

Surfaces Optiques

Marc Cayrel (ESO)

Renaud Mercier Ythier (Safran Reosc)



3 Environnement

Contraintes d 'environnement

Il est essentiel de connaître les conditions d 'environnement d 'utilisation d 'un instrument.

⇒ Les **conditions d 'environnement clés** à examiner sont :

- *Température*
- *Pression*
- *Vibration et chocs*

A l 'origine de d 'accélérations, déformations, produisent désalignement, contraintes, biréfringence, casse.

⇒ D 'autres conditions d 'environnement sont à prendre en compte :

- *Humidité et corrosion*
- *Contamination*
- *Abrasion / Erosion*
- *Radiation / Hautes Energies*
- *Moisissures / biologie*

A l 'origine de détériorations des composants de l 'instrument et à une réduction des performances.

Contraintes d 'environnement

⇒ On distingue en général les conditions d 'environnement suivant le domaine d 'utilisation de l 'instrument, par exemple :

- Stockage
- Transport
- Lancement (spatial)
- Utilisation, mode veille
- Utilisation, en opération

Des normes permettent d 'aider à spécifier les conditions d 'utilisation, par exemple :

- Militaire, ISO10109 « Environmental Requirements » ou MIL-STD-210 pour les US.

Température (1)

Les éléments clés à prendre en compte sont

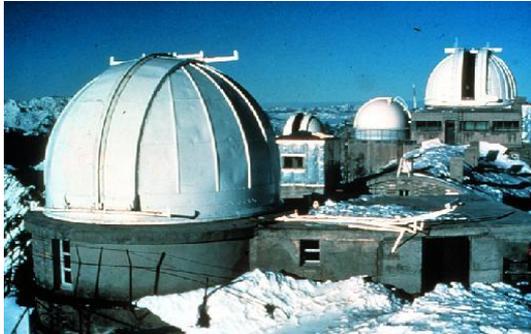
- Température maxi et mini
- Chocs thermiques
- Gradients

Exemple Tmax/Tmin : équipements militaires souvent spécifiés pour

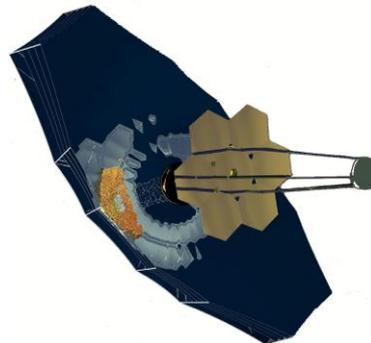
- survie en stockage ou transport [non endommagement] à - 60 / + 70 °C,.
- opération [conservation des performances] à +/- 50 °C

⇒ Les équipements commerciaux sont conçus pour des plages de température bien plus faibles, autour de la température ambiante.

⇒ Des équipements spéciaux comme des senseurs IR spatiaux peuvent approcher le zéro absolu, ou des caméras pour fours les 200 °C.



Pic du midi : - 40°C fréquent



JWST : 35 K [-238 °C]



FELIN : -30 / +50 °C

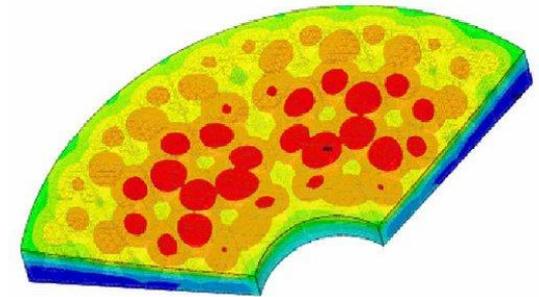
Température (2)

Les changements rapides de température se produisent par exemple pour des instruments spatiaux passant de la zone soleil / ombre en orbite, ou pour des instruments passant d'un abri tempéré à une zone arctique pour utilisation.

⇒ Ces **chocs thermiques** peuvent considérablement affecter les performances des instruments, voire les endommager.

⇒ La **diffusivité thermique** caractérise la vitesse de réponse d'un matériau à un changement de température.

⇒ La plupart des **matériaux optiques ont une diffusivité thermique faible**, la chaleur n'y est pas rapidement transmise. En conséquence, ces matériaux présentent souvent des **gradients thermiques** en milieu à température variable ou avec sources de chaleurs.



Miroir allégé, gradients dans les cellules



Gradients sur structure télescope

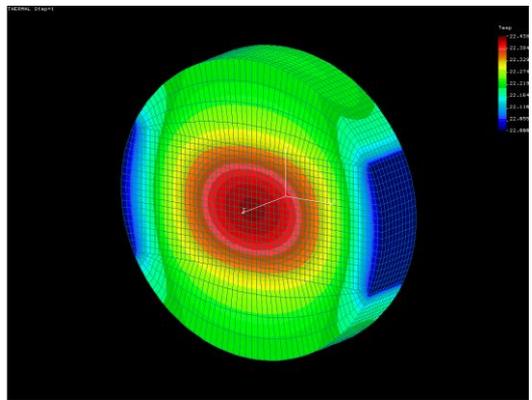
Température (3)

⇒ Les matériaux qui ont un **coefficient de dilatation non homogène**, comme souvent avec les substrats optiques, ont des variations de forme non homogènes, causant des erreurs de surface d'onde.

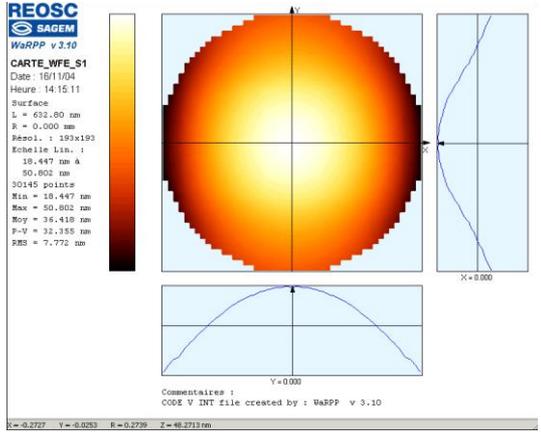
⇒ Les variations dimensionnelles des différents éléments d'un instrument provoquent des erreurs d'alignement, de focus, de qualité optique, de pointage, etc.

⇒ Les gradients peuvent dégrader l'uniformité de l'indice de réfraction des optiques en transmission, comme les verres, et provoquent des effets similaires (dn/dT).

⇒ Des techniques d'**athermalisation** existent (voir plus loin), notamment pour la conservation du focus, mais **en général on ne peut pas corriger les problèmes dus aux gradients**.



Gradients : lentille sous flux laser UV



Influence sur surface d'onde transmise

Température (4)

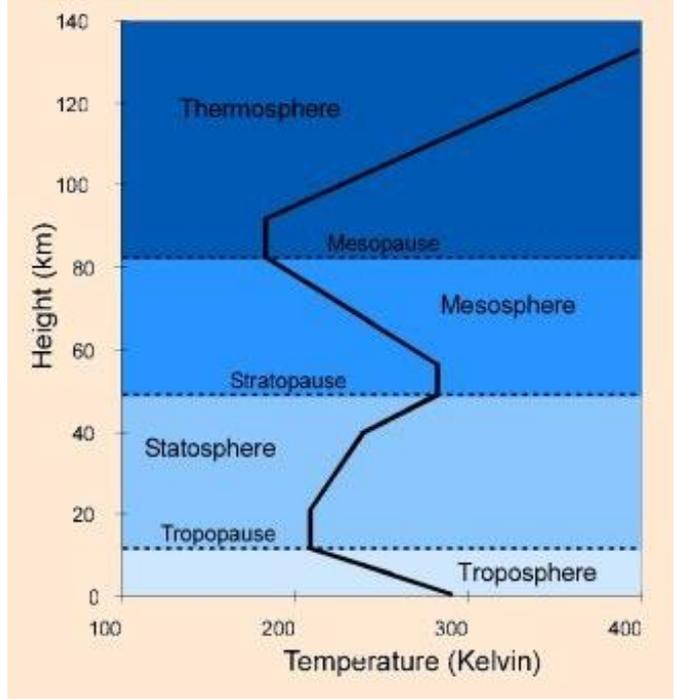
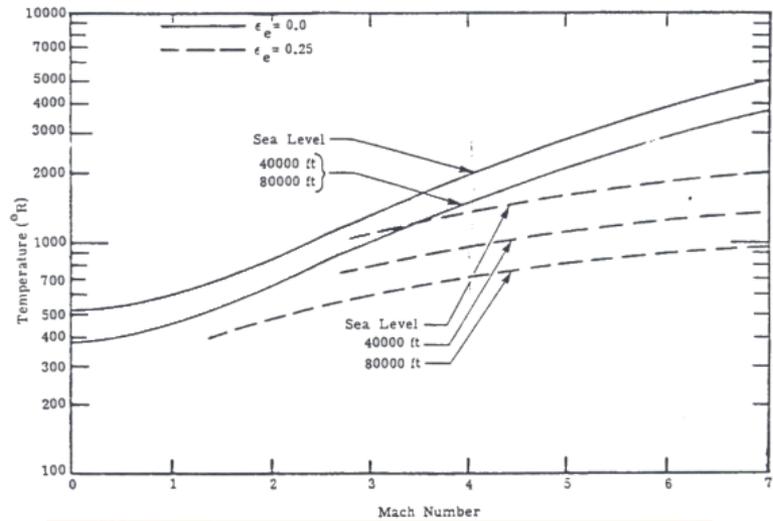
⇒ Exemple : température vue par un dôme missile en fonction de sa vitesse, de son émissivité, de l'altitude.

On approche rapidement les 700 K (à Mach 2) ! Haute altitude favorable à diminution de température, mais modérée.

⇒ Evacuer la chaleur vers le corps du missile

⇒ Utiliser matériau à faible CTE, forte conductibilité, forte chaleur massique.

Si on rajoute la pression hydrodynamique, qui peut atteindre qq Mpa à cette vitesse, on comprend le peu de matériaux candidats pour réaliser des dômes IR.



Pression (1)

⇒ Une manifestation première d'un changement de pression est la **variation d'indice de réfraction avec l'altitude**.

$$[n_{air}=1.0003, n_{vide}=1] \quad n = \frac{\text{Vitesse de la lumière dans le vide}}{\text{Vitesse de la lumière dans le média}} = \frac{c}{v}$$

⇒ Les instruments avec « fuite » peuvent « pomper » des gaz, humidité, et autres contaminants [Objectif embarqué].

⇒ Un composant optique sujet à une **pression différentielle** se déforme, ou se brise dans des cas extrêmes [Hublot sous-marin].



POD de reco aérienne - 1 à 0.2 atm



Robot imageur sous- marin - 1 à 1000 atm



Télescope Mauna Kea - 0.5 atm



Mât périscope - 1 à xxx atm

Pression (2)

⇒ Un composant optique peut être sujet à de la **pression aérodynamique** [Dôme missile, hublot avion] ou hydrodynamique.

⇒ Certains instruments de haute performance, comme les objectifs de microlithographie, voient leur performances affectées par les changements quotidiens de pression atmosphérique (infimes variations d'indice de l'air) : ils disposent de dispositif de correction qui en tiennent compte (réalignement et refocalisation)!



IR Dôme Mica [SAGEM]



Objectif microlithographie

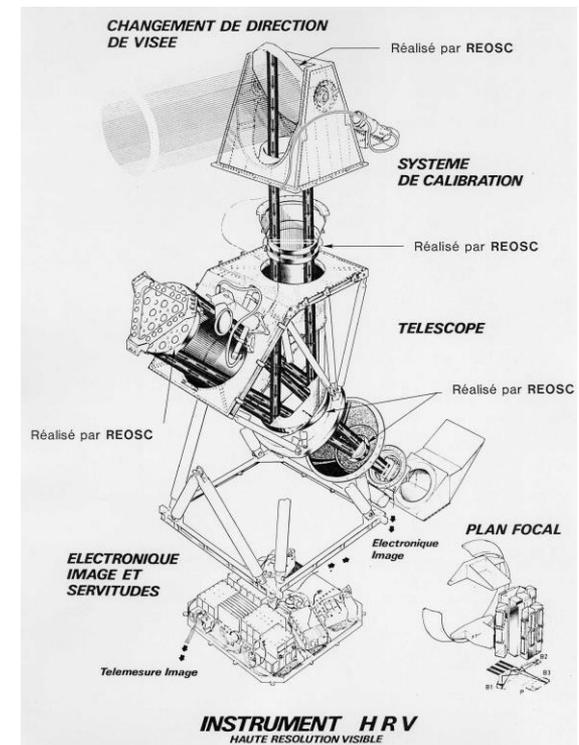
Pression (3)

⇒ Une autre manifestation importante des variations de pression comprend le **dégazage de certains matériaux** (plastiques, élastomères, lubrifiants, joints de brasure, traitements de surface, etc), et la **libération de contaminants** aux passages de joints ou par des parois semi-poreuses (pièces moulées).

⇒ La sélection des matériaux doit être faite avec soin, ainsi que celle des procédés de fabrication.



SPOT : pas de matières à dégazage sous vide



Humidité et autres contaminants (1)

⇒ Afin de maximiser la résistance d'un instrument à l'humidité, à la corrosion, à la contamination, il est très important :

- d'utiliser des **matériaux compatibles entre eux** (pas de couples oxydants)
- d'assembler l'instrument dans une **ambiance propre et sèche**
- d'**étanchéifier** tout chemin de fuite et de **purger avec de l'azote sec** (ou hélium)
- dans certains cas de mettre une **légère surpression gazeuse** au sein de l'instrument (ne réduit pas les risques d'humidité, mais de contamination particulière)
- pour certains systèmes, on laisse une **fuite au travers d'un filtre et dessicant.**

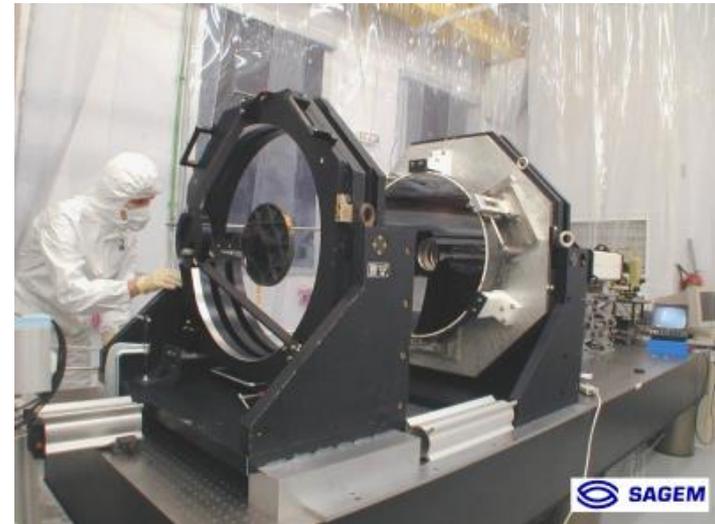
Humidité et autres contaminants (2)

⇒ Pour le spatial, toute **contamination particulaire et moléculaire** « s ' échappe » en orbite et peut se déposer sur les surfaces optiques, instruments, etc, avec fort risque de dégradation des performances (notamment les détecteurs).

⇒ Afin de garantir une durée de vie maximum, tout élément d 'un instrument spatial est nettoyé, décontaminé, assemblé en salle blanche (classe 100), stocké sous azote sec. Des témoins de contamination suivent les composants jusqu 'à utilisation.



Miroir primaire ISO - Intégration salle blanche
[SAGEM]



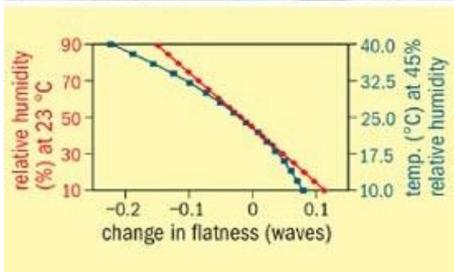
Alignement optiques SiC - Salle blanche [SAGEM]

Humidité et autres contaminants (3)

⇒ Pour des optiques travaillant dans l'UV à 157 ou 193 nm (lithographie), les performances sont dégradées en présence d'infimes quantités de contaminants (qq ppm) (**hydrocarbures, silicones**), eux mêmes transformés par le flux laser. Le contrôle de contamination de ces instruments est drastique (fonctionnement en classe 10 voire 1).



Industrie des photomasques : classe 1



Changement de planéité cristal en humidité et température (absorption)

Vibrations et chocs

⇒ Vibrations et chocs induisent des forces sur l'instrument, donc des déplacements et des vibrations pour revenir à une position d'équilibre (retour élastique, ou dû à la gravité).

⇒ Si la vibration est périodique, la réponse est une vibration.

⇒ Si c'est un choc, la réponse est une vibration d'amplitude dégressive (amortie).

Voir plus loin exposé sur les vibrations.

En général pas beaucoup de solutions :

⇒ **Augmenter les fréquences propres** vibratoires

⇒ **Mettre en place des dispositifs amortisseurs**

Environnement - Classifications types

A titre d'information, variables d'environnement typiques et classifications de sévérité.

Environnement	Normal	Sévère	Extrême	Exemple condition extrême
Basse température	20°C [293 K]	-50°C [223 K]	-271°C [2.4 K]	<i>Charge satellite à temp. Cryogénique</i>
Haute température	27°C [300 K]	70°C [343 K]	150°C [423 K]	<i>Etude de combustion</i>
Basse pression atmosphérique	0.9 atm [88 kPa]	0.5 atm [57 kPa]	0.0 atm [0 kPa]	<i>Télescope spatial</i>
Haute pression atmosphérique	1.1 atm [108 kPa]	9.8 atm [1 MPa]	1361 atm [138 MPa]	<i>Hublot de sous-marin</i>
Humidité relative	25-75%	100%	Immergé	<i>Caméra immergée</i>
Facteur d'accélération	2 g	12 g	11000 g	<i>Projectile canon / arme</i>
Vibration	200 10^{-6} m/s rms f >= 8 Hz	0.04 g ² /Hz 20 < f < 100 Hz	0.13 g ² /Hz 30 < f < 1500 Hz	<i>Lancement satellite</i>

Radiation

⇒ Rayonnements typiques d'un environnement spatial, et éventuellement en nucléaire :

- Rayons Gamma
- Rayons X
- Neutrons, Protons, Electrons

Seule **protection** envisageable, et de toute façon **limitée** : des **boucliers de matériaux dédiés**.

⇒ Certains matériaux optiques comme la silice (fused silica) sont relativement peu sensibles à ces radiations.

⇒ Certains **verres** sont **dopés** pour une protection accrue (oxyde de cérium), mais au détriment d'une perte de transmission dans le bleu/UV (retrouvée après irradiation !).

