

Quelques motivations pour une recherche sur l'instrumentation des infrastructures de transport

Jean-Marie CAUSSIGNAC,
Frédéric BOURQUIN

Université Paris-Est, LCPC, France

Préambule

Cette préface au double numéro spécial du Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées dédié à l'instrumentation reflète une vision prospective partagée par un certain nombre d'experts européens en contrôle de santé des infrastructures de transport. Il s'inspire en partie du Strategic Research Agenda de l'association SAMCO [3], des rapports de prospective sur l'intelligence structurale élaborés à l'occasion des rencontres régulières ESF-NSF [6, 4, 8, 2] et de la prospective de l'ECTP (plate-forme technologique européenne pour le secteur de la construction).

Le vieillissement des infrastructures de transport

La société accepte de moins en moins l'éventualité d'accidents majeurs pour les infrastructures ou constructions de main d'homme. Il en va de même pour ce qui est des systèmes de transport. Cette montée d'un nouveau droit à la sécurité s'accompagne d'une exigence accrue de mobilité et de confort. Les gouvernements d'Europe aspirent à une meilleure protection des citoyens. Par ailleurs, la réduction des coûts dans les pays développés et, de façon générale, l'amélioration de l'efficacité deviennent des enjeux cruciaux, en matière d'emploi notamment. De plus, le développement durable implique une meilleure préservation du patrimoine bâti, y compris contre les conséquences du changement climatique annoncé. On pense que les systèmes de capteurs peuvent concourir à ces trois objectifs.

Dans le domaine du génie civil, on assiste à une croissance continue de la taille des ouvrages d'art neufs, qui deviennent de plus en plus sensibles aux excitations du vent et aux chargements thermiques.

On assiste par ailleurs à un vieillissement sensible du parc européen d'infrastructures de transport qui atteindra un pic vers 2010-2020. Les conséquences en termes de pathologies ont fait l'objet de nombreuses recherches [1].

La détection précoce des endommagements qui affectent les infrastructures de transport (ouvrages d'art, chaussées, ...) tout au long de leur cycle de vie est un élément important de diagnostic dans le choix de mise en œuvre de politiques d'entretien. Or l'entretien, la réparation et la remise à niveau du parc d'infrastructures de transport consomment plus de crédits que la construction d'infrastructures nouvelles. À titre d'exemple, la détection précoce de fissures remontantes dans la couche profonde des chaussées constitue un enjeu économique important au niveau national. Il en va de même des déformations des réseaux d'eau potable, des sites naturels et des flottes de véhicules. Mais l'évaluation fiable de la santé ou de la capacité de service à tout instant d'une infrastructure suppose l'évaluation rapide de grandeurs d'usage directement utilisables par le gestionnaire ou l'exploitant. Cette évaluation se doit de prendre en compte la connaissance disponible grâce aux mesures issues de capteurs embarqués et aux modèles des systèmes que l'on instrumente.

Vers une globalisation des besoins, ...

On parle souvent de l'expérience du terrain, sous-entendu de l'expérience de l'homme de terrain. Force est de constater qu'une partie non négligeable de notre patrimoine résulte de dispositions constructives établies à partir de règles de dimensionnement et de savoir-faire transmises de génération en génération. Aujourd'hui, l'amélioration des connaissances et la mise à disposition d'outils performants de conception, de fabrication et de contrôle ont contribué à faire évoluer ces pratiques. La demande du client se diversifie et les exigences deviennent de plus en plus pointues. À la notion d'objet vient s'ajouter celle de service, de niveau de service ou de fonctionnalité. À titre d'exemple, on ne se contente plus d'un matériau passif vendu au mètre cube ou à la tonne, mais on souhaite en connaître, à la fois, l'histoire et le devenir, c'est-à-dire l'origine, les procédés de fabrication, le transport, la mise en œuvre, la conformité par rapport aux spécifications imposées, le comportement d'usage à court, moyen et long terme. Le recours à des quantificateurs globaux pour caractériser chaque phase importante du processus fait partie d'une démarche qualité d'ensemble, fréquemment exigée maintenant dans les cahiers des charges.

..., des prestations et des concepts

Pour répondre à ces nouveaux besoins, les outils et moyens d'aide à la gestion et à la décision ont dû s'adapter. On souhaite de plus en plus avoir accès en temps réel à des informations exploitées de façon semi-automatique, voire automatique, le moyen pour y parvenir devant rester *transparent* pour l'utilisateur. Le capteur devient un maillon d'une chaîne plus ou moins complexe, incluant la mise en forme des signaux délivrés, leur validation, l'extraction, le traitement local ou déporté, l'exploitation des données à l'aide de modèles performants développés et l'utilisation de ces informations pour éventuellement commander une action ou un asservissement. On substitue donc à la notion de capteur ou de réseau de capteurs celle de système d'instrumentation. L'instrumentation ne se limite donc plus à l'instrument : il s'agit aussi de l'action qui débouche sur le système et des démarches tant intellectuelles que pratiques qui président à cette action.

