



(51) Classification internationale des brevets : Non classée

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/IB2009/050463

(22) Date de dépôt international :
5 février 2009 (05.02.2009)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
00161/08 6 février 2008 (06.02.2008) CH
00255/08 22 février 2008 (22.02.2008) CH
01803/08 20 novembre 2008 (20.11.2008) CH

(71) Déposants et

(72) Inventeurs : **APTER, Robert** [CH/CH]; Rue du Jura
26B, CH-1373 Chavornay (CH). **APTER, Alain**
[CH/CH]; 18 Crêts de Champel, CH-1206 Genève (CH).

(74) Mandataire : **LEMAN CONSULTING S.A.** 284;
Chemin de Précossy 31, CH-1260 Nyon (CH).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR DETERMINING THE CONFIGURATION OF AN OPHTHALMIC LENS, OPHTHALMIC LENS PRODUCED ACCORDING TO SAID METHOD, AND METHOD FOR PRODUCING SAID LENS

(54) Titre : PROCEDE DE DETERMINATION DE LA CONFIGURATION D'UNE LENTILLE OPHTALMIQUE, LENTILLE OPHTALMIQUE OBTENUE SELON CE PROCEDE ET PROCEDE DE FABRICATION DE CETTE LENTILLE

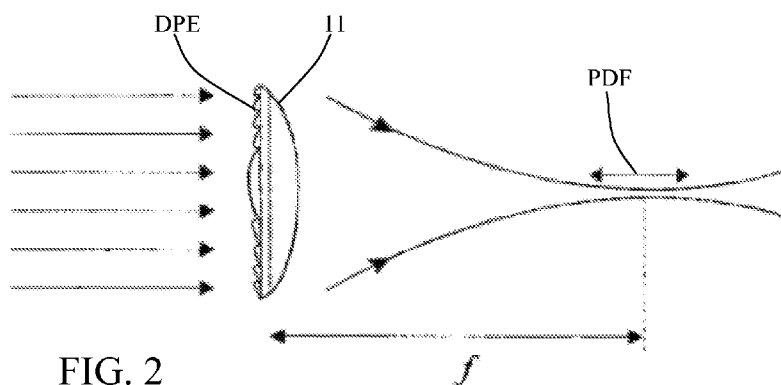


FIG. 2

(57) Abstract : The invention relates to a method for determining the configuration of an ophthalmic lens for increasing the depth of the field of vision of the user. Said method comprises steps of determining the form of a base optical corrective element according to at least one of the following parameters: the desired power of the ophthalmic lens; the desired resolution or modulation transfer function FTM; the desired extent of the correction of spherical aberrations of said ophthalmic lens; the desired extent of the correction of spherical aberrations of the cornea of the user; the desired extent of the correction of the chromatic aberrations of the ophthalmic lens; the desired extent of the correction of chromatic aberrations of the cornea of the user; or the desired extent of the correction of higher-order aberrations (HOA). Said method also comprises a step of determining the profile of a diffractive phase distribution structure, said determination comprising steps of defining a desired focalisation depth of said ophthalmic lens; a step of calculating the phase distribution from the desired depth of focalisation; a step of finding phases which minimise the differences between the effective phase distribution and the desired phase distribution; and a step of converting the phase data into geometrical data in such a way as to define the profile of the diffractive phase distribution structure. The method further comprises a step for juxtaposing the diffractive structure and the base optical corrective element. The invention also relates to a lens obtained according to the above-mentioned method, and to a method for producing such a lens.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

**Publiée :**

- *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

La présente invention concerne un procédé détermination de la configuration d'une lentille ophtalmique destinée augmenter la profondeur du champ de vision de l'utilisateur. Ce procédé comporte les étapes de détermination de la forme d'un élément correcteur optique de base en fonction d'au moins l'un des paramètres suivants : puissance recherchée de la lentille ophtalmique; résolution ou fonction de transfert de modulation FTM recherchée; étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques de ladite lentille ophtalmique; étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques de la cornée de l'utilisateur; étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de ladite lentille ophtalmique; étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de la cornée de l'utilisateur; ou étendue recherchée de la correction d'aberrations d'ordre supérieur (HOA). Il comporte en outre une étape de détermination du profil d'une structure diffractive de distribution de phase, cette détermination comportant les étapes de définition d'une profondeur de focalisation recherchée de ladite lentille ophtalmique; de calcul de la distribution de phase à partir de la profondeur de focalisation recherchée; de recherche des phases qui minimisent les différences entre la distribution effective de phase et la distribution de phase recherchée; de conversion des données de phase en données géométriques de façon à définir le profil de la structure diffractive de distribution de phase. Le procédé comporte finalement une étape de juxtaposition de la structure diffractive et de l'élément correcteur optique de base. L'invention concerne en outre une lentille obtenue selon le procédé ci-dessus ainsi qu'un procédé de fabrication d'une telle lentille.

**PROCEDE DE DETERMINATION DE LA CONFIGURATION D'UNE
LENTILLE OPHTALMIQUE, LENTILLE OPHTALMIQUE OBTENUE SELON
CE PROCEDE ET PROCEDE DE FABRICATION DE CETTE LENTILLE**

DOMAINE TECHNIQUE

5 La présente invention concerne un procédé de détermination de la configuration d'une lentille ophtalmique. Elle concerne également une lentille ophtalmique obtenue selon ce procédé ainsi qu'un procédé de fabrication d'une telle lentille ophtalmique.

De façon générale, la présente invention traite de lentilles ophtalmiques à
10 profondeur de focalisation (PDF) étendue et donc avec des profondeurs de champs (PDC) correspondantes étendues. Ces lentilles hybrides réfractive-diffractive, utilisent sur une des surfaces un masque diffractif et sur l'autre une surface asphérique. Ces lentilles permettent de choisir la profondeur de focalisation, même très large, tout en conservant une résolution acceptable
15 sur le champ de focalisation. La surface portant le masque diffractif peut être remplacée par une surface asphérique avec des caractéristiques optiques proches. La lentille hybride est alors constituée de deux surfaces asphériques. La profondeur de focalisation peut être créée sur des segments par exemple pour la vision proche et/ou pour la vision lointaine. La vision
20 proche a en général une profondeur de focalisation et donc une profondeur de champ plus faible que la vision lointaine. Il est donc possible en augmentant la profondeur de focalisation pour la vision proche seule d'obtenir une profondeur de focalisation totale importante.

Le procédé de l'invention est applicable à toutes les lentilles ophtalmiques
25 telles que :

- toutes les lentilles intraoculaires positives et négatives et de toutes formes; pseudo-phakic IOL, phakic IOL pour chambres antérieure et postérieure ainsi que les versions toriques;
- toutes lentilles de contact positives et négatives et toriques;
- 30 ▪ tous les verres de lunettes positifs et négatifs et toriques;

- tous les matériaux utilisés, notamment plastique, verre, matériaux hydrogels, matériaux hydrophobes.

TECHNIQUE ANTERIEURE

Actuellement, il existe de nombreuses lentilles ophtalmiques permettant de
5 corriger différents types de problèmes de vision. Dans ces lentilles, il est
parfois utile de corriger différents types d'aberrations, en particulier les
aberrations sphériques SA (spherical aberrations), afin d'offrir à l'utilisateur
une meilleure acuité visuelle. L'un des facteurs importants lors de la
correction de la vision est la profondeur de champ PDC ou la profondeur de
10 focalisation PDF correspondante.

Il est à noter que la profondeur de champ PDC et la profondeur de focalisation
PDF sont liées, mais ne doivent pas être confondues. Elles sont définies de la
manière suivante.

Une lentille "parfaite", sans aberrations permet de définir un plan spécifique
15 de l'espace objet qui est précisément le conjugué du plan récepteur (film,
caméra, rétine, capteur,...) dans le plan image. Il s'agit, dans le plan objet, du
plan de focalisation objet. Lorsque l'objet est déplacé, il y aura une tolérance
sur la position du plan image qui permettra à un observateur de reconnaître
que l'image est toujours bien focalisée jusqu'à une position appelée limite de
20 focalisation. La profondeur de focalisation PDF est par définition la distance
sur l'axe de la lentille du côté image où la dimension de l'image, appelée
cercle de moindre confusion (CMC) si l'objet est ponctuel, devient confuse,
c'est-à-dire où l'observateur reconnaît une perte de résolution. La
défocalisation devient alors clairement perceptible. La profondeur de champ
25 PDC est la distance correspondante du point objet, du côté objet, avant que
l'image atteigne la dimension maximale tolérable du cercle de moindre
confusion.

Un autre facteur important lors de la correction de la vision est la résolution ou
la fonction de transfert de modulation FTM (ou modulation transfer function
30 MTF en anglais).

