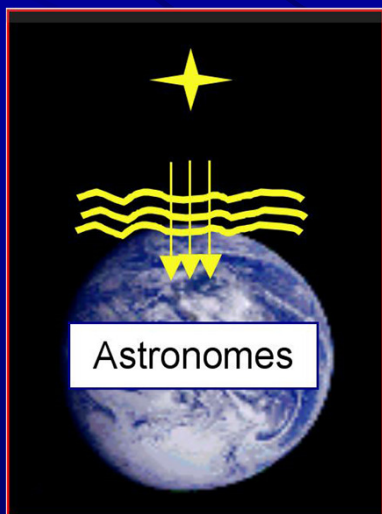


L'image télescopique et l'atmosphère

[quand l'Astronome rencontre le
Météorologue]

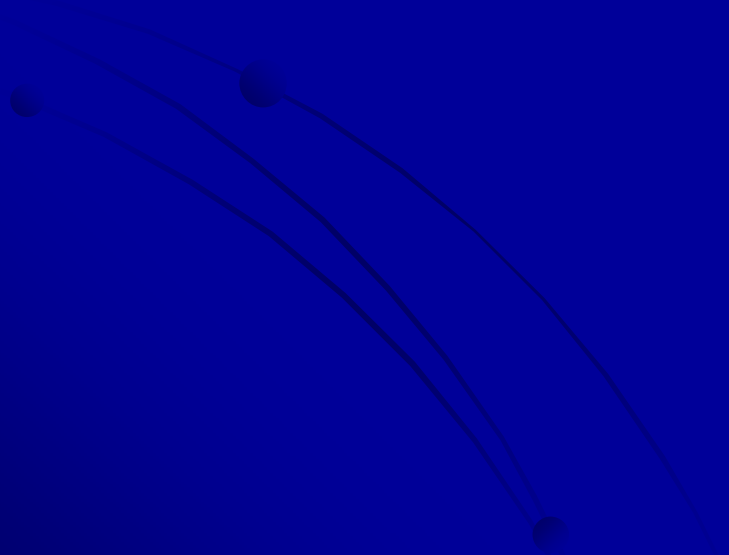
Partie n° 3 : Mise en application
de nos connaissances sur la turbulence



Jean-Luc Mainardi

Club Albédo 38- Voiron- Octobre 2013

Où en sommes-nous?



Récapitulons les acquis de la dernière fois ! (★ diapo la + importante)

Kolmogorov (1941)

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1/\cos \gamma) \cdot [\langle C_n^2 \rangle \cdot \Delta h]$$

Distance zénithale

Longueur d'onde de l'observation

Fried (1965)

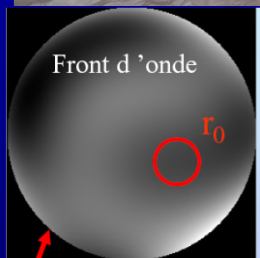
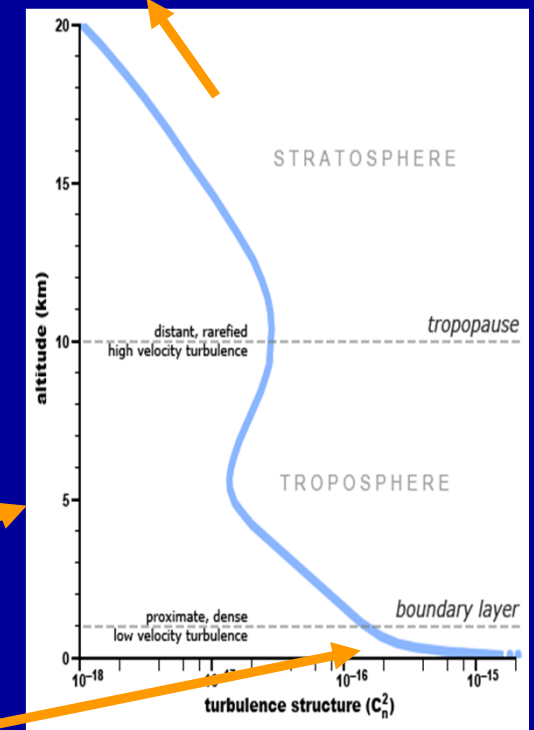
Tatarskii (1961)

Hufnagel (1966)

Richardson (1922) ($\Delta\theta$ dans CLA)

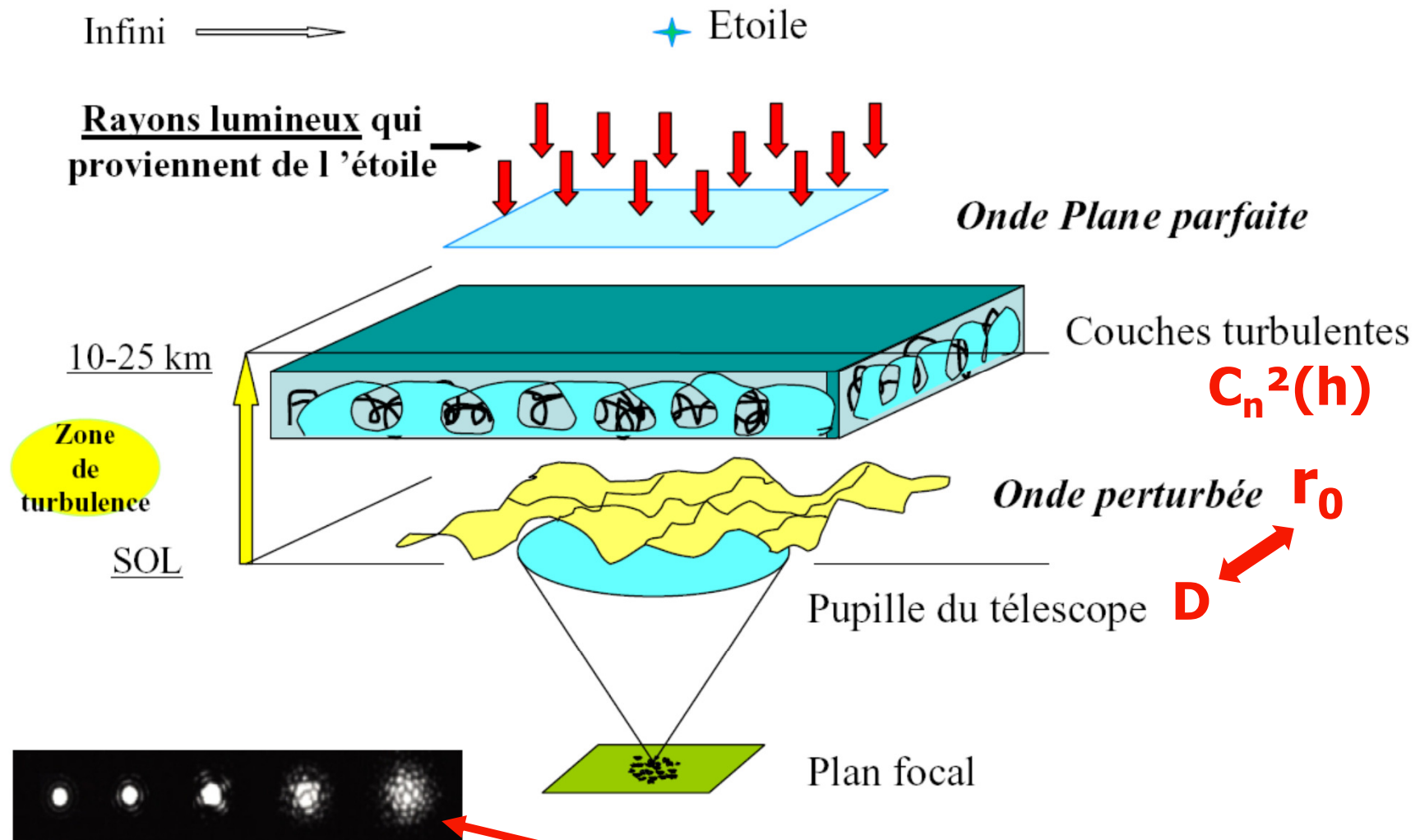
→ Ce qui importe pour l'image astronomique : la valeur du rapport D/r_0

$$\text{Seeing } s = 0,98 (\lambda / r_0)$$



Un schéma pour tout se rappeler

La turbulence optique



Seeing $s = 0,98 (\lambda / r_0)$

Qualité de l'image : D / r_0



Correction du Devoir à la maison

Paramètre de Fried r0 et Seeing s

On se propose de calculer le paramètre de Fried r0 et le seeing s en deux endroits choisis :

Voiron : altitude = 300 m

Col de Restefond : altitude = 2800 m

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- observation visuelle : la longueur d'onde d'observation est $\lambda = 550$ nanomètres (vert)

- objet observé : placé à 60° au-dessus de l'horizon

- la valeur de la constante de structure d'indice C^2n est moyennée à partir de l'atmosphère standard de Hufnagel :

Pour VOIRON $\langle C^2n \rangle = 5. 10^{-17}$ unités MKSA (SI) entre 300 m et 20 km

Pour RESTEFOND $\langle C^2n \rangle = 2,4. 10^{-17}$ unités MKSA (SI) entre 2800 m et 20 km

1ere question :

Pour l'endroit VOIRON, calculer r0 (résultat demandé en cm) et le seeing s (résultat demandé en seconde d'arc).

Calculer D / r0 pour une observation avec une lunette de diamètre 80 mm et pour une observation avec un télescope de 300 mm : que peut-on dire de la qualité des images dans chacun des instruments ?

2ème question :

Pour l'endroit RESTEFOND, calculer r0 (résultat demandé en cm) et le seeing s (résultat demandé en seconde d'arc).

Calculer D / r0 pour une observation avec une lunette de 80 mm et pour une observation avec un télescope de 300 mm : que peut-on dire de la qualité attendue des images à Restefond par rapport à celles de Voiron.

Y-a-t-il intérêt à observer au-dessus de la Couche Limite Atmosphérique (CLA) (limite supérieure 2000 m) ?

Acquis issus du cours

1- expression du paramètre de Fried :

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1 / \cos\gamma) \cdot [\langle C^2n \rangle \cdot \Delta h]$$

avec λ longueur d'onde d'observation, γ = distance zénithale, Δh = hauteur d'atmosphère entre le lieu d'observation et la limite supérieure 20 km et $\langle C^2n \rangle$ constante de structure d'indice moyennée sur toute la hauteur Δh (en unité MKSA (SI) = $m^{-2/3}$)

2- expression du seeing : $s = 0,98 (\lambda / r_0)$ donné en radian

3 - qualité des images (D / r0) → critère de Pickering (D= diamètre de l'instrument)

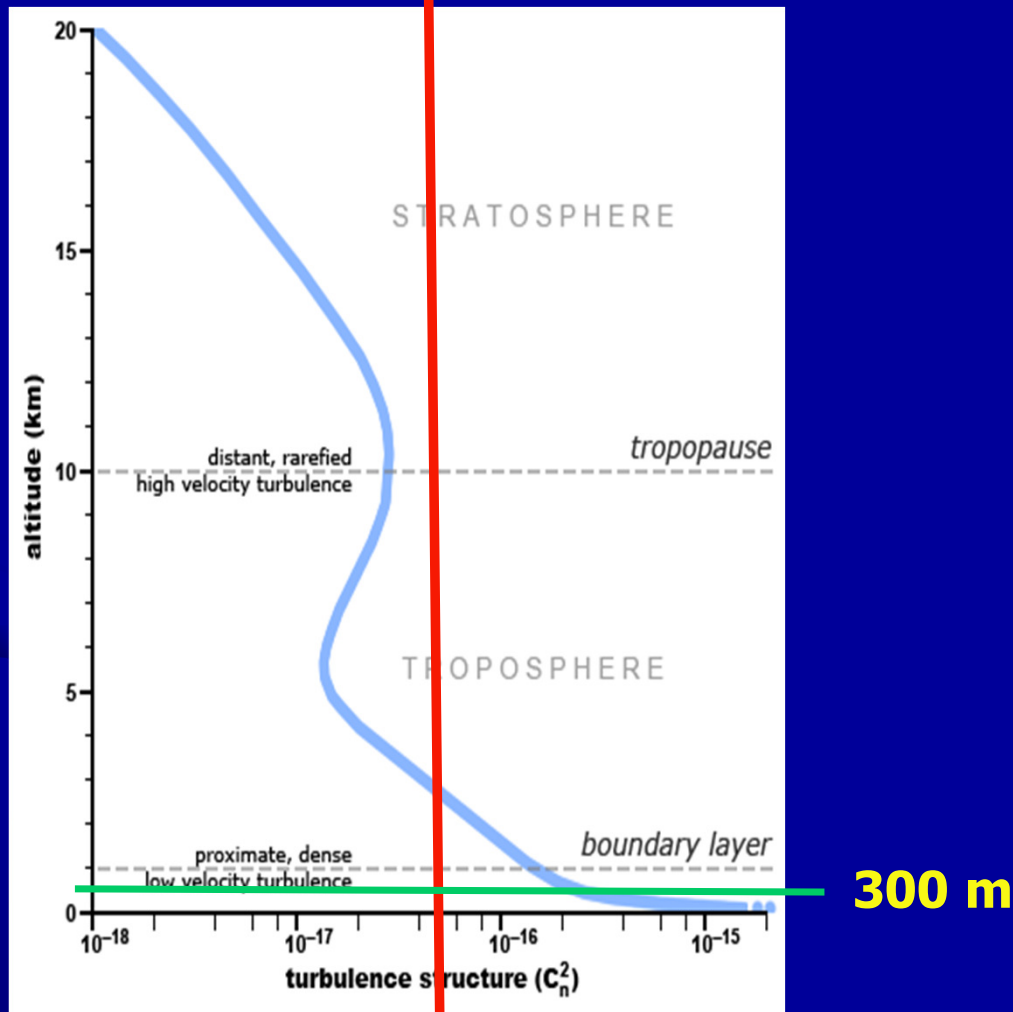
(D/r0) < 2 (Pickering 6) → bonnes images à excellentes images

2 < (D/r0) < 4 (Pickering 4) → images moyennes à médiocres

4 < (D/r0) → mauvaises images

1-cas : Voiron

estimation



Voiron -altitude # 300m

→ je prends mon Hufnagel

Sur la courbe on estime :

$\langle C_n^2 \rangle$ moyen # $5 \cdot 10^{-17}$

$\langle C_n^2 \rangle$ moyen # $5 \cdot 10^{-17}$

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1/\cos\gamma) \cdot [\langle C_n^2 \rangle \cdot \Delta H]$$

Application numérique Voiron :

On observe dans le visible $\rightarrow \lambda = 550 \text{ nm}$

L'objet visé se trouve à 60° au-dessus de l'horizon

\rightarrow distance zénithale $\gamma = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$

Hufnagel Voiron $\rightarrow \langle C_n^2 \rangle = 5 \cdot 10^{-17}$ sur 19,7 km

Calculez r_0 et le seeing à Voiron ?

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1/\cos\gamma) \cdot [\langle C_n^2 \rangle \cdot \Delta H]$$

Application numérique Voiron :

On observe dans le visible $\rightarrow \lambda = 550 \text{ nm} = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

L'objet visé se trouve à 60° au-dessus de l'horizon

\rightarrow distance zénithale $\gamma = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$ et $\cos 30^\circ = \sqrt{3} / 2 = 0,866$

Hufnagel Voiron $\rightarrow \langle C_n^2 \rangle = 5 \cdot 10^{-17}$ sur 19,7 km (19700 m)

$$\begin{aligned} r_0^{-5/3} &= 0,423 \cdot (2\pi / 550 \cdot 10^{-9})^2 \cdot (1 / 0,866) \cdot [(5 \cdot 10^{-17}) \cdot (19700)] \\ &= 0,423 \cdot (1,304 \cdot 10^{14}) \cdot (1,155) \cdot (9,85 \cdot 10^{-13}) \end{aligned}$$

$$r_0^{-5/3} = 62,75$$

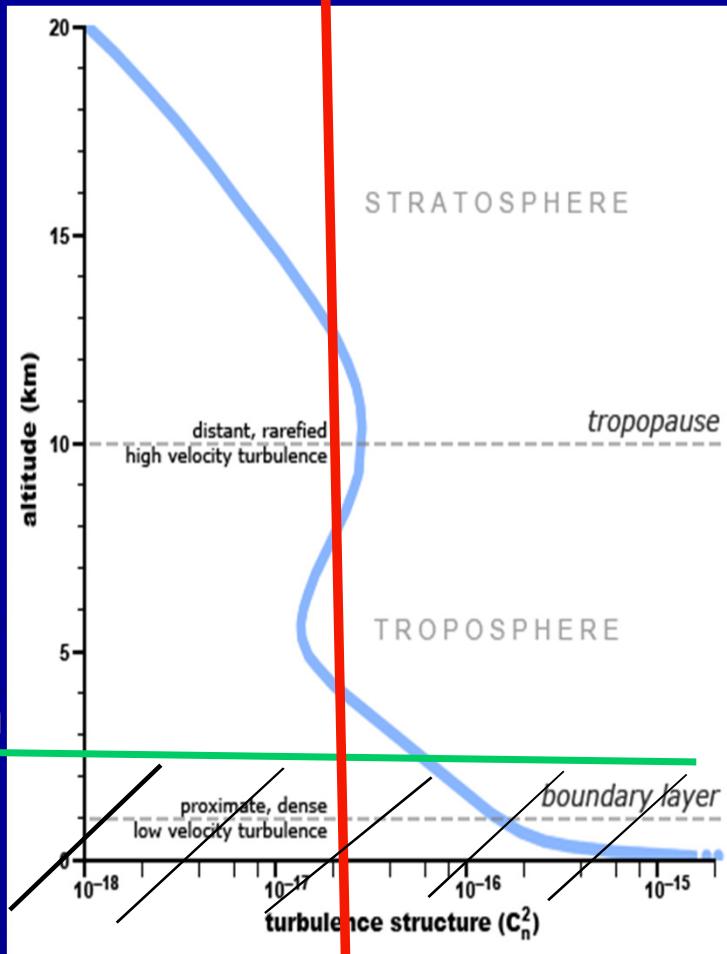
on élève chaque membre de l'égalité à la puissance $-3/5$

$$(r_0^{-5/3})^{-3/5} = r_0^1 = (62,75)^{-3/5} \rightarrow r_0 = 62,75^{-0,6} = [1 / (62,75^{0,6})] = 8,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

\rightarrow à Voiron : $r_0 \# 8 \text{ cm}$ et donc $s = 11 / 8 \# 1,4''$ d'arc

2-cas : Restefond

estimation



Restefond-altitude # 2800 m
→ Hufnagel

Sur la courbe: $\langle C_n^2 \rangle$ moyen # $2,4 \cdot 10^{-17}$

$\langle C_n^2 \rangle$ moyen # $2,4 \cdot 10^{-17}$

r_0 et seeing à Restefond ?

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1/\cos\gamma) \cdot [\langle C_n \rangle \cdot \Delta H]$$

Application numérique Restefond :

Mêmes conditions que précédemment

Mais Hufnagel Restefond $\rightarrow \langle C_n^2 \rangle = 2,4 \cdot 10^{-17}$ sur 17,2 km

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi/550 \cdot 10^{-9})^2 \cdot (1/0,866) \cdot [(2,4 \cdot 10^{-17}) \cdot (17200)]$$

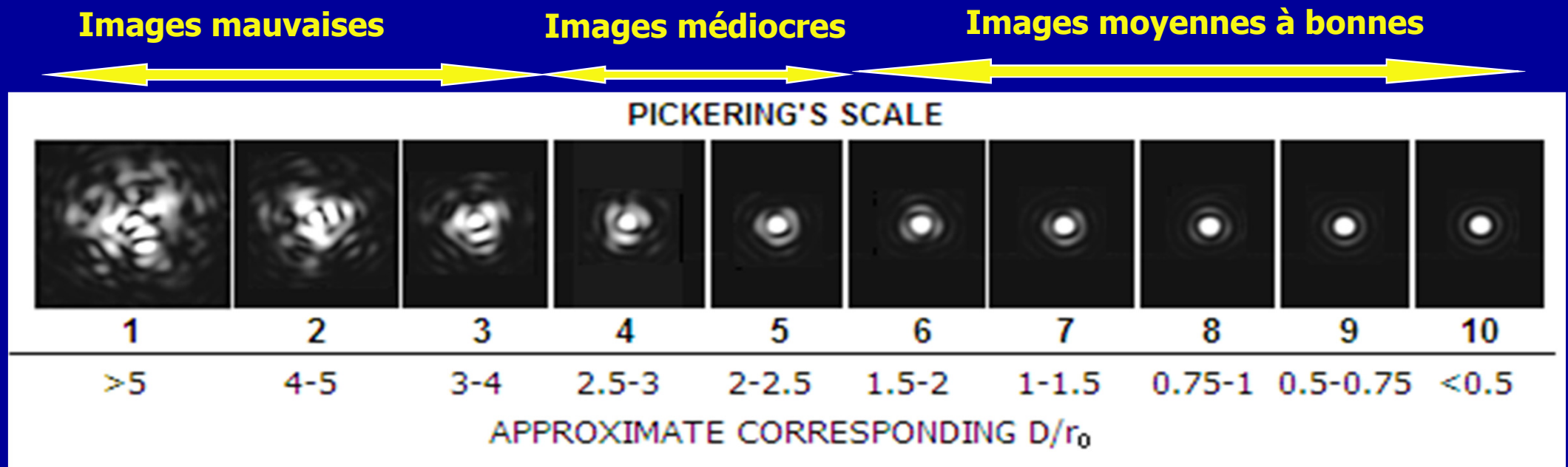
$$r_0^{-5/3} = 26,3$$

$$r_0 = 26,3^{-3/5} = 26,3^{-0,6} = [1 / (26,3^{0,6})] = 0,14 \text{ m}$$

- \rightarrow à Restefond : $r_0 \# 14 \text{ cm}$ et donc $s = 11 / 14 = 0,8$ " d'arc

Conclusion : Voiron: $r_0 \# 8 \text{ cm}$ et Restefond $r_0 \# 14 \text{ cm}$

\rightarrow on a tout intérêt à observer au-dessus de 2000 m
(au-dessus de la CLA) !



VOIRON $r_0 = 8 \text{ cm}$ et $s = 1,4''$

Diamètre 80 mm $D/r_0 = 1 \rightarrow$ bonnes images

Diamètre = 300mm $D/r_0 = 3,7 \rightarrow$ mauvaises images

RESTEFOND $r_0 = 14 \text{ cm}$ et $s = 0,8''$

Diamètre 80 mm $D/r_0 = 0,6 \rightarrow$ très bonnes images

Diamètre 300 mm $D/r_0 = 2 \rightarrow$ images moyennes à bonnes

Attention : les valeurs de r_0 sont fortement dépendantes de l'estimation faite sur Hufnagel

Quand la turbulence $[C_n^2]$ est multipliée par 2, r_0 est divisé par 1,5

Quand la turbulence $[C_n^2]$ est multipliée par 10, r_0 est divisé par 4

Quand la turbulence $[C_n^2]$ est divisée par 2, r_0 est multiplié par 1,5

Troisième Partie -Section 1

**Mise en pratique de ce que nous
avons appris sur la turbulence
quand on utilise le télescope**

Turbulence et Observation visuelle



Estimation visuelle de la turbulence

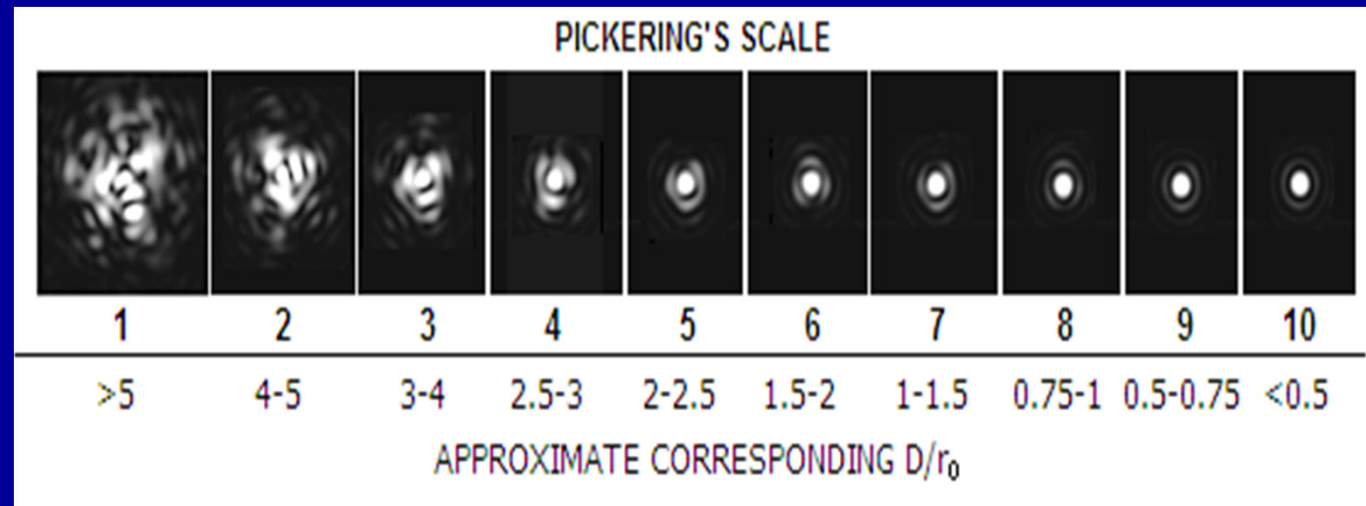
→ Emploi des échelles de turbulence :

266 CONSTRUCTION DU TÉLESCOPE D'AMATEUR

COTE	t	DESCRIPTION (voir fig. 149)
V	$t < 0,25 \rho$	Images parfaites, sans déformation sensible et à peine agitées.
IV	$t = 0,25 \rho$	Anneaux complets, parcourus par des condensations mobiles.
III	$t = 0,5 \rho$	Agitation moyenne, anneaux de diffraction brisés, tache centrale à bords ondulants.
II	$t = \rho$	Agitation vive, anneaux évanouissants ou absents.
I	$t > 1,5 \rho$	Image tendant vers l'aspect planétaire.

$t/\rho < 0.25$	$t/\rho = 0.25$	$t/\rho = 0.5$	$t/\rho = 1$	$t/\rho > 1.5$

Fig. 149. — Échelle de cotation de la turbulence dans un petit instrument.



