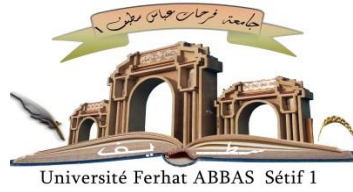


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة فرحات عباس- سطيف 1-

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1

THESE

Présentée à l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision Pour
l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Optique et Mécanique de précision

Par

ZAIDI Sassia

THÈME

**Localisation de microparticules dans un volume
par holographie digitale hors axe et réduction
d'ouverture**

Soutenue le 11 / 06 / 2025 devant le Jury:

SEMCHEDINE Fouzi	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
FERRIA Kouider	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
BENCHEIKH Abdelhalim	Professeur	Univ. B B A	Examineur
GUESSOUM Assia	MCA	Univ. Houari Boumediene Alger	Examinatrice
HAMADOU Abdelouahab	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur

Dédicace

À mes parents

À mes frères et mes sœurs

À mon mari et mes filles

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Que Sa guidance éclaire toujours mon chemin.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude éternelle à la mémoire de mon directeur de thèse, feu Professeur **Bouamama Larbi** qu'Allah lui fasse miséricorde et l'accueille dans Son vaste Paradis.

Son encadrement rigoureux, sa bienveillance, sa générosité intellectuelle et la confiance qu'il m'a accordée ont profondément marqué mon parcours de recherche. Il m'a accompagnée avec patience, exigence et humanité tout au long de cette thèse, me guidant avec sagesse et dévouement.

Grâce à sa vision scientifique éclairée, à ses conseils avisés et à sa disponibilité constante, j'ai pu progresser, apprendre et grandir tant sur le plan académique que personnel. Son humilité, son écoute, et son attachement à la rigueur scientifique resteront à jamais gravés dans ma mémoire, et c'est avec une émotion sincère que je lui dédie le fruit de cette recherche.

Je prie Allah, Le Très-Haut, de récompenser son œuvre, de faire de son savoir un héritage bénéfique, et de l'élever parmi les savants sincères et les bien-aimés auprès de Lui.

J'exprime également mes sincères remerciements à mon directeur de thèse le professeur **FERRIA Kouider**, qui a accepté de poursuivre l'encadrement de ce travail avec bienveillance et exigence. Son expertise, ses conseils avisés et son soutien ont été déterminants dans l'aboutissement de cette thèse.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux membres du jury, Monsieur **SEMCHEDINE Fouzi**, Professeur à l'université de Sétif 1, pour avoir accepté de présider mon jury, Monsieur **BENCHEIKH Abdelhalim**, Professeur à l'université Mohamed El Bachir El Ibrahim Bordj Bou Arréridj, Madame **GUESSOUM Assia**, Maître de conférences classe-A- à l'université Houari Boumediene Alger, Monsieur **HAMADOU Abdelouahab**, Professeur à l'université de Sétif 1 d'avoir accepté d'être les examinateurs de cette thèse.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à mes enseignants de l'institut d'Optique et **Mécanique de Précision, les ingénieurs et les techniciens de laboratoire d'optique appliquée et mes collègues**, dont le soutien et les échanges m'ont été d'une aide précieuse tout au long de ce parcours.

Enfin, je dédie une pensée toute particulière à **ma famille**, et notamment à **mes parents**, pour leur patience, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants tout au long de ce parcours. Leur présence a été une source précieuse de motivation.

Table des matières

Introduction générale	1
Références	5
I Holographie digitale	7
I.1 Introduction	7
I.2 Principe de base de l'holographie digitale :	9
I.2.1 Etape d'enregistrement :	9
I.2.1.1 Condition d'enregistrement d'un hologramme de manière digital	10
I.2.1.2 Montage d'enregistrement	12
I.2.1.3 Les différentes configurations d'enregistrement	13
I.2.1.3.1 Holographie digitale de Gabor :	13
I.2.1.3.2 Holographie digitale en ligne :	13
I.2.1.3.3 Holographie digitale hors axe :	14
I.2.1.3.4 Holographie digitale de Fresnel :	15
I.2.1.3.4.1 Holographie digitale de Fresnel avec une onde de référence plane :	15
I.2.1.3.4.2 Holographie digitale de Fresnel avec une onde de référence sphérique :	15
I.2.1.3.5 Holographie digitale de Fraunhofer	15
I.2.1.3.6 Holographie digitale de Fourier :	16
I.2.1.3.6.1 Holographie digitale de Fourier avec len- tille :	16
I.2.1.3.6.2 Holographie digitale de Fourier sans lentille :	17
I.2.1.3.7 Holographie Digitale Image :	17
I.2.2 Etape de la reconstruction numérique d'hologramme :	18

TABLE DES MATIÈRES

I.2.2.1	Reconstruction par Approximation de Fresnel	18
I.2.2.2	Reconstruction par méthode de Convolution	21
I.2.2.3	Reconstruction par transformée de Fourier : [18,19]	22
I.3	L'effet des paramètres d'enregistrement (distance d'enregistrement, angle d'enregistrement, taille du capteur CCD et taille de l'objet) sur l'enregistrement :	23
I.3.1	Montage en ligne :	23
I.3.2	Le montage hors axe :	23
I.4	Les avantages de l'holographie digitale :	25
I.5	Conclusion	26
Références		27
II Agrandissement d'hogrammes digitaux de particules par différentes techniques d'interpolation		31
II.1	Introduction	31
II.2	Interpolation	32
II.3	Interpolation d'image	33
II.3.1	Interpolation au plus proche voisin :	34
II.3.2	Interpolation bilinéaire :	34
II.3.3	Interpolation bicubique :	35
II.3.4	Interpolation par B-spline :	36
II.3.5	Interpolation par lanczos :	36
II.3.6	Interpolation de Lagrange :	37
II.3.7	Interpolation de Newton	39
II.3.8	Interpolation par la transformée de Fourier :	40
II.3.8.1	Fenêtre de Hamming :	41
II.3.8.2	Fenêtre de Hann :	42
II.3.8.3	Fenêtre de Blackman :	42
II.3.8.4	Fenêtre de Kaiser :	42
II.3.9	Interpolation par Ondelettes :	42
II.3.9.1	Interpolation des coefficients d'ondelettes :	44
II.3.9.2	Reconstruction de l'image interpolée :	44
II.4	Montage expérimental	45

TABLE DES MATIÈRES

II.5	Comparaison des méthodes d'interpolation et évaluation de la qualité des images interpolées	46
II.5.1	Mesure de SNR, PSNR, MSE & SSIM :	46
II.5.2	Temps du traitement	47
II.6	Résultats et discussion	47
II.6.1	Qualité visuelle	47
II.6.2	Qualité métrique	48
II.7	Conclusion	53
	Références	54
III	Application de la réduction d'ouverture en holographie digitale pour la détection de position de particules	57
III.1	Introduction	57
III.2	Principe de la réduction d'ouverture	61
III.3	Validation expérimentale	63
III.4	Localisation de microparticules par holographie digitale hors axe à deux vues et réduction d'ouverture	68
III.5	Analyse numérique de l'hologramme :	71
III.5.1	Prétraitement de l'hologramme :	72
III.5.2	Création de la version binaire des images :	73
III.5.3	Extraction des coordonnées des particules :	74
III.5.4	Localisation 3D des particules :	76
III.5.5	Détermination des diamètres des particules :	87
III.6	Conclusion	89
	Références	91

Table des figures

I.1	Principe d'enregistrement d'hologramme digital	9
I.2	Limitation du champ	11
I.3	Installation expérimentale pour enregistrer un hologramme numérique M1, M2, M3, M4 : miroirs; CS1, CS2 : cubes séparateurs; OM1, OM2 : objectifs de microscope; FS1, FS2 : filtres spatiaux; L1, L2 : lentilles. . . .	12
I.4	holographie digitale de Gabor. a) enregistrement par un seul faisceau lumineux qui sert à la fois faisceaux objet et faisceaux de référence. b) reconstruction du point objet (ordre -1) et l'image jumelle (ordre+1). [14]	13
I.5	holographie digitale en ligne. a) enregistrement par la superposition des deux faisceaux objet et référence. b) reconstruction par superposition de l'ordre zéro et l'image jumelle. [14]	14
I.6	holographie hors axe [15]	14
I.7	holographie digitale de Fresnel [16]	15
I.8	holographie digitale de Fraunhofer [16]	16
I.9	Holographie digitale de Fourier avec lentille [17]	16
I.10	Holographie digitale de Fourier sans lentille. [17]	17
I.11	holographie digitale image [17]	17
I.12	Système de coordonnées utilisé pour la reconstruction numérique d'ho- logrammes. [7]	18
I.13	Montage en ligne de l'holographie digitale. [22]	23
I.14	Montage hors axe de l'holographie digitale. [22]	25
II.1	interpolation d'image par insertion de nouveaux pixels [10]	33
II.2	interpolation bilinaire	35
II.3	interpolation bicubique	35
II.4	Montage d'enregistrement basé sur la configuration hors axe à deux vues et deux faisceaux.	45

TABLE DES FIGURES

II.5	Agrandissement d'hologramme digitale par différentes techniques d'interpolation, (a) hologramme digitale, (b) hologramme digitale réduit à sa moitié, (c) interpolation au plus proche voisin, (d) interpolation Bilinéaire, (e) interpolation Bicubique, (f) interpolation Lanczos, (g) interpolation Spline, (h) interpolation de Newton, (i) interpolation de Lagrange, (j) interpolation de Fourier, (k) interpolation ondelette.	49
II.6	Valeur de SNR et PSNR de l'hologramme de particules agrandies par différentes méthodes d'interpolation.	50
II.7	Valeur de MSE de l'hologramme de particules agrandies par différentes méthodes d'interpolation.	51
II.8	Valeur de SSIM de l'hologramme de particules agrandies par différentes méthodes d'interpolation.	51
II.9	Comparaison de temps de calcul des méthodes d'interpolation	52
III.1	principe de la technique de la réduction d'ouverture	62
III.2	Hologramme agissant comme une lentille convergente.	63
III.3	Montage d'holographie digitale hors axe (OM : objectif de microscope, FS : filtre spatiale, CS : cube séparateur, M : miroir)	64
III.4	Image photographique de montage d'holographie digitale hors axe	64
III.5	a) hologramme, b) image reconstruite, c) ordre (-1) sélectionné, d) image photographique de l'objet (épingles)	65
III.6	a) la première ouverture horizontale, c) son image reconstruite, e) l'ordre (-1) sélectionné, b) la deuxième ouverture horizontale, d) son image reconstruite, f) l'ordre (-1) sélectionné.	66
III.7	a) la première ouverture verticale, c) son image reconstruite, e) l'ordre (-1) sélectionné, b) la deuxième ouverture verticale, d) son image reconstruite, f) l'ordre (-1) sélectionné.	67
III.8	Montage d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et deux vues [40]	68
III.9	Image photographique du montage d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et deux vues	69
III.10	Hologramme enregistré (a), sa reconstruction (b)	71
III.11	Processus d'analyse d'hologrammes pour localiser les microparticules	72

TABLE DES FIGURES

III.12	a) vue directe, b) vue orthogonale, c) vue directe après soustraction de bruit et ajustement de contraste, d) vue orthogonale après soustraction de bruit et ajustement de contraste,	73
III.13	a) vue directe, b) vue orthogonale, c) version binaire de la vue directe, d) version binaire de la vue orthogonale	74
III.14	extraction des centroïdes des particules de la vue directe	75
III.15	Extraction des centroïdes des particules de la vue orthogonale	75
III.16	correspondances des particules des deux vues	76
III.17	a) vue directe, b) vue orthogonale, c) les coordonnées (x, y) des particules de la vue directe, d) les coordonnées (z, y) des particules de la vue orthogonale.	77
III.18	représentation 3D des positions de particules	78
III.19	Hologramme (a) divisé en deux ouvertures (b et c).	79
III.20	Reconstruction de la première ouverture : (a) hologramme (première ouverture), (b) reconstruction d'ouverture, (c) vue directe agrandie, (d) vue orthogonale agrandie, (e) détection de particules en vue directe, (f) détection de particules en vue orthogonale et (g) Représentation 3D des particules détectées.	80
III.21	Reconstruction de la première ouverture : (a) hologramme (deuxième ouverture), (b) reconstruction d'ouverture, (c) vue directe agrandie, (d) vue orthogonale agrandie, (e) détection de particules en vue directe, (f) détection de particules en vue orthogonale et (g) Représentation 3D des particules détectées.	81
III.22	Assemblage des résultats des deux sous-ouvertures et superposition avec la distribution des particules de l'ensemble de l'hologramme.	82
III.23	Hologramme enregistré (a), vues agrandies (vue directe (b) et vue orthogonale (c)), détection de particules à partir des deux vues (vue directe (d) et vue orthogonale (e)) et la particule 3-D répartition (f).	84
III.24	Hologramme divisé en quatre ouvertures.	85
III.25	Quatre ouvertures (a, c, e et g) et quatre représentations de particules 3D (b, d, f et h).	86
III.26	Les résultats des ouvertures et leur superposition sur la vue de l'hologramme complet.	87
III.27	Diamètre de féret d'une particule	88

TABLE DES FIGURES

III.28 a) Particule sélectionnée, b) Détermination de diamètre d'une particule .	88
III.29 Variation de diamètre des particules en fonction de l'angle	89

Liste des tableaux

II.1	Comparaison de temps de traitement des méthodes d'interpolation	50
------	---	----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dennis Gabor a inventé le concept de l'holographie optique [1,2] en 1948 alors qu'il travaillait pour améliorer la résolution et la qualité des images générées par microscopie électronique au sein de la société Thomson-Houston, située à Rugby, en Angleterre. Toutefois, avec l'arrivée du laser en 1962, cette technique a connu son véritable développement car la nature unique de la source permet de générer des interférences cohérentes.

L'holographie optique [1] est une méthode d'interférence permettant d'enregistrer les ondes lumineuses diffractées par un objet illuminé par une lumière cohérente. Les ondes diffractées interfèrent avec une onde de référence. Si les ondes sont très cohérentes, la phase relative entre l'onde objet et l'onde de référence reste constante dans le temps, produisant un effet observable sur la distribution d'intensité du motif d'interférence résultant. L'enregistrement photographique de ce motif, l'hologramme, contient suffisamment d'informations sur la phase et l'amplitude des ondes diffractées par l'objet. La reconstruction du front d'onde a lieu, dans un deuxième temps, lorsque l'hologramme est éclairé avec l'onde de référence

En raison de manque de moyens pratiques adéquats, l'holographie optique est peu exploitée dans l'industrie. En effet, pour l'enregistrement et le développement d'une plaque

holographique, il est essentiel de disposer, en plus des conditions de cohérence de la source de lumière et des composants optiques adéquats, d'un espace spécifique ainsi que de produits chimiques spécialisés. La configuration précise de l'hologramme est essentielle pour la phase de restitution.

J.W. Goodman et R.W. Lawrence ont été les premiers à introduire le concept d'holographie numérique en 1967 [3, 4]. À cette époque, bien qu'ils enregistraient encore l'hologramme sur une plaque photographique, ils échantillonnaient numériquement les données afin de reconstruire le front d'onde provenant de l'objet.

Cette technique poursuit son évolution en matière d'enregistrement et de reconstruction numériques. En 1980, L. P. Yaroslavskii et N. S. Merzlyakov ont présenté leurs concepts innovants dans ce domaine.

Leurs travaux se sont concentrés sur la synthèse informatique d'hologrammes sur la base de descriptions numériques d'un objet. L'enregistrement et la reconstruction holographiques ont été effectués numériquement par ordinateur. Le principe de la méthode est qu'il faut connaître des descriptions mathématiques précises d'un objet, puis appliquer les théories des ondes scalaires pertinentes pour simuler la propagation, l'interférence et la diffraction des ondes. Plus tard, des travaux ont été réalisés pour reconstruire des images holographiques à partir d'hologrammes photographiquement agrandis à l'aide de méthodes mathématiques. U. Schnars et W. Juptner ont proposé le nouveau concept d'holographie numérique en 1994. Les hologrammes de Fresnel hors axe étaient enregistrés par un CCD et reconstruits numériquement. Malgré sa courte période de développement, les potentiels de l'holographie numérique sont largement reconnus tant pour les mesures et les tests non destructifs que pour l'imagerie et la visualisation. En holographie numérique, puisque les hologrammes sont échantillonnés numériquement, les informations sur les ondes optiques interférées sont stockées sous forme de matrices. Un traitement numérique peut ainsi être effectué pour simuler les processus optiques d'interférométrie, de filtrage spatial, etc. Les distributions d'amplitude et de phase de l'onde peuvent être extraites numériquement. De plus, le traitement numérique permet de soustraire le bruit de fond et peut être utile pour éliminer le terme de diffraction d'ordre zéro pour un système holographique en ligne. Ainsi, le traitement numérique peut compenser le manque de résolution spatiale des capteurs numériques.

Grace au développement technologique et informatique, l'holographie numérique est présente dans un vaste champ d'applications, pour effectuer des tests sans contact en particulier dans les domaines de la biologie et la médecine [5, 6], du contrôle industriel [7] et de l'analyse d'écoulements [8, 9].

Un domaine spécifique où cette technique continue de progresser est la mécanique des fluides, en particulier tous les phénomènes liés à l'environnement et au corps humain. Il s'agit d'une méthode qui permet de surveiller les particules de type traceur en temps réel ou différé, ce qui offre la possibilité d'analyser l'évolution des divers phénomènes étudiés et de prévoir les différentes solutions envisageables.

L'utilisation de cette technique pour suivre ces particules présente certaines limitations, comme la localisation précise en raison de la résolution limitée des capteurs numériques qui est cinquante fois inférieure à celle des plaques holographiques, ainsi que de la grande profondeur de champ associée à cette méthode.

Plusieurs solutions ont été suggérées afin de remédier à cette difficulté, mais elles restent inefficaces. La méthode de réduction d'ouverture appliquée semble pouvoir apporter une amélioration significative.

L'objectif de cette étude est d'explorer cette méthode et de l'appliquer afin de surmonter cette problématique de localisation.

Le présent manuscrit est réparti trois chapitres :

Le premier chapitre aborde l'introduction à l'holographie digitale. Les principes de base de l'holographie digitale, processus d'enregistrement, les différentes configurations d'enregistrement, la phase de reconstruction et les différentes méthodes de reconstruction sont exposés.

Le deuxième chapitre propose une analyse théorique et pratique des diverses approches et techniques d'interpolation qui ont été évaluées en vue d'améliorer la résolution des images holographique numériques dans le but d'atteindre la super-résolution. Dans une première étape, nous présenterons la méthode d'interpolation et son principe et ses différentes approches ainsi que son application à l'imagerie numérique. Dans une seconde

étape, nous verrons la possibilité d'appliquer la technique d'interpolation en imagerie holographique pour augmenter la résolution des hologrammes numériques en développant des programmes sous environnement MATLAB. Les techniques sont donc programmées et la qualité des images interpolées est évaluée en calculant les paramètres métriques SNR, PSNR, MSE et SSIM et le temps de traitement de chaque technique pour les comparer et prédire quelle technique appropriée pour obtenir des résultats optimaux.

Le troisième chapitre se concentre sur l'utilisation de la méthode de réduction d'ouverture en holographie digitale hors axe pour localiser des microparticules dans un volume. Nous verrons également le principe de cette technique et sa compatibilité avec la technique d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et à deux vues. Nous commencerons par une partie expérimentale qui vise à réaliser une installation d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et à deux vues.

Nous aborderons ensuite la partie de simulation, réalisée sous MATLAB, où des programmes ont été développés pour localiser des microparticules dans un volume en utilisant la technique de la réduction d'ouverture.

Les conclusions principales de notre étude seront finalement présentées, et nous démontrons les possibilités d'amélioration du système d'imagerie, tant sur le plan matériel que numérique.

RÉFÉRENCES

- [1] L. H. L. Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Optical Holography. Academic Press, 1971. doi : 10.1016/B978-0-12-181050-4.50006-8.
- [2] P. Blanche, Introduction to Holographic. Elsevier, 2020. doi : 10.1016/B978-0-12-815467-0.00001-3.
- [3] F. D. Yafei Xing, Mounir Kaaniche, Béatrice Pesquet-Popescu, Digital Holographic Data Representation and Compression. Academic Press, 2016. doi : 10.1016/B978-0-12-802854-4.00002-1.
- [4] P. Picart and S. Montresor, Digital Holography. Elsevier Inc., 2020. doi : 10.1016/B978-0-12-815467-0.00005-0.
- [5] I. Bernhardt, L. Ivanova, and P. Langehanenberg, "Application of digital holographic microscopy to investigate the sedimentation of intact red blood cells and their interaction with artificial surfaces," vol. 73, pp. 92–96, 2008, doi : 10.1016/j.bioelechem.2007.12.001.
- [6] G. U. Kaya and T. Ö. Onur, "Genetic algorithm based image reconstruction applying the digital holography process with the Discrete Orthonormal Stockwell Transform technique for diagnosis of COVID-19," Comput. Biol. Med., vol. 148, no. June, p. 105934, 2022, doi : 10.1016/j.compbiomed.2022.105934.

RÉFÉRENCES

- [7] A. Haleem, M. Javaid, R. Pratap, R. Suman, and S. Rab, “Internet of Things and Cyber-Physical Systems Holography and its applications for industry 4 . 0 :An overview , Internet Things cyber-physical Syst., vol. 2, no. April, pp. 42–48, 2022, doi : 10.1016/j.iotcps.2022.05.004.
- [8] Z. Essaïdi, P. Lauret, L. Aprin, and P. Slangen, “Aerodynamic fragmentation of water , ethanol and polyethylene glycol droplets investigated by high-speed in-line digital holography,” vol. 122, no. June, 2021, doi : 10.1016/j.optmat.2021.111747.
- [9] M.J. Berg, Tutorial : Aerosol characterization with digital in-line holography,” J. Aerosol Sci., vol. 165, no. May, p. 106023, 2022, doi : 10.1016/j.jaerosci.2022.106023.

CHAPITRE

I

HOLOGRAPHIE DIGITALE

I.1 Introduction

L'holographie [1] a été inventé par Dennis Gabor en 1948 comme une technique d'enregistrement et de reconstruction de l'amplitude et de la phase d'un front d'onde optique, dans le but d'améliorer les images obtenues par microscope électronique.

Dans sa description originale, l'holographie est une méthode d'imagerie optique en deux étapes. Dans un premier temps, une onde cohérente éclaire l'objet et est réfléchi, diffusée par celui-ci ou éventuellement transmise à travers lui. La deuxième onde, désignée comme faisceau de référence, interfère avec le faisceau objet dans le plan d'un support d'enregistrement, qui était traditionnellement une plaque holographique. Par la suite, la plaque holographique, après un traitement approprié, est remise dans sa position initiale et éclairée à l'aide de l'onde de référence.

Le terme "hologramme" provient des mots grecs "holos" signifiant "complet" ou "entier" et "graphien" signifiant "écrire". Il contient des informations relatives à la distri-

I.1 Introduction

bution tridimensionnelle du champ d'onde optique sous la forme d'un motif d'interférences. L'objet est reconstruit en illuminant l'hologramme enregistré avec l'onde de référence utilisée lors de l'enregistrement initial.

Avec l'apparition du laser (1960), l'holographie est devenue un outil métrologique très utile en biologie, en médecine, en mécanique des fluides et en contrôle non destructif. L'une des principales limitations de l'holographie et de ses approches associées a été les procédures chimiques peu pratiques liées aux supports d'enregistrement holographiques. De plus, la reconstruction optique des images nécessite une mise au point sur chacune des images.

En 1967 Goodman et Lawrence [2] ont démontré comment un front d'onde enregistré par un détecteur électronique pourrait être reconstruit numériquement par un ordinateur. C'était le premier exemple de l'holographie numérique. La première étape dans le processus holographique est exécutée optiquement, mais le milieu traditionnel d'enregistrement est remplacé par un dispositif électronique comme une caméra numérique (CCD). Le front d'onde est digitalisé et stocké dans la mémoire d'un ordinateur. Avec l'hologramme numérique comme base, la deuxième étape - la reconstruction - est une simulation numérique de la propagation d'onde. L'obtention des hologrammes et la reconstruction sont rapides et faciles; aucun processus chimique encombrant n'est nécessaire.

Le développement de la technologie informatique a permis le transfert du processus de reconstruction à l'ordinateur. L'idée de la reconstruction numérique de l'hologramme enregistré optiquement a été proposée dès les années 70 par Goodman [2] et Lawrence, Yaroslavski et al [3,4]. À la fin des années 1980, de nouveaux algorithmes et des méthodes innovantes ont été proposés pour le traitement numérique et l'amélioration des hologrammes numérisés. Dans les années 1990, les progrès technologiques dans l'industrie des capteurs d'images numériques, notamment en matière de résolution et de plage dynamique, ont permis l'enregistrement direct des hologrammes à l'aide de caméras numériques. Ainsi, les hologrammes pouvaient désormais être capturés et traités de manière numérique.

Le développement des capteurs d'image à semi-conducteurs et de la technologie in-

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

formatique a permis d'enregistrer des hologrammes sur des capteurs CCD [5,6] et de les reconstruire numériquement sans l'utilisation des supports holographiques.

Cette nouvelle technique est nommée HOLOGRAPHIE NUMÉRIQUE, plus souple, et répondant mieux à des contraintes de rapidité d'exécution, Ceci offre de nouvelles possibilités pour une variété d'applications.

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

L'holographie numérique est une extension de l'holographie conventionnelle, reposant sur le même principe fondamental d'enregistrement et de reconstruction. La distinction réside dans le fait que les hologrammes sont directement capturés et numérisés à l'aide d'un capteur CCD, en combinaison avec un système d'analyse d'image.

I.2.1 Etape d'enregistrement :

Le principe de l'enregistrement des hologrammes numériques est représenté à la figure I.1. [7] Une onde de référence plane et l'onde réfléchi, diffusée par l'objet, interfèrent à la surface d'un capteur CCD placé à une distance d de l'objet. L'hologramme ainsi obtenu est enregistré et stocké de manière électronique.

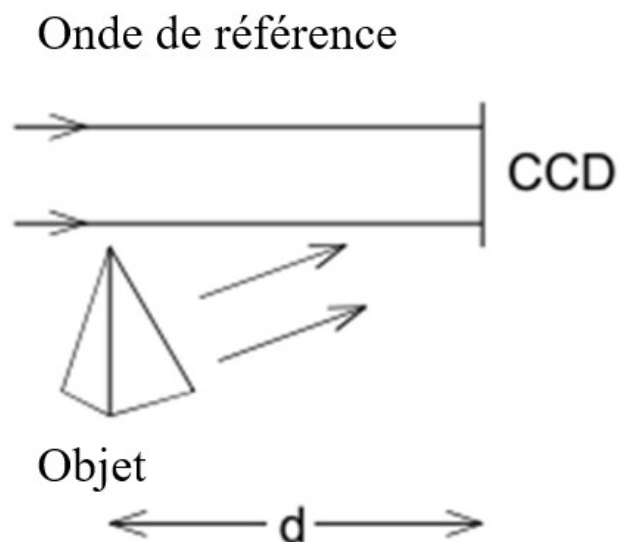


FIGURE I.1 – Principe d'enregistrement d'hologramme digital

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

L'amplitude complexe de l'onde diffractée par l'objet au niveau du plan d'enregistrement est décrite par :

$$E_0(x, y) = a_0(x, y) \exp(i\varphi_0(x, y)) \quad (\text{I.1})$$

Avec a_0 représentant le module de l'amplitude complexe et φ_0 la phase de l'onde objet.

$$E_R(x, y) = a_R(x, y) \exp(i\varphi_R(x, y)) \quad (\text{I.2})$$

est l'amplitude complexe de l'onde de référence avec a_R le module et φ_{0R} la phase.

Les deux ondes interfèrent sur le capteur CCD, l'intensité est définie par

$$I(x, y) = |E_0(x, y) + E_R(x, y)|^2 \quad (\text{I.3})$$

$$I(x, y) = |E_0(x, y)|^2 + |E_R(x, y)|^2 + E_0(x, y) \cdot E_R(x, y)^* + E_0(x, y)^* \cdot E_R(x, y) \quad (\text{I.4})$$

L'amplitude de la transmission $h(x, y)$ du support d'enregistrement est proportionnelle à $I(x, y)$. [7, 8]

$$h(x, y) = h_0 + \beta \tau I(x, y) \quad (\text{I.5})$$

La constante β représente la pente de la courbe caractéristique reliant la transmittance en amplitude à l'exposition lumineuse du matériau photosensible. En holographie classique et dans le cas particulier des émulsions photographiques, cette constante est négative, traduisant ainsi une diminution de la transmittance avec l'augmentation de l'exposition. Le paramètre τ désigne la durée d'exposition, tandis que h_0 correspond à la transmittance en amplitude de la plaque avant exposition (état initial). La fonction $h(x, y)$ est définie comme la fonction hologramme, décrivant la répartition spatiale de la transmittance après enregistrement. En holographie numérique, lorsque l'enregistrement est réalisé à l'aide de capteurs de type CCD, la transmittance initiale h_0 est généralement négligée

I.2.1.1 Condition d'enregistrement d'un hologramme de manière digital

En plus les conditions d'enregistrement de l'holographie conventionnelle, il existe également des critères relatifs à la distance d'enregistrement, aux dimensions de l'objet, à la longueur d'onde, ainsi qu'aux dimensions des pixels du capteur CCD. [9–11]

- La distance d'enregistrement, à laquelle l'objet doit être positionné, doit être déterminée avec soigneusement, en prenant en considération les dimensions de l'objet et l'angle maximal d'interférence, afin de limiter la taille des tâches de speckle et d'assurer une qualité d'image optimale.

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

- Cette distance est également choisie en fonction des dimensions du pixel de la caméra CCD afin de résoudre les franges d'interférence des faisceaux objet et de référence.
- Ces paramètres dépendent étroitement de l'angle maximum d'interférence.
- Pour que la caméra CCD puisse enregistrer des interférences, il faut que l'interfrange i soit supérieur à la largeur de 2 pixels (figure I.2) : $i > \Delta\xi$ et remplir la condition :

$$i = \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{\alpha(p)}{2}\right)} \quad (\text{I.6})$$

- Pour que le plan d'interférence soit enregistré, la relation suivante doit être remplie :

$$\alpha(p) < \frac{\lambda}{2\Delta\xi} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

$\alpha(p)$: l'angle d'interférence au point p de la caméra CCD.

$\Delta\xi$: dimension du pixel dans la direction ξ .

λ : longueur d'onde de la lumière utilisée.

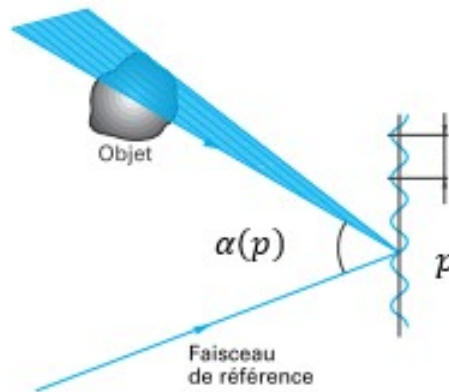


FIGURE I.2 – Limitation du champ

Pour satisfaire l'approximation de diffraction de Fresnel [6, 12, 13] il faut que la distance entre le plan objet et le plan hologramme soit suffisante :

$$d^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right]^2 \quad (\text{I.8})$$

Où

d : distance d'enregistrement d'hologrammes digitales

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

(x, y) : coordonnées de plan objet

(ξ, η) : coordonnées de plan hologramme

I.2.1.2 Montage d'enregistrement

Plusieurs montages sont exploités en holographie digitale, parmi ses montages nous citons un montage basé sur l'architecture de l'interféromètre de Mach-Zehnder qui est illustré sur la figure I.3. Ce montage travaille en réflexion comme il peut travailler en transmission.

