

## CFA/VISHNO 2016

**Analyse Expérimentale et Numérique de l'interaction  
Non-linéaire entre une onde longitudinale et une interface  
de contact**

A. Saidoun<sup>a</sup>, A. Meziane<sup>a</sup>, M. Renier<sup>a</sup>, C. Bacon<sup>a</sup>, F. Zhang<sup>b</sup> et H.  
Walaszek<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institut de Mécanique et d'ingénierie, I2M - UMR 5295 CNRS-Université Bordeaux,  
351 cours de la libération-Bat A4-RDC, 33405 Talence, France

<sup>b</sup>CETIM Fondation, CETIM/EPI, 52 avenue Félix Louat, 33405 Talence, France  
abdelkrim.saidoun@u-bordeaux.fr



LE MANS

Dans le domaine de l'industrie, la caractérisation de l'endommagement des matériaux est un élément clé pour maîtriser la durabilité et la fiabilité des pièces et matériaux en service.

Des études expérimentales ont montré les limites des méthodes acoustiques linéaires à détecter un endommagement à un stade précoce ou très localisé comme les fissures fermées ou les microfissures. De tels défauts représentent les précurseurs de la rupture finale et sont de ce fait très importants à identifier. Devant une telle difficulté, les méthodes acoustiques non-linéaires présentent une alternative intéressante capable de détecter et éventuellement de caractériser ces défauts. Dans cette étude la méthode de génération d'harmoniques a été considérée. Lorsqu'une onde d'amplitude suffisante est incidente sur une interface de contact précontrainte (ex : fissures fermées), des harmoniques supérieurs apparaissent dans le spectre de fréquences des ondes transmises et réfléchies. Cet effet est dû au contact acoustique non-linéaire (CAN).

Des manipulations expérimentales ont été effectuées sur une éprouvette comportant une fissure de fatigue réelle. Les résultats montrent une amplitude importante des harmoniques supérieurs et notamment le second harmonique. L'évolution de l'amplitude du second harmonique en fonction de la force de compression appliquée au niveau de la fissure présente un passage par une valeur optimale caractéristique du CAN.

Une étude numérique basée sur un modèle 2D utilisant la méthode des Eléments Finis a été effectuée. Le modèle simule l'interaction entre une onde longitudinale et une interface de contact entre deux solides. L'évolution de l'amplitude du second harmonique en fonction de l'état de contrainte au niveau de l'interface passe par une valeur optimale. La prise en compte de différentes morphologies de surface de contact a montré que la géométrie de l'interface de contact a un effet sur l'interaction non-linéaire onde/fissure fermée.

## 1 Introduction

Dans le domaine de l'industrie, la plupart des structures modernes fonctionnent dans des conditions de chargement cycliques, ce qui peut incuber des fissures de fatigue et aboutir à une défaillance structurelle.

L'objectif du contrôle non destructif (CND) est de détecter ces fissures et déterminer leurs dimensions, données permettant de statuer sur leurs nocivités et l'endommagement de la structure. Parmi les différentes méthodes de CND, les ultrasons permettent un examen volumique de l'ensemble de la structure, avec une mise en œuvre relativement aisée et non contraignante en termes de sécurité et réglementation. L'interaction entre les ondes ultrasonores et les discontinuités ou fissures présentes au sein de la structure conduit à des modifications de propriétés linéaires des ondes ultrasonores, tels que la réflexion, l'atténuation, la conversion de mode etc. Cependant, selon la nature de l'endommagement (microfissurations, fissures partiellement ou complètement fermées, ...) des phénomènes plus ou moins complexes sont mis en jeu et les propriétés linéaires des ondes ultrasonores ne sont pas suffisamment sensibles pour dimensionner, voire même de détecter ces défauts.

D'autre part, il a été constaté dans de nombreux matériaux, que la présence des microfissurations ou des fissures fermées peut produire des effets non linéaires très significatifs. Exploitant ces effets non-linéaires, il existe aujourd'hui de nombreuses techniques ultrasonores non linéaires telles que la résonance non linéaire [1] la génération d'harmoniques supérieurs [2] et la modulation non-linéaire de fréquences [3] qui ont montré leur efficacité pour détecter des microfissures ou fissures fermées. Dans cette étude, la technique de génération d'harmoniques supérieurs est considérée. Si l'amplitude de l'onde incidente est suffisante pour activer le phénomène de « clapping » entre les deux interfaces d'une fissure fermée, des harmoniques supérieurs apparaissent dans le spectre de fréquences des ondes transmises et réfléchies. L'amplitude du second harmonique est la plus importante. Cet effet est dû au Contact Acoustique Non-linéaire (CAN) [4]. La solution analytique [5] de l'interaction entre une onde acoustique et une interface de contact plane a montré que

l'évolution de l'amplitude du second harmonique en fonction de l'état de contraintes au niveau de l'interface passe par une valeur optimale.

