

L'image télescopique et l'atmosphère

[quand l'Astronome rencontre le
Météorologue]



Jean-Luc Mainardi
Albédo- 2012

Pour prendre conscience du problème !

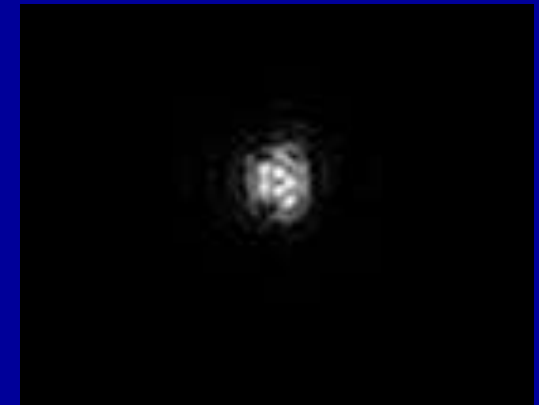
- Antares (α Scorpion) est une étoile super-géante (700 fois la taille du Soleil) située à 520 années-lumière de la Terre. C'est une étoile double. La principale à une magnitude de 0,9 et le compagnon à une magnitude de 5,5 et la séparation est de 2,9 " d'arc.
- Les rayons lumineux des deux astres vont voyager côte à côte pendant 520 années sans se mélanger . Arrivés la surface de la Terre les rayons lumineux vont traverser les 20 km d'atmosphère en un temps de $20\text{km} / 300000\text{ km/s}$ soit en 66 millièmes de seconde et l'image sera alors irrémédiablement brouillée.



Pendant 520 ans



passage à travers l'atmosphère



66 millièmes de seconde plus tard !!!!

Plan

→ 3 parties

1^{ère} partie: *les basiques*

- basiques en optique
- basiques en météorologie

2^{ème} partie : *la théorie de la turbulence et les chiffres*

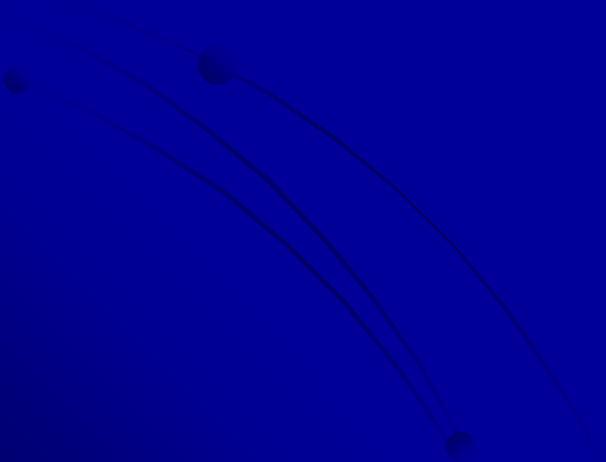
- quantification de la turbulence
atmosphérique

3^{ème} partie : *applications pratiques*

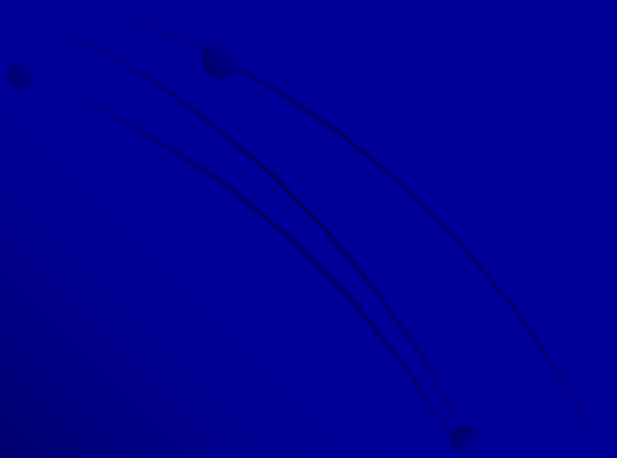
- turbulence et vision télescopique
- turbulence et photographie astronomique
- « battre » la turbulence

1ère partie

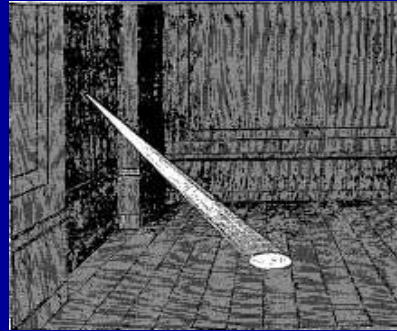
- Les basiques en optique
- Les basiques en météorologie



Les basiques en Optique



Le Rayon Lumineux



**Le rayon lumineux est un concept d'optique par lequel on représente la lumière qui se déplace.
On en a une approche intuitive.**

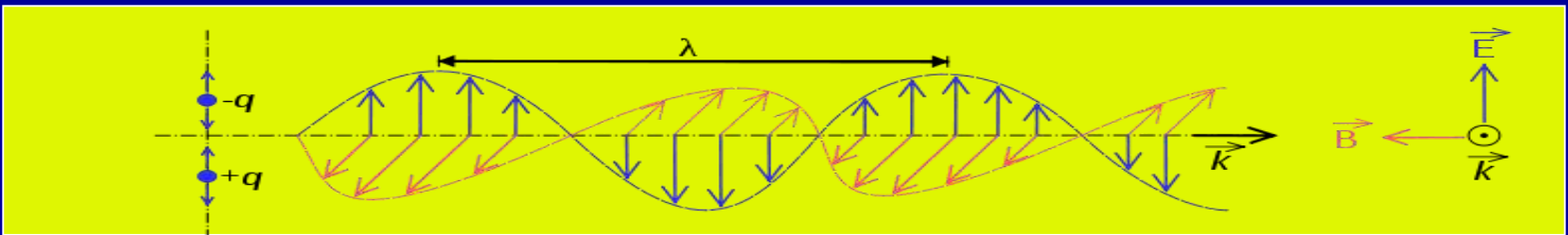


**Cairns- 6 h TL
13 Nov 2012
(21 h TL à Voiron
le 12 Nov 2012)**



Mais que veut-on représenter à l'aide d'un rayon lumineux ?

- On veut représenter une onde électromagnétique qu'on appelle la lumière

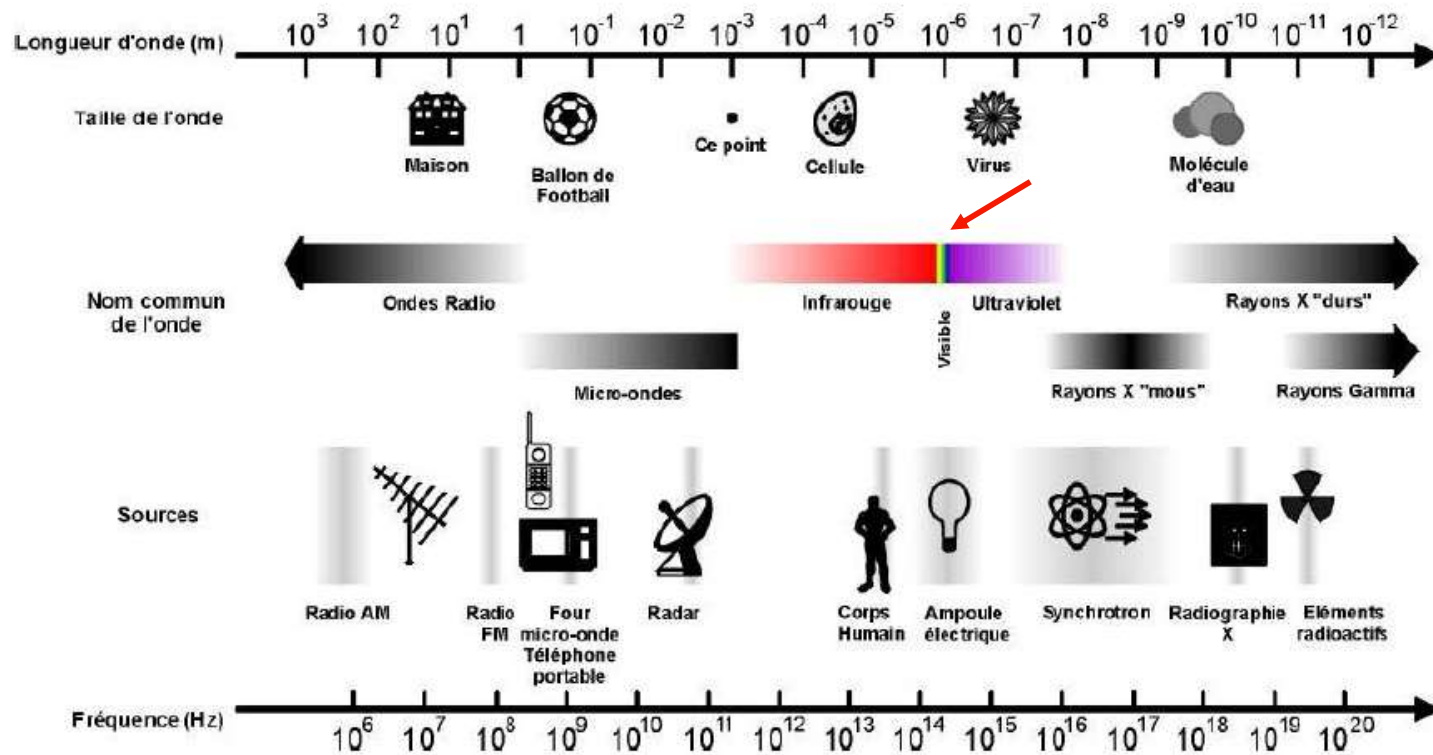


- Cette onde électromagnétique résulte du couplage d'un champ Electrique \vec{E} avec un champ magnétique \vec{B} .
(couplage = les 2 champs sont liés et varient de la même façon)
- Dans le vide cette onde électromagnétique se déplace en ligne droite à la vitesse $c \approx 300000\text{km/s}$ selon la direction \vec{k} - Elle n'a pas besoin de support matériel pour exister et se déplacer (contrairement à une onde à la surface de l'eau).
- L'onde est caractérisée par sa longueur d'onde λ (ou sa fréquence $f \rightarrow \lambda = c/f$).



Les domaines de l'onde électromagnétique selon la longueur d'onde (spectre)

Spectre électromagnétique : La lumière visible représente une infime partie du spectre électromagnétique



Spectre électromagnétique.

Approfondissons quelque peu !

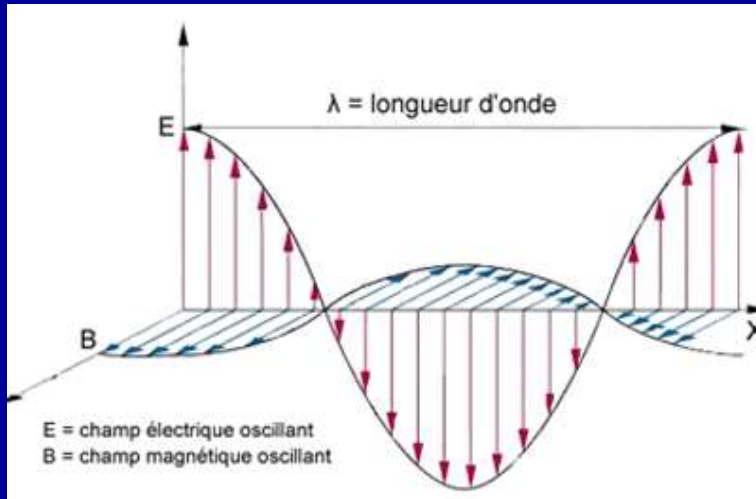
- Il s'agit d'un phénomène ondulatoire périodique que l'on peut écrire mathématiquement sous la forme :

$$E(t, x) = E_0 \cos (2\pi t/T - 2\pi x/\lambda)$$

(E et B étant couplés il suffit d'écrire la forme mathématique pour E et B s'en déduit)

T = période = λ/c avec λ = longueur d'onde
t est le temps

x est une distance comptée sur la direction de déplacement (sur le rayon lumineux)



- **L'onde présente une double périodicité:**
 - Temporelle de période $T = 1/f = \lambda/c \rightarrow$ l'onde est identique à elle-même toutes les T secondes
 - Spatiale de longueur unitaire $\lambda \rightarrow$ l'onde est identique à elle-même tous les λ mètres
- \rightarrow C'est une onde électromagnétique progressive se déplaçant selon la direction du rayon lumineux**

Indice de réfraction n

- On a considéré jusqu'ici le parcours du rayon lumineux (déplacement de la lumière) que dans le vide .

$C = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ → célérité (sert à définir le m)

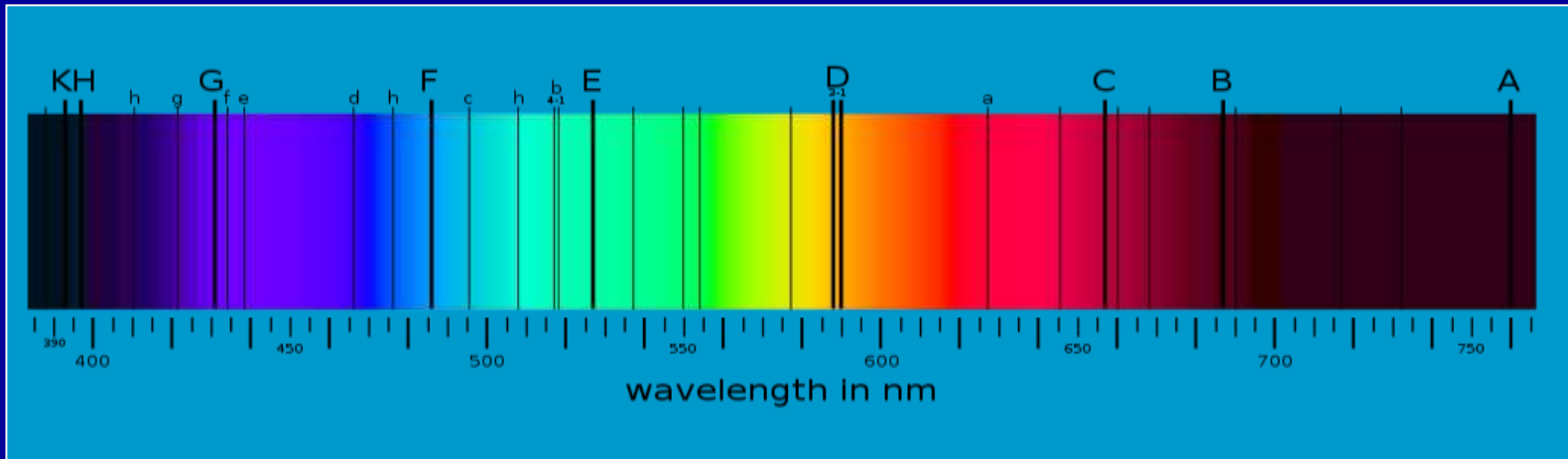
- La lumière peut également se déplacer à travers d'autres milieux que le vide : air , eau, verre , minéraux ...
- On définit pour ces milieux l'indice de réfraction n : $n = c/v$
« L'indice de réfraction n est égal au rapport de la vitesse de la lumière c dans le vide à la vitesse de la lumière v dans le milieu »

Indices de réfraction de différents milieux

Milieu	Indice	Vitesse de la lumière
Le vide	1.0000	299 792 km/s
L'air (son indice peut varier selon la température et la pression de l'air)	1.0008	299 552 km/s
L'eau	1.3300	225 407 km/s
Les verres organiques	1.500 à 1.740	de 199 861 à 172 294 km/s
Les verres minéraux	1.525 à 1.900	de 196 584 à 158 452 km/s
Le diamant	2.460	121 868 km/s

L'indice n est toujours plus grand que 1 !

Variation de n



- **n varie avec la longueur d'onde de la lumière → chaque radiation λ à sa propre vitesse donc son propre indice dans tout milieu différent du vide**

$$n_{\lambda} = a + b / \lambda^2 \quad (\text{Cauchy}) \quad (n \text{ augmente quand } \lambda \text{ diminue})$$

Exemple Verre ordinaire (crown) :

$$n_C \text{ (rouge)} = 1,5127 - n_D \text{ (jaune)} = 1,5153 - n_F \text{ (bleu)} = 1,5214$$

- **Pour l'air n varie globalement avec la température , la pression et l'humidité e :**

$$n - 1 = \frac{77.6 \cdot 10^{-6}}{T} \left(1 + 7.52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2} \right) \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right)$$

-10°C	n=1,00030284
0°C	n=1,00029165
+10°C	n= 1,00028120
+20°C	n=1,00027137

- **Pour l'air n varie de façon importante avec la température T (plus l'air est froid et dense plus l'indice est élevé)**

Qu'entraîne l'existence des variations de n pour le rayon lumineux ?

- La variation de n avec λ s'appelle la **dispersion**: c'est l'effet de prisme, à l'origine de l'aberration chromatique de nos instruments.



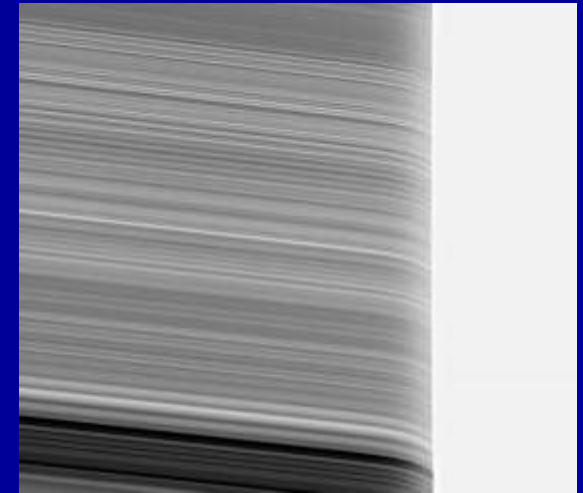
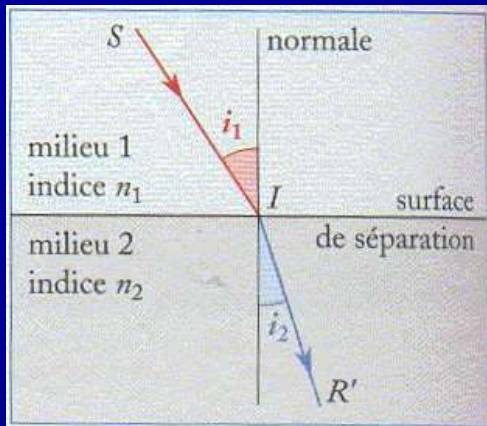
Vénus à l'horizon = dispersion atmosph.