Dans le cadre de cette évolution, l'instrumentation à demeure n'apparaît plus uniquement comme un moyen occasionnel de surveillance de cas pathologiques, mais comme une aide à l'évaluation en temps réel de l'état d'un ouvrage au cours de son existence. Selon le niveau de complexité des outils et des modes d'exploitation choisis par rapport à l'usage envisagé, il est possible de rendre une structure sensible ou de lui affecter une certaine *contrôlabilité* ou *détectabilité* plus ou moins évoluée que certains n'hésitent pas à appeler *intelligence*.

Cette évolution des besoins, concomitante des progrès technologiques sans précédent que nous constatons aujourd'hui, conduit à répondre de façon spécifique, souvent pointue, aux demandes de plus en plus exigeantes. Celles-ci relèvent de la maintenance des infrastructures, du monitoring et du contrôle, de la sécurité routière ou de l'environnement pour ne citer que quelques voies d'approfondissement. La mise à disposition de nouveaux systèmes d'instrumentation ou d'instrumentations intégrées peut offrir à l'utilisateur potentiel de véritables outils d'aide à la gestion et à la décision, ainsi que lui ouvrir des perspectives pour couvrir de nouveaux besoins non accessibles par les moyens classiques.

Vers l'intelligence embarquée

Dans ce contexte, deux axes majeurs émergents apparaissent : les structures intelligentes et réactives ainsi que les systèmes d'instrumentation pour impliquer l'infrastructure dans l'environnement et la sécurité routière.

Toutefois, le développement et l'utilisation de ces nouveaux outils nécessitent des efforts de R&D conséquents. Il s'agit, à la fois, de s'appuyer sur une approche globale et pluridisciplinaire des

besoins, de maîtriser les techniques émergentes et d'en assurer le transfert applicatif, de comprendre leur fonctionnement et de réaliser les adaptations aux conditions réelles d'emploi.

Tout ceci suppose beaucoup de sciences théoriques et expérimentales pour franchir les barrières théoriques et technologiques, intégrer les modélisations performantes des phénomènes étudiés et les propriétés d'usage recherchées, choisir les méthodes de mesure appropriées, ainsi que les référentiels et les moyens de validation et de caractérisation.

De plus, cette approche globale conduit à favoriser les couplages interdisciplinaires à travers la modélisation multiphysique, les codes de calcul, l'électronique, la communication sans fil, l'informatique temps réel, la détection d'endommagement, la mécanique vibratoire et thermique pour le comportement thermovibratoire des structures, la géolocalisation et l'imagerie pour la trajectographie de véhicules, les composites, les matériaux à mémoire de forme et autres matériaux multifonctionnels, le contrôle optimal et le monitoring, la durée de vie des infrastructures de transport, les balises intelligentes pour la localisation et le dialogue véhicule/infrastructure et véhicule/véhicule, la détection de polluants, la météorologie de l'état prévisionnel des routes, l'analyse de la fluidification du trafic, la localisation d'événements, la gestion des réseaux d'assainissement, pour ne citer que quelques exemples applicatifs. De fait, compte tenu de cette ouverture applicative et du niveau de service offert, la générericité, les performances, le non-destructif, le non-intrusif et le degré élevé d'automatisation constituent les spécificités remarquables de ces outils évolués.

Eu égard à ce qui vient d'être dit, l'isolement ne peut pas se tolérer tant les progrès sont rapides, la technicité toujours plus pointue et les moyens de mise en œuvre particuliers et compliqués. D'où une tendance de plus en plus forte vers les avancées technologiques accompagnées de potentialités logicielles. Les disciplines scientifiques et techniques mises en jeu se croisent et se superposent [5] ; elles requièrent ainsi une disponibilité d'experts dans de nombreux domaines : optique et électromagnétisme, optoélectronique, microélectronique intégrée, capteurs à fibres optiques, drones, dispositifs de commande et superviseurs, capteurs sans fil, réseaux de capteurs, géolocalisation, informatique temps réel, DSP, microsystèmes électromécaniques, MEMS, MOEMS, méthodes numériques, imagerie dynamique, modélisations directe et inverse, micro- et nanotechnologies, matériaux multifonctionnels, etc.

En outre, les systèmes d'instrumentation ainsi développés nécessitent une optimisation (nombre et localisation des capteurs), une évaluation performancielle métrologique et une qualification sur site de façon à permettre une valorisation industrielle des produits.

En bref, les systèmes d'instrumentation qui mémorisent et exploitent en temps réel de façon semi-automatique ou automatique une partie plus ou moins importante de la connaissance, auparavant du domaine de l'intervention humaine, offrent maintenant à l'utilisateur des moyens de prévention et de suivi sur lesquels il peut s'appuyer pour garantir un service ou un niveau de service attendu.

Des enjeux mondiaux

Bien entendu, cette évolution ne se limite pas à l'hexagone mais apparaît au niveau européen, voire mondial, si l'on se réfère aux contenus des appels d'offre des différents programmes consacrés à la maintenance et au suivi du patrimoine d'ouvrages, au transport, à la sécurité routière, à l'environnement et à la maîtrise de l'énergie.

