

# Métrologie laser pour la mécanique des fluides

*granulométrie et techniques spectroscopiques*



*sous la direction de*  
Alain Boutier

**hermes**

*Lavoisier*

## Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	15
Alain BOUTIER	
<b>Chapitre 1. Diffusion de la lumière par les particules</b> . . . . .	17
Fabrice ONOFRI et Séverine BARBOSA	
1.1. Introduction. . . . .	17
1.2. Théorie électromagnétique, rappels. . . . .	18
1.2.1. Équations générales de Maxwell . . . . .	18
1.2.2. Ondes planes harmoniques . . . . .	20
1.2.3. Constantes optiques. . . . .	26
1.2.4. Diffusion de la lumière par une particule isolée . . . . .	27
1.3. Méthodes de séparation des variables . . . . .	34
1.3.1. Théorie de Mie (ou Lorenz-Mie) . . . . .	34
1.3.2. Théories de Debye et du moment complexe angulaire . . . . .	44
1.4. Théorie de Rayleigh et approximation en dipôles discrets . . . . .	48
1.4.1. Théorie de Rayleigh (rayonnement du dipôle) . . . . .	48
1.4.2. Approximation en dipôles discrets . . . . .	50
1.5. Méthode de la T-Matrice (conditions limites étendues) . . . . .	51
1.6. Modèles d'optique physique. . . . .	53
1.6.1. Intégrale d'Huygens-Fresnel . . . . .	53
1.6.2. Théorie de la diffraction de Fraunhofer . . . . .	55
1.6.3. Théorie de l'arc-en-ciel d'Airy . . . . .	59
1.6.4. Théorie de la diffusion critique de Marston. . . . .	63
1.7. L'optique géométrique . . . . .	66
1.7.1. Calcul de l'angle de diffusion. . . . .	67
1.7.2. Calcul de l'intensité des rayons. . . . .	67
1.7.3. Calcul de la phase et de l'amplitude des rayons . . . . .	68

1.8. Diffusion multiple et méthode de Monte Carlo . . . . . 70  
 1.8.1. Diffusion d'un nuage de particules optiquement dilué . . . . . 70  
 1.8.2. Diffusion multiple . . . . . 70  
 1.8.3. Méthode de Monte Carlo . . . . . 71  
 1.9. Conclusion . . . . . 76  
 1.10. Bibliographie . . . . . 77

**Chapitre 2. Granulométrie Laser** . . . . . 85  
 Fabrice ONOFRI et Séverine BARBOSA

2.1. Introduction . . . . . 85  
 2.2. Les particules dans les écoulements . . . . . 87  
 2.2.1. Diamètre, forme et état de surface . . . . . 87  
 2.2.2. Représentations statistiques pour le diamètre . . . . . 88  
 2.2.3. Concentration et flux . . . . . 92  
 2.3. Classement des techniques de granulométrie . . . . . 93  
 2.3.1. Principes physiques et quantités mesurées . . . . . 93  
 2.3.2. Mode d'obtention et nature des statistiques . . . . . 94  
 2.4. Interférométrie ou anémométrie phase Doppler . . . . . 95  
 2.4.1. Principe . . . . . 99  
 2.4.2. Modélisation de la relation phase-diamètre . . . . . 105  
 2.4.3. Dispositif expérimental et exemple d'application . . . . . 109  
 2.4.4. Conclusion . . . . . 110  
 2.5. Ellipsométrie de particules . . . . . 110  
 2.6. Diffractionnètrie vers l'avant . . . . . 112  
 2.6.1. Origine et principe . . . . . 112  
 2.6.2. Modélisation et inversion de la figure de diffraction . . . . . 114  
 2.6.3. Dispositif expérimental et exemple de résultat . . . . . 117  
 2.6.4. Conclusion . . . . . 119  
 2.7. Diffractionnètries arc-en-ciel et critique . . . . . 120  
 2.7.1. Similitudes avec la diffractionnètrie vers l'avant . . . . . 120  
 2.7.2. Diffractionnètrie arc-en-ciel . . . . . 122  
 2.7.3. Diffractionnètrie critique . . . . . 128  
 2.8. Imagerie ombroscopique . . . . . 133  
 2.8.1. Principe et dispositif pour l'imagerie ombroscopique 2D . . . . . 133  
 2.8.2. Principe et dispositif pour l'imagerie ombroscopique Doppler 1D . . . . . 136  
 2.8.3. Modélisation d'une image à l'aide de la réponse impulsionnelle . . . . . 136  
 2.8.4. Conclusion . . . . . 140  
 2.9. Imagerie interférométrique en défaut de mise au point . . . . . 140

