

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

## THÈSE

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

### DOCTORAT 3<sup>ème</sup> Cycle LMD

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Optique et mécanique de Précision

Spécialité: **Optique et Photonique Appliqué**

Par

**Soufiane Mebarek Azzem**

## THÈME

*Multiplexage angulaire et chromatique d'hologrammes de  
particules en configuration hors-axe.*

**Soutenue, le:**

**Devant le jury composé de:**

Président du Jury	Smail Djabi	Prof.	UFA Sétif1
Directeur de thèse	Larbi Bouamama	Prof.	UFA Sétif1
Examineur	Nacereddine Demagh	Prof.	UFA Sétif1
Examineur	Rabah Mokdad	Prof.	UMMTO
Examineur	Abdelhalim Bencheikh	Dr	UBBA

## Liste des figure

### chapitre 1

Figure I.1: Principe de superposition des ondes objet et de référence. ....	3
Figure I.2: interférence entre deux ondes .....	5
Figure I.3: Principe de la configuration en-ligne.....	6
Figure I.4: principe de la configuration hors-axe. ....	7
Figure I.5 : principe de reconstruction de l'hologramme. ....	8
Figure I.6 : système de coordonnées en holographie. ....	10
Figure I.7. Premiers hologrammes numériquement reconstruits avec un ordinateur: .....	11
Figure. I.8: Configuration de Fourier(holographie de Fourier lensless ) .....	15
Figure I.9: l'effet de la distance d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $D_1 > D_2$ ). ....	19
Figure I.10: l'effet de la distance d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $D_1 > D_2$ ). ....	20
Figure I.11: Effet de l'angle d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $\theta_1 < \theta_2$ ). ....	20
Figure I.12: Effet de l'angle d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $\theta_1 < \theta_2$ ). ....	21

### chapitre 2

Figure II.1: multiplexage de quatre hologrammes sur le même support ; géométrie des ondes objet (a gauche), illustration de l'image des ondes objet sur l'image reconstruite (a droite) .....	25
Figure II.2: multiplexage spatiale de deux hologrammes avec la même longueur d'onde $\lambda$ et angle d'enregistrement $\theta$ ; illustration des ondes objets (a gauche), positionnement des ordres a la reconstruction (a droite). ....	26
Figure II.3: multiplexage angulaire de deux hologrammes avec la même longueur d'onde $\lambda$ et deux angles d'enregistrement différentes $\theta_1$ et $\theta_2$ ; illustration des ondes objets (a gauche), positionnement des ordres a la reconstruction (a droite). ....	27
Figure II.4: multiplexage chromatique entre deux hologrammes avec deux longueurs d'ondes $\lambda$ et la même angle d'enregistrement $\theta$ ; illustration des ondes objets (a gauche), positionnement des ordres a la reconstruction (a droite). ....	28
Figure II.5: multiplexage de polarisation entre deux hologrammes avec la même longueur d'ondes $\lambda$ et deux orientation de polarisation différentes; illustration des ondes objets (a gauche), positionnement des ordres a la reconstruction (a droite). ....	29
Figure II.6.a): multiplexage combiné entre l'angulaire et le chromatique. ....	30
Figure II.6.b): montage expérimentale d'un multiplexage combiné. ....	31

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure II.6. c): spectre de Fourier de l'hologramme.</i> .....	31
<i>Figure II.7.a: multiplexage combiné entre l'angulaire, le chromatique et par polarisation</i> .....	32
<i>Figure II.3.b: montage expérimentale d'enregistrement d'un hologramme multiplexé [13]</i> .....	32
<i>Figure II.3.c: Image de l'objet holographié et la distribution des fréquences a la reconstruction [13]</i> .....	33

### chapitre 3

<i>Figure III.1 : Photo sur le montage de développement (avec fiole en quartz).</i> .....	39
<i>Figure III.2 : Schéma de l'installation de la veine à eau du LMFA.</i> .....	39
<i>Figure III.3 : Configuration d'holographie digitale à deux vues avec un seul faisceau de référence, utilisée par Boucherit et all.</i> .....	40
<i>Figure III.4 : Schéma de conception du montage sur la veine à eau.</i> .....	41
<i>Figure III.5 : Photographie sur le montage sur veine réelle.</i> .....	41
<i>Figure III.6 : Montage expérimental d'un multiplexage angulaire avec faisceau de référence adapté.</i> .....	42
<i>Figure III.7 : a) Hologramme enregistré à l'aide du montage de la figure.III.6, b) son image reconstruite</i> .....	42
<i>Figure III.8 : Image agrandie des deux vues de l'hologramme enregistré43 a) la vue direct, b) la vue orthogonale.</i> .....	43
<i>Figure III.9 : Montage expérimental d'holographie digitale à deux vues sans faisceau de référence.</i> .	44
<i>Figure III.10 : Hologramme enregistré d'un objet statique.</i> .....	45
<i>Figure III.11 : Image reconstruite des deux vues directe et orthogonale d'un objet statique.</i> .....	45
<i>Figure III.12 : Image reconstruite des deux vues directe et orthogonale agrandie d'un objet statiques.</i> .....	46
<i>Figure III.13 : Image du montage avec le système d'injection de particules.</i> .....	47
<i>Figure III.14 : a) Hologramme des particules enregistré, b) Image reconstruite.</i> .....	48
<i>Figure III.15 : Image reconstruite agrandie des deux vues directe et orthogonale.</i> .....	48
<i>Figure III.16 : Reconstruction sur différentes distances.</i> .....	48
<i>Figure III.17 : Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°1</i> .....	49
<i>Figure III.18 : Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°3</i> .....	49
<i>Figure III.19 : Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°2</i> .....	49

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure III.20 : Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°4</i> .....	49
<i>Figure III.21 : Distribution d'intensité suivant l'axe Z des quatre particules.</i> .....	50
<i>Figure III.22 : Image binaire de la vue directe.</i> .....	51
<i>Figure III.23 : Image binaire de la vue orthogonale</i> .....	51
<i>Figure III.24 : Reconstruction 3D de la distribution des particules dans le volume d'étude.</i> .....	51
<i>Figure III.25 : Schéma du montage expérimental utilisé.</i> .....	52
<i>Figure III.26 : Image du montage utilisé sur la vaine.</i> .....	53
<i>Figure.III.27. Hologrammes d'étalonnage : (a) vue directe, (b) vue orthogonale</i> .....	54
<i>Figure III.28.a : Image reconstruite des hologrammes étalons ; (a) mise au point sur la première face directe D1=152cm, (b) mise au point sur la deuxième face directe D2=172cm.</i> .....	55
<i>Figure III.28.b : Image reconstruite des hologrammes étalons ; (a) mise au point sur la troisième face orthogonale D3=126 cm, (b) mise au point sur la quatrième face orthogonale D4=140 cm.</i> .....	55
<i>Figure III.29. Hologramme de particules</i> .....	56
<i>Figure III.30. Image reconstruite de l'hologramme de particules.</i> .....	57
<i>Figure III.31: multiplexage angulaire et chromatique avec référence.</i> .....	59
<i>Figure III.32: Images reconstruite de l'hologramme enregistré par la configuration de la Figure III.31 ;a) mise au point est sur l'hologramme vert, b) mise au point est sur l'hologramme rouge</i> .....	60
<i>Figure III.33 : Multiplexage angulaire et chromatique d'hologramme de particules.</i> .....	61
<i>Figure III.34 : emplacement des faisceaux sur la cuvette</i> .....	61
<i>Figure III.35 : image du montage a quatre vues sans référence.</i> .....	62
<i>Figure III.36 : hologramme enregistré avec sont image reconstruite.</i> .....	62
<i>Figure III.37 : image reconstruite de l'hologramme enregistré avec une mise au point sur les vues rouge.</i> .....	63
<i>Figure III.38 : axe des coordonnées des particules d'après les vues rouge a) La vue orthogonale, b) la vue directe</i> .....	63
<i>Figure III.39 : coordonnées des particules d'après la vue direct rouge</i> .....	64
<i>Figure III.40 : coordonnées des particules d'après la vue orthogonale rouge</i> .....	64
<i>Figure III.41 : vue 3D obtenue d'après les deux vues rouge</i> .....	65
<i>Figure III.42 : image reconstruite de l'hologramme enregistré avec une mise au point sur les vues verte.</i> .....	65

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure III.43 : axe des coordonnées des particules d'après les vues vertes a) La vue orthogonale, b) la vue directe.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure III.44 : coordonnées des particules d'après la vue direct verte.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure III.45 : coordonnées des particules d'après la vue orthogonale verte.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure III.46 : vue 3D obtenue d'après les deux vues vertes.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure III.47 : synthèse d'ouverture des deux vues a) la vue orthogonale, b) la vue directe.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure III.48 : coordonné des particules après synthèse d'ouverture des deux vues a droite la vue directe et a gauche la vue orthogonale.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure III.49: vue 3D du volume après synthèse d'ouverturedes deux vues 3D verte et rouge.....</i>	<i>69</i>

## **Introduction générale**

Le travail de recherche présenté dans cette thèse consiste à mettre au point une technique d'étude des particules de type marqueurs. Une technique qui permet de surmonter les problèmes de grande profondeur de focalisation d'une part et la faible résolution des capteurs d'images utilisés actuellement d'autre part. Cette technique est basée sur les procédures de multiplexage angulaire et chromatique.

La thèse est divisée en trois 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. Nous exposons par la suite les deux configurations principales appliquées en holographie. 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 enfin du chapitre, les principaux algorithmes de reconstruction des hologrammes digitaux (transformée de Fresnel, transformée de Fourier et convolution).

Au second chapitre, nous avons traité quatre techniques de multiplexage tels que le spatial, l'angulaire, le chromatique et par polarisation. Puis deux autres techniques de multiplexage combiné ont été étudiées. Ces techniques ont été exploitées en chapitre 3 dans le but d'enregistrer des hologrammes multiplexés de microparticules.

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 troisième chapitre sera dédié aux différents travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette thèse. En vue de visualiser et localiser les particules de type traceur, les techniques de multiplexage angulaire à deux vues ont été appliquées. Une nouvelle technique dans laquelle le faisceau de référence a été supprimé a été développée. La technique proposée a été utilisée pour enregistrer un hologramme de particules, puis de reconstruire l'hologramme enregistré en 3D par le croisement entre les deux vues. Le besoin d'une zone d'étude importante nous a conduits à utiliser quatre vues sur la zone d'étude. Les quatre vues sont enregistrées simultanément et avec la même distance d'enregistrement on appliquant la combinaison entre le multiplexage angulaire et le chromatique. Cette dernière technique nous a permis de faire

une synthèse d'ouverture de la zone d'étude avec des faibles distances d'enregistrement (par rapport à l'holographie digitale avec référence) et un montage expérimental moins compliqué donc un ajustage simple.

Les résultats expérimentaux obtenus sont sous forme de hologrammes numériques de particules, la reconstruction de ces hologrammes et avec un croisement entre les vues nous a donné une vue 3D de la distribution des particules dans la zone d'étude.

Ce travail est motivé par la possibilité d'étudier des  $\mu$ particules en mouvement, le multiplexage angulaire utilisé permet d'augmenter la résolution longitudinale sur la détection de la position exacte des particules.

# CHAPITRE I

## L'Holographie Numérique

---

### Contenu

---

I.1 Introduction .....	2
I.2 Bases de l'holographie numérique.....	3
I.2.1 Etape d'enregistrement .....	3
I.2.1.2 Conditions d'enregistrement .....	4
I.3 Différentes configurations d'enregistrement .....	6
I.2.3.1 Holographie numérique en-ligne .....	6
I.2.3.2 Holographie numérique hors-axe .....	7
I.2.2 Etape de la reconstruction.....	8
I.2.2.1 Reconstruction numérique d'un hologramme .....	11
I.2.2.1.1 Reconstruction par transformée de Fresnel .....	12
I.4.2 Reconstruction par transformée de Fourier .....	15
I.4.3 Reconstruction par convolution .....	16
<b>I.3.2.2.1 L'effet des paramètres d'enregistrement sur l'image reconstruite :</b> .....	18
I.3.2.2.1.1 L'effet de la distance d'enregistrement : .....	18
I.3.2.2.1.2 L'effet de l'angle d'enregistrement : .....	20
I.4 Conclusion.....	21
I.5 Référence.....	21

---

**Résumé :** Dans ce chapitre nous rappellerons 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 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.

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

---

### I.1 Introduction

L'holographie numérique, malgré les différentes tentatives de sa mise en application qui remontent aux années soixante [1-6] n'a pas pu être concrétisée de manière adéquate. Parmi les causes qui ont freiné ce développement, on cite, la faible résolution des capteurs d'images et la puissance de calcul des ordinateurs. Son point de départ réel a été en 1994 avec le travail de Schnars et al. [7-11] qui ont réussi de faire un enregistrement direct d'un hologramme à l'aide d'une caméra CCD liée à un ordinateur. A partir de cette date, la technique a vu un essor considérable dans pratiquement tous les domaines.

L'holographie numérique se réalise en deux étapes à savoir l'enregistrement et la reconstruction. L'étape supplémentaire de développement nécessaire en holographie classique est bien sûr éliminée.

Les milieux photosensibles (plaques holographiques), utilisés en holographie classique dans l'étape d'enregistrement, sont remplacés par un capteur électronique bidimensionnel où les hologrammes sont directement stockés dans la mémoire de l'ordinateur. L'étape de restitution est remplacée par des techniques de reconstruction d'image basées sur la simulation du processus de diffraction des hologrammes enregistrés. Par cet effet, le temps d'exposition de l'hologramme en holographie numérique est très bref et l'exploitation de l'hologramme est immédiate. Malgré les avantages de l'holographie numérique par rapport à l'holographie classique, l'inconvénient majeur de l'holographie numérique est la faible ouverture numérique pendant l'enregistrement de l'hologramme due à la faible résolution du capteur optoélectronique utilisé. Ceci entraîne la présence du bruit de speckle et le repliement des ordres de diffraction dans l'image reconstruite. C'est deux derniers engendrent une perte d'information sur l'objet enregistré.

Dans le présent chapitre, nous rappelons les principes de base de l'holographie numérique en matière d'enregistrement des hologrammes et de reconstruction des images des objets holographiés. Les différents paramètres intervenant dans chacune des deux étapes seront présentés et discutés.

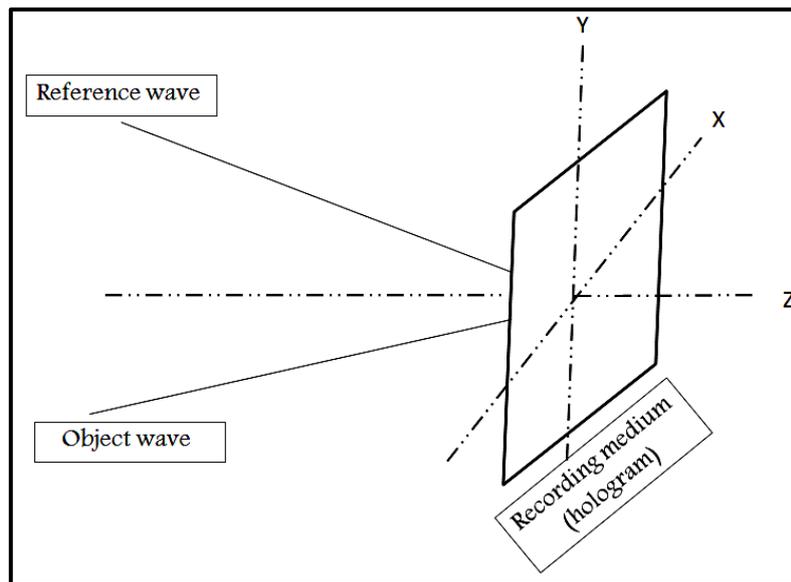
## I.2 Bases de l'holographie numérique

Comme souligné en introduction, le processus d'holographie numérique suit les mêmes étapes que celles de l'holographie classique à part l'étape de développement qui est éliminée.

Le principe général de l'holographie numérique est alors l'enregistrement d'un processus d'interférence entre deux ondes sur un capteur optoélectronique, généralement une camera CCD (Charged coupled device), ou CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor) et la reconstruction numérique de l'image par simulation sur ordinateur du processus de diffraction [12 ,13].

### I.2.1 Etape d'enregistrement

Le processus d'interférence enregistré, nommé hologramme est la résultante d'une superposition entre deux ondes, la première provenant directement de la source d'éclairage c'est l'onde de référence, est l'autre, soit réfractée soit réfléchié par l'objet à holographier c'est l'onde d'objet (figure I.1).



*Figure I.1: Principe de superposition des ondes objet et de référence.*

En désignant l'onde objet par :

$$O = a_o \exp(j\varphi_o) \quad (\text{I.1})$$

Et l'onde de référence par :

$$R = a_r \exp(j\varphi_r) \quad (\text{I.2})$$

Sur le capteur, on aura la distribution d'amplitude résultant de la superposition des deux ondes objet et de référence :

$$A = O + R = a_o \exp(j\varphi_o) + a_r \exp(j\varphi_r) \quad (\text{I.3})$$

Comme tous les capteurs optiques ne sont sensibles qu'aux variations d'intensité (carré de l'amplitude), la caméra enregistre alors l'intensité résultant de cette superposition et qui sera donnée par :

$$\begin{aligned} I_{CCD} &= (O+R)^2 = (O+R) (O+R)^* \\ &= O^2 + R^2 + OR^* + R O^* \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r + I_o} \cos(\varphi_r - \varphi_o) \end{aligned} \quad (\text{I.4})$$

L'équation (I.4) exprime la distribution d'intensité d'un phénomène d'interférence classique, ce qui montre que la première étape de l'holographie n'est autre que l'enregistrement d'un phénomène d'interférence.

En observant cette équation, on voit bien que l'onde objet est présente en sa totalité (amplitude et phase), seulement elle est codée à l'aide de l'onde de référence.

L'enregistrement de ce phénomène d'interférence à l'aide du capteur optoélectronique donne ce qu'on appelle un hologramme numérique. L'hologramme est donc stocké sous forme d'image numérisée dans la mémoire de l'ordinateur.

### I.2.2 Conditions 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 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) :

$$v_{e_{x,y}} \geq 2v_s \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$$v_{e_{x,y}} = \frac{1}{\Delta x, \Delta y} \quad (\text{I.6})$$

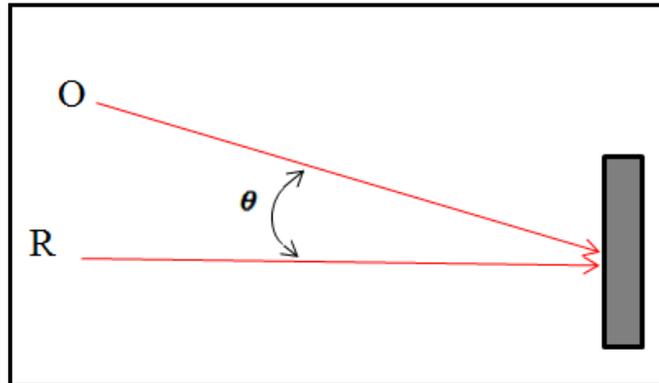
Où  $\Delta x, \Delta y$  sont les dimensions des pixels du capteur utilisé respectivement suivant x et y.

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

Où  $i$  est le pas des franges ou interfranges 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 (figure I.2).



*Figure I.2: interférence entre deux ondes*

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 de référence soient résolues par le capteur utilisé. Cette valeur sera donc donnée par :

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

Par exemple, avec  $\lambda = 632.8$  nm et  $\Delta_x = \Delta_y = 4.65$   $\mu$ m, l'angle d'enregistrement maximum est de  $(3.6)^\circ$ . Si la taille de pixel augmente l'angle d'enregistrement maximal diminue, et si la longueur d'onde d'enregistrement augmente l'angle d'enregistrement maximal augmente également.

La condition sur l'angle d'enregistrement  $\theta$  conditionne alors la taille de l'objet et sa position par rapport au capteur d'image.

Il est également nécessaire d'observer d'autres conditions telles que la sensibilité du capteur et sa taille globale.

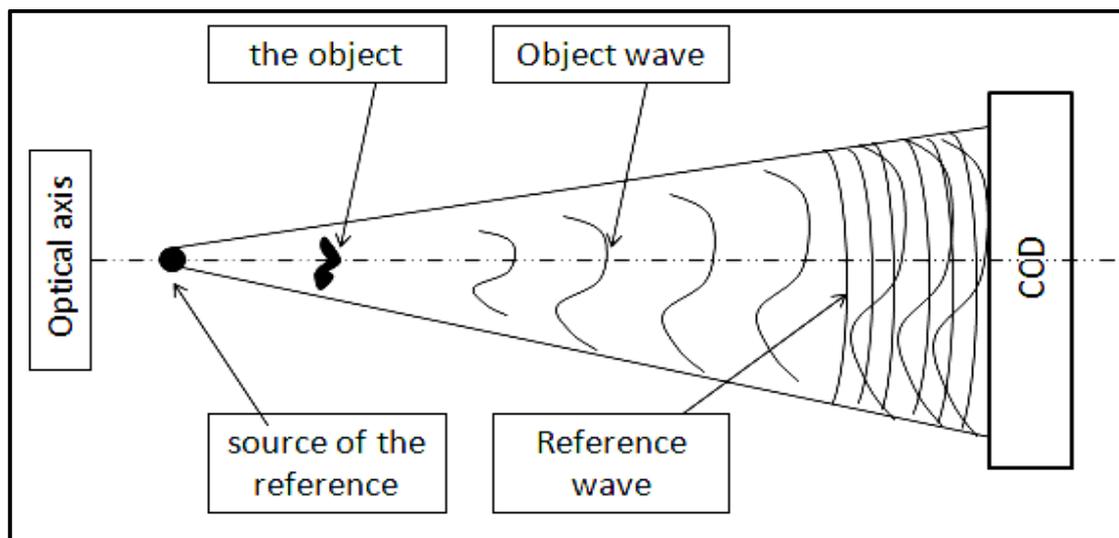
### I.2.3 Différentes configurations d'enregistrement

L'enregistrement des hologrammes numériques se fait généralement avec deux configurations, la configuration en-ligne et la configuration hors-axe. L'utilisation de l'une ou l'autre est en fonction de la taille de l'objet (petit ou grand) ainsi que sa nature (opaque ou transparent).

La première configuration utilisée pour enregistrer des hologrammes est celle proposée par Gabor dite 'en-ligne', où l'onde éclairant l'objet sert aussi de référence. Cette configuration souffre de la superposition de l'image réelle et virtuelle avec l'ordre zéro lors de la reconstruction de l'hologramme. Pour cette raison, Leith et Upatnieks [1] ont proposé en 1962 une autre configuration pour l'holographie dite 'hors-axe'. Elle permet de séparer l'image réelle et virtuelle de l'ordre zéro. C'est la raison pour laquelle cette configuration a été adoptée dans la plus part des applications de l'holographie, surtout les montages d'interférométrie holographique.

#### I.2.3.1 Holographie numérique en-ligne

L'holographie numérique en-ligne ou l'holographie de Gabor c'est quant la source de référence, l'objet et le support d'enregistrement (CCD) soient sur le même axe (figure I.3).



*Figure I.3: Principe de la configuration en-ligne.*

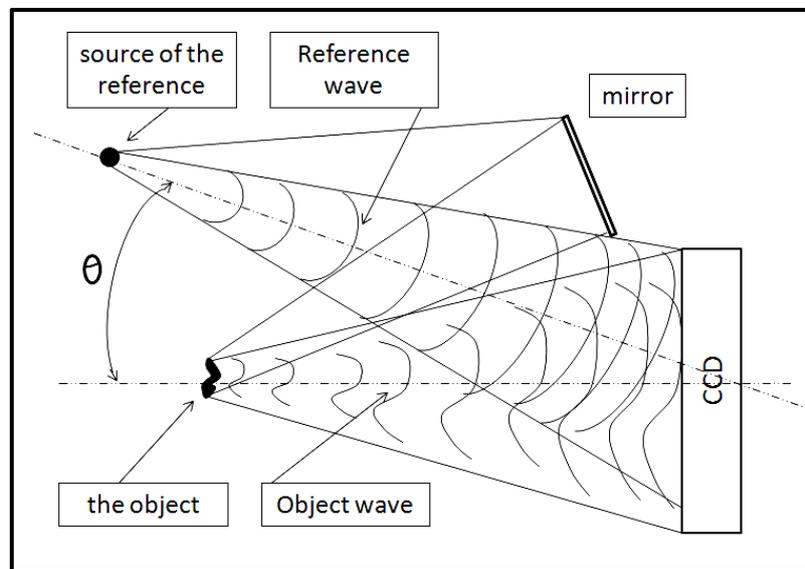
Dans cette configuration, la partie de l'onde modifiée par l'objet se comporte comme onde objet et la partie non modifiée est prise comme onde de référence. Cette configuration est

beaucoup plus utilisable pour des objets opaques de faibles dimensions ou des objets transparents.

L'holographie numérique en-ligne se caractérise par sa configuration simpliste, par contre, elle souffre pendant la reconstruction de la superposition des ordres (+1 et -1) qui contiennent l'image de l'objet et l'ordre zéro.

### I.2.3.2 Holographie numérique hors-axe

L'holographie numérique hors-axe ou holographie de Leith et Upatnieks 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 (figure I.4). 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.4: principe de la configuration hors-axe.*

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

Dans cette configuration, les ondes objet et de référence peuvent être prises comme étant sphériques, on est alors dans le cas de l'holographie de Fresnel, ou de Fourier si leurs sources sont situées dans un même plan.

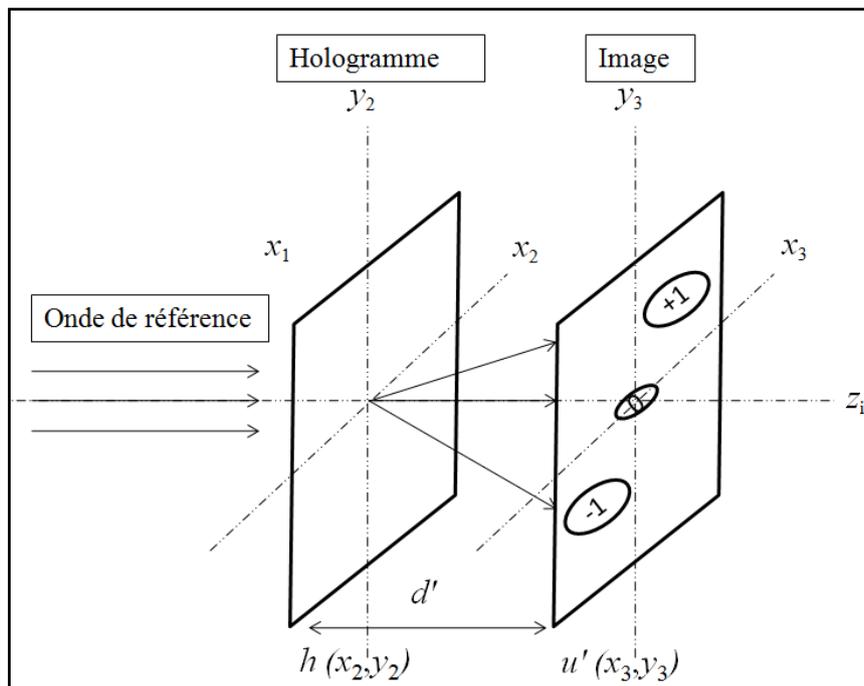
## I.2.2 Etape de la reconstruction

Une fois l'hologramme enregistré et stocké dans la mémoire de l'ordinateur, il peut être reconstruit pour l'observation et l'exploitation de l'image de l'objet enregistré.

Dans cette étape le processus de restitution de l'holographie classique est alors simulé. En holographie classique, l'hologramme est éclairé par le faisceau de référence et permet par effet de diffraction de restituer l'image de l'objet dans les ordres +1 et -1 avec une distribution d'éclairement sans information de phase dans l'ordre 0 (figure I.5).

Le phénomène de diffraction se produit lorsque les ondes, quelles que soient leur nature, rencontrent des obstacles ou des ouvertures dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde qui se traduit par des perturbations dans la propagation de ces ondes.

En holographie, l'hologramme enregistré est un motif de franges d'interférence (réseau de diffraction), pour cela, quand il est éclairé par l'onde de référence, il diffracte la lumière. Ainsi, l'information codée dans l'hologramme peut être extraite dans les ordres de diffraction.



**Figure I.5 :** principe de reconstruction de l'hologramme.

L'hologramme numérique enregistré n'est autre que la distribution d'intensité captée par la caméra :

$$H = I_{\text{CCD}} = [(O+R)(O+R)^*]$$

$$\begin{aligned}
 H &= OO^* + OR^* + RO^* + RR^* \\
 &= O^2 + R^2 + OR^* + RO^*
 \end{aligned} \tag{I.10}$$

L'éclairement de l'hologramme numérique enregistré par une onde de référence donne le champ reconstruit suivant:

$$\begin{aligned}
 R \cdot h &= R \cdot I_{ccd} = R[O^2 + R^2 + OR^* + RO^*] \\
 &= \underbrace{RO^2 + RR^2}_{\text{Ordre zéro}} + \underbrace{RR^*O}_{\text{Image virtuelle}} + \underbrace{RR O^*}_{\text{image réelle}}
 \end{aligned} \tag{I.11}$$

L'équation (I.10) montre bien les trois ordres de diffraction propres à l'holographie, zéro, +1 et -1, où l'information sur l'objet (onde objet) est bien présente dans les ordres +1 et -1 comme une image réelle et virtuelle.

La simulation du processus de restitution (reconstruction) sur ordinateur nécessite automatiquement un algorithme de calcul pour implémenter l'équation (I.10). Différents algorithmes (méthodes) peuvent être utilisés, dont on cite la méthode de Fresnel, la méthode de convolution et la méthode de Fourier. Pour décrire ces méthodes, on doit partir de l'équation de diffraction bien connue de Fresnel-Kirchhoff :

$$O'(x', y') = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x_h, y_h) E_r(x_h, y_h) \frac{\exp(i\frac{2\pi}{\lambda}r')}{r'} dx_h dy_h \tag{I.12}$$

$h(x_h, y_h)$  est la fonction d'hologramme,  $E_r(x_h, y_h)$  est une onde numérique plane ou sphérique utilisée pour la reconstruction de l'hologramme (figure I.6). L'onde plane qui arrive sur la caméra avec une incidence normale est la plus adaptée pour l'évaluation numérique, à cause de son amplitude et sa phase constantes spatialement. Elle est donnée par son amplitude réelle :

$$E_r = a_r + i0 = a_r \tag{I.13}$$

Généralement on prend  $E_r = a_r = 1$  [].

