
Retournement temporel avec un post-traitement non linéaire : TR-NEWS

Dans ce chapitre, l'étude du retournement temporel avec un post-traitement non linéaire est présentée. Dans ce cas, le retournement temporel sert à augmenter la contrainte sur une zone localisée. Dans un deuxième temps, une analyse non linéaire est appliquée à ces signaux au niveau de la tache de focalisation. Pour cela, le principe de réciprocité, présenté dans le chapitre II.2.1.1, est utilisé. Dans le but de limiter les nonlinéarités supplémentaires qui pourraient être dues directement aux transducteurs ou à l'appareillage électronique permettant la génération de l'onde acoustique, le principe d'interaction paramétrique entre deux ondes de fréquences proches a été choisi (partie I.2.1.2). Ce principe va nous permettre de découpler entièrement les appareils électroniques d'un point de vue couplage électro-magnétique autant que d'un point de vue couplage non linéaire entre les signaux. Les mesures alors réalisées sur les composantes aux fréquences somme et différence ($f_{\pm} = f_2 \pm f_1$) vont nous permettre de caractériser directement le comportement non linéaire de la propagation des ondes dans le milieu.

Cette méthode a été appliquée sur une structure à l'échelle réelle lors d'une semaine de manipulations rassemblant tous les partenaires du projet AERONEWS au centre aéronautique VZLU à Prague. La manipulation a été réalisée en partenariat avec Koen Van Den Abeele et Pierre-Yves Le Bas de l'Université Catholique de Louvain sur une structure rivetée avec des raidisseurs (figure 52). Après avoir réalisé une encoche à proximité d'un rivet, cette structure a été soumise à un effort de traction (figure 52(a)), permettant ainsi l'apparition d'une fissure.

Des cycles de traction ont été appliqués à chaque extrémité de la structure. Entre chaque cycle, une cartographie autour de la zone où la fissure devait apparaître a été réalisée. La figure 53 présente l'évolution de la longueur de la fissure, mesurée par les techniciens du centre VZLU, en fonction du nombre de cycles.

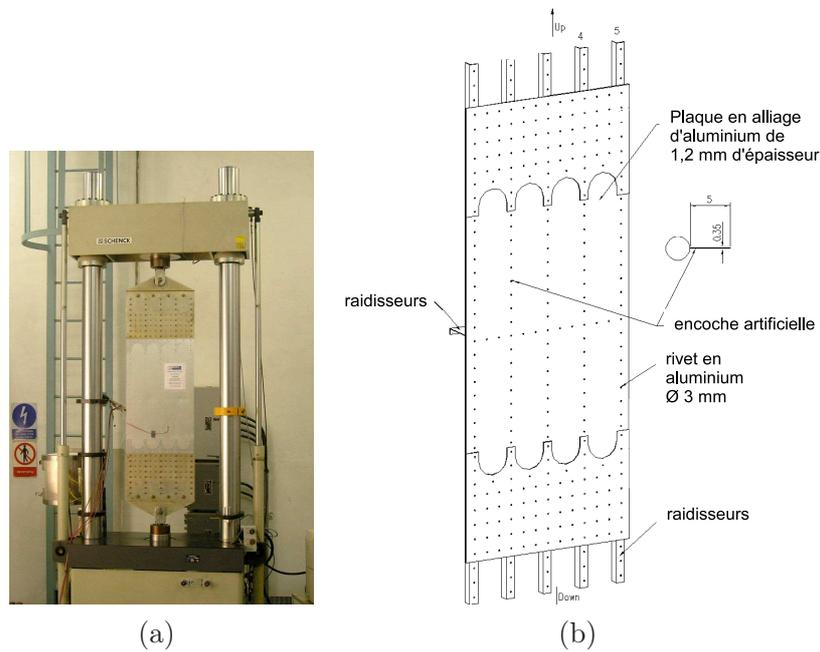


Figure 52 – (a) Photographie de la structure utilisée pendant la semaine de manipulation au centre aéronautique VZLU à Prague. (b) Représentation du rivetage et des raidisseurs.

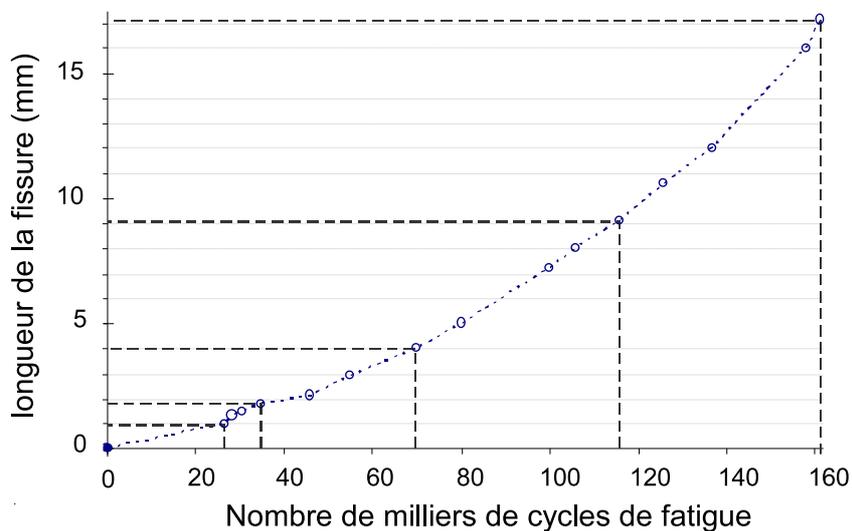


Figure 53 – Représentation de la longueur de la fissure créée à proximité d'un rivet en fonction du nombre de cycles de traction (mesures réalisées par les techniciens du centre VZLU).

Quatre pastilles piezo-électriques, montées sur des cavités résonantes, ont été positionnées à proximité de cette zone émettant deux à deux les deux fréquences d'intermodulation

choisies ($f_1 = 180$ kHz et $f_2 = 500$ kHz). La cartographie a été réalisée par la mesure de la vitesse à la surface de l'échantillon grâce à un vibromètre laser (Polytec OFV-505). Le procédé de mesure de la méthode de retournement temporel avec un post-traitement non linéaire (TR-NEWS), qui sera développé en détail par la suite, passe par l'émission indépendante de chaque fréquence dans l'échantillon et la mesure du signal reçu après propagation en un point. Le signal alors reçu pour chaque fréquence est temporellement retourné et stocké dans les générateurs d'émission (figure 54).



Figure 54 – (a) Instrumentation installée sur le site du centre aéronautique VZLU à Prague. (b) Vibromètre laser Polytec OFV-505 mesurant la vitesse à la surface de l'échantillon.

Les deux signaux sont renvoyés simultanément dans l'échantillon par les transducteurs d'émission et rétrofocalisent sur le point de mesure laser. Une étude spectrale nous permet ensuite de relever le niveau de la composante à la fréquence somme ($f_1 + f_2 = 680$ kHz) (figure 55).

Ce niveau est ensuite mesuré pour plusieurs points et placé dans une matrice, présentée sur la figure 56, après la dernière série d'essais en traction.

La fissure est attendue dans la partie centrale de la cartographie. On remarque l'apparition de niveaux plus élevés dans cette partie ce qui confère une signature non linéaire au défaut.

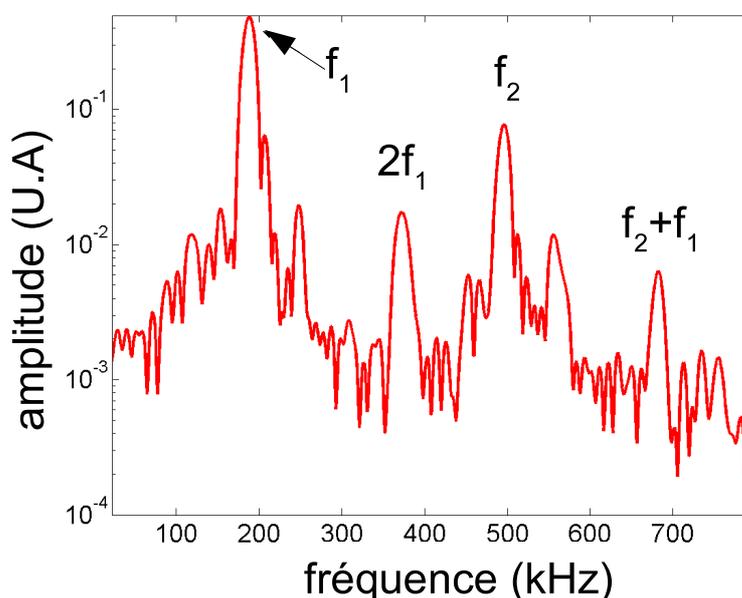


Figure 55 – Représentations spectrales des signaux $f_1 = 180$ kHz et $f_2 = 500$ kHz focalisés simultanément en un point de la surface de l'échantillon. Signature de l'intermodulation à $f_+ = 680$ kHz.

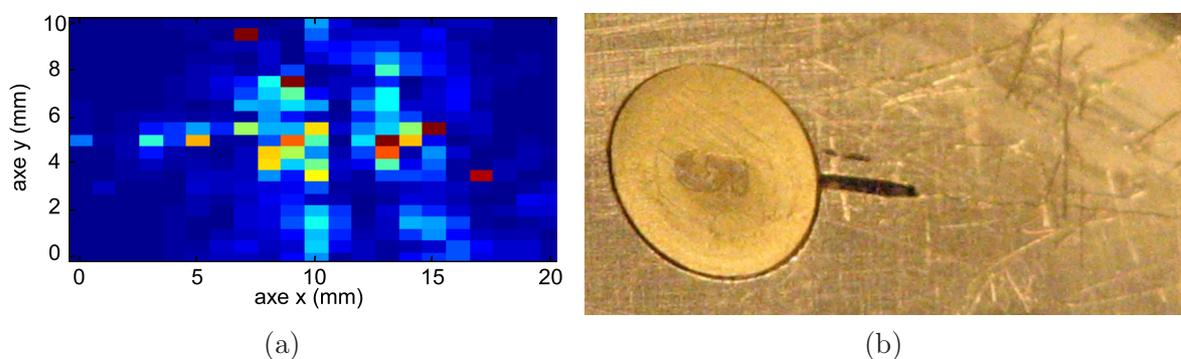


Figure 56 – (a) Représentation de la matrice pour les niveaux de vitesse maximum mesurés à la surface de l'échantillon pour la composante à la fréquence somme $f_+ = 680$ kHz. (b) Photographie du rivet avec l'encoche artificielle et la fissure créée.

Le travail qui va être présenté dans cette partie porte sur la compréhension du phénomène d'interaction au niveau de la zone de réfocalisation. Y a-t-il un lien entre la signature détectée au niveau du défaut et le niveau de nonlinéarité mesuré? En effet, une signature non linéaire est détectée à partir de l'interaction paramétrique entre deux ondes se propageant au même endroit (tache de focalisation). Le problème important apparaît lorsque le terme "propagation" est utilisé. D'après la théorie sur l'interaction paramétrique [63], le niveau d'intermodulation est proportionnel à la distance de propagation que les ondes vont parcourir ensemble. Plus cette distance est élevée, plus le niveau va être important. Les ondes utilisées dans cette étude sont des ondes rétrofo-

calisées par retournement temporel et la mesure est réalisée sur la tache focale dont le diamètre est d'environ une demi longueur d'onde ($\lambda/2$). Ainsi la distance d'interaction est faible (≈ 5 mm). Peut-on alors vraiment mesurer une interaction entre deux ondes et donc un niveau de nonlinéarité, lorsque la distance est faible mais que le niveau de contrainte est important ?

C'est pourquoi nous allons plus particulièrement étudier la signature non linéaire que l'on peut mesurer au point de focalisation de deux ondes acoustiques temporellement retournées et la variation de cette signature à proximité d'une zone dégradée.

4.1 Signature non linéaire au point de focalisation

Dans cette partie, les expériences TR-NEWS réalisées au laboratoire concernant la mesure de la nonlinéarité à travers la détection des composantes aux fréquences somme et différence sont présentées. Il s'agit d'étudier les bases de la mesure par la méthode TR-NEWS. Une étude particulière concernant la dépendance du niveau des composantes d'interaction paramétrique au niveau des amplitudes des fréquences d'excitation est exposée. La variation du niveau de nonlinéarité mesuré à proximité d'une zone fissurée a été ensuite analysée.

Le dispositif expérimental TR-NEWS est présenté en figure 34. Le matériel utilisé et les paramètres expérimentaux sont présentés dans le tableau 8.

