

L'image télescopique et l'atmosphère

[quand l'Astronome rencontre le
Météorologue]

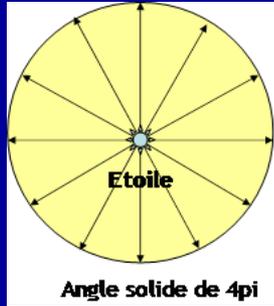
Partie n° 2 : Théorie (allégée) de la
turbulence



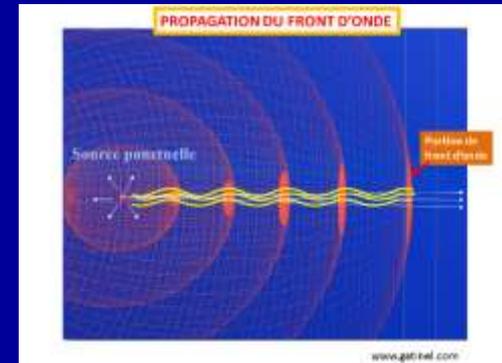
Rappel Optique

- Rayon lumineux et onde électromagnétique (λ)
 - Vitesse de la lumière et indice de réfraction ($n = c / v$)
 - Variation de l'indice de réfraction (température de l'air)
 - Déphasage entre deux rayons lumineux
 - Rayons lumineux et surface d'onde
 - Déphasage et cabossage de la surface d'onde
 - Critère de Rayleigh
-
- Disque ou tache d'Airy
 - Pouvoir séparateur $PS = 14 / D$ cm en " d'arc (étoiles doubles)
 - Fonction de transfert de Modulation (FTM) et transmission des contrastes
 - Application du critère de Rayleigh à l'image astronomique
 - bonne image si le plus grand déphasage est inférieur à $\lambda / 4$

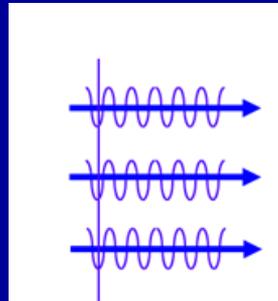
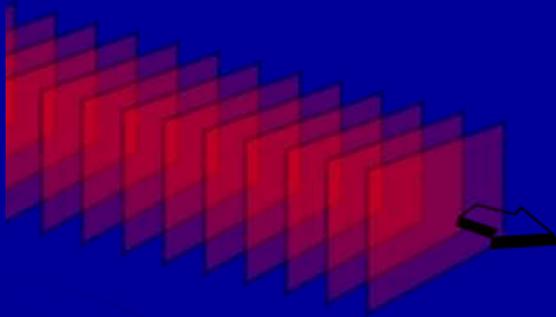
Notion importante: La surface d'onde



Angle solide de 4π



Matérialisation d'une surface d'onde



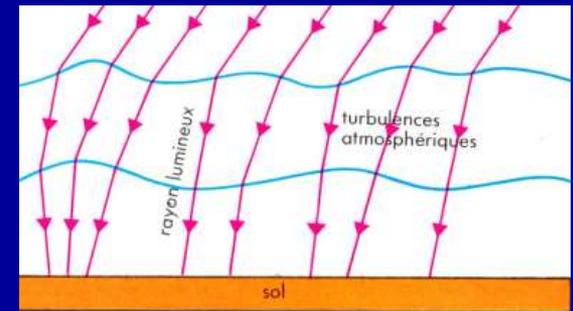
Les rayons lumineux sont perpendiculaires à la surface d'onde

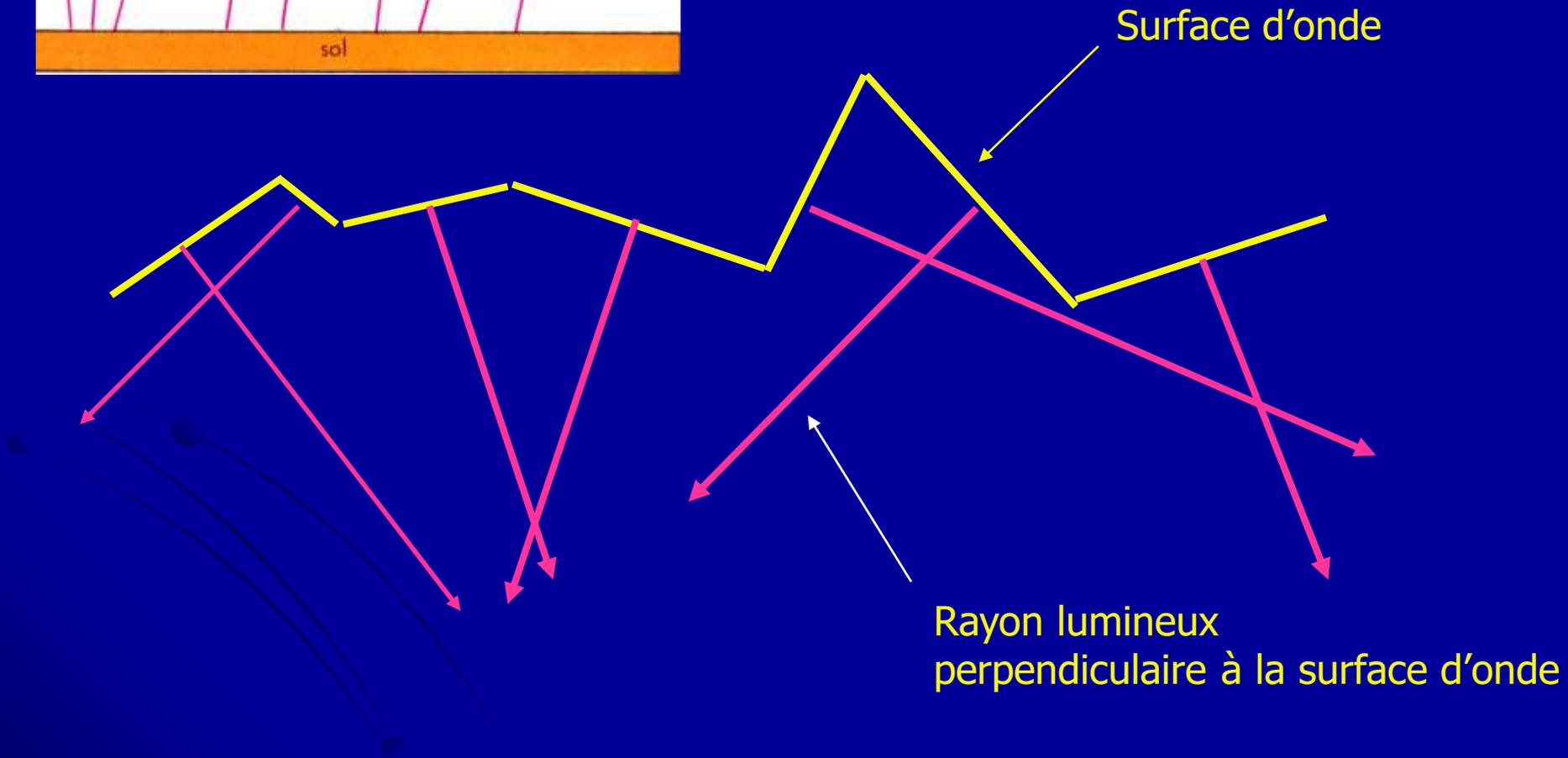
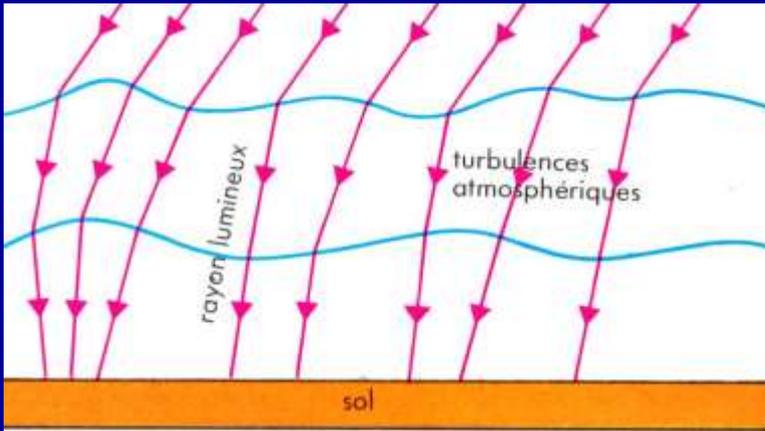


Surface d'onde plane :
Rayons lumineux
parallèles



Surface d'onde « cabossée »: en chaque point de la surface il y a un rayon lumineux perpendiculaire mais l'ensemble des rayons lumineux ne sont plus parallèles entr'eux

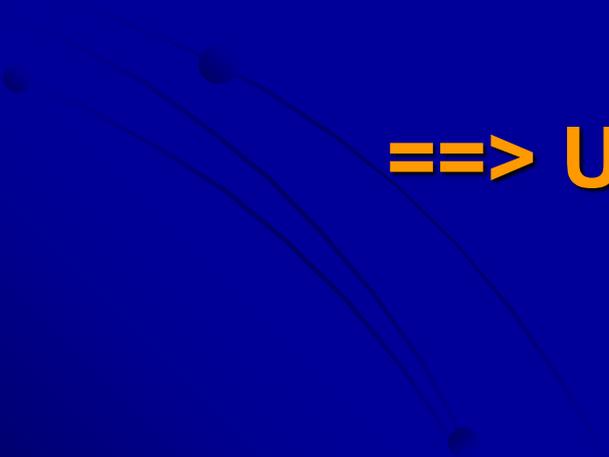




Rappel Météorologie

- L'atmosphère et ses différentes couches : → la Troposphère
- L'atmosphère= machine thermique pour faire passer l'excès de chaleur de l'Equateur aux Pôles
- les 3 cellules : Hadley- Farrel et Polaire et les zones HP et BP
- La troposphère supérieure (9 km à 15 km)
 - le Jet-stream polaire
- La troposphère intermédiaire (2 km à 9 km)
 - la couche du Bulletin météo : masses d'air-front polaire-NAO-centres actifs HP et BP – vents géostrophiques-perturbation océanique - fronts chaud et froid ("aileron de requin")- espacement des isobares-systèmes nuageux
- La basse troposphère (0 km à 2 km): la CLA (Couche Limite Atmosphérique)
 - Vents et frottements sur la rugosité du sol- échange de chaleur entre le sol et l'air en contact- comparaison entre la CLA sur continent et la CLA sur l'Océan –évolution des mouvements de l'air dans la CLA en fonction de l'heure de la journée

Nous allons donc essayer maintenant de quantifier (de mettre des chiffres) sur le phénomène de turbulence atmosphérique afin d'en tirer des enseignements !



==> Un peu de théorie ...

Section 1 :

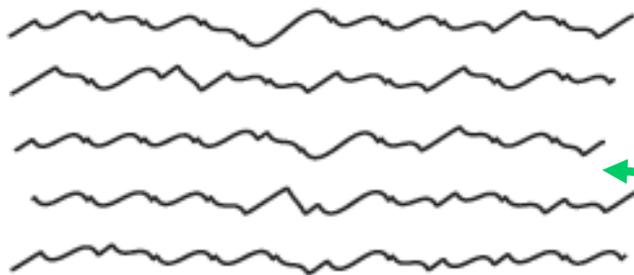
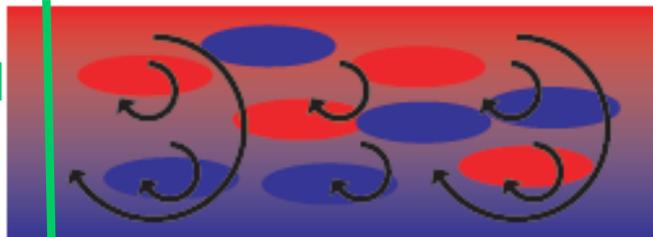
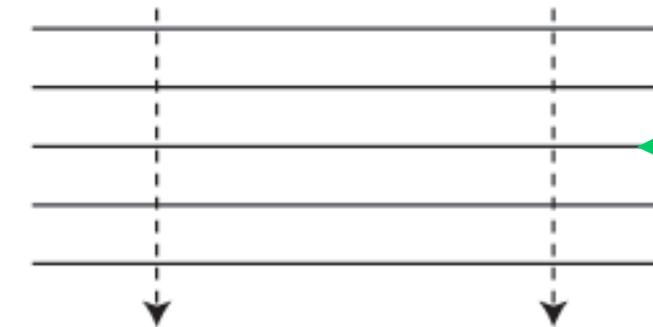
Introduction à la Turbulence

De quoi va-t-on parler ?

Surface d'onde plane
en provenance de l'objet astro
avant passage dans l'atmosphère

Nous allons nous focaliser
sur ce qui se passe dans
cette zone et y mettre un peu de
physique et de mathématiques
→ zone de la turbulence

Surface d'onde « cabossée »
après passage dans l'atmosphère



Optical
Turbulence

Pour étudier la turbulence partons de l'expression mathématique générale de la stabilité de l'atmosphère :

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = - \left(\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{g}{\theta_0} \left[\overline{w'\theta'} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \overline{ew'} + \frac{1}{\rho_0} \overline{p'w'} \right\} - \varepsilon$$

Expression dans laquelle:

g = accélération la pesanteur

ρ = masse volumique

z = coordonnée d'altitude

w' = ...



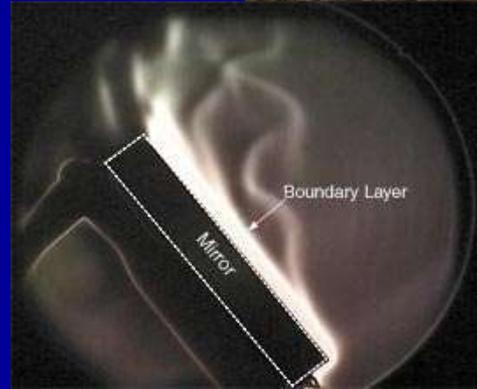
**Non, je rigole !
On va aborder la turbulence en douceur,
de façon soft, intuitivement ...
mais il y aura un peu de maths.**

Visualisation intuitive de la turbulence 1



Mont St Hélène - 18 mai 1980

Visualisation intuitive de la turbulence 2



En résumé, le dessin le plus célèbre représentant la turbulence



Leonard de Vinci

turbulence ↔ **tourbillons**

Mais d'où vient la turbulence atmosphérique ?

- La turbulence est la conséquence de l'introduction d'énergie dans l'atmosphère :
 - par **le vent** → énergie cinétique due à la vitesse : l'introduction d'énergie se développe en couches horizontales
 - par **l'ensoleillement** → énergie thermique due à la chaleur : l'introduction d'énergie se fait en extension verticale à partir du sol
- La turbulence se manifeste sous la forme de tourbillons de différentes tailles.

La turbulence est la façon qu'a trouvée l'atmosphère pour évacuer ces suppléments d'énergie et pour revenir à un état d'équilibre : en créant des tourbillons l'atmosphère va permettre de dissiper ces excès d'énergie.
- L'importance relative des deux sources de turbulence va permettre de classer l'atmosphère (surtout dans la CLA) en atmosphère stable (faible turbulence) ou en atmosphère instable (forte turbulence).

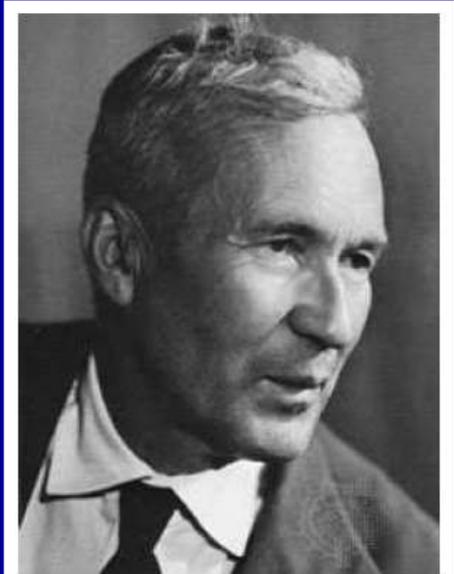
La cascade de Kolmogorov

Kolmogorov a postulé en 1941 que , d'une façon générale la turbulence d'un fluide est caractérisée par des tourbillons de différentes dimensions , mais que les dimensions de ces tourbillons ne sont pas quelconques.

On a donc dans un fluide turbulent tout un ensemble de tourbillons du plus grand au plus petit et le retour au calme du fluide se fait par passage successif de l'énergie de mouvement des gros tourbillons jusqu'aux plus petits qui finalement disparaissent par frottement visqueux dans le fluide (le mouvement est transformé en chaleur)

==>c'est la cascade de Kolmogorov

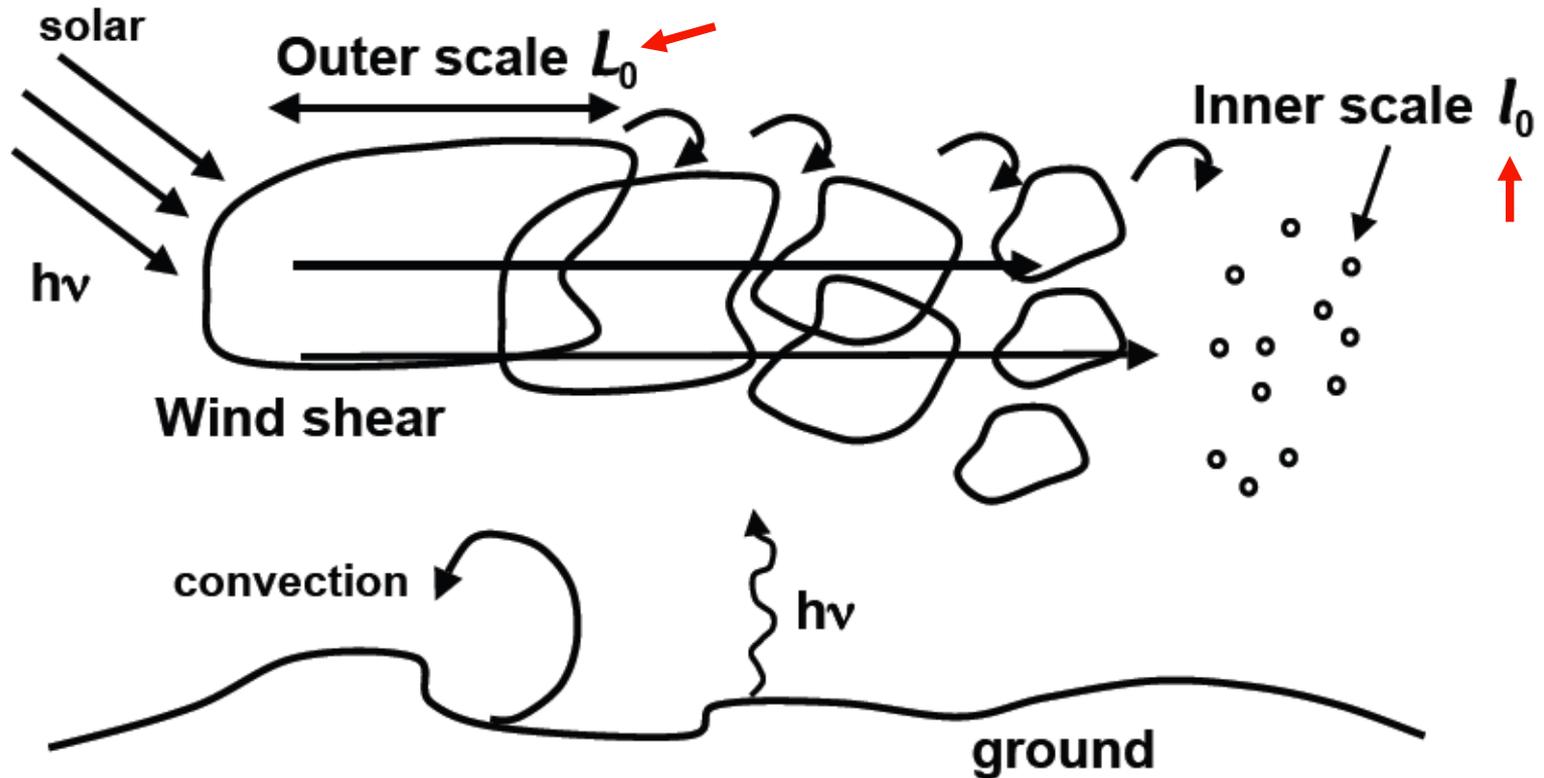
[les gros tourbillons donnent naissance à des tourbillons moyens qui eux-mêmes donnent naissance à des tourbillons plus petits etc...]



