



Institut  
Pierre  
Simon  
Laplace



# Lidar Géophysique

## Fondamentaux Lidar (1/2)

Pierre H. Flamant

Institut Pierre Simon Laplace

Laboratoire de Météorologie Dynamique

École Polytechnique, Palaiseau

*Courriel:* [pierre.flamant@lmd.polytechnique.fr](mailto:pierre.flamant@lmd.polytechnique.fr)

*Téléphone:* 01 69 33 51 50

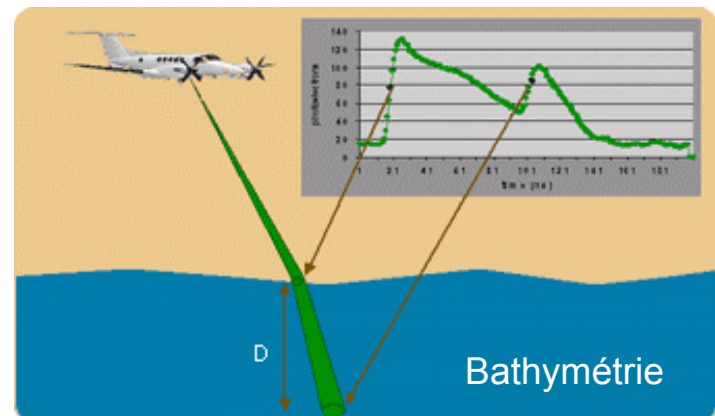
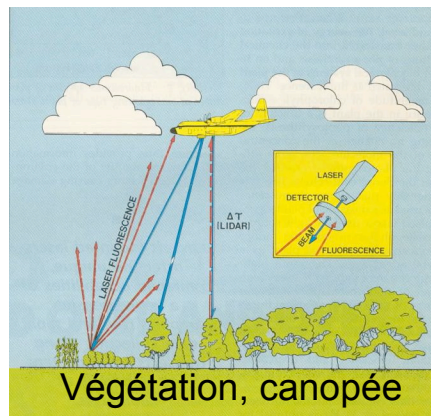
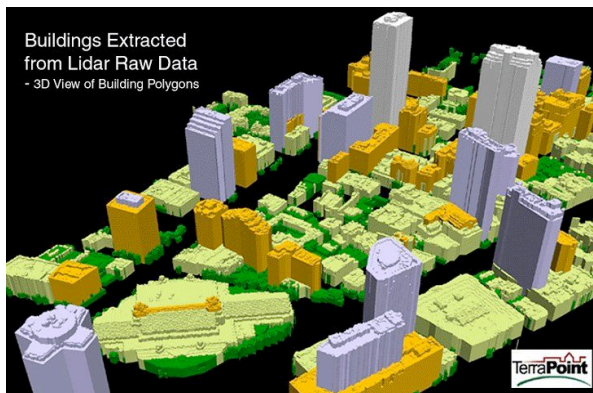
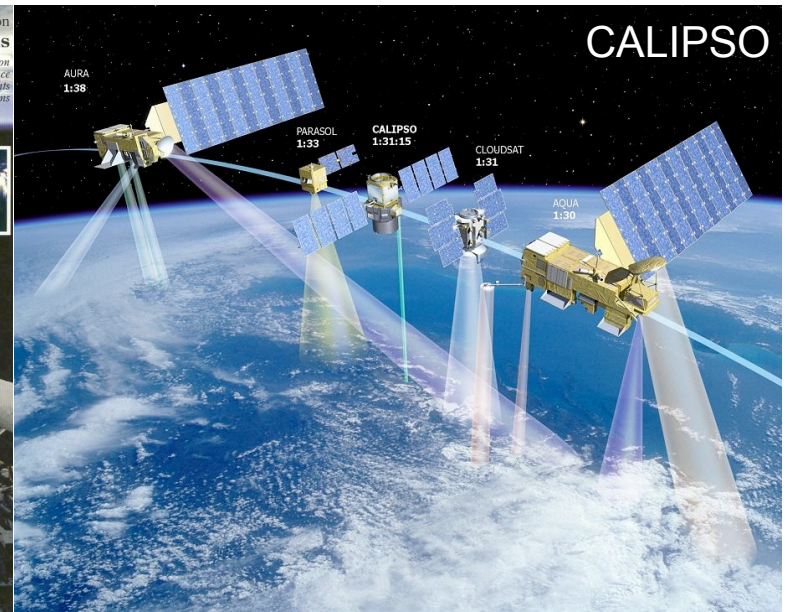
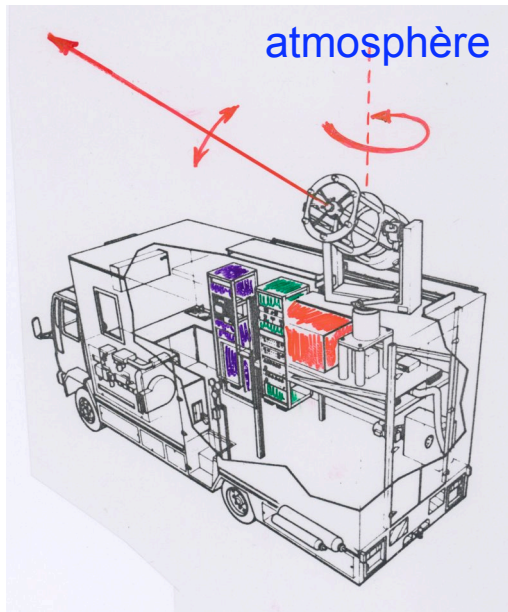


# Le Lidar

---

- **Lidar (Light Detection And Ranging)** est une méthode de télédétection active qui utilise un laser comme émetteur pour des mesures portant sur la composition, les propriétés physiques et la dynamique de l'atmosphère, la topographie des surfaces naturelles et des zones urbanisées, les propriétés physiques de la végétation
- Les Lidars sont utilisés en observation de la terre et pour l'exploration planétaire
- Les premières études ont lieu dans les années 30, et le nom Lidar a été proposé dans les années 50
- Les premières applications du laser au lidar ont suivi la mise en œuvre du 1<sup>e</sup> laser à rubis en 1960
- Le lidar a pris de l'importance dans les années 1980 mais les performances limitées des différentes technologies : laser, détecteurs, électronique, informatique, ont freiné les applications

# La Famille Lidar



# Applications

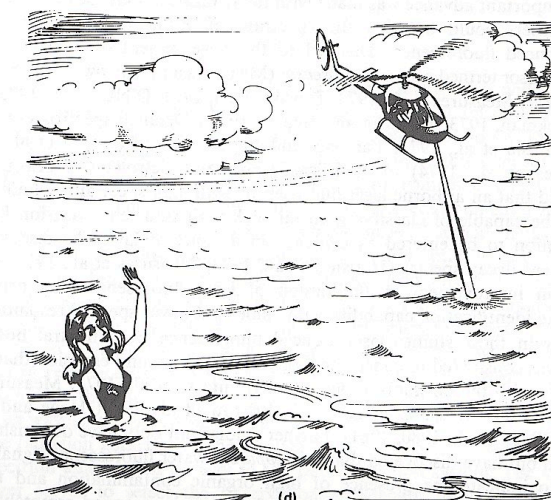
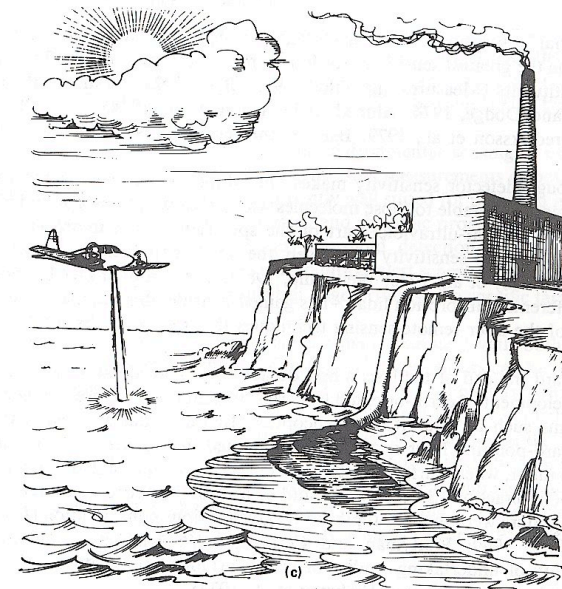
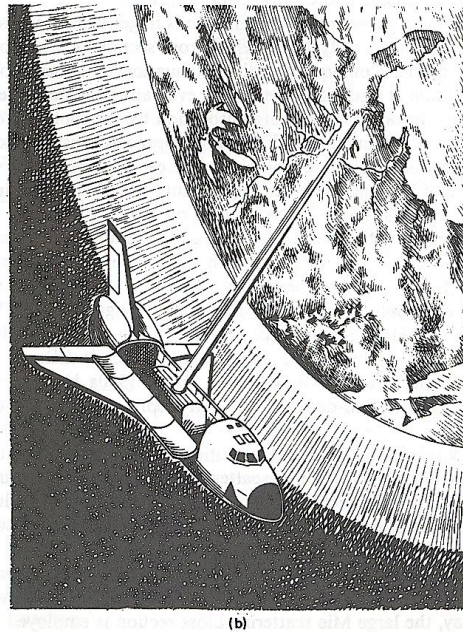
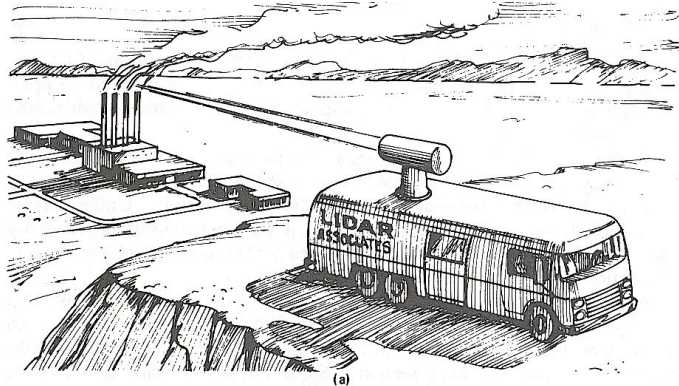


Fig. 6.2. (a) Lidar monitoring of atmospheric pollution sources will enable remote surveillance of industrial emission. (b) Laser sensors mounted aboard the NASA Shuttle will make remote measurements of the upper atmosphere. (c) An airborne laser fluorosensor might be used to study the dispersion of water effluents from industrial and municipal treatment plants. (d) Laser bathymetry of coastal regions could be undertaken from helicopters.



# Applications

---

- Atmosphère
  - Qualité de l'air, pollution : composition gaz traces, particules
  - Météorologie (p, T, u, V) : champ de vent
  - Climat : bilan radiatif (nuages, aérosols, GES), cycle hydrologique (nuages, vapeur d'eau), cycle du carbone (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), ...
- Surfaces
  - Continentales: topographie, archéologie, régions côtières, végétation, agriculture, géologie,
  - Eaux continentales
  - Océaniques
- Géodésie : distance terre-lune, suivi de satellite, ...
- Automobile
- Militaires
- Altimétrie (topographique) pour l'exploration lunaire et planétaire



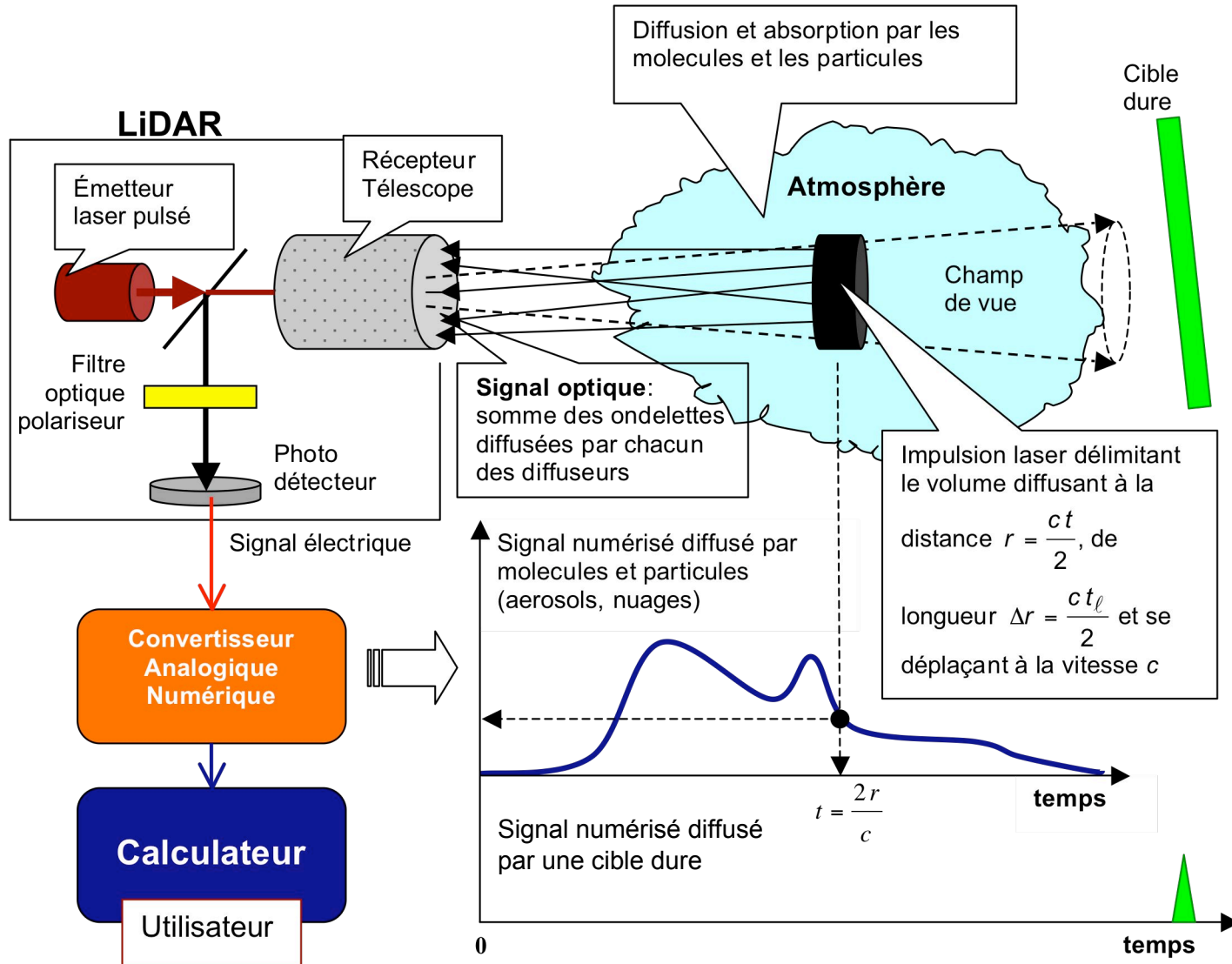
# Mesure Lidar

- Signal lidar fourni par diffusion de la lumière laser sur les cibles
  - Molécules et particules en suspension dans l'air,
  - Surfaces : sol nu, végétation, ouvrage maçonné, bâtiment, étendues d'eau, etc
- Un instrument lidar est formé par l'émetteur laser (ex: pulsé) et par le télescope récepteur équipé d'un détecteur. Le signal électrique est converti en signal numérique.
- Toutes les traitements et calculs sont effectués sur les signaux numériques
- Le temps de vol entre l'émission laser ( $t=0$ ) et la détection de la lumière diffusée mesure la distance  $R$ , entre le lidar et les cibles

$$t = \frac{2R}{c}$$

$c$  est la vitesse de la lumière dans le milieu (air  $\approx 1$ ). Variation de l'indice avec la température et le contenu en vapeur d'eau

# Principe de la Mesure Lidar



- Le signal lidar renseigne sur le milieu et les cibles
- Le **support de la mesure** lidar est la diffusion par les cibles
- Milieu dilué (résolution en distance)  $\Rightarrow$  puissance (W). Signal lidar accumulé dans une porte de mesure  $\Rightarrow$  énergie (J).
- La **signature de la mesure** lidar est la diffusion en intensité, le changement spectral, de polarisation, et l'absorption

$$P_L(t) = K \frac{\beta(R)}{R^2} [T(R)]^2 + \text{bruit}$$

- Cibles compactes  $\Rightarrow$  énergie (J)

$$E_L(R) = K \frac{1}{R^2} \frac{\rho}{\pi} [T(R)]^2 + \text{bruit}$$

- Mesures atmosphériques en colonnes intégrées en utilisant des cibles compactes dont il faut connaître la réflectivité
- Si on s'intéresse aux surfaces, il faut connaître la transmission atmosphérique





- « Lidar » recouvre des applications, des méthodes et des instruments différents.
- Il recouvre aussi deux communautés différentes quant aux objectifs,
- La communauté atmosphérique développe ses instruments lidar pour obtenir des profils de variables atmosphériques (nuages, aérosols, gaz minoritaires, vent) alors que l'autre utilise des lidars industriels et des sociétés de service pour les applications altimétriques et bathymétriques
  - Atmosphère (0, 100 km)
  - Surface ( $\pm 100$  m)
- La communauté atmosphérique est entrée dans l'ère spatiale avec **LITE** en 1994 et plus encore avec **CALIPSO** (mission NASA/CNE) lancé en 2006 et toujours opérationnel en 2010
- La communauté surface a bénéficié de 3 missions **Apollo** NASA dans les années 70, et **ICESat** en 2003



# Communauté Lidar Atmosphérique

---

- Depuis les années 60, les expérimentateurs conçoivent et fabriquent leur propre lidar pour leurs recherches
- Il existe de nombreux types de lidars suivant les applications
- On peut dire : un lidar pour chaque application
- Dans ces conditions, il est difficile de définir, promouvoir et vendre des produits commerciaux. Ce n'est que récemment que des PME ont commencé à s'implanter dans le domaine
- Les différentes techniques clé: laser, photo-détecteur, électronique, CAN, comme elles existent aujourd'hui, étaient très loin des attentes des expérimentateurs jusqu'à la fin des années 80
- Les expérimentateurs développent leurs propres traitements du signal
- La communauté lidar se rencontre dans 2 conférences:
  - International Laser Radar Conference (ILRC) tous les 2 ans. La 25e ILRC a lieu en 2010 à St Petersburg, Russie
  - Coherent Laser Radar Conference (CLRC). La 15e CLRC a eu lieu à Toulouse, France en 2009
- Applications atmosphériques <http://iclas.hamptonu.edu>

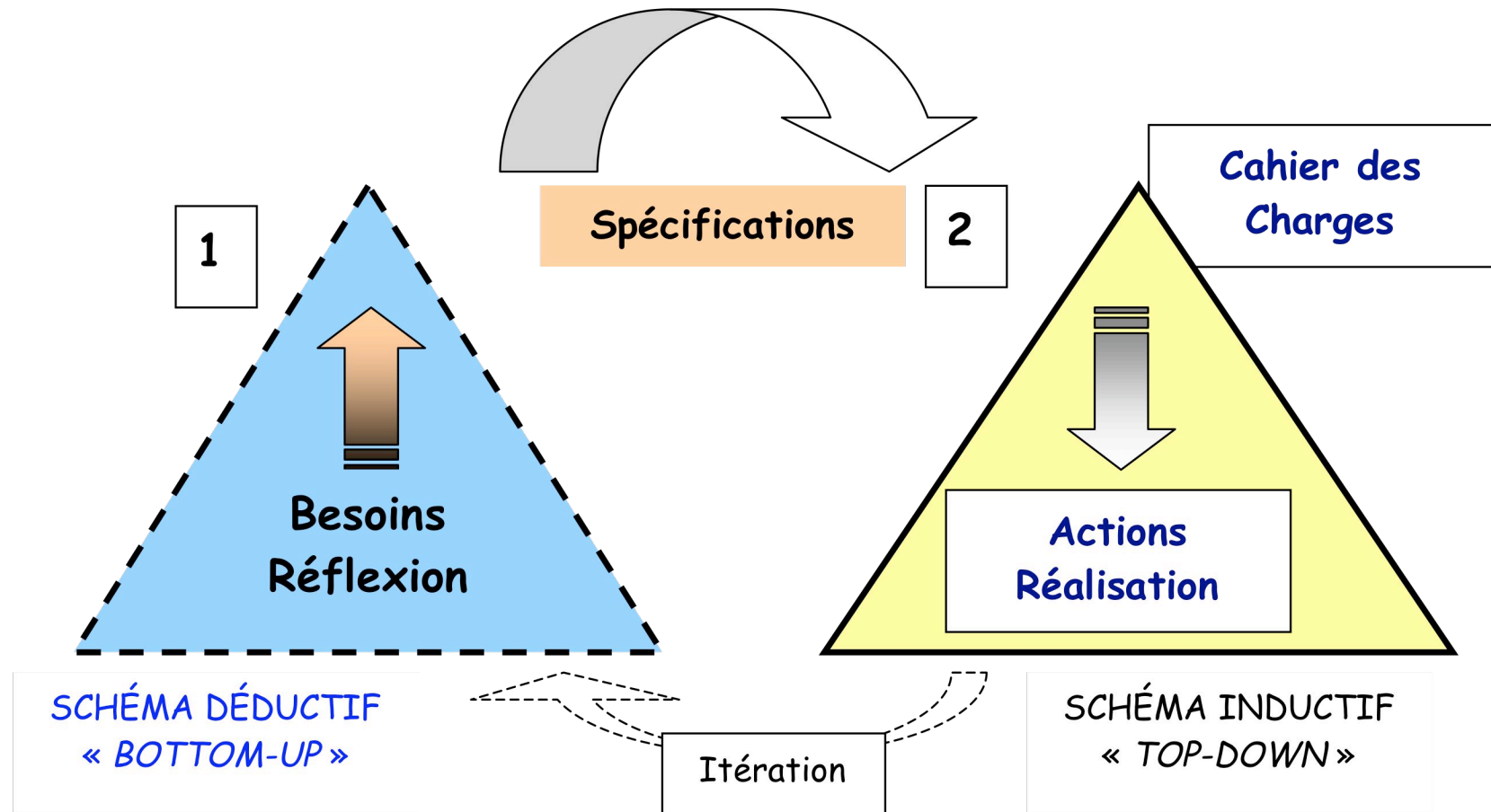


# Communauté Lidar Surface

---

- La plus grande partie des applications demandent une grande précision sur la mesure de distance et un positionnement très précis des impact lidar sur les surfaces
- La plus grande partie des applications sont aéroportées
- Contrairement aux applications atmosphériques, et à l'exception des applications de lidars fluorescents pour la végétation et la pollution marine, le même type de lidar par diffusion élastique est utilisé
- Il s'agit de lidar utilisant des lasers Nd<sup>3+</sup>-YAG à haute cadence de répétition qui émettent à 1.064 µm ou à 2 longueurs d'onde 0.532 µm et 1.064 µm pour la bathymétrie
- Les lidars aéroportés sont mis en œuvre par des compagnies privées prestataires de service suivant un cahier des charges défini par le client
- Le traitement du signal et l'analyse des données est généralement effectuée de la même manière en utilisant des logiciels commerciaux
- Seules les données de niveaux 2 et 3 sont utiles aux clients
- Les applications surface = [www.lidarmap.org](http://www.lidarmap.org)

# Schéma de Définition





# Instrument & Signal Lidar

# Instrument Lidar

## Principaux sous systèmes :

L'émetteur Laser (1) et l'expandeur de faisceau (1bis)

L'ensemble opto mécanique (2) pour diriger la ligne de visée

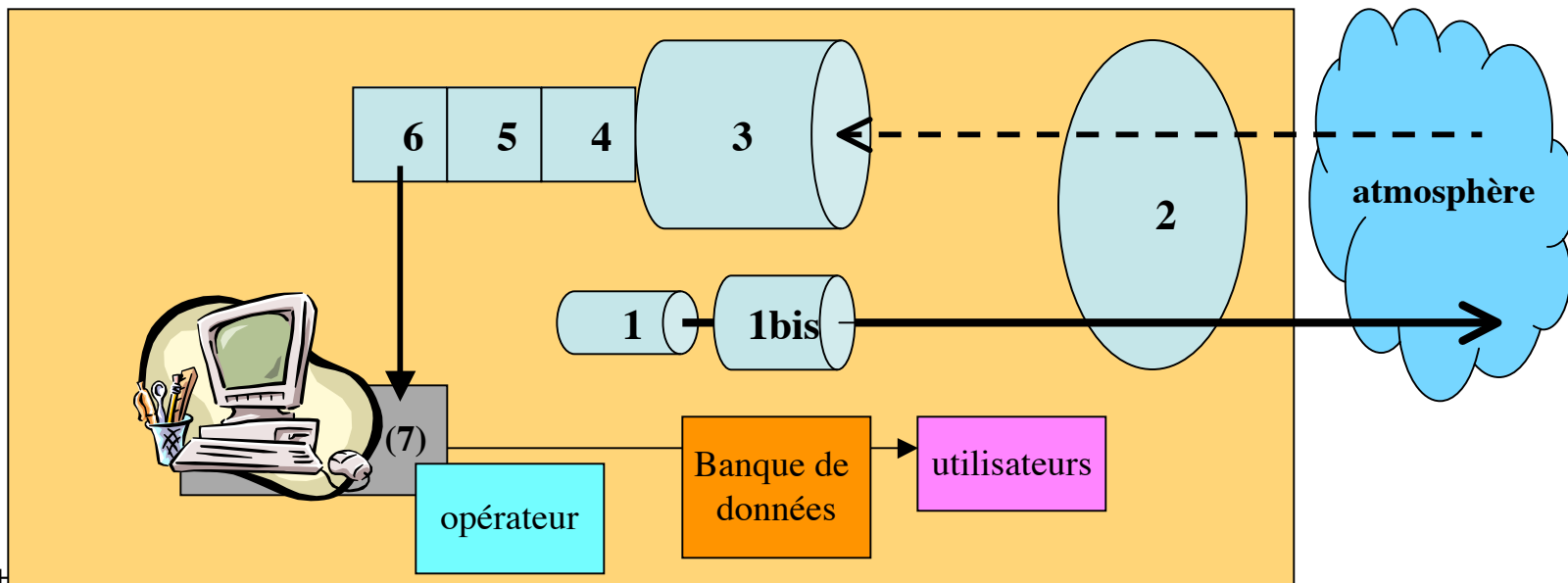
Le télescope (3) de réception qui collecte la puissance optique diffusée

Une optique (4) de reprise et de filtrage de la lumière parasite

Un photodétecteur (5) et une électronique pour la mise en forme du signal électrique

Un Convertisseur Analogique-Numérique (6)

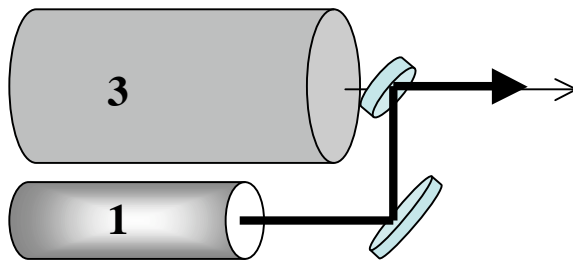
Un ensemble informatique (7) avec un ordinateur pour le traitement du signal en temps réel, les affichages, le stockage des données, ...



