



Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Licence

Filière : Physique
Option : Physique des matériaux

THÈME : CONSTRUCTION DES
ELEMENTS OPTIQUES DIFFRACTIVES

Préparé par :
HERIZI Wided

BOUZIANE Rahima

Soutenu le :14/06/2014

Devant le jury :

Président :BENCHIKH Abdelhalim
Rapporteur:MIHOUBI Karima
Examineur :BENCHIHEB Nadjat





Remerciement

Le travail présent dans ce mémoire a été réalisé à l'Universitaire Mohamed ElBachir Elibrahimi.

Nous tenons de tout cœur à remercier Allah le tout puissant qui nous a donné la force nécessaire pour réaliser et mener à terme ce travail de recherche.

Nous tenons à remercier profondément notre encadreur : le professeur

MIHOUBI KARIMA

Pour avoir accepté de diriger ce mémoire, la confiance qu'elle nous a accordée, ses encouragements et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, malgré ses multiples occupations.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères

A tous les membres de jury qui ont accepté de juger le présent travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres du département des sciences de la matière.

Nous exprimons la grande gratitude à tous les enseignants que nous avons rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à nos questions avec gentillesse.

Nous voudrions exprimer nos reconnaissances envers les amis et les collègues.

Merci à tous du plus profond de notre cœur



Dédicace

Avant tout : louanges à Dieu, élément et miséricordieux pour nous avoir donné la force de mener a terme ce travail.

Et je dédie ce modeste travail

Tous ceux qui ont su être présents dans ma vie :

Ma lumière du jour et l'étoile de mes nuits

Ma perle rare, mon symbole de patience, d'amour et de tendresse

Ma mère "Adila Djazia "Aussi à PURE ESPRIT de mon très cher père, cette flamme de sacrifice et d'honnêteté que je remercie pour tout ce qu'il ma donné.

Je dédie aussi ce travail à mes chers sœurs : Fatiha, Hayet, yamona, Nassima, Bouchra

A mes chers frères : Hamza, Mourade, Yacine

Et mes beau-frères : Abed al Karim , Ahmed

Et belles sœurs:, Nadia , Sumia

Ames yeux : Nawel , Zino, Meriem , Riyadh , Lakhder

A mes oiseaux : Monir, Sarah, , Taher , Lamis

A tout mes amies surtout : Karima, samia, Sarah, Wided ,hassiba

Je ne peux bien sur oublier : Hassina

A mes amies de classe et hors classe

Enfin, je dédie ce travail à toute personne qui m'aime et me respecte.

Rahima

Dédicace

*Avant tout : louanges à Dieu, élément et miséricordieux pour nous
avoir donné la force de mener a terme ce travail.*

Et je dédie ce modeste travail

Tous ceux qui ont su être présents dans ma vie :

Ma lumière du jour et l'étoile de mes nuits

Ma perle rare, mon symbole de patience, d'amour et de tendresse

*Ma mère Aussi à mon très cher père, cette flamme de sacrifice et
d'honnêteté que je remercie pour tout ce qu'il ma donné.*

Je dédie aussi ce travail

A mes cherssœurs

A mes chers frères

Et mes beau-frères

Et bellessœurs

Ames yeux : Nabil, Amina, Akram, Karim, Soufian

*A mes oiseaux : Ibtihel, Achraf, Tasnim, Kheireddin, Anfel, Inas,
Maria, Isra*

A tout mes amies surtout : Karima, Rahima, Samia, Hassiba, Sara

Je ne peux bien sur oublier : Manea Houda et leur famille

A mes amies de classe et hors classe

*Enfin, je dédie ce travail à toute personne qui m'aime et
me respecte.*

Wided

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des Figure

Liste des Tableaux

I-Introduction générale..... 01

CHAPITRE I : Notion de diffraction

I.1. Historique..... 03

I.2. Définition de diffraction..... 04

I.3. Principe de diffraction..... 04

I.4. Quelque principe de diffraction..... 06

I.4.1. Principe de Huygens..... 06

I.4.2. principe de Kirchhoff..... 07

I.4.3. principe de Fresnel..... 09

I.4.4. principe de Fraunhofer..... 10

I.5. Exemples des phénomènes de diffraction..... 12

I.5.1. Diffraction par un trou circulaire (tache d'Airy)..... 12

I.5.2. Diffraction par une fente..... 12

I.5.3. Diffraction par un réseau de fente..... 13

I.5.4. Diffraction par une ouverture rectangulaire..... 13

I.5.5. Diffraction par deux trous circulaires..... 16

I.6. Formule des réseaux..... 16

I.6.1. Réseau en réflexion..... 16

I.6.2. Réseau en transmission..... 17

I.7. L'expérience de Young..... 17

I.8. Applications des diffractions..... 18

I.8.1. Application dans l'astronomie..... 18

I.8.2. Application à la spectroscopie..... 19

CHAPITRE II : Les éléments optiques diffractifs

II.1. Origine des éléments optiques diffractifs..... 21

II.2. Définition des éléments optiques diffractifs..... 22

II.3. L'essor industriel et commercial de l'optique diffractive..... 23

II.4. Choix de classifications des optiques diffractives..... 23

II.5. Les différents EOD..... 27

<i>II.5.1. Réseau d'amplitude.....</i>	<i>27</i>
<i>II. 5.2. Réseau de phase.....</i>	<i>28</i>
<i>II.5.3. Réseau de pas.....</i>	<i>29</i>
<i>II.5.4. Réseau à échelottes.....</i>	<i>30</i>
<i>II.5.5. Réseau de Fresnel.....</i>	<i>31</i>
<i>II.5.6. Réseau holographie.....</i>	<i>32</i>

CHAPITRE III : Processus de fabrication des EOD

<i>III.1. Introduction.....</i>	<i>35</i>
<i>III.2. Enregistrement holographique.....</i>	<i>35</i>
<i>III.3. Principe de l'holographie optique.....</i>	<i>35</i>
<i>III.4. Eléments Diffractifs Calculés par Ordinateur.....</i>	<i>36</i>
<i>III.5. Méthodes de fabrication par lithographie.....</i>	<i>38</i>
<i>III.5.1. Principe.....</i>	<i>38</i>
<i>III.5.2. Ecriture directe pour la lithographie.....</i>	<i>40</i>
<i>III.5.3. Méthodes de fabrication par gravure directe.....</i>	<i>41</i>
<i>III.5.4 Usinage par pointe en diamant.....</i>	<i>42</i>
<i>III.5.5. Ecriture direct par faisceau d'électrons.....</i>	<i>42</i>
<i>III.5.6. Ecriture directe par faisceau d'ions.....</i>	<i>43</i>
<i>III.6. Avantages et désavantages.....</i>	<i>44</i>
<i>IV. Conclusion générale.....</i>	<i>46</i>

Références bibliographiques

Résumé

Liste des figures

Figure I.1	Rayons solaires en forêt. On peut observer le caractère rectiligne des rayons lumineux	03
Figure I.2	Diffraction d'une lumière monochromatique par différentes ouvertures.....	04
Figure I.3	Principe de diffraction.....	05
Figure I.4	Diffraction de l'onde lumineuse.....	05
Figure I.5	Principe de Huygens.....	06
Figure I.6	Sondition de diffraction.....	06
Figure I.7	Théorie de la diffraction de Kirchhof.....	09
Figure I.8	Schéma de diffraction montrant le plan objet (contenant une ouverture ou un objet diffractant circulaire) et le plan image	10
Figure I.9	Schéma représente le principe de Fraunhofer	10
Figure I.10	De diffraction obtenue au LASER avec un trou circulaire.....	12
Figure I.11	Diffraction de la lumière par une fente.....	13
Figure I.12	Figure de diffraction par une fente infinie de largeur $a=0.5\text{mm}$. La distance de la fente à l'écran est $D=2\text{m}$; la longueur d'onde $\lambda=0.5\mu\text{m}$	14
Figure I.13	Diffraction par deux trous circulaires.....	16
Figure I.14	Une ampoule placée derrière un réseau de diffraction.....	16
Figure I.15	expérience de Young.....	17
Figure I.16	application de diffraction dans l'astronomie.....	19
Figure I.17	Un réseau de diffraction fonctionne comme un " biprisme ", décomposant la lumière.....	19
Figure II.1	Réseaux de diffraction.	21
Figure II.2	Réseau optique diffractif.....	22
Figure II.3	Coordonnées pour la diffraction sur un réseau d'amplitude.....	27
Figure II.4	Motif de diffraction d'un réseau d'amplitude: (a) $N=2$; (b) $N=3$; (c) $n =4$; (d) $N=5$	28
Figure II.5	Coordonnées pour un réseau à échelle: (a) la lumière diffractée et réfractée et interférence; (b) les coordonnées de la diffraction sur une seule face.....	29
Figure II .6	Représentation schématique d'un réseau de pas; (b) les coordonnées pour le calcul de la diffraction sur un réseau de pas.....	30
Figure II.7	Réseau à échelle.....	31
Figure II.8	Réseau de Fresnel : focalisation par diffraction et interférences.....	32

Figure II.9	Montage pour réseau holographique.....	32
Figure III.1	Enregistrement holographique.....	35
Figure III.2	Montage d'enregistrement de Leith et Upatnieks.....	36
Figure III.3	D'interférence produite par l'enregistrement de deux ondes planes.....	36
Figure III.4	Etapes de codage d'un élément diffractif calculé.....	37
Figure III.5	Fabrication des EOD par ordinateur.....	37
Figure III.6	Etapes et techniques de lithographie pour la création d'un relief de surface....	39
Figure III.7	Génération d'un composant diffractif à quatre niveaux : première étape de gravure (a) pour la génération de deux niveaux et seconde étape de gravure (b) pour la génération de quatre niveaux.....	40
Figure III.8	Principe d'un système d'écriture directe par faisceau laser.....	41
Figure III.9	Processus de lithographie avec écriture modulée dans la résine pour la création d'un relief de surface analogique.....	41
Figure III.10	Principe de l'usinage du relief de surface d'un composant optique par fraisage mécanique à l'aide d'une pointe en diamant.....	42
Figure III.11	Système d'écriture directe par faisceau d'électrons.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1 Classification éléments optique diffractifs	24
Tableau 2 Classification des composants optiques diffractifs ou réfractifs en fonction de l'échelle caractéristique de la structuration de leur état de surface	26



Introduction générale

Introduction

Les composants diffractifs sont de plus en plus utilisés dans des domaines très variés : divertissement, médecine, métrologie, sécurité, visualisation et énergies renouvelables par exemple. les technologies diffractives sont en pleine croissance particulièrement en ce qui concerne de nouveaux systèmes opto-mécatroniques. Ces développements récents profitent des techniques issues de la micro-électronique concernant la fabrication d'un composant –maître, et de méthodes de réplification. Ces technologies ont été élaborées de manière à réduire de manière drastique le coût de production unitaire. Les éléments diffractifs ainsi produits sont particulièrement attractifs puisqu'ils peuvent permettre de réaliser de façon satisfaisante une fonction optique complexe à un moindre coût [1].

Le développement des méthodes de conception des éléments optique diffractives a connu un essor important et de nouvelles voies d'investigation ont été ouvertes.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un thème de recherche qui consiste à présenter et définir les EOD, leurs importances et les majeures méthodes de conception.

Le présent travail comporte trois chapitres:

- Le premier chapitre, évoque le phénomène de diffraction avec les différents théorèmes pour mieux comprendre le fonctionnement des EOD.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des éléments optique diffractives les plus courants.
- Le troisième chapitre est destiné pour les méthodes de conception de ses éléments, en expliquant le principe de fonctionnement.

Le travail s'achève par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Notion de diffraction

I.1. Historique

D'un point de vue historique la diffraction a été découverte avec la lumière en 1665 par Grimaldi. Elle interprétée correctement comme un comportement ondulatoire par Huygens, puis étudiée par Fresnel et Fraunhofer suite aux expériences de Young (trous d'Young).

Pour des raisons historique, on distingue encore la diffraction des interférences alors qu'il n'y pas lieu de le faire : ces deux comportement dérivent de la nature ondulatoire d'un phénomène et ne vont pas l'un sans l'autre : Il n'ya pas de diffraction sans interférence.

La réciproque n'est pas vraie, il existe des interférences par division d'amplitude : coin d'air, anneaux de Newton, Fabry- pérot ... [2]



Figure I.1 : Rayons solaires en forêt. On peut observer le caractère rectiligne des rayons lumineux [3].

I.2. Définition de diffraction

Les phénomènes de diffraction s'observent lorsque la taille des objets est comparable à la longueur d'onde des champs optiques qui les éclairent. Elle se traduit par un comportement de la lumière que ne prévoit pas l'optique géométrique. Il faut donc faire appel à la théorie électromagnétique pour chercher une explication de ce phénomène.

Il apparaît ainsi que la description de la diffraction à partir de la notion d'onde est très naturelle et surtout plus simple qu'une description utilisant la notion de corpuscule. C'est en se basant sur le principe de Huygens (1629-1695) et sur la notion d'interférence que Fresnel (1788-1827) a décrit le phénomène de diffraction.

Kirchhoff (1824-1887) lui donnera plus tard une forme mathématique. Cependant, la diffraction reste un problème très complexe et rares sont les solutions exactes à ce problème. Nous serons donc amenés à faire de nombreuses approximations. Ainsi nous supposons que les milieux de propagation sont homogènes et qu'il n'y a ni densité de courant ni densité de charge [4].