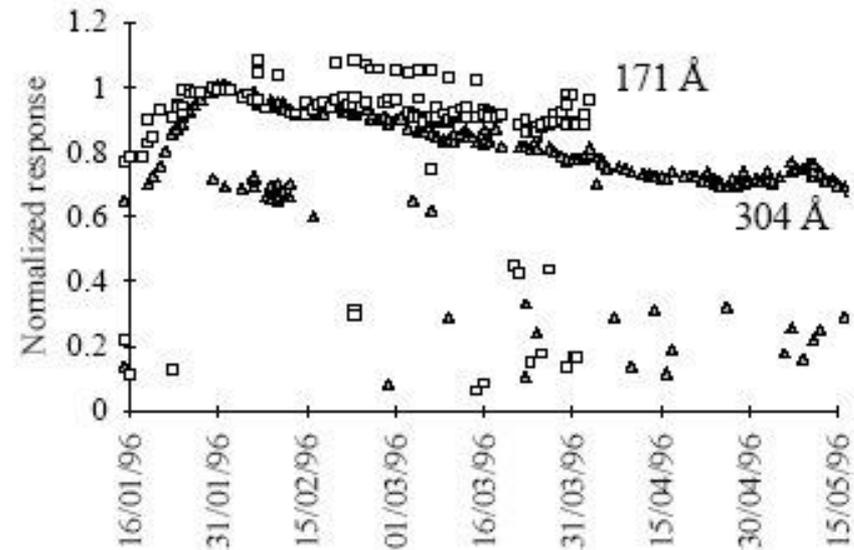


Figure 3: Total response at 304 and 171 Å

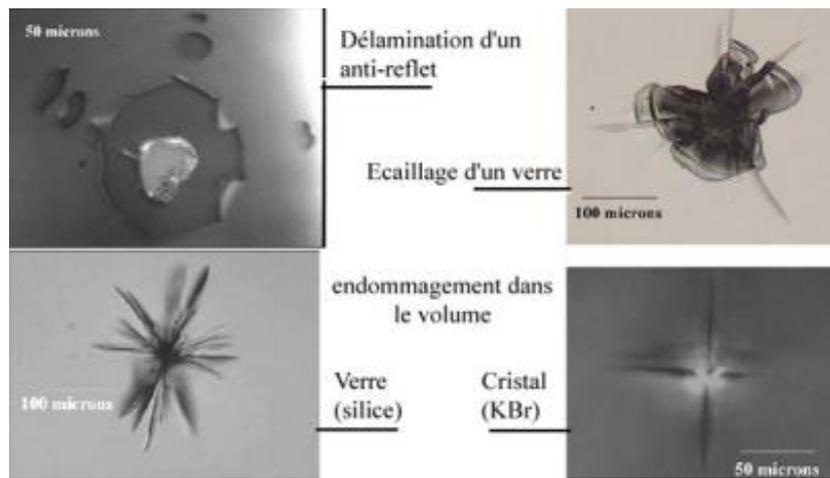
Variation de la réponse d'un capteur CCD du satellite d'observation du soleil SOHO en fonction du temps

Radiation (2)

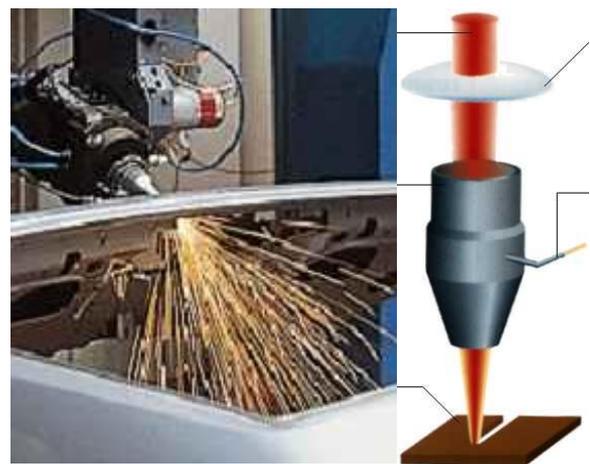
⇒ Pour des applications laser :

- **Expériences Hautes Energies** (Mégajoule, Expériences Pétawatt), des flux intenses de 5 à 50 j/cm², à 1,053 micron.
- **Systèmes de découpe/soudage laser**, plusieurs dizaines de j/cm²
- **Lithographie**, flux de quelques watts à longueur d'onde très courte (248, 193, 157, 13.4 nm).

⇒ Traitement couches minces dédiés, silices, verre dopés laser, et polissage bas niveau de défauts et de contaminants piégés en surfaces (oxydes, métaux, organiques).



Endommagements laser typiques



Exemple type : optiques de focalisation laser de découpe CO2

Moisissures, biologie

⇒ Certains environnements favorisent, **même sur des verres et traitements**, des proliférations biologiques (moisissures), en particulier à fort taux d'humidité et température élevée (climats tropicaux).

⇒ L'usage de matériaux organiques, comme **le liège et le cuir sont strictement interdits** pour les applications optiques militaires.

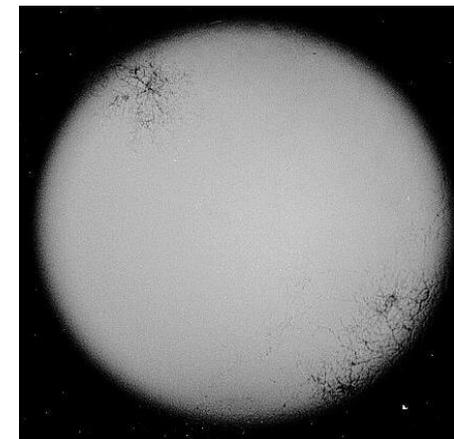
Il est fortement conseillé de faire de même pour les applications courantes.

⇒ Les matériaux inorganiques peuvent être sujet à des croissances biologiques car ils ne sont jamais parfaitement propres. Même le verre peut être attaqué dans certaines conditions (examiner les vitres de bâtiments très anciens !).

Cette croissance va à long terme mater les surfaces et affecter la transmission et la qualité optique.



Vieil appareil photo avec optiques endommagées



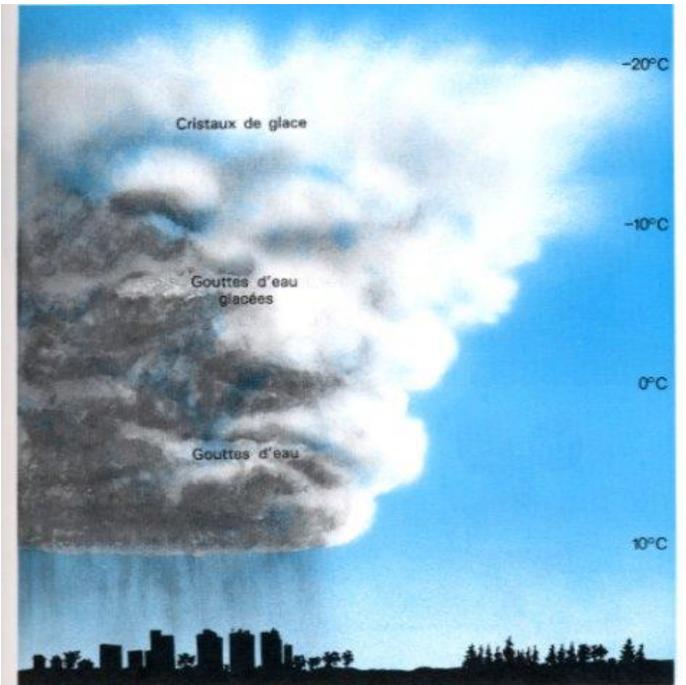
Traitement antireflet dégradé par stockage long

Abrasion et Erosion

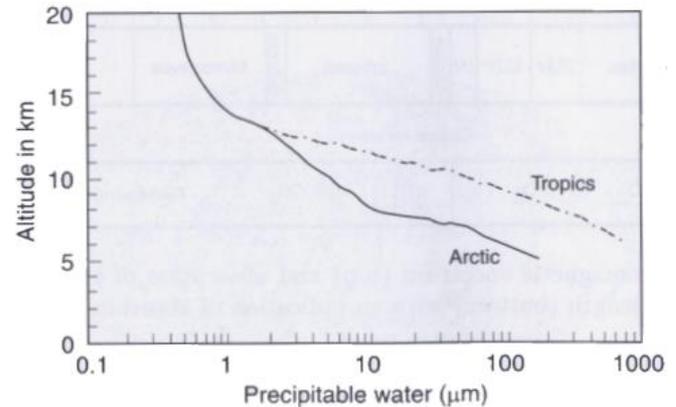
⇒ Concerne en général des optiques soumises à des particules entraînées par le vent et la pluie, ou la neige/les cristaux de glace rencontrés à haute vitesse.

⇒ Pour le vent, cela concerne les véhicules terrestres et les hélicoptères.

⇒ Pour les cristaux de glace cela concerne plus particulièrement les avions ($v > 200$ m/s)



C'est surtout en été que la différence entre l'air chaud et l'air froid est importante : des courants ascendants s'accompagnent de la formation de nuages d'orage à des altitudes de 6 000 à 10 000 m. La montée rapide d'air surchauffé donne des cumulo-nimbus, nuages d'orage bien connus. La vitesse ascensionnelle peut dépasser 10 m par seconde. Dans le tiers inférieur, ces nuages sont constitués par des gouttes d'eau : au milieu se trouvent des gouttes d'eau glacées ; le haut est occupé par des cristaux de glace.



Abrasion et Erosion (2)

⇒ Les **matériaux optiques les moins durs**, ceux utilisés pour l'**infrarouge** notamment, sont évidemment plus sujet à ce type d'abrasion/érosion.

⇒ La **protection** peut être améliorée par **traitement dur** des surfaces optiques (Optiques de viseurs).

⇒ En environnement spatial, l'exposition à des **micrométéorites et autres débris** en orbite endommagent les optiques. Les instruments possèdent en général un couvercle / bouclier de protection amovible pour limiter les dégâts, mais compte tenu de l'énergie cinétique des particules, on ne peut pas faire grand chose.



Impact micro-météorite - Hubble Space Telescope

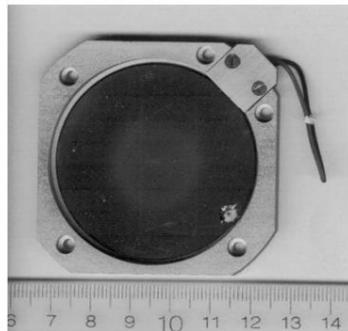
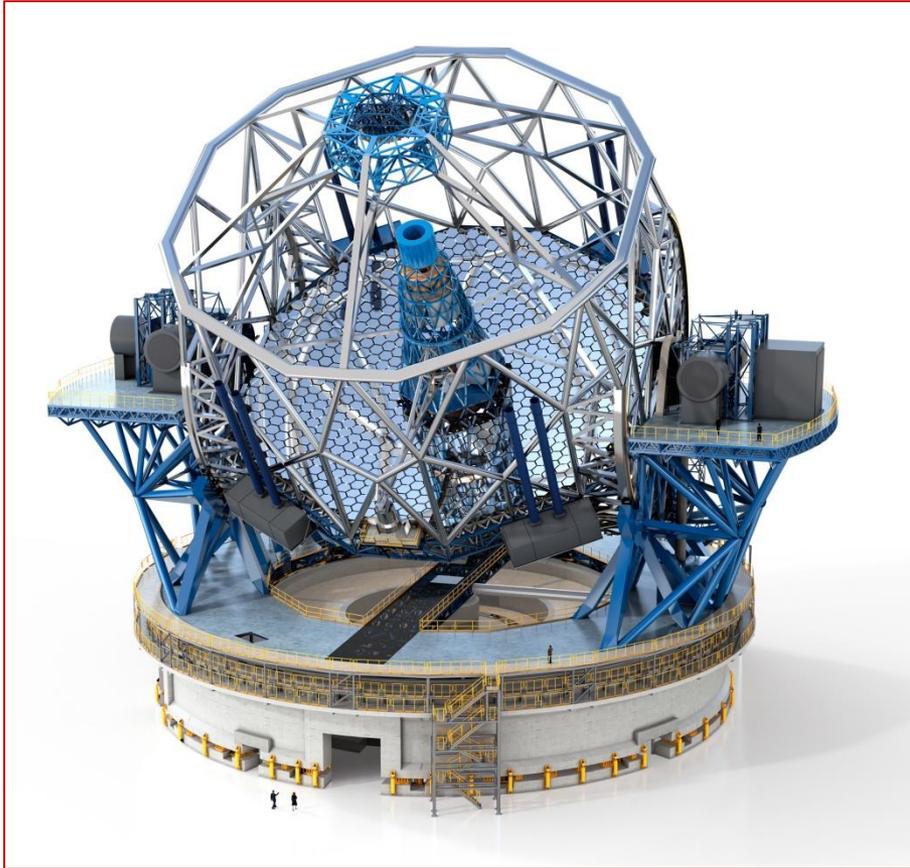


Figure 3. LDEFIDE impact detector with roughly 4000 µm center. Photo J-D. Mulholland, ESA/ESA Astr. Espace 2002.

Impact débris détecteur



Tissus de protection débris - 3M NEXTEL



3.1 Dynamique

Vibrations

⇒ **Mouvements périodiques d'aller et retour autour d'une position moyenne.**

Deux influences notables :

- En condition de lancement satellite :

⇒ **éviter endommagement et désalignement des instruments optiques**

- En condition d'utilisation :

⇒ **l'amplitude des vibrations relatives entre l'objet et le champ objet doit être inférieure à la résolution.**

- En condition d'utilisation :

⇒ **l'amplitude des vibrations relatives entre les différents composants optiques d'un système doit permettre de conserver la performance**

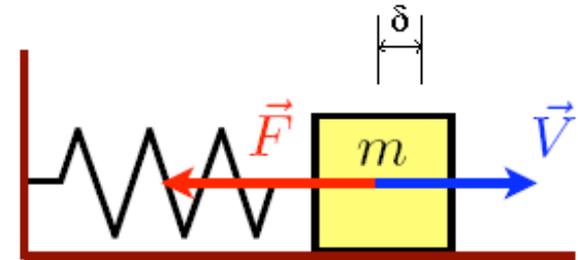
Fréquence propre (1)

Rappel : système simple à l'équilibre, constitué d'un mobile en mouvement :

$$\sum F_{\text{extérieures}} = 0$$

Soit :

$$k.\delta + \phi(v) + M.\gamma = 0$$



Avec :

k : raideur de rappel (ex : ressort, lame en flexion)

δ : déplacement du mobile

$\phi(v)$: forces de frottement, fonction de la vitesse du mobile $v = \frac{d\delta}{dt}$

M : masse en déplacement

γ : accélération du mobile $\gamma = \frac{d^2\delta}{dt^2}$

Fréquence propre (2)

Pour la plupart des mécanismes, la force de frottement est faible, on peut écrire :

$$k.\delta + M.\gamma = 0$$

Ou encore :

$$k.\delta = -M.\frac{d^2\delta}{dt^2}$$

Equation différentielle du premier ordre de solution connue, fonction harmonique (fonction sinusoïdale du temps) :

$$\delta(t) = \Delta.\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}.t\right) \quad \text{ou} \quad \delta(t) = \Delta.\sin(\omega.t)$$

avec ω pulsation propre du système, en rad/s

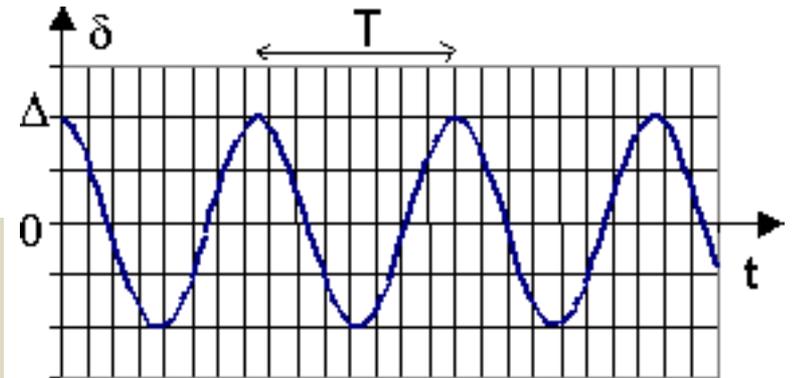
Fréquence propre (3)

La fréquence propre f , associée à la pulsation propre ω vaut :

$$f = \frac{\omega}{2.\pi}, \text{ en Hz}$$

Ou encore :

$$f = \frac{1}{2.\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}, \text{ et période } T = \frac{1}{f} \text{ (en sec)}$$



L'énergie (le travail) mécanique contenue dans le mouvement harmonique s'exprime par :

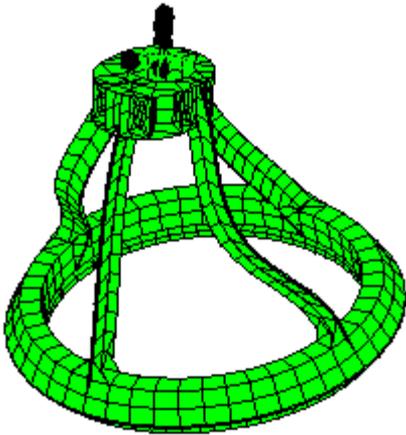
$$E = \frac{1}{2} M . \omega^2 . \Delta^2$$

Elle est proportionnelle aux carrés de la fréquence f et de l'amplitude Δ

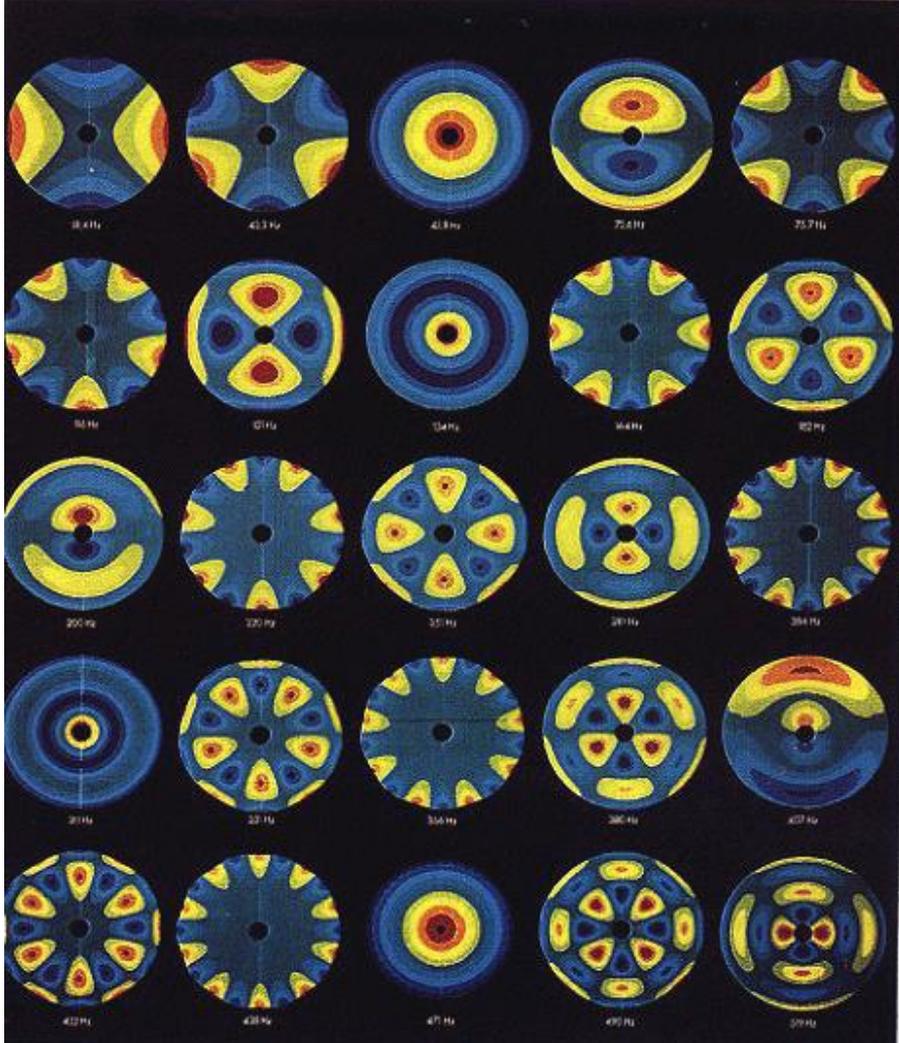
Fréquence propre (4)

Par analogie avec le système simple, l'équilibre d'un système plus complexe peut être représenté par un ensemble d'équations différentielles. Les solutions du système d'équations fournissent ses fréquences propres.

Le calcul est par exemple effectué par résolutions numériques matricielles (Calculs aux éléments finis).



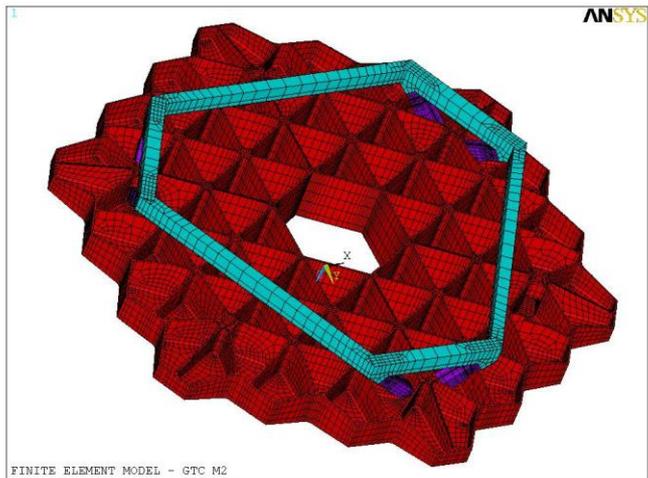
Un mode de vibration - Support de miroir secondaire



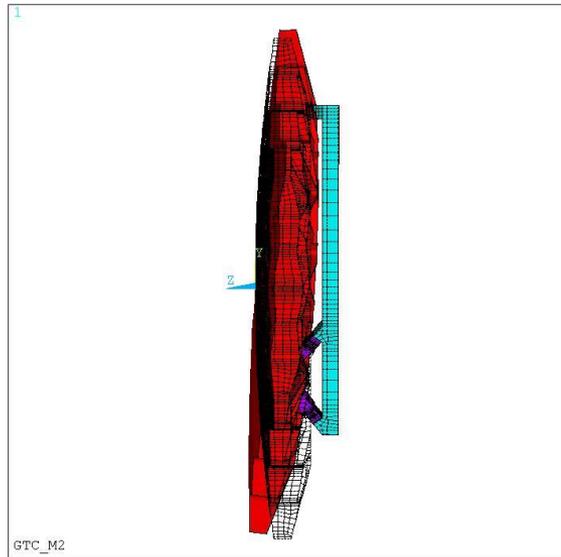
Modes propres du miroir primaire VLT (ménisque circulaire)

Fréquence propre (5)

Calculs de fréquences propres - Miroir secondaire de télescope monté sur son barillet.