(1903 - 1987)

Andrei Kolmogorov

Kolmogorov turbulence, cartoon



L_0 # de 10 à 50 m

l_0 # quelques mm

La fameuse loi en puissance - 5/3

Un fluide est turbulent parce que il contient en son sein des inhomogénéités de vitesse donc d'énergie cinétique. Les tourbillons traduisent ces inhomogénéités.

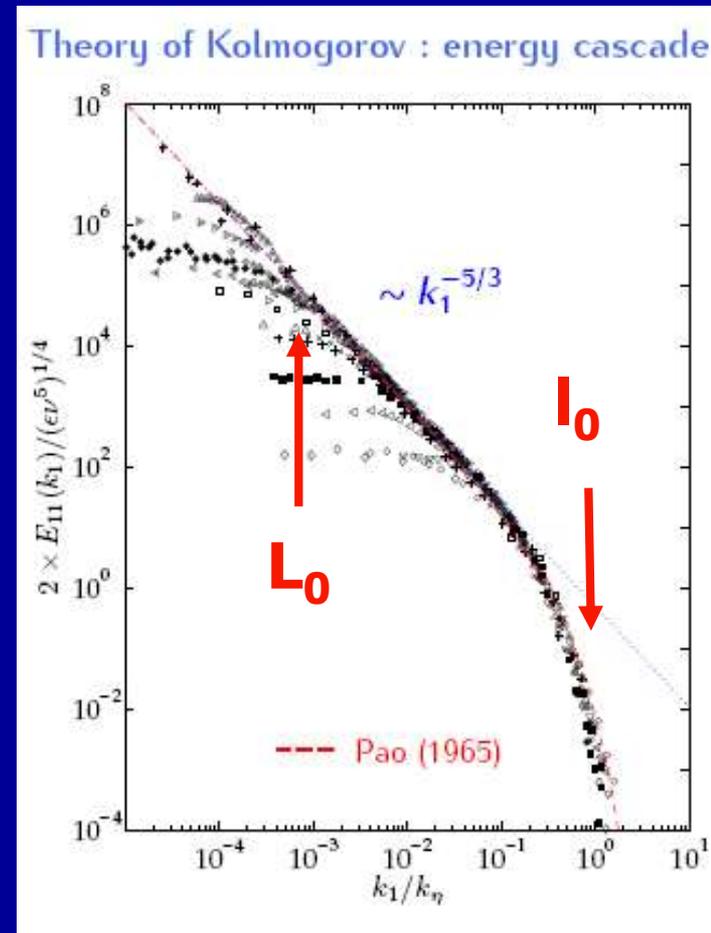
Dans un fluide agité par la turbulence La répartition de l'énergie cinétique dans les différents tourbillons formant la cascade de Kolmogorov suivent une loi de la forme:

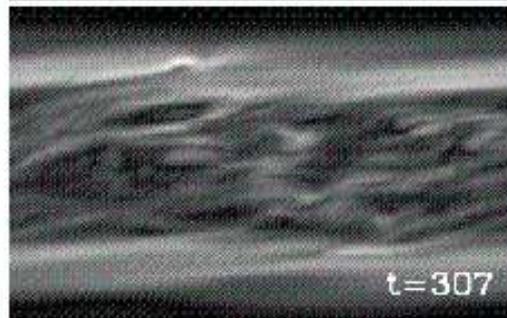
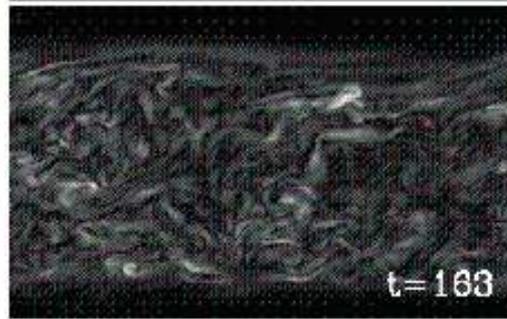
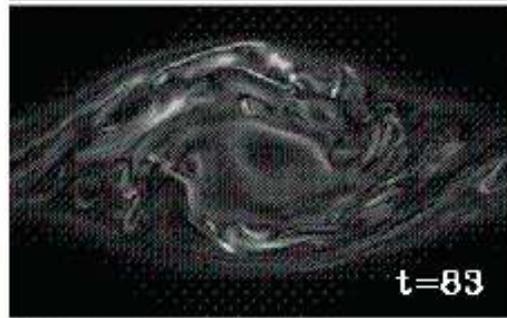
$$E(k) \propto C k^{-5/3}$$

k représente la taille des tourbillons, comprise entre L_0 et l_0 ($k=2\pi/l$)

→ A chaque instant dans un fluide turbulent on peut donc connaître la répartition de l'énergie de mouvement en fonction de la taille des tourbillons

C'est le spectre d'énergie issu de la cascade de Kolmogorov : loi en puissance -5/3.

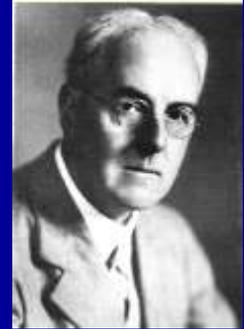




**L'évolution de la turbulence
en fonction du temps :**

**==>il y a des tourbillons de moins
en moins gros et de plus en
plus nombreux**

Nombre de Richardson Ri



- Le nombre de Richardson Ri (1922) est un indicateur de la stabilité de la CLA- Il va traduire l'importance relative des 2 sources de turbulence : vent et température

$$Ri = \frac{\text{gradient vertical de Température}}{\text{gradient de vitesse entre couches atm.}}$$

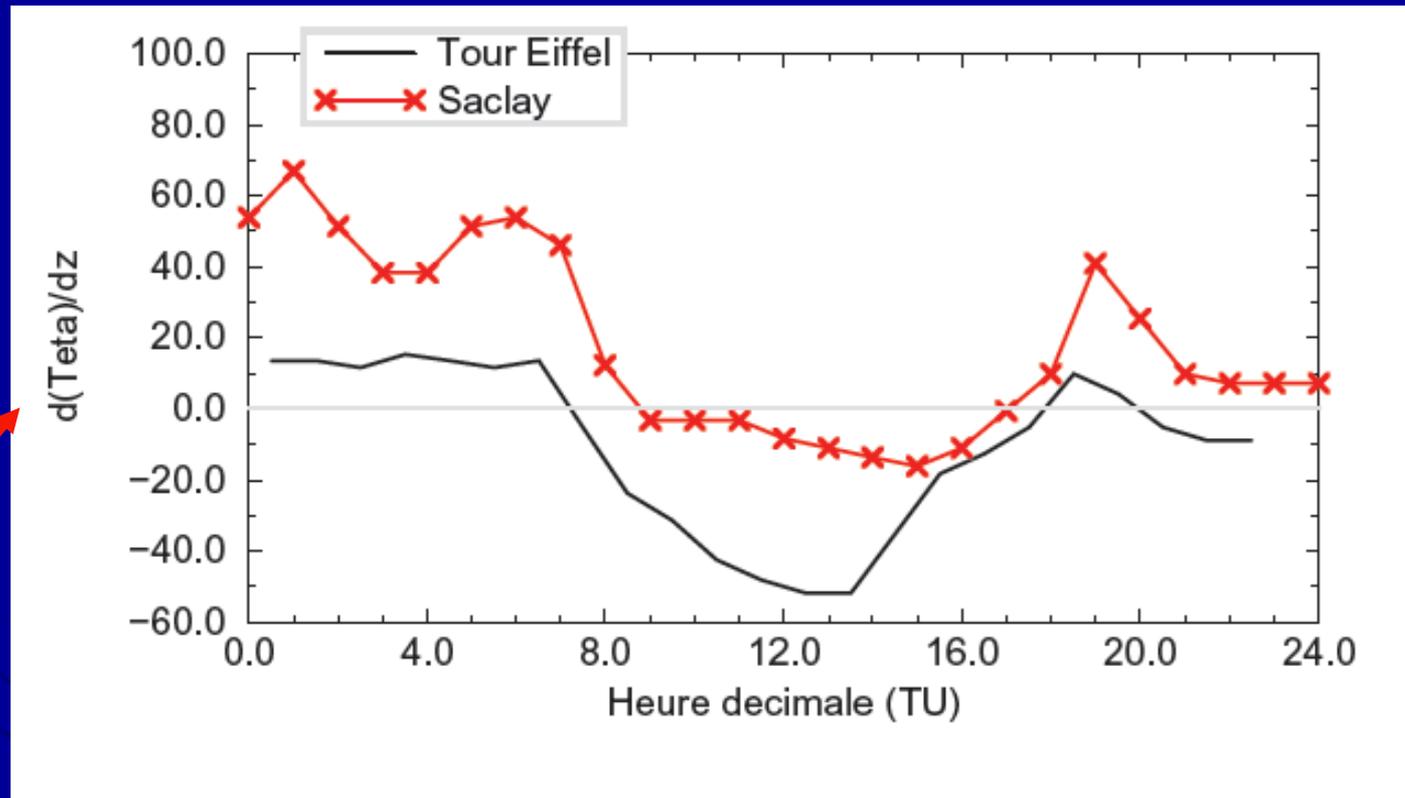
Lewis Richardson
(1881-1953)

[gradient = évolution d'une grandeur physique en fonction d'une distance, en général]

Ri # K $[\Delta \theta / \Delta v^2]$ Ri dépend de la « taille » des tourbillons

- Si $Ri > 0,21$: le régime est stable - les forces d'Archimède dues aux différences de densité ont tendance à minimiser la turbulence introduite par le cisaillement du au vent → faible turbulence
C'est le cas de la **situation anticyclonique** où la subsidence stabilise l'atmosphère (subsidence = air dense qui descend).
- Si $Ri < 0,21$: le régime est instable - les forces d'Archimède dues aux différences de densité sont la cause principale de la turbulence → forte turbulence
Cette situation se rencontre **en été** quand l'air est surchauffé par le sol

Evolution du gradient de température en fonction de l'heure de la journée



Gradient
 $\Delta \theta$

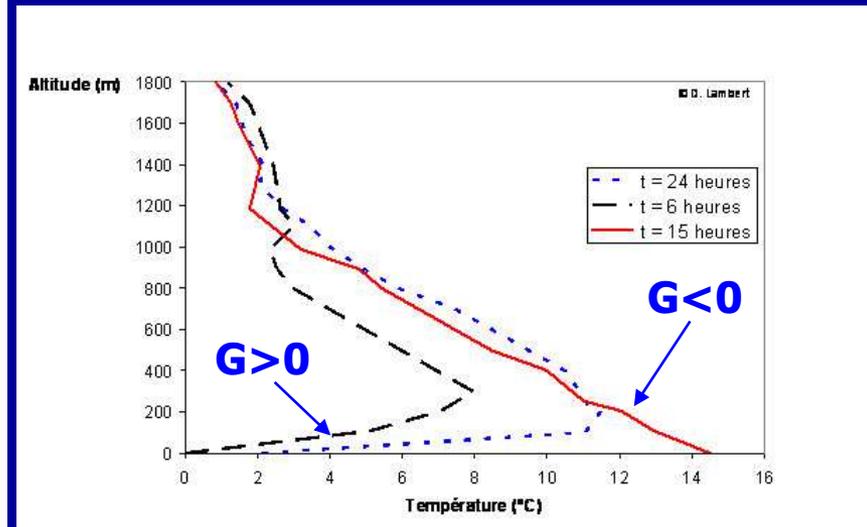
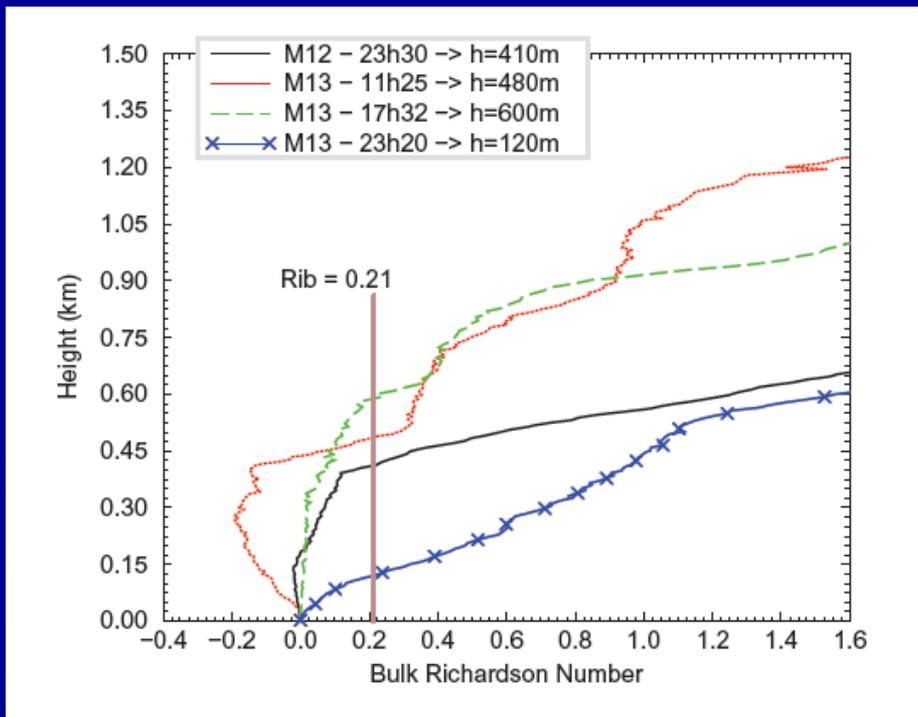
Remarque: quand le sol est surchauffé par rapport à l'air ambiant le gradient est négatif

Le gradient initialement positif diminue pour devenir négatif :

Ri devient fortement négatif vers 8 H à Paris et faiblement négatif à Saclay

→ Ri négatif = turbulence importante

Evolution du nombre de Richardson en fonction de l'heure de la journée et impact sur la hauteur de la couche turbulente



Evolution de la température au cours de la journée

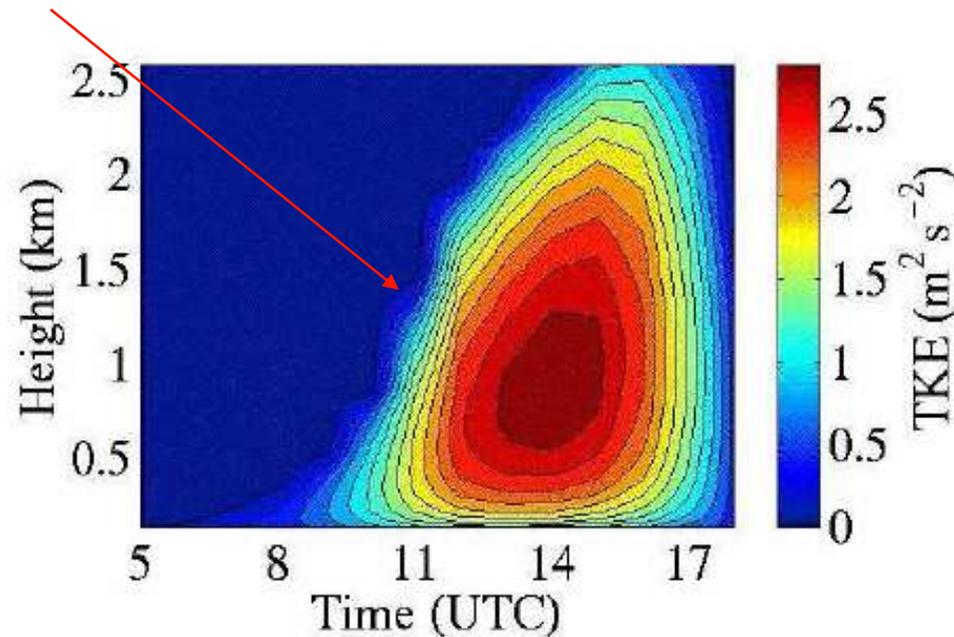
Aux environs de 17 h30 [M 13] l'épaisseur de la couche turbulente ($Ri < 0,21$) est d'environ 0,6 km

A 23h20 [M13] l'épaisseur de la couche turbulente n'est plus que de 0,1 km
Mais un autre jour [M12] à la même heure 23h 30 l'épaisseur est 0,4 km !

