
Détection d'endommagement dans une poutre en béton précontraint par recalage de modèles et mesures par fibres optiques

Julien Waeytens¹, Maria Pina Limongelli², Erick Merliot¹, Dominique Siegert¹, Xavier Chapeleau³, Roland Vidal⁴, Véronique Le Corvec⁵, Louis-Marie Cottineau³

¹ Université Paris-Est, IFSTTAR, Cité Descartes, 14-20 Boulevard Newton, F-77447 Marne-la-Vallée, France, email : julien.waeytens,erick.merliot,dominique.siegert@ifsttar.fr

² Politecnico de Milano, Department Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy, email : mariapina.limongelli@polimi.it

³ LUNAM Université, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France, email : xavier.chapeleau,louis-marie.cottineau@ifsttar.fr

⁴ ADVITAM, Vinci, 280 Avenue Napoléon Bonaparte, F-92506 Rueil Malmaison, France, email : roland.vidal@advitam-group.com

⁵ Numerical Engineering & Consulting Services (NECS), 196 rue Houdan, F-92330 Sceaux, France, email : veronique.lecorvec@necs.fr

RÉSUMÉ. Une méthode pour la détection et la quantification de l'endommagement est proposée. Elle est fondée sur le recalage des paramètres de modèle caractéristiques de l'endommagement, i.e. le module d'Young, à partir de mesures de déformation par fibres optiques. L'information locale apportée par la mesure de déformation permet une détection précoce de l'endommagement. La méthode a été appliquée sur une poutre en béton précontraint de 8m de long soumise à un chargement statique. Le problème de recalage pouvant s'écrire sous la forme d'un problème de minimisation, i.e. minimisation de l'écart entre déformation simulée et déformation mesurée, un algorithme de descente avec un calcul du gradient à moindre coût grâce à l'état adjoint est mis en œuvre. Cette méthode utilise les outils numériques standards de l'Ingénieur, e.g. un superviseur en langage Python et le code de calculs éléments finis Code_Aster. Concernant la poutre en béton précontraint, la méthode a permis de déterminer la zone endommagée et d'estimer l'endommagement à 10%.

ABSTRACT. A technique has been developed to detect and quantify structural damages. It consists of updating the model parameters associated to the damage, i.e. Young modulus, from strain sensor outputs obtained by optical fiber. Early damage detection can be expected using the local information given by the strain measurement. The method has been applied to a 8 meter post-tensioned concrete beam under a static loading. The model updating problem can be formulated as a minimization problem, i.e. minimize a data misfit functional. To solve this problem, we use a gradient-based method. The gradient of the functional is computed at a low computational cost by means of the adjoint state. Concerning the numerical implementation of the proposed method, it can be achieved using standard numerical engineering tools, e.g. Python language and the finite element software Code_Aster. The technique is able to detect the damaged area in a post-tensioned concrete beam and to estimate its level of damage.

MOTS-CLÉS : détection d'endommagement, problèmes inverses, recalage de modèles, fibres optiques

KEYWORDS: damage detection, inverse problem, model updating, optical fiber

1. Introduction

La surveillance de l'état des structures, communément appelée "Structural Health Monitoring" (SHM) en anglais, est primordiale pour détecter un éventuel endommagement. Cette information offre la possibilité au gestionnaire de réajuster son plan d'intervention et ainsi de réduire les coûts de maintenance tout en garantissant la sécurité des usagers. Dans [RYT 93], l'auteur a proposé différents niveaux associés à la détection d'endommagement : la détection (niveau 1), la localisation (niveau 2), la quantification (niveau 3). Les méthodes d'identification d'endommagement fondées uniquement sur les mesures, notamment les mesures accélérométriques, permettent la détection et la localisation des défauts [LIM 10, POS 10]. Afin de quantifier l'endommagement, les méthodes combinant les mesures et un modèle physique de l'ouvrage [ROS 13, WAE 14, CHA 14, WAE] doivent être privilégiées.

Dans cet article, nous étudions une méthode de recalage de modèles pour l'identification d'endommagements dans une poutre en béton précontraint de 8m de long. Cette poutre a été réalisée dans le cadre d'un projet FUI intitulé "Systèmes Intelligents pour la Prévention des Risques Structurels" (SIPRIS). Ce projet a impliqué Advitam (Vinci), Autoroutes du Sud de la France (ASF), NECS, SYROKKO, ESIEE-Paris et IFSTTAR. Afin de réaliser et comparer différentes techniques de détection d'endommagement, la poutre précontrainte a été massivement instrumentée : accéléromètres, inclinomètres, capteurs de déplacement, extensomètres, température, cellules d'effort pour mesurer la tension dans les câbles, fibres optiques disposées au cœur du béton et fibres optiques disposées dans une saignée en surface. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'utilisation de la mesure de déformation par fibres optiques. L'information locale apportée par la mesure de déformation permet une détection précoce de l'endommagement.

