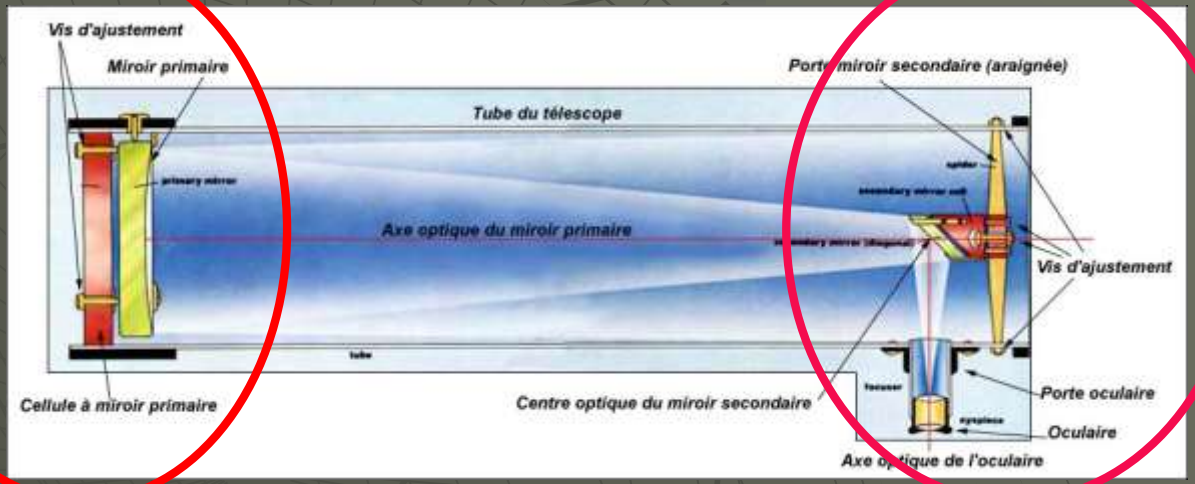
Miscellanées autour de l'optique du télescope de Newton

1ère partie

Jean-Luc Mainardi
Septembre 2021
Albédo 38

L'exposé, en 2 parties se placera surtout dans le cadre de l'utilisation du télescope pour une observation visuelle.

(NB: on n'abordera pas le domaine des oculaires, ni des montures)



1ére partie :

Le miroir primaire
Diamètre D-Epaisseur-
Matériau

2éme partie :

Le miroir secondaire: dimmension
Focale F et rapport F/D
Le porte Oculaire
Collimation - Atmosphère
Règles pratiques d'observation

Télescope de Newton = Instrument d'optique pour observer des objets lointains, petits et généralement peu lumineux

- **En utilisant un télescope on veut avoir accès :**
  - à la détection visuelle de l'objet : sa géométrie et/ou sa forme
  - aux détails éventuels de sa surface et/ou ses variations de contraste

- **C'est en examinant l' image donnée par l'optique *plus ou moins* parfaite du télescope que nous pourrons atteindre ces deux objectifs .**

- **C'est cette image que nous allons agrandir et examiner visuellement à l'aide d'une <u>loupe de bonne qualité</u> : l'oculaire (dont on ne parlera pas)**

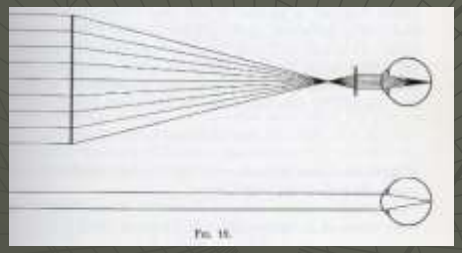
Ce qu'on observe, c'est pas l'objet céleste réel c'est son image !

Toute l'information est contenue dans l'image

L'objectif donne une image caractérisée par :

Brillance-Luminosité-Eclairement
(Télescope= entonnoir à lumière)

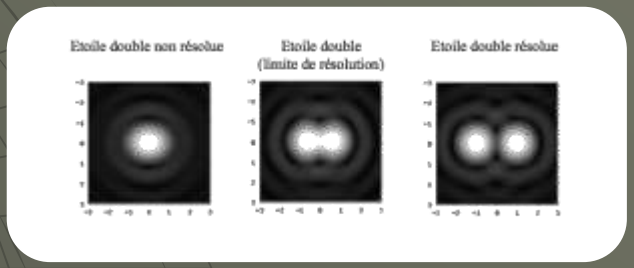
Proportionnel à D^2
(mais à relativiser avec la réponse de l'œil)



Magnitude limite (détection)

Détails accessibles présents dans l'image

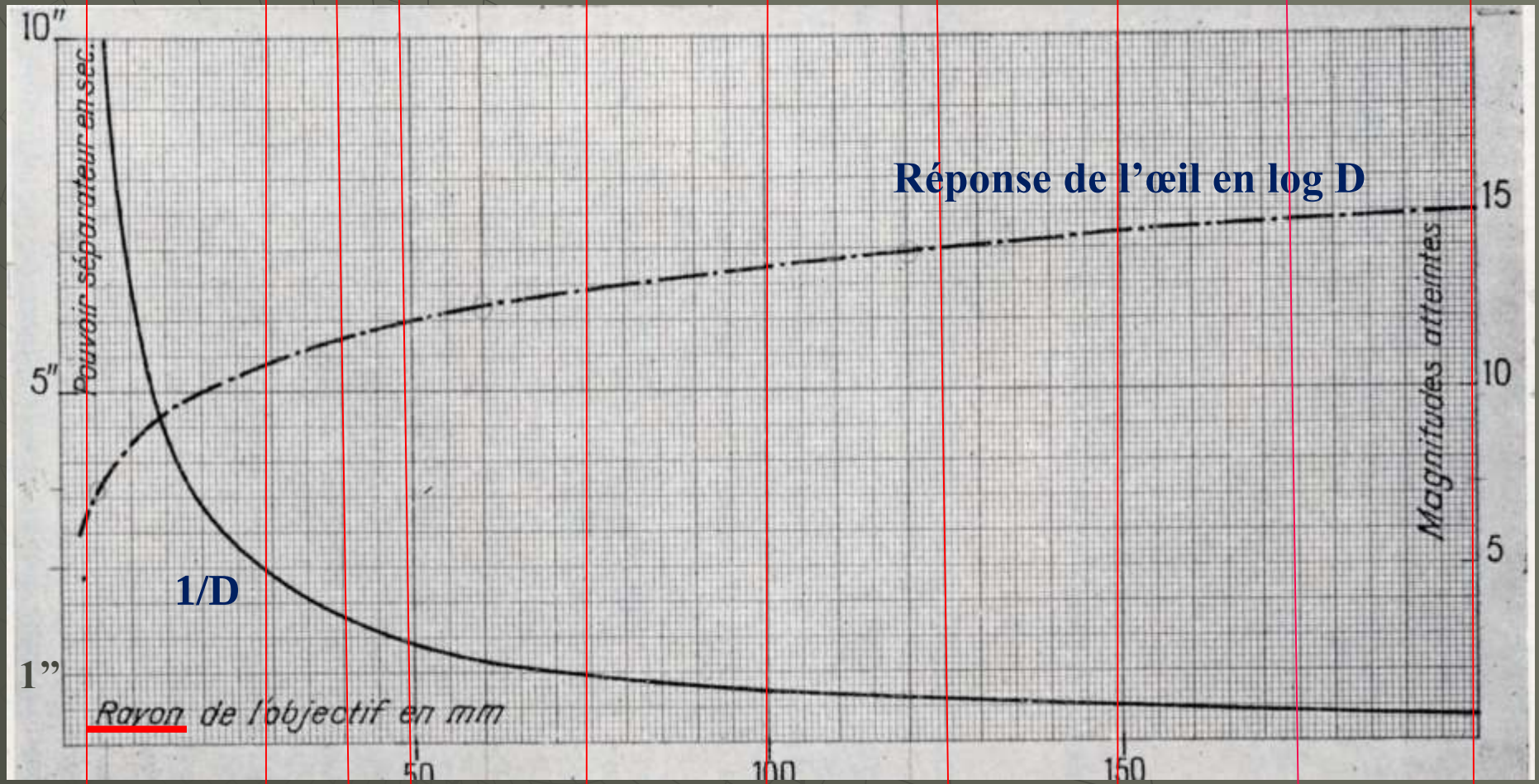
Dim Tache d'Airy = 14" / D_{cm}



Pouvoir séparateur (détails)

Le diamètre D de l'objectif (miroir) est la <u>caractéristique principale:</u>
Plus D est ↗ plus le télescope est performant …. jusqu'à un certain point !

Pour fixer les idées, mais pas que !
==>un vieux graphique des années 1980



D = Oeil | 60 mm | 80 mm | 100 mm | 150 mm | 200 mm | 250 mm | 300 mm | 350 mm | 400 mm

La Diamètrite !!!

Quelques repères

DIAMÈTRE	MAG. LIMITE	GALAXIES	ÉTOILES
ŒIL NU	6	3	7 700
50 mm	10	870	300 000
60 mm	11	1 000	690 000
70 mm	11,3	1 200	1 000 000
80 mm	11,6	1 400	1 500 000
90 mm	11,9	1 550	1 800 000
100 mm	12,1	1 700	2 250 000
115 mm	12,4	1 900	3 000 000
130 mm	12,7	2 100	3 800 000
150 mm	13	2 300	4 600 000
180 mm	13,4	3 300	6 750 000
200 mm	13,6	3 900	8 200 000
250 mm	14	5 000	10 000 000
300 mm	14,5	6 200	18 250 000
350 mm	14,8	8 000	23 200 000
400 mm	15,1	10 000	30 000 000
460 mm	15,4	16 000	42000 000
625 mm	16,1	27 000	73 000 000

Catalogue Messier

= 110 objets-mv < 11,5

-AG = 29

- AO = 27

- Neb émission = 6

- NP = 4

- Gal = 39

- Reste SN = 1 (M1)

-Nuage d'étoiles= 1 (M24)

- Astérisme 2 (M40 et M73)

- Doublon =1 (M102)

En plus des Messier

il y a des *non-Messier* faciles

- 20 AG avec mg < 9

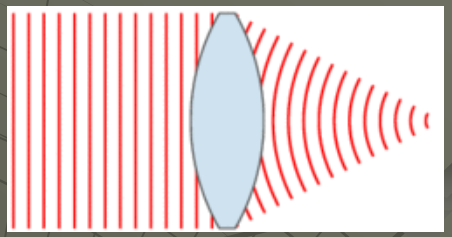
- 17 NP avec mg <10,8

- 45 Gal avec mg < 10

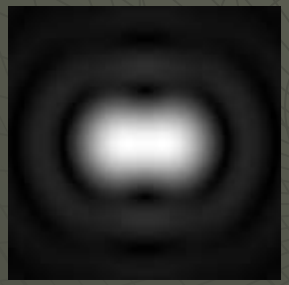
Le Miroir Primaire

- Rappel de quelques notions dont nous aurons besoin
- Critères de qualité du miroir primaire
- Le supportage du miroir primaire
- La mise en température du miroir primaire

