



HAL
open science

L'instrumentation à fibre optique pour les structures intelligentes

Alexandra Labrousse-Ansiaux, Sylvain Magne, Stéphane Rougeault, Laurent Maurin, Guillaume Laffont, Véronique Dewynter-Marty, Jonathan Boussoir, Pierre Ferdinand

► To cite this version:

Alexandra Labrousse-Ansiaux, Sylvain Magne, Stéphane Rougeault, Laurent Maurin, Guillaume Laffont, et al. L'instrumentation à fibre optique pour les structures intelligentes. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 2004, 29 (6), pp.65-80. cea-04106886

HAL Id: cea-04106886

<https://cea.hal.science/cea-04106886>

Submitted on 24 Jun 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.

L'INSTRUMENTATION À FIBRE OPTIQUE POUR LES STRUCTURES INTELLIGENTES

Alexandra LABROUSSE-ANSIAUX, Sylvain MAGNE, Stéphane ROUGEAULT, Laurent MAURIN, Guillaume LAFFONT, Véronique DEWYNTER-MARTY, Jonathan BOUSSOIR, Pierre FERDINAND

CEA-List DETECS-SYSSC-LMO CEA-Saclay F91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Abstract – Fiberoptic instrumentation for smart structures. Across the last ten-year timespan, the concept of smart structures has largely penetrated several industrial fields (civil engineering, transportation and avionics). Due to its strong experience in Bragg grating sensors, the Optical Measurement Laboratory (LMO) of the CEA-List went naturally to this emerging concept believed to have strong future implications in safety and reliability, combined with yield requirement in structures and public works manufacturing. Fiberoptic instrumentation, in particular Bragg grating-based, could be favored due to intrinsic advantages (remote operation, Electro-Magnetic insensitivity (EM), non-intrusivity, multiplexing ..). After a state-of-the-art review, this paper presents the achievements carried out by the laboratory relative to fiberoptic instrumentation for smart manufacturing processes and sensors and systems implementation to conceive self-adaptative structures.

Résumé - Le concept de structure « intelligente » (ou bien encore « auto-adaptative ») a progressivement diffusé lors de la dernière décennie dans de multiples secteurs industriels (génie civil, transport, aérospatial). Compte tenu de son expérience en Capteurs à Fibres Optiques (CFO) à Réseaux de Bragg (RdB), le Laboratoire de Mesures Optiques (LMO) du CEA-List s'intéresse à ce domaine émergent et porteur à long terme du fait des obligations croissantes de sécurité et de fiabilité, conjuguées à l'accroissement des rendements de fabrication des structures et des ouvrages. L'instrumentation à fibre optique, en particulier à réseaux de Bragg, y trouve en effet une place privilégiée du fait de ses avantages intrinsèques (déport, insensibilité Electro-Magnétique (EM), non-intrusivité, multiplexage, ...). Après un rapide état de l'art, ce papier présente les réalisations menées par le LMO sur l'instrumentation à fibre optique pour les procédés de fabrication intelligents (*smart manufacturing*) et la réalisation de structures auto-adaptatives.

1. INTRODUCTION

Les structures « intelligentes » sont des structures auto-adaptatives en ce sens qu'elles sont sensibles (dotées de capteurs) mais aussi réactives à leur environnement (dotées d'actionneurs). Ces éléments dialoguent entre eux *via* une boucle de commande (par anticipation ou par contre-réaction) régulée par une loi de contrôle (concept parfois appelé *Adaptronique*). L'ensemble complet forme ainsi une structure autonome capable de surveiller son environnement et de s'auto-contrôler afin de s'adapter à toutes modifications dues à l'effet des perturbations environnementales.

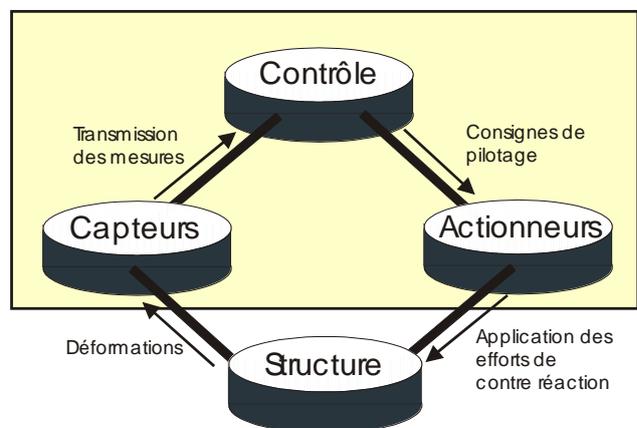


Figure 1. Les 3 composantes d'une structure « intelligente » [2]

Ainsi, une structure « intelligente », tout en fonctionnant sur le modèle d'une structure biologique (*figure 1*), peut être vue comme une structure physique conçue pour un objectif précis et dotée de moyens et d'impératifs permettant d'atteindre cet objectif; moyens qui intègrent un système d'acquisition de données (capteurs), un module de contrôle et de commande (contrôleur) ainsi qu'un système d'activation des ordres de contre-réaction (actionneurs) [1-3].

Ce domaine, relativement complexe, fait donc intervenir de nombreuses spécialités (mécanique, optique, électronique, informatique, automatique, ...). Tous les éléments nécessaires à sa croissance sont désormais rassemblés grâce aux progrès importants réalisés en traitement du signal, électronique intégrée, automatique et informatique ces dernières années.

En pratique, la surveillance des structures peut nécessiter des mesures de déformation, de vitesse ou d'accélération. Cette dernière mesure est encore la plus utilisée. En génie civil, les capteurs LVDT (*Linear-Variable Displacement Transducer*) et les extensomètres à cordes vibrantes sont abondamment utilisés depuis longtemps mais ces capteurs, de taille importante, ne sont pas multiplexables et peu compatibles avec les nouveaux enjeux structurels. Les capteurs piézoélectriques (de type piézocéramiques ou à cristaux piézoélectriques, ou PVDF) ont fait l'objet d'importants progrès en terme de coût, de taille et de fiabilité. Ils sont dorénavant préférés pour les structures « intelligentes » du fait de leur faible intrusivité et sont abondamment utilisés pour réaliser des accéléromètres ou des capteurs à ultra-sons par exemple. Ils présentent aussi l'intéressante fonctionnalité de pouvoir agir simultanément comme jauge de mesure de déformations et comme actionneur (*e.g.* plaque de PVDF collée). En revanche, les capteurs piézoélectriques ne sont pas multiplexables et leur connexion devient donc très vite complexe.

En contrepartie, les Capteurs à Fibre Optique (CFO) [4] ont été largement étudiés du point de vue industriel durant les années 90 pour leur immunité électro-magnétique, leur tenue aux environnements sévères (chimiques, nucléaires, vibrations, très hautes températures), leur caractère non-intrusif (capteur intrinsèque), et leur excellente compatibilité avec les matériaux composites. Les CFO les plus utilisés sont d'abord la fibre optique elle-même, utilisée comme capteur de micro-courbures (détection d'impact [5]) ou pour la mesure d'indice en bout de fibre [6], voire par onde évanescence. En ce qui concerne les mesures de température ou de déformations, les CFO les plus employés incorporent des interféromètres (Michelson ou Fabry-Perot), ou des Réseaux de Bragg (RdB). D'autres mesurandes sont également accessibles par un mécanisme de transduction approprié (mesure de la pression déformant une membrane, mesure d'inclinaison par rapport à la verticale, etc). Les capteurs à réseaux de Bragg notamment sont multiplexables spectralement et sont bien adaptés à ces applications où des micro-capteurs performants de divers paramètres sont requis.

