

# TOLERANCEMENT SOUS CODE V<sup>®</sup>

Ensemble de lentilles montées par  
entretoises

22/01/2014

Frédéric DUVAL

# Introduction

## Tolérancement:

Prédiction des dégradations en performance d'un système fabriqué par rapport au système nominal

### → **Besoin d'une modélisation de plus en plus fiable**

- Temps de développement réduits
  - Peu ou pas de maquette et prototype
- Performances accrues des capteurs
  - Implique une performance accrue de l'optique

### → **Optiques montées par entretoises difficiles à modéliser**

- Interaction des entretoises sur plusieurs lentilles
- Quasiment pas de bibliographie sur le sujet

# Plan de la présentation

→ Quelques généralités sur le tolérancement

→ Schéma d'un montage par entretoises

→ **Méthode Classique**

- Philosophie de la méthode
- Calcul détaillé de l'impact de la position des entretoises
- Simulation complexe

→ **Méthode proposée**

- Présentation de la méthode
- Types de tolérances utilisées
- Détail du calcul de l'amplitude des défauts

→ **Conclusion**

# /01/

## Tolérancement généralités

# Tolérancement : Généralités

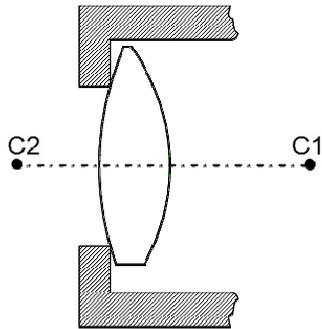
- **Fournir les tolérances sur tous les paramètres de fabrication d'un système optique complet → plans de fabrication**
  - Tolérances de fabrication des éléments optiques (lentilles, miroirs, prismes)
  - Tolérances des pièces mécaniques sur lesquelles sont montés ces éléments optiques
  
- **Connaitre l'impact sur un ou plusieurs critères (souvent FTM)**
  - Simulation des défauts par Code V<sup>®</sup> (TOR, Monte Carlo)
  
- **Construction d'un fichier de tolérances (liste des défauts)**
  - Défauts de géométrie des surfaces optiques et défauts de position et d'orientation des surfaces ou de groupes de surfaces
    - Quelques défauts indépendants du montage mécanique (tolérances de forme des dioptries, tolérances sur les indices)
    - Beaucoup de défauts de position et d'orientation complètement dépendants de l'architecture mécanique (regroupement des surfaces liées mécaniquement)

# Montage par entretoises (schéma)

→ Schéma d'un tel système:

→ Hypothèses sur le montage:

1. Toutes les lentilles sont en appui sur sphère (pas de fermeture ou d'usinage spécifique pour l'appui de la lentille)
2. Ce sont les faces d'appui qui positionnent les lentilles
  - Le jeu de chaque lentille dans le barillet est suffisant.



**Si tel est le cas, les casquettes des lentilles n'ont pas d'impact sur le positionnement des dioptries et elles ne feront donc pas l'objet de tolérances lors de la simulation.**

NB: Les casquettes à porter au plan seront calculées pour répondre à la condition 2

