

Concept de Plate-forme Mobile Instrumentée (PMI) pour l'inspection des ouvrages d'art

F.Derckx, J.Dumoulin, J-L.Sorin, V.Legeay

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Résumé—L'inspection des ouvrages d'art est une opération nécessaire afin de maintenir le niveau de service de l'ouvrage et de garantir la sécurité des usagers. C'est une opération normalisée et réalisée périodiquement par des inspecteurs spécialisés. Elle consiste principalement à relever visuellement la totalité des défauts sur l'ensemble de l'ouvrage. Il est question aujourd'hui d'automatiser certaines tâches afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle de ces contrôles et de garantir au maximum l'intégrité physique des intervenants. Une des voies possibles est de réaliser ces contrôles à l'aide de dispositifs de vision embarqués sur une plate-forme mobile d'instrumentation évoluant à l'extérieur voire à l'intérieur de l'ouvrage d'art. Pour établir le diagnostic de l'ouvrage, il sera nécessaire de traiter les images obtenues par des algorithmes appropriés afin de mettre en exergue les défauts, de les localiser sur l'ouvrage et de regrouper l'ensemble des images définissant le défaut pour reconstituer une scène. Pour ce qui concerne la plate-forme nous nous intéressons aux potentialités des drones, sous l'aspect d'aéromodèle submétrique, notamment apte au vol stationnaire. Afin de vérifier ce concept une première expérimentation sur site réel a été effectuée, sur le viaduc de Saint-Cloud, à l'aide d'un aéromodèle d'hélicoptère téléopéré et équipé d'une caméra vidéo.

Mots clé—drone, surveillance, auscultation, ouvrages d'art, traitement d'image.

I. INTRODUCTION

A. Contexte

Les dernières décennies ont vu la réalisation d'ouvrages d'Art de plus en plus grands et de plus en plus hauts établissant de nouveaux records mondiaux à chaque inauguration grâce à l'utilisation de nouvelles techniques et à de nouveaux concepts.

Il faut maintenant s'intéresser à l'entretien de ce patrimoine considérable. Les gestionnaires d'ouvrages d'art (Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées, Centre Technique de l'Équipement, SNCF, Sociétés d'autoroute...) doivent, pour déterminer avec précision et efficacité les opérations d'entretien à entreprendre, disposer d'outils performants capables de leur donner des informations pertinentes permettant d'établir le diagnostic précis de l'ouvrage et de connaître sa pathologie éventuelle.

B. Inspection des ouvrages

L'inspection d'un ouvrage d'art est donc une opération nécessaire destinée à maintenir le niveau de service et à garantir la sécurité publique. Actuellement l'action de base de la surveillance est un examen visuel effectué par des

inspecteurs d'ouvrages au cours de visites et d'inspections détaillées et normalisées [1]-[2]. Cette inspection vise à vérifier l'intégrité de la totalité de l'ouvrage, aussi bien le gros œuvre, que la chaussée, les corniches, les garde-corps et les câbles dans le cas des ponts suspendus. Cette inspection a lieu tous les six ans, avec éventuellement un suivi plus rapproché pour les ouvrages souffrant de désordres préoccupants. Or pour pouvoir examiner une partie d'ouvrage il faut pouvoir y accéder tout en garantissant au maximum l'intégrité physique des intervenants. C'est pour répondre à ce problème que des passerelles automotrices, matériels importants et lourds d'emploi ont été développées [3]. La figure 1 ci-dessous montre à titre d'exemple la passerelle FIP (Forniture Industriali Padova). D'un poids total de 26 tonnes avec le véhicule, elle a une longueur déployée de 12,50 mètres, une hauteur sous chaussée de 5,50 mètres et une charge maximale de 500 kilogrammes. Elle offre une plate-forme de 1,40 mètre de largeur.

C. Intérêt économique.

Il est question aujourd'hui d'automatiser certaines tâches afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle de ces contrôles. Le gain apporté par l'utilisation d'une plate-forme aéroportée pour l'auscultation d'un ouvrage d'art est difficile à quantifier au stade actuel, il doit cependant se traduire par une réduction des risques d'accidents, une diminution des coûts d'inspection et un gain de productivité par un dégrossissage de l'ouvrage à ausculter et l'inspection des zones impossibles d'accès. L'utilisation d'une telle plate-forme doit conduire entre autres à réduire la logistique nécessaire à une inspection d'ouvrage en évitant l'utilisation coûteuse d'une passerelle automotrice. Il doit éviter la fermeture de l'ouvrage à la circulation du trafic routier lors de l'inspection. Il doit réduire les coûts induits par une intervention humaine dans une zone à risque ainsi que diminuer le coût global des mesures par une diminution du nombre d'intervenants.

