

Là-haut...

Accueil Échos Portfolio Annexe Auteur Liens Appendix 

Courtes présentations

This page is available in English, [here](#).

Sommaire :

- 01 - [Profondeur de champ.](#)
- 02 - [Reflex-Nikkor 500mm f/8 Ai.](#)
- 03 - [Quelle est l'ouverture maximum compatible avec la monture Nikon F ?](#)
- 04 - [Micro-Nikkor 55mm f/2.8 \(Ais et AF\).](#)
- 04a - [Effet du système CRC](#) (Close-Range Correction) des deux Micro-Nikkor 55mm f/2.8 (Ais et AF) sur leur distance focale.
- 05 - [AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED.](#)
- 06 - [AF-S DX Micro-Nikkor 85mm f/3.5G ED VR.](#)
- 07 - [Fonctionnement d'un boîtier reflex mono objectif.](#)
- 08 - [Anatomie d'un objectif moderne.](#)
- 08a - [Mouvements combinés.](#)
- 08b - [Moteur piézoélectrique à onde progressive.](#)
- 08c - [Micro-gyromètres vibrants piézoélectriques.](#)

à suivre...

-o---0---o-

Profondeur de champ.

Il existe un grand nombre d'articles consacrés à la notion de profondeur de champ ; je me limite donc ici à une simple présentation graphique après quelques mots d'introduction...

La notion de profondeur de champ est basée sur la tolérance de notre œil au flou, autrement dit sa capacité à assimiler, dans certaines circonstances, une tache à un point. Si notre œil ne présentait aucune tolérance à au flou, seul les objet situés rigoureusement dans le plan de mise au point apparaîtraient nets sur l'image ; par conséquent la restitution d'une scène en trois dimensions sur une image

bidimensionnelle serait impossible avec un appareil photographique classique.

Une image nette est constituée de points que la résolution de l'œil ne permet pas de discerner. Pour une image observée à une distance donnée, il est donc possible de définir la dimension maximum d'un point pour que celui-ci soit effectivement assimilé comme tel par notre œil. Au-delà de cette dimension, les points sont vus comme des taches, et l'image qu'elles constituent est perçue comme floue.

Rapportée au niveau du capteur de l'appareil photographique (compte tenu du facteur d'agrandissement), cette dimension maximum de la "tache image" détermine le diamètre du cercle de confusion C . L'animation ci-dessous montre comment ce cercle de confusion définit la profondeur de foyer dF au centre de l'image pour un Nombre d'ouverture donné N .

L'angle au sommet du cône utile émergent ne dépendant que du Nombre d'ouverture, il en va de même pour la profondeur de foyer (qui ne dépend donc pas de la distance focale) ; on démontre facilement que la profondeur de foyer $dF = 2 \cdot C \cdot N$.

Les points situés aux limites de la profondeur de foyer, côté image, sont conjugués aux points matérialisant les "limites" de la profondeur de champ, côté objet. Dès lors, l'image de tout objet situé à l'intérieur de ces "limites" apparaît nette dans le plan image. La dimension de la "tache image" sur le capteur variant continument au fur et à mesure que le point objet s'éloigne du plan de mise au point, la transition net - flou se fait de manière progressive sur l'image.

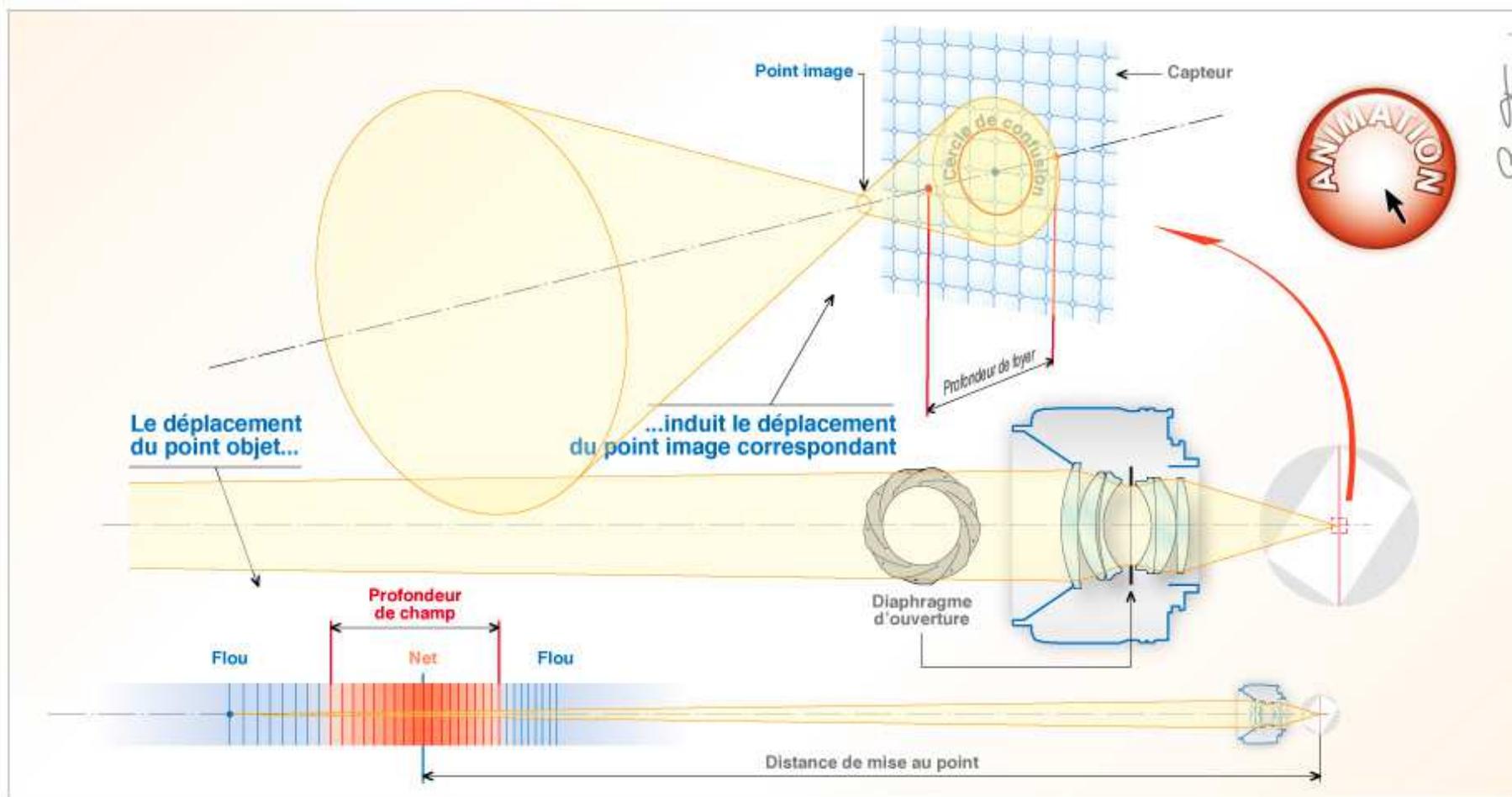


Fig. 01 : Profondeur de foyer – Profondeur de champ.

[Haut de page](#)

-o---0---o-

Reflex-Nikkor 500mm f/8 Ai.

La pupille d'entrée de ce type d'objectif est de forme annulaire. En configuration de mise au point sur l'infini, le demi angle d'ouverture extérieur du cône utile émergent est de $4,28^\circ$ correspond à un Nombre d'ouverture $N \approx 6,7$. C'est ce Nombre d'ouverture qui doit être utilisé dans les calculs de profondeur de champ (ouverture géométrique).



Fig. 04 : Reflex-Nikkor 500mm f/8 Ai.
 Mouse Out : mise au point sur l'infini.
 Mouse Over : mise au point sur la distance minimum (1,5 m).

Le Nombre d'ouverture nominal ($N_{\text{nom}} = 8$) correspond à une valeur corrigée et arrondie prenant en compte la partie centrale aveugle du cône utile émergent.

Le demi angle d'ouverture de la partie aveugle du cône utile émergent est de $2,47^\circ$; cela correspond à un Nombre d'ouverture $N' \approx 11,6$. Compte tenu de la faiblesse des angles au sommet des deux cônes (extérieur et aveugle), le Nombre d'ouverture corrigé de l'objectif peut être calculé simplement d'après le diamètre d'une surface circulaire d'aire égale à celle de la surface annulaire de la pupille d'entrée.

Diamètre extérieur de la pupille d'entrée : $\varnothing_{\text{ext}} = f' / N \approx 499 / 6,7 \approx 74,5 \text{ mm}$.

Aire correspondante : $S_{\text{ext}} \approx 4356,5 \text{ mm}^2$.

Diamètre de la partie aveugle de la pupille d'entrée : $\varnothing_{\text{int}} = f' / N' \approx 499 / 11,6 \approx 43,0 \text{ mm}$.

Aire correspondante : $S_{\text{int}} \approx 1453,4 \text{ mm}^2$.

Aire d'une surface circulaire équivalente : $S_{\text{eq}} = S_{\text{ext}} - S_{\text{int}} \approx 2903,1 \text{ mm}^2$.

Diamètre correspondant : $\varnothing_{\text{eq}} = \sqrt{4 * S_{\text{eq}} / \pi} \approx 60,8 \text{ mm}$.

Nombre d'ouverture corrigé : $N_{\text{cor}} = f' / \varnothing_{\text{eq}} = 499 / 60,8 \approx 8,2$.

Nota :

- En corrigeant l'ouverture de cette manière on considère que tous les rayons lumineux émergents transmettent au capteur la même quantité d'énergie. Or, ceci n'est pas vrai : les rayons proches de l'axe optique transmettent plus d'énergie que les rayons obliques. La partie aveugle du cône utile émergent étant plus proche de l'axe optique que la partie périphérique, l'ouverture corrigée ainsi obtenue est donc une valeur par défaut.
- Cette correction géométrique du Nombre d'ouverture n'aboutit pas à une ouverture photométrique (T) car elle ne tient compte ni de la transmission des éléments réfractifs, ni de la réflectance des miroirs (l'ouverture photométrique est proche de $T \approx 9.5$).

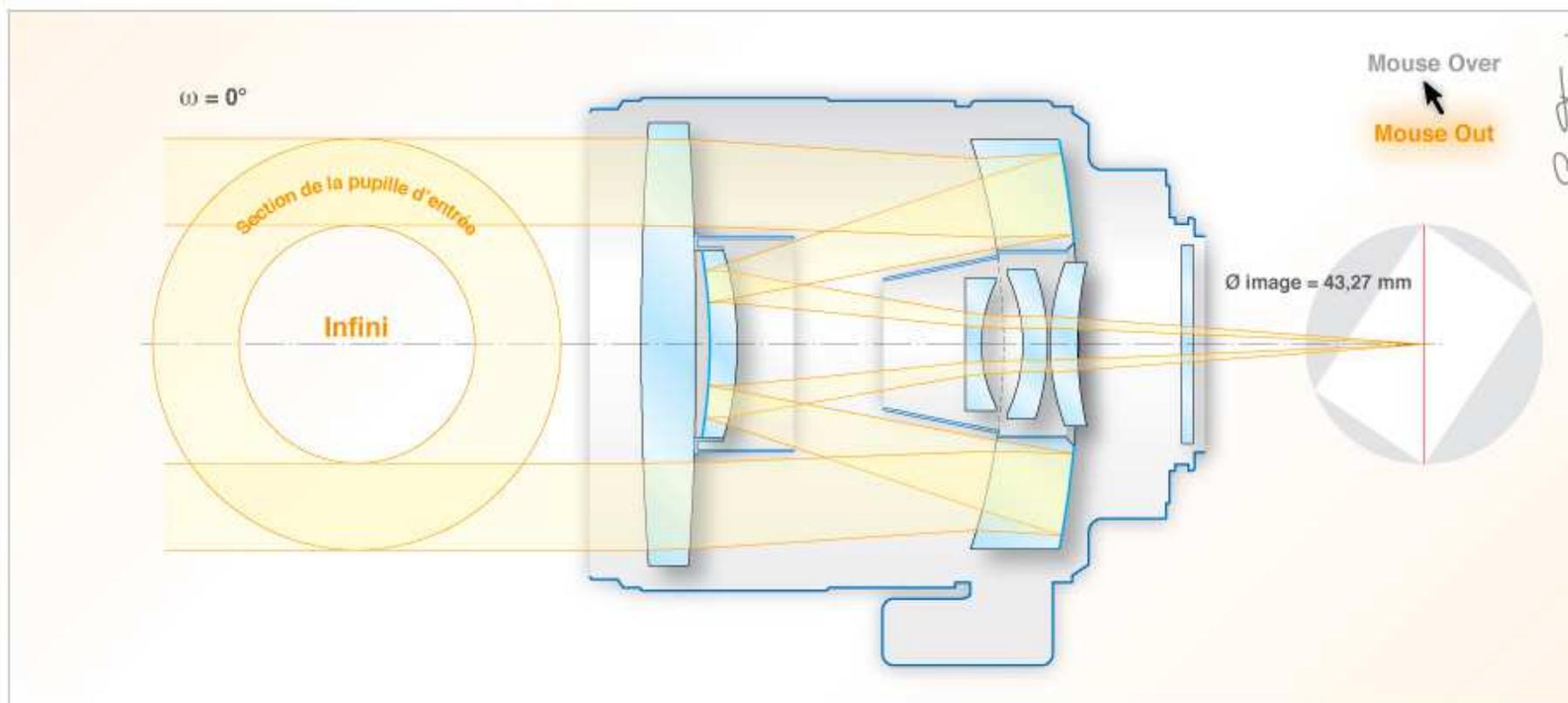


Fig. 05 : Reflex-Nikkor 500mm f/8 Ai.

