



Détection de fissures dans les poutres d'acier : une nouvelle approche par balayage de mesures de vibrations



Cracks detection in steel beams: A new approach by sine-sweep vibration measurements

Mourad Dougdag^{a,*}, Mohammed Ouali^b, Nacim Mellel^a, Karim Attari^a

^a COMENA/CRNB/DTN/Laboratoire des études mécaniques, CRNB, BP 180, Ain-Oussera, 17200 Willaya de Djelfa, Algérie

^b Département de mécanique, faculté des sciences pour l'ingénieur, Université Saad-Dahleb, Blida, BP 27, route de Soumâa, Blida, Algérie

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 12 janvier 2011

Accepté le 14 mai 2014

Disponible sur Internet le 20 juin 2014

Mots-clés :

Détection précoce

Mécanique de la rupture

Analyse modale expérimentale

Calcul numérique

Vibration

Keywords:

Early detection

Fracture mechanic

Experimental modal analysis

Numerical calculation

Vibration

R É S U M É

Durant ces dernières années, les techniques de détection et d'identification des dommages dans les structures ont bénéficié d'importants efforts de recherche ; plusieurs méthodes non destructives de détection des dommages, telles que celles basées sur l'analyse modale, ont été développées. Le problème qui se pose pour ces techniques est leur faible performance face aux exigences de l'industrie pour une détection précoce des fissures.

Dans ce travail, une rétrospective des principaux paramètres modaux est effectuée, dans le but d'en discuter leurs sensibilités face à l'identification précoce d'une fissure transversale dans une poutre d'acier (arbre, tube, barre, etc.) et de rechercher d'éventuelles propriétés plus sensibles, le cas échéant. Les résultats préliminaires expérimentaux obtenus ont, comme prévu par l'étude bibliographique, montré que les paramètres utilisés présentent une faible sensibilité due au fait qu'ils sont tributaires des erreurs de mesure et du taux de variation de la raideur globale de la structure. En effet, bien que les tests aient couvert une large gamme de modes, les résultats restaient toujours au-dessous de nos espérances pour ce qui concernait les premiers stades de fissuration. Or, il s'avère, d'après la théorie, que la flexibilité locale est largement affectée aux faibles tailles de fissure. L'étude d'autres paramètres de bonnes caractéristiques locales semble être la voie vers une amélioration de la technique de détection précoce des fissures. Des paramètres tels que la raideur locale ont été utilisés. Les résultats d'études portant sur la sensibilité des propriétés modales et des paramètres introduits sont présentés et discutés dans cet article.

© 2014 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

In the last few years, the techniques of detection and identification of damage in structures benefited from important research efforts. Several methods of non-destructive damage detection, such as techniques based on modal analysis, were developed in addition to the traditional methods. The difficulties encountered by these techniques are their

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : Dougdag_m@yahoo.fr (M. Dougdag), oualimohammed@yahoo.fr (M. Ouali).

low performance, considering the industrial requirements to detect cracks as early as possible.

In this work, a retrospective of the principal modal parameters is done, in order to discuss their sensibility for identifying precociously a transverse crack in a steel beam (shaft, tube, bars, etc.), and if possible to find more sensitive properties or techniques. Our preliminary experimental results, as predicted by a bibliographical study, showed that the parameters used have a low sensitivity due to their dependence on measurement errors and to the low variation of the total stiffness rate. In fact, although testing has covered a broad range of modes, results remained always below our hopes to detect early cracks. However, it turned out, according to the theory, that local flexibility is significantly affected in the case of small cracks. Investigating other parameters that have good local characteristics seems to be the best way to improve the sensitivity of techniques allowing one to detect cracks at an early stage. Parameters such as local stiffness were used. A comparison of results concerning the sensitivity of various properties as well as of the introduced parameters is presented and discussed in this article.

© 2014 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

1. Introduction

L'effet de la présence d'une fissure dans un élément de structure est connu depuis longtemps : on sait qu'il conduit à une concentration d'énergie à proximité des lèvres et introduit une flexibilité locale. Kirmsher [1] et Thomson [2] sont les premiers à avoir essayé de quantifier la réponse vibratoire d'une structure en présence d'une discontinuité due à une petite rainure. Mais les premières tentatives d'analyse et de calcul de la flexibilité locale d'une région fissurée d'un élément de structure sont dues à Irwin, Bueckner et Westmann [3], qui ont relié la flexibilité locale aux facteurs d'intensité de contraintes. La flexibilité locale a été introduite à l'endroit de la fissure par des auteurs tels que Dimarogonas [4,5] pour résoudre le problème de la poutre fissurée.

Par la suite, Dimarogonas a expliqué que, du fait de l'ouverture et de la fermeture de la fissure, le comportement devient non linéaire [6]. Gasch et Henry [7] et Henry et Okah-Avae [8] se sont alors intéressés au mécanisme non linéaire dû au phénomène de respiration (*breathing*) par l'application du principe du rotor de Laval, mais plusieurs chercheurs assurent dans leurs travaux que la fissure dans un élément structural reste ouverte pendant les vibrations [9–11]. Cette hypothèse a été faite pour éviter les complexités qui résultent de la présence des caractéristiques non linéaires en présence de fissures de respiration, du fait du changement des caractéristiques mécaniques (variation de la raideur) lors de la fermeture et de l'ouverture de la fissure [10–12]. D'autres auteurs ont estimé que seul le changement géométrique est dominant [13,14].

Étant donné que ce processus de dégradation par fissuration change les propriétés mécaniques de ces structures, et en particulier occasionne d'importants dommages à la raideur, ce dommage peut être identifié par plusieurs techniques de CND, dont l'analyse modale expérimentale. L'intérêt de l'utilisation de cette dernière réside dans ses capacités à aiguiller la recherche des imperfections aux endroits à risque, non accessibles, et à vérifier l'état global de la structure. En exploitant la propriété qu'offre chaque mode qui apporte un élément d'information sur la présence d'une fissure, la détection de celle-ci (profondeur et position) se fera par une combinaison optimale de ces informations.

Plusieurs paramètres modaux sont utilisés comme indicateurs d'endommagement, dont les déformées propres d'une structure mécanique ; ces dernières sont souvent utilisées pour l'évaluation des endommagements à travers le coefficient de corrélation entre les modes comme le coefficient MAC (*Modal Assurance Criterion*) [15]. Salane et Baldwin (1990) [16] ont étudié l'influence de l'endommagement sur les coefficients d'amortissement, et leurs conclusions ont été qu'ils ne pouvaient pas constituer des indicateurs fiables. D'autres méthodes qui emploient le changement d'indicateurs évolués plus sensibles aux petits dommages, tels que les dérivés des déformées modales, font appel à des paramètres modaux. Cependant, leur applicabilité est faible, puisque leur évaluation à partir des données expérimentales est difficile [16].

Sachant l'importance de la détection précoce des fissures pour les industriels, notre contribution consiste à réaliser une rétrospective de la sensibilité des principaux paramètres modaux utilisés afin de sélectionner les meilleurs d'entre eux pour la détection des petites fissures et les plus adéquats à l'utilisation dans les machines tournantes, ainsi qu'à rechercher d'éventuelles propriétés plus sensibles ou à explorer de nouvelles approches, le cas échéant. Cette procédure, qui fait appel à l'analyse modale expérimentale, a été adoptée, d'une part, du fait de sa large utilisation et des commodités qu'elle offre et, d'autre part, parce que plusieurs auteurs ont statué positivement sur la validité de l'utilisation des paramètres modaux en tant qu'indicateurs viables [17,18,19–21].

Pour ce faire, on a adopté l'hypothèse selon laquelle un seul défaut localisé (fissure) est existant, et on s'est assuré de ce que la fissure restait ouverte pendant les tests de vibration, en choisissant judicieusement l'épaisseur de l'entaille pratiquée sur la poutre. Cette hypothèse a été faite pour éviter les complexités qui résulteraient de la présence de caractéristiques non linéaires dans le cas des fissures de respiration [21], ce qui permet de focaliser les efforts sur les aspects liés à l'approche.