Le faisceau laser émet par la source est divisée en deux faisceaux fils à l'aide d'un cube séparateur (CS1) après qu'il a subi une réflexion par le miroir (M1). Ensuite les deux faisceaux sont élargis et collimatés à l'aide d'un système de collimation (filtres spatiaux FS1 et FS2, lentilles L1 et L2). Le premier faisceau qui est considéré comme faisceau de référence subi une réflexion par le miroir (M4) où il tombe sur un deuxième cube séparateur (CS2) ce dernier qui le fait diriger vers la caméra CCD. Le deuxième faisceau qui est considéré comme faisceau objet éclaire l'objet après qu'il subit une réflexion par le miroir (M3). L'objet diffuse la lumière vers le cube séparateur (CS2) où elle passe directement vers la caméra CCD qui est reliée à un ordinateur.

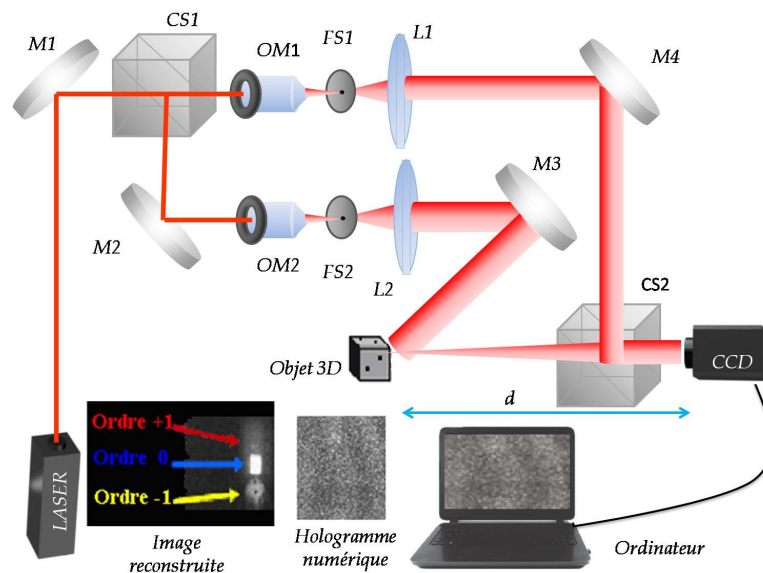


FIGURE I.3 – Installation expérimentale pour enregistrer un hologramme numérique
M1, M2, M3, M4 : miroirs ; CS1, CS2 : cubes séparateurs ; OM1, OM2 : objectifs de microscope ; FS1, FS2 : filtres spatiaux ; L1, L2 : lentilles.

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

I.2.1.3 Les différentes configurations d'enregistrement

En holographie digitale, on distingue deux configurations d'enregistrement des hologrammes en fonction de l'angle qui sépare les deux faisceaux lumineux objet et référence :

I.2.1.3.1 Holographie digitale de Gabor :

Dans l'holographie de Gabor, l'objet est éclairé par un seul faisceau lumineux, sans l'utilisation d'une onde de référence distincte (Figure I.4). La lumière incidente diffusée par l'objet constitue l'onde objet, tandis que la portion non diffusée joue le rôle d'onde de référence. Cette méthode est particulièrement efficace lorsque l'objet est de petite taille, de manière à ce que l'onde de référence ne soit pas trop diffusée.

Compte tenu de la simplicité de sa configuration optique, l'holographie de Gabor s'avère particulièrement adaptée à l'analyse des images de particules ou de fibres minces. De plus, l'holographie numérique de Gabor offre de nouvelles opportunités et permet d'élargir significativement le champ de ses applications.

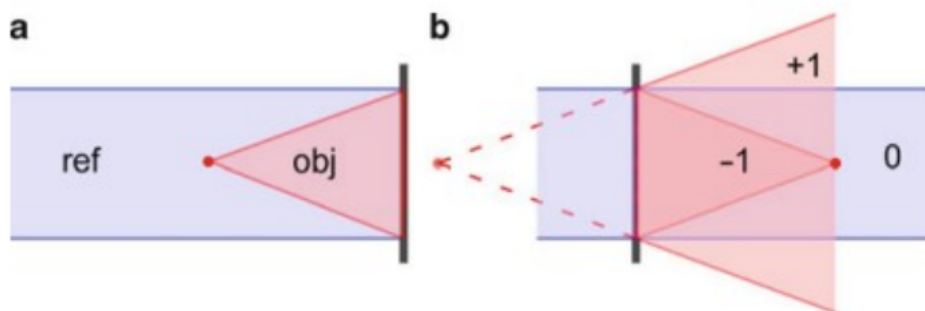


FIGURE I.4 – holographie digitale de Gabor. a) enregistrement par un seul faisceau lumineux qui sert à la fois faisceaux objet et faisceaux de référence. b) reconstruction du point objet (ordre -1) et l'image jumelle (ordre+1). [14]

I.2.1.3.2 Holographie digitale en ligne :

Pour l'holographie en ligne, un faisceau de référence séparé est fourni dans un alignement général avec le faisceau objet, Figure I.5 (Certains auteurs se réfèrent à l'holographie de Gabor également comme holographie en ligne) Cela permet l'imagerie d'objets

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

quelle que soit sa taille par rapport au champ visuel. Un avantage de l'holographie digitale en ligne par rapport à l'holographie digitale de Gabor est qu'elle n'est pas limitée aux petits objets. D'autre part, l'image focalisée est superposée à l'ordre zéro et d'image jumelle. Par conséquent, il est généralement nécessaire de trouver des moyens pour réduire ou éliminer les termes erronés.

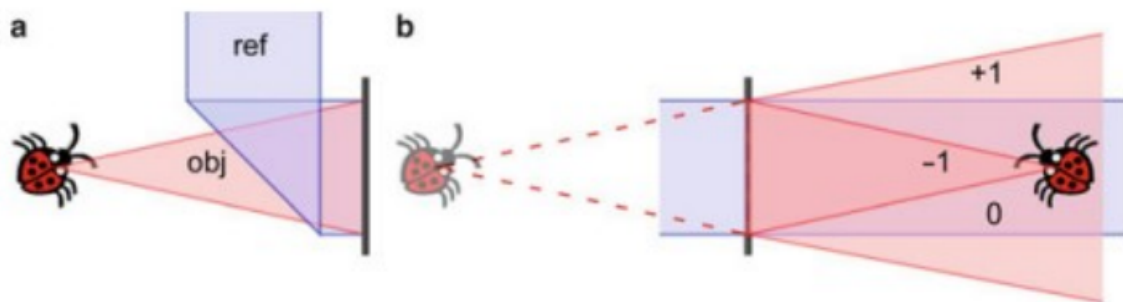


FIGURE I.5 – holographie digitale en ligne. a) enregistrement par la superposition des deux faisceaux objet et référence. b) reconstruction par superposition de l'ordre zéro et l'image jumelle. [14]

I.2.1.3.3 Holographie digitale hors axe :

La configuration hors axe est une géométrie inventée par Emmett Leith et Juris Upatnieks pour scinder les trois ordres de diffraction (l'ordre -1, l'ordre 0 et l'ordre +1) dans le processus de la reconstruction numérique de l'hologramme enregistré, les faisceaux d'enregistrement objet et de référence sont incidents au support d'enregistrement à des angles différents. La géométrie est illustrée à la Figure I.6.

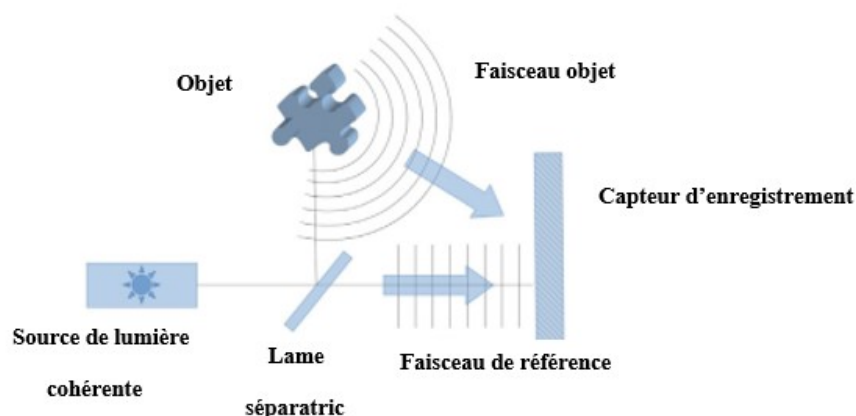


FIGURE I.6 – holographie hors axe [15]

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

En fonction de la nature, de la forme et de l'origine des fronts d'onde interférant sur le capteur, les hologrammes ainsi que les géométries d'enregistrement peuvent être classés en diverses catégories.

I.2.1.3.4 Holographie digitale de Fresnel :

I.2.1.3.4.1 Holographie digitale de Fresnel avec une onde de référence plane :

C'est le cas le plus utilisé en général, il implique à positionner l'objet à une certaine distance (d) du capteur CCD et la lumière diffusée par l'objet vient interférer sur le capteur CCD avec celle de l'onde plane de référence qui tombe de manière normale sur ce dernier (figure I.7).

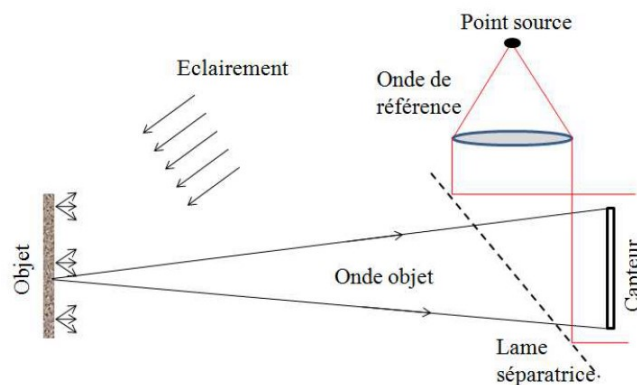


FIGURE I.7 – holographie digitale de Fresnel [16]

I.2.1.3.4.2 Holographie digitale de Fresnel avec une onde de référence sphérique :

Dans cette configuration, la lumière diffusée par l'objet vient s'interférer sur le capteur CCD avec celle de l'onde de référence sphérique provenant du point focal d'une lentille convergente.

I.2.1.3.5 Holographie digitale de Fraunhofer

Dans cette configuration (figure I.8) L'objet est installé dans le plan focal d'une lentille mise entre l'objet et le support d'enregistrement, dans le but de former son image à l'infini. Cependant, des aberrations sont introduites par l'utilisation d'une lentille de collimation.

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

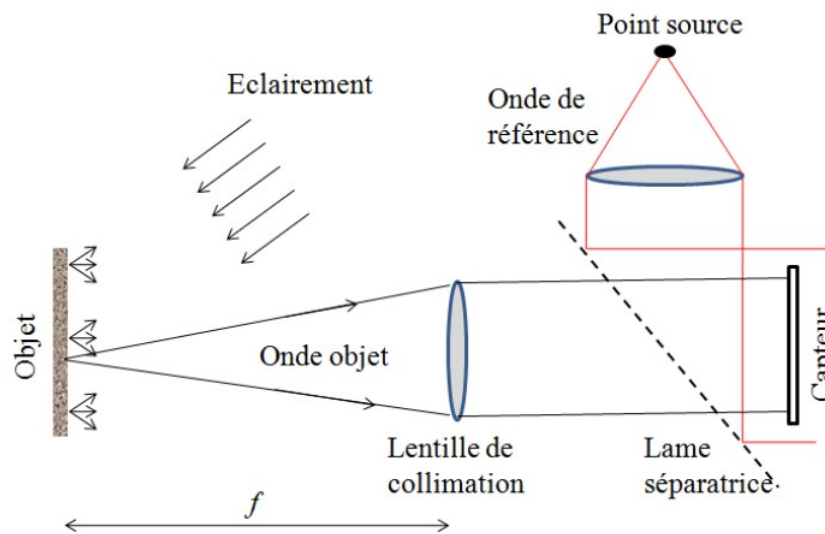


FIGURE I.8 – holographie digitale de Fraunhofer [16]

I.2.1.3.6 Holographie digitale de Fourier :

I.2.1.3.6.1 Holographie digitale de Fourier avec lentille :

Cette configuration est une version de la configuration de Fraunhofer où l'enregistrement de l'hologramme s'effectue au niveau du plan focal image de la lentille. Cela permet de produire la transformée de Fourier de l'objet, d'où l'appellation de "hologramme de Fourier" attribuée à cette configuration. (Figure I.9).

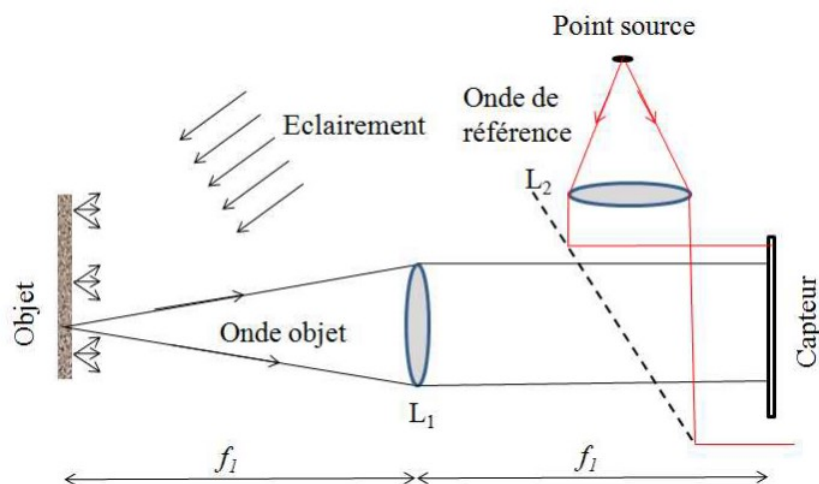


FIGURE I.9 – Holographie digitale de Fourier avec lentille [17]

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

I.2.1.3.6.2 Holographie digitale de Fourier sans lentille :

Dans cette configuration, le point source de l'onde de référence se trouve à la même distance que l'objet. Les deux ondes sont sphériques. (Figure I.10).

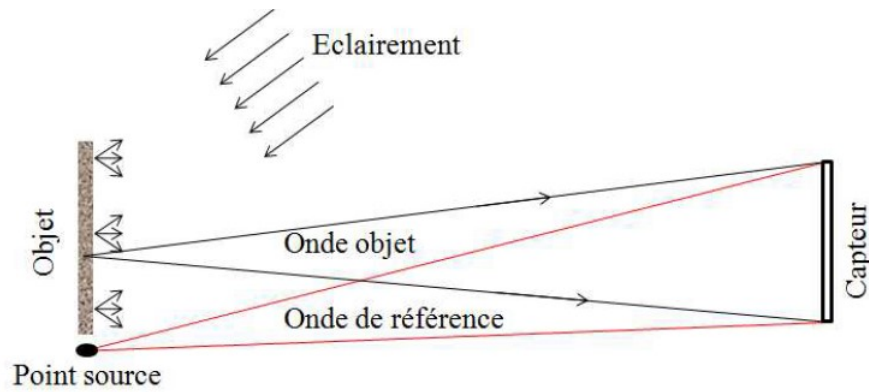


FIGURE I.10 – Holographie digitale de Fourier sans lentille. [17]

I.2.1.3.7 Holographie Digitale Image :

Dans cette configuration, l'image de l'objet sur le plan du capteur est formée par une lentille convergente placée entre l'objet et le support d'enregistrement. La lentille permet de focaliser l'onde lumineuse diffusée par l'objet, générant ainsi une image réelle de celui-ci à une distance précise du capteur. Cette approche (figure I.11) est couramment utilisée en microscopie holographique numérique, car elle permet de capturer une image de haute résolution tout en préservant les informations de phase essentielles à la reconstruction holographique.

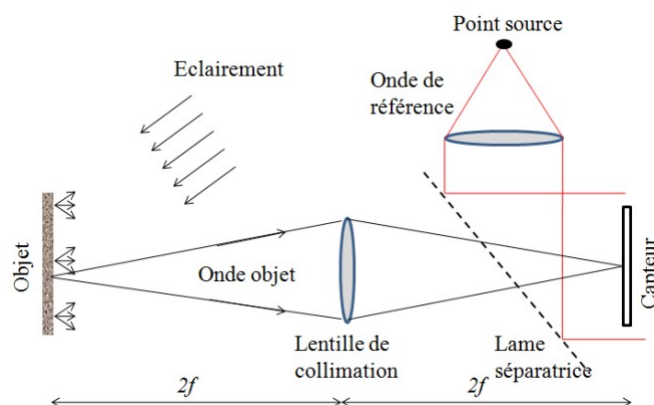


FIGURE I.11 – holographie digitale image [17]

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

I.2.2 Etape de la reconstruction numérique d'hologramme :

I.2.2.1 Reconstruction par Approximation de Fresnel

L'intégrale de Fresnel Kirchhoff qui décrit la diffraction [11,18–21] d'une onde lumineuse incidente normalement par une ouverture (ici un hologramme) est donné par :

$$\Gamma(\chi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right)}{\rho'} dx dy \quad (I.9)$$

Avec

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (I.10)$$

$h(x, y)$ est la fonction d'hologramme

ρ' est la distance entre un point qui se trouve dans le plan d'hologramme et un autre point dans le plan de reconstruction.

L'onde de référence plane $E_R(x, y)$ est donnée simplement par l'amplitude réelle :

$$E_R = a_R + i0 = a_R \quad (I.11)$$

Les grandeurs géométriques sont illustrées sur la figure I.12 :

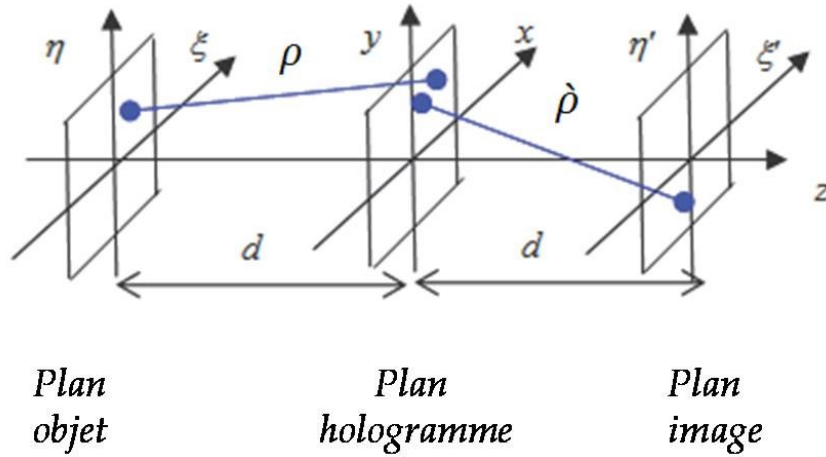


FIGURE I.12 – Système de coordonnées utilisé pour la reconstruction numérique d'hologrammes. [7]

Le modèle de diffraction est calculé à une distance d derrière le plan de CCD, ce qui signifie qu'il reconstruit l'amplitude complexe de l'onde dans le plan de l'image réelle.

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

L'équation (I.9) est la base pour la reconstruction numérique. Puisque le champ d'onde réfracté $\Gamma(\xi', \eta')$ est une fonction complexe, les valeurs de l'intensité et de la phase peuvent être calculées en même temps. C'est contrairement au cas de la reconstruction optique d'hologramme dans laquelle, seulement, l'intensité est rendue visible.

Pour reconstruire une image réelle en holographie digitale il est donc nécessaire d'insérer E_R^* au lieu de E_R dans l'équation (I.9) :

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} dx dy \quad (I.12)$$

avec

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2} \quad (I.13)$$

Pour les valeurs x, y, ξ et η qui sont plus petites devant la distance d entre le plan de reconstruction et le plan de CCD, l'expression de l'équation (I.13) peut être développée en une série de Taylor :

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - x)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - x)^2]^2}{d^3} + \dots \quad (I.14)$$

Le quatrième terme peut être négligé s'il est plus petit devant la longueur d'onde

$$\frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - x)^2]^2}{d^3} \ll \lambda \quad (I.15)$$

ou

$$d \gg \sqrt[3]{\frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - x)^2]^2}{\lambda}} \quad (I.16)$$

Alors la distance ρ se compose de termes linéaires et quadratiques :

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - x)^2}{2d} \quad (I.17)$$

Les deux formules de reconstruction, Eq (I.9) et (I.12) sont équivalentes parce que

$$E_R = E_R^* = a_R$$

Le dénominateur de l'équation (I.12) est remplacé par d où l'expression de la reconstruction de l'image réelle devient :

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \\ &\times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_R^*(x, y) h(x, y) \exp\left[-\frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned} \quad (I.18)$$

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

Cette formule, désignée sous le nom d'approximation de Fresnel [7] ou transformation de Fresnel, permet de reconstruire le front d'onde dans un plan situé à l'arrière de l'hologramme, en l'occurrence, dans le plan de l'image réelle. L'intensité est donnée par :

$$I = |\Gamma(\xi, \eta)|^2 \quad (\text{I.19})$$

La phase est donnée par

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]} \quad (\text{I.20})$$

Pour la digitalisation de la transformation de Fresnel (Eq (I.18)), les substitutions suivantes sont introduites :

$$v = \frac{\xi}{\lambda d}, \quad \mu = \frac{\eta}{\lambda d} \quad (\text{I.21})$$

L'équation (I.18) devient :

$$\begin{aligned} \Gamma(v, \mu) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp[-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)] \\ &\times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_R^*(x, y) h(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2) \exp[i2\pi(xv, y\mu)]\right] dx dy \end{aligned} \quad (\text{I.22})$$

La fonction peut être digitalisée si la fonction de l'hologramme $h(x, y)$ est prélevée sur une trame rectangulaire de $M \times N$ points, avec un pas de Δx et Δy le long des coordonnées. Δx et Δy sont les distances entre les Pixel voisins sur le CCD dans la direction horizontale et verticale. Avec ces valeurs discrètes les intégrales de (I.22) sont converties en sommes finies :

$$\begin{aligned} \Gamma(m, n) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp[-i\pi\lambda d(m^2 \Delta v^2 + n^2 \Delta \mu^2)] \\ &\times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R^*(k, l) h(k, l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp[i2\pi(k\Delta x m \Delta v + l\Delta y n \Delta \mu)] \end{aligned} \quad (\text{I.23})$$

Pour $m = 0, 1, \dots, N-1; n = 0, 1, \dots, N-1$

$$\Delta v = \frac{1}{N \Delta x}, \quad \Delta \mu = \frac{1}{N \Delta y} \quad (\text{I.24})$$

Après substitution on trouve :

$$\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N \Delta x}, \quad \Delta \eta = \frac{\lambda d}{N \Delta y} \quad (\text{I.25})$$

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

En utilisant ces équations, (I.23) devient :

$$\begin{aligned} \Gamma(m, n) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \pi \lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \\ &\times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R^*(k, l) h(k, l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[i 2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right] \end{aligned} \quad (I.26)$$

C'est la transformation de Fresnel discrète.

L'équation de reconstruction de l'image virtuelle est donnée par :

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi' + \eta') &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[+i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi'^2 + \eta'^2)\right] \\ &\times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_R(x, y) h(x, y) \exp\left[+ \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi' + y\eta')\right] dx dy \end{aligned} \quad (I.27)$$

La formule discrète correspondante pour la reconstruction via une lentille virtuelle avec $f = \frac{d}{2}$ est :

$$\begin{aligned} \Gamma(m, n) &= \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[+i \pi \lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \\ &\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R(k, l) h(k, l) \exp\left[+i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[i 2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \end{aligned} \quad (I.28)$$

I.2.2.2 Reconstruction par méthode de Convolution

La méthode de convolution [19, 20] permet de réécrire l'intégrale de diffraction (I.9) sous la forme suivante :

$$\Gamma(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) g(\xi, \eta, x, y) dx dy \quad (I.29)$$

Où la réponse impulsionnelle $g(\xi, \eta, x, y)$ est donnée par :

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}\right]}{\sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} \quad (I.30)$$

Selon l'éq. (I.29) le système linéaire caractérisé par $g(\xi, \eta, x, y) = g(\xi - x, \eta - y)$ est invariant dans l'espace.

L'intégrale peut être considérée comme une convolution et le théorème de convolution peut être appliqué. D'après ce théorème, la transformée de Fourier de $h.E_R^*$ Convolué

I.2 Principe de base de l'holographie digitale :

à g est le produit simple de leurs transformées de Fourier. La fonction de la réponse impulsionnelle devient :

$$g(k, l) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + \left(k - \frac{M}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2} \right]}{\sqrt{d^2 + \left(k - \frac{M}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}} \quad (\text{I.31})$$

Le décalage des coordonnées de $\frac{N}{2}$ est pour des raisons de symétrie. En bref, la reconstruction dans le plan de l'image réelle est :

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}(h.E_R^*) . \mathcal{F}(g) \} \quad (\text{I.32})$$

La transformée de Fourier de $g(k, l)$ peut être calculée et exprimée analytiquement par :

$$G(n, m) = \exp \left\{ -i \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \left(n + \frac{M^2 \Delta x^2}{2d\lambda}\right)^2}{M^2 \Delta x^2} - \frac{\lambda^2 \left(m + \frac{N^2 \Delta y^2}{2d\lambda}\right)^2}{N^2 \Delta y^2}} \right\} \quad (\text{I.33})$$

L'équation (I.32) devient :

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}(h.E_R^*) . G \} \quad (\text{I.34})$$

I.2.2.3 Reconstruction par transformée de Fourier : [18, 19]

La géométrie d'enregistrement holographique de Fourier sans lentille est représentée dans la figure I.9. Comme c'est décrit au-dessus, cette géométrie est caractérisée par l'emploi d'une source ponctuelle émettant une onde de référence sphérique et qui est située sur le plan objet. L'onde de référence au plan de la caméra CCD est donc décrite par :

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{\exp \left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + x^2 + y^2} \right)}{\sqrt{d^2 + x^2 + y^2}} \\ &\approx \frac{1}{d} \exp \left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d \right) \exp \left(-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2) \right) \end{aligned} \quad (\text{I.35})$$

Le terme $\sqrt{d^2 + x^2 + y^2}$ Le il s'agit de la distance séparant le point source du point de coordonnées (x, y) dans le plan CCD.

L'insertion de cette formule dans l'équation de reconstruction de l'image virtuelle, telle que présentée dans l'équation (I.27), aboutit à l'équation suivante :

$$\Gamma(\xi, \eta) = C \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2) \right] \mathcal{F}^{-1} \{ h(x, y) \} \quad (\text{I.36})$$

I.3 L'effet des paramètres d'enregistrement (distance d'enregistrement, angle d'enregistrement, taille du capteur CCD et taille de l'objet) sur l'enregistrement :

I.3 L'effet des paramètres d'enregistrement (distance d'enregistrement, angle d'enregistrement, taille du capteur CCD et taille de l'objet) sur l'enregistrement :

I.3.1 Montage en ligne :

Dans le montage en ligne (figure I.13), le centre de l'objet ainsi que celui de la barrette CCD se trouvent tous deux alignés sur l'axe optique du système [22]. La relation de la distance minimale admissible D_{min} (en ligne) peut être obtenue par :

$$D_{min} = \frac{L_{CCD} + L_{OY}}{2\alpha_{max}} \quad (I.37)$$

La distance D_{min} (en ligne) augmente linéairement avec la taille de l'objet avec une pente de $\frac{1}{2\alpha_{max}}$

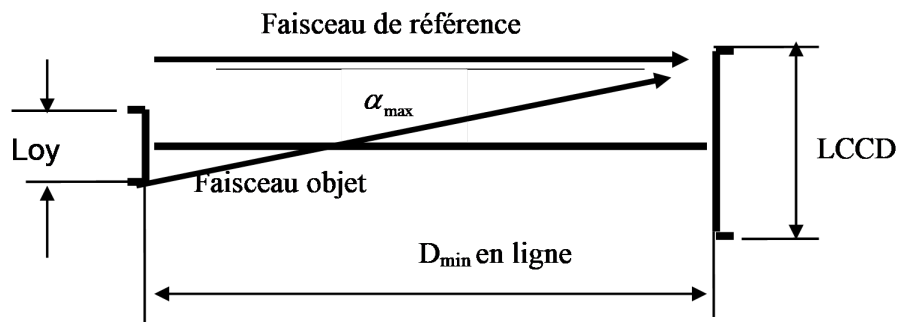


FIGURE I.13 – Montage en ligne de l'holographie digitale. [22]

I.3.2 Le montage hors axe :

Dans le montage hors axe, l'angle décentré (décalé) est introduit pour séparer les composantes des ondes de diffraction par le placement de l'objet à une distance décalée de l'axe optique du système. [22] Les ondes de référence sont généralement collimatées, et elles sont incidentes perpendiculairement sur la barrette CCD. Dans le but de séparer les images jumelles entre elles et de la lumière transmise dans les directions proches de l'axe optique, il faut que l'angle de décalage θ soit supérieur à la valeur minimale.

$$\theta \sin^{-1}(3\omega\lambda)_{min} \quad (I.38)$$

I.3 L'effet des paramètres d'enregistrement (distance d'enregistrement, angle d'enregistrement, taille du capteur CCD et taille de l'objet) sur l'enregistrement :

Où ω : est la plus haute fréquence spatiale de l'objet.

Supposant que les dimensions latérales de l'objet sont $L_{OX} \times L_{OY}$. Alors dans l'holographie hors axe de FRESNEL, où l'objet est positionné à une distance D du plan d'enregistrement, la largeur de la bande de l'objet dans le plan de l'hologramme est limitée à l'intérieur d'un rectangle centré avec les dimensions : $2\omega_X \times 2\omega_Y$ où :

$$2\omega_X = \frac{L_{OX}}{\lambda D} \quad 2\omega_Y = \frac{L_{OY}}{\lambda D} \quad (\text{I.39})$$

Si l'objet est déplacé le long de l'axe Y , tel qu'indiqué dans la figure (figure I.14), la largeur de l'objet $2\omega_Y$ dans la direction Y est celle d'importance. Donc le minimum admissible de l'angle de décalage θ est approximativement donné par :

$$\theta = \frac{3L_{OY}}{2D_{min}} \quad (\text{I.40})$$

Dans le montage hors axe, l'enregistrement numérique de l'hologramme est influencé par deux paramètres en même temps.

La position de l'objet doit être déterminée soigneusement de manière d'assurer le minimum de l'angle de décalage θ_{min} tout en conservant les limites de l'angle maximum d'interférence α_{max} . En tenant compte de l'angle exigé, la relation entre la distance minimale admissible D_{min} et la taille de l'objet peut être écrite comme suit :

$$D_{min} = \frac{L_{CCD} + L_{OY} + 2d}{2\alpha_{max}} \quad (\text{I.41})$$

Où, $b = \theta_{min} \times D_{minhorsaxe}$, donc $D_{minhorsaxe}$ est finalement donnée par :

$$D_{minhorsaxe} = \frac{L_{CCD} + 4L_{OY}}{2\alpha_{max}} \quad (\text{I.42})$$

Les deux équations (I.37) et (I.42) indiquent les exigences sur la distance minimale d'enregistrement qui augmente linéairement avec la taille de l'objet. Cependant, la pente dans la configuration en ligne est quatre fois plus petite par rapport à celle dans le système hors axe.

