



## Bases de l'Opto-mécanique

[bertrand.forestier@fr.thalesgroup.com](mailto:bertrand.forestier@fr.thalesgroup.com)  
+33 1 30 96 76 48

THALES LAS France  
Mise à jour sept 2023

THALES

2

Préambule

### Plan du cours

- ◆ L'Opto-mécanique, qu'est-ce que c'est?
- ◆ Compléments d'Optique pour la conception opto-mécanique
- ◆ Eléments de Mécanique pour l'Opto-mécanique
- ◆ La conception opto-mécanique par l'exemple
- ◆ Références pour aller plus loin

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

THALES

- ◆ **Introduction** à l'Opto-mécanique
- ◆ **Point de vue d'un opticien...**
- ◆ **Exposé à dominante "Optronique"**
  - Domaine spectral 450 nm (Visible) à 14 microns (LWIR)
  - Optiques plutôt haut de gamme
  - Environnements sévères
- ◆ **Extrapolations possibles**
  - Domaine spatial (e.g. grands télescopes à miroirs)
  - Domaine UV (e.g. objectifs de photolithographie)
  - Optiques plastiques
- ◆ **Exclusions**
  - Procédés de réalisation des composants optiques
  - Procédés de réalisation des composants mécaniques

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

THALES

L'Opto-mécanique, qu'est-ce que c'est?

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

THALES

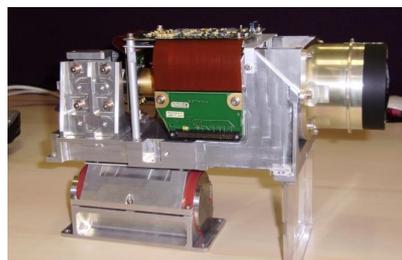
- ◆ L'Opto-mécanique, c'est l'ensemble des techniques permettant d'intégrer dans des pièces mécaniques des composants optiques (lentilles, miroirs, prismes, réseaux etc...) et opto-électroniques (détecteurs...)
- ◆ Les modules opto-mécaniques peuvent être animés par des servo-mécanismes (zoom, focus, dispositif d'orientation de la ligne de visée, scanner, etc...)
- ◆ Un module ou sous-ensemble opto-mécanique doit:
  - Répondre à des exigences de performances dans des environnements donnés
  - Etre réalisable au coût objectif

- ◆ Dans le processus de développement, la conception opto-mécanique prend la suite de la conception optique: elle s'appuie sur les résultats du tolérancement de la combinaison optique, pour aboutir à la définition du produit
  - Néanmoins, de façon évidente, la combinaison optique est fortement conditionnée par le volume disponible, les environnements, les tolérances accessibles et les techniques de montage maîtrisées par l'entreprise
  - => forte imbrication des deux disciplines

- ◆ Du concept....



- ◆ ....à la réalité matérielle



- ◆ L'assemblage mécanique doit permettre de mettre en position et de maintenir en position les composants optiques tout en préservant la qualité de la formule optique calculée
- ◆ Il est parfois nécessaire de recourir à des réglages « usine » pour atteindre les performances attendues.
- ◆ Ne pas oublier que:
  - Une mécanique réglable peut être un maillon faible en environnement thermique ou vibratoire,
  - Un dispositif de réglage n'est pas sans conséquence sur les coûts: moyen de réglage à développer & temps de réglage...
  - => à n'utiliser qu'en dernier recours, suite à un sérieux parcours de tolérances

- ◆ Dans l'industrie, la conception opto-mécanique est généralement assurée par un ingénieur spécialisé en mécanique, assisté d'un projeteur
- ◆ ...mais la responsabilité de la performance du sous-ensemble optique incombe souvent au concepteur opticien
- ◆ => nécessité d'une ingénierie simultanée multi-métiers et d'une bonne compréhension mutuelle
- ◆ => il s'agit pour vous opticiens d'acquérir les notions de base et les bons réflexes vous permettant de collaborer efficacement avec les mécaniciens

Le cahier des charges définit l'ensemble des exigences techniques et non techniques à prendre en compte pour la conception/réalisation d'un produit:

- ◆ Interfaces (optique, mécanique, électronique, logicielle)
- ◆ Conditions d'environnement
  - Opérationnelles
  - Non opérationnelles (transport, stockage)
- ◆ Performances à tenir en opérationnel
- ◆ Matrice de vérification des exigences (Inspection/Analyse/Démonstration/Test)
- ◆ Fiabilité (ce qui nécessite de connaître le profil de mission...)
- ◆ Coût non récurrent
  - Développement y/c réalisation des prototypes
  - Industrialisation
- ◆ Coût récurrent (coût de production)
- ◆ Le client doit définir ses priorités
  - Perfos/Délai/Coût ou Coût/Délai/Perfos ?
  - ⇒ Négociations possibles (particulièrement les tests)

- ◆ **A méditer:** le bon produit est celui qui réalise le meilleur compromis permettant de satisfaire au moindre coût les besoins de l'utilisateur
- ◆ Quelques règles simples à respecter:
  - S'adapter au juste besoin: éviter le perfectionnisme technique
  - Ré-utiliser à bon escient...surtout les concepts: ré-utiliser un module existant est parfois très (trop) contraignant
  - Bien connaître l'état de l'art de façon à minimiser les risques
  - Anticiper les évolutions (voire ruptures...) technologiques
  - Ne pas privilégier la phase prototype au détriment de la phase série
    - La réussite de la conception se juge au résultat global de l'affaire car coût global = coûts de développement (non récurrents) + N x coûts récurrents
    - => impliquer la Production dès la phase conception
    - Une phase de conception insuffisante (due à une pression excessive sur les délais par exemple) peut conduire à des ré-études dans la précipitation, et donc en fin de compte à des sur-coûts

## Paramètres à prendre en compte et conséquences:

- ◆ **Vibrations**
  - Déformation dynamique des structures, des montages et des composants
  - => instabilité de la ligne de visée
  - Performances requises pendant l'excitation (aléatoire, généralement)
- ◆ **Chocs**
  - Déformation dynamique des structures, des montages et des composants
  - Pas de performances pendant...mais besoin de performance après!
  - => il faut rester dans le domaine d'élasticité des matériaux et des assemblages (réversibilité requise)
- ◆ **Température**
  - Modification de la géométrie des pièces optiques et mécaniques, (dilatation, voire déformation), et modification des propriétés optiques des matériaux
  - => changement de focale, défocalisation, aberrations, instabilité de la ligne de visée
- ◆ **Pression**
  - Changement de l'indice de « l'air » ambiant
  - => défocalisation

- ◆ **Humidité**
  - Corrosion des structures
  - Détérioration des couches minces => perte de transmission
  - Condensation lors des variations de température => buée => perte d'image
  - Variations dimensionnelles de certains composants hygroscopiques (e.g plastiques)
- ◆ **Brouillard salin**
  - Corrosion des structures
  - Détérioration des couches minces optiques donc perte de transmission
- ◆ **Sablo-érosion & pluvio-érosion**
  - Détérioration des couches minces optiques et des matériaux massifs  
=> diffusion, perte de transmission
- ◆ **Champignons & moisissures**
  - Détérioration des couches minces optiques et des joints de colles

- ◆ **Poussières**
  - Diffusion, artefacts dans l'image, claquages (laser de puissance)
- ◆ **Contamination moléculaire (dégazage)**
  - Altération de la transmission
- ◆ **Radiations ionisantes (RX, alpha, gamma)**
  - Altération de la transmission et/ou luminescence
- ◆ **Ondes électromagnétiques**
  - Perturbation des composants électroniques de l'équipement optronique

### Paramètres de choix (liste non exhaustive):

- ◆ **Transmittance spectrale**
  - Dépend parfois de la température....
- ◆ **Indice de réfraction**
  - $n(\lambda)$ , si possible constant, et grand
  - $dn/dT$ , si possible petit
  - Homogénéité
- ◆ **Coefficient de dilatation linéique**
  - $CTE = \alpha = 1/L \, dL/dT =$  allongement relatif par °C , si possible petit (mais pas trop)
  - de 0 (Zerodur) à qq 100 E-6 (plastiques)
- ◆ **Masse volumique**
  - $\rho$  en  $g \, cm^{-3}$ , si possible petite
    - ( $\rho$  en  $kg \, m^{-3}$ ) = 1000 ( $\rho$  en  $g \, cm^{-3}$ )
  - Densité =  $\rho/\rho_{eau}$  de 1 (plastiques) à 9 (cuivre)
- ◆ **Résistivité**
  - $\rho_{elec}$  en  $\Omega \, cm$
  - Rappel: résistance d'un élément de longueur L et de section S:  $R = \rho_{elec} \, L/S$

### ◆ Capacité calorifique (chaleur spécifique)

- $C_p$  est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1K la température d'une unité de masse d'une substance donnée
- $C_p$  en  $J K^{-1} kg^{-1}$

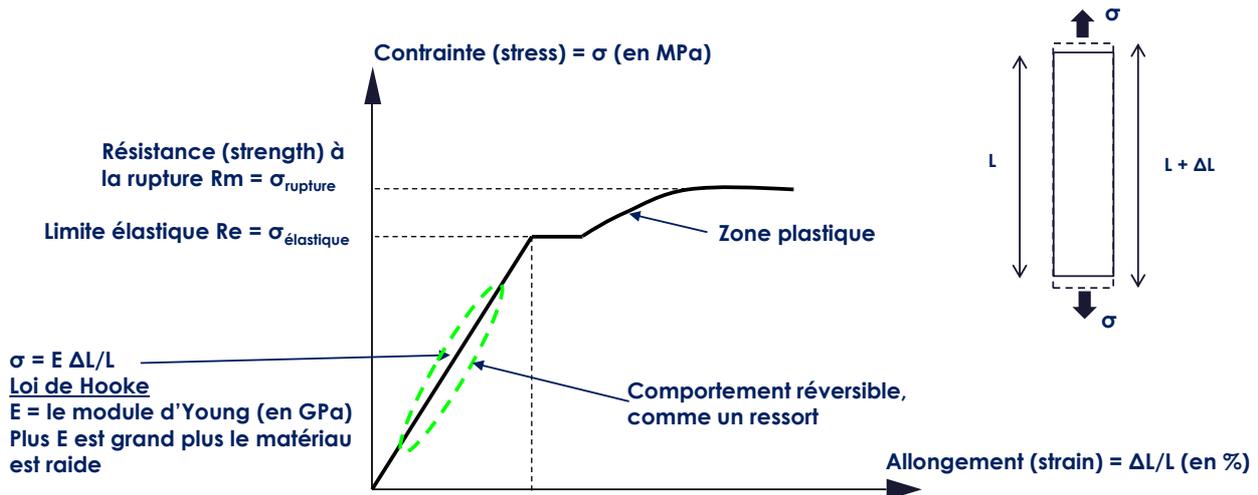
### ◆ Conductivité thermique

- Loi expérimentale de Fourier:  $J = \text{vecteur courant de chaleur} = -k \text{ grad}(T)$
- Le flux de  $J$  à travers une surface représente la quantité de chaleur traversant cette surface par seconde
- $k$  en  $W m^{-1} K^{-1}$ , si possible grande

### ◆ Diffusivité thermique

- Equation de la chaleur: chaleur entrant dans un volume - chaleur sortant => variation de  $T$ , se traduit mathématiquement par  $d^2T/dx^2 = D dT/dt$
- $D = k/(\rho C_p)$  en  $m^2 s^{-1}$ , si possible grande
- $D$  caractérise la vitesse du changement de  $T$  à travers le matériau

### ◆ Elasticité: courbe de traction



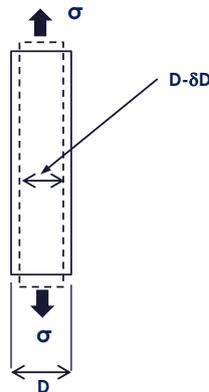
### ◆ Matériaux ductiles (e.g métaux): $R_m > R_e$

### ◆ Matériaux fragiles (e.g verres minéraux et céramiques): peu de différence entre $R_m$ et $R_e$

- NB: le comportement des matériaux fragiles dépend de leur état de surface (un verre poli résiste bien mieux qu'un verre brut)

### ◆ Elasticité: déformations transversales

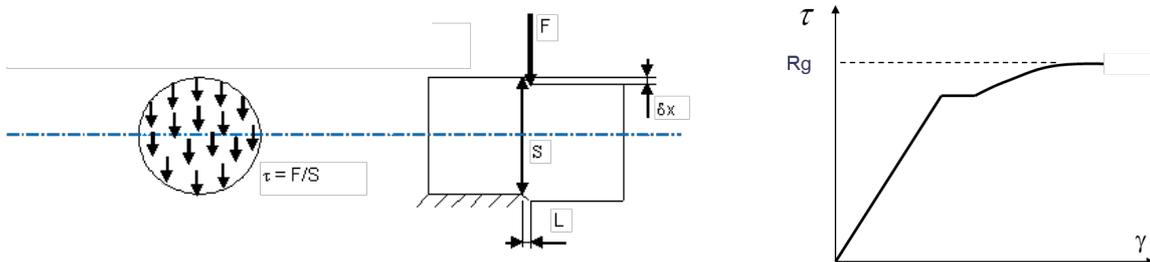
- En réalité, la traction sur le matériau provoque aussi une contraction dans la direction transversale:



- Coefficient de Poisson =  $\nu$  = rapport de la déformation transversale sur la déformation longitudinale =  $[-\delta D/D] / [\delta L/L]$ 
  - = 0.25 à 0.4 (alliages d'aluminium ou d'acier)
  - = 0.5 pour un élastomère

### ◆ Contrainte de cisaillement

- La contrainte transversale  $\tau$  provoque une déformation de l'éprouvette  $\gamma = dx/L$



- Relation cisaillement-déformation:  $\tau = G \gamma$  avec  $G$  = module de Coulomb
  - $G = E / [2(1+\nu)]$
- => Résistance au cisaillement  $R_g$  (= 0.5 à 0.6  $R_m$ )

- ◆ Dureté (e.g Knoop)
  - Mesure la résistance à l'indentation
  - S'exprime en  $\text{kg}/\text{mm}^2$
  - saphir 2200; verres environ 600

### Quelques (autres) facteurs de mérites importants pour les matériaux

- ◆ Raideur spécifique =  $E/\rho$ , si possible grande
- ◆ Coefficient de distorsion thermique =  $\alpha/D$ , si possible petit
- ◆ Résistance au choc thermique =  $S(1-\nu)k/(\alpha E)$ , si possible grande
  - $S$  = strength =  $R_m$  = résistance du matériau (rappel: toujours approximative car dépend du finish, des impuretés du matériau, etc...)

## Compléments d'optique pour la conception opto-mécanique

**UV ( 200 nm  $\leq$   $\lambda$   $\leq$  400 nm): peu de matériaux dispo., tous bas indices**

- ◆ **Monocristaux: BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, LiF (fragiles & chers)**
- ◆ **SiO<sub>2</sub> (silice fondue ou quartz synthétique)**

**VIS & NIR (450 nm  $\leq$   $\lambda$   $\leq$  1100 nm): verres**

- ◆ **Schott & Ohara, principalement + copies chinoises.**
- ◆ **Une des difficultés de la bande Visible: les verres peu (resp. très) dispersifs ont un faible (resp. fort) indice de réfraction...**
- ◆ **Point positif: achromatisation possible à l'aide de doublets collés**
- ◆ **Les catalogues se rationalisent; attention aux obsolescences, liées aux directives européennes ROHS**
- ◆ **Quelques dizaines de verres suffisent pour couvrir la grande majorité des besoins**

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

**VIS & NIR (450 nm  $\leq$   $\lambda$   $\leq$  1100 nm): plastiques**

- ◆ **Solution bon marché en grande série (moulage),**
- ◆ **Légers (densité < 1.25), mais propriétés mécaniques médiocres**
  - Faible raideur
  - CTE de l'ordre de 60E-6 /°C, soit environ 10 fois plus grand que celui des verres
  - Conduisent mal la chaleur (5 fois moins bien que les verres)
- ◆ **Peu résistants aux environnements, dans l'ensemble**
  - Température de service limitée
- ◆ **Les classiques à connaître**
  - PMMA: peu dispersif, dur, mais absorbe l'eau
  - PC: dispersif, un peu biréfringent, assez bonne résistance aux environnements, en particulier aux impacts
  - PS: dispersif, un peu biréfringent, un peu moins résistant que le PC, globalement
  - O-PET, e.g OKP4: dispersif, faiblement biréfringent
  - COP, e.g Zeonex 330R: peu dispersif, faiblement biréfringent, faible absorption eau, bonne résistance à la chaleur
  - COC, eg. Topas 5013: idem
- ◆ **En réalisation, on n'atteint pas les mêmes niveaux de précision que pour les verres**
  - => utiles pour des applications optiques tolérantes, e.g les oculaires

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### VIS & NIR ( $450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$ ): solutions plus baroques

- ◆ **CaF<sub>2</sub>**: très peu chromatique donc intéressant pour les longues focales; mais plus cher que les verres, fragile et forte dilatation
- ◆ **Polycristaux ZnS CVD multispectral (Cleartran), ZnSe CVD**: matériaux chers normalement utilisés dans l'IR, potentiellement utiles car indice de réfraction plus élevés que les verres
- ◆ **Achromatisation possible par éléments diffractifs (DOE binaires multiniveaux sur substrat plan)**

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Bande 8-12 $\mu\text{m}$ (= LWIR): choix restreint, matériaux chers

- ◆ **Monocristaux semi-conducteurs: Ge (matériau roi dans cette bande)**
  - Existe en grand diamètre
  - Dopage type N, résistivité 5-40  $\Omega\text{cm}$ 
    - Attention: en LWIR, l'absorption du Ge dépend de la température & de la résistivité
  - n élevé,  $dn/d\lambda$  très faible, mais très grand  $dn/dT$
  - NB: GaAs possible mais très peu utilisé
- ◆ **Verres infrarouges: AMTIR1 (= IG2 = IRG22), GASIR1 (moulable), IG4 (= IRG24), IG6 (= IRG26 = GASIR5), IRG27**
- ◆ **Matériaux polycristallins diélectriques: ZnS CVD, ZnSe CVD**
- ◆ **Monocristaux: (KRS5 possible, à la rigueur, pour l'athermalisation)**
- ◆ **Doublets achromatiques classiques: Ge/ZnS, Ge/ZnSe, ZnSe/ZnS**
- ◆ **Asphériques possibles (par usinage diamant), sauf sur KRS5**
- ◆ **Achromatisation à l'aide de DOE, gravés par usinage diamant: Ge/DOE, ZnSe/DOE**

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Bande 3-5 $\mu\text{m}$ (= MWIR): choix restreint, matériaux chers

- ◆ **Monocristaux semiconducteurs: Si & Ge (existent en grand diamètres)**
  - Le matériau roi c'est le silicium:  $n$  élevé,  $dn/d\lambda$  faible
  - GaAs possible mais peu utilisé en pratique
- ◆ **Verres IR: AMTIR1, GASIR1, IG4, IG6, IRG27**
- ◆ **Monocristaux diélectriques: CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub> & LiF (fragiles, limitation pratique des diamètres à environ 80 mm), saphir (biréfringent => applications hublots essentiellement)**
- ◆ **Matériaux polycristallins: ZnS CVD (standard grade ou multispectral grade), ZnSe CVD (existent en grands diamètres), MgF<sub>2</sub> (dômes), ALON (dômes, hublots), Spinel (dômes, hublots)**
- ◆ **Doublets achromatiques classiques: Si/Ge, Si/CaF<sub>2</sub>, ZnS/CaF<sub>2</sub>, ZnSe/CaF<sub>2</sub>**
- ◆ **Asphériques possibles (par usinage diamant) sur Ge, ZnS, ZnSe & Si**
- ◆ **DOE possibles (Si/DOE, ZnS/DOE) par usinage diamant mais attention aux images parasites, en particulier si la pleine bande est utilisée (rendement de diffraction médiocre)**

