



(11) **EP 3 336 594 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:  
**20.06.2018 Bulletin 2018/25**

(51) Int Cl.:  
**G02B 17/06 (2006.01) G02B 23/06 (2006.01)**  
**G02B 26/06 (2006.01) G02B 27/00 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **17205097.3**

(22) Date de dépôt: **04.12.2017**

(84) Etats contractants désignés:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Etats d'extension désignés:  
**BA ME**  
Etats de validation désignés:  
**MA MD TN**

(71) Demandeur: **Thales**  
**92400 Courbevoie (FR)**

(72) Inventeur: **TETAZ, Nicolas**  
**06156 CANNES (FR)**

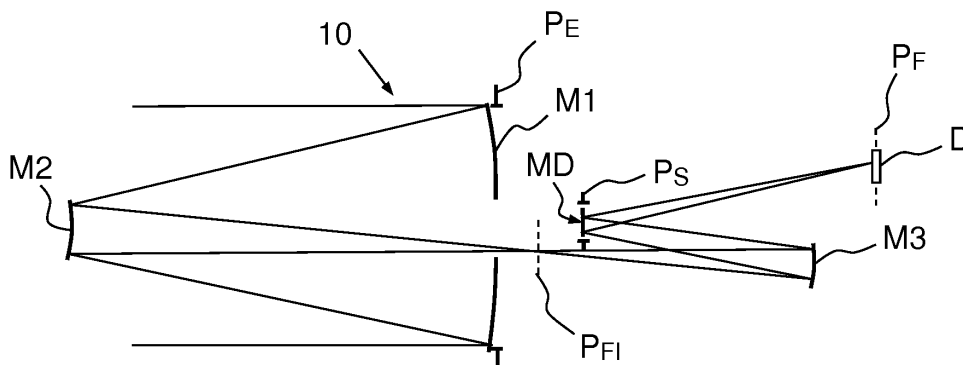
(74) Mandataire: **Joubert, Cécile et al**  
**Marks & Clerk France**  
**Conseils en Propriete Industrielle**  
**Immeuble "Visium"**  
**22, avenue Aristide Briand**  
**94117 Arcueil Cedex (FR)**

(30) Priorité: **13.12.2016 FR 1601770**  
**09.03.2017 FR 1700254**

(54) **TELESCOPE COMPACT PRESENTANT UNE PLURALITE DE FOCALES COMPENSE PAR DES COMPOSANTS OPTIQUES ASPHERIQUES**

(57) L'invention concerne un télescope anastigmat à trois miroirs asphériques comprenant:  
- des moyens (5) de déplacement linéaire du troisième miroir (M3) sur l'axe optique du télescope (O) de manière à faire varier la focale du télescope selon une pluralité de focales ( $f_i$ ) entre au moins une focale minimale ( $f_{min}$ ) et une focale maximale ( $f_{max}$ ),  
- une pluralité de composants optiques asphériques (CA<sub>i</sub>) associés respectivement à la pluralité de focales ( $f_i$ ),  
-le troisième miroir présentant une nouvelle conicité ( $c'3$ ) déterminée à partir d'une conicité initiale ( $c3$ ),

la nouvelle conicité ( $c'3$ ) étant déterminée de sorte que le télescope présente, sans la présence desdits composants asphériques et pour les focales minimale et maximale, des aberrations compensables par lesdits composants asphériques,  
- la position (PCA<sub>i</sub>) et la forme de la surface (S<sub>i</sub>) de chaque composant asphérique étant déterminée de manière à corriger lesdites aberrations compensables dudit télescope pour la focal associée ( $f_i$ ) et à optimiser la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon un critère prédéterminé.



**FIG.1**

**EP 3 336 594 A1**

**Description**

**DOMAINE DE L'INVENTION**

5 **[0001]** Le domaine de l'invention est celui des télescopes, notamment celui des télescopes d'observations embarqués dans des satellites. Plus précisément, le domaine de l'invention concerne les systèmes catoptriques à grandes focales.

**ETAT DE LA TECHNIQUE**

10 **[0002]** Les télescopes spatiaux actuels sont à focale unique. Un type de télescope connu est le télescope de type Korsh. Le télescope de type Korsch, également dénommé TMA (acronyme de l'expression anglo-saxonne « Three Mirrors Anastigmat ») est un télescope anastigmat à trois miroirs asphériques (soit de type Concave-Convexe-Concave) qui comprend au moins un premier miroir M1 concave, un second miroir M2 convexe et un troisième miroir M3 concave. Les trois miroirs étant asphériques et de forme classique pour un tel télescope. Les premier, deuxième et troisième miroirs M1, M2 et M3 sont asphériques, de formes fixes, chaque miroir étant caractérisé par au moins deux paramètres, un rayon de courbure R et une conique c.

**[0003]** Ce système optique présente un axe optique O bien connu de l'homme de l'art, défini par le rayon passant par le centre de la pupille d'entrée P<sub>E</sub> et perpendiculaire à cette pupille.

20 **[0004]** Les trois miroirs M1, M2 et M3 sont agencés de sorte que le premier miroir et le second miroir forment d'un objet à l'infini une image intermédiaire disposée dans un plan focal intermédiaire P<sub>F1</sub> situé entre le second miroir et le troisième miroir, le troisième miroir formant de cette image intermédiaire une image finale dans le plan focal P<sub>F</sub> du télescope dans lequel est placé un détecteur D. Par application des équations de Korsch bien connues de l'homme de l'art on calcule aisément les positions et paramètres respectifs des trois miroirs. La solution théorique est de très bonne qualité, ce qui fait tout l'intérêt de ce type de télescope.

25 **[0005]** La qualité d'un système optique s'évalue par comparaison entre l'onde lumineuse idéale limitée par la diffraction et l'onde lumineuse réelle à la sortie du système optique tenant compte des défauts du système optique traversé. L'analyse de la différence entre onde théorique et onde réelle permet d'identifier les types de défauts ou aberrations du système optique. Il est connu que les principales aberrations géométriques sont : l'aberration sphérique, l'astigmatisme, la coma, la courbure de champ (defocus dans le champ) et la distorsion.

30 **[0006]** Des polynômes, et plus particulièrement les polynômes de Zernike, sont classiquement utilisés pour qualifier plus facilement les différents types d'aberrations d'un front d'onde (soit une surface) à la sortie d'un système optique.

**[0007]** Les surfaces de Zernike sont les plus couramment utilisées. Une surface de Zernike est définie en coordonnées polaires dans un espace (ρ, θ, z), et si z(ρ, θ) représente la coordonnée z d'un point de cette surface, on a la relation :

35

$$z(\rho, \theta) = \frac{c(\rho^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum C_j Z_j \quad (1)$$

40 **[0008]** Z<sub>j</sub> étant un polynôme de Zernike d'ordre j et C<sub>j</sub> étant la constante associée à ce polynôme, j étant un indice variant respectivement entre 0 et un nombre entier, k étant la constante de conicité et c la courbure de la surface.

**[0009]** Une surface quelconque décomposée suivant des polynômes est dénommée surface φ-polynomiale. Cette surface est donc caractérisée par des valeurs des coefficients de ces polynômes.

45 L'intérêt de la décomposition de front d'onde en polynômes de Zernicke orthogonaux est que chaque polynôme de la base considérée correspond à une catégorie d'aberration géométrique différente. Il est alors possible de connaître la nature des aberrations présentes dans un front d'onde.

**[0010]** La table I ci-dessous illustre les différents polynômes « Fringe Zernike » en fonction que de leur ordre (ici 1 à 16), ainsi que le type l'aberration correspondant.

50

Table I

| Ordre | Polynôme              | Aberration (s)   |
|-------|-----------------------|------------------|
| 1     | 1                     | Piston           |
| 2     | ρ Cos[θ]              | Inclinaison en x |
| 3     | ρ Sin[θ]              | Inclinaison en y |
| 4     | -1 + 2 ρ <sup>2</sup> | Focalisation     |

55

EP 3 336 594 A1

(suite)

5

10

15

20

| Ordre | Polynôme  | Aberration (s)             |
|-------|---|----------------------------|
| 5     | $\rho^2 \cos[2 \theta]$                         | Astigmatisme à 0°          |
| 6     | $\rho^2 \sin[2 \theta]$                         | Astigmatisme à 45°         |
| 7     | $\rho (-2 + 3 \rho^2) \cos[\theta]$             | Coma en x                  |
| 8     | $\rho (-2 + 3 \rho^2) \sin[\theta]$             | Coma en y                  |
| 9     | $1 - 6 \rho^2 + 6 \rho^4$                       | Sphéricité et focalisation |
| 10    | $\rho^3 \cos[3 \theta]$                         | Tri feuille                |
| 11    | $\rho^3 \sin[3 \theta]$                         | Tri feuille                |
| 12    | $\rho^2 (-3 + 4 \rho^2) \cos[2 \theta]$         | Astigmatisme ordre 2       |
| 13    | $\rho^2 (-3 + 4 \rho^2) \sin[2 \theta]$         | Astigmatisme ordre 2       |
| 14    | $\rho (3 - 12 \rho^2 + 10 \rho^4) \cos[\theta]$ | Coma en x ordre 2          |
| 15    | $\rho (3 - 12 \rho^2 + 10 \rho^4) \sin[\theta]$ | Coma en y ordre 2          |
| 16    | $-1 + 12 \rho^2 - 30 \rho^4 + 20 \rho^6$        | Sphéricité ordre 2         |

**[0011]** En adoptant la définition des polynômes de Fringe Zernike, les différents types d'aberration correspondent à :

- le focus correspond au terme Z4,
- l'astigmatisme correspond aux termes Z5 et Z6,
- la coma aux termes Z7 et Z8 et
- l'aberration sphérique de premier ordre à Z9.
- l'aberration sphérique de deuxième ordre à Z16

**[0012]** Classiquement il est connu d'améliorer la qualité de l'image des instruments optiques par adjonction d'un miroir déformable MD en pupille de sortie, communément dénommé à surface « free form » ou de forme libre, tel qu'illustré figure 1 pour un TMA monofocale.

Mais la solution théorique du télescope à 3 miroirs Korsch étant de très bonne qualité, celui-ci n'intervient pas dans la combinaison optique du télescope et est utilisé uniquement pour compenser les défauts dû à l'imperfection de réalisation du système réel par rapport à la solution théorique (turbulences atmosphériques, défauts du miroir M1). Ainsi, on utilise généralement un miroir déformable en pupille de sortie pour corriger les aberrations constantes dans le champ. Lorsqu'il est positionné en pupille d'un instrument, la déformation du miroir déformable par ajout d'un polynôme de Zernike introduit des aberrations constantes dans le champ. Par exemple, si l'on introduit une valeur non nulle pour le polynôme Z5 sur le miroir déformable, chaque point du champ sera impacté par de l'astigmatisme.

Dans le cas général la surface S à donner au miroir déformable pour permettre la correction des défauts est dénommée surface « free form », signifiant qu'elle n'a pas de symétrie de révolution (voir formule générale (1) et table I).

La formulation (1) est une base mathématique de polynômes orthogonaux permettant de définir une surface à symétrie de révolution ou non.

Une surface asphérique est une surface à symétrie de révolution qui ne peut être décrite par un unique rayon de courbure (comme une sphère) car la courbure locale change le long de la surface.

La définition classique d'une surface asphérique définie dans un espace (p, z) est :

$$Z = \frac{\rho^2}{R} + A \cdot \rho^4 + B \cdot \rho^6 + C \cdot \rho^8 + \dots \quad (2)$$

$$1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \frac{\rho^2}{R^2}}$$

**[0013]** R est le rayon du courbure, k la constante de conicité, les termes A, B, C les coefficients d'asphéricité du 4<sup>e</sup>,

## EP 3 336 594 A1

6<sup>e</sup> et 8<sup>e</sup> ordre.

**[0014]** En comparant avec la formule (1) et le tableau I avec la formule (2), on remarque qu'une surface asphérique décomposée sous la forme de polynômes de Zernike présente du Z4, du Z9 et du Z16 (polynômes de Fringe Zernicke fonction de  $\rho$  uniquement, c'est-à-dire uniquement à symétrie de révolution) et pas de Z5, Z6, Z7, Z8, Z10 à Z15 (coefficients fonction de  $\theta$ ), ces derniers coefficients étant donc nuls pour ce type de surface.

**[0015]** Lorsqu'on utilise un miroir MD déformable et pilotable pour compenser les aberrations d'un système, on peut obtenir une surface quelconque souhaitée en pilotant le miroir, la surface souhaitée du MD étant calculée de manière à compenser les défauts du système réel. On décompose la surface souhaitée à l'aide des polynômes, et on génère cette surface en appliquant de manière maîtrisée les bons coefficients via le système de pilotage du miroir. On peut ensuite faire évoluer la forme de la surface en modifiant les valeurs des coefficients.

Il est ainsi possible en pilotant directement la valeur des coefficients  $C_j$  d'introduire dans le design les aberrations voulues.

**[0016]** Par ailleurs il peut être intéressant de pouvoir changer la focale en vol. En effet, changer la focale en vol permet de changer le champ de vue et/ou la résolution de l'image avec un seul et même instrument.

**[0017]** Il existe actuellement deux familles de télescopes :

- les télescopes bifocaux qui permettent d'effectuer une prise d'image à haute résolution mais sur un champ étroit ou une prise d'image sur un champ étendu mais à plus faible résolution, et
- les télescopes à zoom réflectif continu permettant un changement de focale en vol.

**[0018]** Comme exemples de télescopes bifocaux, on peut citer ceux qui reposent sur une séparation d'une voie commune en deux voies de focales différentes. La séparation peut se faire de manière spectrale : un même champ est séparé par une lame dichroïque si le domaine de longueur d'onde permet cette séparation spectrale (ex : visible et infrarouge). Elle peut se faire en séparant le flux reçu en flux réfléchi et flux transmis, au moyen d'une densité optique s'il s'agit d'un domaine de longueur d'onde non disjoint (ex : 50% du flux est réfléchi, 50% transmis).

Avantages de ces solutions bifocales à séparation de voie commune :

- Fonction bifocale en simultanée,
- Observation d'un champ de vue commun.

Inconvénients de ces solutions :

- Ajout d'éléments optiques (lame dichroïque/densité + miroirs/lentilles spécifiques à chacune des voies),
- Détecteurs spécifiques à chaque voie,
- Si le domaine spectral des voies n'est pas disjoint, cela nécessite de perdre une partie importante du flux,
- Seulement bifocal.

**[0019]** On peut aussi citer les télescopes à séparation dans le champ de vue : les deux voies n'ont alors pas le même champ de vue.

Avantage de ces solutions bifocales à séparation dans le champ de vue :

- fonction bifocale en simultanée.

Inconvénients de ces solutions :

- Ajout d'éléments optiques : miroirs/lentilles spécifiques à chacune des voies,
- Détecteurs spécifiques à chaque voie,
- Observation d'un champ de vue différent,
- Seulement bifocal.

**[0020]** Une autre solution bifocale décrite dans le brevet US 6084727 permet de changer la focale du télescope en insérant des éléments réflectifs sur le trajet optique.

Avantages de cette solution à insertion d'éléments réflectifs :

- Un seul détecteur,
- Observation d'un champ commun.

Inconvénients de cette solution :

## EP 3 336 594 A1

- Ajout d'éléments optiques : miroirs spécifiques à l'une des voies,
- Seulement bifocal,
- Fonction bifocale non simultanée.

5 **[0021]** Comme exemple de télescope à zoom réflectif continu, on peut citer le télescope décrit dans le brevet US 6333811 ; il est basé sur un télescope de type Cassegrain avec reprise d'image dont le grandissement est variable ce qui permet d'obtenir un zoom continu.

Avantages de cette solution :

- 10
- Un seul détecteur,
  - Zoom continu,
  - Observation d'un champ commun,
  - Pas de modification de la forme des miroirs.

15 Inconvénients de cette solution :

- Le nombre de miroirs : 7 miroirs dont 3 asphériques, 2 « freeform » et 1 miroir plan de renvoi,
- Déplacement de deux miroirs freeforms dont le positionnement peut être sensible,
- Télescope de type Cassegrain, donc à champ limité.

20 **[0022]** Il existe par ailleurs des zooms utilisant des miroirs à rayons de courbure déformables, dont un exemple est illustré dans la publication de Kristof Seidl et al. : « Wide field-of-view all-reflective objectives designed for multispectral image acquisition in photogrammetric applications ».

Avantages de cette solution :

- 25
- Un seul détecteur,
  - Zoom continu,
  - Observation d'un champ commun,
  - Pas de déplacement des miroirs.

30 Inconvénients de cette solution :

- Trop encombrant pour de longues focales, par exemple supérieures à 10m,
  - Les miroirs déformables ne fonctionnent que pour des miroirs sphériques à petits diamètres de l'ordre de quelques
- 35 cm : ils ne sont donc pas compatibles des tailles de pupilles des télescopes spatiaux typiquement supérieures à 0.5m.

**[0023]** Ainsi il n'existe actuellement aucun télescope de type TMA multifocales présentant une très grande qualité optique pour toute les focales et qui n'utilise pas de composant onéreux tel un miroir déformable.

40 **[0024]** Un but de la présente invention est de palier aux inconvénients précités en proposant un télescope à trois miroirs asphériques multifocal, mono détecteur et compact, fonctionnant pour des diamètres de pupille importants, avec un champ de vue plus important que celui d'un Cassegrain ( $>1^\circ$ ), présentant une très grande qualité d'image pour toutes les focales en étant compensé avec des composants « classiques » asphériques ne présentant pas de fonction déformable « free-form ».

### 45 DESCRIPTION DE L'INVENTION

**[0025]** La présente invention a pour objet un télescope anastigmat à trois miroirs asphériques comprenant au moins un premier miroir concave, un second miroir convexe un troisième miroir concave et un premier détecteur, et présentant un axe optique,

- 50
- les trois miroirs étant agencés de sorte que le premier miroir et le second miroir forment d'un objet à l'infini une image intermédiaire située entre le second miroir et le troisième miroir, le troisième miroir formant de cette image intermédiaire une image finale dans un premier plan focal du télescope dans lequel est placé le premier détecteur, les premier, deuxième et troisième miroirs étant de forme fixe caractérisée par au moins un rayon de courbure et
- 55 une conicité,

le télescope comprenant en outre :

## EP 3 336 594 A1

- des moyens de déplacement linéaire du troisième miroir sur l'axe optique du télescope de manière à faire varier la focale du télescope selon une pluralité de focales entre au moins une focale minimale et une focale maximale,

le télescope à la focale minimale présentant une première pupille de sortie à une première position, et le télescope à la focale maximale présentant une deuxième pupille de sortie à une deuxième position,

- une pluralité de composants optiques asphériques associés respectivement à la pluralité de focales, disposés respectivement à une pluralité de positions situées entre la première et la deuxième position, chaque composant asphérique étant disposé sur un chemin optique d'un faisceau correspondant à ladite focale associée lorsque le télescope fonctionne à ladite focale associée, et en dehors du chemin optique associé à une autre focale lorsque le télescope fonctionne à ladite autre focale,
- des moyens de variation du chemin optique disposés entre les composants asphériques et le premier détecteur, et configurés de sorte que le détecteur reste positionné dans le premier plan focal du télescope,
- le troisième miroir présentant une nouvelle conicité déterminée à partir d'une conicité initiale,

la conicité initiale étant déterminée à partir des équation de Korsch,

la nouvelle conicité étant déterminée de sorte que le télescope présente, sans la présence desdits composants asphériques et pour les focales minimale et maximale, des aberrations compensables par lesdits composants asphériques,

- la position et la forme de la surface de chaque composant asphérique étant déterminée de manière à corriger lesdites aberrations compensables dudit télescope pour la focal associée et à optimiser la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon un critère prédéterminé.

**[0026]** Préférentiellement la forme de la surface de chaque composant asphérique comprend de l'aberration sphérique de premier ordre et du focus. Préférentiellement la forme de la surface de chaque composant asphérique comprend en outre une aberration sphérique de deuxième ordre pour améliorer encore la qualité d'image selon ledit critère.

Avantageusement la nouvelle conicité s'écarte de la conicité initiale de plus de 5% et de moins de 30 %

Selon un mode de réalisation une nouvelle conicité du premier miroir et une nouvelle conicité du deuxième miroir sont déterminées à partir respectivement d'une conicité initiale du premier miroir et d'une conicité initiale du deuxième miroir, les conicités initiales étant déterminées à partir des équation de Korsch,

**[0027]** les nouvelles conicités étant déterminées de manière à améliorer encore la qualité d'image dudit télescope selon ledit critère.

**[0028]** Préférentiellement chaque surface d'un composant asphérique est définie à partir des coefficients des polynômes de Fringe Zernike Z4, Z9 et le cas échéant Z16.

**[0029]** Selon un mode de réalisation les aberrations compensables sont l'astigmatisme et la coma. Selon un mode de réalisation on définit :

- un astigmatisme positif comme un astigmatisme pour lequel un foyer tangentiel se situe avant un foyer sagittal,
- un astigmatisme négatif comme un astigmatisme pour lequel un foyer sagittal se situe avant un foyer tangentiel,
- une coma positive comme une coma pour laquelle une forme de la tache image d'un point source est une « comète » dont la queue s'éloigne de l'axe optique et,
- une coma négative comme une coma pour laquelle une forme de la tache image d'un point source est une « comète » dont la queue est dirigée vers l'axe optique,

les aberrations compensables étant de l'astigmatisme positif et de la coma positive pour la focale maximale, de l'astigmatisme positif et de la coma négative pour la focale minimale.

**[0030]** Préférentiellement on définit la nouvelle conicité du troisième miroir est déterminée de manière à modifier le signe de l'astigmatisme du télescope pour la focale minimale, sans la présence de composant asphérique. Préférentiellement le critère prédéterminé consiste à minimiser une erreur de forme d'onde.

Préférentiellement lesdites positions des composants asphériques sont séparées les une des autres de 50 mm au maximum.

**[0031]** Selon un mode de réalisation au moins un composant asphérique est escamotable de manière à être disposé sur le chemin optique du faisceau correspondant à la focale associée lorsque le télescope fonctionne à ladite focal associée, et en dehors des chemins optiques associés aux autres focales lorsque le télescope fonctionne à une de ces autres focales.

Avantageusement les composants optiques asphériques sont des miroirs escamotables.

Avantageusement les miroirs escamotables sont montés sur un support unique, les positions des miroirs escamotables étant alors sensiblement identiques.

