

# Table des matières

<b>Chapitre 1. Principes d'imagerie ultrasonore et du traitement de signal</b> . . . . .	<b>1</b>
S. Lori BRIDAL	
1.1. Introduction : évaluation des systèmes vivants par échographie . . . . .	1
1.2. Sondes échographiques . . . . .	4
1.2.1. Matériaux piézoélectriques : conversion électroacoustique . . . . .	4
1.2.2. Transducteurs . . . . .	5
1.2.3. Modélisation de la réponse du transducteur . . . . .	7
1.2.4. Fréquence et période d'oscillation . . . . .	8
1.2.5. Fréquence de résonance du transducteur et bande passante . . . . .	9
1.3. Ondes ultrasonores longitudinales . . . . .	11
1.3.1. Vibrations le long de l'axe de la propagation de l'onde . . . . .	11
1.3.2. Équation d'onde élastique, en 1D . . . . .	12
1.3.3. Propagation de l'onde . . . . .	15
1.4. Ultrasons pulse-écho . . . . .	17
1.4.1. Impulsions ultrasonores . . . . .	17
1.4.2. Pression et intensité. . . . .	19
1.4.3. Choix de la fréquence centrale . . . . .	19
1.4.4. Atténuation. . . . .	20
1.4.5. Vitesse de propagation . . . . .	20
1.4.6. Effets de la propagation non linéaires . . . . .	21
1.4.7. Réflexion, transmission et réfraction . . . . .	21
1.4.8. Diffusion et <i>speckle</i> acoustique. . . . .	22
1.4.9. Cavitation et indice mécanique . . . . .	24
1.4.10. Réchauffement et indice thermique. . . . .	24
1.4.11. Pression de radiation acoustique . . . . .	25
1.5. Formation d'une image . . . . .	25
1.5.1. Un ensemble de signaux pouvant être visualisé de plusieurs façons . . . . .	25

1.5.2. Diffraction et focalisation naturelle . . . . .	26
1.5.3. Focalisation électronique et ondes planes ultrarapides . . . . .	26
1.5.4. Innovations techniques clés . . . . .	28
1.5.5. Compensation temporelle du gain . . . . .	28
1.5.6. Rapport contraste-sur-bruit . . . . .	28
1.5.7. Volume du faisceau et résolution spatiale. . . . .	28
1.5.8. Fréquence de répétition d'impulsions et cadence d'image . . . . .	29
1.6. D'autres modes d'imagerie pour sonder les systèmes vivants . . . . .	30
1.6.1. Doppler . . . . .	30
1.6.2. Propagation d'ondes de cisaillement et propriétés élastiques . . . . .	32
1.6.3. Imagerie échographique de contraste . . . . .	33
1.6.4. Imagerie super-résolue . . . . .	34
1.6.5. Imagerie photoacoustique . . . . .	34
1.7. Bibliographie. . . . .	35

## **Chapitre 2. Transducteurs, systèmes d'imagerie et formation d'image . . . . . 37**

Enrico BONI, Alessandro RAMALLI, Alessandro Stuart SAVOIA  
et Piero TORTOLI

2.1. Transducteurs ultrasonores. . . . .	37
2.1.1. Principes fondamentaux des transducteurs . . . . .	38
2.1.2. Technologies de transducteurs . . . . .	45
2.2. Techniques de formation d'image . . . . .	51
2.2.1. Modules de construction de systèmes d'imagerie . . . . .	51
2.2.2. Imagerie ultrarapide . . . . .	54
2.2.3. Imagerie 3D . . . . .	58
2.2.4. Amélioration de la qualité d'image avec des techniques de formation de faisceau. . . . .	59
2.3. Systèmes d'imagerie avancés : architectures avancées et plateformes de recherche . . . . .	60
2.3.1. Architecture de transmission . . . . .	61
2.3.2. Architecture de réception . . . . .	62
2.4. Conclusion . . . . .	63
2.5. Bibliographie. . . . .	63

## **Chapitre 3. Ondes de cisaillement et évaluation des propriétés mécaniques de tissus . . . . . 71**

Stefan CATHELINE et Bruno GIAMMARINARO

3.1. Introduction : une perspective historique de la palpation . . . . .	71
3.1.1. Définition de l'élasticité . . . . .	72