3. Entretoise finale entre l'écrou et la dernière lentille
  - Positionnement de la dernière lentille

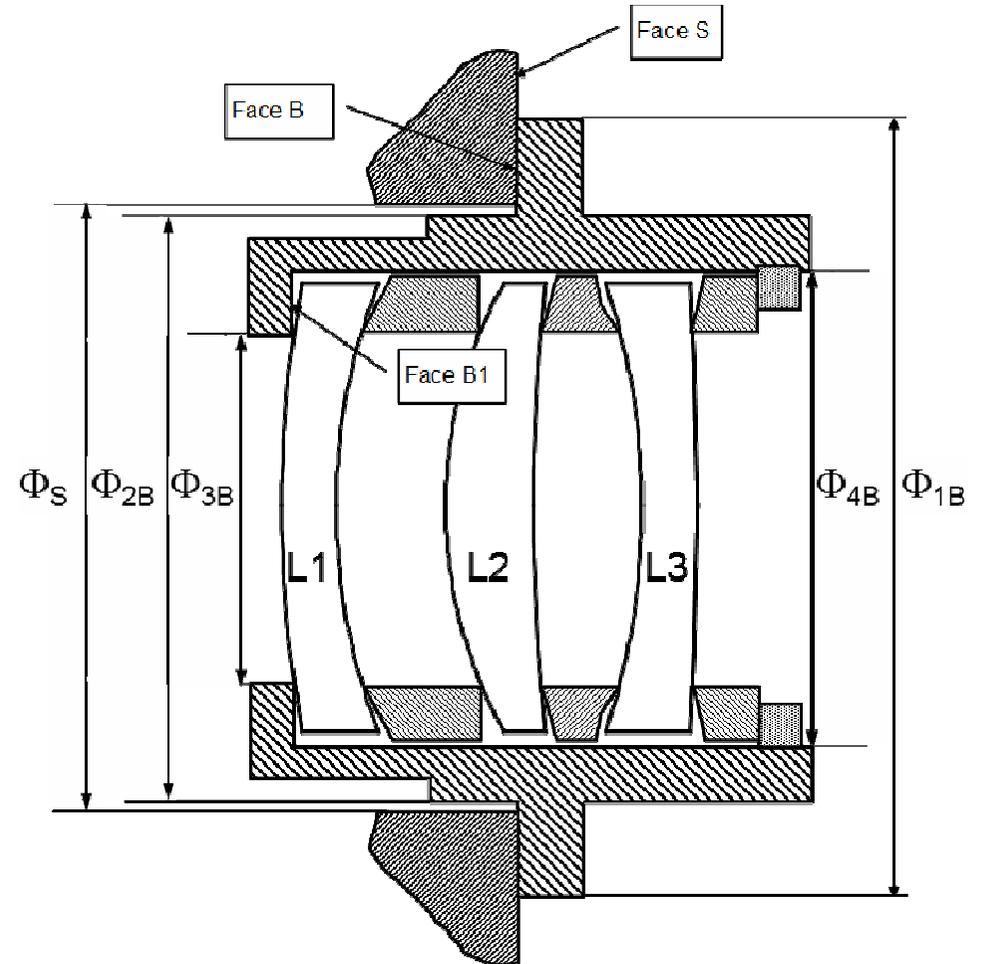


Fig. 1

# /02/

## Méthode Classique

# Méthode classique : Philosophie de la méthode

## → Philosophie de la méthode

- Simulation des défauts de position des éléments optiques
  - Méthode de tolérancement par défaut
  - Connaitre la sensibilité au déplacement de ces éléments
- Tolérances de position des lentilles par des tolérances du type:
  - DSZ S1..2
  - BTI S1..2
  - DIS S1..2
  - ROL S1..2

# Méthode classique : Calcul détaillé de l'impact de la position des entretoises (1/3)

## → Etude d'un défaut de positionnement d'une entretoise

- La lentille L1 est en appui sur la face B1 → rotulage de L1 sur S1
- le défaut de positionnement de la lentille induit par les défauts de positionnement de l'entretoise sera donc un ROL S1..2

### → Le ROL dépend de 2 paramètres

- L'excentrement du diamètre interne de l'entretoise  $\Phi 2$  (Fig.2)
- Le basculement de la première face de l'entretoise (Fig.3)

### Calcul du ROL de L1 lié à l'excentrement de $\Phi 2$ :

Cet excentrement est dû au jeu au rayon de l'entretoise, à la concentricité entre le diamètre interne et le diamètre externe de l'entretoise et à la concentricité entre le diamètre  $\Phi 1$  et le diamètre interne du barillet.

$D$  = excentrement du diamètre  $\Phi 2$  par rapport au diamètre  $\Phi 1$

$$\overline{S1C1} = r_1 \quad \overline{S2C2} = r_2 \quad \overline{C1C2} = -r_1 + r_2 + e$$

$$\sin(\alpha) = \frac{ROL}{\overline{S1C1}} \quad \sin(\alpha) = \frac{D}{\overline{C2C1}}$$

$$D'ou \quad ROL = \frac{D * r_1}{r_1 - r_2 - e}$$

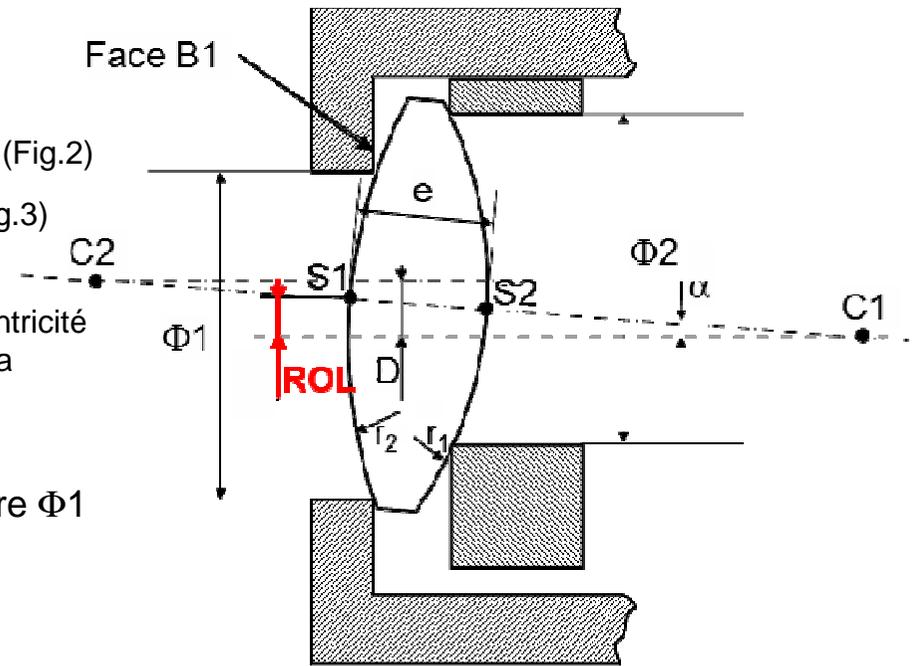


Fig. 2

# Méthode classique : Calcul détaillé de l'impact de la position des entretoises (2/3)

## Calcul du ROL de L1 lié au basculement de la première face de l'entretoise :

Ce basculement est dû à la perpendicularité de la face de l'entretoise par rapport à son diamètre externe et au basculement de l'entretoise (Fig.3).

