

Validation expérimentale in vitro de la reconstruction adaptée CLAIFbC

s'est donc naturellement imposée pour apprécier objectivement les effets aberrateurs du cristallin lors de l'emploi de barrette US HF, d'une part, et la capacité de notre méthode d'imagerie US à les corriger, d'autre part.

Grâce à l'emploi d'un cristallin synthétique amovible, les deux formes extrêmes qu'emprunte le cristallin lors de l'accommodation, *i.e.* accommodée et désaccommodée ou relâchée, sont investiguées. Le protocole expérimental mis en place à cet effet, décrit dans la seconde partie de ce chapitre, permet pour chacune de ces deux formes, la confrontation de CLAIFbC à la reconstruction conventionnelle ainsi qu'à une reconstruction adaptée négligeant les effets de la réfraction (CLAPC). S'ensuit la présentation des résultats associés, dans lesquels figurent une étude quantitative de la résolution et la fidélité spatiale et du contraste, pour chacune des techniques de reconstruction, effectuée à l'aide d'un fantôme de fil en de nombreux points d'intérêts pour l'imagerie US oculaire. Les effets aberrateurs des formes accommodées et désaccommodées du cristallin sur la reconstruction conventionnelle sont ensuite discutés ainsi que les apports respectifs des reconstructions adaptées CLAIFbC et CLAPC pour l'échographie oculaire au moyen de barrette US linéaire HF.

Sommaire

5.1	Réalisation d'un fantôme bi-phasique du milieu intra-oculaire	156
5.1.1	Choix des matériaux	157
5.1.2	Réalisation des moules pour cristallin synthétique	159
5.1.2.1	Définition des formes accommodée et non-accommodée	159
5.1.2.2	Fabrication des moules α et Ω	160
5.1.3	Caractérisation acoustique HF de la turpentine et de la gélatine à 15% en fonction de la température	163
5.1.3.1	Matériel et méthode	163
5.1.3.2	Célérité US mesurée	166
5.1.3.3	Atténuation US mesurée	167

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

5.2	Protocole expérimental pour l'imagerie échographique du fantôme intra-oculaire	169
5.2.1	Un fantôme de fil pour quantifier la résolution à 20 MHz	169
5.2.2	Protocole expérimental d'imagerie US	170
5.2.3	Recueil des signaux RF, formation de faisceau en émission et de voies en réception	172
5.2.3.1	Précisions sur la reconstruction CLAPC	174
5.2.4	Traitement appliqué aux images échographiques pour l'analyse quantitative	175
5.3	Résultats expérimentaux des reconstructions conventionnelle, CLAPC et CLAIFbC	177
5.3.1	Résultats qualitatifs sur formes cristalliniennes accommodées et non-accommodées	177
5.3.2	Analyse quantitative de la résolution et de la fidélité spatiale	180
5.4	Analyse des résultats quantitatifs et discussion	187
5.4.1	Appréciation générale des B-scans obtenus au travers des cristallins synthétiques	187
5.4.1.1	Artéfacts	187
5.4.1.2	Distorsions spatiales	188
5.4.2	Fidélité spatiale	188
5.4.2.1	Des réflecteurs ponctuels dans l'ombre acoustique des cristallins synthétiques	188
5.4.2.2	Du contour des cristallins synthétiques	189
5.4.3	Résolution spatiale	190
5.4.4	Contraste	190
5.4.5	Impact de la forme du cristallin sur les B-scans	192
5.4.6	Remarque sur les performances de la technique CLAIFbC en terme de convergence	193
5.5	Étude et résultats complémentaires	193
5.5.1	Effets du F-number en réception	193
5.5.2	Reconstructions conventionnelle, CLAPC et CLAIFbC issues d'une émission conventionnelle	197
5.6	Conclusion	199

5.1 Réalisation d'un fantôme bi-phasique du milieu intra-oculaire

Le fantôme que nous avons réalisé pour sa validation expérimentale s'inscrit dans cette représentation bi-phasique du milieu intra-oculaire, l'objectif étant de reproduire le rapport de célérité existant entre le cristallin ($\sim \frac{1}{10}$ ^{ème} du volume oculaire) et les humeurs qui l'entourent ($\sim \frac{1}{10}$ ^{ème} d'humeur aqueuse et $\sim \frac{8}{10}$ ^{ème} de vitré). Cette partie décrit comment le couple de matériaux pour représenter le cristallin et les humeurs a été sélectionné, puis le procédé de moulage utilisé pour synthétiser deux cristallins adoptant les formes accommodées et désaccommodées d'un adulte sain.

5.1.1 Choix des matériaux

Le choix des matériaux pour représenter le cristallin et les humeurs n'a pas été guidé par le souci d'approcher précisément les caractéristiques acoustiques *in vivo* (célérité, atténuation et impédance) mais par celui de pouvoir reproduire et observer les effets aberrateurs qui existent à l'interface entre ces tissus. C'est donc le rapport de célérité *in vivo* $\mu_{L/H}$ *i.e.* $\sim 110\%$, que nous nous sommes attachés à reproduire. De plus, l'atténuation dans les deux milieux devait être suffisamment raisonnable pour d'une part permettre une profondeur d'exploration satisfaisante au regard de la pratique ultrasonographique oculaire et d'autre part laisser les effets aberrateurs prédominer dans la dégradation des B-scans.

À ces considérations acoustiques s'ajoutent des contraintes mécaniques et physico-chimiques :

- Le matériau du cristallin synthétique doit être propice au moulage.
- Il ne doit pas y avoir de miscibilité ni d'interactions chimiques entre les deux matériaux.

Pour synthétiser le cristallin, il nous faut donc un matériau que l'on puisse couler et capable par la suite de conserver une forme donnée, de préférence dans des conditions normales de température et de pression. Aussi, notre choix s'est d'abord porté vers le silicone, matériau dont la fabrication débute par une phase liquide et visqueuse avant sa polymérisation à température ambiante. La célérité des ondes longitudinales dans le silicone, comprise entre 970 m/s et 1050 m/s environ, implique de trouver un matériau de célérité avoisinant les 900 m/s pour représenter les humeurs. Les candidats potentiels sont alors :

- l'argon : 926 m/s à -185°C
- l'oxygène liquide : 900 m/s à -182°C
- le césium : 967 m/s à 28.5°C
- le tetrachlorure de carbone : 900 m/s à 25°C

De tels matériaux, rares, toxiques ou bien inutilisables sans de lourds protocoles expérimentaux ne sont pas envisageables en pratique.

Nous nous sommes alors orientés vers la gélatine, matériau économique issu de l'industrie agroalimentaire et présentant une particularité acoustique intéressante : la célérité des US varie significativement en fonction de sa concentration. À 20°C , elle passe de 1480 m/s pour une concentration de 0.5% à 1620 m/s pour une concentration de 30%, comme en attestent les mesures effectuées par Parker et al.[Parker et Povey, 2012] (voir Fig. 5.1).

Deux liquides sont alors susceptibles d'apporter le rapport de célérité souhaité avec le cristallin synthétique : l'huile minérale et la turpentine, de célérités US respectives 1440 m/s et 1280 m/s, à 25°C . Tous deux étant bon marché et sans contrainte d'utilisation rédhibitoire, la mesure de l'atténuation US dans ces deux milieux nous a permis de les départager (Fig. 5.2). Bien que dégageant des vapeurs toxiques nécessitant le port d'un masque dotés de filtres de type A2, l'atténuation environ quatre fois plus faible à 20 MHz dans la turpentine par rapport à l'huile minérale a imposé ce liquide comme milieu pour représenter les humeurs.

Pour émuler le ratio de célérité cristallin/humeur, nous avons alors choisi une gélatine concentrée à 15%. Cette concentration s'est avérée être la valeur minimale pour laquelle la forme du cristallin synthétique est pérenne et supporte les contraintes appliquées lors du démoulage. La combinaison de la gélatine à 15 % à la turpentine offre un ratio de célérité $\mu_{L/H}$ accentué par rapport à la situation *in vivo* ; l'écart relatif de célérité étant prati-

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

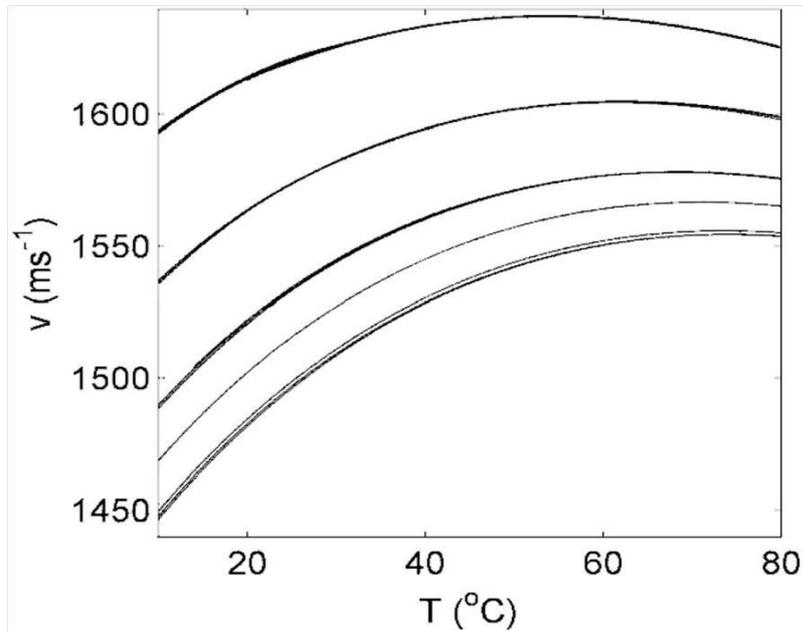
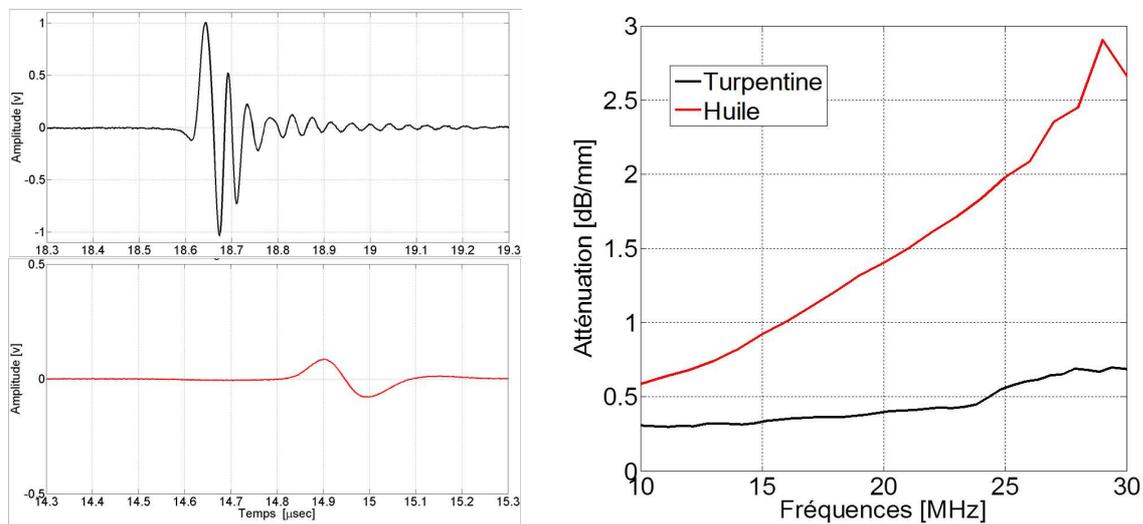


FIGURE 5.1 – Courbes de célérité des ondes longitudinales dans la gélatine en fonction de la concentration C et de la température. De bas en haut : $C = 0, 0.5, 5, 10, 20$ et 30% . D'après *N.G Parker et M.J.W. Povey [Parker et Povey, 2012]*.



(a) Echogrammes sur cible métallique à la distance focale pour l'huile (en bas) et pour la turpentine (en haut)

(b) Coefficient d'atténuation dans l'huile et la turpentine

FIGURE 5.2 – Comparaison des atténuations dans la turpentine (en noir) et l'huile minérale (en rouge) mesurées à 25°C par une méthode de substitution en pulse-écho.

quement doublé. Cette exacerbation de $\mu_{L/H}$ constitue un moyen intéressant pour mieux cerner les effets aberrateurs associés à la géométrie biconvexe du cristallin et apprécier, de

plus, le bon fonctionnement de CLAIFbC lorsque la réfraction s'intensifie.

5.1.2 Réalisation des moules pour cristallin synthétique

Du fait de l'important changement de forme subit par le cristallin au cours du processus d'accommodation, pouvant par conséquent affecter différemment les B-scans, nous avons décidé d'investiguer ses deux états extrêmes, c'est à dire la forme accommodée et la forme désaccommodée également dite relâchée.

5.1.2.1 Définition des formes accommodée et non-accommodée

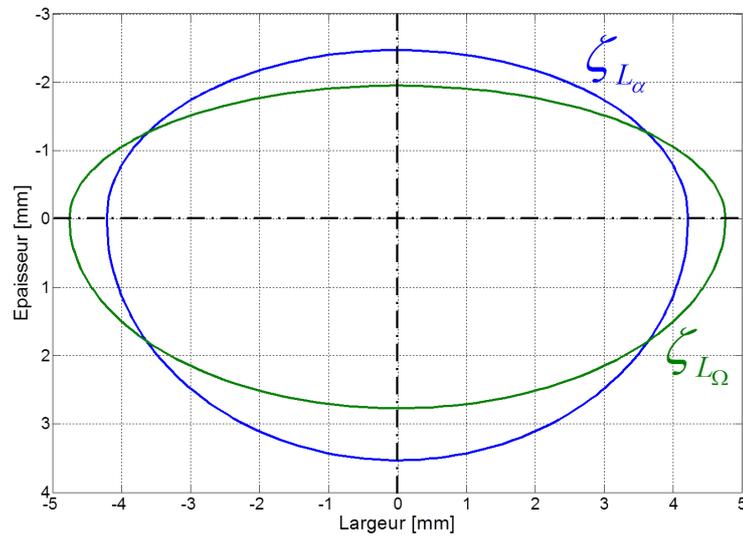


FIGURE 5.3 – Géométrie des formes accommodées (ζ_{L_α} en bleu) et désaccommodées (ζ_{L_Ω} en vert) telles que définies dans la table 5.1 et utilisées pour la réalisation des moules.

Les paramètres choisis pour décrire ces deux formes s'inscrivent dans l'hypothèse d'une représentation ellipsoïdale du cristallin, telle que décrite dans le chapitre 4. Afin de différencier par la suite les résultats se rapportant à la forme accommodée de ceux de la forme désaccommodée, nous avons décidé de leur attribuer respectivement l'indice α et Ω .

La forme accommodée α a ainsi été définie en moyennant les données recueillies *in vitro* par Rosen *et al.* [Rosen *et al.*, 2006] sur 37 cristallins humains âgés de 20 à 99 ans. L'observation *in vitro* de la géométrie du cristallin renseigne - en l'absence de contraintes particulières - sur l'état accommodatif maximal que peut atteindre un cristallin une fois débarrassé de la tension zonulaire et de la pression intra-oculaire. La géométrie observée par Rosen *et al.* peut donc être légèrement plus bombée que la forme accommodée *in vivo*.

Les dimensions de la forme désaccommodée Ω ont ensuite été déduites de celles de la forme accommodée en appliquant la régression linéaire proposée par Sheppard *et al.* [Sheppard *et al.*, 2011] sur le grand-axe équatorial L_{eq} , lorsque l'on considère une désaccommodation de $D=12 \delta$ (*e.g.* $L_{eq\Omega} = L_{eq\alpha} - 0.09D$). Cette régression provient d'une étude des changements de forme du cristallin au cours du processus accommodatif (sur une plage de 0.17 à 8δ), menée par résonance magnétique 3D sur $n = 6$ cristallins humains et dans laquelle Sheppard *et al.* ont proposé un fit linéaire des paramètres géométriques associés

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

e.g. l'épaisseur axiale $e_{ap} = e_{ant} + e_{post}$, le grand-axe équatorial, *etc.* La valeur de $e_{ap\Omega}$ a ensuite été fixée à partir de $L_{eq\Omega}$ de façon à assurer un volume identique aux deux géométries, conformément aux observations effectuées par Hermans *et al.* Ces derniers ont en effet démontré, dans une étude récente combinant imagerie de Scheimpflug et imagerie par résonance magnétique, que le volume du cristallin humain demeure constant tout au long du processus d'accommodation [Hermans *et al.*, 2009]. Notons que le ratio $\frac{e_{ant}}{e_{post}}$ est identique pour les deux formes α et Ω , ce qui n'est pas tout à fait fidèle à notre connaissance actuelle de l'accommodation. En effet, la courbure postérieure du cristallin décroît de façon plus importante que la courbure antérieure lors de son relâchement. Néanmoins, par manque de données bibliographiques concordantes sur la valeur de $\frac{e_{ant}}{e_{post}}$ à l'état désaccommodé, nous avons préféré considérer que ce ratio était constant.

Les dimensions des formes accommodée et désaccommodée sont reportées Table 5.1, conjointement aux caractéristiques géométriques typiquement associées en phacométrie *i.e.* le rayon de courbure ρ_{arc} sur l'axe optique (au niveau des pôles, en x_L), l'aire de la section axiale (tranche dans le sens antéro-postérieur, CSA en anglais pour Cross Section Area) et le volume, en supposant une symétrie de rotation autour de l'axe optique.

Le rayon de courbure ρ_{arc} et l'aire CSA correspondant à notre géométrie ellipsoïdale sont décrits respectivement par les équations 5.1 et 5.2.

$$\rho_{arc} = \left| \frac{(1 + \xi'_{arc}(x_L)^2)^{3/2}}{\xi''_{arc}(x_L)} \right| \quad (5.1)$$

$$CSA = \frac{\pi L_{eq}}{4} (e_{ant} + e_{post}) \quad (5.2)$$

En supposant une symétrie de rotation autour de l'axe optique, le volume du cristallin s'obtient par l'équation 5.3 suivante :

$$V = \frac{\pi L_{eq}^2}{6} (e_{ant} + e_{post}) \quad (5.3)$$

5.1.2.2 Fabrication des moules α et Ω

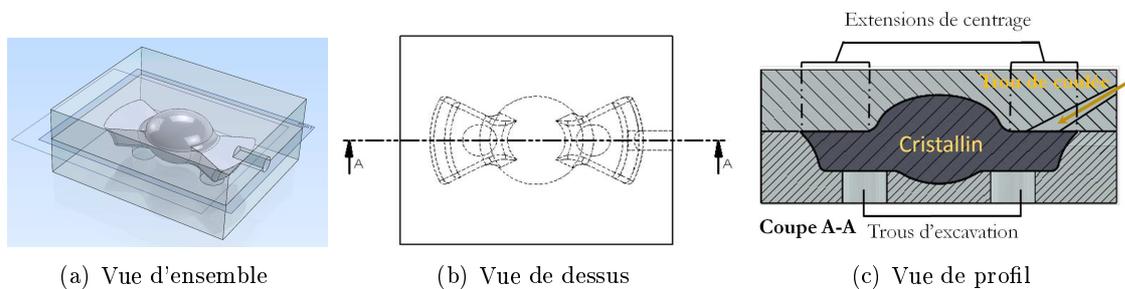


FIGURE 5.4 – Dessins techniques du moule utilisé pour réaliser le cristallin synthétique de forme accommodée α .

Les deux moules nécessaires à la réalisation des cristallins synthétiques de forme accommodée et désaccommodée ont été fabriqués par impression 3D, depuis les dessins techniques

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

	Forme accommodée α	Forme désaccommodée Ω
e_{ant} [mm]	2.47	1.95
e_{post} [mm]	3.53	2.77
L_{eq} [mm]	8.44	9.52
ρ_{ant} [mm]	7.21	11.62
ρ_{post} [mm]	5.04	8.18
CSA [mm ²]	39.77	35.29
$Volume$ [μ L]	223.78	223.98

TABLE 5.1 – Formes accommodée et non accommodée, décrivant un cristallin humain adulte moyen, utilisées dans la réalisation des moules des cristallins synthétiques. Les valeurs des demi-petit axes antérieur e_{ant} et postérieur e_{post} et du grand-axe équatorial L_{eq} sont reportées, pour chacune des deux ellipsoïdes, dans la partie supérieure du tableau. La partie inférieure comprend les caractéristiques géométriques associées *i.e.* le rayon de courbure antérieur et postérieur sur l'axe optique l'aire CSA et le volume, calculées respectivement, pour chaque forme, depuis les équations 5.1, 5.2, et 5.3. Notons que $V_\alpha \cong V_\Omega$.

réalisés sous Solidworks[©]. L'imprimante 3D utilisée correspond au modèle Alaris Objet 30 de la société M2G system (France). Parmi les différents matériaux utilisables avec cette imprimante se trouve le Veroclear, matériau transparent en PMMA avantageux pour contrôler l'absence de bulles à l'issue de l'injection de la gélatine. Ce matériau permet de réaliser des couches d'impression de 18 μ m d'épaisseur, offrant une résolution suffisante pour garantir des surfaces assez lisses, et ne pas compromettre ainsi la réfraction attendue au contour.

Les deux moules femelles conçus pour réaliser les empreintes des formes accommodée et désaccommodée sont constitués, chacun de deux pièces permettant le démoulage (Fig ; 5.5) : une supérieure comprenant la portion antérieure du cristallin, et une inférieure comprenant la portion postérieure. Le plan de jonction entre ces deux pièces a été défini au niveau du plan équatorial (jonction antéro-postérieure) de façon à ce que l'impression 3D ne nécessite pas l'emploi d'un gel de soutien temporaire. En effet, en fonction du plan de coupe, un gel de soutien peut être temporairement appliqué pour réaliser des structures creuses. Bien que ce gel soluble dans l'eau se retire par simple lavage, il affecte l'état des surfaces à son contact. Celle-ci présentent alors une granulométrie élevée susceptible de perturber la réfraction attendue.

