

Résultats expérimentaux de mesures de nonlinéarité classique

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux, obtenus dans les échantillons homogènes de silice et de verre et dans les échantillons bi-couches, échantillons de silice et de verre placés en contact avec différents couplants et échantillons d'aluminium collés, sont présentés [78–80].

Le dispositif expérimental utilisé pour toutes les mesures du coefficient non linéaire par modulation de phase est celui présenté en I.2.2 (figure 5). L'onde haute fréquence se propageant à travers l'échantillon est générée par un transducteur Panametrics Videoscan V-113 RM large bande de fréquence centrale 15 MHz et de diamètre 0,25" (6,3 mm). Ce transducteur est excité par un train d'ondes de 30 arches émis par un générateur HP3314A placé avant un amplificateur ENI-150A de 55 dB. L'onde basse fréquence est émise à travers l'échantillon à l'aide d'un transducteur Panametrics Videoscan V-182 RM de fréquence centrale 3,5 MHz et de diamètre 0,5" (12,7 mm), excité par une impulsion générée par un HP3314A avec des tensions variant de 0 mV à 400 mV (par pas de 25 mV) avant un amplificateur AR-150A100B (Amplifier Research) de 55 dB. Les fréquences utilisées, variant pour chaque échantillon, sont précisées avant chaque résultat présenté.

3.1 Modulation de phase dans des matériaux homogènes

Les mesures du coefficient non linéaire β réalisées dans les échantillons homogènes de silice et de verre (Annexe A) sont exposées dans cette section.

3.1.1 Résultats expérimentaux

3.1.1.1 Paramètre non linéaire de la silice

Des mesures du coefficient non linéaire par modulation de phase sont faites dans l'échantillon de silice (cylindrique, épaisseur 30 mm, diamètre 60 mm). Les fréquences utilisées sont $f_{HF} = 15$ MHz et $f_{BF} = 2,22$ MHz, les résultats obtenus sont présentés sur la figure 12.

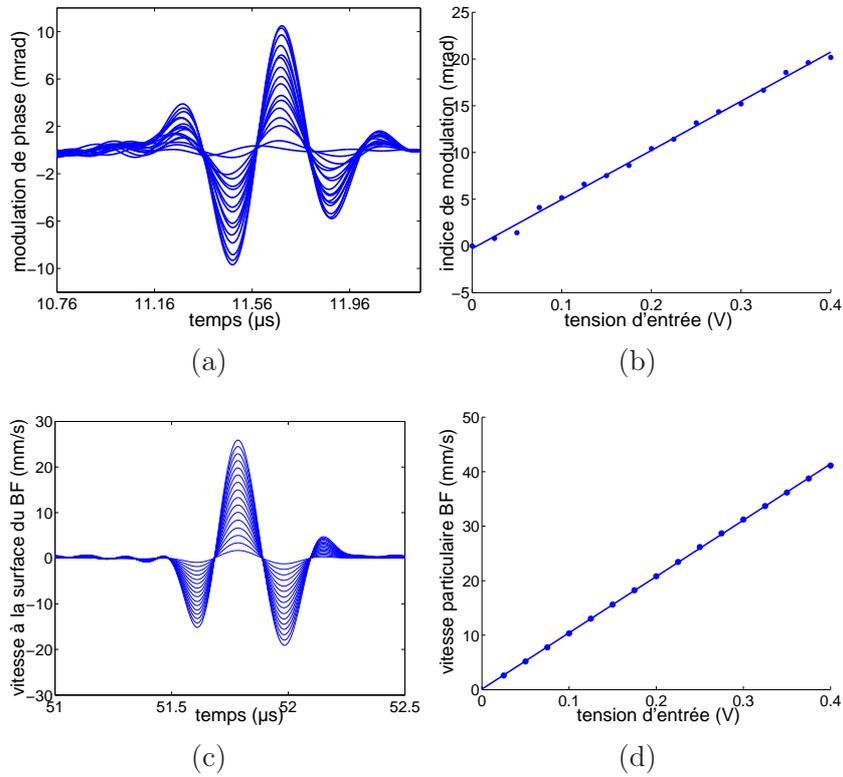


Figure 12 – Évolution temporelle dans un échantillon de silice (a) de la modulation de phase $\varphi_0(t)$, (c) de la vitesse particulaire de l'onde basse fréquence $v_{BF}(t)$. En (b) l'indice de modulation $\Delta\varphi_0$ et en (d) l'indice de vitesse particulaire V_{BF} en fonction de la tension d'entrée de la chaîne d'émission basse fréquence.

L'indice de modulation $\Delta\varphi_0$ est défini comme étant la différence entre le maximum et le minimum de la modulation de phase $\varphi_0(t)$ pour chaque tension d'excitation basse fréquence. De la même manière, l'indice de vitesse particulaire basse fréquence V_{BF} est défini comme étant la différence entre le maximum et le minimum de la vitesse particulaire $v_{BF}(t)$ pour chaque tension. La pente de chaque indice en fonction de la tension d'excitation avant amplification est ensuite calculée et le rapport de ces deux pentes nous

donne le terme $\frac{\Delta\varphi_0}{V_{BF}}$ de l'équation I.2.14 en limitant les problèmes dus aux dispersions des mesures.

Pour la silice, le coefficient non linéaire $\beta_{Silice} = -6,4$ (figure 12). Le signe négatif de ce coefficient non linéaire est dû à l'opposition de phase entre la modulation de phase et la vitesse particulière de l'onde basse fréquence. Ce résultat est en concordance avec ceux de la littérature [25, 32, 71].

3.1.1.2 Paramètre non linéaire du verre

Des mesures de coefficient non linéaire par modulation de phase en contact sont réalisées dans l'échantillon de verre (parallélépipédique, 50 mm de côté, 10 mm d'épaisseur). L'onde haute fréquence est un train d'ondes sinusoïdales de 20 arches à une fréquence de $f_{HF} = 17$ MHz avec un niveau de 10 V. L'impulsion basse fréquence ($f_{BF} = 1,7$ MHz) est émise par un transducteur V-104 RM de fréquence centrale 2,5 MHz et de diamètre 1" (25,4 mm).