Rayons lumineux et surface d'onde-Diffraction et Tache d'Airy-Image parfaite



Pour 550 nm
1,22 λ/D = 14" /D_{cm}



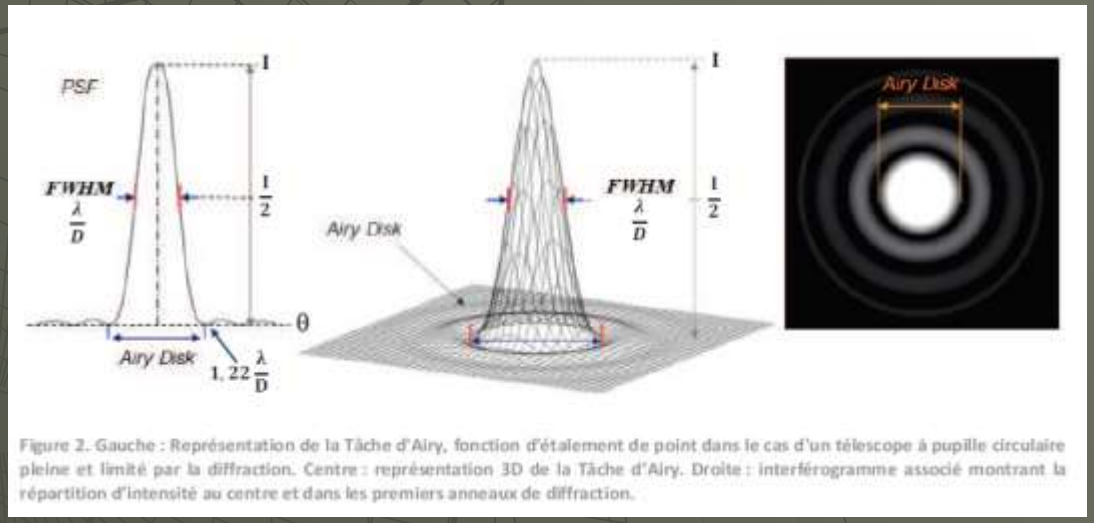


Figure 2. Gauche : Représentation de la Tâche d'Airy, fonction d'étalement de point dans le cas d'un télescope à pupille circulaire pleine et limité par la diffraction. Centre : représentation 3D de la Tâche d'Airy. Droite : interférogramme associé montrant la répartition d'intensité au centre et dans les premiers anneaux de diffraction.

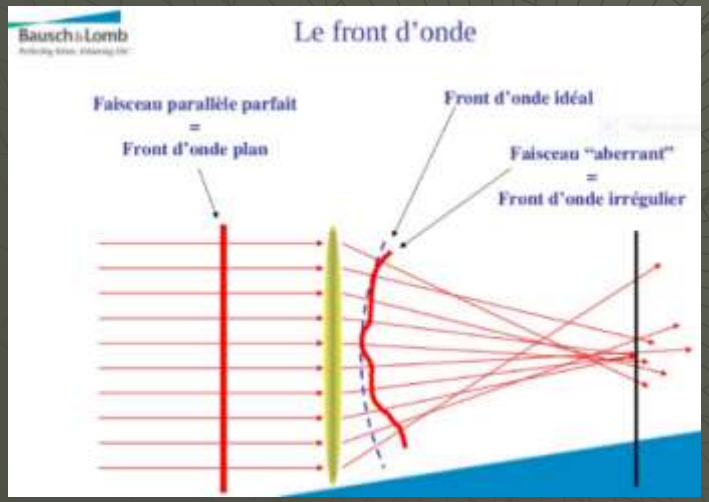
Un point lumineux sans dimension de l'objet va donner une tache image ayant une certaine dimension: la tache d'Airy.
==> L'image créée par le miroir va être constituée par l'assemblage *avec empiétement* de toutes les taches d'Airy

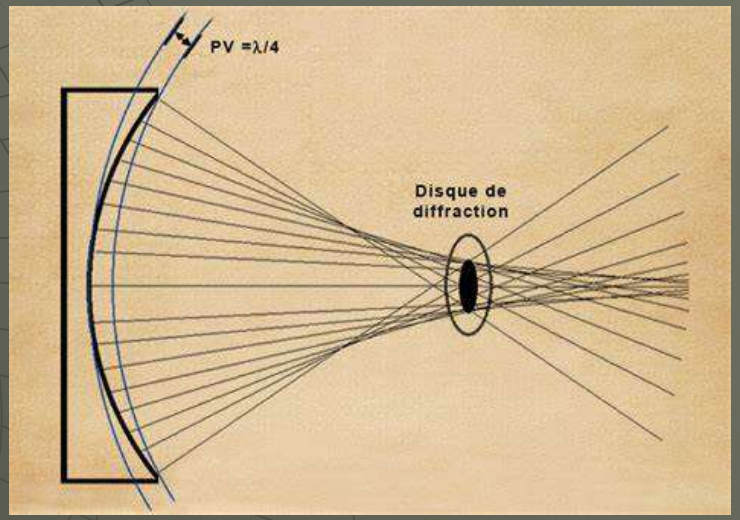
Mais tout n'est pas parfait malheureusement !
==>Perturbation du front d'onde

- Perturbation par l'atmosphère (2éme partie)
- Perturbation par les aberrations géométriques

(pas d'aberration chromatique apportée par le miroir)

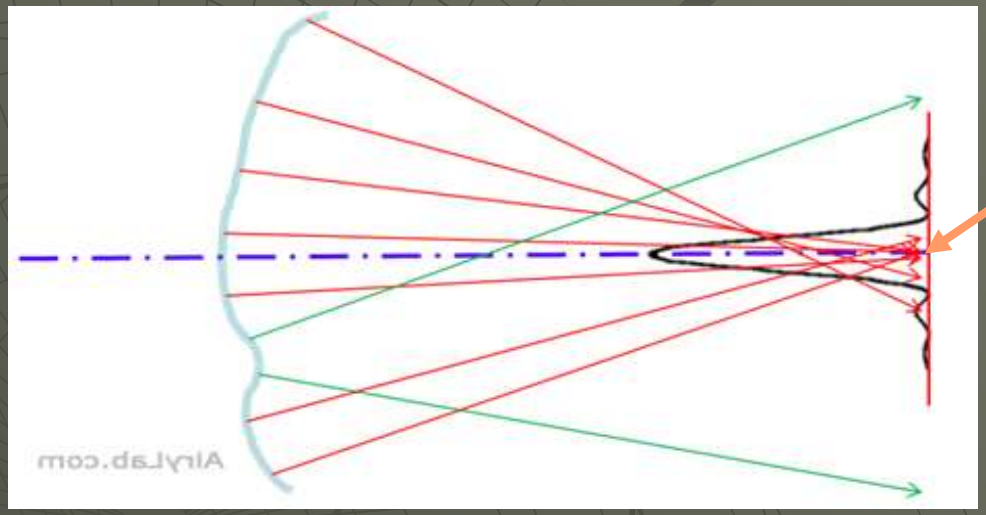
➡ Le front d'onde n'est plus sphérique: il y a des bosses et la tache d'Airy est modifiée : l'image est dégradée





Le critère λ/4 de Rayleigh

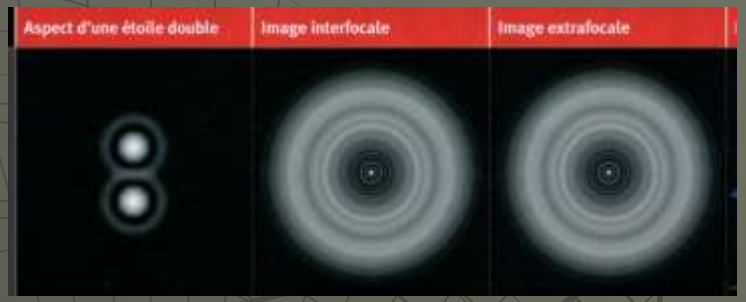
L'existence d'aberrations fait que des rayons lumineux convergent en dehors de la tache d'Airy



On ne parle plus de tache d'Airy mais de PSF (Point Spread Function)

Dans l'image donnée par le télescope , l'étalement et le chevauchement des PSF (assemblage) vont entrainer une baisse du pouvoir séparateur (aptitude à séparer les détails) et une diminution du rendu des contrastes

Les Aberrations géométriques et leur impact sur la tache d'Airy



Tache d'Airy théorique : limite de diffraction

D'une façon générale,
les aberrations renforcent la luminosité des anneaux et les déforment

Aberration de sphéricité
(parabolisation défaillante)

Aberration d'astigmatisme
(surface qui n'est pas de révolution)

Aberration de coma
(inclinaison de l'axe optique)

Aberration de Trefoil
(Pression au supportage)

+ la courbure de champ

Un exemple fameux: Télescope de Hubble 1,6 milliard de dollars

1ére lumière - 20 Mai 1990 -NGC 4321 …. flop !

Edwin Hubble
1889-1953

On s'attendait a voir cela !

On a eu cela !

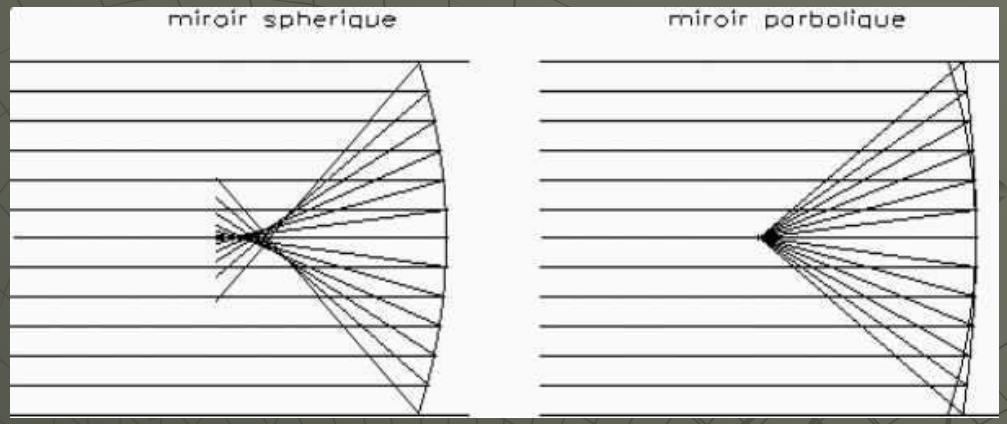
Hubble est myope ! : défaut d'aberration de sphéricité du miroir principal de 2 ,4 m fabriqué par Perkin-Elmer

On lui mettra des lunettes (Costar) et tout reviendra dans l'ordre

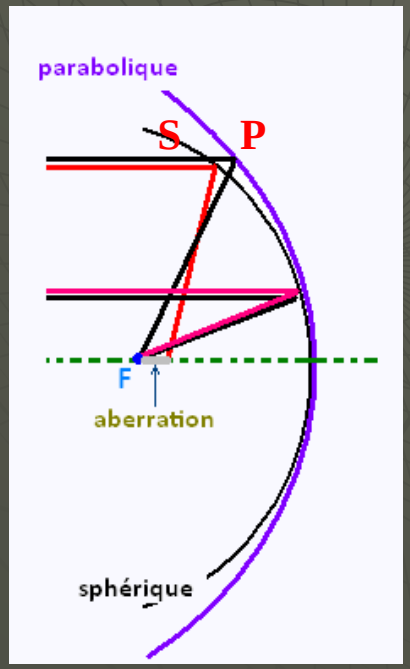
(*Cela a rendu espoir aux porteurs de lunettes qui voulaient faire de l'Astron*omie)

Critères de qualité du miroir primaire

Miroir parabolique versus miroir sphérique



Par rapport au foyer F, la méridienne du Parabolique est plus éloignée que la méridienne du Sphérique