Dans ce cadre, le CEA-List a instrumenté des structures métalliques ou en béton par des CFO à RdB [7] ainsi que des pièces complexes en matériaux composites formées à base de matrices GFRP (*Glass-Fibre Reinforced Plastics*) et CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Plastics*). L'instrumentation de pièces composites dès la fabrication permet de réaliser un Contrôle Non Destructif (CND) tout-à-fait original en ce sens qu'il est *in-situ* et en temps réel contrairement aux CND traditionnels qui sont le plus souvent externes et effectués après fabrication. Les capteurs optiques permettent ainsi d'assurer un suivi cartographique en temps réel de l'évolution thermo-chimique des matériaux (degré de polymérisation) au cœur de la structure ainsi que de la température et des déformations internes instantanées et résiduelles [8]. Le CND optique des pièces composites en cours de fabrication permet d'optimiser la qualité et les coûts de fabrication grâce à un gain de temps dans la conception des pièces, une économie de matériaux et une meilleure compréhension des phénomènes thermo-mécaniques. La seconde étape qui suit le contrôle de fabrication et la qualification consiste à connecter ces éléments pour leur suivi de santé, soit en vol (projet MONITOR par exemple), soit au sol [9]. La connexion optique se fait préférentiellement latéralement dans le sens des plis (bien que des solutions ont été proposées pour sortir la fibre sur le plan des panneaux). Idéalement, la problématique de la « connectique » des pièces composites dans un contexte de production pourrait

être résolue par l'emploi de connecteurs ultra-plats, si besoin multifibres, noyés dans la structure (interface silicone) et récupérables après usinage (détourage) des pièces.

Ainsi, les Capteurs à Fibres Optiques à Réseaux de Bragg rendent possible :

- l'amélioration de la qualité de fabrication par un contrôle en temps réel et *in-situ* du procédé de fabrication (« *Smart Manufacturing* »),
- la qualification des panneaux et éléments structuraux lors des essais et des contrôles,
- la surveillance - temps réel ou programmée – de l'état de santé des structures (SHM), procédure intégrée à la doctrine de maintenance des appareils,
- la détermination des paramètres mécaniques nécessaires aux lois de contrôles actifs des structures « intelligentes ».

2. HISTORIQUE

Ces dernières années, le contrôle actif a été principalement développé *via* des projets relevant des domaines de l'aéronautique et du spatial, du génie civil [10-12], ainsi que des transports (ferroviaire) et portant sur le développement d'installations de confort (anti-bruit) Des projets multisectoriels ont également été menés.

2.1 Le secteur aéronautique et spatial

Ce secteur est sans nul doute le principal domaine à l'origine du développement des efforts de recherche dans le contrôle actif de structures. Les activités de contrôle actif ont démarré dans le secteur militaire dès 1984, à l'initiative du *US Army Research Office (ARO)* [13]. Celles-ci concernent les avions à ailes rotatives (*Rotary Wing Aircraft Technology*) et plus précisément le développement de systèmes anti-vibratoires et la réalisation de pales d'hélicoptère en composites pilotables en torsion (actionneurs piézoélectriques, magnétostrictifs ou à Alliages à Mémoire de Forme (AMF)).

Rappelons que les structures aéronautiques en matériaux composites présentent un rapport rigidité-sur-poids bien supérieur à leur équivalent métallique. L'emploi des matériaux composites est donc en constante augmentation dans l'objectif de concevoir des structures toujours plus légères. Toutefois, l'estimation de l'état de santé des pièces composites (fatigue, délaminage, ...) reste un problème crucial pour les utilisateurs. Le contrôle de santé (*Structural Health Monitoring – SHM*) et le contrôle actif présentent ainsi une importance grandissante. En ce qui concerne l'aéronautique civile, le trafic ne cesse de croître impliquant la mise sur le marché d'avions très gros porteur (*Airbus A380* et successeurs), dont les performances tant aérodynamiques (consommation de carburant et réduction du bruit induit) qu'en terme de confort et de sécurité des passagers doivent être optimisées et garanties.

Ainsi, à titre d'exemple, au Japon, le RIMCOF (*R&D Institute of Metals and COMposites for Future industries*) étudie des démonstrateurs d'avions civils de type *Boeing 737* [14] dans l'objectif de réaliser des systèmes de détection et de réparations d'impacts [15] et des systèmes d'insonorisation [16]. Bien entendu, tant Boeing qu'Airbus réfléchissent également à la surveillance des structures des gros porteurs de demain, même si les enjeux économiques sous-jacents rendent leurs publications quasi inexistantes à ce jour.

2.1.1 Contrôle de forme. Celui-ci trouve des applications pour la conception d'antennes conformes et d'organes de sustentation adaptatifs (rotors et ailes « intelligents ») pour des avions et hélicoptères civils ou militaires Il permet également le contrôle de flux des conduites d'entrée/sortie d'engins sous-marins ou d'avions. Les applications potentielles du contrôle de forme dans le domaine spatial sont *a priori* nombreuses mais sont encore peu répandues.

2.1.1.1 Antennes et véhicules aériens et terrestres. Aux USA, l'*Army Research Office* (ARO) soutient depuis plusieurs années de nombreux projets de recherche dans ce domaine (*Structures and Dynamics Program-SDP*) [17]. Les applications visées sont la dynamique des structures, l'amortissement vibratoire, le contrôle actif de formes et le suivi de santé. Elles sont destinées à être appliquées aux giravions, aux antennes électromagnétiques, aux missiles, aux véhicules terrestres et aux systèmes d'armes. Le contrôle de formes est étudié dans le cadre de la réalisation d'antennes électromagnétiques « intelligentes » multifonctionnelles et conformes [18], installées à bord d'avions ou de satellites. Elles permettent d'avoir un point focal et des fréquences de résonance accordables, ainsi qu'un balayage variable (par actionneurs piézoélectriques).

La DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) soutient le programme « *Smart Materials and Structures Demonstration Program* » (SMSDP) [19] dédié aux applications systèmes des structures auto-adaptatives dont l'objectif est de prouver la valeur ajoutée d'actionneurs à base de matériaux « intelligents ».

2.1.1.2 Rotor « intelligent ». La réduction du bruit vortex-pale (*Blade-Vortex Interaction noise-BVI*) est prioritaire pour le marché civil des hélicoptères. Le but est double : limiter ce bruit dû à la rencontre du sillage d'une pale par la suivante, tout en ajustant en temps réel de la position relative des pales les unes par rapport aux autres.

Dans le cadre du projet « *Smart rotor demonstration* » (Boeing-USA) intégré dans le programme SMSDP de la DARPA, deux approches sont ainsi développées.

- 1/ Des actionneurs PE amplifiés ont été intégrés le long du front montant de la pale (actionneur *X-frame* [20] développé par le MIT). La réduction des vibrations au sein de la cabine de pilotage a été estimée entre 80 % et 90 %, et la limitation du BVI entre 5 dB et 10 dB. Des tests sur une maquette en grandeur réelle au sol, puis en vol, sont prévus.
- 2/ L'intégration d'un composite à base de fibres actives (fibres PE noyées au sein d'une matrice polymère et polarisées par des électrodes interdigitées (MIT)), orientées à $\pm 45^\circ$ dans la structure primaire, capables d'imposer un mouvement de rotation à la pale ($\pm 3^\circ$). Des études analytiques ont montré que des amplitudes de rotations de 1° à 2° peuvent être atteintes pour une large gamme de fréquences et doivent pouvoir être maintenues pour un système complet de pales. Le système de contrôle actif ne rajouterait qu'une faible surcharge pondérale et consommerait peu.

En France, l'ONERA (Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) est engagée dans l'étude de la réduction du bruit vortex-pale (BVI) dans le cadre d'une modélisation prédictive (calculs aérodynamiques & acoustiques) et sur l'étude de rotors silencieux à pales actives, en coopération avec le DLR (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*) et Eurocopter.