$r'$  est la distance entre un point dans le plan de l'hologramme et un point dans le plan de l'image. Selon le système de coordonnées choisi (figure I.6)  $r'$  est donné par :

$$r' = \sqrt{(x_h - x')^2 + (y_h - y')^2 + d'^2} \tag{I.14}$$

En holographie classique la reconstruction de l'hologramme par l'onde de référence  $E_r$  engendre une distorsion de l'image réelle reconstruite, pour cette raison l'hologramme est reconstruit par l'onde conjugué  $E_r^*$  au lieu de  $E_r$  et l'équation de reconstruction devient :

$$O(x, y) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} E_r^*(x_h, y_h) h(x_h, y_h) \frac{\exp(i\frac{2\pi}{\lambda}r)}{r} dx_h dy_h \quad (I.15)$$

Cette onde ( $O(x, y)$ ) représente l'image réelle de l'objet formée à la position exacte où l'objet est placé pendant l'enregistrement.

Et l'expression de  $r$  devient :

$$r = \sqrt{(x_h - x)^2 + (y_h - y)^2 + d^2} \quad (I.16)$$

Cette représentation de l'onde objet par l'intégrale de diffraction de Fresnel-Kirchhoff est la base de la plupart des méthodes de reconstruction en holographie numérique.

L'implémentation de l'équation de Fresnel-Kirchhoff (Equation I.11), repose sur l'expression de la distance  $r'$ .

En plus, il est nécessaire de définir les différents systèmes de coordonnées relatifs aux plans objet, hologramme et image ( Figure I.6).

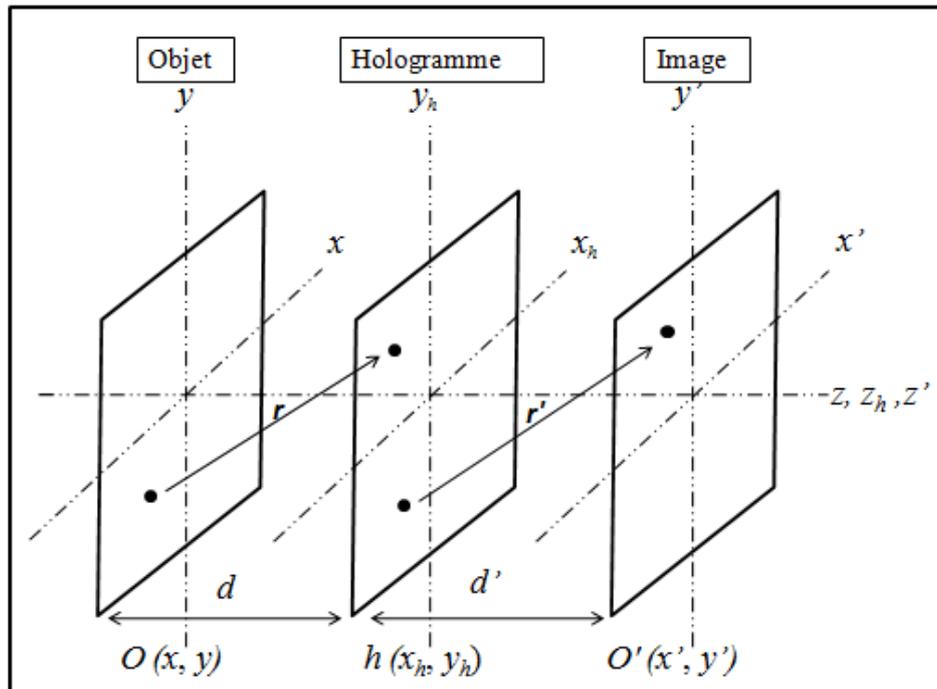


Figure I.6 : système de coordonnées en holographie.

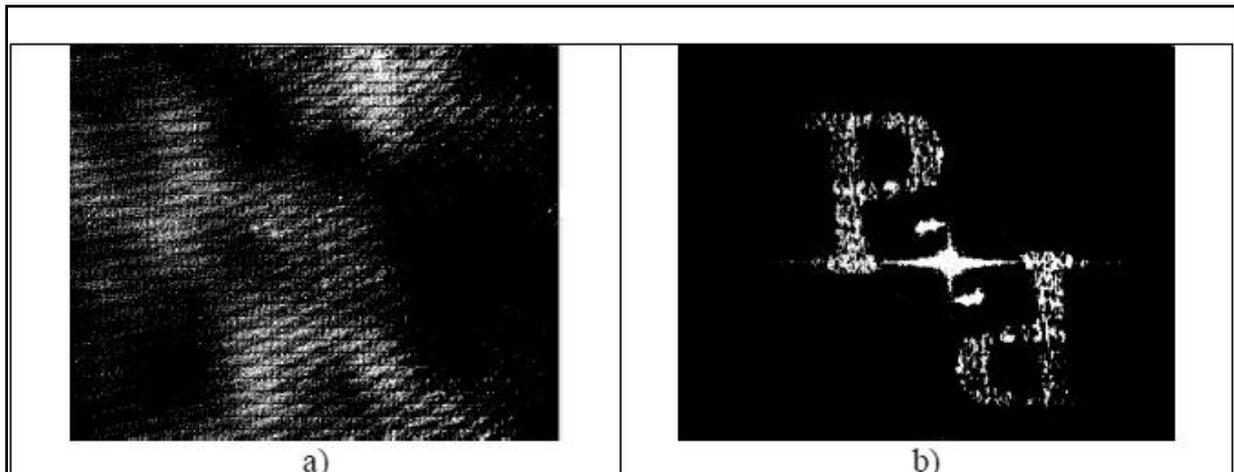
D'après l'équation (I.12) et la figure I.6, le champ  $O'(x, y)$  est une fonction complexe qui contient l'information de l'intensité et de la phase du champ  $O(x, y)$  diffracté par l'hologramme  $h(x_h, y_h)$  à la distance  $d'$ .

### I.2.2.1 Reconstruction numérique d'un hologramme

Les premières expériences de reconstruction numérique des hologrammes optiques remontent à 1960-1970 [2,7]. A cette époque, les dispositifs d'analyse qui pouvaient être utilisés pour numériser l'hologramme avaient de faibles résolutions, ce qui nécessitait un grossissement optique des hologrammes pour les adapter à la résolution des dispositifs de balayage.

La figure (I.9) représente l'un des premiers hologrammes enregistrés avec son image reconstruite [2].

Avec l'apparition des caméras CCD, il était devenu possible d'effectuer l'enregistrement d'un l'hologramme directement numérisé. Dans les premières expériences avec les caméras CCD, les hologrammes ont été enregistrés sous la configuration hors-axe (Leith-Upatnieks) [7-8].



**Figure I.7.** Premiers hologrammes numériquement reconstruits avec un ordinateur:

*a) un hologramme test optique, enregistré électroniquement avec une caméra vidicon TV 256x256 pixels quantifiés à 8 niveaux de gris; b) image numérique reconstruite à partir de cet hologramme avec un ordinateur PDP-6 [7-8]*

### I.2.2.1.1 Reconstruction par transformée de Fresnel

Comme la plus part des méthodes de reconstruction numérique, la méthode Fresnel est basée sur l'équation de diffraction de Fresnel-Kirchhoff, avec une approximation dite de Fresnel. Cette approximation est introduite au niveau de la distance  $r'$ .

L'expression de  $r'$  peut être développée en séries de Taylor pour donner:

$$r' = d' + \frac{(x_h - x')^2}{2d'} + \frac{(y_h - y')^2}{2d'} - \frac{1}{8} \frac{[(x_h - x')^2 + (y_h - y')^2]^2}{d'^3} + \dots \quad (\text{I.17})$$

Le troisième terme est négligé car il est très petit par rapport à la longueur d'onde :

$$\frac{1}{8} \frac{[(x_h - x')^2 + (y_h - y')^2]^2}{d'^3} \ll \lambda \quad (\text{I.18})$$

On peut donc se limiter aux deux premiers termes, on aura :

$$r' = d' + \frac{(x_h - x')^2}{2d'} + \frac{(y_h - y')^2}{2d'} \quad (\text{I.19})$$

Le remplacement de ce nouveau  $r'$  dans l'exponentielle permet de réécrire l'équation (I.12) comme suit :

$$O'(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d'\right)$$

$$\times \iint_{-\infty}^{+\infty} E_r(x_h, y_h) h(x_h, y_h) \frac{1}{r'} \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d'} ((x_h - x')^2 + (y_h - y')^2)\right] dx_h dy_h \quad (\text{I.20})$$

Il s'agit là de la première approximation de Fresnel. Le  $r'$  dans le dénominateur peut être remplacé par  $d'$ , du fait que la distance  $d'$  est nettement grande devant  $(x - x_h)^2 + (y - y_h)^2$ , il s'agit là de la deuxième approximation de Fresnel. En développant les termes  $(x - x_h)^2 + (y - y_h)^2$ , et en faisant sortir tous qui est en fonction de  $x$  et  $y$  en dehors de l'intégrale, on obtient alors l'équation suivante :

$$O'(x', y') = \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d'} (x'^2 + y'^2)\right]$$

$$\times \iint_{-\infty}^{+\infty} E_r(x_h, y_h) h(x_h, y_h) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d'} (x_h^2 + y_h^2)\right] \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda d'} (x_h x' + y_h y')\right] dx_h dy_h$$

(I.22)

Si on remplace  $E_r(x_h, y_h)=1$ , l'équation (I.22) devienne :

$$\begin{aligned} \mathcal{O}'(x', y') &= \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d'}(x'^2 + y'^2)\right] \\ \times \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x_h, y_h) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d'}(x_h^2 + y_h^2)\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda d'}(x_h x' + y_h y')\right] dx_h dy_h \end{aligned} \quad (\text{I.23})$$

Cette équation est connue par *approximation de Fresnel* ou transformée de Fresnel pour sa similarité avec la transformée de Fresnel.

L'intensité reconstruite est donnée par le carré de l'onde objet :

$$I(x', y') = |\mathcal{O}'(x', y')|^2 \quad (\text{I.24})$$

Et la phase est donnée par :

$$\varphi(x', y') = \arctan \frac{\text{Im}[\mathcal{O}'(x', y')]}{\text{Re}[\mathcal{O}'(x', y')]} \quad (\text{I.25})$$

**Re** et **Im** désignent respectivement les parties réelle et imaginaire de l'onde objet.

Avec le changement des variables suivant :

$$u = \frac{x'}{\lambda d'} \quad ; \quad v = \frac{y'}{\lambda d'}$$

L'équation de reconstruction (I.23) devient :

$$\begin{aligned} \mathcal{O}'(u, v) &= \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp\left[i\pi\lambda d'(u^2 + v^2)\right] \\ \times \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x_h, y_h) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d'}(x_h^2 + y_h^2)\right] \exp\left[-i2\pi(x_h u + y_h v)\right] dx_h dy_h \end{aligned} \quad (\text{I.26})$$

Cette équation est similaire à une transformée de Fourier de la fonction

$$h(x_h, y_h) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d'}(x_h^2 + y_h^2)\right]$$

Donc

$$\mathcal{O}'(u, v) = \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp\left[i\pi\lambda d'(u^2 + v^2)\right]$$

$${}_x \mathfrak{F} \left\{ h(x_h, y_h) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda d} (x_h^2 + y_h^2) \right] \right\} \quad (I.27)$$

$\mathfrak{F}$  est le transformée de Fourier.

L'implémentation de l'équation de reconstruction (de Fresnel) nécessite sa transformation sous forme de sommes finies des variables discrétisées.

La fonction hologramme  $h(x_h, y_h)$  étant échantillonnée dans un rectangle de  $N \times M$  points (pixels), avec un pas de  $\Delta x$  et  $\Delta y$  (si on considère qu'il n'y a pas d'espace entre les pixels).

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

Et  $x_h = k \Delta x_h$  ;  $y_h = l \Delta y_h$ .

De même, les fréquences sont discrétisées sous forme :

$$u = k \Delta u \quad ; \quad v = l \Delta v$$

Avec la nouvelle fonction d'hologramme, l'équation (I.26) se présente sous forme de sommes finies:

$$\begin{aligned} O'(n, m) &= \frac{1}{i\lambda d'} \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} d' \right) \exp \left[ i\pi\lambda d' (n^2 \Delta u^2 + m^2 \Delta v^2) \right] \\ &\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} h(x_h, y_h) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x_h^2 + l^2 \Delta y_h^2) \right] \exp \left[ -i2\pi(k \Delta x_h k \Delta u + l \Delta y_h l \Delta v) \right] \end{aligned} \quad (I.28)$$

Et avec

$$\Delta u = \frac{1}{N \Delta x_h} ; \quad \Delta v = \frac{1}{M \Delta y_h}$$

On peut obtenir l'équation suivante :

$$\begin{aligned} O'(n, m) &= \frac{1}{i\lambda d'} \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} d' \right) \exp \left[ i\pi\lambda d' \left( \frac{n^2}{N^2 \Delta x_h^2} + \frac{m^2}{M^2 \Delta y_h^2} \right) \right] \\ &\times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} h(x_h, y_h) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x_h^2 + l^2 \Delta y_h^2) \right] \exp \left[ i2\pi \left( \frac{k n}{N} + \frac{l m}{M} \right) \right] \end{aligned} \quad (I.29)$$

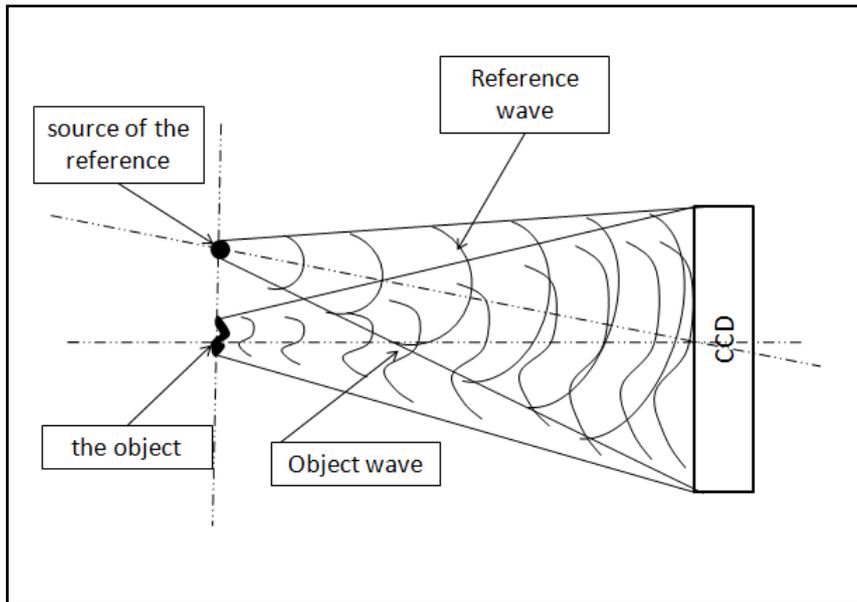
Cette dernière équation est l'équation de reconstruction par l'approximation de Fresnel discrétisée.

#### I.4.2 Reconstruction par transformée de Fourier

La reconstruction par la méthode de Fourier exige une onde d'enregistrement (de reconstruction) sphérique divergente venant d'un point source positionné au plan objet *Figure. I.8.*

L'onde de référence sphérique divergente  $E_{rs}(x_h, y_h)$  peut être exprimée par :

$$E_{rs}(x_h, y_h) = a_{rs} \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda d} (x_h^2 + y_h^2) \right] \quad (\text{I.30})$$



*Figure. I.8: Configuration de Fourier (holographie de Fourier lensless)*

On remplace cette onde de référence dans l'intégrale de Fresnel de l'équation (I.19) pour obtenir :

$$O'(u, v) = \frac{1}{i\lambda d'} \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} d' \right) \exp [i\pi\lambda d'(u^2 + v^2)]$$

$$\times \iint_{-\infty}^{+\infty} E_{rs}(x_h, y_h) h(x_h, y_h) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda d'} (x_h^2 + y_h^2) \right] \exp [-i2\pi(x_h u + y_h v)] dx_h dy_h$$

(I.31)

Si on remplace  $E_{rs}(x_h, y_h)$  avec sa valeur on trouve

$$O'(u, v) = \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp[i\pi\lambda d'(u^2 + v^2)]$$

$$\times \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x_h, y_h) a_{rs} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d'}(x_h^2 + y_h^2)\right] \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d'}(x_h^2 + y_h^2)\right] \exp[-i2\pi(x_h u + y_h v)] dx_h dy_h$$

(I.32)

on peut voir que la partie exponentielle sous l'intégrale est sous forme d'un conjugué complexe de l'onde de référence, donc leur produit est égale à 1 :

$$O'(u, v) = a_{rs} \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp[i\pi\lambda d'(u^2 + v^2)]$$

$$\times \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x_h, y_h) \exp[-i2\pi(x_h u + y_h v)] dx_h dy_h$$

(I.32)

$h(x_h, y_h) \exp[i2\pi(x_h u + y_h v)]$  est une transformée de fourier de  $h(x_h, y_h)$

Donc :

$$O'(u, v) = a_{rs} \frac{1}{i\lambda d'} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} d'\right) \exp[i\pi\lambda d'(u^2 + v^2)] \times \mathfrak{F}^1 \{h(x_h, y_h)\}$$

(I.33)

Cette équation de reconstruction par la transformée de Fourier est sous forme d'une simple transformée de fourier  $\mathfrak{F}^1$  de l'hologramme enregistré multiplié par une constante. La disparition de la distance  $d'$  dans l'intégrale fait perdre l'avantage de la focalisation numérique. Ce type d'holographie est appelé holographie de Fourier sans lentille, la focalisation numérique peut être obtenue en pratique par l'insertion d'une lentille convergente dans la trajectoire de l'onde objet.

### I.4.3 Reconstruction par convolution

La troisième possibilité pour reconstruire l'image de l'objet est basée sur la modélisation de l'équation de Fresnel-Kirchhoff sous forme d'un produit de convolution. En partant des équations ( ) et ( r ), l'intégrale de Fresnel-Kirchhoff s'écrit :

$$\mathbf{O}'(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_r(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}r)}{r} d\mathbf{x}_h d\mathbf{y}_h \quad (\text{I.34})$$

L'intégrale de diffraction devient un produit de convolution de l'onde de référence et de l'hologramme avec la fonction de transfert, l'onde reconstruite peut alors être écrite sous la forme suivante :

$$\mathbf{O}'(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_r(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \mathbf{g}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_h, \mathbf{y} - \mathbf{y}_h) d\mathbf{x}_h d\mathbf{y}_h \quad (\text{I.35})$$

Qui représente un produit de convolution de  $[\mathbf{E}_r(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)]$

avec  $\mathbf{g}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_h, \mathbf{y} - \mathbf{y}_h)$ , avec :

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{(\mathbf{x}_h - \mathbf{x})^2 + (\mathbf{y}_h - \mathbf{y})^2 + d^2}\right]}{\sqrt{(\mathbf{x}_h - \mathbf{x})^2 + (\mathbf{y}_h - \mathbf{y})^2 + d^2}} \quad (\text{I.36})$$

Si on considère que  $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) = \mathbf{g}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_h, \mathbf{y} - \mathbf{y}_h)$  l'intégrale de l'équation () devient

$$\mathbf{O}'(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [\mathbf{E}_r(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \times \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)] \otimes \mathbf{g}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \quad (\text{I.37})$$

⊗ Désigne le produit de convolution.

Selon les propriétés de convolution ; la transformée de Fourier de  $(\mathbf{E}_r \times \mathbf{h})$  convolué à  $\mathbf{g}$  est sous forme d'un produit simple de leurs transformées de Fourier :

$$\mathfrak{F}[(\mathbf{E}_r(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \times \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)) \otimes (\mathbf{g}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h))] = \mathfrak{F}[\mathbf{E}_r(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \times \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)] \times \mathfrak{F}[\mathbf{g}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)]$$

$$(\text{I.38})$$

Donc l'onde reconstruite  $\mathbf{O}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  peut être donnée par

$$\mathbf{O}'(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}[\mathbf{E}_r^*(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h) \times \mathbf{h}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)] \times \mathfrak{F}[\mathbf{g}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)]\} \quad (\text{I.39})$$

La discrétisation de cette formule de reconstruction nécessite la discrétisation de la fonction  $\mathbf{g}(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)$ , pour cette raison il suffi de remplacer la différence continue  $(\mathbf{x} - \mathbf{x}_h), (\mathbf{y} - \mathbf{y}_h)$  par les variable discrètes  $k\Delta\mathbf{x}_h$  et  $l\Delta\mathbf{y}_h$ , on obtient :

$$g(k, l) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{(k\Delta x_h)^2 + (l\Delta y_h)^2 + d^2}\right]}{\sqrt{(k\Delta x_h)^2 + (l\Delta y_h)^2 + d^2}} \quad (\text{I.40})$$

Avec  $l=0,1, 2, \dots, M-1$  ;  $k=0,1, 2, \dots, N-1$ .

La transformée de Fourier de la fonction  $g(x, y, x_h, y_h)$  peut être calculée analytiquement [Kreis T 130], elle est donnée sous forme de l'équation suivante :

$$G(fx_h, fy_h) = \frac{i}{\lambda} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1 - \lambda^2 fx_h^2 - \lambda^2 fy_h^2}\right] \quad (\text{I.41})$$

$fx_h$  et  $fy_h$  Sont des fréquences spatiales peuvent être données sous forme discrète par :

$$fx_h = \frac{n}{N\Delta x_h} \quad , \quad fy_h = \frac{m}{M\Delta y_h}$$

Donc la forme de  $G(fx_h, fy_h)$  devient :

$$G(n, m) = \frac{i}{\lambda} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda n}{N\Delta x_h}\right)^2 - \left(\frac{\lambda m}{M\Delta y_h}\right)^2}\right] \quad (\text{I.42})$$

Et la forme finale de l'onde reconstruite devient :

$$O(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}[E_r^*(x_h, y_h) \times h(x_h, y_h)] \times G\} \quad (\text{I.43})$$

### 1.3.2.2.1 L'effet des paramètres d'enregistrement sur l'image reconstruite :

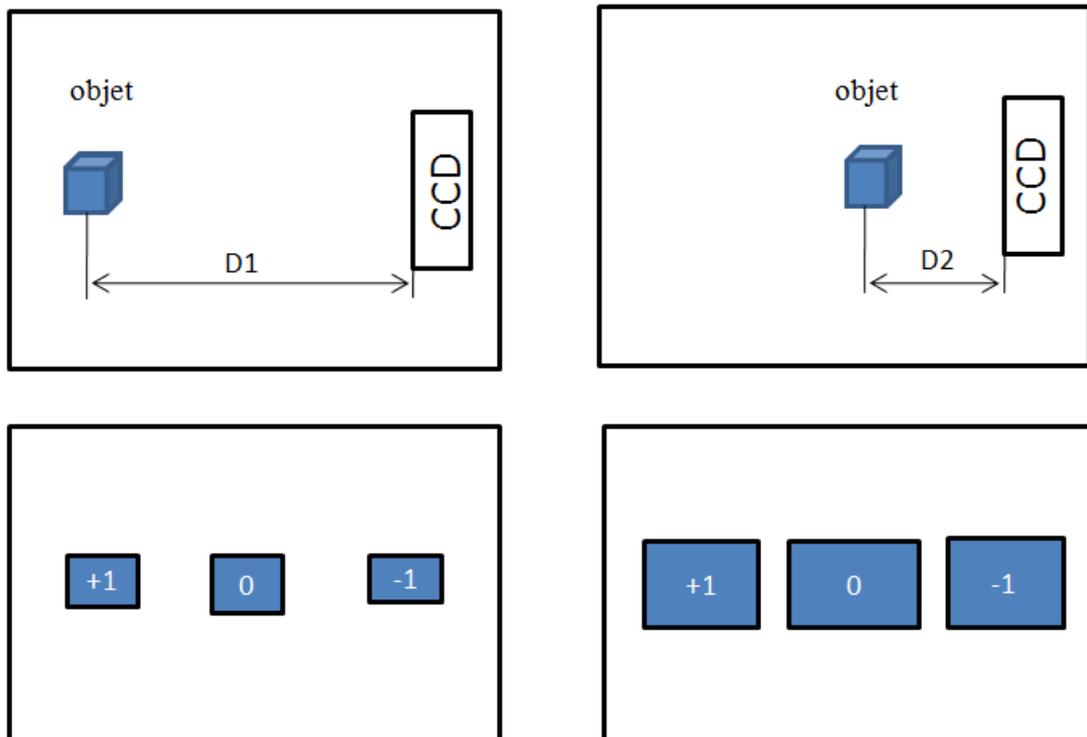
La reconstruction d'un hologramme numériquement à l'aide d'un ordinateur, donne une image de l'objet sous forme d'une distribution d'intensité contenant l'information d'amplitude et de phase qui sont principalement proportionnelles à l'angle entre les deux ondes enregistrées et la distance de l'objet par rapport au support d'enregistrement. La relation qui relie ces deux derniers paramètres est celle de l'échantillonnage (*équation I.7*).

#### 1.3.2.2.1.1 L'effet de la distance d'enregistrement :

La distance  $d$  entre la camera CCD et le plan objet est un paramètre important pendant l'enregistrement. Le choix de la distance d'enregistrement est en fonction de la réflectivité de l'objet, (on considère une source de puissance constante et l'enregistrement par réflexion), les objets qui ont une surface moins réfléchive ne peuvent pas être placés assez loin de la camera CCD. Par contre, les objets de haute réflexion peuvent être placés loin de la camera.

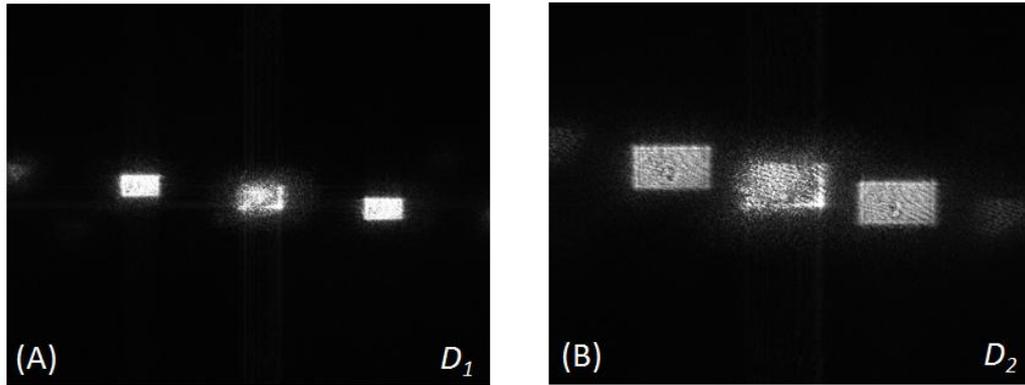
La distance d'enregistrement est choisie aussi en fonction de la condition d'échantillonnage de Shannon. Selon cette condition, l'enregistrement avec une camera CCD qui contient des pixels de petite dimension peuvent supporter des petites distances d'enregistrement. Par contre, les cameras qui contiennent des pixels de grande dimension nécessite de grandes distances d'enregistrement.

La figure (I.9) représente un enregistrement de deux hologrammes avec le même angle et deux différentes distances d'enregistrement  $d_1$  et  $d_2$  ( $d_1 > d_2$ ).



**Figure I.9:** l'effet de la distance d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $D_1 > D_2$ ).

Dans la figure (I.10, A et B), la taille de l'objet dans l'image reconstruite est proportionnelle à la distance d'enregistrement  $d$ . Les objets placés proche de la CCD apparaissent plus grands que les objets placés loin.

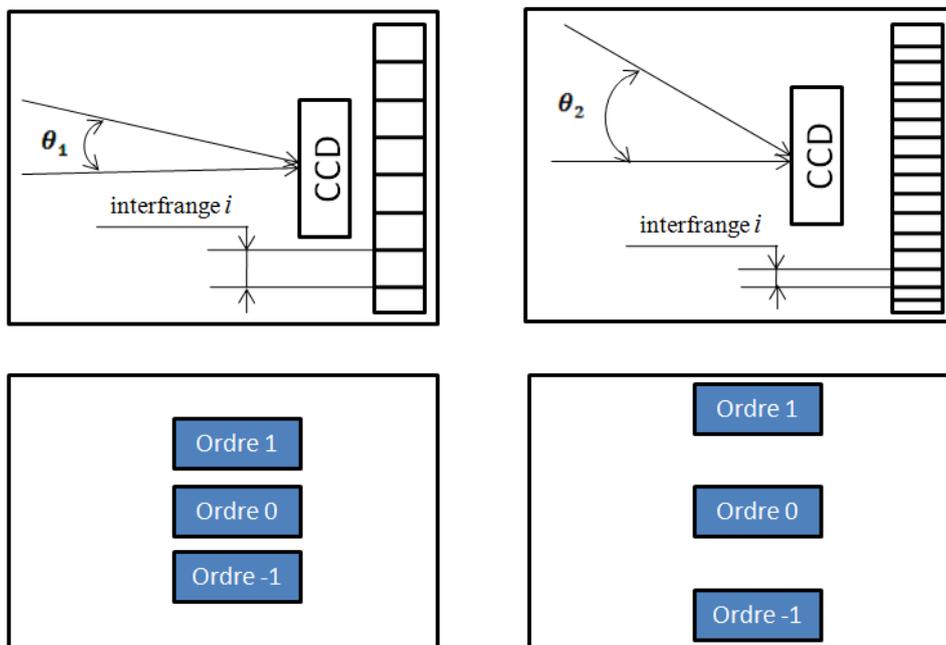


**Figure I.10 :** images reconstruites de deux hologrammes avec deux différentes distances montre l'effet de la distance d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $D_1 > D_2$ ).

Ainsi, la taille du pixel de la camera est un paramètre important pendant l'enregistrement, il commande la distance d'enregistrement et l'angle entre l'onde de référence et l'onde objet (configuration hors-axe) et par suite la taille de l'objet.