	Type	Bande passante à -6dB	Fréquence centrale	Nombre d'arches	Générateur - dynamique	Amplification
Émission $f_1=490$ kHz	Transducteur Panametric Videoscan V102-RM	110%	1 MHz (longitudinale)	20	Agilent 33250A - 12 bits (1 bit signe) 64000 points	AR 150A 100dB 55dB
Émission $f_2=860$ kHz	Transducteur Panametric Acuscan A102S-RM	45%	1 MHz (longitudinale)	35	Agilent 33250A - 12 bits (1 bit signe) 64000 points	ENI - 150A 50dB
Réception	Vibromètre Laser Polytec OFV-505	1.5 MHz	de 0 à 1.5 MHz			
Acquisition	Oscilloscope LeCroy WaveRunner 6050A				8 bits $f_{\text{éch}} = 10$ MHz	

Tab 8 – Tableau décrivant le protocole de l'expérience TR-NEWS et les appareils utilisés.

Le processus de l'expérience est le suivant :

- le générateur de fonction arbitraire branché sur l'entrée de déclenchement externe des deux générateurs (1 et 2) émettant aux fréquences f_1 et f_2 émet une impulsion créneau qui va permettre de synchroniser les deux générateurs sur le front montant du signal ;
- un train d'ondes sinusoïdales de 20 périodes à la fréquence $f_1 = 490$ kHz, amplifié de 55 dB, est appliqué au transducteur 1 ;

- le signal alors transmis dans l'échantillon (figure 57(a)) est mesuré par le vibromètre laser Polytec OFV durant 4,5 ms et enregistré *via* un oscilloscope LeCroy WaveRunner 6050A dans un fichier de données (fréquence d'échantillonnage $f_e = 10$ MHz, longueur du signal 45000 points) ;
- un train d'ondes sinusoïdales déphasé de π est émis avec le même transducteur, à la même fréquence dans l'échantillon et mesuré au même endroit par le vibromètre laser. Ce signal va nous permettre de réaliser le filtrage par inversion d'impulsions ;
- les deux signaux obtenus, temporellement retournés par un traitement numérique direct sur Labview et notés f_{1+} et f_{1-} , sont enregistrés dans le générateur de fonctions arbitraires 1 ;
- indépendamment, un train d'ondes sinusoïdales de 35 périodes à la fréquence $f_2 = 860$ kHz amplifié de 55 dB, est appliqué au transducteur 2. Les durées des deux signaux émis aux fréquences f_1 et f_2 sont identiques, ce qui permet ainsi de générer la même puissance électrique dans les transducteurs ;
- le signal alors transmis dans l'échantillon (figure 57(b)) ($t_{total} = 4,5$ ms) est mesuré par le vibromètre laser au même endroit que le signal à f_1 ; il est enregistré dans un fichier de données ($f_e = 10$ MHz, longueur du signal 45000 points) ;
- de la même manière que pour la fréquence f_1 , le signal déphasé de π est généré et mesuré. Les deux signaux alors numériquement retournés sont enregistrés dans le générateur de fonctions arbitraires 2 ;
- dans le but de générer une interaction paramétrique entre les deux signaux, ces derniers sont renvoyés simultanément dans l'échantillon par leurs transducteurs respectifs (dans un premier temps les signaux aux fréquences f_{1+} et f_{2+} et dans un second temps, les signaux aux fréquences f_{1-} et f_{2-}). On peut également renvoyer séparément les deux signaux retournés ;
- au même point de mesure laser, la vitesse à la surface de l'échantillon est mesurée lors de la rétrofocalisation des signaux (figure 59) ;

Ce processus a été appliqué à différents échantillons : des blocs d'aluminium de dimension $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times N$ (avec $N = 25, 75, 125$ mm), pour étudier la dépendance du niveau de nonlinéarité en fonction de l'amplitude des signaux d'excitation, et dans les échantillons fissurés ASCO.

4.1.1 Dépendance du niveau de nonlinéarité en fonction de l'amplitude de l'excitation

Les premières questions qui sont apparues sur TR-NEWS étaient directement liées aux avantages que l'on pouvait tirer de cette méthode. En effet, le choix du retournement temporel a été motivé par le besoin d'avoir un fort niveau de contrainte localisée tout en permettant la reconstruction d'un train d'ondes pour une interaction entre deux signaux. Ceci doit nous permettre de pouvoir solliciter la signature non linéaire présente au niveau de la zone de focalisation. Dans notre cas, l'application du retournement temporel est réalisée à l'aide d'un transducteur d'émission (signal direct et signal retourné) et par une réception avec le vibromètre laser. Le signal alors reçu en un point est temporellement

retourné et appliqué à la surface du transducteur. Il est donc intéressant d'étudier la qualité du retournement temporel en relevant la réfoculation temporelle et spatiale. Ensuite, les différents points concernant la dépendance du niveau de nonlinéarité par rapport au niveau d'excitation, c'est-à-dire les variations induites par le changement de fréquence et par le changement d'épaisseur de l'échantillon, seront présentés.

4.1.1.1 Réfoculation temporelle et spatiale

La réfoculation temporelle et spatiale est étudiée dans le bloc d'aluminium d'épaisseur 75 mm. Deux signaux sont transmis dans l'échantillon avec des transducteurs placés en contact à l'aide de salol sur le côté de l'échantillon aux fréquences $f_1 = 490$ kHz et $f_2 = 860$ kHz. Les signaux reçus après $t_{\text{total}} = 4,5$ ms de propagation dans l'échantillon sont mesurés en un point à la surface de l'échantillon à l'aide du vibromètre laser (figure 57). Ces signaux sont enregistrés, temporellement retournés et stockés dans les générateurs de fonctions arbitraires 1 et 2.

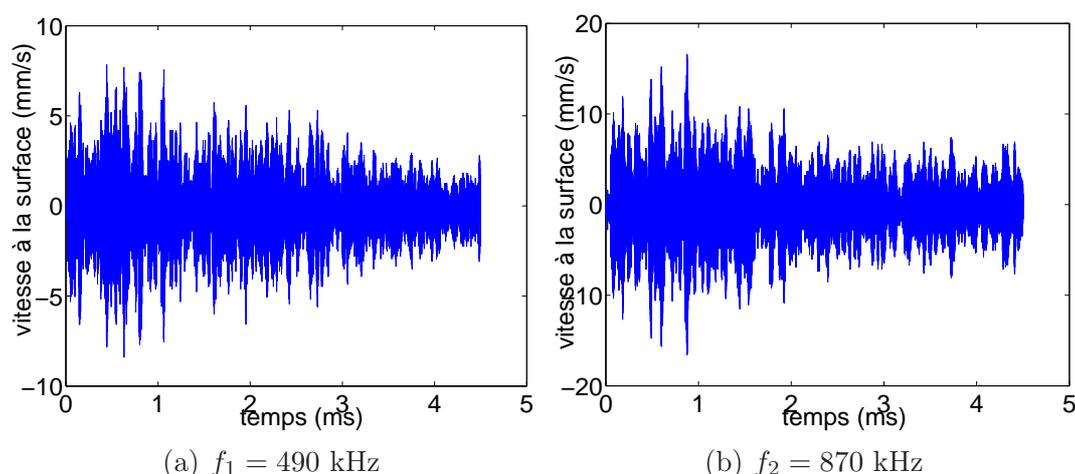


Figure 57 – Représentations temporelles des signaux à la fréquence (a) $f_1 = 490$ kHz et (b) $f_2 = 860$ kHz mesurés par le vibromètre laser en un point à la surface.

Lorsque le signal est renvoyé dans l'échantillon à l'aide du transducteur associé, d'après le principe de retournement temporel et de réciprocité, il réfocule au point de mesure laser (figure 58). La "reconstruction" du train d'ondes de départ à la position de réfoculation est remarquable, nonobstant l'apparition d'échos secondaires ("side lobes") autour de la partie reconstruite (figures 58 b et d). Ces échos supplémentaires sont dus à l'utilisation d'un seul transducteur et d'un seul point de mesure. Malgré tout, le niveau d'énergie au point de focalisation est environ 5 fois plus important que le niveau de réception du signal émis simplement dans l'échantillon. Cette remarque peut être expliquée par le fait que l'échantillon étant réverbérant pour les ondes utilisées, il forme une sorte de cavité résonante [125, 126]. La robustesse du principe de retournement temporel nous

permet, dans un milieu peu atténuant ($\alpha = 5 \text{ Np/m}$ à 1 MHz) et avec un miroir à retournement temporel constitué d'un seul élément, de rétrofocaliser une onde à une position précise (rétrofocalisation spatiale) en reconstruisant le train d'onde de départ (rétrofocalisation temporelle). Il est également important de noter que cette reconstruction utilise un signal de $4,5 \text{ ms}$, ce qui correspond à $l = c \cdot t = 5000 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} = 22,5 \text{ m}$ de propagation dans l'échantillon.

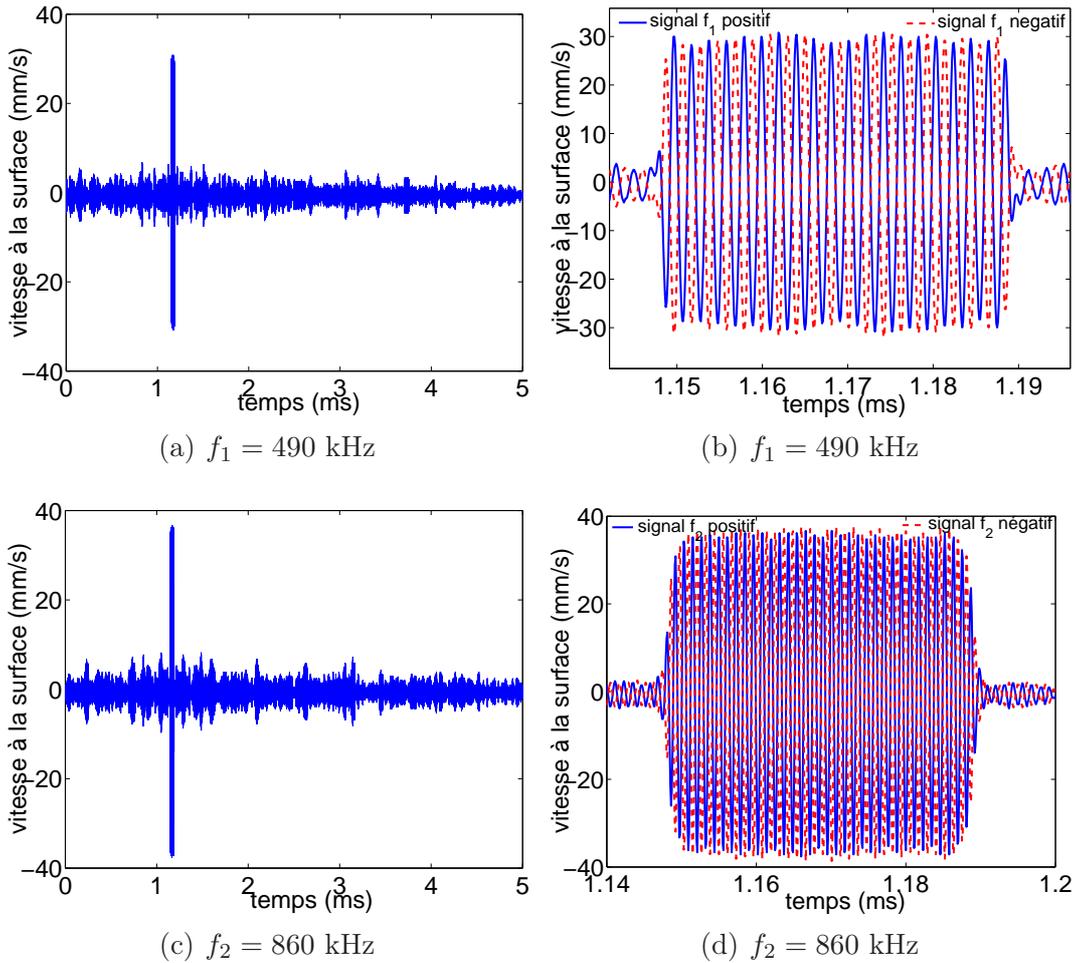


Figure 58 – Représentations temporelles des signaux rétrofocalisés (a-c) sur 5 ms , à la fréquence (a) $f_1 = 490 \text{ kHz}$ et (c) $f_2 = 860 \text{ kHz}$ et autour du temps de rétrofocalisation (b-d) pour les signaux positifs f_{1+} et f_{2+} (en bleu, trait plein) et négatifs f_{1-} et f_{2-} (en rouge, tirets) à la fréquence (b) $f_1 = 490 \text{ kHz}$ et (d) $f_2 = 860 \text{ kHz}$.