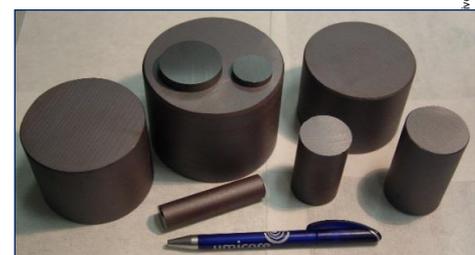
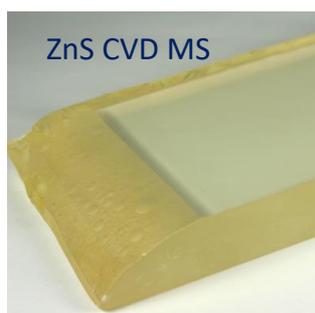
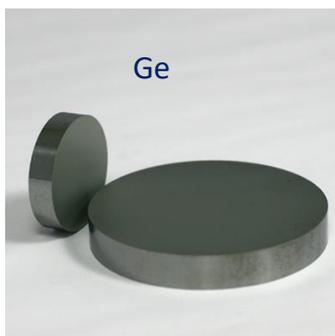
### SWIR (1200 – 2400 nm)

- ◆ **Verres (jusqu'à 1700 nm)**
- ◆ **Matériaux IR: Si, GaAs, ZnS multispectral, ZnSe, BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, LiF, Verres IR**

THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales



THALES LAS France

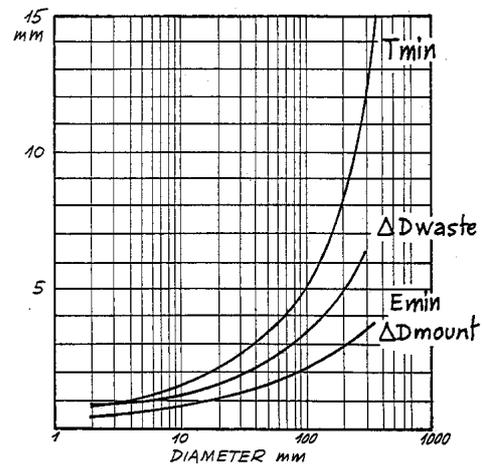
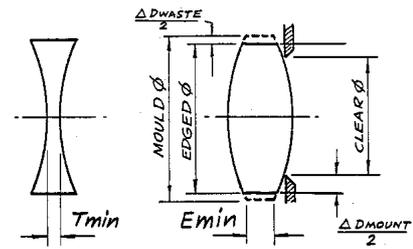
THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

- ◆ Très bonne transparence dans le domaine Vis-NIR
- ◆ Indice de réfraction adapté aux verres Visible & NIR
  - => peu de perte de Fresnel aux interfaces verres-colles
- ◆ Attention au différentiel de dilatation entre les verres, si la gamme de T utile est importante et/ou si les lentilles sont de dimensions importantes
- ◆ Polymérisation rapide (quelques secondes à quelques minutes) sous UV (absorption autour de 360 nm)
- ◆ Exemples classiques
  - NOA 61: solution standard en optro, assez rigide
    - Delta de CTE verres < 2E-6, typiquement (dépend de la gamme de T utile, du diamètre des composants, etc...)
    - n = 1.56 environ
  - NOA 73: beaucoup plus élastique
    - Delta de CTE verres < 4E-6, typiquement
    - N = 1.56 environ

- ◆ Afin de minimiser le nombre d'aller-retours avec le Bureau d'Etude Mécanique pour aboutir à une solution viable, le concepteur opticien doit déterminer au plus tôt, et de façon réaliste, le volume utile du « conduit optique »
- ◆ Au stade de l'avant-projet, on détermine approximativement les diamètres utiles des composants optiques:
  - En tenant compte de la spécification de (non-)vignettage (c'est essentiel en IR refroidi)
  - En surdimensionnant forfaitairement un peu le champ ( $\pm 0.5$  mm sur le détecteur par exemple) & l'ouverture (+ 5% par exemple), afin de « digérer » les tolérances de fabrication
  - En tenant compte de la gamme de température & pression (+3% en IR, +1% en visible)
  - En tenant compte des éventuels réglages (ajustement de la position du détecteur par rapport à l'optique, par exemple)

- ◆ Fréquemment, l'épaisseur n'est pas un paramètre optique déterminant
  - Contre-exemple: ménisque correcteur de champ
- ◆ Il est préférable de minimiser l'épaisseur d'une lentille car:
  - Meilleure transmission
  - Moindre coût matière
  - Moindre masse
- ◆ Mais l'épaisseur & le diamètre doivent:
  - Etre compatibles du process de réalisation
  - Permettre le montage du composant dans son barillet sans déformation excessive; le minimum vital étant de disposer de suffisamment de marge pour l'appui du composant



Source: J. Maxwell, SIRA

THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Fonctions à réaliser:

- ◆ **Transparence dans le domaine spectral considéré**
- ◆ **Blindage mécanique de l'équipement**
  - Résistance à la flexion (delta de pression extérieur/intérieur équipement)
  - Résistance aux impacts de projectiles
  - Résistance à l'abrasion (sablo-érosion, en particulier)
  - Résistance à la pluvio-érosion (applications aéroportées)
- ◆ **Résistance aux environnements climatiques**
  - Résistance au brouillard salin, entre autres
- ◆ **Blindage électromagnétique de l'équipement, si besoin**
  - Les électroniques modernes sont facilement perturbées par les ondes EM (radar ami, ou ennemi...)
  - Si on n'arrive pas à réaliser cette protection au niveau du hublot d'entrée, il faut capoter chacun des composants (opto-)électroniques sensibles et utiliser des connecteurs spéciaux, ce qui a un coût...

THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Pas de solution miracle, on joue sur:

- ◆ **Les matériaux optiques**
- ◆ **Les traitements de surface**
  - Traitements durs
  - Traitements anti-reflets conducteur type ITO (domaine VisNIR uniquement)
- ◆ **Ajout (ou dépôt) d'une grille conductrice, éventuellement**
  - Réseau de fils métalliques très fins (qq dizaines de  $\mu\text{m}$ ) espacés de qq mm
  - Attention: une grille est un réseau de diffraction => lumière parasite
    - Remède plus ou moins efficace: grille à pas aléatoires
  - Il faut assurer la continuité électrique entre la grille et la structure métallique de l'équipement
- ◆ **Un hublot efficace en terme de blindage mécanique ou EM représente toujours une perte de transmittance optique relativement importante**

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Quelques exemples classiques:

- ◆ **Vis/NIR**
  - NBK7 ou silice avec traitement anti-reflet conducteur type ITO en face interne
    - NB: les traitements anti-reflets Vis/NIR sont moins résistants que les verres => pas de traitement sur la face externe
  - Pluvio ou sablo érosion => saphir + traitement ITO en face interne
- ◆ **MWIR**
  - Applis terrestres ou navales: silicium basse résistivité (5–20 ohm.cm) avec traitement DLC (diamond like carbon) en face externe: OK pour la sablo-érosion & le brouillard salin
  - Applis aéroportées & sous-marines: saphir traité anti-reflet face interne + grille
    - Alternative: AION traité anti-reflet face interne + grille
  - MgF2 polycristallin: pas besoin d'antireflet car indice très faible
- ◆ **LWIR**
  - Ge basse résistivité avec DLC OK pour applis terrestres
  - Pas de solution vraiment satisfaisante pour la pluvio-érosion: éventuellement ZnS FLIR grade avec traitement DLC en face externe + grille si besoin CEM

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Epaisseur:

- ◆ On souhaite dimensionner l'épaisseur  $e$  d'un hublot de diamètre  $\varnothing$  exposé à un différentiel de pression  $\Delta P$
- ◆ Ratio nécessaire:  $[\varnothing/e] \leq 2 (S / (k f \Delta P))^{1/2}$ 
  - $S$  = strength =  $R_m$  = résistance du matériau (rappel: toujours approximative car dépend du finish, des impuretés du matériau, etc...)
  - $k = 1.25$  si le hublot est en simple appui sur sa circonférence
  - $k = 0.75$  si le hublot est bridé
  - $f$  = facteur de sécurité = 4 en général
- ◆ Exemples avec  $\Delta P = 4$  atmosphères = 0.4 MPa
  - Saphir ( $S = 400$  MPa):  $[\varnothing/e] \leq 28.1$
  - Silicium ( $S = 120$  Mpa):  $[\varnothing/e] \leq 15.4$
  - NBK7 ( $S = 50$  Mpa):  $[\varnothing/e] \leq 9.9$

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

- ◆ On utilise de préférence des matériaux de raideur spécifique élevée et de coefficient de distorsion transitoire petit
- ◆ Candidats classiques
  - NBK7, silice, Zerodur, Al, Be\*, SiC\* \*cher!
- ◆ Dimensionnement pour les avants-projets
  - $6 < [\varnothing/e] < 10$
- ◆ Minimisation de la masse des grands miroirs (simus par éléments finis)
  - Possibilité d'allègement supérieurs à 50%

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

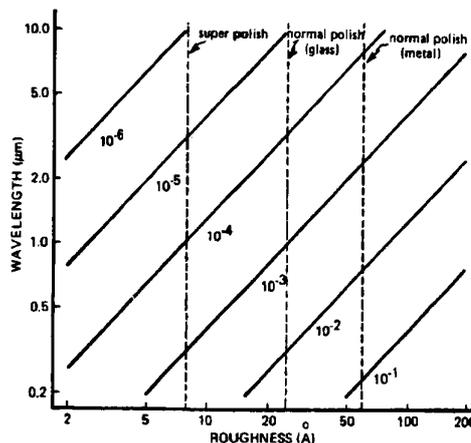
### Déformation d'un miroir sous son propre poids

- ◆ Hypothèses: miroir = plaque circulaire de diamètre  $\emptyset$  et d'épaisseur  $h$
- Matériau: module d'Young  $E$ , coefficient de Poisson  $\nu$ , masse volumique  $\rho$
- ◆ Rigidité à la flexion (en N.m) =  $D = E h^3 / [12(1 - \nu^2)]$
- ◆ Charge surfacique (N/m<sup>2</sup>) =  $q = h \rho g$
- ◆ Si la plaque est encadrée:  $PV = q (\emptyset/2)^4 / (64D)$
- ◆ Si la plaque est appuyée:  $PV = [q (\emptyset/2)^4 / (64D)] (5 + \nu)/(1 + \nu)$

### Rugosité => lumière parasite diffuse

- ◆ Formule approchée pour 1 dioptre air/matériau (indice  $n$ ):  
Total Integrated Scatter = TIS =  $[(2\pi/\lambda) (n-1) R_q]^2$
- ◆  $R_q$  = rugosité quadratique moyenne = qq 0.1nm à qq 10nm
- ◆ Pour les dioptres, de façon évidente on a intérêt à minimiser  $R_q$
- ◆ Pour le « conduit optique », il n'y a pas de règle générale: il faut étudier les trajets parasites et adapter la rugosité des surfaces en conséquence

TIS en fonction de  $R_q$  et  $\lambda$   
pour  $n = -1$  (miroir):



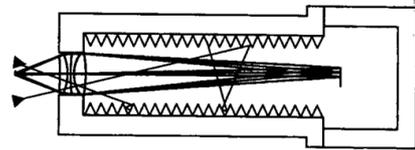
Source: SPIE

### Lumière parasite issue de sources externes intenses hors champ:

◆ NB: ghost images classiques (par double réflexion spéculaire): c'est de l'Optique pure, en dehors du périmètre de ce cours

◆ Précautions de base pour le reste

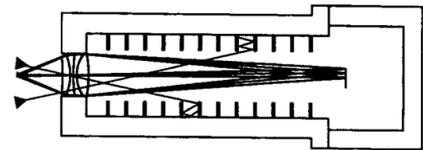
- Adapter la rugosité des dioptrés au domaine spectral utile
- Pièces structurales non réfléchissantes
  - Sablées ou filetés
  - Si possible peintes au noir mat



Source: Robert Fischer, SPIE

○ Précautions supplémentaires

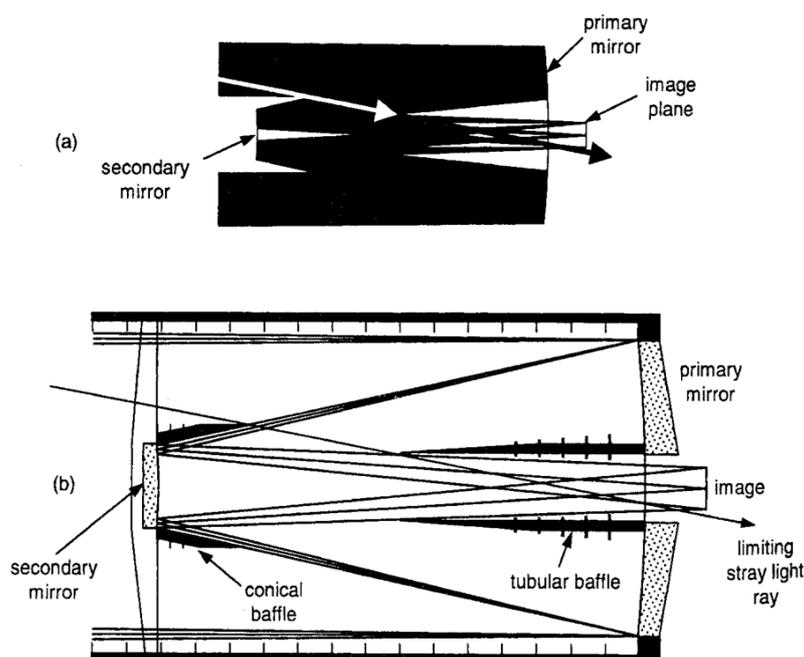
- Diaphragme de champ (au voisinage d'un plan focal intermédiaire)
- Conduit optique bafflé (performant mais cher)
- Casquette...



Source: Robert Fischer, SPIE

○ Toujours se méfier des incidences rasantes (comportement spéculaire!)

### Optiques catadioptriques: attention



Source: Robert Fischer, SPIE

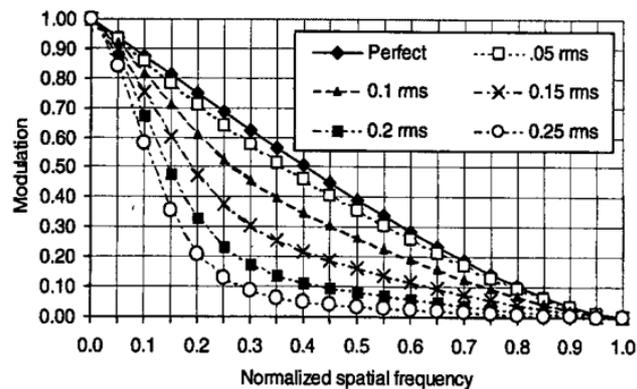
- ◆ **Défauts locaux = trous & rayures**
  - En première approximation, on considère que le défaut est complètement diffusant, ce qui se traduit par une perte totale de flux utile
  - => en tout point du champ, la surface cumulée des défauts doit être très petite devant la section utile du faisceau sur le dioptre considéré
  - Ordre de grandeur: 0.X%
  
- ◆ **Au voisinage d'une surface focale**
  - Spécification toujours serrée car risque de voir les défauts dans l'image
  - Exemple (selon ISO 10110): 5/ 4x0.03; L4x0.01
  
- ◆ **Au voisinage d'un plan pupillaire**
  - Spécification généralement assez lâche pour les dioptres internes, mais serrée sur les dioptres visibles par le client (critère cosmétique...)
  - Exemple (ISO 10110): 5/ 4x0.4; L4x0.03

### Défauts de forme => aberrations

- ◆ **Expression courante (ISO 10110): en nombre de franges par réflexion à  $\lambda = 546$  nm par rapport à un calibre "parfait"**
  - 1 F = 273 nm sur dioptre
  
- ◆ **Verres et matériaux IR**
  - Erreur de rayon de courbure: PWR minimum = 5 F, généralement peu d'influence sur la qualité image
    - Surfaces planes: PWR min = 1 F
  - Astigmatisme: PV minimum = 0.3 F (NB: PV/RMS = 5)
  - Autres défauts d'irrégularités :  
RMS minimum = 0.08 F (NB:  $3 \leq PV/RMS \leq 6$ , en gros)
  
- ◆ **Plastiques injectés: tolérances bien plus larges**
  - PWR minimum = 10 F
  - Irrégularités: PV minimum = 2 F

## Les tolérances sont bien plus larges en IR qu'en UV...

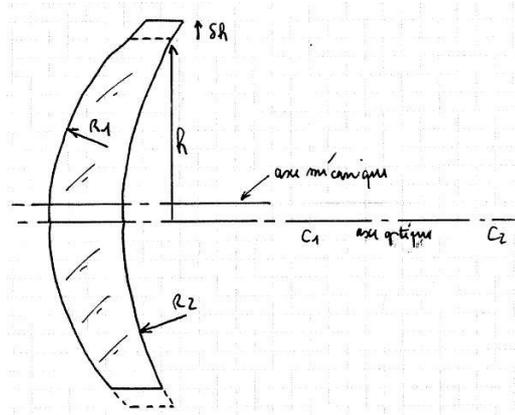
- ◆ Exemple: défaut de forme d'un dioptre en CaF2 ( $n \approx 1.4$ ) débarassé du focus = PV-PWR = 1 F (franges par réflexion à  $\lambda = 546 \text{ nm}$ ) => défaut RMS correspondant  $\approx 0.2 \text{ F}$ , soit 55 nm de déformation sur dioptre
- ◆ => Surface d'onde transmise en UV ( $\lambda = 250 \text{ nm}$ ):  
WFE\_RMS = 22 nm =  $\lambda / 11$  ce qui n'est pas du tout négligeable (Cf. graphique ci-dessous)
- ◆ Surface d'onde transmise en MWIR ( $\lambda = 4000 \text{ nm}$ ):  
WFE\_RMS = 22 nm =  $\lambda / 182$  (négligeable)



Source: Robert Fischer, SPIE

- ◆ **Axe optique d'une lentille sphérique**
  - Pas d'ambiguïté: l'axe optique c'est l'axe joignant les centres de courbure des 2 dioptres constitutifs
  - Pour les ménisques, la notion d'axe optique peut être très relative....
  - Cas d'un dôme ( $e = |R1 - R2|$ ): il n'y a pas d'axe optique, mais 1 seul centre de courbure, commun aux 2 dioptres
- ◆ **Axe optique d'une lentille asphérique**
  - Face sphérique de la lentille: pas de problème (1 seul centre de courbure)
  - La face asphérique a son propre axe optique, autrement dit une infinité de centres de courbures...
  - Pirouette: on choisit comme centre de courbure de référence de la surface asphérique celui de la sphère tangente sur le diamètre utile de la surface (par exemple)

- ◆ **Débordage d'une lentille = réalisation du cylindre externe**
- ◆ **L'axe du cylindre externe peut être excentré par rapport à l'axe optique:**



- => ETV = Edge Thickness Variation (ou ETD = Edge thickness Difference) > 0.010 mm, à l'extrême limite 0.005 mm
- Défaut de concentricité correspondant (centering run-out):  

$$2\delta h = 2/\varnothing_{\text{utile}} \times [ETD | R_1 R_2 | / | R_2 - R_1 | ]$$

- ◆ **Défaut d'épaisseur**
  - Tolérance courante de +/-0.05 mm à +/-0.1 mm
  - A l'extrême limite +/-0.02 mm => surcoût important
- ◆ **Tolérances sur le «plat» de fermeture d'un dioptre concave (idem pour un épaulement sur dioptre convexe)**
  - Perpendicularité avec l'axe optique du composant (flat run-out) > 0.015
  - Position par rapport au sommet du dioptre généralement peu critique: +/-0.05 à +/-0.1, mais on peut descendre à +/-0.02 si besoin

	Radius	PWR (IRR)	Clear aperture diameter	Edge diameter	Central thickness
S1	56.095 CC	7(1) (*)	23.0	27.0 <sup>-0.01</sup> / <sub>-0.1</sub>	2.30 ±0.05
S2	38.415 CC	7(1) (*)	20.5		

Notes:

- ① = To be controlled for acceptance
- Unitary control required for the first batch (prototypes)
- Sampling allowed for production batches
- 2/ Ind. acc. ISO 10110; dimensions in mm
- 3/ Ref. axis A is the axis joining the centers of curvature of S1 & S2
- 4/ Material: N-PSK53A Schott or S-PHM52 Ohara  
nd = 1.6180 ±0.0005; vd = 63.39 ±0.5%
- 5/ Edge chamfers: < 0.3 mm
- 6/ Surface imperfections on S1 & S2:  
5/3x0.25; C1x1.0; L3x0.010; E0.5 ①
- 7/ Coatings on S1 & S2: Visible high efficiency antireflection coatings acc. to specification  
The coatings shall cover the clear apertures

(\*)S1 & S2 form errors are expressed in term of fringes in the reflected wavefront at 546 nm; radius tolerance is included in PWR

Lens L3	DR: B. FORESTIER	6-May-2012
	CHK:	
	APPD:	

	Radius	PWR (IRR)	Clear aperture diameter	Edge diameter	Central thickness
S1	28.752 CX	5(1.5) (*)	20.0	23.0 <sup>-0.01</sup> / <sub>-0.1</sub>	3.50 ±0.03
S2	Note 6	Note 6	19.0		

Notes:

- ① = To be controlled for acceptance
- 2/ Ind. acc. ISO 10110; dimensions in mm
- 3/ Ref. axis A is the axis joining the centers of curvature of S1 & S2 (on Ø 20 ± 1 mm)
- 4/ Material: single crystal silicon (Si), N-type, 5-50 ohm.cm
- 5/ Edge chamfers: < 0.3 mm
- 6/ Definition of the aspheric profile of S2:  
 $z(h) = h^2/R/[1+(1-h^2/R^2)^{1/2}] + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8$   
 $h = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ; R = 67.763 (nominal base radius)  
 A = 0.329948E-04; B = -0.124270E-06; C = 0.626407E-09  
 Form errors of the aspheric surface (\*\*):  
 FV-PWR < 0.410 µm & RMS-PWR < 0.082 µm ①  
 Best fit of base radius: R nominal ± 0.13 mm
- 7/ Surface imperfections on S1 & S2:  
5/5x0.25; C2x1.0; L3x0.010; E0.5  
Long scratch length shall not exceed clear aperture diameter
- 8/ Coatings on S1 & S2: MWIR high efficiency antireflection coating acc. to specification  
The coatings shall cover the clear apertures.

