

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF

(ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à l'Institut d'Optique et de Mécanique de précision

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

En Optique et Mécanique de précision

Option: Optique Appliquée

Par

M^{elle} ZAIDI Sassia

THEME

LOCALISATION DE MICROPARTICULES DANS UN VOLUME PAR
HOLOGRAPHIE DIGITALE ET SYNTHESE D'OUVERTURE.

Soutenu le :.....Devant la commission d'examen:

Dr: N. DEMAGH

M.C à l'université de Sétif

Président

Pr: L. BOUAMAMA

Prof à l'université de Sétif

Rapporteur

Dr: K. AYADI

M.C à l'université de Sétif

Examineur

Dr: H. GUESSAS

M.C à l'université de Sétif

Examineur

Promotion 2010 /2011

DEDICACE



Je dédie ce modeste travail :

Aux personnes qui me sont les plus chères dans ce monde, ma mère et mon père, pour leurs sacrifices, leur encouragement et leur amour. Vous avez fait de moi ce que je suis en ce moment, un grand merci

Je le dédie encore et encore

A ma mère, tu t'es tellement inquiétée pour moi que je le ressens même en étant loin de toi.

Encore une fois, Mama merci

Je le dédie aussi

A celui qui compte beaucoup à mes yeux, mon très cher grand frère Khattab et ses petits Achraf et Maysoune.

A celui qui vit dans le sang de mes veines, mon très cher frère Omar.

A ma petite fleur, mon très cher petit frère Dhahbi.

A la source de l'amour et de la tendresse, mes très chères sœurs Samiha, Radhia, Widad, sans oublier la petite bougie Kenza.

A toute la famille proche et lointaine en particulier ma grande mère, mes oncles et mes tantes.

A tous mes amis : Hiba, B. Hiba, Houria, Kadour, Rachad et Hakim sans oublier Salah et Ishak

A tous mes collègues de la promotion 2008/2009

A toute personne qui m'a connue, m'a respectée et m'a aimée.

SASSIA

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord Dieu le plus grand et le plus puissant qui m'a aidé à établir ce modeste travail.

Mes remerciements vont à Monsieur Larbi Bouamama, professeur au département d'optique et de mécanique de précision de l'université Ferhat Abbas de Sétif, qui a su me faire apprécier et aimer le monde de l'holographie. J'ai pu apprécier, durant mes deux ans de thèse, ses précieux conseils, sa façon de rendre simple des problèmes complexes, ainsi que les enseignements qu'il a su me prodiguer. Je tiens particulièrement à souligner sa pleine disponibilité, sa gentillesse et je lui suis reconnaissante pour les discussions fructueuses dans le domaine scientifique que nous avons pu avoir.

Je souhaite exprimer mes remerciements à Monsieur Demagh Nacerddine, maître de conférence à l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'université Ferhat Abbas de Sétif, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Toute ma gratitude va également à Monsieur Ayadi Khaled, maître de conférence à l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'université Ferhat Abbas de Sétif et à Monsieur Guessas Hocine, maître de conférence à l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'université Ferhat Abbas de Sétif, qui ont accepté d'évaluer et de juger ce travail.

Je tiens également à remercier les personnes qui m'ont aidé. Tout d'abord, je remercie Mr. Nini Brahim de l'université d'Oum El Bouaghi d'avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions et pour ses remarques judicieuses sur mes travaux. Je remercie aussi Mr. Boukrouma Ammar de l'université d'Oum El Bouaghi pour son aide et son intérêt à mes travaux.

Je voulais également remercier tout particulièrement Mr. Kouah Abd Erazak de EMP de m'avoir fourni les documentations sur l'imagerie RADAR sans oublier Mr. Regoui Cherif et Mr. Chaab Omar.

Je n'oublierai pas de remercier tous les enseignants qui ont assuré ma formation et tout le personnel administratif du IOMP surtout Monsieur Fatha Kamel.

Enfin, j'ai une pensée pour l'ensemble de mes amis ainsi que pour ma famille. Leur soutien, amitié et amour ont été des éléments essentiels à l'accomplissement de ce travail.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE..... 01

CHAPITRE « I » : LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE EN IMAGERIE RADAR

I.1. Introduction 04

I.2. Historique de développement de la technologie SAR 04

I.3. Généralité sur les radars..... 06

I.4. Types de radar..... 07

I.4.1. Radar à exploration circulaire 07

I.4.2. Radar latéral 07

I.4.2.1. Le radar à antenne réelle 07

I.4.2.1.1. Principe et géométrie d'acquisition 07

I.4.2.1.2. Le signal radar enregistré..... 09

I.4.2.1.3. Notion de résolution d'un capteur..... 09

 a) La résolution en distance..... 11

 b) La résolution en azimut..... 12

I.4.2.2. Le radar à synthèse d'ouverture 13

I.4.2.2.1. Technique..... 13

I.4.2.2.2. Imagerie RSO..... 14

I.4.2.2.3. La compression d'impulsion..... 14

I.4.2.2.4. La synthèse d'ouverture 15

I.5. Différents modes de fonctionnement 17

I.5.1. Mode strip-map 17

I.5.2. Affinage Doppler, antenne en rotation..... 18

I.5.3. Mode télescope 18

I.5.4. Mode scansar 19

I.5.5. Mode squint, ou mode dépointé..... 19

I.5.6. Mode inverse..... 20

I.5.7. Mode multivue 21

Conclusion..... 22

CHAPITRE « II » : LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE EN IMAGERIE OPTIQUE

II.1. Introduction	23
II.2. La synthèse d'ouverture en télescopée	23
II.2.1. Etat de l'art	24
II.2.2. Principe général	26
II.2.2.1. L'interféromètre COAST (Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope)	27
II.2.2.2. L'instrument GI2T (Grand Interféromètre à 2 Télescopes)	27
II.2.2.3. L'interféromètre Keck	27
II.2.2.4. L'interféromètre SUSI (Sydney University Stellar Interferometer)	27
II.2.2.5. L'interféromètre CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy)	28
II.2.2.6. L'interféromètre VLTI (Very Large Telescope Interferometer)	28
II.2.2.7. L'interféromètre IOTA (Infrared Optical Telescope Array)	29
II.2.2.8. L'interféromètre NPOI (Navy Prototype Optical Interferometer).....	29
II.2.3. Antenne synthétique fibrée	29
II.2.4. Pourquoi la synthèse d'ouverture optique.....	30
II.2.5. Intérêt fondamental de la synthèse d'ouverture optique.....	30
II.2.6. Les différents types d'Instruments à Synthèse d'Ouverture Optique.....	33
II.2.6.1. Le télescope monopupille	33
II.2.6.2. Le réseau de sous-pupilles	33
II.2.6.3. Les interféromètres fibrés	34
II.2.6.4. Les systèmes de type Fizeau	34
II.2.6.5. Les systèmes de type Michelson	34
II.2.6.6. Les systèmes Michelson en mode Fizeau.....	35
II.3. La synthèse d'ouverture en imagerie laser	35
II.4. La synthèse d'ouverture en microscopie	38
II.4.1. La synthèse d'ouverture en microscopie interférométrique	39
II.4.2. Microscopie à synthèse d'ouverture et l'illumination par l'onde évanescente	40
II.4.3. La synthèse d'ouverture en microscopie confocale.....	41
II.4.4. La synthèse d'ouverture en microscopie Tomographique Diffractive	41
II.5. La synthèse d'ouverture en photographie.....	42
II.6. La synthèse d'ouverture en imagerie acousto-optique	43
II.7. La synthèse d'ouverture en PIV	44
Conclusion.....	45

**CHAPITRE « III » : LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE EN HOLOGRAPHIE
DIGITALE**

III.1. Introduction	46
III.2. Rappel sur le principe de l'holographie digitale	46
III.2.1. Définition de l'holographie digitale	46
III.2.2. Principes mathématiques	47
III.2.3. Montage d'enregistrement des hologrammes digitaux	49
III.3. Les différentes approches pour augmenter la résolution des systèmes d'imagerie en holographie	49
III.4. Présentation de quelques approches proposées pour augmenter la résolution	52
III.4.1. Utilisation d'un réseau de diffraction	52
III.4.2. Décalage de phase	57
III.4.3. Déplacement du capteur	58
III.4.4. Utilisation d'ondes d'éclairage inclinées	60
III.4.5. Rotation de l'objet	62
Conclusion	64

**CHAPITRE « IV » : APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE LA SYNTHÈSE
D'OUVERTURE EN HOLOGRAPHIE DIGITALE POUR LA LOCALISATION DE
MICROPARTICULES DANS UN VOLUME**

IV.1. Introduction	65
IV.2. Description du montage mis en œuvre	65
IV.3. Conditions expérimentales et précautions	66
IV.4. Description de la procédure de synthèse d'ouverture	67
IV.4.1. Méthode basée sur la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris des images	67
IV.4.2. Méthode basée sur la corrélation des images	68
IV.4.2.1. Techniques de Fourier	68
IV.4.2.2. Etude de la technique de Fourier basée sur la corrélation et la corrélation de phase ...	68
a) Exposé du problème	68
b) Recalage par corrélation	69
c) Recalage par corrélation de phase	71

IV.5. Résultats obtenus et discussion	72
IV.5.1. Méthode basée sur la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris des images.....	72
IV.5.2. Méthode basée sur la corrélation des images.....	76
a) La corrélation	76
b) La corrélation de phase	81
Conclusion.....	85
CONCLUSION GENERALE	86
ANNEXE	88
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	94

INTRODUCTION GENERALE

Le principe de l'holographie optique a été découvert par Dennis Gabor en 1948 alors qu'il travaillait sur l'amélioration de la résolution des images obtenues par microscopie électronique dans la compagnie Thomson-Houston à Rugby en Angleterre. Cependant, cette technique n'a connu son véritable essor qu'à l'avènement du laser, à partir de 1962, car celui-ci permet l'obtention d'interférences stables dues à la remarquable cohérence de la source.

L'holographie est une méthode optique reconnue permettant d'enregistrer le « relief » d'un objet sur une plaque photosensible et de reconstruire l'image de cet objet en 3D. Elle consiste à superposer une onde cohérente de référence à la lumière diffractée par un objet. Cela permet l'enregistrement de l'amplitude et la phase et de l'onde de objet sur un capteur uniquement sensible à l'intensité.

L'holographie optique est peu utilisée dans l'industrie pour raison de manque de moyens pratiques adéquats. En effet, l'enregistrement et le développement de la plaque holographique nécessitent en plus des conditions de cohérence de la source et des composants optiques adéquats, un local et des produits chimiques spécialisés. L'étape de restitution nécessite une remise en place exacte de l'hologramme.

L'holographie numérique est la numérisation de l'holographie traditionnelle optique, qui a pu se développer ces dernières années grâce aux progrès dans le domaine des caméras numériques et des ordinateurs.

L'idée de l'holographie numérique a été proposée pour la première fois en 1967 par J.W Goodman et R.W Lawrence. Ils enregistraient encore l'hologramme sur une plaque photographique, mais ils l'échantillonnaient de manière numérique afin de reconstruire le front d'onde issu de l'objet numériquement. L'holographie numérique complète dans le sens de l'enregistrement et de la reconstruction informatique a été effectuée tout d'abord par l'équipe de O. Coquoz puis par U. Schnars et W. Jüptner en 1994 quand ils ont introduit une caméra CCD comme support d'enregistrement. Depuis cette date, l'holographie numérique et la reconstruction de front d'ondes est une technique largement utilisée, notamment pour réaliser des mesures sans contact dans les domaines de la biologie, du contrôle industriel et de l'analyse d'écoulements.

Donc l'holographie numérique s'appuie sur l'holographie optique pour l'étape d'enregistrement et la phase de développement n'existe plus où l'hologramme n'est plus rééclairé mais traité numériquement.

Un domaine particulier où cette technique ne cesse de se développer étant la mécanique des fluides précisément tous les phénomènes ayant trait à l'environnement et le corps humain. C'est une technique qui permet de suivre soit en temps réel soit en temps différé les particules de type traceurs qui permettent à leur tour d'envisager l'évolution des différents phénomènes traités et de pouvoir prédire les différentes solutions.

Seulement le suivi de ces particules à l'aide de cette technique souffre de certaines carences telles la bonne localisation due à la grande profondeur de champ de la technique ainsi que la faible résolution des capteurs numériques (50 fois plus petite que les plaques holographiques). Les techniques de traitement d'images doivent être optimales pour permettre de compenser en partie cette faible résolution.

Différentes solutions ont été proposées pour palier à ce problème mais restent insuffisantes. La technique de synthèse d'ouverture utilisée surtout en imagerie radar semble être apte à donner une amélioration conséquente.

L'objectif de ce travail est de découvrir cette technique et de la mettre en œuvre afin de résoudre ce problème de localisation.

Le présent manuscrit se compose de quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne l'introduction à la synthèse d'ouverture en imagerie radar. Dans une première partie, les principes de base de l'imagerie radar sont exposés. La seconde partie traite en détail le principe de la technique de la synthèse d'ouverture et les différents modes de fonctionnement.

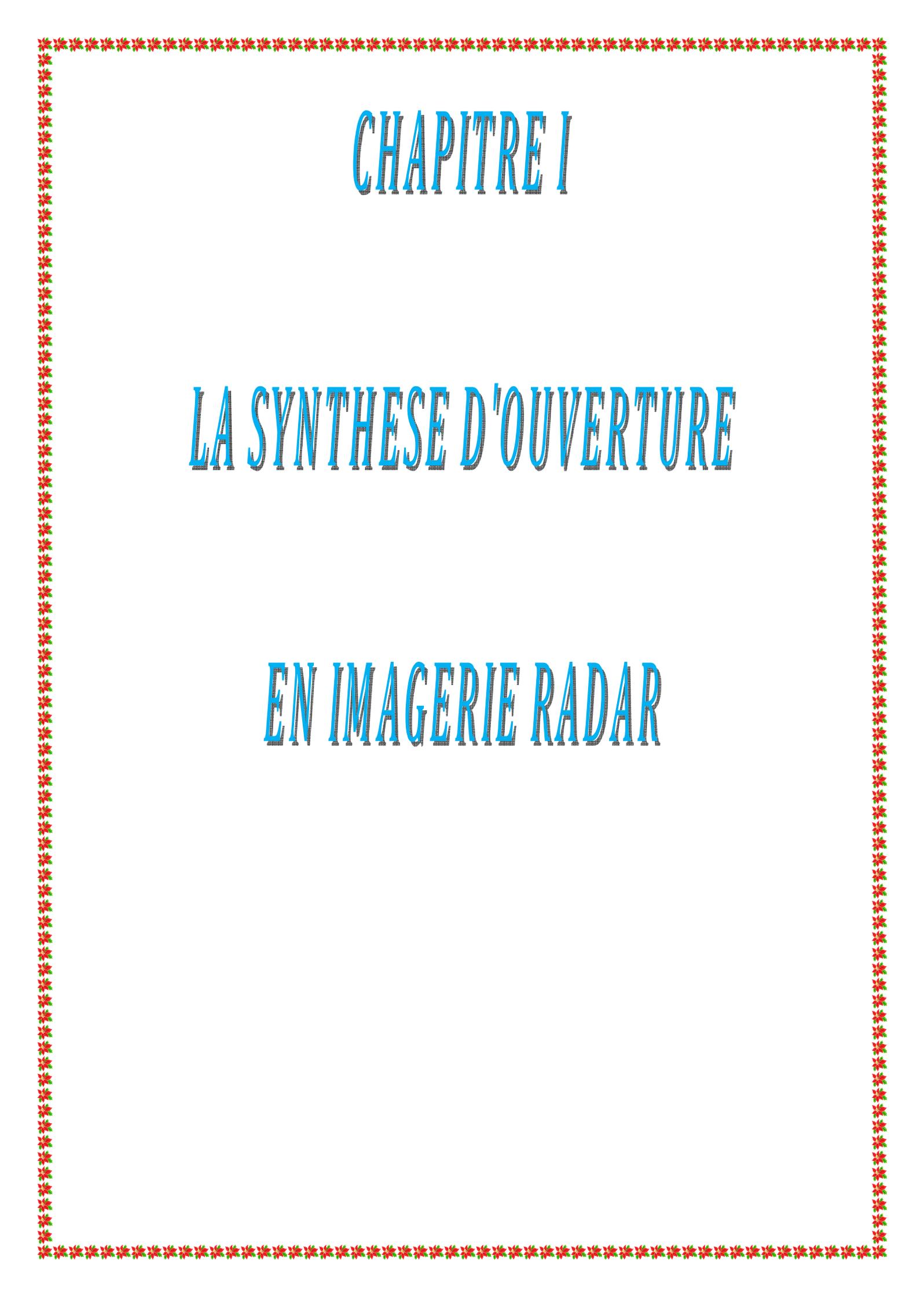
Le deuxième chapitre est dédié à l'application de cette technique en imagerie optique, nous verrons également les différents domaines d'imagerie où la synthèse d'ouverture peut être appliquée.

Le troisième chapitre présente une étude bibliographique sur les stratégies qui ont été définies et les différents approches qui ont été testées pour augmenter l'ouverture numérique du système optique afin d'obtenir la super-résolution. Dans un premier temps, nous

présenterons un rappel sur l'holographie digitale et son principe. Dans un second temps, nous verrons l'interaction entre l'holographie digitale et la technique de la synthèse d'ouverture. Enfin nous présenterons quelques approches proposées pour augmenter la résolution.

L'application de cette technique sera présentée au dernier chapitre, où on commencera par une partie expérimentale qui consiste à réaliser un montage photographique pour l'obtention des photos numériques en appliquant le principe de la technique de la synthèse d'ouverture SAR, on passera ensuite à la partie simulation, qui était faite sous environnement MATLAB. Des programmes ont été réalisés pour l'obtention des images synthétisées.

Enfin nous tirerons les principales conclusions de notre étude et nous verrons comment le système d'imagerie peut être amélioré tant sur le plan matériel que numérique.



CHAPITRE I

LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE

EN IMAGERIE RADAR

I.1. Introduction :

Les systèmes de mesures radar sont aujourd'hui devenus les principaux instruments de surveillance et de navigation aérienne et maritime. Dès l'avènement de la télédétection spatiale, un intérêt particulier est apparu pour ces capteurs [1]. Après un bref rappel historique sur l'instrumentation radar, ce chapitre introductif présentera le principe et les différents modes d'acquisition des radars à ouverture synthétique.

I.2. Historique de développement de la technologie SAR :

Le terme RADAR, acronyme pour Radio Detection And Ranging, est le nom de code adopté au cours de la seconde guerre mondiale par la marine américaine. On désigne sous ce nom, un système qui illumine une portion de l'espace avec une onde électromagnétique puis reçoit les ondes réfléchies par les objets présents dans cette zone, ce qui permet de détecter leur existence et de déterminer certaines de leurs caractéristiques.[2,3,4,5,6,7,8,9,10]

Les radars émettent des ondes radioélectriques, dont la longueur d'onde varie de quelques centimètres à environ 1 m. Les concepts de base du radar sont fondés sur les équations régissant les ondes électromagnétiques, formulées par le physicien britannique Maxwell en 1864. Mais c'est en 1886, qu'Hertz montra que les ondes (radio) pouvaient, comme les ondes lumineuses, être réfléchies par les corps métalliques et diélectriques. Dès 1904, l'allemand Hulsmeyer décrivait un appareil de projection et de réception d'ondes hertziennes pour donner l'alarme en présence d'un corps métallique, tel qu'un navire ou un train situé dans le faisceau du projecteur.

Au cours des années 1920, diverses expérimentations de détection à l'aide d'ondes radio furent réalisées avec succès (Appleton en Angleterre en 1924, Breit et Tuve, Hyland, Taylor et Young aux Etats-Unis, Mesny et David en France). Au milieu des années 1930, ces expériences débouchèrent sur des applications concrètes grâce aux progrès de l'électronique. On installa ainsi en France, sur la ligne Maginot, des radars à ondes continues, d'une portée d'une dizaine de kilomètres. De même, on équipa le paquebot Normandie d'un appareil de détection électromagnétique à ondes décimétriques, capable de détecter les icebergs dans le brouillard.

A partir de 1935, les recherches s'orientèrent vers la réalisation de radars à impulsions.

En 1938, deux chercheurs français, Ponte et Gutton, mirent au point l'un des dispositifs les plus importants en ce domaine : le tube à faisceau électronique, appelé magnétron à cavité résonante, qui émet des impulsions haute fréquence (radar à ondes centimétriques).

En 1940, une ligne de stations radars fut installée le long des côtes sud et est de l'Angleterre pour détecter les agresseurs aériens ou maritimes. Ce système joua un rôle essentiel durant la bataille d'Angleterre (août-octobre 1940), au cours de laquelle l'aviation allemande ne parvint pas à armer sa suprématie dans le ciel britannique. Depuis lors, les systèmes de mesures radar sont restés les principaux appareils de surveillance de navigation aérienne et maritime. Mais la résolution de ces radars resta très médiocre.

En 1950 Wiley propose la théorie de l'antenne à ouverture synthétique apportant ainsi une amélioration spectaculaire de résolution. Aujourd'hui embarqués à bord de satellites en orbite terrestre ou gravitant autour d'autres planètes, les radars sont devenus des instruments importants de la télédétection spatiale. En effet, de par leur autonomie au regard de l'illumination solaire (ce sont des systèmes actifs, transportant leur propre source d'émission), et vue la longueur d'onde utilisée, ces capteurs sont en mesure de fournir des données exploitables, quelles que soient les conditions d'ensoleillement et l'état de la couche nuageuse. [11, 12,13, 14, 15, 16, 17]

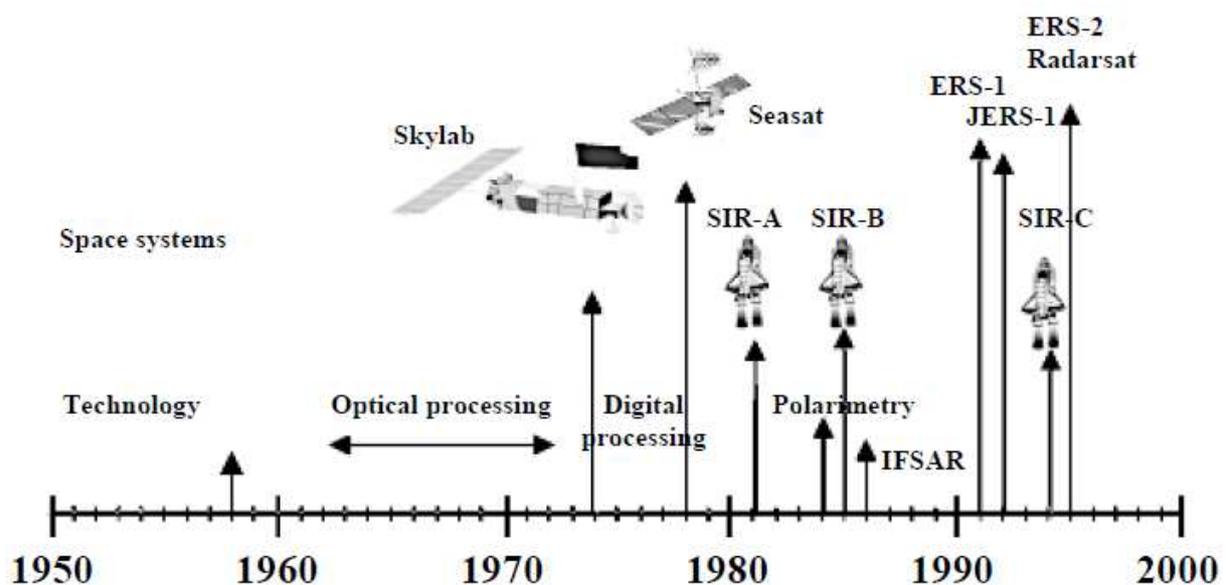


Figure. I.1: Historique de développement de la technologie radar à synthèse d'ouverture. [12]

I.3. Généralité : [4, 12, 13, 15,18, 19, 20, 21]

Le mot RADAR de l'anglais "Radio Detection And Ranging" signifie détection et mesure des distances par ondes radioélectriques. L'imagerie RADAR permet la formation d'images par tous les temps et de jour comme de nuit. Elle apporte, entre autres, par rapport à l'imagerie optique, une information polarimétrique de chaque pixel de l'image. De plus, du fait que les signaux sont récoltés de manière cohérente, l'imagerie RADAR permet d'accéder à des informations interférométriques de l'image.

Un radar désigne tout système constitué par un dispositif d'émission et de réception (antennes émettrices et réceptrices), capable de mesurer les propriétés électromagnétiques de l'onde émise et de l'onde réfléchi par un objet. Les caractéristiques en fréquence et en polarisation du signal sont contrôlées à l'émission comme à la réception. Le radar est donc un système actif, c'est à dire qui possède sa propre source d'illumination, par opposition aux systèmes passifs micro-ondes et optiques.

L'antenne radar émet et reçoit des signaux à une fréquence f (fréquences porteuses), sous la forme d'une séquence, de durée $1/P_{RF}$ (Pulse Repetition Frequency), d'impulsions de durée t (figure. I.2).

Les fréquences le plus souvent utilisées vont de 300 MHz à 30 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde de 1 cm à 1m (on parle d'ondes centimétriques). On utilise couramment une lettre pour désigner une bande de fréquence (figure. I.3). Pour caractériser pleinement la manière dont se propage l'onde électromagnétique radar, il est également nécessaire de préciser la direction de son champ électromagnétique par rapport au plan d'incidence (la polarisation), et la direction de propagation de l'onde (angle d'incidence θ_i).

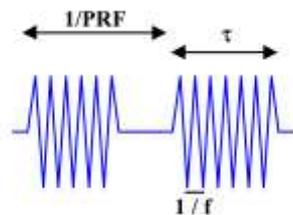


Figure. I.2 : Schéma d'une séquence d'impulsions

Bandes	Fréquences F(GHz)	Longueurs d'onde $\lambda(cm)$
X	8-12.5	2.4-3.75
C	4-8	3.75-7.5
S	2-4	7.5-15
L	1-2	15-30
P	0.3-1	30-100

Figure. I.3 : Bandes de fréquences utilisées en télédétection radar

I.4. Types de radar : [2,3]

I.4.1. Radar à exploration circulaire : Il forme ses images à partir d'une antenne rotative et les affiche au moyen d'un oscilloscope. Il est plus utilisé dans la navigation aérienne.

I.4.2. Radar latéral : Il est plus adapté à l'observation de la terre. Il est caractérisé par son enregistrement des signaux rétrodiffusés et les délais entre ceux-ci et les signaux émis. En effet, en analysant le temps de retour du signal et en se déplaçant, ce capteur forme une image de la cible.

Deux types de systèmes radars se basent sur la visée latérale :

- Radar à ouverture réelle (RAR)
- Radar à antenne synthétique (RSO) ou Synthetic Aperture Radar (SAR)

I.4.2.1. Le radar à antenne réelle: [19, 22]

I.4.2.1.1. Principe et géométrie d'acquisition:

Le radar imageur à visée latérale et à antenne réelle a été le premier radar imageur utilisé. Son fonctionnement est simple et illustré sur la figure I.4. Il émet des trains d'impulsions d'ondes hyperfréquences dans une polarisation donnée et dans une direction oblique à la scène. Il est généralement monté sur une plateforme aéroportée ou embarqué sur un satellite qui suit une trajectoire rectiligne. Ces ondes sont réfléchies ensuite par la surface de la terre ; ce sont les échos retournés qui permettent la formation de l'image.

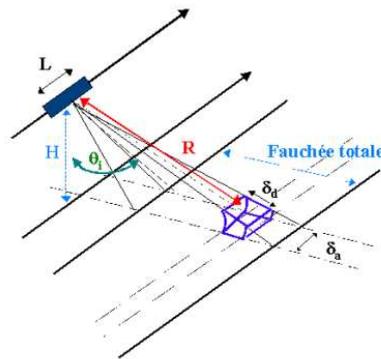


Figure. I.4 : Principe du radar à antenne réelle

Pour réaliser une image, le capteur fonctionne successivement en mode émission puis réception (figure I.5). A un instant t donné, une impulsion d'une certaine durée τ est émise. Le capteur bascule ensuite en mode réception et enregistre pendant une certaine durée Δ_t , les échos renvoyés par la scène observée. Cet enregistrement permet la formation d'une ligne de l'image. Après une durée égale à $1/P_{RF}$, la PRF désignant la fréquence de répétition des impulsions, le capteur bascule à nouveau en mode émission et une nouvelle impulsion est émise. Entre l'instant t et $(t + \frac{1}{P_{RF}})$, le porteur, de vitesse v , s'est déplacé d'une distance $\frac{v}{P_{RF}}$, ce qui permet l'acquisition de la ligne suivante et donc le balayage des colonnes de l'image.

On désigne généralement par azimuth la direction de déplacement du porteur, et distance la direction perpendiculaire à cette direction, correspondant à la seconde dimension de l'image.

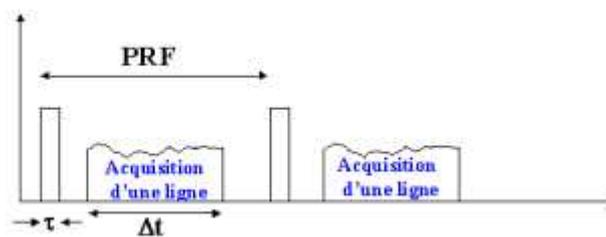


Figure. I.5 : principe de formation des images.

En azimuth le signal est naturellement échantillonné à la fréquence de répétition des impulsions (PRF). En distance la fréquence d'échantillonnage F_e est choisie par les designers du système: le signal enregistré à chaque émission d'impulsion est un signal continu qui est ensuite numérisé par un CAN (convertisseur analogique numérique) pour être stocké et traité.

I.4.2.1.2. Le signal radar enregistré : [22]

L'information enregistrée par un imageur radar est une donnée complexe. La composante d'amplitude donne une information sur la nature des objets composant la scène. La composante de phase porte une information sur le trajet parcouru par l'onde et donc la topologie du terrain. Elle n'est pas exploitable seule mais toujours en couple d'images acquises sous des angles d'incidence différents et très proches (conditions interférométriques). Seule la composante d'amplitude d'une image radar est généralement exploitée.

I.4.2.1.3. Notion de résolution d'un capteur : [11, 12, 14, 22, 23]

Il est important de différencier la résolution d'un capteur de la résolution d'une image. La résolution d'un système se définit par la distance minimale entre deux sources identiques placées à la distance D de l'observateur pour que ce dernier distingue les deux sources.