Autre effet de la variation de l'indice

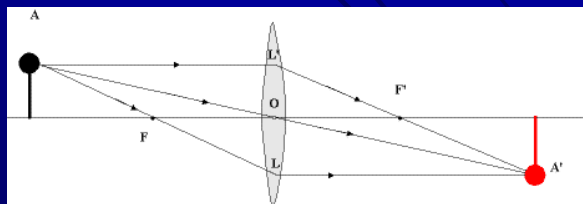
- A chaque passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 le rayon lumineux va modifier sa vitesse ce qui va entraîner une modification de sa direction de propagation: c'est la **réfraction**

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

(Snell-Descartes)



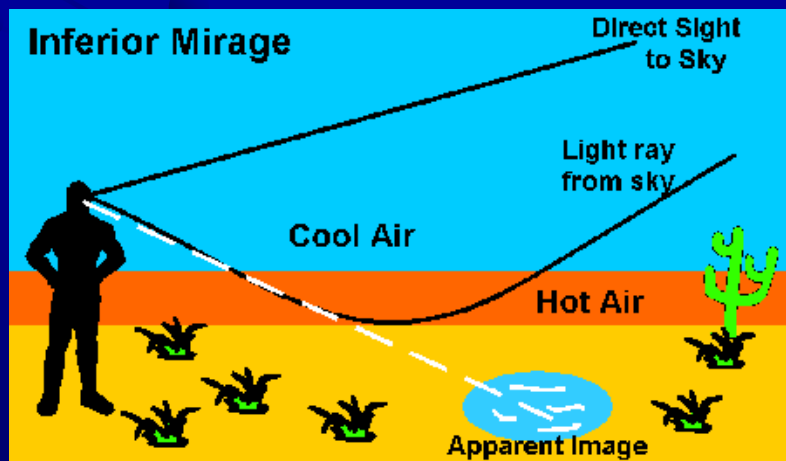
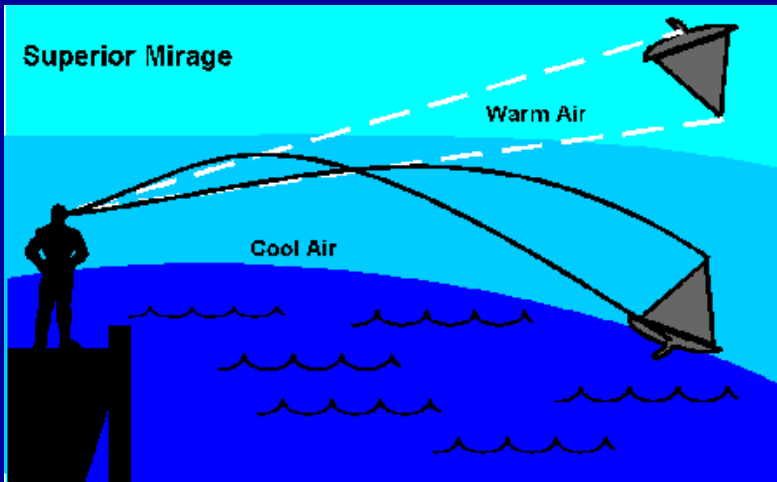
?



Construction d'une image

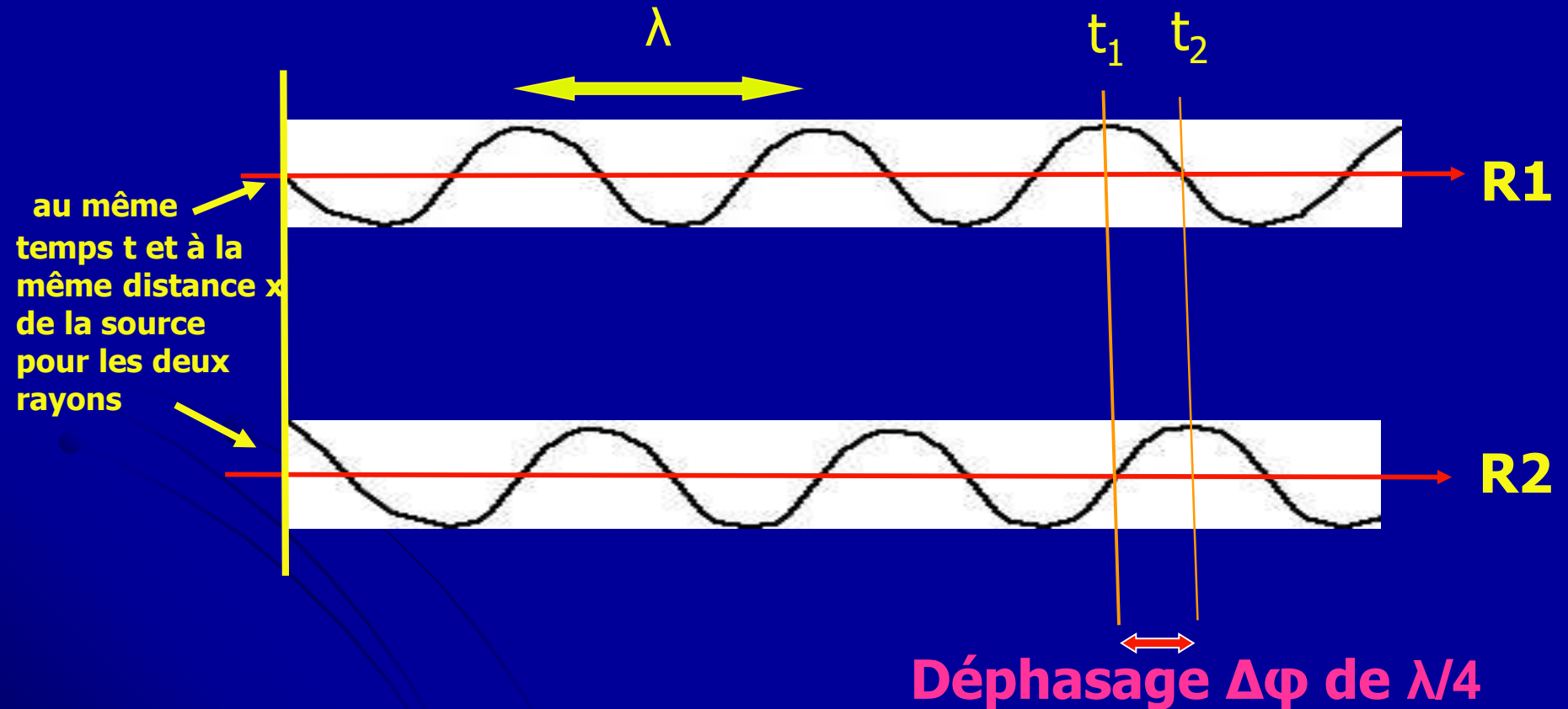
Mirages = variation continue de l'indice entre l'objet et l'œil de l'observateur

→ 2 types de mirage suivant la disposition des couches chaudes/froides



Notion de déphasage entre deux rayons lumineux

Soient 2 rayons R1 et R2 issus d'une même source lumineuse:

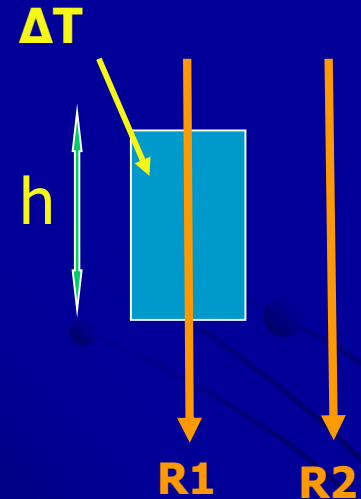


Au même instant on n'est pas au même endroit sur l'onde \rightarrow les vibrations lumineuses des deux rayons ne sont pas en phase

Application numérique : l'atmosphère

- Ce sont les modifications de la vitesse de propagation dues aux variations d'indice qui vont induire le déphasage $\Delta\phi$ des rayons lumineux.
On a vu que pour l'air les variations d'indice sont principalement dues aux variations ΔT de la température

→ formule de Rayleigh pour $\lambda = 550 \text{ nm}$ (vert-bleu-sensibilité max de l'œil) :



Déphasage entre R1 et R2 : $\Delta\phi = 1,1 \cdot h \cdot \Delta T \cdot 10^{-6}$

avec h = hauteur traversée et ΔT = écart de température

Exemple : $h = 1 \text{ m}$ et $\Delta T = 0,13 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta\phi = 1,1 \cdot (1\text{m}) \cdot (0,13^\circ\text{C}) \cdot 10^{-6} = 140 \text{ nm}$$

Ces 140 nm correspondent à $\Delta\phi \approx \lambda / 4$ pour $\lambda = 550 \text{ nm}$

Rmq : $\Delta\phi = \lambda / 4$ est le critère de Rayleigh: si le déphasage est supérieur à $\lambda / 4$ alors l'image donnée conjointement par les deux rayons est mauvaise (les images débordent la tache de diffraction de l'instrument)

Faisons une pause !

On a vu :

Le rayon lumineux

L'onde électromagnétique

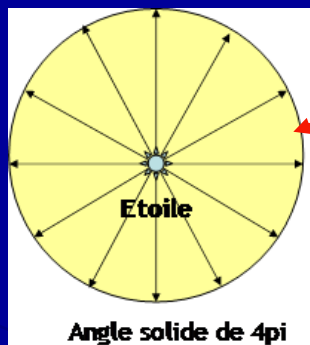
L'indice de réfraction et ses variations

Le déphasage entre deux rayons

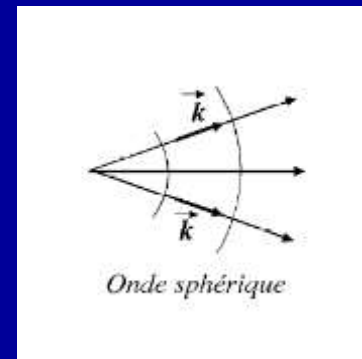
Voyons maintenant ...

La surface d'onde

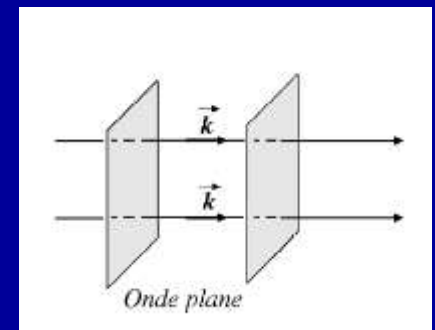
- La lumière (onde électromagnétique) émise par une étoile se répartit dans toutes les directions de l'espace (angle solide de 4π stéradians) selon une onde sphérique.
- A chaque instant les ondes sphériques sont en phase sur une surface sphérique: la surface d'onde



Surface d'onde

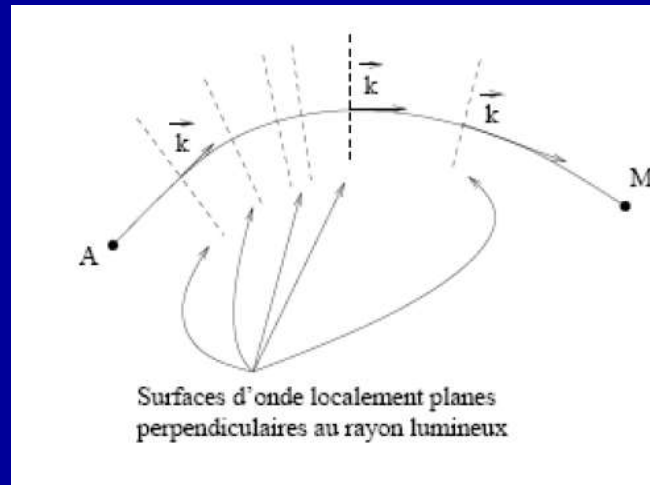


- A une distance suffisamment grande de l'étoile on peut considérer la surface d'onde comme un plan et assimiler l'onde sphérique à une onde plane: Chaque rayon lumineux est perpendiculaire à sa portion de surface d'onde



Surface d'onde et rayons lumineux

- Les rayons lumineux issus de l'étoile sont perpendiculaires à chaque point de la surface d'onde, de plus ils sont **en phase** sur la surface d'onde



- En haut de l'atmosphère la surface d'onde de lumière issue de l'étoile est **plane** et les rayons lumineux sont tous **parallèles** entr'eux et **en phase**



Rayon lumineux provenant de l'étoile

Surface d'onde plane

Déformation d'une surface d'onde

- Si certains rayons lumineux sont ralentis ou déviés la surface d'onde initialement plane prend l'aspect d'un papier froissé, mais en chaque point du « papier froissé » le rayon lumineux est perpendiculaire à sa portion de surface d'onde



« surface d'onde plane »

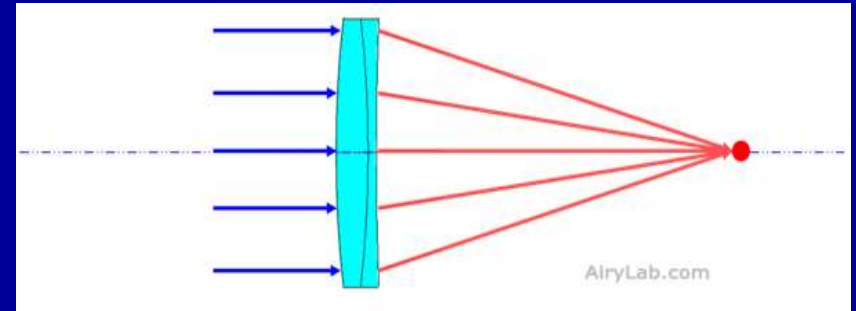
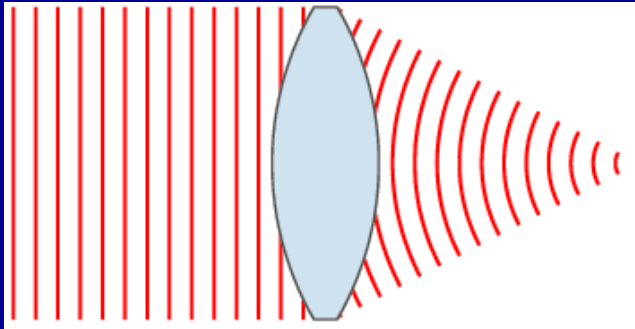


« surface d'onde déformée »

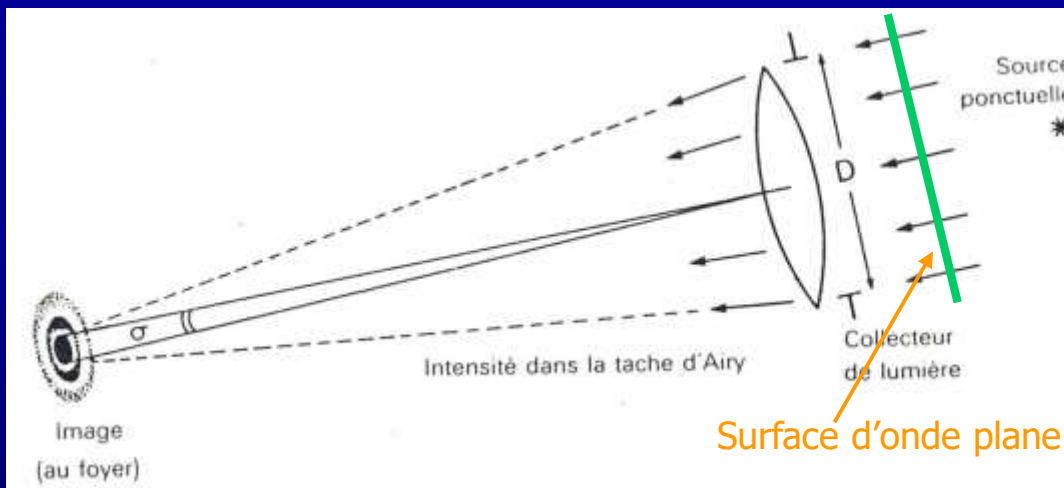
Analogie « Papier »

- Quand les rayons lumineux traversent des inhomogénéités de parcours la surface d'onde se déforme : elle n'est plus plane
 - elle se « cabosse »

Quel est l'aspect de l'image parfaite d'une étoile dans un télescope ?