**[0032]** Selon un mode de réalisation les composants asphériques sont des miroirs escamotables montés sur un support unique, le support comprenant en outre une position pour laquelle aucun miroir escamotable ne figure sur le chemin optique du faisceau incident sur ledit support, le faisceau passant alors au travers du support selon un chemin optique secondaire, le télescope comprenant en outre :

- un dispositif optique disposé sur le chemin optique secondaire, configuré pour générer un deuxième plan focal du télescope correspondant à une focale choisie, ledit dispositif optique étant en outre configuré pour corriger lesdites aberrations compensables dudit télescope et pour optimiser la qualité d'image dans le deuxième plan focal du télescope selon ledit critère prédéterminé et,
- un deuxième détecteur disposé dans le deuxième plan focal du télescope, et sensible dans une deuxième bande spectrale différente d'une première bande spectrale de sensibilité du premier détecteur.

Avantageusement le dispositif optique est adapté pour fonctionner en transmission dans la deuxième bande spectrale, la première bande spectrale est comprise dans le visible et la deuxième bande spectrale est comprise dans l'infrarouge, et la focale choisie présente une valeur inférieure à la focale minimale.

**[0033]** Selon un autre mode de réalisation au moins un composant asphérique est une lame fonctionnant en transmission.

**[0034]** Selon une variante le télescope selon l'invention comprend uniquement deux focales, la focale minimale et la focale maximale.

**[0035]** D'autres caractéristiques, buts et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre et en regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

La figure 1 déjà citée illustre un télescope de type Korsch monofocale présentant un miroir déformable disposé au niveau de la pupille de sortie du télescope.

La figure 2 illustre un télescope de type Korsch multifocal vu dans un plan YZ, la focale étant rendue variable par déglacement du troisième miroir sur l'axe optique. La figure 2a décrit le système optique pour la focale maximale et la figure 2b décrit le système optique pour la focale minimale.

La figure 3 illustre le télescope de la figure 2 vu dans le plan XZ, la figure 3a décrit le système optique pour la focale maximale et la figure 3b décrit le système optique pour la focale minimale.

La figure 4a décrit une première variante de moyen de variation du chemin optique entre le troisième miroir et le détecteur D.

La figure 4b illustre une deuxième variante de moyen de variation du chemin optique entre le troisième miroir et le détecteur D dans laquelle le détecteur D est fixe, les moyens de variation du chemin optique comprenant deux miroirs T1 et T2 en forme de toit, pour une position du miroir T2.

La figure 4c illustre la deuxième variante de moyen de variation du chemin optique entre le troisième miroir et le détecteur D dans laquelle le détecteur D est fixe, les moyens de variation du chemin optique comprenant deux miroirs T1 et T2 en forme de toit, pour une autre position du miroir T2.

La figure 4d illustre une troisième variante dans laquelle les moyens de variation du chemin optique entre le troisième miroir et le détecteur D comprennent des miroirs classiques fixes et au moins un miroir classique escamotable....

La figure 5 illustre les aberrations présentes dans le plan focal pour le télescope bifocal dont les miroirs asphériques M1, M2 et M3 ont les paramètres initiaux obtenus en résolvant les équations de Korsch. La figure 5a illustre ces aberrations lorsque le télescope fonctionne à la focal maximale, et la figure 5b illustre ces aberrations lorsque le télescope fonctionne à la focale minimale.

La figure 6 décrit la convention signe utilisée pour certaines catégories d'aberrations.

La figure 7 schématise un télescope de type Korsh selon l'invention.

La figure 8 illustre une première variante du télescope selon l'invention dans laquelle tous les composants asphériques CAi sont des miroirs asphériques escamotables.

La figure 9 illustre un exemple de télescope bifocal selon la première variante de l'invention.

La figure 9bis illustre un exemple de support pour les miroirs escamotables d'un télescope bifocal selon l'invention.

La figure 10 illustre une deuxième variante du télescope selon l'invention dans laquelle au moins un composant asphérique est une lame fonctionnant en transmission.

La figure 11 illustre, pour le système initial, les aberrations résultantes suite à l'introduction d'aberration sphérique  $Z9_{CA}$  sur un composant asphérique CA en fonction de sa position relative par rapport à la pupille de sortie effective, lorsque CA est disposé en aval de la pupille de sortie effective. La figure 11a correspond à  $Z9_{CA} < 0$  et la figure 8b à  $Z9_{CA} > 0$ .

La figure 12 illustre, pour le système initial, les aberrations résultantes suite à l'introduction d'aberration sphérique  $Z9_{CA}$  sur un composant asphérique CA en fonction de sa position relative par rapport à la pupille de sortie effective, lorsque CA est disposé en amont de la pupille de sortie effective. La figure 9a correspond à  $Z9_{CA} < 0$  et la figure 9b

à  $Z_{9CA} > 0$ .

La figure 13 décrit l'évolution de la valeur moyenne de l'astigmatisme du télescope en fonction de la valeur de conicité du M3.

La figure 14 illustre les différentes aberrations présentes dans le premier plan focal du télescope, avec M3 présentant une conicité  $c_3 = -0.52$ , la figure 14a pour la focale max et la figure 14b pour la focale min.

La figure 15 illustre l'évolution de la valeur quadratique moyenne de l'erreur de forme d'onde WFE RMS en fonction de la valeur de conicité  $u$  M3.

La figure 16 illustre les différentes aberrations dans le premier plan focal d'un télescope selon l'invention, le télescope présentant une nouvelle conicité  $c_3$  du miroir M3, et pour le miroir déformable, une position médiane  $P_m$  et des valeurs de  $Z_{9MD}$  et de  $Z_{4MD}$  ( $Z_{9MD/max}$  et  $Z_{9MD/min}$ ;  $Z_{4MD/max}$  et  $Z_{4MD/min}$ ) optimisées. La figure 16a illustre les différentes aberrations pour la focale max et la figure 16b pour la focale min.

La figure 17 décrit la variation du focus moyen  $\langle Z_4 \rangle$  du télescope à 3 miroirs sans composant asphérique en fonction de la valeur de la conique de M3.

La figure 18 illustre l'évolution des principales aberrations en fonction de la valeur de la conicité de M2, pour les focales min et max.

La figure 19 illustre l'évolution des principales aberrations en fonction de la valeur de la conicité de M1 pour les focales min et max.

La figure 20 illustre les différentes aberrations dans le premier plan focal d'un télescope selon l'invention, le télescope présentant de nouvelles conicités  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  respectivement des miroirs M1, M2 et M3, et pour les composants asphériques de type miroir, une position identique  $P_m$  et des valeurs de  $Z_{9MD}$ , de  $Z_{4MD}$  et de  $Z_{16MD}$  optimisées. La figure 20a illustre les différentes aberrations pour la focale max et la figure 20b pour la focale min.

La figure 21 illustre un mode de réalisation multivoie du télescope selon l'invention.

La figure 22 illustre un support de miroirs asphérique adapté au mode de réalisation multivoie.

La figure 23 illustre le procédé de détermination de paramètres d'un télescope anastigmat selon l'invention

La figure 24 illustre l'évolution de la WFE moyennées sur les différentes focales, après chaque étape du procédé.

## DESCRIPTION DETAILLÉE DE L'INVENTION

**[0036]** Nous allons tout d'abord décrire un télescope de type Korsch rendu multifocale. Les figures 2 et 3 décrivent un télescope 20 de type Korsch à 3 miroirs multifocal, la focale étant rendue variable par déplacement du troisième miroir M3 sur l'axe optique du télescope O à l'aide de moyens 5 de déplacement linéaire. Le document US 4993818 décrit sommairement le principe d'un tel système. Un télescope de ce type est utilisable dans un environnement spatial, mais aussi au sol pour effectuer de l'observation ou de la surveillance.

**[0037]** Le déplacement du miroir M3 entre deux positions extrêmes  $P_{min}$  et  $P_{max}$  permet de réaliser une focale variable entre respectivement une focale minimale  $f_{min}$  et une focale maximale  $f_{max}$ . L'instrument comprend au moins deux focales  $f_{min}$  et  $f_{max}$  et est susceptible de fonctionner pour des focales intermédiaires, par déplacement du miroir M3.

**[0038]** La figure 2 illustre le télescope vu de côté dans un plan YZ, la figure 2a illustre le télescope fonctionnant avec la focale maximale et la figure 2b avec la focale minimale. La figure 3 illustre le télescope vu de côté dans un plan XZ, la figure 3a illustre le télescope fonctionnant avec la focale maximale et la figure 3b avec la focale minimale.

**[0039]** Pour M3 à une des positions extrêmes  $P_{min}$ , le télescope présente la focale minimum  $f_{min}$ , une première pupille de sortie PS1 à une première position P1 et un plan focal PFmin (figures 2b, 3b). Pour M3 à l'autre position extrême  $P_{max}$ , le télescope présente la focale maximum  $f_{max}$ , une deuxième pupille de sortie PS2 à une deuxième position P2 et un plan focal PFmax (figures 2a, 3a).

**[0040]** La position du plan focal du télescope variant avec la focale, il convient d'intégrer des moyens de variation du chemin optique entre le troisième miroir M3 et le détecteur D configurés de sorte que le détecteur reste positionné dans le plan focal du télescope. Ces moyens sont décrits ci dessous pour le cas d'un télescope multifocal 20 standard, et seront appliqués plus loin à un télescope selon l'invention.

**[0041]** Selon une première variante les moyens de variation du chemin optique entre le troisième miroir M3 et le détecteur D comportent des moyens de translation 10 du détecteur D selon l'axe optique O, tels qu'illustré figure 4a. Un miroir plan M0 permet de replier le faisceau pour une meilleure compacité du système optique global et/ou pour résoudre une problématique d'encombrement.

**[0042]** Selon une deuxième variante illustrée figures 4b et 4c le détecteur D est fixe et les moyens de variation du chemin optique comprennent deux miroirs T1, T2 en forme de toit (c'est-à-dire présentant deux faces à environ 90° l'une de l'autre) situés entre le troisième miroir M3 et le détecteur D, et des moyens 10' de translation linéaire d'un des deux miroirs en forme de toit, T2 sur l'exemple, l'autre restant fixe, selon un axe non parallèle à l'axe optique, de manière à faire varier le chemin optique. Les pentes de T1 de préférence à 45° ne sont pas nécessairement parallèles à celles de T2. La figure 4b illustre une première position du miroir en toit T2 correspondant à une première position du miroir M3 (focale courte), et la figure 4c illustre une deuxième position du miroir en toit T2 correspondant à une deuxième position



## EP 3 336 594 A1

du miroir M3 ( focale plus longue). Un miroir plan M0 permet de replier le faisceau pour une meilleure compacité du système optique global et/ou pour résoudre une problématique d'encombrement.

**[0043]** Une troisième variante illustrée figure 4d est particulièrement adaptée lorsque le télescope est bifocal, c'est-à-dire qu'il fonctionne pour deux focales uniquement, la focale  $f_{min}$  et la focale  $f_{max}$ . Le faisceau lumineux correspondant à un fonctionnement à  $f_{min}$  est en gris foncé, et le faisceau lumineux correspondant à un fonctionnement à  $f_{max}$  est en gris plus clair. Les moyens de variations du chemin optique comprennent des miroirs classiques fixes  $M_f$ ,  $M_f'$  et  $M_f''$  et au moins un miroir classique escamotable Mesc. Le miroir  $M_f$  est disposé sur les chemins optiques des deux faisceaux. Le miroir escamotable est escamoté lorsque le télescope fonctionne à  $f_{min}$  et est positionné dans le trajet optique du faisceau lorsque le télescope fonctionne à  $f_{max}$ . Les miroirs de repli  $M_f'$  et  $M_f''$  positionnés dans le trajet optique du faisceau réfléchi par Mesc permettent d'obtenir un plan focal  $PF_{max}$  au même endroit que  $PF_{min}$ , ou on positionne le détecteur D.

**[0044]** Afin de bien comprendre le cheminement qui a conduit à l'invention, nous allons dans un premier temps décrire la manière de calculer un télescope de type Korsch à pluralité de focales  $f_i$ ,  $i$  indice de 1 à  $n$ . La focale  $f_{min}$  correspond à  $f_1$  et la focale  $f_{max}$  correspond à  $f_n$ . Pour un télescope bifocal,  $n=2$ , fonctionnant uniquement à  $f_{min}=f_1$  et  $f_{max}=f_2$ . On détermine des paramètres dénommés paramètres initiaux des premier, deuxième et troisième miroirs compatibles à la fois avec la focale minimale  $f_{min}$  et la focale maximale  $f_{max}$ , avec un logiciel optique d'optimisation connu de l'état de la technique.

Ainsi à l'aide des équations de Korsch, on détermine les rayons de courbures et des coniques initiales pour les deux focales extrêmes de notre zoom.

**[0045]** Par exemple, il est possible de répondre aux équations de Korsch simultanément pour les deux focales  $f_{min}$  et  $f_{max}$  en ayant un rayon de courbure  $M_1$  identiques pour les 2 focales.

Le point de départ est donc constitué par les valeurs:  $R_1$ ,  $R_2_{f_{max}}$ ,  $R_2_{f_{min}}$ ,  $R_3_{f_{max}}$ ,  $R_3_{f_{min}}$ ,  $C_1_{f_{max}}$ ,  $C_1_{f_{min}}$ ,  $C_2_{f_{max}}$ ,  $C_2_{f_{min}}$ ,  $C_3_{f_{max}}$ ,  $C_3_{f_{min}}$ .

La suite de l'optimisation consiste à contraindre les rayons de courbures et les conicités à être identiques pour les 2 focales extrêmes  $f_{min}$  et  $f_{max}$ .

L'optimisation est réalisée de manière classique à l'aide de logiciels de calcul optique (CodeV, Zemax, Oslo,...). Ces logiciels fonctionnent sur le principe de la minimisation d'une fonction d'erreur. Typiquement la fonction d'erreur inclut la qualité image au plan focal et la contrainte des focales  $f_{min}$  et  $f_{max}$ .

**[0046]** Ainsi, avec une première optimisation de la qualité d'image dans le plan focal du télescope selon un critère prédéterminé, on aboutit aux paramètres initiaux :

Rayons de courbure initiaux :  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  pour respectivement  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$  Coniques initiales :  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  pour respectivement  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$ .

**[0047]** Le critère prédéterminé consiste par exemple à minimiser d'une erreur de forme d'onde ou WFE pour « Wave Front Error » en anglais, moyennée sur une pluralité de points du champ, bien connu de l'homme de l'art. Typiquement on cherche à minimiser la valeur quadratique moyenne ou WFE RMS.

**[0048]** Dans ce type de solution les formes des miroirs  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$ , caractérisées par les paramètres rayon de courbure  $R$  et constante de conicité  $c$  (on choisit ici de ne pas prendre en considération les termes d'ordres supérieurs qui n'apportent pas d'amélioration), répondent aux équations établies par M. Korsch afin d'obtenir une solution aplanétique et anastigmatique, sans courbure de champ. Cependant ces équations ne peuvent pas être rigoureusement résolues simultanément pour les deux focales  $f_{min}$  et  $f_{max}$ .

Il s'agit d'un compromis et la qualité image s'en ressent. La qualité image reste acceptable pour des télescopes peu contraints en volume (c'est-à-dire pour lesquels les rayons sont incidents sur les miroirs avec des angles faibles). Dans le domaine spatial, la contrainte de volume est primordiale. Cette solution n'est donc pas envisageable pour des instruments spatiaux de focale et de taille de pupille importantes dans lesquels les rayons sont incidents sur les miroirs avec des angles élevés.

**[0049]** Un exemple illustratif est un télescope bifocal avec :

Focale max = 37.5 m

Focale min : 15 m

Ratio du zoom : 2.5

Diamètre du miroir  $M_1$  : 1.1 m

Distance entre  $M_1$  et  $M_2$  : 1600 mm

Distances entre les deux positions extrêmes de  $M_3$  : 250 mm

Distances entre  $PS_1$  et  $PS_2$  : 250 mm

Distance entre  $PF_{max}$  et  $PF_{min}$  : 1600 mm (PF : plan focal).

## EP 3 336 594 A1

L'étape de détermination des paramètres initiaux par une première optimisation telle que décrite ci-dessus aboutit à une configuration initiale du télescope aux valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} R1 &= 4000 \text{ mm } c1 = -1 \\ R2 &= 1000 \text{ mm } c2 = -2.1 \\ R3 &= 1200 \text{ mm } c3 = -0.61 \end{aligned}$$

**[0050]** La figure 5 illustre les aberrations présentes dans le plan focal  $P_F$  (position du détecteur) pour le télescope bifocal dont les trois miroirs asphériques M1, M2 et M3 ont les paramètres initiaux obtenus en résolvant les équations de Korsch tel qu'expliqué ci-dessus.

La figure 5a illustre les aberrations pour la focale maximale  $f_{max}$ , et la figure 5b pour la focale minimale  $f_{min}$ .

Pour rappel le focus correspond à Z4, l'astigmatisme à Z5 et Z6 (Z5/6), la coma à Z7 et Z8 (Z7/8) et l'aberration sphérique (du premier ordre) à Z9.

**[0051]** Afin de caractériser plus précisément les différentes catégories d'aberrations étudiées nous adopterons une convention de signe illustrée figure 6.

Nous dénommerons :

- astigmatisme « radial »: astigmatisme pour lequel le foyer tangential se situe avant le foyer sagittal. Dans la suite cet astigmatisme sera considéré par convention comme positif et noté  $A^+$ ;
- astigmatisme « tangential »: astigmatisme pour lequel le foyer sagittal se situe avant le foyer tangential. Dans la suite cet astigmatisme sera considéré par convention comme négatif et noté  $A^-$ .
- coma « externe »: coma pour laquelle la forme de la tache image d'un point source est une « comète » dont la queue (partie la plus large) s'éloigne de l'axe optique. Il s'agit de la coma créée par une lentille bifocale. Dans la suite cette coma sera considéré par convention comme positive, et noté  $C^+$ ;
- coma « interne »: coma pour laquelle la forme de la tache image d'un point source est une « comète » dont la queue est dirigée vers l'axe optique. Dans la suite cette coma sera considéré par convention comme négative et noté  $C^-$ .

**[0052]** On constate sur la figure 5 que ces aberrations, à l'exception de l'aberration sphérique Z9, sont variables dans le champ (X, Y) du télescope. Les aberrations dominantes pour cette configuration initiale du télescope sont :

Aberrations dominantes initiales pour la focale maximale (figure 5a):

Astigmatisme (Z5/6)  $>0$  noté  $A^+$ , et Coma (Z7/8)  $>0$  noté  $C^+$

Aberrations dominantes initiales pour la focale minimale (figure 5b): Astigmatisme (Z5/6)  $<0$  noté  $A^-$  et Coma (Z7/8)  $<0$  noté  $C^-$

Le télescope en l'état ne peut être utilisé du fait des aberrations trop importantes.

**[0053]** Le télescope de type Korsh 30 selon l'invention, illustré figure 7, est basé sur un télescope 20 tel qu'illustré figures 2 à 4 comprenant les trois miroirs M1, M2 et M3 tels que décrits précédemment, et un premier détecteur D placé dans un premier plan focal  $P_F$  (on dénomme D et  $P_F$  respectivement premier détecteur et premier plan focal car un deuxième détecteur et un deuxième plan focal seront introduit plus loin dans une variante de l'invention).

Le télescope 30 selon l'invention comprend en outre une pluralité de composants optiques asphériques  $CA_i$ ,  $i$  indice comprise entre 1 et  $n$ , associés respectivement à la pluralité de focales  $f_i$ , et disposés respectivement à une pluralité de positions  $PCA_i$  situées entre la première position P1 de la pupille de sortie PS1 et la deuxième position P2 de la pupille de sortie PS2. C'est entre ces deux positions que la taille des composants asphériques est minimisée. Ces composants asphériques ont pour rôle de compenser les aberrations du système, focale par focale, leur calcul est décrit plus loin.

**[0054]** Préférentiellement les positions respectives des composants asphériques sont séparées les une des autres de 50 mm au maximum, préférentiellement de 20 mm au maximum. Cela facilite les calculs d'optimisation décrits plus loin. Le télescope 30 peut comprendre une pluralité de  $n$  focales avec  $n > 2$ , ou seulement deux focales  $f_{min}$  et  $f_{max}$  (télescope bifocal).

**[0055]** Le télescope 30 comprend en outre des moyens 50 de variation du chemin optique, disposés entre les composants asphériques  $CA_i$  et le premier détecteur D, et configurés de sorte que le premier détecteur reste positionné dans le premier plan focal du télescope. Les moyens 50 sont typiquement les moyens 10 décrits figure 4a, ou l'ensemble [T1, T2, 10'] décrit figures 4b et 4c, ou un ensemble comprenant des miroirs fixes et au moins un miroir escamotable, comme par exemple l'ensemble [M0esc, Mf, Mf'] décrit figure 4d.

**[0056]** Chaque composant asphérique  $CA_i$  est disposé sur un chemin optique d'un faisceau correspondant à la focale

associée  $f_i$  lorsque le télescope fonctionne à ladite focale associée  $f_i$ , et en dehors du chemin optique associé à une autre focale lorsque le télescope fonctionne à cette autre focale. Ainsi un composant asphérique donné  $CA_{i0}$  n'est « vu » (réfléchi ou traversé) par le faisceau lumineux traversant le télescope que lorsque le télescope fonctionne à la focale correspondante  $f_{i0}$ .

5 Pour obtenir cette propriété, selon un mode de réalisation préféré au moins un composant asphérique est escamotable, via un mécanisme ad hoc, de manière à être disposé sur le chemin optique du faisceau correspondant à ladite focale associée lorsque le télescope fonctionne à cette focale associée, et en dehors du chemin optique associé à la focale de fonctionnement, lorsque le télescope fonctionne à l'une des autres focales.

10 **[0057]** Différentes combinaisons de composant asphériques  $CA_i$  et de moyens 50 sont possibles pour obtenir la propriété précitée.

**[0058]** Selon une première variante les composants asphériques  $CA_i$  sont tous des miroirs asphériques  $MA_i$  escamotables, tel qu'illustré figure 8. Ils sont placés sur le chemin optique commun à toutes les focales, et positionné ou pas dans le trajet optique en fonction de la focale utilisée. Typiquement la solution la plus simple en termes de fabrication et réglage est que l'ensemble des miroirs escamotables soient montés sur un mécanisme de déplacement unique 80.

15 Dans ce cas les positions des miroirs escamotables  $PCA_i$  sont alors sensiblement identiques, à moins de 10 mm, voir 5mm d'écart.

Pour un nombre de focales au moins égal à 3, un exemple de mécanisme est une roue à barillet, tel qu'illustrée figure 8. Les moyens 50 pour permettre un positionnement du premier détecteur D dans le premier plan focal  $P_F$  sont par exemple des miroirs en toit avec un mécanisme de translation 10' tel que décrit figures 4b et 4c.