De nombreuses lentilles intraoculaires IOL sont produites aujourd'hui avec une correction qui peut être complète, partielle ou nulle des aberrations sphériques SA de la cornée de l'utilisateur. Une correction partielle permet d'obtenir un accroissement de la profondeur de focalisation. Bien que les
5 utilisateurs semblent satisfaits de cet accroissement de la profondeur de focalisation, cet accroissement reste toutefois modeste, typiquement de quelques dixièmes de mm. Il est obtenu essentiellement au dépend de la résolution et de la fonction de transfert de modulation.

Les lentilles intraoculaires avec une correction partielle des aberrations
10 sphériques de la cornée, de même que celles qui n'ont pas de correction, ont l'avantage d'être moins sensibles à la décentration, au tilt et à un changement de position lorsqu'elles sont implantées dans l'œil d'un patient.

Par opposition, il est connu que les lentilles dans lesquelles les aberrations sphériques de la cornée sont totalement corrigées par le choix d'une surface
15 asphérique adaptée ont une meilleure résolution. Par contre, elles ont une profondeur de focalisation et donc une profondeur de champ plus faible. Elles sont en outre sensibles à la décentration, au tilt et au changement de position.

De façon générale, dans les lentilles usuelles, la profondeur de champ PDC et la résolution sont étroitement liées. L'amélioration de l'un de ces paramètres
20 entraîne la dégradation de l'autre pour une lentille de puissance donnée.

Parmi les lentilles intraoculaires avec ou sans correction des aberrations sphériques, on peut citer :

- Technis multifocal ZM 9000 (Advanced Medical Optics, Inc). Il s'agit d'une lentille intraoculaire diffractive en silicone avec une surface asphérique.
25 Cette lentille a été la première lentille intraoculaire avec surface asphérique disponible commercialement qui compense les aberrations sphériques monochromatiques de la cornée. Elle a une correction d'aberration sphérique négative pour compenser l'aberration sphérique positive de la cornée. La compensation est calculée pour des valeurs
30 d'aberrations SA mesurées sur un échantillon de population et ne cible pas une correction personnalisée. Les performances de ces lentilles sont

particulièrement sensibles au tilt et à la décentration de l'implant. Le système visuel œil - lentille, dans ce cas, aura une très bonne résolution et une profondeur de focalisation et donc de champ bien plus faible que dans le cas où la correction des aberrations sphériques du système est partielle ou nulle.

- Akreos Adapt Advanced Optics (Bausch & Lomb, Inc) est une lentille asymétrique, biconvexe avec des surfaces antérieure et postérieure asphériques qui éliminent l'aberration sphérique SA de la lentille. Ainsi l'œil pseudo-phakique conserve une valeur positive d'aberration sphérique monochromatique due à la cornée, ce qui lui confère une profondeur de focalisation améliorée et crée une certaine pseudo-accommodation. De plus, cette lentille a une puissance constante sur toute sa surface ce qui lui permet d'être plus tolérante aux erreurs d'alignement et au tilt qu'une lentille avec correction des aberrations sphériques SA négative pour compenser l'aberration SA de la cornée de l'utilisateur.

Un autre problème qui se produit avec les lentilles ophtalmiques actuelles, en particulier les lentilles intraoculaires, est qu'elles présentent des halos ou "glares" et des images parasites dans certaines situations, en particulier lors de vision nocturne. Ceci est particulièrement le cas pour les lentilles multifocales.

Lors de la fabrication d'une lentille et du choix de la lentille à implanter dans l'œil d'un patient, des incertitudes existent. En particulier, les fabricants ne mesurent pas toujours avec précision la puissance (ou la longueur focale) de la lentille et fournissent des valeurs approximatives. Pour des lentilles toriques, multifocales et autres, les incertitudes peuvent être plus grandes car des surfaces plus complexes sont traitées. Lors de la mise en place, le tilt, la rotation, la centration, le fléchissement et d'autres erreurs de positionnement dans l'œil peuvent accroître la dégradation de l'acuité visuelle. Ces erreurs dépendent aussi de la construction de la lentille.

Il faut aussi noter les points suivants :

- les aberrations de l'œil changent avec l'âge;

- les valeurs des aberrations dépendent de l'état accommodatif du cristallin;
- toute action sur la cornée telle qu'une incision ou une ablation modifiera sa forme et en conséquence les aberrations.

Toutes ces incertitudes créent une dégradation de la résolution de l'image sur la rétine (liée à la qualité de la vision) et il n'est donc pas surprenant que souvent, une correction additionnelle est nécessaire après implantation d'une lentille intraoculaire. Une erreur de ± 1 dioptrie autour de la valeur recherchée est courante malgré la qualité des spécialistes et les outils modernes utilisés pour les mesures et les calculs.

Malgré la standardisation de l'œil, il faut se souvenir que les caractéristiques oculaires varient d'un individu à l'autre et il faudrait, de façon idéale, adapter de façon précise les lentilles intraoculaires aux besoins spécifiques du patient.

Des valeurs typiques sont par exemple $+ 0.27 \mu\text{m}$ pour l'aberration sphérique SA de la cornée normale d'un œil jeune. Cette valeur peut être compensée par une valeur pratiquement égale d'aberration sphérique négative du cristallin ($-0.27 \mu\text{m}$). Avec l'âge, les valeurs de l'aberration sphérique SA du cristallin deviennent souvent positives. Pour un sexagénaire, une valeur typique de l'œil entier est de $+ 0.54 \mu\text{m}$. Evidemment, les caractéristiques oculaires varient d'un individu à l'autre, de même que les valeurs des aberrations.

EXPOSE DE L'INVENTION

La présente invention se propose de pallier les inconvénients des lentilles ophtalmiques de l'art antérieur en proposant des lentilles ayant une profondeur de champ PDC et donc également une profondeur de focalisation PDF étendue par rapport aux lentilles existantes.

De plus, l'extension de cette profondeur de focalisation n'est pas réalisée au dépend de la résolution ou de la fonction de transfert de modulation FTM comme dans les lentilles de l'art antérieur. Au contraire, dans les lentilles de l'invention, la résolution/fonction de transfert de modulation FTM d'une part et la profondeur de focalisation PDF/profondeur de champ PDC d'autre part sont

relativement indépendantes l'une de l'autre, surtout après implantation lorsque la lentille est combinée avec l'œil. Cette indépendance n'est pas complète, mais permet un meilleur contrôle de ces paramètres indépendamment l'un de l'autre en comparaison avec une lentille classique.

- 5 Ainsi, l'un des objectifs recherchés par la présente invention est donc de séparer, dans une certaine mesure, la détermination de la profondeur de champ ou de focalisation de celle de la résolution ou de la fonction de transfert de modulation.

La présente invention se propose en outre de conserver la résolution ou la
10 fonction de transfert de modulation FTM approximativement constante sur chaque segment de profondeur de champ.

Les buts de l'invention sont atteints par un procédé de détermination de la configuration d'une lentille ophtalmique destinée à corriger l'acuité visuelle d'un utilisateur, ce procédé comportant les étapes suivantes :

- 15 • détermination de la forme d'un élément correcteur optique de base en fonction d'au moins l'un des paramètres suivants :
- puissance recherchée de la lentille ophtalmique;
 - résolution ou fonction de transfert de modulation FTM recherchée;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques
20 (SA) de ladite lentille ophtalmique;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques (SA) de la cornée de l'utilisateur;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de ladite lentille ophtalmique;
 - 25 - étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de la cornée de l'utilisateur;
 - étendue recherchée de la correction d'aberrations d'ordre supérieur (HOA);
- détermination du profil d'une structure diffractive de distribution de phase
30 (DPE), cette détermination comportant les étapes suivantes :
- définition d'une profondeur de focalisation (PDF) recherchée de ladite lentille ophtalmique;

- calcul de la distribution de phase à partir de la profondeur de focalisation recherchée;
- recherche des phases qui minimisent les différences entre la distribution effective de phase et la distribution de phase recherchée;
- conversion des données de phase en données géométriques de façon à définir le profil de la structure diffractive de distribution de phase;
- juxtaposition de la structure diffractive et de l'élément correcteur optique de base.

Les buts de cette invention sont également atteints par une lentille ophtalmique destinée à corriger l'acuité visuelle d'un utilisateur, caractérisée en ce qu'elle comprend un élément correcteur optique de base auquel est juxtaposé une structure diffractive de distribution de phase.

- 15 Les buts de l'invention sont en outre atteints par un procédé de fabrication d'une lentille ophtalmique dont la configuration est déterminée selon le procédé de détermination de la configuration d'une lentille.

La séparation entre la profondeur de champ PDC et la résolution se fait par l'introduction d'un élément spécifique pour créer la profondeur de focalisation recherchée. Dans ce but on utilisera une structure diffractive de distribution de phase, notée DPE (Diffractive phase element) qui produit une distribution de phase spécifique. En pratique, la structure diffractive ou masque diffractif, peut être remplacée par une surface asphérique produisant une distribution de phases similaire. Il est donc possible d'utiliser à la place de la structure diffractive de distribution de phase DPE, une surface réfractive qui produit une distribution de phase adaptée à la création d'une profondeur de focalisation étendue.

