

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة فرحات عباس سطيف 1
Université Ferhat Abbas Sétif 1

THESE

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

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Option : Optique et Mécanique de Précision

Par :

Mme. SLIMANI Wahiba

THÈME :

**Exploitation de défauts par la méthode opto-informatique : traitement
d'image par la méthode des hologrammes générés par ordinateur.**

Soutenue le :

Devant le jury composé de :

Mr. Nouiri Abdelkader

Prof. Université d'O.E.Bouaghi

Président

Mr. Beniache Abdelkrim

Prof. Université de Sétif 1

Rapporteur

Mr. Guessas Hocine

M.C.A Université de Sétif 1

Examineur

Mr. Semcheddine Faouzi

M.C.A Université de Bejaia

Examineur

Sommaire

Introduction générale	07
Chapitre I : Le traitement de l'information	08
Introduction	08
1- Partie A: Traitement optique de l'information	08
1.1 Introduction	09
1.2. Principes de base de traitement optique de l'information	09
I.2.1. Corrélateurs optiques	09
I.2.1.1 Corrélateur 4f	10
I.2.1.2 Corrélateur joint JTC	11
I.2.1.3 Les systèmes hybrides	12
1.2.2 L'invention de l'holographie	12
1.2.2.1 De l'hologramme généré par ordinateur à l'élément optique diffractif	12
1.2.2.2 Les SLMs.	13
1.3. Les innovations marquantes du traitement optique de l'information.	13
1.3.1 Calculateurs numériques optiques	14
1.3.3 Mémoires optiques.	14
1.3.4 Interconnexions optiques	15
1.3.5 Traitement optique de l'information	16
1.4. Conclusion	16
1.5 Références	17
2- Partie B: Traitement numérique de l'information	22
2.1 Introduction	22
2.2. Qu'est-ce qu'une image numérique ?	22
2.3 Domaines généraux de traitements numériques d'images	23
2.3.1 L'amélioration et la restauration	24
2.3.2 L'analyse d'images	24
2. 3.2.1 Les outils fondamentaux pour l'analyse	24
2. 3.2.1. a. L'histogramme	24
2. 3.2.1. b. La convolution	25
2.3.2.1. c. La transformée de Fourier	25
2.3.3. La synthèse d'images	26
2.4. Le codage d'images avec compression d'information	26
2.4.1 Formats de fichiers d'images	27
2.4.1.1 Formats sans compression	27
2.4.1.2 Formats avec compression	27
2.5. Acquisition d'une image	27
2.6. Les fréquences dans l'image	29
2.7 Exemples d'application de la TF	30
2.7. a. Filtrage passe-bas par TF	30

2.7. b. Filtrage passe-haut par TF	31
2.7. c Réduction du bruit dans une image	31
3. Conclusion	31
4. Références	32

Chapitre II: Interférométrie et Hologrammes générés par ordinateur HGC, méthode opto-informatique.

I. Interférométrie :	33
1. 1. Introduction	33
1. 2. Rappel des interférences.	34
1. 2. 1 Calcul de l'amplitude de l'onde résultante.	35
1. 2. 2 Calcul de la phase de l'onde résultante.	35
2. Hologrammes générés par ordinateur, HGC	36
2. 1. Introduction	36
2. 2. Approche du principe	37
2. 3.Principe de calcul des hologrammes générés par ordinateur, méthode de programmation	38
2. 4. L'incertitude dans les HGCs	39
2. 4. 1. L'étude des limitations par les caractéristiques énergétiques	40
2. 4. 1. 1 Efficacité de diffraction	41
2. 4.1.2 Rapport signal bruit	41
2. 4. 2. L'étude des limitations causées par les contraintes de réalisations	42
2. 4.2.1. Temps de calcul	42
2. 4.2.2. Méthode de codage et logiciel de calcul	42
3. Conclusion	44
4. Références	44

Chapitre III: Etude expérimentale

1. Introduction	47
2. Réalisation de l'interferogramme numérique	48
3 .Déroulement du travail expérimental	48
3. a. Interprétation des résultats	49
3 .b. Interprétation des résultats	52
3. c. Interprétation des résultats	54
3.d. Troisième interprétation des résultats	56
3.4. Conclusion	56
4. Contrôle de qualité en ligne	56
4.1. La production des cartes électroniques en série	56
5. Méthodes de contrôle proposées par le traitement numérique	58
5. 1. L'identification d'un composant sur une image de carte	58
5.1.1. Interprétation	59
5.2. Extraire une image d'un composant	59
5.2.1. Interprétation	60
5.3. Détection de manque d'un composant	60
5. 3.1. Interprétation	61

5. 4. Autres défaillance fréquentes	61
5. 5. Composant inversé CI	61
5. 5.1. Interprétation	61
5. 6. Composant manquant CM	62
5. 6. 1. Interprétation	62
5. 7. Fausses valeurs FV	62
5. 8. Mal insérée MI	63
5. 9. Les Courts circuits	63
6. Conclusion	63
7. Références	64

Conclusion générale	65
----------------------------	----

Annexes	66
----------------	----

Annexe I : Formats d'images	67
------------------------------------	----

Annexe II : Programmes informatiques en Matlab	70
---	----

Résumé	75
---------------	----

Listes de figures :

Figure (I-1): Montage de corrélateur 4f avec un hologramme généré par ordinateur.	10
Figure (I-2) : Montage de corrélateur joint avec une caméra CCD pour capter le spectre	11
Figure (I-3) : Catégories d'images par nature.	22
Figure (I-4) : Formes d'images par intensité	23
Figure (I-5) : Image restaurée par son histogramme	25
Figure (I-6) : Chaîne de numérisation d'un signal bidimensionnel.	26
Figure (I-7) : Représentation des fréquences d'une ligne prise de l'image.	27
Figure (I-8) : Les basses fréquences.	27
Figure (I-9) : Les hautes fréquences.	27
Figure (I-10): Réalisation de la fft de l'image.	30
Figure (I-11): Le filtrage passe-bas.	30
Figure (I-12): Le filtrage passe-haut.	31
Figure (I-13): Le filtrage du signal bruit de l'image satellite.	31
Figure (II-1): Un interferogramme détermine du criquets d'un moteur.	33
Figure (II-2): Un interferogramme détermine des criques sur une plaques métallique en vibration.	34
Figure (II-3): Etapes principales de réalisation d'un hologramme binaire de Fourier codé par la méthode de Lhomann.	38
Figure (II-4) : l'échantillonnage du front d'onde H (μ, ν).	39
Figure (III-1) : -a- Image de référence (sans défaut) 32x32, -b- image objet avec défaut 32x32 -c- Interferogramme numérique calculé, -d- restitution numérique.	48
Figure (III-2): a- Image de référence (sans défaut) 128x128, -b- image objet avec défaut 128x128 -c- Interferogramme numérique calculé, -d- restitution numérique.	49
Figure (III-3) : -a- Image de référence (sans défaut) 614x482 pixels. -b-Image objet (avec défaut) 614x482 pixels.	50
Figure (III-4): l'interferogramme numérique réalisé sous forme d'un HGC et codé par la méthode de Lhomann pour un échantillonnage : $N_x N_q = 128 \times 8$.	51
Figure (III-5): La restitution numérique obtenue à partir de l'interferogramme numérique.	51
Figure (III-6) : L'ordinateur puissant utilisé pour recalculer l'interferogramme numérique.	52
Figure (III-7): L'utilisation de LED tv Full HD 1080 pxs.	53
Figure (III-8): L'interferogramme numérique réalisé avec un afficheur LED tv.	54
Figure (III-9) : La réponse de l'interferogramme numérique.	54
Figure (III-10): L'interferogramme numérique réalisé avec un afficheur LED tv et un câble HDMI.	
Figure (III-11): La réponse de l'interferogramme numérique avec le câble HDMI.	55
Figure (III-12): L'interferogramme numérique réalisé avec l'afficheur LED tv et câble	

HDMI et NxNq= 256x8.	56
Figure (III-13) : La réponse de l'interferogramme numérique avec l'afficheur LED tv et câble HDMI et NxNq= 256x8.	56
Figure (III-14) : Une extraction de la réponse obtenue.	56
Figure (III-15) : Ligne de production en série de téléviseurs.	57
Figure (III-16) : carte sans composant.	58
Figure (III.17): Inspection visuelle.	58
Figure (III.18): Image de carte électronique.	58
Figure (III.19): Image de circuit à détecter.	58
Figure (III.20) : la corrélation des deux images.	59
Figure (III.21) : l'extraction d'un composant sur l'image d'une carte.	59
Figure (III.22) : Image de carte référence.	60
Figure (III.23): Carte avec manque de composant.	60
Figure (III.24): Pic indiquant l'emplacement du composant manquant.	60
Figure (III.25): Carte électronique avec composant inversé.	61
Figure (III.26): La réponse de la soustraction.	61
Figure (III.27): Carte électronique avec manque de composants.	62
Figure (III.28): Réponse de la soustraction.	62
Figure (III.29): Résistance de différentes valeurs.	62

Listes des tableaux :

Tableau(I.1) : Classement des images suivant leurs captures.	23
---	----

Remerciements

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à mon Directeur de Thèse, Prof. Abdelkrim Beniaiche qui n'a préservé aucun effort pour m'accompagner à accomplir notre travail, et aussi pour ces conseils qu'il a su me prodiguer tout au long de notre recherche.

J'exprime toute ma gratitude à Dr. Hocine Guessas Directeur de l'institut d'optique et mécanique de précision de l'université Ferhat Abbas de Sétif pour sa disponibilité et son accueil et pour le matériel qu'il nous a fourni.

Mes vives reconnaissances sont adressées à mes enseignants de l'institut d'optique et de mécanique de précision et particulièrement : Pr. A. Felkaoui, Pr. S. Bouzid, Pr. R. Louahdi, Dr. Med. Kharguegue de l'université de kenchela, Pr. Benzaroug de l'université de B.B.A et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite dans mes programmes informatiques et ma réalisation expérimentale.

Je remercie vivement l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

*Je dédie ce travail,
à tous mes proches pour leurs soutient moral et matériel.*

"Engineering is the art of making what you want from what you get"

Introduction générale :

Le traitement des informations est une discipline de grande application, développé rapidement grâce à l'émergence des nouvelles technologies. Il s'appuie notamment sur les mathématiques liées à l'information, le traitement du signal, les systèmes électroniques, et sur l'avancée de capacité de stockage, et la vitesse des microprocesseurs.

Le traitement opto-informatique consiste à utiliser des techniques optiques plus des algorithmes ou des logiciels spécialisés informatiques pour effectuer certaines opérations.

L'approche que nous avons appliquée dans notre projet, est l'utilisation des concepts optiques et des bases de traitement numérique pour faire des applications sur le contrôle de qualité des produits réalisés en série.

L'objectif des méthodes proposées consiste à détecter les défaillances sur les composants des produits réalisés en série qui influent sur leur durée de vie et leur rendement. Il peut être atteint par des programmes informatiques utilisant des concepts optiques : l'interférométrie numérique, la corrélation, la convolution, le filtrage, l'holographie générée par ordinateur...etc. L'inspection et le contrôle des articles en cours de réalisation, dans une chaîne de production ou de montage permet d'éviter les pannes avant la phase de sortie.

Un interferogramme numérique est réalisé sous la forme d'un hologramme généré par ordinateur entre l'élément de référence et l'élément fabriqué, et d'autres programmes sont élaborés pour identifier chaque défaillance persistante durant le temps de production. Les réponses sont analysées et traités pour valider la fiabilité ou la défaillance de ces éléments.

Hormis, l'introduction et la conclusion générale, la thèse est répartit en trois chapitres distincts : - Chapitre: I, expose en détail le traitement de l'information, on la répartie en deux volets : Partie A : Traitement optique de l'information, Partie B : Traitement numérique de l'information.

- Chapitre: II : est consacré à l'étude des hologrammes générés par ordinateur HGC et l'interférométrie holographique (*méthode opto-informatique*), aperçu théorique sur le principe et les formules de liaison.

- Chapitre: III: Expose l'application des méthodes opto informatique pour facilité le contrôle et la détection de défauts dans des produits réalisés en série : l'interférométrie numérique, la corrélation, la convolution, la filtrage..etc, et on termine par une conclusion générale.

Chapitre I : Le traitement de l'information

- Introduction :

Le traitement de l'information date depuis de longues années, il s'introduit de plus en plus dans tous les domaines : médecine, industrie, statistiques, agriculture..etc. Et suite, à la demande de perfectionnement et aux résultats proches à la fidélité, cette discipline a fait appel aux meilleures compétences qui se trouvent dans les sciences de liaison : l'électronique, l'informatique et l'optique.

Les acteurs de ces branches scientifiques cherchent toujours à optimiser les moyens et les méthodes pour prouver que cette discipline est meilleure que l'autre au traitement et à l'application.

Ce chapitre est consacré pour le traitement de l'information qui est partagé en deux volets, le traitement optique et le traitement numérique de l'information.

1- Partie A : Le traitement optique de l'information :

1-1- Introduction :

La connaissance de certaines histoires des sciences, ses succès et ses échecs, est utile pour comprendre l'évolution des domaines de recherches. Le traitement optique de l'information, est âgé d'environ 60 ans et il est un domaine bien défini avec ses propres conférences spécialisées et ses propres programmes de financement et de recherche.

De nombreux livres ont été écrits sur le sujet, par exemple ceux décrivent l'état de l'art du calcul optique 1972 [1], 1981-1982 [2, 3], 1989 [4], et 1998-99 [5, 6] .et d'autre qui traitent la concurrence entre l'optique et l'électronique [7] ...etc.

La prochaine section présente les principes de base de traitement optique de l'information. Un aperçu historique est évoqué depuis les premières années jusqu'à les années deux mille, ensuite l'évolution du domaine est démontée jusqu'à nos jours.

1-2- Principes de base de traitement optique de l'information :

Le traitement optique de l'information est basé sur l'idée d'utiliser toutes les propriétés de vitesse et de parallélisme de la lumière afin de traiter l'information à un taux élevé de données en temps réel. L'information est sous la forme d'un signal 1D ou une image. Le traitement parallèle inhérent a souvent été présenté comme l'un des principaux avantages du traitement optique par rapport à celui de l'électronique qui utilise les ordinateurs de traitement en série. La propriété de la transformée de Fourier d'une lentille est la base du calcul optique. Elle réalise la transformation de l'amplitude et de la phase d'une manière analogue [8].

En 1946, Duffieux a apporté une contribution majeure, par l'utilisation des méthodes de transformation de Fourier en optique [9]; de même Maréchal, en 1953, par le filtrage de fréquence spatiale en éclairage cohérent [10].

Le traitement optique linéaire peut être décomposé en deux volets : espace d'opérations invariant tel que la corrélation et la convolution, ou bien espace d'opérations variant où on utilise la transformation de Hough [11, 12].

Le développement du traitement optique a connu son essor après l'invention d'une source de lumière cohérente, le laser, en 1960 [13, 14]. Les principaux acteurs du traitement optique de l'information étaient, Vander Lugt [15] en 1974, et Leith [16] en 2000.

Dès que le laser a été inventé en 1960, le traitement optique de l'information est en expansion rapide et toutes les grandes inventions du domaine ont été faites avant 1970. Les processeurs optiques utilisés pour effectuer les traitements sont les corrélateurs optiques, présentés successivement dans la section suivante.

1-2-1- Corrélateurs optiques :

L'architecture des corrélateurs est constituée par trois plans : le plan d'entrée, le plan de traitement, et le plan de sortie. Les données traitées, effectuées à la vitesse de la lumière sont affichées sur le plan de sortie. Le signal d'entrée peut être en 1D ou en 2D. Une cellule acousto-optique est souvent utilisée dans le cas d'un signal d'entrée 1D et un Modulateur Spatial de Lumière (SLM), pour les signaux 2D.

Dans les premières années, en raison de l'absence des SLM, le plan d'entrée est composé de lames fixes. Le plan de traitement est composé : de lentilles, d'hologrammes (optiquement enregistrées ou générées par ordinateur). Par contre, le plan de sortie est constitué : d'un photo détecteur, un réseau photo détecteur, une caméra pour détecter les résultats du traitement. La vitesse de l'ensemble du processus est limitée par la vitesse du composant le plus lent.

Le SLM est l'élément clé pour le développement pratique des processeurs optiques et dépend de son coût et de sa performance en temps réel.

Au début, la reconnaissance des formes en temps réel a été considérée comme l'une des applications les plus prometteuses des processeurs optiques et par suite, deux architectures de corrélateur optique ont été proposées.

1-2-1-1- Corrélateur 4f :

Comme il est illustré dans la figure en dessous, étant donné que la distance entre le plan d'entrée et le plan de sortie est quatre fois la distance focale de la lentille utilisée dans ce système, le corrélateur de base est appelé corrélateur 4f. Cette architecture très simple, est basée sur les travaux du filtrage spatial de Maréchal et Croce [10] en 1953 et développée au cours des années suivantes par plusieurs auteurs [17, 18].

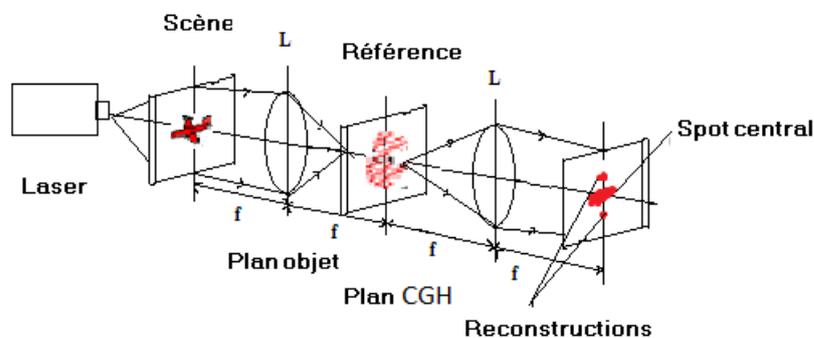


Figure (I-1): Montage de corrélateur 4f avec un hologramme généré par ordinateur [20].

D'après la figure précédente, la scène d'entrée est affichée dans le plan objet, elle contient des informations globales. A l'aide de la source cohérente, la première lentille L_1 réalise sa transformée de Fourier au deuxième plan: plan de l'hologramme généré par ordinateur HGC. La référence contient l'information cherchée, elle est placée à ce plan, les termes de sa fonction de transfert sont multipliés avec les termes de la transformée de Fourier de la scène d'entrée. Une deuxième lentille L_2 réalise une seconde transformée de Fourier de l'ensemble à la sortie. La corrélation entre la scène d'entrée et la référence est affichée.

La mise en œuvre du filtre complexe de la transformée de Fourier de la référence est le principal défi de ce système. Vander Lugt a proposé en 1964 d'utiliser un hologramme de Fourier comme filtre [19,20].

1-2-1-2- Corrélateur joint JTC :

Weaver et Goodman ont représenté une autre architecture de corrélateur optique, le corrélateur de transformation jointe (JTC) [21], voir la figure suivante :

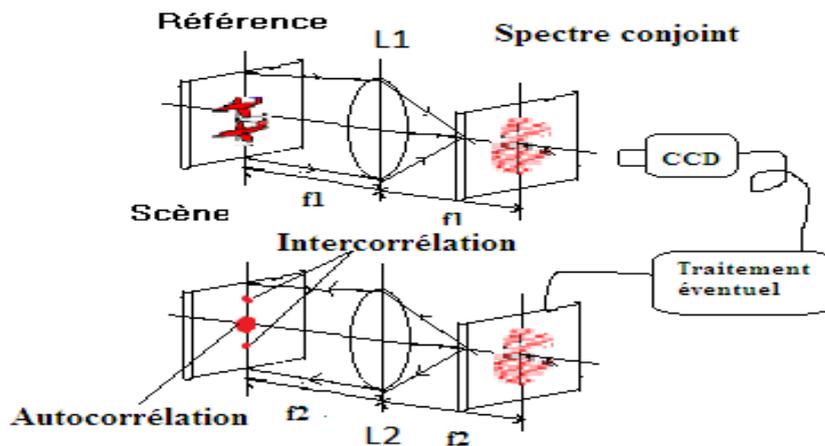


Figure (I-2) : Montage de corrélateur joint avec une caméra CCD pour capter le spectre [20]

En 1966, Weaver et Goodman ont présenté le corrélateur joint de transformation (JTC), l'architecture qui sera largement utilisée comme un alternatif du corrélateur $4f$ pour la reconnaissance des formes. L'image et la référence sont placées côte à côte dans le même plan d'entrée, la lentille réalise la transformée de Fourier de l'ensemble. L'intensité du spectre joint est détectée, ensuite éjectée, puis une autre lentille réalise une deuxième fois la transformée de Fourier du spectre. Seuls les deux pics d'inter corrélation sont d'intérêt. Pour avoir un processeur purement optique, la caméra CCD peut être remplacée par un composant optique tel qu'un SLM à cristaux liquide. Un des avantages du JTC est qu'aucun filtre de corrélation ne doit être calculé. Par conséquent, le JTC est l'architecture idéale pour les applications en temps réel où on a besoin de traiter un taux élevé de données.