2.1.1.3 Smart wing demonstrator (Northrop) {programme SMSDP de la DARPA [21]}. L'objectif est d'améliorer les performances aérodynamiques des avions d'armes en terme de rapport portance/trainée, de maniabilité, et d'effets aéroélastiques par le contrôle de l'orientation et de l'inclinaison d'ailerons et volets. Des essais, réalisés sur maquette ($16/100^\circ$), ont permis de contrôler l'inclinaison par des AMF, ou des actionneurs piézo-électriques (plus rapides). Le contrôle de forme permet ainsi d'obtenir une aile conforme, présentant des améliorations en terme de roulis, de maniabilité et de moment de roulement à Mach 1.

2.1.1.4 Le projet SAMPSON (Smart Aircraft and Marine Propulsion System demONstration, programme SMSDP de la DARPA [22]).

L'objectif de ce projet est d'étudier le contrôle de flux et de forme des conduites d'entrée / sortie d'engins sous-marins et d'avions afin d'améliorer les performances de vol. La géométrie des entrées d'air peut être adaptée en fonction de l'altitude, de la vitesse de vol, de l'angle d'attaque des ailes et des caractéristiques du flux d'air moteur dans le but de réduire la traînée, et d'augmenter la maniabilité et de la stabilité. Il est prévu de concevoir, fabriquer, et tester une entrée adaptative à l'échelle 1 d'un avion F15-Eagle.

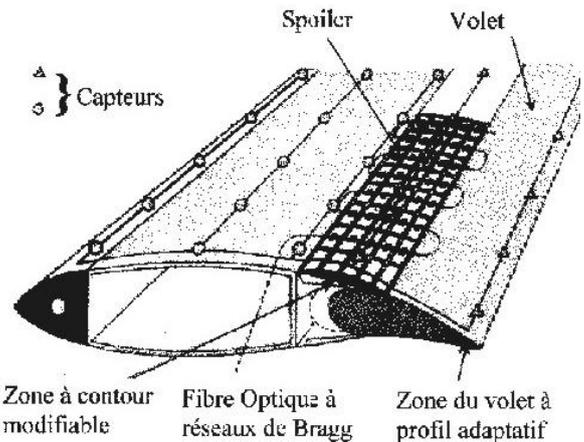


Figure 2. Aile adaptative (Daimler-Chrysler)

2.1.1.5 Le projet ADIF. Ce projet allemand de 7 ans a été initié en 1996 par le DLR et Daimler-Chrysler.

Son objectif était de développer une aile adaptative capable de modifier sa forme par des actionneurs pilotés selon les informations délivrées par des CFO de Bragg de déformations et de température, intégrés à la structure (figure 2).

2.1.1.6 Le projet ADAPT [23]. Le projet européen ADAPT est mené par EADS. Son objectif est d'étudier le comportement en amortissement de composites instrumentés par des AMF. Une dérive a ainsi été instrumentée par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) afin d'être testée en soufflerie (figure 3).

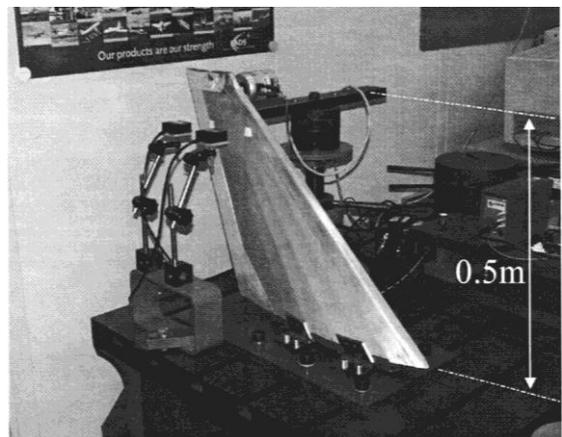


Figure 3. Dérive instrumentée par des AMF [23]

2.1.1.7 Contrôle de forme des structures spatiales. Dans le domaine spatial, les structures « intelligentes » sont principalement utilisées pour le contrôle vibratoire. Néanmoins, le contrôle de forme pourrait se décliner en différentes approches selon les applications. Au sol, les avantages du contrôle de forme seraient l'augmentation de la robustesse de la structure et le contrôle de sa dynamique (linéarisation et suppression d'ordres supérieurs) [24]. En vol, on peut escompter l'amélioration de l'aérodynamisme des structures spatiales (e.g. adaptation de la courbure de l'aile en fonction des conditions de vol) et ainsi la réduction du bruit et des coûts opérationnels (notamment le carburant). En ce qui concerne les navettes spatiales, il s'agit d'optimiser la ré-entrée atmosphérique grâce à des revêtements « intelligents » (peau) innervés par des capteurs (de température par exemple). En orbite, l'adaptation de la morphologie des antennes et panneaux solaires en fonction des conditions environnementales, et l'aide au déploiement et à l'assemblage de structures.

2.1.2 Contrôle actif anti-bruit et vibratoire. L'augmentation de la sécurité, du confort et la réduction des coûts sont les trois principales motivations soutenant cette approche. Le contrôle peut être passif, actif ou hybride. Le contrôle passif (TMD/SAMD, cf §2) [25] ne requiert ni capteurs, ni contrôle. Il utilise uniquement un ensemble d'éléments élastiques et dissipatifs ou d'amortissement. Il agit comme un puits d'énergie (l'énergie mécanique extraite de la structure est dissipée dans le système d'amortissement), leur fréquence propre de vibration étant calée sur celle du mode

structurel fondamental. Si ce type de contrôle est simple, il ne permet cependant pas d'adresser les basses fréquences. De plus, le temps de réponse de ces systèmes est élevé et ils ne peuvent répondre aux variations transitoires des régimes vibratoires. Le contrôle actif (AMD/HMD, Cf §2.2) permet aussi l'isolation par introduction d'une nouvelle source vibratoire générant une onde synchrone mais antagoniste pour l'onde de bruit. Différentes stratégies de contrôle coexistent telles la création d'une anti-force ou d'un anti-couple à un point précis de la structure (contact ponctuel) pour s'opposer à la composante dynamique de la force ou du couple de contact, la minimisation ponctuelle d'un déplacement, la réflexion intégrale d'une perturbation ou bien son amortissement.

2.1.2.1 Anti-bruit. Les développements actuels se concentrent sur la réalisation de casques anti-bruit (société Technofirst, France) et de systèmes de réduction du bruit des gaines de ventilation. Dans le cadre du contrôle anti-bruit distribué, il faut citer le programme de R&D concerté « avion du futur » (Brite-EuRam 4), regroupant notamment les projets RAIN (*Reduction of Airframe and Installation oNise*), RANTAC (*Reduction of Aircraft Noise by nacelle Treatment and Active Control*) et RESOUND (*Reduction of Engine SOURce Noise through understanding and novel Design*).

Dans le cadre du programme SMSDP la DARPA a développé, en collaboration avec Lockheed Martin Missiles/Space, un système de silencieux pour les torpilles sous-marines (« *Smart Sleeve Demonstration System* »). Enfin, la société SAAB 2000 développe le Système Dowty, procédé de réduction active du bruit en cabine d'un avion de type *Dornier 228* (projet BE-ASANCA).

2.1.2.2 Contrôle actif vibratoire des structures spatiales. L'utilisation de structures auto-adaptatives pour l'amortissement vibratoire est l'application majeure [26]. Des capteurs inertiels et d'accélération permettent de remonter aux forces internes de la structure et aux déplacements. Le contrôle vibratoire actif [27] cherche soit à contrôler l'ensemble de la structure ($f < 30$ Hz), soit à compenser les vibrations générées par des impacts ($f > 100$ Hz) ou bien encore à atteindre de grandes précisions de positionnement (VISSP, *Vibration Isolation Suppression Steering and Pointing*) en contrôlant les vibrations de faibles amplitudes.