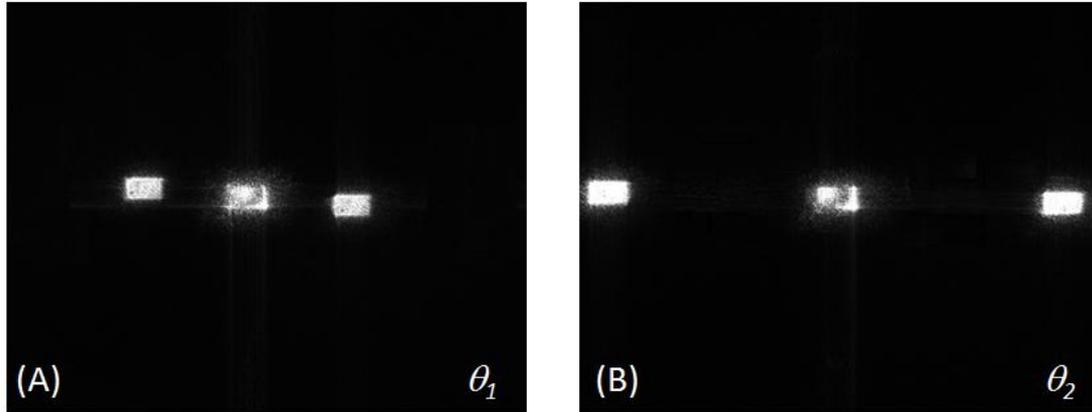
#### I.3.2.2.1.2 L'effet de l'angle d'enregistrement :

Avec la même distance d'enregistrement, le changement de l'angle d'enregistrement module la fréquence spatiale des franges qui contiennent l'information sur l'objet. Plus l'angle est important, plus la fréquence est élevée, donc l'espacement entre les ordres de diffraction pendant la reconstruction augmente avec l'augmentation de l'angle (figure I.11).



**Figure I.11:** Effet de l'angle d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $\theta_1 < \theta_2$ ).

La figure (I.12) montre des images reconstruites d'hologrammes enregistrés avec différents angles ( $\theta_1 < \theta_2$ ). On remarque que plus l'angle  $\theta$  est grand, plus les ordres sont séparés par contre la taille de l'image reste inchangée.



*Figure I.12: l'effet de l'angle d'enregistrement sur l'image reconstruite ( $\theta_1 < \theta_2$ ).*

L'angle d'enregistrement  $\theta$ , doit être inférieur à un angle limite dit  $\theta_{max}$  imposé par le théorème d'échantillonnage de Shannon (*équation I.7*).

D'après l'effet de la distance et de l'angle d'enregistrement sur l'image reconstruite, on peut conclure que les paramètres d'enregistrement doivent avoir des valeurs optimales.

### 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. A cet effet, nous avons rappelé le phénomène d'interférence et de diffraction, ainsi que quelques conditions pour l'enregistrement des hologrammes digitaux,

### I.5 References

- [1] A. W. Lohmann. Optische Einseitenbandübertragung angewandt auf das Gabor-Mikroskop. *Optica Acta*, 3:97–99, (1956).
- [2] B. R. Brown and A. W. Lohmann. Complex spatial filtering with binary masks. *Applied Optics*, 5(6):967–969, (1966).
- [3] A. W. Lohmann and D. P. Paris. Binary Fraunhofer holograms generated by computer. *Appl. Opt.*, 6:1739–1748, (1967).
- [4] J. W. Goodman and R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied Physics Letters*, 11:777–778, December (1967).
- [5] J. W. Goodman. Temporal filtering properties of holograms. *Appl. Opt.*, 6:857–859, (1967).
- [6] W. H. Lee. Sampled Fourier transform hologram generated by computer. *Appl. Opt.*, 9:639–643, (1970).
- [7] U. Schnars. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms. *Journ. Opt. Soc. Amer. A*, 11(7), (1994).
- [8] U. Schnars and W. Jüptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. *Appl. Opt.*, 33(2):179–181, (1994).
- [9] U. Schnars and W. Jüptner. Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography. *Appl. Opt.*, 33(20):4373–4377, (1994).
- [10] U. Schnars, Th. Kreis, and W. Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms: Reduction of the spatial frequency spectrum. *Opt. Eng.*, 35(4):977–982, (1995).
- [11] U. Schnars, Th. Kreis, and W. Jüptner. CCD-recording and numerical reconstruction of holograms and holographic interferograms. 2544, *Soc. Photo-Opt. Instr. Eng.*, (1995).
- [12] U. Schnars, and W. Jüptner, *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*, Springer, (2005).
- [13] Thomas Kreis, "Handbook of Holographic Interferometry, Optical and Digital Methods", WILEY—VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, (2005)

# CHAPITRE II

## Le Multiplexage en Holographie Numérique

---

### Contenu

---

II.1 Introduction .....	24
II.2 Condition principale du multiplexage .....	25
II.3 Différents types de multiplexage .....	25
II.3.1 Multiplexage spatial .....	26
II.3.2 Multiplexage angulaire.....	27
II.3.3 Multiplexage chromatique.....	28
II.3.4 Multiplexage par polarisation .....	28
II.3.5 Multiplexage hybride.....	29
II.3.5.1 Combinaison entre l'angulaire et le chromatique .....	30
II.3.5.2 Combinaison entre l'angulaire, le chromatique et par polarisation.....	31
II.4 Conclusion .....	33
II.5 Référence.....	33

---

**Résumé :** Dans le chapitre précédent nous avons rappelé les bases théoriques de l'holographie numérique. Nous avons présenté les processus d'enregistrement et de reconstruction d'un hologramme obtenu à l'aide d'un support optoélectronique. Les besoins en enregistrement de plusieurs hologrammes sur un même support ont incité les chercheurs du domaine à développer des techniques de multiplexage.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes techniques de multiplexage utilisées en holographie tels que, l'angulaire, le chromatique, de polarisation et le multiplexage combiné entre deux techniques ou plus.

---

### II.1 Introduction

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

On peut 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.

Il existe plusieurs techniques de multiplexage, parmi ces techniques, on peut citer les multiplexages spatial [2], angulaire [3-5], chromatique [6-9], de polarisation [10-12] et hybride [13,14]:

- Dans le premier type de multiplexage (spatial), on fait l'enregistrement de plusieurs ondes objet séparées spatialement et faisant le même angle avec l'onde de référence.
- Dans le deuxième type de multiplexage (angulaire), on fait l'enregistrement de plusieurs ondes objet séparées spatialement et faisant des angles différents avec l'onde de référence. Dans le troisième type de multiplexage (chromatique), on fait l'enregistrement de plusieurs ondes objet ayant différentes longueurs d'ondes.
- Dans le quatrième type de multiplexage (par polarisation), on fait l'enregistrement de plusieurs ondes objet avec différentes directions de l'état de polarisation.
- Dans le dernier type de multiplexage (hybride), on fait l'enregistrement de plusieurs ondes objets en combinant entre deux ou plus des techniques déjà citées.

Les techniques de multiplexage trouvent de nombreux domaines d'applications telles que la surveillance des changements dynamiques, les mesures de déformation et l'augmentation de l'ouverture numérique [14,15]. Pour ce dernier cas, on peut par exemple, éclairer différentes régions d'un objet étendu avec plusieurs longueurs d'onde pendant l'enregistrement et la synthèse des images reconstruites résoudra tout l'objet.

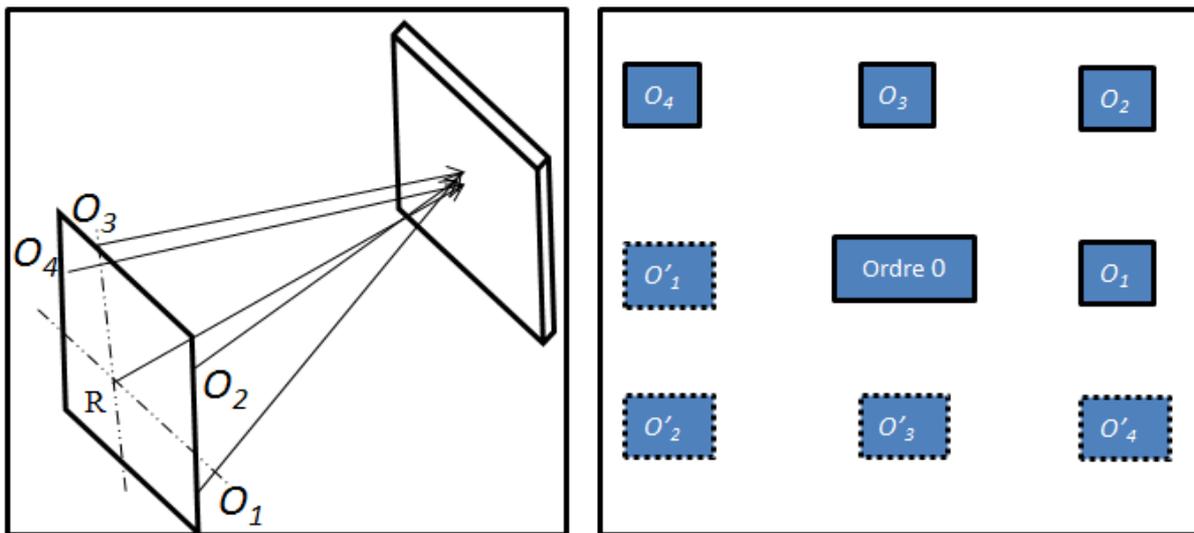
Parmi les avantages du multiplexage, on cite, la réduction du bruit et la correction des aberrations sur l'image reconstruite.

## II.2 Condition principale du multiplexage

Le multiplexage est conditionné par la largeur de la bande spectrale du capteur. Plus le nombre d'hologrammes multiplexés est élevé, plus une bande spectrale plus large est nécessaire.

En effet, le réseau de détecteurs doit contenir la largeur de la bande spectrale de tous les hologrammes enregistrés en même temps.

Le domaine spectral de Fourier sur la figure (II.1) montre comment tous les ordres des différentes ondes objet et l'ordre zéro sont situés dans un champ reconstruit unique.



*Figure II.1 : Multiplexage de quatre hologrammes sur le même support ; géométrie des ondes objet (à gauche), illustration de l'image des ondes objet sur l'image reconstruite (à droite)*

Le rapport  $Q$  entre la taille de la tache de diffraction limitée ( $\lambda D$ ) et le pas de pixel du détecteur ( $\Delta x, \Delta y$ ) est donné par.

$$Q = \frac{\lambda D}{\Delta x, \Delta y} \quad (\text{II.1})$$

Des valeurs élevées de  $Q$  permettent d'enregistrer un nombre élevé d'ondes objets.

## II.3 Différents types de multiplexage

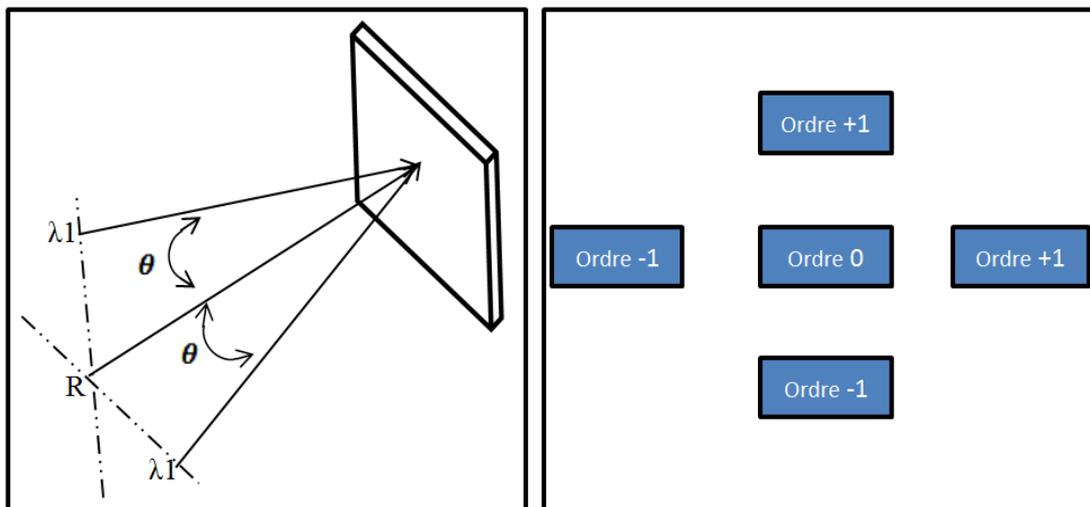
Comme souligné en introduction, différents types de multiplexage peuvent être utilisés.

### II.3.1 Multiplexage spatial

Le multiplexage spatial est basé principalement sur l'enregistrement de plusieurs hologrammes sur le même support d'enregistrement avec le même angle d'enregistrement, et une orientation différente des franges. Cette différence d'orientations permet de séparer spatialement les ordres de diffraction dans le domaine spectral au cours de la reconstruction.

Le nombre des hologrammes multiplexés dépend de la taille de l'objet enregistré, ainsi que de la taille du support d'enregistrement (CCD) et sa largeur de pixel. Le multiplexage spatial peut être utilisé pour résoudre le problème de la limite de taille sur l'objet imposée par le théorème d'échantillonnage de Shannon. Les ondes objets enregistrées peuvent interférer avec une seule onde de référence ou plusieurs.

La figure (II.2) montre un multiplexage spatial de deux hologrammes où les deux ondes objets ont une même longueur d'onde, un même angle d'enregistrement et une seule onde de référence mais avec une orientation différente des franges. A la reconstruction, les ordres de diffraction sont séparés spatialement.



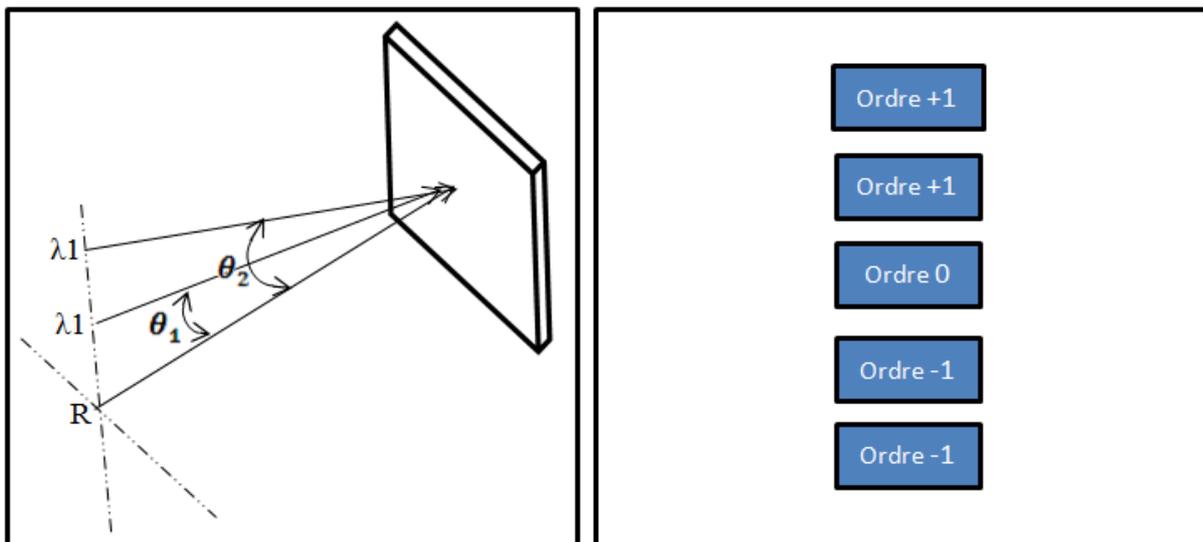
**Figure II.2 :** Multiplexage spatial de deux hologrammes avec la même longueur d'onde et un même angle d'enregistrement  $\theta$ ; illustration des ondes objets (à gauche), positionnement des ordres à la reconstruction (à droite).

Ce type de multiplexage a été utilisé en premier temps comme solution du recouvrement des ordres en holographie en-ligne, puis il a été utilisé pour enregistrer plusieurs ondes objet sur le même capteur. Ce type de multiplexage est considéré comme étant le plus simple par rapport aux autres types.

### 2.3.2 Multiplexage angulaire

Dans le multiplexage angulaire, l'hologramme est créé 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. Cette technique peut être combinée avec la technique de multiplexage chromatique ou par polarisation.

La figure (II.3) 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.3 :** 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).

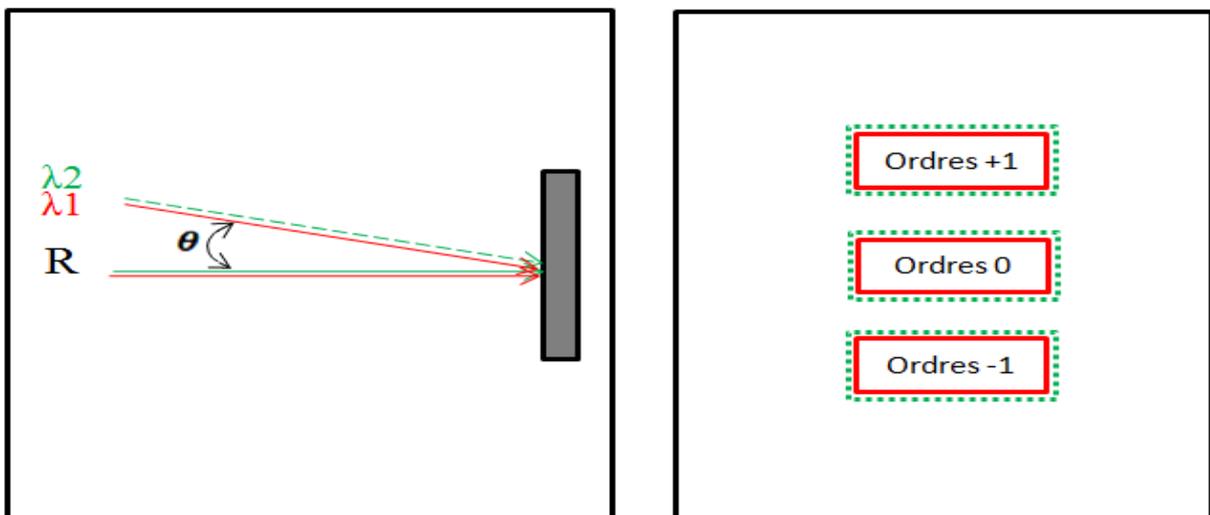
Le multiplexage angulaire est beaucoup plus utilisé dans le cas des objets non étendus et des angles entre les ondes faibles.

Cette technique est généralement combinée au multiplexage chromatique ou spatial pour enregistrer différentes couleurs sur le même support (par exemple : les billets d'argent et les cartes de paiement).

### II.3.3 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 permet d'enregistrer les deux hologrammes (ondes objets) sur le même support d'enregistrement sans aucun chevauchement.

La figure (II.4) 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.4 : 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).*

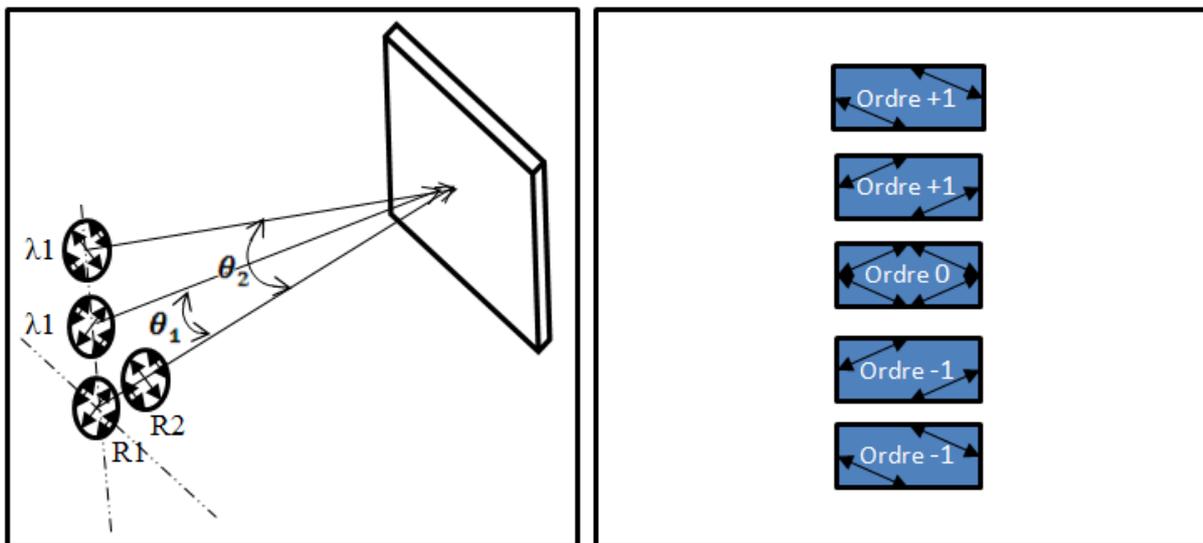
Parmi les applications de cette technique, on peut citer la visualisation en holographie couleur par l'utilisation de trois longueurs d'ondes au cours de l'enregistrement (rouge, vert et bleu).

### II.3.4 Multiplexage par polarisation

La technique de multiplexage par polarisation, est l'enregistrement de plusieurs hologrammes avec des différentes directions de l'état de polarisation des ondes objets et de référence. Le but du changement de l'état de polarisation est d'éviter l'interférence entre les ondes objets à

la reconstruction. Cette technique permet de multiplexer au moins deux hologrammes avec deux états de polarisation orthogonale.

La figure (II.5) montre la géométrie de deux ondes objet avec des directions différentes de l'état de polarisation au cours de l'enregistrement. Les deux ondes ont la même longueur d'onde et différents angles. A la reconstruction, les ordres sont séparés spatialement à cause de la différence des angles et ne présentent aucun chevauchement (pas d'interférence entre les mêmes longueurs d'ondes) à cause de la différence de l'état de polarisation.



*Figure II.5 : Multiplexage par polarisation entre deux hologrammes avec la même longueur d'onde  $\lambda$  et deux orientations différentes ; illustration des ondes objets (à gauche), positionnement des ordres à la reconstruction (à droite).*

Cette technique est applicable si on veut faire le multiplexage avec la même longueur d'onde ou de connaître l'effet de l'état de polarisation sur l'objet.

### II.3.5 Multiplexage hybride

Avec les techniques de multiplexage citées précédemment, on peut réaliser différentes techniques supplémentaires en combinant deux ou plusieurs de ces techniques.

II.3.5.1 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 vert  $\lambda_2$ ) simultanément sur le même capteur CCD. Chaque onde contient une information différente par rapport à l'autre. L'utilisation de deux longueurs d'onde à l'enregistrement, produit à la reconstruction des ordres nets. Puisque on évite le chevauchement entre les ordres créé par interférences supplémentaire entre les ordres à la reconstruction dans le cas d'utilisation d'une seule longueur d'onde.

D'après la figure (II.6.a), 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 références).

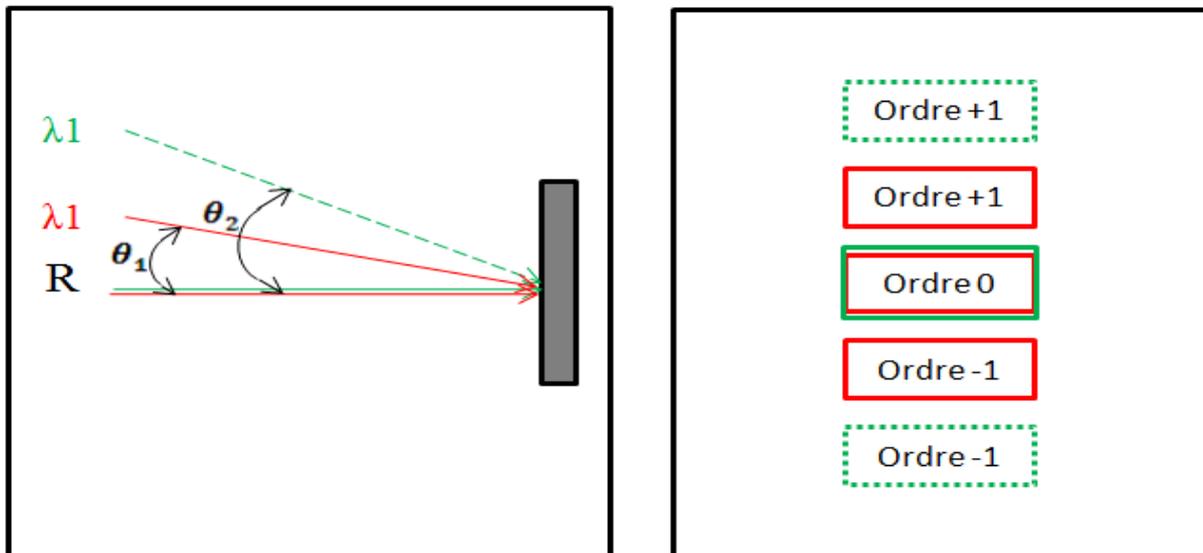


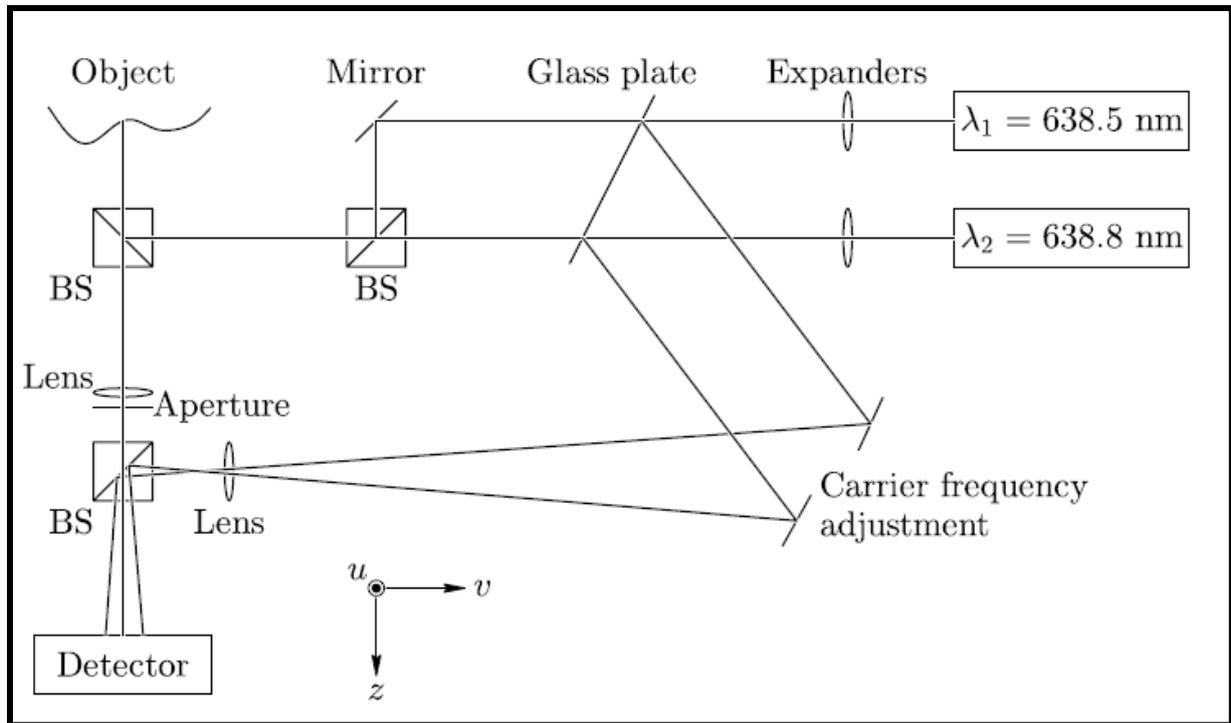
Figure II.6.a) : Multiplexage combiné entre l'angulaire et le chromatique.

Bergström et all [8] ont utilisé ce type de multiplexage, pour visualiser la forme d'un objet métallique et mesurer ses dimensions.

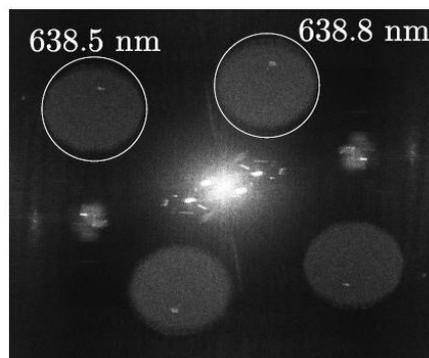
L'objet mesuré est un demi-cylindre ayant un diamètre de 48 mm qui présente trois traces de profondeurs 1, 2 et 3 mm, respectivement, la section mesurée est de 11,6 mm × 11,6 mm. L'éclairage est réalisé à l'aide de deux diodes lasers de longueurs d'ondes  $\lambda_1=638,5\text{nm}$  et  $\lambda_2= 638,8 \text{ nm}$ .

La figure (II.6.b) schématise la configuration du montage utilisé, les faisceaux de référence sont obtenus par réflexion à l'aide d'une lame en verre. L'angle d'incidence de chacun des

faisceaux de référence sur le détecteur est contrôlé à l'aide d'un miroir séparé. Ces angles sont réglés de telle sorte que les spectres spatiaux pour les deux longueurs d'onde peuvent être séparés. Le spectre de Fourier de l'hologramme numérique est représenté sur la Figure(II.6.c), où chacune des longueurs d'onde est également indiquée.



*Figure II.6.b) : Montage expérimental d'un multiplexage combiné [8].*



*Figure II.6.c) : Spectre de Fourier de l'hologramme [8].*

### II.3.5.2 Combinaison entre l'angulaire, le chromatique et par polarisation

La combinaison entre plus de deux technique de multiplexage rendre l'ajustage du montage optique d'enregistrement plus difficile, la figure(II.7.a) montre une combinaison entre l'angulaire, le chromatique et par polarisation, par cette effet il est nécessaire d'introduire un

## CHAPITRE II : Le multiplexage en holographie numérique

angle entre les ondes objet enregistré et d'utilisé deux Laser de différente longueur d'onde, chaque longueur d'onde est divisée en deux ondes objet de deux directions d'état de polarisation différente.

Yongli Wu et all [13], et pour le bute d'éclairé et enregistré différente région de l'objet utilisent ce type de multiplexage, chromatiquement ils ont utilisé deux Laser différent (rouge a 632,8 nm et vert a 532 nm) figure (II.7.b), chaque ondes des deux Laser utilisé a été divisé en deux ondes pour avoir deux direction d'état de polarisation (deux direction d'état de polarisation orthogonale).

La camera CCD reçoit quatre faisceaux d'objet et quatre faisceaux de références, a la reconstruction la distribution des fréquences et montré sur la figure II.7.c.