3.1.2. Élastographie clinique et applications émergentes. . . . .	74
3.1.3. Plan du chapitre . . . . .	74
3.2. Ondes sonores dans les tissus humains : l'homme liquide . . . . .	75
3.3. Au-delà de l'imagerie ultrasonore : l'homme solide. . . . .	77
3.4. Le problème de la source de l'onde de cisaillement . . . . .	78
3.4.1. Source de vibrations externes à piston. . . . .	80
3.4.2. Pression de radiation acoustique . . . . .	81
3.4.3. Source électromagnétique . . . . .	83
3.4.4. Sources lasers et bulles. . . . .	84
3.4.5. Sources naturelles. . . . .	85
3.5. L'élastographie au-delà des ultrasons . . . . .	86
3.6. Bibliographie. . . . .	88

## **Chapitre 4. Échographie Doppler et cartographie des flux sanguins . . . . . 93**

Alfred C.H. YU

4.1. Doppler en mode continu ( <i>continuous-wave</i> , ou CW). . . . .	94
4.1.1. Origine des signaux dans le sang. . . . .	94
4.1.2. Équation Doppler dans le contexte de mesure du flux sanguin . . . . .	95
4.1.3. Implémentations pratiques et considérations . . . . .	98
4.1.4. Format d'affichage et applications . . . . .	99
4.2. Doppler pulsé. . . . .	101
4.2.1. Principes d'évaluation du flux sanguin en mode pulsé . . . . .	101
4.2.2. Concept d'échantillonnage à temps lent. . . . .	103
4.2.3. Implémentation en pratique . . . . .	104
4.2.4. Considérations techniques : repliement de spectre ( <i>aliasing</i> ) et résolution Doppler. . . . .	106
4.2.5. Doppler CW et Doppler pulsé . . . . .	108
4.3. Doppler couleur ( <i>color flow imaging</i> , ou CFI) . . . . .	109
4.3.1. Une extension du Doppler pulsé à une fenêtre. . . . .	110
4.3.2. Principe d'estimation des couleurs de pixel . . . . .	111
4.3.3. Estimation de puissance Doppler et cartographie . . . . .	112
4.3.4. Considérations d'imagerie. . . . .	114
4.4. Nouvelles techniques de cartographie de flux. . . . .	116
4.4.1. Imagerie de flux <i>B-flow</i> . . . . .	116
4.4.2. Estimation de vecteur de flux . . . . .	117
4.4.3. Imagerie de flux avec l'imagerie ultrarapide . . . . .	118
4.4.4. Cartographie de flux en 3D . . . . .	120
4.5. Conclusion . . . . .	121
4.6. Bibliographie. . . . .	122

<b>Chapitre 5. Échographie cardiaque</b> . . . . .	125
Konstantina PAPANGELOPOULOU, Marta ORLOWSKA, Sjoerd NOOIJENS et Jan D'HOOGHE	
5.1. Introduction à l'échographie cardiaque . . . . .	125
5.1.1. Maladie cardiaque, anatomie et fonction . . . . .	126
5.1.2. Mesures cliniques typiques . . . . .	129
5.1.3. Besoins cliniques à pourvoir . . . . .	137
5.2. Imagerie ultrarapide (en 2D). . . . .	138
5.2.1. Émission multiligne . . . . .	139
5.2.2. Ondes planes et divergentes . . . . .	140
5.2.3. Potentiel clinique . . . . .	142
5.3. Imagerie volumétrique . . . . .	144
5.3.1. 3DUS du cœur . . . . .	144
5.3.2. Configuration idéale pour la 3DUS cardiaque . . . . .	145
5.3.3. Défis matériels . . . . .	146
5.3.4. Formation de faisceau – défis et solutions . . . . .	150
5.3.5. Défis logiciels . . . . .	151
5.4. Bibliographie . . . . .	152
<b>Chapitre 6. Agents de contraste ultrasonore : caractérisation microvasculaire.</b> . . . . .	161
Simona TURCO, Peiran CHEN, Andrej LYSHCHIK, Ahmed EL KAFFAS et Massimo MISCHI	
6.1. Introduction . . . . .	161
6.2. Échographie par agent de contraste et réponse acoustique . . . . .	164
6.2.1. Imagerie de contraste spécifique . . . . .	166
6.2.2. Calibration pour l'évaluation de la concentration d'UCA . . . . .	167
6.3. Analyse des cinétiques de l'UCA . . . . .	169
6.3.1. Analyse par injection de bolus . . . . .	170
6.3.2. Analyse avec un taux d'infusion constant . . . . .	180
6.3.3. Analyse spatiale . . . . .	182
6.3.4. Analyse spatio-temporelle en 3D . . . . .	186
6.4. Défis actuels et perspectives . . . . .	192
6.5. Bibliographie . . . . .	195
<b>Chapitre 7. Limites de résolution et échographie super-résolue . . . . .</b>	209
Vincent HINGOT et Olivier COUTURE	
7.1. Introduction . . . . .	209
7.1.1. Échelles en biologie et en médecine . . . . .	209
7.1.2. Résolution dépendant de la longueur d'onde et de la géométrie . . . . .	211

