

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
Corinne FOURNIER et Olivier HAEBERLÉ	
<b>Chapitre 1. Microscopie quantitative de phase par analyse de front d'onde</b> .....	7
Serge MONNERET, Julien SAVATIER et Pierre BON	
1.1. Introduction .....	7
1.2. Description des principes utilisés en imagerie de phase .....	8
1.3. L'interférométrie à décalage quadrilatéral pour l'analyse de front d'onde à haute résolution spatiale .....	11
1.3.1. Génération des répliques du champ incident .....	12
1.3.2. Détermination du front d'onde incident .....	13
1.3.3. Réalisation des analyseurs de front d'onde .....	17
1.4. Utilisation d'un analyseur de front d'onde en microscopie .....	17
1.4.1. Approximations nécessaires .....	17
1.4.2. Montage expérimental .....	18
1.5. Applications à l'imagerie biologique .....	20
1.5.1. Imagerie à fort contraste sans marquage .....	20
1.5.2. Mesure de la masse sèche de cellules biologiques vivantes .....	21
1.5.3. Imagerie rapide de phénomènes biologiques .....	24
1.5.4. Imagerie corrélative de phase quantitative et de fluorescence .....	26
1.6. Imagerie de retardance optique .....	28
1.7. Autres applications et nouveaux développements .....	32
1.8. Bibliographie .....	32

<b>Chapitre 2. Holographie</b> . . . . .	<b>35</b>
Michel GROSS et Nicolas VERRIER	
2.1. Introduction . . . . .	35
2.2. Principe de l'holographie . . . . .	38
2.3. La sélection de l'ordre + 1 . . . . .	40
2.3.1. L'holographie hors axe . . . . .	40
2.3.2. L'holographie à décalage de phase . . . . .	44
2.4. Reconstruction holographique . . . . .	47
2.4.1. Reconstruction à une transformée de Fourier . . . . .	48
2.4.2. Reconstruction à deux transformées de Fourier (spectre angulaire) . . . . .	53
2.4.3. Reconstruction à deux transformées de Fourier avec <i>zero padding</i> . . . . .	55
2.4.4. Reconstruction à deux transformées de Fourier avec ajout d'une lentille numérique . . . . .	55
2.5. Configurations d'holographie et applications associées . . . . .	56
2.5.1. Holographie en ligne . . . . .	56
2.5.2. Holographie hors axe . . . . .	59
2.5.3. Microscopie holographique et imagerie quantitative de phase . . . . .	62
2.6. Conclusion . . . . .	65
2.7. Bibliographie . . . . .	67

<b>Chapitre 3. Les problèmes inverses pour la reconstruction d'image en holographie</b> . . . . .	<b>71</b>
Ferréol SOULEZ et Éric THIÉBAUT	

3.1. Introduction . . . . .	71
3.1.1. Notations . . . . .	72
3.2. Modèle direct . . . . .	72
3.3. Application expérimentale . . . . .	74
3.4. Approche du maximum de vraisemblance . . . . .	76
3.4.1. Expression formelle . . . . .	76
3.4.2. Statistique du bruit et vraisemblance . . . . .	76
3.4.3. Rétropropagation . . . . .	77
3.4.4. Méthodes itératives pour l'estimation du maximum de vraisemblance . . . . .	78
3.4.5. Extrapolation du champ de vue . . . . .	79
3.5. La reconstruction de phase : un problème non linéaire . . . . .	81
3.6. Méthodes de projections alternées . . . . .	85
3.6.1. De la projection alternée à la minimisation d'un critère . . . . .	85
3.6.2. Élaborer la bonne mesure de vraisemblance . . . . .	86

