

---

# Méthode de localisation d'une zone dégradée

Le but de ce chapitre est de présenter une méthode permettant de localiser dans un échantillon une zone fissurée. Dans un premier temps, l'étude se limitera, d'un point de vue expérimental, à des fissures supposées localisées à la surface de l'échantillon. L'idée que nous avons développée au cours de cette deuxième partie de travail de thèse a été de combiner le retournement temporel acoustique, développé par l'équipe de Matthias Fink au LOA, avec le traitement non linéaire basé sur l'interaction paramétrique des ondes.

## 2.1 Focalisation des ondes ultrasonores par retournement temporel acoustique

### 2.1.1 Principe du retournement temporel acoustique

Le principe de focalisation des ondes par retournement temporel repose sur l'invariance par renversement du temps de l'équation de propagation des ondes acoustiques dans un milieu non dissipatif [123, 124] :

$$\vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\vec{\nabla} p(\vec{u}, t)}{\rho} \right) - \frac{1}{\rho c_0^2} \frac{\partial^2 p(\vec{u}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (\text{II.2.1})$$

avec  $p(\vec{u}, t)$  la pression acoustique de l'onde ultrasonore,  $\rho$  la masse volumique du milieu,  $c_0$  la célérité de l'onde ultrasonore dans le milieu et  $t$  le temps. On remarque que l'on a une dépendance temporelle au second ordre ( $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ ). Cette propriété de dépendance est à l'origine du principe de retournement temporel. Cette invariance signifie que lorsqu'un champ de pression acoustique  $p(\vec{u}, t)$  est solution de l'équation,  $p(\vec{u}, -t)$  est également

---

solution. Cette onde a une forme similaire à la première mais se propage en direction inverse, comme si le temps s'écoulait à l'envers.

L'intérêt de ce principe peut être développé comme suit : une source ponctuelle génère une onde sphérique et divergente  $p(\vec{u}, t)$ . L'onde temporellement retournée  $p(\vec{u}, -t)$  correspond alors exactement à l'onde qui parcourrait à l'envers le chemin suivi par l'onde divergente. Cette onde a donc pour propriété fondamentale d'être convergente vers le point d'émission initial et ce quelque soit la complexité du milieu de propagation considéré tant qu'il peut être modélisé par l'équation II.2.1. En particulier, l'ajout d'un terme dissipatif ( $\frac{\partial}{\partial t}$ ) briserait la symétrie de cette invariance par rapport au temps.

La technique de retournement a donc pour but d'émettre une onde retournée temporellement  $p(\vec{u}, -t)$  dans un milieu à partir de la connaissance de l'onde émise  $p(\vec{u}, t)$ . Ceci est moins simple qu'il n'y paraît et plusieurs problèmes sont directement liés à ce principe. Le premier problème vient de la causalité du signal retourné. En effet, pour que ce signal ait un sens physique, il est nécessaire de considérer des signaux finis : il existe un temps  $t_0$  tel que  $p(\vec{u}, t) = 0$  pour  $t > t_0$ . De cette façon, le champ  $p(\vec{u}, t_0 - t)$  est causal et il a un sens physique.

Le deuxième problème porte sur la réception et la génération d'une onde sphérique dans un milieu. Il est difficile de recevoir et émettre une onde dans le volume complet, puisque cela nécessiterait la présence d'un très grand nombre de transducteurs sur un angle solide de  $4\pi$ , même avec un échantillonnage spatial de  $\lambda/2$ . Des techniques particulières ont alors été développées au sein du LOA, notamment la cavité à retournement temporel [125, 126] et le miroir à retournement temporel [86, 127].

- Le concept de cavité à retournement temporel [125], basé sur le principe de Huygens, consiste à tapisser une surface autour du volume d'étude avec des transducteurs fonctionnant en émission-réception.

La réception d'une onde sphérique s'étant propagée dans le volume d'étude est réalisée sur la surface avec chaque transducteur. L'émission du signal temporellement retourné est faite simultanément avec chaque transducteur. Du fait du principe d'Huygens, l'onde alors créée va focaliser à la position du point source initial. Toutefois, même après réduction du nombre de transducteurs à utiliser, le dispositif expérimental reste difficilement réalisable en pratique : le nombre de transducteurs nécessaire peut être très grand et, dans certain cas, il n'est pas possible d'entourer entièrement le volume d'étude.

- C'est pour cette raison que le développement des miroirs à retournement temporel (MRT) a été effectué [86, 125, 126]. Les miroirs à retournement temporel utilisent des barrettes de transducteurs ultrasonores classiques. Le protocole de focalisation par retournement temporel reste le même que celui de la cavité à retournement temporel. Si la diminution de l'ouverture angulaire permet la réalisation pratique de tels miroirs, elle en est également la principale limitation. Tandis que la cavité perçoit l'onde acoustique divergente pendant la première phase, le miroir enregistre l'onde sur l'ouverture finie du réseau de transducteurs, ce qui induit inévitablement une perte d'information. Toutefois, cette perte d'information spatiale est compensée par une augmentation de l'information temporelle : avec les miroirs à retournement temporel, le signal reçu va être l'association de toutes les réflexions dans l'échantillon. Ces réflexions constituent alors des sources virtuelles du signal et remplacent

---

la cavité. Lors de la phase de réémission, seule une partie de l'onde peut être temporellement retournée et la qualité de focalisation se trouve diminuée.

L'utilisation du principe du retournement temporel et plus particulièrement des miroirs à retournement temporel s'est développée, depuis quelques années, dans plusieurs domaines d'application. Dans le domaine médical, les calculs rénaux (lithotriteur) sont cassés par des ultrasons de forte puissance focalisés à l'aide d'un miroir à retournement temporel [128]. Par ailleurs, le retournement temporel permet de traiter les tumeurs du cerveau par hyperthermie à travers le crâne humain de manière non invasive [129, 130]. Dans le domaine industriel, une des applications est le développement d'un outil de contrôle non destructif de billettes de Titane [131–133].

Il est également intéressant d'observer que le théorème de réciprocité [113, 134] est applicable au principe du retournement temporel [123]. Il peut être noté que lorsque la propagation non linéaire d'une onde crée un saut d'entropie alors l'invariance par rapport au temps et la réciprocité du retournement temporel sont brisées [135].

Le théorème de réciprocité indique que les positions du point source et de l'observateur peuvent être inversées sans altérer la pression acoustique observée. Il est valide dans un milieu homogène autant que dans un milieu inhomogène absorbant. Cette réciprocité va nous permettre de réaliser le retournement temporel en focalisant sur le point de mesure. Dans le cas expérimental présenté ci-après, l'émission est réalisée à l'aide d'un transducteur piezo-électrique et les mesures de vitesses à la surface de l'échantillon avec un vibromètre laser. La réciprocité va alors nous permettre de réfocaliser l'onde acoustique temporellement retournée au point de mesure en utilisant le même transducteur d'émission. Ceci est directement lié à l'utilisation d'un échantillon réverbérant permettant de créer un filtre adapté spatialement et temporellement.

### 2.1.2 Limites du retournement temporel

Dans cette partie, il s'agit d'exposer succinctement les limites liées à la technique de retournement temporel relevées dans les différents travaux publiés [136], que ce soit dans les expériences de multidiffusion, d'acoustique sous-marine ou d'hyperthermie.

Tout d'abord, afin de réaliser une expérience de retournement temporel, le milieu de propagation doit être stationnaire, c'est-à-dire que la phase de réémission doit se dérouler dans les mêmes conditions que la phase d'enregistrement. Afin d'obtenir une focalisation optimale par retournement temporel, deux propriétés doivent être de plus vérifiées :

1. Il doit y avoir réciprocité spatiale entre les transducteurs, c'est-à-dire que le champ de pression créé par le transducteur 1 sur le transducteur 2 doit être le même que celui créé par le transducteur 2 sur le transducteur 1. Cette propriété n'est pas vérifiée dans les milieux en mouvement mais elle est vérifiée dans le cas de notre étude.
2. L'énergie acoustique doit être conservée.

Au cours des travaux qui seront présentés, les expériences ont été réalisées dans des milieux dissipatifs, mais la robustesse du retournement temporel sera étudiée et l'observation

---

montrera malgré tout une augmentation du niveau de contrainte et une reconstruction cohérente du train d'onde.

## 2.2 Combinaison du retournement temporel avec l'acoustique non linéaire

Les différentes recherches réalisées sur les techniques de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires ont permis de souligner deux principes importants :

- les signatures non linéaires les plus importantes observées à l'échelle macroscopique (échantillon) proviennent de zones fissurées où les relations micro-mécaniques de contrainte-déformation sont non linéaires ;
- les signatures non linéaires les plus importantes sont produites à l'endroit où le niveau de contrainte dans l'échantillon est le plus important.

Ces deux principes peuvent être employés comme point de départ de nouvelles techniques de visualisation de micro-fissures par mesures de propriétés non linéaires. Le problème important qui apparaît vient du fait qu'il est nécessaire de réaliser des mesures "focalisées". C'est pourquoi il est paru intéressant d'utiliser le retournement temporel (**TR** pour Time Reversal) comme outil de focalisation et de le combiner avec une technique de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires (**NEWS** pour Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy).

### 2.2.1 Principe de rétrofocalisation sur une source de nonlinéarité

Le principe de retournement temporel permet donc de focaliser des ondes acoustiques temporellement retournées sur les sources ou les inhomogénéités à l'intérieur du volume d'étude qui peuvent être assimilées à des sources virtuelles secondaires. Un des avantages du retournement temporel est qu'il permet de localiser des inhomogénéités fortes (des vides ou des interfaces ayant un fort contraste d'impédance avec le milieu de propagation) qui sont à l'intérieur du volume d'étude. Pour des inhomogénéités plus faibles telles que des zones de micro-fissures, des liaisons affaiblies entre grains ou des défauts minuscules par rapport à la longueur d'onde, la sensibilité du retournement temporel s'avère être faible. La raison principale réside dans le fait que le principe de retournement temporel utilisé dans ces applications est basé sur l'inversion du temps et est fondé sur les changements de propagation des ondes dues à des inhomogénéités linéaires telles que la réflexion, la réfraction, la diffusion ou la conversion de mode, ou dues à une nonlinéarité classique dans un matériau homogène [135]. Ainsi, le procédé classique de retournement temporel doit être adapté de telle manière qu'il soit réalisé "linéairement" sur les composantes non linéaires (harmoniques) du signal propagé dans le matériau. Il est ainsi nécessaire de sélectionner, en filtrant, uniquement la signature non linéaire (les harmoniques ou les

---

---

produits d'intermodulation) contenue dans les signaux reçus et de renvoyer cette partie retournée dans le milieu. De ce fait, le signal non linéaire temporellement retourné focalisera notamment sur la zone où des harmoniques ont été créées, c'est-à-dire la zone où se trouvent les micro-fissures, alors que les inhomogénéités linéaires (source) n'apparaîtront plus.

Le concept de fusionner les avantages des techniques de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires NEWS et le retournement temporel TR, comme outil de focalisation, possède un grand potentiel dans la localisation de sources ultrasonores non linéaires et donc un avenir important dans le domaine du contrôle non destructif. Il est le sujet de nombreuses études depuis quatre ans, non seulement d'un point de vue expérimental mais également d'un point de vue numérique [43, 93–98, 137–140].

