



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : MICRO-ELECTRONIQUE

Présenté par

**Yani AIT OUALI**

**Massinissa ATTAR**

Thème

**Etude d'un système de mesure automatisé par  
interférométrie holographique pour une analyse  
rapide des microparticules**

**Encadreur : Mr.R.MOKDAD**

**Président : Mme. D.HATEM.**

**Examineur : Mme. O.OURAHMOUN**

2023/2024

**Remerciement**

**Et**

**Dédicace**

# Remerciements

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements et sincères reconnaissances à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement et à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions notre promoteur Mr MOKDAD pour la confiance qu'il nous a accordé en acceptant de nous encadrer dans ce mémoire.

Nous le remercions pour son implication, ses conseils et l'intérêt qu'il a porté à notre travail, pour ses conseils et orientations précieuses et sa disponibilité tout au long de la période de réalisation de ce travail de recherche.

Nos chaleureux remerciements aux membres de nos familles et amis(es) qui nous ont soutenus et accompagnés tout le long de notre travail.

Nous tenons ensuite à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer notre modeste travail.

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à mes chers parents, source inépuisable de soutien et d'affection inconditionnels.

A mon frère, ma sœur pour leurs encouragements, et leurs soutiens.

Sous oublier mes petits neveux Aylane & Anes.

A tous mes ami(e)s.

**Yani**

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur soutien et leurs prières tous au long de mes études, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse leur offrir; sans oublier tous les membres de ma famille notamment mon petit frère Rayane.

A tous mes ami(e)s.

**Massinissa**

## Sommaire

### Chapitre 1: Les méthodes de la Caractérisation des microparticules.

1.1 Introduction .....	1
1.2 Mise en place d'un dispositif expérimental.....	1
1.3 Acquisition d'hologrammes et de données sur des échantillons de microparticules...2	
1. 4 Notions de base sur le traitement d'images .....	3
1. 4.1 Définition de l'image .....	3
1.4.2 L'image numérique .....	3
1.4.3 Caractéristiques d'une image numérique.....	3
1.5. Architecture générale d'un système de traitement d'images.....	4
1.6. Acquisition.....	5
1.7. Soustraction de l'arrière-plan.....	5
1.7.1. Présentation de la problématique.....	5
1.7.2. Principes de la soustraction de fond.....	5
1.7.3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les méthodes conventionnelles de mesure.....	5
1.8. Description des méthodes conventionnelles.....	6
1.8.1. Mesures mécaniques conventionnelles .....	6
1.8.1.1. Jauges de contrainte .....	6
1.8.1.2 Définition de la contrainte.....	6
1.8.1.3 La jauge .....	6
1.9 Principe de fonctionnement des jauges de contraintes.....	7
1.9.1. Les jauges piézorésistives ou à semi-conducteurs .....	9
1.9.2 Les jauges métalliques .....	9
1.10 Méthodes de mesure Dimensionnelle des Particules Micrométriques et Leur Classification par Taille .....	11
1.10.1 Méthode de diffraction Laser .....	11
1.10.2 Méthode de sédimentation .....	11
1.10.3 Méthode d'Imagerie optique.....	11
1.10.4 Méthode de Microscopie Électronique.....	12
1.10.4.1 Microscopie Électronique en Transmission (MET).....	12
1.10.4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB).....	12
1.10.4.3 Microscopie optique conventionnelle .....	13
1.10.4.4 Mesure par Interférométrie... ..	14
1.11. Introduction à la méthode holographique numérique .....	16
1.11.1 Principe de Fonctionnement .....	16

## Sommaire

---

1.11.2 Avantages de la méthode holographique numérique.....	17
1.11.3 Comparaison avec d'autres méthodes.....	19
1.11.3.1 Comparaison avec la Microscopie Électronique.....	19
1.11.3.2 Comparaison avec l'Imagerie optique.....	19
1.11.3.3 Comparaison avec la méthode de diffraction Laser.....	19
1.12. Analyse par diffraction ou spectroscopie... ..	19
1.12.1 Diffraction de la lumière.....	19
1.12.2 Réseau cristallin et réseau réciproque.....	20
1.13 Spécificité de la diffraction des électrons.....	22
1.13.1 Diffraction par réseau.....	23
1.13.2 Diffraction à plusieurs fentes.....	24
1.13.3 Géométrie du patron d'interférence d'un réseau.....	25
1.14 La spectroscopie... ..	26
1.14.1 Spectroscopie d'absorption.....	26
1.14.2 Spectroscopie Raman.....	26
1.14.3 Effet Raman.....	27
1.14.4 Effet Raman de résonance.....	27
1.14.4.1 Les nombreux domaines d'applications offerts par le Raman.....	27
1.14.5 Différents effets Raman.....	27
1.14.5.1 Effet Raman conventionnel.....	28
1.14.5.2 Effet Raman de résonance.....	28
1.15 Conclusion.....	30

## ***Chapitre 2 : Fondements théoriques de l'interférométrie holographique.***

2.1 Introduction.....	31
2.2 Principe de base de l'holographie.....	31
2.3 Formation d'une image holographique.....	34
2.4 Reconstruction numérique d'un hologramme.....	35
2.5 Reconstruction par transformée de Fourier.....	36
2.6 Les avantages de l'interférométrie holographique pour la mesure des microparticules.....	37
2.7 Conclusion.....	38

---

***Chapitre 3 : Conception du système de mesure automatisé.***

<b>3.1 Introduction .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Configuration optique de l'interférométrie holographique.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.1 Holographie numérique de Fresnel.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2 Holographie numérique de Fraunhofer .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Sélection des sources de lumière cohérente .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.1 Cohérence spatiale .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.2 Cohérence temporelle .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Techniques de traitement numérique des images holographiques .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.1 Interférométrie holographique par double exposition.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.2 Dispositif expérimental .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5 Interférométrie holographique en temps réel.....</b>	<b>44</b>
<b>3.6 Interférométrie holographique en temps moyenné.....</b>	<b>46</b>
<b>3.7 Interférométrie holographique par phase de contraste.....</b>	<b>47</b>
<b>3.8 Interférométrie holographique dynamique .....</b>	<b>49</b>
<b>3.9 Comparaison numérique/analogique .....</b>	<b>50</b>
<b>3.10 Conclusion .....</b>	<b>51</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>52</b>

## *Liste des figures*

**Figure 1.1:** Le système d'acquisition qui permet d'enregistrer les images de diffraction de l'objet par le faisceau incident.

**Figure 1.2 :** Exemple d'une image médicale cérébrale avec son histogramme.

**Figure .1.3 :** Schéma d'un système de traitement numérique d'image.

**Figure 1.4 :** Définition de la mesure de déformation par jauge de contrainte.

**Figure 1.5 :** Diagramme d'une jauge.

**Figure 1.6 :** jauge de contrainte.

**Figure 1.7:**Schéma de principe du MEB, illustrant le faisceau d'électrons balayé sur l'échantillon.

**Figure 1.8 :** Schéma de principe du microscope optique montrant les lentilles objectif et oculaire.

**Figure 1.9 :** Schéma de principe d'un interféromètre de Michelson et sources de lumière.

**Figure 1.10 :** Schéma de la méthode holographique numérique.

**Figure 1.11:**Comparaison des résultats obtenus par la méthode holographique numérique avec d'autres techniques.

**Figure 1.12 :** Famille de plans réticulaires (hkl) et équidistance  $d_{hkl}$ .

**Figure 1.13:** Réflexion sélective de Bragg sur une famille de plans réticulaires (hkl).

**Figure 1.14:** Schéma représentant la construction d'Ewald.

**Figure 1.15:** Schéma mettant en évidence les différents signaux issus de l'interaction entre Les électrons et la matière.

**Figure 1.16:** expérience de Young.

**Figure 1.17:** diffraction a trois fentes.

**Figure 1.18:** schéma sur l'interférence a 3 fentes et a 4 fentes.

**Figure.1.19 :** Mécanisme de différents modes d'émission : (a) Rayleigh, (b) non-résonance Raman, (c) pré résonance Raman, (d) résonance Raman et (e) résonance fluorescence ; D'après Turrell & Corset (1996).

**Figure 2.1 :** Principe d'enregistrement d'un hologramme.

**Figure 2.2 :** Restitution d'un Hologramme.

**Figure 2.3 :** Figure d'interférence produite par la superposition de deux ondes planes.

**Figure 2.4 :** Principe de reconstruction de l'hologramme.

**Figure 2.5 :** Premiers hologrammes numériques reconstruits avec un ordinateur

a) Hologramme test optique, enregistré électroniquement avec une caméra vidicon TV de 256x256 pixels, quantifiés à 8 niveaux de gris. b) Image numérique reconstruite à partir de cet hologramme avec un ordinateur PDP-6.

**Figure 2.6 :** Configuration de Fourier (holographie de Fourier sans lentille).

**Figure 3.1 :** Dispositif d'enregistrement numérique de Fresnel.

**Figure 3.2:** Dispositif d'enregistrement numérique de Fraunhofer.

**Figure 3.3 :** Enregistrement d'hologrammes en double exposition.

**Figure 3.4:** Visualisation d'hologrammes en double exposition.

**Figure 3.5 :** Exemple d'hologramme en double exposition.

**Figure 3.6 :** Enregistrement d'un hologramme en temps réel.

**Figure 3.7 :** Visualisation en temps réel.

**Figure 3.8 :** Exemple d'hologrammes en temps réel.

**Figure 3.9 :** Hologramme temps moyenné à : (a) 980Hz, (b) 1180Hz (c)1300Hz, (d) 2110Hz et (e) 2200Hz.

## Liste des figures

---

**Figure 3.10:** Signatures modales sans et avec défaut (a) et (b) à 1180Hz, (c) et (d) à 1820Hz.

**Figure 3.11:** Exemple d'hologramme par phase de contraste.

**Figure 3.12 :** Exemple d'hologrammes dynamiques : Interféromètre holographique numérique.

**Figure 3.13 :** Comparaison entre temps moyenné analogique et temps moyenné numérique pour différentes amplitudes de vibration d'un haut-parleur excité à 3700 Hz.

### Introduction générale

L'holographie est un domaine important de l'optique moderne. Les premiers hologrammes furent réalisés par D. Gabor en 1948. Ces derniers étaient de piètres qualités dues à la difficulté d'obtenir un fond lumineux cohérent. Depuis l'apparition du premier laser en 1962, la réalisation d'hologrammes est devenue beaucoup plus accessible. Plusieurs méthodes d'enregistrement ont été développées, permettant d'obtenir des images tridimensionnelles de qualité remarquable. Bien que spectaculaire, la réalisation d'images tridimensionnelles n'est pas l'unique application de l'holographie. L'interférométrie a également bénéficié de cette technologie, permettant maintenant de faire interférer des ondes enregistrées à différents instants. Il est ainsi possible d'étudier les modes propres de vibrations de surfaces complexes. Le principe fondamental de l'holographie repose sur la création d'interférences en utilisant un éclairage cohérent, qui fait interagir une onde de référence avec la lumière diffractée par l'objet étudié. Ce processus génère des motifs d'interférences capturés par un capteur sensible à l'intensité lumineuse, et ces motifs renferment des informations cruciales sur la phase de l'onde émise par l'objet. L'ensemble de ces motifs est consigné sous la forme d'un hologramme.

Lorsque l'hologramme est illuminé par une onde lumineuse identique à celle de la référence, le phénomène de diffraction intervient pour reconstruire l'onde provenant de l'objet, permettant ainsi de visualiser et d'analyser l'objet en trois dimensions.

Le premier chapitre sera consacré pour les différentes méthodes de la caractérisation des microparticules.

Dans le second chapitre, nous rappellerons les bases théoriques de l'holographie, à savoir le processus d'enregistrement et de reconstruction de l'hologramme.

Le troisième chapitre se concentre sur la conception du système de mesure automatisé.

# **Chapitre 1**

## **Les méthodes de la Caractérisation des microparticules**

## **1.1 Introduction**

Ce chapitre se concentre sur deux aspects fondamentaux : tout d'abord, la présentation du dispositif expérimental utilisé pour enregistrer des hologrammes numériques des microparticules transparentes dans l'axe, et ensuite, l'explication de la méthodologie mise en place pour extraire des informations cruciales en vue de la caractérisation de ces micro-objets dans des conditions de champ lointain. La première partie de ce chapitre sera consacrée à la description détaillée du dispositif expérimental qui a été conçu et mis en place pour capturer des hologrammes numériques des microparticules transparentes. Il expliquera les composants, les réglages et les paramètres essentiels de ce dispositif, ainsi que la justification de leur choix pour l'expérience. Il mettra en lumière les caractéristiques techniques du système, telles que les sources de lumière, les objectifs, les caméras, et autres composants cruciaux. La deuxième partie du chapitre décrira la méthodologie utilisée pour extraire des informations pertinentes à partir des hologrammes enregistrés. Cela inclura les étapes de prétraitement des données, de reconstruction holographique, et d'analyse des images résultantes. Cette section expliquera également comment ces données sont utilisées pour caractériser les microparticules dans des conditions de champ lointain, en mettant l'accent sur les paramètres clés tels que la taille, la forme, la position et la trajectoire des particules.

En résumé, ce chapitre s'attache à détailler l'équipement et les méthodes nécessaires pour enregistrer et analyser des hologrammes numériques de microparticules transparentes, une étape essentielle dans le processus de caractérisation de ces micro-objets dans des conditions de champ lointain. Il offre un aperçu complet de la démarche expérimentale et de l'analyse des données, fournissant ainsi une base solide pour la recherche ultérieure dans ce domaine.

## **1.2 Mise en place d'un dispositif expérimental**

La Figure 1.1 montre le montage de notre système. Le montage que nous décrivons est conçu pour caractériser un objet, en l'occurrence une bille micrométrique, en utilisant un laser He-Ne avec une longueur d'onde de 632 nm. Le montage peut être divisé en deux parties : celle en amont de l'objet et celle après l'objet. Voici une description des composants utilisés dans chaque partie du montage :

- ❖ Source de lumière (laser He-Ne): Nous avons utilisé un laser He-Ne comme source de lumière. Ce laser émet une lumière cohérente à une longueur d'onde de 632 nm, ce qui est essentiel pour la génération d'interférences et d'hologrammes.
- ❖ Atténuateur disque: L'atténuateur disque est utilisé pour ajuster l'intensité du faisceau laser qui atteindra le système d'acquisition. Cela permet d'éviter la saturation du système d'acquisition en réduisant l'intensité du laser si elle est trop élevée.

- ❖ Miroirs plans: Deux miroirs plats sont utilisés pour diriger le faisceau laser, de manière à le faire coïncider avec l'axe du système d'acquisition. Cela garantit que le faisceau laser suit un chemin précis à travers l'ensemble du montage.
- ❖ Filtre optique: Le filtre optique, composé d'une lentille et d'un diaphragme, est employé pour nettoyer le faisceau laser brut, éliminant ainsi les imperfections et les aberrations du faisceau.
- ❖ Lentille de collimation: Cette lentille est utilisée pour transformer le faisceau lumineux émanant de l'objet en un faisceau de lumière parallèle. La collimation est importante pour obtenir une figure de diffraction nette et cohérente.

Dans l'ensemble, ce montage optique est conçu pour préparer et conditionner le faisceau laser avant qu'il n'atteigne l'objet à caractériser, puis à le recueillir et à l'analyser après son interaction avec l'objet. Cette configuration est essentielle pour la création d'hologrammes numériques et pour la caractérisation des propriétés de l'objet en utilisant des techniques de diffraction.[1]

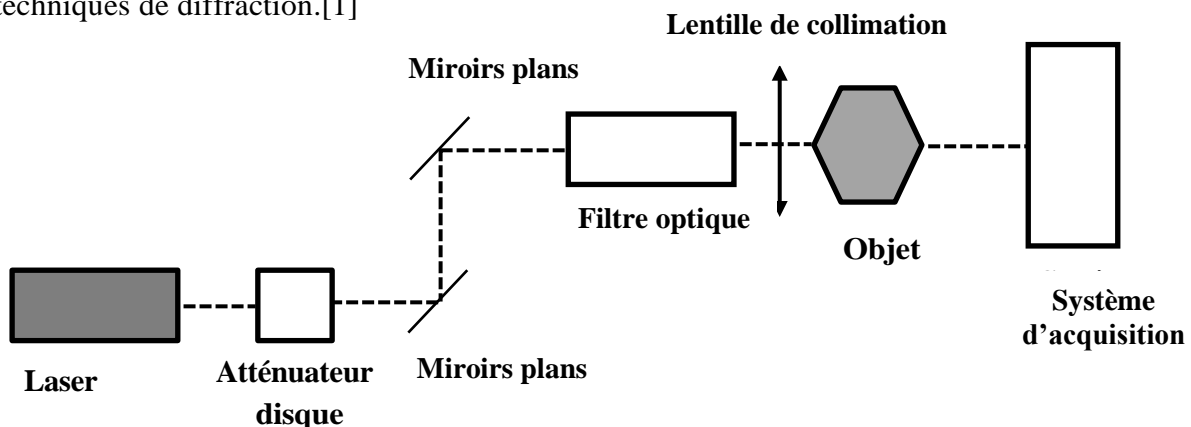


Figure 1.1: Le système d'acquisition qui permet d'enregistrer les images de diffraction de l'objet par le faisceau incident.

### **1.3 Acquisition d'hologrammes et de données sur des échantillons de microparticules**

Le système d'acquisition est essentiel pour enregistrer les images de diffraction de l'objet exposé au faisceau laser. Nous avons utilisé une caméra Hamamatsu, qui est un appareil photo et un analyseur de faisceau pour cette tâche. Cependant, en raison des franges d'interférences provoquées par les plaques parallèles internes de ces dispositifs, nous avons rencontré un problème potentiel avec la caméra Hamamatsu. Pour résoudre ce problème et éliminer les franges d'interférences indésirables qui peuvent encombrer la figure de diffraction, voici quelques méthodes couramment utilisées :

- ❖ Utilisation d'un filtre anti-reflets: on peut installer un filtre anti-reflets devant la caméra Hamamatsu et l'appareil photo pour minimiser les réflexions internes et les interférences.
- ❖ Diffusion de la lumière: placer un diffuseur, comme un verre dépoli, devant la caméra ou l'appareil photo peut aider à réduire les interférences.
- ❖ Utilisation de l'analyseur de faisceau: comme mentionné, l'analyseur de faisceau présente moins d'interférences. cela dépendra de la précision requise pour vos mesures.
- ❖ Traitement d'image post-acquisition: après avoir acquis les images, vous pouvez effectuer un traitement d'image pour supprimer les franges d'interférences.

Après avoir acquis les images, nous avons opté pour le traitement d'image post-acquisition pour supprimer les franges d'interférences.

### **1.4 Notions de base sur le traitement d'images**

#### **1.4.1 Définition de l'image**

L'image est une représentation d'une personne ou d'un objet par divers moyens visuels.

#### **1.4.2 L'image numérique**

L'image dont la surface est divisée en éléments de taille fixe appelés pixels, chacun ayant un niveau de gris ou de couleurs.

#### **1.4.3 Caractéristiques d'une image numérique**

- Pixel: Unité de base de l'image numérique matricielle.
- Dimension: Matrice de valeurs numériques représentant des intensités lumineuses.
- Résolution: Nombre de pixels par unité de mesure.
- Bruit: Variation brusque de l'intensité d'un pixel par rapport à ses voisins.
- Luminance: Degré de luminosité des points de l'image.
- Contraste: Différence de luminosité entre les parties claire et sombre d'une image.
- Contour: Frontières entre les objets de l'image.
- Région: Ensemble connexe de pixels ayant des propriétés communes.
- Histogramme d'une image: Représentation graphique des niveaux de gris ou des couleurs d'une image.