Les systèmes optiques incohérents sont également proposés. Dans ce cas l'information ne module pas l'amplitude de l'onde cohérente, mais l'intensité d'une onde incohérente. En d'autre terme, ces systèmes ne sont pas sensibles aux variations de phase dans le plan d'entrée [22]. Sur les références [23-24] on trouve les améliorations introduites sur l'architecture du JTC telles que la création du JTC non linéaire.

1-2-1-3- Les systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides, optique / numérique sont apparus comme une solution pour la mise en œuvre pratique et pour résoudre des problèmes réels de traitement de reconnaissance des formes. Casasent classé comme un chercheur très actif dans ce domaine, a donné une vision complète des systèmes hybrides qui existent [25]. Tous ces systèmes ont donné des résultats très prometteurs. Des Corrélateurs pour des applications réelles ont même été commercialisés. Cependant, vers les années 2000, l'intérêt pour le sujet a commencé à décliner à cause de l'évolution des ordinateurs numériques en termes de performances, de puissance et de flexibilité. Et presque tous les systèmes proposés restent des prototypes dans les laboratoires, et n'ont jamais eu une chance de remplacer les systèmes électroniques.

1-2-2- L'invention de l'holographie :

L'hologramme de Gabor inventé en 1948 [26] présente encore un inconvénient majeur de l'affichage de la reconstruction. En 1962, Leith et Upatnieks introduisent l'holographie hors axe qui a permis la séparation des différents termes de la reconstruction donnant la reconstruction 3D remarquables [27, 28], qui fait le début de l'aventure de l'holographie pratique.

En 1963, Vander Lugt a fait preuve d'une technique de synthèse du filtre complexe d'un système optique cohérent à l'aide d'une technique d'hologramme de Fourier [20]. Cette invention a donné au corrélateur 4f avec le filtre adapté toute sa puissance et a généré toutes les recherches dans le domaine.

En 1966, Lohmann a révolutionné l'holographie en introduisant le premier hologramme généré par ordinateur (HGC) [29, 30] et en utilisant un codage orienté cellule adaptée à la puissance limitée des ordinateurs disponibles. En 1969, un HGC de phase pure codée, 'le kinoforme ' [31] ouvre la voie à l'optique diffractive moderne avec une grande efficacité de diffraction.

1-2-2-1 De l'hologramme généré par ordinateur à l'élément optique diffractif EOD:

Les premiers hologrammes générés par ordinateur (HGC) étaient principalement d'orientés cellules, car cette méthode est bien adaptée à la puissance des ordinateurs avec une petite capacité de mémoire et à la technologie des imprimantes.

D'autres méthodes de codage ont été élaborées en vue d'atteindre les reconstructions optiques de haute qualité et à haute efficacité de diffraction, les méthodes orientées points.

Des algorithmes itératifs ont été proposés et les plus connus sont : l'algorithme Binaire de Recherche Direct (DBS) proposé par Seldowitz et al en 1987 [32], et la transformée de Fourier itérative (IFTA) proposé par Wyrowski et Bryngdahl en 1988 [33]. Le HGC codé avec ces algorithmes produit une reconstruction avec un haut rapport signal bruit et une haute efficacité de diffraction.

Il convient de noter que ces méthodes itératives sont encore utilisées. Les principaux progrès introduit sur les HGC sont surtout sur les méthodes de fabrication par l'utilisation de techniques de lithographie qui permettent la fabrication de HGC de phase de haute précision. La dénomination *éléments optique diffractifs* (DOE ou EOD) qui englobe les HGCs est maintenant utilisée et reflète cette évolution. Grâce aux progrès de la lithographie, l'EOD peut être fabriqué comme un HGC par des méthodes très avancées [34], ce qui a mené les études vers la nano-optique numérique [35].

La fabrication des structures de nano nécessite l'utilisation de nouveaux concepts de la théorie de diffraction à la place de la théorie de la diffraction scalaire [36]. Plusieurs livres donnent un aperçu complet du champ des EOD, leurs applications et leurs évolutions [37, 38].

1-2-2-2- Les SLMs:

Depuis la disponibilité des SLMs, beaucoup d'effort a été investis dans le développement des SLM, répondant aux exigences des systèmes optiques en termes de : vitesse, résolution, taille, capacité de modulation et uniformité spatiale. Fisher et Lee en 1987 ont révélé ces meilleures performances [39], ses évolutions et ses applications [40].

Plus de 50 types de SLMs ont été introduits dans les années quatre-vingt et quatre-vingt dix, et à titre d'exemple, SLM à cristaux liquides, SLM magnéto- optiques [41], SLM à puits quantiques (MQW), à pièce électrique Si PLZT SLM [42] et à miroir déformable [43]. Toutefois, très peu de ces SLM ont survécu. Aujourd'hui, les SLM commercialisés remplissent les exigences requises en termes de vitesse, capacité de modulation et résolution, ce qui a conduit à d'autres applications, comme la formation d'impulsion [44], la métrologie optique [45]...etc.

1-3- Les innovations marquantes du traitement optique de l'information :

Pu et al. construisent un robot qui fait le balayage en temps réel à l'aide d'un processeur optoélectronique basée sur une mémoire holographique [46]. Et dans le cadre d'un projet européen, à Thomson-CSF, ils ont construis et testé avec succès un corrélateur compact photoréfractif pour

les applications robotiques [47]. Ce corrélateur a également été utilisé pour l'identification d'empreintes digitales [48]. En 1990, un corrélateur optique de Vander Lugt miniature a été construit pour le guidage des missiles autonome et la navigation. Le processeur est remarquable par son assemblage robuste, de 105 mm de diamètre et de 90 mm de long, et de poids 2,3 kg [49].

En 1995, un prototype d'un corrélateur optique a été construit qui peut être intégré dans un ordinateur personnel en mesure de traiter jusqu'à 65 Mo de données d'images par seconde [50].

1-3-1- Calculateurs numériques optiques:

L'optique peut contribuer de manière significative au développement d'une nouvelle classe de calculateurs numériques optiques de haute vitesse à usage général (ordinateurs optiques) mais Teager [51] a souligné que le développement d'un ordinateur optique à usage général était très prématuré parce que la technologie optique n'était pas prête pour concurrencer les ordinateurs électroniques.

Pour lui, les ordinateurs optiques auront une forme différente de celle des ordinateurs électroniques, ils seront plus parallèles. Malheureusement ce débat est maintenant presque fermé, il est largement admis qu'un processeur optique pur n'existera pas, mais la solution est d'associer l'électronique à l'optique.

1-3-2- Mémoires optiques:

La mémoire holographique est toujours considérée comme un candidat parfait pour la mémoire de l'avenir. C'est une technique de stockage de masse utilisant l'holographie pour stocker de hautes densités de données dans des cristaux ou des polymères photosensibles. En effet, les techniques utilisées pour les CD ou les DVD atteignent leurs limites physiques à cause des rayons d'écriture limitée par la diffraction. L'holographie permet d'utiliser le volume du support au lieu de se limiter à la surface pour enregistrer des données. De plus, les données peuvent être multiplexées dans le volume d'enregistrement en ajoutant un angle au faisceau enregistreur par rapport au faisceau de référence, ou encore en modifiant sa fréquence ou sa phase.

La mémoire holographique était sujet d'intérêt depuis les années 1960 et ce, depuis l'invention du Laser. En 1968, la première mémoire holographique a vu le jour avec une matrice de 64 bits [52]. En 1974, Thomson-CSF ont construit le premier système de mémoire optique en 3D complet par un cristal photoréfractif et ont réalisé le stockage de 10^4 bits [53]. Des mémoires holographiques utilisant des films ont été également développés aux États-Unis.

Au milieu des années 1990, notamment sous l'impulsion de la DARPA (Defense Advanced Research Project Agency), de grands laboratoires comme ceux d'IBM et de Lucent Technologies et plus récemment Imation ont intensifié les recherches dans ce domaine. Au début des années 2000, les trois principales compagnies impliquées dans le développement de la mémoire holographique étaient InPhase Technologies, Aprilis et Optware au Japon, En 2005, InPhase a présenté un premier prototype d'un périphérique de stockage commercial. Cependant, après plusieurs annonces et délais en 2006 et 2007, aucun produit n'a été commercialisé et InPhase a déclaré faillite en 2010 après avoir investi 100 millions de dollars dans le développement de la mémoire holographique.

A IBM, deux programmes importants ont été réalisés dans les années quatre vingt dix : projet de PRISM (Photorefractive Information Storage Material), et projet de HDSS (systèmes de stockage de données holographiques) [54]. Et d'autres entreprises ont été créées pour développer les mémoires holographiques en commercialisant un système holographique de disque mémoire WORM qui utilise un matériau photopolymère.

Les disques holographiques HDS peuvent être effacés par un éclairage uniforme du cristal qui est alors prêt à recevoir de nouvelles données. Il est également possible d'effacer sélectivement l'une des images enregistrées en éclairant le matériau avec la figure d'interférence utilisée lors de l'enregistrement, mais en introduisant un déphasage supplémentaire uniforme de π sur le faisceau objet. Et on peut également rafraîchir les HDS avant leur effacement total, ou les fixés définitivement par un traitement thermique approprié du cristal.

La révolution de la mémoire holographique n'est pas encore achevée et le problème des matériaux d'enregistrement n'est pas encore résolu, car il n'y a pas de matériau réinscriptible facile à utiliser et de bon marché.

Les photopolymères ne peuvent être transcrits qu'une seule fois et pour les cristaux photoréfractifs, malgré tous les efforts de recherche, ils restent coûteux et très difficiles à utiliser.

1-3-3- Interconnexions optiques :

L'interconnexion optique est un domaine très prometteur, grâce à la propriété de l'absence d'interaction avec le champ magnétique et surtout la miniaturisation des ses constituants [55]. Aujourd'hui, l'optique n'a pas de concurrent dans les domaines des télécommunications avec ses fibres optiques, ses amplificateurs optiques et ses commutateurs. Intel à partir de 2009, a continué à étudier la possibilité de remplacer les interconnexions électriques entre les puces par des interconnexions optiques dont la fréquence peut atteindre les térahertz, avec une faible perte et une faible diaphonie [56].

Jusqu'à présent, il n'était pas possible de transférer des téraoctets de données avec la technologie existante de communications optiques parallèles. Mais à IBM les scientifiques ont développé un prototype de chipset optique désigné « Holey Optochip », premier émetteur-récepteur optique parallèle pouvant transférer mille milliards de bits (un téraoctet) d'informations par seconde, soit l'équivalent du téléchargement de 500 films haute définition. Ce qui permet d'avoir un très haut débit pour les futures applications de centres de données et de superordinateurs.

1-3-4- Traitement optique de l'information :

Toutes les recherches sur la fabrication des EOD a rendu possible la fabrication de nano structures pour enrichir de nouveaux domaines de recherche tels que la nanophotonique [57, 58], nanofluidique [59] et optofluidique [60]. L'holographie numérique trouve ainsi des applications industrielles, notamment pour le contrôle de qualité des produits fabriqués [61-62], la microscopie holographique digitale [63] et les applications de sécurité, qui peuvent propulser d'avantage le traitement optique de l'information [64].

1-4- Conclusion :

L'histoire du développement du domaine du calcul optique révèle un évènement scientifique important qui a débuté avec la puissance de la lumière cohérente notamment sa transformée de Fourier. La genèse illustre que des efforts considérables ont été consacrés à la construction de processeurs optiques capables de traiter en temps réel un grand nombre de données.

A présent, nous voyons que l'optique a très bien réussie dans les systèmes d'informations tels que les communications et les mémoires par rapport à son échec relatif dans le calcul. Cela aurait changé si, dans les années soixante-dix, les ordinateurs électroniques n'ont pas marqué leurs lenteur et leurs limites de puissance et que les SLM, les diodes laser et les détecteurs à haute résolution n'auraient été disponibles.

Cependant, tous les résultats de recherches en calcul optique contribuent fortement au développement de nouveaux thèmes de recherches tels que la biophotonique, la nanophotonique, l'optofluidique et l'optique femto-seconde non-linéaire. Mais le rêve d'un ordinateur tout-optique de surmonter l'ordinateur numérique n'a jamais été fait, et les corrélateurs optiques de reconnaissance de formes ont presque disparu. La vitesse du processeur optique est toujours limitée par la vitesse des dispositifs d'entrée et de sortie. Les ordinateurs optiques ne sont pas en mesure de concurrencer les ordinateurs électroniques en raison de l'absence de composants optiques appropriés.

Il apparaît clairement que la solution est d'associer l'optique et l'électronique. Utiliser l'optique seulement quand elle peut apporter quelque chose que l'électronique ne peut pas la faire. Le potentiel de traitement optique parallèle en temps réel reste important et l'avenir nous dira si le calcul optique sera de retour, par exemple en utilisant les nanotechnologies [65].

1-5-Références :

1. K. Preston, *Coherent Optical Computers*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1972.
2. S. H. Lee, *Optical Information Processing Fundamentals*, Springer, Berlin, Germany, 1981.
3. H. Stark, *Application of Optical Fourier Transform*, Academic Press, Orlando, Fla, USA, 1982.
4. H. H. Arsenault, T. Szoplik, and B. Macukow, *Optical Processing and Computing*, Academic Press, San Diego, Calif, USA, 1989.
5. J.-L. Tribillon, *Traitement Optique de l'Information & Reconnaissance des Formes par Voie Optique*, Teknea, Toulouse, France, 1998.
6. J. Shamir, *Optical Systems and Processes*, SPIE Press, Bellingham, Wash, USA, 1999.
7. H. J. Caulfield, *Perspectives in optical computing*, *Computer*, vol. 31, no. 2, pp. 22–25, 1998.
8. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, San Francisco, Calif, USA, 1968.
9. P.-M. Duffieux, *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Faculté des Sciences Besançon, Chez l'Auteur, France, 1946.
10. A. Maréchal and P. Croce, *Un filtre de fréquences spatiales pour l'amélioration du contraste des images optiques*, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 237, no. 12, pp. 607–609, 1953.
11. P. Ambs, S. H. Lee, Q. Tian, et al., *Optical implementation of the Hough transform by a matrix of holograms*, *Applied Optics*, vol. 25, no. 22, pp. 4039–4045, 1986.
12. J. W. Goodman, *Linear space-variant optical data processing*, in *Optical Information Processing Fundamentals*, S. H. Lee, Ed., pp. 235–260, Springer, Berlin, Germany, 1981.
13. T. H. Maiman, *Stimulated optical radiation in ruby*, *Nature*, vol. 187, no. 4736, pp. 493–494, 1960.
14. T. H. Maiman, *Optical and microwave-optical experiments in ruby*, *Physical Review Letters*, vol. 4, no. 11, pp. 564–566, 1960.
15. A. Vander Lugt, *Coherent optical processing*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 10, pp. 1300–1319, 1974.

16. E. N. Leith, The evolution of information optics, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 6, pp. 1297–1304, 2000.
17. L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo, et al., Optical data processing and filtering systems, *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 6, no. 3, pp. 386–400, 1960.
18. E. O'Neill, Spatial filtering in optics, *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 2, no. 2, pp. 56–65, 1956.
19. A. Vander Lugt, Signal detection by complex filtering, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 10, no. 2, pp. 139–145, 1964.
20. L. Bigué, Reconnaissance des formes en temps réel par voie optique: étude comparative d'implantations optiques de filtres de corrélation. Application au corrélateur optique à transformée de Fourier conjointe, Ph.D. thèse, Université de Haute Alsace, 1996.
21. C. S. Weaver and J. W. Goodman, A technique for optically convolving two functions, *Applied Optics*, vol. 5, no. 7, pp. 1248–1249, 1966.
22. W. T. Rhodes and A. A. Sawchuk, Incoherent optical processing, in *Optical Information Processing Fundamentals*, S. H. Lee, Ed., pp. 69–110, Springer, Heidelberg, Germany, 1981.
23. B. Javidi, Nonlinear joint power spectrum based optical correlation, *Applied Optics*, vol. 28, no. 12, pp. 2358–2367, 1989.
24. P. Refregier, V. Laude, and B. Javidi, Nonlinear joint-transform correlation: an optimal solution for adaptive image discrimination and input noise robustness, *Optics Letters*, vol. 19, no. 6, pp. 405–407, 1994.
25. D. Casasent, Hybrid processors, in *Optical Information Processing Fundamentals*, S. H. Lee, Ed., pp. 181–233, Springer, Berlin, Germany, 1981.
26. D. Gabor, A new microscopic principle, *Nature*, vol. 161, no. 4098, pp. 777–778, 1948.
27. E. N. Leith and J. Upatnieks, Wavefront reconstruction with continuous-tone objects, *Journal of Optical Society of America*, vol. 53, no. 12, pp. 1377–1381, 1963.
28. E. N. Leith and J. Upatnieks, Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects, *Journal of Optical Society of America*, vol. 54, no. 11, pp. 1295–1301, 1964.
29. B. R. Brown and A. W. Lohmann, Complex spatial filtering with binary masks, *Applied Optics*, vol. 5, no. 6, pp. 967–969, 1966.
30. W. Lohmann and D. P. Paris, Binary Fraunhofer holograms, generated by computer, *Applied Optics*, vol. 6, no. 10, pp. 1739–1748, 1967.

31. L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan Jr., The kinoform: a new wavefront reconstruction device, *IBM Journal of Research and Development*, vol. 13, no. 2, pp. 150–155, 1969.
32. M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, Synthesis of digital holograms by direct binary search, *Applied Optics*, vol. 26, no. 14, pp. 2788–2798, 1987.
33. F. Wyrowski and O. Bryngdahl, Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography, *Journal of Optical Society of America A*, vol. 5, no. 7, pp. 1058–1065, 1988.
34. F. Xu, R. C. Tyan, P. C. Sun, Y. Fainman, C. C. Cheng, and A. Scherer, Form-birefringent computer-generated holograms, *Optics Letters*, vol. 21, no. 18, pp. 1513–1515, 1996.
35. B. Kress and P. Meyrueis, *Applied Digital Optics: From Micro-Optics to Nanophotonics*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2009.
36. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, UK, 1980.
37. J. Turunen and F. Wyrowski, *Diffraction Optics for Industrial and Commercial Applications*, Akademie, Berlin, Germany, 1997.
38. J. N. Mait, From ink bottles to e-beams: a historical perspective of diffractive optic technology, in *Optical Processing and Computing: A Tribute to Adolf Lohmann*, vol. 4392 of *Proceedings of SPIE*, pp. 75–86, Orlando, Fla, USA, 2001.
39. A. D. Fisher and J. N. Lee, The current status of two-dimensional spatial light modulator technology, in *Optical and Hybrid Computing*, vol. 634 of *Proceedings of SPIE*, pp. 352–371, Leesburg, Va, USA, March 1986.
40. T.-C. Poon, R. Juday, and T. Hara, Spatial light modulators—research, development and applications: introduction to the feature issue, *Applied Optics*, vol. 37, no. 32, p. 7471, 1998.
41. W. E. Ross and J. A. Davis, The magneto-optic spatial light modulator, in *Spatial Light Modulator Technology: Materials, Devices, and Applications*, U. Efron, Ed., pp. 361–390, Marcel Dekker, New York, NY, USA, 1995.
42. T.-H. Lin, A. Ersen, J. H. Wang, et al., Two-dimensional spatial light modulators fabricated in Si/PLZT, *Applied Optics*, vol. 29, no. 11, pp. 1595–1603, 1990.
43. D. R. Pape and L. J. Hornbeck, Characteristics of the deformable mirror device for optical information processing, *Optical Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 675–681, 1983.
44. E. Frumker and Y. Silberberg, Phase and amplitude pulse shaping with two-dimensional phase-only spatial light modulators, *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 24, no. 12, pp. 2940–2947, 2007.
45. W. Osten, C. Kohler, and J. Liesener, Evaluation and application of spatial light modulators for optical metrology, *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 38, no. 3, pp. 71–81, 2005.