Les structures spatiales sont conçues pour optimiser le rapport rigidité-sur-poids. Néanmoins, leur taille souvent considérable et leur légèreté en font d'excellents vecteurs de vibrations d'où l'intérêt de les instrumenter par des systèmes de contrôle vibratoire ou d'amortissement. Ainsi, une structure en treillis de 1,8 m de long dotée de céramiques piézoélectriques servant d'actionneurs/capteurs a été embarquée dans la station MIR dans le cadre du projet CASTOR [28-29]. Autre exemple : les grands télescopes qui permettent d'atteindre une précision élevée d'observation de la planète sont également instrumentés avec de tels systèmes. Le télescope Hubble (NASA) est ainsi actionné par des céramiques électrostrictives.

Des développements récents portent sur des systèmes d'amortissement à plusieurs doigts (ou pieds). Le système HAVI [30] (*Hexapod Active Vibration system*) permet d'isoler une plate-forme de l'ensemble des vibrations. L'hexapode (6 pieds) est ainsi équipé d'actionneurs MS (Terfenol-D) se coupant continûment en angle droit. Ils permettent d'adapter son impédance acoustique à celle de la structure et ainsi optimiser le transfert d'énergie vibratoire de la plate-forme à isoler vers les actionneurs (*figure 4*).

Figure 4. Hexapode (plate-forme de Stewart) développée à l'Université Libre de Bruxelles (ULB). Chacun des pieds est équipé d'un actionneur linéaire électro-dynamique, d'un capteur de force et de 2 joints flexibles [photo ULB] (a/ vue de côté, b/ vue de dessus).



Dans le cadre du projet ACTEX (*Advanced Control Technology EXperiment*), un tripode instrumenté par des céramiques PE a été envoyé dans l'espace en 1996 dans le cadre d'un vol expérimental. Un autre système d'isolation (ARIS, *Active Rack Isolation System*) a été mis au point au sein de la Station Spatiale Internationale (ISS) [31]. Finalement, les interféromètres spatiaux qui émulent des télescopes de très grande ouverture doivent pouvoir être positionnés avec une grande précision (inférieure au nm ou au nRad). Les optiques des satellites Spot et Helios ont ainsi été équipées d'actionneurs PE (Cedrat, France) destinés à leur micro-positionnement et à leur amortissement vibratoire (de même que le télescope Hubble). Le contrôle précis de position est également essentiel pour les satellites de télécommunication mis en réseau.

2.2 Le secteur génie civil

Le contrôle actif peut être utilisé en génie civil tout d'abord lors de la construction d'ouvrages. Les objectifs sous-jacents sont le contrôle aérodynamique des structures (en cours d'assemblage), l'augmentation de la productivité en améliorant l'ergonomie du travail, la diminution du délai de mise en service des ouvrages (durée d'inopérabilité), l'économie de matériaux, *etc.* Cette démarche peut également être mise en œuvre en service pour accroître la stabilité des ouvrages, le confort (isolation vibratoire, anti-bruit), le confinement des vibrations (en ville), le renforcement pour mise à niveau (sismique, fonctionnelle), et l'augmentation de la durée de vie des infrastructures lors de leur réhabilitation. La conception actuelle des ponts emploie désormais massivement des structures légères tolérant de fortes déformations (matériaux composites) afin d'optimiser le rapport rigidité-sur-poids.

Ces structures présentent ainsi des fréquences propres plus élevées que celles des structures traditionnelles en béton. De plus, leur rapport poids en charge sur poids structurel évolue beaucoup plus (les fréquences propres évoluent ainsi considérablement en fonction du chargement du pont) de sorte qu'un amortissement, voire un contrôle actif de ces nouvelles structures devient souhaitable, voire nécessaire. Les structures de génie civil étant de grandes dimensions, le nombre de capteurs à employer et le coût peuvent devenir importants. Il est donc important d'optimiser leur nombre et leur placement.

Le système d'amortissement le plus rencontré en génie civil est l'amortissement passif par un assemblage masse-ressort de fréquence accordée à celle de la structure d'intérêt (*Tuned Mass Damping* (TMD)). Il ne nécessite aucun apport d'énergie et est d'une maintenance aisée. En revanche, il n'est efficace que pour une fréquence bien déterminée. Une première évolution du système passif consiste à agir sur les paramètres d'amortissement (*Semi-Active Mass Damping* (SAMD)). Une seconde évolution consiste à opter pour des contrôles actifs exerçant directement une force sur la structure. On parle alors d'amortissement par masse active (*Active Mass Damping* – AMD) tels les tendons actifs. Des systèmes hybrides (*Hybrid Mass Damping* – HMD), *i.e.* combinaison des systèmes passif et actif, ont également vu le jour. La grande inertie des structures du génie civil implique l'utilisation d'actionneurs délivrant des énergies considérables. Ainsi, un démonstrateur a été conçu et réalisé par la société Bouygues et testé au laboratoire ELSA à Ispra (Italie) dans le cadre du projet ACE (*Active Control in Civil Engineering*) [32]. Il consistait en une poutre de 30 mètres de long portée par 8 haubans dont deux sont équipés d'actionneurs hydrauliques spécifiques. Des capteurs de déplacement LVDT et des accéléromètres ont été fixés sur la poutre tandis qu'un système original de visée laser enregistrerait le mouvement 2D des câbles.

Le contrôle actif, AMD, fonctionnait sur la base de la mesure du débattement proportionnel à l'intégrale de la force (*Integral Force Feedback* – IFF), selon une logique de contrôle de contre-réaction. Un démonstrateur similaire est en cours de conception à l'EMPA en Suisse, équipé de CFO de courbure, et qui exploiterait un concept de contrôle de type TMD. De nombreuses infrastructures en Chine, au Japon et aux Etats-Unis utilisent déjà ces technologies [33-34]. A titre

d'exemple de systèmes actifs (AMD) citons le bâtiment Kyobashi Seiwa, construit en 1989 au Japon [33] et le renforcement de structures consolidées avec des AMF (clocher de l'église St-George de Triguano (USA)), l'augmentation de la tolérance des structures aux déformations (Basilique supérieure de San-Francisco), le contrôle actif des vibrations de piles de ponts (Kurushima Bridge à Onomichi-imabari, Japon) et la stabilité aérodynamique des structures en construction (Viaduc de Millau).

Pour les systèmes semi-actifs (HMD), mentionnons la réhabilitation de ponts en Chine (Dong Ting, Win Zhou) effectuée à l'aide de vérins utilisant des matériaux magnétorhéologiques (MR) et Electro-rhéologiques (ER). Dans ce type d'application, les tendons actifs font partie intégrante de la structure à contrôler. Ils lui imposent une force directe qui génère une oscillation antagoniste à la vibration à compenser. Ils sont constitués d'un ensemble de câbles auxquels est raccordé un actionneur, souvent hydraulique, commandé par une servo-valve, qui par son déplacement modifie leurs tensions induisant une force de contrôle horizontale à la structure (*figure 5*) [34-35].

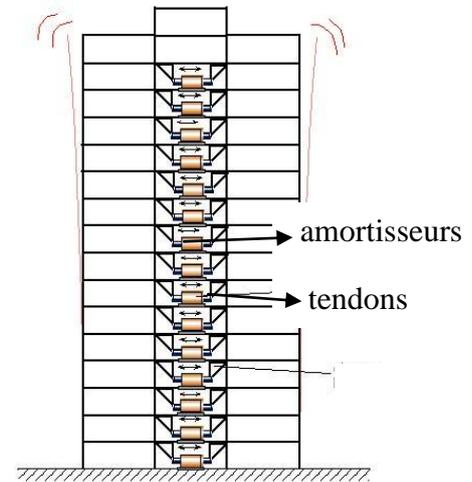


Figure 5. Structure munie de tendons actifs

En Allemagne, le gouvernement fédéral a financé de 1998 à 2002 le projet ADAPTRONIK, dirigé par le DLR (*Deutsche Forschungsanstalt für Luft-und Raumfahrt*). Les recherches concernent le développement d'actionneurs à fibres et *patches* piézo-électriques pour le contrôle actif de vibrations et de bruit dans des domaines aussi divers que les transports (ferroviaire, automobile), l'aéronautique et le secteur médical [36]. Dans le même cadre, des actionneurs AMF ont été intégrés structurellement dans un prototype de volet de *Fowler* d'un *Airbus A340*. L'objectif est d'adapter la déformée du volet afin d'optimiser ses performances aérodynamiques par l'emploi d'actionneurs répartis, de fonctionnement simple et de surpoids modéré.