La Figure 1.2 montre un exemple d'une image médicale cérébrale avec son histogramme.

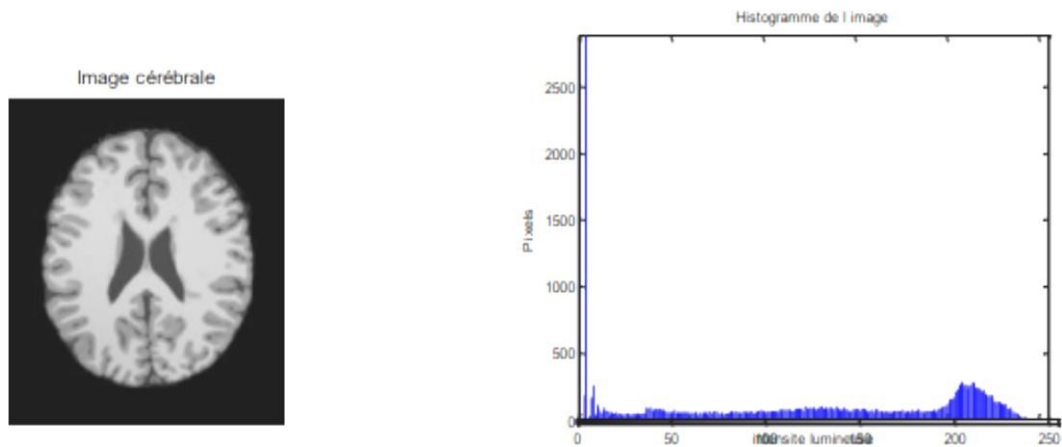


Figure 1.2 : Exemple d'une image médicale cérébrale avec son histogramme.

## 1.5. Architecture générale d'un système de traitement d'images

Un système de traitement d'image est composé de plusieurs parties. La Figure 1.3 montre les différentes étapes de traitement :

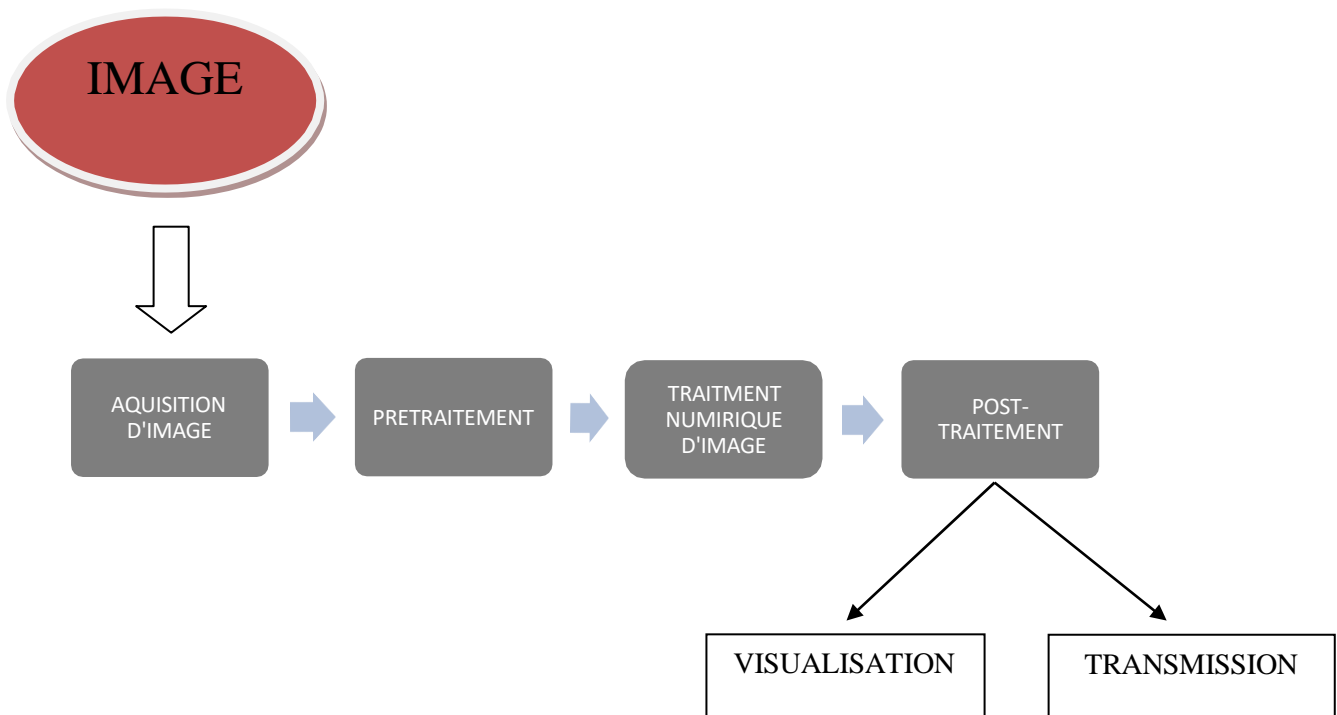


Figure .1.3 : Schéma d'un système de traitement numérique d'image.

### **1.6. Acquisition**

L'acquisition d'une image est l'opération qui permet le passage de l'information réelle à une représentation numérique. Elle est réalisée en trois étapes :

- La transformation du signal optique en un signal analogique (électrique).
- L'échantillonnage, qui consiste à multiplier le signal analogique par une série d'impulsions unité dans le but d'obtenir des échantillons du signal.
- La quantification, qui est une traduction des échantillons en valeurs numériques selon une règle de codage [1].

### **1.7. Soustraction de l'arrière-plan**

#### **1.7.1. Présentation de la problématique**

La soustraction de fond est une technique très utilisée pour extraire les objets en mouvement. Chaque séquence vidéo est comparée à une référence qui est le modèle de fond (background model). Les pixels de la séquence étudiée dont la déviation par rapport à l'arrière-plan (fond) est significative sont considérés comme des objets en mouvement. Comme la soustraction de fond est souvent la première étape dans les applications de la vision par ordinateur, il est crucial que l'extraction des pixels appartenant au premier plan corresponde correctement aux objets d'intérêt. L'élaboration d'un bon algorithme de soustraction de fond est soumise à de nombreuses contraintes : l'algorithme doit être robuste contre les changements d'éclairage, éviter la détection d'objets non stationnaires de l'arrière-plan (comme la pluie, la neige, les feuilles d'arbre qui bougent et les ombres dues aux objets en mouvement), et répondre rapidement aux changements de l'arrière-plan[2].

#### **1.7.2. Principes de la soustraction de fond**

Les étapes les plus importantes dans un algorithme de soustraction de fond sont :

- Le prétraitement,
- La modélisation de l'arrière-plan,
- La détection du premier plan et la validation de données.

Le prétraitement comprend une série de traitements simples qui modifient le format de la vidéo d'entrée afin qu'elle puisse être traitée dans les étapes suivantes. La modélisation du fond (arrière-plan) comprend le calcul et la mise à jour du modèle de fond pour les nouvelles séquences d'entrée. Le modèle de fond fournit une description statistique de toute la scène de l'arrière-plan. La détection du premier plan (foreground) identifie les pixels de la séquence vidéo qui ne peuvent être décrits par le modèle de fond. Ces pixels forment un masque binaire candidat du premier plan. Enfin, la validation de données examine le masque candidat et élimine les pixels qui ne correspondent pas aux objets mobiles du premier plan.

#### **1.7.3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les méthodes conventionnelles de mesure**

Dans cette section, nous introduisons le contexte de la comparaison des résultats expérimentaux avec les méthodes conventionnelles de mesure. L'objectif de cette

comparaison est de valider notre méthode expérimentale, de démontrer sa précision ou de mettre en évidence ses avantages par rapport aux méthodes traditionnelles.

### **1.8. Description des méthodes conventionnelles**

Les méthodes conventionnelles de mesure que nous avons choisies pour la comparaison sont les suivantes :

#### **1.8.1. Mesures mécaniques conventionnelles**

##### **1.8.1.1. Jauges de contrainte**

Les contraintes produisent des déformations sur le milieu où elles sont appliquées. Les capteurs de déformation permettent de calculer ces contraintes à partir des déformations mesurées en des zones judicieusement choisies. L'étude des contraintes mécaniques agissant sur une structure est importante pour apprécier la sécurité de son fonctionnement et établir les meilleures conditions d'emploi. Les jauges de déformation sont un type de capteur de déformation très important.

##### **1.8.1.2 Définition de la contrainte**

La contrainte correspond au degré de déformation d'un corps suite à l'application d'une force. De façon plus précise, la contrainte ( $\epsilon$ ) se définit comme la variation relative de longueur, comme présentée dans la Figure 1.4.

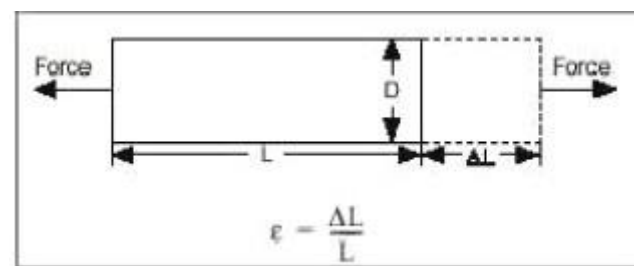


Figure 1.4 : Définition de la mesure de déformation par jauge de contrainte.

##### **1.8.1.3 La jauge**

Même s'il existe plusieurs méthodes différentes pour mesurer la déformation, la plus courante est le recours à la jauge de contrainte, un dispositif dont la résistance électrique varie en fonction de la charge exercée sur le matériau.

### Une jauge de contrainte

C'est un capteur dont la résistance varie avec la force appliquée. Elle convertit la force, la pression, la tension, le poids, etc., en un changement de résistance électrique qui peut ensuite être mesuré.

### Constitution

La jauge: Il s'agit d'un circuit métallique mince (de l'ordre du  $\mu\text{m}$ ), dont la résistance électrique varie sous l'effet d'une déformation. La jauge doit résister aux hautes températures et à l'usure. Elle est fixée sur un support [3].

### Le support

Il sert de lien entre le corps d'épreuve et la jauge. Il doit être souple et isolant, souvent fabriqué en résine. La fabrication de la jauge et du support est similaire à celle des circuits imprimés.

### Le corps d'épreuve

C'est le corps qui subira la déformation. Il doit être souple et élastique, avec le support fixé dessus. Il est important de rester dans la gamme de déformation élastique pour éviter toute déformation permanente.

La Figure 1.5 illustre la constitution d'une jauge de contrainte, avec ses composants principaux : la jauge elle-même, le support, et le corps d'épreuve.

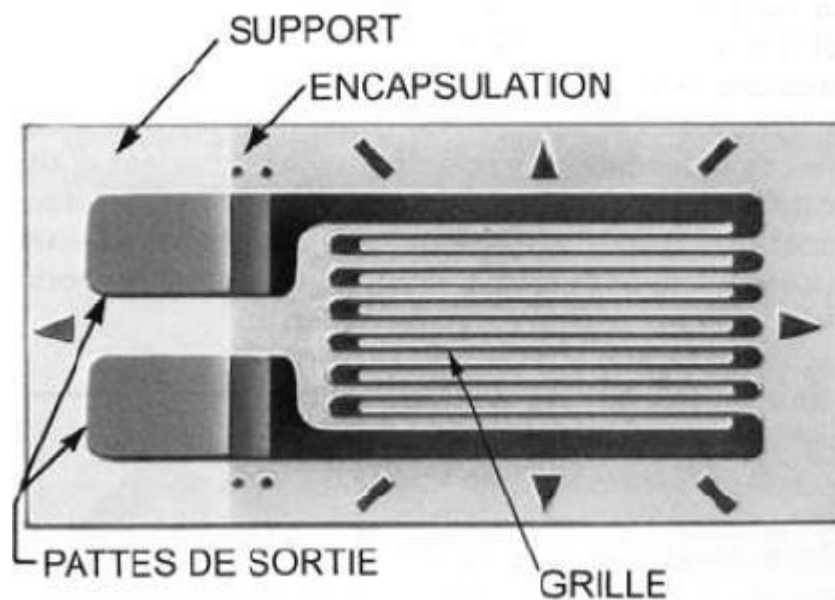


Figure 1.5 : Diagramme d'une jauge.

### 1.9 Principe de fonctionnement des jauges de contraintes

Sous sa forme la plus simple, une jauge est constituée d'un très fin fil (2 microns) conducteur collé sur un support. Cette feuille très mince est arrangée suivant la forme de la figure 1.6. Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure, on

peut admettre que le fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée.

La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :  $R = \frac{\rho L}{s}$  1.1

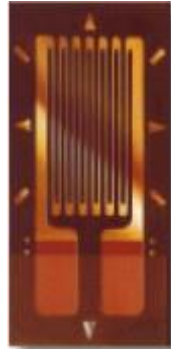


Figure 1.6 : jauge de contrainte.

Où  $R$  est la résistance électrique,  $\rho$  la résistivité du matériau

$L$  la longueur du fil,  $s$  la section du fil

En prenant le logarithme népérien et la différentielle de chaque membre et en considérant que les paramètres varient très peu lors de la mesure, on obtient la relation

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad 1.2$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad 1.3$$

Où  $K$  est le facteur de jauge

### Facteur de jauge

Le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de jauge  $K$  qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation:  $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$

$K$  est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge. Pour les jauges métalliques,  $K$  est proche de 2. Pour les jauges semi-conductrices, la valeur absolue de  $K$  est comprise entre 100 et 200. Ces dernières ont donc une sensibilité bien supérieure aux jauges métalliques. Cependant, elles ont une linéarité inférieure et sont plus sensibles aux effets de la température

### Les différents types de jauges de contraintes

Il existe quatre principaux types de jauges de contraintes, tel cités ci-dessous.

- les jauges piézorésistives (ou **à semi-conducteurs**)
- jauges soudable pour application a haute température.
- jauges à trame pelliculaire.
- jauges à fil tramé

Ces dernières étant actuellement les plus utilisées en extensomètre. A l'origine, elles étaient constituées d'un fil (généralement en constantan) collé en spires rapprochées sur un support mince. Aujourd'hui, on trouve plutôt des jauges à trame pelliculaire obtenues à partir d'une feuille métallique mince (quelques m d'épaisseur) et d'un support isolant (une résine synthétique) que l'on traite, comme un circuit imprimé, par lithographie et attaque à l'acide. C'est à ce type de jauges que nous nous intéresserons plus particulièrement.

#### 1.9.1. Les jauges piézorésistives ou à semi-conducteurs

La piézorésistance est le changement de conductibilité d'un matériau dû à une contrainte mécanique. La piézorésistance dans les semi-conducteurs a été découverte sur un cristal de silicium. Les piézorésistances sont des résistances variables faites à partir d'un matériau piézorésistant et sont utilisées pour les jauges de contraintes, couplées avec un pont de Wheatstone. La variable K d'un semi-conducteur peut-être cent fois supérieure à celle des métaux. Les semiconducteurs généralement utilisés sont le germanium et le silicium (amorphe ou cristallisé). Une contrainte appliquée sur du silicium va modifier sa conductibilité pour deux raisons : sa variation géométrique mais aussi sur la conductibilité intrinsèque du matériau. Il en résulte une amplitude bien plus importante que pour des capteurs métalliques.

#### Caractéristiques

- Matériau : silicium dopé avec des impuretés.
- construction : formation contrôlée d'un cristal de si dont l'orientation et la quantité d'impuretés sont choisies d'avance.
- découpage en lamelle suivant la direction longitudinale du cristal (0.5 à 12mm).
- collage sur support de plastique laminé avec conducteur a chaque bout.
- Très grande sensibilité ( $60 < S_a < 200$ ).
- Sensibilité transversale très faible
- Variation facile des propriétés par le contrôle du dopage des impuretés
- Très fragile
- Utilisées pour la mesure de petites déformations avec grande précision.
- Requier des circuits de conditionnement spéciaux car R est variable en fonction de la déformation

### 1.9.2 Les jauges métalliques

#### a) Jauge a trame pelliculaire

- Fabrication par photogravure (plusieurs géométries possibles).
- Grille très mince (0.004mm) et grande variété des dimensions (0.2mm a 50mm et plus)
- Support mince (0.013mm) et très flexible (époxy ou polyamide)
- Variété de résistance disponibles 120, 350, 1000,5000 $\Omega$
- Bonne adhésion et dissipation de chaleur.
- Bonne auto compensation en température.  
Diminution de l'effet transversale par boucles de raccordement épaisses.
- Possibilité de combiner plusieurs jauges sur un seul support (rosettes).

#### b) Jauge a fil tramé

En général 10 à 12 cm de constantan de diamètre 0.025mm pour une résistance totale de 120 $\Omega$

- Trame plate-longueur minimum 6mm.
- Bobine aplatie-longueur minimum 0.25mm.
- Support, papier, plastique souvent temporaire.
- Auto compensation en température difficile.
- Facteur de sensibilité transversale (k) plus grande que pour les jauges a trame pelliculaire.
- Peu répandues de nos jours, sauf pour des applications spéciales, comme la haute température.

#### c) Jauges soudables pour haute température

- Pour les hautes températures (650°C) car elles ne contiennent pas de matière organique.
- Deux types : variation de résistance d'un fil Ni-Cr ou bien variation de capacitance d'un condensateur a plaques.
- Dimensions importantes (50mm et plus) pour surfaces planes seulement

#### Les matériaux utilisés pour les jauges

Le matériau composant les jauges doit avoir une bonne résistance à la fatigue une aptitude au soudage et une bonne tenue en température. On utilise les matériaux suivants :

- Constantan (alliage 55% Cu, 45% Ni), couramment utilisé. Il supporte des températures de 200 °C.

- Karma (alliage 74 Ni, 20 Cr, 3% Cu, 3% Fe), meilleure sensibilité et peut être utilisé jusqu'à 350 °C.
- Platine – Tungstène (92% Pt, 8% W), plus cher mais présente une meilleure résistance à la fatigue. Il reste donc pour des utilisations spécifiques.
- Semi-conducteurs (Silicium). Ils ont une sensibilité bien meilleure (50 à 100 fois plus) mais ont une moins bonne linéarité et sont plus sensibles aux variations de température.

### **1.10 Méthodes de mesure Dimensionnelle des Particules Micrométriques et Leur Classification par Taille**

La mesure dimensionnelle des particules micrométriques est essentielle dans divers domaines scientifiques et industriels, y compris la science des matériaux, la biotechnologie, et l'industrie pharmaceutique. La précision dans la mesure et la classification de ces particules permet de garantir la qualité des produits et d'assurer la performance des systèmes dans lesquels elles sont utilisées. Cette section explore les différentes méthodes de mesure des particules micrométriques, en mettant particulièrement en avant la méthode holographique numérique et en la comparant brièvement aux techniques traditionnelles.

#### **1.10.1 Méthode de diffraction Laser**

Elle repose sur l'analyse du motif de diffraction produit lorsqu'un faisceau laser passe à travers une suspension de particules. La taille des particules est déterminée par l'analyse des angles et des intensités des faisceaux diffractés. Cette technique est largement utilisée en raison de sa simplicité et de sa rapidité, mais elle peut présenter des limitations pour les particules très petites ou celles de taille similaire.

#### **1.10.2 Méthode de sédimentation**

La méthode de sédimentation repose sur la mesure de la vitesse à laquelle les particules se déposent sous l'effet de la gravité dans un liquide. La taille des particules est déterminée en utilisant les équations de la loi de Stokes pour les particules sphériques. Bien que cette méthode soit efficace pour des particules de grande taille, elle est moins précise pour les particules micrométriques et nécessite des temps d'analyse relativement longs.