20 **[0059]** Pour un télescope bifocal, on peut utiliser un mécanisme de translation 90 pour positionner  $MA_1$  ou  $MA_2$  dans le trajet des faisceaux optiques commun aux deux focales tel qu'illustré figure 9. Lorsque le télescope 30 fonctionne avec la focale longue  $f_{max}$  (gris foncé), on positionne le miroir escamotable  $M_{0esc}$  dans le trajet optique, les miroirs fixes  $M_f'$  et  $M_f''$  renvoyant le faisceau sur le premier détecteur D, comme décrit figure 4d et figure 9. Lorsque le télescope fonctionne avec la focale  $f_{min}$  (gris clair), on escamote le miroir  $M_{0esc}$  avec un mécanisme 95. On évite ainsi le

25 mécanisme complexe de déplacement des miroirs en toit.

Pour un télescope bifocal à deux miroirs asphérique escamotables  $MA_1$  et  $MA_2$ , on peut également utiliser un support 80 pour lequel la commutation d'un miroir asphérique à l'autre se fait par basculement autour d'un axe de rotation, mécanisme dénommé « flip/flop ».

30 **[0060]** Cette première variante de télescope 30 uniquement composée de miroirs présente l'avantage d'un fonctionnement indépendant de la longueur d'onde, les miroirs ne présentant pas de chromatisme. La bande spectrale de fonctionnement est alors déterminée par la nature du matériau réfléchissant des miroirs et la bande spectrale de sensibilité du premier détecteur.

**[0061]** Selon une deuxième variante, au moins un composant asphérique est une lame asphérique LA fonctionnant en transmission. Un exemple pour un télescope bifocal est illustré figure 10. Le miroir asphérique escamotable MA est positionné dans le trajet des faisceaux lorsque le télescope fonctionne à la focale  $f_{max}$ , et est escamoté (par un mécanisme 105) lorsque le télescope fonctionne à la focale  $f_{min}$ , la lame asphérique LA se retrouvant alors sur le trajet du faisceau. On supprime alors le mécanisme de déplacement 95.

35 **[0062]** Dans le cas d'un télescope 30 selon l'invention, la pupille de sortie n'est pas fixe suivant la focale du zoom. La pupille de sortie se déplace (ordre de grandeur  $\sim 200$ mm) suivant la focale choisie. Les miroirs asphériques  $CA_i$  travaillent donc dans le champ. Cela a un impact très important sur les aberrations apportées au système par les miroirs asphériques. Pour un miroir disposé en pupille de sortie, un faisceau correspondant à un point du champ éclaire ce miroir dans son intégralité, et donc le faisceau réfléchit va être impacté par de l'aberration sphérique si le miroir en question a de l'aberration sphérique.

40 Pour un miroir positionné hors pupille de sortie, chaque faisceau correspondant à un point du champ éclaire des zones différentes du miroir (et non pas l'intégralité). Les fronts d'ondes réfléchis par des zones différentes du miroir auront donc des aberrations différentes. Par exemple comme expliqué plus bas, l'introduction d'aberration sphérique sur les  $CA_i$  dont la position ne coïncide pas avec la pupille de sortie, introduit dans le télescope de l'astigmatisme et de la coma dans des proportions beaucoup plus importantes que de l'aberration sphérique.

45 **[0063]** Etudions à présent quelles sont les aberrations susceptibles d'être corrigées par un composant asphérique placé dans la zone interpupille, c'est-à-dire entre  $PS_1$  et  $PS_2$ , pour le télescope initial optimisé avec les équations de Korsh.

**[0064]** Pour la suite il convient de ne pas confondre les aberrations du télescope, correspondant aux défauts du télescope en tant que système optique, et les aberrations introduites dans la forme du composant asphérique, notées avec l'indice CA.

50 **[0065]** L'analyse qui suit utilise des composants asphériques de type miroirs à titre d'exemple, les calculs pouvant être facilement adaptés à l'utilisation d'au moins une lame au lieu d'un miroir.

**[0066]** La figure 11 illustre, pour le système initial, les aberrations résultantes suite à l'introduction d'aberration sphérique sur un composant asphérique  $Z_{9CA}$  ( $Z_{9CA} > 0$  pour la figure 11a et  $Z_{9CA} < 0$  pour la figure 11b), en fonction de sa

position relative par rapport à la pupille de sortie effective PS, lorsqu'il est situé en aval de PS par rapport au miroir M3.

**[0067]** La figure 12 illustre, pour le système initial, les aberrations résultantes suite à l'introduction d'aberration sphérique  $Z_{9CA}$  sur un composant asphérique, avec  $Z_{9CA} > 0$  pour la figure 12a et  $Z_{9CA} < 0$  pour la figure 12b, en fonction de sa position relative par rapport à la pupille de sortie effective PS, lorsqu'il est situé en amont de PS par rapport au miroir M3.

**[0068]** Le composant asphérique étant disposé entre P1 et P2, il est situé selon la figure 11 pour la focale max (en aval de PS2 par rapport à M3) et selon la figure 12 pour la focale min (en amont de PS1 par rapport à M3).

**[0069]** On voit sur les figures 11 et 12 que l'introduction d'aberration sphérique  $Z_{9CA}$  sur un composant asphérique CA introduit des aberrations telles que astigmatisme et coma dans le télescope. Ce qui signifie qu'un composant asphérique peut compenser les aberrations inverses de celles créées par  $Z_{9CA}$ .

**[0070]** On déduit de la figure 11 que pour la focale max  $f_{max}$  :

- introduire du  $Z_{9CA} > 0$  crée de l'astigmatisme  $< 0$  et de la coma  $< 0$ , ce qui permet de corriger de l'astigmatisme  $> 0$  et de la coma  $> 0$
- introduire du  $Z_{9CA} < 0$  crée de l'astigmatisme  $> 0$  et de la coma  $> 0$ , ce qui permet de corriger de l'astigmatisme  $< 0$  et de la coma  $< 0$

**[0071]** On déduit de la figure 12 que pour la focale min  $f_{min}$  :

- introduire du  $Z_{9CA} > 0$  crée de l'astigmatisme  $< 0$  et de la coma  $> 0$ , ce qui permet de corriger de l'astigmatisme  $> 0$  et de la coma  $< 0$
- introduire du  $Z_{9CA} < 0$  crée de l'astigmatisme  $> 0$  et de la coma  $< 0$  ce qui permet de corriger de l'astigmatisme  $< 0$  et de la coma  $> 0$

**[0072]** Ainsi, en plaçant un composant asphérique par focale entre P1 et P2, du  $Z_{9CA}$  d'un signe donné permet de corriger simultanément pour les deux focales extrêmes de l'astigmatisme d'un même signe donné et de la coma de signe opposé.

Par exemple  $Z_{9CA} > 0$  permet de corriger de l'A<sup>+</sup> et du C<sup>+</sup> pour  $f_{max}$  et de l'A<sup>+</sup> et du C<sup>-</sup> pour  $f_{min}$ .

Cette capacité de correction n'est pas compatible du système initial dont les aberrations à corriger sont illustrées figure 5. Ainsi en appliquant au télescope bifocal une méthode classique d'optimisation de ses paramètres à l'aide des équations de Korsch (configuration initiale du télescope 3 miroirs) et en tentant de compenser des aberrations à l'aide d'un composant asphérique, on arrive à une impasse : Un composants CA par focale placé dans la zone interpupille ne peut corriger simultanément l'astigmatisme et la coma présentes dans le système fonctionnant à la focale minimale et à la focale maximale

**[0073]** Après de nombreux calculs les inventeurs ont identifié une manière de réaliser un télescope de type Korsch à pluralité de focales présentant une très bonne qualité d'image.

Dans le télescope 30 selon l'invention, le troisième miroir M3 présente une nouvelle conicité  $c_3$  déterminée à partir de la conicité initiale  $c_3$  (calculée à partir des équation de Korsch lors de la première optimisation tel qu'expliqué ci-dessus).

**[0074]** La nouvelle conicité  $c_3$  est déterminée de sorte que le télescope anastigmat à trois miroirs asphériques présente, sans la présence d'un composant asphérique, et pour les focales minimale et maximale, des aberrations compensables par adjonction de ce composant asphérique.

**[0075]** Selon un mode de réalisation les aberrations compensables sont l'astigmatisme et la coma. Compte tenu de l'enseignement des figures 11 et 12, on cherche à obtenir une configuration du télescope M1/M2/M3 (sans CAi) présentant les aberrations compensables suivantes :

- Pour la focale maximale : astigmatisme positif A<sup>+</sup> et coma positive C<sup>+</sup>.
- Pour la focale minimale : astigmatisme positif A<sup>+</sup> et coma négative C<sup>-</sup>.

**[0076]** Sur la figure 5 on voit que l'astigmatisme pour la focale minimale est négative.

La nouvelle conicité  $c_3$  est donc déterminée de manière à modifier le signe de l'astigmatisme de télescope sans la présence d'un composant asphérique, pour la focale minimale, c'est-à-dire de manière à transformer l'astigmatisme négatif du système en un astigmatisme positif pour la focale minimale.

**[0077]** La figure 13 décrit l'évolution de la valeur moyenne de l'astigmatisme du télescope à 3 miroirs (sans les CAi)  $\langle Z_{5/6} \rangle$  selon une unité arbitraire, pour la focale min (courbe 11) et la focale max (courbe 12), en fonction de la valeur de conicité du M3. On retrouve pour la conicité initiale  $c_3 = -0.61$  un astigmatisme positif pour  $f_{max}$  et négatif pour  $f_{min}$ . Cette figure met en évidence l'existence d'une valeur de  $c_3$  inf pour laquelle le signe de l'astigmatisme pour la focale min s'inverse, ici  $c_3$  inf = -0.56. Pour une nouvelle conicité  $c_3$  supérieure ou égale à  $c_3$  inf, l'astigmatisme de la focale min change de signe. La nouvelle valeur de  $c_3$  ne peut en outre pas trop s'éloigner de la valeur initiale  $c_3$  afin de maintenir la convergence du système optique.

**[0078]** Une deuxième optimisation de la qualité d'image, à partir de la valeur  $c'3_{inf}$  est alors effectuée, afin de déterminer la nouvelle conicité  $c'3$ , et chaque position  $PCAI_i$  des  $CAI_i$ , ainsi que chaque forme de la surface  $Si$  permettant d'obtenir la meilleure qualité d'image selon le critère prédéterminé.

**[0079]** Préférentiellement lorsque tous les composants asphériques sont des miroirs, on considère qu'ils sont positionnés au même endroit, c'est à dire que toutes les  $PCAI_i$  sont égales à une position unique  $Pm$ , ce qui simplifie l'optimisation. On calcule ensuite  $S1$  pour  $f_{min}$  et  $Sn$  pour  $f_{max}$ , et on déduit les  $Si$  intermédiaire à partir de  $S1$  et  $S2$ .

**[0080]** Selon un autre mode de réalisation, on calcule d'abord  $PCA1$  et  $S1$  et  $PCAn$  et  $Sn$ , et on déduit  $PCAI_i$  et  $Si$  intermédiaires à partir de ces valeurs.

**[0081]** Avec la connaissance a priori des aberrations susceptibles d'être compensées par un composant asphérique, tel qu'illustré figures 11 et 12, on sait que la forme de la surface  $Si$  d'un  $CAI_i$  apte à compenser les aberrations du système optique de focale  $fi$  comprenant  $M1$ ,  $M2$ , et  $M3$  de conicité  $c'3$ , doit comprendre de l'aberration sphérique du premier ordre  $Z9_{CA}$ , et plus particulièrement du  $Z9_{CA}$  positif.

**[0082]** Ainsi la valeur exacte de la nouvelle conicité  $c'3$ , les positions  $PCAI_i$ , le cas échéant la position médiane  $Pm$  des  $CAI_i$ , et les formes  $S1$  pour  $f_{min}$ ,  $Sn$  pour  $f_{max}$ , et  $Si$  pour  $fi$ , sont déterminées par une deuxième optimisation des trajets optiques dans l'instrument, de manière à corriger les aberrations du télescope 3 miroirs présentant une nouvelle conicité  $c'3$  et à optimiser la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon le critère prédéterminé, typiquement la minimisation d'une erreur de front d'onde WFE.

**[0083]** La modification de la conicité de  $M3$  permet d'inverser le signe de l'astigmatisme de la focale min, et ainsi d'introduire dans le système optique des aberrations telles que les aberrations résultantes du système optique sont compensables par un composant asphérique positionné dans la zone interpupille.

**[0084]** La figure 14 illustre les différentes aberrations présentes dans le premier plan focal du télescope à 3 miroirs dont le  $M3$  présente la nouvelle conicité  $c'3 = -0.52$

La nouvelle valeur  $c'3$  de la conique de  $M3$  permet d'obtenir de l'astigmatisme positif pour toutes les focales et des comas opposées pour les focales extrêmes.

Dans l'exemple la nouvelle conicité  $c'3$  s'écarte d'environ 20% de la valeur de la conique initiale  $c3$  (égale à  $-0.61$ ). Préférentiellement la nouvelle conicité  $c'3$  s'écarte de la conicité initiale  $c3$  de plus de 5% et de moins de 30 %.

**[0085]** La figure 15 illustre l'évolution de la valeur quadratique moyenne de l'erreur de forme d'onde WFE RMS en fonction de la valeur de conicité du  $M3$ , pour les focales min (courbe 15) et max (courbe 16). On constate que la conicité initiale  $c3$  correspondait à la valeur optimisée de qualité d'image, une nouvelle valeur de conicité  $c'3$  supérieure à  $-0.56$  entraînant une augmentation de la WFE, c'est-à-dire une diminution de la qualité d'image. Le changement de valeur de la conique de  $M3$  ne répond pas à un besoin de qualité d'image, mais permet d'obtenir des aberrations compensables par un CA. On s'éloigne de l'optimum de qualité d'image dans le but de permettre la correction des aberrations.

**[0086]** L'introduction d'aberration sphérique  $Z9_{CA}$  au niveau de chaque composant asphérique  $CAI_i$  permet de réduire fortement le  $Z7/8$  (coma) et  $Z5/6$  (astigmatisme) du système, mais ne réduit pas le focus  $Z4$ . Au contraire,  $Z9_{CA}$  va également entraîner une augmentation du  $Z4$  du télescope comme illustré figure 17, qui décrit la variation du focus moyen  $\langle Z4 \rangle$  du système (télescope 3 Miroirs sans  $CAI_i$ ) en fonction de la valeur de la conique de  $M3$ , pour la focale min (courbe 17) et la focale max (courbe 18) : on constate que le focus  $Z4$  augmente sensiblement, particulièrement pour la focale min.

Il convient d'introduire du focus  $Z4_{CA}$  dans le forme de chaque  $CAI_i$  pour compenser le  $Z4$  du système (celui initialement présent et celui introduit par  $Z9_{CA}$ ).

L'introduction de  $Z4_{CA}$  permet également d'équilibrer les valeurs d'astigmatisme et de coma, c'est-à-dire de rendre proches les valeurs des coefficients respectifs, ce qui permet d'améliorer la compensation par le  $Z9_{CA}$ .

**[0087]** A partir de la plage identifiée pour  $c'3$ , la détermination de la valeur finale de  $c'3$ , du  $Z9_{CA(i)}$  et du  $Z4_{CA(i)}$  pour  $S1$ ,  $Sn$  et tous les  $Si$  intermédiaires, ainsi que les différentes positions (ou la position unique  $Pm$ ) des  $CAI_i$  s'effectue par une deuxième optimisation.

**[0088]** La figure 16 illustre les différentes aberrations dans le premier plan focal d'un télescope 30 selon l'invention, le télescope présentant une nouvelle conicité  $c'3$  du miroir  $M3$ , et des  $CAI_i$  présentant une position médiane  $Pm$  unique et des valeurs de  $Z9_{CA(1)}$ ,  $Z9_{CA(n)}$ , et de  $Z4_{CA(1)}$ ,  $Z4_{CA(n)}$  (soit  $Z9_{CA/max}$  et  $Z9_{CA/min}$  ;  $Z4_{CA/max}$  et  $Z4_{CA/min}$ ) optimisées. La figure 16a illustre les différentes aberrations pour la focale max et la figure 16b pour la focale min.

La forme de la surface pour la focale max  $Sn$  comprend donc du  $Z9_{CA}(n)$  et du  $Z4_{CA}(n)$  La forme de la surface pour la focale min  $S1$  comprend du  $Z9_{CA}(1)$  et du  $Z4_{CA}(1)$ .

Dans l'exemple  $c'3 = -0.52$ , les  $CAI_i$  sont tous positionnés à 110 mm après la  $PS1$  et à 140mm avant la  $PS2$ .

On constate en comparant cette figure 16 avec la figure 5 (voir le changement d'échelle), que la qualité du télescope est grandement améliorée.

**[0089]** Selon un mode de réalisation, pour améliorer encore la qualité d'image, on modifie légèrement la conicité des miroirs  $M2$  et  $M1$  du télescope 30 selon l'invention.

Dans l'exemple, la performance du télescope peut encore être améliorée, le  $Z7/8$  et le  $Z9$  étant compensé uniquement par le  $Z9_{CA}$ .

EP 3 336 594 A1

Modifier la conicité de M2 (nouvelle valeur c'2) permet justement de jouer sur ces deux aberrations. Cependant cette nouvelle conicité c'2 apporte également du Z4 en quantité importante. Cet excès de Z4 est contrebalancé par la modification de la conicité du M1 (nouvelle valeur c'1), qui joue également sur le Z9.

5 Ainsi une nouvelle conicité du premier miroir c'1 et une nouvelle conicité du deuxième miroir c'2 sont déterminées à partir respectivement d'une première conicité initiale c1 du premier miroir et d'une deuxième conicité initiale c2 du deuxième miroir, de manière à améliorer encore la qualité d'image du télescope selon le critère prédéterminé.

**[0090]** Pour l'exemple, ces modifications sont illustrées figures 18 et 19.

La figure 18 illustre l'évolution des principales aberrations en fonction de la valeur de la conicité de M2, pour les focales min et max, et la figure 19 l'évolution des principales aberrations en fonction de la valeur de la conicité de M1.

10 Par une troisième optimisation on détermine les nouvelles valeurs de conicité c'2 et c'1, illustrées figures 18 et 19 :

$$C'1 = -0.98$$

$$C'2 = -2.1$$

15 En les comparant aux valeurs initiales c1 = -1 et c2 = -2, on constate que ces variations de conicité sont faibles (moins de 10%, voir moins de 5% pour c1), mais permettent néanmoins d'améliorer encore la qualité d'image.

**[0091]** En variante, on ajoute également du Z16<sub>CA</sub> soit de l'aberration sphérique du deuxième ordre, qui influence Z16, Z9, Z4 Z5/6 et Z7/8 et permet d'augmenter encore la qualité d'image.

20 **[0092]** La figure 20 illustre les différentes aberrations dans le premier plan focal d'un télescope 30 selon l'invention, le télescope présentant de nouvelles conicités c'1, c'2 et c'3 respectivement des miroirs M1, M2 et M3, et pour CA1 et CAn, une position médiane Pm et des valeurs de Z9<sub>CA</sub>, de Z16<sub>CA</sub> optimisées. La figure 20a illustre les différentes aberrations pour la focale max et la figure 20b pour la focale min.

Pour rappel on a c'3 = -0.52, c'1 = -0.98 et c'2 = -2.1 .

25 **[0093]** La table 2 ci-dessous illustre les valeurs des paramètres (R, k, A, B) ainsi que les coefficients de Zernicke Z4, Z9 et Z16 équivalents permettant de caractériser la surface Sn du miroir asphérique MAn correspondant à fmax = 37.5m.

Table 2

|    |   |           |      |              |
|----|---|-----------|------|--------------|
|    |   |           | Z4   | -2.89E-02 mm |
|    |   |           | Z5   | 0            |
| 30 |   |           | Z6   | 0            |
|    | R | -34500    | Z7   | 0            |
|    | k | 0         | = Z8 | 0            |
|    | A | -3.43E-10 | Z9   | -7.21 E-04   |
| 35 | B | 4.27E-15  | Z10  | 0            |
|    |   |           | Z11  | 0            |
|    |   |           | Z12  | 0            |
|    |   |           | Z13  | 0            |
| 40 |   |           | Z14  | 0            |
|    |   |           | Z15  | 0            |
|    |   |           | Z16  | 1.06E-05     |

45 **[0094]** La table 3 ci-dessous illustre les valeurs des paramètres (R, k, A, B) ainsi que les coefficients de Zernicke Z4, Z9 et Z16 équivalents permettant de caractériser la surface S1 du miroir asphérique MA1 correspondant à fmin = 15m.

Table 3

|    |   |           |      |           |
|----|---|-----------|------|-----------|
|    |   |           | Z4   | -2.72E-02 |
|    |   |           | Z5   | 0         |
| 50 |   |           | Z6   | 0         |
|    | R | -46500    | Z7   | 0         |
|    | k | 0         | = Z8 | 0         |
|    | A | -5.40E-10 | Z9   | -1.31E-03 |
| 55 | B | 1.67E-14  | Z10  | 0         |
|    |   |           | Z11  | 0         |
|    |   |           | Z12  | 0         |
|    |   |           | Z13  | 0         |

(suite)

|     |          |
|-----|----------|
| Z14 | 0        |
| Z15 | 0        |
| Z16 | 6.50E-05 |

5

**[0095]** L'optimisation de chaque surface peut être réalisée sur les paramètres (R, k, A, B) ou sur les coefficients de Zernicke Z4, Z9, Z16 équivalents, en fonction de l'option choisie du logiciel utilisé.

10 **[0096]** On peut également développer l'optimisation plus loin dans les ordres supérieurs en affinant la surface par des paramètres C, D ...ou leur équivalent en coefficients de Zernicke.

**[0097]** On constate en comparant la figure 20 avec la figure 16 (voir changement d'échelle), que la qualité du télescope est encore améliorée. La qualité d'image finale obtenue est compatible avec la contrainte d'une WFE RMS  $< \lambda/15$ , qui pour le visible correspond à une WFE RMS  $< 50$  nm. (voir plus loin figure 22).

15 Dans le télescope 30 selon l'invention les composants asphériques CAi font partie intégrante de la combinaison optique de l'instrument.

**[0098]** Préférentiellement, lorsque le télescope selon l'invention présente une pluralité de focales intermédiaires avec  $n > 2$ , la forme Si de chaque CAi associé aux focales intermédiaires est calculée à partir de la forme de la surface pour les valeurs de focale minimale S1 et maximale Sn, afin d'appliquer la correction adéquate pour chaque focale ;

20 **[0099]** Ainsi, une fois les aberrations Z9<sub>CAi</sub> de et de Z16<sub>CAi</sub> optimisées pour fmin et fmax, c'est-à-dire des valeurs de coefficients des polynômes de Fringe Zernike déterminés pour fmin et fmax, on calcule les valeurs des coefficients de polynômes pour chaque valeur de focale intermédiaire, à partir des valeurs de coefficients des polynômes de Fringe Zernike déterminés pour fmin et fmax.

