



D. GATINEL

Service d'Ophtalmologie, Fondation A. de Rothschild, et CEROC (Centre d'Expertise et de Recherche en Optique Clinique), PARIS.

Les implants diffractifs utilisent les propriétés ondulatoires de la lumière. Ils peuvent être décrits comme l'addition d'une optique purement diffractive et d'une optique monofocale réfractive.

La puissance d'addition procurée dépend de la largeur des marches diffractives. Leur hauteur contrôle la répartition entre les différents ordres de diffraction, principalement l'ordre 0 (lumière non déviée par le motif de diffraction) et l'ordre 1.

Pour les implants diffractifs bifocaux, environ 20 % de la lumière sont dirigés vers des ordres de diffractions non utiles pour la vision. Les propriétés de ces implants dépendent fortement de la longueur d'onde considérée.

Quelques fondamentaux et caractéristiques particulières des implants multifocaux diffractifs pour la chirurgie de la cataracte

La réalisation d'une optique diffractive est une solution élégante au défi que représente la conception de lentilles multifocales optimisées afin de fournir la meilleure performance visuelle en vision de loin et en vision rapprochée. Elle repose toutefois sur des principes optiques relativement complexes, dont il est possible de saisir les conséquences avec un peu d'explications.

Cet article s'adresse aux chirurgiens curieux, dont la soif de connaissance vis-à-vis des implants multifocaux n'est pas suffisamment étanchée par les informations succinctes délivrées par les compagnies qui les fabriquent ou distribuent.

■ DIFFRACTION, REFRACTION ET IMPLANT MULTIFOCAL DIFFRACTIF

L'étude des phénomènes lumineux fournit certainement des pages parmi les plus captivantes de l'histoire des sciences, marquée par l'affrontement entre la théorie corpusculaire et ondulatoire pour décrire le déplacement de la lumière. La théorie ondulatoire s'est imposée comme une alternative recevable à la théorie corpusculaire (lumière assimilée à un flux de particules, les photons) grâce à la mise en évidence de phénomènes inattendus liés à la diffraction lumineuse que seul un comportement ondulatoire pouvait expliquer.

Toutefois, les avancées de la physique du XX^e siècle ont montré que l'énergie transportée par la lumière est quantifiée, chaque photon transportant une quantité discrète d'énergie (quanta). La dualité onde-particule (ou onde-corpuscule) en mécanique quantique est ainsi mal nommée, car elle réconcilie ces deux théories et prédit qu'à chacune des particules est associée une onde. De fait, lorsque l'on considère le déplacement d'un unique photon, les points d'arrivée possibles sont donnés sous forme de probabilités par l'onde associée. Sur un très grand nombre de photons, chaque lieu d'arrivée est illuminé avec une intensité proportionnelle à la probabilité... et correspond au résultat de la théorie classique. Les formules mathématiques relatives à ces probabilités de distribution constituent un outil puissant pour le design d'optiques diffractives, là où échouent les formules classiques d'optique géométrique.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de conflit d'intérêt concernant les données publiées dans cet article.

En effet, le comportement des optiques diffractives se distingue de celui des optiques dites réfractives. Les implants réfractifs peuvent être monofocaux (une zone réfractive) ou multifocaux (juxtaposition de zones séparées de différentes puissances réfractives). Chacune de ces zones réfractent l'ensemble de la lumière qui les traverse vers un foyer distinct, qui peut être celui de la vision de loin, de près ou encore intermédiaire, et les lois de l'optique géométrique permettent de prédire le trajet de rayons lumineux au travers de ces optiques. A qualité de focalisation égale, l'énergie lumineuse réfractée vers un foyer est directement proportionnelle à la surface de la zone dédiée au foyer considéré. L'ouverture pupillaire module ainsi les propriétés réfractives de ces implants, et impose certaines contraintes de *design*. La zone la plus centrale est généralement dédiée à la vision de loin, et est entourée d'une zone annulaire dédiée à la vision de près. Une répartition inverse aurait pour inconvénient de sélectionner la vision de près en cas de myosis serré, et de gêner les activités comme la conduite automobile en ambiance photopique.