L'objectif de cette étude est d'analyser la génération du second harmonique ainsi que son passage par la valeur optimale dans le cas d'une fissure de fatigue réelle numériquement et expérimentalement.

Des mesures de génération du second harmonique ont été effectuées sur une éprouvette CT en acier comportant une fissure de fatigue.

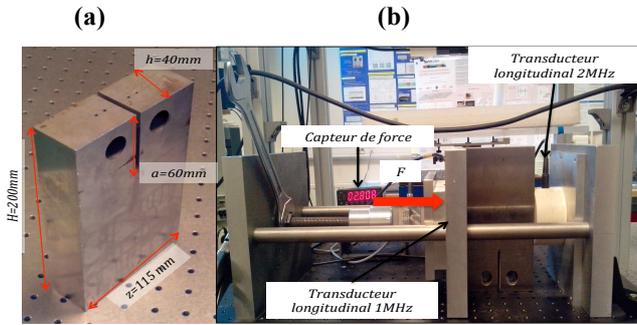
Une analyse numérique a été réalisée à l'aide d'un modèle 2D EF décrivant l'interaction non linéaire entre une onde longitudinale et une interface de contact entre deux solides. Différentes morphologies de contact ont été considérées dans le but d'étudier leur influence sur l'interaction non-linéaire onde/fissure fermée.

## 2 Analyse expérimentale

### 2.1 Dispositif expérimental

La géométrie de l'éprouvette utilisée dans cette étude est présentée dans la figure.1.a. Il s'agit d'une éprouvette CT en acier comportant une fissure de fatigue.

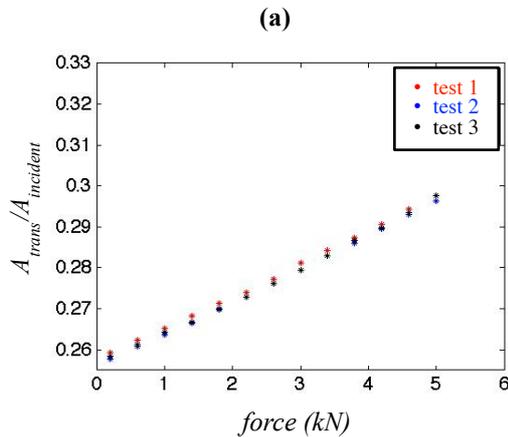
Le dispositif expérimental utilisé pour l'application de la méthode de génération d'harmoniques est présenté dans la figure.1.b. Une force de compression [0,5,5] kN est appliquée sur l'éprouvette à l'aide d'un système de vis-écrou. Ensuite, un transducteur longitudinal d'une fréquence centrale de 1MHz est utilisé pour l'excitation. De l'autre côté de la fissure, un transducteur longitudinal d'une fréquence centrale de 2MHz est utilisé pour mesurer la composante fondamentale ainsi que le second harmonique de l'onde transmise. L'amplitude du second harmonique est ensuite étudiée en fonction de la force appliquée.



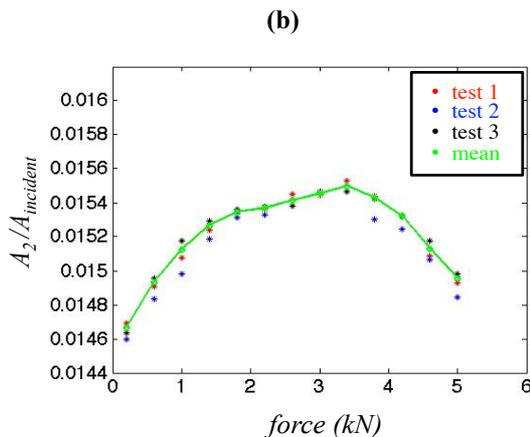
**Figure.1.** (a) géométrie de l'éprouvette. (b) dispositif expérimental utilisé pour l'application de la méthode de génération d'harmoniques.