La détection d'endommagement par recalage de modèles est un problème inverse. L'objectif est de déterminer les paramètres du modèle physique, i.e. le module d'Young dans les zones potentiellement endommagées de la structure, afin de minimiser l'écart entre les mesures de déformation par fibres optiques et la solution numérique du modèle physique. Concernant la modélisation de la poutre, nous avons retenu les équations en 3D de la mécanique des milieux continus. Les problèmes relatifs à l'identification de paramètres sont très souvent mal-posés : non-unicité de la solution et forte sensibilité à l'erreur de mesure. Différentes stratégies ont été proposées pour régulariser le problème. Par exemple, on peut citer la régularisation de Tikhonov, la régularisation par l'erreur en relation de comportement et la régularisation à l'aide d'approches Bayésiennes. Dans notre étude, nous considérons la méthode de régularisation de Tikhonov pour sa facilité de mise en œuvre. De plus, nous avons limité le nombre de paramètres à identifier, i.e. le module d'Young est considéré constant par morceaux sur une maille de discrétisation plus grossière que la discrétisation fine utilisée pour la résolution par les éléments finis. Il est important de noter que le problème d'identification de paramètres correspond à un problème de minimisation sous contraintes. Pour le résoudre, une méthode itérative de descente est mise en œuvre. Le gradient de la fonctionnelle à minimiser est calculé à moindre coût à l'aide de l'état adjoint. Les premiers résultats obtenus sur la poutre en béton précontraint ont permis de localiser précisément l'endommagement et de le quantifier.

2. Poutre en béton précontraint et instrumentation par fibres optiques

Sur le site de l'IFSTTAR Nantes, une poutre en béton de 8m de long précontrainte par deux câbles longitudinaux et un câble parabolique a été réalisée. Cette poutre a été fortement instrumentée avec des accéléromètres, des inclinomètres, des palpeurs, des extensomètres, des capteurs de température, des cellules d'effort pour mesurer la tension dans les câbles et enfin des fibres optiques. L'objectif était d'analyser la réponse de différents types de capteurs lors de scénarios d'endommagement et de réparation de la poutre. Après fissuration de la poutre, une réparation a été effectuée par l'application d'une précontrainte additionnelle à l'aide du câble parabolique. Dans cet article, nous nous focaliserons sur l'exploitation de la mesure de déformation obtenue par une fibre optique disposée le long d'une armature longitudinale (cf Figure 1) afin de cartographier l'endommagement de la poutre.

Aujourd'hui, dans le domaine du génie civil, les capteurs à fibre optique apparaissent comme une solution crédible, fiable et performante pour l'instrumentation d'ouvrages d'art et d'infrastructures. Face aux capteurs traditionnels, leur principaux avantages sont leur petite taille, leur résistance à la corrosion, leur insensibilité aux perturbations électromagnétiques, leur flexibilité et la possibilité de faire des mesures à distance. De plus, ils peuvent à la fois être intégrés à cœur (pour des structures en béton ou en matériaux composites) ou collés à la surface d'une structure (pour les structures déjà existantes).

