



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

Téléphone: 01 69 33 51 50

- Introduction
- Instrument Lidar
- Mesure de distance

Lidar Atmosphérique

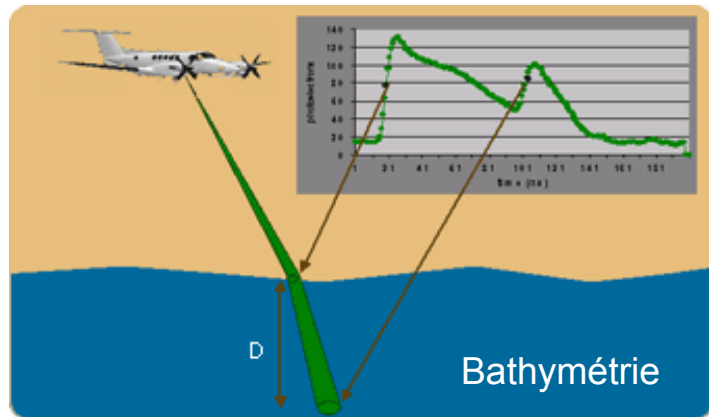
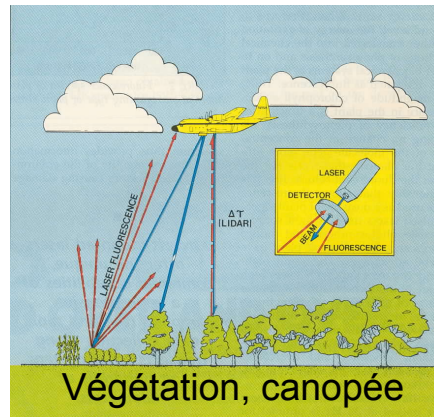
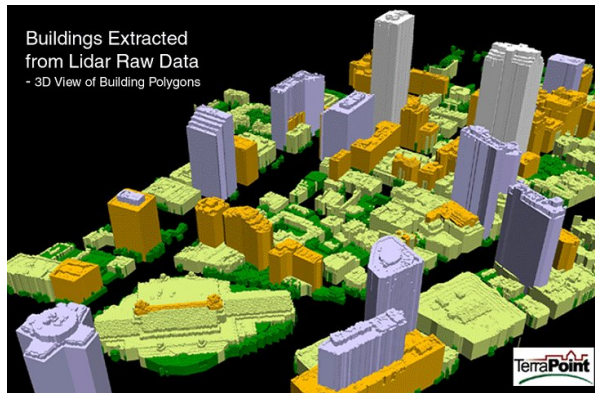
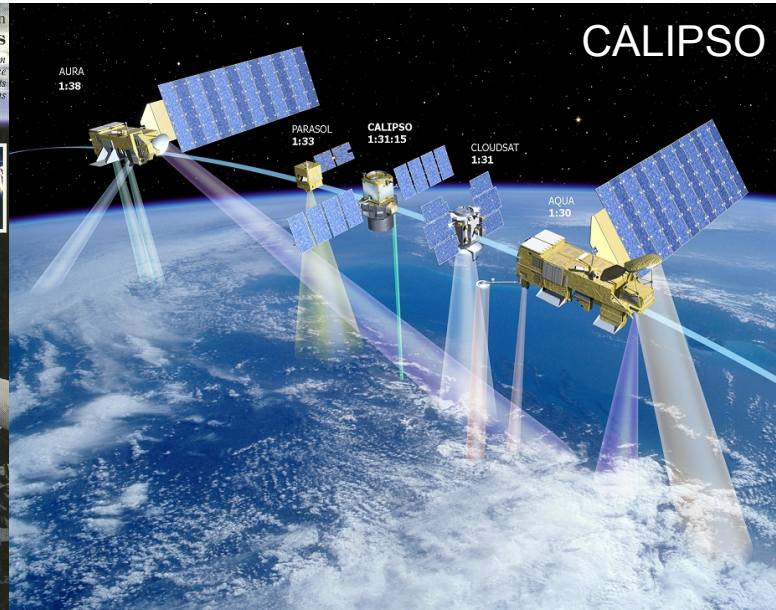
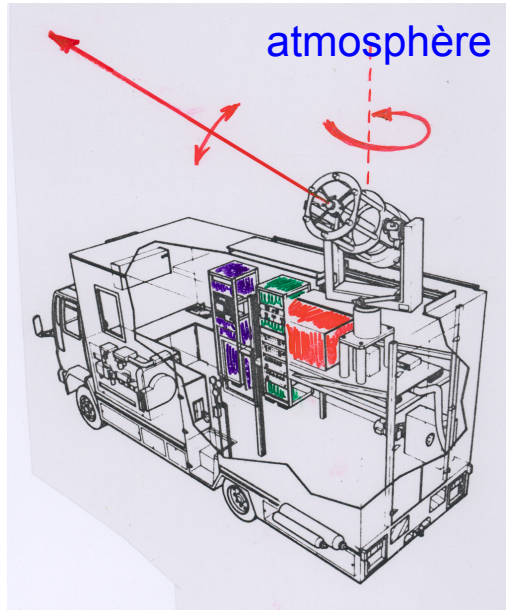
- Spectroscopie
- Bilan de Liaison & Équation Lidar
- Statistique du signal
- Bruits