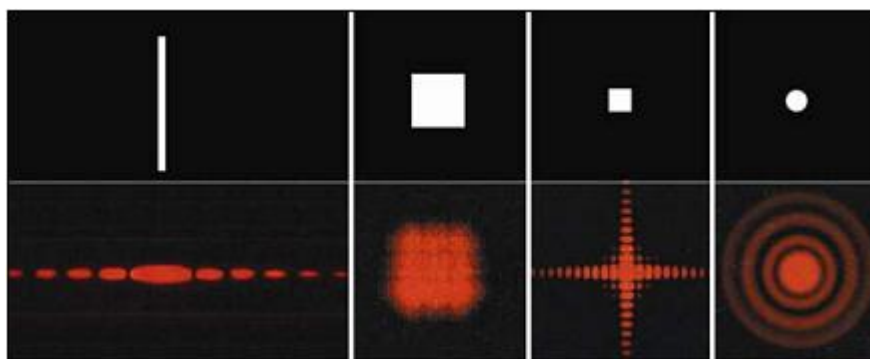


Figure I.2 : Diffraction d'une lumière monochromatique par différentes ouvertures [5].

I.3. Principe de diffraction

Le phénomène physique de diffraction se produit lorsqu'une onde rencontre un obstacle de taille comparable à la longueur d'onde. Il est particulièrement bien illustré par la figure (I.3). Quand la longueur d'onde est beaucoup plus petite que l'obstacle, l'onde reste plane derrière l'obstacle. Par contre quand la longueur d'onde se rapproche de la taille de l'obstacle, les surfaces d'onde derrière l'obstacle sont de plus en plus courbées, et l'onde n'est réémise que dans une certaine ouverture angulaire qui augmente quand la taille de l'obstacle diminue, et qui augmente quand la longueur d'onde augmente.

L'ouverture angulaire varie ainsi en λ / d , où d est la dimension latérale du trou.

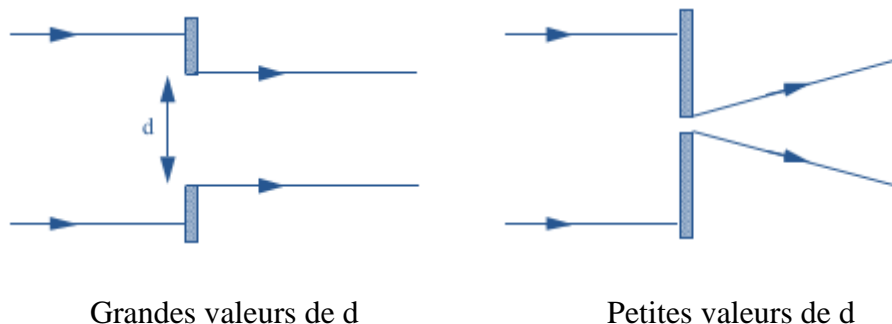


Figure .I 3: Principe de diffraction.

Si on éclaire un diaphragme de diamètre d avec une onde lumineuse plane, on observe quand d est grand une tache lumineuse qui correspond à la projection du trou. Quand on diminue peu à peu la taille du diaphragme, la taille de sa projection diminue et la projection devient moins lumineuse. A partir d'une certaine valeur de d , la taille de la projection se met à augmenter au lieu de diminuer. De plus cette tache lumineuse apparaît alors comme étant « structurée », c'est-à-dire qu'elle comporte une alternance de lignes sombres et lumineuses.

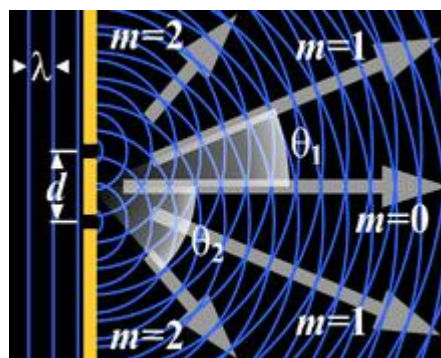
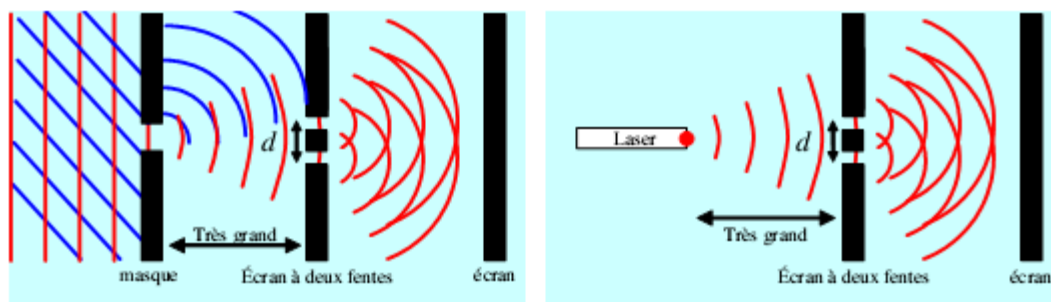


Figure. I. 4 : Diffraction de l'onde lumineuse.

Remarque:

On peut observer le phénomène de diffraction dans deux conditions : soit l'onde rencontre un diaphragme qui masque une partie du front d'onde, soit elle rencontre un obstacle. Le deuxième cas correspond par exemple au cas d'une onde sonore diffractée par un poteau : si l'on se place derrière le poteau, on entend quand même le son. De même on peut diffracter la lumière par un trou ou une fente suffisamment petit(e) ou par un fil (cheveu Par exemple).



Expérience de Young avec lumière et

Expérience de Young avec Laser

masque

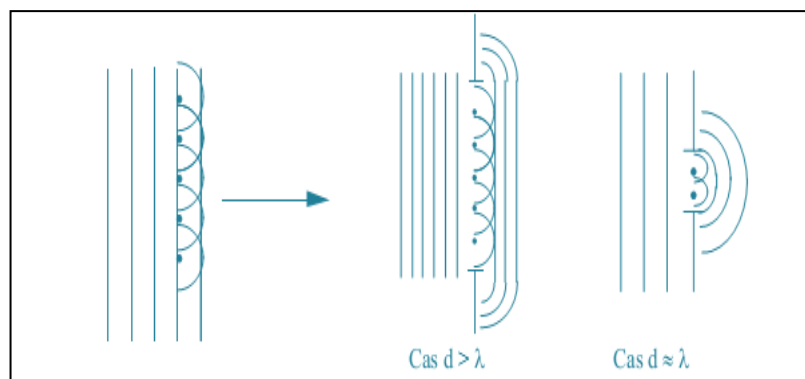
Figure I.5: Condition de diffraction [6].

I.4.quelque principe de diffraction

I.4.1.Principe de Huygens

Huygens, physicien hollandais (1628-1695) qui émit l'hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière. Sa modélisation de la propagation de la lumière est la suivante :

Chaque point d'une surface d'onde peut être considéré comme une source secondaire, et la surface d'onde à un instant postérieur est l'enveloppe des surfaces d'onde provenant de cette infinité de sources secondaires. Ceci est illustré par le schéma suivant(a) :



a) propagation d'une onde plane

b) diffraction par une ouverture de taille d

Figure. I.6: Principe de Huygens.

On peut ainsi comprendre qualitativement le phénomène de diffraction (schéma (b) ci-dessus) : quand l'onde plane arrive sur une ouverture de taille d , une partie des sources secondaires est supprimée. Il y en aura d'autant moins que la longueur d sera petite par rapport à λ . Grâce aux dessins ci-dessus, on comprend donc grossièrement le phénomène de diffraction. Cependant ce raisonnement ne nous donne pas l'ouverture angulaire dans laquelle l'onde est réémise par le diaphragme.

Remarque:

La distinction entre interférences et diffraction n'est pas toujours évidente. Les phénomènes de diffraction et d'interférences sont profondément liés : le phénomène de diffraction lui-même résulte de l'interférence d'une infinité d'ondes.

- Quand on examine la superposition de deux ondes, il s'agit d'interférences.
- Quand on a un ensemble de points qui diffractent l'onde incidente, et que les ondes diffractées interfèrent entre elles, on parle de diffraction (cas d'un réseau ou d'un cristal).
- Dans le cas des interférences produites par une lame à faces parallèles (cf. problème sur le film de savon), il n'y a pas de diffraction du tout, on parle alors bien d'interférences [7].

I.4.2. le principe de Kirchhoff

Le point de départ de cette théorie est d'une part l'équation scalaire de propagation d'un champ monochromatique (de pulsation ω) en milieu homogène, c'est-à-dire l'équation d'Helmholtz :

Où U représente un champ (électrique ou magnétique) et k est le vecteur d'onde du champ, et d'autre part le théorème mathématique de Green qui stipule que :

$$\int_V [u \Delta u' - u' \Delta u] dv = - \int_S \left[u \frac{\partial u'}{\partial n} - u' \frac{\partial u}{\partial n} \right] ds \quad (I.1)$$

À condition que :

- Le volume V est délimité par la surface S
- U possède des dérivées premières et secondes continues dans le volume V et sur la surface S ,

- U' possède également des dérivées premières et secondes continues dans le volume V et sur la surface S .

$\partial/\partial n$ représente la dérivée suivant la normale n^{\rightarrow} à la surface, orientée vers l'intérieur du volume V .

La forme particulière du théorème de Green nous montre qu'en choisissant U' tel qu'il vérifie l'intégrale de Helmholtz ($\Delta U' = -k^2 U'$), il se simplifie puisque:

$$u\Delta u' - u'\Delta u = u(-k^2 u') - u'(-k^2 u) = 0 \quad (\text{I.2})$$

Nous trouvons :

$$\int_S \left[u \frac{\partial u'}{\partial n} - u' \frac{\partial u}{\partial n} \right] ds = 0 \quad (\text{I.3})$$

Nous allons choisir U' , tel que :

$$u' = \frac{e^{ikr}}{r}$$

Qui correspond donc à une onde sphérique scalaire. Cette fonction est très valable exceptée à l'origine où elle n'est pas dérivable. Pour pouvoir appliquer le théorème de Green nous devons donc exclure l'origine du volume V d'intégration. Cela se fait (voir figure I.7) en entourant l'origine par une surface S' sphérique.

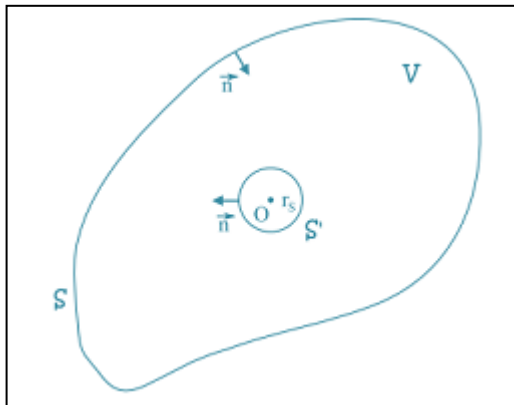


Figure I.7 : Théorie de la diffraction de Kirchhoff.

Après plusieurs simplifications, nous aurions alors trouvé :

$$u(p) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[u \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{e^{ikr}}{r} \right] - \frac{e^{ikr}}{r} \frac{\partial u}{\partial n} \right] ds \quad (\text{I.4})$$

Cette équation représente le théorème intégral de Kirchhoff. Elle permet de calculer le champ en un point P quelconque d'un volume, connaissant le champ U et sa dérivée normale $\partial U/\partial n$ sur la surface de ce volume. r est alors la distance entre le point P et le point courant sur la surface S [4] .

I.4.3. Le principe de Fresnel

En optique et électromagnétisme, la diffraction de Fresnel, encore nommée diffraction en champ proche ou approximation de Fresnel, est une description en champ proche du phénomène physique de diffraction qui apparaît lorsqu'une onde diffracte à travers une ouverture ou autour d'un objet. Elle s'oppose à la diffraction de Fraunhofer qui décrit le même phénomène de diffraction mais en champ lointain.

A l'opposé de la diffraction de Fraunhofer, la diffraction de Fresnel doit prendre en compte la courbure du front d'onde, afin de rendre correctement le terme de phase des ondes interférentes en champ proche.

Les deux formulations ne sont pas incompatibles : lorsque la distance augmente, c'est-à-dire lorsqu'on se place en champ lointain, le rayon de courbure des ondes sortantes diffractées devient

très grand, si bien que ces ondes peuvent être approximées par des ondes planes selon la direction du plan image : on retrouve alors la diffraction ou approximation de Fraunhofer.

Cette description de la diffraction est nommée d'après le physicien français Augustin Fresnel.

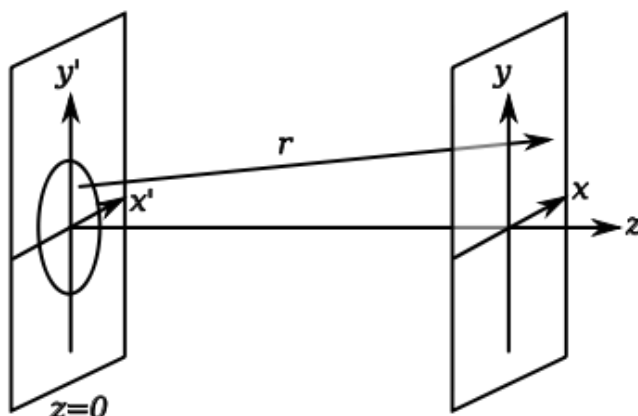


Figure I.8 : Schéma de diffraction montrant le plan objet (contenant une ouverture ou un objet diffractant circulaire) et le plan image.

I.4.4. Le principe de Fraunhofer

La diffraction de Fraunhofer ou diffraction à l'infini est un cas particulier où le plan d'observation situé loin de l'objet diffractant, celui-ci étant éclairée par une onde plane (source ponctuelle à l'infini) et défini par son facteur de transmission $t(X,Y)$.