Il existe différentes technologies de capteurs à fibre optique. La plus utilisée est sans conteste les réseaux de Bragg. Il s'agit d'une technologie assez ancienne (existe depuis 20 ans) qui permet de faire des mesures de déformation et de températures en de multiples points de la fibre optique. Aujourd'hui, les systèmes d'interrogations de réseaux de Bragg sont très performants et de moins en moins chers en comparaison avec d'autres systèmes traditionnels d'instrumentation. Plus récemment depuis une dizaine d'années, une nouvelle famille technologique de capteur à fibre optique est apparue. Elle permet d'obtenir des profils de température et/ou de déformation sur de grandes distances (de quelques mètres à plusieurs kilomètres) avec une résolution spatiale inférieure au mètre. Cette nouvelle famille technologique de capteurs à fibre optique appelée capteurs à fibre optique répartis est basée sur la mesure de la rétrodiffusion de la lumière incidente tout au long de la fibre optique. Cette famille se décompose en 3 groupes selon la nature de la diffusion qui est mesurée : Raman, Brillouin ou Rayleigh. La diffusion Raman permet uniquement de faire des mesures de température alors que les diffusions Rayleigh et Brillouin sont utilisées pour faire majoritairement des mesures de déformation (à noter que la température est une grandeur d'influence à prendre en compte). La différence entre ces 2 technologies Rayleigh et Brillouin réside dans leurs performances. La diffusion Brillouin permet d'obtenir des profils de déformation sur de très grandes distances, plusieurs kilomètres, avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre (25cm pour les appareils les plus performants) alors que la diffusion Rayleigh est limitée à 70 mètres de fibre optique mais la résolution spatiale est très bonne, inférieure au centimètre. Ces différents types de capteurs à fibre optique répartis sont particulièrement bien adaptés pour instrumenter des structures de génie civil, en particulier celles de grandes dimensions. En effet, ils peuvent remplacer avantageusement les capteurs traditionnels en limitant les problèmes de connectique. De plus, les coûts d'instrumentation divisés par le nombre de point de mesures penchent généralement d'autant plus en faveur des capteurs à fibre optique répartis que le nombre de point de mesures est élevé.

Pour le projet SIPRIS, nous avons disposé une fibre optique le long d'une armature longitudinale en partie basse de la poutre (Figure 1) et nous avons choisie de l'interroger avec la technologie Rayleigh car elle présente la meilleure résolution spatiale, de l'ordre du centimètre. Il est important de souligner que cette technique donne une mesure relative. En effet, il faut 2 mesures du signal Rayleigh (la première mesure servant de référence) pour obtenir un profil de déformation. Dans le protocole d'expérimentation de la poutre SIPRIS, nous avons fait des mesures du signal Rayleigh avant et après application d'un chargement mécanique sur la poutre par un vérin hydraulique. En prenant pour référence la mesure Rayleigh avant chargement, on peut ainsi obtenir le profil de déformation induit par le chargement mécanique de la poutre. Par ailleurs, les essais ayant été réalisés en laboratoire dans un local climatisé, la température a peu varié entre les différentes mesures du signal optique Rayleigh. Ainsi, on peut supposer négligeable les effets de la température sur les mesures de profils de déformation.

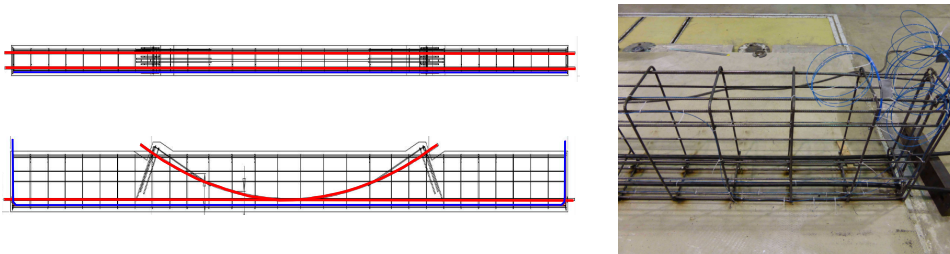


Figure 1. Poutre en béton précontrainte par 3 câbles (en rouge) - Instrumentation par fibres optiques (en bleu) le long d'une armature longitudinale

3. Méthode de détection d'endommagement par recalage de modèle

La méthode proposée de détection et de quantification d'endommagement s'appuie sur la recalage de modèle. L'objectif est de déterminer les paramètres caractéristiques de l'endommagement permettant de minimiser l'écart entre la mesure et la simulation numérique. Comme indiqué dans la partie précédente, nous exploitons une mesure différentielle de déformation obtenue par fibres optiques entre la poutre précontrainte avant et après application d'une charge statique. Pour modéliser le comportement de la poutre et simuler cette déformation différentielle, on considère les équations de la mécanique des milieux continus suivantes :

$$\int_{\Omega} Tr[\epsilon(\mathbf{u})\mathcal{K}(E)\epsilon(\mathbf{u}^*)]d\Omega + \int_{\partial\Omega_i} k u_y u_y^* \partial\Omega - \int_{\partial\Omega_f} F_d u_y^* \partial\Omega = 0, \quad \forall \mathbf{u}^* \in \mathcal{U}_0 = \{\mathbf{u}^* \in H_1(\Omega)\} \quad (1)$$

