

Simulation de la shearographie appliquée à l'évaluation de zones fissurées d'un aéroréfrigérant

Michel PANET

Électricité de France

Frédéric TAILLADE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Le coût élevé de remplacement des réfrigérants atmosphériques des centrales électronucléaires conduit à rechercher un critère de décision fondé sur l'évaluation non destructive du vieillissement des ouvrages. Une approche antérieure s'est intéressée à l'étude de l'évolution des caractéristiques modales de la structure. Évaluées en très basse fréquence par l'analyse de la réponse au vent des tours en béton, ces grandeurs ont été très difficiles à utiliser pour diagnostiquer l'évolution mécanique au cours du temps. L'identification des matériaux pouvant faire appel à leur réponse aux ultrasons, on a étudié l'onde de Lamb propagée dans l'ouvrage, pour obtenir une approche du module d'élasticité. Dans la présente approche, la longueur d'onde est corrélée au module élastique par une modélisation de la propagation. La détectabilité de l'onde par shearographie est ensuite simulée, en modulant la phase optique à l'aide d'un modulateur électro-optique. Les conditions environnementales sont reproduites en tenant compte du mouvement induit par le vent, de la variabilité spatiale de l'indice de réfraction de l'air et de la rugosité de surface à l'origine du speckle.

DOMAINE : Ouvrages d'art - Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

The high cost of replacing the cooling towers within nuclear power plants has led to seeking a decision-making criterion based on the non-destructive evaluation of structural aging. A previous approach focused on studying the evolution of the eigenmodes of the structure. These magnitudes, assessed at extremely low frequency levels by analyzing the wind resistance response of concrete towers, have been very difficult to implement in generating a diagnosis of mechanical evolution over time. With material identification capable of making use of ultrasound response, an investigation was conducted on the Lamb wave propagated in the structure in order to obtain an approximation of the elasticity modulus. According to the approach presented herein, the wavelength is correlated with the elastic modulus by modeling wave propagation. The capacity to detect the wave using shearography is then simulated by modulating the optical phase with an electro-optical modulator. Environmental conditions can be reproduced by taking into account the following parameters: wind-induced motion, spatial variability of the refractive index of the air and surface roughness at the origin of the speckle.

FIELD: Structural engineering - Engineering sciences.

NOTATIONS

t	: Temps
E, G	: Module d'Young et module de cisaillement initiaux
E_3, G_{13}	: Modules de direction circonférentielle
β, δ	: Indice de fissuration, largeur des fissures
μ'	: Module de cisaillement des fissures
θ, s	: Azimut, abscisse curviligne
r, e	: Rayon, excentrement du centre de masse
I	: Inertie, intensité lumineuse
k_0, k_1, k_2	: Raideurs de liaison des modes rigides de rotation, de translation et de déformation par flexion
d	: Espacement moyen des fissures

$\vec{U}_v, \vec{U}_0, \vec{U}$: Déplacement de réponse au vent, au passage de l'onde, total
v_n, w_n	: Coordonnées généralisées du déplacement
m	: Masse linéique
\bar{m}	: Masse linéique moyenne
ω_n, ζ_n	: Pulsation propre, amortissement modal
\vec{K}, φ	: Vecteur sensibilité shearographique, phase optique
p	: Charge linéique
p_n, q_n	: Coefficients de Fourier de la charge linéique
$e(), E[]$: Fonction échelon, espérance mathématique
V_0	: Vitesse du vent à l'infini
Λ	: Longueur d'onde de l'onde de Lamb
v	: Contraste des franges d'interférences (visibilité)

Fissuration des réfrigérants atmosphériques

L'observation des aéroréfrigérants atmosphériques (fig. 1) montre une fissuration méridienne de direction verticale. Ce faciès suit l'orientation préférentielle des contraintes principales de la coque en béton. Il définit un matériau élastique isotrope transverse : isotrope dans le plan $(\vec{1}, \vec{2})$ et de module moindre dans la direction circonférentielle $\vec{3}$, normale au plan de fissuration. La réduction du module circonférentiel est évaluée selon la théorie de Morland [4, 5] (fig. 2).

Le problème que l'on se pose est de mesurer le module E_3 , en fonction de la longueur d'onde du mode antisymétrique d'une onde de Lamb générée par une salve de fréquence 50 Hz. Sensible au vieillissement par fissuration, la réduction de ce module peut nuire à la stabilité de l'aéroréfrigérant par flambage sous vent violent.