I.4 Les avantages de l'holographie digitale :

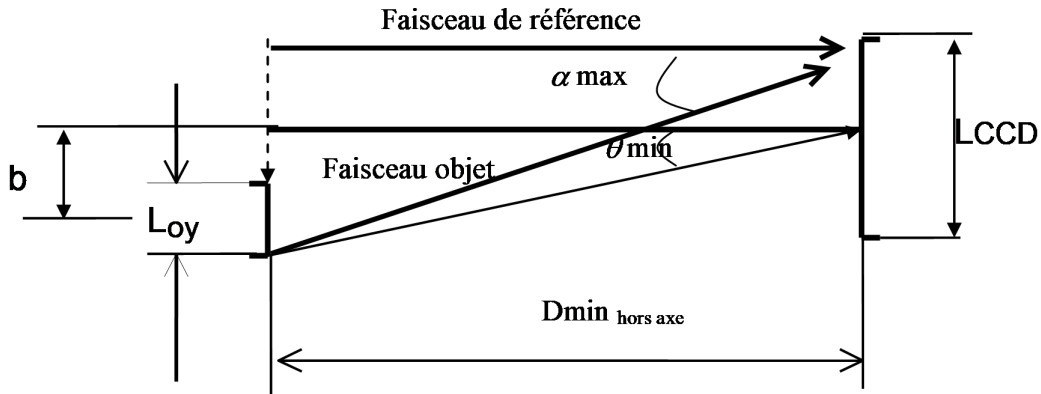


FIGURE I.14 – Montage hors axe de l'holographie digitale. [22]

I.4 Les avantages de l'holographie digitale :

L'holographie numérique constitue un domaine de recherche particulièrement dynamique depuis le début des années 2000. L'holographie numérique offre plusieurs avantages distincts, parmi lesquels figurent [23, 24]

1. Premièrement, aucune nécessité de processus de développement chimique des plaques holographiques ainsi que l'analyse à l'aide d'un montage optique. Par conséquent, l'utilisation de la technologie numérique contribue de manière significative à atténuer les contraintes expérimentales associées à la technique holographique.
2. La capacité d'enregistrer des hologrammes et de les reconstruire en temps réel.
3. Les processus d'enregistrement et de reconstruction sont rapides.
4. L'accès numérique aux hologrammes enregistrés permet de les traiter ultérieurement. Les prétraitements permettent d'améliorer le rapport signal/bruit des plans restitués.
5. La disponibilité d'informations complètes sur l'amplitude et la phase du front d'onde.
6. L'adaptation du noyau de convolution (focalisation numérique) permet la mise au point sur un plan particulier.

En plus de la reconstruction numérique adaptée par le majeur parti des holographistes, une deuxième méthode qui est la reconstruction optique existe également. Elle se fait en transmettant l'image enregistrée par la caméra CCD et stockée dans la mémoire d'un

ordinateur, vers un afficheur à cristaux liquides LCD (Liquide Crystals Display). La figure d'interférence adressée sur l'afficheur agit comme un réseau qui diffracte la lumière quand il est illuminé par l'onde de référence, l'image de l'objet est alors reconstruite sur un écran.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements théoriques de l'holographie digitale, depuis le principe d'enregistrement des hologrammes digitales jusqu'à la reconstruction numérique du champ optique. L'étude des équations de propagation, notamment selon les formulations de Fresnel et de Fourier, a permis de décrire le lien entre l'hologramme enregistré et la distribution spatiale du champ complexe dans le plan objet. Ce cadre théorique constitue une base essentielle pour la compréhension des mécanismes de formation et de restitution des hologrammes numériques. L'holographie digitale a remplacé l'holographie conventionnelle dans de nombreuses situations. De nombreuses études témoignent du développement de cette technique. Ce regain d'intérêt pour l'holographie est essentiellement dû au développement récent des caméras CCD qui permettent d'enregistrer en temps réel des hologrammes sur des dimensions de plus en plus importantes. Les recherches récentes montrent les applications de l'holographie digitale à la biologie [25–27], à la médecine, [28–30], à la science des matériaux [31, 32], à l'industrie [33–35] et à la mécanique des fluides [36–40].

Cependant, malgré ces avancées, l'holographie digitale présente une limite de résolution spatiale, principalement liée à la taille des pixels du capteur. L'amélioration de cette résolution par des dispositifs optiques plus complexes ou des capteurs de dernière génération reste possible, mais le coût élevé et la complexité de mise en œuvre de tels systèmes limitent considérablement leur utilisation pratique. Cette contrainte justifie le recours à des approches numériques, plus flexibles et économiquement avantageuses, pour pallier ces limites instrumentales.

Le chapitre II sera consacré au développement et à l'évaluation de méthodes numériques d'amélioration de la résolution des hologrammes digitaux dans le but d'optimiser la qualité des images reconstruites.

RÉFÉRENCES

- [1] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wave-fronts," Roy. Soc. Lond. A Mat, vol. 197, pp. 454–487, 1949.
- [2] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," Appl Phys Lett, vol. 11, no. 3, pp. 77–79, 1967, doi : 10.1063/1.1755043.
- [3] M. Kronrod, N. Merzlyakov, and L. Yaroslavskii, "Reconstruction of a Hologram with a Computer," Soviet Physics Technical Physics, vol. 17, no. July 1972, pp. 333–334, 1972.
- [4] B. F. Fedorov and R. I. El'man, "Computer Synthesis of Holograms.," Sov J Opt Technol, vol. 39, no. 4, pp. 205–207, 1972.
- [5] U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," Journal of the Optical Society of America A, vol. 11, no. 7, p. 2011, 1994, doi : 10.1364/josaa.11.002011.
- [6] U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," Appl Opt, vol. 33, no. 2, p. 179, 1994, doi : 10.1364/ao.33.000179.
- [7] U. Schnars and W. Jüptner, Digital holography : Digital Hologram recording, Numerical reconstruction and Relation Techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg,

- 2005.
- [8] P.HARIHARAN, BASICS OF HOLOGRAPHY. Cambridge University Press, 2002.
 - [9] H. Wang, D. Wang, J. Xie, and S. Tao, "Recording conditions of digital holography," in 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, SPIE, Jan. 2007, p. 62791J. doi : 10.1117/12.725187.
 - [10] X. Xiao and I. K. Puri, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms : an optical diagnostic for combustion," 2002.
 - [11] U. Schnars and W. P. O Juptner, "Digital recording and reconstruction of holograms in holograminterferometry and shearography," 1994.
 - [12] P. Das, Lasers and Optical Engineering. Springer New York, 1991.
 - [13] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, Second edit. McGraw-Hill, New York, 1996.
 - [14] H. K. V Lotschet al., Digital Holographic Microscopy : Principles, Techniques and Applications. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.
 - [15] P. A. Blanche, Optical Holography-Materials, Theory and Applications. Elsevier, 2020. doi : 10.1016/B978-0-12-815467-0.00001-3.
 - [16] I. Acharya and D. Upadhyay, "Comparative Study of Digital Holography Reconstruction Methods," Procedia Comput Sci, vol. 58, pp. 649–658, 2015, doi : 10.1016/j.procs.2015.08.084.
 - [17] P. Tankam, "Méthodes d'holographie numérique couleur pour la métrologie sans contact en acoustique et mécanique," Université du Maine, France, 2010.
 - [18] Y. Xing, M. Kaaniche, B. Pesquet-Popescu, and F. Dufaux, "Fundamental Principles of Digital Holography," Digital Holographic Data Representation and Compression, pp. 3–18, 2016, doi : 10.1016/B978-0-12-802854-4.00002-1.
 - [19] P. Picart and S. Montresor, "Digital Holography," Optical Holography : Materials, Theory and Applications, pp. 83–120, Jan. 2020, doi : 10.1016/B978-0-12-815467-0.00005-0.
 - [20] I. Acharya and D. Upadhyay, "Comparative Study of Digital Holography Reconstruction Methods," Procedia Comput Sci, vol. 58, pp. 649–658, Jan. 2015, doi : 10.1016/J.PROCS.2015.08.084.

- [21] U. Schnars and W. P. O. J. "Uptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms," 2002. [Online]. Available : <http://iopscience.iop.org/0957-0233/13/9/201>
- [22] L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," vol. 39, no. December 2000, pp. 3214–3219, 2015.
- [23] C. Zhao, D. Li, and A. Watson, "Digital holography and its applications," in Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control, 2003, pp. 332–336. doi : 10.1117/12.570295.
- [24] A. Rhisheekesane et al., "Review on digital holography techniques using digital micromirror device," Jun. 01, 2024, Elsevier Ltd. doi : 10.1016/j.optlaseng.2024.108120.
- [25] Y. Wang, P. Ju, S. Wang, J. Su, W. Zhai, and C. Wu, "Identification of living and dead microalgae cells with digital holography and verified in the East China Sea," Mar Pollut Bull, vol. 163, no. August 2020, 2021, doi : 10.1016/j.marpolbul.2020.111927.
- [26] X. Lu, J. Chen, S. Liu, Z. Ma, Z. Zhang, and L. Zhong, "3D profile reconstruction of biological sample by in-line image-plane phase-shifting digital microscopical holography," Opt Lasers Eng, vol. 50, no. 10, pp. 1431–1435, 2012, doi : 10.1016/j.optlaseng.2012.05.002.
- [27] B. Rappaz, C. Depeursinge, and P. Marquet, "Digital Holographic Microscopy (DHM) for Measuring Biophysical Parameters of Living Cells," Biomedical Optical Phase Microscopy and Nanoscopy, pp. 71–95, Jan. 2013, doi : 10.1016/B978-0-12-415871-9.00005-3.
- [28] N. Andrés, C. Pinto, J. Lobera, A. M. López, and V. Palero, "Digital holography applied to simultaneously measure the shape and the radial deformation of a blood vessel (ex-vivo)," vol. 129, no. April, 2020.
- [29] G. Ustabas Kaya and T. Ö. Onur, "Genetic algorithm based image reconstruction applying the digital holography process with the Discrete Orthonormal Stockwell-Transform technique for diagnosis of COVID-19," Comput Biol Med, vol. 148, no. August, 2022, doi : 10.1016/j.combiomed.2022.105934.
- [30] P. Memmolo et al., "Differential diagnosis of hereditary anemias from a fraction of blood drop by digital holography and hierarchical machine learning," Biosens Bioelectron, vol. 201, no. January, p. 113945, 2022, doi : 10.1016/j.bios.2021.113945.

- [31] B. Shaet al., “Analysis of agglomerationparticle size near the burning surface of aluminizedsolidpropellantbased on digital inlineholography,” *Acta Astronaut*, vol. 188, no. May, pp. 140–150, 2021, doi : 10.1016/j.actaastro.2021.07.015.
- [32] M. Paturzoet al., “Digital Holography , a metrologicaltool for quantitative analysis : Trends and future applications,” vol. 104, no . November 2017,pp. 32-47, 2018
- [33] E. Meteyer, F. Foucart, M. Secail-geraud, and P. Picart, “Full-field force identification with high-speed digital holography,” vol. 164, no. December 2020, 2022.
- [34] H. Yuan et al., “Accurate reconstruction for the measurement of tilt surfaces with digital holography,” *Opt Commun*, vol. 496, no. February, p. 127135, 2021, doi : 10.1016/j.optcom.2021.127135.
- [35] I. Yamaguchi, “Shape and deformationmeasurements of rough surfaces by phase-shifting digital holography,” vol. 13, no. 4, pp. 70–72, 2021, doi : 10.4302/plp.v13i4.1127.
- [36] L. Wang et al., “Modeling and verification of astigmatic digital off-axis holography for burning droplet measurement in a flame tube,” *Opt Lasers Eng*, vol. 159, no. August, p. 107219, 2022, doi : 10.1016/j.optlaseng.2022.107219.
- [37] Z. Essaïdi, P. Lauret, L. Aprin, and P. Slangen, “Aerodynamic fragmentation of water ,ethanol and polyethylene glycol droplets investigated by high-speed in-line digital holography,” vol. 122, no. October, 2021, doi : 10.1016/j.optmat.2021.111747.
- [38] Y. Wu et al., “Picosecondpulsed digital off-axis holography for near-nozzle droplet size and 3D distribution measurement of a swirlkerosene spray,” *Fuel*, vol. 283, no. August 2020, 2021, doi : 10.1016/j.fuel.2020.119124.
- [39] M. J. Berg, “Tutorial :Aerosolcharacterizationwith digital in-lineholography,” *J Ae-rosolSci*, vol. 165, no. May, 2022, doi : 10.1016/j.jaerosci.2022.106023.
- [40] L. Wang, L. Zhang, W. Lin, Y. Wu, and X. Wu, “Spray trajectory and 3D droplets distribution of liquid jet in crossflowwith digital inlineholography,” *ExpThermFluidSci*, vol. 139, no. September 2021, p. 110725, 2022, doi : 10.1016/j.expthermflusci.2022.110725.

CHAPITRE

II

AGRANDISSEMENT D'HOLOGRAMMES DIGITAUX DE PARTICULES PAR DIFFÉRENTES TECHNIQUES D'INTERPOLATION

II.1 Introduction

L'holographie digitale [1] est une technique d'imagerie tridimensionnelle devenue faisable, grâce au développement des capteurs d'image et des logiciels de traitement de l'information optique. L'holographie digitale est utilisée actuellement dans différents domaines. Son avantage par rapport à l'holographie classique est la non-nécessité à la fois d'un procédé chimique et d'une onde de référence dans le processus de reconstruction. Toutefois, la zone d'enregistrement des capteurs CCD est beaucoup plus petite que celle du film holographique utilisé en holographie classique. De ce fait, la taille de l'hologramme enregistré est devenue petite et la résolution de l'objet reconstruit sur les images

reconstruites est considérablement diminuée.

Pour surmonter ce problème, la méthode d'interpolation qui crée un hologramme plus grand par insertion de nouveaux pixels est proposée.

Les résultats expérimentaux aident l'utilisateur à choisir l'algorithme approprié pour obtenir des résultats optimaux.

II.2 Interpolation

L'interpolation [2–6] est une méthode mathématique fréquemment appliquée dans de différents domaines y compris la reconnaissance de voix, la reconnaissance de formes, l'analyse de données, la statistique, la mécanique, etc. Cette méthode consiste à trouver une courbe ou une fonction qui passe à travers un ensemble de points donnés, et qui peut être utilisée pour prédire la valeur de la fonction pour des valeurs de x qui ne sont pas connues.

L'interpolation a des racines historiques qui remontent à l'Antiquité. Les mathématiciens grecs anciens, tels que Pythagore et Euclide, ont utilisé des techniques d'interpolation pour résoudre des problèmes géométriques. Au Moyen Âge, les mathématiciens arabes, tels qu'Al-Khwarizmi et Omar Khayyâm, ont perfectionné les techniques d'interpolation pour résoudre des problèmes de géométrie et d'astronomie.

Au cours des siècles suivants, les mathématiciens européens ont continué à développer des techniques d'interpolation pour résoudre des problèmes de géométrie, d'astronomie, et de mécanique. Au XVII^e siècle, les mathématiciens tels que Pierre de Fermat et Gilles Personne de Roberval ont introduit des méthodes d'interpolation polynomiale pour résoudre des problèmes de géométrie et de mécanique. Au XVIII^e siècle, le mathématicien Joseph-Louis Lagrange a développé la méthode d'interpolation de Lagrange, qui est encore largement utilisée aujourd'hui.

Au XIX^e siècle, les mathématiciens tels qu'Augustin-Louis Cauchy, Pierre-Simon Laplace et Joseph Fourier ont utilisé des techniques d'interpolation pour résoudre des problèmes de physique mathématique et de mécanique. Au cours du XX^e siècle, des tech-

II.3 Interpolation d'image

niques d'interpolation plus complexes ont été créées par les mathématiciens et les ingénieurs pour résoudre des problématiques de plus en plus compliquées dans les branches de l'informatique, de l'électronique et de la robotique.

Avec l'avènement de l'apprentissage automatique, les techniques d'interpolation ont évolué pour inclure des Algorithmes basées sur des réseaux de neurones qui ont montré de très bons résultats pour résoudre des problèmes d'interpolation dans des domaines tels que génération de données et la vision par ordinateur.

II.3 Interpolation d'image

L'interpolation d'image [7] est une technique qui a été développée depuis les années 1970 dans le domaine du traitement d'image numérique. C'est un processus utilisé pour augmenter la résolution d'une image numérique [8, 9]. Elle consiste à estimer les valeurs des pixels manquants dans une image en utilisant les valeurs des pixels voisins (figure II.1). Cela permet de remplir les zones vides dans une image pour la rendre plus nette et plus détaillée.

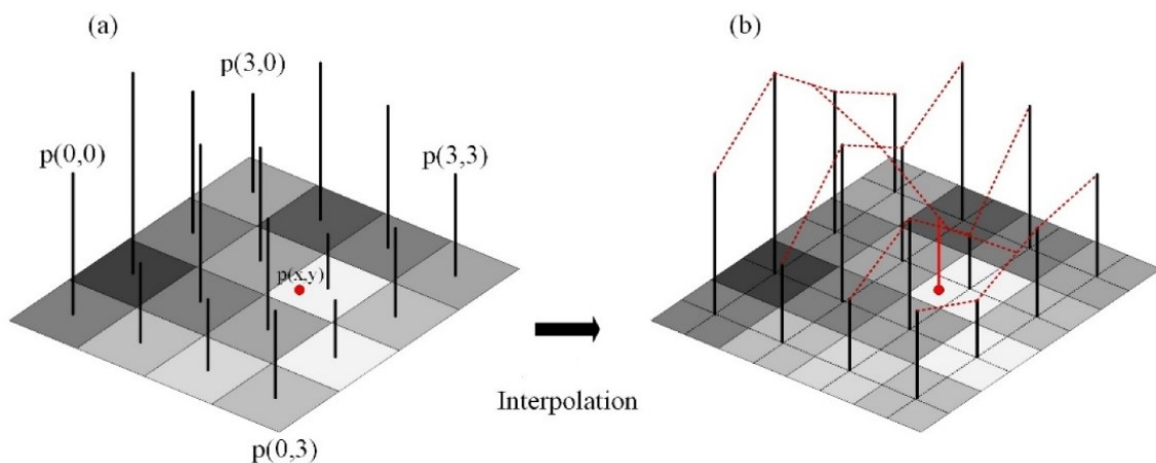


FIGURE II.1 – interpolation d'image par insertion de nouveaux pixels [10]

Les premières techniques étaient simples et basées sur des algorithmes tels que la méthode de bilinéaire et la méthode de Spline.

Au cours des années, des techniques plus avancées ont été mises au point, notamment les approches fondées sur les réseaux de neurones pour l'interpolation en super-

II.3 Interpolation d'image

résolution générative. Toutefois, l'interpolation d'images reste un problème complexe en raison de la nature exigeante du processus et de la nécessité de produire des images de haute qualité à l'aide d'algorithmes performants et optimisés.

Avec le développement de l'intelligence artificielle et du deep learning, les réseaux de neurones ont été largement utilisés pour l'interpolation d'image, ce qui a permis de produire des images de haute qualité avec une précision meilleur. Les avancées actuelles dans l'interpolation d'image sont en train de faire des progrès rapides pour produire des images plus détaillées et plus précises.

L'interpolation d'image est largement utilisée dans les applications de traitement d'image, comme la reconnaissance de formes, l'analyse d'images et la compression d'image.

Il existe plusieurs techniques d'interpolation d'image, on peut citer l'interpolation au plus proche voisin, l'interpolation bilinéaire, l'interpolation bicubique et l'interpolation par spline, qui utilisent différentes méthodes pour estimer les valeurs des pixels manquants.

II.3.1 Interpolation au plus proche voisin :

L'algorithme d'interpolation au plus proche voisin [11–13] est l'algorithme d'interpolation le plus simple où la valeur du niveau de gris de pixel interpolée dans l'image de sortie est déterminée par la valeur du niveau de gris de pixel voisin le plus proche à proximité dans l'image d'entrée, il est autant connu sous le terme de réplique de pixels ou interpolation d'ordre zéro.

La fonction d'interpolation est donnée par :

$$h(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |x| < 0.5 \\ 0, & 0.5 \leq |x| \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

II.3.2 Interpolation bilinéaire :

Comme son appellation le suggère, cette méthode repose sur une interpolation linéaire effectuée dans deux directions successives, initialement dans le sens horizontal,

II.3 Interpolation d'image

puis dans le sens vertical, ou selon l'ordre inverse. L'interpolation bilinéaire [11] utilise la moyenne pondérée des 4 pixels de voisinage pour calculer son pixel interpolé final (figure II.2).

$$h(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & 0 \leq |x| < 1 \\ 0, & 1 \leq |x| \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

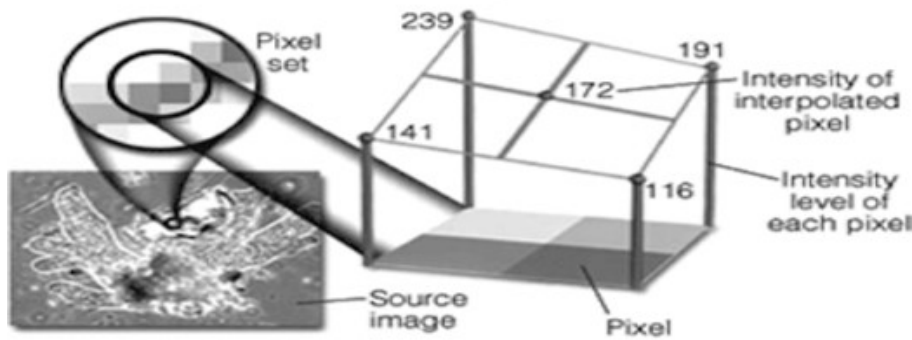


FIGURE II.2 – interpolation bilinaire

II.3.3 Interpolation bicubique :

L'interpolation [6, 9, 11] bicubique est l'interpolation cubique en deux dimensions. L'interpolation bicubique peut être réalisée à l'aide d'un polynôme de Lagrange, de splines cubiques, etc. La formule d'interpolation de splines cubiques du troisième degré constitue une bonne approximation de la fonction sinc idéale. L'interpolation bicubique prend une moyenne pondérée des 16 pixels pour calculer la valeur du niveau de gris du pixel interpolé (figure II.3).

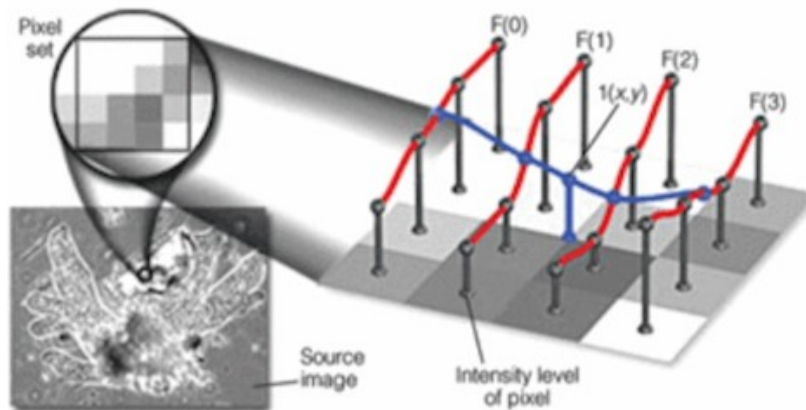


FIGURE II.3 – interpolation bicubique

II.3 Interpolation d'image

La fonction d'interpolation est donnée par :

$$h(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1, & 0 \leq |x| < 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a, & 1 \leq |x| < 2 \\ 0, & 2 \leq |x| \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.3.4 Interpolation par B-spline :

L'interpolation B-spline [14–19] est une méthode d'interpolation polynomiale utilisée pour augmenter la résolution d'une image ou pour remplir des trous dans une image. Elle utilise des fonctions mathématiques appelées B-splines pour interpoler les valeurs manquantes entre les pixels existants dans l'image. L'interpolation B-spline peut être effectuée en plusieurs dimensions, ce qui la rend particulièrement utile pour l'agrandissement d'images en 2D.

Les fonctions B-spline connectent les points de fonctions discrètes pour obtenir des fonctions continues. Tous les éléments de la fonction discrète sont présents dans cette conversion numérique-analogique sous forme de courbe lisse.

$$h(x) = \frac{1}{6} \begin{cases} 3|x|^3 - 6|x|^2 + 4, & 0 \leq |x| < 1 \\ -|x|^3 + 6|x|^2 - 12|x| + 8, & 1 \leq |x| < 2 \\ 0, & 2 \leq |x| \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.3.5 Interpolation par lanczos :

L'interpolation de Lanczos [20–22] est une méthode d'interpolation numérique qui consiste à utiliser une fonction de base à sinusoides pour approximer une fonction donnée. Elle est souvent utilisée pour lisser les données en supprimant les fréquences hautes indésirables tout en préservant les fréquences basses désirables.

L'interpolation de Lanczos est similaire à d'autres méthodes d'interpolation telles que la spline cubique, mais elle se distingue par l'utilisation d'une fonction de base particulière appelée fonction de Lanczos, qui est définie comme un produit de sinus cardinal. La fonction de Lanczos peut être ajustée pour contrôler la quantité de lissage appliquée

II.3 Interpolation d'image

aux données.

La fonction de Lanczos est définie par :

$$l(x) = \begin{cases} \text{sinc}(\pi x) \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{a}\right), & \text{si } -a < x < a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Sachant que : $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ Ce qui est équivalent à :

$$L(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ \frac{a \sin(\pi x) \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{a}\right)}{\pi^2 x^2}, & \text{si } 0 < |x| < a \text{ et } x \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Où a est un entier positif.

II.3.6 Interpolation de Lagrange :

L'interpolation de Lagrange [6, 14–16, 18, 19, 22–24] est une méthode mathématique utilisée pour trouver une fonction qui passe exactement par un ensemble de n points $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})$, l'équation d'interpolation de Lagrange est donnée par :

$$L(x) = \sum_{i=0}^{n-1} (y_i l_i(x)) \quad (\text{II.7})$$

Où $L(x)$ est le polynôme d'interpolation de Lagrange, y_i est la coordonnée y du point i , et $l_i(x)$ est le polynôme de Lagrange correspondant au point i , qui est défini par :

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^{n-1} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \quad (\text{II.8})$$

L'équation d'interpolation de Lagrange de degré 4 et 5 est défini successivement par :

$$\text{Lagra}_{h_4(x)} = \begin{cases} \frac{1}{2}|x|^3 - |x|^2 - \frac{1}{2}|x| + 1, & \text{si } 0 \leq |x| < 1 \\ -\frac{1}{6}|x|^3 + |x|^2 - \frac{11}{6} + 1, & \text{si } 1 \leq |x| < 2 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$Lagra_{h_s(x)} = \begin{cases} \frac{1}{4}|x|^4 - \frac{5}{4}|x|^2 + 1, & \text{si } 0 \leq |x| < \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{6}|x|^4 + \frac{5}{6}|x|^3 - \frac{5}{6}|x|^2 - \frac{5}{6}|x|, & \text{si } \frac{1}{2} \leq |x| < \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{24}|x|^4 + \frac{5}{12}|x|^3 - \frac{35}{24}|x|^2 - \frac{25}{12}|x| + 1, & \text{si } \frac{3}{2} \leq |x| < \frac{5}{2} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

L'interpolation d'image par Lagrange constitue une méthode permettant d'estimer les valeurs des pixels manquants dans une image numérique. Cette approche vise à générer une fonction polynomiale qui passe par un ensemble prédéfini de points, en l'occurrence, les pixels de l'image.

L'interpolation de Lagrange consiste spécifiquement à déterminer un polynôme de degré $n - 1$, où n représente le nombre de points connus, qui passe précisément par ces derniers. Ce polynôme peut par la suite être utilisé pour estimer les valeurs des pixels absents.

La méthode de Lagrange implique d'exprimer la fonction polynomiale sous forme de somme pondérée de polynômes de base, chacun de degré $n - 1$, qui sont construits pour passer par un seul point. La fonction polynomiale résultante est alors obtenue en additionnant les polynômes de base pondérés.

Cette technique d'interpolation peut être appliquée pour combler les valeurs manquantes dans une image ou pour améliorer sa résolution en insérant des pixels supplémentaires entre les pixels déjà présents.

Le modèle mathématique de l'interpolation d'image par Lagrange peut être exprimé comme suit :

Soit $P(x, y)$ une image à interpoler avec des pixels d'entrée $P(x_i, y_j)$ pour $i = 1, 2, \dots, m$ et $j = 1, 2, \dots, n$, où m et n sont les dimensions de l'image d'entrée.

On peut alors utiliser l'équation d'interpolation de Lagrange bivariable pour estimer la valeur $P(x, y)$ à un point (x, y) arbitraire entre les pixels d'entrée, qui est donnée par :

II.3 Interpolation d'image

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P(x_i, y_j) L_i(x) L_j(y) \quad (\text{II.11})$$

où $L_i(x)$ et $L_j(y)$ sont les polynômes de base de Lagrange définis comme suit :

$$L_i(x) = \prod_{k=0; 1; \dots; m, k \neq i} \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)} \quad (\text{II.12})$$

$$L_j(y) = \prod_{l=0; 1; \dots; n, l \neq j} \frac{(y - y_l)}{(y_j - y_l)} \quad (\text{II.13})$$

La formule ci-dessus indique que pour estimer la valeur de $P(x, y)$, on multiplie chaque pixel d'entrée $P(x_i, y_j)$ par les polynômes de base de Lagrange $L_i(x)$ et $L_j(y)$, puis on les ajoute ensemble pour obtenir la valeur interpolée.

II.3.7 Interpolation de Newton

La formule suivante décrit la forme alternative du polynôme d'interpolation de Newton [6, 14–16, 18, 19, 22] qui est plus pratique que le polynôme de Lagrange :

$$p(x) = y_0 + [x_0 x_1](x - x_0) + [x_0 x_1 x_2](x - x_0)(x - x_1) + \dots + [x_0 x_1 \dots x_n](x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}) \quad (\text{II.14})$$

Où les expressions entre crochets correspondent aux différences divisées telles que :

Ordre 1 :

$$[x_i x_{i+1}] = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{p_{i+1,0} - p_{i,0}}{x_{i+1} - x_i} = p_{i,1} \quad (\text{II.15})$$

Ordre 2 :

$$[x_i x_{i+1} x_{i+2}] = \frac{[x_{i+1} x_{i+2}] - [x_i x_{i+1}]}{x_{i+2} - x_i} = \frac{p_{i+1,1} - p_{i,1}}{x_{i+2} - x_i} = p_{i,2} \quad (\text{II.16})$$

Ordre 3 :

$$[x_i x_{i+1} x_{i+n}] = \frac{[x_{i+1} x_{i+n}] - [x_i \dots x_{i+n-1}]}{x_{i+n} - x_i} = \frac{p_{i+1,n-1} - p_{i,n-1}}{x_{i+n} - x_i} = p_{i,n} \quad (\text{II.17})$$

II.3 Interpolation d'image

D'une manière générale, on peut écrire la différence divisée d'ordre k au point x_i de la manière suivante :

$$P_{ik} = \frac{p_{i+1,k-1} - p_{i,k-1}}{x_{i+k} - x_i} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} k = 1, 2, \dots, n \\ i = 0, 1, \dots, n - k \\ p_{i0} = y_i \forall i = 0 : n \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Le polynôme de Newton peut ainsi être exprimé sous la forme suivante :

$$p(x) = y_0 + \sum_{k=1}^n p_{0k} \prod_{j=0}^{k-1} (x - x_j) \quad (\text{II.19})$$

L'interpolation de Newton peut être utilisée pour agrandir une image en augmentant le nombre de pixels dans chaque direction. Le modèle mathématique pour agrandir une image par l'interpolation de Newton est le suivant :

Soit $I(x, y)$ l'image d'origine avec une résolution de $M \times N$, et $I'(x', y')$ l'image agrandie avec une résolution de $M' \times N'$. La méthode d'interpolation de Newton utilise les points voisins de chaque pixel d'origine pour estimer les valeurs des nouveaux pixels agrandis.

Pour un nouveau pixel agrandi $I'(x', y')$ la formule d'interpolation de Newton s'écrit comme suit :

$$I'(x', y') = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j) L_i(x', y') \quad (\text{II.20})$$

Où les sommes sont prises sur les indices i et j de tous les pixels voisins de $I'(x', y')$, et $L_i(x', y')$ sont les polynômes d'interpolation de Newton pour les coordonnées :

II.3.8 Interpolation par la transformée de Fourier :

La transformée de Fourier [8, 25, 26] est un outil mathématique fréquemment utilisé en traitement de signal et en physique. Elle transforme une représentation spatiale d'un signal en une représentation fréquentielle, elle nous renseigne aussi sur de l'aspect fréquentiel du signal à étudier.