Modèle aux éléments finis



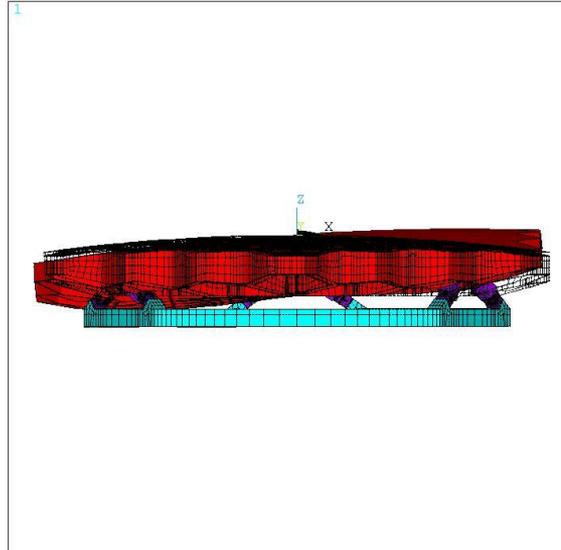
```

ANSYS 5.5.1
OCT 13 2000
15:03:04
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=392.593
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.372576

DSCA=.158167
XV =1
DIST=-.652237
YF =-.016339
ZF =-.078696
Z-BUFFER
EDGE

```

Exemple de modes et fréquences calculés



```

ANSYS 5.5.1
OCT 13 2000
15:07:01
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =2
FREQ=392.593
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.329082

DSCA=.179071
YV =-1
DIST=-.587302
XF =-.018165
YF =.160E-03
ZF =-.091933
Z-BUFFER
EDGE

```

Amortissement (1)

En réalité le **frottement existe toujours**, en friction interne ou externe, et consomme de l'énergie à chaque oscillation.

La **vibration est amortie**.

Le frottement $\phi(v)$ est une fonction dépendante de la vitesse et de la nature des frictions considérés. On distingue :

- Le frottement sec

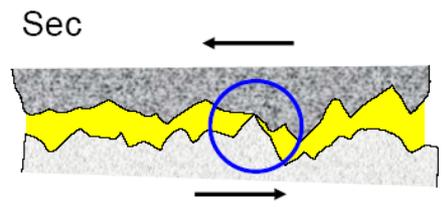
- Indépendant de la surface de contact*
- Indépendant de la vitesse*
- Proportionnel à la force pressante*
- Très dépendant des matériaux en contact*
- Plus élevé à l'arrêt qu'en marche.*

$$F = -sgn(v).p \quad (p = \text{constante})$$

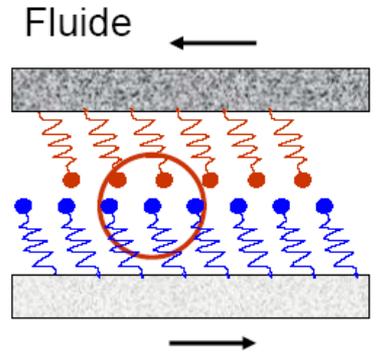
- Le frottement visqueux

- Force de frottement générée par la viscosité d'un fluide.*
- Proportionnel à la vitesse, la surface de contact, l'épaisseur de la couche fluide, à la viscosité dynamique du fluide.*

$$F = \eta \cdot \frac{S}{e} \cdot v = \lambda \cdot v \quad \eta \text{ viscosité dynamique}$$



- o Microgéométrie des surfaces imparfaite
- o Interaction des aspérités:
 - Microcisaillements
 - microsoudures



- o Interactions moléculaires
 - À l'intérieur d'un fluide
 - Entre molécules adsorbées sur des surfaces solides

Amortissement (2)

- Le frottement mixte

Afin de diminuer les efforts de frottement entre deux surfaces, on interpose un fluide plus ou moins visqueux entre celles-ci : lubrification, graissage.

En fait le frottement résultant est à mi-chemin entre le frottement sec et le frottement visqueux : frottement mixte.

Surtout aux faibles vitesses qui caractérisent souvent les micro-mécanismes et instruments.

L'équation d'équilibre devient :

- Frottement visqueux

$$k.\delta + \lambda.v + M.\gamma = 0$$

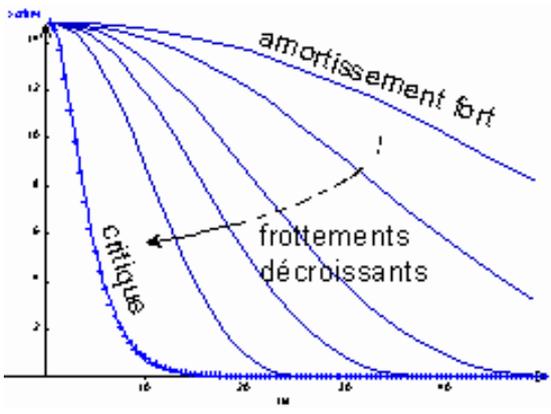
- Frottement sec

$$k.\delta + p.\text{sign}(v) + M.\gamma = 0$$

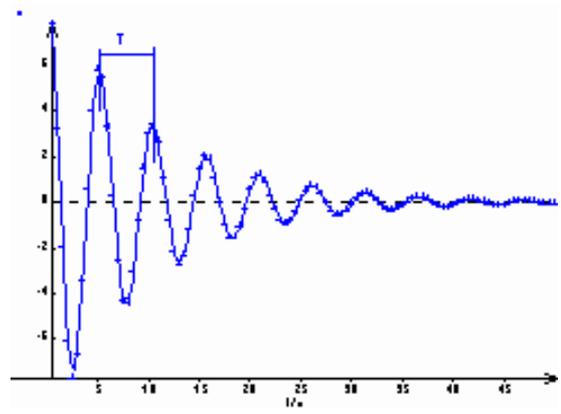
Amortissement (3)

Les solutions sont fonctions de l'ampleur du frottement et conduisent à une **oscillation amortie de pseudo-période T**. Comme le frottement est en général mixte, les solutions réelles sont à mi-chemin entre les types d'amortissement

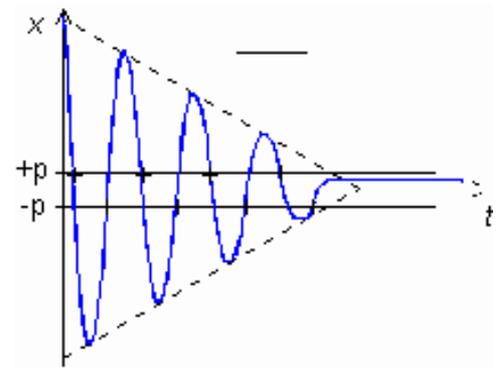
Note : après amortissement sec, la position finale n'est pas nécessairement la position initiale (hystérésis)



Amortissement visqueux fort



Amortissement visqueux faible



Amortissement sec

Résonance (1)

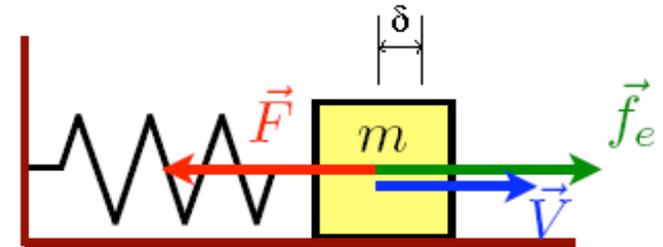
Si on ajoute une force d'excitation périodique f_e au mobile, l'équation d'équilibre devient :

$$k.\delta + \phi(v) + M.\gamma = f_e = F_e.\sin(\omega_e.t)$$

avec

F_e amplitude de l'excitation dynamique

ω_e pulsation de l'excitation dynamique



La réponse du système est une oscillation dont la période et l'amplitude sont dépendantes de la pulsation d'excitation et de l'amortissement (frottement).

On entre : $f_e = F_e.\sin(\omega_e.t)$

Il sort : $\delta = \Delta_d.\sin(\omega_s.t)$

Résonance (2)

La déformation Δ_d engendrée par la force vibrante est comparée à la déformation statique Δ_s que cette force génèrerait si elle était constante ($\omega_e=0$). Le ratio est de la forme :

$$\frac{\Delta_d}{\Delta_s} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\alpha \frac{\omega_e}{\omega_0}\right)^2}}$$

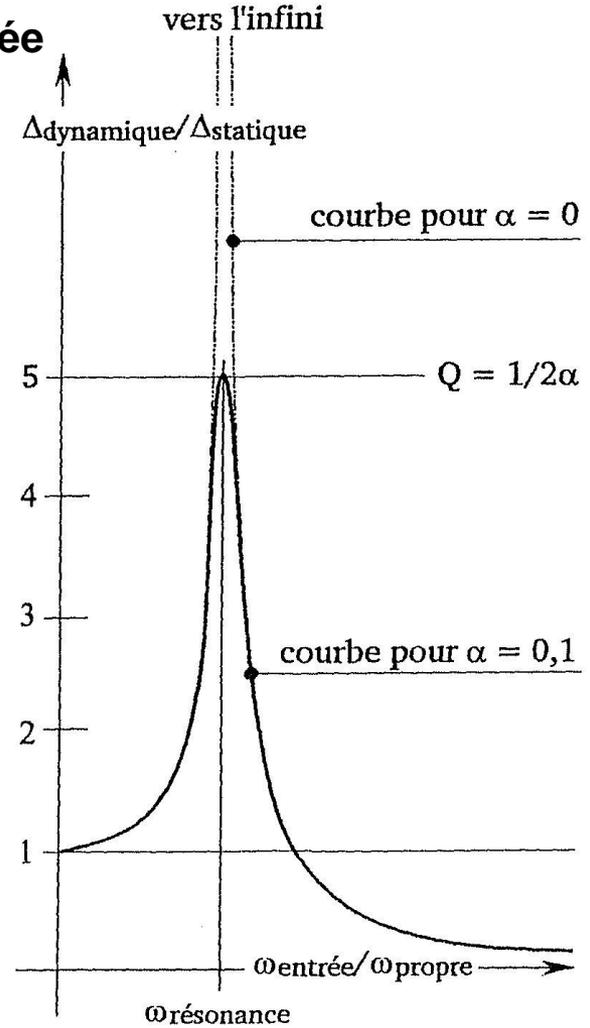
α est le facteur d'amortissement. Pour un frottement fluide :

$$\alpha = \frac{\lambda}{2M\omega_0} = \frac{\lambda}{2\sqrt{kM}}$$

Ce rapport présente pour une fréquence particulière, dite **fréquence de résonance**, une valeur importante nommée **surtension**.

Son amplitude est mesurée par le coefficient **Q**, dit **facteur de surtension**.

$$Q = \frac{\Delta_d}{\Delta_s} \text{ pour } \omega_e = \omega_{résonance}. \text{ Aussi : } Q = \frac{1}{2\alpha}$$



Résonance (3)

On retrouve le facteur d'amortissement interne des matériaux : $Q^{-1} = 2\alpha$

Pour les matériaux utilisés en mécanique, généralement raides, le coefficient d'amortissement est généralement faible : $Q^{-1} = 10^{-1}$ à 10^{-3}

La fréquence de résonance est donnée par : $\omega_r = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - 2\alpha^2}$

Avec ω_0 pulsation propre du système. Comme $\alpha < 0.1$, $\omega_r \sim \omega_0$

Si l'amortissement était nul, l'amplification serait infinie.

En mécanique, l'amortissement α des assemblages est en gros de :

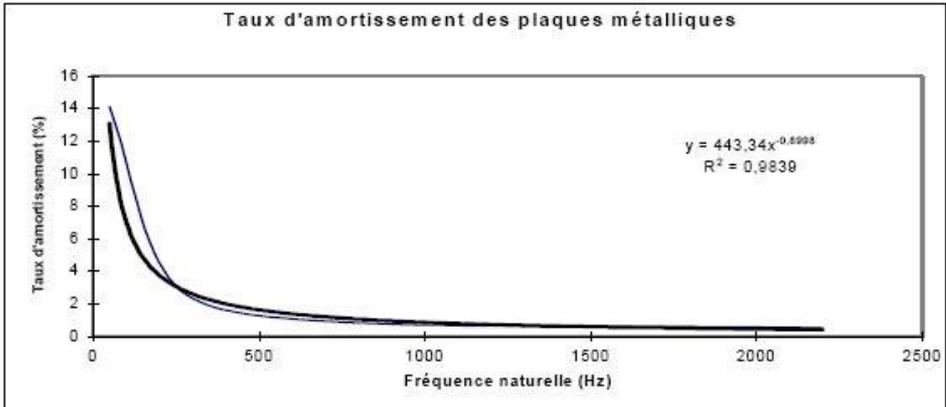
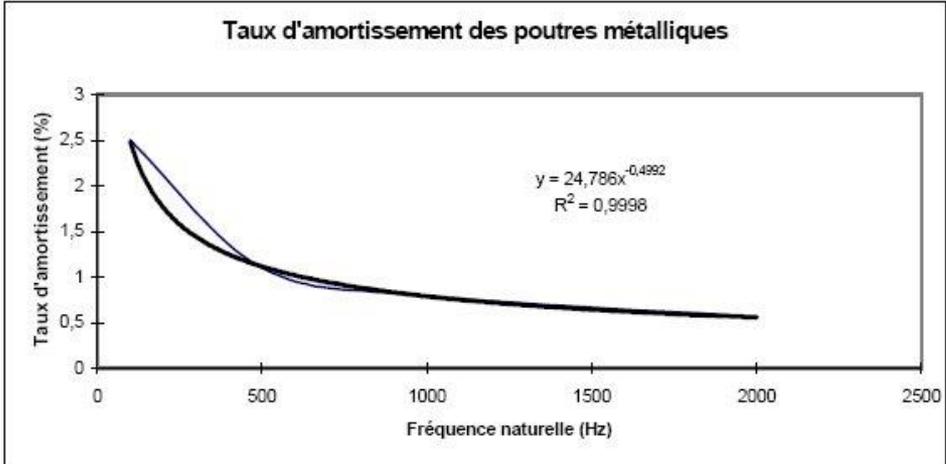
- Pièces uniques : 1%
- Pièces soudées : 2 %
- Pièces rivetées : 4%
- Pièces boulonnées : 5 %

Résonance (4)

En fait, le coefficient d'amortissement est lui même souvent dépendant de la fréquence.

Exemple pour des les aciers, poutres et plaques :

(réduction α vers les hautes fréquences)



Transmissibilité (1)

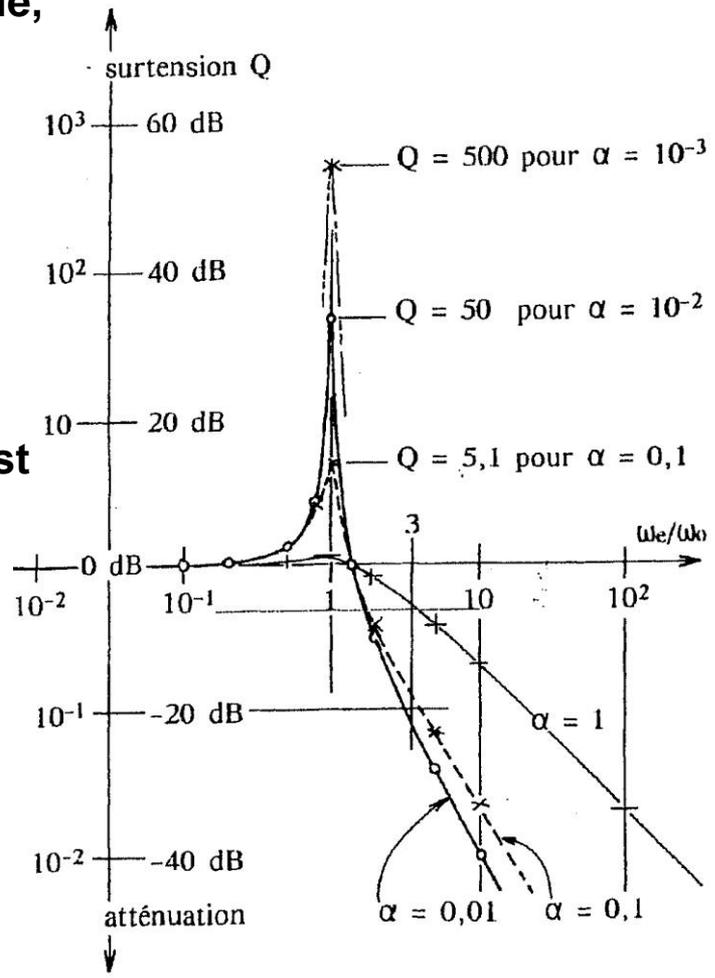
Si on compare les déplacements en entrée et en sortie, on apparente la surtension à un gain.

$$\frac{\Delta_s}{\Delta_e} = \sqrt{\frac{1 + (2\alpha \frac{\omega_e}{\omega_s})^2}{\left[1 - (\frac{\omega_e}{\omega_s})^2\right]^2 + \left[2\alpha \cdot \frac{\omega_e}{\omega_s}\right]^2}}$$

Par analogie avec l'électronique, l'échelle de gain est le Décibel : 1 dB = 20 log(entrée/sortie)

On constate :

Gain quasi - nul pour	$0 < \frac{\omega_e}{\omega_0} < 0.2$
Résonance pour	$0.2 < \frac{\omega_e}{\omega_0} < \sqrt{2}$
Gain négatif (filtrage) pour	$\sqrt{2} < \frac{\omega_e}{\omega_0}$



Transmissibilité (2)

Donc au delà de la zone de résonance, l'élasticité et le moindre amortissement agissent comme un **filtre passe-bas qui isole le système des hautes fréquences**.

Pour le design d'un système :

- on doit connaître les fréquences d'excitation d'un système. Elles sont généralement exprimées sous forme d'un spectre de densité sur une gamme de fréquence.
- le dimensionnement du système est généralement réalisé en recherchant les premières fréquences propres au delà des fréquences principales d'excitation.

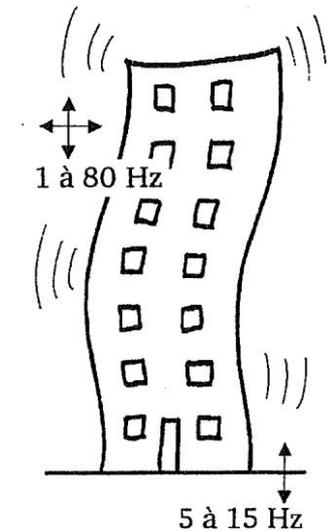
Si c'est mal fait (Pont de Tacoma - Excitation par le vent fort) :



Lutte contre les vibrations (1)

Sources :

- Gens qui marchent : 1 Hz
 - Traffic routier, ferroviaire: 5 à 10 Hz
 - Machines à proximité : 10 à 200 Hz
 - Equipements (moteurs, pompes, ...) : 10 à 500 Hz
- Avec évidemment du 50 Hz en Europe et 60 Hz aux US.



Les vibrations en provenance du sol se propagent par ondes de surfaces verticales, typiquement de 5 à 15 Hz.

Dans les bâtiments, elles sont multidirectionnelles, sur une bande plus large, 1 à 80 Hz.

Lutte contre les vibrations (2)

Exemple de spectre - Labo ESRF (Déplacements)

On constate clairement la décroissance d'amplitude avec la fréquence.

Quelques pics clairement apparents vers 30 / 40 Hz, typiques d'excitations par équipements (clims, moteurs salles blanches, etc).

Au delà de 80 Hz, les amplitudes sont nanométriques.