#### **1.10.3 Méthode d'Imagerie optique**

L'imagerie optique utilise des microscopes pour capturer des images des particules. La taille est ensuite mesurée à partir des images obtenues. Les techniques comme la microscopie à contraste de phase et la microscopie à fluorescence peuvent fournir des détails sur la morphologie des particules, mais la précision de la mesure peut être limitée par la résolution optique et les conditions d'échantillonnage.

### 1.10.4 Méthode de Microscopie Électronique

La microscopie électronique, comprenant la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique en transmission (MET), permet une analyse détaillée des particules à l'échelle nanométrique. Ces méthodes offrent une résolution bien supérieure à celle des techniques optiques mais sont coûteuses et nécessitent une préparation spécifique des échantillons.

#### 1.10.4.1 Microscopie Électronique en Transmission (MET)

La MET examine la structure interne des matériaux à l'échelle nanométrique. Le faisceau d'électrons traverse une lame de l'échantillon, ce qui permet d'obtenir des images à haute résolution. La MET est utile pour observer les variations de densité électronique et pour effectuer des analyses de phase et de diffraction.

##### **Types de contraste en MET :**

- **Contraste massique:** Basé sur la différence de diffusion élastique des électrons, les zones à numéro atomique élevé apparaissent plus sombres.
- **Contraste de diffraction :** Dû aux variations locales d'intensité des faisceaux diffractés, il est particulièrement utile près de l'angle de Bragg.
- **Contraste de phase :** Créé par l'interférence des faisceaux transmis, il produit une image en 3D de la zone explorée.
- **Contraste en Z :** Permet de créer des cartes du pouvoir diffusant des éléments chimiques, souvent avec un détecteur d'électrons sous l'échantillon pour une résolution atomique.

#### 1.10.4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Le MEB utilise un faisceau d'électrons pour analyser la surface des échantillons. Ce faisceau balaie la surface et produit des images basées sur les électrons réémis. Le MEB est simple à utiliser et convient à l'analyse de défauts de surface [4].

##### **- Principe de fonctionnement du MEB :**

Un faisceau d'électrons est généré par un canon à électrons et balayé sur la surface de l'échantillon. Les électrons interagissent avec la surface, produisant divers types de particules détectées pour former une image. Le schéma de principe du MEB est illustré à la figure 1.7.

### -Composants du MEB :

- Source lumineuse
- Condenseur
- Objectif
- Oculaires

### -Caractéristiques du MEB :

- Profondeur de champ : supérieure à celle du microscope optique.
- Préparation des échantillons : simple comparée aux autres techniques.
- Utilisation : détection de défauts tels que trous et fissures, et microanalyse.

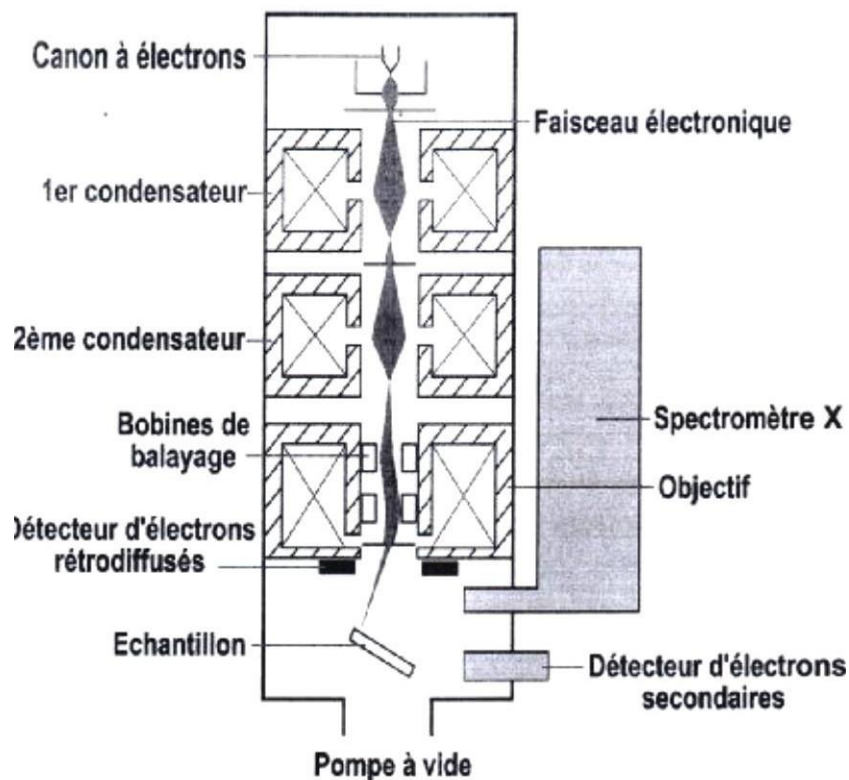


Figure 1.7:Schéma de principe du MEB, illustrant le faisceau d'électrons balayé sur l'échantillon.

#### 1.10.4.3 Microscopie optique conventionnelle

Le microscope optique agrandit les objets grâce à deux lentilles convergentes : l'objectif et l'oculaire. Il permet d'observer les échantillons à une échelle microscopique et est utilisé pour examiner la forme, la taille, et les caractéristiques des échantillons [5].

**Principe optique :** L'objectif forme une image réelle renversée et agrandie de l'échantillon, et l'oculaire agrandit cette image pour l'observateur. Le schéma de principe du microscope optique est montré à la figure 1.8.

**-Méthodes de préparation des échantillons :**

- Fixation: Immobilisation des échantillons.
- Coloration: Mise en évidence des caractéristiques.
- Déssection: Découpe en sections fines.
- Montage: Placement sur un support approprié.

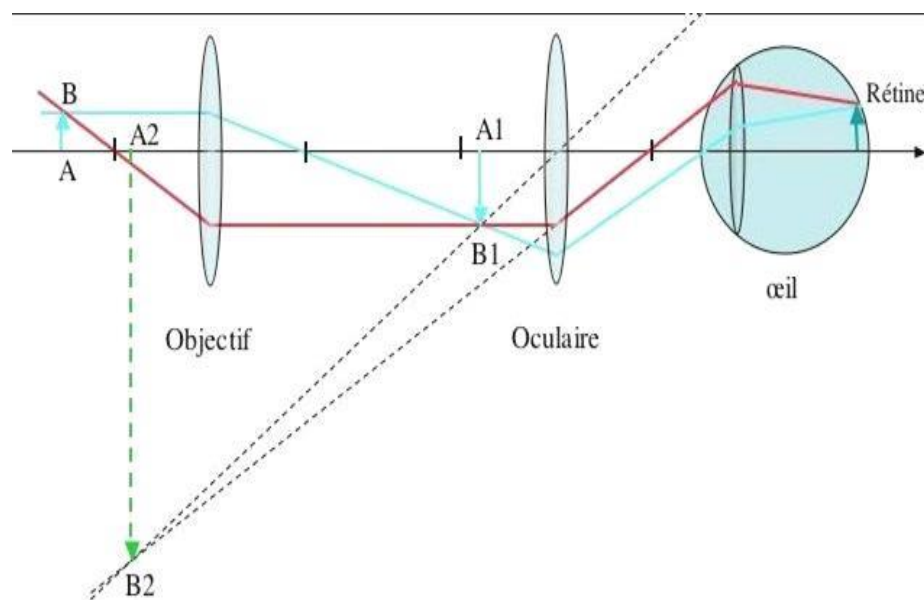


Figure 1.8 : Schéma de principe du microscope optique montrant les lentilles objectif et oculaire.

### 1.10.4.4 Mesure par Interférométrie

L'interférométrie, comme avec l'interféromètre de Michelson, est utilisée pour mesurer des différences de phase et de distance avec une grande précision. Le faisceau laser est divisé en deux faisceaux perpendiculaires, réfléchis par deux miroirs et recombinaison pour produire un motif d'interférences. Ces deux faisceaux présentent une différence de phase qui dépend de la différence de marche  $\Delta Z$  parcourue par chaque faisceau dans les bras de l'interféromètre. La propagation des ondes électromagnétiques suivant les bras de référence et de mesure de l'interféromètre peuvent être modélisée par :

$$E_{ref} = (\omega t + kr_r - \phi_r) e_1 \quad 1.4$$

$$E_{mes} = (\omega t + kr_m - \phi_m) e_2 \quad 1.5$$

où  $E_r$  et  $E_m$  représentent l'amplitude des champs électriques,  $\omega$  la fréquence angulaire,  $t$  le temps,  $\mathbf{k}$  le vecteur de propagation,  $\mathbf{r}$  le vecteur de position ;  $\varphi_r$  et  $\varphi_m$  sont les termes de phase respectivement associés au bras de référence et de mesure. Après la recombinaison sur la lame séparatrice, le champ électromagnétique est la superposition linéaire des deux ondes. En supposant que la propagation du champ ne soit que dans une seule dimension, l'intensité lumineuse détectée est alors :

$$I = \varepsilon_0 c_0 \langle E^2 \rangle = \varepsilon_0 c_0 (E_r^2 + E_m^2 + 2E_r E_m \cos(k(r_m - r_r) - (\varphi_m - \varphi_r))) \quad 1.6$$

où  $\varepsilon_0$  est la constante diélectrique,  $c_0$  la vitesse de lumière dans le vide,  $k$  la constante de propagation ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ),  $r_m$  la distance parcourue dans le bras de mesure et  $r_r$  la distance parcourue dans le bras de référence. Pour des raisons pratiques, la constante  $\varepsilon_0$  est omise dans le calcul suivant. En considérant des ondes initialement en phase et les amplitudes de ces deux faisceaux égales, l'intensité lumineuse devient :

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(r_m - r_r)\right) \right) \quad 1.7$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde du laser dans le milieu de propagation.

Supposons que le miroir mobile se déplace sur une distance optique  $\Delta Z$ , la différence de marche entre les deux bras de l'interféromètre est  $2\Delta Z$ . L'intensité s'écrit alors :

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(2\Delta Z)\right) \right) \quad 1.8$$

Un cycle complet de variation d'intensité au niveau des franges correspond à un déplacement du miroir de  $\lambda/2$  puisque le cosinus est périodique modulo  $2\pi$ . Ceci permet donc de mesurer un déplacement uniquement par un comptage de franges.

Le schéma de principe vu ci-dessus peut ensuite être développé en fonction des modes de fonctionnements, notamment si l'on introduit les polarisations des faisceaux.

Le schéma du système de mesure avec interféromètre de Michelson est illustré à la figure 1.9.

### -Applications :

- Mesures de précision
- Évaluation de défauts dans les composants
- Caractérisation des matériaux optiques

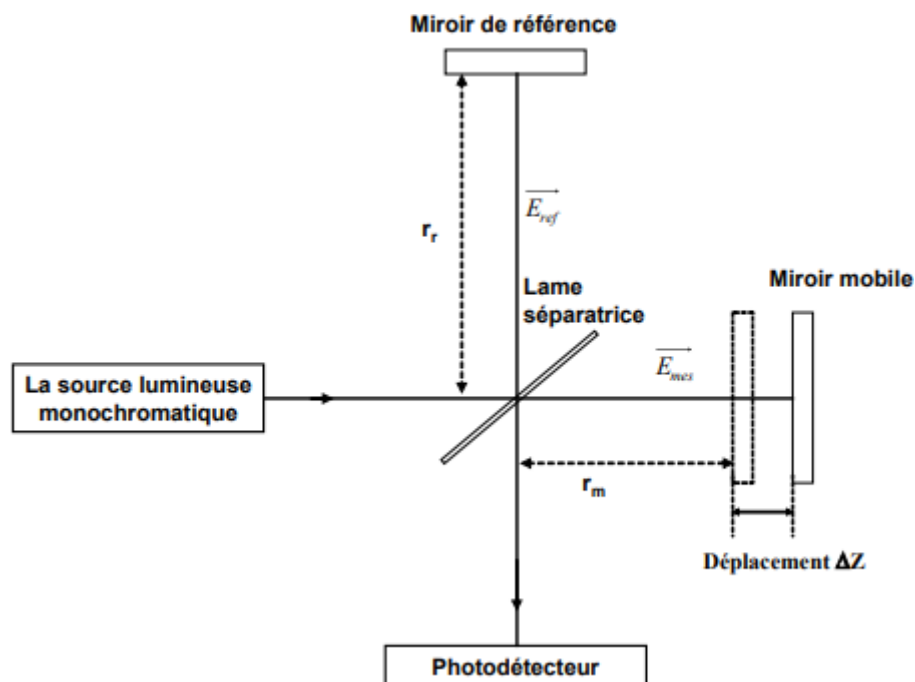


Figure 1.9 : Schéma de principe d'un interféromètre de Michelson et sources de lumière.

### **1.11. Introduction à la méthode holographique numérique**

La méthode holographique numérique est une technique récente qui utilise des principes d'holographie combinés à des techniques de traitement numérique pour mesurer la taille et la forme des particules micrométriques. Cette méthode repose sur la capture et l'analyse des hologrammes, qui sont des images 3D de la diffraction des ondes lumineuses par les particules.

#### **1.11.1 Principe de Fonctionnement**

La méthode holographique numérique capture des hologrammes des particules en utilisant un faisceau laser pour créer une interférence entre la lumière transmise par la particule et un faisceau de référence. L'hologramme résultant est ensuite analysé numériquement pour extraire les informations sur la taille et la forme des particules.

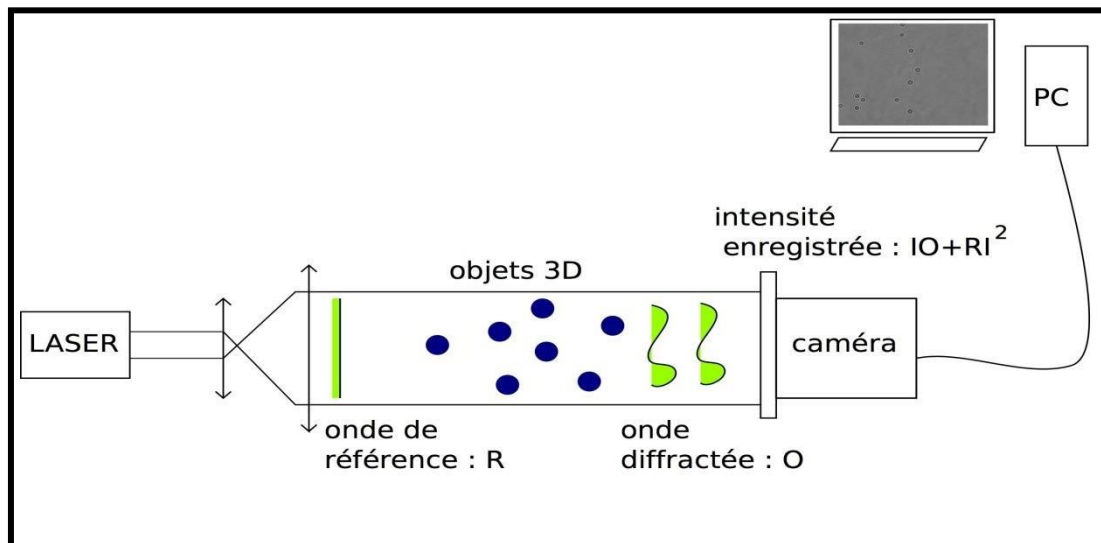


Figure 1.10 : Schéma de la méthode holographique numérique.

### 1.11.2 Avantages de la méthode holographique numérique

Cette méthode présente plusieurs avantages tels cités ci-dessous.

- Précision et Résolution: La méthode holographique numérique offre une résolution élevée et une précision accrue dans la mesure des particules, même à des tailles micrométriques très petites.
- Analyse en Temps Réel: Contrairement à certaines méthodes traditionnelles, la méthode holographique numérique permet une analyse en temps réel des particules, facilitant ainsi les processus de contrôle de qualité et de recherche.
- Mesure Non-Destructive : Cette méthode est non-destructive et permet la mesure des particules sans les altérer, ce qui est particulièrement important pour les applications sensibles.
- Polyvalence: Elle peut être utilisée pour analyser des particules dans des fluides et des gaz, ce qui élargit son domaine d'application par rapport aux méthodes qui nécessitent des échantillons préparés.

<b>Critère</b>	<b>Holographie numérique</b>	<b>Interférométrie classique</b>	<b>Moiré</b>	<b>Shearography</b>
<b>Précision</b>	Très élevée (submicronique)	Très élevée (submicronique)	Moyenne (micronique)	Elevée
<b>Vitesse de mesure</b>	Moyenne à rapide (dépend de l'algorithme)	Moyenne	Rapide	Moyenne
<b>Cout</b>	Elevée (matériel spécifique requis)	Elevée (système optique couteux)	Faible (système faible)	Moyen
<b>Simplicité de mise en œuvre</b>	Moyenne (traitement numérique requis)	Complexe (alignement précis)	Simple à mettre en œuvre	Moyenne
<b>Sensibilité au vibration</b>	Très sensible (système stable requis)	Très sensible	Faible	Moins sensible
<b>Mesure 3D</b>	Oui (mesure volumétrique possible)	Non (mesure principale non 2D)	Non	Non
<b>Capacité de mesure sans contact</b>	Oui	Oui	Oui	Oui
<b>Application typique</b>	Analyse de déformation, microparticules, bio-imagerie	Analyse de microdéformation	Cartographie de surface	Détection de défauts structurels
<b>Robustesse (environnement difficile)</b>	Moyenne (nécessite un environnement contrôlé)	Faible (sensibilité aux perturbations)	Bonne (robuste aux environnements variés)	Bonne (bonne tolérance)

Figure 1.11: Comparaison des résultats obtenus par la méthode holographique numérique avec d'autres techniques

### 1.11.3 Comparaison avec d'autres méthodes

#### 1.11.3.1 Comparaison avec la Microscopie Électronique

Bien que la microscopie électronique offre une résolution extrêmement élevée, elle peut être coûteuse et nécessite une préparation d'échantillon spécifique. La méthode holographique numérique, en revanche, permet une mesure plus rapide et moins invasive des particules, avec une résolution souvent suffisante pour de nombreuses applications.

#### 1.11.3.2 Comparaison avec l'Imagerie optique

L'imagerie optique traditionnelle est limitée par la résolution des lentilles optiques, ce qui peut rendre difficile la mesure précise des particules micrométriques. La méthode holographique numérique surmonte cette limitation en utilisant des techniques de traitement numérique pour améliorer la précision des mesures.

#### 1.11.3.3 Comparaison avec la méthode de diffraction Laser

La diffraction laser est une méthode rapide et efficace pour mesurer la taille des particules, mais elle peut rencontrer des difficultés avec des particules de tailles très petites ou similaires. La méthode holographique numérique peut offrir une meilleure précision pour ces types de particules, grâce à sa capacité à analyser des hologrammes en 3D.

## 1.12. Analyse par diffraction ou spectroscopie

La diffraction de la lumière et la spectroscopie sont des méthodes analytiques essentielles pour étudier la structure et les propriétés des matériaux en observant les modifications que subit la lumière lorsqu'elle interagit avec un objet.

### 1.12.1 Diffraction de la lumière

Comme le montre la Figure 1.10, la diffraction de la lumière se produit lorsqu'un faisceau lumineux traverse un cristal ou un réseau cristallin, ce qui entraîne la déviation de la lumière selon des angles spécifiques. Ce phénomène est utilisé pour analyser la structure des matériaux cristallins, où les atomes ou les molécules sont disposés de manière régulière.