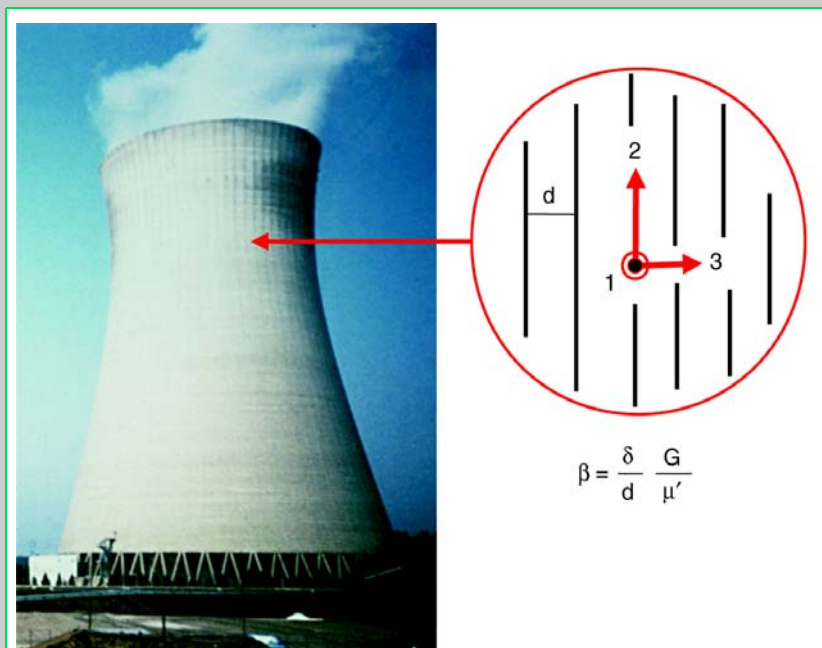


Fig. 1 - Fissuration d'une tour de réfrigération.

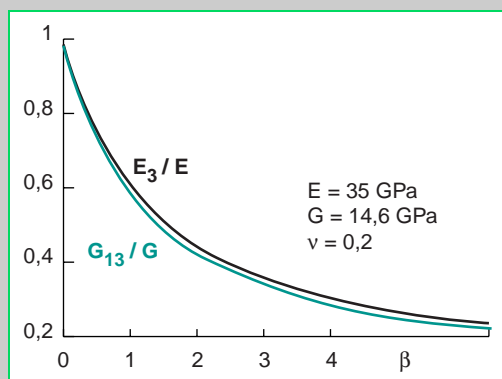


Fig. 2 - Réduction du module du béton fissuré.

Modèle dynamique

La modélisation est utilisable en tous points de la structure. On l'applique préférentiellement au raidisseur situé au sommet de l'aéroréfrigérant. L'étude de cette zone apparaît importante car la fissuration y est plus intense qu'en zone courante. Par ailleurs, la rigidité du raidisseur conditionne fortement la stabilité d'ensemble en imposant les conditions aux limites d'indéformabilité du voile. Le modèle choisi est un anneau circulaire déformé en flexion simple qui néglige les effets des efforts normal et tranchant (fig. 3) et permet l'étude paramétrique de l'analyse shearographique par MATLAB 5.0.

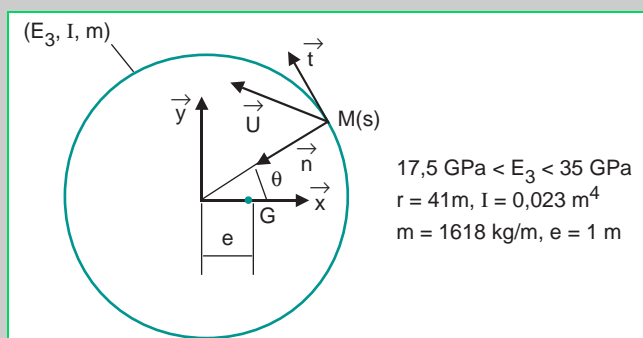


Fig. 3 - Données du modèle.

L'excentricité du centre de gravité est introduite par une imperfection de la distribution de la masse linéique :

$$m = \bar{m} \left(1 + 2 \frac{e}{r} \cos \theta \right) \quad (1)$$

Le déplacement et la charge linéique sont développés en harmoniques spatiales :

$$\bar{U} = \sum_{n=0}^{\infty} v_n \left[\bar{t} \cos(n\theta) - \bar{n} n \sin(n\theta) \right] + w_n \left[\bar{t} \sin(n\theta) + \bar{n} n \cos(n\theta) \right] \quad (2)$$

$$p = p_n \cos(n\theta) + q_n \sin(n\theta)$$

En posant les pulsations associées aux raideurs de liaison :