L'empreinte dessinée par chacun des deux moules diffère d'un cristallin original par la présence de deux extensions périphériques ajoutées afin de faciliter, au moyen d'un support prévu à cet effet, le centrage du cristallin synthétique sous la sonde US lors des expériences *in vitro* (voir Figs. 5.4 et 5.5). Ce support permet également d'ajuster la distance du cristallin par rapport à la sonde. Celle-ci est choisie de façon à se rapprocher de la configuration *in vivo* lors de la réalisation de B-scans trans-cornéaux. Le centrage du cristallin est important pour garantir que le plan d'insonification comprenne l'axe antéro-postérieur et par conséquent que la coupe observée corresponde à celle des formes α et Ω telles que définies dans le tableau 5.1. De plus, le centrage permet au balayage linéaire de la sonde US d'être en incidence normale avec les segments antérieurs et postérieurs, et donc assure que les réflexions aux interfaces soient contenues dans le plan d'imagerie.

Précisons que les extensions périphériques des cristallins synthétiques ne sont pas com-

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

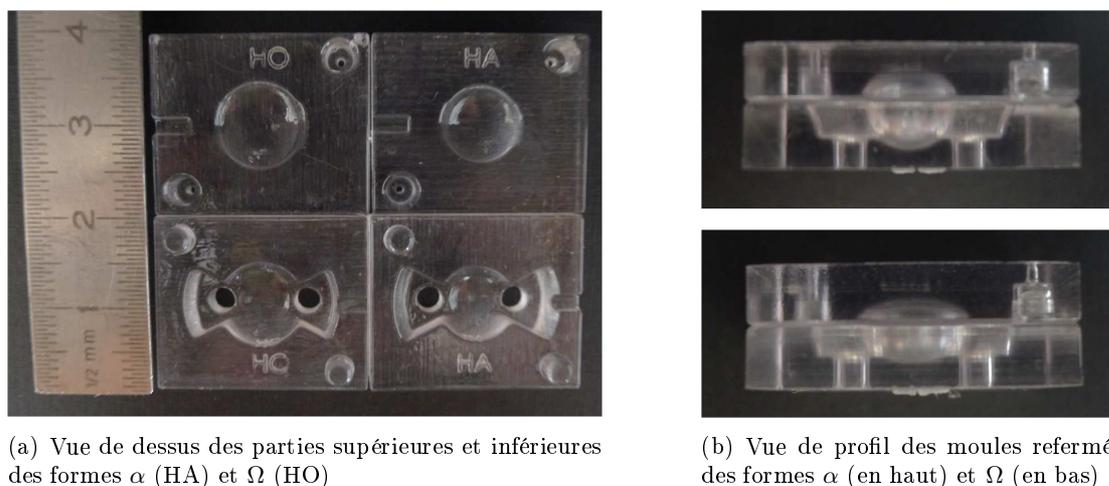


FIGURE 5.5 – Photographies des moules utilisés pour réaliser les cristallins synthétiques accommodé et désaccommodé.

prises dans le plan d'imagerie US grâce à un positionnement de l'axe de ces dernières perpendiculairement à celui-ci, comme illustré par la vue de dessus du schéma du protocole d'imagerie (voir Fig. 5.13).

Enfin, les moules comportent deux trous d'excavation et un trou de coulée, absents de l'empreinte finale. Le trou de coulée permet le remplissage du moule par la gélatine chauffée. Les trous d'excavations ont une double utilité : ils favorisent l'évacuation de l'air lors de la phase d'injection et ils constituent des points de poussée facilitant le démoulage une fois la gélatine refroidie.

La gélatine résiduelle, présente sur les cristallins synthétiques, au niveau des trous d'excavation et du plan de jonction des deux parties du moule est retirée au scalpel à l'issue du démoulage.

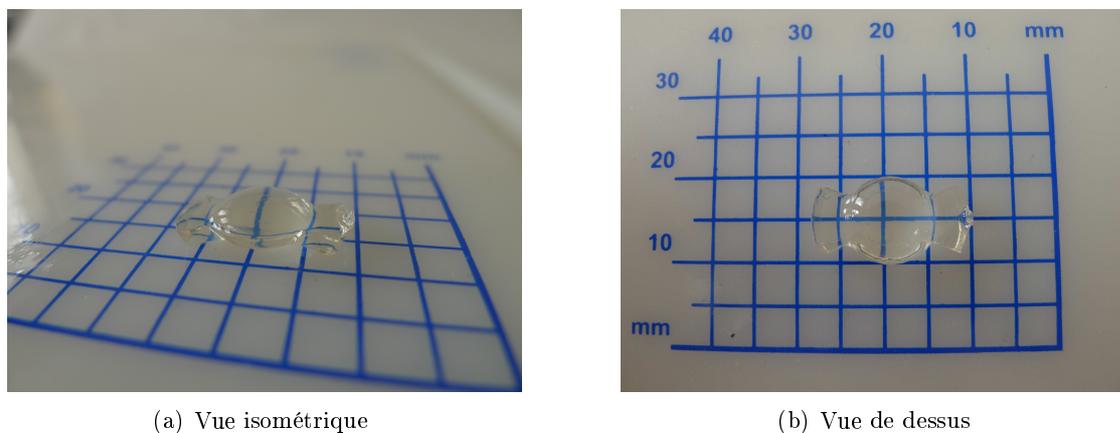


FIGURE 5.6 – Photographies du cristallin synthétique de forme désaccommodée Ω composé de gélatine concentrée à 15%.

Au final, le fantôme intra-oculaire est constitué d'un cristallin synthétique amovible

(Fig. 5.6) de forme accommodée ou désaccommodée, placé à une distance anatomique de la sonde linéaire US et immergé dans la turpentine.

5.1.3 Caractérisation acoustique HF de la turpentine et de la gélatine à 15% en fonction de la température

Les propriétés acoustiques de la turpentine et la gélatine à 15%, sélectionnées pour représenter respectivement les humeurs et le cristallin, ont été caractérisées par substitution en mode pulse-écho [Techavipoo *et al.*, 2004] [Arditi *et al.*, 1991], en fonction de la température.

La connaissance de la célérité, l'atténuation et l'impédance acoustique de ces milieux est nécessaire au bon paramétrage de la technique de reconstruction CLAIFbC. Afin d'estimer au mieux ces paramètres, dans cette phase de validation expérimentale, nous avons choisi, en l'absence de climatisation de notre salle d'expérimentation, d'étudier leur dépendance sur une plage de température comprise entre 20°C et 40°C.

5.1.3.1 Matériel et méthode

La gélatine (ref. W0220CH) et la turpentine de densité 770 g/L (ref. W0510H) proviennent de la société Fisher Chemical Co. (Illkirch, France). La concentration en gélatine à 15% est obtenue en diluant de la gélatine pure (solide translucide) dans de l'eau, en respectant les proportions suivantes (Eq. 5.4) :

$$m_{gelatine} = \frac{ratio}{1 - ratio} m_{eau} \quad (5.4)$$

où le ratio représente la concentration en gélatine pure (%). Les masses d'eau et de gélatine sont pesées avec une balance A&D (ref. HR200) précise à ± 0.1 mg.

L'homogénéité de la concentration est garantie en chauffant le mélange dans un bécher disposant d'un agitateur magnétique.

Chaîne d'acquisition

La chaîne instrumentale, utilisée pour la caractérisation acoustique en fonction de la température (coefficient d'atténuation et célérité) de la turpentine et de la gélatine à 15%, est illustrée par la figure 5.7.

L'ensemble des mesures est mené en double-transmission à l'aide d'un transducteur mono-élément Imasonic en PVDF, focalisé à 11.56 mm dans l'eau pure à 25°C, offrant une bande passante relative d'environ 100% pour une fréquence centrale de 23 MHz. Un émetteur/récepteur Panametrics (ref. 5900PR) génère des impulsions électriques HF large bande (200 MHz), d'énergie $2\mu\text{J}$, à une cadence de 500 Hz (PRF), permettant ainsi au transducteur l'émission et la réception d'échos US. Celui-ci est positionné perpendiculairement à une cible métallique au moyen d'un système de translation 3D (ref. DC 500, société OWIS) de précision micrométrique (1 pas = $0.5 \mu\text{m}$). Les signaux RF sont recueillis, à une fréquence d'échantillonnage de 2.5 GHz, à l'aide d'un oscilloscope à phosphore numérique de marque Tektronix (ref. DPO 4034) et de profondeur de numérisation 8 bit. Le monitoring de la température est assuré par une sonde platine Dostmann (ref. P655-LOG), placée à proximité du faisceau US du transducteur. Les acquisitions sont déclenchées tous

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

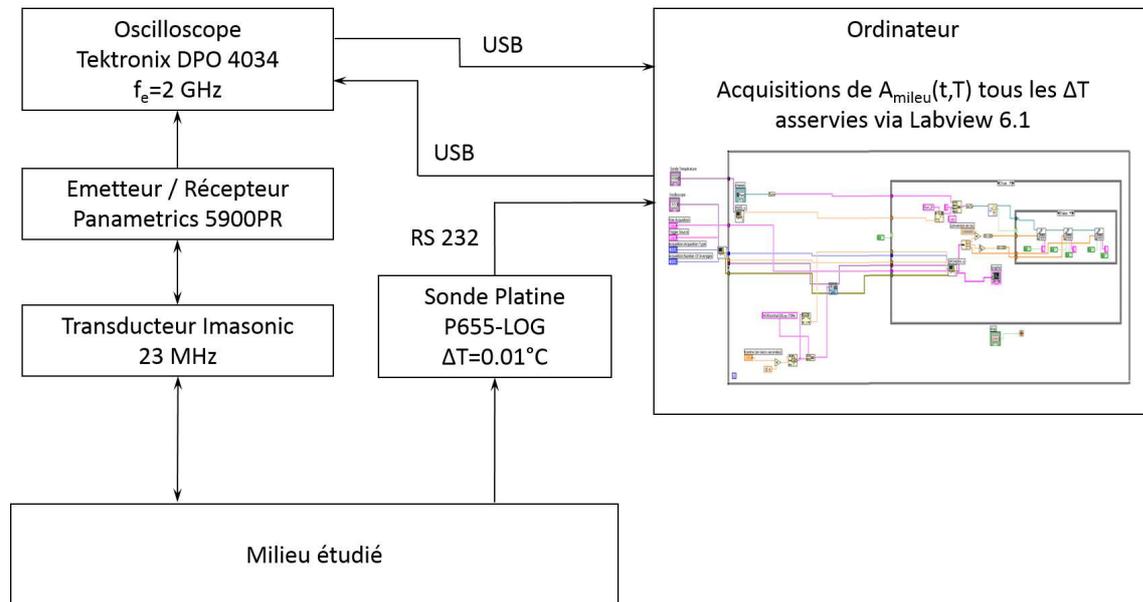


FIGURE 5.7 – Chaîne d'acquisition pour la caractérisation en pulse-écho de la gélatine et de la turpentine en fonction de la température.

les $\Delta T = 0.01^\circ\text{C}$ - ce qui correspond à la précision de la sonde platine - *via* un programme développé sous LabView 6.1.

Protocole expérimental pour la mesure des célérité et atténuation US en fonction de la température

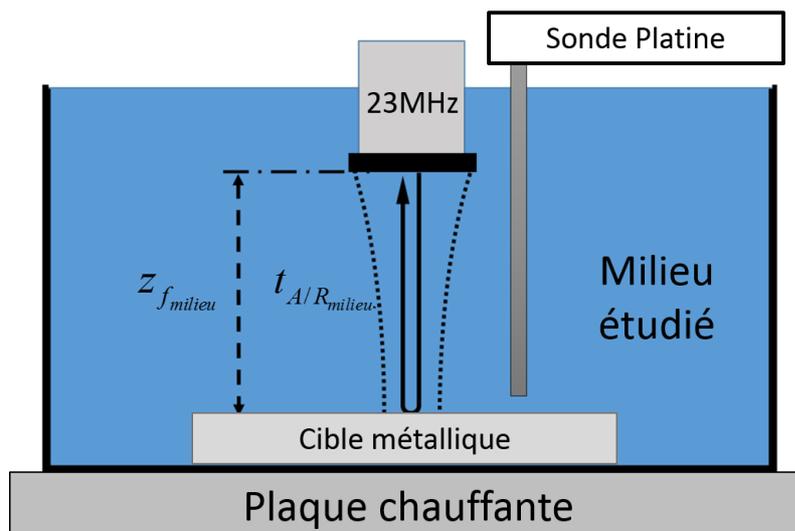


FIGURE 5.8 – Protocole expérimental pour la mesure en double-transmission de la célérité et de l'atténuation US par substitution.

Le protocole expérimental, illustré par la figure 5.8, se déroule en plusieurs étapes :

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

1- Tout d'abord le milieu à caractériser est chauffé à 40°C. La hauteur du transducteur par rapport à la cible métallique est réglée de sorte à obtenir un écho d'amplitude pic-pic maximale. L'écho de cible recueilli provient alors de la distance focale, $z_{f_{milieu}}$, au sein de ce milieu. Précisons qu'à cette température, la gélatine est en phase liquide.

2- La plaque chauffante utilisée pour porter le milieu étudié à 40°C est ensuite éteinte et l'acquisition de l'écho de cible $A_{milieu}(t, T)$ est alors déclenchée tous les ΔT °C.

3- Une fois la température ambiante T_{ref} de la salle atteinte, le milieu étudié est remplacé par de l'eau distillée, en prenant soin de maintenir le transducteur et la cible métallique à la distance $z_{f_{milieu}}$ que l'on souhaite déterminer. Pour ce faire, la connaissance précise de la célérité US, pour une température donnée, au sein de l'eau distillée est mise à profit. En effet, Bilaniuk et Wong ont proposé un fit polynomial d'ordre 5 de celle-ci (Eq. 5.5), à partir de mesures effectuées sur une plage de température comprise entre 0°C et 100°C [Bilaniuk, 1993].

$$c_{eau}(T) = \sum_{n=0}^5 k_n T^n \text{ avec } \begin{cases} k_0 = 1.40238744e^3 \\ k_1 = 5.03835027 \\ k_2 = -5.81142290e^{-2} \\ k_3 = 3.34558776e^{-4} \\ k_4 = -1.48150040e^{-6} \\ k_5 = 3.16081885e^{-9} \end{cases} \quad (5.5)$$

La distance $z_{f_{milieu}}$ s'obtient alors, avec précision, au moyen de la relation suivante (Eq. 5.8) :

$$z_{f_{milieu}} = c_{eau}(T_{ref}) \frac{t_{A/R, eau}(T_{ref})}{2} \quad (5.6)$$

où $t_{A/R, eau}$ est le temps de vol aller/retour de l'écho US émis par le transducteur et réfléchi par la cible métallique pour la température T_{ref} .

De même que pour les milieux étudiés, ce temps aller/retour est calculé comme le centroïde temporel de l'enveloppe de l'écho recueilli dans l'eau distillée (Eq. 5.7) :

$$t_{A/R} = \frac{\sum_n t_n \times \mathcal{H}\{|A_{milieu}|\}(t_n)}{\sum_n \mathcal{H}\{|A_{milieu}|\}(t_n)} - \frac{T_{pulse}}{2} \quad (5.7)$$

pour les échantillons n du signal A_{milieu} correspondant à l'écho de la cible métallique, avec \mathcal{H} l'opération de transformation de Hilbert et T_{pulse} la durée de l'écho. On retranche la demi longueur de l'écho, car le trig de l'oscilloscope se fait dès le déclenchement de l'impulsion électrique de l'émetteur/récepteur Panametrics, et, par conséquent, précède l'émission du pulse.

Mesure de la célérité US Une fois la distance $z_{f_{milieu}}$ connue, la célérité dans le milieu étudié à la température T se déduit de l'expression 5.8 :

$$c_{milieu}(T) = \frac{2z_{f_{milieu}}}{t_{A/R, milieu}(T)} \quad (5.8)$$

où $t_{A/R,milieu}$ correspond au centroïde temporel de l'écho réfléchi par la cible métallique (Eq. 5.7).

La méthode d'intercorrélation a été écartée au profit du calcul du centroïde, dans la détermination des temps de vol aller/retour, en raison de son manque de robustesse face aux brusques changements de forme des échos de cible dans la turpentine. La caractéristique diphasique de ce liquide d'origine végétale (produit de la distillation de résine de pin) est probablement la cause de ces changements.

4- Ensuite, de même que pour le milieu étudié, l'eau distillée est chauffée à 40°C. Le transducteur est alors positionné à la distance focale dans l'eau distillée.

5- Enfin, la plaque chauffante est éteinte et l'écho de cible $A_{eau}(t, T)$ est recueilli tous les ΔT °C.

Mesure du coefficient d'atténuation US Le coefficient d'atténuation, pour chaque milieu étudié à la température T , est alors déterminé, en négligeant les effets de diffractions, au moyen de l'expression 5.9 suivante :

$$\alpha_{milieu}(f, T) = -\frac{10}{2z_{f,milieu}} \log_{10} \left(\left| \frac{\text{FFT} (A_{milieu}(t, T))}{\text{FFT} (A_{eau}(t, T))} \right|^2 \right) \quad (5.9)$$

où $Z_{f,milieu}$ est la distance focale US du transducteur dans le milieu considéré (*i.e.* la gélatine à 15% ou la turpentine) à laquelle est placée la cible métallique, $A_{milieu}(t, T)$ l'écho de cible recueilli dans l'eau à une température T , $A_{milieu}(t, T)$ l'écho de cible recueilli dans le milieu testé à une température T , et FFT l'opération de transformation de Fourier discrète.

Le positionnement du transducteur aux points focaux de chaque milieu garanti la pertinence de la mesure du coefficient d'atténuation par substitution, en particulier dans le cas de l'étude de la turpentine, milieu où la célérité US est sensiblement éloignée de celle dans l'eau.

5.1.3.2 Célérité US mesurée

Les courbes de mesure de célérité US, effectuées entre 20°C et 40°C, sont représentées sur la figure 5.9, pour la turpentine et la gélatine à 15%.

Le comportement opposé des deux courbes sur la plage de température étudiée constitue un moyen intéressant pour ajuster l'intensité des aberrations de phase en fonction de la température. Le rapport de célérité $\mu_{L/H}$ passe ainsi d'une valeur de 1.186 à 20°C pour atteindre 1.283 à 40°C. Dans l'expérience de validation qui nous intéresse, le rapport de célérité offert autour de 20°C semble être le plus adéquat pour observer des effets aberrateurs exacerbés tout en restant suffisamment proche de la réalité *in vivo*.

Notons que les résultats obtenus dans la gélatine concordent avec ceux de Povey et Parker [Parker et Povey, 2012] pour la concentration considérée (voir Fig. 5.1).

Les courbes de célérité US ont été approchées pour chaque milieu étudié par un polynôme d'ordre 4. Nous avons déduits de ces mesures de célérité, les approximations polynomiales d'ordre 4 pour chaque milieu étudié.

Le fit polynomial d'ordre 4 (Eq. 5.10) déduit de la courbe de célérité de la turpentine mesurée entre 20°C et 40°C est :

$$c_{turpentine}(T) = -4.2088e^{-4}T^4 + 4.9246e^{-2}T^3 - 2.1313T^2 + 37.285T + 1071 \quad (5.10)$$

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

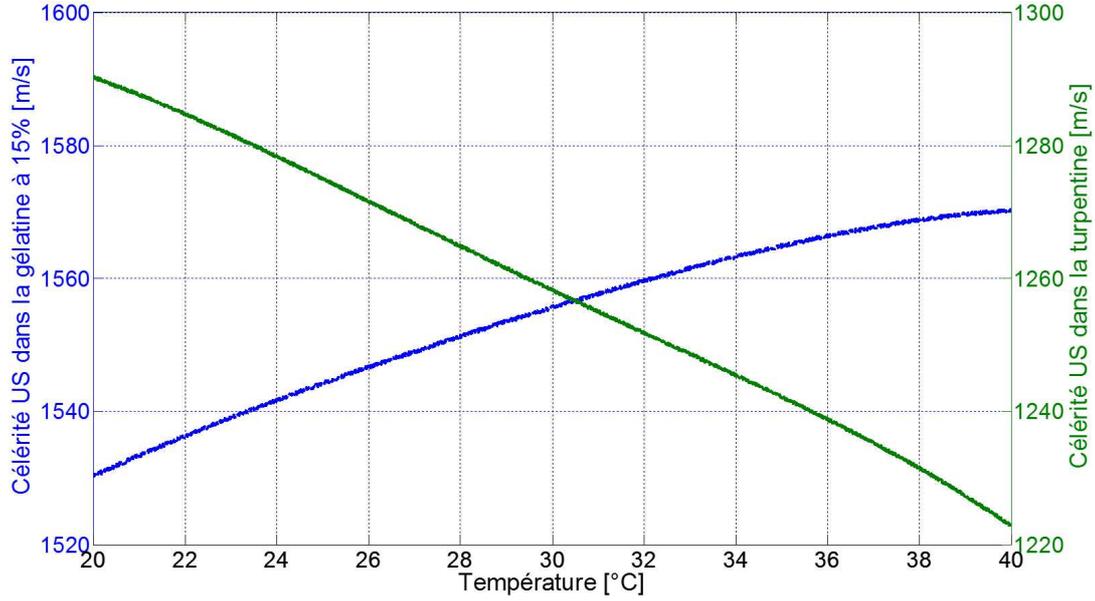


FIGURE 5.9 – Célérité US mesurée en fonction de la température au sein de la turpentine (vert) et la gélatine à 15% (bleu).