## 2.2.2 Pré-traitement ou post-traitement non linéaire appliqué au retournement temporel

Le retournement temporel et la Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires peuvent être combinés de deux manières différentes [5, 93, 94] (figure 33) :

- **la Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires peut être utilisée comme pré-traitement du retournement temporel** (partie de gauche sur la figure 33). Dans cette combinaison, le traitement non linéaire, qui équivaut à un filtrage du signal reçu dans le but d'éliminer les composantes linéaires, est réalisé en premier. Le signal filtré alors obtenu est temporellement retourné et renvoyé dans l'échantillon. D'après le principe du retournement temporel, le signal renvoyé focalise sur la source de nonlinéarité. Cette combinaison a été appelée NEWS-TR puisque l'outil retournement temporel révèle la source de nonlinéarité.
  - **la Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires peut être utilisée comme post-traitement du retournement temporel** (partie de droite sur la figure 33). Dans ce concept, le principe de réciprocité, présenté dans la partie II.2.1.1, est utilisé. Une augmentation localisée de la contrainte est obtenue au niveau du point de rétrofocalisation. Il va donc ensuite être judicieux de réaliser une analyse non linéaire sur ce même point de mesure. Cette combinaison porte le nom de TR-NEWS puisque l'analyse non linéaire NEWS s'opère après l'utilisation de l'outil de retournement temporel.
-

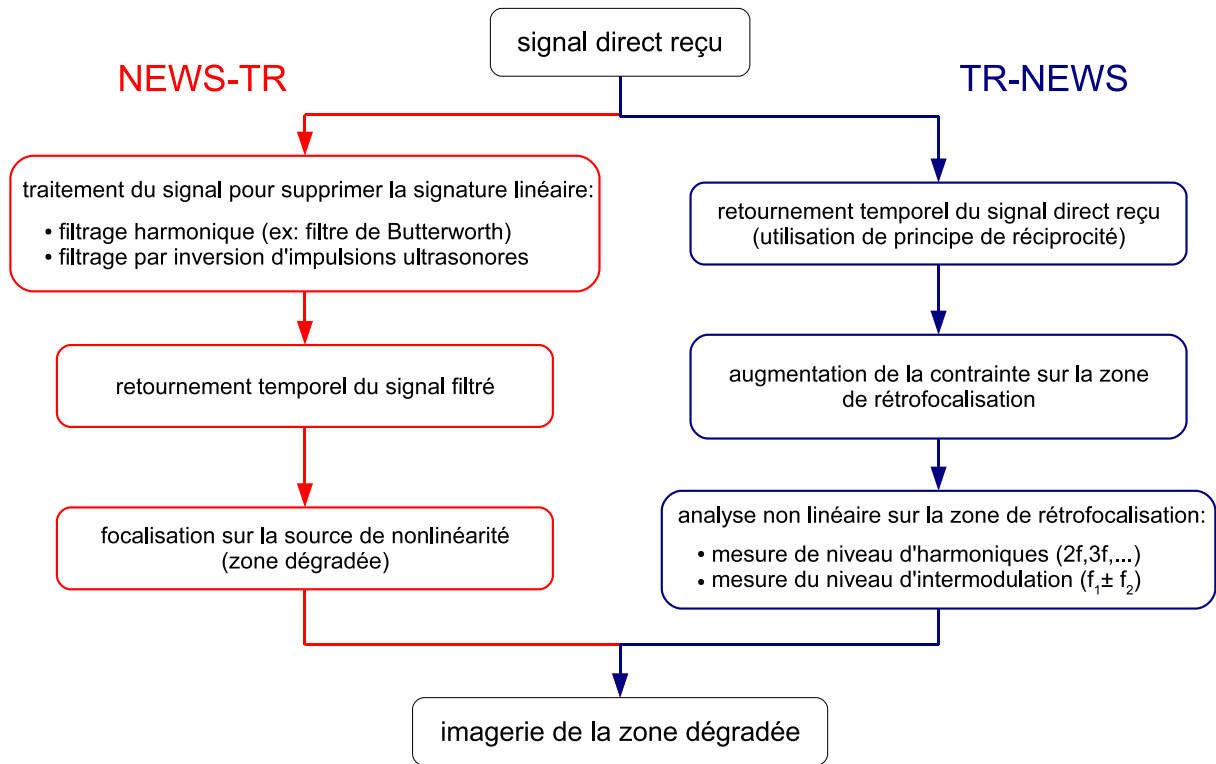


Figure 33 – Représentation des deux combinaisons entre les techniques de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires et le retournement temporel : pré-traitement non linéaire (NEWS-TR) et post-traitement non linéaire (TR-NEWS).

## 2.3 Dispositif expérimental associé à NEWS-TR et TR-NEWS

Une méthode d'interaction paramétrique entre deux ondes de fréquence proche (partie I) a été choisie comme technique de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires pour limiter les nonlinéarités dues aux appareils électriques ou aux transducteurs d'émission [33, 62]. Pour cela, deux transducteurs sont placés en contact sur l'échantillon à l'aide de salicylate de phényle (salol). Le premier transducteur est excité par un train d'ondes de fréquence  $f_1$  grâce à un générateur Agilent 33250A piloté par un ordinateur *via* une liaison GPIB et délivrant un signal passant à travers un amplificateur. Un deuxième transducteur est excité par un train d'ondes de fréquence  $f_2$  émis par un deuxième générateur Agilent 33250A, également piloté par ordinateur, à travers un amplificateur. Les générateurs d'émission vont également permettre la réémission du signal retourné à travers chaque transducteur. Dans le but de garantir l'exacte synchronisation entre les ondes retournées temporellement, les deux générateurs sont pilotés en déclenchement par un troisième générateur externe Agilent 33220A. La vitesse à la surface de l'échantillon est mesurée à l'aide d'un vibromètre laser Polytec OFV-505. Le signal est enregistré avec un oscilloscope LeCroy WaveRunner 6050A (8 bits, 5 GHz de fréquence d'échantillonnage maximale). Ce dispositif expérimental est utilisé pour les deux méthodes développées,

NEWS-TR et TR-NEWS. Les caractéristiques du matériel utilisé ainsi que les fréquences d'utilisation des transducteurs seront présentées pour chaque expérience dans un tableau récapitulatif.

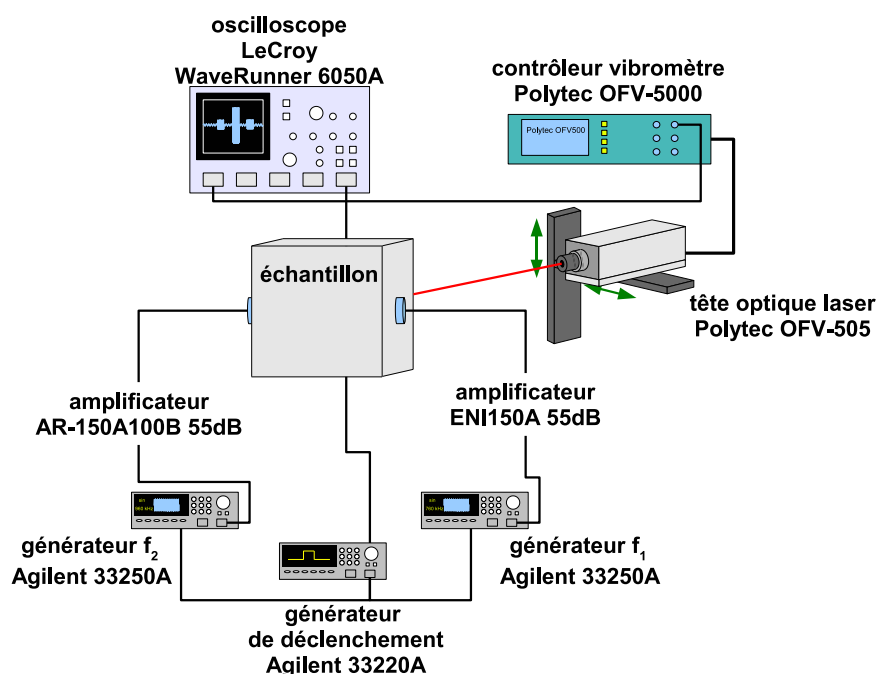


Figure 34 – Dispositif expérimental des expériences TR-NEWS et NEWS-TR par interaction paramétrique avec deux ondes acoustiques.

- La conception d'un tel dispositif expérimental a mis à jour plusieurs difficultés :
- le nombre limité de transducteurs : le nombre d'amplificateurs et de générateurs disponibles au laboratoire a limité le nombre de transducteurs utilisables pour réaliser l'émission et la réémission des ondes acoustiques dans l'échantillon ;
  - le nombre de points temporels du signal acquis a été limité par l'utilisation de générateurs (Agilent 33250A) de fonctions arbitraires de 64000 points maximum. Il a donc fallu faire un compromis entre échantillonnage temporel et nombre de points du signal à retourner ;
  - la fréquence des signaux émis dans l'échantillon a été limitée par l'utilisation d'un vibromètre laser Polytec dont le module de démodulation en vitesse possède une fréquence de coupure de 1,5 MHz.





## Chapitre 3

# Retournement temporel avec un pré-traitement non linéaire : NEWS-TR

Dans cette combinaison, comme nous l'avons décrit précédemment, le traitement non linéaire des signaux est réalisé avant le retournement temporel. Le signal reçu après propagation dans un échantillon fissuré est filtré dans le but de ne garder que la signature non linéaire (harmoniques ou composantes d'intermodulation), temporellement retournée et renvoyée dans l'échantillon. D'après le principe du retournement temporel, le signal renvoyé focalise sur la source de nonlinéarité c'est-à-dire le défaut dans notre cas.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux deux techniques différentes utilisées pour extraire les composantes non linéaires du signal reçu : le filtrage harmonique et l'inversion d'impulsions ultrasonores. Ensuite, une étude numérique sur la comparaison de ces deux méthodes de filtrage réalisée à l'aide de l'algorithme pseudo-spectral bi-dimensionnel sera présentée [95]. L'application de cette technique de détection de défaut à un échantillon fissuré sera présentée par la suite d'un point de vue numérique à l'aide de l'algorithme pseudo-spectral tri-dimensionnel [97], puis d'un point de vue expérimental.

### 3.1 Traitements non linéaires des signaux

Dans cette partie, les différentes méthodes d'extraction des composantes non linéaires vont être présentées : filtrage harmonique de type Butterworth et inversion d'impulsions ultrasonores. Une étude numérique permettra de quantifier les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

---

### 3.1.1 Les méthodes de filtrage numérique

Dans le but d'extraire les composantes non linéaires, que ce soient les composantes harmoniques ou d'intermodulation, un filtrage numérique est utilisé sur les données issues du code pour la propagation du signal dans l'échantillon. L'étude de deux types de filtrage, filtrage harmonique de type Butterworth et filtrage par inversion d'impulsions, a été réalisée à l'aide du code de propagation bi-dimensionnel (chapitre II.1.4) dans le but de montrer les avantages et les inconvénients de ces filtres pour une application expérimentale donnée [95, 96].