Cette extension de la profondeur de focalisation PDF s'effectuera, en général, avec une résolution/fonction de transfert de modulation FTM approximativement constante sur la fenêtre considérée. En pratique, la

variation de résolution sur la profondeur de focalisation pourra être environ d'un facteur deux ou trois, mais pas d'un ordre de grandeur.

Il faut noter que l'augmentation de la profondeur de focalisation peut également être obtenue en augmentant la correction des aberrations sphériques SA longitudinales. Cette correction peut être positive ou négative. Si elle est positive, elle sera additionnée à l'aberration sphérique positive de la cornée.

Les structures diffractives de distribution de phase DPE créent un front d'onde particulier. Le faisceau de lumière ainsi créé a des caractéristiques qui sont utilisées ici pour les applications à des lentilles ophtalmiques et peut être considéré comme une apodisation en trois dimensions de l'image pour obtenir une extension sur l'axe longitudinal sans perte trop importante sur les axes transversaux. Comme mentionné ci-dessus, la structure diffractive de distribution de phase DPE peut parfois être remplacée par une surface asphérique calculée soit par déballage ("unwrapping"), soit à partir de polynômes représentant la phase (ou des distributions équivalentes), soit à partir de distributions de phases permettant d'obtenir des résultats équivalents.

On aura ainsi des valeurs choisies sur les paramètres essentiels de la lentille, à savoir la résolution ou la fonction de transfert de modulation FTM d'une part et la profondeur de focalisation PDF ou de champ PDC d'autre part. Ces valeurs pourront couvrir, entre autres, les effets de vieillissement, de tolérances des mesures, d'erreurs de calcul, de position et autres qui rendent l'intervention du spécialiste contraignante. La lentille doit fournir une profondeur de focalisation suffisante dans tous les cas, ainsi qu'une résolution/fonction de transfert de modulation FTM acceptable.

Selon un aspect particulier de l'invention, il est possible d'améliorer la vision ou l'acuité visuelle d'un utilisateur en proposant une lentille ophtalmique ayant différentes profondeurs de focalisation PDF sur différentes fenêtres ou zones. La profondeur de focalisation PDF peut être relativement faible sur une fenêtre pour la vision proche et plus grande sur une fenêtre pour la vision

lointaine. La vision proche a en général une profondeur de focalisation PDF et donc une profondeur de champ PDC plus faible que la vision lointaine. Il est donc possible d'obtenir une profondeur de focalisation PDF importante en augmentant seulement la profondeur de focalisation PDF de la vision proche.

- 5 Une lentille selon l'invention permet d'obtenir un tube de lumière qui évite largement les images parasites, halos et "glaires".

Les procédés décrits dans ce texte permettent d'obtenir une lentille ophtalmique incluant une première surface, antérieure ou postérieure, destinée à neutraliser ou étendre les aberrations (sphériques, chromatiques et d'ordres supérieurs) du système de vision œil-lentille. Cette surface est en général, asphérique. Elle inclut une seconde surface, postérieure ou antérieure, formée d'une ou plusieurs zones qui peuvent être réalisées comme des structures diffractives ou des structures de distribution de phase DPE ("Diffractive Phase Element"). Ces structures diffractives peuvent être
10 identifiées, calculées, juxtaposées, puis fabriquées comme des surfaces asphériques. Ces structures diffractives ou asphériques, produisent des profondeurs de focalisation PDF, donc de champ PDC, variables et contrôlables.
15

L'épaisseur centrale de la lentille sera choisie en fonction des besoins : faibles pour obtenir une incision réduite de la cornée; plus grande si une lentille plus épaisse est recherchée pour mieux remplir le sac capsulaire. Les caractéristiques de profondeur de focalisation PDF et de résolution sont obtenues dans des plages importantes de variations de cette épaisseur.
20

DESCRIPTION SOMMAIRE DES DESSINS

25 La présente invention et ses avantages seront mieux compris en référence aux figures annexées et à la description détaillée d'un mode de réalisation particulier, dans lesquelles :

- la figure 1 est une vue en coupe d'un exemple de lentille ophtalmique utilisé dans la présente invention; la surface réfractive concave est

asphérique et l'autre surface qui porte la structure diffractive de distribution de phase est plane;

- la figure 2 est une vue schématique en coupe d'une lentille ophtalmique selon la présente invention; d'autres formes des surfaces sont possibles;
- 5 – la figure 3 représente de façon schématique les trajets de différents rayons traversant une lentille; le cercle de moindre confusion CMC, le plan de focalisation paraxial et le plan de focalisation marginal sont représentés;
- la figure 4 illustre la profondeur de champ PDC d'une lentille;
- la figure 5 illustre la segmentation et la profondeur de focalisation selon
10 cette invention;
- la figure 6a représente un exemple de la profondeur de champ obtenue avec une lentille ophtalmique mono-focale de l'art antérieur;
- la figure 6b représente un exemple de la profondeur de champ obtenue avec une lentille ophtalmique selon l'invention;
- 15 – la figure 7 représente un exemple de la profondeur de focalisation d'une structure diffractive telle qu'utilisée dans la présente invention; les abscisses sont en m et les intensités en ordonnées sont arbitraires; et
- la figure 8 est un exemple de la distribution d'intensité du côté image obtenue avec une lentille selon la présente invention; les abscisses sont
20 en m et les intensités en ordonnées sont arbitraires.

MANIERES DE REALISER

Un mode de réalisation particulier de l'invention est décrit en référence aux figures annexées. Cet exemple est basé sur une lentille ophtalmique intraoculaire IOL (Intraocular lens). Il est à noter cependant que les procédés
25 de l'invention s'appliquent également à tous types de lentille ophtalmique tels que mentionnés précédemment.

Le procédé de détermination de la configuration d'une lentille tel que décrit dans la présente demande peut être scindé en trois étapes. L'une de ces étapes comprend la détermination de la forme d'un élément correcteur optique de base 10 sur la base de paramètres tels que la puissance finale
5 recherchée pour la lentille ophtalmique, le fait de corriger ou non des aberrations de la lentille ou de la cornée de l'utilisateur, telles que des aberrations sphériques, des aberrations chromatiques ou des aberrations d'ordre supérieur, etc. Cet élément correcteur optique de base pourra avoir une surface plane, convexe, concave, torique et/ou asphérique. La lentille
10 résultante pourra être de puissance positive, négative ou nulle; elle pourra également être multifocale ou torique notamment.

Une autre étape comprend la détermination du profil d'une structure diffractive de distribution de phase DPE ayant pour objectif d'augmenter la profondeur de focalisation PDF ou la profondeur de champ PDC.

15 La troisième étape est la juxtaposition de la structure diffractive de distribution de phase et de l'élément correcteur optique de base de façon à obtenir une lentille ophtalmique hybride 11.

De façon générale, une lentille ophtalmique selon l'invention pourra avoir une face, par exemple la face postérieure, plane, sphérique, asphérique ou
20 torique et pourra être utilisée pour compenser partiellement, totalement ou pas du tout, les aberrations sphériques ou d'autres aberrations de la lentille ou de la cornée de l'utilisateur. La seconde face de la lentille, par exemple la face antérieure, pourra comporter une structure pour augmenter la
25 profondeur de champ PDC. Il est possible de considérer la face postérieure comme l'une des faces de l'élément correcteur optique de base 10 et la face antérieure comme la juxtaposition de cet élément correcteur optique de base 10 avec la structure diffractive de distribution de phase DPE.

Il est également possible d'inverser la lentille de sorte que la face postérieure comporte la structure diffractive de distribution de phase DPE. Dans ce cas
30 toutefois, la lentille n'est pas simplement inversée, mais la détermination de la structure et de la puissance doivent être recalculées.

La structure diffractive de distribution de phase DPE détermine essentiellement la profondeur de focalisation et sera peu affectée par le choix de la correction des aberrations, contrairement aux lentilles usuelles classiques.

