

DE LA MESURE DES EFFORTS D'IMPACT INDUITS PAR UNE AVALANCHE PAR ANALYSE INVERSE

A. LIMAM, D BAROUDI,

URGC, INSA Lyon

P. BERTHET-RAMBAUD, CETE Lyon

E. THIBERT, UR ETNA, CEMAGREF Grenoble

Introduction

L'estimation des charges dynamiques par des mesures directes, pour des structures complexes qui sont dans des conditions réelles d'utilisation, peut s'avérer être en pratique très difficile et souvent impossible. Une des solutions est de recourir à l'analyse inverse. Dans cette étude, on s'intéresse à la détermination des efforts dynamiques générés par une avalanche de neige lors de l'impact frontal d'une structure plane. La connaissance de ces efforts dynamiques est indispensable en vue d'un meilleur dimensionnement des structures de protection telles que les murs déflecteurs. Nous proposons ici de déterminer ces efforts en se basant sur la mesure des déformations en certains points d'une structure cible, qui est positionnée dans un écoulement avalancheux. La structure étant assimilée à un capteur, le choix s'est donc porté sur une forme géométrique simple afin de ne pas alourdir la résolution du problème inverse ou direct. Les capteurs en question correspondent à des poutres suffisamment élancées pour garantir la validité du modèle le plus simple, celui de Bernoulli. Ces capteurs sont mis en place sur le site du col du Lautaret [6] qui dispose d'une infrastructure permettant le déclenchement d'avalanches de neige.

Au problème inverse est liée une difficulté intrinsèque : il est mal posé au sens qu'il n'est pas forcément continu par rapport aux données (instabilité du schéma numérique). Pour le résoudre correctement on doit, en premier lieu, le régulariser. Nous proposons d'utiliser dans le domaine temporel, la régularisation de Tikhonov de degré zéro, ainsi que la troncature des petites valeurs singulières (TSVD). Pour le domaine fréquentiel, on utilisera un filtre passe bas. Dans les deux cas nous proposons de contrôler le degré optimal de régularisation par le « principe de distinction de Morozov ». Une fois la validation de l'approche, via la méthode inverse, acquise dans le cas de données synthétiques et dans le cas d'une sollicitation dynamique réelle (impact au marteau de choc), la même méthodologie est appliquée dans le cas de structures identiques soumises à une avalanche de neige. La mesure de la réponse ou déformation est dans ce cas menée in situ (site du Lautaret en France), le traitement via l'analyse inverse permet une estimation du

$$\rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = f(x,t), t > 0 \quad (1)$$

$$w(0,t) = 0, w'(0,t) = 0, \quad (2)$$

$$-EI w''(L,t) = 0, \quad (3)$$

$$-EI w'''(L,t) = 0, \quad (4)$$

$$w(x,0) = 0, \dot{w}(x,0) = 0 \quad (5)$$

champ de la pression induit par l'avalanche.

Le problème direct

On considère une poutre élastique de longueur L encastree, sous sollicitation dynamique $f(x,t)$, travaillant à la flexion sans déformation à l'effort tranchant (modèle d'Euler-Bernoulli), et sans précontrainte. L'équation du mouvement, exprimée en variables de déplacement $w(x,t)$, s'écrit :

où (x,t) dans $[0, L] \times [0, T]$, $T > 0$. On considérera des forces ponctuelles situées aux points de sollicitations x_j , c'est à dire, $f(x,t) = f_j(t) \delta(x - x_j)$, $j=1, \dots, N_j$, où N_j , est le nombre de forces ponctuelles.

La déformation $\varepsilon(x,t; y)$ induite par le moment fléchissant $M = -EI \cdot w''$ en x d'une fibre située à une hauteur y , par rapport à l'axe neutre, est donné par :

$$\varepsilon(x,t; y) = -y \cdot w''(x,t) \quad (6)$$

Dans le présent travail, on résout ce problème par la *méthode des déplacements modaux* avec conditions aux limites et initiales adéquates. Le problème est en pratique résolu une fois que les modes propres et les charges sont connus.

Le problème inverse

Le problème inverse revient à estimer la force $f_j(t)$ appliquée au point x_j à partir des mesures de déformations $\varepsilon(t; y)$ aux points x_i , $i = 1, 2, \dots, m$, collectées pour des temps discrets t_r dans l'intervalle $[0, T]$, $r = 1, 2, \dots, n$.

