

Turbulence et seeing

Principales sources :

Marc Sarazin : ESO Observatory
Bernard Tregon : <http://brizhell.org/interferointro.htm>
Jean-Pierre Prost
Sky and Telescope
Telescope-optics.net
<http://www.handprint.com/ASTRO/seeing1.html>
Estimating local seeing at DCT facility
<http://atm.udjat.nl/>



Sommaire

- Effets de la turbulence sur les images stellaires et planétaires
- Atmosphère, turbulence et seeing :
 - Causes de la turbulence
 - Quelques équations : paramètre de Fried, temps de cohérence, ..
 - Conséquences sur le choix du temps de pose et des filtres
 - Météo et prévisions de seeing
- Turbulence instrumentale (miroir, coupole)
- Turbulence locale (surface environnante)
- Turbulence géographique (reliefs local)
- Turbulence d'altitude

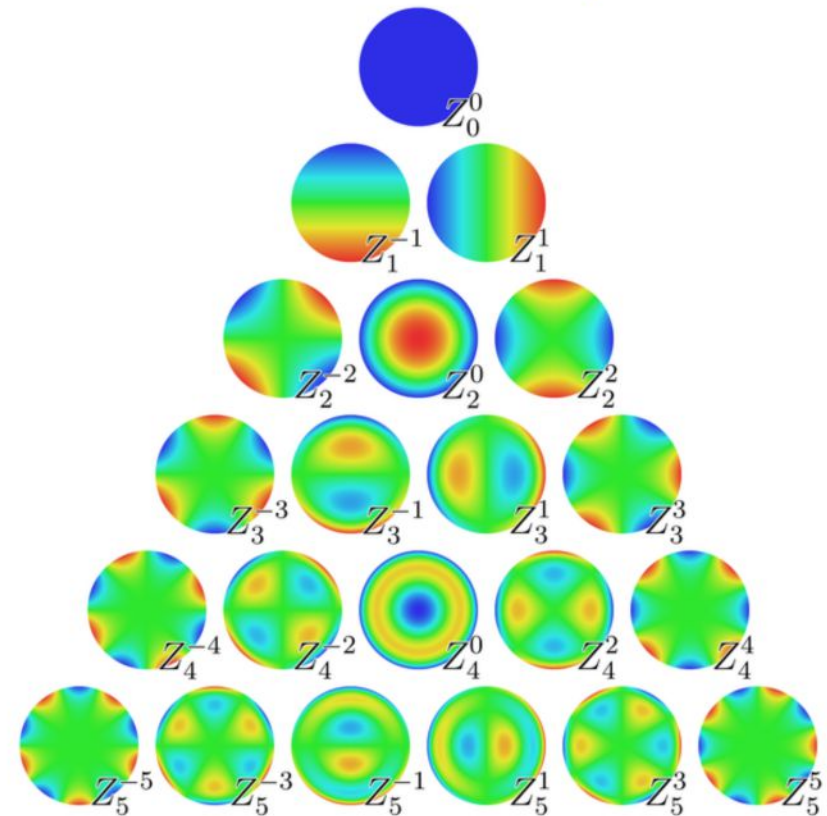


Les effets de la turbulence sur les images



D'abord sur une étoile ...

- C14 : 200 im/s – pose 5 ms - 0.15 arcs/pixel : Film
- L'atmosphère se comporte comme une lame à face "pas parallèle" dont les défauts varient en permanence (fréquence de l'ordre de 100 Hz).
- Plusieurs effets de déformation qui se combinent :
 - (Z1) : Déplacement en X / Y : tip / tilt
 - (Z2) : Astigmatisme, défocalisation
 - (Z3) : coma, trefoil
 - (Z4) : sphéricité, astigmatisme secondaire, tetrafoil
 - et toutes la suite des polynômes de Zernicke



D'abord sur une étoile

- Des effets plus ou moins importants :



Évaluation de la turbulence: ce type d'évaluation est relative et dépend du diamètre de l'instrument.

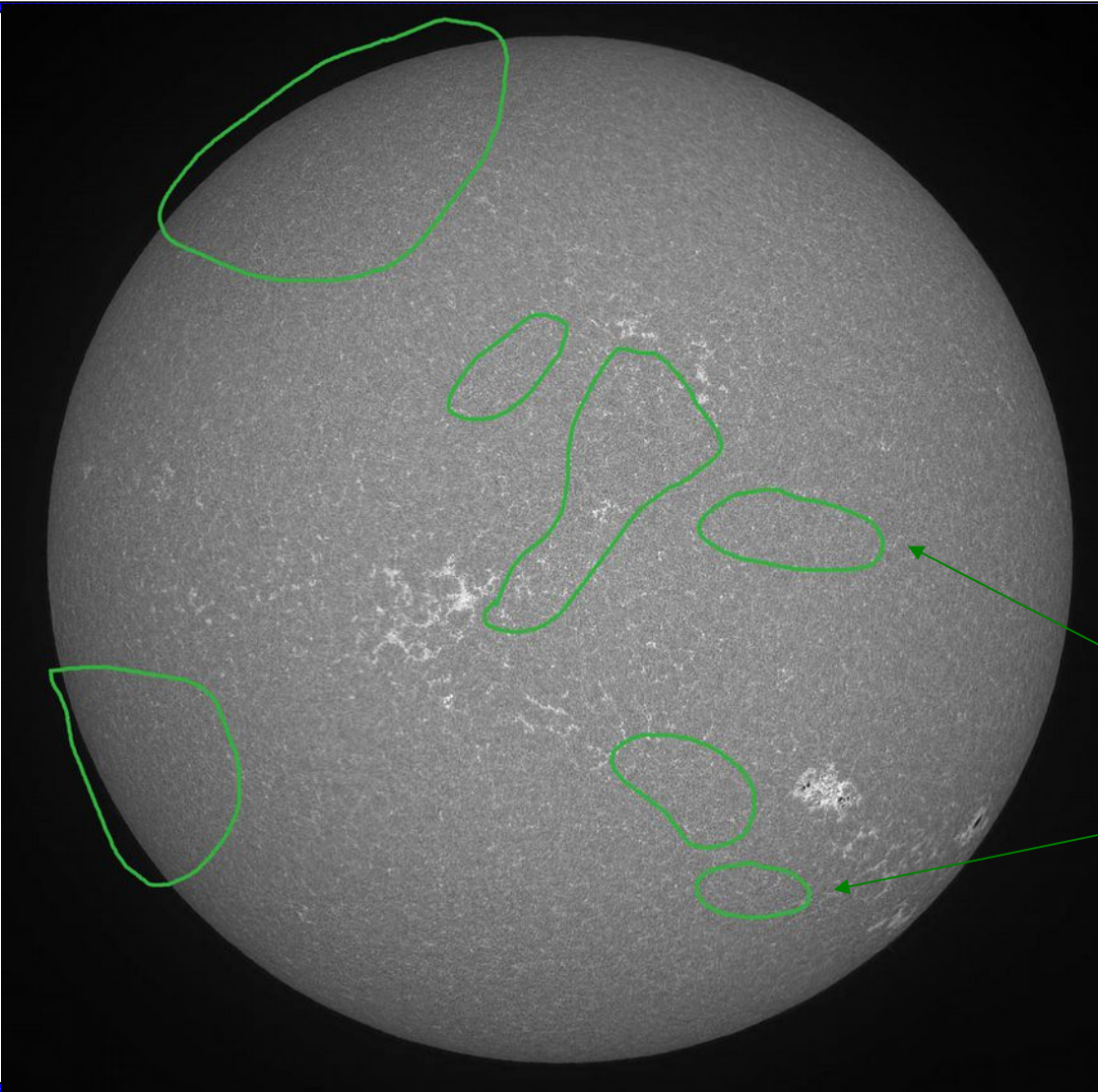
- Difficulté pour transposer la mesure d'un diamètre d'instrument à un autre.
 - Avec cette méthode, le seeing estimé avec un télescope de 20 cm, renseigne assez peu sur le seeing que l'on peut espérer avec un télescope de 30 cm.
 - Les professionnels utilisent une batterie d'instruments pour caractériser la turbulence et son profil en fonction de l'altitude (DIMM, MASS, ballons,..) .
- => Néanmoins ... intérêt de noter le niveau de turbulence lors des acquisitions.

Ensuite sur du « grand champ » : soleil, lune, planètes

- Film soleil & lune :
 - Déplacement en X / Y : l'image est agitée mais reste nette => correction par recentrage
 - Distorsion : image déformée, mais reste nette => correction par morphing
 - "Defocus, coma, etc " : l'image est floue => correction par ... sélection d'images
- "Gros capteurs" (> 1.5 Mpx), les effets de la turbulence ne sont pas identiques sur tout le champ :
 - Disque solaire (champ $1/2^\circ$) : jamais net dans sa totalité (échantillonnage 1 arcsec/pixel).
 - Soleil HR (champ $3' \times 2'$) : jamais net dans sa totalité (échantillonnage 0.15 arcsec/pixel)
 - Problème moins significatif pour la Lune ou les planètes (quoique ...)
- Le logiciel de traitement images doit donc pouvoir :
 - Découper chaque image (= frame) en N "morceaux" (= sub - frames).
 - Chaque séquence de sub-frames est triée indépendamment des autres (il y a donc N tris)
 - Recentrer chaque sub-frame de chaque image pour corriger la distorsion.
 - Additionner les meilleurs morceaux sélectionnés pour augmenter le S/N.