5 Calcul de la forme de l'élément correcteur optique de base

La forme de l'élément correcteur optique de base 10 détermine essentiellement la résolution de la lentille et du système visuel après implantation. Un tel élément correcteur est illustré par la figure 1. Cet élément peut être choisi, entre autres, en fonction des critères suivants :

- 10 • puissance de la lentille recherchée;
 - neutralisation des aberrations sphériques SA de la lentille. Une lentille sans correction de l'aberration sphérique SA permettra d'obtenir, après implantation, un système oculaire ayant une aberration sphérique due à la cornée;
 - 15 • création d'aberration sphérique SA négative pour la lentille IOL. La valeur de la correction de l'aberration SA sera choisie pour compenser entièrement ou partiellement l'aberration SA généralement positive de la cornée de l'utilisateur. Cette aberration de la cornée peut être mesurée sur le patient ou correspondre à des valeurs moyennes sélectionnées sur
 - 20 un groupe de population. La résolution du système visuel sera optimum si les aberrations sphériques SA du système oculaire avec la lentille IOL sont nulles.
 - neutralisation d'autres aberrations telles que les aberrations d'ordre supérieur (HOA) ou réduction des aberrations chromatiques.
- 25 Il faut noter que la correction des aberrations sphériques SA de la cornée n'est pas toujours recherchée et que d'autres caractéristiques peuvent être importantes par exemple le contrôle ou la réduction de la croissance des cellules épithéliales par la forme de la surface ou d'autres effets, par exemple des bords carrés ("square edge").

Selon un mode de réalisation préféré, l'élément correcteur optique de base 10 aura une surface asphérique. La distance sagittale d'une telle surface asphérique sera donnée par l'équation ci-dessous :

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \dots + \alpha_8 r^{16} \quad (1)$$

où :

c est la courbure au centre de la surface

k est la conicité

α_i sont les coefficients du polynôme décrivant la distance sagittale de la surface asphérique.

La réalisation de la surface asphérique est alors possible. Des corrections d'aberrations sphériques positives ou négatives peuvent être réalisées, de même que des corrections d'aberrations d'ordre supérieur HOA. Les profils des surfaces ainsi que les fonctions de transfert de modulation FTM correspondantes et les résolutions peuvent être calculées sous diverses formes par exemple avec un programme de tracé de rayons optique tels que Zemax qui fournira également les dimensions des images, les divers coefficients de Zernike ou de Seidel, les éventuelles aberrations chromatiques, etc.

La dispersion chromatique de l'œil et des matériaux est définie par le nombre d'Abbé qui emploie les longueurs d'onde $\lambda_c = 656.3$ nm, $\lambda_d = 587.6$ nm et $\lambda_f = 486.1$ nm. Les dispersions V(réf) d'un élément réfractif et V(dif) d'un élément diffractif sont donnés respectivement par :

$$V(\text{réf}) = (n_d - 1) / (n_f - n_c) \quad \text{et} \quad V(\text{dif}) = \lambda_d / (\lambda_f - \lambda_c) \quad (2)$$

V(dif) est négatif alors que V(réf) est positif.

Une lentille hybride donne :

$$P = P(\text{réf}) + P(\text{dif}) \quad (3)$$

La correction chromatique est obtenue avec :

$$(P(\text{réf}) / V(\text{réf})) + (P(\text{dif}) / V(\text{dif})) = 0 \quad (4)$$

V(dif) est constant et négatif, (voir équation 2), et V(réf) est connu. Les deux équations ci-dessus se réduisent à calculer deux inconnues P(réf) et P(dif) pour neutraliser les aberrations chromatiques. Ces relations peuvent être

5 intégrées dans le calcul des puissances des éléments de la lentille hybride quand une correction chromatique est recherchée. En choisissant les puissances paraxiales (qui sont liées aux nombres d'Abbé), on peut réduire ou parfois éliminer les dispersions chromatiques.

Profondeur de champ et de focalisation

10 L'une des surfaces de la lentille est utilisée pour augmenter la profondeur de focalisation PDF/profondeur de champ PDC. Cette surface peut être considérée comme la juxtaposition de la structure diffractive DPE et de la surface de l'élément correcteur optique de base 10.

La figure 3 est une représentation des tracés de rayons optique dans les

15 plans focaux, respectivement paraxial et marginal.

La profondeur de focalisation PDF est le produit du diamètre C' du cercle de moindre confusion autorisé (sur le film, la caméra, la rétine, etc.) par l'ouverture numérique de la lentille (Voir figure 4).

Avec la géométrie de la figure 4 on obtient :

$$20 \quad C/A = D1/(S + D1) = D2 / (S-D2) \quad (5)$$

où C est le diamètre du cercle de moindre confusion dans le plan objet (conjugué de C' défini dans le plan image);

D1 et D2 sont les distances lointaine et proche de focalisation acceptable;

A est le diamètre de la lentille, ou plutôt de la pupille d'entrée;

25 S est la distance entre le plan de focalisation et la lentille.

On obtient ainsi :

$$D1 = CS / (A-C) \quad (6)$$

$$D2 = CS / (A+C) \quad (7)$$

- D1 est plus grand que D2 et sera infini si $A = C$. Quand C croît, par exemple en augmentant les aberrations sphériques de la lentille, D1 croît et D2 décroît. Cette situation est intéressante puisque les aberrations sphériques sont
- 5 pratiquement toujours présentes dans le système œil-lentille surtout lorsque la pupille croît au delà de 3 mm.

Les distances sont :

$$L1 = S + D1 = AS / (A-C) \quad (8)$$

$$L2 = S - D2 = AS / (A+C) \quad (9)$$

- 10 Ceci est défini du côté objet. Les notations primes ' s'appliquent du côté image avec des relations adaptées en conséquence.

Le cercle de moindre confusion C' d'une lentille parfaite, limitée par la diffraction est généralement considéré comme donné par le critère de Rayleigh par lequel une déformation du front d'onde de $\lambda/4$ est acceptable.

- 15 Pratiquement, C' sera déterminé à partir de la dimension du pixel d'une caméra ou de la résolution de la rétine, de la résolution d'un film, etc. Pour augmenter C' , on introduit souvent une aberration sphérique SA qui peut être importante. Ceci augmente la profondeur de focalisation PDF et en conséquence la profondeur de champ PDC directement au dépend de la
- 20 résolution.

- Dans nos considérations sur une profondeur de focalisation PDF étendue, C' est donné par la résolution du système visuel. La profondeur de champ correspondante est donnée par les formules ci-dessus. Les distances L1 et L2 peuvent, par exemple, être pour L1 la distance de lecture et pour L2 une
- 25 distance lointaine.

Notons que C' peut varier sur les différents segments de profondeur de focalisation différente. En effet la zone périphérique de la lentille donne une valeur de C' plus grande que la zone centrale ("marginal focus" sur la figure 3). La résolution de cette zone externe sera donc plus faible, en fonction des

aberrations résiduelles du système de vision œil - lentille. La situation peut être délicate si les aberrations sphériques résiduelles du système œil - lentille sont importantes. La figure 3 montre la situation, par l'optique géométrique, avec le cercle de moindre confusion, dans le plan de focalisation, que l'on voit plus petit pour les rayons paraxiaux que pour les rayons marginaux pour une illumination monochromatique ("marginal focus" et "paraxial focus"). La situation se dégrade pour une illumination polychromatique pour donner des valeurs de C' qui peuvent devenir importantes si aucune correction chromatique n'est apportée. Bien que l'œil humain soit tolérant et la vision adaptative, il peut être judicieux d'apporter des corrections chromatiques pour des profondeurs de focalisation importantes et/ou pour les domaines de puissances élevées. Les aberrations résiduelles créent des profondeurs de focalisation souvent faibles en regard des profondeurs de focalisation créées par les structures diffractive DPE ou par les surfaces asphériques considérées.

La distance hyperfocale d'un système optique est la distance à laquelle le système doit être focalisé pour que la profondeur de champ PDC s'étende à l'infini. Une augmentation de la profondeur de champ entraîne une distance hyperfocale plus courte de façon à avoir une image de vision proche, par exemple adaptée à la lecture, et une image de vision lointaine à l'infini. Les lentilles intraoculaires usuelles, après implantation, ont une profondeur de champ limitée créée par le cercle de moindre confusion CMC, due aux aberrations sphériques résultantes du système. Les valeurs typiques de profondeur de champ des lentilles usuelles actuelles mono-focales, sont de l'ordre de 2 m à l'infini. Ces valeurs dépendent des aberrations sphériques résiduelles du système de vision qui seront différents pour chaque personne, mais qui peuvent être évaluées pour un "œil standard".

De façon classique, le critère de Rayleigh donne une profondeur de focalisation de

$$PDF = \pm 2 \cdot \lambda \cdot N^2 \quad (10)$$

où λ est la longueur d'onde et

N est l'ouverture relative : longueur focale/diamètre effectif de la pupille.

La valeur typique totale de la profondeur de focalisation PDF d'une lentille IOL mono-focale est de l'ordre de 0.1 à 0.2 mm. Avec des aberrations sphériques importantes, qui peuvent dégrader l'acuité visuelle, les lentilles mono-focales mentionnées ci-dessus donnent des profondeurs de focalisation PDF inférieures à 0.2 dioptries. Une profondeur de focalisation de 0.135 mm correspond à une vision distincte de l'infini à environ 2 mètres, à 22 D.