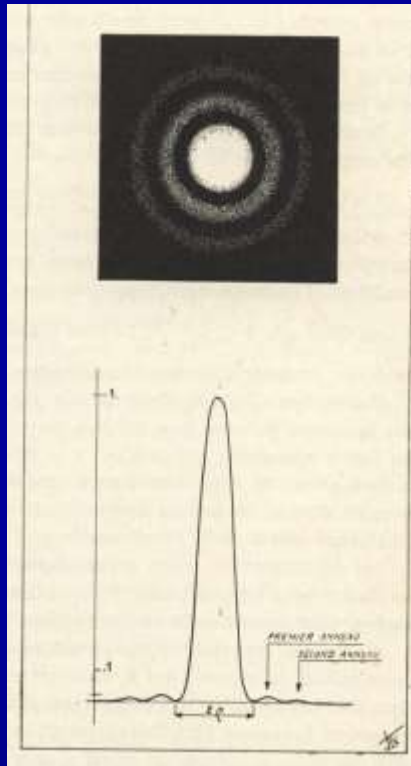


→ l'image d'une étoile donnée par un télescope est la **tache d'Airy** (due à la diffraction de la surface d'onde à travers la pupille d'entrée D)



$\sigma = 2,44 \lambda / D$ (en radian)
 $\sigma = 28 / D$ cm (en " d'arc)
(pour le visible)

La taille de la tache d'Airy varie avec le diamètre de l'instrument

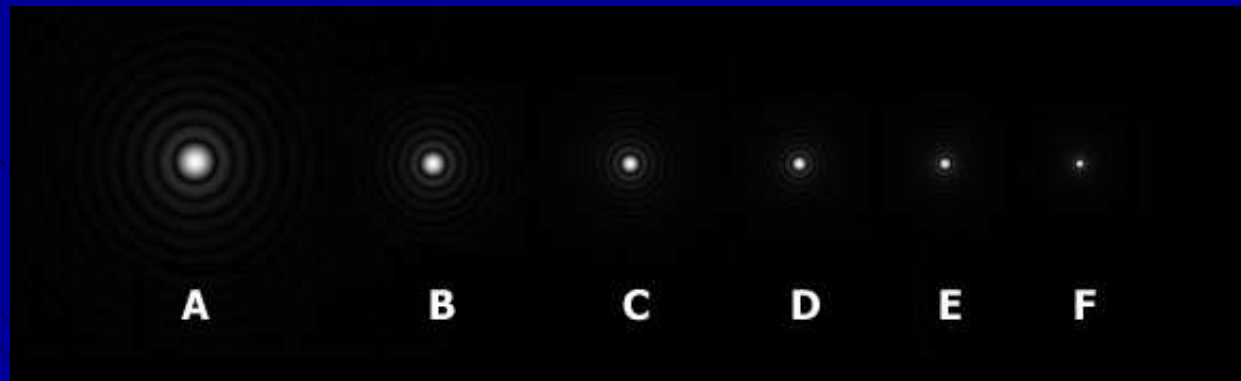
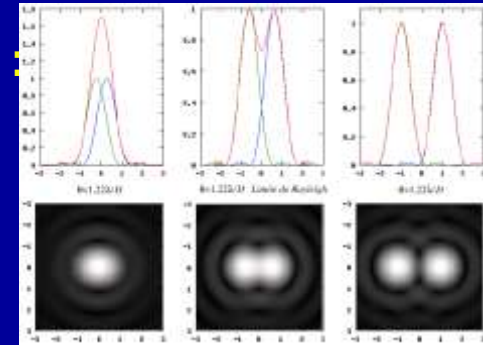


Avec un instrument parfait la tache d'Airy concentre 83,8 % de la lumière et le 1^{er} anneau 7,2 %
Le rayon du 1^{er} anneau noir est : $\rho = 1,22 \lambda / D$

Ce qui donne pour le visible ($\lambda = 550 \text{ nm}$) :

$$\rho = 14 / D \text{ cm} \quad (\rho \text{ en " d'arc})$$

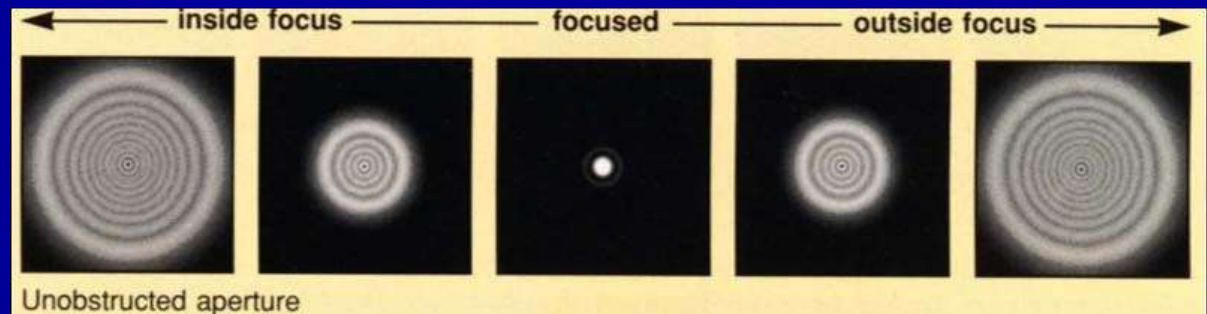
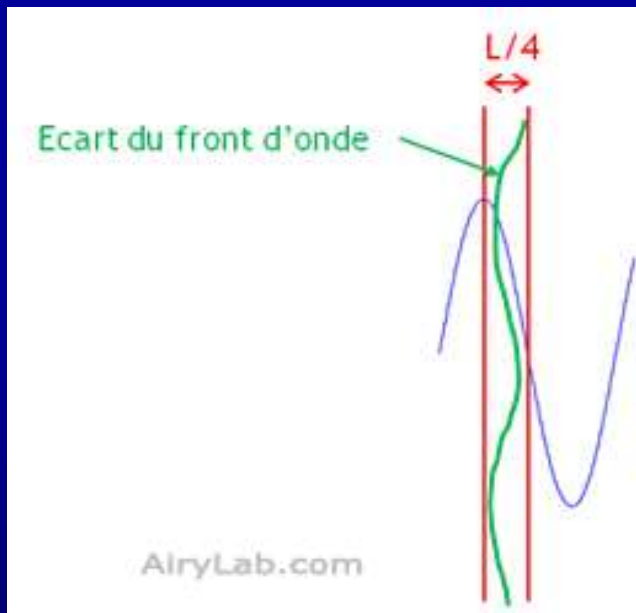
Le pouvoir séparateur de l'instrument est lié au rayon de la tache d'Airy



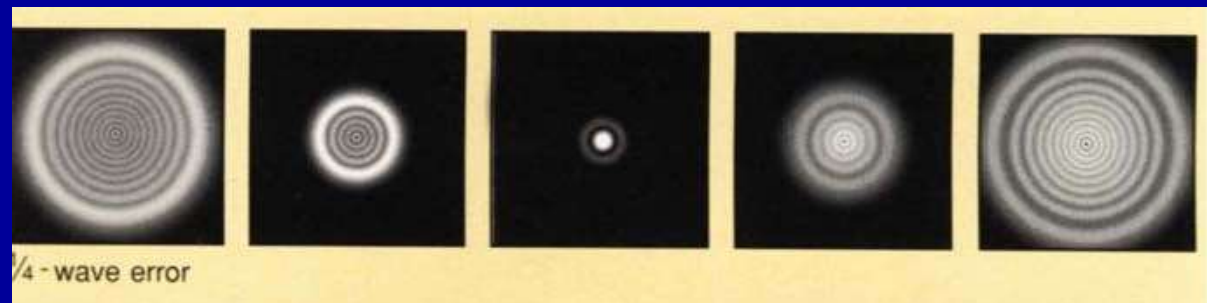
Le diamètre des instruments augmente de A vers F
→ Plus le diamètre augmente, plus la tache d'Airy est petite

Le critère de Rayleigh

Le **critère de Rayleigh** stipule que si le déphasage sur la surface d'onde (PTV) est plus faible que $\lambda / 4$ alors l'image sera peu perturbée par rapport à une image parfaite : la tache d'Airy concentrera encore 68 % de l'énergie lumineuse (au lieu de 84 %). Dans ce cas l'instrument peut encore être considéré comme limité par la diffraction → instrument « encore » parfait optiquement (la focalisation des rayons ne « déborde » pas trop la tache d'Airy)

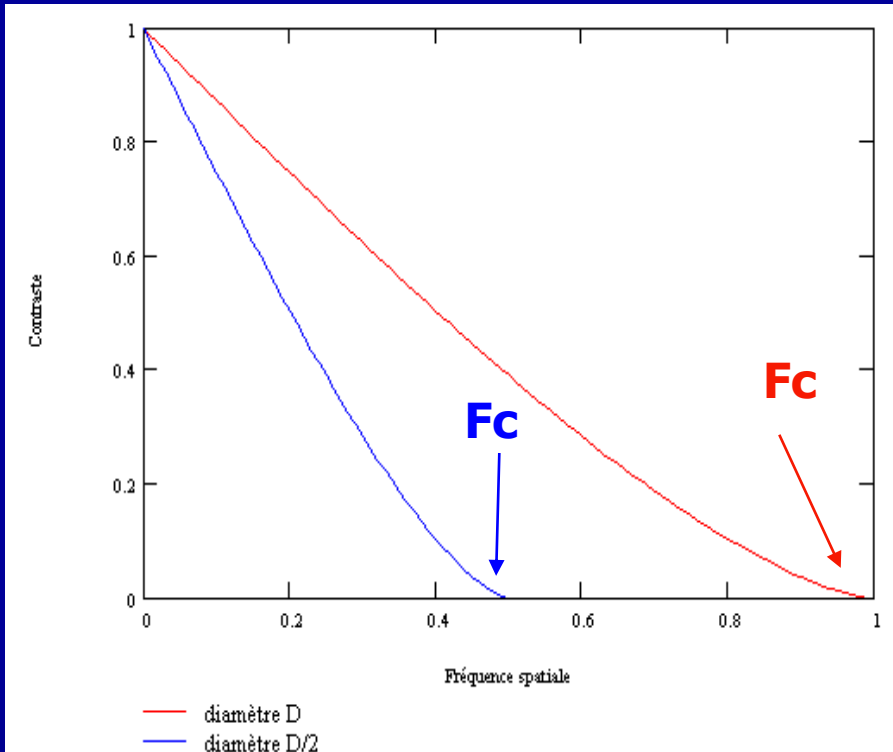


Pas de déphasage

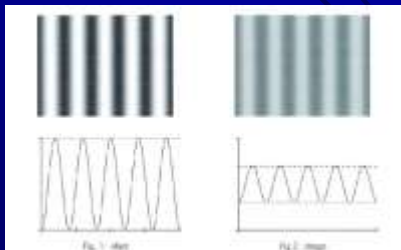


Déphasage Lambda/4

La Fonction de Transfert de Modulation (FTM) : la transmission des contrastes



La FTM traduit l'aptitude d'un objectif à transmettre les plus petits détails les moins contrastés

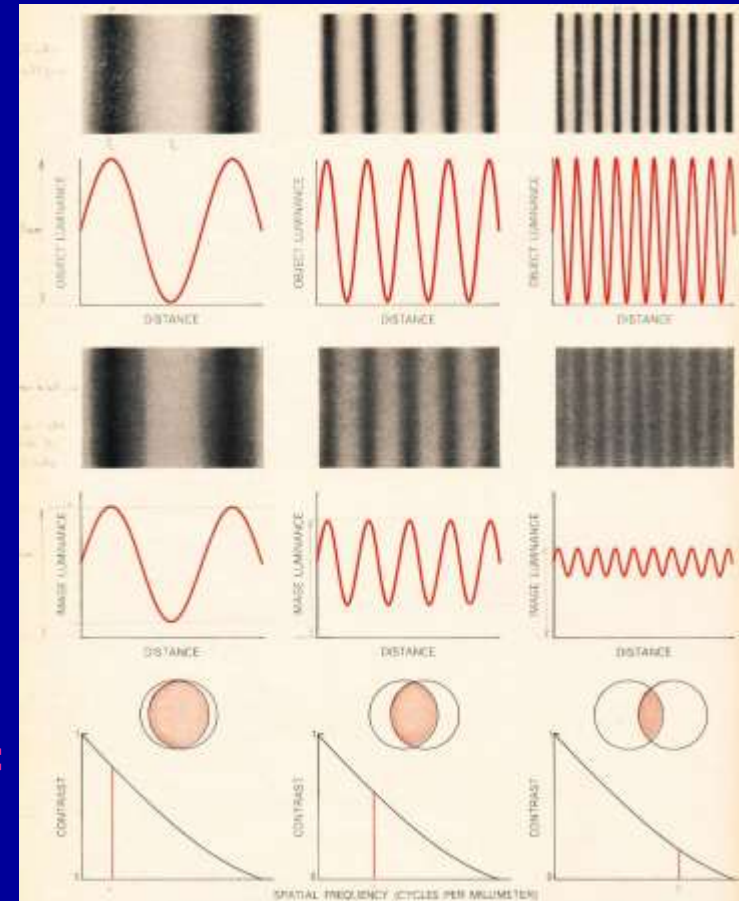


Fc = Fréquence spatiale de coupure

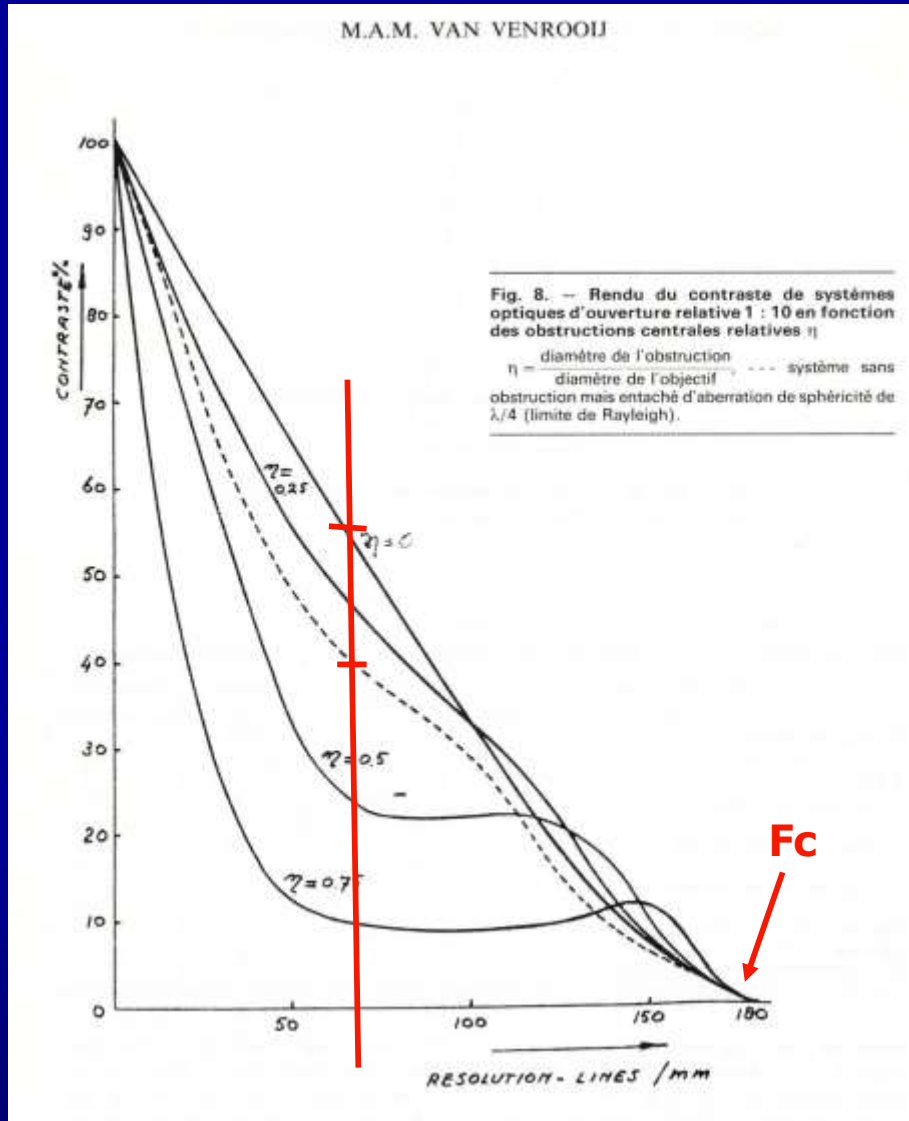
$$F_c = D / (57,3 \cdot \lambda) \text{ en cycle par degré}$$

Pouvoir séparateur : PS = 1 / Fc

→ un télescope est un filtre « passe-bas » optiquement parlant



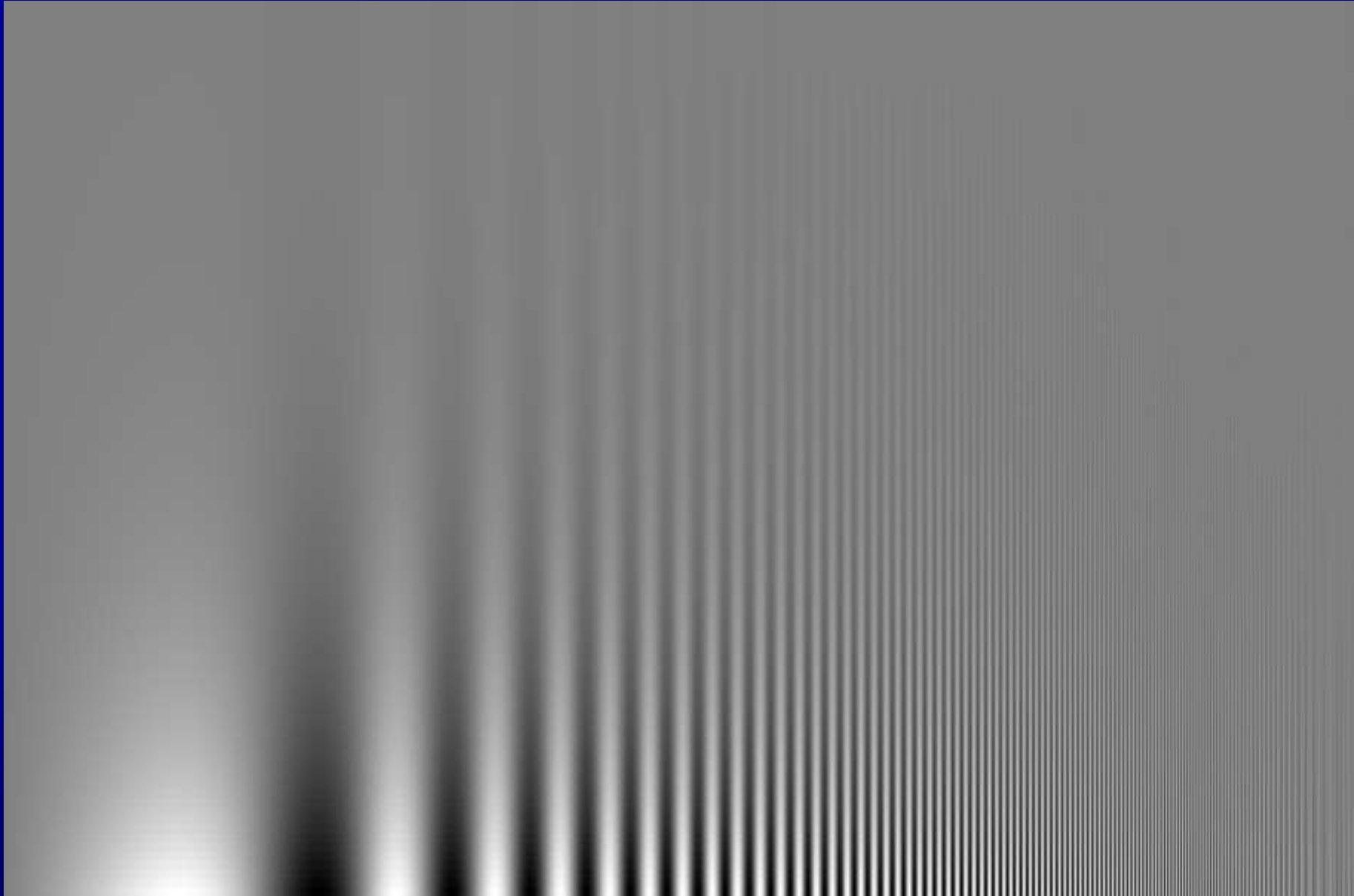
FTM et critère de Rayleigh



Sur le réseau de FTM ci-joint, la FTM relative à l'application du critère de Rayleigh apparaît en pointillé

→ Un instrument qui focalise une surface d'onde avec un déphasage de $\lambda/4$ le fait avec une perte de contraste que l'on peut estimer à 25 % pour les fréquences moyennes donc pour des objets de dimensions moyennes