Mouse Out : section de la pupille d'entrée du faisceau axial.

Mouse Over : section de la pupille d'entrée du faisceau d'inclinaison extrême.

Sur l'image, la forme annulaire de la pupille d'entrée se retrouve dans les taches floues des objets lumineux ponctuels situés en dehors du plan de mise au point. A la périphérie de l'image, ces anneaux apparaissent plutôt sous formes de croissants fermés. La partie épaisse du croissant est tournée vers le centre de l'image pour les objets situés en deçà du plan de mise au point, alors que pour les objet situés au-delà elle est tournée vers l'extérieur de l'image.

Référence : brevet US 4,666,259 (1987) de M. Yutaka Iizuka. Exemple n° 1.

[Haut de page](#)

-o---o---o-

Quelle est l'ouverture maximum compatible avec la monture Nikon F ?

La monture F de Nikon est apparue pour la première fois en 1959 lors de la sortie du boîtier reflex Nikon F. Les dimensions de la baïonnette et le tirage optique minimum compatible avec le fonctionnement du miroir reflex déterminent l'angle d'ouverture maximum du cône utile émergent des objectifs d'un système de boîtiers reflex. Dans le système Nikon, cet angle est de 54° environ. Ainsi, sans tenir compte des accessoires de transmission électriques et/ou mécaniques venant éventuellement encore réduire la section de passage de la lumière, le Nombre d'ouverture minimum théorique est supérieur à $N \approx 1.1$.

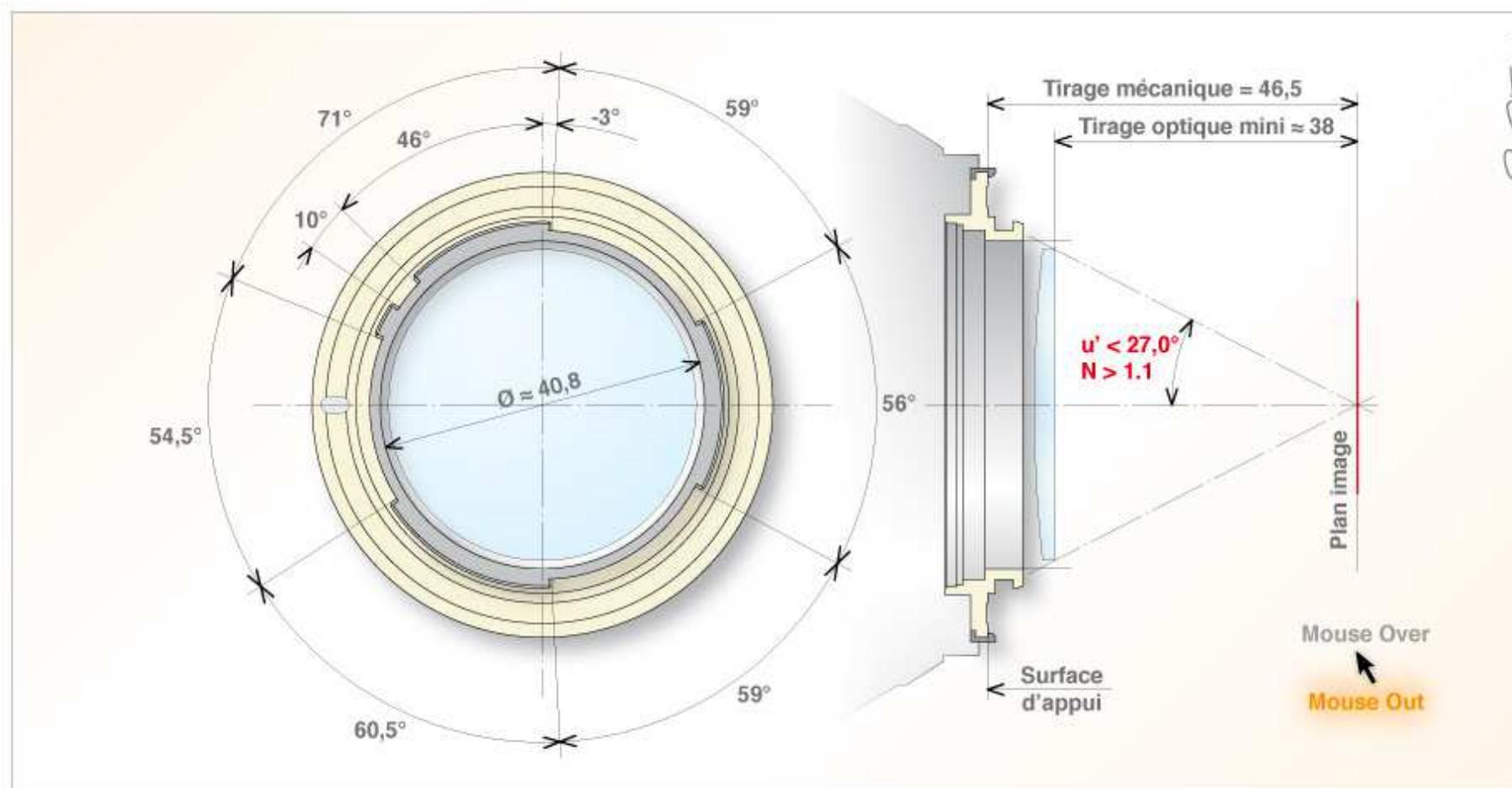


Fig. 06 : Baïonnette Nikon F.
Mouse Out : baïonnette seule.
Mouse Over : avec bus de couplage électrique.

Cependant, lorsqu'on considère la taille des éléments optiques arrières d'un 50 mm f/1.2 et l'espace indispensable aux éléments mécaniques les supportant, il est très vraisemblable que la limite pratique soit plus proche de $N \approx 1.2$, soit un cône utile émergent de 49.2° d'ouverture angulaire ($2 \times 24.6^\circ$).

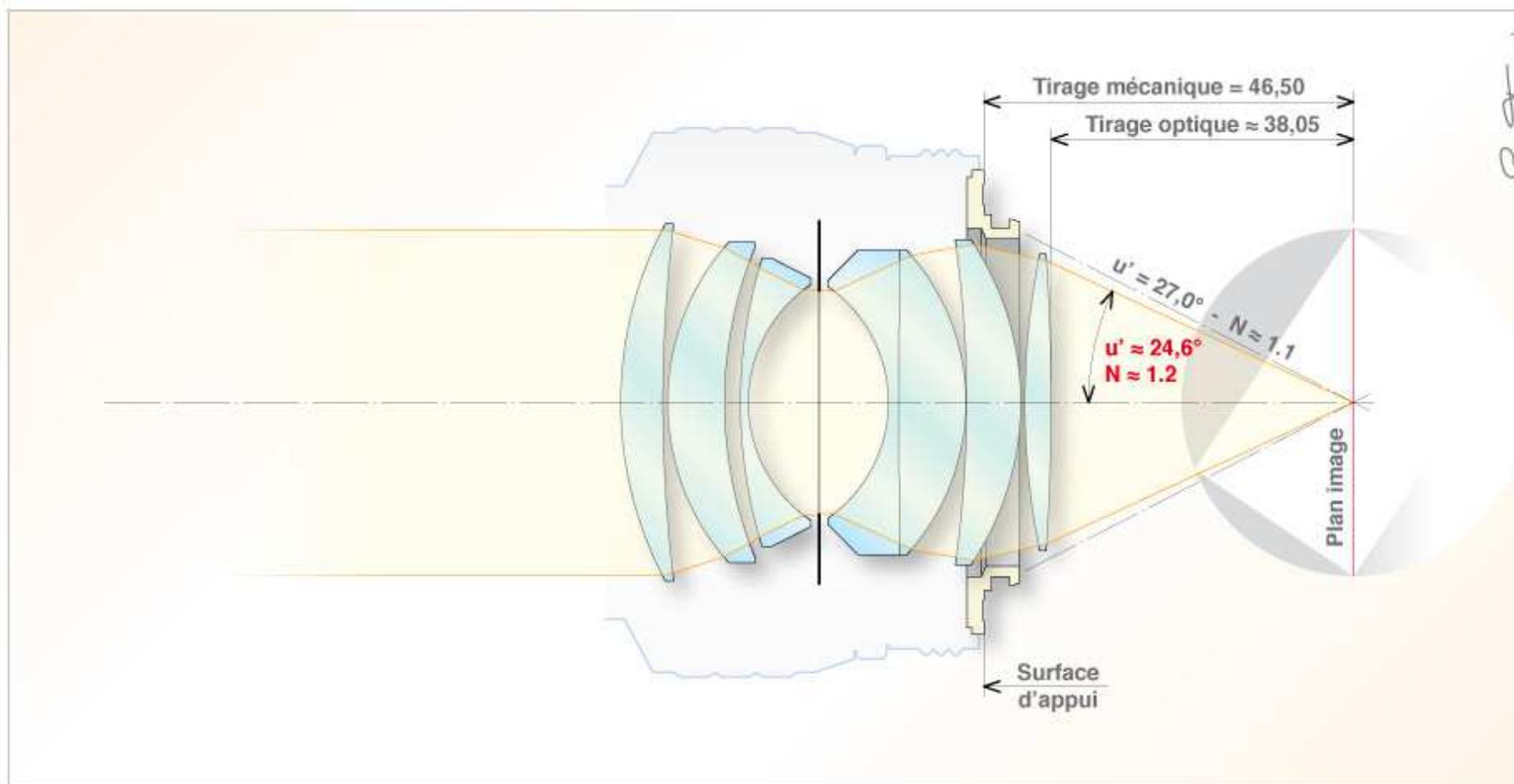


Fig. 06bis : *Ouverture angulaire du cône utile émergent d'un 50 mm F/1.2.*

Le Nikkor-N 5cm f/1.1 pour boîtiers télémétriques en monture S est sorti en 1956 ; c'était "le second objectif de l'Histoire offrant une ouverture supérieure à f/1.2". Le faible tirage optique autorisé par ce type d'appareil photographique (sans miroir reflex) simplifie la conception d'objectifs lumineux ayant un diamètre de monture réduit.

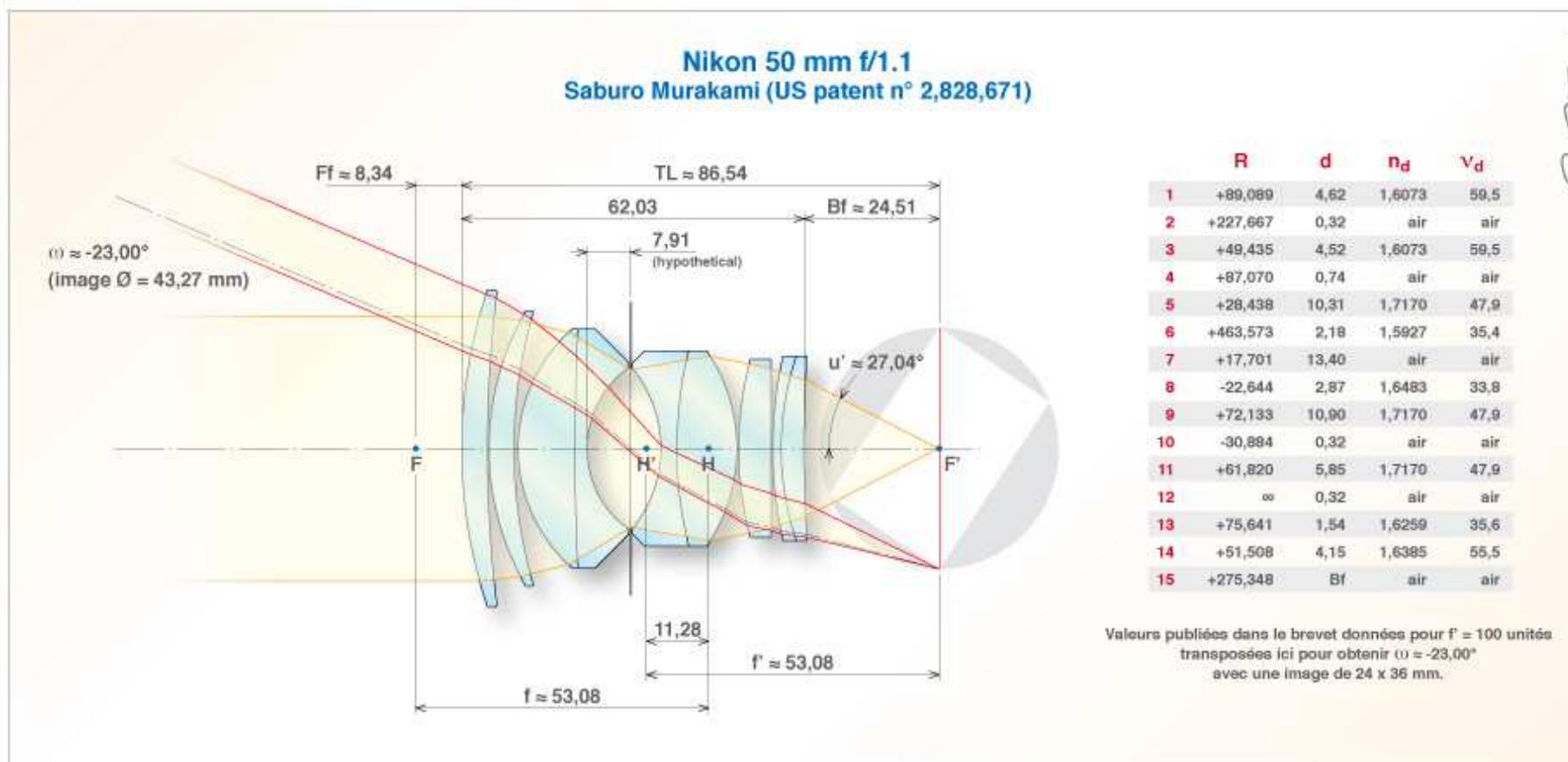


Fig. 06ter: système optique du Nikkor-N 5cm f/1.1.