$\beta$ =angle de basculement de la première face de l'entretoise.

$$X = \text{Sin}(\beta) * (\overline{C2S2} - f) \quad \text{avec } f = \text{flèche de } S2 = r_2 \pm \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2}$$

$$X = \text{Sin}(\beta) * \left( \pm \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right) \quad (- \text{ si } r_2 > 0 \text{ et } + \text{ si } r_2 < 0)$$

$$\text{Sin}(\alpha) = \frac{X}{C2C1} = \frac{X}{r_1 - r_2 - e} \rightarrow \text{Sin}(\alpha) = \frac{\text{Sin}(\beta) * \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2}}{r_1 - r_2 - e}$$

$$\text{Sin}(\alpha) = \frac{\text{ROL}}{r_1} \rightarrow \text{ROL} = \text{Sin}(\alpha) * r_1$$

$$\text{ROL} = \frac{r_1 * \text{Sin}(\beta) * \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2}}{r_1 - r_2 - e}$$

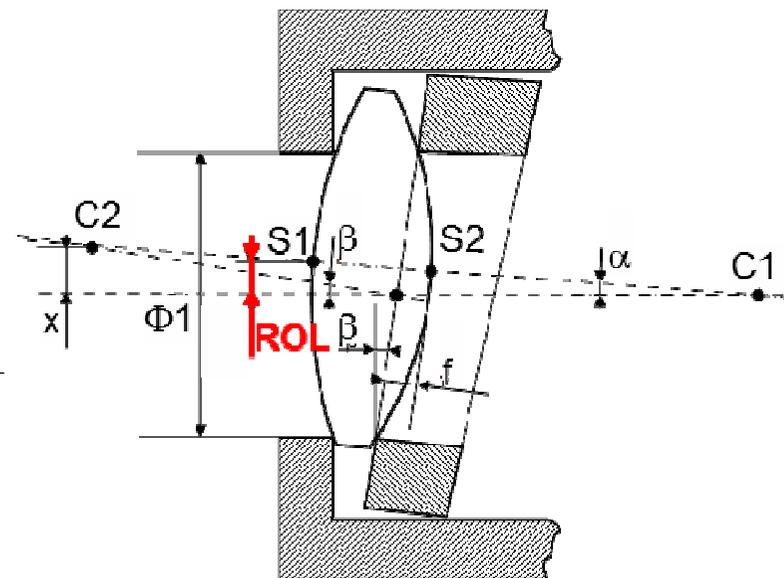


Fig. 3

# Méthode classique : Calcul détaillé de l'impact de la position des entretoises (3/3)

Calcul du ROL total (excentrement + basculement de la face d'appui sur l'entretoise) :

$$\text{ROL} = \frac{D * r_1}{r_1 - r_2 - e} + \frac{r_1 * \text{Sin}(\beta) * \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2}}{r_1 - r_2 - e}$$

(Eq 1.)

$$\text{ROL} = \frac{r_1 * \left( D + \text{Sin}(\beta) * \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}{r_1 - r_2 - e}$$

## → Lentille L2 (Fig.4)

- La lentille L2 est en appui sur la seconde entretoise → rotulage de L2 sur S4
  - ROL de L2 lié à l'angle  $\delta$  de la deuxième face de l'entretoise
  - $\delta = \beta + \varphi$  avec  $\varphi$  parallélisme de l'entretoise.
  - L'angle  $\beta$  intervient donc à la fois dans le ROL de la lentille L1 et dans le ROL de la lentille L2.

## Le ROL de L1 et de L2 sont liés

- Possibilité de couplage des tolérances dans Code V<sup>®</sup>.
  - ✓ ROL de L1 ne dépend pas que de l'angle  $\beta$  tout comme le ROL de L2
  - ✓ Couplage partiel → complexe avec Code V<sup>®</sup>