#### 3.1.1.1 Filtrage harmonique

Le filtrage numérique utilisé est un filtre de Butterworth du quatrième ordre. Ce filtre, linéaire, est conçu pour posséder un gain constant dans sa bande passante. La décroissance de ce filtre dans la bande de coupure est de -20 dB/décade pour un filtre de premier ordre et de -80 dB/décade pour un filtre du quatrième ordre (figure 35). La fonction de transfert normalisée d'un filtre de Butterworth peut être écrite sous la forme suivante :

$$H_n(s) = \frac{1}{B_n(s)}, \quad (\text{II.3.1})$$

où  $B_n(s)$  est un polynôme de degré  $n$  qui, à l'ordre quatre, est égal à :

$$B_n(s) = (s^2 + 0,7654s + 1) (s^2 + 1,8478s + 1). \quad (\text{II.3.2})$$

Le filtre de Butterworth possède l'avantage d'être le seul filtre ayant la même forme pour tous les ordres (mise à part une pente différente dans la bande de coupure). Par comparaison avec les filtres de Tchebychev ou elliptiques, les filtres de Butterworth ont une pente dans la bande de coupure plus faible, ce qui implique d'utiliser un ordre plus important. En revanche, le gain est nettement plus constant dans la bande passante. Notre choix s'est porté sur ce type de filtre, passe haut ( $f_c = 300$  kHz) car son utilisation sur des signaux temporels enregistrés expérimentalement est courante.

---

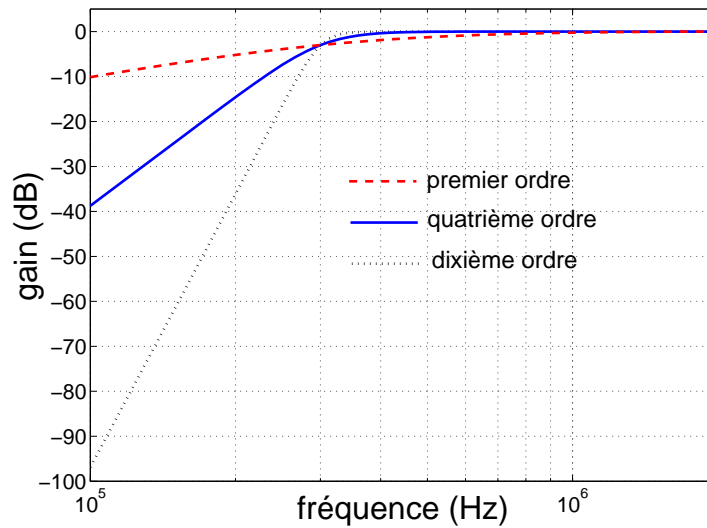


Figure 35 – Gain du filtre Butterworth utilisé. Filtre passe-haut dont la fréquence de coupure est  $f_c = 300$  kHz avec trois ordres différents : premier ordre (rouge, tirets), quatrième ordre (bleu, plein) et dixième ordre (noir, pointillés).

### 3.1.1.2 Inversion d'impulsions ultrasonores

Dans le but de limiter les artefacts induits par la réponse d'un filtre harmonique numérique de type Butterworth, une méthode alternative de filtrage utilisant les propriétés de symétrie en traitement du signal a été utilisée. Cette méthode s'inscrit dans une démarche désormais courante en acoustique [141] consistant à utiliser l'analyse systématique des symétries des équations non linéaires en s'appuyant sur la théorie des groupes continus [142]. L'utilisation de l'analyse des symétries et d'une méthode de pseudo-séparation des variables peut permettre de mettre en exergue des conditions particulières d'excitation [143, 144].

Afin d'extraire la nonlinéarité tout en supprimant la composante linéaire, l'analyse des symétries montre que l'inversion d'impulsions ultrasonores semble tout à fait implémentable expérimentalement. Cette opération, présentée par Simpson *et al.* [145] et souvent utilisée en imagerie ultrasonore biomédicale, est appelée filtrage par séquences d'impulsions codées en phase ("phase-coded pulse-sequence (PC-PS)") ou par inversion d'impulsions ultrasonores (Pulse Inversion (PI)). Elle permet de ne récupérer que les harmoniques paires.

Cette méthode de filtrage est basée sur le fait que l'inversion de phase d'un signal impulsionnel (décalage en phase de  $180^\circ$ ) conduira à l'inversion de phase de la réponse obtenue après propagation dans un milieu linéaire (figure 36), ce qui n'est pas le cas dans un milieu non linéaire du fait de la génération d'harmoniques.

Considérons le premier écho reçu après la propagation dans un milieu non linéaire dont la réponse à une impulsion positive de pression acoustique  $p_1(t)$  s'écrit :

$$e_1(t) = N_1 p_1(t) + N_2 p_1^2(t) + o(p_1^n(t)), \quad (\text{II.3.3})$$

où  $N_1$  est le coefficient linéaire et  $N_2$  le coefficient non linéaire du second ordre. Pour une impulsion négative  $p_2(t) = -p_1(t)$ , l'écho reçu peut s'écrire :

$$e_2(t) = N_1 p_2(t) + N_2 p_2^2(t) + o(p_2^n(t)). \quad (\text{II.3.4})$$

Comme le milieu de propagation est identique pour la propagation de l'impulsion  $p_1(t)$  et  $p_2(t)$  ( $N_1$  et  $N_2$  sont constants), l'expression de  $e_2(t)$  devient :

$$e_2(t) = -N_1 p_1(t) + N_2 p_1^2(t) + o((-1)^n p_1^n(t)). \quad (\text{II.3.5})$$

On peut alors remarquer qu'en ajoutant ces deux échos (ligne 3 figure 36), on obtient :

$$\boxed{e_1(t) + e_2(t) = 2N_2 p_1^2(t) + o(p_1^{2n+1}(t))}. \quad (\text{II.3.6})$$

Cette somme nous permet d'obtenir les harmoniques paires après la propagation de deux impulsions de polarité différente dans un milieu non linéaire.

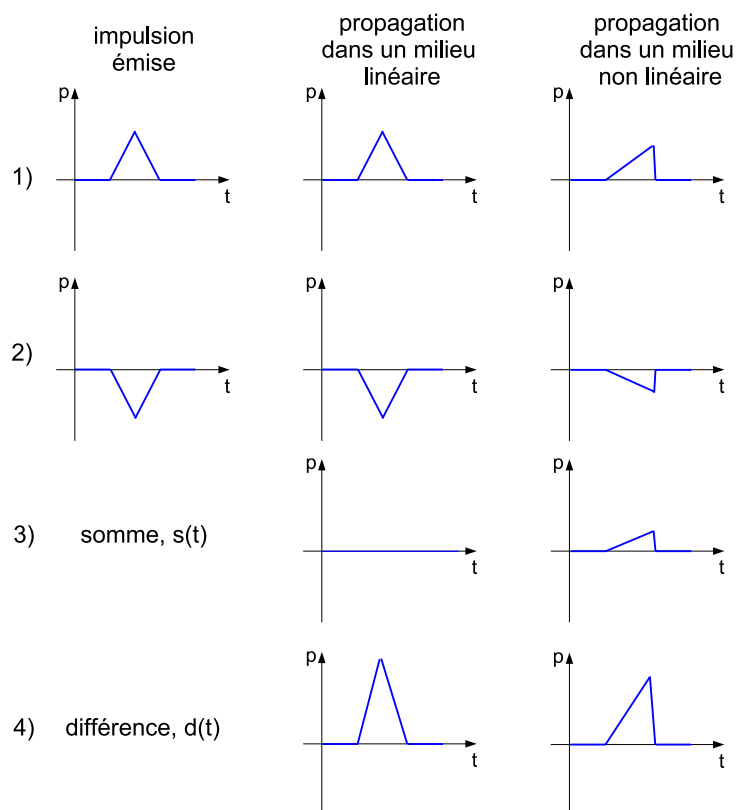


Figure 36 – Principe de filtrage par inversion d’impulsions ultrasonores : (1) une impulsion est transmise, les propagations dans un milieu linéaire et dans un milieu non linéaire sont représentées ; (2) l’inverse de la première impulsion est transmise par le même transducteur, les propagations dans les mêmes milieux linéaire et non linéaire que précédemment sont représentées ; (3) les signaux reçus sont sommés ; (4) les signaux reçus sont soustraits. La somme  $s(t)$  est non nulle uniquement dans le cas d’une propagation dans un milieu non linéaire.

### 3.1.2 Comparaison numérique des méthodes de filtrage

Dans le but d’une application expérimentale de ces deux méthodes de filtrage, une étude numérique a été menée pour les comparer [95, 96]. Le domaine de simulation et les paramètres d’excitation vont être décrits dans la première partie. Ensuite, les résultats obtenus pour des simulations de la méthode NEWS-TR seront développés dans le cas des deux méthodes de filtrage. Deux différentes signatures non linéaires sont testées, à savoir la génération d’harmonique et le spectre d’intermodulation résultant de l’interaction paramétrique entre deux ondes de fréquences proches (partie I.2.1.2.2).

### 3.1.2.1 Validation du code de propagation par l'étude du retournement temporel linéaire

Dans un premier temps, il a fallu valider le bon fonctionnement du code de propagation numérique 2D avec le principe de retournement temporel. Pour cela, nous avons décidé de réaliser l'expérience de retournement temporel classique afin de vérifier que le signal rétrofocalisait, dans ce cas, correctement sur la position de la source.

#### Paramètres de simulation

La figure 37 représente la géométrie et les propriétés physiques du domaine bi-dimensionnel de simulation utilisé pour la réalisation des expériences virtuelles de retournement temporel et d'analyse non linéaire. Ce domaine de simulation représente un échantillon d'aluminium (300 mm × 500 mm) qui a permis de faire valider, par le consortium AERONEWS, le code de propagation devant les partenaires proposant d'autres codes numériques (Polytecnico di Torino (LISA), Université de Louvain (EFIT) et Université de Cranfield (EF)). La grille de simulation a une dimension de 256 × 128 points et la zone de propagation 200 × 112 points (incrémentes spatiaux  $dx = dz = 2,5$  mm/points). Les conditions aux limites sont réalisées de telle manière que la réflexion soit totale aux interfaces simulant ainsi l'échantillon dans l'air. Une source de dimension 4 × 20 points est placée dans le domaine. La forme du signal émis  $e(x, z, t)$  a été choisie par le consortium AERONEWS dans le but de comparer les différentes simulations de chaque groupe, *i.e* :

$$e(x, z, t) = \pm p_0 \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\chi}\right)^2} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{s_\chi}\right)^2}\right) \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_s}{\chi_x}\right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_s}{\chi_z}\right)^2}, \quad (\text{II.3.7})$$

où  $f_c$  est la fréquence centrale de l'onde émise,  $p_0$  la pression acoustique initiale,  $\chi$  et  $s_\chi$  les coefficients d'apodisation temporelle,  $\chi_x$  et  $\chi_z$  les coefficients d'apodisation spatiale suivant  $x$  et  $z$  et enfin  $x_s$  et  $z_s$  les coordonnées du centre de la source suivant  $x$  et  $z$ .