46. A. Pu, R. Denkewalter, and D. Psaltis, Real-time vehicle navigation using a holographic memory, *Optical Engineering*, vol. 36, no. 10, pp. 2737–2746, 1997.
47. H. Rajbenbach, S. Bann, P. Réfrégier, et al., A compact photorefractive correlator for robotic applications, *Applied Optics*, vol. 31, no. 26, pp. 5666–5674, 1992.
48. J. F. Rodolfo, H. J. Rajbenbach, and J. P. Huignard, Performance of a photorefractive joint transform correlator identification, *Optical Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 1166–1171, 1995.
49. J. A. Sloan and D. W. Small, Design and fabrication of a miniaturized optical correlator, *Optical Engineering*, vol. 32, no. 12, pp. 3307–3315, 1993.
50. S. Bains, Miniature optical correlator fits inside a PC, *Laser Focus World*, vol. 31, no. 12, pp. 17–18, 1995.
51. H. M. Teager, Parallel organized optical computers, in *Optical Processing of Information*, D. K. Pollock, C. J. Koester, and J. T. Tippett, Eds., pp. 13–19, Spartan Books, Washington, DC, USA, 1963.
52. L. K. Anderson, Holographic optical memory for bulk data storage, *Bell Laboratories Records*, vol. 46, pp. 318–325, 1968.
53. L. d'Auria, J. P. Huignard, C. Slezak, and E. Spitz, Experimental holographic read-write memory using 3-D storage, *Applied Optics*, vol. 13, no. 4, pp. 808–818, 1974.
54. J. Ashley, M. P. Bernal, G. W. Burr, et al., Holographic data storage, *IBM Journal of Research and Development*, vol. 44, no. 3, pp. 341–368, 2000.
55. W. Goodman, H. H. Arsenault, T. Szoplik, and B. Macukow, Optics as an interconnect technology, in *Optical Processing and Computing*, Academic Press, San Diego, Calif, USA, 1989.
56. Young, E. Mohammed, J. Liao, et al., Optical I/O technology for tera-scale computing, in *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC '09)*, pp. 468–469, San Francisco, Calif, USA, February 2009.
57. Y. Fainman, K. Tetz, R. Rokitski, and L. I. N. Pang, Surface plasmonic fields in nanophotonics, *Optics & Photonics News*, vol. 17, no. 7-8, pp. 24–29, 2006.
58. Y. Fainman, Ultrafast and nanoscale optics, in *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics, and Conference on Quantum Electronics and Laser Science (CLEO/QELS '09)*, pp. 1–2, Baltimore, Md, USA, June 2009.
59. D. Erickson, T. Rockwood, T. Emery, A. Scherer, and D. Psaltis, Nanofluidic tuning of photonic crystal circuits, *Optics Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 59–61, 2006.
60. A. Groisman, S. Zamek, K. Campbell, L. I. N. Pang, U. Levy, and Y. Fainman, Optofluidic 1×4 switch, *Optics Express*, vol. 16, no. 18, pp. 13499–13508, 2008.

61. U. Schnars and W. Jueptner, *Digital Holography*, Springer, Berlin, Germany, 2005.
62. U. Schnars and W. Jueptner, Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography, *Applied Optics*, vol. 33, no. 20, pp. 4373–4377, 1994.
63. J. Kühn, F. Montfort, T. Colomb, et al., Submicrometer tomography of cells by multiple-wavelength digital holographic microscopy in reflection, *Optics Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 653–655, 2009.
64. B. Javidi, *Optical and Digital Techniques for Information Security*, Springer, New York, NY, USA, 2005.
65. P. Ambs, *Optical Computing: A 60-Year Adventure*, *Advances in Optical Technologie*, Hindawi publishing corporation, 2010.

2- Partie B : Le traitement numérique :

2-1- Introduction :

On désigne par le traitement numérique des images l'ensemble des techniques numériques permettant de modifier ou de restituer une image dans le but de l'améliorer (qualitativement ou quantitativement) ou d'en extraire des informations et de l'employer dans des logiciels de manipulation et de contrôle. Le traitement d'images numériques est une nouvelle discipline qui s'est développée rapidement grâce à l'émergence des nouvelles technologies de l'information. Il s'appuie notamment sur les mathématiques liées à l'information, le traitement du signal, les systèmes électroniques et informatiques, et sur l'avancée des capacités de calcul des microprocesseurs.

2- 2- Qu'est-ce qu'une image numérique ?

Une image est, avant tout, un signal 2D (x, y) représentant souvent une réalité 3D (x,y,z) . D'un point de vue mathématique, une image est une matrice de nombres symbolisant un signal dont on peut le manipuler par plusieurs outils [1].

On peut classer les images, selon leurs natures, en deux catégories, voir figures en dessous:

- Images naturelles.
- Images artificielles.



a- Image naturelle : événements en Égypte. [2].

b- Image artificielle: Synthèse d'un robot [3].

Figure (I-3): Catégories d'images par nature.

Ces catégories peuvent être répertoriées sous plusieurs formes:

- Images couleurs, $I(x, y)$ est composé de trois intensités, rouge, verte et bleu: $I_R(x,y)$ $I_G(x,y)$, $I_B(x,y)$.
- Images en niveaux de gris $I(x, y) \in [0,255]$, voir figure (1-4-a).
- Images en forme binaire $I(x, y)$ peut être que 0 ou 1. voir figure (1-4-b).



a- Image en niveaux de gris [4].

b- Image binaire réalisée sous Matlab voir annexe I.

Figure (I-4): Formes d'images par intensité

Elles peuvent également, être classer suivant le capteur utilisé pour les acquérir.

Phénomène physique	Grandeur mesurée.	Capteur
Emission et réflexion de la lumière visible.	Réflectance, luminance,...	CCD, CMOS, œil humain
Rayonnement infrarouge.	Luminance IR (chaleur), ...	Bolomètres...
Echo ultrasonore.	Profondeur, densité de tissus,...	Echographie, sonar,...
Résonance magnétique.	Présence d'un corps chimique...	IRM, RMN,...
Echo électromagnétique.	Distance, ...	Radar,...
Absorption des rayons X.	Densité de tissus...	Radiographie, Tomographie...

Tableau(I.1) : Classement des images suivant leurs capteurs [5].

2-3- Domaines généraux de traitements numériques d'images :

- Amélioration et Restauration.
- Analyse.
- Codage d'images avec compression, cryptage, ...etc.
- Synthèse [6].

2-3-1- L'amélioration et la restauration :

Le traitement effectué pour nous donner en sortie l'image transformée, doit permettre d'exploiter l'information contenue de manière plus efficace que l'information dans l'image directement observée. Dans le cas d'une modification positive de caractéristiques de présentation de l'image, on parlera de « traitement d'amélioration ». Alors que, dans le cas d'une inversion partielle du phénomène de dégradation on parlera de « traitement de restauration » [7] (exemples : filtrage linéaire 2-D, filtrage 2-D adaptatif, ...).

2-3-2- L'analyse d'images :

Il s'agit de décrire partiellement ou complètement la scène à partir de l'image observée (objets présents, dimensions, position dans l'espace, ...). Classiquement ce processus d'analyse se décompose en 3 phases successives :

- Prétraitement et extraction des traits caractéristiques,
- Classification et reconnaissance de formes,
- Description de l'image et, éventuellement, interprétation.

Il faut cependant noter que l'analyse d'images varie également en fonction du support. Les problématiques soulevées par l'analyse d'images 2-D, l'analyse d'images 3-D, ou l'analyse des images animées varient, si bien qu'on différencie ces dernières en raison des techniques mises en œuvre et de la nature des objectifs recherchés [8].

2- 3-2- 1- Les outils fondamentaux pour l'analyse :

2- 3-2- 1- a- L'histogramme :

L'histogramme est utilisé par certains opérateurs d'analyse comme outil de base pour l'étude d'une scène. Il représente la distribution des niveaux de gris (ou de couleurs) dans une image, $h(k)$ = nombre de pixels de l'image ayant la valeur k [9].

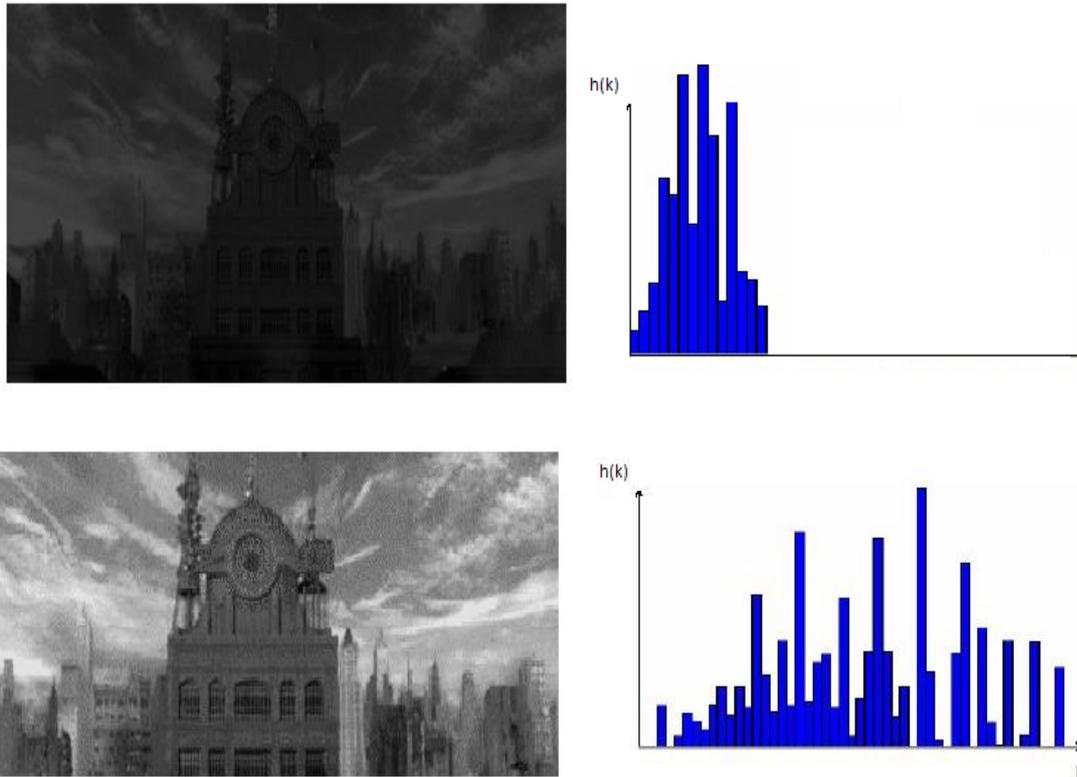


Figure (I-5) : Image restaurée par son histogramme [10].

2- 3-2-1-b- La convolution :

La convolution c'est le fait d'intervenir dans le domaine spatial de l'image, qui se fait par la multiplication conventionnelle de la fonction de l'image par la fonction du filtre spatial.

Soit $I(x, y)$ une image numérique et $h(x, y)$ définit dans l'intervalle $[x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$ par une fonction de valeurs réelles, la convolution de I par h est définie par :

$$I(x, y) \otimes h(x, y) = \sum_{i=x_1}^{x_2} \sum_{j=y_1}^{y_2} h(i, j).I(x - i, y - j) \tag{I-1}$$

2-3-2-1-c- La transformée de Fourier :

C'est un outil essentiel d'analyse en traitement numérique du signal, l'extension bidimensionnel de la TF et sa version discrète peut être appliquée avec profit aux images numériques. On peut avec, analyser les fréquences spatiales au lieu de fréquences temporelles. Pour cela, on crée impérativement un histogramme représentant les fréquences de l'image dans son domaine spatial et non pas temporelle. Cette transformée reste un outil théorique et pédagogique idoine exploitée en détail dans les prochains paragraphes.

2-3-3 La synthèse d'images :

Son but est de reconstruire une image qui ressemble à une scène, la simulée à partir de sa description des objets qui la composent, des caractéristiques, de l'éclairage (incidence, intensité...) et, enfin, du dispositif de prise de vue (caméra CCD, CMOS...). Cette scène reconstruite peut être analogue à la réalité ou purement imaginaire. Les premières applications liées aux images de synthèse furent d'abord orientées vers les simulateurs d'entraînement (vol, engins terrestres...) puis se sont amplement diversifiées (audiovisuel, cinéma, art...). L'application que nous allons représentée dans notre travail expérimental rentre dans cette rubrique [1].

2-4- Le codage d'images avec compression d'information :

La représentation d'une image numérique correspond à un tableau 2-D d'éléments appelés pixels, il faut mémoriser typiquement 512×512 pixels (soit 256 000 pixels) et 8 bits par pixel pour obtenir une bonne résolution. Pour des images couleurs de haute résolution, et pour des images animées, le nombre de bits nécessaires à la représentation de base devient vite très important pour la mémorisation ou la transmission [11].

Le codage d'une image a donc pour but d'obtenir de cette dernière, une représentation qui ne nécessite qu'un nombre très réduit de bits. Le taux de compression, τ , est défini par le nombre de bits pour la représentation de l'image après codage, sur le nombre de bits pour la représentation de l'image de base. Ce taux doit être inférieur à 1 pour effectuer une compression effective.

Pour une compression macroscopique, il suffit de se contenter d'une représentation visuellement exacte. Dans ce cas, l'œil ne distingue aucune différence entre l'image d'origine et l'image reconstituée après décodage, dans le but de faciliter la mémorisation et la transmission sans engendrer de dégradations gênantes. Le logiciel le plus utilisé pour l'usage normal est : JPEG, voir annexe1, mais il est d'une classe indésirable pour les scientifiques à cause de ces pertes qualitatives [11].

Les traitements de la détection et de l'extraction jouent un rôle important dans plusieurs domaines selon l'application et les objectifs, pour représenter certaines informations visuelles. Une grande quantité de données occupe la mémoire selon ce qui suit:

– Une page Télétexte = 25 lignes \times 40 caractères => 1 Kbyte.

- Une page A4 de texte = 50 lignes \times 80 caractères \Rightarrow 4 Kbytes.
- Une seconde de téléphone (300 Hz - 3400 Hz) \Rightarrow 8 Kbytes.
- Une seconde d'audio en hi-fi stéréo \Rightarrow 176.4 Kbytes.
- Une fax A4 \Rightarrow 1.1 Mbytes.
- Une image couleur (qualité diapositive: 2000 \times 3000) \Rightarrow 18 Mbytes.
- Une seconde de programme TV (signal vidéo) \Rightarrow 21 Mbytes.
- Une seconde de programme HDTV \Rightarrow 230 Mbytes.

Pour cela, on opte à les enregistrer sous plusieurs formats en fonction de l'extraction de l'information nécessaire à notre traitement.

2-4-1- Formats de fichiers d'images :

Il existe beaucoup de format de fichiers images dont chacun possède ses particularités singulières et qui sont:

TIF, GIF, JPEG, PNG, PPM, PGM, BMP.... (Voir l'annexe I).

2-4-1-1 Formats sans compression :

Les formats les plus simples sont les formats où les images ne sont pas compressées. Les pixels sont codés directement, les uns à la suite des autres. Les plus utiles principalement sont :

PGM : images en niveaux de gris 8 bits, et **PPM** : images en couleurs Rouge-Vert-Bleu 24 bits.

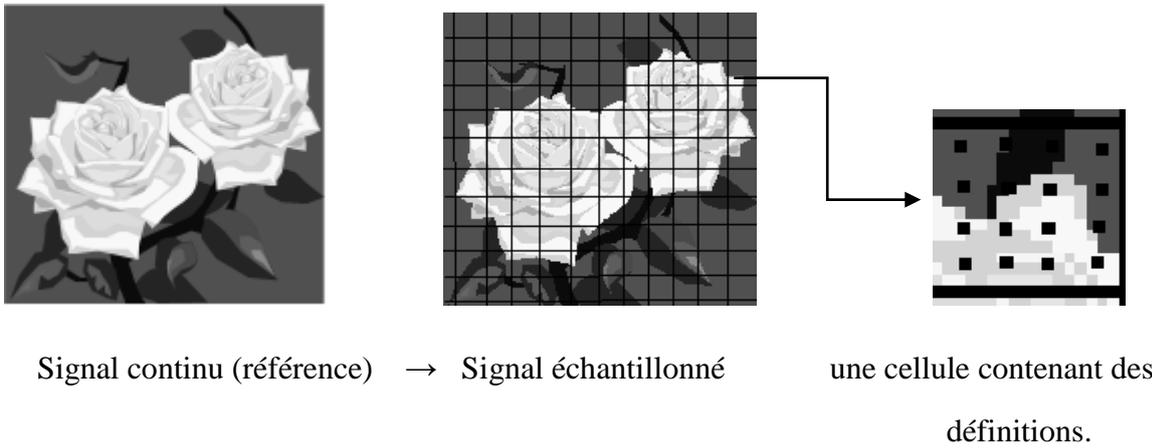
2-4-1-2 Formats avec compression :

Les pixels sont compressés pour que le fichier soit plus petit sur le disque.

- La compression sans perte veut dire fichier compressé sans modification de la valeur des pixels.
- La compression avec perte sous entend que les valeurs des pixels modifiées pour prendre encore moins de place après la compression (PNG, JPEG). On évite autant que possible de sauvegarder les résultats de recherches scientifiques qui se basent sur la haute définition en JPEG.

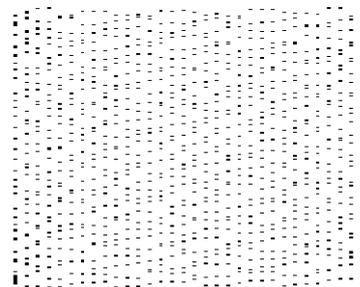
2-5- Acquisition d'une image :

L'acquisition de l'image par un appareil, s'effectue en une fraction de seconde Le capteur converti le phénomène observé à des valeurs de "voltage" continu. La numérisation de l'image s'effectue d'abords par l'échantillonnage qui est limité par le nombre de pixels du capteur disponible, puis la quantification qui dépend de la quantité des tons dans l'intervalle échantillon qu'elle peut être représentée, la figure suivante illustre les prétraitements sur un signal bidimensionnel [9].



25	58	45	00	12	77
69	45	00	60	55	52
36	0	21	33	41	10
98	10	11	11	23	00
65	23	23	00	99	33

Signal quantifier →



Signal codé.

Figure (I-6) : Chaîne de numérisation d'un signal bidimensionnel.

La représentation numérique des images se fait par une matrice de dimension $M \times N$, chaque élément a une valeur entière dans l'intervalle de L , Le nombre de "bits" élémentaire à notre disposition pour représenter les niveaux de gris dans cette intervalle est "K", ou la relation entre "K" et "L" est : $L = 2^K$, K est un entier positif. Alors le nombre de bits pour enregistrer une image est donc : $b = M \times N \times K$. La résolution de l'image se décompose en deux catégories:

- Résolution spatiale qui est définie par le plus petit détail discernable.
- Résolution tonale (de tons de gris) qui est le plus petit changement discernable.

Une image a donc une résolution spatiale de $M \times N$ pixel et une résolution de tons de gris de L niveaux ou bien de K bits.

2-6- Les fréquences dans l'image:

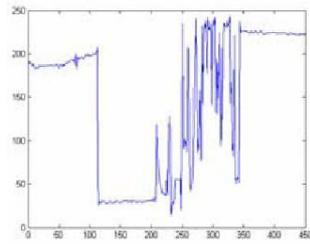


Figure (I-7): Représentation des fréquences d'une ligne prise de l'image [13].

La fréquence dans une image c'est le changement d'intensité (Figure 1-7). Les basses fréquences sont les régions étalées et presque homogènes; le flou aussi, est défini comme une basse fréquence. Les hautes fréquences sont les contours, le changement brusque d'intensité est le bruit voir les figures (1-8) et (1-9). La plus grande partie de l'énergie d'une image se situe dans les basses fréquences [12].

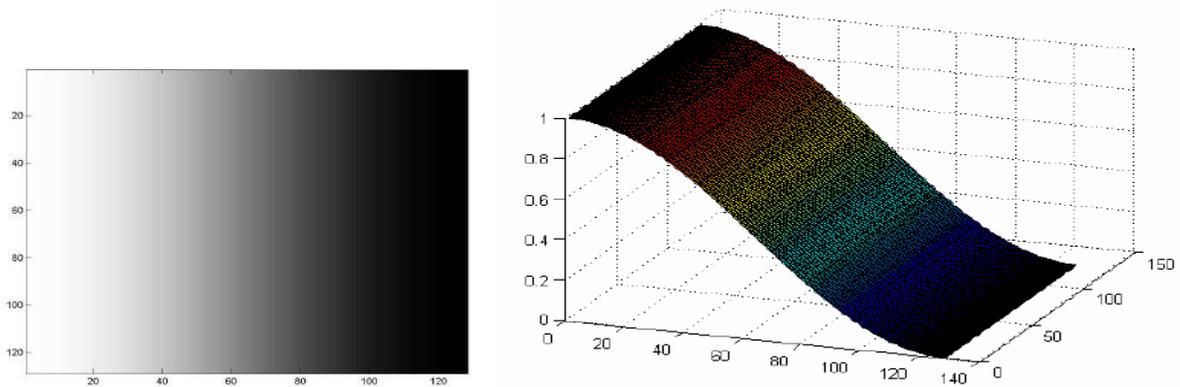


Figure (I-8): Les basses fréquences [13].

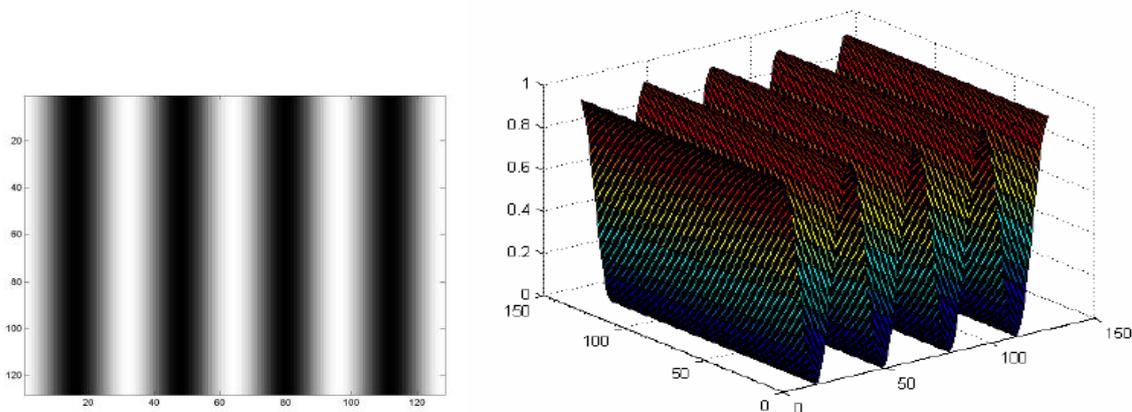


Figure (I-9): Les hautes fréquences [13].

