

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 - SÉTIF 1

## **THESE**

Présentée à l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

## **Doctorat En Sciences**

École doctorale des technologies et des applications spatiales

Option : optique spatiale et mécanique de précision

Par

*Soumaya KARA MOHAMMED*

## **THEME**

### **ETUDE DES MOUVEMENTS DE PARTICULES SOLIDES PAR HOLOGRAPHIE DIGITALE**

Soutenue le : 09/10/2017

Devant le jury composé de :

Mr. DJABI Smail	Pr.	Université Sétif 1	Président
Mr. BOUAMAMA Larbi	Pr.	Université Sétif 1	Rapporteur
Mr. PICART Pascal	Pr.	Université du Maine	Co-rapporteur
Mr. FERRIA Kouider	MCA.	Université Sétif 1	Examineur
Mr. BENCHEIKH Abdelhalim	MCA.	Université Bordj Bou Arreridj	Examineur
Mr. MOKDAD Rabah	Pr.	Université Tizi-Ouzou	Examineur

---

## Remerciements

---

Je tiens à remercier tout d'abord ALLAH le plus grand et le plus puissant pour la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces longues années d'études et de recherche.

Je tiens également à remercier le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique, Algérien qui a financé mon séjour au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, dans le cadre du Programme National Exceptionnel (PNE). Sans ce financement, ce travail de thèse, réalisé en collaboration entre l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision, Universités de Sétif 1 et le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine n'aurait pas vu le jour. Je tiens à partager ce mérite avec toutes les personnes qui ont contribué à son aboutissement.

Toute ma reconnaissance à l'Université du Maine et plus particulièrement au Laboratoire d'Acoustique pour son accueil et son accompagnement.

Un grand merci à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans (ENSIM) et à tout son personnel pour leur accueil et leur accompagnement. Un merci particulier à Safia VIEIRA et Khedidja LE BAIL pour leur travail dévoué.

Toute ma reconnaissance au Professeur Larbi BOUAMAMA, mon directeur de thèse, pour le thème de recherche choisi, son suivi et ses conseils et le soutien qu'il m'a accordé durant ce travail. Monsieur, franchement et malgré toutes les difficultés rencontrées dans cette tâche ardue, j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec vous.

Toute ma gratitude au Professeur Pascal PICART, co-directeur de thèse, pour avoir accepté de codiriger cette thèse, de m'avoir permis de faire un séjour à l'ENSIM (LAUM), pour son accompagnement et son soutien permanent pendant la durée de mon séjour, merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir inculqué le goût de la recherche. Ses qualités scientifiques et humaines et son dynamisme m'ont été d'une grande importance.

Je remercie également le professeur Smail DJABI de l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Mes remerciements vont également au Professeur Rabah MOKDAD de l'Université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou qui a bien voulu accepter le déplacement sur Sétif pour juger ce travail.

Je remercie le Docteur Kouider FERRIA de l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie le Docteur Abdelhalim BENCHEIKH de l'Université Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj qui a également accepté le déplacement sur Sétif pour juger ce travail.

## TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<hr/>	
<b>Chapitre I</b> <b>Holographie numérique</b>	<b>10</b>
<hr/>	
I.1 Introduction	11
I.2 Bases de l'holographie numérique	11
I.2.1 Enregistrement	11
I.2.2 Différentes configurations d'enregistrement	13
I.2.3 Capteur d'enregistrement	16
I.2.4 Condition d'enregistrement	17
I.3 Reconstruction numérique d'un hologramme	18
I.3.1 Reconstruction numérique par transformée de Fresnel	19
I.3.2 Reconstruction numérique par convolution	22
I.4 Conclusion	23
I.5 Références	23
<hr/>	
<b>Chapitre II</b> <b>Holographie numérique hors-axe à deux vues</b> <b>appliquée à la visualisation des particules marqueurs</b>	<b>25</b>
<hr/>	
II.1 Introduction	26
II.2 Définition du multiplexage	26
II.3 Différents types de multiplexage	27
II.3.1 Multiplexage angulaire	27
II.3.2 Multiplexage chromatique	28

II.3.3 Multiplexage hybride : combinaison entre l'angulaire et le chromatique	28
II.4 Holographie hors-axe à deux vues monochromes avec un seul faisceau de référence	29
II.4.1 Simulation d'un hologramme hors axe à deux vues monochromes avec un seul faisceau de référence	30
II.4.1.1 Cas d'une particule opaque	30
II.4.1.1.1 Processus d'enregistrement	32
II.4.1.1.2 Processus de reconstruction	35
II.4.1.1.3 Influence de la bande passante de filtrage	39
II.4.1.2 Cas d'une particule transparente (objet de phase)	42
II.4.1.2.1 Processus d'enregistrement	42
II.4.1.2.2 Processus de reconstruction	43
II.4.1.2.3 Influence de la bande passante de filtrage	44
II.5 Holographie hors-axe à deux vues bichromes avec deux faisceaux de référence	46
II.5.1 Processus d'enregistrement	47
II.5.2 Processus de reconstruction	49
I.6 Conclusion	51
I.7 Références	51

---

## **Chapitre III**

### **Critères de refocalisation en holographie numérique hors-axe à deux vues**

---

III.1 Introduction	55
III.2 Critères de refocalisations en holographie numérique de particules	55
III.3 Différents critères de refocalisations en holographie numérique	56
III.3.1 Critère d'Entropie (ENTR)	56
III.3.2 Critère d'Amplitude intégrée (Md)	56

III.3.3 Critère du Gradient (GRA) et du Laplacian (LAP)	57
III.3.4 Critère de Variance (VAR)	57
III.3.5 Critère de la Fonction Spectrale de Fourier (SPEC)	58
III.3.6 Critère de Tamura (TC)	58
III.3.7 Critère du coefficient de corrélation (CC)	58
III.3.8 Critère de rapport complexe (RC)	59
III.3.9 Critère d'index de Gini (GI)	59
III.3.10 Critères développés (GRAX, GRAY et LAPMAX)	59
III.4 Critères de refocalisation appliqués à des hologrammes simulés de particules	60
III.4.1 Refocalisation pour une particule opaque	61
III.4.1.1 Processus d'enregistrement	61
III.4.1.2 Processus de reconstruction	61
III.4.1.3 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la vue directe	63
III.4.1.4 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la vue directe	65
III.4.1.5 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la vue orthogonale	66
III.4.1.6 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la vue orthogonale	68
III.4.2 Refocalisation pour une particule transparente (objet de phase)	70
III.4.2.1 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la vue directe	71
III.4.2.2 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la vue directe	72
III.5 Critères de refocalisation appliqués à des hologrammes expérimentaux	74
III.5.1 Dispositif expérimental	74
III.5.2 Enregistrement d'hologrammes expérimentaux	76
III.5.3 Reconstruction d'hologrammes expérimentaux	76
III.5.4 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de l'USAF1951	78

III.5.5 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de l'USAF1951	79
III.5.6 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la particule opaque	80
III.5.7 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la particule opaque	81
III.6 Comparaison du temps de calcul	82
III.7 Discussion générale	83
III.8 Conclusion	84
III.9 Références	85

---

## Chapitre IV

### **Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues**

88

---

IV.1 Introduction	89
IV.2 Problématique d'identification des particules	90
IV.2.1 Hologramme enregistré	90
IV.2.2 Hologramme reconstruit	94
IV.3 Calibrage des deux vues	96
IV.3.1 Calcul du centre de gravité de chaque vue (objet test)	96
IV.3.1.1 Dérivation de l'image binaire	96
IV.3.1.2 Recherche des points du cercle	97
IV.3.1.3 Superposition de deux vues (superposition au centre de gravité)	98
IV.4 Application de la technique aux particules réelles en mouvement	100
IV.5 Représentation 3D	103
IV.6 Conclusion	104
IV.7 Références	106

---

## **Conclusion Générale**

109

---

**Résumé**

**Abstract**

---

## **LISTE DES FIGURES**

---

### **CHAPITRE I**

<b>Fig.I.1</b>	Principe d'obtention d'un hologramme.....	12
<b>Fig.I.2.a</b>	Principe de la configuration en ligne.....	14
<b>Fig.I.2.b</b>	Principe de la configuration hors-axe.....	14
<b>Fig.I.3</b>	Différentes géométries d'enregistrement des hologrammes, (a) de Fresnel ; (b) de Fraunhofer ; (c) de Fourier ; (d) image.....	16
<b>Fig.I.4</b>	Géométrie d'un capteur sous forme de grille de pixels. $M_x$ : nombre de pixels du capteur selon les axes y et x ; $\Delta x, \Delta y$ : largeurs des pixels suivant les directions x et y ; $p_x, p_y$ : pas des pixels selon les directions x et y	17
<b>Fig.I.5</b>	Disposition des systèmes de coordonnées en holographie numérique.....	19

### **CHAPITRE II**

<b>Fig.II.1</b>	Multiplexage angulaire de deux hologrammes avec la même longueur d'onde et deux angles d'enregistrement différents $\theta_1$ et $\theta_2$ ; illustration des ondes objets (à gauche), positionnement des ordres à la reconstruction (à droite) .....	27
<b>Fig.II.2</b>	Multiplexage chromatique entre deux hologrammes avec deux longueurs d'ondes et le même angle d'enregistrement $\theta$ ; illustration des ondes objets (à gauche), positionnement des ordres à la reconstruction (à droite).....	28
<b>Fig.II.3</b>	Multiplexage combiné entre l'angulaire et le chromatique	29
<b>Fig.II.4</b>	Disposition optique de l'enregistrement holographique hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence. La ligne pointillée correspond à la deuxième vue de (BS3) .....	30
<b>Fig.II.5</b>	Configuration pour l'enregistrement hors axe à deux vues avec un seul faisceau de référence.....	31

<b>Fig.II.6</b>	Hologrammes simulés d'une particule opaque, (a) hologramme de la vue directe, (b) hologramme de la vue orthogonale, (c) hologramme des deux vues, (d) zoom sur la région sélectionnée.....	34
<b>Fig.II.7</b>	Synoptique de l'algorithme de convolution avec spectre angulaire.....	35
<b>Fig.II.8</b>	Reconstruction de la vue directe en amplitude, (a) spectre de l'hologramme hors axe à deux vues, (b) filtre binaire {F}, (c) modulation spatiale de l'onde de référence ; (d) fonction de transfert correspondant au spectre angulaire modulé spatialement, (e) vue directe reconstruite en amplitude, (f) ROI agrandie.....	37
<b>Fig.II.9</b>	Reconstruction de la vue orthogonale en amplitude, (a) spectre de l'hologramme hors axe à deux vues ; (b) filtre binaire {F}, (c) modulation spatiale de l'onde de référence, (d) fonction de transfert correspondant au spectre angulaire modulé spatialement, (e) vue orthogonale reconstruite en amplitude, (f) ROI agrandie.....	39
<b>Fig.II.10</b>	Contraste et profil de reconstruction d'un hologramme d'une particule opaque située à $drD = 80.91\text{mm}$ du capteur, (a) vue directe, (b) courbe de variation du contraste de la particule en fonction de la bande passante dans l'intervalle $\Delta U = \Delta V = \{3.5, 30\} \text{mm}^{-1}$ en pas de $0.1\text{mm}^{-1}$ , (c) profil de focalisation par rapport aux distances de reconstruction $drD = \{dD-20, dD+20\}$ en pas de $0.2 \text{mm}$ , (d) profil de focalisation en 3D.....	40
<b>Fig.II.11</b>	Contraste et profil de reconstruction d'un hologramme d'une particule opaque située à $drO = 93.85 \text{mm}$ du capteur, (a) vue orthogonale, (b) courbe de variation du contraste de la particule en fonction de la bande passante dans l'intervalle $\Delta U = \Delta V = \{3.5, 30\} \text{mm}^{-1}$ en pas de $0.1\text{mm}^{-1}$ , (c) profil de focalisation par rapport aux distances de reconstruction $drD = \{dO-20, dO+20\}$ en pas de $0.2 \text{mm}$ , (d) profil de focalisation en 3D.....	41
<b>Fig.II.12</b>	Hologrammes simulés d'une particule transparente (objet de phase), (a) hologramme de la vue directe, (b) hologramme de la vue	

	orthogonale, (c) hologramme des deux vues, (d) agrandissement de la région sélectionnée.....	43
<b>Fig.II.13</b>	Reconstruction de l'image en phase, (a) vue directe reconstruite en phase, (b) agrandissement de la ROI, (c) vue orthogonale reconstruite en phase, (d) agrandissement de la ROI.....	44
<b>Fig.II.14</b>	Contraste et profil de reconstruction d'un hologramme d'une particule transparente (objet de phase) située à $d_{r0} = 93.85$ mm du capteur, (a) vue orthogonale, (b) courbe de variation du contraste de la particule en fonction de la bande passante dans l'intervalle $\Delta U = \Delta V = \{3.5, 30\}$ mm <sup>-1</sup> en pas de 0.1mm <sup>-1</sup> , (c) profil de focalisation par rapport aux distances de reconstruction $d_{rD} = \{d0-20, d0+20\}$ en pas de 0.2 mm, (d) profil de focalisation en 3D.....	45
<b>Fig.II.15</b>	Configuration pour l'enregistrement hors axe à deux vues bichromes avec deux faisceaux de référence.....	46
<b>Fig.II.16</b>	Images de simulation : (a) et (b) éclairagements gaussiens avec des taches de diffractions parasites aléatoires pour la vue directe et la vue orthogonale, (c) hologramme simulé des particules opaques de la vue directe, (d) hologramme simulé des particules opaques de la vue orthogonale.....	49
<b>Fig.II.17</b>	Reconstruction d'images en amplitude, (a) vue directe, (b) vue orthogonale.....	50
<b>Fig.II.18</b>	Représentation des particules en 3D.....	50

### **CHAPITRE III**

<b>Fig.III.1</b>	Hologrammes simulés d'une particule opaque, (a) hologramme de la vue directe, (b) hologramme de la vue orthogonale.....	61
<b>Fig.III.2</b>	Reconstruction de l'image en amplitude, (a) vue directe reconstruite en amplitude, (b) agrandissement de la ROI, (c) vue orthogonale reconstruite en amplitude, (d) agrandissement de la ROI.....	62
<b>Fig.III.3</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliquée à l'amplitude reconstruite de la vue directe, (a) les critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA,	

	GRAX et GRAY, (b) les critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) le critère CC, (d) le critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	64
<b>Fig.III.4</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliquée à la phase reconstruite de la vue directe, (a) les critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) les critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) le critère CC, (d) le critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	66
<b>Fig.III.5</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliquée à l'amplitude reconstruite de la vue orthogonale, (a) les critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) les critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, C) le critère CC, (d) le critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	68
<b>Fig.III.6</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliqués à la phase reconstruite de la vue orthogonale, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	70
<b>Fig.III.7</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule de phase, appliqués à l'amplitude reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	71
<b>Fig.III.8</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule transparente, appliquées à la phase reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC lors	

	de la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	73
<b>Fig.III.9</b>	Montage expérimental, PBS : séparateur de faisceau polarisé, $\lambda / 2$ : lame demi-onde, Ob : objectif de microscope, SF : filtre spatial, L : objectif collimateur, M : miroirs, CCD : capteur d'enregistrement.....	75
<b>Fig.III.10</b>	Hologrammes expérimentaux (a) hologramme numérique de l'USAF1951, (b) hologramme numérique de la particule opaque.....	76
<b>Fig.III.11</b>	Résultats expérimentaux, (a ) amplitude reconstruite à la distance 535mm, (b) agrandissement de la ROI pour l'application des critères aux images USAF1951, (c) image de phase de l'USAF 1951 reconstruite à la distance 535mm, (d) agrandissement de la ROI, (e) image d'amplitude de la particule reconstruite à la distance 300mm, (f) image de phase de la particule reconstruite à la distance 300mm.....	77
<b>Fig.III.12</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la mire USAF1951, appliqués à l'amplitude reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	78
<b>Fig.III.13</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la mire USAF1951, appliqués à la phase reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	79
<b>Fig.III.14</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule opaque, appliqués à l'amplitude reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	81

<b>Fig.III.15</b>	Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule opaque, appliqués à la phase reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.....	82
-------------------	---	----

## **CHAPITRE IV**

<b>Fig.IV.1</b>	(a) Montage expérimental, PBS : séparateur de faisceau polarisé, SF : filtre spatial, L : lentilles, DF : filtre dichroïque, M : miroirs, CCD : capteur d'enregistrement couleur, dD : distance pour la VD, dO : distance pour la VO, (b) VD fournit une projection dans le plan XY, (c) VO fournit une projection dans le plan ZY. La direction Y du repère est la même pour les deux vues.....	92
<b>Fig.IV.2</b>	Hologrammes expérimentaux (a) Hologramme de référence, (b) hologramme bi-chromatique numérique à deux vues, (c) VD enregistré par $\lambda = 457\text{nm}$ , (d) VO enregistré par $\lambda = 532\text{nm}$ .....	94
<b>Fig.IV.3</b>	Hologrammes reconstruits : (a) amplitude reconstruite de la VD à $d_r = 300\text{mm}$ , (b) amplitude reconstruite de la VO à $d_r = 700\text{mm}$ .....	95
<b>Fig.IV.4</b>	Dérivation de l'image binaire fournissant le contour : (a) vue directe, (b) vue orthogonale .....	97
<b>Fig.IV.5</b>	Recherche des points du cercle : (a) vue directe, (b) vue orthogonale.....	97
<b>Fig.IV.6</b>	(a) l'image bi-couleurs des deux vues sans calibrage, (b) l'image bi-couleurs des deux vues après l'application du processus d'étalonnage, (c) la VD dans l'ensemble commun de l'axe de référence, (d) la VO dans l'ensemble commun de l'axe de référence .....	99
<b>Fig.IV.7</b>	(a) Hologramme de référence lorsque la cuve est remplie d'eau et sans particules, (b) hologramme numérique bi-couleur de deux vues avec des particules dans la cuve, (c) amplitude de l'image au niveau du capteur pour la VD à $\lambda = 457\text{ nm}$ , ( d) amplitude de l'image au niveau du capteur pour la VO à $\lambda = 532\text{nm}$ , (e) amplitude reconstruite de la VD à $d_r \sim 300\text{mm}$ , (f) amplitude reconstruite de le la VO à $d_r \sim 700\text{mm}$ ...	101

<b>Fig.IV.8</b>	(a) Vue directe étalonnée des particules, (b) vue orthogonale des particules, (c) centroïdes des particules dans la vue directe, (d) centroïdes des particules dans la vue orthogonale.....	103
<b>Fig.IV.9</b>	Reconstruction 3D du mélange entre la vue directe à la figure (IV.8.c) et la vue orthogonale de la figure (IV.8.b).....	104

---

## Introduction générale

---

L'holographie numérique a trouvé son origine au début des années 1970 [1], mais elle n'a été pratiquement réalisable qu'à partir de 1994 [2]. L'holographie numérique est une méthode optique qui consiste à enregistrer un hologramme sur un capteur matriciel et à reconstruire numériquement le champ complexe de la scène objet 3D [2]. Depuis la démonstration pratique fournie par Schnars et al. [2], de nombreuses applications ont été développées telles que la microscopie à contraste de phase [3-9], la reconnaissance d'objets tridimensionnels et la sécurisation des informations [10-13], l'imagerie de polarisation [14-15], la mesure de la forme de surface ainsi que les investigations sur les propriétés des matériaux [16-23], l'analyse des vibrations avec des lasers pulsés et par temps moyenné [24-31]. Les propriétés particulières de l'holographie en ligne pour l'imagerie ont également été étudiées pour l'extraction de particule [32-46]. Cependant, l'imagerie holographique numérique fournit en fait une image 2,5D car il manque la parallaxe par le fait que l'holographie numérique n'est pas capable de « voir derrière l'objet » [47]. Cette propriété devient un facteur limitant pour l'imagerie de particules lorsque le nombre de particules est important. Il n'est alors pas possible de discriminer deux particules alignées le long de l'axe de visée. Ceci est encore plus vrai si les particules ne sont pas régulières, c'est-à-dire non parfaitement sphériques. S'ajoute à cela le fait que l'holographie présente une grande profondeur de focalisation de par les faibles ouvertures numériques mises en jeu, ce qui accentue la difficulté d'identifier le plan de netteté de localisation de ces particules. Des solutions pour résoudre ces problèmes peuvent être trouvées en utilisant les problèmes inverses, pour lesquels un modèle paramétrique du diagramme de diffraction de la particule est ajusté pour extraire la position et le diamètre [36-46]. Cependant, bien que fournissant des résultats spectaculaires, une telle approche qui nécessite des particules de formes parfaitement sphériques, n'est pas entièrement adaptée aux particules non calibrées ou non régulières. Une approche alternative pour obtenir l'effet de parallaxe et le plan de netteté est basée sur le multiplexage des hologrammes sans multiplier le nombre de capteurs [48-51]. Plusieurs applications du multiplexage d'hologrammes ont été

décrites au cours des dernières années. Par exemple, Wu et al [52] ont utilisé le multiplexage combiné angulaire, par polarisation et chromatisme pour enregistrer quatre régions différentes de l'objet avec un capteur CCD unique. Kuhn et al [53] ont développé un système de multiplexage basé sur deux paires d'ondes de référence et objet ayant des longueurs d'ondes et des directions de propagation différentes. De cette façon, le filtrage spatial a été rendu possible par la séparation spatio-chromatique des ordres diffractés dans le spectre de Fourier des hologrammes. La méthode permet alors de faire de la profilométrie à deux longueurs d'ondes. Avec un dispositif d'holographie de Fresnel, Picart et al [54] ont proposé un schéma bi-couleur pour mesurer simultanément la déformation dans-le-plan et hors-du-plan d'une structure soumise à un chargement mécanique. Plus récemment, dans le contexte de l'imagerie des particules, Boucherit et al [55,56] ont développé une technique à deux vues basée sur le multiplexage angulaire en utilisant un seul faisceau de référence qui permet de discriminer selon la direction axiale. Dans cette technique de multiplexage spatial utilise un mélange cohérent de trois ondes (deux vues et une référence) mais ne conduit pas toujours à une séparation claire des ordres de diffraction. De plus, en raison des conditions d'enregistrement de Shannon en configuration d'holographie de Fresnel, la distance entre les particules et le capteur doit être augmentée. Ceci a pour conséquence de réduire la résolution spatiale dans les images reconstruites. Une solution alternative serait d'utiliser deux longueurs d'onde pour permettre d'encoder les informations des deux vues sur un seul hologramme de Fresnel numérique bi-couleur.

Parallèlement aux problèmes liés à la parallaxe, la recherche du meilleur plan de netteté des images a stimulé un grand nombre d'équipes de recherche. Différentes techniques de recherche du plan de netteté (critères de refocalisation) ont été développées dans la littérature [57-65]. Ces critères peuvent être appliqués soit sur des hologrammes multiplexés soit sur des hologrammes simples. La question de savoir quels sont les critères de netteté les plus performants pour l'imagerie de particule est ouverte. Afin d'obtenir une réponse claire sur les meilleurs critères de netteté et l'obtention d'un mode de parallaxe complet pour les particules, nous avons étudié l'ensemble des critères développés dans la littérature sur des hologrammes de particules.

Ce travail de thèse synthétise les travaux de simulation et expérimentaux que nous avons mené sur les critères de refocalisation et en holographie numérique bicouleur hors-axe à deux vues et l'application à l'étude de particules de type traceur. Nous avons choisi de nous concentrer sur les particules non calibrées (non régulières, non sphériques) car l'étude de leurs propriétés dynamiques dans un fluide est d'un intérêt croissant.

Le manuscrit est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous rappellerons les bases théoriques de l'holographie numérique à savoir le processus d'enregistrement et de reconstruction de l'hologramme. L'enregistrement d'un hologramme digital sera ensuite abordé avec les deux configurations (en ligne et hors axe), en montrant les différents paramètres d'enregistrement et leurs effets sur l'image reconstruite.

Nous présentons à la fin du chapitre, les algorithmes de reconstruction des hologrammes digitaux par transformée de Fresnel et par convolution.

Au second chapitre, nous montrons le principe de simulation d'un hologramme (de particules) à deux vues soit avec un seul faisceau de référence, soit avec deux faisceaux de référence en utilisant deux techniques de multiplexage angulaire et chromatique.

Le but le plus important dans l'utilisation du multiplexage en holographie numérique est l'augmentation du champ d'étude de l'objet par enregistrement de plusieurs régions du même objet ainsi que l'augmentation de la résolution sur la profondeur.

Le traitement numérique pour obtenir des images à partir des particules est basé sur la convolution.

Le troisième chapitre sera dédié aux critères de refocalisation. Des critères de refocalisation ont été proposés au cours des dernières années. Généralement, le meilleur plan de focalisation est déterminé par la distance de reconstruction pour laquelle la fonction du critère considéré présente un extremum (maximum ou minimum).

Pour évaluer la robustesse de ces critères, treize critères sont comparés avec application sur les objets d'amplitude et de phase. La simulation et les résultats expérimentaux conduisent à définir une règle générale et à présenter les critères les plus robustes pour une refocalisation précise et rapide des particules sur des hologrammes numériques.

Le dernier chapitre présente une approche basée sur deux vues orthogonales et deux longueurs d'onde pour l'enregistrement des hologrammes bi-couleurs hors axe. L'approche permet de discriminer les particules alignées le long de l'axe de visée. Un processus de recalage est proposé et est basé sur le théorème de modulation pour superposer parfaitement les deux vues dans un repère XYZ, pour obtenir les images de particules dans le volume 3D. Enfin, l'approche est appliquée sur des particules dynamiques.

## Références

- [1] M.A. Kronrod, N.S. Merzlyakov, and L.P. Yaroslavskii, Reconstruction of a hologram with a computer, *Soviet Physics Technical Physics* 17, 333-334 (1972).
- [2] U. Schnars, and W. Jüptner, Direct recording of holograms by a CCD target and numerical 410 reconstruction, *Applied Optics* 33, 179-181 (1994).
- [3] T. Zhang, and I. Yamaguchi, Three-dimensional microscopy with phase shifting digital holography, *Optics Letters* 23, 1221-1223 (1998).
- [4] E. Cuche, F. Bevilacqua, and C. Depeursinge, Digital holography for quantitative phase contrast 414 imaging, *Optics Letters* 24, 291-293 (1999).
- [5] P. Ferraro, D. Alferi, S. De Nicola, L. De Petrocellis, A. Finizio, and G. Pierattini, Quantitative phase contrast microscopy by a lateral shear approach to digital holographic image reconstruction, *Optics Letters* 31, 1405-1407 (2006).
- [6] G. Pedrini, and H.J. Tiziani, Short-coherence digital microscopy by use of a lens less holographic imaging system, *Applied Optics* 41, 4489-4496 (2002).
- [7] C. Mann, L. Yu, L. Chun-Min, and M. Kim, High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography, *Optics Express* 13, 8693-8698 (2005).

- [8] K. Chalut, W. Brown, and A. Wax, Quantitative phase microscopy with asynchronous digital holography, *Optics Express* 15, 3047-3052 (2007).
- [9] J. Kühn, T. Colomb, F. Montfort, F. Charrière, Y. Emery, E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition, *Optics Express* 15, 7231-7242 (2007).
- [10] B. Javidi, and E. Tajahuerce, Three-dimensional object recognition by use of digital holography, *Optics Letters* 25, 610-612 (2000).
- [11] B. Javidi, and T. Nomura, Securing information by use of digital holography, *Optics Letters* 25, 28-30 430 (2000).
- [12] Y. Frauel, and B. Javidi, Neural network for three-dimensional object recognition based on digital holography, *Optics Letters* 26, 1478-1480 (2001).
- [13] B. Javidi, and D. Kim, Three-dimensional-object recognition by use of single-exposure on-axis digital holography, *Optics Letters* 30, 236-238 (2005).
- [14] T. Nomura, and B. Javidi, Object recognition by use of polarimetric phase-shifting digital holography, *Optics Letters* 32, 2146-2148 (2007).
- [15] T. Nomura, and B. Javidi, Object recognition by use of polarimetric phase-shifting digital holography, *Optics Letters* 32, 2146-2148 (2007).
- [16] I. Yamaguchi, J. Kato, and S. Ohta, Surface shape measurement by phase shifting digital holography, *Optical Review* 8, 85-89 (2001).
- [17] I. Yamaguchi, T. Ida, M. Yokota, and K. Yamashita, Surface shape measurement by phase shifting 442 digital holography with a wavelength shift, *Applied Optics* 45, 7610-7616 (2006).
- [18] M. Mosarraf, G. Sheoran, D. Singh, and C. Shakher, Contouring of diffused objects by using digital holography, *Optics and Lasers in Engineering* 45, 684-689 (2007).
- [19] S. Seebacher, W. Osten, T. Baumbach, and W. Juptner, The determination of material parameters of microcomponents using digital holography, *Optics and Lasers in Engineering* 36, 103-126 (2001).
- [20] Y. Morimoto, T. Nomura, M. Fjigaki, S. Yoneyama, and I. Takahashi, Deformation measurement by 448 phase shifting digital holography,

- Experimental Mechanics 45, 65-70 (2005).
- [21] P. Picart, E. Moisson, and D. Mounier, Twin sensitivity measurement by spatial multiplexing of digitally recorded holograms, *Applied Optics* 42, 1947-1957 (2003).
- [22] P. Picart, B. Diouf, E. Lolive, and J.-M. Berthelot, Investigation of fracture mechanisms in resin concrete using spatially multiplexed digital Fresnel holograms, *Optical Engineering* 43, 1169-1176 453 (2004).
- [23] T. Baumbach, W. Osten, C. von Kopylow, and W. Juptner, Remote metrology by comparative digital holography, *Applied Optics* 45, 925-934 (2006).
- [24] G. Pedrini, and H.J. Tiziani, Digital double pulse holographic interferometry using Fresnel and image plane holograms, *Measurement* 18, 251-260 (1995).
- [25] Y. Fu, G. Pedrini, and W. Osten, Vibration measurement by temporal Fourier analyses of a digital hologram sequence, *Applied Optics* 46, 5719-5727 (2007).
- [26] G. Pedrini, S. Schedin, and H.J. Tiziani, Pulsed digital holography combined with laser vibrometry for 3D measurements of vibrating objects, *Optics and Lasers in Engineering* 38, 117-129 (2002).
- [27] P. Picart, J. Leval, D. Mounier, and S. Gougeon, Time averaged digital holography, *Optics Letters* 28, 1900-1902 (2003).
- [28] N. Demoli, and I. Demoli, Dynamic modal characterization of musical instruments using digital holography, *Optics Express* 13, 4812-4817 (2005).
- [29] A. Asundi, and V.R. Singh, Time-averaged in-line digital holographic interferometry for vibration analysis, *Applied Optics* 45, 2391-2395 (2006).
- [30] J. Leval, P. Picart, J.-P. Boileau, and J.-C. Pascal, Full field vibrometry with digital Fresnel holography, *Applied Optics* 44, 5763-5772 (2005).
- [31] P. Picart, J. Leval, F. Piquet, J.-P. Boileau, Th. Guimezanes, and J.-P. Dalmont, Tracking high amplitude auto-oscillations with digital Fresnel holograms, *Optics Express* 15, 8263-8274 (2007). 472 32.
- [32] D.J. Stigliani, A.R. Mittra, R.G. Semonin, and J.S. Daniel, Particle-size measurement using forward-scatter holography, *JOSA A* 60, 1059-1067 (1970).
- [33] K.D. Hinsch, Holographic particle image velocimetry, *Measurement Science &*

Technology 13, R61475 R72 (2002).

- [34] L. Onural, and M.T. Ozgen, Extraction of three-dimensional object-location Information directly from in-line holograms using Wigner analysis, *JOSA A* 9, 252-260 (1992).
- [35] S. Coetmellec, D. Lebrun, and C. Oskul, Application of the two-dimensional fractional-order Fourier transformation to particle field digital holography, *JOSA A* 19, 1537-1546 (2002).
- [36] F. Nicolas, S. Coetmellec, M. Brunel, and D. Lebrun, Digital in-line holography with a sub-picosecond laser beam, *Optics Communication* 268, 27-33 (2006).
- [37] F. Nicolas, S. Coëtmelec, M. Brunel, and D. Lebrun, Suppression of the Moiré effect in subpicosecond digital in-line holography, *Optics Express* 15, 887-895 (2007).
- [38] M. Malek, D. Allano, S. Coëtmelec, D. Lebrun, Digital in-line holography: influence of the shadow 485 density on particle field extraction, *Optics Express* 12, 2270-2279 (2004).
- [39] L. Denis, C. Fournier, T. Fournel, C. Ducottet, and D. Jeulin, Direct extraction of the mean particle size 487 from a digital hologram, *Applied Optics* 45, 944-952 (2006).
- [40] L. Denis, D. Lorenz, E. Thiebaut, C. Fournier, and D. Trede, Inline hologram reconstruction with sparsity constraints, *Opt. Lett.* 34, 3475-3477 (2009).
- [41] N. Verrier, C. Fournier, and T. Fournel, 3D tracking the Brownian motion of colloidal particles using digital holographic microscopy and joint reconstruction, *Appl. Opt.* 54, 4996-5002 (2015).
- [42] N. Verrier and C. Fournier, Digital holography super-resolution for accurate three-dimensional reconstruction of particle holograms, *Opt. Lett.* 40, 217-220 (2015).
- [43] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, A Thibaut, and C. Goepfert, Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization, *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 1164-1171 496 (2007).
- [44] M. Seifi, C. Fournier, N. Grosjean, L. Macas, J. Maris, and L. Denis, Accurate 3D tracking and size measurement of evaporating droplets using in-line digital holography and inverse problems reconstruction approach, *Opt. Express* 21,

- 27964-27980 (2013).
- [45] M. Seifi, C. Fournier, L. Denis, D. Chareyron, and J. Maris, Three-dimensional reconstruction of particle holograms: a fast and accurate multiscale approach, *J. Opt. Soc. Am. A* 29, 1808-1817 (2012).
  - [46] F. Soulez, L. Denis, A. Thiebaut, C. Fournier, and C. Goepfert, Inverse problem approach in particle digital holography: out-of-field particle detection made possible, *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 3708-3716 (2007).
  - [47] S.S. Kou, and G.J.R. Sheppard, Imaging in digital holographic microscopy, *Opt. Express* 15, 13640-13648 (2007).
  - [48] J. Weng, and J. Zhong, Angular multiplexing and de-multiplexing by Gabor wavelet transform in digital holography, *Optics Communications* 291, 124-132 (2013).
  - [49] C. Yuan, H. Zhai, and H. Liu, Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis, *Opt. Letters* 33, 2356-2358 (2008).
  - [50] C. Yuan, G. Situ, G. Pedrini, J. Ma, and W. Osten, Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing, *Appl. Optics* 50, B6-B11 (2011).
  - [51] J. Wang, J. Zhao, C. Qin, J. Di, A. Rauf, and H. Jiang, Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion, *Opt. Letters* 37, 1211-1213 (2012).
  - [52] Y. Wu, Y. Yang, H. Zhai, Z. Ma, L. Deng, and Q. Ge, Single-exposure approach for expanding the sampled area of a dynamic process by digital holography with combined multiplexing, *J. of Optics*, 15, 085402 (2013).
  - [53] J. Kuhn, T. Colomb, F. Montfort, F. Charriere, Y. Emery, E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge, Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition, *Opt. Express* 15, 7231-7242 (2007).
  - [54] P. Tankam, and P. Picart, Use of digital color holography for crack investigation in electronic components, *Optics & Lasers in Engineering*, Vol. 49, N°11, 1335-1342 (2011).
  - [55] S. Boucherit, L. Bouamama, H. Benchikh, J.M. Lenoir, and S. Simoëns, Three-dimensional solid particle positions in a flow via multi-angle off-axis digital

- [56] holography, *Opt. Letters* 33, 2095-2097 528 (2008).  
S. Boucherit, L. Bouamama, R. Zegadi, and S. Simoëns, Formulation of off-axis single reference beam and two angle views for digital holography, *J. of Optics* 12:035302 (2010).
- [57] S. Grare, S. Coëtmellec, D. Allano, G. Gréhan, M. Brunel, and D. Lebrun. Dual-wavelength digital holography for 3D particle image velocimetry. *J. Eur. Opt. Soc-Rapid*. 10, 15009, (2015).
- [58] P. Memmolo, C. Distante, M. Paturzo, A. Finizio, P. Ferraro, and B. Javidi. Automatic focusing in digital holography and its application to stretched holograms. *Opt. Lett.* 36, 1945, (2011).
- [59] P. Memmolo, M. Paturzo, B. Javidi, P.A. Netti, and P. Ferraro. Refocusing criterion via sparsity measurements in digital holography. *Opt. Lett.* 39, 4719, (2014).
- [60] D. Zonoobi, A.A. Kassim, and Y.V. Venkatesh. Gini Index as sparsity measure for signal reconstruction from compressive samples. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 5, 927, (2011).
- [61] J. Dohet-Eraly, C. Yourassowsky, and F. Dubois. Fast numerical autofocus of multispectral complex fields in digital holographic microscopy with a criterion based on the phase in the Fourier domain. *Opt. Lett.* 41, 4071, (2016).
- [62] L. Xu, M. Mater, and J. Ni. Focus detection criterion for refocusing in multi-wavelength digital holography. *Opt. Expr.* 19, 14779, (2011).
- [63] M. Liebling and M. Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnelet-sparsity criterion. *J. Opt. Soc. Am. A* 21, 2424, (2004).
- [64] E.S.R. Fonseca, P.T. Fiadeiro, M. Pereira, and A. Pinheiro. Comparative analysis of autofocus functions in digital in-line phase-shifting holography. *Appl. Opt.* 55, 7663, (2016).
- [65] S. Kara Mohammed, L. Bouamama, D. Bahloul, P. Picart. Quality assessment of refocus criteria for particle imaging in digital off-axis holography. *Applied Optics*, 56, 13 (2017).

# CHAPITRE I

## Holographie Numérique

---

---

Dans ce chapitre nous rappelons les bases théoriques de l'holographie numérique avec ses deux phénomènes principaux, l'interférence pendant l'enregistrement et la diffraction pendant la reconstruction. L'enregistrement d'un hologramme numérique sera ensuite abordé avec les deux configurations (en-ligne et hors-axe), en montrant les différents paramètres d'enregistrement et leurs effets sur l'image reconstruite.