(\*)Form errors of S2 are expressed in term of fringes in the reflected wavefront (at 546 nm); radius tolerance is included in PWR

(\*\*)Form errors of S1 are expressed in term of departure of the surface from the best fit asphere (aspheric coefficients A, B, C unchanged; fitting of base radius allowed)

(\*\*\*)For information, the centering error tolerance is equivalent to a Edge Thickness Difference (or TIR) < 0.009 on edge diameter

Lens L8	DR: B. FORESTIER	18-oct-2014
	CHK:	
	APPD:	

Avantages / miroirs

- ◆ Guidage de la lumière
- ◆ Angles entre surfaces réfléchissantes maintenus
- ◆ Moins de déformation des surfaces réfléchissantes au montage
- ◆ Réflexion totale
- ◆ Correction d'une partie du chromatisme axial de l'optique amont

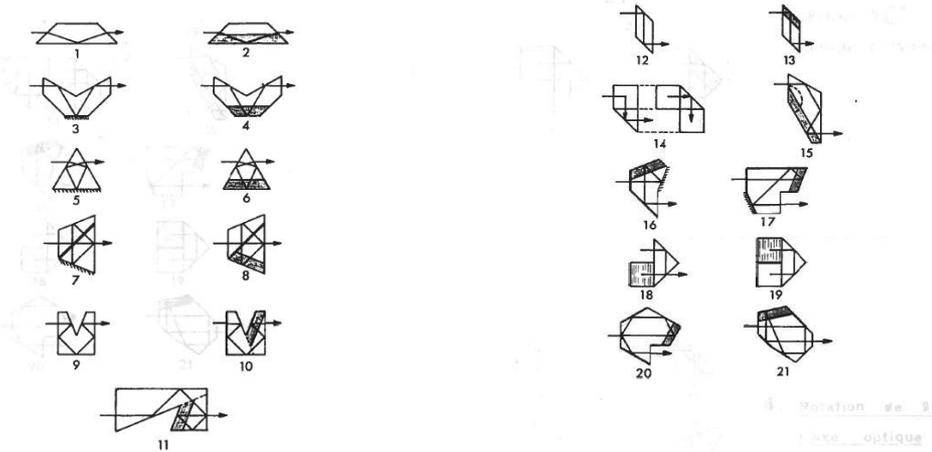
Inconvénients / miroirs

- ◆ Extension du trajet de  $e(n-1)/n$
- ◆ Masse
- ◆ Absorption matière
- ◆ Trajets parasites
- ◆ Coût

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

Catalogue

Source: Serge Lowenthal, cours ESO



- 1. Axes optiques incidents et émergents confondus**  
 Prismes 2. 4. 6. 8. 10. 11. images congruentes  
 Prismes 1. 3. 5. 7. 9. images enantiomorphes

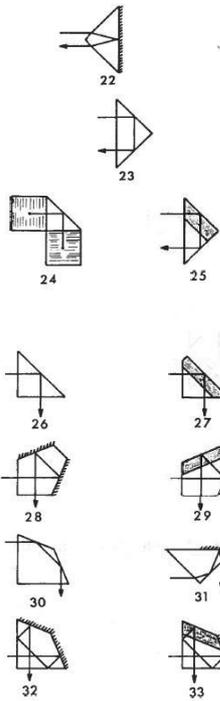
- 2. Translation de l'axe optique**  
 Prismes 13. 14. images enantiomorphes  
 Les autres prismes donnent des images congruentes

◆ NB: si une réflexion supplémentaire est nécessaire pour inverser une image on peut remplacer une face réfléchissante par un toit

○ Exemple ci-dessus prisme n°1 (sans toit) → prisme n°2 (avec toit)

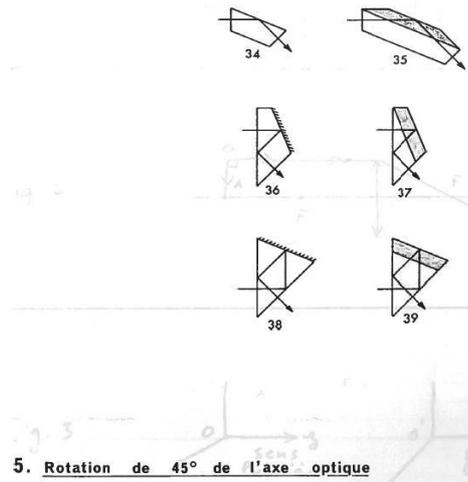
Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

Catalogue, suite



3. Rotation de 180° de l'axe optique  
 Prismes 22. 24. 25.  
 images enantiomorphes  
 Prisme 23.  
 image congruente

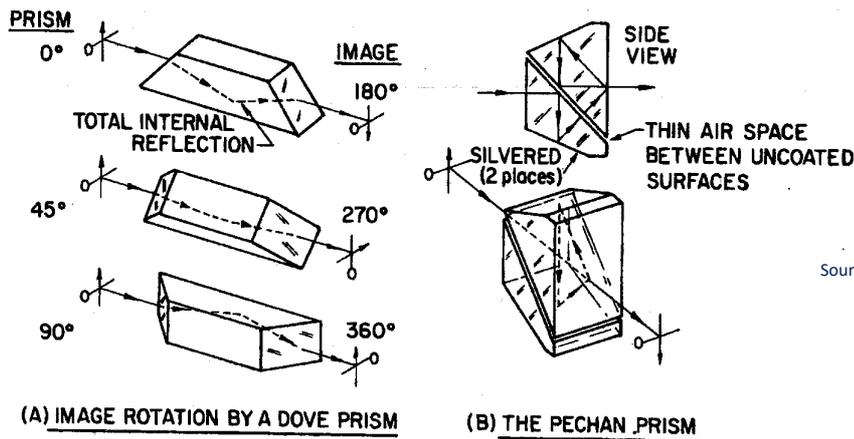
4. Rotation de 90° de l'axe optique  
 Prismes 26. 29. 31. 33.  
 images enantiomorphes  
 Prismes 27. 28. 30. 32.  
 images congruentes



5. Rotation de 45° de l'axe optique

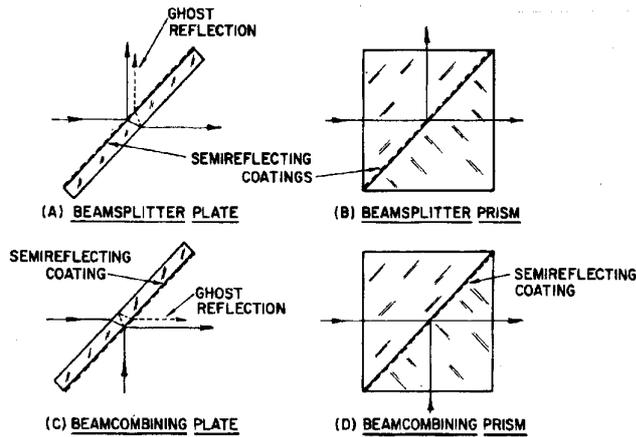
Source: Serge Lowenthal, cours ESO

Prismes dérotateurs: exemples

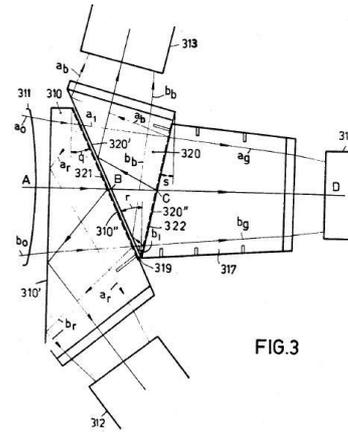


Source: Warren Smith

- ◆ Dove: uniquement en faisceaux parallèles (sinon aberrations)
- ◆ Péchan: faisceaux parallèles ou convergents



Source: SPIE



Source: brevet PHILIPS

### ◆ lame

- Aberrations en faisceaux convergents, compensables dans une certaine mesure par une légère prismaticité
- Belle image parasite!

### ◆ Prismes

- Attention aux trajets parasites => rainurages & bafflages
- Coatings plus délicats (la difficulté est liée à l'incidence sur la surface séparatrice)

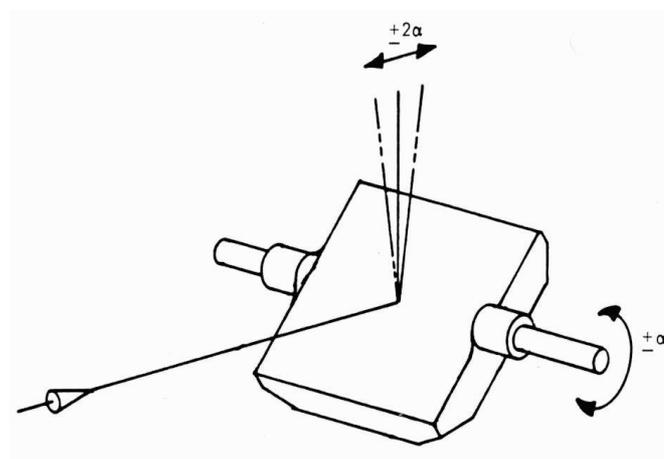
THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Balayage avec un miroir de tête travaillant en « 2 pour 1 »

- ◆ L'axe de rotation du miroir est perpendiculaire au « rayon moyen image »
- ◆ Avantage: pas de rotation d'image pendant le balayage
- ◆ Inconvénient: amplitude limitée à environ  $\pm 20^\circ$  pour conserver une dimension de miroir raisonnable



Source: SPIE

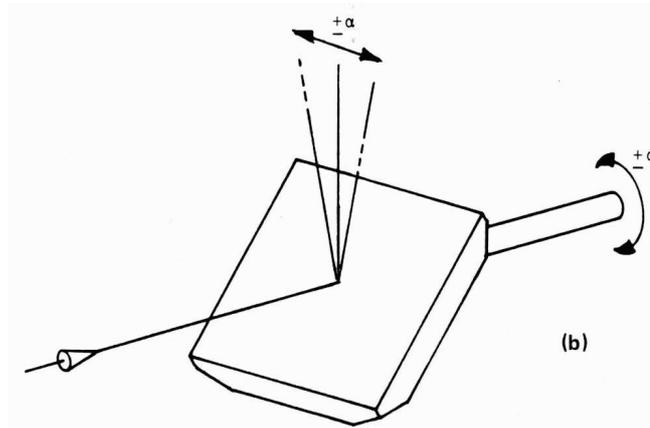
THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Balayage avec un miroir de tête travaillant en «1 pour 1»

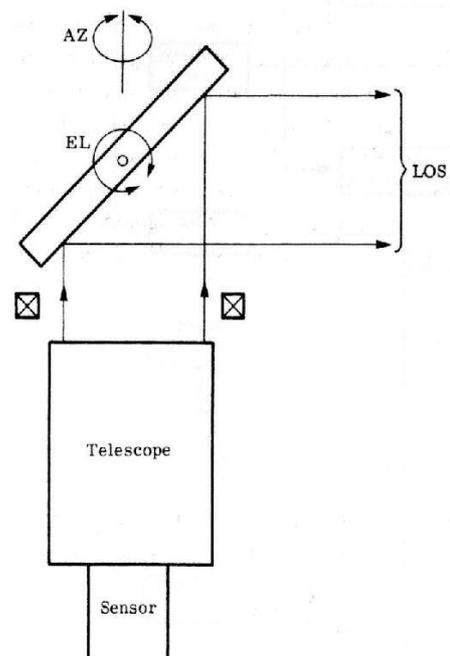
- ◆ Le miroir pivote autour du « rayon moyen image »
- ◆ Avantages: pas de limitation en terme de débattement
- ◆ Inconvénient: rotation de l'image pendant le balayage



Source: SPIE

## Balayage panoramique

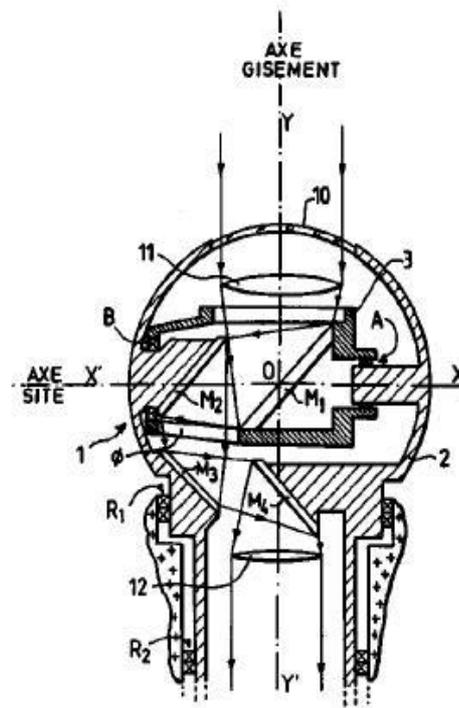
- ◆ Si on tourne l'ensemble du senseur en gisement (azimuth): pas de rotation d'image
- ◆ Si on tourne le miroir de tête en gisement, le reste du senseur étant fixe, l'image tourne sur le détecteur en "1 pour 1" => nécessité d'un dispositif de dérotation (optique ou électronique)
- ◆ Pointage en site (élévation) en "2 pour 1", relativement limité
- ◆ Applications: surveillance, viseurs de chars...



Source: IR/EO systems HDBK

### Tête à 4 miroirs (T4M)

- ◆ Compacité
- ◆ Grand débattement en gisement (azimuth) & en site (élévation)
- ◆ Faisceaux parallèles ou convergents possibles (on peut insérer des lentilles entre les miroirs)
- ◆ Rotation de l'image pendant le balayage (site & gisement)
- ◆ Application: veille optronique aéroportée



Source: brevet THOMSON-CSF

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

THALES

### Exemple classique en faisceaux parallèles: miroir oscillant en pupille

- ◆ **Avantage:** pas de chute de FTM, même avec une grande amplitude de balayage
- ◆ **Inconvénients**
  - Miroir en pupille => maîtrise des défauts de forme, y/c sous accélération
  - Très grande sensibilité du dispositif
- ◆ **Compromis débattement/dimension de miroir possible en plaçant le scanner derrière un afocal et en jouant sur le grossissement de celui-ci**
- ◆ **Application classique:** caméra thermique de 2ème génération (on scanne horizontalement la scène avec une barette verticale)

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

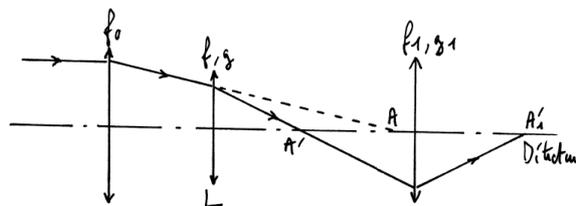
THALES

## Exemple classique en faisceaux convergents: lame oscillante au voisinage d'une surface focale

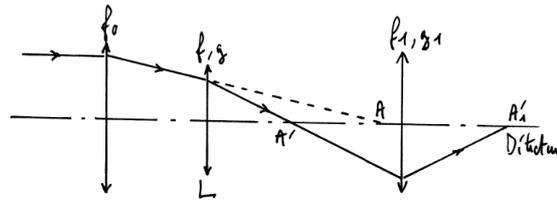
- ◆ **Avantage: démultiplication importante**
- ◆ **Inconvénients**
  - Plus la lame est inclinée, plus la FTM chute => amplitude relativement limitée
  - Image parasite
  - Sensibilité aux défauts de surface & aux poussières
- ◆ **Applications: contre-balayage, stabilisation, entrelacement**

## Micro-scanning par déplacement transversal d'une lentille

- ◆ **Petits déplacement sinon aberrations**
- ◆ **Peu de contraintes d'implantation**
- ◆ **Applications: stabilisation fine & entrelacement**



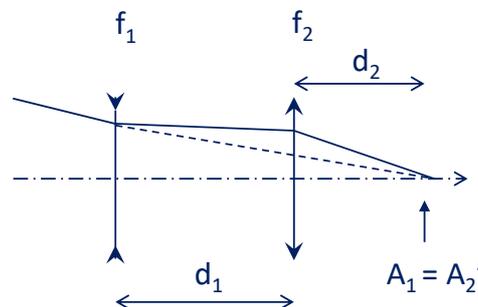
- ◆ **La lentille L fonctionne entre A & A' avec un grandissement transversal g**
- ◆ **On déplace axialement L de  $\delta z$ : A étant fixe, A' bouge de  $\delta z'$** 
  - On montre que  $\delta z' / \delta z = 1 - g^2$
- ◆ **On peut ainsi relier le déplacement axial de la lentille à un defocus dans le plan focal. En effet, si  $g_1$  est le grandissement transversal de l'optique entre A' et le point  $A_1'$  du plan focal, on a:**
  - $\delta z_1' / \delta z' = g_1^2$  d'où  $\delta z_1' / \delta z = (1 - g^2) g_1^2$
- ◆ **Application: dimensionnement d'un mécanisme de focalisation, ou d'un réglage usine de focalisation**
  - $\delta z_1' \leq \lambda(F/\#)^2$  &  $\delta z \geq$  précision d'arrêt du mécanisme  $\Rightarrow$  choix de g &  $g_1$
  - Si g est proche de +/- 1, le dispositif est «mou»: peu de précision requise...mais course importante