Pour finir, le projet européen ASSET (terminé en 2002 et désormais prolongé dans le cadre du réseau RESET), dont l'objectif est de promouvoir le transfert technologique des structures « intelligentes » vers l'industrie, a permis de réaliser plusieurs démonstrateurs auto-adaptatifs (contrôle actif des vibrations de structures aciers (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)) ou de machines (Université de Southampton, UK), contrôle de forme pour la réduction de bruit de turbines à gaz (Rolls-Royce, UK).

3. APPLICATIONS AUX STRUCTURES INTELLIGENTES MENÉES PAR LE CEA-LIST

3.1 Fabrication intelligente et qualification de structures spatiales

Les capteurs optiques fournissent des informations *in-situ* non intrusives et en temps réel permettant d'adapter une contre-réaction dans le contrôle des procédés. Une instrumentation optique délivre ainsi un gain de temps important car l'optimisation en temps réel du processus de fabrication ne nécessite plus de contrôle destructif des pièces pour analyse *a posteriori*. Deux exemples de fabrication intelligente sont donnés ci-après pour lesquels l'instrumentation à fibre optique et à réseaux de Bragg permet de fournir des informations au cœur du matériau qui serviront à caler les modèles de conception de pièces complexes.

3.1.1 Fabrication intelligente d'une pale d'hélice (collaboration CEA / Ratier-Figeac). Depuis quelques années, on assiste à un surcroît d'intérêt pour l'assistance à la fabrication des pièces en matériaux composites, tels que celles obtenues par les procédés d'infusion ou RTM¹. Ainsi, pour ce dernier, l'enjeu consiste à visualiser l'avancée du front de résine (prévenir l'apparition de zones sèches), puis suivre l'avancement de la polymérisation et ses conséquences sur le comportement thermo-mécanique de la pièce. Dans ce contexte, un projet regroupant la DGA, le CEA et la société Ratier-Figeac a porté sur la fabrication RTM d'une pale d'hélice d'avion de la famille ATR [6].

Cette pale (*figure 6*) a été instrumentée de 38 capteurs à réseau de Bragg divisés en 8 lignes de mesure de 4 à 5 capteurs chacune, également répartis sur ses deux faces (*intrados* et *extrados*). Etant donnée la stabilité en température (quelques °C) de l'ensemble du moule, un seul capteur pour chaque face a été conditionné pour n'être sensible qu'à la température, afin de permettre la compensation de ce paramètre sur les capteurs de déformations. Ce capteur de température, est constitué d'un réseau de Bragg inséré dans un micro-capillaire en silice gainé de polyimide ($L = 20$ mm, $\varnothing_{\text{ext}} = 350 \mu\text{m}$). La fibre est maintenue collée au capillaire par une seule extrémité (adhésif opérationnel jusqu'à 350°C), de sorte que celle-ci est isolée des contraintes mécaniques de la structure composite environnante, et n'est sensible qu'aux effets thermiques. L'avancée du front de résine est détectée par une variation de déformation due aux contraintes locales imposées par la résine. Les capteurs fournissent ainsi une indication sur le remplissage de la pale, permettant de contrôler précisément l'arrêt de l'injection, puis d'effectuer le suivi de la polymérisation. Des mesures par réfractométrie en bout de fibre ont également permis de suivre l'évolution de l'indice et renseignent sur l'évolution de la polymérisation [37].

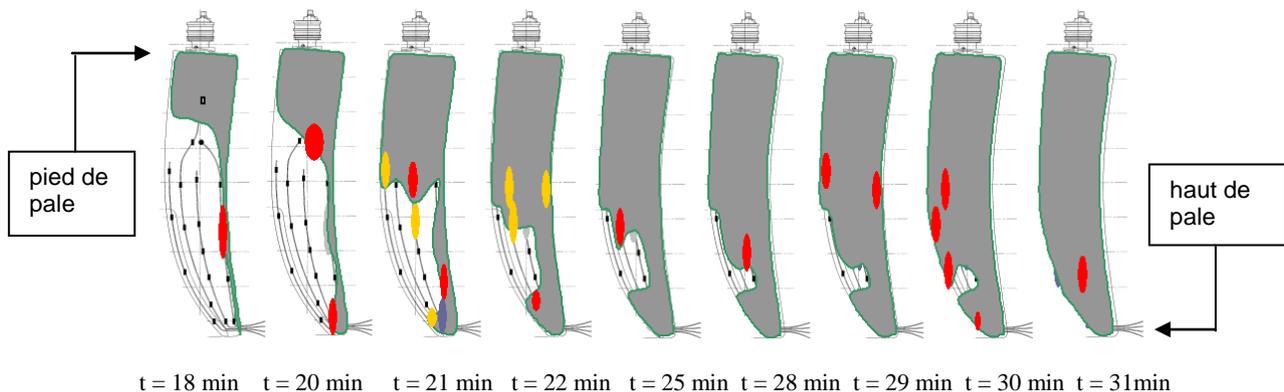


Figure 6. Avancée du front de résine en fonction du temps sur la face *intrados*

La surveillance en temps réel du processus RTM, avec des réseaux de Bragg, nécessite un système d'acquisition et de traitement rapide (typiquement 50 Hz par voie), couplée à un modèle permettant l'interprétation des phénomènes. De nos jours, ce couplage reste un enjeu pour la profession.

3.1.2 Aide à la conception de réservoirs sous pression pour lanceurs (collaboration CEA/EADS-ST). Les réservoirs pour lanceurs comportent tout d'abord une zone cylindrique (zone virole) raccordée *via* deux zones raccord (cylindre/sphère) à une zone fond destinée à recevoir les raccords extérieurs. Le réservoir est placé en rotation autour de son axe et son renforcement est obtenu par bobinage de fibres en carbone sur un « *liner* » métallique (*figure 7*). Les fibres optiques sont insérées parallèlement aux fibres de renfort, les réseaux de Bragg étant repérés et positionnés précisément dans le but de comparer avec les modélisations numériques.

¹Resin Transfert Molding : Ce procédé consiste dans un premier temps à fabriquer la structure mécanique de la pièce, c'est-à-dire l'empilement des différents tissus ; la pièce est ensuite disposée dans un moule adapté au sein duquel la résine, constituant le liant, est ensuite injectée sous pression et pénètre dans toute la structure pour y polymériser sous l'effet de la température.

Dans cette étude un soin particulier a été apporté dans la définition des réseaux multiples et leurs positionnements géométriques dans des zones de transition (géométrie et raideur) afin de suivre les forts gradients de déformations (positionnement et longueurs de réseaux millimétriques). Une fois les fibres installées, l'ensemble est polymérisé. La mesure des déformations sous pression en comparaison de la réponse des jauges électriques a ainsi permis de pondérer les résultats de modélisation par Eléments Finis.