Considérons une antenne rectangulaire. En bande X, la longueur d'onde est de 3cm environ. La taille de l'antenne RADAR est de l'ordre de quelques longueurs d'onde. Soient L et l respectivement la longueur et la largeur de l'antenne. Sur la figure I.6 est représenté le plan (P) orthogonal à l'axe des distances et situé à une distance D du capteur. Dans ce plan, le point Q a les coordonnées x et y selon les axes (Ox) et (Oy) .

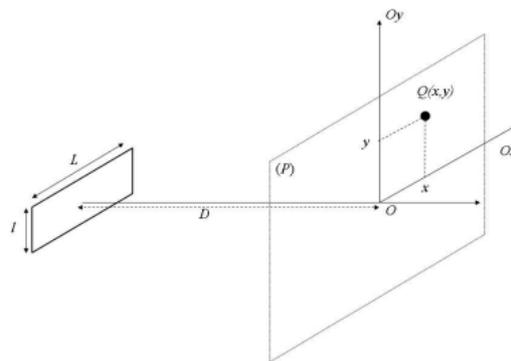


Figure. I.6 : Exemple d'antenne RADAR.

Le RADAR imageur illumine des zones situées à plusieurs kilomètres. L'approximation de Fraunhofer est donc valide et le module du champ électromagnétique U en Q s'exprime sous la forme d'un produit de deux sinus cardinaux :

$$U(x, y) \propto \text{sinc}(\pi Lx/\lambda D) \text{sinc}(\pi Ly/\lambda D) \quad (\text{I.1})$$

Avec λ longueur d'onde du signal RADAR

L'ouverture angulaire de l'antenne à -3dB est notée $\alpha_{-3\text{dB}}$ et s'exprime par :

$$\sin(\alpha_{-3\text{dB}}) = 0.88\lambda/L \quad (\text{I.2})$$

Lorsque $\alpha_{-3\text{dB}}$ est petit : $\alpha_{-3\text{dB}} \approx 0.88\lambda/L$

Sur la figure. I.7 sont représentées les énergies reçues par l'antenne rectangulaire sous forme de sinus cardinaux par deux sources distantes de d_0 , pour d_0 grand, d_0 à -3dB et d_0 faible. Lorsque d_0 diminue, la séparation des sources devient difficile voir impossible.

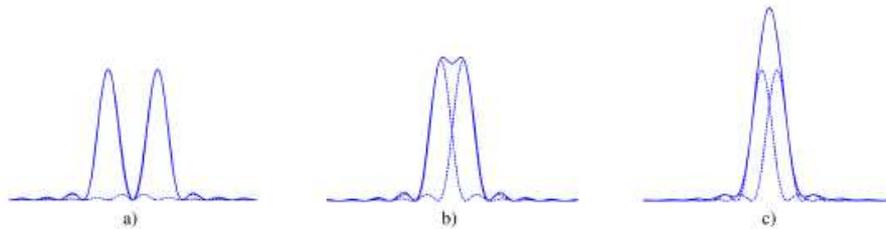


Figure. I.7 : Illustration de la résolution avec a) d_0 grand, b) d_0 = largeur à -3dB et c) d_0 faible en pointillés sont représentées les énergies des sources prises séparément, en trait plein selle du mélange.

La résolution d'une image correspond au pas d'un pixel c'est à dire à la dimension au sol qu'il représente. Dans les deux directions, cette résolution est liée aux fréquences d'échantillonnage du signal (PRF et F_e). La résolution d'une image est généralement choisie moins grande que celle du système afin d'être en accord avec le théorème d'échantillonnage de Shannon.

La résolution est dite "haute" si la taille des cellules de résolution est petite, et inversement la résolution sera "basse" pour de grandes cellules de résolutions. On parle généralement de haute résolution (ou grande résolution) lorsque cette dernière approche le mètre (inférieur à 2-3 mètres). Les moyennes ou basses résolutions désignent des résolutions de l'ordre de quelques dizaines à centaines de mètres.

Par la suite, L désigne la largeur de l'antenne, τ la durée de l'impulsion, λ la longueur d'onde du train émis, c la célérité de la lumière, δ_d la résolution du système en distance, δ_a la résolution du système en azimut.

En imagerie RADAR, deux résolutions sont définies : en distance et en azimut.

a) La résolution en distance : [12, 22, 24]

La résolution en distance est fonction uniquement de la durée τ de l'impulsion émise. Deux cibles seront différenciables si leurs échos ne se superposent pas. Pour cela, il faut que ces échos soient séparés d'une durée au minimum égale à τ (figure. I.8). La résolution radiale en distance δ_d est ainsi donnée par la distance radiale minimale entre deux cibles pour que leurs échos ne soient pas mélangés, à savoir $c\tau/2$ (équation I.3). La résolution projetée au sol est alors donnée par l'équation I.4, pour une onde émise sous une incidence θ_i .

$$\delta_d = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{I.3})$$

$$\delta_{dproj} = \frac{c\tau}{2\sin(\theta_i)} \quad (\text{I.4})$$

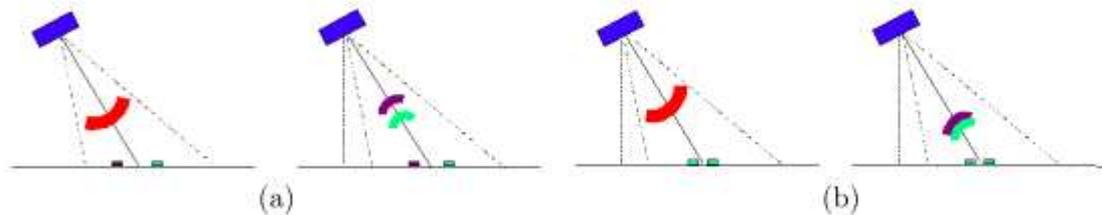


Figure. I.8 : Résolution en distance

La figure (I.8.a) représente le cas de figure favorable où les deux cibles sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, par rapport à la durée de l'impulsion, pour que leur échos soient séparés. La figure (I.8.b) représente le cas contraire, les deux échos se chevauchent, car la distance radiale entre les deux cibles est inférieure à la longueur de l'impulsion émise.

Pour obtenir une bonne résolution en distance, il faut donc une durée d'impulsion très brève. Considérons le cas du satellite ERS, pour obtenir une résolution de 20m il faudrait une durée d'impulsion de 20ns. L'idéal serait de s'approcher du Dirac pour atteindre des résolutions métriques, ce qui est impossible technologiquement : l'émission d'une impulsion

très courte ayant une puissance suffisante n'est pas réalisable. Le principe de la compression d'impulsion employé par les systèmes RSO permet de palier ce problème.

b) La résolution en azimuth : [12, 22, 24]

La résolution en azimuth est fonction de l'angle d'ouverture β du lobe principal du diagramme d'antenne du signal émis (figure I.9). Pour que deux cibles soient séparables en azimuth, il faut qu'elles ne soient pas dans le lobe d'antenne au même moment.

L'ouverture d'antenne est conventionnellement calculée à -3dB. En première approximation, elle est donnée par l'équation :

$$\beta = \frac{\lambda}{L} \quad (\text{I.5})$$

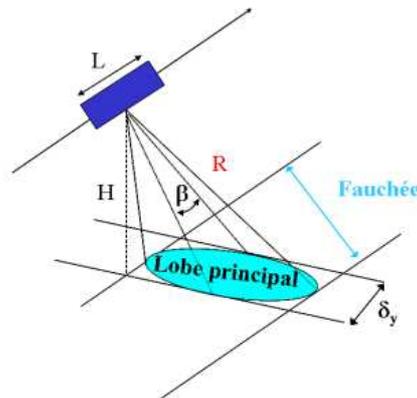


Figure. I.9 : Résolution en azimuth

A une distance R du capteur (l'angle d'ouverture de l'antenne est généralement assez petit pour être assimilé à son sinus, étant données les bandes de fréquences de l'onde émise), on obtient une résolution égale à :

$$\delta_a = R\beta = R\frac{\lambda}{L} \quad (\text{I.6})$$

Ainsi la résolution azimuthale dépend de la distance radiale au capteur. Elle est en théorie non constante sur toute la largeur de la fauchée : les cibles au plus proche (Near Range) du capteur ont une résolution meilleure que celle au plus loin (Far Range).

On fait souvent l'hypothèse que la largeur de la fauchée est suffisamment petite devant l'altitude du porteur, pour se permettre l'approximation d'une résolution azimuthale constante.

Finalement, la résolution azimutale est donnée par la formule :

$$\delta_a = \frac{H\lambda}{L \cos \theta_i} \quad (I.7)$$

Il est important de remarquer que la résolution en azimut est inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne. Pour augmenter, la résolution en azimut, il faut donc travailler avec des antennes très grandes. Considérons le cas du satellite ERS, l'incidence est de 23° , la longueur d'onde $\lambda = 5.6\text{cm}$ et l'altitude du porteur est de 800km . Dans ces conditions pour obtenir une résolution de 20m , il faudrait une antenne de longueur 2.5km : les limites du radar imageur à antenne réelle apparaissent ici.

1.4.2.2. Le radar à synthèse d'ouverture : [11, 12, 13,16, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28]

L'obtention de résolutions décimétriques avec une antenne réelle à visée latérale n'est ainsi pas possible. Le principe du radar à synthèse d'ouverture est de simuler par des techniques de traitement du signal adéquates, les conditions nécessaires à l'amélioration de la résolution.

Ainsi le principe dit de compression d'impulsion permet de simuler l'émission d'une onde de durée très courte, autorisant de grandes résolutions en distance et de puissance compatible avec la technologie embarquée actuelle. La méthode de synthèse d'ouverture permet quant à elle, en exploitant l'effet Doppler, de simuler une antenne de très grande dimension et d'améliorer ainsi considérablement la résolution en azimut.

1.4.2.2.1. Technique : [2,3, 12, 21, 22, 26, 29, 30]

La synthèse d'ouverture est une technique utilisée pour améliorer la résolution azimutale. Le mouvement de l'antenne couplé au temps d'éclairement de la scène compense la petite taille d de l'antenne. La résolution obtenue est comparable à celle d'une très grande antenne de taille $L \gg d$. Elle devient indépendante de la distance à la cible et de la fréquence du système et elle équivaut à :

$$R_a = d/2 \quad (I.8)$$

Une impulsion est transmise à intervalle régulier ; l'écho réfléchi est reçu et enregistré. Cet écho est décalé en fréquence Doppler, négativement quand le radar approche du point cible et positivement quand le radar a dépassé ce point cible. La mesure de ces décalages permet de mettre au point sur la cible, comme si l'on avait une très grande

antenne. Cette technique nécessite une grande précision dans le contrôle de la trajectoire de la plate-forme. Aujourd'hui, elle est couramment employée et maîtrisée. On utilise également le mot SAR (Synthetic Aperture Radar) pour désigner le système RSO.

I.4.2.2.2. Imagerie RSO : [22]

Une image RSO est composée de points juxtaposés les uns à côté des autres. Chaque élément de l'image (pixel) est défini par son intensité et sa position dans l'image. La valeur de l'intensité du pixel est proportionnelle au rapport de l'intensité reçue sur l'intensité émise en direction de la surface. On parle de rétrodiffusion radar, elle correspond à la somme cohérente des réponses de chaque diffuseur élémentaire situé dans la cellule de résolution. Autrement dit, elle dépend des interférences et des couplages électromagnétiques qui se créent entre ces réponses. Les interférences donnent à l'image un effet de chatoiement (le speckle).

I.4.2.2.3. La compression d'impulsion : [22, 31]

Pour améliorer la résolution en distance, on émet des signaux linéairement modulés en fréquence autour d'une fréquence centrale f_c . Ces signaux sont communément appelés chirp et sont définis pour un signal de durée τ par l'équation I.9.

$$e(t) = Ae^{2j\pi(f_c t + \frac{Kt^2}{2})} \quad \forall t \in \left[-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2}\right] \quad (\text{I.9})$$

K désigne le taux de modulation, il est défini par $K = \frac{Bc}{\tau}$ avec Bc la largeur de bande passante du signal. Ces signaux ont la particularité de posséder une grande bande passante. De plus le résultat du filtrage adapté du signal par lui même est un signal comprimé (sinus cardinal), de largeur de bande inversement proportionnelle à Bc . Le principe de la compression d'impulsion exploite cette propriété très intéressante des chirps. A la réception des échos réfléchis par la surface irradiée par un chirp, un filtrage adapté de ces signaux avec le signal émis par l'antenne est effectué. La réponse impulsionnelle du système est ainsi un sinus cardinal dont la largeur à -3dB (durée de l'impulsion à -3dB) est égale à $\tau = \frac{1}{Bc}$. La résolution radiale en distance du système devient finalement :

$$\delta_d = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2Bc} \quad (\text{I.10})$$

La résolution dépend maintenant uniquement de la bande passante du chirp. Plus celle-ci sera grande, meilleure sera la résolution en distance. Par exemple, une résolution de 1 mètre est facilement accessible via une bande de fréquence de 150MHz de largeur. Le capteur haute résolution aéroporté RAMSES de l'ONERA utilise des largeurs de bande jusqu'à 1200MHz pour atteindre des résolutions de l'ordre de la dizaine de centimètres.

Enfin pour respecter le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage en distance doit vérifier la contrainte suivante $F_e \geq B$. Dans la pratique, ce critère se traduit par le choix d'une résolution de l'image en distance plus grande que la résolution du système.

I.4.2.2.4. La synthèse d'ouverture : [22, 31]

Pour augmenter la résolution en azimuth, un procédé similaire est employé. Il s'agit d'exploiter la modulation linéaire de fréquence induite naturellement par l'effet Doppler découlant du mouvement relatif du porteur par rapport à la scène fixe.

Pendant le temps où la trace du faisceau de l'antenne se déplace au sol, elle illumine plusieurs fois les différents éléments de la zone imagée (on parle de temps d'illumination). A chaque enregistrement d'un écho, le porteur s'est déplacé par rapport à la scène. La distance relative scène-capteur, ainsi que l'angle d'incidence local, varient donc localement entre deux réceptions. La synthèse d'ouverture consiste à combiner de façon intelligente ces différentes réponses d'une même cible vue sous des angles différents dans la direction de déplacement du porteur. La figure (I.10) présente le principe de la synthèse d'ouverture.

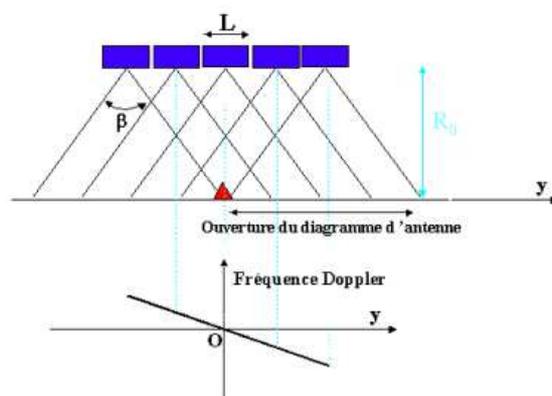


Figure. I.10 : Principe de la synthèse d'ouverture (Chirp naturel induit par le mouvement relatif du porteur par rapport à la cible fixe)

Considérons une cible fixe au sol et notons R_0 la distance minimale (à Doppler zéro) entre la cible et l'antenne. Considérons un repère (Oxy) tel que le centre O soit positionné sur la cible fixe, et l'axe (Oy) soit orienté dans le sens de déplacement du porteur. L'origine des temps est placée au moment où le satellite est à une distance R_0 de la cible. Enfin le porteur a une vitesse constante notée ϑ . Dans la suite, f_c désigne la fréquence centrale de l'onde émise.

La cible est illuminée plusieurs fois par l'antenne. A un instant donné t , la vitesse du porteur étant supposée constante, la position y de ce dernier dans le repère (Oxy) lié à la cible est donnée par $y = \vartheta t$. En supposant R_0 très grand devant y , on en déduit la distance relative $R(t)$ du porteur et de la cible.

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + y^2} = \sqrt{R_0^2 + (\vartheta t)^2} \approx R_0 + \frac{(\vartheta t)^2}{2R_0} \quad (\text{I.11})$$

La phase instantanée $\phi(t)$ de l'onde réfléchiée par la cible, après le parcours aller-retour entre le capteur et la cible, est alors la suivante :

$$\phi(t) = 2\pi f_c \left(t - \frac{2R(t)}{c} \right) \quad (\text{I.12})$$

Ce qui correspond à une fréquence instantanée :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = f_c - \frac{2f_c \vartheta^2 t}{cR_0} = f_c - \frac{2\vartheta^2 t}{\lambda R_0} \quad (\text{I.13})$$

La variation de la distance relative cible-porteur entraîne ainsi une variation de la vitesse relative du porteur par rapport à la cible et donc un effet Doppler. La fréquence Doppler résultante à un instant t vaut :

$$f_D = f(t) - f_c = -\frac{2\vartheta^2 t}{\lambda R_0} \quad (\text{I.14})$$

L'onde reçue par la cible pendant l'intervalle de temps, a ainsi une fréquence linéairement variable en fonction du temps et de la vitesse du porteur. Il peut être vu comme un chirp dont la bande passante B_D est fonction de la durée d'illumination de la cible par l'antenne.

Le choix d'une résolution à -3dB du lobe d'antenne, nous donne la valeur de cette période T d'illumination $T = \frac{R_0 \lambda}{L \vartheta}$ On en déduit :

$$B_D = \frac{2\vartheta^2 T}{\lambda R_0} = \frac{2\vartheta^2 R_0 \lambda}{R_0 \lambda L \vartheta} = \frac{2\vartheta}{L} \quad (\text{I.15})$$

Soit une durée d'impulsion :

$$\tau' = \frac{1}{B_d} = \frac{L}{2\vartheta} \quad (\text{I.16})$$

La résolution en azimut d'un système radar RSO correspond alors à la distance parcourue pendant cet intervalle τ' , à savoir :

$$\delta_a = \vartheta \tau' = \frac{L}{2} \quad (\text{I.17})$$

La résolution en azimut dépend ainsi uniquement de la taille de l'antenne réelle embarquée à bord du porteur. Contrairement aux cas des radars à antennes réelles, plus l'antenne est petite, meilleure est la résolution.

Ainsi dans le cas d'ERS et de son antenne de 10 mètres, le processus de synthèse d'ouverture permet d'atteindre une résolution de 5 mètres contre 4.5 km sans synthèse d'ouverture.

Enfin, rappelons que l'échantillonnage en azimut est naturellement effectué par la fréquence de répétition des impulsions (PRF). L'étendue spectrale en azimut étant égale à B_D , le théorème de Shannon implique la contrainte suivante sur la PRF :

$$PRF \geq B_D \text{ C'est-à-dire } PRF \geq \frac{2\vartheta}{L} \quad (\text{I.18})$$

I.5. Différents modes de fonctionnement :

I.5.1. Mode strip-map : [32, 33, 34, 35]

Le mode strip-map (figure. I.11) correspond aux acquisitions obtenues en configuration SLAR (Side Looking Airbone Radar). Dans ce cas, l'antenne est fixe, orientée perpendiculairement à la direction de déplacement du porteur. L'image est alors formée en défilement continu.

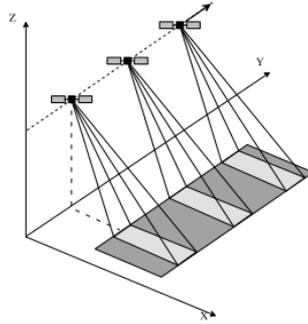


Figure. I.11 : Acquisition en mode strip-map.

I.5.2. Affinage Doppler, antenne en rotation : [32, 33]

L'affinage Doppler (en anglais DBS : Doppler Beam Sharpening) peut être utilisé par les radars aéroportés pour acquérir une image du sol autour de l'avion (figure. I.12). L'antenne est en rotation, avec une vitesse angulaire ω .

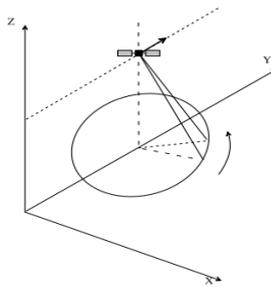


Figure. I.12 : Acquisition par affinage Doppler

I.5.3. Mode télescope : [32, 33, 34, 35]

Le télescope (en anglais : spotbeam ou spotlight) est utilisé par des radars aéroportés ou spatiaux. Le principe consiste à faire varier l'angle de visée du faisceau de l'antenne lors du déplacement du radar (figure I.13). Ainsi, une même région est illuminée plus longtemps qu'avec une synthèse d'ouverture classique. Cette technique est envisageable sur les systèmes capables de dépointer leur antenne afin de suivre une zone au sol. Le temps d'éclairement, et donc la taille de l'antenne synthétique, peut être augmenté jusqu'à ce que la résolution recherchée soit obtenue. L'image ne défile pas en continu, elle n'est disponible qu'à la fin de l'éclairement.

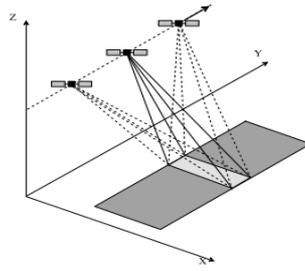


Figure. I.13 : Acquisition en mode télescope

I.5.4. Mode scansar : [28]

Le scansar est utilisé par un radar ayant un angle d'incidence faible pour obtenir une fauchée plus grande que la distance ambiguë au prix d'une résolution dégradée (figure. I.14). Cette technique consiste à utiliser les propriétés de dépointage latéral de l'antenne. Le temps d'éclairage naturel est partagé en n segments.

Chaque segment est consacré à l'observation d'une fauchée différente. Les fauchées sont choisies adjacentes. Le nombre de segments est ajusté pour atteindre la fauchée totale recherchée. La mise en œuvre de ce procédé nécessite une commutation rapide du faisceau d'antenne en élévation qui n'est réalisable qu'avec une antenne à balayage électronique.

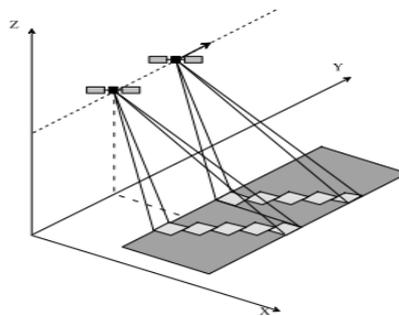


Figure. I.14 : Acquisition en mode scansar

I.5.5. Mode squint, ou mode dépointé : [32, 33, 34, 35]

Le squint est un mode analogue au strip-map, mais pour lequel l'antenne est maintenue fixe dans une direction non perpendiculaire au vecteur vitesse (figure. I.15). L'image est donc formée en défilement continu. Les résolutions obtenues sont identiques au mode strip-map. L'antenne latérale reste toutefois une solution préférentielle car elle minimise le temps d'éclairage. Elle est également la plus simple du point de vue du

traitement car c'est celle pour laquelle les phénomènes de migration sont les plus faibles c'est-à-dire que les variations de distances entre le radar et la cible sont faibles.

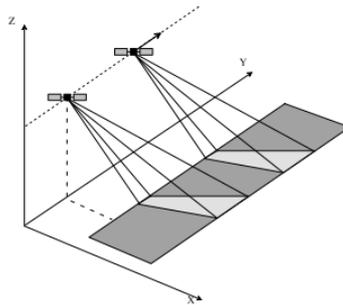


Figure. I.15 : Acquisition en mode squint

I.5.6. Mode inverse : [32, 33, 34, 35]

Le radar en mode inverse produit des images d'objets présentant un mouvement de rotation par rapport au radar (figure. I.16). Il est basé sur une analyse du signal reçu en fonction du temps et de la fréquence Doppler. Le résultat est une image à deux dimensions. L'analyse temporelle fournit la position des points brillants suivant l'axe de la ligne de visée du radar. L'analyse de la fréquence Doppler fournit la position des points brillants suivant l'axe azimutal.

La principale application, dans le cas des radars aéroportés, est la reconnaissance d'avions en vol ou de navires en mer. Le radar et la cible étant simultanément en mouvement, le traitement n'est pas exactement de type ISAR mais plutôt une sorte de SAR généralisé. Le récepteur adapté au signal reçu est difficile à réaliser. En effet, les cibles n'étant pas coopératives, la géométrie du système n'est pas maîtrisée. De plus, les caractéristiques polarimétrique de la cible et du milieu sont difficilement prédictibles.

Lorsque le radar est fixe et que la cible est en mouvement rotatif, alors cette configuration est équivalente à celle pour laquelle la cible est fixe et le radar en mouvement suivant une trajectoire circulaire.

Ainsi, on remarque que le mode inverse est un cas particulier du mode télescope pour lequel la trajectoire est circulaire.

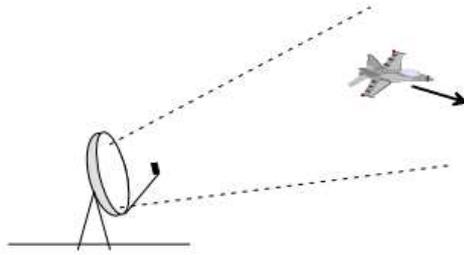


Figure. I.16 : Acquisition en mode inverse

I.5.7. Mode multivues : [32, 33, 34, 35]

Tous les modes reposant sur le principe de l'antenne synthétique peuvent donner lieu à une variante dite multivue dans laquelle plusieurs images d'un même site sont formées à partir d'observations sous des angles de vue différents. Ces images, statistiquement indépendantes du fait de la fluctuation des cibles en fonction de l'angle de vue, sont ensuite sommées en module, produisant ainsi un effet de post-intégration non-cohérente qui réduit la granulation apparente (speckle).

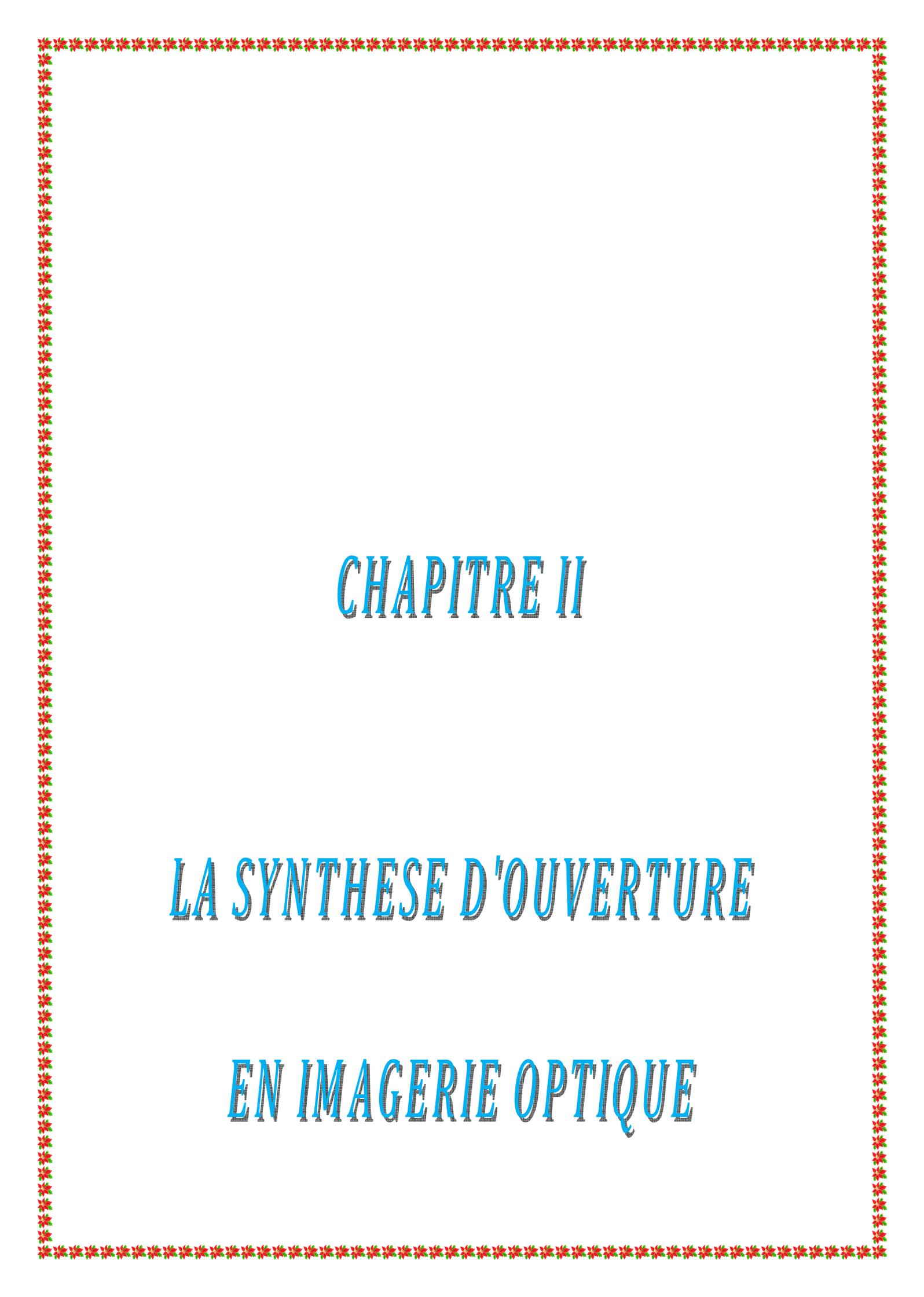
Ce mode ne diffère du mode de base dont il est dérivé que par le traitement. Les modes multivus sont largement utilisés pour améliorer la résolution radiométrique. Ils sont applicables aussi bien au cas de l'antenne synthétique focalisée qu'à celui de l'antenne synthétique non focalisée.

Conclusion :

Le radar imageur SAR reste un instrument unique en télédétection de part de son aspect actif et ses avantages :

- ✓ Sa capacité de fonctionnement tout temps (son fonctionnement de jour comme la nuit).
- ✓ Sa grande portée.
- ✓ La possibilité de contrôle de la radiation électromagnétique émise : puissance, fréquence, polarisation.
- ✓ L'accès à des paramètres physiques différents de ceux détectés dans le visible et l'infrarouge.
- ✓ Possibilité de très haute résolution spatiale par l'intermédiaire du traitement complexe du signal issu de la rétrodiffusion radar.

L'imagerie radar de type SAR a trouvé de très nombreuses applications que ce soit dans le domaine civil pour la détection d'icebergs, la cartographie géologique, l'hydrologie des surfaces continentales, l'océanographie (étude des vagues et des courants), l'agriculture (suivi de croissance des cultures), la déforestation et les inondation et la pollution et l'urbanisme, ou dans le domaine militaire pour l'observation et le surveillance des territoires[17, 36].