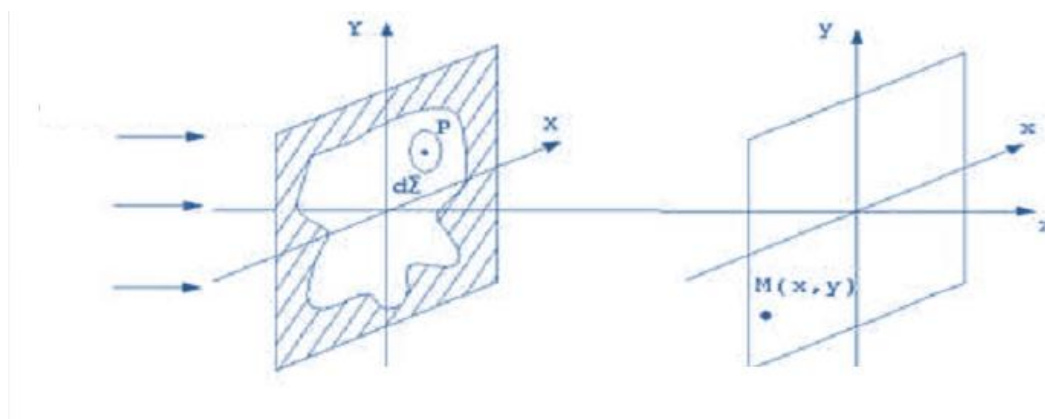


Figure I.9 : Schéma représente le principe de Fraunhofer.

$$E(M) = k' \iint_{\Sigma} E(P) \exp \left[\frac{j\pi}{\lambda r} \left[(x - X)^2 + (y - Y)^2 \right] \right] dXdY \quad (I.5)$$

On suppose que la source est située sur l'axe et donc que $E(P)$ est constant dans le plan diffractant:

Si :

$$\frac{X^2}{\lambda r} \ll 1$$

Alors :

$$\exp \left[j \frac{\pi}{\lambda r} (x - X)^2 \right] \approx \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda r} x^2 \right] \exp \left[- j \frac{2\pi}{\lambda r} xX \right] \quad (I.6)$$

Et idem en Y

-Condition de Fraunhofer :

$$X^2 / \lambda r \ll 1 \quad \text{et} \quad Y^2 / \lambda r \ll 1$$

Si l'ouverture est de taille caractéristique d , on définit le Nombre de Fresnel.

$$\frac{d^2}{\lambda r} \ll 1$$

On obtient pour l'amplitude de l'onde diffractée dans les Conditions de Fraunhofer :

$$E(M) = K'' \iint t(X, Y) \exp \left[- \frac{2j\pi}{\lambda r} (xX + yY) \right] dXdY \quad (I.7)$$

Avec :

$$K'' = k' E(P) \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda r} (x^2 + y^2) \right] \quad (\text{I.8})$$

$$K' = \frac{K}{r} e^{j \frac{2r\pi}{\lambda}} \quad (\text{I.9})$$

Et $t(X, Y)$ la transmittance définissant l'objet diffractant [8].

I.5.Exemples des phénomènes de diffraction

I.5.1.Diffraction par un trou circulaire (tache d'Airy)

On aura une onde diffractée dans tout le $\frac{1}{2}$ espace situé après le motif diffractant, mais comme le motif est à symétrie de révolution, l'onde diffractée aura également cette symétrie. L'angle de la première annulation dans le cadre des petits angles sera dans ce cas : $\theta \approx 1,22\lambda/2R$ où R est le rayon du motif diffractant circulaire [9].

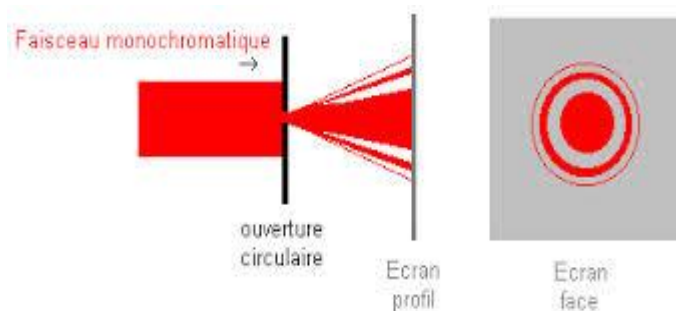


Figure I.10: La diffraction obtenue au LASER avec un trou circulaire [10]

Remarque: La tache centrale circulaire est appelée "tache d'Airy"[9].

I.5.2. Diffraction par une fente

La figure de diffraction est constituée d'une tache centrale double des taches voisines. Ces taches sont alignées selon une direction perpendiculaire à la fente. Plus la fente étroite plus la diffraction est marquée

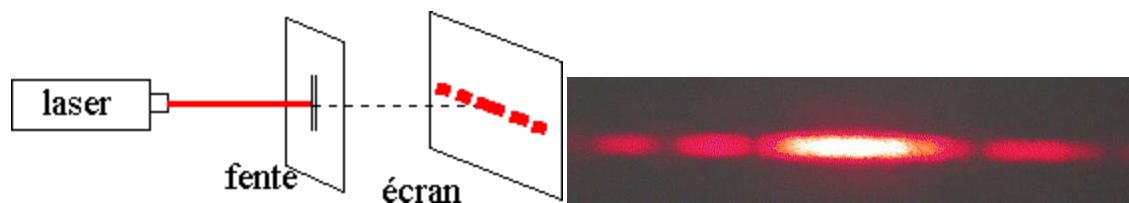


Figure. I.11: Diffraction de la lumière par une fente [9].

I .5.3. Diffraction par un réseau de fente

Considérons maintenant la diffraction par un réseau de K fentes ; Un réseau de diffraction est un dispositif optique composé d'une série de fentes parallèles. Ces traits sont espacés de manière régulière, l'espacement est appelé le « pas » du réseau.

Si la distance entre plusieurs traits est de l'ordre de grandeur d'onde de la lumière incidente, le réseau permet d'obtenir des figures de diffraction particulières influencées par la répétition. Il s'agit donc d'un effet de diffraction lié à la répétition d'une structure optique, distinct de l'effet issu de la diffraction par une structure de taille comparable à la longueur d'onde, comme une fente de Young [11].

I .5.4. Diffraction par une ouverture rectangulaire

Nous supposons maintenant que la pupille est une fente rectangulaire qui occulte le faisceau incident dans les deux directions x et y . Si un point du faisceau est à l'intérieur de la fente rectangulaire.

De dimension ab , ce point devient une source secondaire et il y a diffraction. La fente est transparente dans la fenêtre ce qui impose que :

$$t(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{Si } M \in F \\ 0 & \text{Si } M \notin F \end{cases}$$

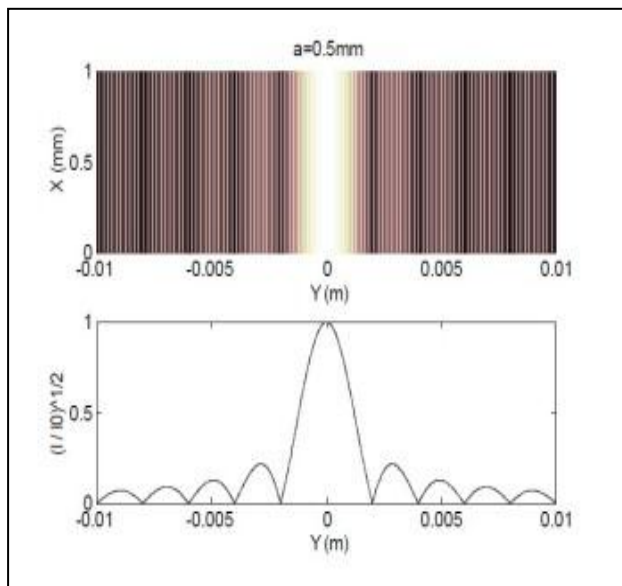


Figure .I.12 : Figure de diffraction par une fente infinie de largeur $a=0.5\text{mm}$. La distance de la fente à l'écran est $D=2\text{m}$; la longueur d'onde $\lambda=0.5\mu\text{m}$.

Il est facile de voir que l'on peut séparer les variables x et y ce qui conduit à :

$$t(x, y) = t(x)t(y)$$

Avec

$$t(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si } M \in I = [-a/2, a/2] \\ 0 & \text{Si } M \notin I \end{cases}$$

Et

$$t(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si } M \in I' = [-a/2, a/2] \\ 0 & \text{Si } M \notin I' \end{cases}$$

L'amplitude diffractée en P est donnée par :

$$E(u, v) = kA \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x)t(y)e^{-2i\pi(ux-vy)} dx dy \quad (\text{I.10})$$

$$E(x, v) = kA \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{a/2} e^{-2i\pi(ux,vy)} dx dy \quad (\text{I.11})$$

Les variables x et y sont indépendantes ce qui permet d'effectuer séparément le calcul des deux intégrales d'où :

$$E(x, v) = kA \int_{-a/2}^{a/2} e^{-2i\pi ux} dx \int_{-b/2}^{a/2} e^{-2i\pi vy} dy \quad (\text{I.12})$$

Après quelque calcul nous obtenons :

$$E(X, Y) = KAab \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi Xa}{\lambda D} \right) \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi Yb}{\lambda D} \right) \quad (\text{I.13})$$

ce qui conduit à l'intensité diffractée suivante :

$$I(X, Y) = A^2 a^2 b^2 k^2 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi Xa}{\lambda D} \right) \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi Yb}{\lambda D} \right) \quad (\text{I.14})[12].$$

I.5.5. Diffraction par deux trous circulaires

Les deux trous sont identiques, outre le rayon commun des trous on fixera la demi-distance entre les centres des deux trous avec : $[d]$ et pour ce cas de figure on activera l'option `[twoHole]`. On notera que les temps de calculs d'allongent. . .

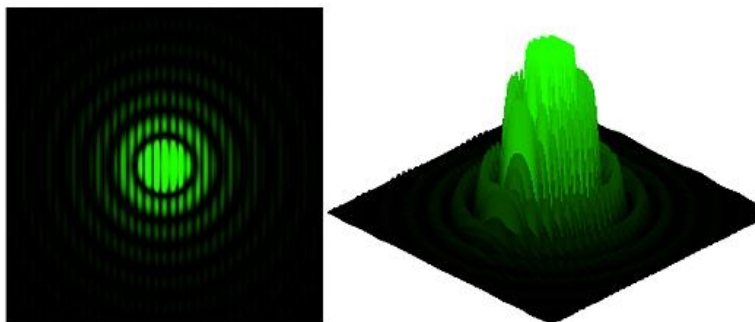


Figure I.13: Diffraction par deux trous circulaires [13].

I.6. Formule des réseaux

Lorsque la lumière frappe un réseau, elle n'est réfléchié ou transmise qu'en certains points, les traits du réseau. Chaque trait diffusé la lumière dans toutes les directions, et ces ondes interfèrent. Comme les traits sont disposés de manière régulière, on a une alternance interférence constructive/interférence destructive selon l'angle de diffusion. On peut ainsi calculer, pour une longueur d'onde λ donnée, les angles θ pour lesquels on aura une interférence constructive.



Figure I.14 : Une ampoule placée derrière un réseau de diffraction.

I.6.1. Réseau en réflexion

Soit n_1 l'indice du milieu de propagation de l'onde incidente (de longueur d'onde λ). Soit θ_i l'angle d'incidence et θ_r l'angle de réflexion pour lequel on a une interférence constructive. Soit a le pas du réseau et m un nombre entier. On a des interférences constructives si :

$$n_1 \sin r = -n_1 \sin i + m \frac{\lambda}{a} \quad (\text{I.15})$$

I.6.2. Réseau en transmission

Soit n_1 l'indice du milieu de propagation de l'onde incidente (de longueur d'onde λ), et n_2 l'indice du milieu transparent dans la fente du réseau (on peut avoir $n_1 = n_2$ si la fente est un simple évidement). Soit i l'angle d'incidence et r l'angle de réfraction pour lequel on a une interférence constructive. Soit a le pas du réseau et m un nombre entier. On a des interférences constructives si :

$$n_2 \sin r = n_1 \sin i - m \frac{\lambda}{a} \quad (\text{I.16})$$

Dans ces deux formules, les angles sont décrits par une valeur algébrique.

Le nombre m se nomme le « mode », ou encore « ordre de diffraction » [14].

I.7.L'expérience de Young

L'étalement de l'onde plane en onde sphérique. Lorsqu'une onde plane subit une diffraction au travers une ouverture, l'onde prend la forme d'une onde sphérique. Lorsque l'onde sphérique s'est beaucoup déployée, elle se comporte localement comme une onde plane, car la courbure de l'onde est faible puisque le rayon du cercle décrit par le front d'onde est très grand. Onde sphérique Distance très grande. Onde plane (localement).

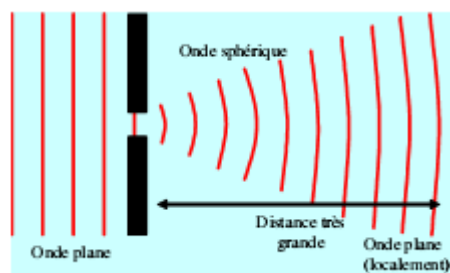


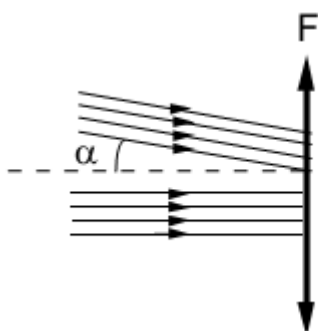
Figure I.15: Expérience de Young [6].

I.8.Applications des diffractions

I.8.1.Application dans l'astronomie

Les conséquences de ce phénomène de diffraction sont très nombreuses. Elles peuvent être gênantes, comme par exemple en microscope optique où la diffraction va limiter la taille des objets que l'on peut observer. En optique, par exemple en optique astronomique, la diffraction va ainsi provoquer des limitations d'observation. Une lunette astronomique est destinée à l'observation d'objets situés dans le ciel, donc à l'infini. L'élément principal est une lentille convergente de diamètre d et de distance focale f qui va recueillir l'intensité lumineuse envoyée par ces objets ; tous les rayons qui pénètrent à travers cet objectif traversent ensuite les autres éléments optiques et notamment l'oculaire.