## 2.2 Résultats et discussions

La figure.2 montre l'évolution de l'amplitude de l'harmonique fondamental et du second harmonique en fonction de la force appliquée pour les trois tests effectués. Les mesures sont reproductibles. La transmission de l'onde augmente en fonction de la compression (figure.2.a) et le ratio  $A_2/A_{incident}$  passe par une valeur optimale à Force=3.4kN (figure.2.b).



**Figure.2.b** Evolution de l'amplitude du second harmonique en fonction de la force appliquée.



**Figure.2.a** Evolution de l'amplitude de la composante fondamentale en fonction de la force appliquée.

Cependant, il est à noter que le ratio  $A_2 / A_{incident}$  est inférieur à celui de la solution analytique de l'interaction entre l'onde plane et une interface plane [6]. Son évolution est moins régulière. Ces différences peuvent être expliquées

(en partie) par un effet de la géométrie de l'interface (rugosité, planéité non parfaite ...) non prise en compte dans le modèle [6]. Afin d'étudier cette influence sur l'évolution de la transmission et du second harmonique. Une analyse numérique en considérant différentes morphologies d'interfaces de contact a été effectuée.

## 3 Analyse numérique

Le code Plast2D a été utilisé pour la modélisation de l'interaction entre une onde longitudinale et une interface de contact entre deux solides homogènes par EF. Plast2D est basé sur une description Lagrangienne réactualisée. La résolution temporelle est explicite et a recours à un schéma de Newmark de type  $\beta_2$  [7]. Les Eléments Finis utilisés sont des quadrangles de dimension régulière égale à 0.2mm qui permet d'assurer la convergence en maillage. Le pas de temps est pris égal à 2 ns.

Le modèle considère une loi de contact unilatéral avec frottement de Coulomb (Eq.1 & 2). Le coefficient de frottement  $\mu$  est égal à 0.3. Le contact est géré à l'aide de la méthode des multiplicateurs de Lagrange [8].

$$\begin{cases} u_n \leq 0 \\ \sigma_n \leq 0 \\ u_n \cdot \sigma_n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$u_n$  et  $\sigma_n$  sont respectivement le déplacement normal et la contrainte normale au niveau de l'interface. La première équation dans (Eq.1) correspond à la condition de non-interpénétration. D'après la seconde équation, les efforts normaux ne peuvent correspondre qu'à de la compression. La dernière équation, dite de complémentarité, assure le fait que l'interface est soit ouverte, soit fermée.

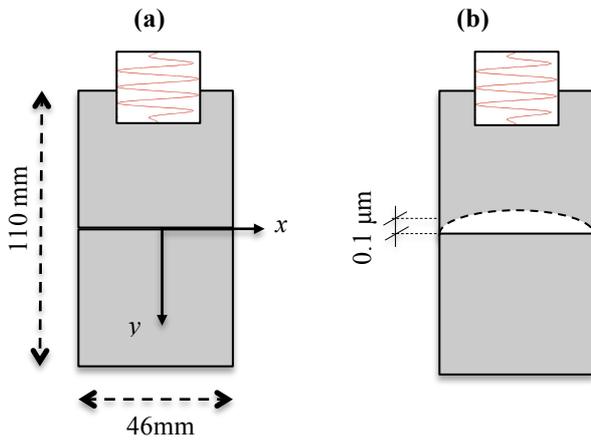
Le frottement est pris en compte par l'intermédiaire du coefficient de frottement  $\mu$  et de la loi de Coulomb qui est rappelée ici en terme de déplacements et de contraintes :

$$\begin{cases} |\tau| \leq \mu|\sigma_n| \Rightarrow \text{Adhérence } [u_t]=0 \\ \text{si } |\tau| < \mu|\sigma_n| \Rightarrow \text{Glissement: } \exists \alpha \geq 0; [u_t] = -\alpha\tau \\ u_n \cdot \sigma_n = 0 \quad \tau = \pm \mu|\sigma_n| \end{cases} \quad (2)$$

Où  $[u_t]$  correspond au saut de déplacement tangentiel. Tant que la contrainte tangentielle  $\tau$  est inférieure à  $\mu|\sigma_n|$ , il y a adhérence et le saut de déplacement tangentiel est nul. Pendant les phases de glissement, la contrainte tangentielle est égale à  $\pm\mu\sigma_n$ .