Modélisation de la turbulence

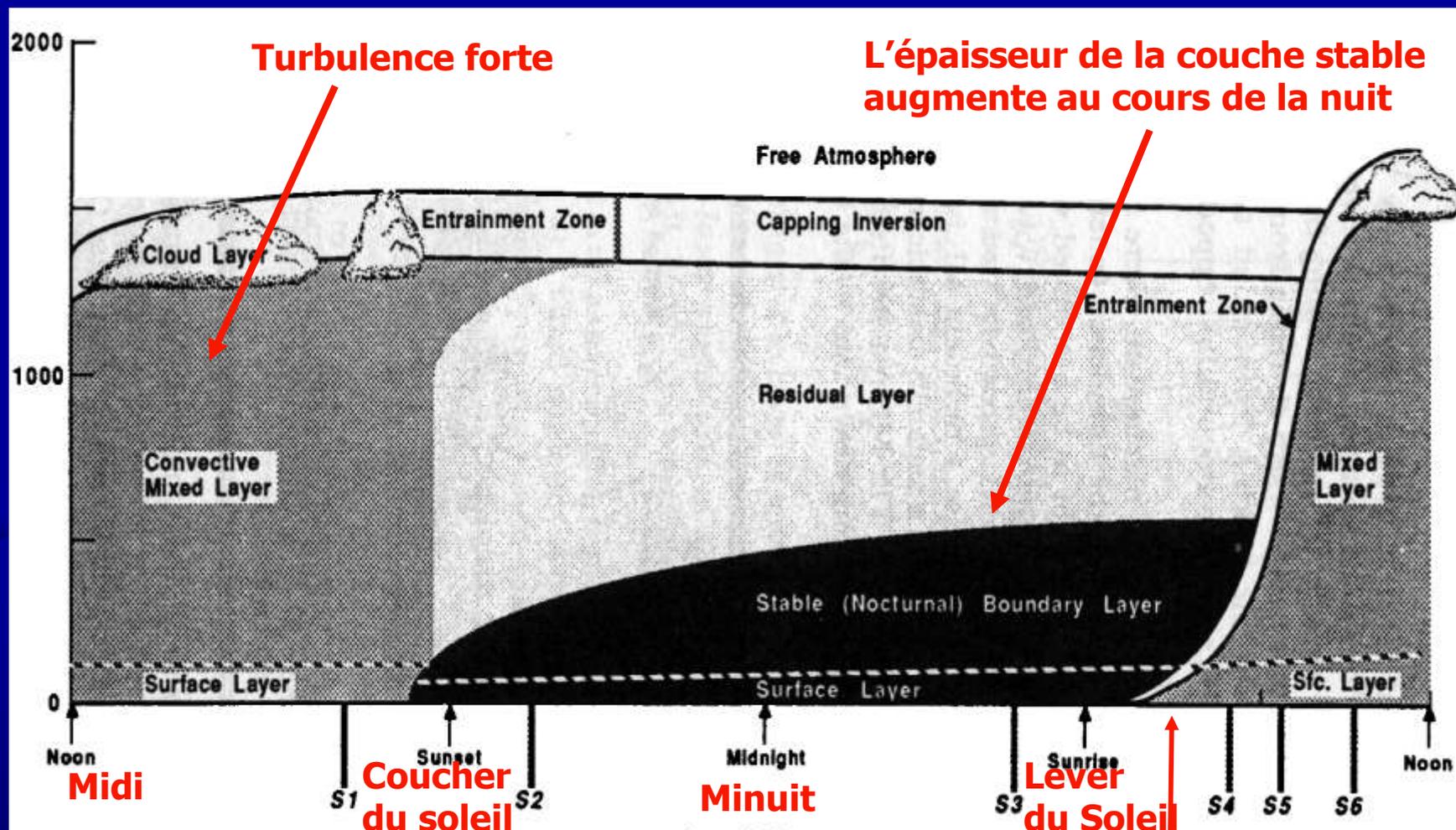
La turbulence s'établit lentement

Variation temporelle et spatiale
d'énergie cinétique turbulente
(Fochesatto et al., 2001)



La turbulence est représentée par un paramètre en relation avec l'énergie cinétique des mouvements de l'air dans l'atmosphère

Evolution de la stabilité de la basse atmosphère (CLA) au cours d'un Jour



Autre façon pratique d'aborder la turbulence

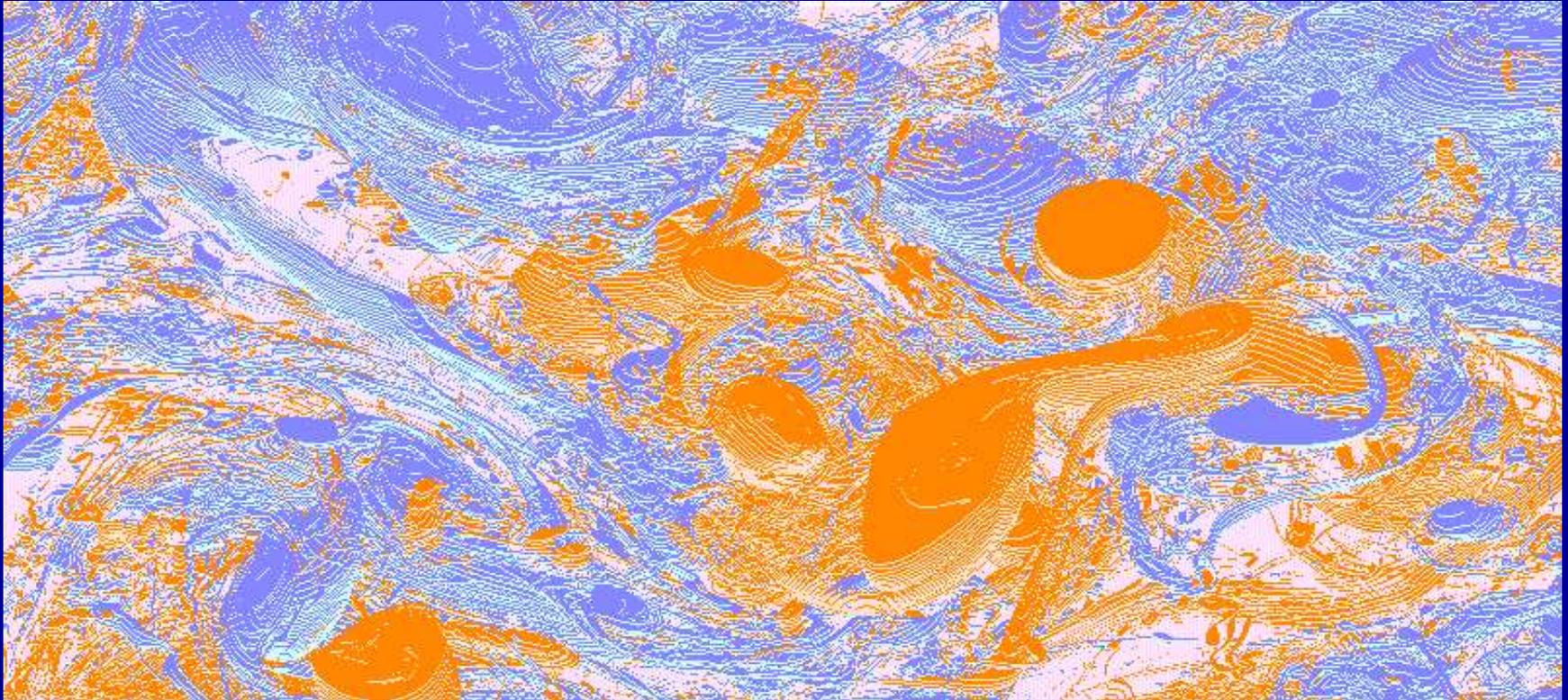
- Vent modéré à fort et Ciel couvert (intéressant pour l'astro?) → $Ri \approx 0$
la turbulence modérée produite est essentiellement due au vent.
- Vent faible et journée ensoleillée ==> $Ri < 0$
tourbillons convectifs importants-fortes instabilités thermiques qui ont tendance à s'amplifier avec la montée en température du sol.
- Vent faible et nuit claire ==> $Ri > 0$ Le sol refroidit par rayonnement-la turbulence devient de plus en plus faible à mesure du refroidissement.
- Cas de l'inversion de température (couche près du sol plus froide qu'en hauteur) :
 - L'atmosphère est stable près du sol ($Ri > 0$) mais instable en altitude ($Ri < 0$).
- Quand le gradient de vitesse baisse donc quand le gradient de pression baisse alors Ri augmente → un temps calme est favorable à une faible turbulence
(attention: on parle du gradient de pression et non pas de la pression)

==> Questions: Ri d'une zone de brouillard ?
 Ri d'une zone orageuse ?

**On a beaucoup parlé de turbulence dynamique
(Kolmogorov- Ri- mouvements dans
l'atmosphère - tourbillons) mais qu'en est-il de
la turbulence optique ?**

**[NB: Ri est un paramètre important pour tout ce qui se passe dans la Couche
Limite Atmosphérique (CLA) : études de diffusion de polluants dans
l'atmosphère et modèles de réchauffement climatique]**

Modélisation du mélange de deux couches d'air avec des températures différentes



==> l'air se mélange difficilement et a du mal à s'homogénéiser: existence de poches de températures différentes

Les travaux de Tatarskii → cascade de Kolmogorov et optique atmosphérique

- Tatarskii (1961) a appliqué la notion de cascade de Kolmogorov au fluide turbulent constitué par l'atmosphère en se focalisant sur les inhomogénéités de température et non plus sur la répartition de l'énergie cinétique.
- Tatarskii a postulé que les fluctuations de température dans l'atmosphère sont semblables à des « bulles » et que la répartition de fluctuations de température dans les « bulles » de différentes tailles suit une loi en $-5/3$ identique à celle de la cascade des tourbillons d'énergie cinétique de Kolmogorov.
- Passant des fluctuations de température aux valeurs d'indice de réfraction, il introduit une caractéristique optique de l'atmosphère qu'il nomme « Constante de structure d'indice » $C_n^2(h)$ pour chaque niveau h dans l'atmosphère.

==> La constante de structure d'indice $C_n^2(h)$ traduit l'état de la turbulence optique (force de la turbulence) dans la couche atmosphérique d'altitude h

Conséquences optiques des inhomogénéités de température de l'atmosphère

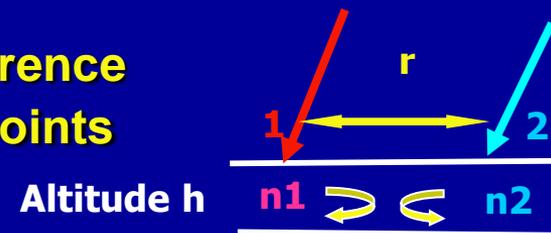
- Cette constante de structure d'indice $C_n^2(h)$ entrainera des fluctuations D_n de l'indice de réfraction entre deux points de la couche d'atmosphère d'altitude h .

- Puis Tatarskii postule que les fluctuations d'indice D_n sont corrélés au spectre de puissance de Kolmogorov (en-5/3) et les calculs conduisent à

$$D_n = C_n^2(h) \cdot r^{2/3}$$

r = distance horizontale entre 2 points dans la couche atmosphérique d'altitude h

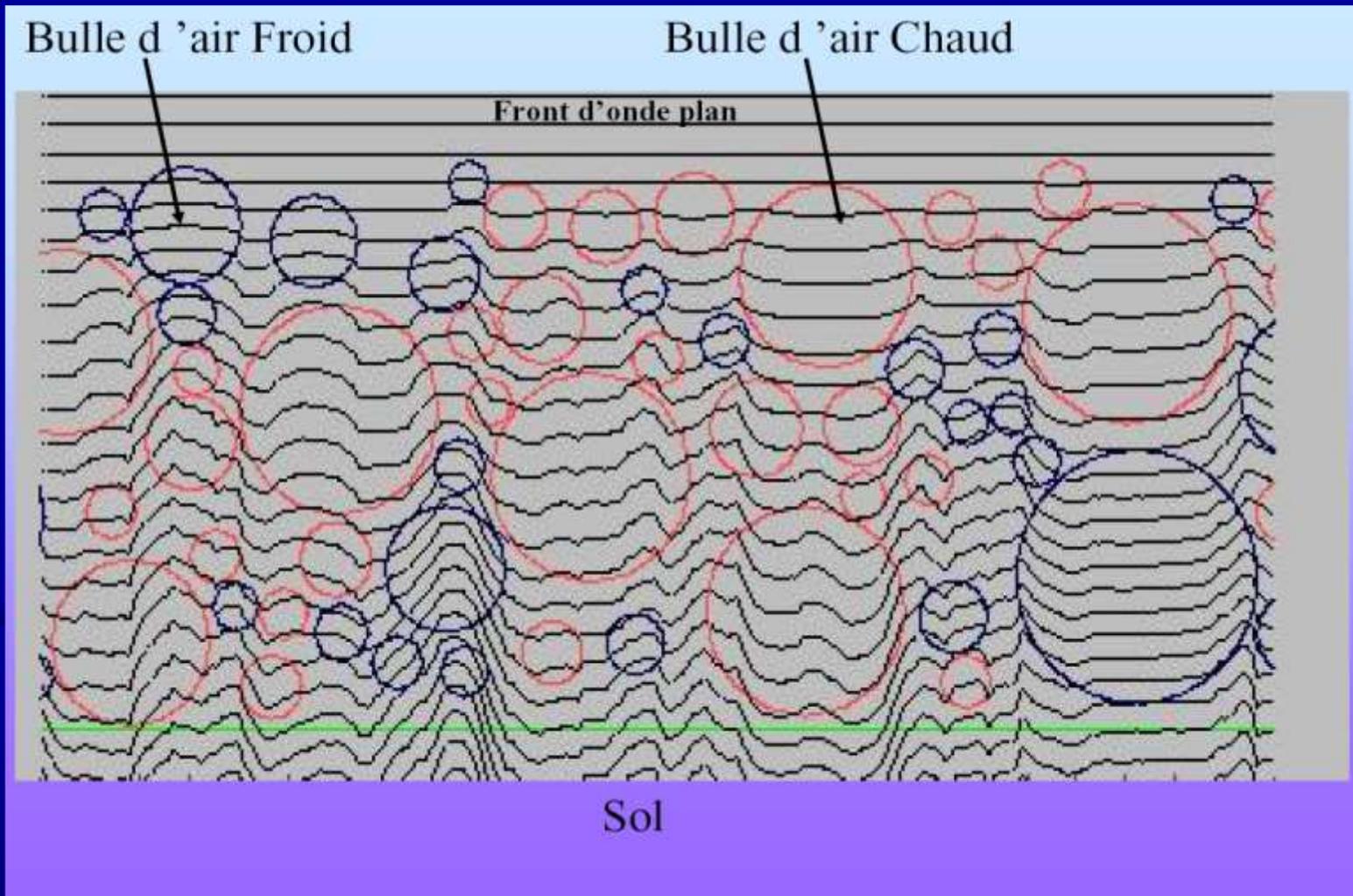
==> la fluctuation d'indice D_n est la différence d'indice de réfraction existant entre 2 points de l'atmosphère d'altitude h séparés horizontalement par une distance r .



- Si un rayon lumineux passe en chacun de ces deux points séparés par r , du fait que l'indice de réfraction n 'est pas le même en ces deux points, il va apparaître un déphasage entre ces deux rayons lumineux :

→ Il s'ensuit que tous les rayons lumineux qui traversent la couche atmosphérique d'altitude h vont être déphasés les uns par rapport aux autres entraînant ainsi le « cabossage » de la surface d'onde .

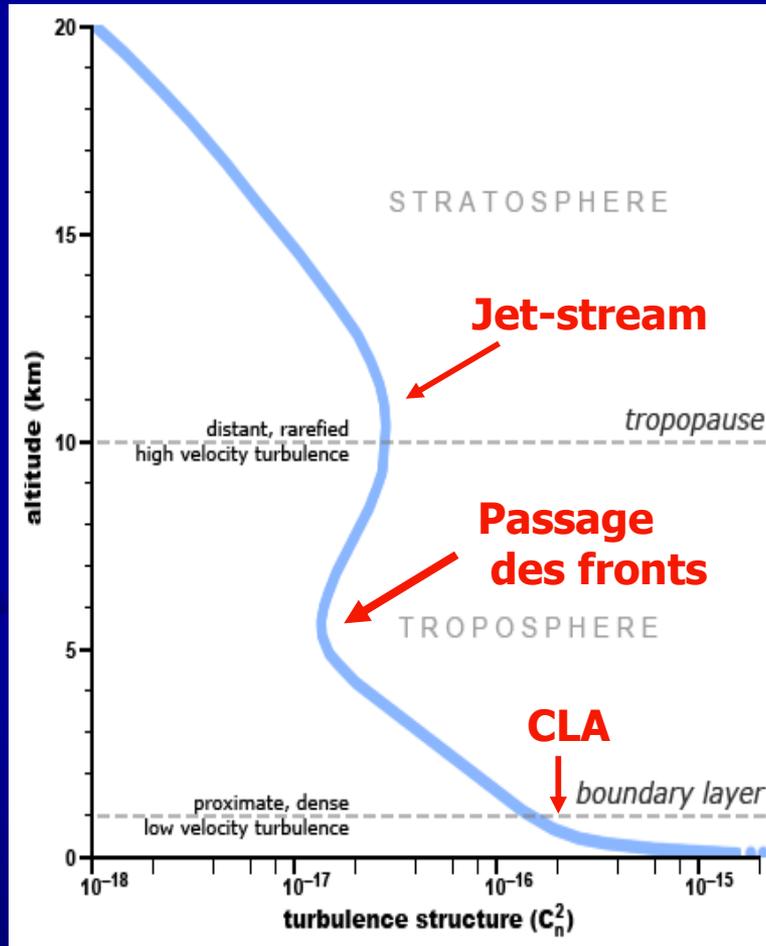
Schématisation du phénomène



Quand $T \uparrow$
alors $n = c/v$
diminue
donc $v \uparrow$
 \Rightarrow
La surface
d'onde
prend
de l'avance
dans la bulle
d'air chaud

Les tourbillons de Kolmogorov sont remplacés par les bulles de Tatarskii

L'atmosphère standard de Hufnagel : la détermination de $C_n^2(h)$



- **Hufnagel (1966)** a déterminé un type d'atmosphère turbulente standard C'est-à-dire que à chaque altitude h il a calculé la valeur de la constante de structure $C_n^2 \Rightarrow$ cf courbe (variation de C_n^2 de 10^{-14} à 10^{-17}) (3 ordres de grandeur)

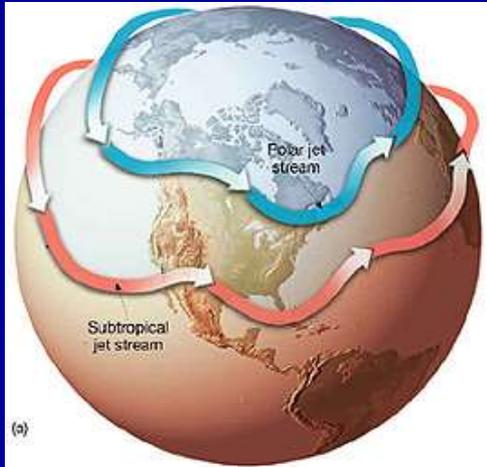
- Il existe dans l'atmosphère 3 grandes zones turbulentes:
 - 1-une zone très turbulente dans les 2 premiers km
 \Rightarrow Couche Limite Atmosphérique (CLA)
 - 2-une zone intermédiaire vers 5 km plus ou moins perturbée en fonction du passage des fronts et des masses d'air
 \Rightarrow La zone de la météorologie classique
 - 3- une zone de turbulence à la limite de la troposphère
 \Rightarrow La zone du jet-stream