De même, nous avons déduit de la courbe de célérité dans la gélatine à 15% le fit (Eq. 5.11) suivant :

$$c_{gelatine15\%}(T) = -1.4131e^{-4}T^4 + 1.6004e^{-2}T^3 - 7.1668e^{-1}T^2 + 17.144T + 1369 \quad (5.11)$$

5.1.3.3 Atténuation US mesurée

Les courbes de mesure de l'atténuation, effectuées entre 20°C et 40°C, sont représentées sur la figure 5.10, pour la turpentine et la gélatine à 15%. Les courbes en cascade représentant la dépendance en fréquence du coefficient d'atténuation pour les différentes températures étudiées, sont présentées sur une plage de 10 à 30 MHz (Figs. 5.10(c) et 5.10(d)). La dépendance du coefficient d'atténuation en fonction de la température pour la fréquence 20 MHz est ensuite extraite de ces courbes en cascade (Figs. 5.10(c) et 5.10(d)). Cette fréquence correspond à la fréquence centrale de la barrette linéaire utilisée dans le protocole de validation de CLAIFbC décrit ci-après.

Les courbes du coefficient d'atténuation à 20 MHz en fonction de la température ont été approchées pour chaque milieu étudié par un polynôme d'ordre 2. Le fit quadratique (Eq. 5.12) déduit de l'atténuation dans la turpentine est :

$$\alpha_{turpentine}(T) \Big|_{20MHz} = 3.5113e^{-3}T^2 - 1.1163e^{-1}T + 9.9459e^{-1} \quad (5.12)$$

De même, dans la gélatine à 15% nous avons obtenu (Eq. 5.13) :

$$\alpha_{gelatine15\%}(T) \Big|_{20MHz} = 1.4561e^{-3}T^2 - 8.4823e^{-2}T + 1.3473 \quad (5.13)$$

5.1. RÉALISATION D'UN FANTÔME BI-PHASIQUE DU MILIEU INTRA-OCULAIRE

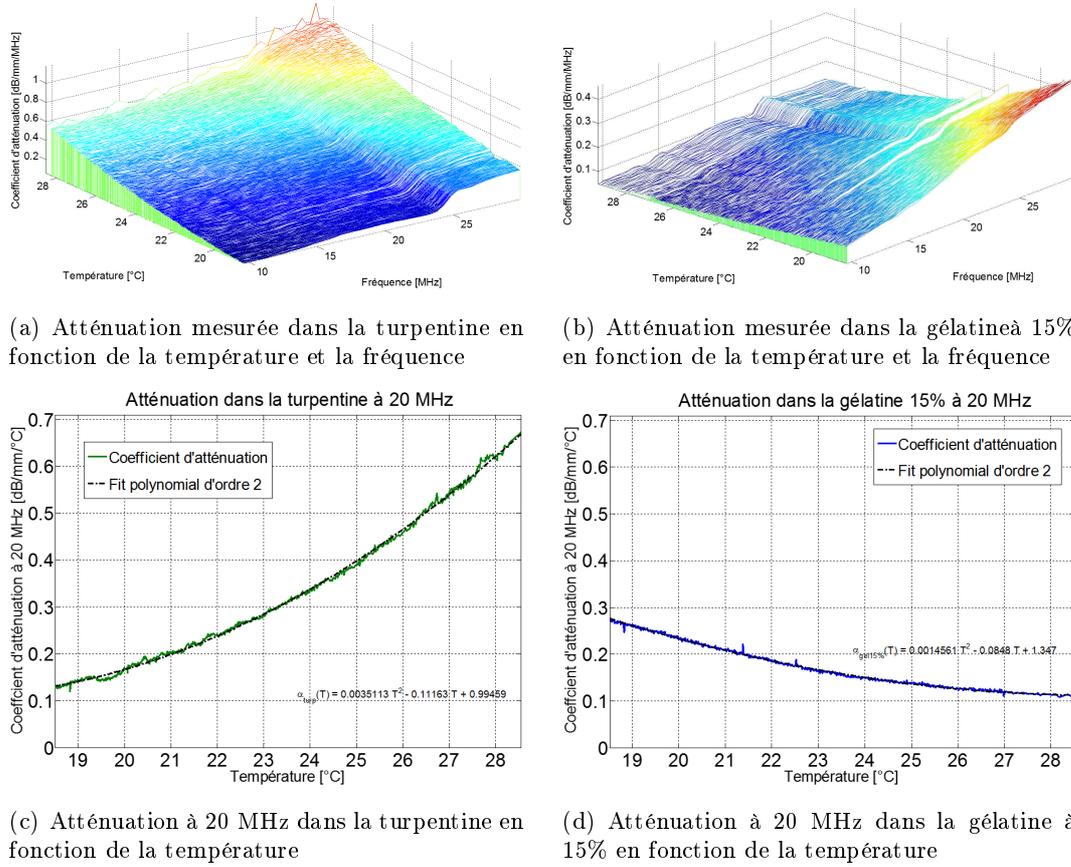


FIGURE 5.10 – Courbes en cascade représentant la dépendance en fréquence, entre 10 et 30 MHz, du coefficient d’atténuation de la gélatine à 15% (5.10(b)) et de la turpentine (5.10(a)), pour les différentes températures étudiées. Les courbes du coefficient d’atténuation à 20 MHz en sont extraites, pour les deux milieux (5.10(c) et 5.10(d)).

L’ensemble des paramètres acoustiques utilisés dans les expériences sur fantôme intra-oculaire pour la validation de CLAIFbC, et déduits des présentes mesures, sont reportés dans la table 5.2, aux températures T_α et T_Ω relevées respectivement lors des acquisitions au travers de la forme accommodée et désaccommodée. La température T_α se situant légèrement en dessous de la plage de mesure, les célérités dans la turpentine et la gélatine à 15% ont été extrapolées à l’aide des approximation polynomiales d’ordre 4 5.11 et 5.10.

L’impédance acoustique des deux milieux étudiés a été obtenue au moyen de la relation (Eq. 5.14) suivante :

$$Z_{milieu}(T) = \rho_{milieu} \times c_{milieu}(T) \quad (5.14)$$

où ρ_{milieu} est la masse volumique de valeur 770 kg/m^3 dans la turpentine et 1150 kg/m^3 dans la gélatine à 15%.

La table 5.2 révèle un ratio de célérité de 1.18 dans l’expérience sur la forme accommodée et de 1.187 sur celle désaccommodée. Ce faible écart garanti des effets aberrateurs et réfractifs de même ampleur entre les deux expériences, permettant ainsi l’observation objective de l’impact de la forme du cristallin synthétique dans la dégradation des B-scans.

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE

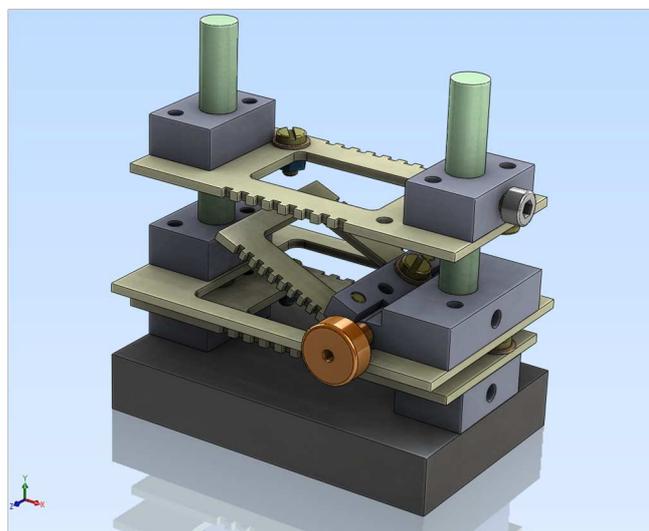
		c_{milieu} [m/s]	α_{milieu} [dB/mm]	Z_{milieu} [Mrayl]
Turpentine	$T_\alpha = 18.60^\circ\text{C}$	1292	0.128	0.994
	$T_\Omega = 20.15^\circ\text{C}$	1289	0.174	0.992
Gélatine à 15%	$T_\alpha = 18.60^\circ\text{C}$	1525	0.283	1.772
	$T_\Omega = 20.15^\circ\text{C}$	1530	0.237	1.759

TABLE 5.2 – Propriétés acoustiques à 20MHz des milieux émulant les humeurs et le cristallin aux températures des expériences visant à valider CLAIFbC

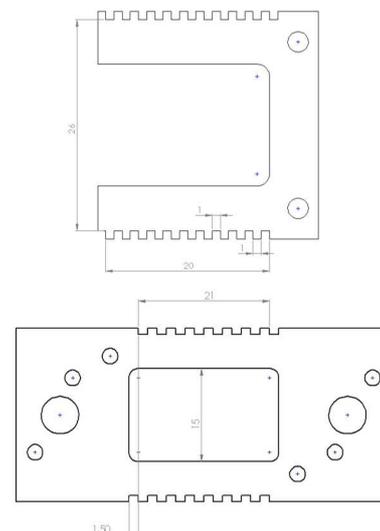
5.2 Protocole expérimental pour l'imagerie échographique du fantôme intra-oculaire

L'objectif du protocole expérimental décrit dans cette partie est de valider et quantifier, *in vitro* au moyen du fantôme intra-oculaire réalisé, les performances de la technique de reconstruction adaptée CLAIFbC, au regard de la reconstruction conventionnelle ou adaptée également, mais négligeant la réfraction à l'interface cristallin/humeurs (CLAPC). Cette dernière a été introduite afin d'apprécier l'intérêt de considérer la réfraction dans la compensation des aberrations de phases cristalliniennes et a été baptisée CLAPC pour Crystalline Lens Phase Aberration Partial Correction.

5.2.1 Un fantôme de fil pour quantifier la résolution à 20 MHz



(a) Vue d'ensemble



(b) Vue de dessus du plateau inclinable (en haut) et horizontal (en bas)

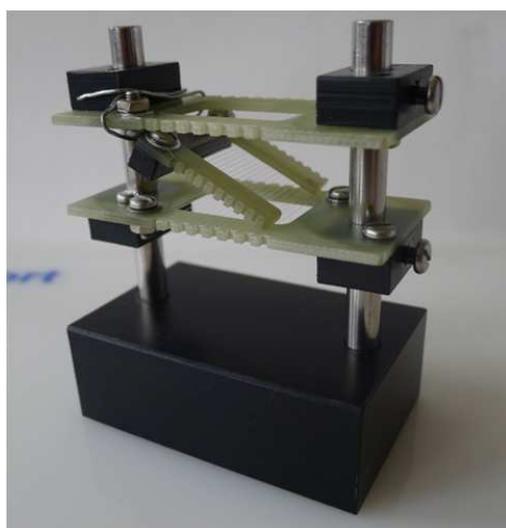
FIGURE 5.11 – Dessins techniques du fantôme de résolution HF et de ses plateaux mobiles. Les fils ne sont pas représentés.

Un fantôme de fils a été réalisé pour mesurer la résolution à 20 MHz. Il est constitué de trois plateaux mobiles (réglables en hauteur) comprenant chacun un unique fil de faible

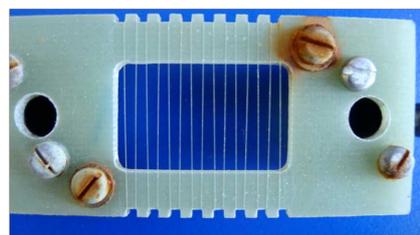
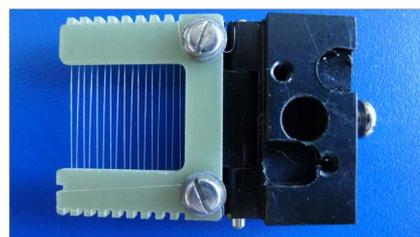
5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE

diamètre (Nanofils $\varnothing 37.5 \mu\text{m}$) disposé en réseau linéique comme illustré sur la figure 5.12. Deux des plateaux sont horizontaux et encadrent, dans le dispositif expérimental décrit ci-après, un plateau inclinable. Le fil utilisé, normalement destiné à la pêche, est produit par la société Berkley (USA) et constitué d'un mélange de polyéthylène et de Dyneema (polyéthylène à haut poids moléculaire). Chaque plateau est doté de créneaux disposés en quinconce par rapport aux créneaux du côté opposé (voir Fig. 5.12(b)). Cette disposition permet de n'utiliser qu'un seul fil par plateau, tendu au moyen de deux vis, ce qui facilite ainsi sa pose et minimise l'encombrement servant à son maintien. Une fois tendu le fil est plaqué au niveau du coin de chaque créneau, ce qui assure au réseau linéique qu'il forme, grâce à la disposition en quinconce, une périodicité égale à la largeur des créneaux. Cette périodicité est égale à 1.5 mm pour les deux plateaux horizontaux et à 1 mm pour le plateau inclinable, soit des espacements correspondant respectivement à 23 et 15 longueurs d'onde dans la turpentine.

En dépit d'une longueur d'onde US dans le polyéthylène seulement trois fois supérieure au diamètre du fil utilisé, nous assimilons le réseau linéique de chaque plateau à un ensemble de réflecteurs ponctuels (un facteur 10 serait plus rigoureux).



(a) Dispositif expérimental.



(b) Plateaux crénellés inclinable (en haut - fils espacés de 1 mm) et horizontal (en bas - fils espacés de 1.5 mm).

FIGURE 5.12 – Photographie du fantôme de fils expérimental. Le support du plateau inclinable a été retiré afin d'augmenter l'angulation de celui-ci entre les deux plateaux horizontaux.

5.2.2 Protocole expérimental d'imagerie US

Le dispositif du protocole expérimental mis en place pour la validation de la technique de reconstruction CLAIFbC est schématisé dans la figure 5.13. Le balayage linéaire d'une sous-ouverture émettrice de la barrette US permet l'insonification du fantôme de résolution au travers du milieu aberrateur *i.e.* le cristallin synthétique, dans une configuration sonde/cristallin visant à approcher celle rencontrée *in vivo*, lors de l'échographie oculaire

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE

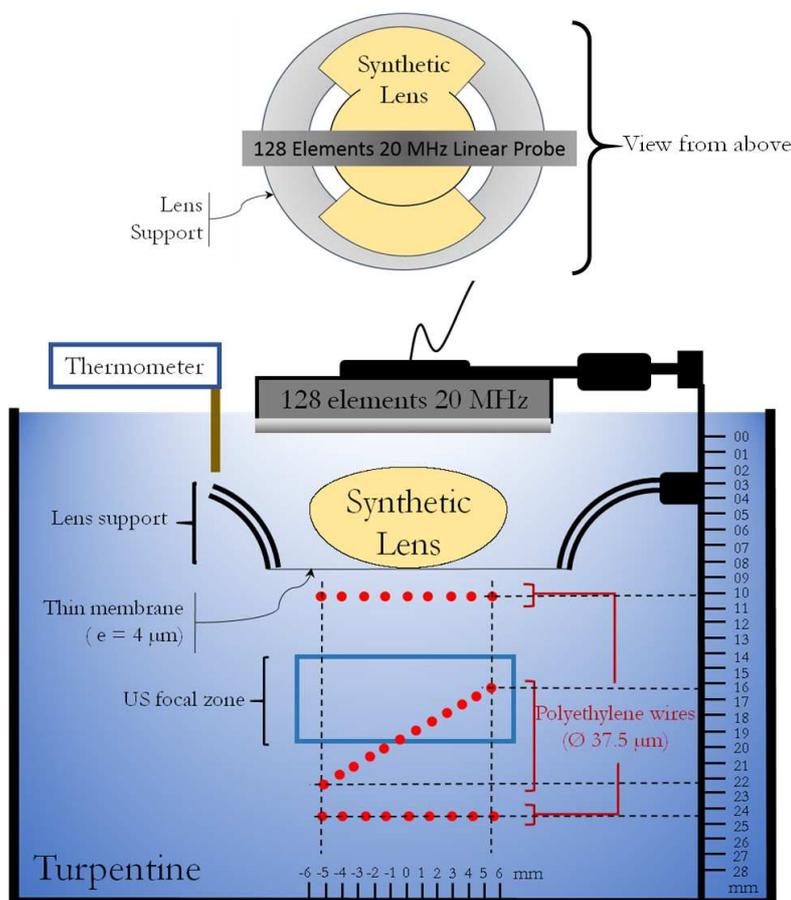


FIGURE 5.13 – Schéma du dispositif expérimental utilisé pour quantifier la résolution au delà des cristallins synthétiques accommodés et désaccommodés.

transcornéenne.

Le cristallin synthétique a ainsi été centré sous la barrette US à une distance anatomique, au moyen d'un support prévu à cet effet (Fig. 5.14(b)). Il repose sur une fine membrane en polypropylène épaisse de $4 \mu\text{m}$ et maintenue en tension autour du support à l'aide d'un joint torique. Comme évoqué précédemment, le centrage du cristallin assure un plan d'insonification comprenant l'axe antéro-postérieur du cristallin et par conséquent l'observation de la section axiale telle que définie par la table 5.1 pour les formes accommodées et désaccommodées.

Le fantôme de résolution a été placé sous le cristallin synthétique, et ses plateaux arrangés de façon à pouvoir apprécier les effets aberrateur du cristallin sur une vaste zone, incluant les régions d'intérêt propres à l'échographie ophtalmique. Ainsi, le premier plateau horizontal est positionné à 25 mm, soit la position approximative de la rétine pour un œil emmétrope et le second plateau horizontal se situe environ 1 mm en dessous du cristallin. Le plateau inclinable couvre l'espace compris entre les deux plateaux horizontaux. Il est incliné à son angulation maximale, soit 27.5° . Son réseau linéique de périodicité 1 mm conduit alors à un espacement axial de 0.46 mm et latéral de 0.88 mm entre chacun de ses réflecteurs ponctuels.

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE

L'ensemble est immergé dans une cuve de turpentine monitorée en température tout au long du processus d'acquisition des données RF avec l'ECODERM, soit environ 50 minutes en mode recherche. C'est la valeur de température moyenne qui est ensuite retenue pour estimer la célérité dans la turpentine et la gélatine à 15% à partir des ajustements d'ordre 4 présentés dans la partie précédente (voir Table 5.2).

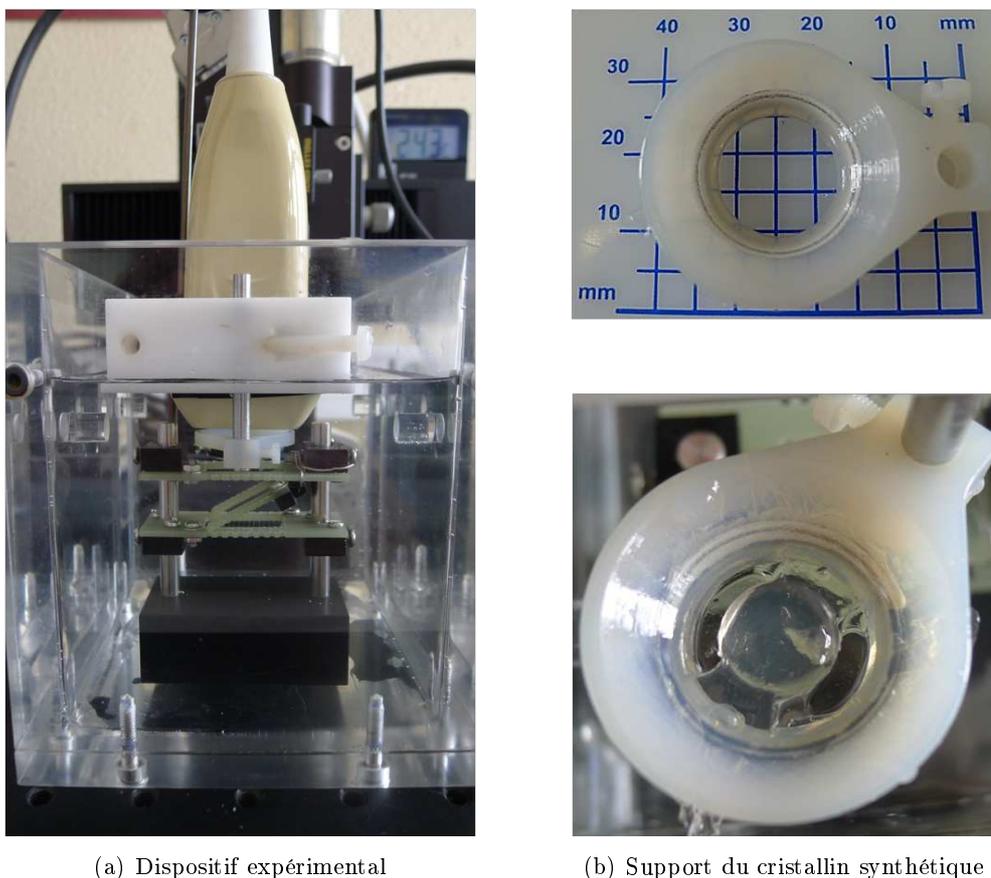


FIGURE 5.14 – Photographies du dispositif expérimental et du support permettant le centrage du cristallin synthétique dans le plan d'insonification US.

5.2.3 Recueil des signaux RF, formation de faisceau en émission et de voies en réception

Pour chaque forme cristallinienne investiguée, deux acquisitions du fantôme de résolution sont réalisées : une dans la turpentine pure afin d'établir la référence et l'autre en présence du cristallin synthétique (Fig. 5.13) à partir de laquelle trois techniques de reconstructions, dont CLAIFbC, sont effectuées "hors ligne", depuis les données RF brutes acquises à l'issue d'un scan linéaire bénéficiant d'une émission adaptée CLAIFbC.