Disque solaire en Ca K

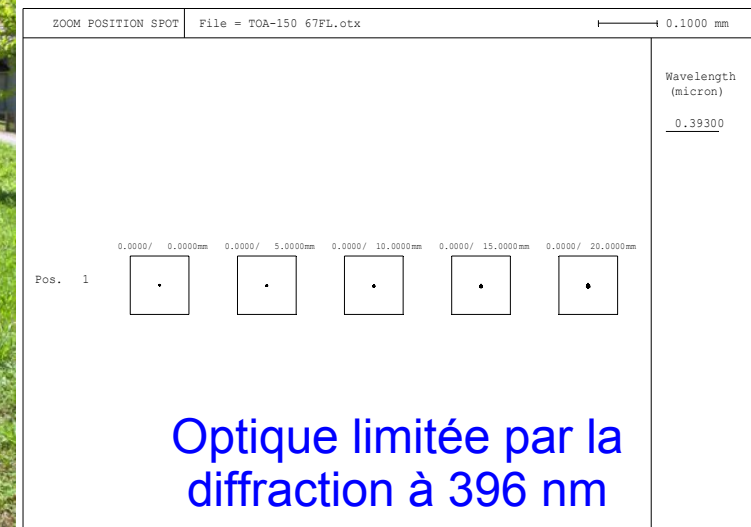


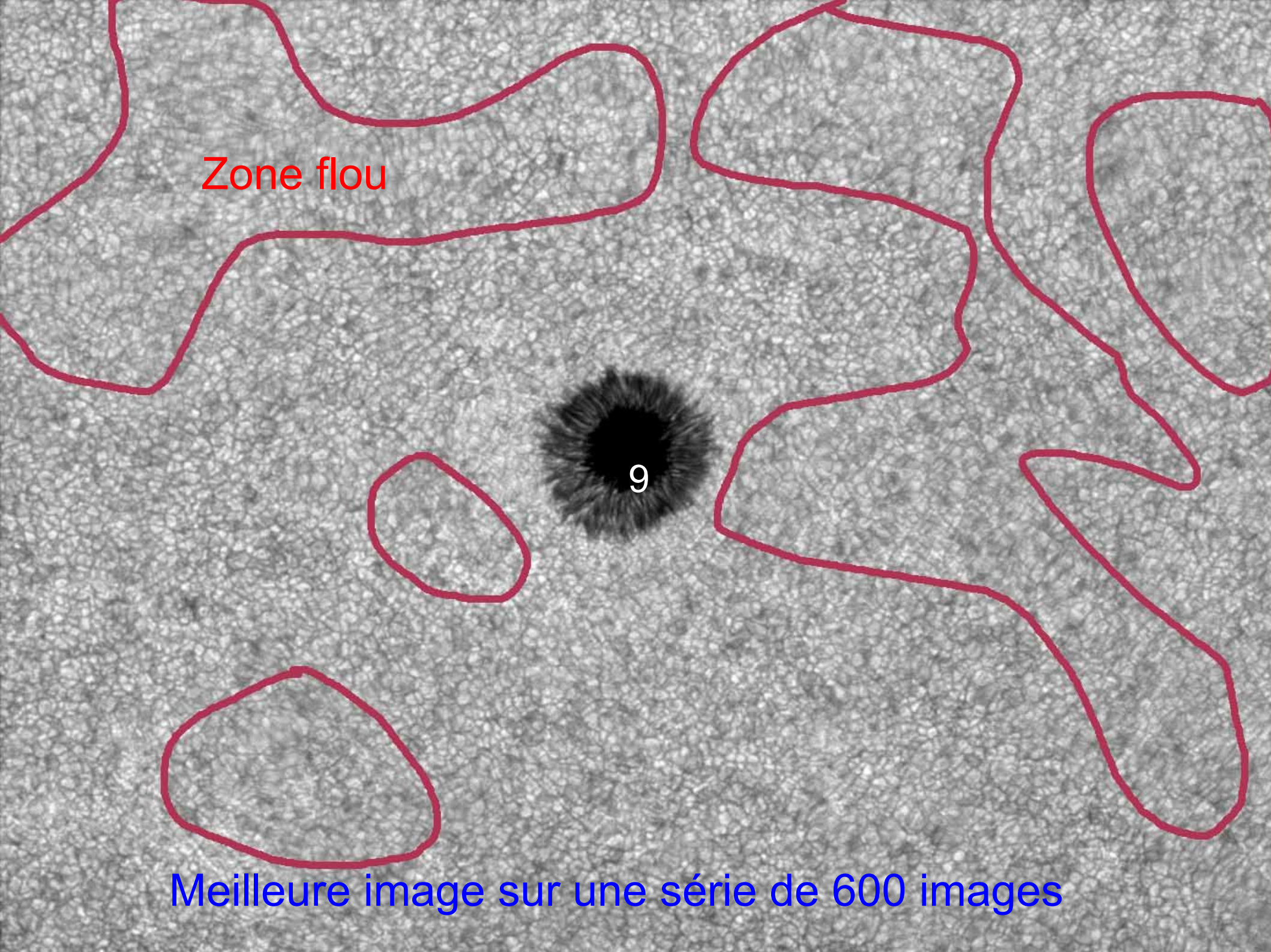
- Takahashi TOA150, STL11000, pose 5 ms, 1 arcsec/pixel.
- En 10 ans d'observation, le disque n'est jamais net dans son ensemble. En général, il y a plus de zones floues que nettes
- Intérêt de sélectionner les meilleurs "morceaux".

Zones nettes

Granulation solaire en K-line

- Takahashi TOA 150, Skynyx 2.1M, acquisition 12 bits, 15 images/s, pose 0.75ms (gel turbulence ...), 0.15 arcsec / pixel.
- Filtre Baader K-line 396 nm FWHM = 10 nm
- Champ : 210 arcsec x 156 arcsec.

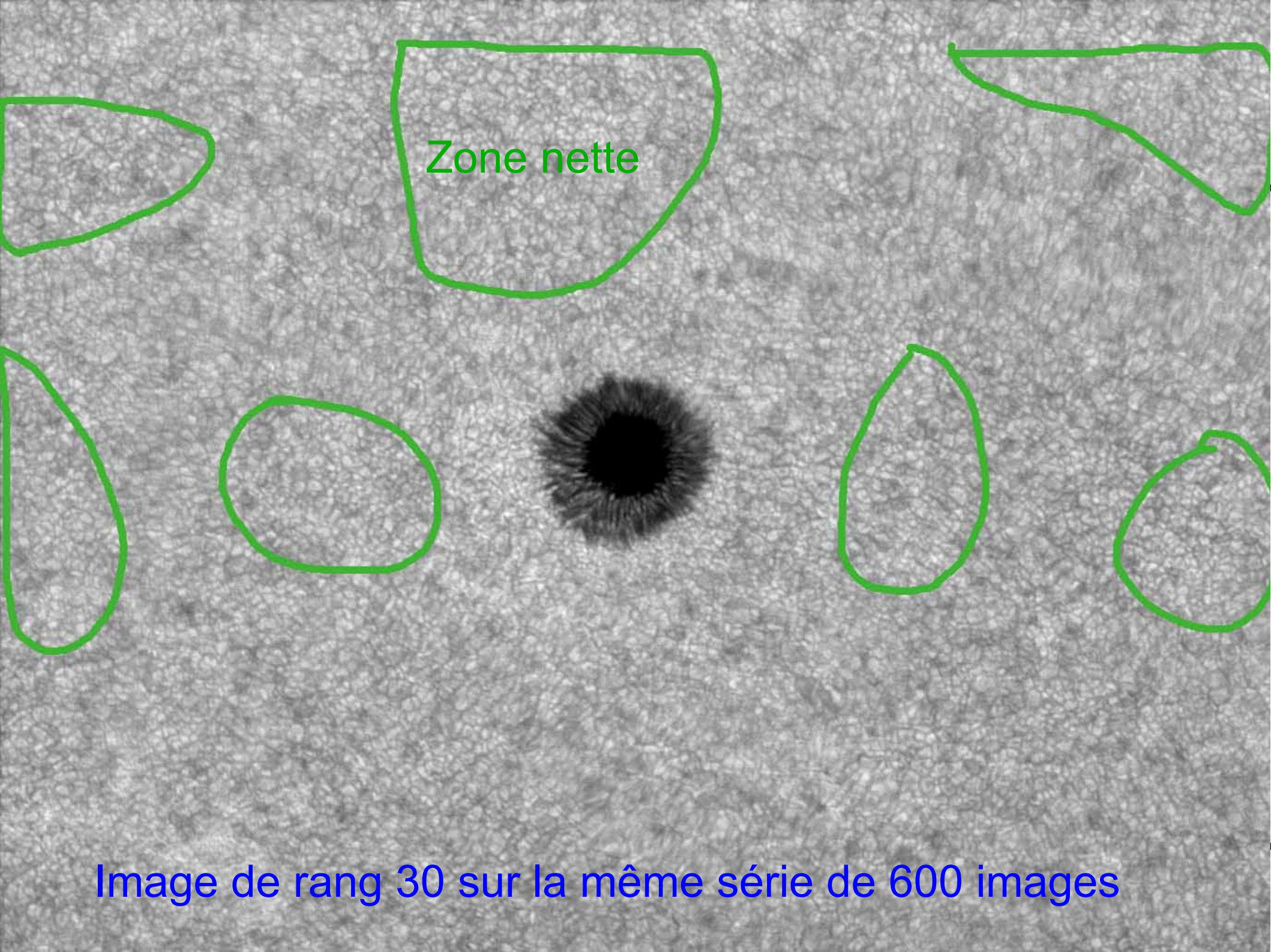




Zone flou

9

Meilleure image sur une série de 600 images



Zone nette

Image de rang 30 sur la même série de 600 images

Un peu de théorie ...