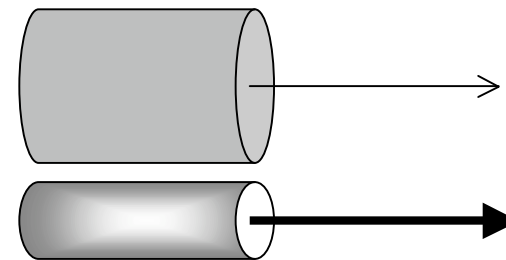
# Configuration Lidar

- Un lidar est conçu en suivant les règles de l'optique géométrique : rayons au voisinage de l'axe optique approximation des petits angle :  $\sin a \approx a$
- Miroir sphérique (réflexion) : aberrations sphériques
- Lentilles (réfraction) : aberration chromatique
- La qualité des images n'est pas très importante, le télescope est utilisé pour collecter la lumière Laser
- La résolution angulaire de télescope est limitée par la tache de diffraction (d'Airy) associée au miroir primaire

**Coaxial: les 2 axes sont confondus**



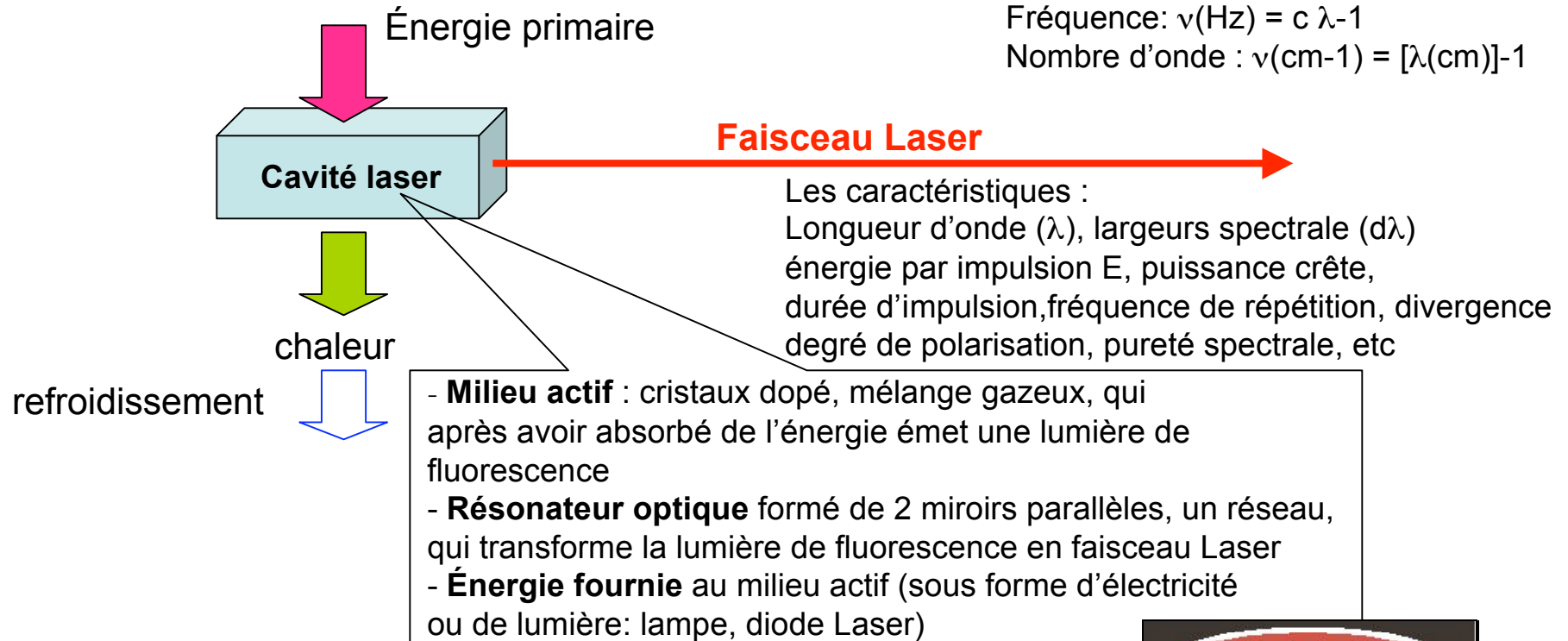
**Paraxial : les 2 axes sont parallèles**



À courte distance, le recouvrement entre faisceau laser et champ de vue du télescope est nul ce qui limite la dynamique du signal optique

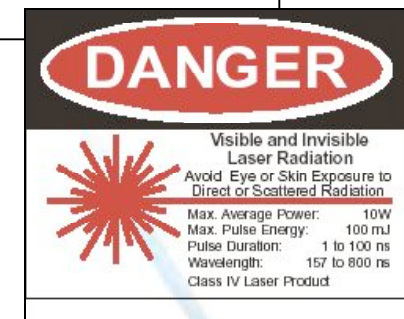
## Principe de fonctionnement & d'utilisation

Les unités spectrales :  
 Longueur d'onde :  $\lambda$  (m)  
 Fréquence:  $\nu(\text{Hz}) = c \lambda^{-1}$   
 Nombre d'onde :  $\nu(\text{cm}^{-1}) = [\lambda(\text{cm})]^{-1}$



### Les contraintes :

- Rendement électrique-optique
- Encombrement : masse, volume,
- Servitude: refroidissement, énergie primaire, etc





La méthode Lidar utilise les différentes propriétés des lasers pour sonder le milieu atmosphérique :

- Longueur(s) d'onde fixe(s) ou accordable(s)

Stabilité en fréquence : 1 MHz pour mesurer l'effet Doppler

- Monochromaticité : émission en raie étroite  $\Rightarrow$  monomode longitudinal

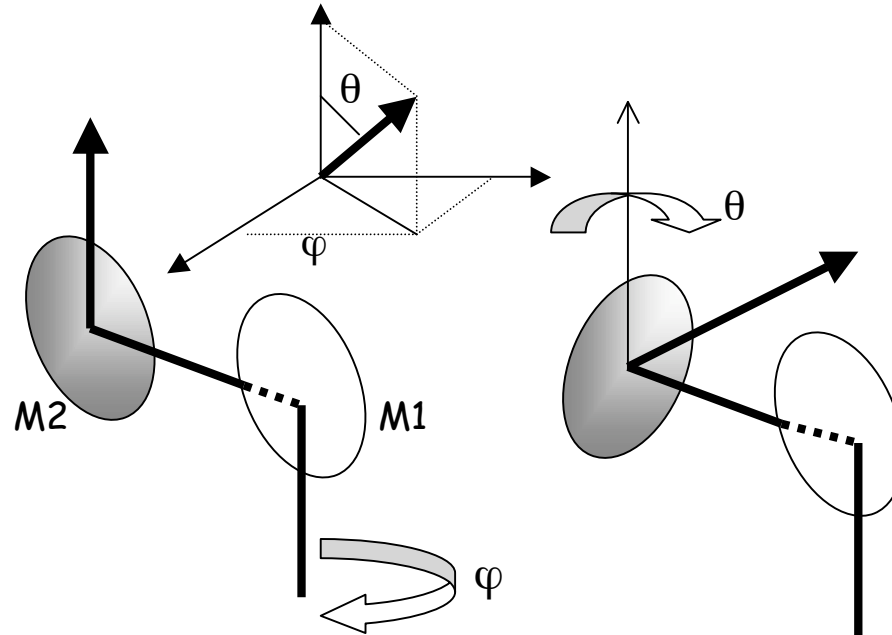
Pureté spectrale (pour application DiAL)

- Directivité : faible divergence  $\Rightarrow$  monomode transverse  $TEM_{00}$ , faisceau gaussien, taille de l'empreinte (section droite du faisceau)
- Émission pulsée pour mesure de distance et obtention de profil
- Énergie par impulsion (de la 10  $\mu$ J à 1 J), fréquence de répétition (10 Hz à 10 kHz), puissance moyenne (0.1 à 10 W). Attention à la sécurité oculaire
- Durée d'impulsion : 1 ns à 1  $\mu$ s  $\Rightarrow$  mesure de distance  $R=ct/2$ , résolution sur la ligne de visée  $R=c \delta t/2$  (1 ns = 15 cm), largeur spectrale  $\Delta\nu\Delta t=0,44$ , 100 ns = 4 MHz)
- Polarisation  $\Rightarrow$  dépolarisation par le milieu sondé

# Composants lidar

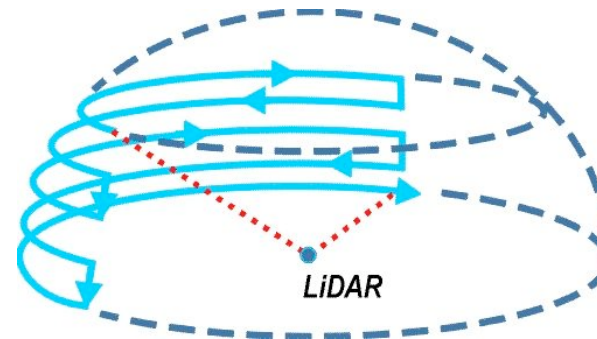
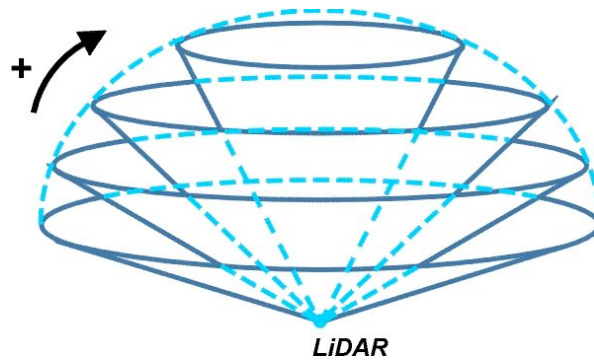
Composant	Fonction
Laser	Émission pulsée, énergie par impulsion
Opto-mécanique	Miroirs pour déplacer la ligne de visée
Télescope	Diamètre, champ de vue, réflectivité $\approx 1$
Optique de reprise & filtre optique	Filtre pour éliminer le fond de scène. Transmission limitée. Filtre interférentiel, Fabry-Perot, polariseur
Détecteur & électronique	PMT, APD, rendement quantique ( $q < 1$ ), bruit interne, amplification interne
Convertisseur Analogique Numérique	Fréquence d'échantillonnage, plage de numérisation ( $2^N$ ), ce sont 2 processus indépendants. Porte de mesure
calculateur	Puissance de calcul, mémoire, ...

# Opto-mécanique

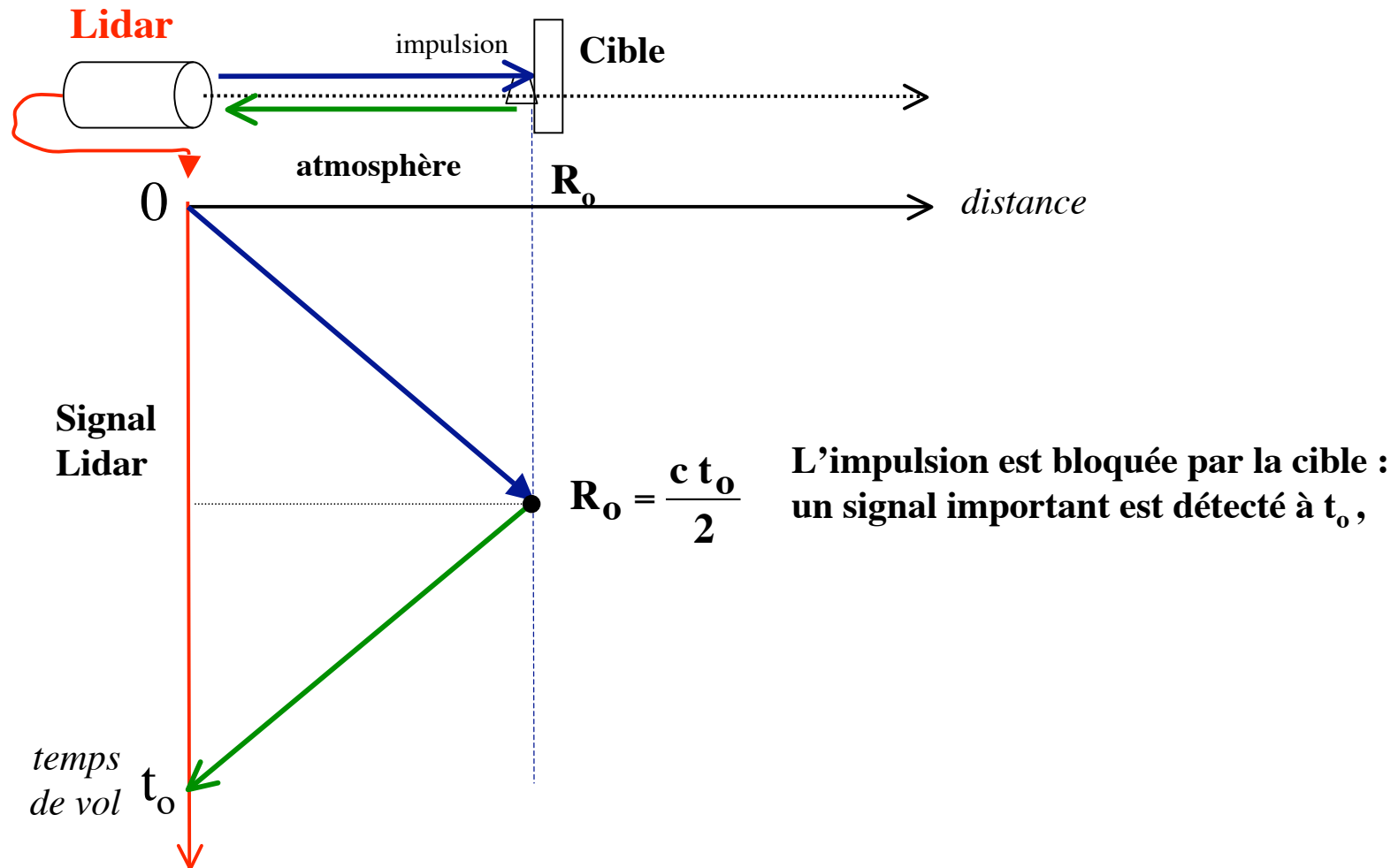


Balayage Conique

Balayage en Trame



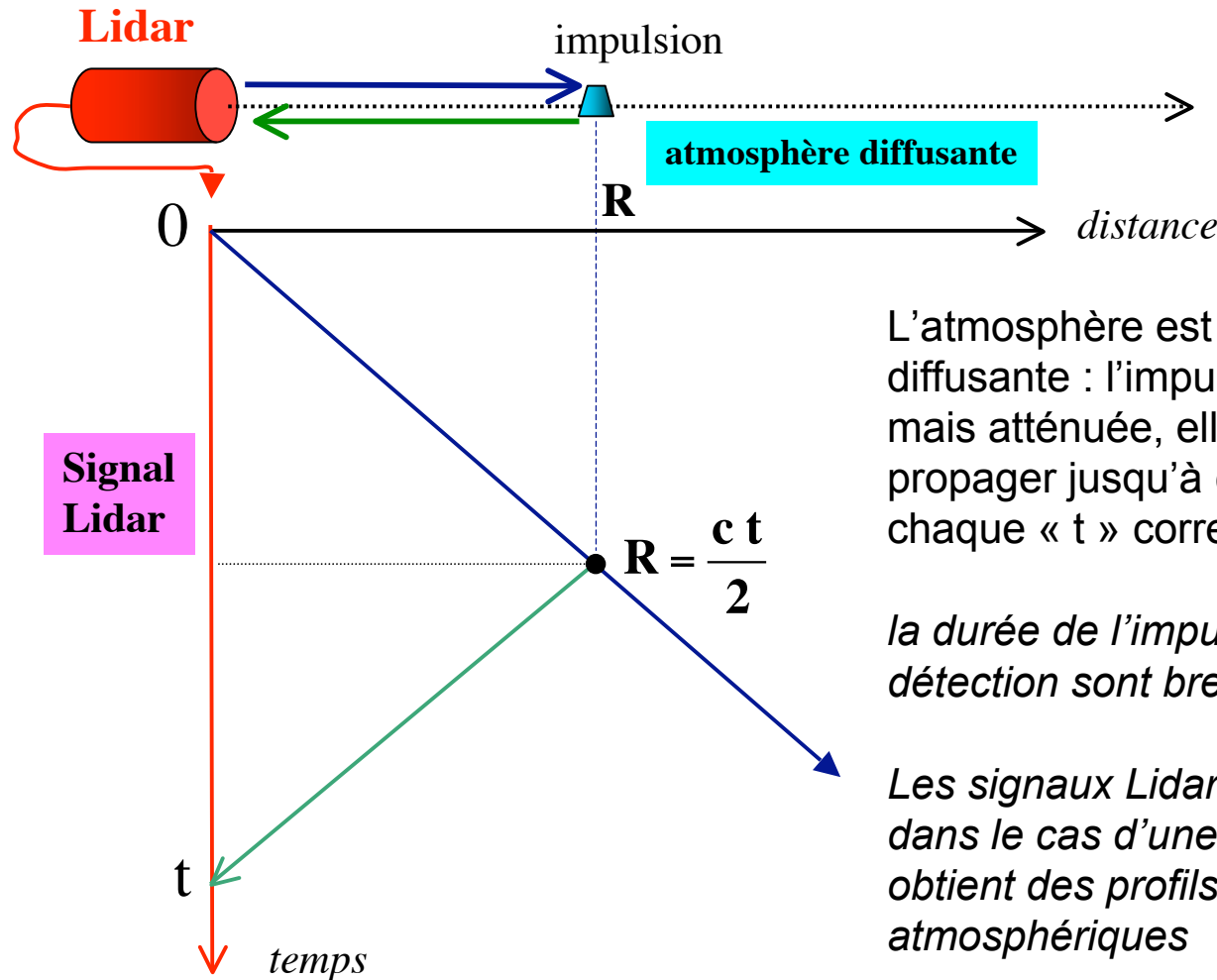
# MESURE DE DISTANCE (TÉLÉMÉTRIE) ÉMISSION PULSÉE & CIBLE DURE



# MESURE DE DISTANCE

## ÉMISSION PULSÉE & DIFFUSEURS MICROSCOPIQUES

### MOLÉCULES & PARTICULES



L'atmosphère est transparente & diffusante : l'impulsion n'est pas bloquée, mais atténuée, elle continue à se propager jusqu'à extinction complète. À chaque « t » correspond une distance R.

*la durée de l'impulsion et le temps de détection sont brefs*

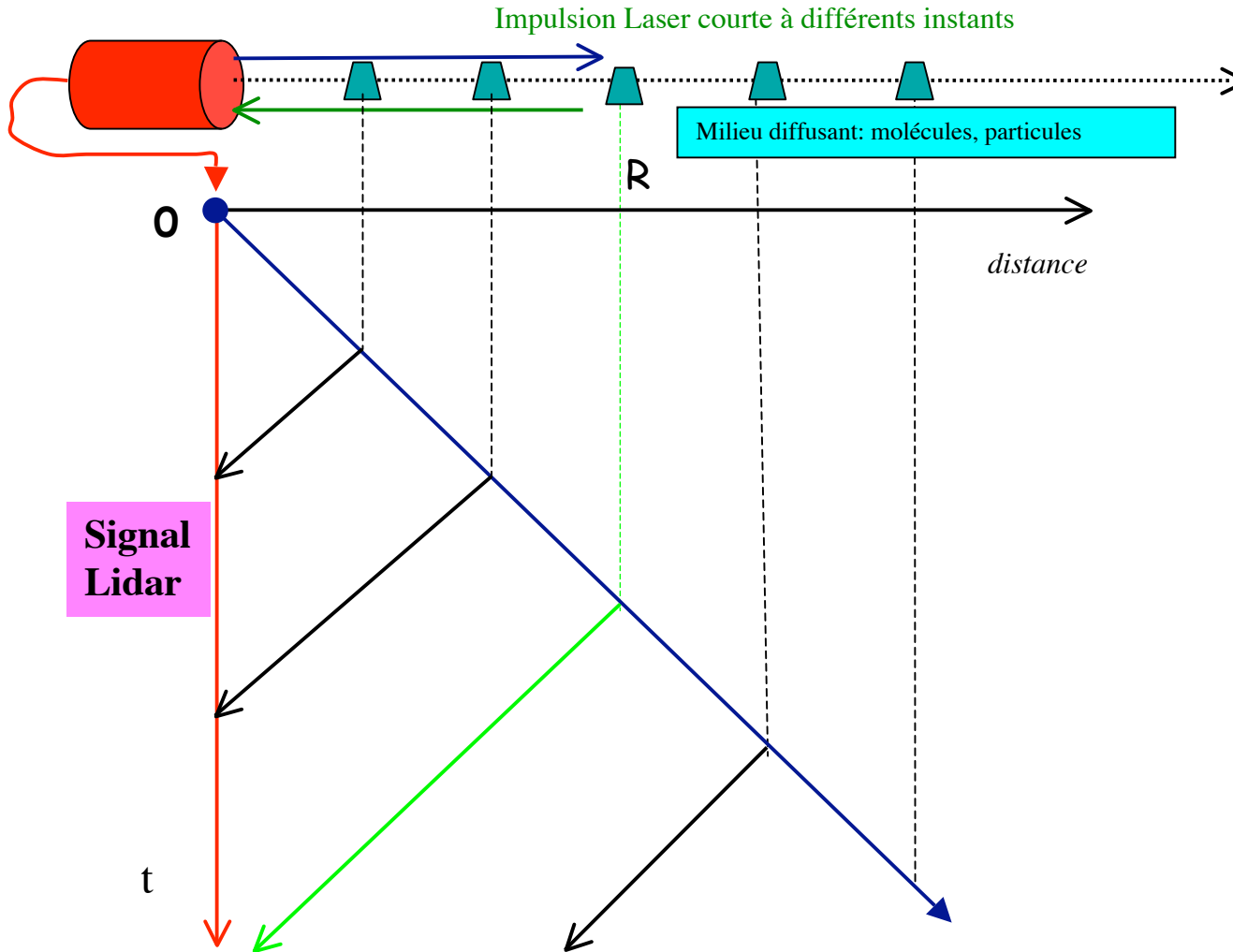
*Les signaux Lidar sont plus faibles que dans le cas d'une cible dure mais on obtient des profils de variables atmosphériques*



# PROFIL LIDAR SUR LA LIGNE DE VISÉE

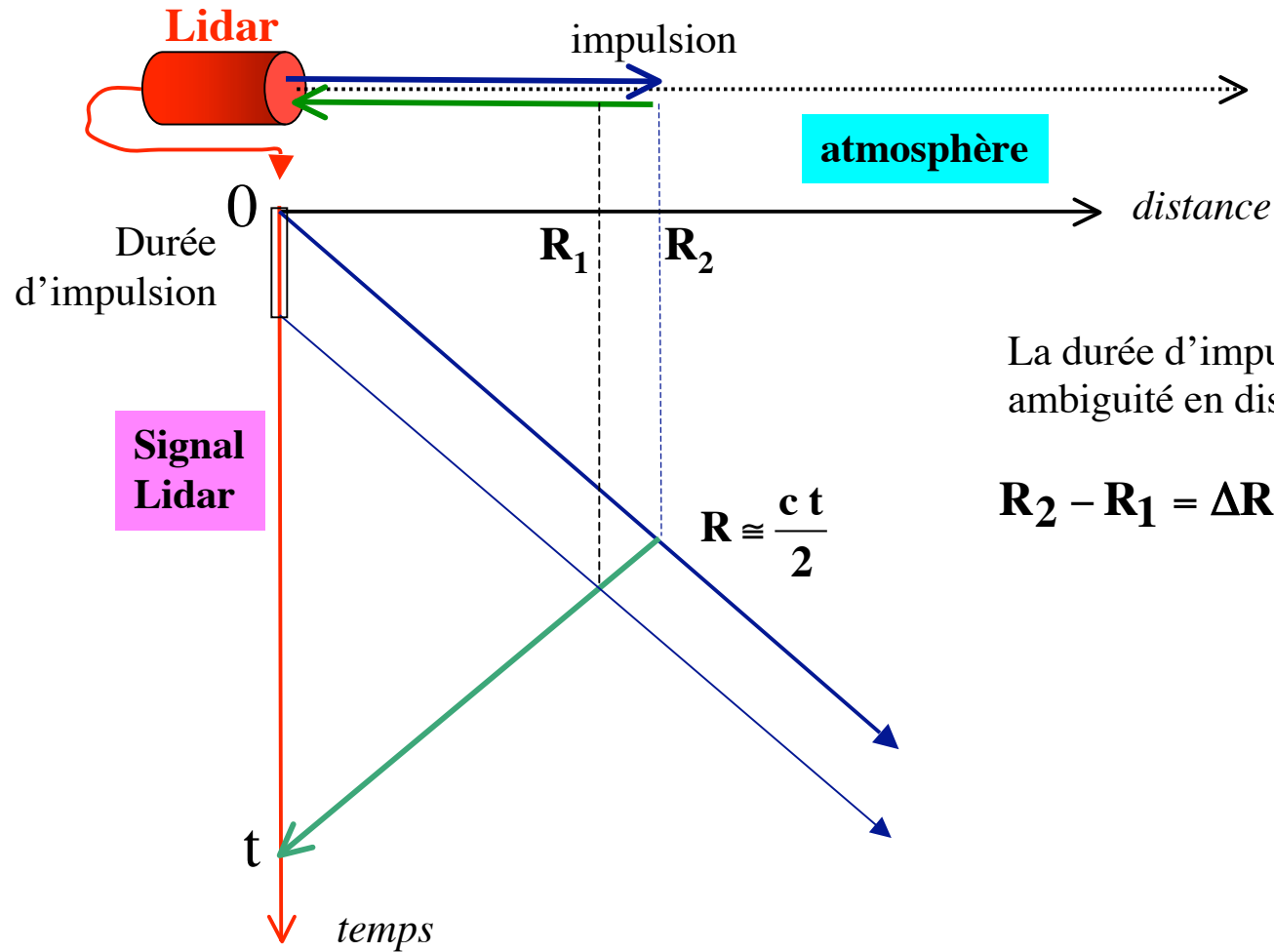
## ÉMISSION PULSÉE & DIFFUSEURS MICROSCOPIQUES

### MOLÉCULES & PARTICULES

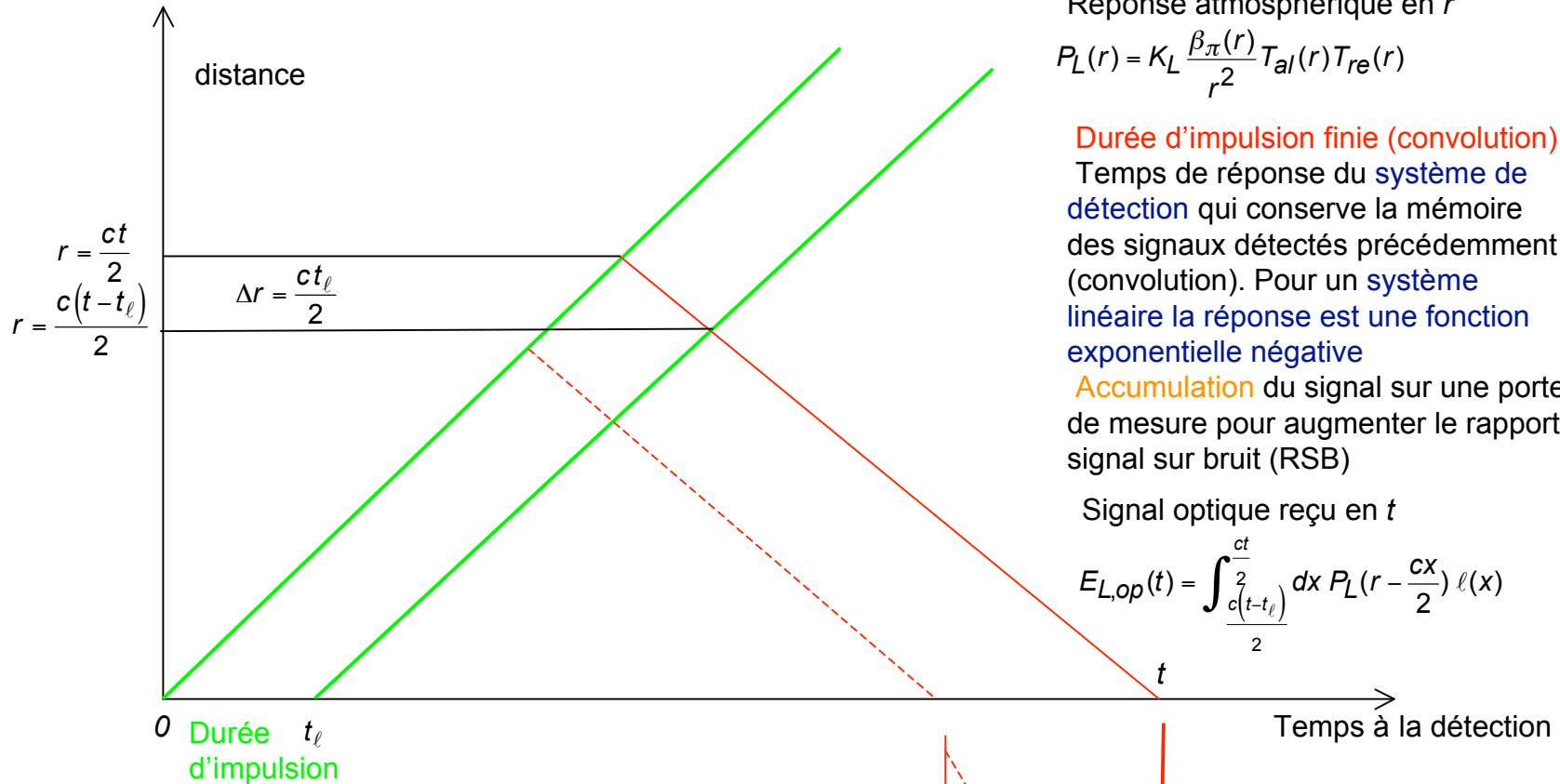


# AMBIGUITÉ EN DISTANCE

## Durée d'impulsion



# Diagramme Lidar temps distance



Réponse atmosphérique en  $r$

$$P_L(r) = K_L \frac{\beta_\pi(r)}{r^2} T_{al}(r) T_{re}(r)$$

Durée d'impulsion finie (convolution)