25 **[0100]** Selon un mode de réalisation, le télescope 30 selon l'invention présente une voie additionnelle fonctionnant dans une plage de longueur d'onde différente de la plage de fonctionnement de la voie principale du télescope, dont un exemple d'architecture est illustré figure 21.

La voie principale fonctionne sur une première plage de longueur d'onde SB1, typiquement le visible entre 400 et 800 nm, et le premier détecteur D présente une sensibilité adaptée à SB1. La voie additionnelle fonctionne pour une deuxième bande spectrale SB2 différente de SB1, typiquement comprise dans la bande infrarouge.

30 Dans ce mode de réalisation les composants asphériques associés aux différentes focales sont préférentiellement des miroirs escamotables MAi montés sur un support unique 80. Ce support présente en outre une position neutre pour laquelle aucun miroir escamotable ne figure sur le chemin optique du faisceau optique incident sur le support (simple « trou sans fonction optique). Le faisceau passe alors au travers du support 80 selon un chemin optique secondaire 86. Pour un télescope bifocal, un exemple de réalisation d'un tel support 80 trois positions est illustré figure 22. Il comprend trois positions, respectivement obtenue par pivotement autour d'un axe de rotation 40, les deux miroirs asphériques MA1 et MA2 étant montés autour d'une structure creuse. Dans une première position MA1 réfléchit le faisceau incident, dans une deuxième position c'est MA2 qui réfléchit le faisceau incident, et dans une troisième position neutre le faisceau incident passe au travers du support. D'autres design sont bien entendu possibles, comme une roue à barillet.

35 Ce télescope 30 multivoie comprend en outre un dispositif optique 85 disposé sur le chemin optique secondaire 86 et configuré pour générer un deuxième plan focal du télescope P'<sub>F</sub> correspondant à une focale choisie f'. Le dispositif optique 85 fonctionne préférentiellement en transmission, de manière à être compatible d'une valeur de focale choisie f' très inférieure à fmin, typiquement 10 fois plus faible. Le dispositif 85 est en outre configuré pour corriger les aberrations compensables du télescope et pour optimiser la qualité d'image dans le deuxième plan focal du télescope P'<sub>F</sub> selon le critère prédéterminé. Il remplit la même fonction compensatrice que les miroirs asphériques. Il s'agit typiquement d'un objectif dioptrique composé de plusieurs lentilles. Du fait de la souplesse de design, les lentilles peuvent être sphériques tout en réalisant la fonction de compensation. ?? autre précision à ajouter ?

40 Un deuxième détecteur D' est disposé dans le deuxième plan focal du télescope P'<sub>F</sub>, et présente une sensibilité dans la deuxième bande spectrale SB2. Un filtre spectral est préférentiellement disposé sur le chemin optique secondaire, entre le support 80 et le deuxième détecteur D' pour sélectionner la bande spectrale SB2.

**[0101]** On réalise ainsi une voie additionnelle avec une complexification mécanique faible.

50 **[0102]** Un exemple de réalisation est un télescope présentant une voie principale bifocale dans le visible et une voie additionnelle infrarouge monofocale. Pour les optiques embarquées sur les satellites, on cherche à obtenir une voie infrarouge de moindre résolution que la voie visible, mais de plus grand champ, ce qui est obtenu avec une focale f' plus faible, typiquement d'un facteur 10, par rapport à fmin. Par exemple une focale dans le visible de l'ordre de la dizaine de mètres et une focale IR de l'ordre du mètre.

55 La position du miroir M3 pour le fonctionnement en infrarouge est préférentiellement (mais non nécessairement) égale à une des positions correspondant aux focales de la voie principale visible. Pour cette focale, une mesure simultanée visible / IR est possible.

**[0103]** Selon une variante, le télescope selon l'invention comporte un diaphragme d'ouverture placé dans la zone interpupille et réglable en ouverture pour garder une ouverture numérique sensiblement constante lorsque la focale varie.

**[0104]** Selon un autre aspect, l'invention concerne un procédé 60 de détermination de paramètres d'un télescope anastigmat illustré figure 23.

5 Le télescope comprend :

- trois miroirs asphériques, un premier miroir M1 concave, un second miroir M2 convexe, un troisième miroir M3 concave,
- un premier détecteur D,
- 10 - une pluralité de composants asphériques CA<sub>i</sub> (i indice de 1 à n) et,
- des moyens 5 de déplacement linéaire du troisième miroir sur l'axe optique O du télescope de manière à faire varier la focale du télescope selon une pluralité de focales f<sub>i</sub> (i indice de 1 à n) entre une focale minimale f<sub>min</sub> et une focale maximale f<sub>max</sub>.

15 **[0105]** Les trois miroirs M1, M2 et M3 sont agencés de sorte que le premier miroir et le second miroir forment d'un objet à l'infini une image intermédiaire située entre le second miroir et le troisième miroir, le troisième miroir formant de cette image intermédiaire une image finale dans le premier plan focal du télescope dans lequel est placé le premier détecteur D.

20 Les premier, deuxième et troisième miroirs sont de forme fixe caractérisée par au moins une conique et un rayon de courbure.

En outre le télescope à la focale minimale présente une première pupille de sortie PS1 à une première position P1, et le télescope à la focale maximale présente une deuxième pupille de sortie PS2 à une deuxième position P2. La pluralité de composants asphériques CA<sub>i</sub> est associée respectivement à la pluralité de focales f<sub>i</sub>, chaque composant asphérique étant disposé sur un chemin optique d'un faisceau correspondant à ladite focale associée lorsque le télescope fonctionne à ladite focal associée, et en dehors du chemin optique associé à une autre focale lorsque le télescope fonctionne à ladite autre focale.

25 Les composants asphériques sont disposés à respectivement une pluralité de positions PCA<sub>i</sub> situées entre la première et la deuxième position.

30 **[0106]** Le procédé 60 comprend une première étape 100 qui détermine des valeurs de coniques et des rayons de courbure, dénommés valeurs initiales, des premier, deuxième et troisième miroirs du télescope :

M1 (c1, R1) ; M2 (c2, R2), M3 (c3, R3).

35 Ces valeurs initiales sont compatibles à fois de la focale minimale f<sub>min</sub> et de la focale maximale f<sub>max</sub>, sans la présence des composants asphériques, et sont déterminées à partir des équations de Korsh, par une première optimisation de la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon un critère prédéterminé.

Suivant une deuxième étape 200 on détermine une valeur de conicité du troisième miroir c'3<sub>inf</sub>, à partir de la conicité initiale c3 du troisième miroir, à partir de laquelle le télescope présente, sans la présence des composants asphériques et pour les focales minimale et maximale, des aberrations compensables par les composants asphériques CA1 et CAn respectivement associés aux focales f<sub>min</sub> et f<sub>max</sub>.

40 **[0107]** Puis dans une étape 300 on détermine une nouvelle valeur de conicité du troisième miroir c'3, la position PCA<sub>i</sub> et la forme de la surface Si de chaque composant asphérique CA<sub>i</sub> par une deuxième optimisation, de manière à corriger les aberrations compensables et à optimiser la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon le critère prédéterminé. La forme de chaque surface Si comprend au moins de l'aberration sphérique du premier ordre et du focus.

45 **[0108]** Préférentiellement le procédé 60 comprend en outre une étape 400 consistant à déterminer une nouvelle conicité du premier miroir c'1 et une nouvelle conicité c'2 du deuxième miroir M2, de manière à améliorer encore la qualité d'image selon le critère prédéterminé.

50 **[0109]** Préférentiellement le procédé 60 selon comprend également une étape 500 consistant à affiner la surface Si de chaque composant asphérique en intégrant en outre une aberration sphérique du deuxième ordre de manière à améliorer encore la qualité d'image selon le critère prédéterminé.

**[0110]** Typiquement le critère prédéterminé consiste à minimiser une erreur de forme d'onde WFE.

**[0111]** La figure 24 illustre l'évolution de la WFE RMS moyennée sur les différentes focales à la fin de chaque étape du procédé, soit en fonction des différentes modifications introduites dans le système optique, pour l'exemple du télescope donné ci-dessus.

55 La WFE obtenue après la première optimisation basée sur les équations de Korsch est de l'ordre de 560 nm, incompatible avec la contrainte WFE RMS < 50 nm. En modifiant la valeur de conicité de M3 pour modifier le signe de l'astigmatisme, la WFE est dégradée (pas encore de composant asphériques de compensation). Par contre, en introduisant pour chaque focale un composant asphérique dont la surface comprend de l'aberration sphérique du premier ordre et du focus, la



WFE est grandement améliorée à une centaine de nm environ. La modification des conicités de M1 et M2 permet de diminuer la WFE en dessous de la cinquantaine de nm, et l'optimisation finale, introduisant de l'aberration sphérique du deuxième ordre, permet de la diminuer encore à une dizaine de nm.

5

## Revendications

10

1. Télescope (30) anastigmat à trois miroirs asphériques comprenant au moins un premier miroir (M1) concave, un second miroir (M2) convexe un troisième miroir (M3) concave et un premier détecteur (D), et présentant un axe optique (O),

15

- les trois miroirs étant agencés de sorte que le premier miroir (M1) et le second miroir (M2) forment d'un objet à l'infini une image intermédiaire située entre le second miroir et le troisième miroir, le troisième miroir (M3) formant de cette image intermédiaire une image finale dans un premier plan focal du télescope ( $P_F$ ) dans lequel est placé le premier détecteur, les premier, deuxième et troisième miroirs étant de forme fixe **caractérisée par** au moins un rayon de courbure et une conicité,

le télescope comprenant en outre :

20

- des moyens (5) de déplacement linéaire du troisième miroir (M3) sur l'axe optique du télescope (O) de manière à faire varier la focale du télescope selon une pluralité de focales ( $f_i$ ) entre au moins une focale minimale ( $f_{min}$ ) et une focale maximale ( $f_{max}$ ),

25

le télescope à la focale minimale présentant une première pupille de sortie (PS1) à une première position (P1), et le télescope à la focale maximale présentant une deuxième pupille de sortie (PS2) à une deuxième position (P2),

30

- une pluralité de composants optiques asphériques (CAi) associés respectivement à la pluralité de focales ( $f_i$ ), disposés respectivement à une pluralité de positions (PCAi) situées entre la première et la deuxième position, chaque composant asphérique étant disposé sur un chemin optique d'un faisceau correspondant à ladite focale associée lorsque le télescope fonctionne à ladite focal associée, et en dehors du chemin optique associé à une autre focale lorsque le télescope fonctionne à ladite autre focale,

35

- des moyens (50) de variation du chemin optique disposés entre les composants asphériques et le premier détecteur (D), et configurés de sorte que ledit premier détecteur reste positionné dans le premier plan focal du télescope,

- le troisième miroir présentant une nouvelle conicité ( $c'3$ ) déterminée à partir d'une conicité initiale ( $c3$ ),

la conicité initiale ( $c3$ ) étant déterminée à partir des équation de Korsch,

la nouvelle conicité ( $c'3$ ) étant déterminée de sorte que le télescope présente, sans la présence desdits composants asphériques et pour les focales minimale et maximale, des aberrations compensables par lesdits composants asphériques,

40

- la position (PCAi) et la forme de la surface (Si) de chaque composant asphérique étant déterminée de manière à corriger lesdites aberrations compensables dudit télescope pour la focal associée ( $f_i$ ) et à optimiser la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon un critère prédéterminé.

45

2. Télescope selon la revendication 1 dans lequel ladite forme de la surface (Si) de chaque composant asphérique comprend de l'aberration sphérique de premier ordre ( $Z9_{CA}$ ) et du focus ( $Z4_{CA}$ ).

50

3. Télescope selon la revendication 2 dans lequel ladite forme de la surface de chaque composant asphérique comprend en outre une aberration sphérique de deuxième ordre ( $Z16_{CA}$ ) pour améliorer encore la qualité d'image selon ledit critère.

55

4. Télescope selon l'une des revendications précédentes dans lequel la nouvelle conicité ( $c'3$ ) s'écarte de la conicité initiale de plus de 5% et de moins de 30 %

5. Télescope selon l'une des revendications précédentes dans lequel une nouvelle conicité du premier miroir ( $c'1$ ) et une nouvelle conicité du deuxième miroir ( $c'2$ ) sont déterminées à partir respectivement d'une conicité initiale du premier miroir ( $c1$ ) et d'une conicité initiale du deuxième miroir ( $c2$ ),

les conicités initiales étant déterminées à partir des équation de Korsch,  
les nouvelles conicités étant déterminées de manière à améliorer encore la qualité d'image dudit télescope selon ledit critère.

5 6. Télescope anastigmat selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les aberrations compensables sont l'astigmatisme et la coma.

7. Télescope selon l'une des revendications précédentes dans lequel on définit :

- 10 - un astigmatisme positif (A+) comme un astigmatisme pour lequel un foyer tangentiel se situe avant un foyer sagittal,  
- un astigmatisme négatif (A-) comme un astigmatisme pour lequel un foyer sagittal se situe avant un foyer tangentiel,  
15 - une coma positive comme une coma pour laquelle une forme de la tache image d'un point source est une « comète » dont la queue s'éloigne de l'axe optique et,  
- une coma négative comme une coma pour laquelle une forme de la tache image d'un point source est une « comète » dont la queue est dirigée vers l'axe optique,

20 les aberrations compensables étant de l'astigmatisme positif (A+) et de la coma positive (C+) pour la focale maximale, de l'astigmatisme positif (A+) et de la coma négative (C-) pour la focale minimale.

8. Télescope selon l'une des revendications précédentes dans lequel on définit :

- 25 - un astigmatisme positif (A+) comme un astigmatisme pour lequel un foyer tangentiel se situe avant un foyer sagittal,  
- un astigmatisme négatif (A-) comme un astigmatisme pour lequel un foyer sagittal se situe avant un foyer tangentiel,

30 et dans lequel la nouvelle conicité du troisième miroir (c'3) est déterminée de manière à modifier le signe de l'astigmatisme du télescope pour la focale minimale, sans la présence de composant optique asphérique.

9. Télescope selon l'une des revendications précédentes pour lequel le critère prédéterminé consiste à minimiser une erreur de forme d'onde (WFE).

35 10. Télescope selon l'une des revendications précédentes pour lequel lesdites positions des composants asphériques sont séparées les une des autres de 50 mm au maximum.

40 11. Télescope selon l'une des revendications précédente dans lequel au moins un composant optique asphérique est escamotable de manière à être disposé sur le chemin optique du faisceau correspondant à la focale associée lorsque le télescope fonctionne à ladite focal associée, et en dehors des chemins optiques associés aux autres focales lorsque le télescope fonctionne à une de ces autres focales.

45 12. Télescope selon la revendication 11 dans lequel les composants optiques asphériques sont des miroirs escamotables (MAi).

13. Télescope selon la revendication 12 dans lequel les miroirs escamotables sont montés sur un support unique (80), les positions des miroirs escamotables étant alors sensiblement identiques.

50 14. Télescope selon l'une la revendication 13 dans lequel lesdits composants asphériques sont des miroirs escamotables (MAi) montés sur un support unique (80), ledit support comprenant en outre une position pour laquelle aucun miroir escamotable ne figure sur le chemin optique du faisceau incident sur ledit support, le faisceau passant alors au travers du support selon un chemin optique secondaire (86), le télescope comprenant en outre :

- 55 - un dispositif optique (85) disposé sur le chemin optique secondaire, configuré pour générer un deuxième plan focal ( $P'_F$ ) du télescope correspondant à une focale choisie (f'), ledit dispositif optique (85) étant en outre configuré pour corriger lesdites aberrations compensables dudit télescope et pour optimiser la qualité d'image dans le deuxième plan focal du télescope ( $P'_F$ ) selon ledit critère prédéterminé et,  
- un deuxième détecteur (D') disposé dans le deuxième plan focal du télescope ( $P'_F$ ), et sensible dans une

deuxième bande spectrale (SB2) différente d'une première bande spectrale de sensibilité (SB1) du premier détecteur.

- 5 15. Télescope selon la revendication 14 dans lequel le dispositif optique (85) est adapté pour fonctionner en transmission dans la deuxième bande spectrale (SB2), dans lequel la première bande spectrale est comprise dans le visible et la deuxième bande spectrale est comprise dans l'infrarouge, et dans lequel la focale choisie ( $f'$ ) présente une valeur inférieure à la focale minimale.
- 10 16. Télescope selon l'une des revendications 1 à 11 dans lequel au moins un composant asphérique est une lame fonctionnant en transmission.
17. Télescope selon une des revendications précédentes comprenant uniquement deux focales, la focale minimale et la focale maximale.
- 15 18. Procédé (60) de détermination de paramètres d'un télescope anastigmat comprenant trois miroirs asphériques, un premier miroir (M1) concave, un second miroir (M2) convexe, un troisième miroir (M3) concave, un premier détecteur (D), une pluralité de composants asphériques (CA<sub>i</sub>) et des moyens (5) de déplacement linéaire du troisième miroir sur un axe optique (O) du télescope de manière à faire varier la focale du télescope selon une pluralité de focales ( $f_i$ ) entre au moins une focale minimale ( $f_{min}$ ) et une focale maximale ( $f_{max}$ ),
- 20 les trois miroirs étant agencés de sorte que le premier miroir et le second miroir forment d'un objet à l'infini une image intermédiaire située entre le second miroir et le troisième miroir, le troisième miroir formant de cette image intermédiaire une image finale dans le premier plan focal du télescope dans lequel est placé le premier détecteur, les premier, deuxième et troisième miroirs étant de forme fixe **caractérisée par** au moins une conique et un rayon de courbure,
- 25 le télescope à la focale minimale présentant une première pupille de sortie (PS1) à une première position (P1), et le télescope à la focale maximale présentant une deuxième pupille de sortie (PS2) à une deuxième position (P2), la pluralité de composants asphériques (CA<sub>i</sub>) étant associés respectivement à la pluralité de focales ( $f_i$ ), chaque composant asphérique étant disposé sur un chemin optique d'un faisceau correspondant à ladite focale associée lorsque le télescope fonctionne à ladite focal associée, et en dehors du chemin optique associé à une autre focale
- 30 lorsque le télescope fonctionne à ladite autre focale, lesdits composants asphériques étant disposés à respectivement une pluralité de positions (PCA<sub>i</sub>) situées entre la première et la deuxième position, le procédé comprenant les étapes consistant à :
- 35 - déterminer (100) des valeurs de coniques et des rayons de courbure dénommés valeurs initiales des premier ( $c_1$ , R1), deuxième ( $c_2$ , R2), et troisième ( $c_3$ , R3) miroirs dudit télescope compatibles de la focale minimale ( $f_{min}$ ) et de la focale maximale ( $f_{max}$ ), sans la présence desdits composants asphériques, à partir des équations de Korsh, par une première optimisation de la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon un critère prédéterminé,
- 40 - déterminer (200) une valeur de conicité du troisième miroir ( $c_3^{inf}$ ), à partir de la conicité initiale du troisième miroir ( $c_3$ ), à partir de laquelle le télescope présente, sans la présence desdits composants asphériques et pour les focales minimale et maximale, des aberrations compensables par les composants asphériques respectivement associés auxdites focales minimale et maximale,
- 45 - déterminer (300) une nouvelle valeur de conicité du troisième miroir ( $c_3'$ ), la position (PCA<sub>i</sub>) et la forme de la surface (S<sub>i</sub>) de chaque composant asphérique par une deuxième optimisation, de manière à corriger lesdites aberrations compensables et à optimiser la qualité d'image dans le premier plan focal du télescope selon le critère prédéterminé,
- 50 la forme desdites surfaces des composants asphériques comprenant au moins de l'aberration sphérique de premier ordre ( $Z_{9_{CA}}$ ) et du focus ( $Z_{4_{CA}}$ ).
- 55 19. Procédé selon la revendication 18 comprenant en outre une étape consistant à déterminer (400) une nouvelle conicité des premier ( $c_1'$ ) et deuxième ( $c_2'$ ) miroirs de manière à améliorer encore la qualité d'image selon le critère prédéterminé.
20. Procédé selon la revendication 19 comprenant en outre une étape (500) consistant à affiner la détermination de la forme de la surface (S<sub>i</sub>) de chaque composant asphérique en intégrant en outre une aberration sphérique du deuxième ordre ( $Z_{16_{CA}}$ ) de manière à améliorer encore la qualité d'image selon le critère prédéterminé.