Afin d'étudier l'interaction non-linéaire onde/interface de contact, les deux surfaces en contact sont considérées d'abord parfaitement planes (figure.3.a). Cependant, dans un contact réel des zones ouvertes et fermées coexistent au niveau de l'interface de contact en raison de la rugosité par exemple. Afin d'étudier cet effet, une première étape consiste à considérer une interface « convexe » sur une interface plane (figure.3.b).

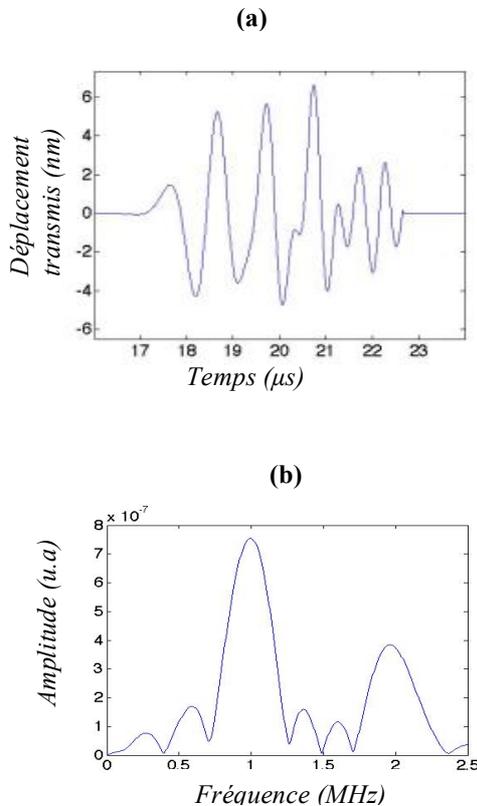
Une onde incidente de cinq cycles modulée par une enveloppe rectangulaire adoucie sur les bords est générée sur la face supérieure du solide. La fréquence centrale de cette onde est de 1 MHz. La longueur d'onde  $\lambda$  est égale à 6 mm. L'amplitude maximale de la contrainte incidente est égale à 1 MPa.



**Figure. 3.** Modèle utilisé pour étudier l'interaction entre une onde longitudinale et une interface de contact (a) plane et (b) interface convexe

**a) cas de l'interface de contact plane.**

Dans un premier temps, les résultats de l'interaction non-linéaire entre l'onde incidente et l'interface de contact plane pour un cas de chargement (ex :  $\sigma_0 = -0.45 \text{ MPa}$ ) sont présentés dans la figure.4. Dans ce cas, le clapping est activé ( $|\sigma_{inc}^{max}| > |\sigma_0|$ ). Le déplacement transmis est représenté dans la figure.4.a, des distorsions sont observées sur la forme du signal. Le spectre du déplacement transmis représenté dans la figure.4.b contient une composante du second harmonique.



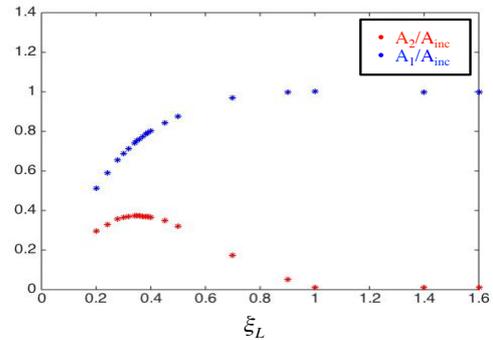
**Figure.4.** solution numérique de l'interaction entre une onde longitudinale et une interface de contact plane pour  $\sigma_0 = -0.45 \text{ MPa}$ . (a) déplacement transmis. (b) FFT du déplacement transmis.

Dans un deuxième temps, l'évolution de l'amplitude du second harmonique en fonction de l'état de contrainte au

niveau de l'interface a été étudiée via un paramètre adimensionné  $\xi_L$ .