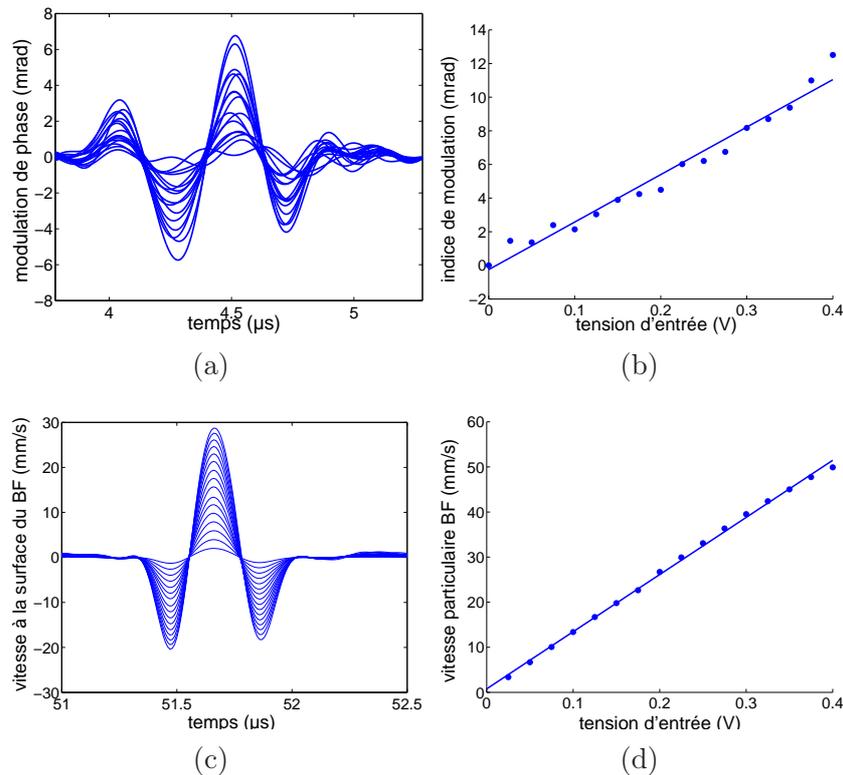


Figure 13 – Évolution temporelle dans un échantillon de verre (a) de la modulation de phase $\varphi_0(t)$, (c) de la vitesse particulière de l'onde basse fréquence $v_{BF}(t)$. En (b) l'indice de modulation $\Delta\varphi_0$ et en (d) l'indice de vitesse particulière V_{BF} en fonction de la tension d'entrée de la chaîne d'émission basse fréquence.

La figure 13 permet d'obtenir un coefficient non linéaire $\beta_{Verre} \approx 7,5$. Le niveau de modulation dans le verre est moins élevé que dans la silice et se rapproche du bruit de phase qui est estimé à $\pm 0,5$ mrad. Ce niveau est la différence entre la mesure de la phase de l'onde haute fréquence émise dans l'échantillon sans impulsion basse fréquence au début et à la fin de l'expérience. Une dispersion peut donc être ainsi observée sur l'indice de modulation (figure 13b).

3.1.2 Comparaison théorie-expérience

Dans le but de valider l'algorithme pseudo-spectral 1-D développé au paragraphe I.1.2 pour ensuite l'appliquer sur les échantillons bi-couches, une expérience de modulation de phase a été simulée dans un bloc de silice d'épaisseur 30 mm, de masse volumique $\rho = 2200 \text{ kg.m}^{-3}$, de module d'Young $E = 79,2 \text{ GPa}$ et de paramètre non linéaire $\beta = -6$. Il va donc nous être possible de comparer les résultats obtenus avec la simulation numérique et ceux obtenus expérimentalement, en relevant le niveau de modulation de phase engendré par une impulsion basse fréquence dont la pression a été choisie identique à celle utilisée expérimentalement. Pour la simulation numérique, l'onde haute fréquence est choisie à 15 MHz et l'impulsion basse fréquence à 3 MHz. Il est nécessaire d'avoir un rapport entier entre la haute fréquence et la basse fréquence à cause de la définition de l'excitation dans le code de propagation. La propagation de la superposition de l'onde haute fréquence et de l'impulsion basse fréquence est simulée à travers une grille 1D de 4096 points avec un incrément spatial de $dz = 55 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ et un incrément temporel $dt = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$. Le signal est enregistré en 10 points différents sur la grille, nous nous sommes intéressés au point qui correspond à la distance de propagation de 30 mm. Des simulations identiques sont réalisées dans un milieu de propagation dont les paramètres sont ceux du verre utilisé en expérience ($\rho = 2492 \text{ kg.m}^{-3}$, $E = 82,8 \text{ GPa}$ et $\beta = 7$).

La figure 14a représente l'indice de modulation en fonction de l'indice de vitesse simulé dans l'échantillon de silice et la pente alors obtenue nous donne le rapport $\frac{\Delta\varphi_0}{V_{BF}}$ nécessaire à la détermination (éq I.2.14) du coefficient non linéaire $\beta = -5,7$. Le niveau de modulation de l'ordre de 14 mrad pour un niveau de vitesse de 15 mm.s^{-1} est en concordance avec les résultats expérimentaux (figure 12). La figure 14b permet de déterminer le rapport $\frac{\Delta\varphi_0}{V_{BF}}$ simulé dans l'échantillon de verre et le coefficient non linéaire obtenu est $\beta = 7,9$. Les niveaux de modulation de phase, obtenus pour le verre (5 mrad) pour une vitesse particulière basse fréquence de 25 mm.s^{-1} , sont également en concordance avec ceux relevés expérimentalement.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux attendus (silice : $\beta = -5,7$, verre : $\beta = 7,5$). L'algorithme pseudo-spectral alors validé va être utilisé pour prédire l'évolution du coefficient non linéaire dans des matériaux bi-couches. L'influence de l'épaisseur de l'interface va être étudiée. Dans un premier temps, les expériences sur ce type d'échantillon sont présentées.

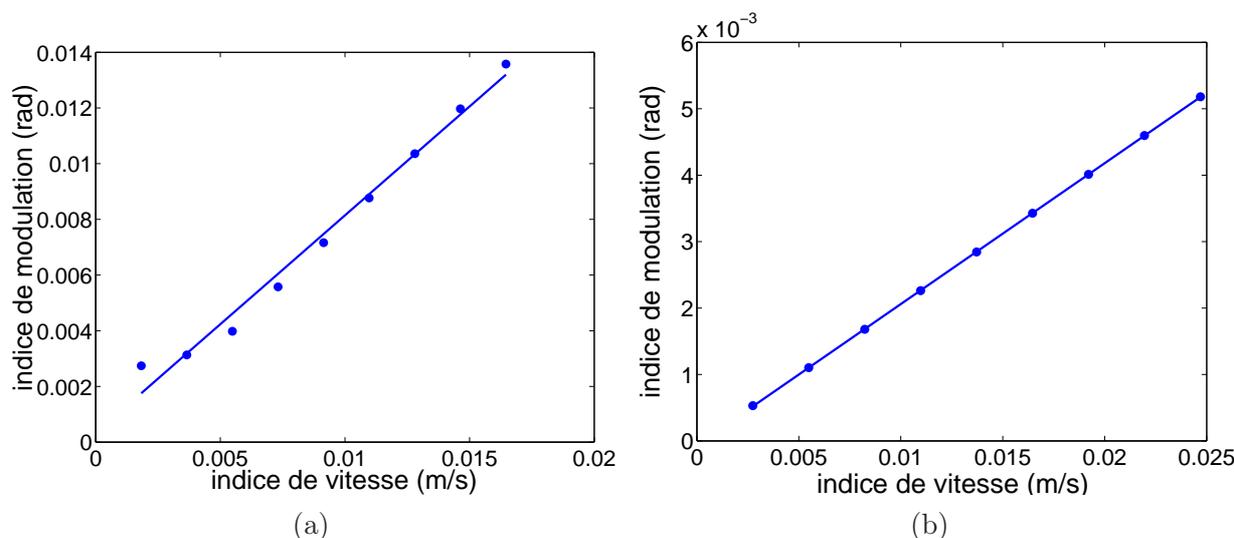


Figure 14 – Indice de modulation de phase en fonction de l'indice de la vitesse particulière pour (a) une propagation simulée dans un échantillon de silice d'épaisseur 30 mm et (b) dans un échantillon de verre d'épaisseur 10 mm.