CHAPITRE II

LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE

EN IMAGERIE OPTIQUE

II.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons vu le principe de la synthèse d'ouverture en imagerie RADAR. Ce chapitre est dédié à la présentation des divers aspects de la Synthèse d'Ouverture en imagerie optique.

II.2. La synthèse d'ouverture en télescope :

Depuis plusieurs dizaines d'années, les astronomes en charge du développement des futures missions pour l'astronomie ou l'observation de la Terre n'ont eu de cesse que d'augmenter le diamètre des collecteurs de leurs instruments pour obtenir des résolutions spatiales de plus en plus importantes.

Malheureusement, la fabrication et le lancement dans l'espace de miroirs de diamètre croissant se heurtent rapidement à de nombreuses limitations aussi bien technologiques (encombrement, masse) que financières. Dès lors, pour répondre aux problèmes posés par la construction ou l'emploi de miroirs monoblocs géants et pour gagner définitivement en résolution, la Synthèse d'Ouverture Optique apparaît comme une solution séduisante. En effet, cette méthode consiste à synthétiser l'équivalent d'un instrument de grand diamètre en faisant interférer plusieurs télescopes ou miroirs individuels (appelés également sous-pupilles) de diamètre inférieur.

Etant donné que le champ des applications possibles est extrêmement vaste, cette méthode se révèle aujourd'hui comme étant incontournable dans le domaine de la haute résolution angulaire. De fait, plusieurs instruments multi pupilles sont actuellement disponibles au sol ou en cours de construction et des projets spatiaux ambitieux et de plus en plus nombreux y font désormais appel. Parmi les applications spatiales, citons le cas de l'observation de la Terre dont l'importance est fondamentale tant sur le plan civil que militaire. Or, si l'observation de notre planète par un télescope monolithique en orbite géostationnaire permet la surveillance en continue d'une zone donnée, elle ne permet pas d'obtenir de haute résolution du fait de l'éloignement de l'orbite, située à environ 36 000 Km. [37,38]

L'utilisation d'instruments à synthèse d'ouverture optique permet de compenser cet éloignement par l'augmentation du diamètre et ainsi d'atteindre des résolutions inégalées de l'ordre du mètre pour cette orbite. [39, 40]

II.2.1. Etat de l'art :

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la synthèse d'ouverture a pris un essor grandissant du fait de la conjonction d'un besoin toujours accru d'images de hautes résolutions et de la disponibilité de techniques matures de fabrication des composants, de stabilisation des instruments et de traitement des données issues des instruments. Le principal champ d'action de ces méthodes prend place dans le domaine de l'imagerie optique pour l'astronomie. Le principe ainsi mise en œuvre repose sur l'utilisation d'un grand nombre d'ouvertures élémentaires afin de synthétiser une ouverture de plus grande dimension la plus part du temps inaccessible par des dispositifs monolithiques. La synthèse d'ouverture peut être utilisée pour la réalisation d'instruments permettant principalement deux types d'applications :

- La réalisation de dispositifs de réception utilisés pour effectuer de l'observation ou de l'imagerie très haute résolution angulaire.
- La réalisation de dispositifs émetteurs ou récepteurs dont la principale qualité recherchée est "l'agilité" (capacité à contrôler la direction d'émission) d'un faisceau. La mise en œuvre de tels dispositifs pourrait alors être appliquée aux systèmes de communications optiques entre satellites.

Dans le cadre d'un dispositif utilisé en réception, la résolution angulaire avec laquelle l'observation est effectuée dépend directement de la plus grande dimension de l'ouverture.

L'amélioration des performances de ce type d'instruments, en termes de résolution, est donc directement liée à l'augmentation de la dimension de l'ouverture collectrice. Cependant, les moyens technologiques actuels limitent les dispositifs monolithiques à des ouvertures inférieures à 10 mètres de diamètres. L'utilisation de la synthèse d'ouverture va permettre d'obtenir des résolutions nettement supérieures en utilisant plusieurs ouvertures élémentaires espacées de plusieurs centaines de mètres. Dans ce cas, l'observation ne permet pas l'obtention d'une image directe de l'objet observé. Les informations sont obtenues par l'analyse du signal interférométrique résultant du mélange des champs collectés par les différents télescopes du dispositif.

C'est historiquement Fizeau, qui le premier a montré le lien entre le contraste des franges d'interférences ainsi obtenues et la morphologie de la source qui l'illumine. Stephan a été par la suite le premier à tenter d'utiliser cette méthode pour l'observation d'objets stellaires en 1873. Cependant, les premiers résultats astronomiques ont été obtenus par Michelson et Pease lors de la mesure du diamètre apparent de plusieurs étoiles. Les moyens technologiques de l'époque limitant les dispositifs à des bases maximum de 6 mètres et à l'observation d'objets très lumineux, la méthode est abandonnée pendant près d'une cinquantaine d'années malgré des premiers résultats prometteurs.

C'est donc en 1974 que les premières franges d'interférences avec deux télescopes ont été obtenues sur l'interféromètre I2T à l'observatoire de la côte d'Azur par Antoine Labeyrie. A la suite de ces nouveaux résultats, un grand nombre d'interféromètres, utilisés actuellement, vont voir le jour. Ces interféromètres sont constitués pour la plupart de deux télescopes, GI2T, SUSI, le KECK Interferometer. Cependant, il existe des interféromètres utilisant un plus grand nombre de télescopes : IOTA (trois télescopes) le VLTI (4 télescopes principaux et à terme 4 télescopes auxiliaires), COAST (5 télescopes), CHARA (6 télescopes). [37, 38,41]

D'autre part des missions spatiales sont à l'heure actuelle à l'étude afin d'envoyer des interféromètres dans l'espace dans le but de s'affranchir des problèmes rencontrés au sol du fait des perturbations atmosphériques. Nous pouvons nommer en exemple le projet DARWIN ou la mission SIM qui devrait être lancés durant les prochaines décennies. [39]

Dans le cas d'une antenne synthétique optique émettrice, l'utilisation de la synthèse d'ouverture va permettre d'apporter un grand nombre d'avantages :

- Le pointage du faisceau peut être contrôlé de façon précise grâce au contrôle de la phase de l'onde émise par chaque ouverture.
- La masse et le volume du dispositif peuvent être réduits de façon significative.
- Le dernier avantage réside en une concentration optimum de l'énergie du lobe principal d'émission de l'antenne associée aux antennes synthétiques compactes. Ces structures compactes réalisent le meilleurs compromis entre la directivité et la concentration énergétique de l'émission.

Si le concept d'antenne synthétique est déjà bien connu dans le domaine des micro-ondes, l'utilisation dans la gamme des longueurs d'onde optiques est encore très peu avancée. Le

potentiel de cette technique est pourtant prometteur ne serait ce que par les très hauts débits qu'elle permettrait d'atteindre par exemple pour des communications inter satellites.

Cependant, peu d'études ont été réalisées jusqu'à ce jour concernant des dispositifs de synthèse d'ouverture en émission. Nous pouvons malgré tout citer d'une part, le dispositif émetteur PHASAR mis en place à l'Air Force Weapon Laborator constitué de trois télescopes et d'autre part, une antenne synthétique en émission constituée de trois ouvertures réalisée à l'Université de Vienne. En complément de cette approche, plusieurs antennes synthétiques en réception, à quatre puis seize ouvertures, ont commencées à être étudiées dans cette même université de Vienne. [37, 38,41]

II.2.2. Principe général : [37, 38,42]

L'observation d'objets stellaires nécessite l'utilisation de télescopes ayant des diamètres de plus en plus importants afin de pouvoir augmenter la résolution angulaire de l'image de l'objet observé. Les problèmes technologiques liés à la construction de télescopes monolithiques de grands diamètres poussent naturellement à se tourner vers la synthèse d'ouverture. Le principe est de remplacer un télescope monolithique de diamètre important (figure. II.1.a) par un réseau de télescopes élémentaires (figure. II.1.b). En effet, la résolution angulaire de l'information recueillie par deux télescopes élémentaires éloignés de 100 mètres peut atteindre celle d'un seul télescope monolithique dont la pupille d'entrée posséderait un diamètre de 100 mètres. De plus la spatialisation d'un tel interféromètre permet de s'affranchir des problèmes introduits par la turbulence atmosphérique lors de la traversée de l'atmosphère par l'onde lumineuse observée.

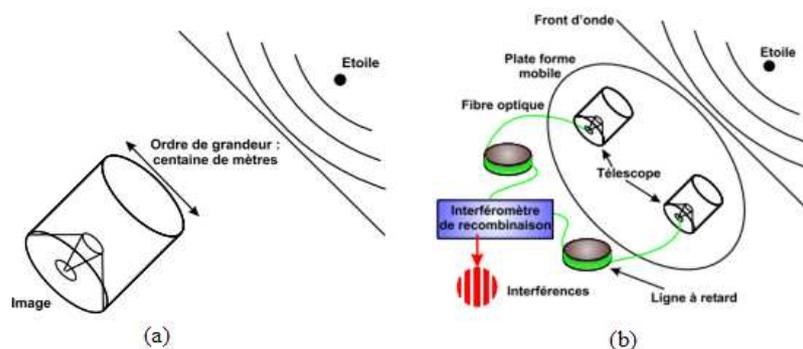


Figure. II.1 : Schéma de principe de la synthèse d'ouverture appliquée à l'interférométrie stellaire. a) Cas d'un seul grand télescope monolithique, b) Cas d'un réseau de deux télescopes.

Les avantages évidents de l'utilisation de la synthèse d'ouverture par rapport à des systèmes monolithiques ont conduit durant ces vingt dernières années à l'apparition de plusieurs interféromètres stellaires :

II.2.2.1. L'interféromètre COAST (Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope) :

A été le premier dispositif de synthèse d'ouverture à obtenir après reconstruction l'image d'un objet stellaire. Cet instrument est composé d'un réseau de cinq télescopes de quarante centimètres de diamètre et peut atteindre une base maximum de soixante sept mètres. Cet interféromètre effectue ses observations dans le domaine des longueurs d'ondes rouges et proche infrarouges. Cet instrument a obtenu au mois de septembre 1995 une image de l'étoile Alpha Aurigae avec trois ouvertures en utilisant le principe de la clôture de phase à une longueur d'onde de 830 nm.

II.2.2.2. L'instrument GI2T (Grand Interféromètre à 2 Télescopes) :

A vu le jour en 1985 sous l'impulsion d'A. Labeyrie. Il s'agit d'un interféromètre basé sur le plateau de Calern dans le sud de la France. Il est constitué de deux télescopes de 1,52 mètres de diamètre, peut atteindre une base maximum de 68 mètres et permet d'effectuer des observations dans une bande spectrale allant de 400 nm à 2,5 μm . L'objectif de cet instrument est de réaliser l'étude des différents processus physiques présents dans une étoile et son environnement.

II.2.2.3. L'interféromètre Keck:

Est un réseau de deux télescopes, de 10 mètres de diamètre chacun, basé sur le mont Mauna Kea à Hawaï aux USA. Ses objectifs principaux sont, de détecter des planètes géantes en dehors du système solaire, de caractériser la poussière exozodiacale et de réaliser des images de disques protoplanétaires avec une haute résolution.

Cet interféromètre travaillant aux longueurs d'ondes de 1,5 à 5 μm et 10 μm peut atteindre une base maximale de 85 mètres. Cet instrument a obtenu ses premières franges d'interférence en Mars 2001 sur l'étoile HD61294 se situant dans la constellation du Lynx.

II.2.2.4. L'interféromètre SUSI (Sydney University Stellar Interferometer) :

Situé à Narrabri (L'Australie). Cet instrument est constitué de deux télescopes possédant une ouverture maximale de 14 cm. Susi est utilisé pour déterminer un certain nombre de

caractéristiques des étoiles observées (le rayon, la luminosité, la masse, la mesure des distances séparant les étoiles doubles, la température effective).

Les télescopes constituant cet interféromètre peuvent être translatés de façon à faire varier la base sur une plage allant de 5 à 640 mètres. Cet instrument permet de réaliser des observations sur une bande spectrale de 400 à 900 nm. Des franges ont été obtenues sur cet interféromètre en Novembre 2002 avec un recombineur de faisceau travaillant aux longueurs d'ondes rouges.

II.2.2.5. L'interféromètre CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy):

A été mis en service en 1984 sur le Mont Wilson aux Etats-Unis. Cet instrument est composé de six télescopes de un mètre de diamètre et peut atteindre une base maximale de 350 mètres. Les observations peuvent être réalisées sur deux bandes spectrales différentes, la première allant de 500 à 800 nm et la seconde de 2 à 2,4 μm . Le principal objectif de cet instrument est de réaliser des mesures de tailles d'étoiles, de différencier les étoiles doubles et d'imager la surface de certaines étoiles. Les premières franges de CHARA ont été obtenues le 23 Novembre 1999. D'autres franges ont été obtenues en septembre 2001 en utilisant une base de 331 mètres.

II.2.2.6. L'interféromètre VLTI (Very Large Telescope Interferometer):

Est situé sur le mont Paranal au Chili. Il est constitué de quatre grands télescopes de 8,2 mètres de diamètre et trois petits télescopes auxiliaires de 1,8 mètre de diamètre et peut atteindre une base maximale de 200 mètres. Cet interféromètre permet de réaliser des observations dans la bande spectrale de 1,5 à 5 μm et à 10 μm . L'instrument VINCI (une réplique de FLUOR pour le VLTI) a permis d'obtenir les premières franges d'interférence avec deux télescopes en mars 2001 sur le VLTI. AMBER (Astronomical Multi BEam combineR) a ensuite été installé sur cet interféromètre. Cet instrument est destiné à travailler sur trois voies dans le proche infrarouge et vient d'obtenir ses premières franges sur Sirius le 21 mars 2004. MIDI l'instrument interférométrique MID-Infrarouge est l'un des trois instruments qui occupent le foyer du VLTI. Cet instrument est optimisé pour travailler à une longueur d'onde de 10 μm et une extension possible à 20 μm est actuellement à l'étude. Il a obtenu ses premières franges sur le VLTI en Décembre 2002.

II.2.2.7. L'interféromètre IOTA (Infrared Optical Telescope Array) :

Est basé sur le Mont Hopkins aux Etats Unis. Cet interféromètre est composé de trois télescopes de 45 cm de diamètre et peut atteindre une base maximum de 38 mètres. Il contient trois tables de recombinaison différentes, dont deux réalisent le mélange des flux avec des lames séparatrices, la première dans le domaine visible et la seconde dans le domaine proche infrarouge. La troisième table de recombinaison est destinée à fonctionner elle aussi dans le domaine infrarouge et supporte l'instrument FLUOR (Fiber Linked Unit for Optical Recombination). L'instrument IOTA a obtenu ses premières franges d'interférence en Décembre 1993 puis a ensuite obtenu d'autres franges en étant combiné avec des dispositifs d'optique guidée et intégrée.

II.2.2.8. L'interféromètre NPOI (Navy Prototype Optical Interferometer) :

Est situé à l'observatoire de Lowell à Anderson Mesa au sud-est de Flagstaff dans l'Arizona. Cet interféromètre est constitué de six télescopes de 50 cm de diamètre et peut atteindre une base de 250 mètres. Les premières franges d'interférence avec cet instrument ont été obtenues en 1994 et la première clôture de phase a été effectuée en Mars 1996.

D'une manière générale, pour un interféromètre stellaire, l'observation de l'objet se traduit par un phénomène interférométrique dont le contraste et la phase constituent les données de l'observation. En effet, les champs lumineux collectés par les différentes ouvertures du dispositif sont recombinaisonnés afin de connaître leur degré de corrélation. [40]

II.2.3. Antenne synthétique fibrée :

Une antenne synthétique optique est un réseau de lentilles élémentaires dont l'objectif est de reconstruire en sortie du dispositif une onde par parties en prenant soin de raccorder les plans d'onde de chaque antenne élémentaire et d'aligner les lobes d'émissions de chaque sous pupille.

L. Delage et al [43] ont présenté un ensemble complet d'acquisition et de traitement de données interférométriques. Le dispositif expérimental de synthèse d'ouverture (figure. II.2) inclut des liaisons par fibres optiques permettant le transport cohérent des faisceaux issus d'un réseau de télescopes, le dispositif fournit des images à haute résolution.

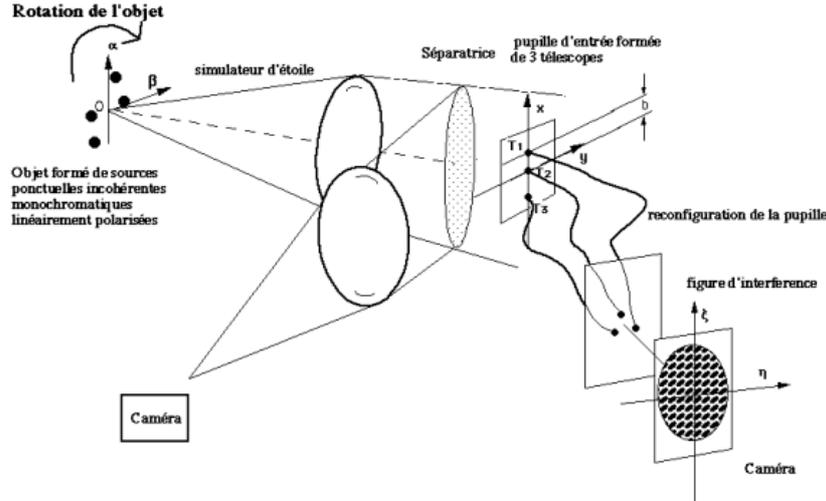


Fig. II. 2 : Dispositif expérimental d'une antenne synthétique fibrée. [43]

II.2.4. Pourquoi la synthèse d'ouverture optique? : [44, 45]

La résolution angulaire ultime d'un instrument (donnée par les lois de la diffraction) est déterminée par le rapport de la longueur d'onde d'observation et du diamètre du télescope. Pour atteindre une haute résolution spatiale à grande distance, il est nécessaire d'utiliser des instruments de très grand diamètre. Or la technologie actuelle limite ce diamètre à dix mètres au sol (en astronomie) et quelques mètres dans l'Espace. Une façon de contourner cette limitation est de coupler de manière cohérente la lumière collectée par plusieurs télescopes élémentaires de petite taille afin de synthétiser un télescope beaucoup plus grand. La résolution est déterminée non plus par le diamètre d'un télescope élémentaire mais par la distance les séparant (la base de l'interféromètre). Ceci conduit à définir un instrument d'encombrement beaucoup plus raisonnable qu'une solution mono-télescope.

II.2.5. Intérêt fondamental de la synthèse d'ouverture optique : [46]

En théorie, la résolution spatiale d'un instrument optique de diamètre D , que l'on peut approximativement définir comme la plus petite séparation angulaire mesurable entre deux objets, est directement reliée à la longueur d'onde d'observation λ par :

$$\theta_0 \approx \frac{\lambda}{D} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi, depuis l'invention de la lunette astronomique, l'augmentation du diamètre s'est accompagnée d'un net gain en résolution. Cependant, au delà d'un certain seuil, l'instrument devient sensible à la présence d'aberrations optiques qui empêchent d'atteindre la limite de

diffraction. Ces perturbations, engendrées sur le trajet du front d'onde incident, peuvent aussi bien provenir du télescope que du milieu de propagation. Toutefois, dans le cadre d'une observation au sol, ces aberrations sont essentiellement dus à la turbulence atmosphérique; dès lors, il existe deux solutions pour s'affranchir au mieux des dégradations dues à l'atmosphère : nous pouvons soit envoyer l'instrument dans l'espace, soit corriger les aberrations par Optique Adaptative (OA). Cette technique consiste en une compensation en temps-réel des perturbations introduites par la turbulence atmosphérique, généralement par réflexion sur un miroir dont la surface est déformée à chaque instant via une boucle d'asservissement en fonction des mesures d'un Analyseur de Surface d'Onde (ASO). Ainsi, il devient possible d'atteindre des résolutions avoisinant la limite de diffraction, et ce grâce aux optiques adaptatives les plus perfectionnées, comme le système NAOS (Nasmyth Adaptive Optic System) installé sur le quatrième télescope de huit mètres du Very Large Telescope. Grâce à cette méthode, la turbulence atmosphérique n'est plus un problème. Cependant, le gain en résolution reste limité du fait des contraintes technologiques actuelles posées par la fabrication des miroirs primaires. En effet, il est actuellement impossible de réaliser des télescopes monoblocs de plus d'une dizaine de mètres de diamètre. Par ailleurs, le coût de construction devient alors excessif. Soulignons également que l'envoi dans l'espace de tels miroirs se révèle impossible, du fait de leur encombrement et de leur masse.

Pour répondre aux problèmes posés par la construction ou l'emploi de miroirs monolithiques géants et pour gagner un surcroît de résolution, deux méthodes ont été proposées :

- Construire un télescope à pupille pleine segmentée en remplaçant le miroir primaire par une mosaïque de segments jointifs plus petits et convenablement alignés ;
- Réaliser l'équivalent d'un instrument de grand diamètre B (Figure. II.3. a) en faisant interférer plusieurs télescopes ou miroirs individuels (appelés également sous-pupilles) de diamètre $D \ll B$, comme représenté (Figure II.3. b); dans ce cas, la pupille de l'instrument équivalent est donnée par l'arrangement de l'ensemble des sous-pupilles. Notons que cette méthode fut envisagée dès 1967 pour réduire les coûts de fabrication des grands télescopes.

Si la couverture fréquentielle de l'instrument n'est pas suffisante, il est possible de la compléter par Synthèse d'Ouverture Optique, en déplaçant la pupille par rapport à l'objet observé comme illustré (Figure II. 3. c).

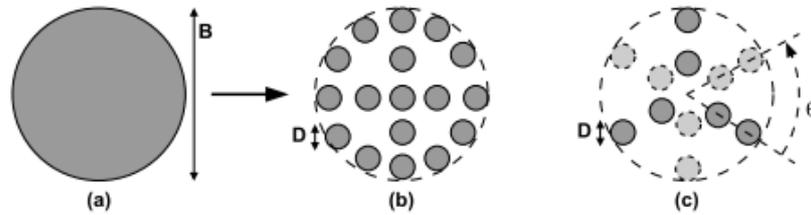


Figure. II.3: Principe de la Synthèse d'Ouverture : une pupille de diamètre B (a) est remplacée par l'association de sous-pupilles de diamètre $D < B$ (b), éventuellement complétée par un déplacement des pupilles, par exemple une rotation d'angle θ_0 .

Appelons base la distance entre deux sous-pupilles ou deux segments. La résolution angulaire d'un ISOO est alors donnée par : $\theta_0 \simeq \frac{\lambda}{B}$ (II.2)

Où B désigne la base maximale de l'instrument. Ainsi, il est possible d'atteindre une résolution comparable à celle d'un télescope monolithique de diamètre B tout en s'affranchissant des contraintes de fabrications posées par les miroirs monoblocs. Notons toutefois que la couverture fréquentielle dépend intrinsèquement de l'arrangement pupillaire choisi.

La synthèse d'ouverture apparaît donc comme une solution efficace grâce au gain en résolution qu'elle peut apporter. Cependant, pour que l'instrument ainsi synthétisé soit exploitable, il est nécessaire que les faisceaux issus des différentes sous-pupilles interfèrent de façon stable.

La course à la résolution se heurte maintenant à la seule limite technologique posée par la fabrication des miroirs primaires. Actuellement les contraintes mécaniques et techniques ne permettent pas de réaliser des miroirs monolithiques de plus d'une dizaine de mètres. Il existe deux réponses à ce problème : [47, 43]

- Utiliser un **télescope multi-pupilles** : cette technique consiste à réaliser l'équivalent d'un télescope de grand diamètre en faisant interférer plusieurs télescopes de diamètre inférieur. La pupille de l'instrument équivalent est alors donnée par la position de chaque **sous-pupille** (télescope individuel) par rapport aux autres (figure. II.3.b).
- Si la couverture des fréquences spatiales réalisée par la pupille instantanée n'est pas suffisante pour les besoins de l'observation, il est possible de la compléter temporellement par déplacement relatif des sous-pupilles par rapport à l'objet : cette technique s'appelle la **Synthèse d'Ouverture Optique (ou SOO)** (figure. II.3.c).

Dans la suite nous utiliserons le terme de SOO pour désigner un télescope multi-pupille. Nous désignerons donc par **Instrument à Synthèse d'Ouverture Optique (ISOO)** un instrument multipupilles ou utilisant la SOO.

Nous appelons **base** la distance entre deux sous-pupilles (deux télescopes). Un ISOO peut évidemment présenter des bases de différentes longueurs. Sa résolution angulaire maximale est alors limitée par sa base B maximale. De façon similaire au télescope monolithique, nous pouvons définir une fréquence de coupure pour un télescope multi-pupille qui s'exprime alors comme : $f_c = \frac{B}{\lambda}$ (II.3)

Ainsi, il est possible avec un ISOO de base B d'atteindre une résolution maximale comparable à celle d'un télescope monolithique de diamètre B . Notons cependant que la couverture des fréquences spatiales n'est pas identique : elle dépend du choix de la configuration pupillaire de l'ISOO.

L'idée de la SOO est inspirée des techniques utilisées en radioastronomie mais elle reste difficile à mettre en œuvre en optique. Pour que le système soit exploitable, il faut en effet que les faisceaux provenant de tous les télescopes interfèrent de façon stable.

II.2.6. Les différents types d'Instruments à Synthèse d'Ouverture Optique : [46]

Après avoir brièvement introduit la notion de synthèse d'ouverture, nous présentons dans cette sous-section les différents types d'instruments utilisant ce principe et nous décrivons, selon la catégorie d'interféromètres considérée, la méthode de détection usuellement associée.

Plusieurs implémentations, comme représentées (Figure. II.4), peuvent être envisagées afin de réaliser un ISOO :

II.2.6.1. Le télescope monopupille: analogue à un monolithique mais dont le primaire est composé de plusieurs miroirs alignés (Figure. II.4.a). Ainsi, le Keck, situé à Hawaii, utilise un miroir de 10 mètres constitué de 36 segments hexagonaux jointifs de 90 cm de côté. Ce principe est également utilisé dans l'espace pour déployer des télescopes dont le diamètre équivalent est supérieur à celui de la coiffe du lanceur. C'est notamment le cas pour le James Webb Space Telescope, dont le diamètre total est de 6,5 mètres ;

II.2.6.2. Le réseau de sous-pupilles : constitué d'un ensemble de télescopes qui peuvent être mécaniquement solidaires (Figure. II.4.b). Par exemple, le Large Binocular Telescope du Mont Graham (Arizona), composé de deux miroirs monopupilles segmentés de 8,4 mètres

espacés centre à centre de 14,4 m, a pour but de fournir une image comparable à celle d'un monolithique équivalent. Ce type d'instruments commence également à être envisagé pour faire de l'imagerie terrestre large champ depuis l'orbite géostationnaire ;

II.2.6.3. Les interféromètres fibrés : pour lesquels les faisceaux sont véhiculés par des fibres optiques monomodes (Figure. II.4.c), comme pour le projet OHANA (Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy) qui consiste en une recombinaison interférométrique des grands télescopes du site de Mauna Kea, à Hawaii.

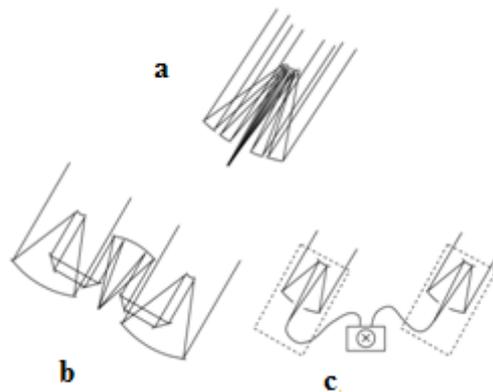


Figure. II.4 : Les différents types de télescopes à synthèse d'ouverture optique ; a) : les télescopes monopupilles segmentés (de type Fizeau), b) : les réseaux de sous-pupilles (Michelson ou Fizeau), c) : les interféromètres fibrés(Michelson).

Parmi ces différentes configurations, nous pouvons distinguer trois catégories d'instruments:

II.2.6.4. Les systèmes de type Fizeau : formant directement une image de l'objet observé (Figure. II.5.a). Cette catégorie, qui recouvre principalement les télescopes segmentés, concerne donc des ISOO imageurs.

II.2.6.5. Les systèmes de type Michelson : basés sur le transport des faisceaux par périscope ou par fibre (Figure. II.5.b). Cette configuration ne se prête pas à l'imagerie dont le champ d'observation est supérieur à λ / D (imagerie grand champ) ; elle est plutôt utilisée pour reconstruire un ensemble discret de fréquences spatiales de l'objet. L'instrument correspondant est alors appelé ISOO corrélateur car il mesure la corrélation des champs électromagnétiques entre les sous-pupilles, comme ce qui est effectué pour le Very Large Interferometer Array (VLTI) situé sur le Mont Paranal.

II.2.6.6. Les systèmes Michelson en mode Fizeau: qui permettent de faire de l'imagerie (notamment de l'imagerie terrestre grand champ) à partir de réseaux de télescopes.

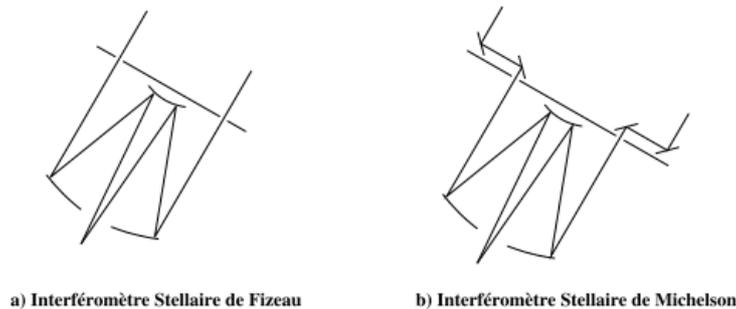


Figure. II.5 : Les deux principales catégories d'instruments à synthèse d'ouverture : les Fizeau (a), généralement utilisés dans un but d'imagerie et les Michelson (b), plutôt employés comme corrélateurs.