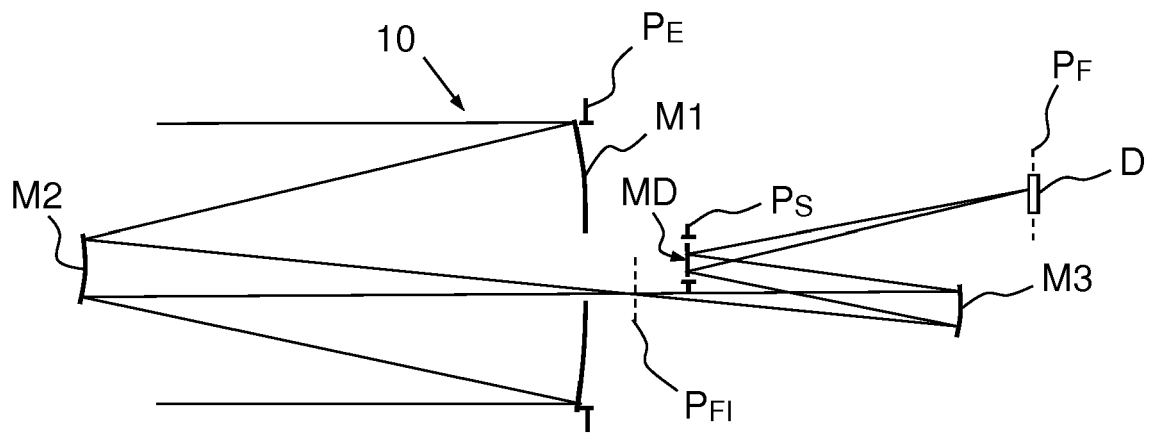


FIG.1

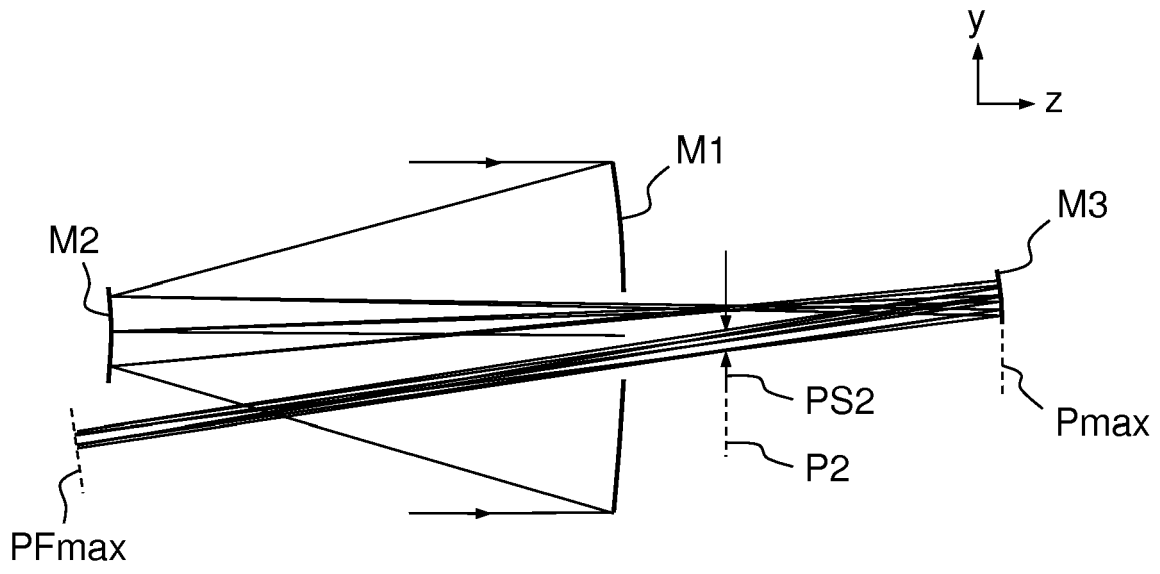


FIG.2a

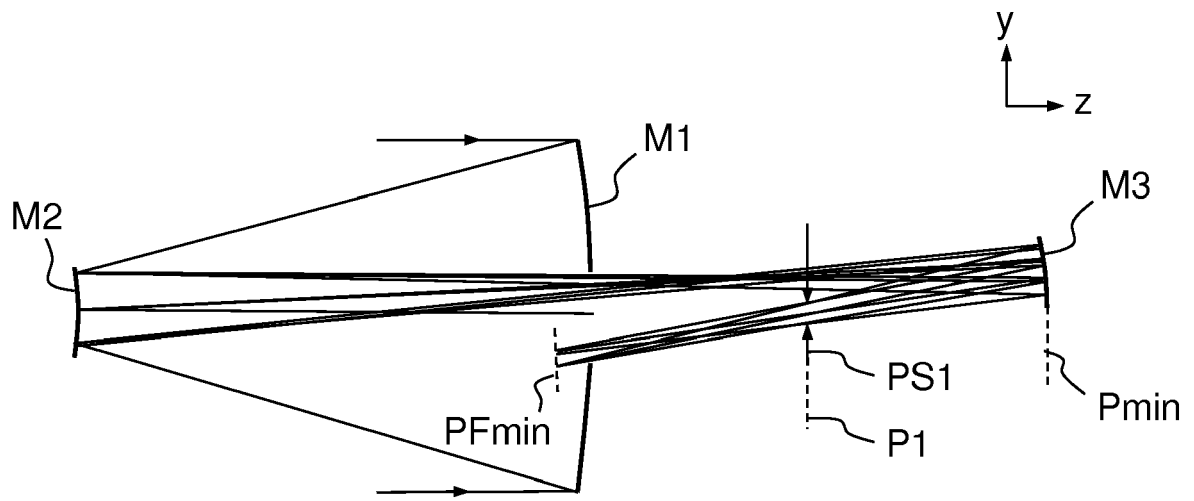


FIG.2b

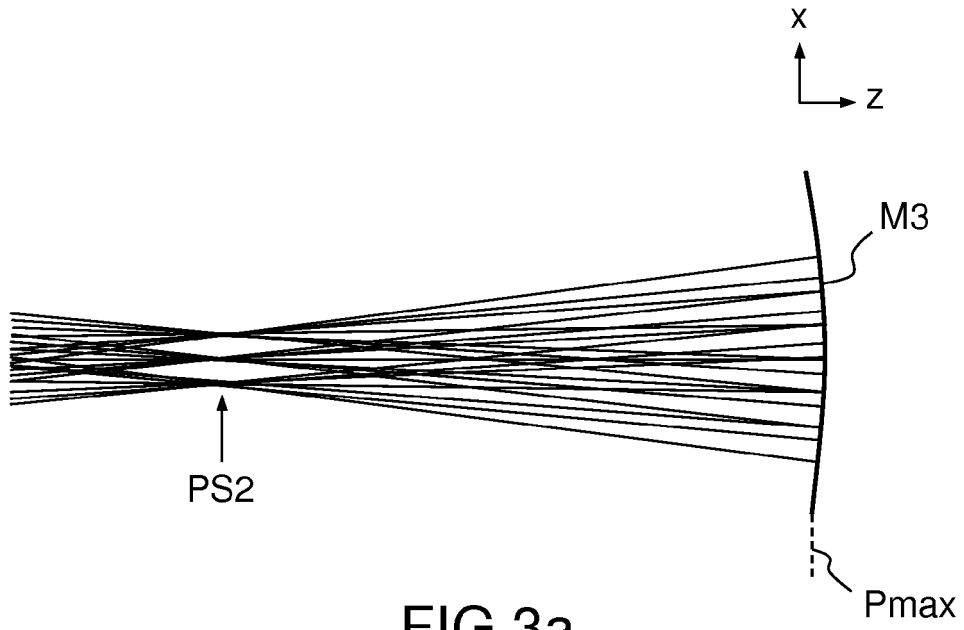


FIG.3a

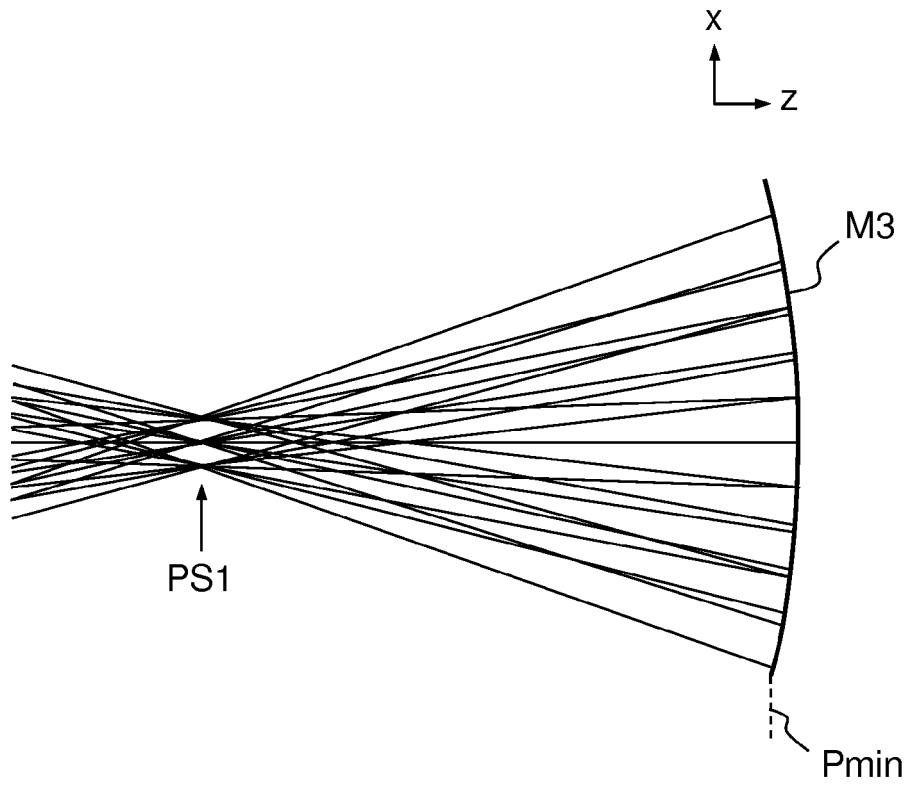


FIG.3b

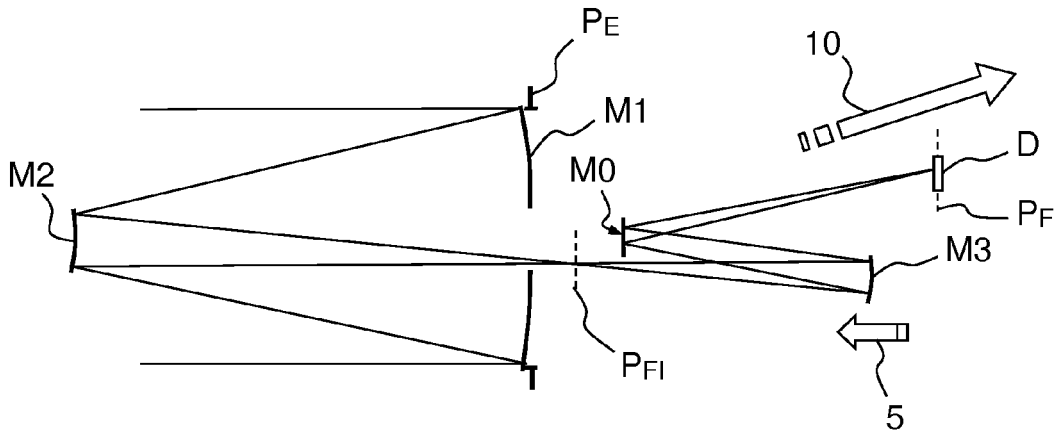


FIG. 4a

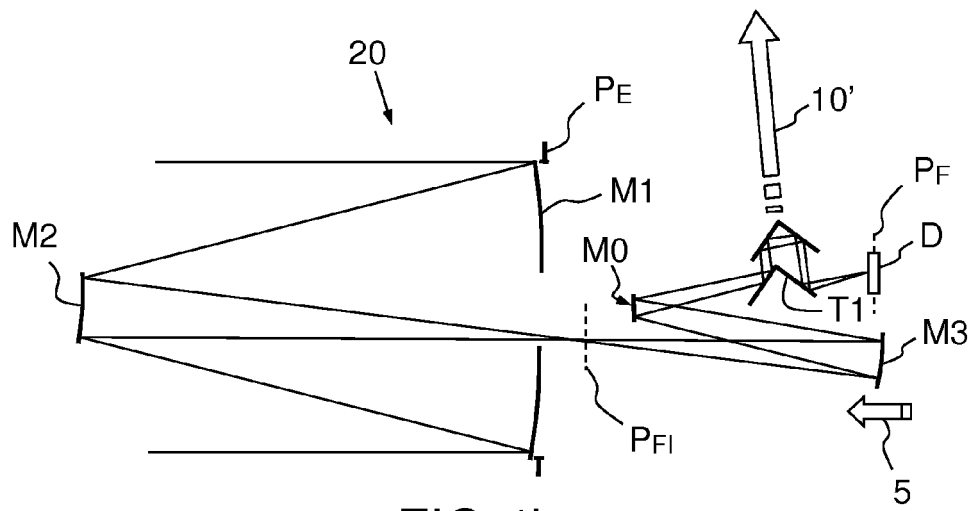


FIG. 4b

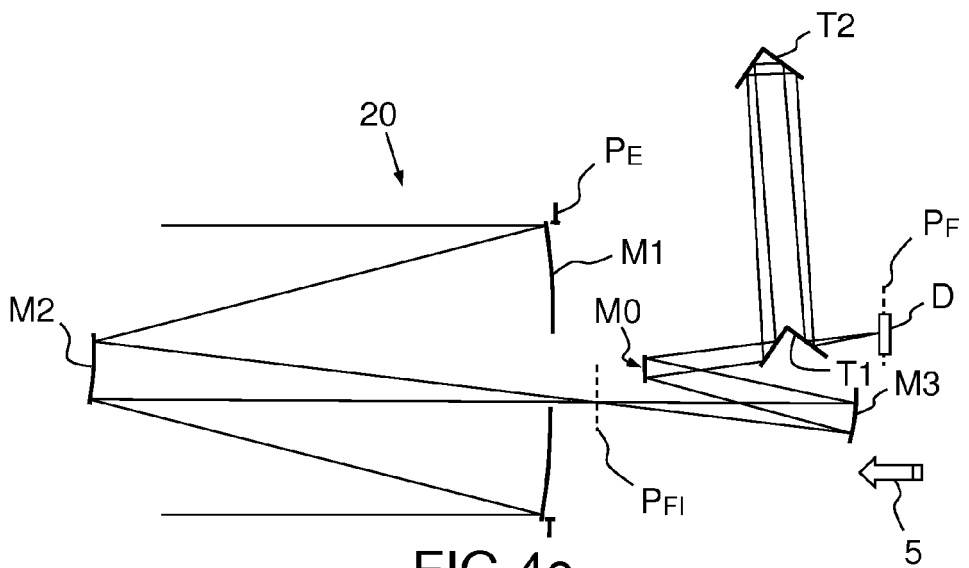


FIG. 4c

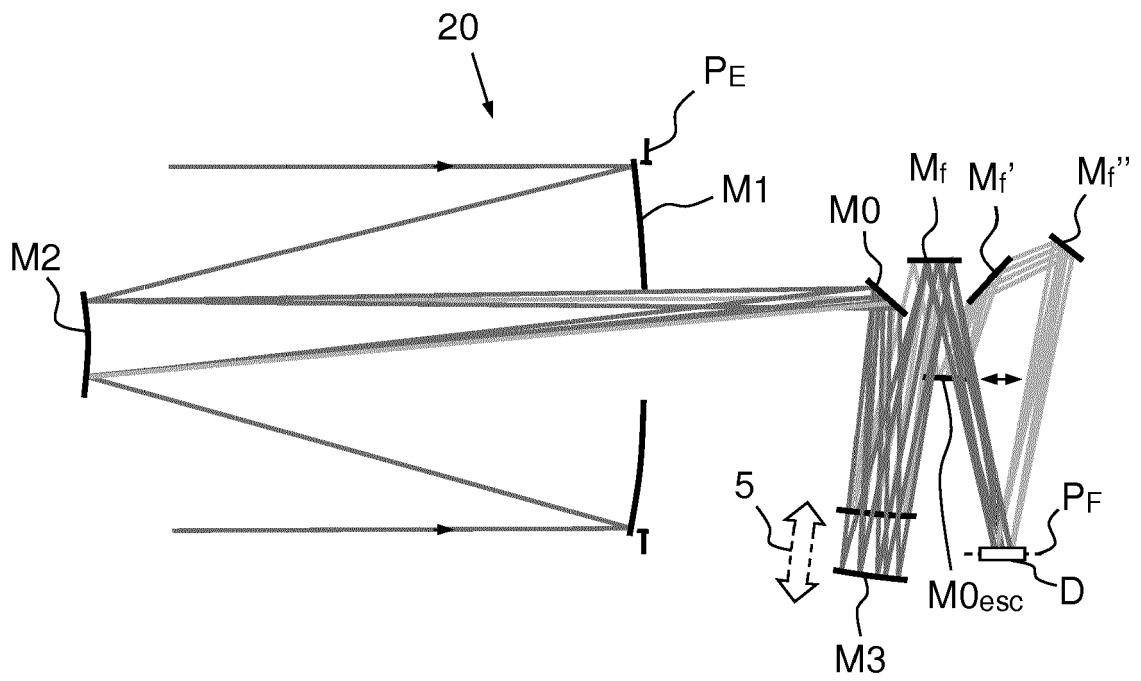


FIG.4d



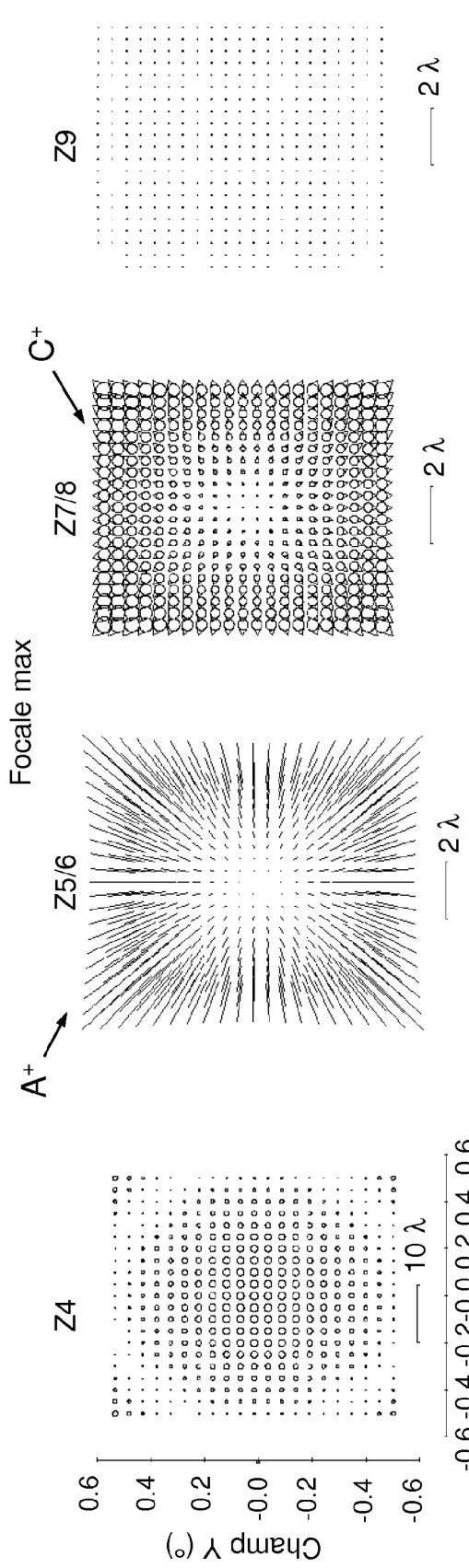


FIG. 5a

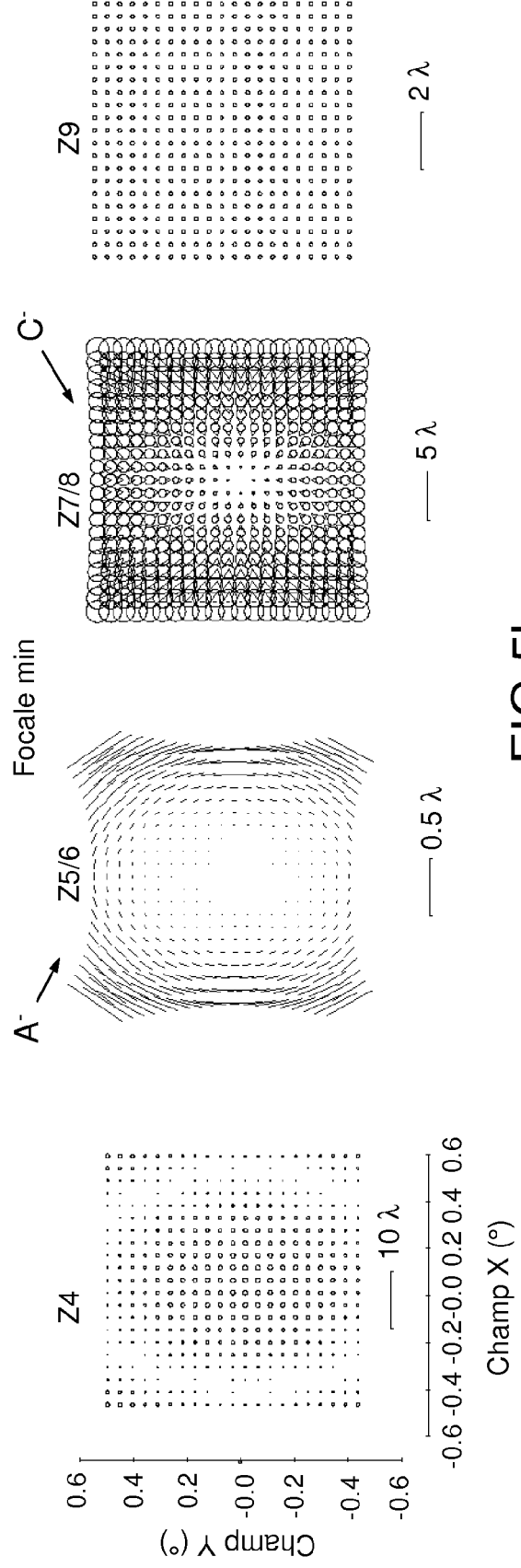


FIG. 5b

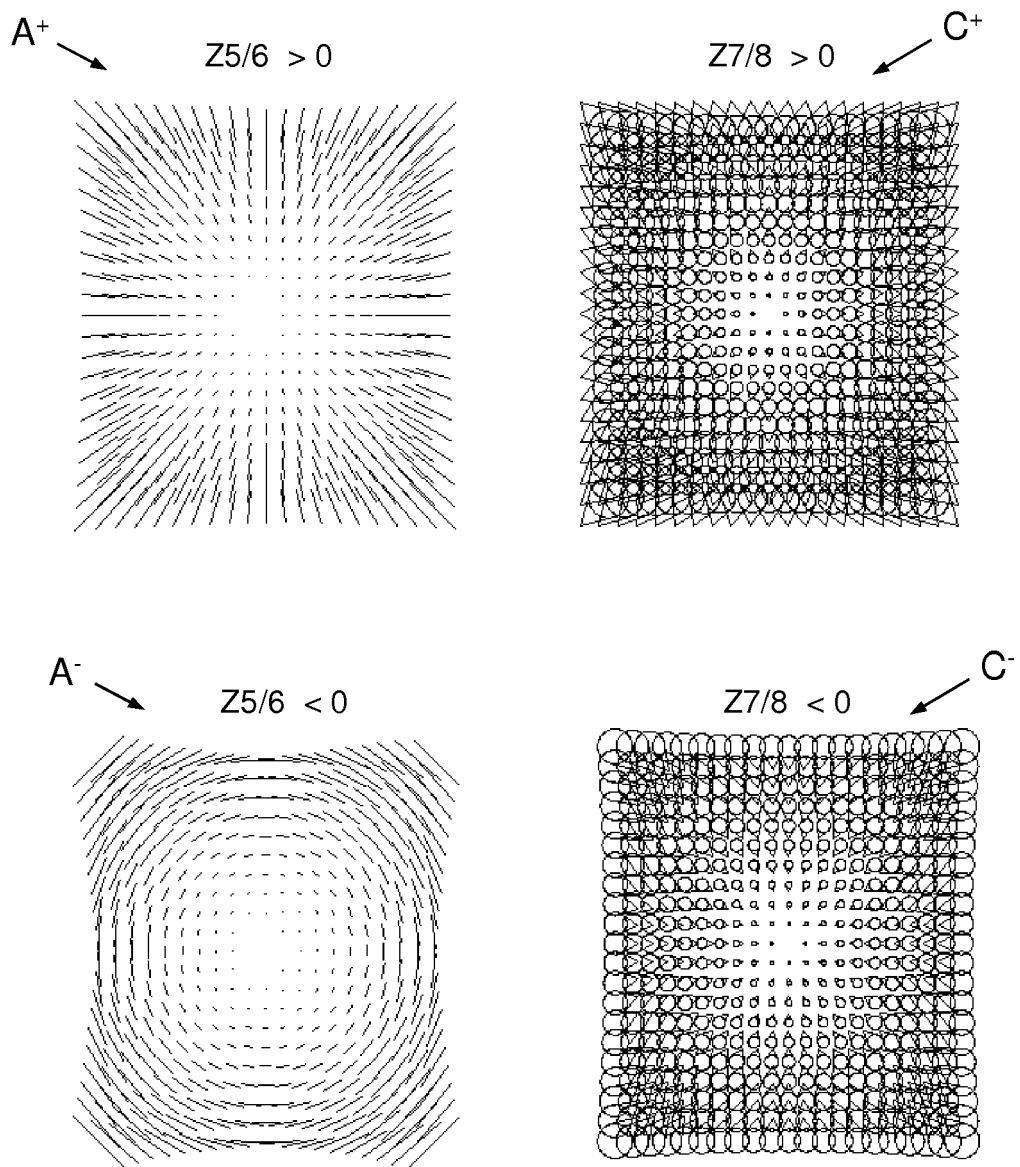


FIG.6

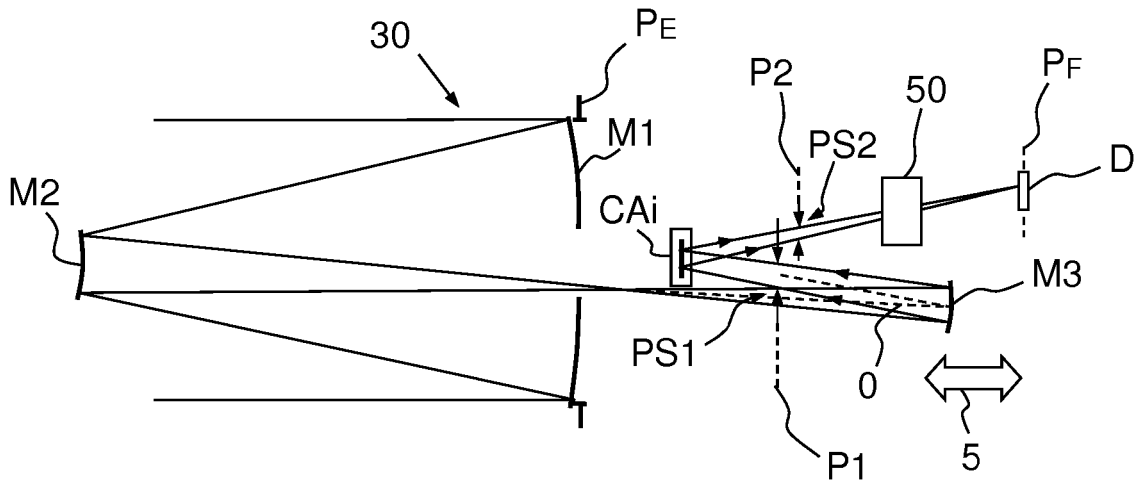


FIG. 7

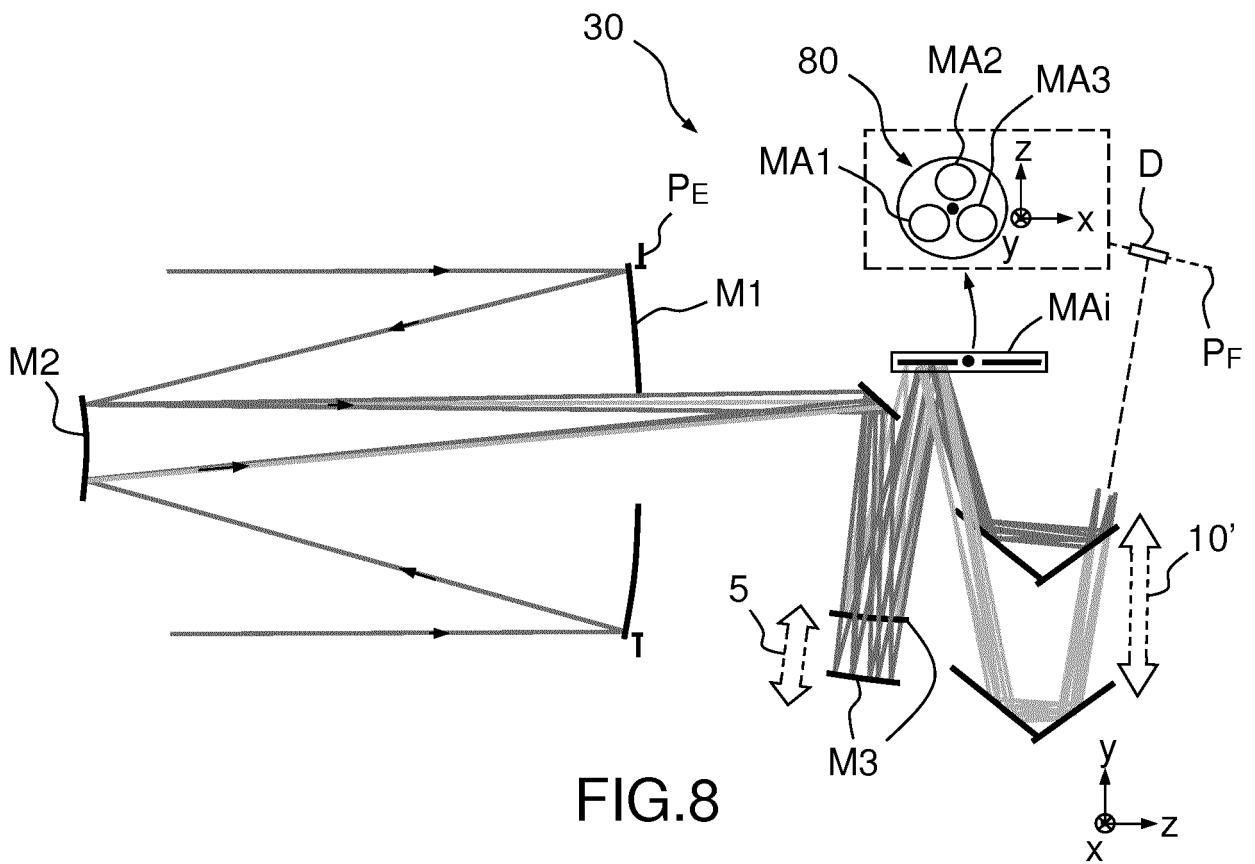


FIG. 8

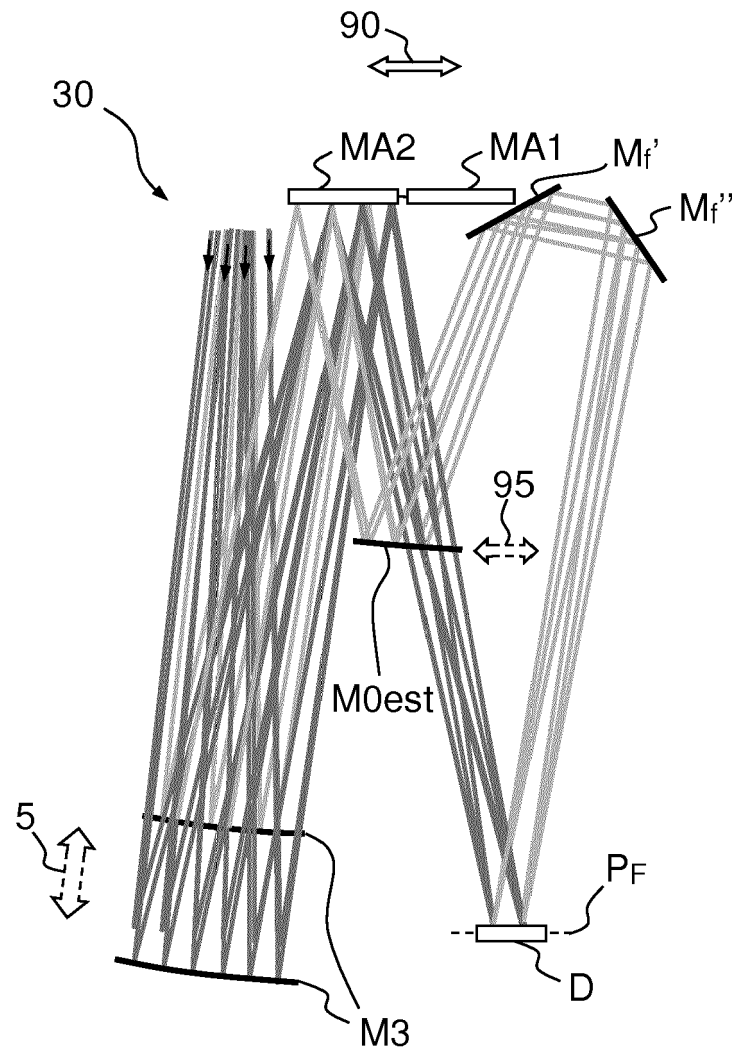


FIG.9

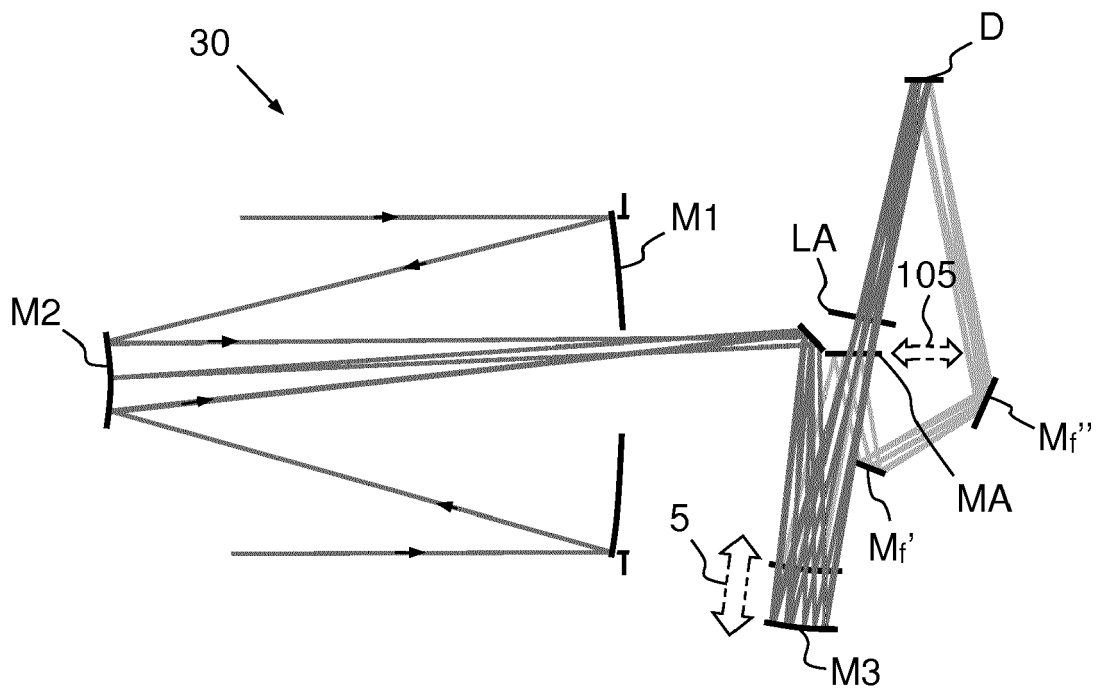


FIG.10

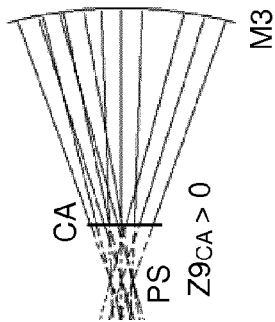