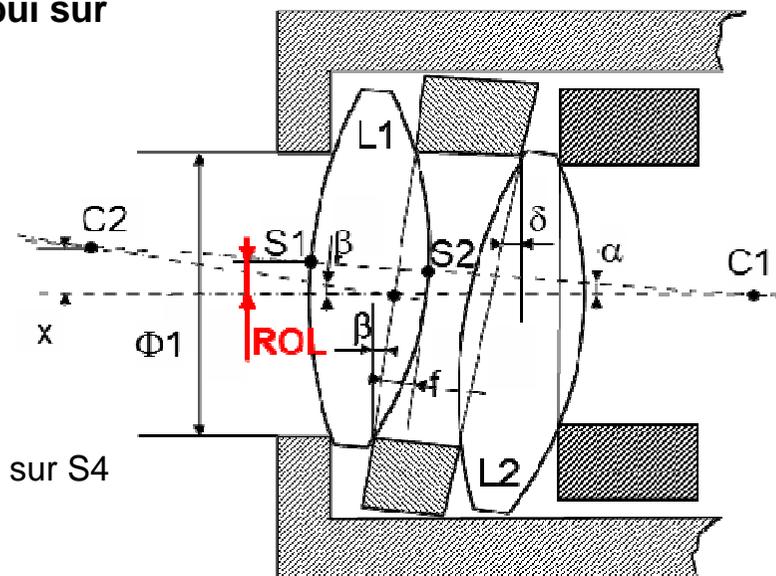


Fig. 4

Une méthode classique ne permet pas une simulation simple

# /03/

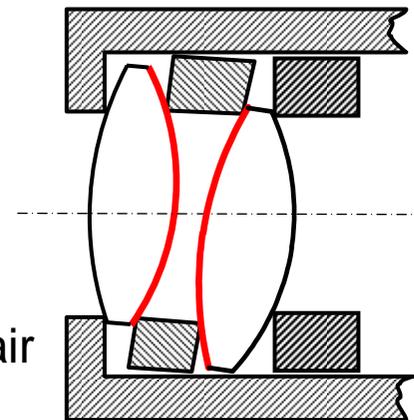
## Méthode alternative proposée

# Méthode alternative : Présentation de la méthode (1/2)

## → Chaque dioptre (centre de courbure) est positionné par la face mécanique sur laquelle il est appuyé

- Originalité de la méthode : réalisation d'un tolérancement dioptre par dioptre plutôt que lentille par lentille.
  - Chaque dioptre aura une tolérance d'orientation, une tolérance d'excentrement et une tolérance de position axiale.
- Certains paramètres vont entraîner le déplacement d'un groupe de surfaces
  - Epaisseurs des lentilles et longueurs des entretoises vont entraîner un déplacement axial de toutes les surfaces qui suivent jusqu'à la dernière du barillet (DSZ a..n).
  - Excentremments et/ou basculements des entretoises qui vont entraîner un excentrement et/ou basculement simultané des 2 faces en appui sur cette entretoise. (DIS a..a+1 et BTI a..a+1).

**Remarque :** Les surfaces a et a+1 n'appartiennent pas à la même lentille.  
Tout se passe comme si le tolérancement concernait le positionnement d'une lentille en air



# Méthode alternative : Présentation de la méthode (2/2)

## → Limites d'utilisation de la méthode

- Ce tolérancement est adapté aux dioptries de lentilles montées par entretoises dans un même barillet (qui peut éventuellement faire parti d'un système optique plus complexe)

## → Références mécaniques du barillet choisies

- Le diamètre interne du barillet ( $\Phi_{4B}$ )
  - Orientation et position radiale
- La face d'appui (Face B) du barillet
  - Position axiale