L'œil possède aussi une FTM



La FTM de l'oeil

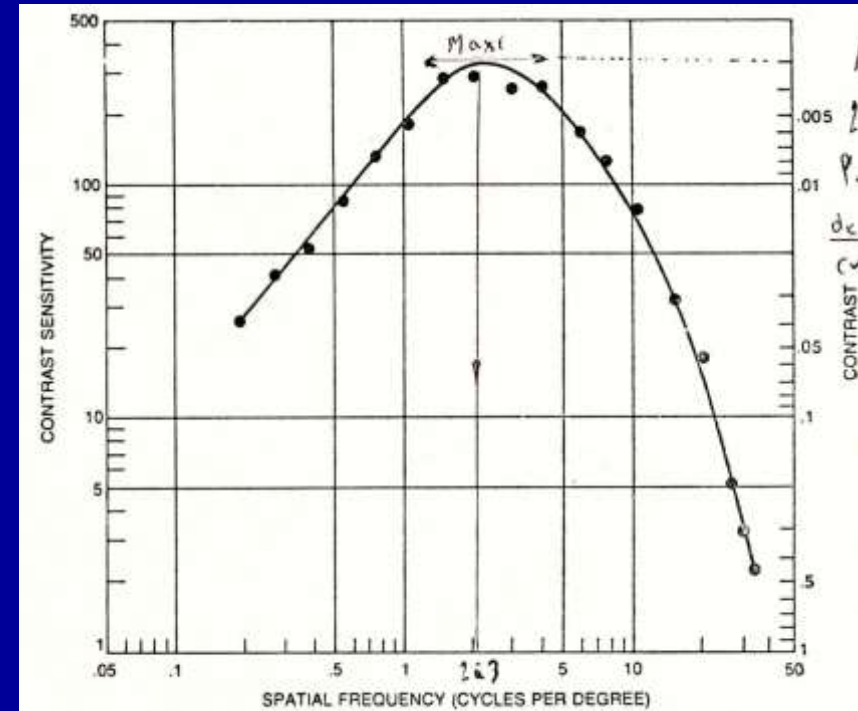
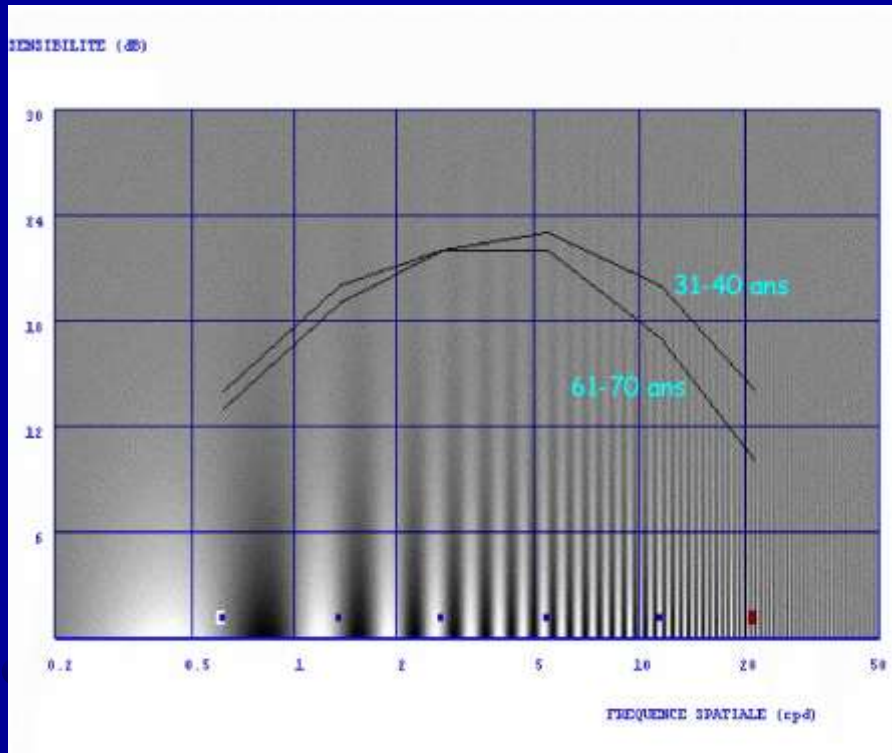


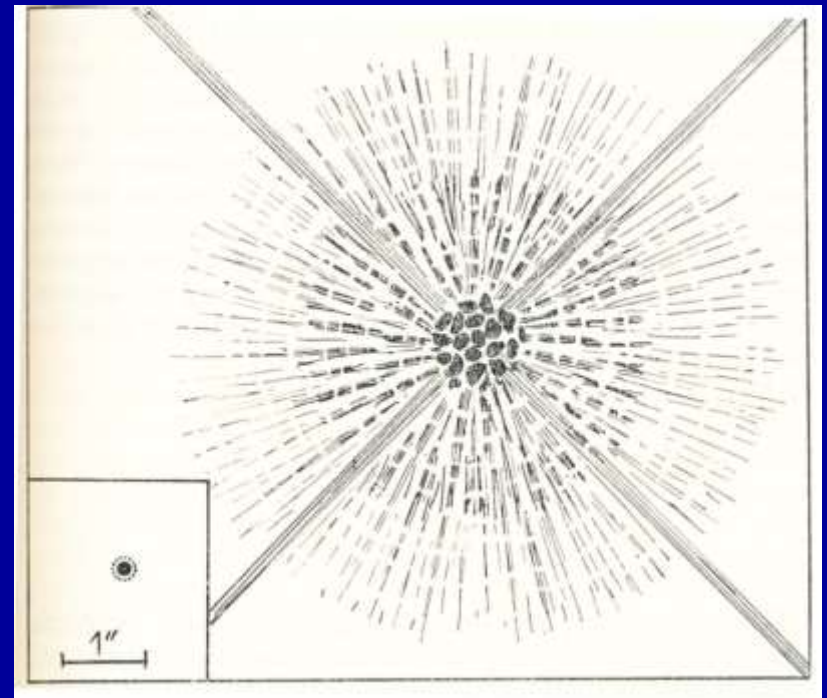
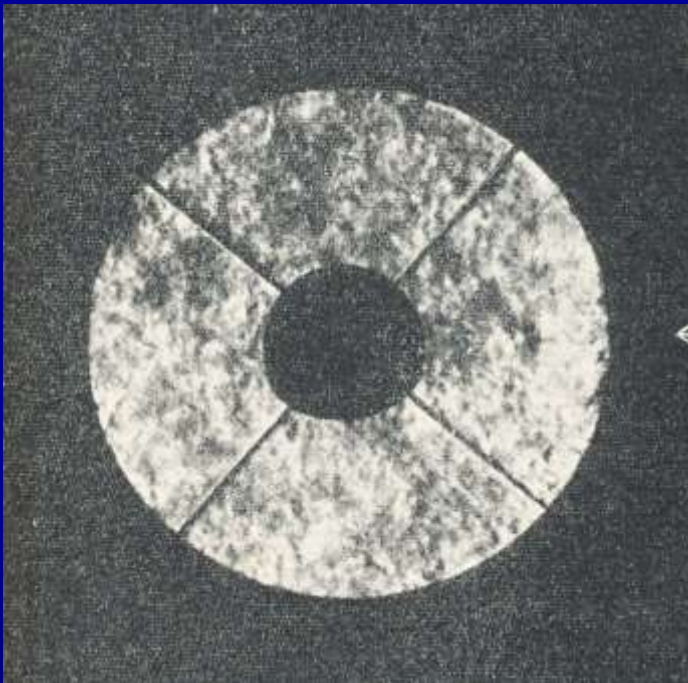
Fig. 3. — Fonction de Transfert de Modulation de l'œil humain moyen.

Avec l'âge l'aptitude de l'œil à discerner les plus faibles contrastes diminue

Fc de l'œil : $D = 2\text{ mm} - \lambda = 550\text{ nm}$
 $F_c = (2 \cdot 10^{-3}) / (57,3 \cdot 550 \cdot 10^{-9}) = 63\text{ cycles par degré}$
 $PS = 1/F_c = 1/63\text{ degré} = 57''\text{ d'arc}$

Le maxi de l'aptitude de l'œil à discerner les plus faibles contrastes se situe à 2 cycles par degré soit un max de résolution pour un détail de dimension $1/2 = 0,5$ degré d'arc = 30 minutes d'arc

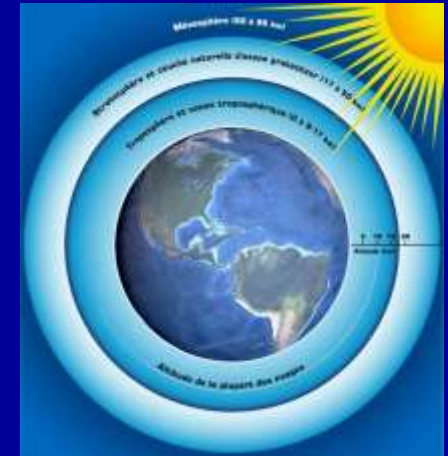
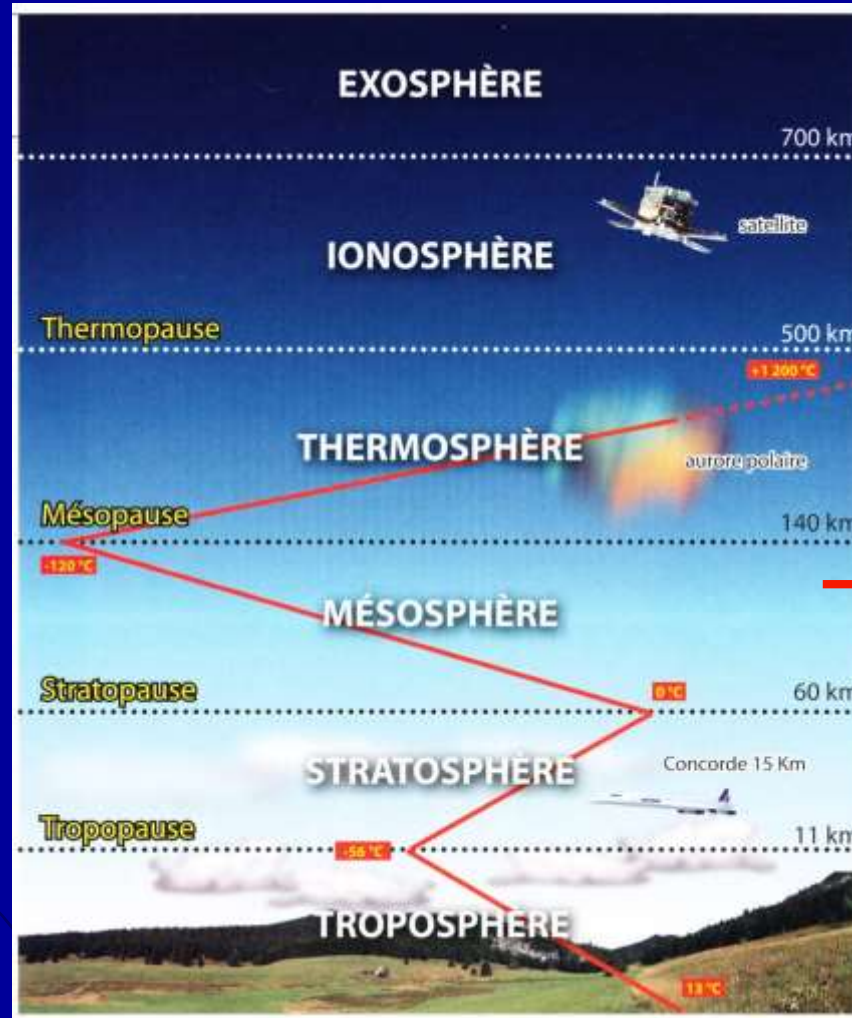
Nous sommes maintenant optiquement armés pour comprendre l'effet de la turbulence atmosphérique



les Basiques en Météorologie



L'atmosphère



L'espace commence à 100km au dessus de la surface du sol (Limite de Karman = limite conventionnelle astronautique)

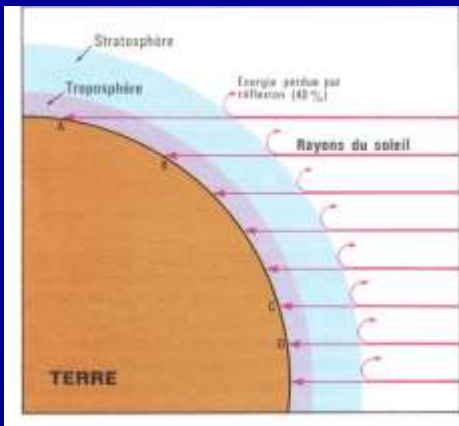
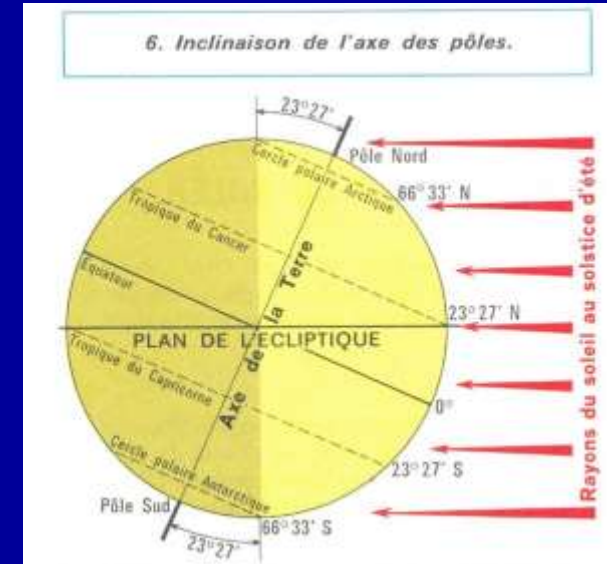
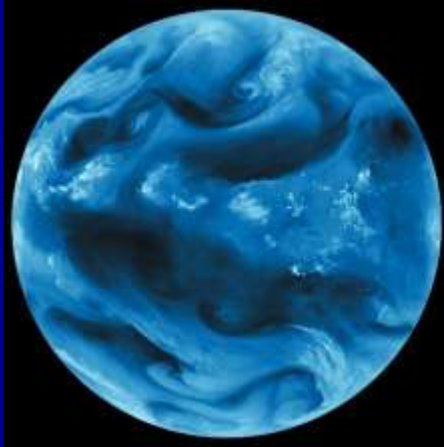
Masse = 5×10^{15} T
(1/1 200 000
Masse Terre)

78 % vol Azote
21% Oxygène
1% argon
392 ppm CO²

Eau = $1,3 \times 10^{13}$ T
3 cm d'eau
liquide

→ C'est dans la **troposphère** que se situe la « turbulence »

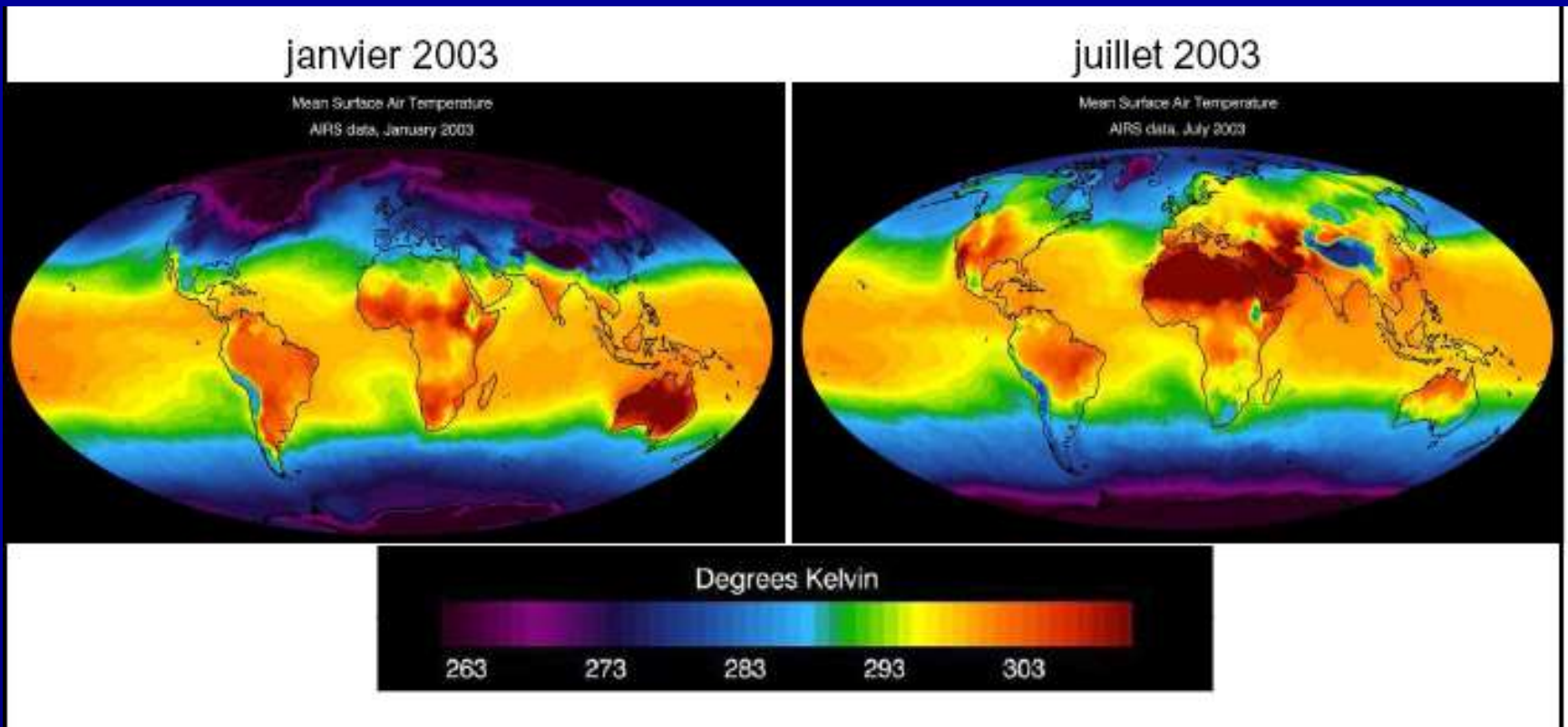
Comment « fonctionne » la troposphère (80 % de l'atmosphère)



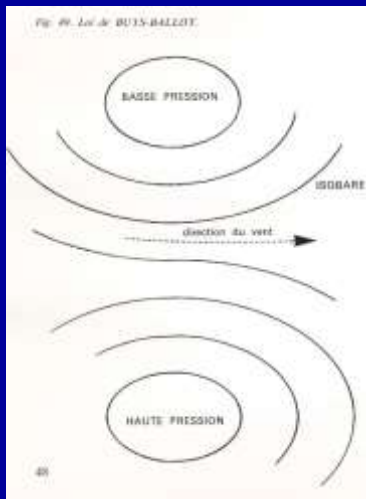
La troposphère est une immense machine thermique qui fait passer l'excès de chaleur reçue au niveau de l'équateur vers les pôles qui sont en déficit de chaleur.