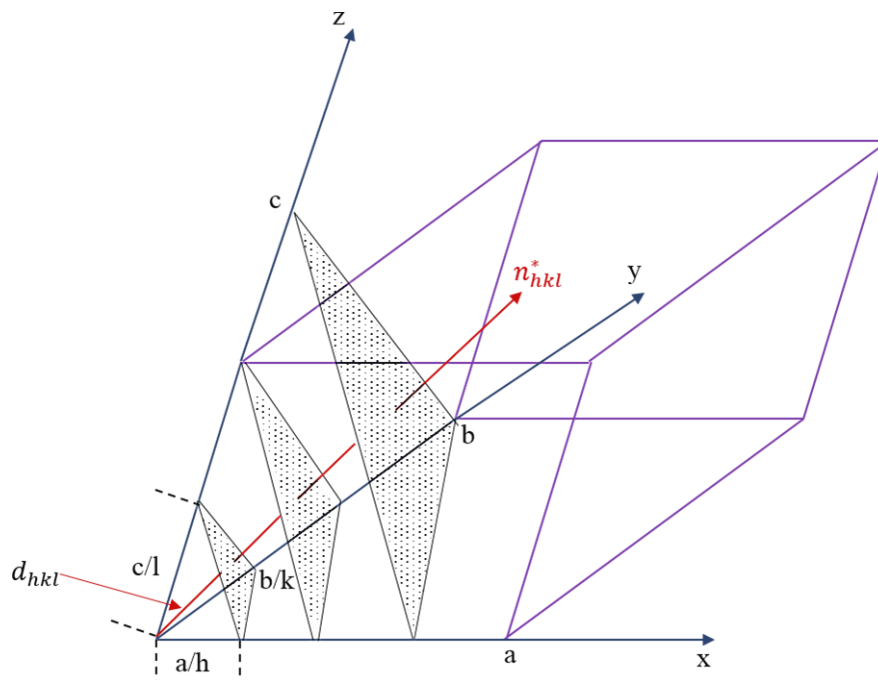


Figure 1.12 : Famille de plans réticulaires (hkl) et équidistance  $d_{hkl}$

### 1.12.2 Réseau cristallin et réseau réciproque

Les cristaux sont constitués d'un réseau régulier d'atomes, de molécules ou d'ions, organisé selon une maille élémentaire répétée dans les trois dimensions de l'espace. La structure cristalline peut être décrite à l'aide d'un réseau cristallin. Les plans réticulaires dans ce réseau sont caractérisés par les indices de Miller (hkl), qui définissent la position et l'orientation des plans dans la structure cristalline.

Le réseau réciproque est une construction mathématique qui facilite l'analyse des phénomènes de diffraction. Chaque point du réseau réciproque correspond à une famille de plans réticulaires dans le réseau direct. La loi de Bragg, qui relie l'angle de diffraction  $\theta$ , la distance entre les plans atomiques  $d_{hkl}$  et la longueur d'onde du rayonnement  $\lambda$ , s'exprime par l'équation suivante :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad 1.9$$

où  $n$  est un entier représentant l'ordre de diffraction.

Les nœuds du réseau direct peuvent être regroupés en plans réticulaires. Une famille de plans réticulaires parallèles peut être représentée par les indices de Miller (hkl). Soit une maille donnée, un plan réticulaire coupe chacun des trois axes du réseau cristallin à une distance de l'origine égale respectivement à  $a/h$ ,  $b/k$ ,  $c/l$ , où  $a$ ,  $b$ , et  $c$  sont les vecteurs de base du réseau cristallin. Pour construire le réseau réciproque, on considère les normales aux plans

réticulaires, chaque normale étant un vecteur  $\mathbf{n}^*_{hkl}$ . L'extrémité de ce vecteur définit un nœud du réseau réciproque, indexé de la même manière (hkl) que le plan correspondant dans le réseau direct. Le vecteur  $\mathbf{n}^*_{hkl}$  du réseau réciproque est défini comme suit :

$$\mathbf{n}^*_{hkl} = h\mathbf{a}^* + k\mathbf{b}^* + l\mathbf{c}^* \quad 1.10$$

Où  $\mathbf{a}^*$ ,  $\mathbf{b}^*$ , et  $\mathbf{c}^*$  sont les vecteurs de base du réseau réciproque. Le module de  $\mathbf{n}^*_{hkl}$  est inversement proportionnel à la distance interarticulaire  $d_{hkl}$ , soit :

$$|\mathbf{n}^*_{hkl}| = \frac{1}{d_{hkl}} \quad 1.11$$

Considérons une onde plane incidente de vecteur d'onde  $\vec{k} \rightarrow_0$ , se réfléchissant sur un cristal dont les plans réticulaires successifs sont séparés par une distance  $d_{hkl}$  (figure 1.12). Pour observer une intensité diffractée dans la direction  $\theta$ , il faut que les interférences entre les rayons successifs soient constructives, c'est-à-dire que le déphasage entre les rayons successifs doit être multiple de  $2\pi$ . Ceci revient à dire que la différence de marche entre deux rayons successifs (la différence de longueur de trajet) doit être un multiple de leur longueur d'onde  $\lambda$ . On a alors la relation dite « loi de Bragg » (avec n entier naturel non nul) qui est définie par :

Avec  $n=1$  dans la pratique où on utilise en général le premier ordre de la diffraction. Ainsi lors d'une expérience de diffraction, uniquement les familles de plans atomiques (hkl) satisfaisant la loi de Bragg vont diffracter. Les conditions de diffraction d'un réseau cristallin sont souvent vérifiées simplement à l'aide de la construction d'Ewald (figure 3).

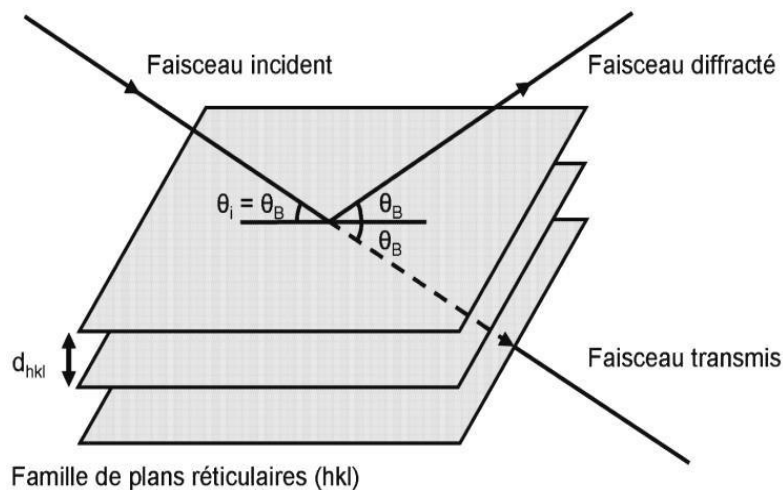


Figure 1.13: Réflexion sélective de Bragg sur une famille de plans réticulaires (hkl). Le faisceau incident faisant un angle  $\theta_i$  satisfaisant la loi de Bragg, il y a réflexion sélective sur une famille de plans réticulaires amenant à l'émergence d'un faisceau diffracté. [Exemple J. P Morniroli, LACBED 1998].

Soit une sphère de rayon  $1/\lambda$ , et le cristal diffractant placé en son centre : le centre de la sphère est l'origine du réseau direct du cristal (figure 1.12). Une famille de plan (hkl) se trouve en incidence de Bragg dans la direction  $\vec{k}$  si et seulement si le vecteur de diffusion  $\vec{k} - \vec{k}_0$  ( $\vec{k}_0$  étant la direction du faisceau incident) correspond à un vecteur du réseau réciproque  $\vec{g}_{hkl}$  ( $\vec{g}_{hkl} = \vec{k} - \vec{k}_0$ ). Le vecteur  $\vec{O}^*M$  ( $\vec{k} - \vec{k}_0$ ) est normal au plan (hkl) et a pour module :

$$|\vec{O}^*M| = \frac{2\sin\theta}{\lambda} = \frac{1}{d} \quad 1.12$$

Ainsi, on retient que, chaque fois qu'un point de la sphère coïncide avec un nœud du réseau réciproque, la famille de plans correspondante se trouve en incidence de Bragg et il y'a diffraction.

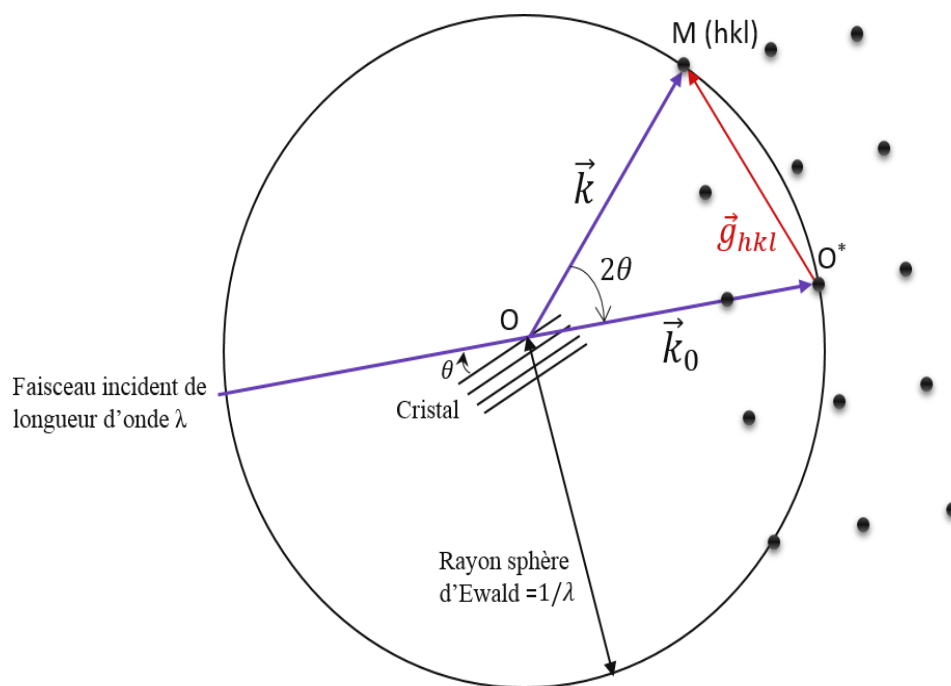


Figure 1.14: Schéma représentant la construction d'Ewald.

### 1.13 Spécificité de la diffraction des électrons

Lorsqu'un faisceau d'électrons interagit avec la matière, celle-ci émet plusieurs types de signaux ondulatoires et corpusculaires. Ces signaux se répartissent de part et d'autre de la matière. On distingue d'une part les signaux réémis du côté de la face d'entrée des électrons (comme les photons X, les électrons secondaires et rétrodiffusés), et d'autre part les signaux transmis à travers la matière (face de sortie), où les électrons sont diffusés soit élastiquement (sans perte d'énergie), soit inélastiquement (avec perte d'énergie). À chaque type de signal

correspond une technique de caractérisation spécifique qui permet d'obtenir des informations précises sur la matière. Pour les signaux réémis tels que les photons X et les électrons secondaires, des techniques de caractérisation comme la spectroscopie EDX et l'imagerie MEB sont utilisées, respectivement (Figure 1.13). Concernant les signaux transmis, les électrons diffusés élastiquement sont utilisés pour l'imagerie MET ou la diffraction électronique, tandis que les électrons diffusés inélastiquement sont exploités pour la spectroscopie de pertes d'énergie des électrons (EELS). Nous allons maintenant porter une attention particulière à la diffraction électronique.

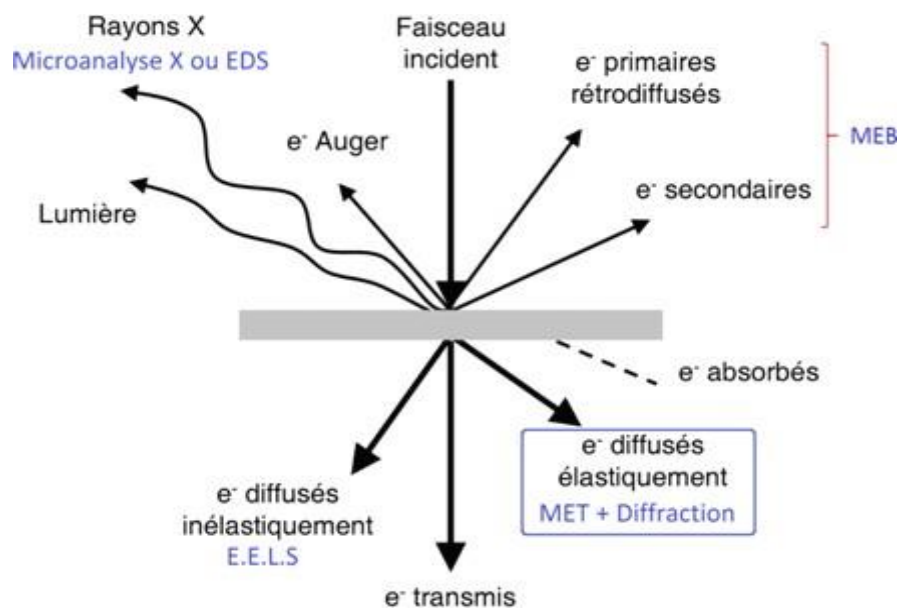


Figure 1.15: Schéma mettant en évidence les différents signaux issus de l'interaction entre Les électrons et la matière.

### 1.13.1 Diffraction par réseau

La diffraction de la lumière par un réseau est un phénomène optique qui se produit lorsque la lumière incidente rencontre un dispositif composé d'une série de fentes parallèles (réseau en transmission) ou de rayures réfléchissantes (réseau en réflexion). Les traits du réseau, régulièrement espacés, sont à l'origine d'une figure de diffraction caractéristique lorsqu'ils diffractent la lumière.

### 1.13.2 Diffraction à plusieurs fentes

Dans l'expérience de Young, qui consiste en une interférence à deux fentes, on observe sur l'écran plusieurs maximums d'intensité égale, espacés par des zones sombres dues à l'interférence destructive entre les fentes 1 et 2 (Figure 1.14). Si l'on étend l'expérience à trois fentes, des maximums principaux d'intensité maximale apparaissent au même endroit que dans l'expérience à deux fentes, mais ils sont séparés par des maximums secondaires de plus faible intensité, dus à l'interférence entre deux fentes avec la contribution de la troisième (Figure 1.15). Lorsque le nombre de fentes  $(N)$  augmente, les maximums principaux deviennent plus fins et plus intenses en raison des multiples possibilités d'interférence destructive entre les fentes. Les maximums secondaires, quant à eux, diminuent d'intensité (Figure 1.16).

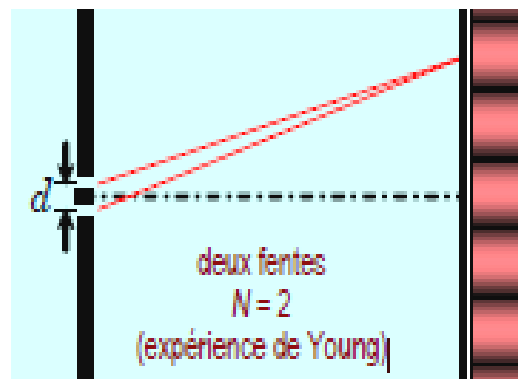


Figure 1.16: expérience de Young.

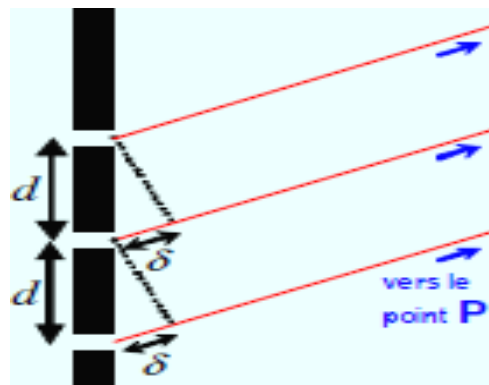


Figure 1.17: diffraction a trois fentes.

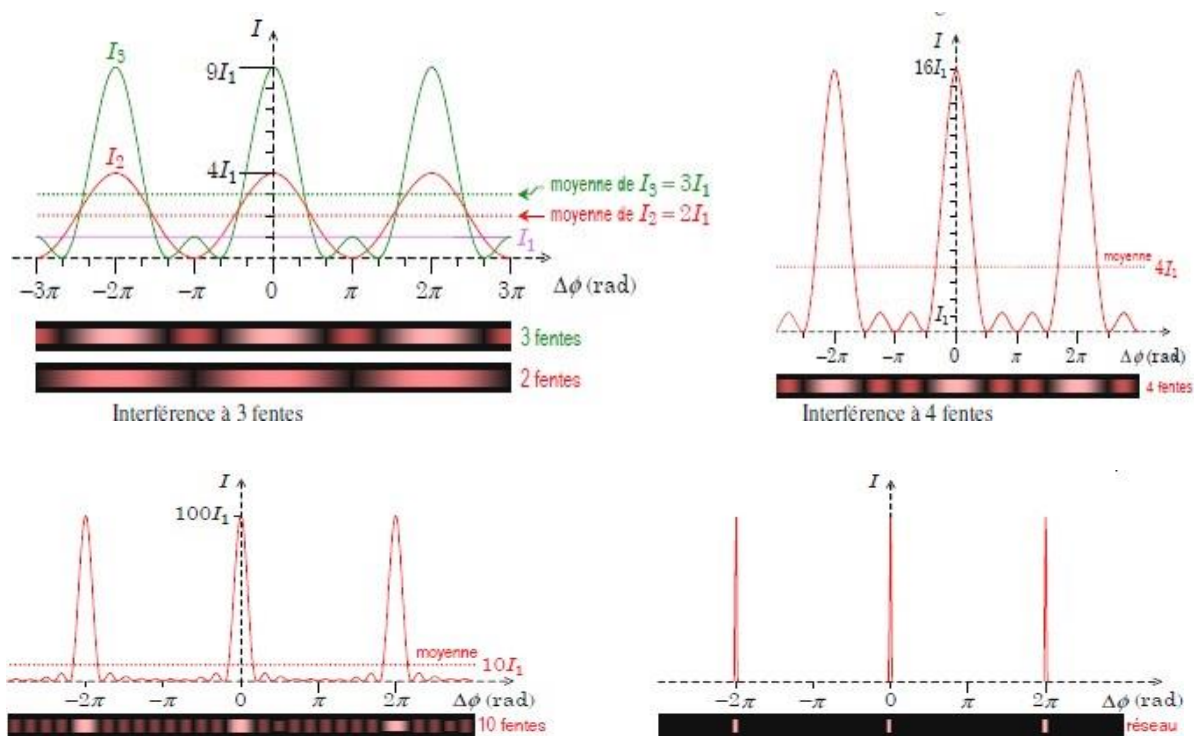


Figure 1.18: schéma sur l'interférence a 3 fentes et a 4 fentes.

### 1.13.3 Géométrie du patron d'interférence d'un réseau

La géométrie du patron d'interférence d'un réseau est similaire à celle de l'expérience de Young, mais avec un plus grand nombre de fentes. Les paramètres suivants sont utilisés pour décrire ce patron :

Où  $d$  : Distance entre deux fentes consécutives (pas du réseau) (m)

$N$  : Nombre de fentes

$\delta$  : Différence de marche de deux fentes consécutives

$L$  : Distance entre le réseau et l'écran (m)

$y$  : Position verticale sur l'écran par rapport à l'axe central (m)

$\theta$  : Angle formé à l'aide de la relation  $\tan(\theta) = y / L$

$\lambda$  : Longueur d'onde de la source (m)

$Nd$  : Taille du réseau (m)

#### Approximation dans les réseaux

Puisque la taille du réseau  $Nd$  est généralement beaucoup plus petite que la distance  $L$  entre le réseau et l'écran, tous les trajets effectués par la lumière peuvent être approximés comme parallèles. La différence de marche  $\delta$  entre deux fentes consécutives peut alors être évaluée de façon approximative :

Approximation :  $Nd \ll L$

Différence de marche :  $\approx d(\theta)$

A noter que puisque  $d$  est très petit, les angles  $\theta$  pour localiser les maximums sont très rarement petit. Ainsi, il ne faut pas utiliser l'approximation des petits angles.