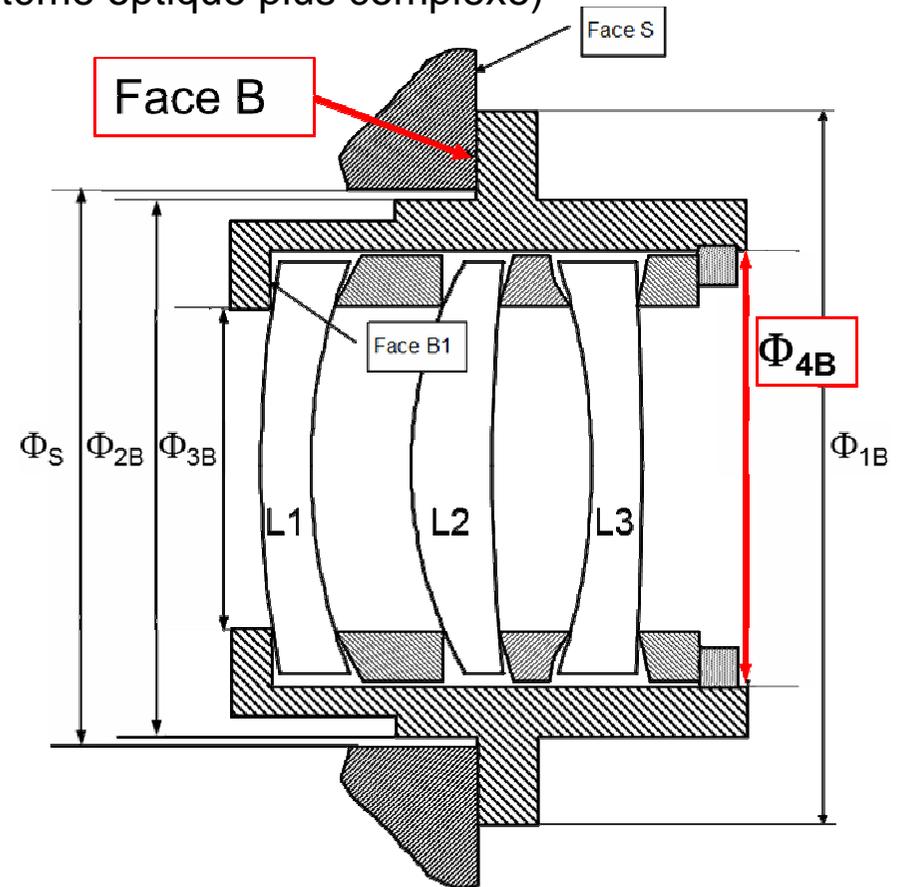


Fig. 1

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (1/11)

## → Dioptre 1

Le dioptre 1 est positionné par la Face B1 et le diamètre  $\Phi 3B$

### ▪ **Basculement du dioptre :**

Le basculement est lié à l'orientation de la face d'appui B1 (Fig. 5)

Si P est la perpendicularité de B1/ $\Phi 4B$

$$\tan(\delta) = \frac{P}{\Phi 4B}$$

La tolérance de basculement sera : **TIL S1  $\delta$**

### ▪ **Excentrement du dioptre :**

L'excentrement est lié à l'excentrement du diamètre d'appui de la lentille (Fig. 6)

Si A est la concentricité de  $\Phi 3B/\Phi 4B$

La tolérance d'excentrement sera : **DEC S1 A/2**

### ▪ **Position axiale du dioptre :**

La position axiale du dioptre est imposée par la face B1. Tous les dioptres qui suivent jusqu'au dernier dioptre du barillet (dioptre n) vont se décaler axialement de la même valeur.

Si D est la tolérance sur la côte entre la face B1 et la face B

La tolérance de position axiale sera: **DSZ S1..n D**

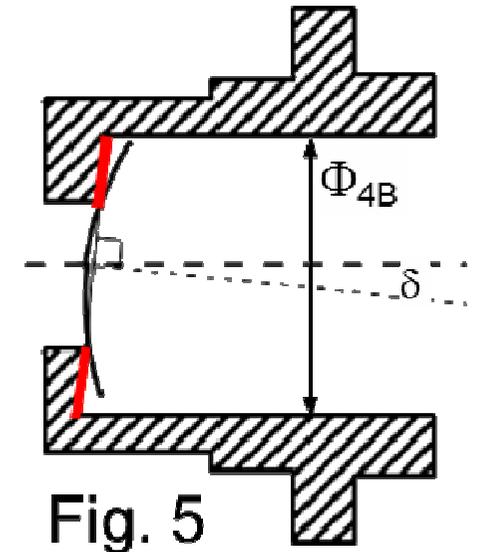


Fig. 5

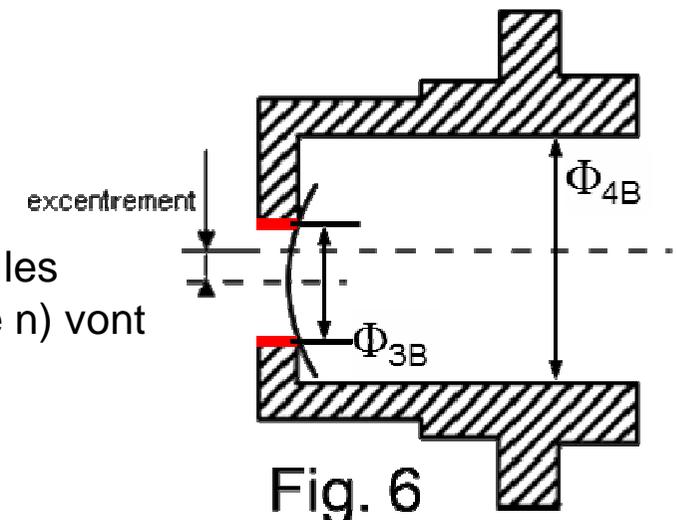


Fig. 6

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (2/11)

## → Dioptre 2

Le dioptre 2 est positionné par la Face 1 de l'entretoise 1 et le diamètre interne de l'entretoise 1.

- **Basculement du dioptre :**

Lié à l'orientation de la face d'appui de l'entretoise. Ce basculement a 2 origines:

- Perpendicularité de la face d'appui par rapport au diamètre externe de l'entretoise (L'entretoise reste parallèle).

Les deux faces de l'entretoise sont basculées de la même valeur → basculement simultané des faces 2 et 3 (Fig. 7).