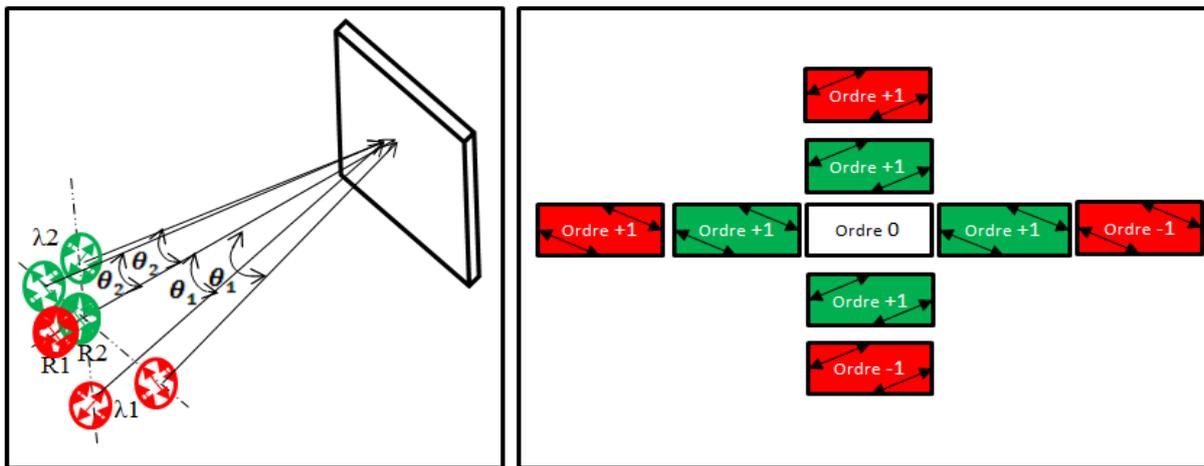


Figure II.7.a : multiplexage combiné entre l'angulaire, le chromatique et par polarisation

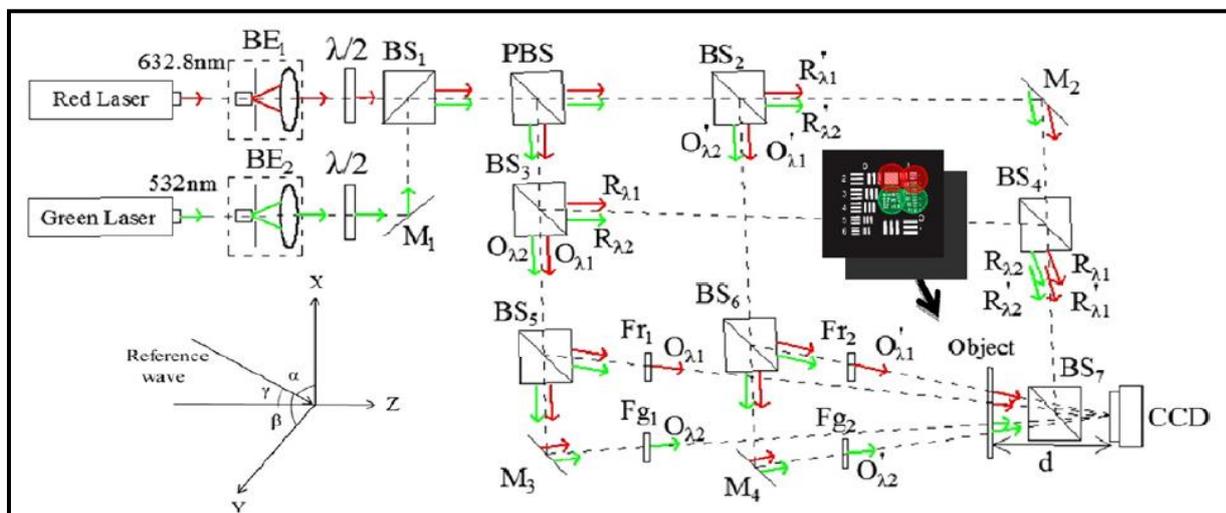


Figure II.7.b : Montage expérimentale d'enregistrement d'un hologramme multiplexé [13]

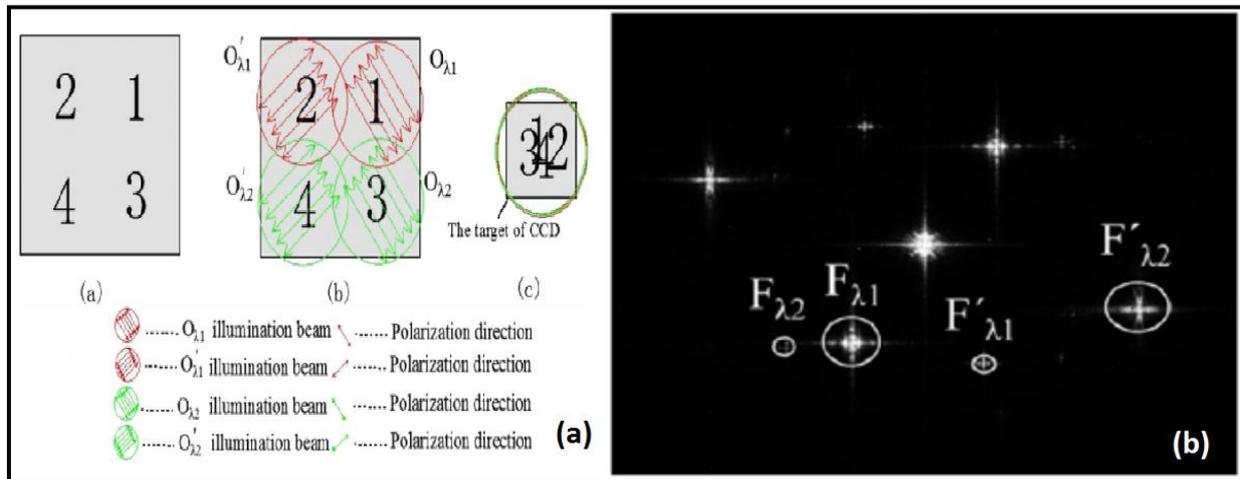


Figure II.7.c : Image de l'objet holographié et la distribution des fréquences à la reconstruction [13]

D'après cette figure on peut voir que l'objet est éclairé par quatre faisceaux, deux rouges avec deux états de polarisations orthogonales et deux verts avec deux états de polarisations orthogonales ainsi, l'utilisation des états de polarisation orthogonale permet d'éviter l'apparition des termes d'interférence supplémentaires au cours de la reconstruction.

## II.4 Conclusion

Nous avons, dans ce chapitre, traité quatre techniques de multiplexage tel que le spatiale, l'angulaire, le chromatique et par polarisation. Puis deux autres technique de multiplexage combiné ont été étudié, c'est technique ont été exploité en chapitre 3 pour le bute d'enregistré des hologrammes multiplexé de  $\mu$ particules.

Le bute le plus important pour utiliser le multiplexage en holographie numérique c'est l'augmentation du champ d'étude de l'objet par l'enregistrement de plusieurs région du même objet ainsi que l'augmentation de la résolution sur la profondeur.

### II.5 References

- [1] M Paturzo, P. Memmolo, L Miccio, A. Finizio, P. Ferraro, ATulino, and B. Javidi, "Numerical multiplexing and demultiplexing of digital holographic information for remote reconstruction in amplitude and phase," *Opt Lett* 33, 2629-2631 (2008).
- [2] P. Picart, E. Moisson, and D. Mounier. Twin sensitivity measurement by spatial multiplexing of digitally recorded holograms. *Appl. Opt.*, 42 1947–1957, (2003).
- [3]. 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," *Opt.Express* 17, 8709-8718 (2009).
- [4] Yuan C, Zhai H and Liu H Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis *Opt. Lett.* 33 2356–8 (2008).
- [5] YUAN, Caojin, ZHAI, Hongchen, et LIU, Haitao. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis. *Optics letters*, 33, 20, 2356-2358.(2008).
- [6] Wang X and Zhai H Pulsed digital micro-holography of femto-second order by wavelength division multiplexing *Opt. Commun.* 275 42–5 (2007).
- [7]Kuhn J, Colomb T, Montfort F, Charrière F, Emery Y, Cuche E, Marquet P and Depeursinge C Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition *Opt. Express* 15 7231–42 (2007).
- [8] Bergström, P., Khodadad, D., Hällstig, E., &Sjödahl, M. Dual-wavelength digital holography: single-shot shape evaluation using speckle displacements and regularization. *Applied optics*, 53(1), 123-131 (2014).
- [9] 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).
- [10] Yuan C, Situ G, Pedrini G, Ma J and Osten W Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing *Appl. Opt.* 50 B6–11 (2011).
- [11] Colomb T, Dahlgren P, Beghuin D, Cuche E, Marquet P and Depeursinge C Polarization imaging by use of digital holography *Appl. Opt.* 41 27–37 (2002).

[12] Wang J, Zhao J, Qin C, Di J, Rauf A and Jiang H Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion Opt. Lett. 37 1211–3 (2012).

[13] Wu, Yongli, et al. "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).

[14] S. T. Thurman, and A. Bratcher, "Multiplexed synthetic-aperture digital holography," *Appl. Opt.* 54, 559-568 (2015).

[15] YUAN, Caojin, ZHAI, Hongchen, et LIU, Haitao. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis. *Optics letters*, 33,2356-2358 (2008).

# CHAPITRE III

## Application du multiplexage angulaire et chromatique à l'holographie des particules

---

### Contenu

---

III.1	Introduction .....	37
III.2	Application du multiplexage angulaire à l'holographie des particules : .....	38
III.2.1	Holographie digitale hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence : .....	39
III.2.2	Holographie digitale hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence appliquée à la veine : .....	40
III.2.3	Holographie digitale hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence réadaptée : ...	42
III.2.4	Holographie digitale hors-axe à deux vues sans faisceau de référence : .....	43
III.2.4.1	Validation expérimentale : .....	45
	Cas d'un objet statique en forme de L : .....	45
	Cas d'un objet dynamique (particules) .....	46
III.2.4.2	Application de la technique à la veine à eau : .....	52
III.3	Application du multiplexage angulaire et chromatique à l'holographie des particules .....	58
III.3.1	Holographie digitale hors axe à quatre vues .....	58
III.3.1.1	Validation de la technique : .....	58
III.3.1.1.1	Holographie digitale hors axe à quatre vues avec référence .....	58
III.3.1.1.2	Holographie digitale hors axe à quatre vues sans référence .....	60
III.4	Conclusion .....	69
III.5	Référence : .....	70

---

**Résumé :** Si dans le premier chapitre on a présenté les différentes notions de base sur l'holographie numérique, nous avons par contre présenté dans le deuxième chapitre les techniques de multiplexage, soit le multiplexage unique soit combiné.

Le présent chapitre sera dédié aux différents travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette thèse. En vue de visualiser et localiser les particules de type traceur, les techniques de multiplexage angulaire à deux vues ont été appliquées. Une nouvelle technique dans laquelle le faisceau de référence a été supprimé a été développée. Pour augmenter la zone de travail, nous avons combiné entre le multiplexage angulaire est le chromatique.

---

### III.1 Introduction

Comme décrit au premier chapitre, l'holographie numérique est une technique utilisée pour caractériser et visualiser différents types (nature) d'objets. Elle est connue par son aptitude à enregistrer l'amplitude et la phase de l'onde objet holographiée, d'où l'aspect tridimensionnel (3D) des images reconstruites. C'est pour cette raison que l'holographie a été introduite comme technique de caractérisation et de visualisation des écoulements à l'aide des particules traceur. C'est ce qu'on appelle communément la DHPIV (Digital Holographic Particle Image Velocimetry)[1-4].

La configuration hors-axe présente l'avantage de donner des images réelle et virtuelle séparées spatialement[5]. Seulement, à la reconstruction, la profondeur de focalisation est relativement élevée, ce qui perturbe la localisation exacte des particules dans le volume d'étude.

D'autre part, le suivi de ce type de particules sur de grosses installations telles que sur la veine à eau du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon (LMFA-ECL) en France, nécessite des précautions supplémentaires. Pour résoudre, en partie, ces problèmes, le recours au multiplexage devient une solution plus qu'adéquate.

C'est ainsi que dans le chapitre (2) on a présenté les différentes techniques de multiplexage utilisé en holographie numérique tel que le spatial, l'angulaire, le chromatique, par polarisation et le combiné[6-12].

Son aptitude à enregistrer plusieurs hologrammes de manière simultanées sur le même support d'enregistrement permet de visualiser les particules sous différentes vues et pouvoir ainsi les localiser avec une précision acceptable.

Par contre, la limitation en résolution spatiale et la complexité des montages optiques constituent les défis majeurs auxquels il faut faire face.

A cet effet des travaux ont été effectués dans le but de trouver une technique qui répond à toutes ces exigences, particulièrement en matière d'optimisation et de miniaturisation du montage optique[13,14], au niveau de la distance et l'angle d'enregistrement d'une part et d'autre part de couvrir le maximum de volume d'étude afin d'arriver à caractériser au mieux l'objet d'étude [15].

Le travail de Bouchrit et al. [16] a porté sur le développement d'une technique de DHPIV à deux vues croisées utilisant deux faisceaux objet et un seul faisceau de référence a constitué la base à notre étude.

Pour réduire la distance d'enregistrement qui était de l'ordre de trois (3) mètres et surmonter le problème d'ajustage, nous avons proposé une configuration d'un montage optique du DHPIV à deux vues sur laquelle la distance d'enregistrement est réduite jusqu'à 65cm. Et l'ajustage du montage optique est relativement simple par rapport au montage de la DHPIV à deux vues. Cette réduction brutale de la distance est due à une suppression du faisceau de référence dans le montage, et les deux vues ont été enregistrées sans faisceau de référence, à cet effet l'ajustage optique du montage sera plus simple[17].

A cause des exigences d'étudier des volumes d'étude et des objets avec des dimensions importantes, des techniques de multiplexage pour une synthèse d'ouverture ont été appliquées [18-20]. Pour cette raison nous avons proposé un autre montage où le multiplexage chromatique est associé au multiplexage angulaire pour avoir une zone de test assez grande. Dans ce montage nous avons utilisé deux lasers (rouge à 632,8 nm et vert à 532 nm), les deux lasers éclairent deux différentes zones du même volume de travail qui sont des particules en polymère de taille moyenne de 200  $\mu\text{m}$ .

### **III.2 Application du multiplexage angulaire à l'holographie des particules :**

Dans le cadre d'un projet de mise en place d'une métrologie optique de visualisation et de suivi des particules de type traceurs entre l'Université de Sétif 1 et le Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique à l'Ecole Centrale de Lyon, et dans le but de minimiser l'erreur sur les positions des particules dans leur volume tridimensionnel, une technique de visualisation basée sur le multiplexage angulaire a été développée. Dans cette technique, Boucherit et al. ont réussi à utiliser deux faisceaux objets croisés et un seul faisceau de référence pour visualiser les particules dans leur volume par scanning sur les deux vues.

Il est à noter que les travaux en développement sont réalisés sur une fiole en quartz de 1x1x5  $\text{cm}^3$  remplie d'eau et les particules sont mises en mouvement soit par chute gravitationnelle soit par agitation à l'aide d'un microaimant (figure III.1). Les travaux sont ensuite effectués à échelle expérimentale réelle sur la veine à eau du LMFA (figure III.2).

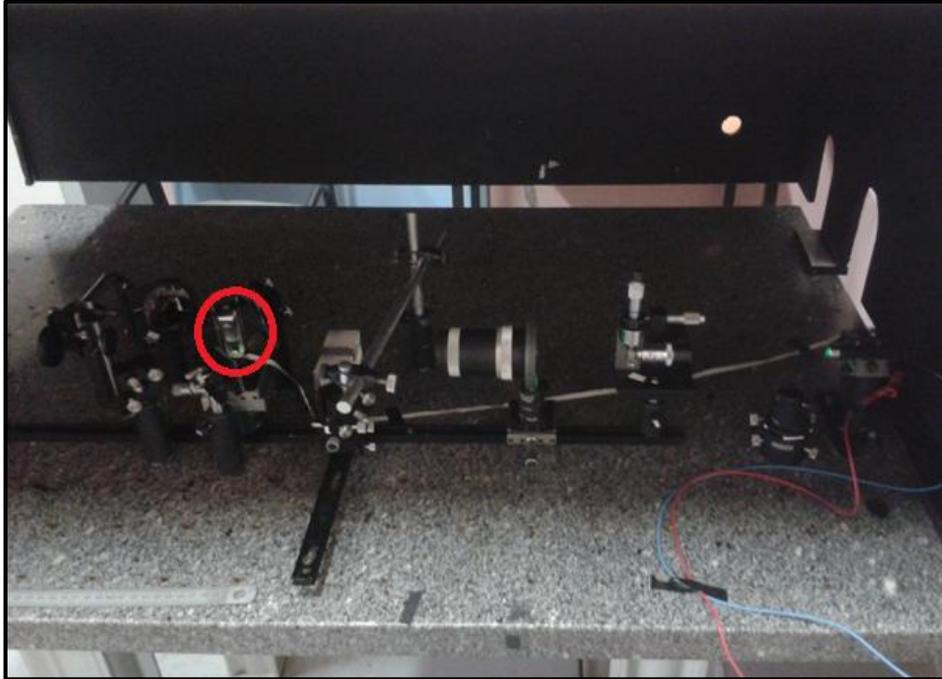


Figure III.1 : Photo sur le montage de développement (avec fiole en quartz).

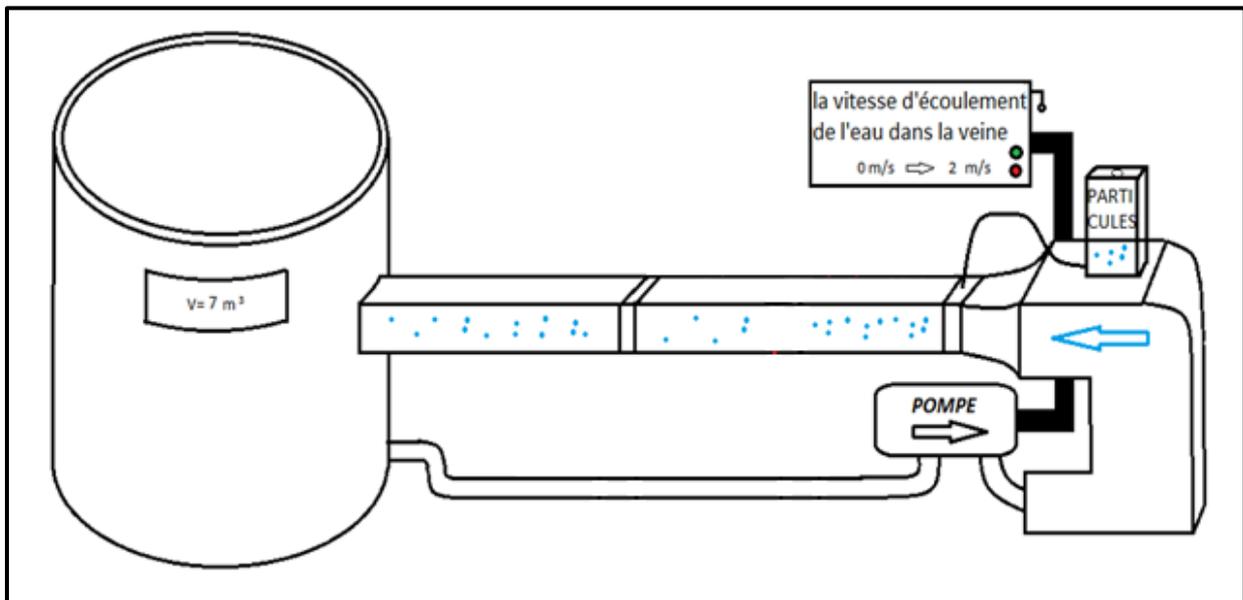


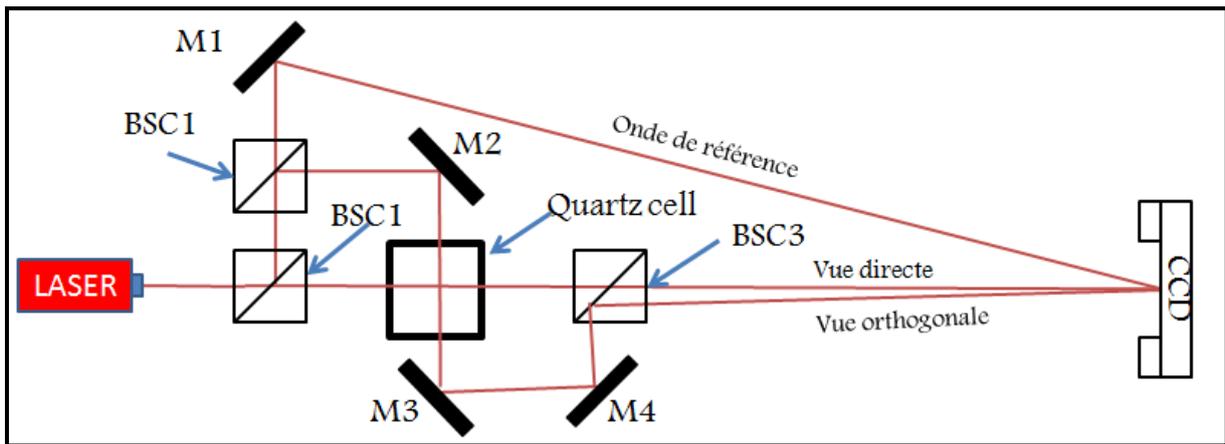
Figure III.2 : Schéma de l'installation de la veine à eau du LMFA.

### III.2.1 Holographie digitale hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence :

La configuration de la figure (III.3) montre un schéma du montage d'holographie digitale à deux vues avec un seul faisceau de référence proposé par Bouchrit et al [16]. Dans cette configuration, les vues directe et orthogonale interfèrent avec le seul faisceau de référence sur

la surface du capteur pour former l'hologramme. La superposition de ces trois faisceaux sur le support d'enregistrement (CCD) nécessite une grande distance d'enregistrement imposée par la condition d'échantillonnage de Shannon, donc un espace de travail important.

Dans cette configuration la distance d'enregistrement et de reconstruction est aux alentours de 3m pour les deux vues. Une telle grande distance d'enregistrement a été imposée par le nombre de faisceaux utilisés et la taille de pixels de la camera utilisée. Dans cette configuration, la taille de pixel était de  $9\mu\text{m}$ , est selon le théorème d'échantillonnage l'augmentation de la taille de pixel engendre une réduction de l'angle d'enregistrement donc des distances d'enregistrement plus grandes.



**Figure III.3 :** Configuration d'holographie digitale à deux vues avec un seul faisceau de référence, utilisée par Boucherit et al.

La distribution d'intensité enregistrée par la camera ( $I_{CCD}$ ) est donnée par :

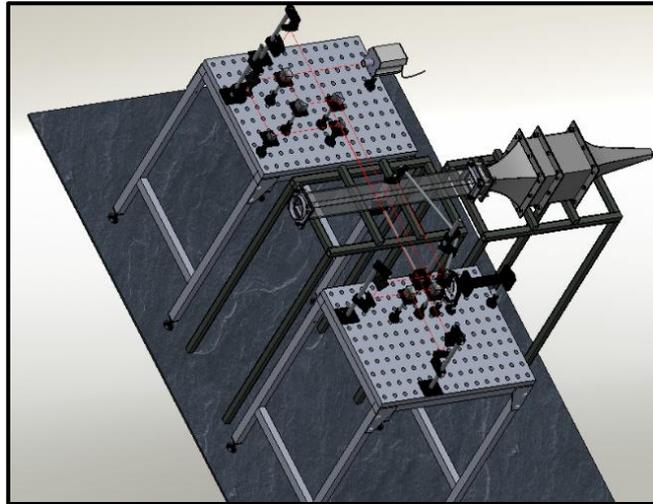
$$\begin{aligned}
 I_{CCD} &= (D+O+R)^2 = (D+O+R)(D+O+R)^* \\
 &= \underbrace{(D^2+R^2+R^2)}_{\text{Ordre zéro}} + \underbrace{(D O^* + D^* O)}_{\text{Interférence entre L'onde directe et orthogonale}} + \underbrace{(D+O)R^*}_{\text{Image réelle}} + \underbrace{(D+O)^* R}_{\text{Image virtuelle}}
 \end{aligned} \tag{III.1}$$

D, O et R sont respectivement les ondes de la vue directe, orthogonale et de référence.

### III.2.2 Holographie digitale hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence appliquée à la veine :

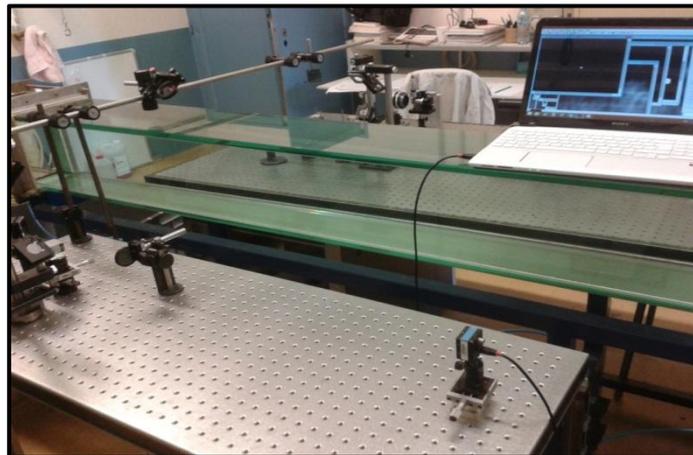
En adaptant la configuration à deux vues avec un seul faisceau de référence, Bouamama et al ont trouvé beaucoup de difficultés tant sur le plan optique que sur le plan mécanique.

Le schéma de conception de ce montage (figure III.4) montre l'utilisation de deux tables optiques de part et d'autre de la veine, en plus le nombre conséquent de composants optiques et leurs supports mécaniques pour manipuler les faisceaux.



*Figure III.4 : Schéma de conception du montage sur la veine à eau.*

La figure III.5 montre une vue photographique sur le montage sur la veine.



*Figure III.5 : Photographie sur le montage sur veine réelle.*

L'utilisation de deux tables séparées augmente l'effet des vibrations tout en sachant que le milieu de travail lui-même est sources de vibrations par excellence (pompe d'alimentation en eau plus les mouvements de l'eau dans les différents compartiments de l'installation). Ces motifs ont fait que les hologrammes enregistrés n'étaient pas fructueux.

### III.2.3 Holographie digitale hors-axe à deux vues avec un seul faisceau de référence réadaptée :

Dans le but de réduire la grande distance d'enregistrement de la configuration à deux vues avec un faisceau de référence (figure III.3), nous avons proposé une amélioration sur cette dernière.

La reconfiguration proposée (figure III.6) permet de réduire la distance à moins d'un mètre. Les hologrammes ont été enregistrés à seulement 65cm. En plus, cette configuration permet l'enregistrement (et la reconstruction) des deux vues avec sensiblement la même distance (figure III.7).

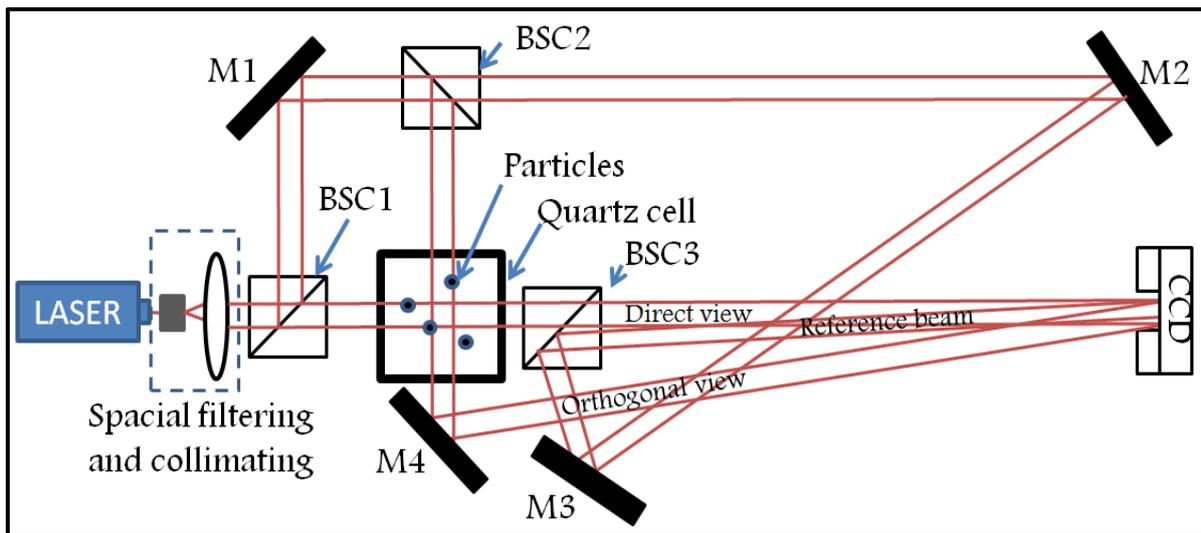


Figure III.6 : Montage expérimental d'un multiplexage angulaire avec faisceau de référence adapté.

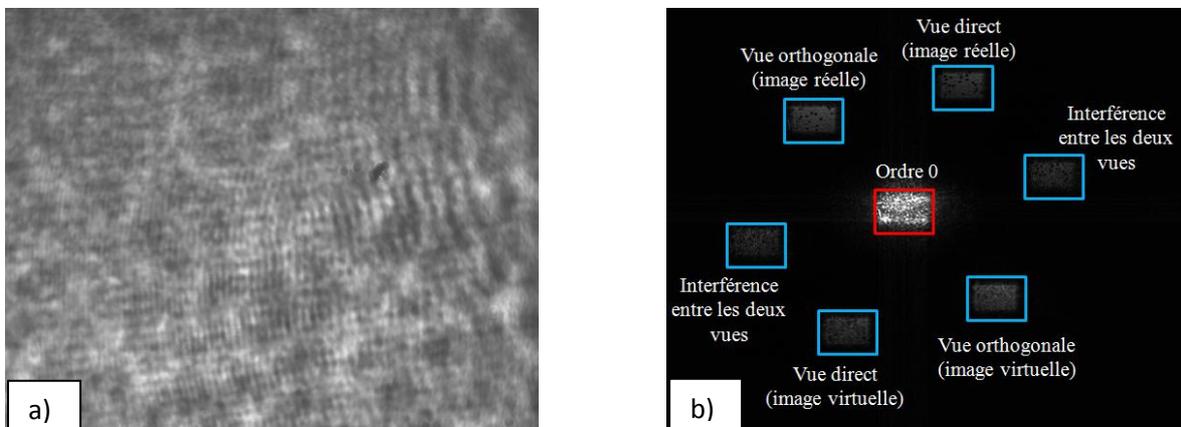


Figure III.7 : a) Hologramme enregistré à l'aide du montage de la figure.III.6, b) son image reconstruite

La figure (III.7.a) montre l'hologramme enregistré par le montage de la figure (III.6) ainsi que son image reconstruite (figure.III.7.b), cette figure présente deux ordres de diffraction +1 de la vue directe et orthogonale, et deux autres ordres -1 des mêmes vues.

Le troisième ordre de diffraction signifie une interférence entre les deux vues, il est mentionné dans l'équation (III.1), l'image agrandie des deux vues (directe et orthogonale) est illustrée sur la figure (III.8). Les vues apparaissent claires avec la même distance de reconstruction.