La première technique de reconstruction consiste en un beamforming de type DAS conventionnel ; elle constitue le gold standard permettant d'observer les dégradations provoquées par le cristallin lors d'une échographie HF à l'aide d'une sonde linéaire multi-élément. La seconde applique une correction des aberrations de phase - après détection du

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE

contour ζ_L - considérant la différence de célérité entre le cristallin et son milieu environnant, mais négligeant les effets de la réfraction. Cette technique de reconstruction désignée par l'acronyme CLAPC (Crystalline Lens Phase Aberration Partial Correction) est expérimentée pour évaluer l'intérêt de la prise en compte de la réfraction dans la troisième reconstruction testée, c'est à dire CLAIFbC que l'on cherche à valider. L'acquisition de référence permet, en plus d'établir la limite de qualité d'image atteignable, de quantifier l'erreur spatiale et le gain relatif (voir définitions dans la sous-section suivante) de ces trois techniques de reconstructions. Toutes les reconstructions sont réalisées sous Matlab, à l'aide d'un ordinateur 64-bit doté d'un processeur 6 cœurs cadencé à 2 GHz et doté de 16 Go de mémoire vive (FSB=1300 MHz).

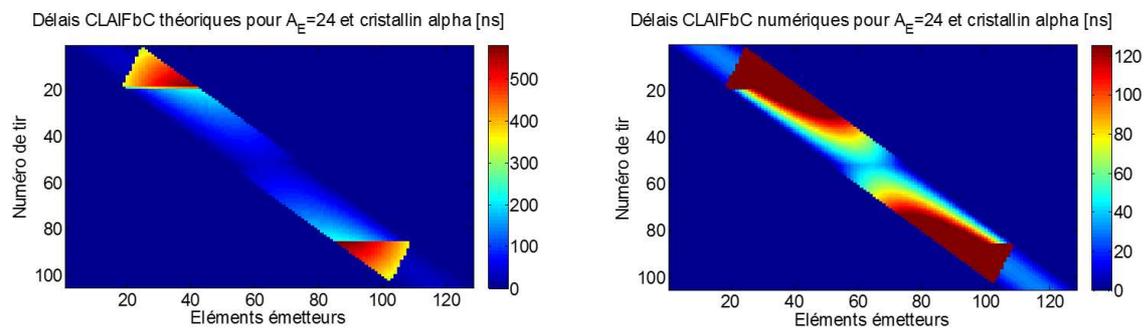
L'acquisition des données RF brutes sur l'ensemble des 128 voies de l'ECODERM se fait, pour chaque tir du balayage linéaire, à une fréquence d'échantillonnage f_e de 100 MS/s. L'ouverture choisie en émission pour effectuer ce balayage comprend 24 éléments, ce qui offre une large profondeur de champ dans la turpentine (approximativement 23 mm) et conduit à la reconstruction de 105 lignes dans les images en mode-B. Les 24 éléments émetteur sont retardés de façon à assurer une focalisation à une distance de 17 mm (approximativement la profondeur du centre du fantôme de résolution) pour chaque tir. Les délais appliqués suivent ainsi une loi parabolique conventionnelle lors des acquisitions de référence dans la turpentine seule, et un profil adapté à chaque tir selon la technique CLAIFbC (cf. section 4.2.2 du chapitre précédent) lors des acquisitions au travers des cristallins synthétiques. Les reconstructions "hors ligne" se font donc à partir des mêmes données RF brutes quel que soit la technique appliquée. À cet égard, la reconstruction désignée comme conventionnelle ne l'est strictement qu'en réception. Aucun biais liés à des différences de conditions expérimentales n'est ainsi introduit entre les différentes techniques. De plus, l'emploi d'une émission adaptée permet l'évaluation de CLAIFbC à la fois en émission (grâce aux résultats complémentaire présentés dans la section 5.5.2) et en réception.

Les émissions adaptées, appliquées lors de l'acquisition au travers du cristallin synthétique de forme accommodée et de forme désaccommodée sont représentées respectivement sur les figures 5.15 et 5.16 dans leur forme théorique et numérique (délais de résolution égale à 500 ps et limités à 125.5 ns). L'appareil ECODERM ne permettant pas la génération de délais supérieurs à 125.5 ns en émission, les tirs périphériques, où les retards CLAIFbC à appliquer sont les plus importants, souffrent de saturation. L'erreur relative $\Delta\tau_{erreur/tir}$ entre les délais numériques appliqués en émission et les délais CLAIFbC théoriques est représentée et quantifiée dans la figure 5.17, pour les expérimentations sur la forme accommodée et désaccommodée. Elle est mesurée d'après l'expression 5.15 suivante :

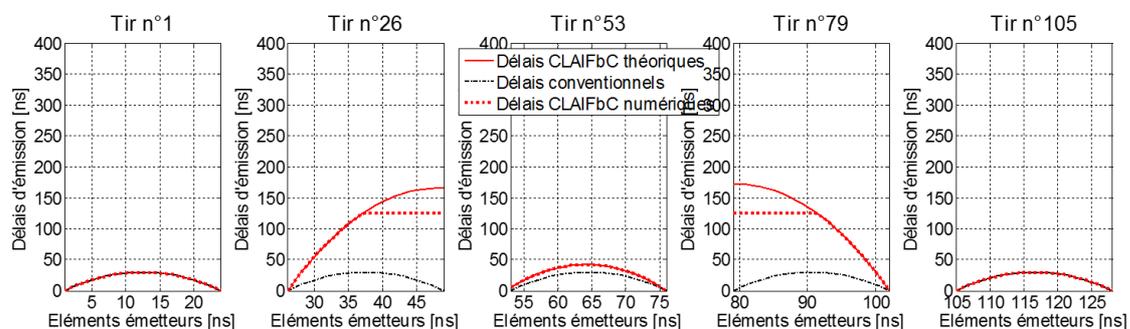
$$\Delta\tau_{erreur/tir} = \frac{\mathbb{E}(|\tau_{th}(elem_E) - \tau_{num}(elem_E)|)}{\mathbb{E}(\tau_{th}(elem_E))} \quad (5.15)$$

Quel que soit l'acquisition, toutes les reconstructions bénéficient en réception d'une ouverture adaptatrice, régie par un F-number($F_{\#}$) commun de 1, et d'une focalisation dynamique continue (DRF, acronyme de Dynamic Receive Focusing *i.e.* pour chaque profondeur échantillonnée). La focalisation continue en réception suit une loi parabolique pour la célérité c_H dans les reconstructions de référence et conventionnelle, et adaptée suivant la technique CLAPC ou CLAIFbC pour les autres. Aucune apodisation n'est appliquée en réception. La valeur de $F_{\#}$ est légèrement inférieure à celle employée d'ordinaire en

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE



(a) Matrice d'émission CLAIFbC adaptée pour la forme accommodée sous sa forme théorique (à gauche) et numérique (à droite).



(b) Profils des délais pour différents tirs du balayage linéaire.

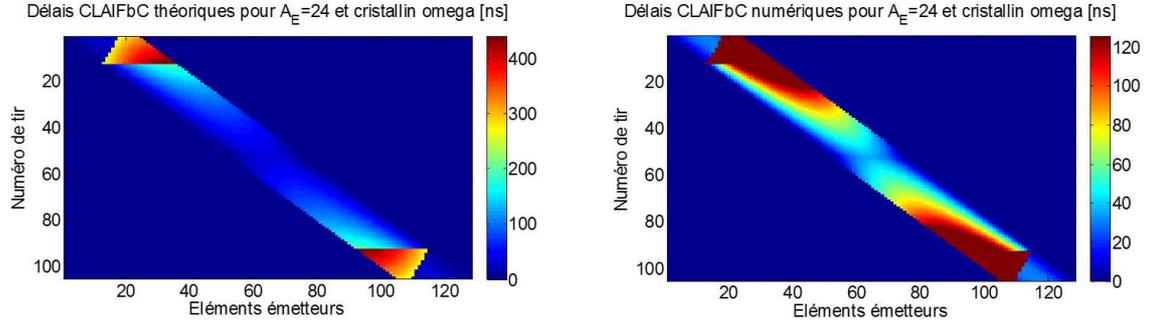
FIGURE 5.15 – Émission adaptée avec la méthode CLAIFbC pour compenser les aberrations de phase générées par le cristallin synthétique dans l'expérience sur la forme accommodée. Le délai numérique maximal que l'on peut appliquer en émission avec l'ECODERM est de 125.5 ns.

échographie médicale où elle est généralement comprise entre 2 et 3 pour l'ouverture réceptrice. Un $F_{\#}$ plus petit est ici choisi délibérément pour accentuer les effets aberrateurs du cristallin synthétique, étant donné qu'une ouverture réceptrice plus grande y sera plus sensible.

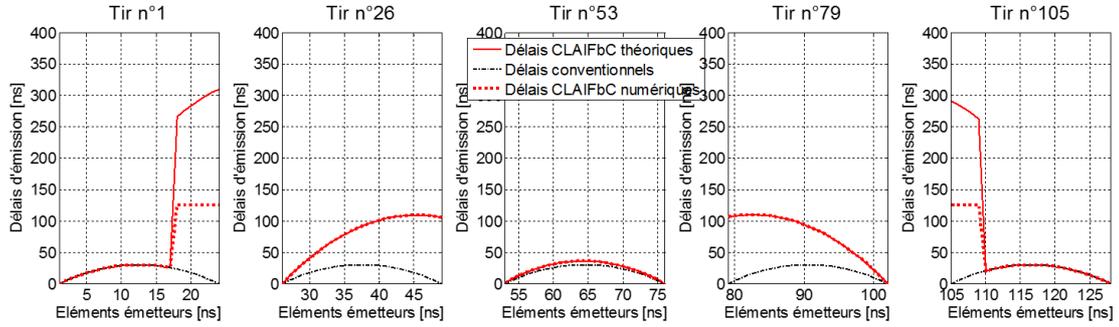
5.2.3.1 Précisions sur la reconstruction CLAPC

Nous l'avons évoqué à plusieurs reprises, la reconstruction CLAPC intègre les célérités c_L et c_H dans la détermination des temps de vol entre un point focal $\Omega_f(x_f; z_f)$ et un élément de la sonde, mais néglige la réfraction. En utilisant une notation analogue à celle employée dans le chapitre 4 pour la technique CLAIFbC, et en considérant un point A extérieur au cristallin, voici comment s'exprime le temps de vol entre deux points A et B dans la reconstruction CLAPC :

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE



(a) Matrice d'émission CLAIFbC adaptée pour la forme désaccommodée sous sa forme théorique (à gauche) et numérique (à droite).



(b) Profils des délais pour différents tirs du balayage linéaire.

FIGURE 5.16 – Émission adaptée avec la méthode CLAIFbC pour compenser les aberrations de phase générées par le cristallin synthétique dans l'expérience sur la forme désaccommodée.

$$TOF_{[AB]} = \frac{\|\vec{AB}\|}{c_H} + L_{L,rect} \left(\frac{1}{c_L} - \frac{1}{c_H} \right) \text{ avec } L_{L,rect} = \begin{cases} 0 & \text{si } I_{[AB] \cap \zeta_L} = 0 \\ \frac{\|\vec{M_{rect}B}\|}{c_L} & \text{si } I_{[AB] \cap \zeta_L} = 1 \\ \frac{\|\vec{M_{rect}M'_{rect}}\|}{c_L} & \text{si } I_{[AB] \cap \zeta_L} = 2 \end{cases} \quad (5.16)$$

où $L_{L,rect}$ représente la portion de segment $[AB]$ incluse dans le cristallin.

Contrairement à CLAIFbC, la technique CLAPC ne bénéficie pas de considérations énergétiques sur le faisceau émis, lorsqu'il est amené à traverser simultanément humeur et cristallin (voir section 4.2.3 du chapitre précédent). Le point E est donc systématiquement le centre géométrique de l'ouverture émettrice, soit le point de coordonnées $(x_f; 0)$, dans l'hypothèse où le cristallin n'est pas incliné par rapport à la sonde US (les éléments de celle-ci ont alors une ordonnée nulle).

5.2.4 Traitement appliqué aux images échographiques pour l'analyse quantitative

Toutes les images échographiques procèdent des mêmes filtrage passe bande à 100% de la fréquence centrale, interpolation, détection d'enveloppe et compression logarithmique.

5.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'IMAGERIE ÉCHOGRAPHIQUE DU FANTÔME INTRA-OCULAIRE

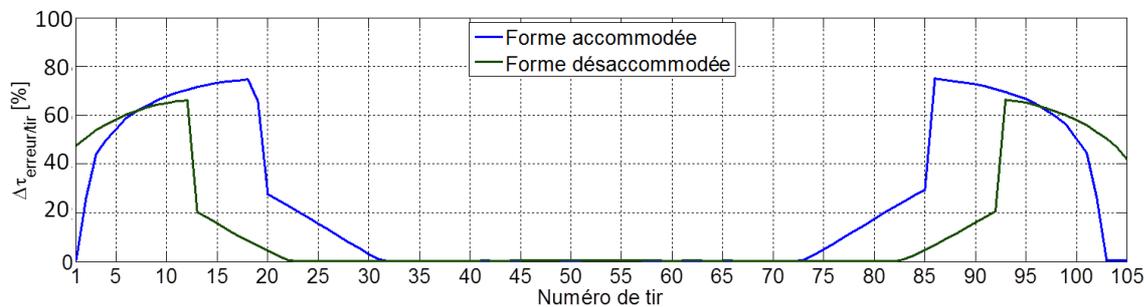


FIGURE 5.17 – Erreur relative en émission des délais numériques par rapport aux délais CLAIFbC théoriques pour les expérimentations sur la forme accommodée ($\Delta\tau_{erreur/tir}|_{\alpha}$ en bleu, égale à 28.2% en moyenne) et désaccommodée ($\Delta\tau_{erreur/tir}|_{\Omega}$ en vert, égale à 16.45% en moyenne). Cette erreur est maximale lorsque les tirs sont amenés à traverser le cristallin synthétique (en périphérie) et la turpentine simultanément (tirs 1 à 19 et 86 à 103 dans le cas accommodé soit une erreur relative moyenne de 66.3% sur 36% des tirs, et 1 à 12 et 93 à 103 dans le cas désaccommodé soit une erreur relative moyenne de 57.7% sur 24% des tirs). Elle décroît ensuite de façon linéaire depuis la périphérie (tirs 20 à 31 et 73 à 85 dans le cas accommodé soit une erreur relative moyenne de 16.9% sur 24% des tirs, et 13 à 21 et 84 à 92 dans le cas désaccommodé soit une erreur relative moyenne de 11.4% sur 17% des tirs). L'erreur relative est quasi nulle pour le reste des tirs, soit 40% dans le cas accommodé et 59 % dans le cas désaccommodé.

La compression logarithmique est appliquée, pour une dynamique d'affichage DR donnée, selon l'expression 3.26 décrite dans la section 3.2.2.2 du chapitre 3.

La résolution et la fidélité spatiale sont quantifiées à partir des fonctions d'étalement du point (PSFs) des réflecteurs ponctuels du fantôme de fils. La précision de l'ensemble des mesures spatiales est comprise entre plus ou moins la moitié du pas axial ($\frac{cH}{2f_e}$ soit la distance élémentaire entre deux points axiaux échantillonnés à f_e) e.g. $\pm 3.2 \mu\text{m}$ aussi bien pour les valeurs axiales que latérales, puisque l'interpolation latérale assure un échantillonnage identique dans la deux directions.

La quantification des distorsions spatiales induites par les cristallins synthétiques est une mesure essentielle pour apprécier d'une part leur ampleur dans les images issues d'un BF conventionnel et d'autre part leur réduction dans celles issues d'un BF adapté, en particulier de CLAIFbC. Les erreurs de position axiale (Err_r) et latérale (Err_l) associées à une PSF particulière, pour un B-scan au travers du cristallin, ont ainsi été déterminées en mesurant la distance entre le centre de cette PSF et celui de la PSF correspondant au même réflecteur ponctuel dans le B-scan de référence. De la norme euclidienne de ces deux erreurs axiale et latérale, est déduite l'erreur spatiale totale (Err_{total}). Le centre de chaque PSF est déterminé comme le centroïde spatial des pixels supérieurs ou égaux à -6 dB de son maximum.

La résolution spatiale est quantifiée pour chaque PSF à -6 dB de son maximum (FWHM - Full Width Half Maximum). La recherche du contour à -6 dB s'effectue axialement à ± 0.2 mm autour du centre de la PSF et latéralement à ± 0.8 mm, pour les mesures respectives de la résolution axiale et latérale.

Le rapport signal sur bruit (SNR) des B-scans est déterminé à partir des signaux reconstruits S_{BF} avant la compression logarithmique. Le SNR est calculé dans une région

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

autour de chacun des trois plateaux de fils d'après l'expression 5.17. Le bruit, σ_{noise} , est mesuré par la valeur rms moyenne des pixels appartenant à une région voisine du plateau considéré et exempte de signal ou de la contribution de lobes secondaires.

$$SNR = 20\log_{10} \left(\frac{\max(S_{BF})}{\sigma_{noise}} \right) \quad (5.17)$$

Afin de mettre en lumière dans quelle mesure l'amplitude des PSFs des B-scans sur cristallins synthétiques est diminuée par rapport aux B-scans de référence, nous avons introduit la mesure du gain relatif en signal $G_{BF/Ref}$ comme suit (Eq. 5.18) :

$$G_{BF/Ref}[n] = 20\log_{10} \left(\frac{\max(PSF_{BF}[n])}{\max(PSF_{Ref}[n])} \right) \quad (5.18)$$

où BF se réfère à la technique de reconstruction appliquée *i.e.* conventionnelle, CLAPC ou CLAIFbC et n désigne l'entier naturel correspondant à une PSF analysée.

La mesure du SNR et de $G_{BF/Ref}$ a été choisie comme moyen d'apprécier le contraste dans les images en lieu et place d'une mesure plus directe du rapport entre le lobe principal d'une PSF et de ses lobes secondaires du fait, d'une part, de l'asymétrie de ceux-ci dans les images obtenues, mais surtout, de l'aliasing spatial dont certaines PSFs peuvent souffrir, notamment dans les B-scans issus d'une reconstruction conventionnelle.

5.3 Résultats expérimentaux des reconstructions conventionnelle, CLAPC et CLAIFbC

Les résultats présentés dans cette section sont ceux parus dans la revue IEEE Transactions on Medical Imaging (TMI) [Mateo *et al.*, 2014].

5.3.1 Résultats qualitatifs sur formes cristalliniennes accommodées et non-accommodées

Les images en mode-B issues des reconstructions conventionnelle, CLAPC et CLAIFbC lors des expérimentations sur cristallin synthétique sont affichées figures 5.18 et 5.20, respectivement pour la forme accommodée et désaccommodée.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

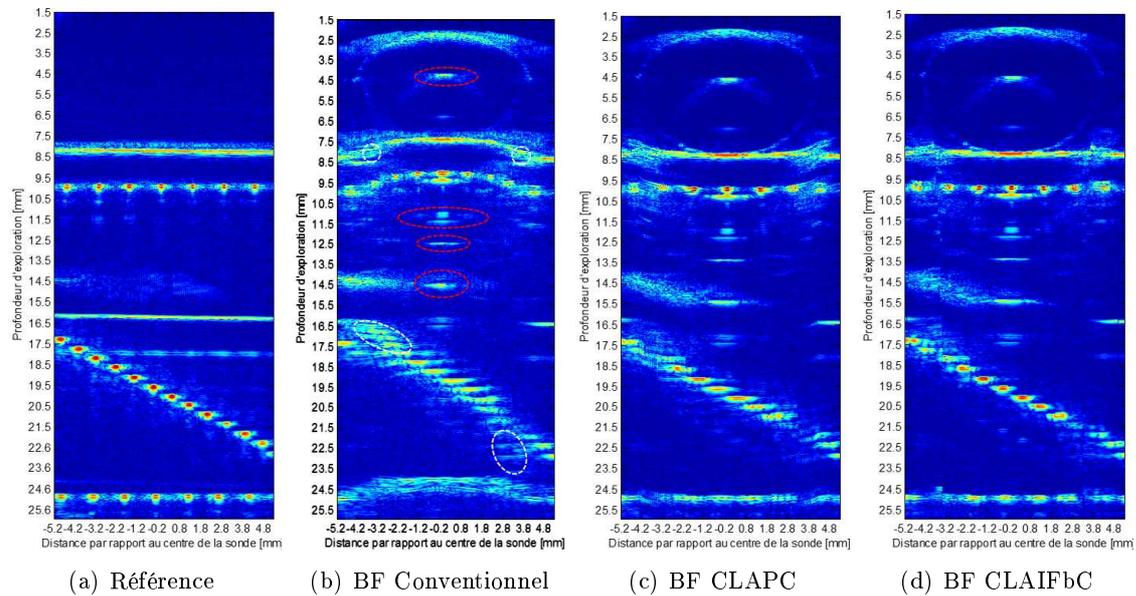


FIGURE 5.18 – Images en mode-B du fantôme de fils dans la turpentine seule (a) et au travers du cristallin synthétique de forme accommodée, reconstruites au moyen des techniques conventionnelle (a et b), CLAPC (c) et CLAIFbC (d). Les traits pointillés soulignent les deux types d'artéfacts rencontrés : les échos de répétition (en rouge) et les mirages acoustiques (en blanc). DR = 40 dB.