A l'inverse, chaque point de l'optique des implants purement diffractifs est à la fois dédié à la vision de loin et la vision de près ! Le recueil de l'énergie lumineuse après traversée d'un réseau diffractif quelconque montre une séparation de la lumière en plusieurs trains d'ondes lumineuses, appelés ordres de diffraction ; cette séparation est liée à la propriété qu'ont les ondes lumineuses d'interférer avec elles-mêmes. Pour produire ces interférences, il faut produire un réseau constitué de bords, d'obstacles ou de variations d'épaisseur dont les dimensions sont du même ordre que les longueurs d'onde que l'on veut faire diffracter (ex. : trous microscopiques, structure kinoforme – voir plus loin) (*fig. 1*).

Chacun des ordres diffractés emporte une partie de l'énergie lumineuse totale de départ. Plus surprenant, une expérience consistant à envoyer un par un des photons au hasard à travers un réseau de diffraction (sans contrôler leur trajectoire) montre après un certain nombre de tirs que la répartition de l'énergie lumineuse est la même que lorsque l'on envoie simultanément un grand nombre de particules lumineuses supposer interférer ! Tout se passe comme si les photons, bien que particules, avaient la capacité d'interférer avec eux-mêmes dans le temps !

Ces propriétés, bien qu'étranges pour l'intuition humaine, sont utilisées pour la conception de structures diffractives. Une manière commode de se représenter les caractéristiques d'un implant bifocal diffractif est de le considérer comme l'assemblage entre une optique monofocale classique et une structure diffractive. Pour un implant bifocal, cette structure diffractive est globalement plane et constituée d'une série de marches asy-

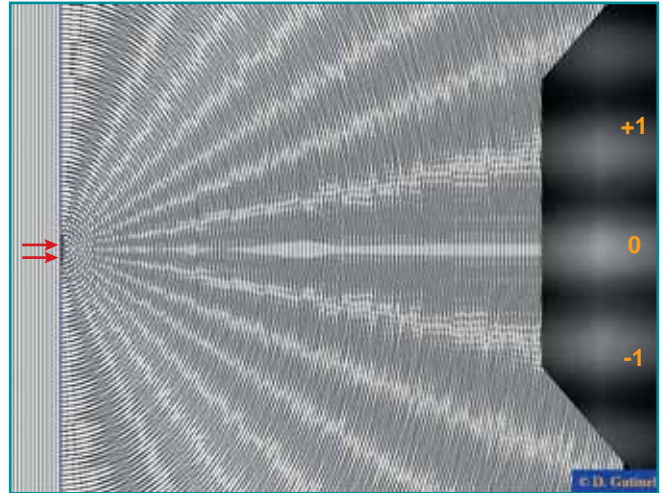


Fig. 1 : Diffraction des ondes lumineuses au travers de deux fentes faiblement espacées (position des flèches). Au lieu d'observer deux pics de lumière uniquement dans la direction des fentes (hypothèse corpusculaire), on observe sur un écran détecteur (à droite) l'apparition de franges lumineuses espacées qui correspondent aux interférences constructives et destructives des ondes lumineuses diffractées. Cette expérience a été réalisée par Young il y a plus de deux siècles pour asseoir la théorie ondulatoire de la propagation de la lumière. En bouchant l'un des trous, ce motif d'interférence disparaît. Le plus étonnant est que si l'on envoie des photons un à un au hasard dans la direction des fentes, sans vérifier par quelle fente ils passent, le motif d'interférence finit par apparaître ! Les bandes lumineuses correspondent à des ordres de diffraction que l'on peut numéroter (ordre 0, -1, +1, etc.). Dans cette expérience, le maximum d'énergie est observé dans l'ordre 0.

métriques triangulaires, de largeur variable. Elle est appelée "kinoforme", et son rôle est de "partager" (diffracter) la lumière incidente, principalement en deux faisceaux (*fig. 2*). La trajectoire d'un des faisceaux diffractés n'est pas modifiée (ordre 0, foyer "à l'infini"), alors que l'autre (ordre 1) est déviée vers un foyer qui dans le cadre d'un implant bifocal devra correspondre à l'addition dioptrique souhaitée pour la vision de près (pour une distance de lecture de 33 cm, il faut une addition 3 D).