Pour une définition globale, les basses fréquences correspondent à des changements d'intensités lents. Les hautes fréquences correspondent à des changements d'intensité rapides.

Une image est avant tout un signal visuel, tout comme le son est un signal audio. On peut analyser la fréquence de ce signal en les transformant de son domaine spatial à un domaine fréquentiel, par la réalisation de la transformée de Fourier. Donc on reçoit une fonction complexe à partir d'une fonction réelle qui est l'image. L'outil de base pour cela est la Transformée de Fourier. Le codage de la transformée de Fourier est réalisé par l'algorithme le plus connu et le plus utilisé qui est la FFT (**FFT = Fast Fourier Transform**) exemple illustré par la figure (1-10).

La transformée de Fourier inverse nous reproduit exactement l'image initiale. Cette application est souvent utilisée pour effectuer des traitements sur les fréquences de l'image ou la propriété de la TF amplifie les basses fréquences et réduit les hautes fréquences [14].

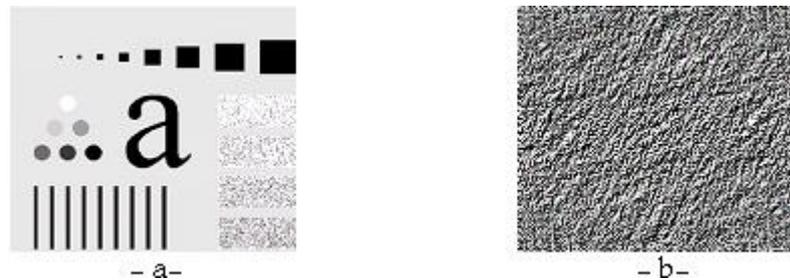


Figure (I-10): Réalisation de la FFT de l'image -a - d'après le Matlab R2009b.

2-7- Exemples d'application de la TF:

2-7-a- Filtrage passe-bas par TF :

On efface les hautes fréquences de la TF en mettant le filtre loin du centre [14], le résultat sera observé comme illustré sur la figure suivante :

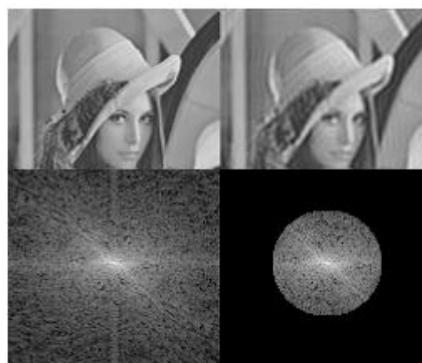


Figure (I-11): Le filtrage passe-bas [15].

2-7-b- Filtrage passe-haut par TF :

On efface les basses fréquences de la TF et on laisse passer les pixels du centre, on obtient une image désignée que sur ses contours, voir figure suivante :

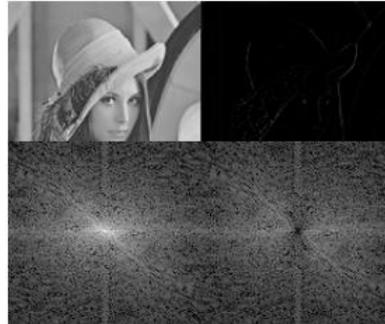
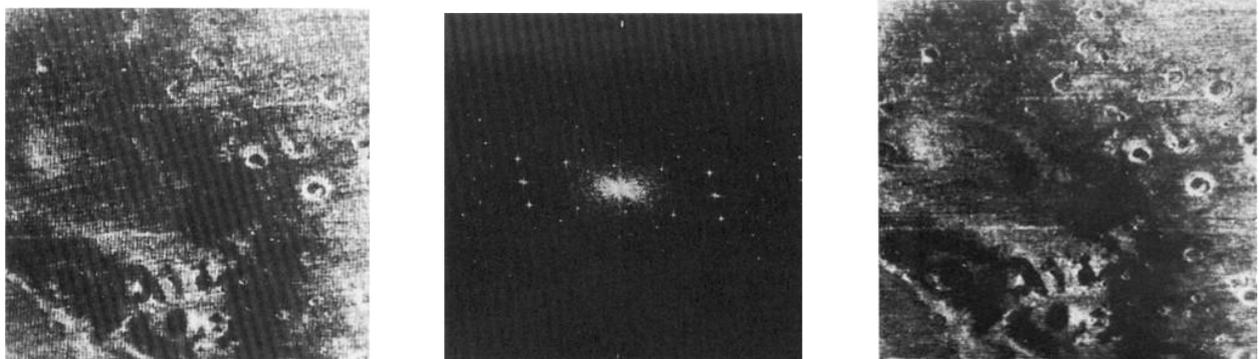


Figure (I-12):Le filtrage passe-haut [15].

2-7- c Réduction du bruit dans une image :

Dans le spectre de l'image, on élimine les fréquences supplémentaires qui représentent le bruit on obtient une image améliorée.



- Image bruitée

-Spectre de Fourier

- Image filtrée

Figure (I-13):Le filtrage du signal bruit de l'image satellite [16].

3- Conclusion :

Enfin, il convient de signaler que le traitement numérique d'images s'appuie également sur les performances des machines de traitement et la puissance de calcul. Il demande des architectures performantes à haut degré de parallélisme et à haute vitesse de traitement. Et l'un des soucis de la mise au point des méthodes de traitement sera de ne pas payer le gain de performance par un accroissement important de temps de traitement.

4- Références :

1. C, Thierry. Colour image segmentation in hue-saturation-intensity space: numerical and symbolic approach. Thèse de doctorat. Université de Chambéry. Chambéry, France 2000.
2. <http://www.rfi.fr/emission/20130713-evenements-egypte-le-pape-francois-lampedusa//>
3. <http://ia-tpe2010.e-monsite.com/pages/l-ia-et-l-histoire/definition-de-l-ia-par-des-scientifiques.html>.
4. <http://willow6783.skyrock.com>.
5. D, Lingrand. Introduction au Traitement d'Images. Vuibert. Paris. 2004.
6. A. Manzaera. Cours de Traitements d'image et vision artificielle, ENSTA D9-2, France.
7. R, C, Gonzalez. R. E. Woods. Digital Image Processing, second edition. Prentice-Hall. 2002.
8. D, A, Forsyth. J, Ponce. Computer Vision: A Modern Approach. Prentice-Hall. 2003.
9. K, R, Castleman. Digital Image Processing. Prentice-Hall. 2000.
10. E. Favier.cours sur l'analyse et le traitement des images: les principes de la vision associée par ordinateur. ENISE. France.
11. A. Rosenfeld et A.C. Kak . Digital picture processing. Academic Press - London 1982.
12. S. Bres, J.M. Jolion, F. Lebourgeois, Traitement et analyse des images numériques, Hermes Lavoisier 2003.
13. T.Guyet. Images numériques. IUT Sérécom. France.
14. J.R. Parker . Algorithms for Image Processing and Computer Vision. Wiley & Sons 1997.
15. J.P. Cocquerez et S. Philipp. Analyse d'images : filtrage et segmentation. Masson 1995.
16. Ganzalez. and Woods.Digital Image Pricessing. Prentice- Hall, 2002.

Chapitre II :

Interférométrie et Hologrammes générés par ordinateur, HGC , (méthode opto-informatique).

1- Interferométrie :

1-1- Introduction:

Les techniques optiques sont actuellement largement utilisées dans la production de systèmes automatisés pour mesurer les déplacements et inspecter les surfaces. Elles présentent des avantages significatifs de fiabilité et de précision. Elles permettent aussi des mesures non destructives et sans contact. Les méthodes interférométriques comme l'holographie, la métrologie speckel et les techniques de projection de franges ont trouvé un intérêt croissant, non seulement dans la recherche en laboratoire mais aussi dans des applications industrielles [1].

Ces méthodes peuvent être exploitées dans l'industrie pour le contrôle et l'optimisation de composants optiques (lentilles, miroirs, etc.), ou pour l'inspection sur place en vue de détecter des défauts de production ou de fonctionnement d'équipements industriels [1].

Le principe de base de ces techniques est la superposition cohérente (interférence) de faisceaux de lumière représentant les différents états de l'objet testé. Une propriété intéressante et commune de ce phénomène réside dans le signal exploitable en sortie, le résultat est matérialisé par des réseaux périodiques de franges d'interférence voir figure (II-1). Les fluctuations d'intensité ainsi obtenues contiennent l'information sur les paramètres caractéristiques du phénomène observé : déplacement, augmentation de température, absorption d'énergie, etc.

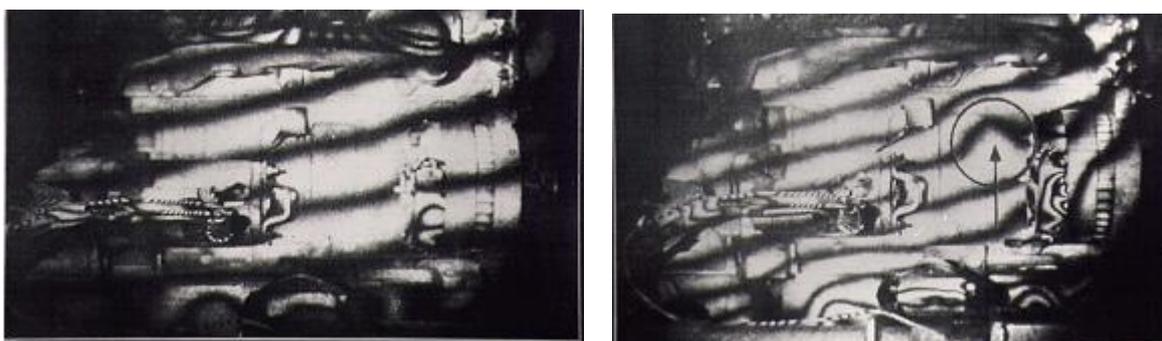


Figure (II-1): Un interférogramme déterminé du cliquetis d'un moteur [1].

L'information peut être tirée ainsi, par des modes de vibrations qui sont localement perturbés par des criques, voir figure suivante:

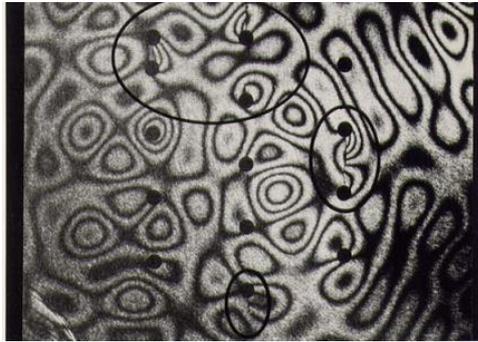


Figure (II-2): Un interférogramme détermine des criques sur une plaque métallique en vibration [1].

Les méthodes d'analyse de réseaux ont toujours été présentes en interférométrie, mais elles étaient effectuées manuellement jusqu'au début des années 1980. L'importance de l'introduction des nouvelles technologies informatiques est justifiée par un gain considérable en temps de traitement et surtout par la suppression des erreurs de manipulation. L'émergence récente de systèmes spécifiques de traitement d'images et particulièrement d'images interférométriques a permis l'utilisation de systèmes capables de mémoriser un grand nombre d'images et de les traiter en des temps de plus en plus courts. La combinaison de l'interférométrie optique et de l'imagerie numérique permet de nouvelles approches en métrologie optique et en contrôle non destructives telles que les techniques d'examen en temps réel [2].

1-2 Rappel des interférences :

On considère deux ondes de même pulsation mais de phases différentes d'expressions, A_1 : onde modulée par une image avant déformation et A_2 : même onde modulée par la même image après déformation.

$$A_1(x, y) = A_{01}(x, y) \cos(\omega t - \varphi_1(x, y)) \quad (\text{II-1})$$

Et

$$A_2(x, y) = A_{02}(x, y) \cos(\omega t - \varphi_2(x, y)) \quad (\text{II-2})$$

On cherche à mettre l'onde résultante sous la forme :

$$A(x, y) = A_1(x, y) + A_2(x, y) = A_0(x, y) \cos(\omega t - \varphi(x, y)) \quad (\text{II-3})$$

En développant, on trouve :

$$\begin{aligned}
 A_0(x, y) \cos(\omega t) \cos(\varphi(x, y)) + A_0(x, y) \sin(\omega t) \sin(\varphi(x, y)) = \\
 A_{01}(x, y) \cos(\omega t) \cos(\varphi_1(x, y)) + A_{01}(x, y) \sin(\omega t) \sin(\varphi_1(x, y)) + \\
 A_{02}(x, y) \cos(\omega t) \cos(\varphi_2(x, y)) + A_{02}(x, y) \sin(\omega t) \sin(\varphi_2(x, y))
 \end{aligned}
 \tag{II-4}$$

On doit donc résoudre simultanément :

$$\begin{aligned}
 A_0(x, y) \cos(\omega t) \cos(\varphi(x, y)) = \\
 A_{01}(x, y) \cos(\omega t) \cos(\varphi_1(x, y)) + A_{02}(x, y) \cos(\omega t) \cos(\varphi_2(x, y))
 \end{aligned}
 \tag{II-5}$$

$$\begin{aligned}
 A_0(x, y) \sin(\omega t) \sin(\varphi(x, y)) = \\
 A_{01}(x, y) \sin(\omega t) \sin(\varphi_1(x, y)) + A_{02}(x, y) \sin(\omega t) \sin(\varphi_2(x, y))
 \end{aligned}
 \tag{II-6}$$

d'où :

$$A_0(x, y) \cos(\varphi(x, y)) = A_{01}(x, y) \cos(\varphi_1(x, y)) + A_{02}(x, y) \cos(\varphi_2(x, y))
 \tag{II-7}$$

$$A_0(x, y) \sin(\varphi(x, y)) = A_{01}(x, y) \sin(\varphi_1(x, y)) + A_{02}(x, y) \sin(\varphi_2(x, y))
 \tag{II-8}$$

1-2-1- Calcul de l'amplitude de l'onde résultante :

On obtient l'amplitude en élevant au carré et en sommant membre à membre les deux équations :

$$\begin{aligned}
 A_0^2(x, y) (\cos^2\varphi(x, y) + \sin^2\varphi(x, y)) = A_{01}^2(x, y) (\cos^2\varphi_1(x, y) + \sin^2\varphi_1(x, y)) + \\
 A_{02}^2(x, y) (\cos^2\varphi_2(x, y) + \sin^2\varphi_2(x, y)) + \\
 2A_{01}(x, y)A_{02}(x, y)(\cos\varphi_1(x, y)\cos\varphi_2(x, y) + \sin\varphi_1(x, y)\sin\varphi_2(x, y))
 \end{aligned}
 \tag{II-9}$$

Et ainsi :

$$A_0^2(x, y) = A_{01}^2(x, y) + A_{02}^2(x, y) + 2A_{01}(x, y)A_{02}(x, y)(\cos(\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)))
 \tag{II-10}$$

Si les ondes se superposent en phase ; ($\varphi_1(x, y) = \varphi_2(x, y)$), on obtient :

$$A_0^2(x, y) = (A_{01}(x, y) + A_{02}(x, y))^2
 \tag{II-11}$$

On parle d'interférence constructive, car la puissance résultante augmente.

Si les ondes se superposent en phase opposée ($\varphi_1(x, y) = \varphi_2(x, y) + \pi$) on obtient :

$$A_0^2(x, y) = (A_{01}(x, y) - A_{02}(x, y))^2 \quad (\text{II-12})$$

On parle d'interférence destructive, car la puissance résultante diminue. Entre ces deux extrêmes, la puissance totale varie selon le cosinus de la différence des phases.

1-1-2- Calcul de la phase de l'onde résultante :

On obtient la phase en rapportant membre à membre les deux équations précédentes :

$$\tan(x, y) = \frac{A_{01}(x, y)\sin\varphi_1(x, y) + A_{02}(x, y)\sin\varphi_2(x, y)}{A_{01}(x, y)\cos\varphi_1(x, y) + A_{02}(x, y)\cos\varphi_2(x, y)} \quad (\text{II-13})$$

Finalement, l'expression de l'onde résultante se résume à :

$$A(x, y, t) = \sqrt{A_{01}(x, y)^2 + A_{02}(x, y)^2 + 2 A_{01}(x, y)A_{02}(x, y)} \\ (\cos (wt - \arctan \left(\frac{A_{01}(x, y) \sin \varphi_1(x, y) + A_{02}(x, y) \sin \varphi_2(x, y)}{A_{01}(x, y) \cos \varphi_1(x, y) + A_{02}(x, y) \cos \varphi_2(x, y)} \right))) \quad (\text{II-14})$$

2-Hologrammes générés par ordinateur, HGC :

2- 1-Introduction :

L'invention de l'holographie par Gabor, suivie par les travaux de Leith et Upatnieks, a rendue possible les transformations du front d'onde à l'aide de microstructures optiques fabriquées par des interférences. La réalisation de Lohmann et ses collègues en 1960 a prouvé que les hologrammes optiques peuvent être simulés par des transparents binaires générés numériquement, qui est une étape importante dans la voie de la généralisation des éléments optiques diffractifs.

Cette nouvelle approche a été appelée holographie numérique, ou de manière équivalente holographie générée par ordinateur. L'hologramme généré par ordinateur (HGC) se distingue principalement de son cousin traditionnel par le fait que l'ordinateur est en mesure de concevoir un hologramme à partir d'un **inexistant, synthétique** ou **virtuel** objet. L'opération de synthèse de l'élément optique diffractif (DOE) peut être optimisée mathématiquement plutôt que expérimentalement.

Cela est évident à partir des déclarations du Professeur Lohmann lui-même, commentant le passage de l'holographie classique à l'holographie numérique en 2008: "*Nous avons considéré les images comme des informations, et nous avons appliqué les notions de modulations d'après les théories de communication et de l'information. En d'autres termes, notre approche représente un changement du paradigme de l'optique physique au traitement optique de l'information.*"[3].

On définit l'élément optique diffractif (DOE) comme étant un dispositif optique dont le micro-relief superficiel a une dimension comparable à la longueur d'onde de lumière utilisée. Etant donné que le fonctionnement du HGC est basé sur la diffraction de la lumière, son concept est basé sur le contrôle des champs optiques par des microstructures.

Les hologrammes numériques qui sont une classe des DOE ont pour but de former une distribution de lumière dans les plans d'observations ou de reconstructions. Une fois que la conception est terminée, des procédés précis sont utilisés pour matérialiser le DOE ou bien le HGC tels que le laser, le faisceau d'ions d'écriture, la technique de masque en demi-teinte, le tournage au diamant... Pour une large connaissance, une importante liste d'approches de micro-usinage est illustrée dans la littérature des références [1, 4, 5].

Pour une production de masse à faible coût de surface à microstructures en relief, parmi les techniques de duplication qui doivent être utilisées, on cite l'embossage à chaud, le moulage par injection. Une autre manière dans la fabrication d'un tel élément diffractif est l'emploi de couche mince à carbone amorphe hydrogéné, également connu sous le nom de Diamond-Like Carbon (DLC). La technique de pulvérisation magnétron réactive utilisée pour produire le film mince de DLC, s'est avéré être très appropriée pour les applications de modulation d'amplitude seule, de modulation de phase seule ou bien de modulation mixtes, [6, 7, 8, 9].

2-2- Approche du principe:

L'holographie est le fruit des propriétés spécifiques de la lumière. Un hologramme a pour objectif de représenter un objet en 3 dimensions et permettre lorsque l'observateur bouge, de voir l'objet sous un autre angle de vue. La réalisation des hologrammes par les méthodes conventionnelles demande des conditions délicates, une stabilité maximum du banc optique, résolution élevée du support utilisé pour l'enregistrement, une source de lumière cohérente, deux systèmes de composants optiques à installer: le premier pour l'enregistrement et le deuxième pour la restitution [10]. Pour améliorer les procédés de réalisation des hologrammes, l'introduction de l'outil informatique dans certaines étapes, s'avère impérative.

L'holographie générée par ordinateur est un procédé qui consiste à calculer l'hologramme que produirait un objet dont on a une description mathématique, ensuite l'imprimer et le restituer comme un hologramme classique. Les données de l'objet peuvent être tirées par deux méthodes :

- En utilisant une simple liste de points : un fichier texte de « point-sources » qui est en quelque sorte l'ensemble des coordonnées (x, y, z) de l'objet. On ne parle plus alors de pixels mais de **voxels** car ce sont des points en 3 dimensions.
- En créant l'hologramme par programmation en langages informatique : JAVA, C, ..etc.(en Matlab pour notre cas, voir chapitre expérimentale IV), qui est la méthode la plus compliquée mais qui donne une liberté totale sur l'objet voulu.