Calcul de la structure de distribution de phase

La structure de distribution de phase DPE peut être diffractive ou être transformée en surface asphérique, comme cela est expliqué en détail ci-dessous. La détermination du profil de cette structure dépend de la profondeur de focalisation PDF choisie. A titre d'exemple, il est possible de choisir une profondeur de focalisation de 1 D, 2 D ou plus... ou des valeurs équivalentes en mm représentant les profondeurs focales. La conversion de puissance en longueur focales et vice-versa est bien connue et dépend en particulier des différences d'indices de réfraction lentille-milieu environnant.

Des profondeurs de focalisation différentes peuvent être créées sur des zones ou fenêtres différentes de la lentille. A titre d'exemple, la partie centrale de la lentille peut être utilisée pour créer des structures augmentant la profondeur de focalisation en vision proche et la partie périphérique de la lentille pour créer des structures de contrôle de la vision lointaine ou inversement. Le nombre de zones n'est pas limité.

L'extension de la profondeur de focalisation PDF introduit un étalement des intensités collectées par la lentille avec une pupille d'entrée définie et réduit la densité d'énergie dans l'image qui est formée sur la rétine. Ceci pourra éventuellement provoquer une compensation par l'ouverture de la pupille oculaire et par un processus d'apprentissage inconscient à l'observation d'image de faible intensité et pourra également réduire le contraste de l'image.

Afin de créer des profondeurs de focalisation importantes, nous utiliserons essentiellement des faisceaux Pseudo Non diffractifs (PNDB) ou des approximations de ce type de faisceaux. Des faisceaux d'ondes électromagnétiques non diffractifs qui se propagent sur de longues distances sans changement de dimensions ont été définis. Ce type de faisceaux a une amplitude transversale proportionnelle à $J_0(\alpha\rho)$, fonction de Bessel d'ordre 0 et du premier type. Un faisceau J_0 idéal se propage dans l'espace sans décroissance et s'étend à l'infini radialement. Les PNDB sont une approximation des faisceaux de Bessel et sont caractérisés par une intensité presque constante dans une direction axiale sur une région déterminée et par une forme de faisceaux dans la direction transversale. Les PNDB ont des caractéristiques uniques telles qu'une intensité axiale constante, une propagation étendue sur l'axe optique et un faisceau étroit. Même avec des approximations, ces faisceaux permettent d'obtenir des caractéristiques optiques particulières concernant la divergence, la profondeur de champ et la résolution.

Les méthodes suivantes liées à la création de faisceaux Pseudo Non diffractifs peuvent être appliquées au calcul de la structure diffractive DPE de la lentille.

La première étape consiste à définir la profondeur de focalisation PDF recherchée. Les distributions de phase du front d'onde sont calculées. La distribution de phase pour une surface diffractive peut être calculée à partir de la formule suivante, avec un polynôme pair (ou en utilisant la formule correspondante pour un polynôme impair).

$$\phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i} \quad (11)$$

où :

ϕ est la phase;

A_i est le coefficient de la $2^{\text{ème}}$ puissance de ρ ;

ρ est la distance radiale

N est le nombre de coefficient du polynôme;

M est l'ordre de diffraction.

La distribution de phase du front d'onde continu est ensuite déterminée par déballage ("unwrap"). La profondeur de focalisation PDF est représentée par un "tube de lumière" sur la figure 2.

- 5 La distribution de phase ainsi obtenue est utilisée pour obtenir les coefficients α de l'équation (1) d'un front d'onde avec un profil continu. Le nombre de coefficients α pourra être choisi, si nécessaire, avec des compromis sur le profil du front d'onde. La réduction du nombre de coefficients donnera un front d'onde approximatif, mais parfois satisfaisant dépendant du nombre de
- 10 coefficients et de l'approximation introduite. Une structure diffractive DPE peut donc être remplacée par une surface asphérique. Cette surface est calculée par l'intermédiaire d'un polynôme représentant la distribution de phase du front d'onde. Ce polynôme peut être calculé à partir de l'équation (1) donnant une fonction de l'épaisseur (paire si possible, mais aussi impaire ou
- 15 combinée) pour une longueur d'onde définie. Il est également possible de calculer la distribution de phase à partir d'une équation donnant directement la distribution de phase du front d'onde, comme présentée ci-dessous.

- Des distributions de phase spécifiques peuvent être recherchées. Quelques exemples de distribution de phase de fronts d'ondes optiques intéressants
- 20 sont données ci-dessous :

$$\varphi(r) = (-2\pi / (\lambda * a)) \log (1 + a * (r^2 - r_1^2) / d_1)$$

avec

$$a = (d_2 - d_1) / (R^2 - r_1^2) \quad (12)$$

$$\varphi(r) = (r / b * R)^p \quad (13)$$

- 25 r_1 est le rayon considéré de la surface optique, d_1 et d_2 sont les longueurs focales avant et arrière.

L'axicon linéaire crée la distribution de phase suivante:

$$\varphi(r) = a * r \quad (14)$$

La distribution de phase φ requise pour créer la profondeur de focalisation PDF, peut être obtenue pliées ou déballée ("wrap / unwrap") pour fournir une surface diffractive ou réfractive-asphérique, parfois complexe.

Les structures de distribution de phase DPE peuvent être réalisées, soit par
 5 des structures diffractives, soit par une surface asphérique équivalente, éventuellement approximative. Le choix de la surface, diffractive ou asphérique, est lié aux coûts de production et à d'autres paramètres tels que les aberrations chromatiques, importantes avec les surfaces diffractives. Celles-ci peuvent être corrigées ou minimisées.

10 Créer un faisceau avec un élément diffractif peut introduire des aberrations chromatiques et les tolérances de production peuvent être critiques sur des paramètres tels que les distributions d'intensité. Le fait d'utiliser une surface asphérique peut alors être judicieux.

La forme de la structure diffractive DPE peut être déterminée par diverses
 15 méthodes, par exemple par un calcul inverse en définissant le domaine de longueurs focales (ou de puissances) recherchées et en calculant ensuite la distribution de phase requise.

Un exemple de lentille hybride résultante est présenté sur la figure 2.

20 Considérons un front d'onde incident, provenant par exemple de l'infini pour simplifier.

Le champ dans le plan d'entrée, $Z=0$ est le suivant :

$$U_1(r_1) = \rho_1(r_1) \exp[i\Phi_1(r_1)] \quad (15)$$

A la sortie sur le plan Z_a , nous obtenons pour la fonction d'onde:

$$U_2(r_{2a}, z_a) = \rho_2(r_{2a}, z_a) \exp[i\Phi_2(r_{2a}, z_a)] \quad (16)$$

25 Avec l'approximation paraxiale d'un système avec symétrie de rotation, la fonction d'onde à la sortie est liée à celle à l'entrée par une transformée linéaire :

$$U_2(r_{2\alpha}, z_\alpha) = \int G(r_{2\alpha}, r_1, z_\alpha) U_1(r_1) dr_1 \quad (17)$$

où $G(r_{2\alpha}, r_1, Z_\alpha)$ est la fonction de transformation.

Dans l'approximation paraxiale, utilisée par la suite, nous obtenons l'intégrale de Fresnel suivante :

$$G(r_{2\alpha}, r_1, z_\alpha) = \frac{2\pi}{i\lambda z_\alpha} \exp(i2\pi z_\alpha/\lambda) \times \exp[i\pi(r_{2\alpha}^2 + r_1^2)/\lambda z_\alpha] \times J_0\left(\frac{2\pi r_{2\alpha} r_1}{\lambda z_\alpha}\right) r_1 \quad (18)$$

Z est la coordonnée axiale sur l'axe optique ; r_1 et $r_{2\alpha}$ sont les coordonnées radiales à l'entrée et à la sortie sur le plan α échantillonné.

Nous avons respectivement pour la résolution et pour la profondeur de focalisation PDF :

$$\rho = (2\pi/\lambda)(NA)R$$

$$u = (2\pi/\lambda)(NA)^2 Z \quad (19)$$

λ est la longueur d'onde, par exemple à 550 nm; NA est l'ouverture numérique; R et Z sont les coordonnées radiales et axiales dans la région focale.

- 15 L'objectif du calcul de la structure diffractive DPE est de trouver les phases de cette structure DPE qui minimisent les différences entre la distribution effective du champ et celle recherchée, avec des pondérations choisies. La fonction erreur est:

$$E = \sum_{\alpha=1}^{N_s} W(\alpha) \left\{ \sum_{m=1}^{N_m} \left| \tilde{\rho}_{2m\alpha} - \left| \sum_{n=1}^{N_s} G_{mn}(z_\alpha) \rho_{1n} \exp(i\Phi_{1n}) \right| \right|^2 \right\} \quad (20)$$

- 20 où $\tilde{\rho}_{2m\alpha}$ est la distribution d'amplitude du plan α th échantillonné. Il peut être choisi à priori de façon arbitraire. $W(\alpha)$ est un facteur de pondération normalisé.