La figure 58 montre également que les signaux aux fréquences f_1 et f_2 sont rétrofocalisés au même instant ($t_{retro} \approx 1,15 \text{ ms}$) ce qui est contrôlé par le pilotage en déclenchement externe des deux générateurs. Il est donc possible d'envoyer simultanément dans l'échantillon ces deux signaux temporellement retournés et de mesurer le signal rétrofocalisé (figure 59). L'interaction paramétrique a lieu pendant le temps durant lequel les deux

signaux rétrofocalisent. L'objectif de générer une source locale importante est atteint puisqu'un niveau de vitesse à la surface de $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ est obtenu, à comparer avec la vitesse de $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ reçue au départ. Le point de focalisation des signaux temporellement retournés est appelé tache de rétrofocalisation. Nous pouvons maintenant nous intéresser à la signature non linéaire présente dans cette zone.

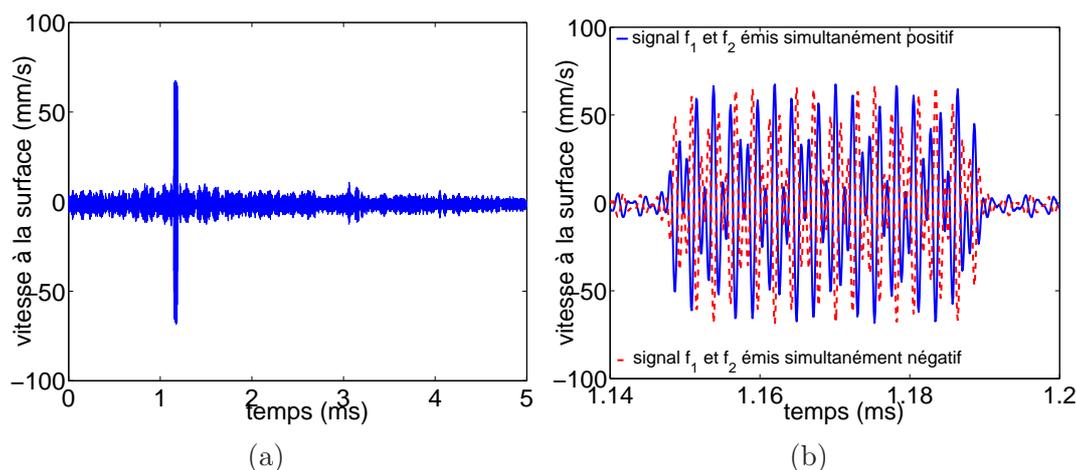


Figure 59 – Représentations temporelles du signal rétrofocalisé positif (en bleu, trait plein) et négatif (en rouge, tirets) (a) pour les deux fréquences $f_1 = 490 \text{ kHz}$ et $f_2 = 860 \text{ kHz}$ émises simultanément et (b) agrandissement de la zone de rétrofocalisation.

4.1.1.2 Signature non linéaire sur la tache de rétrofocalisation

Nous allons maintenant nous intéresser au niveau des composantes d'interaction paramétrique aux fréquences différence $f_- = f_2 - f_1 = 370 \text{ kHz}$ et somme $f_+ = f_2 + f_1 = 1350 \text{ kHz}$. L'étude des signaux dans le domaine spectral est réalisée dans la fenêtre temporelle comprise entre $t_1 = 1,15 \text{ ms}$ et $t_2 = 1,19 \text{ ms}$ avec un fenêtrage rectangulaire. Les spectres des signaux aux fréquences f_1 , f_2 et simultanément f_1 et f_2 sont présentés en figure 60. Avant le filtrage par inversion d'impulsions aucune composante n'est visible aux fréquences somme et différence. Le spectre de l'addition des signaux envoyés simultanément f_{1+} et f_{2+} avec f_{1-} et f_{2-} est présenté en figure 61. Les composantes d'interaction paramétrique apparaissent après le filtrage lorsque les deux ondes aux fréquences f_1 et f_2 sont renvoyées simultanément. La présence de ces composantes montre bien un comportement non linéaire du milieu de propagation. Dans le cas de l'envoi d'une seule fréquence, on remarque l'apparition d'harmoniques paires et principalement aux fréquences doubles ($2f_1 = 980 \text{ kHz}$ et $2f_2 = 1720 \text{ kHz}$). L'absence des harmoniques impaires vient du filtrage par inversion d'impulsions. Ces harmoniques sont également des marqueurs de nonlinéarité mais il n'est pas possible de découpler la nonlinéarité qui est issue du matériau à celle issue du transducteur et du système électrique. C'est pourquoi nous nous intéresserons simplement aux composantes d'intermodulation.

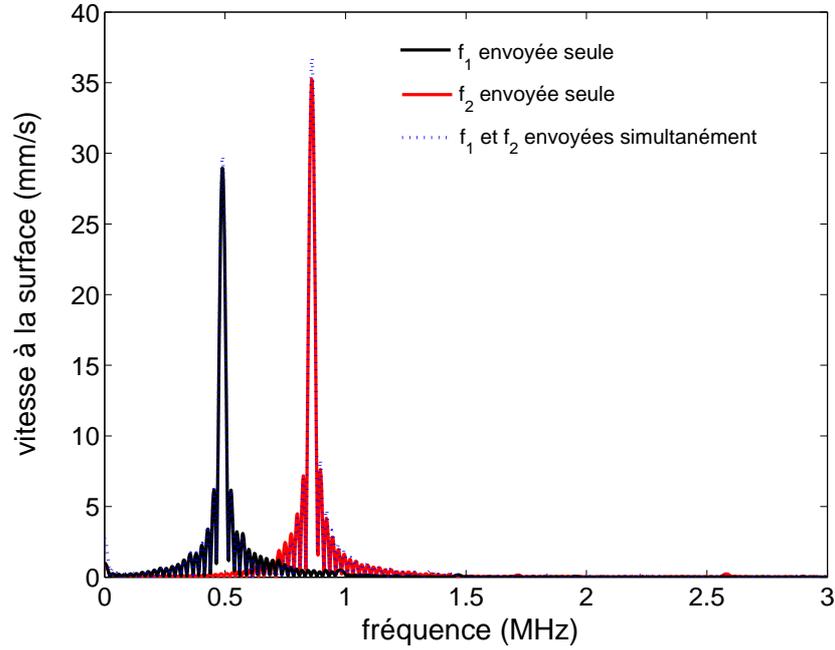


Figure 60 – Représentations spectrales des signaux rétrofocalisés à la fréquence $f_1 = 490$ kHz (en noir), à la fréquence $f_2 = 860$ kHz (en rouge) et aux fréquences f_1 et f_2 envoyées simultanément (en bleu, pointillés).

Cette signature non linéaire présente sur la tache de rétrofocalisation pose beaucoup de questions en ce qui concerne le processus d'interaction. Les deux ondes sont envoyées dans l'échantillon simultanément et il est nécessaire de savoir si elles n'interagissent pas hors de la zone de rétrofocalisation. Pour étudier la sensibilité de l'interaction paramétrique à la nonlinéarité du matériau et noter les paramètres importants agissant sur cette interaction, une étude détaillée sur la dépendance du niveau des composantes aux fréquences somme et différence par rapport au niveau des fréquences fondamentales a été réalisée.

Nous allons tout d'abord baser notre étude sur la théorie de l'interaction paramétrique de deux ondes colinéaires développée par Westervelt [63] et qui donne l'amplitude des composantes d'interaction comme étant :

$$q_{\pm} = \frac{\beta L (\omega_1 \pm \omega_2)^2}{2\rho_0^2 c_0^4} P_1 P_2, \quad (\text{II.4.1})$$

où L est la longueur d'interaction des ondes, β est le coefficient non linéaire classique quadratique du milieu, $\omega_1 = 2\pi f_1$ et $\omega_2 = 2\pi f_2$ sont respectivement les pulsations des ondes aux fréquences f_1 et f_2 , ρ_0 est la masse volumique du milieu de propagation, c_0 est la célérité de l'onde dans le milieu et P_1 et P_2 sont respectivement les amplitudes des ondes aux fréquences fondamentales f_1 et f_2 .

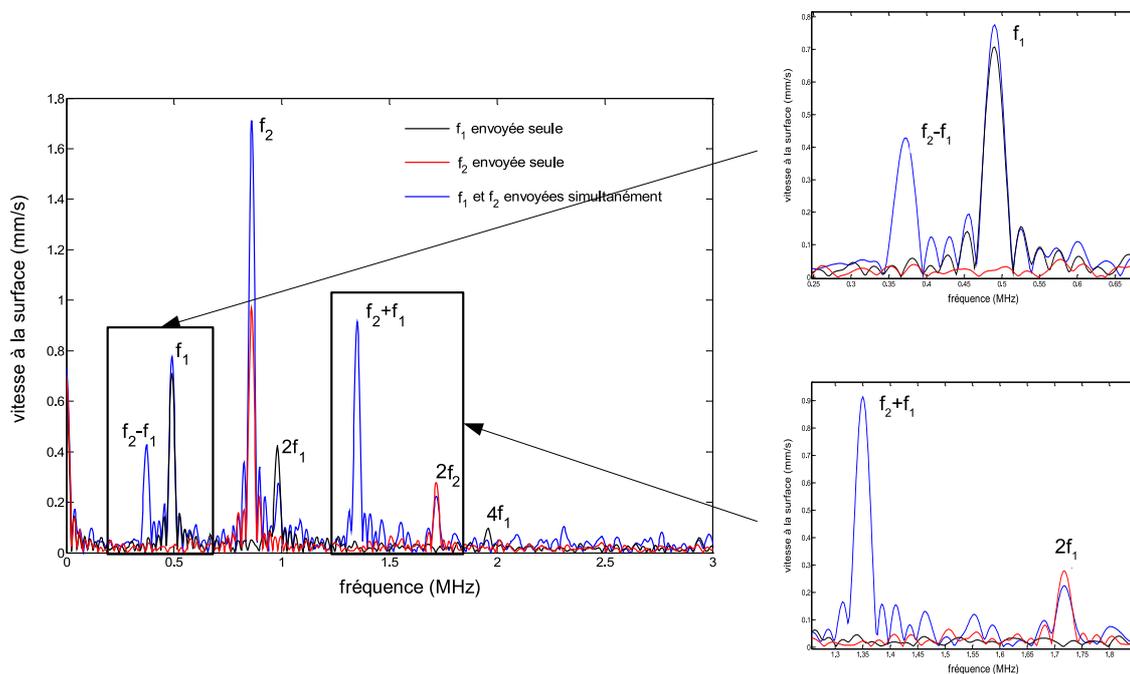


Figure 61 – Représentations spectrales des signaux rétrofocalisés après filtrage par inversion d'impulsions, à la fréquence $f_1 = 490$ kHz (en noir, pointillés), à la fréquence $f_2 = 860$ kHz (en rouge, tirets) et aux fréquences f_1 et f_2 envoyées simultanément (en bleu, trait plein). En fenêtres : zooms sur les fréquences somme $f_+ = 1350$ kHz et différence $f_- = 370$ kHz.

Dans cette expression, nous remarquons que le niveau des composantes d'interaction est proportionnel à la multiplication des amplitudes des fréquences fondamentales. La formule suivante est donc valable :

$$\log(q_{\pm}) = \log(P_1 P_2) + \log\left(\frac{\beta L (\omega_1 \pm \omega_2)^2}{2\rho_0^2 c_0^4}\right), \quad (\text{II.4.2})$$

où $\log(P_1 P_2)$ définit la variable "amplitude" et $\log\left(\frac{\beta L (\omega_1 \pm \omega_2)^2}{2\rho_0^2 c_0^4}\right)$ est une constante. Pour mesurer cette dépendance, l'amplitude des signaux d'excitation délivrée par les générateurs de fonction varie entre 150 mV et 400 mV. Les pentes des droites de la figure 62 sont présentées dans le tableau 9.

