



UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS

École Doctorale EMSTU
UMR Inserm U930, Imagerie et Cerveau

THÈSE présentée par :

Tony MATÉO

soutenue le : 18 décembre 2014

pour obtenir le grade de : Docteur de l'université François - Rabelais de Tours
Discipline : Sciences de la vie et de la santé / Spécialité : Acoustique ultrasonore

ÉCHOGRAPHIE OCULAIRE TRANSCORNÉENNE PAR SONDE LINÉAIRE MULTI-ÉLÉMENTS HAUTE-FRÉQUENCE

Étude et correction des effets aberrateurs du cristallin
dans la reconstruction d'image en mode-B

THÈSE DIRIGÉE PAR :

OSSANT Frédéric

Ingénieur Biomédical, Dr., HDR, Inserm U930
Équipe Imagerie et Ultrasons Tours

RAPPORTEURS :

BRIDAL Lori

DR, CNRS UMR S 1146 / UMR 7371 LIB Paris

LIEBGOTT Hervé

MCU, CNRS UMR 5220, Inserm U1044, Créatis Lyon

JURY :

LAUGIER Pascal

DR, CNRS UMR S 1146 / UMR 7371 LIB Paris

BRIDAL Lori

DR, CNRS UMR S 1146 / UMR 7371 LIB Paris

LIEBGOTT Hervé

MCU, UMR 5220 Créatis Lyon

FILOUX Erwan

Dr., Société Vermon Tours

PISELLA Pierre-Jean

PU-PH, CHRU de Tours

MOFID Yassine

MCU, Inserm U930 Équipe 5 Tours

OSSANT Frédéric

IB Dr., Inserm U930 Équipe 5 Tours

Résumé

Depuis l'avènement des sondes linéaires ultrasonores multi-éléments dans la reconstruction d'images en mode-B, l'échographie médicale s'est considérablement améliorée. Couplées à des échographes numériques de plus en plus performants, elles offrent une résolution spatiale, un contraste et une profondeur de champ nettement supérieurs aux sondes mono-élément à balayage mécanique. Ces avantages découlent des possibilités en termes de formation de faisceaux et de voies qu'elles apportent, autorisant ainsi focalisation continue, apodisation dynamique, ouverture adaptatrice, stratégie de formations de faisceaux adaptatives, balayage électronique rapide et complexe... *etc* En raison de contraintes techniques, il subsiste toutefois un domaine où l'emploi des sondes multi-éléments ne s'est pas démocratisé en clinique : l'échographie haute fréquence ($\geq 20\text{MHz}$) et en particulier l'échographie ophtalmique. Néanmoins, grâce à des progrès récents, l'arrivée sur le marché de sondes multi-éléments haute fréquence à des coûts abordables pour cette discipline est proche.

Le milieu oculaire comporte cependant un obstacle susceptible de limiter l'intérêt de telles sondes en échographie ophtalmique. Il s'agit du cristallin, seconde lentille du système optique de l'œil humain, dont le rôle est central dans le phénomène d'accommodation. D'un point de vue acoustique, cet organe constitue également une lentille mais alors de nature divergente. Milieu où les ultrasons se propagent à une célérité supérieure d'environ 10% à celles des tissus qui l'entourent (l'humeur aqueuse et l'humeur vitrée qui emplissent le volume intra-oculaire), le cristallin se révèle être la source principale d'aberrations de phase pour les faisceaux ultrasonores au sein de l'œil. Il est ainsi connu pour causer une dégradation significative des scans transcornéens, réduisant résolution spatiale et contraste, mais également provoquant des distorsions marquées au niveau du fond de l'œil, où s'observent pourtant les structures les plus essentielles (*e.g.* la rétine et en particulier la macula, le nerf optique et en particulier la papille, les vaisseaux nourriciers de la choroïde). Ces effets néfastes, déjà marqués sur les B-scans transcornéens issus du balayage mécanique d'un mono-élément risquent de s'accroître avec l'emploi d'une sonde multi-élément. En effet, ces dernières sont plus sensibles aux aberrations de phases, du fait d'ouvertures réceptrices plus grandes.