Les récepteurs, représentés sur la figure 37, sont composés de 4 lignes de 112 points de mesures. Afin d'étudier l'influence de la taille du récepteur, différentes simulations ont été réalisées avec les longueurs suivantes : 112 points (300 mm), 66 points (165 mm) et 20 points (50 mm). Les zones de défaut de 3 × 3 points (carrés sur la figure 37) ont un comportement non linéaire hystérétique (partie II.1.4.1). Le reste de l'échantillon est linéaire. Les caractéristiques de simulation sont présentées dans le tableau 4. Six différentes positions de défauts sont définies pour étudier leur influence sur la qualité de rétrofocalisation.

Excitation	Matrice linéaire	Inclusion Hystérétique (3 × 3 points)
$f_c = 200$ kHz $p_0 = 50$ kPa $\chi = 2/f_c$ $s_\chi = 3/f_c$ $\chi_x = 0.15$ $\chi_z = 0.75$ $x_s = 125$ mm $z_s = 150$ mm	$E = 70$ GPa $\rho_0 = 2700$ kg·m <sup>-3</sup> $\nu = 0.33$ $C_{11} = C_{33} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ $C_{44} = \frac{E}{2(1+\nu)}$ $C_{13} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	Forme hystérétique triangulaire (figure 30b) Saut de déformation $\varrho_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ Pourcentage d'UHE initialement ouvertes :25% Pourcentage d'UHE initialement fermées :75%

Tab 4 – Tableau présentant les paramètres de simulations numériques pour l'excitation, la matrice linéaire et l'inclusion hystérétique.

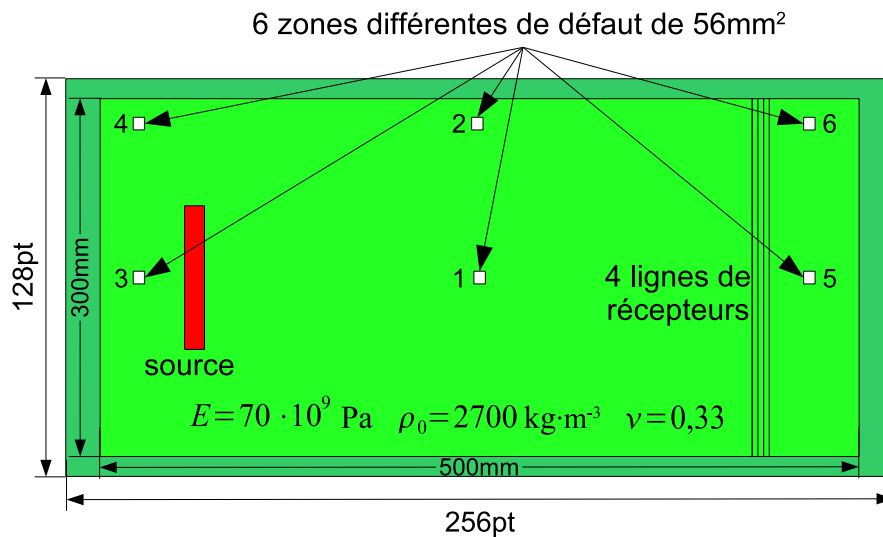


Figure 37 – Géométrie du domaine de simulation avec les positions de la source, des récepteurs, des différents défauts et les caractéristiques du matériau (où  $E$  est le module d'Young,  $\rho_0$  la masse volumique et  $\nu$  le coefficient de Poisson). La partie extérieure foncée représente les zones autour du domaine permettant la réflexion totale aux interfaces.

### Validation du retournement temporel linéaire

Pour valider notre code de propagation dans le cas de l'étude de réfocalisation par retournement temporel, le cas linéaire a été étudié. Le but est de vérifier la réfocalisation de l'onde acoustique au niveau de la source d'émission.

Le signal  $e(t)$  émis (figure 38a) par la source est reçu après propagation dans l'échantillon par les 4 lignes de récepteurs (figure 38b). Ce signal reçu est alors retourné temporellement (figure 38c) et réémis par les récepteurs dans le domaine de simulation (figure 38). Durant la rétropropagation dans l'échantillon avec un défaut central (position 1), la contrainte

$\sigma_{yy}$  maximale obtenue pour chaque point du domaine de simulation est stockée dans une matrice.

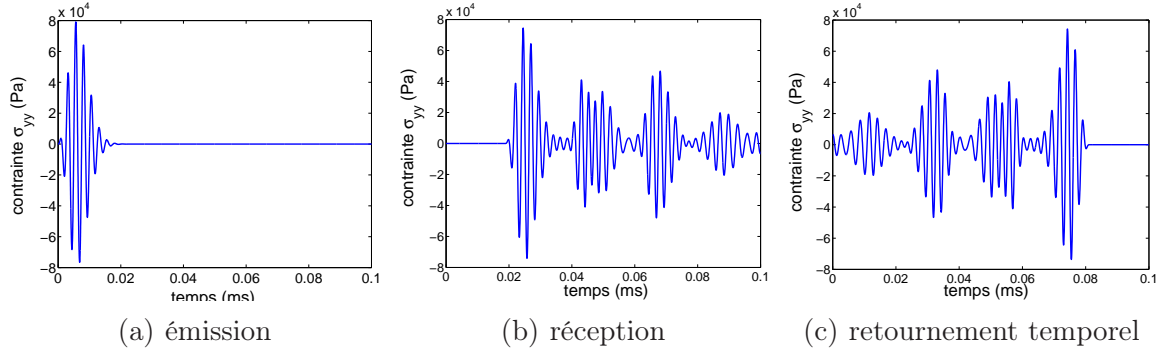


Figure 38 – Signal temporel émis dans l'échantillon (a) et reçu en un point d'une ligne de réception (b) et temporellement retourné (c).

Cette matrice, présentée en figure 39, montre que l'onde temporellement retournée rétrofocalise principalement à la position de la source. La taille de la tâche focale peut être directement liée à la taille et à la forme de la source, et à la fréquence  $f_c$  du signal émis. Deux taches apparaissent de chaque côté de la zone de rétrofocalisation. Au moment de la rétrofocalisation, le point central réagit comme une source sphérique et émet une onde sphérique dans l'échantillon.

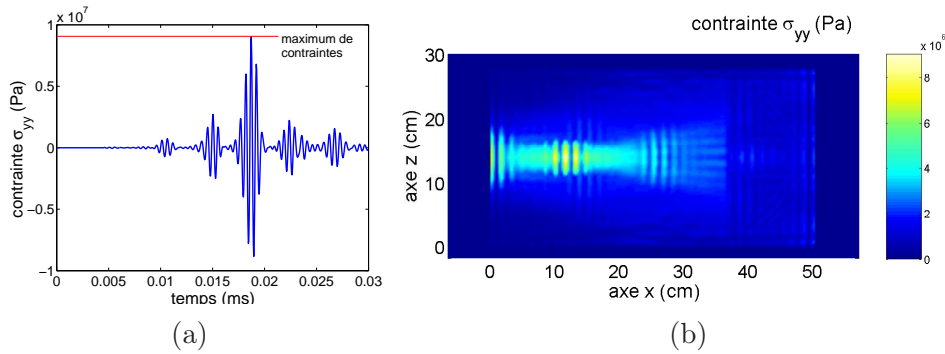


Figure 39 – (a) Représentation temporelle du signal au point  $x = 16$  cm et  $z = 18,5$  cm dont le maximum est stocké dans (b) la matrice des contraintes  $\sigma_{yy}$  maximales obtenues durant la rétropropagation du signal temporellement retourné (figure 38(c)).

### 3.1.2.2 Simulations 2D de la méthode NEWS-TR

L'étude de la rétrofocalisation sur un défaut est maintenant réalisée sur le même domaine de simulation. Le signal reçu par les 4 lignes de récepteurs après propagation dans



l'échantillon est filtré dans le but de ne garder que la signature non linéaire : harmoniques ( $2f_c, 3f_c, \dots$ ) si le signal  $e(t)$  possède une seule composante à la fréquence centrale  $f_c$ , ou composantes d'interaction paramétrique ( $f_1 \pm f_2$ ) si le signal  $e(t)$  possède deux composantes aux fréquences  $f_1$  et  $f_2$ .

## Génération d'harmoniques

### Résultats de simulation

Afin d'étudier l'influence de la position du défaut et de la méthode de filtrage, plusieurs simulations ont été réalisées avec plusieurs positions du défaut (6 positions définies sur la figure 37) et avec les deux méthodes de filtrage. Quatre différents instants de la rétropropagation dans le domaine de simulation sont présentées figure 40.

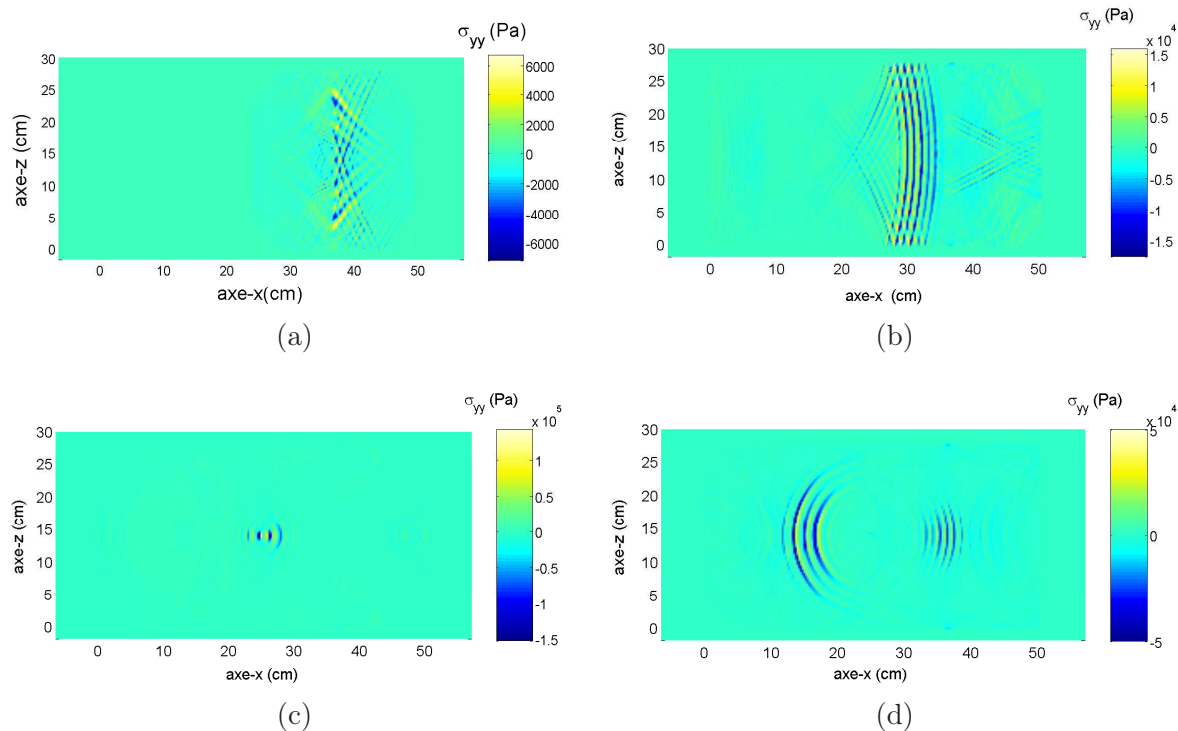


Figure 40 – *Rétropropagation dans l'échantillon : (a)  $2 \mu\text{s}$  : émission du signal temporellement retourné au niveau des récepteurs, (b)  $8 \mu\text{s}$  : réflexion du signal retourné sur les bords de l'échantillon, (c)  $17 \mu\text{s}$  : rétrofocalisation sur la zone de défaut, (d)  $18,8 \mu\text{s}$  : diffraction du signal rétrofocalisé à partir de la zone de défaut.*

Au début de la simulation (a), les 4 lignes de récepteurs émettent le signal temporellement retourné pour la rétropropagation. Après réflexion de ce signal sur les bords du

domaine de simulation (b), le front d'onde focalisée apparaît. Après  $17 \mu\text{s}$  de rétropropagation (c), le signal temporellement retourné rétrofocalise sur la zone de défaut (dans notre exemple position 1). Le signal après rétrofocalisation, proche de la forme d'une émission d'une source ponctuelle, est présenté sur (d).