*Figure III.8 : Image agrandie des deux vues de l'hologramme enregistré  
a) la vue direct, b) la vue orthogonale.*

L'amélioration portée sur le montage de Boucherit et al. et malgré l'avantage de réduction considérable sur et la distance de reconstruction des deux vues, reste assujettie à un ajustage optique relativement compliqué et par suite son adaptation à la veine est inadéquate.

Pour surmonter le problème d'ajustage et minimiser le nombre de composants optiques et mécaniques, nous avons proposé une deuxième configuration, dans laquelle le nombre de faisceaux qui interfèrent sur la CCD est réduit.

#### **III.2.4 Holographie digitale hors-axe à deux vues sans faisceau de référence :**

La figure (III.9) présente une nouvelle conception de la configuration hors-axe à deux vues orthogonales. Cette configuration n'utilise pas de faisceau de référence autonome. La suppression du faisceau de référence nous permet de surmonter le problème d'ajustage imposé par les montages proposés précédemment et en plus nous aurons l'avantage de réduire considérablement les distances d'enregistrement d'une part et d'autre part de pouvoir les équilibrer sur deux vues.

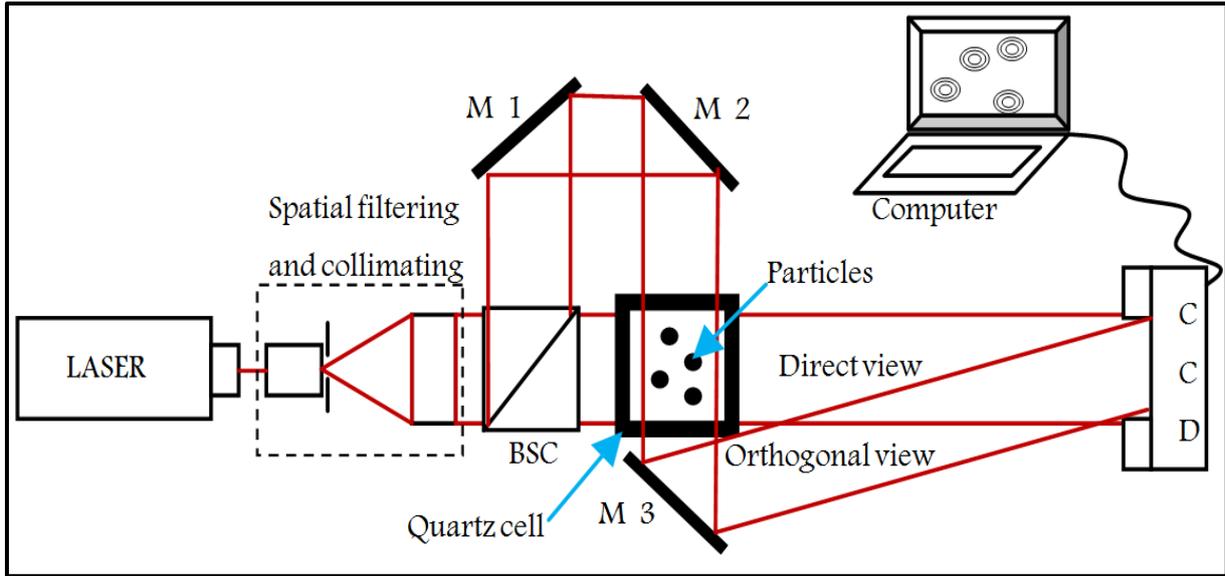


Figure III.9 : Montage expérimental d'holographie digitale à deux vues sans faisceau de référence.

D'après l'équation de l'intensité (III.1) on peut écrire l'intensité enregistrée par la CCD dans cette configuration comme suit :

$$\begin{aligned}
 I_{CCD} &= (D+O)^2 = (D+O) (D+O)^* \\
 &= \underbrace{D^2+O^2}_{\text{Ordre zéro}} + \underbrace{D O^*}_{\text{Vue directe}} + \underbrace{O D^*}_{\text{Vue orthogonale}}
 \end{aligned}
 \tag{III.2}$$

Où  $I_{CCD}$  est l'intensité reçue sur la camera CCD et D, O sont respectivement les ondes de la vue directe et orthogonale.

Cette équation montre que l'information sur les deux vues est enregistrée seulement avec deux faisceaux qui sont considérés à la fois comme faisceaux objets et faisceaux de référence. Donc, quand l'un agit comme faisceau objet l'autre agit comme faisceau de référence. A la reconstruction, l'hologramme enregistré doit être éclairé numériquement avec une des deux ondes, soit directe soit orthogonale.

Le montage proposé comporte un laser (He-Ne) de 632.8 nm de longueur d'onde, une fiole en quartz et une camera CCD de type SONY 07D model XCD de taille de pixel de 4.65\*4.65  $\mu\text{m}^2$ , la résolution maximale de la CCD est de 1024x940 pixels.

Comme il est montré sur la figure (III.9) le faisceau issu du laser est filtré par un objectif de microscope ( $\times 40$ , 0,65) et un filtre spatial de 15  $\mu\text{m}$  de diamètre, puis collimaté par un objectif photographique contenant un diaphragme pour limiter la taille du faisceau.

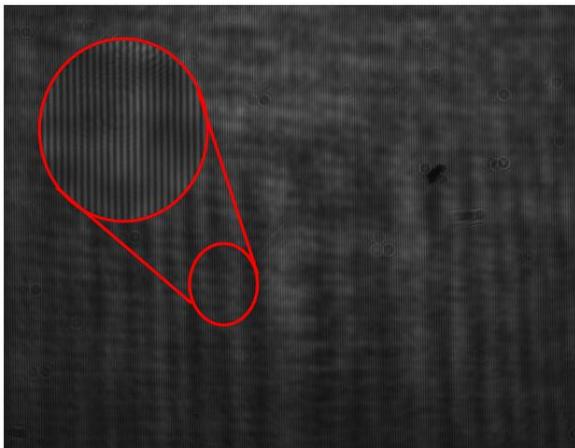
La vue directe est créée par éclairage direct de la fiole par une partie du faisceau après qu'il soit divisé en deux par un cube séparateur et la deuxième partie du faisceau crée la vue orthogonale après orientation par les miroirs  $M_1$  et  $M_2$ , le miroir  $M_3$  sert à orienter la vue orthogonale vers la camera CCD.

#### III.2.4.1 Validation expérimentale :

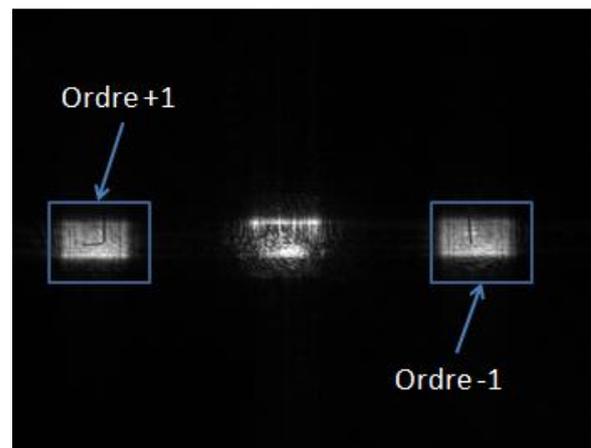
##### Cas d'un objet statique en forme de L :

Dans le but de valider cette nouvelle technique de multiplexage angulaire à deux faisceaux, nous l'avons appliquée sur un objet statique de forme géométrique particulière (fil en acier sous forme de lettre L) placé en face du faisceau direct pour pouvoir connaître la différence entre les deux vues.

La figure (III.10) montre l'hologramme enregistré avec ses franges d'interférences résultant de la superposition des faisceaux direct et orthogonal. L'image reconstruite de l'hologramme est illustrée par la figure (III.11) où on peut voir les deux vues qui apparaissent dans les deux ordres de diffraction +1 et -1.

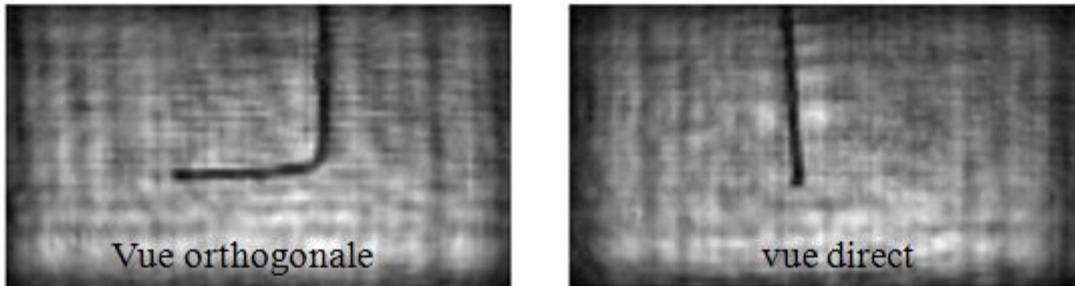


*Figure III.10 : Hologramme enregistré d'un objet statique.*



*Figure III.11 : Image reconstruite des deux vues directe et orthogonale d'un objet statique.*

D'après l'image des deux vues agrandies (figure (III.12)), l'objet apparaît sous forme de lettre I dans la vue directe et sous forme de lettre L inversée dans la vue orthogonale, donc les deux vues ont été enregistrées et reconstruites avec seulement deux faisceaux.



*Figure III.12 : Image reconstruite des deux vues directe et orthogonale agrandie d'un objet statiques.*

A l'aide de cette configuration, on peut affirmer que la suppression du faisceau de référence pendant l'enregistrement de l'hologramme se fait sans difficulté d'ajustages des montages à deux vues précédents. En plus, la diminution de la distance d'enregistrement est considérable du fait que l'angle d'enregistrement peut être manipulé aisément. De plus, on peut avoir des tailles plus grandes des images de l'objet holographié au cours de la reconstruction (augmentation de la résolution de l'image reconstruite).

#### **Cas d'un objet dynamique (particules)**

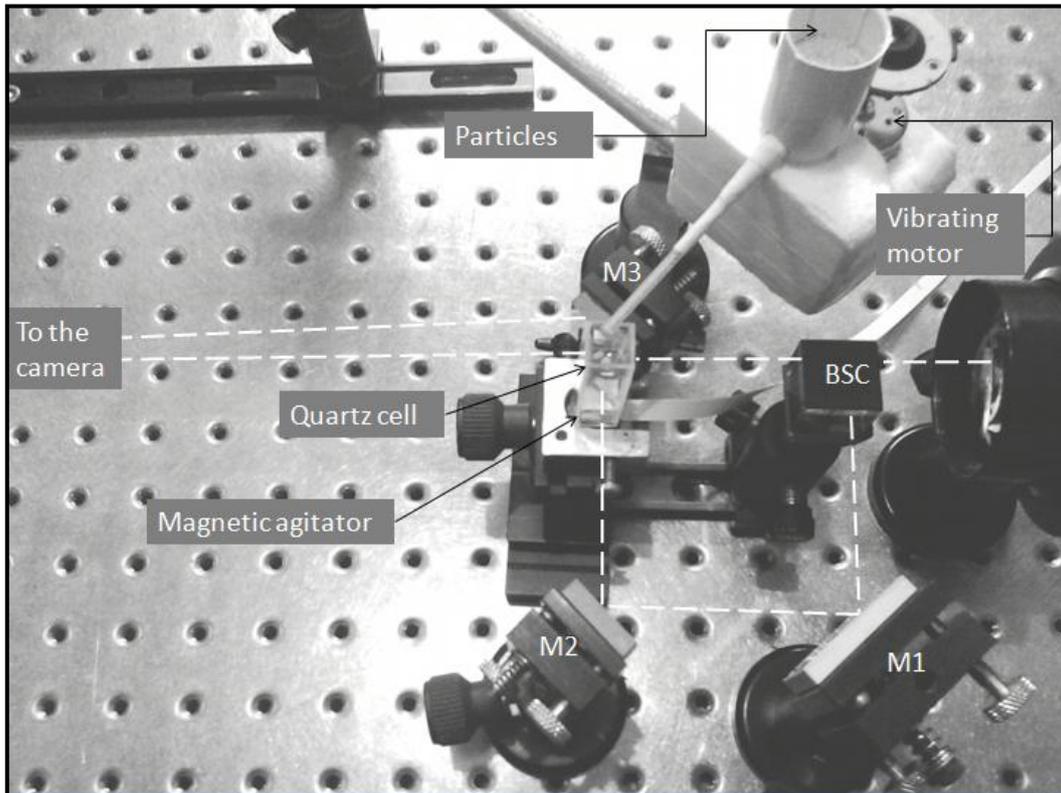
Le montage proposé et après qu'il soit testé avec l'objet statique est utilisé pour enregistrer un hologramme de microparticules en mouvement, puis l'image de ces dernières a été reconstruite.

Pour cela, nous avons utilisé des particules on polymère de diamètre moyenne de 200 $\mu\text{m}$  et une densité volumique proche de celle de l'eau. Ces particules sont injectées dans la cellule en quartz de 1x1x5cm<sup>3</sup> remplie d'eau à l'aide d'un dispositif d'injection bien adapté (figure III.13).

Le système utilisé pour l'injection des particules (figure III.13) est sous forme d'un petit réservoir rempli des particules qui seront canalisées à travers un tuyau au centre de la cellule sous l'effet des vibrations créées à l'aide d'un moteur. L'amplitude des vibrations du moteur commande le début d'injection.

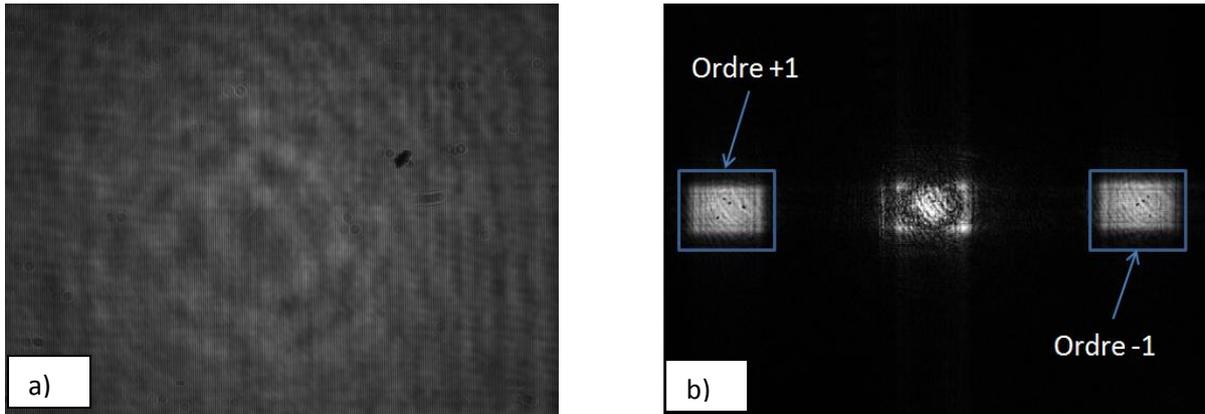
Le support du système d'injection est fixé de telle sorte qu'on évite la propagation des vibrations du moteur vers la table, pour qu'il ne soit pas une source de bruit sur l'hologramme enregistré.

Au cours de l'injection, les particules sont en chute libre dans la fiole, et leur vitesse de déplacement ne peut pas être contrôlée. Mais si nous voulons une injection turbulente des particules il suffit d'alimenter l'agitateur qui se trouve au-dessous de la cellule.

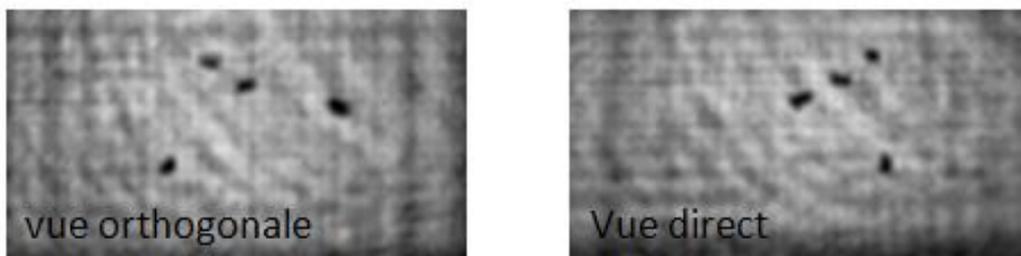


*Figure III.13 : Image du montage avec le système d'injection de particules.*

L'hologramme des particules enregistré et son image reconstruite sont illustrés sur la figure (III.14 (a)) et (III.14 (b)), cette dernière montre l'image des particules dans les deux vues. Pour mieux visualiser les particules nous avons agrandi les deux vues (figure III.15).



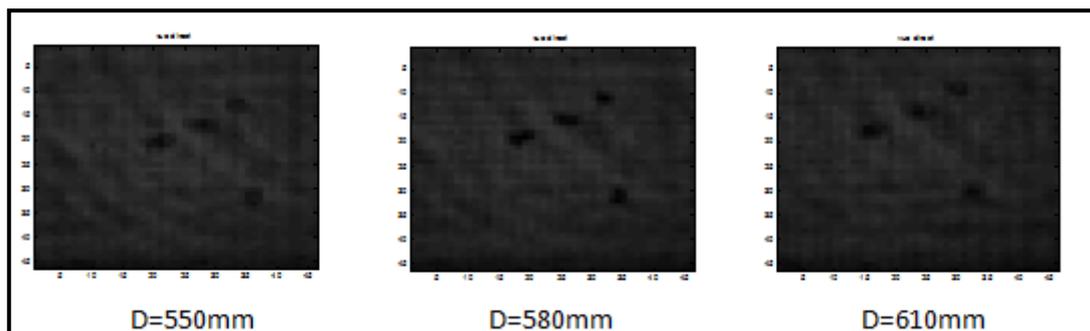
*Figure III.14 : a) Hologramme des particules enregistré, b) Image reconstruite.*



*Figure III.15 : Image reconstruite agrandie des deux vues directe et orthogonale.*

On voit bien qu'à la reconstruction, chaque particule se trouve dans un plan objet différent à l'autre (profondeur), donc la résolution latérale sera faible par rapport à la résolution transversale, ce problème est lié à la grande profondeur de focalisation de l'holographie. Pour cette raison, l'hologramme sera reconstruit sur plusieurs distances de reconstruction.

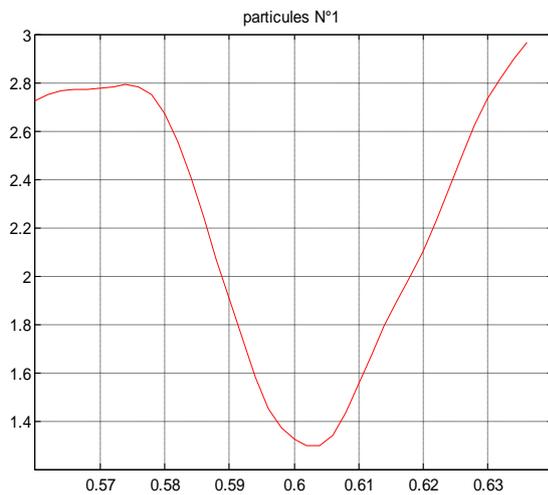
La figure (III.16) montre une reconstruction de la vue directe sur trois distances différentes (550, 580 et 610 mm), on peut voir que l'image des particules où la distances est égale à 580 mm est nette par rapport aux autres images (où  $D=550$  mm et 610 mm), donc c'est le plan des particules.



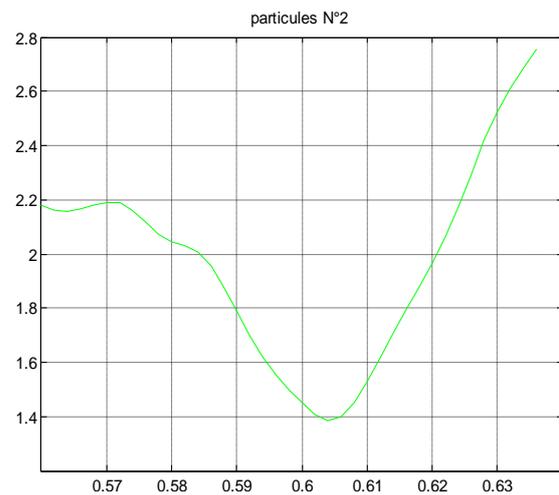
*Figure III.16 : Reconstruction sur différentes distances.*

Dans l'image reconstruite, l'intensité de chaque particule varie en fonction de sa distance de reconstruction. Pour cette raison nous avons tracé la distribution d'intensité des particules en fonction de la distance de reconstruction. Les figures (III.17, 18, 19, 20) montrent la variation de l'intensité des quatre particules enregistrées en fonction de la distance de reconstruction, on peut voir que l'intensité diminue jusqu'au plan de la particule.

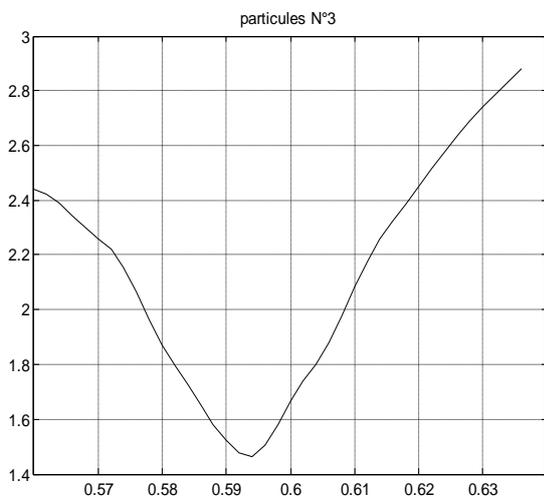
Si on prend par exemple la figure (III.17 et III.18), la valeur minimale de l'intensité de la particule N°1 sera à la distance 605 mm, par contre celle de la particule N°3 sera à 595 mm.



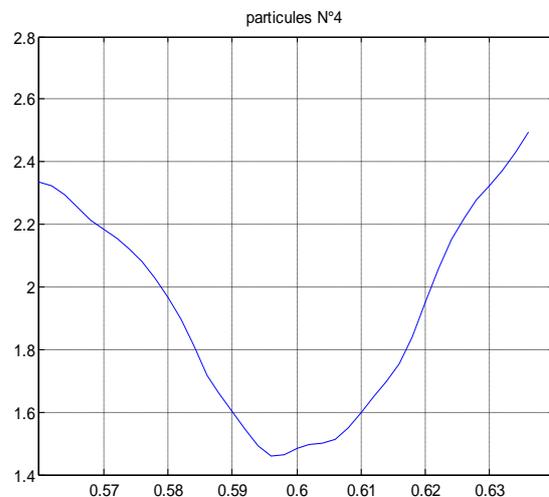
**Figure III.17 :** Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°1



**Figure III.19 :** Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°2



**Figure III.18 :** Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°3



**Figure III.20 :** Distribution d'intensité suivant l'axe Z de la particule N°4

La superposition des quatre figures de distribution d'intensité précédentes (figure III.21) montre la différence des plans objets des particules, et la profondeur de chaque particule sera à son minimum d'intensité.

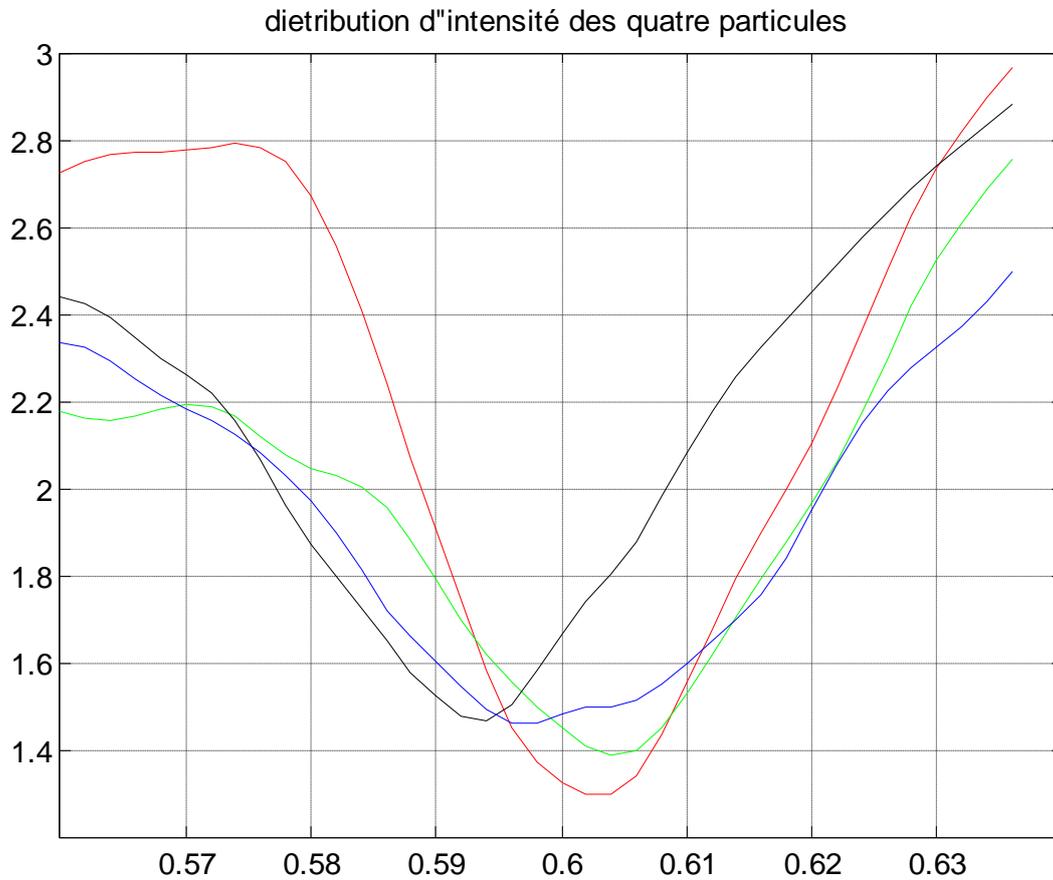


Figure III.21 : Distribution d'intensité suivant l'axe Z des quatre particules.

### Reconstruction 3D de la distribution 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 le but d'éviter le problème de recouvrement des particules est la grande profondeur de focalisation liée à l'holographie.

Dans notre travail nous avons fait en premier temps la conversion des deux vues sous forme binaire (figure III.22 et III.23), puis la détection des coordonnées dans chaque particules (X,Y d'après la vue directe et la coordonnée Z d'après la vue orthogonale).Le croisement des données entre les deux vues donne une vue 3D de la distribution des particules dans le volume (figure III.24).

L'avantage de la technique de croisement des vues est que la résolution latérale est égale à la résolution transversale et le problème de la grande profondeur de focalisation lié à l'holographie digitale est résolu.

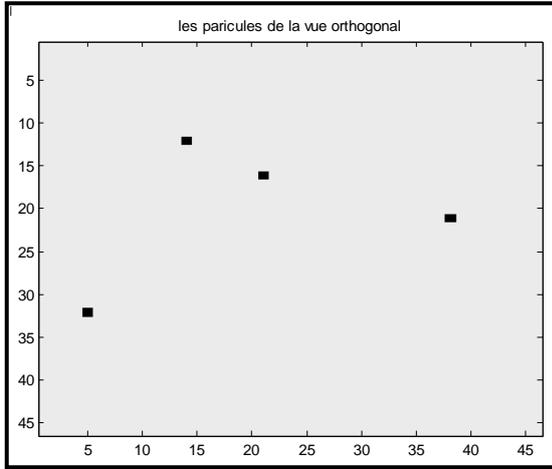


Figure III.22 : Image binaire de la vue directe.

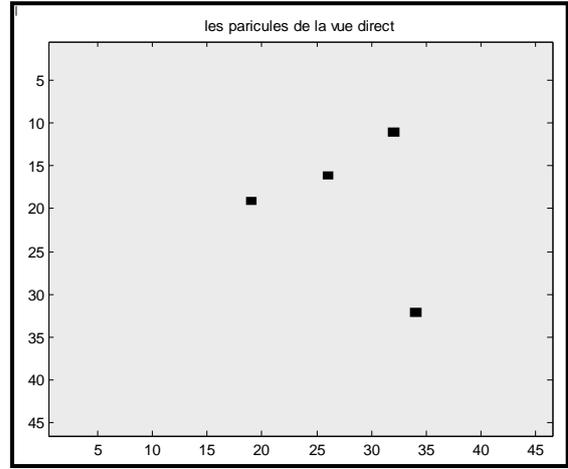


Figure III.23 : Image binaire de la vue orthogonale.