3.2 Modulation de phase dans des échantillons bi-couches

Dans cette partie, les résultats de mesure du coefficient non linéaire β par modulation de phase en contact dans des échantillons bi-couches sont présentés [78–80]. Ces échantillons sont soit des échantillons homogènes placés en contact soit des échantillons collés de l'industrie aéronautique. Pour réaliser ces mesures, nous avons identifié les différents échos d'interface dans le signal haute fréquence et synchronisé l'émission basse fréquence de façon à ce qu'il y ait superposition des ondes haute fréquence et basse fréquence dans la région où l'on souhaite solliciter l'interaction paramétrique (échantillon le plus épais) afin de déterminer la valeur du coefficient non linéaire β par modulation de phase.

3.2.1 Échantillons homogènes placés en contact

Les échantillons bi-couches sont constitués d'un échantillon de silice d'épaisseur 30 mm et d'un échantillon soit de silice soit de verre d'épaisseur 10 mm. Le choix de l'échantillon dans lequel l'interaction paramétrique a lieu est motivé par l'épaisseur la plus importante permettant ainsi une meilleure interaction entre les deux ondes. Le but de ces expériences dans ce type d'échantillon est de caractériser l'influence du couplant sur la mesure du coefficient non linéaire β .

L'onde haute fréquence ($f_{HF} = 15$ MHz) émise à travers l'échantillon d'épaisseur 30 mm est générée par le transducteur Panametrics Videoscan V-113 RM avec une tension de 100 mV avant un amplificateur ENI-150A de 55 dB. L'impulsion basse fréquence ($f_{BF} = 2,22$ MHz) est générée à travers l'échantillon d'épaisseur 10 mm à l'aide d'un transducteur

Panametrics Videoscan V-182 avec des tensions variant de 0 mV à 400 mV (par pas de 25 mV) avant un amplificateur AR-150A100B (Amplifier Research) de 55 dB.

3.2.1.1 Modulation de phase avec un échantillon silice-silice

Dans cette partie la mesure du coefficient β de la silice de l'échantillon le plus épais est présentée. Le contact entre ces échantillons est garanti par 3 couplants différents : gel échographique, huile de silicone et salol.

Certaines observations peuvent être données à partir des mesures réalisées sur l'échantillon silice-silice : les niveaux de modulation obtenus dans cet échantillon sont du même ordre de grandeur que ceux dans l'échantillon de silice homogène. La forme de la modulation de phase (figures 15 a, c et e) présente une légère perturbation à cause de l'interface qui se traduit par une dispersion des indices de modulation $\Delta\varphi_0$ présentés sur les figures (figures 15 b, d et f). En revanche, la dispersion des mesures de vitesse particulière basse fréquence est faible. Les niveaux de vitesse particulière BF sont cependant différents selon le couplant utilisé. Ceci confirme l'importance de l'étape de calibration dans la détermination du coefficient β . Le niveau de vitesse particulière BF est moins élevé lorsque le couplage est réalisé avec du gel échographique. Au regard de la courbe montrant le coefficient de réflexion (figure 11), la mauvaise transmission de l'onde avec le gel explique le niveau de vitesse particulière particulièrement faible.

Les figures 15 et 16 permettent de déterminer un coefficient non linéaire correspondant à la silice présenté dans le tableau 1.

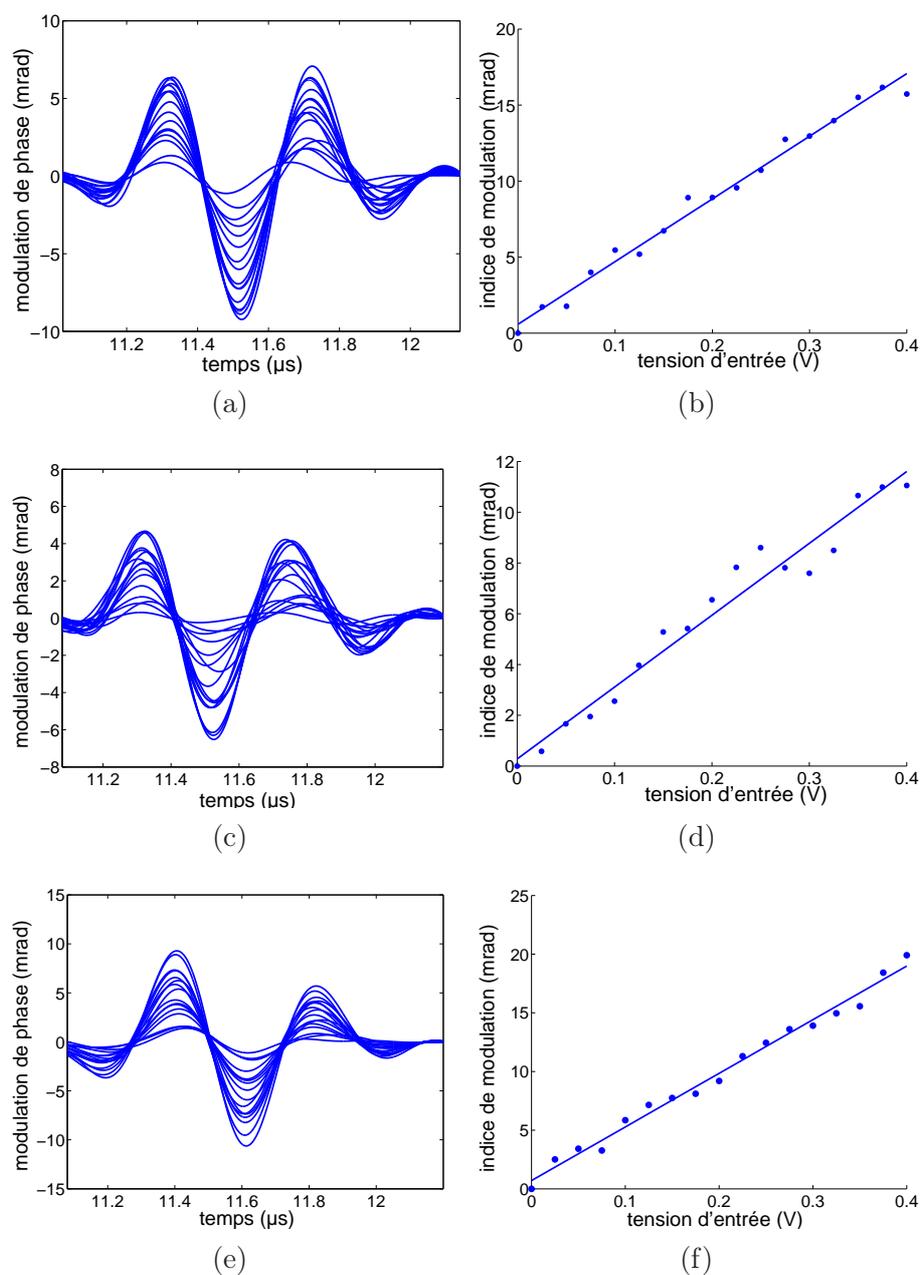


Figure 15 – Évolution temporelle de la modulation de phase $\varphi_0(t)$ dans les échantillons de silice en contact avec du gel échographique (a), de l'huile de silicone (c) et du salol (e) comme couplant et les indices de modulation $\Delta\varphi_0$ associés (b,d,f).

3.2.1.2 Modulation de phase avec un échantillon silice-verre

Dans cette partie les résultats avec l'échantillon de silice (épaisseur 30 mm) placé en contact avec l'échantillon de verre (épaisseur 10 mm) sont présentés.