Les images en mode-B du cristallin synthétique accommodé et désaccommodé issues de la reconstruction conventionnelle et CLAIFbC sont confrontées figures 5.19 et 5.21, pour chaque forme étudiée. La dynamique d'affichage (DR) a été accrue afin de mieux observer la partie postérieure du cristallin. Les contours $\zeta_{L\alpha}$ et $\zeta_{L\Omega}$ détectés depuis la reconstruction conventionnelle sont superposés aux images, laissant apprécier la fidélité spatiale de chacune. En effet, pour les deux formes de cristallin étudiées, ce contour détecté est très proche de celui du moule (voir Table 5.1) et donc du contour réel.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFbC

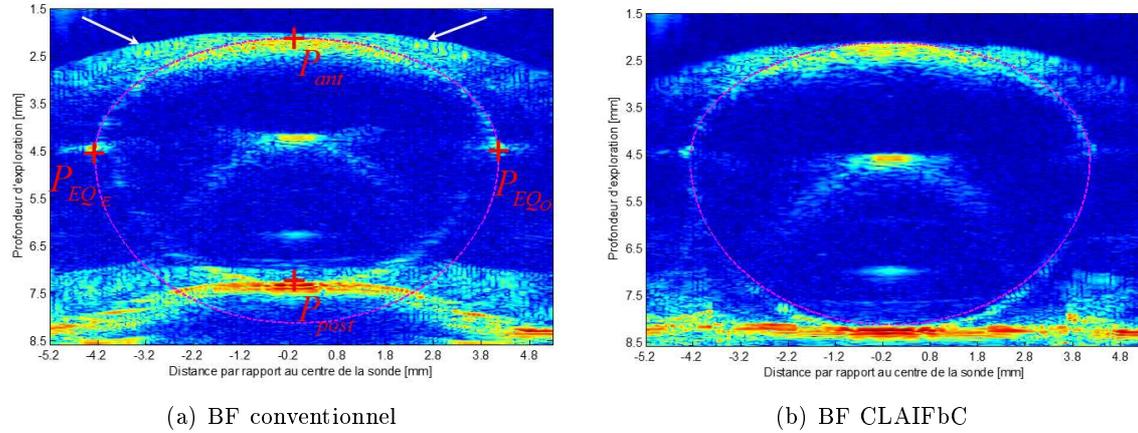


FIGURE 5.19 – Superposition du contour détecté sur les images en mode-B du cristallin synthétique de forme accommodée obtenu par reconstruction conventionnelle et CLAIFbC (trait pointillé magenta). Les croix rouges représentent les 4 points sélectionnés manuellement pour la détection du contour utile aux reconstructions adaptées. Ce contour a pour caractéristiques géométriques $e_{ant} = 2.473$ mm, $e_{post} = 3.541$ mm, et $L_{eq} = 8.439$ mm, soit des valeurs très proches du contour $\zeta_{L\alpha}$ utilisé pour le moule de la forme accommodée. Les flèches blanches pointent les lobes secondaires qui apparaissent à faible profondeur du fait de la grande ouverture réceptrice employée. DR=50 dB.

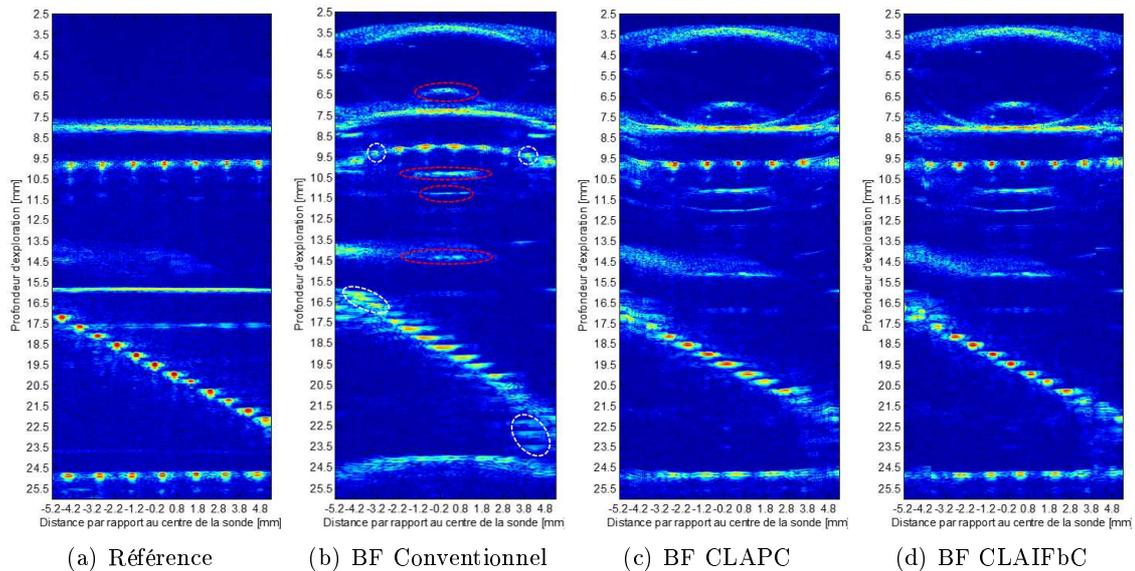


FIGURE 5.20 – Images en mode-B du fantôme de fils dans la turpentine seule (a) et au travers du cristallin synthétique de forme désaccommodée, reconstruites au moyen des techniques conventionnelle (a et b), CLAPC (c) et CLAIFbC (d). Les traits pointillés soulignent les deux types d'artéfacts rencontrés : les échos de répétition (en rouge) et les mirages acoustiques (en blanc). DR = 40 dB.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

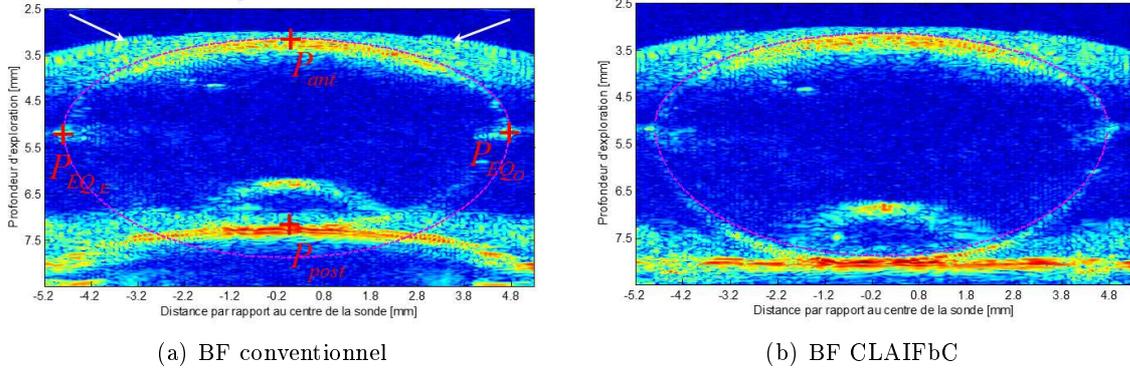


FIGURE 5.21 – Superposition du contour détecté sur les images en mode-B du cristallin synthétique de forme désaccommodée obtenu par reconstruction conventionnelle et CLAIFbC (trait pointillé magenta). Les croix rouges représentent les 4 points sélectionnés manuellement pour la détection du contour utile aux reconstructions adaptées. Ce contour a pour caractéristiques géométriques $e_{ant} = 1.959$ mm, $e_{post} = 2.772$ mm, et $L_{eq} = 9.551$ mm, soit des valeurs très proches du contour $\zeta_{L\Omega}$ utilisé pour le moule de la forme désaccommodée. Les flèches blanches pointent les lobes secondaires qui apparaissent à faible profondeur du fait de la grande ouverture réceptrice employée. DR=50 dB.

Les résultats liés aux performances de convergence de la méthode de reconstruction CLAIFbC sont synthétisés dans la table 5.3 qui liste, pour les expérimentations sur chaque forme de cristallin synthétique, le nombre de chemins résolus et non résolus ($N_{paths\ calculated}$ et $N_{paths\ unresolved}$), le nombre moyen d'itérations ($\widehat{N}_{iterations}$) et de réinitialisations effectuées (\widehat{N}_{reinit}) ainsi que l'erreur angulaire moyenne associée ($\overline{|Err_{ang}|}$).

	Cristallin synthétique accommodé	Cristallin synthétique désaccommodé
$N_{paths\ calculated}$	33,497,437	34,872,548
$N_{paths\ unresolved}$	43,249	9,436
$\widehat{N}_{iterations}$	1.0902	1.0528
\widehat{N}_{reinit}	0.0267	0.0068
$\overline{ Err_{ang} }$ (0.02238°	0.00739°

TABLE 5.3 – Résultats de convergence pour la reconstruction des B-scans 5.18(d) et 5.20(d) par la technique CLAIFbC.

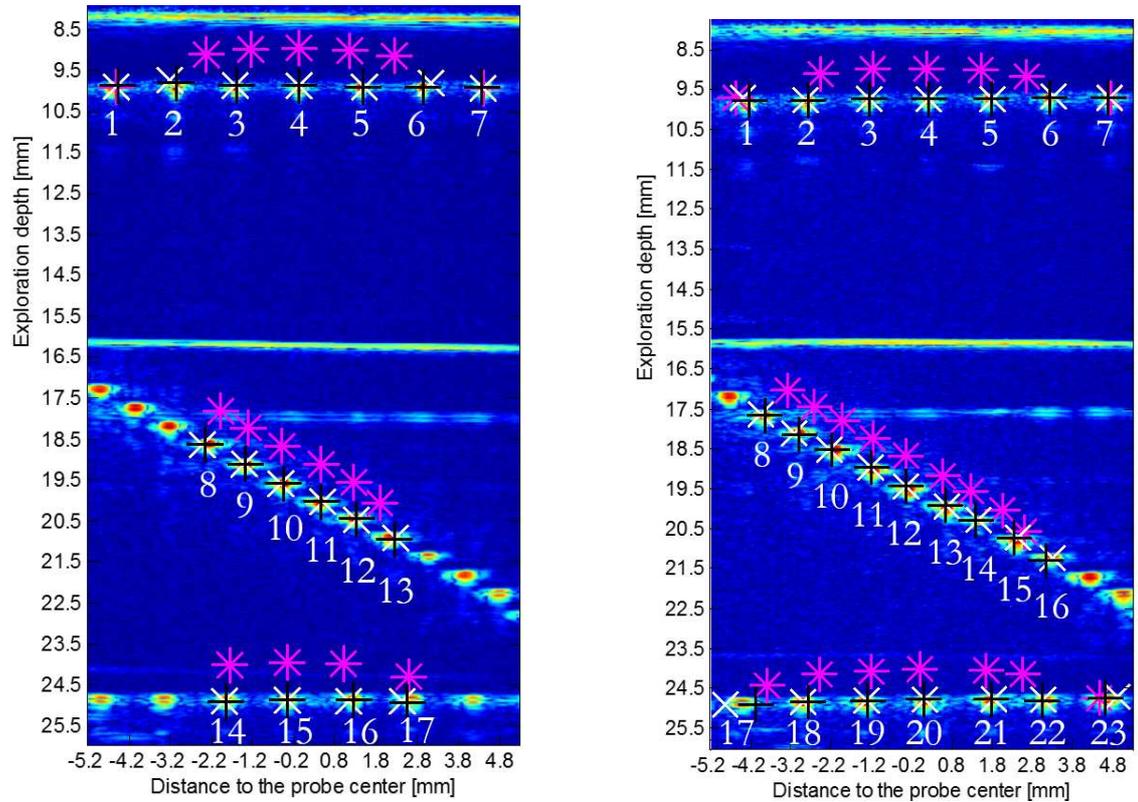
5.3.2 Analyse quantitative de la résolution et de la fidélité spatiale

L'analyse quantitative a été réalisée, pour chaque technique de reconstruction, sur les PSFs suffisamment résolue dans les reconstructions conventionnelles au travers des cristallins synthétiques de forme accommodée et désaccommodée. De ce fait, 17 PSFs ont été analysées dans l'expérimentation sur forme accommodée et 23 dans celle sur forme désaccommodée. Une numérotation a été attribuée à chacune comme illustré respectivement par

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

les figures 5.22(a) et 5.22(b).

Dans ces figures, le centre des PSFs extrait de chaque reconstruction au travers des cristallins synthétique a été superposé aux images de références (Fig. 5.22), afin de mettre en évidence l'erreur spatiale (Err_{total}). Les valeurs quantitative associées, comprenant l'expression des erreurs axiale (Err_r) et latérale(Err_l) sont reportées dans les figures 5.23 et 5.24 pour les formes accommodée et non accommodée, respectivement.



(a) Centres des PSFs issus des reconstructions sur cristallin synthétique accommodé

(b) Centres des PSFs issus des reconstructions sur cristallin synthétique désaccommodé

FIGURE 5.22 – Superposition sur les B-scans de référence du centre des 17 et 23 PSFs extraits des reconstructions conventionnelles (*), CLAPC (x) et CLAIFbC (+) au travers des cristallins synthétiques de forme accommodée (Fig. 5.22(a)) et désaccommodée (Fig. 5.22(b)), respectivement. Le numéro attribué à chaque PSF est celui employé dans le texte et les figures suivantes. DR = 40 dB

Les résolutions axiale (Δr_{-6dB}) et latérale (Δl_{-6dB}) mesurées sont représentées figures 5.25 et 5.27 par des barres verticales et horizontales pour chaque PSF analysée dans les reconstructions au travers des formes accommodée et désaccommodée, respectivement. Les valeurs quantitatives associées sont reportées dans les figures 5.26 et 5.28 pour chaque forme respective.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

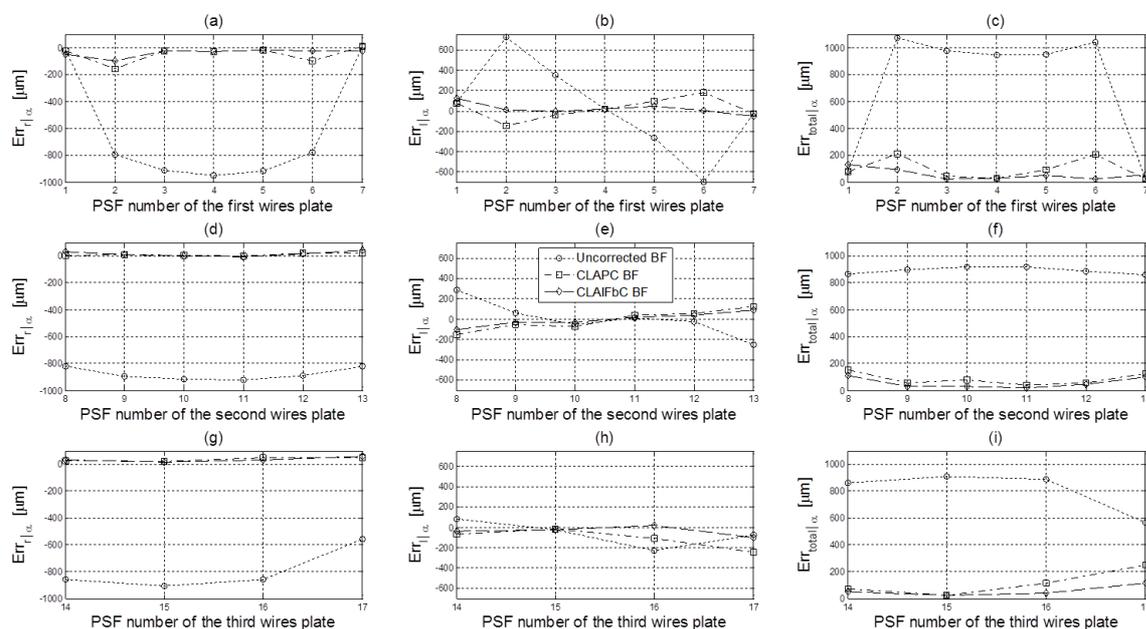


FIGURE 5.23 – Erreur spatiale par rapport à l’image de référence, pour chaque PSF analysée dans les reconstructions conventionnelle (..), CLAPC (-.), et CLAIFbc (-) au travers de la forme accommodée. L’erreur axiale $Err_r|_{\alpha}$ est représentée sur la colonne de gauche (a,d,g). L’erreur latérale $Err_l|_{\alpha}$ se trouve au centre (b,e,h) et l’erreur totale $Err_{total}|_{\alpha}$ à droite (g,h,i). L’affichage des PSFs est réparti suivant les plateaux de fils auxquelles elles appartiennent, afin de mettre en évidence les tendances locales.

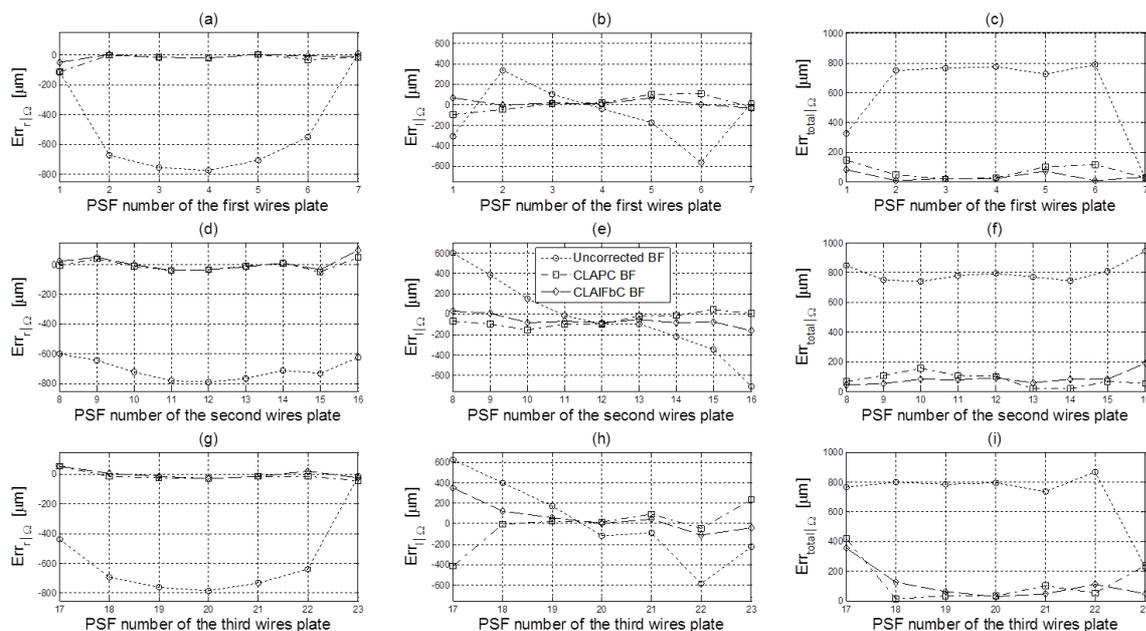


FIGURE 5.24 – Même légende que pour la figure 5.23 qui précède, mais dans le cas du cristallin synthétique de forme déaccommodée.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

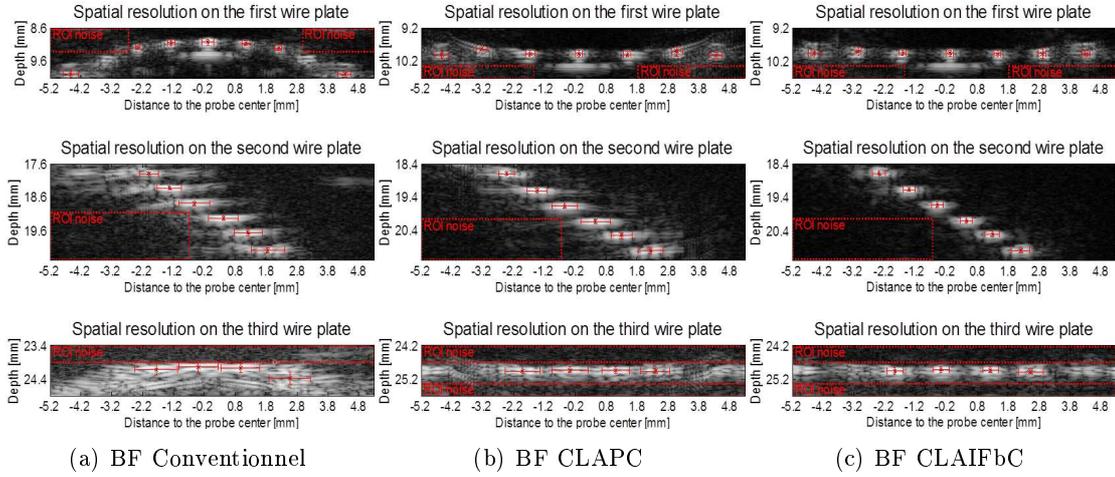


FIGURE 5.25 – Affichage des résolutions axiale ($\Delta r_{-6dB}|\alpha$) et latérale ($\Delta l_{-6dB}|\alpha$), représentées par des barres verticales et horizontales, propres à chaque PSF analysée dans les B-scan conventionnel (a), CLAPC (b) et CLAIFbC (c), dans la situation accommodée. De plus, les régions utilisées pour déterminer le bruit σ_{noise} lors du calcul du SNR sont représentées par des rectangles en trait pointillé rouge. L’affichage est limité aux régions comprenant chaque plateau de fil et l’échelle de couleur est ici en niveau de gris. DR=40dB.