Ce transfert est basé sur l'existence de « cellules thermiques »
Cette machine thermique est en rotation avec la Terre

La machine thermique « Atmosphère » répartit les températures à la surface de la Terre



Les conséquences du transfert thermique



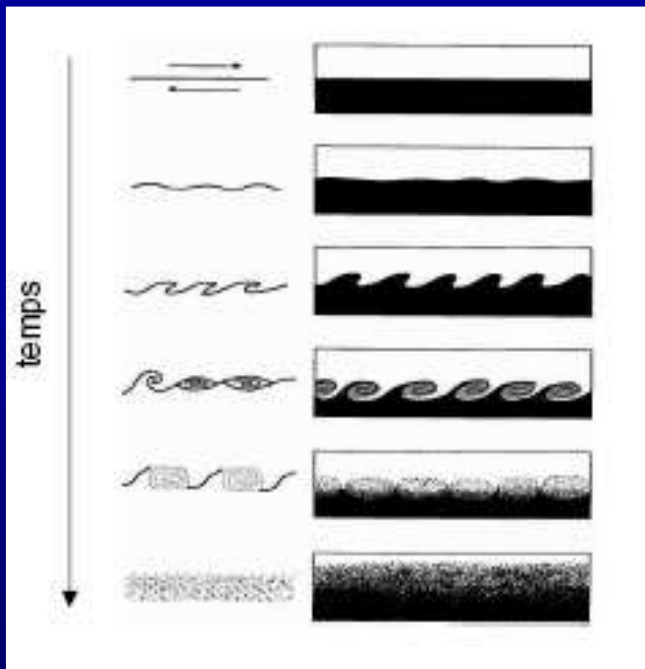
- Le transfert thermique va imposer le déplacement de masses d'air de températures différentes ce qui va entraîner une répartition des pressions à la surface de la Terre

(en gros : air chaud léger qui monte = B P dépression et air froid lourd qui descend = H P anticyclone)

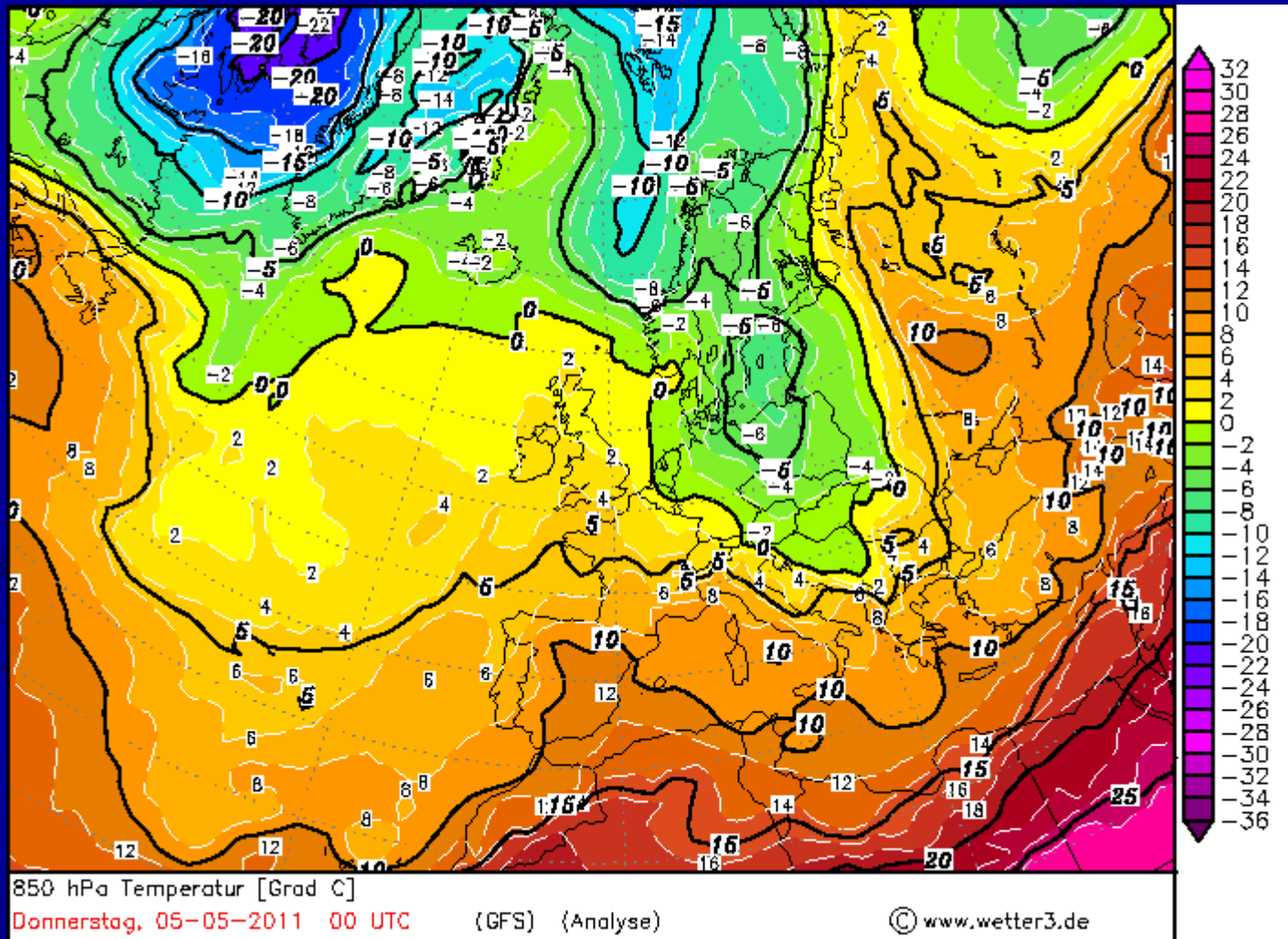
- La répartition des pressions va faire apparaître la répartition des vents :

→ Ce sont les vents géostrophiques (vents résultant de l'équilibre entre gradients de pression et force de Coriolis)

- Dans les différentes couches de l'atmosphère ces vents vont provoquer des cisaillements et donc de la turbulence (idem vagues à la surface de la mer)
- La turbulence va introduire des « poches d'air » de température différente des rayons. L'importance de la turbulence sera proportionnelle à la vitesse du vent



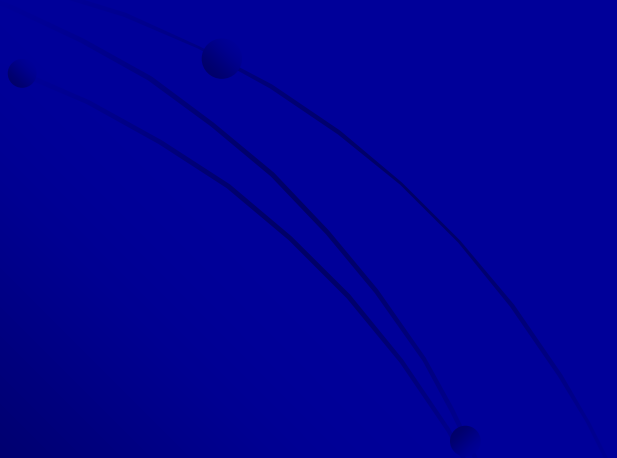
Le transfert de chaleur entraine des inhomogénéités de température



1^{er} étage de la troposphère :

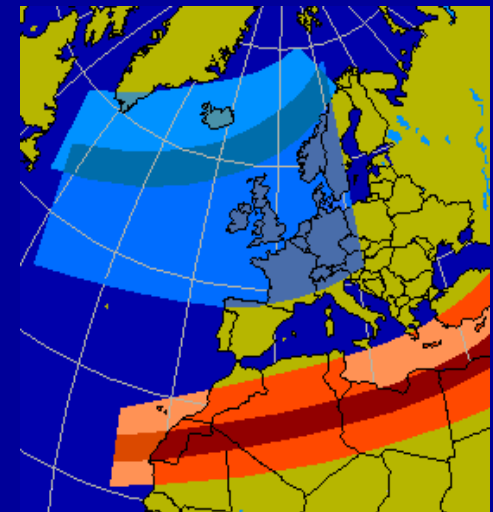
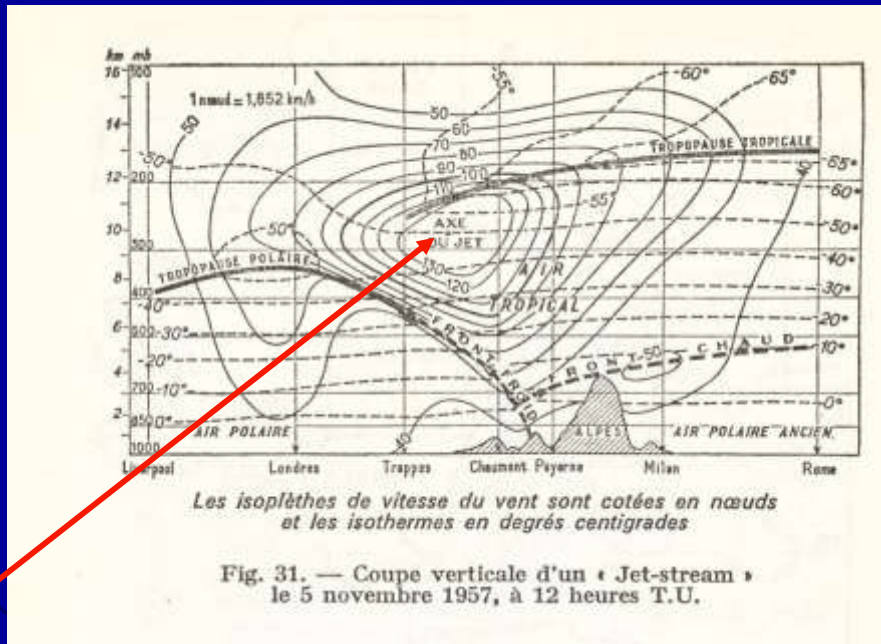
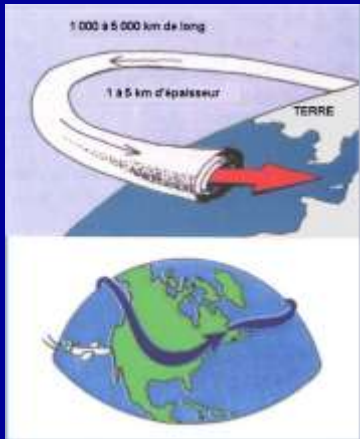
La haute troposphère

Altitude : 8 à 15 km



Le Courant – Jet (Jet-stream) polaire

Le jet-stream polaire est un tube de courant d'air violent (25 m/s à 100 m/s) de 100 km à 400 km de large qui apparaît à environ 8km/12km au-dessus du front polaire et fait le tour de la Terre selon un parcours sinueux



Jet-stream polaire

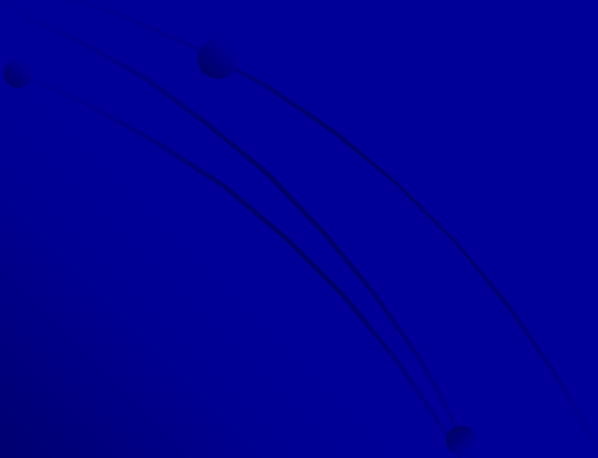
Le jet-stream polaire est celui qui concerne l'Europe de l'ouest. Son parcours est différent selon les saisons :

- Eté: au-dessus de l'Écosse
- Hiver : Sud-Angleterre-Nord de la France

Le parcours du jet-stream est appelé : l'allée des dépressions (BP) car elles sont entraînées par le Jet-stream

- Zone d'extension du jet stream polaire en été
- Zone d'extension du jet stream polaire en hiver
- Zone d'extension du jet stream subtropical
- Position moyenne du jet stream subtropical

2ème étage de la troposphère :
La troposphère intermédiaire
Altitude : 2 à 8 km



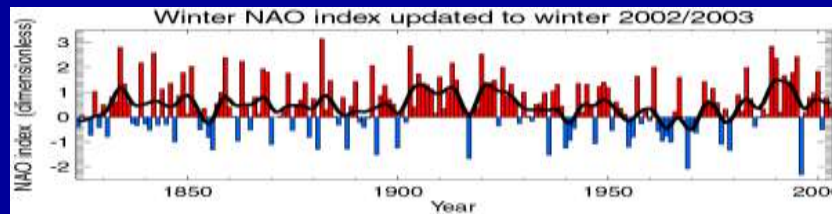
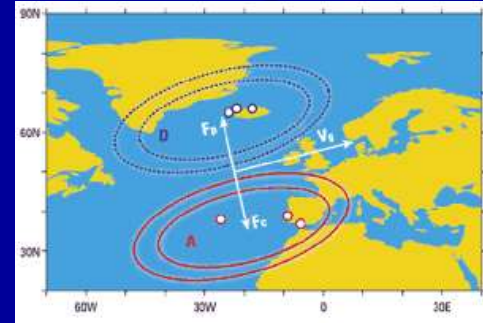
NAO : Le maître du temps en Europe de l'ouest

- **NAO = North Atlantic Oscillation**

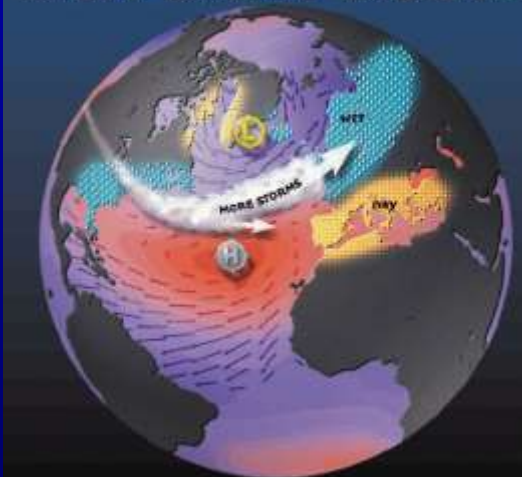
Le temps en Europe de l'ouest dépend des **deux centres actifs** :

Anticyclone des Açores (HP) et Dépression d'Islande (BP)

On définit un index NAO : différence de pression entre Reykjavik et Lisbonne (calculé par rapport aux valeurs moyennes des pressions en ces deux lieux)

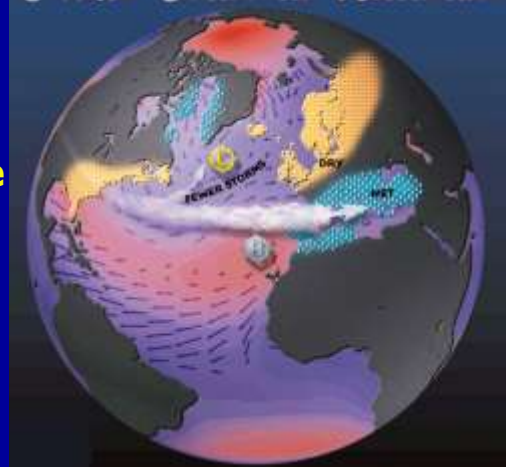


North Atlantic Oscillation



→ **NAO +**
HP Açores plus fort que la normale
Vents d'ouest forts
Temps doux, humide et venteux au Nord
Temps sec au sud

North Atlantic Oscillation

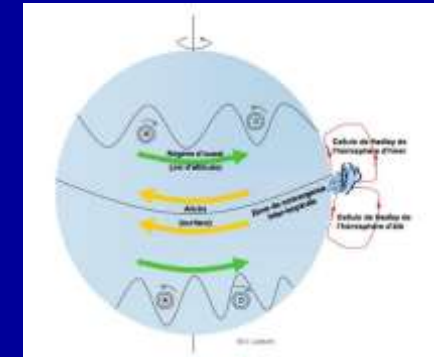
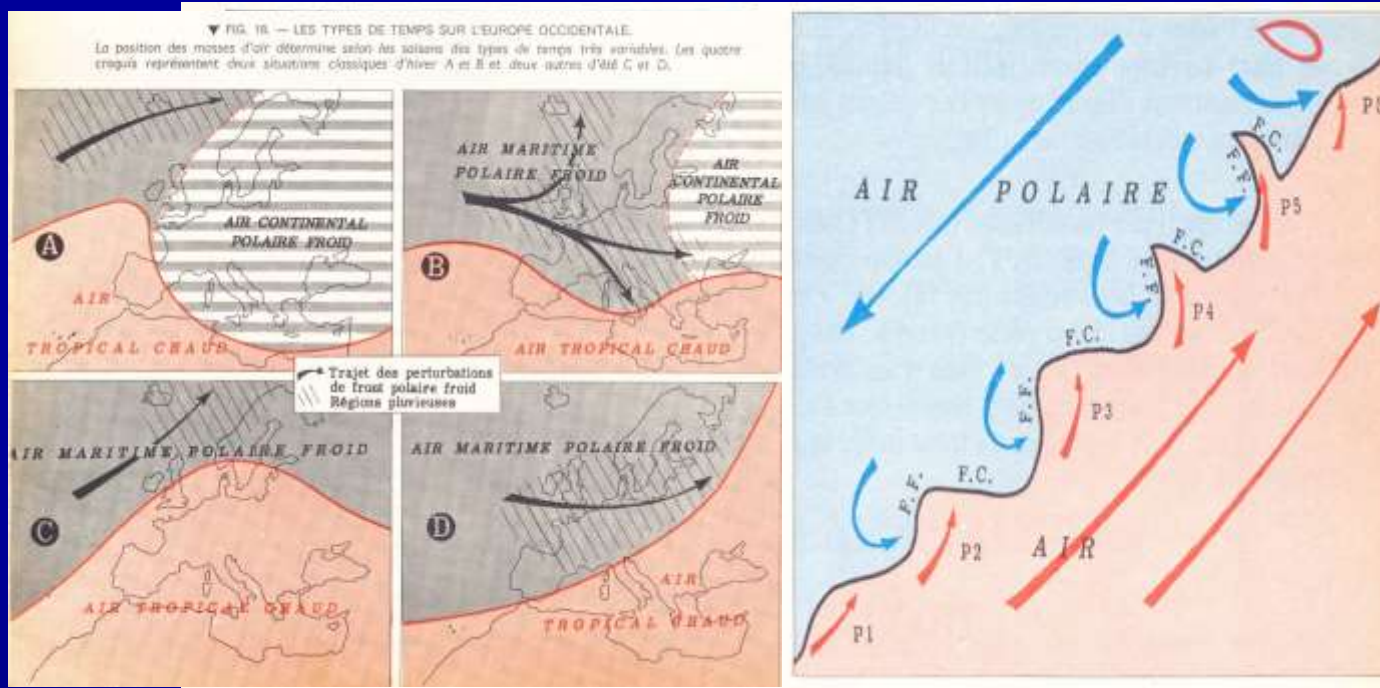


