

# Effets optiques des structures périodiques

## 1.0 Introduction

Les structures périodiques démontrent certaines propriétés optiques intéressantes. La propagation de la lumière est un phénomène spatial et de ce fait elle associe les trois dimensions  $x$ ,  $y$  (transversales) et  $z$  (propagation) dans une harmonie physique maintenue par le principe de conservation de l'énergie en toute position longitudinale  $z$  de l'espace. La périodicité, parce qu'elle présente un lien spatial dans le plan transversal ( $x$ ,  $y$ ), permet à l'association mentionnée ci-dessus d'être à l'origine d'effets optiques intéressants observés à des distances particulières  $z$ . Nous allons décrire ces effets et certaines de leurs applications tout le long de cet article.

Dépendamment de la nature (spatiale ou temporaire) des structures périodiques et de leurs modes d'éclairage (cohérent ou incohérent), on distingue 3 phénomènes que nous allons traiter dans des sections séparées: Effet Talbot spatial [1], Effet Talbot temporel [2], Effet Lau [3].

Étant donné que la périodicité est une condition nécessaire pour les trois effets, nous allons lui consacrer une sous-section à part pour discuter la façon dont on peut assurer cette contrainte. En effet, nous pouvons réaliser cette contrainte lors de la mise en œuvre même de l'objet. Dans ce cas, l'objet à éclairer par la lumière sera périodique par défaut. C'est le cas par exemple d'une diapositive contenant une photo répliquée périodiquement le long des axes  $x$  et  $y$ . Une alternative consiste à éclairer un objet non périodique et créer la périodicité optiquement par un système approprié. Dans ce cas, l'objet initial présentera une seule période. Toujours avec l'exemple de la diapositive comme objet, nous pouvons imaginer qu'elle contient une seule photo.

Les structures périodiques ont des applications directes dans le monde des télécommunications optiques. En effet, la structure périodique peut être un front d'onde ayant une forme périodique comme elle peut être un morceau de fibre optique ayant un indice de réfraction changeant périodiquement le long de ce morceau (réseau de Bragg). En outre, la périodicité peut être temporelle. C'est le cas d'un signal sous forme d'un train d'impulsion qui se propage à travers une fibre monomode. Enfin, l'intérêt des structures périodique se manifeste également lors de la mise en œuvre d'autres structures périodiques essentielles en télécommunications. C'est le cas de l'utilisation des éléments diffractifs périodiques pour la réalisation des réseaux de Bragg.

## 2.0 Effet Talbot Spatial

L'effet Talbot, ou l'auto-imagerie cohérente des structures périodiques, découvert par H. Talbot en 1830 est un phénomène qui a suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs et d'ingénieurs. Des recherches intensives [1], y compris les nôtres [4], ont été menées ces dernières décennies afin de mieux comprendre et ainsi d'exploiter pleinement les différents aspects de ce phénomène. L'effet Talbot basé sur la théorie scalaire de la diffraction est capable d'expliquer diverses observations. Cet effet spatial a ouvert la porte vers beaucoup d'applications: les illuminateurs de tableaux, guidage d'ondes, antennes, interférométrie, photolithographie, métrologie optique, traitement d'image, imagerie 3D, opérations logiques,...

### 2.1 Reproduction intégrale

Le phénomène de diffraction impose que la valeur en un point  $(x_0, y_0, z)$  quelconque du champ diffracté à une distance  $z$  soit la somme des contributions de tous les points  $(x, y, 0)$  du champ initial. Certes, le caractère de périodicité dans le champ initial implique que les points particuliers  $(x, y, 0)$ , séparés les uns par rapport aux autres par un multiple de la période  $d$  le long de l'axe  $x$  ou  $y$ , auront à part un déplacement latéral, des contributions identiques. Ceci fait que l'on observe le champ initial se reproduire intégralement à des distances d'observation  $z$  particulières à savoir  $z = kZ_T$  avec  $Z_T = 2d^2/\lambda$ : la distance de Talbot (Figure 1). Le paramètre  $\lambda$  désigne la longueur d'onde avec laquelle l'objet a été éclairé pour créer le champ initial qui se diffracte par la suite lorsque la lumière se propage. L'entier  $k$  résulte du fait que si le champ initial se produit une fois à la distance  $Z_T$  alors logiquement il doit se reproduire également au bout de la double distance  $2Z_T$  et ainsi de suite.