On a considéré un critère de détection précoce fixant une variation d'au moins 10% d'un paramètre modal pour une progression de la fissure inférieure à 10%.

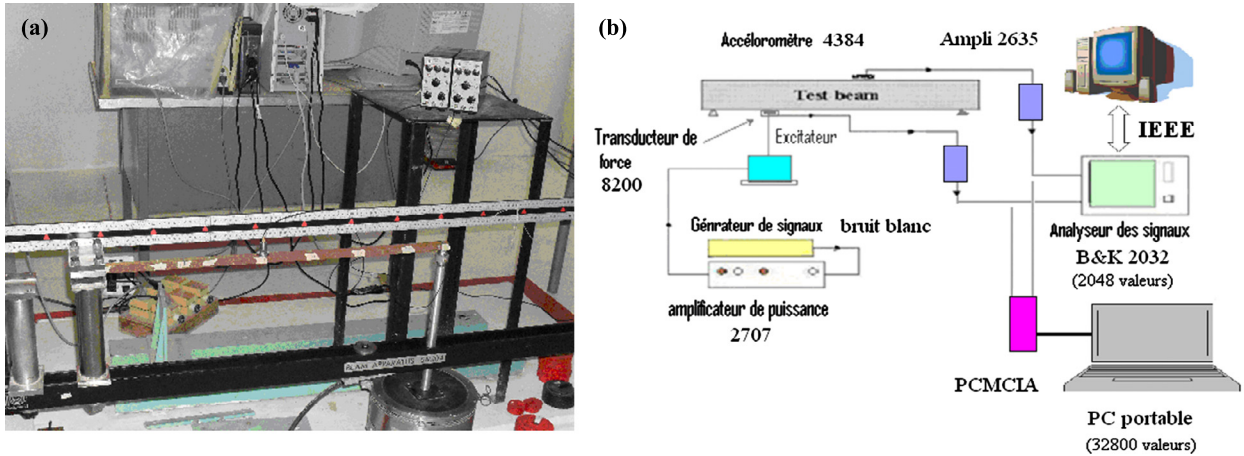


Fig. 1. (Couleur en ligne.) Banc d'essai et chaîne de mesure : (a) photo du banc d'essai, (b) chaîne de mesure.

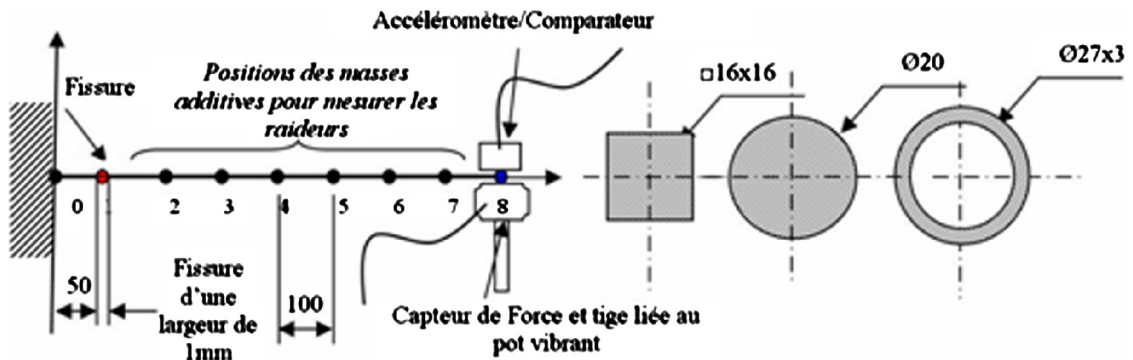


Fig. 2. Modélisation de l'éprouvette n° 1, de longueur 800 mm, et positionnement des points de mesure vibratoire et des poids additifs pour les mesures statiques des raideurs.

2. Expérimentation et calcul numérique

2.1. Banc d'essai et chaîne de mesure

La Fig. 1 illustre le dispositif expérimental utilisé. Pour réaliser les différents tests, on a procédé aux réglages nécessaires de l'instrumentation, des éprouvettes et du banc, puis aux contrôles préliminaires et aux étapes de préparation avant essais. Une fois ceci terminé, on a démarré les tests en mode forcé par un chargement en bruit blanc. Plusieurs paramètres ont été testés ; on présentera seulement ici la fréquence et l'amortissement.

2.2. Modèles

2.2.1. Modèle expérimental

Les éprouvettes utilisées (Fig. 2) sont des barres de longueur variant de 800 à 700 mm. Ces barres respectent les conditions d'Euler–Bernoulli [22]. La fissure est obtenue par une scie d'1 mm d'épaisseur.

Les Figs. 1a et 2 montrent les barres utilisées. On trouve trois types de sections : carrées, rondes et tubulaires. L'objectif de cette diversité est de permettre la mise en évidence expérimentale des effets de diverses variables sur la sensibilité de chaque section face à la progression de la fissure. La Fig. 2 montre la position de la fissure située à 50 mm de l'encastrement et les différentes positions (espacées de 100 mm) des poids pour le calcul des raideurs ; pour le placement de l'accéléromètre baladeur destiné à mesurer les fluctuations des fréquences, la position (1) correspond à la fissure et la position (8) à l'extrémité libre.

2.2.2. Modèle théorique

Le modèle théorique de calcul de la souplesse locale est introduit pour mettre en évidence le comportement de la fissure aux premiers stades de sa progression. Le modèle théorique de Dimarogonas [5,23] est employé pour le calcul de la souplesse d'une poutre de section rectangulaire. Les modèles « poutre ronde » et « tube » sont obtenus par des changements de variables adéquats [5,23,24].

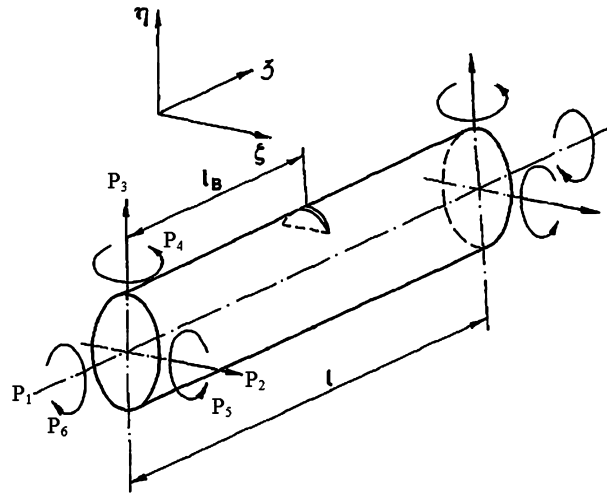


Fig. 3. Modélisation d'une fissure transversale dans une poutre ronde.

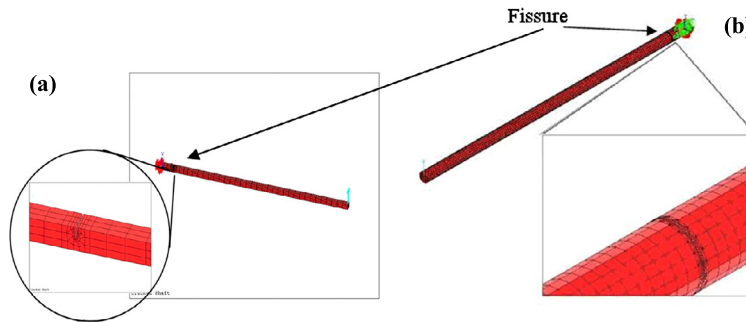


Fig. 4. (Couleur en ligne.) Modèle volume ou 3D de la poutre fissurée : (a) modélisation d'une poutre carrée (8840 éléments briques et 16074 nœuds avec maillage fin près de la fissure), (b) modélisation d'une poutre ronde (6240 éléments briques dont plus de 5000 éléments trapézoïdaux près de la fissure).

La Fig. 3 illustre le modèle de calcul de la souplesse pour une poutre ronde chargée sous l'effet de la présence d'une fissure transversale.