C'est l'objectif qui constitue l'élément le plus cher de la lunette et qui limite ses capacités de séparation.



La séparation des objets se mesure en angle α . Plaçons nous au foyer image de l'objectif les deux images sont séparées d'une distance αf . L'objectif va constituer à la fois les éléments d'optique de diffraction à l'infini et l'objet diffractant lui-même. De chacun des objets situés à l'infini, il va donner, dans son propre plan focal image, une tache de diffraction de largeur $1.22 \lambda f d$. Il faut donc que la distance de séparation entre les images des deux sources soit au moins égale à cette distance. On en déduit ainsi la limite théorique de résolution angulaire de la lunette :

$$\alpha_{\min} = 1.22 \lambda / d$$

Pour une lunette de diamètre 10 cm: $\alpha = 1,38$.

Pour une lunette de diamètre équivalent de 5cm (bien qu'une lentille de diamètre 5 m n'existe pas, on peut utiliser un miroir concave tel celui du télescope du mont Palomar aux USA): $\alpha = 0,028$. En

fait le pouvoir de résolution angulaire n'est pas aussi bon que celui prévu théoriquement car, dès que l'objectif dépasse 10cm de diamètre, les turbulences atmosphériques déforment la surface d'onde. Un objectif de diamètre 5 cm n'est donc pas meilleur de ce point de vue qu'un télescope de diamètre 10cm ; mais il est beaucoup plus lumineux car il collecte plus de lumière. Pour résoudre ce problème de turbulence, une solution radicale a été de placer le télescope dans l'espace, c'est le rôle dédié au satellite Hubble.

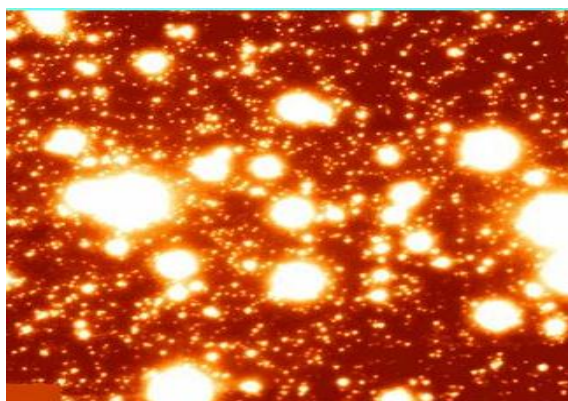


Figure .I. 16: Application de diffraction dans l'astronomie.

I.8.2. Application à la spectroscopie

Si on éclaire un réseau par une lumière poly chromatique, chaque longueur d'onde donnera une figure de diffraction différente puisque la distance entre les taches de diffraction est proportionnelle à la longueur d'onde : il est ainsi possible de disperser les différentes longueurs d'onde et d'en déduire les longueurs d'onde présentes dans les spectres.

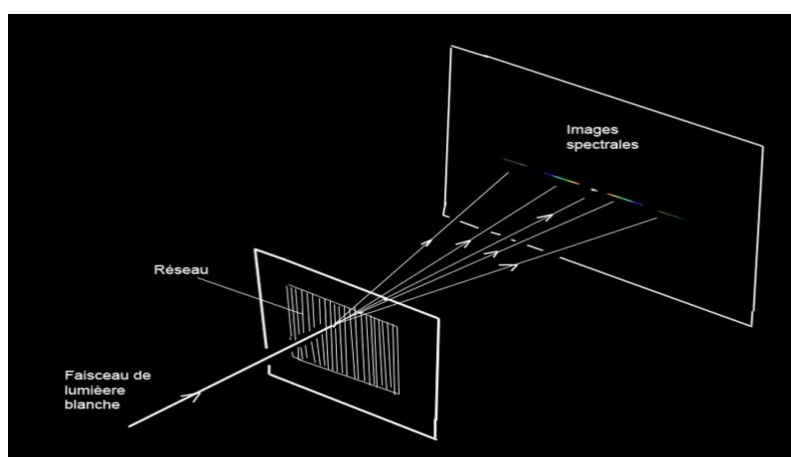


Figure I.17 : Un réseau de diffraction fonctionne comme un " biprisme ", décomposant la lumière [7].

CHAPITRE II

Les éléments optiques diffractifs

II.1. Origine des éléments optiques diffractifs

Un des premiers dispositifs fabriqués tirant avantage de la diffraction est probablement un réseau de diffraction réalisé par l'astronome américain David Rittenhouse en 1785. Bien qu'il n'en ait apparemment pas tiré une quelconque utilité scientifique, sa découverte précède celle de Joseph von Fraunhofer qui commença ses travaux sur les réseaux en 1821 en tirant avantage de la dispersion de ceux-ci pour une utilisation en spectroscopie. De cette manière, il réussit à mesurer les raies d'absorption du spectre de la lumière solaire. Cette découverte a également permis à Moseley, en utilisant la diffraction des rayons X en 1913, de trouver une relation entre la fréquence des lignes d'émission des rayons X et la charge nucléaire de l'atome. De cette manière, il réussit à valider l'intuition de Mendeleïev à l'origine de la classification périodique des éléments. Ainsi, initialement, les réseaux de diffraction ont été développés pour analyser la composition spectrale des faisceaux lumineux. Ces effets ont ensuite pu dépasser les applications pour l'analyse spectrale avec notamment la fabrication de composants optiques conçus pour « structurer » la répartition énergétique spatiale d'un faisceau. Une des découvertes fondatrices de l'optique diffractive selon cette approche est probablement l'holographie.

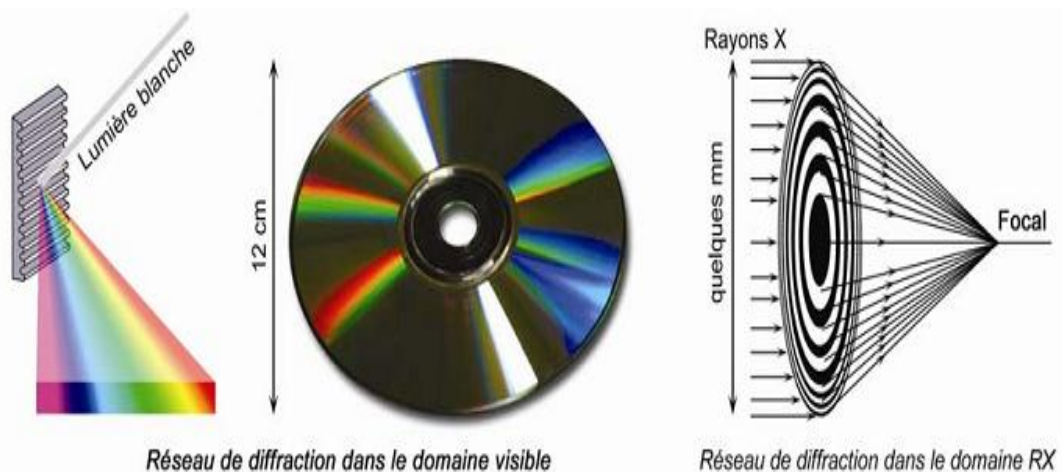


Figure II.1: Réseaux de diffraction.

II.2.Définition des éléments optiques diffractifs

Un élément optique diffractif (EOD) est un élément transparent ou réfléchissant présentant une modulation de phase et /ou d'amplitude définie pour modifier un front d'onde incident par l'intermédiaire des phénomènes combinés de diffraction et d'interférences afin de produire une fonction optique telle que la mise en forme d'un faisceau par exemple .Ainsi ,la caractéristique fondamentale des EOD réside dans l'usage favorable de la diffraction plutôt que celui de la réfraction. Le développement des applications des EOD a été rendu possible par les avancées rencontrées dans les domaines des sciences et techniques de l'information. Initialement fabriqués analogiquement par holographie, ils ont ensuite été élaborés numériquement par micro lithographie ou encore par gravure par faisceau d'électrons contrôlé.

Comparés ou optiques conventionnelles les EOD offrent deux principaux avantages : ils peuvent être fabriqués miniaturisés sur substrat mince et un seul composant peut remplir simultanément de nombreuses fonctions optiques (exemple : collimation et structuration). Cependant, les EOD produisent une importante dispersion spectrale liée au phénomène de diffraction. Ce désavantage est parfois mis à profit pour combiner des optiques réfractives et diffractives afin de produire une paire achromatique [1].

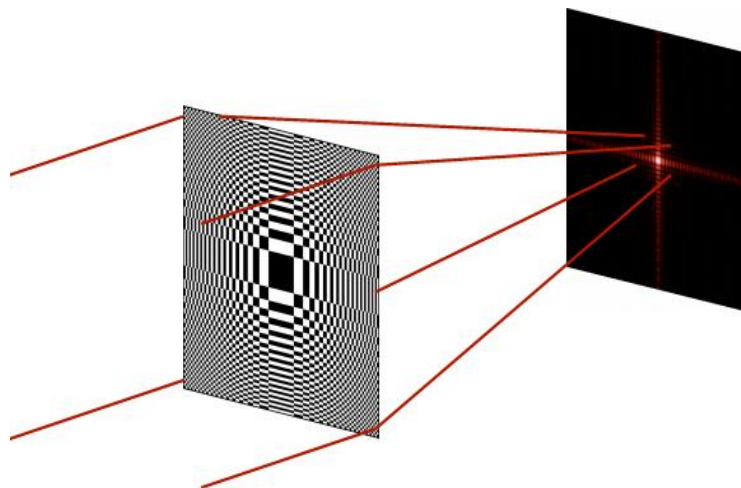


Figure II.2: Réseau optique diffractif [15].

II.3.L'essor industriel et commercial de l'optique diffractive

L'essor des EOD est lié au développement conjoint de l'informatique et des technologies de micro et nano fabrication, les modèles de calcul de ces composants sont aujourd'hui inclus dans les outils de modélisation du commerce .certaines sociétés proposent leur réalisation. De nombreuses application ont été proposées, et parfois développées industriellement incluant : des afficheurs tête-haute pour l'aéronautique militaire, le transport civil ou dans le domaine du biomédical, des composants spécifiques pour le contrôle de forme par exemple. Les EOD jouent naturellement un rôle prépondérant dans la croissance économique de la micro-optique .en effet, leur cout est principalement lié à la fabrication d'un élément maitre, et les répliques relativement bon marché permettent d'amortir ce cout d'autant plus rapidement que le nombre de répliques est important. Il est assez difficile de déterminer le nombre de composants diffractifs qui ont été vendus à ce jour dans le monde tant les applications dans lesquelles ils s'intègrent sont diverses. Les premiers composants diffractifs vendus dans le commerce ont certainement été les réseaux de diffraction utilisés en spectroscopie, largement répandus dans l'industrie, les universités et les centres de recherche. Depuis, les hologrammes sécurité, utilisés notamment pour les cartes de crédit ou les billets de banque, permettent de vérifier leur authenticité d'un coup d'œil. Ceux-ci ont grandement contribué l'intérêt pour éléments diffractifs.

Avant d'aborder le processus de fabrication des optiques diffractives, il est utile de disposer d'une classification des EOD. Elle doit permettre d'identifier les contraintes de conception en fonction de type de composant pour en appréhender les limites. Dans le paragraphe suivant, nous proposons une classification des EOD.

II.4.Choix de classifications des optiques diffractives

Il existe plusieurs types de classifications reconnues et utilisées dans la littérature pour organiser en catégories les EOD. Plusieurs d'entre elles peuvent être envisagées en fonction de la caractéristique de l'EOD étudiée. Les ont été classés, par exemple, en fonction de la méthode du calcul de la disposition des microstructures diffractives (analytique ou numérique), en fonction de la localisation des éclairages structurés produits (en champs proche ou lointain) ou encore en fonction des applications visées. Dans cette étude, nous avons choisi de classer les EOD en cinq catégories. Les cinq catégories proposées sont présentées dans le tableau ci-dessous. Elles ont été définies pour simplifier l'identification des besoins nécessaires au processus d'élaboration, des avantages offerts et des contraintes qui leurs sont associées.

Critère de classification	Type/paramètre	Nom générique de l'élément
Type de modulation	Phase	Elément de phase
	Amplitudes	Elément d'amplitudes
Méthode de calcul	numériques	Computer Generated hologram CGH
	analytique	Elément analytique
Géométrie	Distance de reconstruction	Elément de Fourier
		Elément de Fresnel
	morphologie	Elément en dents de scie
		Eléments à N niveau de phase
		Elément holographique
	Taille des structures	Elément à profile continu
		Eléments sub-longueur d'onde
	Eléments scalaires	

Tableau II.1 : Classification éléments optique diffractifs.

Une première classification consiste à considérer le paramètre physique utilisé pour « coder » la fonction de phase de l'EOD. Deux types de modulations existent : amplitude et phase. Les éléments d'amplitude sont ceux dont le principe repose sur la modulation du front d'onde incident par des modifications locales de la transparence. Les éléments de phase ont une action sur la phase de front d'onde incident. Pour les éléments de phase, la modification du front d'onde incident peut être réalisée en modulant localement le relief d'une surface partiellement transparente ou son indice de réfraction, pour introduire les différences de marches optiques nécessaires à la production d'interférences. Certaines méthodes de conceptions de composants diffractifs utilisent une combinaison de ces deux caractéristiques. Les deux types d'éléments peuvent remplir les mêmes fonctions, mais les éléments d'amplitude ont généralement une efficacité plus faible que les éléments de phase, étant donné qu'ils occultent une grande partie du rayonnement incident. Les éléments de phase constituent pour cette raison, un centre d'intérêt principal.