Enfin, nous présentons les principaux algorithmes de reconstruction des hologrammes digitaux (transformée de Fresnel et convolution).

---

---

### I.1 Introduction

L'holographie est une invention du physicien Denis Gabor [1], pour laquelle, il a eu le prix Nobel de physique en 1971. Son utilisation s'est développée à partir du début des années 1960 avec l'apparition d'une autre invention, le laser [2]. Sa mise en application en laboratoire, quant à elle, a véritablement démarré au milieu des années 1960 avec l'apparition de l'interférométrie holographique [3]. Cette nouvelle méthode a plusieurs avantages : elle permet une mesure sans contact plein champ, quantitativement très précise, et surtout, contrairement aux expériences de photométrie de l'époque, elle permet d'obtenir les informations sur la phase en plus de celles sur l'amplitude. Avec le développement des ordinateurs, des capteurs d'images et des logiciels de traitement (ère des méthodes numériques), l'holographie numérique a débuté [4]. En effet, même si encore les plaques holographiques restent de meilleure résolution que la plupart des capteurs d'image actuels, leur coût et leur manipulation constituent leurs inconvénients majeurs. D'un point de vue expérimental, c'est la manipulation aisée de l'information qui a permis à l'holographie d'avancer et d'être, aujourd'hui, utilisée dans de nombreuses applications scientifiques.

### I.2 Bases de l'holographie numérique

L'holographie numérique est dérivée de l'holographie classique sauf que les hologrammes sont directement enregistrés et numérisés par un capteur CCD ou CMOS.

De ce fait, l'holographie numérique suit les étapes de l'holographie classique (enregistrement et restitution) sans passer par l'étape de développement.

#### I.2.1 Enregistrement

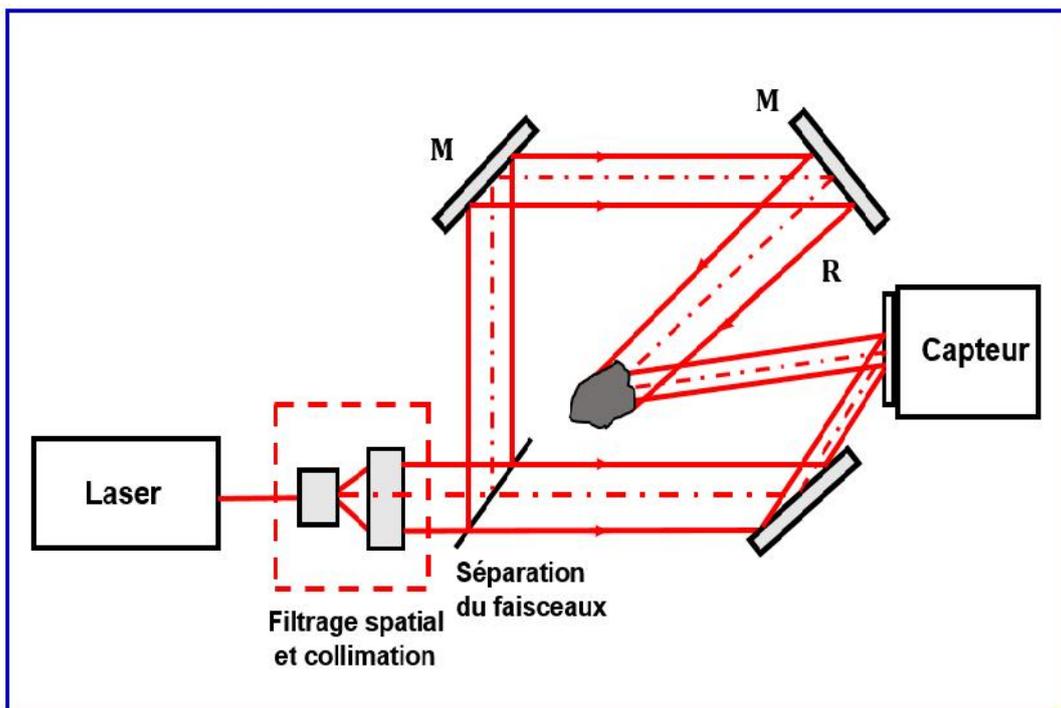
Comme l'holographie est basée sur l'interférence de deux faisceaux, dans sa plus simple configuration, issus d'une même source laser (figure1) :

- un faisceau de "référence", qui se propage directement vers le capteur d'image ;

## Chapitre I. Holographie numérique

- un faisceau "objet" qui sert à éclairer l'objet à holographier. La lumière diffractée par l'objet est alors renvoyée vers le capteur et interfère alors avec le faisceau de référence.

Les franges d'interférences résultantes sont enregistrées à l'aide du capteur CCD ou CMOS et l'image obtenue est stockée dans la mémoire de l'ordinateur et sera tout simplement nommée "hologramme".



**Figure I.1** : Principe d'obtention d'un hologramme.

Notons  $R$  l'amplitude complexe du front d'onde de référence au plan d'enregistrement :

$$R(x, y) = a_r(x, y) \exp(j\varphi_r(x, y)), \quad (\text{I.1})$$

Avec  $a_r$  le module de l'amplitude complexe et  $\varphi_r$  la phase du front d'onde.

Le champ diffracté par l'objet à la distance  $d_0$ ,  $O$ , peut également s'exprimer comme un champ complexe d'amplitude  $a_0$  et de phase  $\varphi_0$  :

$$O(x, y) = a_0(x, y) \exp(j\varphi_0(x, y)) \quad (\text{I.2})$$

L'éclairement total reçu par le capteur photosensible s'écrit :

$$H = |O + R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + R^*O + RO^* \quad (I.3)$$

Et se matérialise par la somme de trois termes :

- la somme des 2 premiers termes exprimant une simple distribution d'intensité,
- le troisième terme qui exprime le fait que l'onde objet est modulée par l'onde de référence conjuguée ;
- et le quatrième terme qui exprime le fait que l'onde objet conjuguée est également modulée par l'onde de référence.

Cette équation peut encore s'écrire sous la forme :

$$H = a_r^2 + a_o^2 + 2a_r a_o \cos(\varphi_r - \varphi_o) \quad (I.4)$$

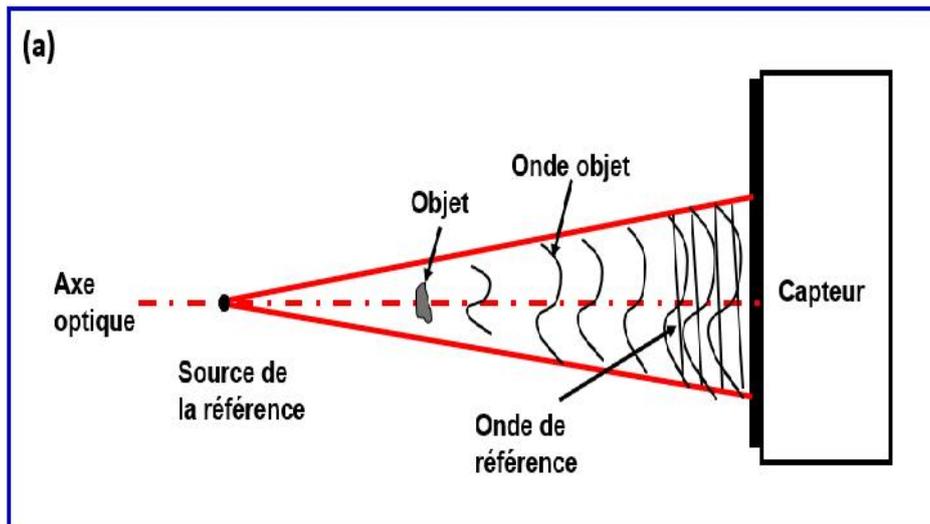
Un logiciel d'acquisition d'images permet d'établir la communication entre le capteur et l'ordinateur et permet alors de stocker l'hologramme sous forme d'image numérisée dans la mémoire de l'ordinateur (hologramme numérique).

### I.2.2 Différentes configurations d'enregistrement

En fonction de l'angle qui doit exister entre les deux ondes objet et de référence, on distingue deux configurations d'enregistrement des hologrammes :

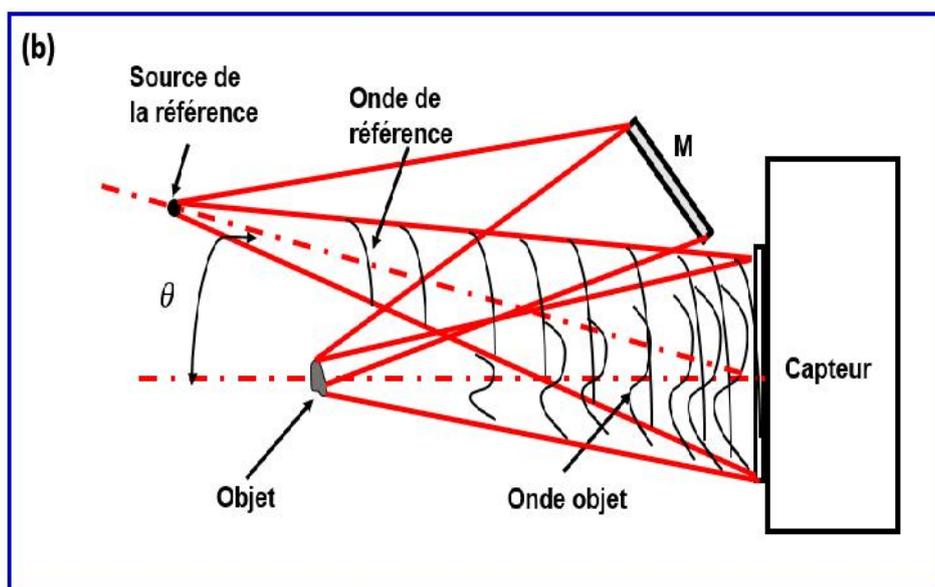
- la configuration de Gabor dite en ligne (figure I.2.a), c'est quand la source de référence, l'objet et le support d'enregistrement (CCD) sont sur le même axe. Dans cette configuration, la partie de l'onde modifiée par l'objet se comporte comme onde objet et la partie non modifiée est prise comme onde de référence. Cette configuration est utilisable pour des objets opaques ou transparents.

L'holographie numérique en ligne souffre pendant la reconstruction de la superposition des images réelle et virtuelle de l'objet et de l'ordre zéro.



**Figure I.2.a :** Principe de la configuration en ligne.

- la configuration de Leight et Upatanieks dite hors axe (figure I.2.b) est une géométrie introduite par Leith et Upatnieks dans le but de séparer les trois ordres de diffraction au cours de la reconstruction de l'hologramme. Elle est basée principalement sur l'utilisation d'un faisceau de référence indépendant de celui utilisé pour l'éclairage de l'objet, et par suite, créer un angle entre eux. Cet angle permet de séparer les ondes diffractées (ordre +1 et -1) de l'onde non diffractée (ordre 0) pendant la reconstruction de l'hologramme.



**Figure I.2.b :** Principe de la configuration hors-axe.

Cette configuration s'adapte mieux aux objets opaques de grandes dimensions par rapport à la configuration en ligne, ainsi qu'aux objets transparents.

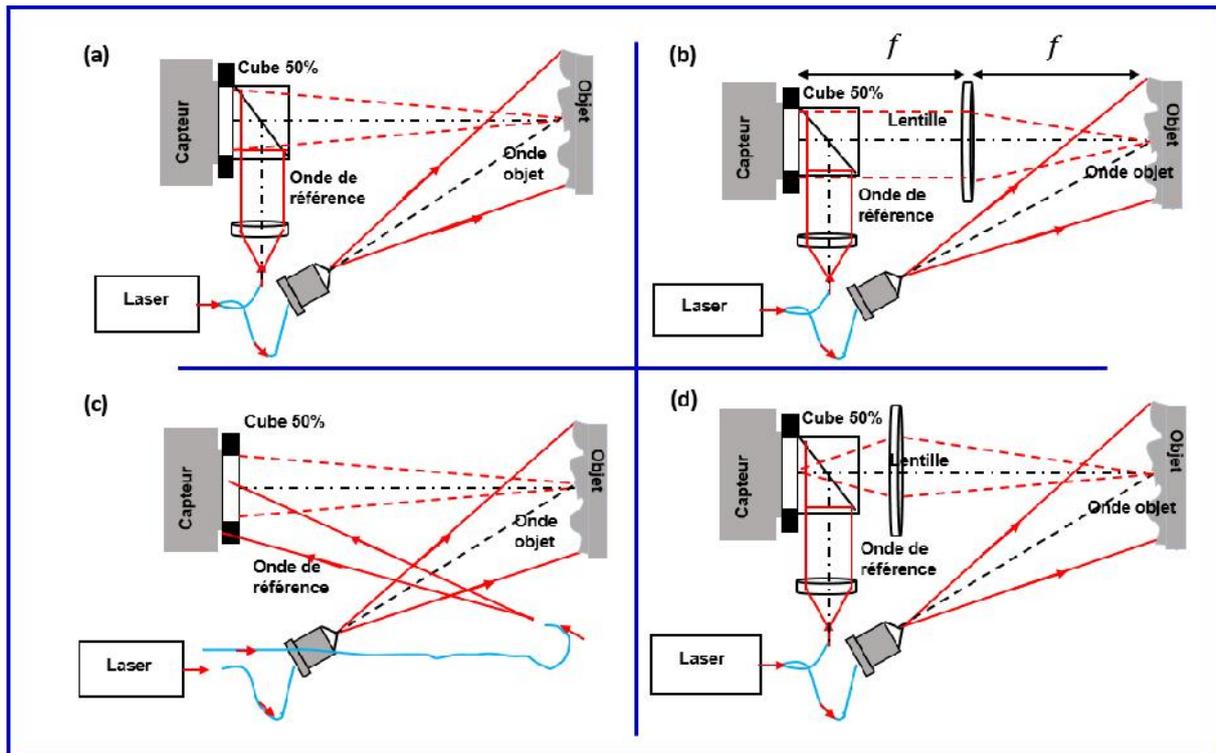
En fonction de la nature des fronts d'onde qui arrivent sur le capteur et selon la présence d'un système optique dans leurs trajets ou non, on distingue plusieurs catégories d'hologrammes et de géométries du dispositif d'enregistrement :

La technique la plus couramment utilisée est l'holographie de Fresnel (figure I.3.a). Les interférences sont créées après le cube situé devant le capteur ;

La technique d'holographie de Fraunhofer (figure I.3.b) qui est caractérisée par le fait que les interférences entre les ondes objet et de référence se réalisent à l'infini (ondes planes), ceci se réalise expérimentalement en mettant une lentille de collimation.

La technique d'holographie de Fourier (figure I.3.c), nommée ainsi parce qu'elle permet d'effectuer la transformée de Fourier de l'onde objet sur le plan du capteur. Cette géométrie se caractérise par le fait que l'objet est au plan focal objet de la lentille et les interférences sont enregistrées au plan focal image de la lentille. On place le point source de référence juste au niveau du plan objet (configuration de Fourier sans lentille) ;

Egalement, il existe une autre technique dite holographie image, dans laquelle l'image de l'objet est formée par la lentille sur le capteur (figure I.3.d).

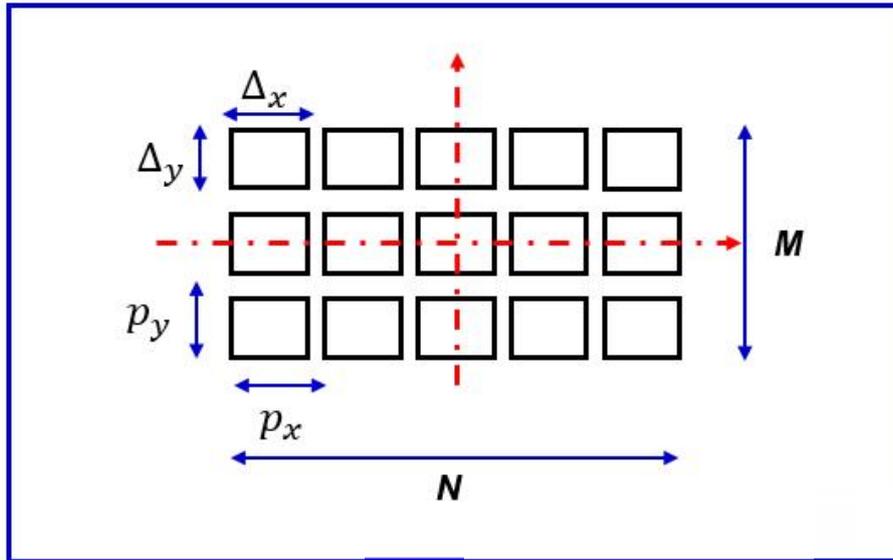


**Figure I.3 :** Différentes géométries d'enregistrement des hologrammes, (a) de Fresnel ; (b) de Fraunhofer ; (c) de Fourier ; (d) image [5].

### I.2.3 Capteur d'enregistrement

Une attention importante doit être donnée lors de l'enregistrement des hologrammes au type et surtout aux caractéristiques du capteur utilisé.

Tous les types de capteur numériques (CCD ou CMOS) possèdent une matrice de pixels de dimensions finies. Le support d'enregistrement comptera donc  $M \times N$  pixels, de surface  $\Delta_x \times \Delta_y$ , et de pas  $p_x \times p_y$  (figure I.4).



**Figure I.4 :** Géométrie d'un capteur sous forme de matrice de pixels.  $M, N$ : nombre de pixels du capteur selon les axes  $y$  et  $x$  ;  $\Delta_x, \Delta_y$ : largeurs des pixels suivant les directions  $x$  et  $y$ ;  $p_x, p_y$  : pas des pixels selon les directions  $x$  et  $y$  [6].

#### I.2.4 Condition d'enregistrement

Etant donné que dans l'étape d'enregistrement de l'hologramme numérique, le processus de numérisation de l'image est engagé ; il est donc nécessaire de respecter le théorème d'échantillonnage de Shannon.

Le respect de la condition d'échantillonnage de Shannon est nécessaire, particulièrement dans la configuration hors-axe, où la fréquence spatiale de l'hologramme enregistré (inverse du pas de la distribution des franges d'interférence) doit être inférieure ou égale à deux fois la fréquence d'échantillonnage du capteur CCD utilisé (inverse du pas des pixels) :

Avec :

$$f_e \geq 2f_s \quad (I.5)$$

$$f_{e_{x,y}} = \frac{1}{\Delta_x \Delta_y} \quad (I.6)$$

Et

$$f_s = \frac{1}{i} \quad (I.7)$$

Où  $i$  est le pas des franges ou interfrange dans l'hologramme enregistré, donné par :

$$i = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}} \quad (I.8)$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait l'onde objet avec l'onde de référence.

Pour respecter la condition d'échantillonnage de Shannon, l'angle  $\theta$  doit alors avoir une valeur maximale à ne pas dépasser pour que les franges résultantes de l'interférence entre l'onde objet et l'onde de référence soient résolues par le capteur utilisé. Cette valeur sera donc donnée par :

$$\theta_{max} = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta_x}\right) \quad (I.9)$$

### I.3 Reconstruction numérique d'un hologramme

La reconstruction des hologrammes numériques peut se faire de différentes manières. Chacune de ces manières diffère des autres par son modèle mathématique adopté dans le calcul de la répartition d'amplitude diffractée dans le plan de reconstruction. Deux modèles sont largement utilisés, la méthode de Fresnel et celle de convolution.

Considérons la diffraction de la lumière monochromatique par une ouverture finie. Comme l'indique la figure (I.5), nous supposons que notre objet se trouve dans un plan dans lequel nous avons défini un système de coordonnées  $(x', y')$ , et son champ de diffraction est enregistré dans un plan de coordonnées  $(X, Y)$  à l'aide d'une camera CCD et que ce plan soit parallèle au plan de l'objet et situé à la distance  $d$ .  $H(X, Y)$  représente l'intensité dans le plan de l'hologramme. Le plan de la reconstruction numérique  $(x, y)$  est un plan parallèle au plan de la caméra CCD et situé à une distance  $d_r$  de celui-ci.  $A_r(x, y)$  est le champ d'image reconstitué. Donc  $A_r(x, y)$  est une fonction complexe, qui implique que nous aurons immédiatement accès aux deux composantes d'intensité et de phase dans le plan de reconstruction [12,13]. C'est un avantage essentiel qui le différencie de la technique de reconstruction optique.

En utilisant l'expression mathématique du principe de Fresnel-Kirchhoff, l'amplitude du champ dans le plan image est donnée par la formule de diffraction :

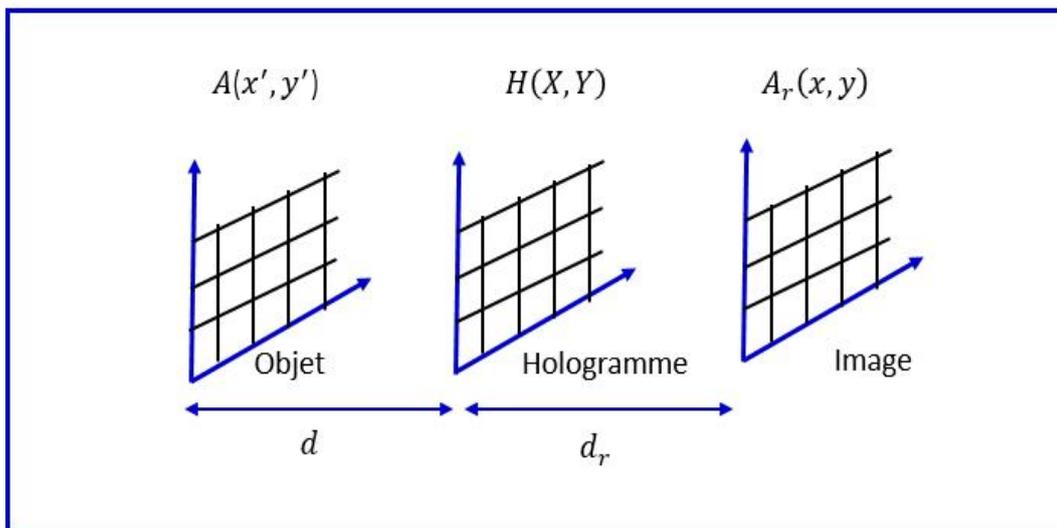
$$A_r(x, y, d_r) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(X, Y) R(X, Y) \frac{\exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} dXdY \quad (\text{I.10})$$

Où

$$\rho = \sqrt{d_r^2 + (X - x)^2 + (Y - y)^2} \quad (\text{I.11})$$

La quantité  $\rho$  qui figure dans l'exposant de l'expression (I.10) est la distance entre un point dans le plan hologramme et un point dans le plan image.  $R(X, Y)$  est l'amplitude du champ d'onde de référence utilisé pour éclairer l'hologramme.

Pour implémenter l'équation (I.10) sur un ordinateur, la méthode de Fresnel et celle de convolution sont en général les plus utilisées. Les deux approches permettent de convertir l'intégrale de diffraction ci-dessus en une ou plusieurs transformées de Fourier qui rendent l'application numérique plus facile.



**Figure I.5 :** Disposition des systèmes de coordonnées en holographie numérique.

### I.3.1 Reconstruction numérique par transformée de Fresnel

L'approximation de Fresnel remplace  $\rho$  dans le dénominateur par  $d_r$ , en supposant que  $d_r$  est plus grand que  $(X - x)$  et  $(Y - y)$ . Le même remplacement dans le numérateur causera par contre des erreurs inacceptables. Le développement binomial de la racine carrée permet de faire l'approximation suivante [13] :

$$\dots = d_r + \frac{1}{2} \frac{(X-x)^2}{d_r} + \frac{1}{2} \frac{(Y-y)^2}{d_r} - \frac{1}{8} \frac{[(X-x)^2 - (Y-y)^2]^2}{d_r^3} + \dots \quad (\text{I.12})$$

Le quatrième terme peut être négligé, s'il est très petit par rapport à la longueur d'onde :

$$\frac{1}{8} \frac{[(X-x)^2 - (Y-y)^2]^2}{d_r^3} \leq \lambda \quad (\text{I.13})$$

Où

$$d_r \gg \sqrt[3]{\frac{1}{8} \frac{[(X-x)^2 - (Y-y)^2]^2}{\lambda}} \quad (\text{I.14})$$

La distance devient égale à :

$$\rho = d_r + \frac{(X-x)^2}{2d_r} + \frac{(Y-y)^2}{2d_r} \quad (\text{I.15})$$

Cette approximation, que nous appelons approximation de Fresnel, permet de réécrire l'intégrale de diffraction de l'équation (I.10) par [14] :

$$A_r(x, y, d_r) = \frac{1}{i\lambda d_r} \exp[ikd_r] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(X, Y) R(X, Y) \exp[ikd_r(X-x)^2 + (Y-y)^2] dXdY \quad (\text{I.16})$$

Dans l'holographie numérique, l'onde de référence peut être une onde plane ou sphérique. Cette onde éclaire la caméra CCD, soit en incidence normale ou en incidence oblique. L'onde plane qui arrive sur la caméra CCD, avec une incidence normale est la plus adaptée pour l'évaluation numérique avec une amplitude et une phase constantes spatialement. Elle peut être exprimée par :  $R(X, Y) = R + 0i$ , avec R amplitude de cette onde. On peut prendre  $R=1$ . Si on développe les termes quadratiques dans l'exposant, on trouve :

$$A_r(x, y, d_r) = \frac{1}{i\lambda d_r} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d_r\right) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d_r} (x^2 + y^2)\right] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(X, Y) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d_r} (X^2 + Y^2)\right] \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda d_r} (Xx + Yy)\right] dXdY \quad (I.17)$$

Cette équation est appelée approximation transformée de Fresnel en raison de sa similarité mathématique avec la transformée de Fourier.

Pour numériser la transformée de Fresnel, les remplacements suivants sont introduits :

$$f_x = \frac{x}{\lambda d_r} ; f_y = \frac{y}{\lambda d_r}$$

Ainsi l'équation (I.17) devient égale à

$$A_r(f_x, f_y, d_r) = \frac{1}{i\lambda d_r} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d_r\right) \exp\left[i\pi\lambda d_r (f_x^2 + f_y^2)\right] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(X, Y) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d_r} (X^2 + Y^2)\right] \exp\left[-i2\pi (Xf_x + Yf_y)\right] dXdY \quad (I.18)$$

Nous pouvons dire que l'approximation de Fresnel est la transformée de Fourier de la quantité  $H(X, Y) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d_r} (X^2 + Y^2)\right]$ , on peut donc réécrire l'équation ( ) comme suit :

$$A_r(f_x, f_y, d_r) = \frac{1}{i\lambda d_r} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d_r\right) \exp\left[i\pi\lambda d_r (f_x^2 + f_y^2)\right] TF\left\{H(X, Y) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d_r} (X^2 + Y^2)\right]\right\} \quad (I.19)$$

La forme discrète de l'équation (I.17) peut être écrite comme suit :

$$A_r(m, n, d_r) = \frac{1}{i\lambda d_r} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d_r\right) \exp\left[i \frac{\pi\lambda d_r}{NM} \left(\frac{m^2}{\Delta x^2} + \frac{n^2}{\Delta y^2}\right)\right] \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} H(k, l) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d_r} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[-i2\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right] \quad (I.20)$$

Avec  $x = n\Delta x$  et  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$  ;  $y = m\Delta y$  et  $m=0, 1, 2, \dots, M-1$ .

$$\text{Et} \quad \Delta x = \frac{\lambda d_r}{M \Delta x}, \quad \Delta y = \frac{\lambda d_r}{N \Delta y}$$

### I.3.2 Reconstruction par convolution

L'approximation de la convolution permet de réécrire l'intégrale de diffraction (I.10) sous la forme suivante :

$$A_r(x, y, d_r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(X, Y) R(X, Y) g(x - X, y - Y) dX dY \quad (\text{I.21})$$

Avec  $g(x, y, X, Y)$ , la réponse impulsionnelle, qui est définie par la fonction suivante :

$$g(x - X, y - Y, d_r) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp\left[2i\pi/\lambda \sqrt{d_r^2 + (x-X)^2 + (y-Y)^2}\right]}{\sqrt{d_r^2 + (x-X)^2 + (y-Y)^2}} \quad (\text{I.22})$$

Ce qui permet de réécrire l'intégrale comme une convolution :

$$A_r(x, y, d_r) = H(X, Y) \otimes g(x, y, d_r) \quad (\text{I.23})$$

Selon les propriétés de la convolution, la transformée de Fourier de  $H(X, Y)$  convolué à  $g(x, y, d_r)$  devient un produit simple de leurs transformées de Fourier :

$$A_r(l, k, d_r) = TF^{-1}[TF[H(l, k)](u, v) \times TF[g(l, k, d_r)](u, v)](l, k) \quad (\text{I.24})$$

La version discrétisée de l'équation (I.24) s'écrit tout simplement :

$$g(k, l) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp\left[2i\pi/\lambda \sqrt{d_r^2 + \left(k - \frac{M}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}\right]}{\sqrt{d_r^2 + \left(k - \frac{M}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}} \quad (\text{I.25})$$

Un cas particulier de la méthode de convolution est la fonction de transfert du spectre angulaire  $G$  définie par :

$$G(u, v, d_r) = \exp[-i\pi d_r(u^2 + v^2)] \quad (I.26)$$

Ainsi la reconstruction par convolution avec fonction de transfert du spectre angulaire est exprimée par :

$$A_r(l, k, d_r) = TF^{-1}[TF[H(l, k)(u, v) \times G(u, v, d_r)](l, k) \quad (I.27)$$

Avec,

$$\{u, v\} = \left\{ \frac{l}{Lp_x}, \frac{k}{Kp_y} \right\} \quad [l, k] \in \left[ -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} - 1; -\frac{K}{2}, \frac{K}{2} - 1 \right] \dots$$

### I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions de base nécessaires à la compréhension des processus d'enregistrement et de reconstruction des hologrammes numériques.

### I.5 Références

- [1] D. Gabor. A new microscopic principle, Nature, 161, (1948).
- [2] E.N. Leith and J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory, Journal of the optical society of America, 52(10), (1962).
- [3] R.L. Powell et K.A. Stetson. Interferometric analysis by wavefront reconstruction. Journal of the optical society of america, 55(12), (1965).
- [4] U. Schnars and W. Jüptner. Direct recording of holograms by a ccd target and numerical reconstruction, Applied optics, 33(2), (1994).
- [5] M. Karray. Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des matériaux composites par méthode holographique numérique 3d et analyse diélectrique, Thèse de doctorat, laum, (2012).
- [6] P. Tankam. Méthodes d'holographie numérique couleur pour la métrologie sans contact en acoustique et mécanique, Thèse de doctorat, laum, (2010).

- [7] S. Coetmellec, D. Lebrun and C. Oskul. Application of the two-dimensional fractional-order fourier transformation to particle field digital holography. *Journal of the Optical Society of America*, 19(8), (2002).
- [8] F. Nicolas, S. Coetmellec, M. Brunel and D. Lebrun. Digital in-line holography with a sub-picosecond laser beam, *Optics communications*, 268(1), (2006).
- [9] F. Nicolas, S. Coetmellec, M. Brunel and D. Lebrun. Suppression of the moiré effect in sub-picosecond digital in-line holography, *Optics express*, 15(3), (2007).
- [10] N. Verrier, S. Coetmellec, M. Brunel, D. Lebrun et A.J.E.M. Janssen. Digital in-line holography with an elliptical, astigmatic gaussian beam: wideangle reconstruction, *Journal of the optical society of america*, 25(6), (2008).
- [11] N. Verrier, S. Coetmellec, M. Brunel and D. Lebrun. Digital in-line holography in thick optical systems: application to visualization in pipes, *Applied optics*, 47(22), (2008).
- [12] P. Picart and J. Leval. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography. *Journal of the Optical Society of America*, 25(7), (2008).
- [13] M. T. Kreis, M. Adams, and P.O. Jüptner. Methods of digital holography: a comparison, *Proc.SPIE*, 3098, 224–233, (1997).
- [14] U. Schnars and W. Jüptner. Digital holography-digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques. Springer new york, 56-57, (2005).

## **CHAPITRE II**

### **Holographie Numérique hors-axe à deux vues appliquée à la visualisation des particules marqueurs**

---

Ce chapitre sera consacré à la simulation d'hologrammes de particules opaques ou transparentes à deux vues, soit en utilisant une seule longueur d'onde soit en utilisant deux longueurs d'onde, en utilisant la méthode du spectre angulaire.

---

### II.1 Introduction

L'holographie numérique hors-axe permet d'obtenir des images réelle et virtuelle séparées spatialement, grâce à une différence dans les angles d'incidence des deux faisceaux [1]. De plus, l'holographie numérique hors-axe permet de visualiser les images tridimensionnelles de différents types d'objets, opaques ou transparents, liquides, solides ou gazeux.

Son aptitude à enregistrer et reconstruire des images tridimensionnelles lui permet d'être utilisée comme une technique de visualisation des images de particules marqueurs dans leurs volumes d'étude.

L'imagerie holographique numérique fournit en fait une image 2,5D car il manque la parallaxe par le fait que l'holographie numérique n'est pas capable de « voir derrière l'objet » [2]. En particulier, cette propriété est un facteur limitant pour l'imagerie de particules lorsque le nombre de particules est grand. Il n'est alors pas possible de discriminer deux particules alignées le long de l'axe de visée. Une solution alternative consiste à multiplier le nombre de vues mais sans multiplier le nombre de capteurs.

Dans ce contexte, Boucherit et al [3,4] ont décrit une technique à deux vues basée sur le multiplexage angulaire en utilisant deux faisceaux objet et un seul faisceau de référence qui permet de discriminer deux particules alignées le long de l'axe de visée.

### II.2 Définition du multiplexage

En holographie, le multiplexage est une technique qui permet d'enregistrer, de manière simultanée, plusieurs hologrammes sur un même support.

Nous pouvons faire le multiplexage de deux manières ; soit optiquement, au cours de l'enregistrement ou bien numériquement (cas de l'holographie numérique), après la prise des hologrammes [1].

Dans le cas du multiplexage optique, un hologramme multiplexé peut être enregistré à l'aide de plusieurs ondes de références et objets, comme il peut être enregistré à l'aide d'une seule onde de référence et plusieurs ondes objets.

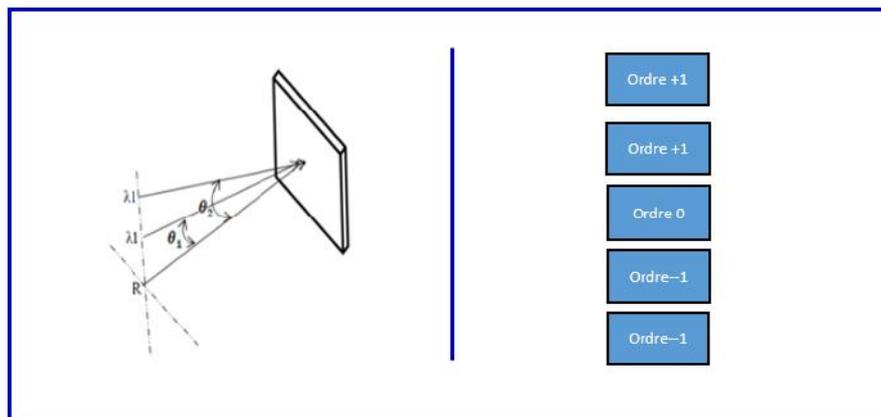
### II.3 Différents types de multiplexage

Il existe plusieurs techniques de multiplexage, parmi ces techniques, on peut citer les multiplexages : spatial [5], angulaire [6-8], chromatique [9-12], par polarisation [13-15] et hybride [16,17]. Dans ce travail, nous avons mis l'accent sur le multiplexage angulaire, le multiplexage chromatique et le multiplexage hybride.

#### II.3.1 Multiplexage angulaire

Dans la technique du multiplexage angulaire, l'hologramme est enregistré par la superposition entre une ou plusieurs ondes de références et des ondes objets avec des angles d'enregistrement différents dans le but de séparer spatialement les ordres de diffraction au cours de la reconstruction.

La figure (II.1) schématise un multiplexage angulaire entre deux hologrammes avec deux angles différents. Les deux hologrammes sont enregistrés simultanément dans le cas des supports électroniques. Dans le cas où le support d'enregistrement est analogique, les hologrammes peuvent être enregistrés séparément.

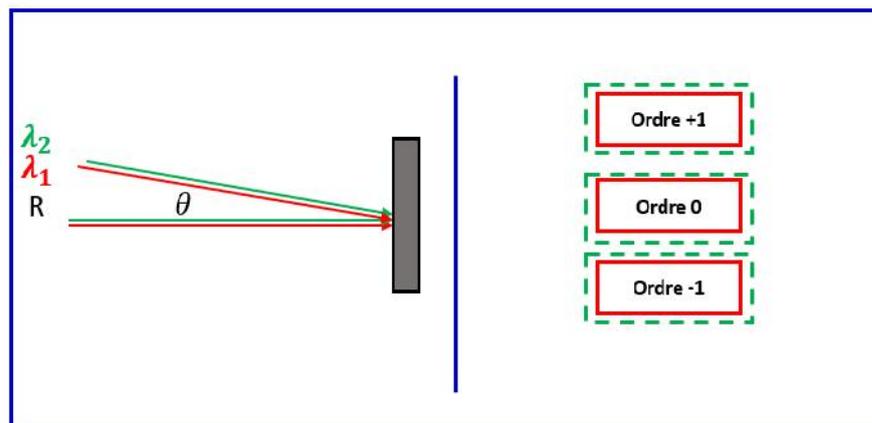


**Figure II.1** : Multiplexage angulaire de deux hologrammes avec la même longueur d'onde et deux angles d'enregistrement différents  $\theta_1$  et  $\theta_2$  ; illustration des ondes objets (à gauche), positionnement des ordres à la reconstruction (à droite) [18].

### II.3.2 Multiplexage chromatique

L'enregistrement d'hologrammes multiplexés chromatiquement nécessite au moins deux longueurs d'ondes différentes. Chaque longueur d'onde véhicule une information différente sur l'objet. La différence des longueurs d'ondes permet d'enregistrer les deux hologrammes (ondes objets) sur le même support d'enregistrement sans aucun chevauchement.