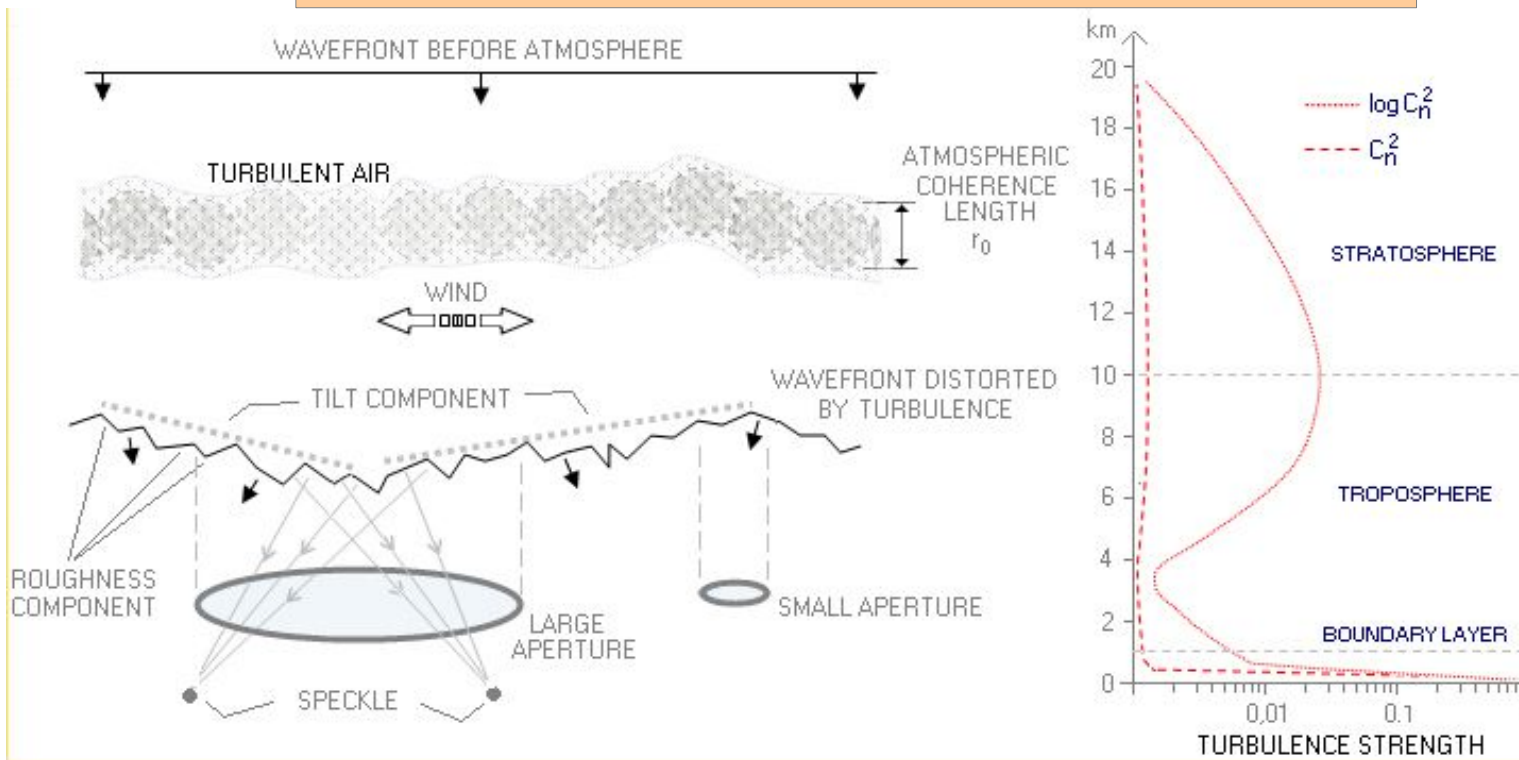


Atmosphère, turbulence et seeing

L'indice de réfraction de l'air dépend de la température et de l'humidité

Un écart de 0.6°C dans une cellule de turbulence de 20 cm produit un écart de $\lambda/4$ sur le front d'onde

L'atmosphère déforme en permanence le front d'onde incident



Entrée en scène du fameux r_0

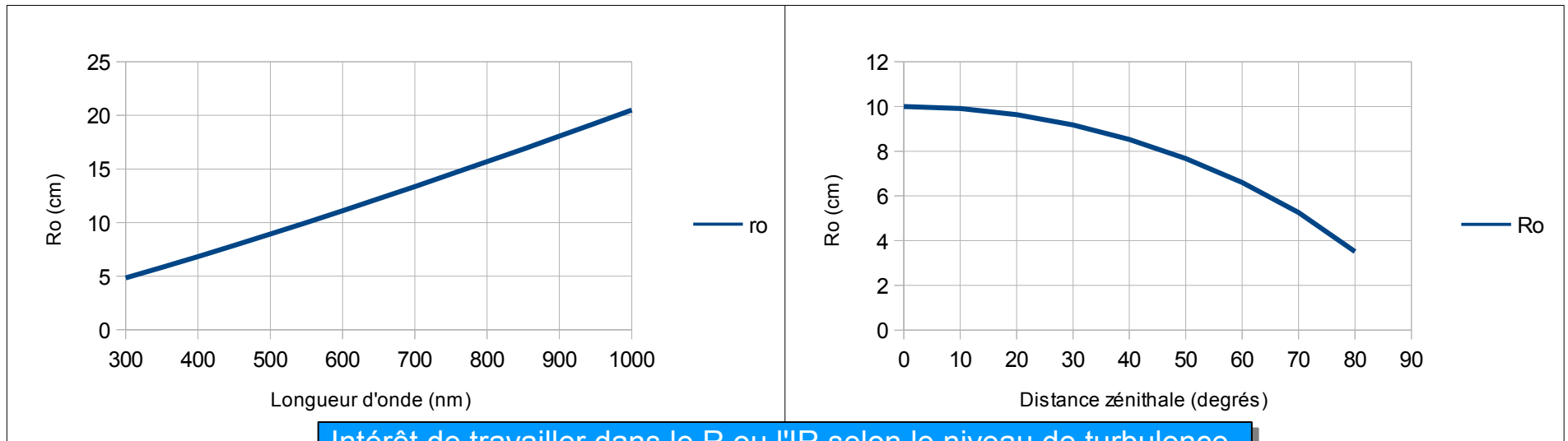
Paramètre de Fried = r_0 = longueur de cohérence transverse :

- Taille des plus petites cellules de turbulence : 5 à 25 cm selon les sites.
- Taille au delà de laquelle la résolution d'un télescope est limitée par la turbulence.

PS (secondes) = $120 / r_0$ (mm) (au lieu de $120 / D$ sans turbulence)

r_0 : proportionnel à $\lambda^{1.2}$ → r_0 augmente de 55% quand on passe du bleu (450 nm) au rouge (650nm)

r_0 : proportionnel à $(\cos z)^{0.6}$ → r_0 divisé par 2 à 30° de hauteur



Intérêt de travailler dans le R ou l'IR selon le niveau de turbulence.

Intérêt de travailler au méridien ou par lune haute



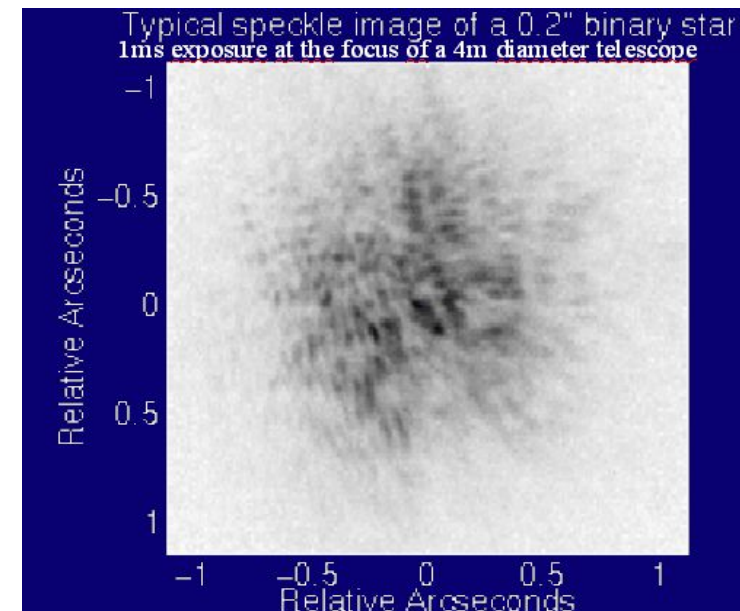
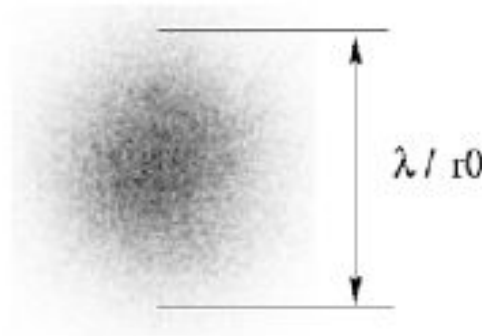
Image d'une étoile en fonction du r_0

- Si le diamètre de l'instrument est $< r_0$, la tache de diffraction est visible (reste l'effet tip / tilt).
- Si $D > r_0$, le faisceau lumineux passe au travers d'un grand nombre de cellules de turbulence, l'image d'une étoile est décomposée en N images de diffraction superposées en mouvement très rapide : les speckles (tavelures)
 - Pose courte, le tip / tilt est gelé, on voit les speckles individuels.
 - Pose longue, les speckles se mélangent $\Rightarrow$ FWHM (radian) = λ / r_0 .