[Haut de page](#)

-o---0---o-

Micro-Nikkor 55mm f/2.8 Ais et AF Micro-Nikkor 55mm f/2.8.

D'après le brevet US 4,260,223 (1981) de M. Yoshinari Hamanishi. Exemple n° 1.

Les valeurs données pour $f' = 100$ unités dans le brevet sont transposées ici pour obtenir $f' = 55$ mm.

Ces deux objectifs partagent le même système optique (type double Gauss). Bien que conçu dès l'origine pour couvrir des valeurs de grandissement transversal allant jusqu'à $g = -1$, ce système optique est resté mécaniquement bridé au grandissement $g = -0,5$ jusqu'à l'adoption de la mise au point automatique, fin 1986.

Le Micro-Nikkor 55mm f/2.8 Ais est sorti en décembre 1979 (4 mois seulement après enregistrement de la demande de brevet aux USA).

Un système CRC (Close-Range Correction) permet de maintenir un niveau de performance élevé sur toute la plage de distances de mise au point et en particulier à fort grandissement. Sur les objectifs de type double Gauss, cette correction s'effectue en modifiant l'espace entre le groupe frontal et le groupe arrière au fur et à mesure que le grandissement augmente (de 7,3 mm à l'infini jusqu'à 12 mm à la mise au point minimum). En pratique, le groupe frontal avance plus vite que le groupe arrière lorsque le plan de mise au point se rapproche.

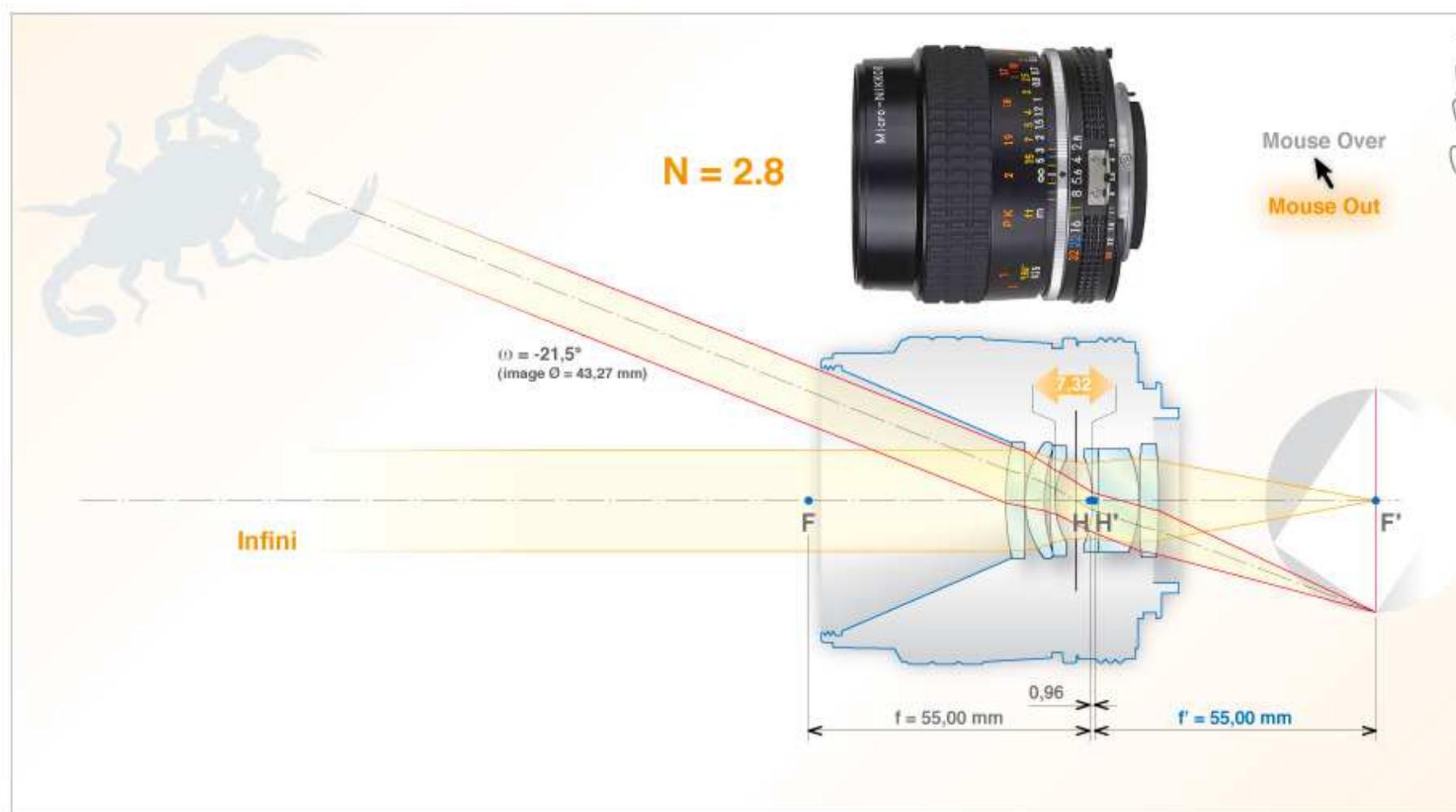


Fig. 07 : *Micro-Nikkor 55mm f/2.8 Ais.*
Mouse Out : mise au point sur l'infini.
Mouse Over : mise au point minimum (0,25 m).

Le AF Micro-Nikkor 55mm f/2.8 est sorti en septembre 1986.

Cet objectif permet d'exploiter la totalité de la plage de grandissement pour lequel son système optique a été conçu. Le grandissement $g = -1$ est atteint à une distance de mise au point légèrement inférieure à 23 cm. Le système CRC opérant sur une plage plus étendue, l'espace séparant le groupe frontal et le groupe arrière augmente jusqu'à 16,4 mm à la mise au point minimum.



Fig. 08 : AF Micro-Nikkor 55mm f/2.8.
 Mouse Out : mise au point sur l'infini.
 Mouse Over : mise au point minimum (0,229 m).

Une bague allonge de 27,5 mm (Nikon PK-13) est nécessaire pour pouvoir atteindre le grandissement $g = -1$ avec la version Ais. Mais dans

ce cas, le système CRC ne pouvant aller au-delà de la configuration adaptée au grandissement $g = -0,5$ (valeur maximum de l'objectif seul), les performances de l'objectif aux extrêmes bords du champ ne sont pas optimales (astigmatisme et courbure de champ). Le modèle AF, avec un système CRC opérant continuellement jusqu'au grandissement $g = -1$ permet de meilleures performances.

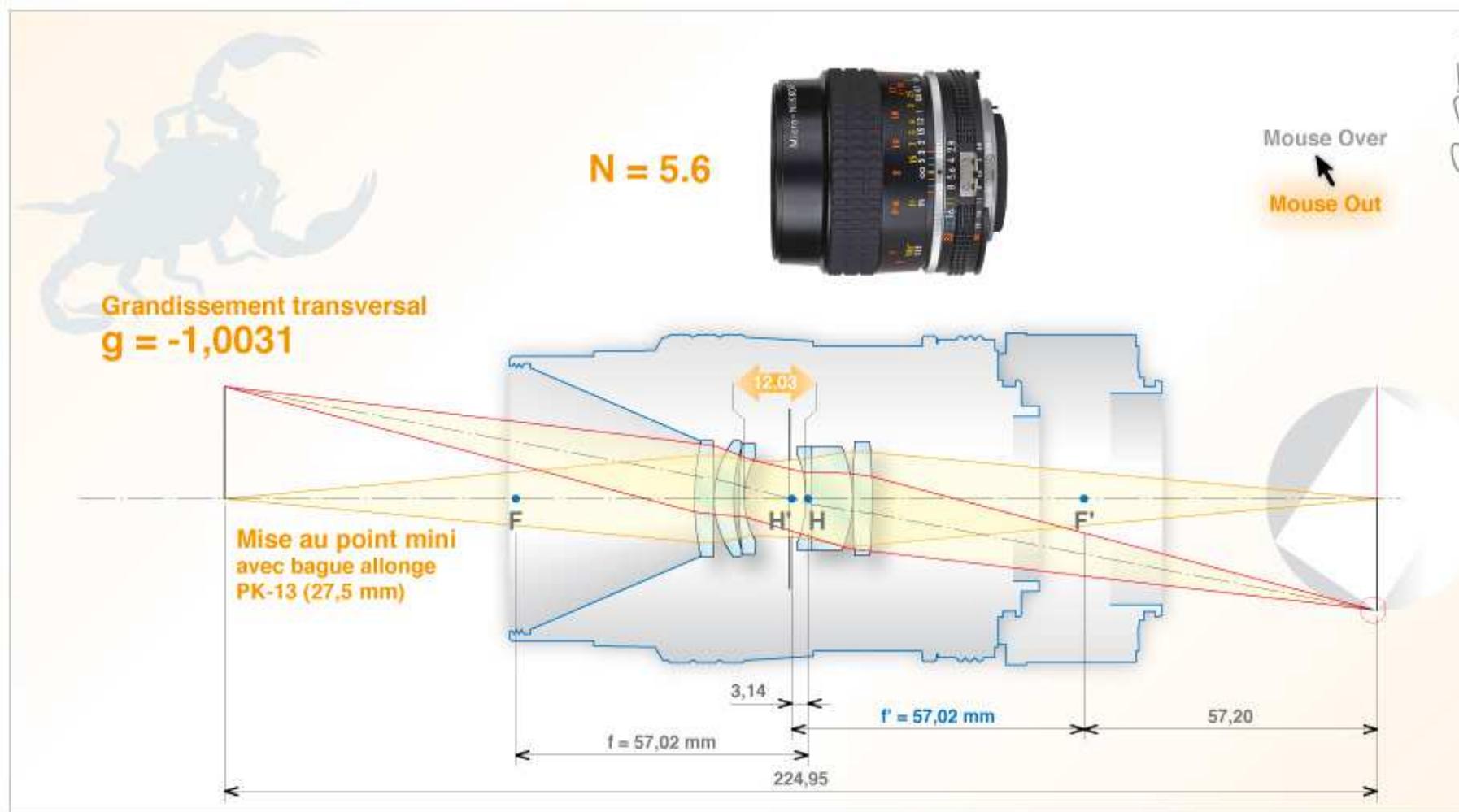


Fig. 09 : Comparaison des deux objectifs au grandissement transversal $g = -1$.
 Mouse Out : Micro-Nikkor 55mm f/2.8 Ais + bague allonge PK-13 (27,5 mm).
 Mouse Over : AF Micro-Nikkor 55mm f/2.8.

[Haut de page](#)

-o---0---o-

Effet du système CRC (Close-Range Correction) des deux Micro-Nikkor 55mm f/2.8 (Ais et AF) sur leur distance focale.

Comme tous les objectifs de type double Gauss, ces Micro-Nikkor 55mm f/2.8 sont constitués de deux groupes convergents placés de part et d'autre du diaphragme d'ouverture. Le fait de faire varier la distance séparant ces deux groupes d'éléments au cours de la mise au point (système CRC), permet d'assurer une bonne correction des aberrations sur toute la plage de valeurs du grandissement. Cependant, cette variation d'une des caractéristiques du système optique induit une modification de la distance focale de l'ensemble qui s'explique de la manière suivante...