Pickering

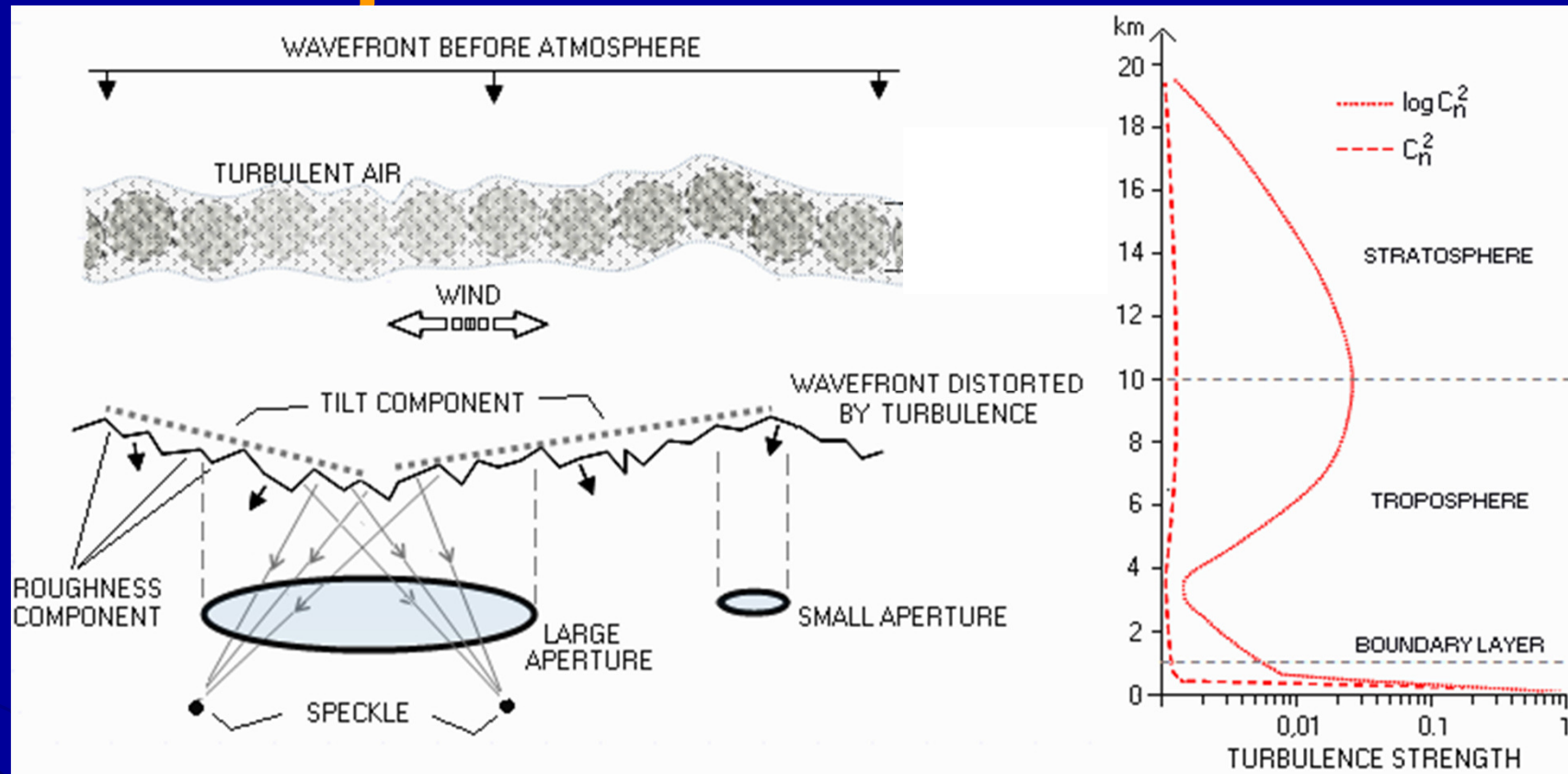
[On a postulé: Danjon III équivaut à Pickering 6]

Danjon-Couder

Par l'observation avec un grossissement suffisant, on "estime" visuellement l'aspect que prend la tache d'Airy et on essaye de se rapporter à une cotation dans une des deux échelles :

→ avec plus ou moins de bonheur on peut accéder à une estimation de r_0

Détaillons le Front d'onde perturbé par la turbulence



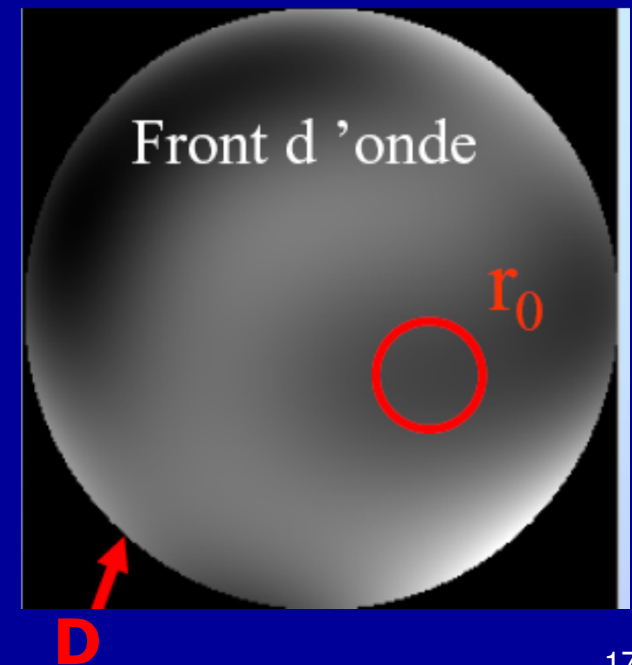
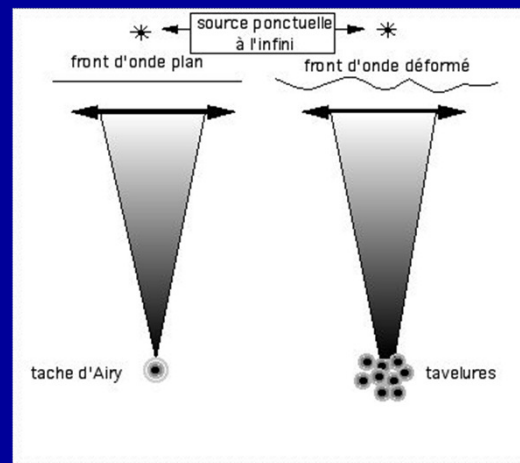
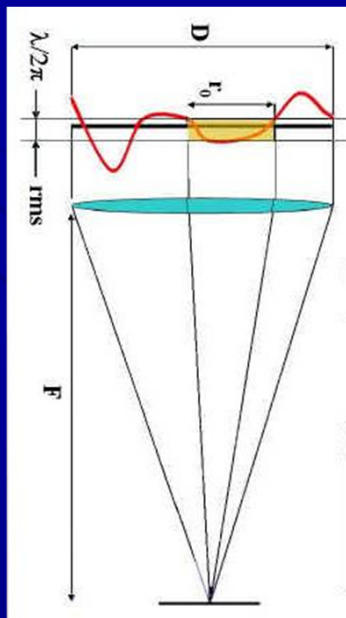
Le front d'onde perturbé par la turbulence va être constitué de vastes portions de surface d'onde présentant une **inclinaison d'ensemble** (Tilt Component) et dans ces portions inclinées on aura des creux et des bosses qui vont constituer une sorte de "**rugosité**" (Roughness component) → ces **deux composantes** différentes du front d'onde perturbé vont déterminer l'altération de la figure d'Airy.

Conséquences 1: l'agitation de l'image

Les surfaces de dimensions r_0 (faible rugosité), qui vont donc donner de bonnes images peuvent se trouver sur des portions de l'onde déformée qui ont des inclinaisons différentes, se modifiant et évoluant avec le temps: les images vont bouger dans le plan image \rightarrow c'est l'agitation qui va donc dépendre du « Tilt » .

- Si r_0 est de l'ordre de D : on aura une image qui s'agitiera dans tous les sens

- si $r_0 \ll D$ on aura plusieurs images s'agitant dans tous les sens: les tavelures (ou speckles)

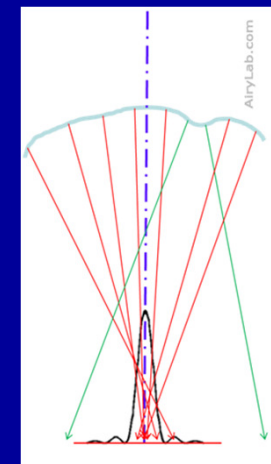
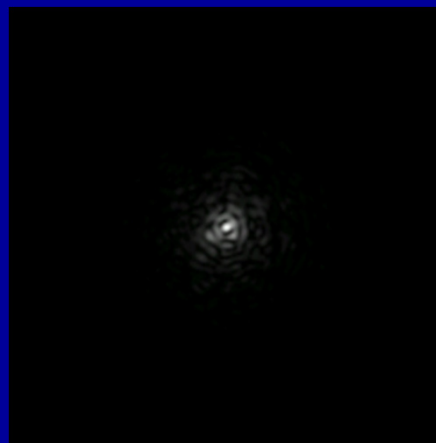
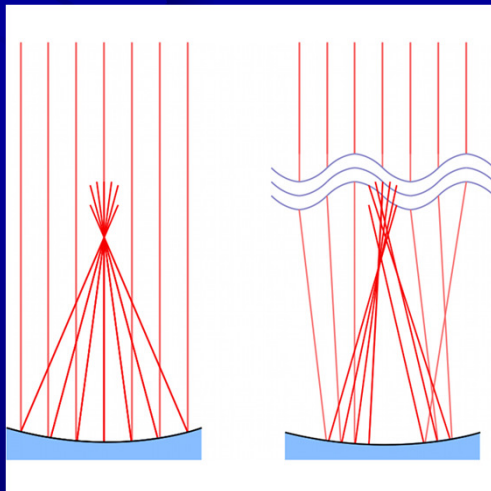


Conséquence 2 : l'altération de la figure d'Airy

La partie "rugueuse" de la surface d'onde du fait des déphasages, va modifier la répartition de l'énergie lumineuse dans l'image: déformation du disque-renforcement des anneaux: la figure d'Airy va en être fortement altérée et la conséquence est que l'énergie lumineuse va se répartir sur une plus grande surface.

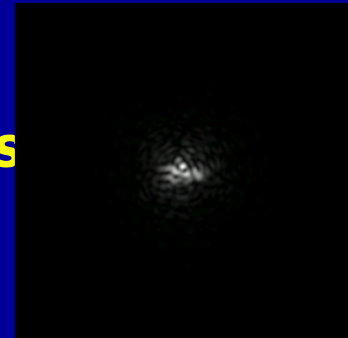
On ne va plus reconnaître la figure d'Airy mais à la place on aura un « patatoïde » dont la forme fluctue constamment et qui émet des aigrettes lumineuses.

C'est le rapport D / r_0 qui va déterminer le degré d'altération de la figure d'Airy pour le télescope de diamètre D .



Observation à l'oculaire : cas du planétaire ou des étoiles doubles

L'œil est un instrument d'optique qui intègre l'image sur 50 ms, c'est-à-dire qu'une image nouvelle est envoyée au cerveau toutes les 50 ms (temps de pose de l'œil de l'œil en quelque sorte # 1 / 20^{ème} de seconde)

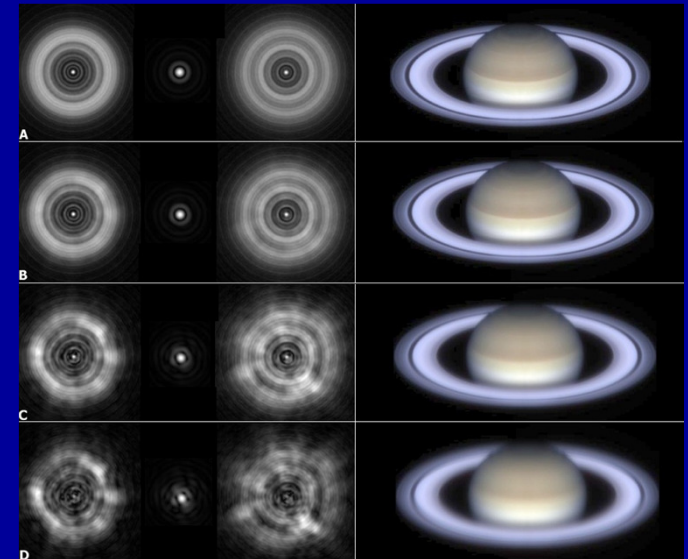


- Si l'agitation de l'image n'est pas trop rapide et si le D / r_0 n'est pas trop important [D pas trop grand et/ ou bon seeing] l'œil aura le temps de bien discerner la tache qui s'agite dans tous les sens: on reconnaîtra en gros la figure d'Airy avec son disque central plus ou moins déformé et ses anneaux évanescents



seeing 'croissant' →

On pourra détecter des étoiles doubles (mais pas faire de mesure)

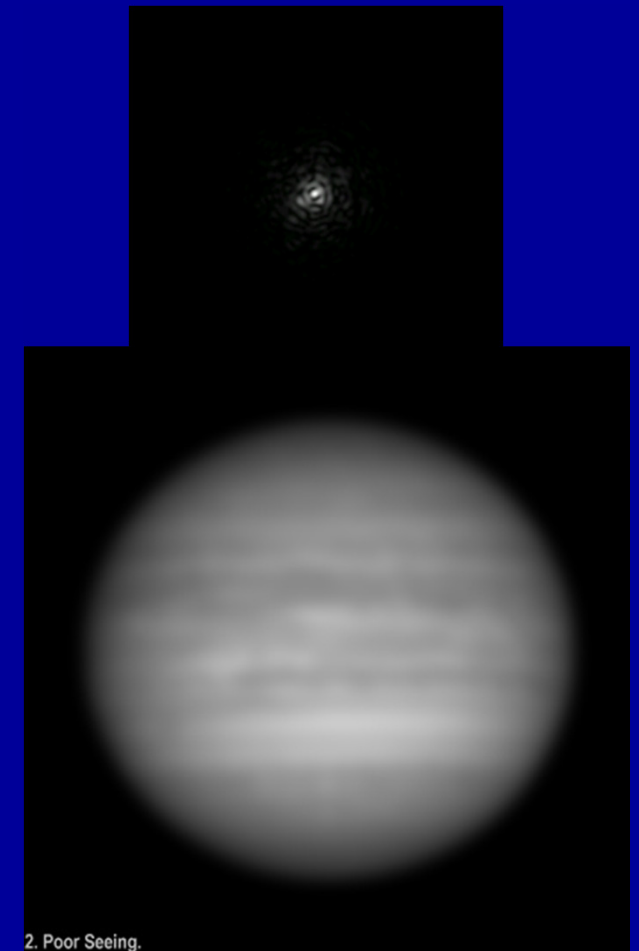
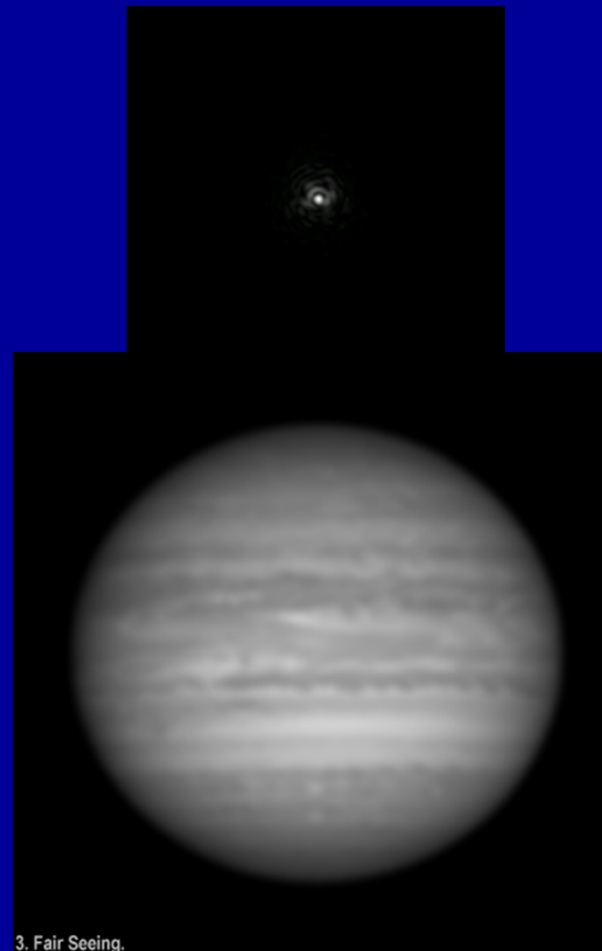
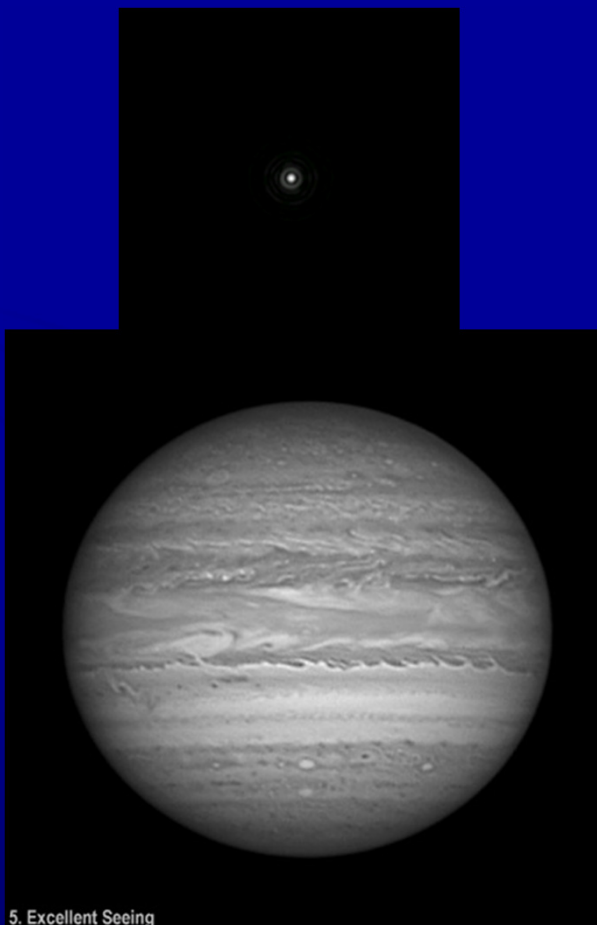


En planétaire on aura accès à des détails plus ou moins importants¹⁹

- Si le D/r_0 devient important [D plus grand ou seeing plus mauvais] les taches deviennent nombreuses et agitées et l'œil n'arrive plus à suivre : l'image se brouille et tend à devenir une tache étalée de dimension importante.

- On ne peut plus mettre en évidence des séparations d'étoiles doubles et en observation planétaire on n'aura plus accès qu'aux gros détails les plus contrastés

→ la résolution chute énormément



Seeing et observation visuelle : → choix du grossissement

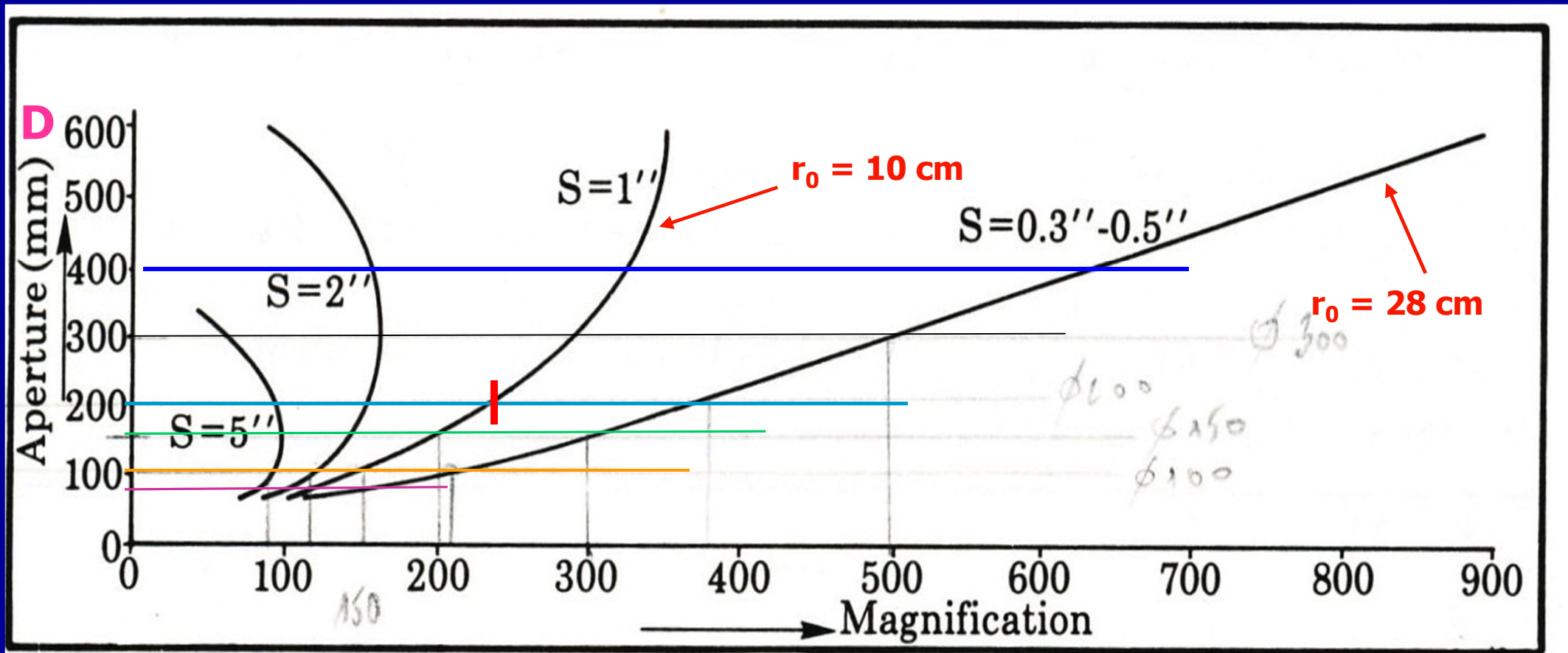


Fig. 18.10 Optimum Magnification in the Presence of Scintillation. (Turbulence)

Star Testing Astronomical Telescopes-H Suiter

Grossissement optimal en présence de turbulence

Pour $s = 1''$ → G_x croit proportionnellement au diamètre jusqu'à $D = 200\text{mm}$, mais au-dessus de 200mm les possibilités de grossissement diminuent de façon drastique ! → on doit adapter le grossissement au niveau de turbulence.

En conclusion: pour le planétaire et les étoiles doubles :

→ Importance du rapport D / r_0

On a vu que le paramètre de Fried était lié à une répartition statistique des déphasages sur la surface d'onde: il s'ensuit que l'on peut attacher → une probabilité à chaque valeur de r_0 et donc au rapport D/r_0 :

Fried: Probabilité P de bonne vision

$D/r_0 = 2$	$P = 0,986$
$D/r_0 = 3$	$P = 0,765$
$D/r_0 = 4$	$P = 0,334$
$D/r_0 = 5$	$P = 0,10$
$D/r_0 = 6$	$P = 0,02$

Comment décrypter les probabilités P ?

- Avec une valeur de site r_0 donnée et dans des conditions d'observations telles que $D / r_0 = 2$ on voit la figure d'Airy pendant 98,6 % du temps d'observation
 - les images sont généralement "bonnes"
 - Avec un r_0 tel que $D / r_0 = 3$ on voit la figure d'Airy pendant 76 % du temps
 - les images sont assez souvent "moyennes à bonnes"
 - Avec un r_0 tel que $D/r_0 = 4$ on voit la figure d'Airy un tiers du temps
 - Avec un r_0 tel que $D/r_0 = 5$ on voit la figure d'Airy en gros 10 % du temps
 - c'est ce qu'on appelle le « creux de turbulence »
- Se souvenir que la détection des détails dans l'image astronomique est liée à la visibilité de la figure d'Airy

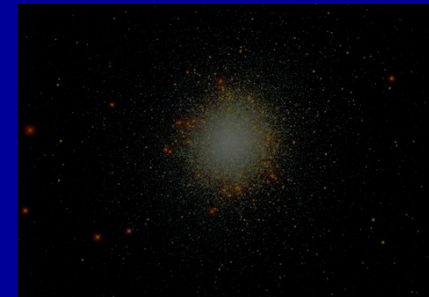
Turbulence et observation ciel profond

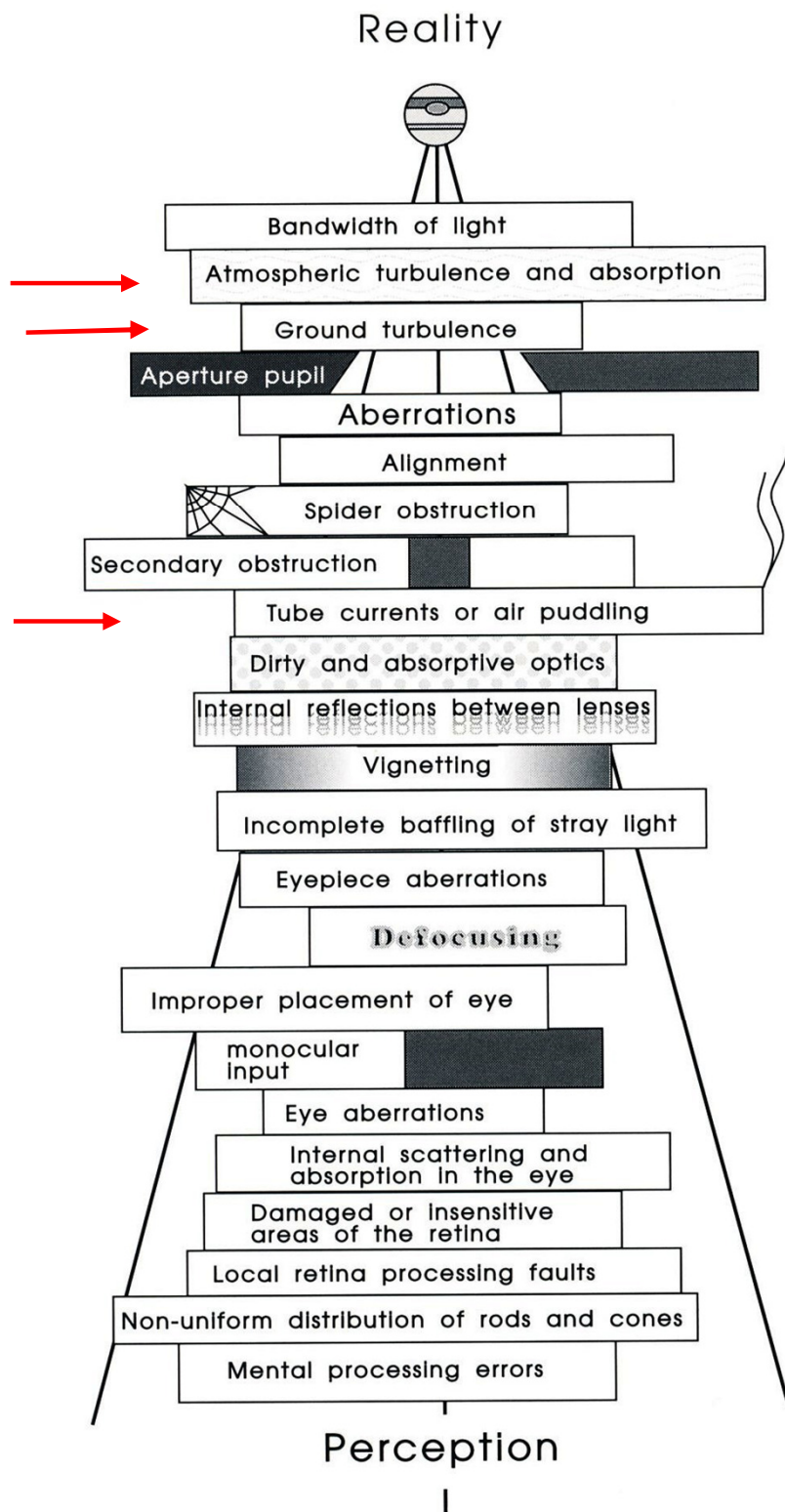
- En observation astronomique du ciel profond, l'œil travaille essentiellement en **détecteur de contrastes** : Le contraste [$\gamma = (b-B)/B$ avec B et b = brillances] le plus faible que l'œil puisse détecter est de l'ordre de 0,03 (Françon)
- A ce niveau l'œil est incapable de percevoir de fins détails: il voit des taches grisâtres au contour mal défini se détachant sur un fond plus ou moins noir. Dans ces conditions la perte de visibilité de détails du fait de la turbulence est secondaire par rapport au gain de luminosité apporté par les grands diamètres : le rapport D / r_0 prend beaucoup moins d'importance.
- C'est la raison pour laquelle les observateurs qui font du ciel profond sont moins concernés par la turbulence, et peuvent donc "monter" les diamètres : ce qui est favorable à la détection des contrastes du fait du gain de luminosité
→ *Un télescope de 300 mm sera toujours plus performant sur le ciel profond qu'une lunette de 100mm quelles que soient les conditions de turbulence.*

Remarque: Néanmoins pour des objets du ciel bien contrastés, par exemple les amas globulaires, la turbulence peut intervenir en ce sens qu'elle peut brouiller la détection des étoiles individuelles se projetant sur l'amas : on ne voit plus l'aspect granuleux de l'amas.