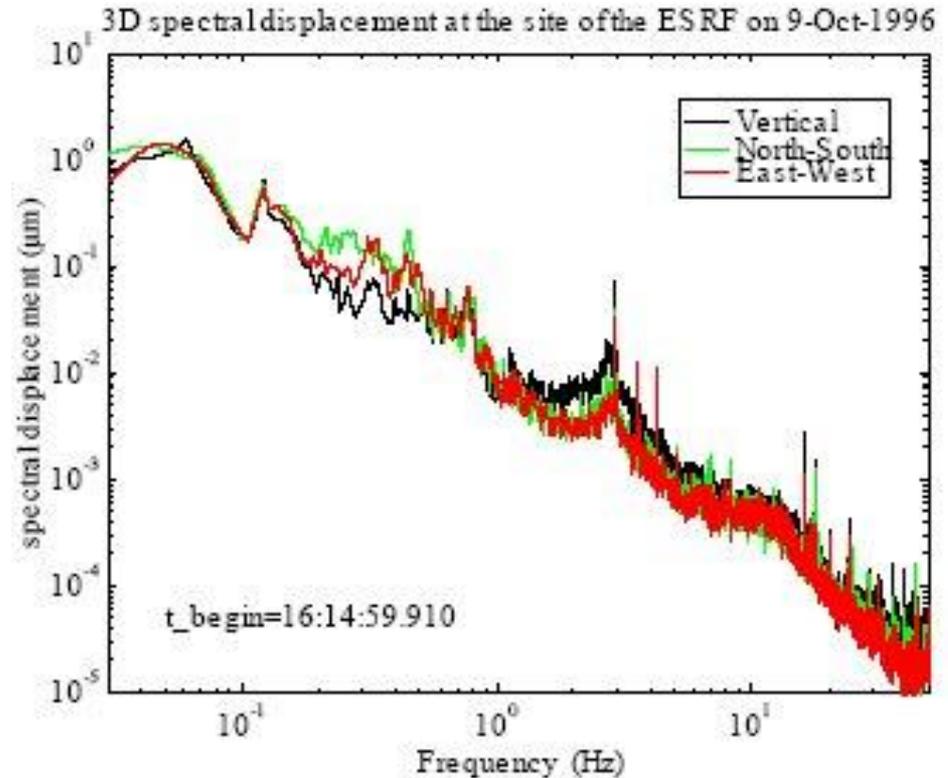


Figure 1: 3D Spectral Displacement of the ground vibration at the ESRF site.

Lutte contre les vibrations (4)

Quelles solutions pour nos systèmes optiques ?

⇒ Du point de vue de la précision, le paramètre important d'une vibration est son amplitude.

Une vibration peut être caractérisée par son énergie :

$$E = \frac{1}{2} M \cdot \omega^2 \cdot \Delta^2$$

En conséquence, le déplacement est de la forme :

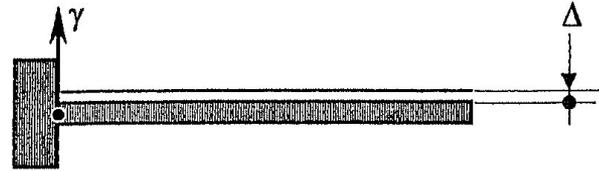
$$\Delta = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}}$$

Donc l'amplitude de la vibration est d'autant plus faible que :

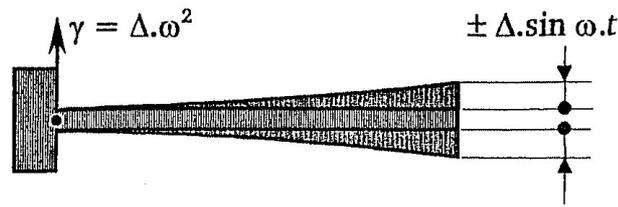
- L'énergie excitatrice est faible
- La fréquence est élevée
- La masse de la structure est importante

Lutte contre les vibrations (5)

Quelles solutions pour nos systèmes optiques ?



Tant que l'accélération γ subie est assez faible pour que le mode fondamental ne soit pas excité, la structure se déplace sans trop vibrer.



Quand la fréquence d'excitation dépasse 20 à 30% de la fréquence de résonance, la vibration prend de l'amplitude.

A la résonance :

$$\Delta_{résonance} = Q \cdot \Delta_{excitation}$$

Lutte contre les vibrations (6)

Quelles solutions pour nos systèmes optiques ?

Compte tenu de ce qui a été vu précédemment, plusieurs directions :

- Obtenir des **fréquences propres élevées**, au delà des fréquences d 'excitation principales.

⇒ Augmenter la raideur et diminuer les masses / inerties

Pas facile d 'augmenter l 'un sans diminuer l 'autre et vice versa !

On joue notamment sur la rigidité spécifique des matériaux (E/ρ) et sur la géométrie

- **Augmenter la masse en mouvement**

⇒ Banc de mesure = masse élevée + raideur.

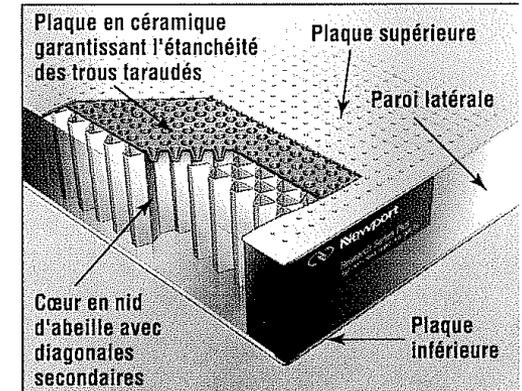
- **Amortir les sources**

⇒ Mettre du frottement fluide / sec entre source et système

Lutte contre les vibrations (7)

Exemple : table raide sur plots amortisseurs (Microcontrôle ou autre).

Les tables de métrologie modernes sont raides, réalisées à partir de structure type « sandwich nid d'abeille ».



Lutte contre les vibrations (8)

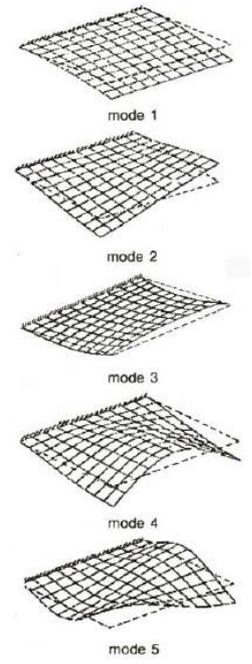
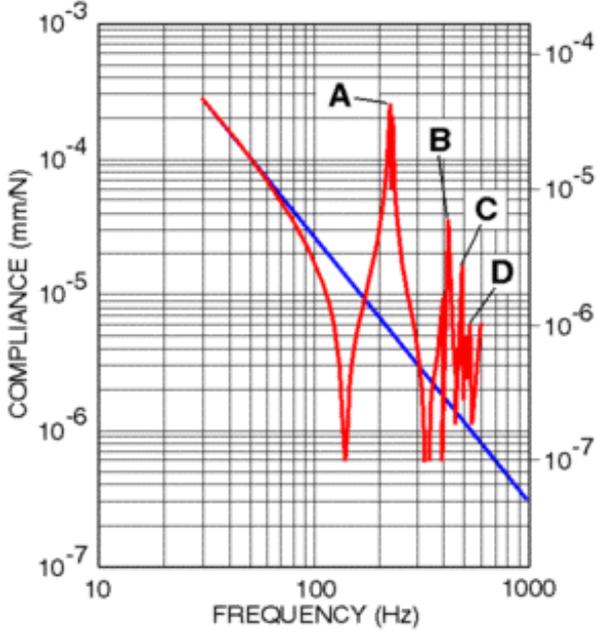
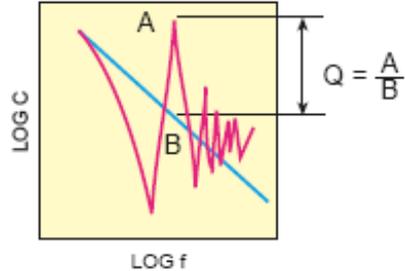
La raideur de la table est exprimée sous forme de compliance : $C = x / F$ (mm/N)

Avec

- F : force appliquée
- x : amplitude de déplacement résultant

On met bien en évidence sur les diagrammes de compliance les fréquences propres de la table, correspondant aux modes d'une plaque rectangulaire.

Ligne théorique : $C = 1 / (m \cdot \omega^2)$
 (Mouvement de corps rigide)
 Jusqu'à 80 Hz, pas de résonance de table, réponse de corps rigide



Lutte contre les vibrations (9)

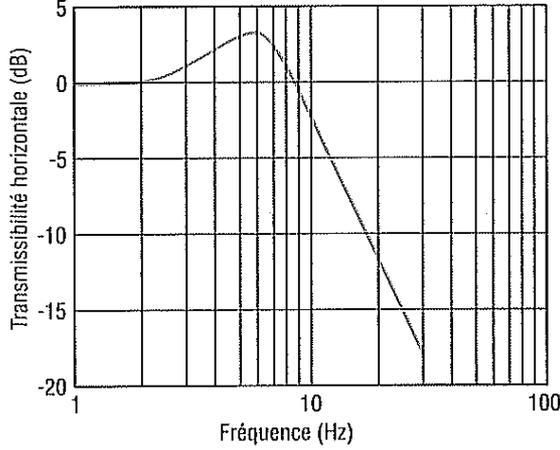
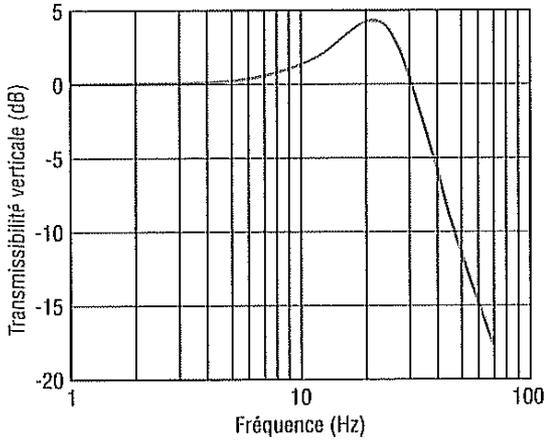
Amortisseurs élastomères.

Le plus simple. L'amortissement est fourni par dissipation (frottement) interne au sein du matériau.

Beaucoup de designs différents, qui peuvent fournir un amortissement sur tous les axes.



Courbes typiques de transmissibilité : (-20 dB : T= 0.1)



Lutte contre les vibrations (10)

Amortisseurs à air.

Principe :

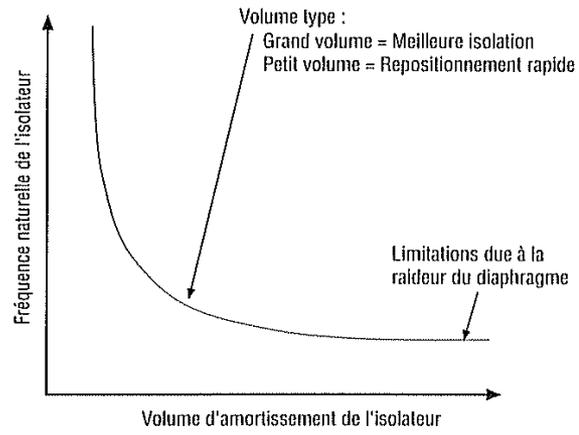
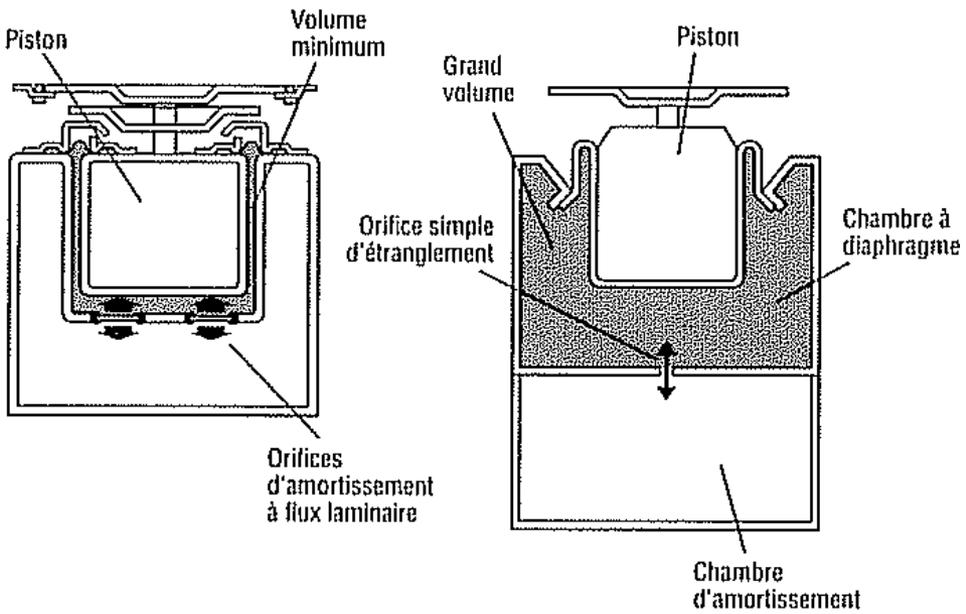
- Piston reposant sur un diaphragme
- Deux chambres séparées par orifice

*Le volume d'air total emprisonné fourni la raideu.
La caractéristique des orifices de transfert fournissent l'amortissement.*

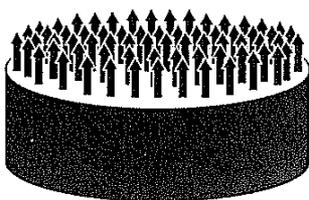
Deux types d'amortisseurs à air :

⇒ A orifice simple

⇒ A amortissement laminaire : orifices multiples, éventuellement sur membrane souple.



Laminaire



Flux laminaire passant par plusieurs orifices

Conventionnel

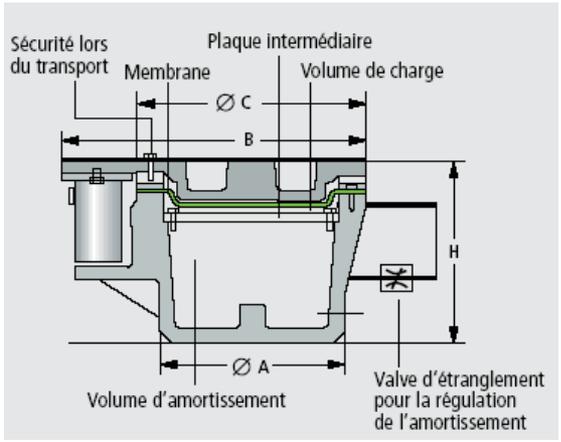


Construction classique

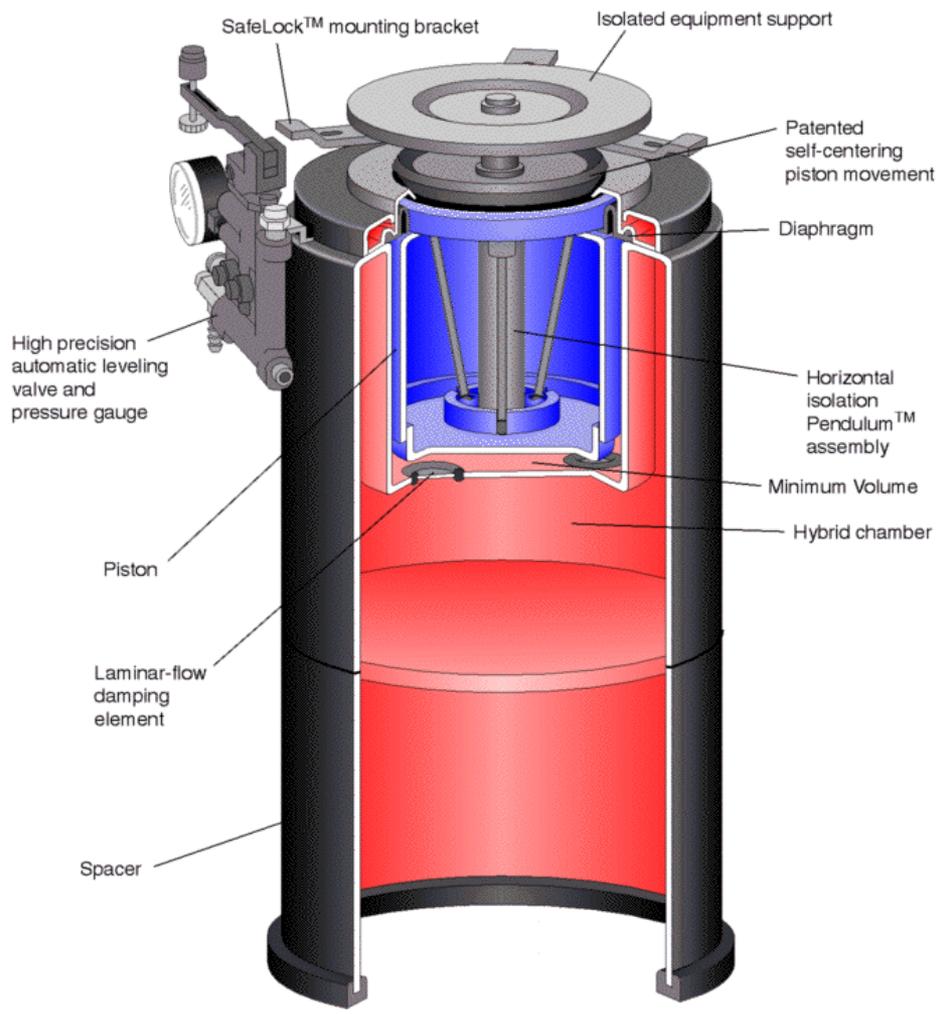
Lutte contre les vibrations (11)

Amortisseurs à air.

Ceux-ci sont asservis en altitude afin que la table reste horizontale lorsqu'on déplace des objets dessus.



Conventionnel (BiAir)



Laminaire (Microcontrôle)

Lutte contre les vibrations (12)

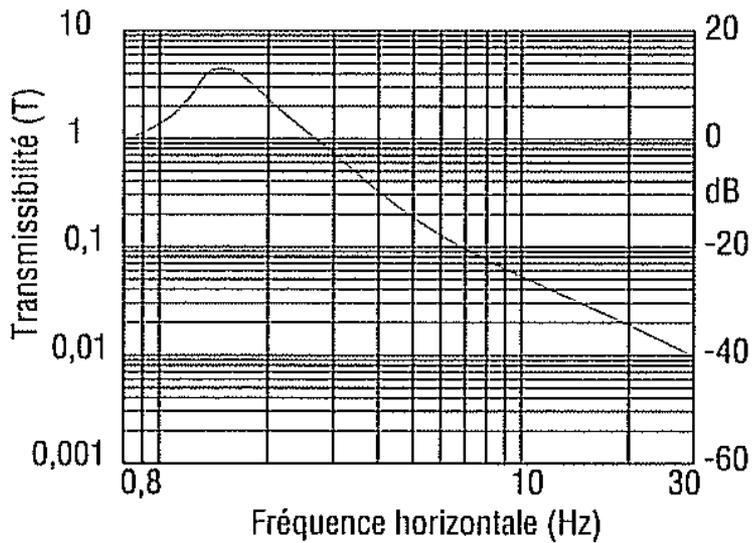
Amortisseurs à air.

Courbe typique de transmissibilité

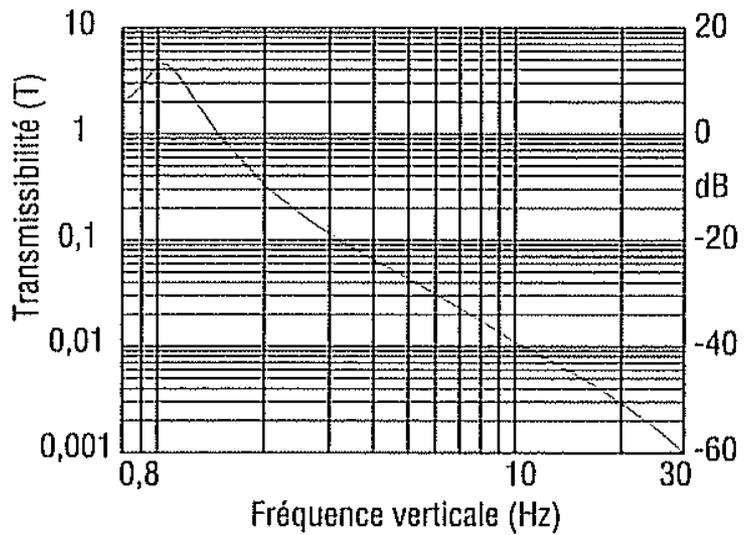
Avec augmentation de la fréquence, au delà de $1.4 f_n$: -40dB / décade

L 'isolation augmente d 'un facteur 100 pour augmentation de fréquence d 'un facteur 10

Horizontale



Verticale



Lutte contre les vibrations (13)

Calcul de mouvements relatifs entre deux points de la table :
Réponse de la table à une vibration aléatoire :

Accélération :

$$G_{RMS} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot f_n \cdot Q \cdot PSD}$$

Avec

G_{RMS} : réponse de la table en accélération

f_n : fréquence de résonance de la table

Q : facteur d'amplification de la table à la fréquence f_n

PSD : densité spectrale de puissance de l'excitation (g RMS)

Déplacement :

$$\delta = \frac{G_{RMS} \cdot g}{(2\pi \cdot f_n)^2}$$

Lutte contre les vibrations (14)

Par combinaison on déduit, pour un point de la table :

Déplacement :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{32 \cdot \pi^3} \cdot g} \cdot \sqrt{\frac{Q}{f_n^3}} \cdot \sqrt{PSD}$$

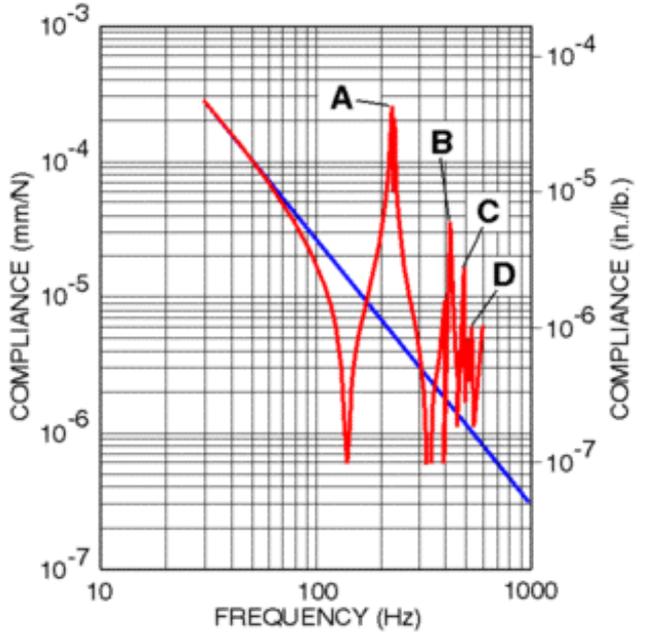
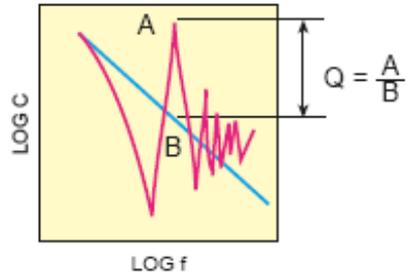
$\sqrt{\frac{Q}{f_n^3}}$ est le coefficient de déflexion dynamique de la table.