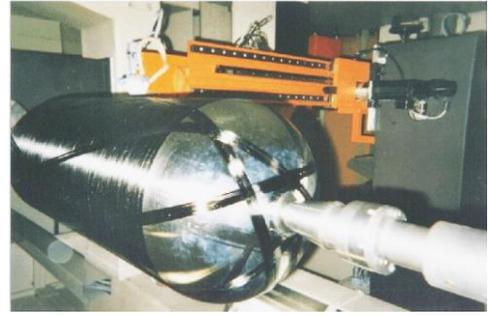


Figure 7. Bobinage d'un réservoir
(avec la permission de la société EADS-ST)

3.2 Contrôle de structures aéronautiques

L'estimation de l'état de santé des composants aéronautiques en matériaux composites peut être effectuée en temps réel (en vol) ou à terre lors d'opérations de maintenance prédictives. Les procédures de mesures et les protocoles de tests sont encore à l'état de recherche de sorte que ces opérations sont encore conditionnelles. Les matériaux composites sont surtout employés pour leur bonne tenue mécanique et à la corrosion. Cependant, certaines pièces requièrent une transparence radar, comme par exemple les radômes. Ils sont réalisés en composite verre-époxy/mousse (*foam*) et sont soumis à des impacts qui peuvent modifier leur comportement mécanique. Le Laboratoire de Mesures Optiques a instrumenté des panneaux composites avec des fibres et a réalisé des mesures OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) en cours de tests d'impacts à différentes énergies [5]. Les déformations de la pièce dues aux impacts induisent des pertes optiques par micro-courbures. Ces mesures couplées à des mesures shearographiques, ultrasoniques et de thermographie infrarouge ont permis de définir un modèle comportemental permettant d'envisager la maintenance prédictive d'une pièce présentant des déformations résiduelles importantes induites par des impacts grâce à une instrumentation OTDR bien maîtrisée dans le secteur des télécommunications optiques.

3.3 Contrôle de structures maritimes

3.3.1 Portes d'écluse « sensibles » en polyester-verre [38].

Un concept innovant de portes d'écluses à matrice de polyester renforcée de tissus de verre (type *GRP*) a été développé et mis au point par la Direction des Constructions Navales (DCN-Lorient), pour les besoins des Voies Navigables de France (VNF). Alors que les portes d'écluses traditionnelles (en bois ou en métal) - parfois séculaires - commencent à être remplacées, ces nouvelles portes devraient offrir une grande durée de vie du fait de la résistance à la corrosion, une facilité de mise en place et d'extraction, *via* un poids considérablement réduit, et nécessiter une maintenance réduite. Enfin, les vantaux, fabriqués de façon standardisée, présentent une esthétique attrayante.

En collaboration avec la DCN, notre laboratoire a équipé un vantail en cours de fabrication. Une fibre optique avec 5 réseaux de Bragg a été insérée au sein de la structure stratifiée formée d'un panneau composite et d'un raidisseur (*figure 8*).



Figure 8. Porte d'écluse équipée de capteurs à Réseaux de Bragg

Les mesures de déformations ont été effectuées en bassin d'essai à Lorient et sur voie navigable (à Golbey près d'Epinal dans les Vosges). Lors des manœuvres pour le passage des bateaux et péniches, nous avons pu montrer la bonne adéquation entre les mesures optiques et celles fournies par les capteurs de comparaison. Ces données, obtenues *in situ*, peuvent désormais servir au Bureau d'Etudes de la DCN pour optimiser la conception par éléments finis lors des prochaines réalisations.

3.3.2 Instrumentation du défi AREVA de l'America's cup. Ce projet associant AREVA, le laboratoire IREENA de l'Université de Nantes et notre laboratoire, a consisté à instrumenter certaines parties structurales du bateau FRA 79 de *l'America's cup 2002*, par des capteurs à réseaux de Bragg. L'objectif sous-jacent était la surveillance de l'état de santé des zones très sollicitées du pont et de la coque (épaisseur 1 cm), et en particulier au niveau du pied du mât. Les avantages attendus concernent l'optimisation de la conception du bateau.

Des fibres avec réseaux de Bragg ont été insérées dans des panneaux d'une cinquantaine de centimètres de côté, puis ceux-ci ont été mis en place au niveau de la structure lors de sa fabrication sur chantier naval (*figure 9*). Dans une telle structure, les difficultés liées à la mise en place des fibres optiques dans les panneaux composites consistent à éviter les courbures importantes pour limiter les pertes de signal et à protéger les fibres optiques hors des panneaux. Pendant leur fabrication, ces derniers subissent en effet des contraintes thermiques (cuisson) et mécaniques (ajout de revêtements carbone). En sortie de panneau, il convient donc de protéger les fibres optiques de tout dommage externe en logeant celles-ci dans une cavité adaptée (*figure 10*). Ces panneaux sont intégrés très tôt dans la structure (avant dépose des draps de carbone). De plus, le procédé de construction du bateau impose des manipulations multiples, comme la pose des draps, des collages, ponçages et cuissons. Ainsi, les connecteurs ont été mis en place une fois les panneaux installés dans le bateau (montage des connecteurs par soudure sur place). Un soin tout particulier a été apporté à l'interface des fibres lors de leur entrée dans ce logement protecteur pour éviter tout cisaillement accidentel.

Malgré tout, certaines fibres présentaient après l'installation des pertes importantes imputables à d'importantes contraintes locales résultant du processus de cuisson des panneaux. Afin de compléter l'éventail des capteurs, d'autres réseaux de Bragg ont également été collés en surface, une fois la structure terminée (*figure 11*). Une instrumentation de lecture des raies de Bragg de type PC portable a ensuite été utilisée pour les mesures. Cette première expérience de mise en conditions réelles d'une compétition internationale nous a permis de prendre la mesure des différentes contraintes liées à des mesures embarquées sur un bateau de type « *Class America* » (*figure 12*).

Les ambitions futures de ce type d'instrumentation sont de fournir un contrôle en temps réel des structures en ajustant automatiquement la portance en fonction de la force du vent et en s'assurant qu'elle reste dans les limites imposées par les concepteurs.

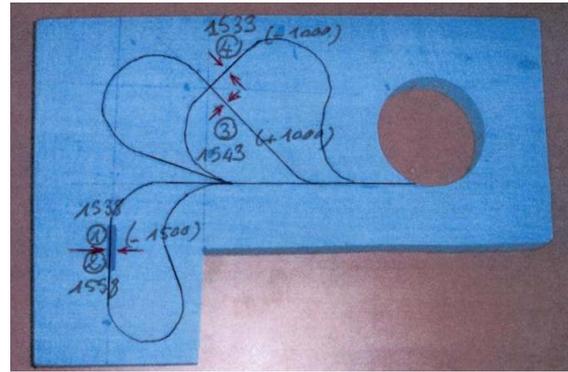


Figure 9. Topologie d'implantation des capteurs de Bragg dans un des panneaux. Les fibres sont lovées dans le trou pendant les manipulations. Les réseaux étant repérés par des flèches.

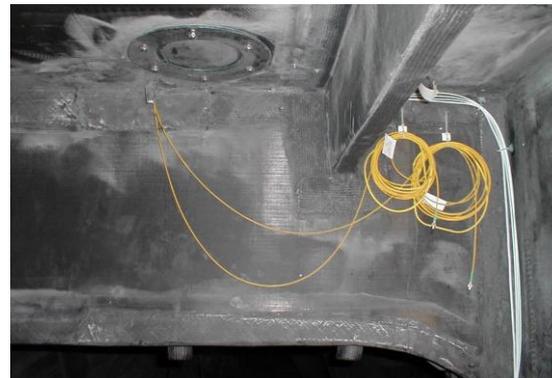


Fig. 10 : Vue de la pièce instrumentée par les fibres optiques (revêtement en place avec sa connectique)

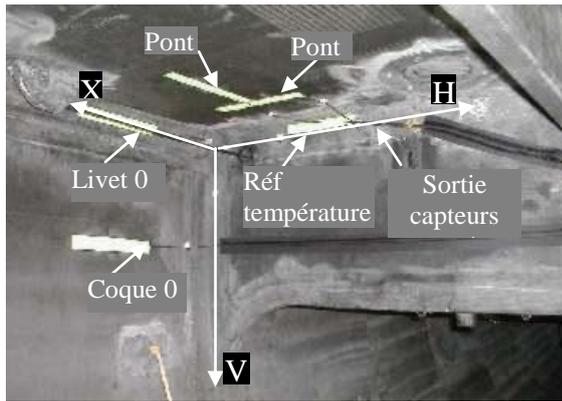


Figure 11. Disposition des réseaux de Bragg en surface à l'intérieur tribord de la coque de FRA 79



Figure 12. FRA 79 et FRA 69 en régate

3.4 Contrôle de structures ferroviaires

3.4.1 Qualification de bogies composites [39]. Dans le cadre d'un projet regroupant Alstom, le CEA-List et la société DDL Consultants, un élément de bogie en matériau composite (*figure 13*) a été instrumenté pour le suivi de tests de fatigue statique et dynamique.