### **1.14 La spectroscopie**

La spectroscopie est l'analyse de la lumière émise ou absorbée par un échantillon pour obtenir des informations sur sa composition chimique ou ses propriétés physiques. Différentes longueurs d'onde sont utilisées pour sonder divers aspects de l'objet étudié.

#### **1.14.1 Spectroscopie d'absorption**

La spectroscopie d'absorption atomique repose sur le principe de la quantification de l'énergie des atomes. Lorsqu'un électron d'un atome passe d'un niveau d'énergie à un autre, il absorbe un photon dont l'énergie correspond à la différence entre les deux niveaux. Cette énergie absorbée est donnée par la relation :  $E=h\nu$

où  $h$  est la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence du photon absorbé. Généralement, ce sont les électrons externes de l'atome qui sont concernés par ce processus.

Les photons absorbés sont caractéristiques des éléments absorbants. La quantité de photons absorbés est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, en accord avec la loi de Beer-Lambert. Cette loi exprime l'absorption en fonction de la concentration des atomes et de la longueur du trajet optique, et elle est donnée par :

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon cl$$

Où  $A$  est l'absorbance,  $I_0$  est l'intensité de la lumière incidente,  $I$  est l'intensité de la lumière transmise,  $\epsilon$  est le coefficient d'absorption molaire,  $c$  est la concentration de l'élément, et  $l$  est la longueur du trajet optique. Lorsque plusieurs éléments doivent être dosés dans un échantillon, l'analyse est réalisée pour chaque élément à une longueur d'onde spécifique correspondant à la transition électronique de l'élément ciblé. Pour chaque mesure, il est donc essentiel de sélectionner une source lumineuse adaptée à l'élément d'intérêt, afin de garantir la précision et la fiabilité des résultats.

#### **1.14.2 Spectroscopie Raman**

La spectroscopie Raman est une technique non invasive qui permet de caractériser les matériaux inorganiques et organiques. Elle se base sur la diffusion Raman, où la lumière monochromatique interagit avec un échantillon, provoquant un léger décalage en fréquence (effet Raman) qui fournit des informations sur la composition moléculaire et la structure du matériau. Les avantages de la spectroscopie Raman incluent la possibilité d'analyser des

échantillons dans différents états (gazeux, liquide, solide), la nature non destructive de la technique, et l'utilisation à distance via des fibres optiques. Cette méthode est efficace même dans des environnements difficiles comme sous haute pression, à température extrême, ou dans des environnements toxiques ou radioactifs.

### 1.14.3 Effet Raman

L'effet Raman conventionnel est observé lorsqu'une lumière monochromatique, souvent d'une source laser, éclaire un échantillon. Une petite fraction des photons est diffusée avec un changement de fréquence, ce qui correspond à l'effet Raman. Selon le décalage, on distingue la diffusion Raman Stokes (décalage vers une fréquence plus basse) et la diffusion Raman anti-Stokes (décalage vers une fréquence plus élevée). Les spectres obtenus fournissent des informations cruciales sur les modes de vibration moléculaires, leur intensité, et leur polarisation (Figure 1.17).

### 1.14.4 Effet Raman de résonance

La diffusion Raman de résonance se produit lorsque la longueur d'onde de l'onde excitatrice est proche de celle d'une transition électronique de la molécule étudiée, amplifiant ainsi l'intensité des raies Raman. Cela permet d'obtenir des informations détaillées non seulement sur l'état fondamental de la molécule, mais aussi sur son état excité (Figure 1.17).

#### 1.14.4.1 Les nombreux domaines d'applications offerts par le Raman

- Le spectre caractéristique de l'échantillon peut en général être obtenu à partir de n'importe quel état de l'échantillon : gazeux, liquide ou solide.
- Il s'agit d'une technique non destructive qui se satisfait d'échantillons de très petite taille (de l'ordre du micromètre cube) et qui en outre peut être utilisée à distance par l'intermédiaire de fibres optiques.
- Par ailleurs, la gamme actuelle des rayonnements d'excitations permet le plus souvent de s'affranchir du problème de la fluorescence et il est souvent possible de travailler sans préparation particulière de l'échantillon.
- Cette technique est donc susceptible d'applications nombreuses, même dans des milieux peu accessibles (haute pression, température extrême, environnement toxique ou radioactif).

### 1.14.5 Différents effets Raman

Les différents effets de Raman sont cités ci-dessous.

### 1.14.5.1 Effet Raman conventionnel

Pour observer l'effet Raman, on éclaire un milieu matériel, contenu dans un récipient transparent, par une lumière monochromatique, cette radiation est appelée radiation excitatrice et provient, dans la majorité des cas, d'une source laser.

Une fraction des photons constituant cette radiation est réfléchié ou absorbée, et une fraction bien plus faible est diffusée dans toutes les directions de l'espace. Parmi les photons diffusés, la plupart ont la même fréquence  $\nu_0$  que le rayonnement excitateur. Ce phénomène de diffusion sans changement de fréquence est la diffusion Rayleigh.

Pour moins d'un millièème des photons diffusés, un changement de fréquence est observé et cela correspond à l'effet Raman. Soit  $\nu_0$  la fréquence des photons ainsi diffusés, deux cas peuvent se présenter :

$$\begin{aligned}\nu_d &= \nu_0 - \nu_v, \text{ c'est la diffusion Raman Stokes ;} \\ \nu_d &= \nu_0 + \nu_v, \text{ c'est la diffusion Raman anti-Stokes.}\end{aligned}$$

Dans les deux cas, les écarts de fréquence  $\nu_v$  sont égaux aux fréquences de vibrations actives en Raman de la molécule considérée.

Des spectres Raman, on peut tirer diverses informations d'un intérêt majeur pour un utilisateur. Chaque raie ou bande peut être caractérisée par :

- sa position dans le spectre, que l'on peut relier à la fréquence d'un mode de vibration.
- son intensité, liée au nombre de molécules diffusantes ainsi qu'au mode de vibration considéré.
- son état de polarisation, qui renseigne sur la symétrie du mode correspondant.
- son profil, qui permet l'étude du mouvement d'interactions en phases condensées ou certaines déterminations de températures en phases gazeuse.

### 1.14.5.2 Effet Raman de résonance

La diffusion Raman de résonance est un cas particulier de l'effet Raman qui intervient lorsque la longueur d'onde de l'onde excitatrice est voisine de celle d'une transition électronique de la molécule étudiée. L'état intermédiaire virtuel dans le processus Raman peut être décrit comme une combinaison linéaire de tous les états électroniques de la molécule, chaque état étant représenté par un terme pondéré par un facteur d'autant plus grand que l'énergie de cet état est proche de l'énergie excitatrice. En Raman conventionnel (Figure 1.17a), tous les facteurs de pondération sont faibles et de grandeur comparable. Le calcul de l'intensité des raies de diffusion résulte donc d'une sommation sur tous les états électroniques excités et n'est sensible à aucun d'eux en particulier. Les spectres ne renseignent que sur les propriétés de l'état électronique fondamental. En revanche, lorsque la radiation excitatrice est proche (en pré résonance, Figure 1.17c) ou en résonance (Figure 1.17d et 1.17c) le terme de

pondération correspondant devient très important et les autres termes de la sommation négligeables. L'état intermédiaire dans le processus Raman peut alors être assimilé à l'état excité résonnant. Les spectres fournissent donc des renseignements précis, non seulement sur les propriétés de l'état fondamental, mais aussi sur celles de l'état excité.

Il s'avère particulièrement instructif pour l'analyse des états électroniques excités de tracer, pour chaque mode de vibration, le profil d'excitation, c'est-à-dire la courbe expérimentale qui représente l'évolution de l'intensité Raman en fonction de la fréquence excitatrice.

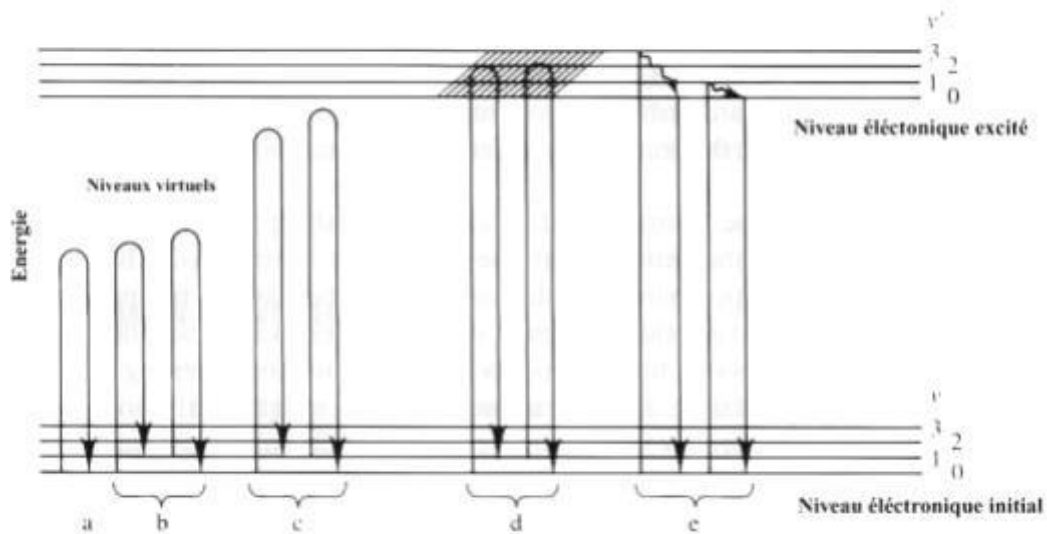


Figure.1.19 : Mécanisme de différents modes d'émission : (a) Rayleigh, (b) non-résonance Raman, (c) pré résonance Raman, (d) résonance Raman et (e) résonance fluorescence ; D'après Turrell & Corset (1996)

### **1.15 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques méthodes de caractérisation des microparticules et leurs applications potentielles, avec un accent particulier sur les techniques expérimentales et les dispositifs de mesure associés. Nous avons exploré les principes de fonctionnement des jauges de contraintes, notamment leurs divers types, tels que les jauges piézorésistives et métalliques, en mettant en lumière leurs caractéristiques, avantages et limitations. Les dispositifs expérimentaux décrits, tels que le montage d'acquisition et les méthodes de soustraction de fond, ont été détaillés pour montrer comment ils permettent une analyse précise des données et une interprétation fiable des mesures. En outre, la définition et le traitement des images numériques ont été abordés pour illustrer l'importance de l'optimisation des images dans le processus d'analyse. La compréhension des jauges de contraintes, ainsi que de leur fonctionnement et de leurs applications industrielles, est essentielle pour l'interprétation correcte des données mesurées et pour la mise en œuvre efficace de ces technologies dans divers contextes d'application. Les jauges métalliques et semi-conductrices, en particulier, offrent des solutions adaptées à une gamme étendue de mesures et de conditions environnementales, soulignant leur importance dans la recherche et l'industrie.

Ce chapitre établit ainsi les bases nécessaires pour les sections suivantes, qui approfondiront les méthodes spécifiques de traitement des données et les applications pratiques des technologies abordées. L'acquisition de données précises et la compréhension des principes sous-jacents sont cruciales pour avancer dans l'optimisation des systèmes de mesure et pour développer des solutions innovantes dans le domaine des microparticules.

# **Chapitre 2**

## **Fondements théoriques de l'interférométrie holographique**

### **2.1 Introduction**

L'holographie est une technique avancée d'imagerie optique qui a transformé notre capacité à capturer et analyser des informations tridimensionnelles. Alors que le premier chapitre a fourni un aperçu général des bases théoriques de l'holographie et des applications des hologrammes, ce chapitre se concentre plus en détail sur les principes fondamentaux de l'interférométrie holographique.

L'interférométrie holographique repose sur l'enregistrement et la reconstruction d'hologrammes pour obtenir des images tridimensionnelles précises d'objets. Ce processus implique la création d'interférences lumineuses, la capture des motifs d'interférence, et la restitution de ces motifs pour reconstituer l'image originale. Dans ce chapitre, nous explorerons les aspects théoriques essentiels de cette technique, en mettant l'accent sur le principe de base de l'holographie, le processus d'enregistrement et de reconstruction, ainsi que les avantages spécifiques de l'interférométrie pour la mesure des microparticules.

Nous commencerons par un examen détaillé du principe de base de l'holographie, suivi d'une discussion sur le processus d'enregistrement des hologrammes, qui constitue la première étape cruciale pour obtenir des images holographiques. Ensuite, nous aborderons les méthodes de reconstruction des images holographiques, tant optiques que numériques, en mettant en lumière les techniques modernes telles que la reconstruction par transformée de Fourier. Enfin, nous discuterons des avantages de l'interférométrie holographique pour l'analyse des microparticules, un domaine où cette technologie offre des capacités de mesure uniques.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des principes qui sous-tendent l'interférométrie holographique, afin de mieux appréhender les systèmes de mesure automatisés et les méthodes de caractérisation des microparticules qui seront abordés dans les chapitres suivants.

### **2.2 Principe de base de l'holographie**

L'holographie est une technique d'imagerie qui utilise l'optique pour enregistrer l'information relative à la forme d'un objet sur un support bidimensionnel (la plaque holographique ou « hologramme ») et restituer l'image de cet objet en trois dimensions. Cette technique permet de reconstruire non seulement l'amplitude réelle de la lumière issue de l'objet, mais aussi sa phase. Ainsi, lorsqu'on observe l'image restituée en éclairant un hologramme, on a

l'impression de voir la forme réelle de cet objet dans son intégralité. Seules les couleurs originales peuvent ne pas être respectées.

Comme le montre la figure 2.1, le principe de réalisation d'un hologramme consiste à faire interférer deux faisceaux cohérents sur une plaque photographique. Le premier faisceau, appelé onde de référence, est envoyé directement sur la plaque. Le second, appelé onde objet, est dirigé sur l'objet à photographier, lequel diffuse cette lumière vers la plaque photographique [8].

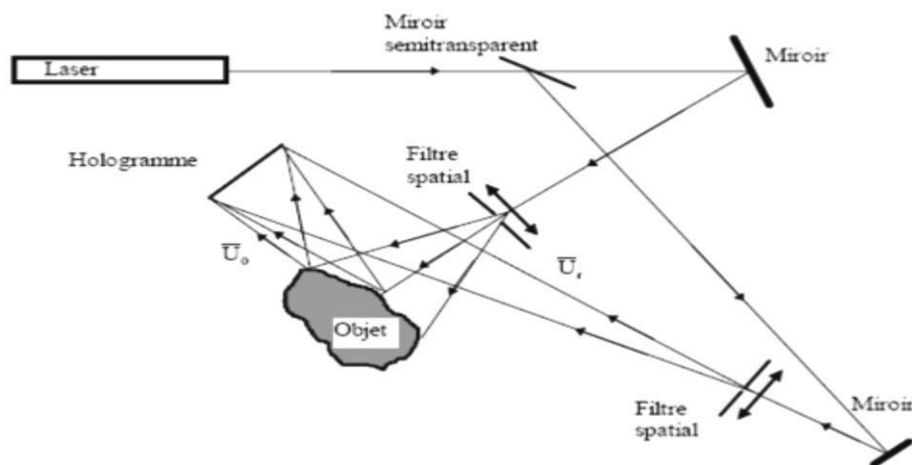


Figure 2.1 : Principe d'enregistrement d'un hologramme.

En général, l'éclairage utilisé est une source laser qui possède les propriétés adéquates pour la création d'interférences lumineuses de bon contraste, à savoir :

- Cohérence spatiale (cohérence directionnelle): le laser agit comme une source ponctuelle, et son faisceau peut être focalisé en un spot lumineux très petit (tache de diffraction).
- Cohérence temporelle (cohérence en phase): le laser émet un rayonnement quasi-monochromatique. Plus le rayonnement est monochromatique, plus la cohérence est grande, permettant ainsi de capturer des objets de grandes dimensions.

Pour restituer l'hologramme, on éclaire la plaque avec un laser sous le même angle que celui du faisceau de référence (figure 2.2). L'image de l'objet holographié est restituée dans l'espace en trois dimensions, sous la forme d'un volume de lumière.

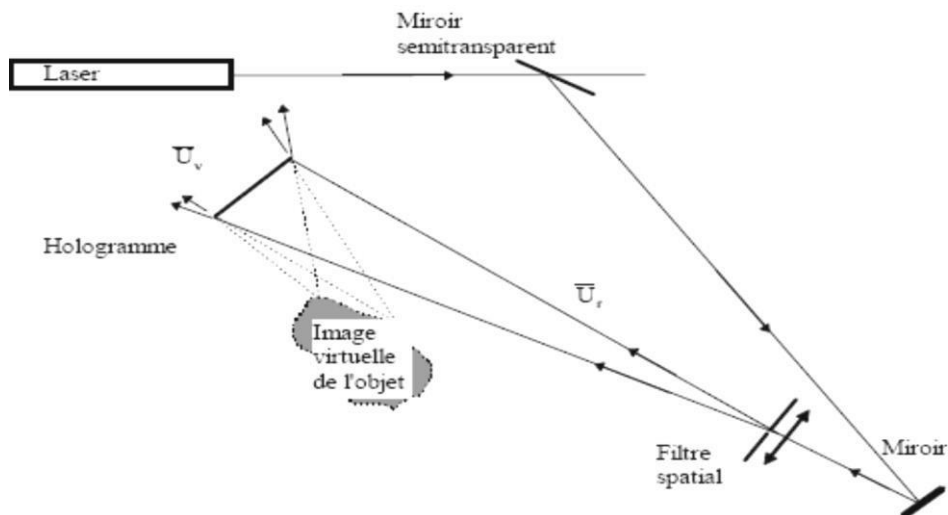


Figure 2.2 : Restitution d'un Hologramme.

La superposition des deux faisceaux crée une image d'interférence porteuse des informations concernant la forme de l'objet et sa position dans l'espace, c'est-à-dire l'amplitude et la phase de l'onde objet, tel représenté par la figure 2.3. En général, l'onde de restitution (ou de lecture) est identique à l'onde de référence utilisée lors de l'enregistrement, ce qui permet de satisfaire aux conditions de stigmatisme de l'image holographique. L'expression générale de l'intensité d'un signal interférométrique en un point donné, défini par ses coordonnées cartésiennes  $(x, y)$  sur le plan de l'interférogramme, est donnée par :

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \Delta\varphi(x, y) \quad 2-1$$

Où :  $a(x, y)$  désigne l'intensité de fond et  $b(x, y)$  la visibilité de franges.

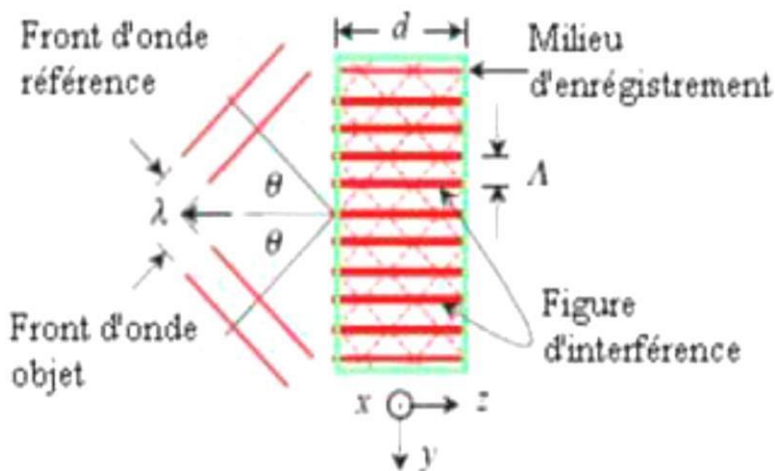


Figure 2.3 : Figure d'interférence produite par la superposition de deux ondes planes.