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k_0}{\bar{m}}}, \Omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{\bar{m}}}, \Omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{\bar{m}}} \quad (3)$$

et en définissant la pulsation propre de chaque harmonique spatiale :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_3 I}{m r^4} \frac{n^2 (1-n^2)^2}{1+n^2} + e \left(\frac{1}{2} - n \right) \Omega_0^2 + n e \left(\frac{3}{2} - n \right) \Omega_1^2 + e \left(n - \frac{3}{2} \right) \Omega_2^2} \quad (4)$$

on déduit les équations de Lagrange du mouvement gêné de l'anneau, par son interaction avec la structure adjacente :

$$\left. \begin{aligned} \ddot{v}_0 + 2 \zeta_0 \omega_0 \dot{v}_0 + \omega_0^2 v_0 &= -\frac{e}{r} \ddot{v}_1 \\ \ddot{v}_n + 2 \zeta_n \omega_n \dot{v}_n + \omega_n^2 v_n &= -\frac{n}{1+n^2} \frac{q_n}{m} \\ \ddot{w}_n + 2 \zeta_n \omega_n \dot{w}_n + \omega_n^2 w_n &= \frac{n}{1+n^2} \frac{p_n}{m} \end{aligned} \right\}, \quad n=1, 2, \dots \quad (5)$$

Charges extérieures

Action du vent

La pression due à l'écoulement du vent est évaluée par la théorie de l'écoulement irrotationnel des fluides incompressibles. Cette hypothèse est vérifiée sous vent faible ($v < 5$ m/s) quand le nombre de Strouhal est inférieur au seuil de formation des tourbillons de Karman.

Le problème revient à déterminer la transformation conforme $Z = f(z)$ du plan z de l'écoulement sur le plan Z des potentiels, muni de la coupure située sur le demi-axe réel positif, pour définir la vitesse complexe de l'écoulement :

$$w = u - i.v = \frac{df}{dz}$$

de module $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ à l'infini $V = V_0$.

La méthode de Rapoport [6] établit que la fonction

$$\frac{df}{dz} = V_0 \frac{\sqrt{Z}}{(\sqrt{Z-1} + i)} e^{-i \left[Q(Z) \sqrt{Z-1} - P(Z) \sqrt{Z} \right]}$$

satisfait les conditions aux frontières de l'écoulement le long de l'anneau (fig. 4). Elle introduit deux polynômes réels $P(x)$ et $Q(x)$ tels que la représentation paramétrique de l'arc OP

$$M \in OP \rightarrow z = x + iy, \quad \frac{dz}{dX} = \frac{i (\sqrt{|X-1|} + 1)}{\sqrt{X}} e^{-i \left[P(X) \sqrt{X} - i Q(X) \sqrt{|X-1|} \right]}, \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (6)$$

coïncide avec la frontière du domaine de l'écoulement. Ces polynômes dépendent des points de décollement P et P', et définissent le module de la vitesse le long de OP :

$$V = V_0 \frac{\sqrt{X}}{\sqrt{|X-1|} + 1} e^{\sqrt{|X-1|} Q(X)} \quad (7)$$

La pression appliquée résulte du théorème de Bernouilli :

$$\Delta\pi = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V^2) \quad (8)$$

Un coefficient d'effet de structure est appliqué pour obtenir la charge linéique de l'anneau :

$$p = C \Delta \pi \quad (9)$$

La vitesse à l'infini, l'angle d'incidence du vent et la position des points de décollement sont des variables aléatoires. Leurs processus temporels sont synthétisés à partir des densités spectrales de puissance, représentées habituellement par des fonctions gaussiennes (fig. 5). La figure 6 indique une réalisation de la charge linéique. Les amplitudes p_n et q_n se déduisent de $p(\theta, t)$ par transformation de Fourier. La résolution des équations (5) donne la réponse de l'anneau sous l'effet du vent (fig. 7). L'ordre de grandeur du déplacement, de quelques millimètres sous vent faible, est conforme à l'évaluation expérimentale [7]. La comparaison des spectres de la vitesse de déplacement, mesurés sur site et calculés (fig. 8), valide le modèle en respectant les ordres de grandeurs des amplitudes spectrales et des fréquences de résonances.

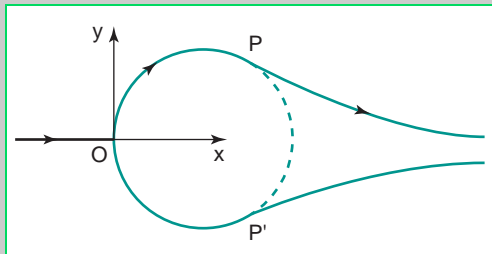


Fig. 4 - Ligne de courant.