La turbulence s'affaiblit dans ce sens

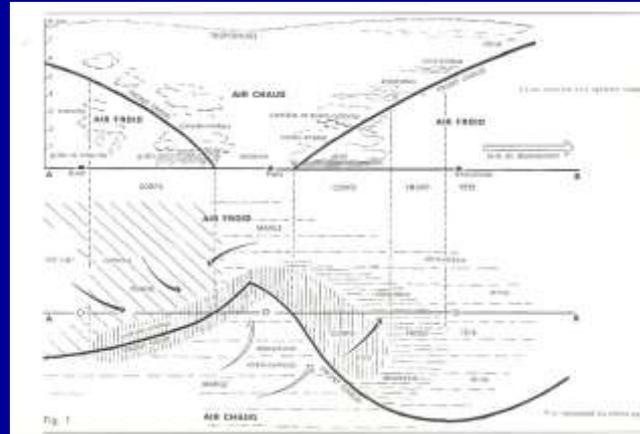
Les 3 niveaux de Turbulence

→ A chaque niveau : des valeurs différentes pour $C_n^2(h)$

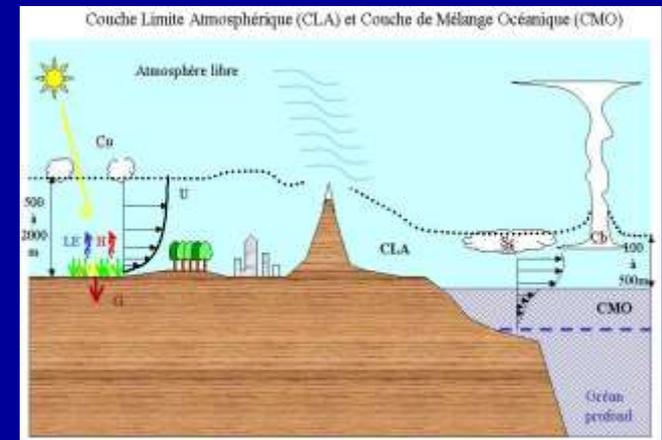


Le trajet sinueux du Jet-stream
10 km

« Aileron de requin »
front chaud et front froid
de 2 km à 8 km



CLA et influence du sol
de 0 m à 1500/2000 m



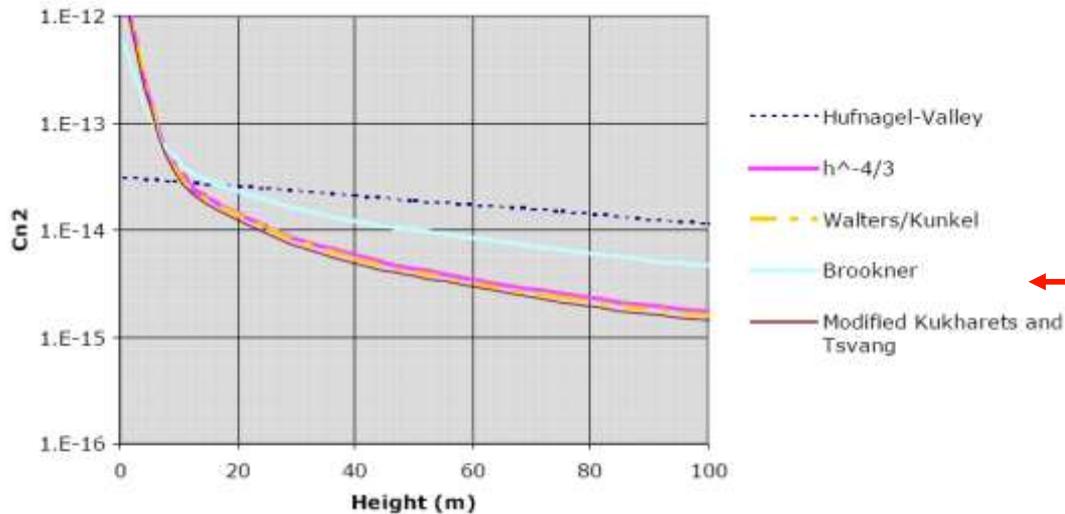
Modélisation de la constante de structure d'indice en fonction de l'altitude h

$$C_n^2(h) = \begin{cases} 1.70 \times 10^{-14} & h < 18.5m \\ 3.13 \times 10^{-13}/h & 18.5m < h < 240m \\ 1.30 \times 10^{-15} & 240m < h < 880m \\ 8.87 \times 10^{-7}/h^3 & 880m < h < 7,200m \\ 2.00 \times 10^{-16}/h^{0.5} & 7,200m < h < 20,000m \end{cases} .$$

Modèle valable pour l'observation au dessus de l'océan

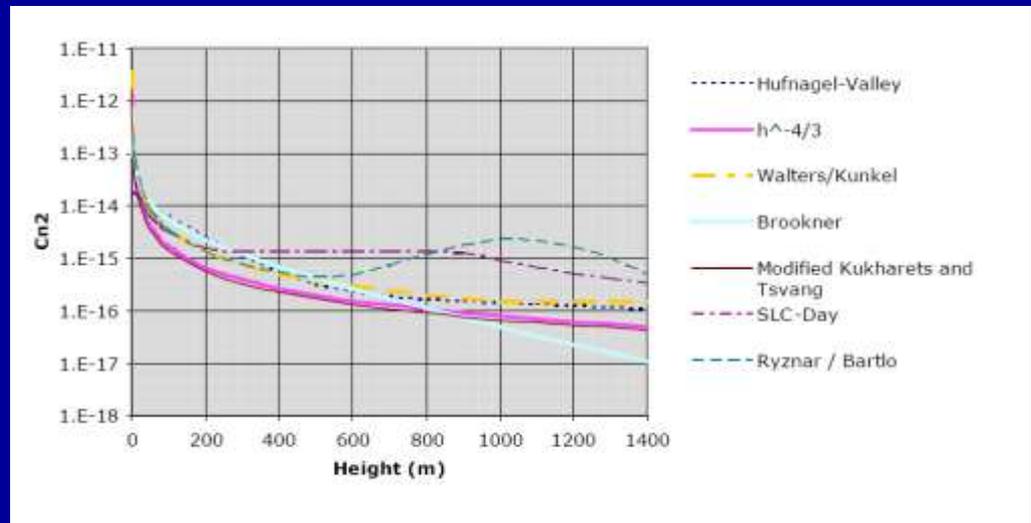
(mis au point par l'US Army pour communication Laser avec les sous-marins nucléaires)

Turbulence dans la CLA

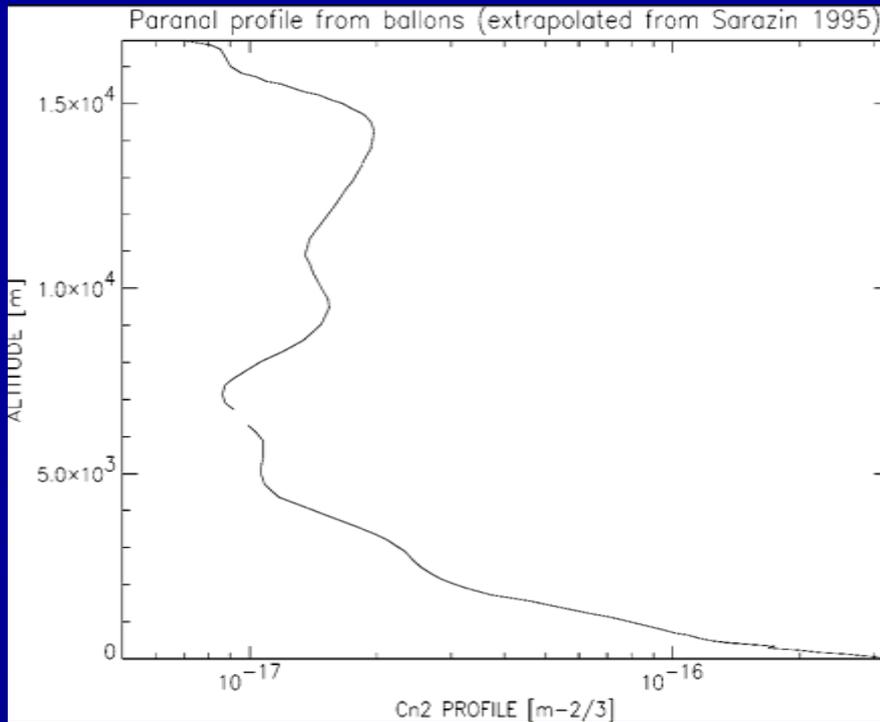


La turbulence est très importante dans les premiers 40 m

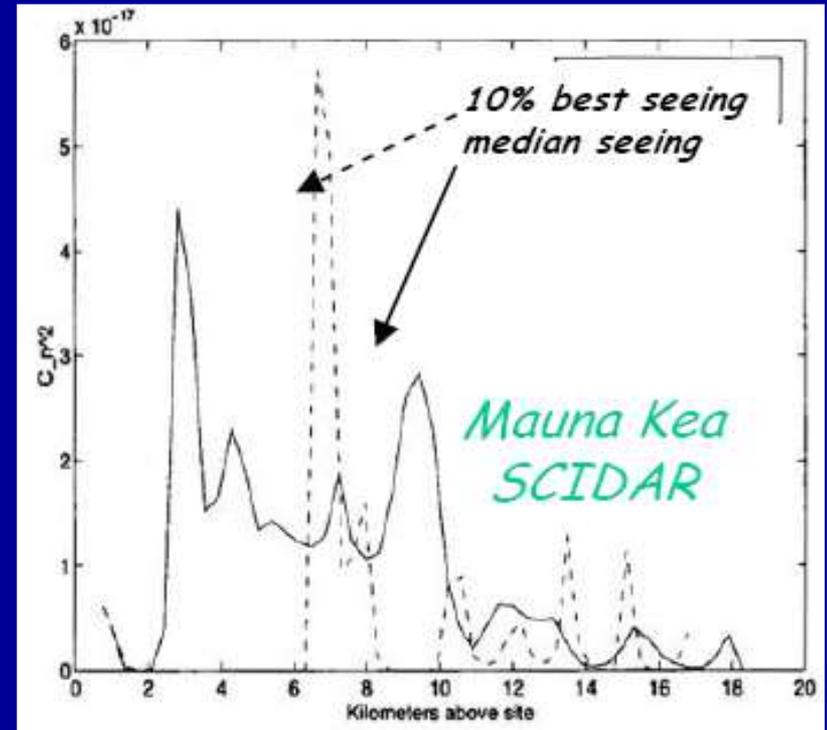
C_n^2 varie de 10^{-12} à 10^{-16} dans la CLA



Exemples de $C^2_n(h)$ [mesurés]

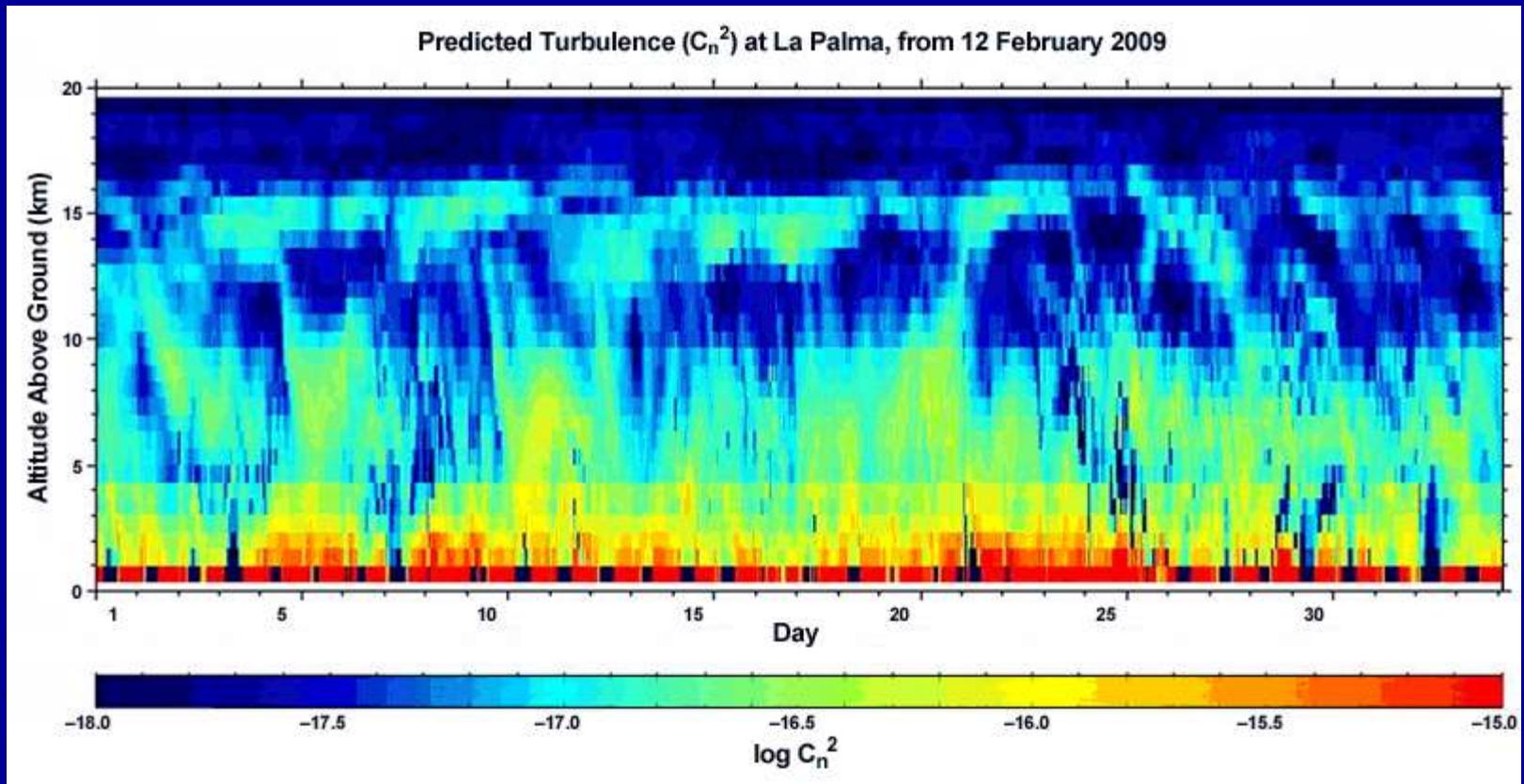


Paranal (Chili)



Mauna Kea (iles Hawaï)

==> On est aux environs de $C^2_n(h)$ # 10^{-16} à 10^{-17} ³⁴



Observatoire de La Palma -Canaries

Rouge-jaune= mauvais
Vert-Bleu= bon

Le meilleur endroit au monde !

Longitude = 123 ° E

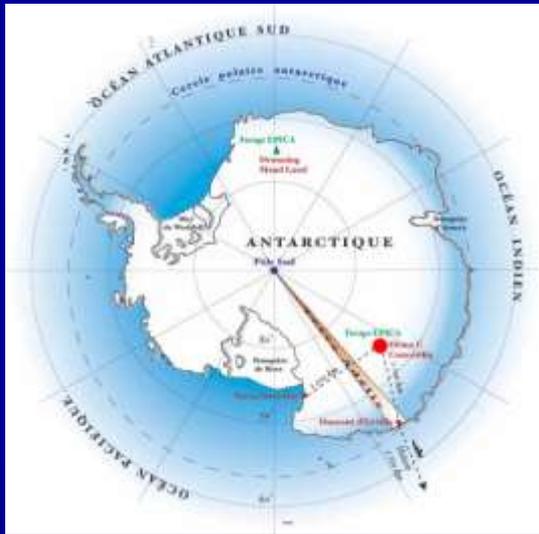
Latitude = 75 ° S

Altitude = 3233 m

Antarctique – Concordia - Dôme C - 3233m



Température:
Air froid et Sec
Été: -25 à -30°C
Hiver -50° C à - 82°C
(hiver 1977)



**$C_n^2(h)$ de l'ordre
 10^{-17} à 10^{-18}
 Au-dessus de 30m !**

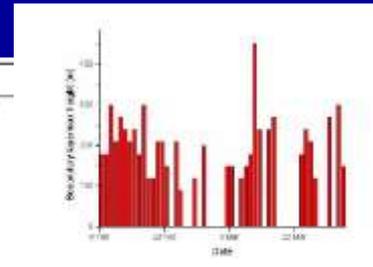
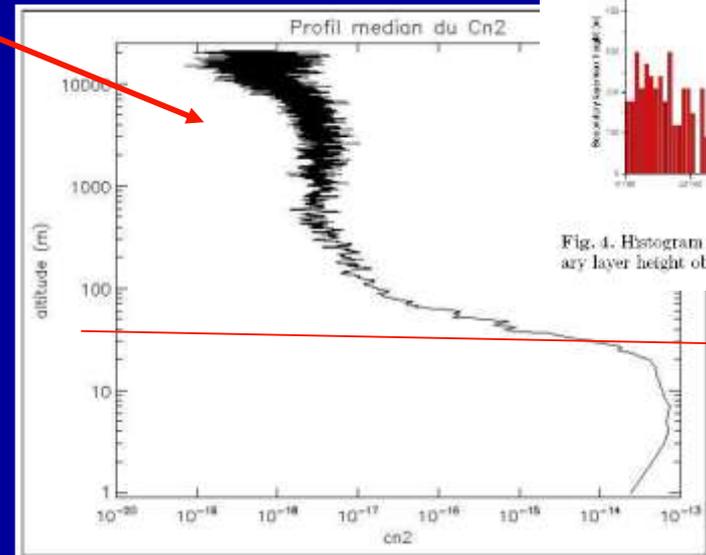
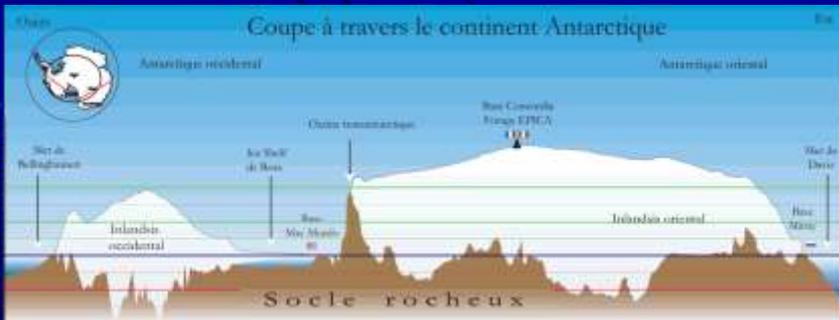