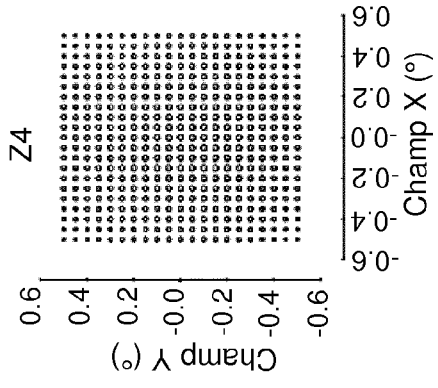
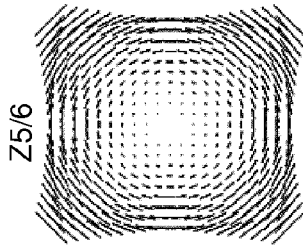
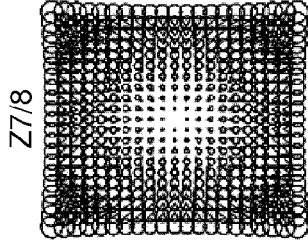
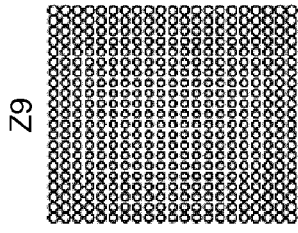


FIG.11a

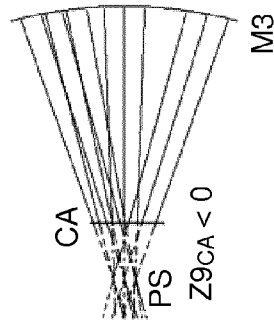
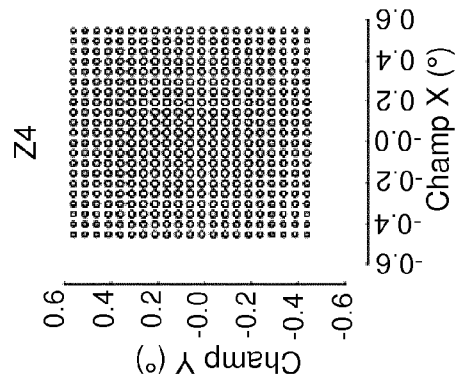
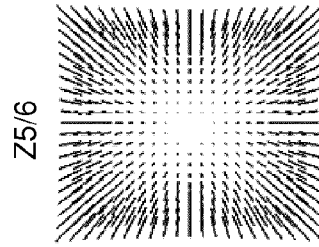
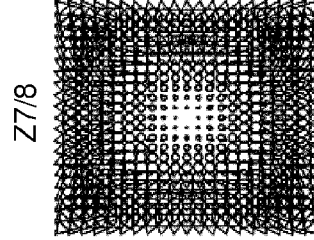
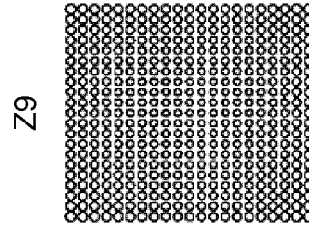


FIG.11b

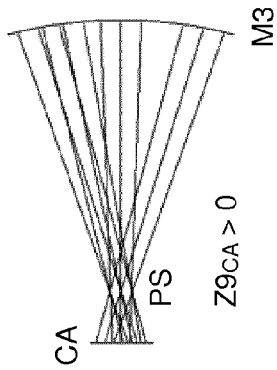
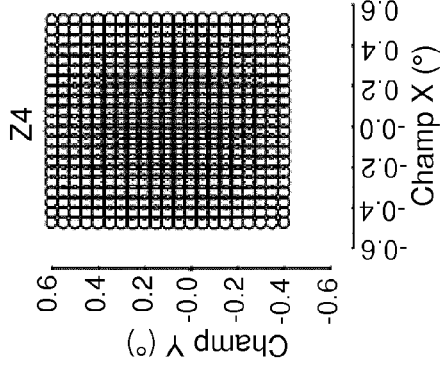
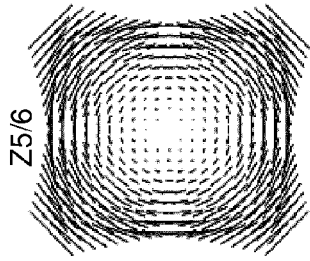
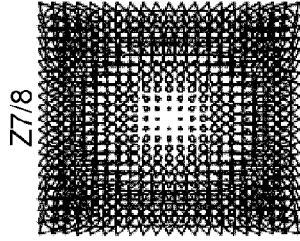
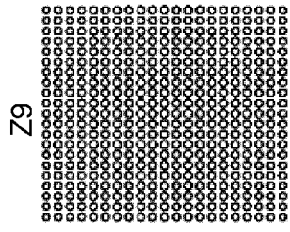


FIG.12a

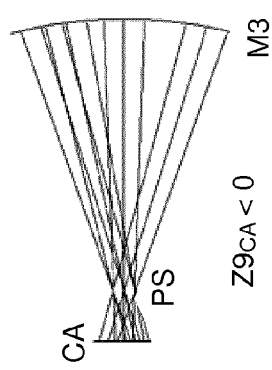
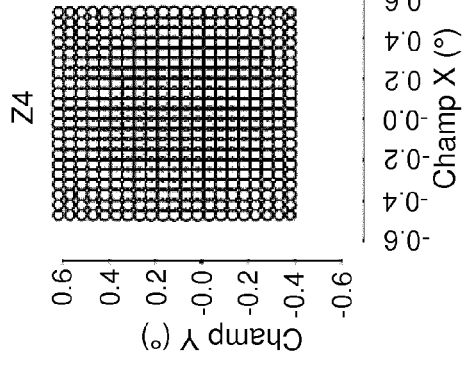
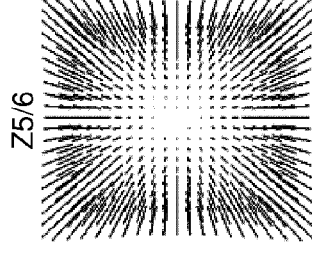
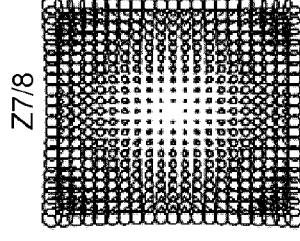
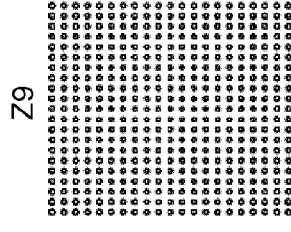
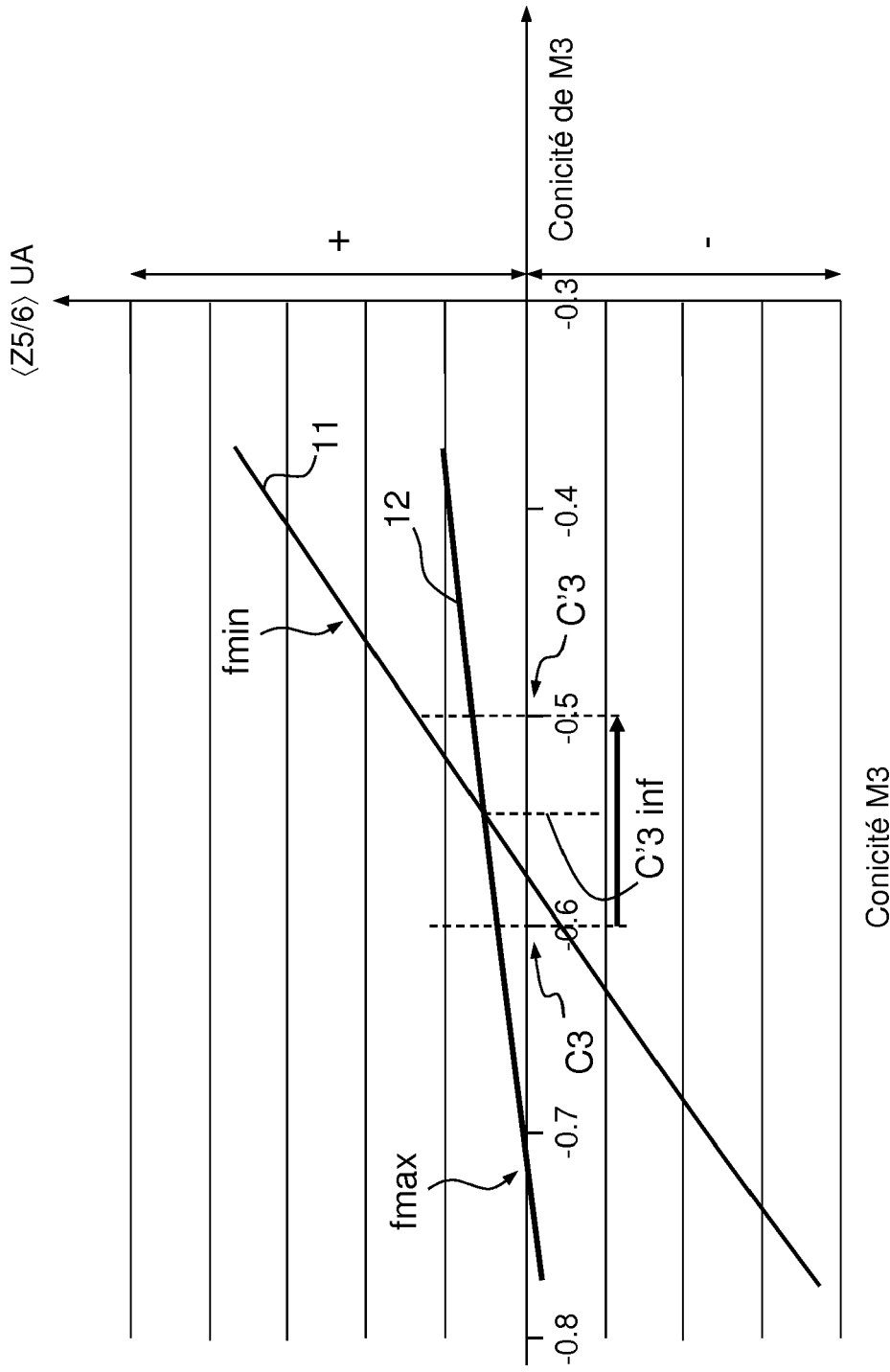