Un objectif de type double Gauss peut être assimilé à l'association de deux systèmes optiques convergents formant un nouveau système dont la distance focale f' est donnée par la relation suivante :

$$f' = f1' \cdot f2' / -\Delta$$

où $f1'$ et $f2'$ sont les distances focales respectives de chacun des deux groupes, et Δ est l'intervalle optique (distance entre le foyer principal image $F1'$ du premier groupe et le foyer principal objet $F2$ du second groupe). *Le tout exprimé en valeurs algébriques compte tenu du sens de propagation de la lumière.*

L'illustration 10, ci-dessous, montre que toute augmentation de l'espace entre les deux groupes induit une diminution de même amplitude de l'intervalle optique Δ . En considérant la relation ci-dessus, lorsque Δ diminue, la distance focale de l'ensemble augmente, et inversement.

Lorsque le Micro-Nikkor 55mm f/2.8 Ais est en configuration de mise au point minimum ($g = -0,5$), l'espace séparant les deux groupes est de 12 mm environ. Dans ces conditions, la distance focale de l'objectif est de 57 mm environ (au lieu de 55 mm à l'infini).

D'un point de vue optique, la seule chose qui change entre les images non survolée et survolée ci-dessous est l'espace entre le groupe frontal et le groupe arrière...

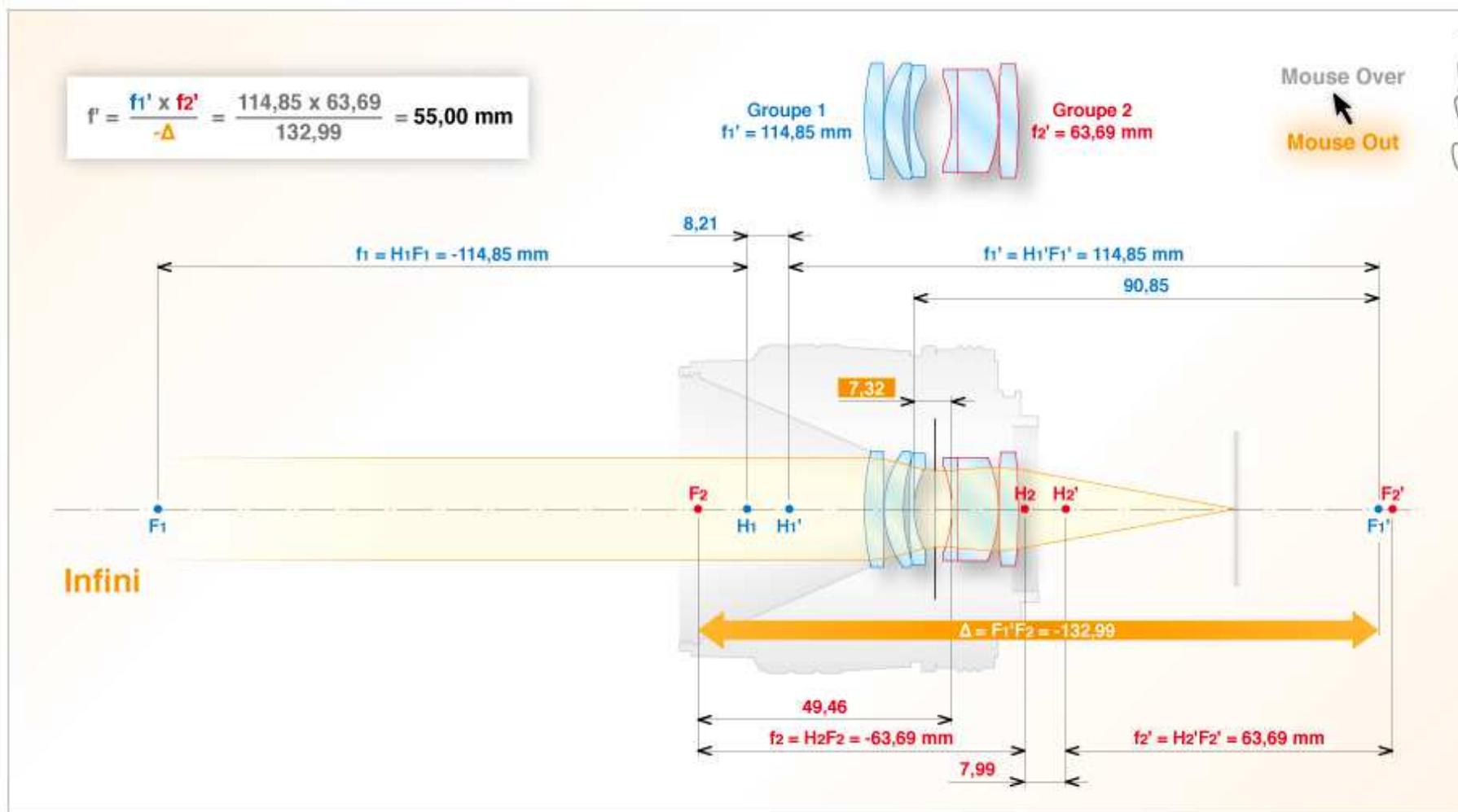


Fig. 10 : Micro-Nikkor 55mm f/2.8 Ais.

Effet de l'augmentation de l'espace inter groupes sur la distance focale du système.

Mouse Out : objectif en configuration de mise au point sur l'infini.

Mouse Over : objectif en configuration de mise au point minimum (0,25 m).

Lorsque le AF Micro-Nikkor 55mm f/2.8 est en configuration de mise au point minimum ($g = -1$), l'espace séparant les deux groupes est de 16 mm environ. Dans ces conditions, la distance focale de l'objectif est de 59 mm environ (au lieu de 55 mm à l'infini).

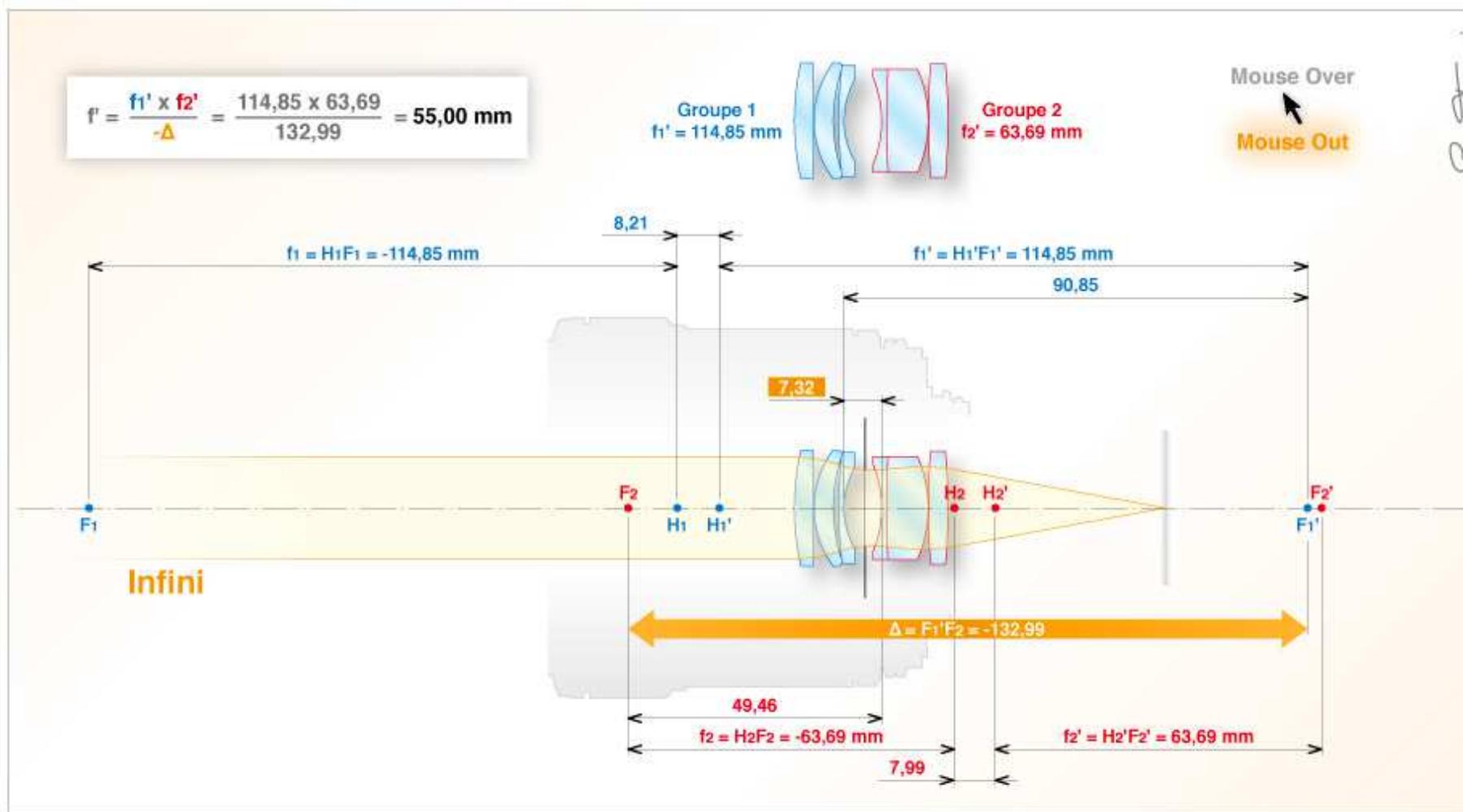


Fig. 11 : AF Micro-Nikkor 55mm f/2.8.
Effet de l'augmentation de l'espace inter groupes sur la distance focale du système.
Mouse Out : objectif en configuration de mise au point sur l'infini.
Mouse Over : objectif en configuration de mise au point minimum (0,229 m).

[Haut de page](#)

-o---o---o-

AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED.

D'après le brevet US 5,402,268 (1995) de M. Wataru Tatsuno. Exemple n° 1.

Calculs réalisés sur la base d'une variation de l'espace d14 en fonction de g suivant une loi du second degré ($a_0 = 31,9737$; $a_1 = 18,4347$; $a_2 = -13,5390$).

Par son principe, cet objectif macro ne nécessite aucun système de correction des aberrations (CRC) à sa distance minimale de mise au point (496 mm). Le déplacement non linéaire (en va et vient) des trois éléments frontaux compense essentiellement la sur correction de l'aberration de sphéricité aux distances de mise au point intermédiaires. La position de ces éléments aux distances de mise au point extrêmes (infini et minimum) est rigoureusement identique. La correction atteint son maximum pour $g = -0,55$ environ.



Fig. 12 : AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED.

Particularité de cet objectif : la distance focale de l'ensemble du système optique varie de manière quasiment linéaire avec le grandissement transversal (voir graphe figure 13, ci-dessous).

Autre particularité : lorsque la distance de mise au point diminue, le diaphragme d'ouverture se ferme (la fermeture atteint environ une valeur à la mise au point minimum). Pourquoi ?

Lorsque le plan de mise au point se rapproche, les éléments frontaux de cet objectif tendent à limiter le diamètre du faisceau utile. Ainsi, à la distance minimale de mise au point (496 mm), le Nombre d'ouverture effectif minimum du faisceau émergent $N_{eff} \approx 5.5$ est imposé par les éléments frontaux. Pour que le diaphragme conserve ses fonctions, un mécanisme resserre son ouverture au fur et à mesure que la distance de mise au point diminue, de manière à maintenir l'iris au contact du faisceau. Sans ce mécanisme, ce sont les éléments frontaux qui détermineraient les pupilles de l'objectif, et le diaphragme perdrait son rôle de contrôle précis de l'ouverture.

Sur la figure 13 (ci-dessous), le diaphragme est représenté fixe à $N = 4.0$ de manière à bien mettre en évidence le phénomène de décollement du faisceau. Le Micro-Nikkor AF-S VR 105mm f/2.8G présente la même particularité (mais moins marquée, voir la page Ouvertures et Pupilles, [ici](#)).