Diverses méthodes de calcul itératives, telles que les méthodes connues sous les noms de "gradient-conjugués", "Gerchberg-Saxton" ou "Adjacent

Sequence Iteration Method (ASIM)" peuvent être utilisées pour calculer des solutions pour que la phase Φ minimise l'erreur E .

Ces méthodes donnent généralement une convergence rapide. Il s'agit de méthodes de calcul numérique itératives du type :

$$5 \quad \Phi^{k+1} = \Phi^k + \tau d^k \quad (21)$$

Avec Φ pour la phase, τ pour le pas et d pour la direction de l'itération k^{th} . Une phase sera choisie pour démarrer le processus.

Les données de phase sont ciblées pour être continues (elles sont modulo 2π) et sont converties en données géométriques pour définir une surface diffractive par la relation suivante :

$$10 \quad t(r) = \frac{\lambda \Phi(r)}{2\pi(n-1)} \quad (22)$$

En pratique, nous utilisons plutôt la méthode des gradient-conjugués.

Nous utilisons ensuite un algorithme qui permet d'obtenir des coefficients définissant le profil d'une surface asphérique similaire à la structure diffractive DPE en assimilant la distribution de phase à un développement polynomial qui fournira les coefficients nécessaires à la définition d'une surface asphérique équivalente.

Les performances de la structure diffractive DPE et de la lentille hybride obtenue par la juxtaposition de cette structure diffractive et de l'élément correcteur optique de base peuvent alors être calculées et éventuellement être optimisées avec un programme de tracés de rayons tels que Zemax (ou autres). On obtient ainsi les paramètres suivants : fonction de transfert de modulation FTM; dimensions de l'image d'un point, "Point-Spread Fonction PSF", aberrations avec coefficients de Zernike ou de Seidel, etc. Chacune de ces surfaces asphériques peut être positive ou négative. L'élément correcteur optique peut avoir toutes sortes de formes. Des combinaisons telles que : convexe-concave, concave-convexe, convexe-convexe, concave-concave peuvent également être calculées et construites. La lentille hybride peut donc

être positive, négative ou avoir des formes complexes par exemple toriques. La figure 8 donne un exemple de l'intensité calculée par la méthode ci-dessus sur une fenêtre.

La structure de distribution de phase DPE peut être calculée dans l'œil avec
5 un œil modèle par exemple celui défini dans la norme ISO 11979-2 ou une fonction de transfert adéquate peut être définie.

La résolution de l'œil pseudo-phakic dépend de la définition de la surface asphérique pour obtenir une aberration sphérique négative qui compensera l'aberration sphérique positive de la cornée. Dans ce cas, le système œil-
10 lentille aura une très bonne résolution/fonction de transfert de modulation FTM, limitée par la rétine et les éléments oculaires, mais pas par la lentille hybride. A l'extérieur de l'œil la lentille hybride donne une résolution médiocre, qui est améliorée après implantation respectivement après combinaison avec le système visuel.

15 Les structures de distribution de phase DPE permettent d'obtenir les profondeurs de focalisation recherchées. Le faisceau lumineux, côté image sera un faisceau de lumière de section presque constante sur un segment. La longueur de ce faisceau de lumière dans chaque segment correspond à une profondeur de focalisation PDF et donc aussi à une profondeur de champ
20 PDC choisie. Ces choix permettent par exemple d'éviter le port de lunettes après implantation d'une lentille intraoculaire IOL, ou d'assurer que le patient pourra voir correctement sans aide de lunettes ou de lentilles de contact CL.

La segmentation des profondeurs de focalisation permet de créer une lentille bifocale ou trifocale ou plus et en général multizones et multifocales. Chaque
25 segment est contrôlable indépendamment sur sa profondeur de focalisation et sur son intensité. La structure diffractive/asphérique de la zone considérée permet de contrôler la profondeur recherchée sur le segment considéré.

Une structure diffractive DPE/surface asphérique peut être construite sur une zone de la lentille par exemple sur la partie centrale pour fournir une
30 profondeur de focalisation choisie des rayons lumineux de cette région (figure 5). La structure diffractive DPE / surface asphérique peut également être

construite sur la zone périphérique de la lentille et fournir une profondeur de focalisation choisie des rayons lumineux de cette région. Cette profondeur de focalisation peut être d'une fraction de dioptrie, de 1 D, ou plus. Ces choix déterminent les longueurs focales paraxiale f_p et marginale f_m qui peuvent
5 donc être obtenues comme suit :

$$f_p < f_m \quad \text{ou} \quad f_p > f_m$$

Les puissances paraxiales et marginales sont bien sûr dans un rapport inverse des longueurs focales.

La profondeur de focalisation pour la vision proche peut être augmentée de
10 façon importante. Celle de la vision lointaine peut être souvent conservée car elle est grande. Une telle combinaison permettra une profondeur de focalisation importante avec une seule fenêtre significative. Ceci est représenté par la figure 6b.

Les intensités dans les diverses zones ou fenêtres sont dépendantes des
15 surfaces des zones considérées et peuvent être choisies. Par exemple, l'intensité dans la zone de vision proche peut être augmentée au dépend de la vision lointaine. La collecte de lumière de la lentille dépend de son ouverture relative (longueur focale/diamètre effectif). En choisissant la dimension des différentes zones, la luminosité des segments est définie.
20 L'une pourra être augmentée au dépend des autres en fonction des besoins.

La zone centrale peut être utilisée pour fournir une profondeur de focalisation des images de l'espace proche ou de l'espace lointain ou inversement la zone périphérique peut être utilisée pour créer une profondeur de focalisation des images de l'espace proche ou de l'espace lointain. Toutes les combinaisons
25 sont possibles. Les diverses zones de la face considérée de la lentille peuvent aussi être créées glissantes, c'est-à-dire que partant du centre ou de la périphérie on peut créer des profondeurs de focalisation pour les régions de l'espace de plus en plus lointaines. Les diverses profondeurs de focalisation sont modulables pour obtenir des intensités variables par exemple 40 % pour
30 une image proche et 60 % pour une image lointaine ou l'inverse. Toute répartition des intensités est réalisable. De façon générale, la distribution

d'intensité entre les différentes zones sera contrôlée par les surfaces relatives de ces différentes zones. La profondeur de focalisation permettra de contrôler séparément les répartitions des intensités de chaque région focale. La largeur de chaque zone est donc choisie en fonction du problème considéré.

- 5 La figure 7 donne un exemple de profondeur de focalisation obtenue avec une structure diffractive de distribution de phase seule. Les abscisses sont en m et les intensités en ordonnées sont arbitraires. La figure 8 illustre les intensités correspondantes ainsi que la profondeur de focalisation d'une lentille calculée et réalisée avec la méthode présentée dans cette invention.
- 10 Comme dans le cas de la figure 7, dans la figure 8, les abscisses sont en m et les intensités en ordonnées sont arbitraires.

- A titre d'exemple, pour corriger la vue d'une personne âgée qui ne conduit pas ou plus, de véhicule, on pourra favoriser la vision proche au dépend de la vision lointaine avec par exemple 65 % de la lumière dans le segment proche,
- 15 ce qui donnera une bonne résolution / FTM dans ce segment de champ proche qui s'étend de 30 cm à 1 m environ. La vision intermédiaire et lointaine sera plus faible, mais encore appréciable.

- Pour corriger la presbytie d'une personne jeune on fournira une répartition de lumière de 50/50 % avec une profondeur de focalisation proche importante au
- 20 centre de la lentille et éventuellement pas de profondeur de focalisation pour la vision lointaine, ou même une puissance nulle à la périphérie puisque la vision presbyte est satisfaisante à distance intermédiaire et lointaine.

REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille ophtalmique destinée à corriger l'acuité visuelle d'un utilisateur, ce procédé comportant les étapes suivantes :

- détermination de la forme d'un élément correcteur optique de base en fonction d'au moins l'un des paramètres suivants :
 - puissance recherchée de la lentille ophtalmique;
 - résolution ou fonction de transfert de modulation FTM recherchée;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques (SA) de ladite lentille ophtalmique;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques (SA) de la cornée de l'utilisateur;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de ladite lentille ophtalmique;
 - étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de la cornée de l'utilisateur;
 - étendue recherchée de la correction d'aberrations d'ordre supérieur (HOA);
- détermination du profil d'une structure diffractive de distribution de phase (DPE), cette détermination comportant les étapes suivantes :
 - définition d'une profondeur de focalisation (PDF) recherchée de ladite lentille ophtalmique;
 - calcul de la distribution de phase à partir de la profondeur de focalisation recherchée;
 - recherche des phases qui minimisent les différences entre la distribution effective de phase et la distribution de phase recherchée;
 - conversion des données de phase en données géométriques de façon à définir le profil de la structure diffractive de distribution de phase;
- juxtaposition de la structure diffractive et de l'élément correcteur optique de base.

2. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'étape de calcul de la distribution de phase comporte une étape de choix d'une distribution de phase connue et une étape de calcul itératif pour obtenir ladite profondeur de focalisation recherchée.
3. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'étape de conversion des données de phase en données géométriques comporte une étape d'approximation au moyen d'un polynôme.
4. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on remplace la structure diffractive de distribution de phase (DPE) par un élément réfractif asphérique générant une distribution de phase similaire à celle de ladite structure diffractive.
5. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on détermine la forme dudit élément correcteur optique de base pour au moins deux zones distinctes de la lentille et en ce que l'on détermine le profil dudit élément diffractif (DPE) pour au moins une zone de la lentille.
6. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 5, dans lequel on détermine la forme dudit élément correcteur optique de base pour au moins deux zones distinctes de la lentille, dans lequel on détermine le profil de ladite structure diffractive de distribution de phase (DPE) pour lesdites au moins deux zones distinctes de la lentille, caractérisé en ce que lesdites zones distinctes de la lentille ont une profondeur de focalisation différentes.
7. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 6, dans lequel lesdites zones distinctes de la lentille ont une fonction de transfert de modulation similaire.

8. Procédé de détermination de la configuration d'une lentille selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on choisit une profondeur de focalisation (PDF) accroissant la vision proche de l'utilisateur.

9. Lentille ophtalmique destinée à corriger l'acuité visuelle d'un utilisateur, caractérisée en ce qu'elle comprend un élément correcteur optique de base (10) auquel est juxtaposé une structure diffractive de distribution de phase (DPE).

10. Lentille ophtalmique selon la revendication 9, caractérisée en ce que ledit élément correcteur optique de base comporte au moins deux zones distinctes et en ce que ladite structure diffractive de distribution de phase est formée d'au moins une zone.

11. Lentille ophtalmique selon la revendication 9 ou 10, caractérisée en ce que ledit élément correcteur optique a une forme dépendant d'au moins l'un des paramètres suivants :

- la puissance recherchée de la lentille ophtalmique;
- la résolution ou fonction de transfert de modulation FTM recherchée;
- l'étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques (SA) de ladite lentille ophtalmique;
- l'étendue recherchée de la correction des aberrations sphériques (SA) de la cornée de l'utilisateur;
- l'étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de ladite lentille ophtalmique;
- l'étendue recherchée de la correction des aberrations chromatiques de la cornée de l'utilisateur;
- l'étendue recherchée de la correction d'aberrations d'ordre supérieur (HOA);

12. Lentille ophtalmique selon la revendication 9 ou 10, caractérisée en ce que la structure diffractive de distribution de phase (DPE) a un profil dépendant :

- de la définition d'une profondeur de focalisation (PDF) recherchée de ladite lentille ophtalmique; et
- du calcul de la distribution de phase à partir de la profondeur de focalisation recherchée.

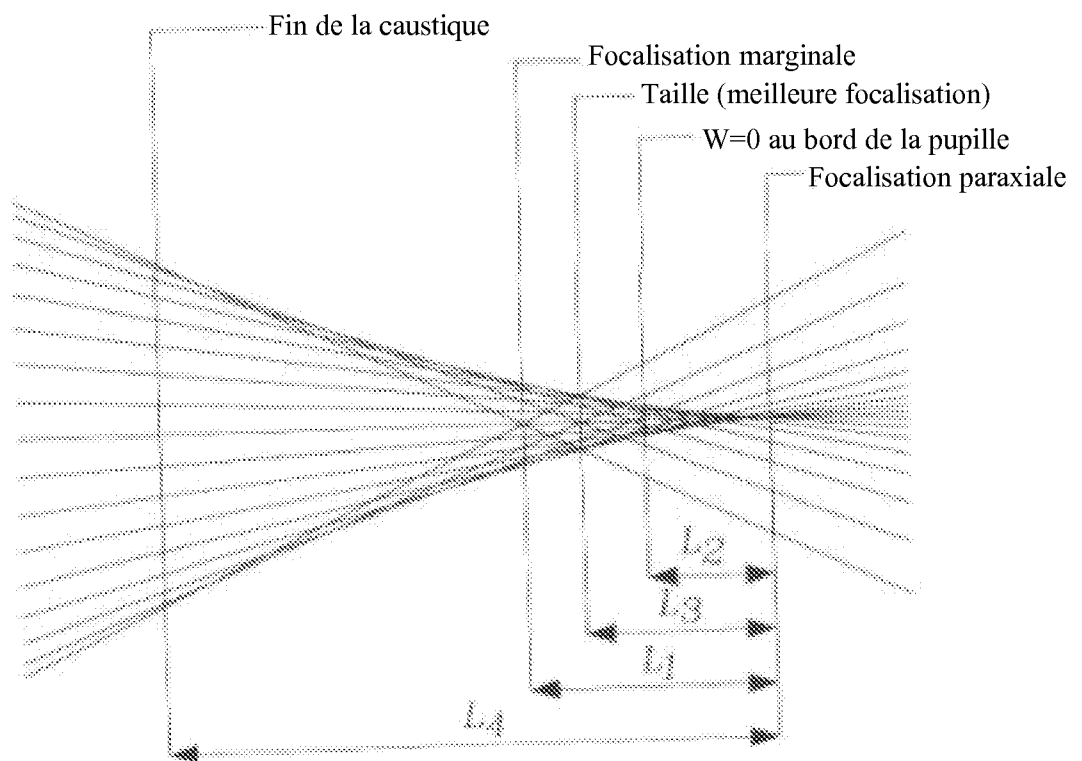
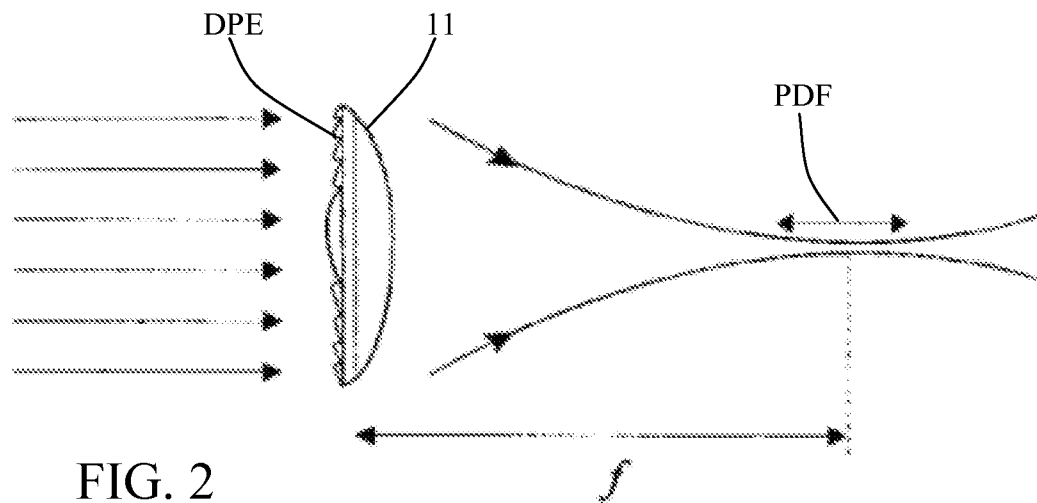
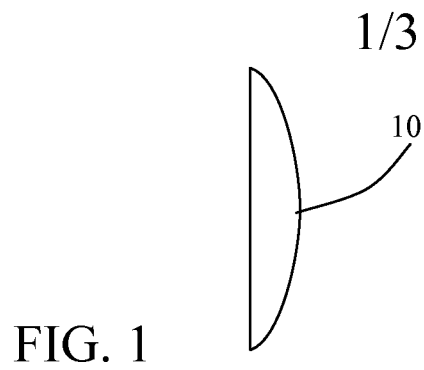
13. Lentille ophtalmique selon la revendication 12, caractérisée en ce que la structure diffractive de distribution de phase (DPE) a un profil dépendant de la minimisation des différences entre la distribution effective de champ et la distribution de champ recherchée.

14. Lentille ophtalmique selon la revendication 9, comportant une face antérieure et une face postérieure, caractérisée en ce que la face postérieure de ladite lentille comporte ladite structure diffractive de distribution de phase (DPE).

15. Lentille ophtalmique selon la revendication 9, comportant une face antérieure et une face postérieure, caractérisée en ce que la face antérieure de ladite lentille comporte ladite structure diffractive de distribution de phase (DPE).

16. Lentille ophtalmique selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle est formée d'au moins l'un des matériaux suivants : verre, polymère, matière hydrophobe, hydrogel.

17. Procédé de fabrication d'une lentille ophtalmique dont la configuration est déterminée selon le procédé de l'une quelconque des revendications 1 à 8.