FIG.12b



Conicité M3

FIG.13



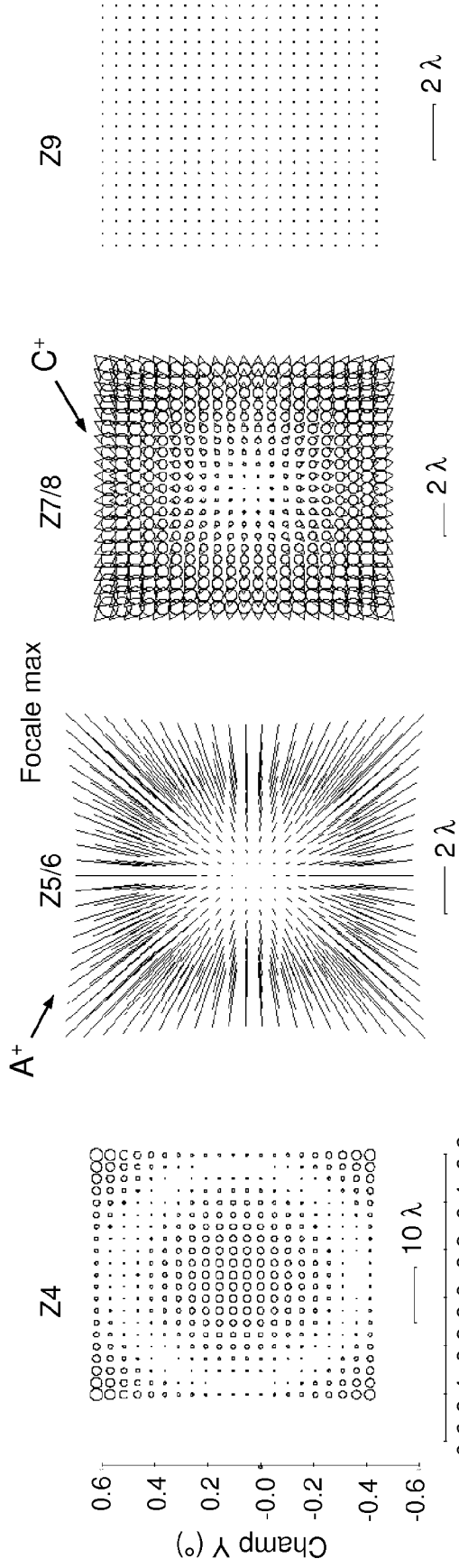


FIG. 14a

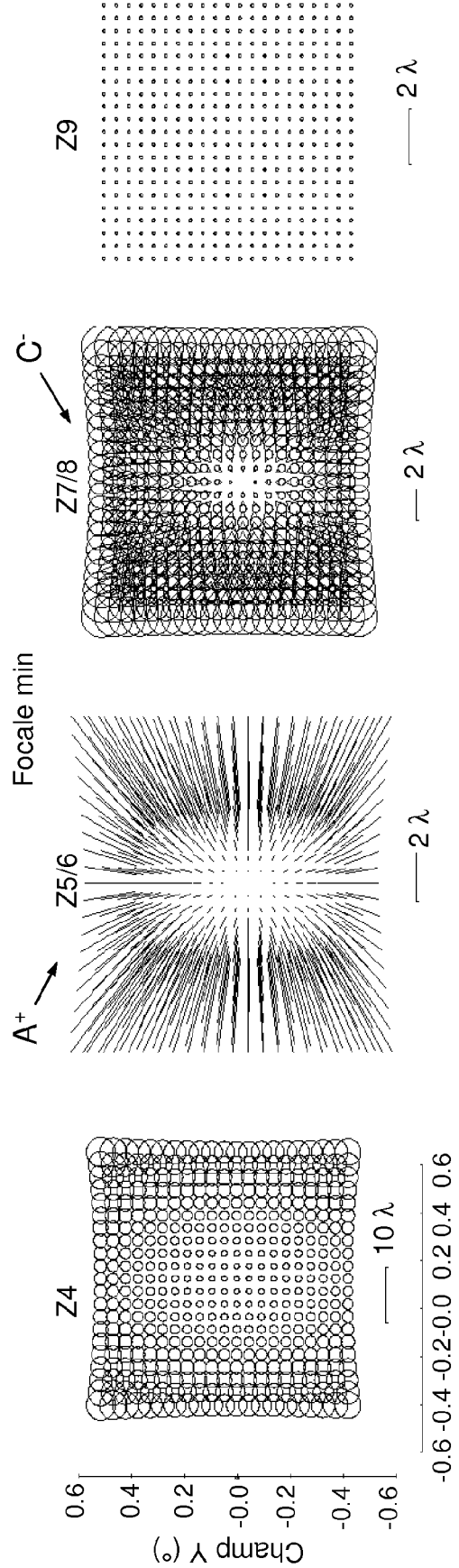


FIG. 14b

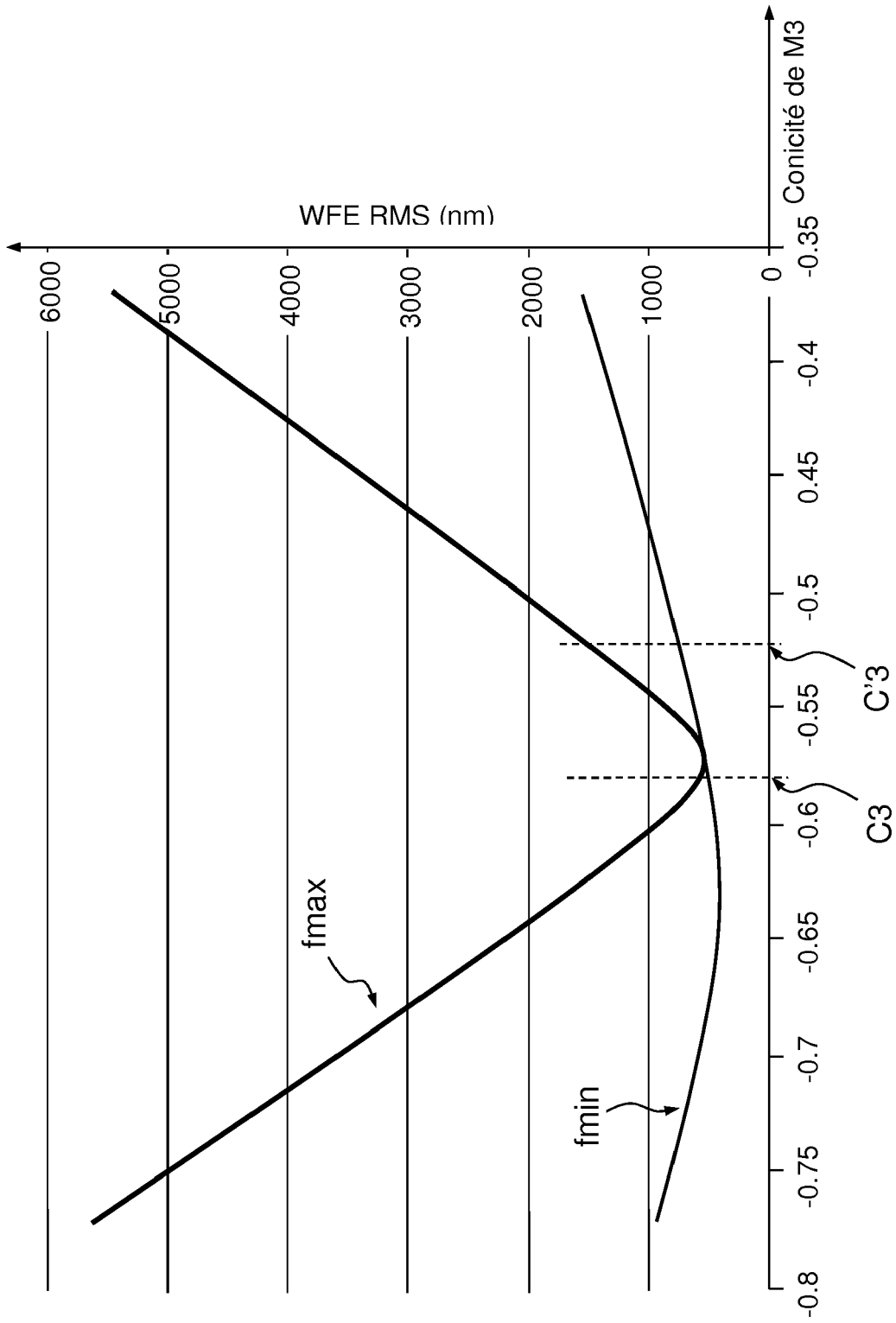
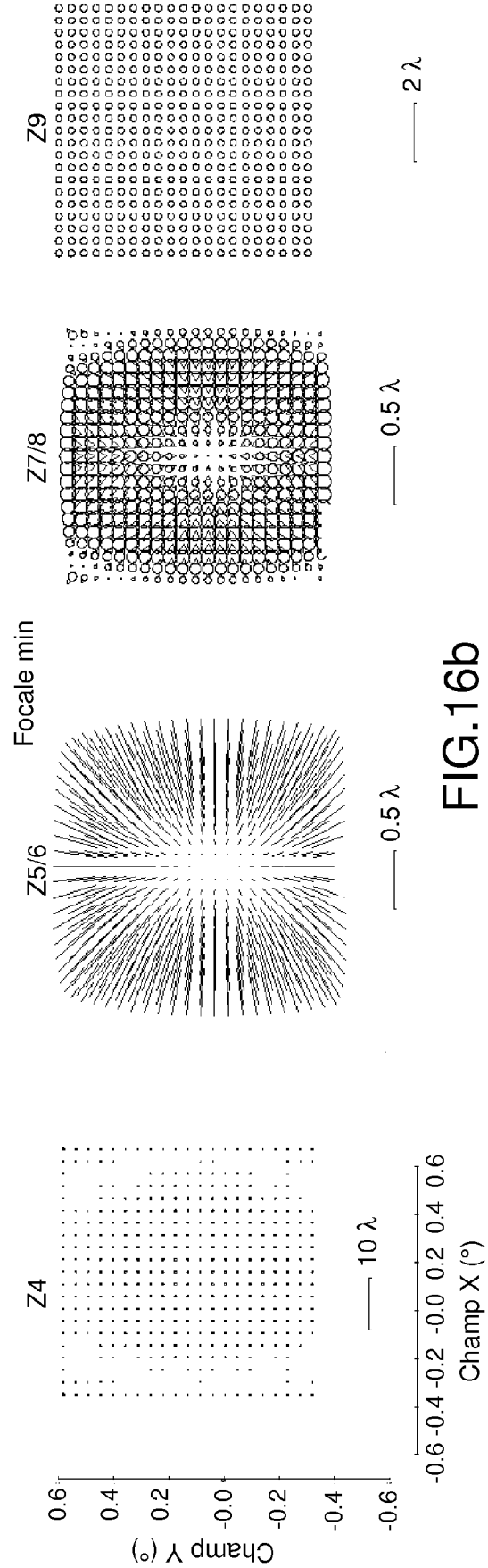
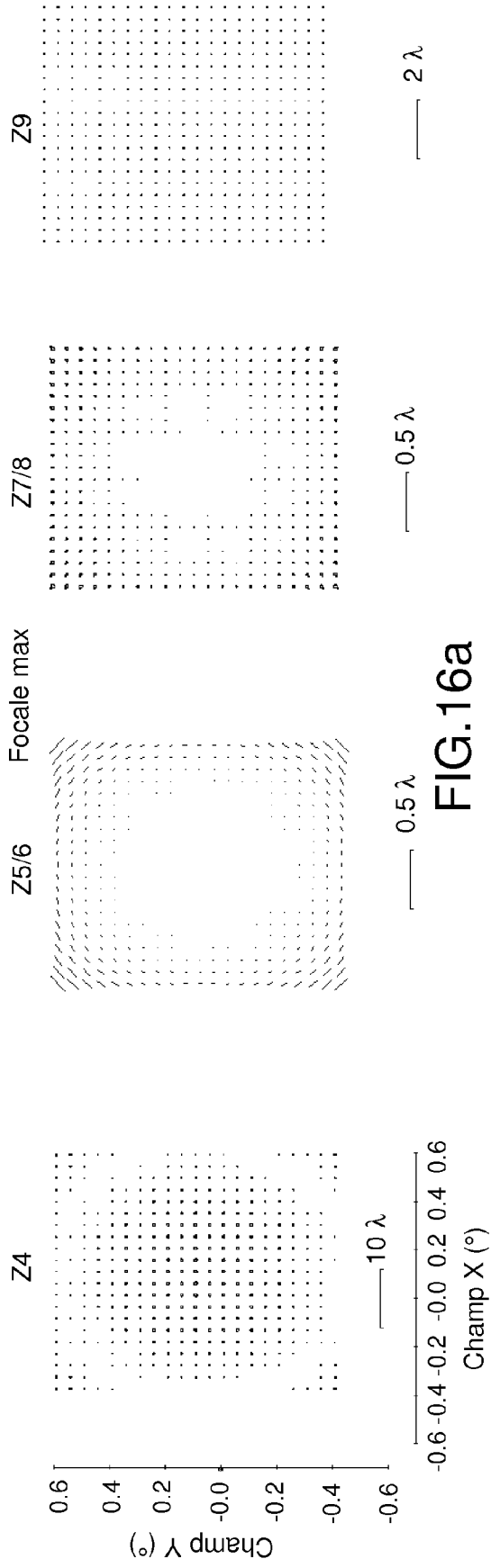