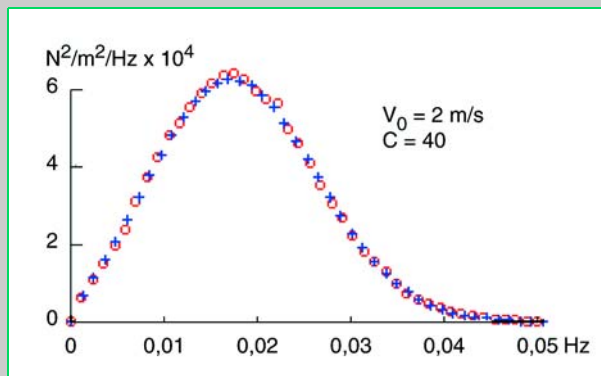


Fig. 5 - Densité spectrale de la charge linéique.

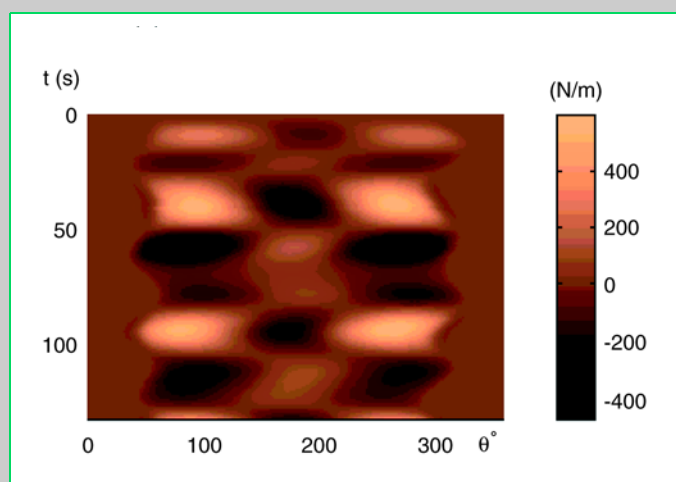


Fig. 6 - Charge linéique $p(\theta, t)$.

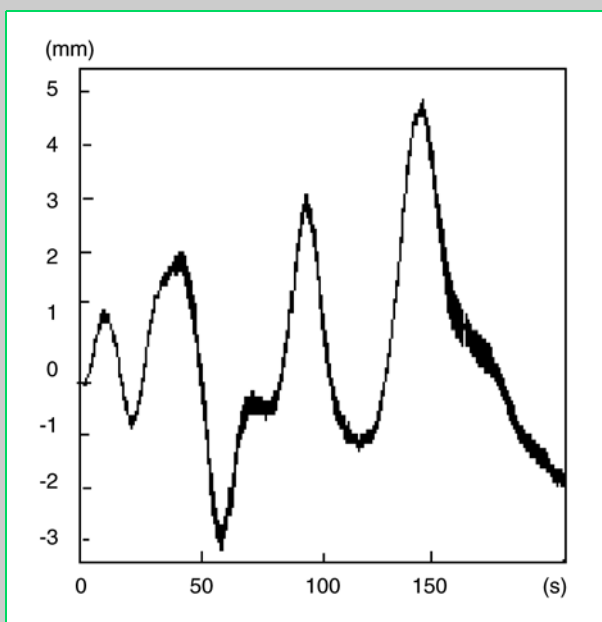
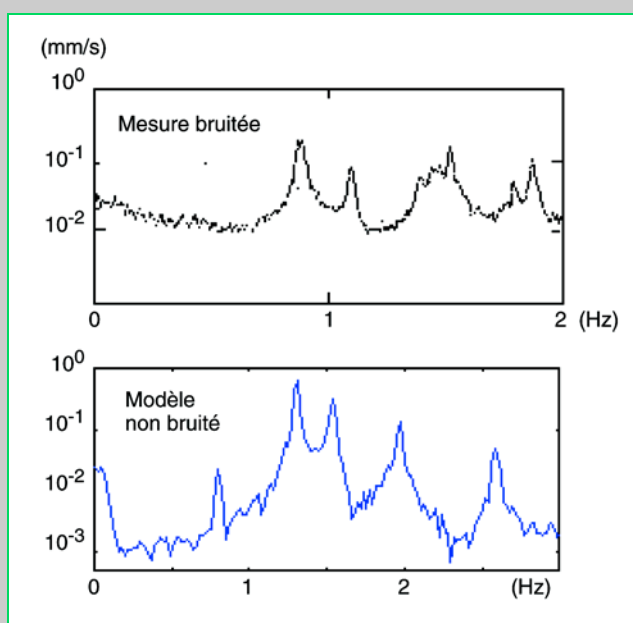


Fig. 7 - Déplacement à $\theta = 60^\circ$.

Fig. 8 - Spectres de vitesses.