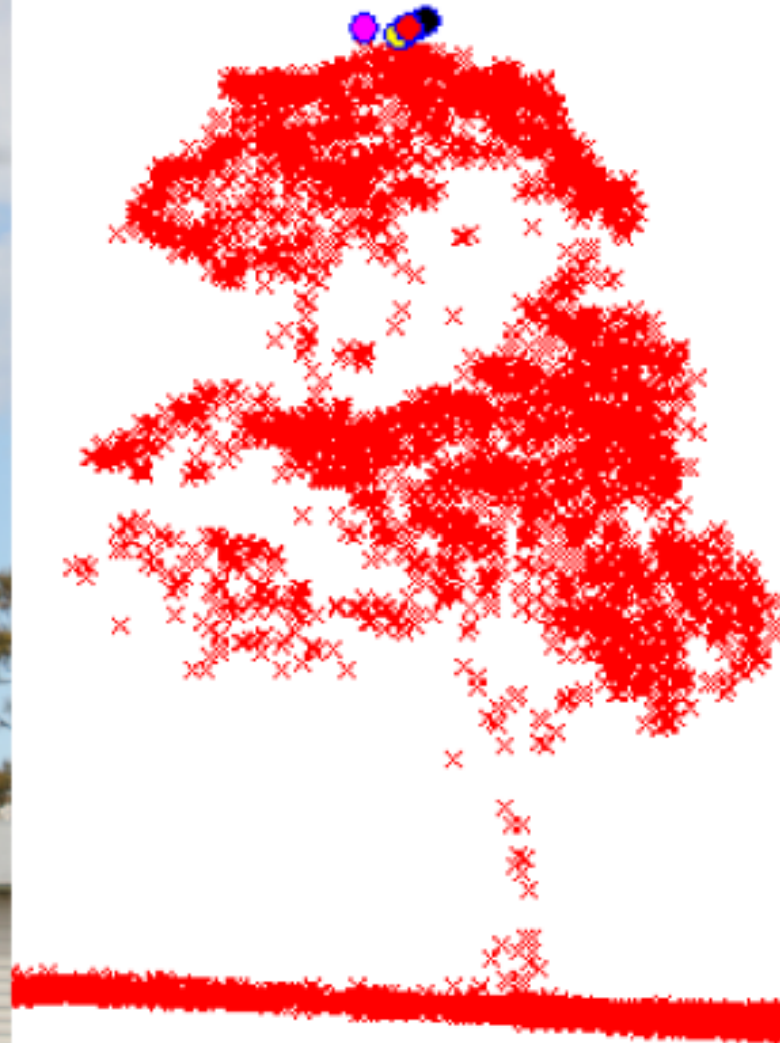
Le Lidar

- **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
- 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 (± 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