3.7. Améliorations par rapport au maximum de vraisemblance . . . . .	88
3.7.1. Maximum de vraisemblance pénalisé . . . . .	88
3.7.2. Interprétation bayésienne : le maximum <i>a posteriori</i> (MAP) . . . . .	88
3.8. Fonctions de régularisation et <i>a priori</i> . . . . .	89
3.8.1. Régularisation quadratique . . . . .	89
3.8.2. Lissage avec préservation de bords . . . . .	90
3.8.3. Parcimonie . . . . .	91
3.8.4. Parcimonie jointe . . . . .	92
3.8.5. Variation totale . . . . .	93
3.8.6. Régularisation <i>plug and play</i> . . . . .	94
3.9. Choix de l'algorithme d'optimisation pour la résolution du problème inverse . . . . .	94
3.10. Exemples pratiques . . . . .	96
3.10.1. Problème non contraint et différentiable . . . . .	96
3.10.2. Problèmes sous contraintes . . . . .	97
3.11. Bibliographie . . . . .	100

## **Chapitre 4. Reconstruction d'échantillons en microscopie holographique numérique en ligne . . . . . 103**

Fabien MOMEY, Thomas OLIVIER et Corinne FOURNIER

4.1. Introduction . . . . .	103
4.2. De la microscopie classique à l'holographie numérique dans le domaine biomédical . . . . .	104
4.3. Montages de microscopie holographique en ligne . . . . .	106
4.3.1. Configurations d'imagerie, avec ou sans lentille . . . . .	106
4.3.2. Cohérence et mise en forme de l'illumination . . . . .	108
4.4. Méthodologie problèmes inverses types pour la reconstruction d'hogrammes en ligne . . . . .	111
4.4.1. Cas expérimental : hogrammes en ligne d'objets micrométriques déphasants . . . . .	113
4.4.2. Modèle de formation d'hogrammes en ligne . . . . .	115
4.4.3. Reconstructions numériques . . . . .	120
4.5. Apport étendu des approches problèmes inverses : super-résolution numérique et extension de champ . . . . .	132
4.5.1. Problème direct . . . . .	134
4.5.2. Critère à minimiser . . . . .	134
4.5.3. Algorithme de reconstructions alternées . . . . .	135
4.6. Pour aller plus loin . . . . .	137
4.6.1. Raffinement du modèle et auto-étalonnage . . . . .	137
4.6.2. Reconstruction de données multivariées . . . . .	138

4.6.3. Vers une reconstruction 3D . . . . .	138
4.7. Bibliographie . . . . .	139

## **Chapitre 5. Microscopie tomographique diffractive en transmission . . . . . 143**

Nicolas VERRIER, Matthieu DEBAILLEUL, Bertrand SIMON  
et Olivier HAEBERLÉ

5.1. Introduction . . . . .	143
5.2. Microscopie holographique : intérêt et limitations . . . . .	144
5.3. Lien entre champ diffracté et distribution d'indice . . . . .	145
5.3.1. Principe . . . . .	145
5.3.2. Équation de Helmholtz en milieu faiblement inhomogène . . . . .	146
5.3.3. Approximation de Born . . . . .	148
5.3.4. Support spectral dans l'espace de Fourier 3D . . . . .	151
5.3.5. Algorithme en holographie . . . . .	152
5.4. De l'holographie à la tomographie . . . . .	153
5.4.1. Rotation de l'illumination . . . . .	153
5.4.2. Rotation de l'échantillon . . . . .	156
5.4.3. Rotation de l'échantillon et de l'illumination . . . . .	158
5.5. Implémentations pratiques . . . . .	159
5.5.1. Techniques de rotation de l'échantillon . . . . .	159
5.5.2. Techniques de balayage de l'illumination . . . . .	161
5.6. Reconstruction sous hypothèse de Born . . . . .	164
5.6.1. Exemples de systèmes commerciaux . . . . .	165
5.7. Conclusion . . . . .	166
5.8. Bibliographie . . . . .	169

## **Chapitre 6. Microscopie interférométrique . . . . . 177**

Rémy CLAVEAU, Sébastien MARBACH, Stéphane PERRIN, Amir NAHAS,  
Manuel FLURY et Paul MONTGOMERY

6.1. Introduction . . . . .	177
6.2. Principe et théorie . . . . .	179
6.2.1. Interférences . . . . .	179
6.2.2. Cohérence de la lumière . . . . .	180
6.3. Algorithmes . . . . .	182
6.3.1. Microscopie à décalage de phase . . . . .	182
6.3.2. Interférométrie à balayage de cohérence . . . . .	183