Pour ce faire, une fibre optique avec quatre réseaux de Bragg a été introduite dans la pièce pendant sa fabrication. Trois réseaux mesurent la déformation tandis qu'un quatrième, non contraint, sert à corriger les effets thermiques. Compte tenu de la norme de tests mise en œuvre, les cycles thermiques étant de 16 heures et la fréquence des sollicitations de 7 Hz, la pièce a subi plus de 10^6 de cycles pendant les 3 semaines d'enregistrement, ce qui correspond à l'essai le plus sévère réalisé à ce jour avec des réseaux de Bragg (*figure 14*). Les mesures ont consisté à enregistrer en continu pendant les essais la température et les 3 valeurs de déformations (de l'ordre de $-3500 \mu\epsilon \pm 1000 \mu\epsilon$ pour les plus élevées sous un effort cyclique de $38 \text{ kN} \pm 11 \text{ kN}$ à $f = 7 \text{ Hz}$). Les mesures de déformation sont comparables à celles obtenus en simulation. Les mesures ont également mis en évidence l'intégrité de la structure dans le temps, par la constance du niveau moyen des déformations pour différents niveaux de chargements. Ainsi, la pièce instrumentée présente un comportement mécanique non évolutif, garantissant une raideur constante et un excellent comportement à la fatigue. Malgré 10^7 cycles subis, les réseaux de Bragg ont parfaitement résisté et fonctionné correctement.

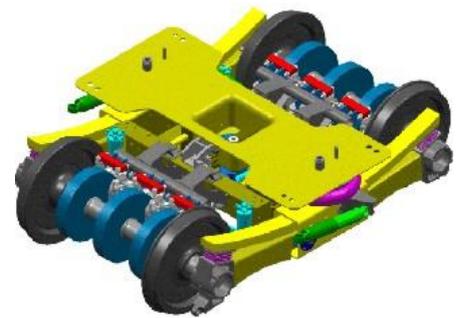


Figure 13. Bogie composite Alstom®



Figure 14. La lame instrumentée dans le banc d'essais climatiques

Ce principe de mesure, mis en œuvre dans un contexte de qualification structurelle, pourrait être employé à l'avenir pour réaliser de la surveillance embarquée.

3.4.2 Mesures de force sur pantographes instrumentés. La politique de dérégulation du marché des transports ferroviaires engagée en Europe implique qu'à terme plusieurs opérateurs puissent utiliser un même réseau ferré. Les faire cohabiter et rendre le réseau exploitable de façon optimale est donc un enjeu important pour les acteurs de ce domaine. Tout comme le bogie, autre élément important assurant l'interface entre le rail et le matériel roulant, le pantographe assure l'interface avec la caténaire afin de capter le courant (*figure 15*).

En ce qui concerne les pantographes, les statistiques de pannes s'établissent chaque année entre 4 et 5 évènements aux 100 km sur le réseau ferré européen de 60 000 km. De plus, avec l'amélioration du confort (climatisation ...) et l'accroissement de leur vitesse, les trains sont destinés à être de plus en plus consommateurs d'énergie, et par voie de conséquence les pantographes s'usent de plus en plus rapidement.

La solution passe donc à terme par le pilotage en temps réel du contact entre le pantographe et la ligne d'alimentation, afin d'optimiser son fonctionnement et sa maintenance. Un consortium européen regroupant Siemens [D], Morganite [UK], SNCF [F], IPHT [D], CEA-List [F], BLS AG [CH] s'est donc formé autour du projet SMITS (*Smart Monitoring In Train Systems / Growth project GRD2-2001-50045*) pour mettre au point et valider sur rail un système de mesure de la force de contact pantographe-caténaire fondé sur les réseaux de Bragg (figure 16). Dans ce contexte, les fibres sont incontournables compte tenu de la présence de courant, de champs électromagnétique, et de fortes températures (jusqu'à 200°C).

Le consortium a d'ores et déjà prouvé la faisabilité du concept, tant en laboratoire que lors d'essais sur matériel roulant à des vitesses moyennes (jusqu'à 60 km/h). Des essais sur train rapide sont programmés avant le fin du projet (mi 2005). Ils valideront ainsi le procédé ouvrant la voie à un contrôle actif des pantographes sur matériel roulant.



Figure 15. Pantographe instrumenté de fibres optiques

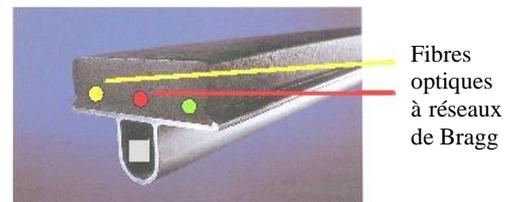


Figure 16. Procédé innovant de mesure de force dans les pantographes par capteurs à RdB

4. CONCLUSION

L'instrumentation à fibre optique, majoritairement développée pour le secteur des télécommunications optiques, est de plus en plus employée dans le secteur de la métrologie pour toutes les applications de surveillance de procédés ou de structures requérant des mesures déportées, multi-points et temps réel, parfois sur des structures de très grandes dimensions, d'accès difficile ou placées en environnements sévères.

Ces applications regroupent les procédés de fabrication intelligente, le suivi de santé (maintenance prédictive) et le contrôle actif (« structure intelligente »). A travers quelques réalisations pratiques menées par le CEA-List, nous avons voulu illustrer tout le potentiel de l'instrumentation à fibre optique pour la surveillance et le contrôle actif de structures complexes. Parmi les applications de suivi de fabrication, nous avons détaillé la fabrication d'une pale d'hélice selon le procédé RTM et le suivi du bobinage et essai d'un réservoir. Parmi les applications de suivi de santé, nous avons détaillé le contrôle de panneaux composites après impacts, le suivi de portes d'écluse et l'instrumentation d'un bateau de type *class America*. Enfin, nous avons décrit l'instrumentation ferroviaire d'un bogie et d'un pantographe pour des applications temps réel menant, dans le futur, à des applications de contrôle actif.

La technologie des structures « intelligentes » (auto-adaptatives) en est encore au début de son développement industriel bien que les premières recherches en laboratoire remontent à plus de 20 ans. Le concept de structure « intelligente » est principalement dédié aux applications aéronautiques et spatiales, du génie civil, des transports, ainsi que celles de défense. Les applications concernent la furtivité (torpilles), le contrôle de forme (antennes conformes, organes de sustentation adaptatifs (rotors et ailes), contrôle de flux des conduites d'entrée/sortie d'engins sous-marins ou d'avions), et de vibration (rotors, amortissement actif).

A ce jour le contrôle de vibration et anti-bruit sont les activités les plus développées (solutions commercialisées). La lutte anti-bruit constitue un enjeu de santé publique (*e.g.* triplement du trafic aérien d'ici 15 ans) et conduisant à l'instauration de normes économiques (coût de maintenance, valorisation, ...), de sécurité (diminution de la fatigue des structures, consolidation des ouvrages, ...), et de performances pour chaque application. Le contrôle actif dans les secteurs du génie civil, des transports et de l'aéronautique prennent également de plus en plus d'importance afin d'optimiser la sécurité, réduire la consommation de carburant et optimiser la maintenance (maintenance prédictive et non plus conditionnelle).