→ **NAO -**
HP Açores plus faible que la normale
Vents d'ouest faibles
Nord de l'Europe passe sous l'influence de l'anticycl. Sibérie
Hiver sec et froid au Nord
Pluie au sud
Chutes de neige

La circulation atmosphérique générale

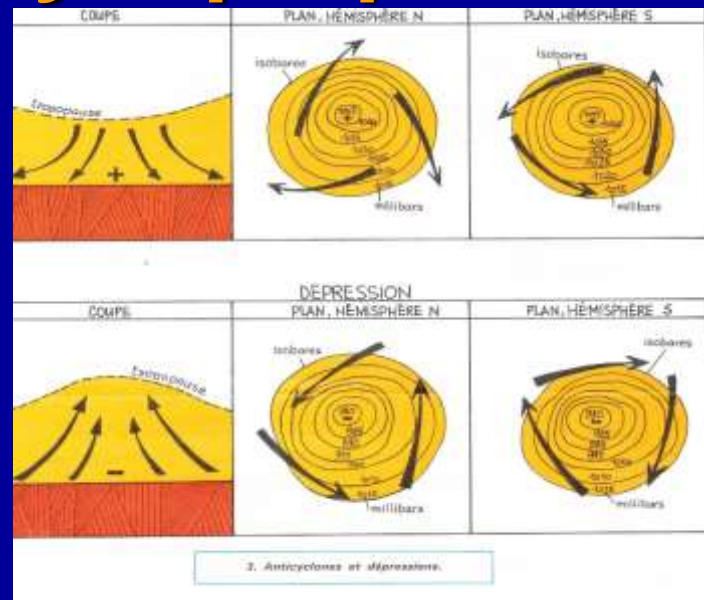
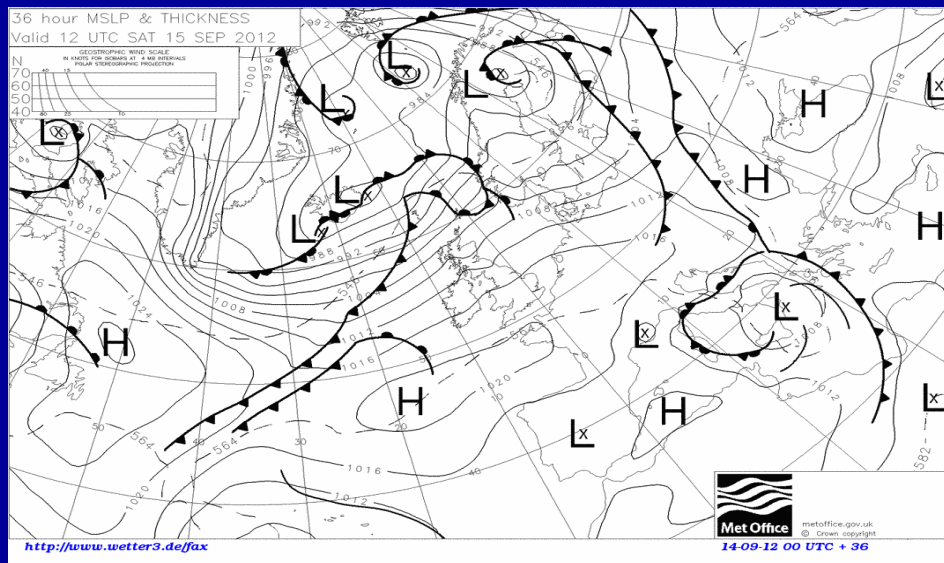
La notion de « front »

C'est la NAO qui positionne la position du front polaire et détermine la trajectoire des perturbations qui touchent l'Europe de l'Ouest.



La NAO détermine les changements de pression au sol, les températures et les variations du régime des vents d'ouest (surtout période Nov-Avril) On est dans la zone des vents qui ne dépendent que de la répartition des pressions : champ géostrophique → géopotentiel 700hPa (#3000m d'altitude)

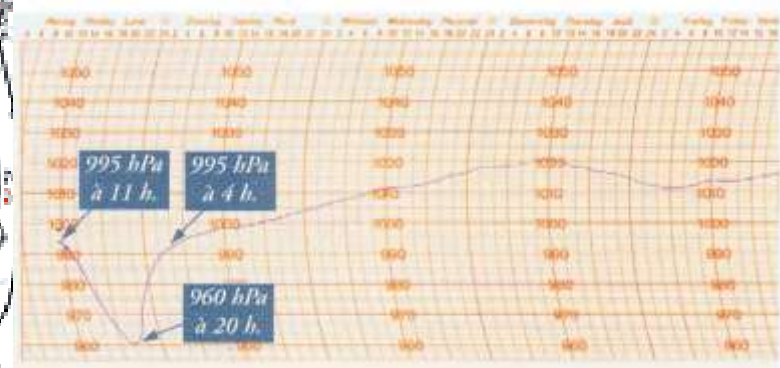
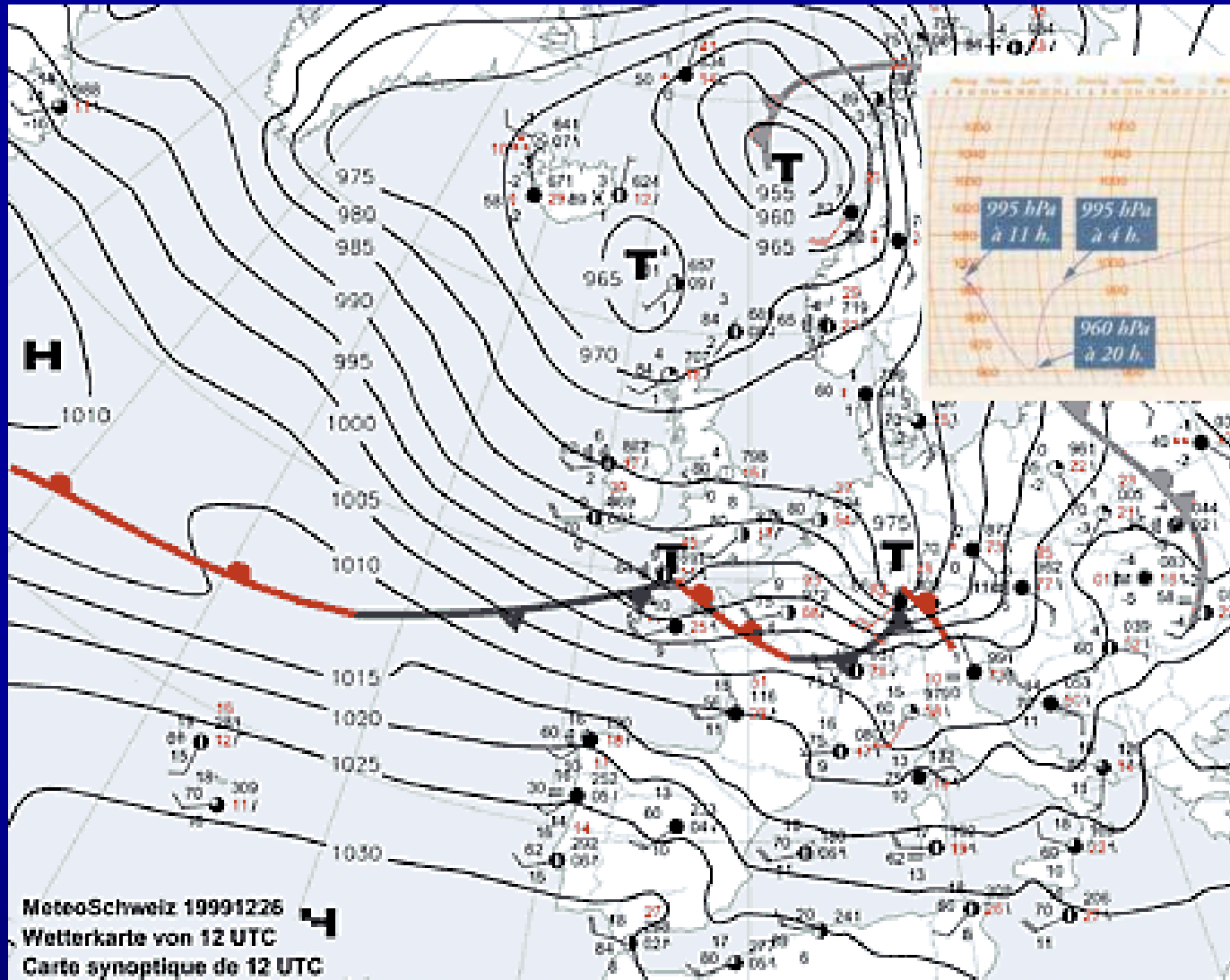
Les cartes météo synoptiques



→ **Centres d'action:**
L=BP =dépression
(mini 980mb)
(Cyclone<950mb)
H=HP Anticyclone
(maxi 1030 mb)

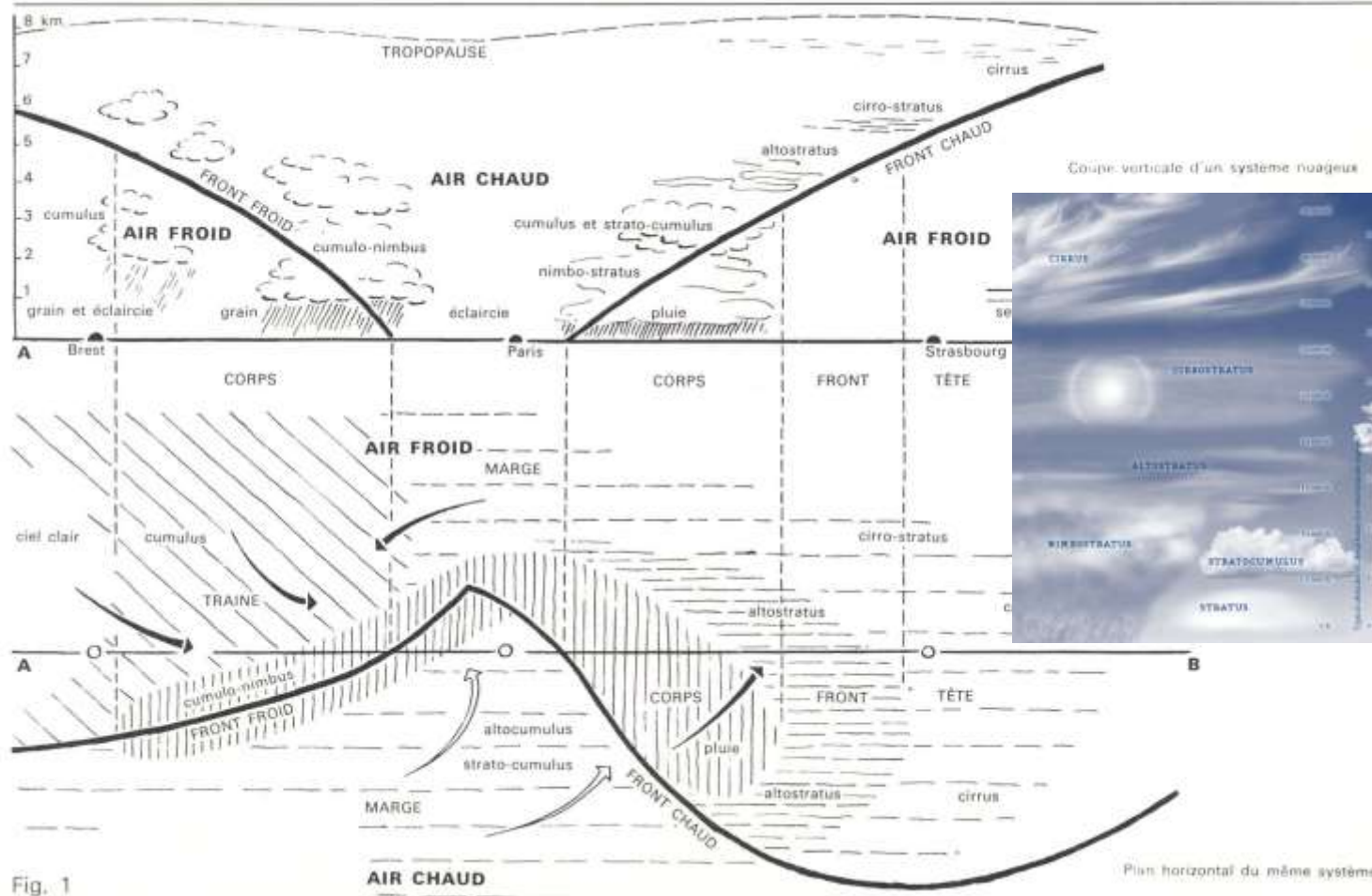
- **Centres d'action** (les vents tournent dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour d'une dépression BP dans l'hémisphère N)
- **Isobares** et leur **espacement** (les vents sont parallèles aux isobares et plus ceux-ci sont rapprochés plus le vent est fort)
- **Fronts chauds** et **Fronts Froids** séparant les masses d'air

Autre exemple : qu'en pensez-vous?



T = Tief
= Dépression
en Allemand

La troposphère agitée : la perturbation dépressionnaire

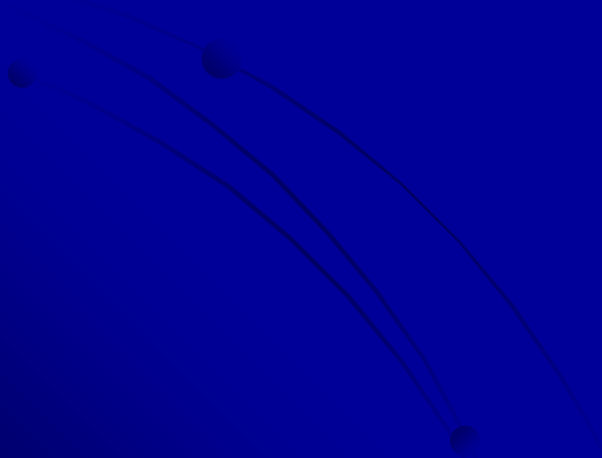


Déplacement de la perturbation

3ème étage de la troposphère

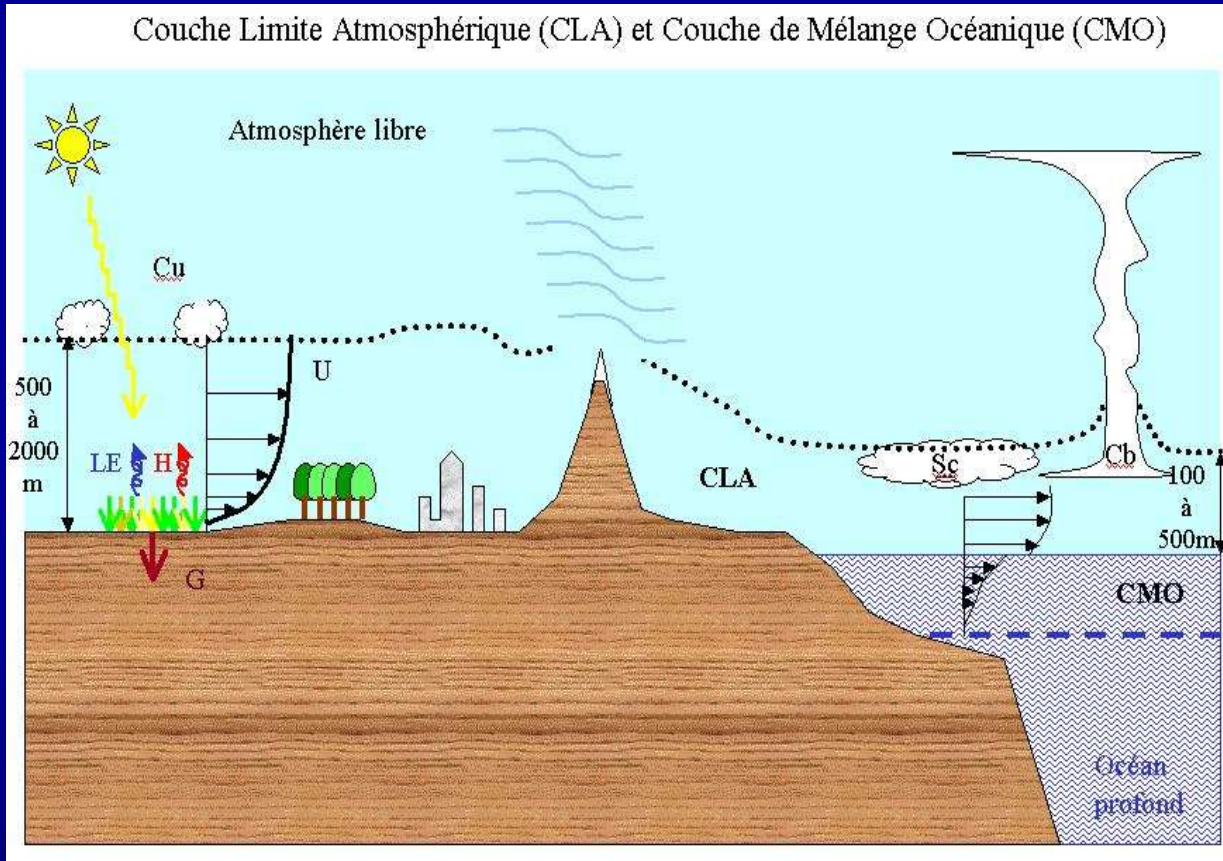
La basse troposphère :

Altitude : 0 à 2 km



La Couche Limite Atmosphérique (CLA):

→ Le frottement de l'air sur la surface de la Terre et les échanges thermiques avec le sol