II.3 Interpolation d'image

La formule suivante est utilisée pour décrire une fonction $f(t)$ qui peut être intégrée à une seule variable :

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II.21})$$

La transformation de Fourier inverse est donnée par :

$$\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}(\nu)\} = f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}(\nu)e^{j\nu t} d\nu \quad (\text{II.22})$$

L'interpolation d'image par la transformée de Fourier est une méthode d'interpolation qui utilise la transformation de Fourier pour interpoler les pixels manquants dans une image. Cette technique est basée sur le fait que la transformation de Fourier d'une image est une représentation fréquentielle de l'image qui peut être utilisée pour estimer les fréquences manquantes.

La méthode d'interpolation en utilisant transformée de Fourier consiste à effectuer les étapes suivantes :

1. Calculer la transformation de Fourier de l'image initiale.
2. Tronquer la transformation de Fourier pour enlever les hautes fréquences, ce qui permet de réduire l'effet d'aliasing et de rendre l'interpolation plus précise.
3. Effectuer la transformation inverse de Fourier pour obtenir une image interpolée.

La formule mathématique pour l'interpolation d'image par transformée de Fourier est la suivante :

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{T(\mathcal{F}(f(x, y))h(x, y))\} \quad (\text{II.23})$$

Où $f(x, y)$ est l'image originale, \mathcal{F} est la transformation de Fourier, \mathcal{F}^{-1} est la transformation inverse de Fourier, T est le filtre de troncature des hautes fréquences, et $h(x, y)$ est la fonction de fenêtrage pour éviter les effets de bord.

Il existe plusieurs fonctions de fenêtrage couramment utilisées pour l'interpolation d'image par transformée de Fourier, notamment :

II.3.8.1 Fenêtre de Hamming :

Cette fonction de fenêtrage est utilisée pour réduire les effets de bord dans l'image. Elle est définie par la formule suivante [27, 28] :

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/N) \quad (\text{II.24})$$

II.3 Interpolation d'image

Où N est la taille de la fenêtre et n est un indice allant de 0 à $N - 1$.

II.3.8.2 Fenêtre de Hann :

Cette fonction de fenêtrage est similaire à la fenêtre de Hamming, mais elle a une réponse impulsionnelle plus lisse. Elle est définie par la formule suivante [27–29] :

$$w(n) = 0.5(1 - \cos(2\pi n/N)) \quad (\text{II.25})$$

II.3.8.3 Fenêtre de Blackman :

Cette fonction de fenêtrage est utilisée pour réduire les effets de bord et la distorsion spectrale. Elle est définie par la formule suivante [27–29] :

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos(2\pi n/N) + 0.08 \cos(4\pi n/N) \quad (\text{II.26})$$

II.3.8.4 Fenêtre de Kaiser :

Cette fonction de fenêtrage est employée pour atténuer les effets de repliement spectral et réguler la largeur de la bande passante du filtre. Elle est définie par l'expression suivante [27, 30] :

$$w(n) = \frac{i_0 \left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{n - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \right)^2} \right)}{I_0 \beta} \quad (\text{II.27})$$

Où I_0 est la fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro et β est un paramètre de forme qui contrôle la largeur de la fenêtre.

Ces fonctions de fenêtrage sont conçues pour atténuer les effets de bord de l'image et pour minimiser la distorsion spectrale lors de l'interpolation. Le choix de la fonction de fenêtrage dépend de la qualité et des caractéristiques de l'image originale, ainsi que de l'application visée.

II.3.9 Interpolation par Ondelettes :

Les ondelettes [31–34] proviennent de ce que l'on désigne sous le terme d'onde mère (mother wave). Il est possible de représenter tout signal 2L en utilisant une base d'onde-

II.3 Interpolation d'image

lettes, lesquelles sont essentiellement des versions dilatées et translatées de l'onde mère.

Une base d'ondelettes permet de représenter un signal continu $x(t)$ de la manière suivante :

$$x(t) = \sum W(a, b) \Psi_{a,b}(t) \quad (\text{II.28})$$

La contribution de l'ondelette $\Psi(a, b)$ associée à l'onde mère est pondérée par $W(a, b)$ qui représente son poids :

$$\Psi(t) = \frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.29})$$

L'échelle est représentée par a et la translation par b . La pondération de chaque ondelette est alors donnée par l'expression suivante :

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (\text{II.30})$$

Les ondelettes doivent appartenir à l'espace L^2 ce qui signifie qu'elles sont intégrables au carré, et répondre à la condition d'admissibilité suivante :

$$\Psi(\omega)|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) e^{-j\omega t} dt|_{\omega=0} \quad (\text{II.31})$$

Cette condition est nécessaire pour garantir la reconstruction du signal d'origine $x(t)$ à partir de la transformée inverse d'ondelettes.

L'interpolation d'image par ondelettes est une méthode qui exploite la transformation en ondelettes pour améliorer la résolution d'une image. Elle est fréquemment utilisée pour rehausser la qualité des images à faible résolution en reconstruisant les hautes fréquences spatiales manquantes.

L'approche par ondelette consiste à décomposer l'image originale en plusieurs niveaux de résolution, en utilisant une transformation en ondelettes. Cette décomposition produit une série de coefficients d'ondelettes qui contiennent des informations sur les fréquences spatiales de l'image. Ensuite, les coefficients d'ondelettes peuvent être interpolés pour augmenter la résolution de l'image en introduisant des techniques d'interpolation telles que l'interpolation linéaire ou l'interpolation par Spline. Enfin, une transformation inverse en ondelettes est utilisée pour reconstruire l'image à une résolution plus élevée.

II.3 Interpolation d'image

La méthode d'interpolation utilisée pour les coefficients d'ondelettes détermine la formule mathématique pour l'interpolation d'image par ondelette. De manière générale, l'interpolation par ondelette consiste à appliquer une technique d'interpolation aux coefficients d'ondelettes pour reconstruire les hautes fréquences spatiales de l'image. Une fois les coefficients d'ondelettes interpolés, une transformation inverse en ondelettes est appliquée pour obtenir l'image interpolée.

Soit $f(x, y)$ l'image originale de taille $M \times N$. La décomposition en ondelettes de $f(x, y)$ produit une série de coefficients d'ondelettes $a(j, k)$ de taille $M/2^j \times N/2^j$ pour chaque niveau de résolution j et chaque position k .

II.3.9.1 Interpolation des coefficients d'ondelettes :

Les coefficients d'ondelettes peuvent être interpolés en utilisant une méthode d'interpolation, telle que l'interpolation linéaire. Par exemple, l'interpolation linéaire des coefficients d'ondelettes $a(j, k)$ pour obtenir les coefficients d'ondelettes interpolés $b(j, k)$ peut être exprimée comme suit :

$$b(j, k) = a(j, k) + \frac{1}{2} (a(j+1, 2k) + a(j+1, 2k+1)) \quad (\text{II.32})$$

II.3.9.2 Reconstruction de l'image interpolée :

Une fois les coefficients d'ondelettes interpolés, la transformation inverse en ondelettes peut être utilisée pour reconstruire l'image interpolée $f'(x, y)$:

$$f'(x, y) = \sum \sum b(j, k) \Psi(j, k; x, y) \quad (\text{II.33})$$

où $\Psi(j, k; x, y)$ est la fonction d'ondelette correspondant aux coefficients d'ondelettes $b(j, k)$ et représente une ondelette de résolution j et de position k .

La méthode d'interpolation utilisée pour les coefficients d'ondelettes, ainsi que les fonctions d'ondelettes spécifiques utilisées pour la décomposition et la reconstruction d'images, peuvent influencer l'adaptation de cette formule mathématique générale.

II.4 Montage expérimental

Une source lumineuse laser He-Ne d'une longueur d'onde de $632,8nm$ émet un faisceau qui passe d'abord à travers un filtre spatial et un système de collimation. Ce faisceau arrive ensuite sur un cube séparateur (BSC) qui divise la lumière en deux : une partie traverse directement une cellule en quartz de $1 \times 1 \times 5cm^3$ remplie d'eau contenant des microparticules, tandis que l'autre partie est dirigée vers les miroirs ($M1, M2, M3$) permettant d'observer la scène sous un angle différent (dans notre cas 90°). Après interaction avec les particules dans la cellule, les faisceaux issus des différentes directions (vue directe et vue orthogonale) sont transmis vers une caméra CCD Sony de 960×1280 pixels, qui enregistrent les motifs lumineux générés. La taille de pixel du capteur est de $4.65 \times 4.65\mu m^2$. La distance d'enregistrement est de ($54cm$).

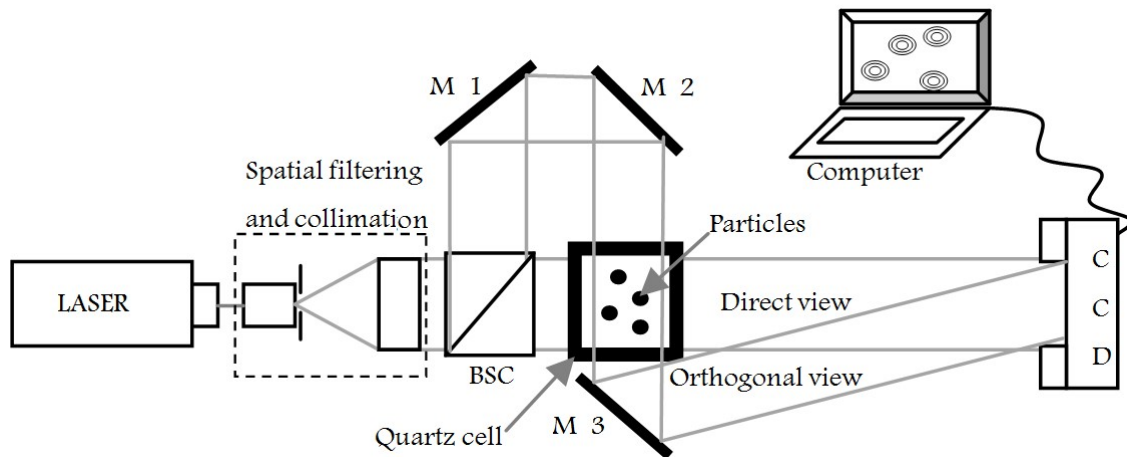


FIGURE II.4 – Montage d'enregistrement basé sur la configuration hors axe à deux vues et deux faisceaux.

Ces images sont finalement envoyées à un ordinateur pour un post traitement. Les hologrammes enregistrés sont reconstruits numériquement par la transformée de Fresnel.

II.5 Comparaison des méthodes d'interpolation et évaluation de la qualité des images interpolées

II.5.1 Mesure de SNR, PSNR, MSE & SSIM :

Le SNR (rapport signal sur bruit) [24, 35, 36] représente le rapport entre la puissance moyenne d'un signal et la puissance du bruit de fond présent, tandis que le PSNR (rapport signal sur bruit de pic) est le rapport entre la puissance maximale possible d'un signal et celle du bruit. Le SNR et le PSNR sont généralement exprimés sur une échelle logarithmique en décibels et peuvent être formulés de la manière suivante :

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_j \sum_j a_{i,j}^2}{\sum_i \sum_j (a_{i,j} - b_{i,j})^2} \quad (II.34)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255}{MSE} \quad (II.35)$$

Le PSNR permet d'évaluer la qualité de l'agrandissement d'une image ; plus la valeur du PSNR est élevée, meilleure est la qualité de l'image.

Le MSE [35–37], ou erreur quadratique moyenne, représente l'écart quadratique moyen entre l'image d'origine et l'image interpolée. La formule suivante peut être utilisée pour calculer le MSE :

$$MSE = \frac{\sum_i \sum_j (a_{i,j} - b_{i,j})^2}{m, n} \quad (II.36)$$

Où m et n sont respectivement les nombres de lignes et de colonnes. $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$ désignent respectivement l'image d'origine et l'image interpolée. Lorsque les deux images sont identiques, la MSE sera nulle.

SSIM [36, 37] signifie la similarité structurelle, elle est considérée comme une mesure de qualité. La SSIM est une nouvelle approche pour calculer la similarité entre deux images, tandis que la première est considérée comme une image comparée, et la seconde est considérée comme une image d'excellente qualité. Il peut donner des résultats entre 0 et 1, où 1 signifie une qualité parfaite et 0 signifie une mauvaise qualité. La valeur SSIM est définie comme suit :

$$SSIM(a, b) = \left[\frac{2\mu_b\mu_a + C_1}{\mu_a^2 + \mu_b^2 + C_1} \right] \cdot \left[\frac{2\sigma_b\sigma_a + C_2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + C_2} \right] \cdot \left[\frac{\sigma_b\sigma_a + C_3}{\sigma_b\sigma_a + C_3} \right] \quad (II.37)$$

II.6 Résultats et discussion

Ou b est l'image agrandie et a est l'image originale; μ et σ^2 sont la valeur moyenne et la variance pour les images a ou b , et σ_{ba} est la variance croisée entre les image b et a . C_1, C_2, C_3 sont des constantes; et généralement $C_1 = C_2, C_3 = 1$

Pour évaluer la qualité des images interpolées, les mesures SNR, PSNR, MSE et SSIM (II.34), (II.35), (II.36) et (II.3) respectivement) ont été calculées pour comparer les techniques d'interpolation.

II.5.2 Temps du traitement

Le temps de traitement désigne la durée nécessaire à la méthode d'interpolation pour traiter une image. Il est crucial d'évaluer la vitesse de calcul ainsi que la complexité de la méthode utilisée.

II.6 Résultats et discussion

Pour évaluer les performances de diverses fonctions d'interpolation, elles sont implémentées dans MATLAB sur un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5-4258U 2,40 GHz, 4,0 Go de RAM. Pour comparer les performances des différents algorithmes, une image holographique numérique des particules est prise (Figure II.5a). Cette image est réduite de moitié par interpolation bicubic (Figure II.5b). Cette image de taille réduite est ensuite agrandie égale à sa taille d'origine en utilisant différentes fonctions d'interpolation (figure II.5c, II.5d, II.5e, II.5f, II.5g, II.5h, II.5i, II.5j, II.5k). Le rapport signal sur bruit (SNR), le signal sur bruit maximal (PSNR), l'erreur quadratique moyenne (MSE), l'indice de similarité structurelle (SSIM) de ces images sont calculés par rapport à l'image d'origine et représentés graphiquement (figure II.6, figure II.7 et figure II.8) successivement. Le temps de traitement est tabulé dans (table II.1) et représenté graphiquement (Figure II.9).

II.6.1 Qualité visuelle

D'après la figure II.5, l'image de particule traitée par la méthode du plus proche voisin donne un aspect visuel mauvais par rapport aux autres méthodes. Cela est dû à la faible interaction avec les pixels proches, lors du calcul du pixel cible. Cela provoque

l'apparition de créneaux, d'escaliers et d'une luminosité non uniforme. Bilinéaire, Bicubic et Lanczos3 ont presque les mêmes performances en termes d'apparence visuelle. De même, les images produites par Spline, Newton et Fourier sont également presque identiques. Cependant, toutes ces méthodes ont de meilleures performances que celles du plus proche voisin. Parmi les résultats obtenus pour les techniques Lagrange et wavelet ont un aspect visuel comparativement mauvais par rapport au Spline, Newton et Fourier.

II.6.2 Qualité métrique

La figure II.6 montre que le PSNR est plus élevé pour la méthode Lanczos3, Bicubic puis Bilinéaire (51,51dB, 50,22 dB et 45,52 dB respectivement) Au contraire, Wavelet, Lagrange et Fourier donnent la valeur la plus faible de PSNR (respectivement 16.59 dB, 16.86 dB, 27.83 dB) Cependant, d'après la figure II.7, le MSE est minimum pour la méthode Lanczos3, Bicubic puis Bilinéaire (respectivement 30320.79, 40830.44 et 120420.13). Au contraire, Lagrange, Wavelet et Fourier donnent la valeur de MSE la plus élevée (5156745.34, 4043070.57 et 324668.73). On peut observer que la mesure SSIM (figure II.8) a une bonne corrélation avec la mesure PSNR; on constate que le meilleur SSIM est obtenu si Lanczos3, Bicubic et Bilinéaire sont utilisés. D'après le résultat de la figure II.9, la méthode au plus proche voisin est la méthode la plus lente, prenant plus de 0.040373 secondes pour traiter une image. Le deuxième plus lent est Bilinéaire, qui prend environ 0.034984 secondes. Wavelet est la méthode la plus rapide avec les techniques d'interpolation Newton et Lanczos3 prenant respectivement 0.018560 s, 0.019680 s et 0.020146 s.

II.6 Résultats et discussion

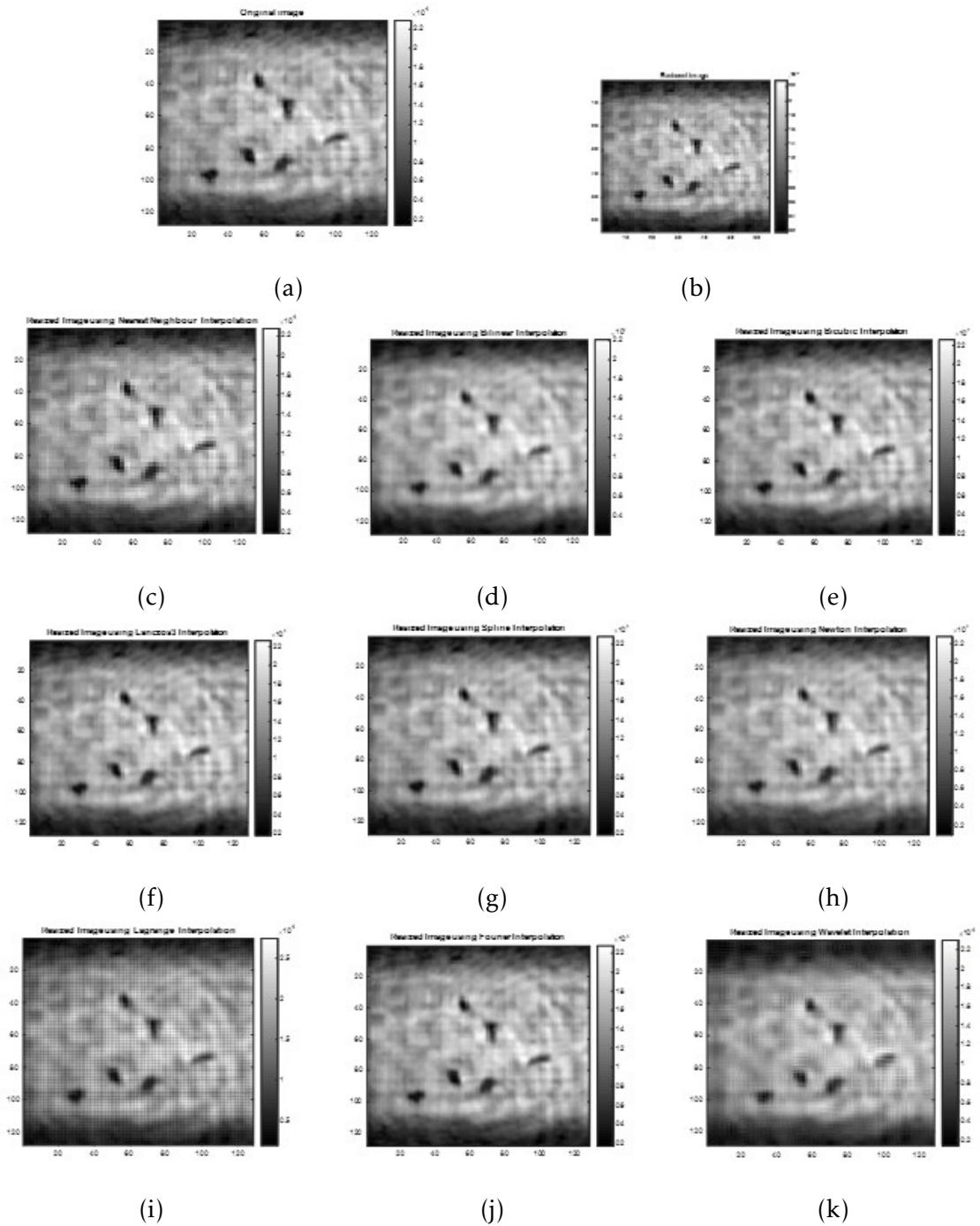


FIGURE II.5 – Agrandissement d'hologramme digitale par différentes techniques d'interpolation, (a) hologramme digitale, (b) hologramme digitale réduit à sa moitié, (c) interpolation au plus proche voisin, (d) interpolation Bilinéaire, (e) interpolation Bicubique, (f) interpolation Lanczos, (g) interpolation Spline, (h) interpolation de Newton, (i) interpolation de Lagrange, (j) interpolation de Fourier, (k) interpolation ondelette.

II.6 Résultats et discussion

TABLE II.1 – Comparaison de temps de traitement des méthodes d'interpolation

<i>Méthode d'interpolation</i>	<i>Temps d'exécution (second)</i>
Interpolation au plus proche voisin	0.040373 seconds
Interpolation Bilinéaire	0.034984 seconds
Interpolation Bicubique	0.020712 seconds
Interpolation Spline	0.020146 seconds
Interpolation Lanczos 3	0.020649 seconds
Interpolation de Newton	0.019680 seconds
Interpolation de Lagrange	0.022032 seconds
Interpolation de Fourier	0.021816 seconds
Interpolation ondelette	0.018560 seconds

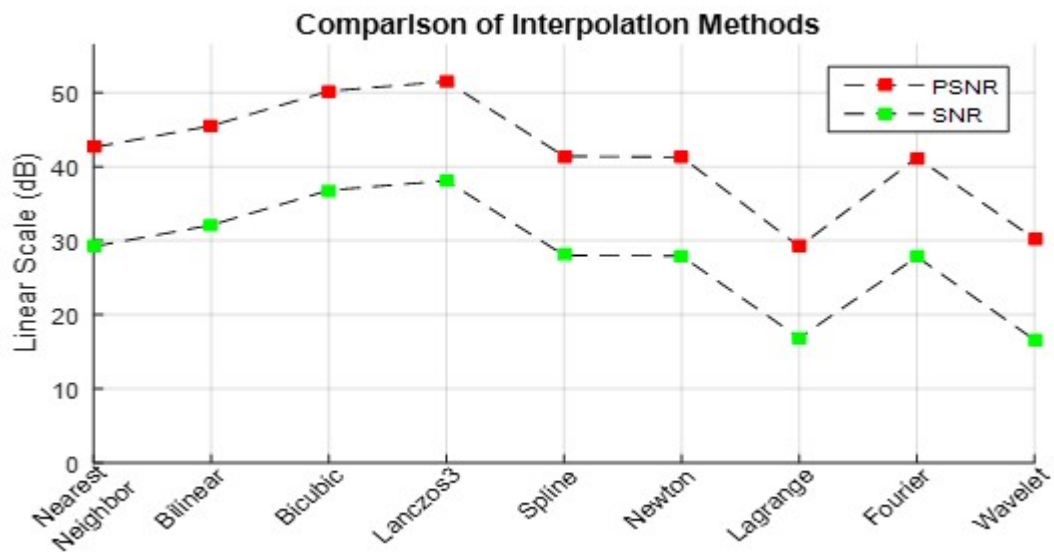


FIGURE II.6 – Valeur de SNR et PSNR de l'hologramme de particules agrandies par différentes méthodes d'interpolation.

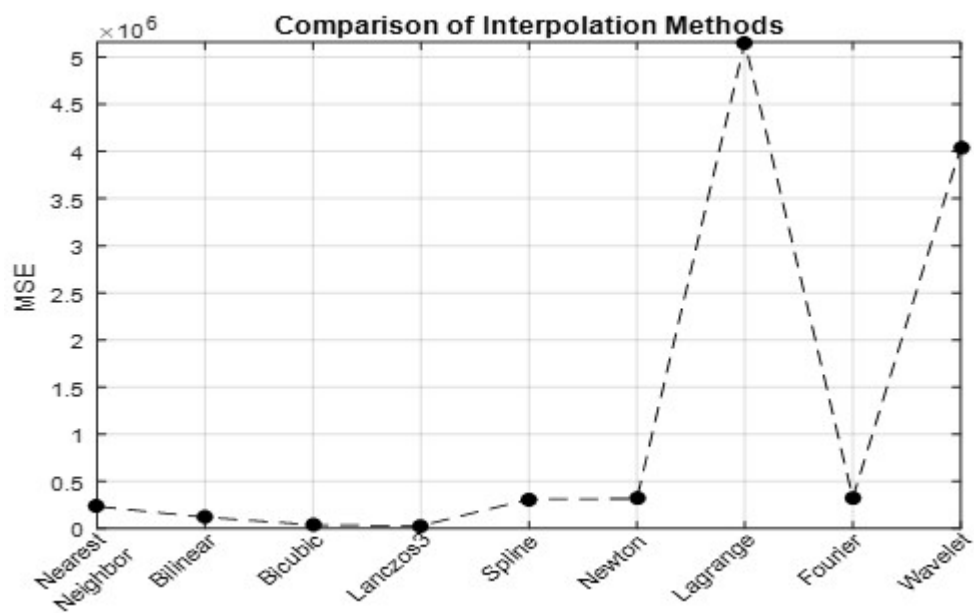


FIGURE II.7 – Valeur de MSE de l’hogramme de particules agrandies par différentes méthodes d’interpolation.

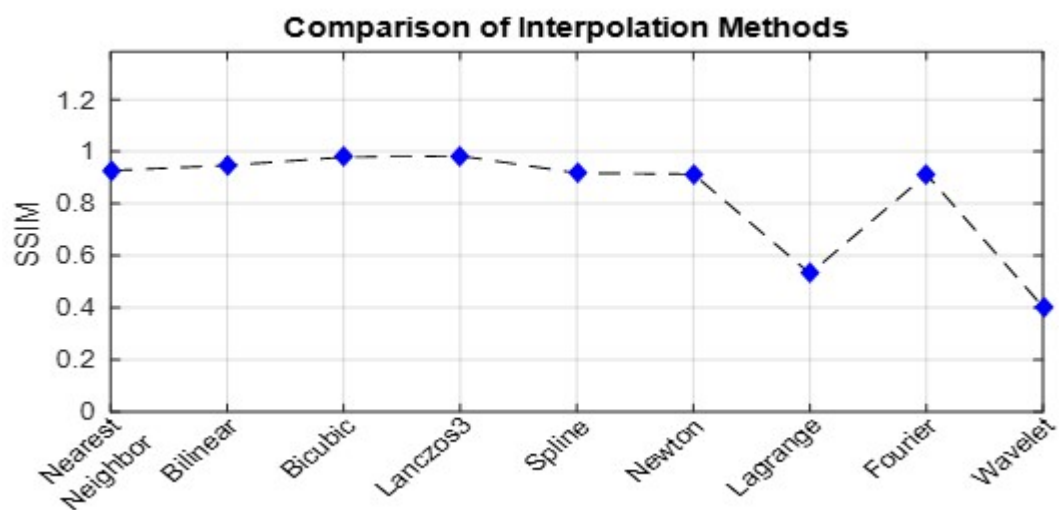


FIGURE II.8 – Valeur de SSIM de l’hogramme de particules agrandies par différentes méthodes d’interpolation.

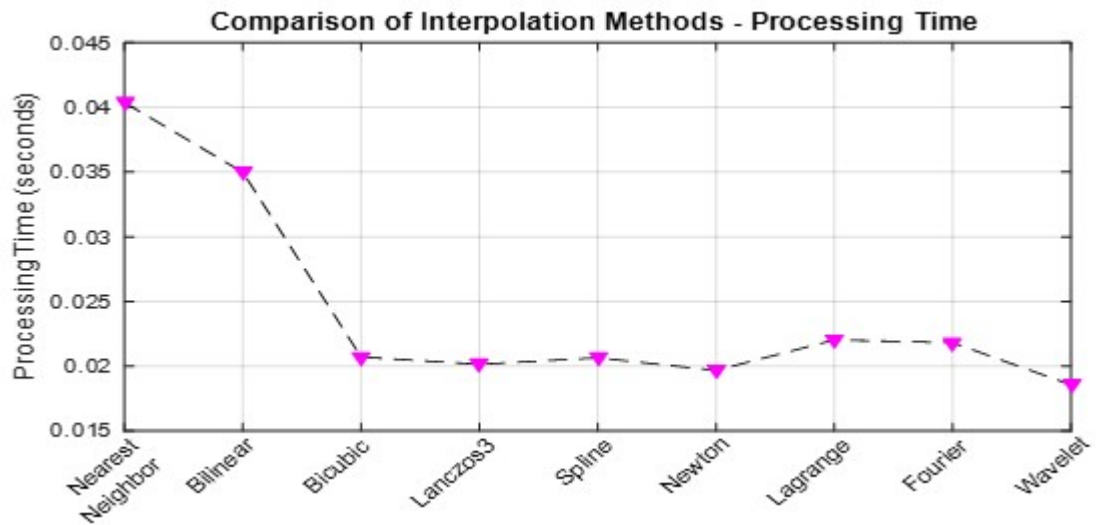


FIGURE II.9 – Comparaison de temps de calcul des méthodes d'interpolation

D'après les résultats on peut dire que :

- L'interpolation au plus proche voisin est facile à implémenter, mais elle peut entraîner une perte de qualité et des artefacts visuels.

- L'interpolation bilinéaire utilise une interpolation linéaire pour estimer les valeurs des nouveaux pixels agrandis en utilisant les valeurs des pixels voisins de l'image originale. Elle est donc plus précise que l'interpolation au plus proche voisin.

- L'image obtenue par interpolation bicubique est légèrement plus nette que celle produite par l'interpolation bilinéaire et elle n'a pas l'aspect décousu produit par l'interpolation au plus proche voisin.

- L'avantage de l'interpolation Spline par rapport à d'autres méthodes d'interpolation, comme l'interpolation bilinéaire ou bicubique, est qu'elle peut produire des images plus lisses et de meilleure qualité.

- L'interpolation de Lanczos est fréquemment employée pour améliorer la qualité de l'image en minimisant les artefacts et en augmentant la résolution.

- L'interpolation de Lagrange peut également engendrer des artefacts dans l'image

II.7 Conclusion

finale, surtout lorsque le nombre de pixels utilisés est insuffisant pour représenter de manière adéquate la variation de la fonction d'origine.

- L'interpolation d'image par Newton est une méthode efficace pour agrandir ou réduire une image en utilisant l'interpolation polynomiale pour estimer les valeurs des pixels manquants.

La transformée de Fourier constitue une méthode efficace pour l'interpolation d'images, car elle permet de limiter l'aliasing ainsi que la perte de détails, tout en préservant la qualité globale de l'image. Elle offre également un traitement plus approprié des hautes fréquences spatiales que la transformée en ondelettes, ce qui peut conduire à une meilleure qualité d'image.

II.7 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur l'agrandissement d'images holographiques numériques par différentes techniques d'interpolation dans le but d'améliorer la résolution de ces images. La qualité de l'image agrandie dépend du type de la technique d'interpolation utilisée dans le processus d'agrandissement. Ces techniques sont ensuite évaluées et discutées. Chaque technique d'interpolation présente ses propres avantages et inconvénients. Dans cette étude, les résultats des algorithmes ont montré que les méthodes Lanczos3, Bicubic, et Bilinéaire ont la valeur la plus faible de MSE et la valeur la plus élevée de PSNR et SSIM et ce qui les rend appropriées pour le grossissement des images holographiques numériques 3D et super résolution.

RÉFÉRENCES

- [1] U Schnars and W Jueptner, Digital holography : Digital Hologramrecording, Numerical reconstruction and Rellation Techniques. Springer-Verlag Belin Heidelberg, 2005.
- [2] J. Davis, Interpolation and approximation. General Publishing Com-pany, Ltd., 30 Lesmill Road, Don Mills, Toronto, Ontario.Canada, 1975.
- [3] L. A. Sakhnovich, Interpolation Theory and Its Applications Mathematics and Its Applications. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. Sold, 1997.
- [4] E. Süli and D. F. Mayers, An Introduction to numericalanalysis. Cambridge UniversityPress, 2003.
- [5] G. Mastroianni and G. V.Milovanović, Interpolation Processes : Basic Theory and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] J. F. EPPERSON, AN INTRODUCTION TO NUMERICAL METHODS AND ANALYSIS, Second Edi. John Wiley& Sons, 2013.
- [7] W. K. Pratt, PROCESSING DIGITAL IMAGE PROCESSING, Third Edit. John Wiley& Sons, 2001.
- [8] Bernd. Jähne, Digital image processing. Springer, 2005.
- [9] R. C. . Gonzalez and R. E. . Woods, Digital image processing. Pearson, 2018.