Combinée à une optique monofocale réfractive biconvexe (ex. : implant de 22 D), la structure diffractive kinoforme lui transfère sa propriété de partager la lumière, entre l'ordre 0 (la lumière non déviée par le kinoforme mais focalisée par l'optique monofocale) qui fournit l'énergie lumineuse nécessaire au foyer de "loin" (22 D dans notre exemple) et l'ordre 1, qui fournit l'addition (+3 dioptries, qui s'ajoutent au 22 D) (*fig. 3*). Un implant asphérique et/ou torique diffractif est conçu de cette manière, l'asphéricité et/ou la toricité étant portées par l'optique réfractive. En fait, pour la portion de lumière diffractée dans l'ordre 0, tout se passe comme si l'implant était purement monofocal.

La distance focale (le degré d'addition désiré) dicte quel doit être l'espacement des marches du motif de diffraction. La

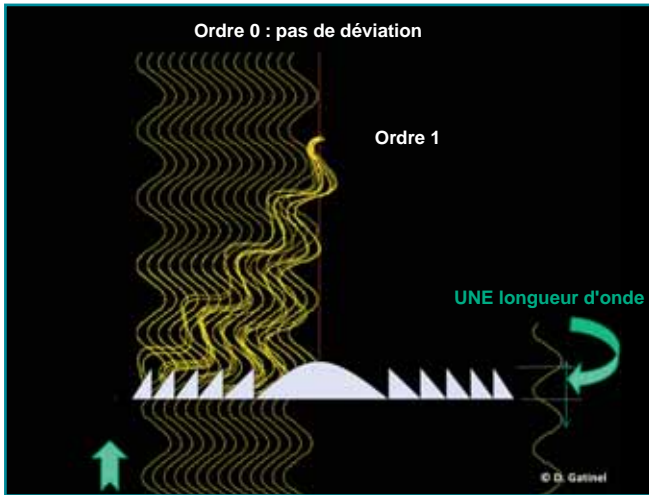


Fig. 2 : Représentation schématique d'une structure diffractive de type kinoforme telle qu'utilisée pour la réalisation d'implants diffractifs pour une lumière monochromatique (pour plus de clarté, seule la transmission par une moitié de l'implant est représentée). Si la hauteur des marches diffractive est calculée pour être égale ou proche de la moitié d'une longueur d'onde considérée dans le matériau, alors 40 % de la lumière n'est plus diffractée dans l'ordre 1 et semble traverser le réseau (ordre 0) sans être déviée. Si la hauteur de marches correspond exactement à la longueur d'onde, l'essentiel de l'énergie lumineuse est diffracté dans l'ordre 1.

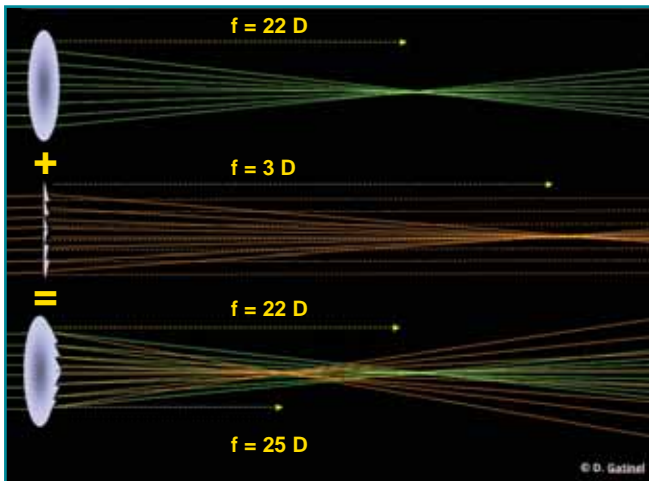


Fig. 3 : Représentation schématique du principe optique d'une optique bifocale d'implant multifocal diffractif. Sa structure globale est complexe (en bas), mais on peut la décomposer en une partie "réfractive monofocale" (en haut), et une partie "diffractive" (au milieu). La partie diffractive est un "réseau diffractif" dont les marches ont une hauteur et une largeur calculées pour diffracter la lumière incidente en plusieurs faisceaux à une puissance focale déterminée. Dans le cas d'un implant bifocal, ce réseau est conçu pour répartir 80 % de l'énergie lumineuse incidente dans les deux premiers ordres de diffractions (représentés sur le schéma). L'ordre 0 n'est pas dévié; l'ordre 1 est diffracté vers un foyer correspondant à une puissance focale de 3 dioptries. Il existe d'autres ordres de diffractions (non représentés ici) qui représentent environ 20 % de l'énergie incidente.

hauteur des marches permet le contrôle la répartition de l'énergie entre les deux foyers principaux.