M13



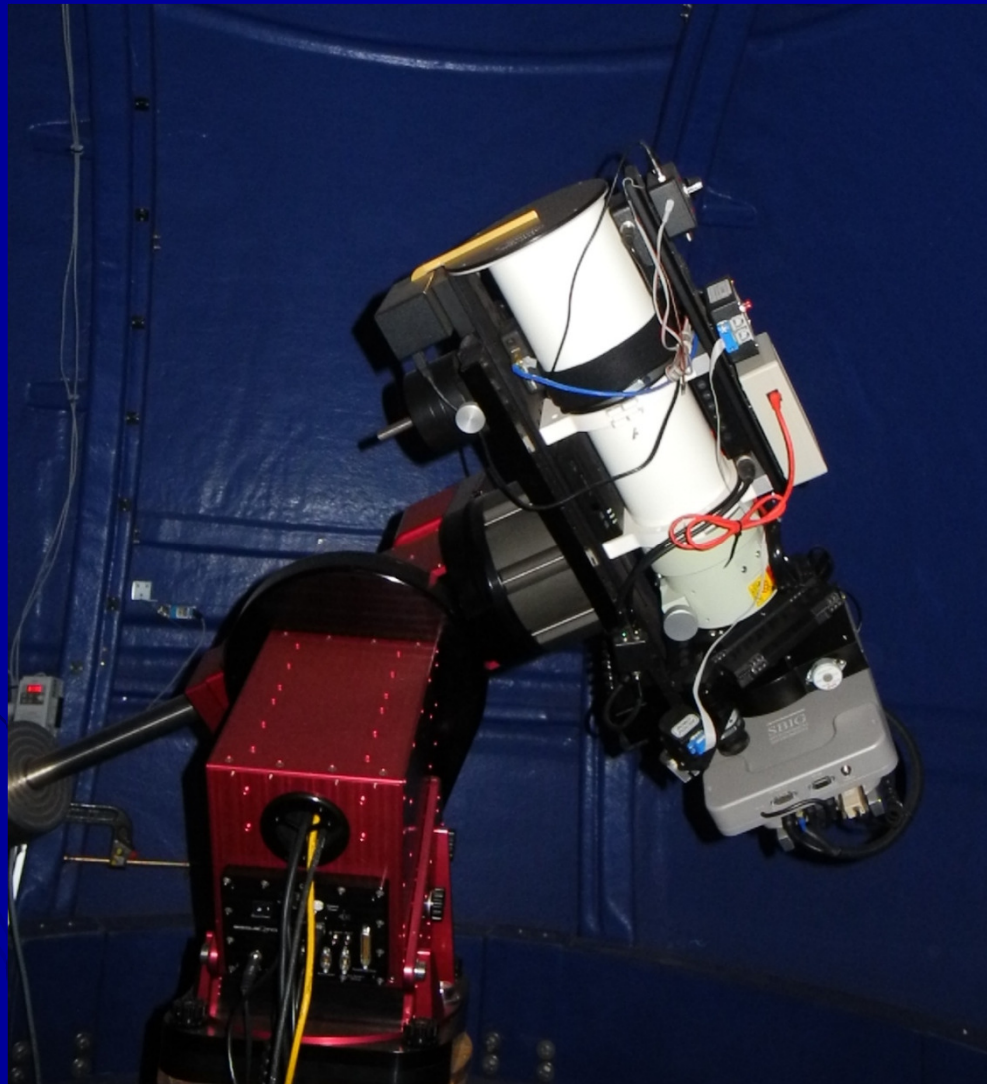


Inventaire des causes de mauvaise image astronomique

[Ou encore les tas de bonnes raisons de ne pas voir ce qu'on veut voir !]

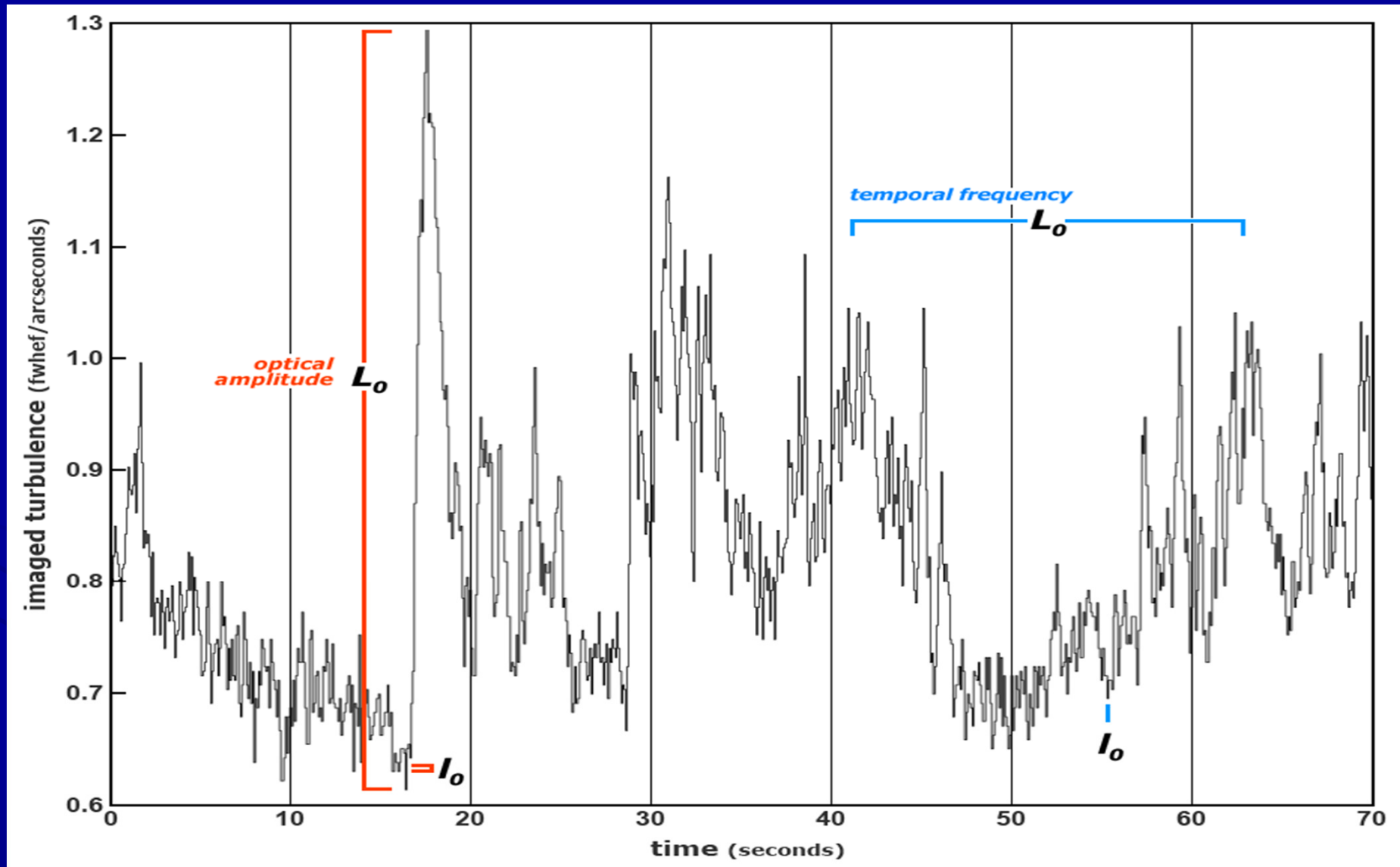
« Star Testing
Astronomical Telescopes »
H R Suiter

Turbulence et Astrophotographie

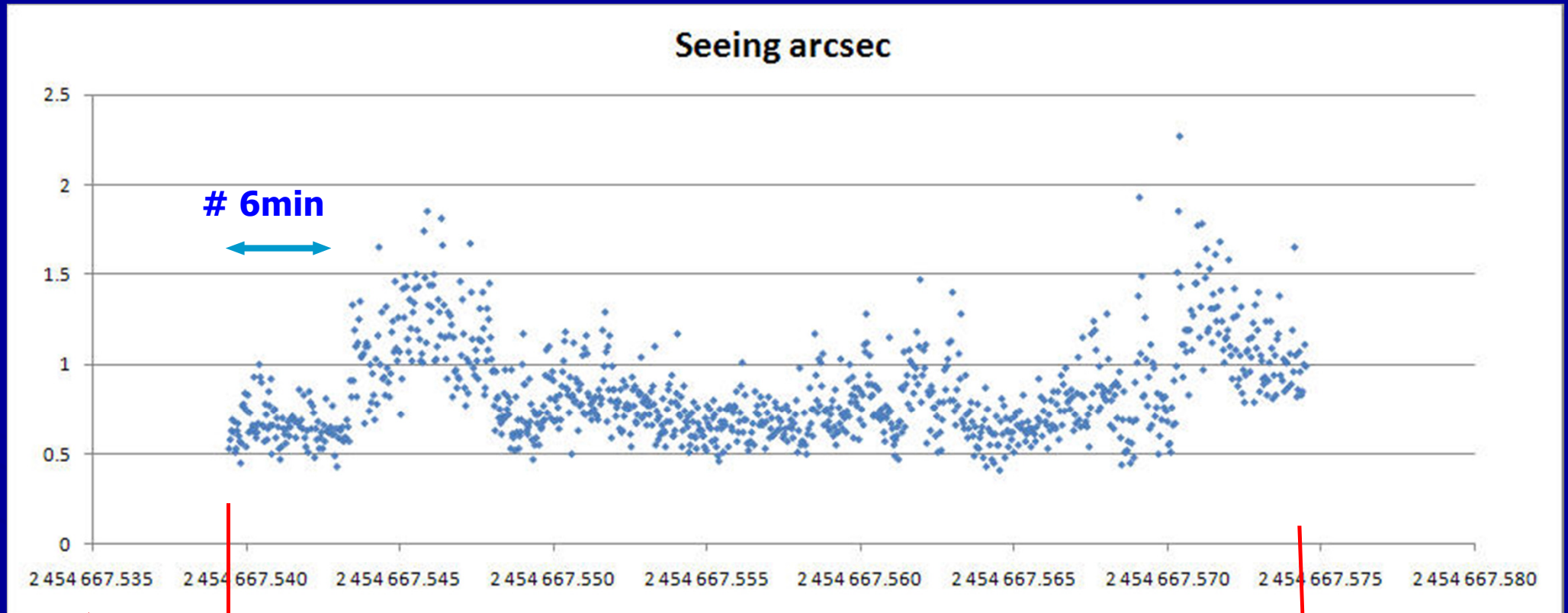


Université
d'Adélaïde
Arkaroola
Oct 2012

Les fluctuations du seeing sur 1 minute

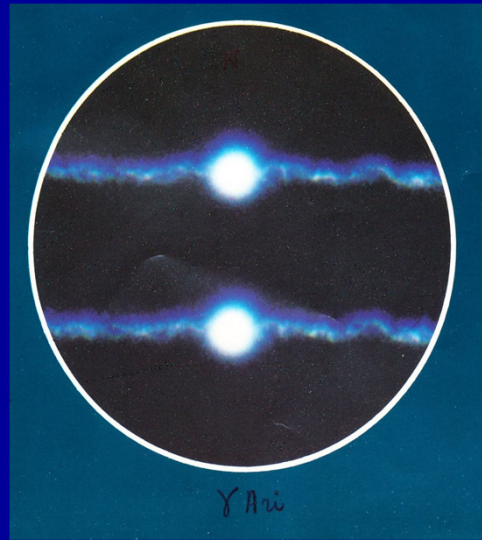


Les fluctuations moyennes du seeing sur # 1 heure

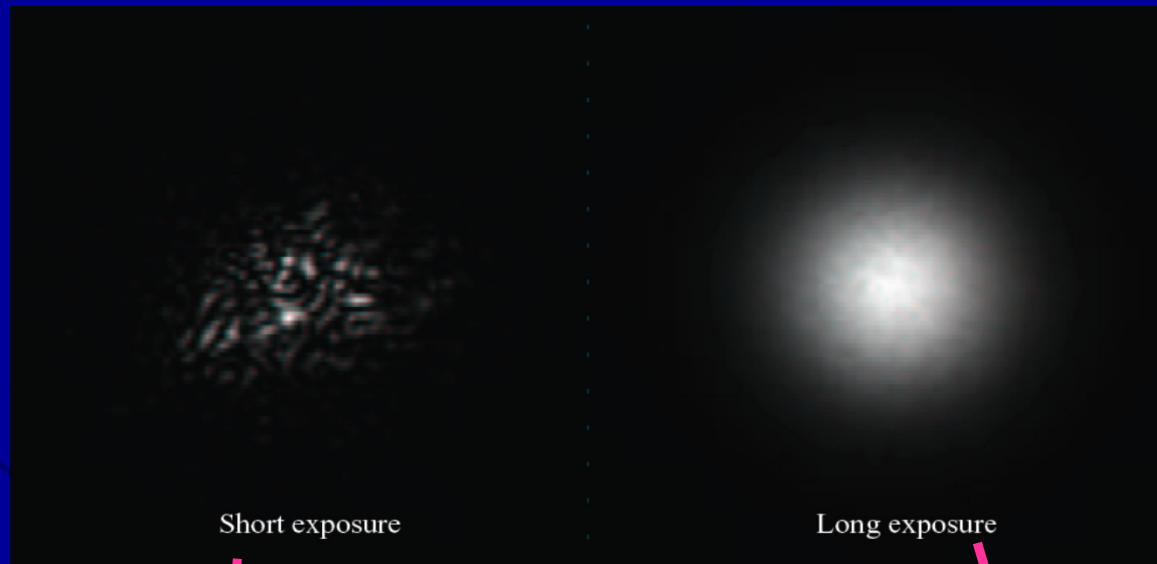


Jours Juliens

50 minutes



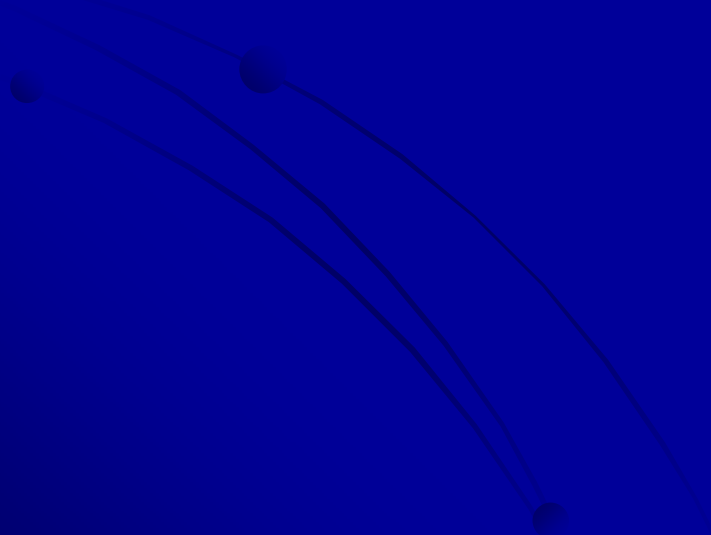
Etoile Double γ Arietis
mv= 4,7/4,8 sép=8''



Courte pose :
Lucky imaging

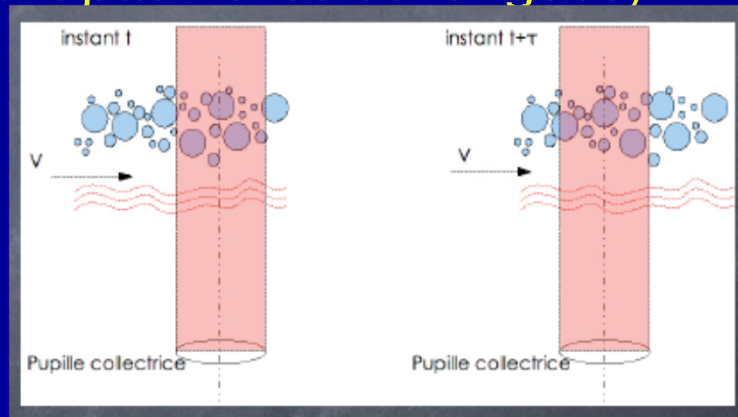
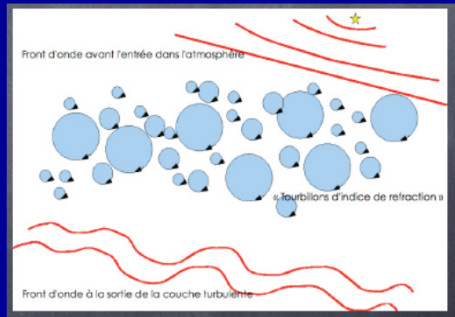
Pose longue:
Strehl ratio

Astrophotographie avec expositions courtes



Temps de cohérence

- Le front d'onde perturbé est emporté par le vent présent dans la / les couche(s) turbulente(s) à la vitesse V .
- On définit le temps de cohérence τ_0 comme le temps pendant lequel la turbulence n'évolue pas et semble être "gelée" (les déformations du front d'onde n'évoluent pas : elles sont figées).



Temps de cohérence :

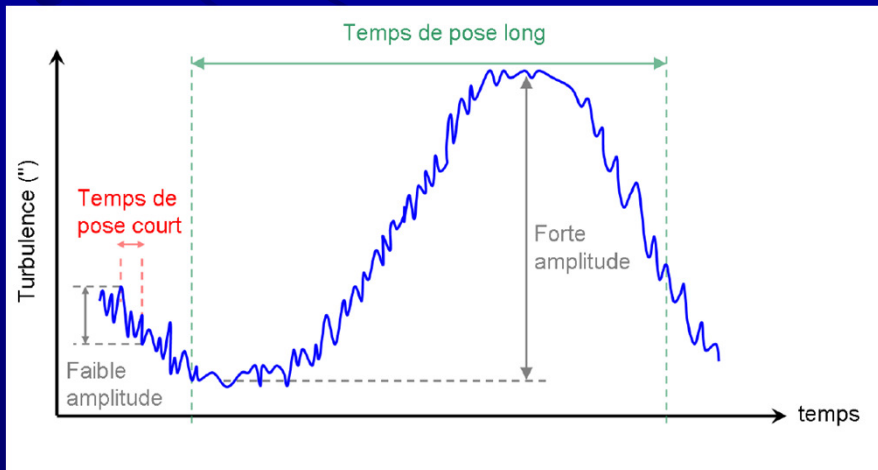
$$\tau_0 = 0.31 \frac{r_0}{V}$$

**Exemple: V est la vitesse du vent
10 m/s (36 km /h)**

r_0 #10 cm (longueur de cohérence de l'atmosphère)

$\tau_0 = 0,3 \cdot 0,1 / 10 = 3$ millisecondes

**Pour réaliser des photographies
« Haute-Résolution » il faut que le
temps de pose soit de l'ordre de τ_0**



Loi de probabilité de capturer une image "limitée par la diffraction" en fonction de D / r_0 (Fried-1977)

Probability P of capturing a diffraction limited image as a function of telescope diameter D and seeing parameter r_0 :

$$P \sim 5.6 \cdot \exp[-0.1557(D/r_0)^2]$$

r_0 depends on λ as $r_0 = 0.98\lambda/\epsilon$
where ϵ is the size of the seeing disk

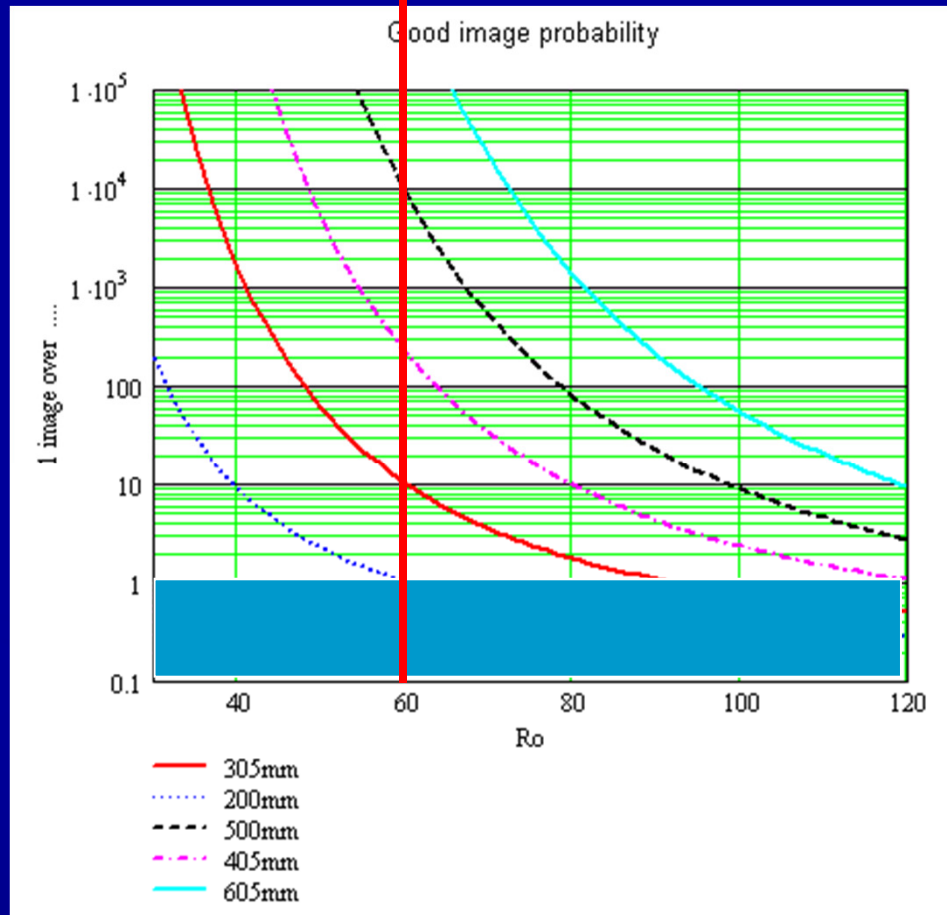
[Valable pour D/r_0 supérieur à 3,5]

→ Même si $r_0 < D$ la probabilité n'est pas nulle d'avoir une bonne image

Solution=

Prendre beaucoup de photos en rafale puis procéder à une sélection:

→ Technique du « Lucky Imaging »
(.avi avec Webcam)



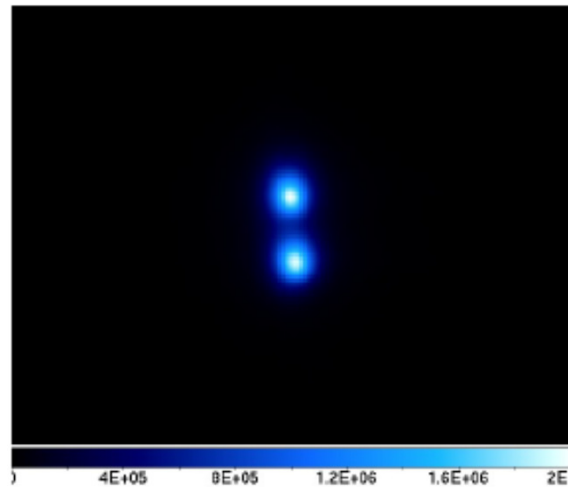
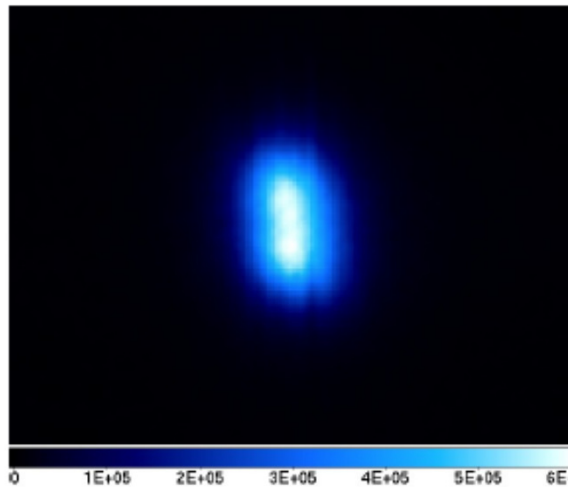
Astrophotographie