Les expressions attendues (Eq. II.4.2) ne sont pas vérifiées expérimentalement. Afin de vérifier la répétabilité de nos mesures, la même expérience a été réalisée trois fois sans aucune modification des paramètres expérimentaux (figure 63). Les pentes de chaque droite d'approximation sont présentées dans le tableau 10. Une variation des pentes de 5% peut être relevée pour la fréquence différence et de 7% pour la fréquence somme. La pente de la fréquence somme s'approche plus du résultat attendu (pente de 1). C'est pourquoi, pour vérifier le lien entre la fréquence et la pente, les deux fréquences f_1 et f_2 ont été changées. Les fréquences utilisées dans la figure 64 et le tableau 11 sont $f_1 = 310$ kHz et $f_2 = 950$ kHz. Les composantes d'interaction sont donc $f_- = 640$ kHz et $f_+ = 1260$ kHz.

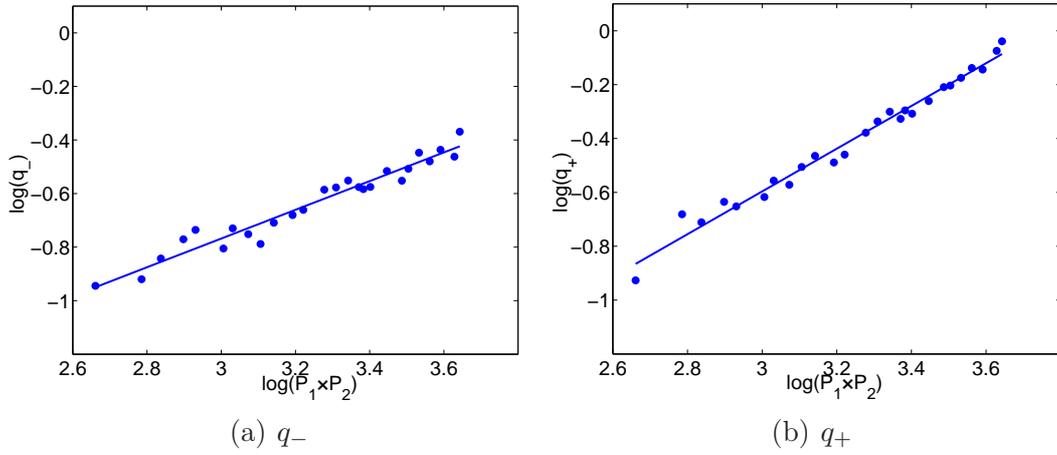


Figure 62 – Représentations de l'évolution des amplitudes (a) q_- et (b) q_+ des composantes (a) $f_- = f_2 - f_1 = 370$ kHz et (b) $f_+ = f_2 + f_1 = 1350$ kHz en fonction de l'évolution des amplitudes P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales.

	Polynômes d'approximation linéaire
Fréquence différence	$\log(q_-) = 0,54 \log(P_1 P_2) - 2,38$
Fréquence somme	$\log(q_+) = 0,79 \log(P_1 P_2) - 2,98$

Tab 9 – Polynômes d'approximation pour la fréquence différence ($f_- = 370$ kHz) et la fréquence somme ($f_+ = 1350$ kHz) sur le bloc d'aluminium d'épaisseur 75 mm.

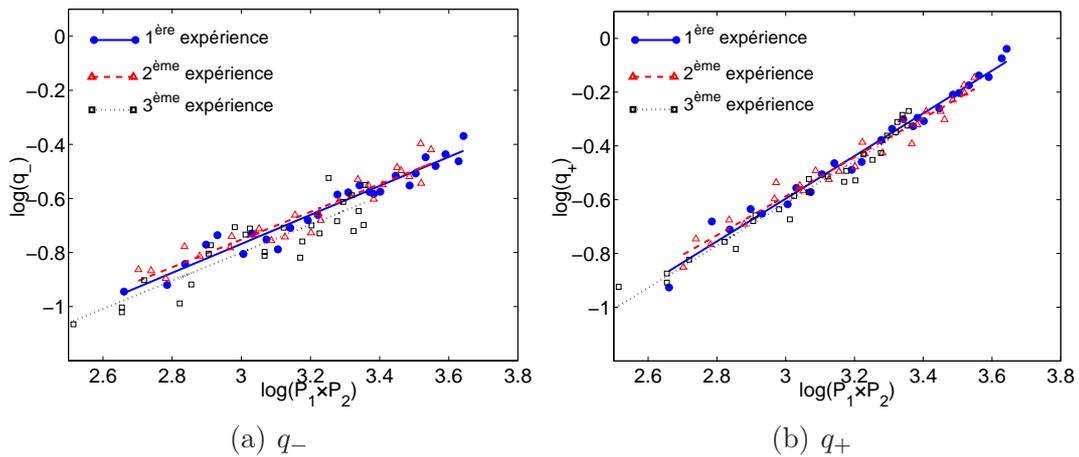


Figure 63 – Représentations de l'évolution des amplitudes q_- et q_+ des composantes (a) $f_- = f_2 - f_1 = 370$ kHz et (b) $f_+ = f_2 + f_1 = 1350$ kHz en fonction de l'évolution des amplitudes P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales pour trois expériences consécutives.

Les coefficients directeurs des droites d'approximation pour f_- et f_+ varient selon la fréquence utilisée. Plus la fréquence est importante, plus le coefficient directeur se rap-

	Polynômes d'approximation linéaire pour la fréquence différence
1 ^{ère} expérience	$\log(q_-) = 0,54 \log(P_1 P_2) - 2,38$
2 ^{nde} expérience	$\log(q_-) = 0,51 \log(P_1 P_2) - 2,29$
3 ^{ème} expérience	$\log(q_-) = 0,52 \log(P_1 P_2) - 2,36$
	Polynômes d'approximation linéaire pour la fréquence somme
1 ^{ère} expérience	$\log(q_+) = 0,79 \log(P_1 P_2) - 2,98$
2 ^{nde} expérience	$\log(q_+) = 0,73 \log(P_1 P_2) - 2,77$
3 ^{ème} expérience	$\log(q_+) = 0,79 \log(P_1 P_2) - 2,97$

Tab 10 – Polynômes d'approximation pour la fréquence différence et la fréquence somme sur le bloc d'aluminium d'épaisseur 75 mm pour trois expériences consécutives.

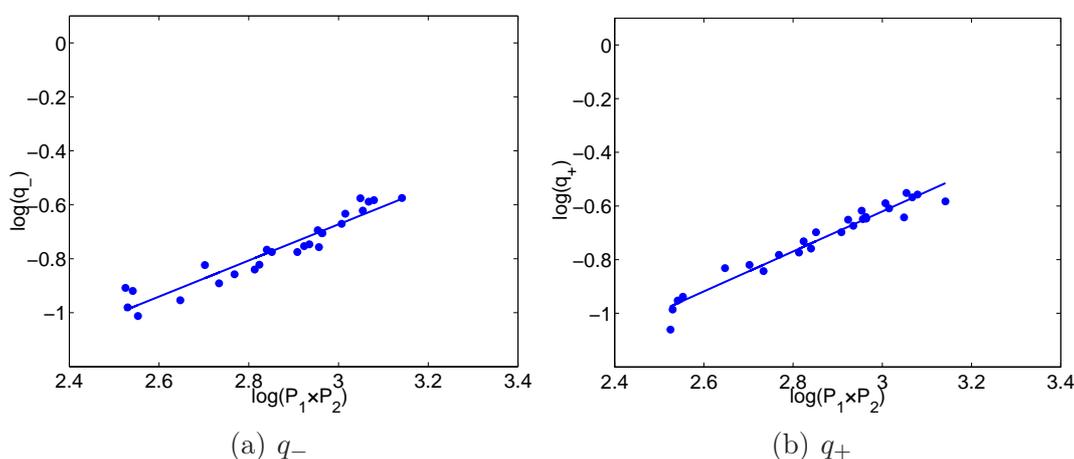


Figure 64 – Représentations de l'évolution des amplitudes (a) q_- et (b) q_+ des composantes (a) $f_- = f_2 - f_1 = 640$ kHz et (b) $f_+ = f_2 + f_1 = 1260$ kHz en fonction de l'évolution des amplitudes P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales.

	Polynômes d'approximation linéaire
Fréquence différence	$\log(q_-) = 0,67 \log(P_1 P_2) - 2,68$
Fréquence somme	$\log(q_+) = 0,75 \log(P_1 P_2) - 2,86$

Tab 11 – Polynômes d'approximation pour la fréquence différence ($f_- = 640$ kHz) et la fréquence somme ($f_+ = 1260$ kHz) sur le bloc d'aluminium d'épaisseur 75 mm.

proche de 1. Cette dépendance peut s'expliquer par le fait que l'interaction paramétrique qui a lieu au niveau de la rétrofocalisation des deux signaux est proportionnelle à la longueur d'onde des signaux. En effet, plus la fréquence est importante, plus la longueur d'onde est petite, plus il y a d'arches dans la tache de rétrofocalisation et plus il y a d'interaction entre les deux signaux. La dépendance des coefficients directeurs en fonction de l'épaisseur de l'échantillon utilisé va maintenant être étudiée. Dans ces expériences, les

fréquences utilisées sont $f_1 = 490$ kHz et $f_2 = 860$ kHz.

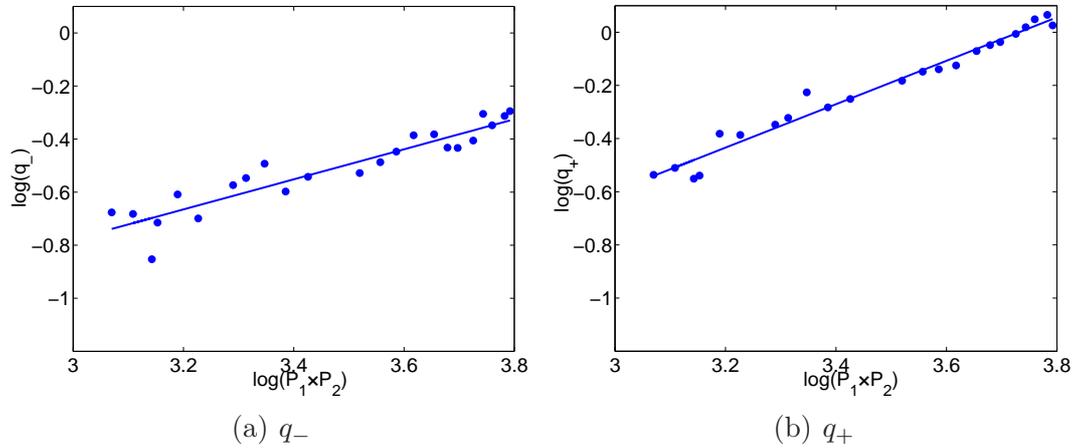


Figure 65 – Représentations de l'évolution des amplitudes (a) q_- et (b) q_+ des composantes (a) $f_- = f_2 - f_1 = 640$ kHz et (b) $f_+ = f_2 + f_1 = 1260$ kHz en fonction de l'évolution des amplitudes P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales dans un échantillon d'aluminium $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$.

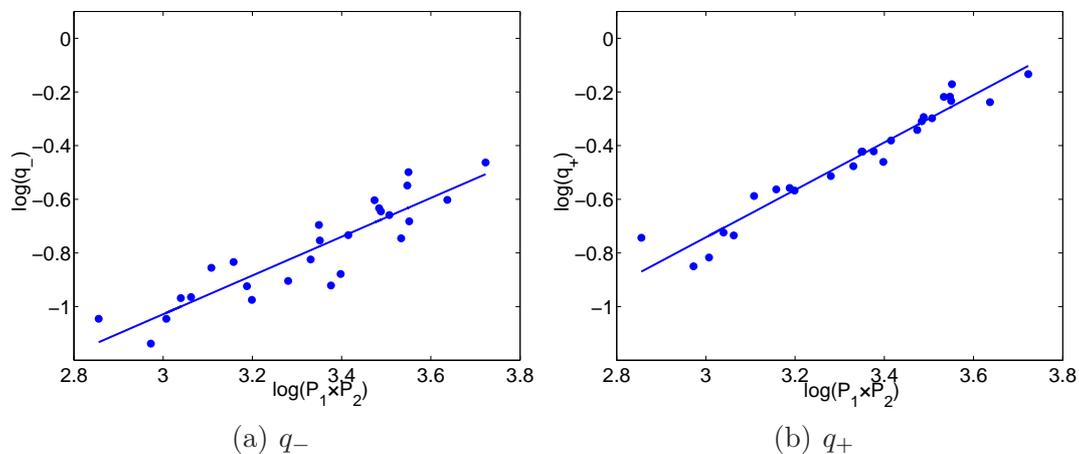


Figure 66 – Représentations de l'évolution des amplitudes (a) q_- et (b) q_+ des composantes (a) $f_- = f_2 - f_1 = 640$ kHz et (b) $f_+ = f_2 + f_1 = 1260$ kHz en fonction de l'évolution des amplitudes P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales dans un échantillon d'aluminium $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$.