2/3

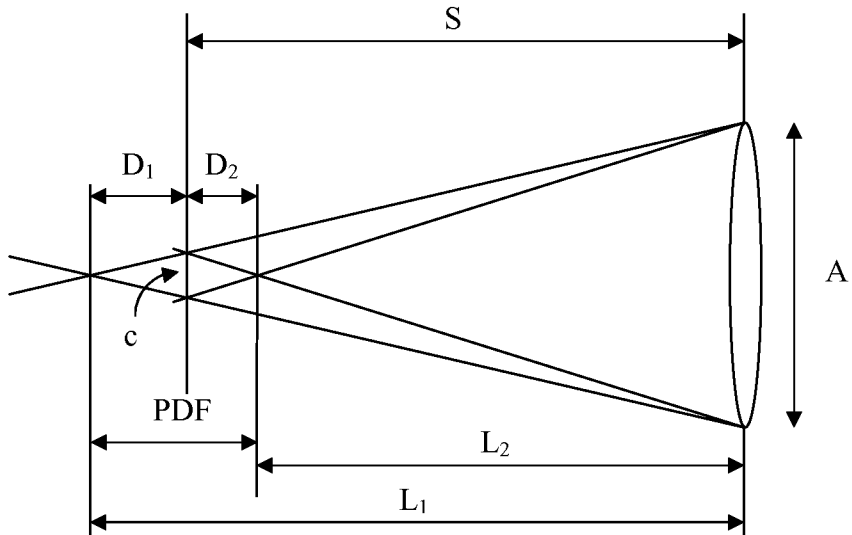


FIG. 4

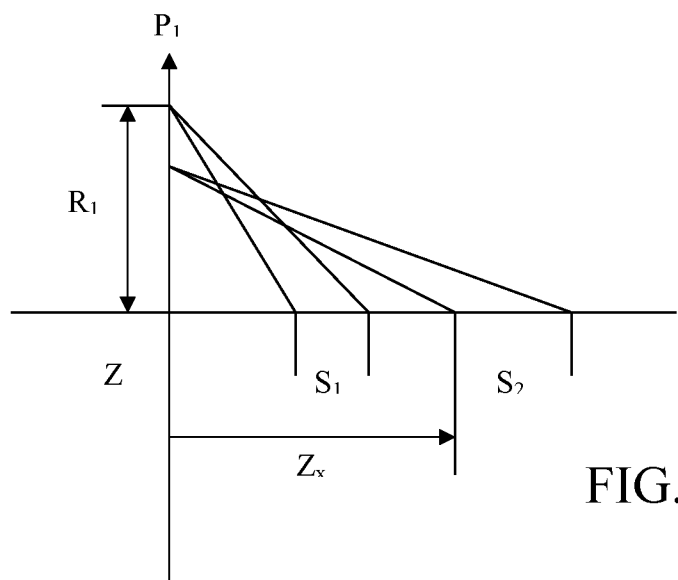


FIG. 5

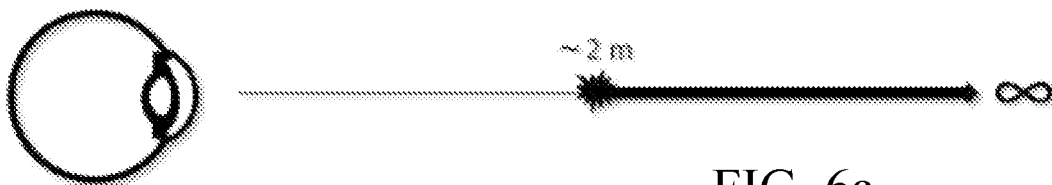


FIG. 6a



FIG. 6b

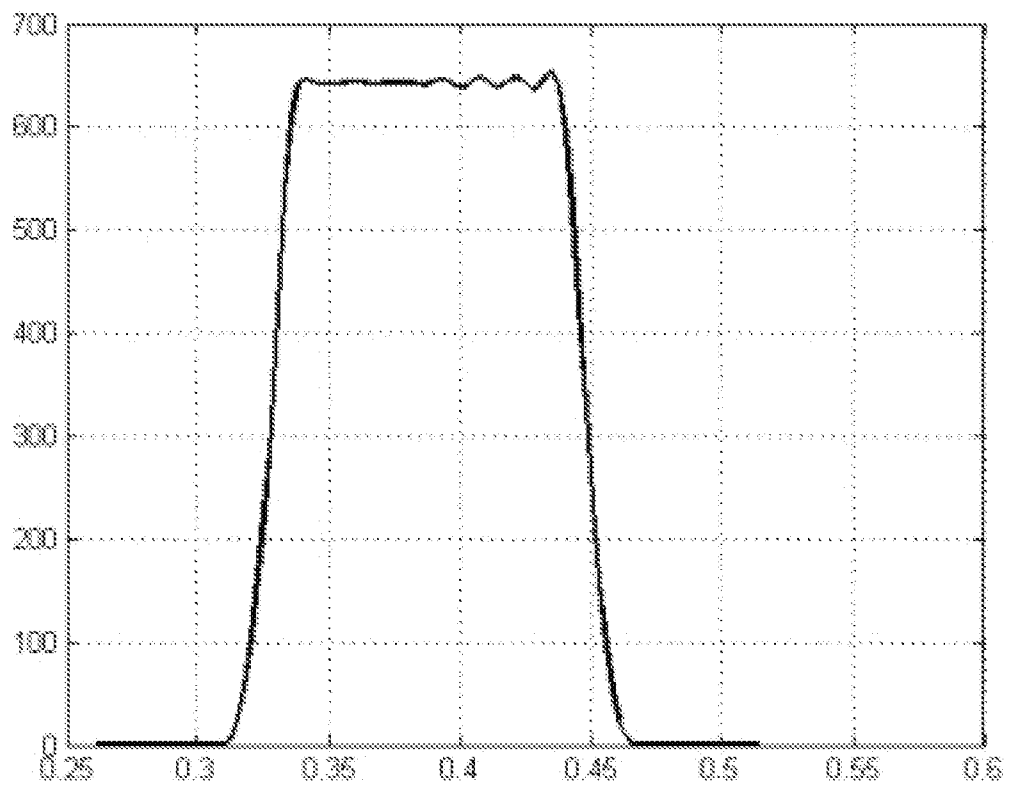


FIG. 7

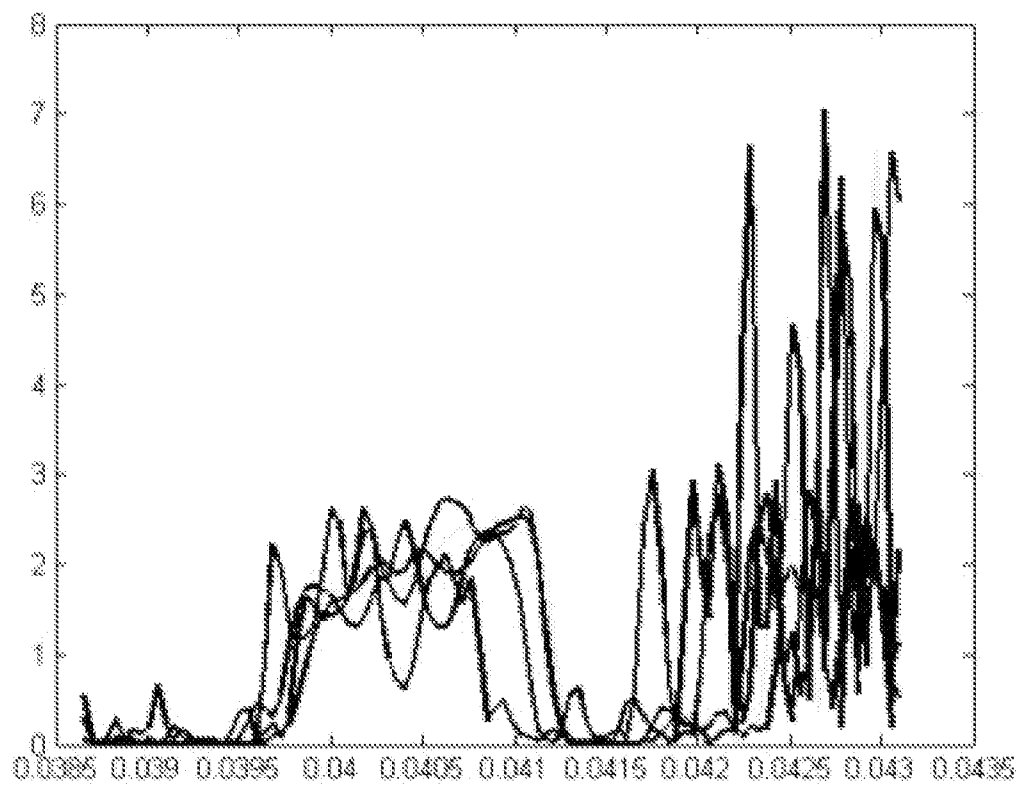


FIG. 8