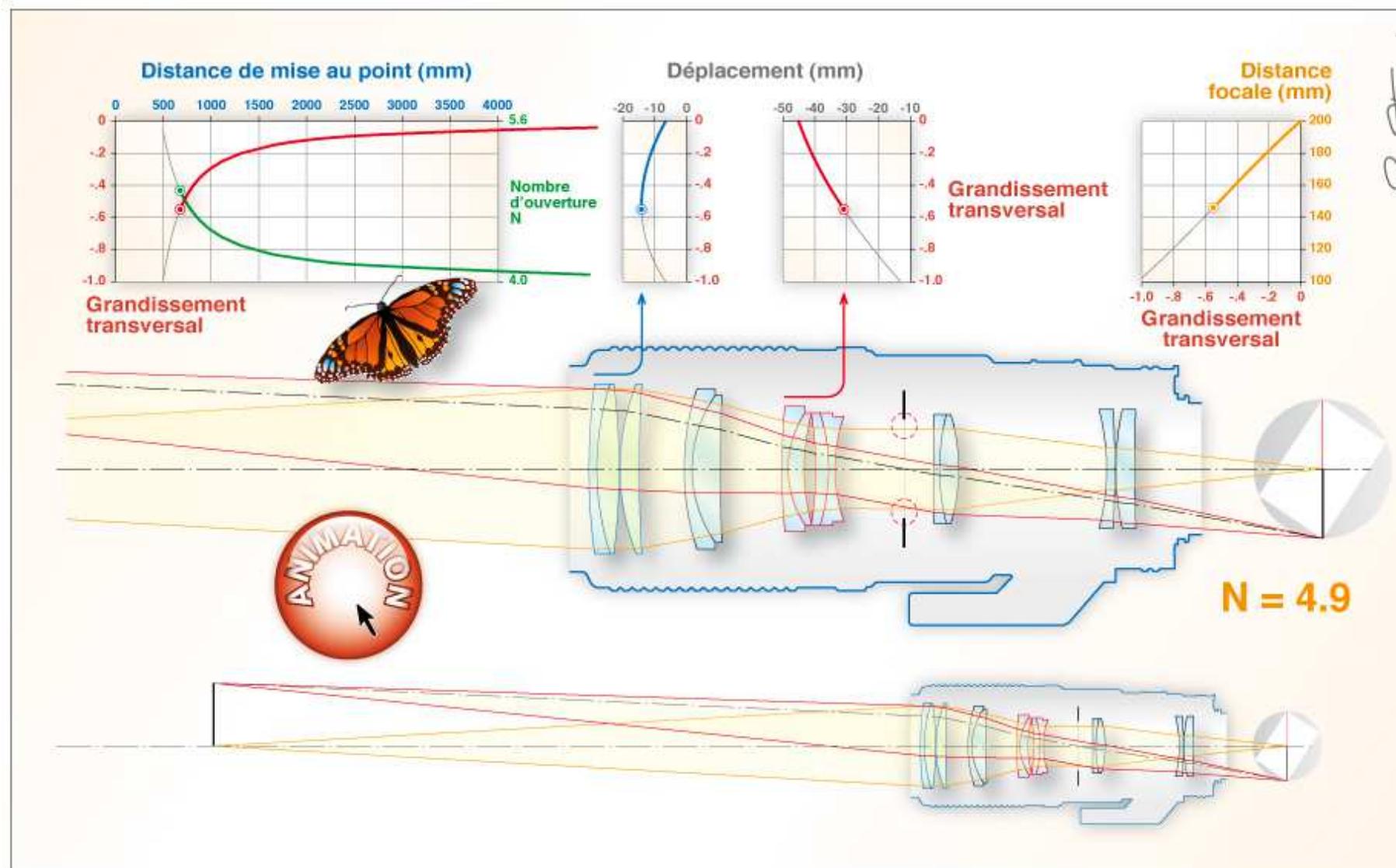


Fig. 13 : AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED. Fonctionnement.

[Haut de page](#)

-o---o---o-

AF-S DX Micro-Nikkor 85mm f/3.5G ED VR.

D'après le brevet US 2009/0190220 A1 (2009) de M. Haruo Sato. Exemple n° 5.

Calculs réalisés sur la base d'une variation de l'espace $d7$ en fonction de g suivant une loi du second degré ($a_0 = 0$; $a_1 = -20,87309$; $a_2 = -5,11258$).

Le principe de fonctionnement de ce nouveau type d'objectif macro est très différent des modèles de la génération précédente de type double Gauss + convertisseur arrière intégré (AF 60mm f/2.8D, AF 105mm f/2.8D), ou téléobjectifs afocaux / pseudo afocaux (AF 200mmf/4 IF-ED, voir ci-dessus).



Fig. 14 : AF-S DX Micro-Nikkor 85mm f/3.5G ED VR.

Cet objectif est constitué de cinq groupes principaux de lentilles, G1 à G5 (voir figure 15 ci-dessous). La mise au point est assurée par les déplacements synchronisés, de sens opposés, des deux groupes G2 et G3 situés de part et d'autre du diaphragme d'ouverture. Le groupe G4 est affecté à la stabilisation optique (VR). Le grandissement transversal $g = -1$ est atteint à la distance minimale de mise au point de 0,236 m ; le sujet est alors à 145 mm de l'élément frontal.

Lorsque le plan de mise au point se rapproche, le mouvement vers l'arrière du premier groupe mobile G2 modifie très fortement la vergence de la partie de l'objectif située à l'avant du diaphragme d'ouverture, de $-3,4 \varnothing$ (infini) à $+7,4 \varnothing$ (mise au point minimum). Ainsi, l'angle d'ouverture du faisceau traversant le diaphragme ne varie que de $-5,3^\circ$ (infini) à $-11,2^\circ$ (mise au point minimum), à pleine ouverture ($N = 3.6$). Pour maintenir le tirage optique constant malgré cette variation d'ouverture du faisceau traversant le diaphragme, la vergence de la partie arrière de l'objectif doit augmenter légèrement au fur et à mesure que le sujet se rapproche. C'est le rôle du second groupe mobile G3 dont le mouvement synchronisé vers l'avant fait passer la distance focale de la partie arrière de l'objectif de 57,2 mm (infini) à 49,4 mm (mise au point minimum).

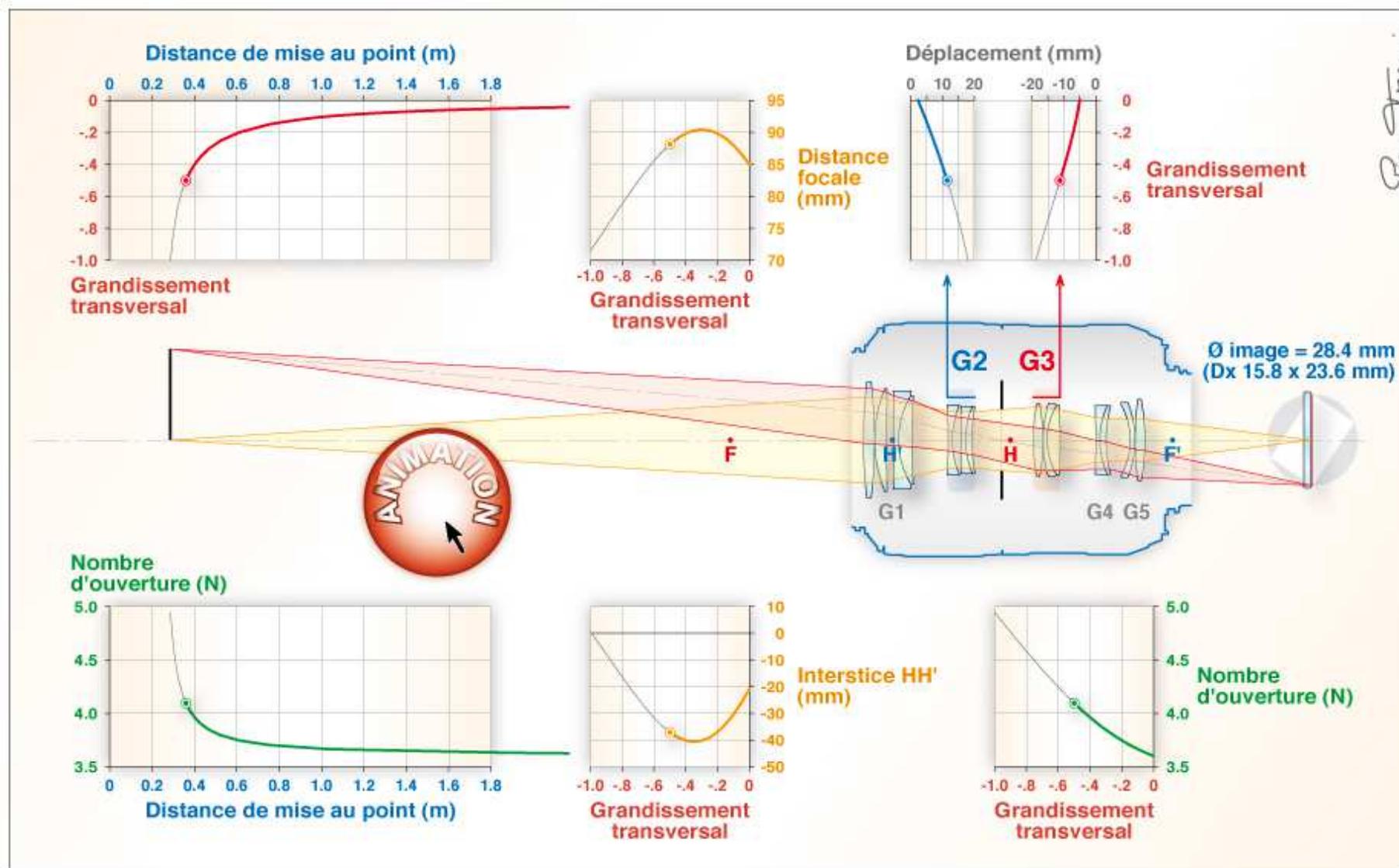


Fig. 15 : AF-S DX Micro-Nikkor 85mm f/3.5G ED VR. Fonctionnement.

Pendant la mise au point, la distance focale de l'ensemble du système varie avec le grandissement d'une manière plus complexe que celle des objectifs de la génération précédente dont la distance focale ne fait généralement que décroître assez régulièrement lorsque la distance de mise au point diminue. Dans le cas présent, la distance focale de l'objectif est égale ou supérieure à la valeur nominale sur une très large plage de distance de mise au point : de 0,33 m ($g = -0,6$) à l'infini.

Le Micro Nikkor AF-S 60mm f/2.8G ED et le Micro Nikkor AF-S VR 105mm f/2.8G ED fonctionnent selon le même principe. Ce système de mise au point comportant deux groupes mobiles peut également être utilisé sur des objectifs de distance focale plus importante. Ainsi, le brevet US 2011/0109979 (mai 2011) présente plusieurs systèmes optiques du même type et de distance focale comprise entre 160 mm et 220 mm ; tous permettent d'atteindre le grandissement $g = -1$. A titre d'exemple, la figure suivante illustre un 200 mm f/2.5 offrant le grandissement transversal $g = -1$ à la distance de 0,486 m.

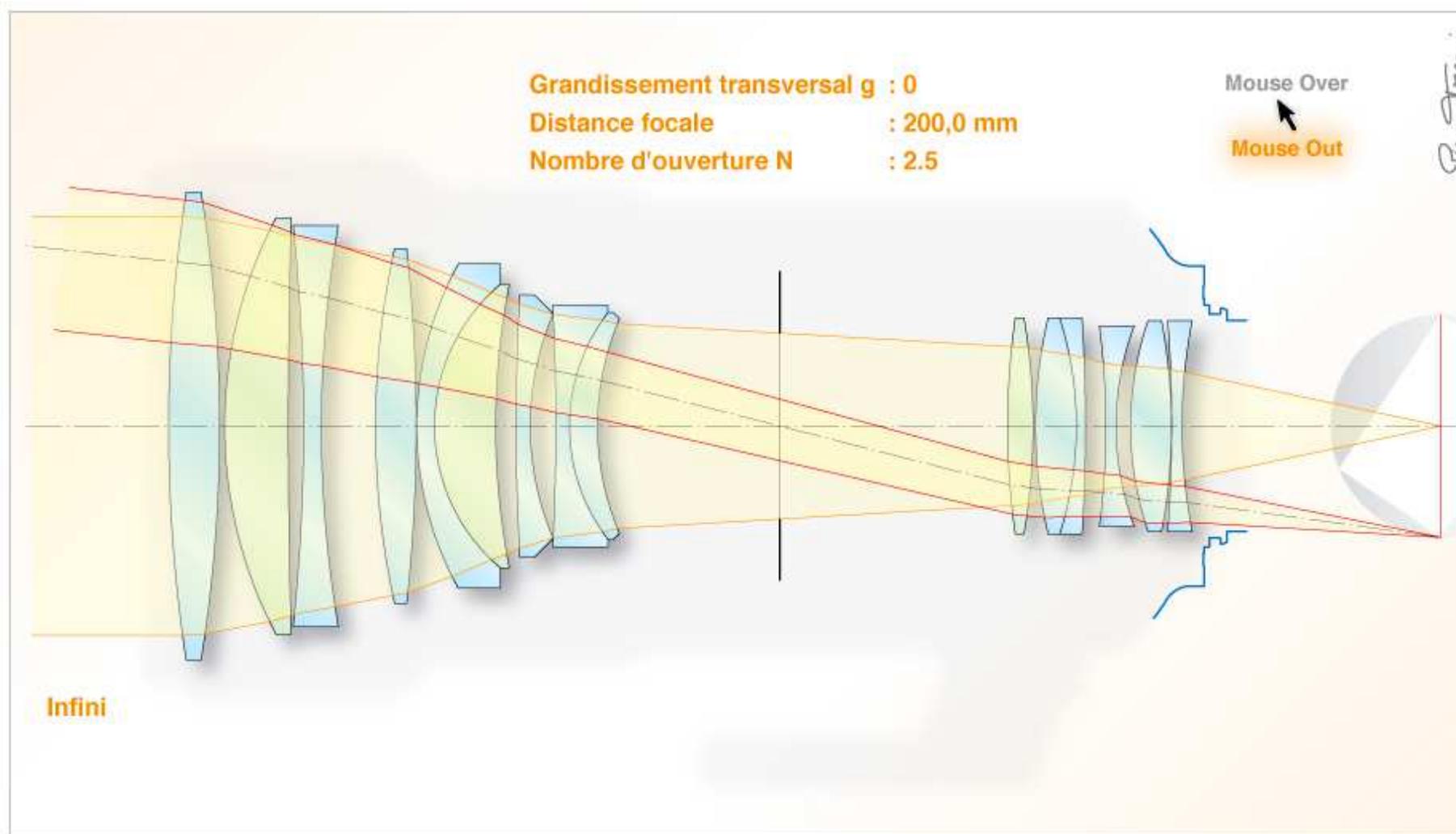


Fig. 15bis : Micro Nikkor 200mm f/2.5 ED (étude).
Mouse Out : mise au point sur l'infini.
Mouse Over : mise au point minimum (0,486 m).