$$\xi_L = \frac{\sigma_0}{\sigma_{inc}^{max}} \quad (3)$$

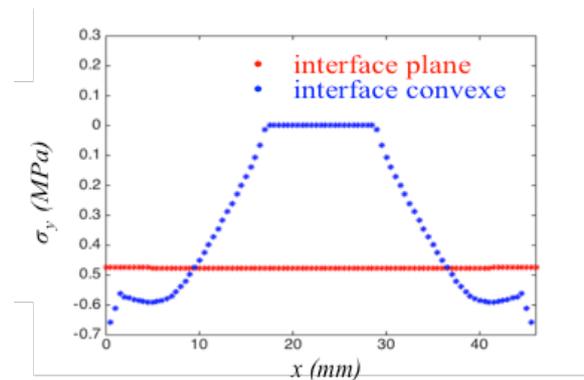
La figure.5 présente les résultats de l'évolution de la transmission et du second harmonique en fonction de  $\xi_L$ . Pour les valeurs de  $\xi_L \geq 1$  Le signal est totalement transmis sans génération du second harmonique. Cependant, pour  $\xi_L < 1$ , la transmission diminue, le second harmonique est généré et son amplitude passe par une valeur optimale pour  $\xi_L = 0.39$ .



**Figure. 5.** Evolution de l'amplitude de la composante fondamentale et du second harmonique en fonction de  $\xi_L$ .

**b) cas d'une interface de contact convexe.**

Une force de compression est appliquée uniformément sur l'ensemble des nœuds de la partie supérieure du solide créant une précontrainte au niveau de l'interface. La figure.6 montre la distribution de la contrainte normale pour une force appliquée  $F = 1 \text{ kN}$  avant l'interaction entre l'onde acoustique et l'interface de contact. La distribution de la contrainte normale au niveau de l'interface n'est pas uniforme dans le cas « convexe » par rapport au cas de référence (interface plane) (figure 6).



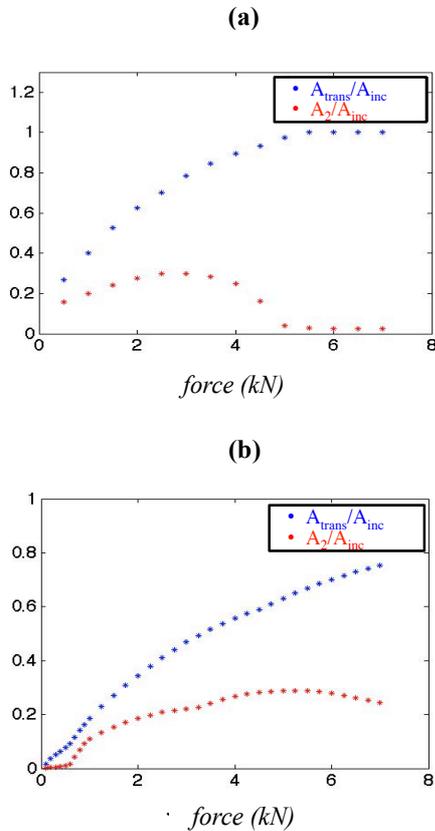
**Figure.6.** Distribution de  $\sigma_y$  pour une force de 1kN dans le cas d'une interface convexe et une interface plane.

La figure.7.a montre l'évolution de la transmission et le second harmonique en fonction de la force appliquée dans le cas des surfaces planes. La transmission de l'onde augmente en fonction de la compression jusqu'à  $F = 5.5 \text{ kN}$ . Le rapport  $A_2/A_{incident}$  passe par une valeur optimale à  $F = 3 \text{ kN}$ .

La figure.7.b montre l'évolution de la transmission et le second harmonique en fonction de la force appliquée dans

le cas de l'interface convexe sur une interface plane. L'amplitude du ratio  $A_2/A_{incident}$  est plus faible que celle obtenue dans le cas de l'interface plane. L'évolution présente deux régimes différents limités à  $F=3.25\text{kN}$  et un passage par une valeur optimale à  $F=5\text{kN}$ .

Même si les évolutions ne sont pas identiques, la prise en compte de géométrie non régulière permet de se rapprocher des observations expérimentales (figure.2.b).



**Figure.7.** Evolution de la transmission et du second harmonique en fonction de la force appliquée dans le cas (a) d'une interface plane et (b) une interface convexe.

Afin d'expliquer l'évolution irrégulière du second harmonique observée dans la figure.7.b, une analyse a été effectuée en deux étapes.

L'évolution du second harmonique a d'abord été étudiée en fonction d'un état local de contrainte au niveau de l'interface (à cause de la distribution non uniforme de la contrainte (figure.6) afin de localiser les zones où le second harmonique devrait être majoritairement généré.