La figure (II.2) montre un multiplexage chromatique de deux hologrammes avec deux longueurs d'ondes (rouge et verte), les deux ondes objet ont le même angle d'enregistrement mais au cours de la reconstruction on peut distinguer chaque ordre (onde objet) avec sa propre longueur d'onde. Généralement, cette technique de multiplexage est utilisée avec le multiplexage spatial pour séparer les ordres spatialement.



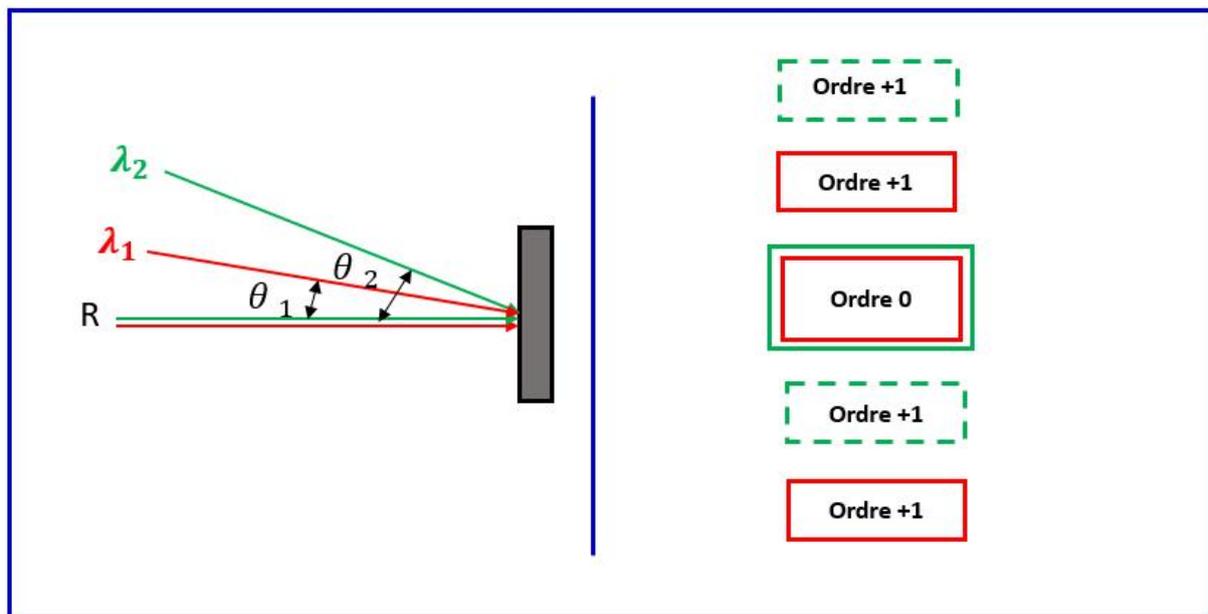
**Figure II.2 :** Multiplexage chromatique entre deux hologrammes avec deux longueurs d'ondes et le même angle d'enregistrement  $\theta$  ; illustration des ondes objets (à gauche), positionnement des ordres à la reconstruction (à droite) [18].

### II.3.3 Multiplexage hybride : combinaison entre l'angulaire et le chromatique

La figure ci-dessous montre l'enregistrement à l'aide de deux longueurs d'ondes (rouge  $\lambda_1$  et verte  $\lambda_2$ ) simultanément sur le même capteur CCD. Chaque onde contient une information sur l'objet différente par rapport à l'autre. L'utilisation de deux longueurs d'onde à l'enregistrement, produit à la reconstruction des ordres nets. On évite alors le chevauchement qui pourrait se produire entre les ordres créés par interférences

supplémentaires entre les ordres à la reconstruction dans le cas d'utilisation d'une seule longueur d'onde.

D'après la figure (II.3), le multiplexage combiné entre l'angulaire et le chromatique permet d'enregistrer deux ondes objet sur le même support d'enregistrement. Les deux ondes sont séparées spatialement à la reconstruction à cause du multiplexage angulaire (angle introduit entre les ondes objet et référence).



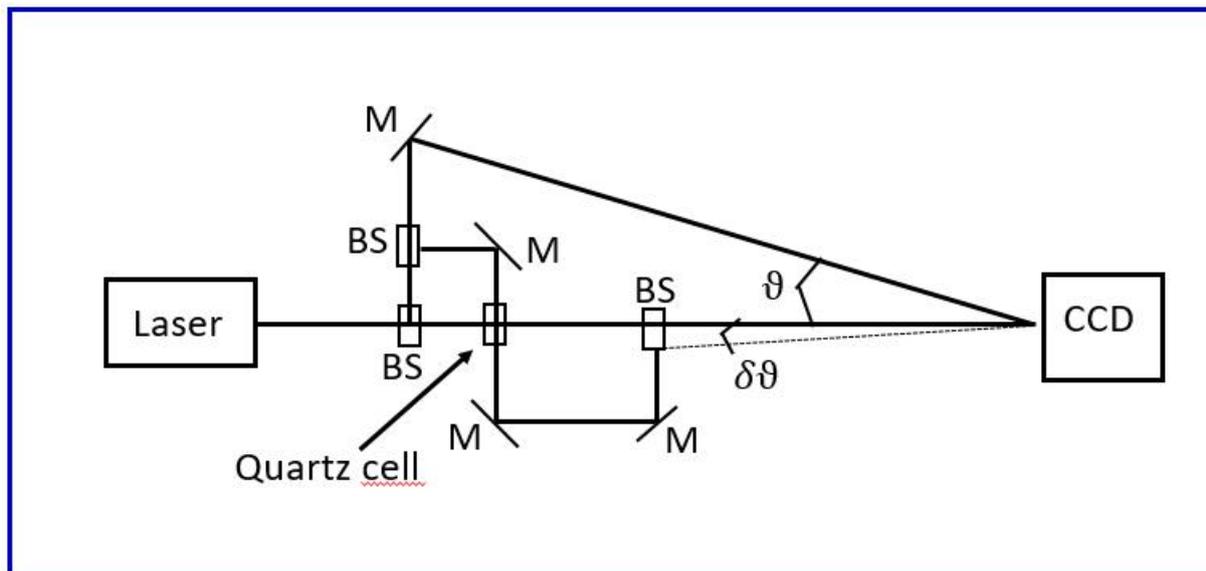
**Figure II.3** : Multiplexage combiné entre l'angulaire et le chromatique [18].

### II.4 Holographie hors-axe à deux vues monochromes avec un seul faisceau de référence

Comme décrit auparavant dans ce chapitre, l'holographie numérique hors-axe permet de visualiser les images tridimensionnelles de différents types d'objets, opaques ou transparents, liquides, solides ou gazeux.

Ces objets de type particules marqueurs sont codés dans un hologramme hors-axe par la technique du multiplexage angulaire ou la technique du multiplexage chromatique.

Boucherit et al [3,4], ont développé une technique basée sur le multiplexage angulaire utilisant deux faisceaux objet et un seul faisceau de référence (figure II.4).



**Figure II.4** : Disposition optique de l'enregistrement holographique hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence. M : miroir, BS : Cube séparateur.  
La ligne pointillée correspond à la deuxième vue de (BS3) [3,4].

Un hologramme hors-axe à deux vues peut se réaliser soit par simulation, soit expérimentalement.

Dans ce chapitre, notre travail sera basé sur le traitement d'un hologramme (de particules) à deux vues parfois avec un seul faisceau de référence et parfois avec deux faisceaux de référence réalisé par simulation.

## II.4.1 Simulation d'un hologramme hors axe à deux vues monochromes avec un seul faisceau de référence

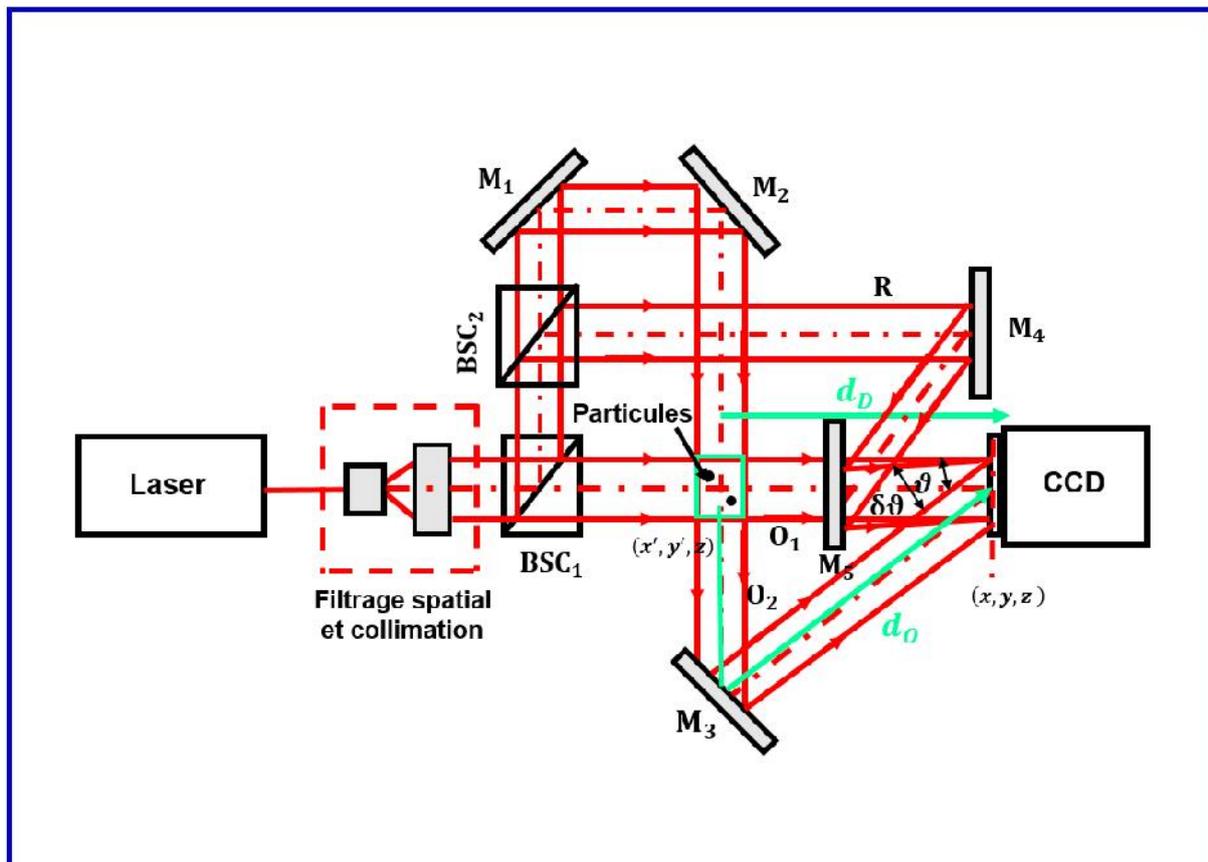
### II.4.1.1 Cas d'une particule opaque

La simulation numérique a été développée en tenant compte du processus complet d'enregistrement et de reconstruction, y compris la nature de l'objet qui est dans ce cas une particule opaque. Ce processus comprendra la propagation des ondes optiques, le modèle d'interférence, l'enregistrement et le traitement.

## Chapitre II. Holographie numérique hors-axe à deux vues appliquée à la visualisation des particules marqueurs

La première partie de la simulation traite propagation des ondes optiques (diffraction, interférences) et processus d'enregistrement (type de capteur, numérisation à 8 bits). La deuxième partie traite processus de reconstruction. Pour les deux processus de diffraction lors de l'enregistrement et de la reconstruction, la fonction de transfert du spectre angulaire est utilisée et la convolution est calculée avec l'algorithme FFT double. La longueur d'onde est fixée à 632.8nm, les pixels sont de pas  $p_x = p_y = 10\mu\text{m}$ . Le capteur et le plan de l'objet comprennent 1024×1024 pixels.

Pour le cas présent, la simulation de l'hologramme hors axe à deux vues avec un seul faisceau de référence et deux faisceaux objets est basée sur le montage de la figure (II.5). Il s'agit du montage de Boucherit et al. légèrement modifié.



**Figure II.5** : Configuration pour l'enregistrement hors axe à deux vues avec un seul faisceau de référence.

Le faisceau lumineux émis par la source laser est divisé en deux parties à l'aide d'un cube séparateur (BSC1). Le premier faisceau est directement dirigé vers la camera CCD en éclairant l'objet à son passage. Il est considéré comme faisceau objet direct  $\{O_1\}$ .

Le deuxième faisceau est divisé encore une fois en deux parties à l'aide d'un cube séparateur (BSC2). Le deuxième faisceau tombe sur le miroir réglable (M4) ensuite (M5) qui le fait orienter directement vers la caméra CCD. Il est considéré comme faisceau de référence R. Le troisième faisceau tombe sur les miroirs réglables (M1), (M2) ensuite (M3) qui le font diriger vers la camera CCD en ré-éclairant l'objet de manière orthogonale à son passage (l'éclairage est fait par transmission). Il est considéré comme faisceau objet orthogonal  $\{O_2\}$ .

#### **II.4.1.1.1 Processus d'enregistrement**

Soit la distribution d'amplitude binaire d'une particule opaque de diamètre  $\phi_p = 40\mu m$  éclairée par une onde plane, située à une distance  $d_D$  de la vue directe et  $d_0$  de la vue orthogonale du capteur quadratique comme le montre la figure (II.5). Dans ce qui suit, on considère que le champ objet se propage le long des distances  $d_D$  pour la vue directe et  $d_0$  pour la vue orthogonale et interfère avec une onde de référence notée R pour produire l'hologramme H.

A partir de l'intégrale de Huygens-Fresnel, l'amplitude complexe des ondes objets dans le plan du détecteur peuvent être exprimées comme suit [19-22] :

$$\left[ \begin{array}{l} O_1(x, y, d_D) = \frac{i}{\lambda d_D} \exp\left(\frac{2i\pi d_D}{\lambda}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x', y') w(x', y') \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d_D} (x' - x)^2 \right. \\ \left. + (y' - y)^2\right] dx' dy' \\ O_2(x, y, d_0) = \frac{i}{\lambda d_0} \exp\left(\frac{2i\pi d_0}{\lambda}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_2(x', y') w(x', y') \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d_0} (x' - x)^2 \right. \\ \left. + (y' - y)^2\right] dx' dy' \end{array} \right. \quad (II.1)$$

Où  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière,  $w(x, y)$  est le front d'onde d'éclairage.

De même, la distribution de l'onde de référence peut être exprimée par :

$$R(x, y) = w(x, y) \exp(ik \sin(\vartheta_x)x + ik \sin(\vartheta_y)y) \quad (\text{II.2})$$

De ce fait, les ondes éclairant l'objet selon les deux directions directe et orthogonale sont exprimées par :

$$\begin{cases} E_1 = w_1(x, y) \exp(i\varphi) \\ E_2 = w_2(x, y) \exp(ik \sin(\delta\vartheta_x)X + ik \sin(\delta\vartheta_y)Y) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Où  $\{w, w_1, w_2\}$ , sont les amplitudes de chaque onde,  $k \sin(\vartheta_x)$  et  $k \sin(\vartheta_y)$  sont les fréquences spatiales de l'onde de référence,  $k \sin(\delta\vartheta_x)$  et  $k \sin(\delta\vartheta_y)$  sont les fréquences spatiales de l'onde de référence pour l'onde objet 2, et  $\varphi$  est une phase aléatoire uniformément répartie sur  $[-\pi, +\pi]$ .

L'équation (II.1) est calculée numériquement en utilisant le théorème de convolution et la fonction de transfert du spectre angulaire dans l'approximation de Fresnel. Ainsi, l'amplitude complexe dans le plan du détecteur peut être calculée selon **[16-19]** :

$$\begin{cases} O_1 = FT^{-1}[FT[E_1] \times G] \\ O_2 = FT^{-1}[FT[E_2] \times G] \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Où la fonction de transfert du spectre angulaire est donnée par l'équation (II.5)

$$\begin{cases} G(u, v, d_D) = \exp[-i\pi d_D(u^2 + v^2)] \\ G(u, v, d_O) = \exp[-i\pi d_O(u^2 + v^2)] \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

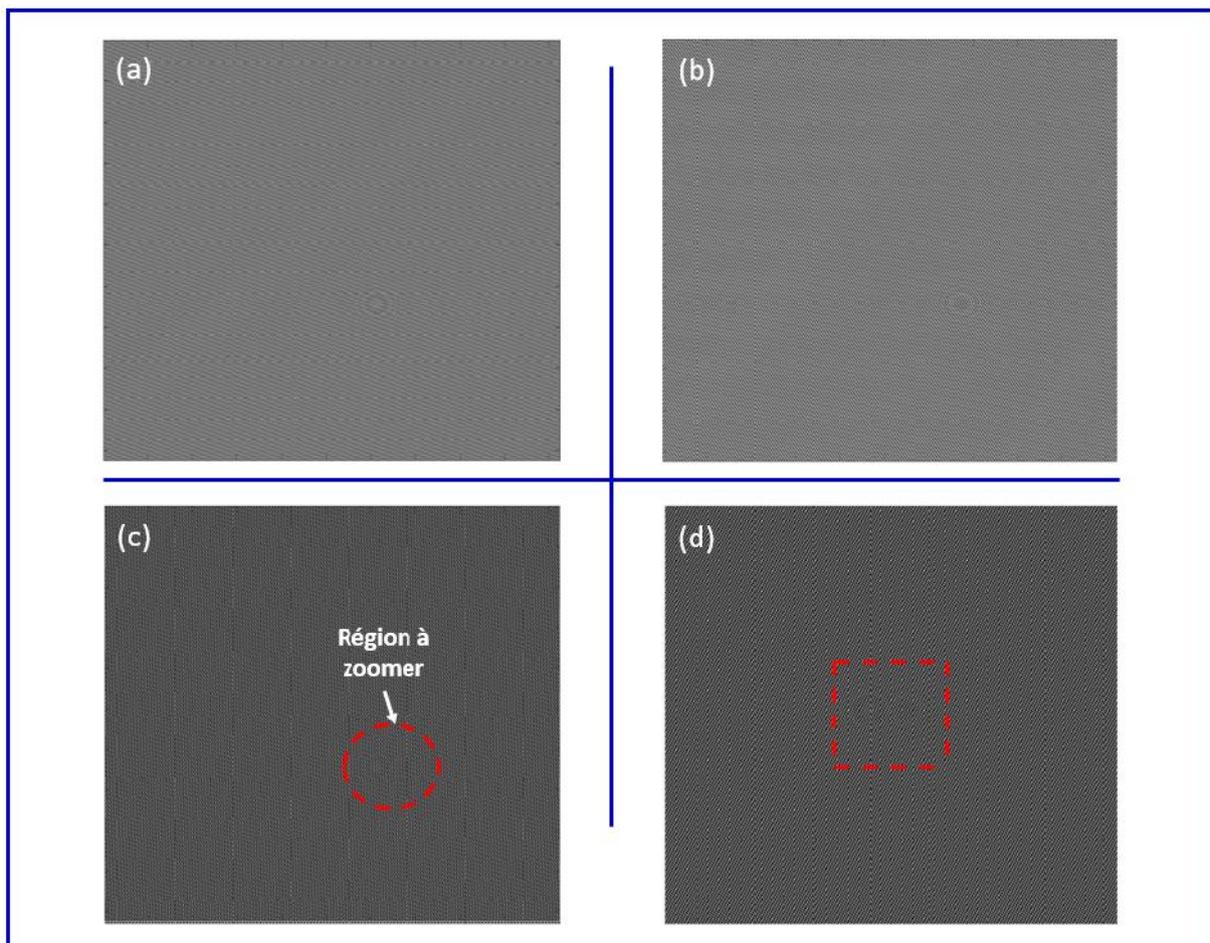
Dans le plan d'enregistrement, l'hologramme est exprimé comme suit :

$$H = |O_1|^2 + |O_2|^2 + |R|^2 + O_1 O_2^* + O_1^* O_2 + (O_1 + O_2)R^* + R(O_1 + O_2)^* \quad (\text{II.6})$$

## Chapitre II. Holographie numérique hors-axe à deux vues appliquée à la visualisation des particules marqueurs

Cette équation contient quatre termes : le terme situé aux fréquences spatiales nulles qui correspond à  $|O_1|^2 + |O_2|^2 + |R|^2$ , un terme situé aux fréquences basses qui est sans intérêt et qui correspond à  $O_1O_2^* + O_1^*O_2$  et les termes situés aux hautes fréquences et qui correspondent aux termes  $(O_1 + O_2)R^*$  et  $R(O_1 + O_2)^*$ .

La figure (II.6) montre des hologrammes simulés sur la base du montage holographique hors-axe à deux vues. L'hologramme de la vue directe est montré par la figure (II.6.a), l'hologramme de la vue orthogonale est montré par la figure (II.6.b), l'hologramme des deux vues combinées est montré par la figure (II.6.c) et la figure (II.6.d) montre juste un zoom sur la région où se trouve la figure de diffraction de la particule. Sur cette région, on observe bien les micros franges d'interférences qui codent notre objet.



**Figure II.6 :** (a) Hologramme de la vue directe, (b) hologramme de la vue orthogonale, (c) hologramme des deux vues, (d) zoom sur la région sélectionnée.

### II.4.1.1.2 Processus de reconstruction

A toute distance  $d_r$  la reconstruction de l'amplitude complexe du champ objet est basée sur les formules de convolution de diffraction (II.4) dont la donnée d'entrée est l'hologramme  $H$ . Le traitement est réalisé en suivant le diagramme montré sur la figure (II.7) sous environnement Matlab :

- dans un premier temps, l'hologramme est transformé par FFT et ensuite, convolué au filtre  $F$  qui permet de sélectionner l'ordre d'intérêt (+1) ;
- par FFT inverse, la modulation spatiale de l'onde de référence est supprimée. Puis, on propage l'ordre (+1) vers le plan situé à la distance  $d_r$  ;
- par convolution avec le spectre angulaire on obtient ainsi l'image reconstruite en amplitude et en phase.

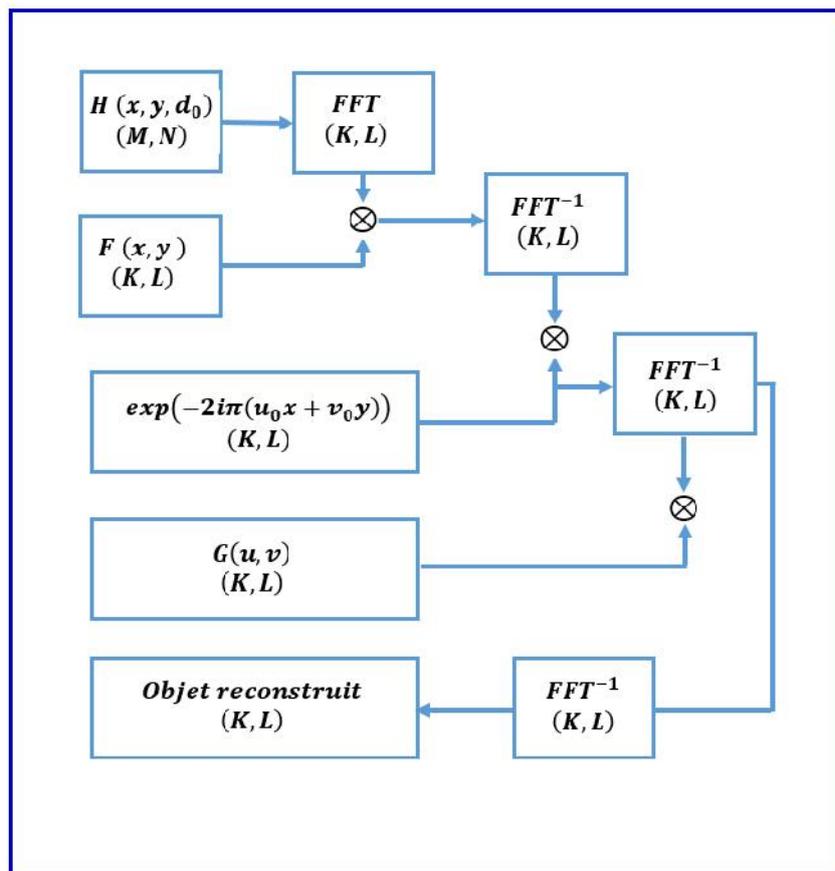
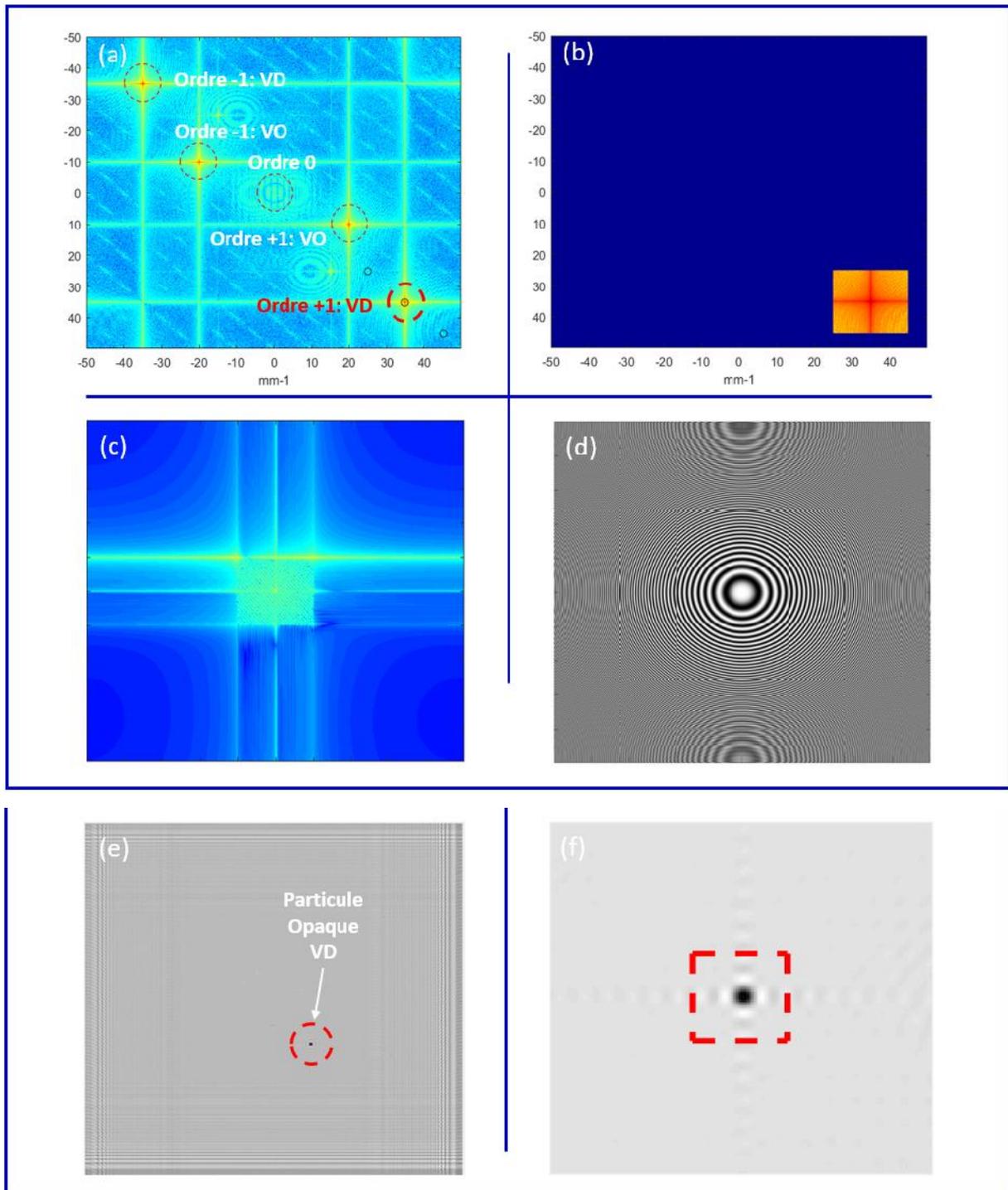


Figure II.7 : Algorithme de convolution avec spectre angulaire.

L'application de l'algorithme de la figure (II.7) sur l'hologramme de la figure (II.6.c) permet en premier lieu d'obtenir le spectre de l'hologramme qui est montré sur les figures (II.8.a) et (II.9.a). Le spectre montre que les deux hologrammes sont codés simultanément sur un même capteur CCD.

Dans un premier temps, on se focalise sur la procédure de reconstruction de la vue directe.

Le filtre binaire  $\{F\}$  est représenté par la figure (II.8.b) pour sélectionner l'ordre (+1) qui correspond à la vue directe. Dans la figure (II.8.c) on peut voir que la bande passante utile est localisée sur la bande passante de l'objet représenté sur la figure (II.8.b) et l'information sur l'objet est centrée autour des coordonnées spectrales  $\{u_0, v_0\} = \{35, 35\}$   $\text{mm}^{-1}$ . La bande passante doit aussi être centrée à une fréquence  $\{u_0, v_0\}$  dans le spectre de l'hologramme. Ceci est nécessaire pour reconstituer la vue directe. La figure (II.8.d) représente la partie réelle du spectre angulaire  $\{G\}$ . La figure (II.8.e) montre la reconstruction de la vue directe à une distance de  $d_{rD} = 80.91\text{mm}$ . Un agrandissement de la région où se trouve la particule (région d'intérêt (ROI)) est représentée par la figure (II.8.f).

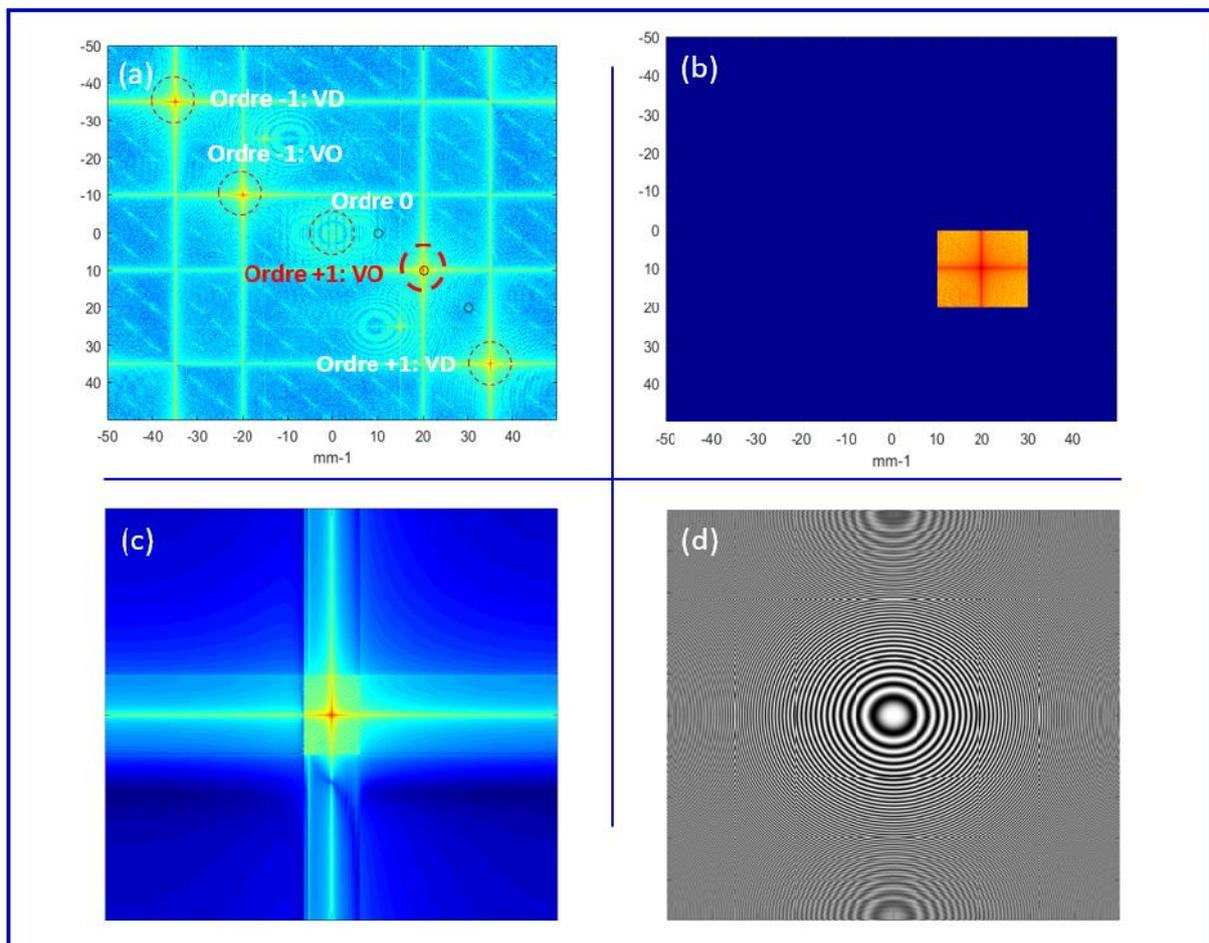


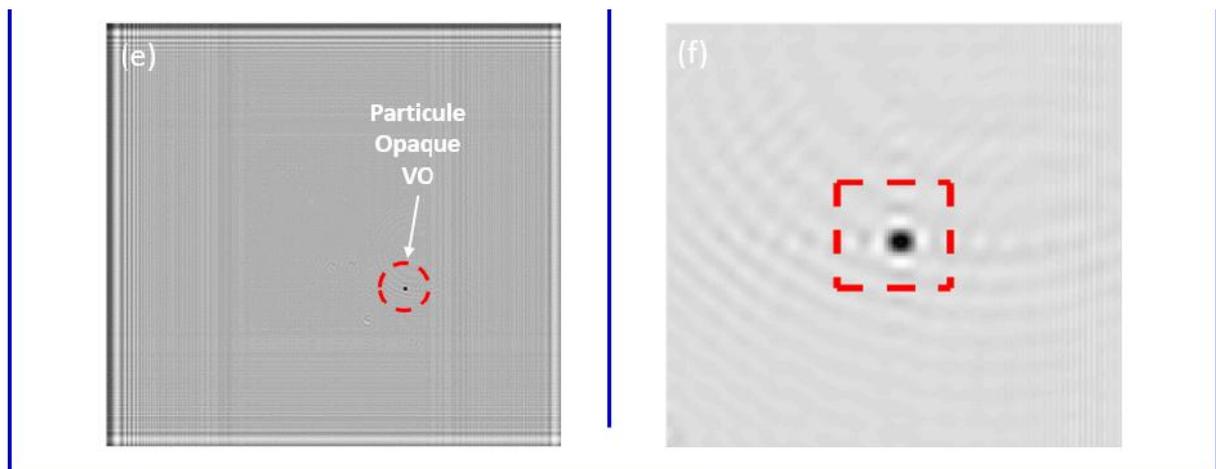
**Figure II. 8 :** Reconstruction de la vue directe en amplitude, (a) spectre de l'hologramme hors axe à deux vues, (b) filtre binaire  $\{F\}$ , (c) modulation spatiale de l'onde de référence ; (d) fonction de transfert correspondant au spectre angulaire modulé spatialement, (e) vue directe reconstruite en amplitude, (f) ROI agrandie.

## Chapitre II. Holographie numérique hors-axe à deux vues appliquée à la visualisation des particules marqueurs

Dans une seconde étape, on se focalise sur la procédure de reconstruction de la vue orthogonale.

La même procédure que précédemment est appliquée. Il faut juste noter que dans les figures (II.9.b) et (II.9.c) la fonction de transfert est maintenant localisée à des fréquences spatiales  $\{u_0, v_0\} = \{20, 10\} \text{mm}^{-1}$ . La figure (II.9.e) montre la reconstruction de la vue orthogonale à  $d_{r0} = 93.85 \text{ mm}$  ainsi qu'un agrandissement de la région d'intérêt est représenté par la figure (II.9.f).





**Figure II. 9 :** Reconstruction de la vue orthogonale en amplitude, (a) spectre de l'hologramme hors axe à deux vues ; (b) filtre binaire  $\{F\}$ , (c) modulation spatiale de l'onde de référence, (d) fonction de transfert correspondant au spectre angulaire modulé spatialement, (e) vue orthogonale reconstruite en amplitude, (f) ROI agrandie.

### II.4.1.1.3 Influence de la bande passante de filtrage

En vue d'étudier l'influence de la bande passante de filtrage lors de la sélection de l'ordre (+1) qui correspond à la vue directe ou à la vue orthogonale afin de rechercher le meilleur contraste de l'image d'un hologramme d'une particule, nous avons calculé le contraste de la particule à différentes bandes passantes  $\Delta U = \Delta V = \{3.5, 30\} \text{mm}^{-1}$  en pas de  $0.1 \text{mm}^{-1}$  en utilisant la fonction de transfert du spectre angulaire pour les deux vues.

Le rapport  $\{C = VE/VC\}$  est le contraste qui a été calculé. C'est un rapport entre la moyenne de la zone extérieure  $\{VE\}$  et la moyenne de la zone centrale  $\{VC\}$ .