D'après le brevet US 2011/0109979 A1 (2011) de M. Mitsuaki Wada. Exemple n° 1.

Calculs réalisés sur la base d'une variation de l'espace d11 en fonction de g suivant une loi du second degré ($a_0 = 0$; $a_1 = -28,43686$; $a_2 = 2,33644$). Les valeurs de tirage optique de l'exemple n°1 (BF) données dans le brevet sont erronées ; le tirage optique est de 50,833 mm.

[Haut de page](#)

-o---0---o-

Fonctionnement d'un boîtier reflex mono objectif

L'animation ci-dessus est, pour essentiel, basée sur la cinématique du Nikon F5.

Intervalle de temps entre deux images : 1333 μ s environ.

Durée réelle du cycle : environ 108 ms pour une durée d'exposition de 4 ms, soit 1/250 s (phases d'accélération et de stabilisation des rideaux et des miroirs non représentées).

Le réarmement partiel du premier rideau, en fin de cycle, permet de recouvrir les joints des lames du second rideau.

Objectif : 50 mm f/1.8 (brevet US n° 4,514,051), ouverture réglée sur f/16 pour la prise de vue.

Viseur : à vergence variable réglé pour focaliser l'image formée sur le verre de visée à $-1 \varnothing$ (réglable de -3 à $+1 \varnothing$).

Distance focale de l'ensemble du viseur $f'_v = 70,42$ mm ; distance focale de l'oculaire seul $f'_e = 78,03$ mm (brevet US n° 4,664,485).

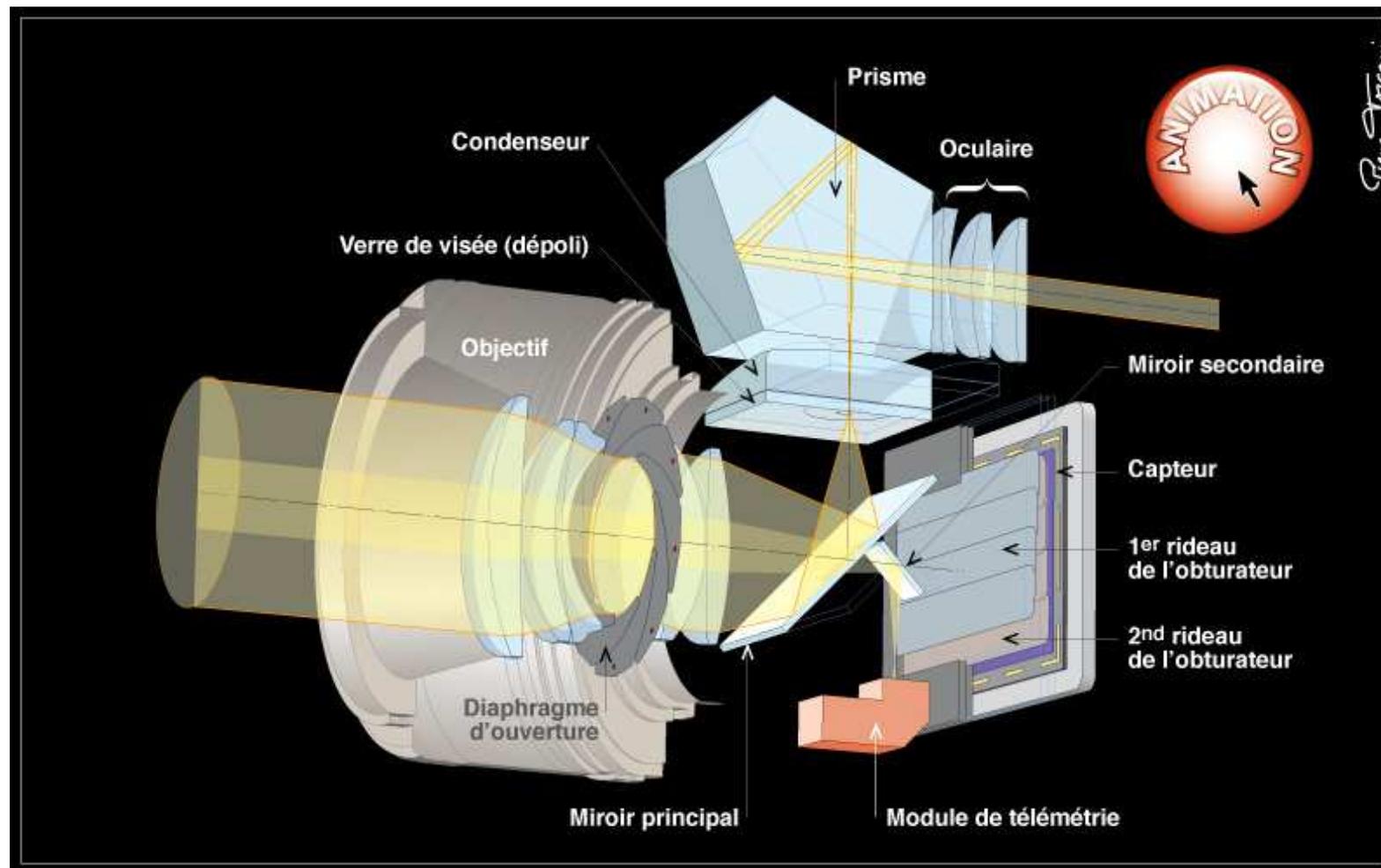
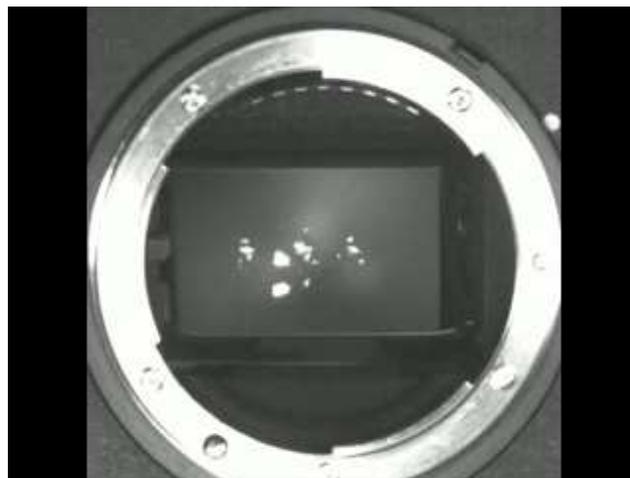


Fig. 16 : Fonctionnement d'un boîtier reflex mono objectif (étude des réflexions sur les miroirs).

Une séquence vidéo réalisée à 4300 images/s sur un Nikon F5 est visible en cliquant sur la vignette ci-dessous.

Durée réelle de la séquence : 104 ms.

Durée d'exposition du Nikon F5 : 1/2000 s.



[Haut de page](#)

-o---0---o-

Anatomie d'un objectif moderne.

Avec leur système de mise au point automatique très rapide, leur module de stabilisation optique, et leur système optique très sophistiqué, la plupart des objectifs modernes sont des instruments complexes. L'illustration ci-dessous présente un objectif de ce type. Ici, la mise au point est réalisée par les déplacements simultanés (de sens opposés) de deux groupes de lentilles placés de part et d'autre du diaphragme.

Lorsque la mise au point est effectuée manuellement, les parties colorées en orange et en rouge tournent autour de l'axe optique, alors que seules les pièces colorées en rouge tournent lorsque la mise au point est assurée par le moteur (autofocus).

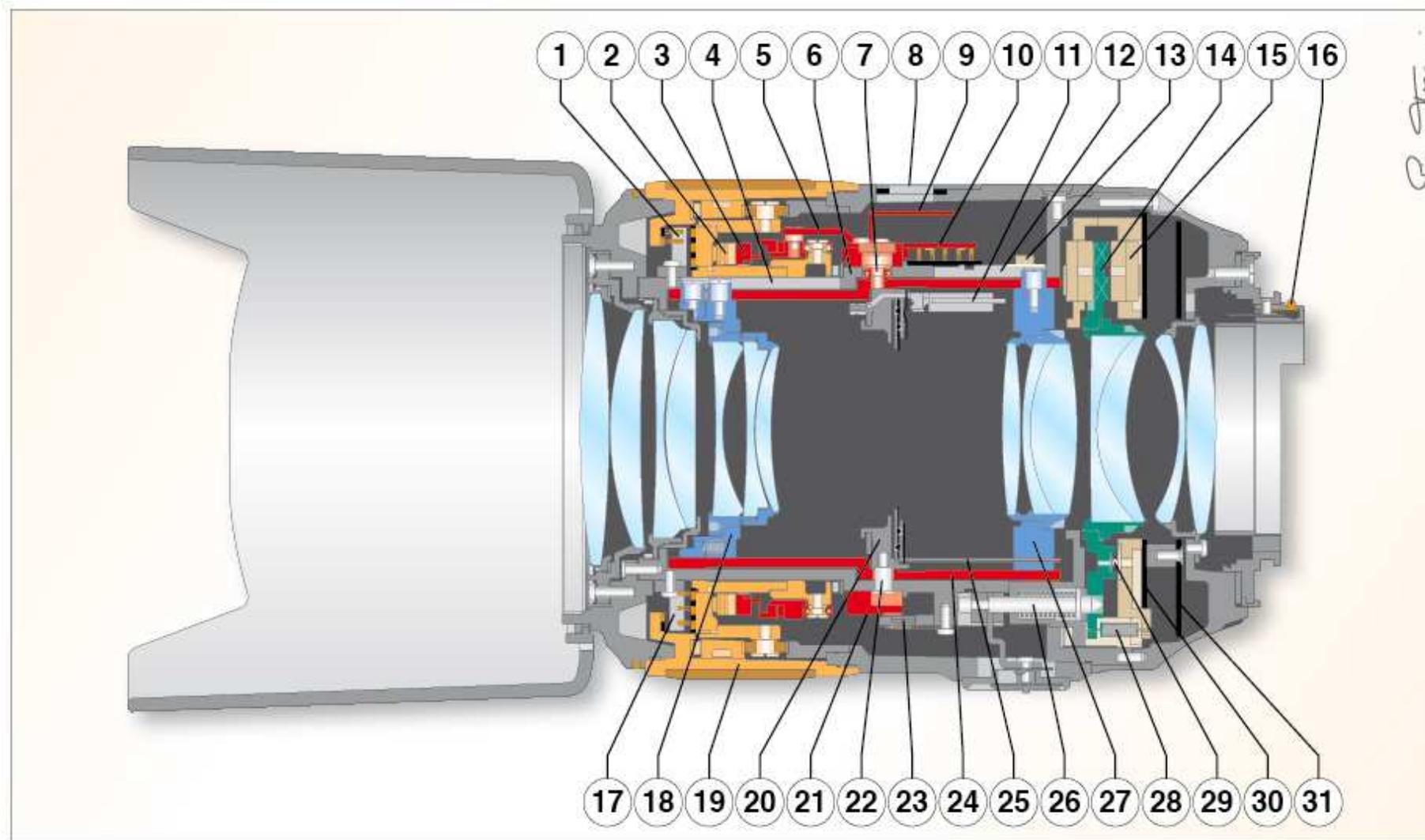


Fig. 17 : Coupe simplifiée d'un objectif moderne (Micro-Nikkor AF-S VR 105mm f/2.8G).