Temps de réponse du système de détection qui conserve la mémoire des signaux détectés précédemment (convolution). Pour un système linéaire la réponse est une fonction exponentielle négative

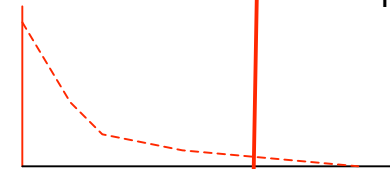
Accumulation du signal sur une porte de mesure pour augmenter le rapport signal sur bruit (RSB)

Signal optique reçu en  $t$

$$E_{L,op}(t) = \int_{\frac{c(t-t_\ell)}{2}}^{\frac{ct}{2}} dx P_L(r - \frac{cx}{2}) \ell(x)$$

Signal détecté à  $t$   $P_{L,el}(t) = \int_0^t P_{L,op}(x) \exp\left(-\frac{(t-x)}{t_d}\right)$

Signal dans une porte de mesure  $i$   $E_{L,nu}(i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} E_{L,el}(t) dt$





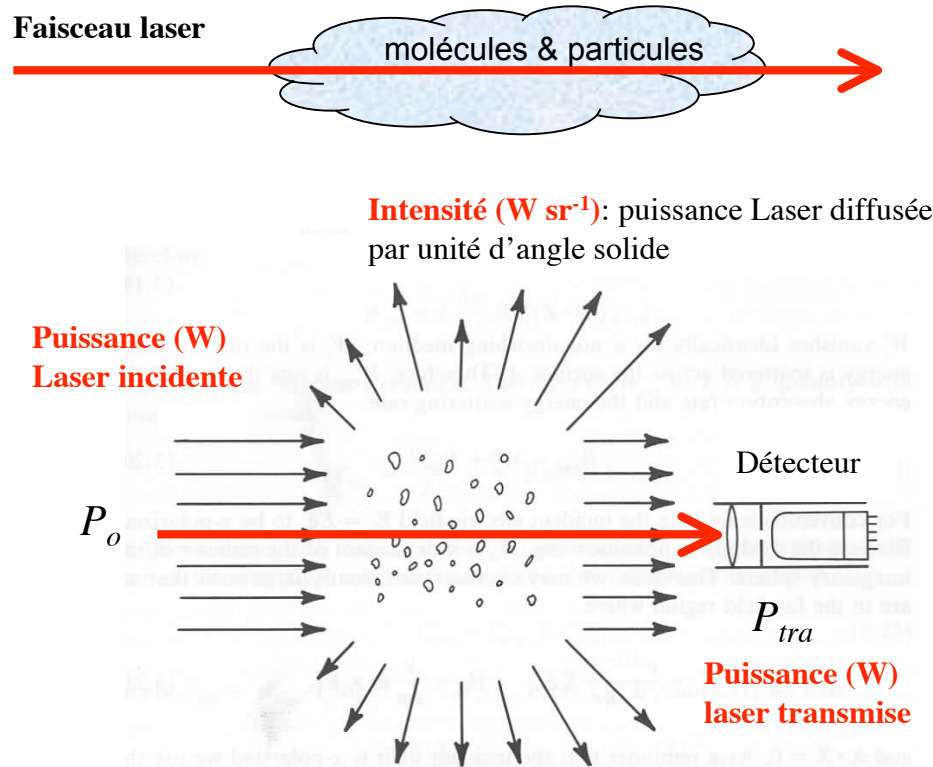


# Spectroscopie

## Diffusion

## Absorption

# Interaction Lumière-Matière



$$\text{Bilan : } P_o = P_{tra} + P_{dif} + P_{abs}$$

On envoie un faisceau laser sur un milieu constitué de molécules et de particules  
 Pour décrire les interactions et le bilan optique en énergie on suit une approche phénoménologique  
 La diminution de lumière laser par unité de longueur traversée est donné par :

$$dP_\ell = -\alpha(x) P_\ell(x) dx$$

Le coefficient d'extinction rend compte l'atténuation par diffusion et par absorption  
 La lumière absorbée est perdue

La lumière diffusée est redistribuée dans tout l'espace ( $4\pi\ sr$ ), l'intensité diffusée dans une direction  $\varpi$  est

$$I_\varpi = \beta_\varpi(x) P_\ell(x) V_{dif}$$

# Variables Macroscopiques

- Dans l'atmosphère les particules diffusent et absorbent indépendamment les unes des autres.

- Coefficient d'extinction  $\alpha(x) = \alpha_e(x) + \alpha_a(x)$

- Pour des particules identiques les coefficients s'écrivent sous la forme d'un produit d'une section efficace et d'une concentration  $\alpha(x) = \sigma N$

- Pour des diffuseurs différents  $\alpha(x) = \sum_i \sigma_i N_i \quad N = \sum_i N_i$

- L'intégration sur une distance x correspond à une épaisseur optique

$$\delta(0, x) = \int_0^x \alpha(y) dy = \int_0^x (\alpha_e(y) + \alpha_a(y)) dy = \int_0^x \left( \sum_i \alpha_e(y) + \sum_j \alpha_a(y) \right) dy$$

- Transmission du milieu  $T(0, x) = \frac{P_\ell(x)}{P_\ell(0)} = \exp \left[ - \int_0^x \alpha(y) dy \right]$

- Pour i composés

$$T(0, x) = \frac{P_\ell(x)}{P_\ell(0)} = \exp \left[ - \sum_i \int_0^x \alpha(y) dy \right]$$

# Variables Macroscopiques

- Le coefficient de diffusion angulaire  $\beta_{\varpi}(x)$  s'écrit sous la forme d'une section efficace de diffusion angulaire et d'une concentration  $\beta_{\varpi}(x) = d\sigma/d\varpi N(x) \Rightarrow \beta_{\varpi}(x) = \sum_i \beta_{\varpi,i}(x) = \sum_i \left. \frac{\partial\sigma}{\partial\varpi} \right|_i N(x)$

- La totalité de l'intensité diffusée est égale à l'intensité soustraite au faisceau laser par diffusion

$$\int_{4\pi} \beta_{\varpi}(y) d\varpi = \alpha_e(x)$$

- En lidar on utilise la rétrodiffusion à  $180^\circ$  ou  $\pi \Rightarrow \beta_{\pi}(x)$
- On peut relier les 2 coefficients par une relation linéaire

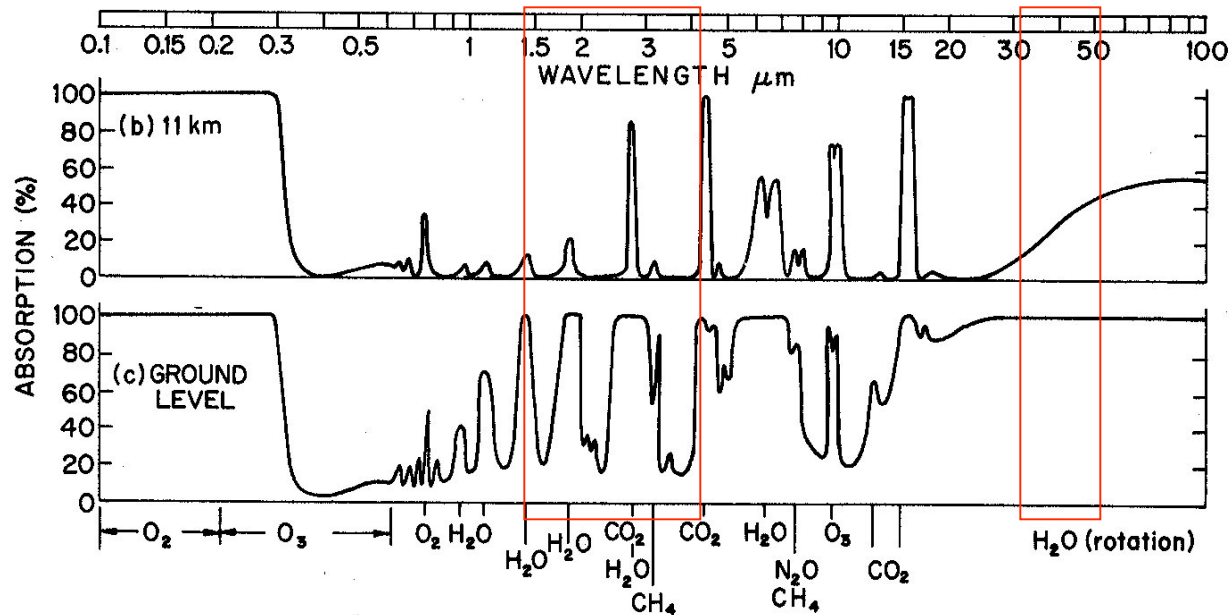
$$\alpha(x) = S(x) \beta_{\pi}(x) \quad \beta_{\pi}(x) = k \alpha(x)$$

$$S(x) = \frac{\beta_{\pi}(x)}{\alpha_e(x) + \alpha_a(x)} \quad S(x) \text{ ou } k(x) \text{ est le rapport lidar}$$

- Rapport de diffusion particules/molécules

$$R_{dif}(x) = \frac{\beta_{\pi}(x)}{\beta_{\pi,m}(x)} = \frac{\beta_{\pi,p}(x) + \beta_{\pi,m}(x)}{\beta_{\pi,m}(x)} = \frac{\beta_{\pi,p}(x)}{\beta_{\pi,m}(x)} + 1$$

# Fenêtres atmosphériques



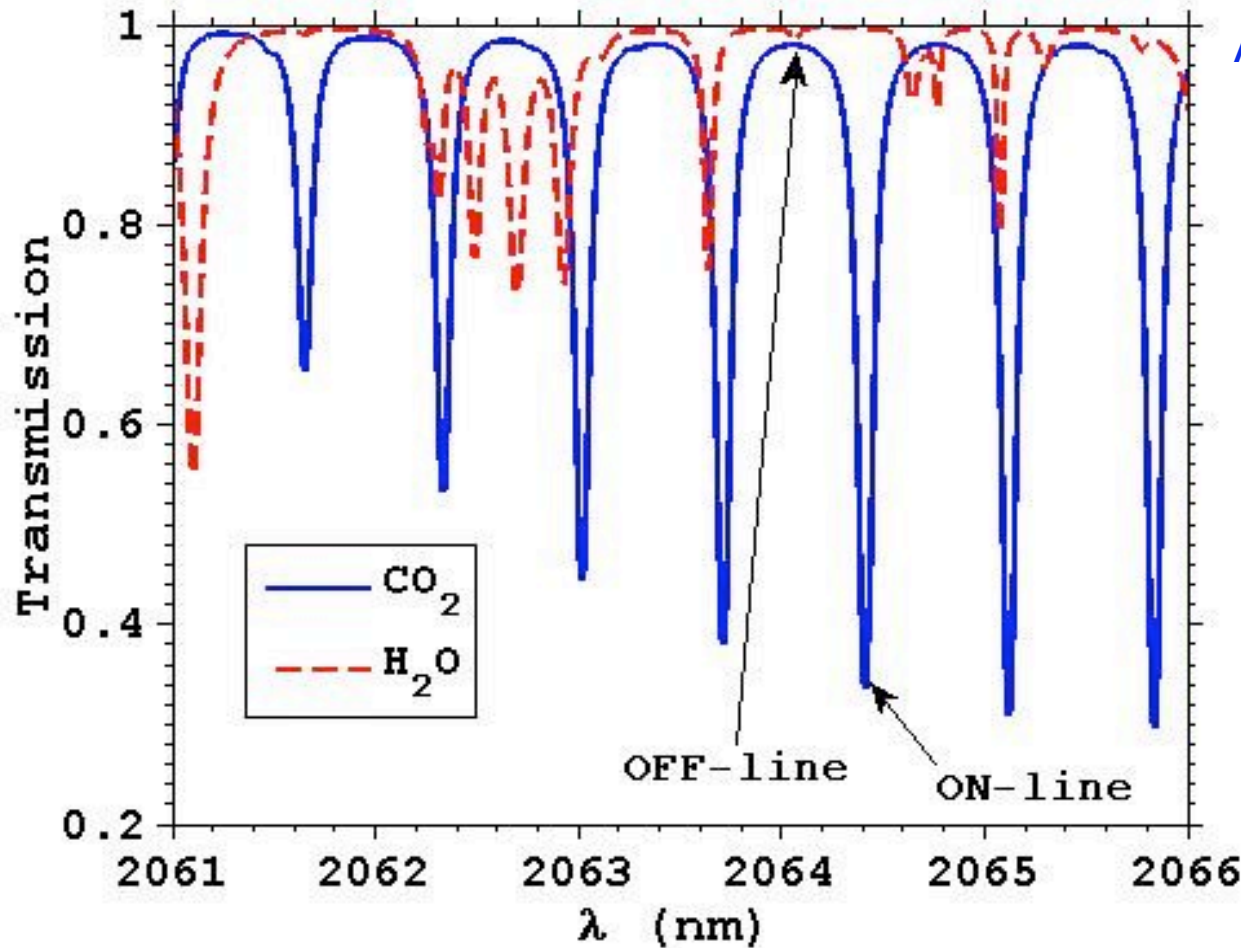
Le sondage à distance dans toute l'épaisseur de l'atmosphère est rendu possible par l'existence de zones de « fenêtres atmosphériques ».

L'une est située dans le domaine visible entre 0,35 et 1  $\mu\text{m}$ , l'autre dans l'infrarouge thermique entre 8 et 12  $\mu\text{m}$ . Il existe aussi d'autres fenêtres plus étroites dans les domaines spectraux intermédiaires.

La notion de fenêtre atmosphérique est importante pour la télédétection passive et des mesures en bandes spectrales larges

# Haute Résolution Spectrale

Les Lasers qui émettent en raie étroite permettent d'effectuer des sondages dans tout le spectre optique à partir du sol ou de satellite



Absorption par CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O

Deux raie d'émission laser sont nécessaires pour les mesures DiAL, l'une coïncidant avec une raie d'absorption du gaz trace à étudier, l'autre hors absorption utilisée comme référence

*Attention: interférences !*



- Atomes
  - Absorption/Diffusion résonante
- Molécules et particules
  - Diffusion : élastique, inélastique
  - Absorption : électronique, vibrationnelle
- Surface solides et liquide
  - Réflexion
- Milieux liquides
  - Diffusion et Absorption



# Diffusion par les molécules

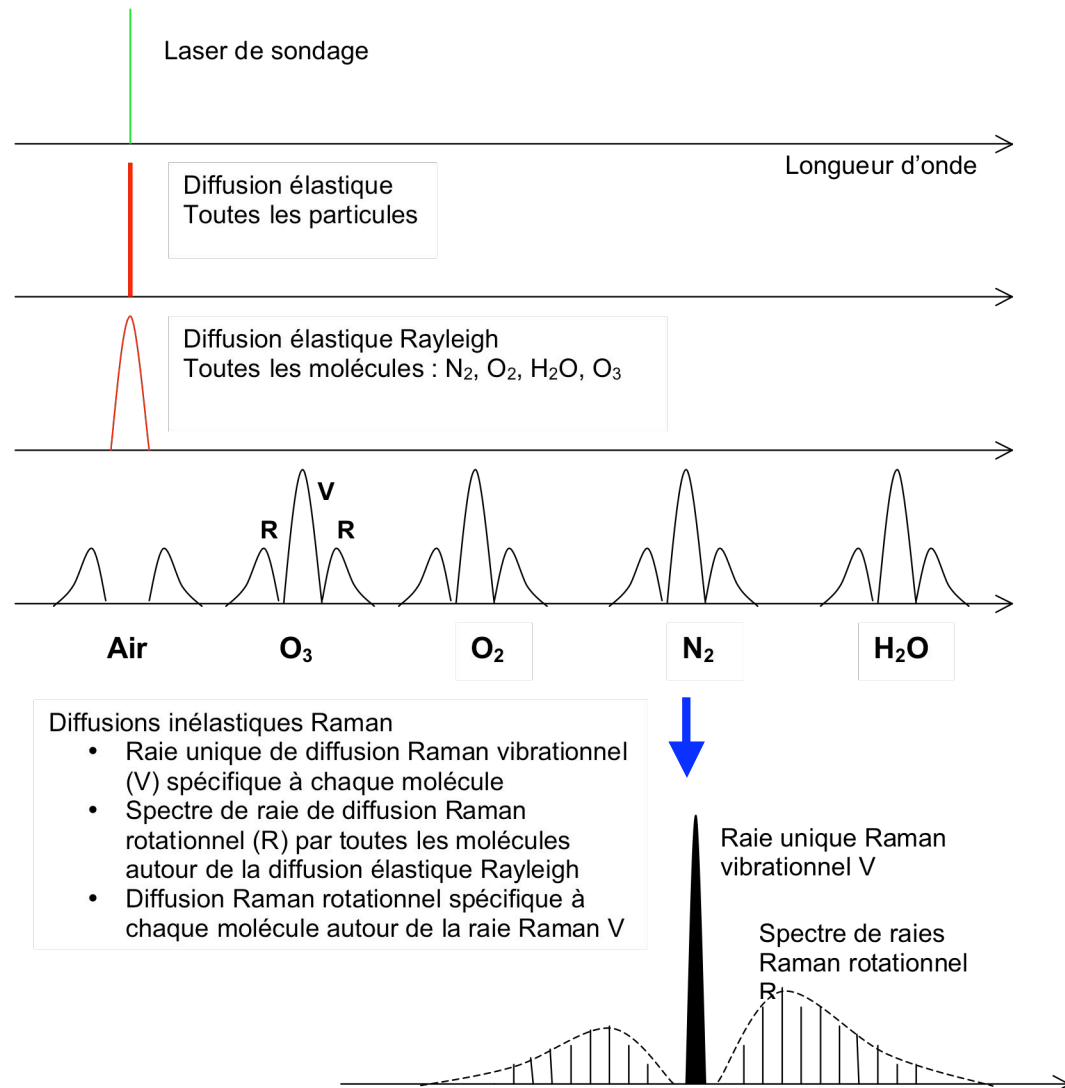
---

- Diffusion élastique & diffusion inélastique
- Rayleigh
  - Intensité
  - Indicatrice de diffusion
  - Spectre
- Brillouin
- Raman
  - Vibrationnel
  - Rotationnel



# Processus de Diffusion

- Les processus de diffusion sont le support et la signature de la mesure par Lidar
- Ensemble des spectres diffusés par les particules et les molécules présentes dans le volume diffusant pour une émission laser à une seule longueur d'onde fixe
- Le déplacement de fréquence par effet doppler n'est pas représenté





# Processus de Diffusion

---

Diffusion élastique moléculaire (Rayleigh)

$$\alpha_{e,m} (m^{-1}) = 2,89 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\rho(hP)}{T(K) [\lambda(\mu m)]^{-4,08}}$$

$$\beta_{\pi,m} (m^{-1} sr^{-1}) = \frac{3}{8\pi} \alpha_{e,m}$$

Diffusion inélastique moléculaire Raman



# Diffusion élastique par Molécules

- Le spectre diffusé par les molécules est large pour les conditions standard de pression et température.
- Le spectre diffusé est le résultat de plusieurs processus de diffusion qui s'ajoutent : Rayleigh, Brillouin
- Le spectre diffusé a une forme gaussienne qui reproduit la distribution des vitesses des molécules sur la ligne de visée (les molécules se déplacent dans toutes les directions, la projection des vitesses conduit à observer des vitesses relatives positives et négatives)
- Le spectre est centré sur la fréquence (longueur d'onde) d'émission du Laser  $\nu_0$  ( $\lambda_0$ ),  $\delta\nu$  demie largeur à 1/e,  $\Delta\nu$  demie largeur à mi-hauteur

$$f(\nu, \nu_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \delta\nu} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\delta\nu}\right)^2\right]$$

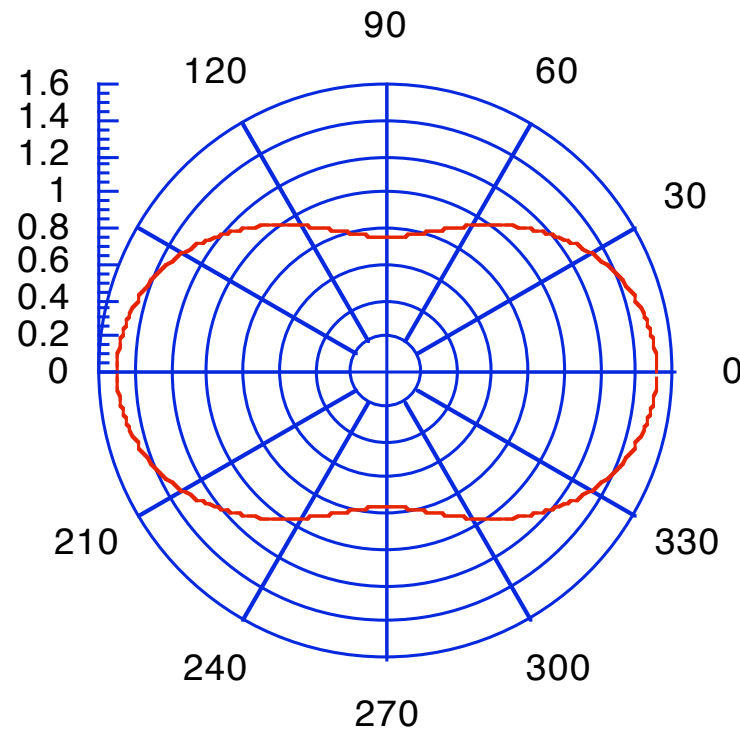
$$\delta\nu = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

$$\delta\nu(\text{MHz}) = \frac{676}{\lambda(\mu\text{m})}$$

$$\Delta\nu = 2\sqrt{\text{Ln}2} \delta\nu$$

# Indicatrice de diffusion

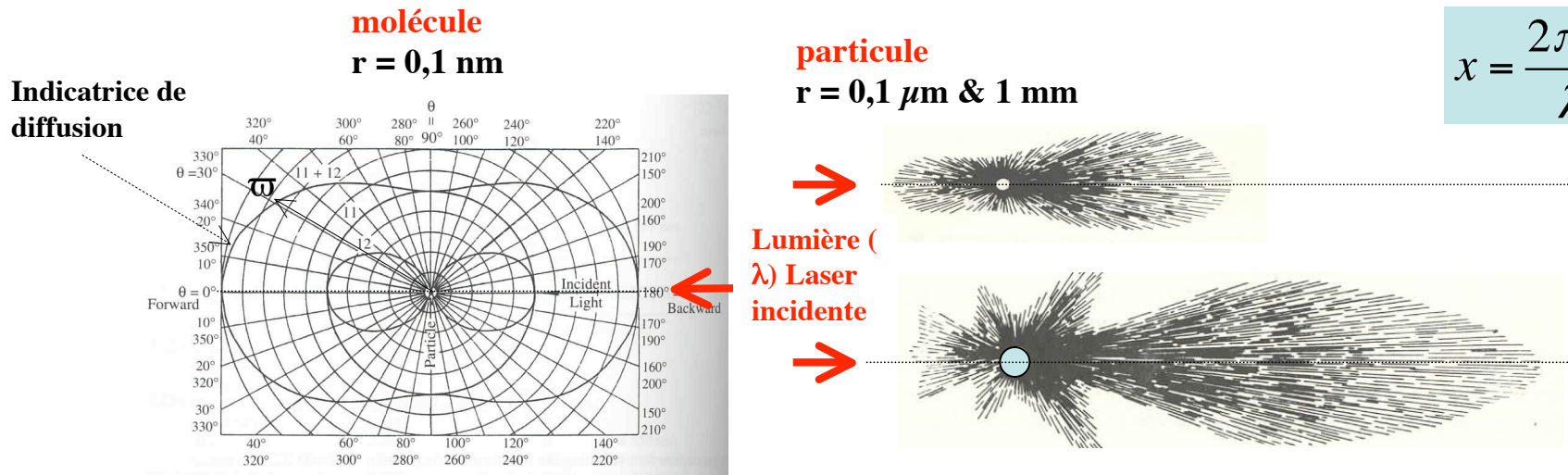
- Diffusion par les molécules  $P(\Theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2(\Theta))$



# Indicatrice de Diffusion

Chaque particule ou molécule diffuse la lumière Laser dans toutes les directions suivant une indicatrice de diffusion qui dépend de sa taille, de sa forme, de son indice de réfraction, etc. Le paramètre de taille ( $x$ ) qui est le rapport entre le rayon ( $r$ ) et la longueur d'onde incidente ( $\lambda$ ) est essentiel afin de connaître le régime de diffusion élastique : Rayleigh (molécules) ou Mie (particules, gouttelettes). Les molécules diffusent en  $\lambda^{-4}$ , les particules et gouttes en  $\lambda^{-m}$ ,  $m$  variant de 0 à 2.