7.1.3. Compromis résolution/pénétration . . . . .	214
7.1.4. Résolution du dilemme résolution/pénétration . . . . .	216
7.1.5. Super-résolution par microscopie à localisation moléculaire . . . . .	218
7.2. Microscopie de localisation à ultrasons . . . . .	220
7.2.1. Les microbulles comme source de contraste pour la localisation microscopique. . . . .	220
7.2.2. Le processus de microscopie de localisation par ultrasons . . . . .	223
7.2.3. Localisation de sources ponctuelles et individuelles . . . . .	225
7.2.4. Suivi interimage de microbulles en mouvement . . . . .	227
7.2.5. Visualisation de données de microscopie de localisation par ultrasons . . . . .	228
7.2.6. Comparaison avec la micro-CT comme méthode de référence . . . . .	229
7.3. Thèmes liés à la microscopie de localisation par ultrasons . . . . .	230
7.3.1. Définition et mesure de la résolution . . . . .	230
7.3.2. Artefacts fréquents et méthodes de compensation. . . . .	233
7.3.3. Microscopie de localisation par ultrasons : de la 2D à la 3D. . . . .	235
7.3.4. Intelligence artificielle . . . . .	236
7.4. Perspectives et défis. . . . .	237
7.4.1. Applications de l'échographie en super-résolution . . . . .	237
7.4.2. Défis à venir et perspectives. . . . .	241
7.5. Bibliographie. . . . .	243

## **Chapitre 8. Correction des sources de dégradation d'image de tissus hétérogènes en échographie pulse-écho. . . . .**

Guillaume RENAUD, Danaï E. SOULIOTI et Gianmarco PINTON

8.1. Introduction. . . . .	251
8.2. Sources de dégradation d'image . . . . .	253
8.2.1. Aberration et aberrateur . . . . .	253
8.2.2. Diffusions multiples (réverbérations) . . . . .	258
8.2.3. Importance de la fréquence ultrasonore . . . . .	259
8.2.4. Illustration de l'impact des aberrations et des diffusions multiples sur la qualité de l'image sur des simulations numériques . . . . .	260
8.2.5. Élasticité anisotrope dans l'os. . . . .	264
8.2.6. Hétérogénéité de l'atténuation (ombrages et améliorations). . . . .	266
8.3. Méthodes de correction. . . . .	269
8.3.1. Besoins en techniques de correction en échographie de diagnostic. . . . .	269
8.3.2. Correction de phase d'aberration. . . . .	270
8.3.3. Correction d'élasticité anisotrope dans l'os. . . . .	277
8.3.4. Réduction des diffusions multiples avec l'imagerie tissulaire harmonique . . . . .	279

8.4. Limites actuelles de correction des sources de dégradation d'image et perspectives . . . . .	282
8.4.1. Besoins en réseaux matriciels et en puissance de calcul . . . . .	282
8.4.2. Correction d'aberration en temps réel et hors ligne . . . . .	282
8.4.3. Quantification de flux sanguin . . . . .	282
8.5. Bibliographie . . . . .	283

**Chapitre 9. Tomographie et spectroscopie : photoacoustique . . . . . 289**

Théotim LUCAS et Jérôme GATEAU

9.1. Mélange d'ultrasons et d'ondes optiques . . . . .	289
9.1.1. Propriétés optiques des tissus biologiques . . . . .	290
9.1.2. Interaction entre ondes optiques et ultrasonores . . . . .	291
9.2. Génération d'ultrasons et détection tomographique en imagerie photoacoustique . . . . .	292
9.2.1. Génération optique d'ondes ultrasonores dans les tissus biologiques . . . . .	292
9.2.2. Détection tomographique ultrasonore . . . . .	296
9.2.3. Reconstruction d'une image photoacoustique . . . . .	303
9.3. Imagerie photoacoustique multispectrale . . . . .	306
9.3.1. Séparation d'absorbeurs optiques avec différents spectres d'absorption . . . . .	306
9.3.2. Absorbeurs endogènes et exogènes . . . . .	308
9.4. Conclusions et perspectives . . . . .	313
9.5. Bibliographie . . . . .	314

**Glossaire . . . . . 319**

**Liste des auteurs . . . . . 335**

**Index . . . . . 337**