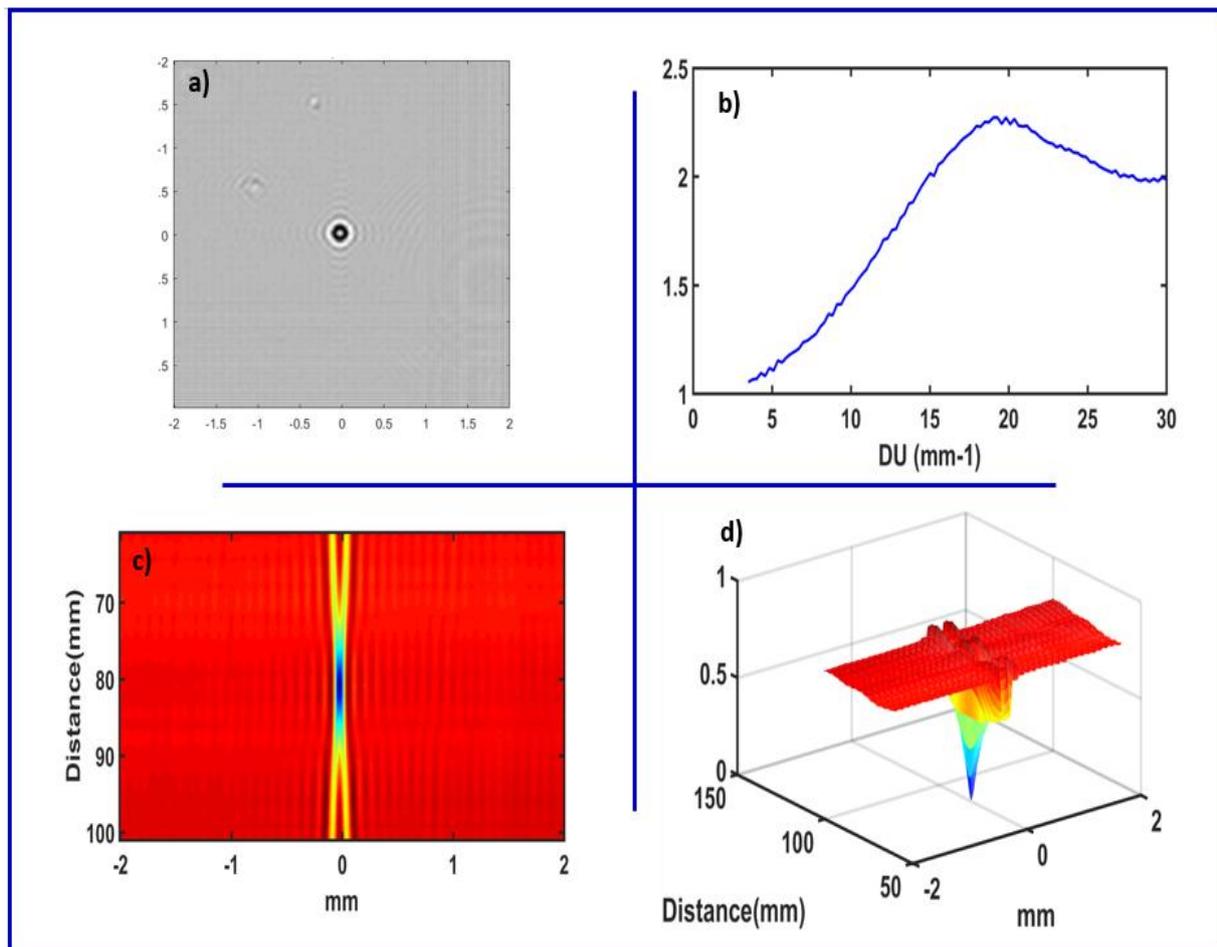
Afin de réduire le temps de calcul, une zone d'intérêt de  $\{401 \times 401\}$  pixels centrée sur la particule a été sélectionnée sur chaque image d'amplitude, comme illustré ci-dessous sur les figures (II.10 a) et (II.11.a).

Les courbes dans les figures (II.10.b) et (II.11.b) montrent la variation du contraste de la particule en fonction de la variation de la largeur de la bande passante respectivement de la vue directe et de la vue orthogonale.

On remarque que le contraste de la particule de la vue directe augmente à chaque fois qu'on varie la bande passante ( $\Delta U, \Delta V$ ) jusqu'à ce que cette dernière atteigne la valeur

## Chapitre II. Holographie numérique hors-axe à deux vues appliquée à la visualisation des particules marqueurs

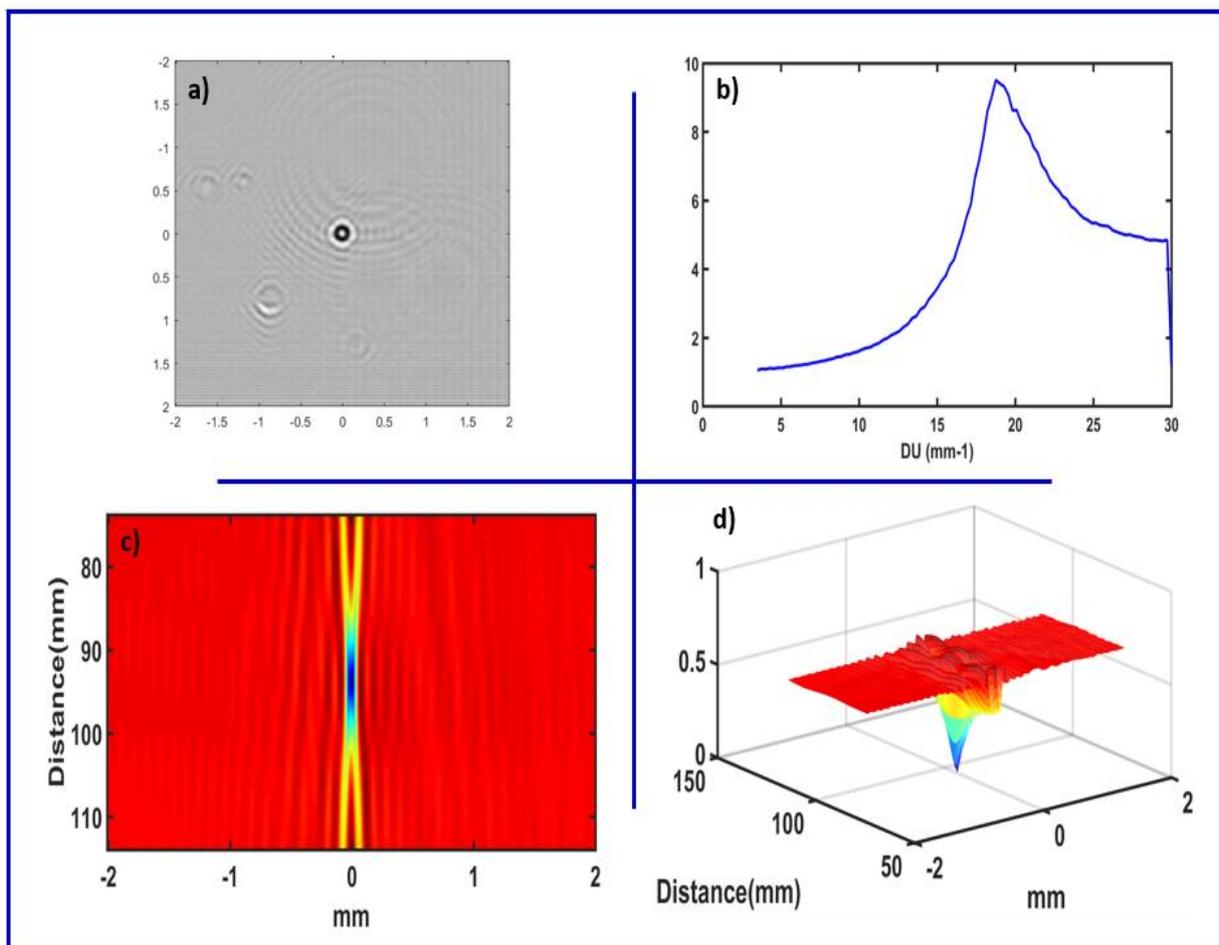
$\{DU, DV\} = \{19.03 ; 19.03\} \text{ mm}^{-1}$  où le contraste est à son maximum  $C_{\max} = 2.27$ . Ceci peut être expliqué par le fait que la particule devienne nette tout en se rapprochant de son plan de focalisation. On constate que dans le plan de focalisation de cette particule qui correspond la distance  $d_{rD} = 80.91 \text{ mm}$ , le profil de focalisation est le plus contrasté et le plus étroit, comme le montre les figures (II.10.c) et (II.10.d). Au-delà de cette valeur, toute augmentation de la bande passante entraîne une diminution du contraste de la particule.



**Figure II.10 :** Contraste et profil de reconstruction d'un hologramme d'une particule opaque située à  $d_{rD} = 80.91 \text{ mm}$  du capteur, (a) vue directe, (b) courbe de variation du contraste de la particule en fonction de la bande passante dans l'intervalle  $\Delta U = \Delta V = \{3.5, 30\} \text{ mm}^{-1}$  en pas de  $0.1 \text{ mm}^{-1}$ , (c) profil de focalisation par rapport aux distances de reconstruction  $d_{rD} = \{d_D - 20, d_D + 20\}$  en pas de  $0.2 \text{ mm}$ , (d) profil de focalisation en 3D.

## Chapitre II. Holographie numérique hors-axe à deux vues appliquée à la visualisation des particules marqueurs

On remarque que le contraste de la particule de la vue orthogonale augmente à chaque fois qu'on varie la bande passante ( $\Delta U, \Delta V$ ) jusqu'à ce que cette dernière atteigne la valeur  $\{DU, DV\} = \{18.85, 18.85\} \text{ mm}^{-1}$  où le contraste est à son maximum  $C_{\max} = 9.50$ . Ceci peut être expliqué par le fait que la particule devienne nette tout en se rapprochant de son plan de focalisation. On constate que dans le plan de focalisation de cette particule qui correspond la distance  $d_{r0} = 93.85 \text{ mm}$ , le profil de focalisation est le plus contrasté et le plus étroit, comme le montre les figures (II.11.c) et (II.11.d). Au-delà de cette valeur, toute augmentation de la bande passante entraîne une diminution du contraste de la particule.



**Figure II.11:** Contraste et profil de reconstruction d'un hologramme d'une particule opaque située à  $d_{r0} = 93.85 \text{ mm}$  du capteur, (a) vue orthogonale, (b) courbe de variation du contraste de la particule en fonction de la bande passante dans l'intervalle  $\Delta U = \Delta V =$

{3.5, 30} mm<sup>-1</sup> en pas de 0.1mm<sup>-1</sup>, (c) profil de focalisation par rapport aux distances de reconstruction  $d_{FD} = \{d_0-20, d_0+20\}$  en pas de 0.2 mm, (d) profil de focalisation en 3D.

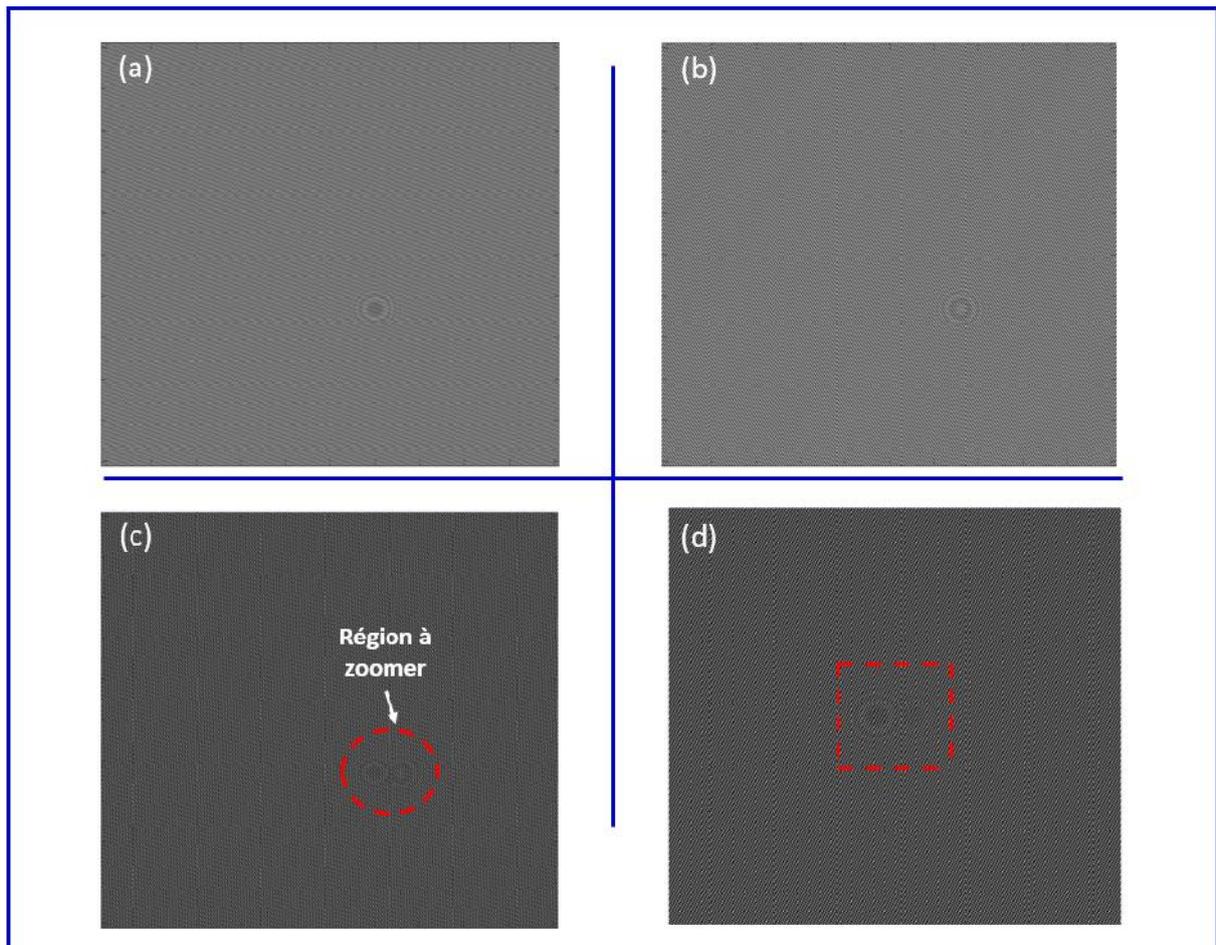
### II.4.1.2 Cas d'une particule transparente (objet de phase)

Dans cet exemple, la simulation a été faite pour simuler une particule transparente (objet de phase).

#### II.4.1.2.1 Processus d'enregistrement

Le même raisonnement qu'au paragraphe (II.4.1.1) a été suivi, sauf que les ondes éclairant l'objet selon les deux directions directe et orthogonale sont multipliées par un terme de phase.

La figure (II.12) montre des hologrammes simulés sur la base du montage holographique hors-axe à deux vues. L'hologramme de la vue directe est montré par la figure (II.12.a), l'hologramme de la vue orthogonale est montré par la figure (II.12.b), l'hologramme des deux vues combinées est montré par la figure (II.12.c) et la figure (II.12.d) montre juste un agrandissement sur la région où se trouve la figure de diffraction de la particule. Sur cette région, on observe bien les micros franges d'interférences qui codent notre objet.



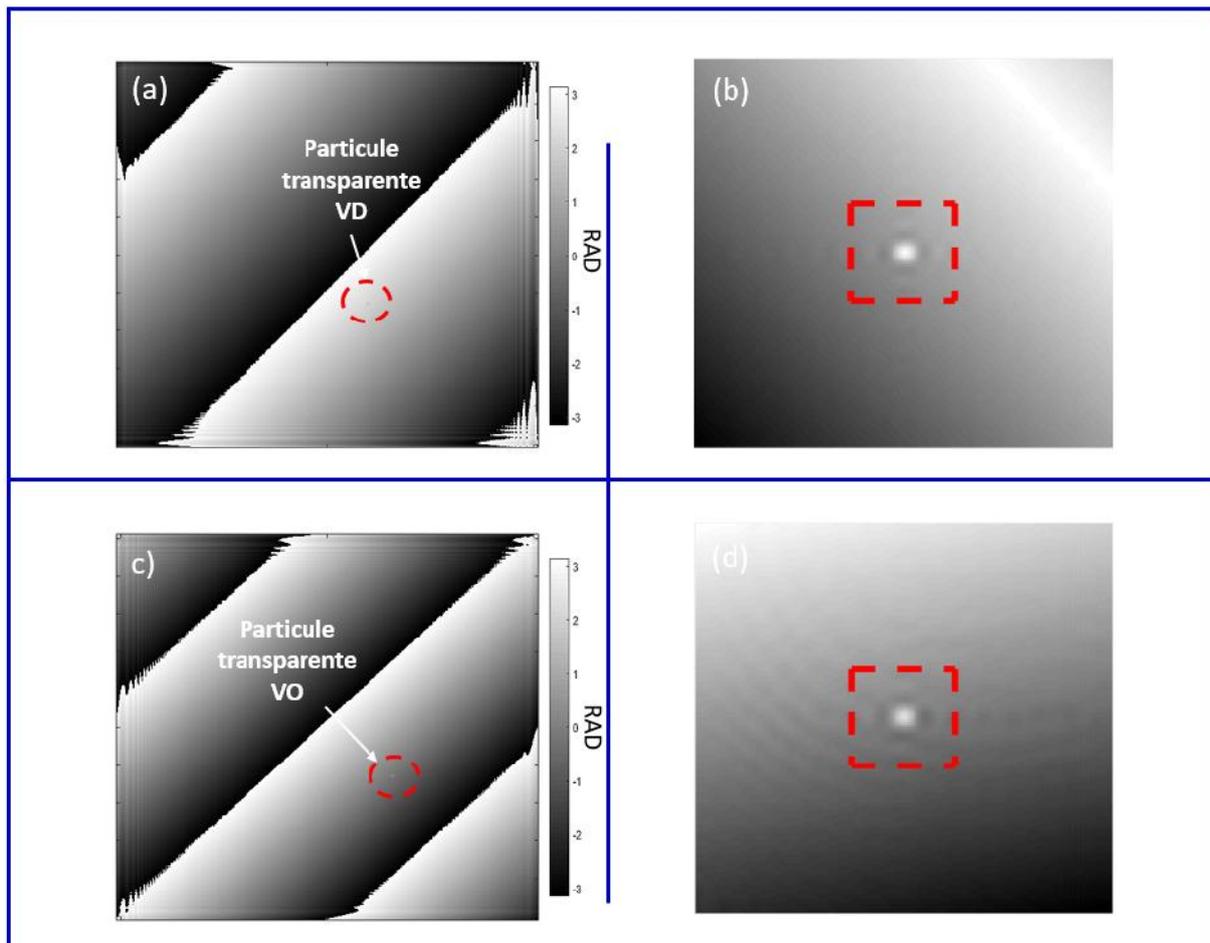
**Figure II.12** : Hologrammes simulés d'une particule transparente (objet de phase), (a) hologramme de la vue directe, (b) hologramme de la vue orthogonale, (c) hologramme des deux vues, (d) agrandissement de la région sélectionnée.

#### II.4.1.2.2 Processus de reconstruction

L'application de l'algorithme de la figure (II.7) sur l'hologramme de la figure (II.12.c) permet d'obtenir l'image reconstruite.

La figure (II.13.a) montre la reconstruction de la vue directe à une distance de  $d_{rD} = 80.91$  mm ainsi qu'un agrandissement de la ROI est représenté par la figure (II.13.b).

La figure (II.13.c) montre la reconstruction de la vue orthogonale à une distance de  $d_{rO} = 93.85$  mm ainsi qu'un agrandissement de la ROI est représenté par la figure (II.13.d).



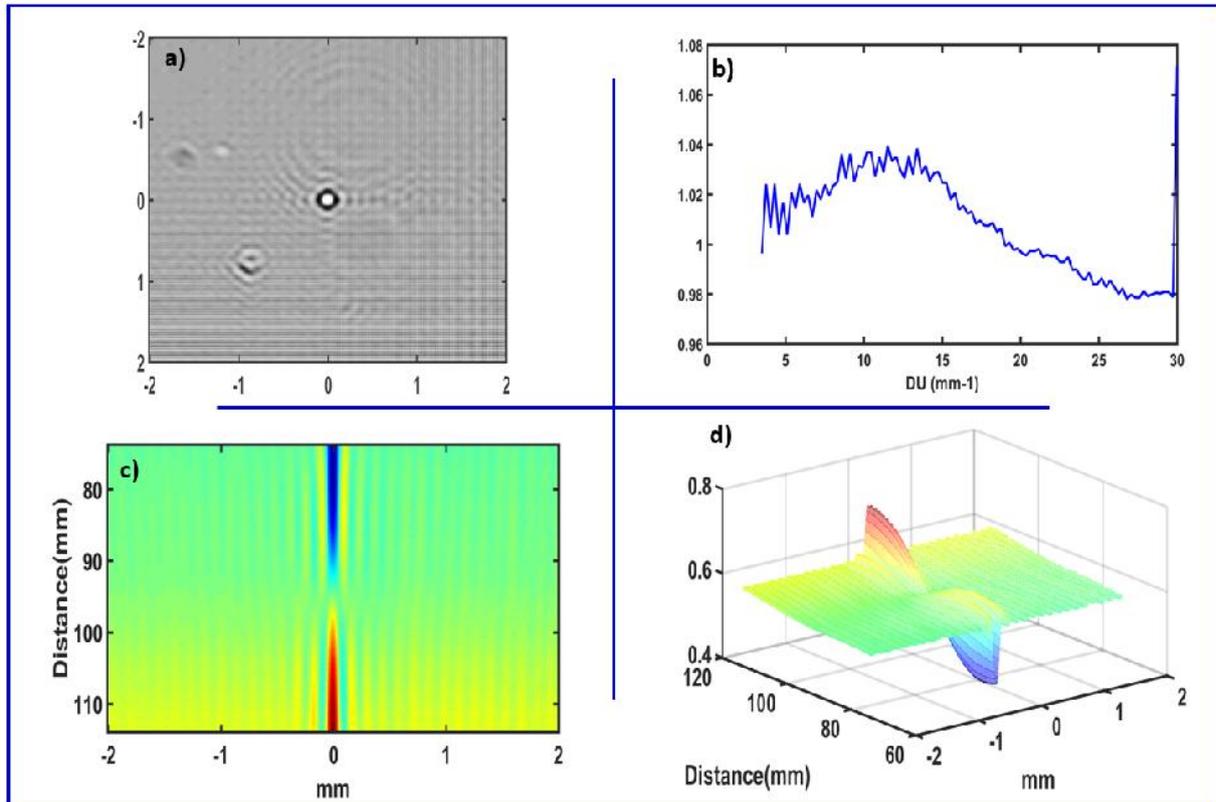
**Figure II. 13 :** Reconstruction de l'image en phase, (a) vue directe reconstruite en phase, (b) agrandissement de la ROI, (c) vue orthogonale reconstruite en phase, (d) agrandissement de la ROI.

#### II.4.1.2.3 Influence de la bande passante de filtrage

La courbe dans la figure (II.14.b) montre la variation du contraste de la particule (objet de phase) en fonction de la variation de la largeur de la bande passante de la vue orthogonale.

On remarque que le contraste de la particule de la vue orthogonale augmente à chaque fois qu'on varie la bande passante ( $\Delta U, \Delta V$ ) jusqu'à ce que cette dernière atteigne la valeur  $\{DU, DV\} = \{11.53 ; 11.53\} \text{ mm}^{-1}$  où le contraste est à son maximum  $C_{\max} = 1.04$ . Ceci peut être expliqué par le fait que la particule devienne nette tout en se rapprochant de son plan de focalisation. On constate que dans le plan de focalisation de cette particule qui correspond la distance  $d_{r0} = 93.85 \text{ mm}$ , le profil de focalisation est le plus contrasté et

le plus étroit, comme le montre les figures (II.10.c) et (II.10.d). Au-delà de cette valeur, toute augmentation de la bande passante entraîne une diminution du contraste de la particule.



**Figure II.14 :** Contraste et profil de reconstruction d'un hologramme d'une particule transparente (objet de phase) située à  $d_{r0} = 93.85$  mm du capteur, (a) vue orthogonale, (b) courbe de variation du contraste de la particule en fonction de la bande passante dans l'intervalle  $\Delta U = \Delta V = \{3.5, 30\}$  mm<sup>-1</sup> en pas de 0.1mm<sup>-1</sup>, (c) profil de focalisation par rapport aux distances de reconstruction  $d_{rD} = \{d_0-20, d_0+20\}$  en pas de 0.2 mm, (d) profil de focalisation en 3D.

## II.5 Holographie hors-axe à deux vues bichromes avec deux faisceaux de référence

Pour cet exemple, la simulation d'hologramme hors axe à deux vues a été faite par combinaison entre le multiplexage angulaire et le multiplexage chromatique, comme représenté sur la figure (II.15).

Le faisceau lumineux émis par le laser rouge est divisé en deux parties à l'aide d'un cube séparateur. Une partie sera orientée sur le capteur CCD en éclairant à son passage l'objet de manière directe ( $O_R$ ). Le deuxième faisceau émis par le laser vert est également divisé en deux parties à l'aide d'un deuxième cube séparateur. Une partie sera orientée sur le capteur CCD éclairant à son passage l'objet de manière orthogonale ( $O_V$ ). Les deux premières parties des deux faisceaux lasers rouge et vert sont combinées, ensuite, orientées vers le capteur CCD pour constituer les faisceaux de référence ( $R+V$ ).

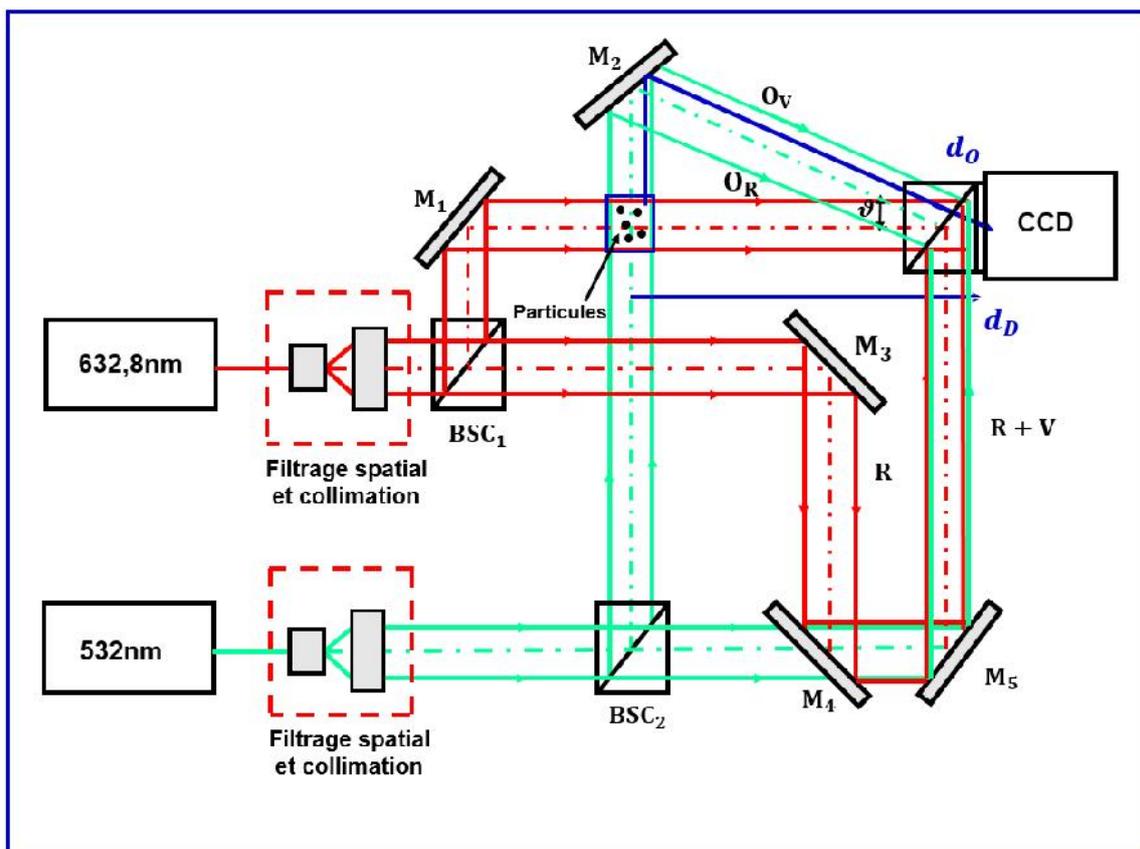


Figure II.15 : Configuration pour l'enregistrement hors axe à deux vues bichromes avec deux faisceaux de référence.

**II.5.1 Processus d'enregistrement**

Les positions initiales des particules et les taches de diffractions parasites ont été choisies aléatoirement. De plus, nous avons considéré que l'onde lumineuse  $w(x,y)$  produisant des ondes d'objet et de référence (figure II.16.a et b), a une amplitude gaussienne (mode TEM00). En outre, les hologrammes numériques ont été enregistrés avec capteur 8 bits et nous avons pris en compte le bruit des photons, (figure II.16.c et d). Le puits de pixels a été pris pour 16 000 électrons à saturation.

Soit

$$\begin{cases} E_R(x,y) = w_R(x,y)\exp(ik_R\sin(\vartheta_x)x + ik_R\sin(\vartheta_y)y) \\ E_G(x,y) = w_G(x,y)\exp(ik_G\sin(\vartheta_x)x + ik_G\sin(\vartheta_y)y) \end{cases} \quad (II.7)$$

Où  $\{E_R, E_G\}$  sont respectivement les ondes éclairant l'objet selon les deux directions directe et orthogonale,  $\{w_R, w_G\}$ , sont les amplitudes gaussiennes de chaque onde,  $k\sin(\vartheta_x)$  et  $k\sin(\vartheta_y)$  sont les fréquences spatiales de l'onde de référence rouge et l'onde de référence verte.

L'équation (II.7) est calculée numériquement en utilisant le théorème de convolution et la fonction de transfert du spectre angulaire dans l'approximation de Fresnel. Ainsi, l'amplitude complexe dans le plan du détecteur peut être calculée selon [13-16] par :

$$\begin{cases} O_R = FT^{-1}[FT[E_R] \times G_R] \\ O_G = FT^{-1}[FT[E_G] \times G_G] \end{cases} \quad (II.8)$$

Où la fonction de transfert du spectre angulaire est donnée par l'équation (II.9)

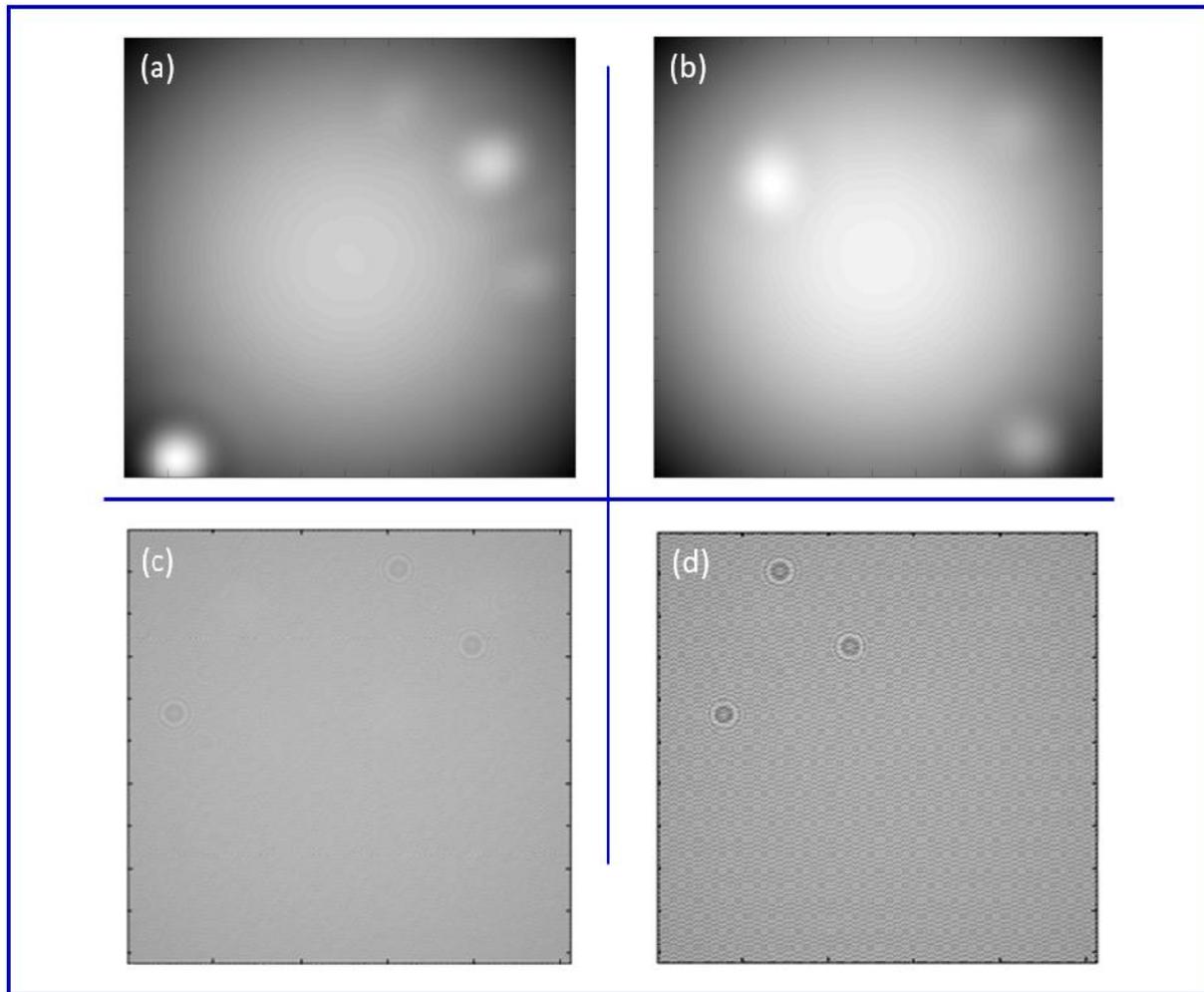
$$\begin{cases} G_R(u,v,d_D) = \exp[-i\pi d_D(u^2 + v^2)] \\ G_G(u,v,d_O) = \exp[-i\pi d_O(u^2 + v^2)] \end{cases} \quad (II.9)$$

Dans le plan d'enregistrement, l'hologramme est exprimé comme suit :

$$H = |O_R|^2 + |R_R|^2 + |O_G|^2 + |R_G|^2 + O_R R_R^* + O_G R_G^* + O_R^* R_R + O_G^* R_G \quad (\text{II.10})$$

Cette équation contient cinq termes : le terme situé aux fréquences spatiales nulles qui correspond à  $|O_R|^2 + |R_R|^2 + |O_G|^2 + |R_G|^2$ , un terme situé aux fréquences basses qui est sans intérêt et qui correspond à  $O_R R_R^* + O_G R_G^*$  et les termes situés aux hautes fréquences et qui correspondent aux termes  $O_R^* R_R + O_G^* R_G$ .

La figure (II.16.c et d) montre les hologrammes simulés sur la base du montage holographique hors-axe à deux vues avec deux faisceaux de longueurs d'ondes différentes. Les distributions de l'éclairement gaussien avec les taches de diffractions parasite aléatoires pour la vue directe et la vue orthogonale sont représentées respectivement sur la figure (II.16.a et b). L'hologramme de la vue directe est montré par la figure (II.16.c), l'hologramme de la vue orthogonale est montré par la figure (II.16.d).



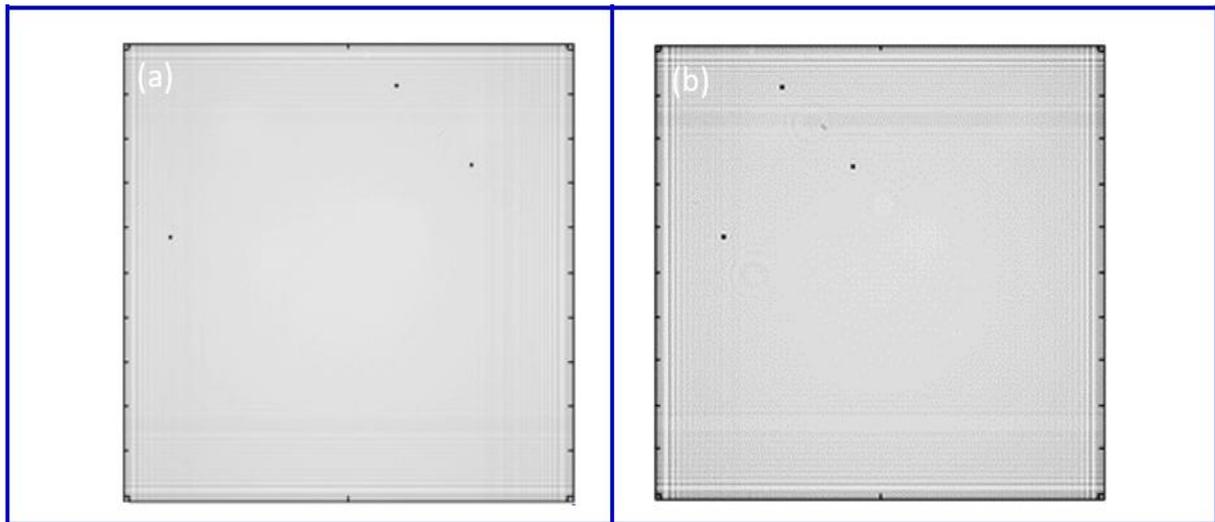
**Figure II.16 :** Images de simulation : (a) et (b) éclaircissements gaussiens avec des taches de diffractions parasites aléatoires pour la vue directe et la vue orthogonale, (c) hologramme simulé des particules opaques de la vue directe, (d) hologramme simulé des particules opaques de la vue orthogonale.

### II.5.2 Processus de reconstruction

La reconstruction est réalisée en suivant le diagramme montré par la figure (II.7).

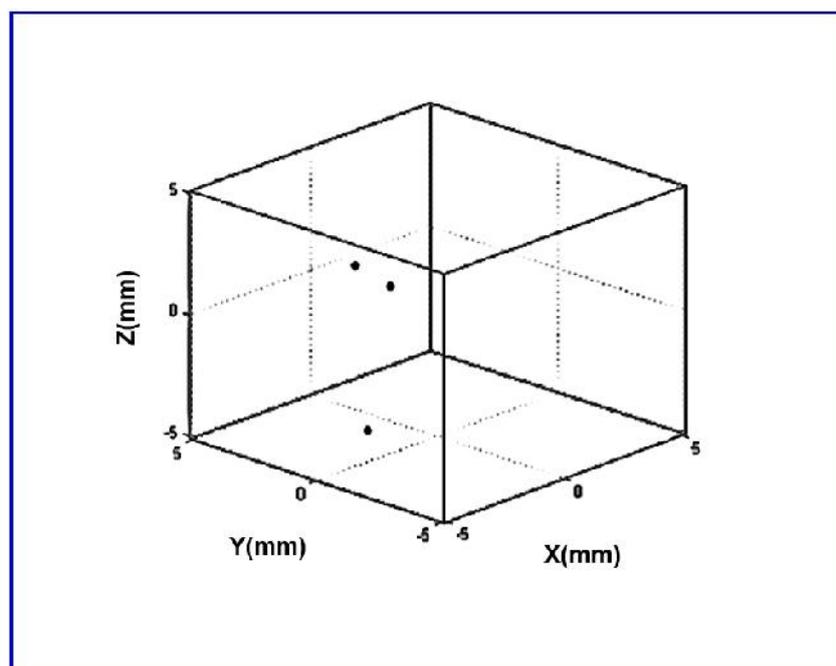
La figure (II.17.a) montre la reconstruction de la vue directe à une distance de  $d_{rD} = 80.91\text{mm}$

La figure (II.17.b) montre la reconstruction de la vue orthogonale à une distance de  $d_{rO} = 96.24\text{ mm}$



**Figure II.17** : Reconstruction d'images en amplitude, (a) vue directe, (b) vue orthogonale.

La représentation 3D des particules dans la cuve est montrée sur la figure (II.18). Cette figure montre la position exacte de chaque particule dans la cuve. Les coordonnées  $\{X_i, Y_i\}$  sont obtenues de la vue directe, et la coordonnée  $\{Z_i\}$  est obtenue à partir de la vue orthogonale.