Polynômes d'approximation linéaire pour la fréquence différence	
épaisseur=27 mm	$\log(q_-) = 0,57 \log(P_1 P_2) - 2,48$
épaisseur=75 mm	$\log(q_-) = 0,54 \log(P_1 P_2) - 2,38$
épaisseur=125 mm	$\log(q_-) = 0,65 \log(P_1 P_2) - 3,00$
Polynômes d'approximation linéaire pour la fréquence somme	
épaisseur=27 mm	$\log(q_+) = 0,82 \log(P_1 P_2) - 3,05$
épaisseur=75 mm	$\log(q_+) = 0,79 \log(P_1 P_2) - 2,98$
épaisseur=125 mm	$\log(q_+) = 0,94 \log(P_1 P_2) - 3,59$

Tab 12 – *Polynômes d'approximation linéaire pour la fréquence différence et la fréquence somme pour $f_1 = 490$ kHz et $f_2 = 860$ kHz pour trois épaisseurs différentes de blocs d'aluminium (27 mm, 75 mm et 125 mm).*

On remarque d'après le tableau 12 que plus l'épaisseur de l'échantillon est importante, plus le coefficient directeur de la droite d'approximation est proche de 1. En prenant en considération l'hypothèse que l'interaction paramétrique entre les deux ondes a lieu sur la tache de rétrofocalisation, comme celle-ci est petite dans les échantillons de faible épaisseur (plus de sources virtuelles), les composantes d'intermodulation sont faibles. Tout au long de cette étude le coefficient directeur n'a jamais atteint la valeur attendue proche de l'unité. La théorie développée par Westervelt [63] sur l'interaction paramétrique ne prend en compte que le cas de deux ondes colinéaires. Dans notre cas, les ondes générées sont rétrofocalisées en un point donc l'hypothèse de colinéarité n'est pas vérifiée. Pour mesurer la largeur de la tache focale des composantes d'intermodulation, une procédure de rétrofocalisation a été réalisée sur un point de l'échantillon. Une ligne de mesure a ensuite été réalisée autour de ce point sans changer les signaux renvoyés par les deux transducteurs. Les niveaux des composantes aux fréquences f_- et f_+ sont présentés sur la figure 67. Une augmentation du niveau autour du point de focalisation apparaît ainsi qu'une tache focale moins large pour la composante à la fréquence f_+ , ce qui est dû à la proportionnalité à $\lambda/2$.

Le processus d'interaction reste tout de même difficile à comprendre au niveau de la tache de rétrofocalisation. Il est impossible de dire si la tache de rétrofocalisation agit comme une somme de sources ponctuelles sur une demi-sphère ou bien si les ondes interagissent directement en un point. Malgré tout, on remarque bien une signature non linéaire avec les ondes temporellement retournées et rétrofocalisées. Il paraît maintenant intéressant de voir l'influence que peut avoir une zone dégradée autour d'une fissure sur cette signature.

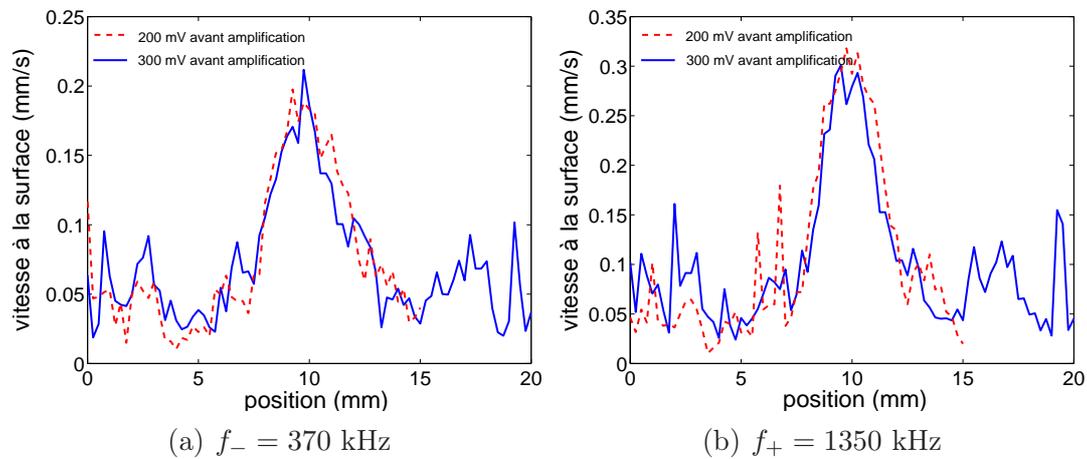


Figure 67 – Mesures réalisées sur une ligne autour du point de focalisation (position $x = 10$ mm) pour deux niveaux de tension 200 mV et 300 mV avant amplification pour les fréquences (a) $f_- = 370$ kHz et (b) $f_+ = 1350$ kHz.

4.1.2 Signature non linéaire à proximité d'une zone fissurée

Les mêmes expériences sur la dépendance du niveau des composantes aux fréquences f_- et f_+ en fonction du niveau des composantes aux fréquences fondamentales ont été réalisées dans les échantillons de type ASCO. Les fréquences utilisées sont $f_1 = 490$ kHz et $f_2 = 860$ kHz, les formes temporelles des signaux reçus sont présentées sur la figure 68.

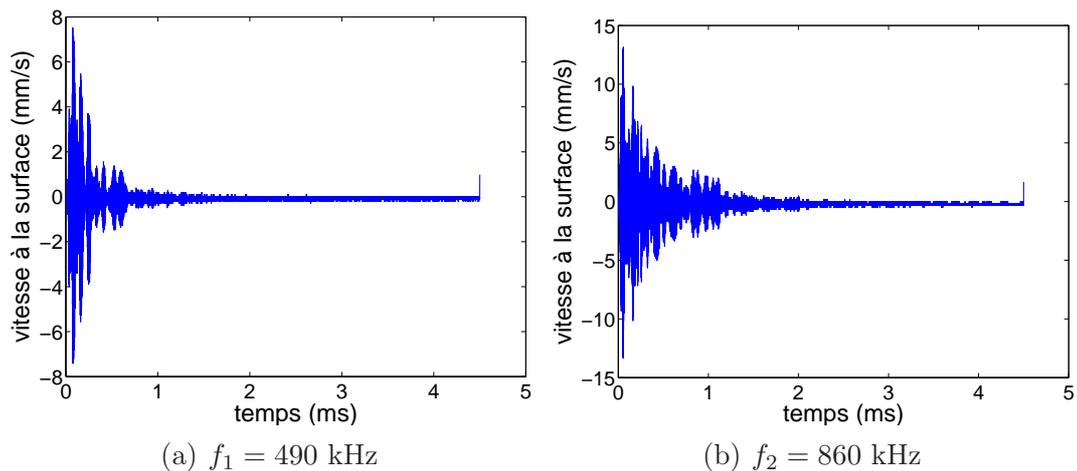


Figure 68 – Représentations temporelles des signaux à la fréquence (a) $f_1 = 490$ kHz et (b) $f_2 = 860$ kHz mesurés par le vibromètre laser en un point à la surface d'un échantillon de type ASCO.

La représentation logarithmique des niveaux des composantes d'interaction en fonction

des niveaux des composantes aux fréquences fondamentales est présentée sur la figure 69.

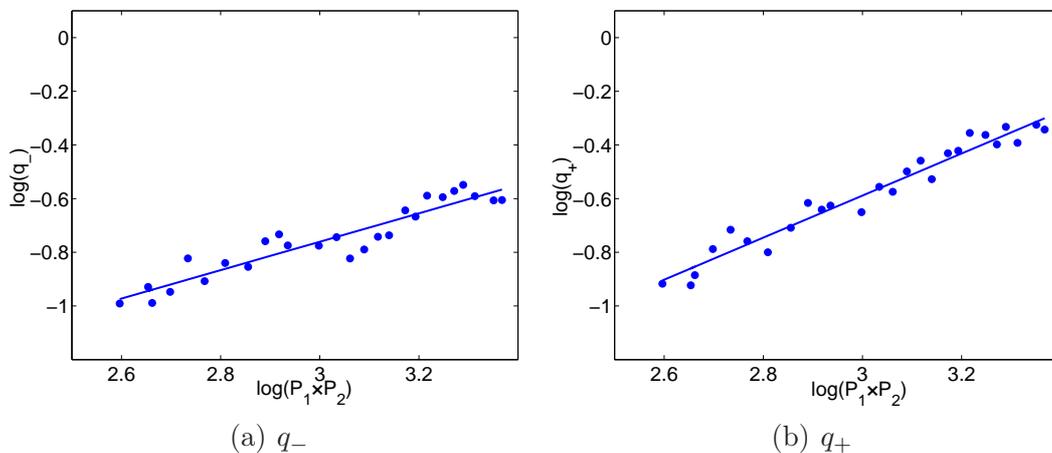


Figure 69 – Représentations de l'évolution des amplitudes (a) q_- et (b) q_+ des composantes (a) $f_- = f_2 - f_1 = 370$ kHz et (b) $f_+ = f_2 + f_1 = 1350$ kHz en fonction de l'évolution des amplitudes P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales dans un échantillon ASCO.

	Polynômes d'approximation linéaire
Fréquence différence	$\log(q_-) = 0,52 \log(P_1 P_2) - 2,34$
Fréquence somme	$\log(q_+) = 0,79 \log(P_1 P_2) - 2,95$

Tab 13 – Polynômes d'approximation pour la fréquence différence et la fréquence somme sur l'échantillon du type ASCO.

Il n'y a pas de variation importante des coefficients directeurs des droites d'approximation. Il est donc possible de noter que la dépendance des niveaux des composantes d'intermodulation en fonction des niveaux des composantes fondamentales suit une loi de puissance. Les niveaux q_- et q_+ peuvent être décrits par :

$$q_- \propto \frac{\beta L (\omega_1 - \omega_2)^2}{2\rho_0^2 c_0^4} (P_1 P_2)^{0,52} \quad \text{et} \quad q_+ \propto \frac{\beta L (\omega_1 + \omega_2)^2}{2\rho_0^2 c_0^4} (P_1 P_2)^{0,79}. \quad (\text{II.4.3})$$

Le niveau des composantes aux fréquences d'interaction paramétrique va maintenant être étudié à proximité d'une zone dégradée. Pour cela, la technique TR-NEWS est effectuée en chaque point d'une ligne de mesure traversant une fissure à la surface (figure 70).

Les niveaux des composantes aux fréquences différence et somme sont relevés dans le domaine fréquentiel (figure 71).

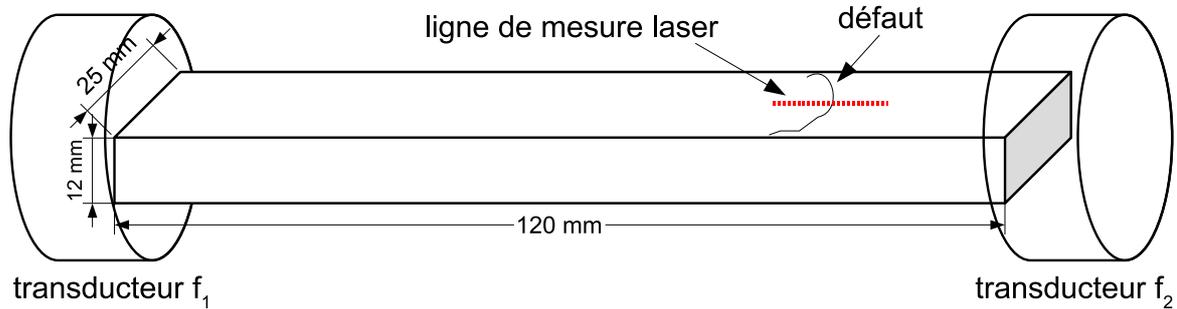


Figure 70 – Schéma de l'expérience TR-NEWS en suivi dynamique avec la position de la ligne de mesure, des transducteurs f_1 et f_2 par rapport à la fissure.