Ch Buil

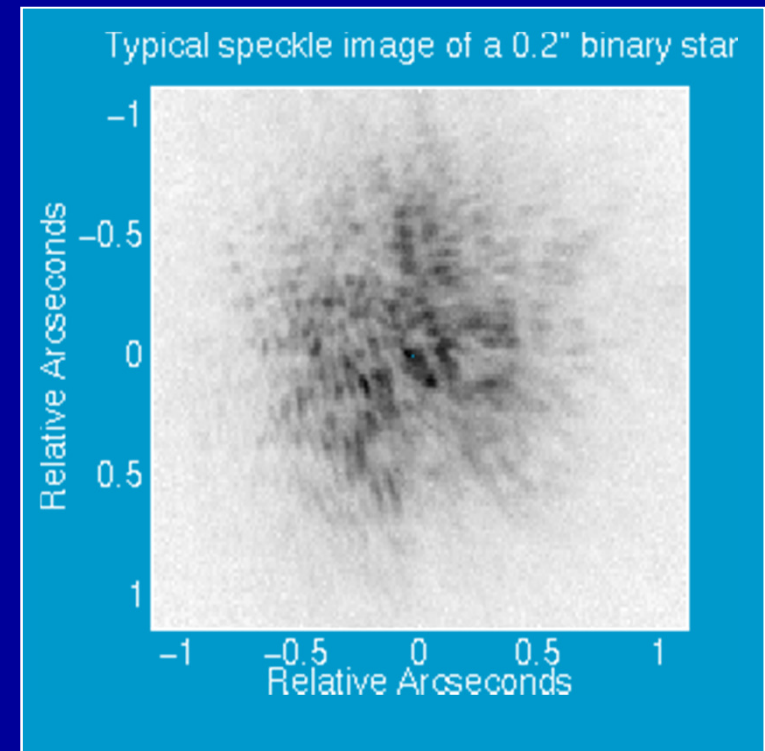
Séquence ϵ 2 Lyrae à la webcam

GJ 4282: 1.4" Separation Binary
R-mag~9.6

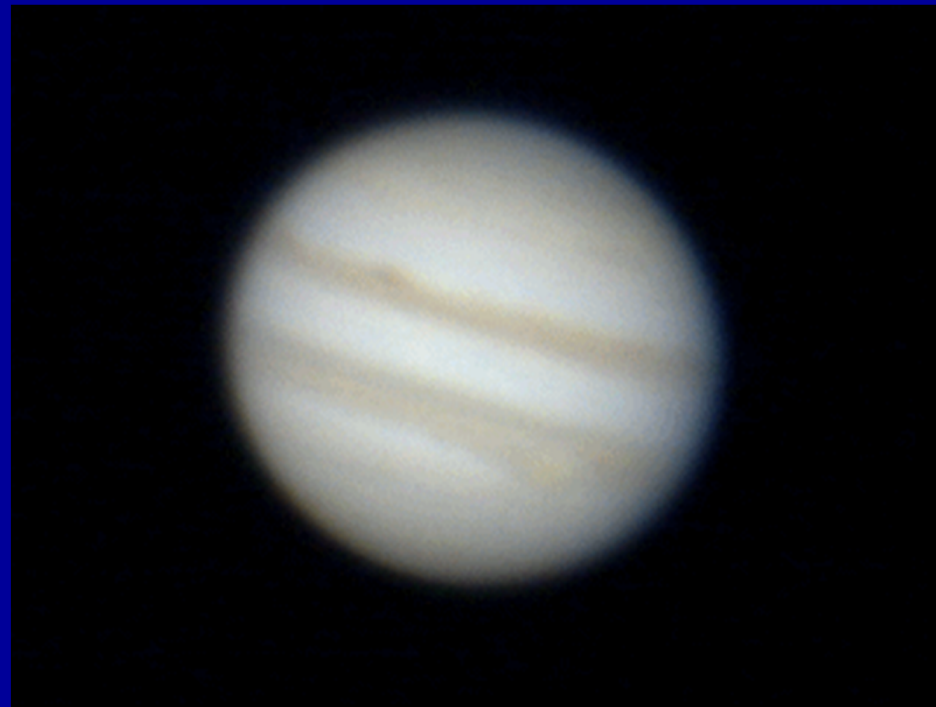


1% Selection at 10Hz
Total Exposure: 13.5s

10 Hz=10 photos par seconde



Etoile double

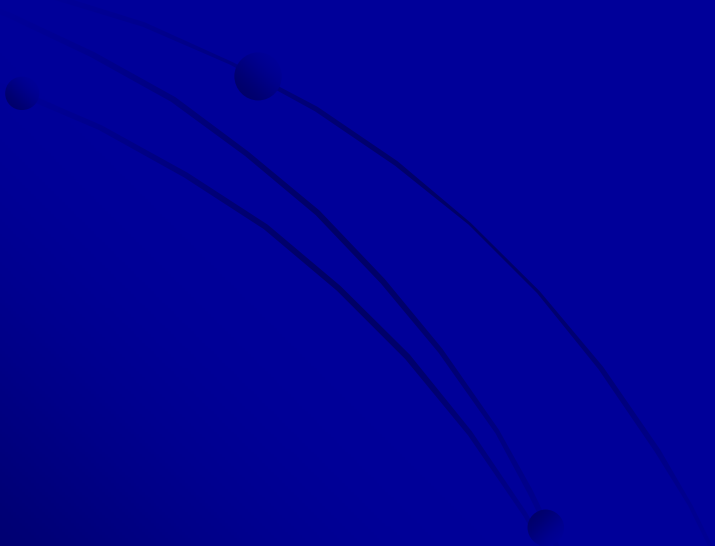


Slooth Lucky Imaging

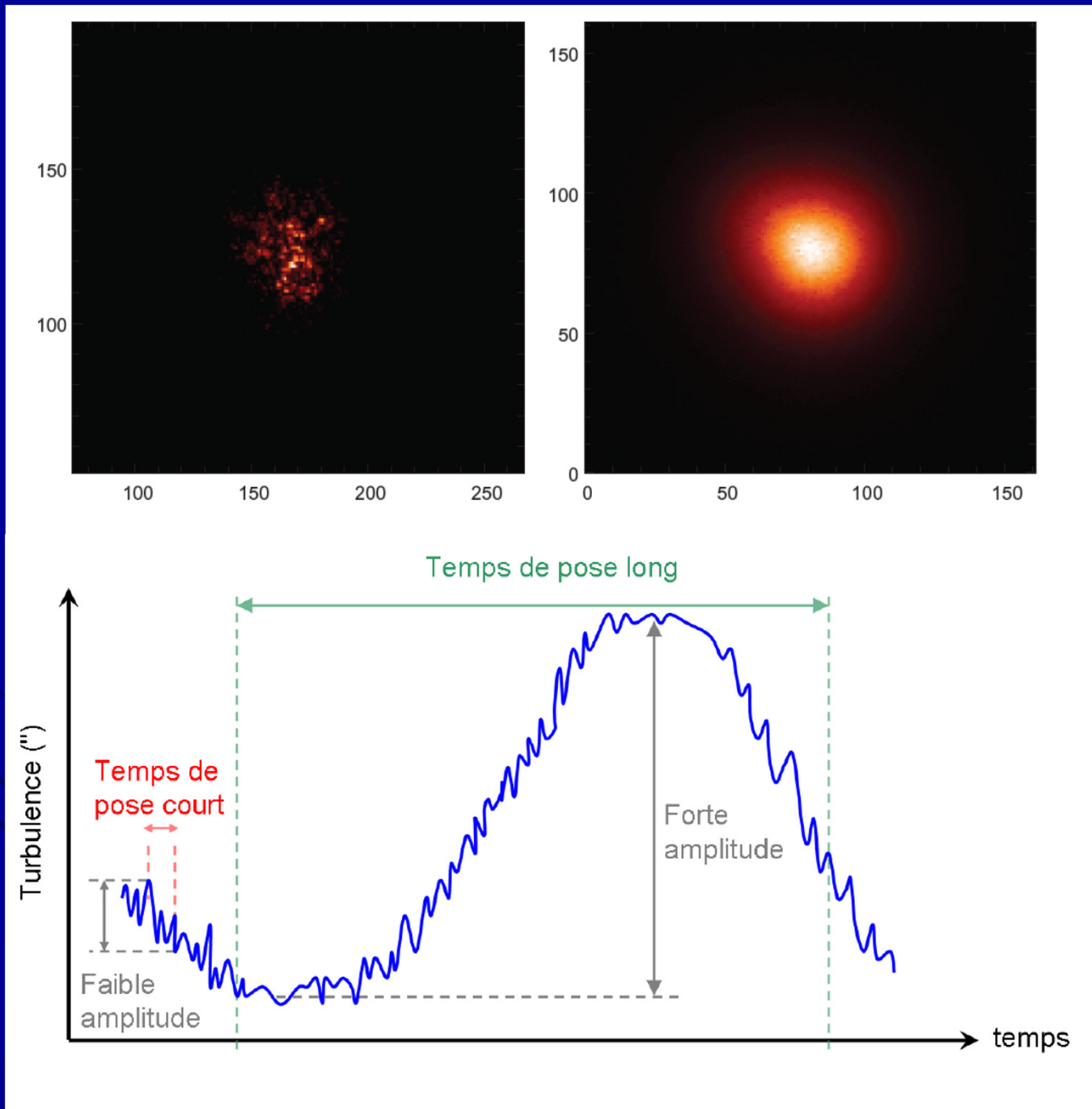
Sélection d'une image sur un enregistrement .avi
d'une centaine d'images :

→ dans les creux de turbulence le télescope montre ses possibilités

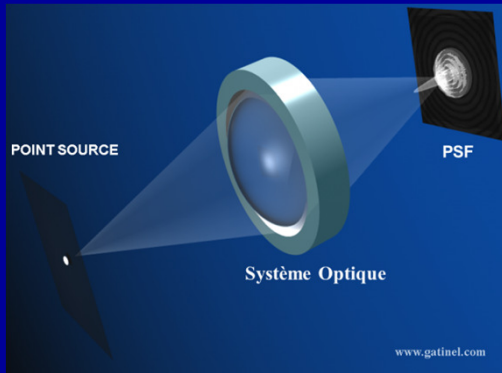
Astrophotographie en longue pose



Astrophotographie en longue pose



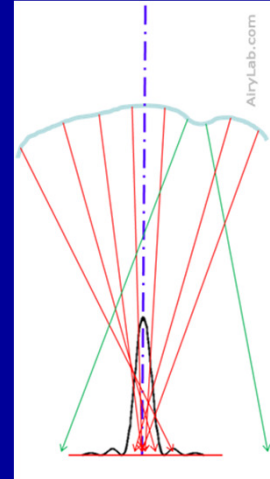
Fonction d'étalement du point (PSF) et Rapport de Strehl (SR)



Tout instrument d'optique est caractérisé par une grandeur qui s'appelle:

« **Fonction d'étalement du Point** » (FEP)

→ c'est la loi mathématique de distribution de l'énergie lumineuse dans le plan image.
(Point Spread Function-PSF en anglais).



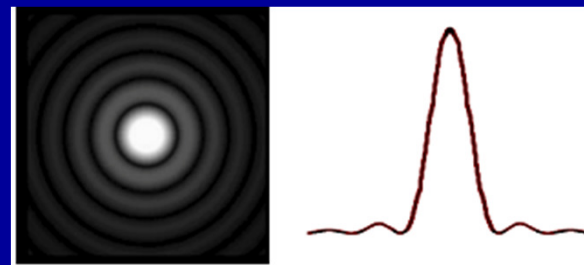
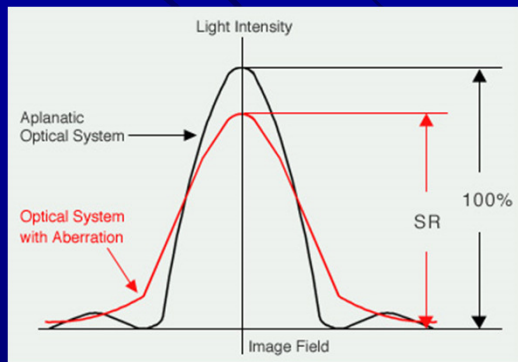
→ Un instrument parfait donnera d'un point lumineux la figure d'Airy théorique :
La FEP d'un instrument traduit donc la plus ou moins grande perfection optique de l'instrument (correction des aberrations).

→ Une bonne approche de la FEP d'un instrument est donnée par le Rapport de Strehl (Strehl Ratio SR) :

Intensité du pic lumineux image donnée par l'instrument

SR =

Intensité du pic lumineux image d'Airy théorique



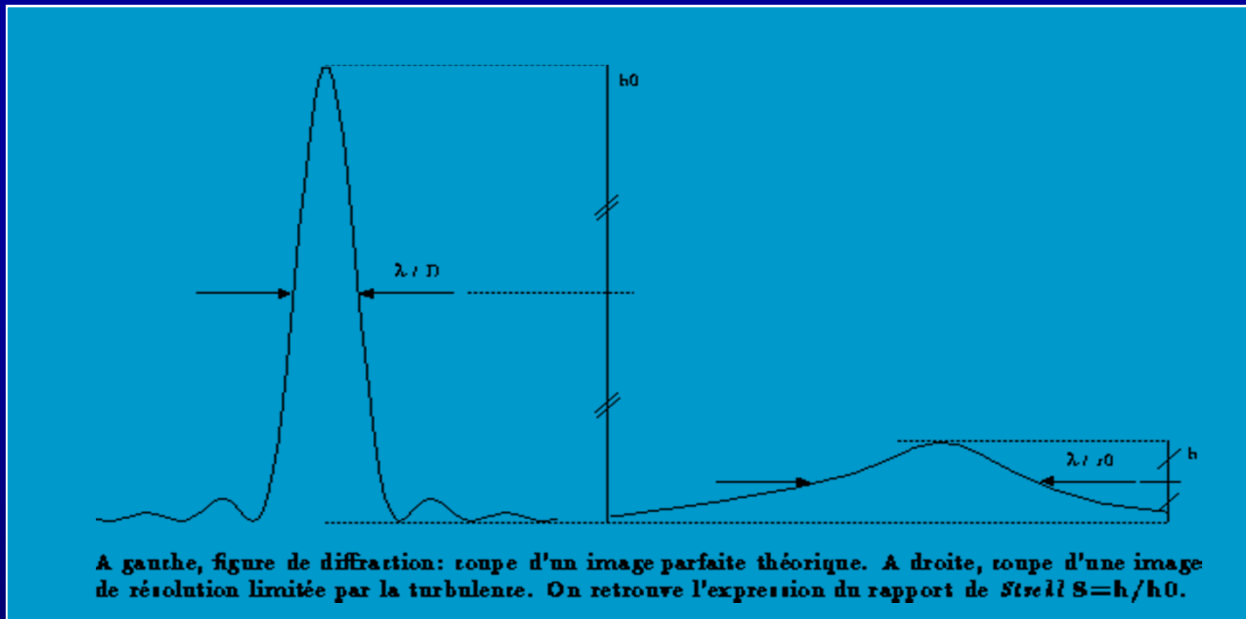
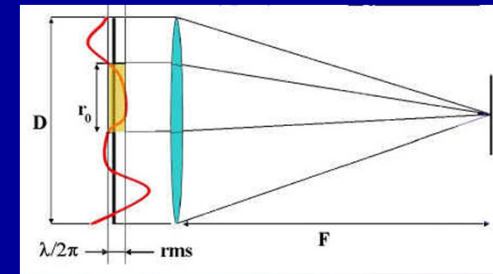
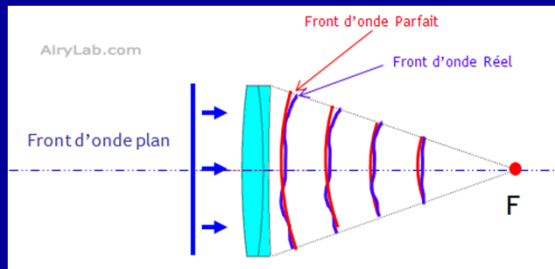
← **Figure d'Airy théorique**

Quelques valeurs de “ Strehl ratio ”

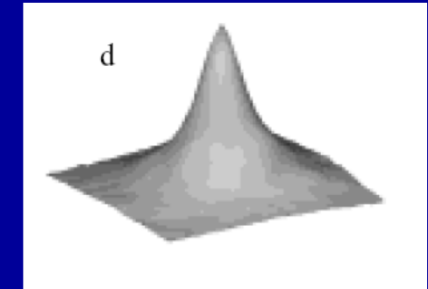
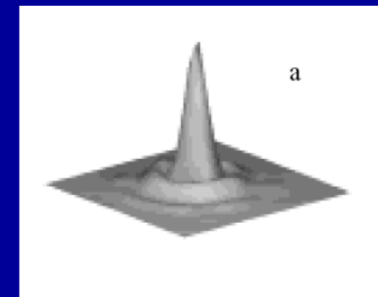
- Un instrument satisfaisant au critère de Rayleigh ($\lambda/4$ PTV) (instrument dit « limité par la diffraction » dans le commerce) aura un SR égal à 80%
- les meilleures lunettes ont un SR supérieur à 95 %
- Les télescopes les plus performants ont un SR de l'ordre de 85% (avec obstruction inférieure à 0,3)
- L'œil ouvert à 6 mm a un SR de # 10 % !!! mais un SR >90% avec une pupille de 1 mm)
- Télescope Hubble (diamètre 2,4 m) :
 - SR = 80 % dans le visible
 - SR = 98 % à 1,2 μ (IR proche)

Rapport de Strehl et turbulence

Toute surface d'onde plus ou moins perturbée (déformée) qui se focalise au foyer de l'instrument va impacter le rapport de Strehl. Ces déformations de la surface d'onde peuvent venir des aberrations optiques de l'instrument mais également de la turbulence :
 → on peut donc définir un Rapport de Strehl « turbulent »



Le rapport de Strehl turbulent est relié au seeing (FWHM) (étalement de la figure d'Airy)



Quelques valeurs de "Strehl ratio" en présence de turbulence

→ La valeur de r_0 va impacter le Strehl ratio :

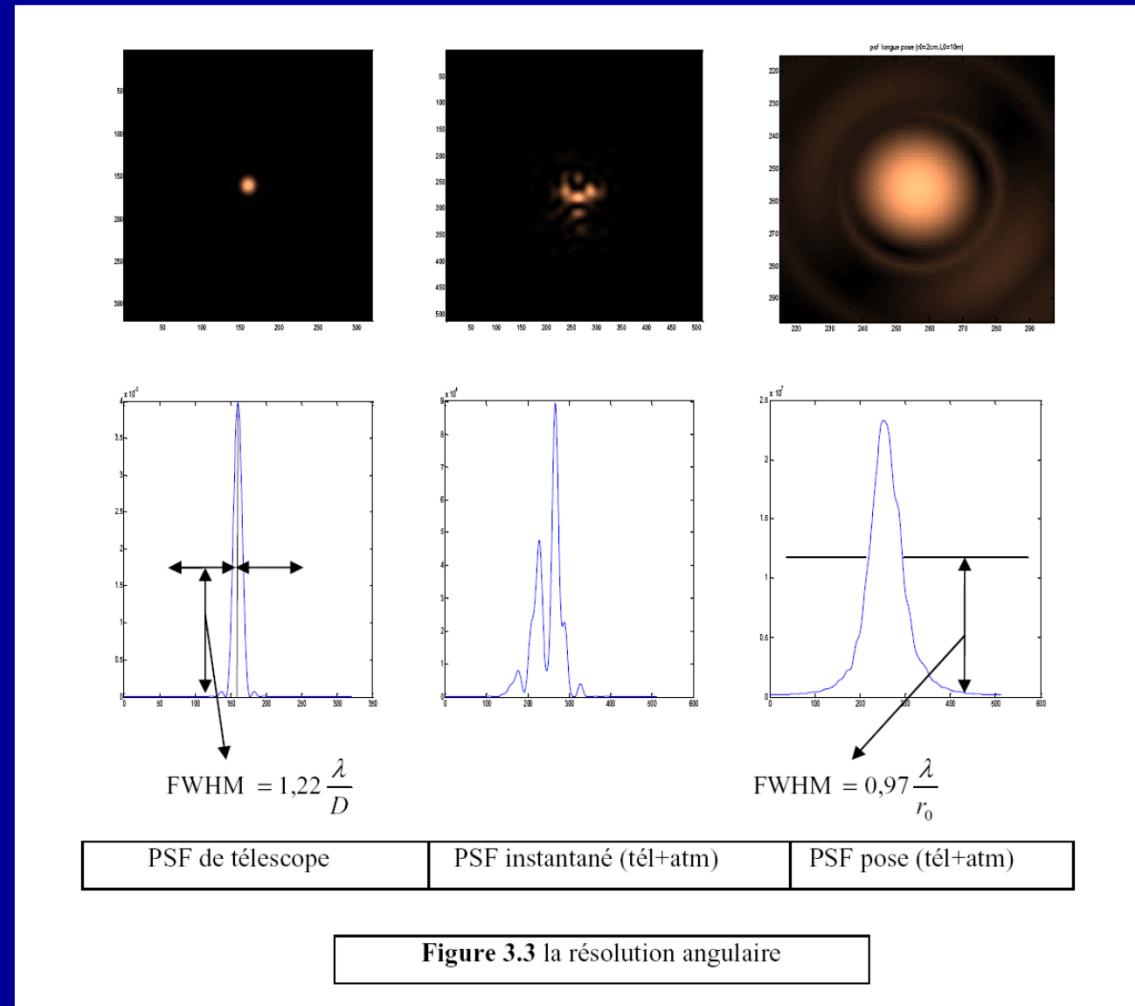
-pour le paramètre de Fried r_0 ($\approx \lambda / 6$ RMS) et $D/r_0 = 1$
alors $SR = 35\%$ (c'est pour $\lambda/4$ PTV que $SR = 80\%$!)

-pour obtenir un $SR = 80\%$
il faut $D / r_0 = 0,4$!
(Si $D = 100$ mm alors $r_0 = 25$ cm)

- $D/r_0 = 1,7$ donne $SR = 9\%$

- $D/r_0 = 2,5$ donne $SR = 1\%$

-Pour $D/r_0 = 10$, la « tache d'airy »
a une largeur 10 fois plus grande
que pour $D/r_0 = 1$



pose longue avec suivi

α Ursa Minoris

Mv = 2 et 9

Sép = 19'' d'arc

Noter l'empâtement
de α

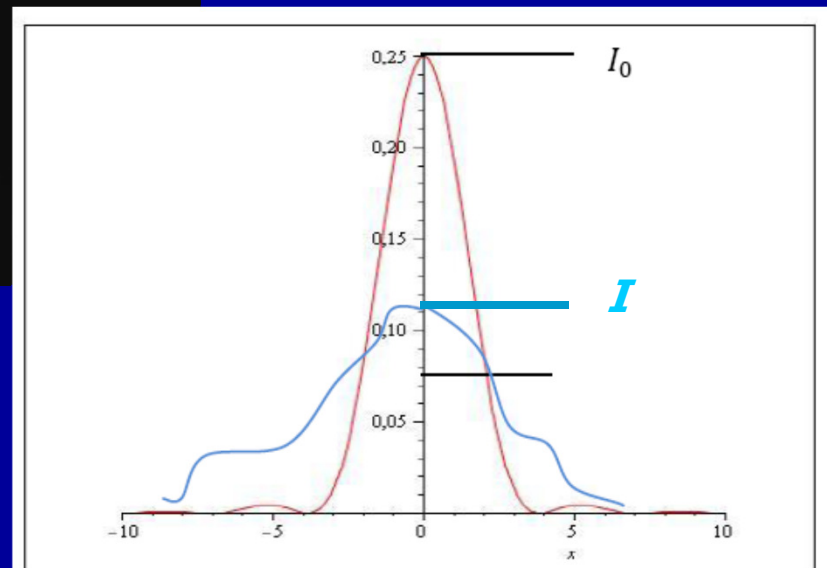
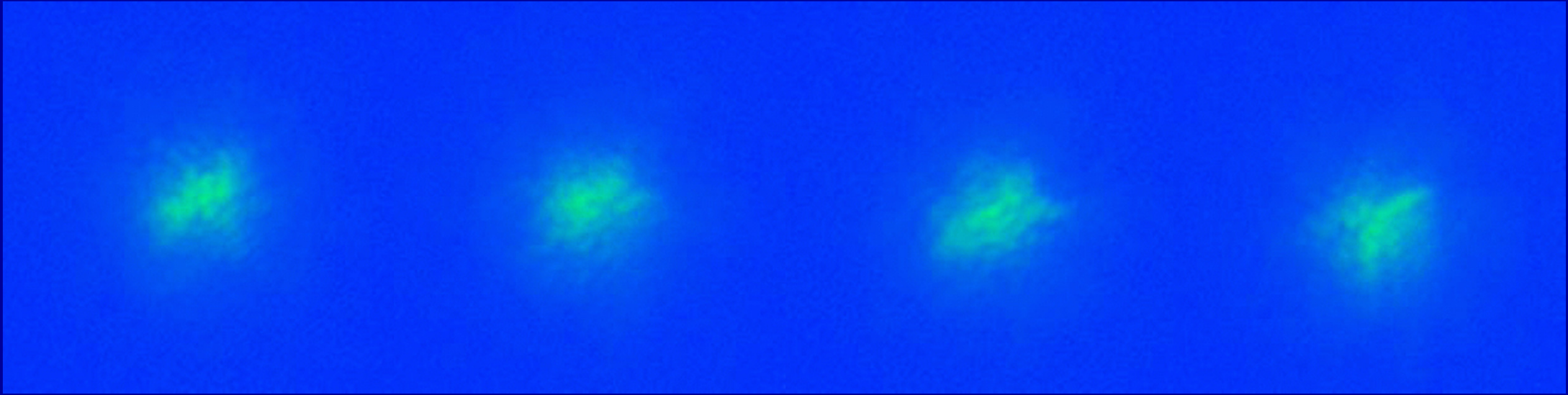
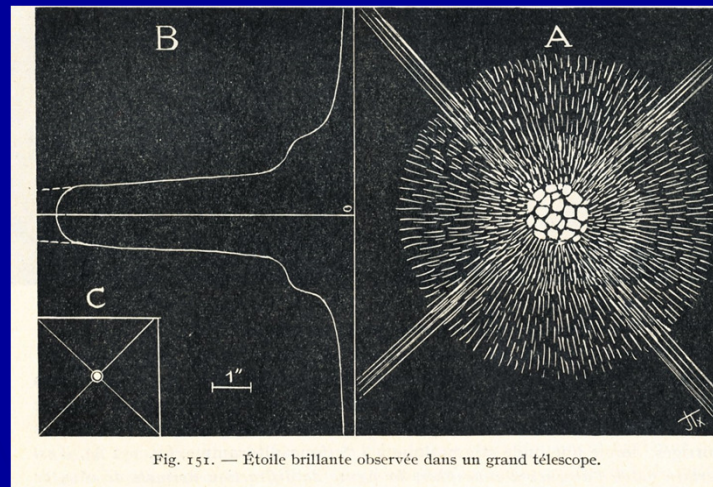


Figure 11 : Rapport de Strehl.