On reprend l'exemple de table précédent. On examine l'effet de vibration de la table aux points de résonance A et B

Elle est montée sur amortisseurs, et au dessus de 10 Hz, leur transmissibilité est $T < 0.01$.

Au point A : $f_n = 210$ Hz et $Q = 30$. Donc $\sqrt{\frac{Q}{f_n^3}} = 1.8 \cdot 10^{-3}$

Au point B : $f_n = 400$ Hz et $Q = 20$. Donc $\sqrt{\frac{Q}{f_n^3}} = 5.8 \cdot 10^{-4}$



Lutte contre les vibrations (15)

Le spectre de vibration est le suivant (mesuré au niveau du sol), avec le camion UPS qui vient livrer un miroir à contrôler (autre courbe : niveau normal)

On trouve un niveau moyen de $10^{-9} \text{ g}^2/\text{Hz}$. (Niveau classique dans les labos).

Déplacement relatif entre deux points :

$$\delta = 2.T \cdot \sqrt{\frac{1}{32.\pi^3}} \cdot g \cdot \sqrt{\frac{Q}{f_n^3}} \cdot \sqrt{PSD}$$

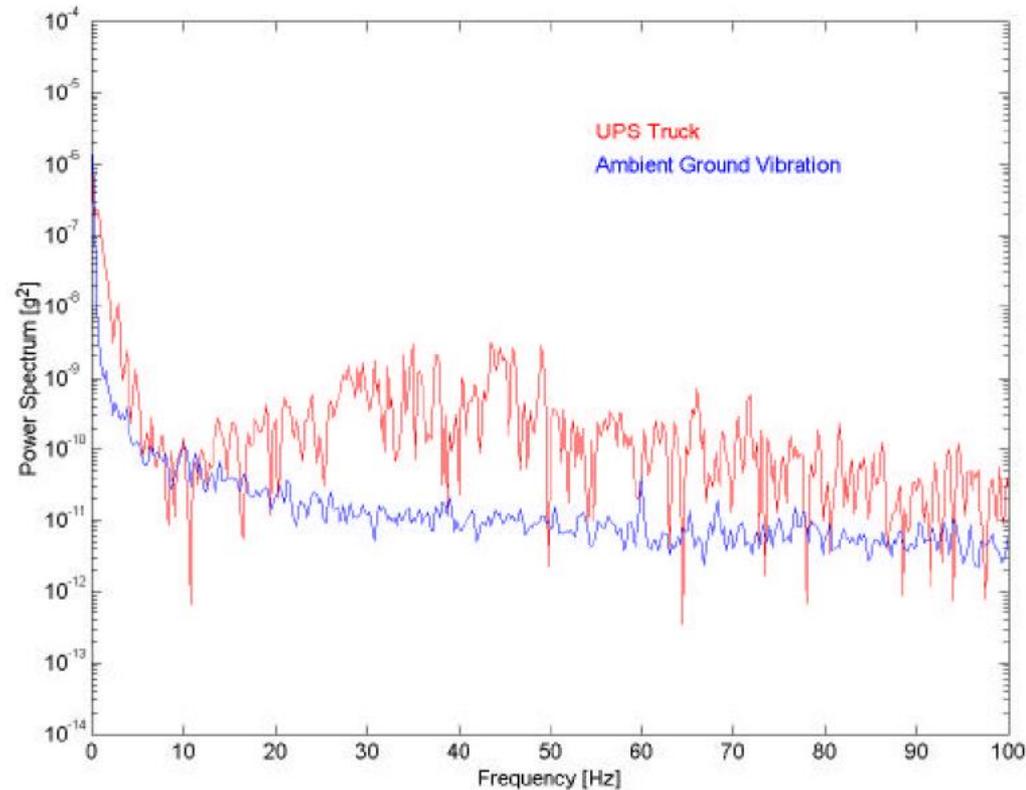
On trouve :

$\delta = 0.36 \text{ nm}$ en A 0.11 nm en B

L'isolation vibratoire est « propre », compatible d'une manip optique de précision.

Avec un amortisseur élastomère (T~0.1):

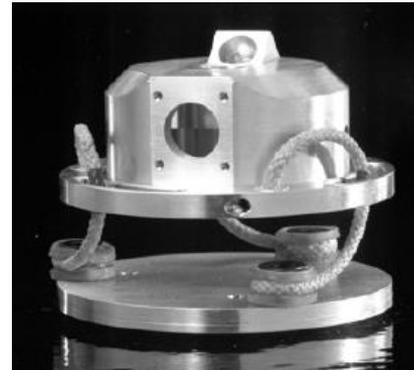
$\delta = 3.6 \text{ nm}$. Ca passe encore.

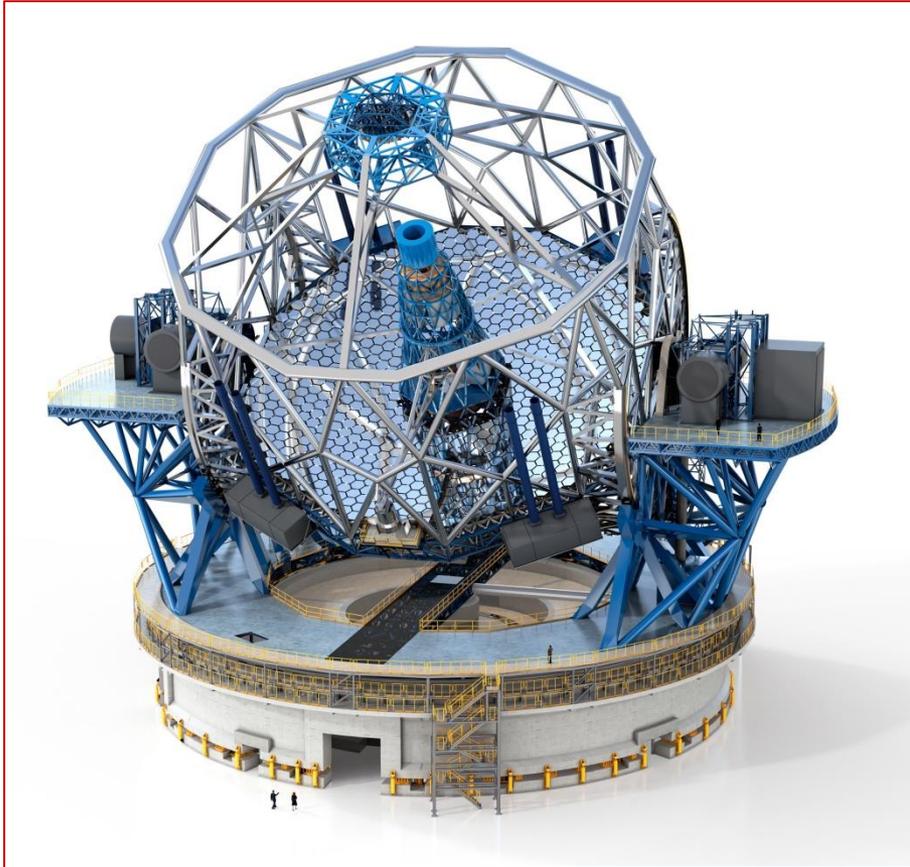


Lutte contre les vibrations (16)

Nombreuses autres technologies disponibles :

- **Structural** : obtenu par géométrie et matériaux
(*Rigidité spécifique E/ρ , $k=E.S/L$, $m=S.L.\rho$, ...*)
- **A ressort** (on ne joue que sur les fréquences)
(*Amortisseurs à lames des vieilles 2CV*)
- **A câbles = ressorts**
- **Frottement de Coulomb (sec)**
(*Dalles antisismiques : sables, graviers + dalle lourde et raide*)
- **Amortissement actif** : variation pilotée de raideur (longueur, par exemple)
- **Amortisseurs hydrauliques passifs** (Type automobile)
- ...





3.2 Thermique

Transfert de chaleur

Conduction

Propagation de la chaleur dans les corps solides par proximité moléculaire sans déplacement de matière.

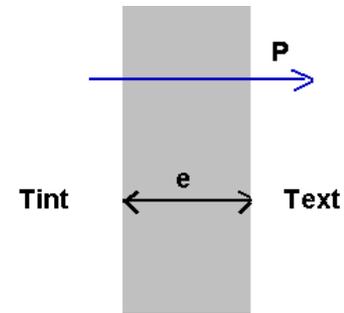
Flux transmis à travers une paroi :

k: conductivité thermique en W/m/K

e : épaisseur de paroi

S : surface d'échange

$$P = k \cdot \frac{S}{e} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$



Flux thermique dans une barre :

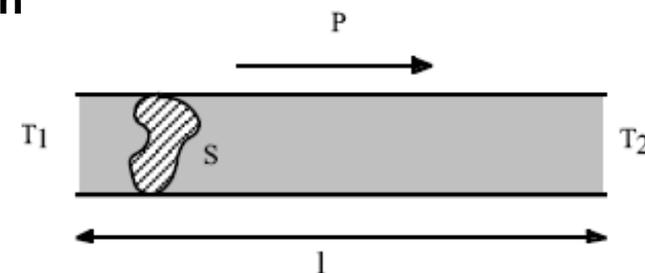
Hypothèse : écoulement de chaleur dans une seule direction

Distribution de température linéaire :

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{l} x$$

Puissance transférée par conduction :

$$P = k \cdot \frac{S}{l} (T_1 - T_2)$$



Transfert de chaleur

Convection

Propagation de chaleur dans les fluides par proximité moléculaire, avec déplacement de matière, qui peut être naturel ou forcé (pompe ou ventilateur).

Les mouvements de convection sont essentiels à la transmission de chaleur d'un solide au liquide.

Puissance transférée (W):

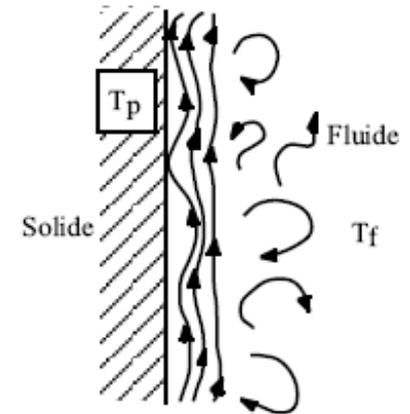
h : coefficient d'échange

T_p : température de paroi solide

T_f : température du fluide

S : surface d'échange

$$P = h \cdot S \cdot (T_p - T_f)$$



Convection libre (naturelle) : mouvements de fluide dus aux variations de masse volumique

Convection forcée : mouvements imposés par moyen extérieur (pompe, ventilateur)

h (W/m²/K) très dépendant de la géométrie, propriétés du fluide, etc...

Transfert de chaleur

Rayonnement

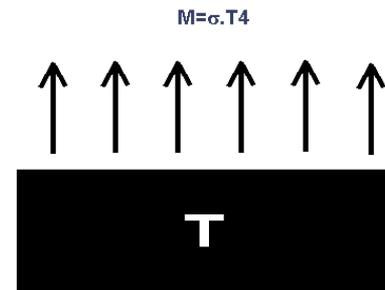
Propagation de la chaleur dans une ambiance transparente (vide, air, gaz) par émission d'ondes électromagnétiques.

Une partie du rayonnement est visible (soleil, éclairage), et une autre partie est invisible (infrarouge) et à une importance capitale en chauffage / refroidissement.

Corps noir = corps de référence

Emittance M = puissance émise par unité de surface sur tout le domaine de longueur d'onde (0 à ∞) dans demi-espace supérieur

$$M = \sigma.T^4$$

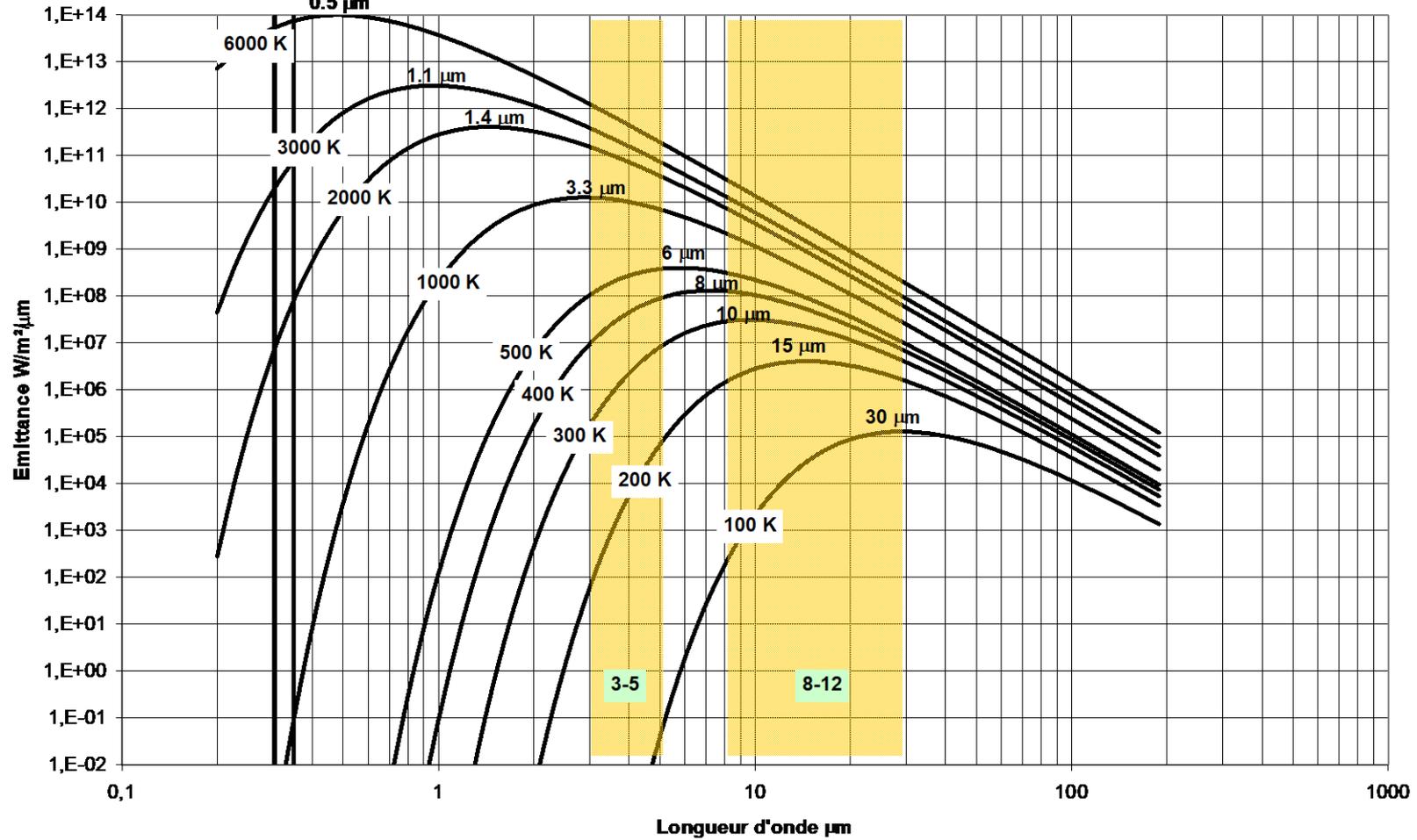


T : température absolue (en K)

σ : constante de Stefan = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

Transfert de chaleur

Rayonnement de corps noir (loi de Planck)



Transfert de chaleur

Rayonnement de corps noir (loi de Planck)

Plus le corps est chaud : plus le maximum d'émission vers les courtes longueurs d'onde.

Loi de Wien : $\lambda_{max} = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot K$

Soleil (6000 K) : 0.5 micron (sensibilité max de l'œil).

Corps à température ambiante (300 K) : 10 microns

Corps à température de l'azote liquide (77 K) : 38microns.

⇒ Dans la bande 3-5 microns : imagerie pour $T \sim 750 \text{ K}$
(Bonne sensibilité pour température élevée : tuyère réacteur par exemple)

⇒ Dans la bande 8-12 microns : imagerie pour $T \sim 300 \text{ K}$
(Bonne sensibilité pour les objets à température ambiante)

Transfert de chaleur

Rayonnement (suite)

Corps réel = comparé à un corps noir (corps gris si émissivité = constante (λ))

Propriétés déduite du corps noir par simple multiplication par l'émissivité ε .

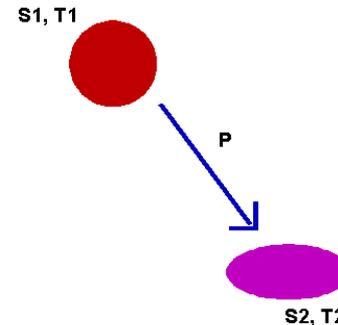
L'émissivité est un nombre < 1

(Corps peint en blanc : $\varepsilon \sim 0.25$)

Flux échangé :

$$P = S_1 \cdot F_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$F_{1,2}$ facteur de forme, sans dimension, fonction de la géométrie et de l'émissivité des deux corps



Pour un corps placé dans une enceinte de grande dimension par rapport au corps :

$$P = S_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Transfert de chaleur

Emissivité de quelques matériaux

Forte dépendance avec l'état de surface et l'incidence (ici normale)

Matériau	Température (°C)	Emissivité (normale)
Alu poli	0	0,03
Alu poli	100	0,05
Alu anodisé	100	0,55
Or poli	100	0,02
Fer poli	40	0,21
Fer oxydé	100	0,64
Acier poli	100	0,07
Acier oxydé	100	0,79
Graphite	20	0,95
Papier blanc	20	0,93
Bois	20	0,90
Verre poli	20	0,94
Peau humaine	32	0,98
Eau	1	0,92
Neige	0	0,80

Effets d'une variation de température homogène

Variation de courbure :

$$\frac{dR}{dT} = \alpha.R \quad \frac{dC}{dT} = -\alpha.C$$

Variation d'épaisseur :

$$\frac{de}{dT} = \alpha.e$$

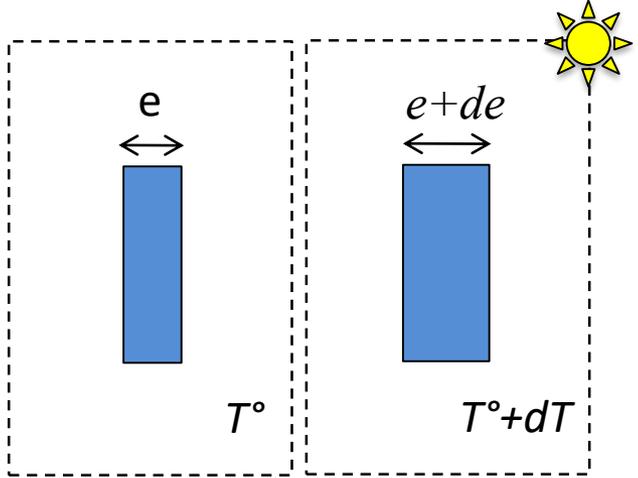
Variation d'indice :

$$\beta = \frac{dn}{dT}$$

Sous l'effet d'une variation de température homogène dT un matériau subit une dilatation/contraction linéique de , tel que,

$$de = \alpha \times e \times dT$$

α est appelé **coefficient de dilatation thermique (K^{-1})**. Il dépend également de la température. Cela entraîne une variation relative des épaisseurs, diamètres, rayons de courbure et focales dans les systèmes optiques.