par *F. Benkabou and H. Hamam*

*Faculté d'ingénierie, Université de Moncton, NB*

### Abstract

We summarily cover the optical effects of spatial as well as temporal periodical structures. Three effects are considered: spatial Talbot effect, temporal Talbot effect and Lau effect. These phenomena are used in applications in various fields, such as interferometry, photolithography, optical metrology, image processing, 3D imaging. Moreover, the periodic structures have direct applications in the telecommunications world. The Bragg grating presents a typical example of using periodic structures in optical telecommunications. This grating can be a small part of an optical fibre along which the refraction index varies periodically. In addition to spatial structures, periodicity may be temporal. It is, for instance, the case of signal pulse sequences propagating through a monomode fibre. The importance of periodic structure is also emphasized by their possible use for the implementation of other basic periodic structures in telecommunications.

### Sommaire

Nous présentons ici un résumé des effets optiques des structures périodiques spatiales et temporelles. Les trois effets présentés ici sont l'effet Talbot spatial, l'effet Talbot temporel et l'effet Lau. Ces phénomènes sont utilisés dans des applications dans des domaines divers, tels que l'interférométrie, la photolithographie, la métrologie optique, le traitement d'image, l'imagerie 3D, ... En outre, les structures périodiques ont des applications directes dans le monde des télécommunications. L'exemple typique est le réseau de Bragg qui est structure spatiale périodique très utilisée en télécommunications optiques. Ce réseau peut être un morceau de fibre optique ayant un indice de réfraction changeant périodiquement le long de ce morceau. Outre les structures spatiales, la périodicité peut être temporelle. C'est le cas d'un signal sous forme d'un train d'impulsion qui se propage à travers une fibre monomode. L'intérêt des structures périodique se manifeste également lors de la mise en œuvre d'autres structures périodiques essentielles en télécommunications.

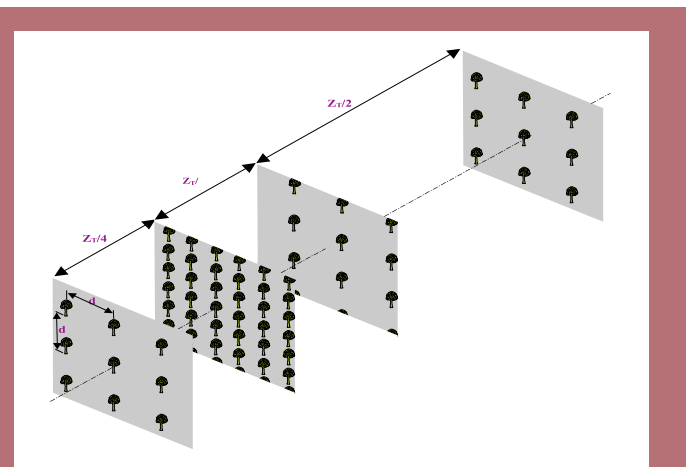


Figure 1 : Effet de la diffraction au niveau des plans de Talbot fractionnaires,  $Z_T/4$ ,  $Z_T/2$  et  $Z_T$