L'équation du coefficient d'influence de la souplesse normale à la section fissurée en déformation plane pour le cas d'une poutre ronde en flexion pure selon la direction ξ [5] s'exprime par :

$$c = \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{32}{\pi^2 R^8} \int_0^a \int_{-b}^b (R^2 - \xi^2) \pi \alpha F_1(\alpha/h) d\alpha d\xi \quad (1)$$

où $\alpha = \alpha(\xi) = \sqrt{R^2 - \xi^2} - (R - a)$, $b = \sqrt{R^2 - (R - a)^2}$ et $h = h(\xi) = 2\sqrt{R^2 - \xi^2}$; a est la profondeur de la fissure, α est la hauteur relative de la fissure, h est la hauteur de la poutre, b est sa largeur et R son rayon, E est le module d'Young et $F_1(\alpha/h)$ est la fonction de facteur de forme dépendant du type et du mode de chargement [5], exprimée par :

$$F_1(\alpha/h) = \sqrt{\frac{2h}{\pi\alpha} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi\alpha}{2h}\right)} \frac{0.923 + 0.199(1 - \sin \frac{\pi\alpha}{2h})^4}{\cos(\frac{\pi\alpha}{2h})}$$

La résolution de l'équation (1) se fait par le calcul numérique de l'intégrale double en deux étapes imbriquées (calcul selon a selon ξ) en utilisant la méthode de Simpson [25]; le résultat obtenu sera donc fonction de la profondeur de la fissure (a/R).

2.2.3. Modèle numérique

L'analyse modale numérique par éléments finis de la poutre étudiée (saine et fissurée) a été effectuée en utilisant les éléments finis de type volumique sur le code ANSYS.

La Fig. 4 illustre la modélisation numérique d'une poutre (encastree libre) en présence d'une fissure transversale; un maillage fin est opéré à proximité de la fissure.

3. Problématique de la sensibilité de la détection précoce

Étant donné que l'étude bibliographique a montré, d'une part, que les techniques donnent une sensibilité modeste du fait de leur dépendance à la faible variation de la raideur globale et aux erreurs de mesure [16] et, d'autre part, que la souplesse locale est un indicateur très expressif du phénomène de fissuration [5], on combine alors deux approches, l'une globale (classique) et l'autre locale pour une meilleure détection et une localisation plus efficace.

Dans la première, on étudie la sensibilité des différents paramètres modaux ainsi que l'effet de certains aspects tels que la corrélation entre modes et positions de fissure. Dans la deuxième, on introduit le paramètre de raideur locale et l'effet de la position de la mesure baladeuse sur la sensibilité des fréquences.

4. Approche globale

4.1. Fréquences

Les résultats obtenus pour chaque profondeur de la fissure, pour le cas d'une poutre carrée, sont illustrés sur la Fig. 5.

La Fig. 5 montre un décalage des fréquences à gauche sous l'effet de la progression discontinue de la fissure. L'exploitation de ces résultats pour le calcul des sensibilités absolue et relative donne les graphes de la Fig. 6.

La sensibilité relative (Fig. 6a) montre que l'effet de propagation de la fissure est d'autant plus important qu'on s'approche du mode fondamentale, alors que la sensibilité absolue (Fig. 6b) a mis en évidence les modes élevés. Cependant, la sensibilité absolue est dépendante de la structure test, contrairement à la sensibilité relative, qui peut être utilisée comme référence.

Par ailleurs, on constate que, pour un changement significatif de 10% de la sensibilité relative des fréquences (mode 1), on détecte une propagation de la fissure de l'ordre de 20%. Des valeurs similaires et supérieures à celles trouvées sont souvent citées dans la littérature [17–19].

4.2. Coefficient d'amortissement

Faire varier le coefficient d'amortissement donne de bonnes sensibilités, puisque cela permet de détecter une progression de fissure inférieure à 2% pour une variation de 10% de ξ/ξ_0 . Au-delà, les résultats deviennent instables, ce que plusieurs auteurs ont relevé [16]. Les mêmes résultats ont été obtenus pour l'amplitude FRF. Voir la Fig. 7.

4.3. Effet de la position de la fissure (c/l)

4.3.1. Calcul numérique

Dans cette partie, on introduit le modèle numérique afin de mettre en évidence ce phénomène d'interaction entre les déformées modales et l'emplacement de la fissure.

La Fig. 8 montre que les valeurs des fréquences propres de la poutre fissurée diminuent avec l'augmentation de la profondeur de la fissure.

La Fig. 8a montre que le taux de décroissance de la fréquence f_1 est maximum pour $c/l = 0,0625$ et $c/l = 0,25$. Ce rapport diminue rapidement quand c/l augmente entre $c/l = 0,25$ et $c/l = 0,75$, puis il reste invariable ($c/l > 0,8$). Le premier mode est le plus affecté quand la fissure est au voisinage de l'encastrement.

On observe sur la Fig. 8b que la diminution du taux de décroissance de f_2 est un peu significative quand la fissure est localisée entre $c/l = 0,5$ et $c = 0,75$. Quand la fissure est localisée près de l'extrémité encastree ($c/l = 0,0625$ et $c/l = 0,25$), cette diminution est moins significative, ce qui est confirmé par la littérature [19].

Dans la Fig. 8c, on observe que le mode 3 est moins affecté ; il est presque insensible à l'existence de la fissure au milieu de la poutre ($c/l = 0,5$) et à son extrémité libre ($c/l = 1$) ; il change rapidement quand la fissure est située aux alentours de ($c/l = 0,3125$) et beaucoup plus aux environs de ($c/l = 0,8$).

En comparant les graphes de la Fig. 8 aux allures des déformations modales illustrées sur la Fig. 9a–c, on observe une grande similitude, ce qui permet de déduire que l'ampleur des variations des fréquences propres dépend à la fois à la profondeur de la fissure, au moment fléchissant maximal et à la position de la fissure par rapport à la position des nœuds modaux.

4.3.2. Effet des conditions aux limites

La Fig. 10a–b confirme les constatations faites pour le cas encastree-libre. Ces observations montrent que les dommages affectent, indépendamment du type des conditions aux limites appliquées, les fréquences d'une manière différente, selon l'éloignement ou le rapprochement de la fissure des nœuds modaux. En conséquence, l'utilisation de cette corrélation peut permettre la localisation des fissures en plus de la détection.

4.3.3. Comparaison entre différentes sections

La comparaison des résultats expérimentaux des sensibilités, selon la section de la poutre, montre, pour les trois premiers modes que le tube est, généralement, le plus affecté par la présence de la fissure, suivi par la poutre à section carrée, alors que la poutre à section ronde semble être plus résistante (Fig. 11).