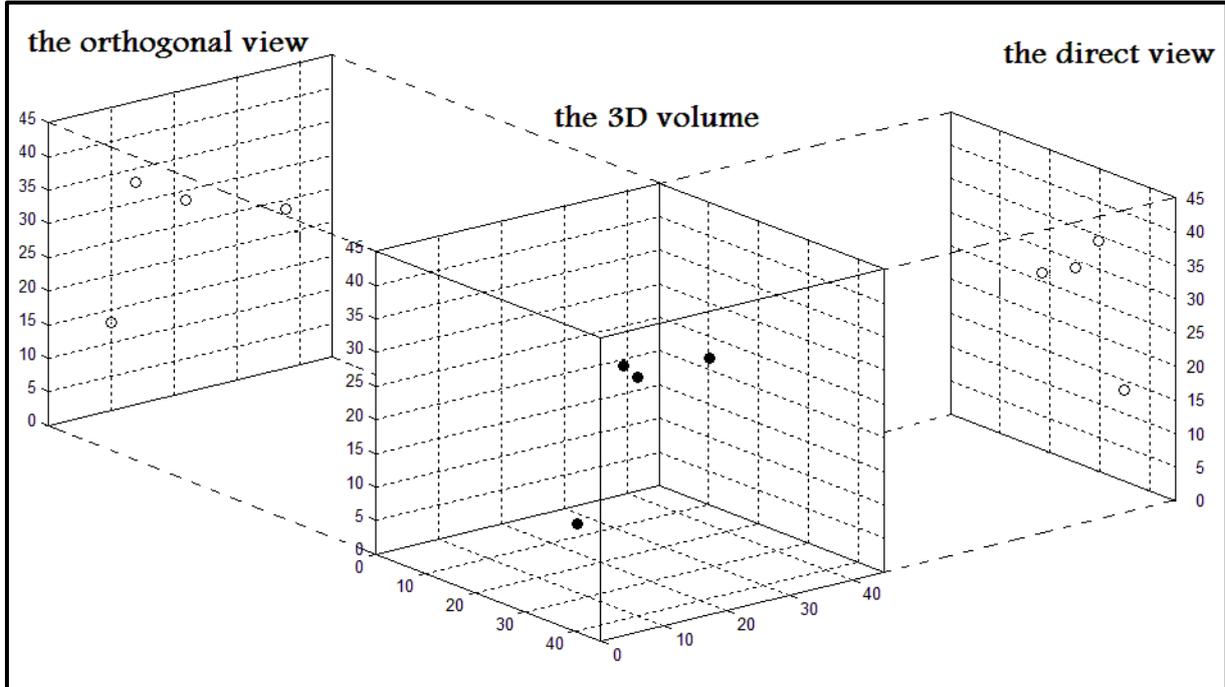
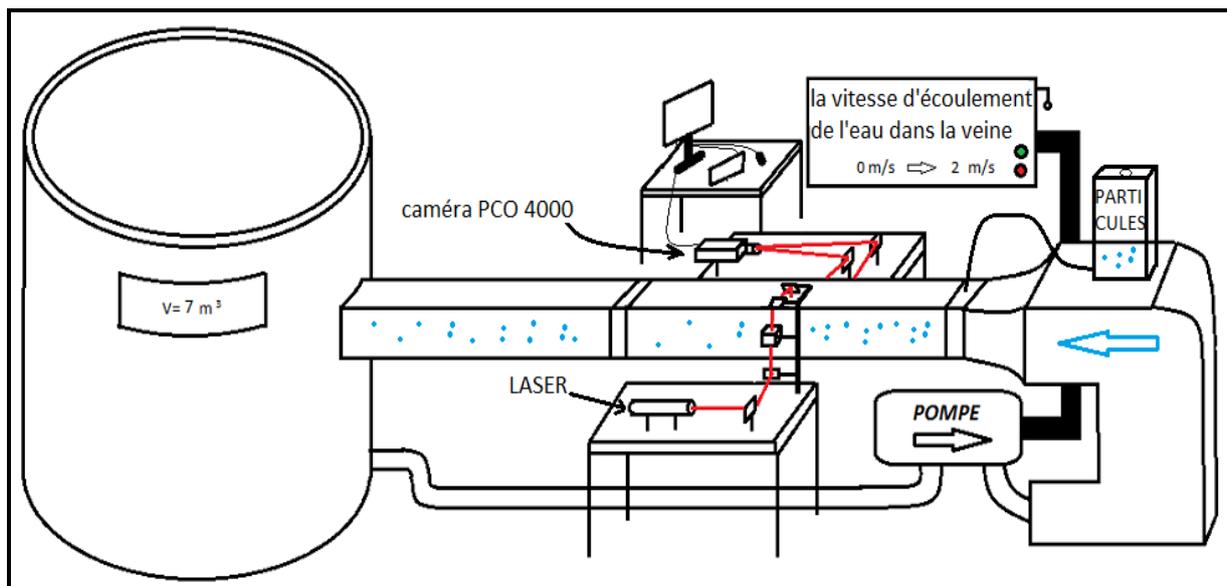


Figure III.24 : Reconstruction 3D de la distribution des particules dans le volume d'étude.

### III.2.4.2 Application de la technique à la veine à eau :

En premier temps, il a fallu adapter le montage d'holographie digitale à deux vues orthogonales et deux faisceaux au canal à eau (20cm\*20cm\*7m) muni en amont d'une grille pour l'étude de la turbulence homogène et isotrope. L'objectif était de visualiser la position de particules solides, transportées par cet écoulement, dans la zone centrale du canal.

Comme dans le cas du montage à deux vues avec un faisceau de référence, l'utilisation de deux tables optiques était nécessaire, sauf que la suppression du faisceau de référence nous a donné beaucoup de flexibilité en matière de manipulation des deux faisceaux objets et références à la fois (figure III.25).



*Figure III.25 : Schéma du montage expérimental utilisé.*

Dans ce montage (figure III.26), le faisceau issu du laser est filtré (objectif de microscope 0.65 40X et un filtre spatial de 10 $\mu$ m) puis, il est collimaté à l'aide d'un objectif photographique de 50mm de focale fixe. Une fois le faisceau filtré et collimaté, on le divise en deux (par un cube séparateur SC pour éclairer la veine en deux vues orthogonales. Le faisceau de la première vue directe arrive sur la camera via les miroirs M7, M8, M9 et M10, et la deuxième vue est obtenue par ; M3, M4, M5, M6. La caméra utilisée est une caméra PCO 4000 de haute résolution (4008x2672) avec une taille du capteur CCD de 36x24 mm<sup>2</sup> et une largeur de pixel de 9x9 $\mu$ m<sup>2</sup>. Avec cette largeur de pixel et en appliquant le théorème

d'échantillonnage de Shannon l'angle d'enregistrement doit être très petit si l'on veut pouvoir observer les interférences de l'hologramme. ( $\theta_{\max} \leq (2,014)^\circ$ .)

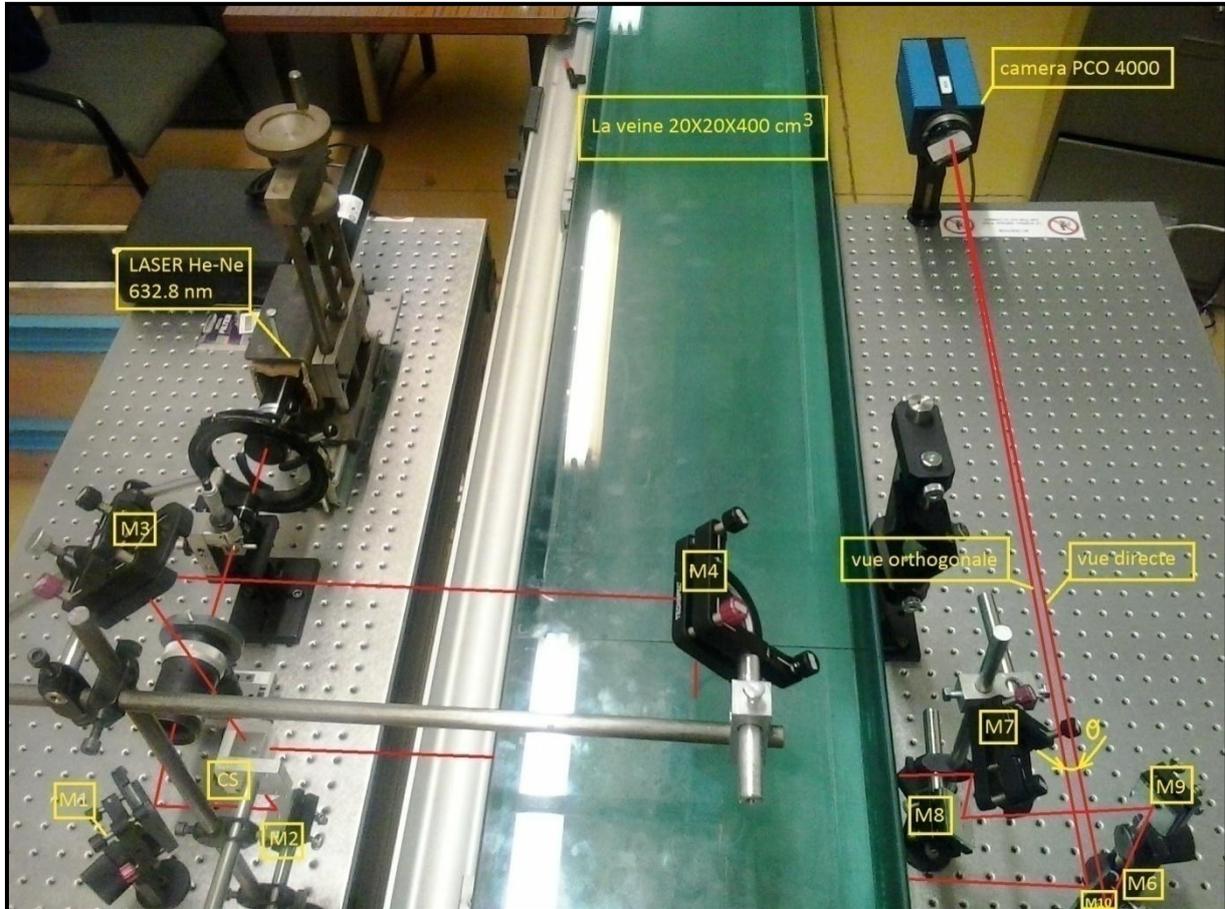


Figure III.26 : Image du montage utilisé sur la veine.

La zone d'étude comme le montre la figure (III.25) est située au milieu de la veine.

Le problème majeur que nous avons rencontré dans cette étude, pour obtenir des franges d'interférences stables, a été bien sur les vibrations introduites par la turbine à eau qui alimente la veine et fait circuler l'eau avec des vitesses différentes (de 10 cm/s à 2 m/s).

Pour cela nous avons travaillé avec des vitesses faibles et un temps d'acquisition assez court de l'ordre de la micro seconde. Il a aussi été nécessaire d'isoler la pompe du sol afin de minimiser les vibrations.

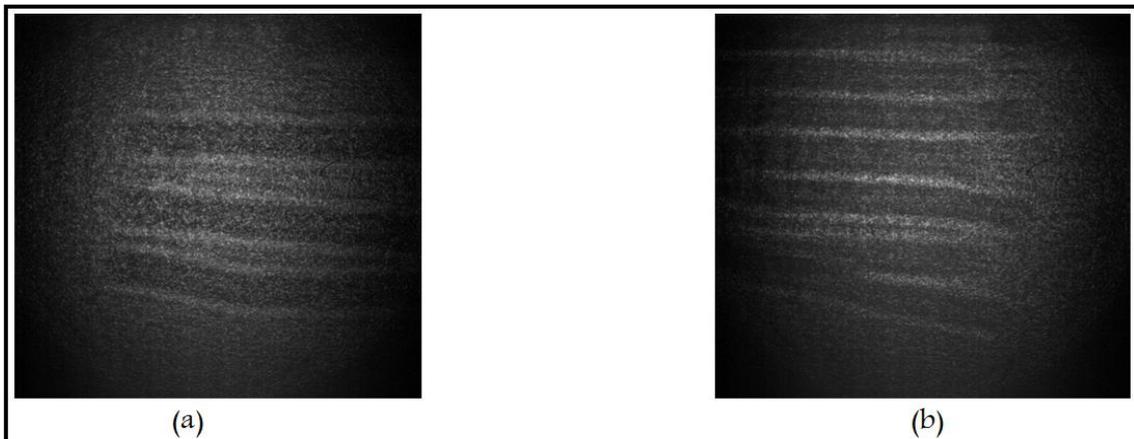
Une fois les franges obtenues, il était nécessaire de faire un étalonnage pour localiser la zone de travail du fait que les dimensions du canal sont relativement importantes et pouvoir déterminer les distances de reconstruction.

**Étalonnage :**

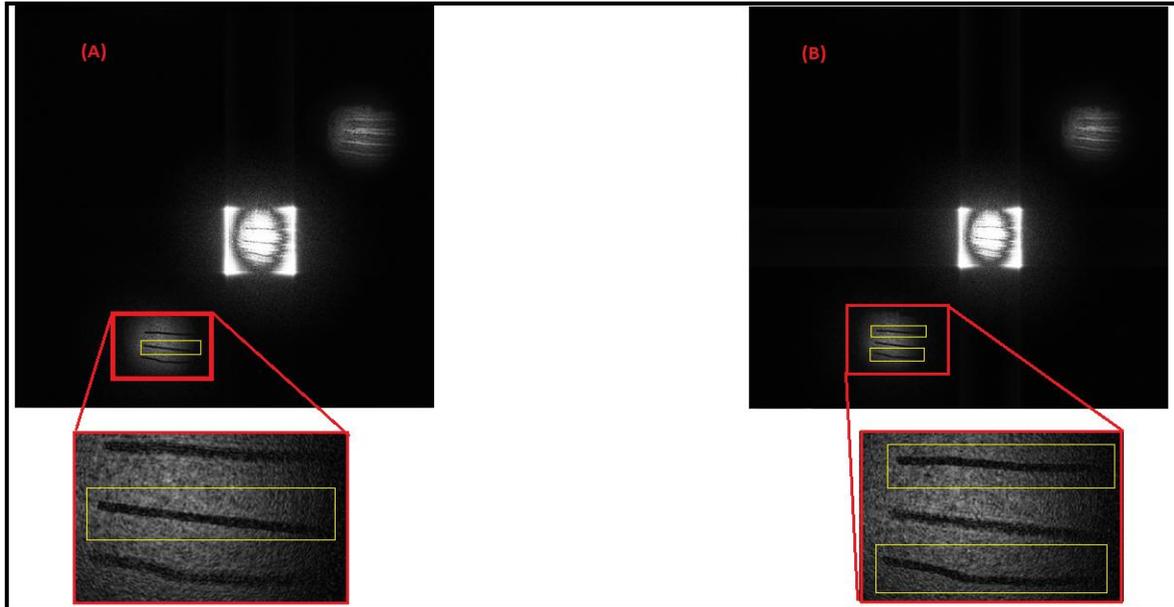
Nous avons utilisé des repères solides, sous forme de segments métalliques d'épaisseur fine mais de formes caractéristiques propres pour être identifiables. Nous avons disposé les segments un et deux sur la première et la deuxième face du canal pour la vue directe (droite et gauche), et les segments trois et quatre sur la troisième et la quatrième face du canal pour la vue orthogonale (haute et basse).

La figure (III.27) montre les deux hologrammes étalons de la vue directe et de la vue orthogonale. La reconstruction du premier hologramme (figure III.28.a) avec une mise au point sur le premier et le deuxième segment métalliques donne la distance entre la caméra et la première et la deuxième face de la vaine,  $D1=152cm$  et  $D2=172cm$ .

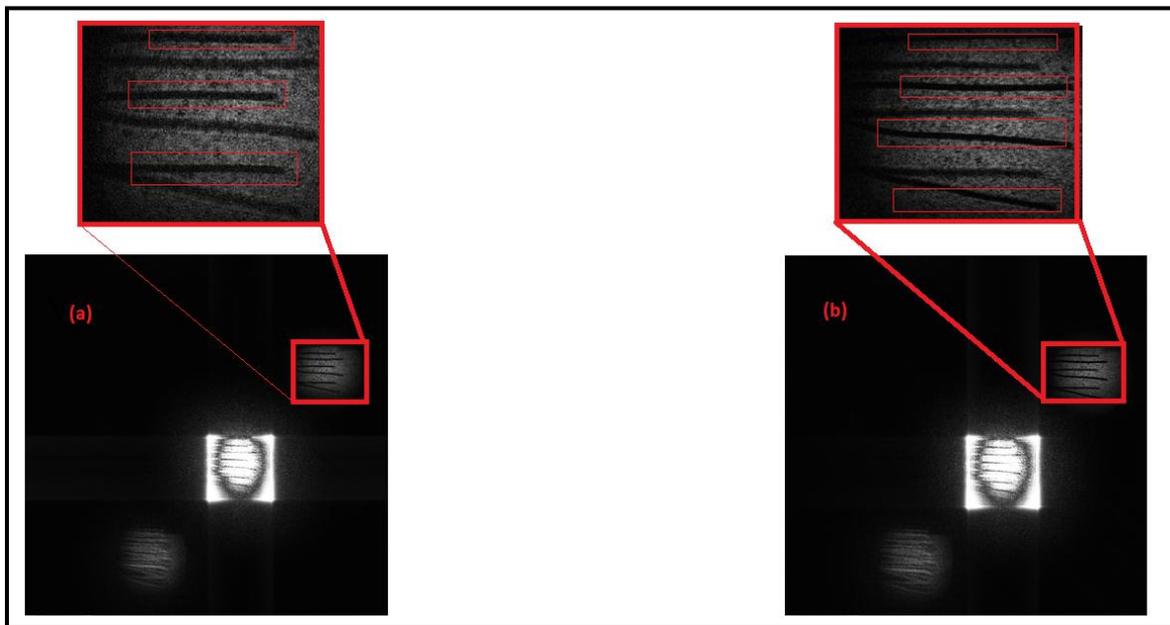
La reconstruction du deuxième hologramme (figure III.28.b) avec une mise au point sur le troisième et le quatrième segment métallique donne la distance entre la caméra et la troisième et la quatrième face de la vaine,  $D3=126cm$  et  $D4=140cm$ .



**Figure.III.27.** Hologrammes d'étalonnage : (a) vue directe, (b) vue orthogonale



**Figure III.28.a** : Image reconstruite des hologrammes étalons ; (a) mise au point sur la première face directe  $D1=152\text{cm}$ , (b) mise au point sur la deuxième face directe  $D2=172\text{cm}$ .



**Figure III.28.b** : Image reconstruite des hologrammes étalons ; (a) mise au point sur la troisième face orthogonale  $D3=126\text{ cm}$ , (b) mise au point sur la quatrième face orthogonale  $D4=140\text{ cm}$ .

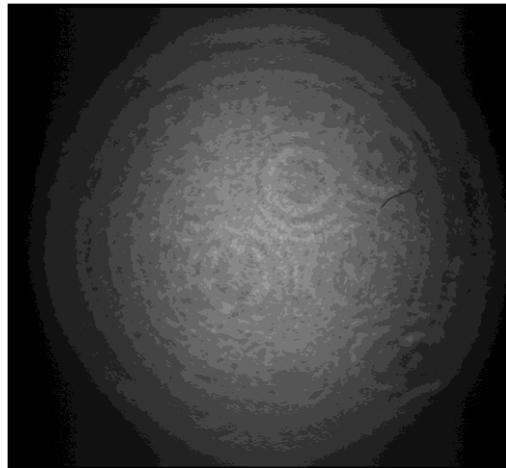
### Hologramme de particules

On a travaillé avec les mêmes particules dont la taille moyenne est de  $200\mu\text{m}$  et leur densité volumique est proche à celle de l'eau évitant ainsi les problèmes de sédimentation à la paroi

inférieure de la veine. Les particules ont été injectées via la grille à l'aide d'un dispositif d'injection.

L'écoulement de l'eau dans la veine est assuré à l'aide d'une pompe à vitesse variable et contrôlable, nous permettant d'obtenir une vitesse moyenne du fluide porteur (eau) entre 0 et 2m/s. La concentration ainsi que la répartition des particules est contrôlable à l'aide du système d'injection utilisé qui n'a pas été ici optimisé en vue d'une synchronisation avec les enregistrements holographiques. L'injection a été faite à l'aide d'air comprimé à travers un réservoir de 30 litres contenant des particules en suspension dans l'eau (figure III.25).

La zone d'étude est distante de 50cm de la grille et le croisement des faisceaux se fait sur une zone centrale d'étude de l'ordre de 2cm\*2cm à mi-distance entre les différentes parois (haute - basse et droite - gauche). La figure (III.29) montre un hologramme de particules.



*Figure III.29. Hologramme de particules*

Connaissant les distances de reconstruction d'après la procédure d'étalonnage, nous permet de reconstruire les images de particules de manière aisée.

La mise au point sur la vue directe et avec une distance de reconstruction  $D_{\text{directe}}=160\text{cm}$  nous a permis de localiser quatre particules dans ce plan (figure III.30).

Sur cette figure(III.30), on voit que les particules qui sont dans la zone d'étude et qui sont montrées par un cercle rouges ont nettes, par contre les autres particules sont hors-plan (particules floues).

A l'aide de cette vue on peut connaître les deux coordonnées  $x$  et  $y$  de chaque particule. La coordonné  $z$  est obtenue par la mise au point sur la vue orthogonale ou par le critère de minimum d'intensité.

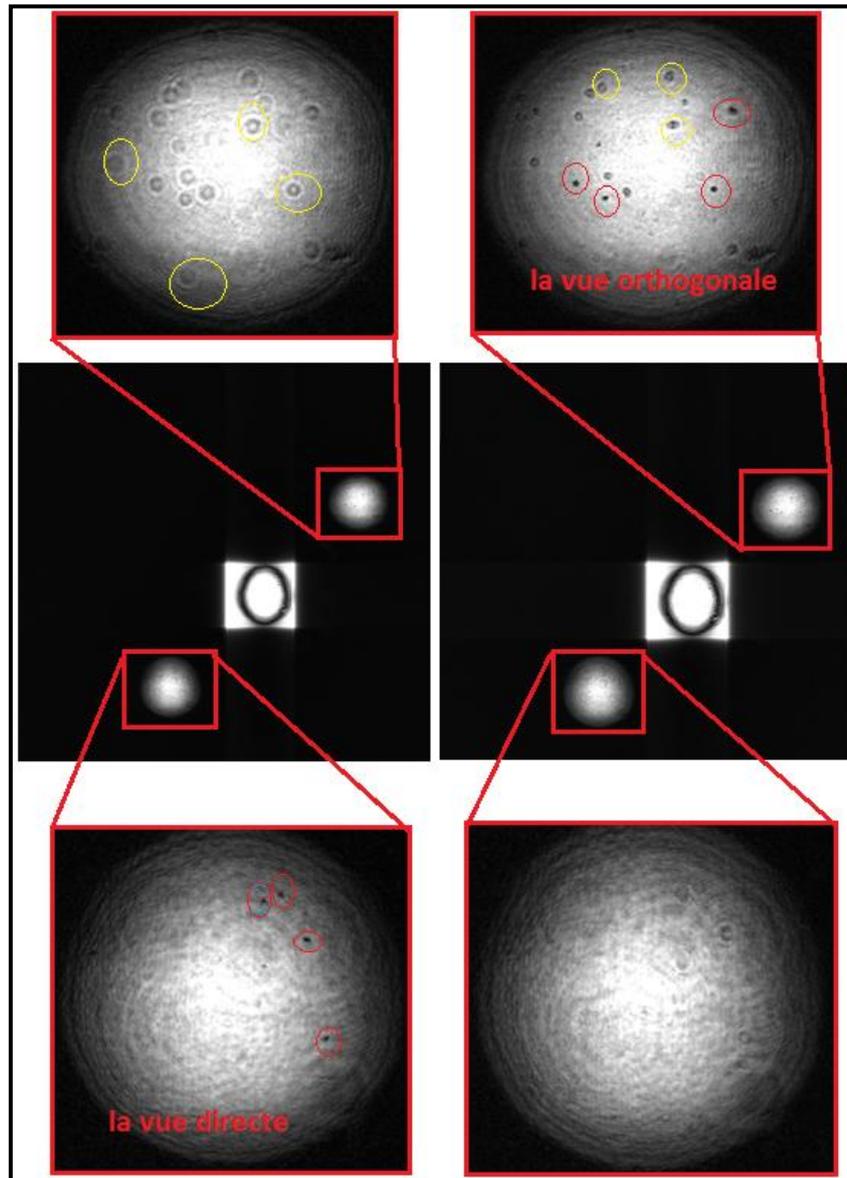


Figure III.30. Image reconstruite de l'hologramme de particules.

Dans cette étude, les résultats obtenus montrent qu'on peut utiliser le montage par holographie digitale à deux vues orthogonales et à deux faisceaux pour la visualisation et la localisation des particules dans une veine de grande dimension pour des régimes d'écoulements relativement importants et pouvant générer des vibrations soit par la pompe soit par l'écoulement lui-même (frottement à la paroi, cavitation, ...).

Des études supplémentaires peuvent être effectuées pour la trajectographie des particules (notion d'hologramme successif temporellement). Pour l'extension de la zone d'étude un multiplexage chromatique peut être appliqué.

### **III.3 Application du multiplexage angulaire et chromatique à l'holographie des particules**

Comme, le canal à eau présente une section relativement importante et que la zone d'intersection entre les faisceaux est limitée à la zone centrale d'une part et comme d'autre part on a à faire à des objets dynamiques (particules), il est alors possible d'augmenter la zone de travail et le nombre d'hologrammes multiplexés en jouant sur les techniques de multiplexage combinées, dans ce cas on associe l'angulaire au chromatique.

Comme, la technique à deux vues sans faisceau de référence présente plus de flexibilité expérimentale, elle s'adapte donc mieux à ce genre de situations.

#### **III.3.1 Holographie digitale hors axe à quatre vues**

Pour connaître l'effet du changement de la longueur sur les objets et de couvrir un volume d'étude important, l'holographie digitale hors axe à quatre vues a été appliquée. Dans cette technique nous avons combiné entre le multiplexage angulaire et le chromatique pour enregistrer quatre vues en même temps, le scanning se fait de manière globale en même temps, ce qui est impossible pour les montages simples en holographie à cause de la largeur limitée du faisceau (composants optiques de dimensions limitées et limitation imposée par le critère de Shannon).

##### **III.3.1.1 Validation de la technique :**

###### **III.3.1.1.1 Holographie digitale hors axe à quatre vues avec référence**

Dans cette technique nous avons utilisé le montage de la figure (III.31), nous avons associé le multiplexage chromatique au multiplexage angulaire où la même zone d'étude a été éclairée avec deux lasers de longueurs d'ondes différentes ce qui permet de connaître l'effet du changement de la longueur d'onde sur les objets. Les deux techniques de multiplexage permettent d'enregistrer quatre hologrammes simultanément à l'aide du même capteur. On aura donc deux hologrammes pour la vue directe et deux autres pour la vue orthogonale.

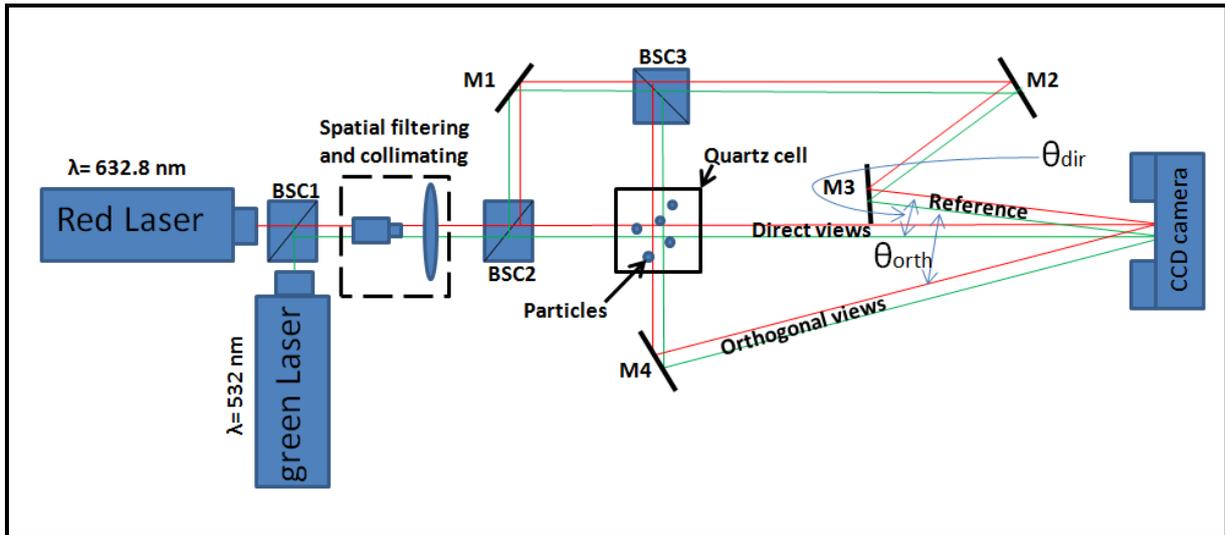


Figure III.31 : Multiplexage angulaire et chromatique avec référence.

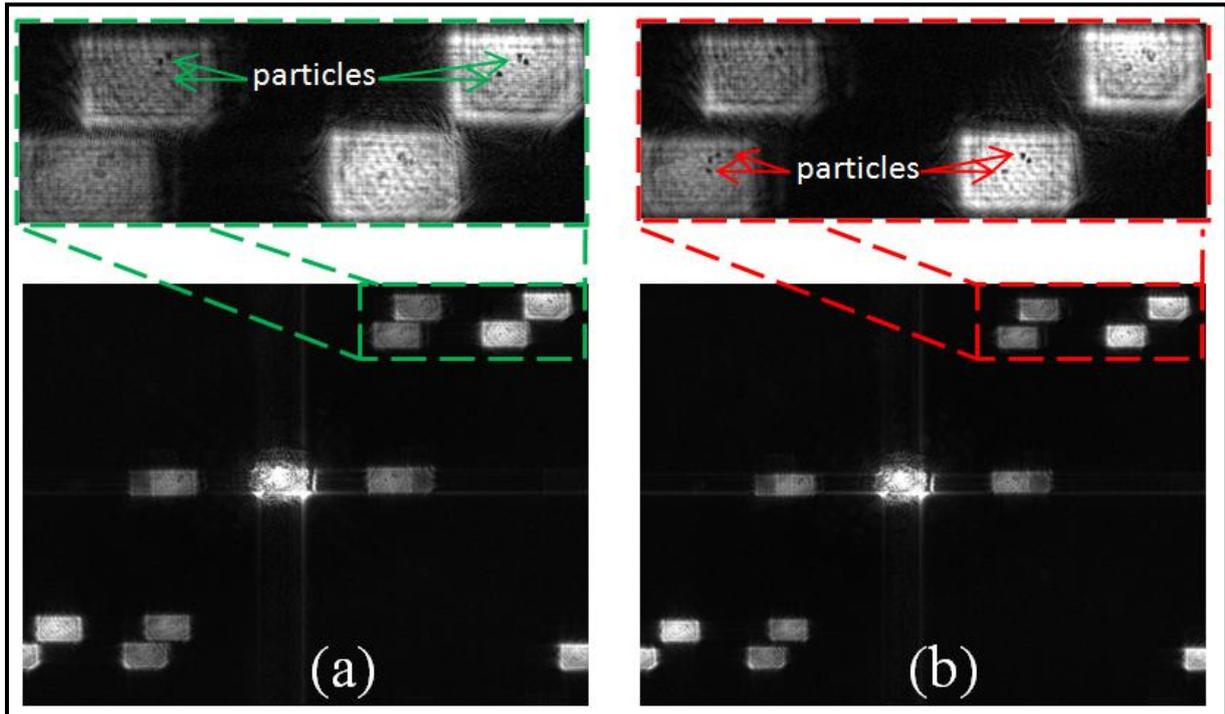
Chromatiquement nous avons utilisé deux lasers (rouge et vert), filtrés et collimatés en même temps à l'aide d'un objectif de microscope (x40 0,65) et un filtre spatial de 15 $\mu$ m de diamètre, puis un objectif photographique. Un cube séparateur est utilisé pour créer les deux ondes d'éclairage des vues directes et orthogonales.

Au niveau du laboratoire, le montage expérimental de la figure (III.31) a été réalisé dans le but de pouvoir enregistrer quatre hologrammes sur un même support d'enregistrement de manière simultanée. Deux hologrammes ont été enregistrés avec deux différentes longueurs d'ondes pour connaître l'effet du changement de la longueur d'onde sur les l'objet, et deux hologrammes ont été enregistré avec deux différents angles. Dans cette configuration nous avons utilisé deux Lasers (rouge à 632,8 nm et vert à 532 nm), les deux faisceaux Laser ont été superposés sur le même axe optique à l'aide d'un cube séparateur (figure 2.4.a), puis ils ont été filtrés et collimatés par un objectif de microscope et un objectif photographique.