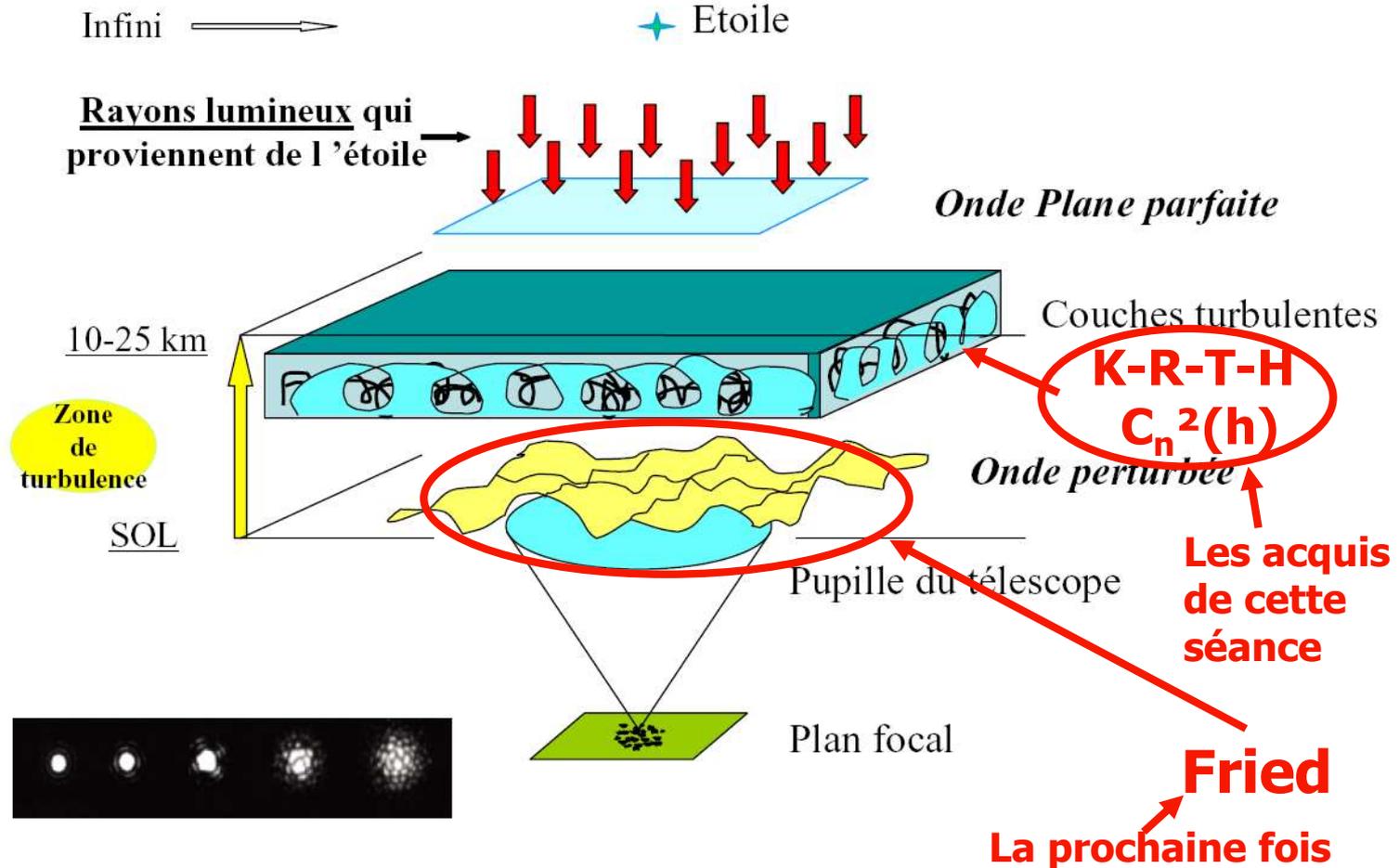
Fig. 4. Histogram of the maximum boundary layer height observed each day



Récapitulation des acquis

- Kolmogorov (1941) ==> turbulence mécanique dans les fluides- cascade de tourbillons de plus en plus petits - loi en $-5/3$
- Richardson (1922) ==> turbulence dans la CLA- nombre Ri (Ri négatif = turbulence) – importance du gradient de température
- Tatarskii (1961)==>atmosphère -fluctuations de température- bulles - constante de structure d'indice $C_n^2(h)$ – déphasage des rayons lumineux - cabossage de la surface d'onde
- Hufnagel (1966) ==>atmosphère standard-calcul de $C_n^2(h)$ pour chaque altitude- 3 zones de turbulence

La turbulence optique



Section 2 :

Turbulence optique

et observations astronomiques

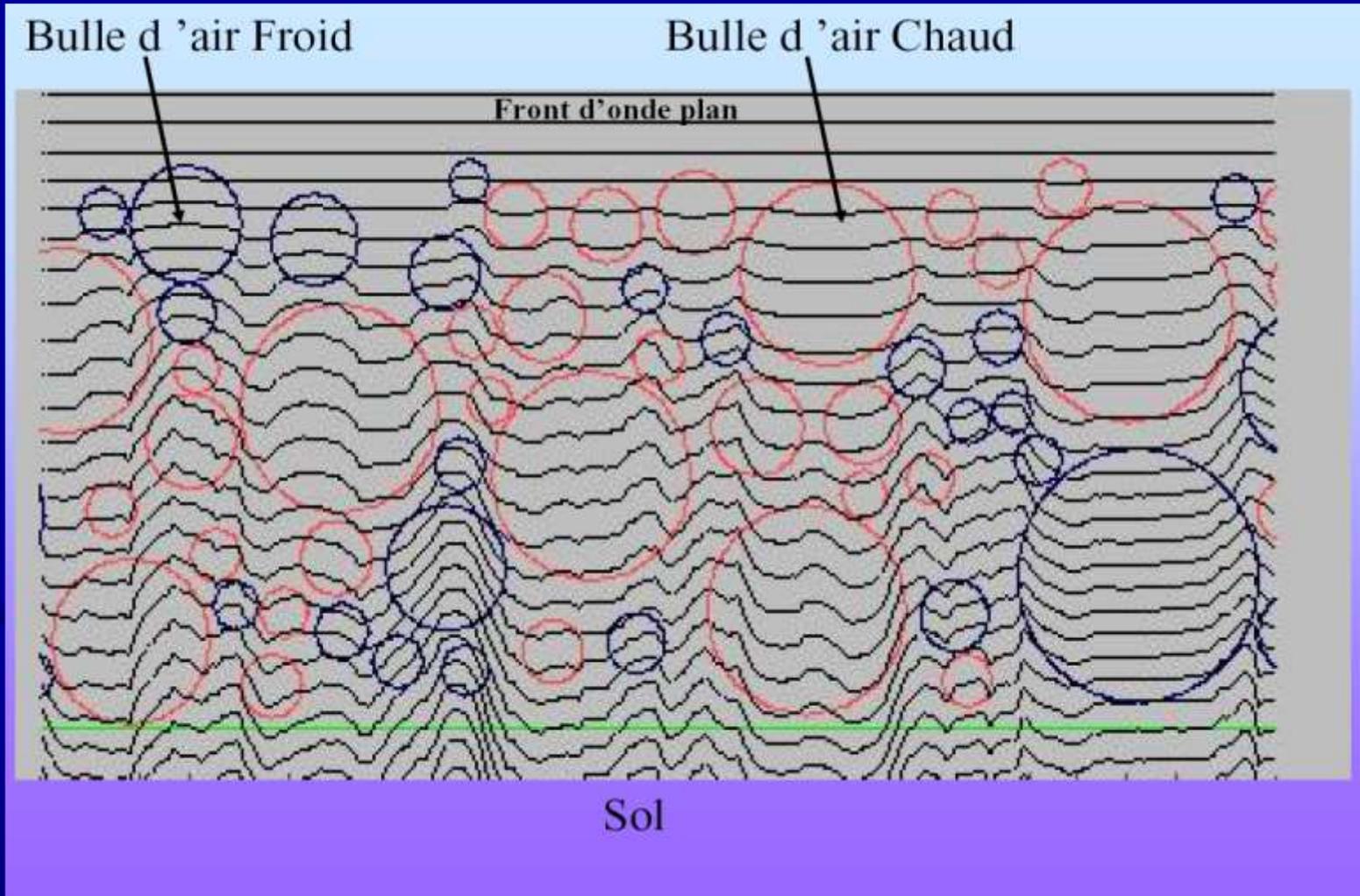
**Rappel des acquis de la dernière
fois en 3 diapos**



Les 4 piliers de la turbulence

- Kolmogorov (1941) ==> turbulence mécanique dans les fluides- cascade de tourbillons de plus en plus petits - loi en - 5/3
- Richardson (1922) ==> turbulence dans la CLA- nombre Ri (Ri négatif = turbulence) –importance du gradient de température
- Tatarskii (1961) ==> atmosphère -fluctuations de température- bulles - constante de structure d'indice $C_n^2(h)$ – déphasage des rayons lumineux - cabossage de la surface d'onde
- Hufnagel (1966) ==> atmosphère standard-calcul de $C_n^2(h)$ pour chaque altitude- 3 zones de turbulence

Schématisation du phénomène

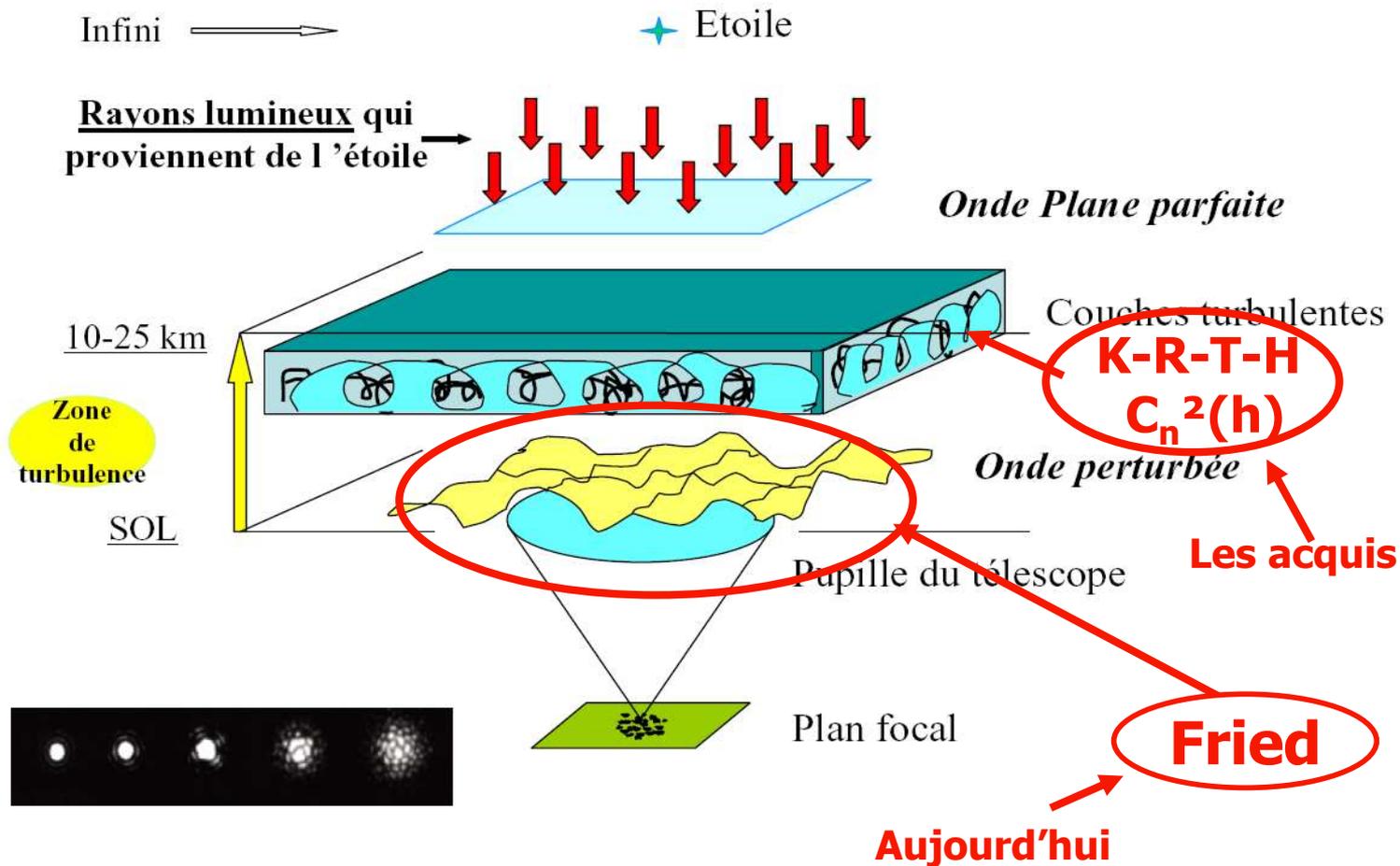


Quand $T \uparrow$
alors $n = c/V$
diminue
donc $v \uparrow \implies$
La surface
d'onde prend
de l'avance
dans la bulle
d'air chaud

Les tourbillons de Kolmogorov sont remplacés par les bulles de Tatarskii \implies à chaque niveau h : $C_n^2(h)$

Pour Résumer

La turbulence optique



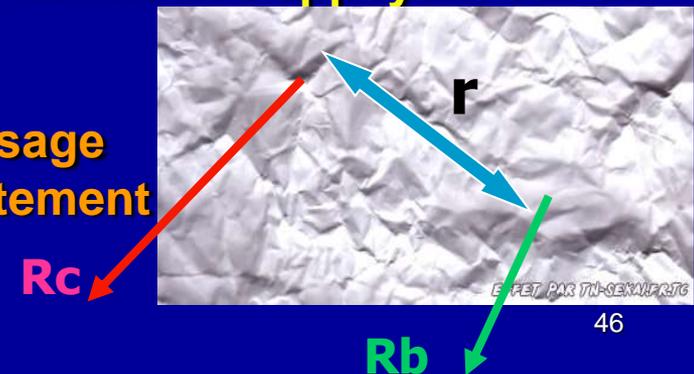
Le Paramètre de FRIED r_0



Les travaux de Fried r_0 (1965)

- Les fluctuations d'indice donnés par la constante de structure d'indice de Tatarskii vont influencer sur la vitesse et la direction des rayons lumineux qui traversent la couche turbulente d'altitude h et vont donc entraîner la déformation de la surface d'onde traversant cette couche.
- David FRIED en 1965 a calculé la déformation totale de la surface d'onde lors de la traversée à travers toutes les couches de l'atmosphère:
 - Intégration de la constante de structure $C_n^2(h)$ le long de la traversée de l'atmosphère → on fait la somme de toutes les contributions « turbulence » des différentes couches de la troposphère ==> la surface d'onde finale présente des bosses et des creux plus ou moins importants (matérialisation des déphasages).
- Fried a ensuite fait une étude statistique de la répartition des creux et des bosses afin d'établir le déphasage entre deux rayons lumineux s'appuyant sur cette surface cabossée : par exemple calcul du déphasage entre un rayon lumineux s'appuyant sur une bosse et un rayon lumineux s'appuyant sur un creux :

==>Le calcul montre que l'importance du déphasage dépend de l'écartement r des deux rayons, écartement mesuré sur la surface d'onde



Le Paramètre de Fried r_0

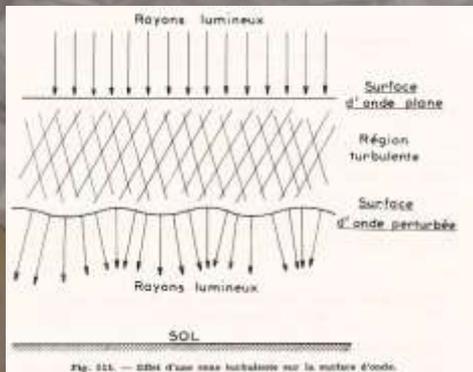
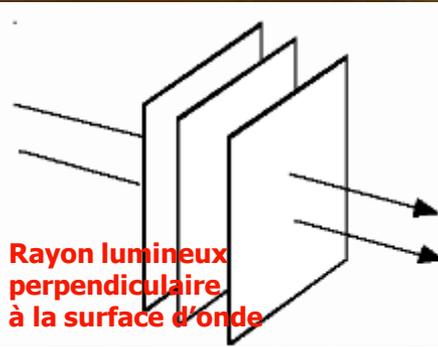
Puis Fried a calculé la distance r_0 entre 2 rayons lumineux pour laquelle le déphasage est plus petit que $\lambda / 6$ sur la surface d'onde cabossée , c'est-à-dire la distance pour que l'écart moyen entre les bosses les plus élevées et les creux les plus profonds soit inférieur à $\lambda / 6$:

→ entre ces deux rayons lumineux la surface d'onde peut être considérée comme plane et non cabossée .

Cette distance r_0 est appelée « Paramètre de Fried »

Ce paramètre donne donc la dimension des portions relativement planes dans la surface d'onde cabossée.

r_0 : analogie Papier froissé



2013/02/08 14:53

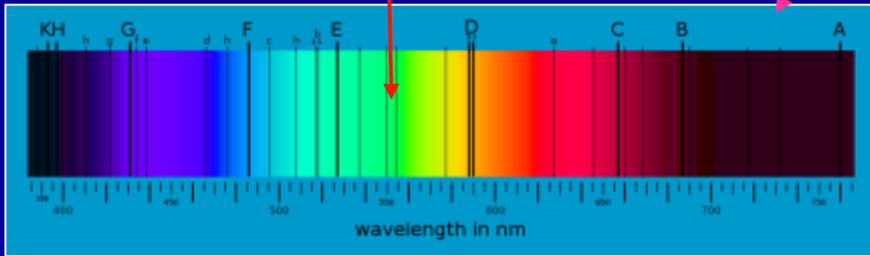
**Respirez un grand coup
et accrochez-vous !**



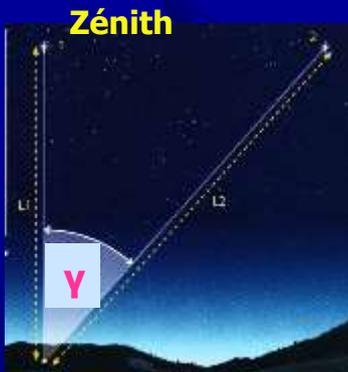
Expression mathématique du paramètre de Fried r_0

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1 / \cos\gamma) \cdot \int C_n^2(h) \cdot dh$$

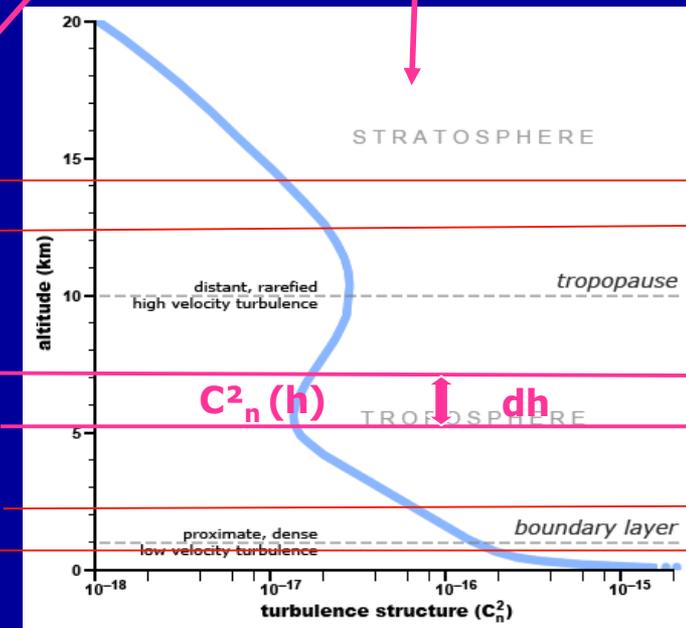
$$\lambda = 550 \text{ nm} = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$



λ est la longueur d'onde de la lumière



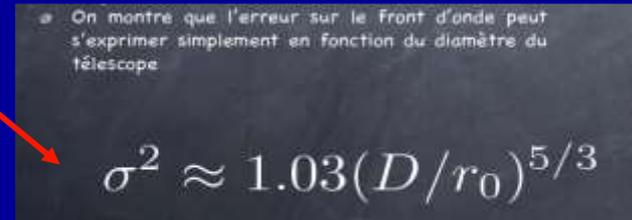
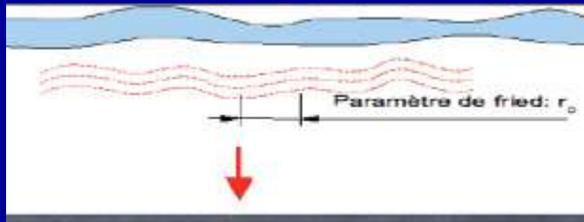
Distance zénithale : angle γ



L'intégrale va additionner toutes les contributions "turbulence" de chacune des couches dh au dessus de l'endroit d'observation

Planéité de la surface d'onde , r_0 et diamètre D du télescope

On peut estimer l'importance moyennée des creux et des bosses sur la surface cabossée à l'aide d'un coefficient statistique : σ^2 (RMS) - Ce coefficient σ^2 traduit en quelque sorte le degré de planéité de la surface



==> Un déphasage égal à $\lambda / 6$ (surface # plane) correspond à $\sigma^2 = 1$ rd²

Si $\sigma^2 < 1$ rd² alors $D < r_0$: la surface est considérée comme plane et sans déphasage par " le télescope" - Si, a contrario, $\sigma^2 > 1$ rd² alors $D > r_0$: la surface d'onde ne peut plus être considérée comme plane par le " télescope" (le télescope voit la turbulence).