Dans la pratique, ces paramètres ( $a(x,y)$  et  $b(x,y)$ ) ne sont pas toujours connus en raison de plusieurs facteurs :

- L'objet est illuminé par un faisceau laser amplifié ayant un profil gaussien, ce qui peut provoquer une instabilité dans la luminosité de l'hologramme.
- L'interférogramme est affecté par un bruit de haute fréquence.
- La surface de l'objet peut avoir une réflectivité variable, influençant ainsi l'éclat et la visibilité de l'interférogramme.
- L'enregistrement et la transmission électroniques des interférogrammes génèrent du bruit additionnel.

L'équation (2-1) décrit la relation entre l'intensité et la phase de l'interférence, qui contient les informations sur la quantité à mesurer (déplacement de l'objet, changement d'indice de réfraction, etc.).

### **2.3 Formation d'une image holographique**

Une fois que l'hologramme a été enregistré et stocké dans la mémoire de l'ordinateur, il peut être reconstruit pour permettre l'observation et l'exploitation de l'image de l'objet enregistré. À cette étape, le processus de restitution de l'holographie classique est simulé. Dans l'holographie classique, l'hologramme est exposé au faisceau de référence, ce qui permet, grâce au phénomène de diffraction, de récupérer l'image de l'objet enregistré dans les ordres +1 et -1. L'ordre 0, quant à lui, présente une distribution d'éclairement dépourvue d'information de phase, comme illustré dans la Figure 2.4. Le phénomène de diffraction se manifeste lorsque les ondes, qu'elles soient lumineuses ou d'une autre nature, rencontrent des obstacles ou des ouvertures dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde. Cela entraîne des perturbations dans la propagation des ondes. En holographie, l'hologramme enregistré prend la forme d'un motif de franges d'interférence, créant ainsi un réseau de diffraction. Par conséquent, lorsque l'hologramme est éclairé par l'onde de référence, il provoque la diffraction de la lumière. Cette diffraction permet d'extraire l'information encodée dans l'hologramme en analysant les différents ordres de diffraction. Cette analyse aboutit à la reconstitution de l'image originale de l'objet enregistré, permettant ainsi de visualiser et d'exploiter l'image en trois dimensions.

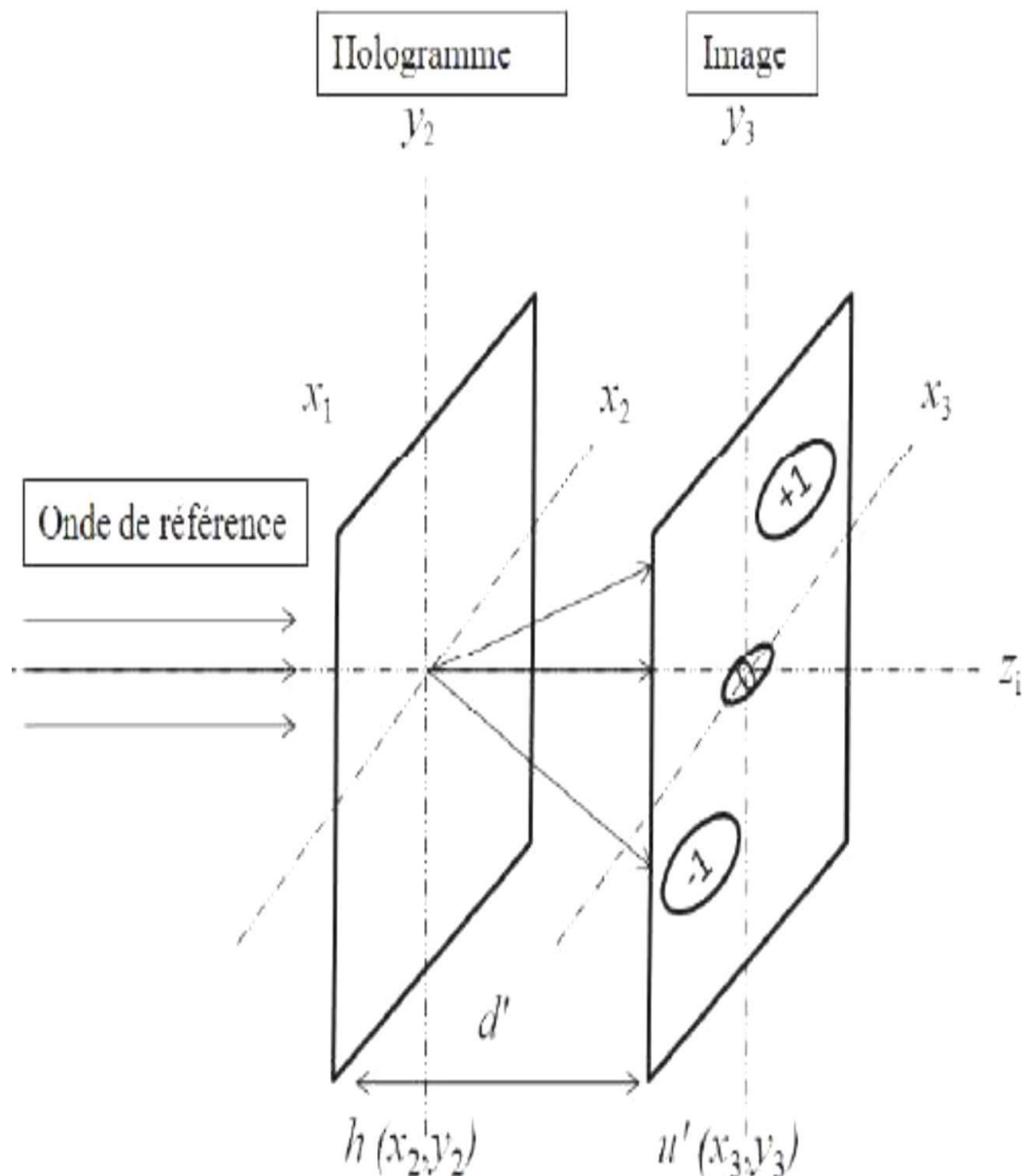


Figure 2.4 : Principe de reconstruction de l'hologramme.

## 2.4 Reconstruction numérique d'un hologramme

Les premières expériences de reconstruction numérique des hologrammes optiques datent des années 1960-1970. À cette époque, les dispositifs d'analyse disponibles pour numériser les hologrammes avaient des résolutions faibles, ce qui rendait nécessaire un grossissement optique des hologrammes pour les adapter à la résolution des dispositifs de balayage. Figure 2.5 montre l'un des premiers hologrammes enregistrés avec son image reconstruite. Avec l'apparition des caméras CCD, il est devenu possible d'effectuer l'enregistrement d'un

hologramme directement sous forme numérique. Dans les premières expériences utilisant les caméras CCD, les hologrammes étaient enregistrés en configuration hors-axe, selon la méthode **Leith-Upatnieks**.

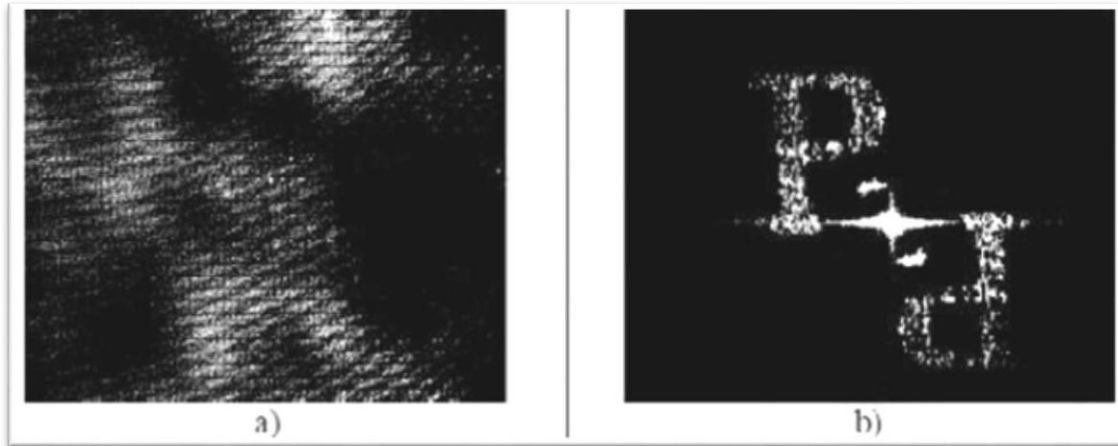


Figure 2.5 : Premiers hologrammes numériques reconstruits avec un ordinateur  
a) Hologramme test optique, enregistré électroniquement avec une caméra vidicon TV de 256x256 pixels, quantifiés à 8 niveaux de gris. b) Image numérique reconstruite à partir de cet hologramme avec un ordinateur PDP-6.

### **2.5 Reconstruction par transformée de Fourier**

La reconstruction par la méthode de Fourier nécessite une onde de reconstruction sphérique divergente provenant d'une source ponctuelle positionnée au niveau du plan objet. L'onde de référence sphérique divergente **Ers (Xh ,Yh)** peut être exprimée par :

$$(Xh, Yh) = ars \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda d} (Xh^2 + Yh^2) \right]$$

Comme illustré dans la Figure 2.6, cette configuration est souvent appelée holographie de Fourier sans lentille.

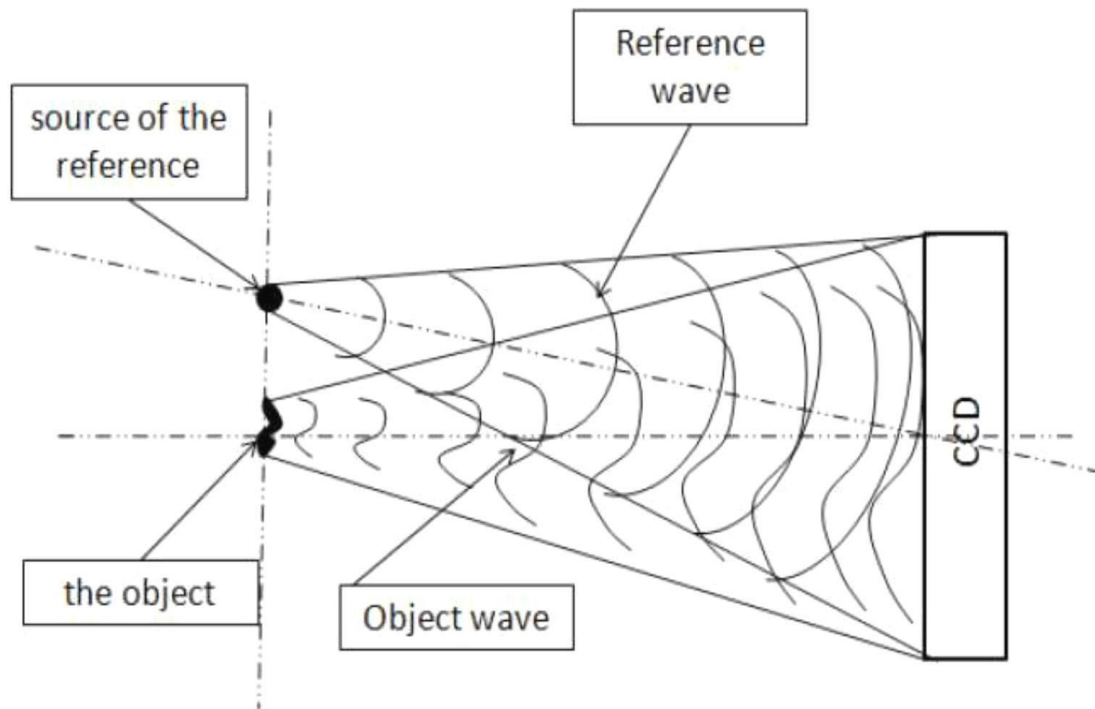


Figure 2.6 : Configuration de Fourier (holographie de Fourier sans lentille).

## **2.6 Les avantages de l'interférométrie holographique pour la mesure des microparticules**

Les hologrammes sont idéaux pour diverses applications, y compris les présentations, les spectacles, les événements, ainsi que pour l'analyse des microparticules. Ils offrent un impact visuel et émotionnel fort en créant une expérience immersive et réaliste. Les principaux avantages de l'holographie pour la mesure des microparticules sont les suivants :

- Plages de mesure (0,8 nm - 6500 nm)
- Précision
- Résolution (plus la résolution est élevée, plus l'appareil est précis)
- Exactitude
- Efficacité du filtre
- Mesure des microparticules en temps réel
- Efficacité dans les mesures de lutte contre la pollution

### **2.7 Conclusion**

Ce chapitre a présenté les fondements de l'holographie, en détaillant les processus d'enregistrement et de restitution des hologrammes, ainsi que les techniques de reconstruction, comme la méthode de Fourier. Nous avons également exploré les avantages distincts de l'interférométrie holographique pour la mesure des microparticules, soulignant sa capacité à fournir des mesures précises et en temps réel. L'holographie se révèle ainsi être un outil essentiel dans l'analyse des microparticules, alliant précision, résolution et efficacité.

# **Chapitre 3**

## **Conception du système de mesure automatisé**

### 3.1 Introduction

Le développement d'un système de mesure automatisé par interférométrie holographique représente une avancée significative dans le domaine de l'analyse des microparticules. Ce chapitre se concentre sur la conception détaillée de ce système novateur, visant à répondre aux exigences spécifiques de précision, de résolution et de facilité d'utilisation nécessaires pour une analyse exhaustive des microparticules en temps réel et moyennée.

### 3.2 Configuration optique de l'interférométrie holographique

L'enregistrement d'un hologramme peut être effectué selon différentes configurations qui, pour certaines, s'éloignent du principe de l'holographie mais conservent une forte ressemblance avec cette dernière en ce qui concerne l'enregistrement du motif interférométrique. Il est souvent fait usage d'une lentille convergente ou divergente interposée entre l'objet et la caméra CCD. Ces configurations à but métrologique permettent la quantification de champs de déplacements statiques ou dynamiques.

#### 3.2.1 Holographie numérique de Fresnel

La diffraction avec les approximations de Fresnel nécessite de prendre en considération la distance finie séparant l'objet du support d'enregistrement. Figure 3.1 décrit le dispositif d'enregistrement. L'onde de référence est plane et peut être dans l'axe de l'onde objet pour la configuration 'inline' ou faire un angle avec cette dernière en configuration 'off-axis'. Ce dispositif est le plus répandu pour l'enregistrement numérique de motifs interférentiels. La distance objet-matrice CCD doit respecter les conditions de Fresnel. La distance objet-matrice CCD doit respecter les conditions de Fresnel.

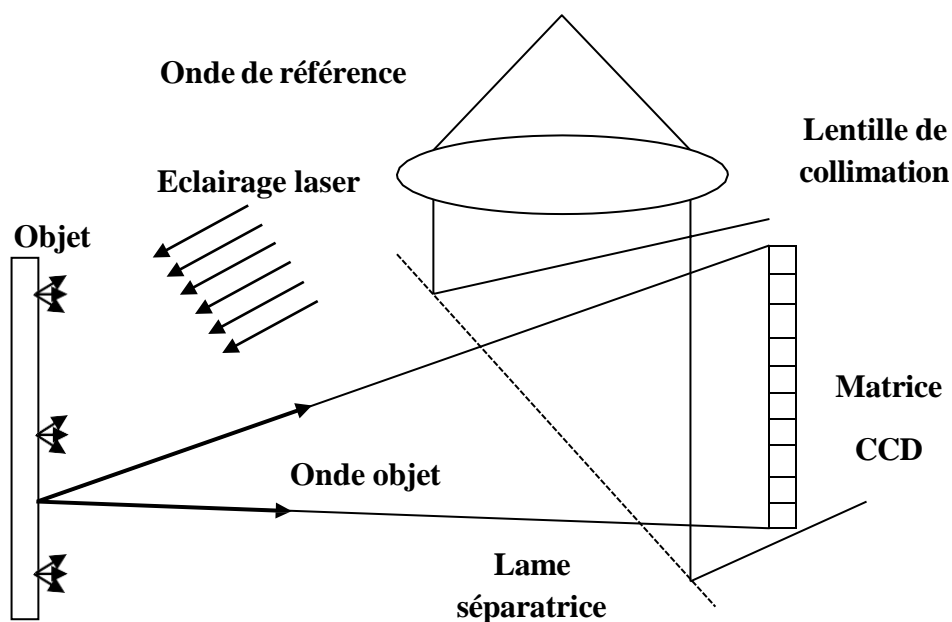


Figure 3.1 : Dispositif d'enregistrement numérique de Fresnel.

### 3.2.2 Holographie numérique de Fraunhofer

Le dispositif d'enregistrement, représenté par la Figure 3.2, place l'objet dans le plan focal d'une lentille convergente. La lentille a pour rôle de collimateur de faisceau diffracté par l'objet. Cette configuration permet de compenser le terme de phase quadratique modulant la transmittance dans l'intégrale. Ainsi, la distance effective entre l'objet et le plan d'enregistrement est infinie relativement aux ouvertures objet et CCD. Cette configuration correspond aux conditions de Fraunhofer. Généralement, l'hologramme est qualifié d'hologramme de Fourier.

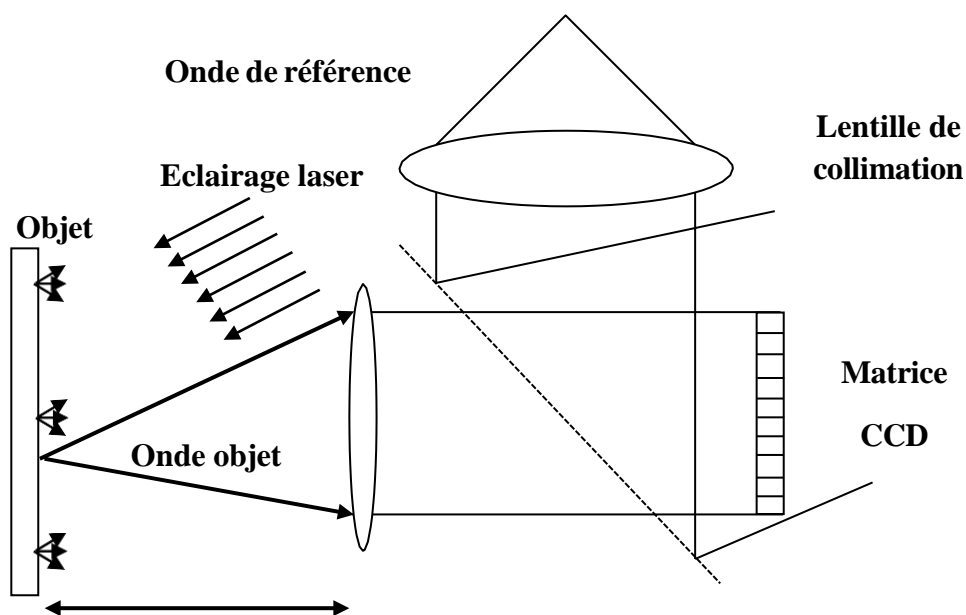


Figure 3.2: Dispositif d'enregistrement numérique de Fraunhofer

## 3.3 Sélection des sources de lumière cohérente

Il existe deux notions de cohérence : la cohérence spatiale et la cohérence temporelle. Ces deux formes de cohérence sont essentielles pour réaliser des hologrammes.