■ IMPLANTS DIFFRACTIFS : CARACTERISTIQUES PARTICULIERES

A ce stade, il est utile de préciser certains points supplémentaires qui sont souvent absents de la communication relative à ces implants. La propagation de la lumière à travers une optique diffractive bifocale peut être décrite mathématiquement par des équations complexes, et bien au-delà du cadre de cet article. Mais elles mettent en exergue des points qu'il n'est pas toujours judicieux d'occulter.

>>> En plus de l'ordre 0 et de l'ordre 1, il existe pour les lentilles diffractives, même étiquetées comme bifocales, d'autres ordres de diffraction, affectés d'un nombre entier (ordre 2, etc.). Dans le cadre des implants diffractifs bifocaux, le pourcentage total de la lumière "perdue" dans ces ordres de diffraction est proche de 20 %. Les pourcentages de répartition lumineuse (ex.: 50 % foyer de loin/50 % foyer de près) ne concernent que la répartition entre les ordres 0 et 1. Ainsi, si l'on considère la répartition totale de la lumière diffractée, ces pourcentages deviennent ainsi proches de 40 % = foyer de loin, 40 % = foyer de près, et 20 % = autres foyers. Pour un implant non apodisé (voir plus loin), cette répartition demeure constante quelle que soit la surface de la zone considérée (invariance avec le diamètre pupillaire).

>>> La hauteur des marches diffractives est calculée pour une longueur d'onde, choisie proche du pic de la sensibilité rétinienne (jaune-vert). Les pourcentages affectés aux foyers de loin et de près ne sont exacts que pour cette longueur d'onde. Or la lumière réfractée par l'œil est naturellement polychromatique (lumière blanche).

Ainsi, (pour un implant disposant de marches diffractives d'épaisseur identique), avec les longueurs d'ondes plus longues (vers le rouge), le pourcentage de l'énergie affectée à l'ordre 1 (vision de près) diminue, et il augmente pour l'ordre 0 (vision de loin). Pour des longueurs d'ondes plus courtes (vers le bleu), le pourcentage de l'énergie affectée à l'ordre 1 (vision de près) augmente, alors qu'il diminue conjointement pour l'ordre 0 (vision de loin).

Ce raisonnement conduit à postuler qu'il existe une longueur d'onde plus courte (dans l'ultraviolet) pour laquelle la structure diffractive (calculée pour être bifocale dans le milieu du spectre visible) deviendrait quasi monofocale (l'énergie lumineuse incidente correspondant à cette longueur d'onde serait déviée en quasi-totalité vers l'ordre 1)! De même, à l'autre extrémité du spectre, plus on s'éloigne dans le rouge, puis l'infrarouge, et

- Le design d'un implant multifocal diffractif utilise les propriétés ondulatoires de la lumière.
- Les implants diffractifs bifocaux ont une géométrie calculée pour une longueur d'onde particulière et un design optimisé pour la qualité de la vision de loin.

moins la structure diffractive se comporte de manière bifocale. En effet, dans cette gamme de rayonnement, l'énergie lumineuse correspondante est de moins en moins déviée (le pourcentage affecté à l'ordre 1 se réduit progressivement).

Cette dépendance vis-à-vis de la longueur d'onde a une conséquence clinique d'importance ; toute méthode diagnostique objective utilisant un rayonnement situé en dehors du spectre visible a peu de chances de fournir un résultat pertinent. C'est le cas de la plupart des aberromètres, qui utilisent un rayonnement infrarouge (dont l'avantage est d'être non éblouissant car non perçu par le patient). Toutefois, ce rayonnement est moins diffracté que les longueurs d'ondes situées dans le spectre visible, ce qui réduit l'influence réelle de la diffraction dans le résultat de l'examen.