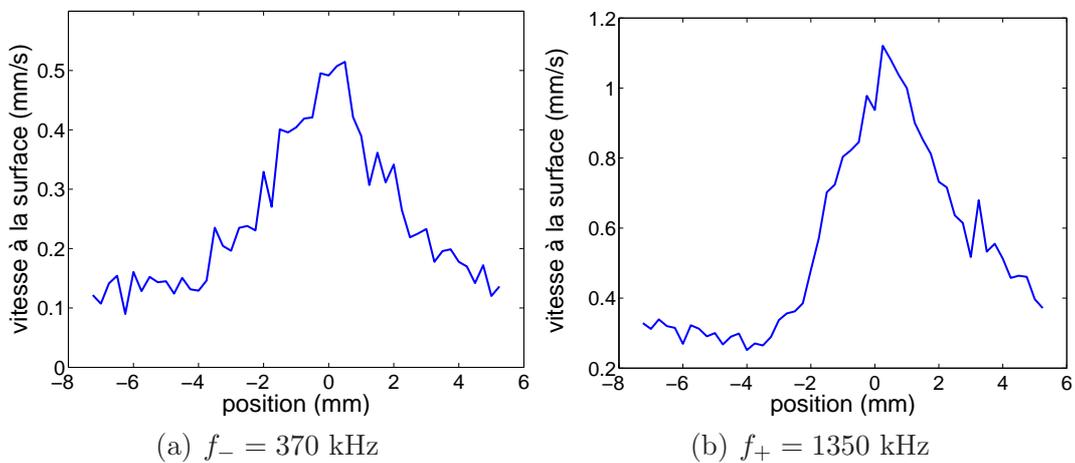


Figure 71 – Représentations de l'évolution des niveaux des composantes aux fréquences (a) différence $f_- = 370$ kHz et (b) somme $f_+ = 1350$ kHz autour d'une fissure (position 0 mm) à la surface de l'échantillon ASCO.

Une augmentation du niveau des composantes en fonction de la position du défaut, que ce soit à la fréquence f_- ou f_+ , est observée. Plus la mesure est réalisée à proximité de la zone fissurée, plus le niveau des composantes est important. Pour avoir une idée plus précise et pour vérifier l'origine de l'augmentation du niveau de nonlinéarité à proximité de la fissure, la variation des composantes aux fréquences fondamentales a été également mesurée (figure 72).

Le niveau des composantes aux fréquences fondamentales, $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour f_1 et $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour f_2 , augmentent également à proximité de la zone fissurée. Cette augmentation peut s'expliquer par le fait que la fissure apparaît comme une interface d'un point de vue des signaux émis dans l'échantillon. Le signal subit donc de multiples réflexions sur la fissure : le signal mesuré à proximité de la fissure possède alors une traîne plus importante que celui éloigné (figure 73).

Lorsque ces signaux vont rétrofocaliser vers le point de mesure, l'énergie au niveau de la zone de rétrofocalisation sera plus importante.

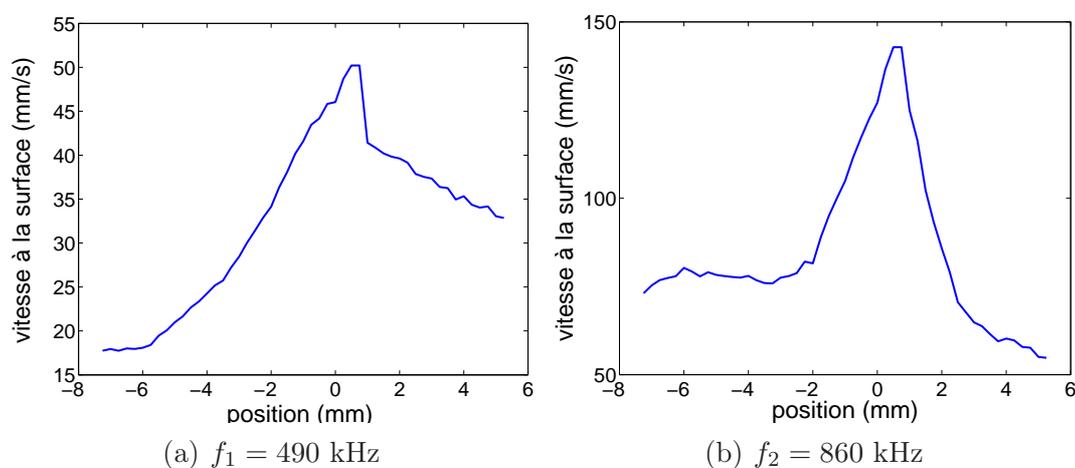


Figure 72 – Représentations de l'évolution des niveaux des composantes aux fréquences fondamentales (a) $f_1 = 490$ kHz et (b) $f_2 = 860$ kHz autour d'une fissure (position 0 mm) à la surface de l'échantillon ASCO.

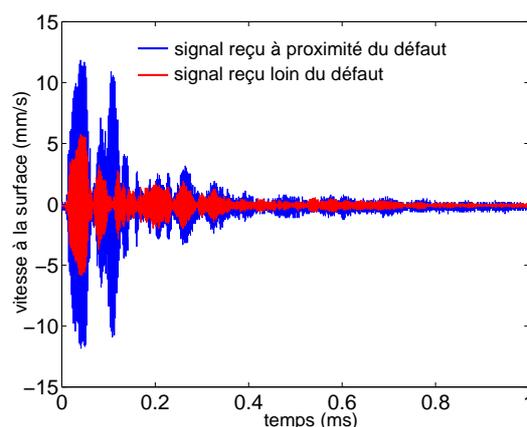


Figure 73 – Comparaison des signaux reçus à proximité d'un défaut (trait bleu) et éloigné du défaut (trait rouge) pour la fréquence $f_1 = 490$ kHz.

Pour justifier cette remarque, les courbes sur la figure 74 nous montrent que, de l'autre côté de la fissure, par rapport au transducteur, la décroissance de l'amplitude est plus rapide, ce qui montre bien que la fissure agit directement sur les signaux reçus.

L'augmentation des niveaux des composantes aux fréquences f_- et f_+ est donc directement liée à l'augmentation des niveaux P_1 et P_2 des composantes aux fréquences fondamentales. Pour vérifier l'existence d'une signature non linéaire différente de la signature classique, c'est-à-dire dépendante du paramètre non linéaire classique intrinsèque au matériau, le niveau des composantes d'intermodulation doit être normalisé par rapport au niveau des composantes fondamentales en prenant en compte le coefficient déterminé dans le tableau 13. Si la variation de cette valeur normalisée en fonction du défaut est constante, aucune signature non linéaire non classique ne pourra être extraite de la mesure.

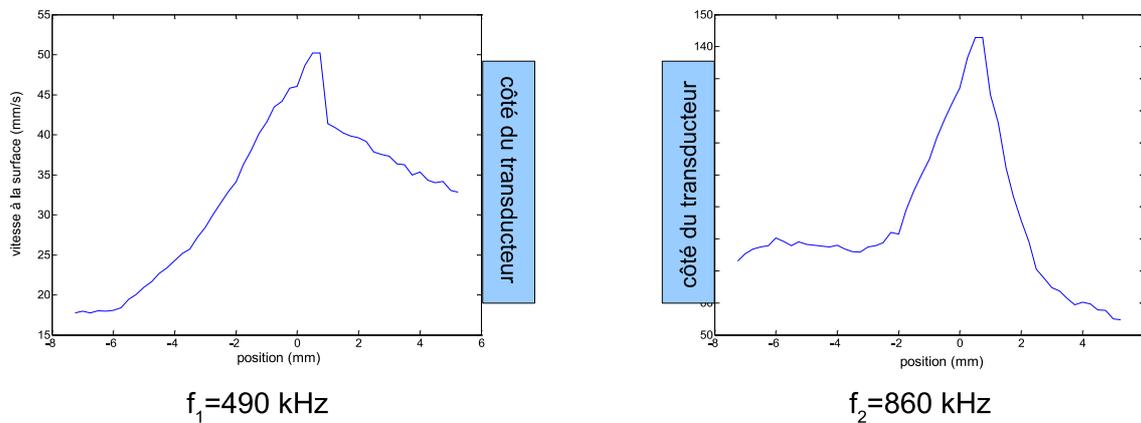


Figure 74 – Représentations de l'évolution des amplitudes des composantes aux fréquences fondamentales $f_1 = 490 \text{ kHz}$ et $f_2 = 860 \text{ kHz}$ montrant les "ombres" de la fissure pour l'onde rétrofocalisée.

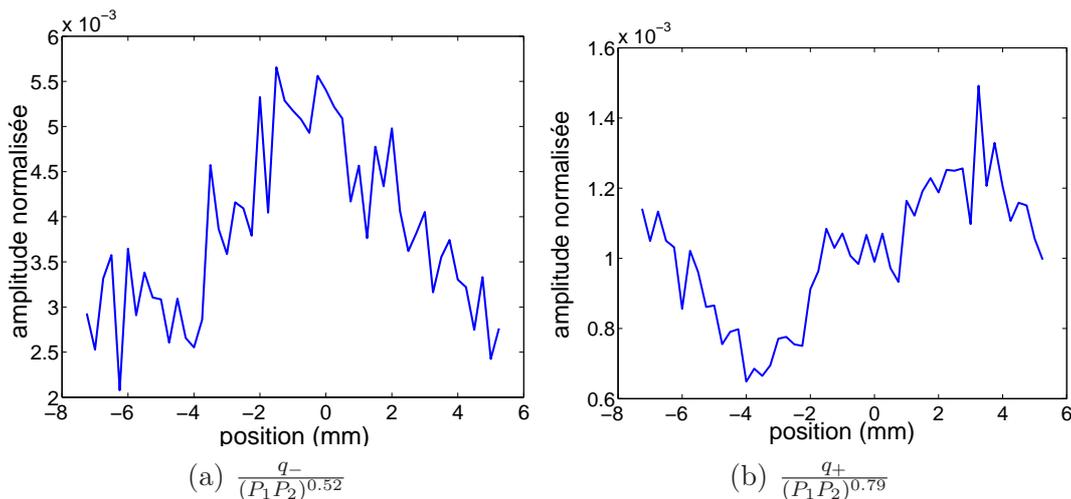


Figure 75 – Représentations de l'évolution des niveaux des composantes aux fréquences (a) différence $f_- = 370 \text{ kHz}$ et (b) somme $f_+ = 1350 \text{ kHz}$ normalisés par les caractéristiques déterminées par les courbes de la figure 69 et le tableau 13, des fréquences fondamentales autour d'une fissure (position 0 mm) à la surface de l'échantillon ASCO.

D'après la figure 75, il n'y a pas de signature non linéaire non classique importante à proximité de la fissure. La raison de cette absence de signature peut venir du fait que la fissure ne subit pas de processus d'ouverture/fermeture. Différentes explications peuvent être données au fait de ne pas ouvrir ni fermer la fissure. La première est l'épaisseur de la fissure à l'endroit de la rétrofocalisation. L'ouverture de la fissure est d'environ $25 \mu\text{m}$ (figure 76) à l'endroit où la rétrofocalisation a lieu, or le déplacement induit par les ondes acoustiques rétrofocalisées est de l'ordre de 10 nm , donnée par la relation $v = 2\pi fd$. La deuxième explication vient du fait que les ondes rétrofocalisées vont induire un déplacement important perpendiculaire à la surface et donc parallèlement à la fissure. Ceci

ne va pas procurer un effort permettant l'ouverture ou la fermeture de la fissure et donc elle ne sera pas "excitée" dans le but de lui faire fournir un comportement non linéaire.

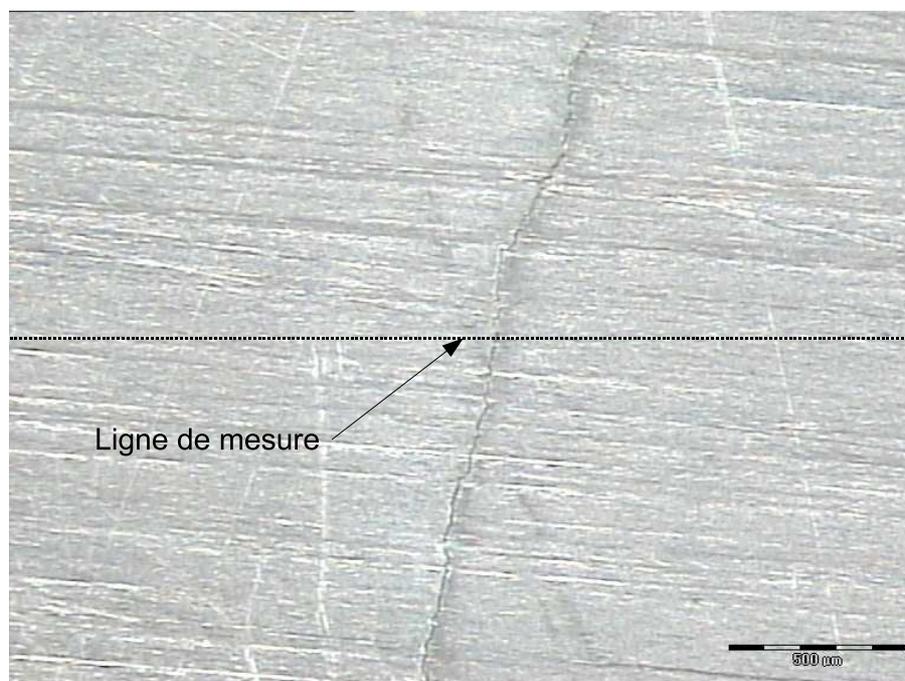


Figure 76 – Photographie de l'échantillon ASCO au niveau de la zone fissurée.