L'écart géométrique SP entre les 2 surfaces est proportionnel à : $D.(F/D)^{-3}$

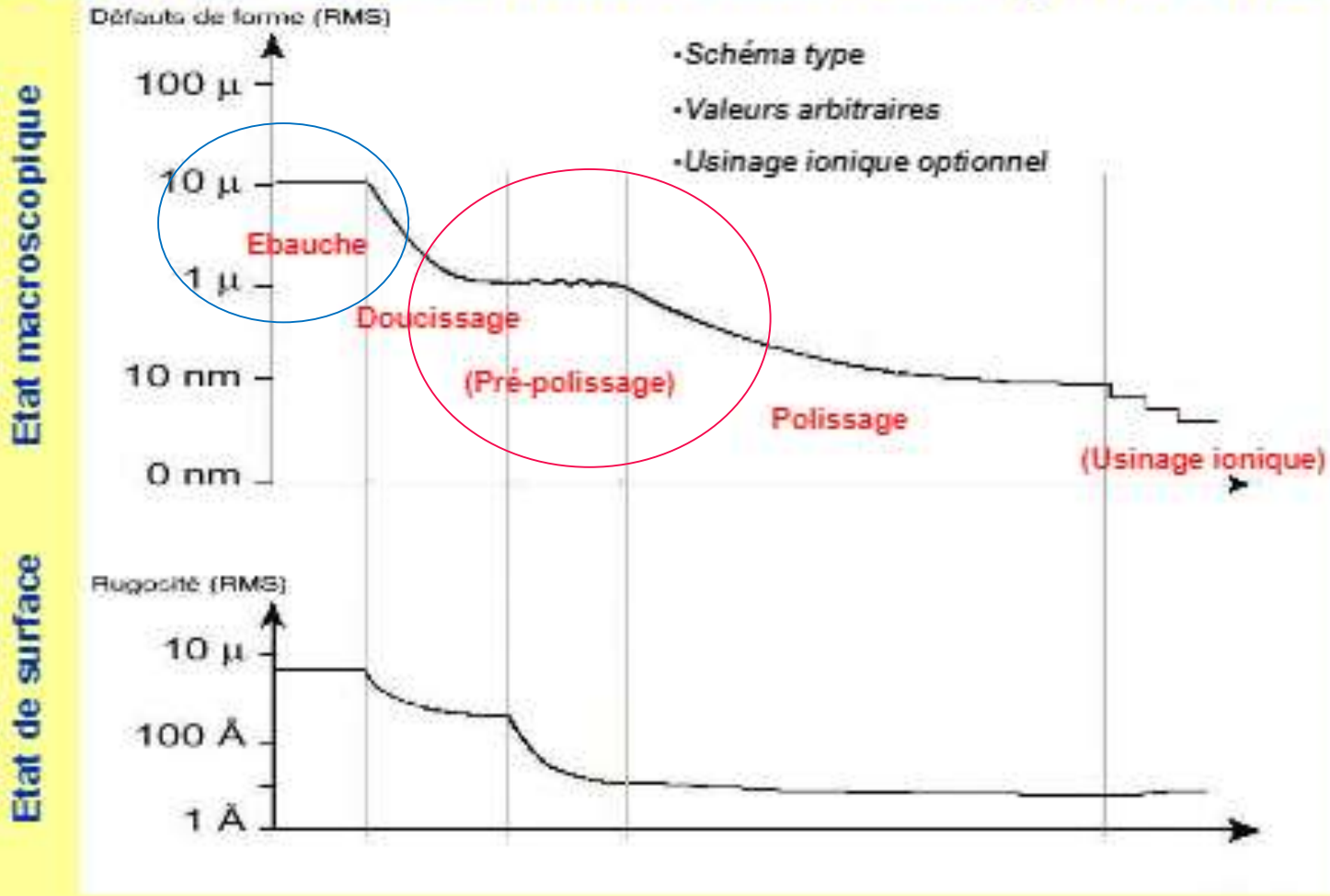
Il faut $(2.SP) < \lambda/4$ (Rayleigh)

Application:

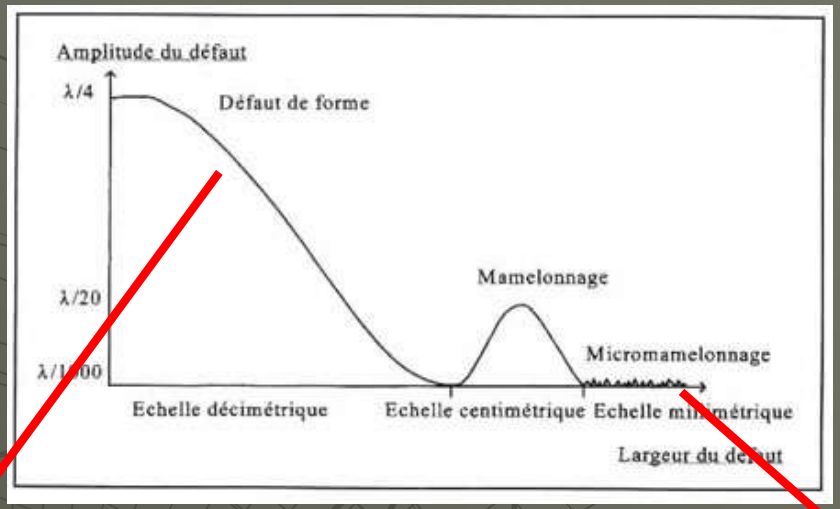
D= 115mm - F/D = 9

En bordure : SP # 79 nm (λ /3,6)

Les phases de fabrication du primaire



Qualité optique d'un miroir



1-Ecarts de forme par rapport à la surface de référence (Parabole)

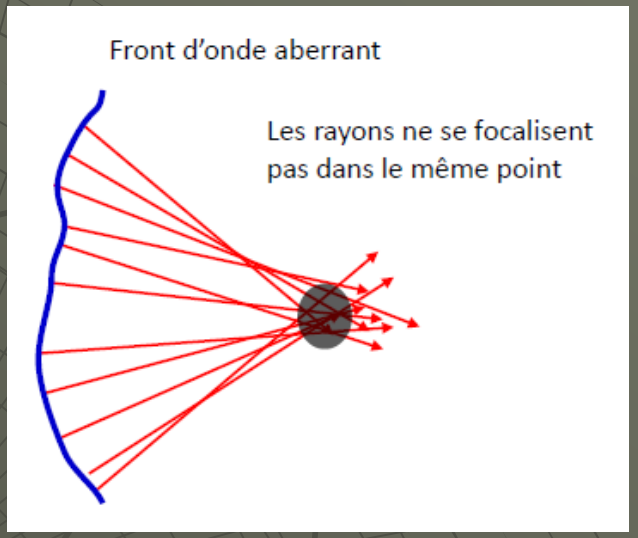
2-Etat de la surface de réflexion : rugosité et mamelonage notion de superpolissage

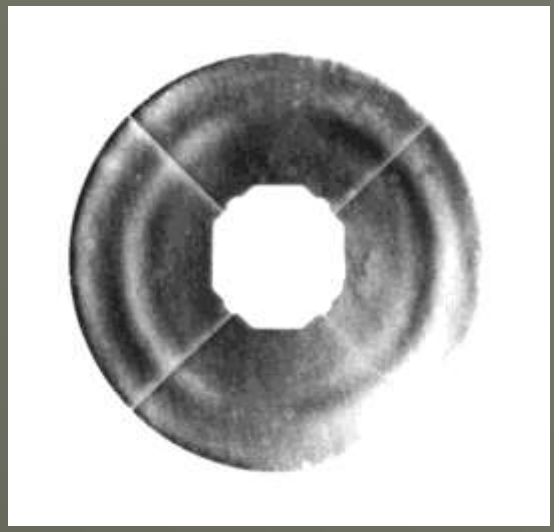
Impact sur la tache d'Airy = PSF

Impact sur le contraste de l'image

Il n'y a pas de corrélation entre les deux

Ecarts de forme par rapport à la parabole: le Pic to Valley (PtV)





Foucaultgramme d'un parabolique parfait

Différentes façons d'estimer le PtV mais pas le même effet sur l'image:
Les pentes raides vont entrainer un ''poudroiement lumineux des PSF ''

Le Graal : état de surface superpoli : mamelonnage et rugosité maitrisés

La rugosité du miroir entraine une plus ou moins grande diffusion de la lumière donc une baisse du rendu des contrastes

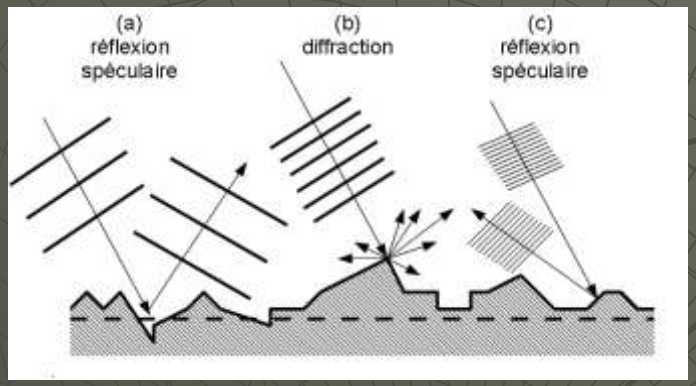


Fig 7a : Micromamelonnage de plusieurs nm sur un miroir de 600 mm.

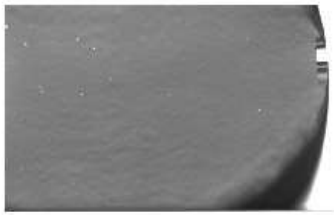


Fig 7b : Résidus de micromamelonnage d'environ 0,3 nm sur un miroir de 600 mm dont le poli est de très haute qualité

1 atome de Silicium = 1,11 Angstrom (Ä)

- Bonne qualité standard : 50 Ä RMS (Orion optics UK)

- Qualité supérieure 20 à 15 Ä RMS (Mirrosphére-Lightholder-Skyvision-Zambuto)

- Superpoli avec ingrédients chimiques dans la poudre de polissage : maitrise de la couche de Beilby ==>10 à 5 Ä RMS (Coronographe-miroir pour laser)

Rmq: les miroirs chinois GSO pêchent davantage par leur aspect de surface (rugosité) que par leur écart à la parabole

Rayures sur le miroir

Elles peuvent être amoindries lors de l'aluminure si elles ne sont pas trop profondes

<u>Cas ou une rayure apparait lors du *nettoyage* du miroir:</u>

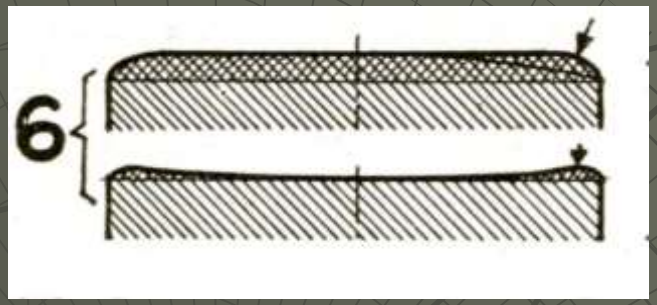
- Elle va apporter un peu de diffusion lumineuse et influer un peu sur le contraste