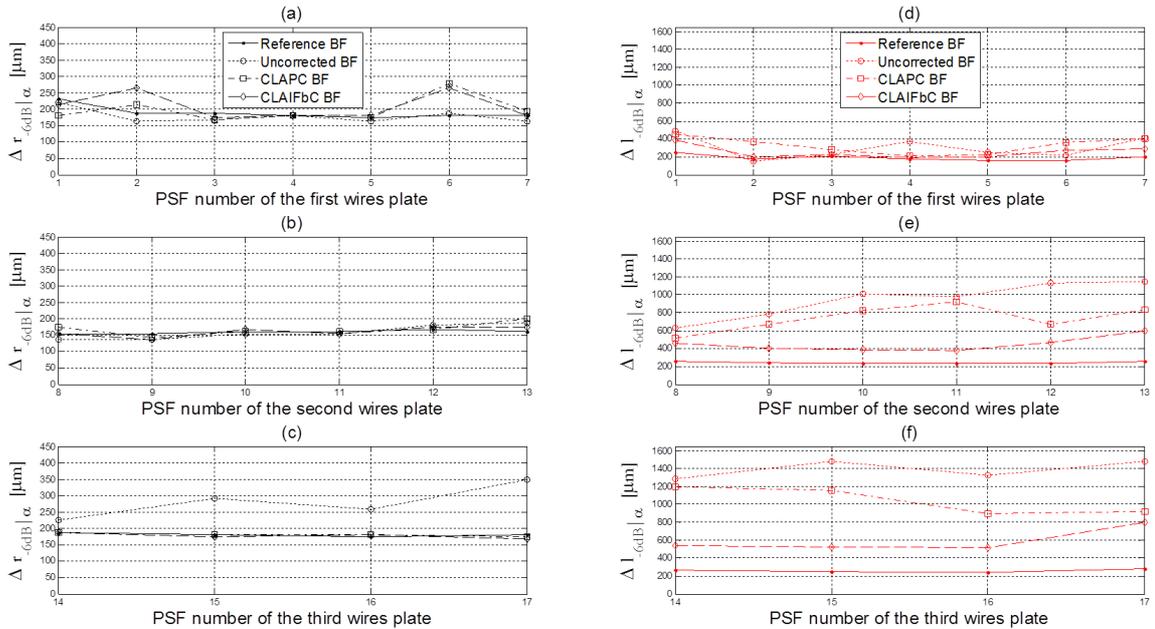


FIGURE 5.26 – Résolutions axiale (a,b,c) et latérale (d,e,f) $\Delta r_{-6dB}|\alpha$ et $\Delta l_{-6dB}|\alpha$, pour chaque PSF analysée dans les reconstructions conventionnelles, CLAPC et CLAIFbC au travers de la forme accommodée. De même que pour les figures précédentes, l’affichage est séparé par plateau de fil.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

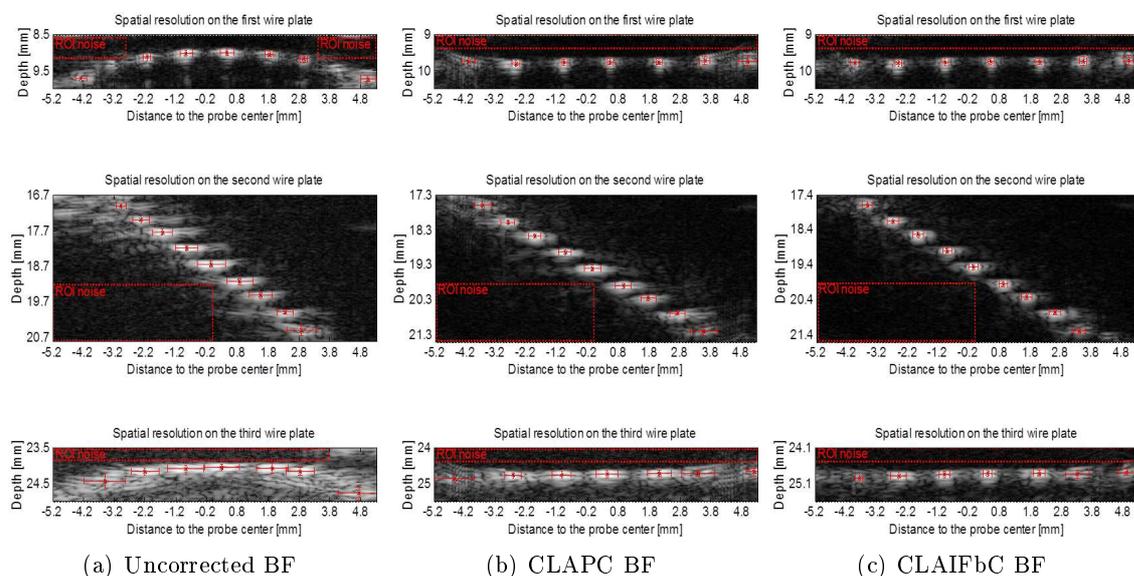


FIGURE 5.27 – Affichage des résolutions axiale ($\Delta r_{-6dB}|\Omega$) et latérale ($\Delta l_{-6dB}|\Omega$), représentée par des barres verticales et horizontales, propres à chaque PSF analysée dans les B-scan conventionnel (a), CLAPC (b) et CLAIFbC (c), dans la situation désaccommodée. De plus, les régions utilisées pour déterminer le bruit σ_{noise} lors du calcul du SNR sont représentées par des rectangles en trait pointillé rouge. L’affichage est limité aux régions comprenant chaque plateau de fil et l’échelle de couleur est ici en niveau de gris. DR=40dB.

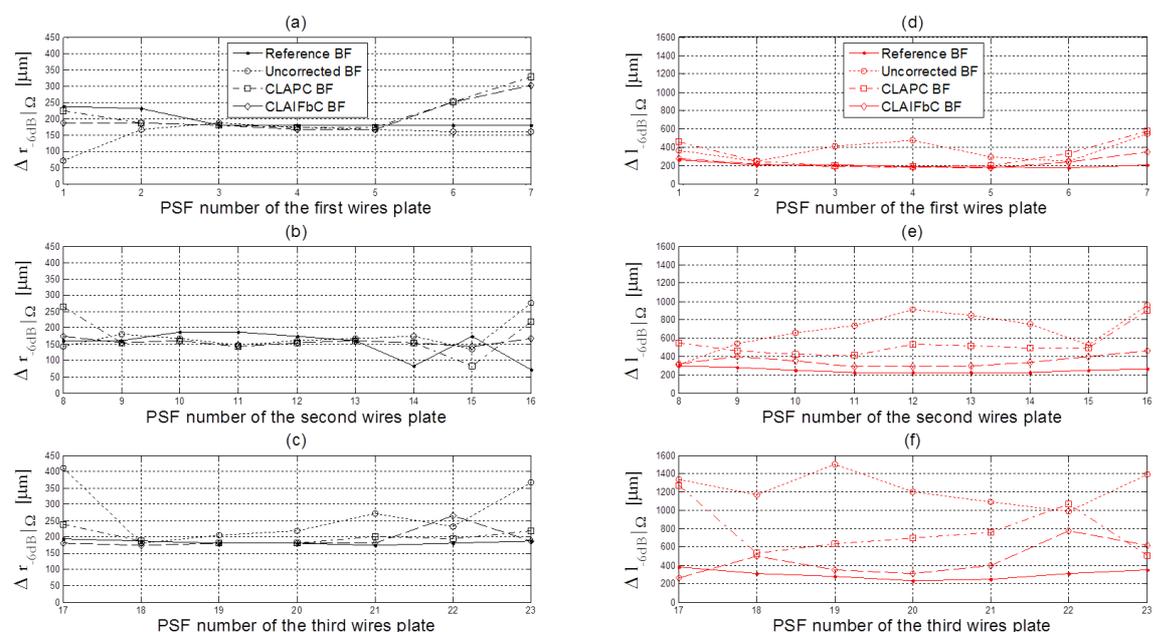


FIGURE 5.28 – Même légende que pour la figure 5.26 qui précède, mais dans le cas du cristallin synthétique de forme désaccommodée.

La résolution latérale mesurée sur les images de référence concorde avec la résolution

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

théorique dans un milieu homogène pour l'ouverture effective utilisée. En revanche, ce n'est pas le cas pour la résolution axiale dont la valeur est environ trois fois supérieure à celle attendue ($\lambda_{turpentine} \simeq 64\mu m$ à 20 MHz). Cette inconsistance est attribuée à l'existence d'un double écho associé à l'entrée puis la sortie du pulse US, probablement induit par le polyéthylène à haut poids moléculaire que contient le fil utilisé. Bien que l'hypothèse de réflectivité ponctuelle des fils ne soit plus exacte, les tendances générales que l'on observe sur la résolution restent valides.

Le SNR mesuré dans chacune des régions entourant un des trois plateaux de fils, telles qu'affichées dans les figures 5.25 et 5.27 pour les formes accommodées et désaccommodées, respectivement, est représenté figure 5.29. Les zones de bruits sélectionnées et représentées par des cadres en trait pointillé rouge dans les figures 5.25 et 5.27, sont identiques pour les deux techniques de reconstruction adaptées et les plus proches possible dans les images conventionnelles. Les importantes distorsions que comportent ces dernières n'ont en effet pas permis de sélectionner la même zone de bruit.

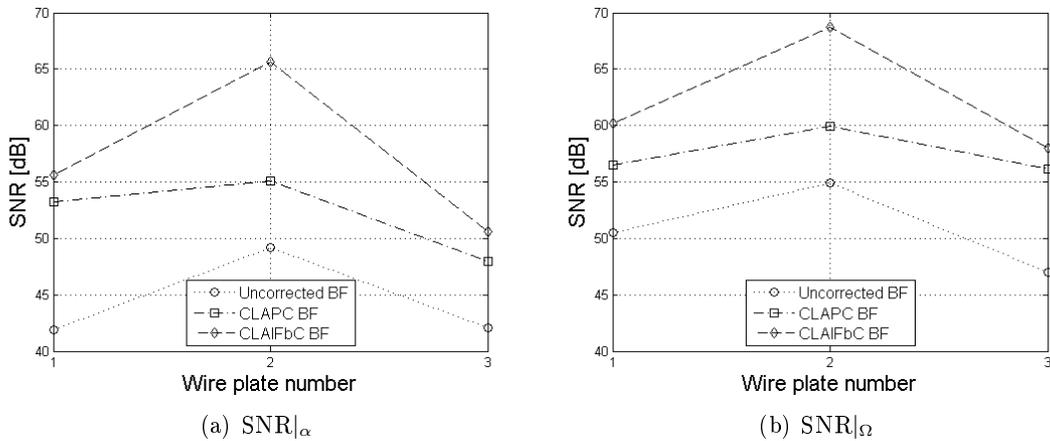


FIGURE 5.29 – SNR calculé pour chaque région autour d'un plateau de fil, dans les B-scans conventionnels, CLAPC et CLAIFbC, pour les formes accommodée (a) et désaccommodée (b). Les plateaux de fils sont numérotés de façon croissante avec leur profondeur.

Le gain relatif en signal $G_{BF/Ref}$ est représenté, pour l'ensemble des PSFs analysées et chaque expérimentation, dans la figure 5.30.

5.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES RECONSTRUCTIONS CONVENTIONNELLE, CLAPC ET CLAIFBC

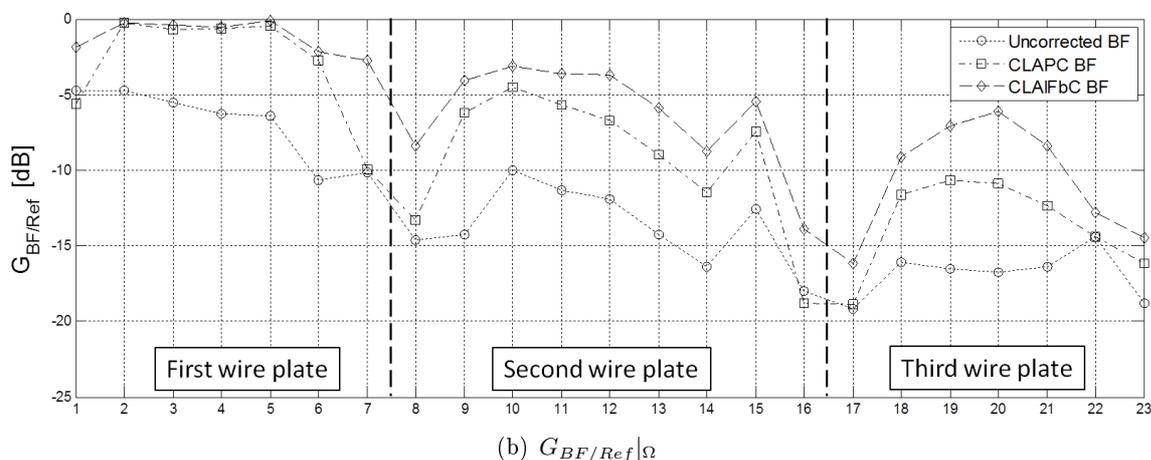
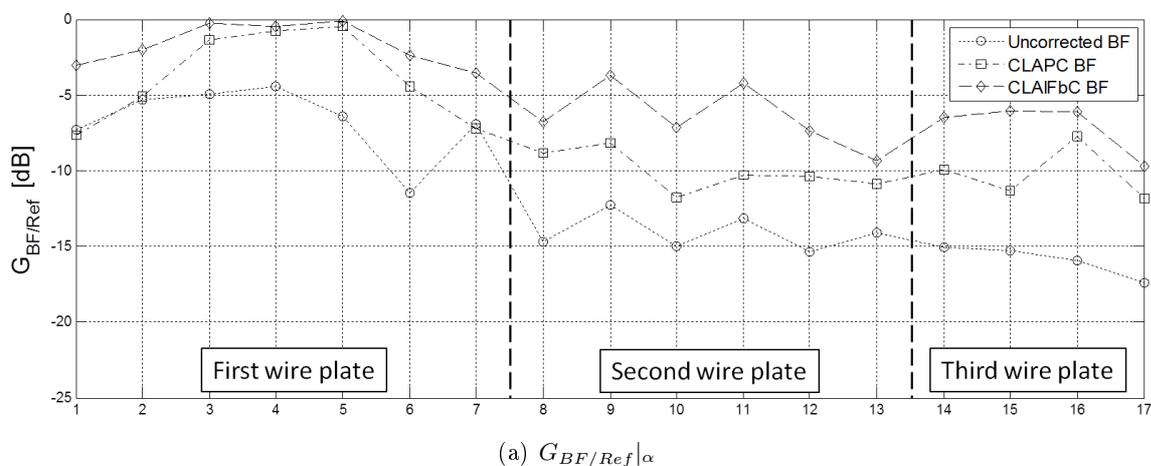


FIGURE 5.30 – Gain relatif par rapport à la référence pour chaque PSF analysée dans les B-scans conventionnels, CLAPC et CLAIFbC, pour les formes accommodée (a) et désaccommodée (b).

L'analyse quantitative, ici exposée dans ses détails, est synthétisée dans la table 5.4 où figurent les valeurs moyennes calculées pour l'ensemble des paramètres analysés, sur chaque PSF suffisamment résolues. Certaines PSFs, parmi les 17 et les 23, analysées respectivement au travers des formes accommodée et désaccommodée, ont du être rejeté du calcul de ces valeurs moyennes lorsqu'elles n'apparaissaient pas pertinente pour le critère considéré. Ainsi, dans les deux situations, les PSFs n°1 et n°7 ne sont pas comprises dans le calcul de l'erreur spatiale moyenne des B-scans conventionnels car elles apparaissent deux fois à l'image. Il s'agit d'un phénomène de mirage acoustique discuté dans la section suivante. Dans la situation accommodée, les PSFs n°2 et n°6 ont été retirées du calcul de la résolution spatiale moyenne des B-scans conventionnels. De même, dans la situation désaccommodée, les PSFs n°2, 6, 8, 17 et 23 ont été retirées du calcul de la résolution spatiale moyenne des B-scans conventionnels, car elles étaient trop bruitées. Les PSFs n°23 et 17 ont de plus été retirées, respectivement, des B-scans CLAPC et CLAIFbC, car elles étaient tronquées et bruitées.

5.4. ANALYSE DES RÉSULTATS QUANTITATIFS ET DISCUSSION

		$\widehat{\Delta r}_{-6dB}$ [μm] \pm SD	$\widehat{\Delta l}_{-6dB}$ [μm] \pm SD	$ \widehat{Err}_r $ [μm] \pm SD	\widehat{Err}_l [μm] \pm SD	\widehat{Err}_{total} [μm] \pm SD	$\widehat{G}_{BF/Ref}$ [dB] \pm SD
Accommodée	Référence	177 \pm 18	224 \pm 37	-	-	-	0
	Conventionnel	197 \pm 59	869 \pm 433	853 \pm 93	209 \pm 225	905 \pm 110	-11.4 \pm 4.4
	CLAPC	183 \pm 28	643 \pm 310	33 \pm 37	89 \pm 62	98 \pm 68	-8.9 \pm 4.2
	CLAIFbC	184 \pm 33	402 \pm 161	30 \pm 22	44 \pm 37	57 \pm 36	-4.6 \pm 2.9
Désaccommodée	Référence	175 \pm 35	251 \pm 50	-	-	-	0
	Conventionnel	182 \pm 46	776 \pm 322	660 \pm 168	288 \pm 212	758 \pm 129	-12.6 \pm 4.6
	CLAPC	191 \pm 49	544 \pm 267	27 \pm 24	79 \pm 90	89 \pm 89	-8.6 \pm 5.5
	CLAIFbC	183 \pm 39	352 \pm 139	25 \pm 22	68 \pm 71	76 \pm 71	-6 \pm 4.7

TABLE 5.4 – Valeurs moyennes et écarts types de l’ensemble des paramètres analysés, calculés sur les 17 et 23 PSFs suffisamment résolues que comportent respectivement les B-scans au travers des formes accommodée et désaccommodée.

5.4 Analyse des résultats quantitatifs et discussion

La discussion abordée dans cette partie porte sur les résultats de l’analyse quantitative. Elle débute par quelques remarques générales sur les qualités des images obtenues avant de se concentrer sur les résultats de l’analyse quantitative. Lorsque la forme du cristallin n’est pas mentionnée, celles-ci s’appliquent aux deux états accommodatifs étudiés.

5.4.1 Appréciation générale des B-scans obtenus au travers des cristallins synthétiques

La comparaison des B-scans de référence (Figs. 5.18(a) et 5.20(a)) avec ceux issus de la reconstruction conventionnelle au travers des cristallins synthétiques de forme accommodée et désaccommodée (Figs. 5.18(b) et 5.20(b)) renseigne sur les altérations conséquentes qu’ils provoquent. À la baisse de résolution spatiale et du contraste manifeste, s’ajoutent des artefacts et des distorsions induites par les fortes aberrations de phase qu’ils engendrent. Ces altérations apparaissent clairement diminuées, voire pour certaines éliminées, dans les B-scans issus de l’émission adaptée CLAIFbC et reconstruits au moyen des techniques CLAPC et CLAIFbC.

5.4.1.1 Artefacts

Les B-scans conventionnels (Figs. 5.18(b) et 5.20(b)) souffrent de différents artefacts parmi lesquels deux types sont identifiables :

- des échos de répétition identifiés sur les B-scans par les traits pointillés rouges,
- des mirages acoustiques identifiés par les traits pointillés blancs.

Les premiers sont communs en échographie, apparaissant lorsqu’une différence d’impédance acoustique significative existe entre deux milieux. Certains des échos de répétition que nous observons ici résultent de la présence du cristallin synthétique *e.g.* les échos situés à l’intérieur et juste après le cristallin) et d’autres proviennent de la fine membrane sur laquelle il repose.

5.4. ANALYSE DES RÉSULTATS QUANTITATIFS ET DISCUSSION

Les autres artéfacts, ici dénommés mirages acoustiques mais également désignés par "échos multiples de PSF" [Nock *et al.*, 1989], "artéfact de dédoublement d'image" [Müller *et al.*, 1984], ou encore "artéfact d'image de chemins multiples" [Meyer, 1982] dans la littérature, résultent tous d'une intense réfraction, capable de ramener des échos extérieurs à l'axe de tir. Ces mirages acoustiques se remarquent dans les régions situées au delà de la périphérie du cristallin. Les exemples les plus évidents sont les PSFs mirages, entourés en blanc, et clairement notables sur le plateau de fil le plus proche des cristallins synthétiques. Elles consistent en une seconde image des réflecteurs ponctuels n°1 et n°7 provoquée par le défléchissement du tir émis au niveau de la périphérie cristallinienne. Nous reviendrons sur ces effets, conséquences de l'intense réfraction au bord du cristallin, dans la section 5.4.4.

Ces mirages acoustiques sont absents des B-scans issus des reconstructions adaptées (Figs. 5.18(c), 5.20(c) et 5.18(d), 5.20(d)) lorsque l'émission est également adaptée, mais se retrouvent légèrement perceptibles lorsque celle-ci ne l'est pas (voir Figs 5.35 et 5.36 de la section 5.5.2 qui suit).

5.4.1.2 Distorsions spatiales

Les B-scans conventionnels (Figs. 5.18(b) et 5.20(b)) sont également affectés par de sévères distorsions au niveau du segment postérieur des cristallins synthétiques et au delà. L'ensemble des PSFs situés dans l'ombre acoustique des cristallins apparaissent décalées axialement vers la sonde, et décalées latéralement en direction de l'axe du cristallin. Par conséquent, la fine membrane de polypropylène tendue pour supporter le cristallin apparaît faussement convexe, et avec moins d'intensité aux abords de la périphérie cristallinienne, ce qui traduit une perte de cohérence dans le rephasage des échos avant la sommation lors du DAS. Les PSFs en deçà des bords du cristallin sont soit des mirages, soit très bruitées. Les B-scans issus des reconstructions CLAPC ne présentent que peu de manifestations de ces distorsions et ceux issus des reconstructions CLAIFbC en sont quant à eux exempts.

5.4.2 Fidélité spatiale

Les pourcentages cités ici et dans les sections suivantes de la discussion ont été déterminés depuis les valeurs moyennes - marquées d'un chapeau - résumées dans la table 5.4. En raison de la différence de nombre d'échantillons (17 et 23) entre les deux états accommodatifs évalués, il se peut, dans de rares cas, que les valeurs moyennes ne reflètent pas les tendances de certains critères.