La maîtrise de ces concepts autorise la conception d'une lentille diffractive monofocale à partir d'un kinoforme dont la hauteur des marches serait calculée pour affecter la quasi-totalité de l'énergie lumineuse proche du milieu du spectre visible (pic de la sensibilité rétinienne) vers l'ordre 1, et leur espacement non pas pour fournir une puissance d'addition de près (ex.: +3 D), mais l'emmétropisation en vision de loin (puissance à fournir de l'ordre de +22 D) (ex.: implant ThinOptX Ultra). Ces implants ont donné des résultats cliniques encourageants, mais au prix d'un effet indésirable rapporté dans la seule étude publiée à ce jour sur ces implants : la perception de franges colorées par les patients autour des sources lumineuses [1] !

►► La puissance d'addition nominative fournie par le motif de diffraction d'un implant bifocal (ordre 1) est calculée pour une longueur d'onde donnée du spectre visible ; si cette puissance est choisie pour être égale à 3 D pour le jaune/vert, elle faiblit du fait de l'influence de la longueur d'onde à 2 D environ pour le bleu, et croît à 4 D pour le rouge (fig. 4). Fait heureux, le sens de cette modulation diffractive (réduction de puissance pour les courtes longueurs d'ondes) est opposé à celui de l'aberration chromatique d'origine réfractive (caractérisée par la dispersion du prisme où l'on note une augmentation de la réfraction pour les courtes longueurs d'ondes). En théorie, cette compensation prédit une amélioration de la qualité optique pour la vision de près, mais corrobore le risque de

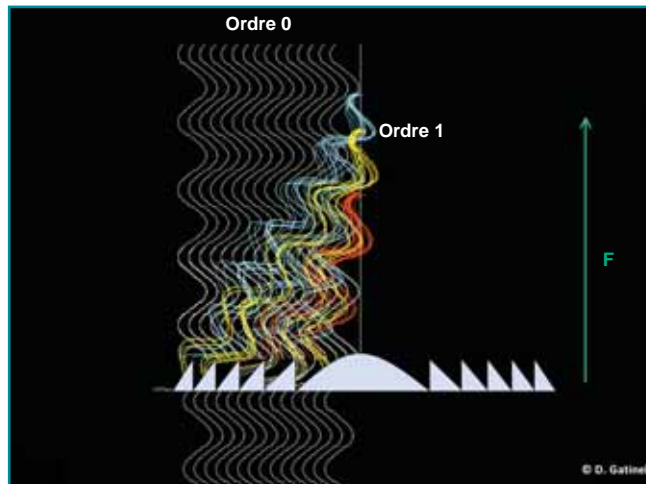


Fig. 4 : Le motif diffractif de l'implant disperse les différents constituants de la lumière blanche, qui sont diffractés dans l'ordre 0 et l'ordre 1. Pour l'ordre 1, la longueur focale F est d'autant plus faible (plus forte puissance optique) que la longueur d'onde est longue (ex. : le rouge est diffracté en avant du bleu). In vivo, cela est partiellement compensé par l'aberration chromatique réfractive intrinsèque de la cornée (qui réfracte le rouge après le bleu).

percevoir des franges colorées concentriques (propagation de l'énergie lumineuse initialement dédiée au foyer de près de manière relativement identique pour les différentes couleurs) en vision de loin. Précision que la compensation de l'aberration chromatique n'existe pas pour la lumière focalisée vers le foyer de loin (il reçoit principalement la lumière diffractée par l'ordre 0, absence de déviation par le motif de diffraction).