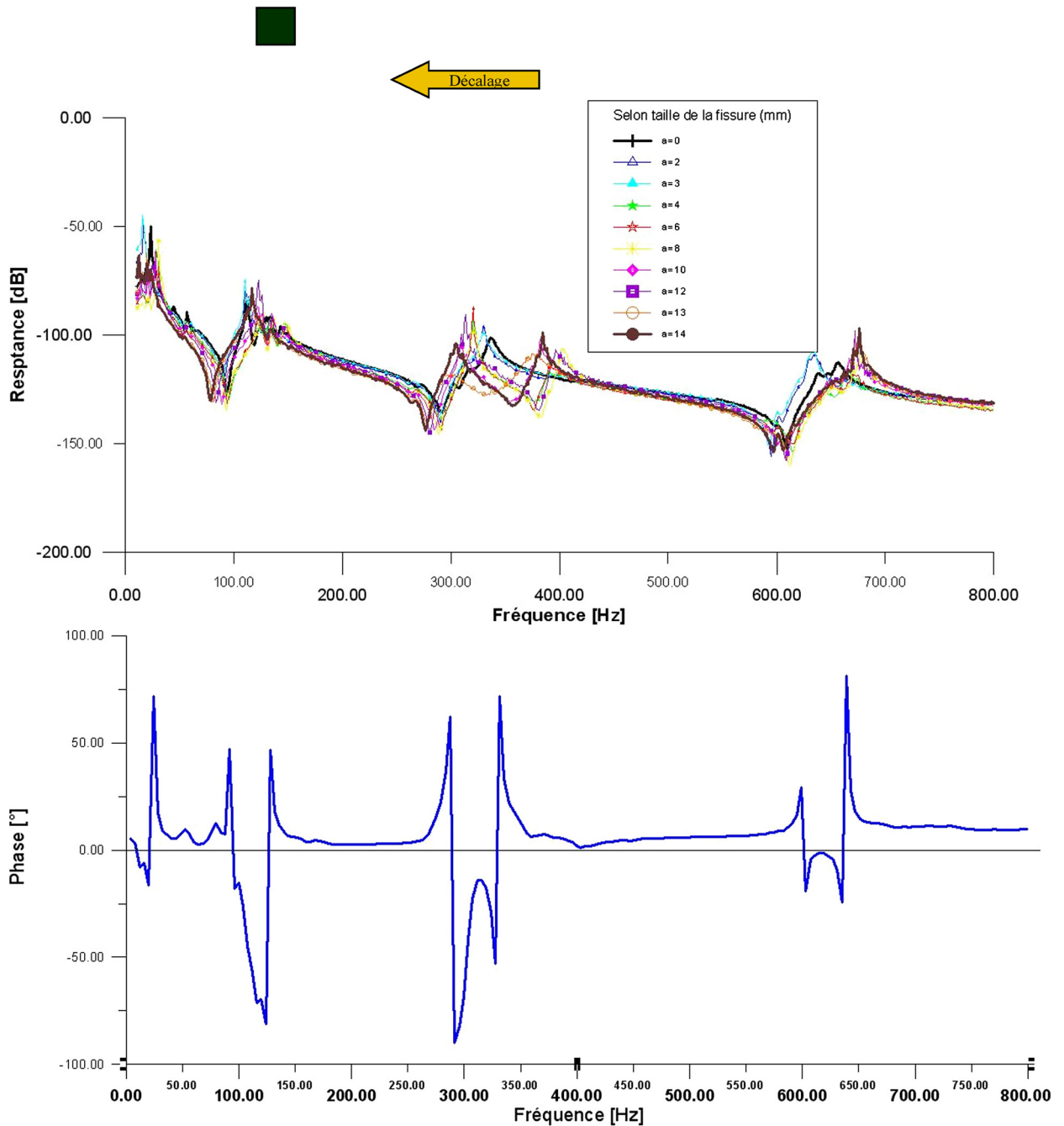


Fig. 5. (Couleur en ligne.) Réponse avec déphasage de la poutre carrée fissurée (pour différentes profondeurs de fissure) comparée à celle intacte.

En effet, cette dernière présente un front de fissure plus court que celui de la poutre carrée et un fond plus consistant que celui du tube.

4.4. Conclusion de la première étape

L'examen des résultats montre que la technique utilisant les fréquences reste l'une des plus stable et des plus sûres, que la corrélation entre variation des fréquences et déformées modales peut être un outil de localisation, et que le facteur d'amortissement, comme la fonction de réponse en fréquence FRF, sont des paramètres qui satisfont le critère de détection précoce. Malheureusement, ils présentent des instabilités, l'association de ces paramètres pouvant être utilisée pour confir-

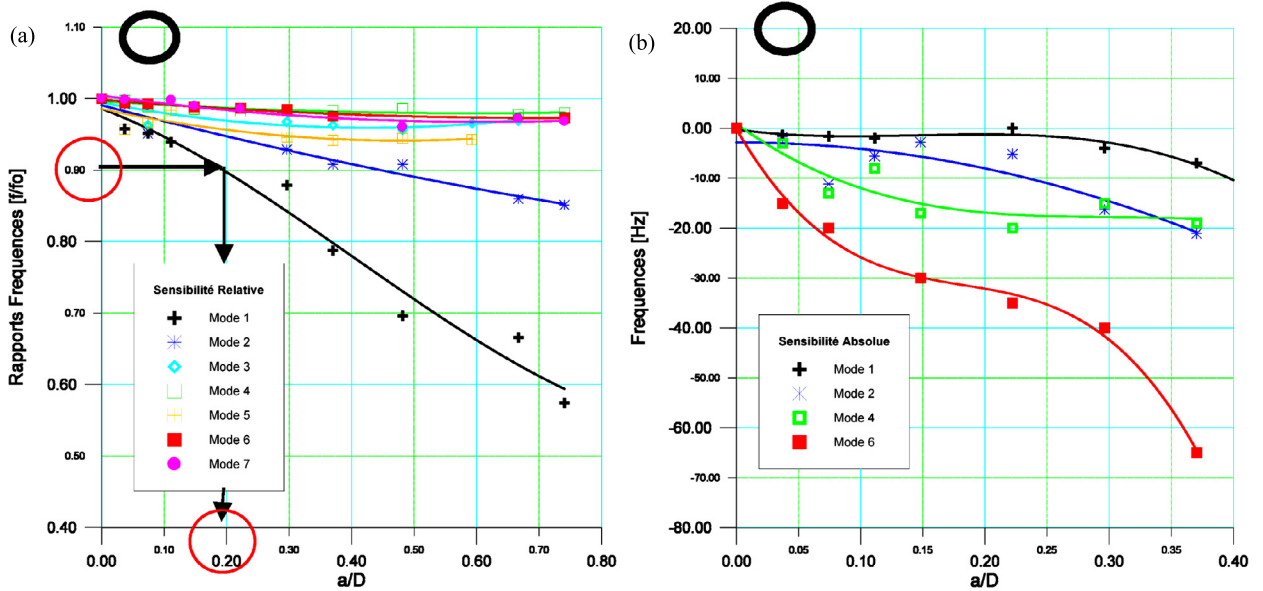


Fig. 6. (Couleur en ligne.) Variation relative (a) et absolue (b) des fréquences pour différents modes d'un tube (avec lissage polynomial).

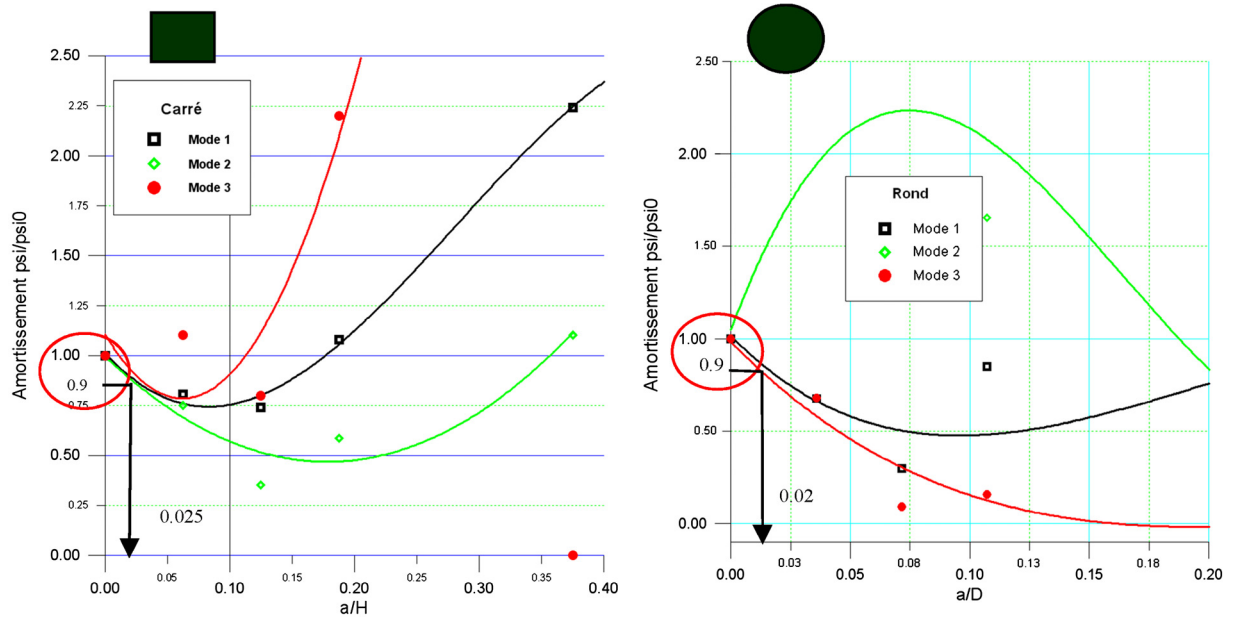


Fig. 7. (Couleur en ligne.) Variation relative du coefficient d'amortissement pour les poutres à section carrée et ronde (avec lissage polynômiale d'ordre 2).

mer l'existence de la fissure. En outre, la sensibilité absolue est un bon indicateur de la présence de fissures aux hautes fréquences, mais souffre du problème d'appréciation et de quantification de la progression de la fissure.