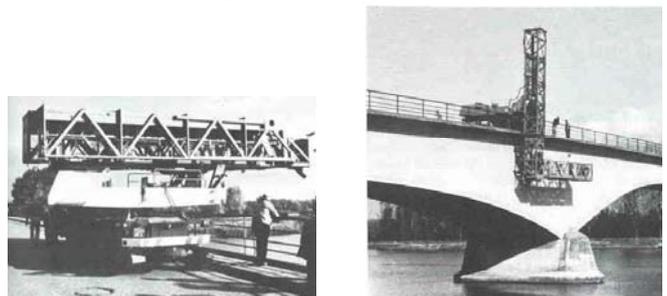


Figure 1 : Passerelle FIP.

Enfin il doit pouvoir faciliter le suivi à long terme de l'ouvrage inspecté et améliorer la compréhension du comportement des ouvrages par la mesure d'autres grandeurs physiques que celles « accessibles » à l'œil.

D. Utilisation

Se rapportant aux problèmes du génie civil [4], ce projet intéresse les organismes et sociétés qui ont eux aussi à gérer des ouvrages. Nous pouvons par exemple citer EDF pour l'inspection des tours aéroréfrigérantes des centrales nucléaires, des pylônes haute-tension, des barrages hydroélectriques, les Monuments Historiques pour le contrôle des cathédrales, et d'autres services du Ministère de l'Équipement comme le Service Technique des Remontées Mécaniques. Ce concept peut également intéresser des applications hors génie civil, notamment pour des problèmes liés à l'environnement comme l'analyse de la pollution atmosphérique et le suivi de l'évolution de nuages toxiques, le contrôle des émissions gazeuses en sortie des cheminées, l'inspection des sites contaminés par des éléments radioactifs, le suivi et l'estimation de la pollution maritime, la surveillance des massifs forestiers pour la prévention et le suivi de l'évolution des incendies, la mesure des mouvements de terrain.

II. PROJET PMI

A. Cadre de recherche

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées s'est fixé un cadre de recherche pour évaluer les potentialités de surveillance des ouvrages de grande hauteur, d'accès difficile, offertes par une plate-forme de type drone équipée notamment d'un dispositif de prises d'images. C'est le projet PMI du LCPC (Plate-forme Mobile d'Instrumentation) [5].

Ce projet comprend deux parties principales fortement couplées (cf. figure 2). En effet tous les mouvements et toutes les vibrations de la plate-forme auront des conséquences sur l'instrumentation embarquée (par exemple flou de bougé sur une prise d'image) et tout dispositif embarqué aura une influence sur la plate-forme (changement de masse, de la position du centre de gravité).

B. Plate-forme

Nous pouvons envisager d'avoir des plates-formes de nature différente (volante, grimpante ou rampante...) selon les configurations de l'ouvrage à examiner. Les caractéristiques principales de cette plate-forme dans le cas d'un drone seraient les suivantes :

- être capable de vol à l'extérieur et à l'intérieur des voussoirs des ponts en béton,
- avoir une charge d'emport suffisante pour embarquer l'instrumentation,

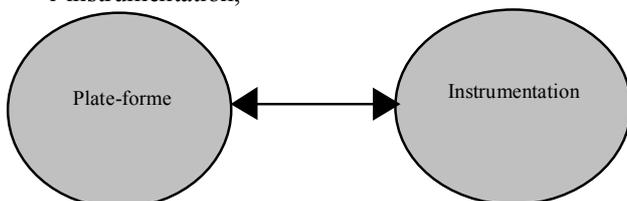


Figure 2 : Schéma de principe du projet PMI

- avoir un contrôle-commande suffisamment performant permettant :
 - son pilotage par des non-professionnels de l'aéromodélisme,
 - le contrôle de la position,
 - le contrôle de la trajectoire,
- être facile d'entretien,
- permettre les évolutions,
- assurer la sécurité des hommes et des biens.