Image d'une étoile dans un grand télescope



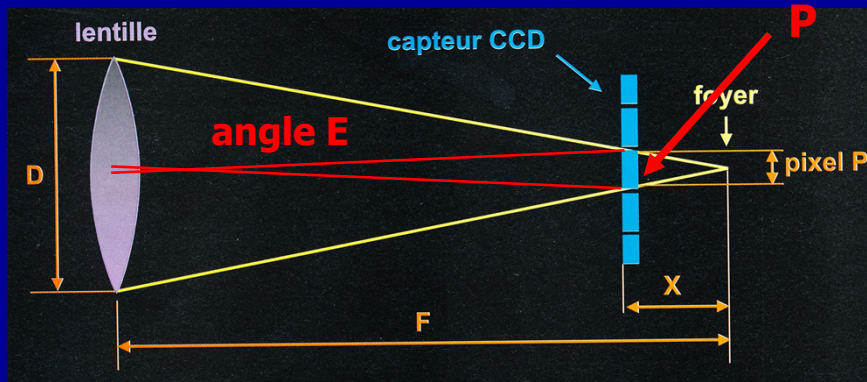
ESO-Télescope de 3,6 m
Séquence de poses de 5 s sur une étoile



Seeing et astrophoto numérique :

→ choix de l'Echantillonnage E

- Suivant le type de photo numérique choisie on définit l'échantillonnage E c'est-à-dire le champ couvert par un photosite (angle E en '')



Formule de l'échantillonnage : $E = 206 P / F$
avec P = dimension du photosite CCD en μ
F = focale de l'instrument en mm
(D n'intervient pas)

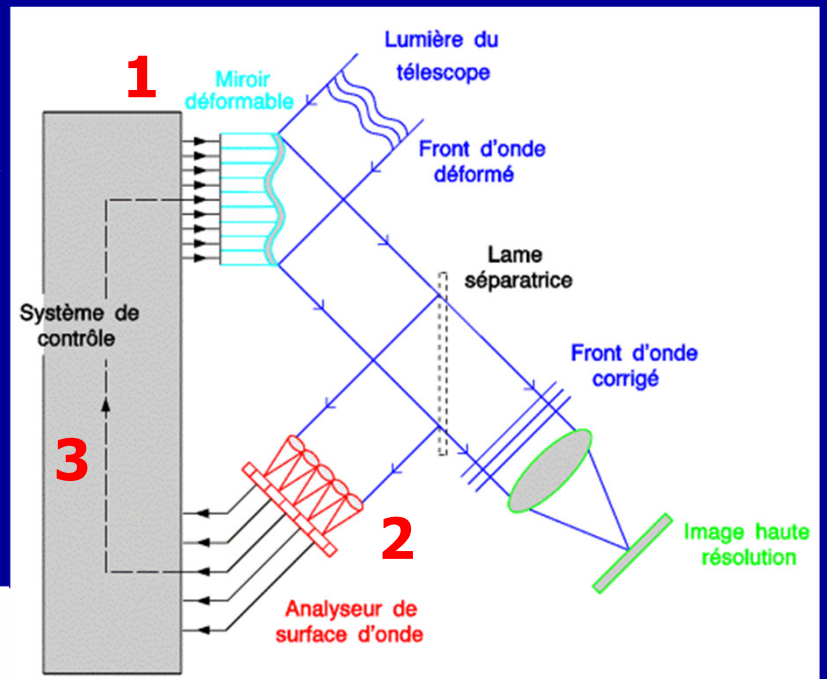
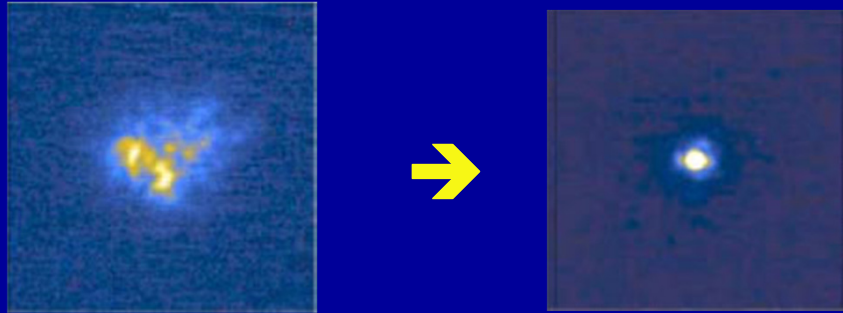
La taille du photosite doit être en rapport avec la valeur désirée E de l'échantillonnage (Théorème de Nyquist) et la focale F de l'instrument

- La valeur du seeing a une très grande importance sur le choix de l'échantillonnage : suivant le seeing, il faut « ajuster » l'échantillonnage E choisi, la focale F de l'instrument et la taille P des photosites . Pour cela on peut être amené à grouper plusieurs photosites ensemble: c'est le "binning".
- En longue pose, compte tenu du seeing et des erreurs de suivi , on recommande un échantillonnage de 2 secondes d'arc par photosite.
[si seeing+ erreur de suivi #4'' d'arc → Nyquist= échantillonnage à 1/2 → E = 2''d'arc]
- De ce fait, en astro longue pose ,si P est trop petit ,on choisit souvent un " binning 2x2'' , c'est-à-dire qu'un pixel-image provient de 4 photosites CCD regroupés.

Battre la turbulence :
l'optique adaptative et les miroirs
~~déformants~~ , déformables



Principe de l'optique adaptative



Fonction d'étalement de point (FEP) longue pose en optique adaptative

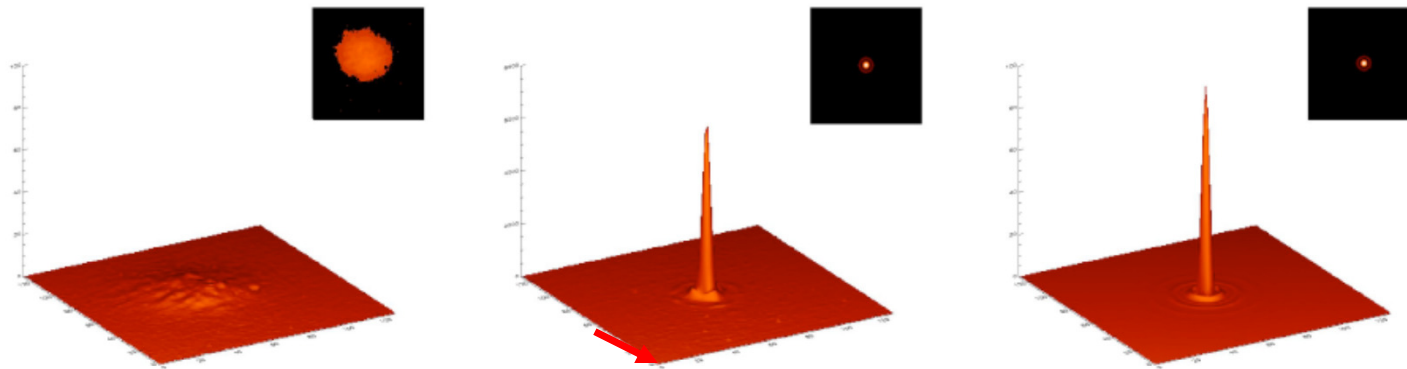


image turbulente

image corrigée ($SR = 64\%$)

tâche d'Airy

Longueur d'onde d'imagerie : $2.2\mu\text{m}$

Télescope 8m, $r_o = 1\text{m}$, $v = 10\text{m/s}$

Système d'OA: 185 actionneurs, fréquence 440 Hz

$r_o = 1\text{m} !!!$
Pourquoi ?

$$(r_oV/r_oIR) = (\lambda_V/\lambda_{IR})^{6/5}$$

$$= (0,5/2,2)^{1,2}$$

$$= 0,16 \text{ m} = 16 \text{ cm}$$

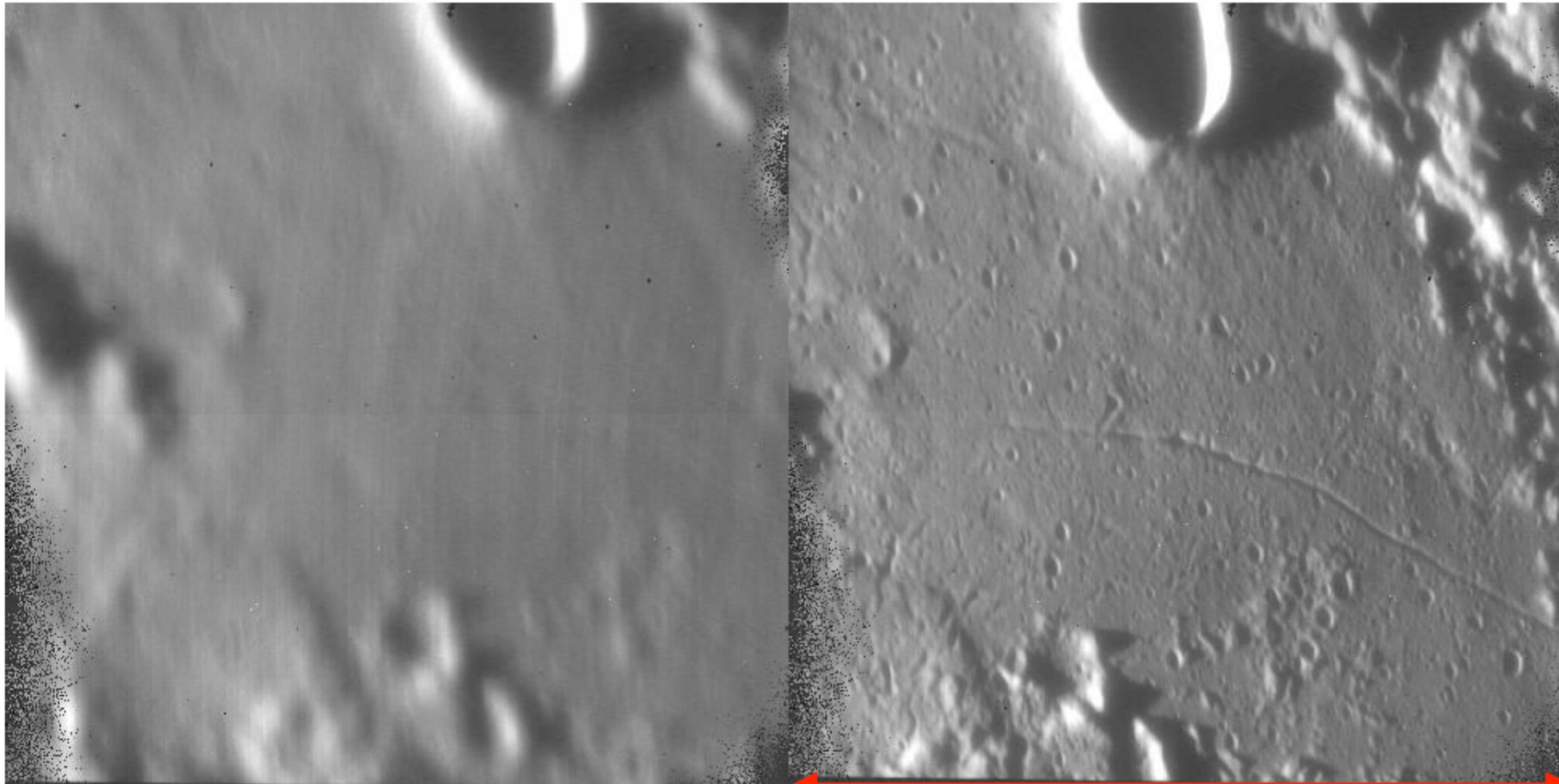
dans le visible



Largeur 7 m
Visible de la Lune ?

**Longueur d'onde
de fonctionnement
de l'AO -NAOS**

Surface de la Lune à $\lambda = 2,3$ microns



G. Rousset, O.A.

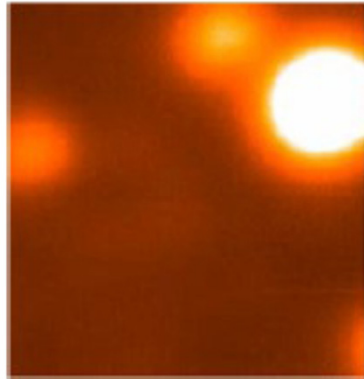
Image brouillée par la turbulence

Image corrigée par NAOS

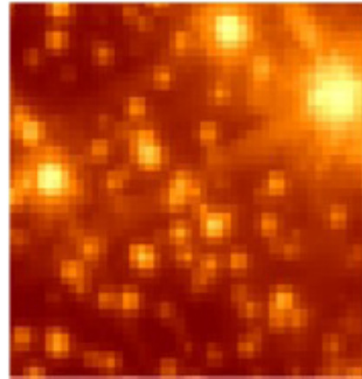
26'' = 45 km

**Largeur de
la rainure :
200 m**

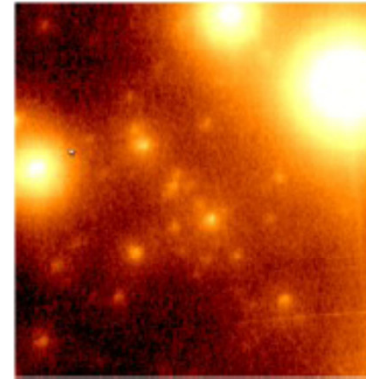
Globular Cluster M13



Normal exposure
taken with Palomar
5.1m Telescope

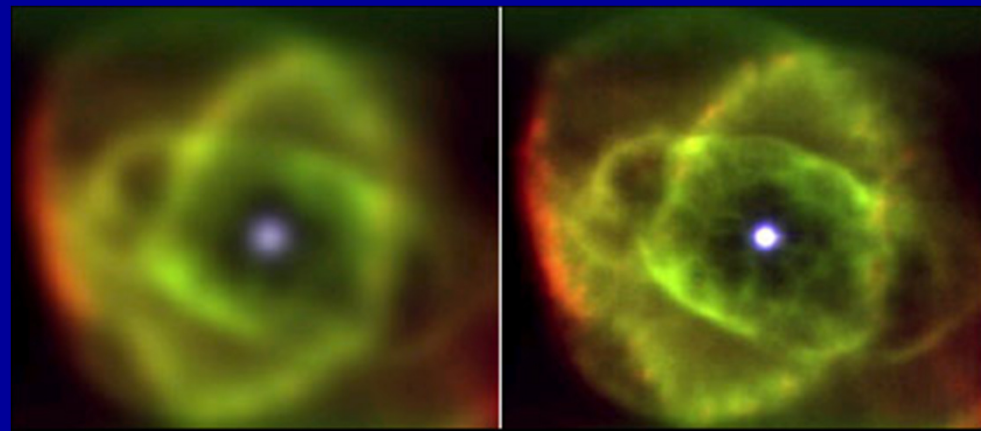
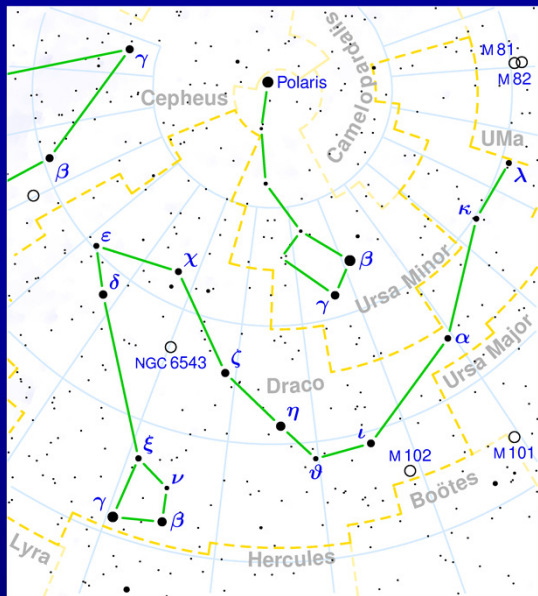


Normal exposure
taken with Hubble
Space Telescope



Lucky Imaging with
Adaptive Optics at
Palomar 5.1m
Telescope

**NGC 6205
M 13
Hercules**



Sans AO

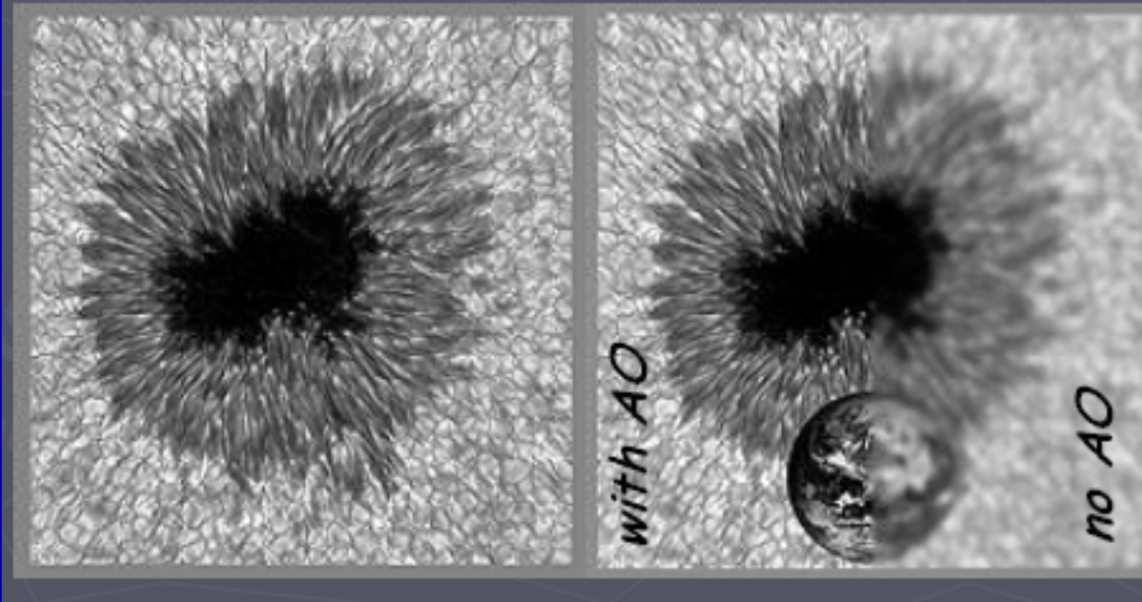
Avec AO

NGC 6543-Draco

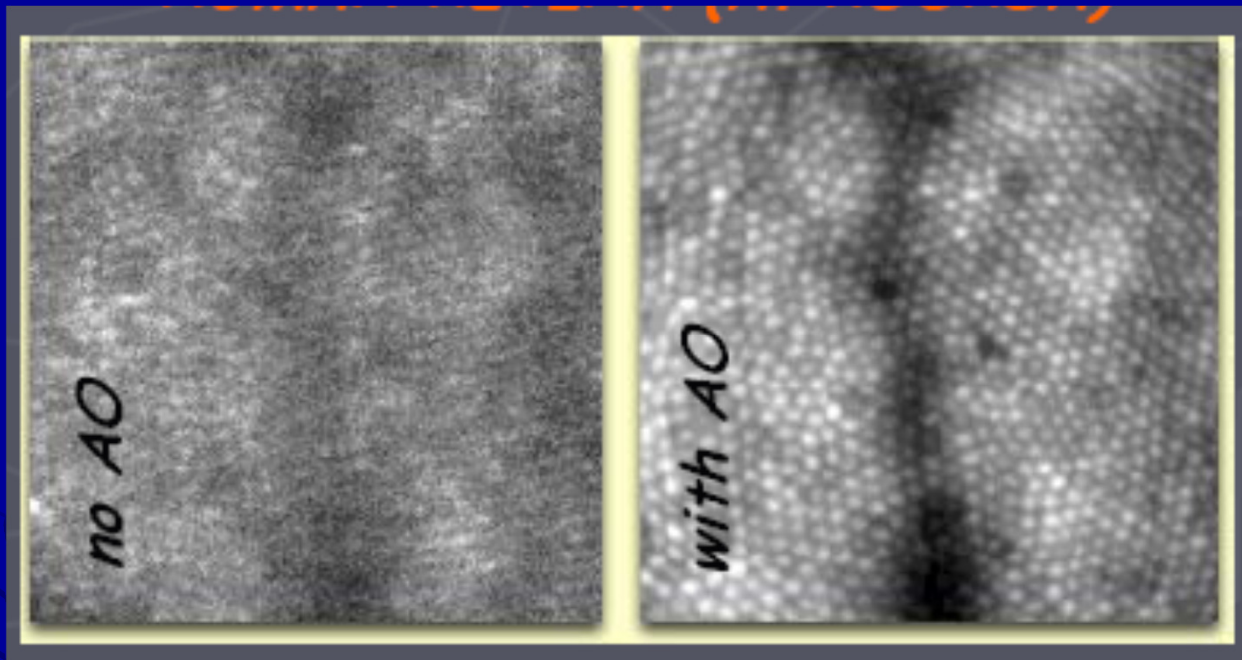
**Neb. Plan. du Pôle
de l'écliptique
Cat's Eye
mv= 8,1-3000 AL**

Télescope de 5 m – Mont Palomar

SUNSPOT (NSO DUNN TELESCOPE)

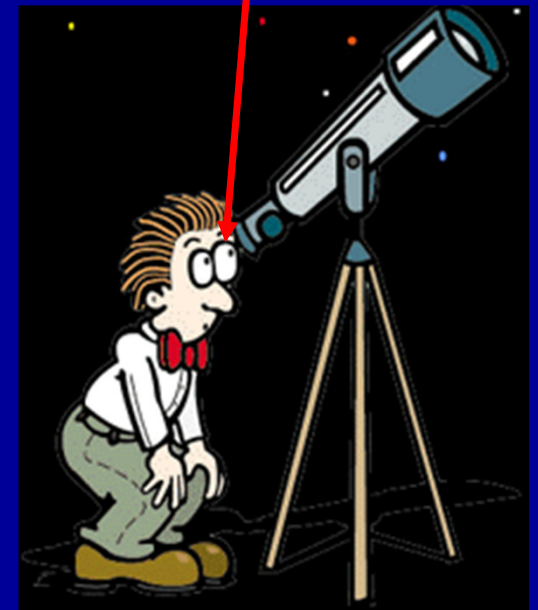


Tache solaire



!?

OA du coté de l'oculaire



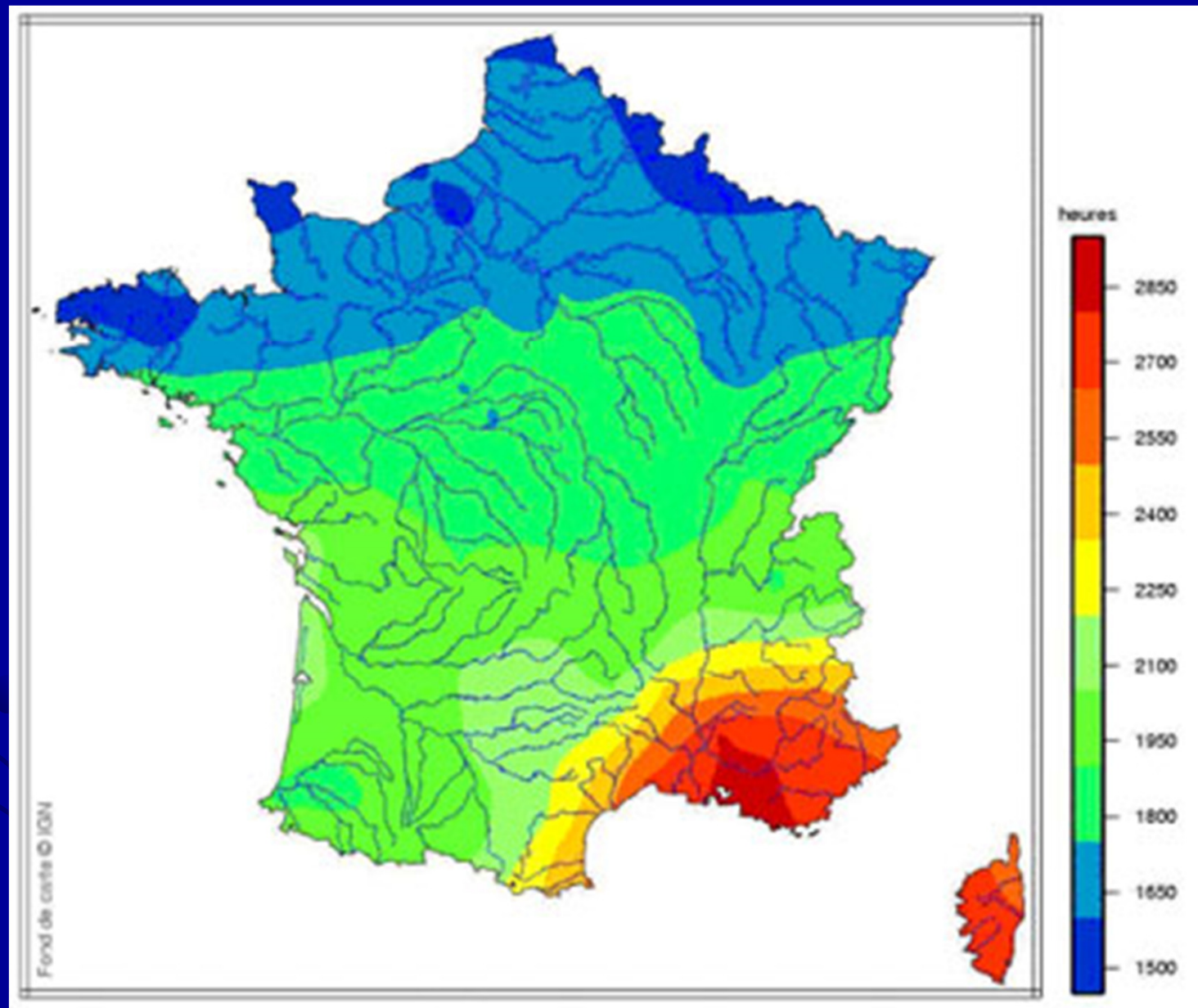
Réponse= rétine de l'œil

→ L'optique adaptative, sa technologie et ses contraintes feront l'objet d'une présentation spécifique ultérieure.