Les recherches d'avoir des instruments à synthèse d'ouverture plus adaptés aux besoins scientifiques ne cessent de se développer, Barak Katz and Joseph Rosen dans leur étude, ont proposé et fait preuve d'un processus d'enregistrement des hologrammes incohérents dans un mode à synthèse d'ouverture qui peut être utilisé comme une base conceptuelle pour un nouveau type de télescopes incohérents à synthèse d'ouverture pour des objets relativement proches. [48]

II.3. La synthèse d'ouverture en imagerie laser : [49]

La détection laser par rétrodiffusion optique consiste à sonder une cible avec une source laser et récupérer la lumière rétrodiffusée par cette cible afin de pouvoir l'analyser. Par exemple, la microscopie confocale laser permet d'imager des objets micrométriques en détectant directement la lumière qu'ils rétrodiffusent à l'aide d'une simple photodiode.

L'inconvénient de cette technique est qu'elle est donc limitée par le bruit de détecteur. La Tomographie Optique Cohérente (ou OCT pour Optical Coherent Tomography) est une autre technique d'imagerie laser qui permet de s'affranchir du bruit du détecteur par une mesure interférométrique entre le signal renvoyé par la cible et un signal de référence.

L'inconvénient de cette technique est de devoir aligner le faisceau laser sonde et le faisceau laser de référence. Pour éviter les problèmes d'alignement et simplifier le dispositif expérimental, la technique LFI (Laser Feedback Interferometry) utilise la réinjection optique,

c'est à dire que le laser est à la fois la source et le détecteur, ce qui permet d'être en configuration auto-alignée. Le signal de référence est alors le champ électrique intra-cavité et l'interférence entre le signal renvoyé par la cible et le signal de référence se produit donc dans la cavité laser. Le signal mesuré est alors la modification de l'état stationnaire du laser induit par la réinjection optique. La technique LOFI (Laser Optical Feedback Imaging) (figure. II.8) est une amélioration de la technique LFI qui consiste à décaler en fréquence le signal réinjecté dans le laser afin de créer un battement optique à la fréquence de décalage qui va être amplifié par la dynamique du laser.

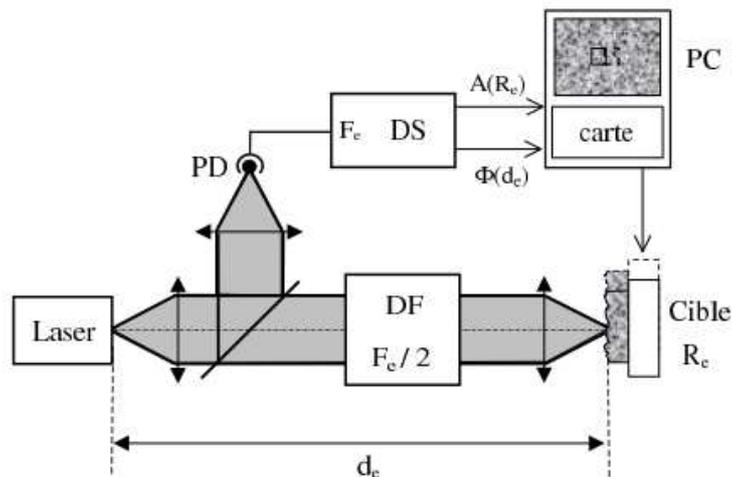


Figure. II.8 : Schéma de principe de la technique LOFI. PD : photodiode, DS : détection synchrone, DF : décalage en fréquence. Pour un aller-retour, F_e : représente le décalage total subi par la fréquence optique du laser. R_e : est la réflectivité effective de la cible à analyser et d_e est la distance laser-cible. A et Φ : amplitude et phase de la modulation de l'intensité du laser à la fréquence de décalage F_e induite par la réinjection optique.

L'imageur de base, appelé Laser Optical Feedback Imaging (LOFI), détecte la faible quantité de lumière rétrodiffusée par la cible à analyser, qui est décalée en fréquence et réinjectée dans la source laser pour être amplifiée par la dynamique du laser. Le grand avantage de cette technique est qu'elle est auto-alignée, c'est à dire que le laser est à la fois la source et le détecteur. La résolution spatiale des images LOFI est limitée par la diffraction: l'auteur [49] a proposé d'adapter la technique de synthèse d'ouverture, bien connue dans le domaine radar, pour lui affranchir de ce problème. En mettant à profit le balayage du laser sur la cible pour faire l'acquisition de l'image pixel par pixel, il a montré qu'il est possible d'augmenter synthétiquement l'ouverture de collection du système et donc la résolution de

l'image. Il a présenté le traitement du signal adapté à la reconstruction de l'image super-résolue à partir des données acquises pour les différentes positions successives du laser. Il a montré aussi qu'il peut étendre cette technique utilisée en balayage linéaire à un balayage angulaire et qu'il peut obtenir une résolution, non seulement meilleure que la limite de diffraction, mais également meilleure que celle obtenue avec un balayage linéaire. Il a validé cette technique expérimentalement en comparant des images LOFI obtenues avec et sans synthèse d'ouverture.

Les deux figures ci dessous (II.9 ; II.10) représentent le principe de la synthèse d'ouverture dans le cas simple d'un balayage en translation du laser par rapport à une cible ponctuelle i , à une distance d'observation h et dans le cas d'un balayage galvanométrique.

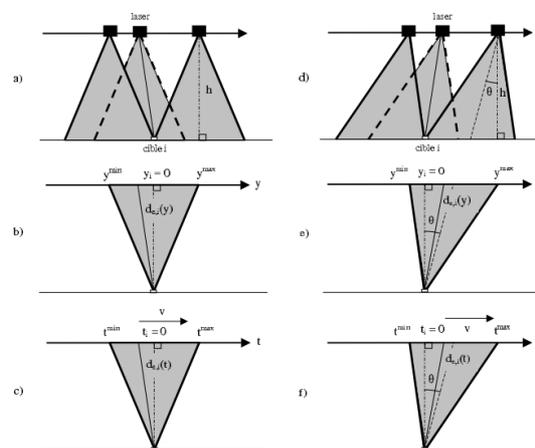


Figure. II.9 : Schéma de principe de la synthèse d'ouverture pour un balayage en translation. a) différentes positions successives occupées par le laser par rapport à une cible ponctuelle i à une distance d'observation constante h . La flèche indique le sens de déplacement. b) Ouverture synthétisée, $d_e, i(y)$ est la distance entre la cible i de coordonnée $Y_i = 0$ et le laser dont la position y est comprise entre les bornes d'éclairement Y_{\min} et Y_{\max} . c) Représentation temporelle dans le cas particulier d'un mouvement rectiligne uniforme à la vitesse v . d), e) et f) mêmes légendes respectives que a), b) et c) dans le cas d'un angle de visée θ non nul.

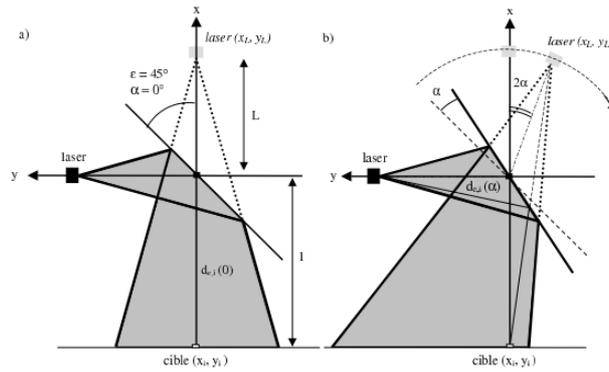


Figure. II.10 : Schéma de principe de la synthèse d'ouverture à balayage galvanométrique. a) Position de référence du miroir ($\epsilon=45^\circ$) et représentation virtuelle du symétrique du laser par rapport au miroir. L'origine du repère (x, y) est le centre de rotation du miroir. Coordonnées du laser : $(X_L=L, Y_L=0)$, coordonnées de la cible : $(X_i=-l, Y_i=0)$. b) Balayage en rotation : lorsque la position du miroir varie d'un angle α , tout se passe comme si le laser s'était déplacé d'un angle 2α sur un arc de cercle de rayon L . $d_{e,i}(\alpha)$ représente la distance laser-cible en fonction de l'angle de rotation α .

II.4. La synthèse d'ouverture en microscopie :

Le microscope optique est devenu un instrument de référence en biologie, grâce à ses possibilités uniques d'observation en 3D de spécimens vivants, marqués spécifiquement si nécessaire (fluorescence). Comparé à d'autres techniques (microscopie électronique, en champ proche), sa résolution reste cependant limitée, ce qui a motivé de nombreux travaux visant à améliorer cet instrument. [50]

L'amélioration de résolution de la microscopie optique est une quête séculaire. Les limites classiques de la résolution sont décrites en premier temps par Abbe par λ/NA et une résolution correspondante à $\lambda/2NA$ pour une illumination cohérente dans le cas d'une incidence normale où NA est l'ouverture numérique de la lentille de l'objectif. [51]

Plusieurs techniques permettent maintenant de dépasser la limite classique d'Abbe, et ouvrent la voie à une imagerie optique en champ lointain avec une résolution nanométrique et non plus micrométrique ou submicrométrique.

II.4.1. La synthèse d'ouverture en microscopie interférométrique :

Dans leurs travaux R. Tylers et all ont décrit et démontré une nouvelle technique de formation d'images appelée microscopie interférométrique à synthèse d'ouverture (ISAM) qui est capable d'enregistrer le champ lumineux complexe. Le concept de la synthèse d'ouverture est d'enregistrer en premier temps multiples champ électrique des images prises sous différents angles d'éclairage couvrant différentes parties du spectre de l'objet, puis de les synthétiser de manière à augmenter la bande passante du spectre de l'objet.

Le SAR a été utilisé longtemps pour produire des terrains à haute résolution et des cartes topographiques en combinant les signaux radar retournés d'une cible qui a été éclairée par de nombreuses directions en une seule image, de façon similaire (figure. II.11), des multiples ISAM acquisitions ont fourni des données quantitativement significatives avec une résolution spatiale fiable invariante à toutes les profondeurs dans un échantillon, qui augmente considérablement la valeur diagnostique des données. [52, 53, 54]

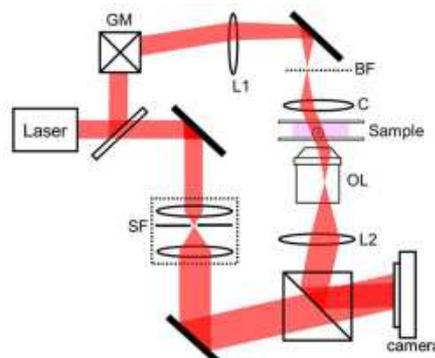


Figure. II.11 : Principe de la microscopie à synthèse d'ouverture. Laser: laser He–Ne; GM, miroir à galvanomètre de balayage double-axe; L1 lentille; BF, plan focal de la lentille condensatrice; C, lentille condensatrice; OL, objective; L2, lentille; SF, filtre spatiale.[55]

ISAM a le potentiel d'influencer sur la microscopie tridimensionnelle en temps réel et la visualisation et l'analyse des cellules dans les domaines de la biologie et de la médecine. [52, 53, 54, 55]

Neumann. A et al [56] ont proposé une nouvelle approche pour atteindre la super-résolution en utilisant une configuration basée sur l'illumination structurée (figure. II. 12) au moyen de deux faisceaux d'éclairage interférents à des angles d'incidence différents (un

interféromètre dans le système d'éclairage) offre une couverture des fréquences décalées dans laquelle toutes les informations sur l'image sont transmises à travers un objectif de faible ouverture numérique.

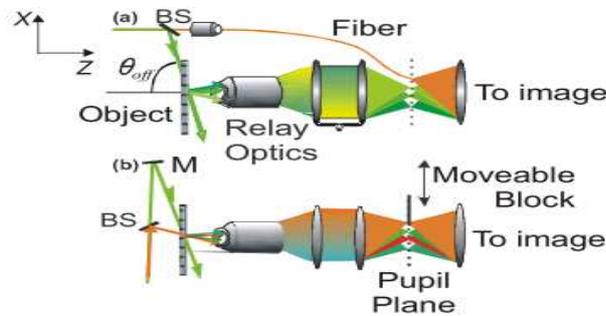


Figure. II.12 : Dispositions optiques pour (a) microscopie interférométrique classique avec un interféromètre qui comprend l'objectif, et (b) illumination structurée avec l'interféromètre en face de l'objet. [56]

Daniel L. Marks et al ont amélioré la qualité de l'image obtenue par ISM en abaissant la cohérence spatiale de la source d'éclairage ou bien l'utilisation d'une lumière partiellement cohérente. [57]

II.4.2. Microscopie à synthèse d'ouverture et l'illumination par l'onde évanescente:

N. Alexander et al [50] ont appliqué l'illumination par l'onde évanescente et la technique de la synthèse d'ouverture à la microscopie sur un substrat transparent solide (figure. II.13) pour étendre la limite de résolution à $\lambda / 2 (n + 1)$ (où n est l'indice de réfraction du substrat) indépendante de l'ouverture numérique de l'objectif.

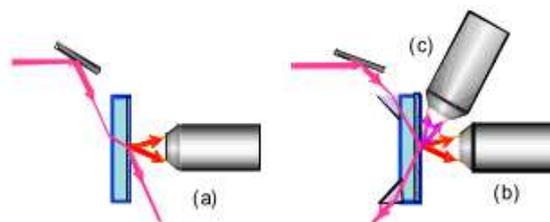


Figure. II.13 : arrangements optique pour l'imagerie par microscopie interférométrique. a) Vue étendue d'illumination et configuration de détection; b) Illumination à travers le substrat pour augmenter la fréquence spatiale; c) Rotation de l'axe optique pour collecter les hautes fréquences spatiales.

Dans cette approche la synthèse d'ouverture est obtenue par rotation de l'axe optique du système d'imagerie.

II.4.3. La synthèse d'ouverture en microscopie confocale :

Dans leur article, M. Levoy et al [58] ont employé la photographie et l'éclairage à synthèse d'ouverture pour mettre en œuvre des adaptations discrètes de la technique de microscopie confocale en remplaçant les ouvertures optiques avec des ouvertures synthétiques formées par des réseaux (réel ou virtuel) des projecteurs et des caméras et des miroirs.

II.4.4. La synthèse d'ouverture en microscopie Tomographique DiffRACTIVE :

La microscopie tomographique diffractive (figure. II. 14) est une technique d'imagerie 3D qui combine les méthodes expérimentales de la microscopie de phase et la synthèse d'ouverture avec les outils mathématiques de la théorie de diffusion, le spécimen observé étant successivement illuminé par une série d'ondes planes cohérentes dont l'angle d'incidence varie. Pour chaque incidence, l'onde diffractée par l'objet est enregistrée dans l'espace de Fourier au moyen d'un interféromètre à décalage de phase et d'une caméra CCD. Chaque hologramme en décalage de phase permet de mesurer un front d'onde diffractée, en amplitude et en phase. Cette technique se rapproche donc des techniques de synthèse d'ouverture utilisée en astronomie ou en imagerie radar. Les enregistrements successifs permettent alors de reconstruire le spectre de l'onde diffractée par le spécimen. [59, 60, 61]

La technique de microscopie tomographique diffractive, inspirée des techniques de synthèse d'ouverture en astronomie, permet de dépasser la limite classique d'Abbe et permet aussi la mesure de la distribution des indices optiques à travers le spécimen.

Une autre approche proposée par N. Lue et al [62], pour l'imagerie 3D de cellules vivantes en mouvement de translation par tomographie à synthèse d'ouverture sans avoir besoin au balayage axial de détecteur est présentée et détaillée.

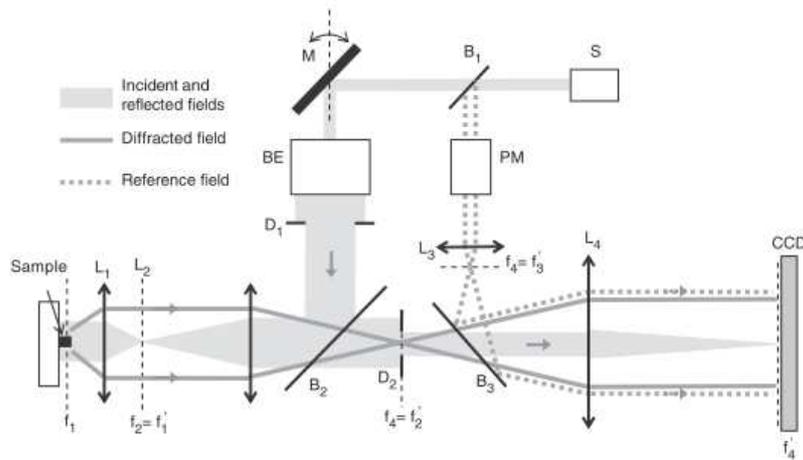


Figure. II.14. Configuration expérimentale. L 1-L 4, lentilles; S, source laser émettant à 633 nm; M : miroir réglable; B 1- B 3 : séparateurs de faisceau; BE : élargisseur de faisceau; PM : modulateur de phase; D 1, D 2 : diaphragmes. [60]

II.5. La synthèse d'ouverture en photographie : [63]

La photographie digitale intégrale est l'une des technologies d'imagerie 3D basée sur un réseau de petites lentilles pour capturer les rayons de lumière incohérente de différentes directions (figure. II.15).

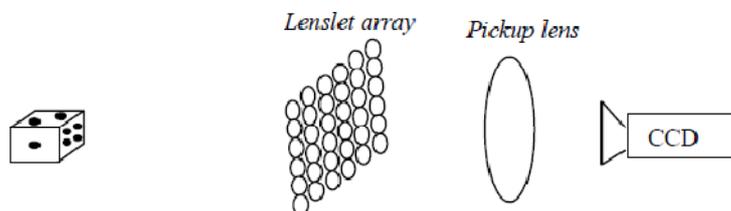


Figure. II.15 : Principe d'enregistrement en imagerie digitale intégrale

Les applications de cette technique sont limitées grâce aux limitations de champ de vue et l'angle de vision. Afin d'accroître l'ouverture Adrian Stern and Bahram Javidi ont mis en œuvre une approche à synthèse d'ouverture qui sert à augmenter le champ de vue et angle de vision de système d'imagerie. La synthèse d'ouverture est obtenue par un mouvement relatif du système d'imagerie et de l'objet dans un plan perpendiculaire à l'axe optique (figure. II.16).

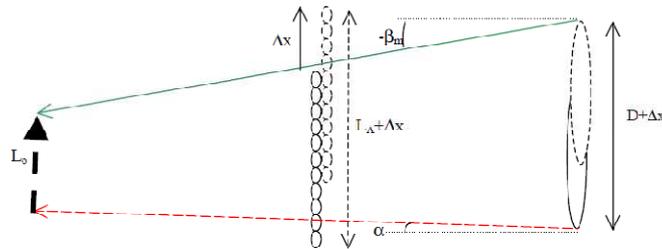


Figure. II.16 : Principe de l'imagerie à synthèse d'ouverture intégrale. L'objet est scanné dans la direction verticale. Le déplacement Δx entre deux expositions augmente l'ouverture du système par Δx

Les images intégrées capturées pendant le processus de scanning sont combinées numériquement pour créer une image de synthèse d'ouverture qui a un champ de vision élargi. Donc l'ouverture synthétique est obtenue par un processus de scanning, la méthode proposée est adaptée lorsque le système d'imagerie intégrale est situé sur des supports mobiles tels que les avions ou lorsque l'objet est en mouvement. La technique proposée permet de reconstruire des images à des distances différentes du système d'imagerie.

II.6. La synthèse d'ouverture en imagerie acousto-optique :

L'imagerie acousto-optique profite du haut contraste optique et de la basse dispersion acoustique, elle a trouvé plusieurs applications biomédicales. Un faisceau laser éclaire l'objet à imager, et un transducteur acoustique localisé sur le même côté que le faisceau laser détecte le signal acousto-optique produit par l'effet du thermo-élastique. Une image est formée en parcourant latéralement le faisceau laser et le transducteur. Bien que la largeur du faisceau laser soit généralement étroite pour fournir la bonne résolution latérale, la dispersion optique forte dans le tissu élargit le modèle de l'illumination optique et donc dégrade la résolution latérale.

Pour résoudre ce problème, C.-K. Liao, et al [64] ont proposé une approche basée sur la synthèse d'ouverture (figure. II.17). Cette méthode synthétise une grande ouverture en additionnant différents signaux reçus à différentes positions du système.

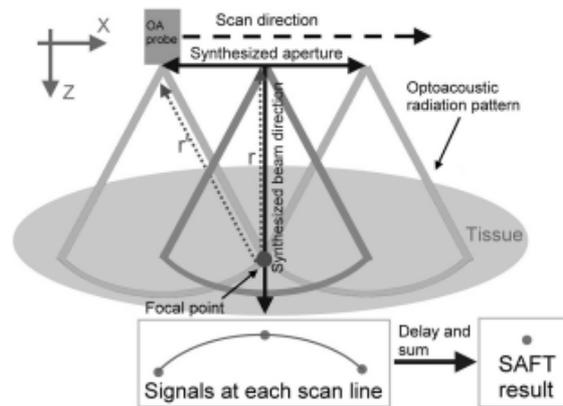


Figure. II.17 : Illustration graphique du principe de la technique de la synthèse d'ouverture appliquée à l'imagerie acousto-optique.

II.7. La synthèse d'ouverture en PIV :

J. Belden et al [65] ont présenté une nouvelle méthode (3D) pour résoudre des champs de vitesse du fluide en trois dimensions en utilisant une technique dite vélocimétrie par imagerie de particule à synthèse d'ouverture (SAPIV) (figure. II.18). SAPIV surmonte beaucoup des défis inhérents à la vélocimétrie par imagerie de particules 3D (3D PIV). Cette méthode offre la possibilité de reconstruire numériquement un champ 3D d'écoulement dans des plans arbitraires dans un volume.

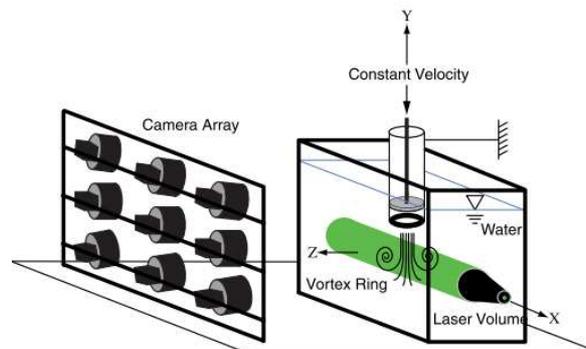
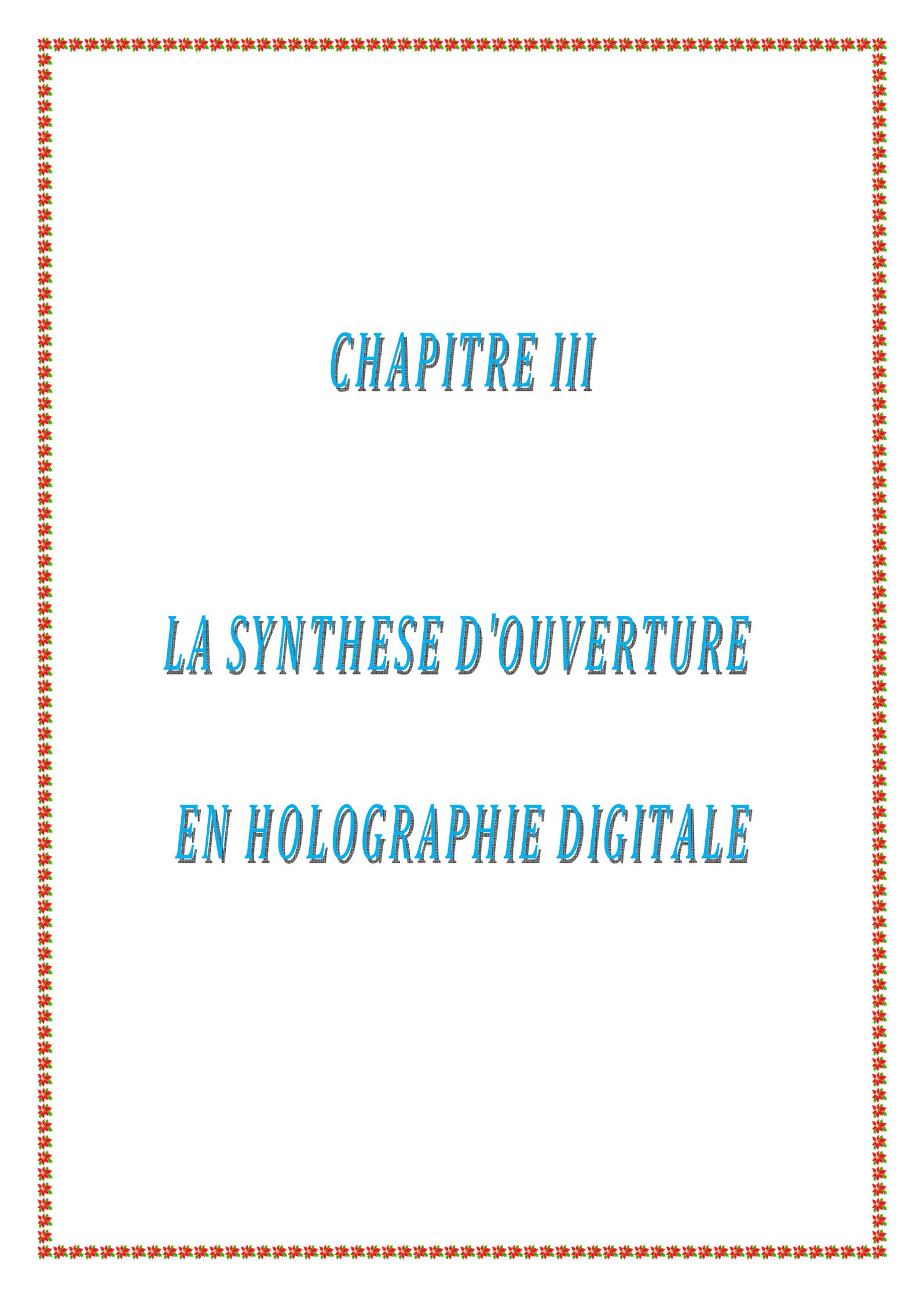


Figure. II.18 : Principe de la PIV à synthèse d'ouverture.

Conclusion

Le développement des futures missions pour l'astronomie ou l'observation de la Terre nécessite des résolutions spatiales importantes, ce qui implique le développement de télescopes de plus en plus grands. Malheureusement, la fabrication et le lancement dans l'espace de miroirs de diamètre croissant se heurte rapidement à de nombreuses limitations, aussi bien technologiques (encombrement, masse) que financières. Dès lors, pour répondre aux problèmes posés par la construction ou l'emploi de miroirs monoblocs géants et pour gagner définitivement en résolution, la Synthèse d'Ouverture Optique apparaît comme une solution séduisante. Etant donné que le champ des applications possibles est extrêmement vaste, cette méthode se révèle aujourd'hui comme étant incontournable dans le domaine de la haute résolution angulaire. De fait, plusieurs instruments multipupilles sont actuellement disponibles au sol ou en cours de construction, et des projets spatiaux ambitieux de plus en plus nombreux y font désormais appel. [46]

La synthèse d'ouverture est devenue un outil très utile pas seulement dans l'imagerie radar mais aussi dans nombreuses technique d'imagerie tel que la photographie, la tomographie diffractive, la microscopie interférométrique, l'imagerie laser, la PIV, grâce à sa capacité de dépasser les limites de résolution des systèmes d'imagerie.



CHAPITRE III

LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE

EN HOLOGRAPHIE DIGITALE

III.1. Introduction :

Bien que l'holographie numérique (DH) ait été démontrée pour être un outil utile dans la métrologie optique, cependant, en raison de la limite du nombre et de la taille des pixels dans un détecteur CCD, il est difficile pour satisfaire simultanément la condition d'échantillonnage d'enregistrement et la condition de reconstruction. En outre, la résolution et l'angle de visualisation en holographie digitale sont significativement plus faibles que dans l'holographie traditionnelle.

Dans les dernières années un grand nombre de techniques ont été démontrées pour augmenter la résolution d'un système d'imagerie par l'utilisation de l'ouverture synthétique. L'idée de base est d'enregistrer les différentes parties du spectre de Fourier d'un objet consécutivement et de les réunir numériquement pour avoir un spectre total contenant plus de fréquences spatiales de l'objet. Les principes de ces techniques ont été développés par W. Lukosz au milieu du 20^{ème} siècle. [66]

La résolution est une question importante pour la visualisation des objets sur l'échelle microscopique. Un certain nombre d'approches ont été proposées pour augmenter synthétiquement la résolution optique au delà la limite de diffraction d'un système d'imagerie optique, notamment l'imagerie sans lentille (lensless imaging), l'éclairage variable à l'aide d'une source ponctuelle programmable, l'éclairage à l'aide d'onde évanescente, et la translation du détecteur ou de l'échantillon. Ces approches pourraient être utilisées pour la métrologie et les applications d'imagerie optique dans plusieurs domaines techniques et biologique. [67,68, 69, 70,71]

Dans ce chapitre nous décrivons comment la technique de la synthèse d'ouverture peut être appliquée à l'holographie et nous présenterons les différentes approches qui ont été définies pour augmenter la résolution en holographie digitale.

III.2. Rappel sur le principe de l'holographie digitale :

III.2.1. Définition de l'holographie digitale: [72, 73, 74, 75]

L'holographie digitale est dérivée de l'holographie conventionnelle dont les hologrammes sont directement enregistrés et numérisés par un capteur CCD couplé à un système d'analyse d'image. Le processus de reconstruction est alors effectué numériquement en simulant les lois

de propagation de l'optique diffractive fournissant l'information quantitative de l'amplitude et de la phase du front d'onde.

Le stockage de l'hologramme dans un ordinateur nous permet de réduire le bruit à travers des techniques de traitement d'image et de reconstruire numériquement l'objet avec des vues arbitraires.

Avec l'augmentation de la résolution des capteurs (CCD) et la vitesse du traitement informatique, l'holographie digitale est récemment devenue faisable. Elle est explorée pour surmonter les problèmes de l'holographie classique basée sur le film classique. Dans l'holographie Digitale, les capteurs CCD fournissent la flexibilité pour enregistrer les hologrammes directement en forme numérique. Ceci offre de nouvelles possibilités pour une variété d'applications.

III.2.2. Principes mathématiques: [76]

La diffraction d'une onde lumineuse incidente normalement par une ouverture (dans ce cas-ci un hologramme) est décrite par l'intégrale de Fresnel Kirchhoff :

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right)}{\rho'} dx dy \quad (\text{III-1})$$

Avec

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

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

ρ' est la distance entre un point dans le plan d'hologramme et un point dans le plan de restitution.

$E_R(x, y)$ est l'onde de référence.