C. Instrumentation

L'instrumentation embarquée sur la plate-forme comprendrait sans que cette liste soit exhaustive, les dispositifs et méthodes (physique, numérique) permettant :

- de visualiser les défauts d'un ouvrage,
- de localiser les défauts sur l'ouvrage,
- de transmettre les données ou de sauvegarder les données,
- de positionner la plate-forme par rapport à l'ouvrage,
- d'interroger les capteurs en place sur l'ouvrage,
- de mettre en place une instrumentation, de nouveaux capteurs sur l'ouvrage,
- de prélever des échantillons,
- de voir autrement que l'œil, en surface, et plus tard en profondeur.

D. Exigences sur la détection des défauts de type fissure

Actuellement l'observation visuelle détaillée des ouvrages d'art inclut le relevé de fissures de l'ordre du 1/10 mm. Pour la quantification des fissures repérées les inspecteurs utilisent un fissuromètre (cf. figures 3 et 4). Il est requis que la qualité des images acquises sur un ouvrage d'art permette de détecter des fissures aussi fines (cf. images situées à gauche). Sur la partie droite des figures, sont présentées ces images binarisées par un traitement approprié. Il est donc raisonnable d'envisager à terme la détection automatique de telles fissures par traitement d'images. Néanmoins il faudra être en mesure d'obtenir à partir d'un système de vision embarqué des images dont la qualité soit suffisante.

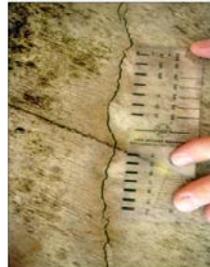
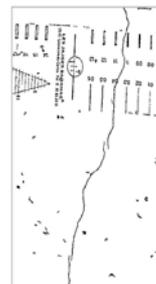


Figure 3 : Mesure de fissure



Figure 4 : Mesure de fissure



III. EXPERIMENTATION SUR LE VIADUC DE SAINT-CLOUD

A. Objectifs

L'un des objectifs de notre projet est de visualiser des défauts sur ouvrages d'art à partir d'un dispositif de prise de vue embarqué sur un drone. Pour ce faire, il a été décidé de valider ce concept en réalisant une expérimentation sur site réel. La plate-forme mobile instrumentée qui a été testée était un aéromodèle d'hélicoptère téléopéré équipé d'une caméra vidéo.

B. Choix et localisation du site

Nous avons choisi le viaduc de Saint-Cloud en raison de sa morphologie et de son implantation (cf. figure 5). Ce viaduc à fort trafic se situe en effet dans une zone très urbanisée et soumise aux contrôles des grands aéroports parisiens. Il enjambe la Seine et se trouve sur deux communes, Boulogne-Billancourt et Saint-Cloud.

Les manœuvres de décollage et d'atterrissage se sont déroulées à partir d'un quai. L'espace d'évolution était limité à un couloir de déplacement parallèle à la partie de l'ouvrage qui enjambe la Seine.

C. Caractéristiques du viaduc (cf. tableau 1 et figure 6)

D. Autorisations préalables

Le viaduc de Saint-Cloud se trouvant en milieu urbain et en zone de contrôle d'aérodrome (hélicoptère d'Issy-les-Moulineaux), une demande de dérogation pour l'autorisation de survol à basse altitude a été instruite auprès de la préfecture des Hauts de Seine.

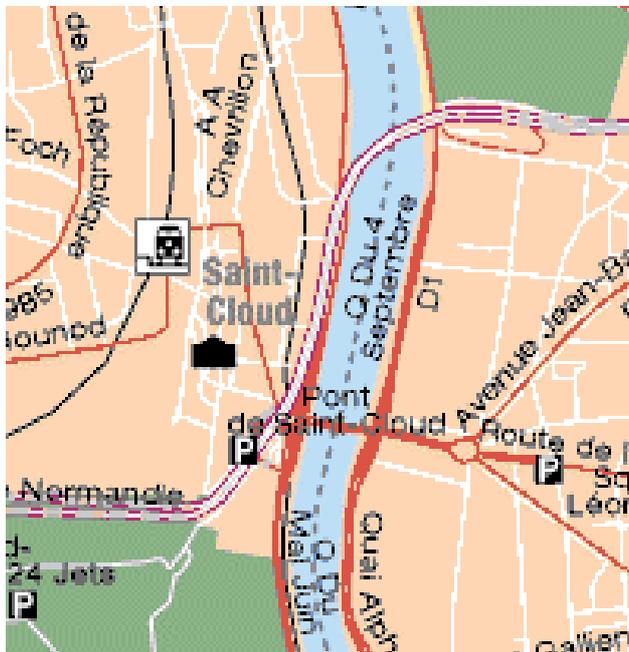


Figure 5 : Implantation du Viaduc de Saint-Cloud

TABLEAU I
CARACTERISTIQUES DU VIADUC

Date de mise en service	1974
Longueur totale	1 100 m
Longueur au-dessus de la Seine	280 m
Largeur	20, 4 m
Hauteur au-dessus de la Seine	8 m
Epaisseur totale du tablier	4.6 m
Technologie	voussoirs en béton précontraint