5.4.2.1 Des réflecteurs ponctuels dans l'ombre acoustique des cristallins synthétiques

Dans les B-scans conventionnels, l'erreur axiale Err_r apparaît maximale au niveau de l'axe des cristallins synthétiques puis décroît progressivement lorsque l'on s'en écarte, relativement à la proportion de milieu aberrateur traversé (Figs. 5.23 et 5.24). L'erreur latérale Err_l suit quant à elle l'évolution inverse, pratiquement inexistante dans l'axe du cristallin, elle s'accroît lorsque l'on se rapproche de ses bords, c'est à dire conjointement à l'augmentation de la courbure des faces antérieure et postérieure qui s'accompagne d'une intensification des effets réfractifs (cf. chapitre 2).

5.4. ANALYSE DES RÉSULTATS QUANTITATIFS ET DISCUSSION

Du fait de ces tendances opposées des erreurs axiale et latérale dans la direction transverse, l'erreur spatiale totale Err_{total} se retrouve relativement constante, affichant une valeur de 0.9 mm et 0.75 mm en moyenne, respectivement au travers des formes accommodée et désaccommodée. L'épaisseur et la courbure plus importante de la forme accommodée amplifient les erreurs axiale et latérale et conduisent donc à une erreur spatiale totale plus conséquente.

En comparaison des B-scans conventionnels, les erreur total moyenne $\widehat{Err}_{total}|_{\alpha}$ sur la forme accommodée et $\widehat{Err}_{total}|_{\Omega}$ sur la forme désaccommodée des B-scans adaptés apparaissent réduits respectivement de 89% et 88%, avec la technique CLAPC et 94% de 90% avec la technique CLAIFbC par rapport à la technique conventionnelle, le 100% étant défini par les B-scans de référence. Signalons que l'apparente meilleure correction des erreurs spatiales dans le cas accommodé (*e.g.* de 1% pour CLAPC et de 4% pour CLAIFbC) ne correspond pas à ce que l'on observe lorsque l'on compare les PSFs correspondant aux mêmes réflecteurs ponctuels sur les figures 5.23 et 5.24. Elle est faussement induite par les PSFs additionnelles, également les plus distordues, incluses dans le calcul des valeurs moyennes au travers de la forme désaccommodée, qui sont donc responsables d'un léger biais. En considérant néanmoins ces valeurs moyennes, la correction des distorsions apportée par CLAIFbC par rapport à CLAPC, se montre supérieure de 71% dans le cas accommodé et de 17% dans le cas désaccommodé. Ces améliorations sont principalement apportées par la plus grande réduction de l'erreur latérale (*e.g.* de 72% pour $\widehat{Err}_l|_{\alpha}$ et de 16% pour $\widehat{Err}_l|_{\Omega}$) qu'apporte CLAIFbC. L'intérêt et l'efficacité de CLAIFbC est ainsi mis en évidence, lorsque la géométrie du cristallin est cause d'une réfraction plus intense.

Bien que nous constatons ici que CLAPC apporte une amélioration substantielle de la fidélité spatiale, nous remarquons aussi la présence de quelques distorsions résiduelles sur ses B-scans, en deçà des bords des cristallins, en particulier sur la forme accommodée. Ces distorsions ne sont presque plus perceptibles dans les B-scans CLAIFbC, comme en témoigne l'erreur spatiale réduite à environ la longueur d'onde dans la turpentine ($\widehat{Err}_{totale}|_{\alpha} = 57 \mu\text{m}$ et $\widehat{Err}_{totale}|_{\Omega} = 76 \mu\text{m}$).

5.4.2.2 Du contour des cristallins synthétiques

L'importante restauration de la fidélité spatiale apportée par CLAPC et surtout CLAIFbC, favorise l'observation des régions postérieures au cristallin mais également l'observation du cristallin lui-même. Ainsi les segments postérieurs des cristallins synthétiques apparaissent beaucoup plus proches de leur géométrie réelle comme en attestent les figures 5.19 et 5.21 pour les deux formes étudiées. En effet, les B-scans CLAIFbC affichent un contour cristallinien voisin du contour détecté, lui-même très proche de la géométrie du moule, telle qu'établie par la table 5.1. De plus, nous observons une nette amélioration de l'intensité et de la définition du contour du segment postérieur des cristallins synthétiques, en particulier lorsque l'on se rapproche de la zone équatoriale. Il est important de relever que cette zone équatoriale n'est que difficilement observable *in vivo*, avec un transducteur mono-élément à balayage mécanique [Ketterling et Silverman, 2006], et non visible par les méthodes d'imagerie optique.

5.4.3 Résolution spatiale

Comme observé généralement en présence de milieux aberrateurs, la résolution spatiale est essentiellement dégradée au niveau de sa composante latérale [Ng *et al.*, 1994]. La résolution axiale reste quant à elle très proche de celle observée sur les images de référence, quel que soit la technique de reconstruction employée. Les figures 5.26 et 5.28 montrent que la FWHM latérale est clairement plus grande sur les B-scans conventionnels que sur ceux de référence, et augmente avec la profondeur, en dépit de l'ouverture adaptative en réception (*i.e.* croissante pour maintenir le F-number à 1). En conséquence, les PSFs des réflecteurs ponctuels appartenant au plateau de fil le plus profond (profondeur rétinienne), ne sont plus distinguables.

Ces observations s'appliquent également aux B-scans CLAPC, notamment sur la forme accommodée, mais dans une moindre mesure.

Les B-scans CLAIFbC présentent, au contraire, une résolution spatiale élevée et particulièrement uniforme (faible écart type de $\widehat{\Delta l}_{-6dB}|\alpha$ et $\widehat{\Delta l}_{-6dB}|\Omega$), proche de celle des B-scans de référence. Les PSFs des réflecteurs ponctuels les plus profonds sont ainsi suffisamment résolues, en particulier au travers de la forme désaccommodée, pour qu'ils soient clairement distinguables.

Ajoutons que pour les B-scans conventionnels, nous observons que la FWHM latérale diminue relativement à l'éloignement des PSFs de l'axe du cristallin. Ainsi, les PSFs situées sous la périphérie cristallinienne et également les plus distordues du fait de l'intensification des effets réfractifs dans cette zone, sont étonnamment mieux résolues. Cette amélioration de la résolution est probablement la conséquence de la réfraction accrue du faisceau émis - comme en atteste la diminution brutale de $G_{BF/ref}$ (cf. section suivante sur le contraste) - provoquant une diminution des échos réfléchis par les réflecteurs ponctuels. Les échos reçus par les éléments les plus périphériques de l'ouverture réceptrices sont alors trop faibles pour provoquer des interférences destructives lors de l'étape de beamforming (somme après recalage des signaux). Ceci nous ramène artificiellement dans une situation analogue à celle que l'on observe lorsque l'on augmente le F-number des reconstructions conventionnelles (cf. section 5.5.1 de l'étude complémentaire).

Les valeurs moyennes de l'expérience sur cristallin accommodé nous apprennent que par rapport au B-scan conventionnel, la FWHM $\widehat{\Delta l}_{-6dB}|\alpha$ des B-scans CLAPC et CLAIFbC est plus petite (meilleure) de respectivement 35% et 116%. La FWHM de CLAIFbC est donc plus petite de 60% en moyenne que celle de CLAPC, et plus grande au final de 79% que celle de la référence. De même, les valeurs moyennes de l'expérience sur cristallin désaccommodé montrent que par rapport au B-scan conventionnel, la FWHM $\widehat{\Delta l}_{-6dB}|\Omega$ des B-scans CLAPC et CLAIFbC est plus petite (meilleure) de respectivement 45% et 120%. La FWHM de CLAIFbC est donc plus petite de 52% en moyenne que celle de CLAPC, et plus grande au final de 40% que celle de la référence.

Enfin, signalons que, dans les deux expérimentations, l'écart type de la FWHM $\widehat{\Delta l}_{-6dB}$ des B-scans CLAIFbC est nettement réduit par rapport à celui des B-scans CLAPC et en particulier conventionnels.

5.4.4 Contraste

Une mesure rigoureuse du contraste consisterait en la quantification du rapport d'amplitude entre le lobe principal et les lobes secondaires pour chaque PSF de l'image. Cependant,

5.4. ANALYSE DES RÉSULTATS QUANTITATIFS ET DISCUSSION

comme nous l'avons déjà évoqué dans la section 5.2.4, cette mesure s'avère difficile, notamment pour les PSFs des plateaux horizontaux où les lobes des PSFs voisins se chevauchent. De plus, la valeur en amplitude des lobes secondaires est parfois sujette à interprétation du fait de leur asymétrie importante. Voilà les raisons qui nous ont conduit à définir le gain relatif $G_{BF/Ref}$, dont la mesure nous renseigne sur l'écart en amplitude entre les PSFs issues des différents B-scans au travers des cristallins synthétiques et les PSFs des B-scans de référence. Sa valeur étant exprimée en dB, nous nous attendons à ce qu'elle soit inférieure à zéro, quel que soit la qualité de la correction des aberrations de phase effectuée, car les faisceaux ultrasonores traversant les cristallins synthétiques sont soumis aux phénomènes suivants :

- **Réfraction** : elle provoque l'étalement et la déflexion (au niveau des bords du cristallin - cf. chapitre 2) du faisceau émis et donc diminue l'énergie transmise d'une part et reçue d'autre part.
- **Réflexion** : l'énergie transmise et reçue sont diminuées relativement au coefficient de transmission $T_{H \rightarrow L} \simeq 0.9$,
- **Atténuation** : elle est légèrement supérieure dans la gélatine à 15% par rapport à la turpentine, aux fréquences et températures expérimentales ;

Le gain relatif $G_{BF/Ref}$ suit une décroissance globale avec la profondeur, quel que soit la technique de reconstruction employée (Figs. 5.30(a) et 5.30(b)). Cette décroissance n'est cependant pas monotone puisque l'on observe des chutes importantes de sa valeur, au niveau des PSFs situées sous la périphérie cristallinienne, et donc principalement sur la figure 5.30(b) du cas accommodé (PSFs n°8, 16, 17, 22 et 23). La décroissance globale de $G_{BF/Ref}$ résulte essentiellement de l'étalement des faisceaux US (dispersion spatiale de l'énergie) provoqués par la forme biconvexe du cristallin (cf. chapitre 2). Les chutes sont quant à elles la conséquence de la déflexion des faisceaux et notamment des faisceaux émis, aux abords des bords du cristallins, causant une diminution de l'énergie transmise dans l'axe de reconstruction et une augmentation des échos hors axes.

Le gain relatif $G_{BF/Ref}$ diminue quel que soit la technique de reconstruction utilisée, mais de façon plus marquée pour les techniques de reconstruction CLAPC et surtout conventionnelle, comparativement à CLAIFbC. En effet, le $G_{BF/Ref}$ des B-scans conventionnels est sensiblement plus faible que celui des B-scans CLAIFbC, et s'en écarte de plus en plus avec la profondeur. Bien qu'un comportement similaire s'observe sur les B-scans CLAPC, dont le $G_{BF/Ref}$ est également systématiquement inférieur à celui de CLAIFbC, l'écart est moindre, notamment au travers de la forme désaccommodée. Les PSFs CLAPC centrales du plateau de fil le moins profond ont d'ailleurs un $G_{BF/Ref}$ très proche de celui des PSFs CLAIFbC *i.e.* proche de zéro dans cette zone.

Pour les deux formes investiguées, la technique CLAIFbC a permis de récupérer un $G_{BF/Ref}$ plus élevé, en moyenne, de 6.8 dB et 6.6 dB respectivement, par rapport à la technique conventionnelle, et de 4.3 dB et 2.6 dB respectivement, par rapport à la technique CLAPC. Ainsi, au niveau des PSFs du plateau de fil le plus profond *i.e.* la profondeur rétinienne, CLAIFbC récupère environ la moitié de l'amplitude des échos des réflecteurs ponctuel par rapport à la référence, pendant que CLAPC est plus proche du quart, et la technique conventionnelle du septième.

Bien que le $G_{BF/Ref}$ présente des niveaux d'amplitude similaires au travers des deux formes cristalliniennes, le niveau du SNR est sensiblement plus élevé, (*e.g.* approximativement 5 dB), pour chaque région de réflecteurs ponctuels (plateau) dans le cas de la situation désaccommodée. Ceci reflète une augmentation du niveau de bruit, probablement induit

par une amplitude plus élevée des échos hors axe.

Les figures 5.29(a) et 5.29(b) montrent que le SNR maximum est atteint au niveau des réflecteurs ponctuels appartenant au plateau de fil incliné, c'est-à-dire autour de la focale d'émission (17 mm). Ce résultat, associé aux observations effectuées sur les B-scans au travers des cristallins synthétiques issus d'une émission conventionnelle, atteste de l'efficacité de la focalisation adaptée en émission au moyen de CLAIFbC. Les B-scans CLAIFbC bénéficient d'un SNR systématiquement supérieur à celui des autres techniques de reconstruction, avec des valeurs plus élevées en moyenne de 10.5 dB et 8.6 dB comparé aux B-scans CLAPC, et de 16.7 dB et 13 dB comparé aux B-scans conventionnels, respectivement pour les formes accommodée et désaccommodée.

Pour conclure, les gains apportés par la technique CLAIFbC sur le SNR et le $G_{BF/Ref}$, comparativement aux techniques CLAPC et surtout conventionnelles, améliorent significativement le contraste des images, notamment lorsque la profondeur s'accroît, permettant d'envisager de plus grande profondeur d'exploration ou l'emploi de sondes US de fréquence plus élevée.

5.4.5 Impact de la forme du cristallin sur les B-scans

Les effets défocalisant et défléchissant du cristallin, associés à sa forme biconvexe, sur les faisceau US sont clairement observés dans les expérimentations menées. La défocalisation ou plus précisément la divergence du faisceau causant un élargissement de la FWHM et une diminution du SNR, s'observe principalement autour du centre de l'axe du cristallin, et la déflexion en périphérie. Dans ce dernier cas, Les faisceaux US émis d'incidence axiale sont défléchis du côté opposé à l'axe optique et ramènent alors des échos de ces régions situées en dehors de l'axe de tir. En conséquence, les structures postérieures à la périphérie du cristallin apparaissent, sur les B-scans conventionnels plus proches de l'axe optique qu'elles ne le sont en réalité. Les PSFs mirages sont les manifestations les plus évidentes de ce phénomène. L'ensemble de ces remarques concordent avec les observations faites par Lizzi [Lizzi *et al.*, 1970] et Chivers [Chivers *et al.*, 1984] sur les faisceaux US traversant le cristallin axialement (cf. chapitre 2).

Quel que soit la forme du cristallin synthétique, nous avons pu constater, sur les B-scans conventionnels, les mêmes types de dégradations pour l'ensemble des paramètres mesurés lors de l'analyse quantitative, mais avec plus d'ampleur au travers de la forme accommodée. Ceci peut être en partie causé par l'erreur relative en émission des délais numériques $\Delta\tau_{erreur/tir}$ plus importante dans le cas accommodé ($\Delta\tau_{erreur/tir}|_{\alpha}=28.2\%$ en moyenne et $\Delta\tau_{erreur/tir}|_{\Omega}=16.45\%$ en moyenne), mais nous l'attribuons essentiellement à une intensification des effets réfractifs et divergents, sur les faisceaux émis et reçus, résultant des plus grandes courbures et épaisseur (CSA plus élevé) de la forme accommodée. De fait, les B-scans issus des techniques de reconstructions adaptées CLAPC et CLAIFbC affichent leurs meilleurs résultats (résolution, correction des distorsions) lorsque le cristallin synthétique est sous sa forme désaccommodée, avec systématiquement une prévalence de la qualité des B-scans CLAIFbC par rapport aux CLAPC. Nous remarquons cependant que cette prévalence est plus manifeste au travers de la forme accommodée. Ceci est la conséquence directe de l'intensification des effets réfractifs qui affectent alors la technique CLAPC de façon nettement plus marquée que CLAIFbC.

5.4.6 Remarque sur les performances de la technique CLAIFbC en terme de convergence

En dépit des faibles intervalles de convergence pour déterminer les chemins liant les éléments de la sonde aux points focaux Ω_f situés dans le voisinage du cristallin (cf. chapitre 4), la Table 5.3 atteste d'une grande robustesse de la technique de reconstruction CLAIFbC, puisque 99.87% et 99.97% des chemins \widehat{AB} sont résolus, respectivement pour les formes accommodée et désaccommodée. À cette robustesse s'ajoutent une grande vitesse de convergence et une précision élevée : une seule itération s'avère nécessaire, en moyenne, pour satisfaire les conditions $\mathbf{C}_{CV,1}$ et $\mathbf{C}_{CV,2}$ et suffit pour atteindre une erreur angulaire moyenne très faible ($|Err_{ang_{\alpha,\Omega}}| < 0.03^\circ$).

5.5 Étude et résultats complémentaires

Au cours des expérimentations d'imagerie *in vitro*, nous avons été amenés à employer, pour chaque technique de reconstruction au travers des cristallins synthétiques, une émission adaptée et un F-number égal à 1 en réception. Nous proposons dans cette section, complémentaire aux résultats présentés jusqu'ici et dans l'article IEEE TMI, d'explorer, pour chaque technique de formation de voies, d'une part l'effet du F-number choisi en réception et d'autre part l'impact de l'émission adaptée CLAIFbC, dans la qualité des images reconstruites.

5.5.1 Effets du F-number en réception

En échographie médicale, le F-number utilisé en réception est traditionnellement compris entre 2 et 3 car offrant généralement le meilleur compromis entre la résolution spatiale et le contraste. Dans les expériences qui précèdent nous avons cependant choisi une valeur de 1 pour le F-number en réception car cela permettait d'accentuer les effets aberrateurs du cristallin synthétique et ainsi de mieux juger de la capacité de nos techniques de reconstructions adaptées à les compenser.

Dans cette étude complémentaire nous nous proposons d'investiguer l'effet du F-number en réception, sur chaque technique de reconstruction, pour des valeurs entières comprises entre 1 et 4. Nous avons choisi d'effectuer cette étude sur la PSF du réflecteur ponctuel situé au centre du plateau incliné (approximativement à la profondeur focale d'émission), issue des signaux RF bruts acquis lors de l'émission adaptée CLAIFbC sur le cristallin synthétique de forme désaccommodée. Il s'agit de la PSF désignée par le numéro 12 sur la figure de référence 5.22 de la section 5.3.2. L'évolution de cette PSF en fonction du F-number choisi en réception est bien représentatif, pour chaque technique de reconstruction employée, des tendances générales que l'on peut observer. Elle est affichée, en l'absence de compression logarithmique et pour deux échelles d'affichages différentes, sur les figures 5.31 et 5.32. L'intérêt de ces deux représentations est commenté dans les légendes des figures respectives.

5.5. ÉTUDE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

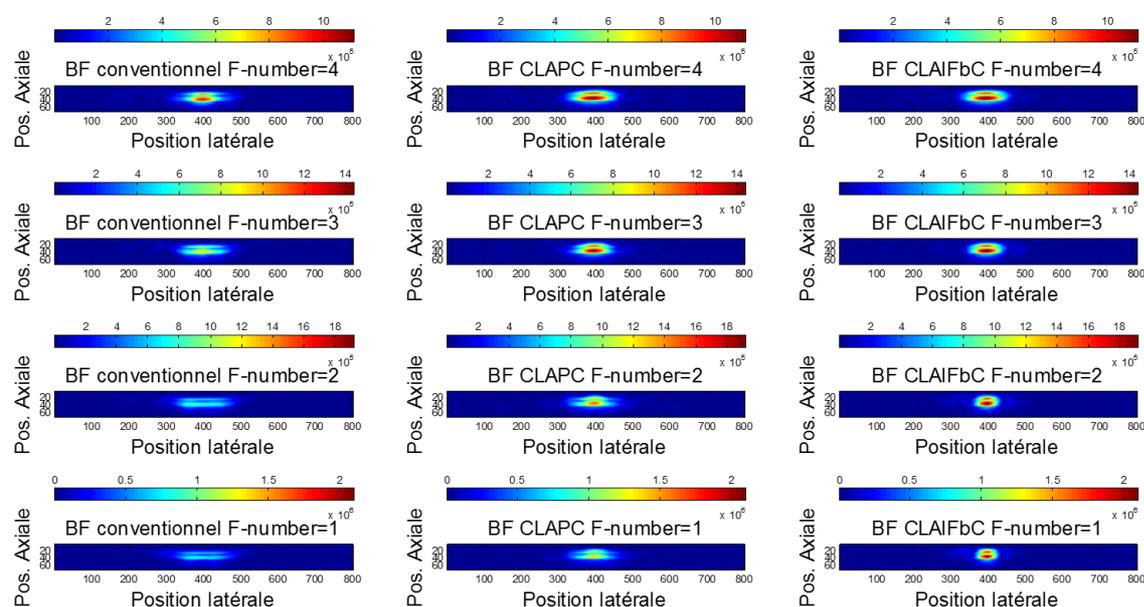


FIGURE 5.31 – PSF du réflecteur ponctuel situé au centre du plateau incliné (PSF n°12 voir Fig. 5.22) reconstruite au moyen des techniques conventionnelle (colonne à gauche), CLAPC (colonne centrale) et CLAIFbC (colonne à droite) à partir des lignes RF issues des acquisitions sur le cristallin synthétique forme désaccommodée. Pour chacune de ces techniques, un F-number de 4, 3, 2 ou 1 a été appliqué en réception (lignes de haut en bas). Afin de faciliter l’appréciation des tendances en fonction du F-number et de chaque technique, ces PSFs sont affichées sans compression logarithmique. L’échelle d’affichage est ici propre à chaque F-number (lecture horizontale) afin de faciliter la comparaison inter technique de reconstruction.