L'opérateur de Hooke dépendant du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν est désigné par $\mathcal{K}(E)$. La poutre repose sur deux appuis de type élastomère de rigidité k , la zone d'appui est notée $\partial\Omega_i$. Le chargement statique F_d est appliqué au centre de la poutre, on note cette zone $\partial\Omega_f$. u_y correspond à la flèche. Afin de déterminer et quantifier l'endommagement, on cherche à recalcer le module d'Young homogénéisé $E(\mathbf{x})$ présent dans les équations du modèle équivalent linéaire élastique (1). Pour limiter le nombre d'inconnus, on se limite à l'identification du module d'Young dans les zones potentiellement endommagées, le module d'Young est supposé constant par sous-domaines. En pratique, nous avons choisi des sous-domaines de 40 cm de long suivant l'axe de la poutre. Le problème de recalage du vecteur \mathbf{E} des modules d'Young dans les sous-domaines potentiellement endommagés peut s'exprimer sous la forme d'un problème de minimisation sous contraintes, le vecteur des modules d'Young recalés est noté \mathbf{E}_{rec} :

$$\mathbf{E}_{\text{rec}} = \arg \min J(\mathbf{u}; \mathbf{E})$$

$$\text{où } J(\mathbf{u}; \mathbf{E}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} \left[\int_{\Omega} \epsilon_{xx}(\mathbf{u}; \mathbf{E}) \psi_i(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) d\Omega - (\epsilon_{xx}^{mes})_i \right]^2 + \epsilon_{reg} \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega} (E(\mathbf{x}) - E_{ud})^2 d\Omega. \quad (2)$$

Ce problème de minimisation est sous contraintes car le champ de déplacement \mathbf{u} doit vérifier les équations de la mécanique des milieux continus (1). Dans la fonctionnelle J , le premier terme est associé à l'écart quadratique entre simulation et mesure et le second terme correspond à un terme de régularisation de Tikhonov [TIK 77]. n_s représente le nombre de mesures par fibre optique, la déformation mesurée au point de coordonnées \mathbf{x}_i est notée $(\epsilon_{xx}^{mes})_i$. La fonction ψ_i permet d'extraire la déformation simulée en \mathbf{x}_i . Concernant le terme de régularisation, ϵ^{reg} est un paramètre de régularisation adimensionnel permettant de définir le poids du terme de régularisation par rapport au terme d'écart aux mesures. En pratique, nous déterminons ce paramètre en utilisant le principe de dis-crépance initialement proposé dans [MOR 66]. L'idée générale consiste à chercher le paramètre de régularisation ϵ^{reg} permettant d'avoir un écart entre simulation et mesure (à la fin du processus de recalage) proche et strictement supérieur à l'erreur de mesure. Afin que les deux termes de la fonctionnelle soit homogène, on introduit le paramètre $\alpha = 1/(LHE_{ud}^2)$. Enfin, E_{ud} correspond au module d'Young en l'absence d'endommagement.

Pour résoudre le problème de minimisation sous contraintes (2), un algorithme de descente est mise en œuvre. Le calcul du gradient par la méthode standard des différences finies pouvant être coûteux, nous proposons de réduire le temps de calcul en utilisant l'état adjoint noté $\tilde{\mathbf{u}}$. Ainsi le gradient de la fonctionnelle J par rapport au module d'Young E_j associé au $j^{\text{ème}}$ sous-domaine est obtenu par la formule suivante :

$$\frac{\partial J}{\partial E_j} = - \int_{\Omega_j} d\lambda \operatorname{div}(\mathbf{u}) \operatorname{div}(\tilde{\mathbf{u}}) d\Omega - \int_{\Omega_j} 2d\mu \operatorname{Tr}[\epsilon(\mathbf{u})\epsilon(\tilde{\mathbf{u}})] d\Omega + \epsilon_{reg} \alpha \int_{\Omega_j} (E(\mathbf{x}) - E_{ud}) d\Omega$$

$$\text{avec } d\lambda = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad d\mu = \frac{1}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