Une deuxième possibilité consiste à classer les EOD en fonction de la méthode de calcul de leur fonction de phase. Deux types des méthodes sont employés dans ce cas : les méthodes dites analytiques et celles dites numériques. Les EOD analytiques sont ceux qui peuvent être calculés en résolvant une équation analytiques au contraire des éléments numériques dont le calcul nécessite, dans la plupart des cas, de développer des algorithmes numériques itératifs. Les éléments numériques sont également appelés hologrammes générés par ordinateur (CGH, Computer Generated Holograms). Ces éléments sont généralement fabriqués par micro-lithographie, une technologie issue de la micro-électronique. Associée aux procédés de micro-usinage, cette méthode permet discrétiser une surface en plusieurs niveaux de gravure.

On peut également distinguer les éléments diffractifs suivant une troisième classification en faisant des considérations géométriques comme par exemple, la distance de reconstruction correspondant à la distance à laquelle la figure de diffraction doit être produite. Dans ce cas, on distingue les éléments de Fresnel pour lesquels la figure de diffraction a été calculée pour être projetée à distance finie des éléments de Fourier correspondant à une reconstruction à l'infini. Les algorithmes de conception de ces types d'éléments sont distincts. La forme de profil de la fonction de phase des EOD peut également être considérée comme un critère de classification morphologique des éléments diffractifs. Cette caractéristique générale du profil dépend de la technologie de fabrication utilisée. Dans ce cas, on parle par exemple d'éléments holographiques (HOE : holographic Optical Element) lorsqu'ils sont réalisés à l'aide d'un enregistrement holographique, ces éléments présentent généralement une modulation sinusoïdale de leur indice de réfraction local.

Les éléments blazés sont généralement fabriqués par tournage diamant et présentent un profil blazé. Lorsqu'ils sont élaborés par gravures successives de la surface, on parle dans ce cas d'éléments à N niveaux de phase. Avec ce type d'éléments, la fonction de phase est quantifiée selon un nombre fini de niveaux de phase. Ces éléments sont fabriqués par micro-lithographie. Ils nécessitent plusieurs niveaux de masquage. Les éléments à profil continu proposent une variation de phase continue et sont habituellement réalisés par lithographie à niveaux de gris ou par gravure par faisceau d'électrons contrôlé. Enfin, il est possible de classer les EOD, toujours selon des critères géométriques, en portant des considérations sur la taille des structures utilisées pour réaliser l'EOD. En tableau (II.2), différents composants sont classés en fonction de la taille du motif élémentaire à partir duquel ils sont élaborés, la troisième colonne présente des exemples de composants optiques dans chacune des catégories :

$\frac{\Delta}{\lambda} > 1000$	Macro-optique	Lentilles réfractives
$100 < \frac{\Delta}{\lambda} < 1000$	Micro-optique réfractive	Matrice de microlentilles Lentilles GRIN
$10 < \frac{\Delta}{\lambda} < 100$	Micro-optique diffractive	Réseaux de spectroscopie Éléments diffractifs scalaire
$\frac{\Delta}{\lambda} < 10$	Domaine résonant	Coupleurs de guide d'onde Filtre étroit par réseau
$\frac{\Delta}{\lambda} < 1$	Réseaux sub-longueur d'onde	Structures anti-réfléchissantes Lame d'onde

Tableau II.2 : Classification des composants optiques diffractifs ou réfractifs en fonction de l'échelle caractéristique de la structuration de leur état de surface.

Le Tableau (2) montre que lorsqu'un composant optique est constitué de structures dont les dimensions locales sont largement supérieures à la longueur d'onde incidente ($\Delta > 1000\lambda$), on est dans le domaine « Macro », c'est-à-dire dans le domaine réfractifs : dans ce cas, le comportement de l'optique peut être simplement décrit par une modélisation à base de l'équation de l'eikonale. Pour des structures dont la taille est comprise entre 100 fois et 1000 fois la longueur d'onde, on se trouve dans le domaine de la micro-optique réfractive, le phénomène de réfraction de la lumière étant toujours prépondérant à celui de la diffraction. On trouve dans cette catégorie les microlentilles à gradient d'indice (lentille GRIN) utilisées dans l'industrie télécom en entrée d'une fibre optique. Il existe également des matrices de microlentilles utilisées, par exemple, pour l'analyse de fronts d'onde dans un montage de type Shack-Hartmann. Le domaine qui nous intéresse particulièrement dans cette partie est celui des optiques diffractives dites 'classiques', ou 'scalaires'. Il s'agit d'éléments diffractifs dont les structures ont des tailles comprises entre 10 fois et 100 fois la longueur d'onde incidente. Pour des tailles de structures plus petites, on est dans le domaine de l'optique dites « résonante », dans lequel on trouve notamment les réseaux sub-longueur d'onde et les cristaux photoniques [1].

II.5. Les différents EOD

II.5.1. Réseau d'amplitude

Réseaux d'amplitude sont des structures périodiques des bandes alternatif transparent et opaques, Nous devons maintenant intégrer sur les zones ouvertes de la série périodique de fentes figure(II.3).l'intégration sur une fente :

$$U(\theta) = \int_{y_1=-d/2}^{y_2=d/2} e^{-ik(y\sin\theta)} dy \tag{II.1}$$

Est maintenant étendu à de nombreux fentes; qui est, nous avons une sommation

$$U(\theta) = \int_{-d/2}^{d/2} e^{-ik(y_1\sin\theta)} dy_1 + \int_{a-d/2}^{a+d/2} e^{-ik(y_2\sin\theta)} dy_2 + \int_{2a-d/2}^{2a+d/2} e^{-ik(y_3\sin\theta)} dy_3 + \dots \tag{II.2}$$

Nous remplaçons dans la seconde intégrale $y_1=y_2- a$, de même dans la troisième intégrale $y_3=y_1-2a$, et ainsi de suite .Modification de la variable d'intégration au y_1 toutes les intégrales.

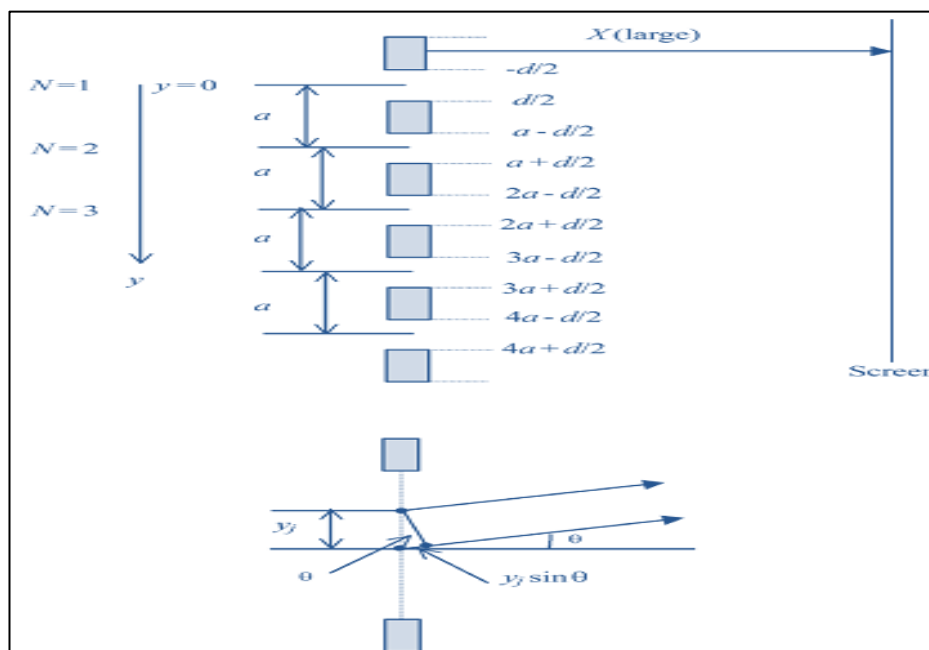


Figure II.3 : Coordonnées pour la diffraction sur un réseau d'amplitude.

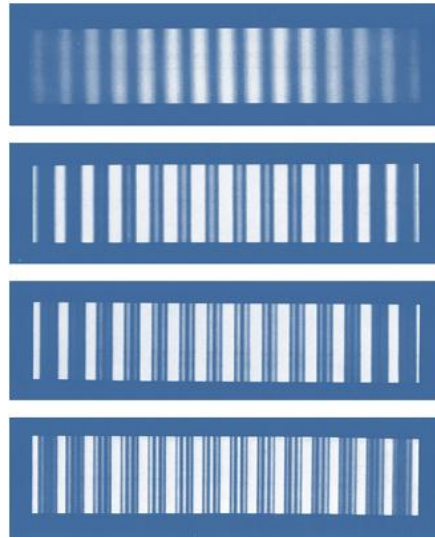


Figure II.4 : Motif de diffraction d'un réseau d'amplitude: (a) $N=2$; (b) $N=3$; (c) $n =4$; (d) $N=5$.

II.5.2. Réseau de phase

Un réseau de transmission avec une différences périodiques de l'épaisseur est appelée une réseau de phase .Lorsque le réseau de diffraction comporte des pas avec l'angle ε , comme le montre la figure(II.5), on l'on appelle un réseau de diffraction à échellette .Il peut être produit à partir de matières d' indice de réfraction(transparent) ni avec une surface métallique, comme dans le cas des réseaux de réflexion, Pour calculer le motif de diffraction de la grille d'échellette, nous devons déterminer la différence de chemin optique entre les équivalents d'ondes voisins pas et à intégrer au cours de toutes les pas. Le résultat est un facteur d'interférence dépend de la périodicité constante a des pas et le coefficient de diffraction dépend de le profil dans le pas.

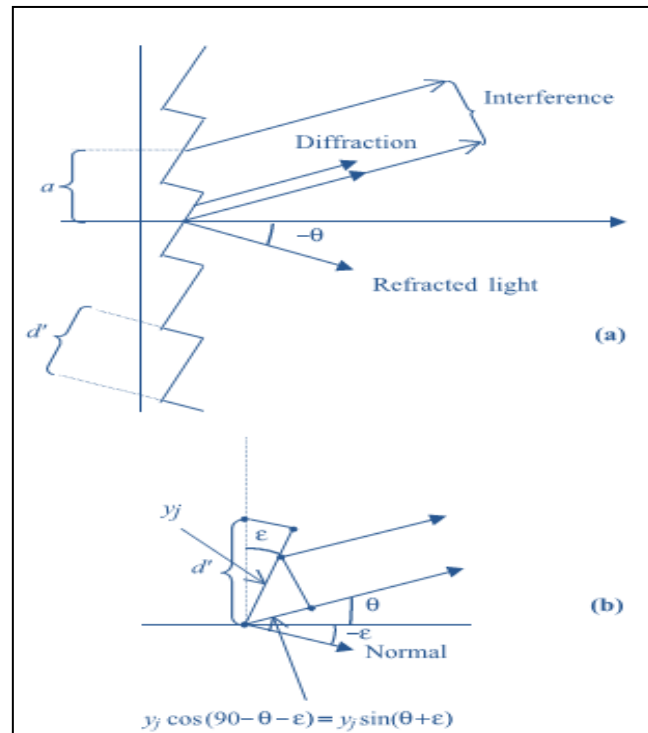


Figure II.5 : Coordonnées pour une réseau à échelotte: (a) la lumière diffractée et réfractée et interférence; (b) les coordonnées de la diffraction sur une seule face.

L'intégration du facteur de diffraction sur la face utilise la différence de chemin optique $y \sin(\theta + \epsilon)$.

II.5.3. Réseau de pas

Un réseau de diffraction avec une surface réfléchissante de forme rectangulaire est appelée un réseau de pas, le réseau a la constant a de périodicité, et les surfaces réfléchissantes de longueur $\frac{a}{2}$ sont positionné dans deux plans. Un tel réseau peut être réalisée à l'aide de deux jeux de réseaux interpénétrés, représenté schématiquement sur la figure(II.6). La distance H entre les plans I et II peuvent être modifiées, et l'interférence correspondant au diagramme de diffraction, en fonction de la hauteur H , est appelé un interférogramme. La lumière incidente est réfléchié au plans I et II et se déplace dans la direction θ . Sur n écran lointain, on observe un diagramme de diffraction interférence.

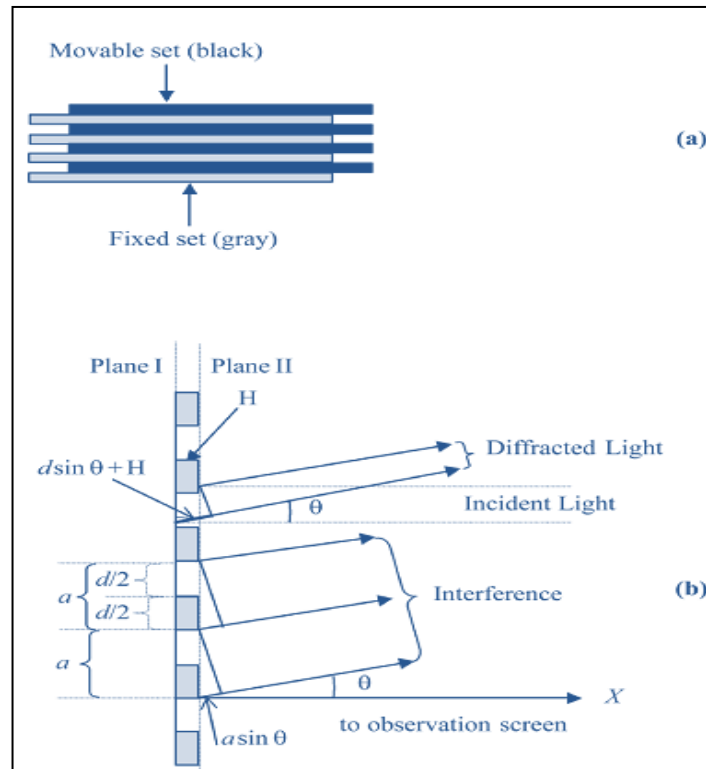


Figure II.6 : Représentation schématique d'un réseau de pas; (b) les coordonnées pour le calcul de la diffraction sur un réseau de pas.