►►► Si l'on diminue la hauteur des marches diffractives, le pourcentage d'énergie lumineuse dédié à l'ordre 1 diminue (fig. 5). L'apodisation utilise ce principe et vise à accroître la quantité d'énergie pour le foyer de loin (ordre 0) avec la dilatation de la pupille ; elle repose donc sur la réduction progressive de la hauteur de marches diffractives du centre vers les bords de l'optique (jusqu'à disparition de celles-ci). Avec l'ouverture pupillaire, un pourcentage croissant d'énergie lumineuse pupillaire est affecté à l'ordre 0 (la diffraction vers l'ordre 1 décroît proportionnellement). Cette diminution a toutefois des effets variables selon les longueurs d'ondes considérées, et affecte donc la composition chromatique de la lumière diffractée ; la proportion de lumière bleue pour le foyer de loin (ordre 0) ira théoriquement croissant avec la dilatation, et cela pourrait aussi participer en fonction du diamètre pupillaire à l'apparition ou la variation d'intensité de franges colorées autour de sources de lumière blanche.

►►► Nous avons mentionné que la maîtrise des propriétés diffractives autorisait la conception d'implants purement diffrac-

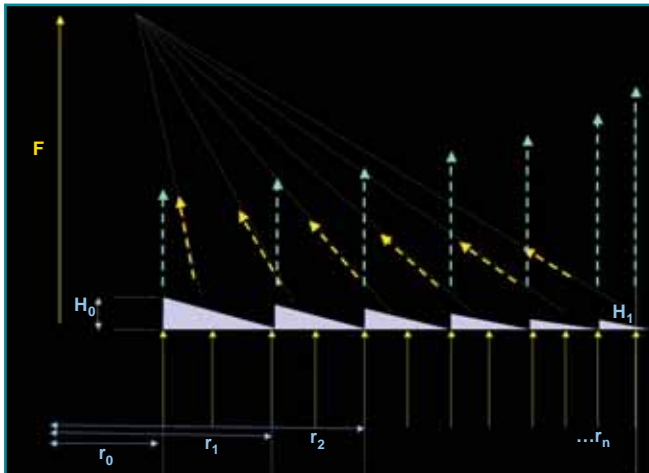


Fig. 5 : La réduction progressive de la hauteur des marches vers la périphérie permet d'augmenter le pourcentage de l'énergie dirigé dans l'ordre 0 (flèches bleues). L'apodisation est une des fonctions qui gouvernent la réduction de la hauteur des marches vers les bords de l'implant. Si cette fonction est "prononcée", la disparition des marches survient sur un diamètre inférieur à celui de l'optique de l'implant (ex. : implant ReSTOR). L'espacement variable des marches suit une progression géométrique et est calculé pour amener la lumière diffractée dans l'ordre 1 vers le foyer de près (distance focale : F). La modulation de cette répartition lumineuse varie en fonction de la longueur d'onde considérée (cf. figure 3) (© D Gatinel).

tifs monofocaux, mais dont la dépendance à la longueur d'onde pourrait générer des halos colorés potentiellement gênants. Il pourrait alors s'avérer judicieux d'ajouter à des implants monofocaux réfractifs des caractéristiques diffractives étudiées pour

corriger l'aberration chromatique en vision de loin. Pour cela, l'énergie lumineuse diffractée dans l'ordre 1 par un motif diffractif peut être dirigée vers le foyer réfractif de l'implant : la dispersion chromatique liée à cette diffraction compense alors l'aberration chromatique liée à la réfraction des dioptries oculaires. Ces principes sont déjà mis en œuvre pour la correction de l'aberration chromatique de certains objectifs photographiques (Canon DO/Diffractive Optics), où des lentilles et doubles achromatiques sont remplacés par de fins réseaux de diffraction. La commercialisation d'une lentille intraoculaire destinée à corriger l'aberration chromatique oculaire pourrait intervenir dans un futur proche [2].

■ CONCLUSION

Les implants diffractifs sont des dispositifs optiques sophistiqués domptant les propriétés ondulatoires de la lumière pour en contrôler le trajet. Plus de 300 ans après leur mise en évidence, l'utilisation des propriétés ondulatoires de la lumière continue de faire évoluer le paysage de l'optique médicale. ■

Bibliographie

1. BORDEIANU CD. Thinoptix implant – the last border in modern cataract surgery. After 7 months, results of first implants in Romania. *Oftalmologia*, 2005 ; 49 : 58-66.
2. LOPEZ-GIL N, MONTES-MICO R. New intraocular lens for achromatizing the human eye. *J Cataract Refract Surg*, 2007 ; 33 : 1 296-302.