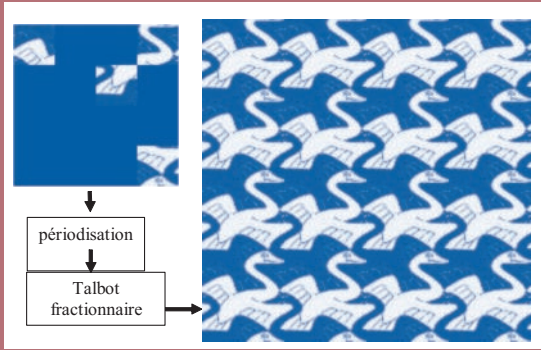


Figure 2: Reconstruction par effet Talbot fractionnaire du tableau artistique d'Escher

## 2.2 Création de répliques

Si l'on s'intéresse, maintenant, à une fraction ( $p/q$ ) de cette distance  $Z_T$ , on observe, alors, la superposition d'un certain nombre de répliques pondérées et translattées du champ initial qui dépend de la distance d'observation  $z$ . On parle dans ce cas de l'effet de Talbot fractionnaire. On conclut qu'aux distances fractionnaires  $p/q Z_T$  ( $q$  est pair) le signal initial donne naissance à  $q/2$  répliques (pour des valeurs impaires de  $q$ , on obtient  $q$  répliques) translattées et ayant des poids différents. Ceci nous permet d'obtenir des combinaisons d'images intéressantes formant même des motifs artistiques d'Escher (Figure 2).

A première vue le tableau de la Figure 2 contient des oiseaux de couleur blanche espacés périodiquement. Avec plus d'attention, le lecteur découvrira la présence d'un deuxième champ d'oiseaux de couleur noire. Le tableau d'Escher n'est autre que l'effet spatial du Talbot fractionnaire obtenu par une périodisation du motif de base contenant les différentes parties d'un oiseau.

La Figure 1 montre la distribution du champ diffracté à des différentes distances  $z$  de l'axe de propagation. On voit bien qu'après un parcours de  $Z_T(k=1)$  et quel que soit le contenu de la période, on retrouve intégralement l'objet de départ.

La situation est identique lorsque la distance parcourue est  $Z_T/2$ , cependant on observe un décalage d'une demi-période dans les directions  $X$  et  $Y$ . À la distance  $Z_T/4$ . Non seulement on observe une reproduction intégrale de l'objet initial, mais on assiste aussi à une création de répliques de cet objet décalé d'une demi-période dans les deux directions transversales.

## 2.3 Création De La Structure Périodique

En pratique, il est souhaitable d'avoir un système basé sur l'effet Talbot qui permet l'utilisation de l'effet Talbot fractionnaire sans besoin de structures périodiques à l'entrée du système. L'essence de la technique, c'est la génération de la périodicité par le système lui-même. Nous avons baptisé cette technique "Imagerie de Talbot" [4]. La périodisation (Figure 2) du motif de base peut être réalisée lors de la mise en œuvre même, par exemple par une réplique au moyen d'un dispositif photographique. Le motif répliqué sera donc l'entrée du système. Une

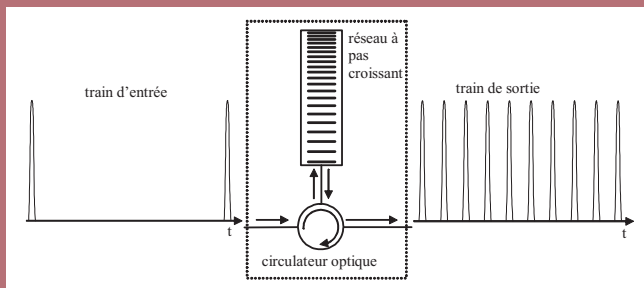


Figure 3: Génération de taux de répétition d'impulsions variables atteignant la gamme de Terahertz

alternative consiste à prévoir un système optique [4] qui fera cette réplique suivie par l'effet Talbot fractionnaire. L'entrée du système sera dans ce cas le motif de base seul (Imagerie de Talbot). Nous avons préparé une animation par Applet pour illustrer cette technique [5]. Le recouvrement et l'inversion du motif, engendrés par l'effet Talbot fractionnaire, sont à l'origine de l'œuvre artistique d'Escher (Figure 2).