2.9.1. Principe . . . . . 140  
 2.9.2. Modélisation de la fréquence angulaire du réseau de franges . . . . . 141  
 2.9.3. Conclusion . . . . . 147  
 3.10. Holographie de particules . . . . . 149  
 2.10.1. Holographie de Gabor sur plaque photosensible . . . . . 149  
 2.10.2. Holographie numérique . . . . . 150  
 2.10.3. Conclusion . . . . . 153  
 2.11. Spectrométrie d'extinction . . . . . 153  
 2.11.1. Principe . . . . . 155  
 2.11.2. Inversion algébrique . . . . . 157  
 2.11.3. Dispositif expérimental, exemple et conclusion . . . . . 160  
 2.12. Spectroscopie par corrélation de photons . . . . . 162  
 2.13. Imagerie de fluorescence et élastique . . . . . 163  
 2.13.1. Principe . . . . . 164  
 2.13.2. Dispositif expérimental et exemple de résultat . . . . . 164  
 2.13.3. Conclusion . . . . . 165  
 2.14. Incandescence induite par laser . . . . . 166  
 2.15. Conclusion générale . . . . . 166  
 2.16. Bibliographie . . . . . 167

**Chapitre 3. Fluorescence induite par laser** . . . . . 179  
 Fabrice LEMOINE et Frédéric GRISCH

3.1. Rappel sur la quantification de l'énergie des molécules . . . . . 179  
 3.1.1. Transitions radiatives . . . . . 182  
 3.1.2. Thermodynamique des niveaux d'énergie . . . . . 184  
 3.1.3. Principe de Franck-Condon . . . . . 184  
 3.1.4. Transitions non radiatives . . . . . 185  
 3.1.5. Largeur des raies . . . . . 188  
 3.2. Principes de la fluorescence induite par laser . . . . . 190  
 3.2.1. Cinétique de l'absorption . . . . . 190  
 3.2.2. Signal de fluorescence . . . . . 194  
 3.2.3. Détection de la fluorescence . . . . . 195  
 3.2.4. Absorption sur le chemin optique . . . . . 195  
 3.2.5. Chaîne de mesure de fluorescence . . . . . 198  
 3.3. Applications de la fluorescence induite par laser en phase gazeuse . . . . . 198  
 3.3.1. Généralités . . . . . 198  
 3.3.2. Molécules diatomiques . . . . . 207  
 3.3.3. Traceurs moléculaires poly-atomiques . . . . . 224  
 3.4. Fluorescence induite par laser en phase liquide . . . . . 224  
 3.4.1. Principes et modélisation . . . . . 224

3.4.2. Réabsorption de la fluorescence . . . . . 227  
 3.4.3. Applications à la mesure de concentration . . . . . 227  
 3.4.4. Application à la mesure de la température . . . . . 232  
 3.5. Bibliographie . . . . . 241