Par ailleurs, toutes les barres montrent une corrélation entre déformation modale et variation des fréquences, alors que la comparaison de l'effet du changement des sections a montré que les tubes sont les plus affectés alors que le rond et le carré se rapprochent.

5. Approche locale

5.1. Souplesse locale théorique

La Fig. 12 représente la variation de la souplesse locale théorique en fonction de la progression de la fissure (a/R) obtenue par la formule (1). On remarque que la souplesse est très affectée par la présence d'une fissure aux premiers stades ($< 10\%$). On pourra exploiter cette propriété en approche locale.

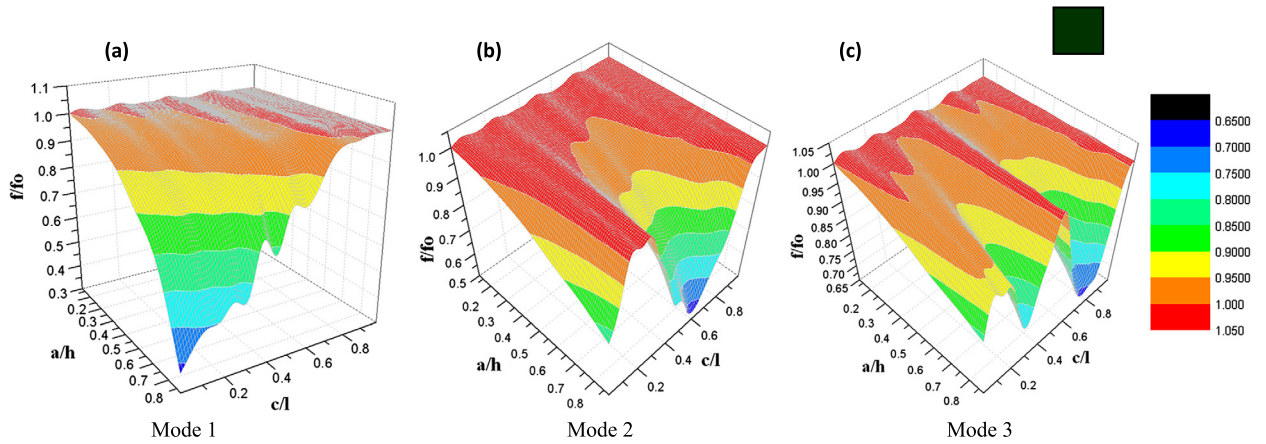


Fig. 8. (Couleur en ligne.) Variation 3D des fréquences (f_i/f_0) en fonction de (c/l) et (a/h) pour différentes profondeurs de fissures dans la barre de section carrée (encastrée libre) et pour différents modes.

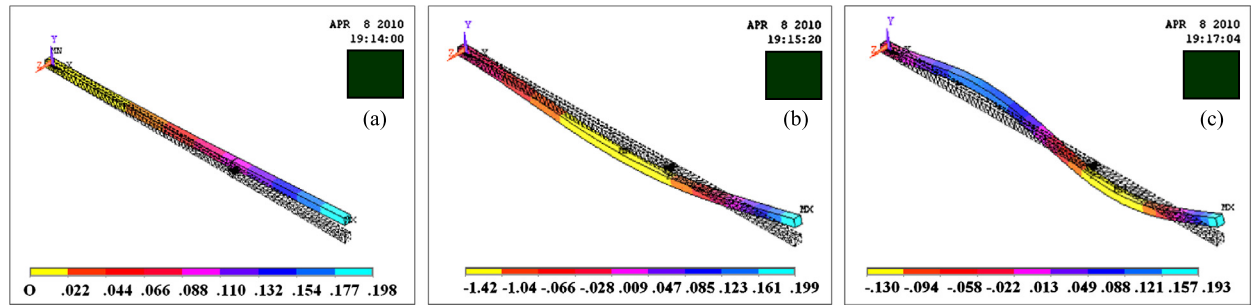


Fig. 9. (Couleur en ligne.) Trois premiers modes de la barre de section carrée (encastrée libre) : (a) 1^{er} mode, (b) 2^e mode, (c) 3^e mode.

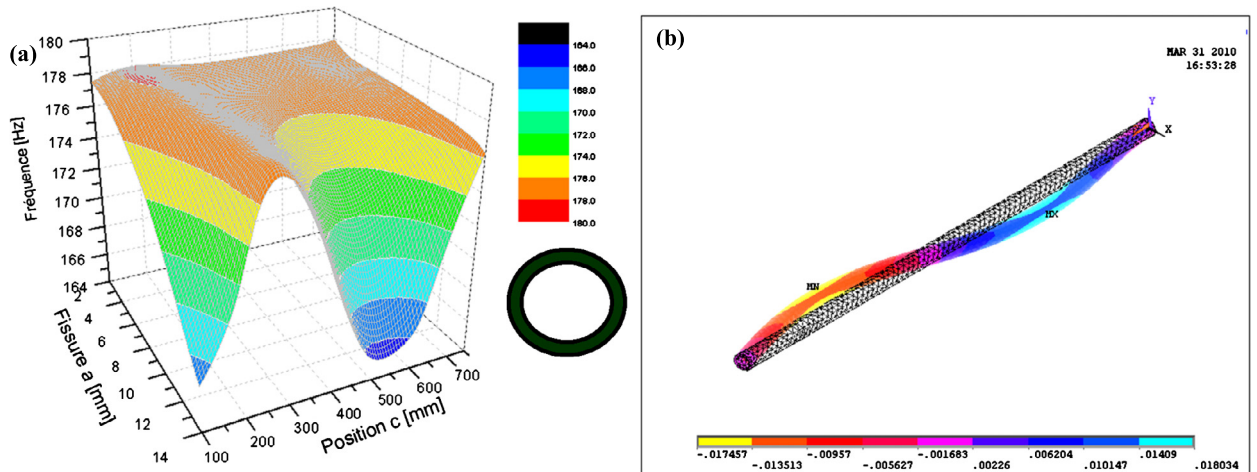


Fig. 10. (Couleur en ligne.) Variation 3D des fréquences (f_i) en fonction de des différentes profondeurs et positions de fissures d'un tube (appuyée–appuyée) pour le deuxième mode.

5.2. Raideur pseudo-locale expérimentale

Pour vérifier la validité de notre approche, on procède à la mesure des raideurs K_{ij} le long de la poutre selon les positions illustrées sur la Fig. 2. À chaque point ($i = 1 \dots 8$), on pose plusieurs masses et on mesure le déplacement au point $j = 8$. La fissure est à ($c/l = 0.0625$). La raideur proche de la fissure est K_{18} . Cette raideur est nommée raideur pseudo locale pour désigner la raideur de l'élément fissuré. Traçant ces différentes raideurs en fonction de l'avancée de la profondeur de la fissure (a/D) pour le cas d'un tube, on trouve les graphes illustrés sur les Figs. 13 et 14.