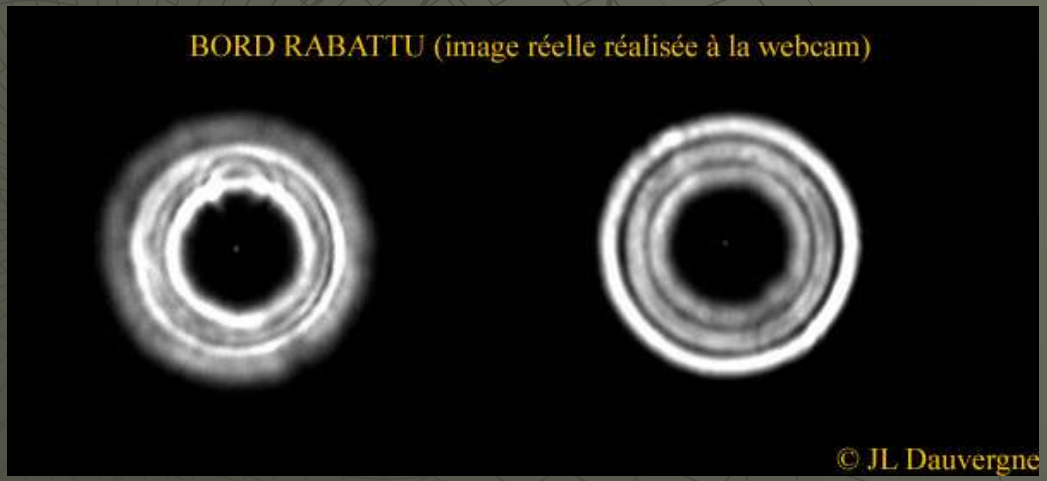
- Sinon la noircir : on supprime la diffusion et on perd un pouième de luminosité

Le Bord rabattu

- C’est généralement l’écart le plus important de la surface du miroir par rapport à la parabole: il se trouve en bordure du miroir

  ==> son effet dépend de sa largeur





Si le bord rabattu est trop important on peut diaphragmer le miroir :

==> amélioration très nette de l’image

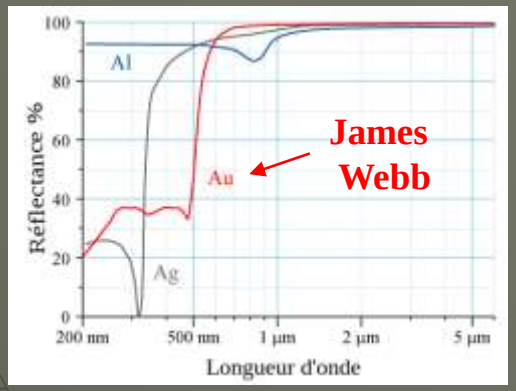
L'Aluminure détermine la réflectivité du miroir

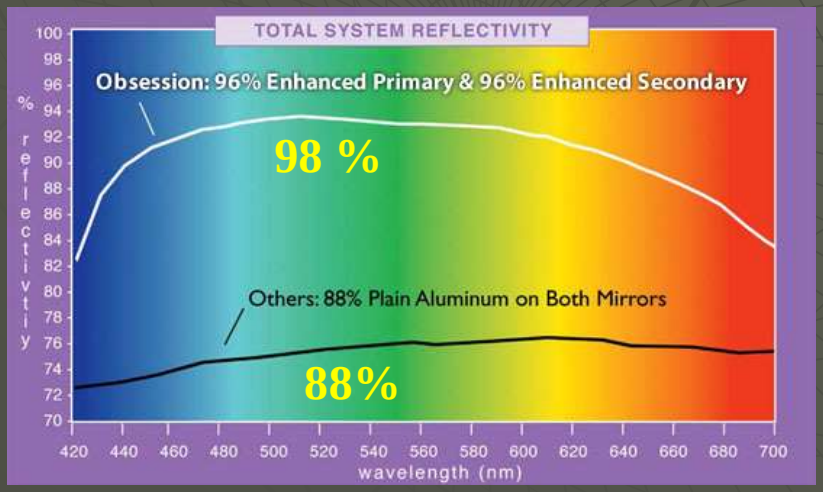
- **Épaisseur de la couche d'aluminium de 15 Ä à 40 Ä**

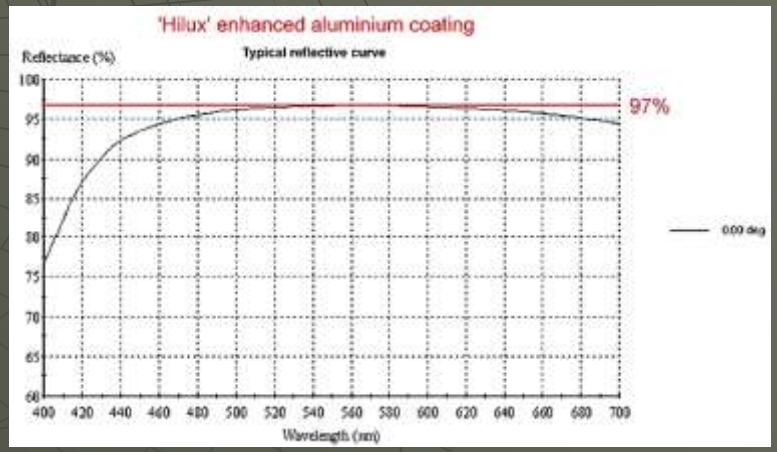
  mais inhomogénéité du dépôt : écart de 30% entre bord et centre suivant conduite du procédé et emplacement du miroir sous la cloche

  NB : 20 Ä = 2 nm ==> λ/ 275

- **Nombre de couches :**
  - **1 = Al**
  - **2 =Al et SiO2**
  - **3= Al + SiO2+Zr o2= couche hydrophobe**
  - **Revêtement diélectrique**







Poussières - dépôts et matité de l'aluminure

- Les poussières et les dépôts sont souvent visibles mais on surestime leur importance et leur impact sur l'image.

ils vont apporter un peu de diffusion donc une légère perte de contraste

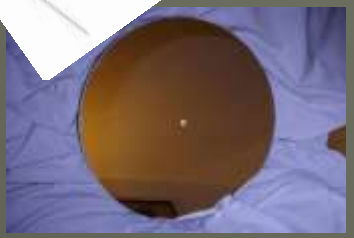
Bien souvent la surface totale globale estimée est moins de 1 cm^2

(miroir de 250 mm: S= 491 cm^2 ==> surface globale poussière =1/490=0,2%

Donc réfléchir avant d'envisager de nettoyer son miroir

- <u>L'emploi d'une bombe à air comprimé pour souffler les depôts :</u>

Aïe , Aïe Aïe = expérience personnelle !!!



➡ Bombe Air Comprimée utilisée tête en bas pour enlever des *chiures de mouche* sur miroir de D = 300 mm

==> gouttes d' air liquide sur l'aluminure

Résultat = Tache d'environ 10 cm^2 avec une aluminure mate !!!

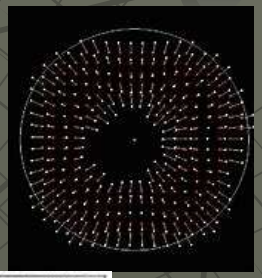
Les tests de contrôle d'un miroir

- **Test de Foucault ==> donne le ''Pic to Valley" (PtV) sur 2 diamètres**

  Rmq= le Root Mean Square (RMS) est plus pertinent car l'échantillonage a lieu sur toute la surface du miroir

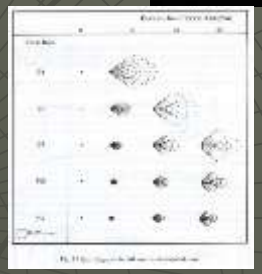
  D'une façon générale : Rapport entre PtV et RMS de l'ordre de 4 à 6

- **Test Shack-Hartmann**
- **Test Roddier**
- **Test Ronchi**
- **Spots-diagramm**

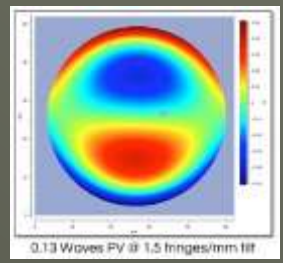


Roddier

Ronchi

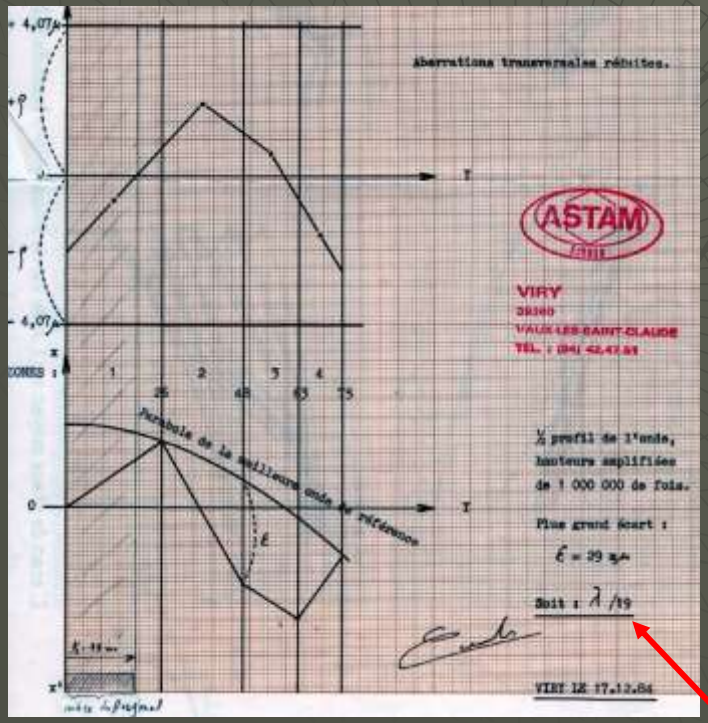


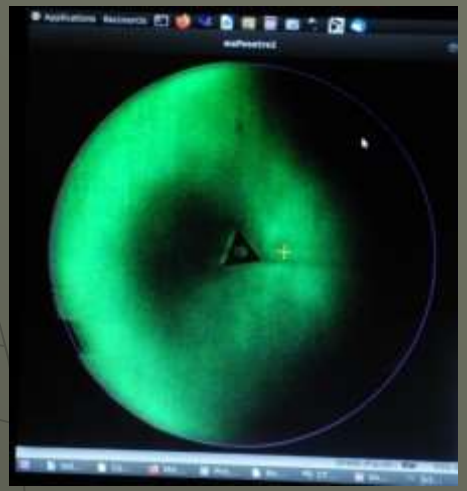
- **Ratio de Strehl :mesure la quantité de lumière qui déborde de la tache d'Airy: si RMS =λ /16 alors Strehl= 0,86 (Diffraction Limited)**
- **L'interférométrie (1500 points de mesure)**
- **La FTM (cf deuxième partie)**



Exemple:Test optique du miroir par Foucaultage

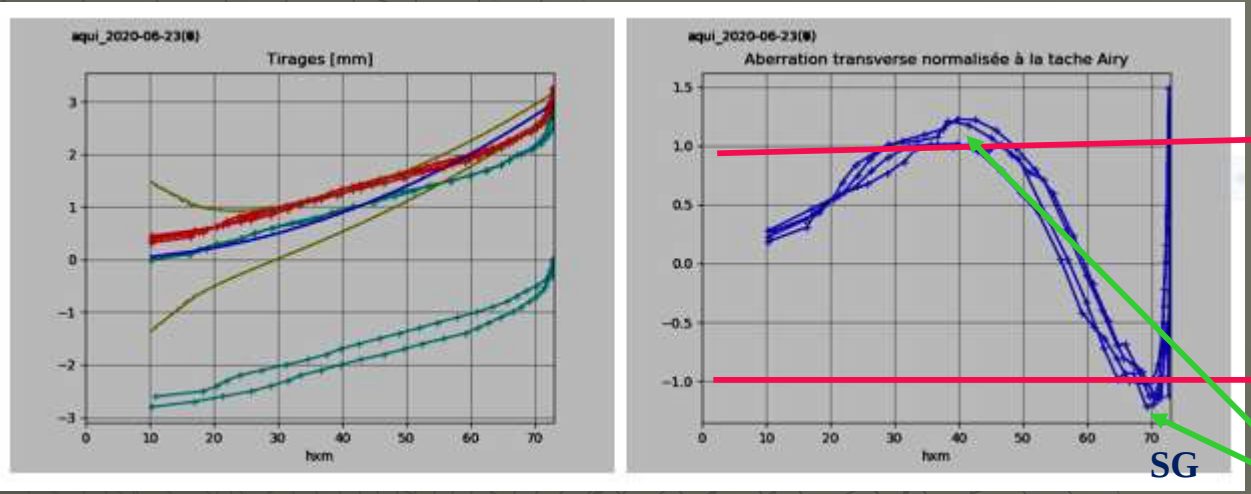
Miroir ASTAM
D= 155 mm-
ep= 26 mm
Acheté en 1984
Donné pour λ /19
calculé sur 4 points