**Chapitre 4. Techniques de spectroscopie d'absorption par diode laser . . . 245**  
 Ajmal MOHAMED

4.1. Spectroscopie d'absorption à haute résolution spectrale en mécanique des fluides . . . . . 245  
 4.2. Rappels sur l'absorption moléculaire . . . . . 248  
 4.2.1. Profil de raie . . . . . 249  
 4.2.2. Force de raie . . . . . 250  
 4.3. Banc de spectroscopie d'absorption . . . . . 251  
 4.3.1. Emission optique . . . . . 253  
 4.3.2. Détection optique . . . . . 257  
 4.3.3. Dépouillement des spectres . . . . . 261  
 4.4. Applications en hypersonique . . . . . 268  
 4.4.1. Caractéristiques de F4 . . . . . 270  
 4.4.2. Dispositif installé à F4 . . . . . 271  
 4.4.3. Résultats obtenus à F4 et HEG . . . . . 272  
 4.5. Autres applications de la spectroscopie d'absorption par diode laser . . . . . 275  
 4.5.1 Applications en combustion . . . . . 275  
 4.5.2. Applications en sondage atmosphérique . . . . . 278  
 4.6. Autres variantes de la spectroscopie d'absorption par diode laser . . . . . 278  
 4.6.1. Spectrométrie multipassages . . . . . 278  
 4.6.2. Spectrométrie dans une cavité résonante . . . . . 282  
 4.7. Perspectives et conclusion sur la spectroscopie d'absorption par diode laser . . . . . 286  
 4.7.1. Source laser : utilisation des diodes non cryogéniques . . . . . 287  
 4.7.2. Résolution spatiale : utilisation de sonde dans l'écoulement . . . . . 287  
 4.7.3. Utilisation des peignes de fréquences . . . . . 289  
 4.8. Bibliographie . . . . . 289

**Chapitre 5. Sources et techniques non linéaires appliquées au diagnostic optique . . . . . 295**  
 Michel LEFEBVRE

5.1. Introduction à l'optique non linéaire . . . . . 295  
 5.2. Les principaux processus en optique non linéaire . . . . . 297

5.2.1. L'importance des effets de propagation . . . . . 297  
 5.2.2. Les non linéarités d'ordre 2 et 3 . . . . . 301  
 5.2.3. La notion d'accord de phase . . . . . 305  
 5.3. Les sources non linéaires pour la métrologie optique . . . . . 308  
 5.3.1. La somme et le double de fréquence . . . . . 309  
 5.3.2. Les convertisseurs Raman . . . . . 311  
 5.3.3. Les générateurs et oscillateurs paramétriques optiques . . . . . 315  
 5.4. Les techniques non linéaires de diagnostic optique . . . . . 322  
 5.4.1. Introduction aux techniques de mélange à quatre ondes . . . . . 322  
 5.4.2. Les mesures de température et de concentration en mélange à quatre ondes . . . . . 326  
 5.4.3. Les mesures de vitesse en mélange à quatre ondes . . . . . 328  
 5.5. Bibliographie . . . . . 333

**Chapitre 6. Sécurité laser . . . . . 335**  
 Jean-Michel MOST

6.1. Généralités sur la sécurité laser . . . . . 335  
 6.2. Type et classification des lasers . . . . . 336  
 6.3. Nature et effets des risques liés aux lasers . . . . . 338  
 6.3.1. Les risques biologiques . . . . . 339  
 6.3.2. Les risques sur l'œil . . . . . 341  
 6.3.3. Les risques cutanés . . . . . 342  
 6.3.4. Les risques auditifs . . . . . 344  
 6.3.5. Les autres risques biologiques . . . . . 344  
 6.4. Les protections . . . . . 345  
 6.4.1. Accidentologie . . . . . 345  
 6.4.2. Protection collective . . . . . 345  
 6.4.3. Protection individuelle . . . . . 347  
 6.5. Consignes de sécurité . . . . . 348  
 6.6. Le comportement humain . . . . . 349

**Conclusion . . . . . 351**  
 Alain BOUJIER

**Nomenclature . . . . . 353**

**Index . . . . . 361**

## GÉOMÉCANIQUE

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

Géomécanique  
Matériaux  
Environnement et risques

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.