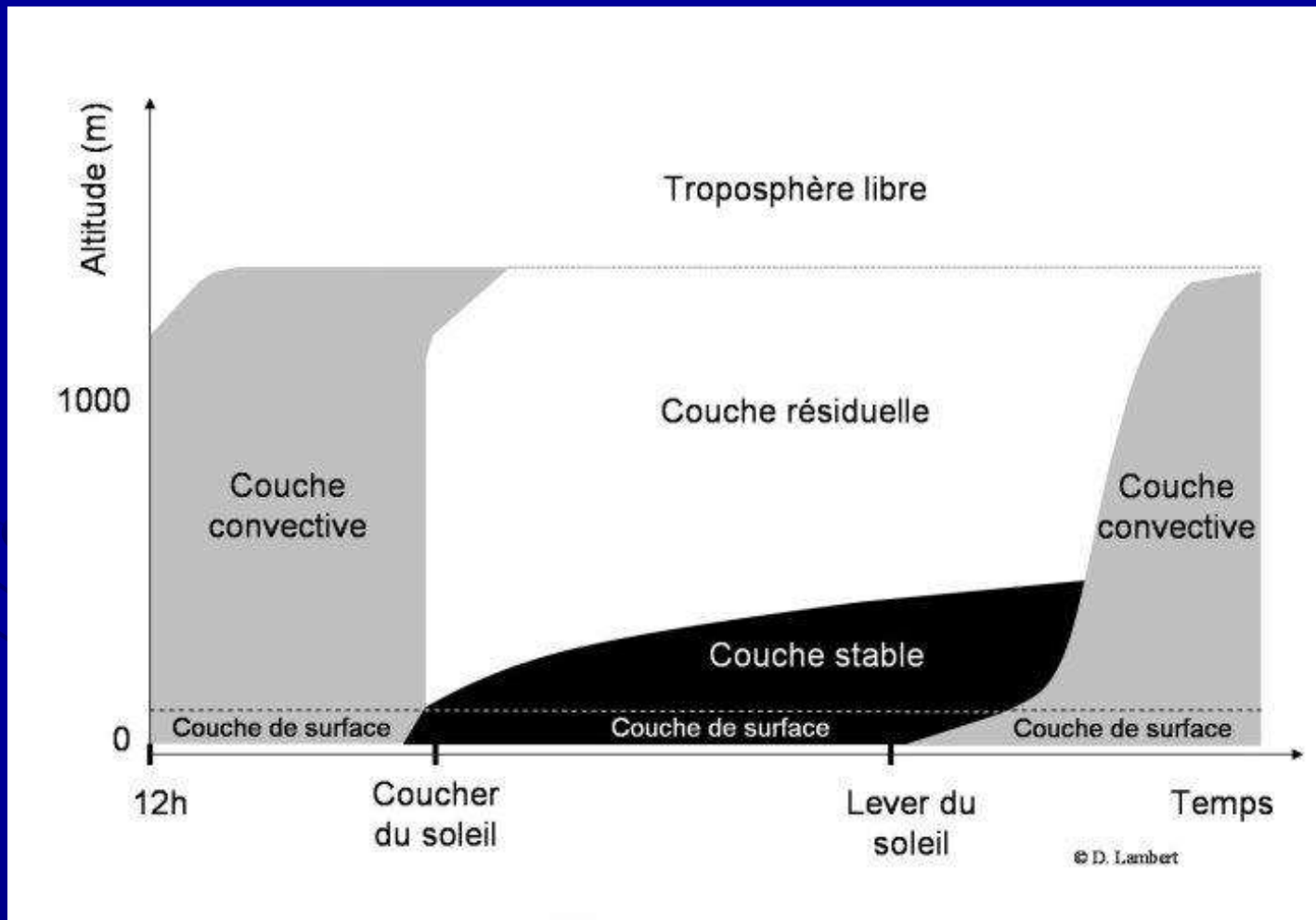


→ C'est dans cette couche que se trouve la turbulence maximale

- La CLA se termine là où commence le **champ géostrophique**, c'est-à-dire là où les vitesses ne dépendent plus que des gradients horizontaux de pression

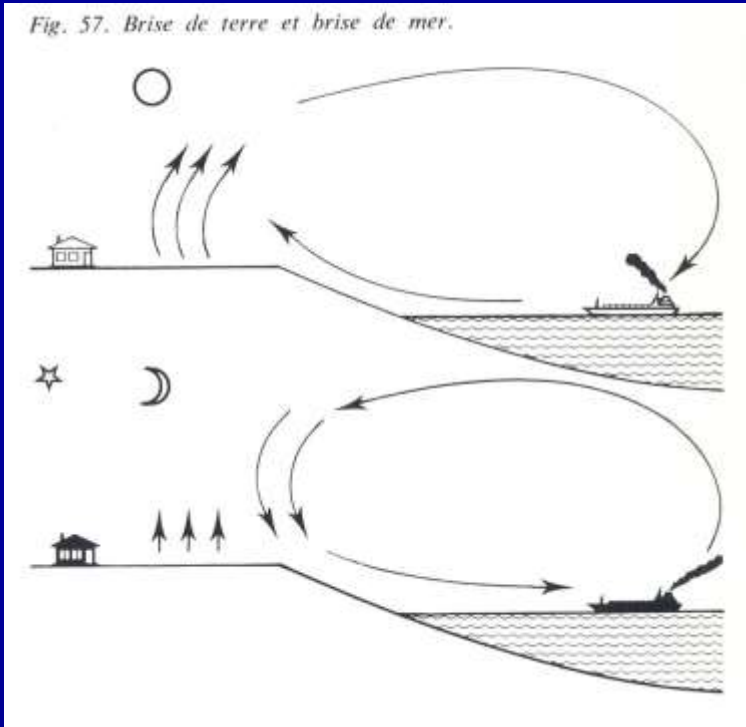
- Hauteur H de la CLA :
 $H = \pi \sqrt{(2.K(z) / f(t))}$
K(z) traduit l'effet de surface (rugosité).
Typiquement $K_{max} \# 10 \text{ m}^2/\text{s}$
f(t) est un coefficient en relation avec la diffusion $f \# 10^{-4} \text{ s}$
→ $H \# 1400 \text{ m}$ ⁴⁵

L'évolution des couches de la CLA durant 24 h



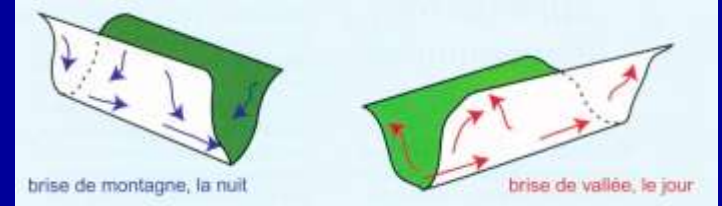
Les perturbations atmosphériques locales - 1

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

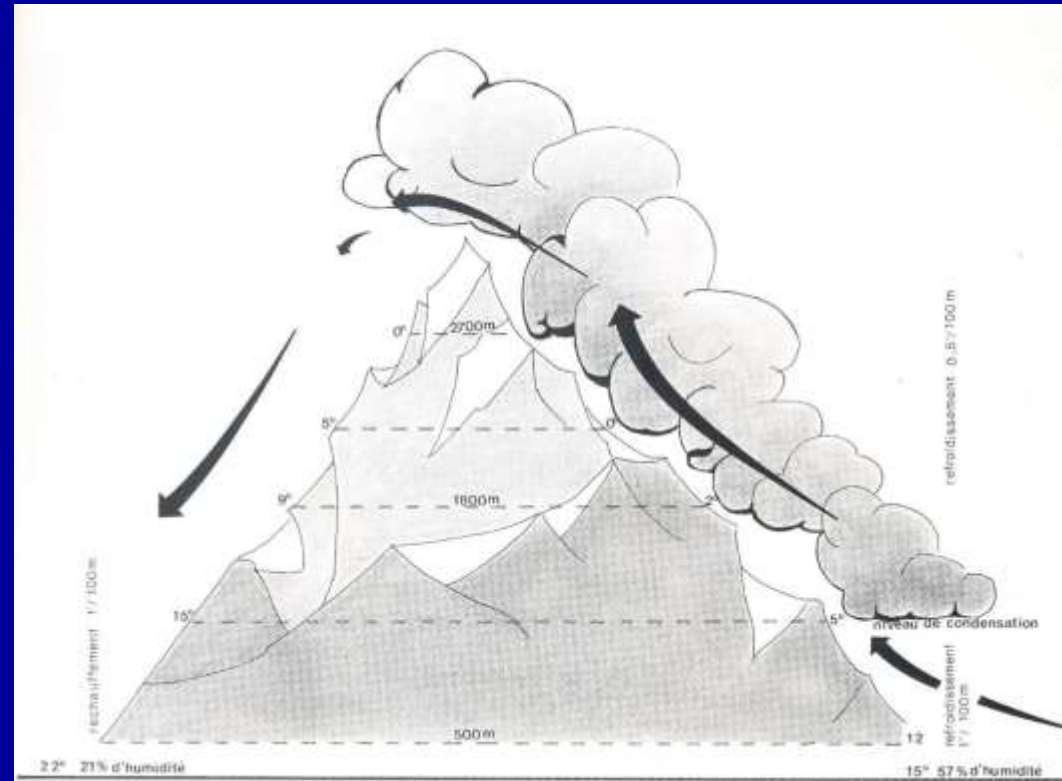


Brise de Mer/brise de Terre

Influence d'un relief



Vents de vallée : brises de montagne ou de vallée



Les perturbations atmosphériques locales - 2

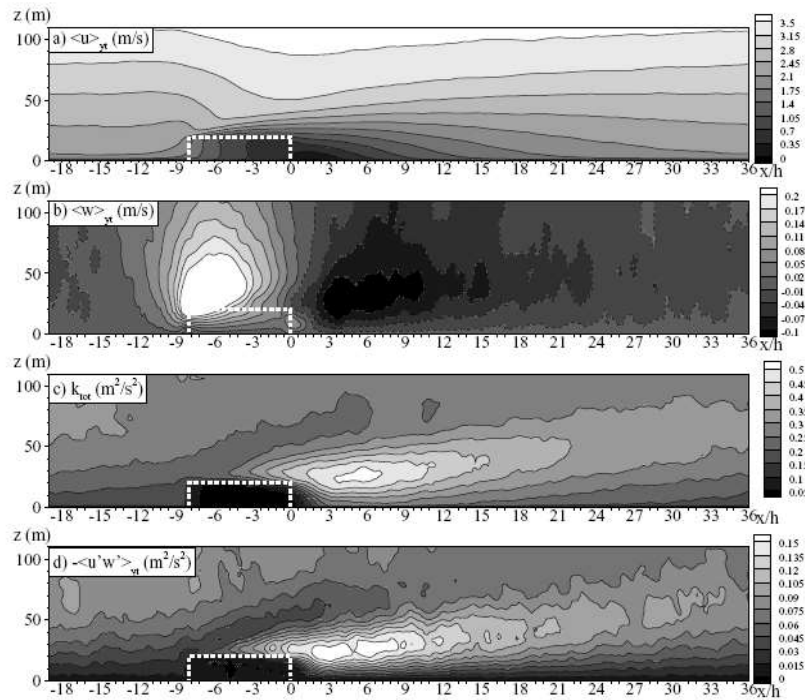
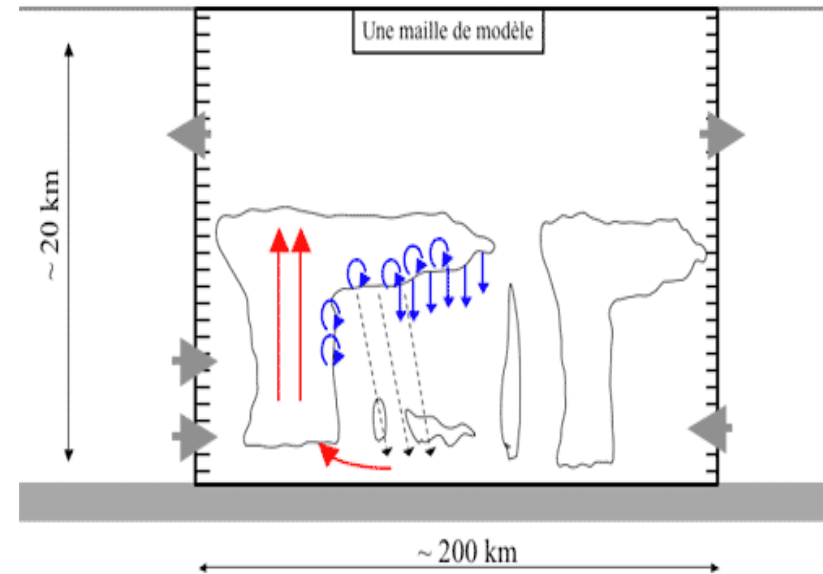


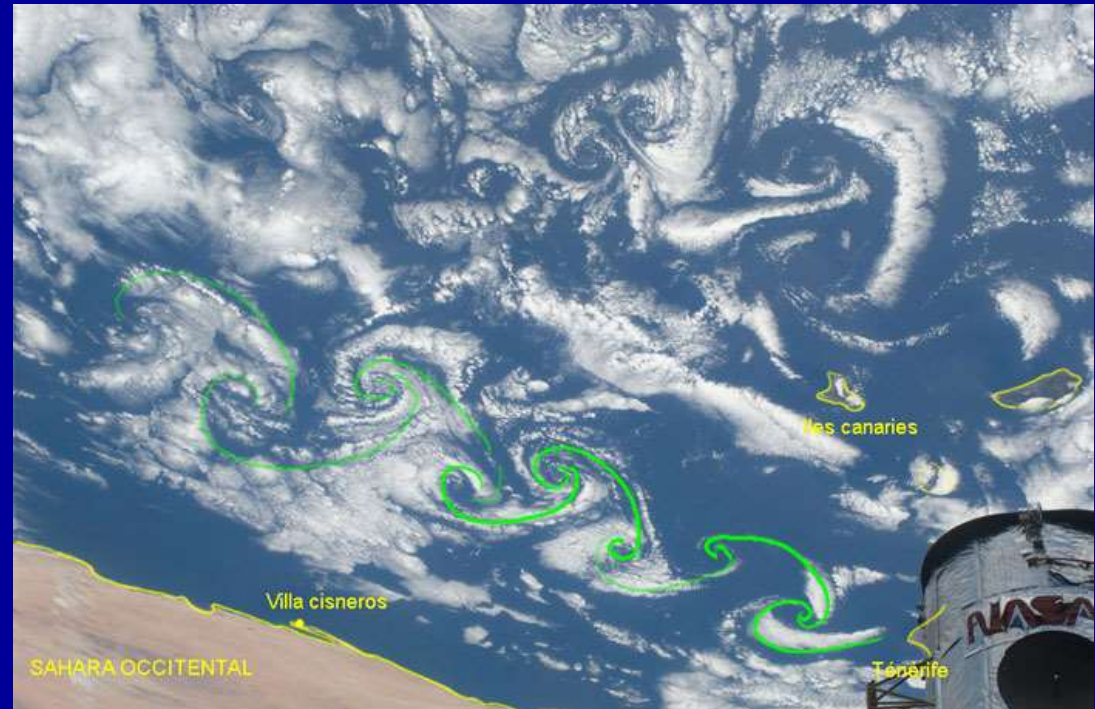
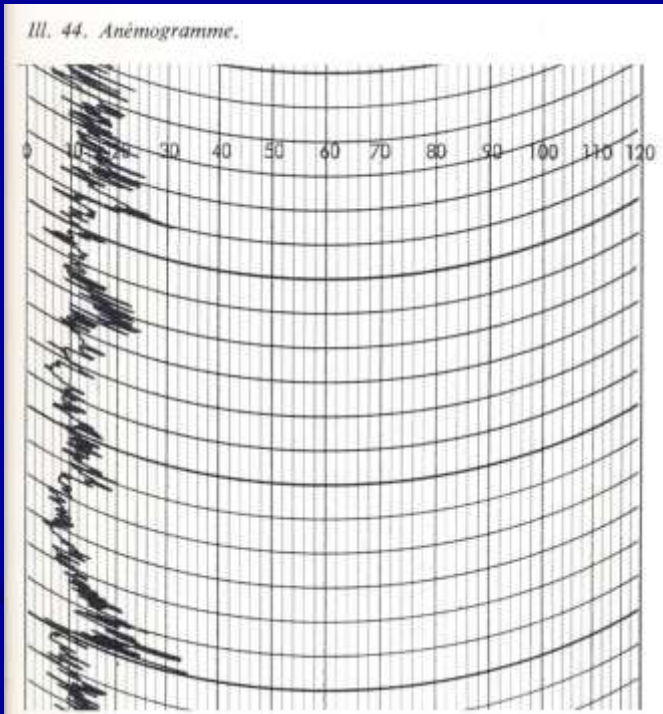
FIG. 6.2 – Ecoulement moyenné simulé en présence de la forêt : vitesse dans le sens de l'écoulement (a), vitesse verticale (b), énergie cinétique turbulente totale (c), le flux de mouvement (d). La ligne blanche pointillée indique le contour de la forêt.



Convection orageuse

Influence d'un obstacle

Les conséquences



**La vitesse du vent varie constamment
→ donc la turbulence dans les différentes couches de la troposphère varie elle-aussi**

L'atmosphère est agitée sur de grandes distances et sur de grandes hauteurs

Agitation atmosphérique → turbulence → dégradation des images



S	<i>Image d'Airy</i>					
	<i>Plus généralement</i>		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.