Si  $P_e$  est la perpendicularité des faces de l'entretoise par rapport à son diamètre externe.

$$\tan(\alpha) = \frac{P_e}{\Phi_{4B}}$$

La tolérance sera : **STI S2..3  $\alpha$**

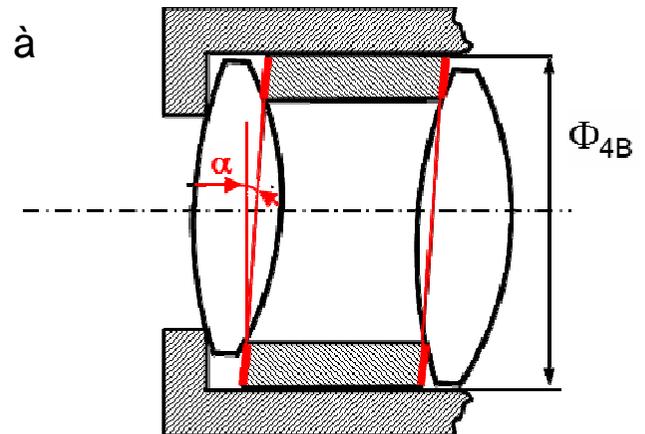
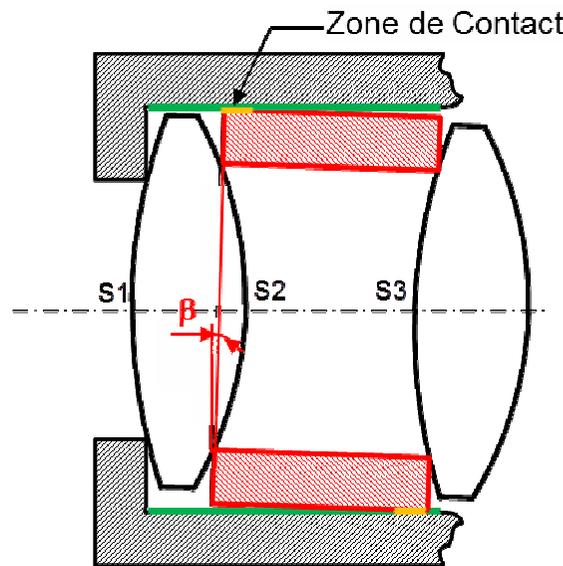


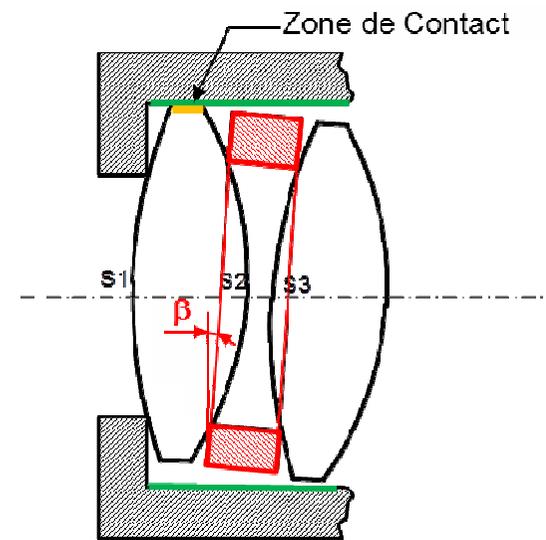
Fig. 7

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (3/11)

- Le basculement de l'entretoise  
2 cas peuvent se présenter (Fig. 8 et Fig. 9)



Cas 1 - Fig. 8



Cas 2 - Fig. 9

- ✓ Cas 1 : L'angle  $\beta$  est limité par l'entretoise elle-même « entretoise longue »
- ✓ Cas 2 : L'angle  $\beta$  est limité par le ROL de la lentille précédente ou de la lentille suivante « entretoise courte »

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (4/11)

Le basculement de l'entretoise fait basculer simultanément les dioptries 2 et 3 (le point de rotation est situé au milieu de l'entretoise)

Ce défaut va se traduire par un BTI S2..3

- Cas 1 « entretoise longue »

Si B est le jeu au rayon de l'entretoise et E la longueur de l'entretoise.  $\sin(\beta) = 2 * \frac{B}{E}$

La tolérance sera : **BTI S2..3 β 0 0 E/2**

- Cas 2 « entretoise courte »

Calcul de l'angle de basculement ρ donnant un ROL de la lentille1 égal à sont jeu au rayon (Jr)

(Eq 1.) 
$$ROL = Jr = \frac{r_1 * \left( D + \sin(\rho) * \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}{r_1 - r_2 - e}$$
 avec  $D = -\frac{E}{2} * \sin(\rho)$  (Fig. 10)

$$Jr = \frac{r_1 * \left( \sin(\rho) * \left(-\frac{E}{2}\right) + \sin(\rho) * \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}{r_1 - r_2 - e}$$

$$\sin(\rho) = \frac{Jr * (r_1 - r_2 - e)}{r_1 * \left( -\frac{E}{2} + \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}$$