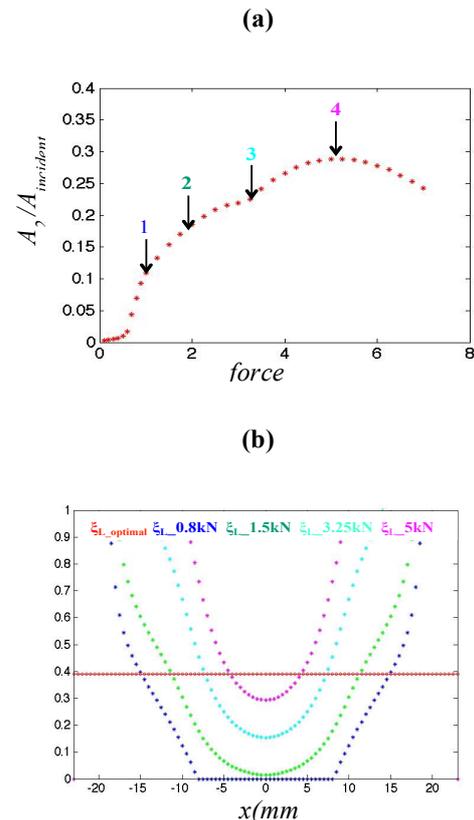
L'état local de contrainte est défini via le paramètre  $\xi_{L\_local}$  qui représente le rapport de la distribution de la contrainte incidente et celle de la précontrainte au niveau de l'interface.

$$\xi_{L\_local} = \frac{\sigma_0^x}{\sigma_{inc}^x} \quad (4)$$

Cette analyse a été effectuée pour quatre forces différentes (figure.8.a). La distribution de  $\xi_{L\_local}$  pour les différentes forces est représentée dans la figure.8.b, la ligne rouge correspond à la valeur pour laquelle la génération du second harmonique est optimale ( $\xi_L=0.39$ , figure.5).

Les résultats présentés dans la figure.8.b montrent que pour les faibles forces appliquées,  $\xi_{L\_local}$  est égal à la valeur optimale sur les bords de l'interface. Cependant, pour des plus grandes forces,  $\xi_{L\_local}$  atteint la valeur optimale plus proche du centre de l'interface. Ainsi, sa distribution est plus proche de la ligne optimale par rapport aux résultats des forces du premier régime.

A partir de ces résultats, il est attendu que la génération du second harmonique est optimale aux bords de l'interface pour les forces  $<3.25\text{ kN}$  et elle est optimale au centre de l'interface avec une amplitude plus importante pour les forces  $>3.25\text{ kN}$ .

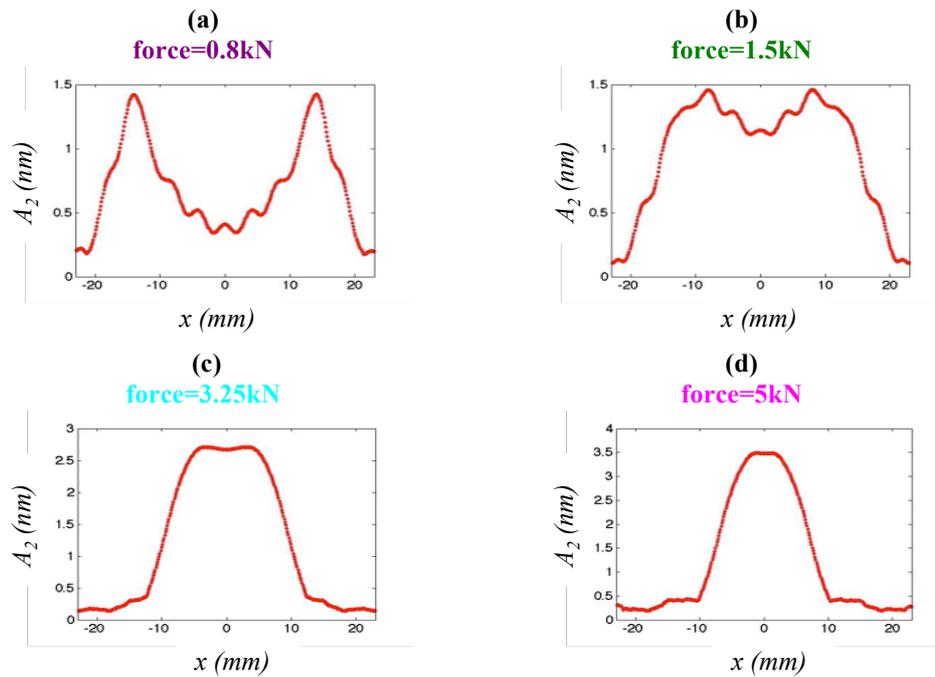


**Figure.8.a** cas de forces étudiés dans l'analyse de génération du second harmonique en fonction d'un état local de contrainte (b) distribution de  $\xi_{L\_local}$  au niveau de l'interface.