RÉFÉRENCES

- [10] Y. Zhang and W. Yu, 'Comparison of DEM Super-Resolution Methods Based on Interpolation and Neural Networks', *Sensors*, vol. 22, no. 3, Feb. 2022, doi : 10.3390/s22030745.
- [11] K. Bredies and D. Lorenz, *Mathematical Image Processing*. Springer Nature Switzerland AG, 2018.
- [12] M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle, *Image Processing ,Analysis , and Machine Vision*, Fourth Edi. Cengage Learning 200 First Stamford Place, 4th Floor Stamford, CT 06902 USA, 2008.
- [13] S. A. Nene and S. K. Nayar, 'A Simple Algorithm for NearestNeighborSearch in High Dimensions', vol. 19, no. 9, pp. 989–1003, 1997.
- [14] R. L. Burden and J. D. Faires, *NumericalAnalysis*, NINTH EDIT. Brooks/Cole, CengageLearning ,USA, 2011.
- [15] A. Quarteroni, R. Sacco, and F. Saleri, *Méthodes Numériques Algorithmes, analyse et applications*. Springer-Verlag Italia, Milano, 2007.
- [16] S. C. Chapra, *AppliedNumerical Methods with MATLAB® for Engineers and Scientists*, Third Edit. McGraw-Hill Companies,New York, 2008.
- [17] G. M. Phillips, *Interpolation and Approximation by Polynomials*. Springer-Verlag New York, Inc, 2003.
- [18] P. O. J. Scherer, *ComputationalPhysics Simulation of Classical and Quantum Systems*Third Edition. 2017. [Online]. Available : [http ://www.springer.com/series/8431](http://www.springer.com/series/8431)
- [19] P. R. Turner, T. Arildsen, and K. Kavanagh, *Applied Scientific ComputingWith Python*. 2018. [Online]. Available : [http ://www.springer.com/series/3191](http://www.springer.com/series/3191)
- [20] E. J. Grimme and D. C. Sorensen, 'On Behaviors, Rational Interpolation, and the LanczosAlgorithm', *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 29, no. 1, pp. 3957–3962, 1996, doi : 10.1016/S1474-6670(17)58298-1.
- [21] Z. Ye, J. Suri, Y. Sun, and R. Janer, 'Four Image Interpolation Techniques for UltrasoundBreast Phantom Data AcquiredUsing Fischer ' s Full Field Digital Mammography and Ultrasound System (FFD MUS) : A Comparative Approach', *IEEE*, pp. 0–3, 2005.
- [22] P. J. . Davis, *Interpolation and approximation*. Dover Publications, 2014.

RÉFÉRENCES

- [23] G. Celant and M. Broniatowski, Interpolation and Extrapolation Optimal Designs 1 : Polynomial Regression and Approximation Theory. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [24] ANIL K. JAIN, Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice Hall, 1989.
- [25] M. Stéphane, A Wavelet Tour of Signal Processing, Third Edit. Academic Press, 2009. doi : 10.1016/B978-0-12-374370-1/00006-9.
- [26] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, Seconedit. McGraw-Hill, New York, 1996.
- [27] S. M. Kuo, B. H. Lee, and W. Tian, Real-Time Digital Signal Processing Implementations and Applications Second Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [28] Steven W. Smith, Digital Signal Processing Second Edition. California Technical Pub., 1977. [Online]. Available : www.DSPguide.com
- [29] C. S. Lessard, 'Signal processing of random physiological signals', Synthesis Lectures on Biomedical Engineering, vol. 1, pp. 1–232, Dec. 2005, doi : 10.2200/S00012ED1V01Y200602BME001.
- [30] V. K. Madisetti, The Digital Signal Processing Handbook SECOND EDITION Digital Signal Processing Fundamentals. CRC Press, 2017.
- [31] M. Mehra, Wavelets Theory and Its Applications A First Course. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018.
- [32] M. Stéphane, A Wavelet Tour of Signal Processing, Third Edit. Academic Press, 2009. doi : 10.1016/B978-0-12-374370-1/00011-2.
- [33] H. CHRISTOPHER E and W. DAVID F, 'Continuous and discrete wavelet transforms', Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 31, no. 4, pp. 628–666, 1989.
- [34] G. Mallat, A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation, Vol. II; no. 7, 1989.
- [35] D. Salomon, Data Compression : The Complete reference. 2007.
- [36] J. Richard. Duro and L. Fernando. Pena, Digital image and signal processing for measurement systems. River Publishers, 2022.
- [37] J. D. van Ouwierkerk, 'Image super-resolution survey', Oct. 01, 2006, Elsevier Ltd. doi : 10.1016/j.imavis.2006.02.026.

CHAPITRE

III

APPLICATION DE LA RÉDUCTION D'OUVERTURE EN HOLOGRAPHIE DIGITALE POUR LA DÉTECTION DE POSITION DE PARTICULES

III.1 Introduction

L'holographie digitale [1–3] est une technique d'imagerie 3D capable de fournir des informations quantitatives sur l'amplitude et la phase. De nombreuses améliorations ont été apportées ces dernières années, que ce soit au niveau des arrangements optiques ou des algorithmes de traitement numérique des images, afin de rendre l'holographie numérique un instrument d'imagerie à haut débit capable d'offrir un outil de diagnostic pour des applications dans divers domaines scientifiques, y compris le suivi des particules dans le flux [4–7], biomédicale [8–11] et la cytométrie [12–14]

L'holographie numérique appliquée à l'étude des particules de type traceur dans un écoulement [1, 4–7] est devenue une technique bien établie en raison de sa capacité à enregistrer l'information tridimensionnelle à partir d'un seul hologramme et de sa profondeur de champ intrinsèquement étendue. Cette grande profondeur de champ, bien qu'avantageuse pour l'imagerie volumique, engendre toutefois un problème analytique majeur lors de la reconstruction numérique : la réponse axiale étendue du système conduit à une superposition d'images focalisées et défocalisées provenant de différentes positions en profondeur, compliquant significativement la localisation précise des particules le long de l'axe optique [15].

Les premières stratégies développées pour traiter cette ambiguïté reposent sur la reconstruction numérique multi-plans et l'utilisation de critères de mise au point afin d'identifier la position axiale optimale des particules. Différents critères basés sur l'analyse de l'amplitude, du contraste ou de la netteté ont été proposés, incluant l'intégrale d'amplitude, les métriques de gradient ou les critères de parcimonie [16–19]. Ces approches constituent la base des méthodes d'auto focalisation en holographie numérique, mais leur coût computationnel élevé et leur sensibilité au bruit et au speckle limitent leur efficacité pour les écoulements denses ou fortement chargés.

Parallèlement, des méthodes fondées sur une modélisation physique du processus de formation de l'hologramme ont été largement explorées. L'ajustement des hologrammes à des modèles analytiques issus de la diffraction de Fresnel ou de la théorie de Mie permet une estimation simultanée de la position tridimensionnelle et des propriétés physiques des particules avec une excellente précision axiale [20–22]. Ces approches ont été étendues à des formulations en problèmes inverses et à des méthodes de reconstruction conjointe exploitant la redondance temporelle, améliorant la résolution axiale et permettant le suivi précis de particules en mouvement brownien ou en écoulement [23–25]. Néanmoins, leur applicabilité reste limitée par des hypothèses restrictives sur la forme et l'isolement des particules, ainsi que par une complexité numérique importante.

Afin de réduire directement l'extension axiale de la réponse du système, des techniques de traitement volumique et de déconvolution tridimensionnelle basées sur la modélisation de la fonction d'étalement du point ont été proposées, permettant une compression de la réponse en profondeur et une amélioration de la localisation axiale

à partir d'un hologramme unique [24–26]. Ces méthodes demeurent toutefois sensibles aux erreurs de modélisation de la PSF et au bruit expérimental. D'autres travaux ont exploré des stratégies optiques et numériques visant à limiter les contributions hors-plan, telles que le filtrage spatial et la suppression de l'image jumelle en holographie hors-axe [27, 28], ainsi que le filtrage en profondeur et l'utilisation de multiples longueurs d'onde pour améliorer la discrimination axiale [29–31].

Le codage optique de la profondeur constitue une autre voie importante pour contourner le problème de la grande profondeur de champ. L'introduction contrôlée d'aberrations, en particulier l'astigmatisme, permet d'encoder la position axiale dans la forme des images de particules et d'accéder à une localisation tridimensionnelle sans reconstruction volumique entière [32, 33]. Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux écoulements micro fluidiques, mais nécessitent une calibration fine du système optique et restent sensibles aux aberrations résiduelles.

Des approches plus récentes ont cherché à dépasser les limitations des méthodes analytiques classiques en combinant la modélisation physique du processus de diffraction, des contraintes de parcimonie favorisant des reconstructions creuses, et des techniques d'apprentissage automatique (Deep Learning).

Les méthodes de reconstruction parcimonieuse adaptative permettent d'estimer conjointement la PSF et le champ reconstruit, améliorant la robustesse face aux écarts entre le modèle théorique et le système réel [34]. Par ailleurs, l'apprentissage profond (Deep Learning) a été utilisé pour la reconstruction holographique, la suppression de l'image jumelle et la localisation rapide de particules à partir d'un seul hologramme, ouvrant la voie à des traitements en temps quasi réel [35]. Bien que certaines techniques issues de l'imagerie ultrarapide et de la focalisation temporelle relèvent d'un cadre différent, elles illustrent l'intérêt croissant pour des stratégies de codage et de reconstruction avancées afin de contrôler la localisation spatio-temporelle de l'information optique [36].

Afin de réduire le problème analytique inhérent à la grande profondeur de champ pendant la reconstruction holographique, la technique des deux vues a été développée [37–39], offrant une reconstruction du volume depuis deux perspectives distinctes et améliorant la précision axiale tout en limitant les erreurs de localisation des microparti-

cules.

Dans la configuration de Boucherit et al [38, 39] deux hologrammes sont enregistrés simultanément à 90° , ce qui permet, en croisant les données des deux vues, de localiser les particules avec une plus grande précision. Mebarek-Azzem et al [40] ont rendu cette technique plus abordable en supprimant le faisceau de référence et en la rendant plus compacte avec moins d'éléments optiques. Cette dernière technique pourrait être appliquée à l'analyse réelle des flux de canaux [41]. Malheureusement, pour de telles études, le traitement, en raison de la grande densité de particules, est plein de difficultés. D'une part, il est nécessaire d'augmenter le nombre de particules d'ensemencement pour observer les variations de l'écoulement du fluide. D'autre part, lorsque la densité des particules est relativement élevée, la détection devient relativement difficile.

L'une des techniques utilisées par plusieurs auteurs est la segmentation des hologrammes. La segmentation d'images [42] est une opération de traitement d'images qui permet de diviser l'image en régions homogènes sur la base de certaines caractéristiques tels que les niveaux de gris ou la texture.

La segmentation a été appliquée à la microscopie holographique numérique [43, 44] et à la macroscopie holographique [45, 46] pour la caractérisation quantitative et la reconnaissance des spécimens biologiques. Les chercheurs ont déjà mis au point diverses méthodes de segmentation des images holographiques reconstruites numériquement [47–50] pour reconnaître et localiser les objets.

Dans la technique de Yong-Seok Choi et Sang-Joon Lee [47], l'hologramme est reconstruit à différentes distances; la profondeur est déterminée en balayant la série d'images reconstruites segmentées.

Dans les travaux de Bahram Javidi et al [48], l'hologramme est reconstruit à différentes distances, l'extraction des caractéristiques est effectuée en mesurant la similarité entre les séries d'images reconstruites segmentées. Cependant, cette technique est appliquée sur l'image reconstruite et la reconnaissance des particules qui ont les mêmes coordonnées x et y et un z différent devient difficile.

III.2 Principe de la réduction d'ouverture

Pour résoudre ce problème, nous proposons une nouvelle technique basée sur la combinaison de la technique des deux vues et de la technique de réduction de l'ouverture de l'hologramme (traitement de l'hologramme partie par partie).

L'idée de diviser l'hologramme enregistré avant de traiter les informations a déjà été présentée dans la littérature [51]. Dans les recherches récentes [52–56], l'hologramme enregistré a été divisé en plusieurs sous-hologrammes (petites ouvertures) et chaque sous-hologramme a été reconstruit séparément.

La technique des deux vues permet de localiser les particules avec une plus grande précision en croisant les données des deux vues, la technique de réduction d'ouverture permet de traiter l'hologramme partie par partie, ce qui permet de trouver la distribution des particules dans chaque volume local facilement et avec précision. Il est alors possible de synthétiser les résultats de toutes les petites ouvertures pour trouver la distribution totale dans tout le volume étudié. [56].

Ce chapitre présente la procédure de cette technique et une application expérimentale pour l'étude des particules dans le cas d'une configuration à deux vues orthogonales. En outre, les particules sont segmentées individuellement pour l'extraction de leurs coordonnées. Ainsi, la combinaison de la technique de réduction de l'ouverture et de la technique des deux vues orthogonales permet de détecter la position des particules en 3D dans un grand canal fluide.

III.2 Principe de la réduction d'ouverture

La technique de réduction d'ouverture est basée sur le fait qu'un hologramme H est une ouverture rectangulaire de $N_x \times N_y$ pixels qui peut être divisée en P sous-hologrammes (sous-ouvertures) H_i de $n_x \times n_y$ pixels chacun. On peut donc l'écrire :

$$H(N_x, N_y) = \sum_{i=1}^P H_i(n_x, n_y) \quad (\text{III.1})$$

III.2 Principe de la réduction d'ouverture

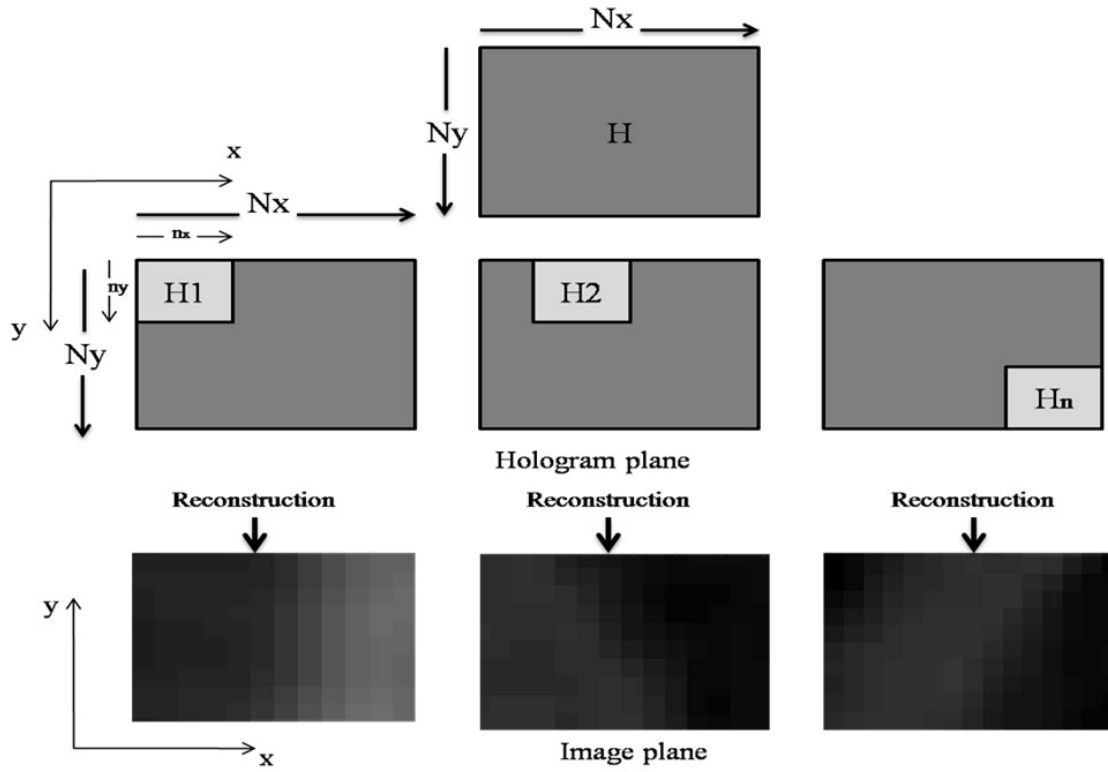


FIGURE III.1 – principe de la technique de la réduction d'ouverture

Chaque sous-hologramme est ensuite reconstruit et traité séparément (figure III.1).

La formule de reconstruction pour chaque sous-hologramme dans l'approximation de Fresnel est la suivante :

$$I_i(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi \lambda d \left(\frac{m^2}{M^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta x^2}\right)\right] \times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} E_R(k, l) H_i(k, l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[i2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right] \quad (\text{III.2})$$

Où $n_x = M$, $n_y = N$, est le nombre de pixels du sous-hologramme $H_i(n_x, n_y)$, λ est la longueur d'onde de la lumière et d est la distance de reconstruction.

Pour $m = 0, 1 \dots M - 1$, $n = 0, 1 \dots N - 1$

Il est à noter que les ouvertures peuvent se chevaucher et que les dimensions ($n_x \times n_y$) peuvent changer d'une ouverture à l'autre. Les parties qui se chevauchent sont éliminées

III.3 Validation expérimentale

au cours des étapes de traitement.

Il est nécessaire de tenir en compte du fait qu'un hologramme agit comme une lentille d'imagerie convergente dans le premier ordre de diffraction [50] (figure III.2 , ce qui conduit à l'identification de la région de l'objet étudié.

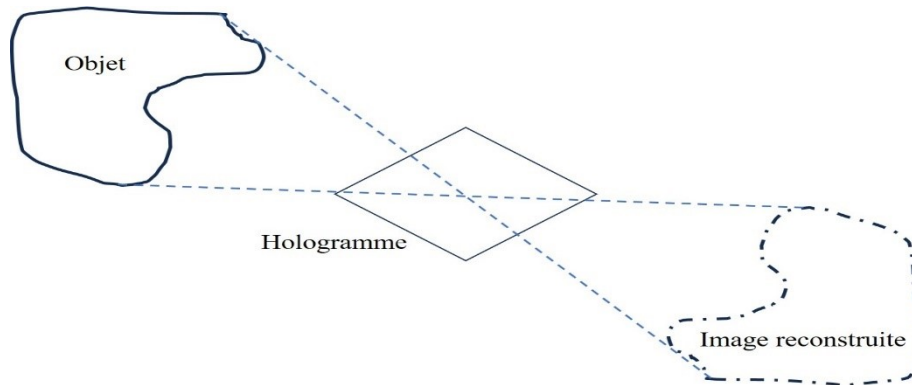


FIGURE III.2 – Hologramme agissant comme une lentille convergente.

III.3 Validation expérimentale

En premier temps nous avons utilisé une configuration hors axe représentée ci-dessous (figure III.3 et figure III.4).

Une source lumineuse laser He-Ne d'une longueur d'onde de $(632,8nm)$ émet un faisceau qui traverse successivement un objectif de microscope (OM) et un filtre spatial (FS), dont la fonction est d'améliorer la qualité du faisceau en supprimant les composantes haute fréquence indésirables. Il est ensuite collimaté par une lentille (L) avant d'atteindre un cube séparateur (CS), qui le divise en deux trajets distincts. Le premier trajet se propage directement vers l'objet, ici représenté par un ensemble d'épingles. Le second trajet est réfléchi par le cube puis redirigé par un miroir (M) de manière à former un faisceau de référence. Les deux faisceaux objet et de référence sont finalement dirigés vers une caméra CCD Sony de $960 * 1280$ pixels, où ils interfèrent, permettant l'enregistrement du front d'onde issue de l'optique. La taille des pixels du capteur est de $4.65 \times 4.65 \mu m^2$. Les hologrammes enregistrés sont ensuite envoyés vers un ordinateur pour le traitement.

III.3 Validation expérimentale

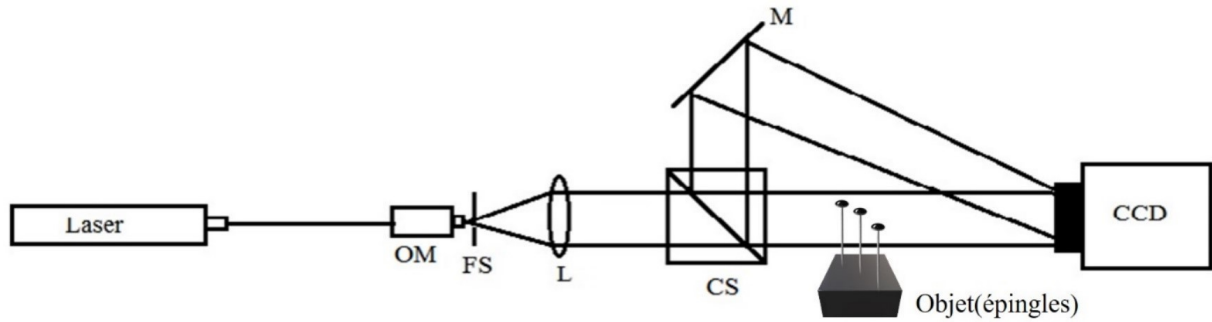


FIGURE III.3 – Montage d'holographie digitale hors axe (OM : objectif de microscope, FS : filtre spatiale, CS : cube séparateur, M : miroir)

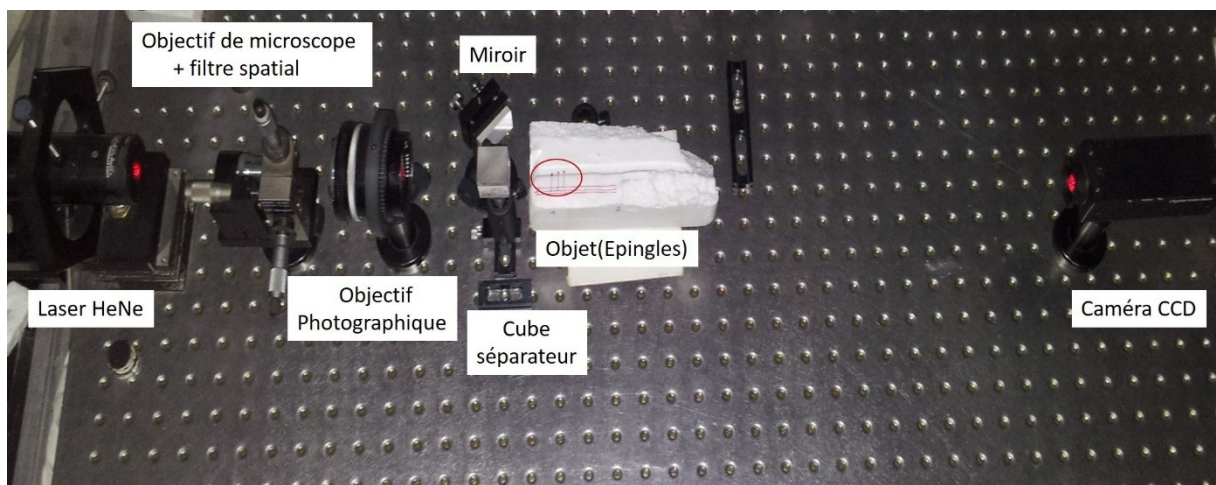


FIGURE III.4 – Image photographique de montage d'holographie digitale hors axe

L'hologramme est découpé en deux sous ouvertures horizontales et verticales en utilisant la fonction matlab « imcrop » (la procédure peut s'élargir à N ouvertures en changeant les dimensions horizontales ou verticales). Les hologrammes résultants sont ensuite reconstruits par la transformé de Fresnel.

On remarque que l'image reconstruite de l'hologramme globale (figure III.5) contient 3 épingles dont la première avec le bout de la tige et la boule, la deuxième avec une partie de la tige et la boule mais la troisième avec presque la tige complète et une partie de la boule.

L'image reconstruite de la première ouverture horizontale (figure III.6e) contient 3 épingles la première avec une le bout de la tige et la boule, la deuxième avec une partie

III.3 Validation expérimentale

de la tige et une partie de la boule mais la troisième avec presque la tige complète (absence de la partie de la boule).

L'image reconstruite de la deuxième ouverture horizontale (figure III.6f) contient 3 épingles la première avec la boule (absence de bout de la tige), la deuxième avec le bout de la tige et la boule mais la troisième avec une partie de la tige et une partie de la boule.

L'image reconstruite de la première ouverture verticale (figure III.7e) contient 2 la première avec le bout de la tige et la boule et la deuxième avec une partie de la tige et de la boule

L'image reconstruite de la deuxième ouverture verticale (figure III.7f) contient 2 épingles la première avec une partie de la tige et de la boule et la deuxième avec presque la tige complète et une partie de la boule.

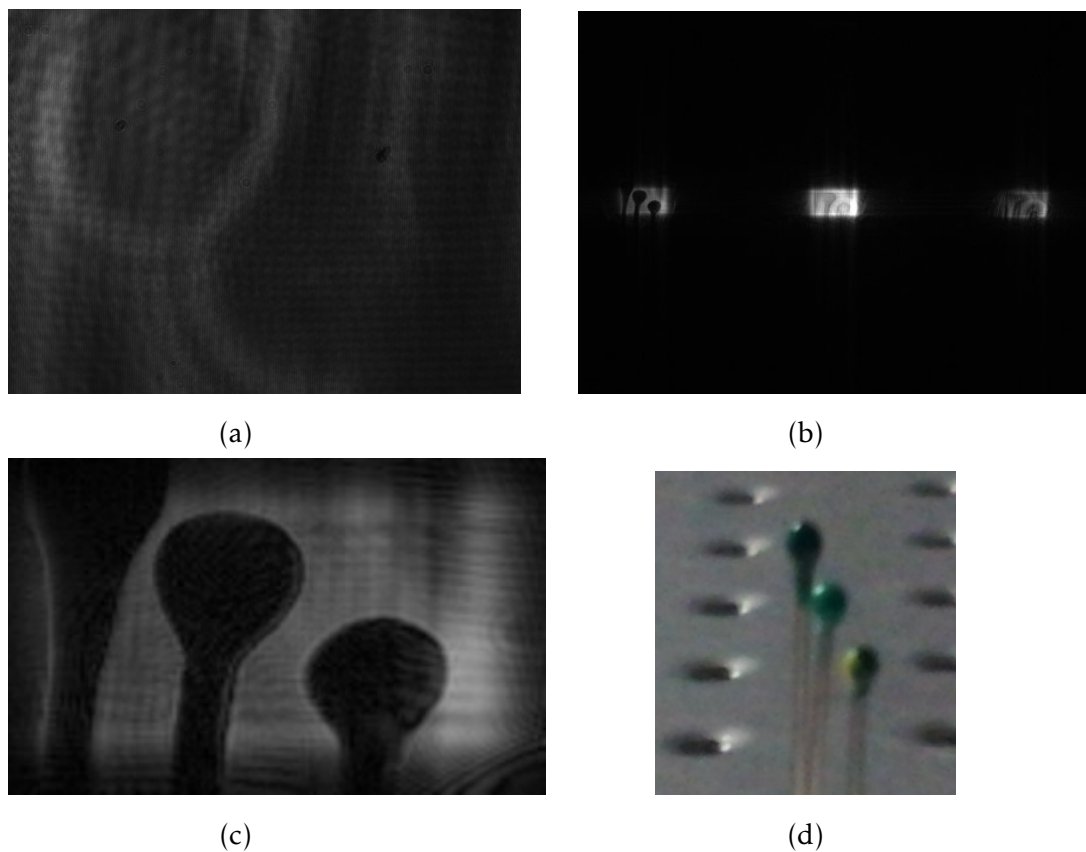


FIGURE III.5 – a) hologramme, b) image reconstruite, c) ordre (-1) sélectionné, d) image photographique de l'objet(épingles)

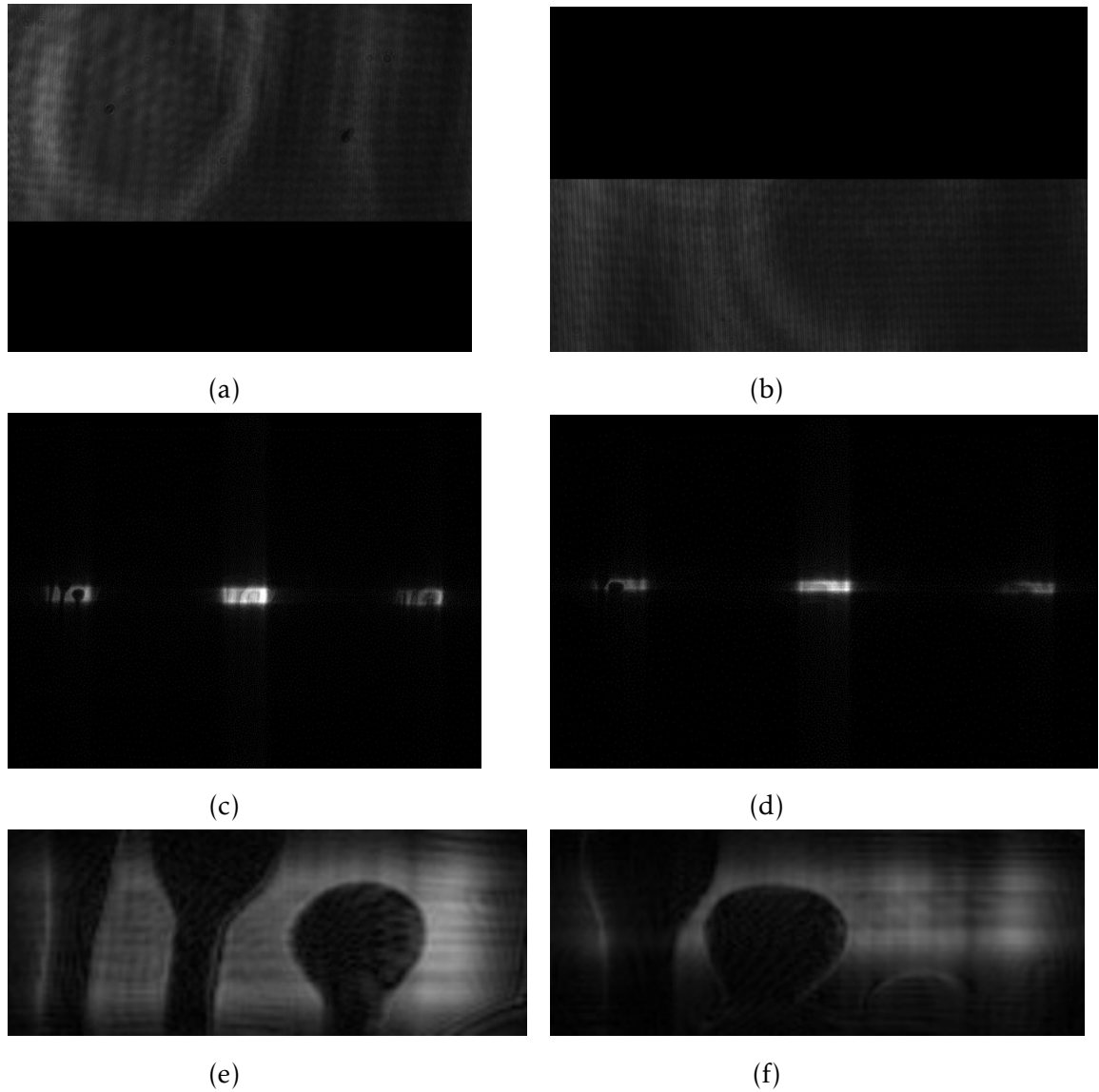


FIGURE III.6 – a) la première ouverture horizontale, c) son image reconstruite, e) l'ordre (-1) sélectionné, b) la deuxième ouverture horizontale, d) son image reconstruite, f) l'ordre (-1) sélectionné.