Pour calculer le gradient de la fonctionnelle, il est donc nécessaire de connaître le champ de déplacement \mathbf{u} du problème de mécanique (1) et le champ de déplacement $\tilde{\mathbf{u}}$ du problème adjoint défini par :

$$\int_{\Omega} \operatorname{Tr}[\epsilon(\tilde{\mathbf{u}})\mathcal{K}\epsilon(\mathbf{u}^*)] d\Omega + \int_{\partial\Omega_i} k\tilde{u}_y u_y^* \partial\Omega - \sum_{i=1}^{n_s} \int_{\Omega} (\tilde{\sigma}_{0_{xx}})_i \frac{\partial u_x^*}{\partial x} d\Omega = 0, \quad \forall \mathbf{u}^* \in \mathcal{U}_0 = \{\mathbf{u}^* \in H_1(\Omega)\}$$

$$\text{avec } (\tilde{\sigma}_{0_{xx}})_i(\mathbf{x}) = \left[\int_{\Omega} \epsilon_{xx}(\mathbf{u}; \mathbf{E}) \psi_i(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) d\Omega - (\epsilon_{xx}^{mes})_i \right] \psi_i(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i), \quad i \in \{1, \dots, n_s\}$$

$$(4)$$

Le problème adjoint est un problème analogue au problème de mécanique (1). Le chargement de ce problème correspond à une précontrainte $(\tilde{\sigma}_{0_{xx}})_i$ au voisinage des points de mesure dont l'amplitude est donnée par l'écart entre simulation et mesure. Dans [WAE 14], nous avons montré que ce problème de détection d'endommagement par recalage de modèle peut être résolu à l'aide des outils numériques de l'Ingénieur, *e.g.* un superviseur en langage Python et le code de calculs éléments finis Code_Aster [EDF].

4. Détection et quantification de l'endommagement sur la poutre en béton

La méthode de détection et de quantification a été appliquée sur la poutre en béton précontraint sous un chargement statique de 10 kN au centre de la poutre. Grâce à une fibre optique disposée à une distance de 30 mm de

la fibre inférieure, nous obtenons le profil de déformation suivant l'axe de la poutre représenté en marron sur la Figure 2. Avant la procédure de recalage, on considère un module d'Young $E_{ud} = 25GPa$ dans l'ensemble de la poutre. La déformation obtenue par la résolution numérique du problème de mécanique (1) avec $E(x) = E_{ud}$ est représentée avec une croix bleue sur la Figure 2. Excepté dans les zones endommagées, la déformation simulée est proche de la déformation mesurée. Pour localiser et quantifier l'endommagement, nous déterminons la baisse de rigidité par un recalage des paramètres du modèle.

Dans la méthode de recalage, nous exploitons une mesure moyennée sur une distance de 40 cm de la déformation obtenue par fibres optiques (cf losange noir sur la Figure (2)). La partie inférieure de la poutre est décomposée en 21 sous-domaines le long de l'axe de la poutre. Pour une erreur de mesure de $2 \mu m/m$, le paramètre de régularisation déterminé par le principe de discrédance est $\epsilon_{reg} = 9 \times 10^{-9}$. Après la résolution du problème de minimisation (2), nous obtenons la cartographie du module d'Young illustrée sur la Figure 3. La déformation associée est représentée avec un disque bleu sur la Figure 2. En observant uniquement la mesure de déformation par fibre optique, nous détectons la présence d'une fissure à 0,7 m du centre de la poutre (cf $x = 0,7$ sur la Figure 2). Notre méthode permet également de mettre en évidence cet endommagement (zone rouge sur la Figure 3) mais elle permet en plus de le quantifier, *i.e.* baisse du module d'Young d'environ 10%.