Les grandeurs géométriques sont illustrées sur la figure (III.1) :

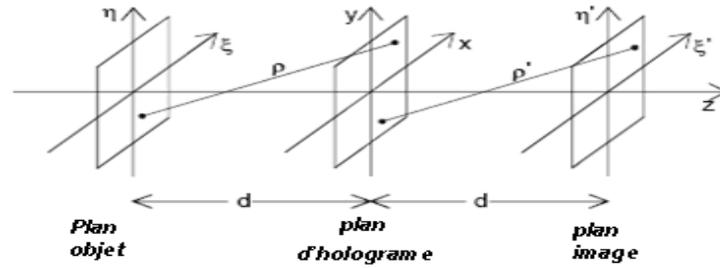


Figure.III.1: Système de coordonnées pour la reconstruction numérique d'hologramme.

[76]

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

L'équation (III-1) est la base pour la reconstruction numérique. Puisque le champ d'onde réfracté $\Gamma(\xi', \eta')$ est une fonction complexe, l'intensité et la phase peuvent être calculées en même temps. C'est contrairement au cas de la reconstruction optique d'hologramme dans laquelle, seulement, l'intensité est rendue visible.

L'expression de la reconstruction de l'image peut être digitalisée si la fonction de l'hologramme $h(x, y)$ est prélevée sur une trame rectangulaire de $N \times N$ points, avec un pas de Δx et Δy le long des coordonnées. Elle est donnée par :

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)\right] \times \sum_{K=0}^{N-1} \sum_{L=0}^{N-1} E_R^*(k, l) h(k, l) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right] \exp\left[i2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \quad (\text{III-3})$$

C'est la transformation de Fresnel discrète.

Δx et Δy sont les distances entre les Pixel voisins sur le CCD dans la direction horizontale et verticale.

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

III.2.3. Montage d'enregistrement des hologrammes digitaux: [77]

Plusieurs montages sont exploités en holographie digitale, parmi ses montages nous citons un montage basé sur l'architecture de l'interféromètre de Mach-Zehnder qui est illustré sur la figure (III.2). Ce montage travaille en réflexion comme il peut travailler en transmission.

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

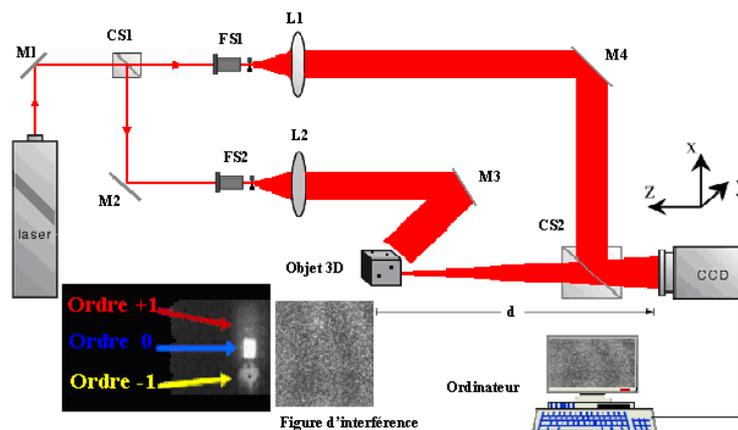


Figure.III.2 : Installation expérimentale pour enregistrer un hologramme numérique.

M1, M2, M3, M4: miroirs; CS1, CS2: cubes séparateurs; FS1, FS2: filtres spatiales; L1, L2: lentilles. [77]

III.3. Les différentes approches pour augmenter la résolution des systèmes d'imagerie en holographie :

L'holographie numérique fournit l'imagerie cohérente en microscopie pour une variété d'applications telles que la caractérisation du silicium MEMS, la microscopie de phase

quantitative en biologie [78, 79, 80], l'imagerie en trois dimensions soit par lumière cohérente soit par lumière incohérente [81, 82, 83], détection de particules dans un volume d'étude [84], analyse d'images de particules [85, 86, 87] et l'analyse des vibrations [88, 89]

Les applications potentielles de l'holographie digitale ont été étendues à une large gamme spectrale, de l'IR [90, 91] à UV [92, 93].

La reconstruction numérique de l'image à partir d'un hologramme numérique présente de nombreux avantages par rapport à l'holographie optique traditionnel, y compris l'imagerie d'amplitude et de phase, l'imagerie 3D et la manipulation de front d'onde numérique. D'un autre côté, quelques inconvénients existent aussi. En fait, aucun appareil électronique est capable de rivaliser avec la haute résolution des émulsions photographiques (jusqu'à 5000 lignes / mm) utilisées en holographie optique. Par conséquent, dans la plupart des cas, la résolution obtenue en holographie digitale est trop faible et non qualifiés pour des applications pratiques.

Récemment, des résultats importants ont été réalisés pour augmenter la résolution optique de l'imagerie par holographie digitale, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités en microscopie 3D. Il est bien connu que, en microscopie, la résolution des systèmes optiques est limitée par l'ouverture numérique (NA). Essentiellement, à cause de l'ouverture finie du système d'imagerie, seules les parties de basse fréquence du spectre de l'objet sont transmises et enregistrées par le capteur. Par conséquent, les images correspondantes sont reconstruites à bande limitée dans le domaine fréquentiel.

Plusieurs stratégies ont été définies et des approches différentes ont été testées pour augmenter l'ouverture numérique du système optique afin d'obtenir la super-résolution.

La plupart des méthodes ci-dessus sont essentiellement destinées à accroître de façon synthétique l'ouverture numérique du capteur de lumière pour obtenir la super-résolution. [68]

Des méthodes ont été mises en évidence pour augmenter la résolution par déplacement du capteur CCD et enregistrement d'un hologramme à synthèse d'ouverture.

Aussi des réseaux de diffraction sont utilisés pour cintrer les fréquences spatiales élevées sur un détecteur qui seraient perdus autrement.

D'autres techniques où deux réseaux de diffraction sont intégrés au montage le premier réseau qui est placé devant l'objet est utilisé pour générer des faisceaux d'éclairage inclinés et le deuxième réseau pour fournir une onde de référence, ce dernier est placé devant la caméra. Une illumination inclinée peut aussi plus facilement être réalisée par l'utilisation d'un réseau de sources de lumière indépendantes. Cela a le grand avantage que les différentes sections du spectre de Fourier de l'objet peuvent être enregistrées à la fois dans un hologramme.

D'autres méthodes pour améliorer la résolution d'un système d'imagerie en changeant la direction d'illumination. Cela se fait par rotation de l'objet.

D'autres approches utilisent le codage de polarisation pour enregistrer à la fois différents hologrammes avec des directions d'illumination différentes.

Une autre approche utilise un dispositif mécanique simple pour générer des ondes d'illumination inclinées et d'enregistrer les différentes sections de façon séquentielle.

Toutes ces techniques ont besoin de méthodes sophistiquées pour combiner les parties enregistrées du spectre de Fourier et de reconstruire une image de l'objet étudié avec résolution augmentée [66].

Massig et al. ont augmenté l'ouverture numérique en enregistrant neuf hologrammes avec une caméra (capteur CCD) traduite dans différentes positions et de les recombinaison en un seul hologramme digital synthétisé [94].

Alexandrov et al. ont été capables de casser la limite de la diffraction en tournant l'échantillon et enregistrant un hologramme numérique pour chaque position pour capturer le champ de diffraction le long de différentes directions [95].

Une approche différente a été proposée par Kuznetsova et al. qui ont tourné l'échantillon envers l'axe optique pour rediriger les rayons éparpillés à angles plus larges dans l'ouverture du système optique, donc aller au delà de sa limite de la diffraction [96].

Mico et al. ont proposé et ont démontré un procédé pour améliorer la résolution de l'ouverture limitée des systèmes d'imagerie basée sur l'utilisation de l'illumination inclinée et l'enregistrement des franges produites par interférence [97].

Martínez et al. ont traduit la caméra de quelques microns, afin d'accroître à la fois la résolution spatiale et l'échantillonnage dans le processus de recodage [98].

La synthèse d'ouverture a été acquise avec l'holographie numérique hétérodyne sur l'axe par Leclerc et al [99]. Tandis qu'une combinaison de la synthèse d'ouverture et de phase shifting DH a été mise au point par Binet et al [100], Granero et al [101] ainsi que par T. Nakatsuji and K. Matsushima [102].

Récemment, une approche qui permet l'imagerie de super-résolution en trois dimensions (3-D) des échantillons par la numerical refocusing a été présentée dans le domaine de la microscopie holographique numérique [103, 104]. Elle est basée sur la variation du spectre de l'objet produit par l'illumination inclinée et par une approche de multiplexage temporel.

Par ailleurs dans un des articles récents [105], l'éclairage par l'onde évanescente a été appliqué à la microscopie à ouverture synthétique sur un substrat solide transparent pour étendre la limite de résolution à $\lambda / 2 (n + 1)$ (où n est l'indice de réfraction du substrat) indépendant de la l'ouverture numérique de la lentille et en utilisant une source laser à 633 nm.

Une méthode complètement différente a été démontrée, où les images super-résolues peuvent être obtenues simplement en utilisant l'effet de diffraction d'un réseau approprié [106, 107]. Essentiellement, la technique permet de recueillir des parties du spectre diffracté par l'objet, qui, autrement, ne relèveraient pas de la matrice CCD. Ceci a été réalisé par l'insertion d'un réseau de diffraction dans le montage d'enregistrement de l'holographie digitale.

Le principe de base est simple mais efficace. En fait, le réseau de diffraction permet de rediriger vers la barrette CCD l'information qui serait autrement perdue. Fondamentalement, trois hologrammes digitaux sont enregistrés et multiplexé spatialement sur le même capteur CCD. Les images super-résolues peuvent être obtenues par la reconstruction numérique de ces hologrammes numérique multiplexés, en augmentant trois fois l'ouverture numérique.

III.4. Présentation de quelques approches proposées pour augmenter la résolution :

III.4.1. Utilisation d'un réseau de diffraction :

M. Paturzo et P.Ferraro [107] ont présenté une nouvelle approche où un réseau de diffraction particulier est utilisé (fig.III.3). Il a trois caractéristiques importantes qui

permettent d'améliorer la résolution optique au-delà de la limite imposée par le système d'enregistrement:

- 1) Le réseau à deux dimensions (2D) géométrie hexagonale qui permet d'obtenir des super-résolutions en deux dimensions;
- 2) Ils ont adopté un réseau de phase, au lieu de celle d'amplitude,
- 3) Depuis leur réseau de phase, qui a été conçu et fabriqué dans leur laboratoire, est constitué d'un substrat électro-optique (lithium niobate), il a une efficacité de diffraction accordable. En ce qui concerne l'accordabilité de diffraction, le réseau de phase permet d'ajuster l'intensité relative des hologrammes multiplexés, en effet, dépendent de l'efficacité de diffraction du réseau lui-même. Ils vont montrer que ces intensités relatives peuvent affecter la qualité de l'image super-résolue obtenue par la superposition des hologrammes reconstruits. Le réseau de phase souple, en fait, donne l'opportunité d'optimiser le processus d'enregistrement des hologrammes multiplexés et par conséquent, d'améliorer la qualité des images super-résolues. En outre, ils vont démontrer que, grâce à la flexibilité du processus de reconstruction numérique, il est possible d'utiliser de manière sélective uniquement les ordres de diffraction qui contribuent de manière significative à augmenter la résolution spatiale.



Figure.III.3 : Une section du masque photo-lithographique utilisé dans le processus de fabrication du réseau de diffraction.

Montage expérimental pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture où un réseau de diffraction est intégré au montage:

Sur la figure III.4, l'échantillon est illuminé par un faisceau laser plan collimaté, et un faisceau laser sphériques est utilisé comme le faisceau de référence. Selon la configuration de l'holographie de Fourier, Le capteur CCD a (1024×1024) pixels de taille de 7,6 microns. Le

réseau de diffraction G, qui est le dispositif clé de cette méthode, est placé en face de l'échantillon.

A cause de l'effet électro-optique, la matrice de phase hexagonale paraît quand le voltage est appliqué au cristal LN. Toutes les fois que le voltage est appliqué, le réseau devient actif. Il est capable de produire différents ordres de diffraction. Essentiellement, chaque ordre de diffraction produit un hologramme numérique correspondant et tous les hologrammes sont multiplexés spatialement et enregistrés simultanément par le CCD.

Une représentation schématique des ondes de l'objet est montrée dans Figure. III.5 où, pour simplification, seulement un point P de l'objet est considéré. En cas de configuration holographique conventionnelle, tous les rayons éparpillés aléatoirement par l'objet propagent en avant du plan CCD. Cependant seulement les rayons centraux atteignent la région de l'hologramme et peuvent être enregistré numériquement. Par conséquent, en raison de l'ouverture limitée de la matrice CCD, l'onde objet enregistré est seulement une partie de la lumière totale diffusée par l'objet. Néanmoins, si le réseau est placé entre l'objet et la matrice CCD, six rayons supplémentaires tombent sur la matrice CCD. Cette configuration est montrée dans Figure.III.10.b. Chacun des six ondes est produite par les premiers ordres de diffraction du réseau. L'hologramme numérique résultant est formé essentiellement par sept faisceaux objet et le faisceau de référence. En d'autres termes la matrice CCD enregistre simultanément sept hologrammes numériques qui sont multiplexés spatialement et superposés dans une seule acquisition d'une manière cohérente. Le système holographique dans la Figure. III.10.b présente clairement une grande ouverture numérique comparé à celle de la Figure.III.10.a. En fait, l'ouverture de CCD augmente jusqu'à trois fois le long de chacune des trois directions à 120° , grâce à la géométrie hexagonale.

Par conséquent, l'image reconstruite du point P a une résolution améliorée jusqu'à trois fois par rapport au système de l'holographie digitale conventionnelle, sans le réseau de diffraction.

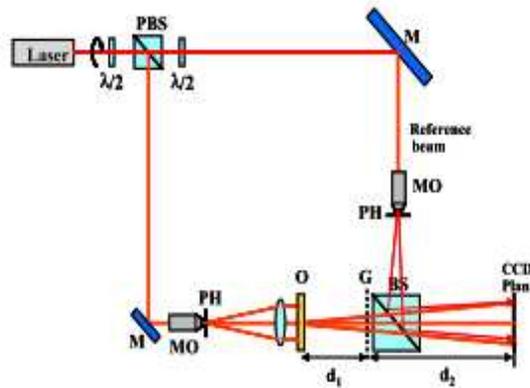


Figure.III.4: Schéma de montage d'enregistrement pour l'holographie digitale: configuration de Fourier en mode hors-axe.

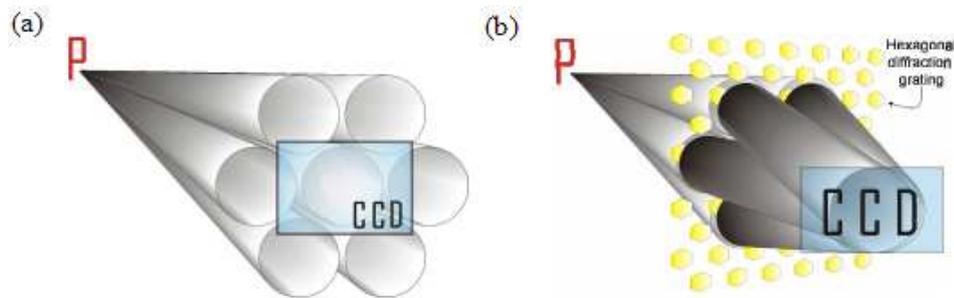


Figure.III.5: Représentation schématique d'un seul point P qui appartient à l'objet. (a) sans réseau de diffraction (b) avec réseau de diffraction. Quand le réseau de diffraction de phase est allumé en appliquant le voltage, les rayons éparpillés à l'extérieur de l'ouverture CCD sont diffractés et redirigés à l'intérieur de la région de barrette CCD qui augmente synthétiquement l'ouverture numérique (NA) du système optique.

La reconstruction numérique de l'hologramme numérique enregistré est divisée en deux étapes. Tout d'abord, le champ d'ondes dans le plan juste derrière le réseau est obtenu par la formule :

$$b(x_1, y_1) = \frac{1}{i\lambda d_2} e^{\frac{i\pi}{\lambda d_2}(x_1^2 + y_1^2)} \iint r(x_2, y_2) h(x_2, y_2) e^{\frac{i\lambda}{d_2 \lambda}[x_2^2 + y_2^2]} e^{\frac{2i\lambda}{\lambda d_2}[x_2 x_1 + y_2 y_1]} dx_2 dy_2 \quad (III.4)$$

Où $r(x_2, y_2)$ est l'onde de référence alors que $h(x_2, y_2)$ est l'intensité de l'hologramme numérique acquise par le capteur CCD. Le réseau utilisé dans la figure. 2b a une fonction de transmission qui peut être écrite comme

$$T(x_1, y_1) = 1 + a \cos\left(\frac{2\pi x_1}{p}\right) + b \cos\left(\frac{(x_1 + \sqrt{3}y_1)\pi}{p}\right) + c \cos\left(\frac{(x_1 - \sqrt{3}y_1)\pi}{p}\right)$$

(III.5)

L'équation (III.5) est composée de trois termes. Le premier terme tient compte de la diffraction dans la direction horizontale, tandis que le 2^{ème} et 3^{ème} terme considère les deux autres directions. Dans l'équation (III.5), P est la période du réseau, tandis que a, b et c sont les efficacités de diffraction le long des trois directions différentes typique du modèle hexagonal de notre réseau de diffraction, respectivement. La distribution d'amplitude complexe de plan juste avant le réseau peut être obtenue en multipliant $b(x_1, y_1)$ avec $T(x_1, y_1)$ et l'image reconstruite dans le plan objet x_0, y_0 peut être obtenue par le calcul de l'intégrale de Fresnel de $b(x_1, y_1)T(x_1, y_1)$ selon la formule suivante :

$$b(x_0, y_0) = \frac{1}{i\lambda d_1} e^{\frac{i\pi}{\lambda d_2}(x_0^2 + y_0^2)} \iint b(x_1, y_1) T(x_1, y_1) e^{\frac{i\pi}{d_1 \lambda}[x_1^2 + y_1^2]} e^{\frac{2i\pi}{d_1 \lambda}[x_1 x_0 + y_1 y_0]} dx_1 dy_1 \quad (\text{III.6})$$

Ils ont adopté l'algorithme de reconstruction double-étape pour avoir le pixel reconstruit (PR) dans le plan image indépendant de la distance entre l'objet et le CCD, différemment de ce qui se passe dans un processus typique de la reconstruction de Fresnel en une seule étape, où $PR = \lambda d / NP_{\text{CCD}}$.

En fait, dans leur cas, le PR ne dépend que de la grandeur d_1/d_2 , selon la formule :

$$PR = P_{\text{CCD}} d_1/d_2. \text{ Ils ont fixé } d_1 \text{ égal à } d_2 \text{ de sorte que } PR = P_{\text{CCD}} = 7,6 \mu\text{m}.$$

De cette façon, ils ont assuré que la PR est le minimum possible, sans diminuer le champ de vision, ce qui correspond à la taille des pixels du capteur CCD [108].

L'amélioration de la résolution peut être obtenue par la superposition de manière sélective les différentes images reconstruites obtenues par les hologrammes numériques. En fait, de cette manière, ils ont pu augmenter l'ouverture numérique du système optique et donc la résolution optique de l'image résultante. [68,109]

III.4.2. Décalage de phase :

T. Nakatsuji et K. Matsushima [102] ont élargi la zone de vision en éclairant l'objet par une onde sphérique et ont étendu la taille du capteur en utilisant une technique de synthèse d'ouverture basée sur le décalage de phase.

Montage expérimental pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par décalage de phase :

La configuration de cette technique est représentée sur la figure.III.11. La sortie du single-mode pompés par diode laser à semi-conducteurs avec une longueur d'onde de 532 nm est divisée en deux voies. Le déphaseur piézo-électrique et le filtre spatial sont insérés dans la trajectoire du faisceau de référence pour former une phase contrôlée. Ici, d_R est la distance entre la source de point de référence et le capteur d'image. L'objet est également irradié par une onde sphérique formée par l'objectif. L'onde objet et l'onde de référence sont combinés dans le cube séparateur du faisceau et donnent des franges d'interférence sur la surface du capteur. Un capteur d'image de type CMOS est utilisé pour capturer le réseau de franges. Le nombre de pixels dans le capteur d'image est de 2000×2000 pixels. Comme le capteur d'image est déplacé en translation dans cette expérience, le capteur est installé sur une scène avec commande à moteur de translation, et sa position est décalée perpendiculaire à l'axe optique. La distribution de l'amplitude complexe est obtenue par un décalage de phase en quatre étapes. Quatre figures d'interférences sont enregistrées pour chaque position du capteur, puis une image à valeur complexe est composée de ces franges capturées à l'aide de la technique d'holographie digitale à décalage de phase.

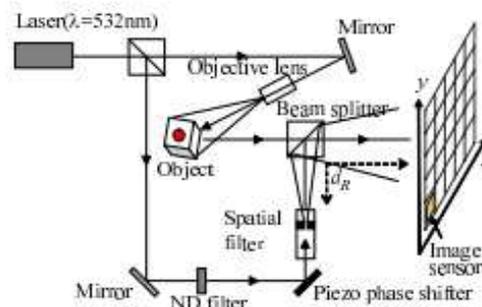


Figure.III.11 : Dispositif expérimental pour capter des ondes objet par holographie digitale à synthèse d'ouverture par décalage de phase. [102]

III.4.3. Déplacement du capteur :

Les images riches d'objets, accompagnées avec l'information de la phase, peuvent être capturées par holographie numérique, en utilisant surtout la technique de décalage de la phase. Ces images riches en information trouveront de nombreuses applications dans l'avenir. Cependant, en général, il ya des limites sévères sur la taille et la position des objets en holographie numérique en raison de la faible résolution des capteurs d'image actuelle. Par exemple, si la dimension d'un objet est de plusieurs centimètres, il doit être placé à quelques mètres du capteur d'image (figure.III.12). Si la taille de l'objet w est plus grande, la distance du capteur d'image d doit être plus grande.

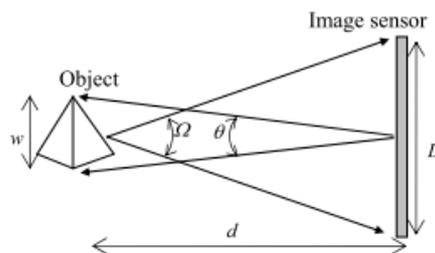


Figure.III.12 : Définition de champ visuel et la zone d'observation. [110]

Bien que presque toute l'information sur la lumière diffractée par l'objet puisse être enregistrée comme une image à valeur complexe, presque toute la lumière à enregistré vient de la même direction. Dans cette situation, l'obtention de l'information riche contenue dans l'image est difficile. Par conséquent, l'augmentation de l'angle de champ visuel est un problème important dans holographie numérique.

Pour augmenter l'angle de champ visuel, la distance d doit être réduite, qui mène directement à l'augmentation de l'angle de la zone d'observation. En conséquence, la réduction de la distance d augmente l'information contenue dans les images capturées, tel que les formes de l'objet observées sous différents angles.

Montage expérimental pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par déplacement du capteur:

Une installation pour l'holographie numérique à synthèse d'ouverture est représentée sur la Fig.III.13. Le faisceau de sortie d'un laser est divisé en deux bras, et un déphaseur piézo-électrique est inséré dans le bras de référence. Le nombre de pixels du capteur d'image est de 2000×2000 [pixel] et de son pas d'échantillonnage est de $6,0 \times 6,0$ [um]. Le capteur est placé sur une platine linéaire pour le déplacer dans la direction de l'axe des x. Les franges sont capturés trois ou quatre fois avec des phases de référence différentes pour chaque position du capteur.

Une image à valeur complexe est composée de ces franges capturées fondée sur le principe du décalage de phasage. Le capteur est déplacé par une distance inférieure à la taille du capteur pour générer un chevauchement entre les images adjacentes. La position exacte relative entre les images adjacentes est fournie en utilisant une fonction de corrélation entre eux.

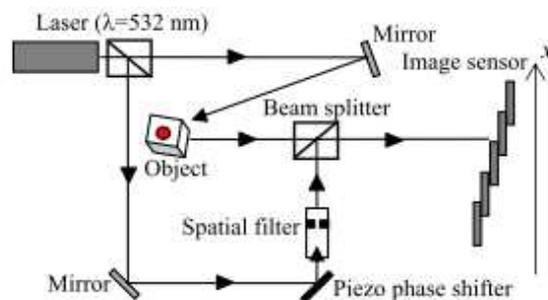


Figure.III.13: montage expérimentale proposé pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par déplacement du capteur. [110]

B. Katz et J. Rosen dans leur article [111], ont proposé et démontré un processus d'enregistrement des hologrammes incohérents dans le mode de l'ouverture synthétique. L'ouverture synthétique augmente considérablement le pouvoir de résolution transversal et axial. Cette expérience est la première démonstration d'un radar à l'ouverture synthétique dans la lumière visible où la scène observée est éclairée par la lumière blanche. Le concept du système présenté peut être appliqué à tous les systèmes d'imagerie de microscopes aux télescopes, aussi bien que pour l'imagerie 2-D et 3-D.

Un exemple d'un système avec l'ouverture synthétique qui est plus large que l'ouverture réelle trois fois est représenté sur la Figue.III.14. Pour simplifier la démonstration, l'ouverture synthétique a été rendue effective seulement le long de l'axe horizontal. L'imagerie avec l'ouverture synthétique est nécessaire pour les cas où le spectre angulaire de la lumière émise par l'objet observé est plus large que l'ouverture numérique du système d'imagerie.

Ils ont enregistré trois hologrammes élémentaires du même objet sous différents angles de vue, L'élément holographique final est une superposition spécifique des trois éléments enregistrés.

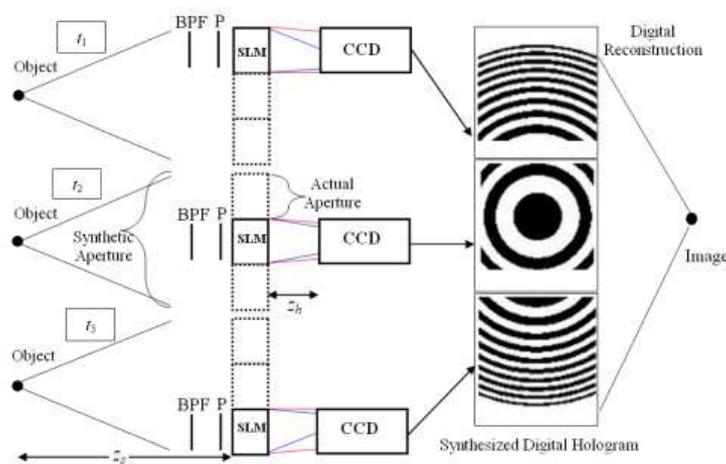


Figure.III.14 : montage expérimentale proposé pour l'holographie digitale travaillant en mode de radar à synthèse d'ouverture pour obtenir la super résolution. [111]

III.4.4. Utilisation d'ondes d'éclairage inclinées : [112]

Dans leur article, P. Feng et al [112] ont présenté une méthode à synthèse d'ouverture pour l'holographie numérique. Les principaux avantages de l'approche proposée est que le système d'imagerie d'holographie numérique n'est pas limitée par la distance de travail et l'image reconstruite n'est pas soumise aux aberrations de l'objectif, tandis que la mise en place de la structure et la procédure de la synthèse d'ouverture sont simples en comparaison avec les autres méthodes. En outre, les résultats expérimentaux obtenus indiquent que non seulement la résolution spatiale de l'image synthétisée peut être améliorée de manière efficace, mais aussi les bruits de speckle de l'image synthétisée peuvent être ainsi supprimés.

Ils ont enregistré une série d'hogrammes de Fresnel hors axe avec différentes ondes planes d'illuminations inclinées. Ensuite, les amplitudes complexes correspondantes sont reconstruites et agrandies à l'aide de méthodes numériques. Enfin, l'image synthétisée avec la meilleure résolution est obtenue par superposition incohérente des champs complexes reconstruits individuellement.

Montage expérimental pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par ondes d'éclairage inclinées:

Le dispositif expérimental est illustré sur la figure.III.15. Un laser à semi-conducteurs avec une puissance de 20 mW et une longueur d'onde de 532 nm est utilisé comme une source d'éclairage. Un cube séparateur polariseur (PBS) est adopté pour séparer et régler l'intensité de la lumière d'éclairage par rapport à la lumière de référence à l'aide de deux lame quarte d'onde ($\lambda / 2$). Les deux faisceaux sont collimatés. L'angle d'incidence de la lumière d'éclairage peut être ajusté par un couple de miroirs (M 3 et un autre miroir non représenté à la Fig. 2 pour des raisons de clarté). Par conséquent, les ondes planes d'éclairage peuvent transmettre de 0, R1, L1, U1, D1, R2, L2, U2, D2. Une caméra CMOS est utilisée pour enregistrer des hologrammes avec une matrice de pixels de 1024 x 1024 et une taille de pixel de $6.7\mu\text{m} \times 6.7\mu\text{m}$. Dans le processus d'enregistrement, des multiples hologrammes sont enregistrés avec différentes ondes d'illuminations inclinées, l'objet, la caméra et le faisceau de référence restent inchangeables. Par la suite, les hologrammes sont reconstruits et traités par des méthodes numériques.

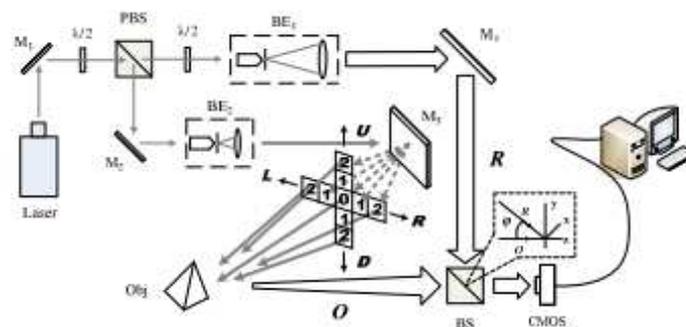


Figure.III.15 : montage expérimentale proposé pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par l'utilisation d'ondes d'éclairage inclinées : M1, M2, M3, M 4 : miroir; BE1, BE 2 : collimateur; BS: cube séparateur; PBS: cube séparateur polariseur.

La même approche a été présentée par J. Bühl et al [66] en introduisant dans le dispositif expérimental qui travaille hors axe (figure.III.16) un réseau de diffraction avant l'objet qui génère des sous sources d'éclairage. L'éclairage incliné est assuré par un LCoS (Liquid Crystal en Silicon) modulateur spatial de lumière (SLM).