FIG.15



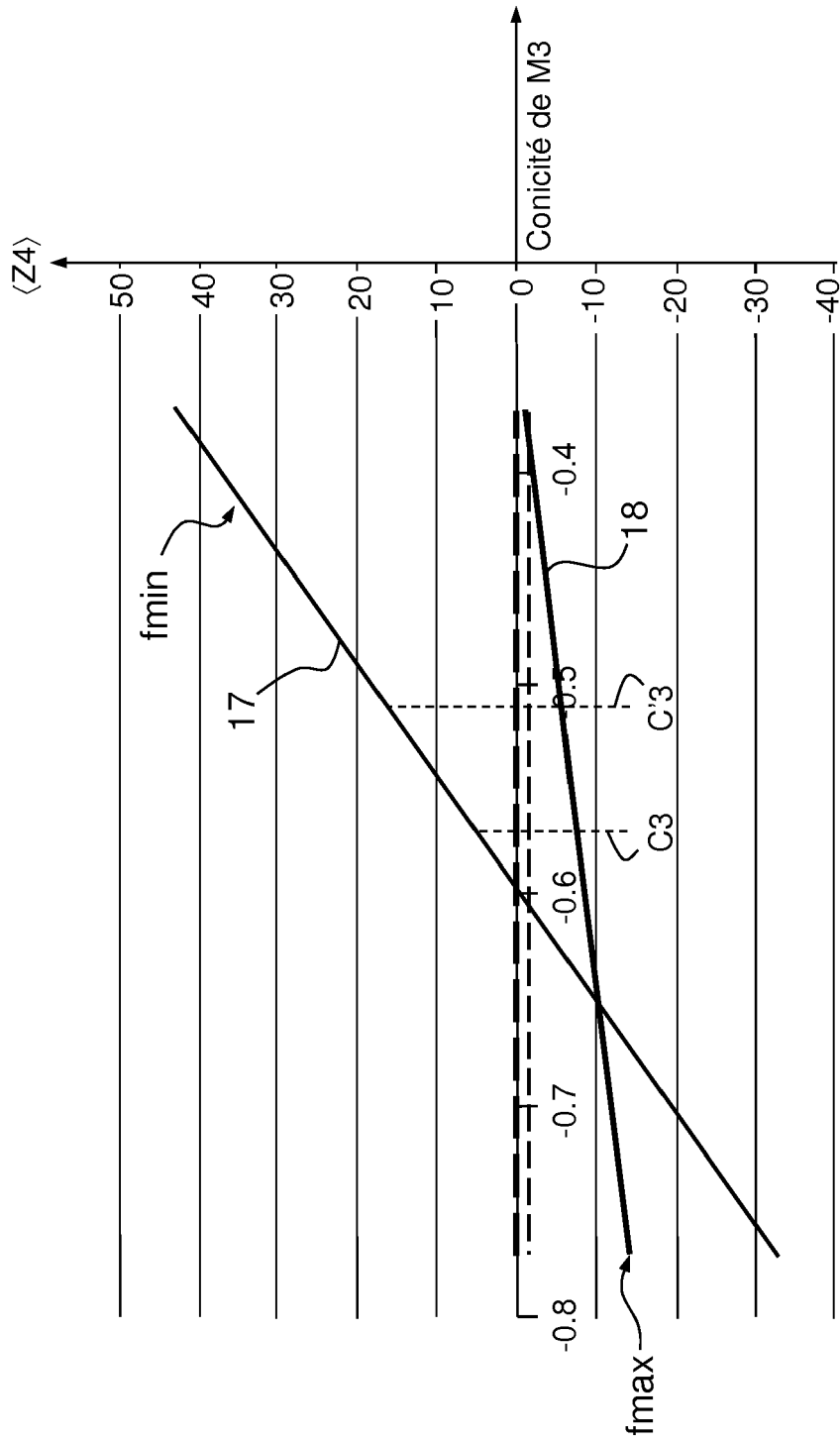


FIG.17

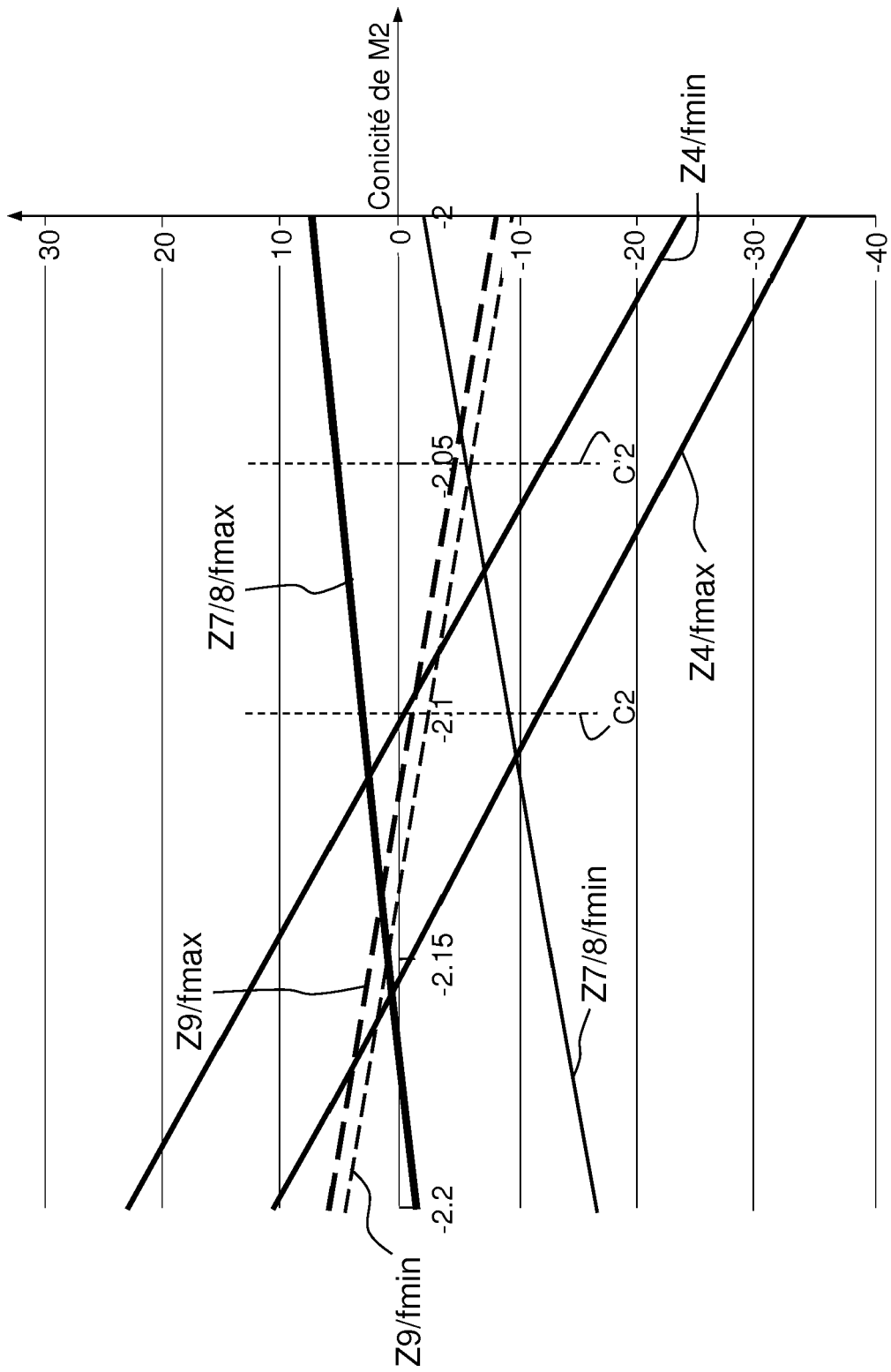


FIG.18

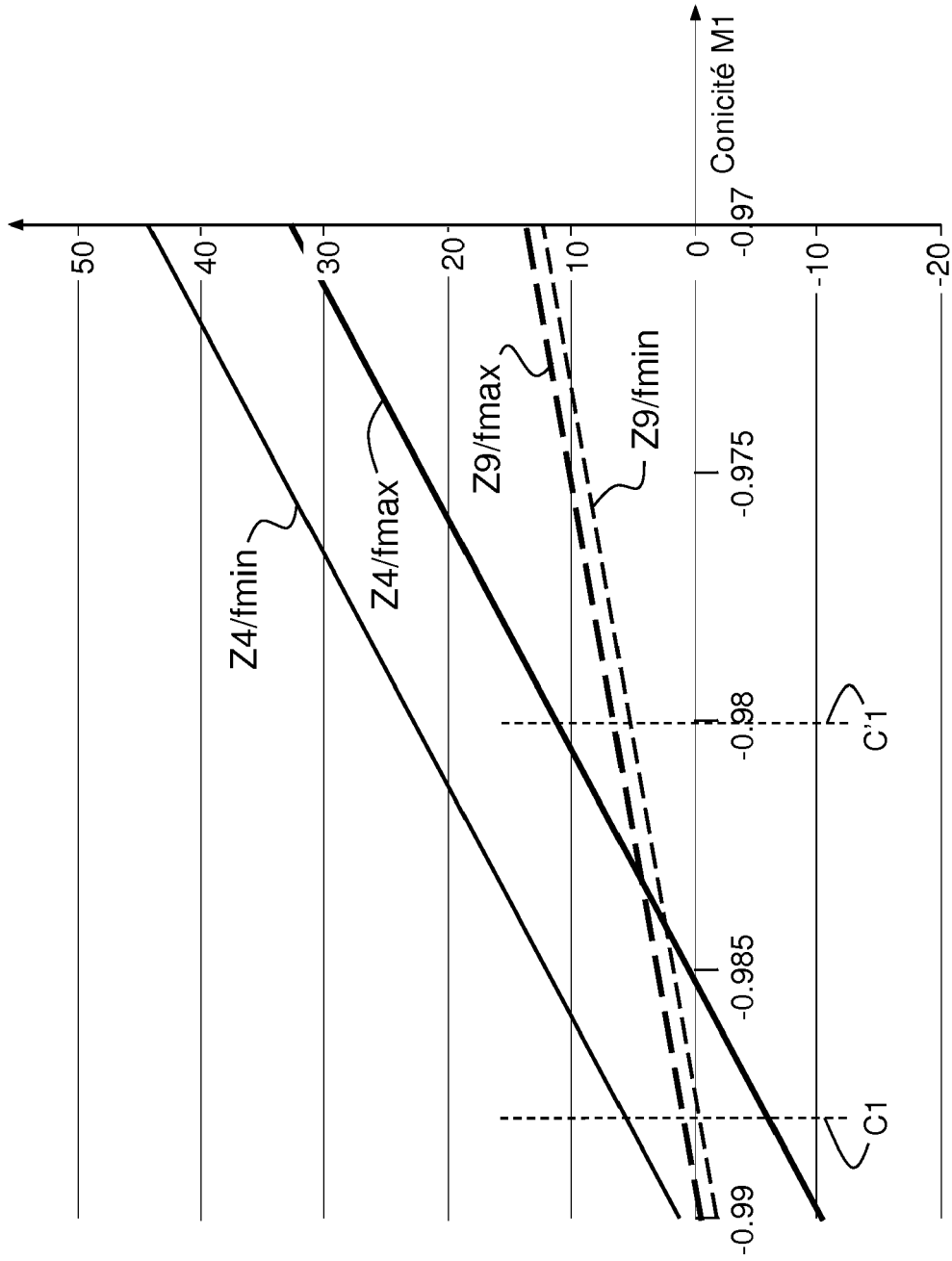
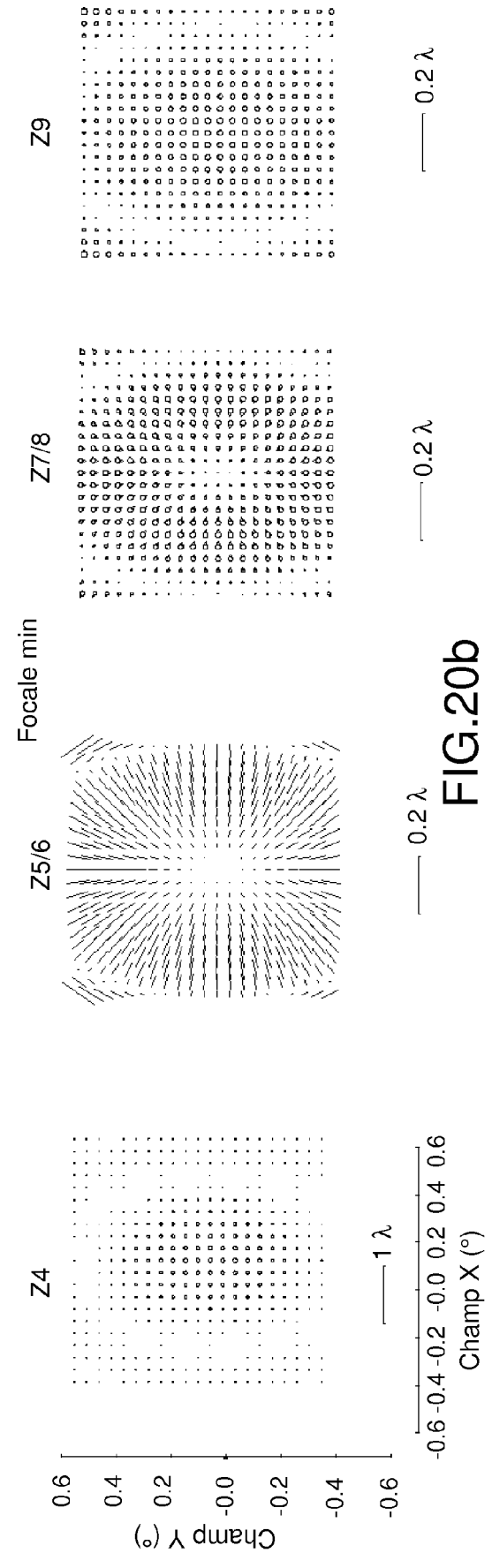
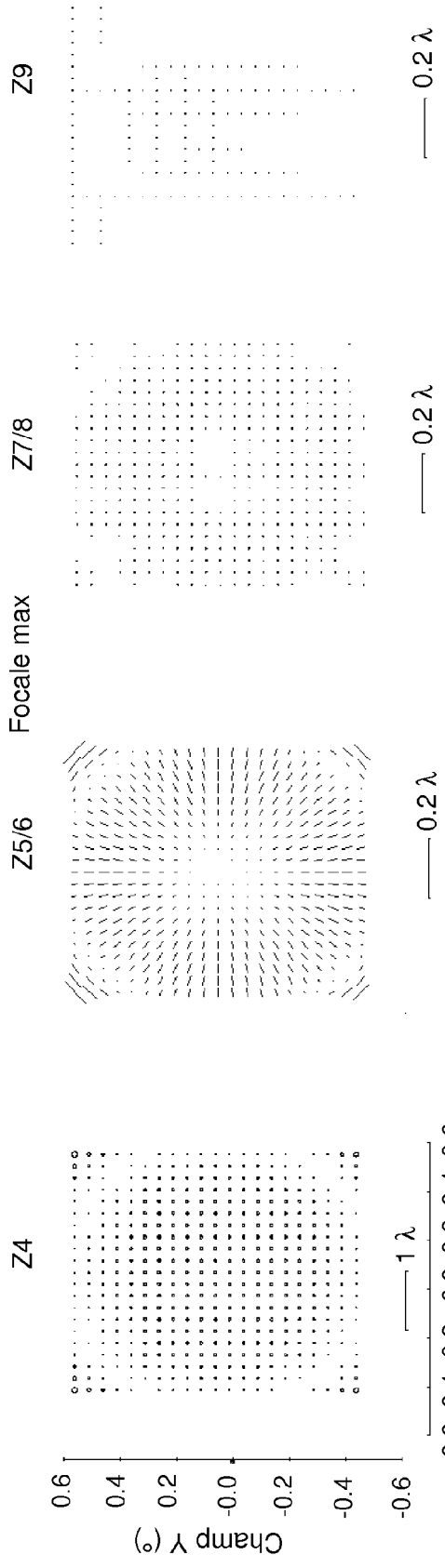


FIG.19



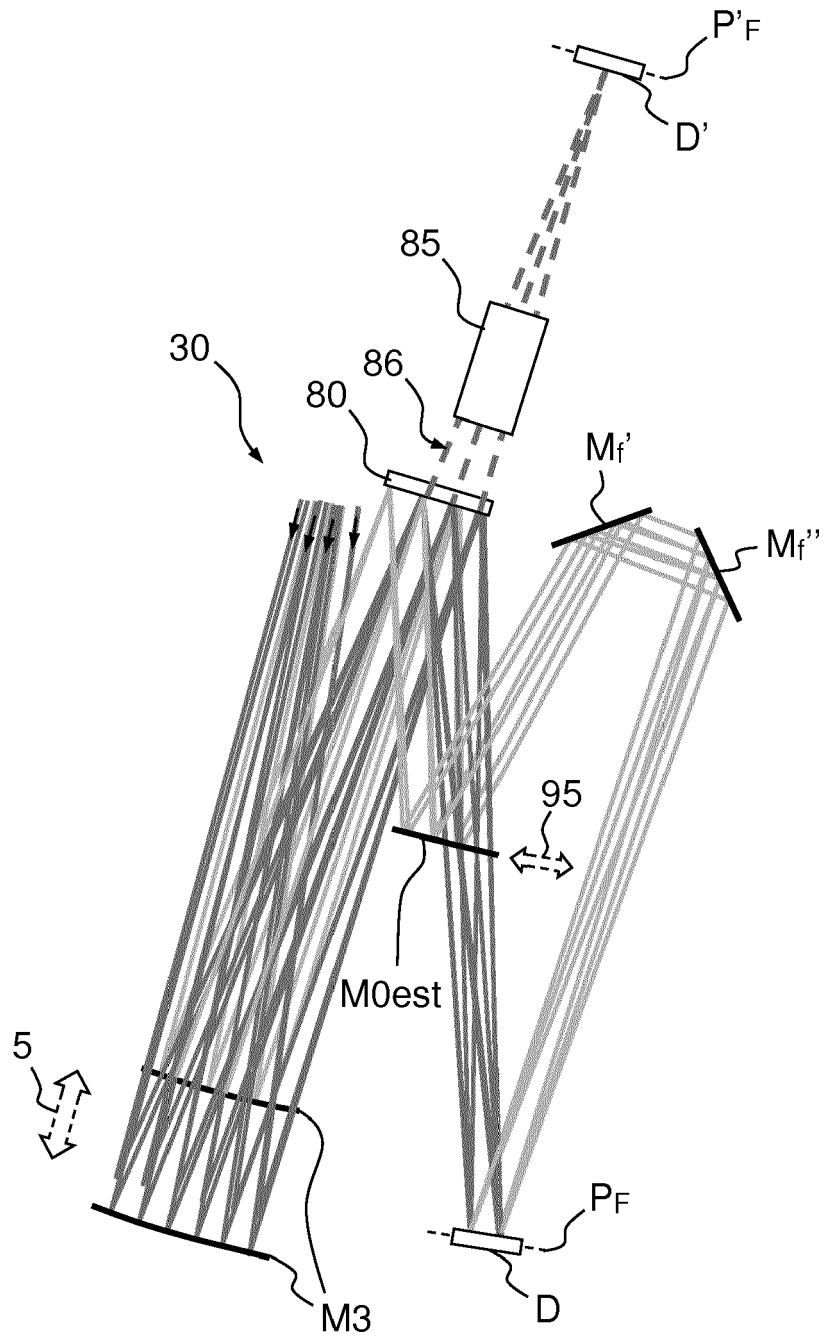


FIG.21



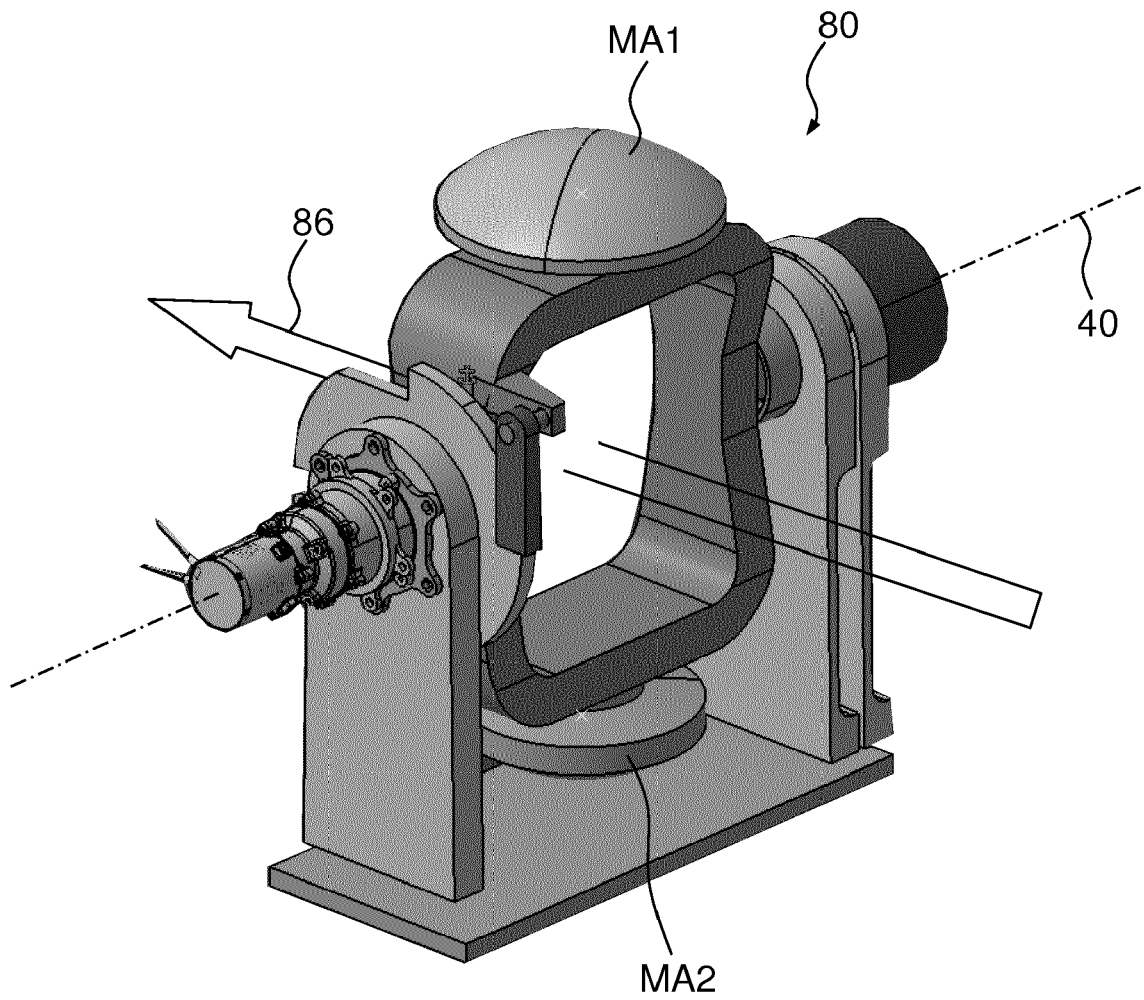


FIG.22

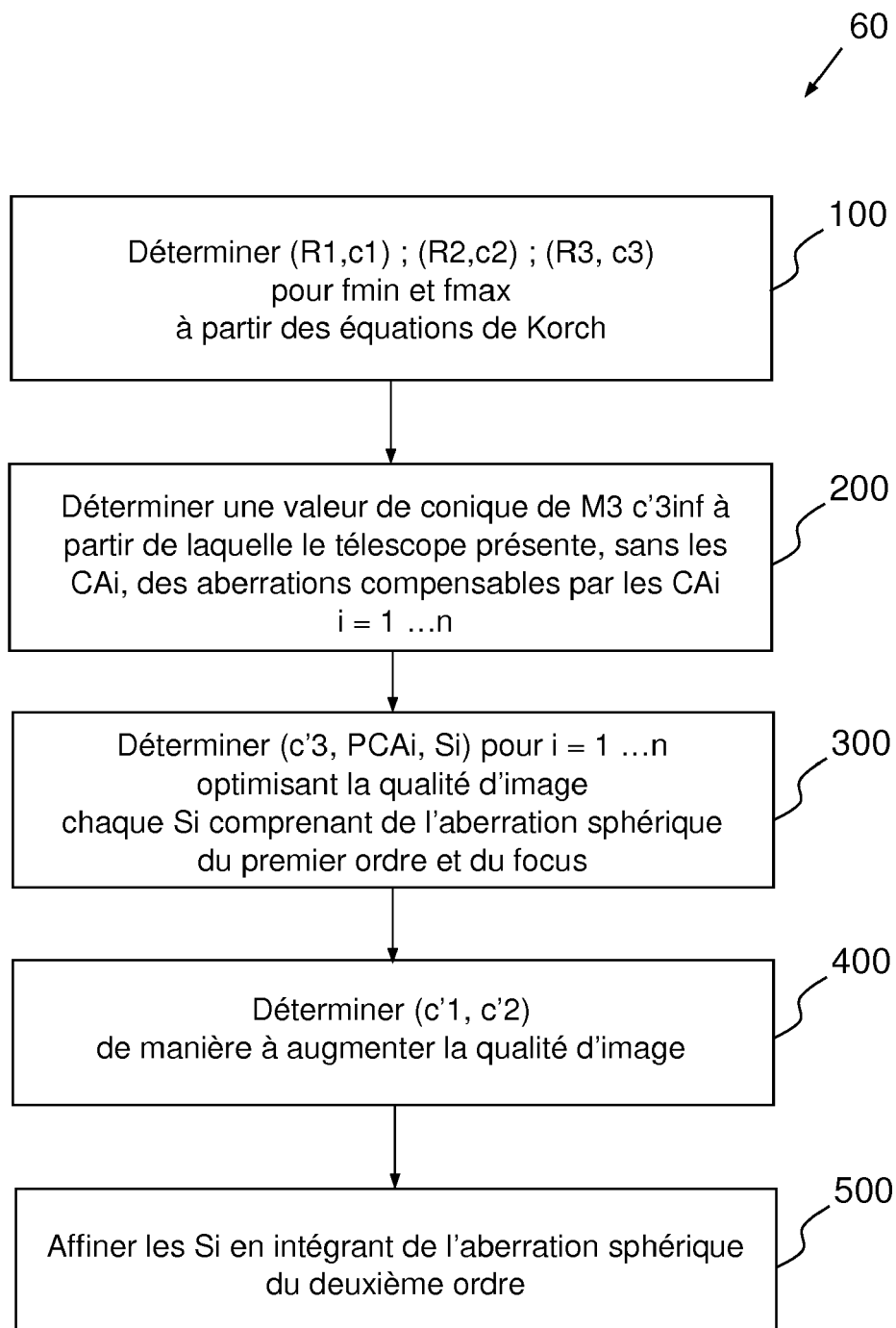


FIG.23

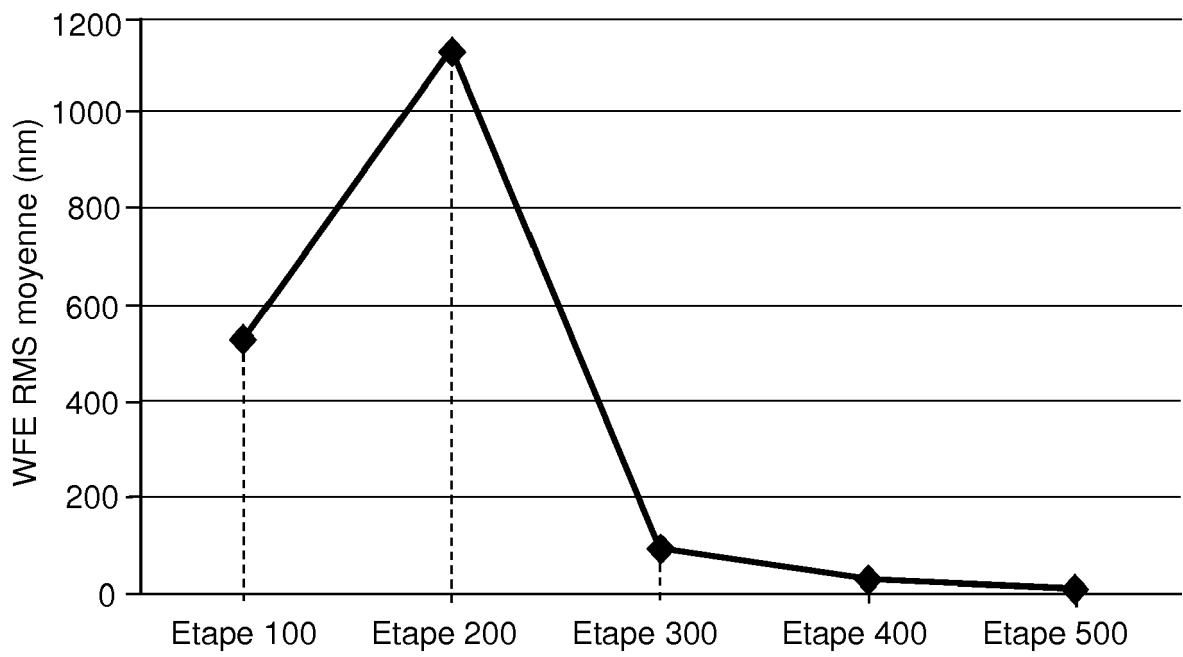


FIG.24



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande  
EP 17 20 5097

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| Catégorie  | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes  | Revendication concernée  | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)                           |
| X<br>A   | US 4 993 818 A (COOK LACY G [US])<br>19 février 1991 (1991-02-19)<br>* figures 1,5 *   | 1,4,9-18<br>2,3,5-8,<br>19,20  | INV.<br>G02B17/06<br>G02B23/06<br>G02B26/06<br>G02B27/00 |
| A  | -----<br>US 6 084 727 A (COOK LACY G [US])<br>4 juillet 2000 (2000-07-04)<br>* figures 1,2 *   | 1-20   |  |
| A  | -----<br>ZHAO XIN ET AL: "Three mirror<br>anastigmatic zoom system using deformable<br>mirrors",<br>INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOTOELECTRONIC<br>DETECTION AND IMAGING 2011: SPACE<br>EXPLORATION TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS,<br>SPIE, 1000 20TH ST. BELLINGHAM WA<br>98225-6705 USA,<br>vol. 8196, no. 1, 9 juin 2011 (2011-06-09)<br>, pages 1-8, XP060016106,<br>DOI: 10.1117/12.900730<br>* chapitre 2 * | 1-20   |  |
| A  | -----<br>US 5 144 476 A (KEBO REYNOLD S [US])<br>1 septembre 1992 (1992-09-01)<br>* figure 1 *   | 1-20   | DOMAINES TECHNIQUES<br>RECHERCHES (IPC)<br>G02B          |
| 1 Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications   |  |  |  |
| Lieu de la recherche<br><b>Munich</b>  |  | Date d'achèvement de la recherche<br><b>1 mars 2018</b>  | Examineur<br><b>Muller, Nicolas</b>                      |
| CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES<br>X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire |  | T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>.....<br>& : membre de la même famille, document correspondant |  |

EPO FORM 1503 03.02 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 17 20 5097

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.  
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

01-03-2018

10

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche |   | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |
|---|---|------------------------|---|------------------------|
| US 4993818                                      | A | 19-02-1991             | AUCUN                                   |                        |
| -----   |   |                        |   |                        |
| US 6084727                                      | A | 04-07-2000             | AUCUN                                   |                        |
| -----   |   |                        |   |                        |
| US 5144476                                      | A | 01-09-1992             | AUCUN                                   |                        |
| -----   |   |                        |   |                        |

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

**RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION**

*Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.*

**Documents brevets cités dans la description**

- US 6084727 A [0020]
- US 6333811 B [0021]
- US 4993818 A [0036]

**Littérature non-brevet citée dans la description**

- **KRISTOF SEIDL et al.** *Wide field-of-view all-reflective objectives designed for multispectral image acquisition in photogrammetric applications* [0022]