Comme nous l'avons dit précédemment, le filtrage harmonique et le filtrage par inversion d'impulsions ont été testés pour les six positions différentes de défaut définies précédemment. La figure 41 représente les amplitudes maximales tracées pour deux positions différentes de défauts. Les figures 41(a) et 41(c) représentent les amplitudes maximales pour un défaut au centre du domaine de simulation (position 1) respectivement par inversion d'impulsions et filtrage harmonique. De la même manière, les figures 41(b) et 41(c) représentent les amplitudes maximales tracées dans le cas d'un défaut dans le coin du domaine (position 4) (figure 42).

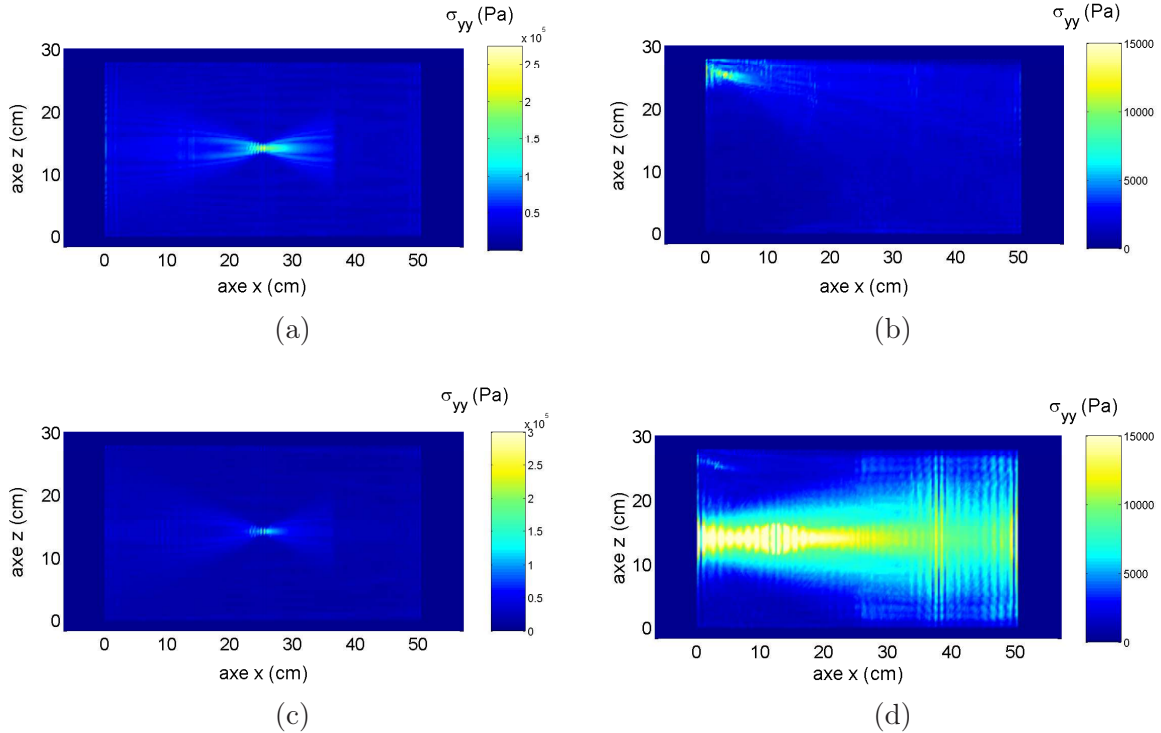


Figure 41 – Matrices des amplitudes maximales pour la rétrofocalisation avec le filtrage par inversion d'impulsions (a-b) et le filtrage harmonique (c-d) pour deux positions de défaut différentes (position 1 (a-c) et position 4 (b-d)).

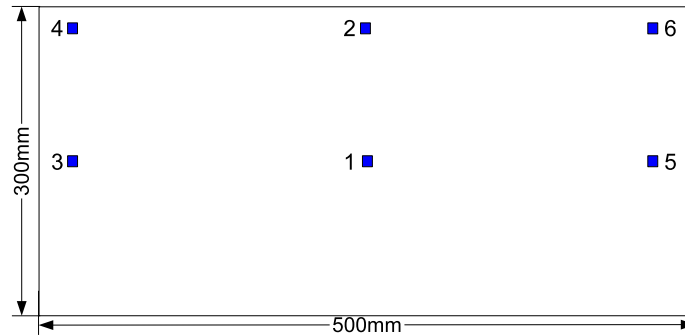


Figure 42 – *Réprésentation des 6 différentes positions de défaut dans le domaine de simulation.*

### Traitements des signaux : comparaisons et discussions

La figure 41 montre une différence sur la qualité de réfocalisation dépendant directement de la position du défaut et de la méthode de filtrage. Lorsque le défaut est situé entre la source et les récepteurs, la tache de focalisation est concentrée. Lorsque le défaut est localisé dans un coin du domaine de simulation, la tache de focalisation est plus précise dans le cas du filtrage par inversion d'impulsions que par filtrage harmonique. Une tache au niveau de la source linéaire apparaît dans le cas du filtrage harmonique. Une étude complète des résultats pour les 3 tailles de source et les 6 positions différentes de défaut, présentés dans le tableau 5, va nous permettre d'expliquer ces remarques. Ils ont été obtenus d'après les matrices des contraintes  $\sigma_{yy}$  maximales pour chaque défaut. La première et la deuxième colonne représentent le rapport entre la moyenne des amplitudes maximales sur le défaut  $\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))$  et la moyenne des amplitudes maximales dans le domaine entier  $\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))$ , respectivement obtenu par filtrage par inversion d'impulsions ( $A_{PI} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ ) et par filtrage harmonique ( $A_{Hfilt} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ ).

	$A_{PI} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ (avec inversion d'impulsions)	$A_{Hfilt} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ (avec filtrage harmonique)	$\frac{A_{PI}}{A_{Hfilt}}$
<b>Position 1</b>			
source de 280 mm	6,44	9,31	<b>0,69</b>
source de 165 mm	5,67	9,66	<b>0,59</b>
source de 50 mm	3,93	4,34	<b>0,90</b>
<b>Position 2</b>			
source de 280 mm	5,86	6,39	<b>0,92</b>
source de 165 mm	5,38	5,30	<b>1,02</b>
source de 50 mm	3,44	2,97	<b>1,16</b>
<b>Position 3</b>			
source de 280 mm	7,08	6,88	<b>1,03</b>
source de 165 mm	6,24	6,15	<b>1,01</b>
source de 50 mm	3,36	3,28	<b>1,02</b>
<b>Position 4</b>			
source de 280 mm	7,27	2,88	<b>2,53</b>
source de 165 mm	6,10	2,10	<b>2,91</b>
source de 50 mm	4,25	1,00	<b>4,25</b>
<b>Position 5</b>			
source de 280 mm	7,35	6,38	<b>1,15</b>
source de 165 mm	6,00	5,68	<b>1,06</b>
source de 50 mm	4,12	4,13	<b>1,00</b>
<b>Position 6</b>			
source de 280 mm	6,62	5,91	<b>1,12</b>
source de 165 mm	5,63	4,50	<b>1,25</b>
source de 50 mm	4,05	2,35	<b>1,72</b>

Tab 5 – Comparaison entre les 2 méthodes de filtrage pour les 6 positions différentes de défaut et les 3 tailles de source.

Le rapport entre les deux résultats pour le filtrage par inversion d'impulsions et le filtrage harmonique est présenté dans la troisième colonne. L'évolution de ce rapport va nous permettre de discuter de la qualité de la méthode de filtrage. Si  $\frac{A_{PI}}{A_{Hfilt}} \leq 1$  alors la qualité de rétrofocalisation est meilleure avec le filtrage harmonique que celle avec le filtrage par inversion d'impulsions.

Les premières remarques vont porter sur le cas où le défaut est au milieu du domaine de simulation, c'est-à-dire entre l'émetteur et les récepteurs (position 1). La taille de la tache focale (figures 41 a et c) est alors plus petite lorsque le filtrage harmonique est utilisé (position 1 :  $A_{PI} = 6,44$  et  $A_{Hfilt} = 9,31$ ). Ceci peut s'expliquer par la dépendance de la taille de la tache focale par rapport à la fréquence utilisée : plus la fréquence est élevée, plus la taille de la tache focale est petite (figure 43(a)). Étant donné qu'avec le filtrage harmonique, le troisième harmonique est renvoyé dans l'échantillon alors qu'avec l'inver-

sion d'impulsions il s'agit majoritairement du second harmonique, il est alors normal que la taille de la tache focale soit plus petite avec le filtrage harmonique. De plus, plus la taille de la source est importante, plus la tache de focalisation est petite (figure 43(b)). Dans un deuxième temps, on s'intéresse aux cas du défaut proche des bords de l'échantillon. La qualité de rétrofocalisation, présentée sur les figures 41 b et d, est meilleure avec le filtrage par inversion d'impulsions (position 4 :  $A_{PI}=7,27$  et  $A_{Hfilt}=2,88$ ). L'explication vient du fait que l'énergie due à la présence d'un défaut dans l'échantillon, c'est-à-dire l'énergie présente sur les fréquences harmoniques, est plus petite lorsque le défaut est sur les bords du domaine de simulation (position 4, position 5) que lorsqu'il est au centre (position 1). Lorsque le filtrage harmonique est appliqué à un signal s'étant propagé dans le domaine de simulation, il reste une partie de la fréquence fondamentale dans le signal filtré due à la réponse de coupure du filtre. Cette partie linéaire est aussi importante que la partie non linéaire produite avec un défaut près d'un bord. C'est pourquoi lorsque ce signal filtré, temporellement retourné, est renvoyé dans le domaine de simulation, il rétrofocalise autant sur la position de la source que sur le défaut (figure 41(d)). Ce problème n'est plus présent avec le filtrage par inversion d'impulsions car toute la partie liée à la propagation linéaire est filtrée.