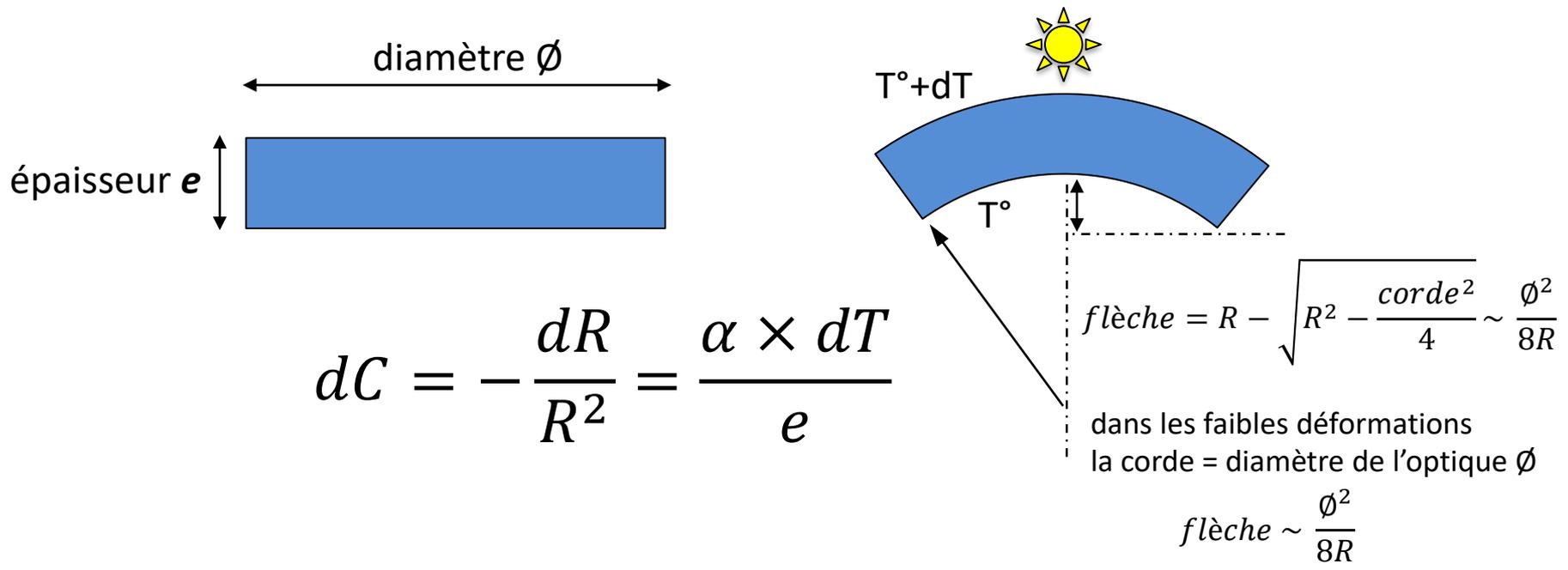


matériau	Zerodur	Silice	SiC	BK7	F2
α (K^{-1})	$\pm 2.10^{-8}$	$0,55.10^{-6}$	4.10^{-6}	$7,1.10^{-6}$	$8,2.10^{-6}$

zérodur = Silice + quartz

SiC (carbure de silicium) : très rigide (permet de fabriquer des miroirs très minces donc légers)

Sous l'effet d'un gradient de température dT un matériau subit un stress thermique qui engendre une déformation (courbure), telle que,

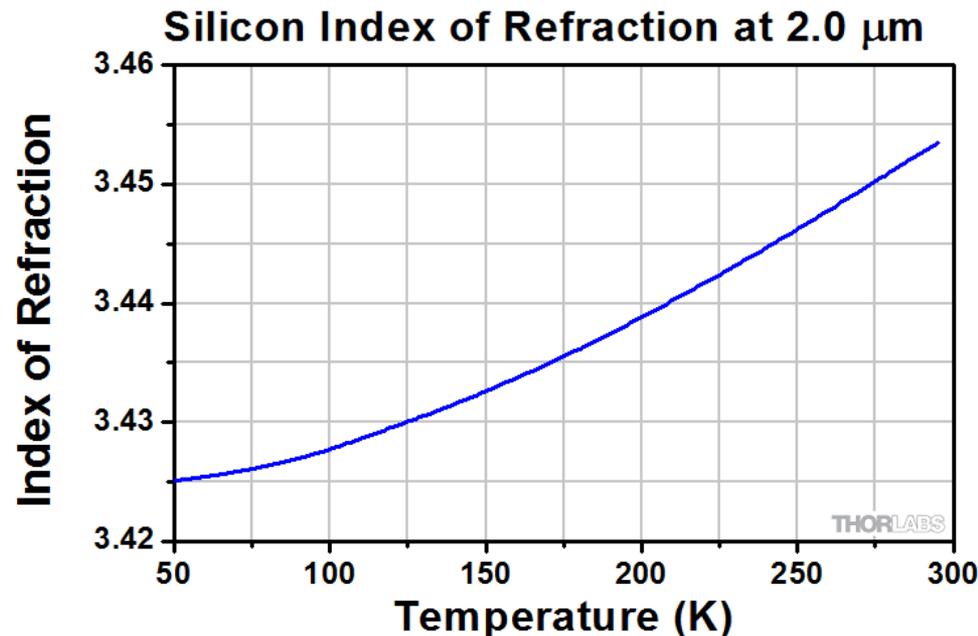


Du point de vue des rayons qui sont incidents, l'effet est plus violent en réflexion qu'en transmission.

Sous l'effet d'une variation de température homogène dT un matériau subit également une variation de son indice de réfraction, tel que,

$$n(T) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} dT = n_0 + \beta dT$$

β est appelé **coefficient thermo-optique**.



Dans une lentille d'épaisseur e et d'indice n , l'effet de dilatation thermique et l'effet thermo-optique se combinent et engendrent une variation du front d'onde transmis, ce qui se traduit au 1^{er} ordre par une défocalisation.

La variation de l'écart normal s'écrit,

$$\Delta = (n - 1)e$$

$$\rightarrow d\Delta = (n - 1)de + edn$$

$$\rightarrow d\Delta = (n - 1)\alpha edT + e\beta dT = e(n - 1) \left[\alpha + \frac{\beta}{n - 1} \right] dT = WFE_{defocus}$$

$$\rightarrow \frac{d\Delta}{\Delta dT} = \alpha + \frac{\beta}{n - 1}$$

La variation relative du front d'onde traduit le déplacement de l'image

$$\frac{1}{\Delta} \frac{d\Delta}{dT} = \frac{-1}{f'} \frac{df'}{dT} = \alpha + \frac{\beta}{n-1}$$

à 546 nm sauf Ge	N-BK7	N-F2	Silice	PK51	Ge à 10 μ m
$\alpha \times 10^{-6}$	7,1	8,2	0,55	12,4	
$\beta \times 10^{-6}$	3	4,4	12,8	-6,7	~ 400
$\left[\alpha + \frac{\beta}{n-1} \right] \times 10^{-6}$	13	15	24	-0,2 à +0,4	140 à 170
K W/m/K	1,1	0,78	1,38	0,65	60 à 70

K = Conductibilité thermique (lié à la vitesse de propagation de la chaleur)

Remarque

Le germanium, utilisé dans les systèmes optiques infrarouge, présente une variation relative très importante et nécessite donc une thermalisation des optiques ou un système de mise au point automatique.

Transfert de chaleur

Exemple : Miroir de télescope spatial, observation du soleil.

Modèle = plaque circulaire d'épaisseur e , de rayon de courbure C , couplée à un corps de température T_0 (corps du télescope), absorbe un flux Q (Soleil : 700 W/m^2).

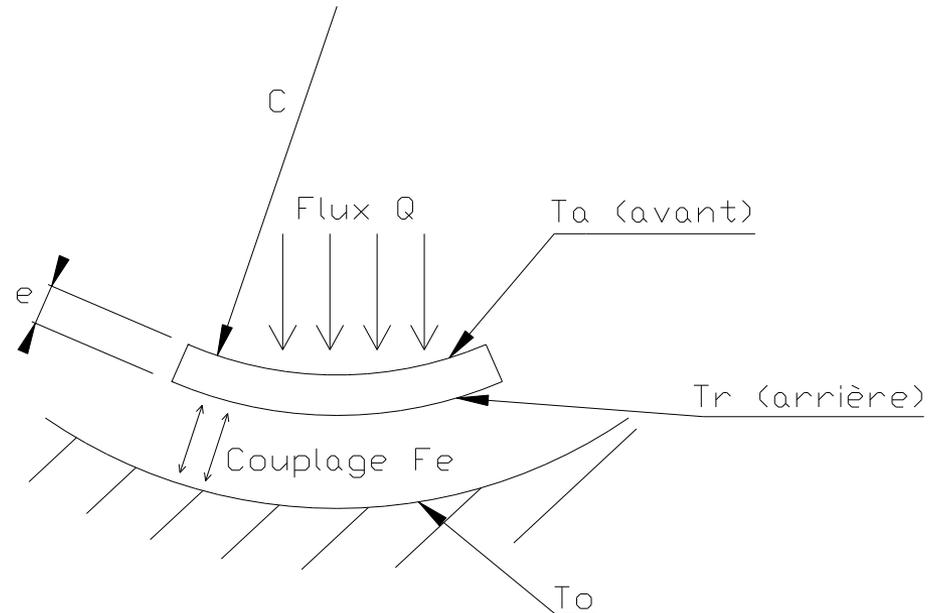
La plaque atteint après un certain temps un équilibre thermique. La distribution de température est supposée linéaire suivant l'épaisseur de la plaque, elle est décrite par un terme d'élévation uniforme en température ΔT_u , et un gradient linéaire ΔT_g suivant l'épaisseur de la plaque.

Après mise en équation :

$$T_a = T_0 + Q \left(\frac{e}{K} + \frac{1}{4\sigma T_0^3 F_\varepsilon} \right)$$

$$T_r = T_0 + Q \left(\frac{1}{4\sigma T_0^3 F_\varepsilon} \right)$$

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_0} - 1}$$



Transfert de chaleur

Exemple (suite)

Les déformations induites sont :

Pour l'élévation de température uniforme :
(R rayon de courbure du miroir et D diamètre)

$$y = -\frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2R} \cdot \alpha \cdot Q \left(\frac{e}{2k} + \frac{1}{4\sigma T_0^3 F_\varepsilon} \right)$$

Pour le gradient d'épaisseur :

$$y = \frac{(D/2)^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{k} \cdot Q$$

Exercice : retrouver ces formules

Transfert de chaleur

Exemple (suite)

Application pour miroir 400 mm, épaisseur 50 mm, rayon de courbure 2 m.

T0 = 20°C (293 K) - Structure alu anodisé - Emissivité ~0,55

Matériau Borosilicate / Aluminium

T0	293		
Q (W/m²)	700		
e (m)	0,05		
R (m)	2		
D (m)	0,4		
Borosilicate	Aluminium		
α (/K)	3,30E-06 α (/K)	2,30E-05	
k (W/m/K)	1,2	k (W/m/K)	130
Cp (J/kg/K)	800	Cp (J/kg/K)	920
σ	5,67E-08	σ	5,67E-08
Emissivité face arrière	0,94	Emissivité face arrière	0,55
Emissivité structure	0,55	Emissivité structure	0,55
F ϵ	0,53	F ϵ	0,38

Borosilicate			
Ta (°C)	Tr (°C)	y unif (µm)	y gradient (µm)
280,1	250,9	0,01	38,50
Qconductif	700,8 W/m²	Qradiatif	91,27 W/m²
Aluminium			
Ta (°C)	Tr (°C)	y unif (µm)	y gradient (µm)
343,8	343,5	0,11	2,48
Qconductif	7,2 W/m²	Qradiatif	109,48 W/m²

**Le refroidissement par rayonnement n'est absolument pas efficace pour du verre !
Surtout en spatial ! Toujours installer de la conduction pour permettre de rapides équilibres thermiques.**

**Sur terre, la chance est avec nous, la convection aide aux transferts de chaleur.
Les verres sont des « briques » qui ne veulent pas s'équilibrer, mais ils sont « transparents » et ont une bonne émissivité (état poli)!**

Effets d'une variation de température homogène

Variation de tirage :

$$\frac{df'}{dT} = -\varphi \left(\alpha + \frac{\beta}{n-1} \right) = -\varphi \cdot \gamma$$

Avec $\phi=1/f'$, puissance du système.

Dans la pratique, il faut tenir compte de la dilatation du matériau constituant le corps de l'appareil ou de l'entretoise de longueur $e = F$ reliant la lentille au détecteur :

$$\frac{df'}{dT} = -\varphi(\gamma + \alpha_{mat})$$

Conditions d'athermalisation : $\alpha + \frac{\beta}{n-1} + \alpha_{mat} = 0$

Pour un doublet et un objet à l'infini, on peut chercher la condition pour qu'il soit achromatique et athermal, en association avec une entretoise de longueur $e = F$.

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2$$

Puissance

$$0 = \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2}$$

Achromatisme

$$0 = \varphi_1 \cdot \gamma_1 + \varphi_2 \cdot \gamma_2 + \Phi \cdot \alpha_{mat}$$

Athermalisation

Troisième équation compatible avec les 2 autres si $\frac{\nu_1 \cdot \gamma_1 - \nu_2 \cdot \gamma_2}{\nu_1 - \nu_2} = -\alpha_{mat}$

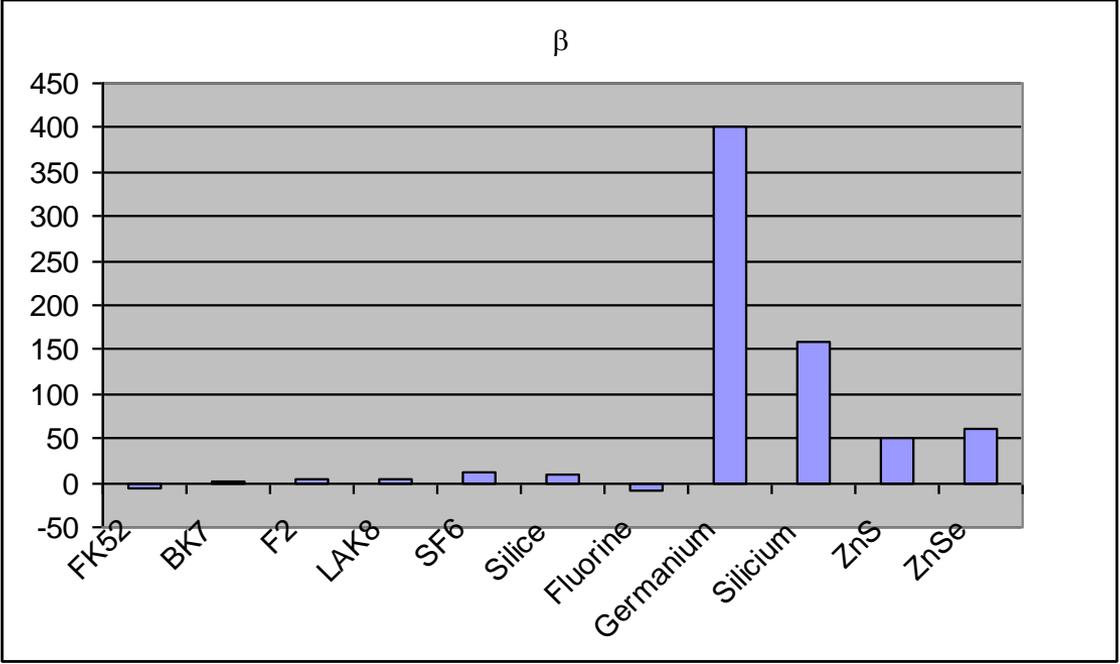
Effets d'une variation de température homogène

Variation d'indice avec la température de quelques matériaux optiques

β , dn/dT

**Les matériaux IR présentent de très fortes sensibilités d'indice avec la température !
Athermalisation très difficile.**

Verre	n_d	β	γ
		$\times 10^6$	$\times 10^6$
FK52	1,48605	-6,5	-27,8
BK7	1,5168	2,8	-1,7
F2	1,62004	4,3	-1,3
LAK8	1,713	4,9	1,3
SF6	1,80518	11,1	5,7
Silice	1,45857	10,5	22,4
Fluorine	1,43388	-9	-44,7
Germanium	4	400	127,2
Silicium	3,4	160	64,4
ZnS	2,1914	50	35,1
ZnSe	2,4025	60	35,1



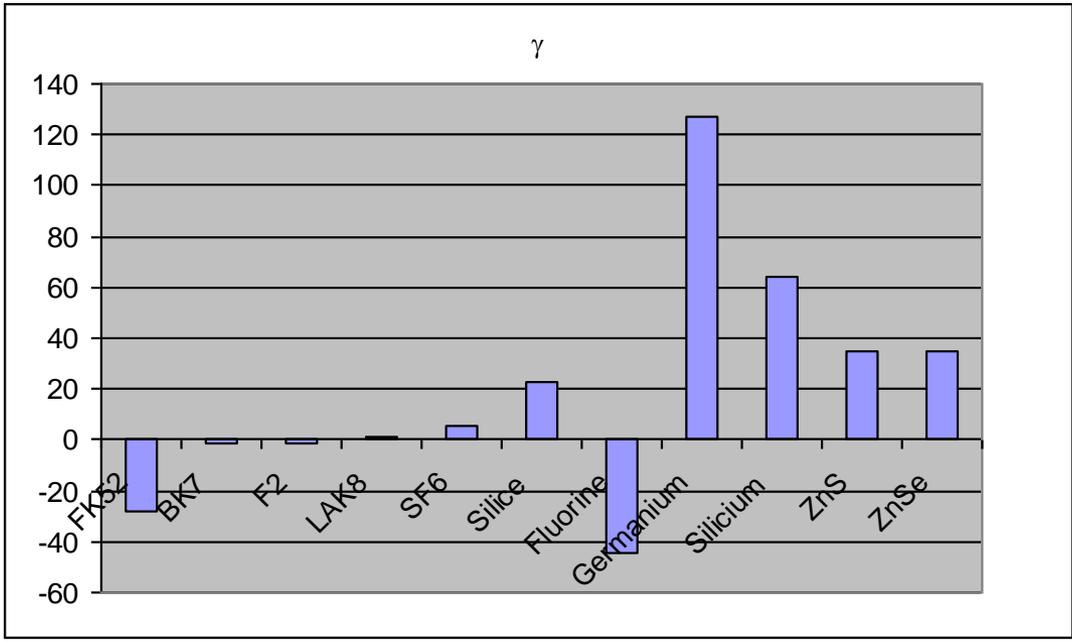
Effets d'une variation de température homogène

Coefficient Thermique Homogène γ , (défocalisation avec température)

Les matériaux IR présentent de très forte sensibilités à la défocalisation avec la température !

Certains matériaux utilisés dans le visible ou l'UV sont eux aussi très sensibles : silice et fluorine.

Verre	n_d	β	γ
		$\times 10^6$	$\times 10^6$
FK52	1,48605	-6,5	-27,8
BK7	1,5168	2,8	-1,7
F2	1,62004	4,3	-1,3
LAK8	1,713	4,9	1,3
SF6	1,80518	11,1	5,7
Silice	1,45857	10,5	22,4
Fluorine	1,43388	-9	-44,7
Germanium	4	400	127,2
Silicium	3,4	160	64,4
ZnS	2,1914	50	35,1
ZnSe	2,4025	60	35,1

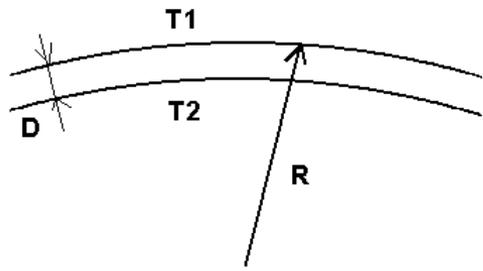


Gradients

Tube avec gradient thermique transverse (T2-T1)

Le tube prend de la courbure, avec :

$$R = \frac{D}{\alpha \cdot (T_2 - T_1)}$$



Exemple : tube de collimateur en aluminium, diamètre 120 mm. Deux lentilles séparées de 500 mm.