Image courte pose



Image longue pose



Figurer la turbulence : le temps de cohérence

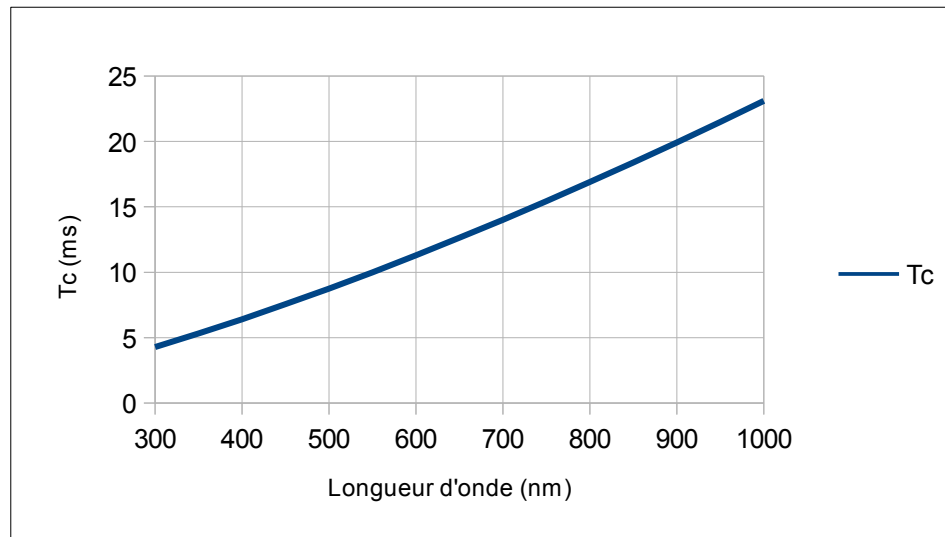
Temps de cohérence : $\tau_o = 0.314 r_o / V$ (ou r_o / V selon la définition)

- avec V = vitesse moyenne de la couche turbulente (altitude 2000 à 7000 m)

La turbulence est figée si temps de pose $< \tau_o$

→ τ_o varie avec la puissance 7/5 de la longueur d'onde

→ de 3 à 10 ms



Intérêt d'avoir une camera sensible et à faible bruit lecture

Planétaire / lunaire C14 :

→ temps de pose : 20 – 40 ms

Solaire lumière visible :

→ temps de pose : 1 ms



Conclusion pratique :
Aller vite, passer au rouge, faire beaucoup
d'images ...



Passer au rouge ?

Aspect négatif :

→ Augmentation du diamètre de la tache diffraction (proportionnel à λ).

Aspects positifs :

→ Réduction de la dispersion atmosphérique.

→ Diminution de la « turbulence » = augmentation du r_0 et du temps de cohérence τ_0 .

→ Amélioration de la correction optique de l'instrument (λ / n) pour un même défaut de forme. L'instrument est donc moins sensible à la turbulence (les défauts s'ajoutant).

→ Schmidt Cassegrain : meilleures images dans le V et le B (aberration sphérochromatique)

Quel filtre pour la meilleure résolution ?

→ Lune : V ou J en 250 mm, R pour 350 mm. A moduler selon turbulence et qualité de l'instrument.

→ Jupiter et Saturne : pas vraiment choix, car toutes les couleurs (R, V, B, IR) sont intéressantes.

→ Venus : pas le choix, UV et IR 800 (ou 1000 nm pour émission thermique).

→ Mercure : R et IR, pour diminuer effets turbulence, dispersion atmosphérique, fond du ciel.

→ Soleil (en « visible ») : de B à R selon le diamètre de l'instrument, sa qualité optique et le niveau de turbulence.



Lucky imaging : faire beaucoup d'images

La **probabilité** d'obtention d'une "bonne" image dépend de la valeur du r_o .

→ "Bonne" signifie ici meilleure que X1.7 pouvoir séparateur (critère orienté ciel profond) :

→ si $D = 2 r_o$, probabilité = 0.986,

→ si $D = 3 r_o$, probabilité = 0.765,

→ si $D = 4 r_o$, probabilité = 0.334.

Intérêt de prendre un très grand nombre d'images pour :

→ Faire de la sélection d'images : soleil en visible = 5 à 10%, planètes & lune = 40 à 60%

→ Et bien sûr aussi pour augmenter le rapport S/N (racine carré de N) de l'image additionnée.

La limite au nombre d'images que l'on peut additionner est fixée par :

→ La vitesse de rotation de la planète (mais aide de WinJupos) ou la vitesse d'évolution des détails sur le soleil (grains de riz, protubérances).

→ La diminution du rapport S/N, quand on diminue le temps de pose pour augmenter la cadence d'acquisition.

→ Mais durée d'acquisition longue possible sur la lune (= acquisition sur 10 mn), Vénus, Uranus.



Pour rêver ...



Quelques unes de meilleurs sites au monde ...

Site	ϵ_0	θ_0	τ_0
Dome C	0.27	5.7	7.9
South Pole	1.8	3.2	1.6
Mauna Kea	0.5-0.7	1.9	2.7
San Pedro Martir	0.59	1.6	6.5
Cerro Paranal	0.80	2.6	3.3
La Palma	0.76	1.3	6.6

Stellaire :

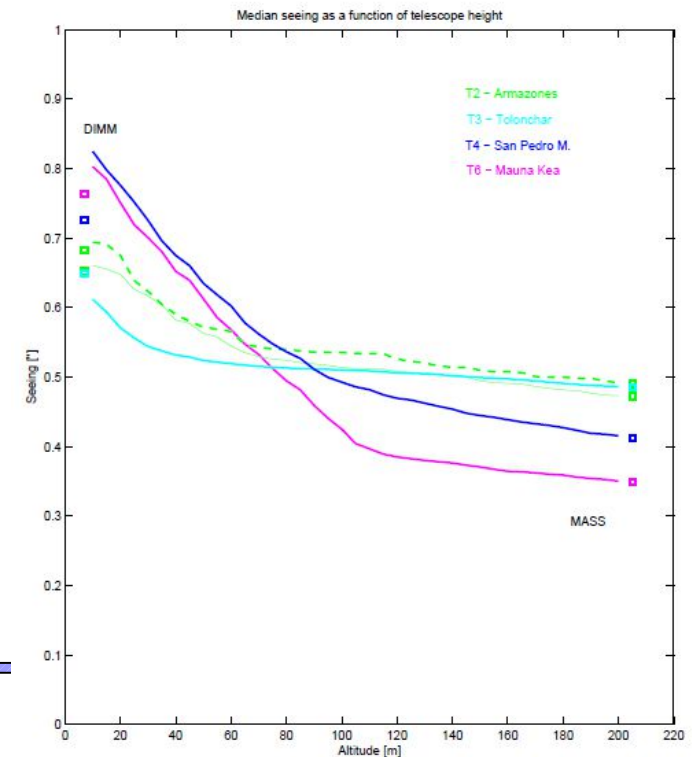
→ Dôme C : $r_0 = 50$ cm à 100 cm, best seeing 25% = 0.15 arcsec.

→ La Palma : $r_0 = 17$ cm et 0.57 arcsec .

Solaire :

→ Big Bear (Iac) : $r_0 = 10$ à 20 cm

→ Tenerife - Izana : $r_0 = 10$ à 15 cm



Les prévisions de seeing



Prévisions de seeing

Fri 30.09.2011

Time (UTC)	00	01	02	03	04	05	06	07	08
High Clouds (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mid Clouds (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Low Clouds (%)	12	22	20	20	19	14	11	5	0
Seeing Index 1	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Seeing Index 2	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Seeing arcSeconds	1.18	1.19	1.17	1.18	1.18	1.21	1.26	1.31	1.36
Jet stream (m/s)	21	22	22	23	22	22	21	21	21
2m Rel. Hum. (%)	74	69	65	66	65	64	64	64	68
Bad Layers Top (km)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Bad Layers Bot (km)	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.1	1.1
Bad Layers K/100m	0.71	0.61	0.54	0.54	0.54	0.52	0.51	0.54	0.58

www.meteoblue.ch



Quelques grandes tendances

La turbulence a tendance à être plus plus faible (... mais pas toujours) :

- Quand écart de température jour / nuit faible (air humide), et quand température varie peu au cours de la nuit.
- A la tombée de la nuit, par temps de brouillardss.
- A proximité étendue d'eau froide : lac, mer (Vendée, La Hague) ... selon orientation vent.
- Avant l'arrivée d'une perturbation ? Après un orage ?

La scintillation :

- Lente : en général turbulence faible altitude
- Rapide : en général haute altitude (jet currents), mais pas visible à l'œil si trop rapide => turbulence type "Montgolfière"
- Estimation hauteur couche turbulente = $Focale * (Focale + e) / e$

Pour le solaire : Le sol se réchauffe plus rapidement que l'air.

- Meilleur seeing : en général le matin et jusqu'au méridien (fin ap. midi?).
- Être à côté (au milieu) d'un lac.
- Le jour, le vent est notre ami : la turbulence diminue avec le vent (2 à 15 m/s).
- La turbulence diminue avec la hauteur : divisée par 2 en passant de 15 à 30 m.



Quelques grandes tendances

En montagne :

- Le niveau de turbulence peut varier fortement en peu de temps (qq minutes ou même secondes).
- Être en haut de la montagne, éviter les fonds de vallées, les pentes et les cols : la nuit l'air froid redescend le long de la pente (brise de vallée), effet de bascule entre vallées. Mais ... il y a souvent du vent ...
- Être au dessus de la couche d'inversion (ou de la mer de nuages).
- Le vent peut être favorable / défavorable selon orientation et relief (écoulement laminaire ou pas)
- Écoulement laminaire : montagne côtière proche d'un océan froid (Paranal, Ténérife, Nord du Maroc), ou montagne isolée sur une île (Hawaï, Barbades, Crête)

En plaine :

- Le niveau de turbulence évolue nettement plus lentement (min juste après coucher soleil?).

En grande ville:

- Assez bonne stabilité ... du fait de la pollution?