En général, les problèmes inverses sont mal posés dans le sens où il n'y a pas de stabilité par rapport aux données. Donc, si on résout directement les sollicitations, par exemple, par déconvolution avec des données expérimentales, on obtient des résultats qui sont physiquement dénués de sens ; le bruit du signal mesuré devient prépondérant vis-à-vis de la partie représentant la grandeur physique. C'est pour remédier à ce problème qu'on a recours à la régularisation. Martin M. T. et Doyle J. F. passent en revue la problématique liée en pratique au problème mal posé de l'identification des forces par les méthodes inverses.

En utilisant la méthode modale (séries de Fourier), on

arrive à ramener le problème de la poutre à la formulation intégrale (7)–(9), où ϕ_k sont les modes propres appropriés aux conditions limites réelles. De cette façon le problème inverse revient à résoudre l'équation intégrale (7), par rapport à $f_j(t)$

$$\epsilon(x_i, t; y) = \int_0^t h_{ij}(t - \tau) f_j(\tau) d\tau, \quad (7)$$

$$h_{ij}(\tau) = -y \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k''(x_i) \phi_k(x_j) h_k(\tau) \quad (8)$$

$$h_k(t) = \frac{1}{\omega_{d_k}} e^{-\xi_k \omega_k t} \sin(\omega_{d_k} t), \quad \omega_{d_k} = \omega_k \sqrt{1 - \xi_k^2}. \quad (9)$$

Les fonctions de transfert h_{ij} sont soit analytiques, issues de la modélisation en poutre soit mesurées « directement ». Les pulsions propres amorties sont ω_{d_k} , les pulsions propres sont ω_k et le coefficient d'amortissement est ξ . Dans les calculs on supposera ce dernier indépendant de la fréquence.

Essai en laboratoire (INSA)

Le but des essais en laboratoire est de « valider » la méthode de détermination des efforts à partir des mesures de déformations, dans des cas concrets corrélant, à la nature de l'impact prés, l'essai in situ. Dans ces essais, on impacte une poutre en aluminium à l'aide d'un marteau dynamométrique. La force d'impact ainsi que les déformations en différents points sont enregistrées en continue à une fréquence d'acquisition de 5kHz. Les déformations sont mesurées à l'aide de jauges de déformation. La force d'impact est mesurée par une cellule piézo-électrique fixée à la partie percutante du marteau. Les jauges de déformations sont positionnées au bord, au milieu et à 15 mm de l'encastrement du fusible. Pour remédier au bruit électrique des filtres analogiques avec des bandes passantes adéquates sont utilisés. Le système d'acquisition et d'analyse utilisé est le *DSTP SigLab analyser 20-42*, avec un capteur de force piézo-électrique de Bruël & Kjaër 8200 (figure 1):



Figure 1 : Essai d'impact au marteau de choc : instrumentation et spécimen d'essai.

Les déformations mesurées, à 15 mm de l'encastrement lors de l'impact avec un marteau de choc, sont présentées sur la figure 2.

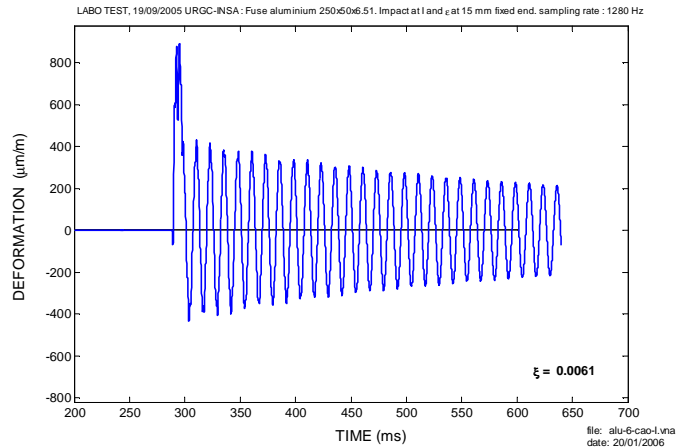


Figure 2 : Déformations mesurées : Impact au bout libre du fusible.

La force mesurée et son évaluation via la méthode inverse sont représentées figure 3.

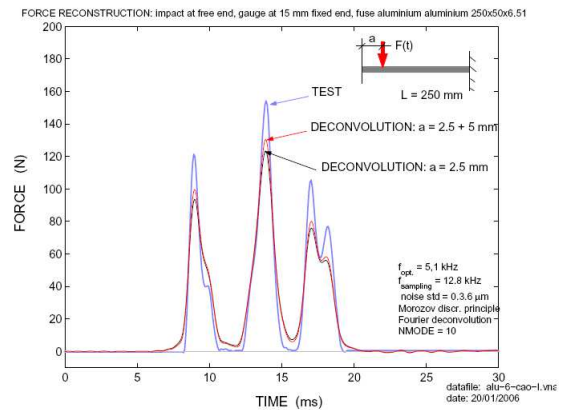


Figure 3 : Force reconstruite par la méthode inverse fréquentielle avec un filtre passe bas comme régularisation (en rouge). La force mesurée est en bleu.