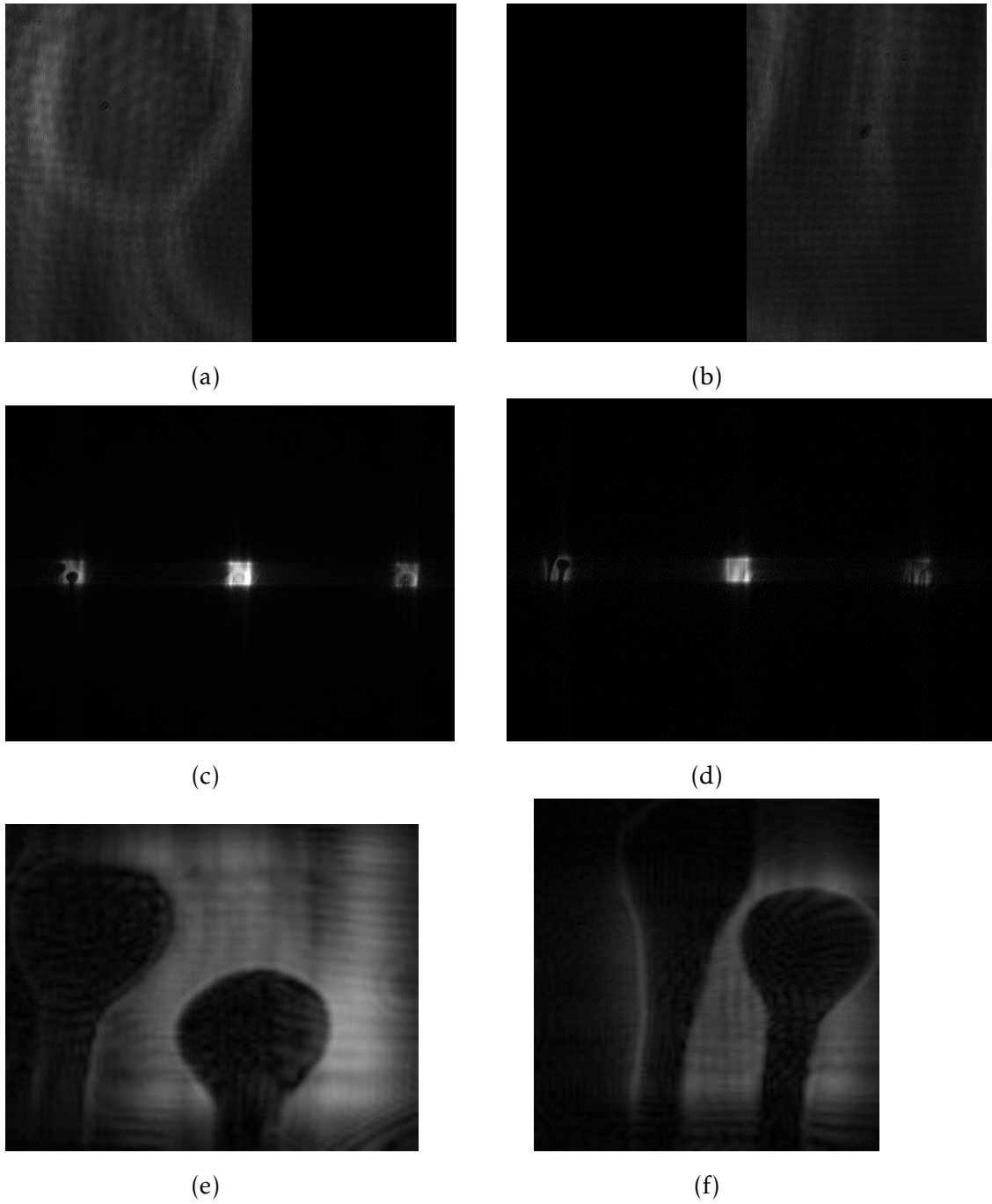


FIGURE III.7 – a) la première ouverture verticale, c) son image reconstruite, e) l'ordre (-1) sélectionné, b) la deuxième ouverture verticale, d) son image reconstruite, f) l'ordre (-1) sélectionné.

III.4 Localisation de microparticules par holographie digitale hors axe à deux vues et réduction d'ouverture

D'après les résultats représentés sur (figure III.5), (figure III.6) et (figure III.7) on remarque que l'image reconstruite de chaque ouverture sélectionnée contient juste une partie de l'objet (pas de perte de résolution) parce que les informations sont codées en fonction de leur distribution fréquentielle spatiale contrairement aux hologrammes classiques où les fréquences spatiales sont uniformément réparties sur la totalité de la surface de l'hologramme.

Dans ce cas, on s'est limité à deux sous-ouvertures en gardant la même dimension horizontale, mais la procédure peut s'élargir à N ouvertures en changeant les dimensions horizontales ou verticales.

La réduction d'ouverture fonctionne donc convenablement sur les hologrammes digitaux, ce qui permet d'aller chercher l'information voulue là où on prévoit sa localisation. Cette prévoyance est basée sur la connaissance préalable sur la nature de l'objet d'étude.

III.4 Localisation de microparticules par holographie digitale hors axe à deux vues et réduction d'ouverture

Le dispositif expérimental (figure III.8, figure III.9) mis en œuvre dans le processus d'enregistrement des hologrammes des particules est présenté dans le chapitre II.

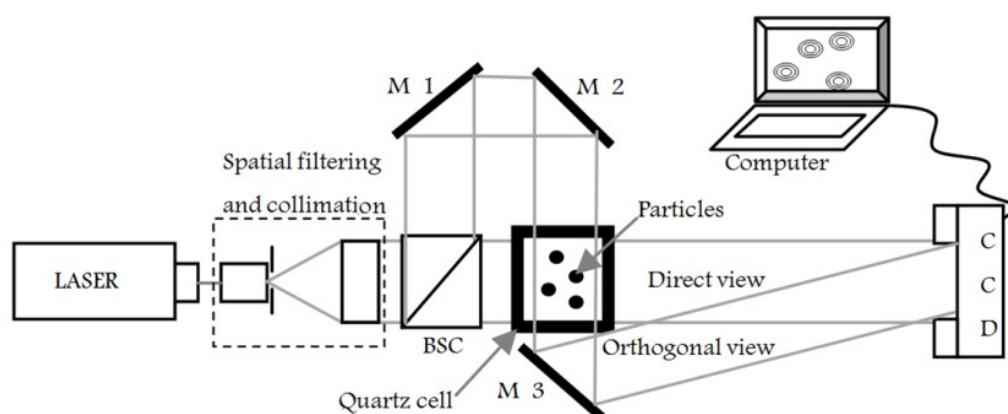


FIGURE III.8 – Montage d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et deux vues [40]

III.4 Localisation de microparticules par holographie digitale hors axe à deux vues et réduction d'ouverture

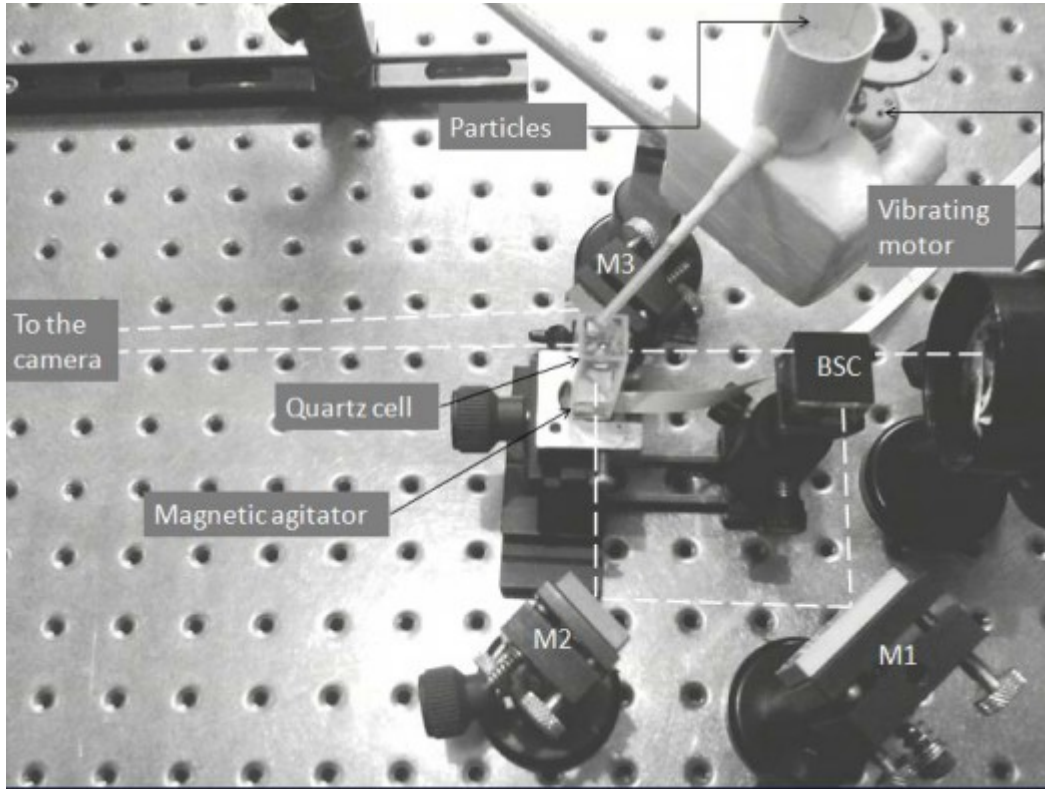


FIGURE III.9 – Image photographique du montage d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et deux vues

L'angle formé entre l'axe optique et le faisceau réfléchi par le miroir 3 désigné comme "vue orthogonale", était de 1.48° . Cet angle doit être inférieur à l'angle maximal (θ_{max}) déterminé par le critère d'échantillonnage de Shannon dans la configuration d'holographie numérique hors axe, tel que défini par la relation suivante :

$$\theta_{max} = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta_x}\right) \quad (III.3)$$

Avec λ représente la longueur d'onde de la lumière utilisée et Δ_x est la taille des pixels de la caméra CCD.

Toute diminution de l'angle entre les deux vues entraîne une réduction de la distance d'enregistrement et amplifie la répartition des fréquences spatiales des franges.

III.4 Localisation de microparticules par holographie digitale hors axe à deux vues et réduction d'ouverture

L'intensité [40] enregistrée par la caméra CCD peut s'écrire comme suit :

$$I_{CCD} = (O_{dir} + O_{ort})(O_{dir} + O_{ort})^* \\ \underbrace{O_{dir}^2 + O_{ort}^2}_1 + \underbrace{O_{dir}O_{ort}^*}_2 + \underbrace{O_{dir}^*O_{ort}}_3 \quad (III.4)$$

où O_{dir} et O_{ort} sont respectivement le faisceau direct et le faisceau orthogonal, et $*$ représente le complexe conjugué. Le terme 1 représente la somme des intensités individuelles des deux faisceaux. Les termes 2 et 3 représentent la distribution complexe de l'amplitude des deux vues.

Lors de l'étape de reconstruction, chaque hologramme doit être multiplié par son onde de référence. En ne tenant compte que des termes relatifs à l'image, on obtient

$$O_{dir} \underbrace{O_{dir}O_{ort}^*}_2 + O_{ort} \underbrace{O_{dir}^*O_{ort}}_3 = O_{dir}^2 O_{ort}^* + O_{ort}^2 O_{dir}^* \quad (III.5)$$

Lors du processus de reconstruction, les deux objets d'onde sont présents. Dans le processus numérique, il suffit de multiplier par une onde directe ou orthogonale.

L'hologramme enregistré est reconstruit à l'aide des formules de diffraction de Fresnel (équation(III.2)), et l'image de phase est ensuite extraite pour être utilisée dans l'analyse.

Figures III.10a ,III.10b montrent l'hologramme original complet, son image reconstruite selon l'algorithme de la transformée de Fresnel.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

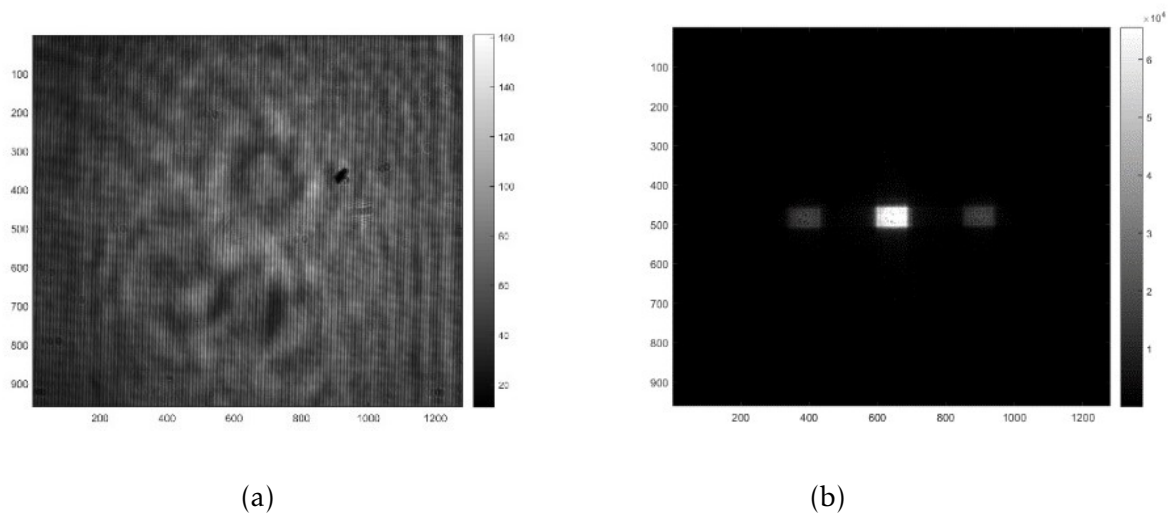


FIGURE III.10 – Hologramme enregistré (a), sa reconstruction (b)

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

L'analyse numérique d'hologrammes digitaux nous permet de décrire de manière quantitative l'information fournie par ces hologrammes. Cette analyse nous permet de segmenter les particules. L'hologramme binarisé résultant constitue une cartographie des particules à partir de laquelle différents paramètres sont automatiquement calculés telles que la position des particules et leurs dimensions.

La figure III.11 représente les différentes étapes suivies pour l'analyse de l'hologramme.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

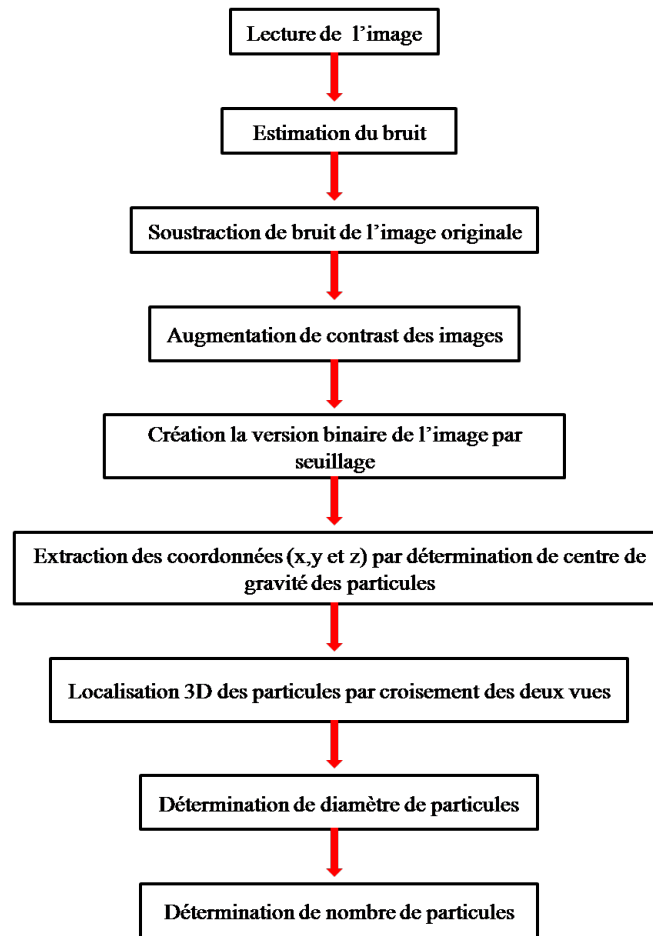


FIGURE III.11 – Processus d'analyse d'hologrammes pour localiser les microparticules

III.5.1 Prétraitement de l'hologramme :

Pour faciliter l'observation visuelle, les images reconstruites sont agrandies par la technique d'interpolation bi-cubique [57].

L'étape de prétraitement des images commence par la lecture de l'hologramme qui est suivi par la minimisation du bruit présent dans celui-ci. Le bruit est donc estimé et soustrait de l'hologramme, ensuite un ajustement de contraste de l'images résultante est effectuée (figure III.12c figure III.12d).

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

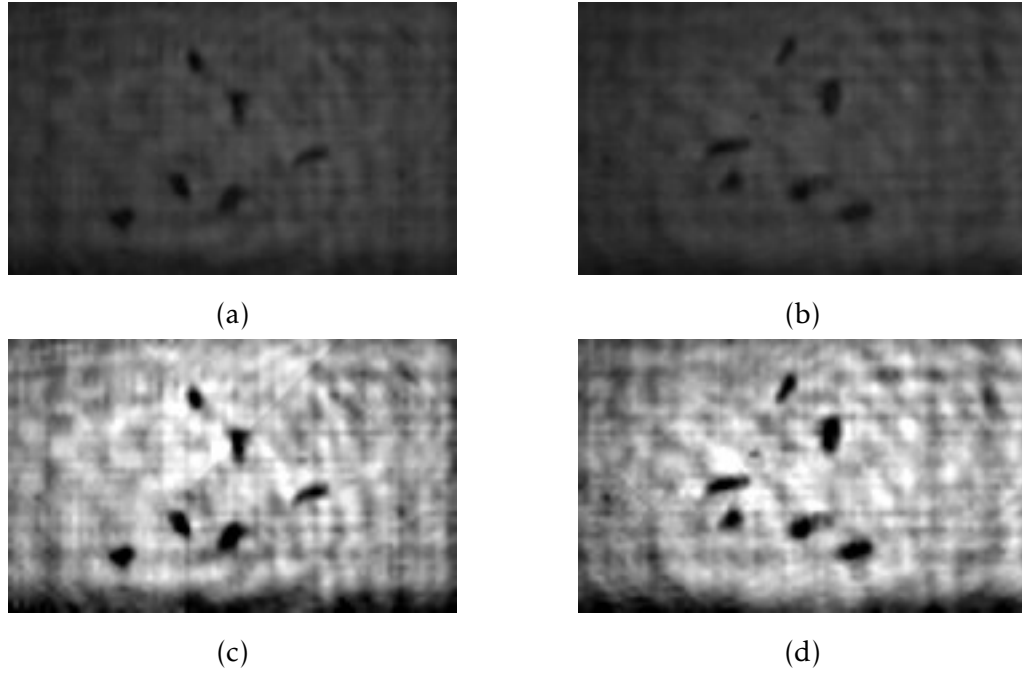


FIGURE III.12 – a) vue directe, b) vue orthogonale, c) vue directe après soustraction de bruit et ajustement de contraste, d) vue orthogonale après soustraction de bruit et ajustement de contraste,

III.5.2 Création de la version binaire des images :

La phase suivante consiste à générer la version binaire de l'hologramme par seuillage (figure III.13) en choisissant une valeur de seuil appropriée.

Pour créer la version binaire d'une image on compare tous les niveaux de gris de l'image au seuil, puis on affecte la valeur 0 aux pixels dont les niveaux de gris sont inférieurs au seuil et la valeur 1 pour les autres pixels ou inversement

$$J(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{si } I(x,y) < \text{seuil} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

La binarisation des images a été réalisée par une méthode hybride combinant un seuil global calculé par la méthode de conservation des moments [58], et un ajustement local avec la méthode Otsu [59] sur des blocs, permettant d'améliorer la précision de la segmentation. Cette stratégie permet d'adapter la binarisation aux variations locales d'intensité tout en conservant la robustesse du seuil global.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

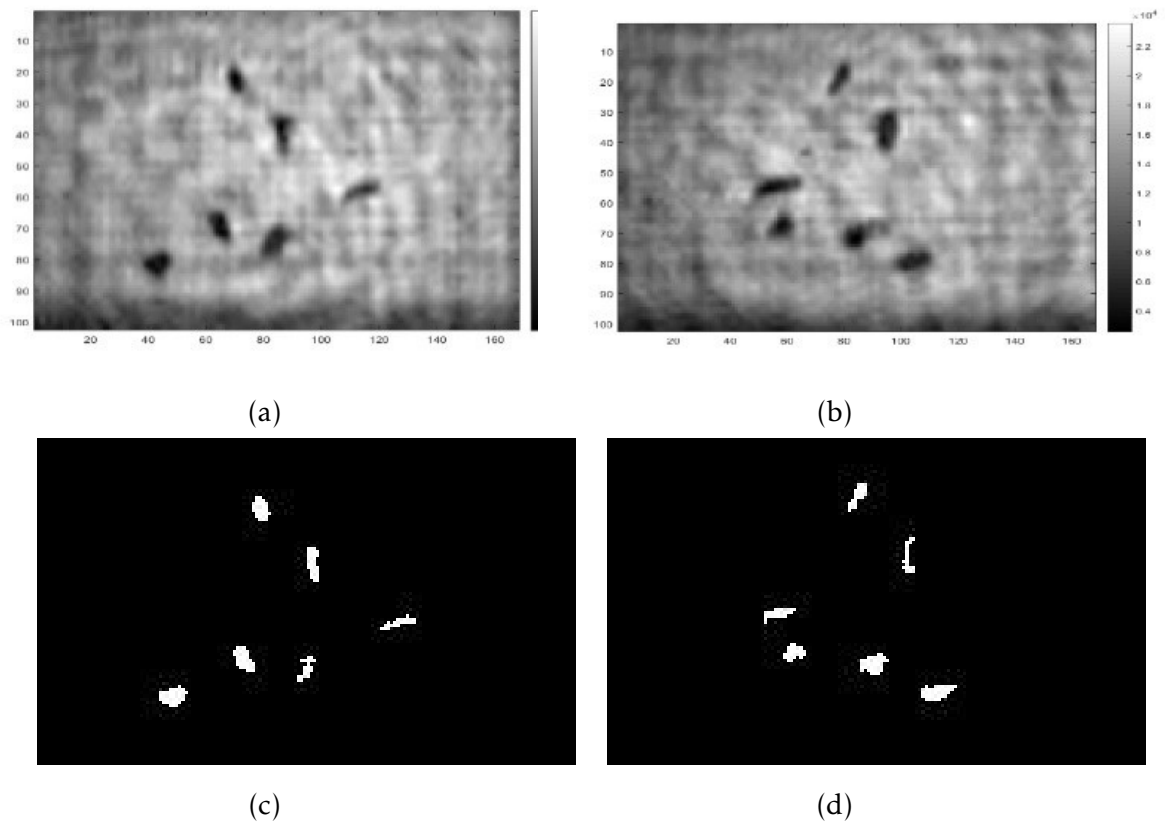


FIGURE III.13 – a) vue directe, b) vue orthogonale, c) version binaire de la vue directe, d) version binaire de la vue orthogonale

III.5.3 Extraction des coordonnées des particules :

Une fois la version binaire de l'hologramme est créée, on arrive à la phase la plus importante qui est l'extraction des coordonnées (x, y, z) des particules. Pour cela on détermine les centroïdes des particules. Pour déterminer les coordonnées (x, y) des particules, on calcule les centroïdes des particules de la vue directe (figure III.14), et la coordonnée z par calcul des centroïdes des particules de la vue orthogonale (figure III.15). La correspondance des particules est représentée sur la (figure III.16). La localisation 3D est faite par croisement des données des deux vues.

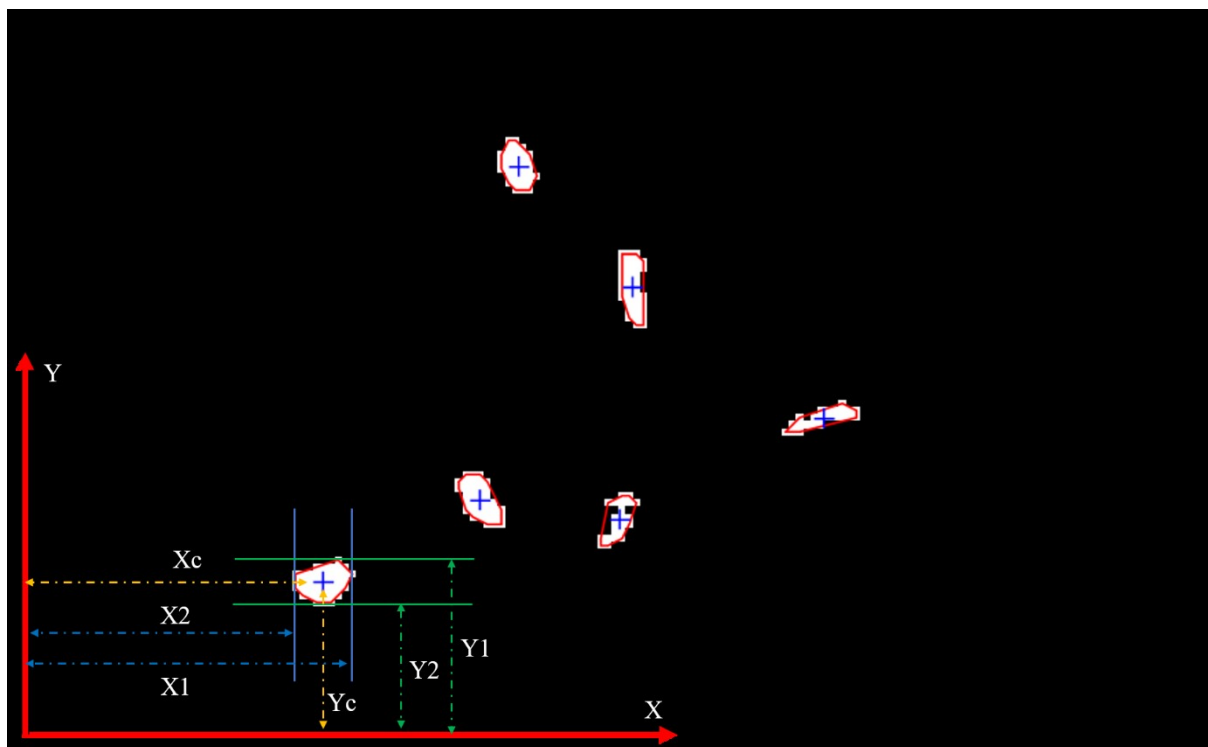


FIGURE III.14 – extraction des centroïdes des particules de la vue directe

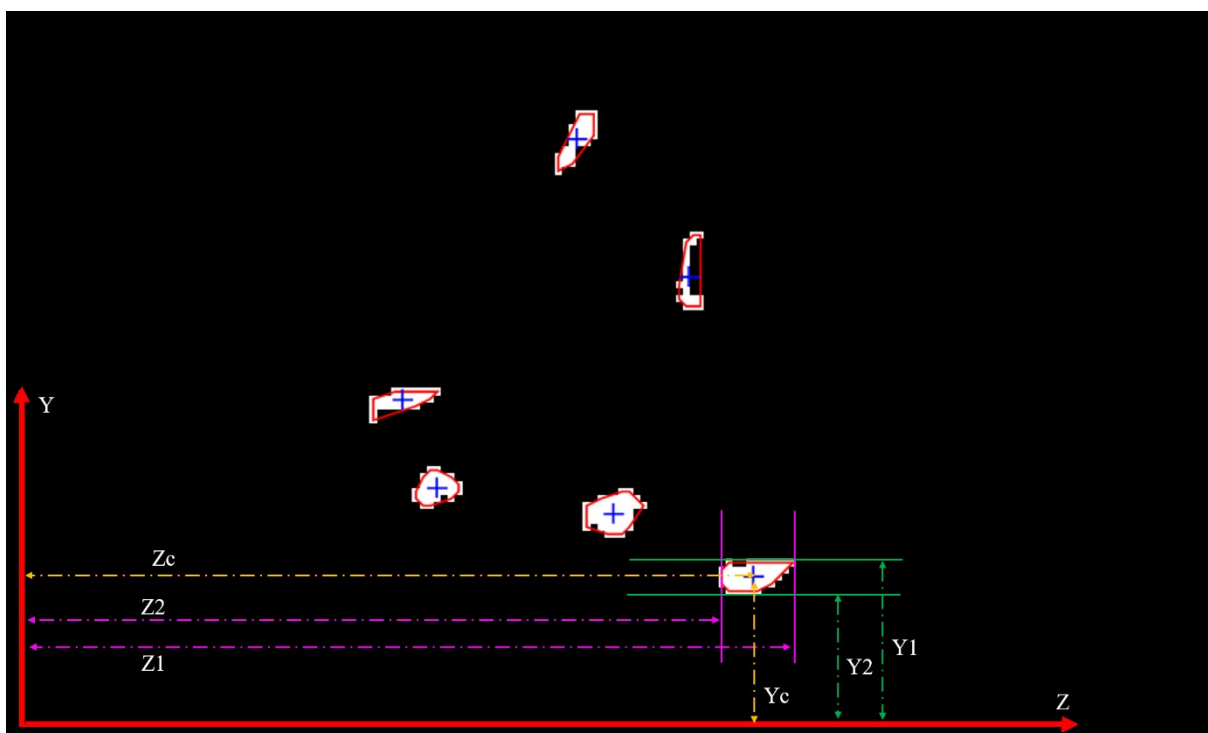


FIGURE III.15 – Extraction des centroïdes des particules de la vue orthogonale

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

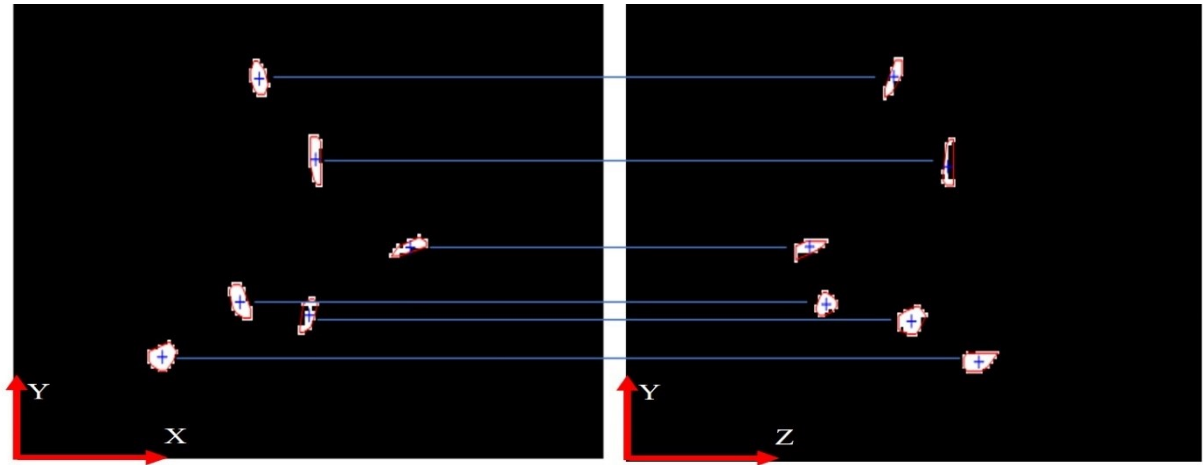


FIGURE III.16 – correspondances des particules des deux vues

III.5.4 Localisation 3D des particules :

Pour la représentation 3-D du volume, les coordonnées XY sont obtenues de la vue directe (figure III.17c), et la coordonnée Z est obtenue de la vue orthogonale (figure III.17d).