Troisième Partie-Section 2

**Mise en pratique de ce que
nous avons appris sur la météorologie**

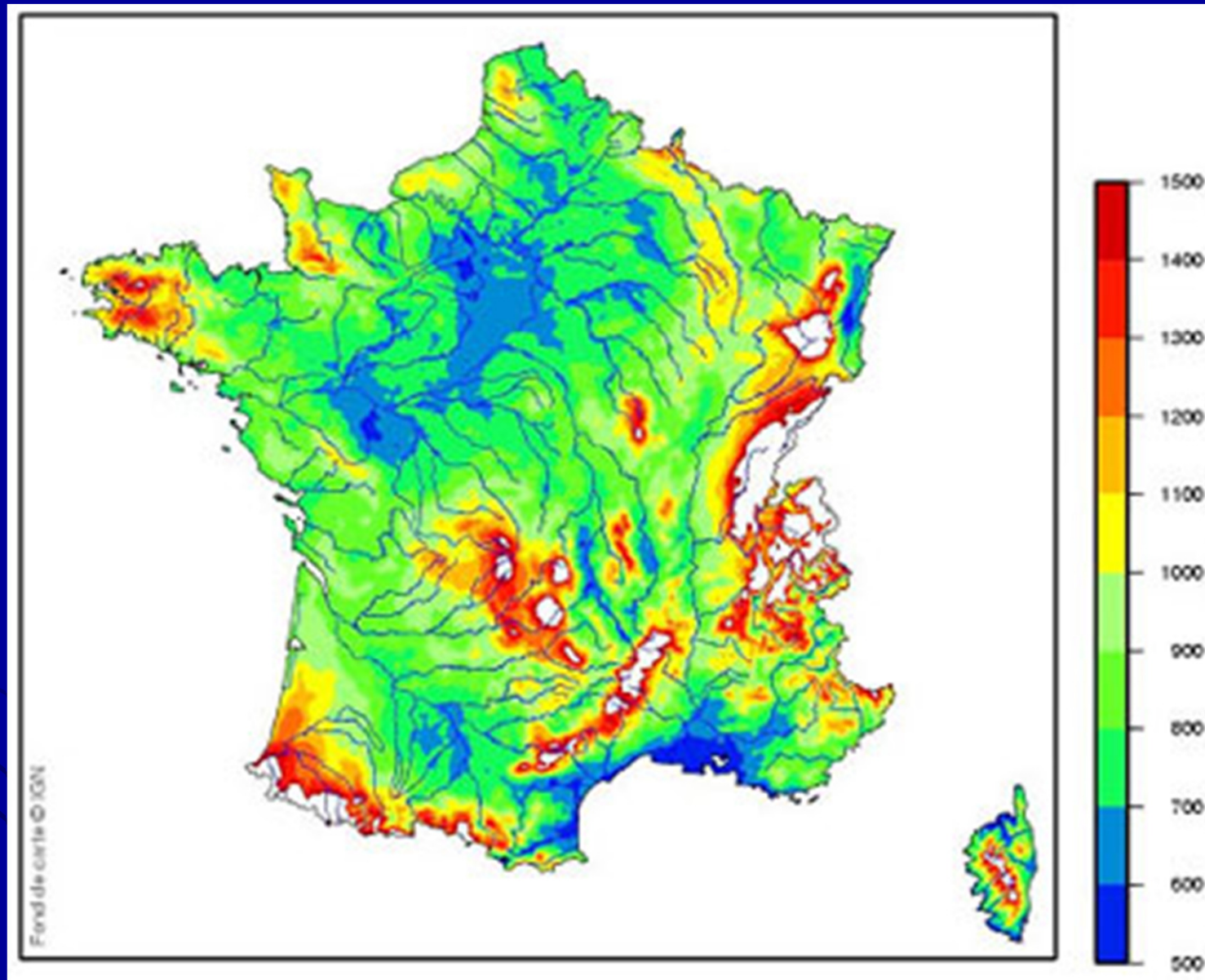
Généralités sur le climat de la France -1



Insolation moyenne annuelle en heure

Météo France

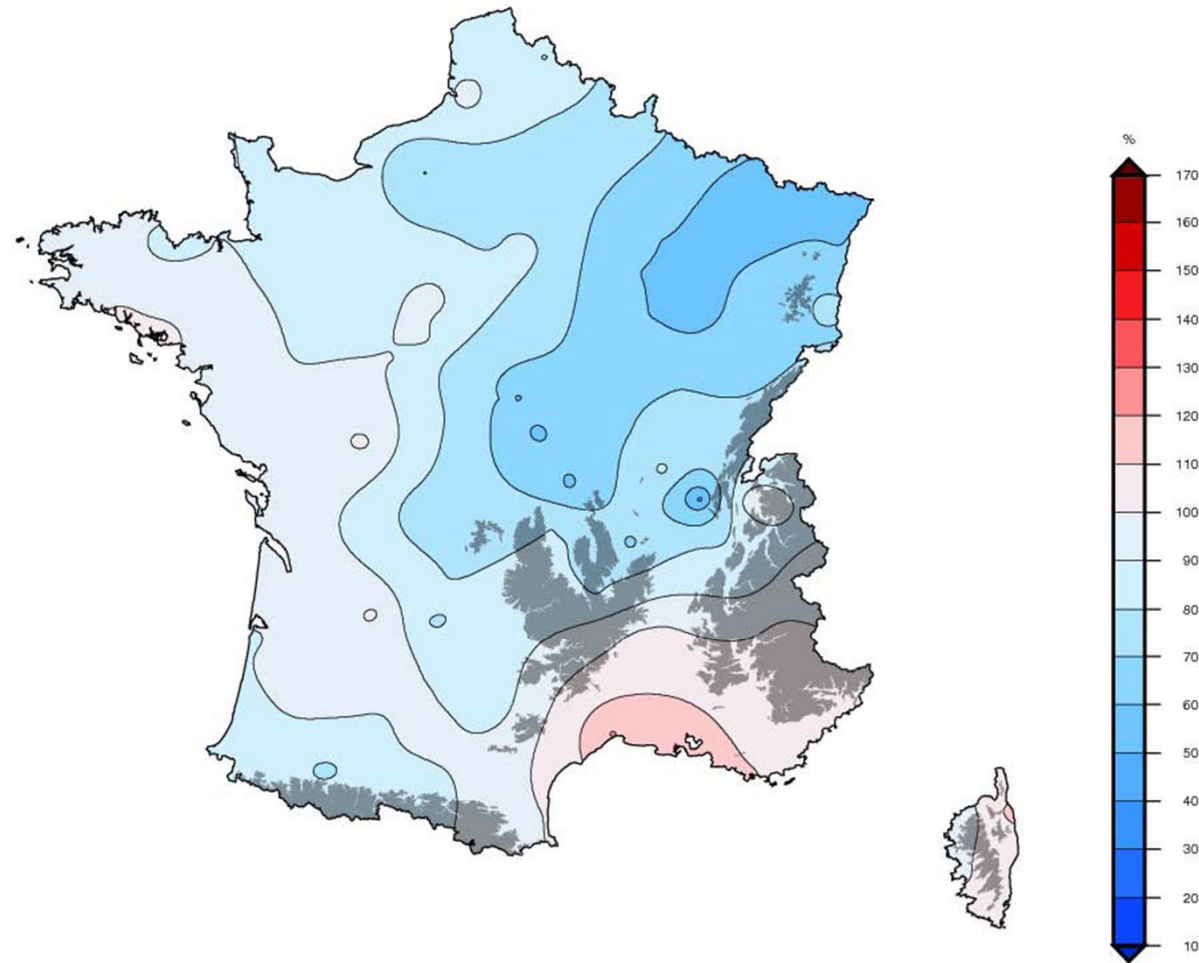
Généralités sur le climat de la France -2



Précipitations cumulées sur l'année - 1 mm = 1 litre / m²

Hiver 2012-2013

Durée d'ensoleillement : Hiver 2012 - 2013
Rapport à la moyenne de référence 1991-2010

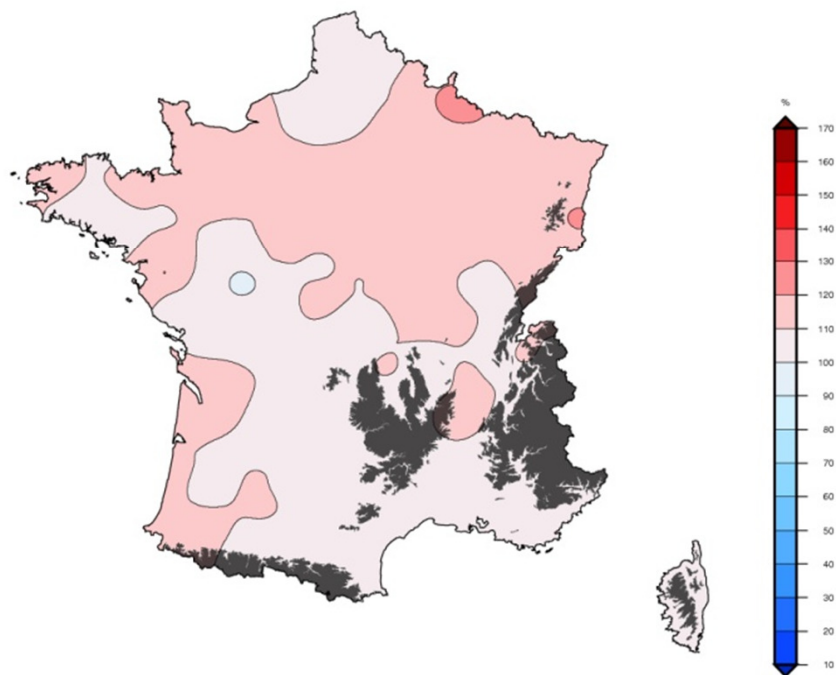


Météo France

ETE 2013

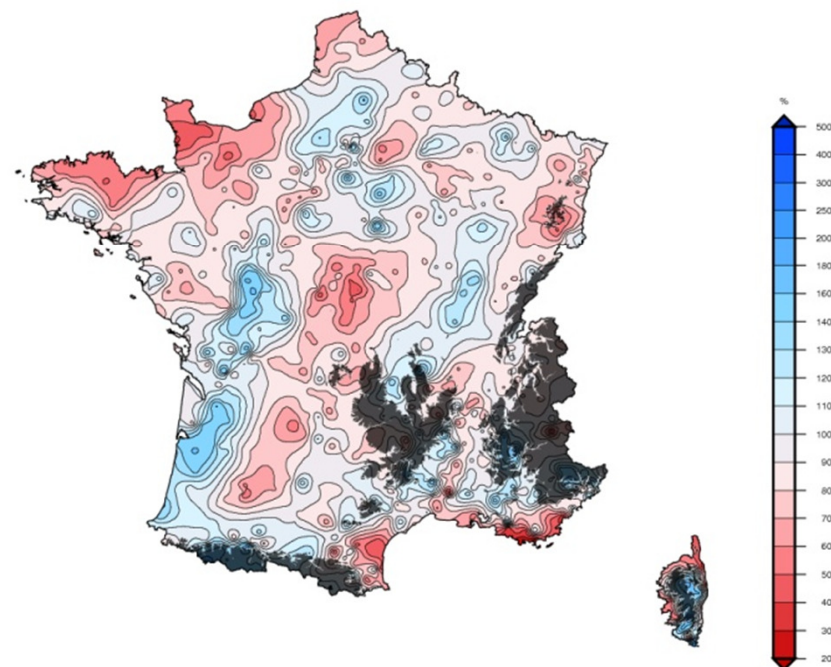
Rapport à la moyenne saisonnière de référence 1991-2010 de la
durée d'ensoleillement
Zone climatique : France

Été 2013



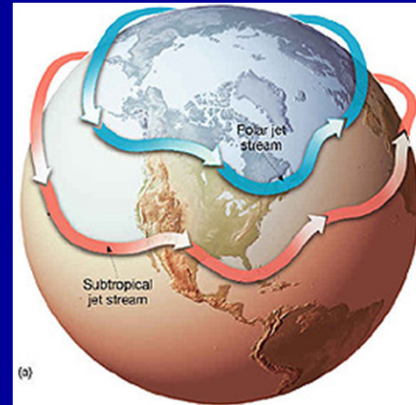
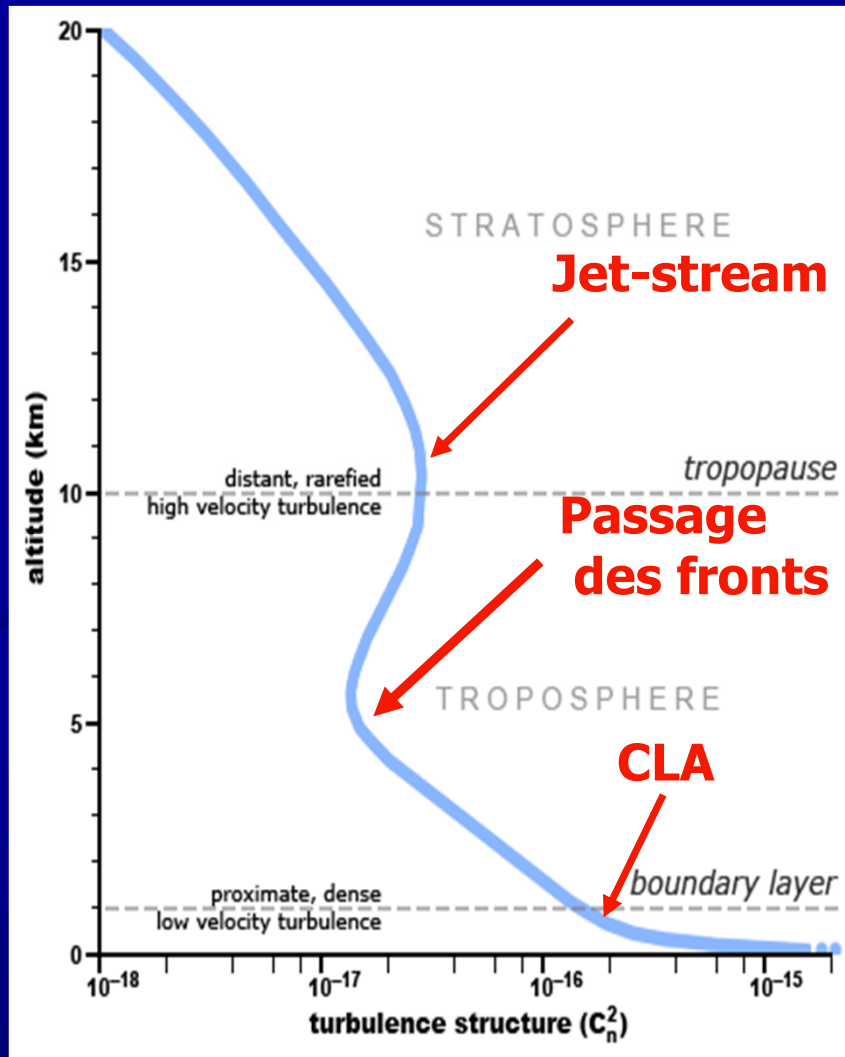
Rapport à la moyenne saisonnière de référence 1981-2010 des
Cumul des précipitations
Zone climatique : France

Été 2013

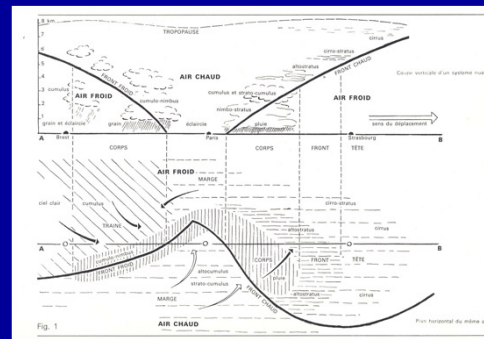


Les étages de la turbulence atmosphérique

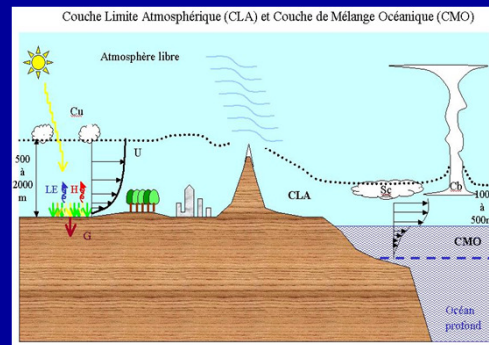
A chacun des 3 étages de la turbulence : des valeurs différentes pour C_n^2



Le parcours sinueux et changeant du Jet-stream



« Aileron de requin » : front chaud et front froid

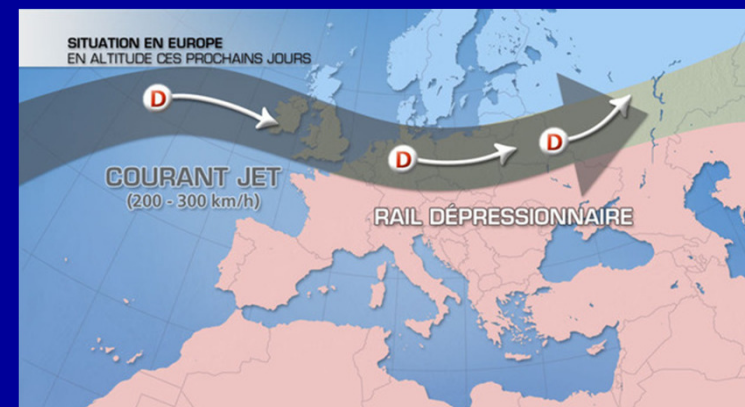
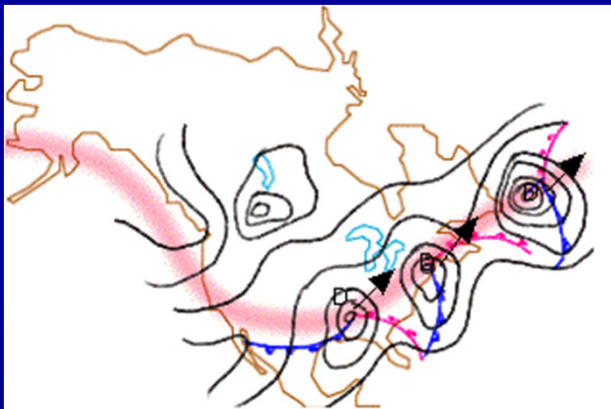
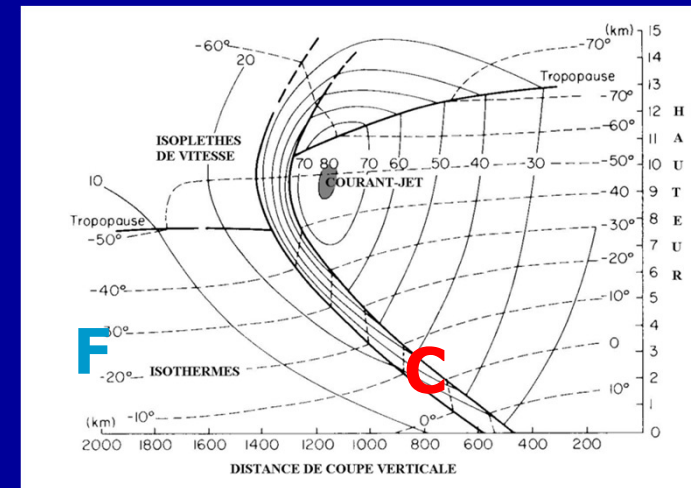
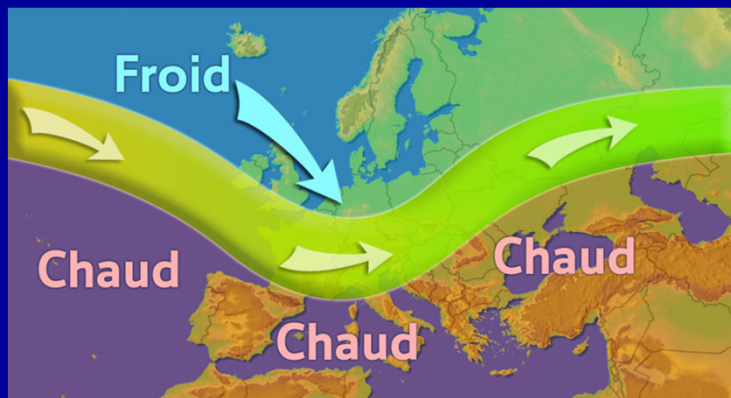


CLA et influence du sol (température) et de sa « rugosité »

La turbulence s'affaiblit dans ce sens

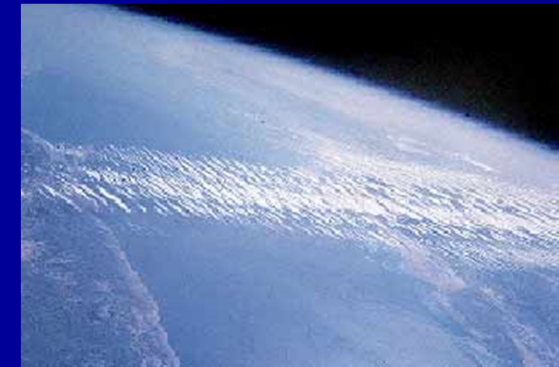
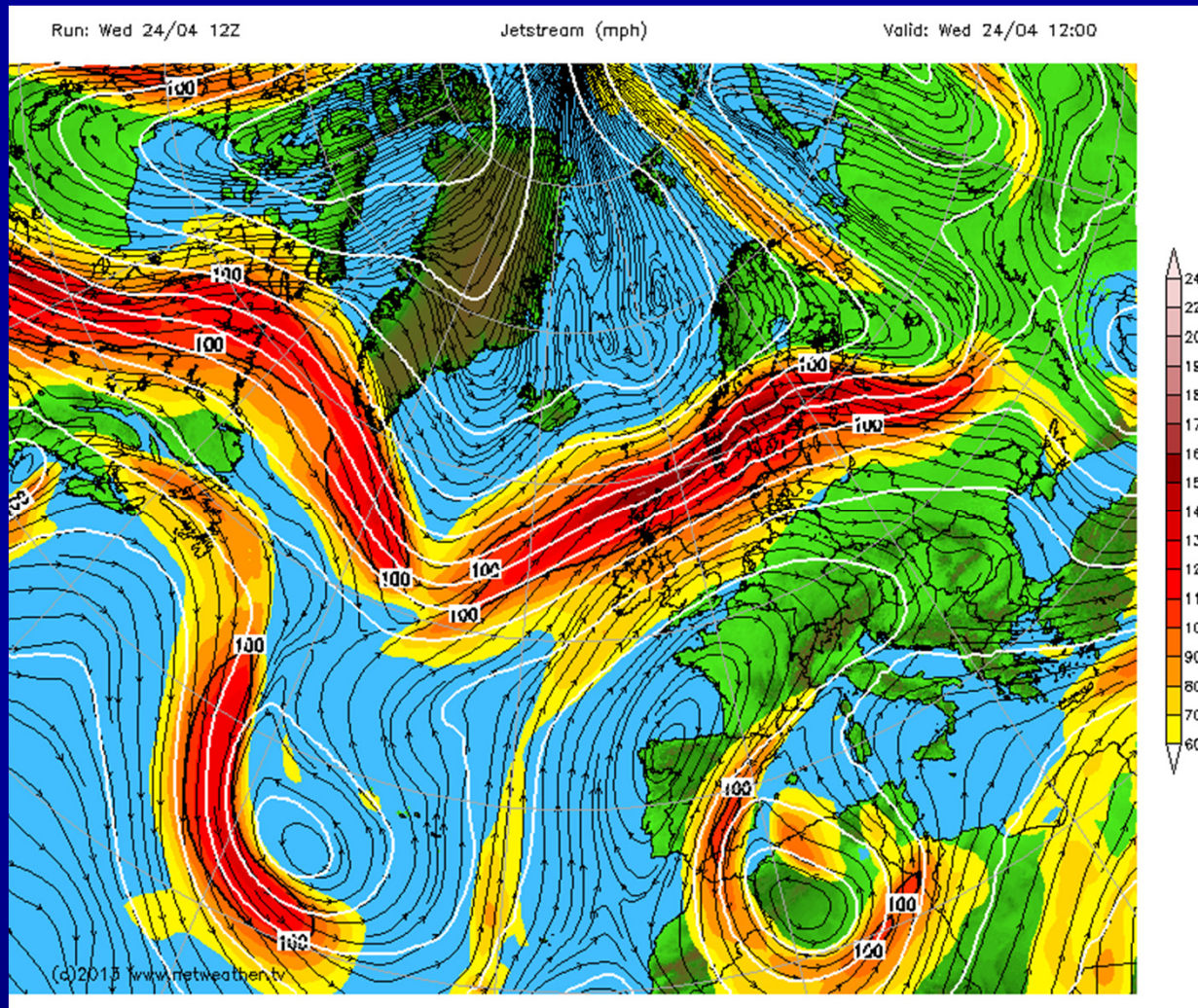
La position du Jet-Stream

Rappel: Le Jet-stream est un courant d'air violent, qui traduit la limite à 300 hpa entre deux masses d'air de température différentes. Au sud du JS on a la masse d'air chaud donc l'air instable siège de forts mouvements verticaux



→ La position du JS déterminera » le rail des dépressions » et donc les zones d'apparition des instabilités et des fronts

Position du JS et répartition de la vitesse des vents à 300 hPa

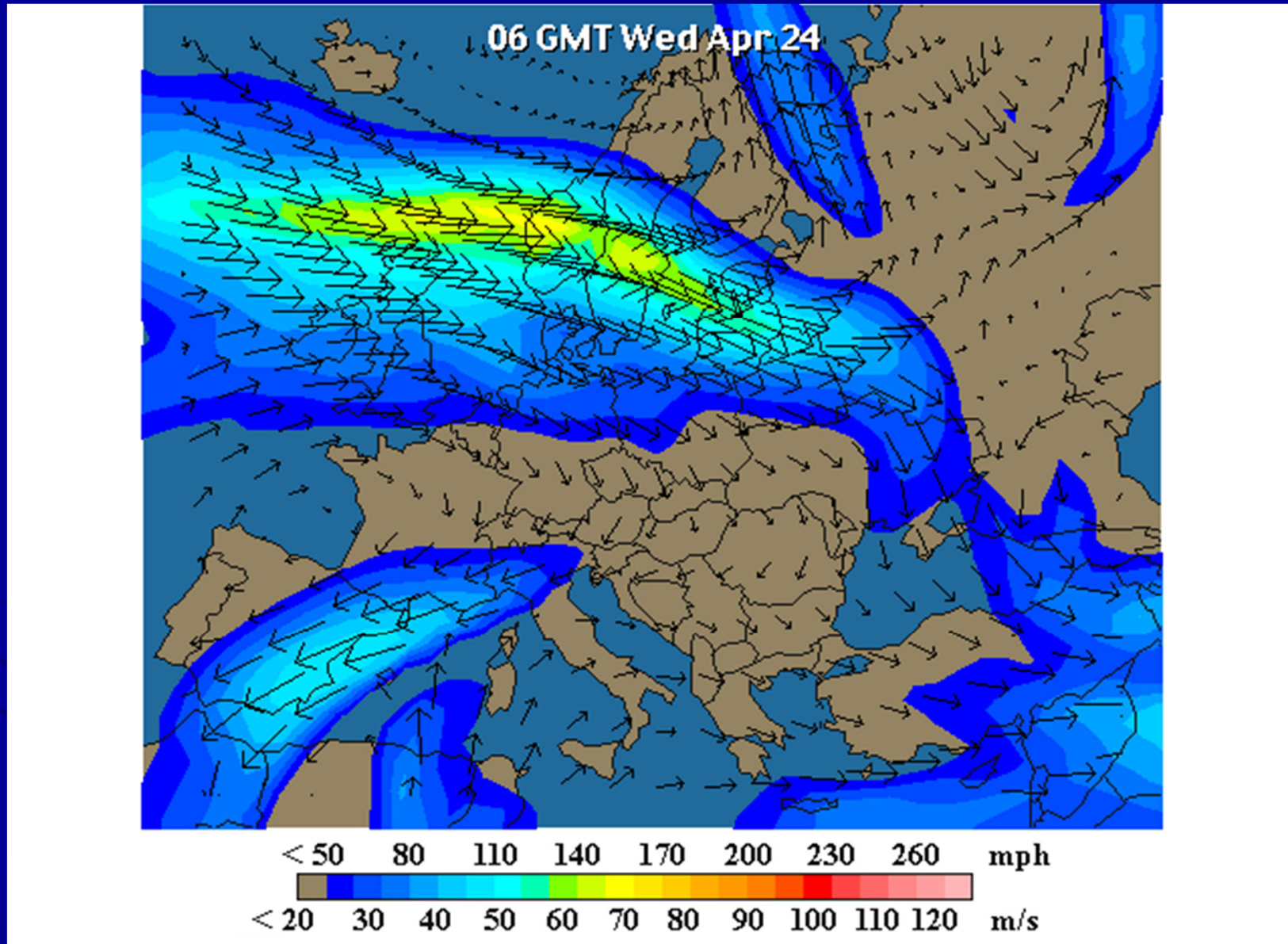


Les vents du JS sont représentés jusqu'à une vitesse de 60 nœuds (miles per hour) (#100 km/h)

→ Les vents au-dessus de 25m/s (50 mph) entraînent une augmentation notable de la turbulence au- niveau de la tropopause : dans la zone colorée
→ mauvais seeing !