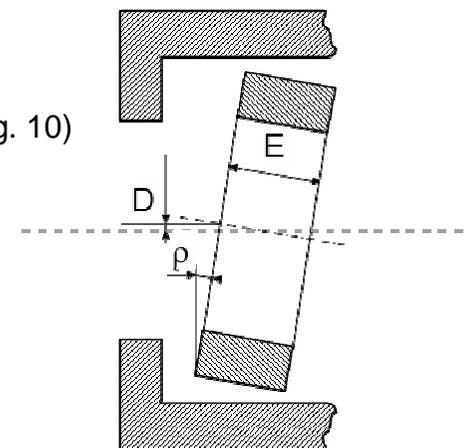


Fig. 10

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (5/11)

Idem pour la lentille 2 : Calcul de l'angle de basculement  $\rho'$  donnant un ROL de la lentille 2 égal à son jeu au rayon  $J_{2r}$

$$e \rightarrow e_2$$

$$r_1 \rightarrow -r_4$$

$$r_2 \rightarrow -r_3$$

$$\sin(\rho') = -\frac{J_{2r} * (-r_4 + r_3 - e_2)}{r_4 * \left( -\frac{E}{2} + \text{signe}(r_3) * \sqrt{r_3^2 - \left(\frac{\Phi_2}{2}\right)^2} \right)}$$

L'angle  $\beta'$  de rotation de l'entretoise est le mini de  $\rho$  et  $\rho'$

**Remarque :** Dans le cas d'une entretoise courte, Le basculement des faces étant limité par le ROL il ne peut pas y avoir de basculement supplémentaire dû à la géométrie de l'entretoise (l'erreur de perpendicularité sera compensée par un basculement inverse de l'entretoise). Il n'y aura donc dans ce cas pas de STI S2..3

La tolérance sera : **BTI S2..3  $\beta'$  0 0 E/2**

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (6/11)

## ▪ Synthèse du basculement:

- Calcul de l'angle  $\beta$  limité par le basculement de l'entretoise
- Calcul de l'angle  $\beta'$  limité par le ROL des lentilles (min de  $\rho$  et  $\rho'$ )

➤ Si  $\beta < \beta'$  : « entretoise longue »

Les tolérances seront:

$$\text{STI S2..3 } \alpha \quad \text{avec } \tan(\alpha) = \frac{Pe}{\Phi 4B}$$

$$\text{BTI S2..3 } \beta \text{ } 0 \text{ } 0 \text{ } E/2 \quad \text{avec } \sin(\beta) = 2 * \frac{B}{E}$$

➤ Si  $\beta > \beta'$  : « entretoise courte »

La tolérance sera:

$$\text{BTI S2..3 } \beta' \text{ } 0 \text{ } 0 \text{ } E/2 \quad \text{avec } \beta' = \min(\rho, \rho')$$

$$\sin(\rho) = \frac{J_r * (r_1 - r_2 - e)}{r_1 * \left( -\frac{E}{2} + \text{signe}(-r_2) * \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}$$

$$\sin(\rho') = -\frac{J_{2r} * (-r_4 + r_3 - e_2)}{r_4 * \left( -\frac{E}{2} + \text{signe}(r_3) * \sqrt{r_3^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}$$

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (7/11)

- **Excentrement du dioptr**

Lié à celui du diamètre d'appui de la lentille. Cet excentrement a pour origine:

- Le jeu au rayon de l'entretoise dans le barillet

Déjà pris en compte par le basculement

- L'excentrement du diamètre interne de l'entretoise par rapport à son diamètre externe (concentricité)

Ce défaut agit simultanément sur les faces 2 et 3

Si C est la concentricité du diamètre interne de l'entretoise par rapport à son diamètre externe.

La tolérance sera : **DIS S2..3 C/2**

- **Position axiale du dioptr**

Imposée par la tolérance sur l'épaisseur de la lentille 1

Tous les dioptr qui suivent jusqu'au dernier dioptr du barillet (dioptr Sn) vont se décaler axialement de la même valeur.

Si de est la tolérance sur l'épaisseur de la lentille 1

La tolérance sera: **DSZ S2..n de**

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (8/11)

## → Dioptre 3

Le dioptre 3 est positionné par la Face 2 de l'entretoise 1 et le diamètre interne de l'entretoise 1

- **Basculement du dioptre :**

Le basculement est lié à l'orientation de la face d'appui de l'entretoise (Fig. 11)

Ce basculement a 2 origines :

- Le parallélisme de la face 2 de l'entretoise par rapport à la face 1.  
Si  $P_a$  est le parallélisme des faces de l'entretoise

$$\tan(\gamma) = \frac{P_e}{\Phi 4B}$$

La tolérance sera : **TIL S3  $\gamma$**

- Le basculement de l'entretoise

Le basculement est le même que pour le dioptre S2 (déjà pris en compte par le BTI S2..3)