Action d'une excitation ponctuelle

La génération de l'onde de Lamb utilise une source ponctuelle placée en $\theta = 0$, exerçant la force harmonique d'amplitude modulée.

$$F = F_0 \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi q f_m t) \left[e(t) - e\left(t - \frac{1}{2f_m}\right) \right] \quad (10)$$

Le déplacement hors plan de l'onde (fig. 9) est validé par les calculs préliminaires aux éléments finis de l'aéroréfrigérant (fig. 10) [8].

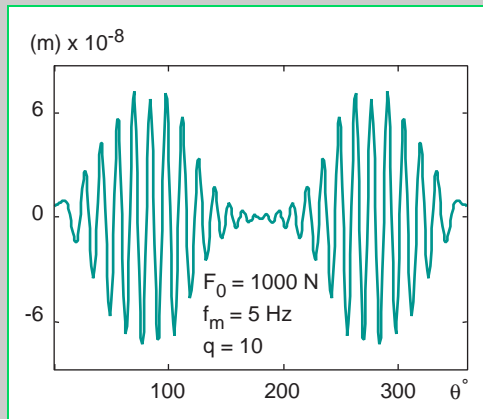
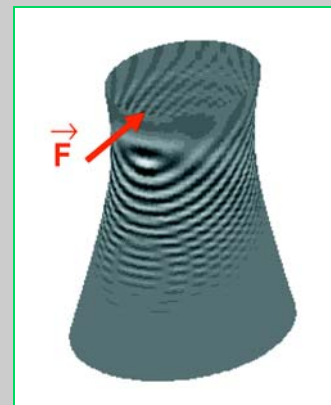


Fig. 9 - Onde hors plan à 110 ms.

Fig. 10 - Propagation à 110 ms [8].



Détection de l'onde par shearographie

Principe de mesure

Le principe de l'interféromètre à dédoublement vidéo (fig. 11) est de faire interférer deux ondes ayant subi sensiblement les mêmes fluctuations aléatoires de chemin optique au cours de leurs trajets entre l'objet étudié et la matrice CCD. Pour cela, une technique classique consiste à réaliser une mesure différentielle de la phase optique φ (11) proportionnelle au produit de l'indice de réfraction par la longueur géométrique le long du trajet respectif de chacun des deux faisceaux. La shearographie fondée sur ce principe fait donc interférer deux ondes provenant de deux points voisins de l'objet séparés d'une quantité δ_s . Dans le plan de la matrice CCD, nous obtenons alors deux images de l'objet légèrement décalées l'une de l'autre (on dit aussi cisailées, d'où le terme *shear* en anglais). Différents dispositifs permettent d'obtenir ce décalage et notamment celui présenté sur la figure 11 qui utilise un interféromètre de Michelson dont l'un des deux miroirs est orientable afin de régler le décalage des deux images. Les ondes issues des deux points A et B interfèrent sur le pixel i de la matrice dont l'éclairement s'exprime par :

$$I = I_0 [1 + v \cos \varphi] \quad (11)$$

La phase optique φ mesure la différence de trajet optique entre les rayons et est la somme de quatre termes :

- ❶ le speckle dû à la rugosité de la surface éclairée :

$$\varphi_r = \pi \text{randn}(\theta) \quad (12)$$

② la phase shearographique du déplacement total (fig.12) :

$$\varphi_s = \frac{\partial (\vec{K} \cdot \vec{U})}{\partial s} \delta_s \quad (13)$$

③ le bruit de fluctuation de l'indice de l'air :

$$\varphi_a = |\varphi_a| \text{randn}(\theta) \quad (14)$$

L'amplitude $|\varphi_a|$ équivaut, par hypothèse, à un bruit de même covariance que le signal de l'onde à détecter :

$$E[\varphi_a^2] = E[\varphi_{s0}^2] \quad \text{où} \quad \varphi_{s0} = \frac{\partial (\vec{K} \cdot \vec{U}_0)}{\partial s} \delta_s \quad \text{est la phase shearographique de l'onde seule.}$$