La seule chose sûre :

- **Tout cela dépend largement du site d'observation qu'il faut apprendre à connaître.**

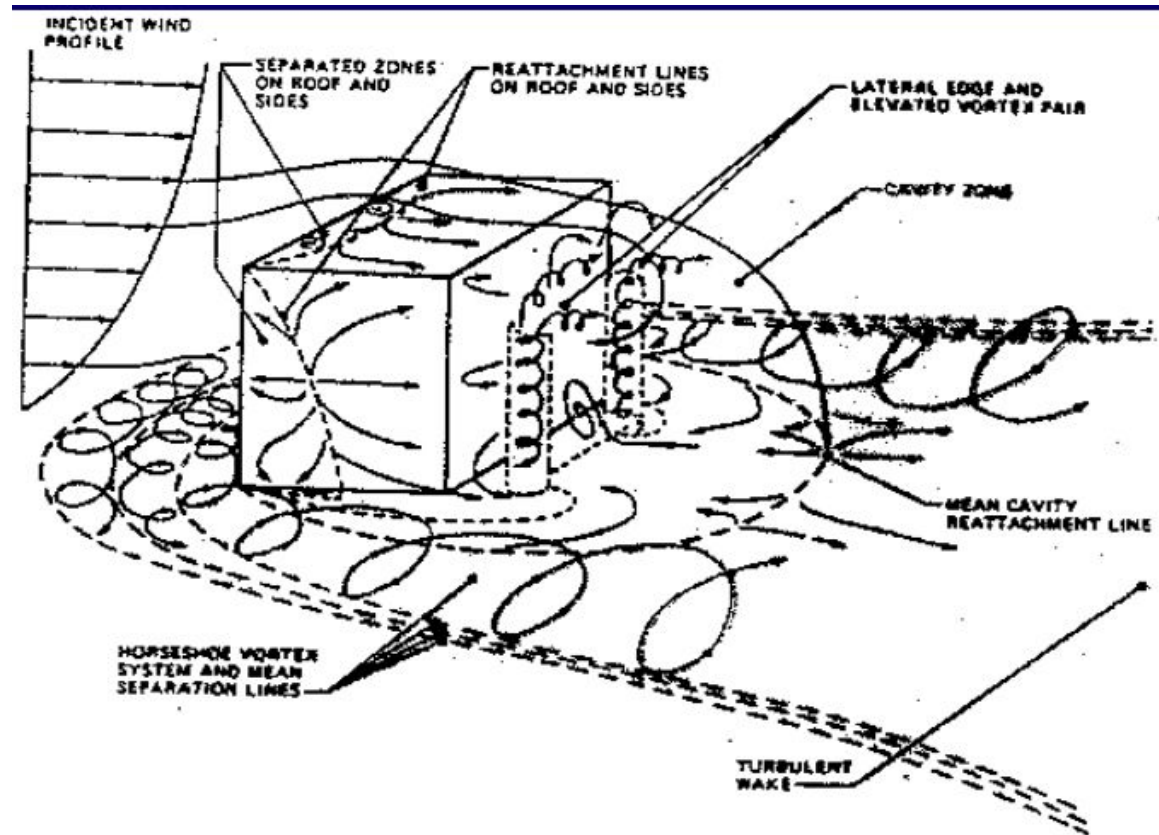


La turbulence locale



Turbulence locale : l'environnement immédiat

Turbulence locale = combinaison vent, relief et sources thermiques



Préférer :

→ Verdre, gazon, arbres, (balcon?)...

Éviter :

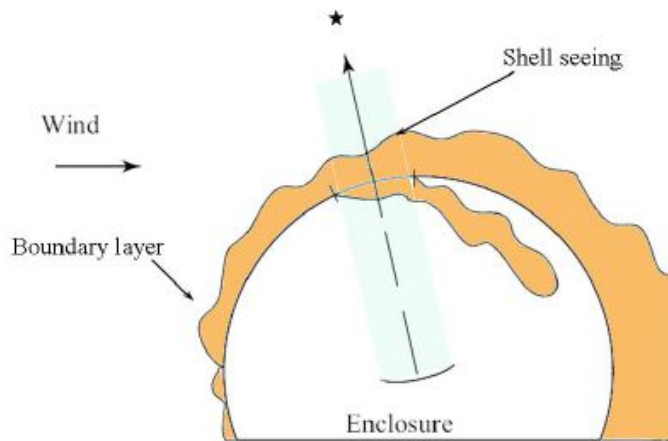
→ Cheminée, terrasse sur un toit.

→ Surface en béton, pavés, goudron : s'échauffe et restitue ensuite la chaleur.

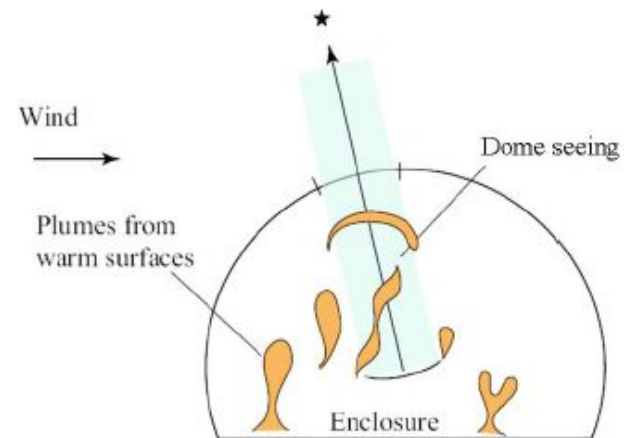
Turbulence locale : l'observatoire

Coupole classique : la solution la plus mauvaise !!

- Il faut que température intérieure suive l'évolution de la température extérieure à mieux que 2°C près.
- Ouverture la plus large possible.
- Isolation thermique le jour.
- Ventilation la nuit (en extraction) = 15 à 30 fois le volume de la coupole / heure.
- Climatisation ?
- Dôme blanc (TiO₂ ou Zinc oxyde): pour solaire car stabilise à température ambiante durant jour. Mais pas bon la nuit :
 - $T_{\text{amb}} - 5^\circ$ par émission (84 % solar reflectivity, 93 % thermal emissivity)
- Dôme alu : OK pour nuit car la température surface se stabilise à ambiante durant nuit.



Turbulence de surface



Turbulence interne

=> Dégradation seeing proportionnelle à $\Delta T^{1.2}$

Turbulence locale : l'observatoire



Abris ventilés, refroidis avec très grandes ouvertures



Tour



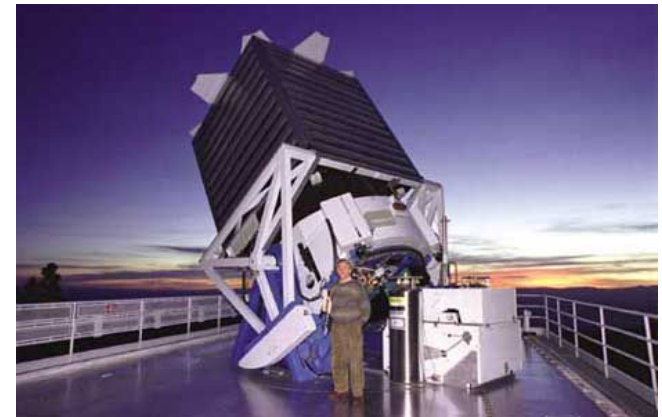
Tour + coupole à ouverture totale



Coupole à ouverture totale



Abri roulant



Turbulence locale : observatoire solaire



Dutch Open Telescope – La Palma
D= 45 cm - h = 15 m – vent 2 à 20 m/s



Swedish vacuum Solar Telescope - La Palma
D = 97 cm - h= 17 m

Big Bear – USA
D = 1.6m



Lunette 150 mm – Alpes



Turbulence locale : observatoire solaire

Dutch Open Telescope – La Palma



Lac de Big Bear : seeing meilleur au méridien

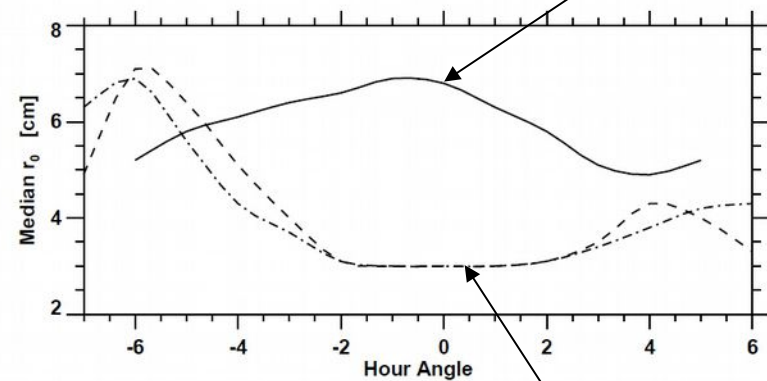


Figure 1. Seeing characteristics at selected sites for high-resolution solar observations (BBSO: solid, La Palma, Canary Islands: dashed-dotted and Haleakala, Maui: dashed).