==> Tout en respectant $\sigma^2 < 1$ (condition de planéité) plus r_0 est grand alors plus le diamètre D du télescope peut être grand.

Exemple : Si $r_0 = 10$ cm calculons le diamètre D du télescope pour lequel $\sigma^2=1$?

$$r_0 = 10 \text{ cm} \implies 1,03 \cdot (D / 0,1)^{5/3} = 1 \implies (D / 0,1) = (1/1,03)^{3/5} \implies (D/0,1) = 0,97^{0,6} \\ = 0,982 \quad (D / 0,1) = 0,982 \implies D = 0,0982 \text{ m} \implies D = 9,8 \text{ cm}$$

==> si $r_0 = 10$ cm alors $D \neq 10$ cm : le télescope ne " voit" pas la turbulence⁵¹

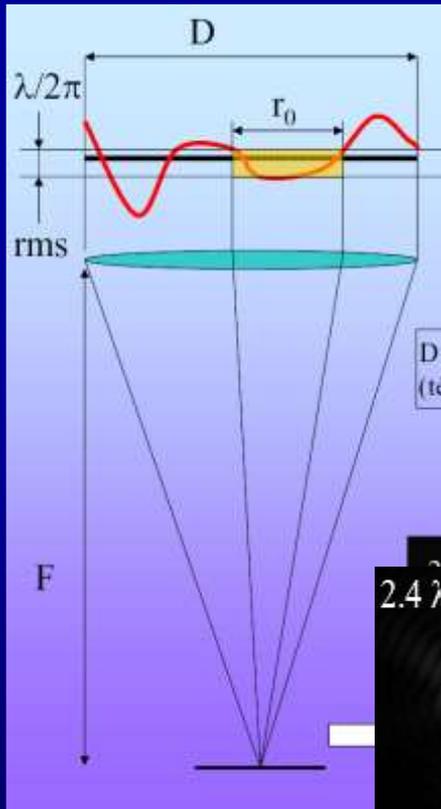
Quelle est la signification pratique du paramètre de Fried r_0 ?

→ La résolution des images obtenues à travers une atmosphère dont le paramètre de Fried est r_0 est la même que celle obtenue avec un télescope parfait, (limité par la diffraction), de diamètre $D = r_0$

En présence de turbulence caractérisée par r_0 , la résolution devient donc égale à

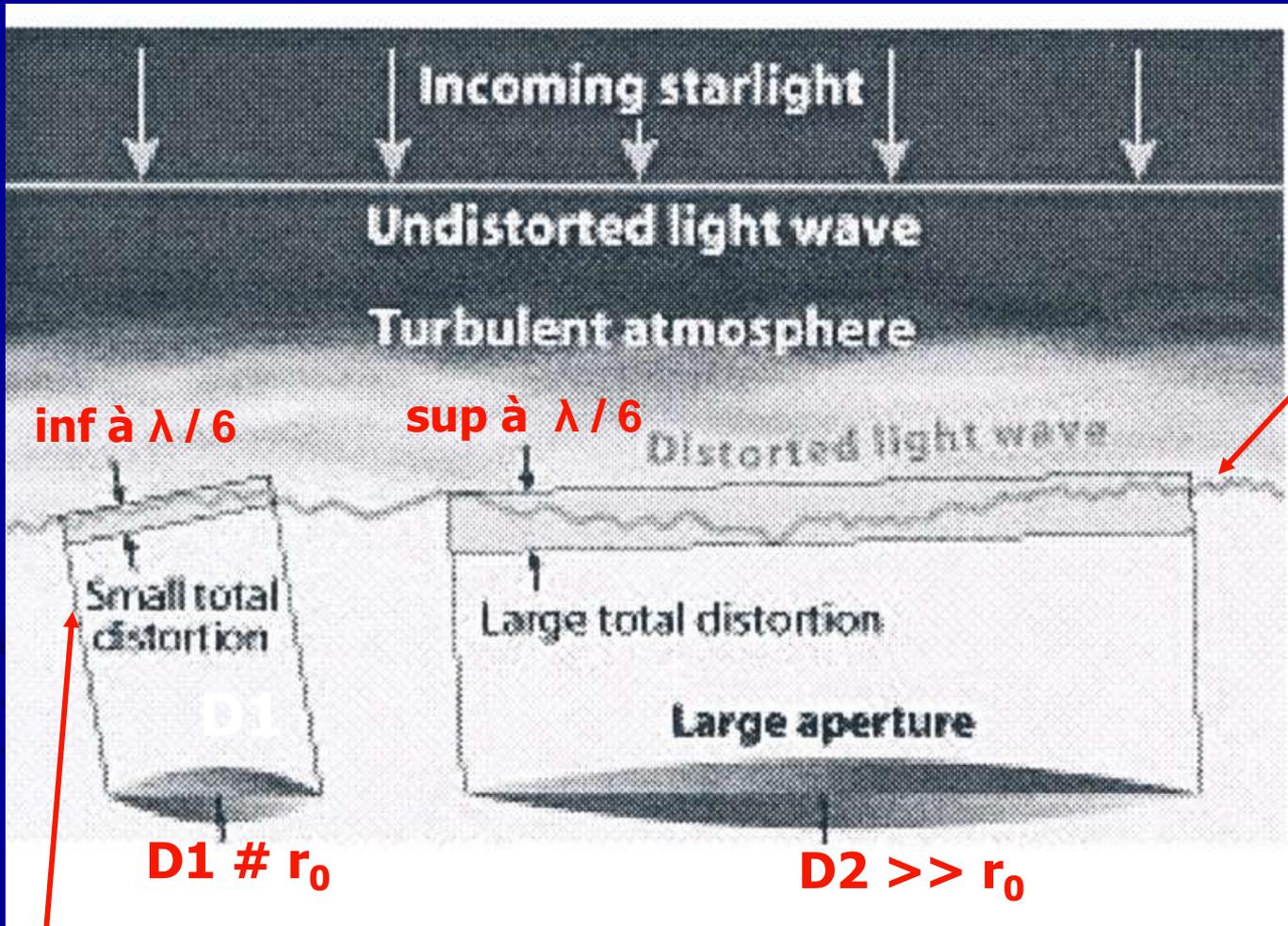
$$PS = 1,22 \lambda / r_0$$

[et non plus à $PS = 1,22 \lambda / D$!]



→ 2 rayons dont la séparation n'excède pas r_0 peuvent alors être considérés en phase et la surface d'onde entre les deux est considérée comme plane ==> en première approximation la surface d'onde de dimension r_0 peut être considérée comme non-déformée par la turbulence (un peu moins sévère que le critère de Rayleigh)

→ Le télescope est donc limité par la diffraction (image parfaite) si $D < r_0$

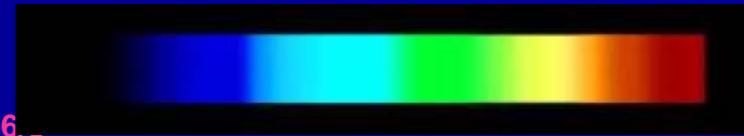


Noter que la surface "plane" peut être inclinée : le tilt

Dépendance du paramètre de Fried avec λ et γ

- Dépendance avec la longueur d'onde λ :

On avait : $r_0^{-5/3} = K (2\pi / \lambda)^2 \implies r_0 \# \lambda^{6/5}$



Supposons $(r_0)_v = 10$ cm pour $\lambda_v = 550$ nm quelle est la valeur de $(r_0)_{IR}$ pour $\lambda_{IR} = 20$ μ m ?
 Réponse: $(r_0)_{IR} = (r_0)_v \cdot [\lambda_{IR} / \lambda_v]^{6/5} = 10 \cdot [20 \cdot 10^{-6} / 550 \cdot 10^{-9}]^{6/5} = 10 \cdot 74 = 7,4$ m !

→ Pour un même degré de turbulence (C^2_n) le paramètre de Fried est plus grand pour les grandes longueurs d'onde $\lambda \implies$ avantage aux télescopes Infrarouges qui ne sont pratiquement pas concernés par la turbulence !

- Dépendance avec la hauteur de visée γ (distance zénithale):

On avait : $r_0^{-5/3} = K (1 / \cos \gamma) \implies r_0 \# (\cos \gamma)^{3/5}$

\implies quand $\gamma \uparrow$ alors $\cos \gamma \downarrow$ et donc $r_0 \downarrow$: le diamètre de Fried diminue quand on regarde bas sur l'horizon (normal car l'épaisseur d'atmosphère traversée est plus grande donc la turbulence est plus importante et r_0 diminue).

Ex: $\cos 0^\circ = 1$ d'où $(\cos 0^\circ)^{3/5} = 1$
 $\cos 30^\circ = 0,866$ d'où $(\cos 30^\circ)^{3/5} = 0,917$
 * $\cos 45^\circ = 0,707$ d'où $(\cos 45^\circ)^{3/5} = 0,812$
 $\cos 60^\circ = 0,5$ d'où $(\cos 60^\circ)^{3/5} = 0,660$



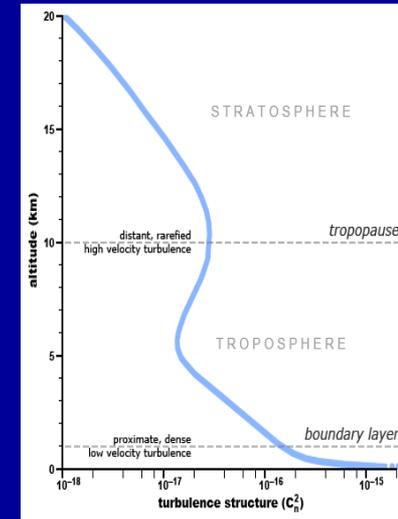
Dépendance du paramètre de Fried avec $C_n^2(h)$

$$r_0^{-5/3} = 0,423 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \cdot (1/\cos\gamma) \cdot \int C_n^2(h) \cdot dh$$

- La constante de structure $C_n^2(h)$ traduit l'importance de la turbulence à l'altitude h . Cette turbulence s'étage sur plusieurs niveaux bien individualisés et le paramètre de Fried prend en compte les différents niveaux.
- La turbulence dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont :
 - l'altitude : échapper à la CLA
 - l'endroit à la surface de la Terre : zone équatoriale mauvaise
 - la saison : ensoleillement
 - la proximité du Jet-stream
 - la situation météorologique : passage de fronts
 - l'emplacement géographique local : fond de vallée - plateau - présence d'une étendue d'eau

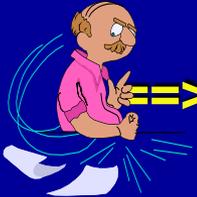
==> On peut remplacer l'intégrale par sa moyenne pondérée sur toute la hauteur d'atmosphère au dessus du site d'observation:

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

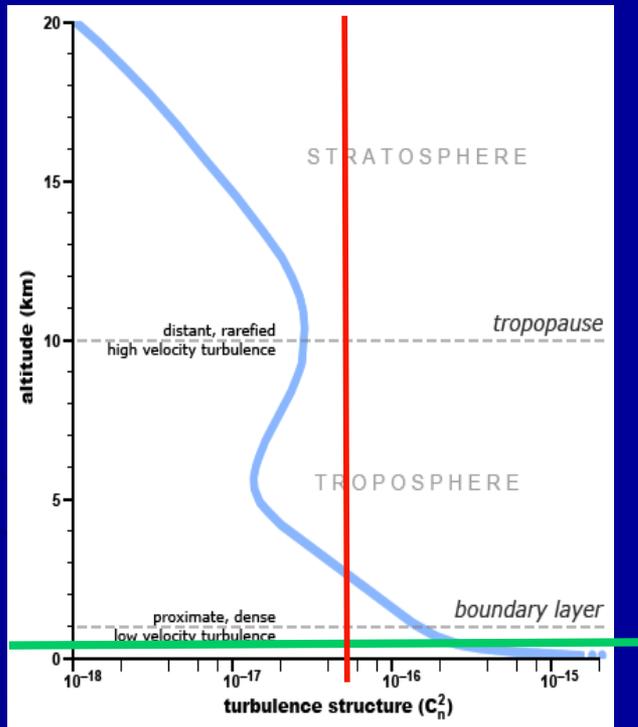


En résumé Fried

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



==> la difficulté : évaluer correctement $[\langle C_n^2 \rangle \cdot \Delta h]$:
choix de la courbe - modélisation- mesures in-situ

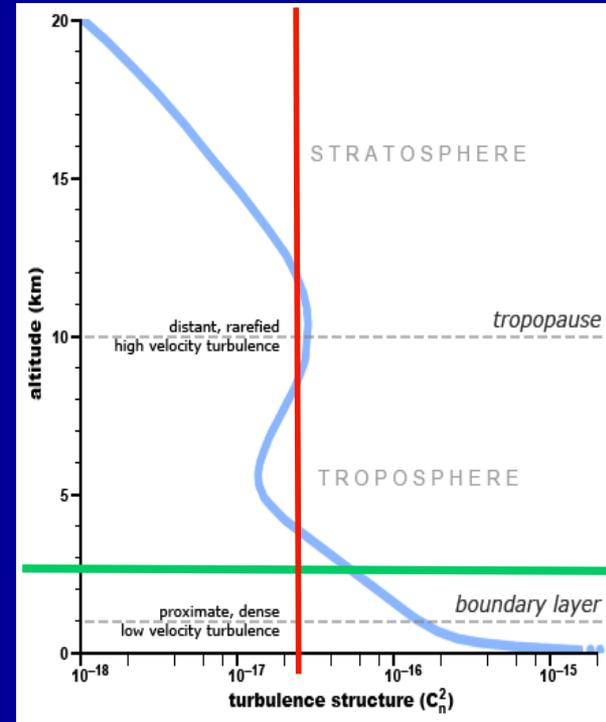


300 m

2800 m

$\langle C_n^2 \rangle$ moyen # $5 \cdot 10^{-17}$
entre 300 m et 20 km

VOIRON (Hufnagel)



$\langle C_n^2 \rangle$ moyen # $2,4 \cdot 10^{-17}$
entre 2800 m et 20 km

RESTEFOND (Hufnagel)

Paramètre de Fried et seeing



Le seeing s

Le « seeing s » est par définition la largeur angulaire à mi-hauteur de l'image télescopique d'une source ponctuelle (étoile par exemple) en présence de turbulence :

$$\text{Seeing: } s = \text{FWHM} = 0,98 \cdot (\lambda / r_0) \quad \text{en radian}$$

(FWHM = Full Width at Half Maxi)

Le seeing s dépend de r_0 et dans une certaine mesure de λ
==> Plus r_0 est grand plus le seeing est petit et plus la turbulence optique est faible

Exemple: si $r_0 = 10$ cm et $\lambda = 550$ nm (observation visuelle)

$$\implies s = 0,98 \cdot [(550 \cdot 10^{-9}) / (10 \cdot 10^{-2})] = 53,9 \cdot 10^{-7} \text{ rd}$$

$$s = 53,9 \cdot 10^{-7} \cdot [(360 \cdot 60 \cdot 60 / 2 \pi)] = 1,1 \text{ '' d'arc}$$

[formule pour le visible ==> $s = 11 / r_{0 \text{ cm}}$ en " d'arc]

seeing s et paramètre de Fried r_0

- Quand il n'y a pas de turbulence le seeing s est donné par le disque d'Airy:
 $s \approx (\lambda / D)$

- En présence de turbulence le seeing est : $s \approx (\lambda / r_0)$

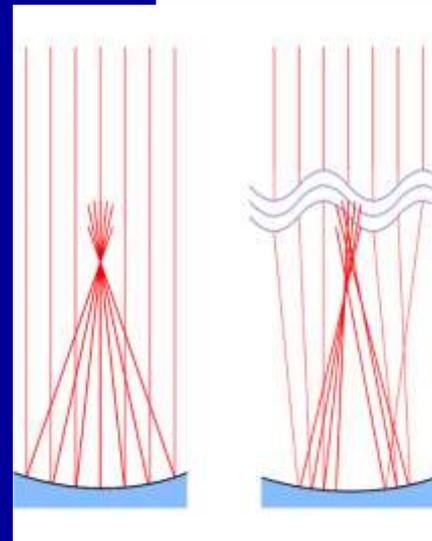
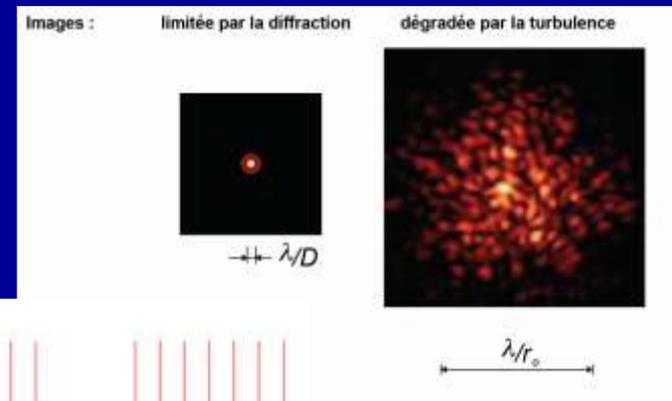
==> en présence de turbulence la « pseudo-tache d'Airy » est formée de grains lumineux (les speckles ou tavelures)

Son diamètre est plus grand que celui du disque d'Airy et donc le pouvoir séparateur diminue.

En conclusion:

Plus r_0 est grand plus le seeing est petit et plus on se rapproche de l'image donnée par la diffraction ==> plus le "rendement" du télescope est grand
→ plus on l'exploite au maximum de ses possibilités : plus on rentabilise son argent dépensé pour l'achat du télescope.

A noter : le seeing est surtout important en photographie longue pose.