**Figure II.18** : Représentation des particules en 3D.

### II.6 Conclusion

Dans ce chapitre notre travail a été focalisé sur le traitement des hologrammes de particules opaques ou transparentes à deux vues, soit en utilisant une seule longueur d'onde soit en utilisant deux longueurs d'onde, réalisé par simulation en utilisant la méthode de transfère du spectre angulaire.

Nous avons aussi étudié l'influence de la bande passante de filtrage lors de la sélection de l'ordre (+1) qui correspond à la vue directe ou à la vue orthogonale afin de rechercher le meilleur contraste de l'image d'un hologramme d'une particule.

Nous avons simulé un hologramme hors-axe à deux vues dont les positions initiales des particules et les taches de diffractions parasites ont été choisies aléatoirement afin de les représenter en 3D, tout en respectant la coordonnées Y qui doit être la même pour les deux vues.

Une analyse des courbes (figures II.10.b, II.11.b et II.14.b), montre que le pic de focalisation n'est pas tout à fait pointu. Il présente un certain aplatissement, montrant que la distance de focalisation est relativement conséquente. Ceci impose à trouver des techniques de détection du plan de focalisation qui soient plus rigoureuses. C'est pour cela que le chapitre suivant (III) se focalisera sur ce type de problème, en passant en revue les différents critères numériques de focalisation et décider du meilleur critère qui donne plus de satisfaction.

### II.7 REFERENCES

- [1] E.N. Leith and J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory, *Journal of the Optical Society of America*, 52(10), (1962).
- [2] S. S. Kou and C. J. R. Sheppard. Imaging in digital holographic microscopy, *Optics Express*, 15, 1364013648, (2007).
- [3] 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, *Optics Letters*, 33, 2095-2097, (2008).

- [4] S. Boucherit, L. Bouamama, Zegadi, R. and S. Simoëns. Formulation of off-axis single reference beam and two angle views for digital holography. *Journal of Optics* 12, 035302, (2010).
- [5] M. Paturzo, P. Memmolo, L. Miccio, A. Finizio, P. Ferraro, A. Tulino and B. Javidi, Numerical multiplexing and demultiplexing of digital holographic information for remote reconstruction in amplitude and phase. *Optics Letters*, 33, 2629-2631, (2008).
- [6] P. Picart, E. Moisson and D. Mounier. Twin sensitivity measurement by spatial multiplexing of digitally recorded holograms, *Applied Optics*, 42 1947–1957, (2003).
- [7] M. Paturzo, P. Memmolo, A. Tulino, A. Finizio, and P. Ferraro. Investigation of angular multiplexing and de-multiplexing of digital holograms recorded in microscope configuration. *Optics Express* 17, 8709-8718, (2009).
- [8] C. Yuan, H. Zhai and H. Liu. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis. *Optics Letters*, 33 2356–8, (2008).
- [9] X. Wang and H. Zhai. Pulsed digital micro-holography of femto-second order by wavelength division multiplexing. *Optics Communication*, 275 42–5, (2007).
- [10] J. Kühn, T. Colomb, F. Montfort, F. Charrière, Y. Emery, E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition. *Optics Express* 15 7231–42, (2007).
- [11] P. Bergström, D. Khodadad, E. Hällstigand M. Sjö Dahl. Dual-wavelength digital holography: single-shot shape evaluation using speckle displacements and regularization. *Applied optics*, 53(1), 123-131, (2014).
- [12] C. J. Mann, P. R. Bingham, V. C. Paquit, and K. W. Tobin. Quantitative phase imaging by three wavelength digital holography. *Optics express* 16, 9753-9764, (2008).
- [13] C. Yuan, G. Situ, G. Pedrini, J. Ma J and W. Osten. Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing. *Applied Optics*, 50 B6–11, (2011).
- [14] T. Colomb, P. Dahlgren, D. Beghuin, E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge. Polarization imaging by use of digital holography. *Applied Optics* 41 27–37, (2002).

- [15] J. Wang, J. Zhao, C. Qin, J. Di, A. Rauf and H. Jiang. Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion. *Optics Letters*, 37 1211–3, (2012).
- [16] Y. Wu, Y. Yang, H. Zai, Z. Ma, L. Deng and Q. Ge. Single-exposure approach for expanding the sampled area of a dynamic process by digital holography with combined multiplexing. *Journal of Optics*, 15, 8 085402, (2013).
- [17] S. Mebarek Azzem. Multiplexage angulaire et chromatique d'hologrammes de particules en configuration hors-axe. Thèse de doctorat, Institut d'Optique et mécanique de Précision, (2016).
- [18] M.T. Kreis. *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods* (Wiley 2004).
- [19] T.C. Poon. *Digital holography and three-dimensional display: Principles and applications*. (Springer-Verlag 2010).
- [20] P. Picart. *New techniques in digital holography* (ISTE-Wiley 2015).
- [21] P. Picart and P. Tankam. Analysis and adaptation of convolution algorithms to reconstruct extended objects in digital holography. *Applied Optics*, 52(1), A240-A253, (2013).

## **CHAPITRE III**

### **Critères de refocalisation en holographie numérique hors-axe à deux vues**

---

Dans ce chapitre, nous proposons une évaluation de la qualité des critères de refocalisation pour l'imagerie des particules en l'holographie numérique hors axe.

Treize critères de refocalisation sont appliqués à la fois à l'image reconstruite en amplitude et en phase obtenue d'hologrammes obtenus par simulation et de manière expérimentale.

---

### III.1 Introduction

L'holographie numérique (HN) et la microscopie holographique numérique (MHN) [1-3] sont des techniques d'enregistrement et de reconstruction d'images tridimensionnelles d'objets. De plus, l'imagerie holographique numérique est une technique efficace pour la mesure des champs de déformation de la surface de l'objet et pour la mesure des formes et contours de surfaces [4]. Généralement, le champ objet est reconstruit numériquement en utilisant un opérateur de propagation (transformée de Fresnel discrète, spectre angulaire [1-3]) dans lequel un paramètre important est la distance de reconstruction.

Ainsi, une image focalisée peut être obtenue à condition que la distance de focalisation soit la plus proche possible du chemin optique dans le montage expérimental. Par conséquent, un critère pour estimer si l'image reconstruite est au meilleur plan focal doit être considéré. Un grand nombre de critères de refocalisation ont été proposés au cours des dernières années. Généralement, le meilleur plan de focalisation est déterminé par la distance de reconstruction pour laquelle la fonction du critère considéré présente un extremum (maximum ou minimum).

### III.2 Critères de refocalisation en holographie numérique de particule

Après le processus de reconstruction, l'information sur la position 3D des particules est déterminée à partir de l'hologramme reconstruit. La position de chaque particule est déterminée en recherchant le pic d'intensité local dans l'image reconstruite qui correspond au meilleur plan de focalisation, ex. figure (II.10.b). Alternativement, on peut utiliser des critères de refocalisation qui assurent ensemble la même fonction.

Les critères de refocalisation sont des métriques de netteté pour mesurer la focalisation d'une image. Cette dernière est déterminée par la distance de reconstruction pour laquelle la fonction du critère considéré présente un extremum (maximum ou minimum).

### III.3 Différents critères de refocalisation en holographie numérique

Dans la littérature, plusieurs critères de refocalisation ont été proposés dans le passé pour obtenir la meilleure distance de reconstruction en holographie numérique.

Pour évaluer la robustesse de ces critères, nous avons comparé un ensemble de treize critères appliqués sur les deux objets d'amplitude et de phase à partir de données holographiques hors axe.

En règle générale, les mesures de focalisation sont évaluées sur une partie sélectionnée de l'amplitude ou de la phase de l'amplitude complexe reconstruite à une distance de reconstruction donnée  $d_r$ .

Dans ce qui suit, on note  $A_z(k, l)$  l'amplitude du champ complexe et  $\varnothing_z(k, l)$  sa phase. Les zones sur lesquelles les critères sont évalués incluent les pixels  $K \times L$ . Pour généraliser l'application des critères, on note  $\Psi(k, l)$  les données sur lesquelles on les applique. Les mesures de chaque critère sont décrites ci-après.

#### III.3.1 Critères d'Entropie (ENTR)

Gillespie et al et Ren et al [5,6] ont utilisé l'auto-entropie (ENTR) comme métrique de focalisation sur la base de la distribution de phase de l'hologramme reconstruit.

L'entropie est définie par l'équation suivante :

$$\text{ENTR} = -\sum_k p_k \log(p_k), \quad (\text{III.1})$$

Où  $p_k$  est la fonction de densité de probabilité de  $\Psi$  dans la zone sélectionnée.

#### III.3.2 Critères d'Amplitude intégrée (Md)

Dubois et al [7] ont proposé l'amplitude intégrée (Md) pour déterminer la distance de refocalisation des objets en microscopie holographique numérique (DHM). La mesure est basée sur le maximum de la courbe de balayage pour l'image d'objets d'amplitude alors qu'elle est basée sur le minimum de cette courbe pour l'image d'objets de phase.

L'amplitude intégrée est définie comme suit :

$$M_d = \sum_k \sum_l |\Psi(k, l)| \quad (III.2)$$

### III.3.3 Critères du Gradient (GRA) et du Laplacien (LAP)

Langehanenberg et al [8] ont examiné l'application de quatre techniques de focalisation, le gradient (GRA), le Laplacien (LAP), la Variance (VAR) et la fonction spectrale de Fourier logarithmique (SPEC) à des objets de phase et d'amplitude, et ont discuté en détail certaines des exigences importantes pour l'application dans la DHM. Les métriques de ces techniques sont données de manière respective par les équations suivantes :

$$GRA = \sum_k \sum_l \sqrt{(\Psi(k, l) - \Psi(k-1, l))^2 + (\Psi(k, l) - \Psi(k, l-1))^2}, \quad (III.3)$$

$$LAP = \sum_k \sum_l \sqrt{\left( \frac{\Psi(k+1, l) + \Psi(k-1, l) + \Psi(k, l+1) + \Psi(k, l-1) - 4\Psi(k, l)}{4} \right)^2}, \quad (III.4)$$

$$VAR = \frac{1}{KL} \sum_k \sum_l (\Psi(k, l) - m_\Psi)^2, \quad (III.5)$$

$$SPEC = \sum_{uv} \log(1 + F(u, v) \tilde{\Psi}(u, v)) \quad (III.6)$$

Dans l'équation (III.5),  $m_\Psi$  désigne la valeur moyenne de  $\Psi$  sur les pixels  $K \times L$ .

$F(u, v)$  dans l'équation (III.6) désigne un filtre passe-bande qui sera appliqué à la transformée de Fourier de  $\Psi$ .

Comme le Gradient et le Laplacien détectent beaucoup plus les contours sur une image numérique, la netteté des contours sera plus conséquente lorsque la distance de reconstruction du plan de focalisation est atteinte.

### III.3.4 Critères de Variance (VAR)

Ma et al [9] ont appliqué la variance des niveaux de gris (VAR) sur la distribution d'intensité de l'hologramme reconstruit à différents plans de profondeur. De la même façon, Tachiki et al [10] ont utilisé la variance des niveaux de gris comme critère dans la

DH pour déterminer la profondeur des objets multiples à partir d'un seul hologramme. La variance a été définie par l'équation (III.5).

### III.3.5 Critères de la fonction spectrale de Fourier (SPEC)

Le critère SPEC correspond à la sommation logarithmique des spectres de puissance pondérés. Il est défini par l'équation (III.6), où  $F(u, v)$  est un filtre passe-bande appliqué à la transformée de Fourier de  $\Psi$ . Pour ce critère, nous considérons un filtrage passe-haut sous la forme d'un masque circulaire binaire, avec un rayon  $R_u$  dans le spectre de Fourier.

### III.3.6 Critères de Tamura (TC)

Le coefficient de Tamura a été utilisé pour refocaliser l'image avec des contraintes de sparsité [11]. Il est basé sur l'estimation de la variance et défini comme suit :

$$TC = \frac{VAR}{m_{\Psi}}. \quad (III.7)$$

### III.3.7 Critères du coefficient de corrélation (CC)

En 2008, le coefficient de corrélation (CC) a été proposé par Yang et Kang pour l'holographie numérique des particules [12-14]. Cette métrique mesure le degré auquel deux images sont similaires. Cette métrique du coefficient calcule le rapport entre le coefficient de corrélation entre deux images obtenues à deux distances différentes. Fondamentalement, il est calculé selon l'équation (III.8) où  $\Psi$  et  $\Psi'$  sont des données aux deux distances considérées :

$$CC = \frac{\sum_k \sum_l (\Psi(k, l) - m_{\Psi})(\Psi'(k, l) - m_{\Psi'})}{\sqrt{\sum_k \sum_l (\Psi(k, l) - m_{\Psi})^2 \sum_k \sum_l (\Psi'(k, l) - m_{\Psi'})^2}}. \quad (III.8)$$

Ils ont reconstruit l'hologramme sur une gamme de profondeurs et ont créé une séquence de plans de reconstruction dans le volume. Ensuite, ils calculent le coefficient de corrélation sur un plan arbitraire entre deux images situées à la même distance de part et d'autre de ce plan. Le coefficient de corrélation le plus élevé indique les images focalisées.

### III.3.8 Critères du rapport complexe (RC)

Un autre critère proposé pour l'holographie numérique des particules a été décrit par Grare et al et est basé sur le rapport entre la variance de la partie réelle sur la variance de la partie imaginaire [15] :

$$RC = \frac{\text{VAR}[R_e(\Psi)]}{\text{VAR}[I_m(\Psi)]}, \quad (\text{III.9})$$

Où  $\text{VAR}[\dots]$  est donnée par l'équation (III.5),  $R_e$  et  $I_m$  sont respectivement les parties réelle et imaginaire de  $\Psi$  (lorsque les données  $\Psi$  sont des valeurs complexes). Il suit que ce critère est appliqué en considérant l'amplitude complexe au lieu de l'amplitude ou de la phase de l'image reconstruite à la distance  $dr$ .

### III.3.9 Critères de l'index de Gini (GI)

En 2014, Memmolo et al [16] ont utilisé l'indice de Gini (GI) pour évaluer l'image refocalisée avec des contraintes de sparsité. Le GI est donné par :

$$GI = 1 - \frac{2}{\|\Psi\|_1} \sum_n \left( \frac{N-n+0.5}{N} \right) \Psi_{kl}(n), \quad (\text{III.10})$$

Où  $\|\dots\|_1$  est la valeur absolue de  $L_1$ ,  $n$  varie de 1 à  $K \times L$  et  $\Psi_{kl}(n)$  sont les entrées triées de  $\Psi(k, l)$  dans l'ordre croissant. Le GI est bien connu pour être une fonction quasi-convexe et il assume des valeurs entre 0 et 1.

### III.3.10 Critères (GRAX, GRAY et LAPMAX)

Pour pouvoir évaluer le gradient moyen horizontal, le gradient moyen vertical et le Laplacien maximal sur une zone sélectionnée, nous avons développé trois critères supplémentaires sont ajoutés pour la comparaison : le gradient horizontal moyen (GRAXLe GRAX et le GRAY peuvent être obtenus en convoluant les données avec des masques de gradient. Cela peut être formulé selon l'équation (III.11), où "D" signifie "X" ou "Y", \* signifie convolution,

$$\text{GRAD} = \Psi * P_D, \quad (\text{III.11})$$

Et les masques de gradient sont définis comme suit :

$$P_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$
$$P_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (\text{III.12})$$

Le critère LAPMAX est calculé comme

$$\text{LAPMAX} = \max[\Psi * P_{xy}], \quad (\text{III.13})$$

Avec le masque Laplacien

$$P_{xy} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (\text{III.14})$$

Afin d'obtenir une approche systématique pour l'évaluation qualitative de ces critères de refocalisation, une simulation numérique complète du processus holographique d'enregistrement et de reconstruction a été réalisée. La section suivante décrit la simulation.

### III.4 Critères de refocalisation appliqués à des hologrammes simulés de particules

Comme décrit au deuxième chapitre, paragraphe (II.4.1), lors de l'enregistrement et de la reconstruction des hologrammes, la fonction de transfert du spectre angulaire a été utilisée et la convolution a été calculée avec l'algorithme FFT double.

La longueur d'onde a été fixée à  $632.8\text{nm}$ , les pixels de pas  $p_x = p_y = 10\mu\text{m}$ . Le capteur et le plan de l'objet comprenaient  $1024 \times 1024$  pixels.

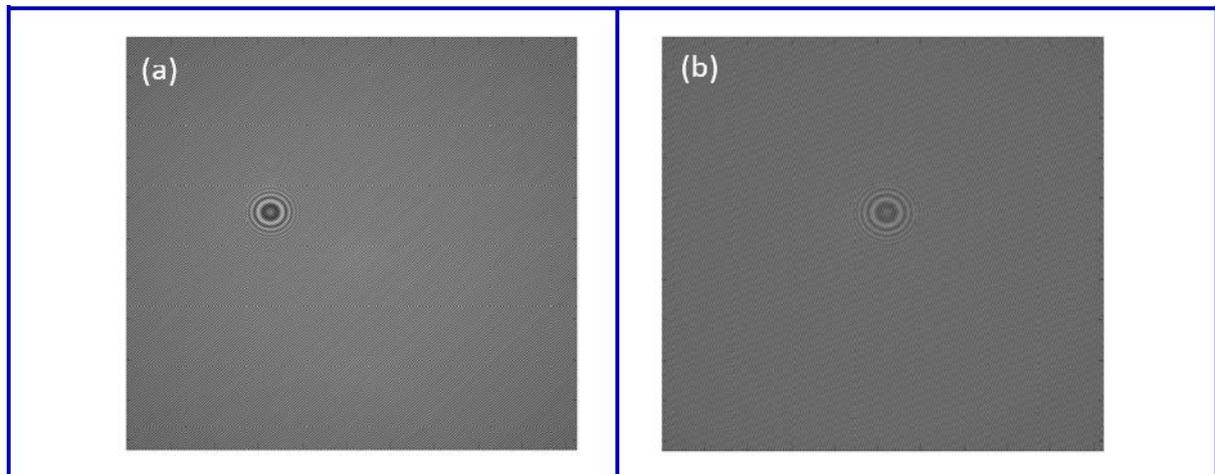
Après récupération du champ image complexe à partir de l'hologramme numérique, l'amplitude et la phase sont extraites et les critères sont systématiquement appliqués à la fois sur l'amplitude et sur la phase.

### III.4.1 Refocalisation pour une particule opaque

#### III.4.1.1 Processus d'enregistrement

Avec les mêmes étapes que celles que nous avons utilisées au deuxième chapitre, paragraphe (II.5.1), les hologrammes hors-axe à deux vues avec deux faisceaux de longueurs d'ondes différentes ont été simulés.

La figure (III.1) montre des hologrammes simulés sur la base du montage holographique hors-axe à deux vues. L'hologramme de la vue directe est montré par la figure (III.1.a), l'hologramme de la vue orthogonale est montré par la figure (III.1.b).



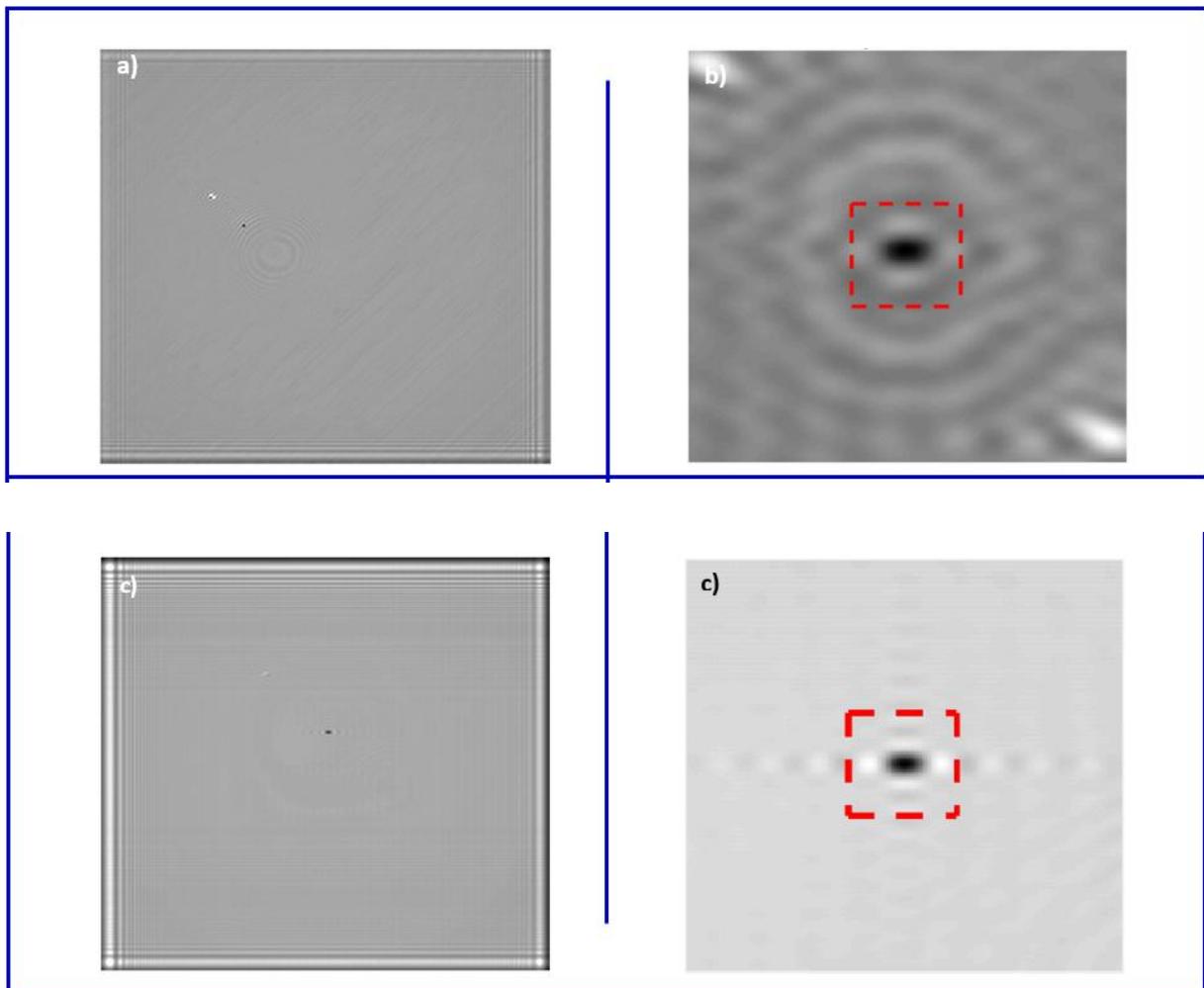
**Figure III.1 :** Hologrammes simulés d'une particule opaque, (a) hologramme de la vue directe, (b) hologramme de la vue orthogonale.

#### III.4.1.2 Processus de reconstruction

La reconstruction est faite selon le diagramme montré par la figure (II.7).

La figure (III.2.a) montre la reconstruction de la vue directe et la figure (III.2.b) montre un agrandissement sur la région où se trouve la figure de diffraction de la particule.

La figure (III.2.c) montre la reconstruction de la vue orthogonale et la figure (III.2.d) montre un agrandissement sur la région où se trouve la figure de diffraction de la particule.



**Figure III.2 :** Reconstruction de l'image en amplitude, (a) vue directe reconstruite en amplitude, (b) agrandissement de la ROI, (c) vue orthogonale reconstruite en amplitude, (d) agrandissement de la ROI.

### III.4.1.3 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la vue directe

Dans cette section, les critères ont été appliqués à l'amplitude  $A_r$  extraite du champ reconstruit de la vue directe avec la particule opaque comme objet initial.

Les figures (III.3.a, III.3.b, III.3.c, III.3.d) montrent les courbes de variation des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction appliqués sur l'amplitude reconstruite de la vue directe  $A_r$  pour le cas d'une particule opaque.

La figure (III.3.a) montre les courbes de variation des critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, où on observe que les courbes présentent une distribution en forme de gaussienne avec un pic localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 80,91\text{mm}$ .

La figure (III.3.b) présente les courbes de variation des critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, où on observe que les courbes présentent un pic localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 80,91\text{mm}$ . Sauf pour le critère Md pour lequel la courbe de variation présente un maximum assez bas par rapport aux autres distributions. On observe également que son pic se présente sous forme d'un étalement autour de  $d_r = 80,91\text{mm}$  avec une certaine irrégularité par rapport aux autres. Pour le moment, nous n'avons pas pu donner une explication à ce comportement, mais il semble y avoir une corrélation avec la figure (5) dans [7].

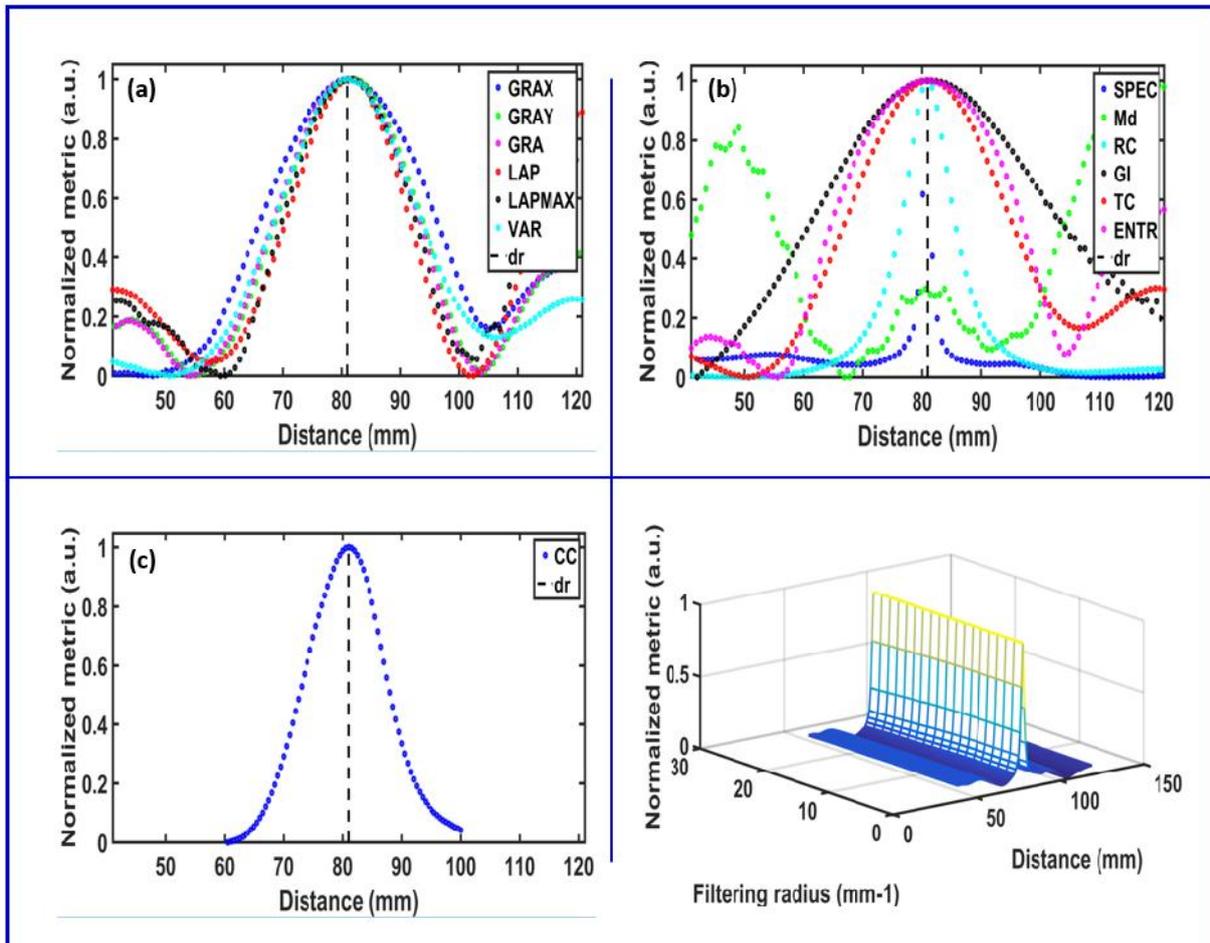
La figure (III.3.c) montre la variation du critère CC, pour lequel, la courbe de variation présente un pic localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 80,91\text{mm}$ .

La figure (III.3.d) présente le critère SPEC en fonction de la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier. Les valeurs de  $R_u$  varient de 1 à 50% de la fréquence de coupure spatiale ( $1 / 2\text{px}$ ).

A partir de toutes les figures précédentes, nous pouvons dire que les critères GRAX, GRAY, GRA, LAP, LAPMAX, VAR, SPEC, ENTR, GI, TC, RC et CC (figures III.3.a, III.3.b, III.3.c) sont capables de produire un pic localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 80,91\text{mm}$  qui est la distance théorique simulée.

Nous pouvons noter par contre que la courbe obtenue avec le SPEC est très étroite et ressemble plutôt à une fonction delta de Dirac qu'à une courbe gaussienne.

La figure (III.3.d) montre que le SPEC n'est pas sensible au choix du rayon de filtrage car un pic est toujours atteint à la bonne distance de reconstruction et la courbe obtenue reste toujours très contrastée.



**Figure III.3** : Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliquée à l'amplitude reconstruite de la vue directe, (a) les critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) les critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) le critère CC, (d) le critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

### III.4.1.4 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la vue directe

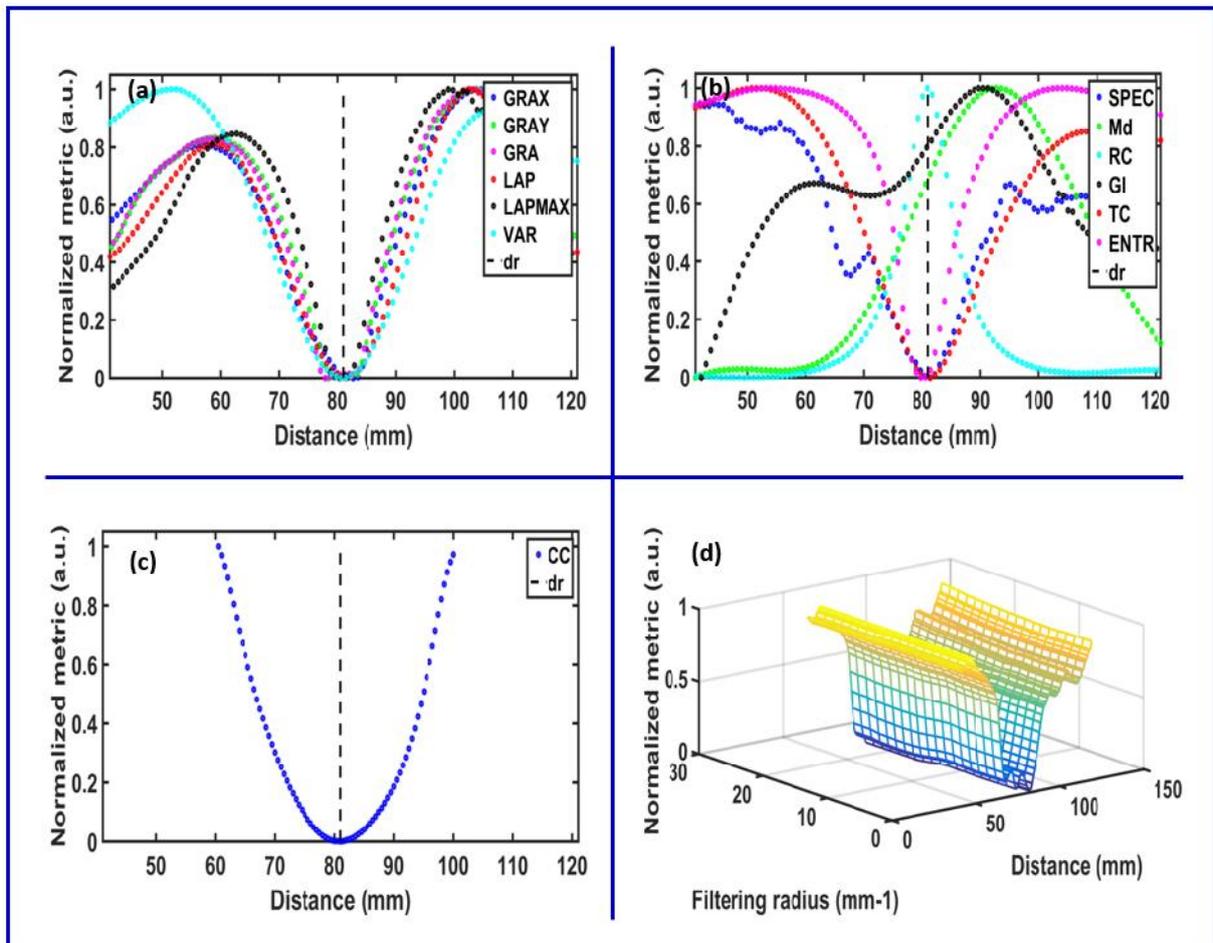
De la même manière que dans la section précédente, les critères ont été appliqués à la phase enveloppée  $\{r$  extraite du champ reconstruit avec la particule opaque comme objet initial.

La figure (III.4.a) montre les courbes de variation des critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY. Les courbes présentent un creux net, comme a été constaté dans la littérature lors de l'application de critères sur la phase.

La figure (III.4.b) présente les courbes de variation des critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC. Les courbes présentent un creux net. Le GI et le Md fournissent par contre des courbes ayant un pic décalé par rapport à la distance théorique.

La figure (III.4.c) montre le critère CC, sa courbe de variation présente un creux net.

La figure (III.4.d) présente la courbe de variation du critère SPEC en fonction de la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier. La courbe présente un creux net. Nous notons que le critère SPEC n'est pas sensible au choix du rayon de filtrage.



**Figure III.4 :** Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliquée à la phase reconstruite de la vue directe, (a) les critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) les critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) le critère CC, (d) le critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

#### III.4.1.5 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la vue orthogonale

Dans cette section, les critères ont été appliqués à l'amplitude  $A_r$  extraite du champ reconstruit de la vue orthogonale avec la particule opaque comme objet initial.

La figure (III.5.a) présente les courbes de variation des critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY. Les courbes présentent une distribution croissante amortie avec un pic central localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ .

La figure (III.5.b) présente les courbes de variation des critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC. Les courbes présentent une distribution variable avec un pic central localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ . Le critère Md présente un maximum qui n'est pas localisé à  $d_r = 134,38\text{mm}$  et la courbe n'est pas régulière par rapport aux autres.

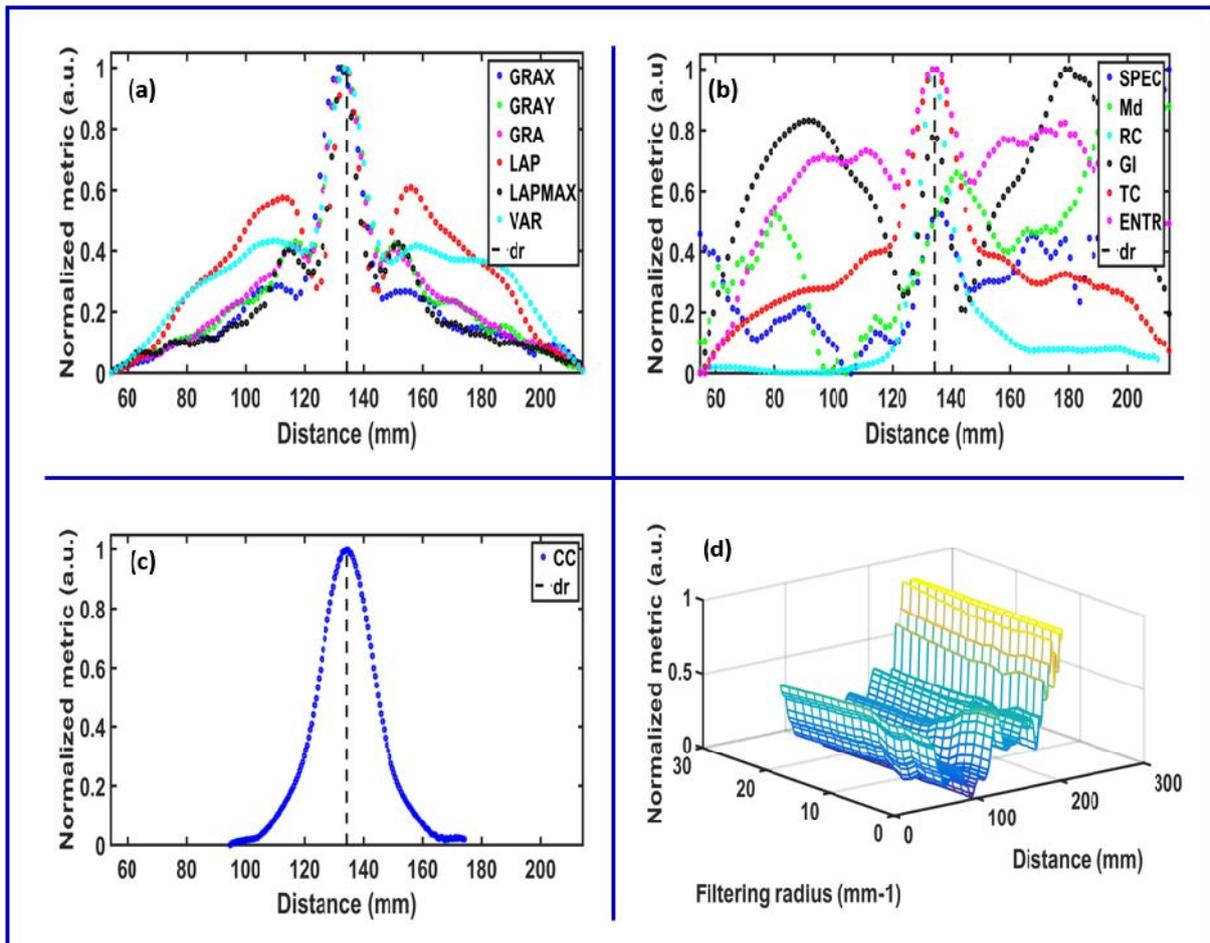
La figure (III.5.c) présente la courbe de variation du critère CC. La courbe présente une distribution en forme de gaussienne avec un pic localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ .

La figure (III.5.d) présente la courbe de variation du critère SPEC en fonction de la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier. Les valeurs de  $R_u$  variaient de 1 à 50% de la fréquence de coupure spatiale ( $1 / 2\text{px}$ ).

A partir des figures (III.5.a, III.5.b, III.5.c), nous pouvons dire que les critères GRAX, GRAY, GRA, LAP, LAPMAX, VAR, ENTR, GI, TC, RC et CC sont capables de produire une courbe avec un pic central localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$  qui est la distance théorique simulée.

La simulation montre que le bruit de photon, le bruit de quantification et l'illumination gaussienne avec peu de motifs parasites ne perturbent pas les critères, confirmant ainsi leur robustesse. La figure (III.5.d) montre que SPEC n'est pas sensible au choix du rayon de filtrage car un pic est toujours atteint à la bonne distance de reconstruction et la courbe obtenue reste toujours très contrastée.

Notons que la courbe obtenue avec le SPEC présente un pic central localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ .



**Figure III.5 :** Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliquée à l'amplitude reconstruite de la vue orthogonale, (a) les critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) les critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) le critère CC, (d) le critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

#### III.4.1.6 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la vue orthogonale

Dans cette partie, les critères ont été appliqués à la phase enveloppée  $\{r$  extraite du champ reconstruit de la vue orthogonale avec la particule opaque comme objet.

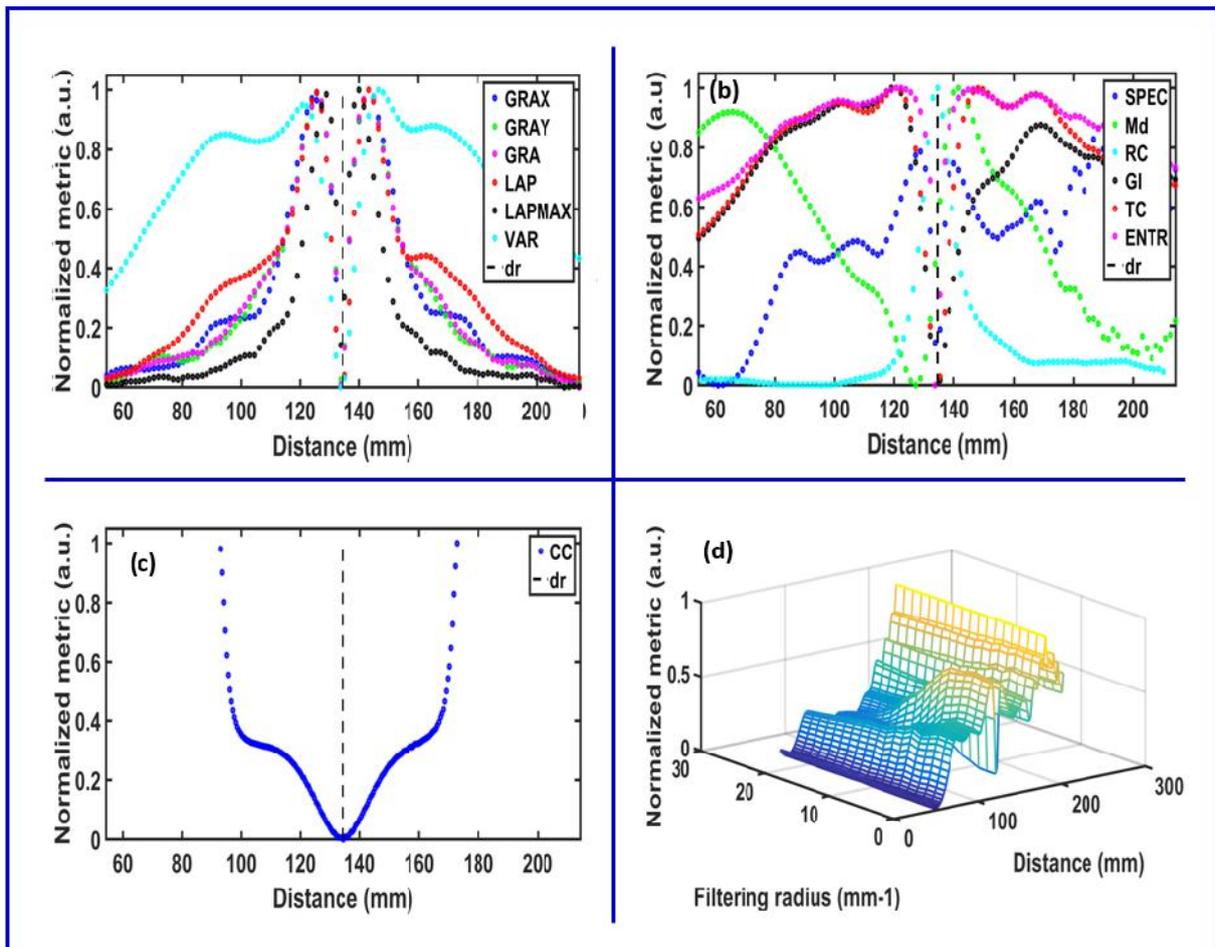
La figure (III.6.a) présente les courbes de variation des critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY. Les courbes présentent une distribution croissante amortie avec un creux localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ .

La figure (III.6.b) présente les courbes de variation des critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC. Les courbes présentent une distribution variable avec un creux central localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ . Le critère Md présente un minimum qui n'est pas localisé à  $d_r = 134,38\text{mm}$  et la courbe n'est pas régulière par rapport aux autres.

La figure (III.6.c) présente la courbe de variation du critère CC. La courbe présente une distribution avec un creux localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$ .

La figure (III.6.d) présente la courbe de variation du critère SPEC en fonction de la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier. Les valeurs de  $R_u$  variaient de 1 à 50% de la fréquence de coupure spatiale ( $1 / 2\text{px}$ ).

A partir des figures (III.6.a, III.6.b, III.6.c), nous pouvons dire que les critères GRAX, GRAY, GRA, LAP, LAPMAX, VAR, ENTR, GI, TC, RC et CC sont capables de produire une courbe avec un creux central localisé à la distance de reconstruction  $d_r = 134,38\text{mm}$  qui est la distance théorique simulée.



**Figure III.6 :** Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour un objet opaque, appliqués à la phase reconstruite de la vue orthogonale, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

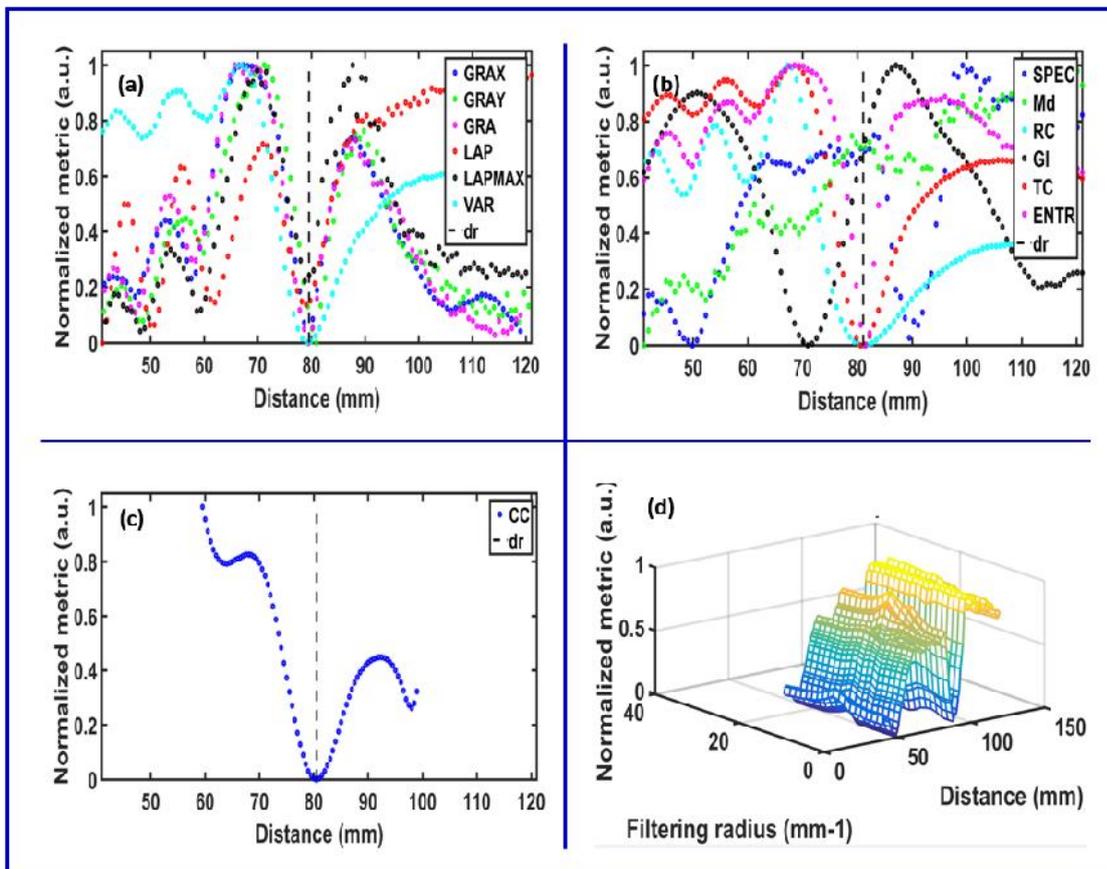
### III.4.2 Refocalisation pour une particule transparente (objet de phase)

Dans cette section, nous avons appliqué les mêmes critères sur un objet de phase tout en se limitant à l'image d'amplitude et de phase de la vue directe de l'hologramme de la particule transparente (le même traitement peut être fait sur la vue orthogonale).

### III.4.2.1 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la vue directe

Les figures (III.7.a, III.7.b, III.7.c) montrent les courbes de variation des critères GRAX, GRAY, GRA, LAP, LAPMAX, VAR, RC, TC, ENTR et CC qui se caractérisent par des variations fluctuantes tout en montrant un creux net lorsque le plan de focalisation est atteint (distance de 80,91mm). Toutefois, les critères SPEC, Md et GI ne montrent pas un tel creux à la même distance.

La figure (III.7.d) montre qu'il n'y a pas de choix optimal pour le rayon de filtrage pour le critère SPEC qui en plus ne donne pas la bonne distance de mise au point.

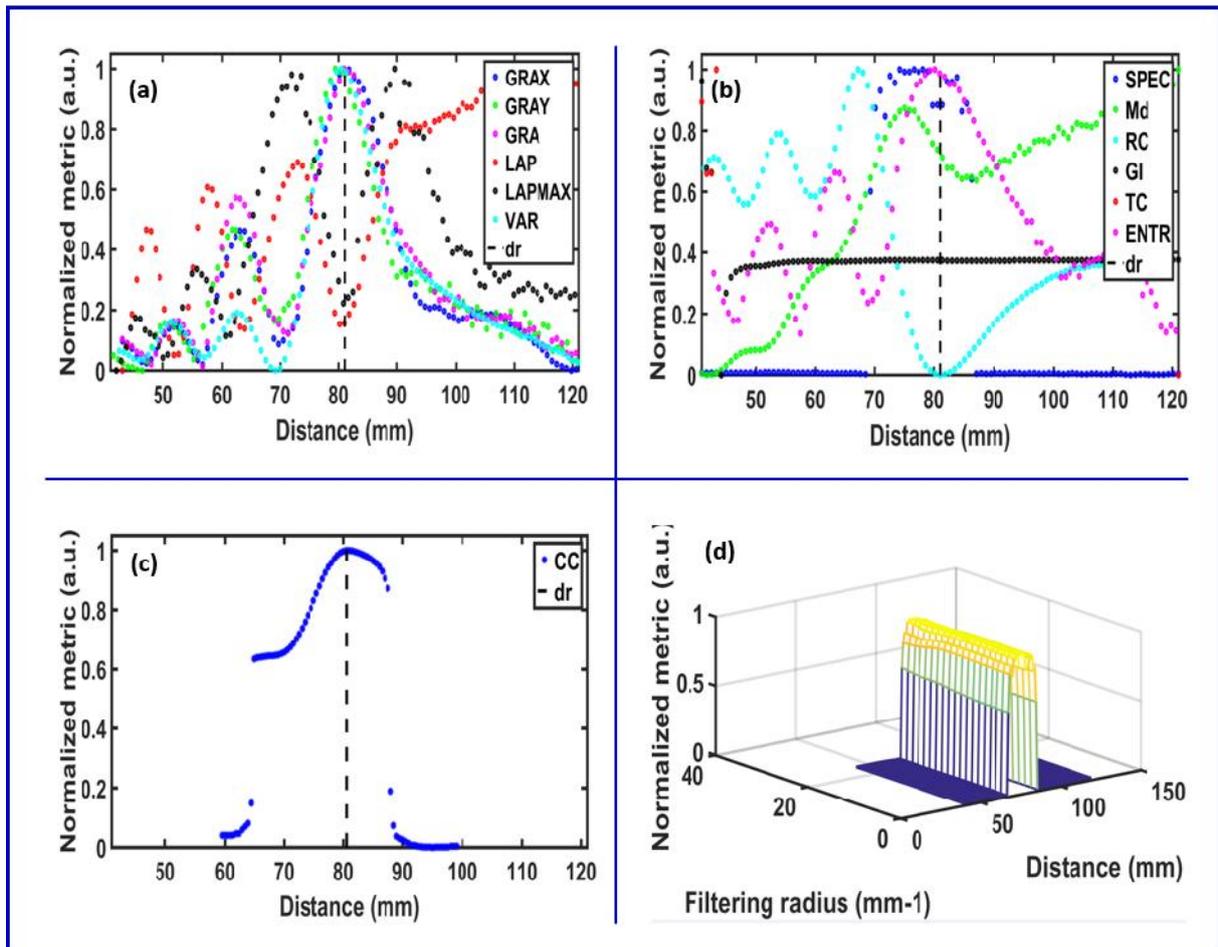


**Figure III.7 :** Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule de phase, appliqués à l'amplitude reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

### III.4.2.2 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la vue directe

Les figures (III.8.a, b, c) montrent un pic maximum pour les critères : GRAX, GRAY, GRA, VAR, SPEC, ENTR et CC lorsque le plan de focalisation est atteint à une distance de 80,91mm. Cependant, les courbes de variation de LAP, LAPMAX et RC montrent un creux pour ce plan. La courbe de variation de Md montre un pic décalé du plan de focalisation. Les courbes de variation de GI et TC ne donnent pas d'information caractérisant le plan de focalisation.

La figure (III.8.d) montre qu'il n'y a pas de choix optimal pour le rayon de filtrage pour le critère SPEC qui donne la bonne distance de mise au point.



**Figure III.8 :** Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule transparente, appliquées à la phase reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC lors de la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

Pour ce cas, les différents critères ne donnent pas des courbes identiques comme dans le cas d'un objet d'amplitude mais plutôt des courbes de variation qui se rapprochent pour les critères GRAX, GRAY, GRA, VAR et ENTR (se caractérisant par un pic) d'une part et d'autre part pour les critères LAP, LAPMAX et RC (se caractérisant par un creux). Seuls TC et GI ne présentent pas cette caractéristique.

### III.5 Critères de refocalisation appliqués à des hologrammes expérimentaux

#### III.5.1 Dispositif expérimental

Dans le but de voir comment évolue l'application de ces critères de refocalisation sur des hologrammes de particules réelles, nous avons enregistré des hologrammes de manière expérimentale. Le montage expérimental est schématisé par la figure (III.9).

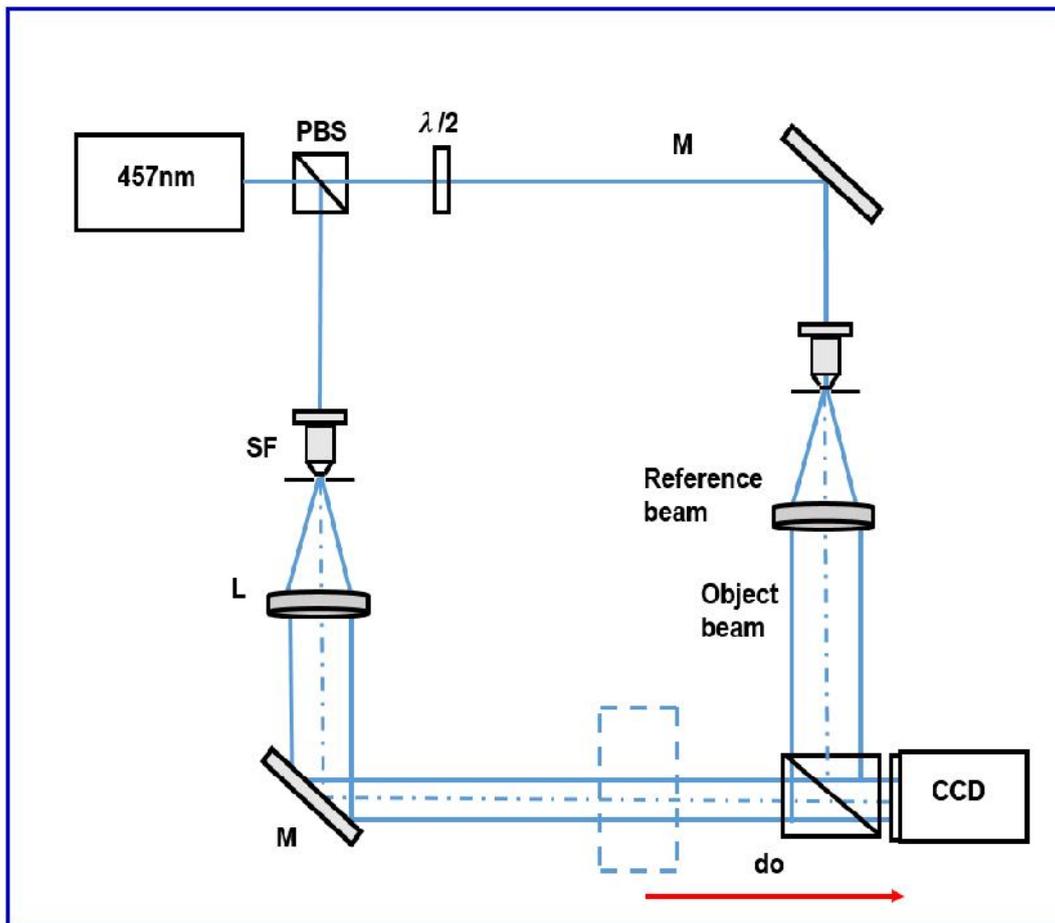
Un laser émettant dans le bleu ( $\lambda = 457\text{nm}$ ) délivre un faisceau qui sera séparé en deux parties en utilisant un cube séparateur pour produire les faisceaux de référence et d'objet. Les deux faisceaux sont agrandis collimatés et filtrés à l'aide d'objectifs de microscope, filtres spatiaux et lentilles. Le faisceau de référence est dirigé directement sur le capteur avec un angle d'incidence produisant un enregistrement hors axe (figure III.9). Le faisceau objet traverse le plan des particules et vient se combiner au faisceau de référence sur le plan du capteur.

Le capteur utilisé est 3-CCD de type Hamamatsu model C7780-20 de  $1024 \times 1344$  pixels, de pas  $6.45\mu\text{m}$  et de quantification sur 8-bits.

Deux types d'objets ont été utilisés. Le premier est une mire USAF1951 et le second est une particule opaque non calibrée avec un diamètre moyen d'environ  $150\mu\text{m}$ .

Le plan USAF1951 a été placé à  $535\text{mm}$  du plan du capteur. La particule opaque est injectée par chute libre dans une fiole en quartz, de volume  $(1 \times 1 \times 4,5) \text{ cm}^3$  remplie d'eau. La particule dans la fiole est à environ  $300\text{mm}$  du capteur.

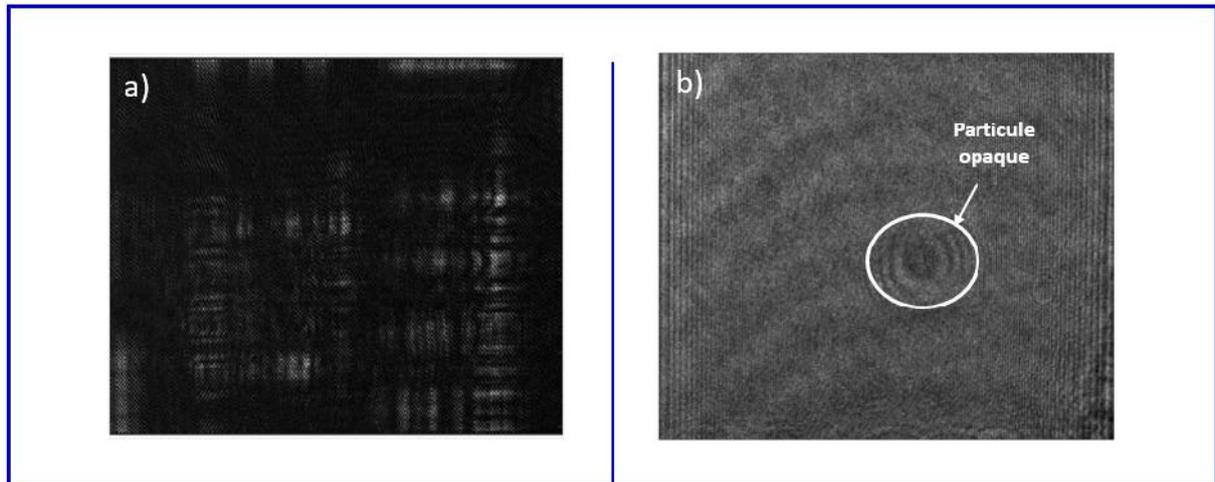
Avant d'enregistrer un hologramme avec l'objet, un hologramme de référence sans objet a été enregistré.



**Figure III.9 :** Montage expérimental, PBS : séparateur de faisceau polarisé,  $\lambda / 2$  : lame demi-onde, Ob : objectif de microscope, SF : filtre spatial, L : objectif collimateur, M : miroirs, CCD : capteur d'enregistrement.

### III.5.2 Enregistrement d'hogrammes expérimentaux

Les hologrammes enregistrés sont représentés sur la figure (III.10).



**Figure III.10** : Hologrammes expérimentaux (a) hologramme numérique de l'USAF1951, (b) hologramme numérique de la particule opaque.

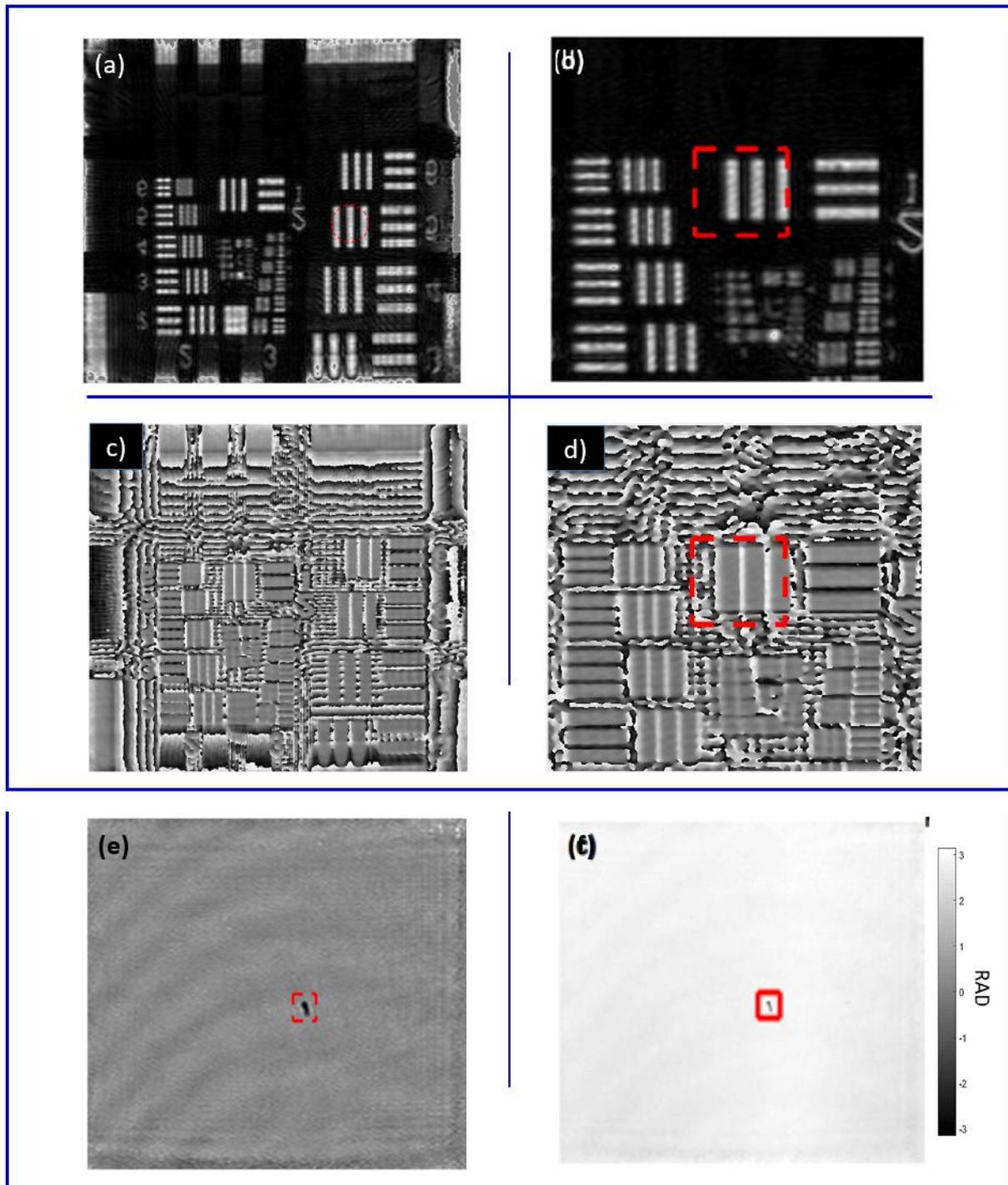
### III.5.3 Reconstruction d'hogrammes expérimentaux

Pour la reconstruction de nos hologrammes, nous avons appliqué l'algorithme réalisé sur la base de l'organigramme de la figure (II.7). La plage de distance de balayage a été choisie pour  $dr = \{d_0 - 80\text{mm}, d_0 + 80\text{mm}\}$  avec pas de 0,8mm.

La figure (III.11.a) montre l'image reconstruite en amplitude de la mire USAF1951 à la distance 535mm. L'image agrandie de la ROI pour l'application des critères aux images USAF1951 est présenté par la figure (III.11.b).

La figure (III.11.c) montre l'image de phase de l'USAF1951. La figure (III.11.d) montre l'agrandissement de la ROI pour l'application des critères aux images USAF195.

Les figures (III.11.e et f) montrent successivement, l'image d'amplitude et de phase de la particule opaque à la distance 300mm. La ROI d'application des critères est de  $\pm 40$  pixels autour du centre de la particule de sorte qu'elle recouvre complètement la surface occupée par l'image de la particule.

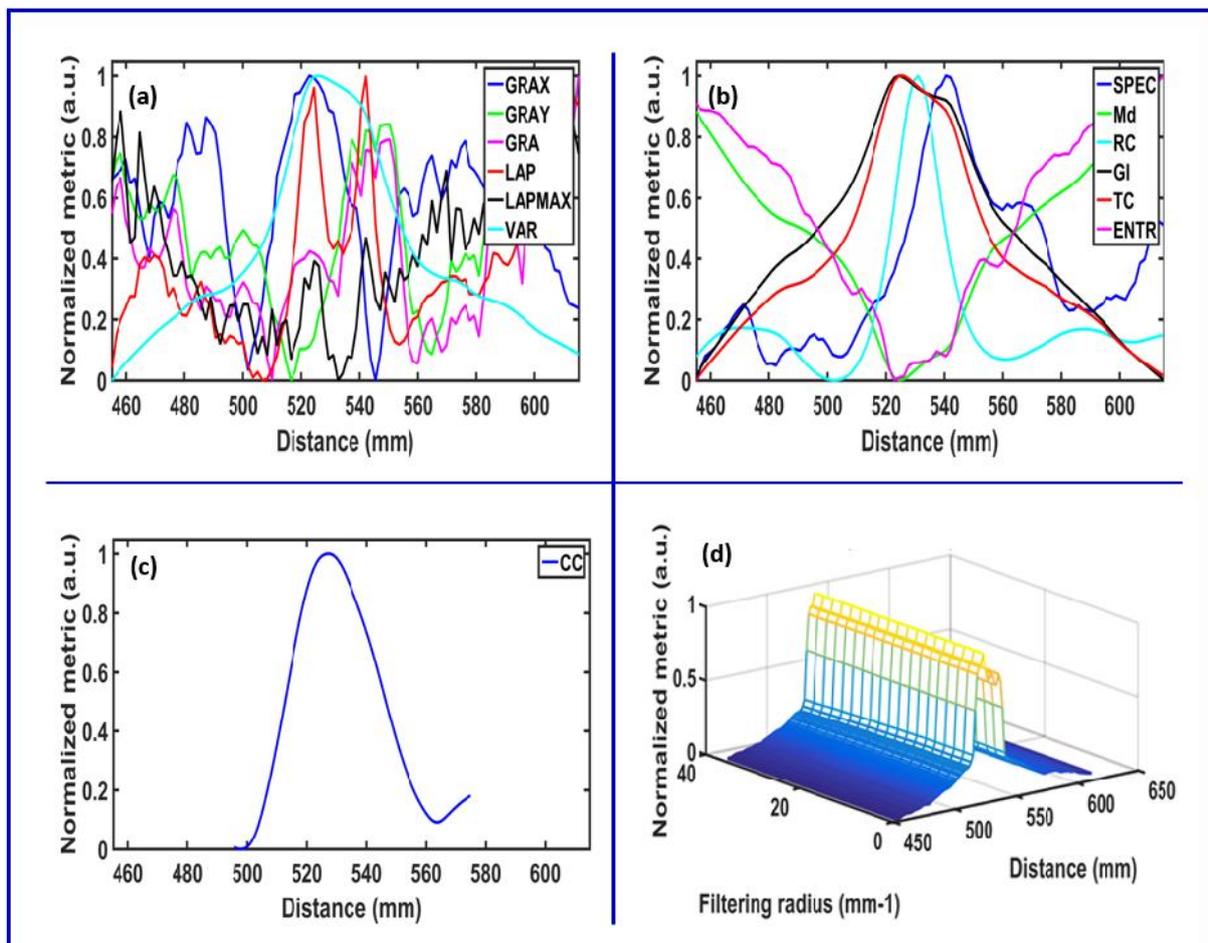


**Figure III.11** : Résultats expérimentaux, (a) amplitude reconstruite à la distance 535mm, (b) agrandissement de la ROI pour l'application des critères aux images USAF1951, (c) image de phase de l'USAF 1951 reconstruite à la distance 535mm, (d) agrandissement de la ROI, (e) image d'amplitude de la particule reconstruite à la distance 300mm, (f) image de phase de la particule reconstruite à la distance 300mm.

### III.5.4 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de l'USAF1951

Suivant l'approche de la section (III.4), les critères ont été appliqués aux images d'amplitude reconstruite de l'USAF1951.

Les figures (III.12.a, b, c) montrent que seuls les critères VAR, RC et CC sont capables de donner un pic net lorsque le plan de focalisation est atteint (distance de 535mm). Les courbes de variation des SPEC, GI et TC montrent un pic décalé du plan de focalisation. Toutefois, les critères SPEC et Md montrent un creux pour ce plan.

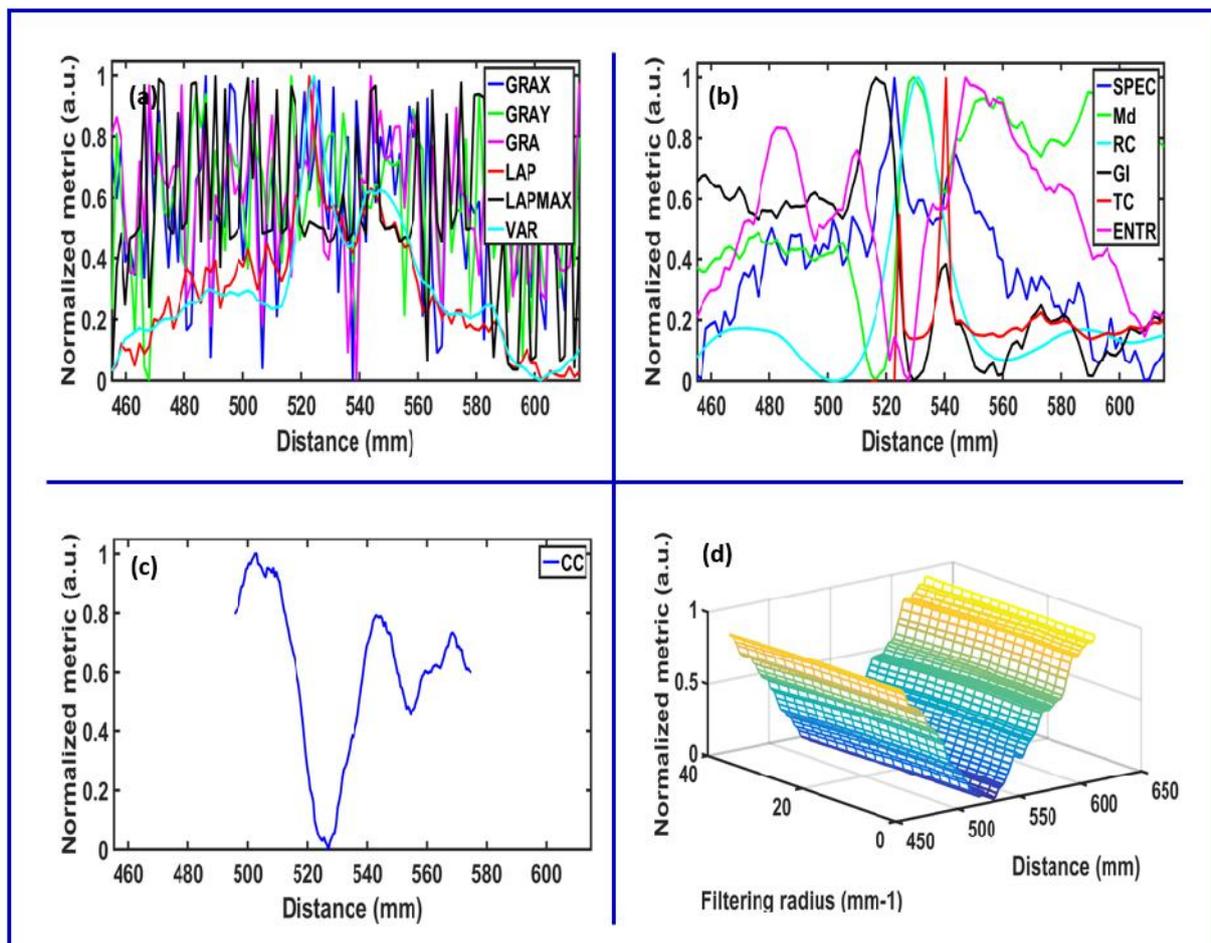


**Figure III.12 :** Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la mire USAF1951, appliqués à l'amplitude reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

### III.5.5 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de l'USAF1951

Dans cette partie, les critères ont été appliqués à la phase reconstruite de l'USAF1951.

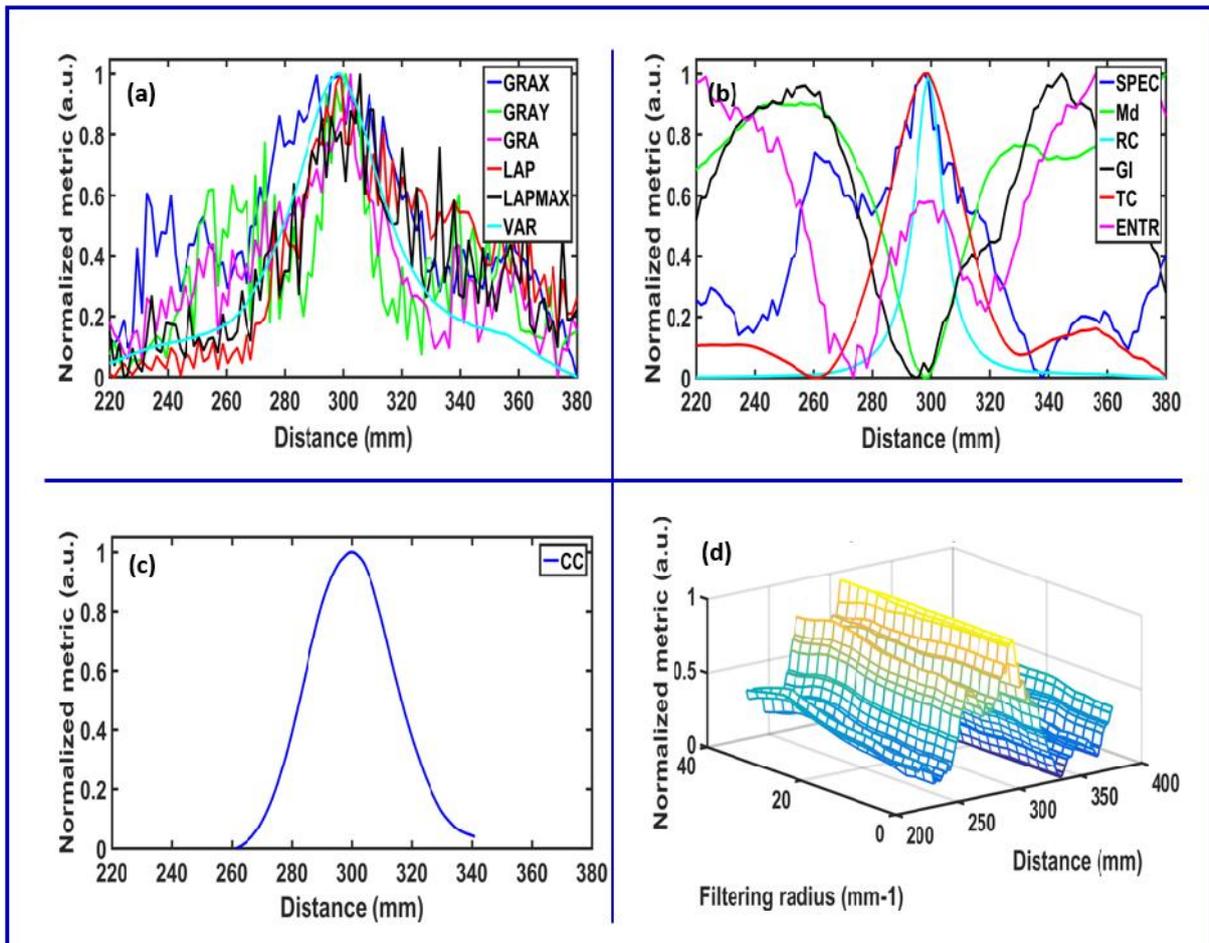
Les figures (III.13. a, b, c) montrent un pic significatif pour les critères Md et RC et un creux pour les critères GI et CC à la distance de focalisation 535mm. Les autres critères ne produisent aucun pic ou creux.