- ◆ La lentille L fonctionne entre A & A' avec un grandissement transversal  $g$
- ◆ On déplace transversalement L de  $\delta y$ ; A étant fixe, A' bouge de  $\delta y'$ :
  - $\delta y' = (1 - g) \delta y$  ; NB: si A est à l'infini,  $\delta y' = \delta y$
- ◆ On peut ainsi relier le dépointage d'axe au déplacement de L; en effet, si  $g_1$  est le grandissement transversal de l'optique entre A' et le point  $A_1'$  du plan focal, on a:
  - $\delta y_1' / \delta y' = g_1$  donc  $\delta y_1' = (1 - g) g_1 \delta y$
  - Ramené dans l'espace scène, le dépointage s'écrit:  $\delta \theta = (1 - g) g_1 \delta y / F$  (avec  $F =$  focale du système  $= f_0 g g_1$ )
- ◆ Remarque: de façon générale, les lentilles produisant par leurs excentrement des dépointages d'axe importants, seront également sensibles en positionnement axial (exception: cas où  $g = -1$ )
- ◆ Applications: calcul de la stabilité d'une ligne de visée, ou dimensionnement d'un dispositif de micro-scanning

## 2 groupes tels que $g > 0$ , avec plans objet & image confondus

- ◆  $f_1$  (resp.  $f_2$ ) = focale image de L1 (resp. L2)
- ◆  $d_1$  = distance entre L1 & L2
- ◆  $d_2$  = distance entre L2 & le plan image



- ◆  $f_2 = -d_1 d_2 / [(g - 1) (d_1 + d_2)] \geq 0$  (groupe convergent)
- ◆  $f_1 = g d_1 (d_1 + d_2) / [d_2 (g - 1)] \leq 0$  (groupe divergent)
- ◆  $F_{GC} = g F_{PC}$  ( $0 \leq g \leq 1$ )

## Application: changement de champ par insertion d'éléments

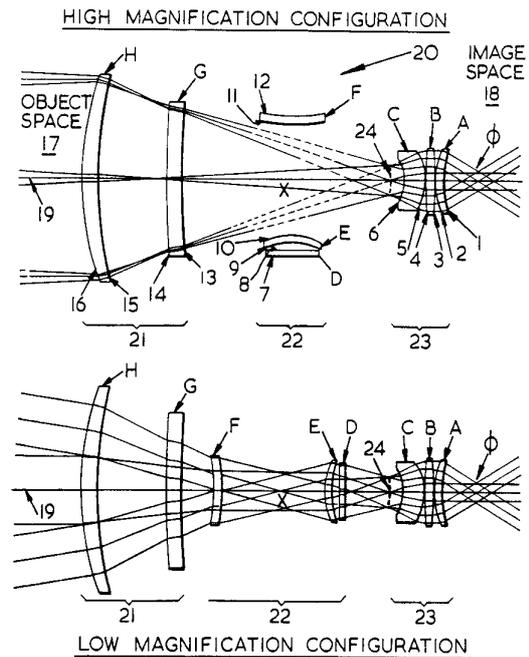
## Exemple: bi-afocal IR de luxe

## ◆ Avantages

- Bonne stabilité de l'axe optique en petit champ, a priori
- Formule optique peu contrainte (ajout d'éléments, donc degrés de liberté supplémentaires)

## ◆ Inconvénients

- Coût élevé
- Il faut un autre mécanisme pour le focus
- (Légère) baisse de transmission en grand champ



Source: brevet PILKINGTON

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Exemple: bi-afocal IR

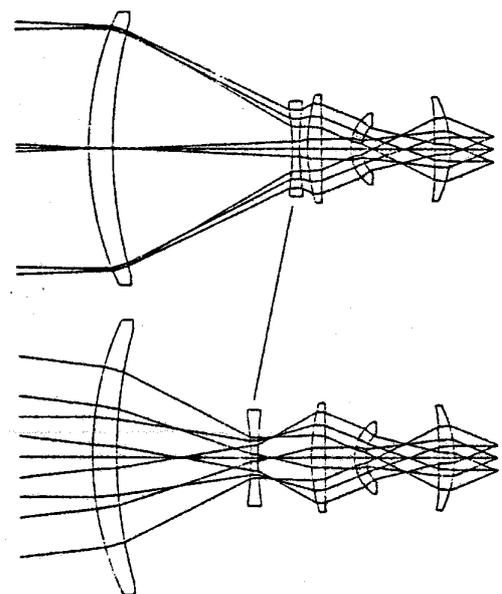
## ◆ Avantages

- 1 seul mécanisme pour changement de champ & focus
- => coût plus modéré

## ◆ Inconvénients

- Stabilité de l'axe optique (?)
- Formule optique plus contrainte

## ◆ Mise en place paraxiale: on utilise les positions de Bessel de la lentille variateur



Source: brevet PILKINGTON

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Etape déterminante pour juger de la viabilité d'une combinaison optique, au même titre que le pré-tolérancement

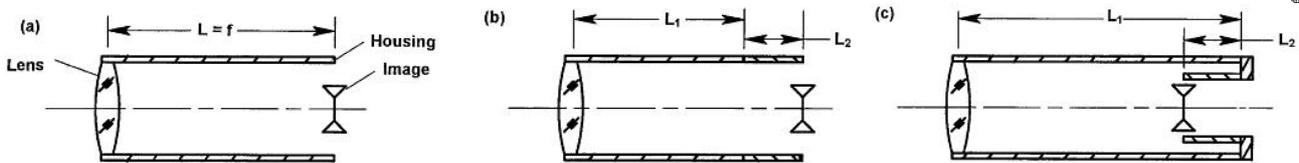
- ◆ Etape critique en l'absence de mécanisme de focalisation...
  - Optiques spatiales, par exemple
- ◆ Lorsque la présence d'un mécanisme de focalisation est admise, cette analyse contribue à son dimensionnement
  - Course de focalisation = course pour la focalisation rapprochée + provision pour digérer les tolérances de fabrication + course pour compenser les environnements
- ◆ Simulation relativement aisée à l'aide d'un logiciel optique, mais la modélisation nécessite souvent des ajustements
  - Les  $dn/dT$  ne sont pas toujours connus avec suffisamment de précision...
  - Prise en compte d'un coefficient de dilatation équivalent entre 2 éléments de la combinaison optique, reflétant l'assemblage mécanique

### 1ere contribution: défocalisation «optique»

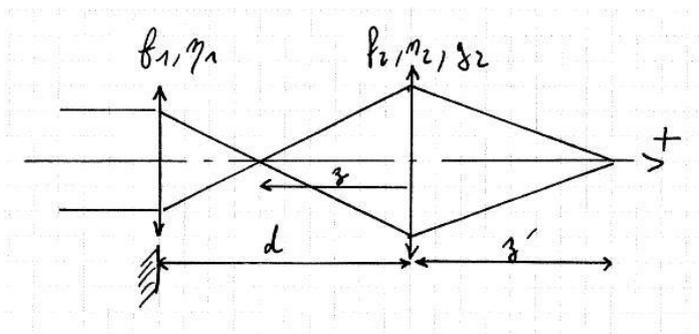
- ◆ Longueurs:  $e, R(T + \Delta T) = e, R(T) \times (1 + \alpha \Delta T)$
- ◆ Indice de réfraction relatif:  $n(T + \Delta T) = n(T) + \beta_{\text{relatif}} \Delta T$ 
  - $\beta = dn/dT$
  - $\beta_{\text{absolu}} = \beta_{\text{relatif}} + n \beta_{\text{air}}$  avec  $\beta_{\text{air}} = -1E-6$ 
    - Pour les verres, il faut faire attention...
    - Pour les matériaux qui ont un fort  $dn/dT$  (e.g Ge), c'est sans grande importance
- ◆ Bilan pour un élément (lentille ou miroir) de focale F (puissance  $K = 1/F$ ):
  - $\Delta K = \delta K \Delta T$ ,  $\Delta F = -\delta F \Delta T$  avec  $\delta = \beta_{\text{relatif}} / (n-1) - \alpha$
  - $\Rightarrow$  Formalisme identique au chromatisme:  $\Delta K = K / v_T$   
avec constringence thermique  $= v_T = 1 / (\delta \Delta T)$ ;  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ , par exemple
  - $\delta$  est un facteur de mérite important pour un matériau optique
    - Verres:  $\delta$  petit & négatif (ex. NBK7  $\delta = -1.3 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
    - Matériaux IR:  $\delta$  grand & positif (ex. Ge  $\delta = 127 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
  - Pour un miroir  $\delta = -\alpha$ 
    - $\Rightarrow$  Les combinaisons à miroirs sont potentiellement plus stables que les combinaisons dioptriques ...surtout si les miroirs & la structure sont réalisées dans le même matériau

## 2eme contribution: dilatation des entretoises

- ◆ Le plan focal est lié à la lentille par l'intermédiaire d'un cylindre de coefficient de dilatation équivalent  $\alpha_{méca}$  :  $\Delta z_{méca} = \alpha_{méca} F \Delta T$
- ◆ Effets combinés optique & mécanique:  $\Delta z_{effectif} = \Delta z_{opt} - \Delta z_{méca}$
- ◆ Constringence thermique effective associée =  $v_{Teff} = 1/[(\delta + \alpha_{méca})\Delta T]$
- ◆ Diamètre tache correspondante =  $F/[(F/\#)v_{Teff}]$ 
  - Exemple: Lentille  $F = 200$  mm en Ge, bande 8-12  $\mu\text{m}$ ,  $F/3$ , méca aluminium,  $\Delta T = 50^\circ\text{C} \Rightarrow \varnothing_{therm} = 0.5$  mm !
  - ... à comparer à  $\varnothing_{diffraction} = 2.5 \lambda F/\# = 75$   $\mu\text{m}$



Source: Robert Fisher, SPIE



- ◆ Contribution optique
  - Pour 1 lentille mince:  $dOPD/dT = +h^2/[2 f \eta]$  avec  $\eta = 1/\delta$  &  $f =$  focale image
  - $\Rightarrow$  pour les 2 lentilles:  $dOPD/dT = h_1^2/[2 f_1 \eta_1] + h_2^2/[2 f_2 \eta_2]$
- ◆ Contribution mécanique
  - Rappel: OPD de défoc =  $-h^2 \delta z' / [2z'^2]$  ( $> 0$  pour  $\delta z' < 0$ )
  - Dilatation de la structure entre les 2 groupes  $\Rightarrow \delta z = -\alpha d \Rightarrow \delta z' = -g_2^2 \alpha d$
  - Déplacement du détecteur:  $\delta z' = \alpha_{det} z'$
  - $\Rightarrow dOPD/dT_{méca} = h_2^2/[2 z'^2] (g_2^2 \alpha d - \alpha_{det} z')$
- ◆ Bilan:  $[dOPD/dT]_{net} = [dOPD/dT]_{opt} - [dOPD/dT]_{méca}$

### Triplets "collés" achromatiques & athermalisés

- ◆  $K_1 + K_2 + K_3 = K$  (contact entre les lentilles)
- ◆  $K_1/v_1 + K_2/v_2 + K_3/v_3 = 0$  (achromatisation)
- ◆  $K_1/\eta_1 + K_2/\eta_2 + K_3/\eta_3 = -K \alpha_{meca}$  (athermalisation)
- ◆  $\Rightarrow$  3 équations linéaires à 3 inconnues....
- ◆ Exemples
  - LWIR: ZnSe/ZnS/Ge; ZnSe/DOE/Ge
  - MWIR: GASIR1/Si/Ge

### Gradients axiaux:

- ◆ Gradients inter-lentilles  $\Rightarrow$  défocalisation
- ◆ Gradients intra lentilles: peu importants, généralement

### Gradients transversaux:

- ◆ Dans la tranche de lentille à hauteur  $h$ 
  - $T \rightarrow T + \Delta T$
  - $e(h) \rightarrow e(h) + \Delta e$  avec  $\Delta e = e \alpha \Delta T$
  - $n \rightarrow n + \Delta n$  avec  $\Delta n = dn/dT \Delta T$
- ◆  $\Rightarrow OPD = (n + \Delta n - 1)(e + \Delta e) - (n - 1)e = (n - 1)e \gamma \Delta T$  avec  $\gamma = \beta/(n - 1) + \alpha$
- ◆  $\Rightarrow \gamma/D$  est un facteur de mérite important pour les matériaux optiques

### Hypothèse: pas de déformation du composant, seul l'indice de réfraction de l'air ambiant change

- ◆  $dn_{\text{air}}/dp = +0.27 \cdot 10^{-6} \text{ hPa}^{-1}$  à 20°C & 1013 hPa
  - Varie peu avec  $\lambda$
- ◆ Formalisme identique au chromatisme:  $\Delta K = K / \nu_p$
- ◆  $\nu_p =$  constringence « pressostatique » =  $-(1-1/n)/[(dn_{\text{air}}/dp)\Delta p]$ 
  - $n = 1.4$  (silice) &  $\Delta p = 500 \text{ hPa} \Rightarrow \nu_p = -2116$
  - $n = 4.0$  (Ge) &  $\Delta p = 500 \text{ hPa} \Rightarrow \nu_p = -5556$
- ◆ Apressurisation + athermalisation + achromatisation  $\Rightarrow$  4 matériaux
- ◆ Ne pas oublier les événements dans le conduit optique de façon à éviter tout effet «cocotte minute»

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

- ◆ But du tolérancement = estimer les dégradations de performances liées aux imperfections de réalisation (& aux environnements)
  - Défauts de fabrication des composants
  - Défauts d'assemblage des composants
  - Défauts d'instabilité des assemblages sous l'effet des environnements
- ◆ Etape indispensable pour:
  - Juger de la viabilité d'un design optique
  - Concevoir l'assemblage opto-mécanique
  - S'engager sur des performances vis à vis du Client
- ◆ Processus itératif, implique parfois un réajustement du design, voire de l'architecture globale, voire des performances

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

- ◆ **Axe de référence d'un sous-ensemble optique: c'est un axe choisi par le concepteur et servant de référence pour le positionnement des différents éléments constitutifs du sous-ensemble**
  - L'axe de référence matérialise l'axe optique théorique du sous-ensemble optique, autrement dit c'est l'axe sur lequel l'opticien souhaiterait voir alignés les centres de courbure des différents dioptries (le rêve!)
  
- ◆ **Exemple 1: l'axe de référence d'un objectif de caméra c'est la perpendiculaire à son plan de pose passant par le centre de son diamètre de centrage dans la caméra**
  
- ◆ **Exemple 2: l'axe de référence d'une lentille est souvent son axe optique, mais ce n'est pas une obligation; il sert alors de référence pour son débordage & pour l'usinage de son plat de fermeture (s'il existe)**

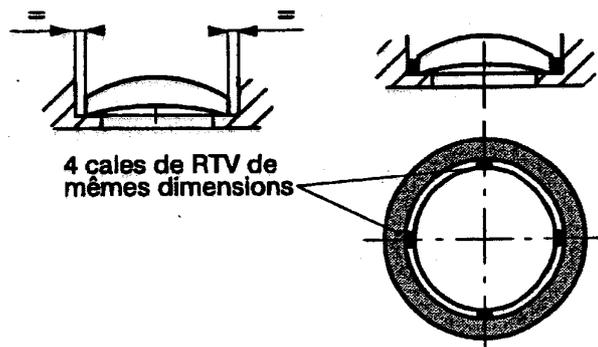
Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

- ◆ **Axe optique d'entrée d'un sous-ensemble (ou ligne de visée) = image dans l'espace d'entrée d'un point de référence dans l'espace image (par exemple le centre image théorique)**
  
- ◆ **Désharmonisation = écart entre l'axe optique d'entrée et l'axe optique théorique d'entrée (i.e. axe de référence mécanique entrée)**
  
- ◆ **Harmonisation = opération visant à ramener les 2 axes l'un sur l'autre (réglage optique ou compensation électronique)**
  
- ◆ **Axe optique de sortie d'un sous-ensemble = image dans l'espace de sortie (généralement espace détecteur) de l'axe optique théorique d'entrée**

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

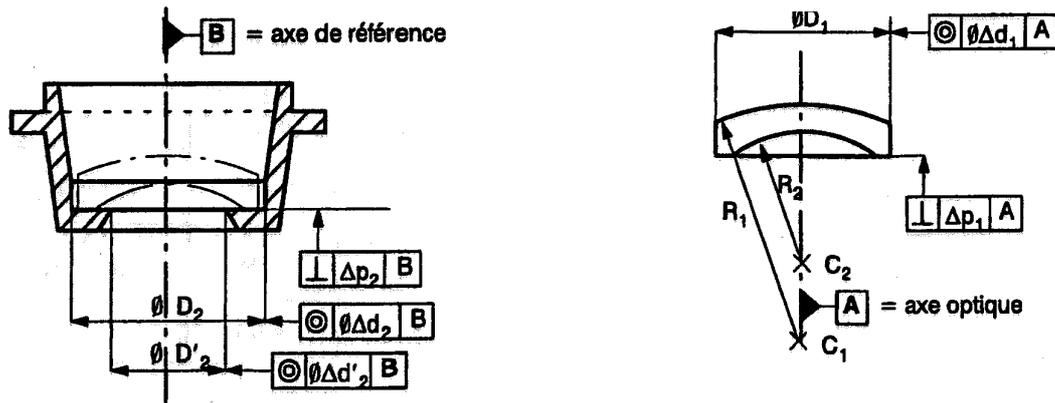
- ◆ Une lentille est dite centrée lorsque son axe optique coïncide avec l'axe de référence du sous-ensemble considéré
- ◆ Défaut 1: excentrement de l'axe optique du composant
  - = DSX ou DSY Sj..j+1 en langage Code V
  - Conséquences: chute de FTM & dépointage d'axe
- ◆ Défaut 2: basculement de l'axe optique du composant
  - = BTX ou BTY Sj..j+1 en langage Code V
  - NB: pour simuler un tilt pur, il faut tourner autour d'un point nodal; les points nodaux sont proches des sommets quand  $e \ll R1$ ,  $e \ll R2$  &  $e \ll R1 - R2$  (contre-exemple = les ménisques épais)
  - Conséquence: chute de FTM, surtout
- ◆ Défaut 3: roulement du composant par rapport au centre du dioptré en appui sur la mécanique (donc couplage excentrement / tilt)
  - = RLX ou RLY Sj..j+1 en langage Code V
  - Conséquence: chute de FTM et dépointage d'axe

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales



- ◆ A l'aide de cales (RTV ou métal) d'épaisseur identique, on centre mécaniquement le diamètre extérieur de la lentille dans son alésage
- ◆ Ensuite on maintient la lentille en position avec un joint de colle silicone

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales



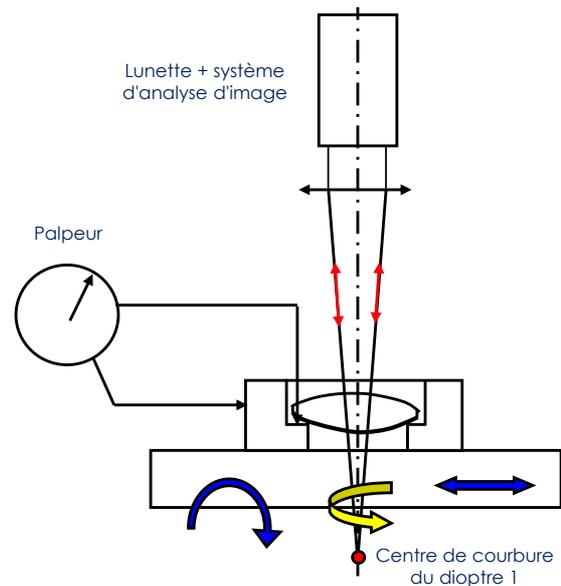
### Tolérances typiques à prendre en compte (lentille $\varnothing 40 \text{ mm}$ )

- ◆ Concentricité alésage par rapport à la référence mécanique:  $\pm 20 \mu\text{m}$
- ◆ Différence d'épaisseur des cales + circularité alésage & lentille:  $\pm 30 \mu\text{m}$
- ◆ Concentricité cylindre de débordage lentille par rapport à l'axe optique de la lentille (rappel: dépend de la forme de la lentille):  $\pm 20 \mu\text{m}$
- ◆ Perpendicularité épaulement par rapport à la référence mécanique:  $\pm 0.5 \text{ mrad}$  ( $\pm 20 \mu\text{m} / \varnothing 40 \text{ mm}$ )
- ◆ Perpendicularité plat lentille par rapport à l'axe optique de la lentille:  $\pm 0.5 \text{ mrad}$