- 1 – Collecteur de détection de mise au point manuelle ;
- 2 – Stator du moteur piézoélectrique annulaire ;
- 3 – Rotor du moteur piézoélectrique annulaire ;
- 4 – Lumière de guidage du 1er groupe optique mobile ;
- 5 – Fourchette de couplage rotor / bague à piste magnétique ;
- 6 – Tube fixe ;
- 7 – Pion d'entraînement de la came ;

- 8 – Fenêtre de lecture de la distance de mise au point ;
- 9 – Régllette des index de distance de mise au point ;
- 10 – Collecteur de codage de la distance de mise au point ;
- 11 – Levier de manœuvre de l'iris (tronqué) ;
- 12 – Lumière de guidage du 2ème groupe optique mobile ;
- 13 – Gyromètre (tangage) ;
- 14 – Partie mobile du module de stabilisation ;
- 15 – Partie fixe du module de stabilisation ;
- 16 – Plot de liaison électrique avec le boîtier ;
- 17 – Collecteur d'alimentation du moteur piézoélectrique ;
- 18 – 1er groupe optique mobile ;
- 19 – Bague de mise au point manuelle ;
- 20 – Module diaphragme ;
- 21 – Bague à piste magnétique (contrôle rotation came) ;
- 22 – Vis de fixation du module diaphragme ;
- 23 – Tête de lecture piste magnétique ;
- 24 – Came
- 25 – Came de couplage de l'ouverture avec la position du 2ème groupe optique mobile ;
- 26 – Pion de verrouillage de la partie mobile du module de stabilisation ;
- 27 – 2ème groupe optique mobile ;
- 28 – Ressort de suspension de la partie mobile du module de stabilisation ;
- 29 – Bille de roulement de la partie mobile sur la partie fixe du module de stabilisation ;
- 30 – Carte électronique du module de stabilisation ;
- 31 – Carte électronique (gyromètres, piste magnétique, distance de mise au point, stabilisation, alimentation moteur, etc.).

[Haut de page](#)

Mouvements combinés.

Bien que chacun des deux groupes d'éléments optiques assurant la mise au point soit placé de part et d'autre du diaphragme (fixe), une seule came permet la synchronisation des deux mouvements opposés. Le module du diaphragme est rendu solidaire du tube fixe par deux vis traversant des lumières usinées dans la came (une seule est représentée pour simplifier le dessin).

L'animation ci-dessous montre comment les lumières usinées dans la came provoquent le déplacement des deux groupes d'éléments optiques lorsque le moteur agit sur deux pions d'entraînement (un seul est représenté pour simplifier le dessin). Quelle que soit la distance de mise au point, la position relative de chacun des deux groupes d'éléments optiques est déterminée par la forme des lumières de la came. Leur usinage doit donc être réalisé avec une grande précision.

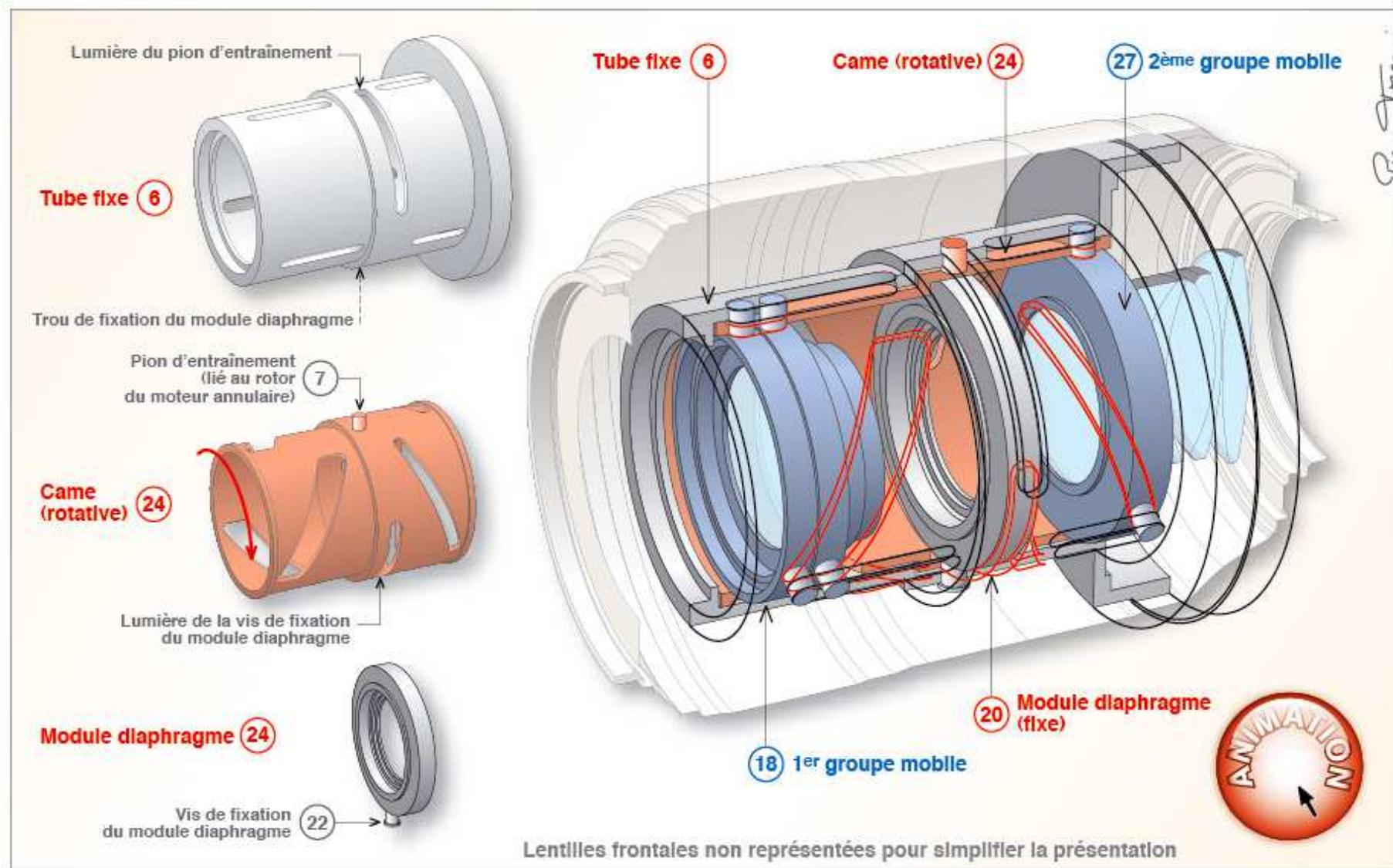


Fig. 18 : Synchronisation des mouvements des deux groupes d'éléments optiques mobiles de part et d'autre du diaphragme.

[Haut de page](#)

Le moteur piézoélectrique à onde progressive.

Dans de nombreux objectifs interchangeables modernes, le déplacement des éléments assurant la mise au point est confié à un moteur

piézoélectrique à onde progressive. L'objectif présenté ici (Micro-Nikkor AF-S VR 105mm f/2.8G) utilise un moteur piézoélectrique annulaire. Ce type de moteur a été mis au point en 1982 par T. Sashida, et fut commercialisé pour la première fois en juin 1986 par la société japonaise Shinsei Co. (associée au fabricant Fukoku Co.).

Le moteur piézoélectrique à onde progressive est particulièrement adapté à la motorisation des objectifs photographiques. Ses principaux avantages sont :

- couple élevé ;
- faible vitesse de rotation permettant un entraînement direct (sans réducteur) ;
- temps de réponse très bref (quelques millisecondes) ;
- très faible niveau sonore, voire nul ;
- couple important de maintien sans alimentation (freinage inutile) ;
- faible inertie ;
- précision de positionnement (pas de jeu fonctionnel).

Pour mettre en avant les performances de leurs objectifs dotés de tels moteurs, chaque fabricant utilise sa propre dénomination : Canon utilise "USM", pour Ultra Sonic Motor ; Nikon a adopté "SWM", pour Silent Wave Motor, etc.

Principe de fonctionnement

Le moteur piézoélectrique opère une conversion d'énergie en deux étapes : l'énergie électrique est d'abord convertie en mouvements de courbure oscillants par le stator, puis ces vibrations ultrasoniques (supérieures à 20 kHz) sont converties en mouvement unidirectionnel de rotation du rotor par frottement sur le stator. Ici, rotor et stator sont tous deux de forme annulaire (voir figure 19, ci-dessous).

Le rotor est pressé contre le stator par un élément non représenté sur l'illustration (force de précontrainte). Une fine couche de friction, collée sur la face inférieure du rotor assure un bon coefficient de frottement entre stator et rotor. La force de précontrainte et le frottement rotor/stator déterminent le couple de maintien du moteur sans alimentation.

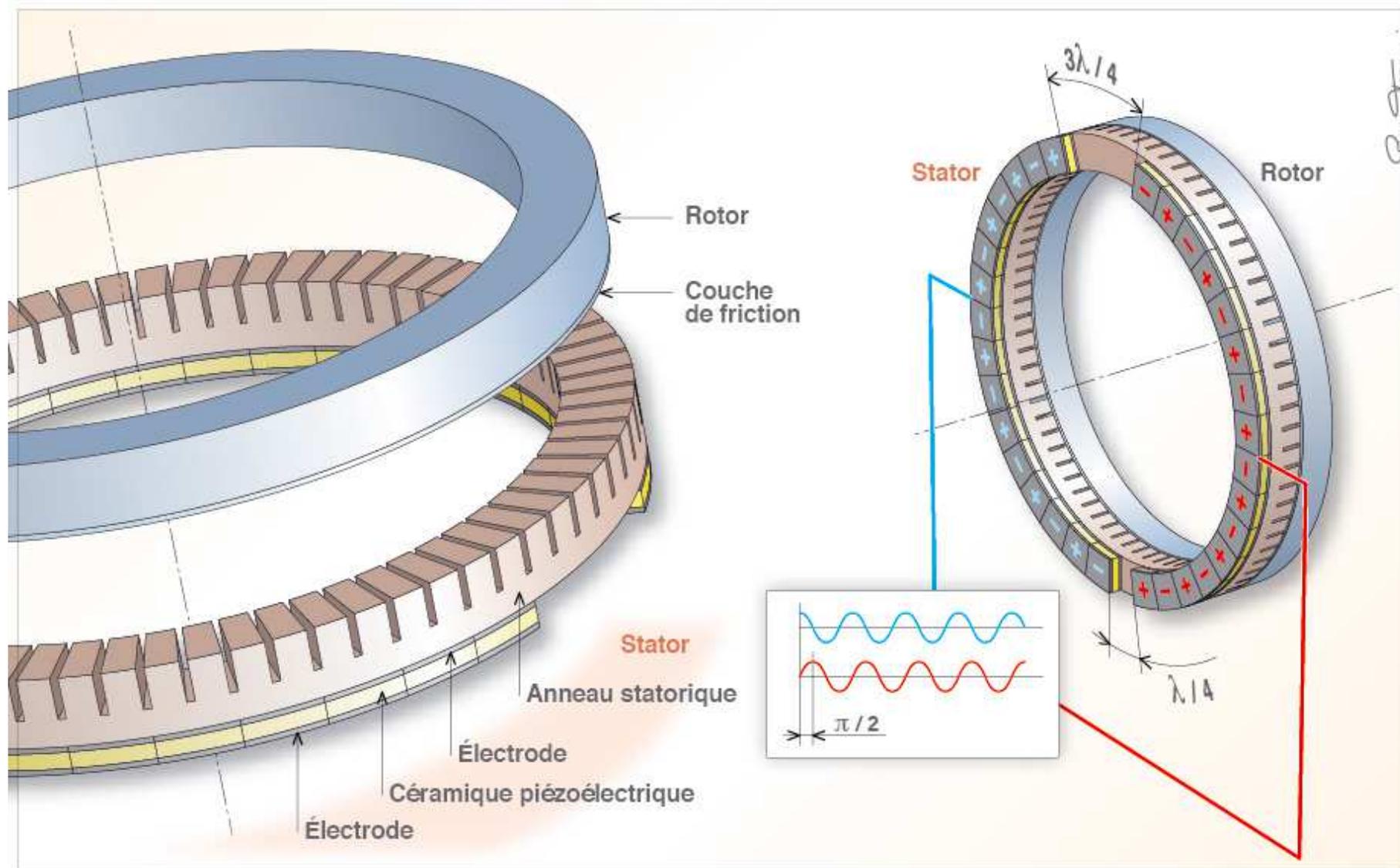


Fig. 19 : Moteur piézoélectrique annulaire à onde progressive.

Le stator est constitué d'un anneau statorique élastique, et de céramiques piézoélectriques (synthétiques) collées sur sa face inférieure. La céramique piézoélectrique présente la particularité de se déformer lorsqu'elle est soumise à un champ électrique (piézoélectricité inverse). En conséquence, lorsqu'elle est soumise à une tension alternative de fréquence élevée, la céramique piézoélectrique vibre. Si la fréquence d'excitation est égale à la fréquence propre du stator (déterminée par sa forme et par le type de matériaux employés), celui-ci entre en résonance. L'amplitude des oscillations mécaniques peut ainsi atteindre 2 à 3 μm .

Les céramiques piézoélectriques forment deux sous-ensembles, alimentés respectivement par une tension sinusoïdale distincte produisant deux ondes stationnaires. Un déphasage spatial (d'un quart de longueur d'onde) et un déphasage temporel ($\varnothing \pm \pi/2$) génèrent l'onde progressive. Contrairement à une onde stationnaire, l'onde progressive se déplace sur la circonférence du stator annulaire à la manière d'une vague (voir figure 20, ci-dessous). Le signe du déphasage temporel détermine le sens de propagation de l'onde progressive et, par conséquent, le sens de rotation du rotor. Un crénelage usiné dans la partie supérieure de l'anneau statorique permet d'amplifier l'effet d'entraînement du rotor ; les fentes recueillent les particules de matière arrachées par le frottement du rotor sur le stator.