2-3- Principe de calcul des hologrammes générés par ordinateur, méthode de programmation:

La synthèse des hologrammes générés par ordinateur se fait par des programmes informatiques. Le processus de codage de l'amplitude et de la phase est effectué par la méthode de Lohmann [12,13], méthode choisie pour la conception des HGCs dans notre partie expérimentale.

L'organigramme suivant montre les étapes de réalisation [11] :

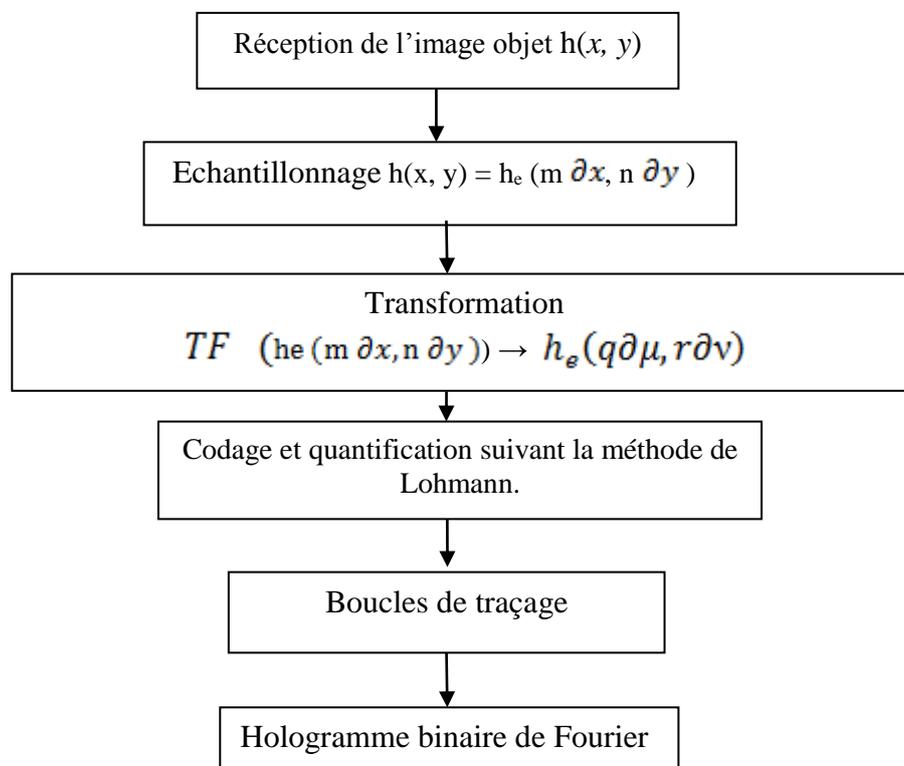


Figure (II-3) : Etapes principales de réalisation d'un hologramme binaire de Fourier codé par la méthode de Lohmann [11].

L'hologramme réalisé est un hologramme de Fourier c'est-à-dire que, les amplitudes complexes échantillonnées de $H(\mu, \nu)$ sont les transformées de Fourier des réponses impulsionnelles de l'objet qu'on veut synthétiser [14] :

$$TF^{-1}(H_e(\mu, \nu)) = h_e(q\partial\mu, r\partial\nu)$$

$$= \sum_{m=-M/2}^{+M/2} \sum_{n=-N/2}^{+N/2} h_e(m, n) \exp(-j2\pi(m\partial x q\partial\mu + n\partial y r\partial\nu)) \quad (\text{II-15})$$

∂x : présente l'échantillon élémentaire de l'hologramme suivant (ox).

∂y : présente l'échantillon élémentaire de l'hologramme suivant (oy).

m et n sont les pas de l'échantillonnage de l'hologramme suivant les deux repères (ox) et (oy).

q et r sont les pas d'échantillonnage de $H(\mu, \nu)$ nécessaires pour reconstruire le front d'onde $h(x, y)$ avant l'hologramme.

Les autres coordonnées qui sont liées avec l'échantillonnage du $H(\mu, \nu)$ sont représentées dans la figure suivante :

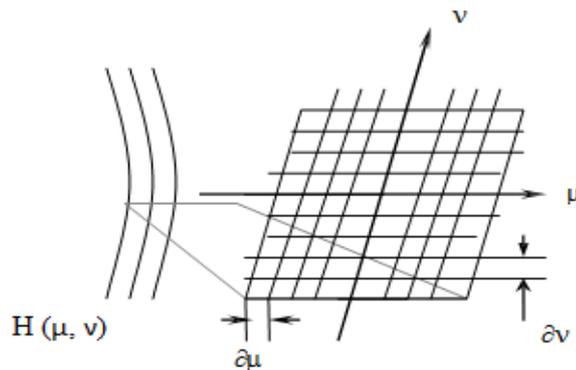


Figure (II-4) : l'échantillonnage du front d'onde $H(\mu, \nu)$ [11].

Pratiquement, la formule (II-15) indique que si l'hologramme binaire de Fourier réalisé est enregistré sur un support transparent, et ensuite éclairé par une onde plane, sa transformée de Fourier réalisée par une simple lentille nous donne alors, l'image de l'objet $h(x, y)$.

2-4- L'incertitude dans les HGCs :

La méthode classique de fabrication de nos HGCs nécessite un certain nombre d'étapes. En commençant par l'échantillonnage du front d'onde objet, puis la quantification du signal, ensuite le codage suivant la méthode de Lhomann et enfin, le tracé de toutes les impulsions codées.

Des dégradations répétitives (linéaires et non linéaires) sont inévitablement introduites à la réalisation des HGCs. Ces défauts affectent gravement la qualité de l'image reconstruite et limitent ses applications pratiques. Le rôle principal des HGCs est de générer un front d'onde de référence idéal à toute forme désirée et d'éviter autant que possible les erreurs de définition et de traçage qui ont un impact direct sur l'amplitude et la phase du front d'onde reproduit [11].

A titre d'exemple, dans le domaine de contrôle et de métrologie optique, les HGCs sont couramment utilisés dans le système optique interférométrique de mesure. Le degré élevé de flexibilité de génération de fronts d'ondes complexes a fait de ces éléments diffractifs extrêmement utiles. Dans les cas de mesures optiques asphériques, la précision des HGCs affecte l'exactitude et l'homologation des résultats de mesures. Cependant, les erreurs et les incertitudes au cours des procédés de fabrication de ces hologrammes donnent lieu à des erreurs dans la diffraction du front d'onde créé par l'hologramme numérique fini. Les conclusions de la référence [15], aborde avec intérêt, les effets des erreurs de fabrication des HGCs sur la précision des mesures interférométriques. Les sources possibles d'erreurs de fabrication des HGCs parviennent, des erreurs d'imageries dues au substrat, de distorsion des motifs, de variations de profondeur de gravure, de dépendance de la phase du front d'onde diffractée de ces incertitudes de fabrication.

L'optimisation de l'algorithme de codage est nécessaire pour produire des hologrammes de haute qualité. Pour un tel objectif, un laboratoire de recherche a développé un algorithme récent nommé, méthode de recherche directe multi niveaux (DMS) introduit au court de codage par la méthode de Lohmann [16]. De plus, le DMS qui incorpore le sur-échantillonnage au codage a été vérifié comme étant efficace pour réduire les erreurs de reconstruction optique par la préparation des HGCs en utilisant la lithographie à faisceau d'électrons [16].

2-4-1- L'étude des limitations par les caractéristiques énergétiques:

L'optimisation de l'algorithme de calcul de l'hologramme générée par ordinateur tend à reconstruire l'objet avec la plus grande précision possible [17]. La qualité de reconstruction peut être exprimée par des caractéristiques énergétiques telles que :

- l'efficacité de diffraction (diffraction efficiency (η)).
- l'erreur quadratique moyenne (the mean square error (MSE)) dans le plan de reconstruction.

- le rapport signal sur bruit (signal-to-noise ratio (SNR))
- l'uniformité de la reconstruction.

2-4-1-1- Efficacité de diffraction:

L'efficacité de diffraction est le rapport entre l'énergie de la reconstruction désirée et l'énergie incidente. On considère dans le cas d'un hologramme, que toute sa surface est éclairée par le faisceau incident et qu'aucune perte d'énergie ne se produit avant l'hologramme.

$$\eta = \text{énergie de la zone désirée de reconstruction} / \text{énergie de l'onde incidente} \quad (\text{II-16})$$

$$\eta = \frac{|I(m, n)|^2}{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} |I_{mn}|^2} \quad (\text{II-17})$$

Où « I » représente l'intensité de la reconstruction mesurée en un point (m, n).

L'efficacité de diffraction est difficile à calculer analytiquement et dépend de la nature de l'hologramme, de sa forme, de la taille du front d'onde à reproduire, de l'emplacement, de la méthode de codage de l'hologramme numérique. Théoriquement, l'efficacité de diffraction dans le n ème ordre est donnée par :

$$\eta_n = [\sin(n\pi/2) / n\pi]^2 \quad (\text{II-18})$$

Dans le cas du premier ordre, l'efficacité est : $\eta_1 = (1/\pi)^2 = 10,1\%$.

2-4-1-2- Rapport signal / bruit:

C'est un critère qui tient en compte les caractéristiques locales de la reconstruction et donnant ainsi une information sur son uniformité. Le rapport signal bruit est défini par :

$$\text{SNR} = \text{intensité du signal} / \text{somme des bruits} \quad (\text{II-19})$$

En 2002, une étude a traité, avec ce concept, l'amélioration de la qualité de l'hologramme généré par ordinateur réalisé par la lithographie [18]. Les erreurs quantifiées dans les HGCs ont été analysées théoriquement et évaluées qualitativement pour déduire leurs influences sur la qualité de l'image reconstruite, Il a été constaté que le SNR de l'image reconstruite est très sensible à la précision de représentation de l'amplitude et de la phase.

Donc, le raffermissement de la précision de ces derniers est plus efficace à la qualité de reconstruction du HGC, qu'une simple augmentation de nombre de cellules d'échantillonnage.

Des plaques de HGCs de la même image sont codées avec la même méthode et conçues par deux méthodes différentes, par photoréduction classique et par faisceau guidé d'écriture directe (lithographie). Les images reconstruites ont été comparées le résultat expérimental a confirmé l'analyse théorique, c'est-à-dire que le faisceau d'écriture directe peut produire des HGCs avec une qualité supérieure à la technique de photoréduction classique [18].

2- 4-2- L'étude de limitations causées par les contraintes de réalisations :

2-4-2-1- Temps de calcul :

Le temps de calcul des HGCs peut être considéré comme une limitation gênante surtout pour le cas de production en masse. Plusieurs procédés permettant d'augmenter la rapidité et la simplicité de calcul des hologrammes avec un affichage en temps réel, sont représentés dans la référence [19].

Une approche différente sur l'élimination du bruit et la représentation des franges d'interférence, est ainsi développée pour obtenir une augmentation remarquable de la vitesse de calcul. Les résultats obtenus à l'aide d'un superordinateur data-parallèle pour calculer les caractéristiques holographiques contenant 6 Méga échantillons indiquent qu'une image constituée de 10 000 points avec luminosité arbitraire, peuvent être calculées en moins d'une seconde [19].

2-4-2-2- Méthodes de codage et logiciels de calcul :

Les hologrammes générés par ordinateur sont une classe des éléments optiques diffractifs de fonction de transfert complexe, où l'amplitude et la phase varient d'une manière complexe. Pour le calcul des HGCs, les paramètres communs à toute méthode de codage, sont:

- L'espace de définition ou bien Space bande width product (hauteur \times largeur) de l'hologramme en pixels.
- La taille du pixel de l'hologramme.

Une méthode d'interpolation permet de synthétiser des HGCs avec une large bande passante (space bandwidth product (SBWP)) par l'extension de cette dernière, où l'information de phase des objets est considérée comme constante, et une phase aléatoire est employée dans le procédé d'interpolation. Cette interpolation est également appliquée au kinoforme, c-à-d hologramme de phase. [20]

Pour une restitution fidèle, chaque point de l'hologramme doit enregistrer l'intensité résultante de la superposition de l'onde objet et de l'onde de référence. C'est exactement ramener les coordonnées de l'objet du domaine spatial à son domaine fréquentiel. La méthode traditionnelle utilise la transformée de Fourier en deux dimensions, les algorithmes de calcul récent et très rapides (Fast Fourier Transform FFT) réalisent cette transformation avec une grande fidélité.

L'algorithme de FFT donne une base de calcul pour la quasi-totalité des méthodes itératives (Soifer et al., 1997) et dans de nombreux cas, on employa l'algorithme de réduction de l'erreur appelé Algorithme Itératif de Transformée de Fourier (IFTA), (Wyrowski, 1989, 1990).

L'IFTA, est une itération obtenue en calculant tout d'abord la propagation de la lumière inverse, à partir du plan de reconstruction au plan de l'hologramme, et en prenant les bornes de l'hologramme en considération, puis on calcule la propagation de la lumière du plan de l'hologramme au plan de reconstruction. Une phase aléatoire est attribuée dans la première itération pour aider à la convergence de l'algorithme [21].

D'autre part, une solution mathématique pratique est proposée [22], peut transformer l'erreur de reconstruction linéaire dans la phase à une décomposition de fausse image très facile à traiter. D'autres travaux sont réalisés pour augmenter l'efficacité de calcul pour un affichage en trois dimensions des informations avec des hologrammes générés par ordinateur de type kinoform. Le procédé de réalisation diffère, par l'absence catégorique de codage. La méthode proposée permet de réduire considérablement le coût et le temps de calcul [23].

L'étude qu'on a effectuée pour optimiser la qualité de reconstruction en jouant sur le nombre de cellules et les niveaux de quantifications choisis, pour représenter les définitions de chaque cellule en phase et en amplitude élémentaire a fait l'objet d'une publication dans une revue de renommée établie en 2014 [11].

Précisément, l'étendu de l'hologramme binaire tracé, est constitué de $B \times B$ points binaires. Pour construire le HGC, la surface de traçage est divisée en $N \times N$ cellules donc, chacune est constituée de $N_q \times N_q$ niveaux de quantification en respectant la condition $N \times N_q \leq B$ [24]. Seul un nombre fini de N^2 de l'amplitude et de la phase élémentaire peut être tracé, et chacun est nécessairement quantifié à N_q niveau. Nous pouvons représenter plus de points en augmentant N , seulement à la diminution de N_q . Et nous pouvons quantifier plus finement, mais en négligeant plus de points. Cela sous entend qu'on a cherché la combinaison optimale des valeurs de N et N_q pour avoir une meilleure restitution.

3- Conclusion :

L'holographie générée par ordinateur est une technologie basée sur une combinaison de l'optique et l'informatique. Les principaux problèmes des HGC sont :

- La grande quantité de calcul nécessaire pour générer ces hologrammes, particulièrement le cas de la réalisation d'une reconstruction dynamique en 3D et en temps réel,
- Les méthodes de codages.
- Les composants d'imagerie performants : photosensible, adressable et effaçable...

Et pour l'interférométrie l'inconvénient principal, est la préservation des mêmes conditions pour la prise des images avant et après déformation. Actuellement, les procédés utilisés nécessitent un matériel de haute performance qui a révolutionné ses applications, surtout pour les caractéristiques d'insensibilité à l'environnement, possibilité d'enregistrer aussi bien des petits objets inaccessibles (endoscopie) que des objets de grande taille.

La suite de ce mémoire sera consacrée à l'étude expérimentale de l'interférométrie holographique, l'optimisation et de le codage par la méthode de Lhomann.

4- Références:

1. P. Smigielski, Holographie et applications, Atelier photomécanique, CNRS, Saint-Étienne.
2. M. Bouhfid, Conception d'un capteur interferometrique et sa caracterisation par imagerie numérique. Thèse de doctorat. Université Louis pasteur. France.1998.
3. F. Monroy,Holography, Different Fields of Application, , Intech, 2011.
4. H. Herzig. Micro-optics: Elements, Systems and Applications, Taylor & Francis, ISBN 0-7484-0481-3, London, England.1997.
5. J.Turunen, F. Wyrowski, Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications,Akademie Verlag, ISBN 3-05-501733-1, Berlin, Germany. 1997.
6. F. Wyrowski, Diffraction efficiency of analog and quantized digital amplitude holograms: analysis and manipulation, Journal of Optical Society of America A (March 1990), vol. 7, pp. 383-389, ISSN 084-7529. 1990.
7. L. Neto, L. Roberto, R. Mansano, P. Verdonck, G. Cirino, M. Steffani , Multiple Line Generation Over High Angle Using Hybrid Parabolic Profile and Binary Surface-Relief Phase Element, Applied Optics, Jan. 2001, vol. 40, issue 2, pp.211-218, ISSN 2155-3165.
8. L. Neto, P. Cardona, G. Cirino, R. Mansano, P. Verdonck, Design,fabrication, and characterization of a full complex-amplitude modulationdiffractive optical element, Journal

- of Microlithography, Microfabrication and Microsystems, 2003, vol. 2, issue 2, pp. 96-104, ISSN 1537-1646.
9. L. Neto, P. Cardona, G. Cirino, R. Mansano, P. Verdonck, Implementation of Fresnel full complex-amplitude digital holograms, *Optical Engineering*, 2004, vol. 43, No. 11, ISSN 0091-3286.
 10. L. Neto, P. Cardona, G. Cirino, R. Mansano, L. Zambom, P. Verdonck, Amorphous hydrogenated carbon film (June 2008), US Patent 7,381,452 F. Monroy, *Holography, Different Fields of Application*, , Intech, 2011.
 11. W. Slimani. A. Beniaiche. Improving software implementation of computer generated holograms. *AJSE, SPRINGER*, April, 2014.
 12. W. Lohmann, D.P. Paris, " Binary Fraunhofer holograms, generated by computer", *Appl. Opt.* 6 (10) (1967) 1739–1748.
 13. W. Lohmann, " How to make computer hologram", Report of the SPIE seminar "Holography 71", Boston, 14–15 April, (1971).
 14. J. M. Brayer. Cours introduction to Fourier transforms for image processing. New Mexico university (USA).
 15. Y. C. Chang, J. Burgeb, Error analysis for HGC optical testing, *SPIE Vol. 3782*. July 1999.
 16. T. Hitoshi, T. Yasuhiro, Enhancement of the Lohmann-type computer-generated hologram encoded by direct multilevel search algorithm, *Optical Review*, 131-141, May 2012.
 17. S. benkherourou, Cours "Traitement de signale : holographie généré par ordinateur", IOMP UFAS, Algérie.
 18. F. Gao , J. Zhu, Q. Huang, Y. Zhang, Y. Zeng, F. Gao, Y. Guo , Z. Cui, Electron-beam lithography to improve quality of computer-generated hologram, *Elsevier, Microelectronic Engineering* 363–369, July (2002).
 19. M. Lucente, Optimization of Hologram Computation for Real-Time Display, *SPIE Proceeding 1667, Practical Holography VI*, Bellingham, WA, USA.
 20. N. Yoshikawa, T. Y. Tsukuba, Interpolation Method for Computer-Generated Holograms Using Random Phase Technique, *Optical Review*, 433-438, June 1999.
 21. M. Malek, "Développement de méthodes d'holographie numérique pour la métrologie tridimensionnelle dans les écoulements, thèse de doctorat, Faculté des sciences et techniques de l'Université de Rouen, Décembre 2004.
 22. W.J. Dallas, Computer generated holograms, *Optical Sciences*, 627, January 2005.
 23. T. Li, R. He, Y. Yang, Q. Gao, Y. Wang, Y. Shi, A location quantization algorithm for three-dimensional information display by using pure-phase computer-generated hologram,

Holography, Speckle Pattern, Interferometry and Applications II, Preceding. SPIE 8202, November 2011.

24. R. A. Gabel, B. Liu, Minimization of Reconstruction Errors with Computer Generated. Binary Holograms, Applied Optics 1180, May 1970.

Chapitre III : Etude expérimentale :

1- Introduction :

Détecter la présence de défauts ou bien identifier et reconnaître certaines formes sont très réussit par les méthodes hybrides. La présence de défauts influence sur la fiabilité de l'élément, et impérativement sur la durée de vie de l'ensemble du mécanisme. La production en série dans les différents secteurs industriels nécessite des méthodes de contrôle fiable et rapide. Le traitement opto-informatique consiste à utiliser des techniques optiques en plus des algorithmes ou des logiciels spécialisés pour effectuer certaines opérations et estimer les défaillances puis faire les statistiques d'analyses sur la cadence de production.