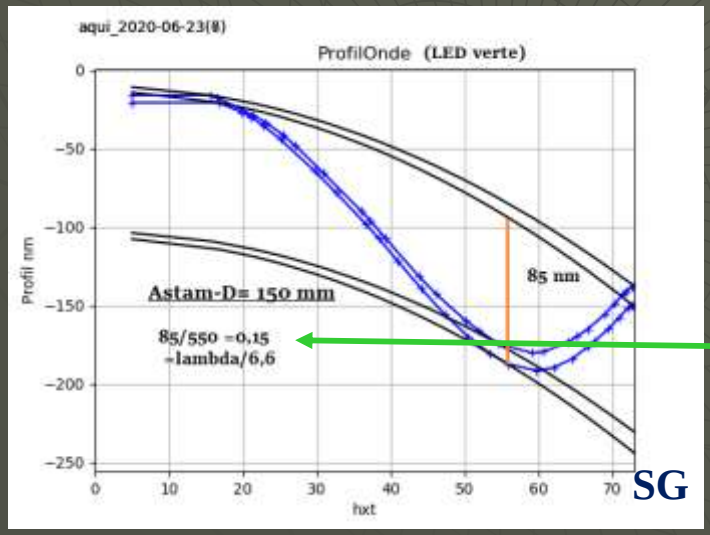


Foucaultgramme

Méthode de Millies-Lacroix / PtV / Critère de Couder



Zones du miroir qui envoient des rayons en dehors de la tache d'Airy:
==> altération de la tache d'Airy



PtV estimé du miroir sur 2 diamètres
= λ /6,6 !

Mais en plus, qu'est-ce qui peut influencer la qualité de la surface d'onde donnée par un miroir plus ou moins *optiquement parfait* ?

- Miroir *parfait* mais surface d'onde modifiée par déformation mécanique ==> supportage du miroir
- Miroir *parfait* mais surface d'onde modifiée par dilatation thermique ==> équilibre thermique

Le supportage du miroir primaire

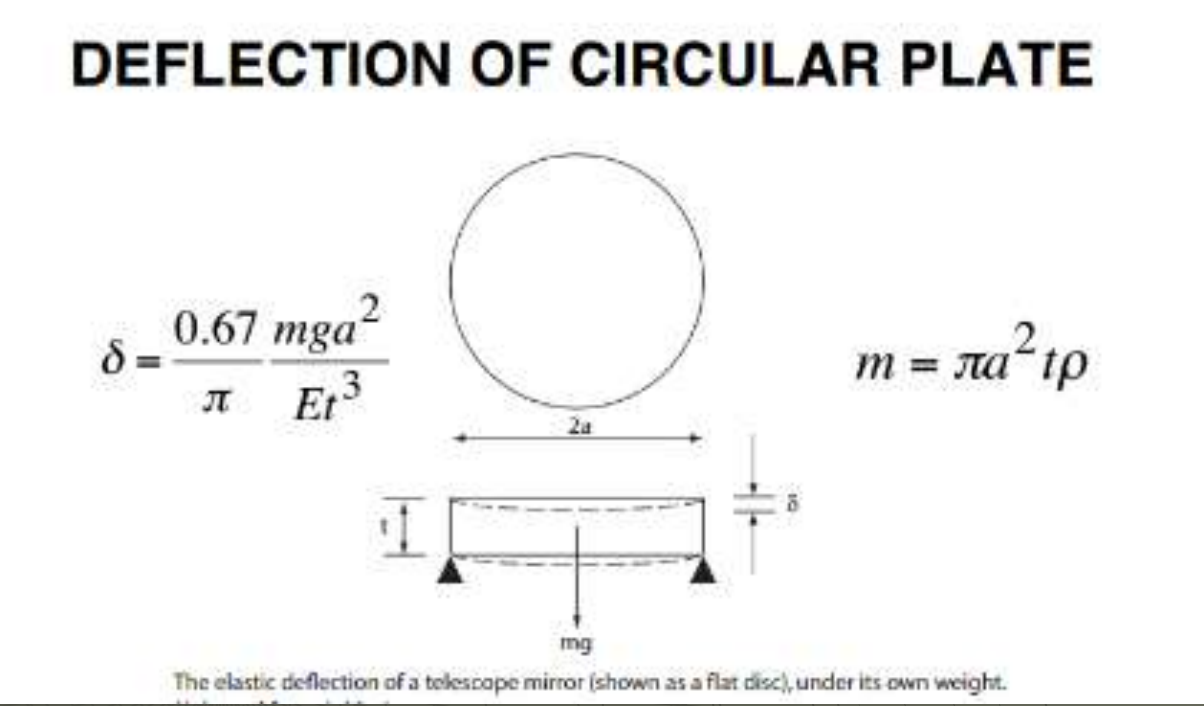
Masse volumique-diamètre- épaisseur- caractéristiques mécaniques du verre (module de Young)

Les verres utilisés pour les miroirs

attention: la lumière ne passe pas dans le miroir

Type de Verre	Masse volumique (en kg/dm^{-3})	Module Young E (en N/mm^2)	Coeff Poisson v	Chaleur spécifique (en J/kg/°K) Conductibilité Thermique	Coefficient dilatation thermique (en (°K)$^{-1}$)
Verre optique N-BK7	2,51	82000	0,21	753 1,1 W/m°K	**7,1. 10^{-6}**
Borosilicate: Pyrex – Duran-Suprax - Supremax	2,23	63000	0,20	728 1,1 W/m°K	**3,3.10^{-6}**
Silice Fondue-Quartz	2,20	72000	0,17	745 1,3 W/m°K	**0,55.10^{-6}**
Vitrocéramique: Zérodur-Cervit	2,53	91000	0,24	825 1,4 W/m°K	**0,05.10^{-6}**

Déformation en creux du miroir sous son propre poids



The elastic deflection of a telescope mirror (shown as a flat disc), under its own weight.

Profondeur de creux $\delta = (0{,}67/\pi)\,(\pi a^2 t\rho)(ga^2)\,/(E\,t^3) = (0.67\,\rho g)\,(1/E)\,(a^4/t^2)$

si t = thickness = épaisseur e et a = rayon = R alors $(a^4/t^2) = (R^4/e^2)$

==> Importance de 1/E et de R^4/e^2

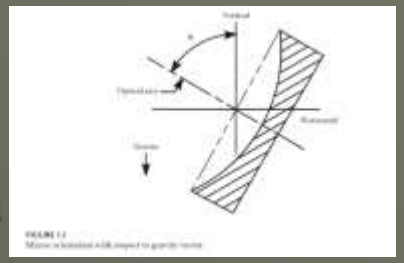
On retrouve le critère de Danjon-Couder R^4/e^2 (Lunettes et Télescope page 570)

Critère de Danjon-Couder [R^4/e^2]

- Traduit la rigidité du miroir (flexibilité)

- Comment se déforme le miroir?
  - Déformation en creux
    ==> aberrations sphérique et tréfoil
  - Déformation de pliage en cas d'inclinaison du miroir ==> astigmatisme par perte de révolution

Fig. 180. — Déformation d'un miroir supporté par son bord.



Le critère Danjon-Couder va définir les besoins de supportage du miroir :

Si $R^4/e^2 < 1000\ cm^2$ les flexions sont imperceptibles et tolérables,

Si $R^4/e^2 > 1000\ cm$ les flexions sont optiquement intolérables

Sélection de miroirs

Diamètre optique (+ 5 mm diam physique)	matériau	épaisseur	Poids	Critère Danjon-Couder
D=153 mm	Pyrex – Duran50	26 mm	1,1 kg	**548 cm²**
D=203 mm	Pyrex	25 mm	1,9 kg	**1698 cm²**
D=255 mm	Pyrex	35 mm	4,1 kg	**2157 cm²**
D=305 mm	Pyrex	38 mm	6,4 kg	**3746 cm²**
D= 405 mm	Pyrex	45 mm	12,6 kg	**8304 cm²**

Exemples de déformation

- **Comparaison Pyrex-N-BK7-même D et même épaisseur**

  Diamètre 255 mm-épaisseur = 35 mm- $R^4/e^2 = 2157\ cm^2$

  N-BK7 (E= 82000) : f= 75 nm soit 75 /550 =0,136 $\lambda = \lambda / 7,4$

  Pyrex (E= 63000) : f= 86 nm soit 86/550=0,154 $\lambda = \lambda / 6,4$

  - **==> le matériau a peu d'influence**

- **Comparaison Diamètre 155 mm-diamètre 300 mm –Pyrex**

  Diamètre 155 mm-ep 26 mm - $R^4/e^2 = 548\ cm^2$

  f = 15 nm soit 0,027 λ $=\lambda / 37$

  Diamètre 305 mm –ep 38 mm - $R^4/e^2 = 3746\ cm^2$

  f = 94 nm soit 0,17 $\lambda = \lambda / 5,8$

  ==> le diamètre est prépondérant

Supportage: Règle de Hindle et relation de Hall

Règle de Hindle :

le poids de la couronne extérieure au cercle des points de support = poids du disque à l'intérieur du cercle des points de support (0,707 R)

Relation de Hall ***: attention relation établie pour λ = 630 nanomètres*** **!**

==> calcul du nombre N de points de supports pour une précision δ donnée

$$N = (15 \times R^2/e).(\rho / E.)^{1/2}.(1/\delta)^{1/2}$$

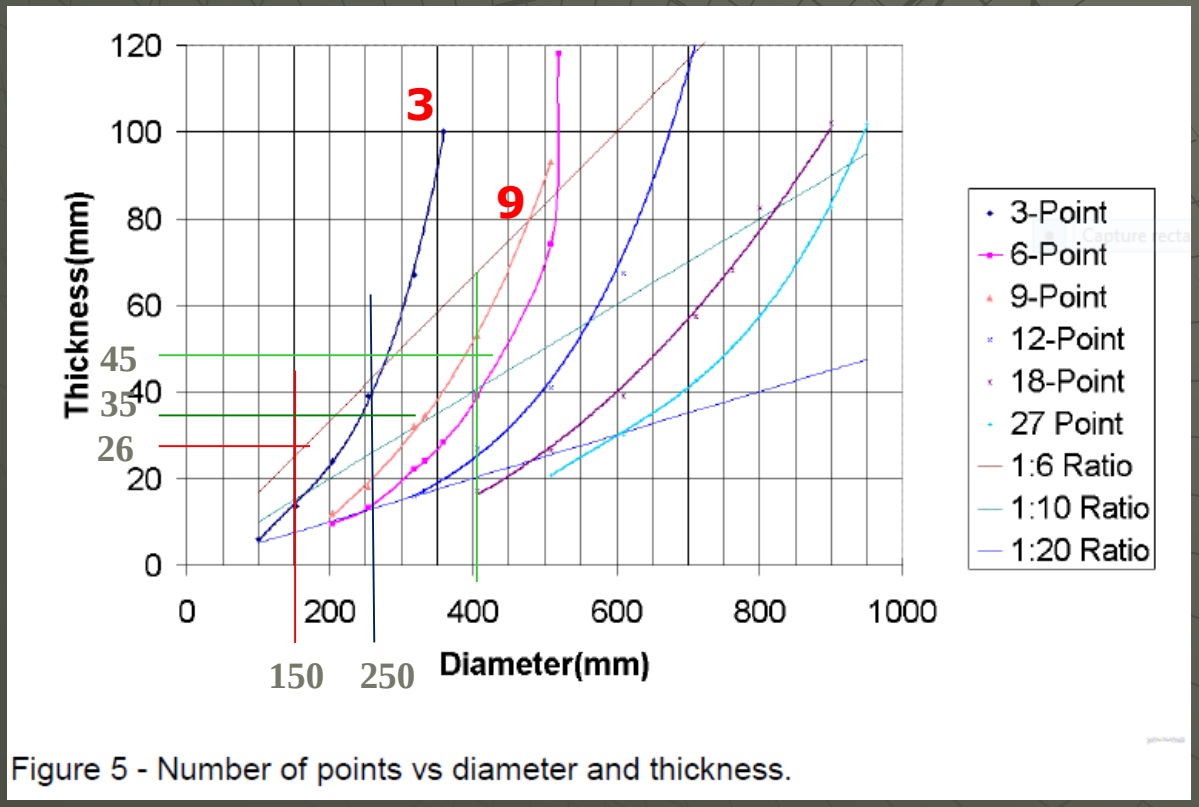


Figure 5 - Number of points vs diameter and thickness.