Figure 6 : Vue d'ensemble du viaduc

E. Sécurité

Pour des raisons de facilité de pilotage et d'accessibilité, il a été retenu de faire évoluer l'hélicoptère en se limitant à la partie amont du viaduc côté Saint-Cloud. En vertical, la limite basse d'évolution a été fixée à sept mètres, en respect des consignes de sécurité imposées par le "Service de Navigation de la Seine" (tirant d'air des bateaux circulant sur la Seine), et la limite haute a été fixée au niveau de la corniche du viaduc, soit environ à douze mètres. La distance horizontale beaucoup moins critique, a été fixée à quelques dizaines de mètres maximum d'éloignement des parements. Il ne devait en aucun cas y avoir de survol des chaussées circulées, l'engin ne devant pas perturber les usagers de la route, en attirant leur attention au détriment de leur sécurité.

IV. LE MATERIEL

A. Hélicoptère

Nous avons utilisé pour cet essai un hélicoptère (cf. figure 7), dont les caractéristiques sont mentionnées ci-après (cf. tableau 2). Cet aéromodèle est une machine professionnelle, spécialement développée pour les prises de vue. Il est sécurisé par redondance au niveau de la radio et de l'énergie électrique d'alimentation.



Figure 7 : Hélicoptère

TABLEAU II
CARACTERISTIQUES DE L'HELICOPTERE

Masse à vide	10 kg
Diamètre du rotor	1.8 m
Longueur du fuselage	1.5 m
Longueur totale	1.95 m
Masse transportée	2 kg

TABLEAU III
CARACTERISTIQUES DE LA RADIOCOMMANDE

Marque	Graupner X3810
Portée	2 km
Fréquences	41.000 MHz et 41.100 MHz

B. Télécommande

Les caractéristiques principales de la radio-commande de l'hélicoptère sont rappelées dans le tableau III.

1) Remarques

L'hélicoptère est piloté à vue. Le seul "contrôle-commande" est assuré par le pilote qui actionne les joysticks de la télécommande. Ce pilotage à vue rend difficile les évolutions proches de l'ouvrage.

Le pilote est aidé par un assistant qui lui donne les consignes de déplacement.

C. Caméscope

Le caméscope numérique (cf. figure 8) est logé dans le support de couleur bleu sur le devant de l'hélicoptère. Ce support peut être orienté par télécommande depuis la station sol. Les images sont enregistrées directement sur une cassette et transmises sur la station sol. Les principales caractéristiques sont données dans le tableau IV

D. Station sol

Cette station (cf. figure 9 et tableau V) permet d'orienter la coiffe bleue à distance grâce à une radio-commande et de visualiser les images sur l'écran de contrôle. Au vu de l'image obtenue, le cadreur oriente la caméra avec le joystick. Par contre le zoom de la caméra n'était pas opérationnel.

1) Remarque

Un scanner de sécurité assure la surveillance de la bande utilisée.



Figure 8: Caméscope numérique

TABLEAU IV
CARACTERISTIQUES DU CAMESCOPE ET
DE LA TRANSMISSION DES IMAGES AU SOL

Marque	Sony
Type	DCR-VX1000E
Format	miniDV Pal
Capteur	3 CCD 410 Kpixels Progressive scan
Sensibilité	4 lux
Zoom optique	x 10
Masse	1.2 kg
Transmission des images	
Module	Hyper
Portée	300 m
Fréquence	2,414 GHz
Puissance	10 mW



Figure 9 : Station sol

TABLEAU V
CARACTERISTIQUES DE LA RADIOCOMMANDE

Type	Graupner MC24
Nombre d'axes	2 (pan, tilt)
Portée	2 km
Fréquence	41.150 MHz
Ecran de contrôle- moniteur LCL	150 x 110 mm

V. L'EXPERIMENTATION

A. Essais

L'expérimentation a eu lieu le 12 juin 2001 de 10h30 à 13h30 avec une météo favorable. Temps sec, température proche de 20°C, avec un milieu de journée très ensoleillé malgré quelques cumulus. Vent faible variable en direction du secteur sud-est environ 10 km/h se renforçant légèrement sous les nuages.