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}$$



- Diagramme polaire ou indicatrice de diffusion. L'intensité de la lumière diffusée est représentée en coordonnées polaires par un vecteur centré sur le diffuseur, sa longueur est proportionnelle à l'intensité et sa direction indique l'angle de diffusion
- Symétrie de révolution autour de l'axe de propagation de la lumière Laser pour des diffuseurs sphériques
- Diffusion élastique : la lumière diffusée à la même longueur d'onde que la lumière laser incidente (sans tenir compte du changement spectral associé à l'effet Doppler)



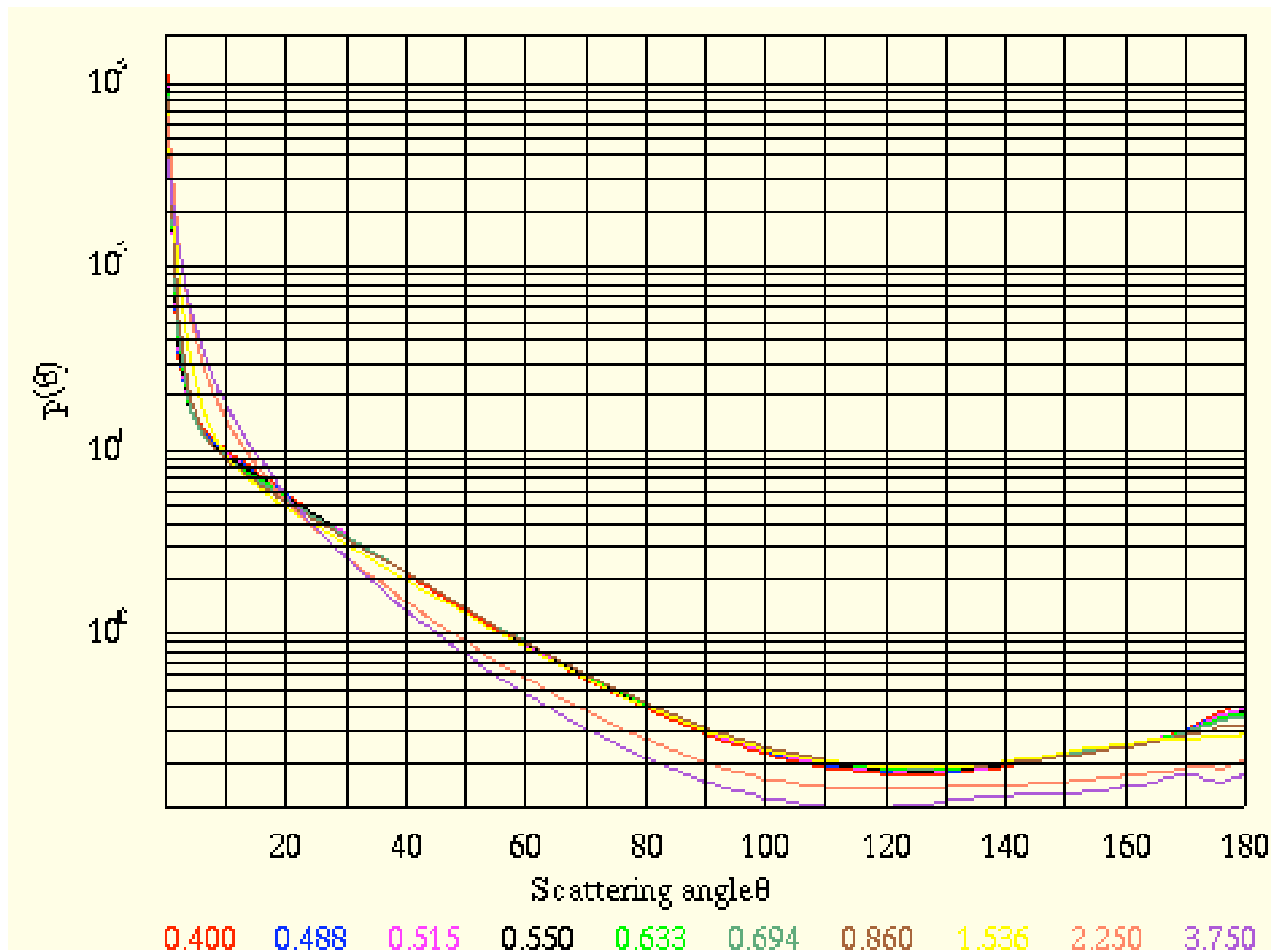
# Diffusion par les Particules

---

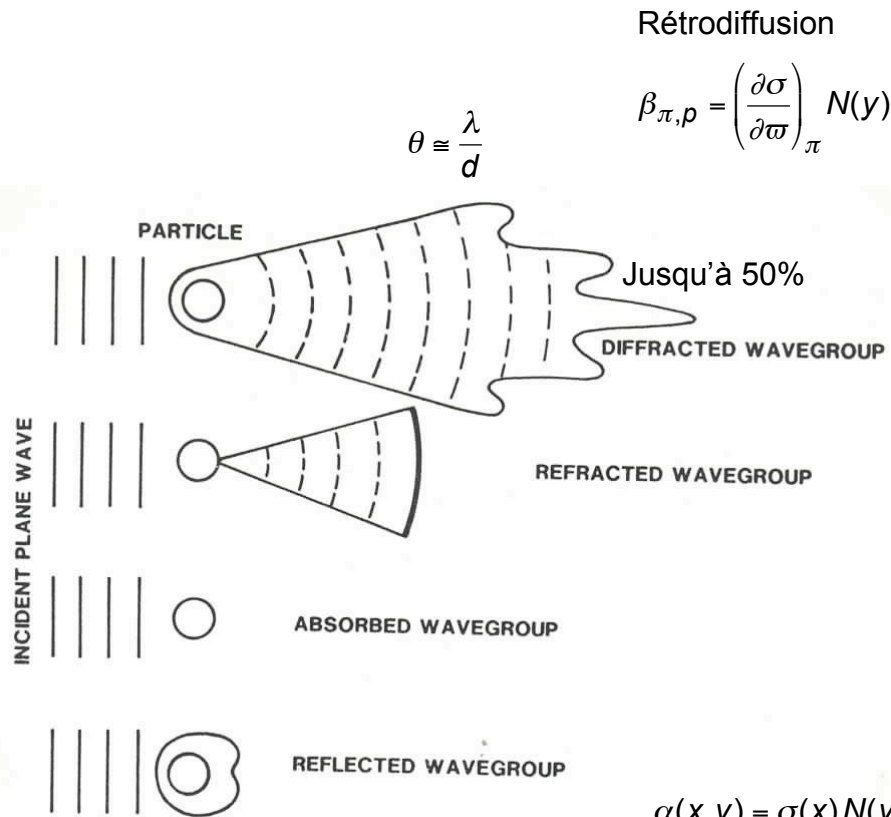
- Diffusion élastique & diffusion inélastique
- Mie
  - Intensité
  - Indicatrice de diffusion
- Raman
  - Vibrationnel

# Aérosols Continentaux

## Fonction de phase

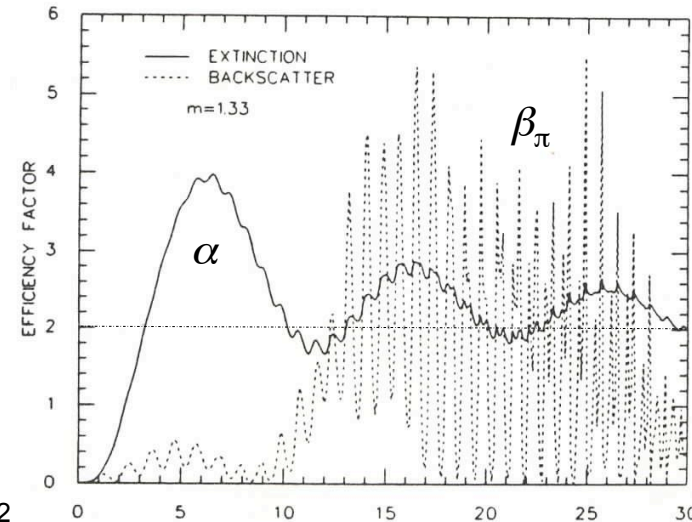
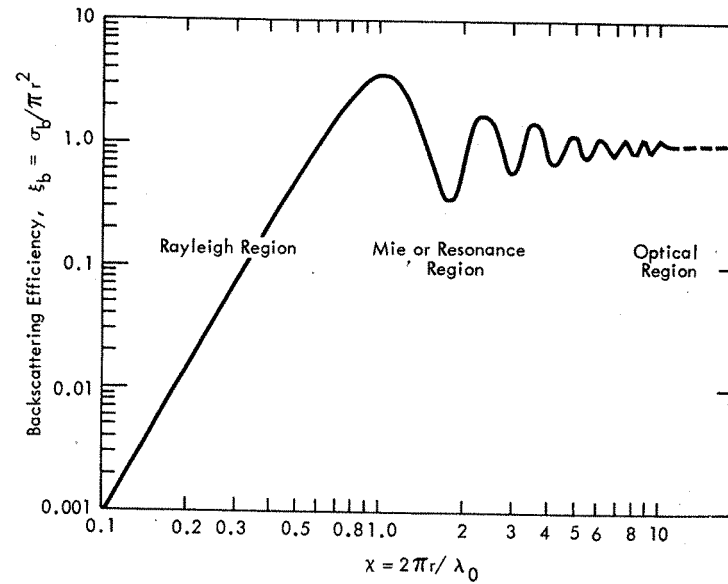


# Diffusion de « Mie »



$$\alpha(x, y) = \sigma(x) N(y)$$

$$\sigma_p(x) = Q_{ext,p}(x, m) (\pi r_p^2)$$

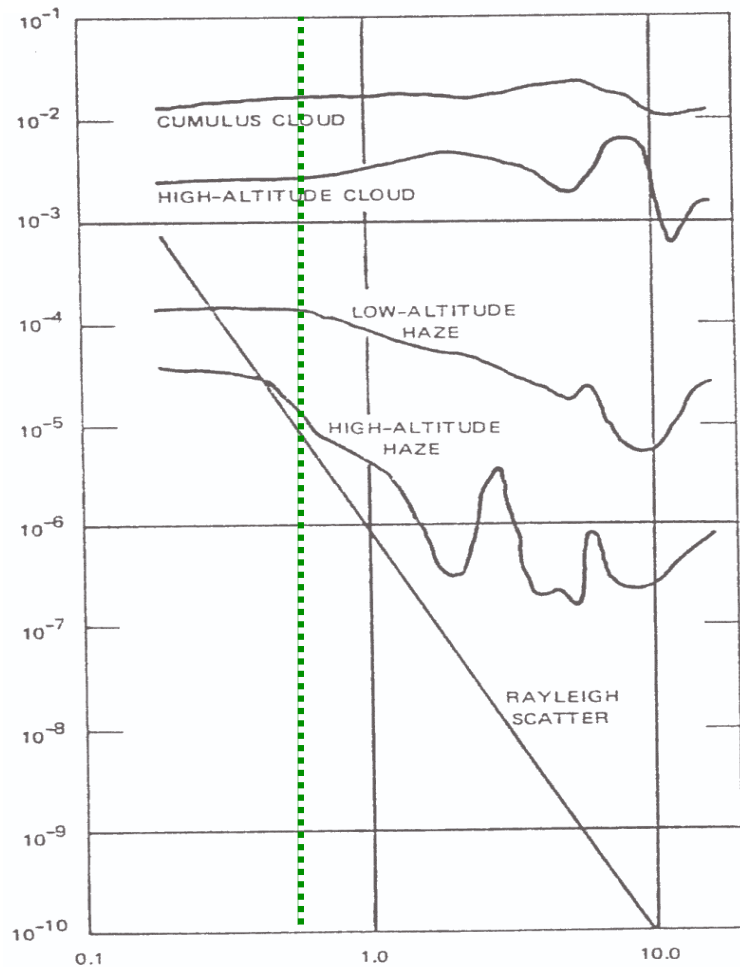


eau

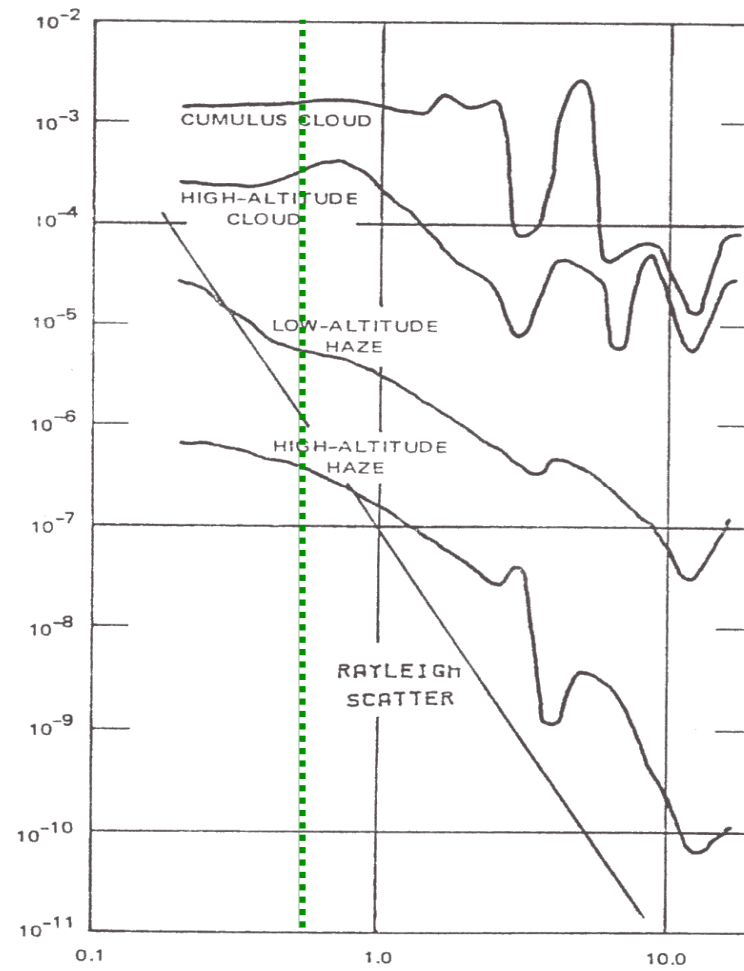


# Extinction & Rétrodiffusion

$\sigma$  : Coefficient d'extinction (par diffusion)

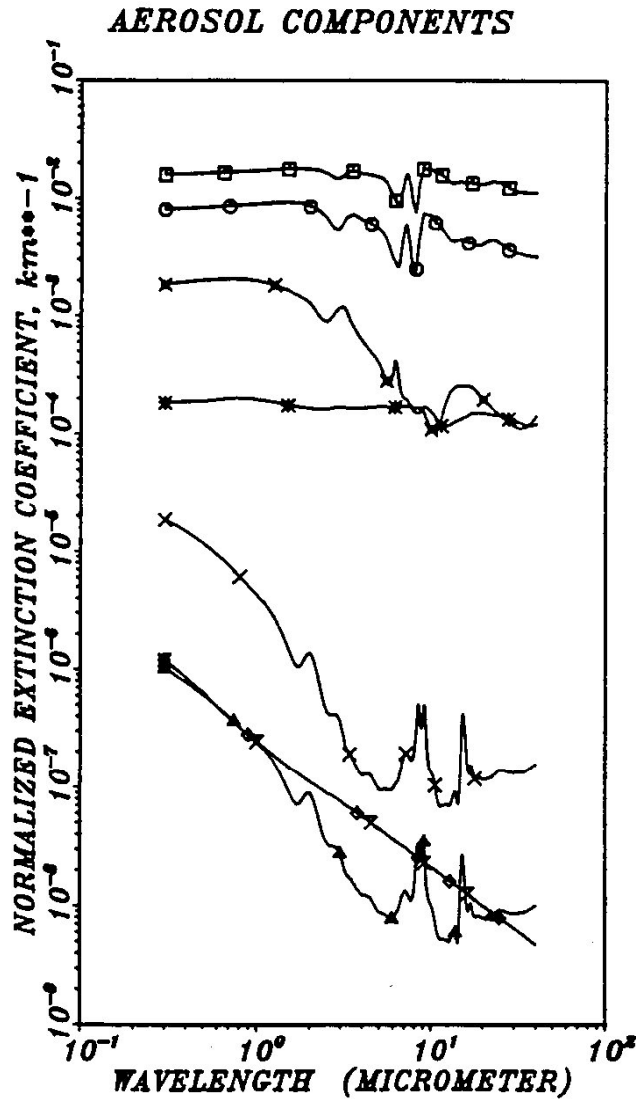


$\beta$  : Coefficient de rétrodiffusion)

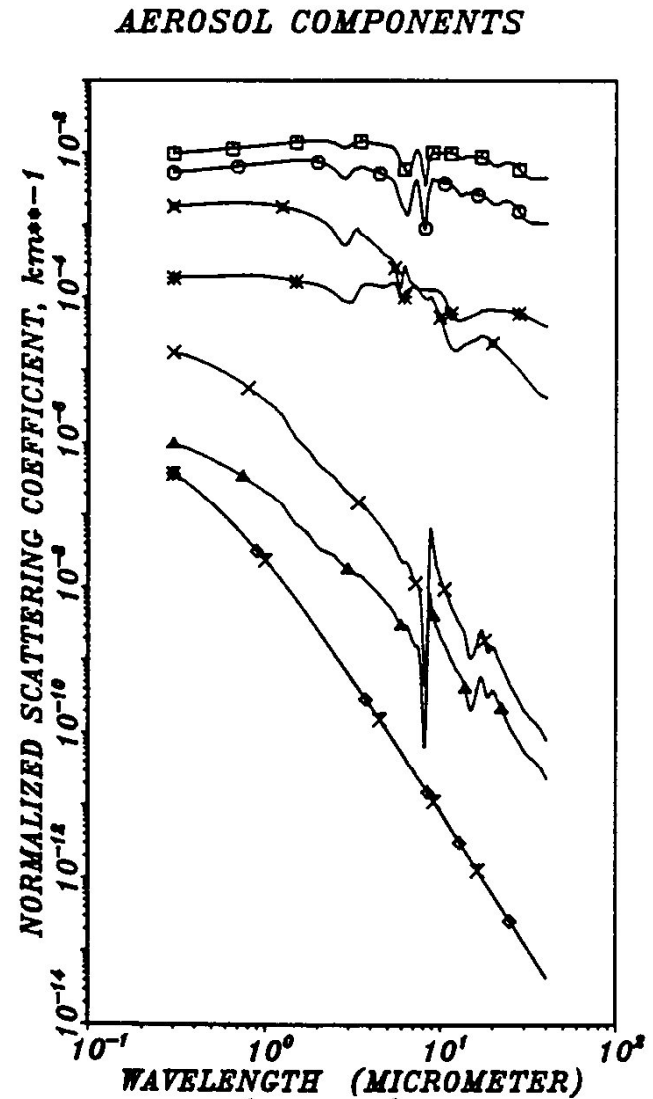


Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

# Extinction & Rétrodiffusion



- ▣ DUST-LIKE (1)
- DUST-LIKE (2)
- ▲ WATER-SOLUBLE (1)
- × WATER-SOLUBLE (2)
- ◆ SOOT(1)
- × SOOT (2)
- × OCEANIC (1)
- ✱ OCEANIC (2)





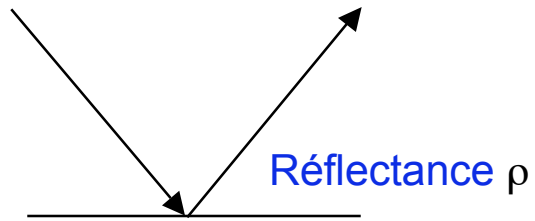
# Dépolarisation

---

- La lumière laser diffusée peut être dépolarisée
- Si la lumière laser est polarisée linéairement, la lumière diffusée est elliptique
- Les particules sphériques ne dépolarisent pas
- Les cristaux : plaquettes, colonnes hexagonales, etc, dépolarisent par réflexion frustrée (suivant les lois de Fresnel)
- Les diffusions multiples dépolarisent la lumière diffusée

# Cibles Dures

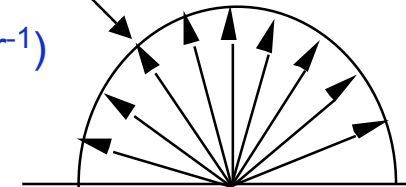
Cibles coopératives, sol, bâtiments, végétation, nuages denses, ...



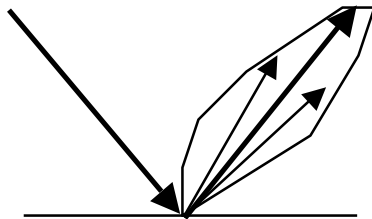
Spéculaire (miroir)

Réflectivité ( $\text{sr}^{-1}$ )

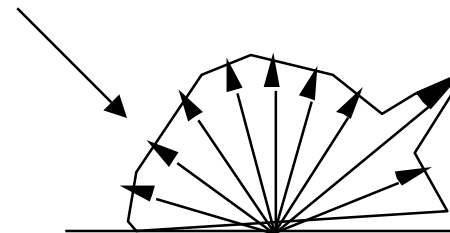
$$\text{nadir } \frac{\rho \cos \theta}{\pi}$$



diffuse (Lambert)

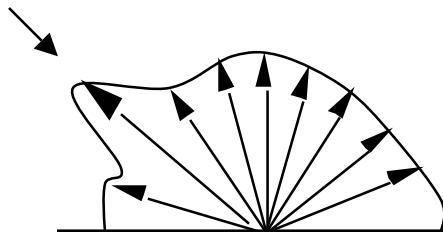


Majoritairement spéculaire (eau)



Majoritairement diffus

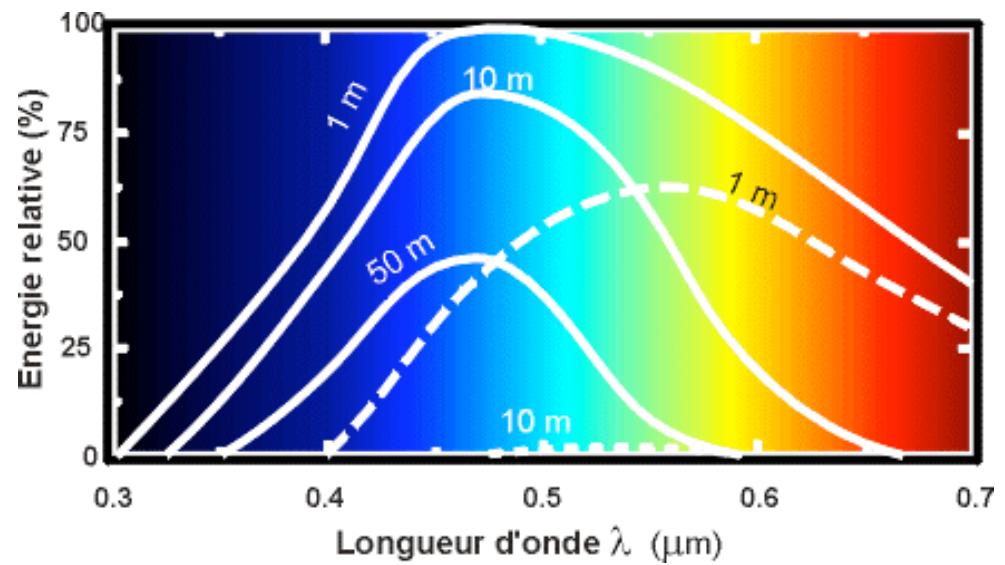
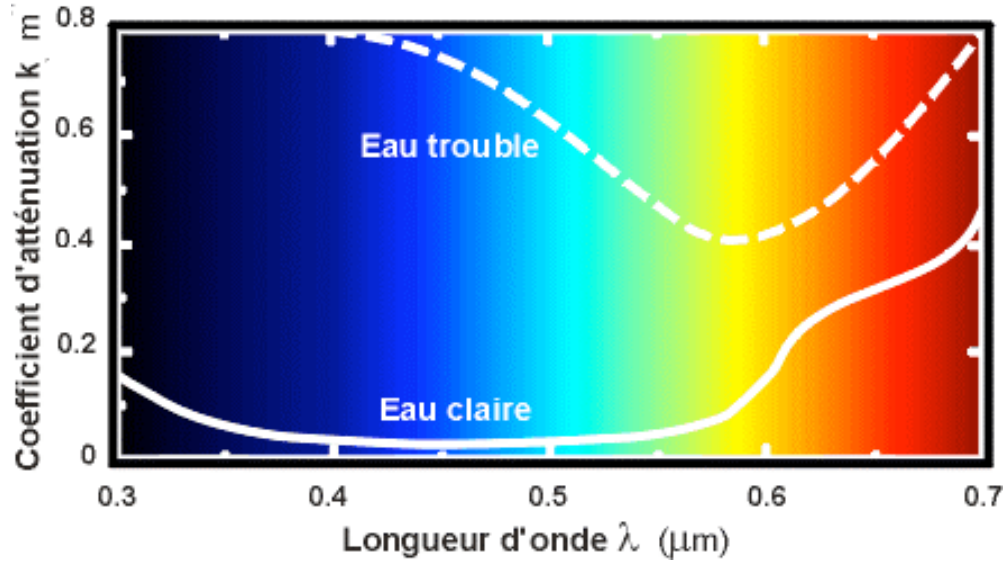
Rugosité de surface



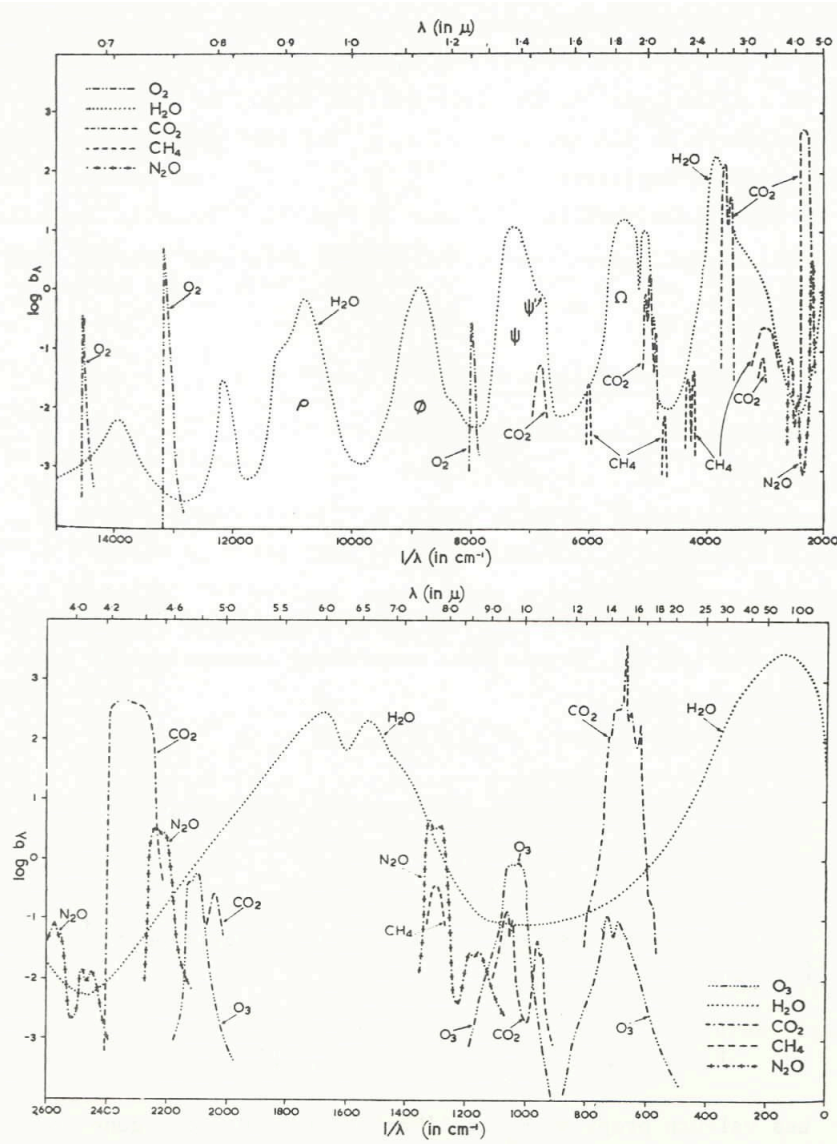
"Hot spot"