L'opération inverse de la périodisation est aussi intéressante, à savoir la concentration de l'information dans une seule période après son passage par le plan Talbot fractionnaire. Dans une récente publication [4], nous avons montré entre autres comment cette technique, appelée "Unification de Talbot", peut être utilisée pour réaliser des faisceaux avec plusieurs géométries (beam shaping).

## 3.0 Effet Talbot Temporel

Il y a une analogie remarquable entre le comportement optique spatial et temporel des structures périodiques, à l'exception que l'effet spatial agit dans le plan transversal à la propagation de la lumière, alors que l'effet Talbot temporel [2] se manifeste dans la direction longitudinale de la propagation. Du fait de l'existence de la dualité spatio-temporelle, on utilise le même formalisme mathématique pour aborder l'aspect temporel de Talbot en se restreignant à une dimension.

Le Talbot temporel se produit lorsqu'un signal d'impulsions lumineuses courtes et périodiques, produites par un laser, se propage dans un milieu dispersif de premier ordre. On note qu'un milieu dispersif est un milieu dans lequel, les différentes harmoniques, qui composent l'impulsion se propagent avec des vitesses différentes, entraînant ainsi l'élargissement de l'impulsion au cours de sa propagation. La largeur temporelle et la forme de l'impulsion correspondent à la largeur et la forme des motifs contenus dans l'exemple de la diapositive citée dans le cas spatial. Le temps de répétition joue le rôle de la période spatiale.

Au fur et à mesure qu'une impulsion périodisée se propage dans un milieu dispersif, elle subit un élargissement temporel aux niveaux des ses ails. About d'une certaine distance de parcours du signal chaque impulsion chevauche avec les deux impulsions des périodes voisines. De ce fait, l'information véhiculée par le signal périodique est affectée. Le chevauchement des impulsions élargies est constructif dans certaines régions et destructif dans d'autres de sorte que des nouvelles impulsions, de même forme que les impulsions initiales, se forment. Il en résulte que la période contient des impulsions supplémentaires et par conséquent la fréquence des impulsions est doublée, triplée et d'une façon générale répliquée  $n$  fois. On parle dans ce cas de l'effet Talbot temporel fractionnaire [2].

L'intérêt de ce phénomène se manifeste au niveau d'utilisation de la fibre comme un milieu dispersif de premier ordre [2]. Pour se faire, on introduit dans la fibre des modifications de son profil d'indice de réfraction. En effet pour créer la dispersion de premier ordre, on rend l'indice du cœur de la fibre, initialement uniforme tout le long de la fibre, variable d'une façon binaire et quasi-périodique avec une période longitudinalement croissante. Cette structure est connue sous le terme de réseau de fibre optique à pas linéairement croissant (Linearly Chirped Fiber Grating). Cette technique permet de maintenir exactement la forme du signal d'entrée à la sortie de la fibre ayant une longueur précise. Elle permet également de générer des taux de répétition d'impulsions variables atteignant la gamme de Terahertz [6, 7] (Figure 3). Ceci est d'un grand intérêt dans le domaine des télécommunications à haut débit. Tel que la Figure 3 le montre, le train d'impulsions d'entrée traverse le circulateur optique qui le dirige vers le réseau à pas linéairement croissant. Le signal subira des réflexions consécutives par les surfaces de transition dans le réseau. Du fait de ces réflexions et étant donné que l'intervalle de séparation des transitions est variable, les impulsions du train seront répliquées et décalées, ce qui donne un train de sortie plus dense (Figure 3).

## 4.0 Effet Lau

Lorsque la cohérence spatiale manque, l'effet Talbot n'est plus valable et on observe plutôt un deuxième effet, découvert par E. Lau en 1948. L'idée de Lau repose sur la sélection périodique des points de la source incohérente étendue (Figure 4). Cette sélection doit se faire au niveau de deux plans successifs séparés par une distance particulière, à savoir le quart de la distance de Talbot. Nous avons préparé une animation par Applet qui présente de principe [8].