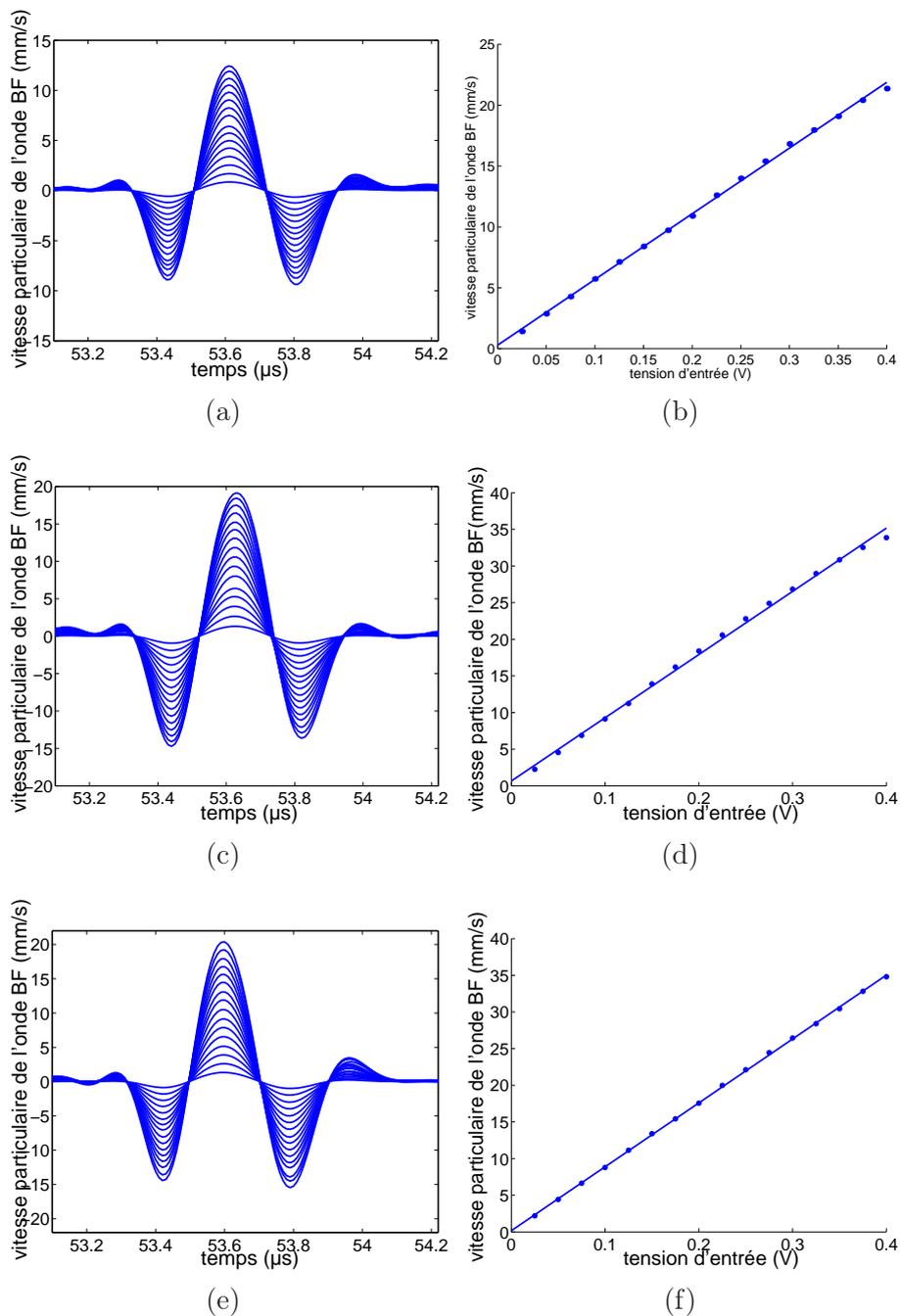


Figure 16 – Évolution temporelle de la vitesse particulaire de l'onde BF $v_{BF}(t)$ dans les échantillons de silice en contact avec du gel échographique (a), de l'huile de silicone (c) et du salol (e) comme couplant et les indices de vitesse V_{BF} associés (b,d,f).

L'interprétation de ces résultats porte dans un premier temps sur le niveau de modulation qui est encore du même ordre de grandeur que dans les échantillons mono-couches et bi-couches silice-silice. La dispersion des mesures de vitesse particulaire est encore faible. La forme de la modulation de phase semble plus perturbée que dans le cas silice-

silice, montrant une sensibilité de la méthode aux différences d'impédances acoustiques des échantillons de verre et de silice ($Z_{\text{verre}} = 14,4 \text{ MRa}$ et $Z_{\text{SiO}_2} = 13,2 \text{ MRa}$).