BRDF

# Transmission de l'eau



# Absorption moléculaire



- Les molécules d'intérêt atmosphérique sont plutôt des petites molécules

## Énergie d'une molécule

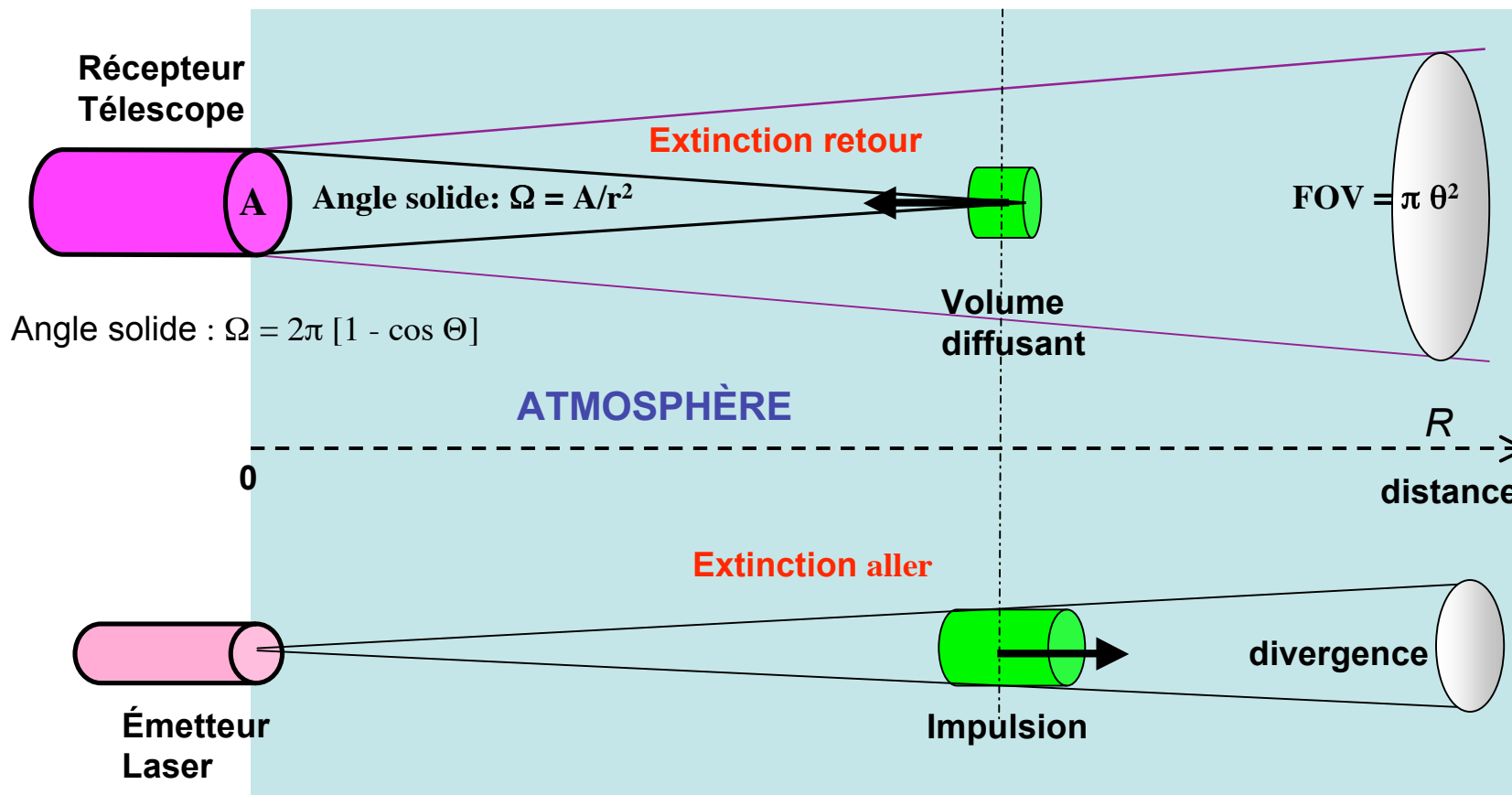
- Énergie électronique  $E_e$  transition entre états électroniques  $\Delta E_e$  dans le domaine UV et visible
- Énergie vibrationnelle  $E_v$  transition entre états vibrationnels  $\Delta E_v$  dans le proche IR et l'IR
- Énergie de rotation  $E_r$  transitions entre états rotationnels  $\Delta E_r$  dans l'IR lointain
- Bandes d'absorption dues à des transitions entre états vibrationnels pour les molécules atmosphériques



# Bilan & Équation Lidar

# Lidar = Bilan Optique

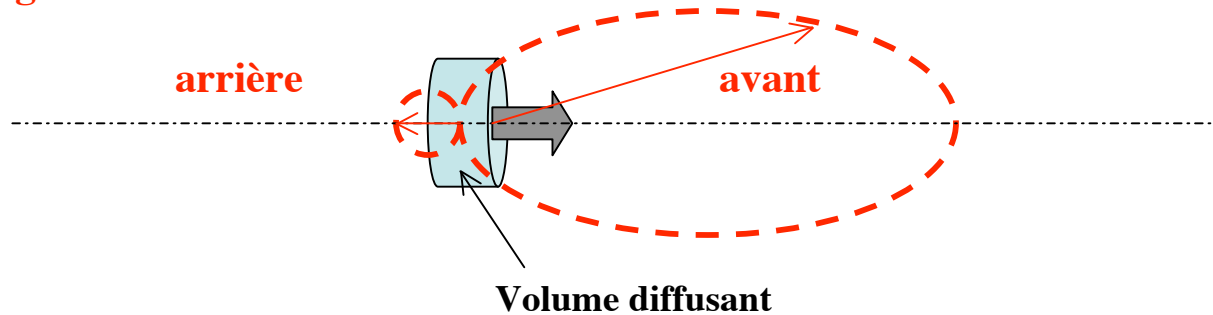
Énergie laser  $\Rightarrow$  Puissance reçue



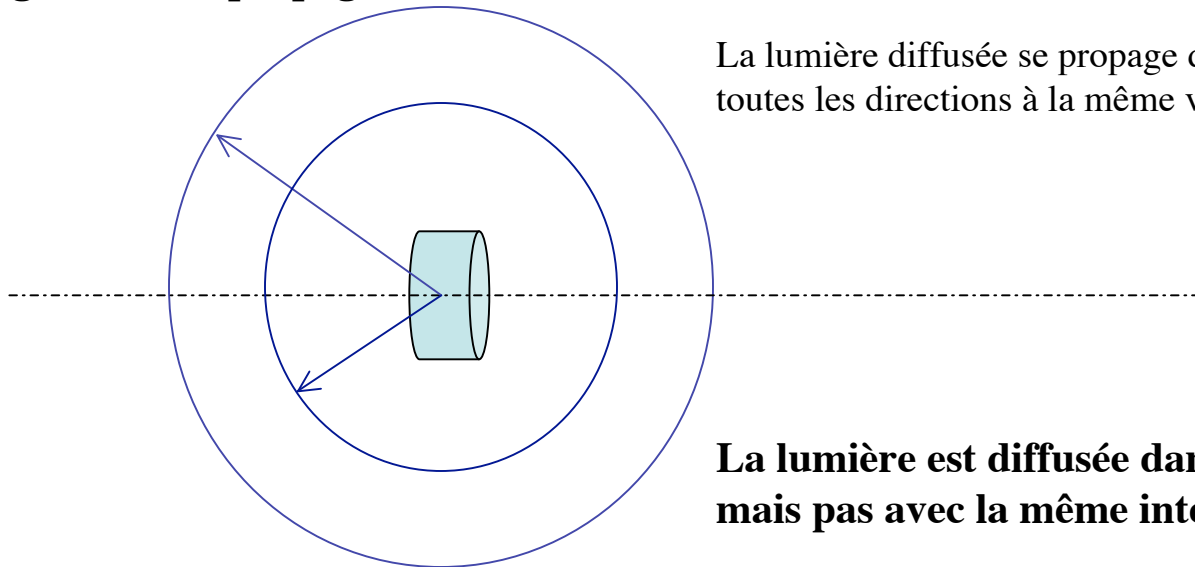


# GÉOMÉTRIE DU PROBLÈME DIRECT

## Diagramme de diffusion



## Diagramme de propagation



La lumière diffusée se propage dans toutes les directions à la même vitesse

**La lumière est diffusée dans tout l'espace mais pas avec la même intensité**

**Problème direct** : L'équation Lidar est l'expression du bilan radiométrique qui relie le signal Lidar  $P_L(R)$  aux variables atmosphériques et aux grandeurs instrumentale

Elle exprime la Puissance diffusée reçue par le télescope en fonction de l'énergie ou de la Puissance Laser émise

$$P_\ell(r) = P_\ell(0) \exp\left[-\int_0^R \alpha(y) dy\right]$$

$$I_\pi(R) = \beta_\pi(R) P_\ell(R) \frac{ct_\ell}{2}$$

$$I_\pi(0) = I_\pi(R) \exp\left[-\int_R^0 \alpha(y)(-dy)\right]$$

$$P_L(0) = \int_{\Omega} I_\pi(0) d\Omega = I_\pi(0) \Omega = I_\pi(0) \frac{A}{R^2} \quad P_L(R) = I_\pi(r) \frac{A}{R^2} \exp\left[-\int_0^R \alpha(y) dy\right]$$

$$P_L(R) = \beta_\pi(R) P_\ell(0) \frac{ct_\ell}{2} \frac{A}{R^2} \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(y) dy\right]$$

# Équation Lidar Optique

Pour un Laser pulsé et une impulsion laser courte la puissance optique peut s'écrire sous la forme d'un produit simple :

$$P_L(r) = \beta_\pi(R) P_\ell(0) \frac{ct_\ell}{2} \frac{A}{R^2} \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(y) dy\right]$$

$$E = P_\ell(0) t_\ell$$

$$P_L(r) = \frac{c}{2} E A \frac{\beta_\pi(R)}{R^2} \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(y) dy\right]$$

La variable instrumentale est essentiellement le produit de l'énergie laser par impulsion multipliée par la surface du télescope et le rendement quantique du détecteur

$$s_L(R) = P_L(R) R^2$$

$$s_L(R) = K \beta_\pi(R) \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(y) dy\right]$$

$$K_{op}(R) = \frac{c}{2} E A m g(R)$$

# Équation Lidar Électrique

**Effet Photo-électrique** : conversion optique  $\Rightarrow$  électrique

**Détection directe** : photons  $\Rightarrow$  photo-électrons

Détection quadratique : champs électrique  $\Rightarrow$  courant

Le rayonnement EM à détecter est constitué de photons (quantités élémentaires de lumière :  $h\nu$ ) ou d'ondes électro-magnétiques (champ électrique  $E \cos \omega t$ )

Nombre de photons par seconde:  $N(t) = P_L(t) / h\nu$

Rendement quantique  $\eta_d < 1$

Mode de détection continue ou directe : le signal Lidar  $P_L(t)$  est continu et varie lentement avec le temps

Nombre de photo électrons (après détection) :  $N^e(t) = \eta_d s_L(t) / h\nu$ ,

Courant de cathode :  $I_c(t) = e N^e(t)$  Courant d'anode :  $I_a(t) = e N^e(t) G$

Temps de détection court

$$s_L(R) = K \beta_{\pi}(R) \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(y) dy \right] \quad K_{él}(R) = \frac{\lambda}{2h} \eta_d e G_j E A m g(R)$$

## Instrument Lidar

- Laser:  $\lambda = 0,53 \mu\text{m}$ ,  $E = 50 \text{ mJ}$  par impulsion,
- Télescope :  $A = 0,1 \text{ m}^2$ ,  $m = 0,10$  & **recouvrement** = 1
- Détection : photo multiplicateur:  $\eta_d = 0,10$  et gain :  $G = 10^6$ , résistance de charge :  $= 50 \Omega$

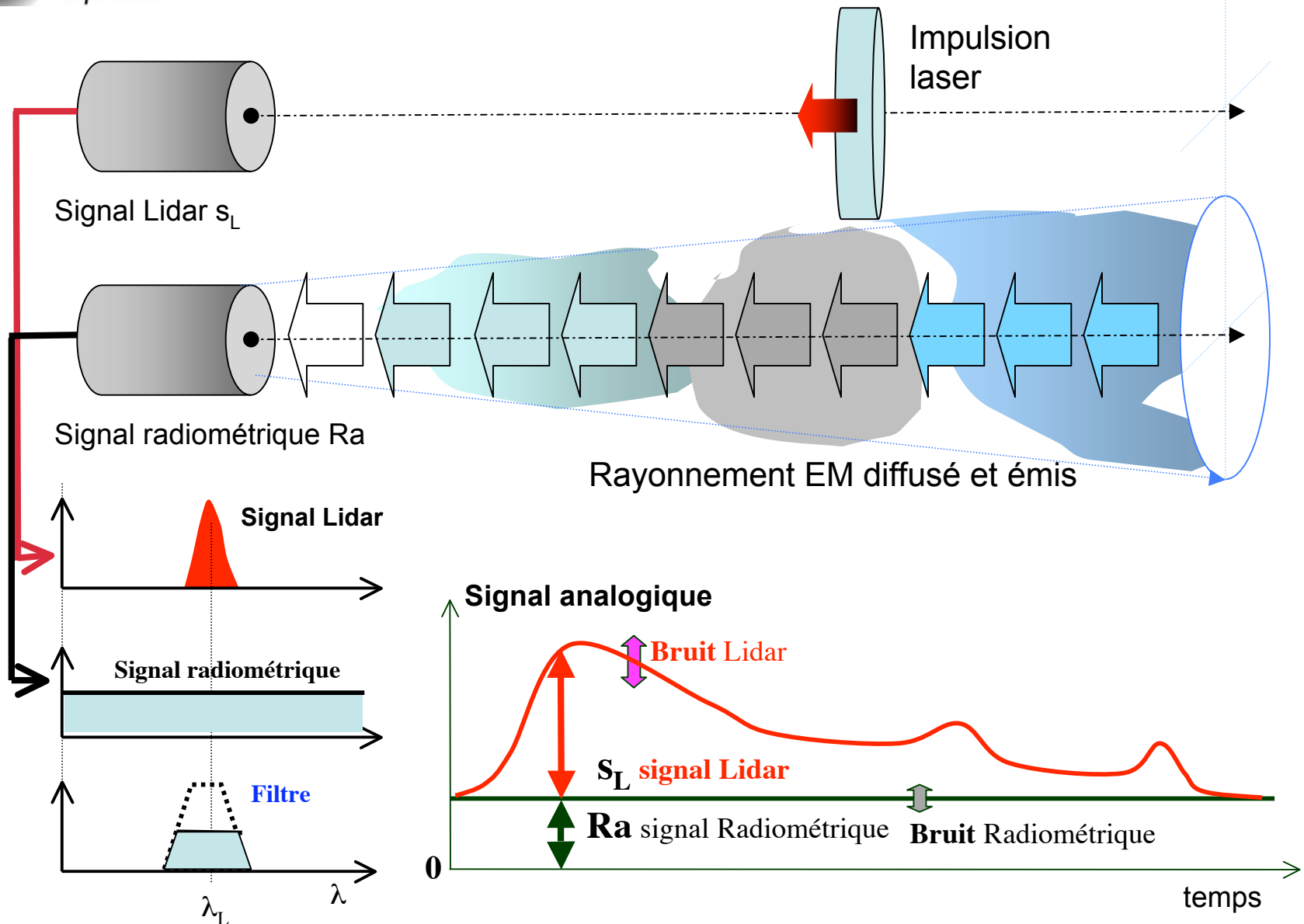
## Propagation & Atmosphère

- Molécules  $\beta = 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
- Visée horizontale, transmission (simple)  $T = 0,90$  for 3 km,  $T = 0,55$  at 20 km



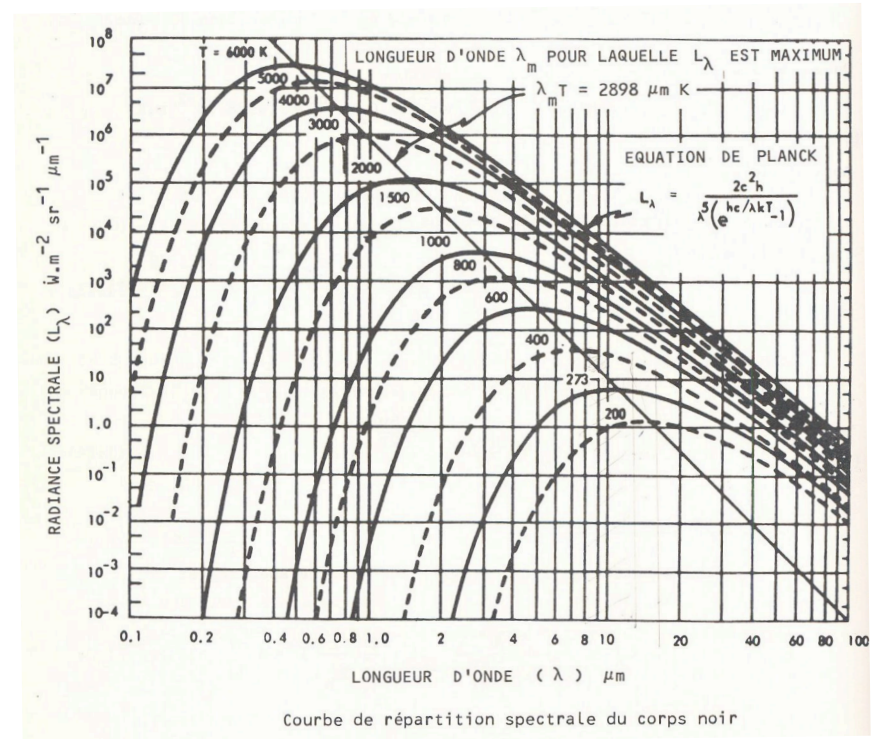
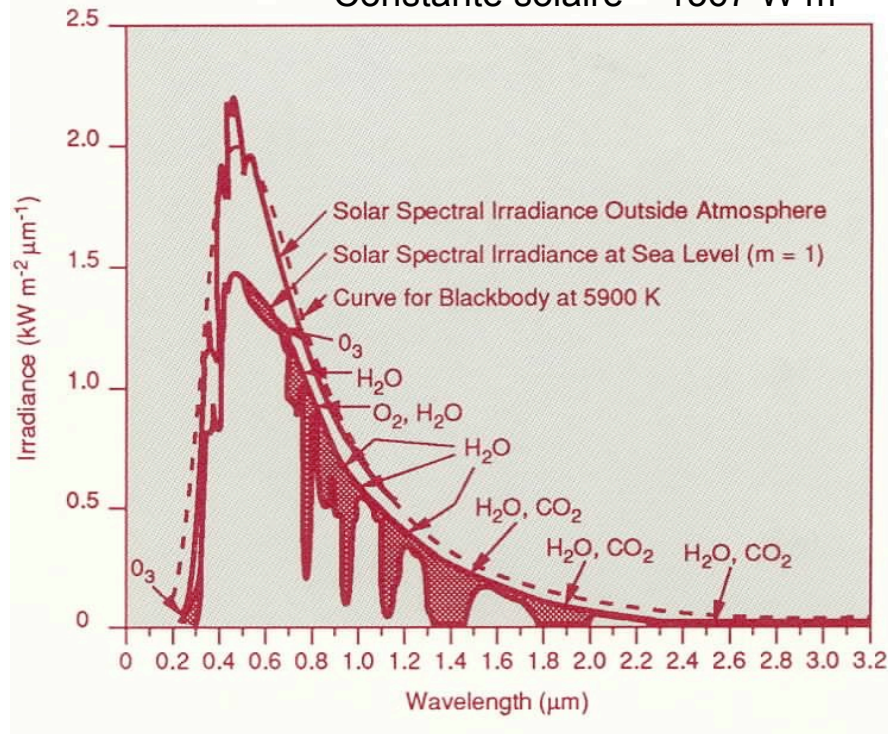
Distance	Puissance optique (W)	Puissance optique (ph s <sup>-1</sup> )	Photons par $\mu\text{s}$	Photo électrons $\mu\text{s}^{-1}$	Courant électrique	tension
<b>3 km</b>	$6.7 \cdot 10^{-9}$ (6,7 nW)	$1,8 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^3$	0,29 mA <b>Courant analogique</b>	14 mV
<b>20 km</b>	$5.6 \cdot 10^{-11}$ (56 pW !)	$1,5 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^2$	15 <b>Comptage photoélectrons</b>	2,4 $\mu\text{A}$	0,12 mV

# DD = Signaux Utile & Parasite



# Fond de Scène

Constante solaire = 1367 W m<sup>-2</sup>



## Luminance atmosphérique (L) du fond de scène

Visible : lumière solaire diffusée

Infra rouge : rayonnement du corps noir, nuages, végétation, ...

## Signal optique parasite (Ra) dû au fond de scène

$$Ra = LA m \pi \theta^2 D$$

A (m<sup>2</sup>) : surface du télescope

L ( W m<sup>-2</sup> nm<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> ) : densité spectrale de luminance énergétique

D (nm ) : largeur à mi-hauteur du filtre, au mieux  $D/\lambda \geq 6 \cdot 10^{-3}$  (3 nm à 532 nm)

$\theta$  ( rad ) : champs de vue du télescope (mi angle)

- Visible – Luminance du ciel (L)
- ciel clair de jour :  $L \sim 0,1 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
- ciel nuageux de jour :  $L \sim 1 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
- nuit :  $L \sim 10^{-7} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
- Infrarouge ( 9 to 11  $\mu\text{m}$  ) – nuages d'eau liquide de basse altitude
- $L \sim 10^{-3} \text{ à } 10^{-2} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  pour  $T = 200 - 300 \text{ K}$





# DD = Comparaison des Signaux

## Signal Radiométrique

Visible :  $L=0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

$A=0,1 \text{ m}^2$  (30-cm de diamètre),  $m=0,1$ ,  $D=3 \text{ nm}$

$\theta=1 \text{ mrad} \rightarrow R_a=3 \cdot 10^{-8} \text{ W}$

$\theta=0,1 \text{ mrad} \rightarrow R_a=3 \cdot 10^{-10} \text{ W}$

$\theta=10 \mu\text{rad} \rightarrow R_a=3 \cdot 10^{-12} \text{ W}$

## Signal Lidar À $0,53 \mu\text{m}$

Distance 3 km  $P_L=6,7 \times 10^{-9} \text{ W}$

Distance 20 km  $P_L=5,6 \times 10^{-11} \text{ W}$

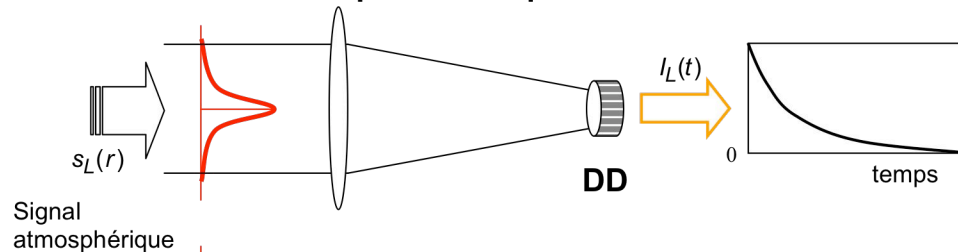
En pratique on mesure :  $\langle P \rangle = \langle P_L + R_a \rangle$

Signal Lidar :  $\langle P_L \rangle = \langle P \rangle - \langle R_a \rangle$

Le signal radiométrique est « coûteux » en numérisation  $\rightarrow$  limitation de la dynamique du signal, et en termes de bruit de détection (qui ne peut en aucune manière être soustrait)