Lors de notre visite aux unités de production qui se trouvent au niveau de la wilaya de Bordj Bou Arreridj, nous avons constaté que le contrôle se fait sur deux voies. Le premier est fait au moment de production, en temps réel avec des postes d'inspections sur la ligne de montage pour chaque état de production. Et la deuxième voie de contrôle, qui n'est pas liée avec la ligne de montage, se fait dans un laboratoire de contrôle de qualité, est réalisé par des contrôleurs qualifiés. Ils prennent un échantillon réalisé sur 50 ou sur 100 articles réalisés en inspectant chaque élément et chaque fonction de ce produit. Cette procédure de contrôle peut prendre une ou deux journées voire bien plus, tous dépend des moyens de contrôle utilisés.

Dans notre travail expérimental, on propose des méthodes opto-informatiques pour faciliter les moyens de contrôle et de détection de défauts. On a pris en considération les paramètres optimisés de l'hologramme généré par ordinateur dans la référence [1], puis on a opté pour la réalisation d'un interferogramme numérique entre des images de pièces idéales et des images des articles réalisés, pour détecter la présence d'une défaillance sur ces produit.

En premier lieu en travail sur des images de texte: une image de référence (sans défaut) et une image objet (avec défaut). Les caractères du texte forment une texture régulière contenant des contours verticaux et horizontaux, et des formes courbées, ce peut ressembler au détail d'un article.

On a conçu un programme en Matlab d'un hologramme HGC qui restitue numériquement l'image d'interférence de deux images (voir annexes des programmes sources). Ce qui implique la création de l'image de l'interferogramme numérique à partir de la fonction d'onde d'interférence, en se basant sur les propriétés des HGCs qui peuvent restitués l'image d'un objet qui n'existe pas, mais seulement à partir de sa description mathématique.

Donc à partir de la formule de l'amplitude et la phase de l'onde d'interférence nous avons conçu cet hologramme généré par ordinateur pour avoir l'image de l'interferogramme numérique. Cette synthèse effectuée pour la première fois, nous permet de voir l'interferogramme numérique, sans passer par le montage expérimental et bien sur, éviter les contraintes de stabilité et de résolution des supports d'enregistrement. L'avantage de flexibilité où on peut effectuer des traitements sur la fonction de transfert de l'hologramme numérique et de voir les résultats en temps quasi-réel, grâce à ce montage, est à notifier.

2- Réalisation de l'interferogramme numérique :

Les images choisies pour réaliser l'interferogramme numérique sont des images texte. Ces initiales prient comme un détail qui se trouvent dans un font noir. La première est l'image de référence, image qui contient l'information complète. La deuxième image est celle qui contient le défaut, un manque, une détérioration, un flou ou n'importe quelle défaillance visuelle.

3- Déroulement du travail expérimental :

Avec un PC de RAM 1.5 GIGA et une résolution de 614 x 460 pxs , Nous avons conçu le programme qui calcule l'interferogramme numérique sous forme d'un HGC codé par la méthode de Lhomann, Nous cherchons à interférer deux images pour localiser la défaillance dans l'image reconstruite de l'interferogramme numérique. Les réponses sont illustrées dans les figures suivantes :

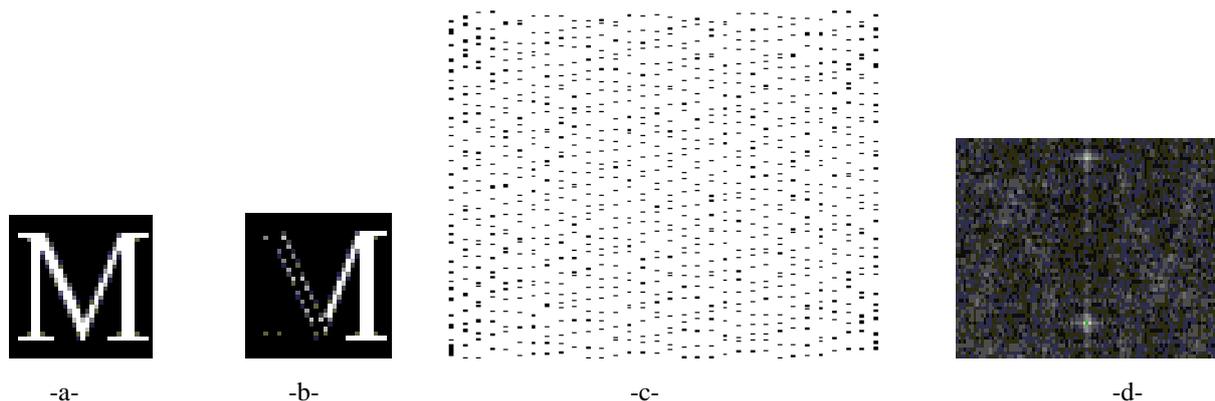


Figure (III-1) : -a- Image de référence (sans défaut) 32 x32 pixels,

-b- Image objet (avec défaut) 32 x32 pixels, -c- Interferogramme numérique calculé,

-d- La restitution de l'interferogramme numérique.

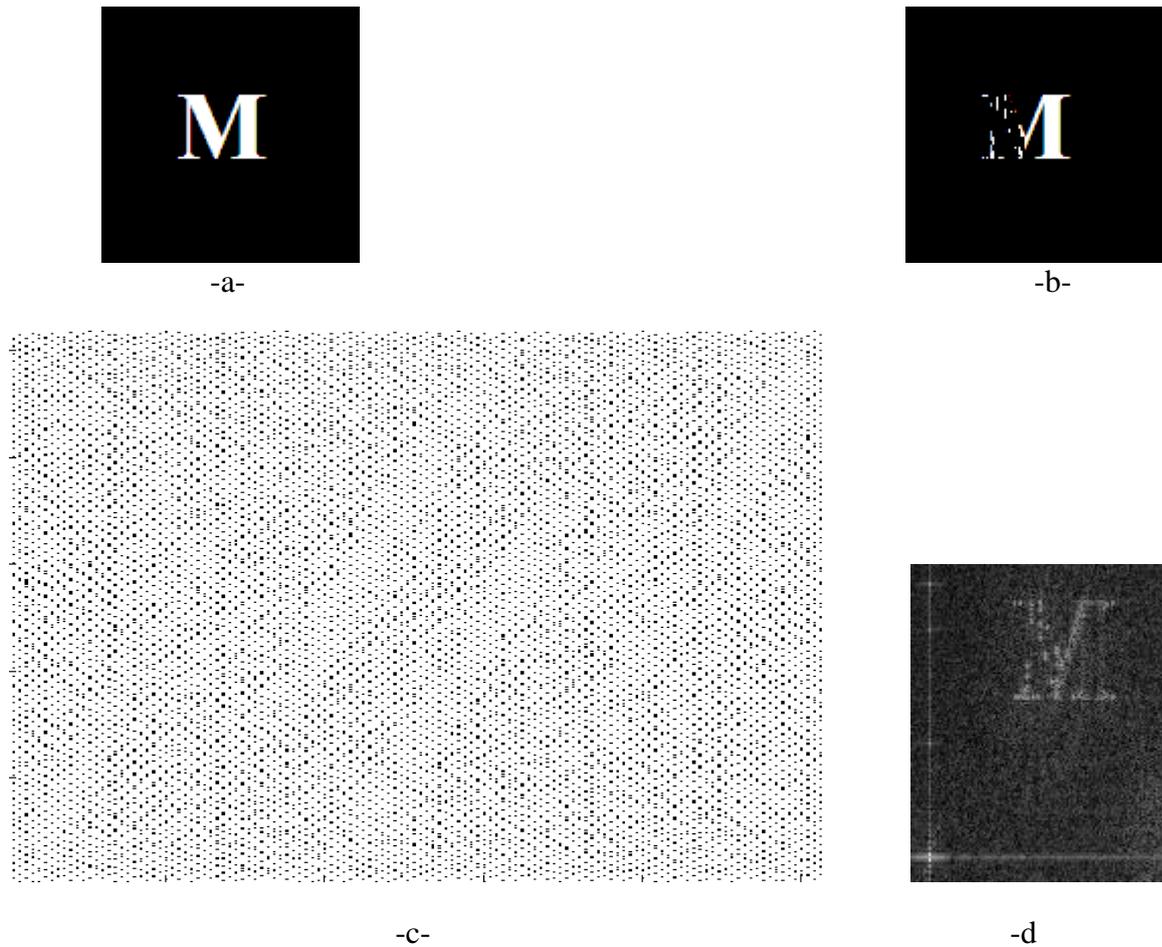
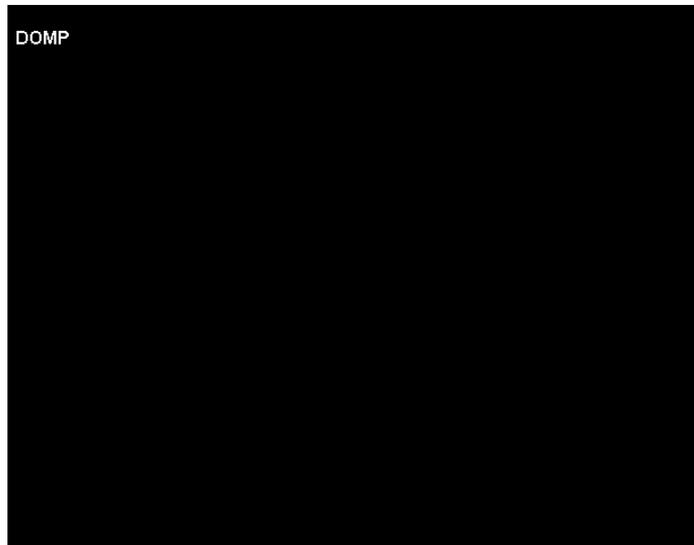


Figure (III-2) : -a- Image de référence (sans défaut) 128 x128 pixels,
-b- Image objet (avec défaut) 128 x128 pixels,
-c- Interferogramme numérique calculé pendant 19 heures,
-d- La restitution de l'interferogramme numérique réalisée par IDEA.

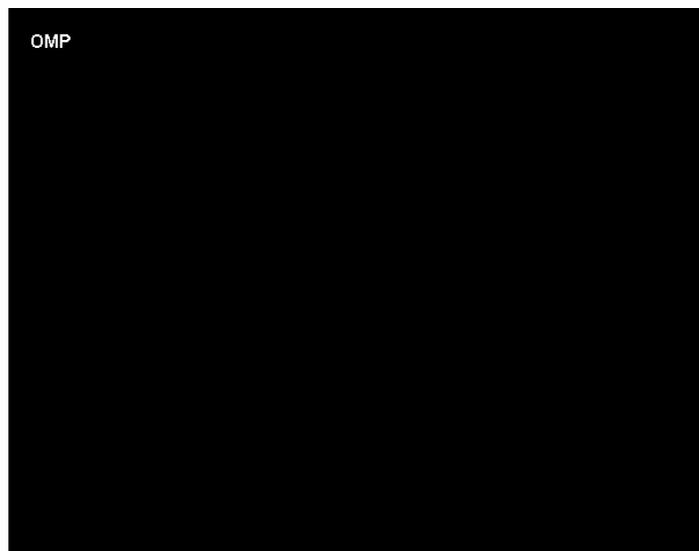
-3-a- Interprétation des résultats :

Nous avons réussi à concevoir le programme de l'interferogramme numérique voir les figures (III-1-c), (III-2-c) sa restitution nous a donné des images très claire, voir les figures (III-1-d). (III-2-d). On a interféré les deux images -a- et -b- pour obtenir ces réponses, le choix de nombre de cellules d'échantillonnages N et le nombre de niveaux de quantifications N_q est pris selon l'optimisation faite selon la référence [1]. $N \times N_q = 128 \times 8$.
Il est évident que la partie de l'image -b- qu'elle n'est pas complète, est restituée incomplète dans les images (III-1-d-) et (III-2-d-). L'interferogramme numérique est réalisé sous une allure discrète (des points), donc la réponse ne peut être que des points à l'endroit de la défaillance c'est ce qu'on a obtenu dans la figure image (III-2-d).

On veut faire un autre traitement avec des images de taille plus grande qui contiennent plus de détails, les images choisies sont illustrées sur les figures suivantes :



-a-



-b-

Figure (III-3) : -a- Image de référence (sans défaut) 614x482 pixels.

-b-Image objet (avec défaut) 614x482 pixels.

Le calcul a pris presque 12 heures, donnant ainsi l'interferrogramme numérique illustré dans la figure suivante :

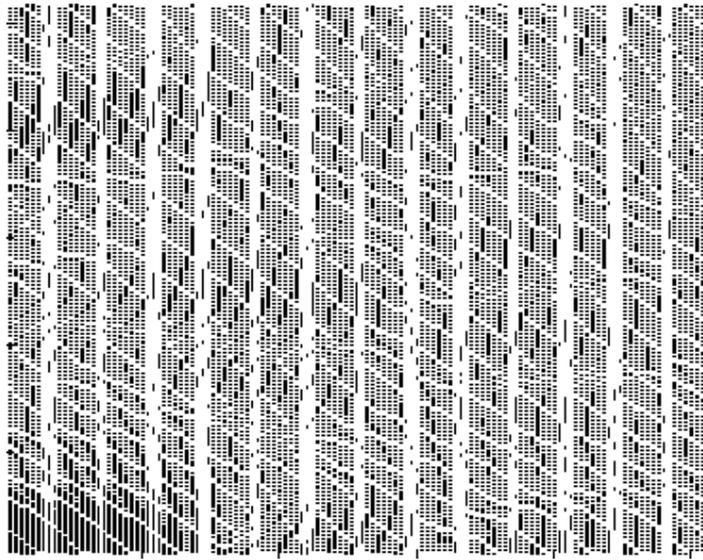


Figure (III.4): L'interferrogramme numérique réalisé sous forme d'un HGC, codé par la méthode de Lhomann pour un échantillonnage : $N_x N_q = 128 \times 8$.

Après le calcul de cet interferrogramme numérique, nous passons à l'étape de la reconstruction numérique d'où on l'a réalisée aussi, avec le logiciel de traitement optique, l'IDEA. L'image restituée de cet interferrogramme numérique est illustrée par la figure suivante :

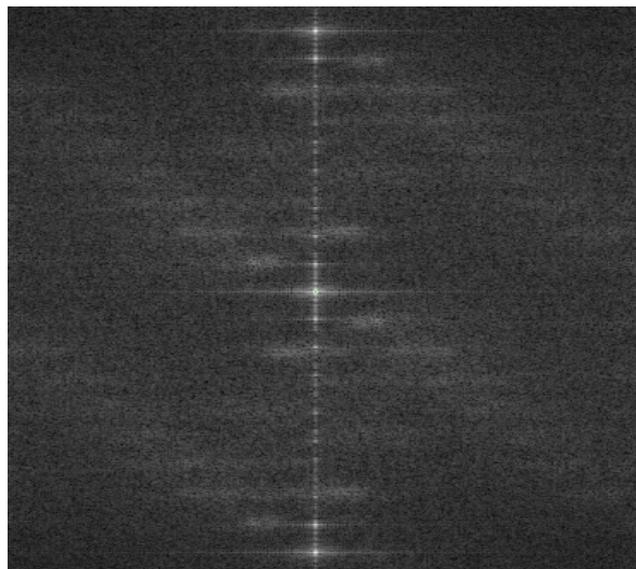


Figure (III.5): La restitution numérique obtenue à partir de l'interferrogramme numérique.

-3-b- Interprétation des résultats :

Nous constatons les ordres séparés qui sont loin du bruit du centre mais on ne peut pas distinguer l'information qui se trouve dans ces ordres. Quand on examine l'interferrogramme numérique réalisé, nous constatons qu'il y'a un pliage de l'image, des bâtonnets plein et d'autre vide. Nous estimons qu'il y a une perte des informations sur les bâtonnets vides, celle qui nous donne le flou sur les ordres. Afin de récupérer la définition perdue, nous devons trouver des solutions et chercher la source de cette perte.

Le temps de calcul est trop long, donc nous devons utiliser un ordinateur puissant.

Avec les mêmes paramètres, on refait les calculs avec un ordinateur de RAM 48 giga, et 8 processeur avec un écran d'affichage de paramètres 1152 x 770 pxs.



Figure (III.6): L'ordinateur puissant utilisé pour recalculer l'interferrogramme numérique.

Nous avons remarqué la rapidité de cette station, le temps de calcul est réduit au tiers (2 heures et demi). Mais en ce qui concerne l'image de l'interferrogramme, nous obtenons la même réponse, la même que celle de la figure (III.4), une image avec des rayures, donc le problème de temps de calcul n'influence pas sur la forme de l'image de l'interferrogramme numérique.

Le problème peut être lié directement aux paramètres d'affichages puisque nous travaillons sur le traitement des images et l'échantillonnage a une relation directe avec l'étendu du moyen d'affichage. De même que pour la quantification qui est liée directement avec la résolution. Nous devons penser à des moyens d'affichages plus grands.

Avec l'innovation des écrans LCD, LED, PLASMA, nous avons le choix d'utiliser des écrans de diverses tailles et d'une résolution Full HD, sachant que le marché offre une gamme qui varie de 15 pouces (38 cm) jusqu'à 60 pouces (1 m 53 cm).

Il est à signaler que notre institut d'optique et mécanique de précision, dispose d'un LED de 50 pouces (1 m 27 cm) de diagonale. Ce qui nous a permis de refaire le calcul avec cet écran, en changeant les paramètres d'affichages du PC utilisé, de 600 x 800 pxs à 1200 x 1600 pxs , de 2 Giga Octs de RAM. et 1.58 GigaHZ de vitesse. Le résultat obtenu est le même que celui de la figure (III-4) avec une seule différence, qui se résume dans le temps de calcul qui s'est réduit à 7 h.

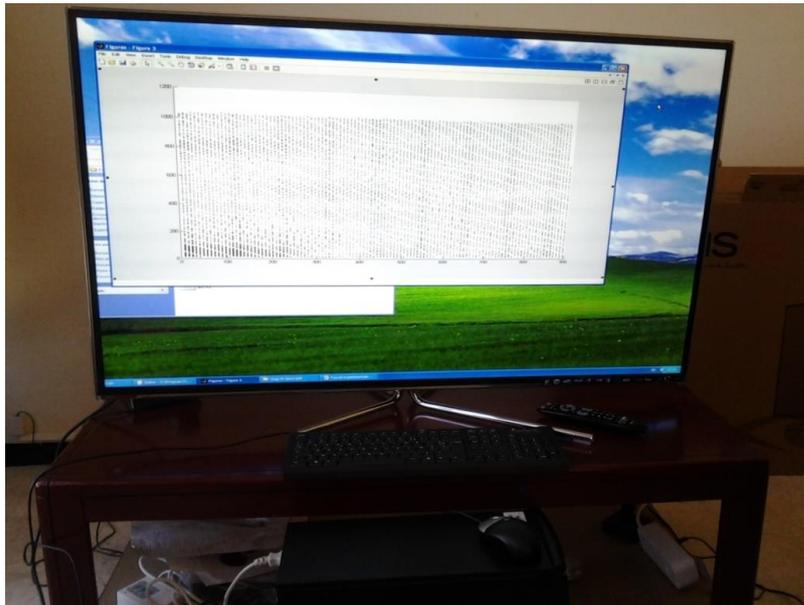


Figure (III.7): L'utilisation de LED TV Full HD 1080 pxs.

L'image obtenue était la même donc les paramètres d'affichages ne sont pas changés malgré qu'on les a modifié sur les paramètres du PC utilisé.

Les spécialistes nous ont conseillés de changer la carte graphique VGA par une carte graphique HD, on a appliqué cette solution, On a monté une carte graphique de référence HD5-50, le résultat obtenu est illustré dans la figure suivante et une remarque très importante le temps de calcul qui s'est réduit à 3H.

On illustre sur les figures suivantes l'interferogramme numérique calculé et sa restitution.

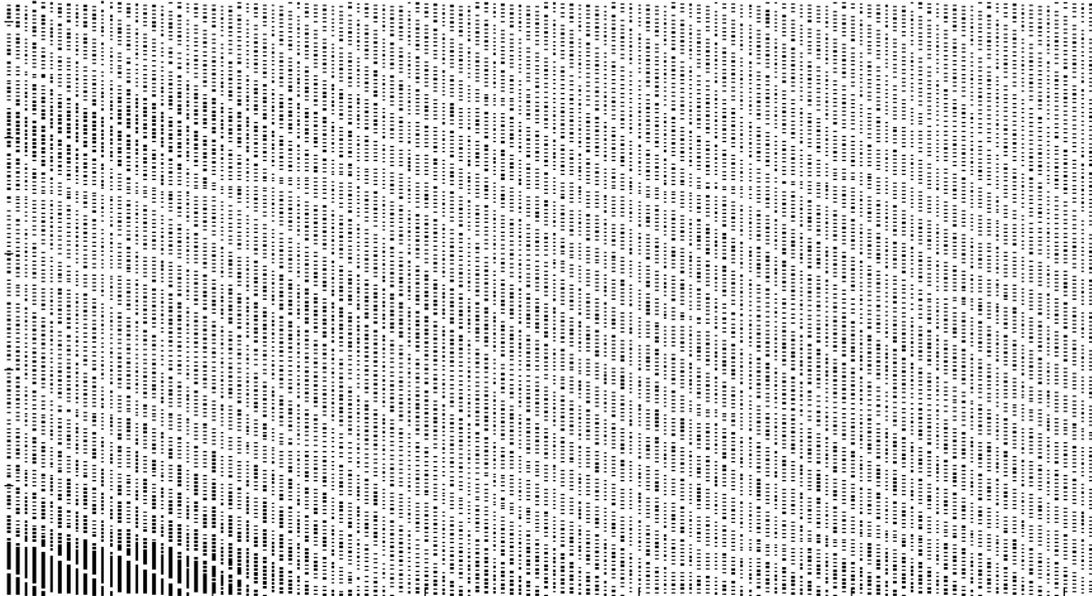


Figure (III.8): L'interferogramme numérique réalisé avec un afficheur LED tv.