En revanche, ce type de sonde offre, au moyen d'un contrôle adéquat de la phase de ses éléments, l'opportunité de corriger ces aberrations. Cet avantage représente un intérêt de taille, spécialement à haute fréquence où les effets néfastes des aberrations de phase s'amplifient. Ainsi, tant que l'on considèrera que l'œil est un milieu homogène, l'augmentation de la fréquence de travail ne s'accompagnera pas du gain en résolution escompté, et cela notamment dans l'imagerie oculaire transcornéenne, profondément affectée par les aberrations cristalliniennes. Les sondes multi-éléments constituent à ce titre le moyen le plus prometteur pour améliorer la résolution des B-scans transcornéens.

C'est cette voie que nous avons choisi d'explorer dans ce travail de thèse. Une technique de formation de faisceau capable de compenser les aberrations de phase engendrées par le cristallin à l'aide d'une sonde linéaire multi-élément a ainsi été développée pour l'imagerie oculaire trans-cornéenne. Cette technique permet, à l'issue d'une étape de détection du contour du cristallin, de calculer des délais de focalisation qui tiennent compte de la célérité ultrasonore en son sein et de celle du milieu qui l'entoure, tout en considérant les effets de réfraction subséquents. Elle s'appuie sur une technique de lancer de rayon de type bending associée à la méthode de Newton-Raphson pour satisfaire le principe de Fermat, dont découle la loi de la réfraction aux interfaces. Initialement conçue pour prendre en compte un cristallin homogène, cette technique de reconstruction adaptée a été étendue pour considérer les inhomogénéités qui existent, essentiellement dans les zones capsulaire et corticale, en périphérie du cristallin. Dans un premier temps cette technique a été testée *in vitro* sur fantôme pour, d'une part procéder à sa validation, et d'autre part estimer son apport au regard d'une technique de reconstruction conventionnelle de type delay-and-sum. De plus, une technique de reconstruction, également adaptée mais ne considérant pas la réfraction, a été introduite pour apprécier l'intérêt de la prendre en compte. Ces expérimentations ont été rendues possibles par la présence d'un échographe de recherche expérimental développé au laboratoire "Imagerie et cerveau" et d'une sonde linéaire ultrasonore 128 éléments, de fréquence centrale 20 MHz, fournie par la société Vermon. Elles ont été menées sur un fantôme bi-phasique du milieu oculaire émulant les aberrations cristalliniennes. Les deux formes accommodatives extrêmes d'un cristallin humain adulte ont été investiguées et pour chacune une analyse des réflecteurs ponctuels d'un fantôme de fil a permis de quantifier la résolution spatiale, le contraste et les distorsions des B-scans reconstruits au moyen des différentes techniques de reconstruction. Les effets néfastes des aberrations cristalliniennes sur l'imagerie conventionnelle par sonde multi-élément haute fréquence ont ainsi pu être mis en lumière, et surtout la capacité de la méthode proposée à les compenser, non seulement pour rétablir une résolution proche de celle d'un milieu homogène mais également pour restaurer grandement la fidélité spatiale.

Enfin, les techniques de reconstruction ont été confrontées *ex vivo* d'abord sur cristallin porcin isolé pour une analyse quantitative des performances de chacune, puis sur deux yeux humains, l'un sain, l'autre doté d'un implant intra-oculaire. L'apport des techniques de reconstruction adaptées s'est révélé significatif : rehaussement de la dynamique des B-scans, diminution des distorsions de 74%, et amélioration d'un facteur 2 de la résolution spatiale. De plus, ces expérimentations ont permis de montrer l'intérêt de considérer l'hétérogénéité de la célérité ultrasonore au sein du cristallin pour augmenter les bénéfices des techniques de reconstructions adaptées, notamment en terme de restauration de la fidélité spatiale. Ces techniques sont prometteuses à ce titre pour la biométrie oculaire et notamment la phakométrie, discipline où les techniques optiques sont favorites bien que souffrant d'imprécisions et de limitations. En outre, il s'est avéré que la technique de reconstruction adaptée qui néglige la réfraction, atteint *ex vivo* une qualité semblable à la technique qui la compense. Il apparaît donc envisageable d'appliquer une technique simple de compensation des aberrations de phases cristalliniennes pour l'imagerie oculaire transcornéenne par sonde linéaire multi-élément à haute fréquence.

Mots clés : Échographie ophtalmique, haute fréquence, sonde ultrasonore linéaire multi-éléments, cristallin, aberrations de phases, lancer de rayon bending, principe de Fermat, reconstruction adaptée, phakométrie