L'objet utilisé sont des microparticules injectées dans une cellule en quartz. La cellule a été éclairée avec les deux faisceaux (rouge et vert) de manière directe et orthogonale, donc, on a deux vues directes (rouge et verte) et deux vues orthogonales (rouge et verte). Les quatre vues sont superposées au niveau de la camera CCD avec deux autres faisceaux de références pour produire quatre hologrammes.

La figure (III.32) représente l'image reconstruite de l'hologramme multiplexé enregistré par la configuration de la figure (III.31). La figure (III.32.a) montre une mise au point sur l'hologramme vert et les particules peuvent être vues dans les deux vues directes est orthogonales, pour la figure (III.32.b)

la mise au point est sur l'hologramme rouge, d'après les vues directes rouge ou verte on peut comparer les vues pour connaître s'il y a un effet sur l'objet par le changement avec différentes longueur d'ondes.



*Figure III.32 : Images reconstruite de l'hologramme enregistré par la configuration de la Figure III.31 ; a) mise au point est sur l'hologramme vert, b) mise au point est sur l'hologramme rouge*

Dans ce montage la zone d'étude est la même pour les deux lasers, dans un autre montage proposé chaque laser éclaire une zone d'étude différente à l'autre pour avoir une zone d'étude plus étendue au plus le faisceau de référence a été supprimer.

### III.3.1.1.2 Holographie digitale hors axe à quatre vues sans référence

Le montage de la figure (III.33) montre un multiplexage angulaire et chromatique de quatre vues différentes avec une suppression du faisceau de référence, chaque laser enregistre deux vues (direct et orthogonale). Pour cette raison, nous avons utilisé deux lasers (rouge à 632,8 nm et vert à 532 nm), chaque laser est filtré et collimaté tout seul par un objectif de microscope (x40, 0.65), filtre spatial (15 $\mu$ m) et un objectif photographique. Les deux faisceaux (rouge et vert) éclairent ensuite, la même cuvette utilisée dans le montage précédant, mais dans ce montage les deux faisceaux sont ajustés de telle sorte qu'on éclaire

deux zones différentes avec une partie commune entre elles. La figure (III.34) montre l'emplacement des faisceaux sur la cuvette, la zone commune entre les deux faisceaux est ajustée à l'aide du miroir  $M_1$  et un cube séparateur. La zone d'étude est formée de deux parties, la première partie est enregistrée à l'aide du laser rouge avec deux faisceaux orthogonaux, et la deuxième partie est enregistrée à l'aide du laser vert avec deux faisceaux orthogonaux également.

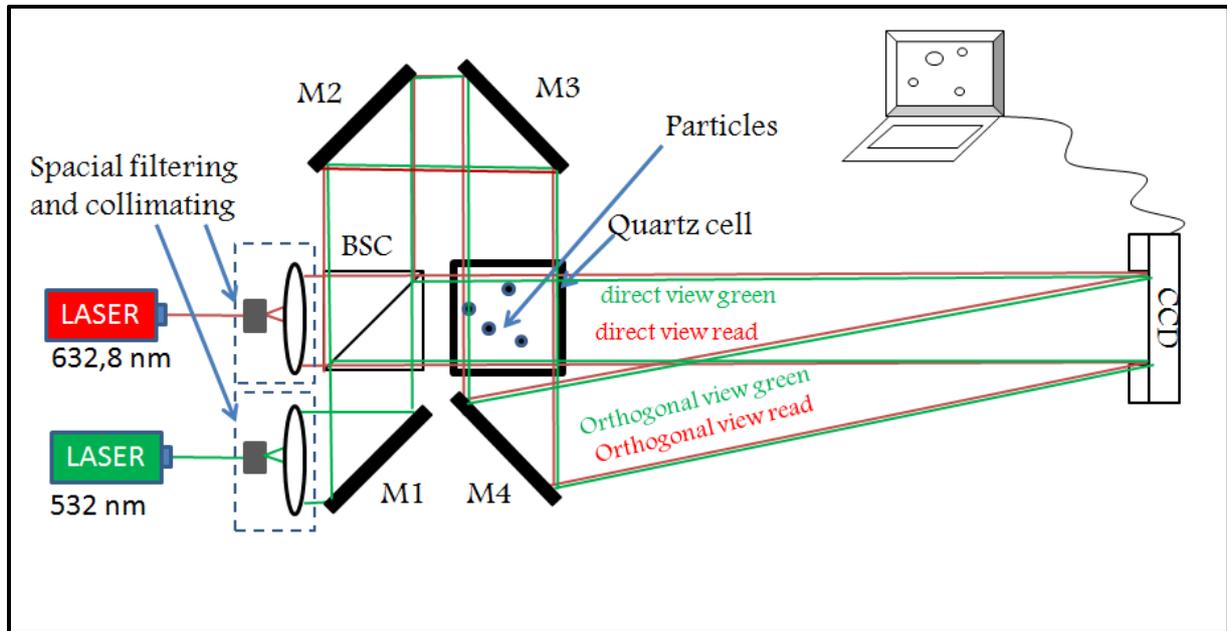


Figure III.33 : Multiplexage angulaire et chromatique d'hologrammes de particules.

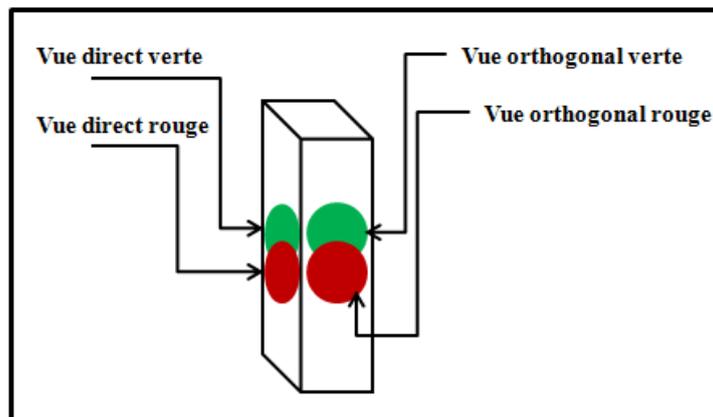


Figure III.34 : Emplacement des faisceaux sur la cuvette.

A l'aide de la partie commune entre les deux vues directe et orthogonale on peut faire une synthèse d'ouverture du volume d'étude.

La figure (III.35) montre une image du montage à quatre vues sans référence utilisé pour faire la synthèse d'ouverture.

L'hologramme enregistré par ce montage et son image reconstruite sont illustré par la figure (III.36) où l'image reconstruite présente quatre vues (ordres de diffraction) ; dans laquelle les deux vues (directe et orthogonale) proches de l'ordre 0 sont obtenues à l'aide du laser rouge, les deux autres vues sont obtenues par le laser vert.

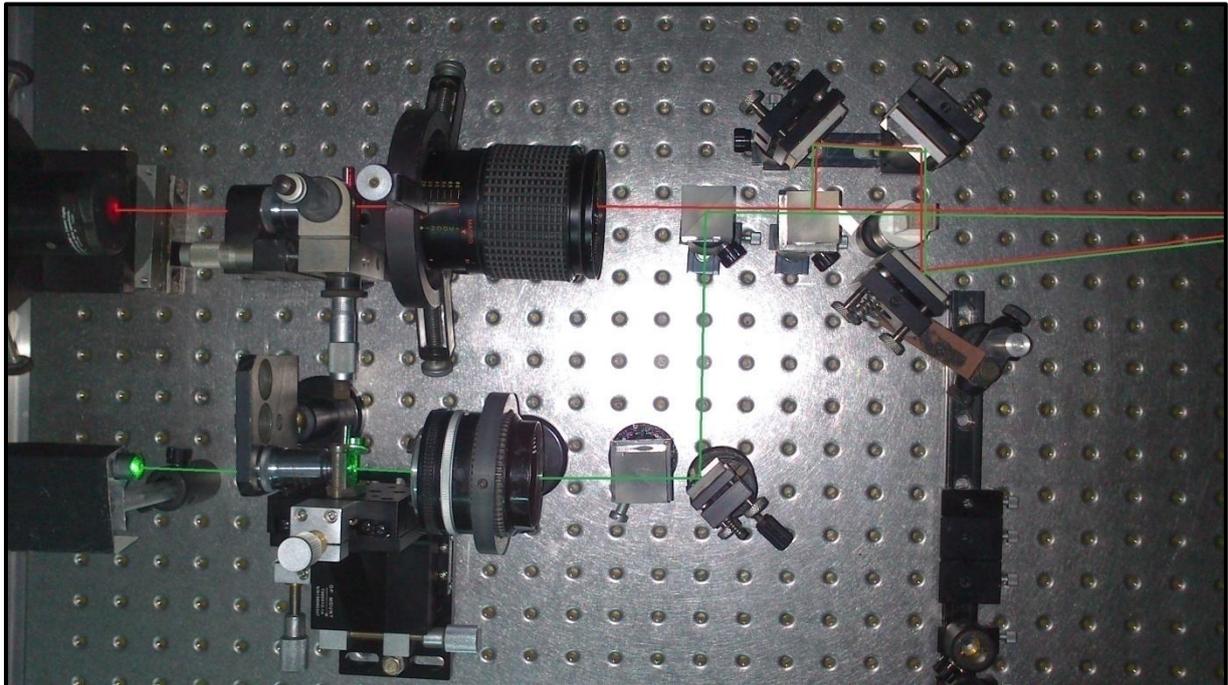


Figure III.35 : Image du montage a quatre vues sans référence.

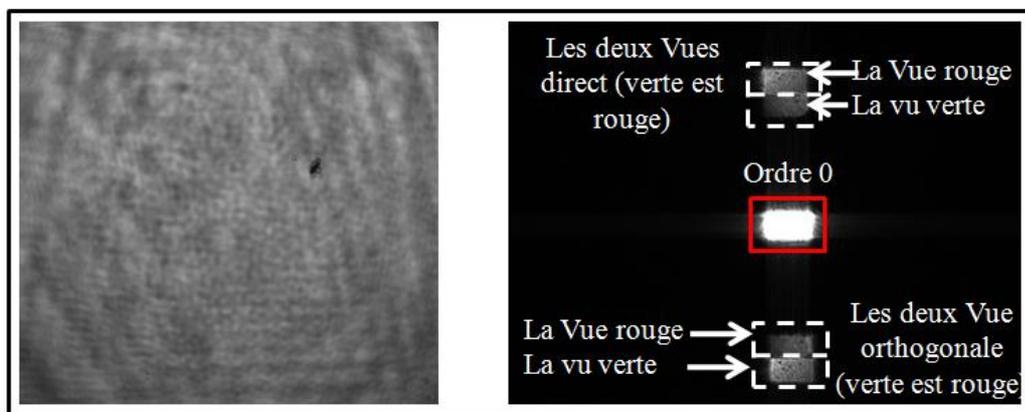
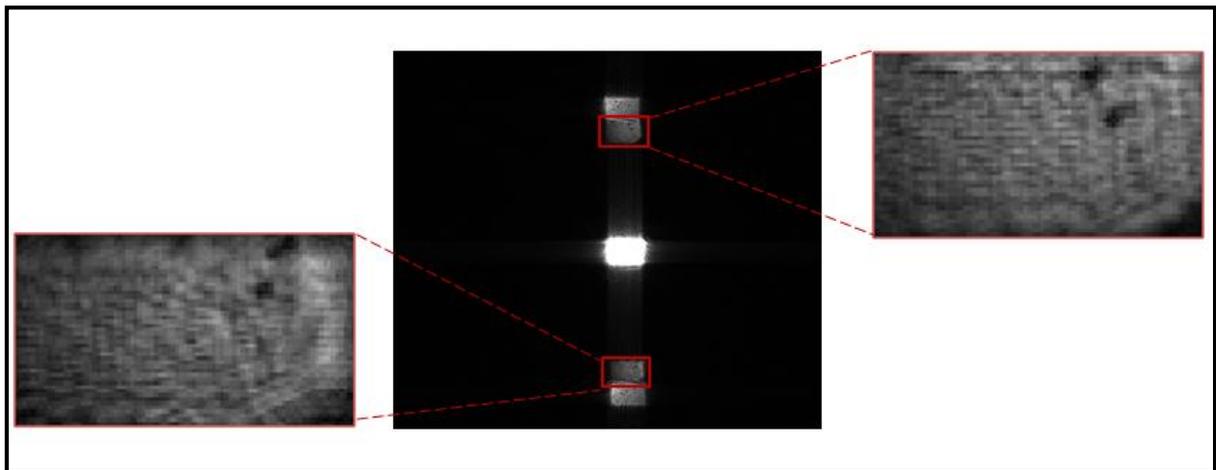


Figure III.36 : Hologramme enregistré avec son image reconstruite.

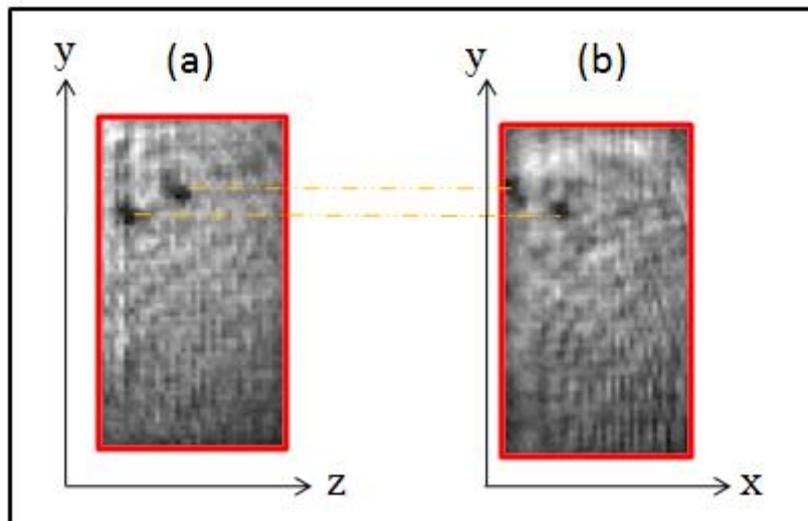
Pour visualiser les particules dans les vues, il nous faut une mise au point sur chaque vues. La figure (III.37) montre une mise au point sur les deux vues rouge, ces vues portent

l'information sur deux particules, et avec un croisement entre les deux vues on peut obtenir une vue en 3D sur le volume éclairé par le laser rouge.

La distance de reconstruction pour cette mise au point est de 65 cm pour les deux vues. Cette distance est utilisée pour reconstruire les deux vues simultanément. Par contre, pour le montage de la figure (III.35) on peut voir qu'il y a un décalage de chemin optique entre les deux vues. A cause de la grande profondeur de focalisation liée à l'holographie, nous avons utilisé la même distance pour les deux vues. La figure (III.38) montre les axes des coordonnées sur les vues.



*Figure III.37 : Image reconstruite de l'hologramme enregistré avec une mise au point sur les vues rouges.*



*Figure III.38 : Coordonnées des particules d'après les vues rouges*

*a) vue orthogonale, b) vue directe*

Pour reconstruire le volume en 3D, nous avons tiré les coordonnées X Y de chaque particule d'après la vue directe et la coordonnée Z d'après la vue orthogonale. Les deux figures(III.39) et (III.40) montrent le positionnement des particules dans chaque vue.

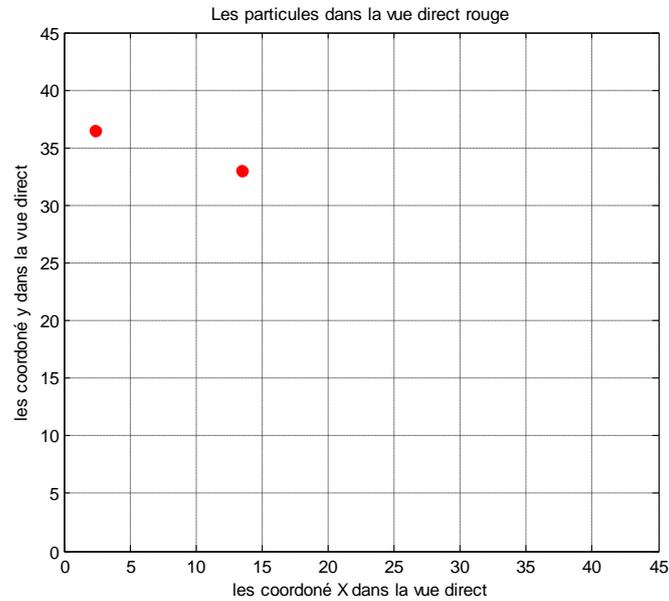


Figure III.39 : Coordonnées des particules d'après la vue directe rouge

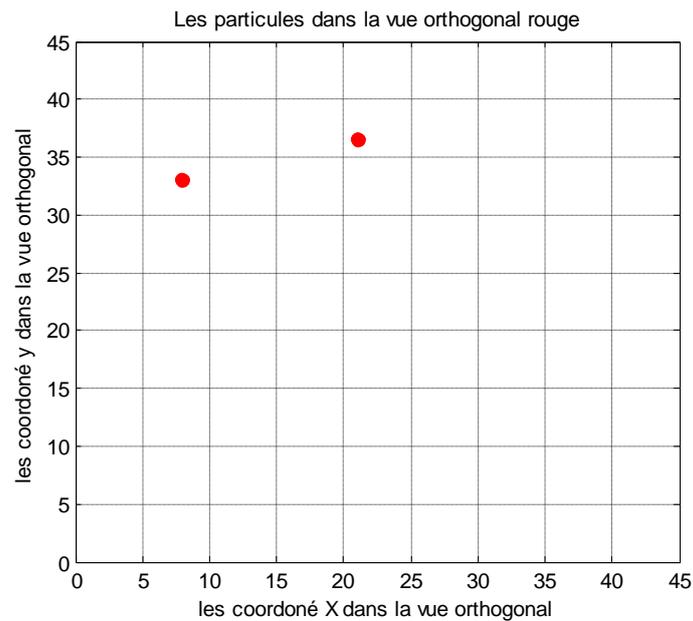
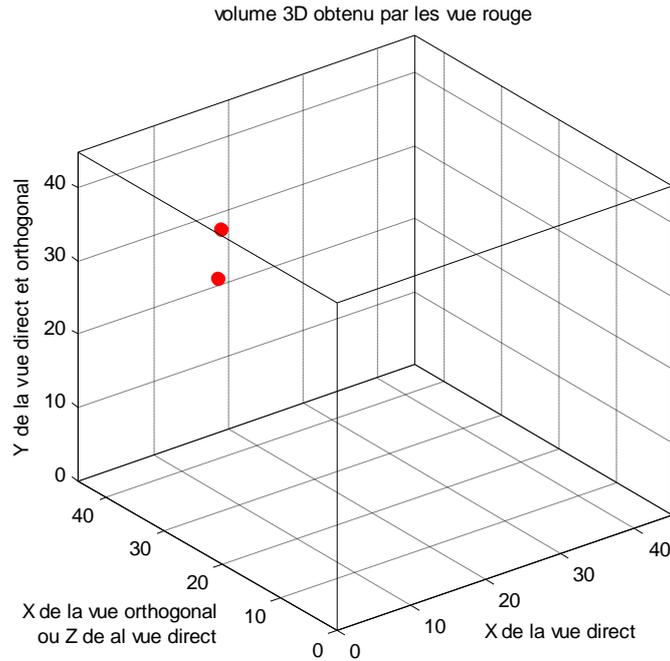


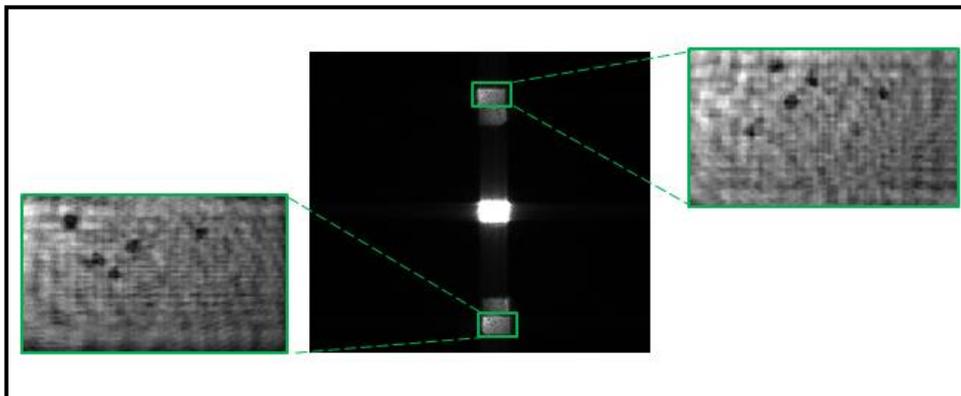
Figure III.40 : Coordonnées des particules d'après la vue orthogonale rouge

Le croisement entre les deux vues (directe et orthogonale) donne une vue 3D du volume étudié, la figure (III.41) montre l'emplacement des particules dans le volume.



**Figure III.41 :** Vue 3D obtenue d'après les deux vues rouges.

Pour voir les particules trouvées sur les vues vertes, une autre mise au point sur les vues vertes est nécessaire. La figure (III.41) montre la mise au point sur les vues vertes, les deux vues portent cinq particules. les coordonnées X et Y de chaque particule sont tirées d'après la vue directe (figure III.43 et III.44), et la coordonnée Z est tirée d'après la vue orthogonale (figure III.43 et III.45).



**Figure III.42 :** Image reconstruite de l'hologramme enregistré avec une mise au point sur les vues vertes.

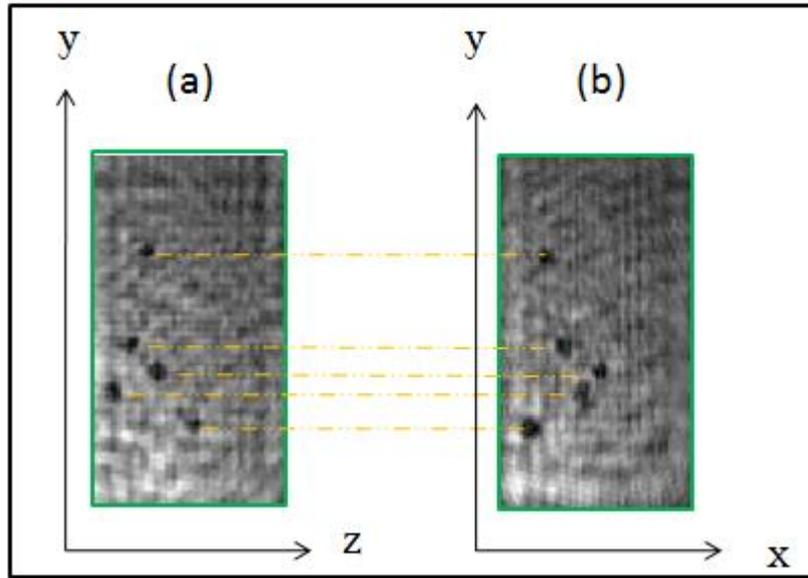


Figure III.43 : Coordonnées des particules d'après les vues vertes

a) vue orthogonale, b) vue directe

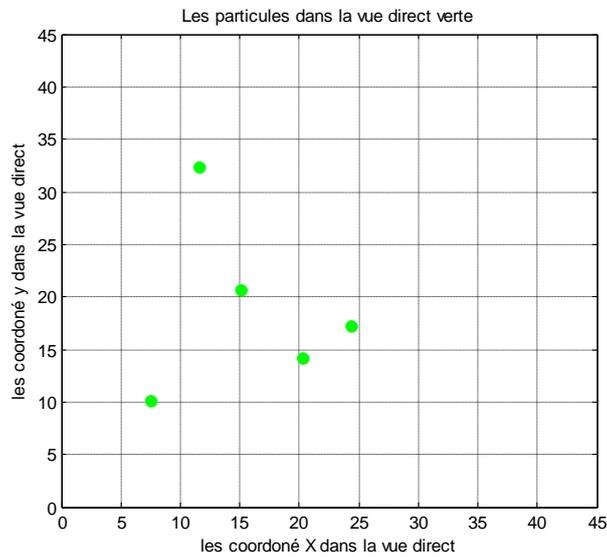


Figure III.44 : Coordonnées des particules d'après la vue directe verte

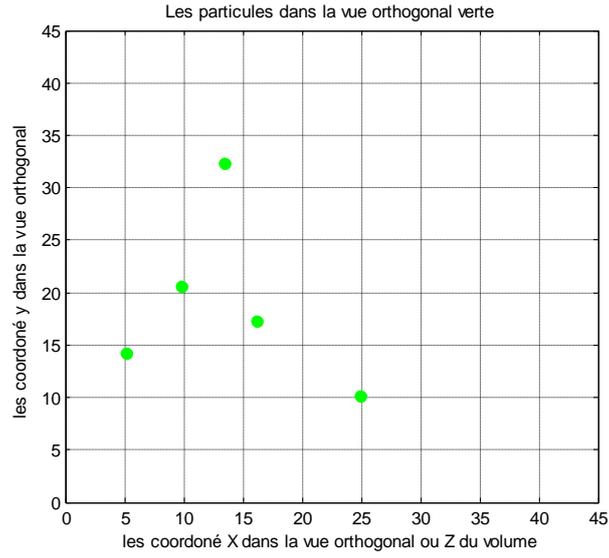


Figure III.45 : Coordonnées des particules d'après la vue orthogonale verte

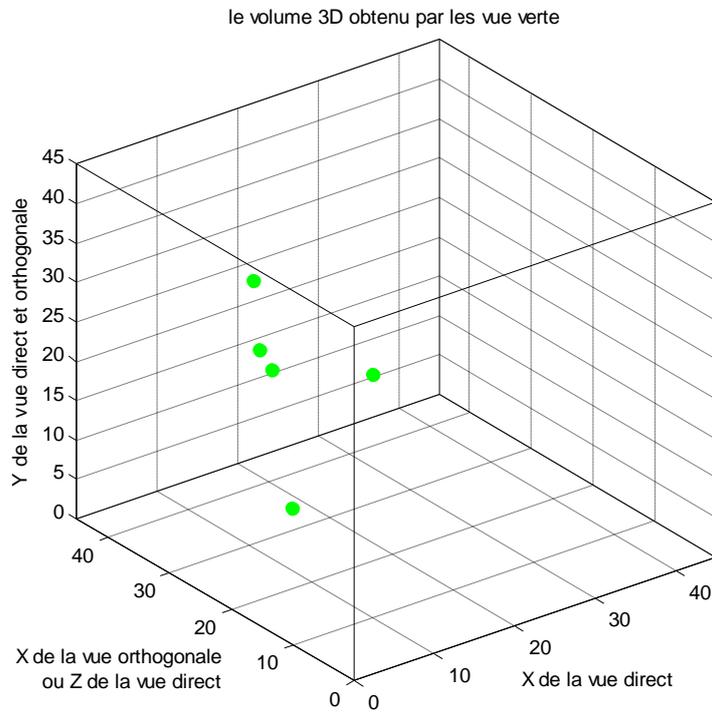


Figure III.46 : Vue 3D obtenue d'après les deux vues vertes

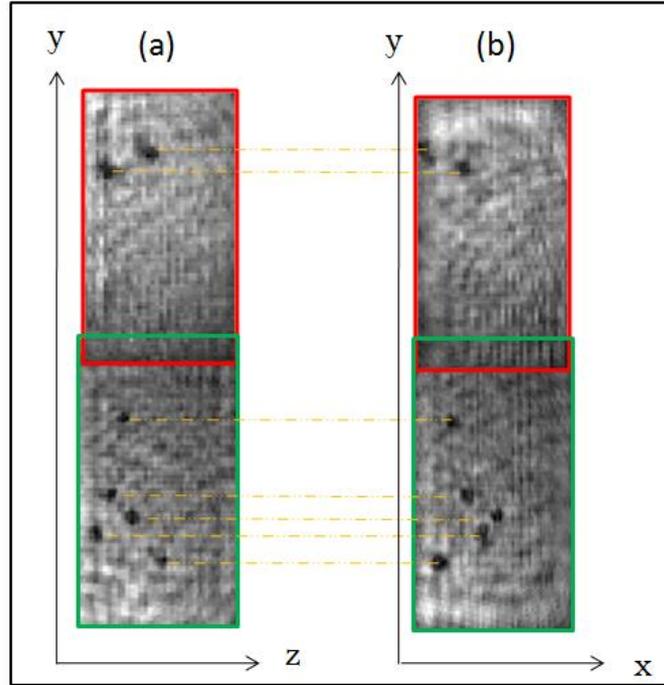


Figure III.47 : Synthèse d'ouverture des deux vues

a) vue orthogonale, b) vue directe

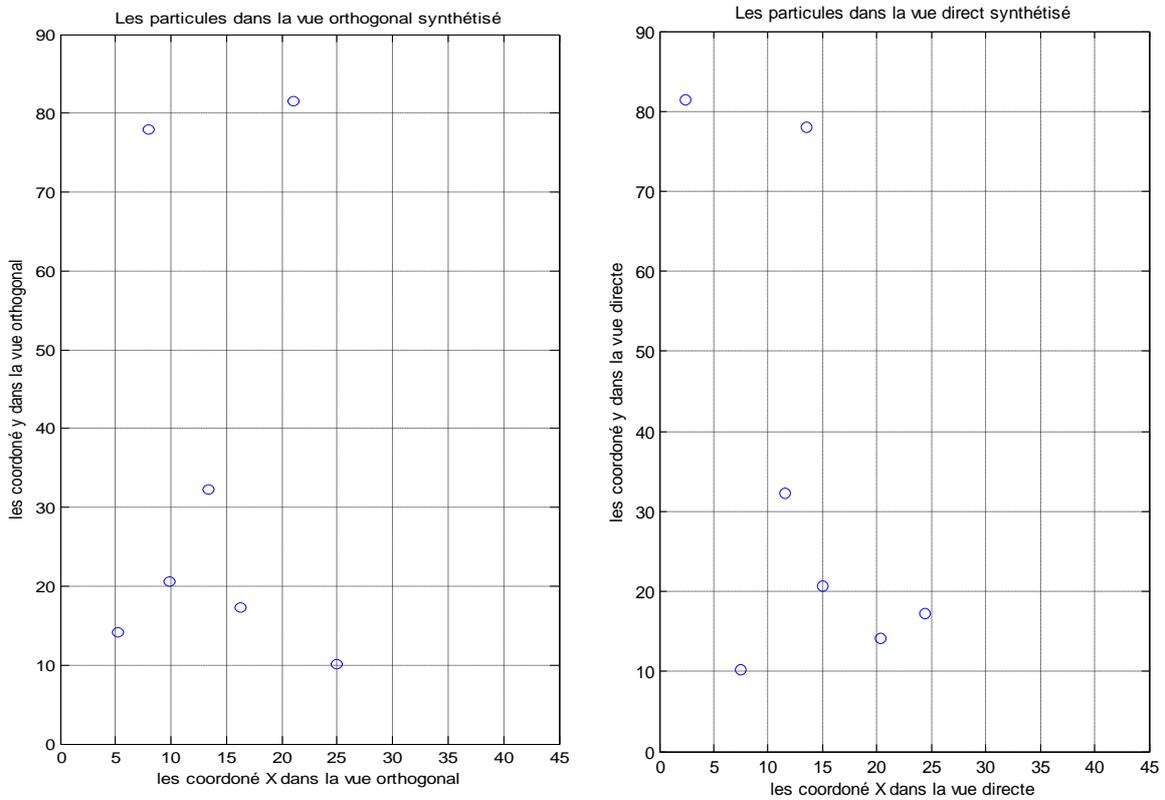
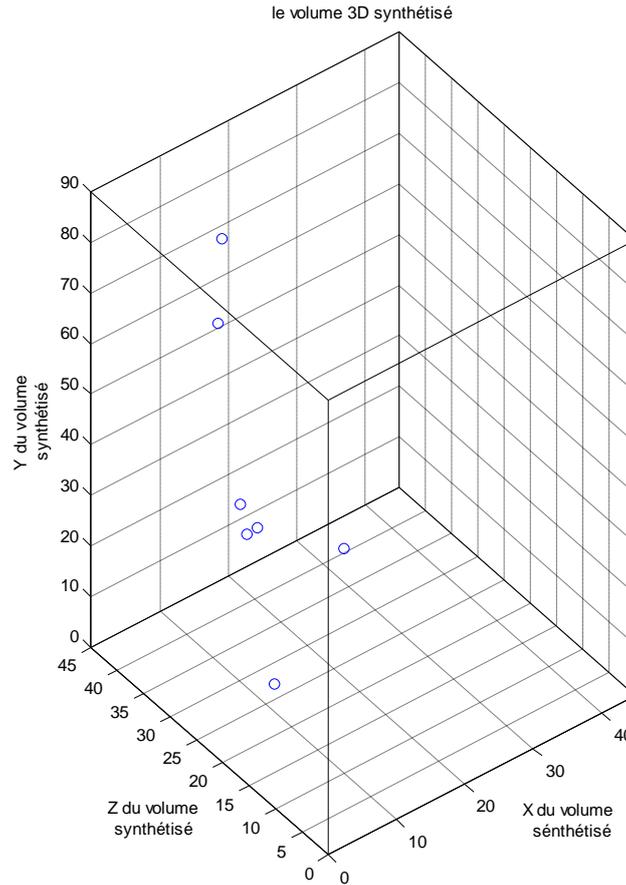


Figure III.48 : Coordonnées des particules après synthèse d'ouverture des deux vues

à droite la vue directe et à gauche la vue orthogonale.