La turbulence modifie la surface d'onde et donc le trajet des rayons lumineux

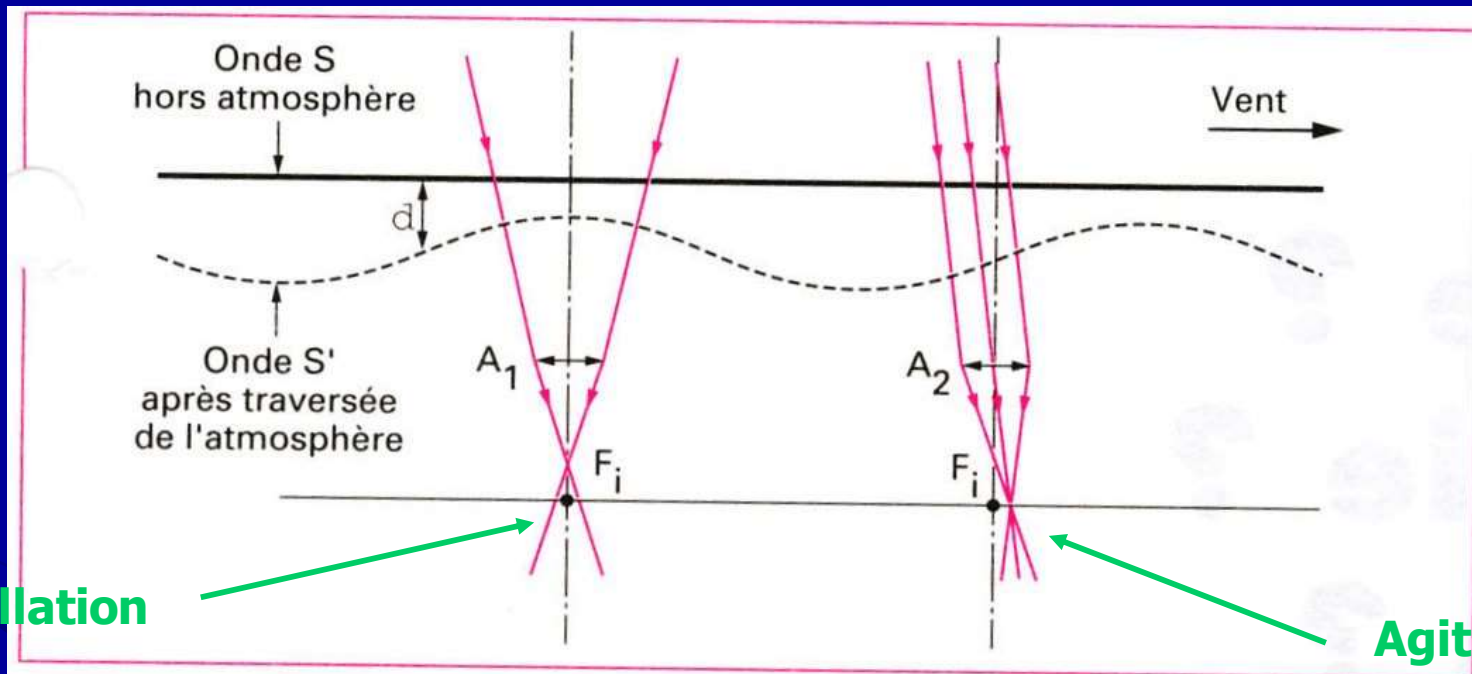
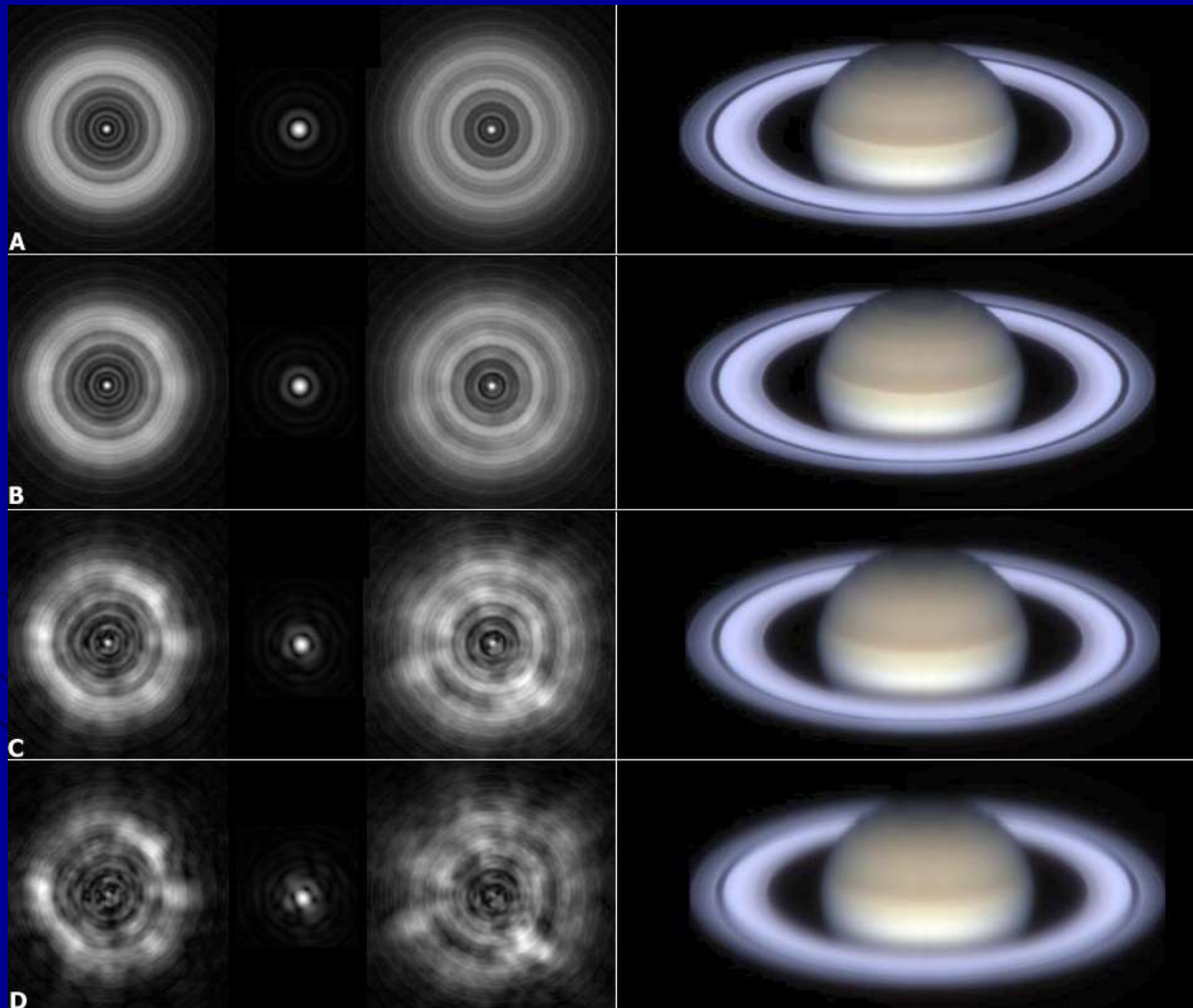


Figure 3 : Déformation d'une onde de rayonnement à la traversée de l'atmosphère. Une onde plane traversant l'atmosphère subit des altérations qui ont pour effet de défocaliser, de déplacer et/ou de déformer l'image d'une source ponctuelle. De plus, en présence de vent, ces défauts fluctuent dans le temps.

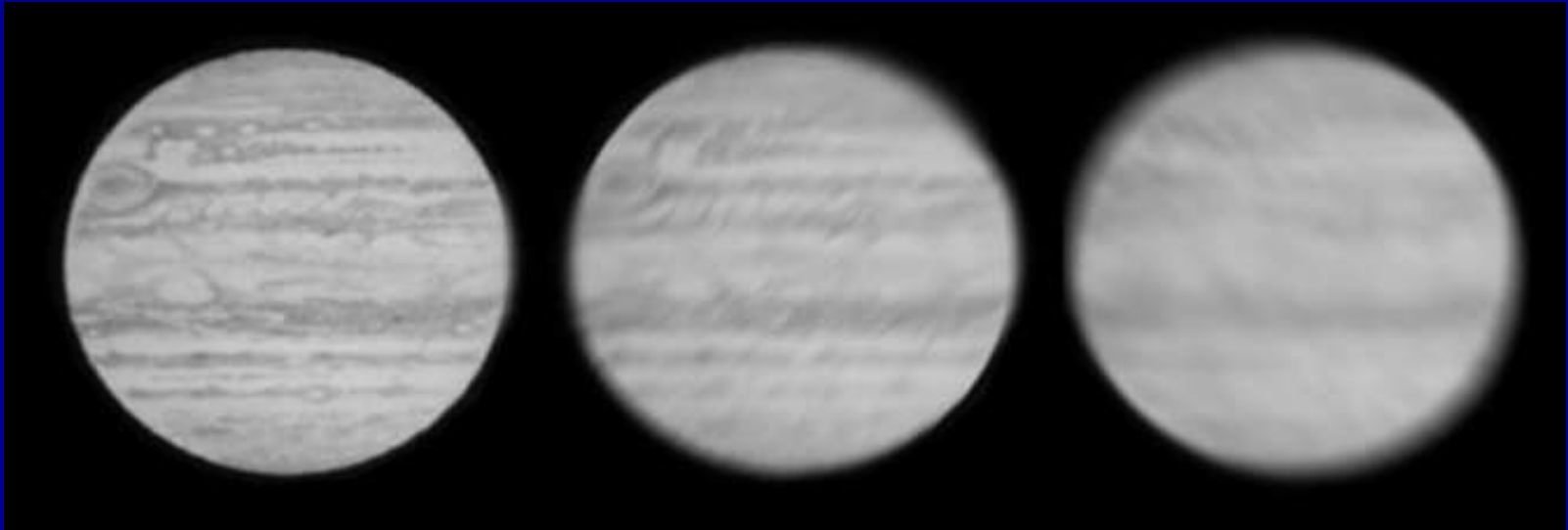
Exemple d'effet de la turbulence sur l'image astronomique 1



Cf la division de Encke (dans anneau A)
(Largeur= 325 km)

Rappel:
Division de Cassini (entre anneau A et anneau B)
=4000 km
(0,7" d'arc)

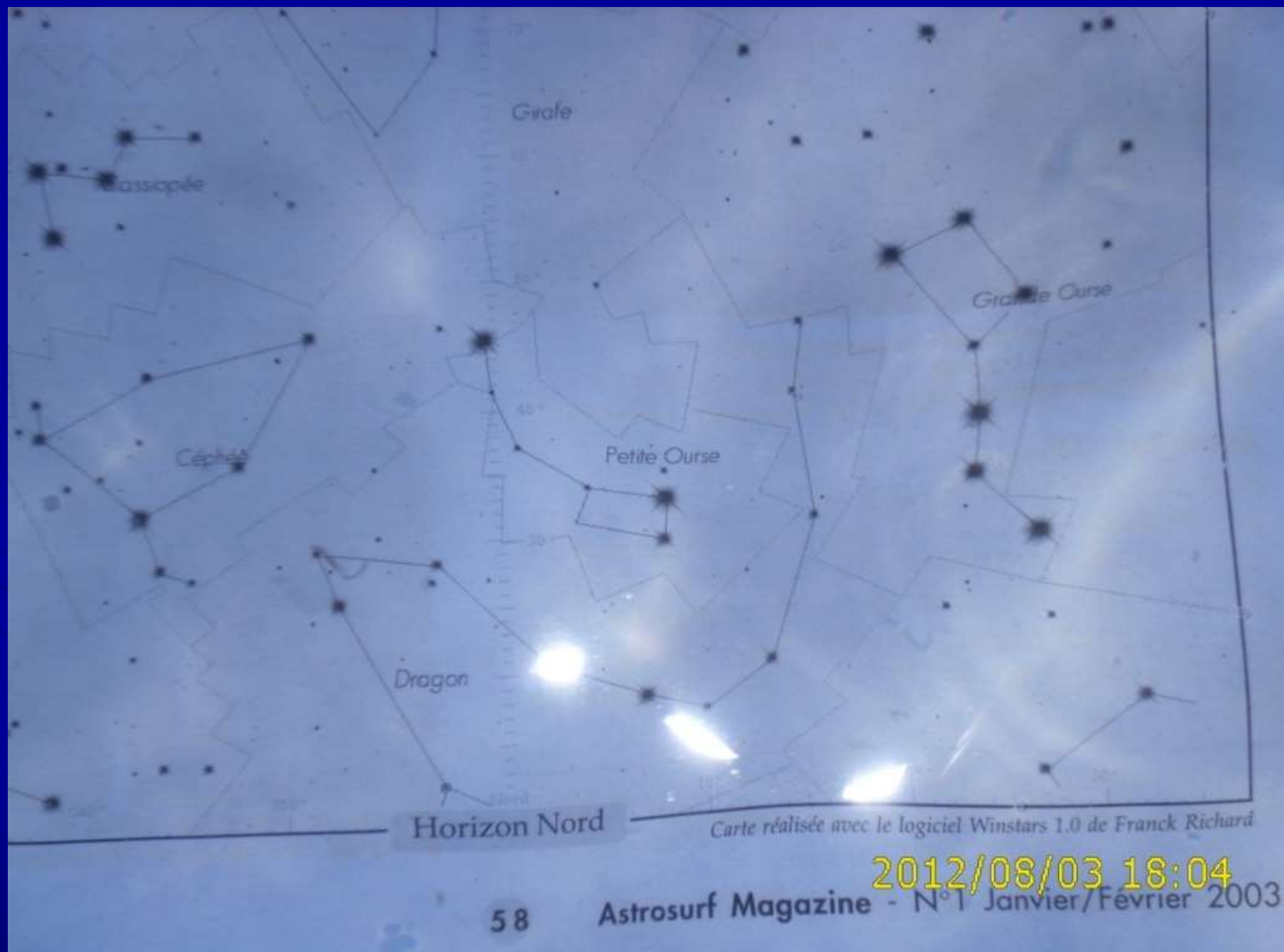
Exemple d'effet de la turbulence sur l'image astronomique 2



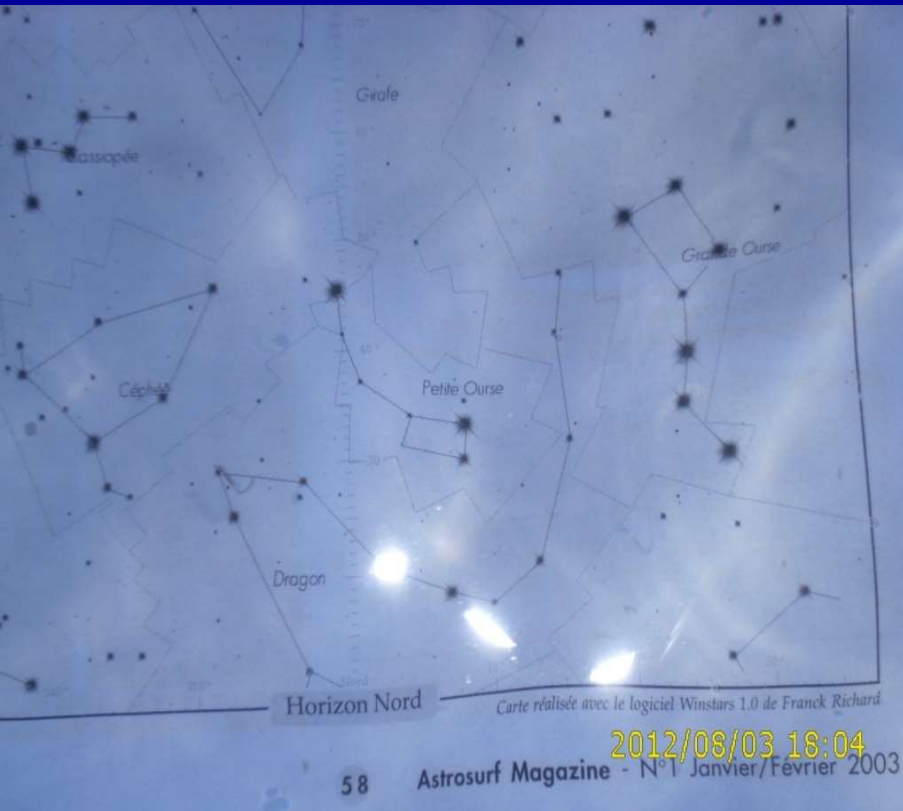
Turbulence croissante →



Analogie 2- locale piscine Reaumont



Analogie 2 bis: On vient de faire « l'atmosphère » en agitant



Ce qu'il faut retenir de cette 1ère partie

- L'image télescopique parfaite d'une étoile est la tache d'Airy dont la dimension dépend du diamètre D du télescope.

Le Pouvoir Séparateur de l'instrument dépend de la taille de la tache d'Airy.

- Les fluctuations de température dans l'atmosphère entraînent des fluctuations d'indice qui entraînent des modifications dans le trajet et la vitesse des rayons lumineux.

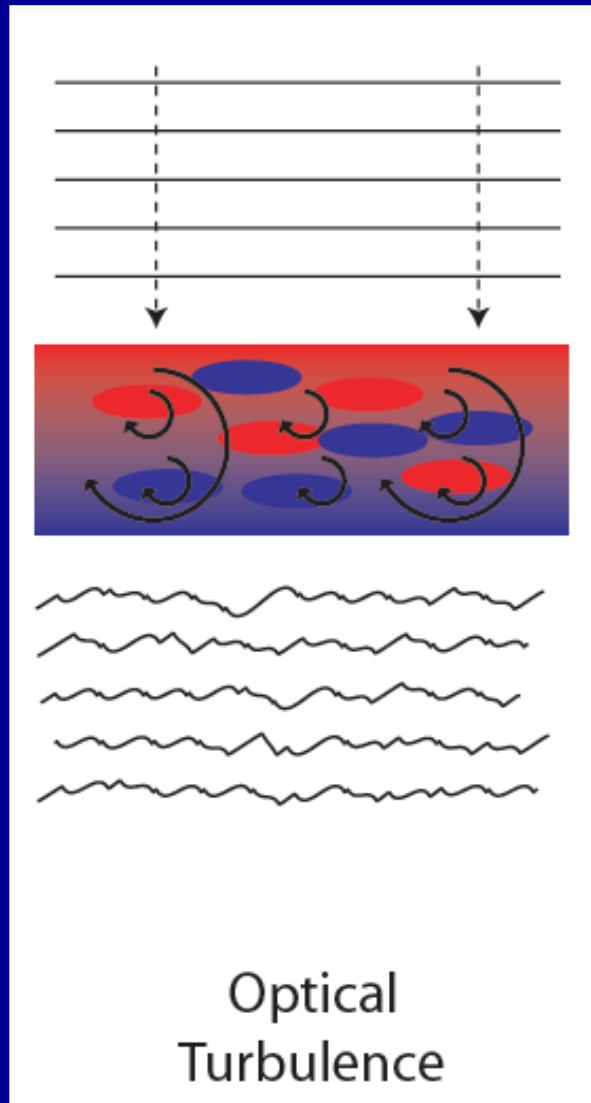
Ces modifications de trajet et de vitesse entraînent la déformation de la surface d'onde donc l'apparition de la turbulence optique (seeing).

- Dans la troposphère les transferts thermiques entre l'Equateur et les Pôles, les échanges thermiques au niveau du sol, les frottements des vents dans la CLA vont entraîner l'apparition de la turbulence mécanique.

- La turbulence mécanique va provoquer la turbulence optique.
Il va y avoir plusieurs niveaux de turbulence en relation avec les 3 niveaux de l'atmosphère.

(Rmq :on ne parlera pas de la turbulence instrumentale, ni de la turbulence de proximité propre au site !)

Un schéma pour résumer:



Au programme de la 2^{ème} partie

- Dans la deuxième partie nous allons approfondir la théorie de la turbulence (Aie, Aie, Aie !!) et essayer de la quantifier
 - ➔ mettre des chiffres pour savoir de quoi on parle
- Nous allons nous faire de nouveaux amis qui ont pour noms :
Kolmogorov, Richardson, Tatarskii , Fried ,
Hufnagel.

*Fin de la 1^{ère}
partie
Merci pour votre
attention...*