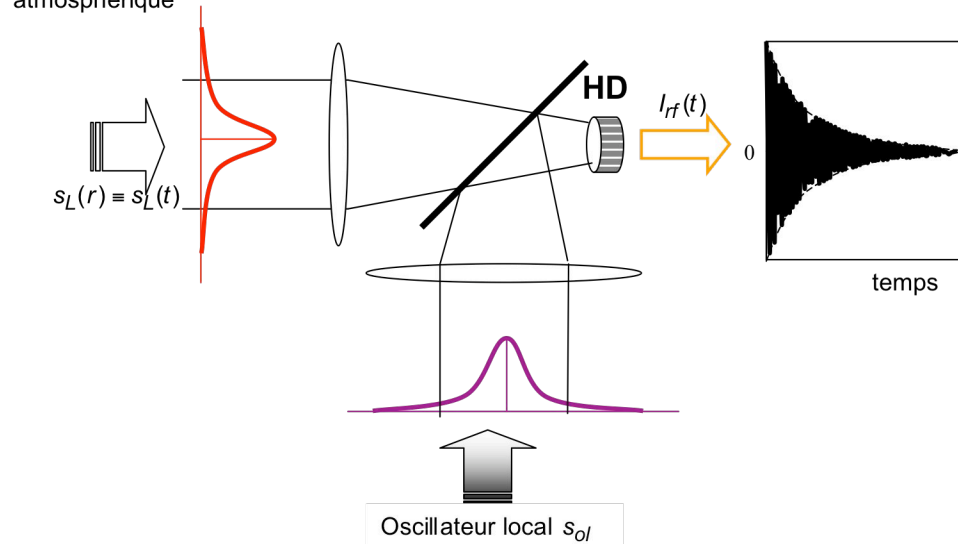
# Détection Directe vs Hétérodyne

**Détection continue ou directe (DD)**, le détecteur reçoit le signal atmosphérique  
 Le courant électrique est quasi continu



$$i_L(t) \propto \eta_d E_L(t) E_L^*(t)$$

$$= \eta_d |E_L(t)|^2 = \eta_d P_L(t)$$

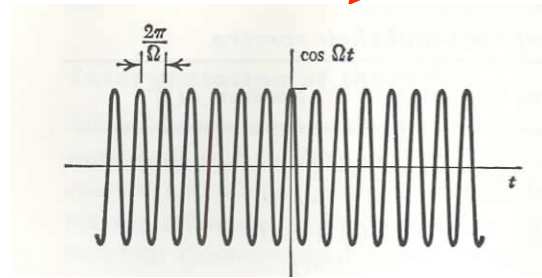
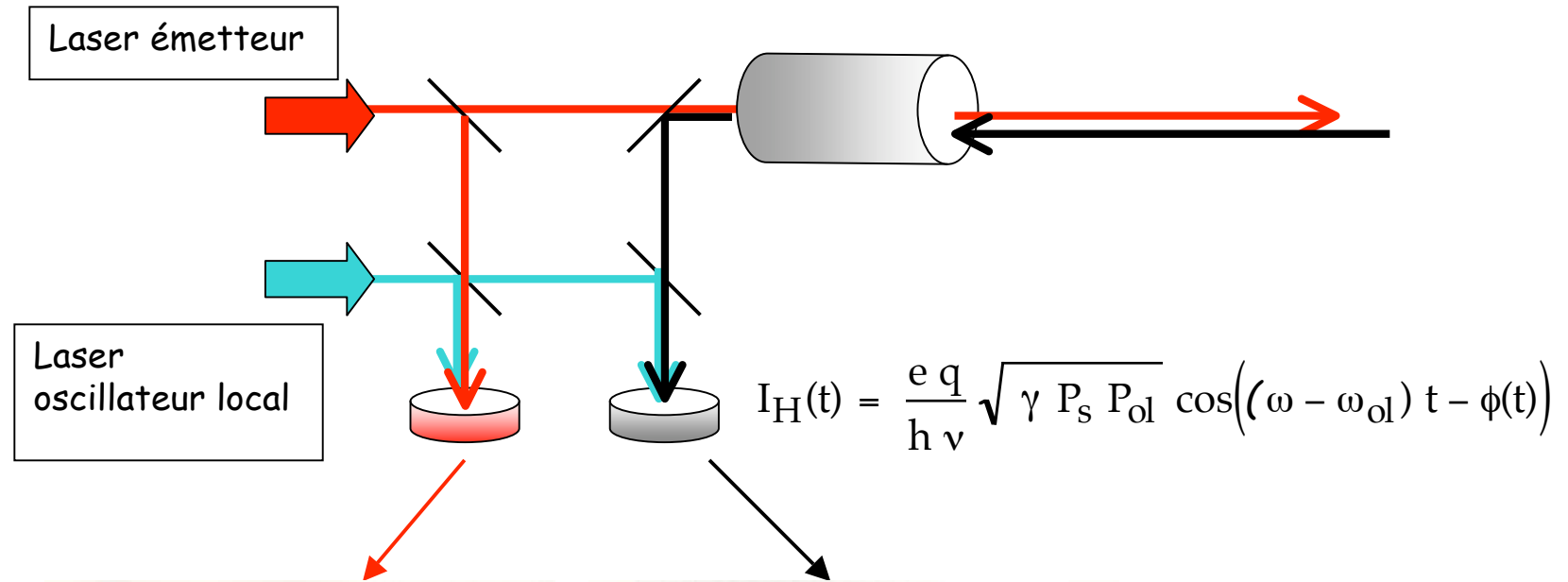


$$i_{rf}(t) \propto \eta_d E_L(t) E_{Ol}^*$$

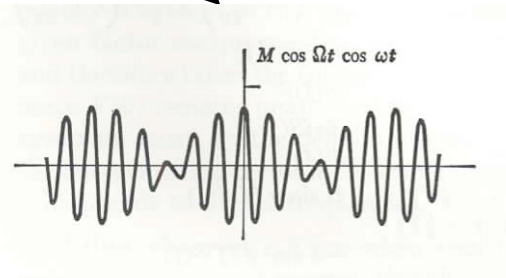
$$= \eta_d \sqrt{\gamma_h P_L(t) P_{Ol}} \cos[2\pi \Delta\nu_L t + \varphi(t)]$$

**Détection hétérodyne (DH)**, le détecteur reçoit à la fois le signal optique en provenance de l'atmosphère et le faisceau d'un laser (dit oscillateur local). Le courant électrique est alternatif radiofréquence. Le recouvrement spatial des 2 faisceaux optiques et leurs alignements sur le détecteur sont très importants pour une bonne efficacité de détection  $\gamma_h$

# Détection Hétérodyne



$$\Delta\nu_{l,ol} = (\nu_l - \nu_{ol})$$



$$\Delta\nu_L = (\nu_l - \nu_{ol} + \Delta\nu_D)$$

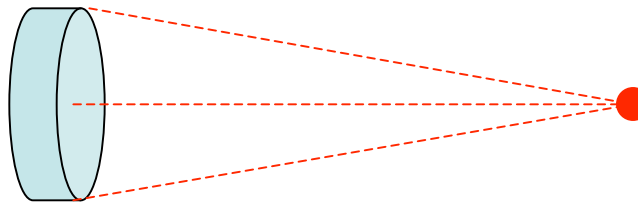
$$\Delta\nu_D = \Delta\nu_L - \Delta\nu_{l,ol}$$

Modulation du signal par effet de chatoiement

# Détection Directe vs Hétérodyne

- Le mode de détection hétérodyne impose une cohérence partielle des signaux atmosphériques
- La cohérence partielle donne l'effet de chatoiement ("speckle")
- En conséquence, les statistiques des signaux lidar sont fonction de l'effet de chatoiement, et peuvent être très différentes suivant le mode de détection
- Le mode de détection conditionne la conception instrumentales et la stratégie d'accumulation des mesures

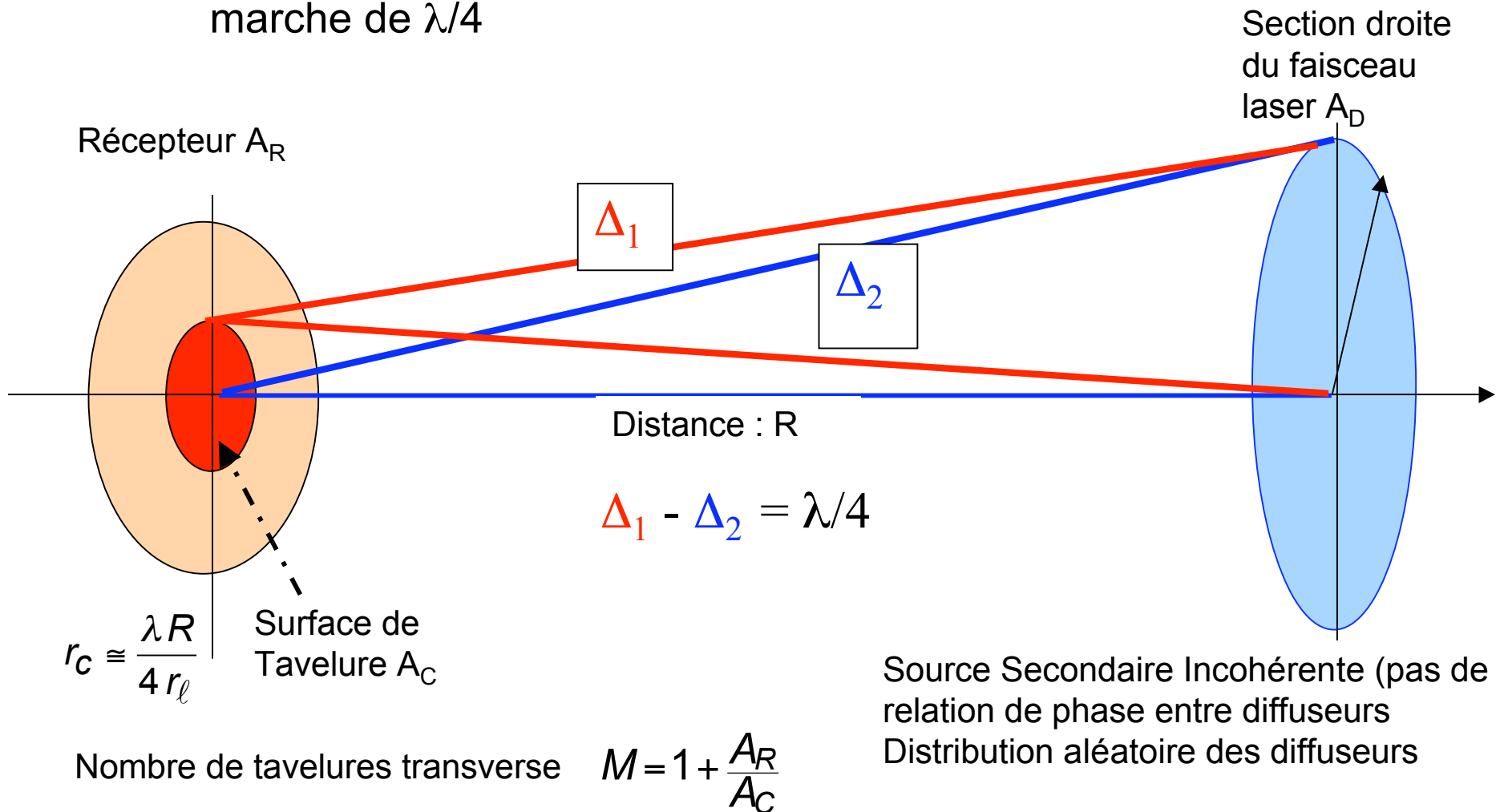
Nombre  $M$  de tavelures  
(speckles) sur le récepteur



- Éclairement cohérent par une source ponctuelle
- Éclairement partiellement cohérent par une source étendue

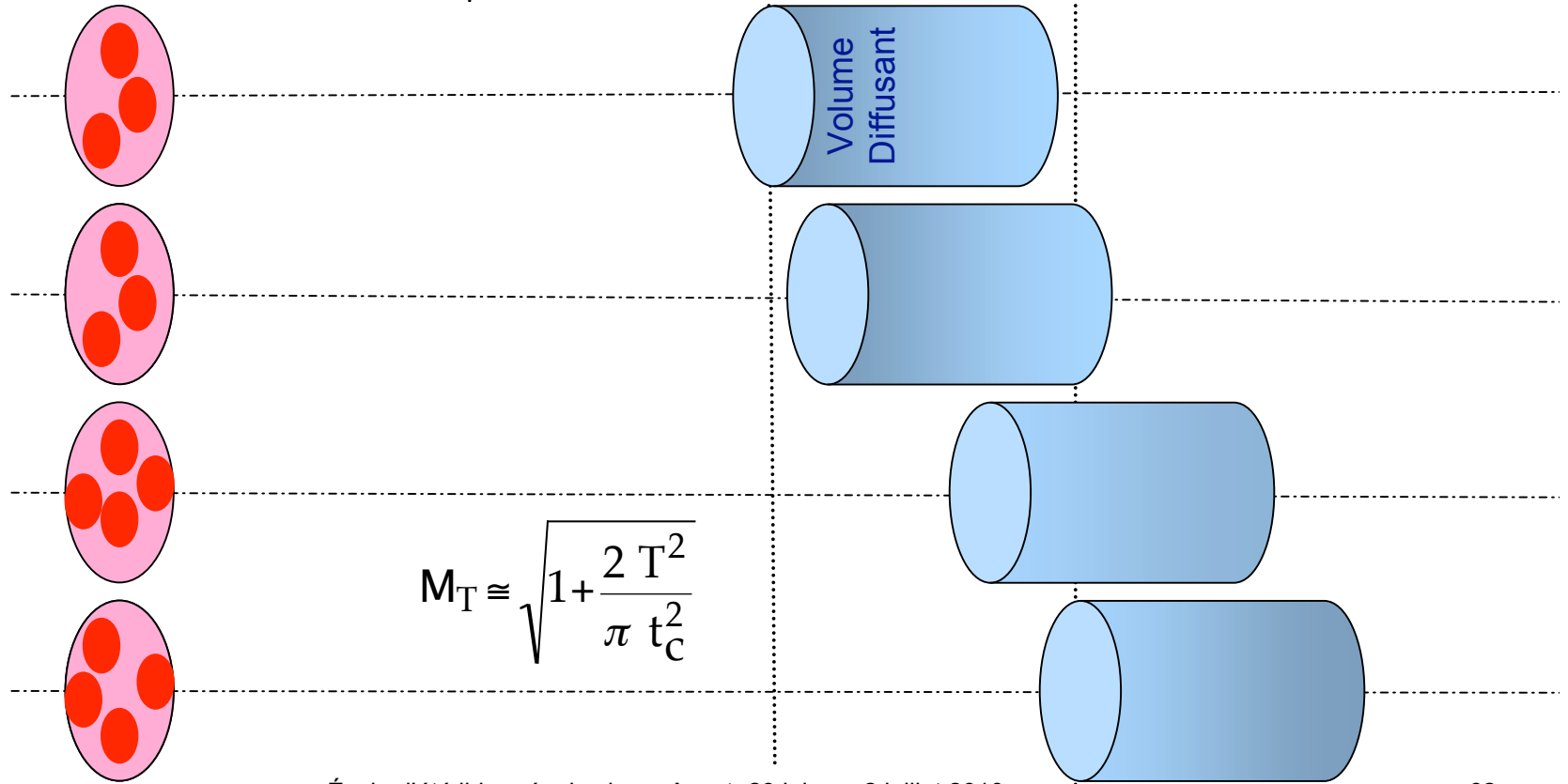
# Cohérence Transverse

- Une tavelure est définie pour la différence de différence de marche de  $\lambda/4$

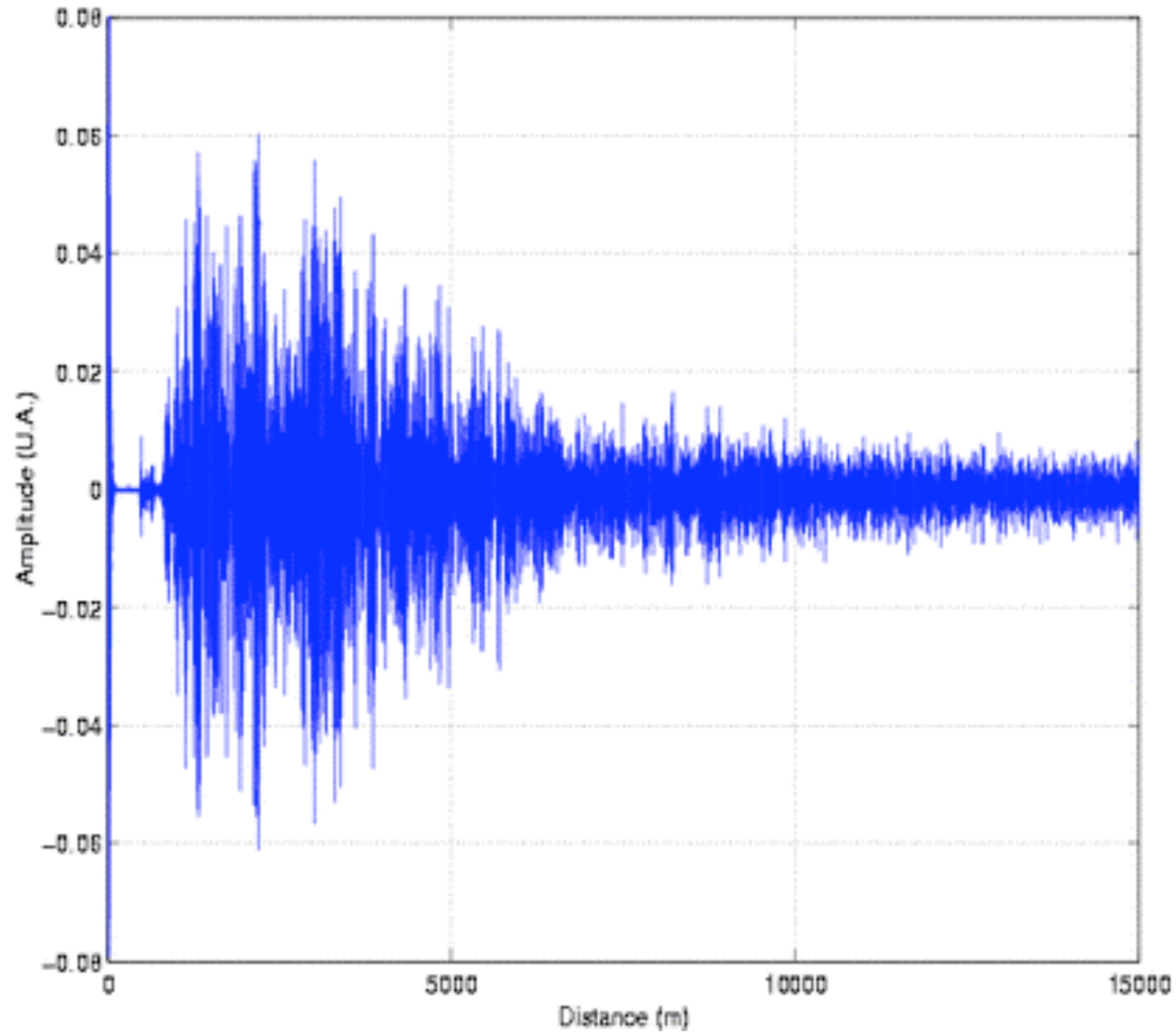


# Cohérence Longitudinale

- En l'absence de turbulence, le temps de cohérence du signal lidar est limité par la durée de l'impulsion laser. La figure de tavelures se modifie durant la propagation de l'impulsion laser
- On peut calculer la figure de tavelures avec la technique numérique des écrans de phase
- Nombre de tavelures  $M_T$  dans une porte de mesure de durée  $T$



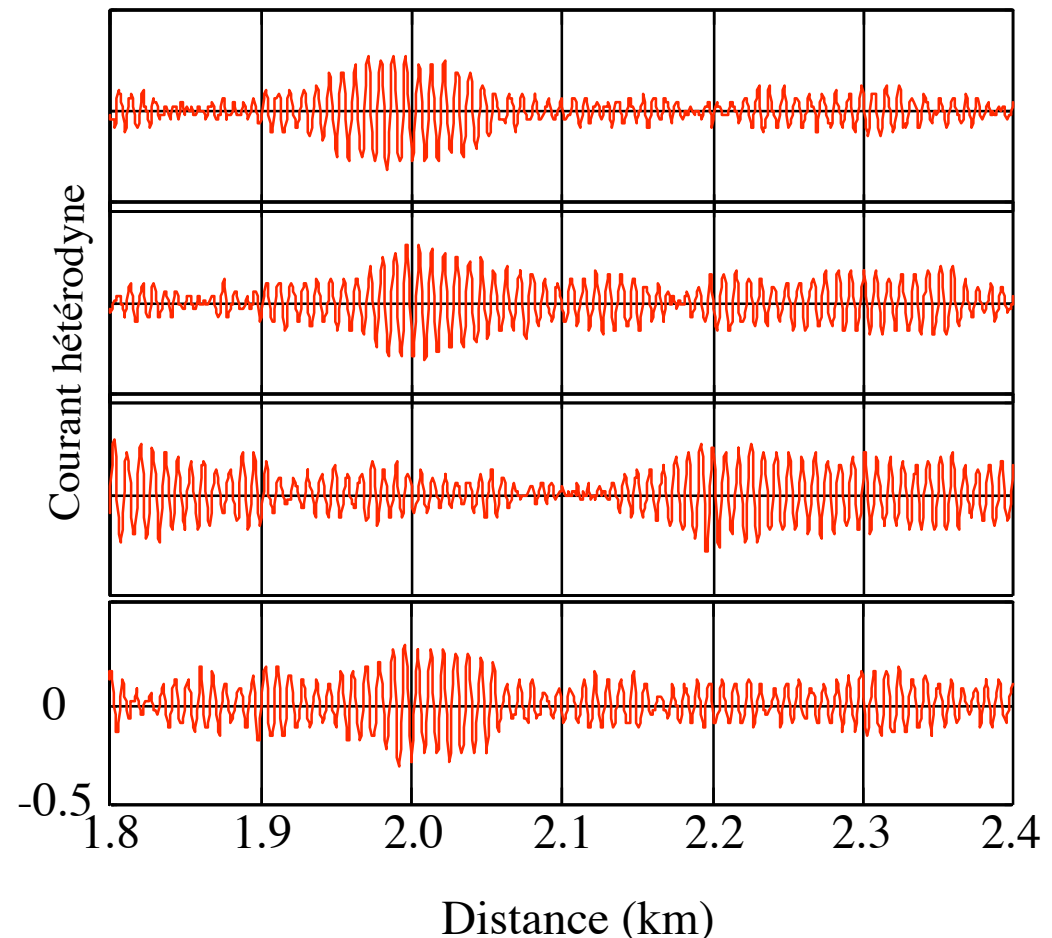
# Signal Lidar Hétérodyne



# SIGNAUX LIDAR HÉTÉRODYNE

- Fluctuation rapide du courant hétérodyne pendant un tir dû à l'effet de chatoiement
- L'effet de chatoiement est dû aux positions aléatoires des diffuseurs qui déterminent les interférences constructives (signal fort) ou destructives (signal faible ou nul)
- L'effet de chatoiement est limité au temps de cohérence lui-même limité par la durée d'impulsion, ce temps peut être raccourci par la turbulence (de vitesse)
- Fluctuation tir à tir du courant hétérodyne dû à l'effet de chatoiement
- Les signaux Lidar sont analysés tir à tir, c'est seulement les estimations après traitement du signal qui sont moyennées

4 tirs Lidar successifs





# Statistique du Signal Optique

- Fonction de densité de probabilité de la puissance optique en fonction de la cohérence du signal (du nombre de tavelures  $M$ )

$$p_M(y) \cong \frac{M^M y^{M-1} \exp(-My)}{\Gamma(M)} \quad y = \frac{P_L}{\langle P_L \rangle}$$

- Pour  $M=1$   $p_1(y) = \exp(-y)$   $\sigma_{P_L}^2 = \langle P_L \rangle$

- Pour  $M \geq 10$  avec formule de Sterling  $\Gamma(n) \cong (n-1)^{n-1} e^{-(n-1)} \sqrt{2\pi(n-1)}$   
 $n! \cong n^n e^{-n} \sqrt{2\pi n}$
- Log normale  $p_M(y) = \sqrt{\frac{M}{2\pi}} \exp\left\{M(1 + \ln y - y)\right\}$

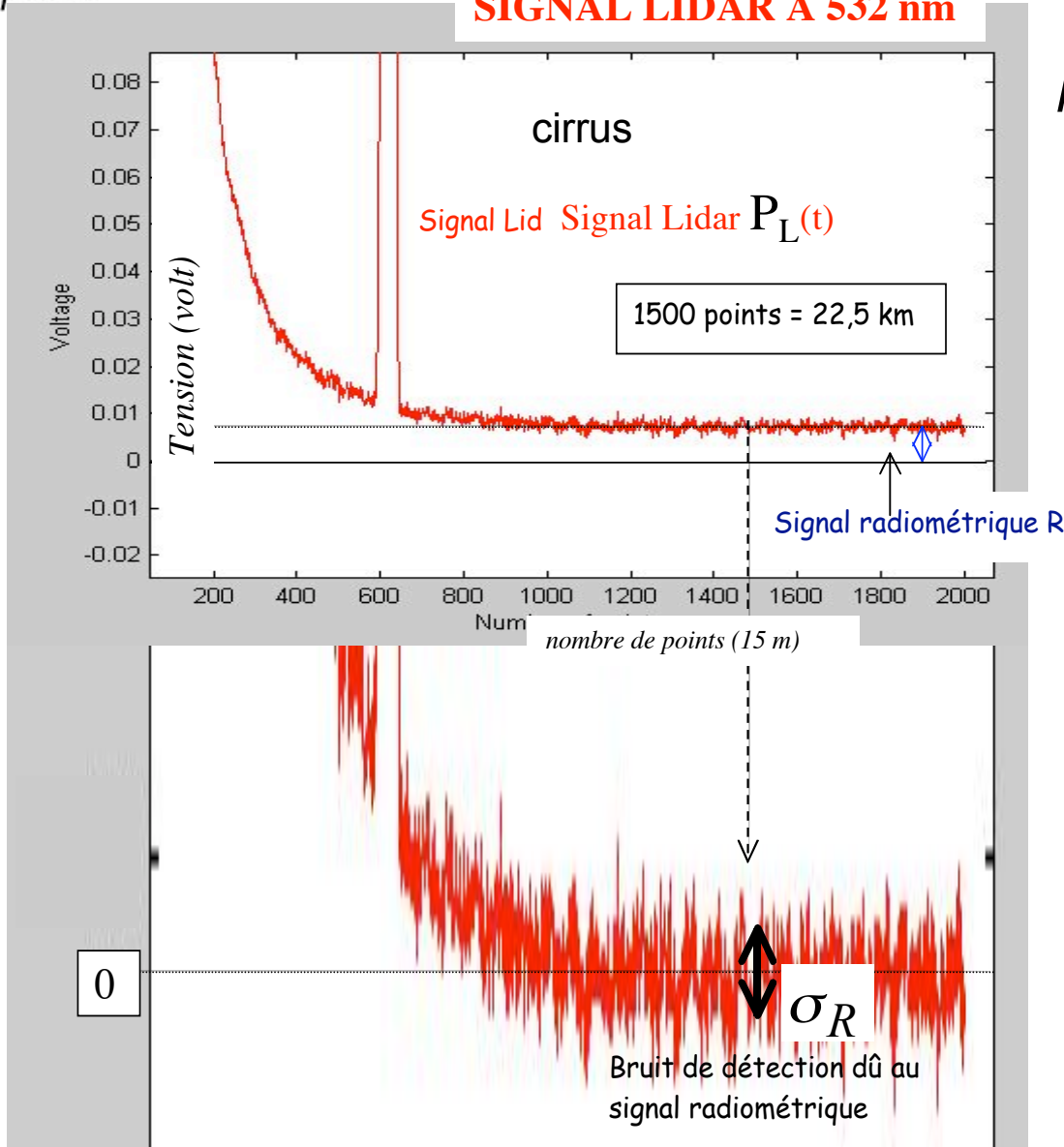
- Approximation  $\ln(y) = 1 + \varepsilon$

Normale  $p_M(y) = \sqrt{\frac{M}{2\pi}} \exp\left\{-\frac{M}{2}(y-1)^2\right\}$   $\langle y \rangle = 1$   
 $\sigma_y^2 = \frac{1}{M}$

- **Bruit optique : tavelures**
- **Bruits électroniques**
- **$I$  est le courant d'anode (après amplification)**
- **$i$  sont les fluctuations de courant**
- Écart type :  $\sigma_I \equiv \iota$
- Variance :  $\sigma_I^2 \equiv \iota^2$
- **Bruit de grenaille :  $\overline{i_g^2} = 2eIBG$**
- Bruit Johnson
- Amplificateur
- Courant noir