**Figure III.13** : Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la mire USAF1951, appliqués à la phase reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

### III.5.6 Critères de refocalisation appliqués à l'amplitude reconstruite de la particule opaque

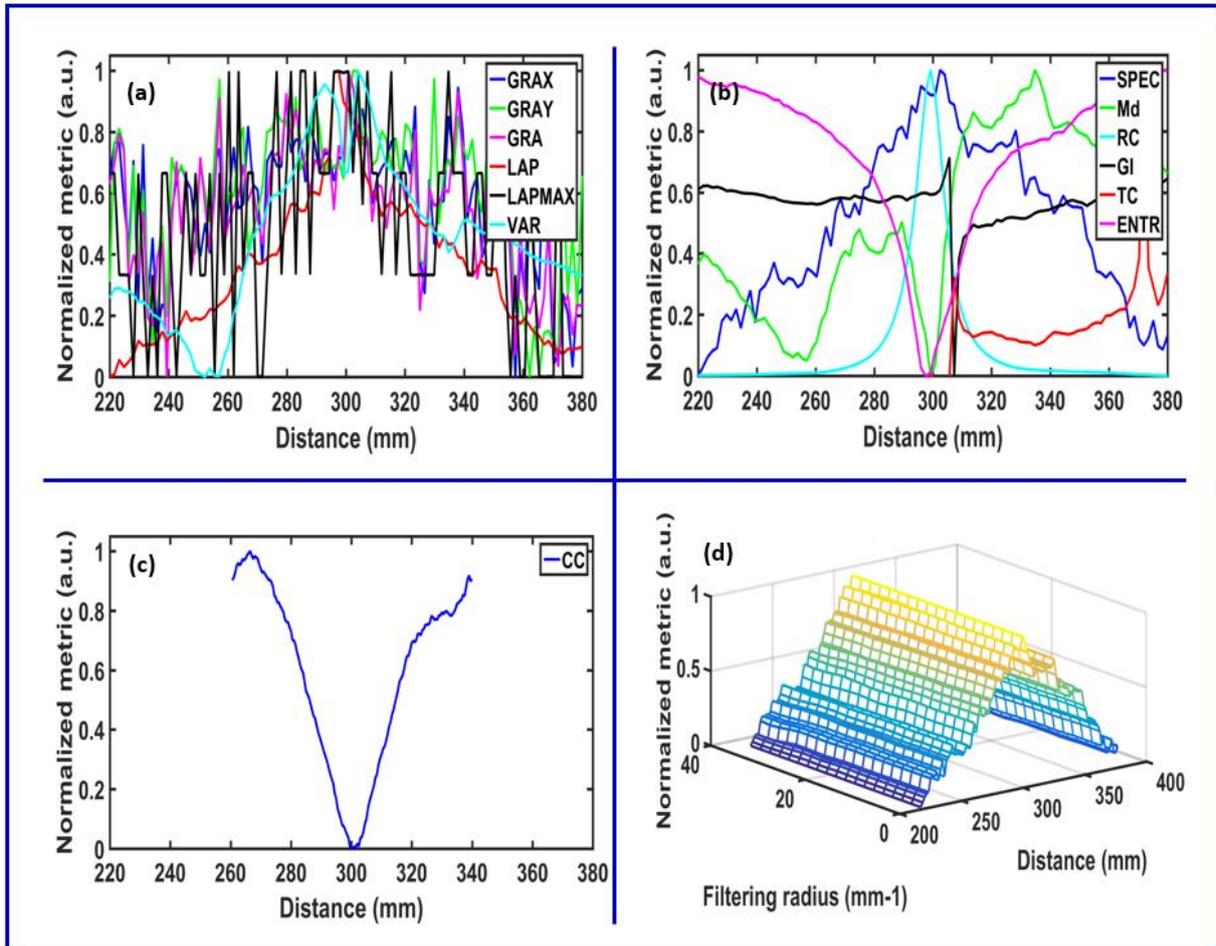
Les figures (III.14.a, b, c) montrent un pic maximum pour les critères VAR, GRA, GRAX, GRAY, LAP, LAPMAX, TC, RC, SPEC et CC lorsque le plan de focalisation est atteint à une distance de 300mm. On peut observer que Md et GI montrent un creux pour ce plan. Cependant, seuls les critères VAR, TC, RC et Md présentent une courbe de forme gaussienne très régulière, avec un pic ou un creux contrasté. Les autres critères présentent une courbe non symétrique et non régulière, mais le maximum est en coïncidence avec les autres maxima. Toutefois, il y a lieu de remarquer que la courbe de variation du critère ENTR présente un pic à la distance correcte mais caractérisé par une baisse d'amplitude. Nous n'avons pas pu donner une explication à cette baisse dans l'état actuel des choses.



**Figure III.14** : Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule opaque, appliqués à l'amplitude reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

### III.5.7 Critères de refocalisation appliqués à la phase reconstruite de la particule opaque

Les figures (III.14.a, b, c) montrent un creux pour les critères Md, ENTR et CC lorsque le plan de focalisation est atteint à la distance de 300mm. Alors que le SPEC et le RC montrent un pic pour ce plan. Nous pouvons noter que les critères CC, RC et ENTR présentent une courbe régulière alors que ce n'est pas le cas pour les autres critères, puisqu'ils semblent plus fluctuants. L'ENTR semble plus robuste avec l'image de phase qu'avec l'image d'amplitude.



**Figure III.15** : Comparaison des critères de refocalisation en fonction de la distance de reconstruction pour la particule opaque, appliqués à la phase reconstruite, (a) critères VAR, LAP, LAPMAX, GRA, GRAX et GRAY, (b) critères SPEC, ENTR, GI, Md, TC, RC, (c) critère CC, (d) critère SPEC avec la variation de la distance de reconstruction et du rayon de filtrage dans le spectre de Fourier.

### III.6 Comparaison du temps de calcul

Le coût de calcul des critères a été évalué avec MATLAB sur un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core i7-2600 3.40GHz et 8 Go de RAM. Les temps de calcul ont été estimés comme un temps moyen pour le calcul de 80 valeurs pour 80 distances de reconstruction. Le tableau (III.1) présente les temps de calcul moyens estimés en millisecondes. Nous constatons que le temps de calcul du critère SPEC est le plus long, ce qui est logique du fait que ce critère nécessite un filtrage dans le spectre de Fourier (calcul

FFT). Vient ensuite, le critère CC qui est aussi caractérisé par un calcul long car il est basé sur le calcul d'un coefficient de corrélation. Toutes les autres valeurs moyennes sont dans la plage de quelques dizaines ou centaines de microsecondes.

**Tableau III.1.** Temps de calcul moyen des critères

Critères	Nombre de plans reconstruits	Temps de calcul Moyen [ms]
GRAX	80	0.124
GRAY	80	0.107
GRA	80	0.093
LAP	80	0.134
LAPMAX	80	0.084
VAR	80	0.439
SPEC	80	4.300
Md	80	0.075
ENTR	80	0.075
TC	80	0.070
GI	80	0.125
RC	80	0.133
CC	80	1.100

### III.7 Discussion générale

Les résultats obtenus à travers l'application des différents critères étudiés [29] nous permettent de faire quelques observations d'ordre général, bien qu'il soit difficile de fournir des règles systématiques pour appliquer les critères de refocalisation étudiés dans le cadre de cette thèse :

- Tout d'abord, un grand nombre de critères de refocalisation sont capables de produire un pic ou un creux lors du balayage de la distance de

reconstruction en considérant une image d'amplitude ou de phase. Ceci est démontré, à la fois, avec des résultats de simulation et des résultats expérimentaux avec la mire USAF1951 et particule ;

- Pour les images de phase de particules, la simulation montre que la VAR et le CC sont les critères robustes et qui donnent la bonne distance de refocalisation ;
- Pour les images de phase expérimentales avec particule, peu de critères (CC, RC et ENTR) produisent une courbe régulière avec un pic ou un creux. Le critère ENTR produit une courbe régulière pour l'image de phase, alors qu'elle ne l'est pas pour l'image d'amplitude. Pour le moment, nous ne disposons pas d'explications convaincantes à ces perturbations.
- Le critère qui semble robuste avec les données expérimentales est le CC car il fournit des courbes régulières et très contrastées (pic ou creux) avec à la fois l'amplitude ou la phase. La raison pour cela pourrait être que le critère CC est basé sur le calcul de corrélation et une telle approche est très robuste au bruit et aux autres fluctuations du signal ;
- Le critère RC comprend une courbe très symétrique et régulière : elle utilise à la fois la partie réelle et la partie imaginaire du champ complexe reconstruit.
- On trouve que le critère SPEC a le coût de calcul le plus élevé dû à la nécessité de calculer une transformée de Fourier rapide. Le SPEC est un critère relativement robuste pour les images d'amplitude et de phase, bien que nécessitant un calcul FFT ; Notons également que le pic ou le creux n'est pas très sensible aux paramètres de filtrage (rayon de filtrage), qui peuvent varier sur une large gamme de valeurs.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une évaluation de la qualité des critères de refocalisation pour l'imagerie des particules en l'holographie numérique hors axe. Un ensemble de treize critères a été comparé. Des simulations ont été réalisées pour générer des hologrammes numériques de particules opaques et de phase en prenant en compte

certaines alias et bruit. Des critères de refocalisation ont été appliqués à la fois à l'image d'amplitude et à l'image de phase obtenue à partir de simulations holographiques numériques hors axe. Ceci a également été réalisé de la même manière en considérant des expériences avec la cible USAF1651 et une particule opaque non calibrée. Les coûts de calcul ont été estimés pour chaque critère.

Il y a lieu de noter à la fin que malgré le nombre de critères développés par les différentes équipes travaillant sur la problématique, beaucoup de choses restent à faire en matière de focalisation exacte surtout dans le cas des particules de type marqueurs (objectif du chapitre suivant).

### II.9 REFERENCES

- [1] J.W. Goodman and R.W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms. *Appl. Phys. Lett.* 11, 77, (1967).
- [2] E T. Kreis, *Handbook of holographic interferometry. Optical and digital methods*, Wiley (2004).
- [3] T.C. Poon. *Digital holography and three-dimensional display: Principles and applications*, Springer-Verlag (2010).
- [4] P. Picart : *New techniques in digital holography*, ISTE-Wiley (2015).
- [5] J. Gillespie, and R.A. King. The use of self-entropy as a focus measure in digital holography, *Patt. Recog. Lett.* 9, 19, (1989).
- [6] Z. Ren, N. Chen, and E.Y. Lam. Extended focused imaging and depth map reconstruction in optical scanning holography, *Appl Opt* 55, 1040, (2016).
- [7] L. Ma, H. Wang, Y. Li H. Jin. Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 6, 396, (2004).
- [8] M.L. Tachiki, M. Itoh, and T. Yatagai. Simultaneous depth determination of multiple objects by focus analysis in digital holography, *Appl. Opt.* 47, D144, (2008).
- [9] F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens, and C. Yourassowsky. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis, *Opt. Expr.* 14, 5895, (2006).

- [10] M. Antkowiak, N. Callens, C. Yourassowsky, and F. Dubois. Extended focused imaging of a microparticle field with digital holographic microscopy, *Opt Lett.* 33, 1626, (2008).
- [11] C. Trujillo and J. Garcia-Sucerquia. Automatic method for focusing biological specimens in digital lensless holographic microscopy. *Opt. Lett.* 39, 2569, (2014).
- [12] C. Trujillo and J. Garcia-Sucerquia. Comparative analysis of the modified enclosed energy metric for self-focusing holograms from digital lensless holographic microscopy, *Appl. Opt.* 54, 5102, (2015).
- [13] J.F. Restrepo and J. Garcia-Sucerquia. Automatic three-dimensional tracking of particles with high-numerical-aperture digital lensless holographic microscopy, *Opt. Lett.* 37, 752, (2012).
- [14] F.C. Groen, I.T. Young, and G. Ligthart. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms, *Cytometry* 6, 81, (1985).
- [15] P. Langehanenberg, B. Kemper, B. Dirksen, D. Dirksen, and G. von Bally. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging, *Appl. Opt.* 47, D176, (2008).
- [16] F. Toy, S. Richard, J. Kühn, A. Franco-Obregón, M. Egli, and C. Depeursinge. Enhanced robustness digital holographic microscopy for demanding environment of space biology. *Biomedical Opt. Expre* 3(2), 313, (2012)
- [17] Y. Yang, B.-S. Kang, and Y.-J. Choo. Application of the correlation coefficient method for determination of the focal plane to digital particle holography. *Appl. Opt.* 47, 817, (2008).
- [18] Y. Yang, and B.-S. Kang. Experimental validation for the determination of particle positions by the correlation coefficient method in digital particle holography. *App. Opt.* 47, 5953, (2008).
- [19] J. Liu, X. Song, R. Han, and H. Wang. Autofocus method in digital holographic microscopy. *Proc. SPIE* 7283, 72833Q, (2009).
- [20] S. Grare, S. Coëtmellec, D. Allano, G. Gréhan, M. Brunel, and D. Lebrun. Dual-wavelength digital holography for 3D particle image velocimetry. *J. Eur. Opt. Soc-Rapid.* 10, 15009, (2015).

- [21] P. Memmolo, C. Distante, M. Paturzo, A. Finizio, P. Ferraro, and B. Javidi. Automatic focusing in digital holography and its application to stretched holograms. *Opt. Lett.* 36, 1945, (2011).
- [22] P. Memmolo, M. Paturzo, B. Javidi, P.A. Netti, and P. Ferraro. Refocusing criterion via sparsity measurements in digital holography. *Opt. Lett.* 39, 4719, (2014).
- [23] D. Zonoobi, A.A. Kassim, and Y.V. Venkatesh. Gini Index as sparsity measure for signal reconstruction from compressive samples. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 5, 927, (2011).
- [24] J. Dohet-Eraly, C. Yourassowsky, and F. Dubois. Fast numerical autofocus of multispectral complex fields in digital holographic microscopy with a criterion based on the phase in the Fourier domain. *Opt. Lett.* 41, 4071, (2016).
- [25] L. Xu, M. Mater, and J. Ni. Focus detection criterion for refocusing in multi-wavelength digital holography. *Opt. Expr.* 19, 14779, (2011).
- [26] M. Liebling and M. Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnelet-sparsity criterion. *J. Opt. Soc. Am. A* 21, 2424, (2004).
- [27] E.SR. Fonseca, P.T. Fiadeiro, M. Pereira, and A. Pinheiro. Comparative analysis of autofocus functions in digital in-line phase-shifting holography. *Appl. Opt.* 55, 7663, (2016).
- [28] P. Picart and P. Tankam. Analysis and adaptation of convolution algorithms to reconstruct extended objects in digital holography. *Appl. Opt.* 52, A240, (2013).
- [29] S. Kara Mohammed, L. Bouamama, D. Bahloul, P. Picart. Quality assessment of refocus criteria for particle imaging in digital off-axis holography. *Applied Optics*, 56, 13 (2017).

## CHAPITRE IV

### Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues

---

Le présent chapitre présente une approche d'enregistrement des hologrammes hors axe basée sur deux vues et deux longueurs d'ondes. La propriété naturelle de l'holographie numérique de "ne pas voir derrière l'objet" est contournée en augmentant la parallaxe pour l'imagerie des particules. Ainsi, l'approche permet de discriminer les particules non étalonnées alignées le long de l'axe de vue.

---

### IV.1 Introduction

Comme déjà décrite aux chapitres précédents, l'holographie numérique est connue comme méthode de diagnostic optique qui permet d'enregistrer et de reconstruire l'information 3D d'un objet. L'imagerie holographique numérique fournit en fait une image 2,5D car il manque la parallaxe par le fait que l'holographie numérique n'est pas capable de « voir derrière l'objet » [1]. En particulier, cette propriété est un facteur limitant pour l'imagerie de particules lorsque le nombre de particules est grand. Il n'est alors pas possible de discriminer deux particules alignées le long de l'axe de visée. Des solutions pour résoudre ce problème peuvent être trouvées en utilisant les problèmes inverses [2-12]. Cependant, une telle approche nécessite des particules sphériques et n'est pas entièrement adaptée aux particules non calibrées ou non régulières. Une approche alternative pour obtenir l'effet de parallaxe est basée sur le multiplexage des hologrammes sans multiplier le nombre de capteurs [13-16]. Plusieurs applications du multiplexage d'hologrammes ont été décrites au cours des dernières années. Par exemple, Wu et al [17] ont utilisé le multiplexage combiné avec angle, polarisation et couleur pour enregistrer quatre régions différentes de l'objet avec un capteur CCD unique. Malkiel et al [18] ont utilisé un système du multiplexage en holographie en ligne en utilisant un miroir incliné, pour obtenir simultanément deux vues orthogonales. Ils ont obtenu deux hologrammes en ligne, un pour la vue directe de l'objet en tant qu'image virtuelle et le second pour la vue orthogonale. Kuhn et al [19] ont développé un système de multiplexage basé sur deux paires d'ondes de référence et d'objet ayant des longueurs d'ondes et des directions de propagation différentes. De cette façon, le filtrage spatial a été rendu possible par la séparation spatio-chromatique des ordres diffractés dans le spectre de Fourier des hologrammes. Dans l'holographie de Fresnel, Picart et al [20] ont proposé un schéma bicouleurs pour mesurer simultanément la déformation dans le plan et hors du plan d'une structure mécanique soumise au chargement. Plus récemment, dans le contexte de l'imagerie des particules, Boucherit et al [21,22] ont développé une technique à deux vues basée sur le multiplexage angulaire en utilisant un seul faisceau de référence qui permet de discriminer selon la direction axiale. Dans cette technique de multiplexage spatial où un mélange cohérent de trois ondes (deux vues et une référence) fait apparaître, sur le champ de reconstruction lié automatiquement à celui du capteur,

les deux images reconstruites. Ceci limite la résolution de l'exploitation des distributions du champ de particules de travail. Pour contourner cette difficulté, nous proposons une approche basée sur deux vues et deux longueurs d'ondes différentes.

Le multiplexage spatio-chromatique permet de coder l'information sur un unique hologramme numérique. Dans ce chapitre nous présentons les bases de la méthode, puis nous décrivons le dispositif expérimental. Nous présenterons également le recalage des deux vues afin d'identifier la position d'une particule dans un unique repère XYZ.

### IV.2 Problématique d'identification des particules

En holographie digitale à deux vues la reconstruction du volume 3D des particules nécessite un croisement entre les deux vues directe et orthogonale. Le croisement a pour but d'éviter le problème de recouvrement des particules et la grande profondeur de focalisation liée à l'holographie.

Les coordonnées  $\{X_i, Y_i\}$  sont obtenues de la vue directe et la coordonnée  $\{Z_i\}$  est obtenue à partir de la vue orthogonale, c.à.d. les deux vues ayant même  $Y$ . Le croisement des données entre les deux vues donne une vue 3D de la distribution des particules dans le volume.

Expérimentalement, afin d'avoir le même  $Y$  pour les deux vues et pour que le croisement soit correcte, nous avons éclairé la région d'intérêt (ROI) qui est dans ce cas un objet statique (bille en acier collée sur une pipette) selon deux directions orthogonales pour pouvoir recalculer la différence entre les deux vues.

#### IV.2.1 Hologramme enregistré

Le dispositif expérimental est décrit par la figure (IV.1). Il est basé sur l'architecture de type Mach-Zehnder à configuration hors-axe à deux vues. Deux lasers continus à 532 nm et 475 nm sont utilisés pour éclairer de manière orthogonale la ROI.

Les faisceaux lumineux émis par chaque source laser passent d'abord par une lame demi-onde afin d'ajuster la polarisation avant de passer à travers un diviseur de faisceau polarisant (PBS). Ainsi, la puissance optique peut être distribuée d'une part aux faisceaux d'objet transmis par le PBS et d'autre part aux faisceaux de référence réfléchis par le PBS.

## Chapitre IV : Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues

Une fois transmis par chaque PBS, les faisceaux passent à nouveau par une lame demi-onde afin de transformer la polarisation pour obtenir des faisceaux d'objet et de référence ayant des polarisations parallèles et pour assurer un contraste maximal d'interférences.

Les deux faisceaux transmis sont mélangés dans un seul faisceau à l'aide d'un filtre dichroïque (DP), et ils sont filtrés et élargis à l'aide d'un dispositif composé d'un objectif de microscope ( $\times 20$ ), d'un filtre spatial de 20 microns de diamètre et une lentille collimatrice. Ensuite, un cube de 50% renvoie les faisceaux de référence sur le détecteur 3-CCD de type Hamamatsu model C7780-20 de  $1024 \times 1344$  pixels, de pas  $6.45 \mu\text{m}$  et une quantification sur 8-bits.

Notons que les faisceaux de référence éclairent le capteur sous un angle d'incidence constant (holographie hors-axe). Il faut noter que, les fréquences spatiales de chaque faisceau monochromatique dépendent de son angle et de sa longueur d'onde.

Pour les deux faisceaux d'objets, le filtrage spatial et la collimation produisent des ondes planes avec des amplitudes uniformes. Chaque faisceau traverse la région d'intérêt avec les directions de propagation à  $90^\circ$ .

Le faisceau bleu ( $\lambda = 457\text{nm}$ ) constitue la vue directe (DV) et éclaire le capteur selon l'axe z par rapport au système de coordonnées lié à la ROI.

Le faisceau vert ( $\lambda = 532\text{nm}$ ) constitue la vue orthogonale (OV) et éclaire la région utile selon l'axe des x par rapport au système de coordonnées lié à la ROI.

Une lame de 50% est utilisée pour recombiner les deux faisceaux d'objet devant le capteur et avant de traverser le cube de 50%.

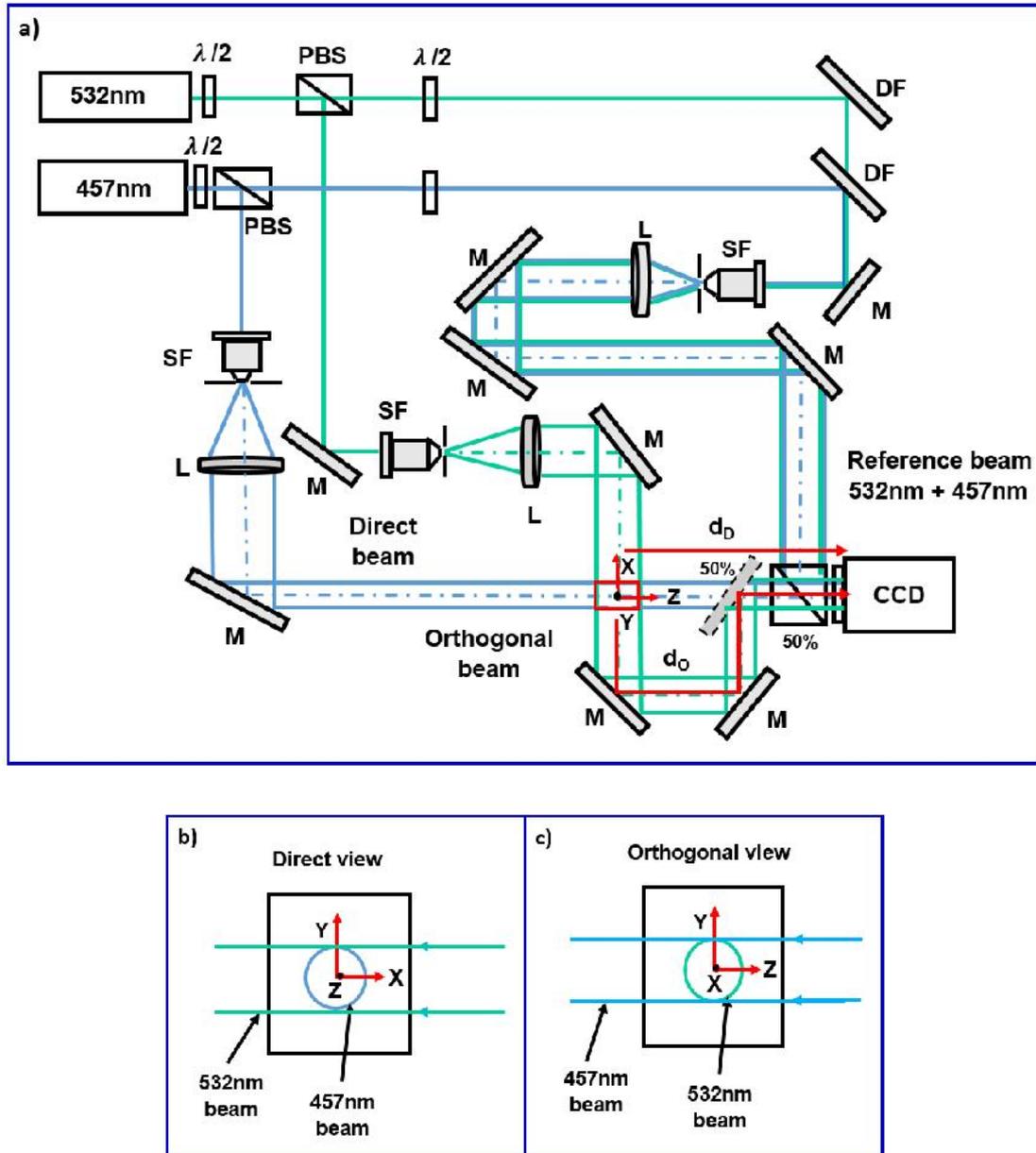
La cuve est en quartz, vide (sans eau), et a un volume de  $(1 \times 1 \times 4.5) \text{ cm}^3$ .

Sur le trajet optique du faisceau bleu (DV), la distance entre la cuve et le capteur est d'environ  $d_D = 300\text{mm}$ , alors que le long de la ligne verte (OV), la distance est d'environ  $d_0 = 700\text{mm}$ .

A titre d'exemple, on considère pour particule objet une bille en acier opaque de diamètre de  $1.5\text{mm}$  collée sur une pipette et plongée dans la cuve. La bille est donc à une

## Chapitre IV : Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues

distance d'environ 300mm du capteur pour la vue directe et à une distance d'environ 700mm pour la vue orthogonale.



**Figure IV.1 :** (a) Montage expérimental a deux vues, PBS : séparateur de faisceau polarisé, SF : filtre spatial, L : lentilles, DF : filtre dichroïque, M : miroirs, CCD : capteur d'enregistrement couleur,  $d_D$  : distance pour la VD,  $d_O$  : distance pour la VO, (b) VD fournit une projection dans le plan XY, (c) VO fournit une projection dans le plan ZY. La direction Y du repère est la même pour les deux vues.

## Chapitre IV : Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues

L'hologramme bicouleurs enregistré est composé de deux hologrammes monochromes individuels car le capteur sépare complètement les couleurs en utilisant le prisme dichroïque. Ainsi, le problème de la reconstruction de l'hologramme peut être considéré comme un problème monochromatique.

Dans le plan du capteur, l'hologramme pour toute longueur d'onde  $\lambda$  est exprimé comme suit:

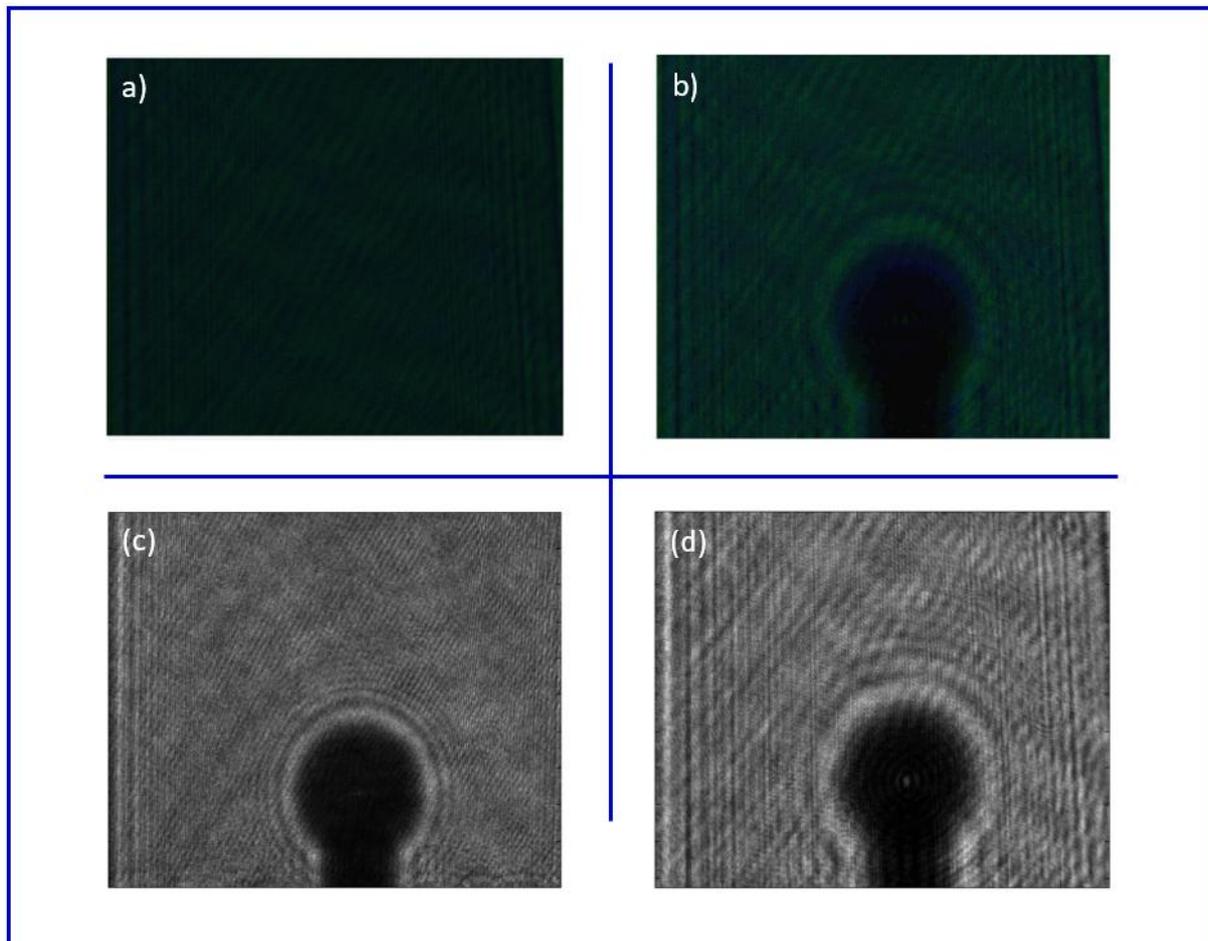
$$H_\lambda = |R_\lambda|^2 + |O_\lambda|^2 + R_\lambda^* O_\lambda + O_\lambda^* R_\lambda \quad (IV.1)$$

$R_\lambda(x', y') = a_R \exp[-2i\pi(u_0 x' + v_0 y')]$  est l'onde plane de référence au plan d'enregistrement, avec une fréquence spatiale  $\{u_0, v_0\}$  en fonction de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde, et  $O_\lambda$  est l'onde diffractée dans le plan d'enregistrement par l'objet situé à distance ( $d_0$  ou  $d_D$ ) de ce plan. L'onde objet au plan d'enregistrement est donnée par une formule de convolution, où le symbole  $*$  désigne le produit de convolution:

$$O_\lambda(x', y', d_0) = (A * h_\lambda)(x', y') \quad (IV.2)$$

Où  $A(x, y) = A_0(x, y) \exp[i\Psi_0(x, y)]$  est le front d'onde objet dans le plan objet.

La figure (IV.2) montre les hologrammes enregistrés par le dispositif expérimental bi-chromatique avec la bille collée sur la pipette. La figure (IV.2.c) montre l'hologramme de la vue directe à 300mm. La figure (IV.2.d) montre la vue orthogonale à 700mm.



**Figure IV.2 :** Hologrammes expérimentaux (a) Hologramme de référence, (b) hologramme bi-chromatique numérique à deux vues, (c) VD enregistré par  $\lambda = 457\text{nm}$ , (d) VO enregistré par  $\lambda = 532\text{nm}$ .

### **IV.2.2 Hologramme reconstruit**

Il existe plusieurs approches pour reconstruire les hologrammes couleurs tout en conservant la taille de l'image à l'aide du zéro padding, l'algorithme de transformation de Fresnel [23-25], l'algorithme de convolution [26], ou aussi convolution avec grossissement réglable [27,28].

Sachant qu'expérimentalement, la région de l'objet est dans le même ordre de grandeur que celle du capteur, ainsi, la reconstruction avec convolution est tout à fait adaptée [26].

## Chapitre IV : Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues

A toute distance  $d_r$ , la reconstruction de l'amplitude complexe du champ objet est basée sur les formules de convolution de diffraction donnée par l'équation :

$$A_r(X, Y, d_r) = (H_\lambda * h_\lambda)(X, Y) \quad (IV.3)$$

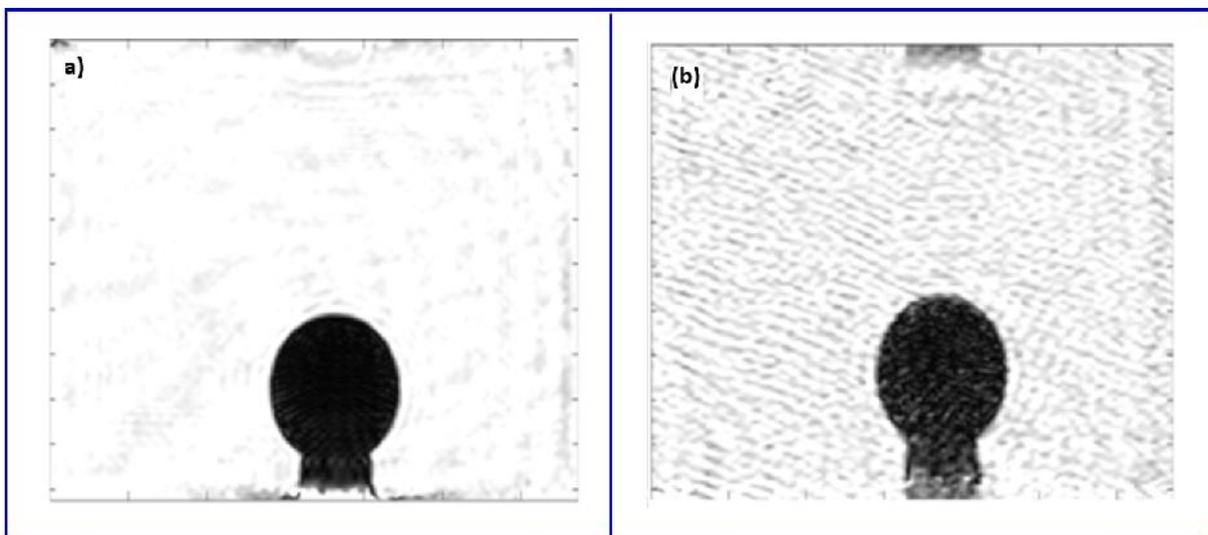
L'objet reconstruit peut également être écrit comme suit :

$$A_r = FT^{-1}[FT(H_\lambda) \times G_\lambda] \quad (IV.4)$$

(FT signifie Transformée de Fourier).

Le traitement est réalisé en suivant le diagramme montré sur la figure (II.7). Une normalisation est opérée en divisant par l'image d'amplitude obtenue lorsqu'il n'y a pas de particules dans la cuve. Ainsi, on obtient une image hautement contrastée qui permet de visualiser facilement les particules.

La figure (IV.3.a) représente l'image reconstruite en amplitude de la VD. La figure (IV.3.b) représente l'image reconstruite en amplitude de la VO, après normalisation.



**Figure IV.3 :** Hologrammes reconstruits : (a) amplitude reconstruite de la VD à  $d_r = 300\text{mm}$ , (b) amplitude reconstruite de la VO à  $d_r = 700\text{mm}$ .

### IV.3 Calibrage des deux vues

Lorsque les vues directe et orthogonale sont reconstruites à partir des hologrammes bicouleur, il faut définir un ensemble commun d'axes de référence pour les deux vues. En effet, la propagation de la lumière sur différentes distances, et aussi avec de légers angles de propagation, conduit à un désaxage des deux vues.

Selon la figure (IV.1.b) et figure (IV.1.c), l'axe Y devrait être identique le long des deux vues. Ainsi, le recalage des deux vues consiste à trouver l'ensemble commun du système XYZ. Pour cela, un objet test de référence doit être inséré dans la région d'intérêt et son barycentre doit être précisément déterminé pour établir la correspondance entre les deux vues.