Le montage de Talbot ressemble au montage de Lau. À la place de la source de lumière ponctuelle monochromatique, Lau utilise une source

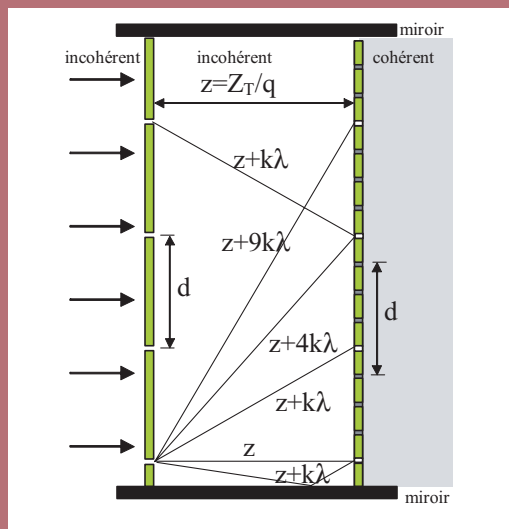


Figure 4: Création de la cohérence spatiale: Montage classique de Lau + Ajout d'ouvertures + Ajout de miroirs longitudinaux

étendue. Son montage consiste à éclairer au moyen d'une source monochromatique de longueur incohérente et étendue, un premier réseau d'amplitude d'ouvertures relativement petites comparées à la période (Figure 4 sans miroirs et sans ouvertures grises). Ainsi, on crée une matrice de sources ponctuelles incohérentes entre elles et espacées d'un pas de  $d$ . Au bout d'une distance, qui correspond au quart de la distance de Talbot,  $z = Z_T/4 = d^2/2$ , on place un deuxième réseau d'amplitude de même période  $d$ . À la sortie de ce dernier, on obtient un ensemble de points spécialement cohérents entre eux. Pour illustrer ce principe, considérons une ouverture quelconque  $n$  du réseau de sortie et examinons les rayons qui sortent à travers elle. Ces rayons doivent obligatoirement provenir des ouvertures du premier réseau. Le fait que nous imposons une distance de séparation  $z = Z_T/4$  entre les deux réseaux fait que tous les rayons, sortant de l'ouverture  $n$ , parcourent la même distance à un multiple de la longueur d'onde près. Par conséquent, les sorties des ouvertures du deuxième sont optiquement identiques. En d'autres termes, indépendamment du profil de phase du front d'onde à la sortie du premier réseau, la phase (et même l'amplitude) sera la même au niveau de toutes les ouvertures du deuxième réseau, d'où la cohérence spatiale mutuelle.

Nous avons généralisé le montage de Lau ( $Z_T/4$ ) en prévoyant une distance fractionnaire  $z = Z_T/q$  ( $q$  multiple de 4). En effet cette condition, implique que les chemins optiques des rayons, traversant les deux réseaux, diffèrent d'un multiple de la longueur d'onde (Figure 4).

Toutefois, un problème majeur surgit du fait de l'utilisation de deux réseaux bloquant presque la totalité de la lumière. Pour y remédier, nous avons proposé des solutions, basées surtout sur la diffraction des réseaux d'amplitude. Nos solutions sont de nature à ouvrir les perspectives vers toutes les applications de l'effet Talbot spatial. De plus, nous avons proposé une solution diffractive permettant de générer la cohérence pour les Lasers à cavité verticale (VCSELs) qui sont de plus en plus utilisés surtout en télécommunications. Ces lasers ont l'avantage d'être miniaturisés et contrôlables séparément. Toutefois pour beaucoup d'applications et surtout en télécommunications, ils nécessitent d'être mutuellement cohérents.