Nous avons demandé au pilote de se rapprocher avec son hélicoptère au plus près de la paroi et de faire du vol stationnaire autour de cette position. Le balayage de la surface de l'ouvrage a été fait en décrivant des mouvements verticaux et horizontaux les plus lents possibles. Il est à noter que le pilote y est plus ou moins bien parvenu et ceci pour plusieurs raisons, à savoir :

- appréhension de l'accident
- difficulté de se repérer par rapport à l'ouvrage
- turbulences liées au passage des camions circulant sur le viaduc

Ci après sont présentées les photos de l'hélicoptère en vol (cf. figure 10) et en position de prise de vue (cf. figure 11).



Figure 10 : Hélicoptère en vol



Figure 11 : Hélicoptère près se l'ouvrage

B. Résultats

Au cours de cet essai deux films vidéo ont été réalisés. Le premier film correspond aux images prises par la caméra embarquée sur l'hélicoptère. Le deuxième film a été réalisé à l'aide d'une caméra fixe au sol filmant les évolutions de l'hélicoptère. Ci-après sont présentées quelques images extraites du premier film et ont été analysées par un inspecteur d'ouvrages d'art. Les commentaires sont rappelés dans les légendes. Ces images illustrent quelques pathologies courantes rencontrées sur les ouvrages.

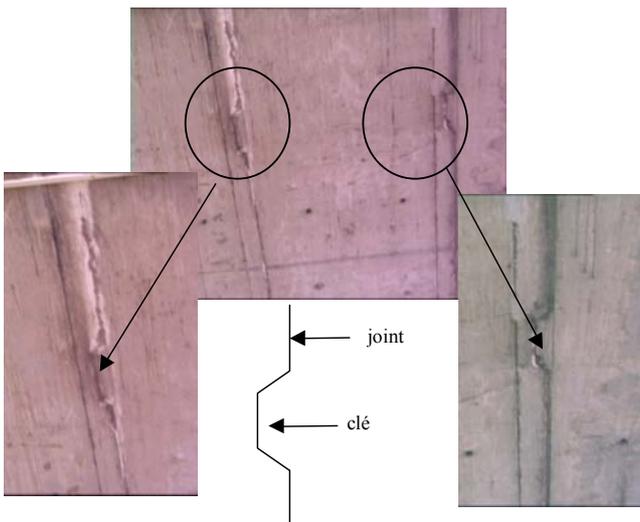


Figure 12 : Visualisation de deux clés d'assemblage des voussoirs.

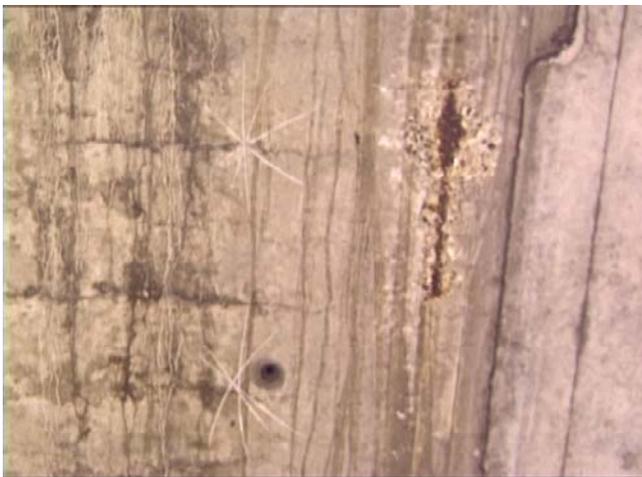


Figure 13 : Eclatement de béton avec armature verticale apparente corrodée, dû vraisemblablement à une insuffisance d'enrobage