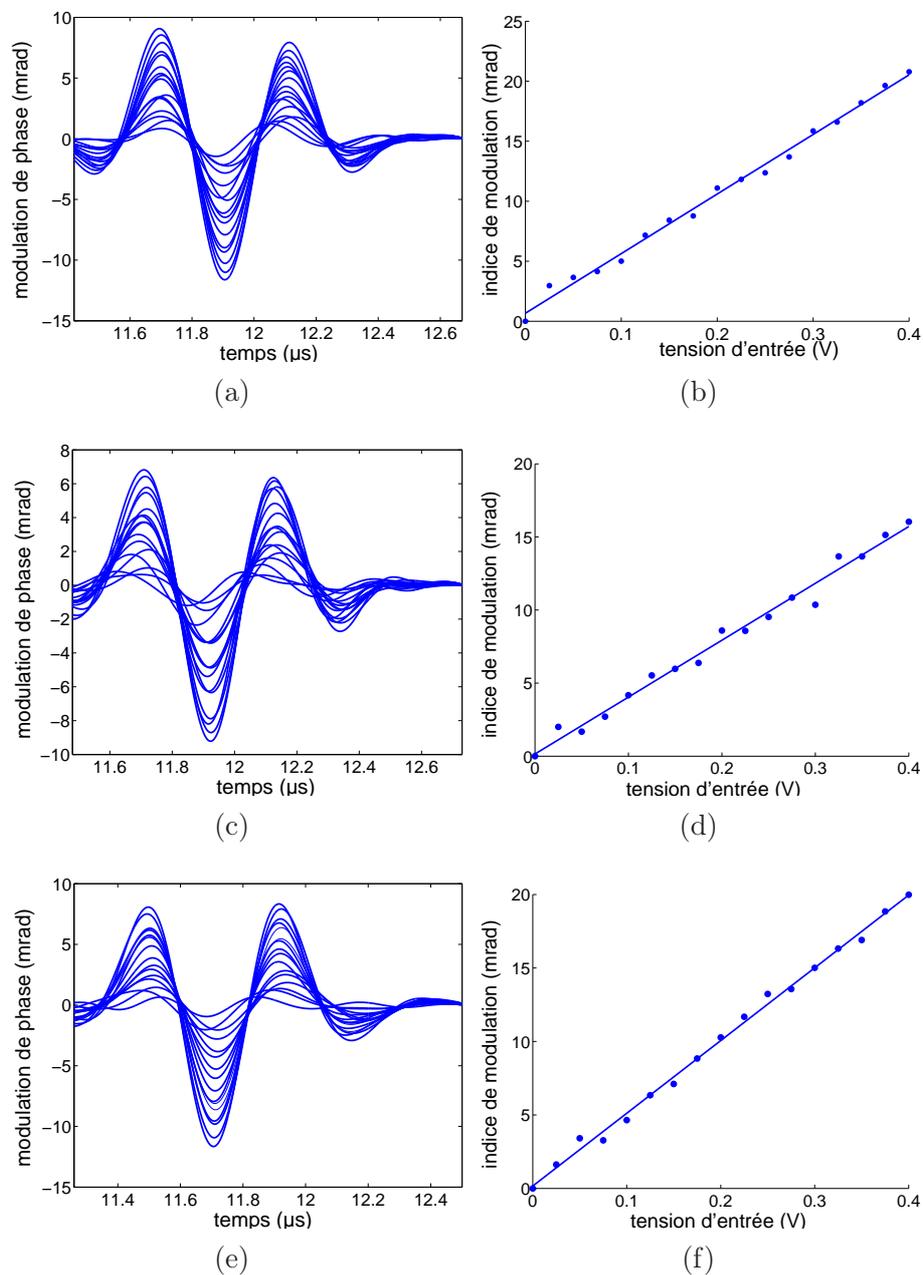


Figure 17 – Évolution temporelle de la modulation de phase $\varphi_0(t)$ dans l'échantillon de silice en contact avec l'échantillon de verre avec du gel échographique (a), de l'huile de silicone (c) et du salol (e) comme couplant et les indices de modulation $\Delta\varphi_0$ associés (b,d,f).

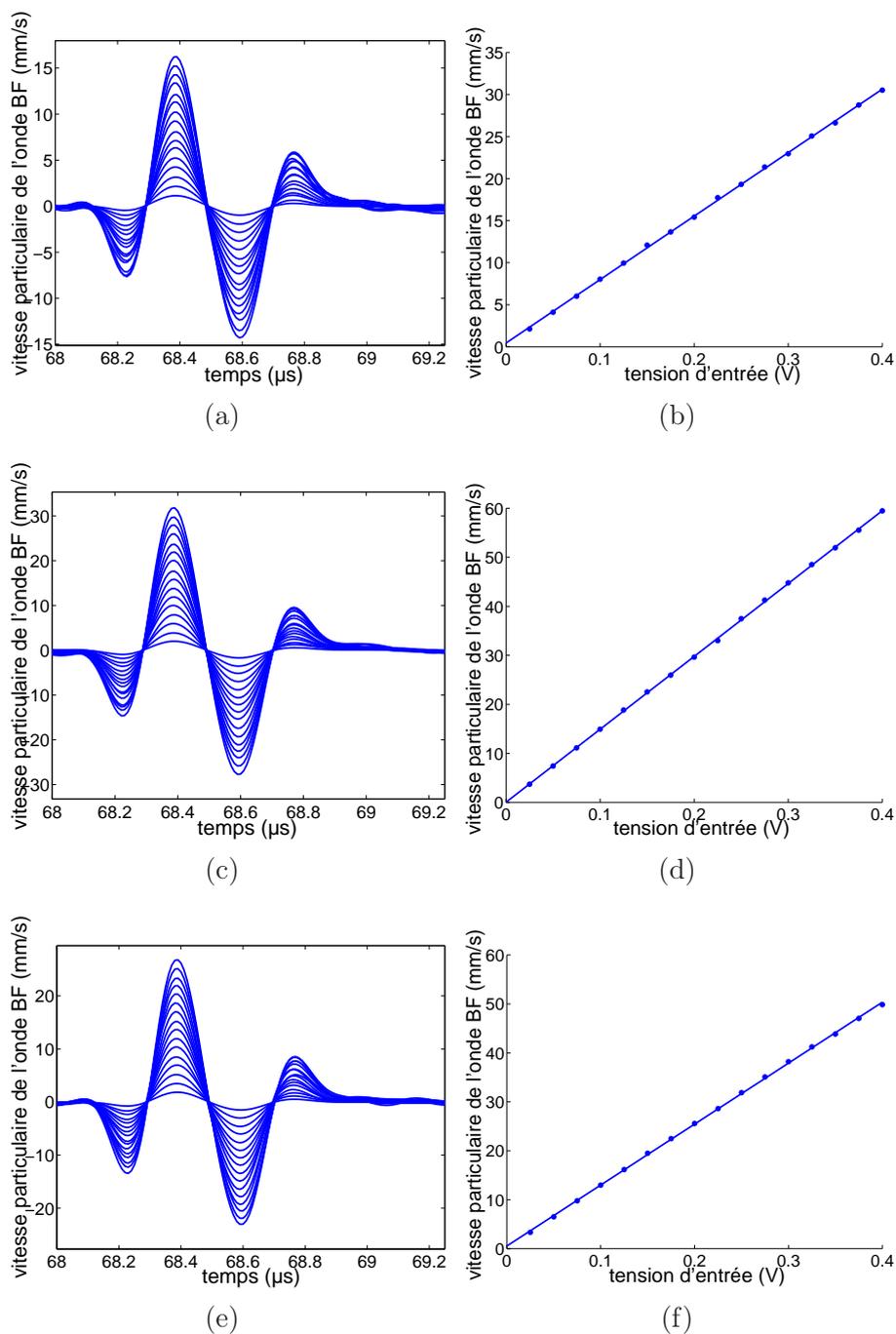


Figure 18 – Évolution temporelle de la vitesse particulaire de l'onde BF $v_{BF}(t)$ dans l'échantillon de silice en contact avec l'échantillon de verre avec du gel échographique (a), de l'huile de silicone (c) et du salol (e) comme couplant et les indices de vitesse V_{BF} associés (b,d,f).

3.2.1.3 Coefficient non linéaire dans les échantillons bi-couches

Le tableau 1 présente les résultats obtenus pour le coefficient non linéaire de la silice pour chaque échantillon bi-couches.

| Couplant | gel écographique | huile de silicone | salicylate de phényle |
|----------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| silice-silice | | | |
| β | -8 | -4,2 | -5,6 |
| silice-verre | | | |
| β | -8,5 | -3,4 | -5,5 |

Tab 1 – *Coefficients non linéaires de la silice mesurés dans les échantillons bi-couches avec les différents couplants*

L'interprétation de ces résultats permet de noter que :

- un déphasage sur l'apparition des maxima de la modulation de phase (figure 15 et 17 a, c et e) est observé. L'impulsion basse fréquence traversant l'interface subit un déphasage que nous avons considéré constant par rapport au niveau d'excitation de l'impulsion, mais il semblerait que ce ne soit pas le cas. Cette observation sera développée plus longuement dans la partie portant sur les limites de la méthode (I.3.3) ;
- l'ordre de grandeur du coefficient non linéaire β dans les échantillons bi-couches est respecté. Il est tout de même possible de noter une dépendance de ce coefficient au couplant. En effet, une signature du couplant apparaît quant à la valeur du coefficient non linéaire mesuré. Le salicylate de phényle donne des résultats cohérents avec ceux trouvés dans la partie I.3.1 et proches pour les deux expériences.

L'adaptation de la méthode de modulation de phase en contact est possible tout particulièrement dans le cas où le contact est réalisé avec un couplant rigide (salicylate de phényle). Un autre type de couplant rigide, la résine époxy, est donc étudié à travers la mesure du coefficient non linéaire dans les échantillons collés d'aluminium.

3.2.2 Échantillons collés d'aluminium de l'industrie aéronautique

Cette partie présente la mesure du coefficient non linéaire par une méthode de modulation de phase en contact pour des matériaux bi-couches collés en aluminium dont l'épaisseur du collage est de l'ordre de 0,5 mm. Le but est d'appliquer à de véritables échantillons bi-couches de l'industrie l'adaptation de la méthode de modulation de phase et de relever les limites pouvant apparaître en fonction de l'interface utilisée.