### 3.3.1 Cohérence spatiale

Imaginez que vous essayez de répéter l'expérience d'interférence des fentes de Young. Pour éclairer simultanément les deux fentes, vous devez utiliser une source ponctuelle. Pourquoi ? Si vous tentez de remplacer la source ponctuelle par une source ayant une dimension finie appréciable, vous n'obtiendrez plus aucune frange d'interférence. Cela s'explique par le fait qu'à l'intérieur de la source, ce ne sont pas tous les atomes qui émettent de la lumière en

même temps. Comme les atomes n'ont aucune relation de phase entre eux, l'émission de lumière est dite incohérente spatialement, ce qui ne permet pas d'obtenir un unique front d'onde d'amplitude et de phase bien définis à la sortie. On peut également montrer que les franges d'interférences obtenues à l'aide d'un interféromètre de Michelson disparaissent lorsqu'on utilise une source qui n'est plus ponctuelle.

### 3.3.2 Cohérence temporelle

Nous savons que lorsque les atomes émettent de la lumière, ils le font sous forme de trains d'ondes. Il y a une relation qui existe entre la durée de ces trains d'ondes et leur composition spectrale. Plus un train d'onde est long, plus le domaine spectral couvert est restreint et inversement. Pour bien comprendre cette notion de cohérence spatiale, utilisons une fois de plus l'interféromètre de Michelson. Si les deux faisceaux qui interfèrent ont subi une différence de parcours optique égale à  $2e$ , et que l'étendue des trains d'ondes est plus grande que  $2e$ , alors la superposition des ondes est possible et il y aura production du phénomène d'interférence. Par contre, si  $2e$  est largement supérieure à l'étendue des trains d'ondes, alors ces derniers se retrouvent l'un derrière l'autre et n'atteindront pas l'écran au même moment. Il ne pourra donc plus y avoir d'interférence. Il y a cependant des trains d'ondes qui se recouvrent à l'écran, mais ceux-ci ne proviennent pas du même train d'onde qui s'est fait divisé en deux par la séparatrice. Ils proviennent d'émissions qui n'ont pas eu lieu au même instant. Cela se produit lorsque l'on utilise une source ordinaire et que la différence de parcours optique  $2e$  est grande. Comme l'émission de trains d'ondes par les atomes est aléatoire, il n'y aura aucune relation de phase entre les interférences produites par des trains d'ondes émis à des instants différents. Ceci fait qu'en moyenne nous ne pouvons observer d'interférence lorsque  $2e$  est supérieur à la longueur de cohérence de la source.

## 3.4 Techniques de traitement numérique des images holographiques

Il existe différentes techniques numériques des images holographiques telles citées ci-après [9].

### 3.4.1 Interférométrie holographique par double exposition

La technique est similaire à celle utilisée pour réaliser un hologramme simple. On effectue une première exposition avec l'objet dans l'état 1, puis une seconde exposition sur la même plaque avec l'objet dans l'état 2. Après développement, on obtient une plaque contenant la somme des deux hologrammes. À la restitution, on obtient la superposition de deux ondes issues de l'objet dans les états 1 et 2. Ces deux ondes interfèrent et les franges d'interférences observées traduisent la modification subie par l'objet. Les franges sont des lignes d'iso-amplitude de déplacement. Ces franges donnent en premier lieu une information qualitative sur les déplacements survenus. Un traitement informatique adéquat permet une analyse

quantitative par numérisation de l'image avec une caméra vidéo ou numérique. La méthode permet de détecter et de mesurer des variations de phase survenues entre les deux expositions.

**Limites du procédé :** les principales limitations sont :

1. - L'amplitude du déplacement doit entraîner un nombre de franges résolubles.
2. - L'état de surface de l'objet ne doit pas se modifier d'une exposition à l'autre car le contraste des franges baissera lorsque la modification augmentera.
3. - Le montage holographique, l'objet et l'environnement doivent être stables pendant la durée de chaque pose pour que chaque hologramme correspondant soit de bonne qualité.
- 4.

### 3.4.2 Dispositif expérimental

La configuration expérimentale typique est du type hors axe. Le faisceau objet et le faisceau référence ne sont pas confondus, le dispositif d'enregistrement hors axe est représenté par la Figure 3.3. La source lumineuse doit être cohérente spatialement et temporellement, sauf si l'on peut assurer l'égalité parfaite entre les chemins optiques objet et référence. On peut utiliser un laser impulsif pour l'enregistrement, ce qui permet d'obtenir des retards temporels très courts pour étudier des objets sous sollicitation dynamique. La durée de chaque exposition est la durée de l'impulsion laser. La figure 3.4 montre le principe de reconstruction des deux hologrammes en double exposition. Le laser de reconstruction peut être continu de même longueur d'onde que le laser d'enregistrement. L'observateur peut visualiser directement avec son œil l'objet reconstruit et les franges d'interférences qui modulent son amplitude. Cependant, en vue d'une exploitation quantitative on remplace l'observation visuelle par une observation avec caméra ou appareil photo. Il suffit de placer la visée de l'objectif vers l'ordre +1 et de faire la mise au point sur l'objet.

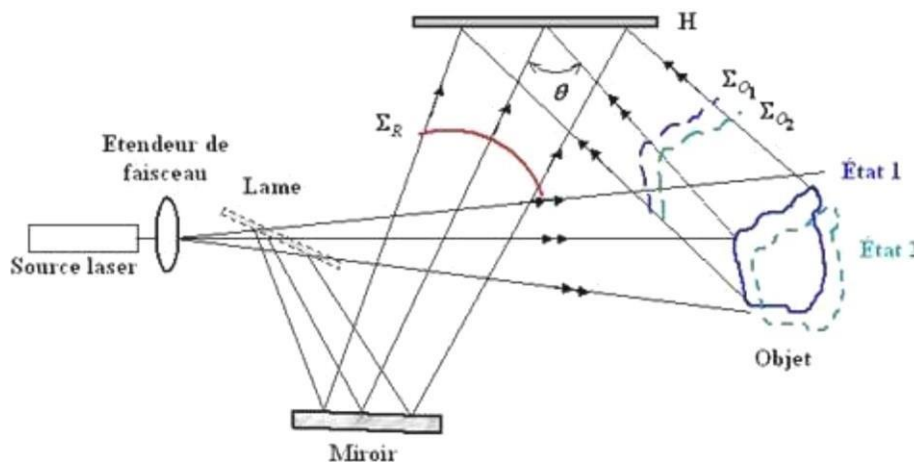


Figure 3.3 : Enregistrement d'hologrammes en double exposition.

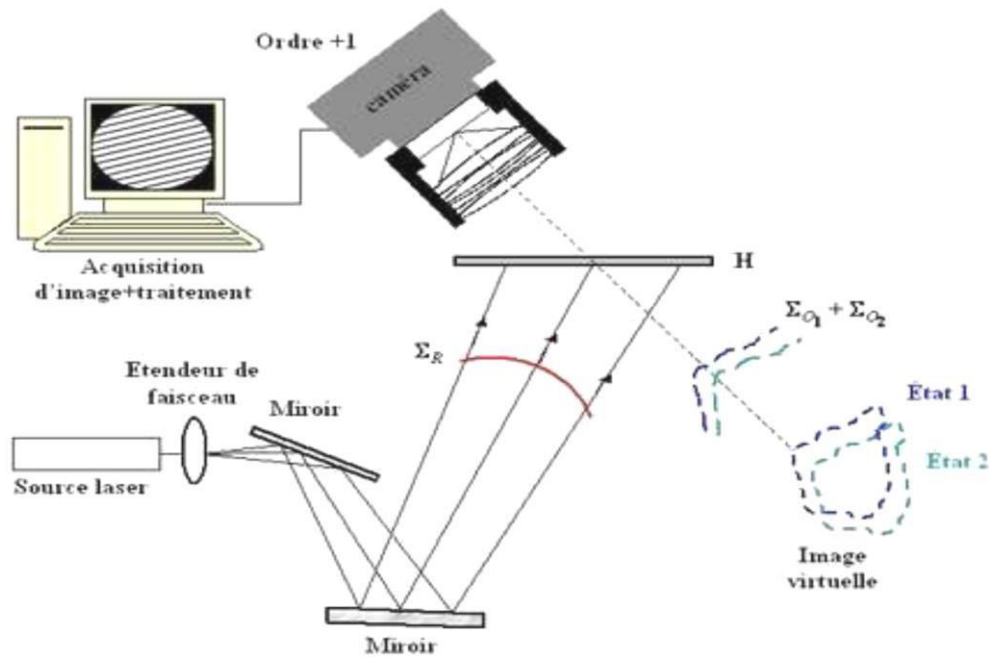


Figure 3.4: Visualisation d'hologrammes en double exposition.

Cette technique est appliquée en contrôle non destructif, en analyse de contraintes mécaniques thermiques ou pneumatiques d'un objet industriel et également en analyse de défauts dans l'objet tels que défauts de collage ou fissures dans les structures. La figure 3.5 montre un hologramme double exposition d'un assemblage mécanique en aluminium soumis à une force appliquée sur son panneau arrière. La vue montre le haut de l'assemblage. Les franges d'interférences visualisées sur le panneau sont interprétées comme étant des lignes d'iso-déplacement de la structure. La forme symétrique des franges montre que le panneau ne subit pas de déformation fortement anisotrope.

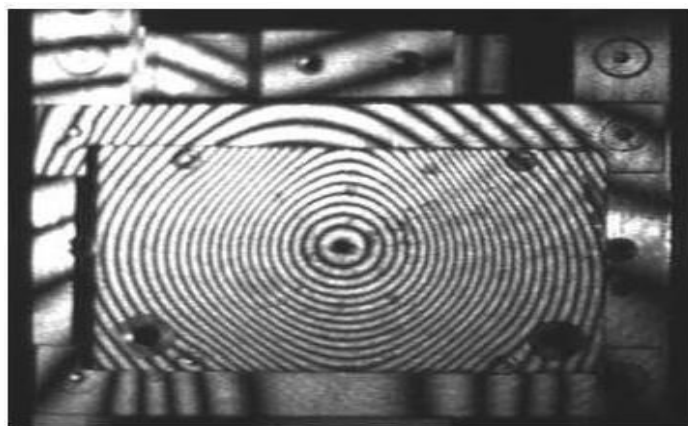


Figure 3.5 : Exemple d'hologramme en double exposition.

### **3.5 Interférométrie holographique en temps réel**

Avec un laser continu, on enregistre l'hologramme d'un objet au repos. Après développement du support photosensible, celui-ci est remplacé avec une précision d'une longueur d'onde dans le montage. Ensuite, on éclaire simultanément l'hologramme avec le faisceau référence et l'objet avec le faisceau objet. On observe à travers l'hologramme :

- L'objet éclairé ;
- L'image holographique de l'objet.

Dans l'ordre +1, des interférences se produisent entre l'onde diffractée dans l'ordre +1 et l'onde issue de l'objet dans son état actuel. Si l'objet se déplace ou se déforme, des franges d'interférences apparaissent. Ces franges peuvent être suivies en temps réel avec l'œil ou une caméra rapide si l'objet évolue trop rapidement.

#### **-Limites du procédé :**

La principale limite de cette technique réside dans la nécessité de replacer le support photosensible avec une haute précision. Un décalage latéral dans le repositionnement peut entraîner des franges parasites ou la visualisation de deux objets décalés spatialement si le décalage est significatif. Pour éviter ce problème, on peut utiliser des films thermoplastiques à développement rapide sur place. Cependant, les limitations sont similaires à celles rencontrées avec la double exposition.

#### **-Dispositif expérimental :**

Le dispositif expérimental est similaire à celui utilisé pour l'enregistrement d'hologrammes en double exposition. La source lumineuse doit être cohérente spatialement et temporellement, sauf si l'on peut garantir l'égalité parfaite entre les chemins optiques objet et référence. Un laser impulsionnel peut également être utilisé pour obtenir des temps de pose très courts. La Figure 3.6 illustre le principe de la méthode en temps réel. On éclaire simultanément l'hologramme avec le faisceau référence et l'objet avec le faisceau objet. Le faisceau référence diffracte sur l'hologramme et reconstruit l'objet enregistré précédemment. En même temps, le faisceau objet éclaire l'objet réel, qui interfère avec l'onde virtuelle reconstruite par diffraction. L'observateur peut visualiser directement l'objet reconstruit et les franges d'interférences qui modulent son amplitude. Pour une exploitation quantitative, on remplace l'observation visuelle par une caméra ou un appareil photographique, en ajustant la visée de l'objectif vers l'ordre +1 (figure 3.7).

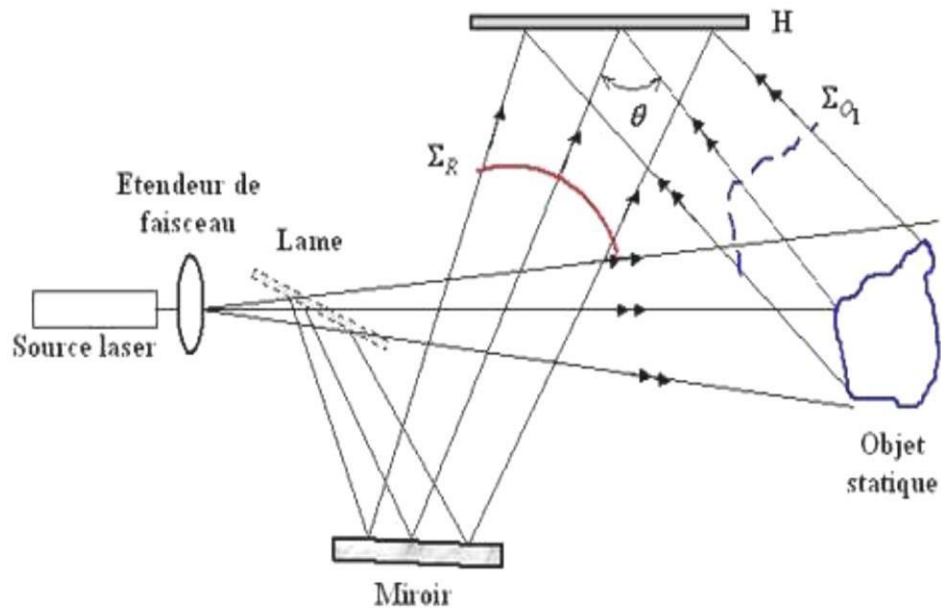


Figure 3.6 : Enregistrement d'un hologramme en temps réel.

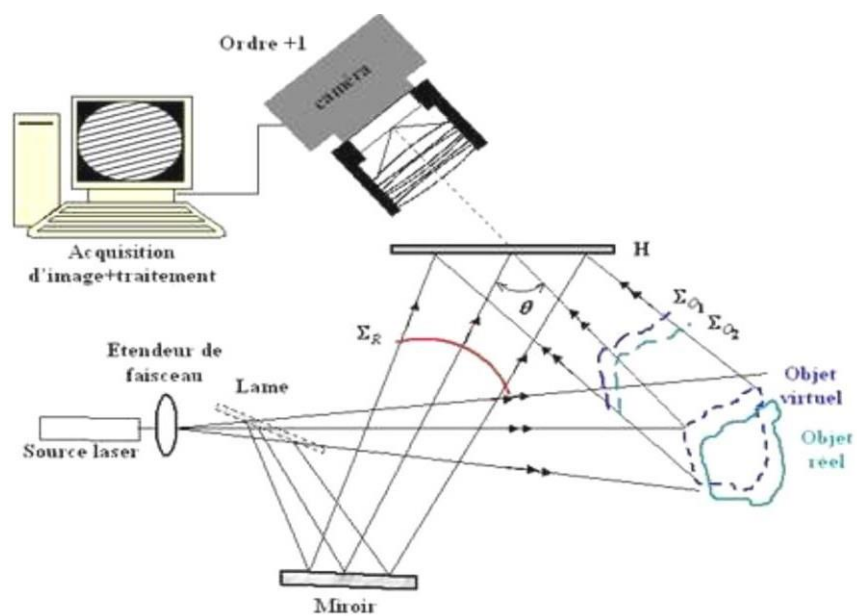


Figure 3.7 : Visualisation en temps réel.

- **Applications** : l'interférométrie en temps réel est employée pour :

- 5. - Contrôle non destructif
- 6. - Analyse vibratoire

7. - Compréhension globale du comportement des ensembles mécaniques soumis à des contraintes statiques ou évoluant lentement

### **Exemple :**

La Figure 3.8 montre l'apparition de franges en temps réel lorsqu'une membrane composite, présentant un défaut de collage, est chauffée avec une source thermique. À mesure que la contrainte thermique augmente, le nombre de franges augmente jusqu'à ce qu'elles deviennent trop serrées pour être observées, comme illustré par l'image de droite.

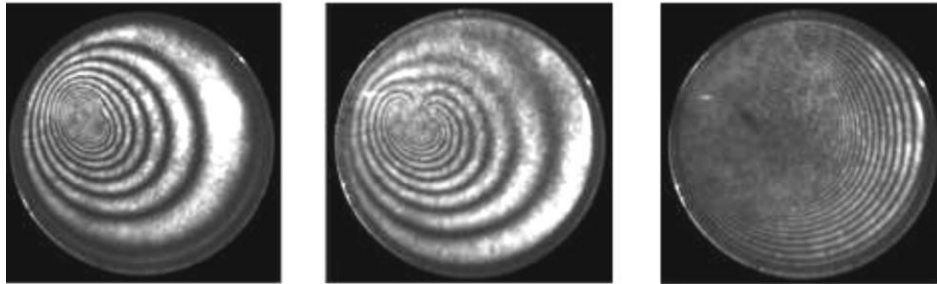


Figure 3.8 : Exemple d'hologrammes en temps réel.

### **3.6 Interférométrie holographique en temps moyenné**

Connue également sous le nom d'interférométrie holographique par intégration temporelle, cette méthode est couramment utilisée pour l'analyse vibratoire des structures (figure 3.9). Le principe consiste à enregistrer l'hologramme d'un objet en vibration avec un temps de pose long comparé à la période de vibration. Cette méthode permet de visualiser la cartographie d'amplitude de l'objet en vibration périodique ainsi que ses lignes nodales. Dans l'ordre +1, l'onde diffractée est modulée par une fonction dépendant exclusivement de l'amplitude de la vibration.

#### **-Limites du procédé**

L'intégration temporelle nécessite un laser à émission continue et des temps de pose longs, la durée d'exposition étant fonction du flux laser disponible. Les conditions d'enregistrement sont les mêmes que pour un hologramme classique : le montage doit être stable sur une table antivibratoire, et l'excitation de la structure ne doit pas entraîner de déplacements parasites.

#### **-Dispositif expérimental:**

Le dispositif expérimental est similaire à celui utilisé pour l'enregistrement classique des hologrammes. Cependant, l'objet doit être excité sinusoïdalement par une source de vibration, telle qu'un haut-parleur (excitation acoustique) ou un pot vibrant (excitation mécanique).