Big Bear - USA



Autres sites : seeing meilleur le matin, puis fin ap/midi

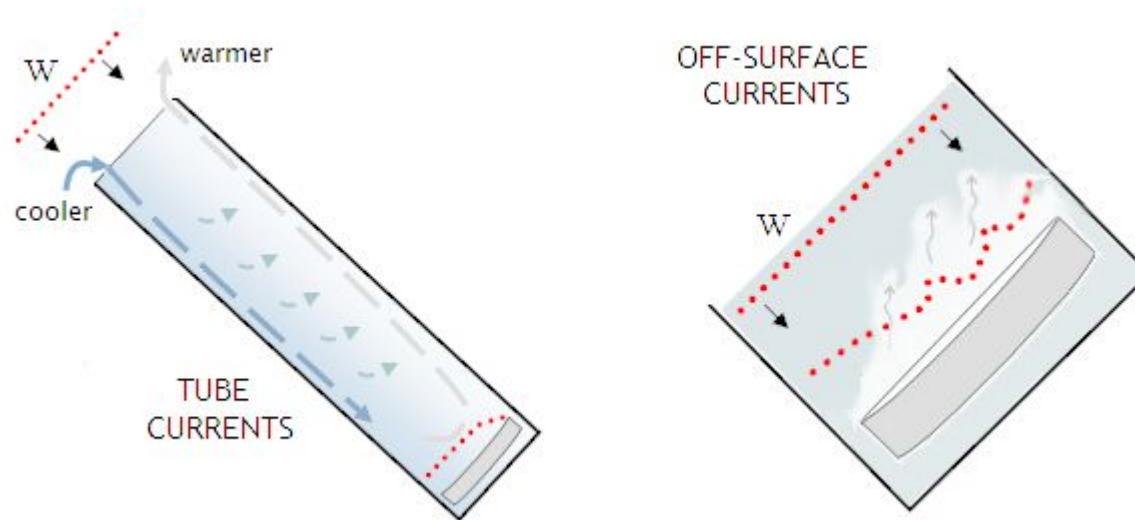


Turbulence interne



Turbulence interne : le tube

- Source chaude = la chaleur accumulée par le miroir.
- Source froide = les parois du tube qui jouent le rôle de dissipateur thermique.
- Effet cheminée : l'air chauffé par le miroir monte, alors que l'air refroidie (par le tube, le baffle, etc) redescend.
- Il y a dégradation du seeing dès que le miroir est plus chaud de 2°C par rapport à la température ambiante
- Quelques animations :
 - [Tube sans ouverture latérale](#)
 - [Tube avec ouverture latérale](#)



Tube fermé / tube ouvert / Serrurier ?

Tube fermé (lame de fermeture ou lame de Schmidt) :

→ plus stable = turbulence interne plus lente, mais mise en température plus longue.

Tube ouvert :

→ courants de tube, mais peuvent être limités si

diamètre tube > diamètre miroir + 10 cm et refroidissement miroir.

Tube Serrurier : pas de courant de tube. Idéal ?



Matériaux et couleurs du tube :

→ Alu avec peinture noire (ex Celestron) : émission thermique importante la nuit, température tube passe en dessous T ambiante. Peut-être pas idéal ?

→ Alu brut : Westley (Australie) : température suit évolution T ambiante.

→ Alu peinture blanche (TiO₂) : pour le solaire, car émission thermique importante, mais conduit à température tube en dessous de T ambiante la nuit.

→ Carbone : a priori pas intéressant car isolant.



Et pour le solaire ...

Tube ouvert :



Couleur tube :

→ Peinture blanche (TiO₂):

car émission thermique importante



Turbulence interne : le miroir

$$\theta = \Delta T^{1.2}$$

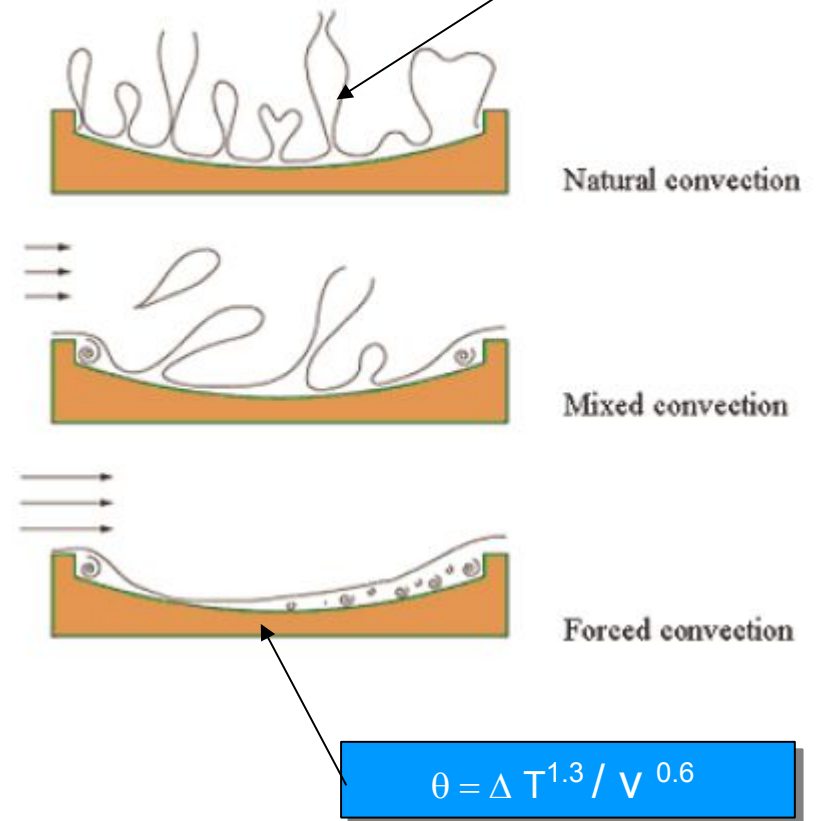
Trois régimes de turbulence.

- 1) Refroidissement passif => prend du (trop) temps.
- 2) Refroidir miroir, ventilateur au dos du miroir - soufflant ou aspirant ?
- 3) Souffler la couche limite par ventilateur latéral.

Mesurer écart T miroir / T externe par sonde température :

- Viser un écart de température < 1° à 2 °C.
- Problème moins significatif quand :
 - Écart T jour / nuit faible (tropiques, bord de mer)
 - Température constante durant la nuit.
 - Télescope stocké dans un endroit frais (miroir au frigo ...)

Et aussi turbulence de baffle pour les SC

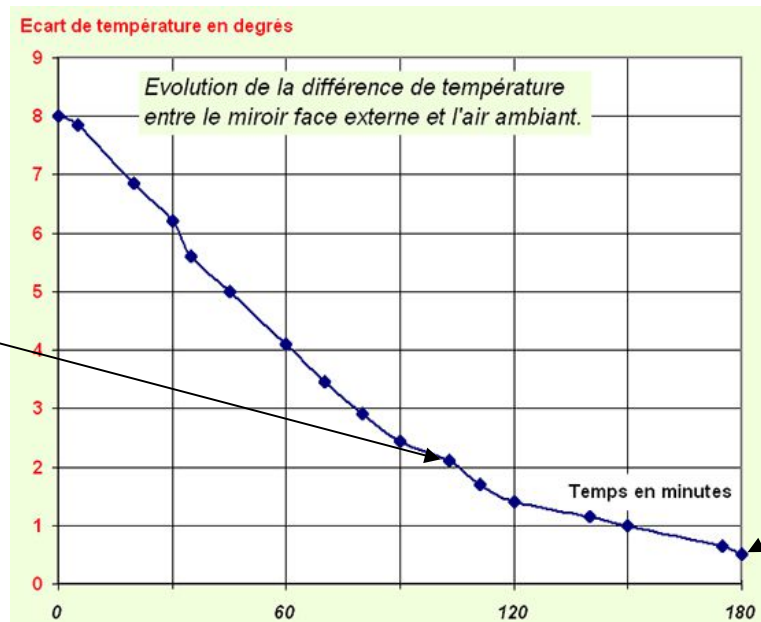


Mise en température du miroir : combien de temps ?

→ Dépend écart $T_{\text{miroir}} / T_{\text{ambiante}}$, et épaisseur du miroir, tube ouvert / fermé, ventilation ou pas.

→ Problème à prendre sérieusement en compte à partir de 250 mm de diamètre.

Exemple 1 : Mewlon de 250 sans ventilation



Ecart $< 2^{\circ}\text{C}$ au bout de 1h40mn

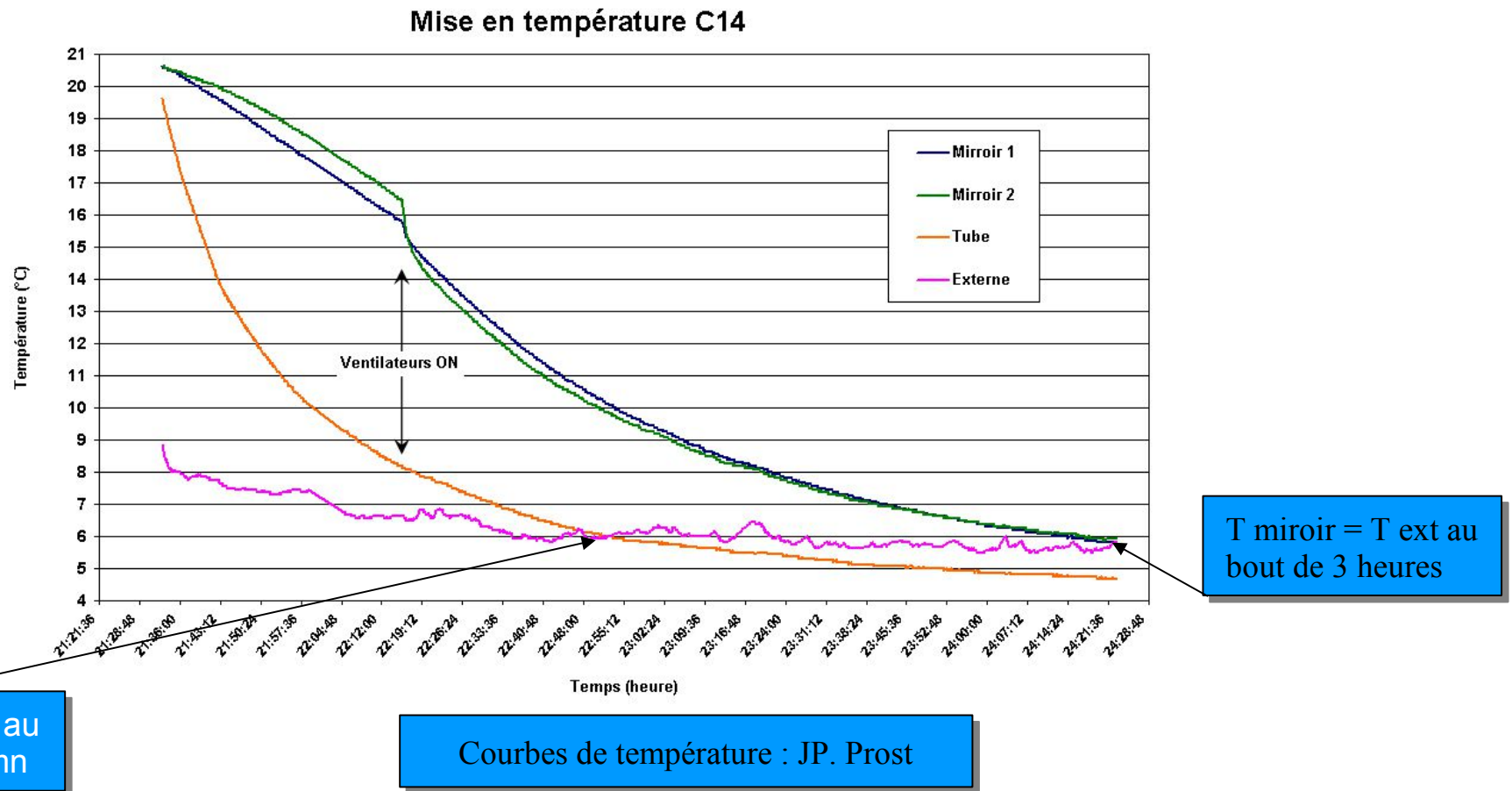
$T_{\text{miroir}} = T_{\text{ext}}$ au bout de 3 heures