Revenons à :

Longitude = 123° E

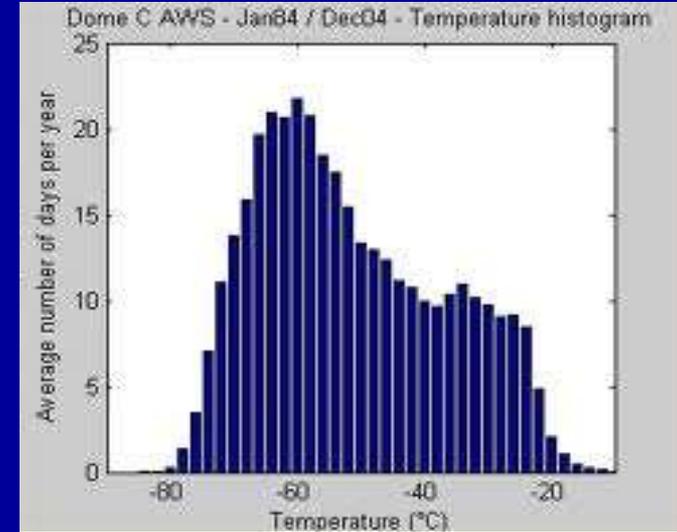
Latitude = 75° S

Altitude = 3233 m



Concordia-Dôme C -3233 m

Un observatoire en Pôle position



Voisin le plus proche à 1100 km !

Un petit gilet est nécessaire

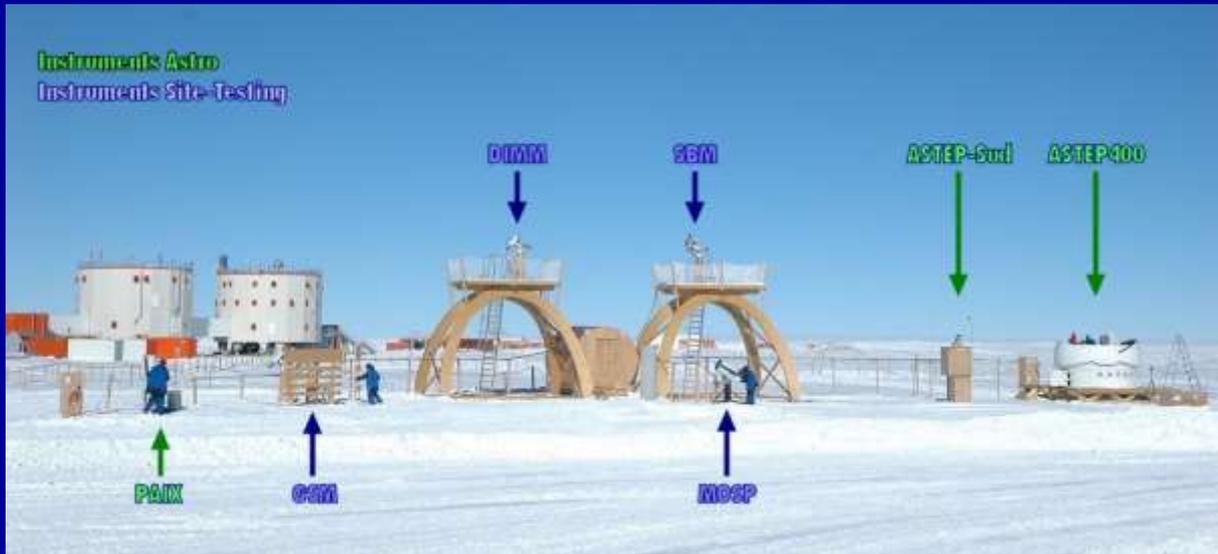
1

2



Solstice d'Hiver - 24 soleils

Modélisation C^2_n Concordia



	4 Couches			
n°couche	1,00	2,00	3,00	4,00
h1 [m]	8,00	30,00	800,00	10000,00
h2 [m]	30,00	800,00	10000,00	21000,00
seeing ["]	1,16	0,21	0,13	0,07
r0 [m]	0,09	0,48	0,77	1,42
%Cn2	0,91	0,05	0,02	0,01

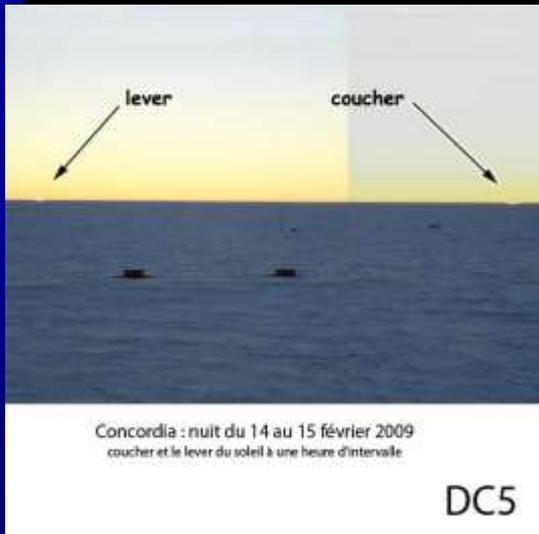
Tableau 3 : Paramètres du découpage en 4 couches.

==> Voir l'évolution de r_0 et du seeing pour chaque couche et remarquer: au-dessus de 30 m : $r_0 > 48$ cm !

Photos Chercheurs hivernant à Concordia



Télescopes mis en température !



Constellations à l'envers!



Réapparition du soleil



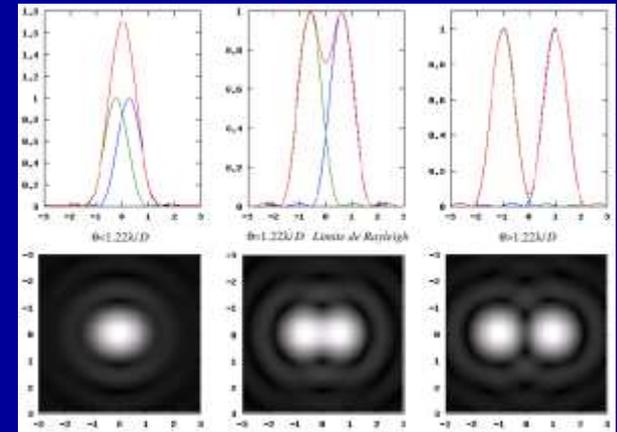
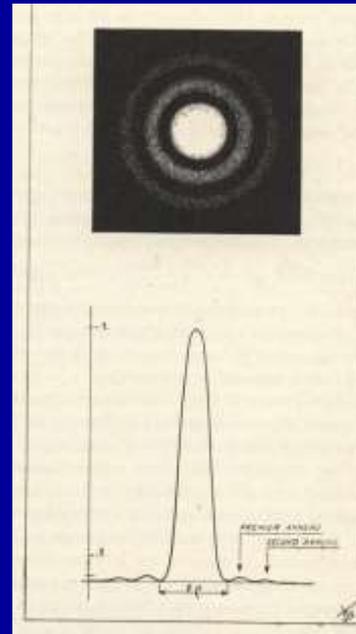
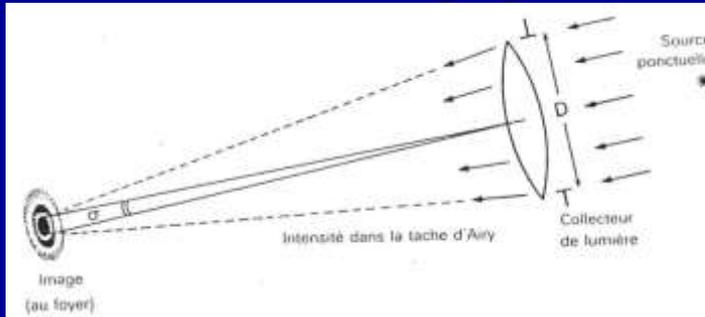
Voie Lactée et aurore polaire

Rayon vert

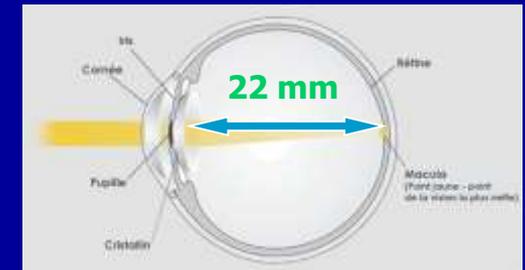
Qualité de l'observation et paramètre de Fried



Rappel : Disque d'Airy



Résolution :
 $PS = \rho = 14 / D_{cm}$ pour $\lambda = 550 \text{ nm}$



$\sigma = 2\rho = 28 / D_{cm}$ en "d'arc"
 (pour $\lambda = 550 \text{ nm}$)

[si $D \uparrow$ alors $\sigma \downarrow$]
==> Grossissement minimal pour voir le disque d'Airy :

==> Œil : dim d'un cône = 5 μ mais détection si image étalée sur 3 cônes
Focale de l'œil = 22 mm

D'où dim minimum que doit avoir le disque d'Airy sur la rétine = 3 x 5 = 15 μ ce qui correspond à un angle de $15 \cdot 10^{-3} / 22 = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ Rd} = 144''$ d'arc :

==> Le disque d'Airy sera visible si $G \times \sigma = 144''$ soit $G = 144 \cdot D / 28$

- D= 10 cm \rightarrow G = 61 X
- D= 20 cm \rightarrow G = 122 X
- D= 30 cm \rightarrow G = 183 X

Modification de l'aspect du disque d'Airy avec le niveau de turbulence

La turbulence va se caractériser par plusieurs effets impactant l'image :

- l'agitation: l'image oscille dans le plan focal (tilt)
- l'altération de l'image du disque d'Airy (déformation du disque-disparition des anneaux-apparition de tavelures (speckles)
- la scintillation : la luminosité de l'image fluctue

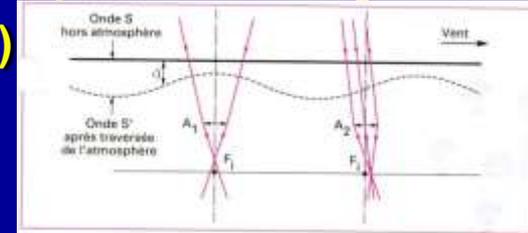
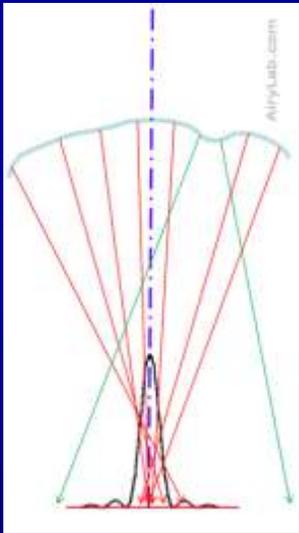
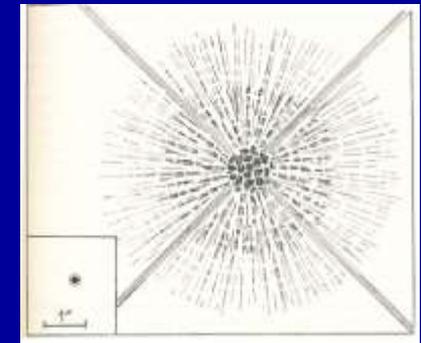


Figure 3 : Déformation d'une onde de rayonnement à la traversée de l'atmosphère. Une onde plane traversant l'atmosphère subit des altérations qui ont pour effet de défocaliser, de déplacer et/ou de déformer l'image d'une source ponctuelle. De plus, en présence de vent, ces défauts fluctuent dans le temps.



		V	IV	III	II	I
S	Image d'Airy					
	Plus généralement		Image excellente, étoile fixe et piquée, même à fort grossissement. Anneaux complets non-déformés.	Image bonne, étoile piquée à faible grossissement. Disque d'Airy stable. Anneaux complets parcourus par des ondulations.	Etoile remuante, empâtée à fort grossissement. Anneaux incomplets avec des remous, tache centrale ondulante.	Etoile agitée, empâtée à moyen grossissement. Anneaux très furtifs, voire absents.



Aspect du disque d'Airy dans un grand télescope

→ l'examen de l'image d'Airy va nous permettre d'estimer la turbulence : cf les échelles de turbulence

Tous les rayons lumineux ne se focalisent plus dans le disque d'Airy

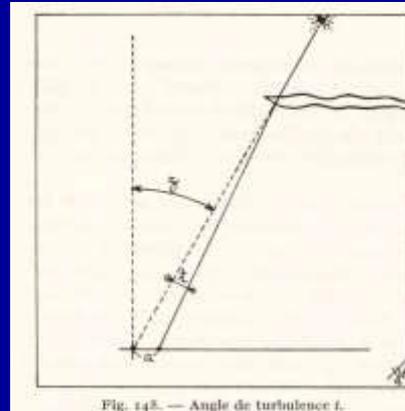
2 Echelles de turbulence : Danjon et Pickering

266 CONSTRUCTION DU TÉLESCOPE D'AMATEUR

COTE	f	DESCRIPTION (voir fig. 149)
V	$f < 0,25 \rho$	Images parfaites, sans déformation sensible et à peine agitées.
IV	$f = 0,25 \rho$	Anneaux complets, parcourus par des condensations mobiles.
III	$f = 0,5 \rho$	Agitation moyenne, anneaux de diffraction brisés, tache centrale à bords ondulants.
II	$f = \rho$	Agitation vive, anneaux évanouissants ou absents.
I	$f > 1,5 \rho$	Image tendant vers l'aspect planétaire.



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



Demi-angle t de turbulence

Avec Danjon, en connaissant D on peut estimer t en appréciant l'aspect de l'image télescopique.
[t est relié au seeing]
 $t \# s / 2$

==> Si Danjon III équivaut à Pickering 6

$t/\rho = 0,5$ équivaut à $D / r_0 = 1,5$

On cherche à établir la valeur

de r_0 en fonction de t:

$D \text{ III} \implies t = 0,5 \cdot 14 / D = 7 / D$

Si Pick 6 ==> $r_0 = D / 1,5$

$r_0 \cdot t = (7 / D) \cdot (D / 1,5) \# 5$

$r_0 \# 5 / t$

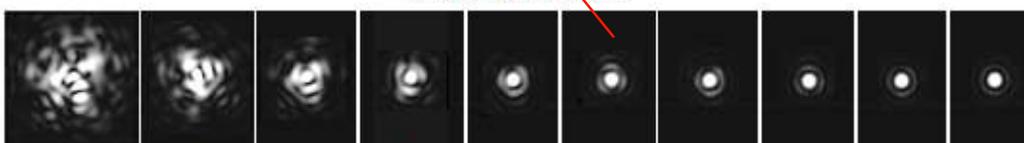
Ex: $D=10\text{cm}$ - Cote V: image parfaite

$t/\rho = 0,25 \implies t = 0,25 \cdot \rho = 0,35 \rho$

$r_0 = 5 / 0,35 \# 14 \text{ cm}$

Echelle Danjon-Couder [ρ en '' = $14 / D$ cm]

PICKERING'S SCALE

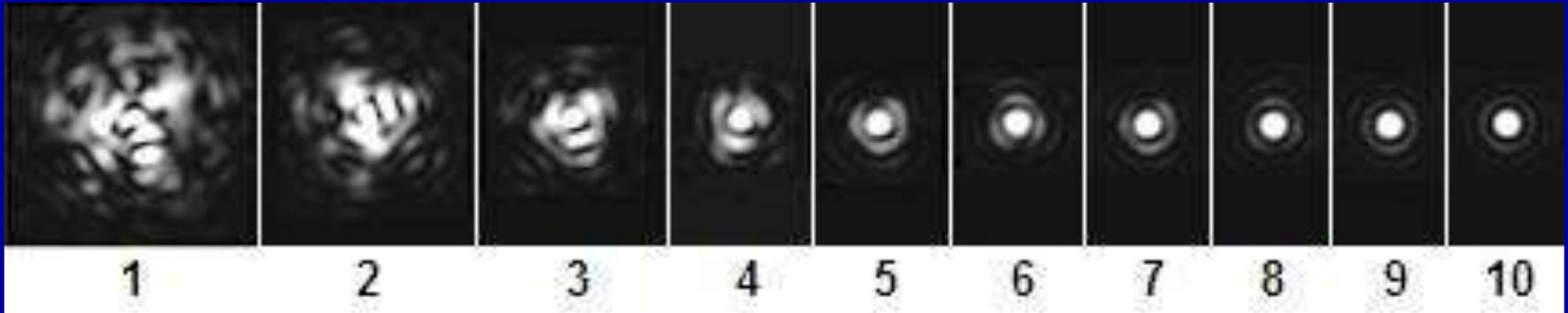


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
>5	4-5	3-4	2.5-3	2-2.5	1.5-2	1-1.5	0.75-1	0.5-0.75	<0.5

APPROXIMATE CORRESPONDING D/r_0

Echelle Pickering

D = diamètre



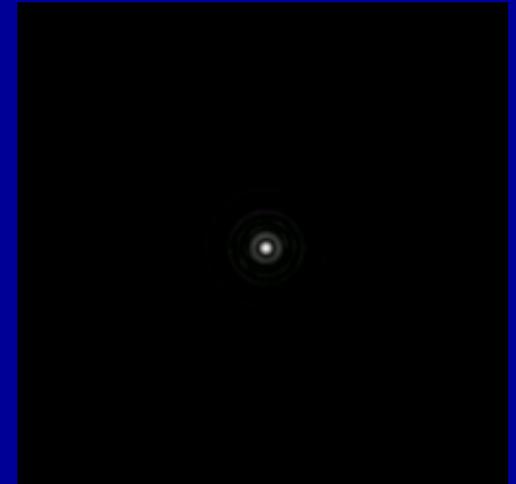
Echelle de Pickering



P3

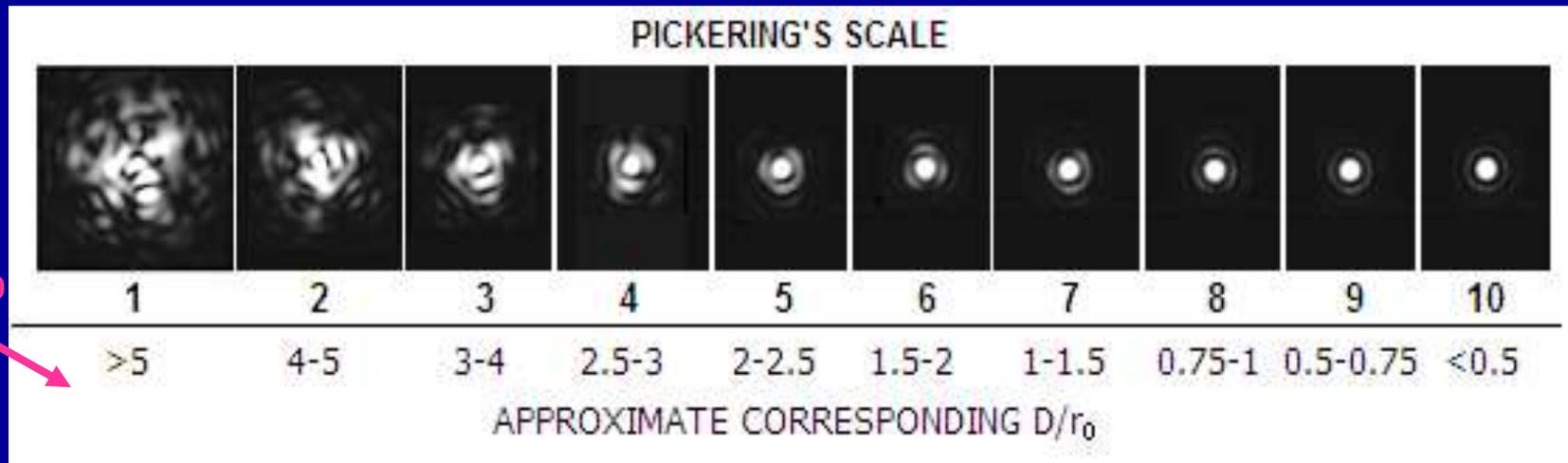


P6



P9

Importance fondamentale du rapport D / r_0



[Images obtenues avec lunette de 5 pouces]

La valeur du rapport D / r_0 est primordiale pour la qualité de l'image lors de l'observation visuelle :

$D < r_0$ pas d'effet visible de la turbulence sur l'image

$D / 4 < r_0 < D$ déplacement global de la tache d'Airy avec le temps

$r_0 < D / 4$ apparition d'une tache complexe avec des grains brillants

==> l'image n'est pas trop dégradée tant que D / r_0 est inférieur à 1,5 - 2 (Pickering 6)

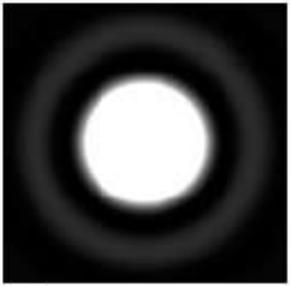
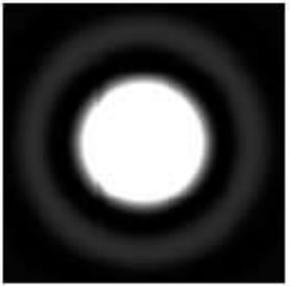
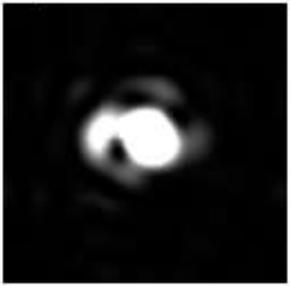
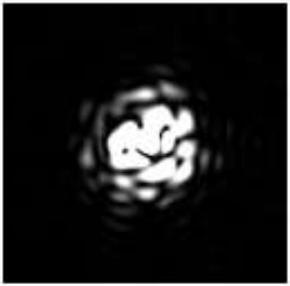
Insistons un peu beaucoup !