On peut donc conclure de cette partie que le filtrage par inversion d'impulsions permet de récupérer la partie du signal due à un effet non linéaire, même dans le cas d'une très faible signature, ce qui est beaucoup plus délicat avec le filtrage harmonique.

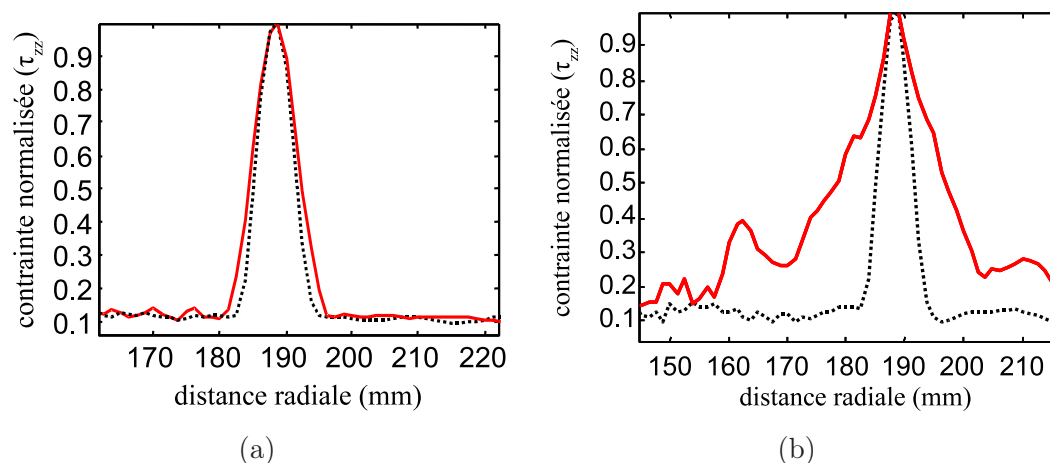


Figure 43 – Comparaison de la taille de la tache focale (a) pour une fréquence de 600 kHz (ligne rouge pleine) et 1 MHz (ligne noire en pointillés) pour une taille de source de 300 mm et (b) pour une source de 50 mm (ligne rouge pleine) et une source de 165 mm (ligne noire en pointillés) pour une fréquence de 1 MHz.

## Intermodulation

Dans le but d'étudier la faisabilité de l'inversion d'impulsions ultrasonores dans le cas de l'intermodulation de deux ondes de fréquences proches, pour ensuite l'appliquer au cas expérimental, des simulations numériques ont été réalisées. Les mêmes paramètres choisis pour la simulation précédente ont été utilisés (tableau 4), exceptée la forme de la source qui est maintenant une source bi-fréquence avec  $f_1 = 200$  kHz et  $f_2 = 300$  kHz et  $p_{0_1} = 50$  kPa et  $p_{0_2} = 50$  kPa. Seules les composantes somme et différence ( $f_{\pm} = f_2 \pm f_1$ ) sont temporellement retournées et renvoyées dans le domaine de simulation. Pour comparer les deux méthodes de filtrage, le filtrage harmonique est appliqué autour de la fréquence somme ( $f_+ = 500$  kHz). Sur la figure 44, le signal temporellement retourné rétrofocalise sur la position du défaut. La qualité de rétrofocalisation avec le filtrage par inversion d'impulsions est meilleure que celle avec le filtrage harmonique. Ceci s'explique par le fait que le filtrage harmonique est appliqué autour de la fréquence somme ( $f_+ = 500$  kHz) est qu'il ne coupe pas entièrement les composantes aux fréquences fondamentales  $f_1$  et  $f_2$ .

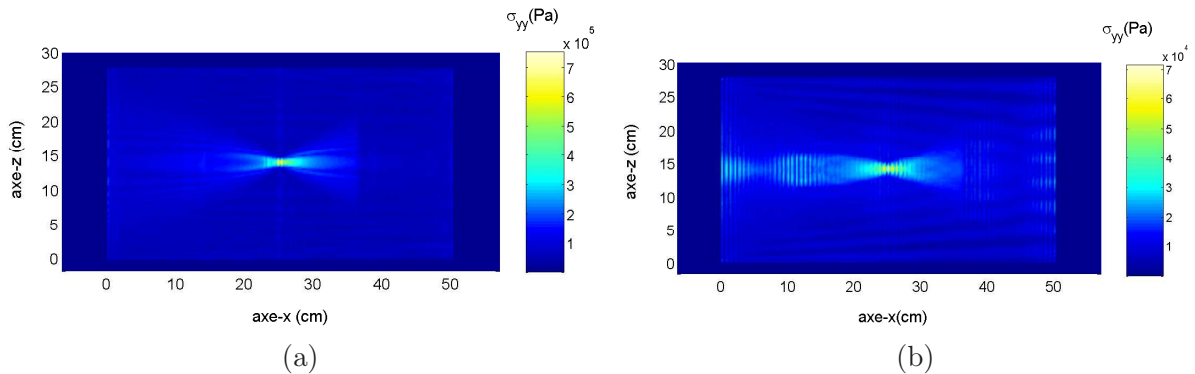


Figure 44 – Matrice des amplitudes maximales pour la rétrofocalisation avec (a) le filtrage par inversion d'impulsions et (b) le filtrage harmonique pour les simulations d'intermodulation (défaut : position 1).

Il est donc possible d'utiliser le filtrage par inversion d'impulsions ultrasonores dans le cas d'intermodulation entre deux ondes de fréquences proches. Ce filtrage va être appliqué à toutes les expériences qui vont suivre.

## 3.2 Examen d'un échantillon fissuré par NEWS-TR

À l'aide de ces simulations numériques, la sensibilité de la méthode NEWS-TR pour localiser une zone fissurée présentant une nonlinéarité non classique a été étudiée. C'est sur l'échantillon fourni par l'industrie aéronautique N.V. ASCO Industries de Belgique,

présentés en annexe A, que nous avons testé la méthode NEWS-TR. La détermination de la position d'une fissure dans un échantillon à l'aide de cette méthode est un concept qui a été développé au cours des deux dernières années en collaboration avec l'équipe de Koen Van Den Abeele au Centre de Recherche Interdisciplinaire de l'Université Catholique de Louvain et Olivier Bou Matar de l'IEMN [93, 94]. En parallèle de nos travaux, l'équipe de recherche de Paul Johnson au Laboratoire National de Los Alamos a aussi étudié la faisabilité d'un point de vue expérimental de la technique NEWS-TR [140].

Dans le travail numérique qui est présenté, le code de propagation a été étendu à un cas tri-dimensionnel [97] (annexe C) pour permettre l'étude comparative entre les simulations numériques et les expériences, et pourra également, à court terme, permettre l'insertion de données expérimentales dans le code de propagation numérique. Cette insertion permettra la localisation de défauts en profondeur non détectables avec les mesures réalisées à l'aide d'un vibromètre laser.

### 3.2.1 Résultats de simulations 3D

La figure 45 représente le domaine de simulation tri-dimensionnel (100 mm  $\times$  25 mm  $\times$  12 mm) utilisé. Cet échantillon de petite taille va permettre d'étudier des signaux correspondant à de la multi-réverbération. Les conditions aux limites sont libres, c'est-à-dire que la vitesse est nulle sur l'extérieur du domaine de simulation comme dans la simulation 2D. Une source de dimensions 5 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm est placée sur la deuxième couche proche de la surface et émet un signal de fréquence  $f_c = 200$  kHz avec une pression acoustique d'amplitude  $p_0 = 50$  kPa. La ligne de récepteurs est composée de 25 points de mesure enregistrant le signal temporel pendant toute la durée de la simulation (soit 0,5 ms). Les zones de défaut sont représentées par une ligne de 5 points ayant un comportement hystérétique. Trois défauts sont placés suivant  $z$  en commençant à la coordonnée  $z = 5$  mm : positions  $\boxed{1}$  ( $x = 50$  mm,  $y = 12$  mm),  $\boxed{2}$  ( $x = 50$  mm,  $y = 2$  mm) et  $\boxed{3}$  ( $x = 2$  mm,  $y = 2$  mm) sur la figure 45, un défaut suivant  $y$  en commençant à la coordonnée  $y = 10$  mm : position  $\boxed{4}$  ( $x = 50$  mm,  $z = 5$  mm) et un défaut suivant  $x$  en commençant à la coordonnée  $x = 40$  mm : position  $\boxed{5}$  ( $y = 12$  mm,  $z = 5$  mm). Il est important de noter que, comme précisé dans l'annexe C, la direction privilégiée pour un défaut, selon la matrice des constantes élastiques, est la direction  $z$ .

Dans le but de valider le code de propagation tri-dimensionnel, le cas du retournement temporel linéaire a été simulé. Le signal reçu après propagation est temporellement retourné et réémis dans l'échantillon au niveau des récepteurs. De la même façon que dans le cas bi-dimensionnel, l'amplitude maximale obtenue pour chaque point du domaine est stockée dans une matrice représentant chaque plan  $xy$  et une autre représentant chaque plan  $yz$ . Les matrices  $xy$  et  $yz$  de coordonnées  $z = 4$  mm et  $x = 10$  mm sont présentées sur la figure 46.

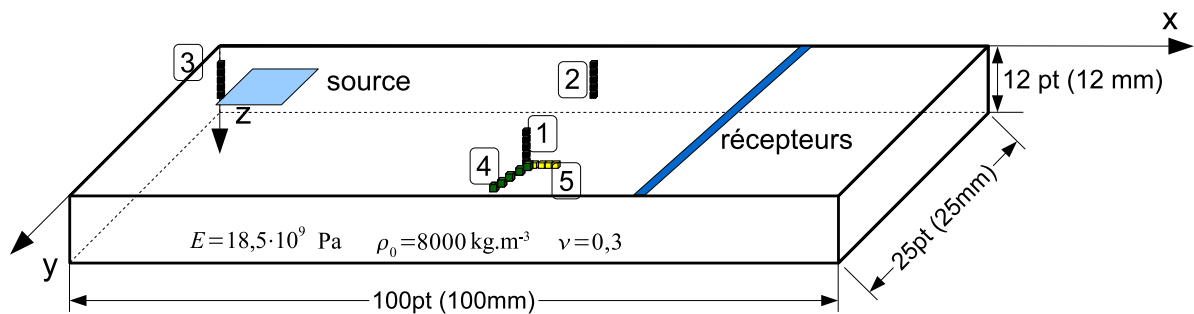


Figure 45 – Géométrie du domaine de simulation tri-dimensionnel avec les positions de la source, de la ligne de récepteurs et des différents défauts. Les caractéristiques du matériau sont :  $E = 18,5 \text{ GPa}$ ,  $\rho_0 = 8000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  et  $\nu = 0,3$ .