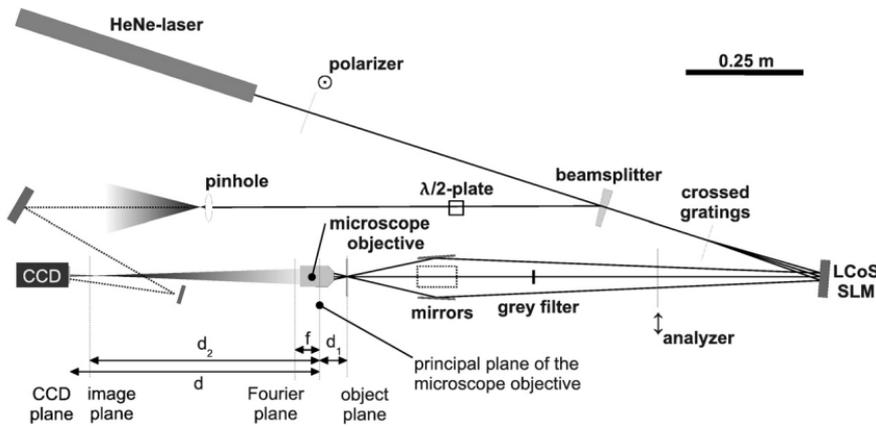


Figure.III.16. : montage expérimentale proposé pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par l'utilisation d'ondes d'éclairage inclinées. [66]

III.4.5. Rotation de l'objet: [113]

En plus des techniques de synthèse d'ouverture indiquées ci-dessus, la technique proposée par Timothy R et al [113] est étroitement liée à la tomographie optique diffractive, dans laquelle la lumière diffractée ou diffusée à partir d'un échantillon est prélevée pour les différentes directions d'éclairage. Cette technique, habituellement effectuée en mode de transmission, peut être utilisée pour générer des images en coupe ou en 3D de la structure de l'échantillon. Les méthodes d'holographie numérique basées sur la tomographie diffractive ont été appliquées à l'imagerie microscopique d'échantillons biologiques.

Le principal avantage de leur approche à synthèse d'ouverture par rapport aux autres méthodes signalées est sa capacité à synthétiser efficacement le profil de réflectance complexe d'un objet sur une large gamme de fréquences spatiales et un large champ de vision à la fois, avec un système optique simple.

Montage expérimental pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par rotation de l'objet:

Le schéma du dispositif expérimental utilisé pour acquérir les hologrammes est représenté sur la figure.III.17. La lumière de la source laser He-Ne 33-mW ($\lambda = 632,8$ nm) a été divisée

en deux faisceaux, faisceau objet et faisceau de référence en utilisant un cube séparateur B1. Un système de télescope est utilisé pour élargir le faisceau de référence.

L'objet est éclairé par ondes planes hors-axe et la lumière dispersée et diffractée par ce dernier suit le chemin optique représenté sur la figure et tombe sur le détecteur CCD où elle se chevauche par le faisceau de référence. L'objet est placé sur une platine de rotation et des multiples hologrammes ont été enregistrés en le tournant dans le sens horaire par un pas de 4° . Les conditions d'éclairage ont été fixées sur toute la séquence des enregistrements. L'hologramme synthétisé est obtenu par la combinaison des sous hologrammes.

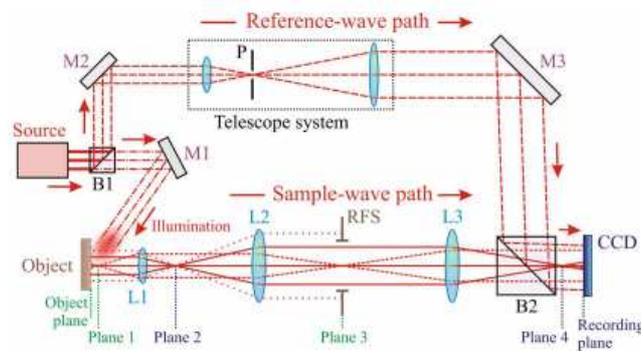
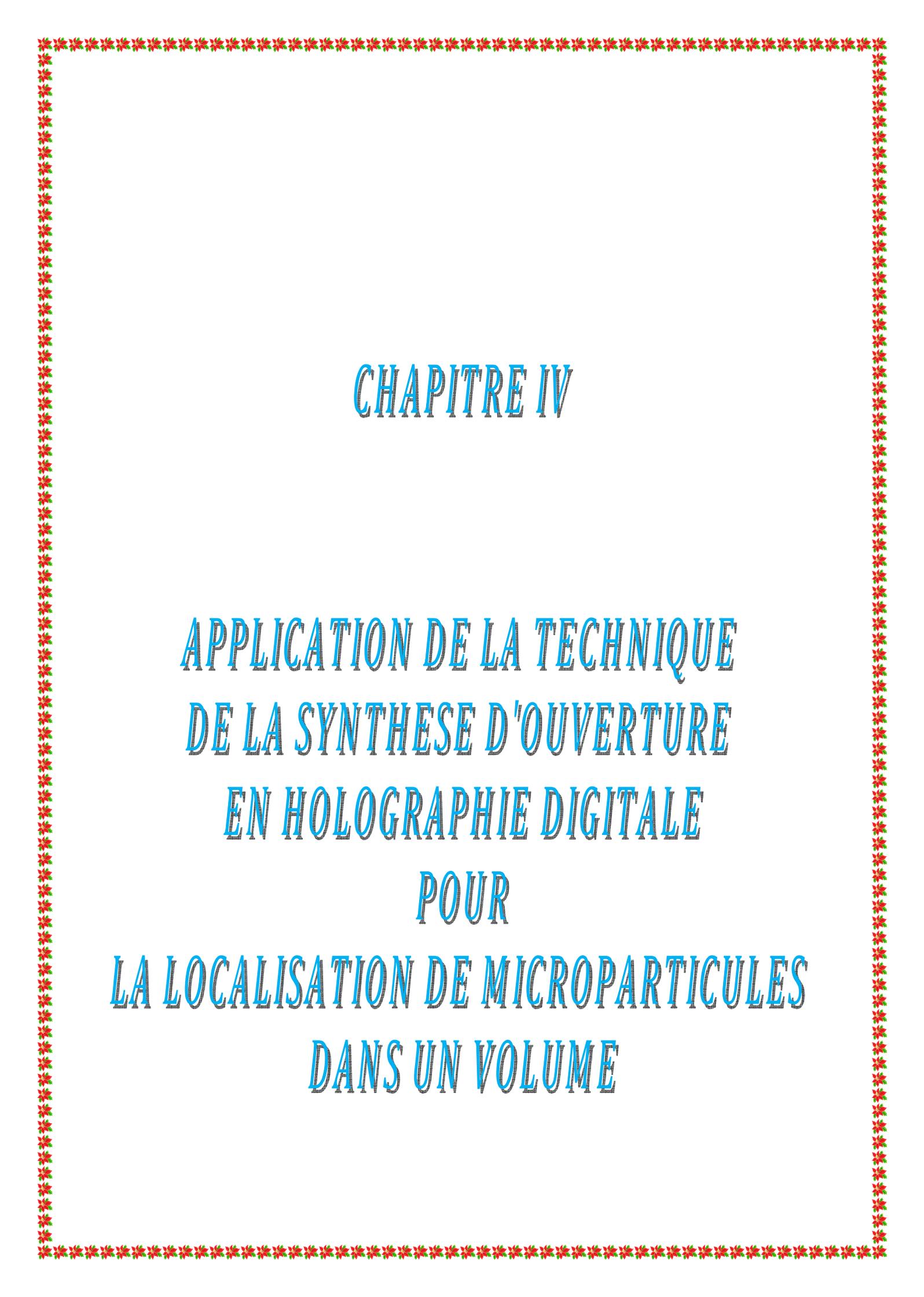


Figure.III.17: Montage expérimentale proposé pour l'holographie digitale à synthèse d'ouverture par rotation de l'objet. B1, 2: cube séparateur; M1,2,3: miroirs; L1, 2,3: lentilles; P: filtre spatiale; RFS: masque rectangulaire; CCD: matrice d'enregistrement.

[113]

Conclusion

La synthèse d'ouverture apparaît comme une solution efficace grâce à sa capacité d'augmenter la résolution des systèmes d'imagerie. Une amélioration importante de la résolution est obtenue en utilisant des méthodes d'holographie digitale à synthèse d'ouverture. Ces méthodes sont basées sur la génération d'une ouverture synthétique en combinant différents hologrammes enregistrés à différentes positions de capteur CCD et de construire un hologramme numérique plus grand. Dans ce cas, le facteur d'amélioration de la résolution est égal au nombre d'hologrammes enregistrés et combinés.



CHAPITRE IV

APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE LA SYNTHÈSE D'OUVERTURE EN HOLOGRAPHIE DIGITALE POUR LA LOCALISATION DE MICROPARTICULES DANS UN VOLUME

IV.1. Introduction :

Le but de notre travail est de surmonter les problèmes de champ de vue et de résolution faible des capteurs CCD utilisés pour l'enregistrement des hologrammes numériques par application de la technique de la synthèse d'ouverture appliquée au RADAR et de développer un programme MATLAB qui fait la synthèse des hologrammes enregistrés de différentes positions pour avoir un hologramme synthétisé. Donc on doit faire une analogie entre les deux techniques.

IV.2. Description du montage mis en œuvre :

En vue de mettre en œuvre cette analogie et vu le manque de moyens expérimentaux (non disponibilité du montage holographique adapté et avec plusieurs caméras) on a travaillé sur des images photographiques. Le raisonnement restera automatiquement le même.

Le montage mis en place est représenté sur la figure ci-dessous.

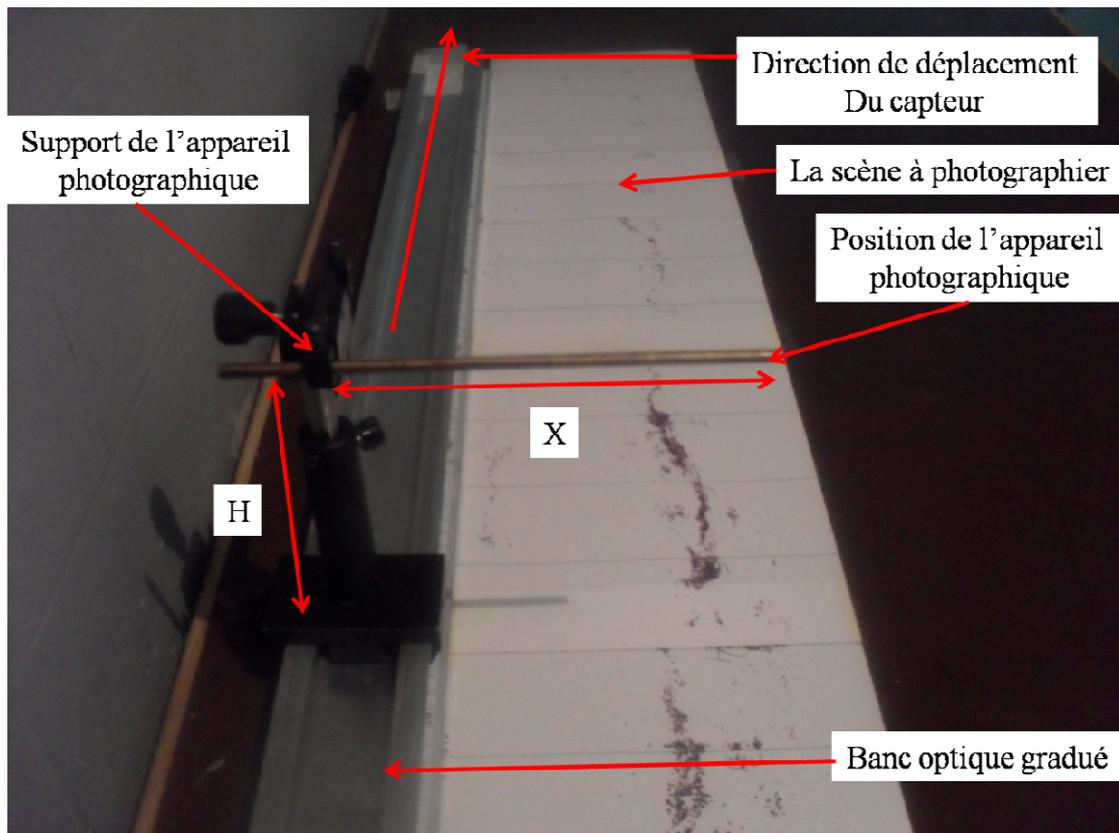


Figure IV.1 : Image photographique du montage.

La scène à photographier est un espace étendu de particules (figure IV.1).

Le capteur qui est dans ce cas un appareil photographique numérique (Samsung Es 60, 12,2MPixel, 3*Zoom 6,3, 18,9mm), est monté sur un banc optique gradué de telle sorte que les distances H (hauteur de la position du capteur) et X (position du capteur par rapport à son support) sont fixes.

Les images ont la même taille (L) 4000*3000, elles sont prises manuellement en déplaçant à chaque fois le support (Y) et en utilisant des traits et des numéros comme repères.

Une remarque très importante est que lors de la prise des vues on doit assurer la création d'un chevauchement entre chaque deux images juxtaposées. Le but de notre travail est de synthétiser ces images en appliquant la technique de la synthèse d'ouverture et en utilisant l'environnement MATLAB.

IV.3. Conditions expérimentales et précautions :

Pour l'obtention de bons résultats, il existe des contraintes liées à l'application que nous devons prendre en compte.

- 1) Les séquences sont acquises avec une grande précision. (nous devons éviter tout mouvement indésirable car Le soin apporté à la prise d'images est crucial à la réussite d'alignement des images car la qualité des résultats finaux en dépend. lors de la prise subséquente d'images, un mauvais repositionnement de l'appareil peut induire des différences géométriques importantes entre les deux images. Quoique le processus de recalage serve à corriger ces différences géométriques, il est évident que plus les corrections à apporter sont faibles plus la probabilité d'un bon alignement des deux images est favorable).
- 2) Nous devons assurer la création d'un chevauchement entre chaque deux séquence d'images.
- 3) Les images à aligner sont toutes acquises avec un même capteur.
- 4) Il existe une variabilité non négligeable au niveau des images pour un même objet lorsque les données sont acquises avec des matériels différents.
- 5) Il existe une grande variabilité au niveau des valeurs de niveau de gris d'une image à l'autre.
- 6) La qualité, les conditions, l'illumination pendant l'acquisition ne sont pas constante donc beaucoup d'attention doit être apportée à l'éclairage de la scène. Étant donné que le recalage ne permet pas de corriger les variations causées par des différences d'intensité entre

les deux images, il est très important de s'assurer d'obtenir les mêmes conditions de luminosité que lors de la prise d'image initiale.

7) Lorsque les conditions d'éclairage sont constantes dans le temps, tous les paramètres optiques de l'appareil soient les mêmes pour l'image subséquente et l'image initiale. Ceci inclus le temps d'exposition, l'ouverture du fût, la sensibilité de l'appareil à la lumière et la distance focale.

IV.4. Description de la procédure de synthèse d'ouverture :

Dans mon travail, je me suis intéressé à deux méthodes de synthèse d'ouverture, la première est basée sur la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris et la deuxième est basée sur la corrélation des images.

IV.4.1. Méthode basée sur la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris des images :

Le recalage d'images peut se définir comme la recherche de la transformation spatiale des points d'une image, en s'appuyant sur les points physiques correspondants d'une autre image, pour que les deux images soient alignées dans le même repère. Ainsi, en recalage, on parle toujours de deux images, l'une sert de référence et l'autre est l'image à transformer. L'image de référence est aussi appelée image cible et l'image à transformer est appelée image source ou image flottante.

Réaliser une image synthétique (une mosaïque) est d'assembler plusieurs images élémentaires (issues du même capteur) et possédant des zones communes. Cette image devrait posséder les mêmes caractéristiques de cohérence géométrique et d'aspect radiométrique qu'aurait une image acquise en une seule fois sur la même zone. La construction de mosaïque pose des problèmes tant géométriques que radiométriques. Une image fournit des informations sur les propriétés géométriques et radiométriques des objets observés. Mais elle est unique et possède des caractéristiques intrinsèques liées en particulier au mouvement du capteur et aux conditions du travail. En d'autres termes, il est impossible de rendre parfaitement identique (en géométrie et en radiométrie) par des traitements appropriés, les parties des images représentant la même zone de l'objet (zone de recouvrement).

L'objectif est de minimiser la distance entre les deux images représentant le même objet et de tendre vers cette identité.

Les points de recouvrement sont des points homologues c'est-à-dire qui représentent le même objet sur chacune des images formant le couple à assembler.

Soit A, B un couple d'images positionnées l'un par rapport à l'autre. Soit $(j=1)$ la coordonnée suivant une colonne d'un objet de l'image B, les coordonnées du même objet dans l'image A est $n+j$.

On cherche à déterminer pour l'image A un point du rang (n) qui réponde au critère suivant : Le point retenu est celui dont la valeur absolue des différences des valeurs de niveau de gris des images soit minimum, pour faciliter le travail on calcule la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris des images.

Une fois le point de rang (n) est déterminé, la zone de chevauchement est déterminée aussi grâce à ce point et il ne reste que de coller les deux images l'une près de l'autre après enlèvement de la zone de chevauchement de l'une des deux images.

IV.4.2. Méthode basée sur la corrélation des images:

IV.4.2.1. Techniques de Fourier:

Dans le cas où les deux images, objet du recalage ou de la combinaison, sont prises dans des conditions différentes (éclairage, climat, outil d'acquisition) ou présentent un bruit plus important, on utilise généralement les techniques de Fourier. Ces techniques exploitent les représentations spectrales de Fourier des images. Basée sur le théorème de retard de la Transformée de Fourier, la corrélation simple et la corrélation de phase sont deux techniques, qui permettent de détecter une transformation géométrique de type translation 2D entre deux images

IV.4.2.2. Etude de la technique de Fourier basée sur la corrélation et la corrélation de phase :

a)Exposé du problème :

On considère deux images A et B de $L * C$ pixels, où B est une version décalée de A. Le problème consiste à déterminer automatiquement le décalage entre ces deux images. Ceci s'exprime mathématiquement par :

$$B(x, y) = A(x + t_x, y + t_y) + \text{bruit}(x, y) \quad (IV. 1)$$

Le bruit caractérise les différences entre les capteurs de chaque image (A et B peuvent représenter la même scène, mais prise par deux capteurs d'images différents) de légères différences de points de vue, des effets de bord, etc.

Dans le cas où notre transformation est une translation seulement, la solution de notre problème revient à déterminer t_x et t_y . Dans ce qui suit, nous allons exposer deux méthodes permettant de déterminer le décalage entre ces deux images: la corrélation et la corrélation de phase.

Le passage dans le domaine fréquentiel dans ces conditions s'avère plus utile. En négligeant le bruit et les effets de bord (dans le cas où le décalage est faible par rapport à la taille des images), on peut écrire la relation suivante entre les transformées de Fourier :

$$B(u, v) = A(u, v)e^{j2\pi\left(\frac{ut_x}{L}, \frac{vt_y}{C}\right)} \quad (IV.2)$$

La détermination de cette formule est issue des propriétés de la transformée de Fourier discrète.

b) Recalage par corrélation :

La méthode de la corrélation d'images, développée depuis les années 80 est basée sur la comparaison de deux images à niveaux de gris aléatoires. La corrélation consiste donc à rechercher le degré de ressemblance entre les deux images.

La fonction d'intercorrélation entre A et B se calcule à partir de la transformée de Fourier:

$$C_{AB}(x, y) = TFD^{-1}[A(u, v)B^*(u, v)] \quad (IV.3)$$

Avec TFD^{-1} la transformée de Fourier inverse.

En effet, on a :

$$C_{AB}(x, y) = TFD^{-1}[A(u, v)B^*(u, v)] = (A * \tilde{B})(x, y) \quad (IV.4)$$

Avec $\tilde{B}(a, b) = B(-a, -b)$

Ainsi on aura :

$$C_{AB}(x, y) = \sum_{a,b} A(a, b) * \tilde{B}(x - a, y - b) = \sum_{a,b} A(a, b) * \tilde{B}(a - x, b - y) \quad (IV.5)$$

D'autre part, en négligeant le bruit, on peut écrire :

$$C_{AB}(x, y) = A(u, v)B^*(u, v) \cong |A(u, v)|^2 e^{-2j\pi\left(\frac{ut_x}{L}, \frac{vt_y}{C}\right)} \quad (IV.6)$$

En exploitant les propriétés de la transformée de Fourier, on déduit :

$$C_{AB}(x, y) \cong C_{AA}(x - t_x, y - t_y) \quad (IV.7)$$

Cette dernière fonction représente la fonction d'autocorrélation de A, centrée en (t_x, t_y) . En général, la fonction d'autocorrélation d'une image a la forme d'un pic (peu abrupt, et on peut donc déterminer (t_x, t_y) en cherchant la position du maximum de $C_{AB}(x, y)$.

Un synoptique de ce programme est représenté sur la Figure IV.2.

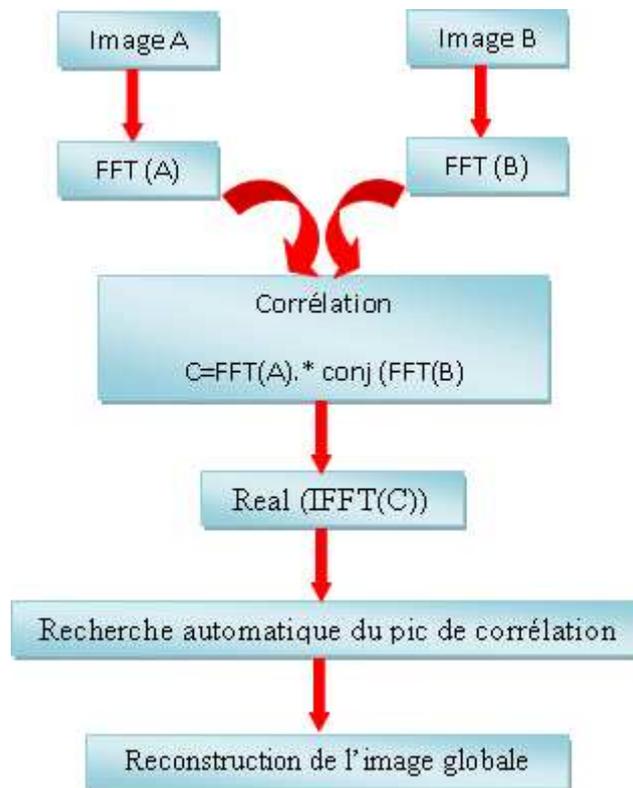


Figure. IV.2 : Synoptique du programme basé sur la corrélation.

c) Recalage par corrélation de phase :

Le principe de la corrélation de phase consiste à calculer l'expression suivante :

$$CP_{AB}(x, y) = TFD^{-1} \left(\frac{A(u, v)}{B(u, v)} \right) \quad (IV. 8)$$

D'autre part, on doit calculer la position du maximum de cette fonction. La fonction $R_{AB}(x, y)$ présente en général un pic très net en (t_x, t_y) . En effet, en négligeant le bruit, on a :

$$CP_{AB}(u, v) = \frac{A(u, v)}{B(u, v)} \cong e^{-j2\pi \left(\frac{ut_x}{L}, \frac{vt_y}{C} \right)} \quad (IV. 9)$$

Ainsi

$$CP_{AB} \cong \delta(x - t_x, y - t_y) \quad (IV. 10)$$

Par conséquent, cela revient à travailler sur une fonction Dirac placée en (t_x, t_y) .

La méthode par corrélation de phase donne généralement un pic beaucoup plus marqué que la méthode par corrélation. Cependant, s'il y a une distorsion entre les deux images (par exemple si elles sont prises de points de vue assez différents), cette méthode peut échouer totalement alors que la méthode par corrélation donnerait toujours des résultats acceptables. Il est donc important de connaître les deux méthodes et de choisir la meilleure en fonction de l'application à traiter.

Lorsque les transformations entre les images consécutives d'une séquence ont été obtenues, il faut ramener (coller) les images dans un repère commun en utilisant ces transformations.

Un synoptique de ce programme est représenté sur la Figure IV.3.

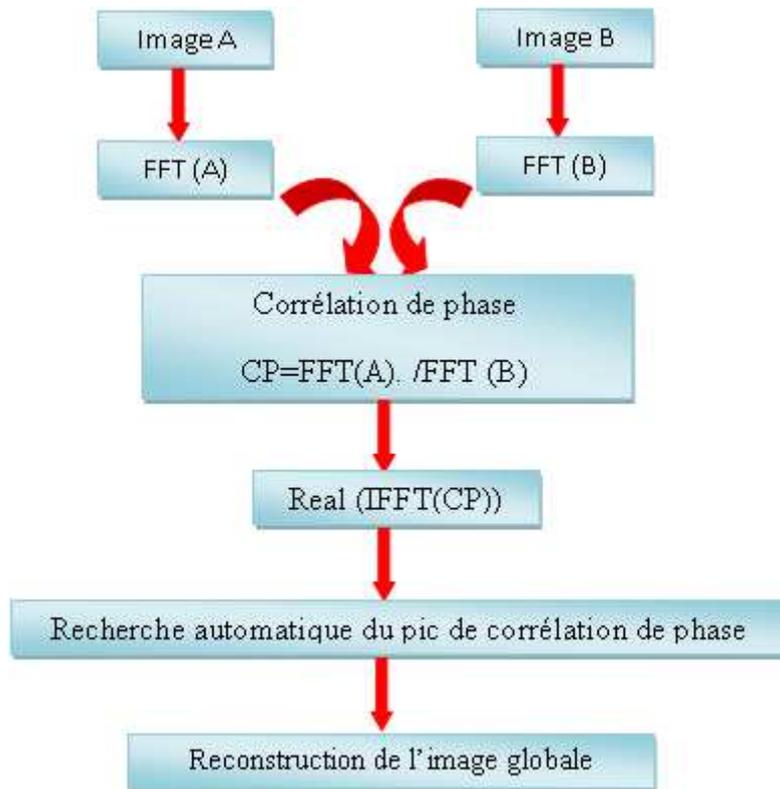


Figure. IV.3 : Synoptique du programme basé sur la corrélation de phase.

IV.5. Résultats obtenus et discussion :

IV.5.1. Méthode basée sur la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris des images :

L'algorithme de la méthode est programmé sous MATLAB (voir Annexe A) et son exécution nous a donné les images représentées sur les figures (IV.4, IV.5).

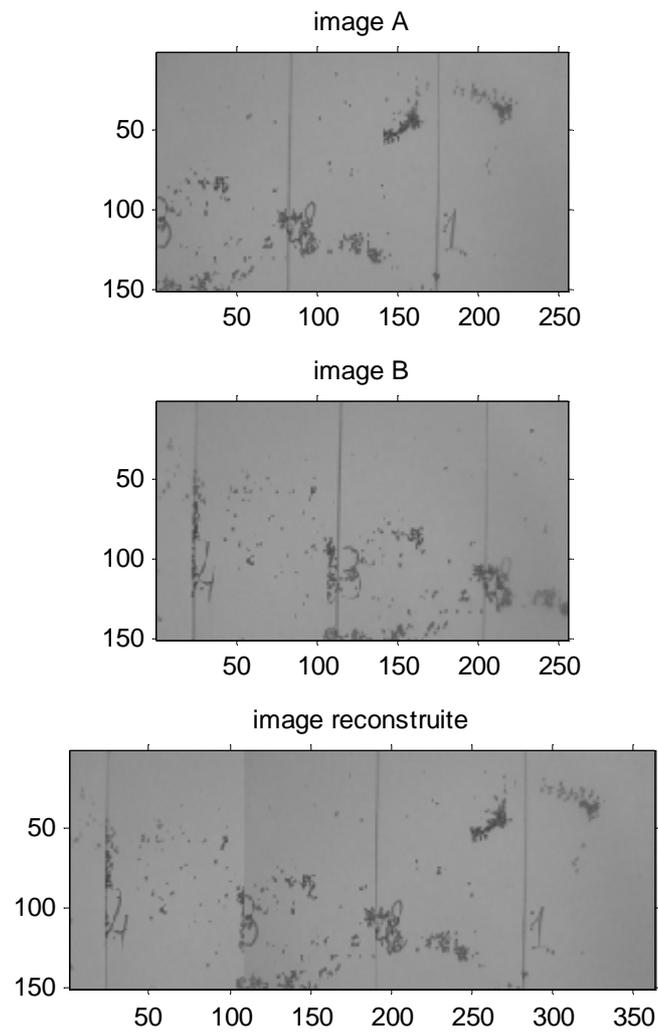


Figure. IV.4 : Image reconstruite à partir des images à aligner.

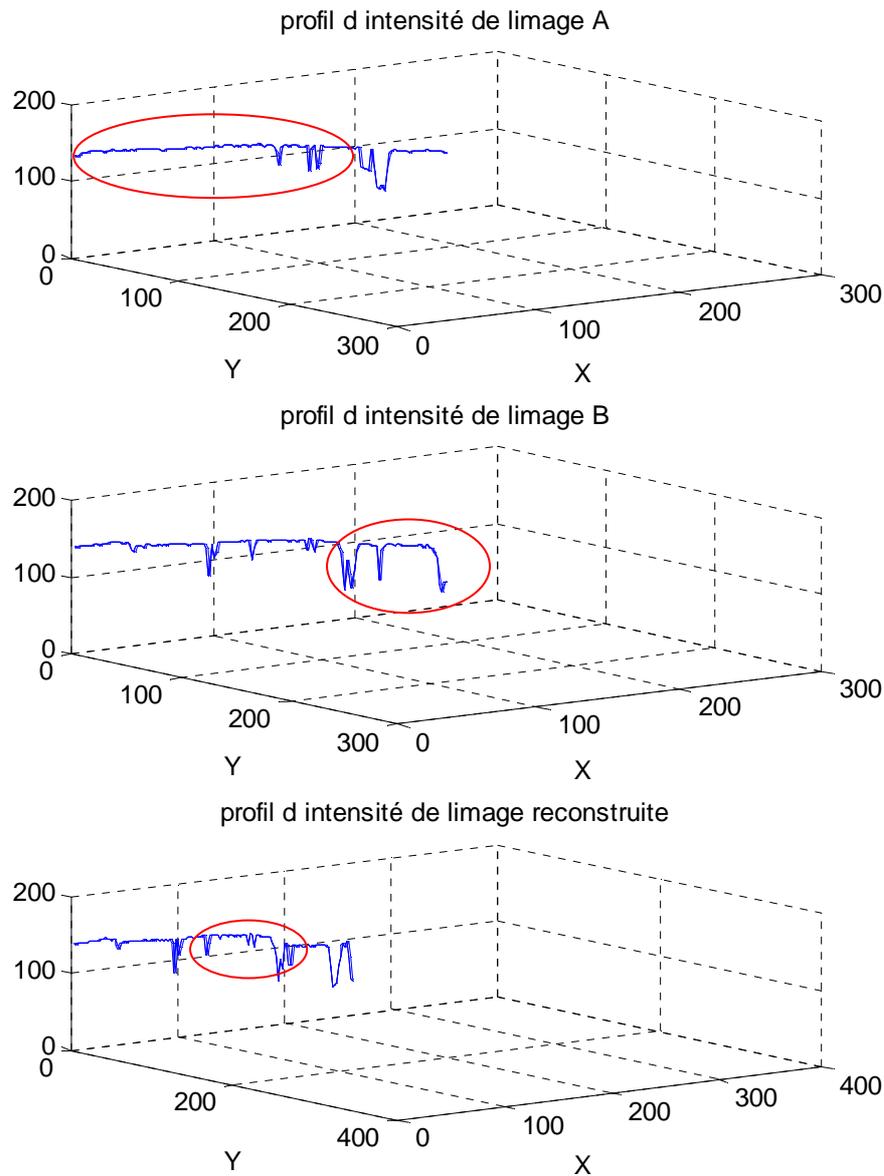


Figure. IV.5 : Profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite.