α		Gradient (°C)	R (mm)	Tilt (mrad)	Décentrement (µm)
D	120	0	-	0	0
L	500	0,1	50000000	0,01	2,5
		0,2	25000000	0,02	5,0
		0,3	16666667	0,03	7,5
		0,4	12500000	0,04	10,0
		0,5	10000000	0,05	12,5
		0,6	8333333	0,06	15,0
		0,7	7142857	0,07	17,5
		0,8	6250000	0,08	20,0
		0,9	5555556	0,09	22,5
		1	5000000	0,1	25,0

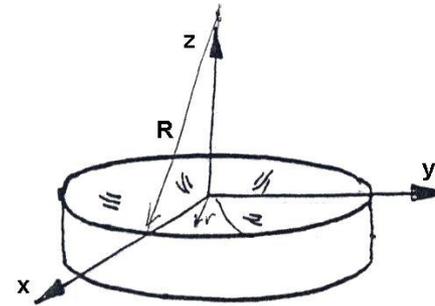
En général, quelques gradients acceptables avec ce type de structures

Gradients

Miroir concave (parabolique) avec distribution thermique linéaire de la forme :

$$T(x, y, z) = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot y + C_3 \cdot z$$

C_0, C_1, C_2, C_3 constantes



La déformation induite exprimée en aberrations est (hors tilt et piston):

$$w(r, \theta) =$$

$$\frac{\alpha \cdot C_3}{8 \cdot R^2} \cdot r^4 \quad [\text{Aberration sphérique}]$$

$$+ \frac{\alpha \cdot C_1}{2 \cdot R} \cdot r^3 \cdot \cos \theta + \frac{\alpha \cdot C_2}{2 \cdot R} \cdot r^3 \cdot \sin \theta \quad [\text{Coma}]$$

$$+ \left(\frac{\alpha \cdot C_3 \cdot z_0}{2 \cdot R} - \frac{\alpha \cdot C_3}{2} + \frac{\alpha \cdot C_0}{2 \cdot R} \right) \cdot r^2 \quad [\text{Focus}]$$

Avec :

r distance radiale sur la surface

θ position angulaire

α coefficient de dilatation thermique

R rayon de courbure

z_0 épaisseur au centre du miroir

Gradients

Exemple :
Miroir en aluminium diamètre 300 mm épaisseur 50

L 'effet d 'un gradient de 0.1 ° suivant l 'épaisseur produit 25 microns ptv de focus et 0.15 microns ptv d 'aberration sphérique (1/2 frange) !

Miroir en aluminium		r	θ	Focus	Coma	Ab. Sphérique
		mm	°	µm	µm	µm
Diamètre (mm)	300	150	0	-25,650	0,000	0,152
Ep. Au centre (mm)	50	150	30	-25,650	0,000	0,152
α	2,40E-05	150	60	-25,650	0,000	0,152
R	1000	150	90	-25,650	0,000	0,152
C0	0	150	120	-25,650	0,000	0,152
C1	0	150	150	-25,650	0,000	0,152
C2	0	150	180	-25,650	0,000	0,152
C3	0,1	150	210	-25,650	0,000	0,152
		150	240	-25,650	0,000	0,152
		150	270	-25,650	0,000	0,152
		150	300	-25,650	0,000	0,152
		150	330	-25,650	0,000	0,152
		150	360	-25,650	0,000	0,152
			PTV	-25,650	0,000	0,152

Gradients

Exemple :
Miroir en aluminium diamètre 300 mm épaisseur 50

L 'effet d 'un gradient de 0.1 ° suivant le diamètre 8 microns pTV de coma !

Miroir en aluminium		r	θ	Focus	Coma	Ab. Sphérique
		mm	°	µm	µm	µm
Diamètre (mm)	300	150	0	0,000	4,050	0,000
Ep. Au centre (mm)	50	150	30	0,000	3,507	0,000
α	2,40E-05	150	60	0,000	2,025	0,000
R	1000	150	90	0,000	0,000	0,000
C0	0	150	120	0,000	-2,025	0,000
C1	0,1	150	150	0,000	-3,507	0,000
C2	0	150	180	0,000	-4,050	0,000
C3	0	150	210	0,000	-3,507	0,000
		150	240	0,000	-2,025	0,000
		150	270	0,000	0,000	0,000
		150	300	0,000	2,025	0,000
		150	330	0,000	3,507	0,000
		150	360	0,000	4,050	0,000
			PTV	0,000	8,100	0,000

Gradients

Heureusement de tels gradients ne sont normalement pas présents : l'aluminium présente une bonne stabilité thermique α/K .

On voit cependant avec cet exemple que **les gradients thermiques sont à bannir de tout instrument.**

⇒ Pas de source de chaleurs / ou isolation par rapport aux sources

⇒ Des matériaux avec

- faible CTE,
- forte conductibilité thermique
- forte chaleur massique

Gradients

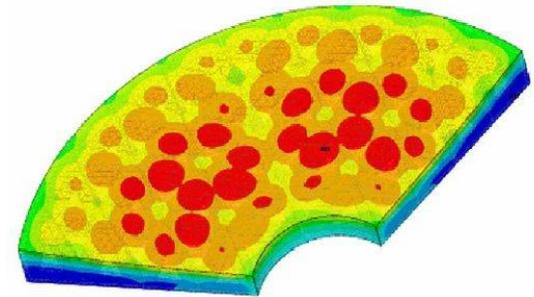
Exemple : Miroir primaire LBT

Miroir parabolique $\phi 8.4$ m en borosilicate E6

Rayon de courbure : $R = 19.2$ m

Coefficient de dilatation thermique $\alpha = 6.5 \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Epaisseur au centre $e = 437$ mm



Hypothèse : gradients de 0.1°C suivants l'épaisseur ($e \sim 450$ mm pour simplifier):

- Erreur locale de surface : $ptv \sim 450 \times 0.1 \times 6.5 \cdot 10^{-6} = 2.9 \cdot 10^{-4}$ mm
- On suppose une distribution à plusieurs cycles suivant le diamètre, soit $PTV/RMS \sim 5$.
- Erreur mécanique RMS, approximation : $RMS \sim 2.9 \cdot 10^{-4} / 5 = 5.8 \cdot 10^{-5}$ mm
- Erreur de surface d'onde (2 x déformée mécanique) : $RMS WFE \sim 1.2 \cdot 10^{-4}$ mm
- Soit ~ 116 nm RMS WFE
- **Dans le visible, à $\lambda=550$ nm, $RMS WFE \sim \lambda / 4.7$**
- **On est à un facteur 3 d'une condition de limite par la diffraction ($\sim \lambda/14$ RMS WFE)!**

\Rightarrow Si possible, choix de matériaux à très faible coefficient de dilatation (ZERODUR, ULE : CTE $\sim 5 \cdot 10^{-8} / \text{K}$ - VLT, GEMINI, SUBARU)

\Rightarrow Sinon (LBT, MMT, MAGELLAN) : contrôle thermique obligatoire + contrôle actif de forme à une fréquence temporelle comparable aux variations thermiques

Gradients

Exemple : VLT

Télescope classe 8 m à F/1.7.

Variations de température dans la structure
(H = 14 m, ϕ 9 m).

Matière : aluminium ($\alpha = 24 \cdot 10^{-6} / \text{K}$)

Hypothèse :

- Variation de 5°C durant 3 h
- Gradients dans la structure : 0.2 °C

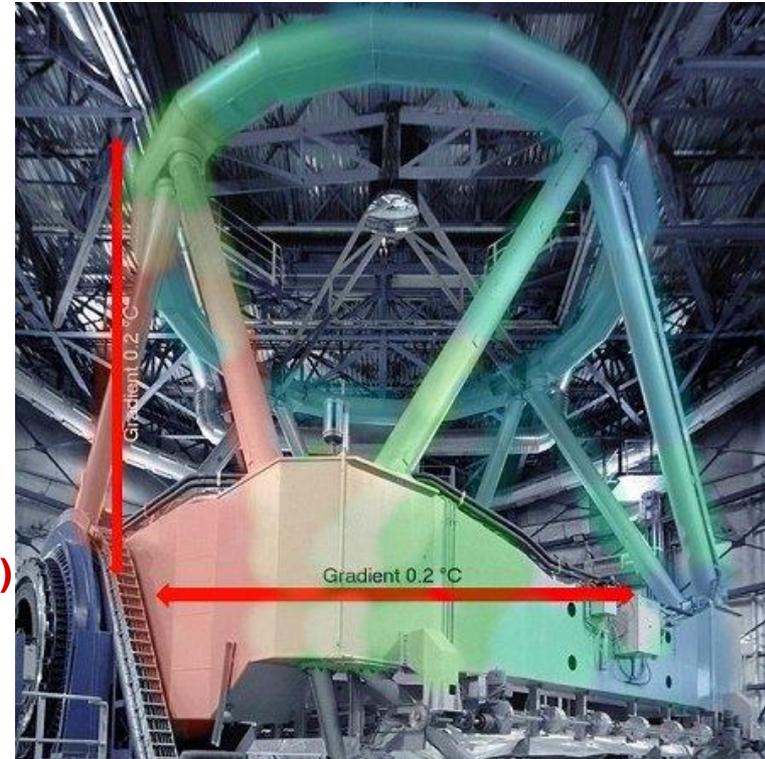
Calculs :

Δ distance M1/M2 : $5 \times 24 \cdot 10^{-6} \times 14000 = 1.7 \text{ mm}$

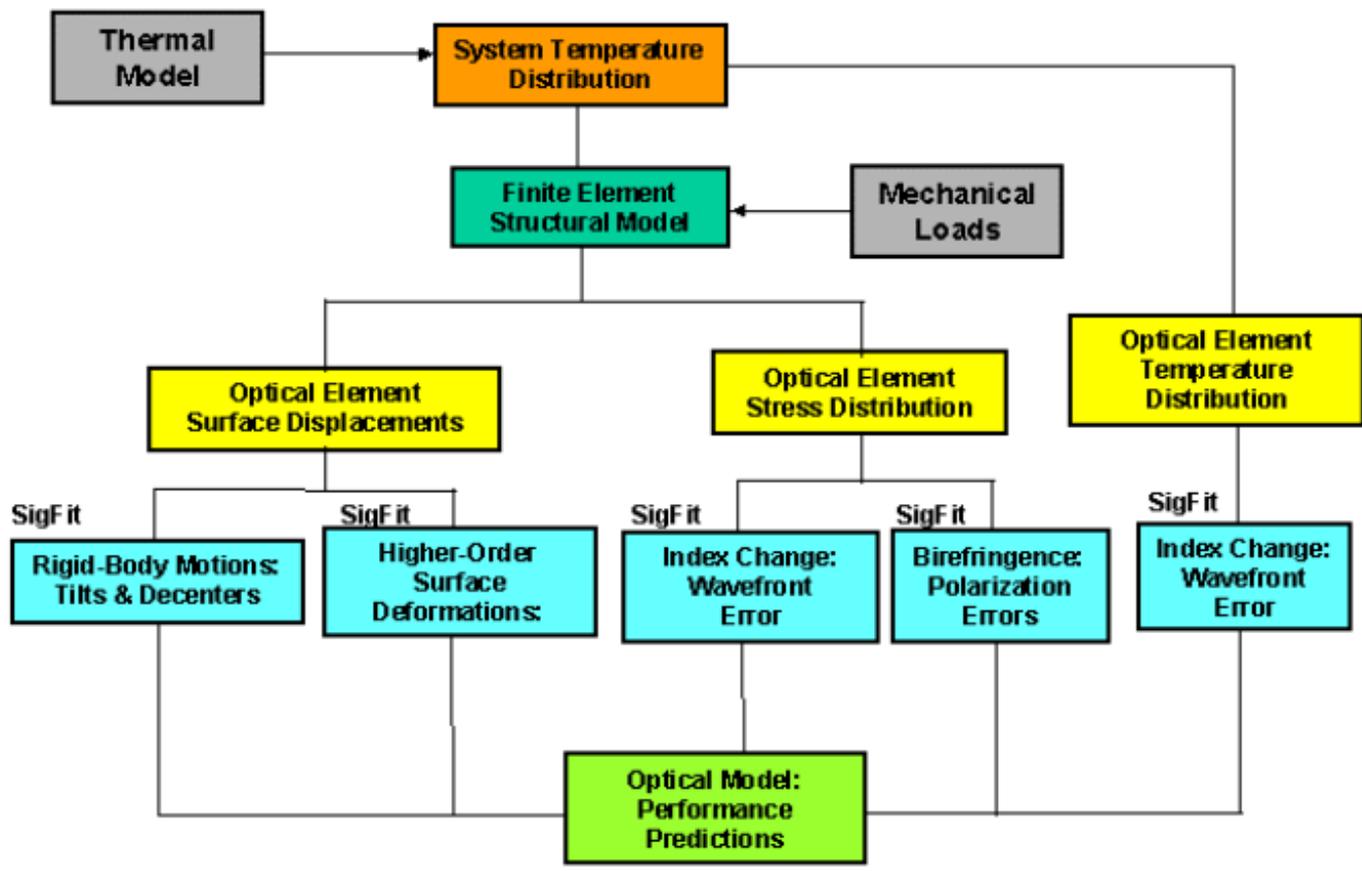
Δ tilt M1/M2 : $0.2 \times 24 \cdot 10^{-6} \times 14000/9000 = 7.5 \text{ } \mu\text{rad}$ (1.5 arcsec)

Δ décentrement M1/M2 : $0.1 \times 24 \cdot 10^{-6} \times 9000 = 0.02 \text{ mm}$

⇒ Le télescope est défocalisé et désaligné



Méthode type d'étude des influences thermiques (ANSYS)

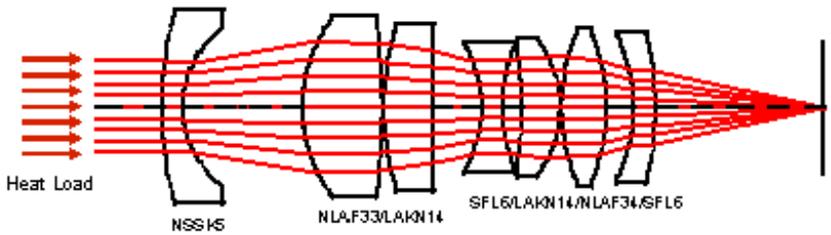


Analysis Flow

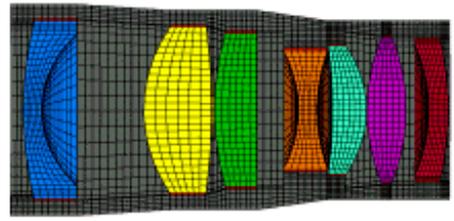
Gradients

Exemple : calcul par éléments finis objectif laser (ANSYS)

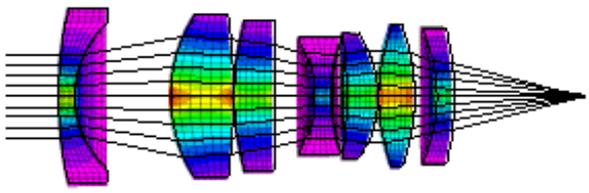
A lens system subjected to a laser beam absorbs heat which causes thermo-elastic distortion, thermo-optic OPD effects and stress-optic OPD effects (see Figure - **Lens system**). The SigFit files were passed to CODE V for system optical analysis. The contribution of each effect is shown as CODE V output (see Figure - **System Wavefront**).



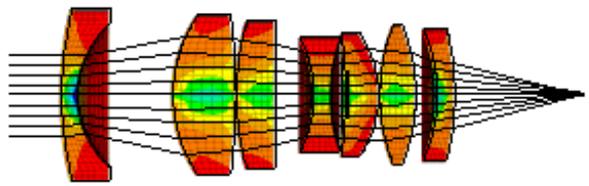
Optical Model



FEA Model



Temperature Field



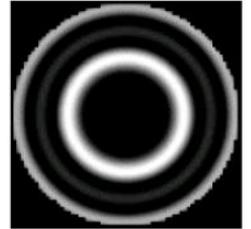
Stress Field

Thermo-Elastic Interferogram Map



rms = 1.7
p-v = 7.6

Stress-Induced Interferogram Map



rms = 0.4
p-v = 1.2

Thermo-Optic Interferogram Map



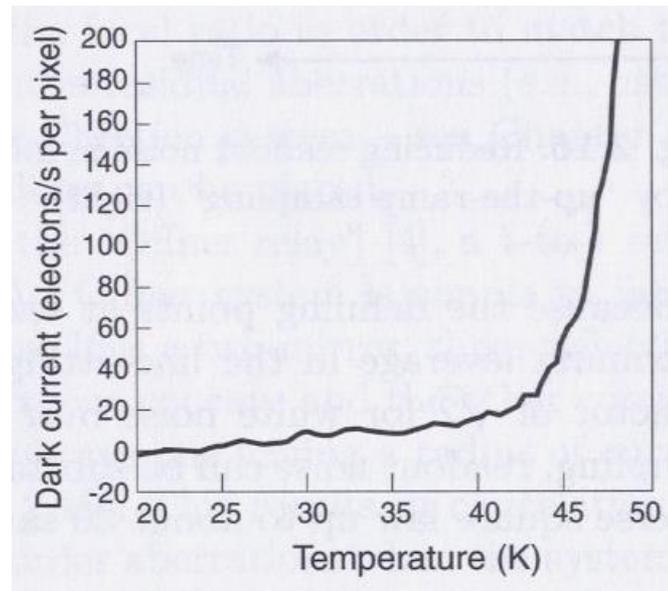
rms = 1.9
p-v = 8.5

Thermique - Autres effets

La température à une influence notable sur les détecteurs CCD, notamment pour la voie IR (accroissement du courant de noir ou « DARK Current »).

Exemple - Détecteur InSb (utilisation jusqu 'à 5 microns).

Ce type de détecteur doit être refroidi à température cryogénique pour maximiser le ratio signal / bruit



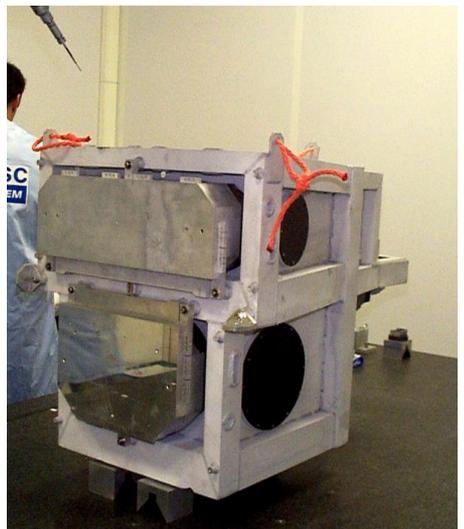
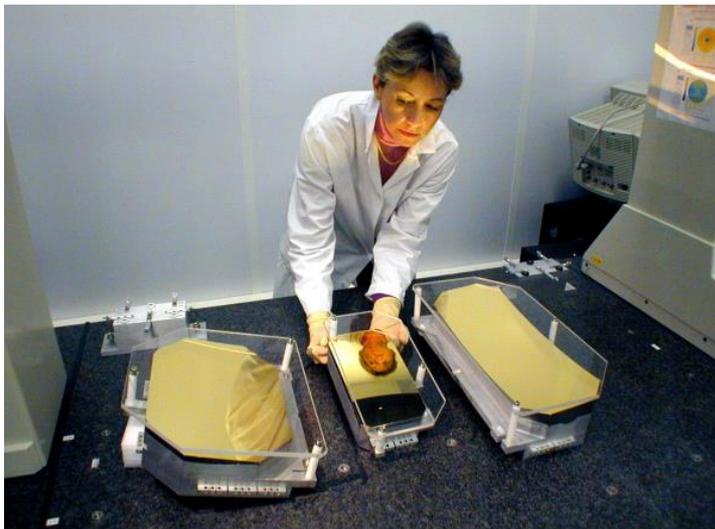
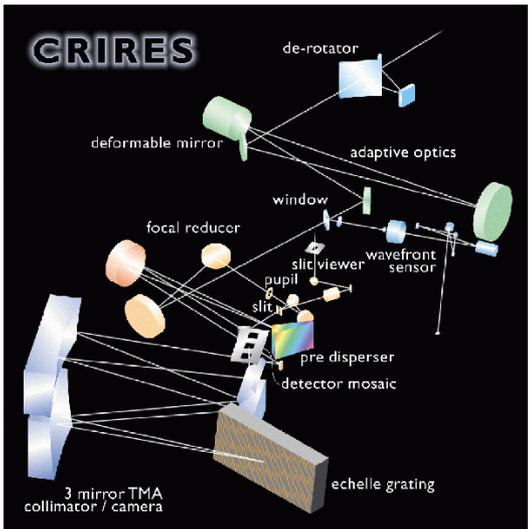
Thermique - Athermalisation

Un première technique évidente d'athermalisation

**Utiliser le même matériau pour tous les éléments composant le système.
Quelques fois possible pour des systèmes à miroirs.**

Cette technique est particulièrement recherchée pour les instruments cryogéniques.