*Figure III.49 : Vue 3D du volume après synthèse d'ouverture des deux vues 3D verte et rouge.*

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier temps une technique d'holographie digitale à deux vues orthogonales dans laquelle le faisceau de référence a été supprimé. La technique proposée a été utilisée pour enregistrer un hologramme de particules. Ensuite, l'hologramme enregistré a été reconstruit en 3D par le croisement entre les deux vues. En deuxième temps, nous avons proposé une autre technique d'holographie digitale des particules mais cette fois-ci à quatre vues. Les quatre vues sont enregistrées simultanément avec la même distance d'enregistrement en appliquant la combinaison entre le multiplexage angulaire et le chromatique. Cette dernière technique nous a permis de faire une synthèse d'ouverture de la zone d'étude avec des distances d'enregistrement faibles.

### III.5 Référence

- [1] Ye Pu and Hui Meng. An advanced off-axis holographic particle image velocimetry (hpiv) system. *Experiments in Fluids*, 29(2) :184–197, (2000).
- [2] Jian Sheng, Edwin Malkiel, and Joseph Katz. Single beam two-views holographic particle image velocimetry. *Applied optics*, 42(2) :235–250, (2003).
- [3] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, B. W. van Oudheusden, “Tomographic particle image velocimetry”, *Exp. Fluids.*, 41, 933-947 (2006)
- [4] H. Meng, G. Pan, Y. Pu, S. H. Woodward, “Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording”, *Meas. Sci. Technol.*, 15, 673-685 (2004)
- [5] leith E. N. and J. Upalnieks. "Reconstructed Wavefronts and Communication Theory ." *J. Opt. Soc. Am*, vol. 52, no. 10, p. 1123. (1962).
- [6] Yuan C, Zhai H and Liu H Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis *Opt. Lett.* 33 2356–8 (2008)
- [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," *Opt. Express* 17, 8709-8718 (2009).
- [8] Wang X and Zhai H, Pulsed digital micro-holography of femto-second order by wavelength division multiplexing *Opt. Commun.* 275 42–5 (2007)
- [9] Kuhn J, Colomb T, Montfort F, Charrière F, Emery Y, Cuche E, Marquet P and Depeursinge C Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition *Opt. Express* 15 7231–42 (2007)
- [10] Colomb T, Dahlgren P, Beghuin D, Cuche E, Marquet P and Depeursinge C Polarization imaging by use of digital holography *Appl. Opt.* 41 27–37 (2002).

- [11] Wang J, Zhao J, Qin C, Di J, Rauf A and Jiang H Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion Opt. Lett. 37 1211–3 (2012).
- [12] Bergström, P., Khodadad, D., Hällstig, E., & Sjö Dahl, M. Dual-wavelength digital holography: single-shot shape evaluation using speckle displacements and regularization. Applied optics, 53(1), 123-131 (2014).
- [13] Yonggang Zhang, Gongxin Shen, Andreas Schröder, and Jürgen Kompenhans. Influence of some recording parameters on digital holographic particle image velocimetry. Optical Engineering, 45(7) 075801–075801 (2006).
- [14] Yuan C, Situ G, Pedrini G, Ma J and Osten W Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing Appl. Opt. 50 B6 11(2011).
- [15] Wu, Yongli, et al. "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).
- [16] Sebti Boucherit, Larbi Bouamama, Rabah Zegadi and Serge Simoens, Formulation of off-axis single reference beam and two angle views for digital holography, J. Opt. 12 035302 (2010).
- [17] Soufiane Mebarek Azzem, Larbi Bouamama, S Simoëns and W Osten, Two beams two orthogonal views particle detection, J. Opt. 17 045301 (2015).
- [18] YUAN, Caojin, ZHAI, Hongchen, et LIU, Haitao. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis. Optics letters, 33, 20, 2356-2358 (2008).
- [19]. S. T. Thurman, and A. Bratcher, "Multiplexed synthetic-aperture digital holography," Appl. Opt. 54, 559-568 (2015).
- [20] Y. Zhang, X. Lu, Y. Luo, L. Zhong, and C. She. Synthetic aperture holography by movement of object Proc. SPIE, 5636, (2005).

## Two beams two orthogonal views particle detection

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

2015 J. Opt. 17 045301

(<http://iopscience.iop.org/2040-8986/17/4/045301>)

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

IP Address: 156.18.40.26

This content was downloaded on 08/10/2015 at 10:17

Please note that [terms and conditions apply](#).

# Two beams two orthogonal views particle detection

S Mebarek Azzem<sup>1</sup>, L Bouamama<sup>1</sup>, S Simoëns<sup>2</sup> and W Osten<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Applied Optics Laboratory, Institute of Optics and Precision Mechanics, Ferhat Abbas University of Setif, 19000 Setif, Algeria

<sup>2</sup> Acoustic and Fluid Mechanics Laboratory, UMR CNRS 5509, UCB Lyon I, INSA Lyon, Central School of Lyon, 69 130 Ecully, France

<sup>3</sup> Stuttgart University Institute of Technical Optics, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Germany

E-mail: [larbi.bouamama@univ-setif.dz](mailto:larbi.bouamama@univ-setif.dz)

Received 25 November 2014, revised 9 January 2015

Accepted for publication 21 January 2015

Published 11 March 2015



CrossMark

## Abstract

This paper presents a new technique for recording the two views off-axis digital holography using only two beams, each one acting as an object beam for its proper view and as a reference for the other view. This technique allows one to obtain two orthogonal views of the same volume simultaneously using only two beams. This leads one to avoid the large focusing distance inherent to off-axis digital holography and gives the real position of any object in the working volume by crossing the two view data. Furthermore, the lateral resolution should be the same as the vertical one. The proposed technique was improved experimentally using a metallic wire in an L shape and four moving particles.

Keywords: two views off-axis digital holography, angular multiplexing holograms, 3D reconstruction, solid particle position

## 1. Introduction

Digital holography has become a widely applicable tool for visualizing and studying the evolution of different kinds of objects and phenomena. Two configurations are possible: in-line [1, 2] and off-axis [3, 4]. It consists of two steps: the recording of an interference pattern resulting from the superposition of the reference and the object beams, then the reconstruction of the object field using optical or numerical techniques [5, 6].

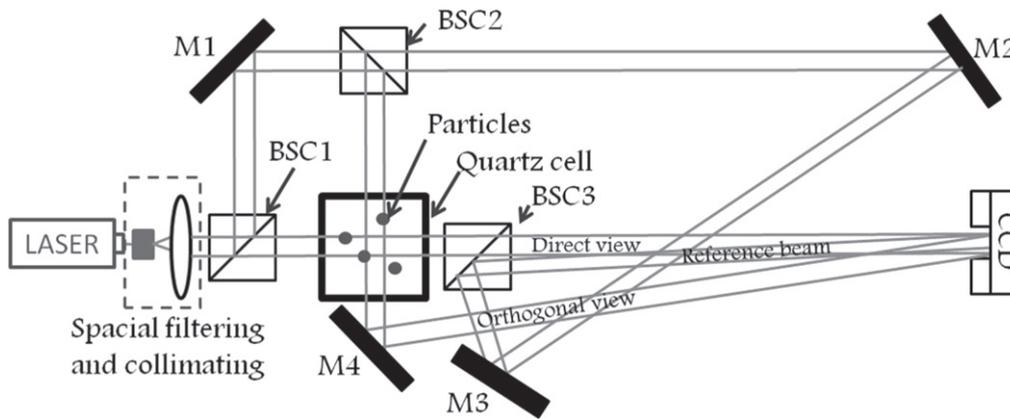
Digital holography with its developments suffers from low size and low resolution of the CCD or CMOS sensors, but it offers a wide range of possibilities in handling and processing data. On behalf of recording and reconstructing holograms in quasi-real-time, various techniques and configurations were developed with the aim of overcoming the problem of low size and resolution of the CCD or CMOS sensors. Several of these techniques are based on the multiplexing of holograms [7, 8], they are done spatially [9, 10], chromatically [11], by polarization [12] or by a combined multiplexing [13]. Wu *et al* [13] used a combined multiplexing between angular, polarization and wavelength with

the aim of recording four different regions of the object on the same CCD sensor. Furthermore, all multiplexing techniques use a separate reference wave for each view. Boucherit *et al* [14, 15] described an angular multiplexing technique using only one reference beam for two views. This is not very convenient for the proposed experimental set-up in which the space of handling optical components with their mechanical holders is much too limited due to the critical angle imposed by the Shannon sampling theorem in off-axis digital holography.

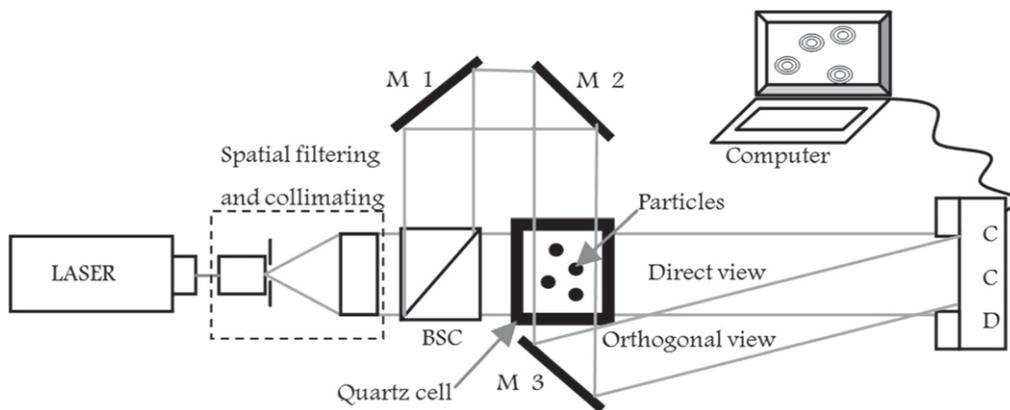
In the present work, we describe a new technique for recording two holograms angularly multiplexed using only two beams. Each beam acts as an object beam for its proper view and as a reference for the other view. The theoretical and experimental results will be discussed.

## 2. Two views off-axis digital holography

In the two orthogonal views off-axis digital holography, a multiplexed hologram is recorded by superimposing two object beams illuminating the object in an orthogonal manner to their respective reference beams. The challenge in this



**Figure 1.** Two orthogonal object beams, one reference beam set-up. BSC1, BSC2 and BSC3: beam splitter cubes; M1, M2, M3 and M4: mirrors.



**Figure 2.** Two beams, two orthogonal views off-axis digital holography. BSC: beam splitter cube; M1, M2 and M3: mirrors.

technique is how to avoid space limitations for carrying all beams on the image sensor without violating the sampling theorem.

**2.1. Two orthogonal object beams, one reference beam digital off-axis holography**

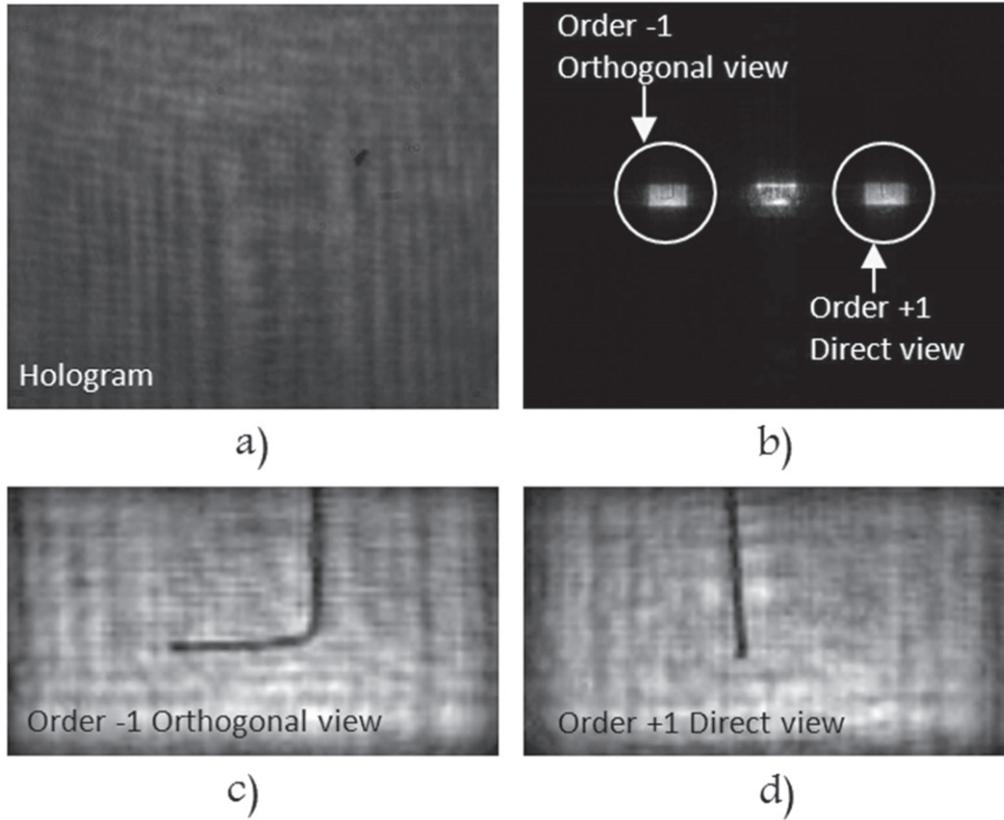
Boucherit *et al* [14, 15] developed a technique based on two orthogonal object beams and one reference beam for better localizing tracer particles in a flow. Unfortunately, in this configuration, the recording and therefore the reconstructing distances were relatively large: more than three meters (360 cm for the direct view and 380 cm for the orthogonal view). In order to reduce these distances, we made some geometrical changes on the set-up (figure 1). By directing the orthogonal object beam directly on the imaging sensor and orienting the reference beam using the beam splitter cube (BSC3), it is possible to reduce the angles between the beam pairs. Using a CCD camera of  $4.65 \times 4.65$  pixel size, the recording and therefore the reconstructing distances were reduced to about 65 cm. However, this configuration leads to difficult adjustments.

**2.2. Two orthogonal object beams digital off-axis holography**

In order to avoid such difficult adjustments and the bulk of the last set-up, we propose a new configuration consisting of only two off-axis beams.

Figure 2 shows the proposed configuration in which the reference beam is suppressed, and each beam acts as an object beam for its proper view and as a reference for the other view. The experimental set-up consists of a He-Ne laser with a 632.8 nm wavelength and a diameter of 2 mm, filtered spatially and expanded to 8 mm in diameter. As the power of the used laser is 30 mW, an attenuator filter is used at the output of the laser to avoid the saturation of the camera. A Sony CCD camera model XCD with  $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$  pixel size and  $1392 \times 1040$  pixels as the maximum resolution records the hologram.

The output laser beam is divided into two parts by a beam splitter cube (BSC); the transmitted part goes through the object, giving the direct view. The reflected part is oriented toward the orthogonal face of the object by M1 and M2 and then by M3 to create the orthogonal view. The two views are superimposed on the plane of the CCD target at a 58 cm distance (object-CCD), forming our hologram. The angle between the two views must be less than the maximum



**Figure 3.** Two beams, two orthogonal views of a static object (metallic wire). (a) Recorded hologram, (b) reconstructed image, (c) orthogonal view, (d) direct view.

angle ( $\theta_{max}$ ) imposed by the Shannon sampling criterion [16]

$$\theta_{max} = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta_x}\right) \quad (1)$$

where  $\Delta_x$  is the pixel size of the CCD camera, and  $\lambda$  is the wavelength of the laser light.

For our set-up  $\Delta_x = 4.65 \mu\text{m}$  and  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ; the angle needed should not exceed  $3.9^\circ$ .

In the proposed configuration the angle between the two beams was  $1.48^\circ$ . Any reduction of the angle between the two views produces a low recording distance and increases the spatial frequency distribution of the fringes.

The irradiance recorded by the CCD camera could be written as follows:

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

where  $O_{dir}$  and  $O_{ort}$  are the direct and orthogonal beams, respectively, and  $*$  denotes the complex conjugate.

Term 1 represents the sum of individual intensities of the two beams. Terms 2 and 3 represent the complex amplitude distribution of the two views.

At the reconstruction, each hologram has to be multiplied with its reference wave. Taking into account only the image

terms, we get

$$O_{dir} \underbrace{O_{dir}O_{ort}^*}_2 + O_{ort} \underbrace{O_{dir}^*O_{ort}}_3 = O_{dir}^2 O_{ort}^* + O_{ort}^2 O_{dir}^* \quad (3)$$

It is clear that at the reconstruction process, the two wave objects are present.

In the numerical process, it is just necessary to multiply with one direct or orthogonal wave.

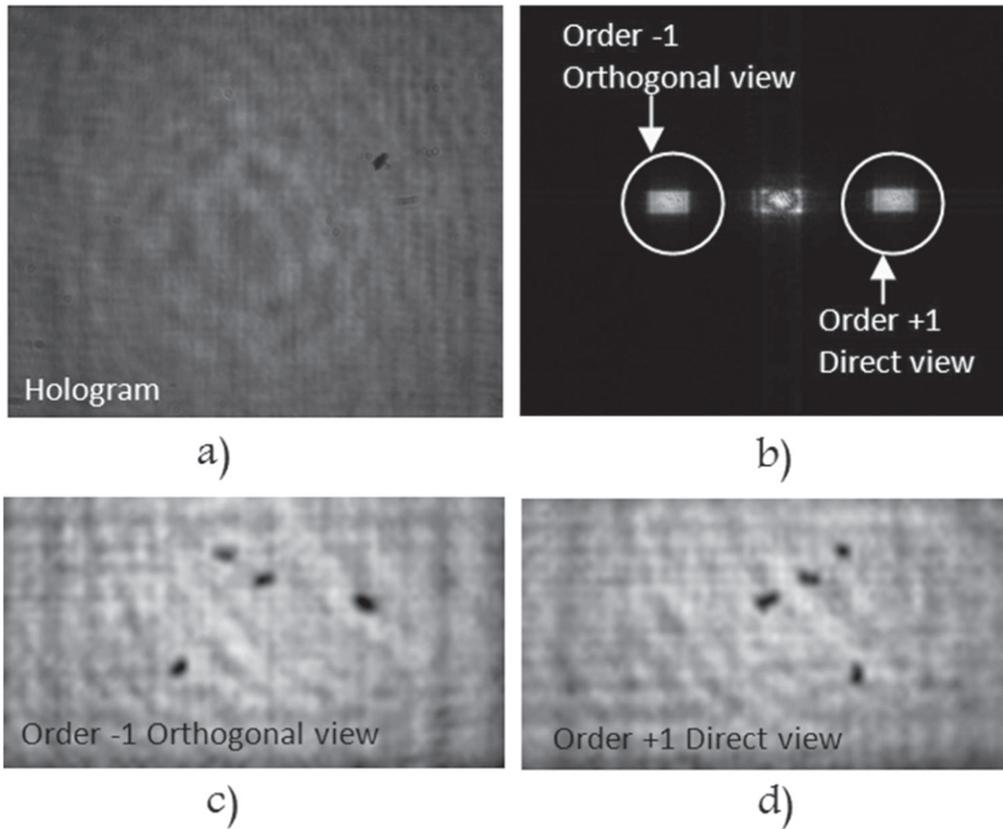
### 3. Results and discussion

In order to improve the efficiency of our proposed configuration, two kinds of objects are used. The first one was a static metallic wire with an L shape, specially selected in order to justify the difference between the two views. The second one was four particles moving in water.

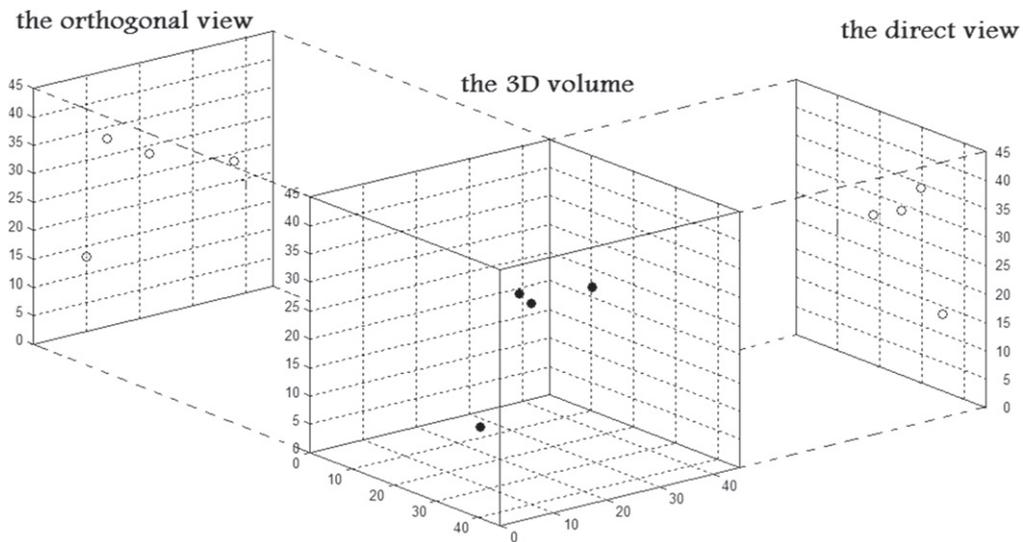
Figures 3(a) and (b) show the recorded hologram and its reconstructed image using the Fresnel approach for the first object. Figures 3(c) and (d) show the enlarged orthogonal and direct views, respectively.

In the orthogonal view (figure 3(c)), the image of our object appears in an inverted L shape, confirming that we are looking at this object from its front side.

In the direct view (figure 3(d)), the image of our object is in an I shape, confirming that we are looking at our object from the back side.



**Figure 4.** Two beams, two orthogonal views of a dynamical object (solid particles). (a) Recorded hologram, (b) reconstructed image, (c) direct view, (d) orthogonal view.



**Figure 5.** 3D volume reconstruction.

Then, our set-up was used for recording holograms of solid particles made from polyester material (mean diameter  $200\ \mu\text{m}$  and density  $1.37\ \text{g cm}^{-3}$ ) moving in a quartz cell ( $1 \times 1 \times 5\ \text{cm}^3$ ) filled with water. The particles were injected manually for the purpose of controlling the number.

Figures 4(a) and (b) show, respectively, the hologram and its reconstructed image using the Fresnel approach.

Figures 4(c) and (d) show the enlarged orthogonal and direct views, respectively.

Figures 3(c) and (d) clearly show the same number of particles and their orthogonal distributions, allowing us to identify them in each view.

For a 3D reconstruction of the volume and to find the exact position in the volume of each particle, we get the two coordinates (X, Y) from the direct view (figure 4(d)), and the third coordinate (Z) is obtained from the orthogonal view (figure 4(c)); the crossing of the two views enables us to reconstruct the 3D volume shown by figure 5.

#### 4. Conclusion

We have presented in this work a new technique for recording two views in off-axis digital holography using only two beams and without a reference beam. This leads to the minimization of the optical components' number and their mechanical holders in the set-up.

The validity and the efficiency of the technique were tested by recording and reconstructing two kinds of objects: the first one as a static one with a special shape for showing the real difference between the two views and the second one by moving particles in water as an aim of the field of application of this technique.

The suppression of the reference beam enables us to reduce the recording distance and to therefore increase the spatial resolution imposed by the Shannon sampling theorem.

This technique, which is based on a lens-less holographic scheme, could be suitable for studies of diffracting objects such as microwires, solid particles, droplets, bubbles, life cells, and so on.

#### References

- [1] Quan C, Chen W and Tay C J 2011 Numerical reconstruction in in-line digital holography by translation of CCD position and gradient operator method *Opt. Commun.* **284** 2767–70
- [2] Yingchun W Y, Wu X, Saengkaew S, Meunier-Guttin-Cluzel S, Chen L, Qiu K, Gao X, Gréhan G and Cen K 2013 Digital Gabor and off-axis particle holography by shaped beams: a numerical investigation with GLMT *Opt. Commun.* **305** 247–54
- [3] Chaab O, Bouamama L and Simoëns S 2013 An adaptive anisotropic magnification algorithm of numerical reconstructed holographic image via a cascaded fresnel transform *Opt. Commun.* **291** 61–9
- [4] Qiu P and Gu J 2014 Elimination of zero-order and conjugate images in off-axis digital holography *Optik* **125** 2652–5
- [5] Schnars U and Jüptner W 2002 Digital recording and numerical reconstruction of holograms measurement *J. Sci. Technol.* **13** R85–101
- [6] Akhter N, Min G, Kim J W and Lee B H 2013 A comparative study of reconstruction algorithms in digital holography *Optik* **124** 2955–8
- [7] Asundi A 2011 *Digital Holography for MEMS and Microsystem Metrology* (Chichester: Wiley)
- [8] Weng J and Zhong J 2013 Angular multiplexing and demultiplexing by Gabor wavelet transform in digital holography *Opt. Commun.* **291** 124–32
- [9] Yuan C, Zhai H and Liu H 2008 Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis *Opt. Lett.* **33** 2356–8
- [10] Wang X and Zhai H 2007 Pulsed digital microholography of femtosecond order by wavelength division multiplexing *Opt. Commun.* **275** 42–5
- [11] Yuan C, Situ G, Pedrini G, Ma J and Osten W 2011 Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing *Appl. Opt.* **50** B6–11
- [12] Wang J, Zhao J, Qin C, Di J, Rauf A and Jiang H 2012 Digital holographic interferometry based on wavelength and angular multiplexing for measuring the ternary diffusion *Opt. Lett.* **37** 1211–3
- [13] Wu Y, Yang Y, Zhai H, Ma Z, Deng L and Ge Q 2013 Single-exposure approach for expanding the sampled area of a dynamic process by digital holography with combined multiplexing *J. Opt.* **15** 085402
- [14] Boucherit S, Bouamama L, Benchikh H, Lenoir J M and Simoëns S 2008 Three-dimensional solid particle positions in a flow via multiangle off-axis digital holography *Opt. Lett.* **33** 2095–7
- [15] Boucherit S, Bouamama L, Zegadi R and Simoëns S 2010 Formulation of off-axis single reference beam and two angle views for digital holography *J. Opt.* **12** 035302
- [16] Schnars U and Jueptner W 2005 *Digital Holography* (Berlin: Springer) pp 64–6

## **Résumé**

Dans ce travail de thèse, nous présentons une technique d'holographie digitale hor-axe à deux vues orthogonales, dans laquelle le faisceau de référence a été supprimé. La suppression de ce dernier surmonte le problème de la grande distance d'enregistrement liée à l'holographie digitale à deux vues, et rend par la suite l'ajustage du montage optique relativement simple.

La technique proposée a été utilisée dans un premier temps pour enregistrer des hologrammes de microparticules de type traceurs injectées dans une cuvette en quartz. Les deux vues enregistrées ont été multiplexées angulairement et le croisement entre ces deux vues donne une vue 3D du volume enregistré.

A cause de la faible ouverture numérique de la première configuration proposée, nous avons associé le multiplexage chromatique au multiplexage angulaire pour pouvoir enregistrer quatre vues du volume d'étude, et avec une synthèse d'ouverture entre les deux techniques de multiplexage le volume d'étude sera doublé.

**Mots-clés :** holographie digitale hor-axe à deux vues, multiplexage angulaire, multiplexage chromatique, hologramme de particules.

## **Abstract**

In the present work thesis, we present a two orthogonal views off-axis digital holography technique, in which the reference beam was suppressed. Suppression of reference beam avoid the problem of the large recording distance inherent to the two views digital holography and therefore leads to an easier handling of the optical set-up.

The proposed technique was used in a first step for recording digital holograms of microparticles kind markers injected in a quartz cell. The two-recorded views were multiplexed angularly and the cross between the two views leads to 3-D representation of the studied volume.

According to the low numerical aperture of the first proposed configuration, we associated chromatic multiplexing to the angular one in order to record four views of the same volume and by using synthetic aperture for the two techniques, the studied volume is doubled.

**Key words:** Two views off-axis digital holography, angular multiplexing, chromatic multiplexing, particle holograms