④ La variation de phase engendrée par le modulateur électro-optique grâce à un signal électrique de commande :

$$\varphi_p = \varphi_{p0} \sin(2\pi f_p t) \quad (15)$$

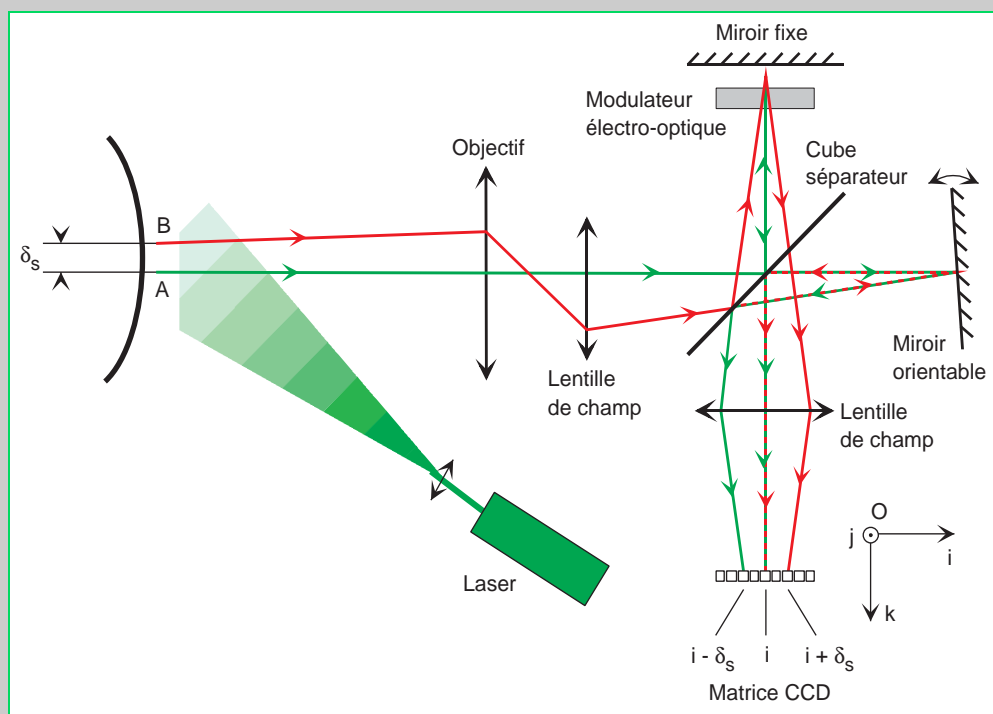


Fig. 11 - Interféromètre shearographique.

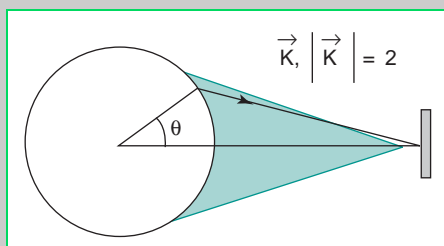


Fig. 12 - Définition du vecteur sensibilité \vec{K} .

En tenant compte de la décorrélation du speckle induit par une rotation importante de la surface de la tour (correspondant à une valeur de φ_{s0} élevée), notamment autour d'un nœud de vibration, le contraste [10] peut alors s'évaluer par l'expression suivante :

$$v = 1 - 0,5 \left(\frac{D_n U}{\max(D_n U)} \right)^2 \quad \text{avec} \quad D_n U = \left| \frac{\partial (\vec{U} \cdot \vec{n})}{\partial s} \right| \quad (16)$$

Le signal analogique de l'intensité lumineuse (11) est ensuite codé en niveaux de gris par la caméra qui le numérise sur huit digits

$$I^* = \text{entier} \left(\frac{I}{\max(I)} (2^8 - 1) \right) \quad (17)$$

Détection de la phase de l'onde

Ayant simulé $\vec{U}(t, \theta)$, on réalise l'échantillonnage en temps de $I^*(t, \theta)$ par une caméra de fréquence 200 kHz pendant une exposition de une milliseconde. La source laser éclaire le secteur $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$, échantillonné en 67 points (pas angulaire $0,9^\circ$) sur la matrice CCD d'enregistrement. Deux cents images sont enregistrées, déphasées par le modulateur électro-optique, qui remplace le miroir translaté par moyen piézoélectrique utilisé habituellement en shearographie.

L'inversion de $I^*(t, \theta)$ pour déterminer la phase φ_{s0}^* de l'onde $\vec{U}_0(t, \theta)$ utilise un préfiltrage autour de la fréquence centrale du modulateur électro-optique (fig. 13, gauche). Puis, pour chaque valeur θ_i , la phase optique φ_f^* est obtenue par inversion de l'intensité lumineuse filtrée I_f^* (fig. 13, centre). Elle est ensuite dérivée par rapport au temps pour éliminer les composantes du speckle et du bruit d'indice de l'air, puis dépliée et filtrée par un filtre passe bande à $\pm 30\%$ autour de la fréquence spatiale de la longueur d'onde théorique. La figure 13 de droite montre les moyennes temporelles des phases φ_f^* du signal préfiltré, φ_{s0}^* du signal après traitement et φ_0 de l'onde simulée en référence. Déduite de φ_{s0}^* , la longueur d'onde est obtenue à 0,5 % de la valeur simulée.