6.4. Instrumentation . . . . .	185
6.5. Performances et limites physiques . . . . .	187
6.5.1. Résolution latérale . . . . .	187
6.5.2. Résolution axiale . . . . .	188
6.5.3. Échantillonnage spatial . . . . .	189
6.5.4. Sources d'erreurs de mesure . . . . .	189
6.6. Applications . . . . .	190
6.6.1. Mesure de la rugosité . . . . .	190
6.6.2. Mesure de surfaces statiques . . . . .	191
6.6.3. Mesure de surfaces en mouvement . . . . .	192
6.7. Récentes avancées . . . . .	193
6.7.1. Tomographie par cohérence optique plein champ . . . . .	193
6.7.2. Spectroscopie locale . . . . .	195
6.7.3. Microscopie interférométrique assistée par microsphères . . . . .	198
6.8. Conclusion . . . . .	199
6.9. Remerciements . . . . .	200
6.10. Bibliographie . . . . .	200

## **Chapitre 7. Imagerie endoscopique multimodale et multispectrale à champ de vue étendu . . . . .** 207

Christian DAUL et Walter BLONDEL

7.1. Introduction à l'endoscopie conventionnelle . . . . .	207
7.1.1. Principe et applications médicales de l'endoscopie . . . . .	207
7.1.2. Intérêts et limites de l'endoscopie conventionnelle . . . . .	208
7.1.3. Objectifs et contenu du chapitre . . . . .	210
7.2. Fonctionnement des endoscopes . . . . .	211
7.2.1. Éléments constitutifs d'un système endoscopique . . . . .	211
7.2.2. Modèle sténopé d'une caméra . . . . .	213
7.2.3. Modélisation et correction des distorsions . . . . .	215
7.2.4. Modélisation et correction du vignettage . . . . .	217
7.3. Cartographie 3D de scènes endoscopiques . . . . .	219
7.3.1. Recalage des données de deux points de vue . . . . .	219
7.3.2. Approches de cartographie 3D . . . . .	227
7.4. Systèmes d'imagerie endoscopique multimodaux et multispectraux . . . . .	234
7.4.1. Introduction . . . . .	234
7.4.2. Systèmes d'imagerie avec marquage chimique . . . . .	234
7.4.3. Systèmes d'imagerie sans marqueur exogène . . . . .	238
7.5. Conclusion . . . . .	242
7.6. Bibliographie . . . . .	242

<b>Chapitre 8. Une introduction à l'imagerie computationnelle monodétecteur</b> . . . . .	247
Nicolas DUCROS	
8.1. Introduction . . . . .	247
8.1.1. Formulation mathématique . . . . .	249
8.1.2. Mise en œuvre expérimentale . . . . .	249
8.2. Optique par transformée de Hadamard : les origines (1970-1980) . . . . .	251
8.3. <i>Compressed sensing</i> : le renouveau (2006-2016) . . . . .	254
8.3.1. Acquisition sous-échantillonnée . . . . .	254
8.3.2. Principe général du <i>compressed sensing</i> . . . . .	255
8.3.3. Choix des motifs d'acquisition . . . . .	257
8.4. Reconstruction par apprentissage profond . . . . .	258
8.4.1. Principe général . . . . .	258
8.4.2. Architecture du modèle . . . . .	260
8.4.3. Entraînement . . . . .	262
8.4.4. Lien simple avec les méthodes classiques . . . . .	264
8.4.5. Meilleur estimateur linéaire : complétion bayésienne . . . . .	265
8.4.6. Prise en compte du bruit . . . . .	268
8.5. Conclusion . . . . .	271
8.6. Remerciements . . . . .	272
8.7. Bibliographie . . . . .	272
 <b>Glossaire</b> . . . . .	 275
 <b>Liste des auteurs</b> . . . . .	 285
 <b>Index</b> . . . . .	 287