Références

- [1] W. B. Spillman, J.S. Sirkis and P.J. Gardiner, Smart materials and structures : what are they?, Smart Mat. Struct. (5) (1996) 247-254
- [2] G. Akhras, Des matériaux intelligents et des systèmes intelligents pour l'avenir, Rev. Mil. Canadienne (2000) 25-31
- [3] R. L. Clark, W. R. Saunders, G.P. Gibbs, Adaptive structure, Wiley Science (1998)
- [4] R. M. Measures, Fiber optic sensor: Overview, in « Fiber optic smart structures », E. Udd Ed., Wiley Series in Pure and Applied Optics (1995) 155-170
- [5] E. Bocherens, S. Bourasseau, V. Dewynter-Marty, S. Py, M. Dupont, P. Ferdinand and H. Berenger, Damage detection in a radome sandwich material with embedded Fibre Optic Sensors, 4th ESSM / 2nd NIMR Conf., Harrogate (UK) (1998) 381-387
- [6] V. Dewynter-Marty, S. Rougeault, P. Ferdinand, M. Bugaud, P. Brion, G. Marc, and P. Plouvier, Contrôle de la fabrication de pièces en matériaux composites réalisées par procédé RTM à l'aide de capteurs à réseau de Bragg, 20^{èmes} JNOG, Toulouse (2000)
- [7] S. Magne, J. Boussoir, S. Rougeault, V. Dewynter-Marty, P. Ferdinand, and L. Bureau, Health Monitoring of the Saint-Jean bridge of Bordeaux, France using FBG extensometers, SPIE Smart Structures and Materials 5050, San Diego (CA) (2003) 305-316
- [8] P. Ferdinand, S. Magne, V. Dewynter -Marty, S. Rougeault, L. Maurin, Applications of Fibre Bragg Grating Sensors in the composite industry, MRS Bull. 27 (5) (2002) 400-407
- [9] P. Ferdinand, S. Magne, V. Dewynter-Marty, C. Martinez, S. Rougeault, M. Bugaud, Applications of Fibre grating sensors in Europe, OFS Williamsburg (VA, USA) (1997)
- [10] T.T. Soong, M. C. Constantinou, Passive and active structural vibration control in civil engineering, Springer (1995)
- [11] A. Preumont, Responsive systems for active vibration control, Kluwer Ac. Pub., Nato Sciences (85) (2002)
- [12] A. Preumont, Vibration control of active structures, an introduction, Solid mechanics & its applications, Kluwer Ac. Pub. (2002)
- [13] D. Neumann, Adaptronics - a concept for the development of adaptive and multifunctional structures, in, « Adaptronics and smart structures », H. Janocha Ed., Springer (1999) 10-12
- [14] N. Tajima, T. Sakurai, M. Sasajima, N. Takeda, T. Kishi, Overview of demonstrator program of Japanese smart materials and structures system project, SPIE Smart Struct. and Mat., San Diego (USA) 5054 (2003) 165-174
- [15] T. Yari, K. Nagai, T. Shimizu, and N. Takeda, Overview of damage detection and damage suppression demonstrator and strain distribution measurement using distributed BOTDR sensors, SPIE Smart Struct. & Mat. 5054, San Diego (2003) 175-183
- [16] T. Takahashi, H. Monzen, T. Yamaoka, K. Kusumoto, K. Bansaku, J. Kimoto, A. Isoe, Y. Hirose, T. Sanda, and Y. Matsuzaki, Noise and vibration technology in aircraft internal cabin, SPIE Smart Struct. & Mat. 5054, San Diego (2003) 213-221
- [17] D. P. Garg, M. A. Zirkry, G. L. Anderson, Current and potential future research activities in adaptive structures: an ARO perspective, Smart Materials and Structures 10 (2001) 610-623
- [18] W.H. Theunissen, H. S. Yoon, G. W. Washington, W. D. Burnside, Reconfigurable contour beam reflector antenna using an adjustable sub reflector and an adjustable feed, Microw. Opt. Tech. Lett. 21 (1999) 436-446
- [19] E. Garcia, Smart structures and actuators: past, present and future, SPIE Smart Struct. & Mat. 4698, San Diego (2002) 1-12
- [20] E.F. Prechtel and S.R. Hall, Design of a high efficiency, large stroke, electromechanical actuator, Smart Mat. & Struct. 8 (1999) 13-30

- [21] J.N. Kudva, B. Sanders, J. Pinkerton-Florance, and E. Garcia, The DARPA/AFRL/NASA smart wing program – Final overview, SPIE Smart Struct. & Mat. 4698, San Diego (2002) 37-75
- [22] D. M. Pitt, J.P. Dunne, and E.V. White, Samson smart inlet design overview and wind tunnel test, SPIE 4698, San Diego (2002) 13-36
- [23] J. Simpson, C. Boller, Performance of SMA-reinforced composites in an aerodynamical profile, SPIE Smart Struct.and Mat. 4698, San Diego (2002) 416-426
- [24] B.K. Wada, Adaptronic Systems in engineering, in « Adaptronics and Smart Structures », H. Janocha Ed., Springer (1995) 285-289
- [25] M. F. Winthrop, R. G. Cobb, Survey of state of art vibration isolation research and technology for space applications, SPIE Smart Struct. & Mat. 5052, San Diego (2003) 13-26
- [26] L.L. Beranek, I.L. Vér, Noise and vibration control engineering, principles and applications, Wiley (1995) 603-613
- [27] C. Boller, Adaptronic systems in aeronautic and space travel, in « Adaptronics & Smart Structures », H. Janocha Ed., Springer 289-309
- [28] P.W. Bousquet, P. Guay, F. Mercier, CASTOR active damping experiment, preliminary flight results, J. of Int. Mat. Syst. & Struct. 8 (1997) 792-800
- [29] P. W. Bousquet, P. Guay, F. Mercier, Evaluation of active damping performances in orbit, 7th Int. Conf. on Adaptive Structures Technology (ICAST), Rome (Italie) (1996)
- [30] Z. J. Geng, G. G. Pan, W. S. Haynes, B. K. Wada, J. A. Gorba, Six degree of freedom active vibration isolation and suppression experiments, 5th Int. Conf. on Adaptive Structures, Sendai (Japon) (1994)
- [31] Grodsinsky, M. Whorton, Survey of active vibration isolation systems for microgravity applications, J. of Spacecraft and Rockets 37 (5) (2000) 586-596
- [32] F. Bossens, A. Preumont, M. Aupérin, C. Dumoulin, G. Magonette, F. Marazzi, Active control of civil infrastructures : theoretical and experimental study, SPIE 4359 (IMAC-19) (2001) 524-530
- [33] B. Culshaw, Smart structures and materials, Artech House Optoelectronics library, *Artech House Boston*, 158-168
- [34] G. Hirsch, Adaptronics in civil engineering structures, in « Adaptronics and Smart Structures », H. Janocha Ed., Springer (1999) 334-350
- [35] J. Rodellar, Active control concepts and strategies, in « Passive and active structural control in civil engineering », T.T. Soong, M. C. Costantinou Ed., Springer (1995) 275-318
- [36] H. P. Monner, H. Hanselka, E. J. Breitbach, New results and future plans of the German major project Adaptronics, SPIE, Smart Struct. and Mat. 4698, San Diego (2002) 313-324
- [37] B. Degamber, G.F. Fernando, Process monitoring of fiber-reinforced polymer composites, MRS Bull., 27 (5) (2002) 370-380
- [38] M. Bugaud, P. Ferdinand, S. Rougeault, V. Dewynter-Marty, P. Parnex and D. Lucas, Health Monitoring of composite plastic waterworks lock gates using in-Fiber Bragg Gratings Sensors, 4th ESSM and 2nd MIMR Conf., Harrogate (1998) 405-412
- [39] L. Maurin, J. Bousoir, S. Rougeault, M. Bugaud, P. Ferdinand, A. Landrot, T. Chauvin et Y-H. Grunevald, Instrumentation de bogie composite par Capteurs à Fibres Optiques à réseaux de Bragg, 20^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée, Toulouse, France (2000)