D'après les images obtenues (figure. IV.4) on constate que les deux images (A et B) sont bien alignées en synthétisant une grande image (image reconstruite) qui contient toute l'information issue de ces deux images. Donc la distance entre les deux images représentant le même objet est minimisée en accédant à leur zone de recouvrement et les petites erreurs remarquées (un décalage de quelques pixels) sont dues à la variation au niveau des valeurs des

niveaux de gris des images acquises (variation au niveau des valeurs des niveaux de gris de la zone de recouvrement des deux images) et ça est du aux conditions du travail citées au paragraphe (IV.3).

La figure. IV.5 représente les profiles d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite où la zone de chevauchement des deux images est représenté par une ellipse rouge.

Pour vérifier le programme on a utilisé une image bien connue dans l'environnement MATLAB (cameraman.tif), on l'a partagé à des sous images qui représentent le même objet ensuite on a reconstruit l'image synthétique. L'exécution du programme nous a donné les images représentées sur les figures (IV.6, IV.7)

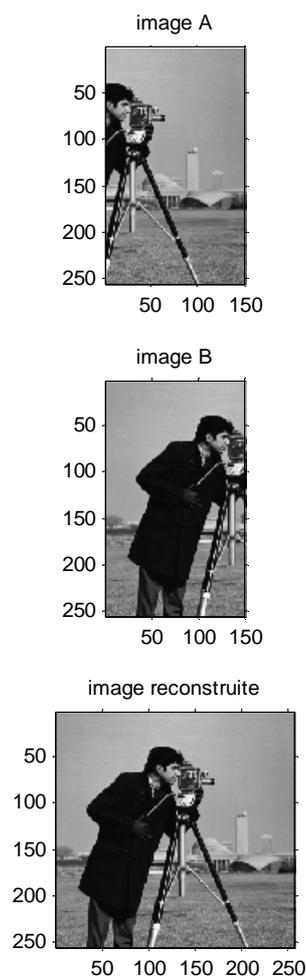


Figure. IV.6 : Image reconstruite à partir des images à aligner.

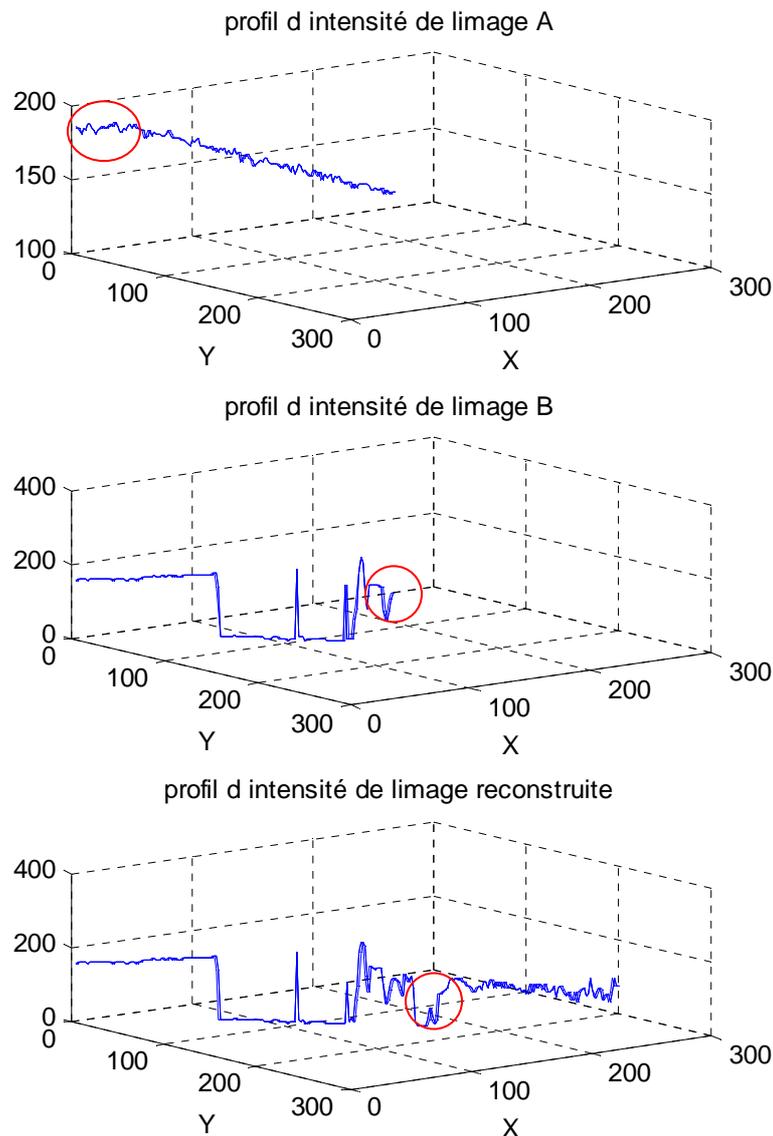


Figure. IV.7 : Profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite.

D'après ces résultats on peut dire que le programme a bien fonctionné et les résultats obtenus sont satisfaisants et pourront être améliorés avec des conditions de travail meilleures.

IV.5.2. Méthode basée sur la corrélation des images:

a) La corrélation :

L'algorithme de la méthode est programmé sous MATLAB (voir Annexe B) et son exécution nous a donné les images représentées sur les figures (IV.8, IV.9)

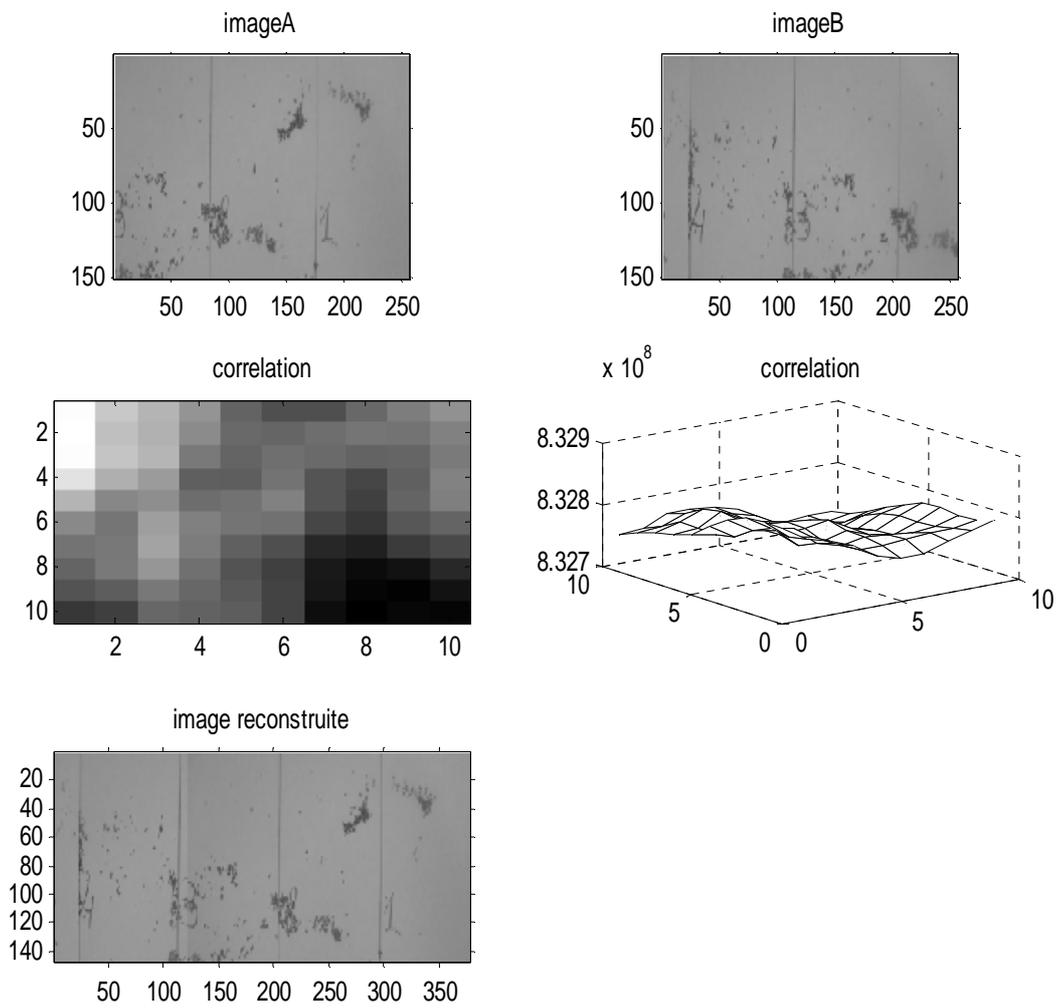


Figure. IV.8 : Image reconstruite à partir des images à aligner.

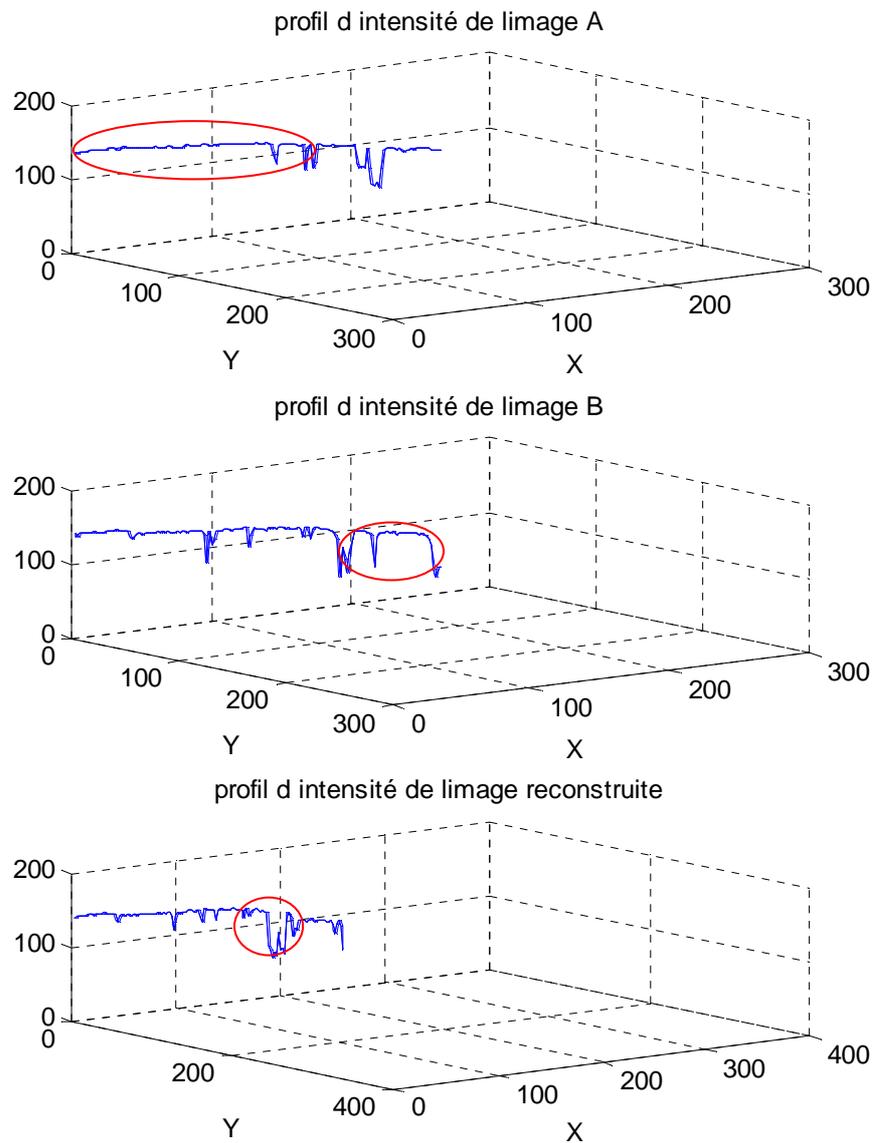


Figure. IV.9 : Profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite.

D'après les images obtenues (figure. IV.8) on constate que les deux images (A et B) sont bien alignées en synthétisant une grande image (image reconstruite) qui contient toute l'information issue de ces deux images. Donc la distance entre les deux images représentant le même objet est minimisée en atteignant le degré de ressemblance entre ces deux images.

La figure. IV.9 représente les profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite où la zone de chevauchement des deux images est représenté par une ellipse rouge.

Pour vérifier le programme on a suivi les mêmes étapes citées au paragraphe IV.5.1. L'exécution du programme nous a donné les images représentées sur les figures (IV.10, IV.11).

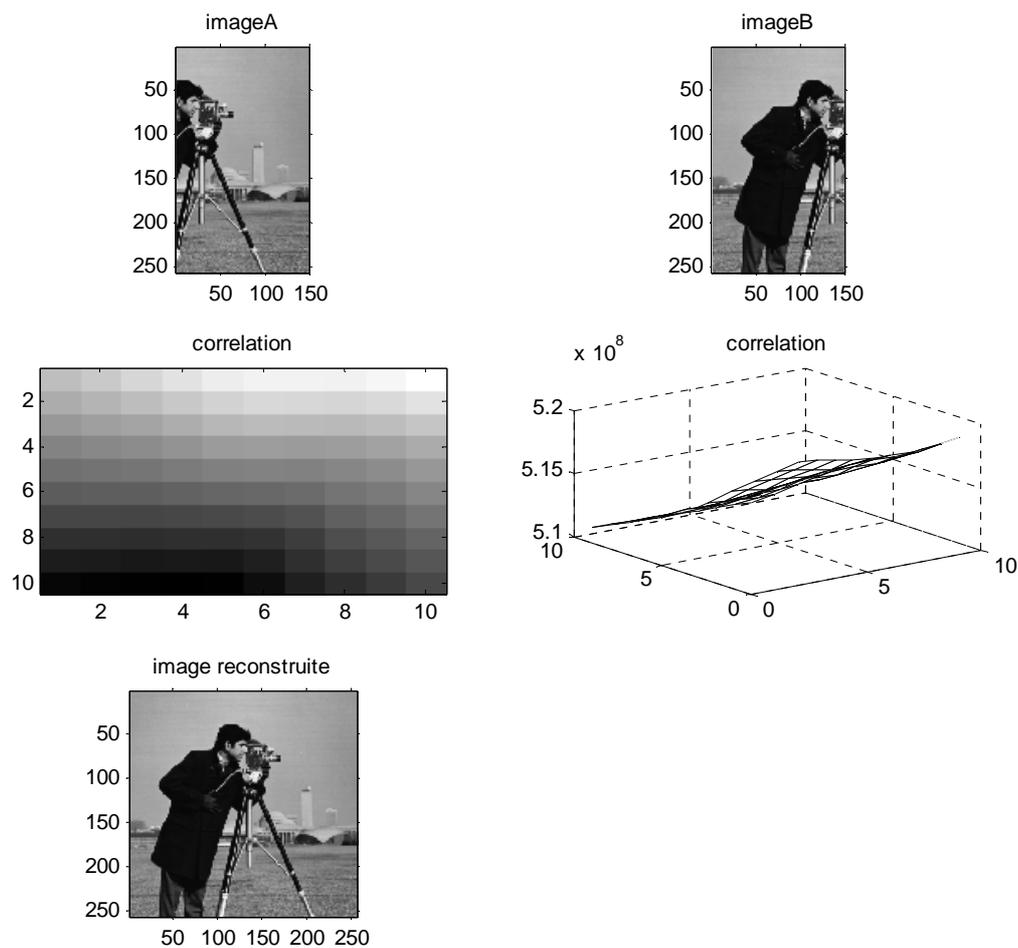


Figure. IV.10 : Image reconstruite à partir des images à aligner.

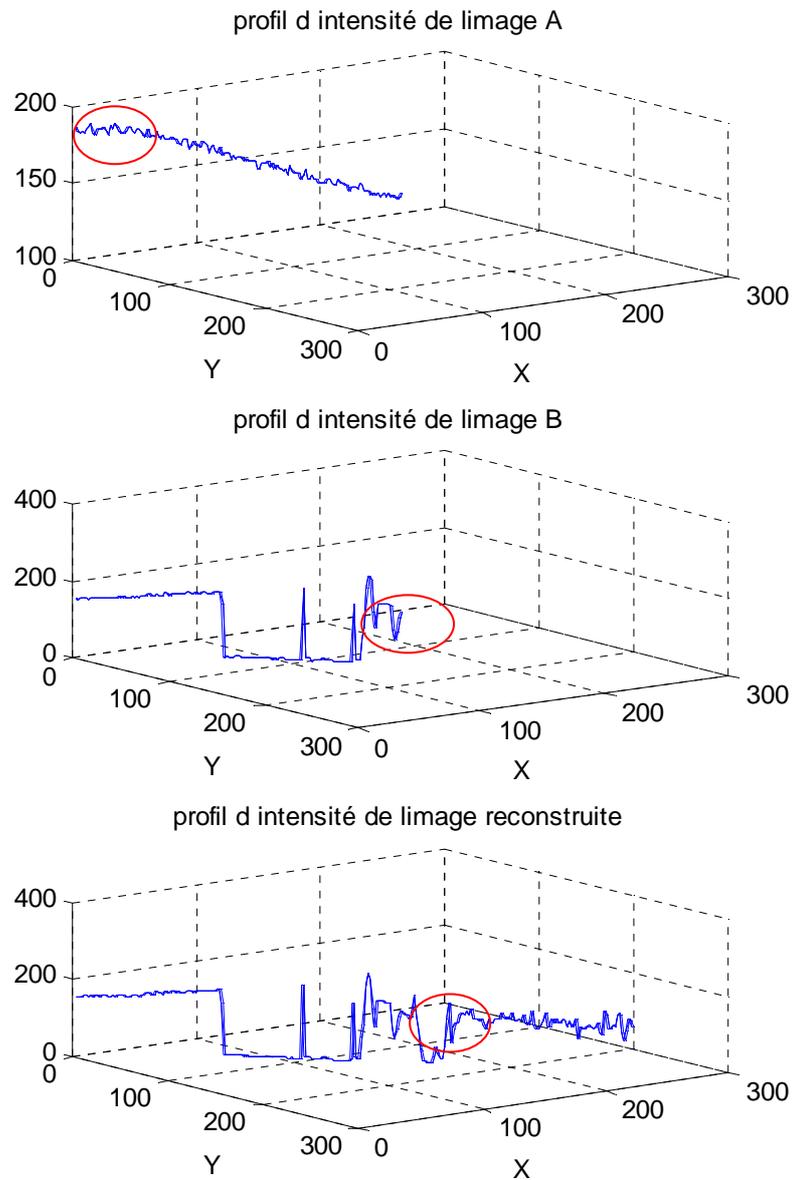


Figure. IV.11 : Profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite.

D'après ces résultats on peut dire que le programme a bien fonctionné et les résultats obtenus sont satisfaisants et pourront être améliorés avec des conditions de travail meilleures.

b) La corrélation de phase :

L'algorithme de la méthode est programmé sous MATLAB (voir Annexe C) et son exécution nous a donné les images représentées sur les figures (IV.12, IV.13)

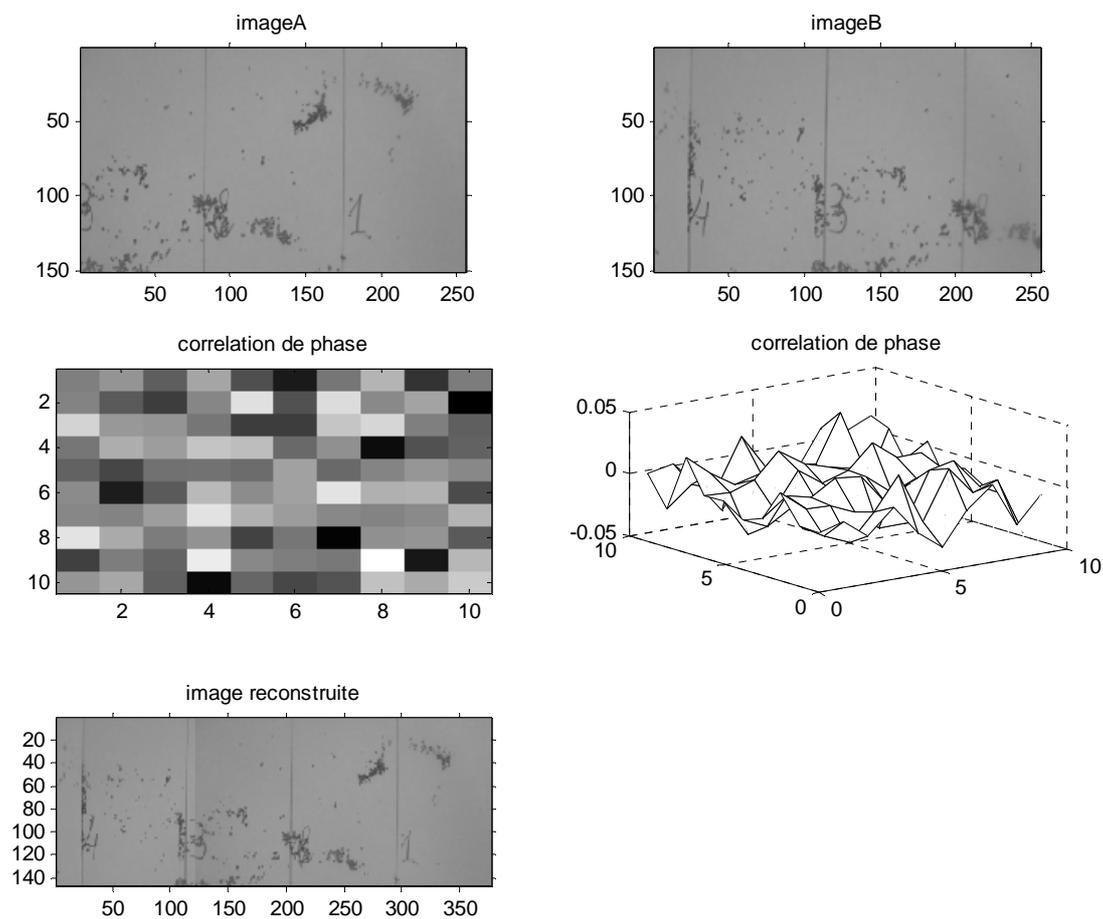


Figure. IV.12 : Image reconstruite à partir des images à aligner.

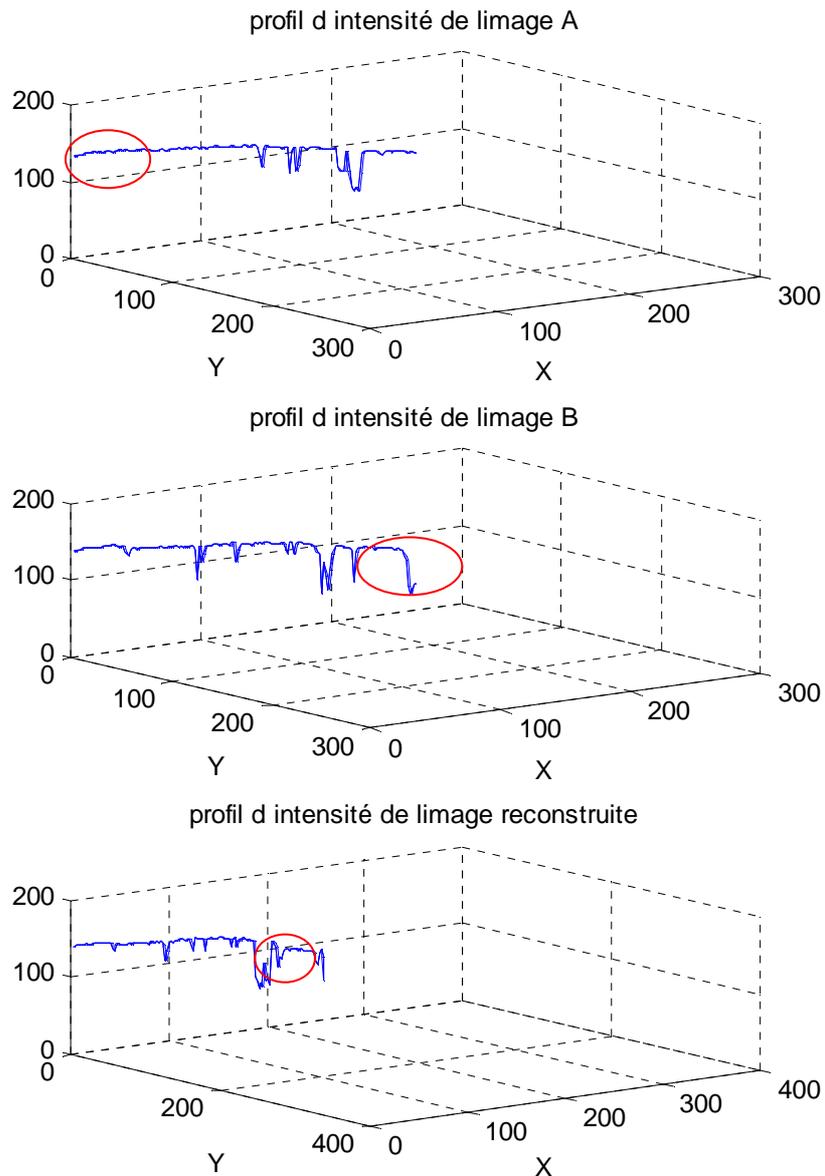


Figure. IV.13 : Profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite.

D'après les images obtenues (figure. IV.12) on constate que les deux images (A et B) sont bien alignées en synthétisant une grande image (image reconstruite) qui contient toute l'information issue de ces deux images. Donc la distance entre les deux images représentant le même objet est minimisée en atteignant le degré de ressemblance entre ces deux images.

La figure. IV.13 représente les profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite où la zone de chevauchement des deux images est représenté par une ellipse rouge.

Pour vérifier le programme on a suivi les mêmes étapes citées au paragraphe IV.5.1. L'exécution du programme nous a donné les images représentées sur les figures (IV.14, IV.15).

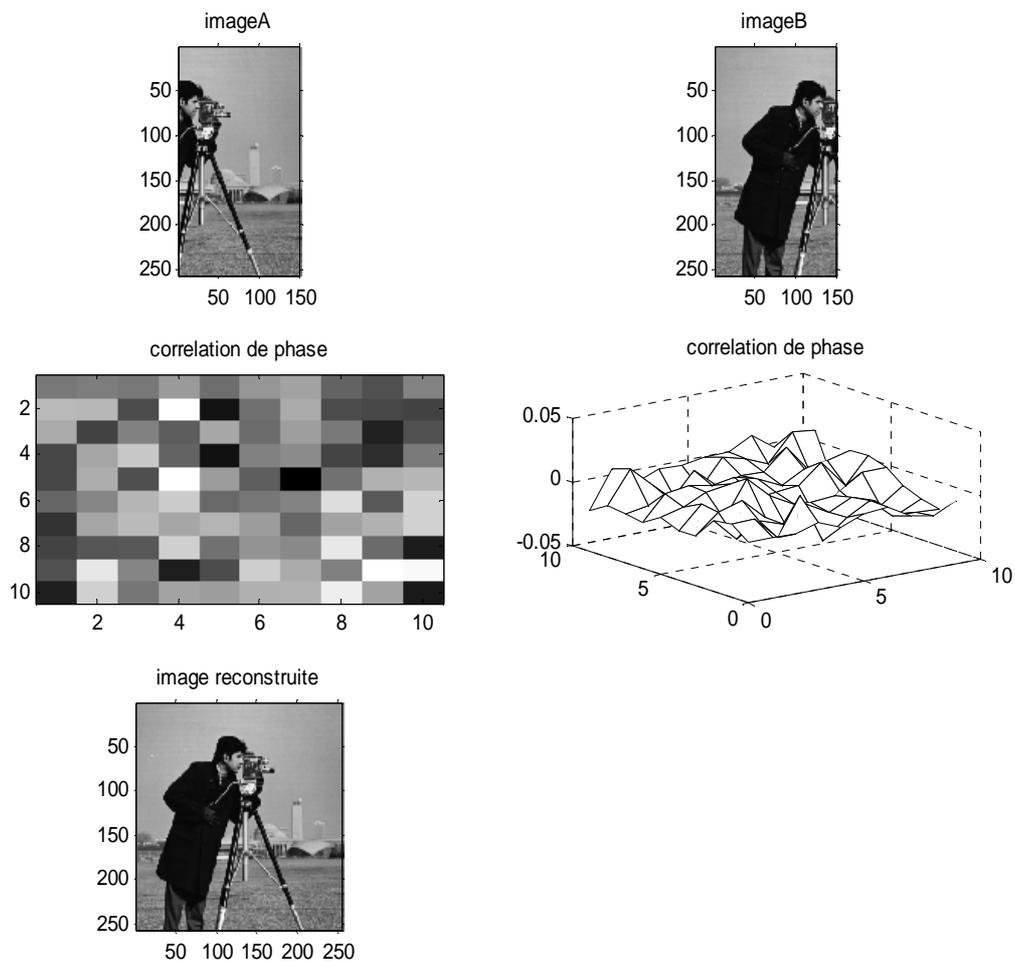


Figure. IV.14 : Image reconstruite à partir des images à aligner.