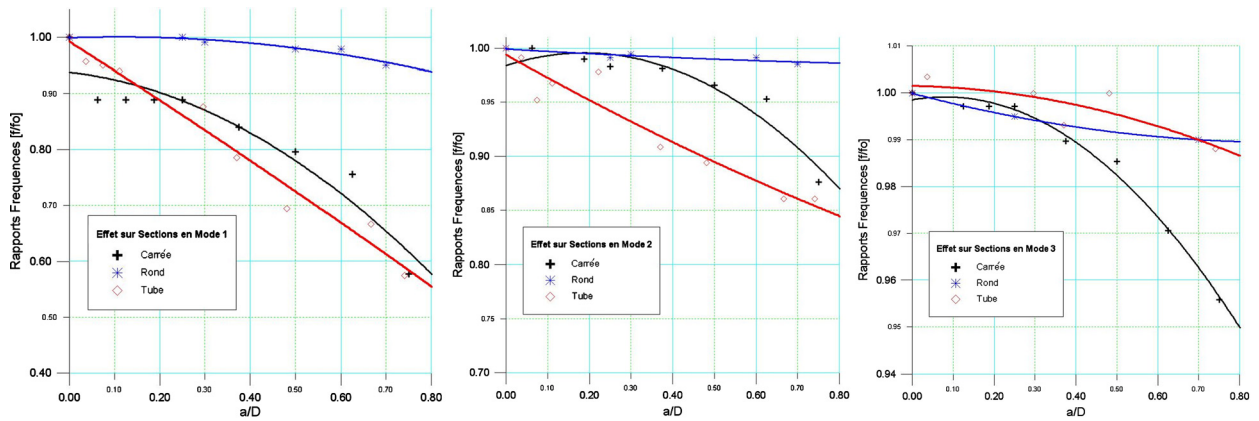


Fig. 11. (Couleur en ligne.) Effet de la forme de la section sur la sensibilité relative des fréquences pour les modes 1, 2 et 3.

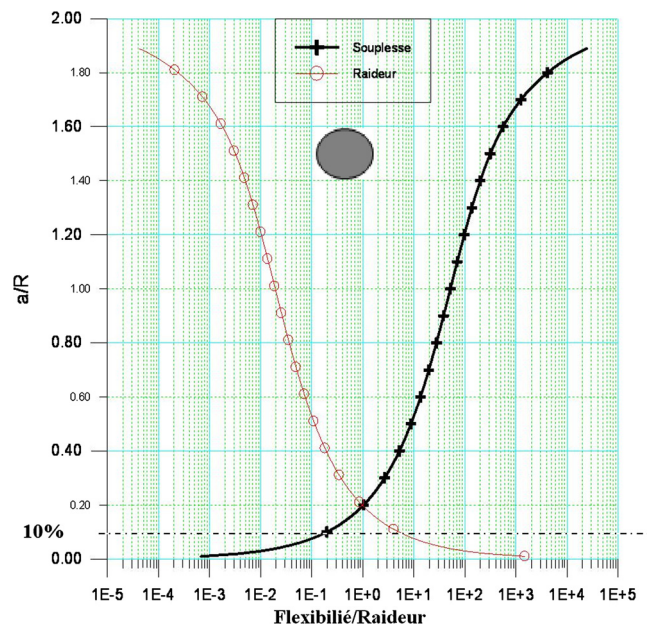


Fig. 12. (Couleur en ligne.) Flexibilité théorique locale d'une poutre ronde selon la formule (1).

La Fig. 13 représente d'une manière significative l'effet de la fissure, qui est d'autant plus important que la raideur mesurée est proche de la fissure. En outre, il s'avère que les erreurs maximales fluctuent entre 7 % et 9 % et que l'erreur moyenne est de 6 %, ces valeurs augmentant lorsqu'on s'approche de $K(1,8)$.

La Fig. 14 montre que la raideur pseudo-locale donne une sensibilité acceptable, proche de 10 %, après avoir extrapolé la dernière raideur $K(1,8)$; ce résultat, en tenant compte de l'erreur moyenne, peut être considéré comme entrant dans la fourche fixée lors de l'établissement du critère de détection précoce (Section 1).

5.3. Balayage des points de mesure (p/l)

5.3.1. Variation des fréquences

Dans le but de mettre en évidence l'approche locale, on propose de prendre des mesures en divers endroits de la poutre. L'observation de la Fig. 15 permet de constater que la présence de la fissure est mise en évidence par une zone caractérisée par une plus grande diminution des fréquences. Cette apparence peut être comparée à une rivière nuancée selon l'échelle des couleurs (voir la version en ligne de cet article). Cette observation a été faite pour tous les modes (1 à 7). La fluctuation des fréquences est influencée par le rapprochement des points de mesure de la fissure ; les raisons en sont imputables, d'une part, à la corrélation qui existe entre la déformée modale et les paramètres mesurés et, d'autre part, à notre avis, à la réduction de la distorsion du signal et à son absorption par la structure avant qu'il ne soit saisi par le capteur baladeur, ainsi qu'à l'effet de la masse du capteur, qui joue le rôle d'une masse additionnelle.

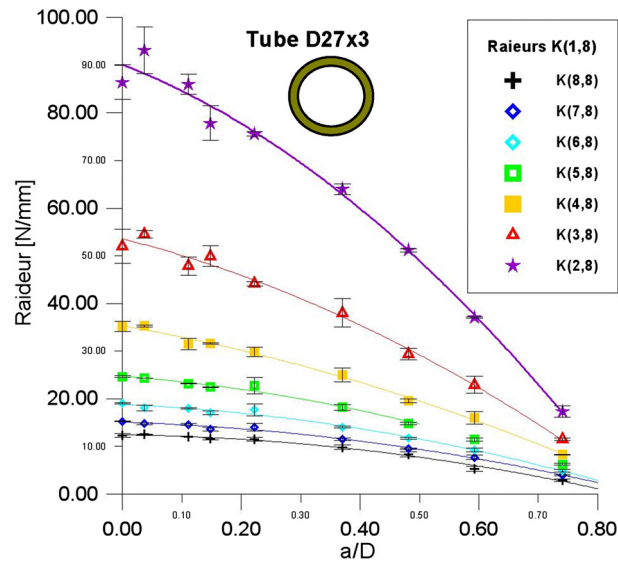


Fig. 13. (Couleur en ligne.) Variation des raideurs locales K_{i8} en fonction de a/D , avec les barres d'erreur.

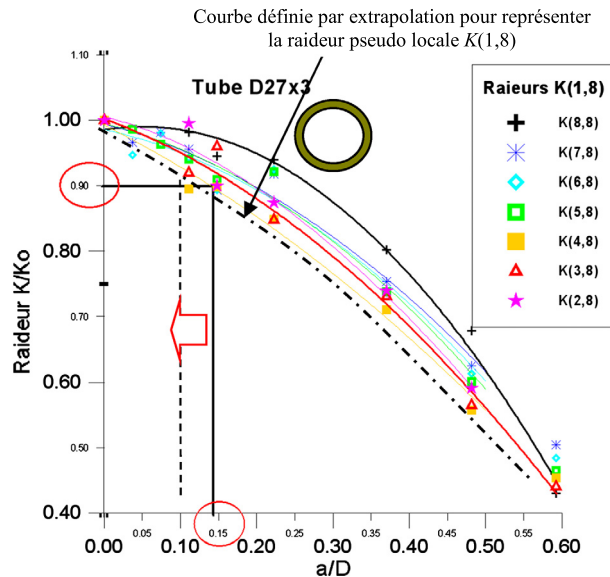


Fig. 14. (Couleur en ligne.) Variation de la sensibilité des raideurs locales K_{i8} avec extrapolation de la raideur pseudo-locale.

La Fig. 16 montre une légère amélioration de la sensibilité relative de l'ordre de 5%, la variation (a/h) passant de 22% à 17% avec une erreur maximale moyenne de 3% entre les diverses positions de mesure (écart entre deux courbes successives).

5.3.2. Les autres paramètres examinés

Les graphes de la Fig. 17 indiquent l'emplacement de la fissure selon une représentation sous la forme de « dunes » ou de « rivières », illustrant la sensibilité absolue élevée pour l'amplitude FRF, la partie réelle, la partie imaginaire et la phase. Il semble que l'introduction de ces paramètres apporte un plus dans la détection et le repérage des emplacements des fissures.

5.4. Conclusion de la deuxième phase

L'exploitation de la mesure statique des raideurs et la raideur pseudo-locale semblent donner des sensibilités relatives satisfaisant le critère de précocité, mais qui peuvent être améliorées encore davantage si les mesures deviennent plus fines et moins tributaires de l'effet du changement de la raideur globale et de la qualité des mesures, surtout aux emplacements des fissures.