Seule la lumière diffractée émergente est montré pour le calcul de la différence de marche. Les deux réseaux de diffraction dans des plans I et II interfèrent les uns avec les autres dans la direction X [16].

II.5.4. Réseau à échelettes

On considère le réseau en réflexion dit à échelettes représenté dans la figure(II.7), constitué d'une succession de facettes réfléchissantes (largeur b) inclinées d'un angle γ par rapport au plan du réseau. Une onde plane monochromatique (longueur d'onde λ) éclaire le réseau sous un angle i_0 par rapport à la normale \vec{e}_r et on observe l'onde diffractée à l'infini dans la direction qui fait un angle θ avec \vec{e}_r . Les angles d'incidence et de diffraction par rapport à la normale de la facette sont respectivement α_0 et α .

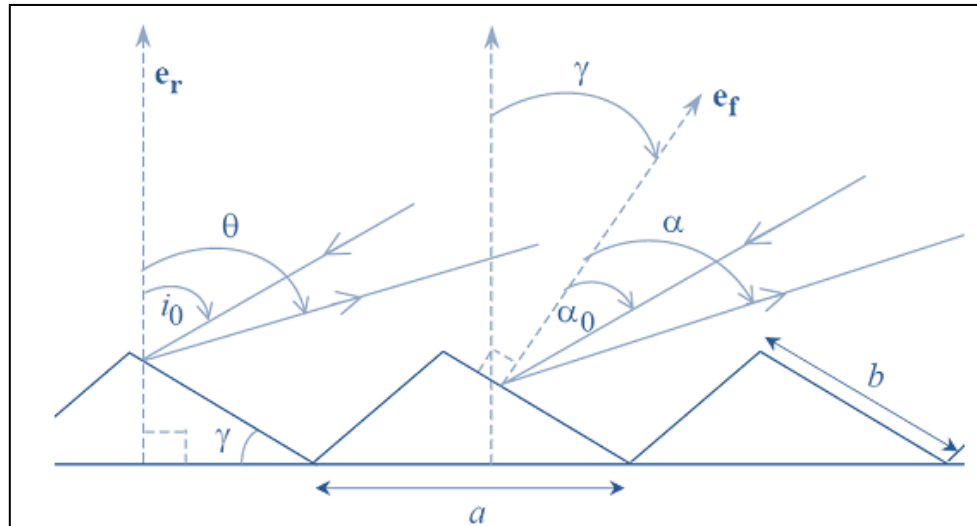


Figure II.7 : Réseau à échelette [17].

II.5.5. Réseau de Fresnel

L'imageur de Fresnel est composé de deux vaisseaux volant en formation. L'optique primaire portée par l'un des deux est un réseau de Fresnel qui peut être vue soit comme un réseau d'interféromètres, soit comme un instrument mono-ouverture. Il s'agit d'une grille formée d'un très grand nombre d'ouvertures rectangulaires : plusieurs dizaines ou centaines de milliers. Chaque ouverture peut être considérée comme faisant partie d'un réseau interférométrique, mais le fait qu'elles soient vides (ne contiennent aucun élément optique) et que la focalisation se fasse par diffraction en rapproche le fonctionnement d'un réseau zoné de Fresnel, un réseau en forme de damier crée un front d'onde sphérique à l'ordre 1 et donc focalise une partie (4 à 6%) de la lumière incidente. Le reste de la lumière est soit intercepté par les parties opaques de la grille, soit transmis sans focalisation (ordre 0) soit divergent (ordre -1). La lumière transmise dans les ordres supérieurs

de diffraction est négligeable. Pour les objets compacts observés en haute dynamique, leur contribution ainsi que celle des ordres 0 et -1 est bloquée par des masques dans l'optique au foyer. Pour les objets étendus ils ne sont pas bloqués mais seul l'ordre 1 étant focalisé, la contribution des autres ordres de diffraction ne nuit pas aux capacités d'imagerie standard [18].

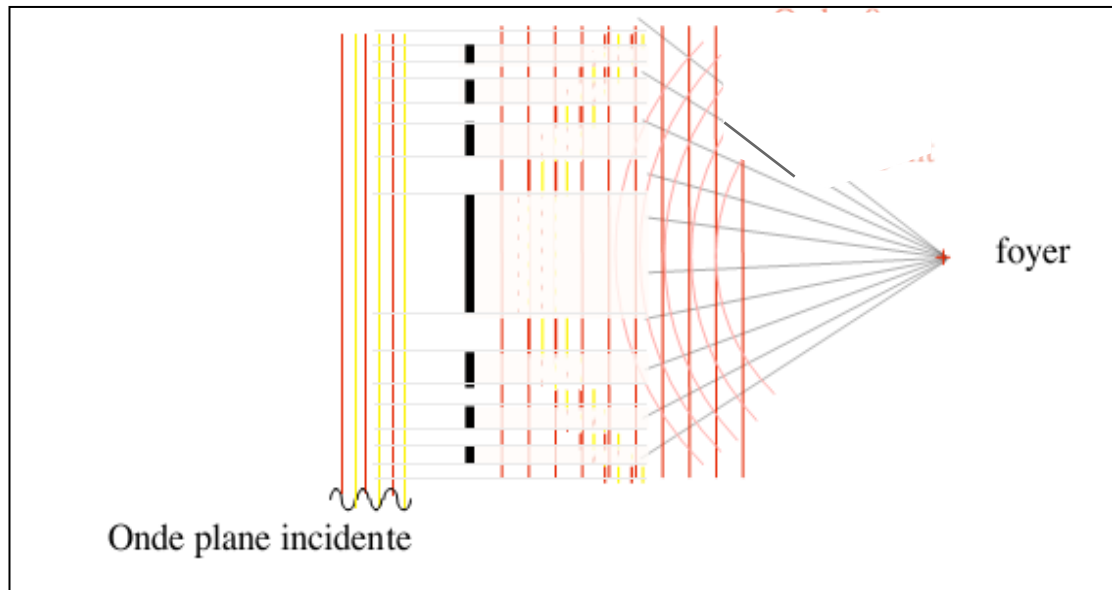


Figure II.8 : Réseau de Fresnel : focalisation par diffraction et interférences [15].

II.5.6. Réseau holographique

Surface optique sur laquelle a été inscrit un grand nombre de traits parallèles et équidistants servant à diffracter tout faisceau de rayons incidents et fonctionnant en réflexion, Il s'agit de produire un interférogamme à partir de la figure d'interférence de 2 faisceaux après séparation d'amplitude. L'angle qui sépare les 2 faisceaux incidents sur la plaque holographique déterminera le pas du réseau et donc son nombre de traits au mm. Les "traits" du réseau sont matérialisés par les franges sombres et brillantes de l'interférogamme.

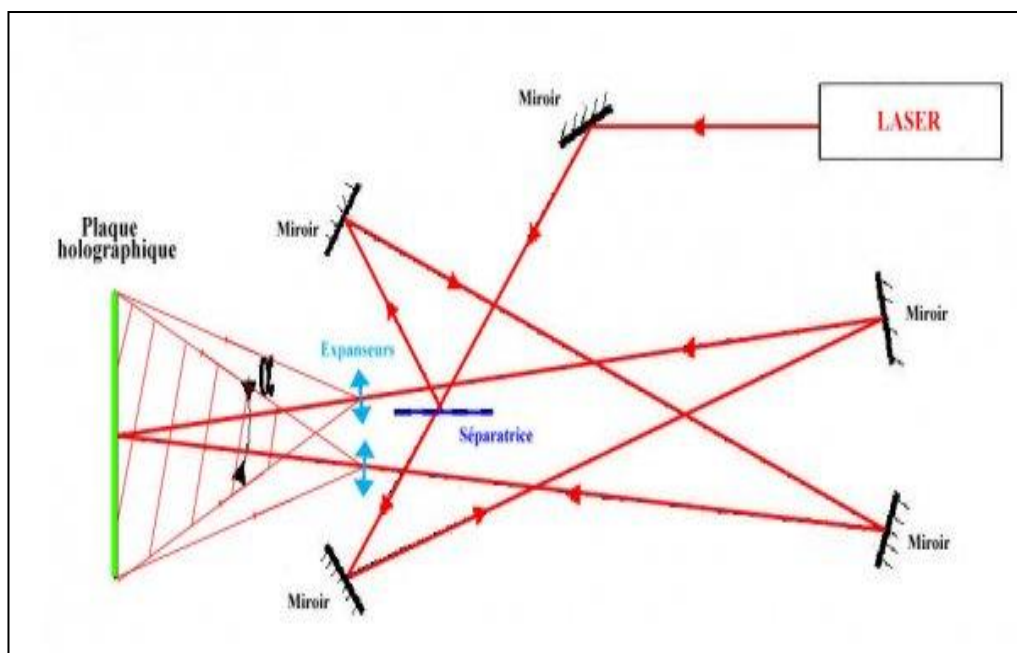


Figure II.9 : Montage pour réseau holographique

Ils sont caractérisés de ce fait d'un certain nombre de propriétés nouvelles et essentielles. Les plus importantes de ces propriétés sont :

-Les EOD peuvent être comparées, d'un point de vue non optique, à des films minces. De ce fait, ces éléments optiques peuvent être légers et compacts comparativement aux optiques classiques.

-Les EOD sont en fait des réseaux de diffraction, la diffraction n'est pas affectée par la forme du support, il est possible de corriger les aberrations la dispersion est forte.

-Du fait du principe même des EOD, l'efficacité du processus doit être considérée dès premiers instants de conception d'un système. Des efficacités de diffraction de l'ordre de 95% peuvent être atteintes.

-Les EOD épais, tels les hologrammes de phase épais formés dans la gélatine dichromatique, ont une efficacité de diffraction beaucoup plus sensible aux variations angulaires et en longueur d'onde que les EOD minces [19].

CHAPITRE III

Processus de

Fabrication

Des EOD

III.1. Introduction

Le choix de méthode de conception des éléments optiques diffractives repose sur plusieurs paramètres tels que : la géométrie, la fonction de l'élément et le coût. Dans ce chapitre on va essayer de présenter quelques méthodes et leurs principes pour faciliter le choix.

III.2 .Enregistrement holographique

Plusieurs tentatives de mise en œuvre de l'holographie aient été menées dans les années 50, la technique est restée inapplicable, à cause de l'absence d'une source cohérente. Mais, l'apparition du laser dans les années 60 a fait progresser très rapidement cette technique d'un point de vue pratique. Les premiers hologrammes effectivement visibles et exploitables furent réalisés par E.Leith, J.Upatnieks et Denisyuk en 1962. L'holographie est donc une technique d'enregistrement de toute l'information optique issue d'un objet (en grec, holos signifie entier). Cela implique l'enregistrement puis la restitution de l'amplitude et de la phase de l'objet en question. Cet enregistrement se présentera en fait comme un réseau de diffraction particulier (non périodique) dont la figure de diffraction contiendra la reconstruction attendue. C'est pourquoi l'holographie peut aussi s'expliquer en termes de diffraction [4].



Figure III.1 : Enregistrement holographique.

III.3. Principe de l'holographie optique

L'holographie utilise l'aspect ondulatoire de la lumière et a pour but d'enregistrer sur un support réel une onde complexe (amplitude et phase). Il faut pour cela faire interférer deux ondes particulières : une onde de référence, et une onde dite "objet" c'est à dire celle dont le trajet passe par l'objet à enregistrer.

- Processus d'enregistrement selon le montage de Leith et Upatnieks.

La figure suivante, présente le principe de ce montage d'enregistrement.

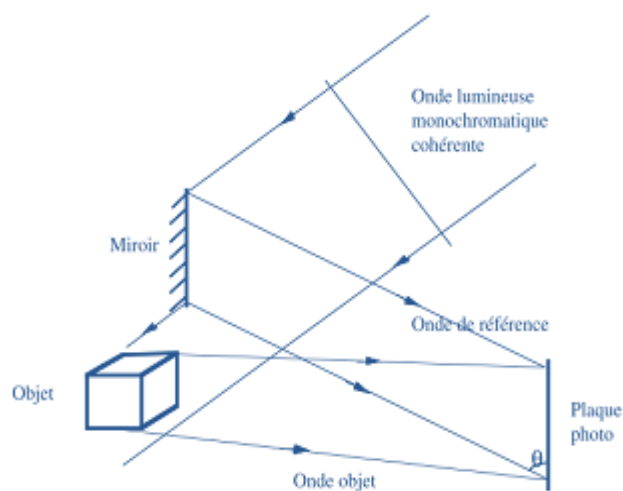


Figure III.2 : Montage d'enregistrement de Leith et Upatnieks.

Exemple de l'enregistrement d'un réseau holographique par transmission (EOD).

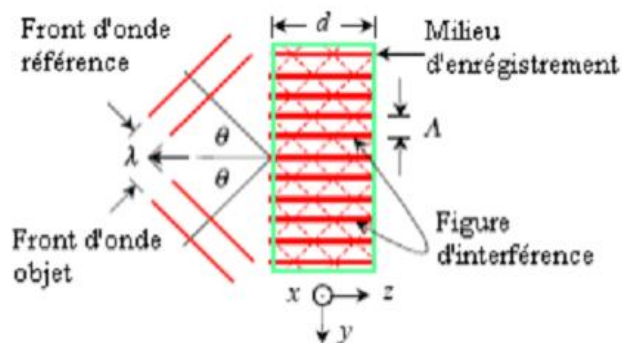


Figure III.3 : D'interférence produite par l'enregistrement de deux ondes planes.