### Défauts résultants:

- ◆ Excentrement de la lentille par rapport à la référence mécanique = somme quadratique des 3 contributeurs =  $\pm 41 \mu\text{m}$
- ◆ Basculement de la lentille par rapport à la référence mécanique = somme quadratique des 2 contributeurs =  $\pm 0.7 \text{ mrad}$
- ◆ Ce type de montage nécessite une très bonne précision de débordage de la lentille, et une très bonne précision d'usinage du barillet
  - On est handicapé par l'opération de calage-collage à  $\pm 30 \mu\text{m}$ , erreur relativement importante par rapport aux défauts de réalisation de la lentille et de son barillet
- ◆ Utilisation courante en LWIR & MWIR
  - Possible aussi en Visible (à la rigueur)

- ◆ Le barillet est positionné sur le plateau rotatif & réglé en concentricité & en battement à l'aide d'un palpeur de précision micronique
- ◆ Le dioptre 2 de la lentille, en contact avec le listel, est donc centré automatiquement sur celui-ci
- ◆ En faisant rouler le composant (avec des vis outillages) sur le listel et en contrôlant le battement du dioptre 1 à l'aide du viseur autocollimateur, on place le centre de courbure du dioptre 1 sur l'axe de rotation du plateau
- ◆ Collage lentille à la colle RTV



Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Défauts résultants (ordres de grandeur pour lentille Ø 40 mm)

- ◆ Excentrement résiduel axe optique lentille / référence méca:  $\pm 21 \mu\text{m}$ 
  - Réglage de la concentricité du diamètre extérieur barillet avec l'axe de rotation du plateau: résidu  $\pm 2 \mu\text{m}$
  - Tolérance de réalisation de l'axe du listel par rapport à la référence mécanique:  $\pm 20 \mu\text{m}$
- ◆ Basculement résiduel axe optique / réf. méca :  $\pm 0.5 \text{ mrad}$ 
  - Réglage battement listel:  $(\pm 2 \mu\text{m}/\text{Ø}40\text{mm})$
  - Perpendicularité listel par rapport à la référence mécanique:  $(\pm 20\mu\text{m}/\text{Ø}40\text{mm})$
- ◆ Conclusions
  - Précision améliorée par rapport au centrage par cales
  - Débordage lentille non critique
  - Mais nécessité d'un usinage de grande précision pour la réalisation du barillet

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Le bilan de tolérances doit refléter le plus fidèlement possible l'assemblage opto-mécanique

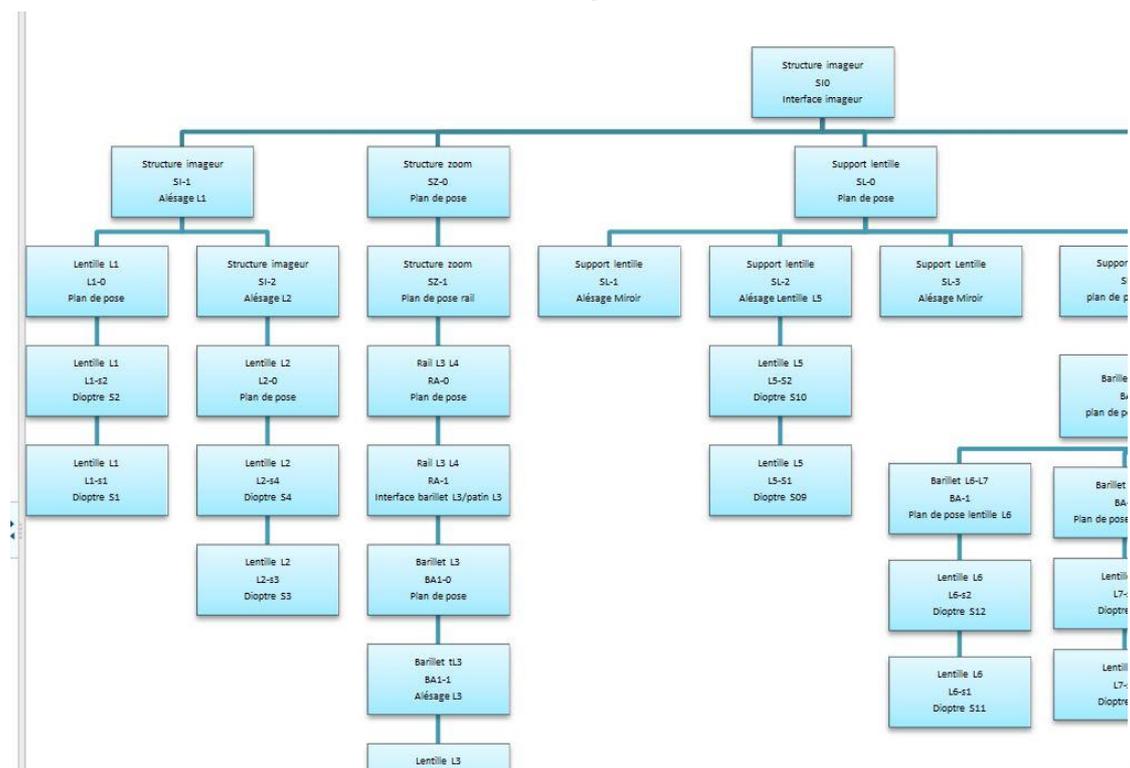
- ◆ **Constat:** dans une combinaison optique bien conçue, il y a toujours toujours des groupes relativement bien corrigés des aberrations, donc semi indépendants les uns des autres
  - Exemple 1: l'objectif & l'oculaire d'un afocal
  - Exemple 2: une lentille zoom (variateur ou compensateur)
  - Exemple 3: une lentille de focus
  
- ◆ **Conséquence:** bilan de tolérances en cascade
  - Tolérances de positionnement des références des différents groupes par rapport à la référence mécanique globale
    - Tolérances de positionnement des composants par rapport à la référence mécanique de chaque groupe, défauts de forme, défauts d'épaisseur

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

THALES

## Exemple de synoptique d'assemblage (extrait)

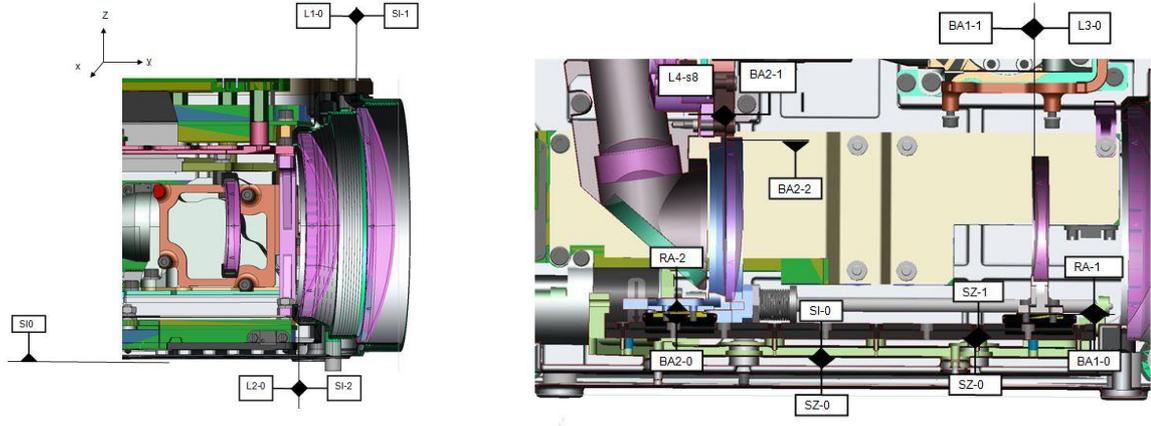


THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

Détail des références mécaniques (extrait)



Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

Détail des contributions (extrait)

BILAN DE TOLERANCES STATIQUE A 20°C				Bilan N° 1					
Lentille L1 Montage à plat	Tirage ou excentremets			TILT			Désignation des défauts + rotation	Détail des rotations	
	mm + ou - Axe X	mm + ou - Axe Y	mm + ou - Axe Z	mrad + ou - Alpha X	mrad + ou - Alpha Y	mrad + ou - Alpha Z		+ ou - mm	Longueur mm
SI-0/SI-1	0.050	0.050	0.050	0.559		0.559	perpendicularité	0.05	89.4
SI-1/L1-0	Collage 0.035	En appui 0.000	Collage 0.035				Parallélisme	0.05	89.4
L1-0/L1-s2	Debordage 0.02	Appui 0.02	Debordage 0.02	0.341		0.341		Appui 0.03	Diam utile 88
L1-s2/L1-s1		0.03							
<b>Cote nominale</b>									
<b>Tolérances linéaire</b>	0.105	0.100	0.105	0.900	0.000	0.900			
<b>Tolérances quadratique</b>	0.064	0.062	0.064	0.655	0.000	0.655			

BILAN DE TOLERANCES STATIQUE A 20°C				Bilan N° 1					
Lentille L2 Montage à plat	Tirage ou excentremets			TILT			Désignation des défauts + rotation	Détail des rotations	
	mm + ou - Axe X	mm + ou - Axe Y	mm + ou - Axe Z	mrad + ou - Alpha X	mrad + ou - Alpha Y	mrad + ou - Alpha Z		+ ou - mm	Longueur mm
SI-1/SI-2	Concentricité		0.010	0.03	0.010	0.213	Parallélisme	0.015	70.4
SI-2/L2-0	Collage 0.035	En appui	Collage 0.035				Parallélisme	0.015	70.4
L2-0/L2-s4	Debordage 0.020	Appui 0.02	Debordage 0.020	0.290		0.290		Appui 0.02	Diam utile 69
L2-s4/L2-s3		0.05							
<b>Cote nominale</b>									
<b>Tolérances linéaire</b>	0.065	0.100	0.065	0.503	0.000	0.503			
<b>Tolérances quadratique</b>	0.042	0.062	0.042	0.360	0.000	0.360			

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Scénario raisonnable pour un 1<sup>er</sup> tour

- ◆ **Tolérances à appliquer à chacun des composants (tol. intra-groupes)**
  - Epaisseurs:  $\pm 50 \mu\text{m}$  ( $\pm 30 \mu\text{m}$  possible)
  - PWR dioptre = 7 F (incertitude calibre + erreur de réalisation par rapport au calibre)
  - PV-PWR dioptres = 1 F (simulé par de l'astigmatisme pur, généralement)
  - Excentrements par rapport à la référence groupe =  $\pm 40 \mu\text{m}$
  - Basculements par rapport à la référence groupe =  $\pm 30 \mu\text{m}$  sur diamètre d'appui
  - Positionnements axiaux par rapport à la référence groupe =  $\pm 50 \mu\text{m}$
- ◆ **Tolérances à appliquer à chacun des groupes (tol. inter-groupes)**
  - Excentrements par rapport à la référence globale =  $\pm 60 \mu\text{m}$
  - Basculements par rapport à la référence globale =  $\pm 50 \mu\text{m}$  sur diamètre d'appui
  - Positionnement axial par rapport à la référence globale =  $\pm 70 \mu\text{m}$
  - Ne pas oublier le tilt du plan focal  $> \pm 5 \text{ mrad}$
- ◆ **Compensateurs**
  - Focus: déplacement du groupe de focalisation ou déplacement de la surface image, si on a décidé d'ajuster la position du détecteur par rapport à la combinaison
  - NB: l'erreur résiduelle de réglage doit être déclarée comme non compensable

## Dans un premier temps: analyse des sensibilités

- ◆ Chaque petit défaut produit après compensation un  $\delta\text{OPD}$  donc une variation de la FTM
- ◆ On (CodeV...) suppose que le  $\delta\text{OPD}$  varie linéairement avec la tolérance  
=> la FTM varie quadratiquement avec chaque tolérance
- ◆ Estimation de la FTM garantie dans x% des cas, compte-tenu des lois de répartition des défauts (pas toujours gaussiennes)
- ◆ **Avantages**
  - Grande rapidité de calcul
  - Possibilité de travailler en mode inverse: pour une chute de FTM donnée (par exemple -0.5 point par défaut) le logiciel détermine la valeur du défaut correspondant, ce qui peut être très utile dans les premières phases du tolérancement

### Itérations....

- ◆ Réduire les tolérances des éléments les plus sensibles
  - Rajouter progressivement des centrages optiques, le cas échéant
- ◆ Relâcher les tolérances des éléments les moins sensibles de façon à répondre au besoin au moindre coût

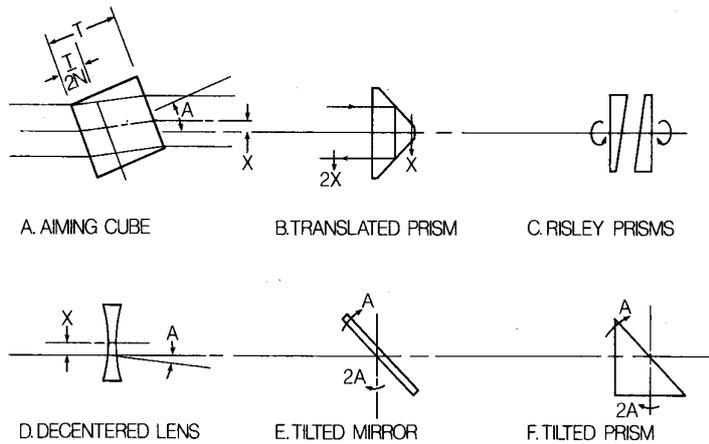
### En cas d'échec:

- ◆ Retoucher le design de façon à désensibiliser les composants les plus critiques
- ◆ Ajouter des compensateurs (par exemple l'excentrement d'un composant)
  - => il faut aussi penser à concevoir les moyens de réglages associés
- ◆ Renégocier les encombrements & les performances

### Finalisation par analyse de type Monte-Carlo

- ◆ Tirage aléatoire d'un grand nombre de systèmes optiques perturbés
- ◆ Chaque système est perturbé par l'ensemble des défauts répertoriés dans le bilan de tolérances; chaque valeur de défaut étant tirée aléatoirement dans son intervalle de tolérance
- ◆ Evaluation de la FTM (ou autre critère de performance) de chaque système perturbé
- ◆ Estimation de la FTM garantie dans 50% des cas (valeur "typique"), dans 98% des cas et dans 100% des cas
- ◆ **Avantage:** cette technique est fidèle à la réalité et simule parfaitement les couplages puisque chaque système tiré aléatoirement est effectivement perturbé par l'ensemble des tolérances
- ◆ **Inconvénients**
  - Temps de calcul...
  - Aucun détail des contributions => ne convient pas à une analyse préliminaire

## Exemples classiques



Source: SPIE

## Points importants

- ◆ Sensibilité du réglage
- ◆ Attention aux couplages (exemple: en décentrant une lentille on peut régler l'axe optique, et simultanément altérer la qualité image...)

THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Réglage du plan focal: on fait coïncider le plan focal optique et la surface sensible du détecteur (FPA = Focal Plane Array)

- ◆ Excentrement = réglage de l'axe optique
- ◆ Tirage = focus
- ◆ Basculement = ajustement de la qualité optique dans le champ
- ◆ Utilisation de cales (pelables, éventuellement), par exemple

## Réglage de la pupille (utilisé en IR refroidi, pas en Visible)

- ◆ Permet d'éviter tout vignettage avec un diamètre de lentille de tête limité au strict nécessaire (matériaux chers + volume généralement contraint)
- ◆ Idéalement ce réglage s'effectue par décentrement du diaphragme d'ouverture (stop en terminologie US), mais on peut aussi bouger d'autres composants (attention aux couplages....)

THALES LAS France

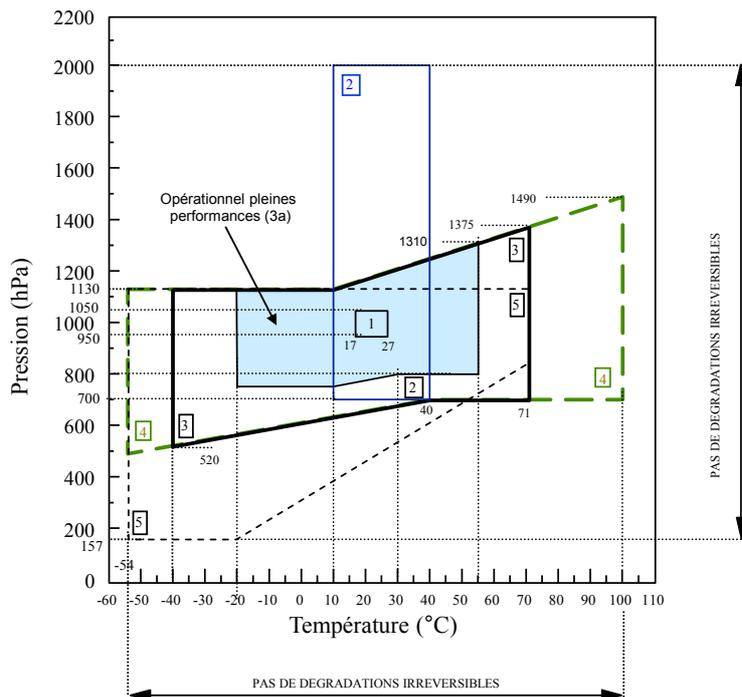
THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Éléments de mécanique pour la conception opto-mécanique

THALES LAS France

## Diagramme pression-température



- Zone 1 (resp. 2): acceptation (resp. intégration)
  - Air classe 10000
  - Humidité relative  $\leq 90\%$
  - $dT/dt \leq 0.5^\circ\text{C}/\text{mn}$
- Zone 3: opérationnel
  - HR  $\leq 50\%$  (dessiccant)
- Zone 4: non opérationnel
  - $dT/dt \leq 7^\circ\text{C}/\text{mn}$
- Zone 5: transport ou stockage en emballage
  - Gaz = air; HR inf à 95%;  $dT/dt \leq 22^\circ\text{C}/\text{mn}$

THALES LAS France

## Vibrations

- ◆ Aléatoires
- ◆ Exemples: vibrations moteurs, balourds, vibrations liées aux perturbations aérodynamiques...
- ◆ Gamme typique: 5 Hz à 2000 Hz
- ◆ Performances requises pendant les vibrations du porteur

## Chocs

- ◆ Pas de performances requises pendant...
- ◆ Exemple: pas besoin d'image pendant l'appontage/catapultage d'un avion
- ◆ ...mais besoin de perfos après!
- ◆ Il ne faut donc pas dépasser le domaine d'élasticité des matériaux (réversibilité requise)

## En Optique, les vibrations gênantes sont celles qui induisent un glissement de l'image de la scène observée sur le détecteur

- ◆ Origine n°1: mouvement du senseur par rapport à la scène
  - Exemple: tremblement du photographe (rotation de l'appareil photo)
- ◆ Origine n°2: décentrement des composants optiques les uns par rapport aux autres
  - vibrations des composants dans leurs barillets
  - Composants entraînés par les déformation dynamiques de la structure

## Conséquences

### ◆ Instabilités BF de la LdV

- Déplacement LdV résolu temporellement par le détecteur (tremblement de l'image)
- Eventuellement compensables par traitement d'image

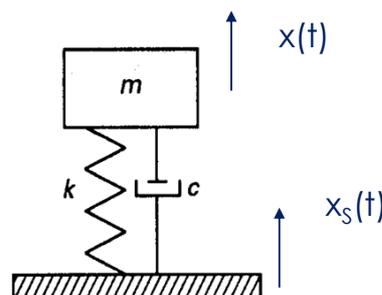
### ◆ Instabilités MF de la LdV

- Flou d'image
- Eventuellement compensables par asservissements ( $\mu$ scanning)

### ◆ Instabilité HF (à l'échelle du temps d'intégration détecteur) de l'axe optique

- Flou d'image
- Incompensable donc à minimiser impérativement (voir + loin comment)