Dans un deuxième temps, la distribution des sources de génération du second harmonique a été étudiée pour les différentes forces présentées dans la figure.8.a.

Tout d'abord, le signal transmis a été enregistré à une distance de 20mm de l'interface afin de séparer l'onde transmise et celle réfléchie. Ensuite, le second harmonique a été extrait du spectre de l'onde transmise puis rétro-propagé linéairement jusqu'à l'interface en utilisant le principe du spectre angulaire [9]. Les résultats de la distribution des sources du second harmonique présentés dans la figure.9 montrent que pour les forces  $<3.25\text{kN}$ , le second harmonique est majoritairement généré sur les bords de l'interface. Cependant, pour les forces  $\geq 3.25\text{kN}$  le second harmonique est majoritairement généré au centre de l'interface avec une amplitude plus importante.

Ces résultats sont en accord avec la distribution de  $\xi_{L\_local}$  (figure.8.b).



**Figure.9.** Distribution des sources du second harmonique au niveau de l'interface. **(a)** force=0.8kN. **(b).** force=1.5kN. **(c).** force=3.25kN. **(d).** force=5kN.

## 5 Conclusions

Dans ce travail, une analyse de la détection des fissures fermées par la méthode de génération d'harmonique a été effectuée. Dans un premier temps, des mesures du second harmonique généré suite à l'interaction entre une onde longitudinale et une fissure réelle de fatigue ont été réalisées. L'évolution de  $A_2/A_{\text{incident}}$  en fonction de la force appliquée présente un passage par une valeur optimale, caractéristique du CAN.

À travers l'analyse numérique 2D l'influence de la géométrie de l'interface de contact sur l'interaction non-linéaire avec l'onde acoustique a été étudiée. Une interface de contact non plane implique une distribution non-uniforme de la contrainte. L'utilisation du paramètre  $\xi_{L\_Local}$  a permis d'analyser le comportement non-linéaire local au niveau de l'interface. Des évolutions particulières du second harmonique en fonction de la force appliquée ont été observées, dépendant de la zone où le clapping s'est principalement produit.

## Références

- [1]. K.E.-A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. A. Ten Cate, and P. A. Johnson. Nonlinear elastic wave spectroscopy (news) techniques to discern material damage, part ii : Singlemodenonlinear resonance acoustic spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*, 12 (1) :31–42, 2000.
- [2]. O. Buck, W. L. Morris, and J. M. Richardson. Acoustic harmonic generation at unbounded interfaces and fatigue cracks. *Applied Physics Letters*, 33(5) :371–373, sep 1978.
- [3]. K. Van Den Abeele, P. A. Johnson, and A.Sutin. Nonlinear elastic wave spectroscopy (news) techniques to discern material damage, part i : Nonlinear wave

modulation spectroscopy (nwms). *Journal of Nondestructive Evaluation*, 12 :17–30, 2000.

- [4]. Solodov, I.Y., Krohn, N., Busse, G. (2002). CAN: An example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids. *Ultrasonics*, vol. 40, no. 1-8, p. 621-625.
- [5]. Richardson, J. M., 1979, "Harmonic Generation at an Unbonded Interface: I. Planar Interface Between Semi-Infinite Elastic Media," *Int. J. Eng. Sci.*, 17, pp. 73–85.
- [6]. S. Hirose. 2d scattering by a crack with contact-boundary conditions. *Wave Motion*, 19 :37–49, 1993.
- [7]. L. Baillet. Du mécanisme au contact – modélisation par éléments finis. 2002.
- [8]. L. Baillet and T. Sassi. Simulation numériques de différentes méthodes d'éléments finis pour les problèmes de contact avec frottement. *Comptes Rendus de Mécanique*, 331 :789–796, 2003.
- [9] B.Hosten. Imagerie ultrasonore numérique de type holographique. Thèse de l'université de Bordeaux1981.