Application à D= 150 mm et épaisseur e = 26 mm

On veut Rayleigh λ/4 ==> δ= 630 /4= 157 nm

La relation pour le Duran (Pyrex) avec

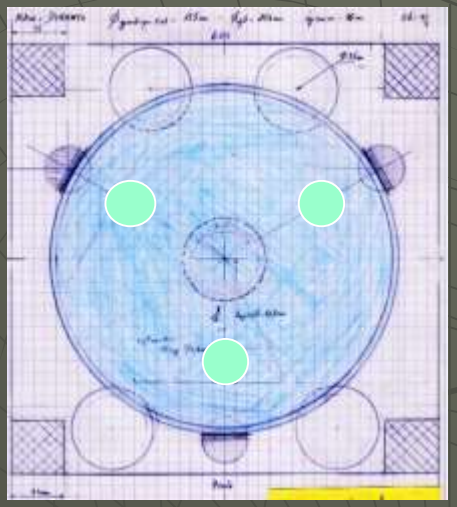
E = 63000 N/mm²

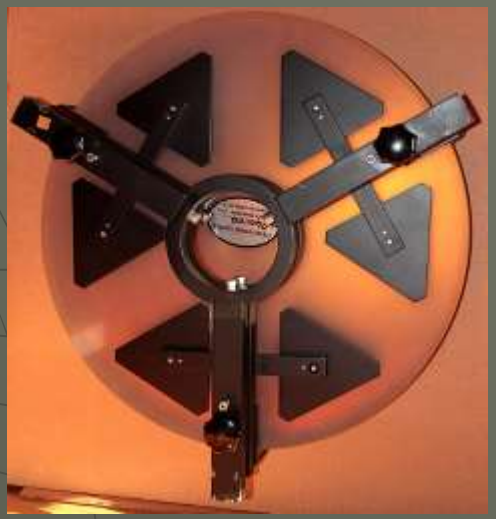
ρ = 2,23 kg/dm 3

donne

N = 3,9 points ==> 3 points

Quelques Types de supportages

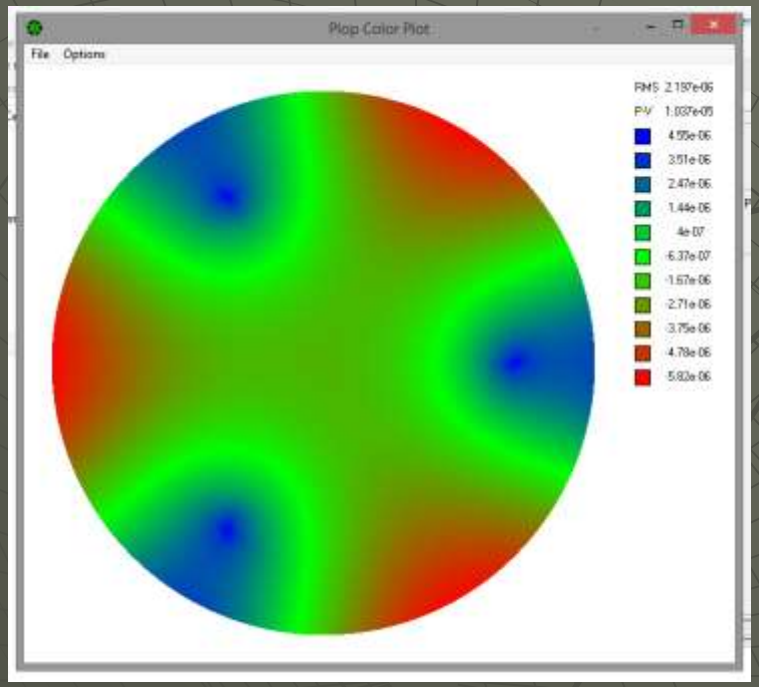


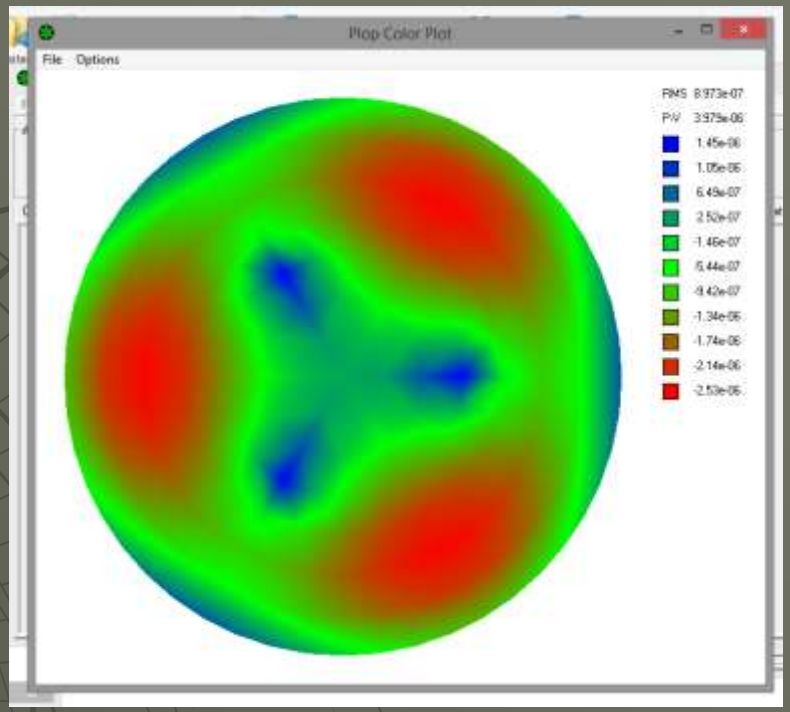


La règle est plutôt de dire que chaque point du support doit supporter le même poids

Le logiciel ‘’Plop”

Diamètre 150 mm-ep = 26 mm -supportage 3 points





Supportage à 53 mm (placés à 0,707 R)

$+4{,}55.\ 10^{-6}/-5{,}82.10^{-6}$

RMS = $22\ .10^{-7}$

PtV = $10{,}4.10^{-6}$

Supportage à 31 mm (prop par Plop)

$+1{,}45.10^{-6}$ / $-2{,}53.10^{-6}$

RMS = $8{,}9.10^{-7}$

PtV = $4{,}0\ .10^{-6}$

L ’équilibre thermique des miroirs

Température - Masse -Chaleur spécifique et Coefficient de dilatation

De quoi s'agit-il ?

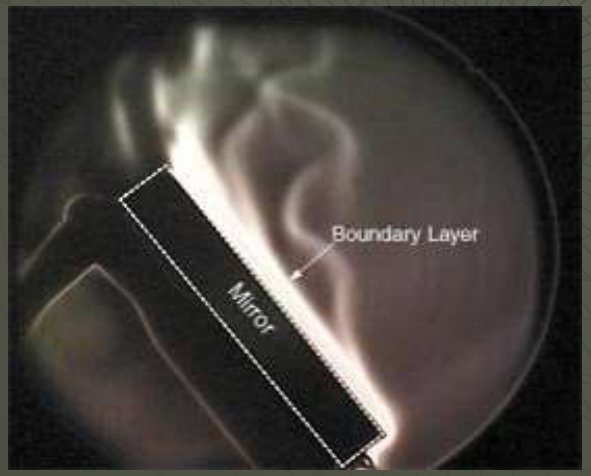
Au début d'une soirée d'observation, l'instrument et en particulier le miroir sont plus chauds que l'air environnant.

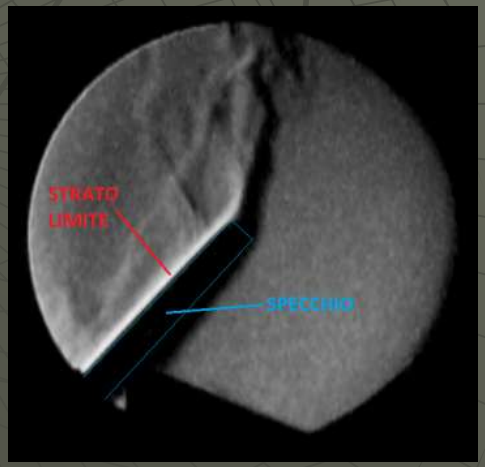
Le refroidissement nocturne de l'ensemble suit le refroidissement nocturne de l'air ambiant avec un certain retard