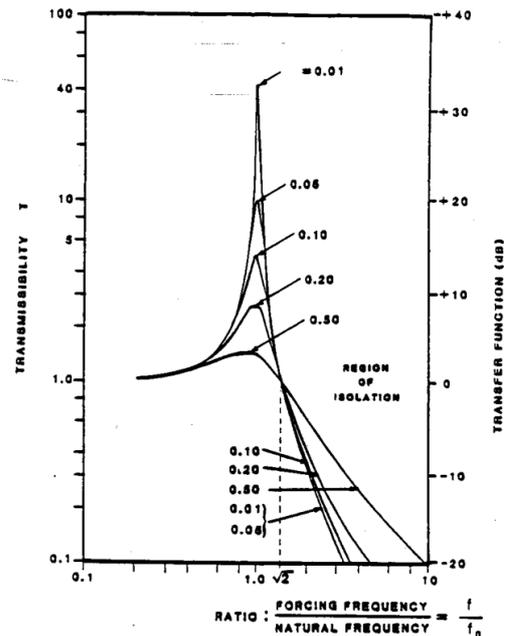
## Système amorti à 1 degré de liberté



- ◆ Déplacement support:  $x_s = X_s \cos \Omega t$
- ◆ Déplacement masse suspendue:  $x = X \cos (\Omega t - \varphi)$
- ◆ 1 seul mode propre, de pulsation naturelle =  $\Omega_n = (k/m)^{1/2}$
- ◆ Coefficient d'amortissement =  $\xi = c / (2 m \Omega_n)$
- ◆  $X/X_s =$  transmissibilité =  $T = [ [ 1 + (2\xi u)^2 ] / [ (1 - u^2)^2 + (2\xi u)^2 ] ]^{1/2}$
- ◆  $u = \Omega/\Omega_n$
- ◆ NB:  $d^2x/dt^2 = -\Omega^2 x$ , donc T est aussi le rapport des accélérations

## Système amorti à 1 DDL, suite

- ◆ Généralement  $\xi$  est faible
- ◆ A la résonance  $T = Q = 1/(2\xi)$  de l'ordre de 10
- ◆ L'amortissement ne réduit la transmissibilité qu'à la résonance, partout ailleurs il l'augmente
- ◆ La masse suspendue est isolée des vibrations du support pour  $\Omega > 1.414 \Omega_n$

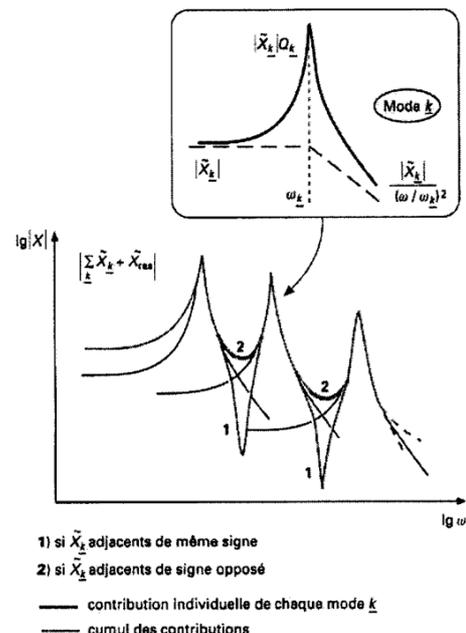


Source: Daniel Vukobratovich, SIRA

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Systèmes réels:

- ◆ Les systèmes réels présentent une infinité de degrés de liberté, donc une infinité de modes de vibrations
- ◆ Mais en pratique, dans le domaine fréquentiel utile, un système réel peut se ramener à un nombre fini de sous-systèmes significatifs à 1 DDL
  - Domaine BF: modes d'ensemble (déformation de la structure); NB: avant la 1ère résonance, la structure se comporte comme un corps rigide
  - Domaine HF: modes locaux (e.g déplacement des composants optiques)
- ◆ Couplages potentiels entre les modes
- ◆ Identification des modes propres en conception: simulation par éléments finis
- ◆ Vérification sur pot vibrant par balayage sinus

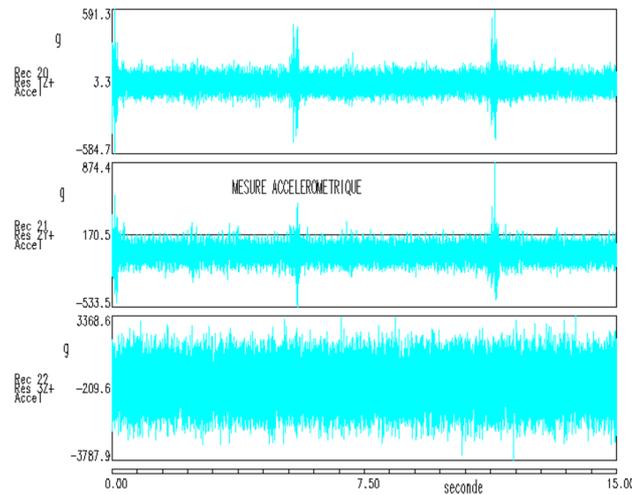


Source: Techniques de l'ingénieur

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

Expression dans les spécifications

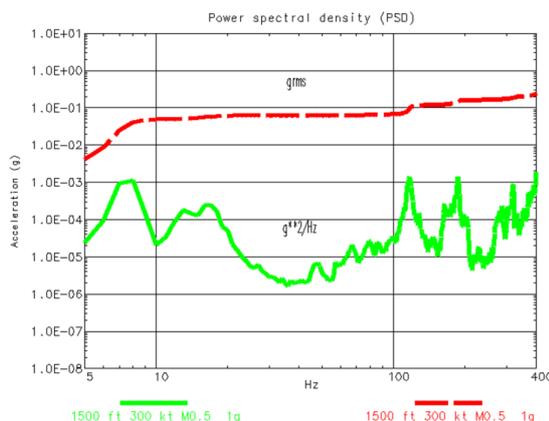
- ◆ On utilise de préférence l'environnement réel comme base de calcul des niveaux de vibrations spécifiés
- ◆ ⇒ mesures par capteurs accélérométriques sur porteur (maquette instrumentée)



Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

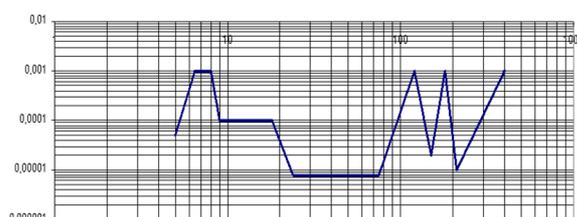
Expressions dans les spécifications, suite

- ◆ Traitement des enregistrements: analyse spectrale
- ◆ ⇒ Densité Spectrale de Puissance



valeur intégrale ( g rms ) = la même que celle du signal temporel

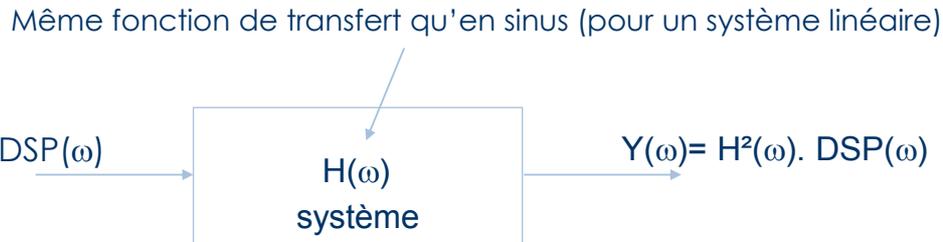
- ◆ Linéarisation et ajustement du niveau (on applique des normes)



Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Réponse aléatoire

- ◆ On s'intéresse ici à la réponse d'un système à une excitation aléatoire dont le signal contient des fréquences multiples
- ◆ Rappel: ce type d'excitation correspond aux sollicitations réelles du matériel
- ◆ Le signal est caractérisé par sa DSP



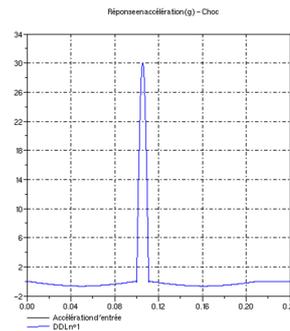
- ◆ Exemple: réponse à un bruit blanc de DSP  $W_0$  d'un DDL résonant à  $f_0$  avec un coefficient de surtension  $Q$ :

$$G_{\text{eff}} (\text{RMS}) = (\pi/2 W_0 f_0 Q)^{1/2}$$

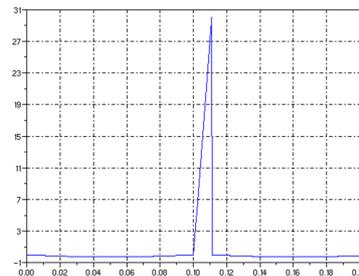
- ◆ Choc = accélération de très «courte» durée qui induit dans les structures des contraintes dynamiques transitoires
- ◆ Conséquences potentielles néfastes: déformations permanentes, voire rupture
- ◆ La sévérité du choc ne peut être estimée qu'en fonction du système qui le subit, d'où la difficulté à spécifier
- ◆ Chocs réels relevés sur porteurs sous forme d'accélérogrammes (formes complexes)

## Spécification dans le domaine temporel: approximation empirique par des formes simples

- ◆ Exemple: demi-sinus 30 g 11 ms



- ◆ Dent de scie à pointe finale 30 g 11 ms



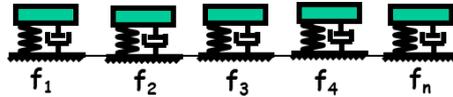
- ◆ Inconvénient majeur: on n'a aucune idée de ce que cela peut produire comme dommages car on ne relie pas cela aux résonances du système

## Mieux: Spectre de Réponse en Choc (SRC)

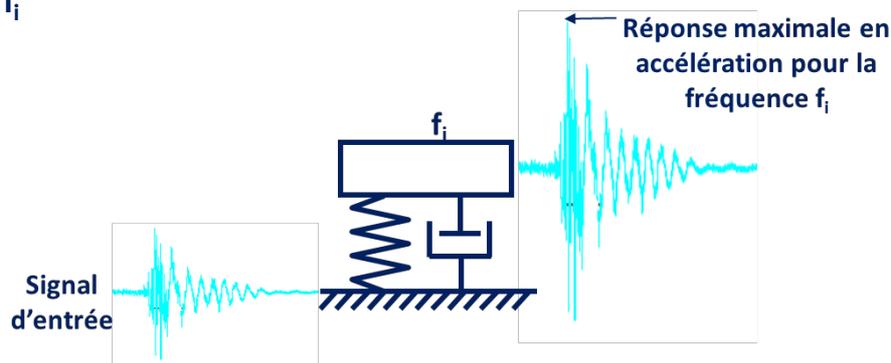
- ◆ Le SRC est l'enveloppe des réponses d'un DDL à toutes les fréquences; il permet de spécifier un signal quelconque
  - 1 temporel donne 1 SRC
  - 1 SRC génère une infinité de temporels (utile pour les essais)
- ◆ Le comportement dynamique d'une structure peut être représentée par ses DDL, i.e. ses modes
  - Avant la phase de conception, les modes de structure ne sont pas connus
  - Pour les spécifications, une structure est assimilée à une infinité de DDL

## SRC, suite

- On applique les chocs mesurés sur porteur à un système mécanique «étalon» composé d'un support et de N résonateurs à 1 DDL (fréquences propres  $f_i$ ); on prend forfaitairement  $\xi = 0.05$  ( $Q = 10$ ) pour chaque résonateur



- Pour chaque choc enregistré, on en déduit l'accélération maximale à chaque  $f_i$



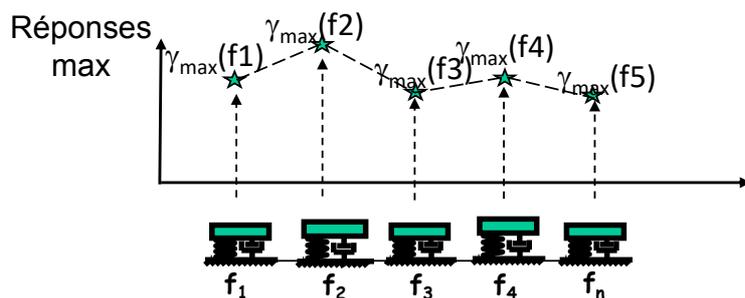
THALES LAS France

THALES

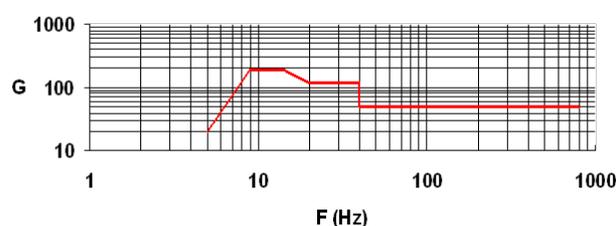
Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## SRC, suite

- On en déduit le spectre enveloppe que doit supporter le matériel



Chocs appontage Axe X, Y et Z (Q=10) (limite)  
chocks for landing along X, Y, Z axes (Q=10), limit



THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Suspension du « Support Optique Equipé (SOE)»

- ◆ But n°1: absorber les chocs
- ◆ But n°2: diminuer les niveaux de vibrations haute fréquence vues par l'optique (afin de ne pas exciter les modes de résonances), tout en maîtrisant les rotations résiduelles basse fréquence du SOE (effet néfaste des suspensions)
- ◆ Matériaux type élastomères:  $f_n$  de l'ordre de quelques Hz

### Stabilisation primaire

- ◆ Compensation basse fréquence, par asservissement, des rotations parasites de la ligne de visée
- ◆ Capteur gyroscopique si possible solidaire de la ligne de visée
- ◆ Motorisation
  - Directe du SOE (orientation par Cardan)
  - D'une tête de balayage 2 axes (miroirs) en tête de SOE
- ◆ Bande passante de l'ordre de quelques dizaines de Hz (50 Hz)

### SOE raide

- ◆ But: éviter les vibrations des composants optiques
- ◆ Critère possible: 1ere fréquence de résonance la plus élevée possible
- ◆ Utilisation de matériaux de raideur spécifique (module d'Young/masse volumique) élevée (ex. SiC, AlBe, Be)
- ◆ Optimisation mécanique de la structure (nervures...) pour maximiser la raideur sans matière inutile

### Eventuellement stabilisation fine par miroirs ou lames agiles montés sur le SOE, à l'intérieur du trajet optique

- ◆ Compensation des vibrations de la ligne de visée pendant le temps d'intégration (bande passante de plusieurs centaines de Hz (500 Hz) à comparer au Ti qui est de l'ordre de quelques ms)
- ◆ Pilotage en boucle ouverte à partir des résidus de stabilisation primaire

### Conception optique: peu de marge de manoeuvre, mais...

- ◆ Limiter autant que possible la sensibilité de l'axe optique au déplacement des composants (ceci n'est pas toujours compatible avec l'encombrement alloué)
- ◆ Rappel: lentilles sensibles en excentrement, surtout; pas (ou peu) sensibles en basculement (pour la LdV)
- ◆ Miroirs sphériques sensibles en excentrement & en basculement
- ◆ Miroirs plans:
  - en faisceau //: 2/1 ou 1/1 ou x/1 en rotation, suivant le cas
  - en faisceau convergent: sensibilité en excentrement et en rotation

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Structures

- ◆ Légères (surtout si optiques embarquées, ou portables)
- ◆ Raides (sinon déformations en vibrations)
- ◆ Diffusant bien la chaleur (sinon déformations sous gradients thermiques)
- ◆ Robustes, i.e compatibles avec gabarit de vibrations aléatoires maximal y/c coefficient de sécurité: on doit rester dans le domaine élastique
- ◆ Endurantes, i.e. compatibles avec gabarit de vibrations représentatif de la durée de vie de l'équipement

### Assemblages

- ◆ Mise en position précise (sinon aberrations)
- ◆ Maintien en position non déformants (sinon aberrations)
- ◆ Robustes & durables (en T & V, sinon instabilité de ligne de visée)

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Métaux

### ◆ Alliages d'aluminium

- Pas chers
- Facilement moulables, et bonne usinabilité
- Raideur moyenne ( $E \approx 70 \text{ GPa}$ ), mais légers ( $\rho \approx 2.7 \text{ g/cm}^3$ )
- Dilatation élevée ( $\alpha \approx 23\text{E-}6 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), mais diffusent bien la chaleur ( $D \approx 70\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ )
- Les caractéristiques peuvent être ajustées en jouant sur la composition de l'alliage, et aussi par des traitements thermiques
  - Alliage 6061-T6: Limite élastique  $Re \approx 276 \text{ Mpa}$ , soudure OK
  - Alliage 7075-T6: bcp plus résistant ( $Re \approx 565 \text{ Mpa}$ ), mais ne se soude pas
- Traitements de protection
  - Anodisation
    - Efficace contre la corrosion
    - Isolant électrique
    - Peut être teinté en noir, utile pour limiter la lumière parasite, du moins dans le Visible
  - Surtech 650 (remplaçant Alodine 1200, qui contenait du chrome hexavalent):
    - Traitement à base de chrome trivalent
    - Conducteur en épaisseur faible (classe  $1 \mu\text{m}$ )
    - Permet d'assurer une émissivité faible ( $\approx 0.12$ ) utile pour limiter les échanges thermiques par rayonnement

## Métaux

### ◆ Alliages de titane

- Relativement chers
- Plus durs à usiner que l'alu
- Bonne raideur ( $E \approx 110 \text{ GPa}$ ), mais plus lourds que l'alu ( $\rho \approx 4.4 \text{ g/cm}^3$ )
  - $\Rightarrow$  même raideur spécifique que l'alu
- Dilatation modérée proche des verres ( $\alpha \approx 9\text{E-}6 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), mais diffusent mal la chaleur ( $D \approx 3\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ )
- Les caractéristiques peuvent être ajustées en jouant sur la composition de l'alliage, et aussi par des traitements thermiques
  - Alliage TA6V-T6:  $Re \approx 828 \text{ MPa}$
  - Alliage UT40:  $Re \approx 275 \text{ Mpa}$ , meilleure conductivité thermique & plus facile à usiner
- Bonne résistance à la corrosion: oxydation naturelle protectrice
- Non magnétisable

## Métaux, suite

### ◆ Aciers

- Acier = fer + faible pourcentage de carbone + autres métaux (Cr, Va, Mo,...) pour amélioration de certaines caractéristiques (inox, dureté, résistance à la rupture, etc...)
- Les bonnes propriétés sont la raideur ( $E \approx 200 \text{ GPa}$ ), la résistance mécanique et un coeff de dilatation proche des verres ( $\alpha \approx 9\text{E-}6 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
- Utilisés avec parcimonie en opto-méca car très lourds ( $\rho \approx 7.8 \text{ g/cm}^3$ )
  - Petites mécaniques de proximité des composants optiques
  - Visserie
  - Tiges filetées
  - Roulements

### ◆ INVAR

- Alliage de Fer + Nickel (36%)
- Lourd ( $\rho \approx 8.0 \text{ g/cm}^3$ ) mais assez raide  $E \approx 145 \text{ GPa}$
- Utile pour l'athermalisation ( $\alpha \approx 1\text{E-}6 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),

## Métaux, suite

### ◆ Magnésium

- Très léger ( $\rho \approx 1.7 \text{ g/cm}^3$ ) &  $E \approx 45 \text{ GPa}$
- Attention au couple galvanique formé avec d'autres métaux

### ◆ Béryllium

- Raideur spécifique exceptionnelle:  $\rho \approx 1.9 \text{ g/cm}^3$  &  $E \approx 287 \text{ GPa}$
- Conduit bien la chaleur & se dilate modérément
- Gros inconvénients: très cher & poussières toxiques