Pour augmenter la précision du traitement, une ondelette de Gabor [11] est ajustée sur la phase détectée φ_{s0}^* . L'écart entre les deux courbes, pondéré par le centrage de l'ondelette dans la fenêtre angulaire d'éclairement, définit un indice de confiance I_C . Une statistique de 7 000 détections permet d'affecter une probabilité d'erreur sur la longueur d'onde, en fonction de I_C (fig. 14). Elle montre qu'un indice de confiance supérieur à 0,8 doit être vérifié par le signal φ_{s0}^* , pour obtenir une erreur inférieure à 1 %.

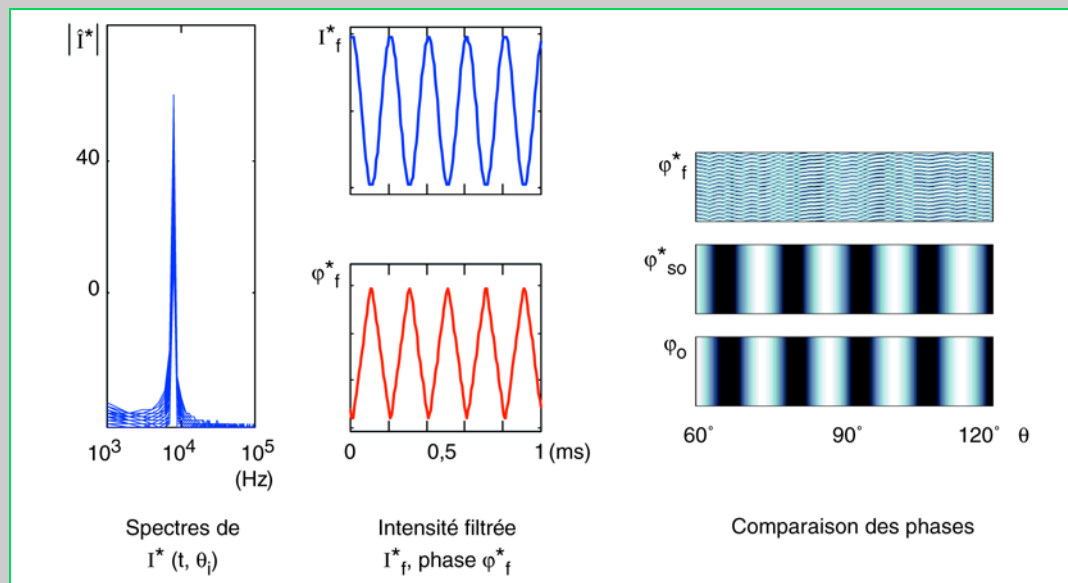


Fig. 13 - Traitement de l'intensité lumineuse.

La simulation précédente est appliquée pour six valeurs du module E_3 , comprises entre 17,5 et 35 GPa, et tient compte des hypothèses suivantes :

- bruit de phase par variation d'indice de l'air $|\varphi_a| = 0,46$ rad,
- cisaillement $\delta_s = 1$ m ,
- vitesse du déplacement dû au vent $|\dot{\vec{U}}_v| = 0,00032$ m/s ,
- déplacement dû au vent $|\vec{U}_v| = 4,2$ mm,
- fréquence de la caméra $f_{ccd} = 200$ kHz , codage de l'intensité lumineuse sur 8 bits,
- fréquence du modulateur électro-optique $f_p = 8$ kHz,
- moyenne de 10 photos par valeur de Λ ,
- moyennes sur l'ensemble des détections de la figure 15, $\bar{I}_C = 0,91$, $\bar{\varepsilon} = -0,004$.

La figure 15 représente l'évolution de la longueur d'onde en fonction du module élastique. Elle montre que la précision de la détection permet de suivre la variation de la longueur d'onde avec le module, compte tenu d'une sensibilité de l'ordre de 8,5 cm/GPa.

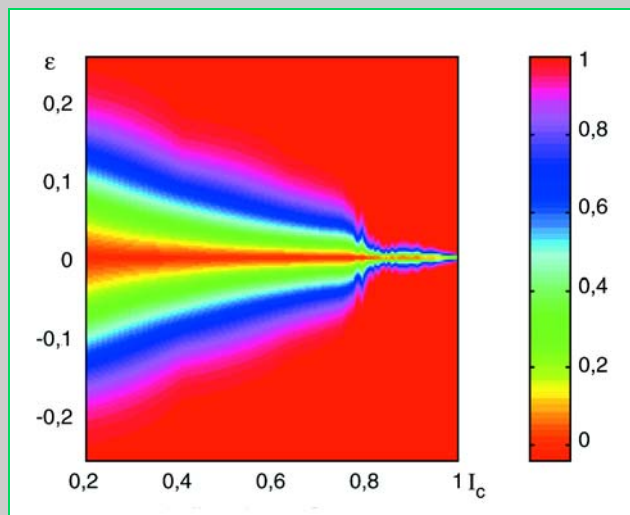


Fig. 14 - Probabilité erreur $\leq |\varepsilon|$.