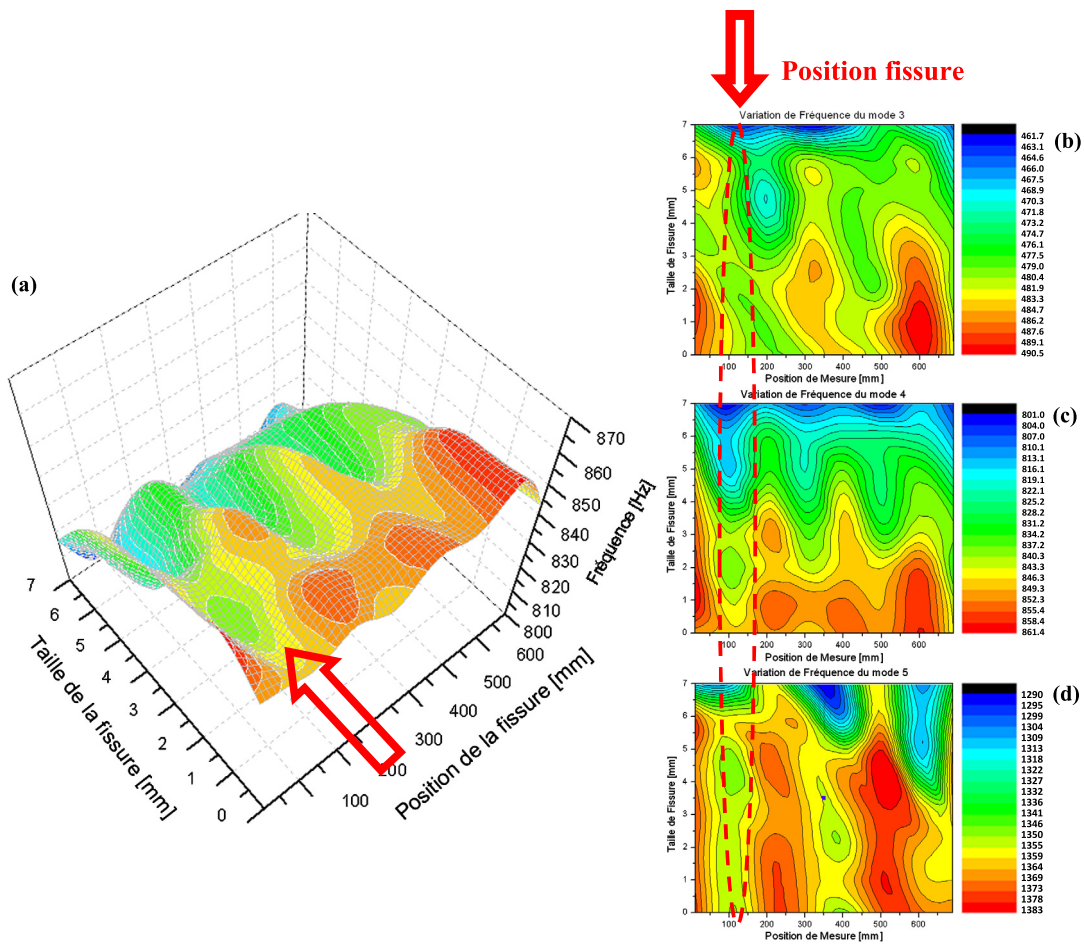


Fig. 15. (Couleur en ligne.) Fluctuation absolue des fréquences modales selon la position de mesures : (a) mode 4 spatial 3D, (b) mode 5, (c) mode 3 et (d) mode 4 contour plan.

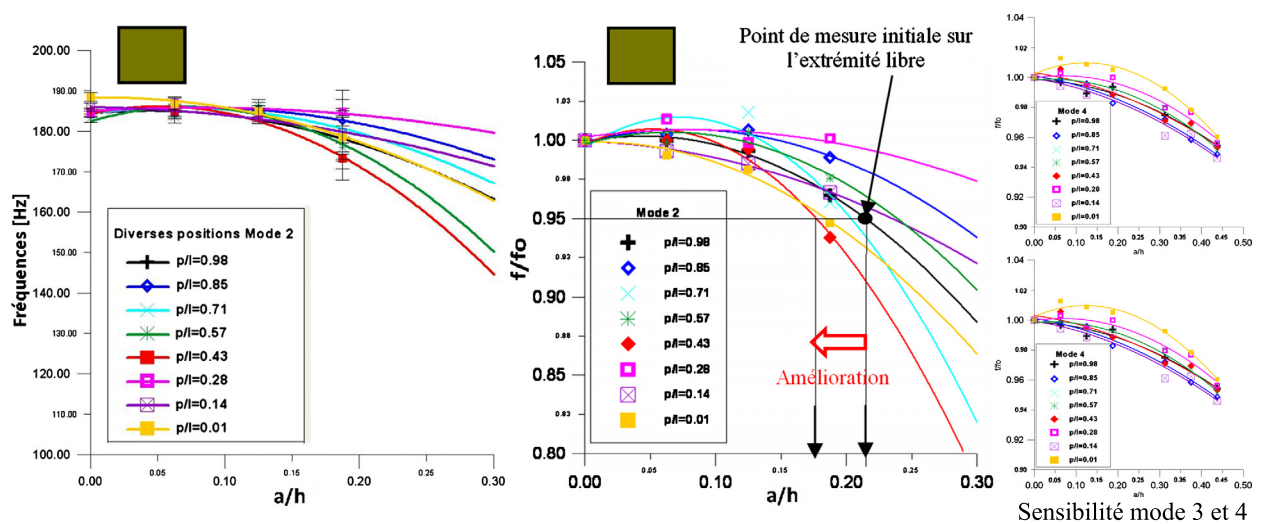


Fig. 16. (Couleur en ligne.) Fluctuation des fréquences avec barres d'erreurs et de leurs sensibilités relatives par position de mesure d'une poutre carrée 16 x 16 pour les modes 2, 3 et 4.