## Céramiques

### ◆ Exemple: SiC 100

- Grande raideur spécifique ( $E = 420 \text{ GPa}$  &  $\rho = 3.2 \text{ g/cm}^3$ )
- Faible dilatation:  $\alpha = 2\text{E-}6 \text{ K}^{-1}$
- Conduit bien la chaleur:  $k = 190 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- $C_p = 680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Peu d'allongement (cassant)
- Inerte chimiquement (pas de dégradation sous humidité, acides, ...)
- Matériau de base peu onéreux (poudre)
- ...mais process complexe
  - Pressage de la poudre → sorte de craie → usinage → frittage (rétreint de qq %)
- => prix élevé
- Nécessité d'inserts métalliques pour les assemblages par vis
- Matériau adapté aux miroirs également (planéité et rugosité OK au polissage) => télescopes monolithiques "tout SiC"

## Généralités

- ◆ Pas de produit miracle, mais des compromis à trouver:
  - Pouvoir d'adhérence
  - Tenue aux environnements
  - Souplesse pour absorber les différences de dilatation entre les 2 matériaux
  - Raideur pour maintenir le composant en position si le matériel est soumis à des vibrations, par exemple
- ◆ Attention au dégazage (si utilisation dans le vide ou température élevée)
- ◆ Préparation des surfaces avant collage (nettoyage, primaire d'accrochage)

## Colles "verre"-métal

### ◆ Epoxydes

- Exemples: Eccobond 285, EC-2216 (bi-composants)
- Résistance mécanique élevée
- Rigidité ( $E \approx 0.7 \text{ GPa}$ )  $\Rightarrow$  attention aux contraintes dans les optiques
- CTE  $\approx 30$  à  $100E-6$
- Temps de prise long à T ambiante
- Dégazage modéré

### ◆ Silicones

- Très utilisées en optronique
- Plus souples que les époxydes:  $R_e \approx 5 \text{ MPa}$ , élongation  $> 150\%$  avant rupture
- CTE élevé ( $\approx$  quelques  $100E-6$ )
- Viscosité élevée
- Exemples: RTV (Room Temperature Vulcanizing) 147, RTV 148, RT 772
- Primaire d'accrochage, souvent (147 & 148)
- Dégazage

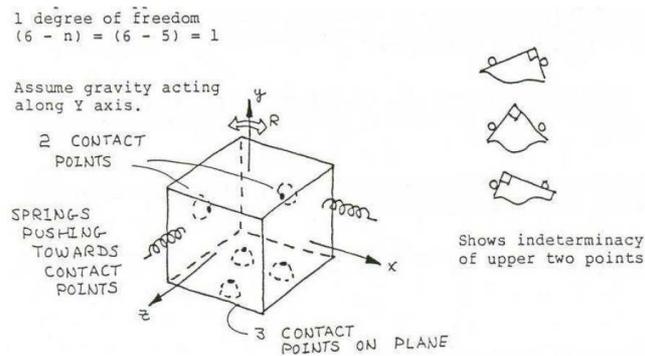
### ◆ Poly-uréthanes

- Intermédiaires entre epoxy et silicone

## La conception opto-mécanique par l'exemple

## Montage isostatique

- ◆ Un corps rigide possède 6 degrés de liberté (DDL)
  - Tx Ty Tz & Rx Ry Rz
- ◆ Montage isostatique:
  - Il s'agit de bloquer les DDL par des appuis ponctuels, sans redondance
    - 3 points = 1 plan
  - Si N est le nombre de points de contacts, il reste  $(6 - N)$  DDL



Source: Daniel Vukobratovich, SIRA

- ◆ Montage hyperstatique: si  $N > 6$  le solide est sur-contraint ( $\Rightarrow$  déformations potentielles)

THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Montage semi-isostatique

- ◆ Inconvénient d'un montage isostatique: le solide étant soumis à des forces extérieures (accélération, vibrations, chocs, etc..) il est nécessaire d'appuyer dessus pour le maintenir en position  $\Rightarrow$  contraintes donc déformations au niveau des points d'appui, ce qui n'est a priori pas souhaitable pour des composants optiques!
- ◆ Remède: on remplace les points de contact par des petites surfaces contact, de façon à distribuer la force (diminution de la contrainte)
  - Attention à la coplanarité des surfaces...
- ◆ Applications: prismes

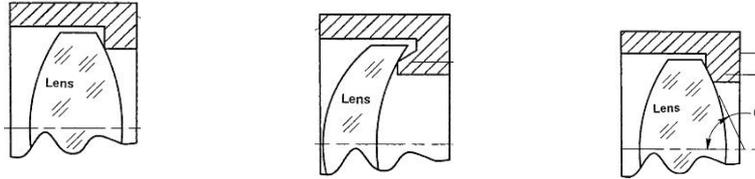
THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Utilisation directe d'un dioptré

- ◆ On place un des deux dioptrés -supposé sphérique- sur un listel (=> autocentrage du dioptré sur l'axe du listel, qui doit par conséquent être correctement réalisé par rapport à la référence mécanique du barillet)
  - NB: listel = cercle de contact, qu'on peut obtenir par un appui sur une arête vive (fragile...), ou sur un cône



Source: Daniel Vukobratovich, SIRA

- ◆ Les autres DDL sont fixés par centrage du composant dans l'alésage du barillet:
  - A l'aide de 3 ou 4 cales en RTV, ce qui nécessite un bon débordage de la lentille...
  - Attention: le montage a tendance à être hyperstatique
  - Ou bien utilisation d'une centreuse optique ou d'un palpeur micrométrique pour mettre en position le second dioptré

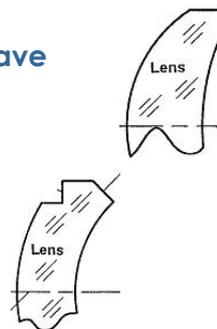
THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Utilisation d'une surface mécanique de la lentille

- ◆ On utilise un plat réalisé sur un des dioptrés pour la mise en position axiale de la lentille dans son barillet
  - Plat de fermeture d'une surface concave
  - Possible aussi sur surface convexe



Source: Daniel Vukobratovich, SIRA

- ◆ Les autres DDL sont fixés par centrage de la lentille dans l'alésage du barillet
  - Utilisation de cales (ce qui nécessite un bon débordage de la lentille...)
  - Ou bien utilisation d'un palpeur micrométrique (ou optique) permettant de contrôler le battement de l'autre dioptré

THALES LAS France

THALES

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Utilisation d'une surface mécanique de la lentille, suite

- ◆ On peut aussi utiliser le pourtour de la lentille pour la monter avec un jeu minimum dans l'alésage du barillet: centrage ajusté
- ◆ Le jeu doit juste permettre de digérer le différentiel de dilatation entre le verre et la mécanique  $\Rightarrow$  jeu au rayon  $> \frac{\varnothing}{2} \Delta\alpha \Delta T$ , typiquement de 20 à 50  $\mu\text{m}$ 
  - Exemple: pour un assemblage silice-aluminium sur un diamètre de 40 mm, la variation de jeu au rayon est de 0.5  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

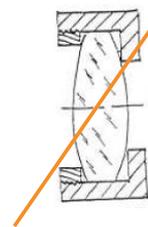
### But

- ◆ Le maintien ne doit pas perturber la mise en position
- ◆ Le maintien doit assurer le contact entre les différents éléments dans toute la gamme d'environnements, sans déformer les dioptries

### Utilisation d'un écrou de serrage

- ◆ Pour éviter les déformations, il faut exercer une pression en face de l'appui de façon à faire travailler le verre en compression, et non en flexion
- ◆ Utiliser autant que possible des liaisons surfaciques, et non linéïques
- ◆ On peut aussi interposer un joint entre la lentille et l'écrou

Source: Daniel Vukobratovich, SIRA



Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

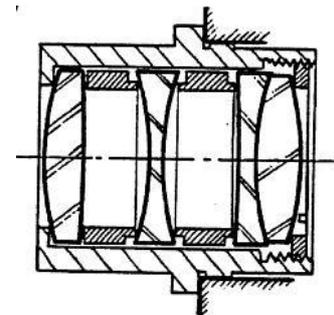
## Collage

- ◆ Colle silicone
- ◆ Colle injectée entre le pourtour de la lentille et l'alésage du barillet
- ◆ Epaisseur du joint de l'ordre de 0.5 à 1 mm
- ◆ Le jeu de collage peut éventuellement servir à athermaliser la liaison, de façon à limiter les contraintes dans le joint de colle: on fait en sorte que le volume de colle se dilate comme le volume compris entre la lentille et le barillet

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

## Utilisation d'entretoises et d'un écrou de serrage

- ◆ Montages sur listels ou sur plats, avec jeu minimum entre lentilles et corps et/ou entre entretoises et corps, pour digérer les différentiels de dilatation



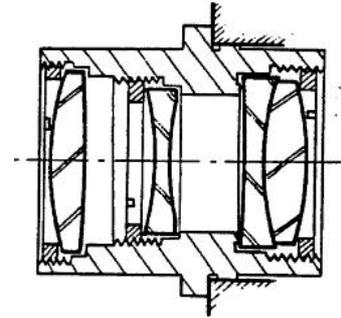
Source: J. Maxwell, SIRA

- ◆ **Avantages**
  - Pièces simples
  - Facile à mettre en œuvre
  - Possibilité d'utilisation des dioptries pour centrer les lentilles (si listels)
  - Un seul diamètre de centrage pour les entretoises ⇒ erreurs minimales, a priori
  - Un seul moyen de maintien en position ⇒ économique
- ◆ **Inconvénients**
  - Centrage assez moyen (en particulier en l'absence de listel)
  - Appuis linéiques ⇒ risque de déformation locale
  - Un seul moyen de maintien en position ⇒ moins efficace?
  - Comportement en vibrations & thermiques?

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Corps monobloc, écrous de serrage individuels

- ◆ Montages sur listels ou sur plats, avec jeu minimum entre lentilles et corps et/ou entre entretoises et corps, pour digérer les différentiels de dilatation



Source: J. Maxwell, SIRA

#### ◆ Avantages

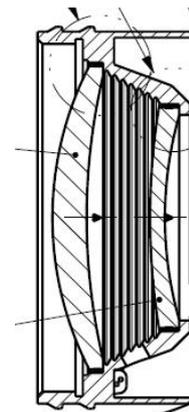
- Simple à mettre en œuvre
- Possibilité d'utilisation des dioptries pour centrer les lentilles (si listels)
- Adapté à des lentilles de diamètres différents
- Serrages individuels

#### ◆ Inconvénients

- Centrage assez moyen (en particulier en l'absence de listel)
- Pièces plus complexes
- Risque de déformation si le serrage est mal maîtrisé
- Comportement en thermique et vibrations?

### Corps monobloc, collages individuels

- ◆ Montages sur listels ou sur plats, avec centrage mécanique (cales) ou optique



#### ◆ Avantages

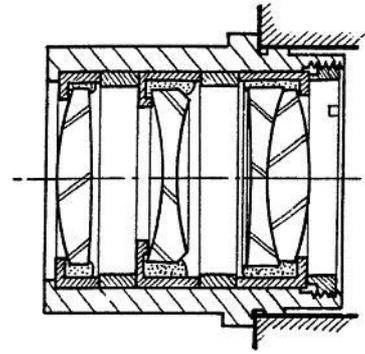
- Peu de pièces
- Centrage d'assez bonne qualité
- Adapté à des lentilles de diamètres différents
- Comportement en thermique et vibrations
- Peu de déformation

#### ◆ Inconvénients

- Temps de montage

### Barillets individuels montés dans le corps

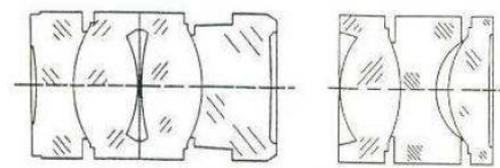
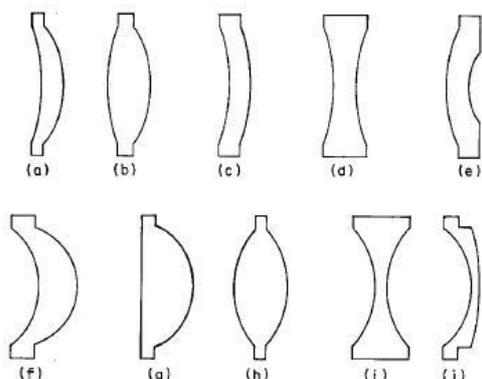
- ◆ Montages sur listels, centrage optique ou mécanique (cales), collage de chaque composant



Source: J. Maxwell, SIRA

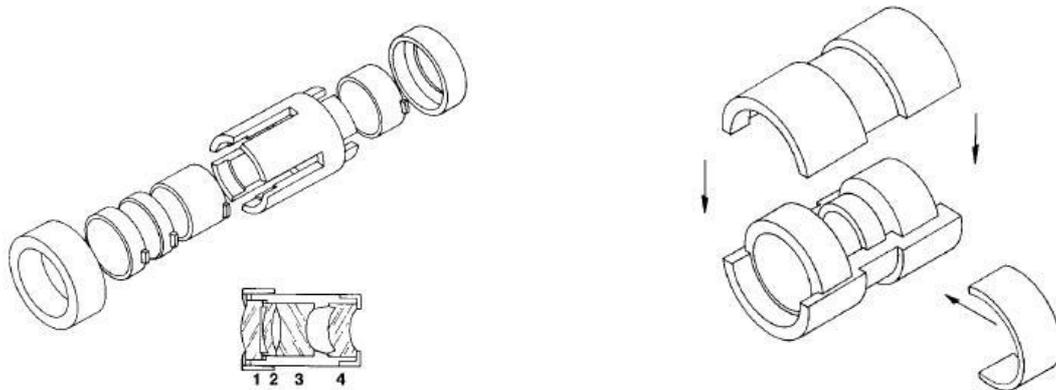
- ◆ **Avantages**
  - Précision élevée (si centrage optique)
  - Comportement en thermiques et vibrations
- ◆ **Inconvénients**
  - Pièces nombreuses (mais simples)
  - Temps de montage

- ◆ Les optiques en plastique injecté permettent une intégration très poussée
- ◆ Il ne faut pas copier l'approche faite pour les optiques en verre; en particulier il est judicieux d'intégrer dans les composants optique des fonctions mécaniques pour le centrage et l'espacement
- ◆ Les éléments optiques peuvent être conçus pour s'emboîter, évitant ainsi des montages coûteux
- ◆ Attention aux effets de bord  $\Rightarrow$  il faut une marge confortable entre l'ouverture utile et le bord (au moins 2 mm)



Source: SPIE

- ◆ Compte-tenu du différentiel de dilatation très important entre plastiques et métaux, les composants plastiques s'insèrent plus volontiers dans des structures en plastique ou en plastique renforcé, elles-même moulées
- ◆ ⇒ centrages a priori assez médiocres



Source: SPIE

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

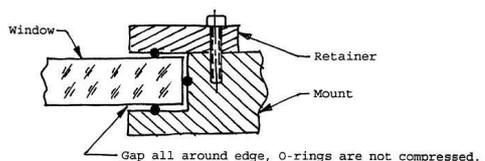
THALES LAS France

THALES

### Hublots plans

- ◆ Face arrière en appui sur épaulement (réalisé directement dans la structure de l'équipement ou sur une monture)
  - Contact électrique, si besoin (traitement ITO ou grille pour CEM)
- ◆ Maintien par colle RTV sur le pourtour
- ◆ Joint supplémentaire fluoro-silicone pour protéger la colle des environnements ext.
- ◆ Eventuellement bride vissée dans la structure pour retenir le hublot (applications aéroportées)
- ◆ Utilisation de joints toriques, éventuellement:

Source: Daniel Vukobratovich, SIRA



### Dômes

- ◆ Hypo-hémisphériques: collage, comme les hublots (y/c bride extérieure, si besoin)
- ◆ Hyper-hémisphériques (bocal à poisson...): collage, mais en plus on rajoute des brides à l'intérieur pour retenir le dôme

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

THALES LAS France

THALES

### Exemple: montage collé

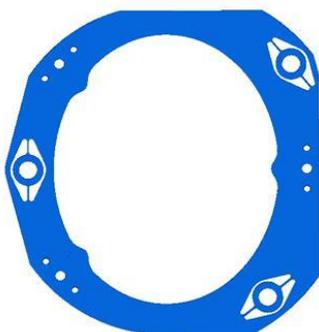
- ◆ Mise en position du prisme
  - A l'aide de références intégrées dans le support
  - Ou à l'aide de moyens externes (cales, etc...)
- ◆ Pour le maintien en position, on utilise les joues de façon à limiter le risque de déformation des surfaces optiquement utiles
- ◆ Collage à l'époxy, le plus souvent
- ◆ L'épaisseur de colle (typiquement 0.1 mm) et la surface de collage doivent être précisément dimensionnées
- ◆ On subdivise souvent la surface de collage en plots de petites dimensions de façon à réduire les effets du différentiel de dilatation verre-colle
- ◆ Le support du prisme doit avoir un coefficient de dilatation assez proche du verre

Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Problème

- ◆ Le coefficient de dilatation de la mécanique de proximité de l'optique peut s'avérer très différent de celui de la structure porteuse...
- ◆ ⇒ si la plage thermique est importante, il faut concevoir un assemblage permettant les dilatations des pièces tout en conservant leurs positions relatives

### Exemples de solutions:



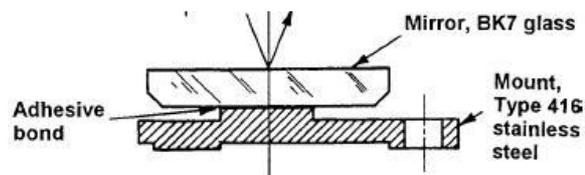
Les informations contenues dans ce document sont la propriété exclusive du Groupe Thales. Elles ne doivent pas être divulguées sans l'accord écrit de Thales

### Montage collé comme une lentille

- ◆ Surface réfléchissante en appui sur épaulement
  - ...ou surface arrière si le parallélisme des 2 surfaces est correct
- ◆ Collage à la colle RTV sur le pourtour du miroir

### Montage collé comme un prisme

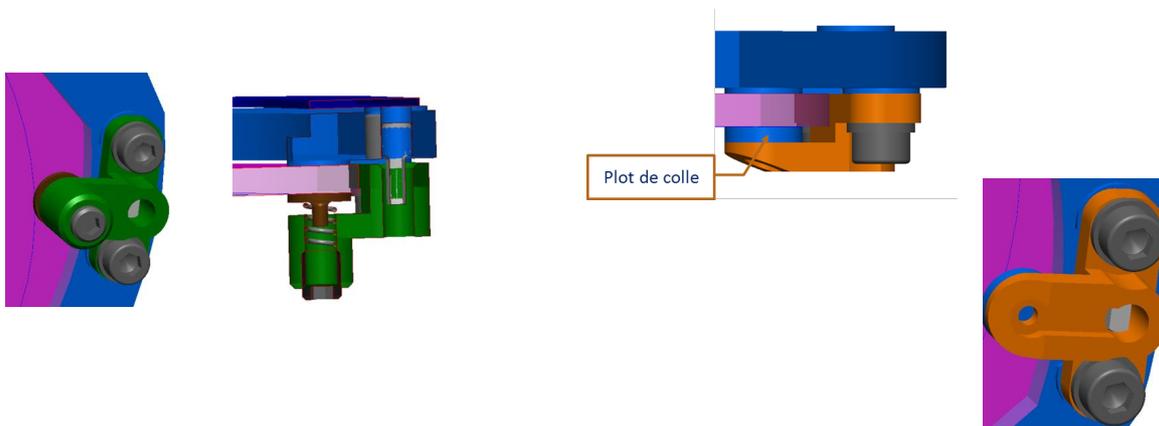
- ◆ Réservé aux miroirs dont le  $\varnothing/e$  est petit ( $< 6$ )
- ◆ La surface arrière est collée à la colle époxy (fine couche)



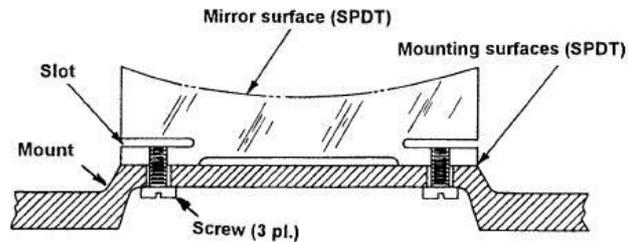
Source: SPIE

### Montage à l'aide de brides

- ◆ Le miroir est en appui sur 3 petits plots coplanaires
- ◆ Maintien en position en exerçant une pression au droit des appuis
- ◆ Précharge pour assurer le contact
  - en thermique...
  - ...et sous l'effet d'une accélération du porteur



## Exemple: miroir aluminium monté sur structure aluminium



Source: SPIE

- ◆ Intérêt: les contraintes exercées au niveau des vis ne sont pas directement transmises à la surface réfléchissante

## Quelques principes

- ◆ Pas de collage RTV (fréquence de résonance trop basse)
- ◆ Utilisation de pattes de fixation => quasi-isostatique
  - Filtrage des déformées de l'interface
  - Capacité d'ajustement de la position du miroir
  - Raideur pour les vibrations
  - Capacité de déformation en T afin de digérer les différentiels de dilatation tout en maintenant le miroir en position par rapport à la référence mécanique

## Exemple



## Bibliographie

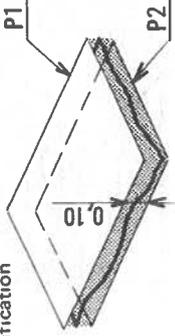
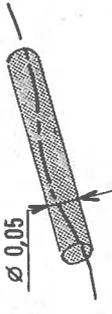
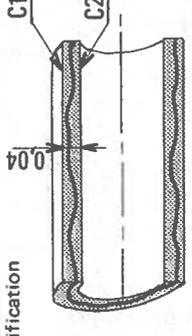
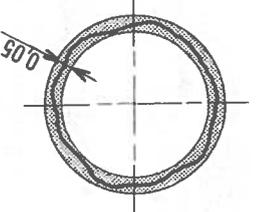
- ◆ Optical system design, Robert Fischer
- ◆ Opto-mechanical systems design, Paul Yoder
- ◆ Handbook of Optics, Michael Bass
- ◆ Normes: ISO 10110, ISO 9211, ISO 9022, MIL-STD-810, GAM- EG-13
- ◆ MIL-HDBK-141 (prismes)
- ◆ IR & EO systems Handbook (gratuit)

## Sites Internet

- ◆ Optica.org (payant): Applied Optics, Journal of Optical Society of America, etc...
- ◆ Freepatentsonline.com
- ◆ SPIE.org (payant): proceedings of SPIE, Ebooks, etc...