4.2 Retournement temporel sur une zone avec un comportement hystérétique : Résultats de simulations 3D

Dans cette partie, la méthode TR-NEWS a été étudiée à l'aide de l'algorithme pseudo-spectral tri-dimensionnel de propagation (annexe B). Dans un premier temps la réciprocity du retournement temporel a été vérifiée. Il a été nécessaire pour cela de changer la ligne de récepteurs. En effet, les simulations numériques présentées précédemment (partie II.3) étaient réalisées avec une ligne de récepteurs constituée de 25 éléments, or il est maintenant nécessaire de réémettre le signal enregistré par la source (3 points \times 3 points), donc une taille identique a été choisie pour la zone de réception. Ensuite, nous étudierons la signature non linéaire qui peut être mesurée au niveau du point de focalisation.

4.2.1 Réciprocité du retournement temporel

Nous allons tout d'abord vérifier la réciprocité du retournement temporel linéaire dans notre domaine de simulation (figure 77). Un signal est émis par la source $((x_{s1} = 5 \text{ mm}, y_{s1} = 5 \text{ mm}, z_{s1} = 1 \text{ mm}), (x_{s2} = 7 \text{ mm}, y_{s2} = 7 \text{ mm}, z_{s2} = 1 \text{ mm}))$ dans le domaine de simulation. Après propagation, ce signal est enregistré par la zone de réception $((x_{r1} = 58 \text{ mm}, y_{r1} = 6 \text{ mm}, z_{r1} = 1 \text{ mm}), (x_{r2} = 61 \text{ mm}, y_{r2} = 8 \text{ mm}, z_{r2} = 1 \text{ mm}))$.

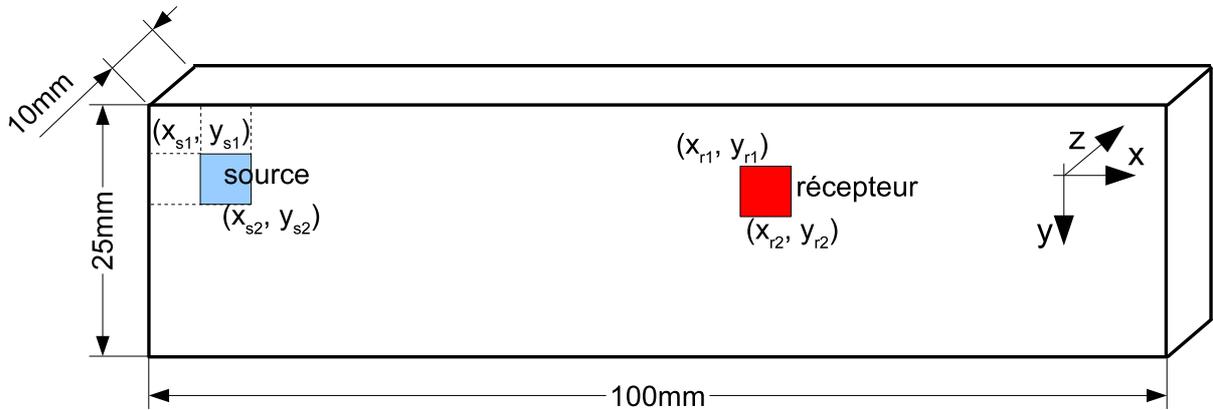


Figure 77 – Zone de simulation pour la vérification de la réciprocité du retournement temporel.

Le signal temporellement retourné est ensuite renvoyé dans le domaine de simulation, dans un premier temps par la zone de réception (figure 78(a)) pour vérifier la rétrofocalisation par retournement temporel classique et dans un deuxième temps par la source (figure 78(b)). Les amplitudes maximales de la composante v_z mesurées pendant la propagation retour dans le domaine de simulation sont enregistrées et les matrices sont représentées sur la figure 78.

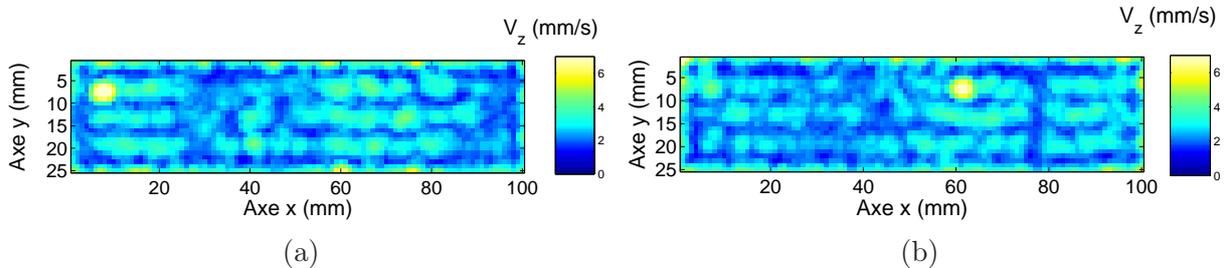


Figure 78 – Vérification de la réciprocité : représentation des matrices des amplitudes maximales enregistrées (a) pendant la rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée envoyée par le récepteur vers la source et (b) pendant la rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée envoyée par la source vers le récepteur.

Lorsque le signal temporellement retourné est renvoyé par les récepteurs, il rétrofocalise, comme on pouvait s'y attendre, à la position de la source (figure 78(a)) : retournement temporel classique. En revanche, si le signal est renvoyé par la source, alors il rétrofocalise à la position des récepteurs (figure 78(b)). Ceci nous montre bien la faisabilité de la réciprocity du retournement temporel : le signal temporellement retourné focalise à la position du récepteur si il est réémis de la position de la source.

Les signaux enregistrés au cours de la propagation retour au niveau de la zone de rétrofocalisation sont présentés sur la figure 79. La rétrofocalisation temporelle apparaît au niveau du temps $t = 0,49$ ms.

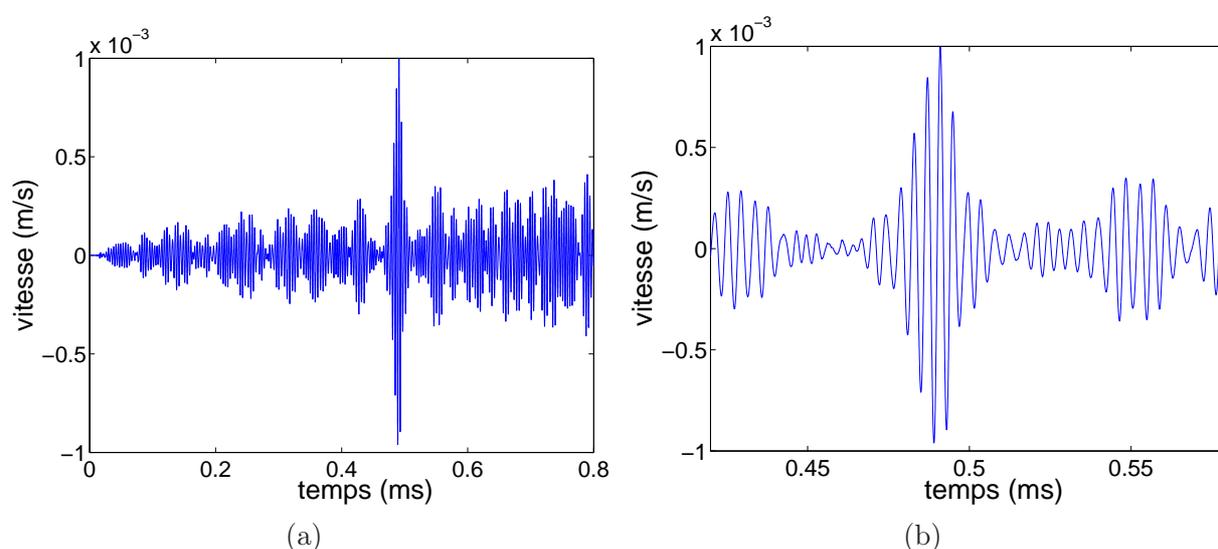


Figure 79 – Représentations temporelles des signaux rétrofocalisés au niveau de la zone de réception en $x = 60$ mm et $y = 9$ mm pour (a) le signal entier et (b) sur la zone de rétrofocalisation temporelle.

Il est maintenant nécessaire de réaliser l'étude du comportement non linéaire que l'on peut mesurer au niveau de la zone de rétrofocalisation et de voir l'applicabilité d'une telle méthode.

4.2.2 Signature non linéaire sur la zone de rétrofocalisation

Dans le but de mesurer la signature non linéaire présente au niveau de la rétrofocalisation, plusieurs simulations ont été réalisées. Neuf zones de réception de $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ont été définies autour d'une zone de défauts de 5 mm de long de coordonnées $x_d = 50$ mm, $y_d = 7$ mm et $z_d = 1 : 5$ mm (figure 80). Cinq zones de réception sont situées suivant l'axe x (horizontal) et notées de 1 à 5 et cinq zones sont situées suivant l'axe y (vertical) et notées de 1' à 5'. Les zones 2 et 2', centrées sur le défaut, sont identiques.

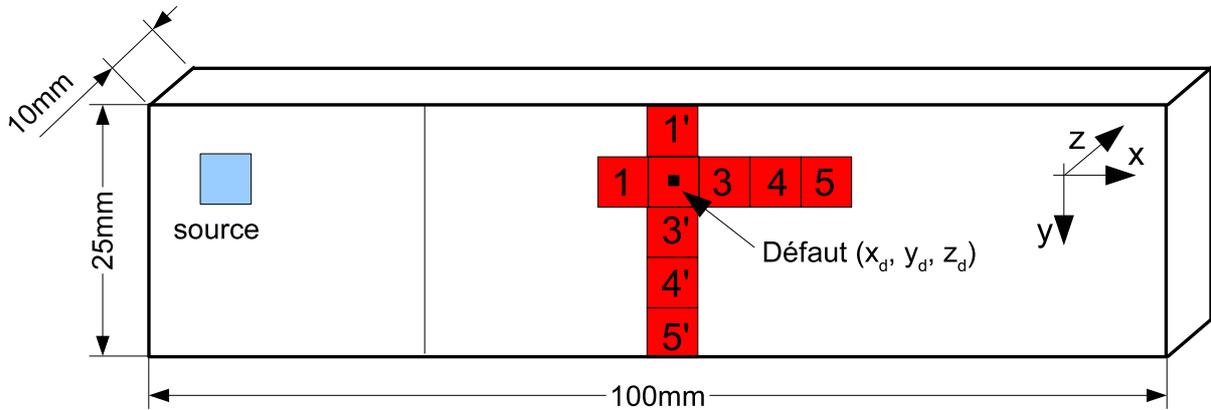


Figure 80 – Représentation de la zone de simulation pour déterminer la signature non linéaire sur la tache de rétrofocalisation. Les carrés rouges représentent les différentes zones de réception testées.

Pour chaque zone de réception, représentée en figure 80, un signal direct est reçu, temporellement retourné et renvoyé à partir de la source. La nonlinéarité est ensuite mesurée au point de la zone de rétrofocalisation (zone de réception). Deux cartographies sont présentées sur la figure 81, l'une pour la rétrofocalisation sur la zone 1 et l'autre pour la rétrofocalisation sur la zone 5'. On remarque bien sur ces deux cartographies les différences entre les deux zones de rétrofocalisation : pour la zone 1, le signal est mieux rétrofocalisé car il est plus proche de la source, c'est pourquoi le niveau du signal reçu et temporellement retourné est plus important.