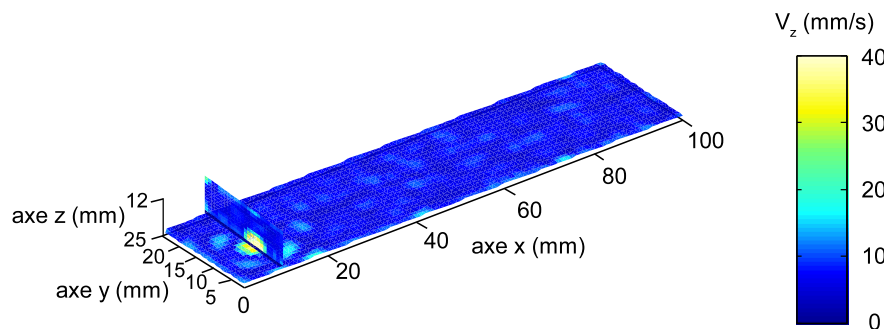


Figure 46 – Matrice des amplitudes maximales de la composante  $v_z$  obtenues durant la rétropropagation du signal temporellement retourné.

La rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée sur la position de la source du signal direct est mise en évidence par la présence d'un maximum d'amplitude (tache jaune). La figure 47 représente l'influence des deux méthodes de filtrage présentées en partie II.3.1.1 sur la rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée sur le défaut placé en position **1**. La méthode NEWS-TR donne des résultats intéressants dans un milieu avec des réflexions sur les bords plus importantes que dans le cas des simulations numériques bi-dimensionnelles. La ligne de défauts suivant  $z$  est bien visualisée sur les matrices suivant le plan  $yz$  (figure 47) et on voit également un point ressortir sur le plan  $xy$  (figure 47).



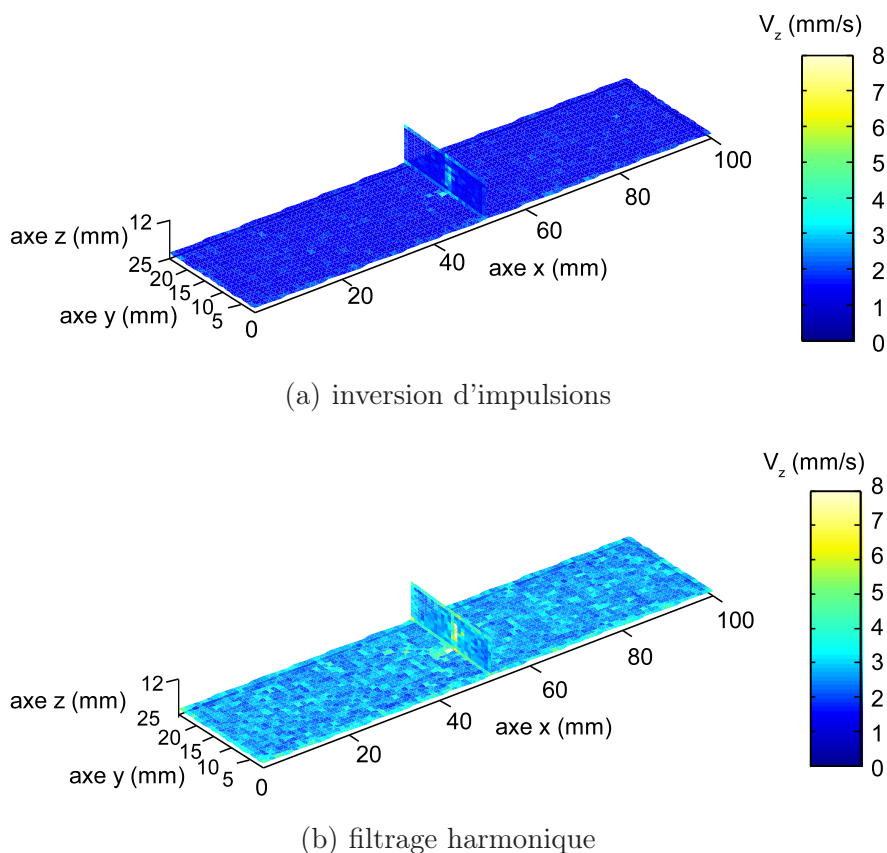


Figure 47 – Matrice des amplitudes maximales de la composante  $v_z$  pour la rétrofocalisation avec le filtrage par inversion d'impulsions (a) et le filtrage harmonique (b) pour la position 1.

À nouveau le filtrage par inversion d'impulsions semble donner des résultats plus intéressants que le filtrage harmonique. Les variations de vitesse entre le point du défaut et le reste du domaine sont plus importantes en utilisant l'inversion d'impulsions.

De manière identique au cas bi-dimensionnel, une étude comparative pour les différentes positions du défaut et les deux méthodes de filtrage a également été réalisée. Deux points importants apparaissent à la vue des résultats présentés en Tableau 6 :

- le niveau de rétrofocalisation ( $A_{PI} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ ), c'est-à-dire le rapport entre l'amplitude sur le point de rétrofocalisation et l'amplitude sur tout le domaine, est plus important lorsque le défaut est suivant l'axe  $z$  (positions 1  $A_{PI} = 3,4$ , 2  $A_{PI} = 1,7$  et 3  $A_{PI} = 2,8$ ) que suivant l'axe  $x$  ou  $y$  (positions 4  $A_{PI} = 1,3$  et 5  $A_{PI} = 1,8$ ). La direction privilégiée du défaut due à l'isotropie transverse du matériau est vérifiée ;
- la rétrofocalisation est meilleure lorsque la fissure est située entre l'émetteur et le récepteur comme dans le cas des simulations bi-dimensionnelles (positions 1  $A_{PI} = 3,4$  et  $A_{Hfilt} = 2,6$ , 2  $A_{PI} = 1,7$  et  $A_{Hfilt} = 1,7$ ). L'énergie acoustique issue de la source est plus importante dans ce cas là.

	$A_{PI} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ (avec inversion d'impulsions)	$A_{Hfilt} = \frac{\bar{m}(A_{max}(\text{défaut}))}{\bar{m}(A_{max}(\text{domaine}))}$ (avec filtrage harmonique)	$\frac{A_{PI}}{A_{Hfilt}}$
<b>Position <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">1</span> (suivant <math>z</math>)</b>			
plan $xy$ ( $z = 8$ mm)	3,4	2,6	<b>1,4</b>
plan $yz$ ( $x = 50$ mm)	2,3	1,9	<b>1,2</b>
<b>Position <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">2</span> (suivant <math>z</math> sur un bord)</b>			
plan $xy$ ( $z = 8$ mm)	1,7	1,7	<b>1</b>
plan $yz$ ( $x = 50$ mm)	1,7	2	<b>0,9</b>
<b>Position <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">3</span> (suivant <math>z</math> dans un coin)</b>			
plan $xy$ ( $z = 8$ mm)	2,8	1,7	<b>1,6</b>
plan $yz$ ( $x = 2$ mm)	1,3	1,5	<b>0,9</b>
<b>Position <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">4</span> (suivant <math>y</math>)</b>			
plan $xy$ ( $z = 5$ mm)	1,3	1,1	<b>1,2</b>
plan $yz$ ( $x = 50$ mm)	1,2	1,5	<b>0,8</b>
<b>Position <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">5</span> (suivant <math>x</math>)</b>			
plan $xy$ ( $z = 5$ mm)	1,8	1,1	<b>1,6</b>
plan $yz$ ( $x = 42$ mm)	1,3	1,1	<b>1,2</b>

Tab 6 – Comparaison entre les deux méthodes de filtrage pour les 5 positions différentes de défaut (définies sur la figure 45) et les deux plans  $xy$  et  $yz$ .

La figure 48 représente les résultats obtenus pour les positions 2 et 3 du défaut et montre bien une meilleure rétrofocalisation sur le défaut, avec le filtrage par inversion d'impulsions, lorsque celui-ci est sur le bord de l'échantillon comme pour les simulations bi-dimensionnelles (partie II).

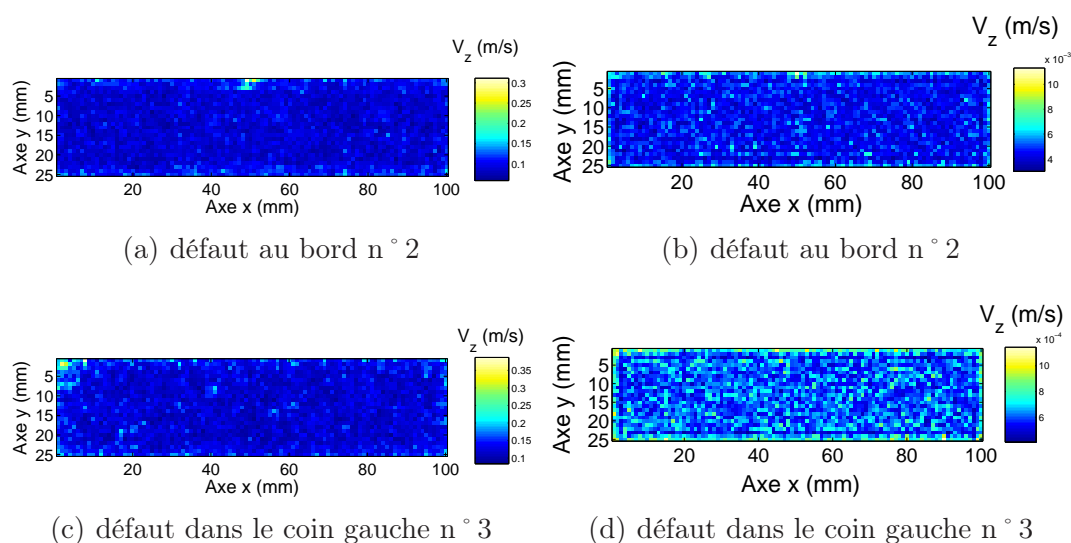


Figure 48 – Matrice des amplitudes maximales de la composante  $v_z$  du plan  $xy$  ( $z = 8$  mm) pour la rétrofocalisation avec le filtrage par inversion d'impulsions (a-c) et le filtrage harmonique (b-d) pour un défaut au bord (a-b) et dans le coin (c-d) (positions définies sur la figure 45).

### 3.2.2 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, les résultats expérimentaux NEWS-TR réalisés dans un échantillon ASCO sont présentés. Le dispositif expérimental permettant ces mesures, représenté sur la figure 49, est une adaptation de celui présenté en figure 34 pour lequel les paramètres d'excitation et de réception sont présentés dans le tableau 7.

	Type	Bande passante à -6dB	Fréquence centrale	Nombre d'arches	Générateur - dynamique	Amplification
Émission $f_1=9$ MHz	Transducteur Panametric Videoscan V112-RM	110%	10MHz	50	Agilent 33250A - 12 bits (1 bit signe) 64000 points	AR 150A 100dB 55dB
Émission $f_2=10$ MHz	Transducteur Panametric Acuscan A111S-RM	45%	10MHz	55	Agilent 33250A - 12 bits (1 bit signe) 64000 points	ENI - 150A 50dB
Réception signal direct	Transducteur Panametric Acuscan A102S-RM	45%	1MHz			
Réception signal retourné	Vibromètre Laser Polytec OFV-505	1.5 MHz	de 0 à 1.5 MHz			
Acquisition	Oscilloscope LeCroy WaveRunner 6050A				8 bits $f_{éch} = 10$ MHz	

Tab 7 – Caractéristiques de l'instrumentation NEWS-TR.