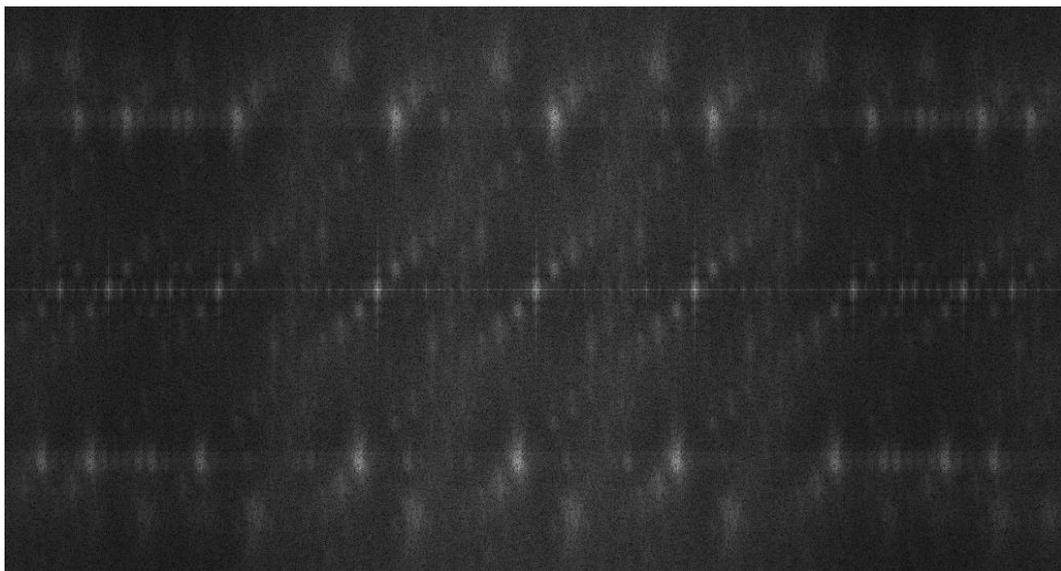


Figure (III.9): La réponse de l'interferogramme numérique.

-3-c- Interprétation des résultats :

Nous avons obtenu, cette fois-ci, de meilleurs résultats en remarquant qu'il y a plus d'ordres dont l'interprétation de ces représentations reste ardue. Nous cherchons à avoir plus d'informations et dans une nouvelle démarche, l'utilisation d'un câble HDMI est plus qu'indispensable. Les résultats ainsi obtenus avec le câble HDMI sont illustrés sur les figures suivantes :

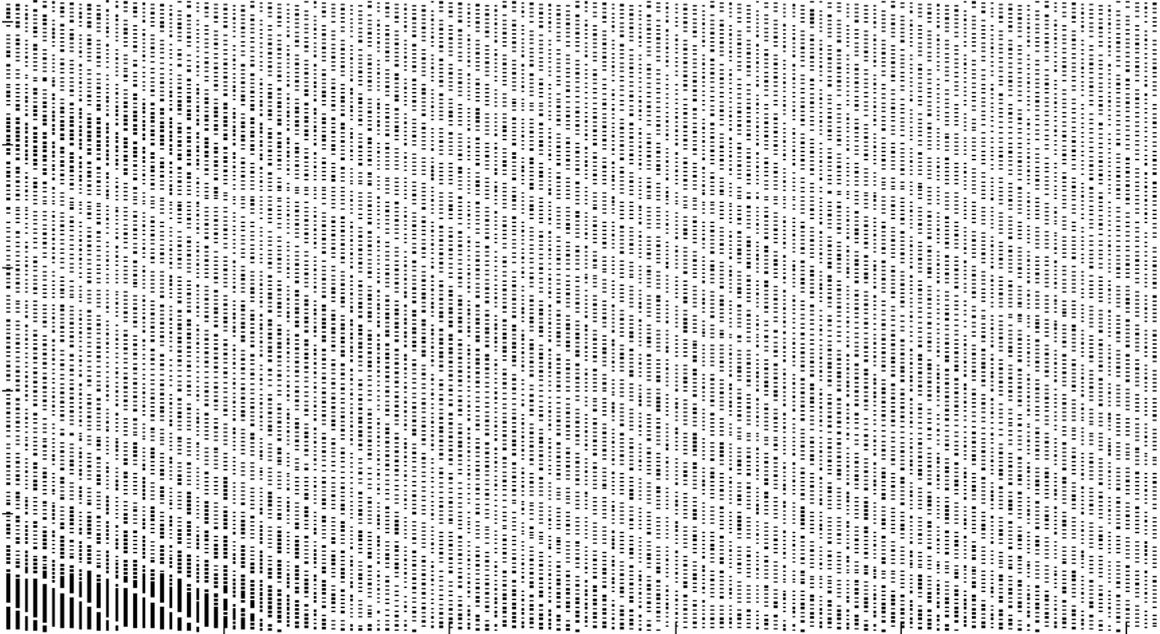


Figure (III.10): L'interferogramme numérique réalisé avec un afficheur LED tv et un câble HDMI.

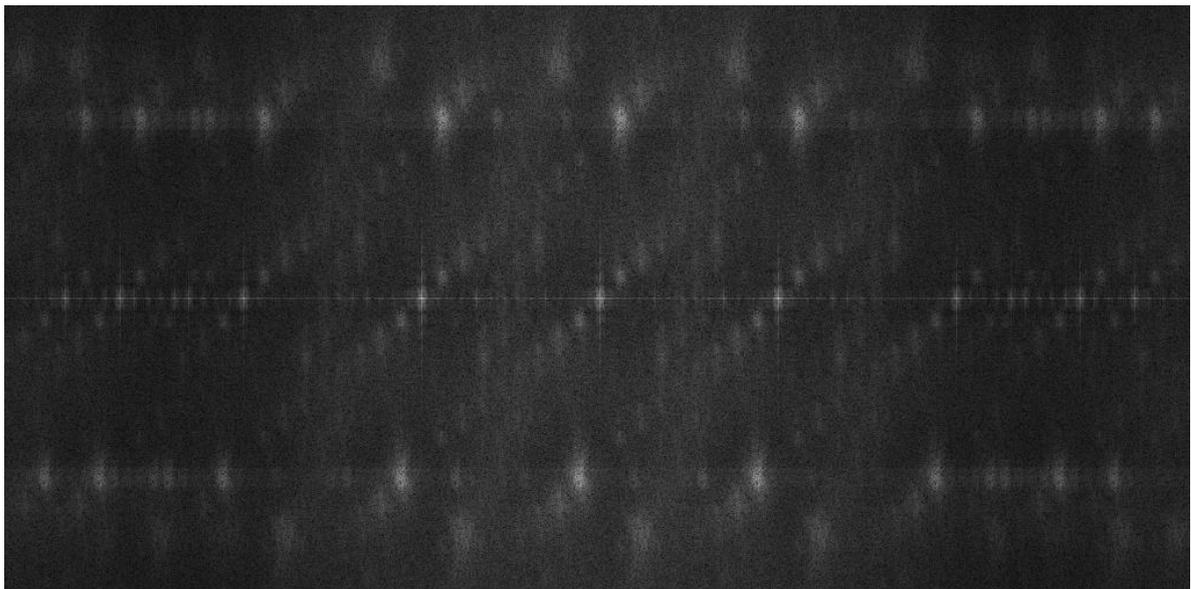


Figure (III.11): La réponse de l'interferogramme numérique avec le câble HDMI.

A partir de ces figures, nous constatons que l'obstacle de manque de définition persiste encore. De ce fait, nous profitons de l'étendue de l'affichage permis par le LED TV, pour augmenter le nombre de cellules d'échantillonnages jusqu'à : $256 \times 8 = 2048$ pcs. Le résultat obtenu est mis en évidence sur les figures suivantes :

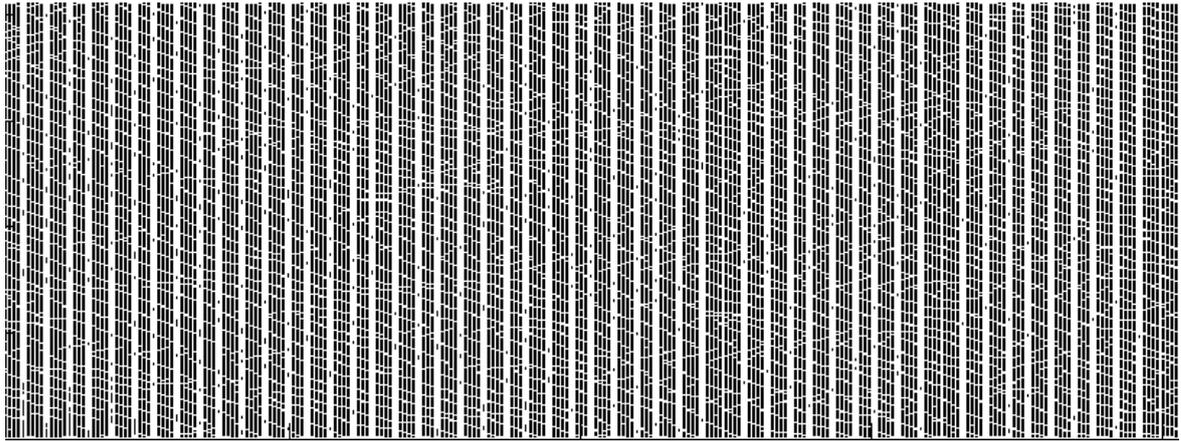


Figure (III.12): L'interferogramme numérique réalisé avec l'afficheur LED TV et câble HDMI avec $N_x N_q = 256 \times 8$.

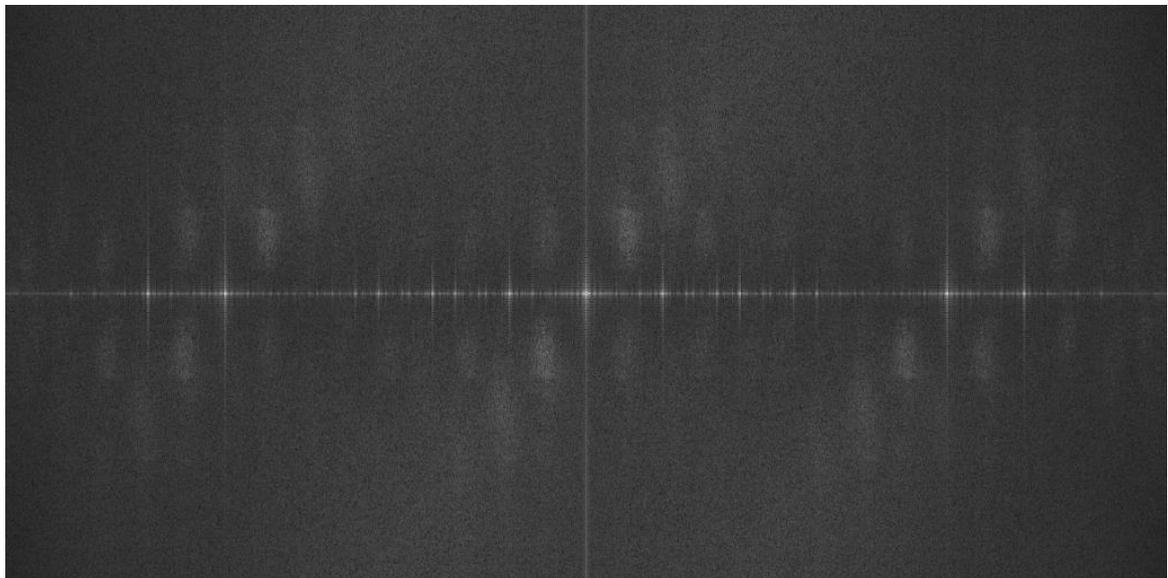


Figure (III.13): La réponse de l'interferogramme numérique avec l'afficheur LED tv et câble HDMI et $N_x N_q = 256 \times 8$.

-3-d- Interprétation des résultats :

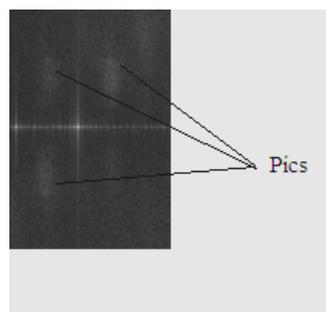


Figure (III.14): Une extraction de la réponse obtenue.

Le temps de calcul a pris plus de 36 heures (3 jours), nous remarquons des ordres bien séparés et avec une concentration de point au sommet de chaque ordre qui est une importante réponse voir figure (III.14). La discrimination de l'information est vraiment difficile la solution est d'utiliser un moyen d'affichage plus grand. Nous estimons qu'en augmentant le nombre d'échantillons, nous pouvons mieux distinguer la réponse.

3-4- Conclusion :

Nous avons proposé une nouvelle méthode pour la réalisation des interférogrammes, utilisant les propriétés du HGC. La réalisation d'un interférogramme numérique nous a donné une réponse remarquable que nous qualifions de réalisation réussite, dont le temps de calcul peut être réduit considérablement si nous utilisons une puissante station de calcul.

4- Contrôle de qualité dans une ligne de production:

4- 1- La production des cartes électroniques en série :



Figure (III.15): Ligne de production en série de téléviseurs [2].

Cette production se fait par la préparation de la baculites qui est une plaque en plastique destinée à cette industrie. On imprime des pistes électroniques de cuivre par des machines à commande numérique suivant un schéma électronique qui est réalisé par les constructeurs. Ces pistes de cuivre ont le rôle de lier les composants électroniques en formant des étages électroniques pour réaliser les différents traitements: de son de vidéo, de télétexte..etc

Ces cartes sont aussi percées à des emplacements bien définis par leurs coordonnées cartésiennes. Devant ces trous, il est indiqué la référence du composant électronique à placer, dont les opérateurs manuels doivent les mettre, en suivant les consignes du constructeur.

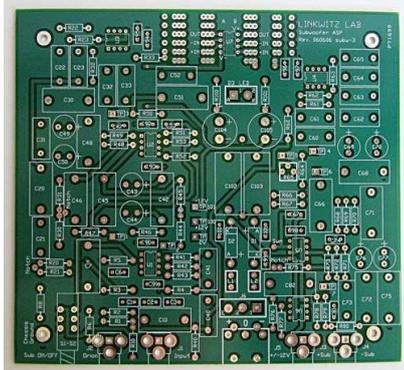


Figure (III.16): carte sans composant [3].

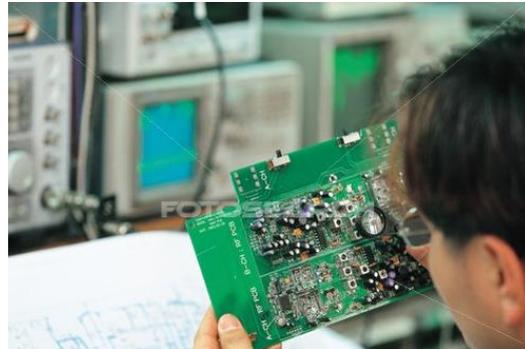


Figure (III.17): Inspection visuelle [4].

5- Méthodes de contrôle proposées par le traitement numérique :

Aux niveaux des unités de production, le contrôle des produits se fait visuellement Figure (III.17). Nous avons réalisé des programmes en MATLAB (voir annexe programmes sources) pour cet objectif, nous introduisons l’outil informatique, pour le contrôle des articles produits en série, que nous énumérons dans ce qui suit.

5- 1- L’identification d’un composant sur une image de carte :

Nous cherchons à identifier l’image d’un circuit intégré pour la localiser sur le plan de l’image d’une carte électronique qui contient différents composants électroniques.



Figure (III.18): Image de carte électronique [4].



Figure (III.19): Image de circuit à détecter [4].

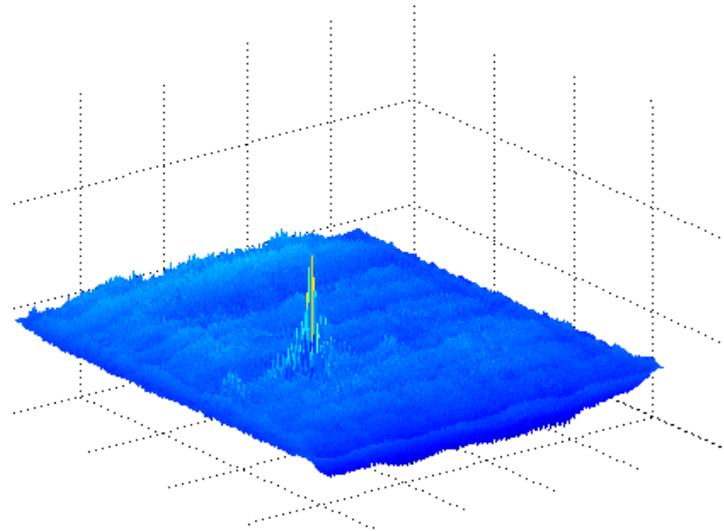


Figure (III.20) : La corrélation des deux images.

5- 1-1- Interprétation :

Le pic donné nous informe sur la présence de ce circuit sur l'ensemble des éléments constituant la carte électronique. Le degré de ressemblance entre l'information cherchée et l'information trouvée sur l'image est exprimé par la hauteur du pic qui est maximale dans notre cas. Donc le composant cherché est identifié et ce pic nous oriente sur l'emplacement du circuit cherché sur la carte.

5-2- Extraire une image d'un composant :

Par le programme suivant, on fait extraire une image d'un composant par besoin de le référencier. On doit définir la zone rectangulaire qui couvre ce composant, c'est à dire les coordonnées du point du sommet du rectangle, la largeur, la hauteur, pour sélectionner la forme qui couvre cet élément à détecter, puis on fait son extraction de l'image principale.



Figure (III.21) : L'extraction d'un composant sur l'image d'une carte [4].

5- 2-1- Interprétation :

Par cette manipulation, nous pouvons identifier les références d'un composant se trouvant dans une carte électronique, pour mieux voir ses références, exemple : une résistance, une inductance, une capacité, la référence d'un circuit intégré..etc , par l'extraction de son image de cette carte. Ce traitement est efficace surtout pour le cas où les composants se ressemblent dans la forme et non dans la valeur.

5-3- Détection de manque d'un composant :

Le traitement nécessite une image de la carte de référence sans défaut et une autre avec défaut :



Figure (III.22) : Image de carte référence [4].

Figure (III.23): Carte avec un manque de composant [4].

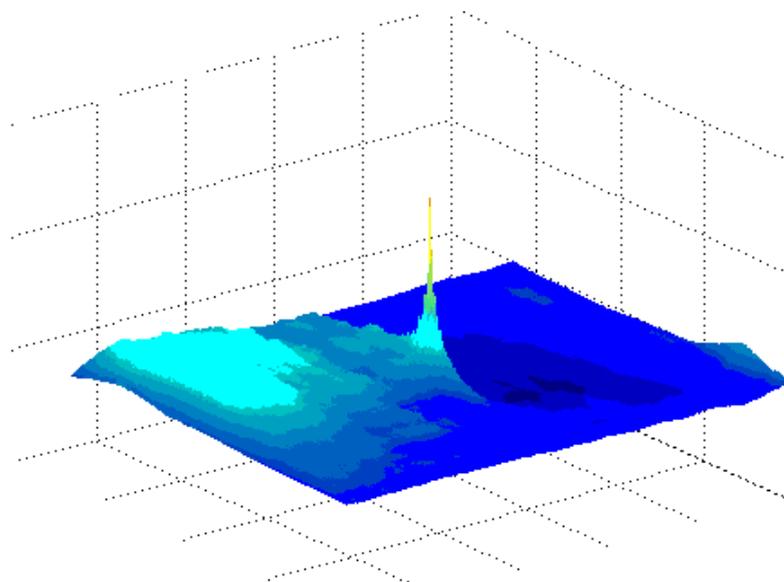


Figure (III.24): Pic indiquant l'emplacement du composant manquant.

5- 3-1- Interprétation :

Ce programme a fait la corrélation entre deux images, la première de la carte de référence et la seconde contient un composant manquant. Par la réponse obtenue sur la figure III.24, nous pouvons s'informer sur le manque d'un composant et sur son emplacement dans la carte par un pic sur une image en 3D.