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

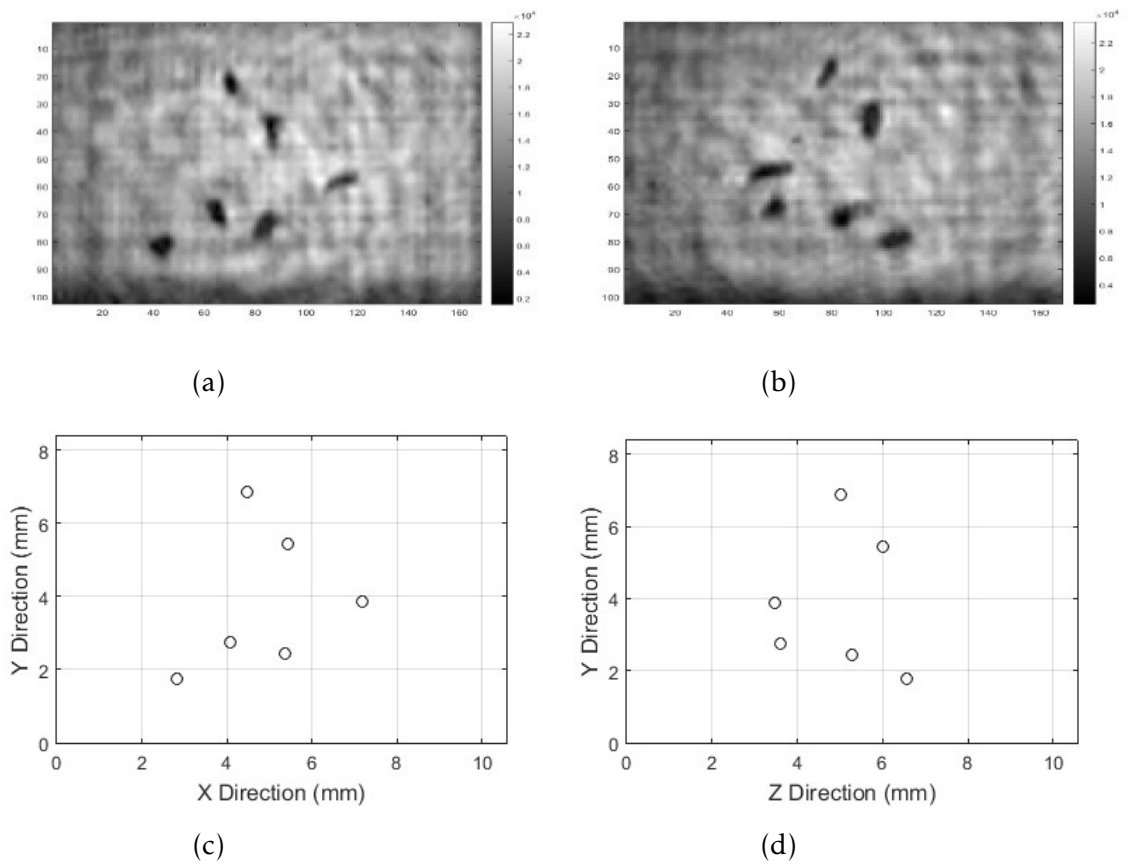


FIGURE III.17 – a) vue directe, b) vue orthogonale, c) les coordonnées (x, y) des particules de la vue directe, d) les coordonnées (z, y) des particules de la vue orthogonale.

Ensuite, le croisement des deux vues permet la reconstruction du volume 3D comme illustré à la figure III.18.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

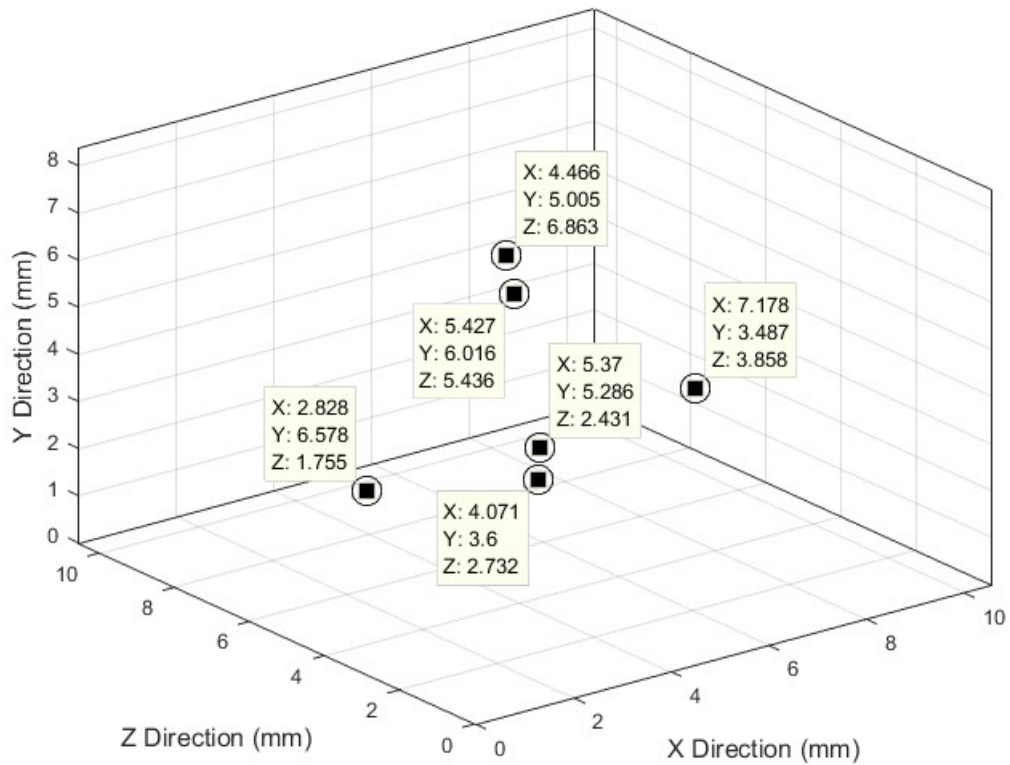


FIGURE III.18 – représentation 3D des positions de particules

Dans les images suivantes, l'hologramme est divisé en différents sous-hologrammes (ouvertures) qui sont ensuite reconstruits individuellement et séparément.

Les paramètres de reconstruction qui sont la longueur d'onde de la lumière($632,8nm$), la taille des pixels de la caméra ($4,65 \times 4,65 \mu m^2$) et la distance de reconstruction($54cm$) restent les mêmes pour tous les sous-hologrammes.

La résolution de surface (nombre de pixels) peut varier en fonction de l'ouverture sélectionnée. Une différence dans la distance de reconstruction sépare la vue à 0° de celle à 90° .

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

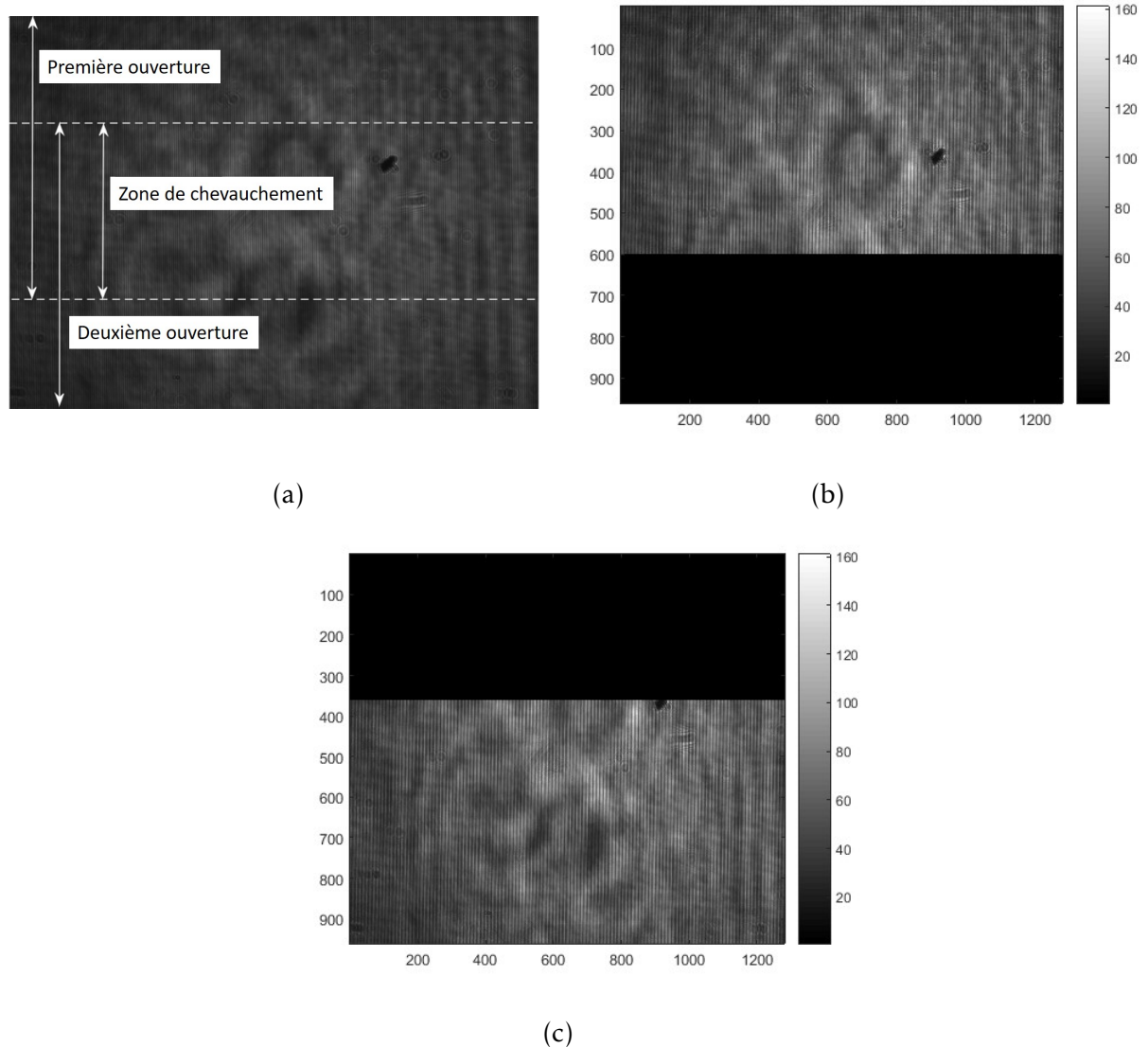


FIGURE III.19 – Hologramme (a) divisé en deux ouvertures (b et c).

La figure III.19a montre le principe de sélection de deux sous-hologrammes superposés de mêmes dimensions. Les figures (III.19b et III.19c) montrent les deux sous-hologrammes coupés horizontalement pour obtenir une taille similaire de 640×1280 pixels chacun.

Nous avons conservé la même dimension horizontale que l'hologramme original pour les deux sous-hologrammes. Par application de même processus d'analyse d'hologramme décrit au-dessus on obtient les résultats représentés sur les figures (III.20 et III.21)

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

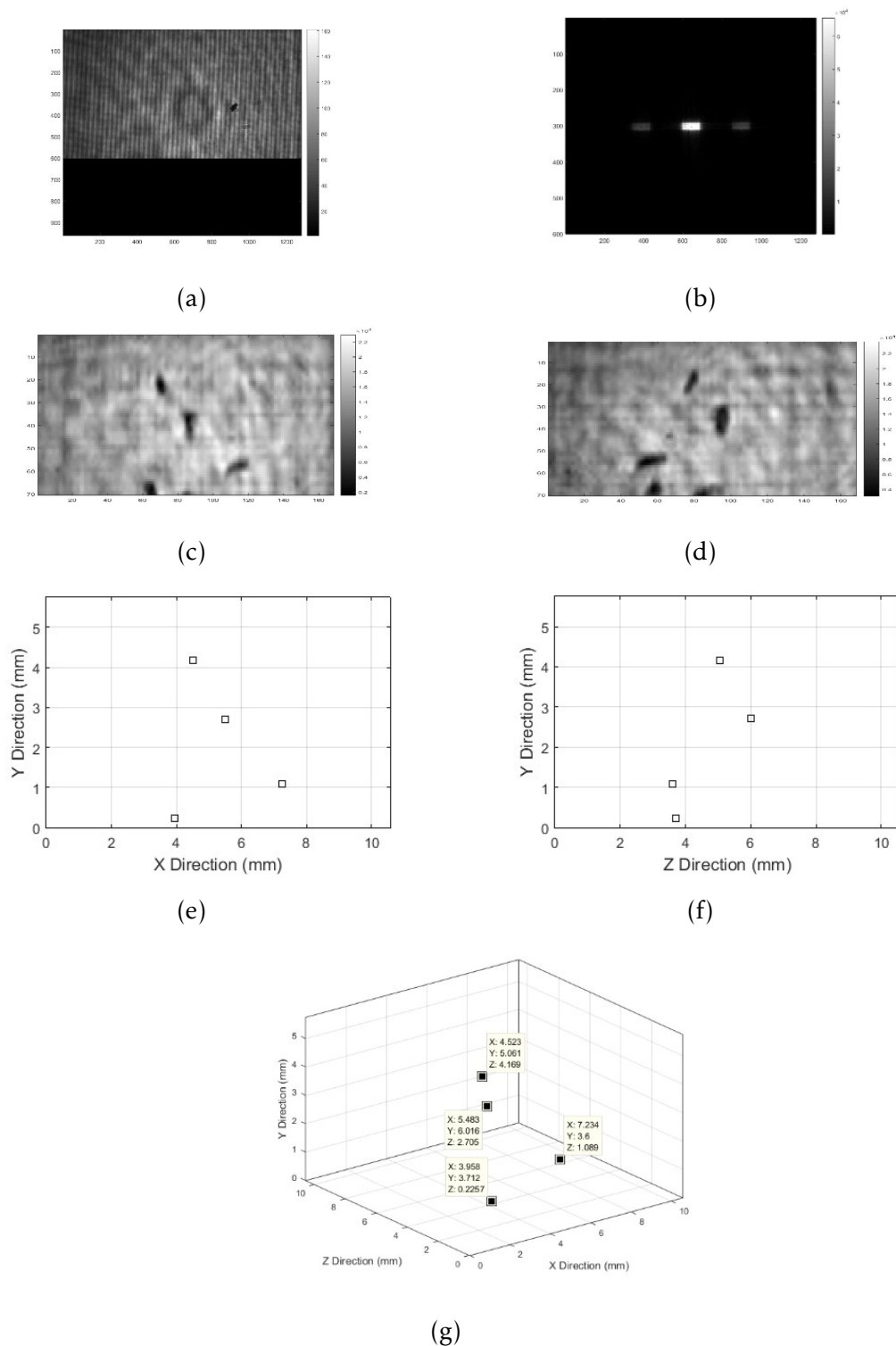


FIGURE III.20 – Reconstruction de la première ouverture : (a) hologramme (première ouverture), (b) reconstruction d'ouverture, (c) vue directe agrandie, (d) vue orthogonale agrandie, (e) détection de particules en vue directe, (f) détection de particules en vue orthogonale et (g) Représentation 3D des particules détectées.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

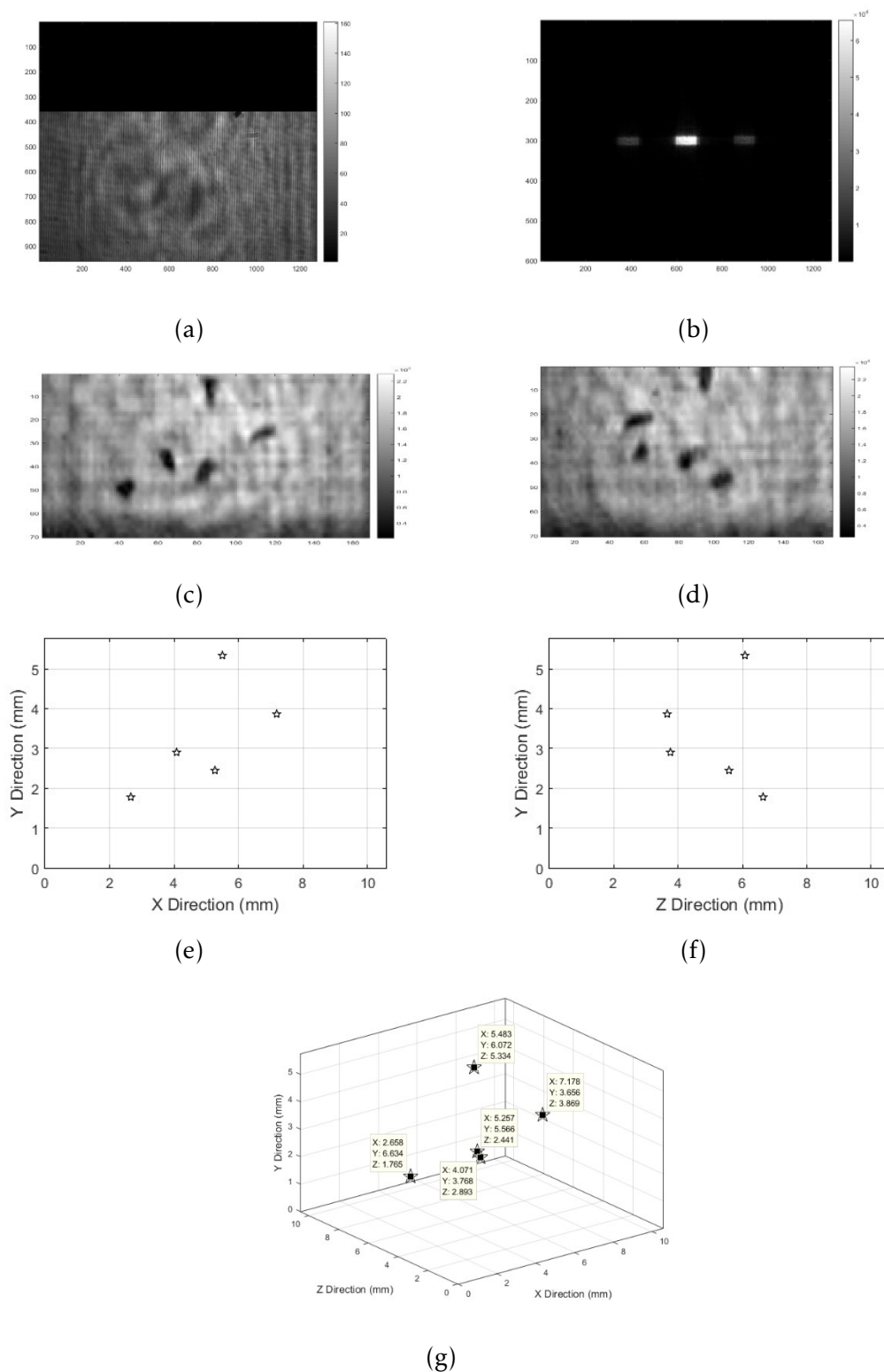


FIGURE III.21 – Reconstruction de la première ouverture : (a) hologramme (deuxième ouverture), (b) reconstruction d'ouverture, (c) vue directe agrandie, (d) vue orthogonale agrandie, (e) détection de particules en vue directe, (f) détection de particules en vue orthogonale et (g) Représentation 3D des particules détectées.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

Les figures (III.20, III.21a, III.21b, III.21c, III.21d, III.21e et III.21f) montrent respectivement la reconstruction de chaque sous-hologramme, l'agrandissement des deux vues, la localisation des particules pour chaque vue et le résultat du croisement des vues (localisation 3- D).

Afin de comparer la représentation 3D de l'hologramme complet à celles obtenues par les deux ouvertures, ces dernières sont synthétisées (ou fusionnées) à l'aide de la corrélation et les coordonnées des particules sont représentées sur le même graphique que l'hologramme complet d'origine.

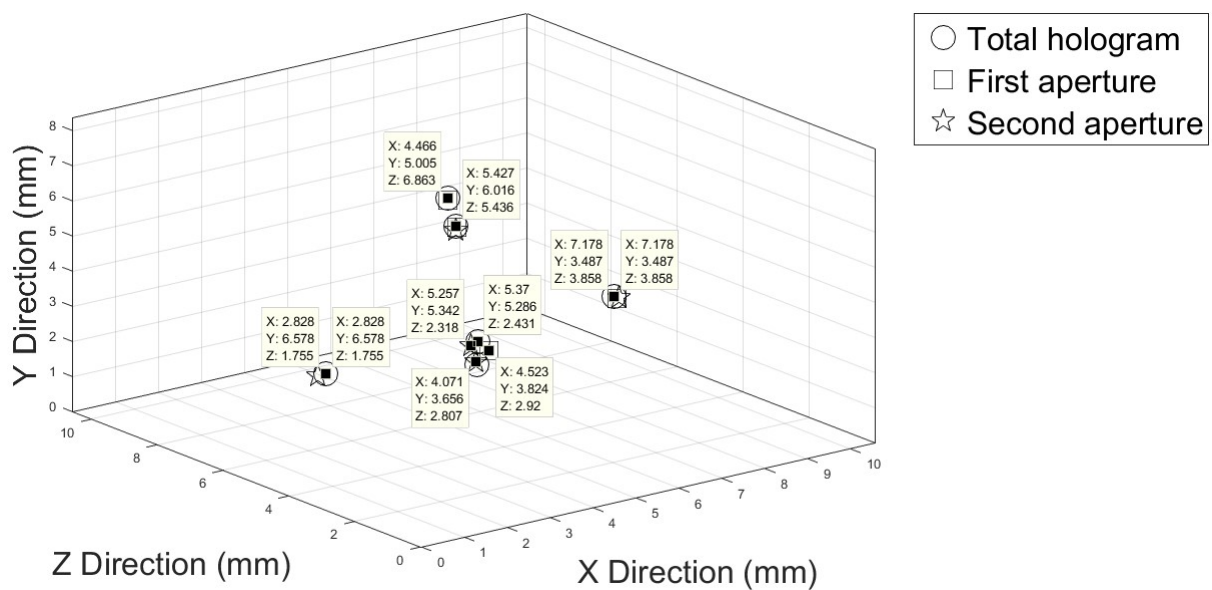


FIGURE III.22 – Assemblage des résultats des deux sous-ouvertures et superposition avec la distribution des particules de l'ensemble de l'hologramme.

La figure III.22 montre les résultats de l'assemblage des deux ouvertures et leur superposition sur la représentation 3D de l'hologramme initial.

Les résultats montrent que, dans ce cas de démonstration, le nombre de particules détectées et leur localisation à l'aide de la technique de réduction de l'ouverture sont identiques à ceux de la détection directe. En présence d'une concentration de particules élevée, la situation est susceptible de changer.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

Afin d'étudier les performances de la technique, le même travail est appliqué sur un autre hologramme à forte concentration de particules. L'objet est des microparticules solides en polyester (diamètre moyen $200\mu m$ et densité $1,37g/cm^3$) injectée dans un canal fluide de $300 \times 300 mm^2$ de section contenant de l'eau.

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

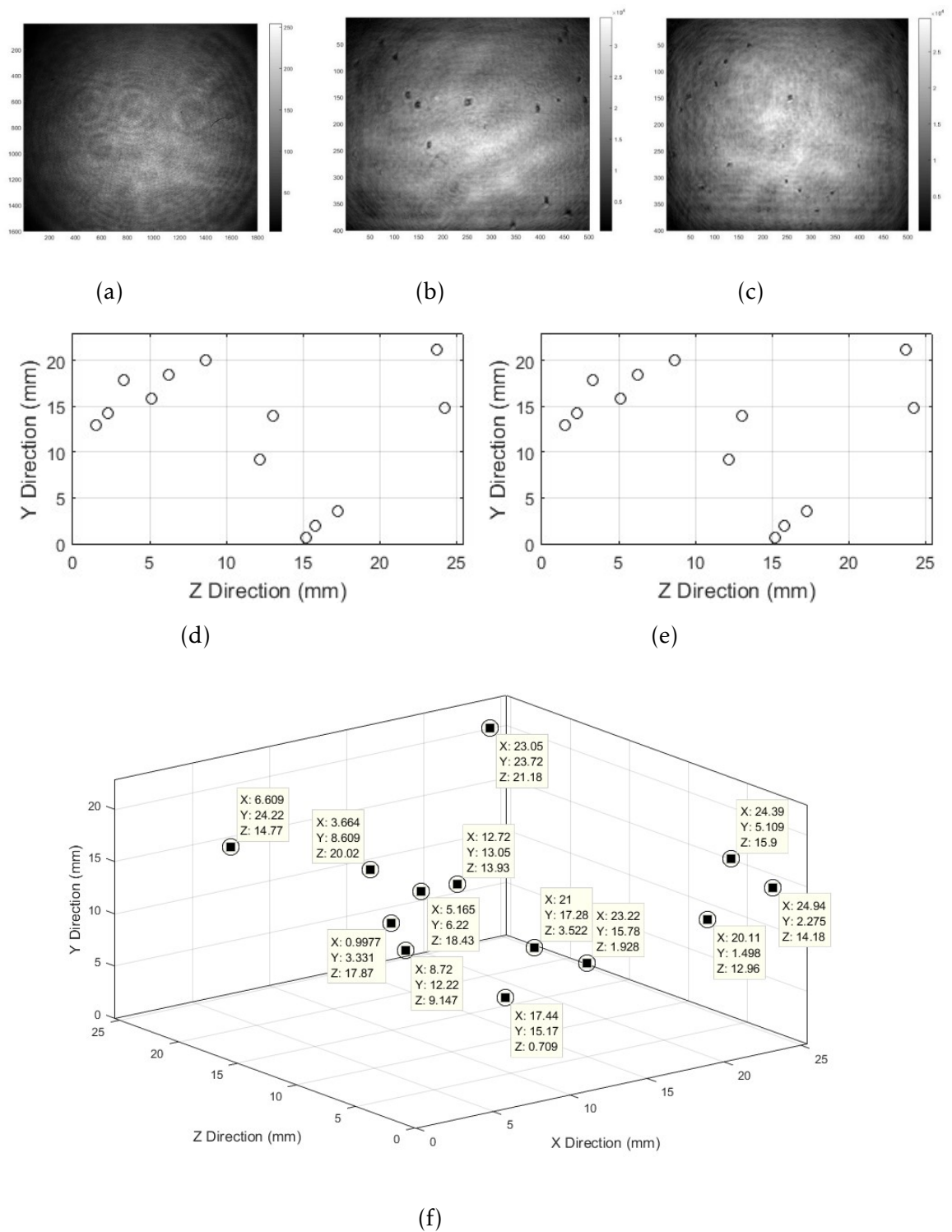


FIGURE III.23 – Hologramme enregistré (a), vues agrandies (vue directe (b) et vue orthogonale (c)), détection de particules à partir des deux vues (vue directe (d) et vue orthogonale (e)) et la particule 3-D répartition (f).

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

La figure (III.23a, III.23b, III.23c, III.23d, III.23e, III.23f) montre successivement l'hologramme original complet, les deux vues orthogonales à analyser, les particules détectées sur chaque vue et leur représentation finale en 3D.

Dans ce cas, l'hologramme est divisé en quatre zones qui se chevauchent, comme le montre la figure III.24.

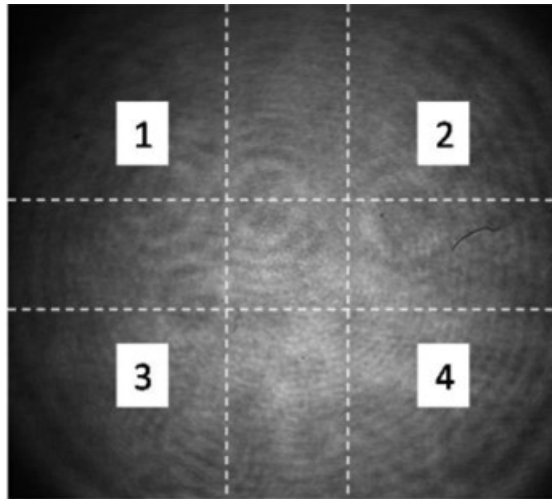
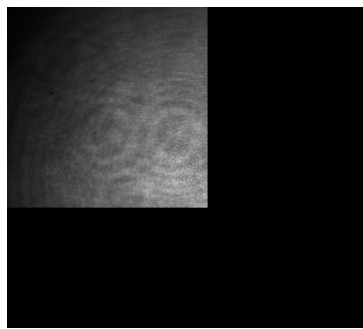


FIGURE III.24 – Hologramme divisé en quatre ouvertures.

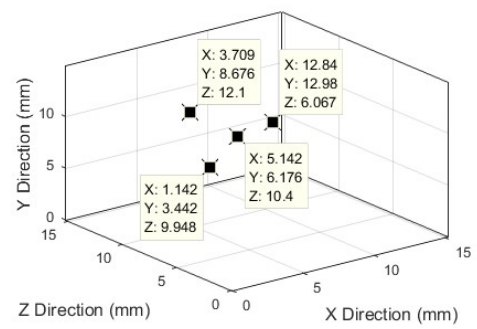
Chaque ouverture est ensuite reconstruite et traitée séparément de la même manière que dans le cas de deux ouvertures. Dans ce qui suit, nous ne présentons que les ouvertures (figures III.25a, III.25c, III.25e et III.25g) et leur représentation particulière tridimensionnelle (figures III.25b, III.25d, III.25f et III.25h).

Les quatre ouvertures sont fusionnées pour obtenir la distribution totale des particules et superposées à la distribution totale de l'hologramme entier (figure III.26).

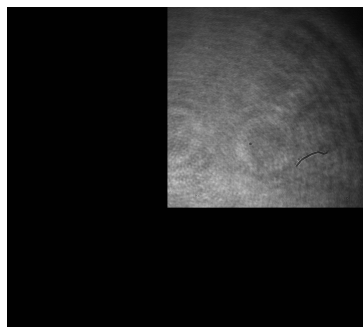
III.5 Analyse numérique de l'hologramme :



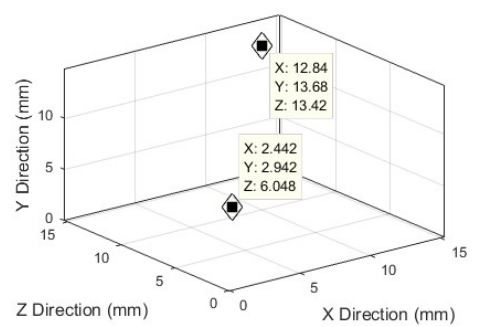
(a)



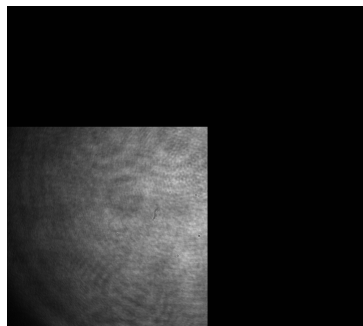
(b)



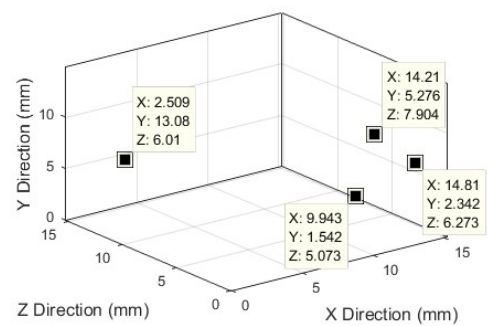
(c)



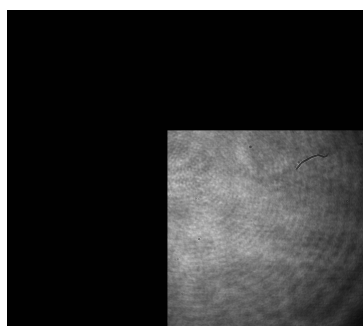
(d)



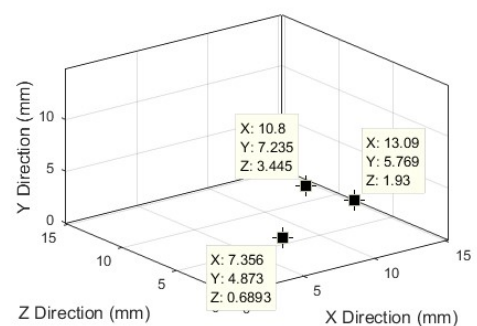
(e)



(f)



(g)



(h)

FIGURE III.25 – Quatre ouvertures (a, c, e et g) et quatre représentations de particules 3D (b, d, f et h).