Courbes de température : Lucien - Lyon



Temps de mise en température du miroir

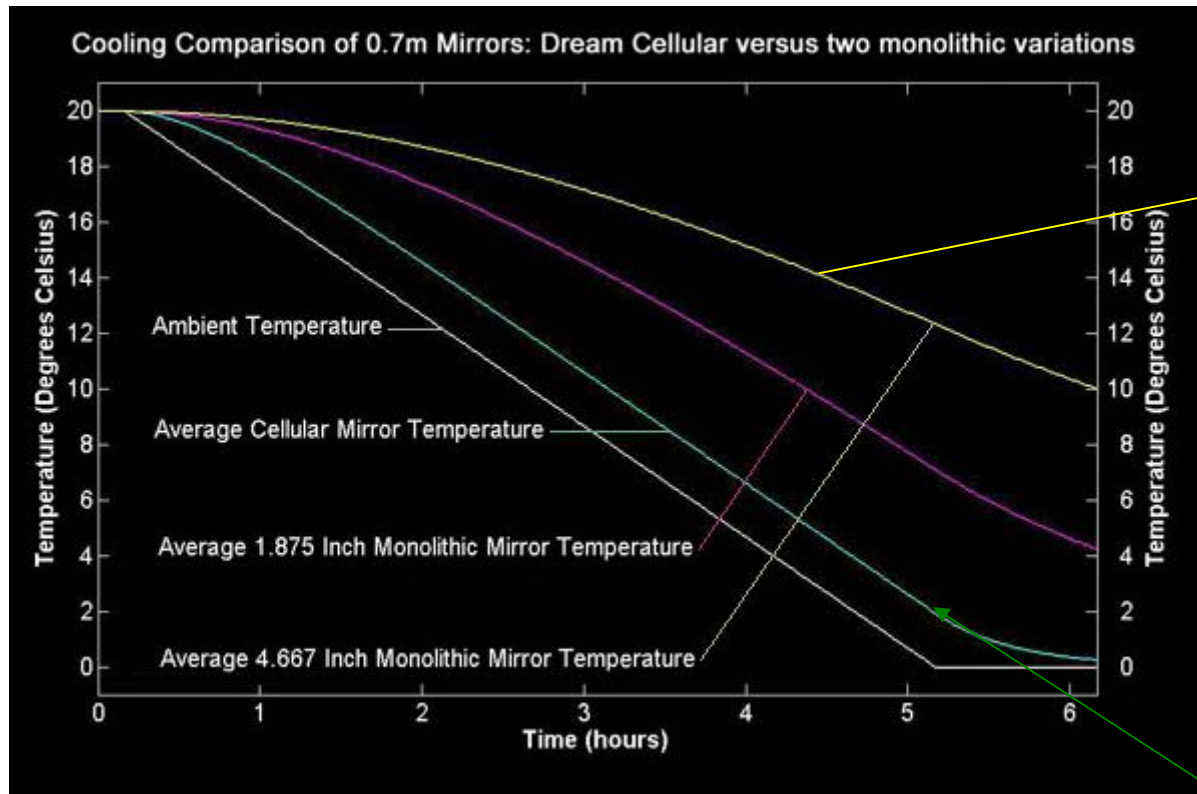
Exemple n° 2 : C14 : peut aller à 6h si non ventilé (rend observation PQ difficile), 2 h typique si ventilé....



Temps de mise en température du miroir

Exemple n° 3 : influence de l'épaisseur sur un miroir de 70 cm de diamètre (source : DreamTelescope)

Gradient de 4°C /
heure à partir de 20°C



Epaisseur 118 mm

Epaisseur 47.6 mm

Miroir cellulaire 100 mm



Et la résistance chauffante ?

Comment éviter le dépôt de buée sur un Schmidt – Cassegrain ?

1 – Pare-buée : diminue la vitesse de refroidissement de la lame

2 – Résistance chauffante réglable :

→ Surveiller l'évolution du degré d'humidité avec un hygromètre.

→ Avoir ses propres repères pour déterminer quand mettre en route la résistance chauffante (ex humidité > 75 %) et à quelle intensité.

Effet de la résistance sur la turbulence interne ?

→ Au pire assez peu marquée.

→ Pourrait même avoir un effet positif (inverse le gradient de température dans le tube) ?

→ Déformation de la lame : pas d'effet, car la lame a une puissance optique très faible.



Conclusions



En conclusion ...

Attention particulière à porter à la mise en température de l'instrument :

- Sonde température sur miroir. Écart températures miroir et ambiante et évolution.
- Ventiler le miroir au delà de 250 mm, et aussi la coupole.

Éviter toutes les sources de chaleur :

- Préférer télescope à l'air libre. Préférer la verdure.

Passer dans le rouge et IR diminue la turbulence (mais augmente la diffraction).

Tester (longuement) plusieurs sites d'observation.

- Relever systématiquement les conditions d'observation, en particulier celles où le seeing est bon.
- Comparer par rapport aux prévisions de seeing.

Et observer le plus souvent pour maximiser les chances de tomber sur la bonne nuit.



Merci de votre attention

Des questions ?



Backup-slides



Turbulence et seeing

Angle d'isoplanétisme = angle à l'intérieur duquel les effets de la turbulence sont identiques

$$\omega_{\text{(en radians)}} = 0.3 \times D / H \quad (\text{ou encore } r_0 / H)$$

- H = hauteur de la couche turbulente (entre 2000 et 7000 m)
- Il est préférable d'avoir une couche turbulente basse (voir prévisions MeteoBlue)
- Au delà de cet angle, les effets de la turbulence sont différents => distorsion.
- Ex : si D = 0.35 m et H = 5000 m, alors $\omega = 4$ arcsec ..., c'est le domaine d'action de l'optique adaptative.
- Heureusement, dans la pratique de l'imagerie planétaire, on peut compter sur des zones « nettes » de tailles plus importantes => lien avec taille des cellules dans Autostakkert2, Registax ou Avistack.

Amplitude de l'agitation (rms) = amplitude de la variation de la position de l'étoile (tip/tilt)