5- 4- Autres défaillances fréquentes:

Les défaillances peuvent surgir dans chaque étape de production depuis la réalisation de la carte électronique jusqu'au test de mise en marche de l'appareil. Nous nous sommes intéressés aux pannes causées durant l'étape de l'insertion des composants électroniques sur la carte, par des opérateurs humains non à ceux insérés par la machine à commande numérique, parce que la défaillance dans cette dernière est nulle.

5- 5- Composant inversé CI :

L'orientation est très importante pour le cas d'insertion des circuits intégrés, des diodes, des bobines, des transistors, des mémoires. Nous avons réalisé un programme qui fait la soustraction des deux images, l'image de référence figure (III.22) et la figure qui montre un composant inversé :



Figure (III.25): Carte électronique avec composant inversé [4]



Figure (III.26): La réponse de la soustraction.

5- 5-1- Interprétation :

L'erreur peut être commise par l'opérateur à cause de la miniaturisation de certains composants, mal concentration, le stress du travail ou bien la fatigue, une erreur qui peut même ne pas être remarquée par l'opérateur qui contrôle l'insertion des pièces. Cette erreur peut être identifiée rapidement par notre programme, par un simple clic.

5- 6- Composant manquant CM :

Le manque des composants est dû à l'oubli de l'insertion, chaque opérateur a cinq ou six tâches à faire, Parfois l'opérateur saute une tâche ou deux ou plus ce qui introduit le manque des composants et il arrive aussi que ce composant tombe de la carte au cours du glissement dans la ligne de montage, pour aller d'un poste à l'autre.



Figure (III.27): Carte électronique avec manque de composants [4].

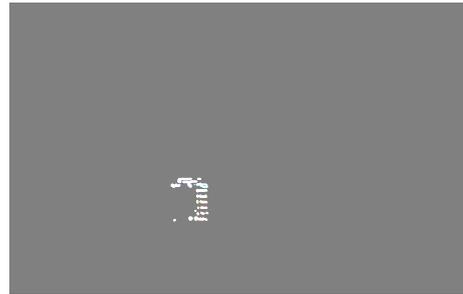


Figure (III.28): Réponse de la soustraction.

5. 6.1. Interprétation :

Nous avons traité ce concept au début avec le programme de soustraction des images, l'image de la carte fiable et celle de la carte produite. Nous avons facilement identifié le manque de composants qui, cette fois-ci, est indiqué par une zone sur l'image de la réponse et non par un pic.

Pour le reste des pannes détectées citées dans ce qui suit, nous pouvons appliquer n'importe quel programme informatique comme souligné dans les prochains paragraphes, car l'anomalie détectée est de l'ordre du pixel.

5-7- Fausses valeurs FV:

L'erreur de la fausse valeur est due à la similitude des composants dans la forme mais ils se différencient dans les références. Les opérateurs, parfois, ne peuvent pas distinguer entre les couleurs, surtout dans les résistances où les couleurs déterminent leurs valeurs. Voir figure suivante :



Figure (III.29): Résistances de différentes valeurs [5].

On utilisant un de ces programmes proposés, on peut identifier cette erreur rapidement.

5- 8- Mal insérée MI :

Composant mal inséré, est une malfaçon, difficile à détecter durant l'étape d'insertion et elle se révèle uniquement au teste de mise en marche. Le composant apparaît à l'œil humain dans son emplacement correct et avec sa juste valeur, alors qu'il est mal inséré et sans contact avec le point de soudure qui le lie avec les pistes de cuivre, laissant le circuit ouvert.

5- 9- Les Courts circuits :

Le court circuit est du au gouttes d'éteint qui se précipite aléatoirement sur la baculite à la sortie du bain de soudure lors de la fixation des composants électroniques. Ces dernières sont insérées automatiquement par les machines et manuellement par les opérateurs. De ce fait, nous devons contrôler l'image du coté inferieur où il nous apparait clairement les pistes et les points de soudures.

6- Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons exploité le traitement optique de l'information. Nous avons proposé une nouvelle méthode pour réaliser l'interferogramme sous forme numérique. La méthode est basée sur la capacité des hologrammes générés par un ordinateur de restituer une image d'un objet qui peut ne pas avoir une existence physique.

Donc, partir de la fonction d'onde d'interférence, nous avons pu réaliser l'interferogramme numérique pour qu'il puisse nous donner l'image d'interférence après la restitution numérique, et d'extraire ensuite l'information cherchée.

L'application proposée s'applique au contrôle de fiabilité des pièces produites en série. Les images doivent être prises sous les mêmes conditions en mettant au point un dispositif rigide qui réalise une meilleure prise de photos de pièces. Les défauts qui vont apparaitre sur l'image sont détectés et identifiés systématiquement.

En assemblant ces opérations dans un logiciel qui contient une interface avec des fenêtres et des boîtes de dialogues, sous l'œil d'un opérateur contrôleur de qualité, nous facilitons la tâche du trie. Dans ce cas, distinguer des pièces fiables et défectives est non seulement rapide mais aussi efficace.

Les différents types de défauts qu'on peut enregistrés sont, le manque de composant, la valeur erronée, l'inversion de positionnement des composants, le manque d'impression d'une piste. Le contrôle s'effectue en examinant la réponse obtenue après l'analyse d'une courbe ou d'une image, la réponse nous oriente directement vers le positionnement de la défaillance.

La méthode de l'interférométrie holographique proposée semble très lente mais pour l'appliquer nous devons disposer d'un ordinateur puissant pour faire le traitement. Disposons d'un tel outil, les résultats obtenus seront parfaites. Surtout avec l'innovation continue et sans cesse, des mémoires et des calculateurs puissants.

7- Références:

1. W.Slimani. A.Beniaiche. Improving software implementation of computer generated holograms. AJSE, SPRINGER, April, 2014.
2. Magazine Condor: Le challenge de la confiance. Publication du Groupe Benhamdi 2007.
3. <http://french.alibaba.com/product-free/any-type-of-electronic-circuit-board-128798592.html>.
4. <http://www.fotosearch.fr>.
5. <http://openclassrooms.com/forum/sujet/module-laser-5v-arduino-en-6v-risques>.

Conclusion générale :

Conclusion générale :

Les visites répétées aux entreprises de productions, notamment celles qui s'occupent des produits électroniques, dont le montage de téléviseurs, nous a conduit à réfléchir à concevoir un moyen fiable et rapide en vue de contrôler les défaillances de construction et de montage.

En outre, l'objectif primordial pour le staff technique d'une telle entreprise est d'hisser la cadence de production et de ne pas culminer les pannes qui persistent au cours de cette production.

Il va sans dire, que posséder un mécanisme de contrôle de qualité fiable, efficace et rapide qui indique le défaut avant d'enregistrer la panne, ne fait qu'augmenter et d'une manière certaine, la productivité de l'entreprise.

Pour ses raisons de rendement et d'efficience, nous avons proposé des méthodes opto-informatiques, au cours d'une chaîne de production, en vue d'introduire le traitement numérique qui fait augmenter la vitesse de trie et par conséquent, la cadence de production.

Cette application qui détecte les défauts de fabrication, se basant sur l'optimisation des paramètres de l'interferogramme numérique réalisé comme un hologramme généré par ordinateur et codé par la méthode de Lhomann, a donné des résultats plus que satisfaisants.

Cependant, les autres programmes informatiques qui ont été conçus, sur la base des concepts optiques comme la corrélation, la convolution des images, la FFT ont montré également, une grande fiabilité pendant la production en série des cartes électroniques.

L'imagerie est de plus en plus introduite comme outil d'expertise et de contrôle. De plus, elle participe à augmenter la flexibilité et la productivité des entreprises de production, à participer à la maintenance, à mieux connaître la qualité des produits (conformité aux normes industrielles) et à résoudre des problèmes jusque là sans issue. C'est un moyen de vérification qui nous permet de gagner du temps, réduire le nombre d'opérateur de contrôle, d'augmenter la production et par conséquent rehausser le profit.

Annexes :

Annexes

ANNEXE I: Format d'images.

-1- Conversion des images en forme binaire

1-Conversion d'une image Quelconque en une image binaire sous Matlab:

```
load image
```

```
BW = im2bw(X,map,0.4);
```

```
imshow(X,map), figure, imshow(BW)
```



Image Courtesy of Susan Cohen



a- " X " image colorée.

b- " BW " image binaire.

Figure.1. Conversion de l'image colorée "X" à la forme binaire image BW.

-1- Format d'images

1- 1- TIF: Tagged Image File Format

Tagged Image File Format, développé par Microsoft et Aldus, généralement abrégé TIFF est un format de fichier pour image numérique. Il a été acheté par Adobe Systems qui possède les droits de la spécification TIFF, la révision de la version 6.0 de TIFF date du 3 juin 1992, qui depuis, l'accès et l'utilisation ont été rendus libre. Il est doté de nombreux codages de pixels et d'espaces colorimétriques, noir et blanc, monochrome, palette de couleurs (de toute taille), RVB et YCbCr. Il permet le stockage d'images par bloc, et multiples par fichier (diaporama) et des annotations sous forme de courbes et de texte. Sa grande flexibilité lui attribue des applications diverses, dans les scanners industriels, les appareils photo numériques et les imprimantes.

-1-2- GIF: Graphics Interchange Format :

Le Graphics Interchange Format, est un format d'image numérique couramment utilisé. Le GIF a été mis au point par CompuServe en 1987 pour permettre le téléchargement d'images en couleur. Ce format utilise l'algorithme de compression sans perte LZW. En théorie GIF supporte 224 nuances de couleur, c'est à dire 16 777 216 nuances, 8 bits par composante RVB. Ce format est utilisé pour les images comportant un nombre limité de couleur et sans dégradation.

En décembre 1994, Unisys, propriétaire de deux brevets sur la compression LZW, a soudainement annoncé que les auteurs de logiciel produisant des images GIF devaient payer des royalties. Ceci a motivé le développement du format PNG (Portable Network Graphics) , format d'image matriciel sans perte, basé sur la compression zip libre et qui améliore toutes les fonctionnalités de GIF pour les images fixes.

PNG est particulièrement adéquat lorsqu'il s'agit d'enregistrer des images synthétiques destinées au Web comme des graphiques, des icônes, des images représentant du texte (bonne conservation de la lisibilité), mais ne gère pas les animations. Pour surmonter ce manque, les formats MNG et APNG ont été créés. Dix ans plus tard, le format GIF était majoritairement utilisé sur le web pour des images synthétiques.

En 1989, le format GIF a été étendu en format (GIF89a) pour permettre le stockage de plusieurs images dans un fichier. Ceci permet de créer des diaporamas et de voir des animations.

-1-3- JPEG: Joint Photographic Experts Group:

Joint Photographic Experts Group (JPEG), nom d'un groupe de travail en partenariat **ISO** et **CEI** (d'où le joint pour mixte). Créé en 1986, il rassemble des professionnels de l'industrie de l'image (TV, fax-télécoms, informatique). Cette initiative fait suite aux demandes d'améliorations de la norme ISO/CEI JBIG (Joint Binary-level Image Group). Ce comité a donné son nom à la norme ouverte de compression d'images numériques JPEG. Ensuite, cette norme a donné son nom au format de données définis et au format de fichier le plus utilisé pour contenir ces données.

Le support du format **JPEG** a été introduit en 1994 par Netscape Navigator à l'usage général.

-1- 4- PGM : Portable graymap :

Ce format de fichier est utilisé pour des images en niveau de gris, en plus des caractéristiques de largeur et de hauteur, une valeur maximale utilisée pour coder les niveaux de gris. Cette valeur doit être inférieure à 65536 (codée en caractères ASCII). Chaque niveau de gris est codé par une valeur entre 0 et la valeur maximale, proportionnellement à son intensité. Un pixel noir est codé par la valeur 0, un pixel blanc est codé par la valeur maximale.

-1-5- PPM: Portable PixMap :

Ce format de fichier est utilisé pour des images couleur. Chaque pixel est codé par trois valeurs (rouge, vert et bleu). Comme le format PGM, plus les caractéristiques de largeur et de hauteur, une valeur maximale utilisée pour coder les niveaux de couleur. Cette valeur doit être inférieure à 65536.

-1-6- PBM : Portable bitmap :

Ce format de fichier est utilisé pour des images noir et blanc. Un pixel noir est codé par un caractère 1, un pixel blanc est codé par un caractère 0.

-1-7- BMP : Bitmap :

BMP un format graphique utilisé communément comme format de fichier graphique simple sur la plate-forme de Microsoft Windows. BMP n'est pas utilisés pour le transfert des images sur l'internet ou d'autres médias à cause de sa taille. Par exemple une image 800x600 occupe près de 1,5 méga-octets.

Le format de fichier BMP est capable de stocker des images numériques 2D et de résolution arbitraires, monochrome et en couleur, éventuellement avec la compression de données, La simplicité du format BMP de fichiers et sa connaissance répandue fait que les programmes de traitement d'image, et de nombreux systèmes d'exploitation peuvent le lire et l'écrire.

ANNEXE I I : Annexes des programmes sources en Matlab R 2013b :**1- Programme de l'interferogramme numérique (inter2014.m) :**

```

image1=imread('Mmodify.bmp','bmp');
image2=imread('M2015.bmp','bmp');
figure(1),imshow(image1),
figure(2),imshow(image2);
[p,s]=size(image1);

Nc=8;
x=fft2(image1);
h1=abs(x);
ph1=angle(x);
y=fft2(image2);
h2=abs(y);
ph2=angle(y);
for i=1:1:p
for j=1:1:s

z(i,j)=sqrt(h1(i,j).^2+h2(i,j).^2+2.*h1(i,j).*h2(i,j).*cos(ph1(i,j)-
ph2(i,j)))...
.*cos(-atan((h1(i,j).*sin(ph1(i,j)))+...
(h2(i,j).*sin(ph2(i,j)))/(h1(i,j).*cos(ph1(i,j)))...
+(h2(i,j).*cos(ph2(i,j))))) );

ph(i,j)=atan(((h1(i,j).*sin(ph1(i,j)))+(h2(i,j).*sin(ph2(i,j))))/...
((h1(i,j).*cos(ph1(i,j)))+(h2(i,j).*cos(ph2(i,j))))));

%z2(i,j)= z(i,j).*cos(-atan(ph3(i,j)));
% z=h1.^2+h2.^2+2.*h1.*h2.*cos(ph1-ph2);
%w=fft2(z);
end
end
%[z,map]=imread('forest.tif');
%[X2,map2]=imread('trees.tif');
%hold on

h=abs(z);
ph=angle(z);
phc=ph2*Nc/(pi);

Hmax=max(max(max(max(h))));

H=(h/Hmax)*Nc;

for i=1:1:128
for j=1:1:128
phij=phc(i,j); Hij=H(i,j);
figure(3),
rectangle('Position',[Nc*i,j*Nc+Nc/2+phij,2,Hij],'FaceColor','BLACK');
hold on;

end
end

```

2 -Programme de l'hologramme générée par ordinateur codé par la méthode de Lhomann (holonumerique.m):

```
N=128; M=128;Nc=8;
    image=imread('DOMP.bmp','bmp');
    figure(1),imshow(image);

        x= fft2(image);
        h=abs(x);
        ph=angle(x);

        phc=ph*Nc/(2*pi);

        Hmax=max(max(max(max(h))));

        H=(h/Hmax)*Nc;

        for i=1:1:128
            for j=1:1:128
                phij=phc(i,j) ;      Hij=H(i,j);
            figure(2),
            rectangle('Position',[Nc*i,j*Nc+Nc/2+phij,2,Hij],'FaceColor','BLACK');
                hold on;
            end
        end
end
```

3- Identifier une image de circuit et de le localisé sur le plan de l'image d'une carte électronique (coorx2.m) :

```
I = imread('board.tif');

figure(1);
imshow(I)
II = imread('circuit.tif');
figure(2);
imshow(II)
C=normxcorr2(II(:,:,1),I(:,:,1))
figure(3),surf(C),shading flat
```

4- Extraire une image (extraireimage.m):

```
circuit = imread('regulator.tif');
board = imread('board1.tif');
imshow(circuit)
figure(2), imshow(board)
%on definie les coordonées du point de demarage et la largeur
%et la hauteur pour selectionner le rectangle qui couvre l'élèment
%à detecter puis on fait extraire son image de l'image principale
rect_board = [27 55 37 32];
sub_board = imcrop(board,rect_board);
figure(3), imshow(sub_board)
```

5- Détection de manque de composant (circuitmanque.m):

```
%II=double(I);
%figure(1),imshow(board1)
circuit= imread('board1manque.tif');
%figure(2), imshow(circuit)
%circuit=im2bw(circuit);
%board=[1 2 3 4 5 6 7 8;9 1 2 3 4 5 6 7;8 9 1 2 3 4 5 6 ;7 8 9 0 1 2 3 5];
%circuit=[8 9 1;7 8 9];
[a b]=size(circuit);
fun = @(block_struct)isequal(block_struct.data(:,:,),circuit(:,:,));
I=blockproc(board,[a b],fun);
c = normxcorr2(circuit(:,:,3),board(:,:,3));
% disp('circuit.tif was similaire')
%else disp('circuit.tif was not similaire')
%end
%figure(1);
%imshow(board);
%figure(2);
%imshow(circuit);
figure(3), surf(c), shading flat
%I
%figure(6);
%imshow(I);
```

6- Corrélation de deux images : (sommeimage.m):

```

I1=imread('board.tif');
%figure(1),imshow(I1);
%I1bw=im2bw(I1);
%figure(2),imshow(I1bw);

I2=imread('boardmodify.tif');
%I2bw=im2bw(I2);
%figure(3),imshow(I2bw);
%I1=[1 2 4 5 6;2 5 6 3 6;3 6 5 8 9;3 6 5 7 4;2 5 4 1 6];
%I2=[6 5 2 1 4;3 2 5 6 4;2 6 8 9 2;6 9 5 8 4;2 5 6 4 1];
%Ires=I1-I2;
[M,N]=size(I1);
for i=1:1:M
for j=1:1:N
II1=mean2(I1);
II2=mean2(I2);
A(:,:)=I1(:,:)-II1;
A=double(A);
B(:,:)=I2(:,:)-II2;
B=double(B);
C(:,:)=A(:,:).*B(:,:);
D(:,:)=A(:,:).*A(:,:);
E(:,:)=B(:,:).*B(:,:);
G(:,:)=sqrt(D(:,:).*E(:,:));
F(:,:)=C(:,:)./G(:,:);
FF(:,:)=1-F(:,:);
end
end
%[M,N]=size(Ires);
%for i=1:1:M
%for j=1:1:N
%if (Ires(:,:))~=1)
%Ires=0;
%end
%end
%end
FFF=surf(FF);
%figure(1),imshow(FFF);

```

7- Détection de manque (soustraction.m):

```
I1=imread('carte.jpg');
%I2=imread('cartefausse valeur.jpg');
%I2=imread('carte cicuirt inversé.jpg');
I2=imread('carte monque.jpg');
%I1=imread('board.tif');
%I2=imread('boardmodify.tif');
%I1=imread('board1.tif');
%I2=imread('board1MQ.tif');
%I1=imread('DOMP.bmp');
%I2=imread('OMP.bmp');
I3=I1-I2;
figure(1);
imshow(I3)
BW = im2bw(I3, graythresh(I3));
figure(2);
imshow(BW)
%II=rgb2gray(I3);
%[B,L] = bwboundaries(BW, 'noholes');
[B,L] = bwboundaries(BW, 'holes');
% Display the label matrix and draw each boundary
imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]))
hold on
for k = 1:length(B)
    boundary = B{k};
    plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'w', 'LineWidth', 2)
end

%figure(3);
%imshow(II)
%III = rot90(II);
%figure(4);
%imshow(III)
%BW = im2bw(III);
%figure(5);
%imshow(BW)
```

Résumé

Le traitement opto-informatique consiste à utiliser des techniques optique plus des algorithmes ou des logiciels spécialisés pour effectuer certaines opérations. La production en série dans les différents secteurs industriels nécessite des méthodes de contrôles sûr et rapide, La présence de défauts influence sur la fiabilité de l'élément, et systématiquement sur la durée de vie de l'ensemble du mécanisme qui fait part, L'application proposée dans cette thèse est en particulier la réalisation de contrôle de qualité de produits en série en utilisant des concepts optique et des programmes informatiques, comme : l'interférométrie, l'holographie générée par ordinateur et la FFT. Dans ce travail expérimental, un interferogramme numérique optimisé a été conçu sous forme d'un hologramme généré par ordinateur HGC, et codé par la méthode de Lhomann, est réalisé à partir de la fonction d'onde d'interférence, en se basant sur les propriétés des HGC qui peuvent restitués l'image d'un objet qui n'existe pas physiquement mais seulement à partir de sa représentation mathématique. Cette synthèse nous permet de voir l'interferogramme numérique, sans avoir recours à un montage expérimental et bien sur, éviter ses contraintes de stabilité et de résolution. Nous avons également, conçu d'autres programmes en Matlab pour effectuer les opérations de corrélation, de convolution, d'identification qui ont donnés de remarquables résultats. L'utilisation de l'imagerie comme un moyen de contrôle, nous permet de gagner du temps, réduire le nombre d'opérateur de contrôle, d'augmenter la cadence de production.