Pour réduire les pertes énergétiques dues au premier montage classique de Lau, notre première solution consiste à augmenter la densité des sorties en prévoyant des ouvertures régulièrement espacées dans chaque période (ouvertures grises sur la Figure 4). Du fait que l'espacement entre deux ouvertures voisines est  $2d/q$ , un rayon quelconque traversant les deux réseaux parcourt un chemin optique  $z+k$ , d'où la cohérence spatiale mutuelle.

Notre deuxième solution pour améliorer le bilan énergétique du système classique de Lau consiste à utiliser des miroirs longitudinaux (Figure 4). Certains rayons initialement perdus (dans le montage initial de Lau) seront réorientés vers le deuxième réseau. Ceci nous permet de transformer des sources incohérentes, qui sont généralement facilement réalisables à coût réduit, en des sources cohérentes.

## 5.0 Conclusion

Cet article a donné un aperçu sur les structures optiques périodiques et leurs applications dans divers domaines particulièrement en télécommunication. Le principe de base étant le même, on distingue deux structures optiques: spatiale et temporelle combinant deux effets Talbot et Lau. Notre approche simplifiée peut servir comme un outil dans la compréhension des phénomènes relevant de la physique quantique, tel que l'exemple du paquet d'onde quantique représentant un électron dans un atome.

## 6.0 Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier le Conseil des Ressources en Sciences Naturelles en Génie du Canada pour sa contribution financière.

## 7.0 Références

- [1]. K.Patorski, "The self-imaging phenomenon and its applications" Progress in Optics, E. Wolf, Ed. North-Holland, Amsterdam 27, 1-110 (1989).
- [2]. T.Jansson and J.Jansson, "Temporal self-imaging effect in single mode fibers", J. Opt. Soc. A. 71, 1373-1376 (1981).
- [3]. E.Lau, "Beugungserscheinung an Doppelrastern", Ann. Physic 6, 417-427 (1948).
- [4]. H.Hamam, "Talbot imaging and unification", Applied Optics. 42, 7052-7059 (2003).
- [5]. <http://www.umoncton.ca/genie/electrique/Cours/Hamam/Optics/Talbot/Tail.htm>
- [6]. K.Tai, A.Tomita, J.L.Jewell, & A.Hasegawa, "Generation of sub-picosecond soliton like optical pulses at 0.3 THz repetition rate by induced modulational instability", Appl. Phys. Lett., Vol 49, N5, 236-238 (1986).
- [7]. J.Azana and M.Muriel, "Temporal self-imaging effects: Theory & Application for Multiplying Pulse Repetition Rates", IEEE Journal on selected topics in Quantum Electronics, Vol 7, N 4, 728 (2001).
- [8]. <http://www.umoncton.ca/genie/electrique/Cours/Hamam/Optics/Lau/Lail.htm>

## A propos des auteurs

**Fatima Zohra Benkabou**, Détient un diplôme en physique du solide de l'Université d'Oran (1990), d'une maîtrise (1994) et un doctorat en physique "Science des matériaux" de l'université de Sidi Bel Abbés, Algérie (2001). Actuellement, elle est professeure en physique à la faculté des sciences, université de Moncton. Ses activités de recherche s'articulent sur: le calcul des propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs (III-V et leurs alliages), les caractérisations des diodes et des photodiodes semi-conducteurs, les cristaux photoniques, et les effets optiques non linéaires.



**Habib Hamam** a obtenu un B.Ing. et une M.Sc. en traitement de l'information de l'Université Technique de Munich, Allemagne 1988 et 1992, et un Ph.D en télécommunications de l'Université de Rennes I conjointement avec l'École Nationale Supérieure de Bretagne, France 1995. Actuellement, il occupe le poste de professeur agrégé au département de génie électrique de l'Université de Moncton. Dans ses recherches scientifiques, il s'intéresse aux télécommunications optiques, à la diffraction, aux composants de fibres optiques, à l'optique de l'oeil, au génie biomédical et à l'apprentissage par réseaux électronique (E-Learning).