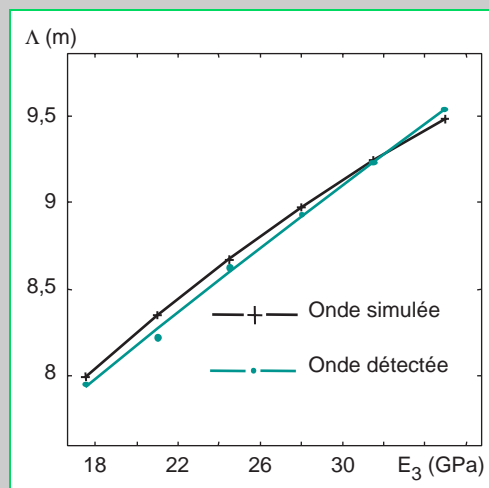


Fig. 15 - Influence du module circonférentiel.

Conclusion

Dans un contexte d'END, l'objectif de l'étude était de proposer une méthode d'identification du degré de fissuration et de sa répercussion sur la rigidité des tours de réfrigération atmosphérique. Par une simulation respectant les ordres de grandeur des phénomènes physiques du comportement

mécanique des structures et du procédé de mesure par shearographie, l'observation d'une onde mécanique propagée se révèle théoriquement possible. Les caractéristiques de cette onde sont choisies pour déterminer le module élastique homogénéisé à l'échelle de la fissuration de structure, telle qu'on la cartographie par photogramétrie [12]. Un matériel électrodynamique de faible puissance, bientôt disponible sur le marché des équipements vibratoires, peut appliquer la force transitoire – environ 1 000 N à 50 Hz – générant l'onde. La détection par shearographie doit être préalablement confirmée expérimentalement, dans des conditions représentatives, pour valider la mesure de longueur d'onde, indicateur sensible au degré de fissuration corrélé au module élastique. Ces grandeurs entrent dans la réévaluation de la marge de sécurité au flambement des ouvrages, orientant la maintenance préventive et le maintien en service, à partir de critères de décision objectifs. Pour réussir, les moyens optiques d'analyse seront à développer afin de sortir du stade du laboratoire, pour atteindre les conditions opératoires spécifiques du génie civil ; ce point s'avèrera difficile à résoudre en contexte industriel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HP62/94/132A, *Point sur la surveillance vibratoire des réfrigérants*, note interne EDF, **1994**.
- [2] CR/EM/100294, *Compte rendu. Mesures de vibrations avec vibromètre laser sur aéroréfrigérant de Dampierre 1*, note interne EDF.
- [3] HP62/92.027, *Mesure des vibrations du réfrigérant n° 2 de Cruas à l'aide du vélocimètre à laser Ometron*, note interne EDF, **1992**.
- [4] HUDSON J.A., Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, *Geophys J. R. astr. Soc.*, **64**, **1981**, pp. 133-150.
- [5] MORLAND L.W., Elastic response of regularly jointed media, *Geophys J. R. Soc.*, **37**, **1974**, pp. 435-446.
- [6] CAÏUS JACOB, *Introduction mathématique à la mécanique des fluides*, Gauthier-Villars, **1959**, pp. 553-640.
- [7] HP62/92/110, *Essai de qualification du vibromètre laser ometron pour la mesure des vibrations des réfrigérants atmosphériques : mesures en laboratoire et à Pont sur Sambre*, note interne EDF, **1992**.
- [8] BAILLARD A., *Étude numérique de faisabilité de la génération d'ondes de Lamb dans un aéroréfrigérant*, note interne ONERA n° RT 1/03313 DMSE, **2000**.
- [9] TAILLADE F., *Association de la shearographie et des ondes de Lamb pour la détection rapide et quantitative des délaminages*, Thèse CNAM, novembre **2000**.
- [10] OWNER-PETERSEN M., Digital speckle pattern shearing interferometry: limitations and prospects, *Applied Optics*, vol. 30, **19**, july **1991**.
- [11] FLANDRIN P., *Temps-Fréquence*, Éditions Hermès, série Traitement du signal, Paris, **1993**.
- [12] R97/PS4855 ind1, *Rapport d'inspection visuelle exhaustive réalisée à l'aide du système CNS*, note interne EDF, **1997**.