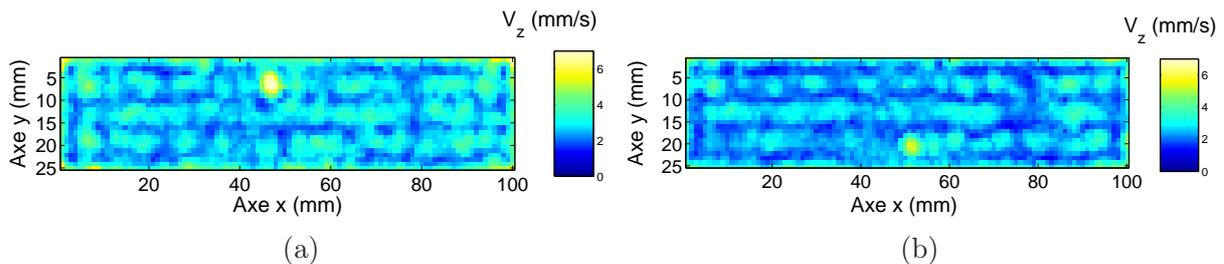


Figure 81 – Représentations des matrices des amplitudes maximales enregistrées pendant la rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée sur (a) la zone de réception 1 et (b) la zone de réception 5'.

L'analyse non linéaire est réalisée au niveau de la zone de rétrofocalisation temporelle du signal (exemple figure 79), c'est-à-dire dans la zone où le signal émis est reconstruit. Pour réaliser le filtrage de nos signaux, la méthode par inversion d'impulsions est utilisée. La somme des deux signaux en opposition de phase rétrofocalisés est représentée sur la figure 82.

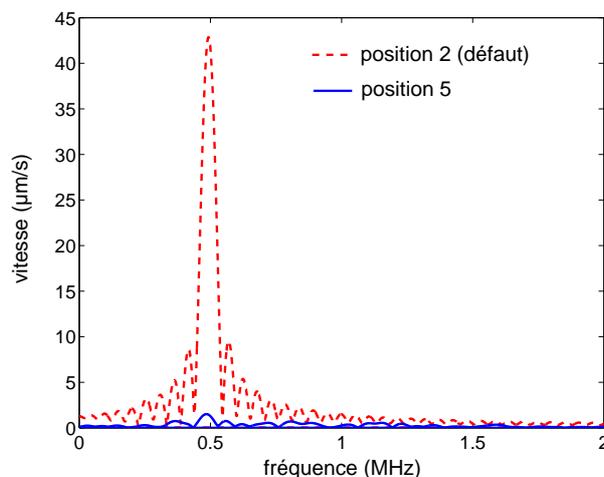


Figure 82 – Représentations spectrales de l’harmonique à $2f = 500$ kHz des signaux rétrofocalisés après filtrage par inversion d’impulsions sur une zone présentant un comportement hystérétique (trait rouge, pointillés) et sur une zone sans comportement hystérétique (trait bleu, plein).

L’amplitude de l’harmonique à $2f = 500$ kHz est relevée pour chaque position de rétrofocalisation, dans le cas vertical et horizontal (figure 83).

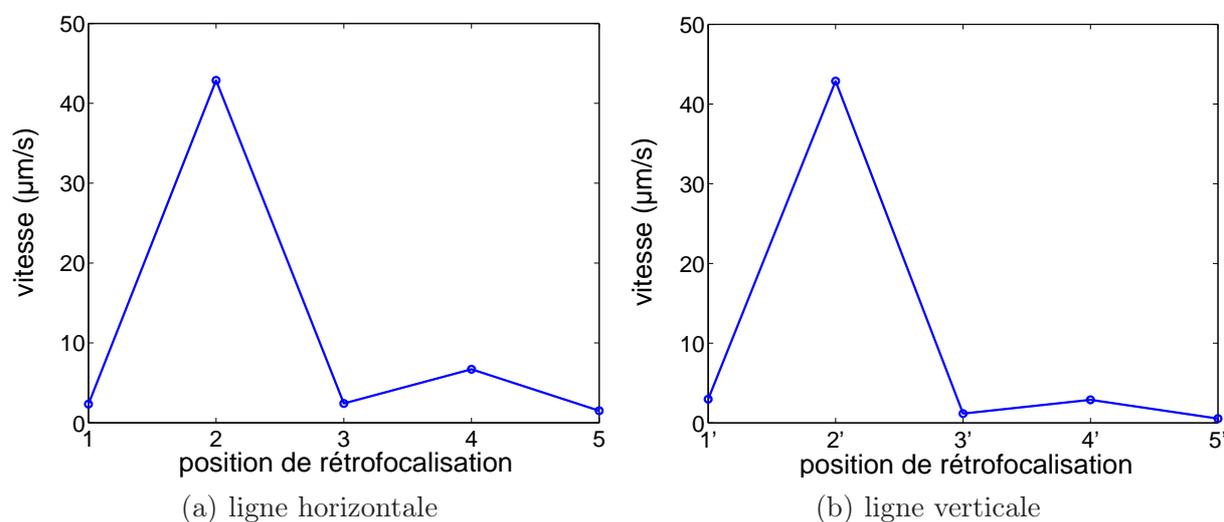


Figure 83 – Amplitude des composantes du second harmonique pour les différentes positions de rétrofocalisation pour (a) la ligne horizontale et (b) la ligne verticale. Le défaut étant situé sur la position 2.

Une augmentation du niveau de ces composantes peut être relevée lorsque la rétrofocalisation est réalisée sur la position du défaut (zone 2). Il est maintenant intéressant de regarder le niveau de ces composantes normalisé par le carré du fondamental reçu (figure

84), comme dans le cas expérimental.

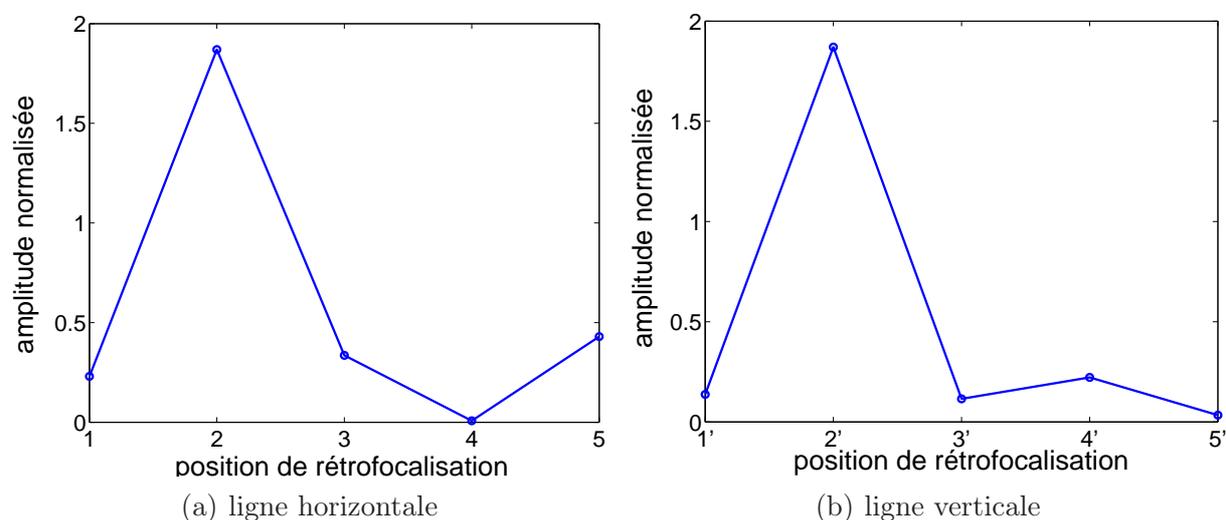


Figure 84 – Amplitude des composantes du second harmonique normalisée par l'amplitude du fondamental pour les différentes positions de rétrofocalisation pour (a) la ligne horizontale et (b) la ligne verticale. Le défaut étant situé sur la position 2.

Malgré une résolution spatiale faible (dans le plan $z = 1$ mm) due aux dimensions des zones de réception $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ comparées à celles du défaut $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ et à des niveaux d'excitation faibles ($p_0 = 50 \text{ kPa}$), on peut remarquer une augmentation du niveau de l'harmonique deux sur la zone 2 (zone du défaut) différente de l'augmentation du fondamental. Donc, contrairement aux résultats expérimentaux, on obtient une signature non linéaire par rapport au fondamental caractéristique d'un comportement non classique. Ces résultats permettent de montrer la faisabilité d'une mesure qualitative des propriétés non linéaires non classiques avec TR-NEWS et l'intérêt qu'il est nécessaire de porter à la recherche du comportement hystérétique de la fissure.

4.3 Conclusions et perspectives sur TR-NEWS

La méthode TR-NEWS combinant le retournement temporel avec un post-traitement non linéaire, développée au sein du laboratoire durant mon travail de Thèse, a été appliquée à un échantillon de taille réelle subissant des efforts en traction durant une semaine dédiée aux manipulations dans le cadre du projet AERONEWS au centre aéronautique VZLU à Prague. En collaboration avec Koen Van Den Abeele et Pierre-Yves Le Bas, le dispositif expérimental a été monté en direct sur la machine de traction. Les résultats, présentés au 9^{ème} Congrès Européen des Essais Non Destructifs (ECNDT) à Berlin [93] ont apporté des conclusions prometteuses quant à la détection de fissure.

La suite du travail de Thèse a porté sur l'approfondissement de l'étude du comportement non linéaire que l'on détecte au niveau de la tache focale d'un signal temporellement retourné. La question pertinente qui est apparue concernant ces résultats était de savoir comment les normaliser pour être sûr que la signature détectée à proximité d'une fissure relève bien d'une nonlinéarité non classique.

Nous nous sommes tout d'abord penchés sur la signature non linéaire présente au niveau de la tache de focalisation [98, 146]. L'interaction paramétrique a été utilisée comme analyse non linéaire pour éviter au maximum l'influence des appareils électroniques. Deux fréquences ont été émises et mesurées indépendamment dans l'échantillon, retournées temporellement, inversées (dans le but de réaliser un filtrage par inversion d'impulsions) et renvoyées simultanément dans l'échantillon. On a pu alors mesurer les composantes d'interaction paramétrique aux fréquences somme $f_+ = f_1 + f_2$ et différence $f_- = f_2 - f_1$. Pour répondre à l'interrogation concernant la signature non linéaire présente lorsque la distance d'interaction entre les ondes est faible, une étude comparative en fonction des fréquences fondamentales, de leur amplitude et de l'épaisseur de l'échantillon a été réalisée. Comme on pouvait s'y attendre, les deux ondes qui interagissent ne sont pas colinéaires, elles ne répondent donc pas à la théorie sur l'interaction de deux ondes développée par Westervelt [63]. Cependant, une signature non linéaire peut être mesurée au niveau de la tache focale. Cette mesure peut donc maintenant être appliquée à proximité d'une zone fissurée pour relever la présence ou non d'un comportement non classique.

Conformément aux résultats présentés par l'équipe de Sutin [139] et ceux obtenus lors de la semaine dédiée aux manipulations à Prague [93], une signature est apparue au niveau de la fissure dans nos échantillons testés (partie II.4). Il a été nécessaire de s'intéresser à la variation du niveau des fréquences fondamentales pour noter que cette signature est directement liée à cette variation. En effet, la fissure intervenant dans la propagation du signal direct comme une interface, la traîne du signal mesuré à proximité de la fissure est importante ce qui entraîne un fort niveau d'énergie qui rétrofocalise en un point. Le niveau des composantes d'interaction paramétrique étant directement lié au niveau des fréquences fondamentales (partie II.4), une augmentation de ce dernier entraîne évidemment une augmentation du premier. Dans nos travaux, aucune signature de nonlinéarité non classique liée à une fissure différente de la non linéaire globale du matériaux n'a pu être extraite.

La question qui restait en suspens était tout de même de savoir si ce problème était lié à la méthode de détection, TR-NEWS, ou au comportement de la fissure. Des simulations numériques de TR-NEWS ont été réalisées à l'aide de l'algorithme pseudo-spectral tri-dimensionnel. Les résultats ont montré une bonne détection d'un comportement non linéaire non classique défini sur un point et donc la faisabilité de la méthode TR-NEWS. Il est donc nécessaire de s'intéresser au comportement de la fissure dans un cas expérimental. Une fissure n'a pas nécessairement un comportement non linéaire non classique lorsqu'une contrainte lui est appliquée. Ce comportement dépend d'un certain nombre de paramètres à vérifier avant toutes mises en œuvre expérimentale : de l'orientation de la contrainte appliquée à la fissure à la largeur d'ouverture, jusqu'à la possibilité d'apparition d'un comportement de friction [119].