3.2.2.1 Collage sain

Les mesures dans l'échantillon en aluminium avec un collage sain sont présentées dans cette partie. L'interaction paramétrique créant la modulation de phase de l'onde haute fréquence $f_{HF} = 15$ MHz est réalisée dans la partie de l'échantillon d'épaisseur 20 mm et le transducteur BF, émettant une impulsion basse fréquence $f_{BF} = 2,2$ MHz, est collé du côté du bloc d'épaisseur 8 mm.

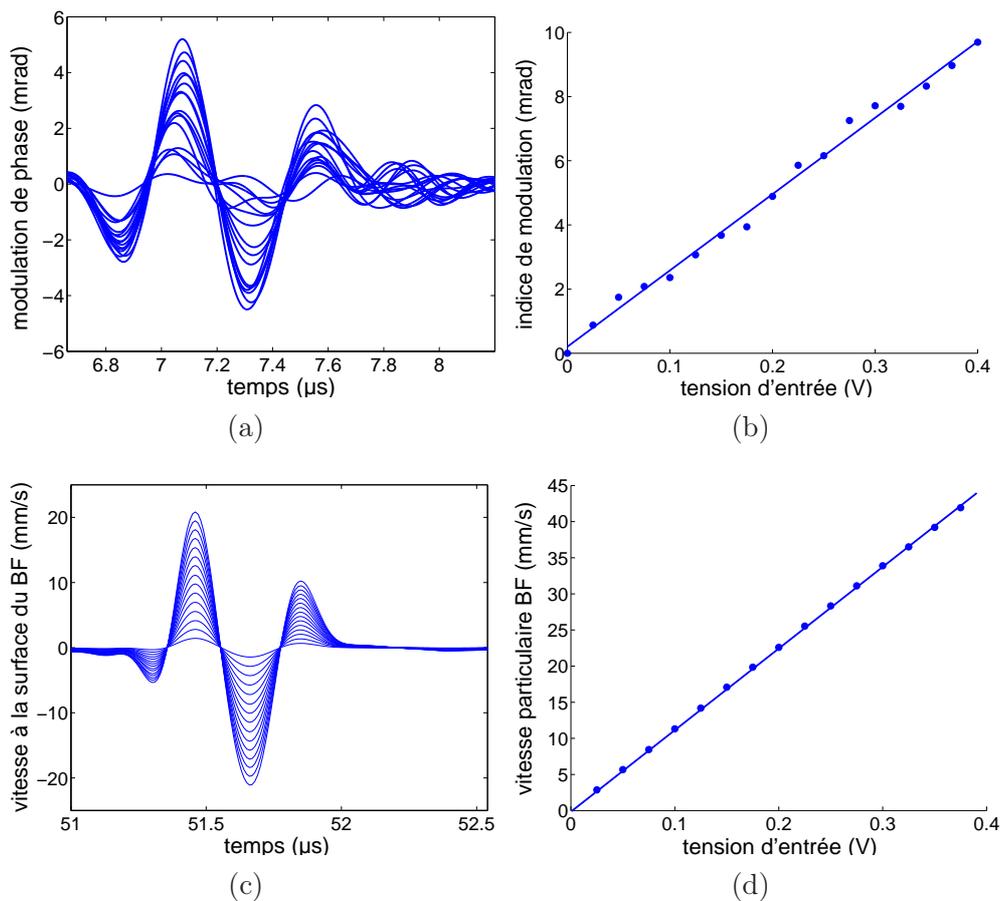


Figure 19 – Évolution temporelle dans un échantillon d'aluminium avec un collage sain (a) de la modulation de phase $\varphi_0(t)$, (c) de la vitesse particulaire de l'onde BF $v_{BF}(t)$. En (b) l'indice de modulation $\Delta\varphi_0$ et en (d) l'indice de vitesse particulaire V_{BF} .

On constate un décalage de phase plus important que dans le cas des échantillons bi-couches verre et silice. Un coefficient non linéaire pour l'aluminium de $\beta_{Al} \approx 5,5$ est déterminé à l'aide de la figure 19. Ce résultat est en accord avec les valeurs trouvées dans la littérature $\beta_{Al} = 5,9$ [32], $\beta_{Al} = 4,7$ [81], $\beta_{Al} = 8,41$ [66] ou $\beta_{Al} = 3,54$ [82]. La dispersion des valeurs de ce coefficient est grande du fait de la grande variété d'alliages en aluminium existants.

La rigidité de la résine époxy garantit également une bonne approche de la valeur du

coefficient non linéaire. Un collage dégradé va maintenant être étudié pour relever les défauts qui peuvent apparaître sur la mesure.

3.2.2.2 Collage dégradé

Dans cette partie, les mesures dans l'échantillon en aluminium avec un collage dégradé sont présentées. Le dispositif expérimental est identique, les fréquences utilisées sont $f_{HF} = 14,8$ MHz et $f_{BF} = 2,06$ MHz.

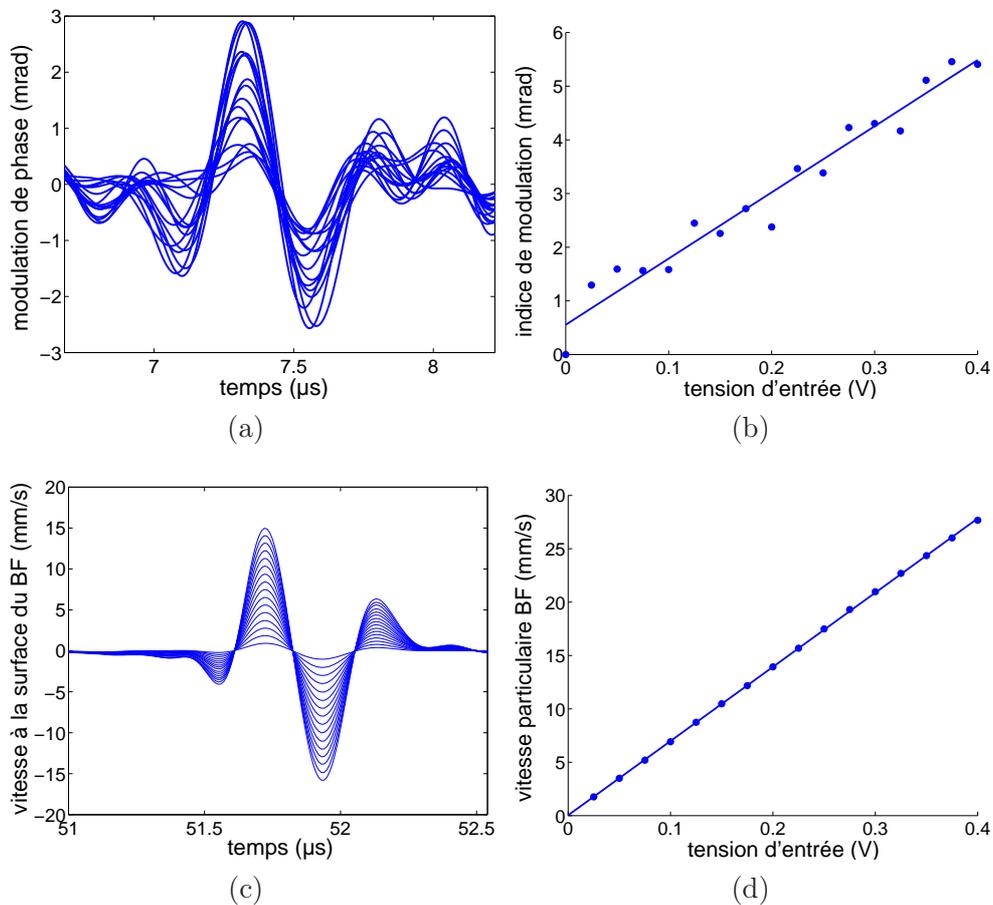


Figure 20 – Évolution temporelle dans un échantillon d'aluminium avec un collage dégradé (a) de la modulation de phase $\varphi_0(t)$, (c) de la vitesse particulaire de l'onde BF $v_{BF}(t)$. En (b) l'indice de modulation $\Delta\varphi_0$ et en (d) l'indice de vitesse particulaire V_{BF} .