III.4.Éléments Diffractifs Calculés par Ordinateur

Suite au développement de l'informatique et la possibilité de calculer la propagation d'une onde et en particulier une transformée de Fourier, il est devenu possible de calculer des fronts d'onde qui au départ n'ont pas forcément une existence physique, et l'on peut ainsi se passer de montage pour l'enregistrement de l'hologramme. Le processus de codage est décrit par la Figure suivante :

Nous parlons ici de processus de codage, mais une question qui pourrait surgir est:

"Pourquoi coder?" En effet, comme nous allons le décrire dans la suite, un EOD peut être vu comme la transformée inverse (Fourier ou Fresnel) du front d'onde à reconstruire. Or, afin de réaliser optiquement la restitution de l'hologramme, il faut le transférer sur un support physique, et à ce jour aucun matériau n'est capable de restituer tel quel la modulation amplitude – phase d'une partie d'un front d'onde complexe. Tout au plus ce support sera capable de transcrire un certains nombres d'échantillons du plan complexe.

Cette adaptation constitue ce que l'on appelle l'étape de codage de l'EOD.

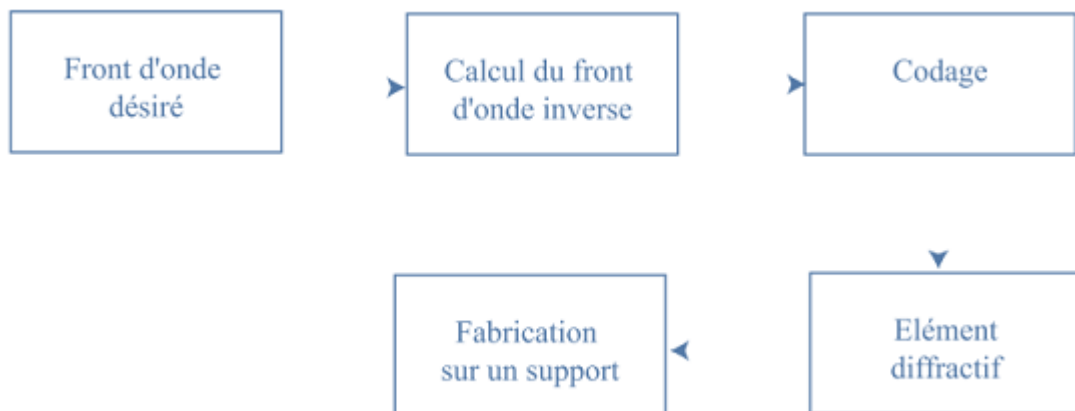


Figure III.4 : Etapes de codage d'un élément diffractif calculé.

Nous rappelons que le modèle d'un élément optique diffractif calculé est appelé également hologramme synthétisé par ordinateur.

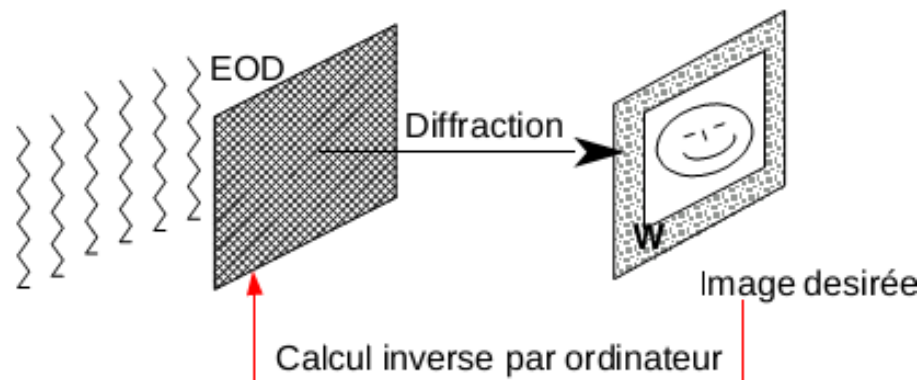


Figure III.5 : fabrication des EOD par ordinateur [4].

III.5.Méthodes de fabrication par lithographie

Dans ce paragraphe est exposé le principe de la fabrication de composants optiques diffractifs par lithographie. Il est détaillé dans le cas de la lithographie par masque d'amplitude binaire. Par la suite, l'écriture directe pour la lithographie et la lithographie par masque à niveaux de gris sont également présentées.

III.5 .1.Principe

Le principe de la lithographie consiste à transférer le profil de l'élément optique diffractif dans le matériau substrat par l'intermédiaire d'une couche mince de polymère photosensible ou électrosensible (résine). Le relief de surface à fabriquer étant connu, un ou plusieurs masques contenant l'image du motif à créer dans le substrat sont réalisés. Le principe consiste à produire dans la couche de résine une copie du masque, sorte de pochoir, à l'aide d'un faisceau de photons, d'électrons ou d'ions. Le principe et les techniques de fabrication qui sont employées pour fabriquer les structures sont schématisés sur la figure(III.6). Une couche mince de résine sensible est déposée sur le substrat à graver (a). Le motif est transféré dans la couche de résine par l'exposition UV à travers le masque d'amplitude comprenant des régions opaques et transparentes (b). Suite à l'exposition, la composition de la couche de résine est modifiée par réaction photochimique ou par réticulation des chaînes polymériques. Lors de l'étape de développement (c), l'excès de résine est dissout dans une solution révélatrice, laissant place au motif. Une résine positive reproduit le motif du masque, tandis qu'une résine négative inverse le motif du masque. Le

motif formé par la résine sert alors de pochoir pour l'étape suivante de transfert du motif dans le substrat, c'est-à-dire l'enlèvement ou la construction d'une couche de matériau pour créer le relief de surface. La gravure chimique humide ou la gravure sèche (en phase gazeuse) enlèvent une couche de matériau non protégé par la résine (d). Les méthodes additives comprennent :

- Le dépôt d'une couche d'un second matériau sur la surface structurée (lift-off) (e) par évaporation, pulvérisation ou dépôt en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition CVD). Cette étape est suivie de l'enlèvement de l'excès de matériau par dissolution de la résine sous-jacente.

- La galvanoplastie ou la croissance épitaxiale d'un matériau (f) dans les zones non recouvertes de résine.

- La diffusion d'ions dans les régions non protégées par la résine (g) qui provoque une modification de l'indice de réfraction ou du volume. Enfin, la dernière étape consiste à dissoudre les résidus de résine.

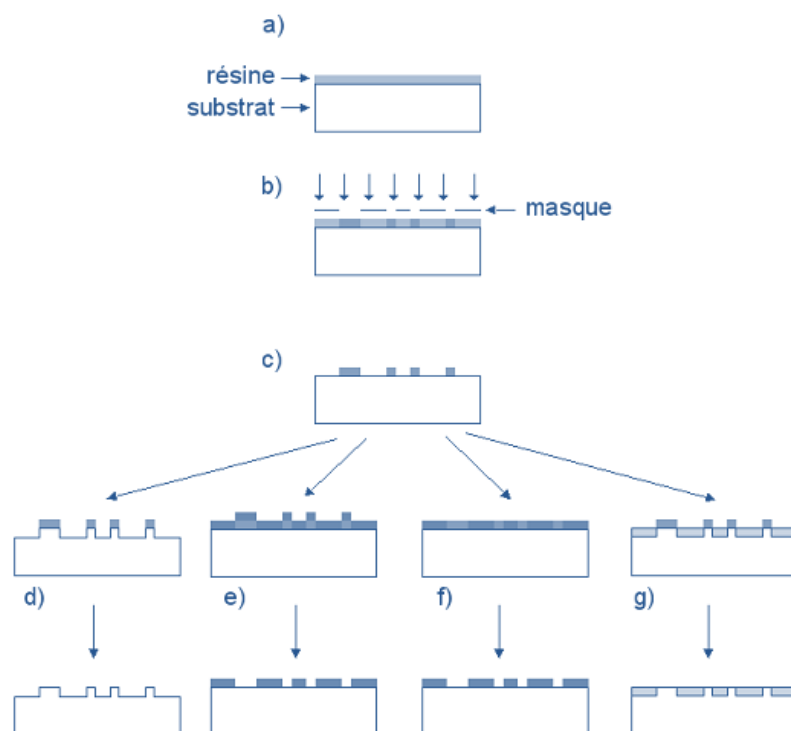


Figure III.6 : Etapes et techniques de lithographie pour la création d'un relief de surface. Dépôt de résine (a), exposition à travers un masque d'amplitude (b), développement (c) et transfert du motif dans le substrat par gravure chimique (d), lift-off (e), galvanoplastie ou croissance épitaxiale (f) ou modification d'indice par diffusion d'ions (g).

Le composant diffractif obtenu est composé de deux niveaux. La réalisation d'un composant multi-niveaux nécessite de répéter l'ensemble du processus. Pour un composant à $2N$ niveaux, N masques binaires et N répétitions du processus sont requises. La profondeur de gravure et la taille des motifs à transférer diminuent à chaque itération du processus. La figure (III.7) présente le principe de la génération d'un composant à quatre niveaux. La résolution des motifs dessinés sur le masque (« critical dimension ») peut atteindre aujourd'hui 100 nm. Des performances d'alignement de l'ordre du micron sont courantes dans l'industrie.

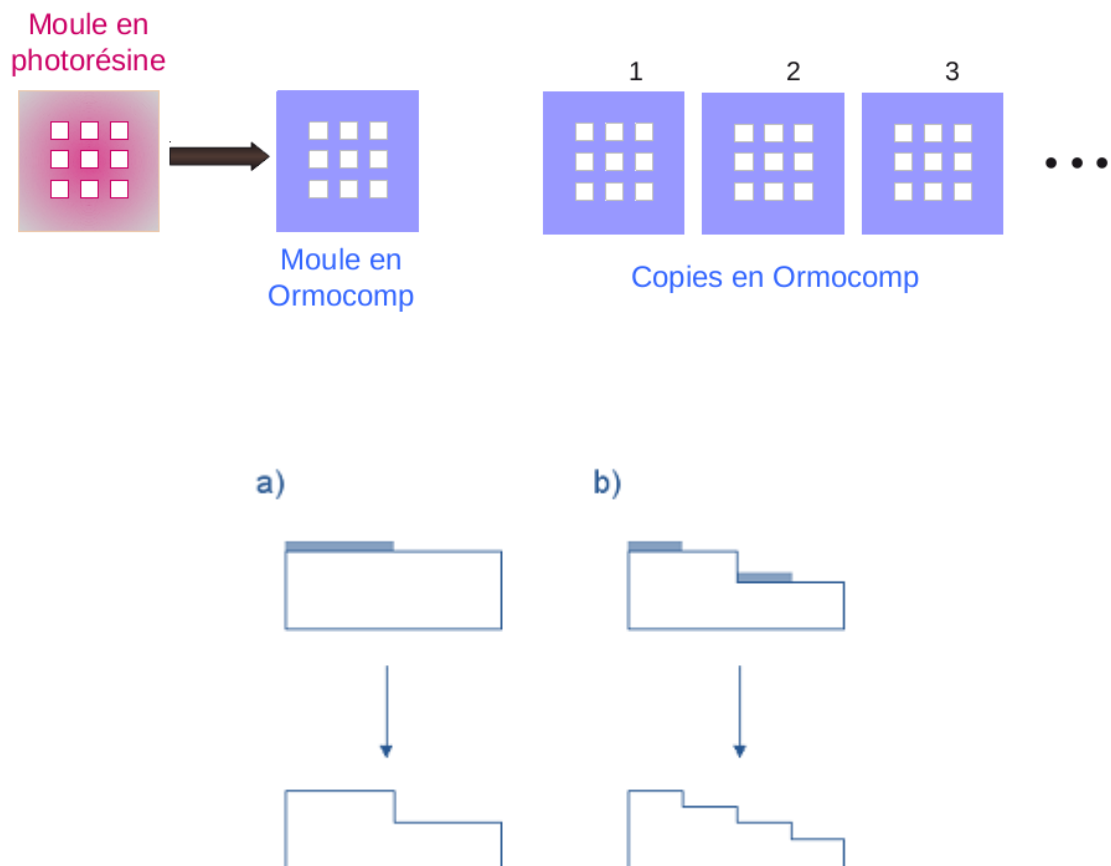


Figure III.7 : Génération d'un composant diffractif à quatre niveaux : première étape de gravure (a) pour la génération de deux niveaux et seconde étape de gravure (b) pour la génération de quatre niveaux [19].

III.5.2. Écriture directe pour la lithographie

Le transfert du motif par exposition à travers un masque peut être remplacé par une technique dite d'écriture directe ou lithographie par balayage du faisceau. Un faisceau laser ou un faisceau d'électrons vient directement écrire le motif dans la couche de résine. La méthode de transfert dans

la résine peut tirer parti de réactions chimiques déclenchées par l'exposition comme pour la lithographie par masque, mais d'autres techniques de transfert existent, comme par exemple l'ablation laser de la couche de résine.

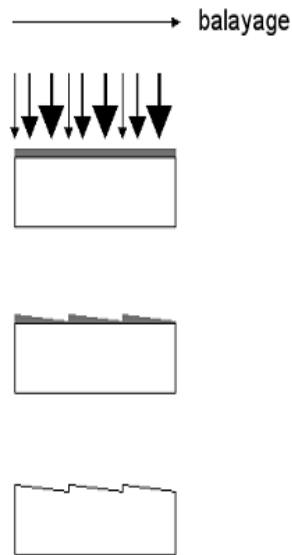


Figure III.8 : Principe d'un système d'écriture directe par faisceau laser [21].