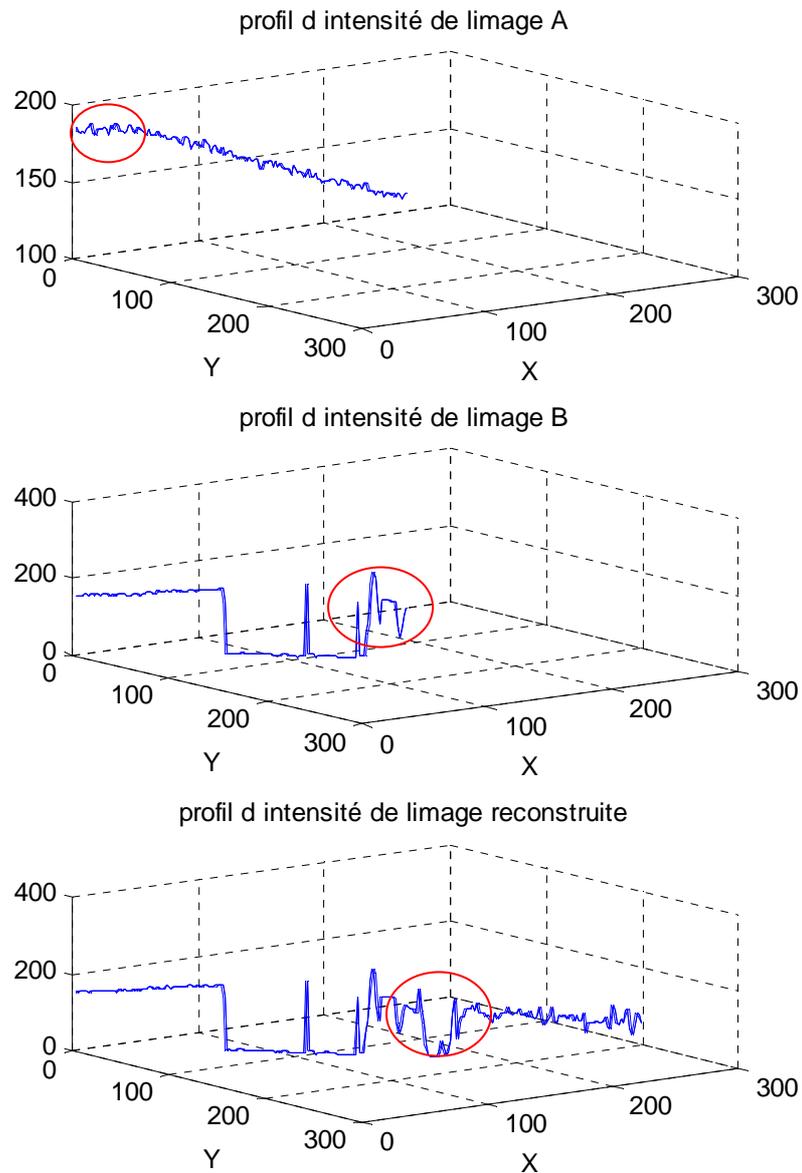


Figure. IV.15 : Profils d'intensité des images à aligner et l'image reconstruite.

D'après ces résultats on peut dire que le programme a bien fonctionné et les résultats obtenus sont satisfaisants et pourront être améliorés avec des conditions de travail meilleures.

Conclusion

La synthèse d'ouverture apparait comme une solution efficace grâce à sa capacité d'augmenter la résolution dans tous les domaines de traitement des signaux.

Nous avons montré à l'aide de différentes prises de photos d'une scène élargie qu'il est possible d'appliquer cette technique pour reconstruire la scène globale en développant un programme sous MATLAB qui fait la synthèse des différentes photos acquises.

Notre programme se compose de deux variantes, la première utilise le principe de la différence des moyennes des valeurs des niveaux de gris et la deuxième utilise le principe de corrélation.

Comme le programme a bien fonctionné sur les photos, il peut donc travailler sur des hologrammes digitaux (images numériques 2D).

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré à appliquer la technique de la synthèse d'ouverture bien connue en imagerie radar, en holographie digitale pour la localisation de microparticules dans un volume dont le but était de surmonter les problèmes de champ de vue et de résolution faible des capteurs CCD utilisés pour l'enregistrement des hologrammes numériques.

Alors ce mémoire fut pour moi, la première occasion pour une prise de contact avec cette technique et ses applications. Il m'a fallu alors en premier temps une concentration sur l'imagerie radar pour pouvoir comprendre son principe et une focalisation sur la technique SAR pour pouvoir faire une analogie entre cette technique et l'holographie digitale.

Ce qui m'a permis de présenter dans la partie théorique une vue sur l'imagerie radar et son principe qui est basé sur l'émission et la réflexion des trains d'ondes hyperfréquences par les objets ainsi que les obstacles limitant son succès qui fait naître les radars à synthèse d'ouverture, ainsi les différents aspects de cette technique en imagerie optique et la possibilité de l'appliquer en holographie digitale en présentant plusieurs testes qui ont été définis et différentes approches qui ont été testées par les chercheurs, pour augmenter synthétiquement l'ouverture numérique des systèmes d'imagerie pour obtenir la super-résolution.

Cette nouvelle méthode donne à l'holographie beaucoup de chance et ouvre des nouveaux horizons pour l'appliquer sur les plans scientifiques et industriels. Elle offre beaucoup d'avantages grâce à sa capacité d'augmenter la résolution dans tous les domaines de traitement des signaux.

Sur le plan application de cette technique et par manque de moyens expérimentaux (montage holographique adapté, plusieurs caméras), je me suis limité à la photographie et j'ai montré à l'aide de différentes prises de photos d'une scène élargie qu'il est possible d'appliquer cette technique pour reconstruire la scène globale en développant un programme sous MATLAB qui fait la synthèse des différentes photos acquises de différentes positions.

A partir de là, beaucoup de temps a été consacré à développer un programme sous MATLAB qui fait la synthèse des images numérique, ce dernier se compose de deux variantes :

- La première utilise le principe de la valeur absolue des différences des moyennes des valeurs des niveaux de gris des deux images à synthétiser.

Réaliser une image synthétique (une mosaïque) est d'assembler plusieurs images élémentaires (issues du même capteur) et possédant des zones communes. L'objectif était de minimiser la distance entre les deux images représentant le même objet et de tendre vers cette identité.

- La deuxième utilise le principe de corrélation et corrélation de phase donc on a passé au domaine fréquentiel. L'objectif était d'arriver à la zone de ressemblance des deux images donc la corrélation de ces derniers nous donne un pic dans cette zone.

Le long de cette partie, j'ai pu acquérir beaucoup d'informations dans le domaine de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture ainsi que l'holographie digitale et l'environnement MATLAB.

Pour conclure, je peux dire que :

- ✚ Les résultats obtenus sont satisfaisants et pourront être améliorés avec des conditions de travail meilleures ;
- ✚ Comme les programmes ont bien fonctionné sur les photos, ils peuvent donc travailler sur des hologrammes digitaux puisqu'il s'agit dans les deux cas d'images numériques 2D.

Comme perspective de cette jeune technique de l'holographie digitale à synthèse d'ouverture, d'une part il y a lieu de faire une étude pratique pour avoir des hologrammes digitaux de particules dans un volume de différentes positions puis leur synthétiser numériquement pour avoir tout le volume à holographier, d'autre part d'améliorer ce programme pour arriver au développement d'un logiciel qui fait cette synthèse de manière automatique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Hermadji, N. Rouane : Etude et réalisation d'un dispositif de mesure des vitesses des cibles RADAR, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie électrique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 1996.
- [2] L. Houam : Filtrage d'images RADAR SAR basé sur les approches EQMM, MAP et la transformée en ondelettes, Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de magister, filière : systèmes électroniques, option : techniques avancées en traitement du signal, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2002.
- [3] S. Bouznad, M. Lekhal : Conception et réalisation d'une application d'aide au positionnement des RADARS, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie informatique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2002.
- [4] M. Airouche : Détection de contours d'images RADAR SAR, Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de magister, filière : systèmes électroniques, option : techniques avancées en traitement du signal, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2003.
- [5] A. Barakat, W. Djabari : Réalisation d'une application d'évaluation de la couverture RADAR et SOL-AIR, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie informatique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2005.
- [6] H. Zemmour, M. Belarbi : etude et réalisation d'un dispositif micro-ondes destiné à former les signaux d'un RADAR de poursuite monopulse, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie électrique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2005.
- [7] S. Maamar, A. Bouagada : Zone de couverture RADAR basée sur la triangulation hiérarchique, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie informatique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2006.
- [8] A. Mesloub, A. Boukhelifa : Etude du RADAR 100 et contribution à l'amélioration de ses performances globales, mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie électrique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El

- Bahri, Alger, 2006.
- [9] H. Bakli, M. Moualhi : Contribution à la modernisation du RADAR HP100 : Caractérisation de l'antenne et automatisation de la mesure des coordonnées des cibles, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie électrique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2008.
- [10] A. Abbane, A. Bousbaa : Conception et étude des performances d'un dispositif de détection RADAR dans des situations d'interférences sévères, Mémoire de fin d'études pour obtenir le diplôme d'ingénieur d'Etat en génie électrique, Ecole Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri, Alger, 2009.
- [11] E. Huot : Etude de l'évolution temporelle de phénomènes terrestres au moyen de l'imagerie radar, Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat de l'université de Caen, Janvier 2000
- [12] C. Proisy : Apport des données radar à synthèse d'ouverture pour l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers, Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, 1999.
- [13] M. Tria: Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture Par Analyse en Ondelettes Continues Multidimensionnelles, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris-Sud XI, Novembre 2005.
- [14] N. Longépé : Apport de l'Imagerie SAR Satellitaire en Bandes L et C pour la Caractérisation du Couvert Neigeux, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Rennes I, Décembre 2008.
- [15] F. X. Estagerie : Modélisation comportementale d'amplificateurs de puissance pour les applications Radars, Thèse présenté pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges, Mai 2008.
- [16] A. Dehouck : Mesure de la salinité de surface par radar aéroporté à ouverture synthétique en Gironde, Thèse présentée pour obtenir Diplôme D'Etudes Approfondies, Université Bordeaux, 2002.
- [17] Y. K. Chan and V. C. Koo: An introduction to synthetic aperture (SAR), Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 2, pp.27–60, 2008.
- [18] I. Pétilot : Combinaison d'informations hétérogènes : intégration d'images RSO pour la surveillance des glaciers alpins, Thèse présentée en vue de l'obtention de Doctorat de l'Université de Savoie, Science et Technologie de l'Information et de la Communication (STIC), Décembre 2008.

- [19] G. Paquet : Detection électromagnétique: Fondements théoriques et applications radar, Elsevier-Masson, pp.219-234, 1997.
- [20] B. Picard : Télédétection de la surface terrestre par un radiomètre imageur à synthèse d'ouverture : principes de mesure, traitement des données interférométriques et méthodes de reconstruction régularisées, Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de Versailles - St Quentin, Novembre 2004.
- [21] M. Duquenoy: Analyse Temps-Fréquence appliquée à l'imagerie SAR polarimétrique, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Rennes, Octobre 2009.
- [22] V. Amberg: Analyse de scènes péri-urbaines à partir d'images radar haute résolution: Application à l'extraction semi-automatique du réseau routier, Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2005.
- [23] F. Cellier: Reconstruction 3D de bâtiments en interférométrie RSO haute résolution: approche par gestion d'hypothèses, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, Janvier 2007.
- [24] A. Shabou: Recalage rigide et non rigide entre images multicateurs radar/optique, Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieures des Télécommunications, Paris, 2006.
- [25] L. Basly : Télédétection pour la qualité de l'air en milieu urbain, Thèse présenté pour obtenir le grade de Docteur en science de l'université de Nice-Sophia Antipolis, Novembre 2000.
- [26] S. Guillaso: Complémentarité polarimétrique/ Interférométrie pour la détection et la caractérisation de cibles, Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Rennes 1, Novembre 2003.
- [27] David W. Hawkins, B. Sc. : Synthetic Aperture Imaging Algorithms: with application to wide bandwidth sonar, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur en génie électrique et électronique, Université de Canterbury, Christchurch, New Zealand, October 1996.
- [28] D. Massonnet & J-C. Souyris: Imaging with synthetic aperture radar, EPFL Press, 1^{ère} Edition, 2008.
- [29] S. Dupont et M. Berthod : Interférométrie Radar et Déroulement de Phase, projet PASTIS, rapport de recherche N° 2344, INRIA, Septembre 1994.

- [30] S. Paquerault : Restitution du relief à partir d'images radar par radar-clinométrie, thèse de doctorat, Département TSI, Paris télécom, Paris, Avril 1998.
- [31] M. Benkaddour: Intégration des données radar et optiques dans un processus classificatoire, Mémoire présenté Pour l'obtention du diplôme de Magister en Techniques Spatiales et Applications, Centre National Des Techniques Spatiales, Septembre 2002.
- [32] F. Comblet: Détection, localisation et identification de cibles radar par imagerie électromagnétique bistatique, Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences, Ecole Doctorale : Science de la Matière, de l'Information et de la Santé, Université de Bretagne Occidentale, Décembre 2005.
- [33] P-T. Gough, D-W. Hawkins: Unified Framework for Modern Synthetic Aperture Imaging Algorithms, Inc. Int J Imaging Syst Technol, Vol. 8, pp.343-358, 1997.
- [34] N. Dastgir : Processing SAR data using Range Doppler and Chirp Scaling Algorithms, thèse de magister, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Avril 2007.
- [35] J. M. Horrell : Range doppler Synthetic Aperture radar processing at VHF Frequencies, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur en génie électrique, université de Cape Town, 1999.
- [36] Y. Yamaguchi and al: Synthetic Aperture FM-CW Radar Applied to the Detection of Objects Buried in Snowpack, IEEE, Vol. 32, No. 1, pp.11-18, Janvier 1994.
- [37] J. Sagne : Etude expérimentale d'antennes synthétiques utilisant des fibres en silice:- Stabilisation d'un réseau d'antennes en réception. -Contrôle interférométrique du pointé d'un système en émission, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Limoges, Juin 2004.
- [38] S. Meimon : Reconstruction d'images astronomiques en interférométrie optique, Thèse de Doctorat présentée pour obtenir le grade de Docteur en sciences de l'université Paris Sud, Novembre 2005.
- [39] C. Avoort : Optical aperture Synthesis a comparaison of techniques for wide Field interferometric Imaging, Thèse de Doctorat présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Delft ,2006.
- [40] A. LABEYRIE et al: An introduction to optical stellar interferometry, Cambridge University Press, USA, 1^{ière} Edition, 2006.
- [41] S. Olivier : Utilisation de dispositifs d'optique guidée pour des applications en

- imagerie haute résolution, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges, Discipline : Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, 2007.
- [42] J-B. Le Bouquin : Imagerie par synthèse d'ouverture optique, application aux étoiles chimiquement particulières, Thèse présentée pour obtenir le diplôme de Docteur de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I Spécialité : Astronomie & Astrophysique, Novembre 2005.
- [43] L. Delage et al: Présentation d'un démonstrateur de synthèse d'ouverture utilisant des liaisons par fibres optiques, Seizième Colloque GRETSI, Grenoble, 15-19 Septembre 1997.
- [44] L. Mugnier et al: Observation haute résolution permanente de la Terre par synthèse d'ouverture optique, Bulletin POLOQ, n o 2005-1, pages 9–16, Groupe de Prospective Orientée sur les Lasers et l'Optronique, ONERA, Paris, Mars 2005.
- [45] L. Damé et al: Synthèse d'Ouverture Optique en Champ Etendu : Applications Solaires et GEO, CNRS, Service d'Aéronomie, 2003.
- [46] M^{elle} I. Mocoœur : Analyse de front d'onde en plan focal : développement d'algorithmes temps réel et application au cophasage de télescopes multipupilles imageurs, Thèse de doctorat présentée pour obtenir le grade de Docteur en science de l'université Paris XI, Juillet 2008.
- [47] F. Baron: Définition et test d'un capteur de cophasage sur télescope multipupilles : Application à l'observation de la terre, Thèse de doctorat présentée pour obtenir le grade de Docteur en science de l'université Paris VI – Pierre et Marie Curie, Mars 2005.
- [48] B. Katz and J. Rosen : Could SAFE concept be applied for designing a new synthetic aperture telescope?, Optics Express, Vol. 19, No. 6, pp. 4924- 4936, Mars 2011.
- [49] A. Witomski: Imagerie laser à synthèse d'ouverture par réinjection optique, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Joseph Fourier, Grenoble I, Discipline : Physique, Avril 2007.
- [50] A. Neumann et al: Optical resolution below $\lambda/4$ using synthetic aperture microscopy and evanescent-wave illumination, Optics Express, Vol. 16, No. 25, pp. 20477-20483, Décembre 2008.
- [51] J. García et al: Synthetic aperture superresolution by speckle pattern projection, Optics Express, Vol. 13, No. 16, pp. 6073- 6078, Aout 2005.

- [52] T-S. Ralston et al: Interferometric synthetic aperture microscopy, *Nat. Phys.* 3, pp.129-134, 2007.
- [53] T-S. Ralston et al: Real-time interferometric synthetic aperture microscopy, *Optics Express*, Vol. 16, No. 4, pp. 2555- 2569, Février 2008.
- [54] B-J. Davis et al : Autocorrelation artifacts in optical coherence tomography and interferometric synthetic aperture microscopy, *Optics Letters*, Vol. 32, No. 11, pp. 1441-1443, Juin2007.
- [55] K. Moonseok et al: High-speed synthetic aperture microscopy for live cell imaging, *Optics Letters*, Vol. 36, No. 2, pp. 148- 150, Janvier 2011
- [56] A. Neumann et al: Structured illumination for the extension of imaging interferometric microscopy, *Optics Express*, Vol. 16, No. 10, pp. 6785- 6793, Mai 2008.
- [57] D-L. Marks et al: Partially coherent illumination in full-field interferometric synthetic aperture microscopy, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 26, No. 2, pp. 376- 386, Février 2009.
- [58] M. Levoy et al: Synthetic Aperture Confocal Imaging, *ACM*, 0730, 0301, pp.825- 834, 2004.
- [59] O. Haeberlé : Du Microscope au Nanoscope ? Développements récents en microscopie optique 3D, *Colloque SF μ -2007*, Grenoble, Juin 2007.
- [60] M. Guillaume et al : Experimental inversion of optical diffraction tomography data with a nonlinear algorithm in the multiple scattering regime, *Journal of Modern Optics*, Vol. 57, No. 9, pp. 746–755, Mai 2010.
- [61] M. Debailleul et al : High-resolution three-dimensional tomographic diffractive microscopy of transparent inorganic and biological samples, *Optics Letters*, Vol. 34, No. 1, pp. 79-81, Janvier 2009.
- [62] N. Lue et al: Synthetic aperture tomographic phase microscopy for 3D imaging of live cells in translational motion, *Optics Express*, Vol. 16, No. 20, pp. 16240- 16246, Septembre 2008.
- [63] A. Stern and B. Javidi : 3-D computational synthetic aperture integral imaging (COMPSAII), *Optics Express*, Vol. 11, No. 19, pp. 2446- 2451, Septembre 2003.
- [64] C.-K. Liao et al: Optoacoustic imaging with synthetic aperture focusing and coherence weighting, *Optics Letters*, Vol. 29, No. 21, pp. 2506- 2508, Novembre 2004.

- [65] J Belden et al: Three-dimensional synthetic aperture particle image velocimetry, *Meas. Sci. Technol.* 21, 125403, pp.21, 2010.
- [66] J. Bühl et al: Digital synthesis of multiple off-axis holograms with overlapping Fourier spectra, *Optics Communications*, Vol.283, pp.3631–3638, 2010.
- [67] T. Gutzler et al: Coherent aperture-synthesis, wide-field,high-resolution holographic microscopy of biological tissue, *Optics Letters*, Vol. 35, No. 8, pp. 1136- 1138, Avril 2010.
- [68] M. Paturzo & P.Ferraro: Resolution-enhanced approaches in digital holography, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI*, Proc. of SPIE Vol. 7389, pp.12, 2009.
- [69] M. Paturzo et al: Digital holography in combination with diffraction grating to get super-resolution, *Optical Micro and Nanometrology in Microsystems Technology II*, Proc. of SPIE Vol. 6995, 699505,pp.8, 2008.
- [70] Hongyan Li et al: Joint approach of the sub-holograms in on-axis lensless Fourier phase-shifting synthetic aperture digital holography, *Optics Communications*, 2011.
- [71] V. Mico et al: Synthetic aperture superresolution with multiple off-axis holograms, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 23, No. 12, pp. 3162- 3170, Décembre 2006.
- [72] F. Dubois et al: Micro-vélocimétrie 3D par holographie digitale, 9e Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Université Libre de Bruxelles, 14-17 Septembre 2004.
- [73] O. Matoba et al: Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram, *Applied Optics*, Vol.41, No. 29,10 Octobre 2002.
- [74] C-P. McElhinney et al: Depth-independent segmentation of macroscopic three-dimensional objects encoded in single perspectives of digital holograms, *Optics Letters*, Vol. 32, No.10, Mai 2007.
- [75] A. Asundi and V-R. Singh: Amplitude and Phase Analysis in Digital Dynamic Holography, *Optics Letters*, Vol. 31, No. 16, pp. 2420, 2006.
- [76] U.Schnars, W.Jueptner: *Digital holography recording, numerical reconstructing and related techniques*, Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [77] Yann Frauel et al: Three-Dimensional Imaging and Processing Using Computational Holographic Imaging. *Proceedings of the IEEE*, Vol.3, N° .94, Mars 2006.
- [78] B. Kemper and G. Von-Bally : Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection, *Appl. Opt.* 47, pp.52-61, 2008.

- [79] W.M. Ash and M.K. Kim: A Demonstration of Total Internal Reflection Holographic Microscopy for the Study of Cellular Motion, in Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (CD) Optical Society of America, DTuB6, 2008.
- [80] N. Warnasooriya et al: Imaging gold nanoparticles in living cell environments using heterodyne digital holographic microscopy, Optics Express, Vol. 18, No. 4, pp.3264-3273, Février 2010.
- [81] J. Rosen, B. Katz and G. Brooker : Review of Three-Dimensional Holographic Imaging by Fresnel Incoherent Correlation Holograms, 3D Research, Vol. 1, No. 1, Décembre 2009.
- [82] Xu. L. Peng, X. J. Miao and A.K. Asundi: Studies of Digital Microscopic Holography with Applications to Microstructure Testing, Appl. Opt. 40, pp.5046-5051, 2001.
- [83] P. Ferraro et al: Extended focused image in microscopy by digital Holography, Opt. Express 13, pp.6738-6749, 2005.
- [84] J. Seneschal : Etude et réalisation d'un système automatique de caractérisation de jets diesel en champ proche et lointain, Thèse Présentée à l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne pour obtenir le grade de : Docteur de l'université de Saint Etienne, 2009.
- [85] F. Dubois et al : Digital holographic microscopy with reduced spatial coherence for three-dimensional particle flow analysis, Appl. Opt.45, pp. 864-871, 2006.
- [86] L. Repetto et al: Lensless digital holographic microscope with light-emitting diode illumination, Opt. Lett. 29, pp. 1132-1134, 2004.
- [87] D. Lebrun et al: Particle field digital holographic reconstruction in arbitrary tilted planes, Optics Express, Vol. 11, No. 3, pp.224-229, Février 2003.
- [88] Picart. P et al: Time-averaged digital holography, Opt. Lett.28, pp.1900-1902 2003.
- [89] N. Demoli. N and I. Demoli: Dynamic modal characterization of musical instruments using digital holography, Opt. Express 13, pp. 4812-4817, 2005.
- [90] De Nicola. S et al: Infrared digital reflective-holographic 3D shape measurements, Opt. Comm. 281, pp. 1445-1449, 2008.
- [91] L. Repetto et al: Infrared lensless holographic microscope with a vidicon camera for inspection of metallic evaporations on silicon wafers, Opt. Comm. 251, pp.44-50, 2005.

- [92] G. Pedrini et al: "Digital holographic microscopy in the deep (193 nm) ultraviolet," *Appl. Opt.* Vol. 46, pp.7829-7835, 2007.
- [93] A. Faridian et al: Deep ultraviolet digital holography for nanoscopic applications, *DGaO Proceedings*, 2010.
- [94] J.H. Massig: Digital off-axis holography with a synthetic aperture, *Opt. Lett.* Vol. 27, No. 24, pp. 2179–2181, 2002.
- [95] S. Alexandrov et al: Synthetic Aperture Fourier Holographic Optical Microscopy, *Phys. Rev. Lett.* Vol.97, N°.168102, pp.4, 2006.
- [96] Y. Kuznetsova et al: Imaging interferometric microscopy—approaching the linear systems limits of optical resolution, *Opt. Express* 15, pp. 6651-6663, 2007.
- [97] V. Mico et al : Superresolved imaging in digital holography by superposition of tilted wavefronts, *Appl. Opt.*, Vol. 45, No. 5, pp. 822-828, 2006.
- [98] L. Martínez-León and B. Javidi : Synthetic aperture single-exposure on-axis digital holography," *Opt. Express*, Vol. 16, No. 1, pp. 161-169, Janvier 2008.
- [99] F. Le Clerc et al : Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography, *Opt. Lett.*, Vol. 26, No. 20, pp. 1550-1552, 2001.
- [100] R. Binet et al : Short-Range Synthetic Aperture Imaging at 633 nm by Digital Holography, *Appl. Opt.*, Vol. 41, No. 23, pp. 4775-4782, 2002.
- [101] L. Granero et al: Superresolution imaging method using phase-shifting digital lensless Fourier holography, *Optics Express*, Vol. 17, No. 17, pp.15008-15022, Août 2009.
- [102] T. Nakatsuji and K. Matsushima: Free-viewpoint images captured using phase-shifting synthetic aperture digital holography, *Applied Optics*, Vol. 47, No. 19, pp.136-143, Juillet 2008.
- [103] Mico, V et al: Superresolution digital holographic microscopy for three-dimensional samples, *Opt. Express* 16, pp. 19260-19270, 2008.
- [104] V. Mico et al : Synthetic aperture microscopy using off-axis illumination and polarization coding, *Optics Communications* 276, pp. 209–217, 2007.
- [105] A. Neumann et al : Optical resolution below $\lambda/4$ using synthetic aperture microscopy and evanescent-wave illumination, *Opt. Express*, Vol. 16, No. 25, pp. 20477-20483, 2008.
- [106] C. Liu et al: Super-resolution digital holographic imaging method, *Appl. Phys. Lett.* 81, 3143, 2002.

- [107] M. Paturzo, et al: Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating, *Opt. Express*, Vol. 16, No. 21, pp.17107-17118, Octobre 2008.
- [108] M. Paturzo et al: Flexible coherent diffraction lithography by tunable phase arrays in lithium niobate crystals, *Opt. Comm*, 281, pp. 1950-1953, 2008.
- [109] M. paturzo and P. Ferraro: Correct self-assembling of spatial frequencies in super-resolution synthetic aperture digital holography, *Optics Letters*, Vol. 34, No. 23, pp. 3650- 3652, Décembre 2009.
- [110] T. Nakatsuji and K. Matsushima: Acquisition of information-rich images using synthetic-aperture digital holography, *OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2007.
- [111] B. Katz, J. Rosen : Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements, *Optics Express*, Vol. 18, No. 2, pp.962-972, Janvier 2010.
- [112] P. Feng et al : Long-working-distance synthetic aperture Fresnel off-axis digital holography, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 17, No. 7, pp. 5473- 5480, Mars 2009
- [113] T-R. Hillman et al : High-resolution, wide-field object reconstruction with synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy, *Optics Express*, Vol. 17, No. 10, pp. 7873- 7892, Mai 2009.

خلاصة:

على الرغم من إظهار الهولوجرافيا الرقمية لتكون أداة مفيدة في مختلف المجالات مثل ميكانيك السوائل ، ولكن، وبسبب العدد المحدود وحجم بكسل في أجهزة الاستشعار ، فإنه من الصعب وفي وقت واحد تلبية شرط أخذ العينات أثناء التسجيل وشرط إعادة التشكيل. وعلاوة على ذلك، فإن قدرة التمييز وزاوية الملاحظة في الهولوجرافيا الرقمية هي أقل بكثير مما كانت عليه في الهولوجرافيا التقليدية. لقد اقترح العديد من الحلول لهذه المشكلة ولكن لا تزال غير كافية. استخدام تقنية تركيب الفتحات المستعملة خاصة في التصوير الراداري تبدو جديرة على إعطاء تحسن كبير. الهدف من هذا العمل هو اكتشاف هذه التقنية وتطبيقها لحل هذا الإشكال.

كلمات البحث : الهولوجرافيا الرقمية خارج المحور، مضاعفة الهولوجرام، الجزيئات الصلبة، تركيب الفتحات

Résumé :

Bien que l'holographie digitale (DH) ait été démontrée pour être un outil utile dans différents domaines telle que la mécanique des fluides, cependant, en raison de la limite du nombre et de la taille des pixels dans un détecteur CCD, il est difficile pour satisfaire simultanément la condition d'échantillonnage à l'enregistrement et la condition de reconstruction. En outre, la résolution et l'angle de visualisation en holographie digitale sont significativement plus faibles que dans l'holographie traditionnelle. Différentes solutions ont été proposées pour palier à ce problème mais restent insuffisantes. La technique de synthèse d'ouverture utilisée surtout en imagerie radar semble être apte à donner une amélioration conséquente. Ce travail consiste donc à découvrir cette technique et de la mettre en œuvre afin de résoudre ce problème.

Mots clés : Holographie digitale hors axe, multiplexage d'hologrammes, particules solides, synthèse d'ouverture.

Abstract:

Although the digital holography (DH) has been demonstrated to be a useful tool in different fields such as fluid mechanics, however, because of the limited number and size of pixels in a CCD detector, it is difficult to satisfy simultaneously the sampling condition in the recording step and the condition of reconstruction. In addition, resolution and viewing angle by digital holography are significantly lower than in traditional holography. Various solutions have been proposed to solve this problem but remain insufficient. The technique of synthetic aperture used mainly in radar imagery seems to be able to give a consequent improvement. This work has as main aim to discover this technique and implement it to solve the problem.

Keywords: Off-axis digital holography, holographic multiplexing, solid particles, synthetic aperture.