!!!! Notion fondamentale à se rappeler à propos de la qualité de l'image :

==> le diamètre D intervient et c'est la valeur du rapport D / r_0 qui est importante pour la qualité de l'image télescopique. Il s'ensuit que, pour des mêmes conditions de turbulence, l'aspect de l'image télescopique sera différente suivant le diamètre D de l'instrument.

un r_0 de 10 cm donnera un seeing de 1,1 '' d'arc et un $D/r_0 = 1$ avec un télescope de diamètre $D = 100$ mm (bonne image), mais un $D / r_0 = 3$ (image médiocre) avec un télescope de $D = 300$ mm

==> l'image sera plus agréable à regarder avec un télescope de 100 mm ,en revanche l'image sera plus détaillée avec le télescope de 300mm ... dans les creux de turbulence (le diamètre s'impose toujours

Diamètre de l'instrument	Avec turbulence moyenne (<u>10 cm</u>)	Sans turbulence
5 centimètres		
12 centimètres		
30 centimètres		
120 centimètres		

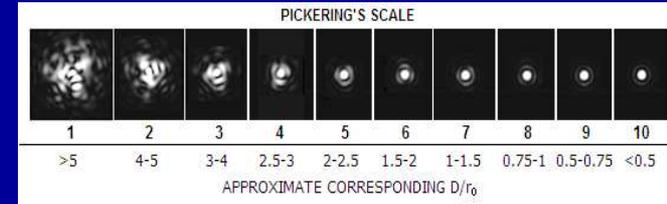
On a Fried
 $r_0 = 10 \text{ cm}$

$D/r_0 = 0,5$

$D/r_0 = 1,2$

$D/r_0 = 3$

$D/r_0 = 12$

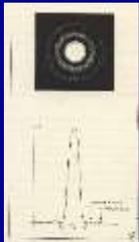


NB1:
 Noter la diminution de la taille de la tache d'Airy quand le diamètre D du télescope augmente.

$$\rho = 1,22 \cdot \lambda / D$$

$$= 14 / D \text{ en "}$$

NB2:
 Noter comme l'image se dégrade quand D/r_0 augmente mais que la taille de l'image ne diminue pas → la taille est imposée par le seeing.



Exemple tiré de Astrosurf N° 2- « Article de David Vernet »

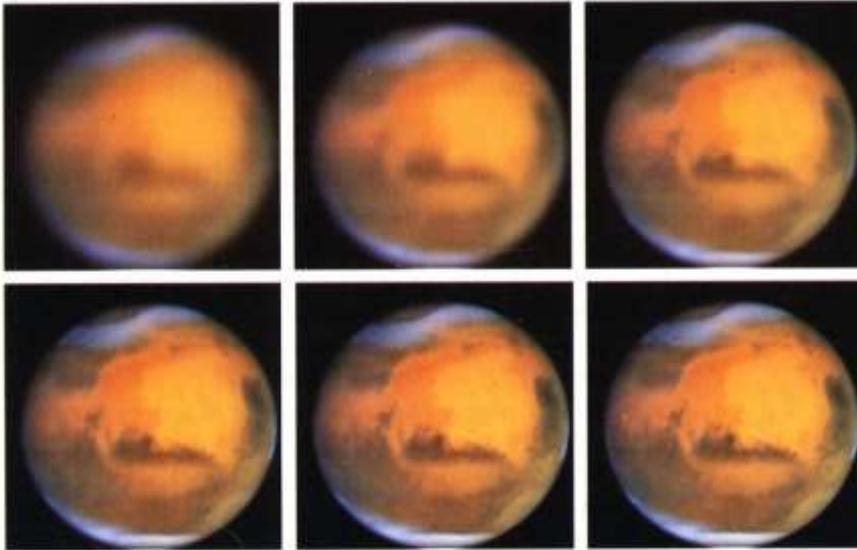


Fig. 3 : Mars, dans des conditions idéales. De gauche à droite puis de haut en bas : lunettes de 60 et 100 mm puis télescopes de 200, 400, 600 et 800 mm.

L'importance du diamètre de l'instrument avec un bon seeing !

Le seeing « étouffe » le diamètre !

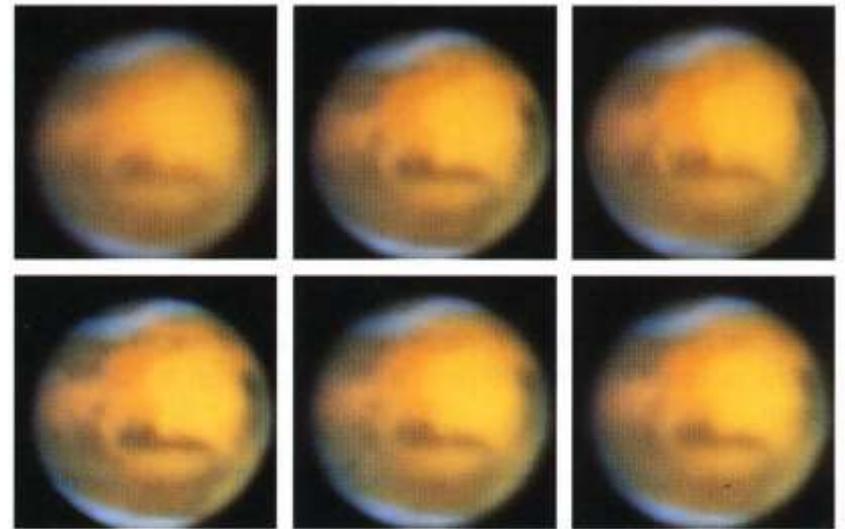
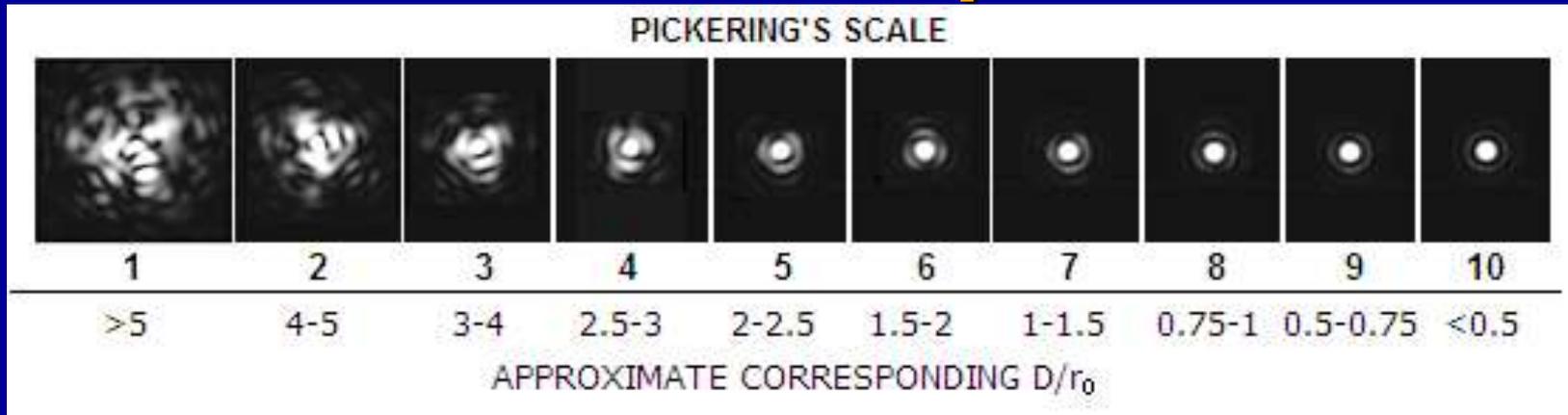


Fig. 7. Mars et R0 de 100 mm. De gauche à droite puis de haut en bas : lunettes de 60 et 100 mm puis télescopes de 200, 400, 600 et 800 mm.

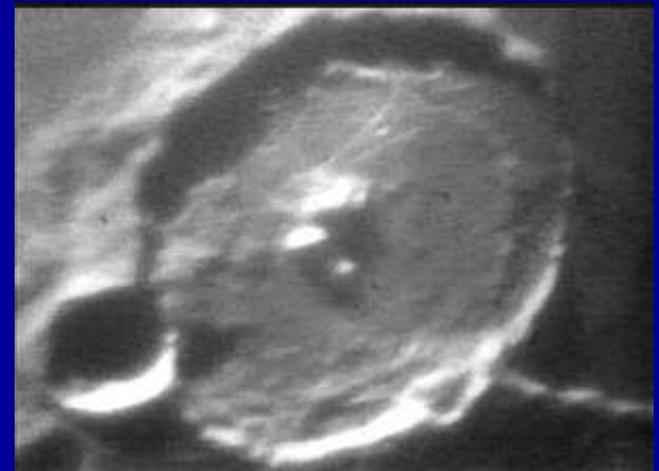
Autre exemple



Pickering 3

D = 200 mm

**Quel cratère
Lunaire ?**



Pickering 7

Mais Attention : un Pickering 7 ($D/r_0 \# 1,5$) avec un diamètre $D = 300\text{mm}$ donnera une image beaucoup plus détaillée qu'un Pickering 7 avec un diamètre $D = 100\text{ mm}$ [dans les creux de turbulence] (influence du diamètre) !



$r_0 = 11 / 0,6 \# 18 \text{ cm}$



$r_0 \# 4 \text{ cm}$

Les régions H II d'une galaxie (raie H α = 656,3 nm)

Mount Wilson (1742m) Télescope Hooker

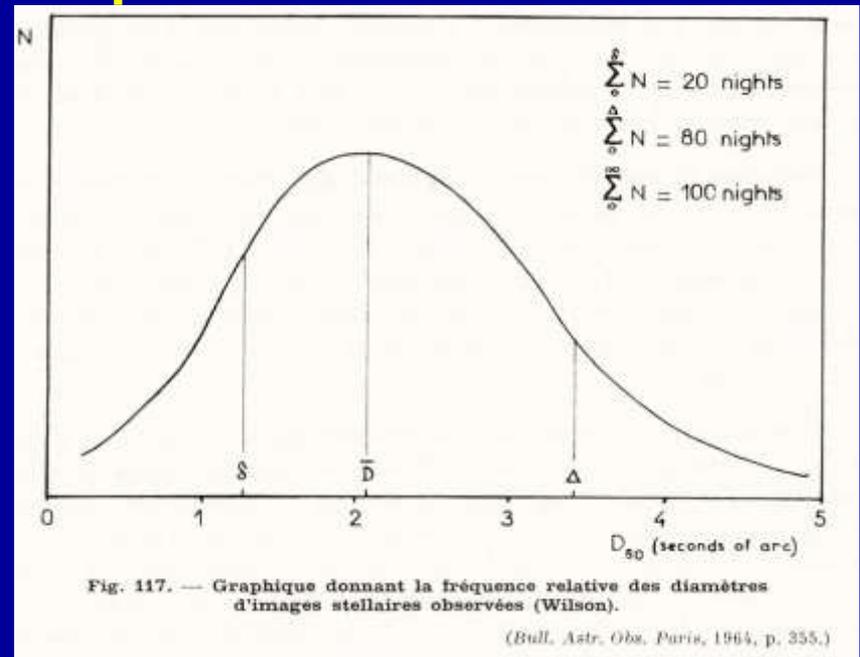


Télescope Hooker-D= 2,5 m (100 inches)
Miroir coulé par Saint-Gobain (France)
Paliers de l'axe NS dans bain de mercure
Le plus grand télescope de 1917 à 1949
==>Celui qui a fait les découvertes
les plus fondamentales

Le télescope Hooker qui a découvert
les galaxies et l'expansion de l'univers



1931 à Mount Wilson



seeing moyen = 2,1 " d'arc ($r_0 = 5$ cm)
mais 20% du temps < 1,2 "



Cratère Clavius

Récapitulons les acquis ! (★ 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

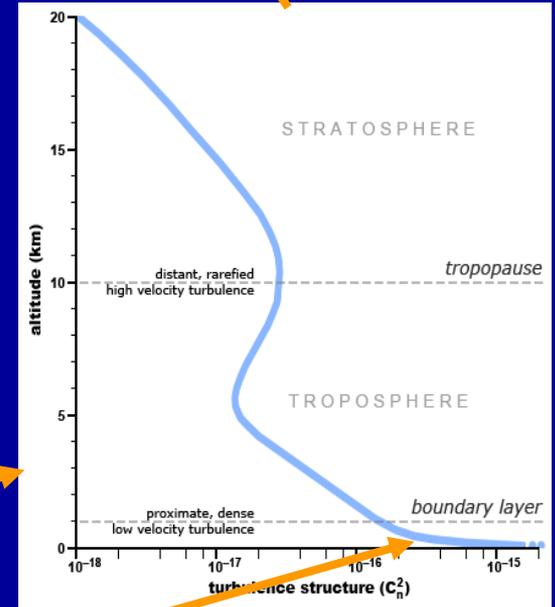
Longueur d'onde de l'observation

Fried (1965)



Tatarskii (1961)

Hufnagel (1966)



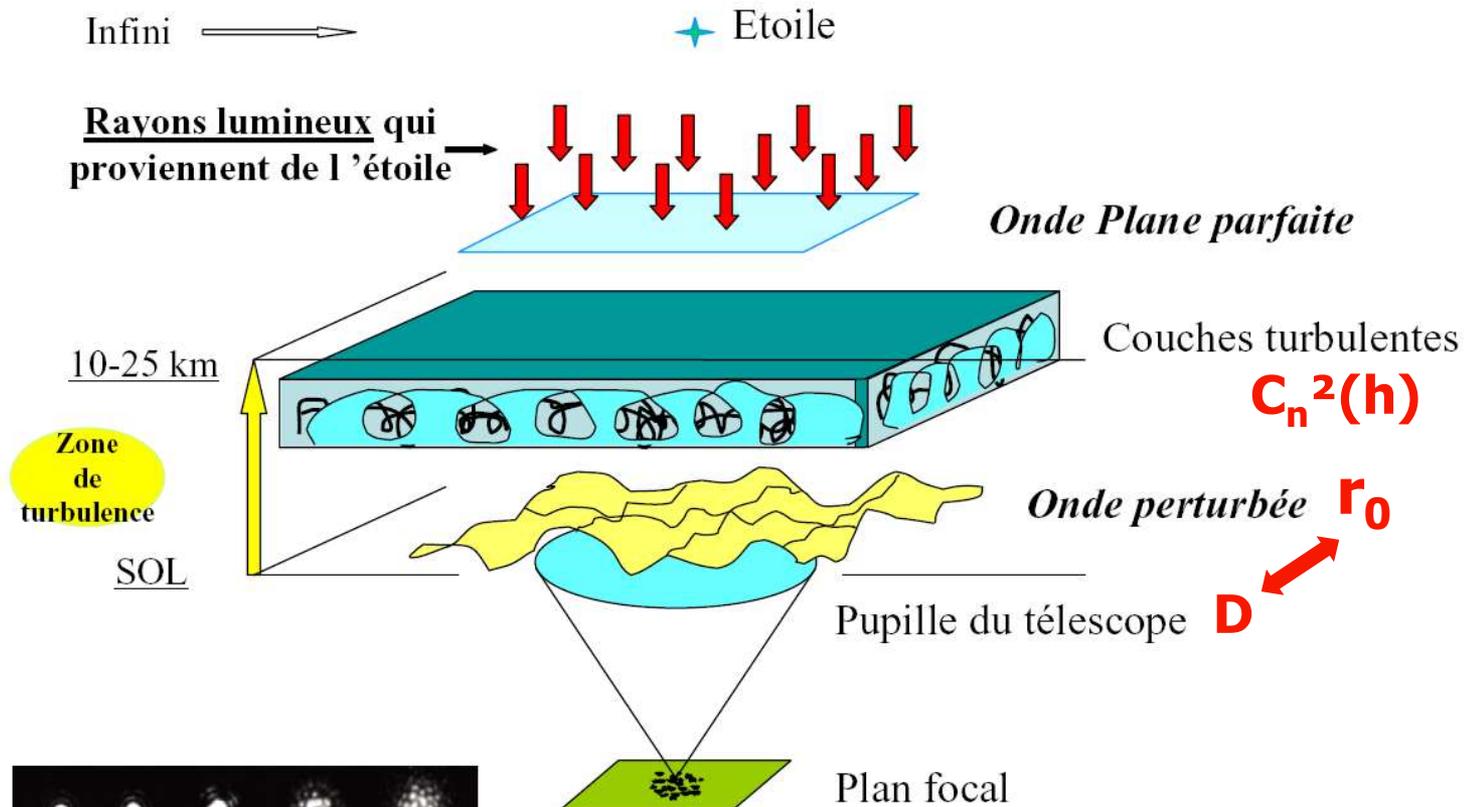
Seeing $s = 0,98 (\lambda / r_0)$

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

==> Ce qui importe pour l'image astronomique : la valeur du rapport D/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

**Nous possédons maintenant tous
les éléments nécessaires pour en
tirer des règles pratiques pour
l'observation**

**C'est ce que nous étudierons dans
la partie 3**

Juste avant de terminer je reviens sur une question que nous nous étions posée :

« r_0 à Voiron ? - r_0 à Restefond ? »



Réponse



devoir



*Fin de la 2^{ème}
partie
Merci pour votre
attention...*