Le contenu de cette page nécessite une version plus récente d'Adobe Flash Player.



Fig. 20 : Onde stationnaire, onde progressive.

L'animation associée à la figure 21, ci-dessous, met en évidence la manière dont l'onde progressive parcourant le stator dans un sens donné entraîne le rotor dans la direction opposée. Au passage de l'onde, chaque élément de surface du stator se déplace alternativement dans le même sens que l'onde (dans le creux d'onde) puis dans le sens opposé (sur la crête d'onde), décrivant une ellipse*. Au contact des crêtes, le rotor est donc entraîné par frottement dans le sens inverse du sens de propagation de l'onde.

** Sur l'illustration, la trajectoire d'un élément de surface (à gauche) est tracée en rouge. Compte tenu des proportions exagérées entre longueur d'onde, amplitude des oscillations et épaisseur du rotor, la trajectoire de l'élément n'apparaît pas elliptique. Dans cet exemple, le rapport de l'amplitude de l'oscillation sur l'épaisseur du stator est énorme ($\approx 1/4$). Dans la réalité, ce rapport est beaucoup plus faible ($\approx 1/1000$).*

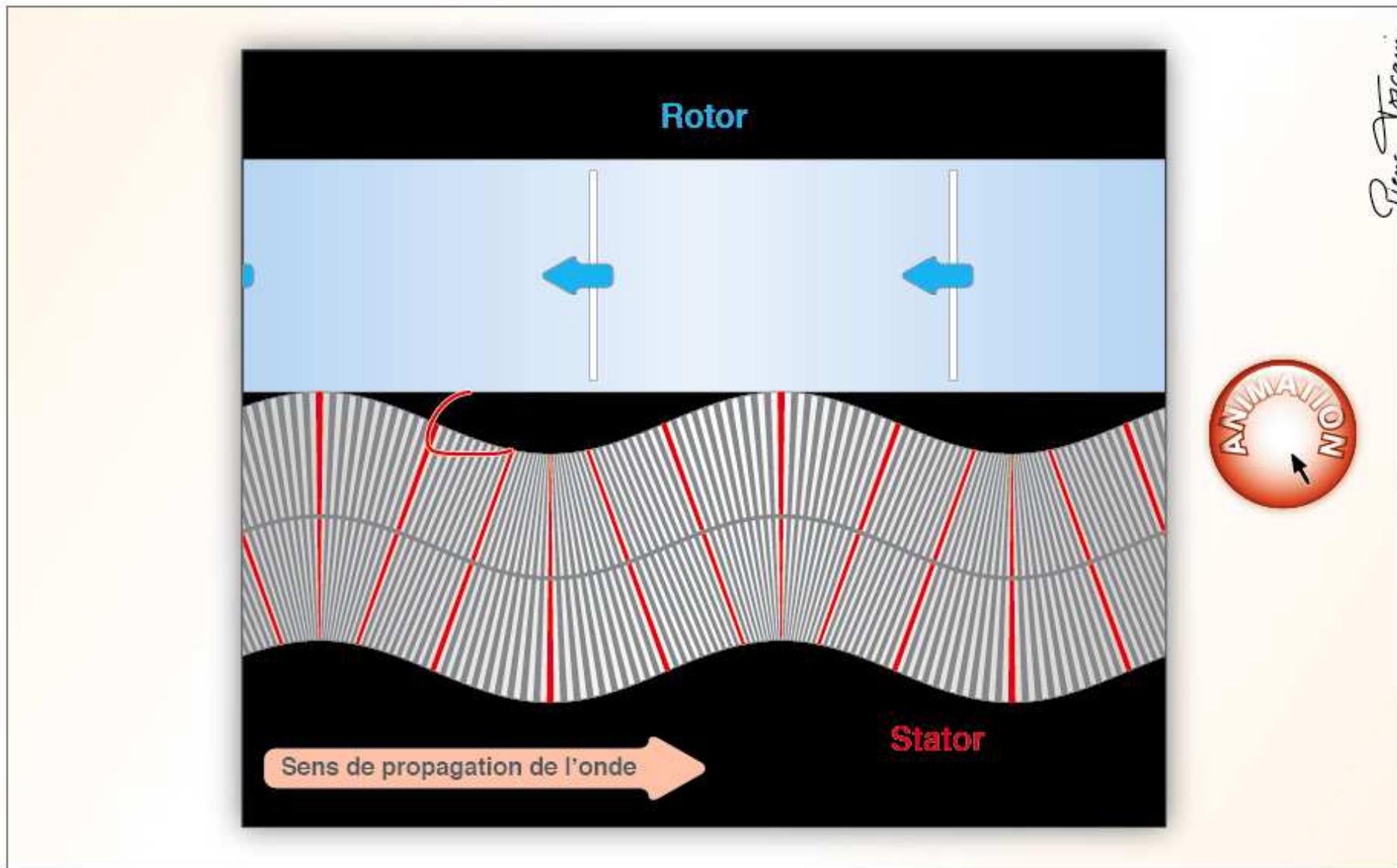


Fig. 21 : Entraînement du rotor par frottement sur les crêtes d'onde du stator.

La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à l'amplitude des oscillations, à l'épaisseur du stator et à la vitesse de propagation de l'onde progressive autour du stator.

Ces moteurs présentent néanmoins quelques inconvénients :

- durée de vie plus faible que les moteurs électriques classiques (usure due au frottement rotor/stator, inadapté au fonctionnement continu) ;
- coût élevé (fabrication et usinage des céramiques)
- complexité des circuits d'alimentation et de contrôle (haute fréquence, synchronisme des deux voies d'excitation) ;
- faible rendement énergétique (10 à 25 %).

Réf. :

- Piezoelectric actuators and ultrasonic motors – Kenji Uchino (1997)
- Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive – Matteo Bullo (2005).

[Haut de page](#)

Les micro-gyromètres vibrants piézoélectriques.

Les systèmes de stabilisation d'image embarqués dans nos objectifs (ou nos boîtiers photographiques) utilisent des capteurs capables de détecter les mouvements de l'appareil. Ces capteurs sont des gyromètres. À la différence d'un gyroscope, qui donne une position angulaire permettant la détermination d'un cap, un gyromètre est un capteur de mouvement permettant une mesure de vitesse angulaire.

Les gyromètres utilisés actuellement permettent de déterminer la vitesse de rotation autour d'un seul axe (gyromètres mono axes). Pour déterminer les vitesses de rotation de l'objectif en tangage et en lacet deux gyromètres sont donc nécessaires (les mouvements de roulis sont généralement considérés comme négligeables).

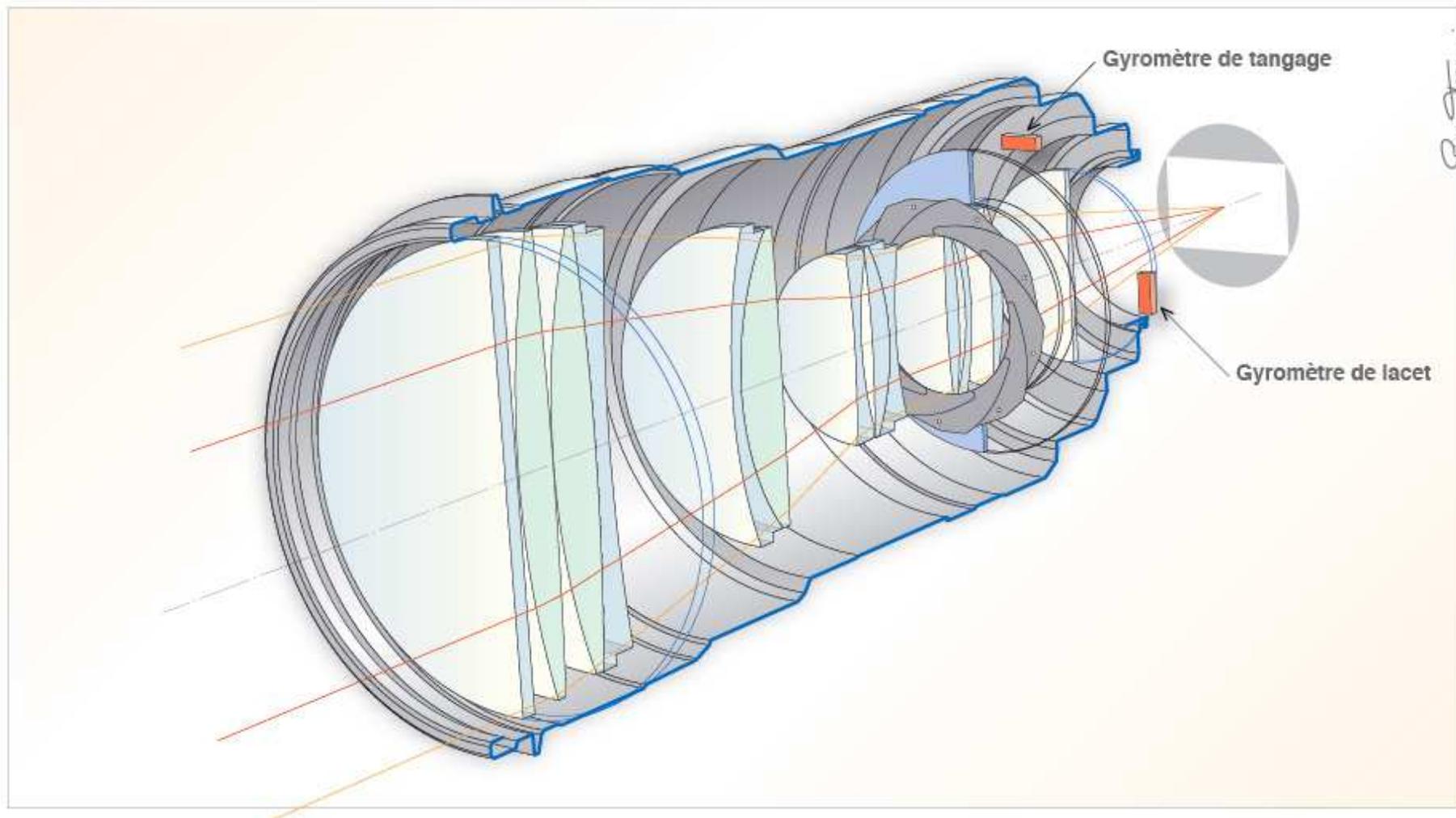


Fig. 22 : Positions relatives des gyromètres de tangage et de lacet dans un objectif.

Il existe de nombreux types de gyromètres de sensibilités et de prix très différents. Les plus performants (très, très chers) permettent de mesurer des vitesses de rotation très faibles (jusqu'à 0,001 degré par heure). La sensibilité nécessaire à la stabilisation optique d'un objectif étant bien moindre (0,1 degré par seconde environ), on utilise des gyromètres beaucoup moins performants et beaucoup moins chers : les micro-gyromètres vibrants piézoélectriques tels que le Gyrostar de Murata ou le CG-L43 de Nec/Tokin.

Le principe de fonctionnement d'un micro-gyromètre vibrant piézoélectrique est illustré par l'animation ci-dessous. Une poutre maintenue par des fils semi-rigides est mise en vibration par effet piézoélectrique inverse (champ électrique \rightarrow déformation) : c'est le premier mode, dénommé mode pilote, ou mode d'excitation. La poutre (section $< 1 \times 1 \text{ mm}^2$, longueur $< 10 \text{ mm}$) peut être en céramique piézoélectrique ou en élinvar sur lequel sont collées des plaques de céramiques piézoélectriques. Dans un repère orthogonal, si l'axe de la poutre est

parallèle à l'axe Z, lorsque la poutre vibre selon l'axe Y, toute rotation du gyromètre autour de l'axe Z induit une vibration selon l'axe X (forces de Coriolis) dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse de rotation. Ce second mode est le mode de détection. L'effet piézoélectrique direct (déformation -> polarisation) permet de quantifier cette amplitude, et par conséquent d'en déduire la vitesse de rotation.

Le contenu de cette page nécessite une version plus récente d'Adobe Flash Player.



Fig. 23 : Principe de fonctionnement du micro-gyromètre vibrant piézoélectrique.

Cette mesure de vitesse de rotation instantanée est une donnée fondamentale utilisée par le module de gestion du déplacement des éléments optiques assurant la stabilisation de l'image sur le capteur.

-o---0---o-

[Haut de page](#) - [Retour Annexe](#)

Autres sujets :

[Fluorine et verres ED](#)

[Principaux principes de mise au point utilisés en téléphotographie](#)

[La mise au point](#)

[Fisheyes](#)

[Distance focale et grandissement](#)

[Télézooms à variateur de champ afocal](#)

[Ouvertures et pupilles](#)

[Grands angulaires](#)

[Prise de vue sous marine](#)

[Courtes présentations 2](#)

[Le pentaprisme en toit](#)

Pierre Toscani - Les photos, textes et illustrations ne sont pas libres de droits - pierretoscani.photo@gmail.com