Ces nouvelles méthodes apparaissent déjà dans de nombreuses applications opérationnelles. De grands ouvrages tels que ceux de Hong-Kong, Rion Antirion, Millau, Belt, disposent, à grande échelle, d'instrumentations performantes à demeure [7]. À titre d'exemple, le futur pont de Stonecutters sera équipé de 1 200 capteurs à demeure [10], le pont du Grand Belt en comportant une centaine et le viaduc de Millau environ 300. Dans le domaine de la géotechnique urbaine, les grands projets actuels peuvent impliquer jusqu'à 35 000 points de mesure.

On voit donc poindre le besoin d'une capacité généralisée de suivi, de diagnostic assisté par ordinateur et d'adaptation pour ces infrastructures. On s'achemine probablement vers des infrastructures intelligentes.

Ces besoins semblent bien compris par les décideurs nationaux et les organismes qui contribuent à définir la politique scientifique des grands états. La NSF aux États-Unis, l'ESF à Strasbourg (Eurocore S3T), et l'Union européenne (priorité 3 du 6^e PCRD, plusieurs thèmes du 7^e PCRD) affichent clairement leur soutien aux travaux de recherche sur cette question [9].

Ces besoins coïncident avec une offre technologique en forte croissance (télécommunications sans fil, électronique et informatique embarquée, etc.) et l'on assiste à des percées dans différents domaines des sciences et des techniques (MEMS, ondes à très haute fréquence, optoélectronique, optimisation, simulation, etc.), dont les déclinaisons potentielles en technologies utiles au génie civil semblent devoir révolutionner à terme la pratique de l'ingénieur, que celui-ci conçoive, construise ou exploite des infrastructures de transport.

*Ouvrages instrumentés
a : viaduc de Millau
b : pont de Stonecutters*



a | b



Il nous a donc semblé utile de consacrer un numéro spécial du Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées à la présentation de quelques techniques et de leurs applications, afin d'éclairer le lecteur sur les potentialités offertes. Comme on pourra le constater, les exemples choisis couvrent les principaux domaines d'applications du génie civil, à savoir : les chaussées, les ouvrages d'art, la géotechnique, la sécurité routière et l'environnement.

Un numéro spécial en deux tomes

Compte tenu des thématiques évoquées, les articles du premier tome (BLPC n° 272) portent respectivement sur :

- la méthodologie de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement pour le contrôle de débit en collecteur d'assainissement ou dans le cadre de conduite d'eau ;
- l'imagerie au sens large, visuelle, infrarouge ou physique, qui ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude du comportement radiatif des matériaux de génie civil et l'analyse de scènes routières ou l'analyse du trafic ;
- les techniques de localisation pour l'analyse des trajectoires de véhicules routiers ;
- l'instrumentation d'un remblai expérimental pour prévoir son comportement en cas de sollicitations occasionnelles provoquées par des événements extérieurs ;
- les techniques électromagnétiques pour le contrôle des gaines de câbles de précontrainte externes et les capteurs à fibres optiques pour les applications de génie civil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **KRONOS 1**, Les facteurs d'influence sur le vieillissement des ouvrages. Projet National de R & D. - Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil, 1999.
- 2 **BOURQUIN F., LE CAM V., CAUSSIGNAC J.-M., COLLET M., KROMMER M., KULLAA J., LENCZNER M., LESOILLE S., PEIGNEY M.**, Informatics and structural intelligence: trends, challenges, research directions, applications. In Proceedings of the NSF/ESF Jointly Sponsored Workshop on Smart Structures and Advanced Sensor Technologies, (Ramesh Shoureshi editor), Santorini, 2005.
- 3 **BOURQUIN F., CAUSSIGNAC J.-M.**, Monitoring and control of civil infrastructures trends, challenges and tentative research directions to meet future European needs, 2005. Main contribution to Samco Strategic Research Agenda.
- 4 **FARAVELLI L. and SPENCER JR. B. F.**, editors. Proceedings of the US - Europe (ESF-NSF) Workshop on Sensors and Smart Structures Technology, Como and Somma Lombardo, Italy. Wiley, 2002.
- 5 **FARRAR C.H., HEMEZ F., SHUNK D., STINEMATES D., and NADLER B.** A review of shm literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Internal Reports, 2003.
- 6 **GLASER St. D. and PESCOVITZ D.** Final nsf report. In Proceedings of the National Workshop on Future Sensing Systems: Living, Nonliving, and Energy Systems, Lake Tahoe, August 26-28, 2002, 2002.
- 7 **KITAGAWA M..** Technology of the akashi kaikyo bridge. Structural Control and Health Monitoring, 11:75-90, 2004.
- 8 **SHOURESHI R.**, editor. CD-ROM Proceedings of the ESF-NSF Workshop on Advancing Technological Frontiers for Feasibility of Ageless Structures, Strasbourg, France, 2003
- 9 **VAN DER AUWERAER H. and PEETERS B..** International research projects on structural health monitoring: An overview. Structural Health Monitoring, 2(4):341-358, 2003.
- 10 **KAI-YUEN WONG.** Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. Structural Control and Health Monitoring, 11:91-124, 2004.