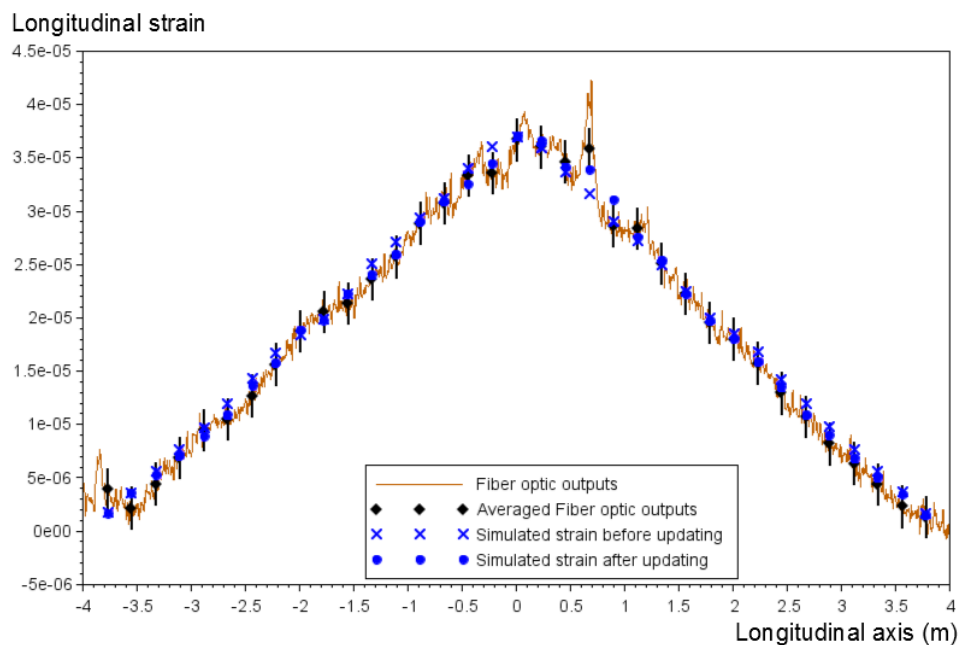


Figure 2. Comparaison de la déformation mesurée par fibre optique et de la déformation simulée (avant et après recalage de modèle) - Chargement statique de 10 kN au centre de la poutre

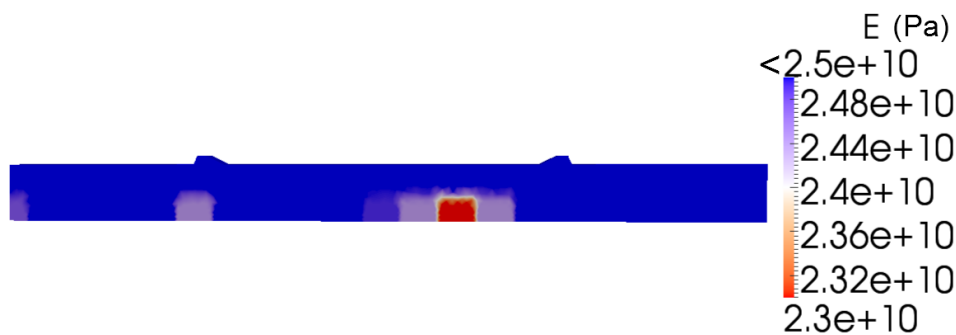


Figure 3. Cartographie du module d'Young obtenue après recalage de modèle

Remerciements

Ces travaux de recherche ont été financés par la Région Ile de France dans le cadre du projet FUI “Systèmes Intelligents pour la Prévention des Risques Structurels” (SIPRIS). Le projet a été réalisé en partenariat avec Advitam (Vinci), Autoroute du Sud de la France (ASF), ESIEE-Paris, NECS, SYROKKO et IFSTTAR.

5. Bibliographie

- [CHA 14] CHAMOIN L., LADEVÈZE P., WAEYTENS J., « Goal-oriented updating of mechanical models using the adjoint framework », *Computational Mechanics*, vol. 54, p. 1415-1430, 2014.
- [EDF] EDF, Finite element code for structural analysis, GNU general public licence.
- [LIM 10] LIMONGELLI M., « Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment », *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, p. 2898-2913, 2010.
- [MOR 66] MOROZOV V., « On the solution of functional equations by the method of regularization », *Soviet Math. Dokl.*, vol. 7, p. 414-417, 1966.
- [POS 10] POSENATO D., KRIPAKARAN P., INAUDI D., I. S., « Methodologies for model-free data interpretation of civil engineering structures », *Computers and Structures*, vol. 88, p. 1000–1020, 2010.
- [ROS 13] ROSIC B., KUCEROVA A., SYKORA J., PAJONK O., LITVINENKO A., MATTHIES H., « Parameter identification in a probabilistic setting », *Engineering Structures*, vol. 50, p. 179-196, 2013.
- [RYT 93] RYTTER A., Vibrational based inspection of civil engineering structures, PhD thesis, University of Aalborg, Denmark, 1993.
- [TIK 77] TIKHONOV A., ARSEININ Y., *Solutions to ill-posed problems*, Wintson-Widley, New York, 1977.
- [WAE] WAEYTENS J., ROSIC B., « Comparison of deterministic and probabilistic approaches to identify the dynamics moving load and damages of a reinforced concrete beam, (submitted) », *Applied Mathematics and Computation*.
- [WAE 14] WAEYTENS J., LE CORVEC V., LÉVÈQUE P., SIEGERT D., BOURQUIN F., « Elastodynamics model updating for the monitoring of reinforced concrete beam : methodology and numerical implementation », *Applied Mechanics and Materials*, vol. 513-517, p. 3401–3406, 2014.