L’observation du profil latéral de la PSF n°12 renseigne sur la résolution spatiale (largeur lobe principal à -6 dB) et le contraste (niveau des lobes secondaires) pour une technique de reconstruction et un F-number donnés. Nous avons ainsi relevé ses différents profils latéraux, à plus ou moins 2.6 mm de son maximum, sur les B-scans issus des techniques de reconstruction conventionnelle, CLAPC et CLAIFbC, pour les F-number 4, 3, 2 et 1 en réception. Nous avons ensuite confrontés les profils obtenus, de deux façons différentes (Figs. 5.33 et 5.34), afin d’identifier plus facilement les phénomènes mis en jeu. Ainsi, la figure 5.33 favorise la comparaison des performances des différentes technique de reconstruction pour un F-number donné et la figure 5.34 vise à mettre en évidence comment chaque technique de reconstruction est impactée par la valeur du F-number.

5.5. ÉTUDE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

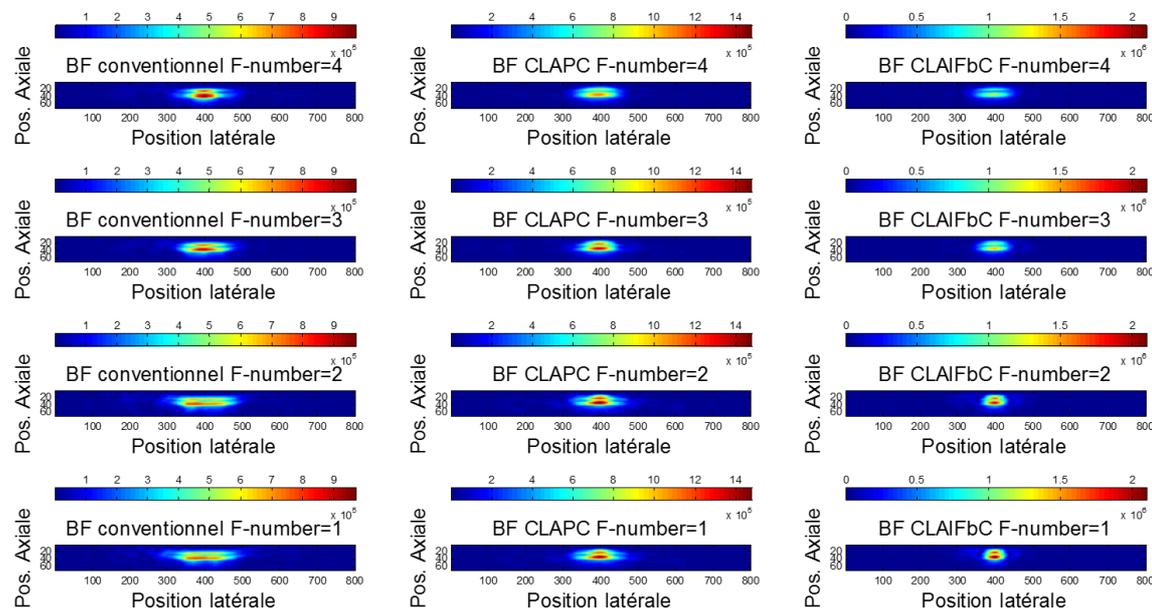


FIGURE 5.32 – Se référer à la légende précédente pour les détails de la figure. L'échelle d'affichage est ici propre à chaque technique de reconstruction (lecture horizontale) afin de mieux apprécier en quoi la valeur du F-number l'affecte.

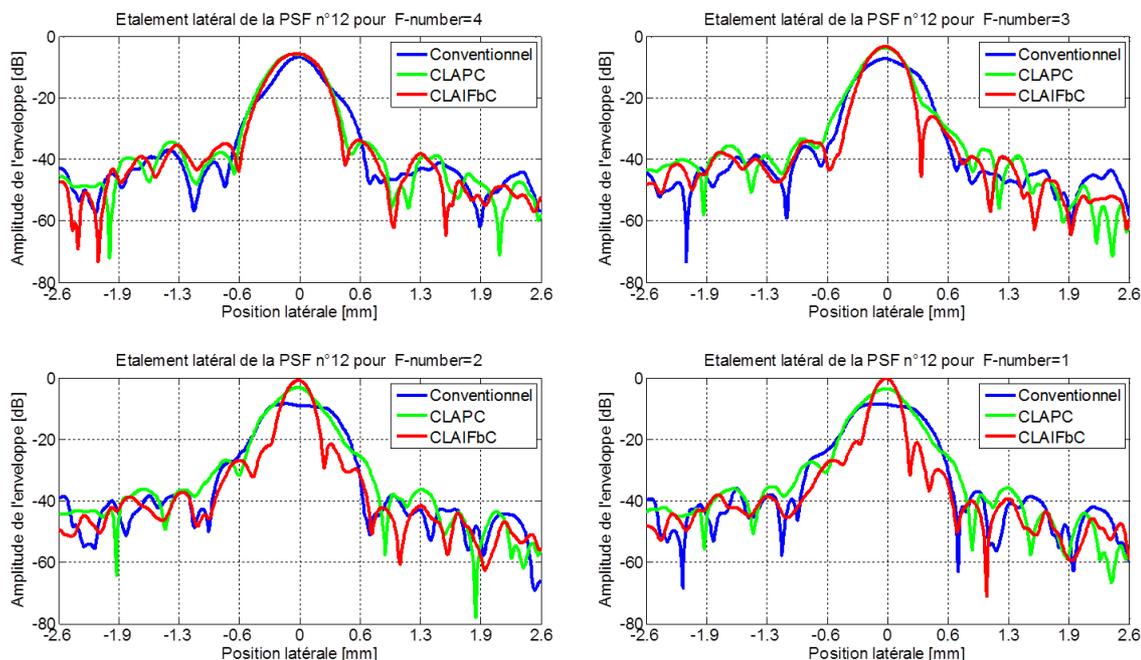


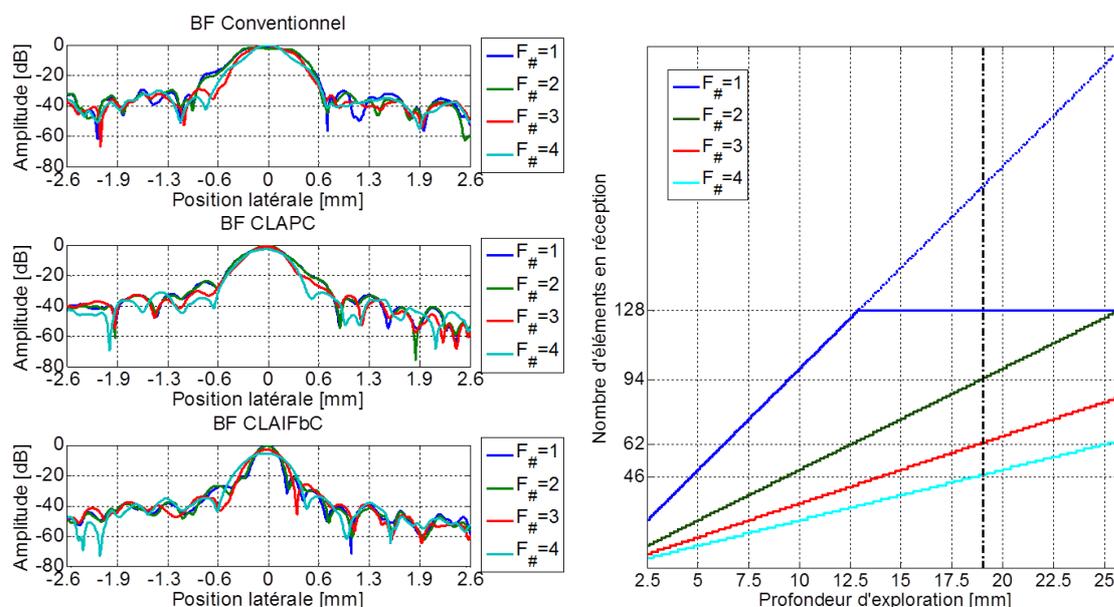
FIGURE 5.33 – Comparaison de l'étalement latéral de la PSF au centre du plateau incliné (n°12 voir Fig. 5.22) en fonction de la technique de reconstruction utilisée pour chaque F-number testé (de 1 à 4).

Nous observons sur la figure 5.33, pour la valeur du F-number la plus faible *i.e.* 1, une résolution latérale meilleure (plus petite) pour la reconstruction conventionnelle que pour

5.5. ÉTUDE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

les reconstructions adaptées CLAPC et CLAIFbC, dont les profils sont très voisins, et une dynamique d'amplitude (ratio lobe principal/lobes secondaires) relativement similaire quel que soit la technique de reconstruction. Cette observation n'est plus valable à partir d'un F-number de 3 et jusqu'à 1, où les reconstructions adaptées, et notamment CLAIFbC, présentent des dynamiques d'amplitude sensiblement supérieures à la reconstruction conventionnelle. Il est intéressant de remarquer que la résolution latérale de CLAIFbC s'améliore et se distingue de plus en plus de celle des reconstructions conventionnelles et CLAPC lorsque la valeur du F-number diminue, notamment à partir de 2. Ce comportement met en évidence la prédominance des effets réfractifs dans la phase des échos reçus par les éléments les plus périphériques de l'ouverture réceptrice et donc l'intérêt de les compenser pour continuer d'améliorer la résolution latérale en accroissant la taille de cette ouverture.

Dans la figure 5.34(b) suivante, le nombre d'éléments en réception N_{elem_R} est calculé pour chaque profondeur échantillonnée z d'après l'expression 3.12 exprimée dans le chapitre 3.



(a) Étalement de la PSF en fonction du F-number pour chaque technique de reconstruction.

(b) Evolution du nombre d'éléments mobilisés en réception pour chaque profondeur en fonction du F-number.

FIGURE 5.34 – Évolution de l'étalement latéral de la PSF au centre du plateau incliné (n°12 voir Fig. 5.22) en fonction du F-number pour chaque technique de reconstruction. Le nombre d'éléments en réception étant limité physiquement à 128, et cette valeur étant dépassée à la profondeur de la PSF n°12, pour un F-number égal à 1 : nous avons en réalité un F-number de 1.4 à cette profondeur.

Nous constatons sur la figure 5.34 que l'amélioration de résolution latérale attendue en diminuant la valeur du F-number n'a pas lieu lorsque l'on emploie une reconstruction conventionnelle, au contraire, décroître sa valeur s'accompagne d'une dégradation notable de celle-ci et d'un rehaussement des lobes secondaires. On observe un comportement similaire sur la PSF issue de la reconstruction CLAPC en ce qui concerne le rehaussement des lobes secondaires avec l'augmentation de la taille d'ouverture en réception. La résolu-

5.5. ÉTUDE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

tion latérale quant à elle s'améliore légèrement lorsque l'on passe d'un F-number de 4 à 3, mais se dégrade ensuite comme observé sur la reconstruction conventionnelle mais dans une moindre mesure. Contrairement aux autres techniques, la PSF issue des reconstructions CLAIFbC bénéficie d'une amélioration constante et notable de sa résolution et de sa dynamique lors de la diminution du F-number de 4 à 2, puis devient minimale à 1. Ce comportement s'apparente à celui se produisant lorsque l'on image un milieu homogène et témoigne donc de l'efficacité de CLAIFbC dans la correction des aberrations de phase cristallinienne.

5.5.2 Reconstructions conventionnelle, CLAPC et CLAIFbC issues d'une émission conventionnelle

Afin de mieux saisir quel est l'apport de l'émission adaptée CLAIFbC dans la qualité des images obtenues par les trois techniques de reconstruction testées, nous avons réitéré l'expérimentation décrite dans les sections 5.2.2 et 5.2.3, en utilisant cette fois une émission conventionnelle focalisée par loi parabolique dans la turpentine à 17 mm (également la profondeur focale de l'émission CLAIFbC). Comme précédemment, nous avons investigué les deux états accommodatifs extrêmes. Les acquisitions au travers des formes accommodée et désaccommodée ont eu lieu sur les mêmes cristallins synthétiques que dans les expériences précédentes et à des températures très similaires (18.6°C et 19.77°C respectivement).

Les images en mode-B obtenues, pour chaque technique de reconstruction, en l'absence d'émission adaptée sont présentées dans les figures 5.35 et 5.36, respectivement pour la forme accommodée et désaccommodée. Elles résultent toutes de l'application des mêmes F-number ($F_{\#}=1$, DRF (continue) et apodisation (porte) que dans les expérimentations avec émission adaptée CLAIFbC.

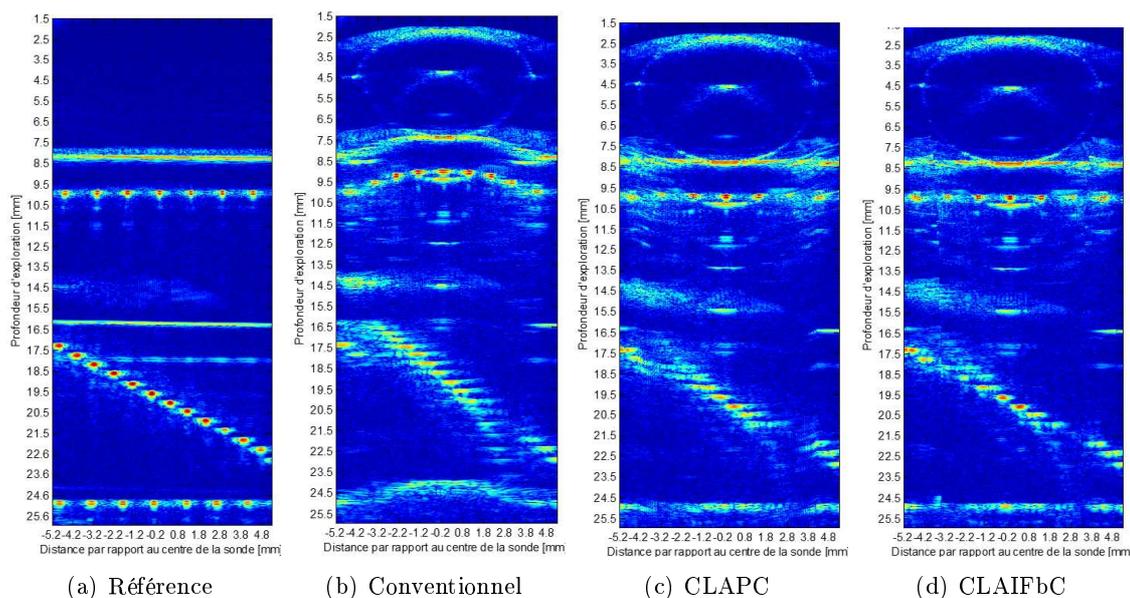


FIGURE 5.35 – Reconstructions issues d'une émission conventionnelle à 17 mm au travers du cristallin synthétique de forme accommodée.

5.5. ÉTUDE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

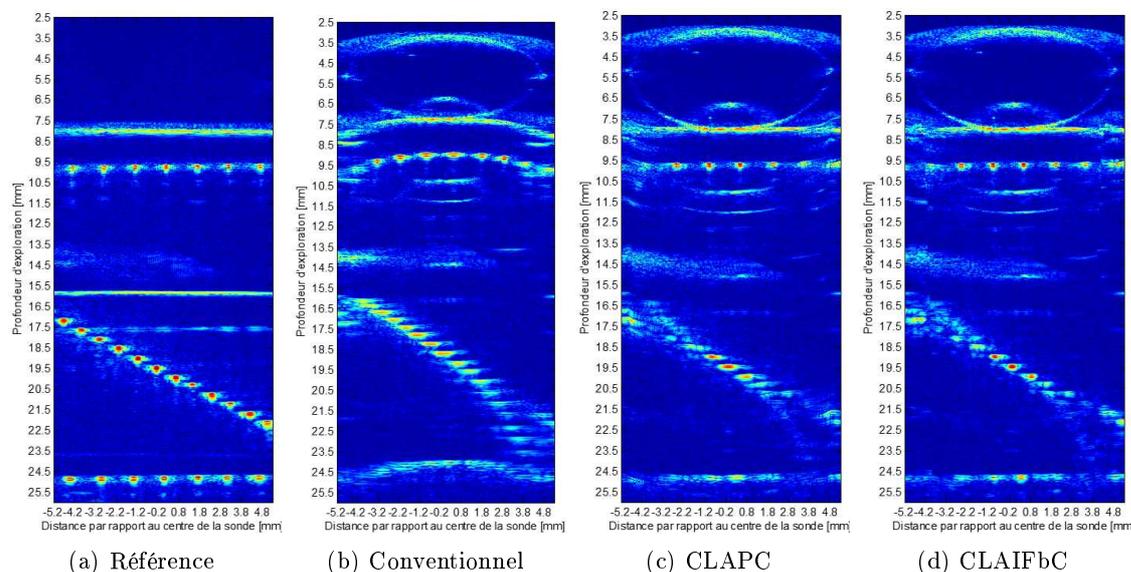


FIGURE 5.36 – Reconstructions issues d’une émission conventionnelle à 17 mm au travers du cristallin synthétique de forme désaccommodée.

Les conclusions sont semblables pour les deux formes investiguées, en l’absence d’émission adaptée, nous observons :

- **sur les reconstructions conventionnelles** : Un accroissement des distorsions spatiales et une diminution de l’amplitude des PSFs. Ces dégradations sont en revanche accompagnées d’une amélioration de la résolution latérale. Cette amélioration apparente est probablement induite par la diminution du nombre de signaux mal rephasés dans la sommation DAS, ceux-ci étant à présent (en l’absence d’émission adaptée) d’amplitude trop faible pour causer une réelle dégradation.
- **sur les reconstructions CLAPC** : De même que pour les reconstructions conventionnelles, on observe une amélioration apparente de la résolution latérale ainsi qu’une diminution d’amplitude des PSFs, essentiellement marquée sous la périphérie cristallinienne où certaines PSFs ne sont presque plus visibles. Contrairement aux B-scans CLAPC issus de l’émission adaptée, nous relevons la présence de distorsions spatiales au centre des plateaux de fil les plus profonds, en particulier sur la forme accommodée, auxquelles s’ajoutent des distorsions résiduelles marquées en périphérie.
- **sur les reconstructions CLAIFbC** : Les observations sont semblables à celle pour la reconstruction CLAPC, mais avec des effets sensiblement moins marqués. La résolution spatiale reste proche de celle obtenue lors des émissions adaptées mais les PSFs périphériques et les plus profondes sont d’amplitude plus faible. De plus, bien que des distorsions résiduelles soient également présentes en périphérie, les distorsions spatiales au centre des plateaux de fils que l’on observe sur les B-scans ne sont plus présentes.

En conclusion, l’apport de l’émission CLAIFbC dans ces expériences *in vitro*, où le rapport de célérité $\mu_{L/H}$ est plus marqué, apparaît manifeste notamment dans les zones où les effets réfractifs sont les plus importants *i.e.* au niveau de la périphérie cristallinienne. Remarquons également que ce sont les reconstructions adaptées, et en particulier CLAIFbC, qui bénéficient le plus de l’emploi d’une émission adaptée.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expérimenté *in vitro*, pour les deux formes accommodatives extrêmes du cristallin, et au moyen d'une sonde linéaire multi-éléments HF, la technique de reconstruction adaptée CLAIFbC sur un fantôme du milieu oculaire bi-phasique émulant les aberrations de phase cristalliniennes. Nous avons confrontés les B-scans ainsi obtenus à ceux issus d'une reconstruction conventionnelle pour apprécier l'apport de CLAIFbC, mais aussi, pour observer en quoi et dans quelle mesure l'imagerie trans-cristallin affecte les images en mode-B lors de l'emploi d'une sonde US multi-éléments HF, en l'absence de compensation efficace des aberrations cristalliniennes. Enfin, pour évaluer l'intérêt de considérer la réfraction dans la compensation des aberrations de phase, nous avons également introduit une technique de reconstruction, qui à l'inverse de CLAIFbC néglige ses effets (CLAPC).

En agissant directement au cœur du processus de reconstruction d'image, la technique CLAIFbC a prouvé sa capacité à délivrer des B-scans non seulement bien plus fidèles spatialement à la réalité physique contrairement aux B-scans conventionnels, mais également à offrir une amélioration d'un facteur 2 de la résolution latérale, associée à un meilleur contraste et une meilleure sensibilité.

Les expérimentations *in vitro* ont donc clairement démontré la capacité de CLAIFbC à compenser de façon très satisfaisante les aberrations de phase cristalliniennes. Précisons toutefois que les résultats de l'analyse quantitative ne sont pas directement transposable à la situation *in vivo* pour deux raisons majeures : l'atténuation élevée du cristallin réelle ($\alpha=2.2$ dB/mm à 20 MHz [De Korte *et al.*, 1994a] susceptible de provoquer des aberrations d'atténuation) et le ratio de célérité $\mu_{L/H}$ plus faible que dans ces expérimentations *in vitro*. Aussi, le gain d'un facteur 2 en résolution latérale apporté par la technique CLAIFbC peut se retrouver plus faible *in vivo*. Nous pouvons cependant avancer que l'erreur axiale sera diminuée de la moitié environ *in vivo*, soit de l'ordre de 400 à 500 μm , puisque celle-ci est proportionnelle à la différence de célérité entre c_L et c_H . Ceci est cohérent avec les simulations de Sokollu, présentées dans le chapitre 2, qui prédisent un avancement apparent de la rétine de 500 μm .

Enfin, signalons que ces expérimentations ont également permis de révéler l'intérêt de la technique CLAPC qui bien que moins efficace pour restituer une résolution se rapprochant d'un milieu homogène que CLAIFbC, notamment au niveau de la profondeur rétinienne, permet cependant une correction satisfaisantes des distorsions spatiales.