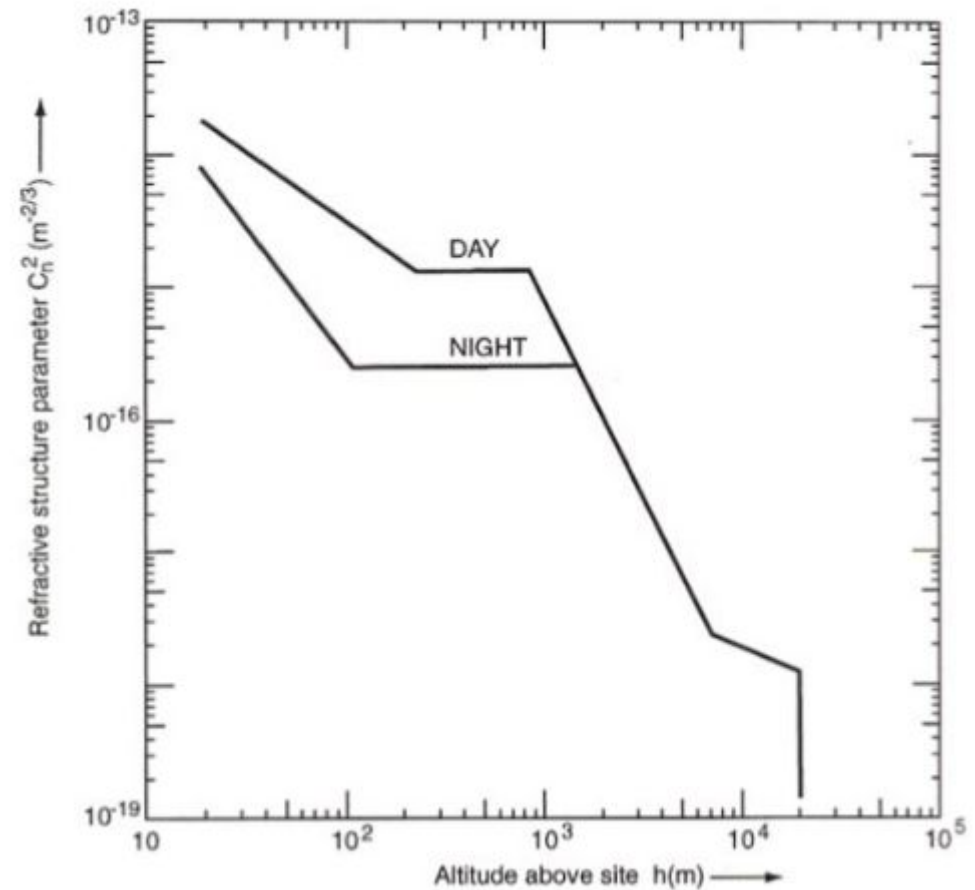
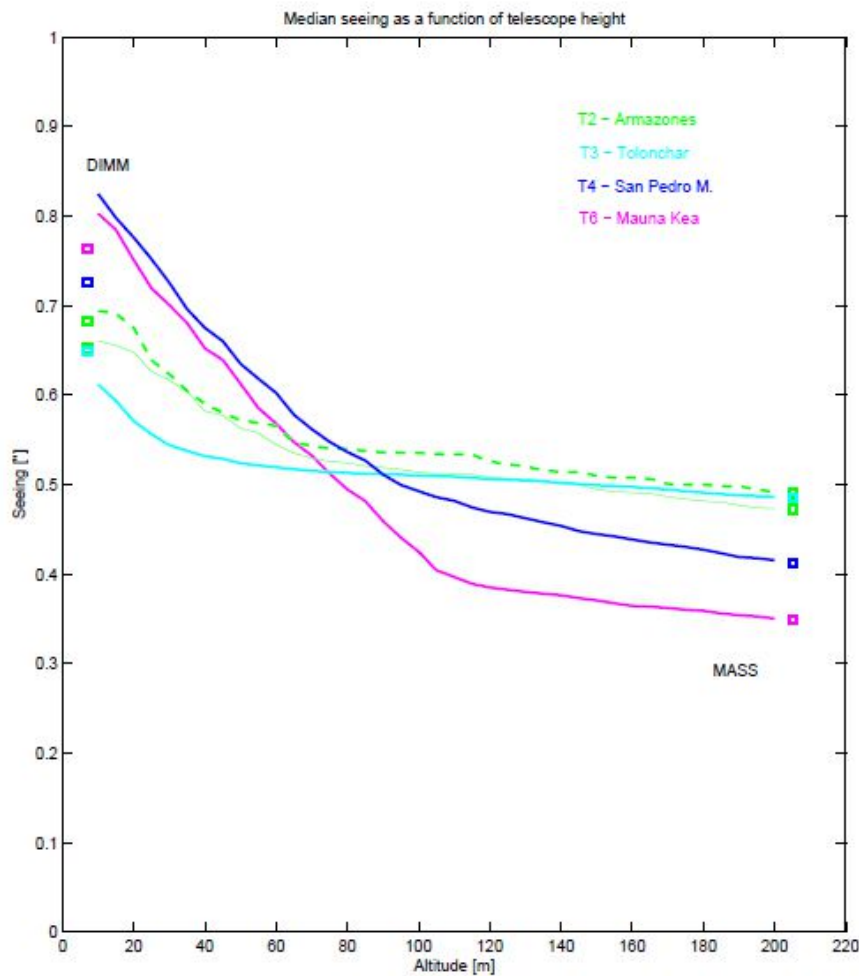
$$\sigma = 8.62 \lambda r_0^{-1.2} D^{-1/6}$$

→ λ en microns

→ r_0 et D en cm



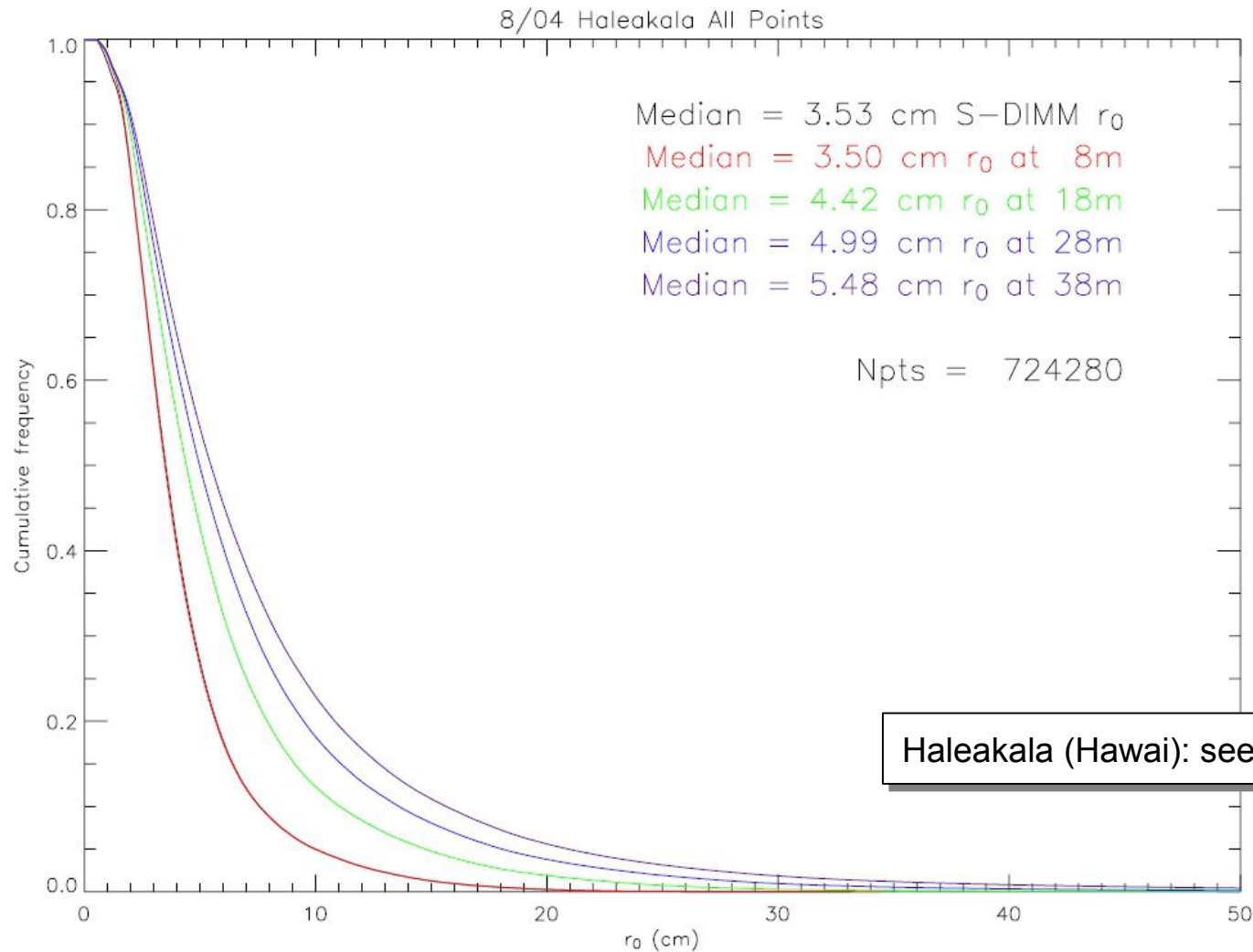
Variation du seeing en fonction de la hauteur du télescope



La Palma : seing jour / nuit en fonction hauteur



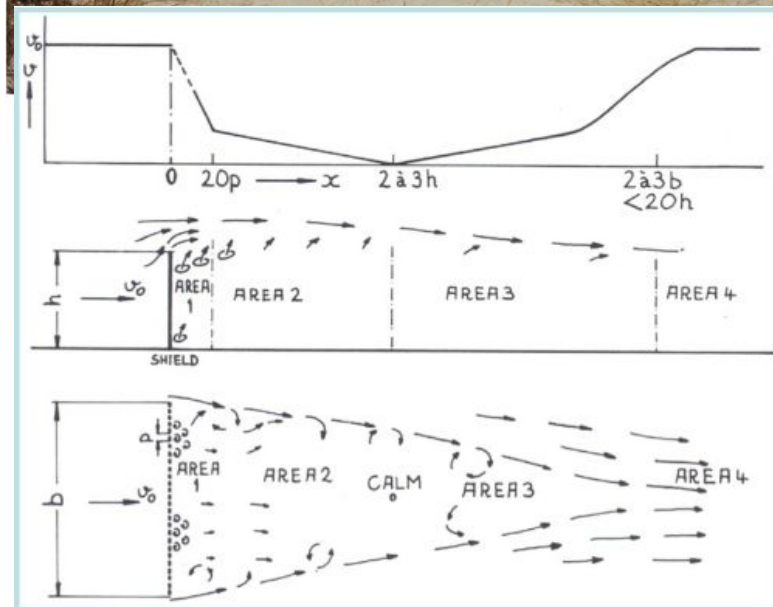
Variation du r_0 en fonction de la hauteur du télescope



Turbulence locale : se protéger du vent ...



Fig. 8. Tests with semitransparent shields on the beach of the same lagoon island (see fig. 7). *At right*: Kees Zwaan in front of the shield, at the side from where the wind is coming. *At left*: Kees behind the shield. The stick with 4 ribbons shows the effect of the shield.



Écran avec 50% de surface de blocage :

- pas / peu de vent jusqu'à une distance de 40 fois la largeur des planches
- il semble préférable de descendre à 20% de blocage.

=> A tester ...

Turbulence interne : le miroir