### -Applications

Cette technique, combinée avec l'analyse en temps réel, est très utile pour la caractérisation des modes vibratoires des structures industrielles, notamment pour :

- Analyse modale tel montré par la figure 3.10.
- Validation de codes de calculs

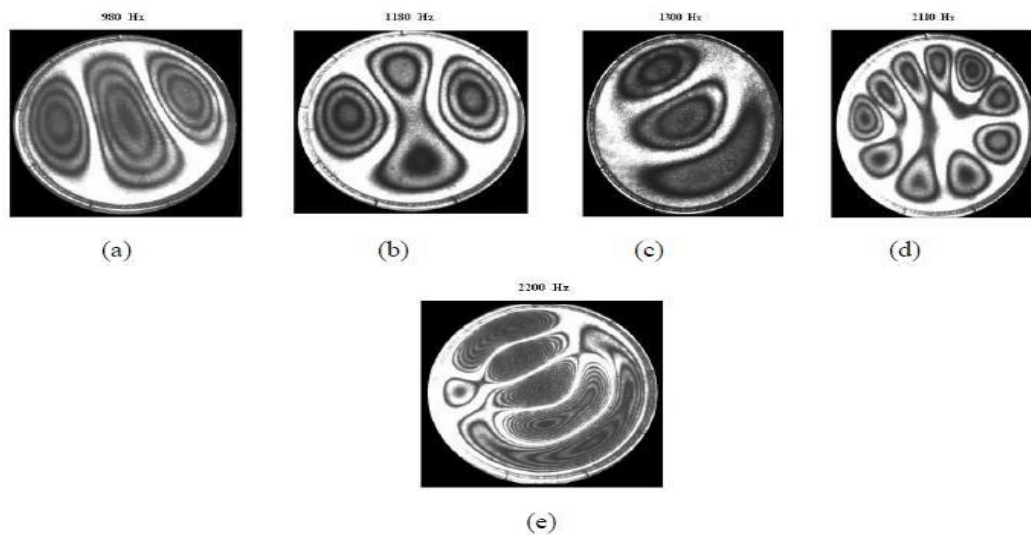


Figure 3.9 : Hologramme temps moyenné à : (a) 980Hz, (b) 1180Hz (c)1300Hz, (d) 2110Hz et (e) 2200Hz.

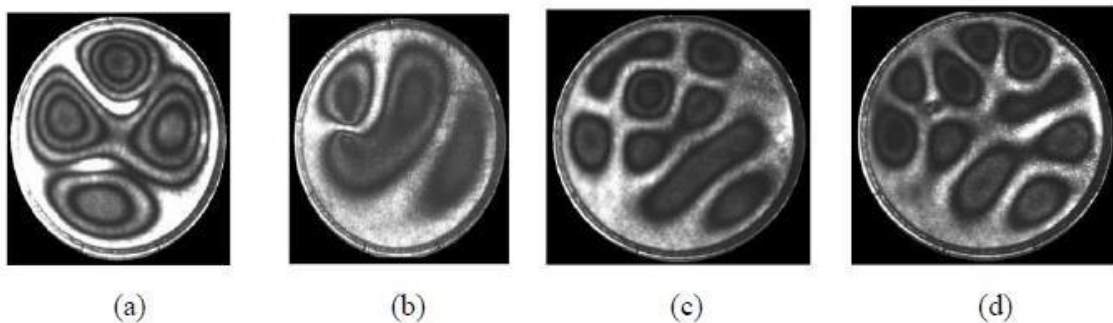


Figure 3.10 Signatures modales sans et avec défaut (a) et (b) à 1180Hz, (c) et (d) à 1820Hz.

### **3.7 Interférométrie holographique par phase de contraste**

Cette méthode, souvent appelée interférométrie holographique par phase de contraste, est utilisée pour améliorer la visualisation des détails fins des objets examinés. Elle permet de révéler des différences de phase très faibles entre les ondes de référence et les ondes diffractées par l'objet, ce qui est particulièrement utile pour observer des défauts subtils ou des déformations minimales. Le principe de cette technique repose sur la modulation de phase de l'onde diffractée par l'objet, qui est alors comparée à une onde de référence. En utilisant des

techniques de traitement numérique, les différences de phase entre les deux ondes peuvent être amplifiées, permettant une meilleure visualisation des détails fins.

### -Limites du procédé :

Les principales limites de l'interférométrie holographique par phase de contraste incluent :

8. - Sensibilité aux perturbations: Les variations de température ou les vibrations peuvent affecter la précision des mesures de phase.
9. -Complexité du traitement numérique : L'analyse des données peut nécessiter des algorithmes sophistiqués et un traitement informatique intensif.

### -Dispositif expérimental:

Le dispositif expérimental pour cette méthode est similaire à celui des autres techniques d'holographie, mais il nécessite souvent des équipements supplémentaires pour le traitement des données et la modulation de phase. Des systèmes de traitement numérique avancés sont nécessaires pour extraire les informations de phase des images holographiques.

### -Applications :

L'interférométrie holographique par phase de contraste est utilisée dans divers domaines, tels que :

10. - Microscopie: Pour observer les structures à l'échelle microscopique avec une résolution accrue.
11. - Analyse des matériaux : Pour détecter des défauts ou des imperfections dans des matériaux composites ou des revêtements minces.

### -Exemple :

La Figure 3.11 montre une image obtenue par interférométrie holographique par phase de contraste, mettant en évidence des défauts minimes dans une couche mince de matériau.

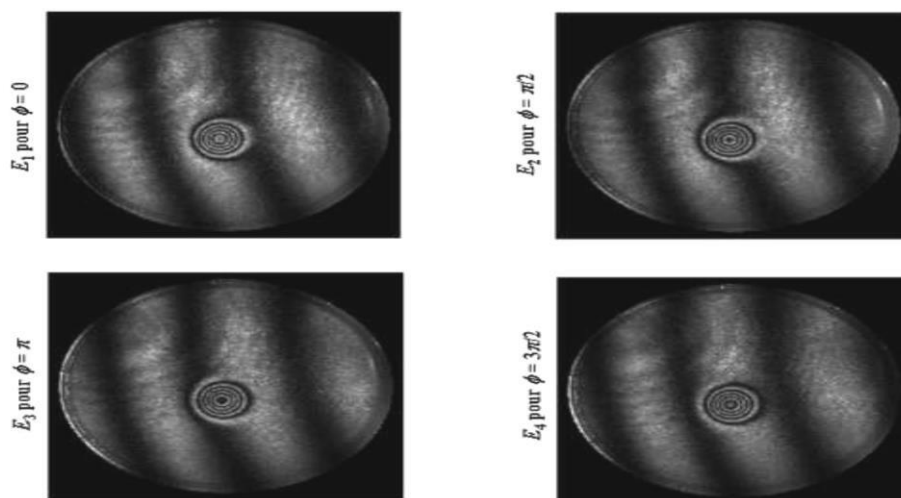


Figure 3.11: Exemple d'hologramme par phase de contraste.

### **3.8 Interférométrie holographique dynamique**

L'interférométrie holographique dynamique est une méthode avancée qui permet d'étudier les variations temporelles des objets en mouvement ou soumis à des variations rapides. Cette technique est particulièrement utile pour l'analyse des comportements dynamiques des structures et des matériaux sous différentes conditions de charge ou d'excitation. Cette méthode implique l'enregistrement d'une séquence d'hologrammes à différents instants pour capturer les changements dynamiques de l'objet. Les hologrammes sont ensuite analysés pour déterminer les variations de phase et d'amplitude au cours du temps, fournissant des informations détaillées sur les comportements dynamiques de l'objet.

**-Limites du procédé :** elles incluent :

12. - Vitesse d'acquisition: Les systèmes doivent être capables de capturer des images à une fréquence suffisamment élevée pour suivre les variations rapides.
13. -Analyse complexe: Le traitement des séquences d'hologrammes nécessite des techniques de traitement de signal avancées.

**-Dispositif expérimental :**

Le dispositif pour l'interférométrie holographique dynamique nécessite des équipements capables de capturer des séquences rapides d'hologrammes, tels que des caméras à haute vitesse et des systèmes de stockage de données rapides. Une synchronisation précise entre le laser, le système de capture et l'objet en mouvement est essentielle.

**-Applications :**

Cette technique est utilisée pour :

14. - Étudier les vibrations et les déformations : Dans des structures telles que les ponts ou les bâtiments soumis à des charges dynamiques.
15. - Analyse des matériaux: Pour observer les réponses dynamiques de matériaux composites ou de structures sous des conditions variées.

**-Exemple :**

La Figure 3.12 montre Interféromètre de March-Zehnder , une séquence d'hologrammes dynamiques illustrant les vibrations d'une poutre soumise à une excitation vibratoire.

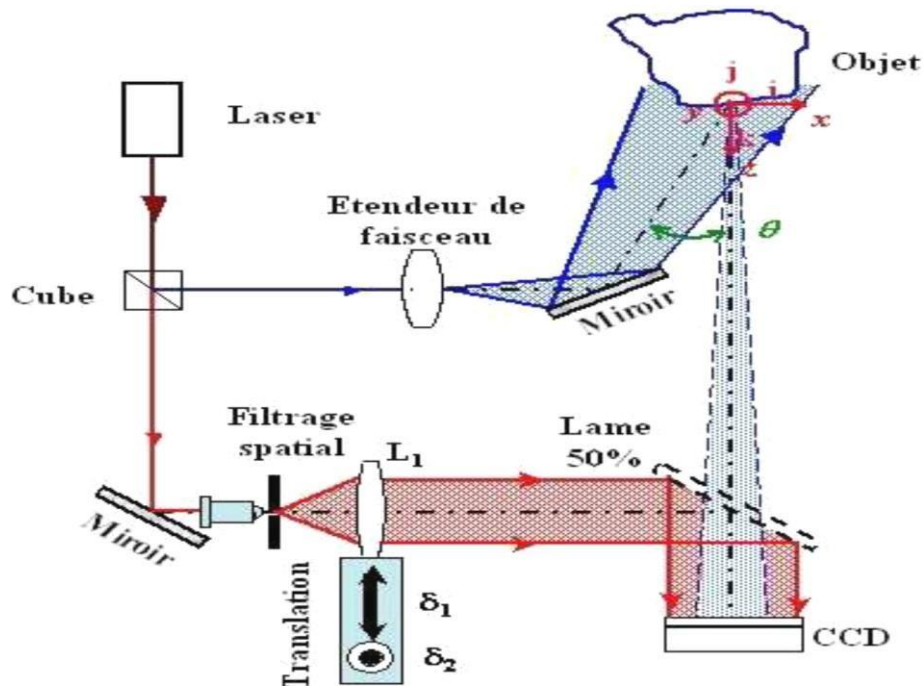


Figure 3.12 : Exemple d'hologrammes dynamiques : Interféromètre holographique numérique.

### 3.9 Comparaison numérique/analogique

La figure 3.13 illustre les images de la reconstruction du haut-parleur obtenues par holographie analogique. Pour faciliter la comparaison entre les méthodes de restitution numérique et analogique en temps moyenné, les images de la restitution numérique dans l'ordre +1 sont également présentées. On observe une très bonne concordance entre les franges analogiques et numériques. Toutefois, la différence de résolution entre l'holographie classique et l'holographie analogique est notable. Le support d'enregistrement analogique est constitué de gélatine dichromatique avec une résolution de  $5000 \text{ mm}^{-1}$ , des grains de  $15 \text{ nm}$  et une sensibilité de  $85 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ . La résolution est ainsi jusqu'à 20 fois meilleure, dans la plus grande dimension, en holographie analogique. Les conditions d'éclairage de l'objet sont identiques à celles du dispositif d'holographie numérique. Les légères différences entre les images de franges résultent des variations d'hygrométrie et de température, qui n'étaient pas rigoureusement identiques lors des enregistrements numériques et analogiques. Les images obtenues en holographie classique correspondent au module carré du champ diffracté dans l'ordre +1, contrairement à l'holographie numérique qui fournit une image complexe grâce au calcul. Cela explique pourquoi l'extraction de la phase de passages par zéro est impossible en holographie analogique, bien que cette limitation soit compensée par une résolution nettement supérieure.

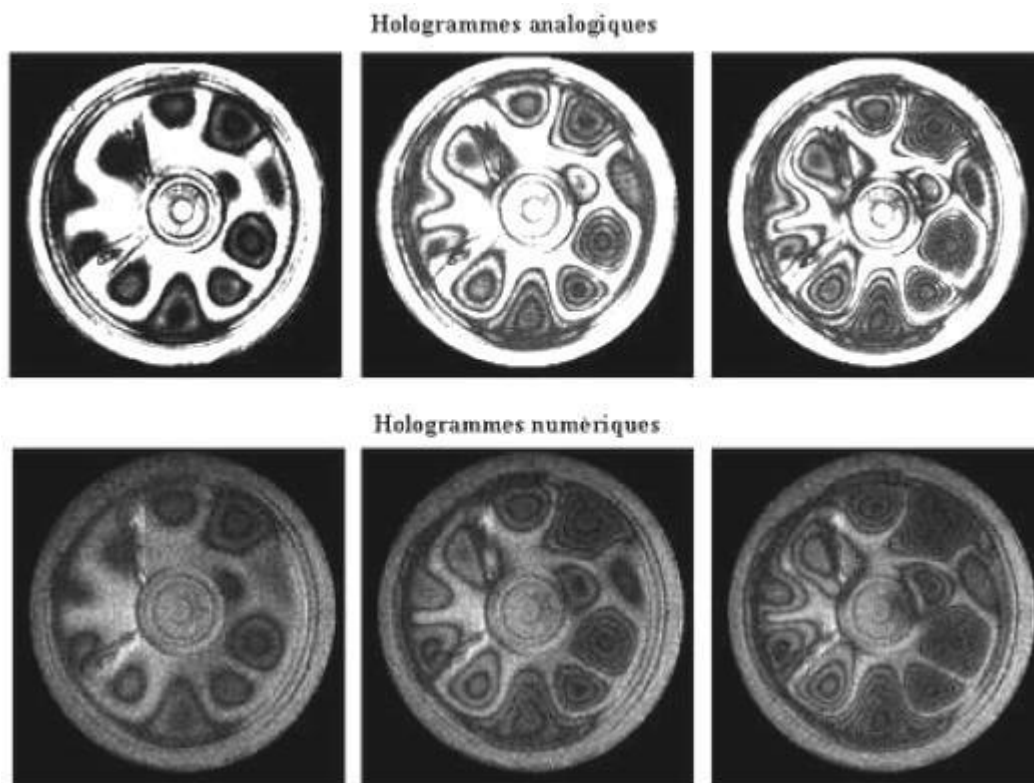


Figure 3.13 : Comparaison entre temps moyenné analogique et temps moyenné numérique pour différentes amplitudes de vibration d'un haut-parleur excité à 3700 Hz.

### **3.10 Conclusion**

Le chapitre 3 a fourni une analyse approfondie des techniques d'holographie, en mettant en lumière les différences significatives entre les méthodes analogiques et numériques. Nous avons examiné les divers composants et méthodes nécessaires pour l'enregistrement d'un hologramme, et souligné l'importance de simuler efficacement la diffraction d'une onde de référence, en utilisant les techniques appropriées, notamment pour l'holographie numérique.

La comparaison entre les méthodes analogiques et numériques a révélé que, bien que la résolution soit bien supérieure en holographie analogique, cette méthode présente des limitations, notamment dans l'extraction de la phase, ce qui est compensé par une meilleure résolution. Nous avons également discuté des défis liés à l'enregistrement des hologrammes, tels que les variations d'hygrométrie et de température qui peuvent affecter la précision des résultats. Cette compréhension des méthodes de reconstruction et des caractéristiques des supports d'enregistrement est essentielle pour la mise en place efficace d'un dispositif expérimental pour l'holographie numérique.

### *Conclusion Générale*

Ce mémoire a exploré l'étude d'un système de mesure automatisé par interférométrie holographique, visant une analyse rapide des microparticules. Dans le premier chapitre, nous avons dressé un panorama des méthodes de caractérisation des microparticules, soulignant les limitations des approches traditionnelles. Le second chapitre a permis de plonger dans les fondements théoriques de l'interférométrie holographique, démontrant sa pertinence pour des applications précises et rapides. Enfin, le troisième chapitre a détaillé la conception et la mise en œuvre du système de mesure automatisé, illustrant son potentiel pour améliorer l'efficacité des analyses.

À l'avenir, il serait intéressant de développer davantage le système en intégrant des algorithmes d'intelligence artificielle pour une analyse encore plus rapide et précise des données. De plus, des études expérimentales pourraient valider les performances du système dans divers environnements, ouvrant la voie à des applications dans des domaines tels que la pharmacologie ou l'environnement. Ces perspectives visent non seulement à affiner les techniques de mesure, mais aussi à enrichir notre compréhension des microparticules et de leur impact dans divers secteurs.

## *Références bibliographiques*

[1] HACHOUR SAMIRA et KABECHE THILELI; << Traitement des images X-Ray pour l'analyse et la détection des fractures osseuses >>, mémoire de fin d'études UMMTO, 2021.

[2] Mme BOURETET Nawel ; << la soustraction de l'arrière plan à seuil unique >>, mémoire de fin d'études, Université SAAD DAHLAB de Blida, 2010.

[3] Mlle BOUDJEMAI Lynda ; << Conception et réalisation d'un système de mesure électronique pour un banc didactique d'études des jauges de contraintes >>, mémoire de fin d'études UMMTO, 2014.

[4] Jean BARRALIS et Gérard MEADER :  
Pièces – métallurgie, structure; propriété, normalisation,  
AFNOR NATHAN paris 2001.

[5] Corentin SPRIET et François Waharte; <<anatomie et fonctionnement du microscope optique >>.

[6] SuanXu; << Conception et réalisation d'un interféromètre polarimétrique : application à la nanométrie dimensionnelle >> Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2009.

[7] Marc Séguin, ondes et physique moderne <<Physique XXI Tome c>>, 2010.

[8] OUDJEBARA Souhila et AISSIOUENE Celia, << Implémentation et adaptation d'une d'hologrammes des microparticules >>, UMMTO, 2017.

[9] Karima BOUMRAR, << Localisation à haute résolution des défauts mécaniques par interférométrie holographique >>, UMMTO, 2011.

## Résumé

Ce mémoire propose une étude approfondie d'un système automatisé de mesure des microparticules utilisant l'interférométrie holographique, une méthode avancée et non invasive permettant d'analyser rapidement les caractéristiques de particules microscopiques. Le travail est structuré en trois grands chapitres, chacun abordant un aspect clé du système de mesure proposé.

Le premier chapitre présente les différentes méthodes utilisées pour la caractérisation des microparticules. Ces techniques incluent des approches optiques, mécaniques et chimiques, mettant en lumière les avantages et les limites de chaque méthode. L'accent est mis sur les systèmes optiques, notamment ceux qui utilisent l'interférométrie et l'holographie, qui offrent des solutions non destructives et de haute précision pour l'analyse de particules à l'échelle micrométrique.

Le deuxième chapitre développe les principes théoriques sous-jacents à l'interférométrie holographique. Il décrit la génération et la reconstruction des hologrammes, en expliquant comment cette méthode permet de capturer des informations sur la forme, la taille, et les propriétés optiques des microparticules. Ce chapitre examine également les avantages de l'interférométrie holographique par rapport aux autres techniques de mesure, notamment sa capacité à fournir des mesures en 3D et à analyser des échantillons sans contact direct.

Le troisième chapitre est consacré à la conception d'un système de mesure automatisé basé sur l'interférométrie holographique. Ce système intègre des composants optiques avancés, un traitement numérique des images holographiques et des mécanismes de contrôle pour permettre une analyse rapide et automatisée des microparticules. Des détails sur la calibration du système, l'optimisation des paramètres de mesure et l'automatisation du processus de collecte de données sont présentés. L'objectif est de rendre le système accessible pour des applications industrielles où une analyse rapide et précise des microparticules est essentielle.

En conclusion, ce mémoire propose une solution innovante pour la caractérisation des microparticules en utilisant une méthode d'interférométrie holographique automatisée, avec des applications potentielles dans des domaines variés tels que l'industrie pharmaceutique, l'environnement, et la fabrication de matériaux de haute précision.

## **Mots clés**

Holographie

Hologramme

Interférométrie

Holographie numérique

Caractérisation des microparticules

Interférométrie holographique

Jauges de contrainte

Traitement d'image

Système d'acquisition