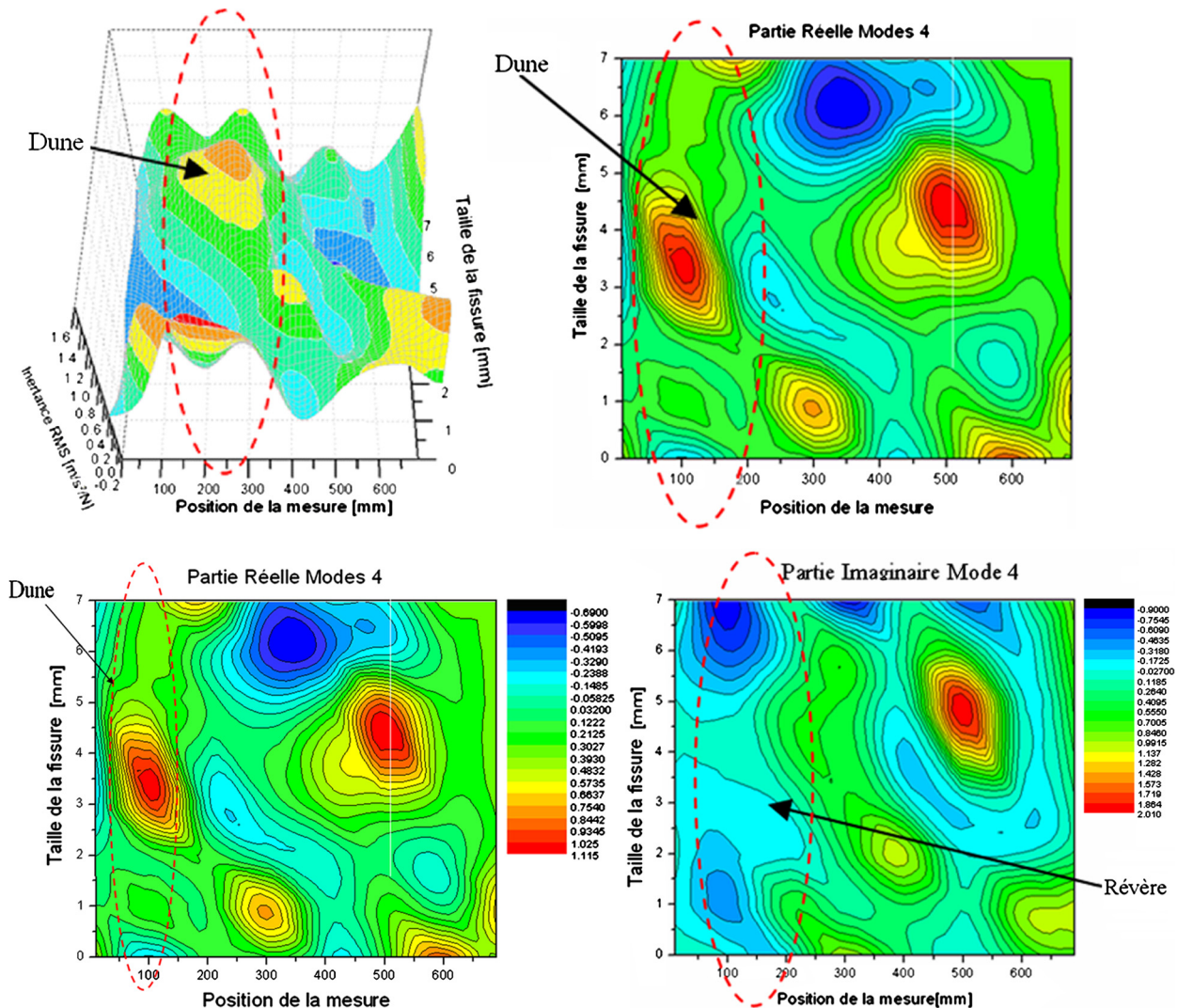


Fig. 17. (Couleur en ligne.) Fluctuation de l'amplitude des autres paramètres modaux (exemple du mode 4) : amplitude FRF, (b) phase, (c) partie réelle et (d) partie imaginaire.

L'exploitation de la technique des mesures locales améliore nettement la sensibilité absolue, mais seulement faiblement la sensibilité relative. L'exploitation des graphes 3D et celle du contour plan des différents paramètres étudiés peuvent être considérées comme des outils prometteurs en matière de localisation des fissures.

6. Conclusion générale

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont globalement satisfaisants.

En effet, l'étude rétrospective a permis de comparer les sensibilités des différents paramètres modaux et de confirmer les résultats d'autres auteurs.

Certes, les essais réalisés sont obtenus à partir d'une fissure artificiellement réalisée avec une épaisseur assez large, éloignant ainsi les effets de contact unilatéral inter-lèvres de la fissure, mais cette approche est acceptable pour les structures non rotatives et valable pour une caractérisation globale en ce qui concerne les structures rotatives.

Par ailleurs, les objectifs liés à la détection précoce des fissures ont été globalement atteints par des améliorations palpables de la sensibilité. De plus, l'association des approches globale et locale peut permettre une meilleure efficacité dans l'investigation des défauts. La combinaison se fait en deux étapes, à savoir une première phase de détection, dans laquelle on utilise des indicateurs comme l'amortissement, la raideur pseudo-locale et/ou la deuxième harmonique, suivie

d'une deuxième phase de confirmation et/ou de localisation, où on utilise les fréquences propres, la raideur pseudo-locale et le balayage des mesures. Ces techniques introduites sont prometteuses.

Références

- [1] P.G. Kirmsher, The effects of discontinuities on the natural frequency of beams, *Proc. Am. Soc. Test. Mater.* 44 (1944) 897–904.
- [2] W.J. Thomson, Vibration of slender bars with discontinuities in stiffness, *J. Appl. Mech.* 17 (1943) 203–207.
- [3] Saber El Arem, Vibrations non-linéaires des structures fissurées application aux rotors de turbines, thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, 2006.
- [4] A.D. Dimarogonas, *Vibration Engineering*, West Publishers, St. Paul, MN, USA, 1976.
- [5] A.D. Dimarogonas, S.A. Paipettis, *Analytical Methods in Rotor Dynamics*, ASP, 1983, pp. 144–166.
- [6] M.K. Sutar, Fault detection of cracked cantilever beam sing smart technique, thesis of master, Department of Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Orissa, India, 2009, pp. 19–22.
- [7] R. Gasch, Dynamic behaviour of a simple rotor with a cross-sectional crack, in: *IME Conf Publ., Vibrations in Rotating Machinery*, 1976, Paper C178/76.
- [8] T.A. Henry, B.E. Okah-Avae, Vibrations in cracking shafts, in: *IME Conf Publ., Vibrations in Rotating Machinery*, 1976, Paper C162/76.
- [9] A. Ouahabi, M. Thomas, A. Lakis, Détection de fissures de respiration de fatigue par excitation harmonique et analyse temps–fréquence, in: *Proceedings of the 24nd Seminar on Machinery Vibration*, CMVA, Montréal, ISBN 2-921145-61-8, 2006, pp. 460–472.
- [10] M. Thomas, A.A. Lakis, L. Hamidi, M. Massoud, Rotor health monitoring by modal analysis, in: *Proceedings of the 20th Seminar on Machinery Vibration*, Québec, Canada, 2002, pp. 4.20–4.29.
- [11] A.K. Batabya, Crack detection in cantilever beam using vibration response, in: *Vibration Problems ICOVP*, Haldia Institute of Technology, India, 2007.
- [12] M. Kisa, M. Arif Gruel, Modal analysis of multi-cracked beams with circular cross section, *Engineering Fracture Mechanic*, Harran University, Turkey.
- [13] J.K. Sinha, M.I. Friswell, S. Edwards, Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data, *J. Sound Vib.* 251 (1) (2002) 13–38.
- [14] I. Green, C. Casey, Crack detection in a rotor dynamic system by vibration monitoring—part I: analysis, *J. Eng. Gas Turbines Power* 127 (2) (2005) 425–436.
- [15] Houssein Nacer, Surveillance vibratoire des structures mécaniques sous contraintes thermiques, thèse de doctorat, université de Rennes-1, France, 2006.
- [16] A. Alvandi, Contribution à l'utilisation pratique de l'évaluation dynamique pour la détection d'endommagements dans les ponts, thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 2003.
- [17] K. Batabyal, *Crack Detection in Cantilever Beam Using Vibration Response*, Springer Science+Business Media B.V., 2008.
- [18] Han-Ik Yoon, In-Soo Son, Sung-Jin Ahn, Free vibration analysis of Euler–Bernoulli beam with double cracks, *J. Mech. Sci. Technol.* 21 (2007) 476–485.
- [19] G.M. Owolabi, A.S.J. Swamidass, R. Seshadri, Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions, *J. Sound Vib.* 265 (2003) 1–22.
- [20] R. Langlois, Analyse numérique d'une base de données expérimentales de tubes sollicités en flexion, Rapport de stage n° 31017441, Génie atomique modélisation des réacteurs, CEA, Gif-sur-Yvette, 1998, 31 p.
- [21] J.-S. Dupuy, P. Janny, S. Corn, L. Daridon, Comparaison de méthodes dynamiques d'analyse du comportement mécanique de matériaux, in : 18^e Congrès français de mécanique, Grenoble, France, 27–31 août 2007.
- [22] Cyril M. Harris, Allan G. Piersol, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, fifth edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-137081-1, 2002, 1996, 1988, 1976, 1961, pp. (7-14)–(7-20).
- [23] Chong-Won Lee, *Vibration Analysis of Rotor*, KAP, 1993.
- [24] Han-Ik Yoon, In-Soo Son, Influence of tip mass on dynamic behavior of cracked cantilever pipe conveying fluid with moving mass, *J. Mech. Sci. Technol.* 19 (9) (2005) 1731–1741.
- [25] J. Nearing, Mathematical tools for physics, <http://www.dlu.edu.vn/FileUpload/2008110102142408.pdf>, 2006.