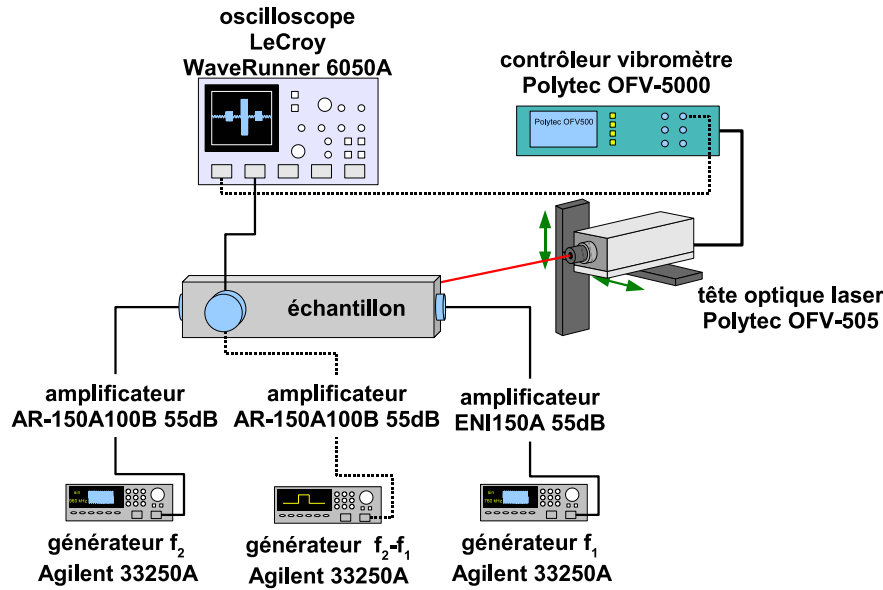


Figure 49 – *Dispositif expérimental de la méthode NEWS-TR.*

Deux transducteurs de fréquence centrale  $f_c = 10$  MHz sont placés en contact avec du salol de chaque côté de l'échantillon. Le transducteur Panametrics Videoscan V-112 RM (large bande) est excité par un train d'onde de 50 arches à 9 MHz et, simultanément, le transducteur Panametrics Acuscan A-111S RM (bande étroite) par un train d'onde de 55 arches à 10 MHz. Le signal propagé dans l'échantillon ASCO est alors reçu par un transducteur Panametrics Acuscan A-102S RM (bande étroite) de fréquence centrale  $f_c = 1$  MHz. Cette fréquence est choisie autour de la fréquence de la composante différence des deux fréquences d'émission ( $f_2 - f_1 = 1$  MHz). Malgré le filtrage dû à la bande passante du transducteur de réception, un filtrage par inversion d'impulsions a également été réalisé. Pour cela, les deux trains d'onde haute fréquence ont été envoyés en opposition de phase dans l'échantillon. Les deux signaux reçus par le transducteur de 1 MHz (figure 50) sont alors sommés et le résultat est retourné temporellement. Cette partie d'émission-réception correspond au circuit en traits pleins sur la figure 49.

Le signal temporellement retourné est ensuite renvoyé dans l'échantillon à travers le transducteur de fréquence 1 MHz. Un balayage mécanique, *via* un système de déplacement OWIS DC500, du vibromètre laser est réalisé autour de la fissure. La matrice des amplitudes maximales de la vitesse à la surface  $v_z$  est présentée sur la figure 51.

Malgré la faisabilité de cette méthode démontrée grâce aux simulations numériques, aux études menées au sein du projet européen AERONEWS [93] et aux récents travaux publiés [140], aucune signature visible de la fissure n'apparaît sur la cartographie. La question importante qu'il est nécessaire de se poser porte sur le comportement hystérétique de la fissure. Est-ce que les ondes ultrasonores émises dans le matériau ont la capacité d'ouvrir et de fermer les micro-inhomogénéités pour leur attribuer un comportement hystérétique ?

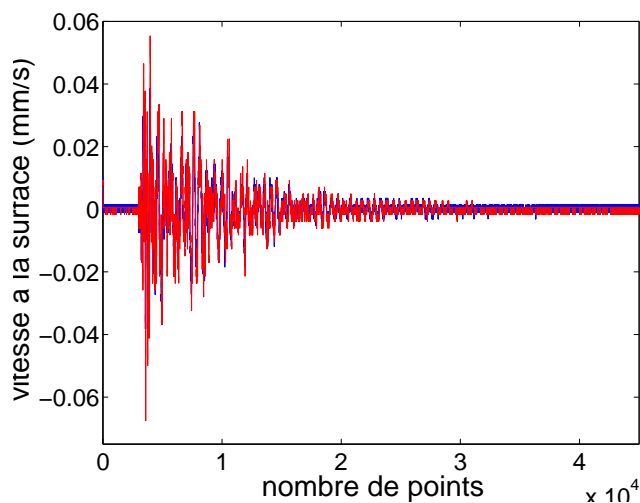


Figure 50 – Signal reçu par le transducteur, dont la fréquence centrale est 1 MHz, après propagation de deux ondes à 9 MHz et 10 MHz dans un échantillon fissuré.

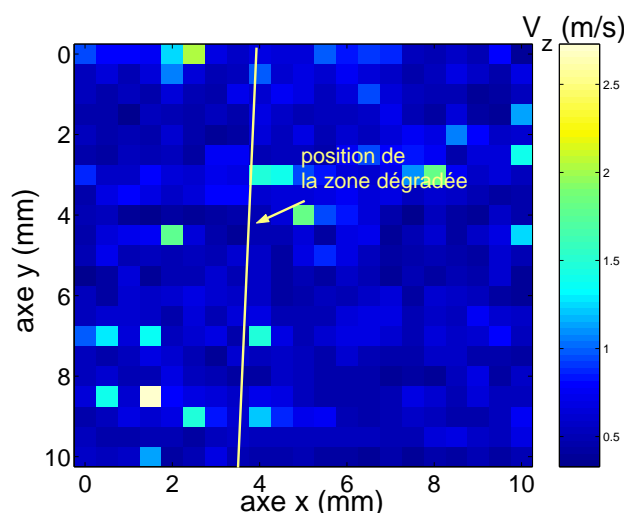


Figure 51 – Cartographie des amplitudes maximales de la vitesse à la surface  $v_z$  mesurée à proximité d'une zone dégradée.

### 3.2.3 Problèmes et limitations de la méthode de mesure

Les différents problèmes qui peuvent être inhérents à cette méthode de mesure viennent de la géométrie de l'échantillon et de la position de la zone dégradée. En effet, la zone dégradée n'étant pas située entre les deux transducteurs d'émission de trains d'ondes courts, l'interaction au niveau de la zone dégradée se réalise avec deux ondes réfléchies sur les bords de l'échantillon.

Une question qui se pose également concerne le comportement de la zone dégradée. Dans la partie sur la modélisation du comportement non linéaire non classique (partie II.1), la relation contrainte-déformation liée à une fissure est définie comme ayant une forme

hystérétique. Dans ce cas, il est nécessaire que la contrainte appliquée à l'échantillon ou à la fissure soit assez importante pour pouvoir entraîner la fermeture ou l'ouverture. Il est donc primordial de s'assurer de l'excitation de la zone dégradée.

### 3.3 Conclusions et perspectives sur NEWS-TR

La méthode NEWS-TR, combinant le retournement temporel avec un pré-traitement non linéaire, a été appliquée à des échantillons fissurés lors de simulations numériques et d'applications expérimentales. Le développement d'un algorithme de propagation pseudo-spectral, couplé à une modélisation du comportement hystérétique d'une fissure (à l'aide du modèle de Preisach-Mayergoysz étendu en 2D et 3D) a montré la faisabilité de cette méthode pour la détection et la localisation de défauts. Des premières simulations numériques bi-dimensionnelles ont permis l'étude comparative de deux méthodes de filtrage, le filtrage harmonique de type Butterworth et le filtrage par inversion d'impulsions ultrasonores. Il est apparu alors plus intéressant d'utiliser cette dernière méthode car elle permet de filtrer les composantes linéaires et d'obtenir des résultats satisfaisants dans le cas difficile de niveaux de nonlinéarité faibles, le tout sans ajouter d'artefacts dus à la réponse temporelle d'un filtre numérique classique. À partir de ce travail [94–97], un algorithme tri-dimensionnel a été développé pour permettre une approche encore plus réaliste des échantillons fissurés. L'avantage d'utiliser le filtrage par inversion d'impulsions ultrasonores a également été observé. Cette méthode NEWS-TR est donc apparue applicable pour la détection de défauts et a donc fait l'objet d'une étude expérimentale.

Il est alors apparu difficile d'obtenir les résultats escomptés : en effet, la cartographie obtenue à proximité d'une fissure n'a pas donné d'informations quant à sa localisation (figure 51). Cependant, plusieurs travaux réalisés au sein du projet AERONEWS, en partenariat avec l'Université Catholique de Louvain [93] et également par l'équipe de Paul Johnson au Laboratoire National de Los Alamos [140] ont montré la faisabilité expérimentale d'une telle méthode. L'utilisation d'échantillons avec des géométries plus complexes peut en être la principale explication.

Malgré tout, plusieurs problèmes peuvent être mis à jour concernant cette méthode, tout d'abord sur le nombre de transducteurs utilisés. Il ne faut pas oublier que le principe de retournement temporel tient essentiellement sur le fait qu'il est nécessaire d'enregistrer tout ou une grande partie dans l'espace du signal à retourner pour permettre une bonne focalisation. Or la manipulation a été réalisée avec uniquement deux transducteurs, un pour chaque fréquence. Il serait alors nécessaire de penser à l'application d'un système multi-voies possédant un système d'amplification indépendant pour chaque voie pour éviter les couplages et permettant une meilleure construction du miroir à retournement temporel. Le deuxième problème vient de la géométrie parallélépipédique de l'échantillon fourni par les partenaires industriels du projet. En effet dans ce type d'expérience, il vaut mieux privilégier une géométrie complexe car elle va permettre, grâce aux multiples réflexions, l'apparition de sources virtuelles qui augmentera l'effet de miroir recherché.

Le troisième point, qui nous apparaît le plus important, est qu'il est nécessaire de s'assu-

rer de l'excitation de la fissure. Il est entendu par là que, pour que la fissure génère une nonlinéarité importante lors de la propagation d'une onde (nonlinéarité non classique), il faut qu'elle engendre un comportement hystérétique visible dans la relation contrainte-déformation. L'onde doit pouvoir ouvrir et fermer la fissure lors de son passage, ce qui paraît dépendant directement de l'excitation et de la géométrie directe de la fissure (largeur d'ouverture). Il est donc nécessaire de s'assurer de ce comportement dans chaque mesure avant de poser les conclusions portant sur la présence d'un défaut.

Dans l'avenir, la modélisation numérique 3D pourra être couplée aux données expérimentales. En effet, la limite importante des manipulations réalisées avec le vibromètre laser est qu'il est impossible de détecter un défaut en profondeur. C'est pourquoi l'idée de réaliser la mesure de la propagation d'une onde émise dans un échantillon fissuré à l'aide d'un vibromètre laser et d'injecter ces données expérimentales temporellement retournées et filtrées dans le code de propagation paraît être une perspective intéressante quant à l'application industrielle d'une telle méthode.

---