# T TOLÉRANCES

## 8/3 - TOLÉRANCES DE FORME

<p><b>PLANÉITÉ</b> d'une surface</p>   	<p>Signification</p> <p>La surface considérée doit être comprise entre les plans P1 et P2, parallèles, espacés de 0,10 mm.</p>
<p><b>RECTITUDE</b> d'un axe</p>   	<p>Signification</p> <p>L'axe du cylindre considéré doit être compris à l'intérieur d'une zone cylindrique de Ø 0,05 mm.</p>
<p><b>CYLINDRICITÉ</b> d'un cylindre</p>   	<p>Signification</p> <p>La surface considérée doit être comprise entre les cylindres C1 et C2 coaxiaux dont la différence des rayons est 0,04 mm.</p>
<p><b>CIRCULARITÉ</b> d'un cylindre</p>   	<p>Signification</p> <p>Tous les points du pourtour de chaque section droite doivent être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,05 mm.</p>

# T TOLÉRANCES

## 8 TOLÉRANCES GÉOMÉTRIQUES

8/1 - TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES A TOLÉRANCER

Pour éléments isolés		Symboles	
Tolérances de FORME	Planéité d'une surface		
	Rectitude d'un axe — d'une ligne		
	Cylindricité d'un cylindre		
	Circularité d'un cylindre — d'un cône		
Tolérances d'ORIENTATION	Forme d'une surface quelconque		
	Inclinaison		
	Perpendicularité		
Tolérances de POSITION	Parallélisme		
	Localisation d'un élément		
	Coaxialité ou concentricité		
	Symétrie		
	BatteMENT	BatteMENT simple	
	BatteMENT total		

## 8/2 - ZONE DE TOLÉRANCE CYLINDRIQUE

- Exemple 1 :**  
Lorsque la zone de tolérance est cylindrique, placer le signe Ø devant la tolérance.

La zone de tolérance est cylindrique.


- Exemple 2 :**  
L'absence du signe Ø signifie que la zone de tolérance est comprise soit entre 2 droites, 2 plans, 2 cercles, 2 cylindres, 2 surfaces quelconques... etc.

La zone de tolérance n'est pas cylindrique.

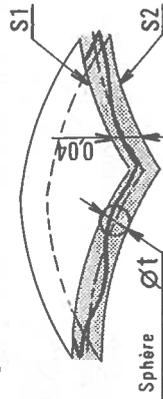


# TOLÉRANCES

## FORME D'UNE SURFACE QUELCONQUE

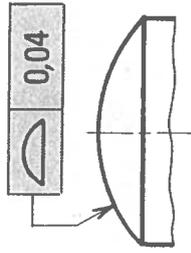
Symbole

Signification



La surface considérée doit être comprise entre deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre 0,04 dont les centres sont situés sur une surface sphérique.

Exemple : surface sphérique

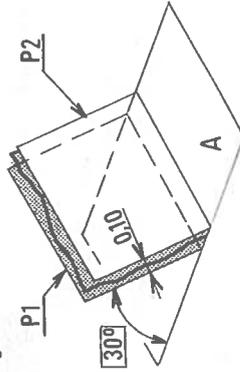


## 8/4 - TOLÉRANCES D'ORIENTATION

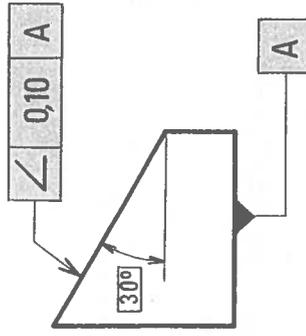
### INCLINAISON de 2 surfaces

Symbole

Signification



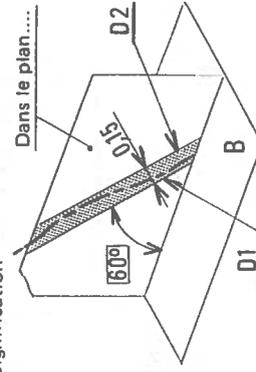
La surface considérée doit être comprise entre les plans P1 et P2 parallèles, espacés de 0,1 mm et inclinés de 30° par rapport au plan de référence (A).



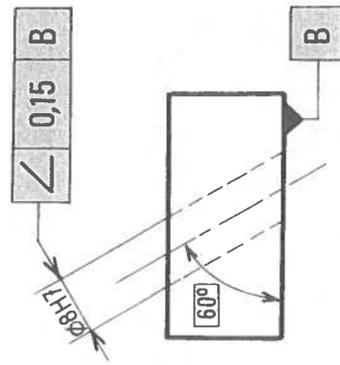
### INCLINAISON d'un axe et d'une surface

Symbole

Signification



Dans le plan indiqué sur le dessin, l'axe du trou considéré doit être compris entre les 2 droites D1 et D2, parallèles, espacées de 0,15 mm et inclinées à 60° par rapport au plan de référence (B).

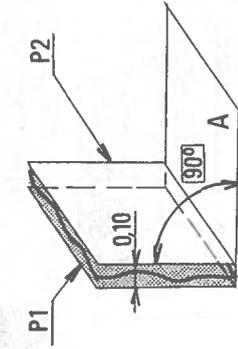


# TOLÉRANCES

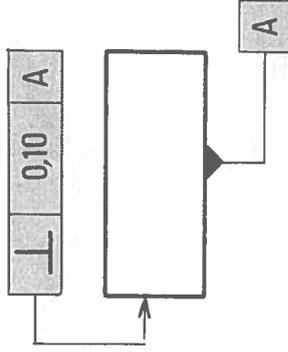
## PERPENDICULARITÉ de 2 surfaces planes

Symbole

Signification



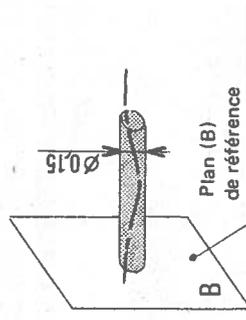
La surface considérée doit être comprise entre les plans P1 et P2, parallèles, espacés de 0,10 mm et perpendiculaires au plan de référence (A).



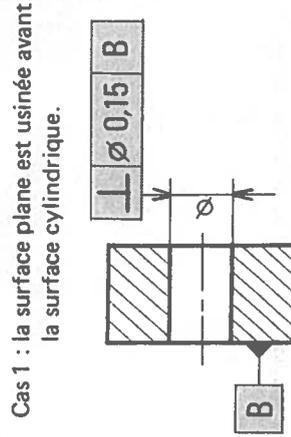
## PERPENDICULARITÉ d'un axe et d'une surface

Symbole

Signification



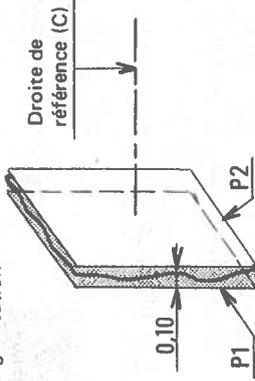
L'axe du trou considéré doit être compris à l'intérieur d'une zone cylindrique de  $\varnothing$  0,15, perpendiculaire au plan de référence (B).



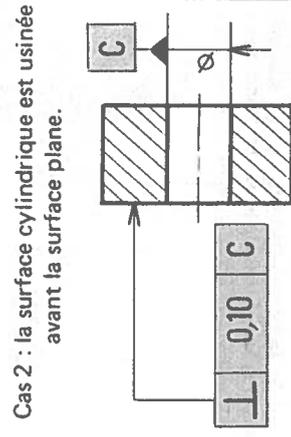
## PERPENDICULARITÉ d'un axe et d'une surface

Symbole

Signification



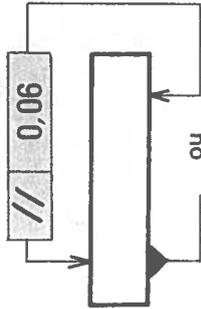
Le plan considéré doit être compris entre les plans P1 et P2, parallèles, espacés de 0,10 mm et perpendiculaires à l'axe (C) - droite de référence.



# TOLÉRANCES

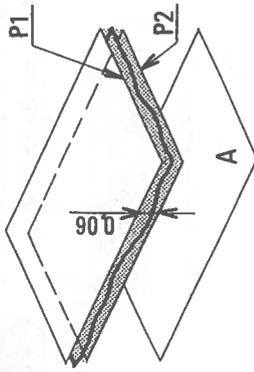
## PARALLÉLISME de 2 surfaces

Signification



Lorsque les surfaces ne sont pas usinées simultanément, placer un pied sur la surface usinée la première (la plus fine) ; elle servira de plan de référence.

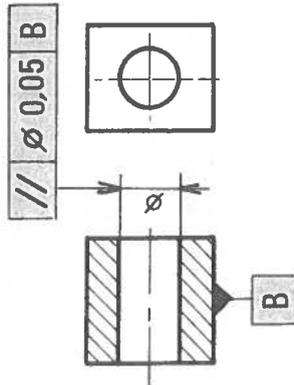
Signification



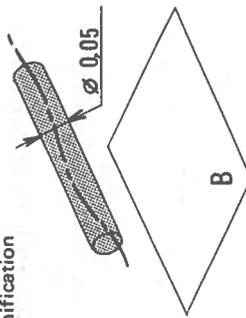
L'une des surfaces étant prise comme plan de référence (par exemple A), l'autre surface doit être comprise entre les plans P1 et P2, parallèles à A et espacés de 0,06 mm.

## PARALLÉLISME d'un axe et d'une surface

Signification



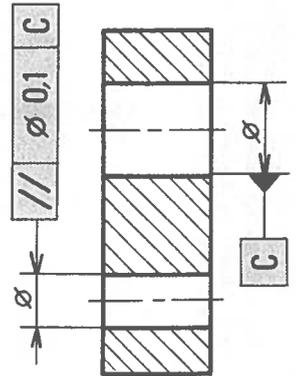
Signification



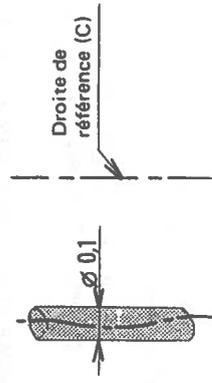
L'axe du trou considéré doit être compris à l'intérieur d'une zone cylindrique de  $\varnothing 0,05$ , parallèle au plan de référence (B).

## PARALLÉLISME de 2 axes

Signification



Signification



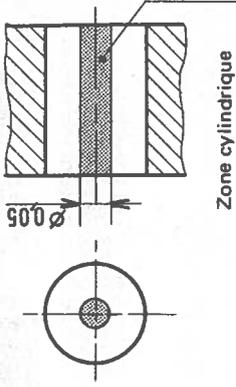
L'axe du trou considéré doit être compris à l'intérieur d'une zone cylindrique de  $\varnothing 0,1$ , parallèle à l'axe du cylindre (c)-droite de référence.

# TOLÉRANCES

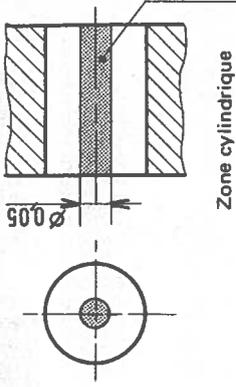
## 8/5 - TOLÉRANCES DE POSITION

### LOCALISATION d'un élément

Signification

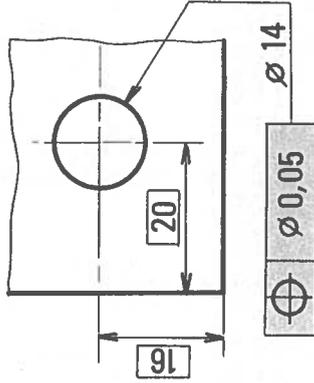


Signification



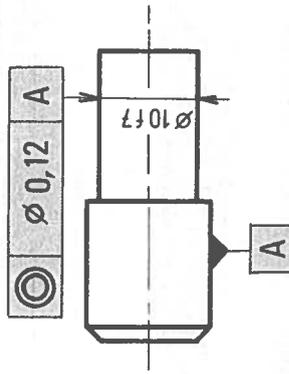
La position théorique de l'axe est définie par les cotes encadrées. L'axe du trou réalisé doit être compris à l'intérieur de la zone cylindrique de  $\varnothing 0,05$  mm dont l'axe est la position théorique.

Exemple : position d'un axe

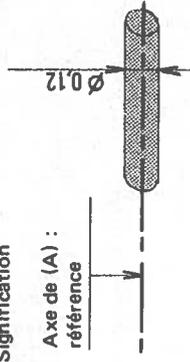


### COAXIALITÉ de 2 cylindres

Signification



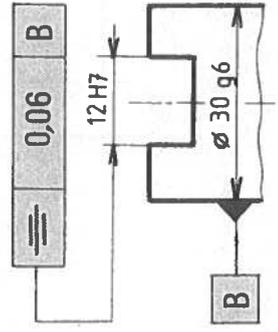
Signification



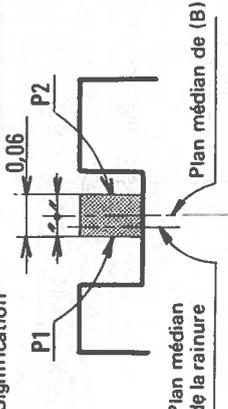
L'axe du cylindre de  $\varnothing 10$  doit être compris à l'intérieur de la zone cylindrique de  $\varnothing 0,12$  mm dont l'axe est confondu avec celui du cylindre (A).

### SYMÉTRIE d'une rainure

Signification



Signification



Le plan médian de la rainure doit être compris entre les plans P1 et P2 symétriques par rapport au plan médian de (B) et espacés de 0,06 mm.

## 8/6 - TOLÉRANCES DE BATTEMENT

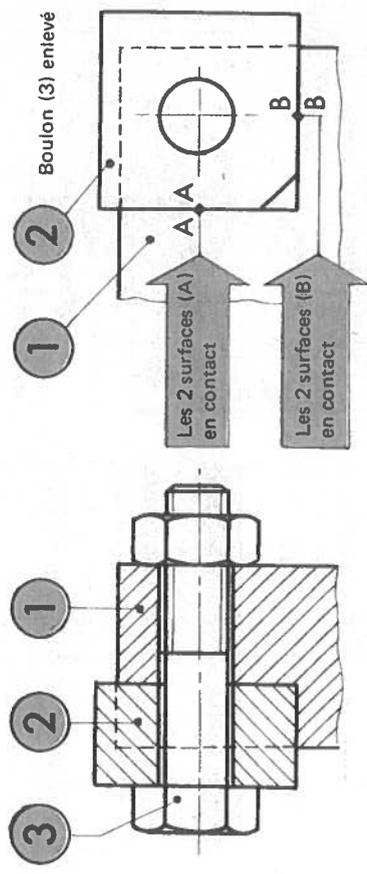
<p><b>BATTEMENT SIMPLE RADIAL</b></p> <p>Symbole ↗</p>	<p>Signification</p> <p>Axe de référence (AB)</p> <p>90°</p> <p>La pièce étant guidée en rotation autour de l'axe de référence (AB), dans chaque section droite de la surface cylindrique tolérancée, le battement ne doit pas dépasser 0,06 mm.</p>
<p><b>BATTEMENT SIMPLE AXIAL</b></p> <p>Symbole ↗</p>	<p>Signification</p> <p>Axe de référence</p> <p>0,04</p> <p>La pièce étant guidée en rotation autour de l'axe de référence (C), pour chaque cercle pris sur la surface latérale, le battement ne doit pas dépasser 0,04 mm.</p>
<p><b>BATTEMENT TOTAL RADIAL</b></p> <p>Symbole ↗↗</p>	<p><b>BATTEMENT TOTAL AXIAL</b></p> <p>Symbole ↗↗</p>

Note : Les tolérances de battement sont éventuellement réparties entre les autres tolérances géométriques, lors de l'étude de fabrication de la pièce.

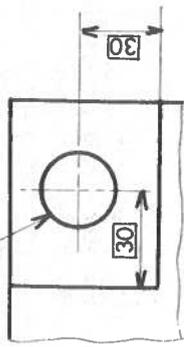
## 9 TOLÉRANCE DE LOCALISATION AVEC CONDITION "AU MAXIMUM DE MATIÈRE"

EXEMPLE : Réaliser l'assemblage des pièces (1) et (2) avec un boulon (3) en assurant le contact des surfaces en (A) et en (B).

PROBLÈME : Les diamètres des trous et du boulon étant déterminés, (cotes nominales et tolérances) calculer la tolérance de position des axes.



PIÈCE 1  $\varnothing 16,5^{+0,110}_0$   $\oplus \varnothing 0,5$   $\textcircled{M}$



Le symbole  $\oplus$  signifie :

L'axe des trous doit être situé à l'intérieur du cylindre enveloppe de  $\varnothing 0,5$ , positionné par les cotes encadrées. (Voir position d'axe).

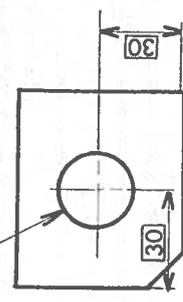
Le symbole  $\textcircled{M}$  signifie :

La tolérance 0,5 a été calculée en considérant les éléments dans leur état «au maximum de matière» c'est à dire en considérant le cas le plus défavorable :

- 1- Le diamètre des trous à la cote mini,
- 2- L'axe du trou de la pièce (1) et l'axe du trou de la pièce (2) écartés au maximum,
- 3- Le diamètre du boulon à la cote Maxi.

Voir page suivante le calcul de cette tolérance.

PIÈCE 2  $\varnothing 16,5^{+0,110}_0$   $\oplus \varnothing 0,5$   $\textcircled{M}$



PIÈCE 3  $\varnothing 16_{-0,5}$