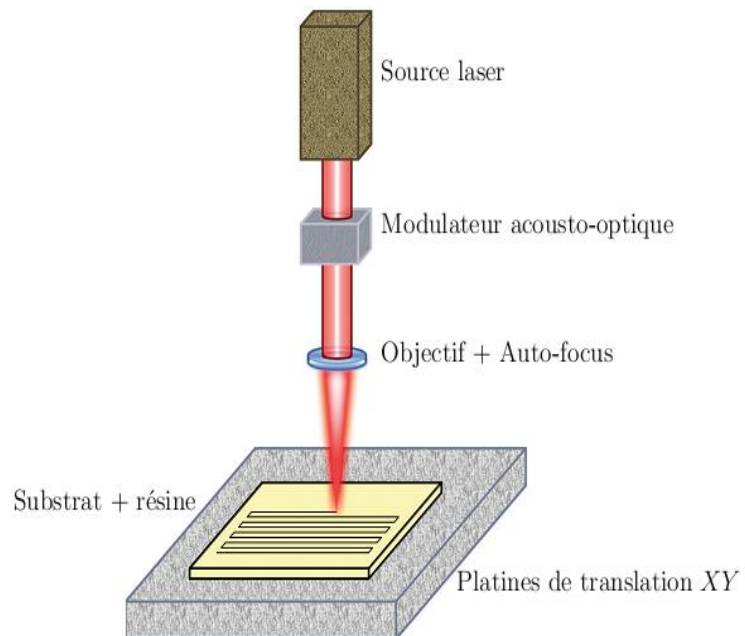


Figure III.9: Processus de lithographie avec écriture modulée dans la résine pour la création d'un relief de surface analogique [19].

Au lieu d'une écriture binaire dans la résine, une modulation en intensité du faisceau d'écriture permet de transcrire dans la résine les variations de profondeur.

III.5.3.Méthodes de fabrication par gravure directe

La fabrication par gravure directe consiste à créer directement le relief de surface dans le substrat. La réalisation de profils analogiques et multi-niveaux est possible par gravure directe. Le principe est similaire à l'étape d'écriture directe pour la lithographie décrite précédemment. Un faisceau d'écriture, éventuellement modulé en intensité, balaye la surface du substrat afin de créer le relief de surface. A la différence de la lithographie où le motif est transféré dans une résine sensible, les méthodes de fabrication par gravure directe agissent directement sur le matériau substrat dans lequel sera inscrit le composant optique. Ces méthodes sont généralement mieux adaptées au prototypage que le procédé de lithographie. L'inscription du motif en une seule étape et

sans masque en est les principaux avantages. Des techniques alternatives à la lithographie ont été développées pour la

gravure directe du relief de surface de composants optiques diffractifs. Elles sont présentées dans ce paragraphe. Il s'agit de l'usinage mécanique du relief par une pointe en diamant, de la gravure par un faisceau d'ions focalisé, de l'ablation laser et de la gravure assistée par laser.

III.5.4. Usinage par pointe en diamant

La fabrication des microstructures du relief de surface par le fraisage mécanique avec une pointe en diamant est une méthode de gravure directe. L'usinage diamant de systèmes optiques de précision est typiquement une technique d'usinage avec un tour programmable équipé d'un outil de coupe optimisé pour la fabrication des surfaces optiques, de rugosité minimale et avec le minimum de dommages figure(III.10). L'usinage par pointe en diamant est limité à la fabrication de surfaces à symétrie de rotation, incluant les microlentilles asphériques et de Fresnel. Les meilleures surfaces optiques sont produites en usinant des métaux tels que le cuivre ou l'aluminium pour lesquels une rugosité de surface inférieure à 1 nm rms peut être réalisée. Le verre est trop fragile pour être usiné directement, mais de bons résultats ont été obtenus par usinage de plastiques tels que des acryliques (PMMA). L'approche par usinage au diamant donne d'excellents résultats dans certains cas et convient particulièrement aux éléments optiques ayant une faible ouverture numérique et présentant une symétrie de rotation. Cette dernière caractéristique limite toutefois son utilisation à un groupe restreint de composants optiques.

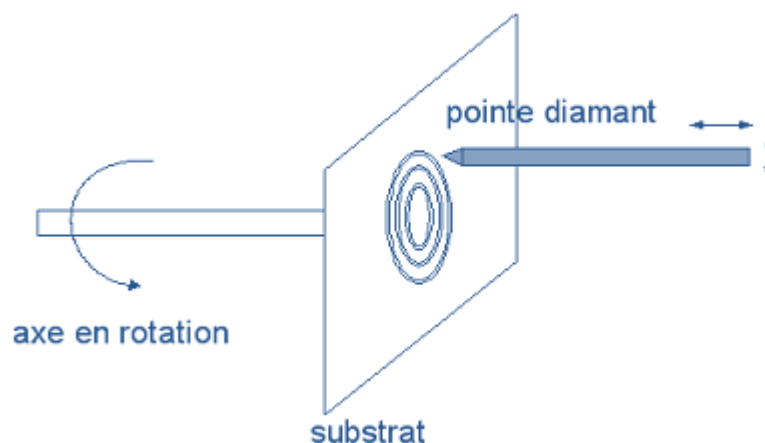


Figure III.10 : Principe de l'usinage du relief de surface d'un composant optique par fraisage mécanique à l'aide d'une pointe en diamant [19].

III.5.5. Écriture directe par faisceau d'électrons

L'écriture directe par faisceau d'électrons de microstructures binaires ou à relief continu dans une résine électro sensible représente une technique alternative à l'approche écriture directe par faisceau laser. Un système e-beam est montré dans la figure(III.11). La source d'électrons expose le substrat sous vide en passant par des optiques électroniques et des lentilles de déflexion.

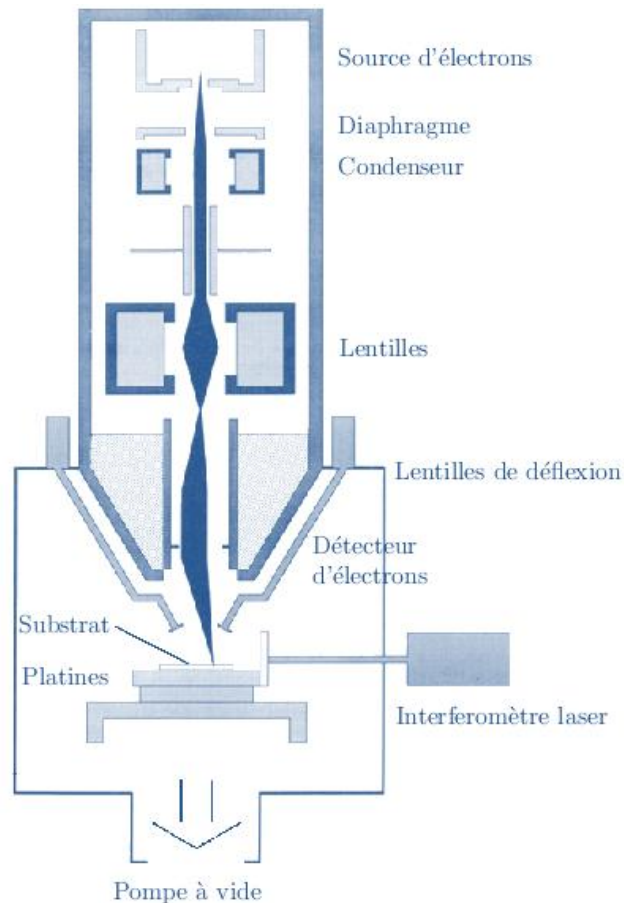


Figure III.11 : Système d'écriture directe par faisceau d'électrons.

Le substrat est posé sur des platines de translation de haute résolution (<10 nm). Cette technique de haute résolution, 2 nm de résolution, souffre encore d'un problème très important qui limite sa résolution, la Proximité effect, qui est particulièrement gênant avec les composants épais~1 à 5 μ m. Des systèmes e-beam commerciaux de résolution de 100 nm sont présents sur le marché avec des prix de 3~5 millions de dollars, ce qui peut atteindre le triple des systèmes à base de laser.

III.5.6. Écriture directe par faisceau d'ions

L'écriture directe par faisceau d'ions (FIB) peut être utilisée pour le fraisage direct des structures avec des dimensions submicroniques dans une variété de matériaux. Le système de base de FIB est similaire à un système d'écriture par faisceau d'électrons comportant une chambre à vide, des lentilles de déflexion du faisceau et des platines de translation xy programmables, sauf qu'il est équipé d'une source d'ions (généralement Gallium) avec une "optique" qui convient à la focalisation et à la déflexion des ions.

Le faisceau d'ions focalisé a suffisamment d'énergie pour graver les substrats comme le verre, le quartz, le silice ou le Ga As. La profondeur à laquelle le matériau est broyé est liée à la dose d'ions et contrôlée par le temps d'exposition.

III.6. Les Avantages et désavantages

Les techniques d'inscription par écriture directe sont les techniques les plus flexibles parmi les techniques de photo inscription. Plus besoin de photo-masques, ni pour les structures binaires, ni pour les structures à relief continue, le changement d'un motif peut être fait en modifiant les fichiers informatiques, donc plus besoin de changer la photo masque à chaque fois. De plus les résolutions obtenues à l'aide de ces techniques sont de l'ordre de quelques nanomètres, qui reste inatteignables par des techniques de masquage classiques. Ces méthodes présentent cependant des inconvénients qui s'avèrent être rédhibitoires lorsqu'il s'agit de produire en série des structures complexes. La fabrication des structures complexes de 1cm^2 peut durer plusieurs heures, ce qui augmente énormément les prix des composants. Ces techniques sont donc peu intéressantes pour la production de masse du au cout de fabrication et à la durée de fabrication qui sont très élevées. Aujourd'hui, l'écriture directe est utilisée pour la fabrication de la photo masques destinés à la photolithographie par projection, pour la fabrication de composants de petites séries, ou pour le prototypage des composants [21].

Conclusion générale

Conclusion

Le présent travail nous a permis de contribuer à la compréhension des notions de diffraction pour puisse comprendre le fonctionnement des éléments optique diffractives, ces dernier que nous avons essayé de le présenter et étudier.

Dans cette perspective, nous avons accédé aux méthodes de conception de ces éléments en précisant leurs principes.

D'après cette étude, on peut conclure que parmi tous ces méthodes de conception le choix ce fait d'après le besoin d'utilisation.



Reference

bibliographie

Référence bibliographie

- [1]. **Victorien RAULOT**, << Méthodes de conception et de fabrication de dispositifs imageurs en optique diffractive à structures sub-longueur d'onde >>, 29 Septembre 2011.
- [2]. [www.Lyc-Lopie-courbevie .ac-versailles.fr/tp-secondeE/Microcosme/Histoire.htm](http://www.Lyc-Lopie-courbevie.ac-versailles.fr/tp-secondeE/Microcosme/Histoire.htm).
- [3] . **Jean-Louis Basdevant**, <<cours de l'école polytechnique >>.
- [4]. **J. Ferbert**, <<Microscopie électronique à balayage Microanalyse X par sonde électronique >>, 1ère éd 2004.
- [5]. **Kevin Heggarty**, <<Matériaux pour la fabrication et l'application industrielle d'éléments optiques diffractifs synthétiques >>, Université Européenne de Bretagne Brest, 2-3 avril 2013.
- [6]. **Marc Séguin**, <<Cours Physique XXI Volume C >> 2005.
- [7]. [https://www.equipes.lps.u-psud.fr/gr-15/SMPEHTML/poly pdf/onde chap8.pdf](https://www.equipes.lps.u-psud.fr/gr-15/SMPEHTML/poly%20pdf/onde%20chap8.pdf)
- [8]. **fronçon**, <<diffraction et cohérence en optique >>, Gauthier –Villars, 1964.
- [9]. **Coure**, << Diffraction des ondes Préparation Olympiades de Physique >> ,2006.
- [10]. [www .cpe .Brizeux .Fr/casiers/francoise/cours/optique/optique3.pdf](http://www.cpe.fr/casiers/francoise/cours/optique/optique3.pdf).
- [11]. **SG & H Lipson**, << Optical Physics >>, 2nd éd, Cambridge Uni. Press, 1981
- [12]. **Born & Wolf**, <<Principles of optics >>, Pergamon press, Oxford, 1980
- [13]. **Manuel Luque Herbert Voß**, <<Diffraction à l'infini par un trou rectangulaire, un trou circulaire, deux trous circulaires, un trou triangulaire >>, 26 septembre 2007.
- [14]. **Léna**, << Méthodes physiques de l'observation >>, EDP Sciences, 1991
- [15]. **Laurent Koechlin, Denis Serre, Paul Deba**, <<L'imageur interférométrique de Fresnel: un instrument spatial pour la haute résolution angulaire >>, 23 Mars 2007.
- [16]. **Karl Dieter Moller** , <<optics >>, Second Edition 1927.
- [17]. [Sccp.inp-toulouse.fr/html/cpge/sujet/2005/mp/MP-physique 2 .pdf](http://Sccp.inp-toulouse.fr/html/cpge/sujet/2005/mp/MP-physique%202.pdf).

Référence bibliographie

[18]. **L.Koechlin, D.Serre, P.Deba**, << Imageur de Fresnel pour observations à haute Résolution Angulaire et haute dynamique >>,2007.

[19]. **Estelle Clauss ép. Neiss**, << Mise en forme de faisceaux de lasers de puissance dans le proche infrarouge par éléments diffractifs>>, 19 octobre 2007.

[20].**C.Liegeois –P. Meyrueis**, <<Methode de realisation et d'utilisation d'elements optiques holographiques a haute performance>>, Mars 1985.

[21]. **Charbel NASSOUR**, << Mention : Sciences de l'ingenieur>>, 5 mars 2012.

Résumé

Dans cette étude, on a présenté les éléments optiques diffractives en expliquant leur principe de fonctionnement, et pour mieux comprendre ces principes on a étudié le phénomène de diffraction de la lumière.

Ces éléments possèdent plusieurs types qui diffèrent par leurs géométries et leurs principes de fonctionnement, pour cela on a essayé de présenter les méthodes de conception qui assurent ces variétés.

Mots clés : diffraction , optique diffractive, conception, lumière.

Abstract

In this study, we presented the diffractive optical elements where we explained their principle of function, and to better understand these principles we studied the phenomenon of diffraction of light.

These elements have several types who differ in their geometry and their principle of function, why we tried to introduce design methods that provided these varieties.

Keywords: diffraction, diffractive optics, design, light.