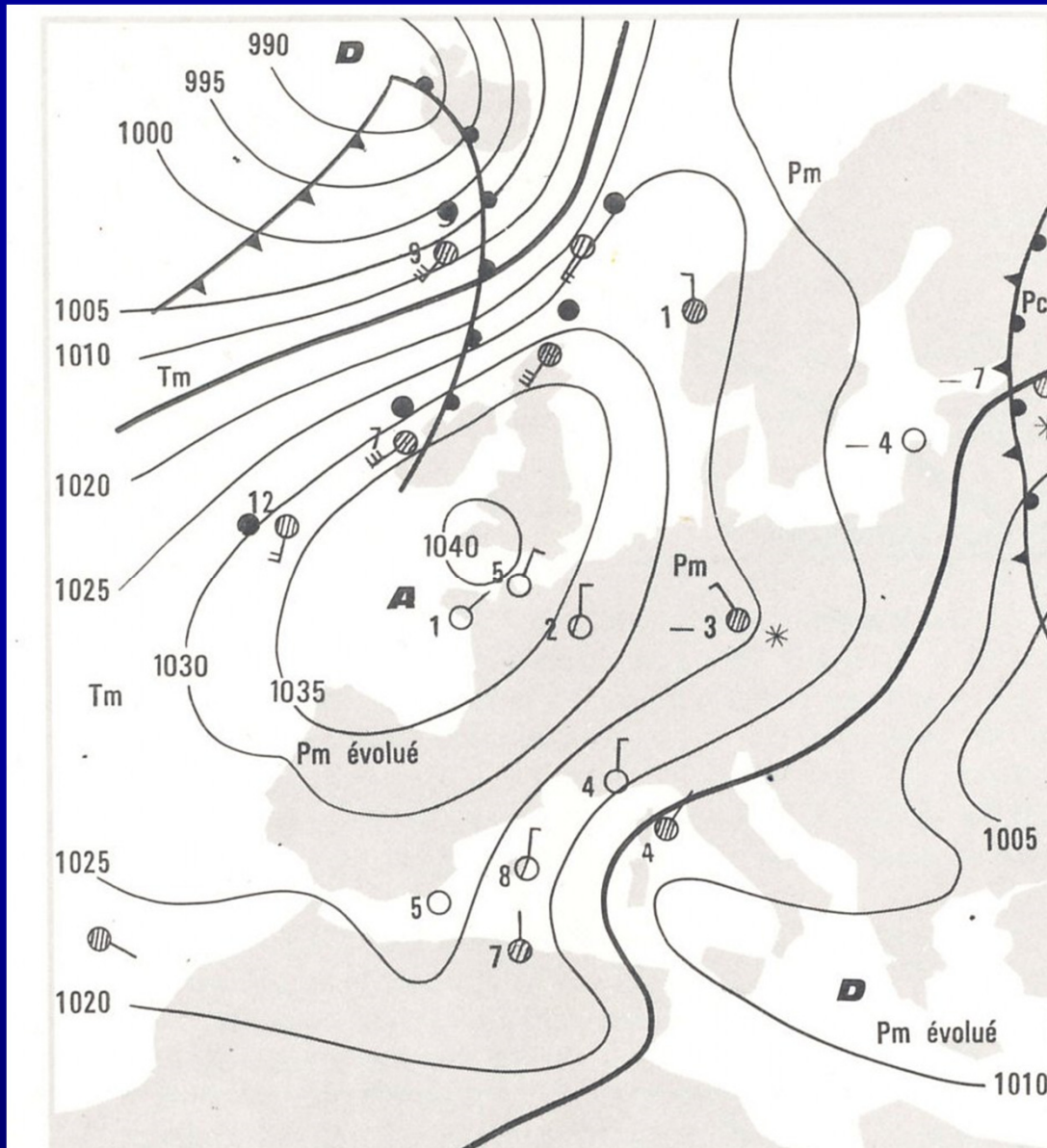
Netweather

Autre exemple : même date



Passage des fronts

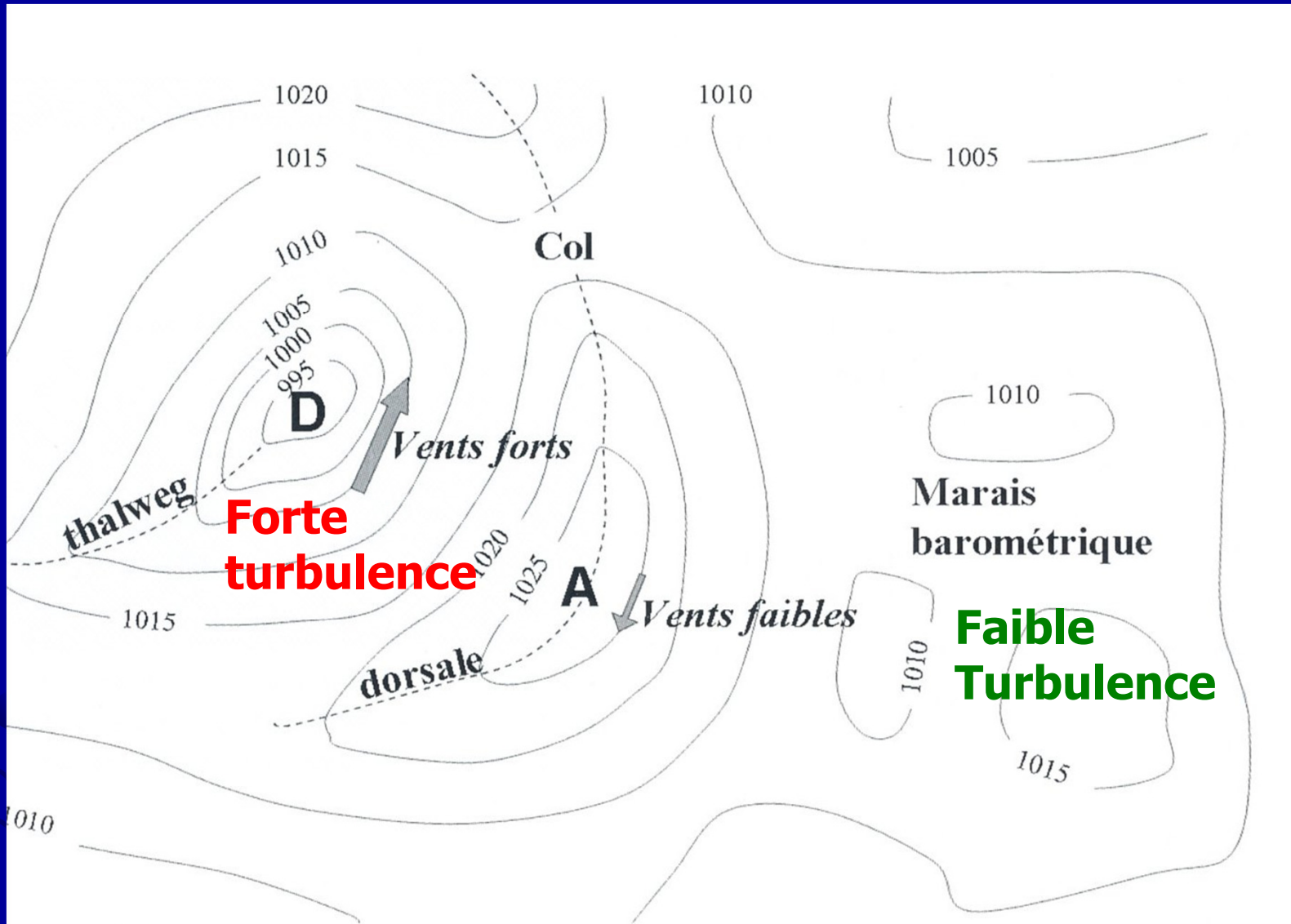
Emploi des cartes synoptiques



Les fronts sont des zones d'instabilité des masses d'air; Ces fronts vont se positionner entre les zones anticycloniques A et les zones dépressionnaires D

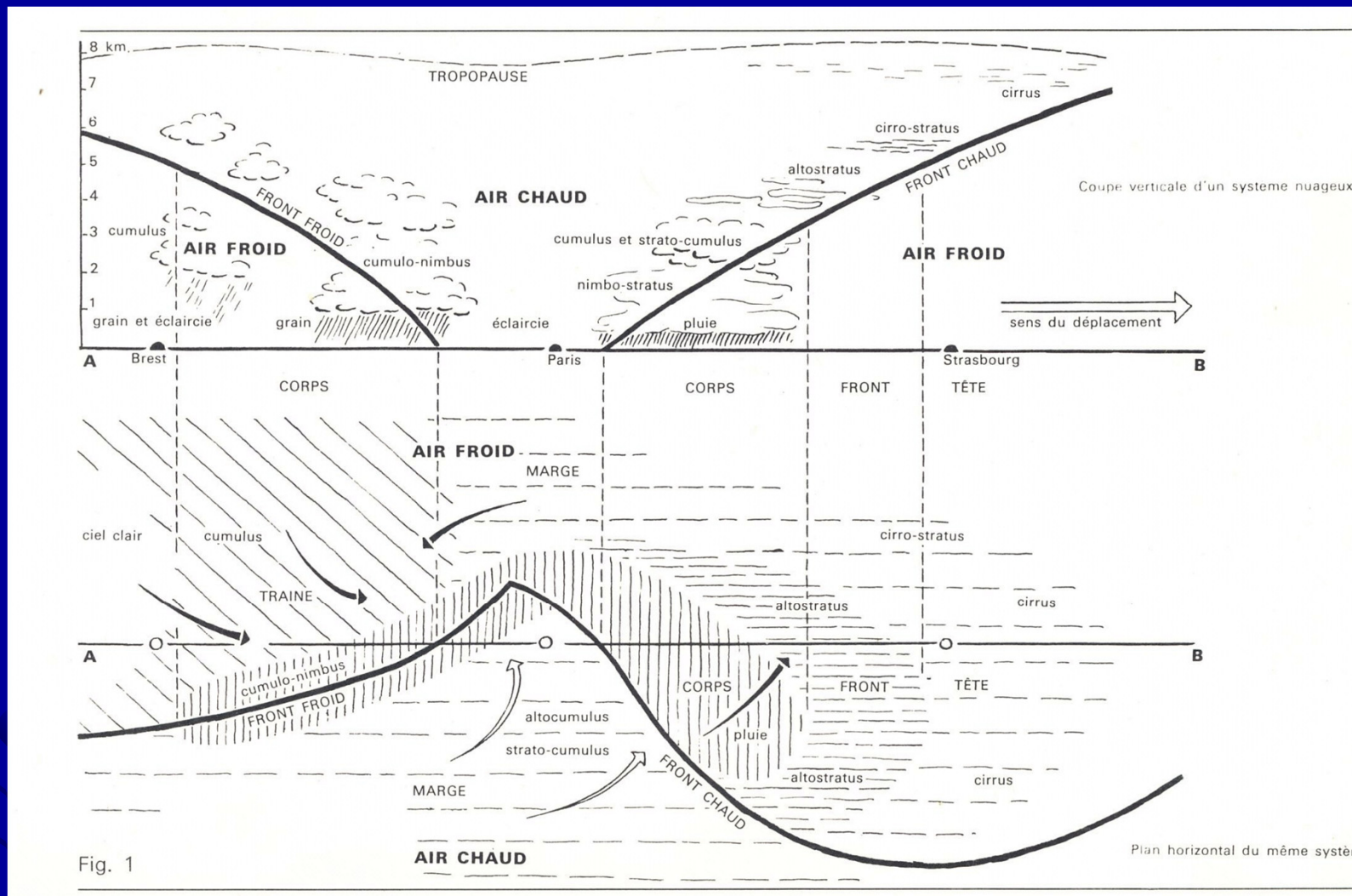
Au-dessus d'un anticyclone la masse d'air est relativement calme et la turbulence est moindre (subsidence)

Exemple:



**Préparons notre télescope si un marais barométrique arrive .
mais attention:
situation anticyclonique ne veut pas dire forcément ciel dégagé !**

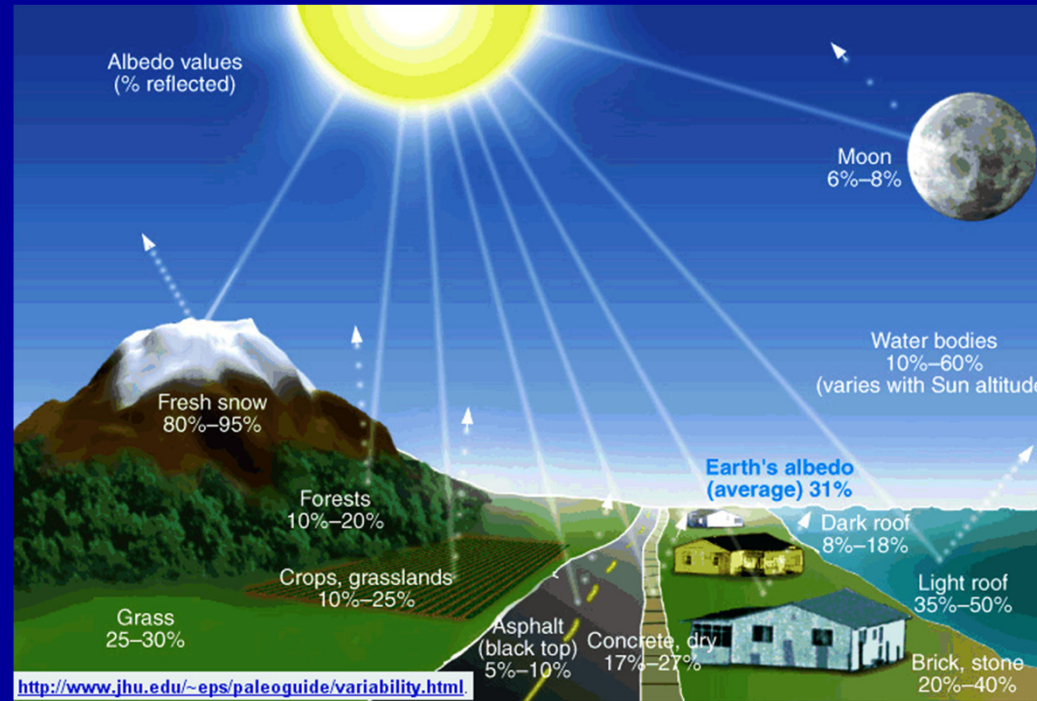
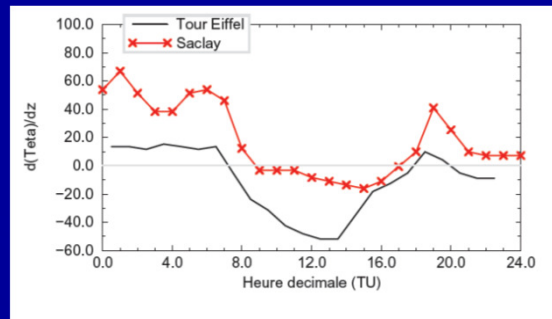
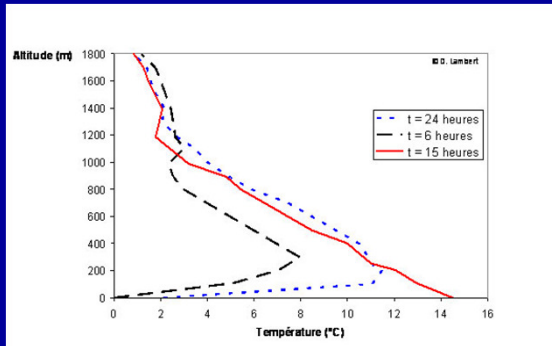
Le passage des fronts vu du sol



**Le passage des fronts n'est pas favorable à l'observation-
Le plus défavorable est le passage d'un front froid : sol réchauffé et
air froid → Richardson mauvais**

La Couche Limite Atmosphérique

La température du sol



Surfaces	Albedo (%)
Eau (soleil à moins de 40° de hauteur)	6 à 80
Eau (soleil à plus de 40° de hauteur)	2 à 4
Neige fraîche	75 à 90
Neige "sale"	40 à 70
Sable sec	35 à 45
Sol mouillé et sombre	5 à 15
Ciment sec	17 à 27
Route bitumée	5 à 10
Herbe	20 à 30
Forêts de conifères	5 à 15
Forêts de feuillus	10 à 20
Champs de cultures	15 à 25

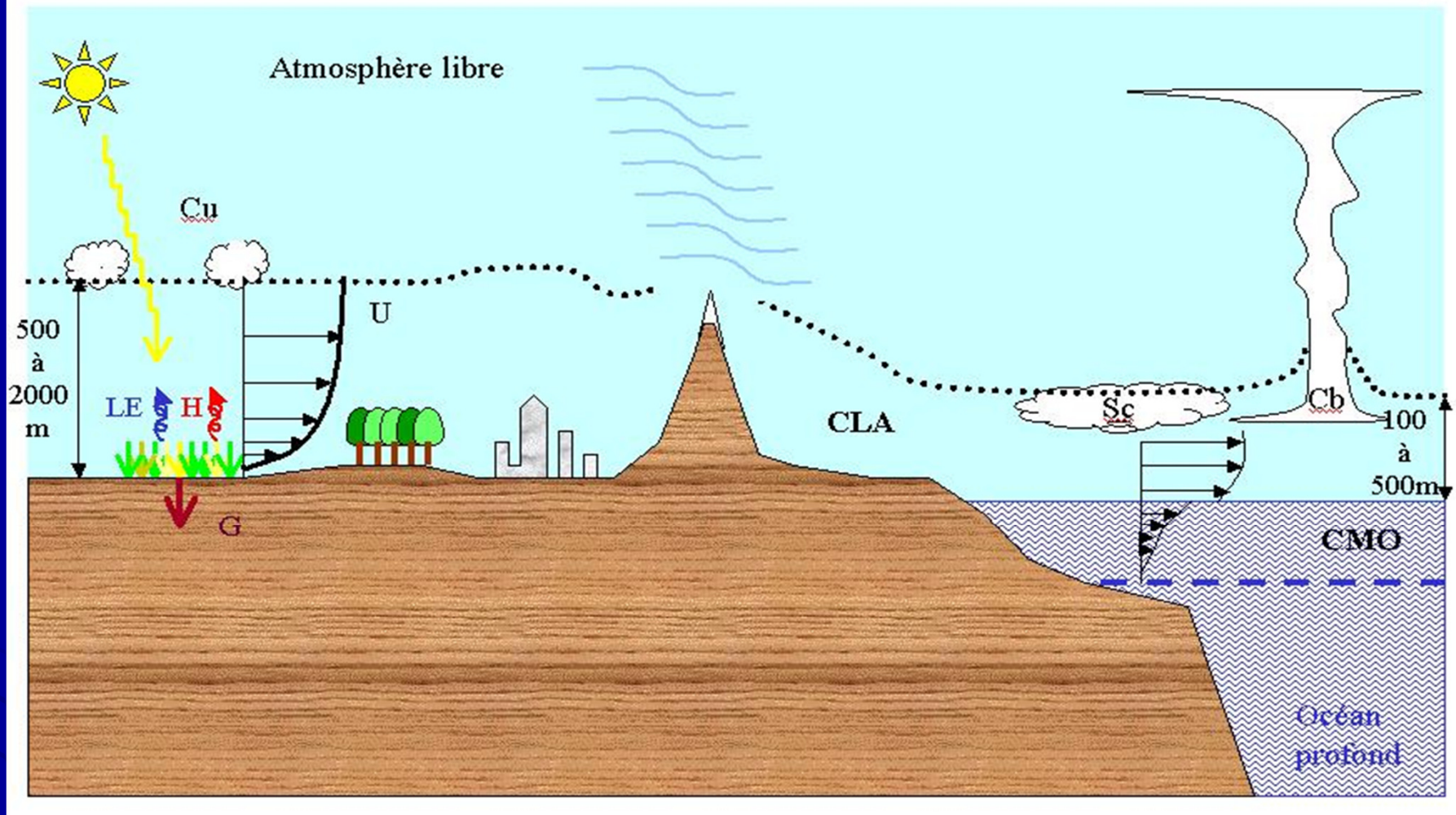
Albédos comparés – pouvoir réfléchissant – de différentes surfaces
Surface rocheuse = 15 à 30

L'albédo du sol va déterminer la température du sol donc le gradient de température au niveau du sol

[Albedo moyen dans le Voironnais = 38 % ?]

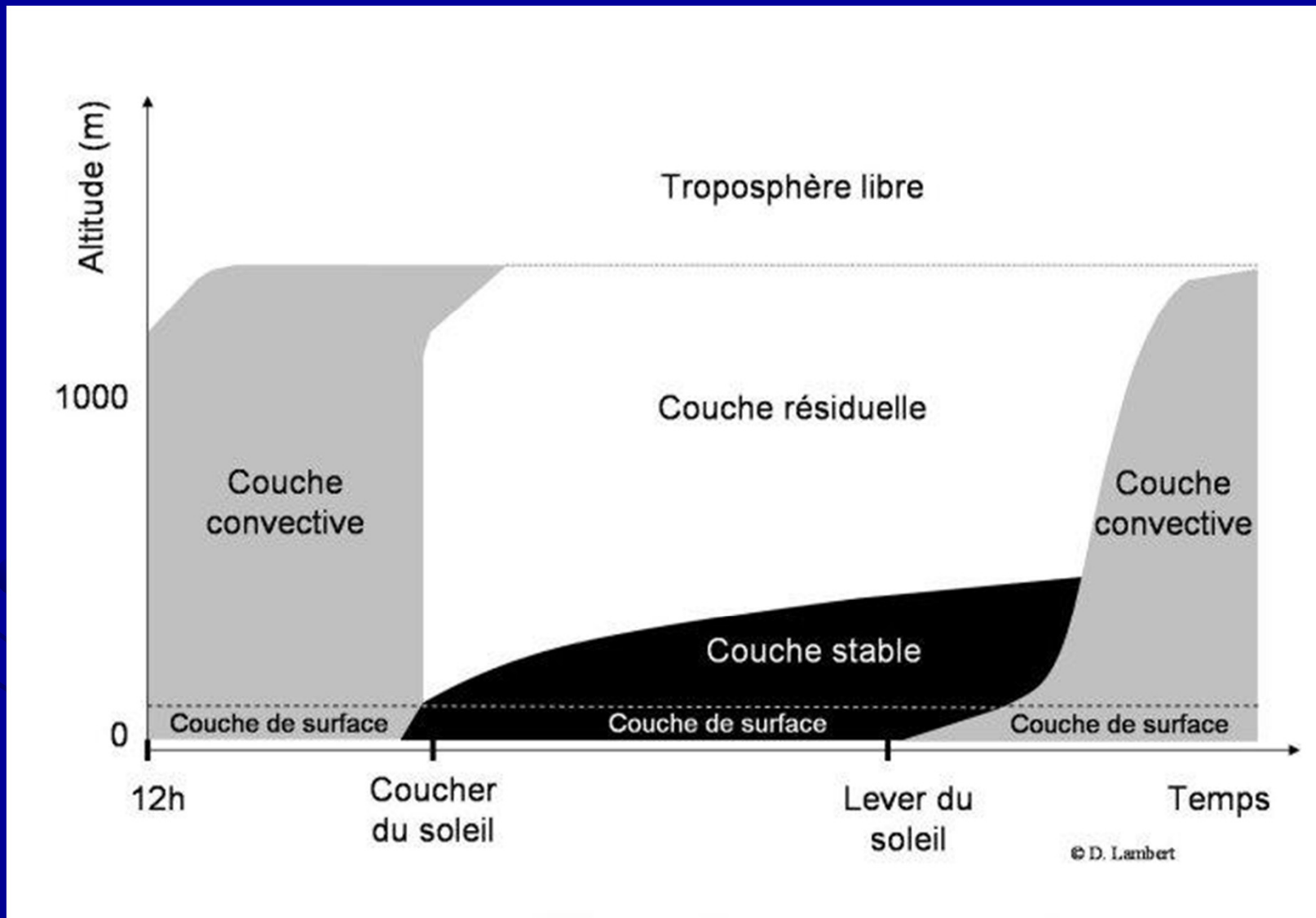
C'est le nombre de Richardson (gradient de température dans la couche au contact du sol) qui va imposer la turbulence au niveau de la CLA
→ quand le sol a été surchauffé durant le jour = risque de mauvais seeing

Couche Limite Atmosphérique (CLA) et Couche de Mélange Océanique (CMO)



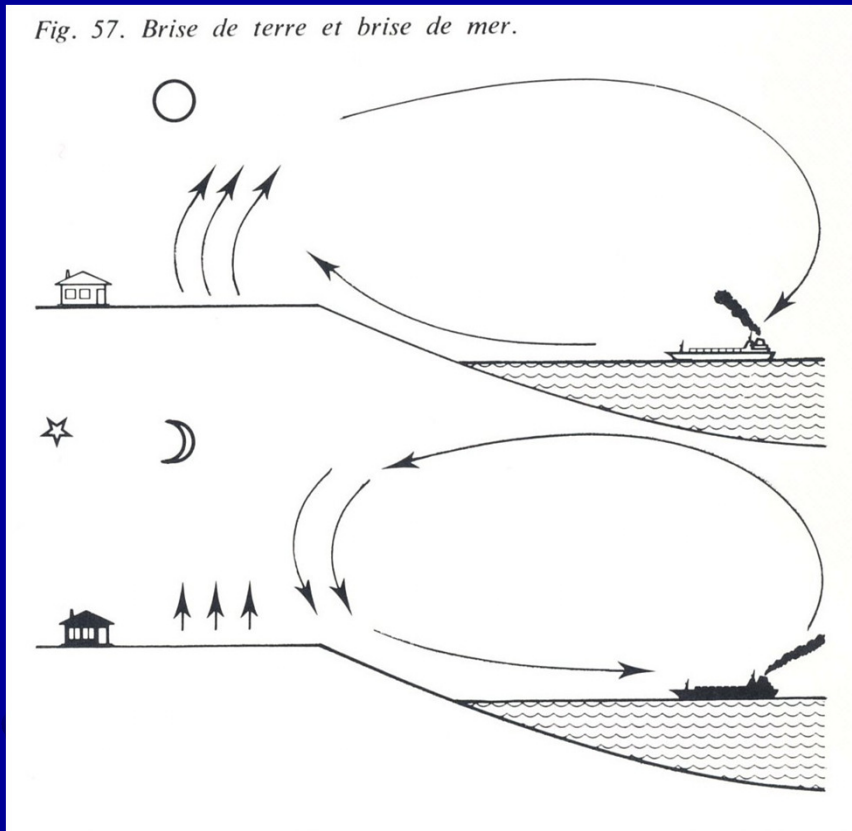
Le C²n dans la CLA est environ 10 à 100 fois plus important que dans les couches précédentes (C²n de l'ordre de # 10⁻¹⁵ au lieu de # 10⁻¹⁷ → c'est principalement de cette zone que proviennent les dégradations du seeing !