Un coefficient non linéaire pour l'aluminium de $\beta \approx 4,5$ est déterminé au regard de la figure 20. L'incertitude par rapport à cette mesure est attribuée au fait que les niveaux de modulation mesurés (≈ 3 mrad) sont proches des niveaux de bruit associés à cette

méthode. La modulation de phase pour un échantillon avec un collage dégradé est plus bruitée et à un niveau moins important que celle pour un échantillon avec un collage sain. Ceci peut s'expliquer par la mauvaise transmission de l'onde basse fréquence à travers une interface dégradée confirmée par les courbes de calibration (figures 20 c et d) : le coefficient de réflexion est plus important à travers le mauvais collage. Le même type de déphasage qu'avec un échantillon bi-couches dû au déphasage de l'onde basse fréquence à l'interface est confirmé et amplifié par la présence du collage dégradé.

L'adaptation de la modulation de phase en contact pour la mesure du coefficient non linéaire d'une partie non accessible est donc également limitée par la "santé" du collage. L'influence de l'épaisseur du collage est maintenant étudiée grâce à des simulations numériques.

3.2.3 Influence de l'épaisseur du collage sur la mesure du coefficient non linéaire

Pour observer l'influence de l'épaisseur de l'interface dans un échantillon d'aluminium bi-couches sur la mesure par modulation de phase, des simulations numériques à l'aide de l'algorithme pseudo-spectral de propagation uni-dimensionnelle, présenté dans la partie I.1.2, sont réalisées. Il est apparu important de pouvoir visualiser la variation de phase que peut subir un train d'ondes haute fréquence superposé avec une impulsion basse fréquence réfléchi sur une interface dans un échantillon d'aluminium collé. Différentes épaisseurs de colle époxy ont été traitées (0,1 mm, 0,5 mm et 1 mm) pour la simulation numérique, un collage dégradé pouvant correspondre à un collage dont l'épaisseur est élevée. Les paramètres de simulations sont présentés dans le tableau 2.

| | Aluminium | Résine époxy |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Masse volumique | $\rho_{Al} = 2780 \text{kg.m}^{-3}$ | $\rho = 560 \text{kg.m}^{-3}$ |
| Module d'Young | $E_{Al} = 113 \text{ GPa}$ | $E = 3,5 \text{ GPa}$ |
| Coefficient non linéaire | $\beta_{Al} = 7$ | $\beta = 10$ |

Tab 2 – Paramètres des simulations numériques pour l'échantillon d'aluminium collé avec une couche de résine époxy.

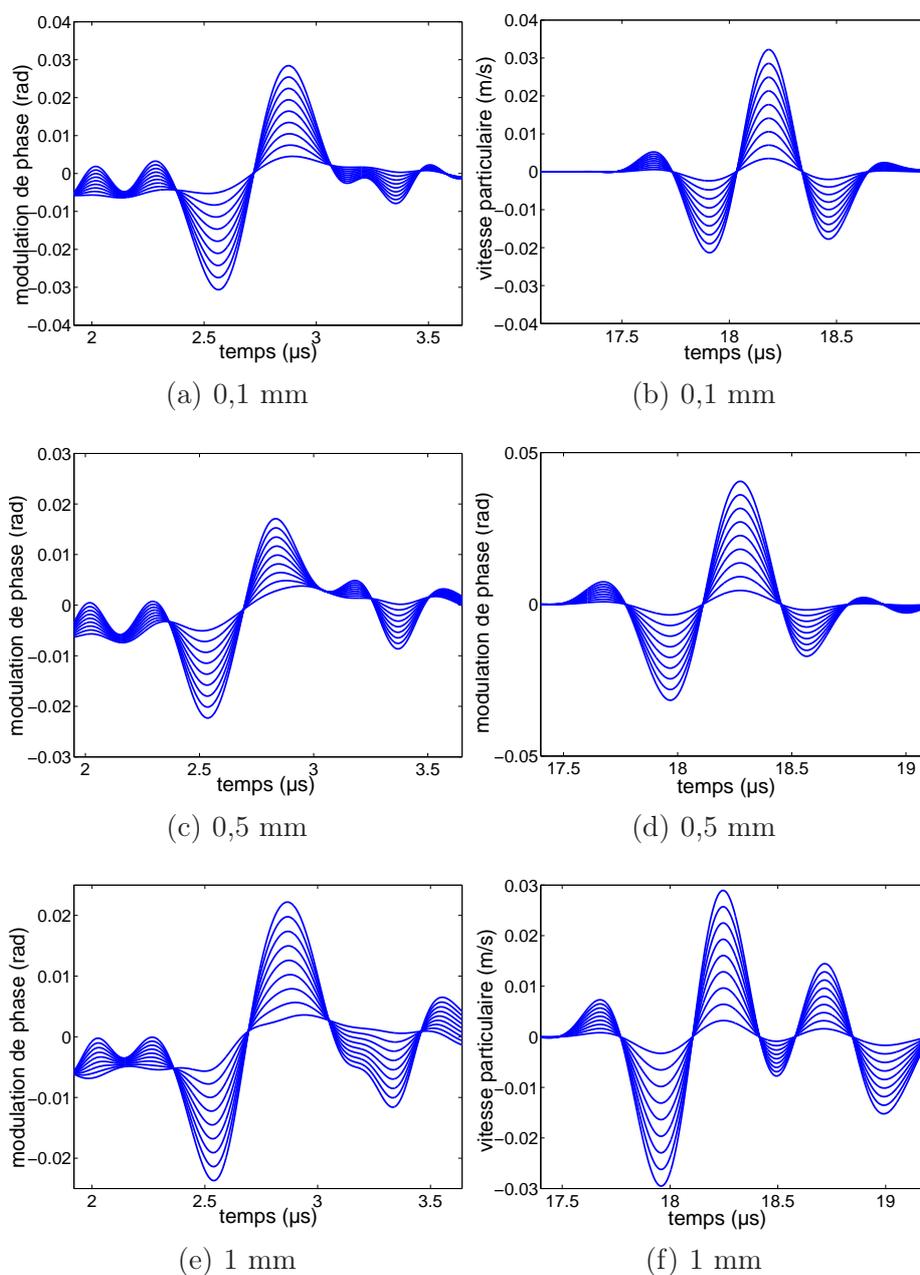


Figure 21 – Représentations temporelles (a-c-e) de la modulation de phase simulée dans un échantillon d'aluminium collé avec une interface en résine epoxy et (b-d-f) de la vitesse particulaire de l'impulsion basse fréquence pour différentes épaisseurs d'interface (a-b) 0,1 mm, (c-d) 0,5 mm, (e-f) 1 mm.