# Rapport Signal sur Bruit

## SIGNAL LIDAR À 532 nm



$$RSB = \frac{P_L}{\sqrt{\sigma_{P_L}^2 + \sigma_R^2}}$$



Institut  
Pierre  
Simon  
Laplace

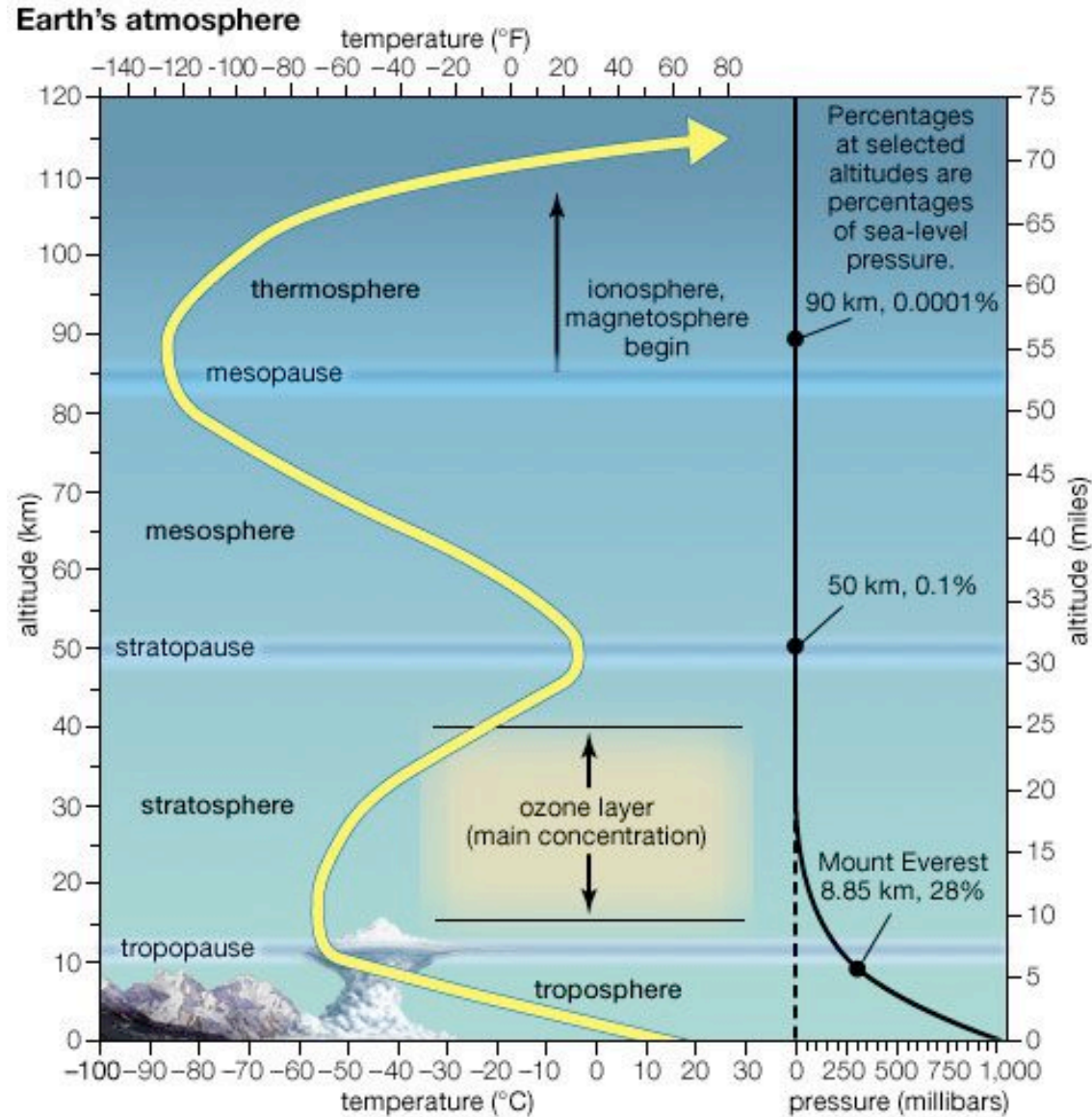
---

# Atmosphère

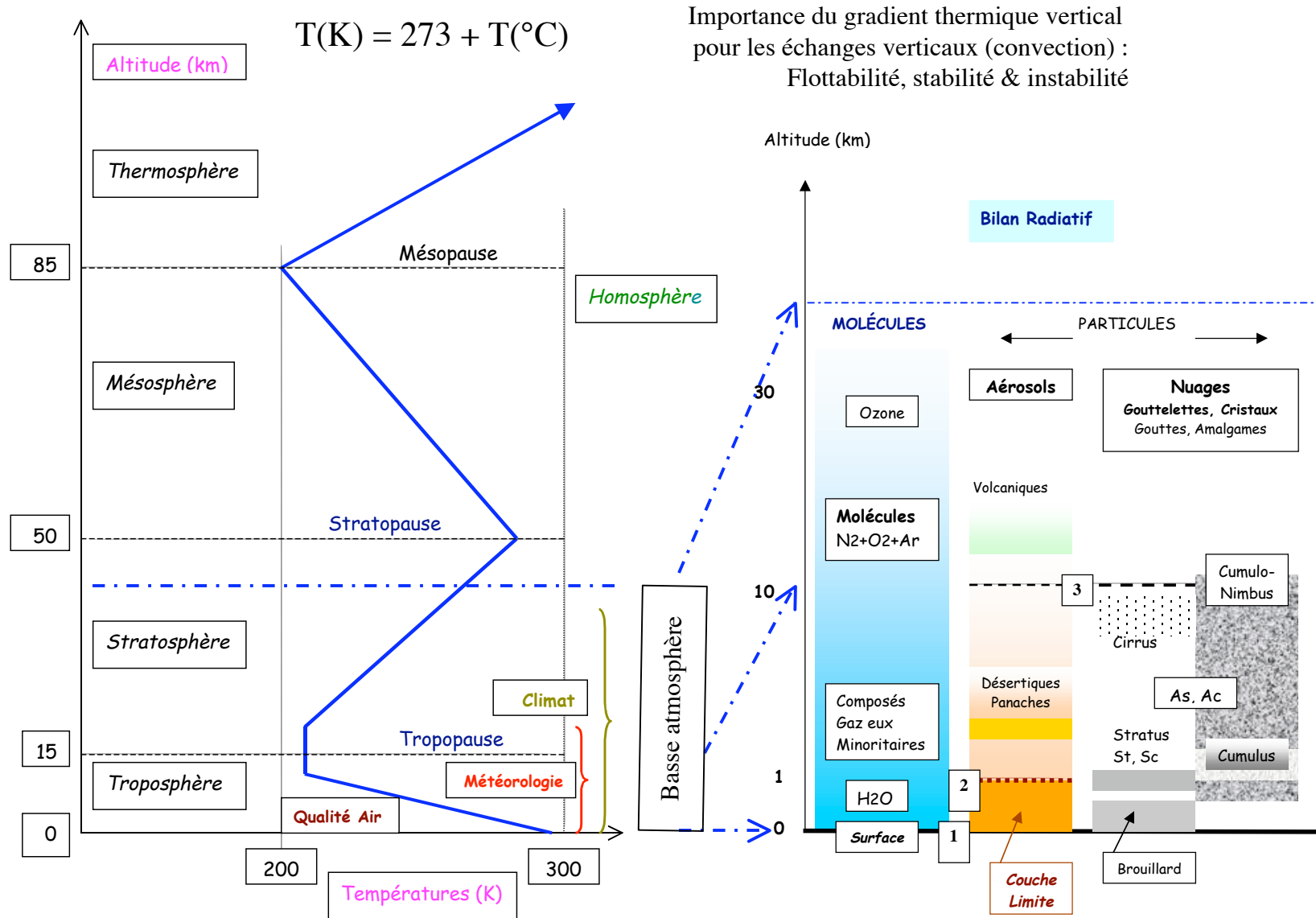
# Composition en Molécules

Permanent Constituents		Variable constituents	
Constituent	% by volume	Constituent	% by volume
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	78.084	Water Vapor (H <sub>2</sub> O)	0.04
Oxygen (O <sub>2</sub> )	20.948	Ozone (O <sub>3</sub> )	12 x 10 <sup>-4</sup>
Argon (Ar)	0.934	Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> ) <sup>b</sup>	0.001 x 10 <sup>-4</sup>
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	0.033	Nitrogen dioxide (NO <sub>2</sub> )	0.001 x 10 <sup>-4</sup>
Neon (Ne)	18.18 x 10 <sup>-4</sup>	Ammonia (NH <sub>3</sub> )	0.001 x 10 <sup>-4</sup>
Helium (He)	5.24 x 10 <sup>-4</sup>	Nitric oxide (NO)	0.0005 x 10 <sup>-4</sup>
Krypton (Kr)	1.14 x 10 <sup>-4</sup>	Hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S)	0.00005 x 10 <sup>-4</sup>
Xenon (Xe)	0.089 x 10 <sup>-4</sup>	Nitric acid vapor	trace
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	0.5 x 10 <sup>-4</sup>		
Methane (CH <sub>4</sub> )	1.5 x 10 <sup>-4</sup>		
Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O)	0.27 x 10 <sup>-4</sup>		
Carbon Monoxide (CO)	0.19 x 10 <sup>-4</sup>		