III.5 Analyse numérique de l'hologramme :

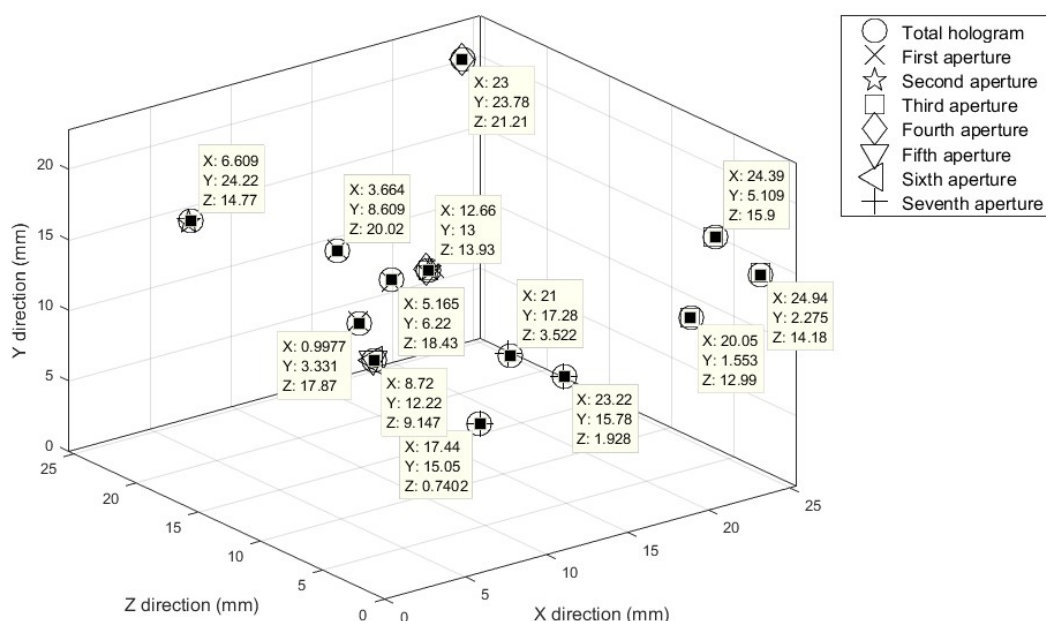


FIGURE III.26 – Les résultats des ouvertures et leur superposition sur la vue de l'hologramme complet.

Les résultats montrent à nouveau que, dans ce cas de démonstration, le nombre de particules détectées et leur emplacement à l'aide de la technique de réduction de l'ouverture sont identiques à ceux de la détection directe.

III.5.5 Détermination des diamètres des particules :

Dans la littérature [60–64], une variété de paramètres de forme est utilisée pour identifier la morphologie des particules. Ces mesures morphologiques sont essentielles pour mieux comprendre la dynamique des particules irrégulières.

L'une des difficultés fondamentales à l'analyse morphologique réside dans la sélection du paramètre de forme.

L'un des paramètres les plus pertinents pour caractériser la nature des particules est le diamètre de F  ret, est défini comme la distance entre deux tangentes parallèles aux bords opposés de la particule. Une illustration des diamètres minimum et maximum est présentée dans la figure III.27.

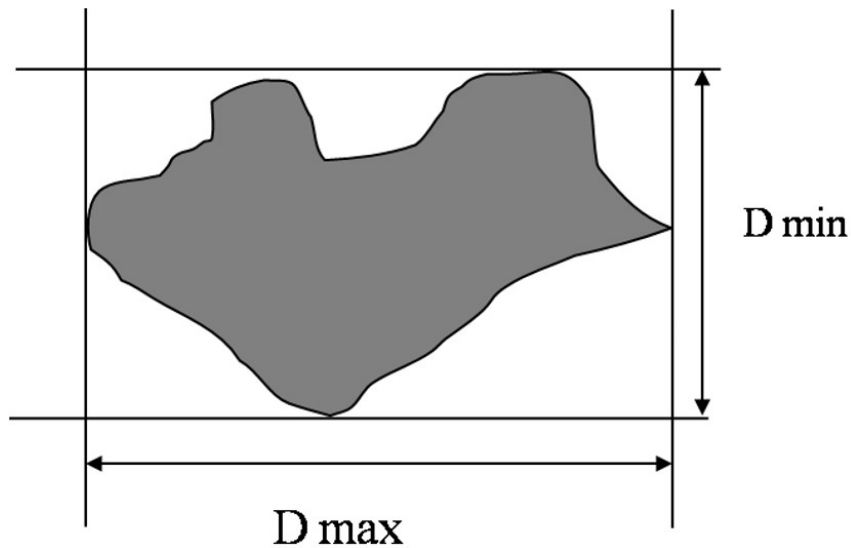


FIGURE III.27 – Diamètre de féret d'une particule

Pour déterminer les diamètres des particules, on crée une enveloppe qui entoure chaque particule ensuite on mesure l'étendue spatiale de chaque particule (figure III.28, figure III.29) dans différentes directions de 0 à 180°, puis on calcule le diamètre moyen de chaque particule.

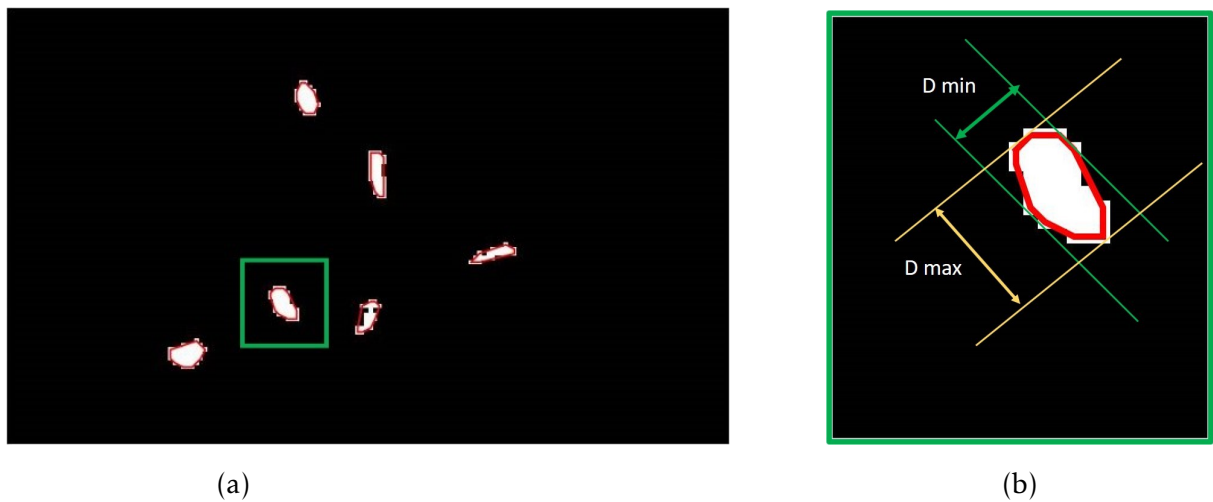


FIGURE III.28 – a) Particule sélectionnée, b) Détermination de diamètre d'une particule

III.6 Conclusion

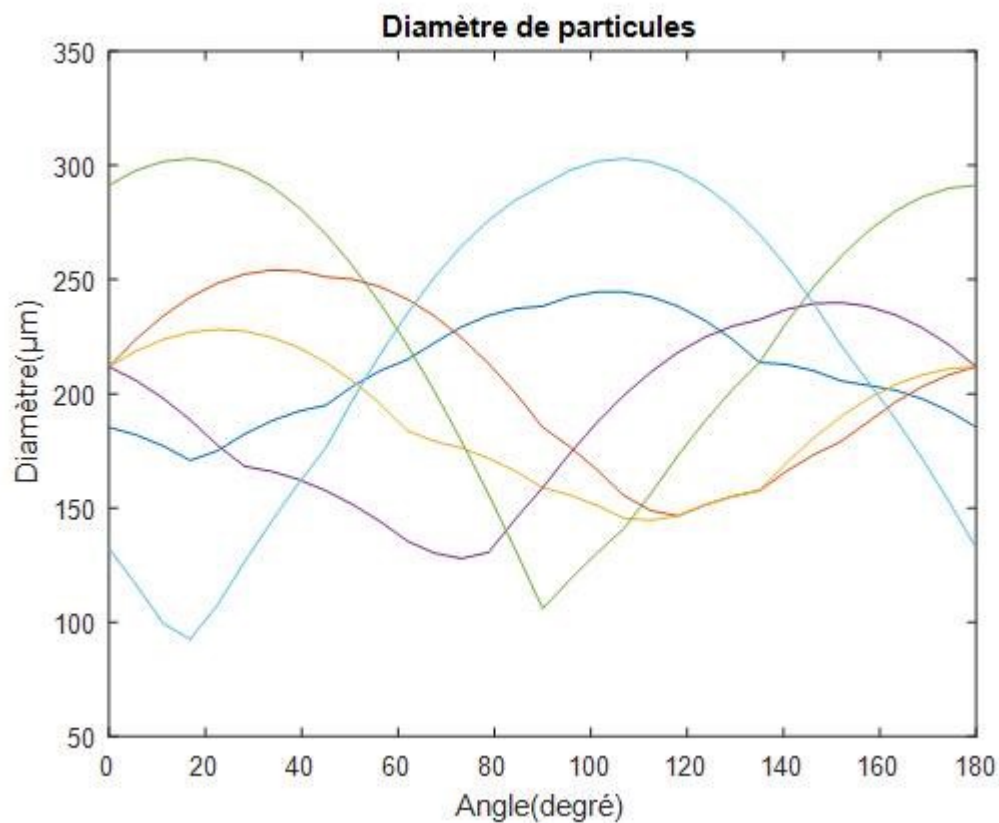


FIGURE III.29 – Variation de diamètre des particules en fonction de l'angle

D'après la figure III.29 on remarque que le diamètre des particules varie selon leurs formes géométriques et que le diamètre moyen mesuré est autour de $200\mu m$, cette valeur mesurée numériquement est proche à celle donnée par le constructeur.

III.6 Conclusion

Nous avons démontré dans ce travail que, comme en microscopie, nous pouvons obtenir des informations locales sur un hologramme numérique en utilisant une nouvelle technique basée sur la combinaison de la technique des deux vues et de la technique de réduction de l'ouverture de l'hologramme.

La technique des deux vues permet de localiser les particules avec une plus grande précision en croisant les données des deux vues.

III.6 Conclusion

La technique de réduction d'ouverture permet de traiter l'hologramme partie par partie, puisqu'un hologramme agit comme une lentille convergente, il est donc possible de rechercher les données nécessaires en traitant la région de leur bonne position.

On peut alors diviser l'hologramme en plusieurs parties appelées ouvertures, chaque ouverture peut être traitée séparément et tous les résultats peuvent ensuite être synthétisés pour obtenir l'ensemble des informations.

Cette technique a été appliquée à la détection des positions des particules de type traceur ainsi que leurs nombres et leurs dimensions.

Les résultats sont identiques avec ceux obtenus par le traitement de l'hologramme entier. La technique est donc très intéressante dans le cas d'hologrammes de particules sur des flux de canaux réels avec des densités élevées de particules.

La technique de détection 3D présentée ouvre de nouvelles perspectives d'applications en cytométrie de flux basée sur l'holographie numérique.

RÉFÉRENCES

- [1] U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl Opt*, vol. 33, no. 2, p. 179, 1994, doi : 10.1364/ao.33.000179.
- [2] U. Schnars and W. P. O. J. "Uptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms," *Meas. Sci. Technol*, vol. 13, pp. 85–101, 2002, [Online]. Available : <http://iopscience.iop.org/0957-0233/13/9/201>
- [3] U Schnars and W Jueptner, *Digital Holography : Digital Hologramrecording, Numerical reconstruction, and related techniques*. Springer, 2005.
- [4] C. S. VIKARM, *Particlefieldholography*. Cambridge UniversityPress, New York, 1992.
- [5] G. Shen and R. Wei, "Digital holographyparticle image velocimetry for the measurement of 3Dt-3c flows," *Opt Lasers Eng*, vol. 43, no. 10, pp. 1039–1055, 2005, doi : 10.1016/j.optlaseng.2004.06.026.
- [6] K. F. Tamrin, B. Rahmatullah, and S. M. Samuri, "An experimental investigation of three-dimensionalparticleaggregationusing digital holographicmicroscopy," *Opt Lasers Eng*, vol. 68, pp. 93–103, 2015, doi : 10.1016/j.optlaseng.2014.12.011.
- [7] M. Brunel et al., "Numericalmodels for exact description of in-situ digital inlineholographyexperimentswithirregularly-shapedarbitrarily-locatedparticles,"

- Applied Sciences (Switzerland), vol. 5, no. 2, pp. 62–76, 2015, doi : 10.3390/app5020062.
- [8] P. Memmolo et al., “Recent advances in holographic 3D particle tracking,” *Adv Opt Photonics*, vol. 7, no. 4, p. 713, 2015, doi : 10.1364/aop.7.000713.
- [9] T. W. Su, L. Xue, and A. Ozcan, “High-throughput lens-free 3D tracking of human sperm reveals rare statistics of helical trajectories,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 109, no. 40, pp. 16018–16022, 2012, doi : 10.1073/pnas.1212506109.
- [10] P. Langehanenberg, G. von Bally, and B. Kemper, “Autofocusing in digital holographic microscopy,” *3D Research*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2011, doi : 10.1007/3DRes.01(2011)4.
- [11] P. Langehanenberg et al., “Automated three-dimensional tracking of living cells by digital holographic microscopy,” *J Biomed Opt*, vol. 14, no. 1, p. 014018, 2009, doi : 10.1117/1.3080133.
- [12] M. Ugele et al., “Label-free, high-throughput detection of *P. falciparum* infection in spheroid erythrocytes with digital holographic microscopy,” *Lab Chip*, vol. 18, no. 12, pp. 1704–1712, 2018, doi : 10.1039/c8lc00350e.
- [13] F. C. Cheong, B. S. Rémi Dreyfus, J. Amato-Grill, K. Xiao, L. Dixon, and D. G. Grier, “Flow visualization and flow cytometry with holographic videomicroscopy,” *Opt Express*, vol. 17, no. 15, p. 13071, 2009, doi : 10.1364/oe.17.013071.
- [14] J. Min et al., “Quantitative phase imaging of cells in a flow cytometry arrangement utilizing Michelson interferometer-based off-axis digital holographic microscopy,” *J Biophotonics*, vol. 12, no. 9, pp. 1–10, 2019, doi : 10.1002/jbio.201900085.
- [15] G. Pan and H. Meng, “Digital holography of particle fields : reconstruction by use of complex amplitude,” *Appl Opt*, vol. 42, no. 5, 2003.
- [16] F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens, and C. Yourassowsky, “Focus plane detection-criteria in digital holographic microscopy by amplitude analysis,” *Opt Express*, vol. 14, no. 13, 2006.
- [17] M. Liebling and M. Unser, “Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel sparsity criterion,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 21, no. 12, 2004.
- [18] P. Memmolo, M. Paturzo, B. Javidi, P. A. Netti, and P. Ferraro, “Refocusing criterion via sparsity measurements in digital holography,” *Opt Lett*, vol. 39, no. 16, p. 4719, Aug. 2014, doi : 10.1364/ol.39.004719.

- [19] Z. Ren, E. Y. Lam, and J. Zhao, "Acceleration of autofocusing with improved edge extraction using structure tensor and Schatten norm," *Opt Express*, vol. 28, no. 10, p. 14712, May 2020, doi : 10.1364/oe.392544.
- [20] E. Malkiel, J. N. Abras, and J. Katz, "Automated scanning and measurements of particle distributions within a holographic reconstructed volume," *Meas Sci Technol*, vol. 15, no. 4, pp. 601–612, 2004, doi : 10.1088/0957-0233/15/4/001.
- [21] J. Sheng, E. Malkiel, and J. Katz, "Digital holographic microscope for measuring three-dimensional particle distributions and motions," *Appl Opt*, vol. 45, no. 16, 2006.
- [22] S.-H. Lee et al., "Characterizing and tracking single colloidal particles with video-holographic microscopy," *Opt Express*, vol. 15, no. 26, 2007, [Online]. Available : <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-15-4-1505>.
- [23] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, É. Thiébaud, and C. Goepfert, "Inverse-problem approach for particle digital holography : accurate location based on local optimization," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, no. 4, 2000.
- [24] N. Verrier and C. Fournier, "Digital holography super-resolution for accurate three-dimensional reconstruction of particle holograms," *Opt Lett*, vol. 40, no. 2, p. 217, Jan. 2015, doi : 10.1364/ol.40.000217.
- [25] N. Verrier, C. Fournier, and T. Fournel, "3D tracking the Brownian motion of colloidal particles using digital holographic microscopy and joint reconstruction," *Appl Opt*, vol. 54, no. 16, p. 4996, Jun. 2015, doi : 10.1364/ao.54.004996.
- [26] Tatiana Latychevskaia, Fabian Gehri, and Hans-Werner Fink, "Depth-resolved holographic reconstructions by three-dimensional deconvolution," *Opt Express*, vol. 18, no. 21, 2010, doi : 10.1364/OA License v1 VOR.
- [27] E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography," *Appl Opt*, vol. 39, no. 23, 2000.
- [28] T. Latychevskaia and H. W. Fink, "Solution to the twin image problem in holography," *Phys Rev Lett*, vol. 98, no. 23, Jun. 2007, doi : 10.1103/PhysRevLett.98.233901.
- [29] N. Koukourakis et al., "Depth-filtered digital holography," *Opt Express*, vol. 20, no. 20, 2012.
- [30] J. Kühn et al., "Dual-wavelength digital holographic microscopy with sub-nanometer axial accuracy," in *Optical Micro- and Nanometrology in Microsystems Technology II*, SPIE, Apr. 2008, p. 699503. doi : 10.1117/12.781263.

- [31] S. Grare, S. Coëtmellec, D. Allano, G. Grehan, M. Brunel, and D. Lebrun, "Dual wavelength digital holography for 3D particle image velocimetry," *Journal of the European Optical Society*, vol. 10, no. 15009, Feb. 2015, doi : 10.2971/jeos.2015.15009.
- [32] H. P. Kao and A. S. Verkman, "Tracking of single fluorescent particles in three dimensions : use of cylindrical optics to encode particle position," *Biophys J*, vol. 67, no. 3, pp. 1291–1300, 1994, doi : 10.1016/S0006-3495(94)80601-0.
- [33] C. Cierpka, M. Rossi, R. Segura, and C. J. Kähler, "On the calibration of astigmatism-particle tracking velocimetry for microflows," *MeasSciTechnol*, vol. 22, no. 1, 2011, doi : 10.1088/0957-0233/22/1/015401.
- [34] C. Pacheco, G. N. McKay, A. Oommen, N. J. Durr, R. Vidal, and B. D. Haeffele, "Adaptive sparse reconstruction for lensless digital holography via PSF estimation and phase retrieval," *Opt Express*, vol. 30, no. 19, p. 33433, Sep. 2022, doi : 10.1364/oe.458360.
- [35] L. E. Altman and D. G. Grier, "CATCH : Characterizing and Tracking Colloids Holographically Using Deep Neural Networks," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 124, no. 9, pp. 1602–1610, Mar. 2020, doi : 10.1021/acs.jpcc.9b10463.
- [36] J. Liang, L. Zhu, and L. V. Wang, "Single-shot real-time femtosecond imaging of temporal focusing," *Light Sci Appl*, vol. 7, no. 42, 2018, doi : 10.1038/s41377-018-0044-7.
- [37] J. Sheng, E. Malkiel, and J. Katz, "Single beam two-view holographic particle image velocimetry," *Appl Opt*, vol. 42, no. 2, pp. 235–250, 2003.
- [38] S. Boucherit, L. Bouamama, H. Benchikh, J.-M. Lenoir, and S. Simoëns, "Three-dimensional solid particle positions in a flow via multiangle off-axis digital holography," *Opt Lett*, vol. 33, no. 18, p. 2095, 2008, doi : 10.1364/ol.33.002095.
- [39] S. Boucherit, L. Bouamama, R. Zegadi, and S. Simons, "Formulation of off-axis single reference beam and two angle views for digital holography," *Journal of Optics*, vol. 12, no. 3, 2010, doi : 10.1088/2040-8978/12/3/035302.
- [40] S. M. Azzem, L. Bouamama, S. Simoëns, and W. Osten, "Two beam two orthogonal views particle detection," *Journal of Optics (United Kingdom)*, vol. 17, no. 4, p. 45301, 2015, doi : 10.1088/2040-8978/17/4/045301.
- [41] L. Bouamama and S. Simoëns, "Adaptation Du Montage D'Holographie Digitale Hors-Axe a Deux Vues a La Veine a Eau Du Lmfa," 3ème rencontre francophone

- d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides 13-14 novembre 2014 - ECL, Ecully France., no. February 2016, pp. 1–5, 2014.
- [42] R.M.Haralick and L.G.Shapiro,"SURVEY Image Segmentation Techniques," Comput.Vis.Graph.Image Process.,Vol.29,pp.100-132,1985
- [43] M. DaneshPanah and B. Javidi, "Segmentation of 3D holographic images usingbi-variatejointlydistributedregionsnake," Opt Express, vol. 14, no. 12, p. 5143, 2006, doi : 10.1364/oe.14.005143.
- [44] E. Malkiel, J. N. Abras, and J. Katz, "Automated scanning and measurements of particle distributions within a holographicreconstructed volume," MeasSciTechnol, vol. 15, no. 4, pp. 601–612, 2004, doi : 10.1088/0957-0233/15/4/001.
- [45] A. Castro and T. J. Naughton, "Perspectives of Digital Holograms," Opt Lett, vol. 32, no. 10, pp. 1229–1231, 2007.
- [46] C. P. McElhinney, B. M. Hennelly, J. B. McDonald, and T. J. Naughton, "Segmentation of macroscopicobject digital holographic reconstructions usingextracteddepth information," Optical and Digital Image Processing, vol. 7000, p. 700003, 2008, doi : 10.1117/12.782776.
- [47] Y. S. Choi and S. J. Lee, "Three-dimensionalvolumetricmeasurement of redblood-cell motion using digital holographicmicroscopy," Appl Opt, vol. 48, no. 16, pp. 2983–2990, 2009, doi : 10.1364/AO.48.002983.
- [48] B. Javidi, I. Moon, S. Yeom, and E. Carapezza, "3d imaging and recognition of microorganismusing single-exposure online (SEOL) digital holography," Advanced Sciences and Technologies for Security Applications, vol. 2, no. 12, pp. 139–156, 2006, doi : 10.1007/0-387-28001-47.
- [49] I. Moon, F. Yi, and B. Javidi, "Automatedthree-dimensionalmicrobialsensing and recognition using digital holography and statistical sampling," Sensors, vol. 10, no. 9, pp. 8437–8451, 2010, doi : 10.3390/s100908437.
- [50] N. J. Crane, S. W. Huffman, F. A. Gage, I. W. Levin, and E. A. Elster, Evidence of a heterogeneous tissue oxygenation : renalischemia / reperfusion injury in a large animal," J Biomed Opt, vol. 18, no. 3, pp. 035001–7, 2003, doi : 10.1117/1.
- [51] P. D. WELCH, "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra : A Method Based on Time Aver. aging Over Short, ModifiedPeriodograms," IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO AND ELECTROACOUSTICS, vol. AU-15, no. 2, pp. 70–73.

- [52] M. Abolhassani and Y. Rostami, "Speckle noise reduction by division and digital processing of a hologram," *Optik (Stuttg)*, vol. 123, no. 10, pp. 937–939, 2012, doi : 10.1016/j.ijleo.2011.06.060.
- [53] J. Maycock, B. Hennelly, and J. McDonald, "Single-shot speckle reduction in numerical reconstruction of digitally recorded holograms : comment," *Opt Lett*, vol. 40, no. 17, p. 3953, 2015, doi : 10.1364/ol.40.003953.
- [54] J. Leng, Z. Zhou, F. Li, Q. Zheng, and G. Liu, "Speckle noise suppression using part of pixels in a single-exposure digital hologram," *Optical Engineering*, vol. 56, no. 5, p. 053103, 2017, doi : 10.1117/1.oe.56.5.053103.
- [55] J. Restrepo, N. Correa-Rojas, and J. Herrera-Ramirez, "Speckle noise reduction in digital holography using a dmd and multi-hologram resampling," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 22, pp. 1–11, 2020, doi : 10.3390/app10228277.
- [56] S. Zaidi and L. Bouamama, "DETECTION DES POSITIONS DE PARTICULES PAR REDUCTION D ' OUVERTURE Plan de l ' exposé Introduction Principe de la réduction d ' ouverture Validation expérimentale Conclusion".
- [57] M. A. Nuño-Maganda and M. O. Arias-Estrada, "Real-time FPGA-based architecture for bicubic interpolation : An application for digital image scaling," *Proceedings - ReConFig2005 : 2005 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs*, vol. 2005, no. 1, 2005, doi : 10.1109/RECONFIG.2005.34.
- [58] Wen-Hsiang Tsai, "Moment-preserving thresholding : A new approach," *Comput Vis Graph Image Process*, vol. 29, no. 3, 1985.
- [59] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, vol. 9, no. 1, 1979.
- [60] M. Meng et al., "Crushing strength of artificial single-particle considering the effect of particle morphology," *Acta Geotech*, vol. 17, no. 9, pp. 3909–3926, Sep. 2022, doi : 10.1007/s11440-022-01516-6.
- [61] U. Ulusoy, "A Review of Particle Shape Effects on Material Properties for Various Engineering Applications : From Macro to Nanoscale," Jan. 01, 2023, MDPI. doi : 10.3390/min13010091.
- [62] Terence. Allen, *Particle Size Measurement*, 3rd edition. Springer New York, NY, 1981.

RÉFÉRENCES

- [63] W. Zhang et al., “Particle morphology, structure and properties of nascent ultra-high molecular weight polyethylene,” *R Soc Open Sci*, vol. 7, no. 8, Aug. 2020, doi : 10.1098/rsos.200663.
- [64] D. W. Smith, “Powder Characterization,” in *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, Elsevier, 1991, pp. 360–365. doi : 10.1016/B978-0-08-034720-2.50099-X.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse a été consacrée à l'application de la technique de réduction d'ouverture en holographie digitale pour la localisation tridimensionnelle de microparticules dans un volume. L'objectif principal était de surmonter les limites liées à la profondeur de champ et à la faible résolution des capteurs CCD utilisés pour l'enregistrement des hologrammes numériques.

Dans ce cadre, nous avons combiné la technique de la réduction d'ouverture avec l'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et à deux vues, afin d'améliorer la qualité de la reconstruction volumique et la précision de localisation de microparticules. Une attention particulière a été portée à l'augmentation de la résolution des hologrammes numériques par interpolation d'images, dont plusieurs méthodes ont été étudiées, programmées et évaluées à l'aide d'indicateurs objectifs tels que le SNR, le PSNR, le MSE, le SSIM et le temps de calcul. Cette analyse comparative a permis d'identifier la méthode d'interpolation la plus performante pour nos besoins expérimentaux.

Sur le plan expérimental, un montage d'holographie digitale hors axe à deux faisceaux et deux vues a été réalisé afin d'enregistrer les hologrammes numériques de microparticules. Les hologrammes obtenus ont été reconstruits numériquement à l'aide de la transformée de Fresnel sous l'environnement MATLAB. Des algorithmes ont été déve-

loppés pour le traitement des hologrammes, la binarisation et segmentation des images reconstruites, ainsi que pour la localisation tridimensionnelle des particules par calcul du centre de masse selon les coordonnées (x, y, z) .

Les résultats obtenus ont mis en évidence la validité et la robustesse de la méthode de la réduction d'ouverture. En effet, la synthèse des sous-ouvertures reconstruites permet d'obtenir une reconstruction 3D du volume global avec une meilleure précision et une résolution améliorée sans perte d'information.

D'un point de vue scientifique, cette approche offre une contribution originale à l'optique numérique en démontrant le potentiel de la réduction d'ouverture appliquée à l'holographie digitale. Elle ouvre également des perspectives prometteuses pour la caractérisation tridimensionnelle non destructive d'objets microscopiques, avec des applications possibles en métrologie optique, biophotonique et contrôle industriel.

Enfin, ce travail constitue une première étape vers le développement d'outils automatisés de localisation et de caractérisation 3D à partir d'hologrammes numériques. Des travaux futurs pourraient s'orienter vers l'optimisation du traitement en temps réel, l'extension à des particules en mouvement de tailles variées, à l'analyse de milieux complexes ou encore l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle pour la détection automatique des particules ainsi que l'amélioration de la résolution optique du système d'enregistrement d'hologramme numérique.

En conclusion, cette recherche a permis de démontrer la pertinence et le potentiel de la réduction d'ouverture appliquée à l'holographie digitale, en posant les bases d'une approche fiable et performante pour la reconstruction et la localisation tridimensionnelle de microparticules.

De nos jours l'holographie digitale s'impose au fil des mois comme une technique tridimensionnelle de visualisation et de mesure dans différents domaines. Particulièrement dans le domaine de la mécanique des fluides où elle est largement utilisée à travers ses deux configurations en ligne et hors axe. La première se caractérise par deux inconvénients majeurs, la présence des différents ordres sur le même axe et la limitation aux faibles concentrations de particules. Le schéma hors axe surmonte ces inconvénients par la séparation spatiale des ondes objet et de référence et des ordres reconstruits d'une part et s'adapte à de fortes concentrations. Seulement à la reconstruction, le fait que la profondeur de focalisation qui est relativement élevée, perturbe la localisation exacte des particules dans le volume d'étude. Ce travail de thèse consiste à chercher une solution à ce problème qui sera basée sur l'optique géométrique à savoir la réduction d'ouverture du système optique.

Mots clés : Mots clés : Holographie digitale, particules solides, réduction d'ouverture.

Abstract

Nowadays, digital holography is established as a three-dimensional visualization and measurement technique in different fields. Particularly in the field of fluid mechanics where it is widely used with its both configurations, on-axis and off-axis. The first one is characterized by two major drawbacks, the presence of different orders on the same axis and the limitation to low particle concentrations. The off-axis scheme overcomes these drawbacks by the spatial separation of the object and reference waves and the reconstructed orders on one hand and on the other hand could be adapted to high concentrations. However, in the reconstruction, the fact that the focusing depth is relatively high disrupts the exact location of the particles in the study volume. This thesis work consists to find a solution to this problem, which will be based on geometric optics, named the aperture reduction of the optical system.

Keywords : digital holography, solid particles, aperture reduction

الملخص

في الوقت الحاضر، تُعدّ الهولوغرافيا الرقمية تقنية راسخة للتصوير والقياس ثلاثي الأبعاد في مجالات مختلفة، لا سيما في مجال ميكانيكا الموائع حيث تُستخدم على نطاق واسع بتكوينها: التكوين الخطي (على المحور) والتكوين خارج المحور. يتميز التكوين الأول بعيبين رئيسيين، وهما وجود رُتب الحيود المختلفة على نفس المحور، والاقتصار على التراكيز المنخفضة للجسيمات. أما التكوين خارج المحور، فيتغلب على هذه العيوب من خلال الفصل المكاني بين الموجتين: الموجة الجسمية والموجة المرجعية، وكذلك بين رُتب الحيود المعاد بناؤها، ومن جهة أخرى يمكن تكيفه مع التراكيز العالية. غير أن إعادة البناء تعاني من مشكلة تتمثل في أن عمق البؤرة المرتفع نسبياً يُعيق تحديد المواقع الدقيقة للجسيمات داخل حجم الدراسة. يتمثل عمل هذه الأطروحة في إيجاد حل لهذه المشكلة، بالاعتماد على مبادئ البصريات الهندسية، من خلال ما يُعرف بتقليل فتحة النظام البصري.

الكلمات المفتاحية: الهولوغرافيا الرقمية، الجسيمات الصلبة، تقليل الفتحة.