L'impulsion basse fréquence subit un phénomène de dispersion après la réflexion sur l'interface d'époxy (figure 21(b-d-f)) qui est différent pour chaque épaisseur et de plus en plus important. Malgré la possibilité de quantifier une telle déformation (mesure de l'impulsion basse fréquence seule, mesure du coefficient de réflexion), une variation de la

phase de l'onde haute fréquence est observée et suivant un protocole distinct par rapport au changement de l'impulsion basse fréquence. Il paraît donc difficile de pouvoir déterminer le coefficient de nonlinéarité β lorsque les deux paramètres importants V_{BF} et $\Delta\varphi_0$ possèdent une variation aussi significative. L'influence de l'épaisseur de l'interface sur de telles mesures est donc prouvée.

3.3 Limites de la méthode de modulation de phase

Au cours de cette étude, la méthode de modulation de phase en contact a été appliquée à différents échantillons : des échantillons homogènes, des échantillons homogènes placés en contact avec différents couplants et des échantillons en aluminium collés de l'industrie aéronautique. On a pu confirmer que l'application sur des échantillons homogènes est intéressante. Elle donne une information précise sur un paramètre global, le coefficient non linéaire β . L'adaptation à des échantillons bi-couches a permis d'obtenir des résultats de coefficient non linéaire β pour la silice et l'aluminium du même ordre de grandeur que ceux de la littérature.

Malgré tout, plusieurs niveaux de limitations ont été observés. Le premier niveau concerne la nature du contact. En effet, il a été noté qu'un contact réalisé avec un couplant "rigide", par exemple le salicylate de phényle, permet d'obtenir des résultats plus réalistes qu'avec d'autres couplants (gel échographique, huile de silicone) pour la détermination du coefficient non linéaire. L'application à des échantillons collés avec de la résine époxy a amené la même conclusion. Le deuxième niveau est directement lié à la nature du collage, un collage sain, permettant une bonne transmission de l'onde basse fréquence, va permettre une meilleure détermination du coefficient non linéaire qu'un collage dégradé. Le troisième niveau de limitation concerne l'épaisseur de l'interface. Des simulations numériques, réalisées à l'aide de l'algorithme pseudo-spectral, ont permis de montrer l'influence de l'épaisseur de la couche d'époxy sur les mesures par modulation de phase dans des échantillons collés. La limite a été atteinte pour une épaisseur de résine époxy de 1mm.

L'application de cette méthode à des échantillons fissurés est également difficile. Des expériences de modulation de phase dans des verres fissurés ont été tentées, mais sans succès. En effet, la présence de fissures change inévitablement la phase de l'onde haute fréquence et il apparaît difficile de mesurer la modulation d'une phase déjà perturbée.

Une autre limitation peut être mise en avant plus au niveau industriel et directement liée à la problématique du projet européen : détecter et localiser une zone fissurée. Les mesures quantitatives avec la méthode de modulation de phase en contact nous donne une information globale et non une information locale sur la nonlinéarité. L'utilisation d'une telle méthode se révèle donc difficile dans cette problématique. C'est pourquoi, nous avons décidé dans une deuxième partie du travail de Thèse de nous intéresser à des mesures qualitatives et localisées des propriétés non linéaires non classiques propres à la présence d'une zone fissurée.

Deuxième partie

Étude des propriétés non linéaires non classiques locales

La dernière décennie a été marquée par une croissance rapide de l'activité de recherche dans le secteur de l'acoustique non linéaire des matériaux non homogènes à l'échelle microscopique [83,84]. Cette définition de la non homogénéité est souvent utilisée pour un milieu contenant des éléments mécaniques tels que des grains, des jointures de grains, des fissures, des pores, des dislocations [16] qui ont une échelle spatiale plus importante que l'espace inter-atomique mais sensiblement moins importante que les longueurs d'ondes acoustiques considérées. L'intérêt de mesurer des phénomènes non linéaires acoustiques dans de tels matériaux, comme par exemple les roches, les métaux poly-cristallins et les céramiques, est motivé par deux facteurs :

- le niveau de nonlinéarité acoustique relevé dans des matériaux micro-inhomogènes peut avoir un ordre de grandeur quatre fois plus élevé que celui relevé dans des monocristaux, des matériaux homogènes ou des liquides dont le coefficient non linéaire est compris entre 2 et 30 [4, 85] ;
- les paramètres acoustiques non linéaires sont beaucoup plus sensibles à la nature et à l'état des micro-inhomogénéités que les paramètres linéaires [84].

La forte nonlinéarité acoustique produite par ce type de matériaux n'est pas due à l'anharmonicité du potentiel inter-atomique mais aux mouvements non linéaires des éléments mécaniques responsables de l'inhomogénéité. Ces phénomènes ont permis de comprendre que l'acoustique non linéaire pouvait devenir un outil extrêmement prometteur pour la caractérisation non destructive des matériaux inhomogènes (fissurés dans notre étude).

Pour mener à bien cette approche permettant de localiser les sources de nonlinéarité, nous avons choisi d'utiliser la puissance de la focalisation par retournement temporel développé par l'équipe de Mathias Fink au sein du Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA) de l'Université Paris VII - Denis Diderot [86]. Ce principe est utilisé comme un outil qui permet soit de focaliser et solliciter localement la nonlinéarité, soit d'extraire la source de nonlinéarité. Cette approche, dans un premier temps expérimentale puis ensuite numérique, a été présentée en février 2005 à l'occasion de la réunion de première année du projet AERONEWS organisée à Blois [87, 88]. L'approche expérimentale a été développée au cours de l'année 2005 par une collaboration entre le LUSI et l'équipe d'Alexander Sutin du Davidson Laboratory à Hoboken aux États-Unis [89] et l'approche numérique a été initiée au cours de la même année dans le cadre d'une collaboration entre le LUSI et Olivier Bou Matar de l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie à Villeneuve d'Ascq [43]. Ce principe a ensuite été largement développé expérimentalement [90, 91] et numériquement [92] par les partenaires du projet AERONEWS.

Deux approches différentes combinant le retournement temporel et l'analyse non linéaire [43, 93, 94] vont être abordées au cours de cette partie :

- la première combinaison exploite le fait qu'un défaut va agir comme une source de nonlinéarité dans un échantillon. L'extraction de sa signature non linéaire et la rétropropagation de ce signal temporellement retourné, va permettre une détection du défaut. Ce principe, appelé NEWS-TR, a été tout d'abord étudié dans le cas de simulations numériques 2D [94–96] et 3D [97] pour en montrer la faisabilité et a ensuite été appliqué à un échantillon fissuré ;
 - la deuxième combinaison, basée sur l'augmentation du niveau de contrainte au point de rétrofocalisation d'un signal temporellement retourné, permet d'étudier la signature non linéaire qui peut être relevée en ce point. Tout d'abord, une étude sur le
-

niveau de nonlinéarité mesuré au point de rétrofocalisation a été réalisée. Le principe, appelé TR-NEWS, a ensuite été appliqué à un échantillon fissuré d'un point de vue expérimental [98] et numérique.

Dans le premier chapitre, la modélisation du comportement non linéaire non classique d'une micro-inhomogénéité est présentée. L'extension de l'algorithme pseudo-spectral à ce type de comportement est traitée. Le second chapitre décrit la méthode ultrasonore utilisée pour localiser une zone dégradée. Ensuite, les résultats concernant l'application de la méthode de NEWS-TR sont détaillés. Enfin, une étude sur la faisabilité et l'application de la méthode de TR-NEWS est présentée dans le dernier chapitre.