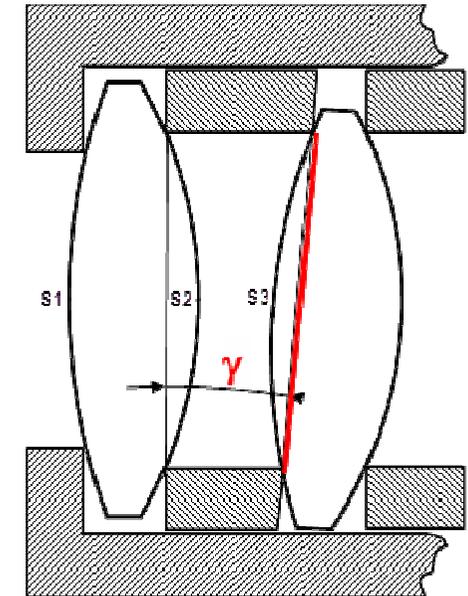


Fig. 11

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (9/11)

- **Excentrement du dioptre :**

L'excentrement est le même que pour le dioptre S2 (pris en compte par le DIS S2..3)

- **Position axiale du dioptre :**

Imposée par la deuxième face de l'entretoise 1

Tous les dioptres qui suivent jusqu'au dernier dioptre du barillet (dioptre Sn) vont se décaler axialement de la même valeur

Si dE est la tolérance sur la longueur de l'entretoise.

La tolérance sera **DSZ S3..n dE**

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (10/11)

## → Dioptries suivants

Le raisonnement est identique pour les dioptries suivants :

- Si le dioptrie est le premier de la lentille, les tolérances sont calquées sur celles du dioptrie S3
- Si le dioptrie est le deuxième de la lentille, les tolérances sont calquées sur celles du dioptrie S2, sauf si ce dioptrie est le dernier du barillet

## → Dernier dioptrie du barillet

Positionné par la face 1 de la dernière entretoise et le diamètre interne de celle-ci

### ▪ **Basculement du dioptrie :**

Raisonnement identique à dioptrie 2 à la différence que la dernière entretoise n'a pas d'impact sur un autre dioptrie

#### ➤ Entretoise longue

Le STI  $S_{n..n+1} \alpha$  se transforme en TIL  $S_n \alpha$

Le BTI  $S_{n..n+1} \beta 0 0 E/2$  se transforme en TIL  $S_n \beta 0 0 E/2$

En général la dernière entretoise qui sert uniquement de « tampon » entre la dernière lentille et l'écrou est de faible épaisseur  $E \approx 0$

La tolérance sera : **TIL  $S_n \alpha + \beta$**

# Méthode alternative : Détail du calcul de l'amplitude des défauts (11/11)

## ➤ Entretoise courte

Le basculement de la face d'appui est limité par le ROL de la dernière lentille.

La tolérance sera : **TIL Sn β'**

$$\text{avec } \sin(\beta') = \frac{J_{nr} * (r_{n-1} - r_n - e_{n/2})}{r_{n-1} * \left( -\frac{E}{2} + \text{signe}(-r_n) * \sqrt{r_n^2 - \left(\frac{\Phi 2}{2}\right)^2} \right)}$$

## ▪ **Excentration du dioptré :**

Raisonnement identique à dioptré 2 à la différence que la dernière entretoise n'a pas d'impact sur un autre dioptré.

Le DIS se transforme en DEC

La tolérance sera : **DEC Sn C/2**

## ▪ **Position axiale du dioptré :**

Imposée par la tolérance sur l'épaisseur de la dernière lentille

Si  $de_p$  est la tolérance sur l'épaisseur de la dernière lentille

La tolérance sera: **DLZ Sn  $de_p$**

# Méthode alternative : Autres tolérances

## → Tolérances de position du barillet

- Excentrement du barillet
- Basculement du barillet
- Position axiale du barillet

## → Tolérances de fabrication des lentilles

### Les lentilles ont elles même leurs tolérances de fabrication

- Tolérances de sphéricité des dioptries :  
**DLR et/ou DLF**
- Tolérances d'irrégularité des dioptries :  
**IRR**
- Tolérances d'épaisseur des lentilles :  
**Les tolérances d'épaisseur des lentilles ont été prises en compte dans le tolérancement des dioptries**
- Tolérances de casquette des lentilles :  
**Sans objet dans cette méthode de tolérancement car sans impact sur le positionnement des dioptries (si la condition 2 des hypothèses est remplie)**
- Tolérances sur les indices :  
**DLN**
- Tolérances sur les constringences :  
**DLV**

# /04/

## Conclusion

# Conclusion

## → La méthode alternative par dioptre permet une simulation adaptée

- Pas d'impossibilité majeure de simulation
- Ne nécessite pas de couplages (tolérances indépendantes les unes des autres)

## → Rupture avec méthodes conventionnelles

- Une recherche bibliographique n'a pas mis en évidence l'utilisation d'une telle méthode

## → Cette méthode est actuellement purement théorique

- Validation de la méthode par mesures expérimentales
- Il faudra faire la corrélation entre les résultats donnés par Code V<sup>®</sup> au travers de cette méthode et des valeurs mesurées de FTM

## → Possibilité de créer des macros ou des feuilles de calcul issuent des équations présentées

- Génération automatique du fichier de tolérance
- Corrélation directe entre les tolérances mécaniques et les tolérances Code V<sup>®</sup>