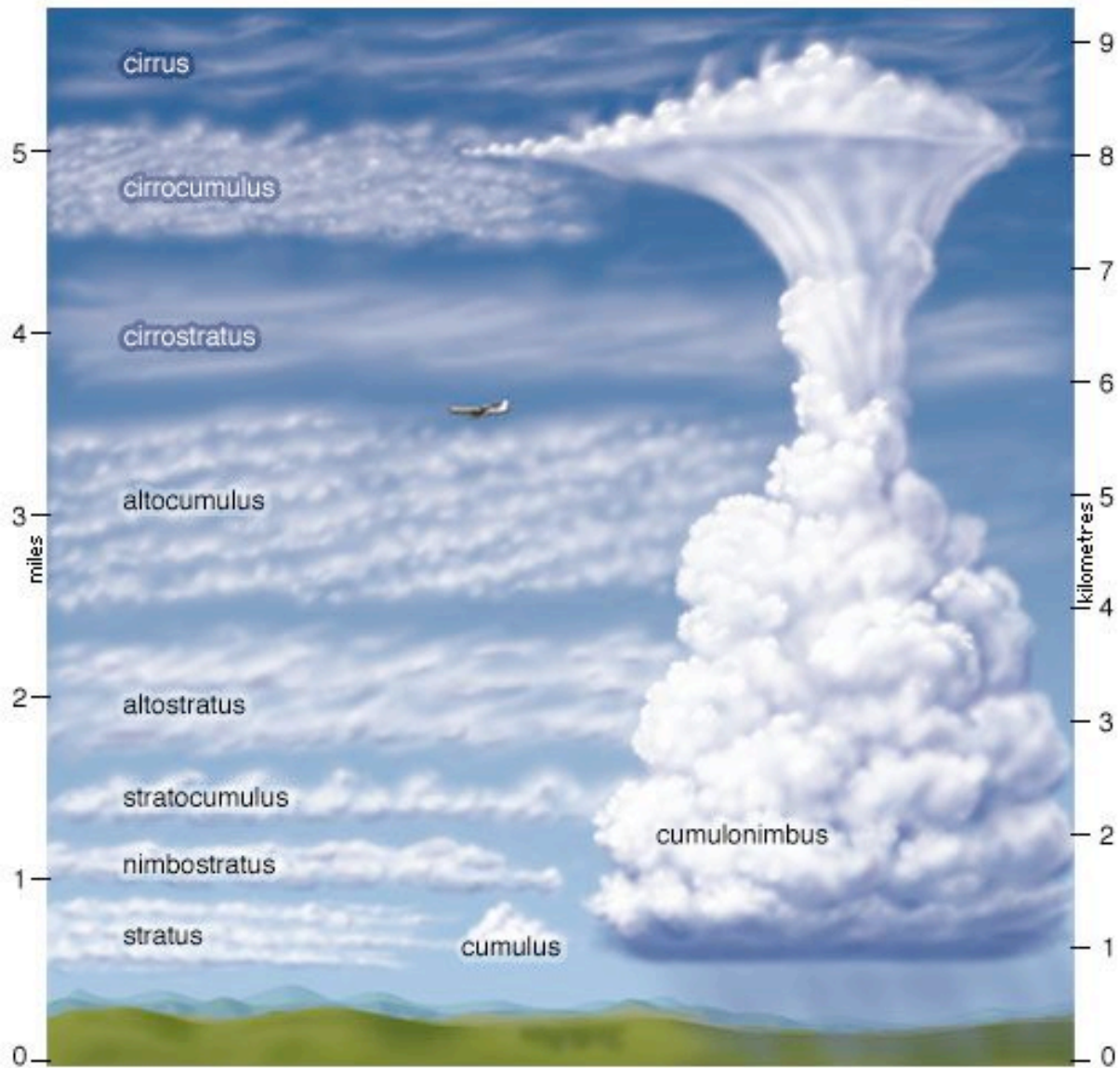
# Structure verticale



# Structure et Composition

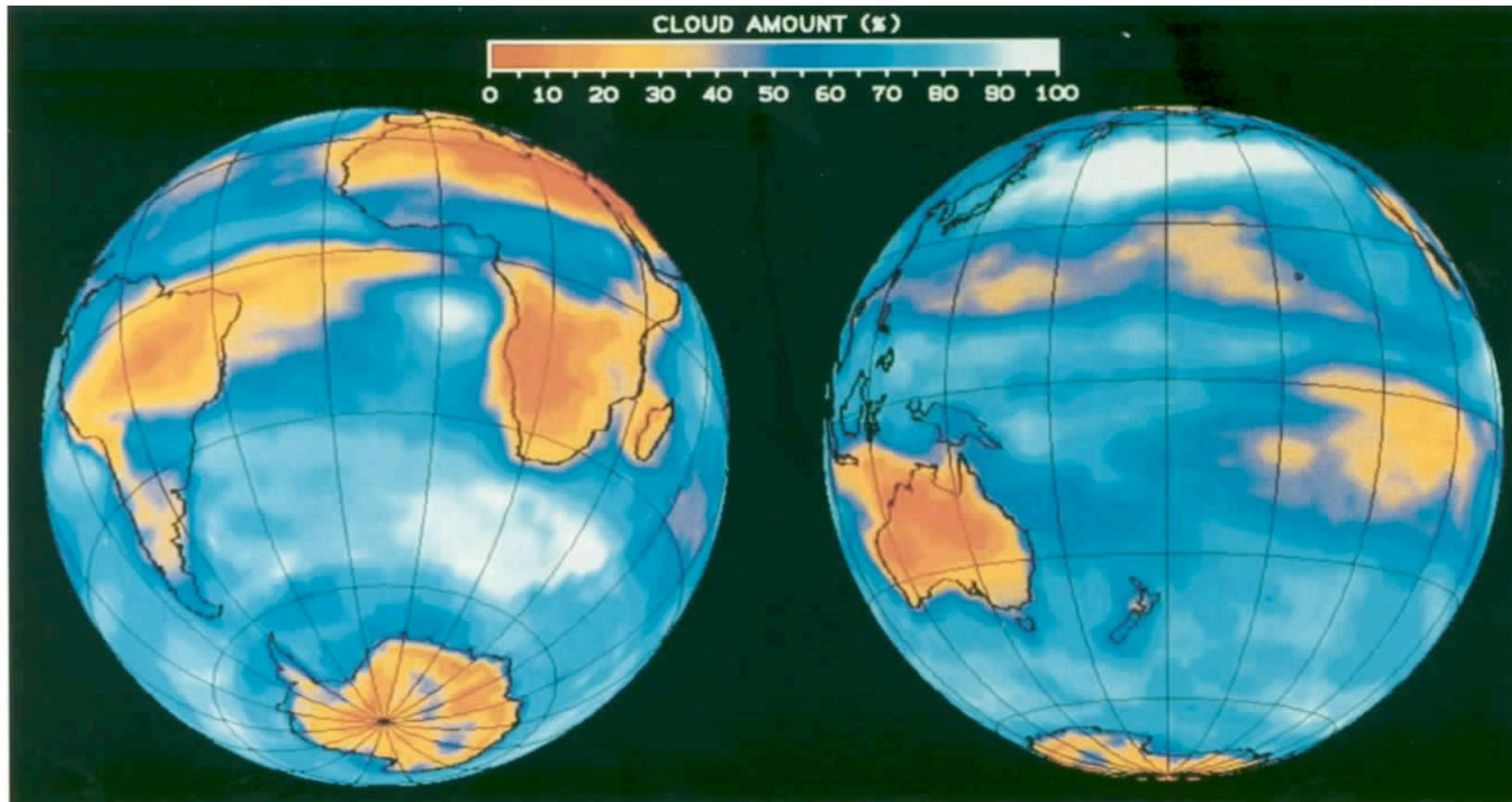


# Nuages

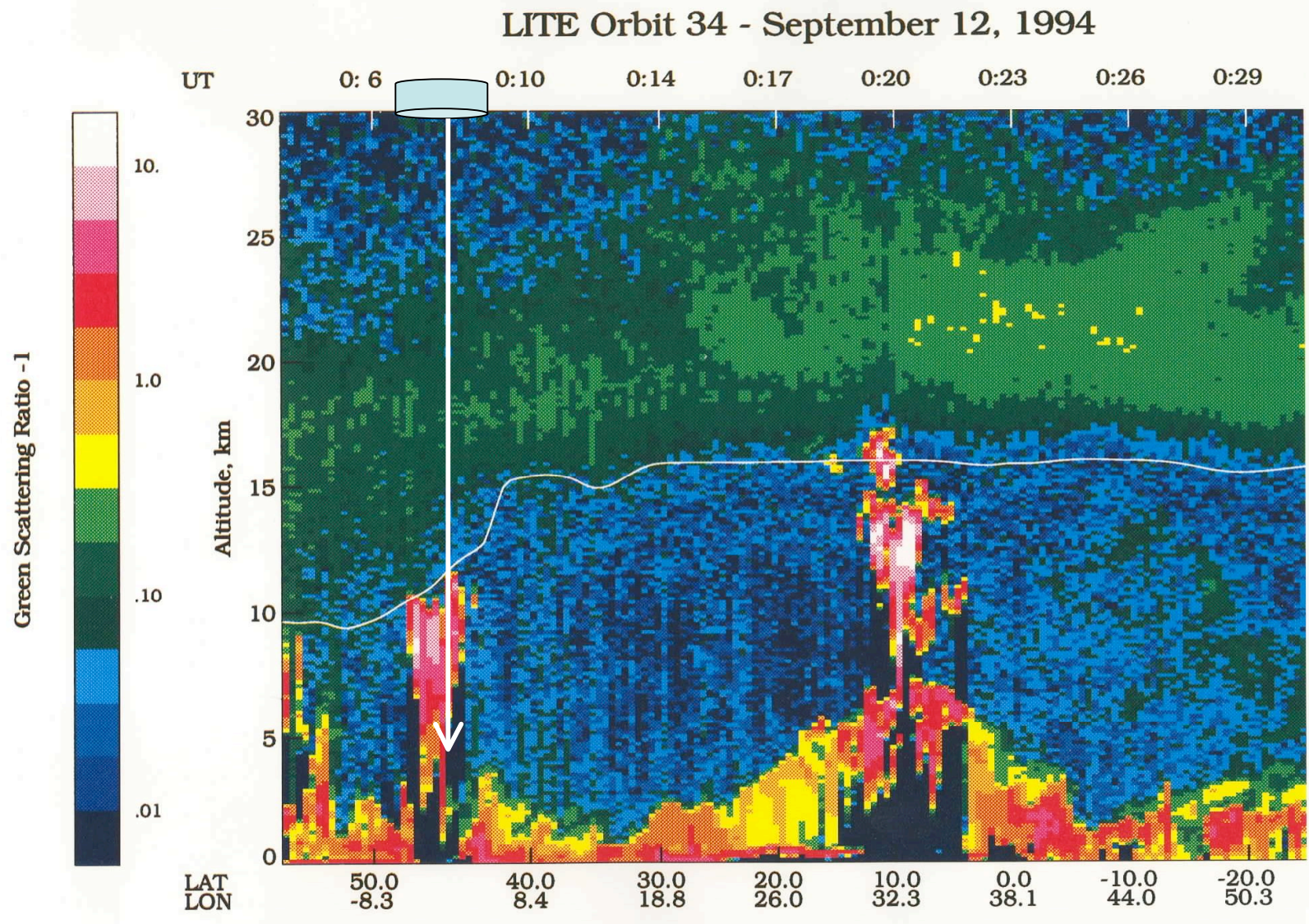




# Nébulosité



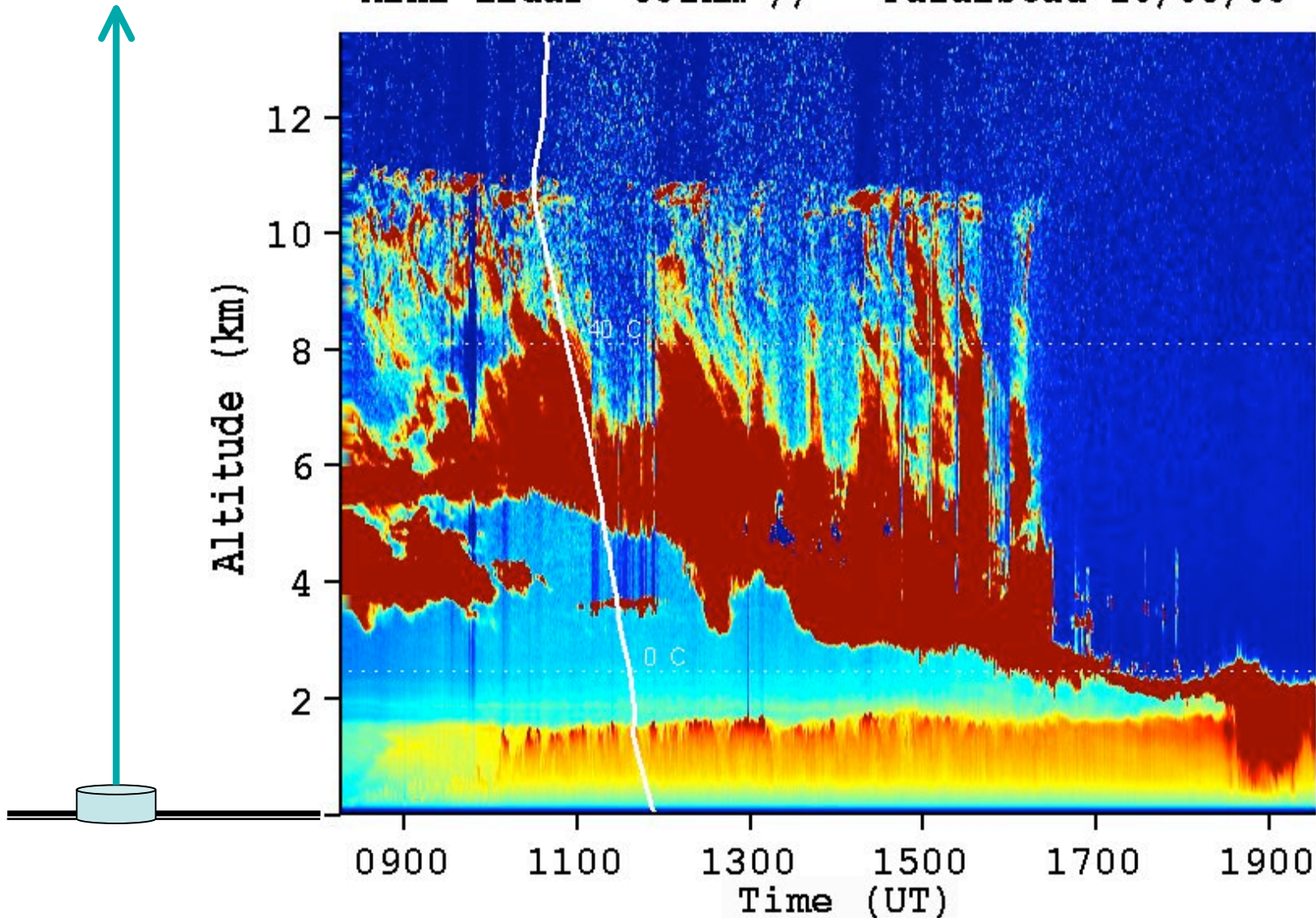
# LITE'94





# Nuages et Aérosols

Mini-Lidar 532nm // - Palaiseau 16/05/03



# Couche Limite Planétaire

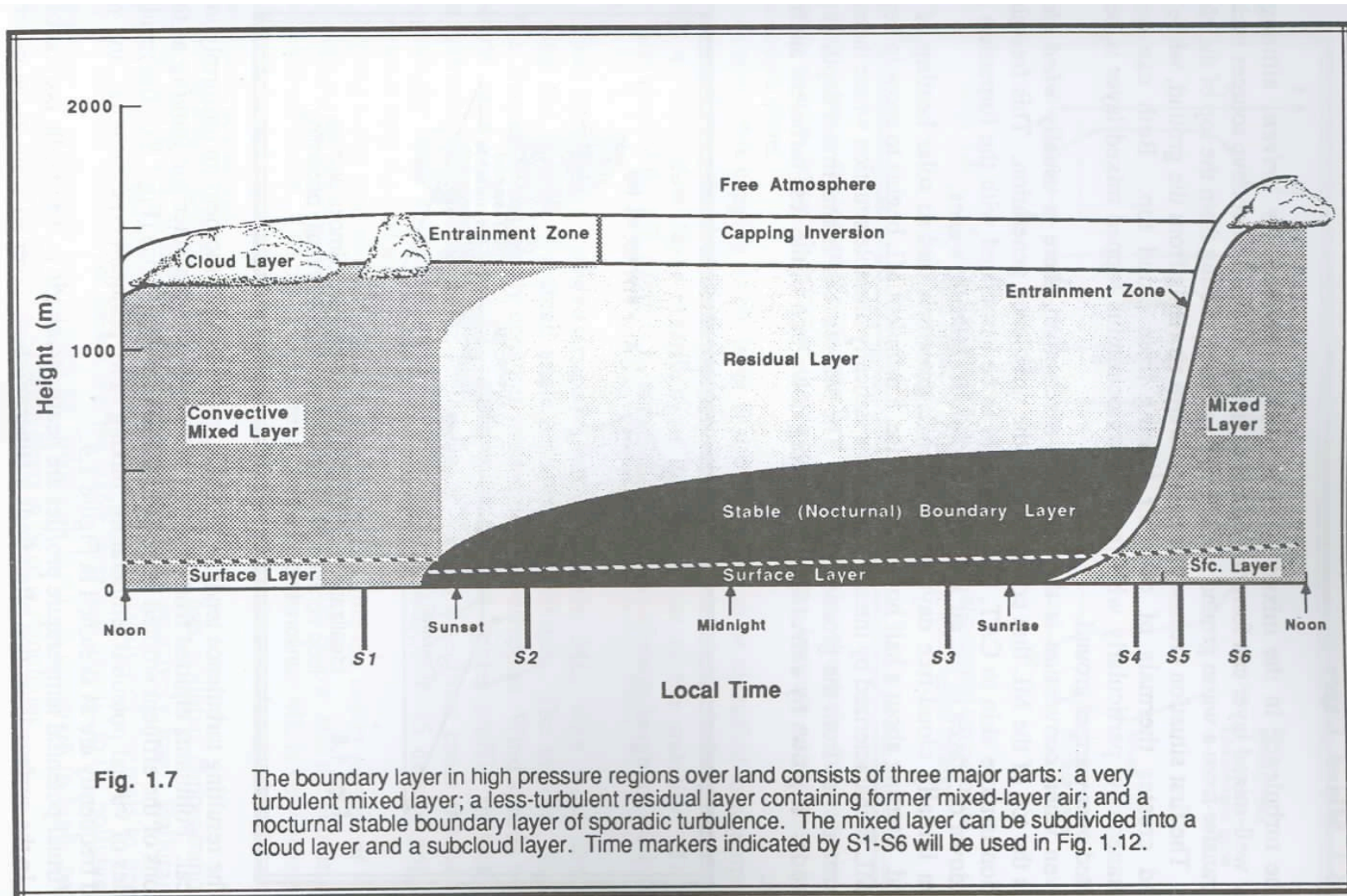
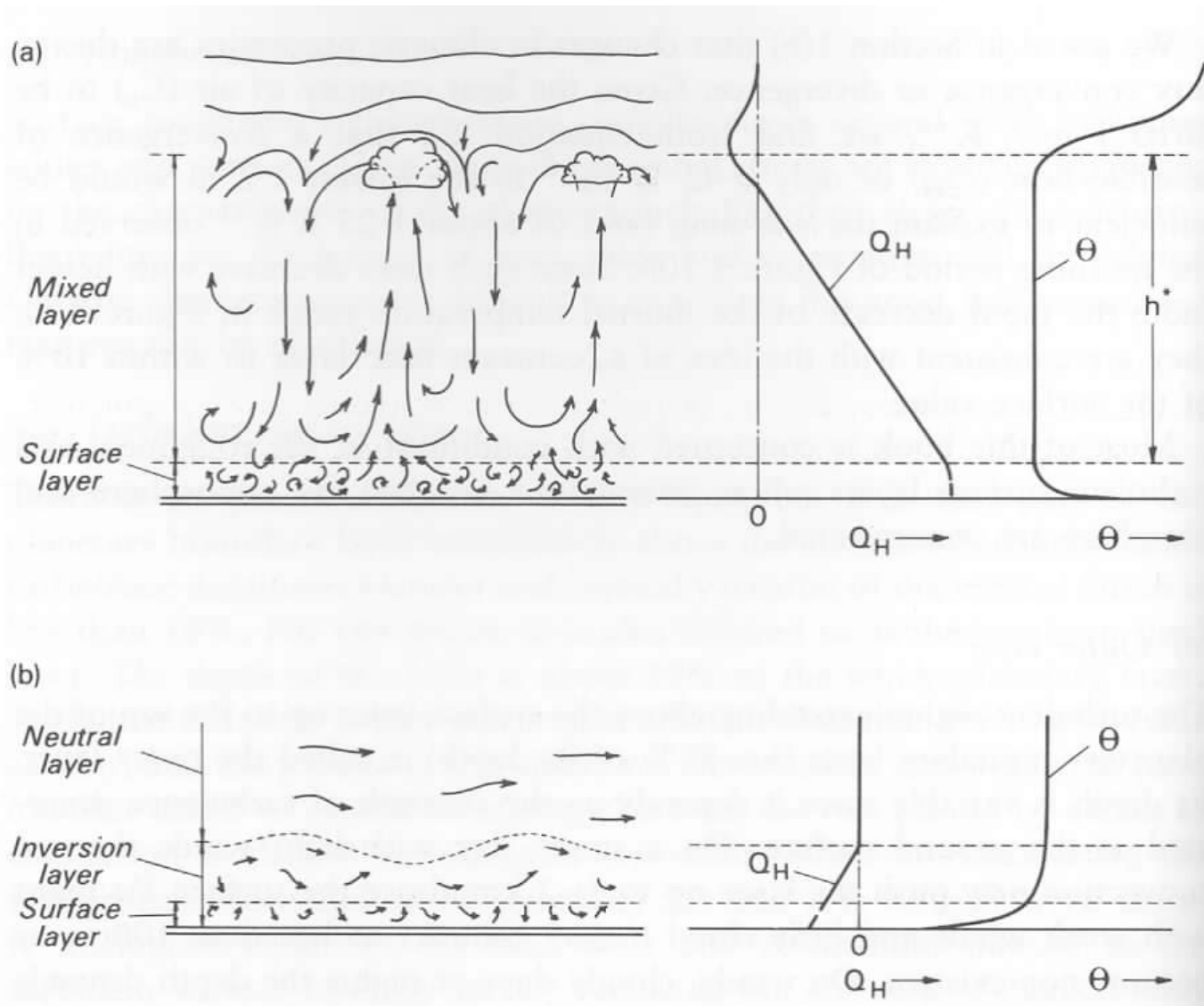


Fig. 1.7

The boundary layer in high pressure regions over land consists of three major parts: a very turbulent mixed layer; a less-turbulent residual layer containing former mixed-layer air; and a nocturnal stable boundary layer of sporadic turbulence. The mixed layer can be subdivided into a cloud layer and a subcloud layer. Time markers indicated by S1-S6 will be used in Fig. 1.12.

# Couche Limite Planétaire

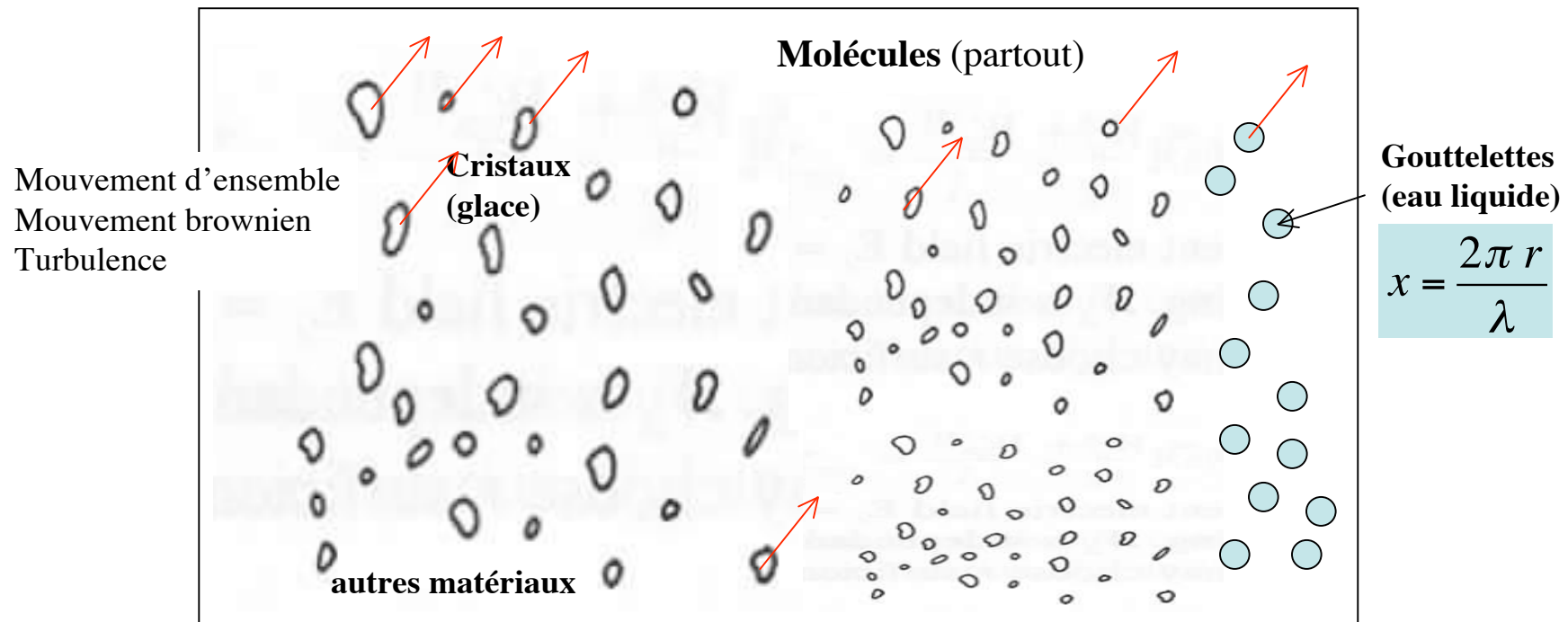


# Milieu atmosphérique

Le milieu atmosphérique est constitué de molécules: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, vapeur d'eau, et de particules microniques (0.1 à 10 μm) en suspension : aérosols, gouttelettes, cristaux, hydrométéores

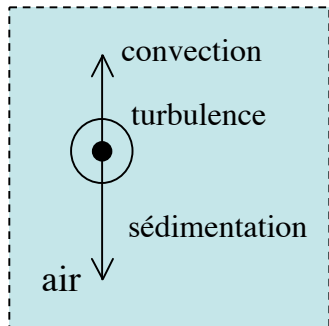
Particules sub microniques indispensables pour former les gouttelettes: noyaux de condensation (CCN), et les cristaux: noyaux de congélation

Gouttelettes d'eau surfondues à T << 0°C

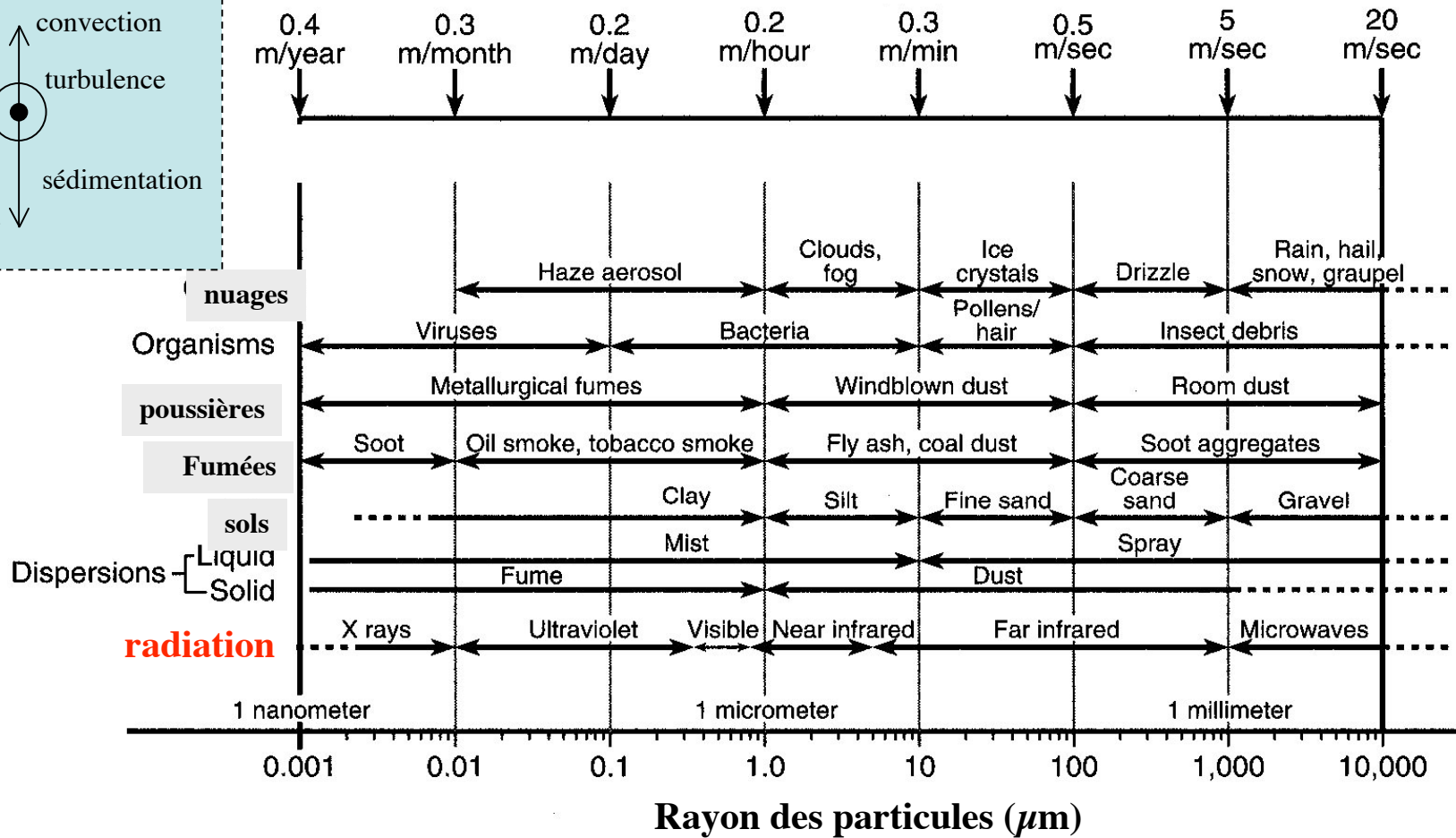


# Particules Atmosphériques

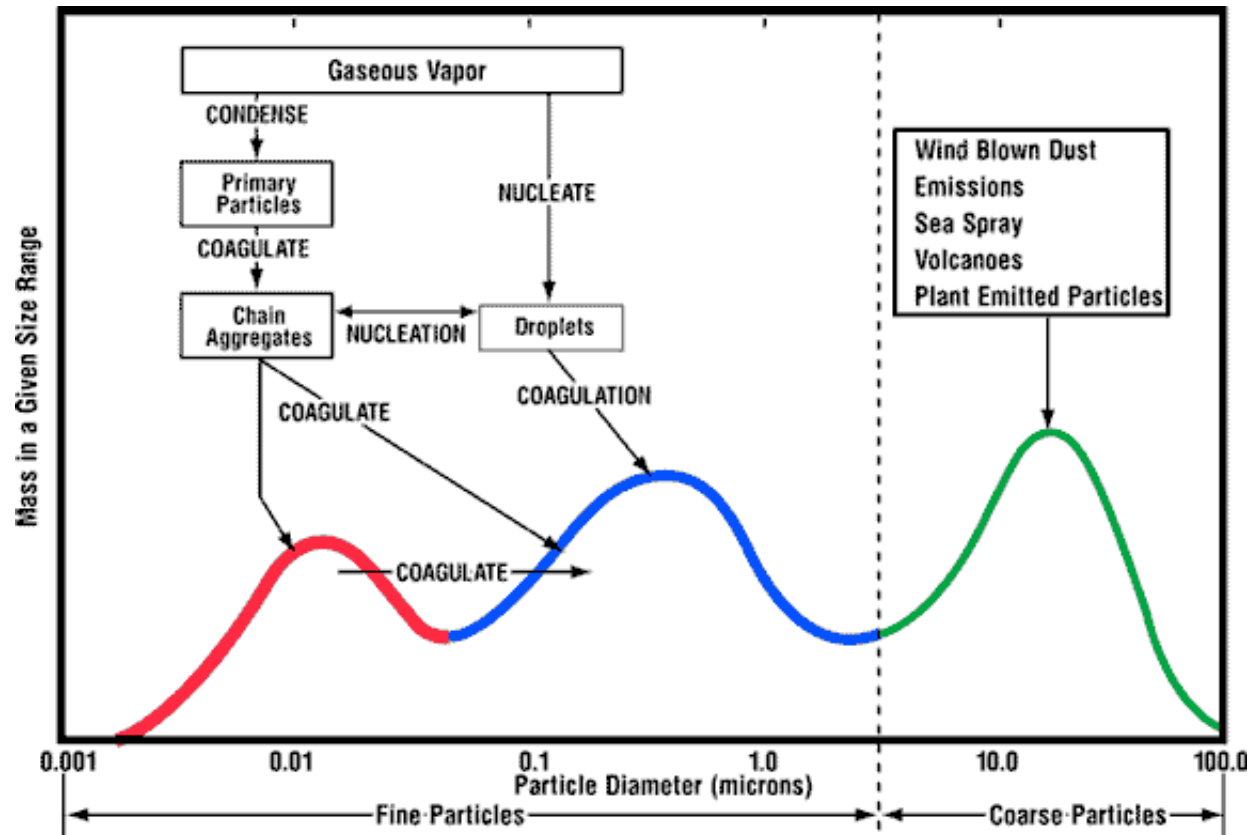
Forces verticales exercées sur une particule  
 Importance de l'aérodynamisme des particules



Vitesse de chute des particules (sédimentation)

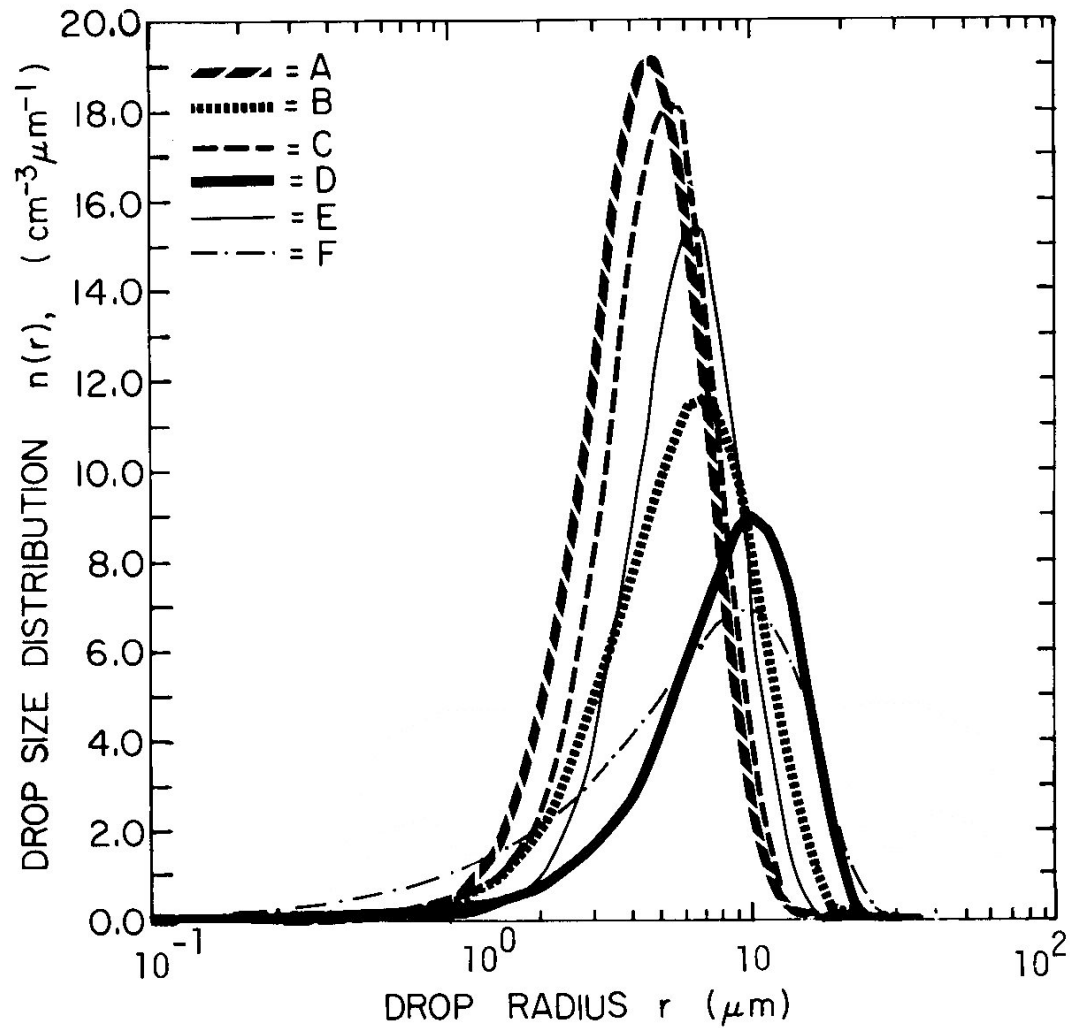


# Aérosols Troposphériques

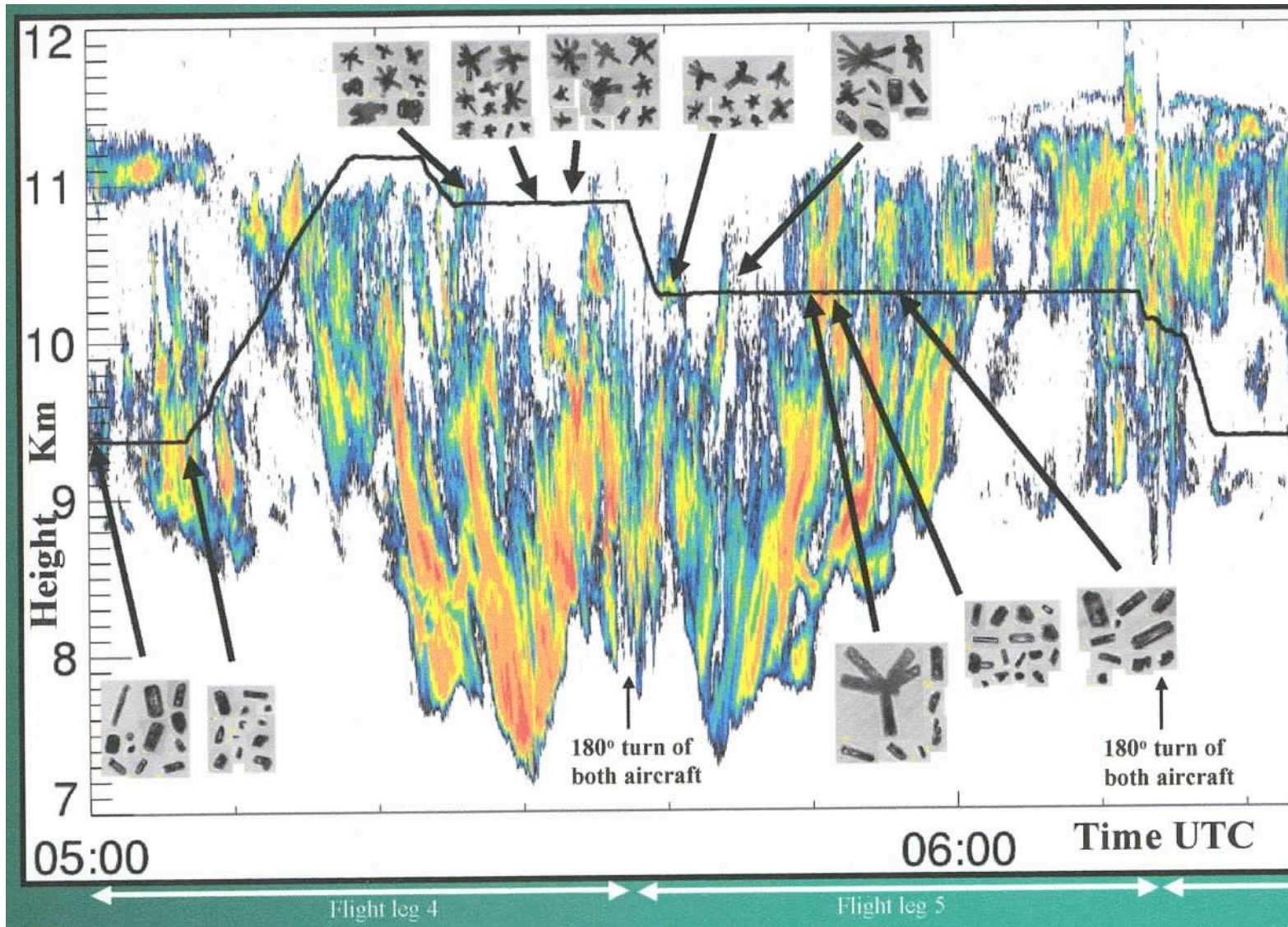




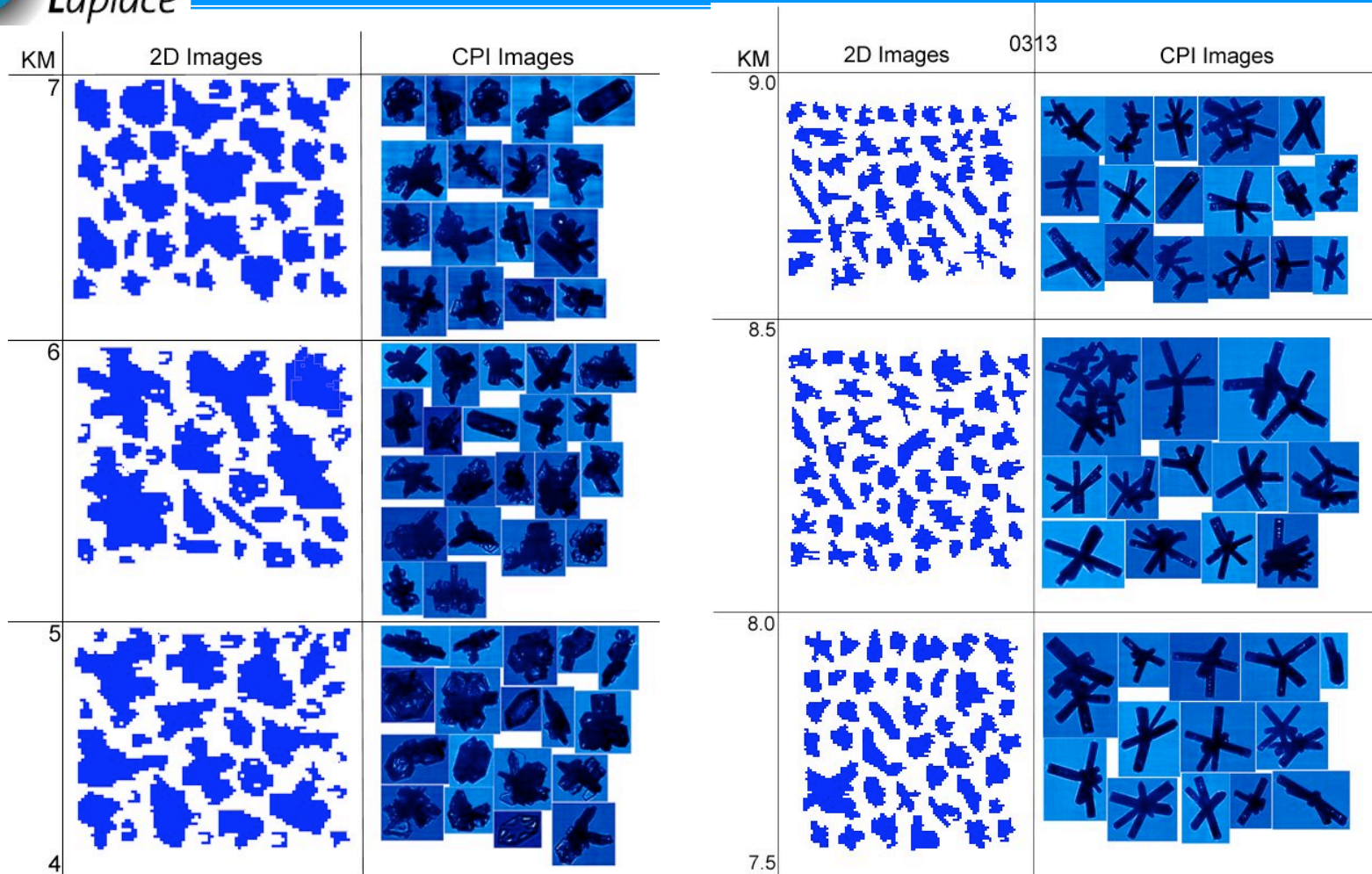
# Nuages Chauds



# Cirrus



# Cirrus



Orientation aléatoire des cristaux  $\Rightarrow$  approx. diffuseurs sphériques  
 Particules orientées Calcul de Monte Carlo pour calculer l'indicatrice de diffusion

# Grands Cycles