La méthode est donc validée, il reste à mieux cerner les facteurs qui tendent à écrêter les pics d'effort.

Essai in situ au col du Lautaret : Avalanche du 21 février 2006

Dans cette section nous calculons, par la méthode inverse, la définition temporelle de l'effort appliqué sur une poutre soumise à une avalanche de neige. La structure est restée dans le domaine élastique durant tout l'écoulement avalanchueux (Figure 4).

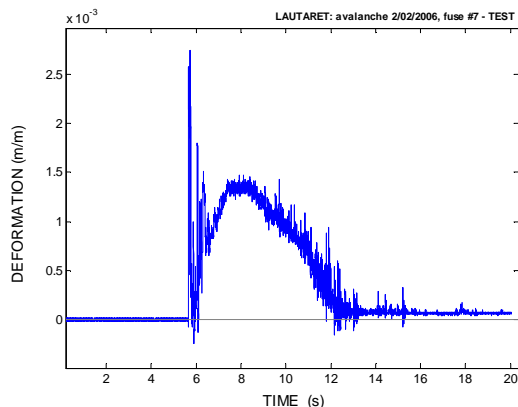


Figure 4. Déformation mesurée.

L'évolution de la pression calculée en utilisant la méthode inverse avec régularisation est présentée figure 5.

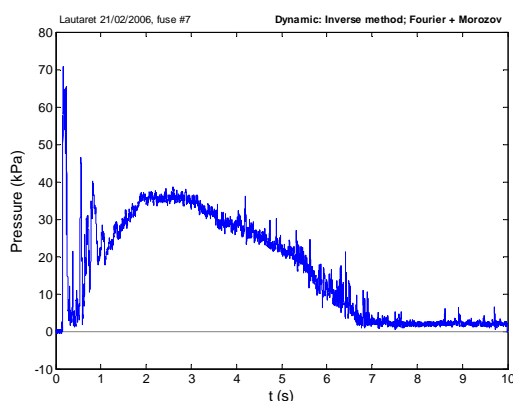


Figure 5. Pression reconstruite par méthode inverse avec régularisation.

Afin de s'assurer que la pression calculée par la méthode inverse induit bien les déformations observées, cette pression a été réinjectée dans un calcul dynamique direct (Figure 6). Le résultat conforte l'applicabilité de la démarche proposée.

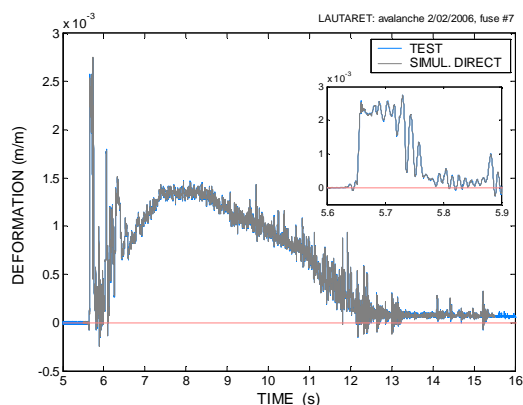


Figure 6 : Déformations mesurées et calculées par le modèle dynamique direct.

Bibliographie

- [1] J. F. Doyle. Wave Propagation in Structures. *Springer, 2nd edition*, 1997.
- [2] Martin M. T. et Doyle~J. F. Impact force identification from wave propagation responses. *Int. J. Impact Engng.*, 18:65--77, 1996.
- [3] Jacquelin E., Bennani A. et Hamelin P. Force reconstruction: analysis and regularization of a deconvolution problem. *Journal of Sound and Vibration*, 265:81--107, 2003.
- [4] Tikhonov A. N. and Arsenin V. Y. Solutions of ill-posed problems. *Wiley*, 1977.
- [5] Groetsch C. W. Inverse problems in the mathematical sciences. *Vieweg*, 1993.
- [6] Berthet-Rambaud P., Structures rigides soumises aux avalanches et chutes de blocs : modélisation du comportement mécanique et caractérisation de l'interaction « phénomène-ouvrage ». *Thèse de Doctorat*. 12 Juillet 2004, Grenoble UJF .