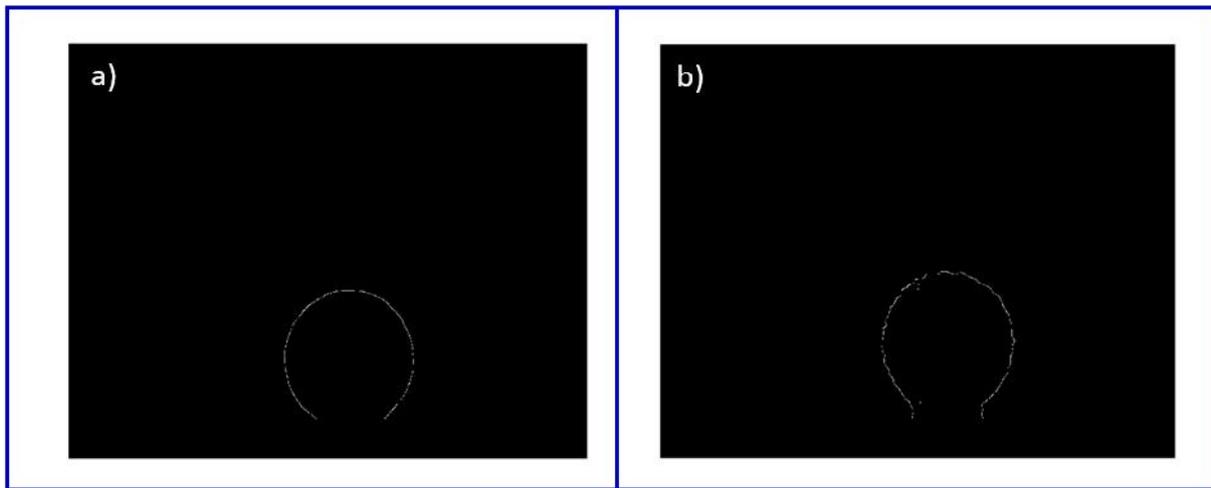
Nous proposons d'utiliser une bille sphérique en acier collée sur une pipette et insérée dans la ROI. Un tel objet symétrique est tout à fait adapté car, dans les deux vues, les projections apparaissent comme un disque parfait et très contrasté. À partir des images d'amplitude dans les deux vues, le cercle de la bordure du disque peut être déterminé en utilisant un opérateur de détection de contour (filtre Canny par exemple).

#### IV.3.1 Calcul du centre de gravité de chaque vue (objet test)

En effet, dans le dispositif expérimental, seule la vue Y est invariable. La procédure de calcul du centre de gravité de chaque vue de la bille (objet test) est :

##### IV.3.1.1 Dérivation de l'image binaire

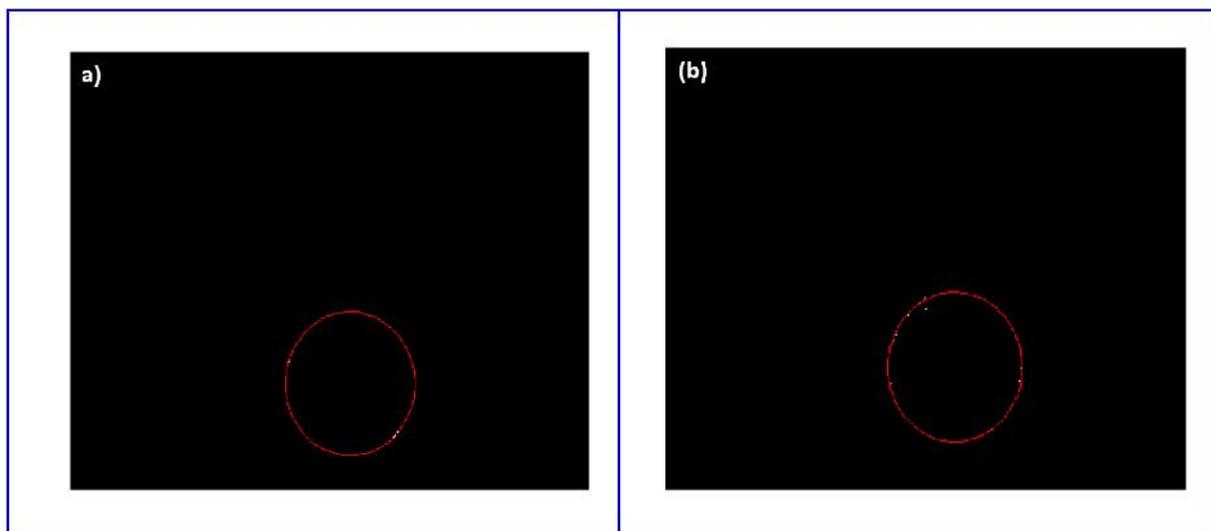
Une détection de contour permet d'identifier, sur l'image binarisée de la bille (figure IV.3.a, b), les bords comme illustré sur la figure (IV.4.a, b).



**Figure IV.4** : Dérivation de l'image binaire fournissant le contour : (a) vue directe, (b) vue orthogonale.

#### IV.3.1.2 Recherche des points du cercle

On détecte alors le meilleur cercle qui passe au mieux par le contour circulaire, au sens des moindres carrés (figure IV.5.a, b). Ainsi on obtient avec une bonne précision les coordonnées du centre de la bille.



**Figure IV.5** : Recherche des points du cercle : (a) vue directe, (b) vue orthogonale.

### IV.3.1.3 Superposition de deux vues (superposition au centre de gravité)

La superposition des deux vues au centre de gravité est basée sur le théorème de modulation. On choisit de recaler la vue directe (faisceau bleu) sur la vue orthogonale (faisceau vert), c'est-à-dire que l'image « bleue » est décalée sur l'image « verte » de la quantité séparant les centres de gravités dans les 2 vues.

Si on note  $\delta X$  et  $\delta Y$  les décalages des centres alors le théorème de modulation fournit l'image recalée et s'exprime par l'équation :

$$M'_B = FT^{-1}[FT[M_B] \times \exp(-2i\pi(\delta Xu + \delta Yv))] \quad (IV.5)$$

Où  $M_B$  est l'image bleue à corriger et  $(u,v)$  sont les fréquences spatiales du plan de Fourier de l'image.

A partir de cette équation, on recalc la vue directe sur la vue orthogonale.

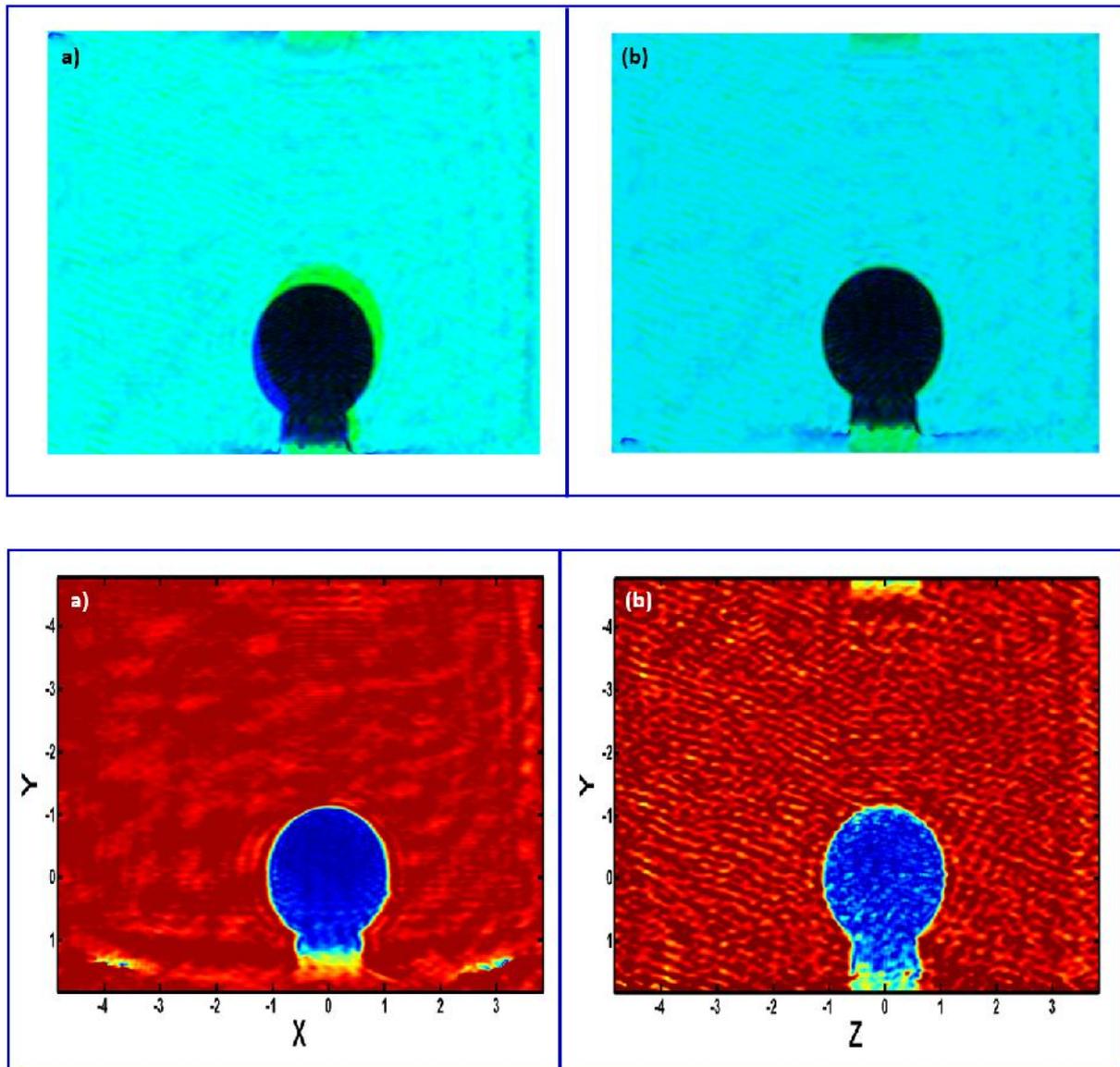
À la fin du processus, on obtient des images ayant un ensemble commun d'axes de référence XYZ. Après recalage, l'équation (IV.5) est systématiquement appliquée aux images de la VD des particules.

La figure (IV.6) montre des images du processus de recalage. La figure (IV.6.a) montre l'image bicouleur affichée à partir des deux vues brutes. Les images verte et bleue ne sont manifestement pas superposées. La figure (IV.6.b) montre l'image en deux couleurs affichées à partir des deux vues après l'application du processus de recalage (IV.5). On voit que la VD et la VO sont assez bien superposées. Notons que les deux images ont rigoureusement la même taille et ne présentent aucune dépendance avec la longueur d'onde. L'image de la VD recalée de la bille est présentée dans la figure (IV.6.c) alors que la figure (IV.6.d) présente l'image de la VO de la bille, à la fois dans l'ensemble commun du système d'axes de référence.

Ainsi, le centre de la bille dans les deux vues est maintenant localisé aux coordonnées  $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$ , comme on peut le voir sur la figure (IV.6.c) et la figure (IV.6.d).

## Chapitre IV : Identification des particules sur les vues des hologrammes expérimentaux hors-axe à deux vues

La mise en place et le traitement numérique sont ensuite optimisés pour l'imagerie des particules en volume 3D.



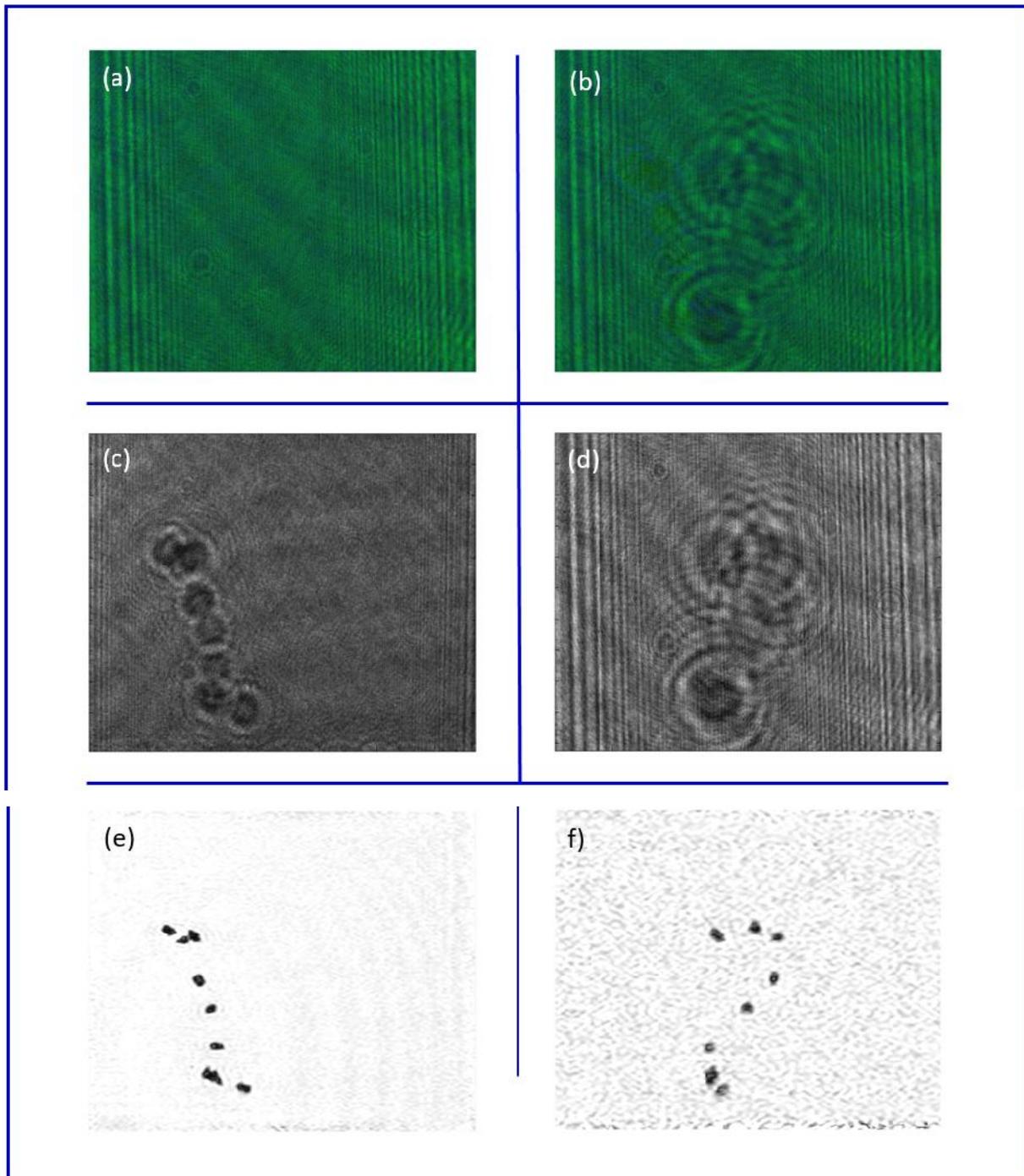
**Figure IV.6 :** (a) l'image bi-couleurs des deux vues sans calibration, (b) l'image bi-couleurs des deux vues après l'application du processus d'étalonnage, (c) la VD dans l'ensemble commun de l'axe de référence, (d) la VO dans l'ensemble commun de l'axe de référence,

#### **IV.4 Application de la technique aux particules réelles en mouvement**

Dans cette section, le dispositif expérimental a été utilisé pour enregistrer un hologramme de microparticules en mouvement.

Pour cela, nous avons utilisé des particules en polymère de diamètre moyen de 150  $\mu\text{m}$  et d'une densité volumique proche de celle de l'eau. Ces particules sont injectées dans la cellule en quartz de  $(1 \times 1 \times 4.5) \text{ cm}^3$  remplie d'eau.

La figure (IV.7.a) montre l'hologramme bicouleur enregistré lorsque la cuve est remplie d'eau mais sans particules. La figure (IV.7.b) montre l'hologramme bicouleur enregistré lorsque la cuve est remplie d'eau et de particules. La figure (IV.7.c) et la figure (IV.7.d) montrent respectivement les images d'amplitude de la VD (lumière bleue) et de la VO (lumière verte) au plan du capteur. La figure (IV.7.e) et la figure (IV.7.f) présentent l'amplitude des images obtenues lors de la propagation du front d'onde du plan du capteur vers le plan image. Les distances de reconstruction se situent à 300 mm pour la VD et à 700 mm pour la VO. La normalisation de l'image d'amplitude est effectuée comme indiqué dans la sous-section précédente.



**Figure IV.7 :** (a) Hologramme de référence lorsque la cuve est remplie d'eau et sans particules, (b) hologramme numérique bi-couleur de deux vues avec des particules dans la cuve, (c) amplitude de l'image au niveau du capteur pour la VD à  $\lambda = 457 \text{ nm}$ , (d) amplitude de l'image au niveau du capteur pour la VO à  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , (e) amplitude reconstruite de la VD à  $d_r \sim 300 \text{ mm}$ , (f) amplitude reconstruite de la VO à  $d_r \sim 700 \text{ mm}$ .

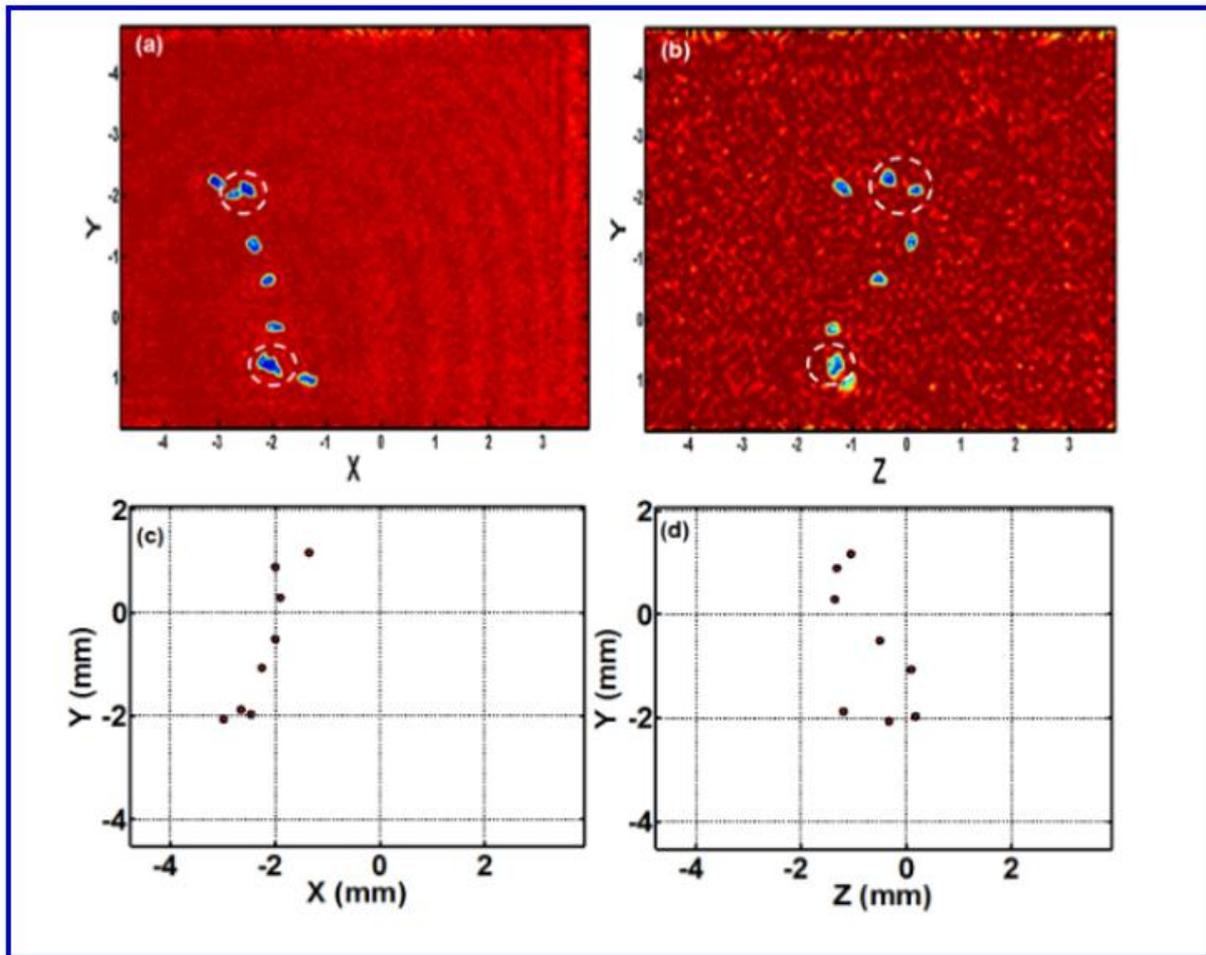
Un ensemble de huit particules peut être observé dans le volume ; La normalisation des images d'amplitude s'effectue en divisant par l'image d'amplitude obtenue à partir du recentrage numérique de l'hologramme lorsque la cuve est vide.

Avec l'image reconstruite brute dans la figure (IV.8.e), le processus d'étalonnage est appliqué pour obtenir des images de particules dans le même repère de référence. Les images calibrées à deux vues des particules sont présentées dans la figure (IV.8.a) et la (IV.8.b). Dans la (IV.8.a), deux cercles blancs pointillés indiquent deux régions dans lesquelles l'identification des particules est ambiguë. Comme les particules sont non calibrées, l'ambiguïté du nombre de particules dans les deux cercles reste. Existe-t-il seulement une grande particule ou y a-t-il deux particules proches ?

Cependant, grâce à la récupération de parallaxes dans la configuration, en considérant la vue orthogonale, l'ambiguïté peut être supprimée.

En effet, dans les deux cercles de la (IV.8.b), on peut apprécier clairement qu'il y a deux particules dans le cercle supérieur, et seulement une grande dans le cercle inférieur. On peut conclure qu'il y a huit particules dans le volume de la cuve.

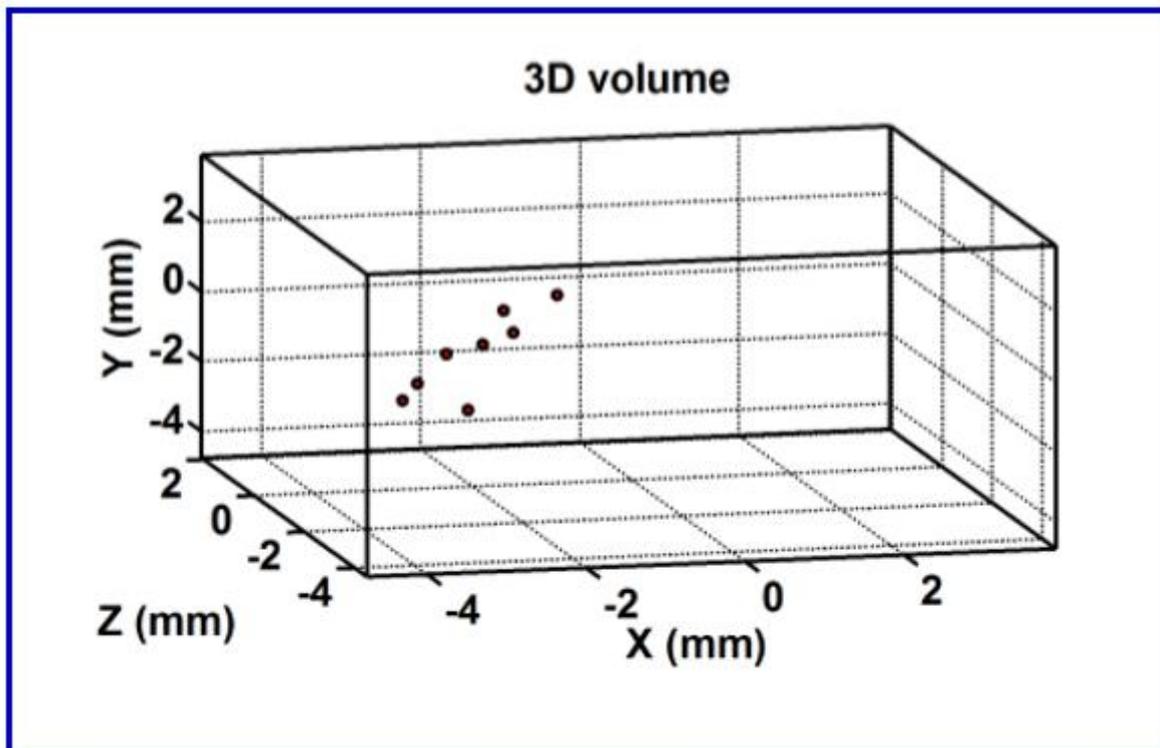
Ensuite, les deux vues peuvent être segmentées pour isoler les particules et leurs centroïdes sont estimés. La figure (IV.8.c) et la figure (IV.8.d) montrent les deux vues des particules représentées dans le repère de référence. A partir des deux vues, la représentation 3D des particules dans le volume peut être obtenue.



**Figure IV.8 :** (a) Vue directe étalonnée des particules, (b) vue orthogonale des particules, (c) centroïdes des particules dans la vue directe, (d) centroïdes des particules dans la vue orthogonale.

### IV.5 Représentation 3D

Pour une reconstruction 3-D du volume, figure (IV.12), on obtient les deux coordonnées XY de la VD, figure (IV.8.a), et la coordonnée Z est obtenue à partir de la VO, figure (IV.8.b). Ensuite, le mélange des deux vues permet la reconstruction du volume 3D comme illustré à la figure (IV.8).



**Figure IV.9 :** Reconstruction 3D du mélange entre la vue directe à la figure (IV.8.c) et la vue orthogonale de la figure (IV.8.b).

A partir de ces résultats, nous pouvons affirmer qu'il est possible d'utiliser cette méthodologie pour suivre les particules temporellement soit pour extraire leurs trajectoires soit déterminer leurs paramètres dynamiques (vecteurs vitesses et déplacements). Il suffit juste de trouver le contexte d'application convenable soit à l'échelle spatiale ou terrestre (études astrologiques, environnementales, médicales, physiques, chimiques, .....).

## IV.6 Conclusion

Nous avons présenté une approche d'enregistrement des hologrammes hors axe basée sur deux vues et deux longueurs d'ondes. La propriété naturelle de l'holographie numérique de "ne pas voir derrière l'objet" est contournée en augmentant la parallaxe pour l'imagerie des particules. Ainsi, l'approche permet de discriminer les particules non alignées le long de l'axe de vue.

Le dispositif expérimental est basé sur une double architecture Mach-Zehnder dans laquelle deux longueurs d'onde différentes fournissent la référence et les faisceaux d'objet. Les faisceaux objet traversent la région d'intérêt avec les directions de propagation orthogonale et les faisceaux sont mélangés avant d'arriver sur la surface du capteur. Les deux faisceaux de référence suivent le même chemin optique et tombent sur la surface du capteur à un angle d'incidence constant, fournissant ainsi les hologrammes hors axe.

Le traitement numérique pour obtenir des images à partir des particules est basé sur la convolution afin d'obtenir des images sans dépendance de longueur d'onde.

Afin d'obtenir les images de particules dans le volume 3D, la position de chaque particule doit être attachée à un système de coordonnées de référence. Pour cela, un processus de recalage est proposé et repose sur l'utilisation d'un objet de référence avec des lignes de contour régulières.

Le recalage des deux vues a été effectué en utilisant le théorème de modulation pour superposer parfaitement les deux projections de l'objet de référence dans le système d'axes XYZ.

Sur le plan expérimental, le recalage a été effectué avec une bille en acier sphérique qui a été collée à une pipette immergée dans la cuve pour être maintenue dans le faisceau lumineux.

La configuration expérimentale a été utilisée pour enregistrer des hologrammes bicouleur de particules opaques non calibrées mobiles avec un diamètre moyen d'environ  $150\mu\text{m}$ .

Après avoir traité les hologrammes bi-couleur avec reconstruction d'image et visualisation, l'emplacement des particules dans le volume 3D peut être obtenu.

Surtout, l'ambiguïté des particules proches, générant des particules cachées dans un schéma de vue unique, peut être supprimée pour déterminer le nombre exact de particules dans la région d'intérêt.

Les travaux futurs comprennent l'étude de la dynamique de ces particules non calibrées dans différents liquides transparents et l'utilisation d'un capteur à grande vitesse pour suivre les mouvements rapides dans le liquide.

## **IV.7 Références**

- [1] S.S. Kou, and G.J.R. Sheppard. Imaging in digital holographic microscopy. *Opt. Express* 15, 1364013648 (2007).
- [2] F. Nicolas, S. Coetmellec, M. Brunel, D. Lebrun. Digital in-line holography with a sub-picosecond laser beam. *Optics Communication* 268, 27-33 (2006).
- [3] F. Nicolas, S. Coëtmelec, M. Brunel, D. Lebrun. Suppression of the Moiré effect in sub-picosecond digital in-line holography. *Optics Express* 15, 887-895 (2007).
- [4] M. Malek, D. Allano, S. Coëtmelec, D. Lebrun. Digital in-line holography: influence of the shadow density on particle field extraction. *Optics Express* 12, 2270-2279 (2004).
- [5] L. Denis, C. Fournier, T. Fournel, C. Ducottet, D. Jeulin. Direct extraction of the mean particle size from a digital hologram. *Applied Optics* 45, 944-952 (2006).
- [6] L. Denis, D. Lorenz, E. Thiebaut, C. Fournier, and D. Trede. In line hologram reconstruction with sparsity constraints. *Opt. Lett.* 34, 3475-3477 (2009).
- [7] N. Verrier, C. Fournier, and T. Fournel. 3D tracking the Brownian motion of colloidal particles using digital holographic microscopy and joint reconstruction. *Appl. Opt.* 54, 4996-5002 (2015).
- [8] N. Verrier and C. Fournier. Digital holography super-resolution for accurate three-dimensional reconstruction of particle holograms. *Opt. Lett.* 40, 217-220 (2015).
- [9] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, A. Thibaut, and C. Goepfert. Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization. *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 1164-1171 (2007).
- [10] M. Seifi, C. Fournier, N. Grosjean, L. Macas, J. Maris, and L. Denis. Accurate 3D tracking and size measurement of evaporating droplets using in-line digital holography and inverse problems reconstruction approach. *Opt. Express* 21, 27964-27980 (2013).
- [11] M. Seifi, C. Fournier, L. Denis, D. Chareyron, and J. Maris. Three-dimensional reconstruction of particle holograms: a fast and accurate multiscale approach. *J. Opt. Soc. Am. A* 29, 1808-1817 (2012).

- [12] F. Soulez, L. Denis, A. Thiebaut, C. Fournier, and C. Goepfert. Inverse problem approach in particle digital holography: out-of-field particle detection made possible. *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 3708-3716 (2007).
- [13] J. Weng, and J. Zhong. Angular multiplexing and de-multiplexing by Gabor wavelet transform in digital holography. *Optics Communications* 291, 124-132 (2013).
- [14] C. Yuan, H. Zhai, and H. Liu. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis. *Opt. Letters* 33, 2356-2358 (2008).
- [15] C. Yuan, G. Situ, G. Pedrini, J. Ma, W. Osten. Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing. *Appl. Optics* 50, B6-B11 (2011).
- [16] J. Wang, J. Zhao, C. Qin, J. Di, A. Rauf, and H. Jiang. Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion. *Opt. Letters* 37, 1211-1213 (2012).
- [17] Y. Wu, Y. Yang, H. Zhai, Z. Ma, L. Deng, Q. Ge. Single-exposure approach for expanding the sampled area of a dynamic process by digital holography with combined multiplexing. *J. of Optics*, 15, 085402 (2013).
- [18] E. Malkiel, J. Cheng, J. Katz and J.R. Strickler. The three-dimensional flow generated by a feeding calanoid copepod measured using digital holography. *J. Exp. Biol.* 206, 3657-3666 (2006).
- [19] J. Kuhn, T. Colomb, F. Montfort, F. Charriere, Y. Emery, E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition. *Opt. Express* 15, 7231-7242 (2007).
- [20] P. Tankam, P. Picart. Use of digital color holography for crack investigation in electronic components. *Optics & Lasers in Engineering*, Vol. 49, N°11, 1335-1342 (2011).
- [21] S. Boucherit, L. Bouamama, H. Benchikh, J.M. Lenoir, and S. Simoëns. Three-dimensional solid particle positions in a flow via multi-angle off-axis digital holography. *Opt. Letters* 33, 2095-2097 (2008).
- [22] S. Boucherit, L. Bouamama, R. Zegadi, and S. Simoëns. Formulation of off-axis single reference beam and two angle views for digital holography. *J. of Optics* 12:035302 (2010).

- [23]** P. Ferraro, S. De Nicola, G. Coppola, A. Finizio, D. Alfieri, G. Pierattini. Controlling image size as a function of distance and wavelength in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms. *Optics Letters*, 29, 854-856 (2004).
- [24]** D. Alfieri, G. Coppola, S. De Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, G. Pierattini and B. Javidi. Method for superposing reconstructed images from digital holograms of the same object recorded at different distance and wavelength. *Optics Communications*, 260, 113-116 (2006).
- [25]** M. Leclercq, P. Picart. Method for chromatic errors compensation in digital color holographic imaging. *Optics Express*, Vol. 21, N°22, 26456-26467 (2013).
- [26]** P. Picart, P. Tankam. Analysis and adaptation of convolution algorithms to reconstruct extended objects in digital holography. *Applied Optics*, Vol. 52, N°1, A240-A253 (2013).
- [27]** J.C. Li, P. Tankam, Z. Peng, P. Picart. Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification. *Optics Letters*, Vol. 34, N°5, 572-574 (2009).
- [28]** P. Picart, P. Tankam, D. Mounier, Z. Peng, J.C. Li. Spatial bandwidth extended reconstruction for digital color Fresnel holograms. *Optics Express*, 17, 9145-9156 (2009).

---

## Conclusion générale

---

Nous avons étudié dans cette thèse la technique d'holographie numérique à deux vues orthogonales sur les particules de type traceur. Les informations enregistrées par les deux vues peuvent être associées pour reconstruire une vue 3D de ces particules afin de mieux caractériser le milieu dans lequel elles se trouvent.

Dans la première partie, notre travail a été focalisé sur la simulation des hologrammes de particules opaques ou transparentes, soit en utilisant une seule longueur d'onde soit en utilisant deux longueurs d'onde, en utilisant la méthode du spectre angulaire. Nous avons aussi étudié l'influence de la bande passante de filtrage lors de la sélection de l'ordre (+1) qui correspond à la vue directe ou à la vue orthogonale afin de rechercher le meilleur contraste de l'image de la particule reconstruite à partir d'un hologramme.

Dans la deuxième partie nous avons évalué la qualité des critères de focalisation pour l'imagerie des particules en l'holographie numérique hors axe. Un ensemble de treize critères a été comparé. Des simulations ont été réalisées pour générer des hologrammes numériques de particules opaques et de phase en prenant en compte certains alias et bruit. Des critères de refocalisation ont été appliqués à la fois à l'image d'amplitude et à l'image de phase obtenue à partir des hologrammes simulés. Le même travail a été également réalisé expérimentalement en utilisant comme cible la mire USAF1651 et une particule opaque non calibrée.

Les coûts de calcul ont été estimés pour chaque critère.

Le critère qui semble robuste avec les données expérimentales est le CC car il fournit des courbes régulières et très contrastées (pic ou creux) avec à la fois l'amplitude ou la phase. La raison pourrait être expliquée par le fait que le critère CC est basé sur le calcul de corrélation et une telle approche est très robuste au bruit et aux autres fluctuations du signal.

La dernière partie présente une approche basée sur deux vues orthogonales à deux longueurs d'onde pour l'enregistrement des hologrammes bi-couleurs hors axe. Un processus de recalage basé sur le théorème de modulation est proposé. Il permet de superposer parfaitement les deux vues dans un repère XYZ, pour mieux localiser les particules dans le volume 3D. L'approche permet de discriminer les particules alignées le long de l'axe de visée et de ce fait, pouvoir caractériser l'écoulement au mieux possible.

## **RESUME**

L'étude des particules est devenue de nos jours un défi à différentes échelles et dans différents domaines. Du macro, au nano en passant par le micro d'une part et d'autre part, de l'astronomie au médical en passant par l'environnemental. Les études sur les particules dites traceurs portent essentiellement sur les techniques de leur visualisation, caractérisation, localisation et la détermination de leurs paramètres dynamiques afin de mieux caractériser l'écoulement qu'elles marquent. L'imagerie 2D est largement utilisée dans ce contexte, malheureusement, la localisation en profondeur de ces particules est perdue. Le recours aux techniques 3D est devenu une nécessité. Parmi ces techniques, l'holographie numérique est devenue un outil incontournable. Comme toute technique expérimentale, l'holographie des particules présente l'inconvénient de la grande profondeur de focalisation donnant une forme allongée aux images reconstruites des particules. Afin de mieux cerner cette problématique, nous allons étudier l'effet du multiplexage angulaire et chromatique d'une part et d'autre part les algorithmes de mise au point à la reconstruction sur les hologrammes de particules obtenus soit par simulation soit de manière expérimentale afin de donner une réponse mieux adaptée à cette problématique.

**MOTS-CLES:** Holographie numérique hors-axe, holographie couleur, hologramme à deux vues, critères de refocalisation, imagerie de particules, reconstruction 3D.

## **ABSTRACT**

Nowadays, the study of particles becomes a challenge at several scales and in many fields. From macro to nano via micro on one hand and on the other hand, from astronomy to medical via environmental. Studies on the so-called tracer particles mainly concern the techniques of their visualization, characterization, localization and the determination of their dynamic parameters in order to better characterize the flow that they mark. 2D imaging technique is widely used in this context; unfortunately, the depth localization of these particles is lost. The use of 3D techniques has become with strong requirement. Among these techniques, digital holography has become an unavoidable tool. Like any experimental technique, the holography of particles has the drawback of the large focusing depth giving rise to elongated shape to the reconstructed particle images. In order to better outline this problem, we will study the effect of angular and chromatic multiplexing on one hand and on the other hand, the focusing algorithms at the reconstructing stage on particle holograms obtained either by simulation or experimentally to give a better answer to this problem.

**KEYWORDS:** Off-axis digital holography, color holography, two views hologram, focusing criteria, particle imaging, 3D reconstruction.