Exemple : CRIRES [SAGEM-REOSC / ESO] - Spectro IR cryogénique avec miroirs et structure tout aluminium(Miroirs avec Ni et traitement Or)



Thermique - Athermalisation

Pour les structures (corps d'objectif, monture de télescope, ...) on peut utiliser des matériaux à très faible coefficient de dilatation comme l'Invar ou les composites à base de Carbone, mais cela conduit rapidement à d'importants problèmes de coût et de faisabilité.

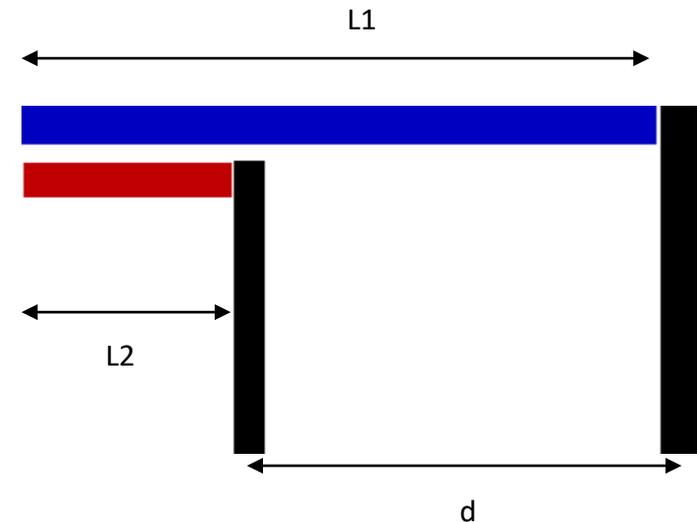
Des solutions « intelligentes » existent pour athermaliser les structures, en utilisant le mariage de plusieurs matériaux.

Quelques idées :

Distance entre composants, en fonction de T :

$$d(T) = L_1 - L_2 + L_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T - L_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T$$

$$\Delta d = (L_1 \cdot \alpha_1 - L_2 \cdot \alpha_2) \Delta T$$



Thermique - Athermalisation des structures

La condition d'athermalisation est donc :

$$L_1 \cdot \alpha_1 = L_2 \cdot \alpha_2 \quad \text{ou} \quad \frac{L_1}{L_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

On a évidemment intérêt à un CTE fort sur L2.

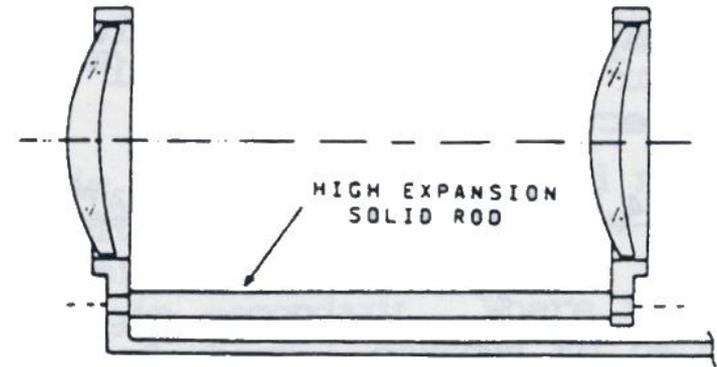
Exemple :
Mariage acier et aluminium.

L1 = 200 mm - Acier - $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}/K$

L2 = ? - Aluminium - $\alpha_2 = 24 \cdot 10^{-6}/K$

L2 = $24/12 \cdot 100 = 50$ mm.

Cette technique est combinée avec l'athermalisation des composants optiques.



Thermique - Athermalisation des structures

Autre possibilité :

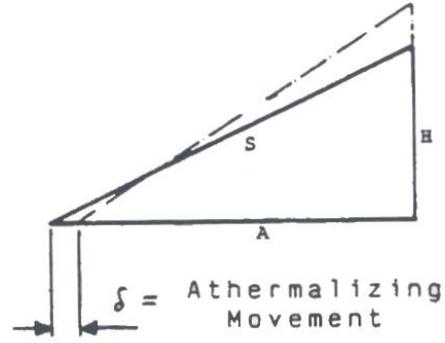
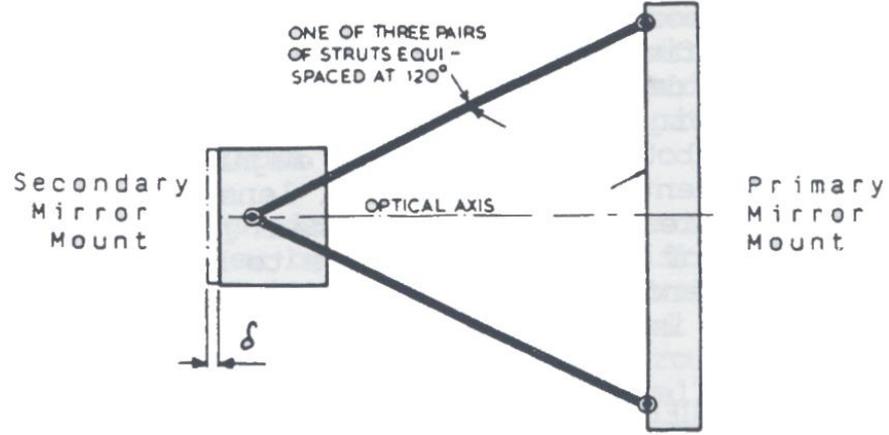
Compensation de dilatation longitudinale par une dilatation transversale.

Ici, pour la combinaison

- CTE barillet (le plus fort)
- CTE structure
- Angle de structure

Il existe une solution à défocalisation zéro.

Cette technique fonctionne bien avec un mariage acier / alu ou titane / alu.



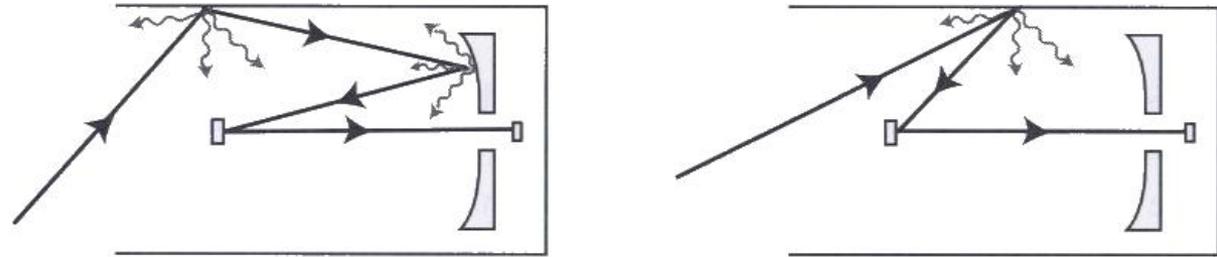
$$S_T = S \left(1 + \left(\frac{dl}{dt} \right)_S \Delta t \right)$$

$$H_T = H \left(1 + \left(\frac{dl}{dt} \right)_H \Delta t \right)$$

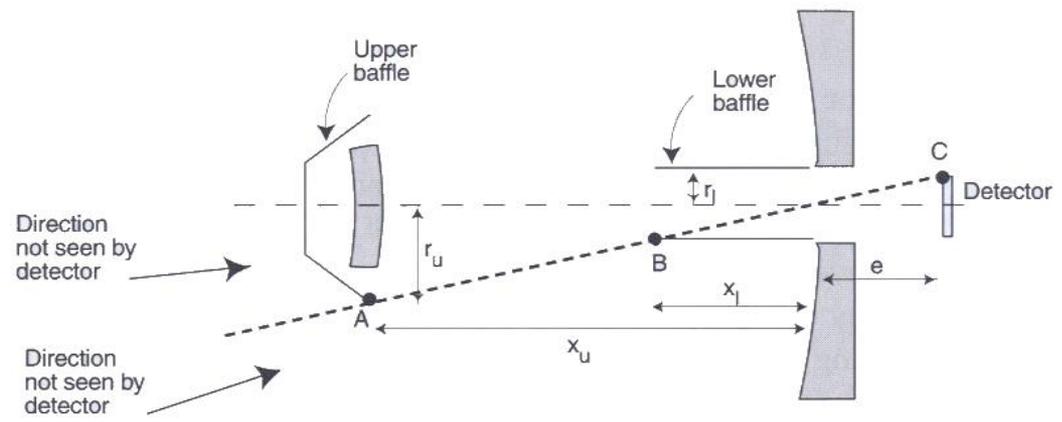
$$\delta = \sqrt{(S_T^2 - H_T^2)} - A$$

Thermique et lumière parasite

Pour les instruments optiques, des dispositifs sont nécessaires pour éviter à toute autre lumière que le signal intéressant d'atteindre le détecteur : le « baffling ».

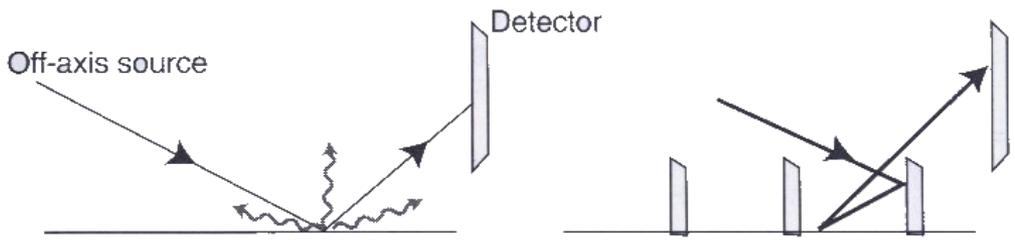


On dispose des baffles qui interceptent les rayons néfastes aux endroits judicieux.

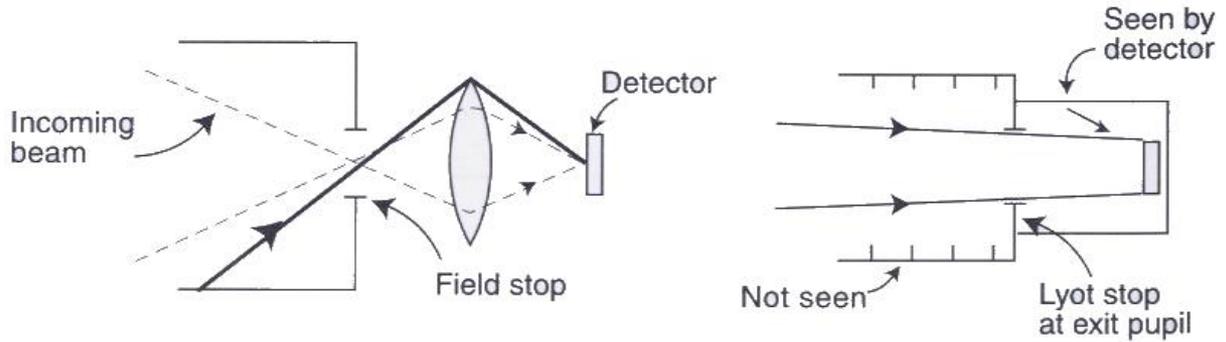


Thermique et lumière parasite

Pour améliorer l'atténuation, sur les tubes notamment, on dispose des baffles à réflexions multiples.



Un « field stop » limite le champ visible par le détecteur.



Thermique et lumière parasite

Problème : dans l'infrarouge, la lumière étudiée est un rayonnement thermique.
 Donc les baffles, en fonction de leur émissivité et de leur température peuvent être eux même des émetteurs !

Les éléments du système rayonnent/absorbent comme un (corps noir) x (émissivité).

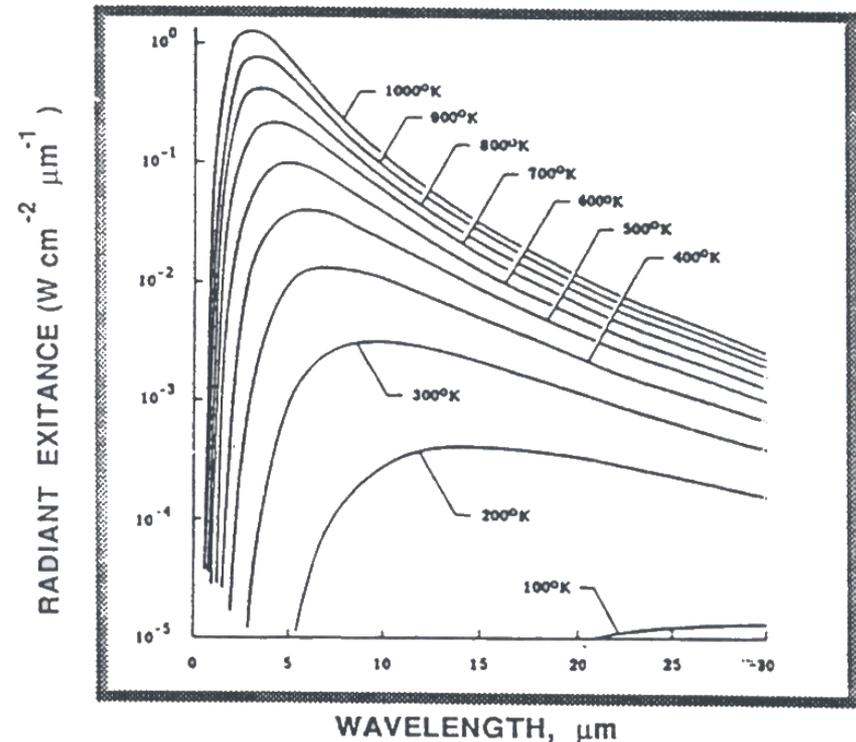
(On regarde du thermique, donc du plus chaud que l'instrument)

Conséquences :

⇒ **Abaisser les températures**

⇒ **Employer des matériaux à forte émissivité thermique.**

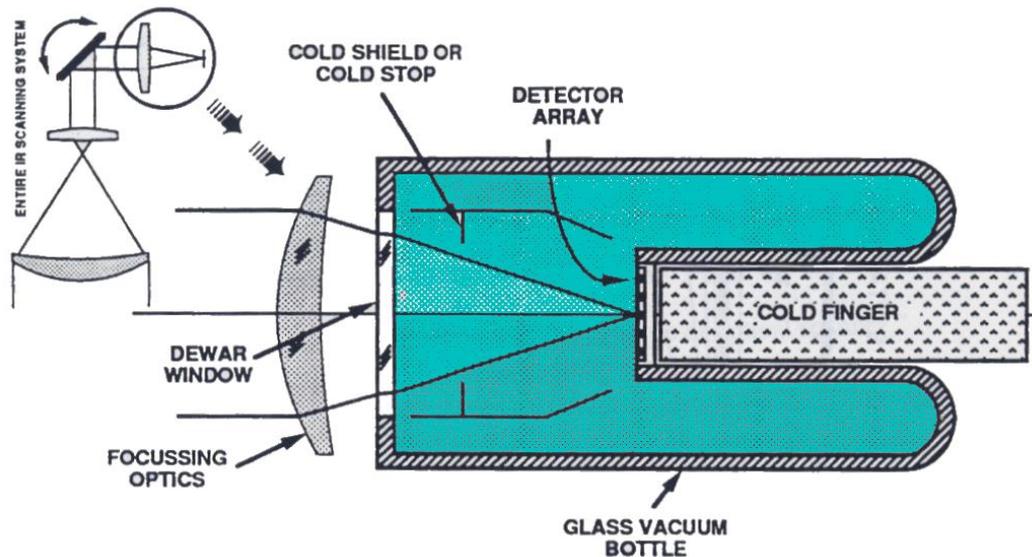
Blackbody curves as a function of temperature



Thermique et lumière parasite

Refroidissement :

- ⇒ Installation du détecteur dans un Dewar (un thermos)
- ⇒ Installation d'un « doigt froid » derrière le détecteur.
- ⇒ Le « field stop » devient « cold stop » par refroidissement.
(Si possible dans le Dewar)



- THE COLD FINGER WHICH MATES TO THE DETECTOR ARRAY IS CRYOGENICALLY COOLED WITH A GAS BOTTLE OR A CRYOENGINE

Thermique et lumière parasite

Emissivité :

- ⇒ Utilisation de peintures à forte émissivité thermique dans l'IR. (Valable aussi dans le visible)
- ⇒ Peintures à micro pigments.
- ⇒ Traitements de surfaces dédiés (Micro- trous)
 - Anodisation
 - Nickelage + acidage.

On atteint des émissivité de 0.98 (à incidence normale)

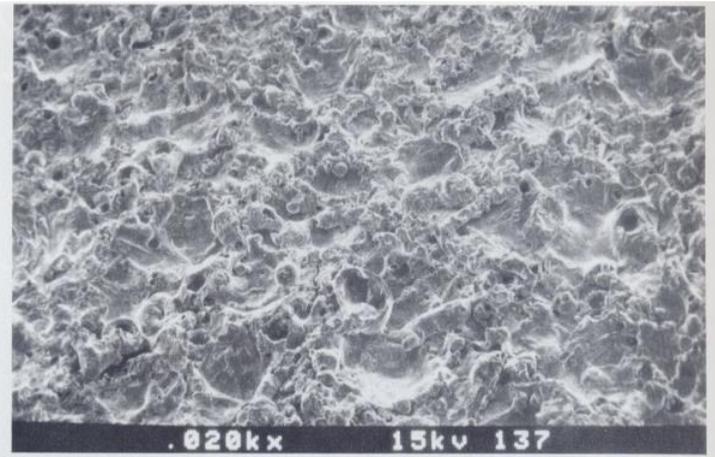


FIGURE 5 Scanning electron micrographs of Ames Perfect Diffuse Reflector (PDR) at 24x magnification. (Photo courtesy of Sheldon Smith, NASA Ames Research Center and Sterling Federal Systems, Palo Alto, Calif.)

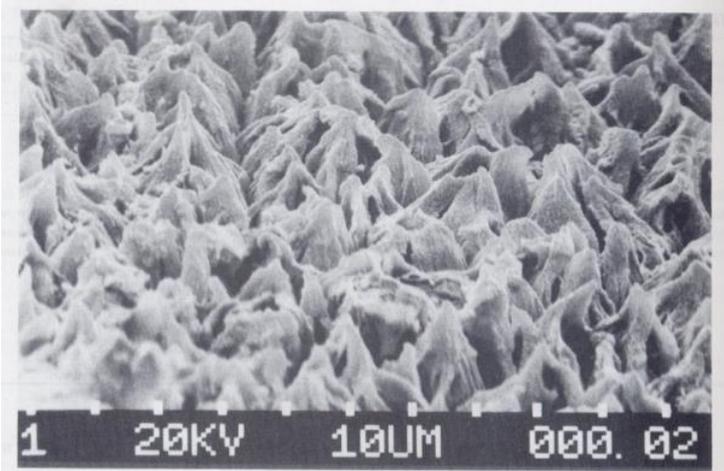


FIGURE 1 Scanning electron micrograph of Martin Optical Black, an anodized aluminum surface for ultraviolet, visible, and infrared use. (Photo courtesy of Don Shepard, Martin Marietta Astronautics Group, Denver.)

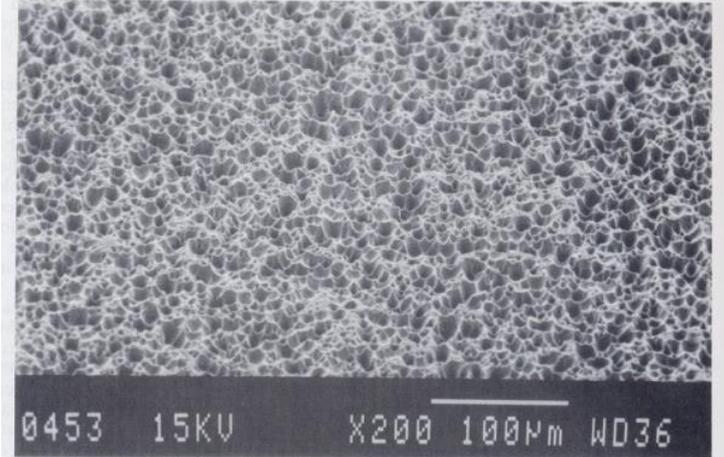


FIGURE 2 Scanning electron micrograph of Ball Black, an etched electroless nickel surface applicable to a variety of substrates. (Photo courtesy of Arthur Olson, Ball Aerospace Systems Group, Boulder, Colorado.)