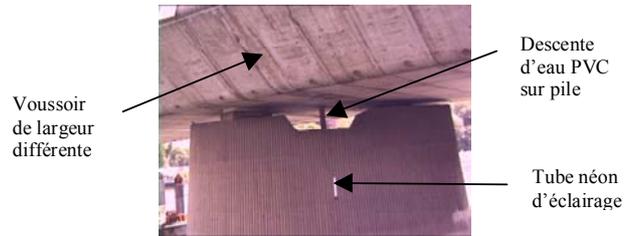


Figure 14 : Vue sur une pile du viaduc

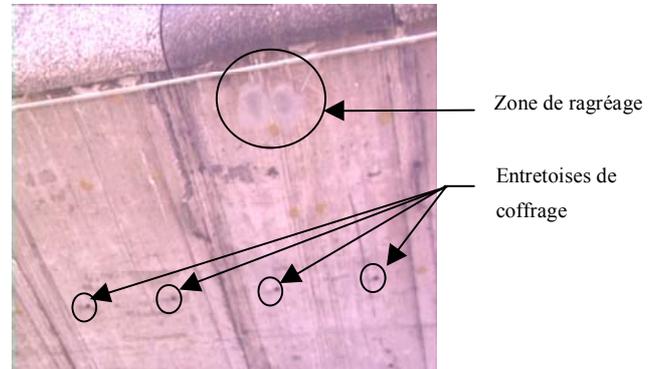


Figure 15 : Exemple de zone de ragréage

C. Analyse

Cet essai a permis de démontrer qu'il est possible de filmer un ouvrage depuis un engin volant. L'exploitation des images obtenues par un inspecteur d'ouvrage d'art montre qu'il est possible d'en extraire certaines informations. Bien que cette expérimentation ait été réalisée avec un pilote professionnel très expérimenté, les limitations induites par le pilotage à vue ne permettent pas d'envisager son application à la surveillance des ouvrages de très grandes dimensions, dans des zones difficilement visibles, ni à l'intérieur des voussoirs pour des raisons d'encombrement de l'aéromodèle. Les images obtenues satisfont partiellement les besoins d'auscultation des ouvrages. Il faudra améliorer la qualité et la résolution des images pour parvenir après un traitement d'images approprié à détecter des fissures de l'ordre du 1/10 mm. Le repérage des défauts sur l'ouvrage passe également par la localisation de l'image sur l'ouvrage et donc de l'aéromodèle par rapport à l'ouvrage.

VI. CONCLUSION

A partir du cahier de charges fonctionnel de la plate-forme rédigé en 1999, plusieurs voies de recherche ont été explorées pour la plate-forme support. Parmi celles-ci, les plates-formes volantes semblent offrir des potentialités très intéressantes. C'est dans cette optique que des essais de faisabilité sur site réel se sont déroulés en 2001.

Ces essais ont permis de valider le concept. Ils ont montré que la qualité des images obtenues reste perfectible. Les performances en vol restent limitées par le pilotage à vue de la plate-forme et s'avèrent insuffisantes au regard de nos besoins, toutefois un contrôle-commande performant permettrait de palier à ces inconvénients. La localisation des images acquises par rapport à l'ouvrage reste relative à des points particuliers sur l'ouvrage.

Des recherches doivent être entreprises ou poursuivies sur le support aérien, le dispositif de vision, la transmission des données, l'archivage des données et sur le positionnement du support par rapport à l'ouvrage.

Il en va de même pour l'instrumentation et la définition d'un site de référence représentatif.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Berthelot et la Société Verti-Services, pour le pilotage de l'hélicoptère et les prises de vue, MM. Ringot et Delahousse de la cellule audiovisuelle du LCPC pour leur participation aux prises d'images de l'opération et M. Renaudin du LR de Strasbourg pour les commentaires des images.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Godart, « La surveillance renforcée et la haute surveillance des ouvrages d'art en France », Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, n°227, 2000, pp 63-70
- [2] « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, Fascicule 01 Dossier d'ouvrage, Fascicule 02 Généralités sur la surveillance, Fascicule 03 Auscultation, Surveillance Renforcée, Haute surveillance, Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde », Documents édités et diffusés par le LCPC et le SETRA
- [3] R. Mathurin, « Contribution au développement d'une plate-forme mobile d'instrumentation », Rapport DGA, Contrat ERE n°9960054/A000, 2000, non publié
- [4] « Les ouvrages d'art », Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, décembre 1978
- [5] L.M. Cottineau, F. Derkx, V. Legeay, R. Mathurin, B. Philippot, J.L. Soin, « Plate-forme mobile d'instrumentation - cahier des Charges fonctionnel », Document interne du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1999, non publié