Conséquences ==>

1 - apparition d'effets nuisibles dus à la turbulence dans l'instrument

2 - déformation thermique du miroir





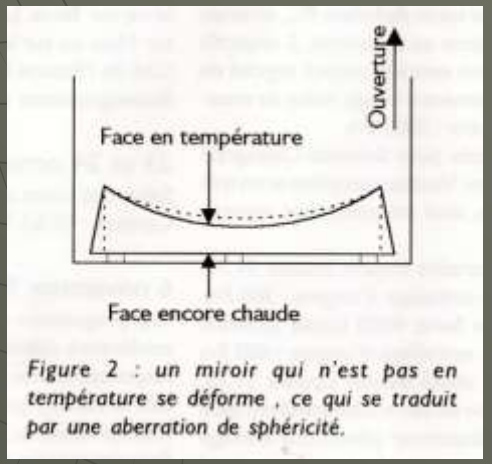
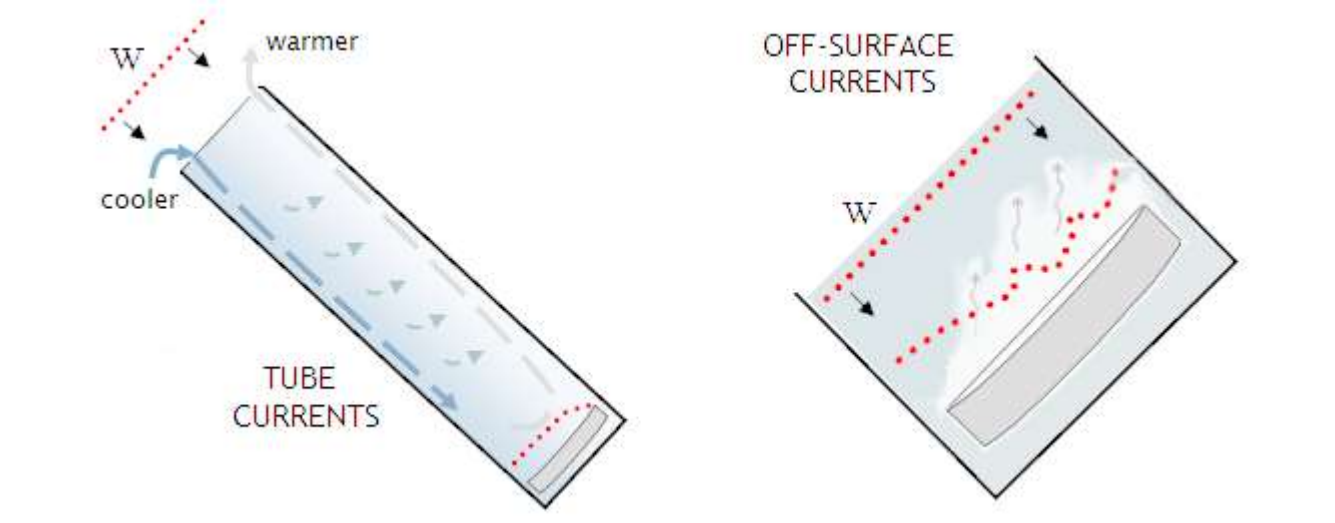
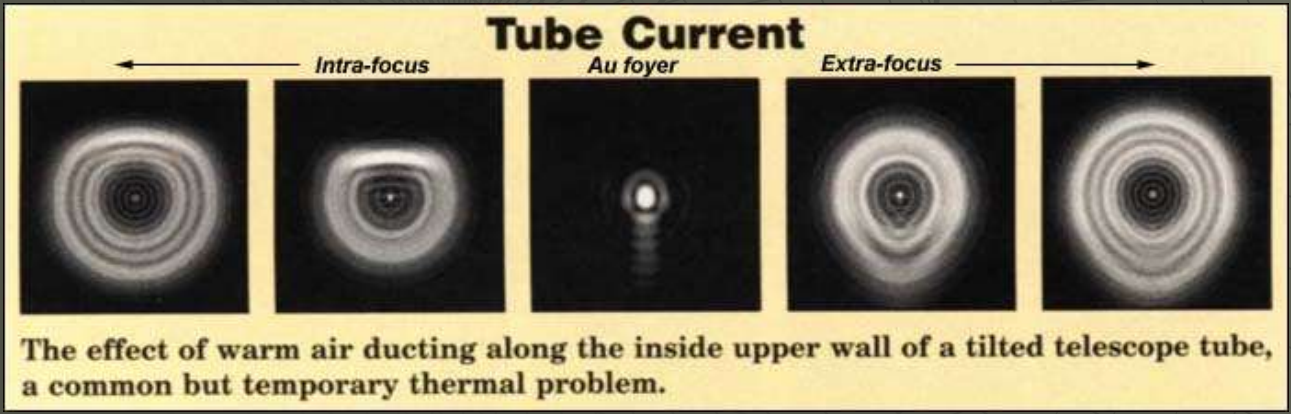


Figure 2 : un miroir qui n'est pas en température se déforme , ce qui se traduit par une aberration de sphéricité.

1-Les courants de convections dans le tube = turbulence interne au tube

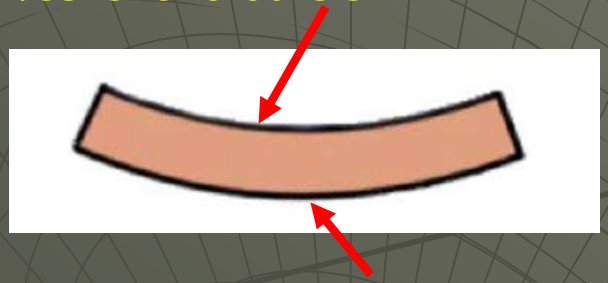




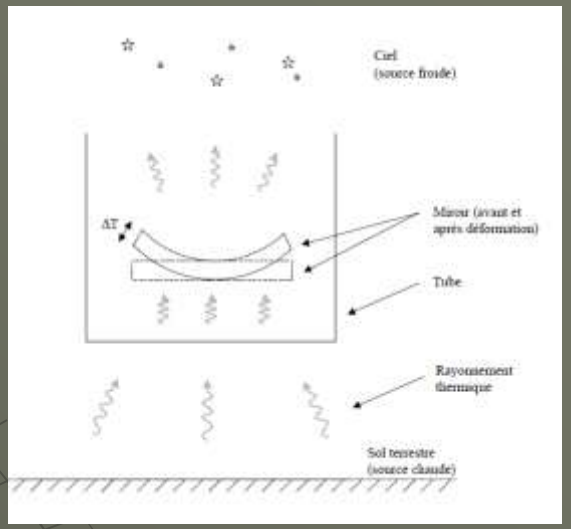
L'image danse et est déformée

2-Déformation thermique du miroir et conséquences

Face froide rayonnant fortement avec le fond du ciel



Face chaude rayonnant faiblement avec les supports



Les déformations thermiques sont <u>proportionnelles</u> au coefficient de dilatation thermique du verre : le verre choisi a une grande importance

N-BK 7 = 7,1.10 $^{-6}$ et Pyrex/Duran = 3,3.10^{-6} -Verre de silice= 0,55.10^{-6}

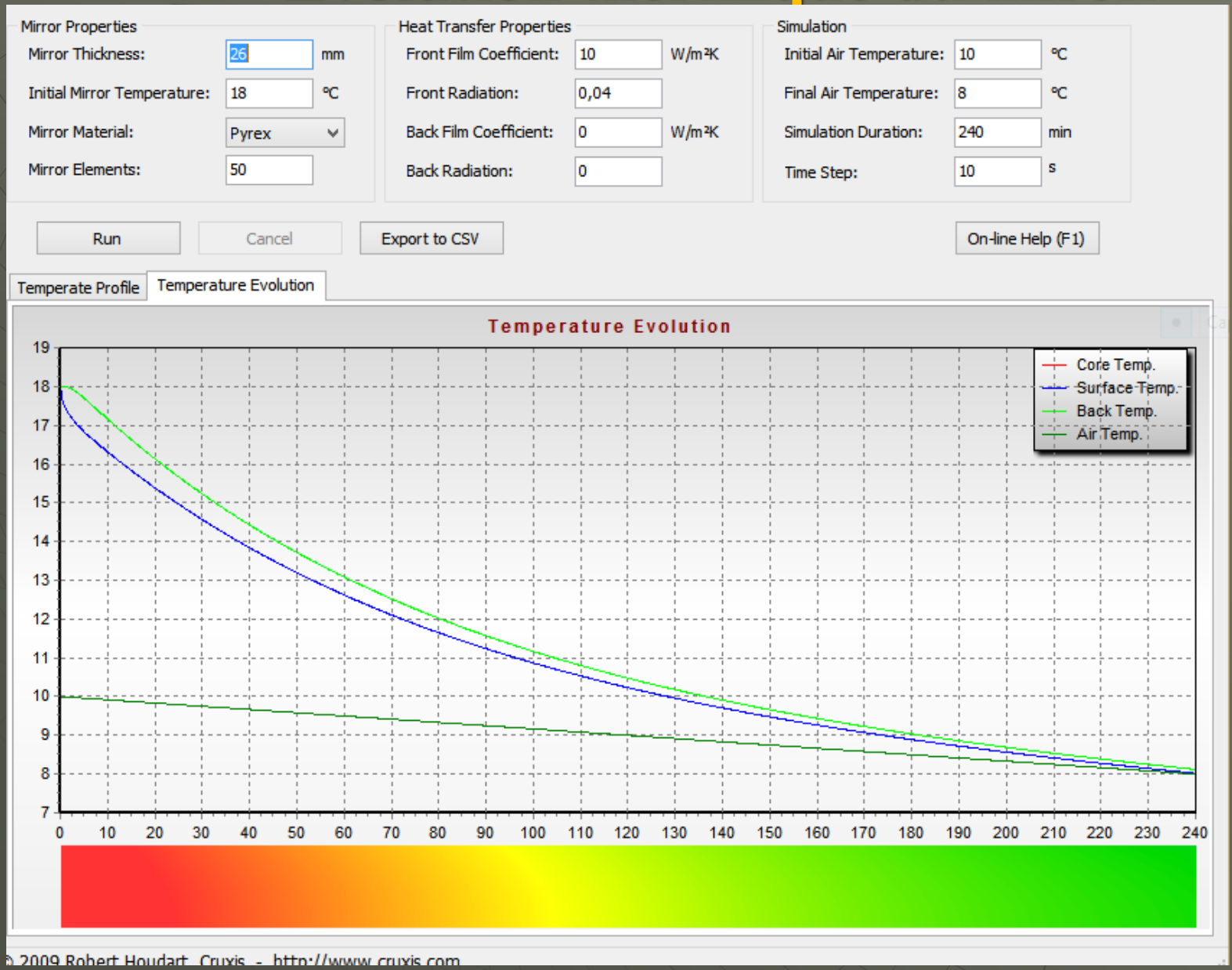
- **<u>Effets:</u>**

  - Modification de la distance focale : pas important en visuel

  - Apparition d'une aberration de sphéricité :

  les bords relevés du miroir font que le miroir parabolique se rapproche d'un miroir sphérique

Evolution thermique du miroir



D= 150 mm
Ep= 26 mm

Écart 1°C= 140 min

Telescope Mirror Cooling

Mirror Properties

Mirror Thickness:	35	mm
Initial Mirror Temperature:	18	°C
Mirror Material:	Pyrex	
Mirror Elements:	50	