Evolution de la turbulence au-cours de la journée

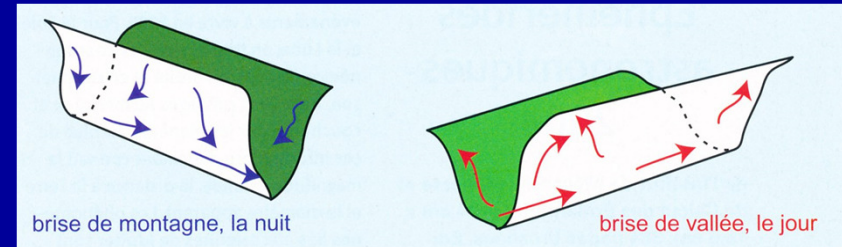


Les turbulences atmosphériques locales - 1

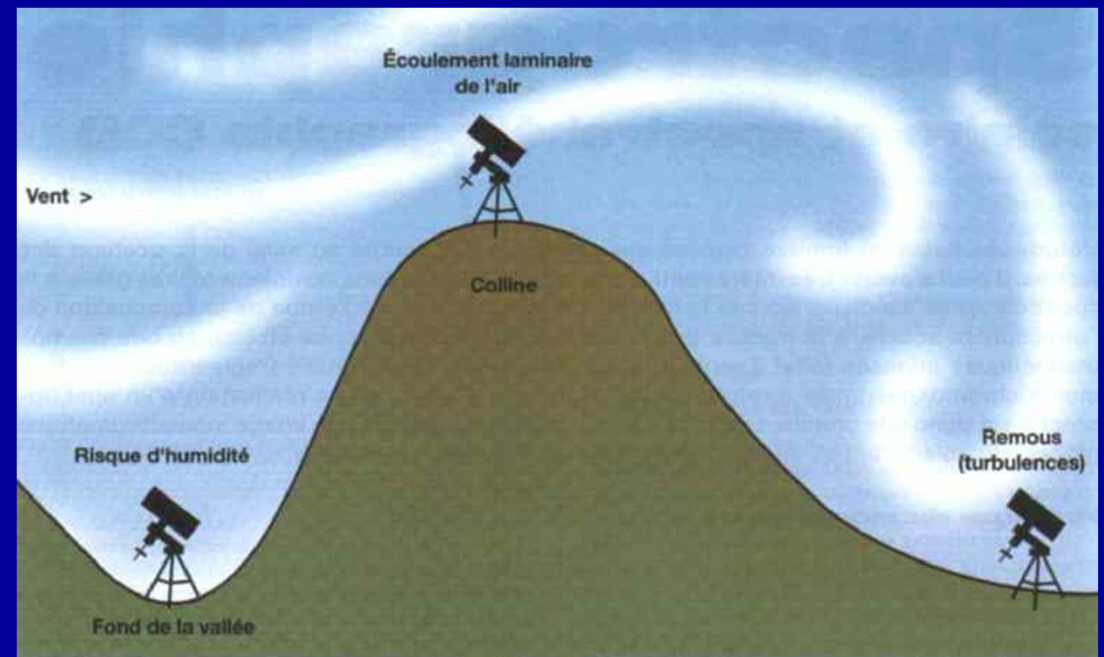
Fig. 57. Brise de terre et brise de mer.



Brise de Mer/brise de Terre



Vents de vallée : brises de montagne ou de vallée



Influence d'un relief

Les turbulences atmosphériques locales - 2

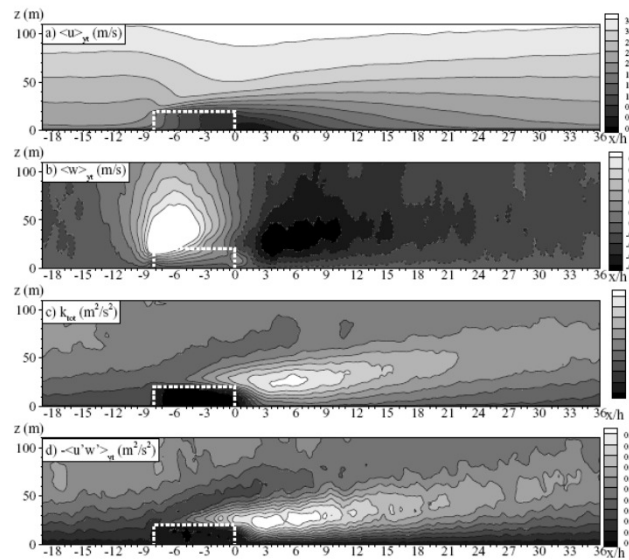
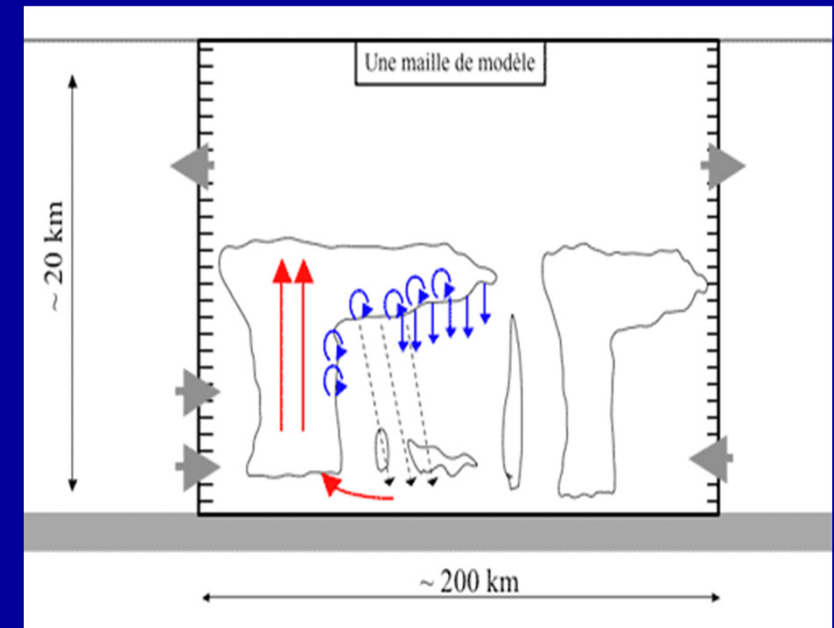
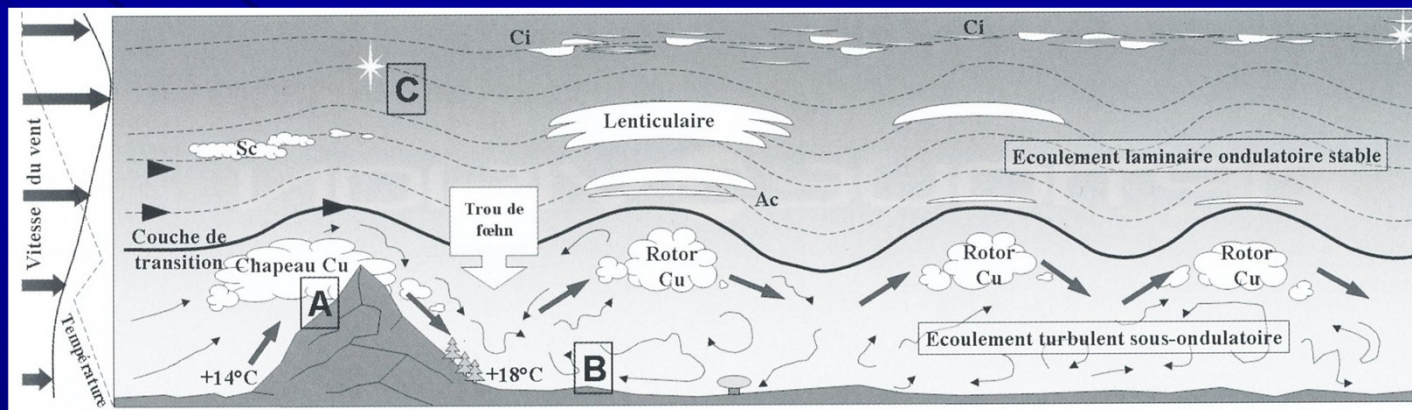


FIG. 6.2 – Écoulement moyenné simulé en présence de la forêt : vitesse dans le sens de l'écoulement (a), vitesse verticale (b), énergie cinétique turbulente totale (c), le flux de mouvement (d). La ligne blanche pointillée indique le contour de la forêt.



Convection orageuse



Influence d'un obstacle

astro surf

Ressource Internet pour prédire le seeing

Ex :MeteoBlue-Astronomy

Miscellaneous > Astronomy Seeing

Limited 3 Days Seeing Prediction

You can subscribe to an extended seven day seeing prediction with point+:

Abonnement

Reaumont (5.52°E / 45.37°N) last update: 28.01 08:41 UTC

Mon

28.01.2013

☀ 08:07

🌇 17:34

meteoblue.com

Time (CET)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
High Clouds (%)	0	100	100	93	94	0	22	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Mid Clouds (%)	60	100	100	100	100	100	100	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Low Clouds (%)	100	100	100	100	100	100	42	43	55	63	86	64	21	11	28	48	0	0	0	0	0	0	0	0
Seeing Index 1	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Seeing Index 2	2	2	3	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	2
Seeing arcSeconds	1.44	1.47	1.44	1.44	1.43	1.39	1.32	1.61	1.54	1.41	1.21	1.24	1.35	1.63	1.93	2.14	2.22	2.30	2.38	2.08	1.94	1.83	1.78	
Jet stream (m/s)	30	28	27	25	24	23	23	23	24	24	22	22	24	24	26	27	27	26	24	26	29	30	31	
2m Rel. Hum (%)	93	95	98	98	97	94	92	91	91	93	91	90	88	78	81	84	89	83	68	65	61	61	66	
Bad Layers Top (km)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3	10.3	10.3	4.9	4.9	4.2	4.2	4.3	
Bad Layers Bot (km)	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	7.9	7.9	9.0	8.0	9.0	9.0	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	4.2	2.0	2.0	2.0	1.5	
Bad Layers K/100m	0.52	0.64	0.71	0.72	0.90	0.95	1.05	0.81	0.80	0.89	0.61	0.74	0.75	0.75	0.70	0.61	0.52	0.54	0.56	0.69	0.76	0.75	0.70	

seeing

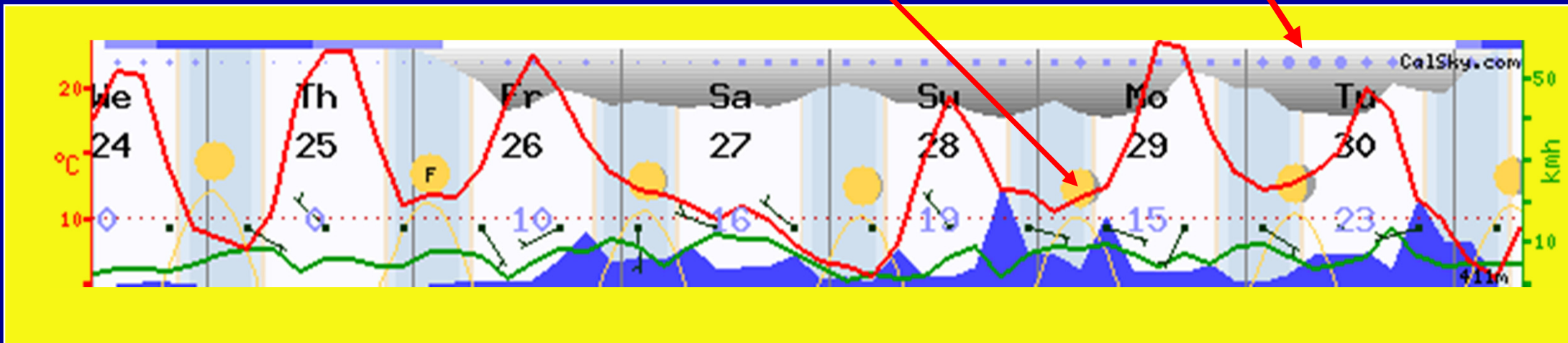
28 Janvier 2013

Autre ressource internet: Ex Calsky

Seeing:

plus la tache est grosse pus
le seeing est mauvais

Lune



24 au 30 Avril 2013

La turbulence autour du télescope (en relation avec la CLA)

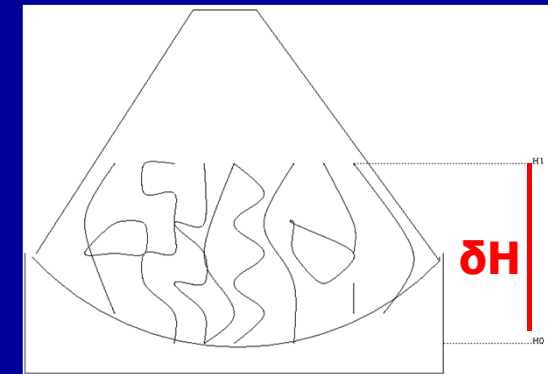
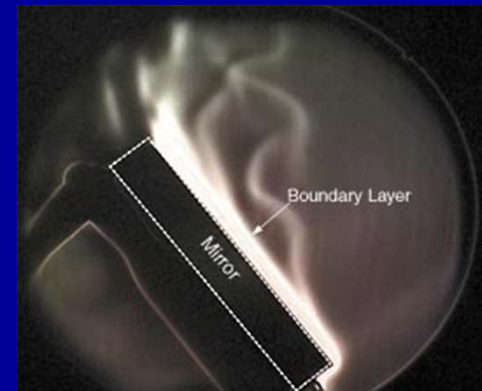
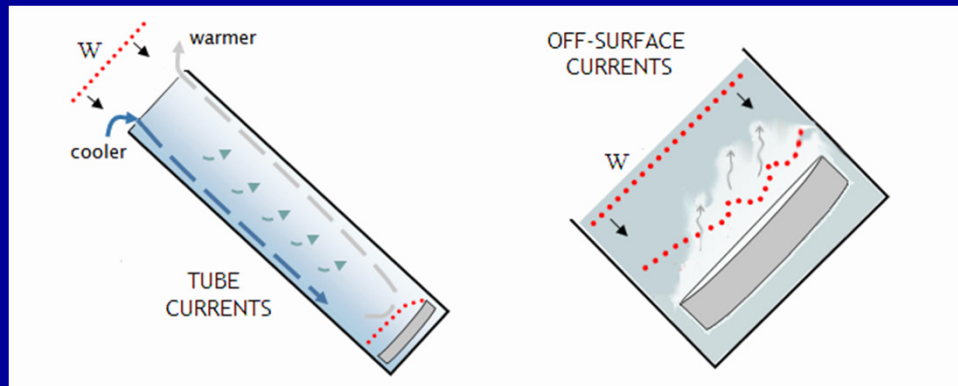


Attention à la proximité de sources de chaleur ou de sources relarguant de la chaleur :

- soi-même - autres astronomes-voitures
- surfaces bétonnées- surfaces macadamisées (parking)- surfaces rocheuses -toitures de maison

→ **Emplacement favorable**: être « au-vent » des autres- observer devant une surface engazonnée ou mieux devant une surface d'eau- être dans un flux laminaire –protéger le tube du Dobson

La turbulence dans le télescope



Quant le miroir présente un écart de température δT par rapport à l'air ambiant il y a des mouvements de convection de l'air au-dessus du miroir et une augmentation du seeing (sans parler des aberrations de déformation du miroir).

L'épaisseur δH de la couche turbulente convective dépend de la différence de température δT , de la taille du miroir et de son poids .

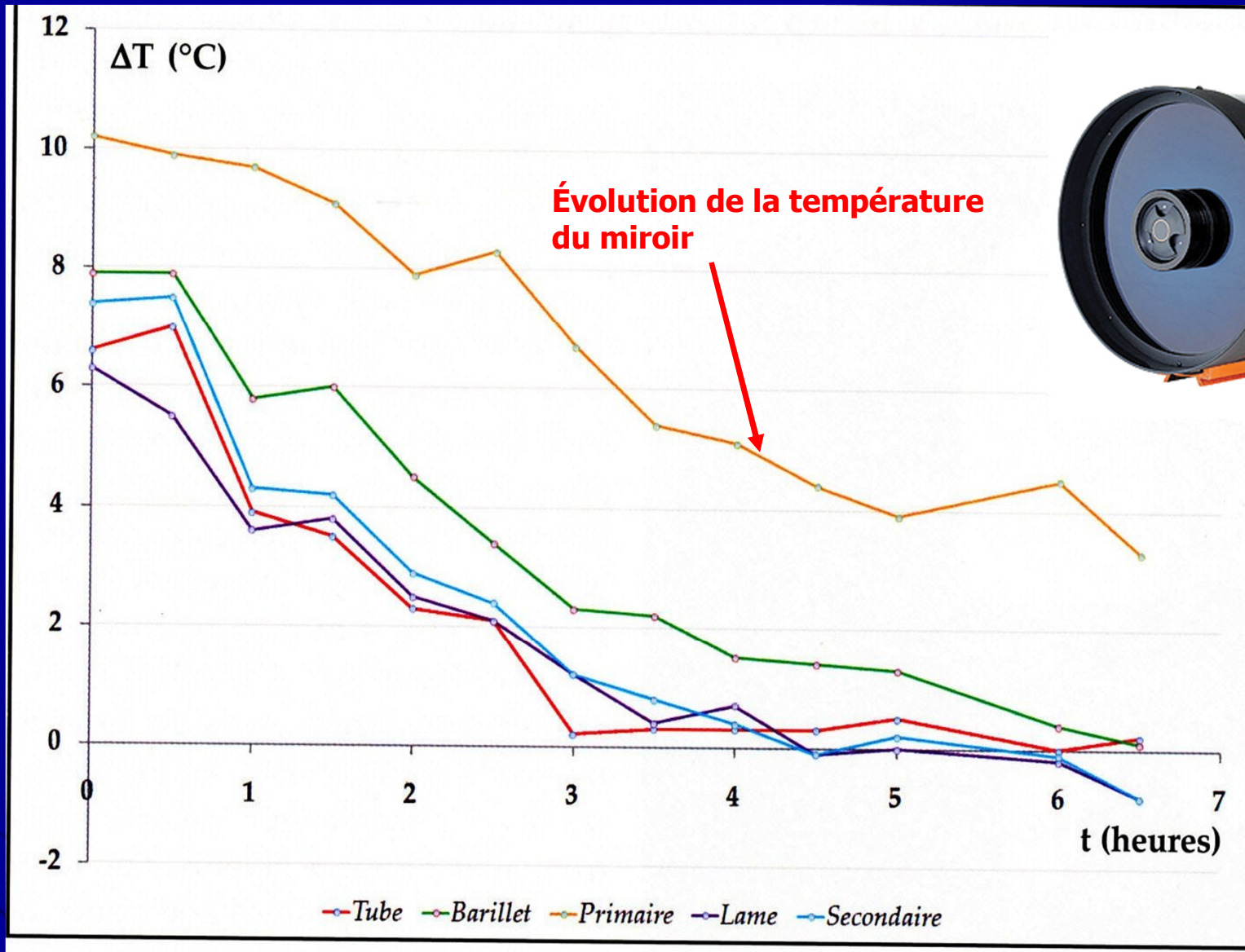
→ δH peut être de quelques cm au-dessus du miroir ce qui peut amener une augmentation du seeing de l'ordre de 0,5 arc-seconde !

Formule reliant le « seeing du miroir »,
l'écart de température δT et l'épaisseur δH



$$\frac{\text{FWHM}}{\delta T} = 1.338 \left[\frac{\delta T \delta H}{K_0^6} \right]^{1/5} ; \text{arcsec K}^{-1}.$$

→ Pour diminuer par 2 le seeing du miroir il faut diviser le δH par 25 (exposant 1/5) !!!
d'où la présence des ventilateurs de mise en température

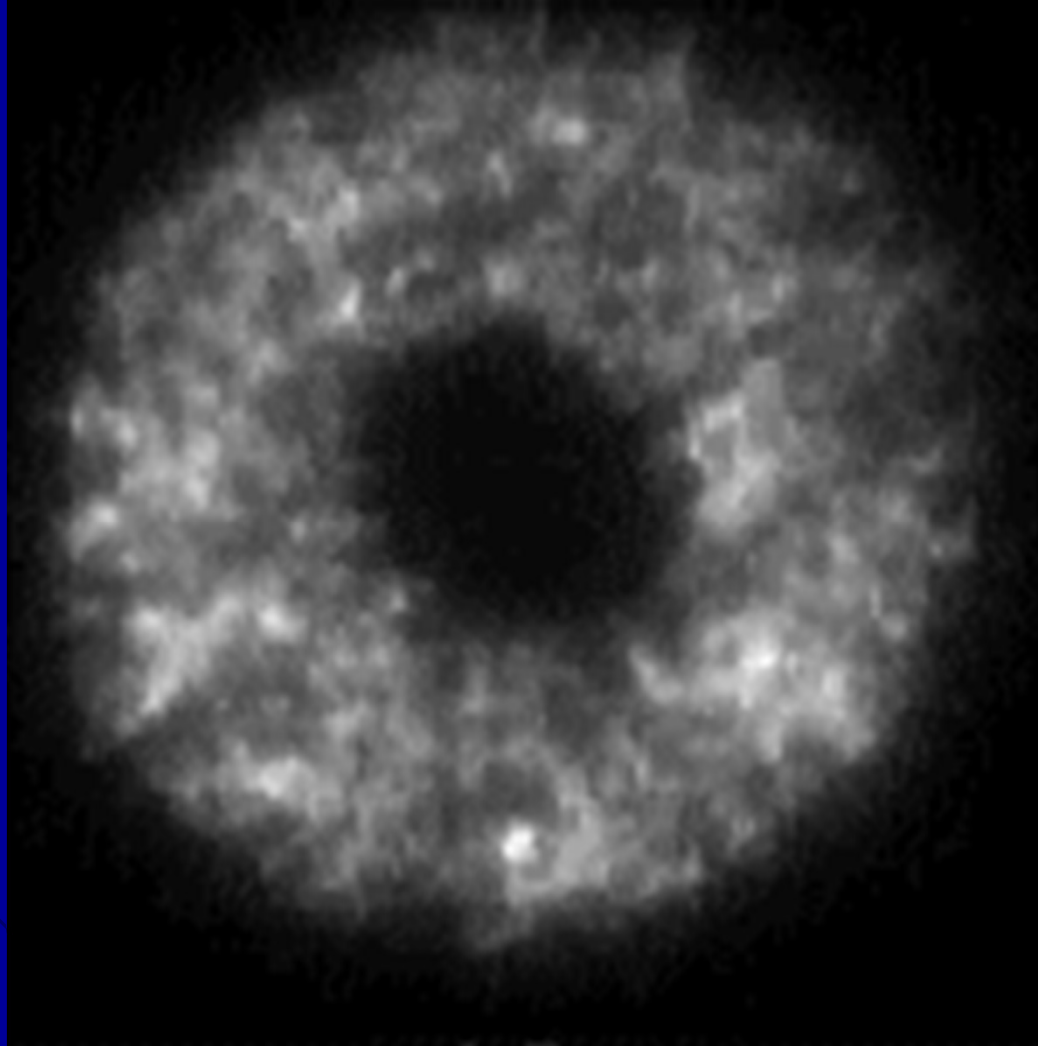


Article astrosurf Mag-Serge Petiot

Exemple: mise en température d'un C14 (tube fermé)
Diamètre du miroir = 355 mm-ep= 4 cm- poids du miroir # 9 kg

Conclusion générale

- La prise en compte de la turbulence est une nécessité si on recherche de la résolution sur l'objet observé.
- La turbulence s'appréhende par le paramètre de Fried r_0 ou par le seeing s qui en découle ($s = 11 / r_0$ en seconde d'arc).
Les valeurs moyennes de r_0 pour le voironnais sont 8 à 12 cm.
- En observation visuelle, la valeur du rapport D / r_0 est d'une importance capitale pour l'image télescopique [« bonnes » images quand $D / r_0 < 1$].
- C'est dans les couches basses de l'atmosphère (CLA) que la turbulence est maximale d'où l'importance de l'emplacement du télescope.



« ça turbule ! »



JLM-Octobre 2013
Albéo 38-Voiron