Heat Transfer Properties

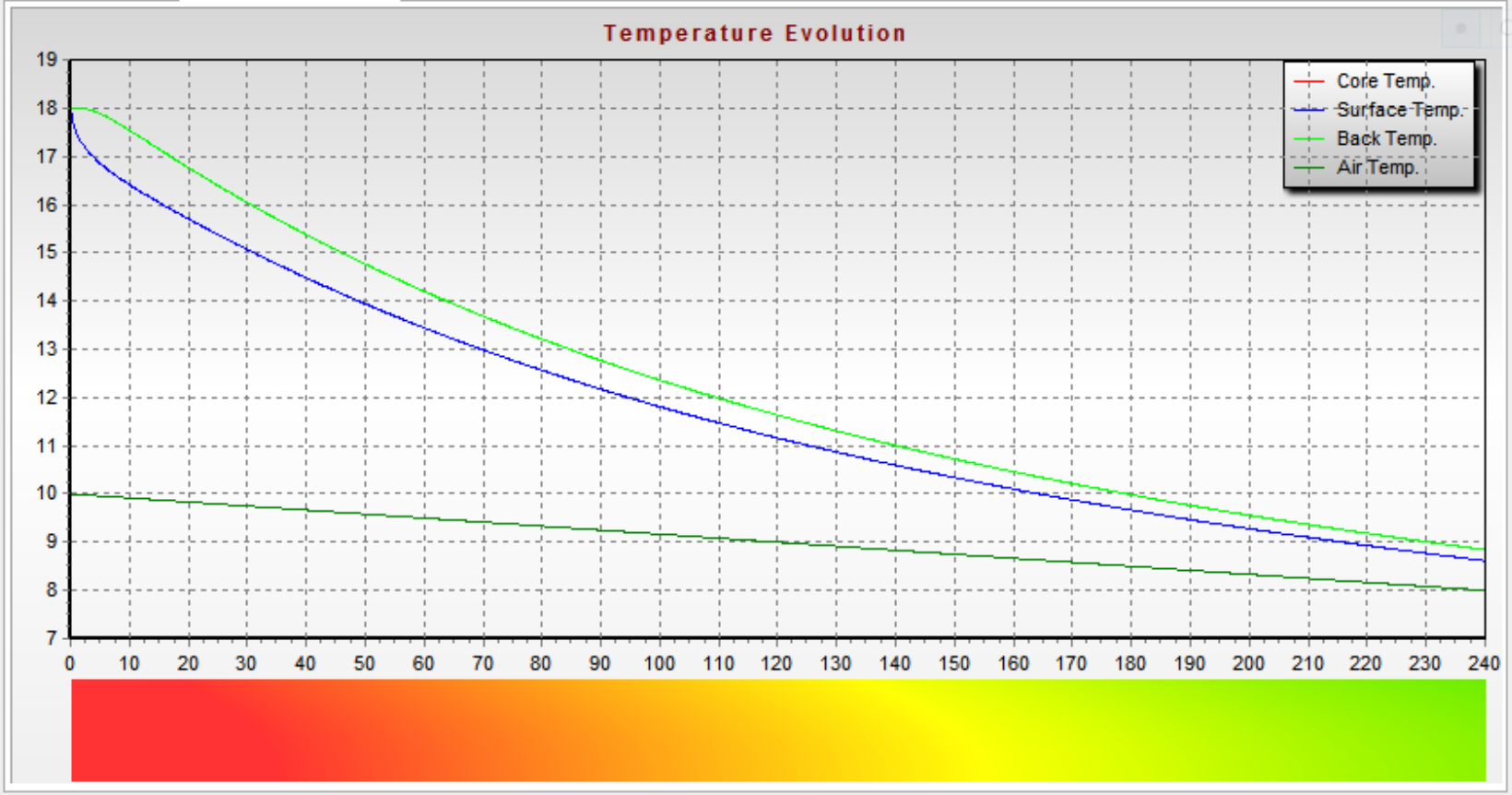
Front Film Coefficient:	10	W/m²K
Front Radiation:	0,04	
Back Film Coefficient:	0	W/m²K
Back Radiation:	0	

Simulation

Initial Air Temperature:	10	°C
Final Air Temperature:	8	°C
Simulation Duration:	240	min
Time Step:	10	s

Run | Cancel | Export to CSV | On-line Help (F1)

Temperate Profile | Temperature Evolution



D= 255 mm
Ep= 35 mm

Écart 1°C= 210 min

Telescope Mirror Cooling

Mirror Properties

Mirror Thickness:	38	mm
Initial Mirror Temperature:	18	°C
Mirror Material:	Pyrex	
Mirror Elements:	50	

Heat Transfer Properties

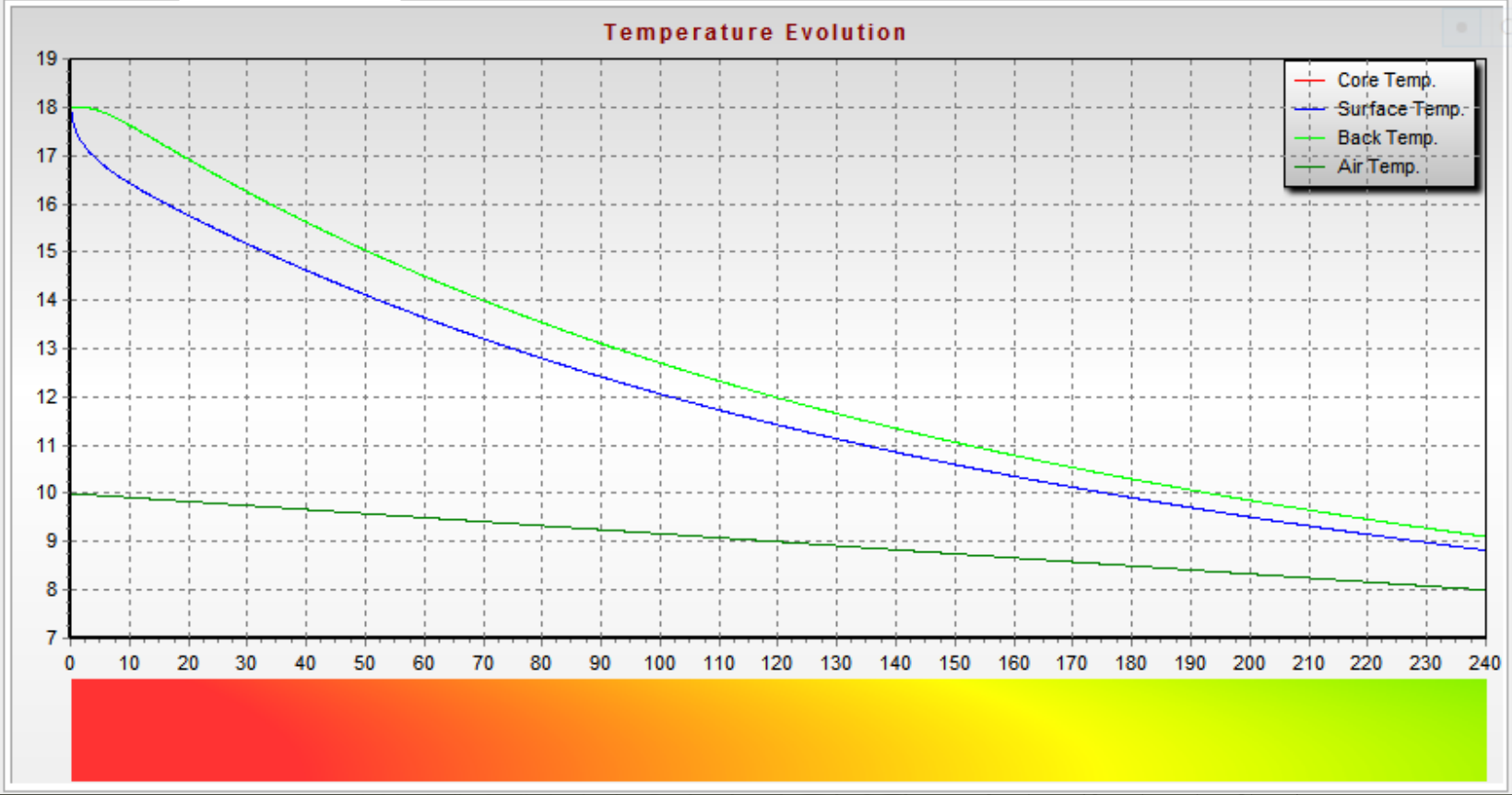
Front Film Coefficient:	10	W/m²K
Front Radiation:	0,04	
Back Film Coefficient:	0	W/m²K
Back Radiation:	0	

Simulation

Initial Air Temperature:	10	°C
Final Air Temperature:	8	°C
Simulation Duration:	240	min
Time Step:	10	s

Run | Cancel | Export to CSV | On-line Help (F1)

Temperate Profile | Temperature Evolution

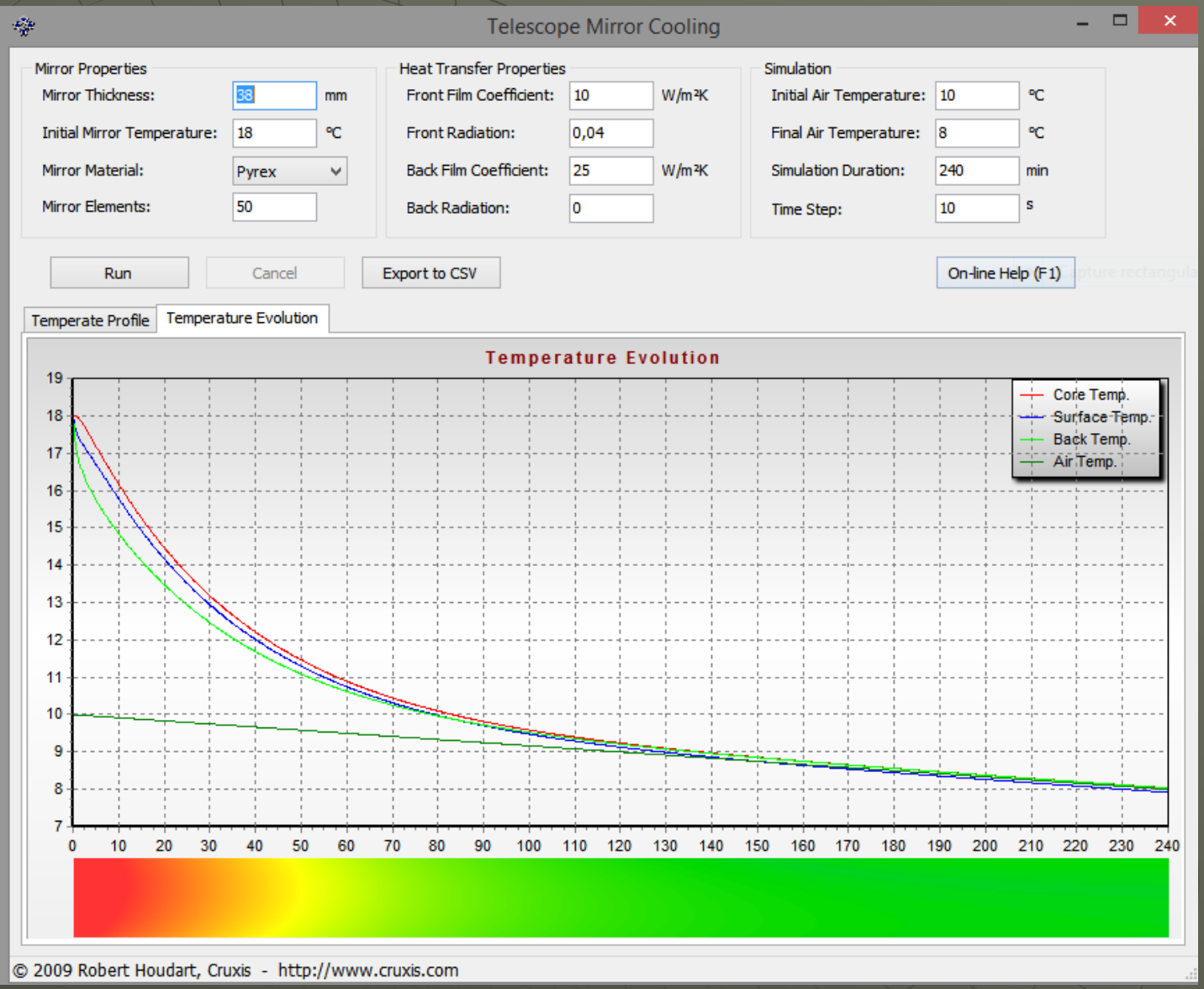


D= 305 mm
Ep= 38 mm

Écart 1°c
=240 min

Comment évolue la température du miroir ?

La maitrise de la thermique du miroir principal: les ventilateurs



Ref du miroir 305 mm
Ep= 38 mm
Avec ventilateurs

Écart 1°C = 70 mm
(contre 240 mm
sans ventilateurs)

Fin de la 1ére partie

- **Dans la Deuxième partie :**
  - **Miroir secondaire:**
    - **qualité-dimension –obstruction-influence sur l'image**
  - **Le rapport F/D- l'offset**
  - **Le porte-oculaire- champ de pleine ouverture**
  - **Latitude de mise au point**
  - **Généralités sur la collimation**
  - **Généralités sur l'influence de l'atmosphère**
  - **Pratique visuelle observationnelle**

The End