La Famille Lidar



Le dernier né : Lidar sur Drône





Communauté Lidar Atmosphérique

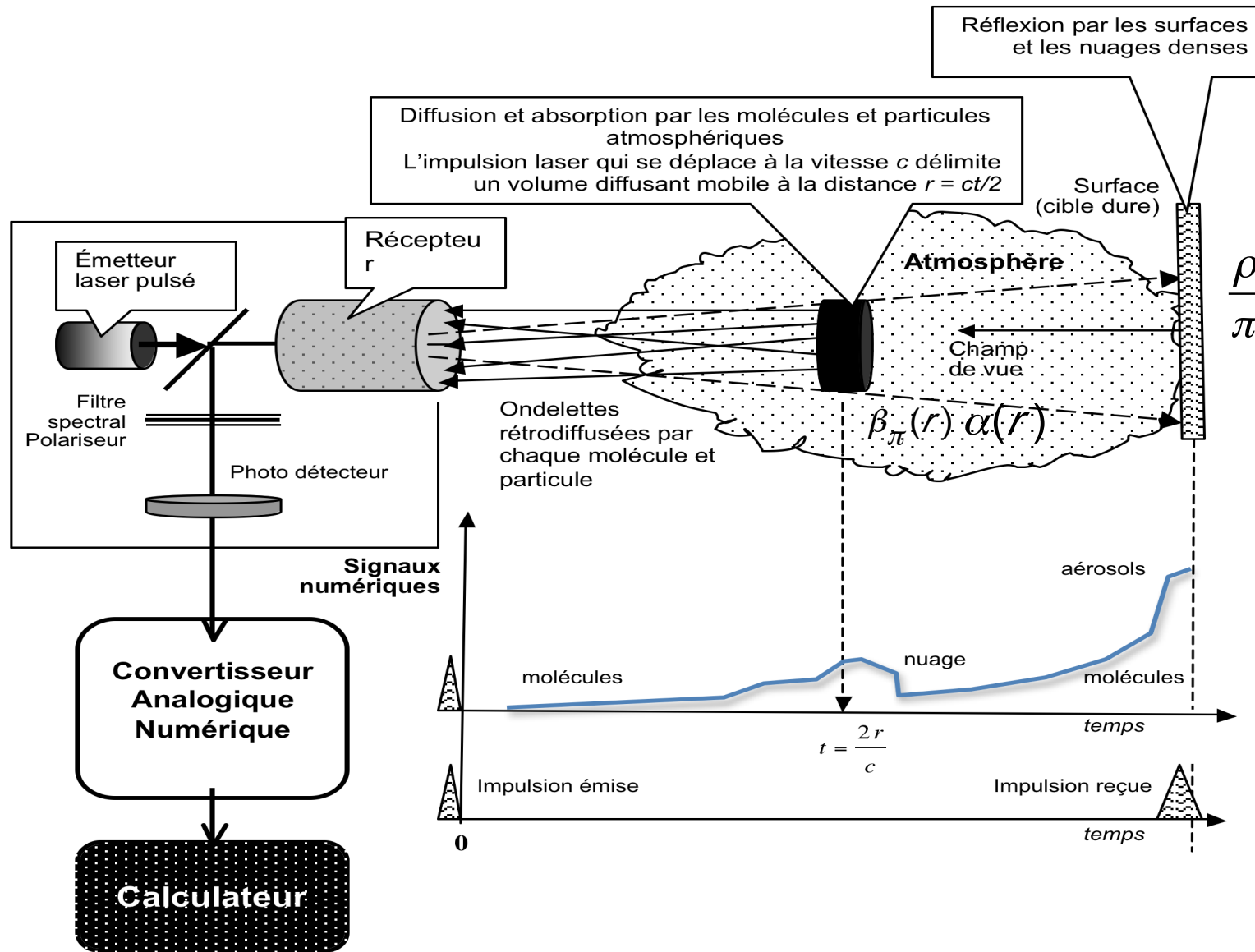
- Il existe de nombreux types de lidars suivant les applications
- On peut dire : un lidar pour chaque application
- Dans ces conditions, il est difficile de définir, promouvoir et vendre des produits commerciaux. Ce n'est que récemment que des PME ont commencé à s'implanter dans le domaine
- Les expérimentateurs 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 impacts lidar
- 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 Nd³⁺-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 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

Principe de la Mesure Lidar





Signal Lidar (1/2)

- La première information c' est le temps de vol A-R (t) des photons et donc la distance (r), entre le lidar et la cible dans l'atmosphère : $r = \frac{c t}{2}$
- c est la vitesse de la lumière
- Les 2 informations : **coefficients de diffusion et d'atténuation** atmosphériques ou aquatique, sont portées par la puissance optique diffusée
- Signal instantané (W) => une équation lidar pour 2 inconnues !

$$s_L(r) = \frac{c}{2} E A m \frac{\beta_\pi(r)}{r^2} \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(y) dy\right] + \text{bruits}$$

Signal Lidar (2/2)

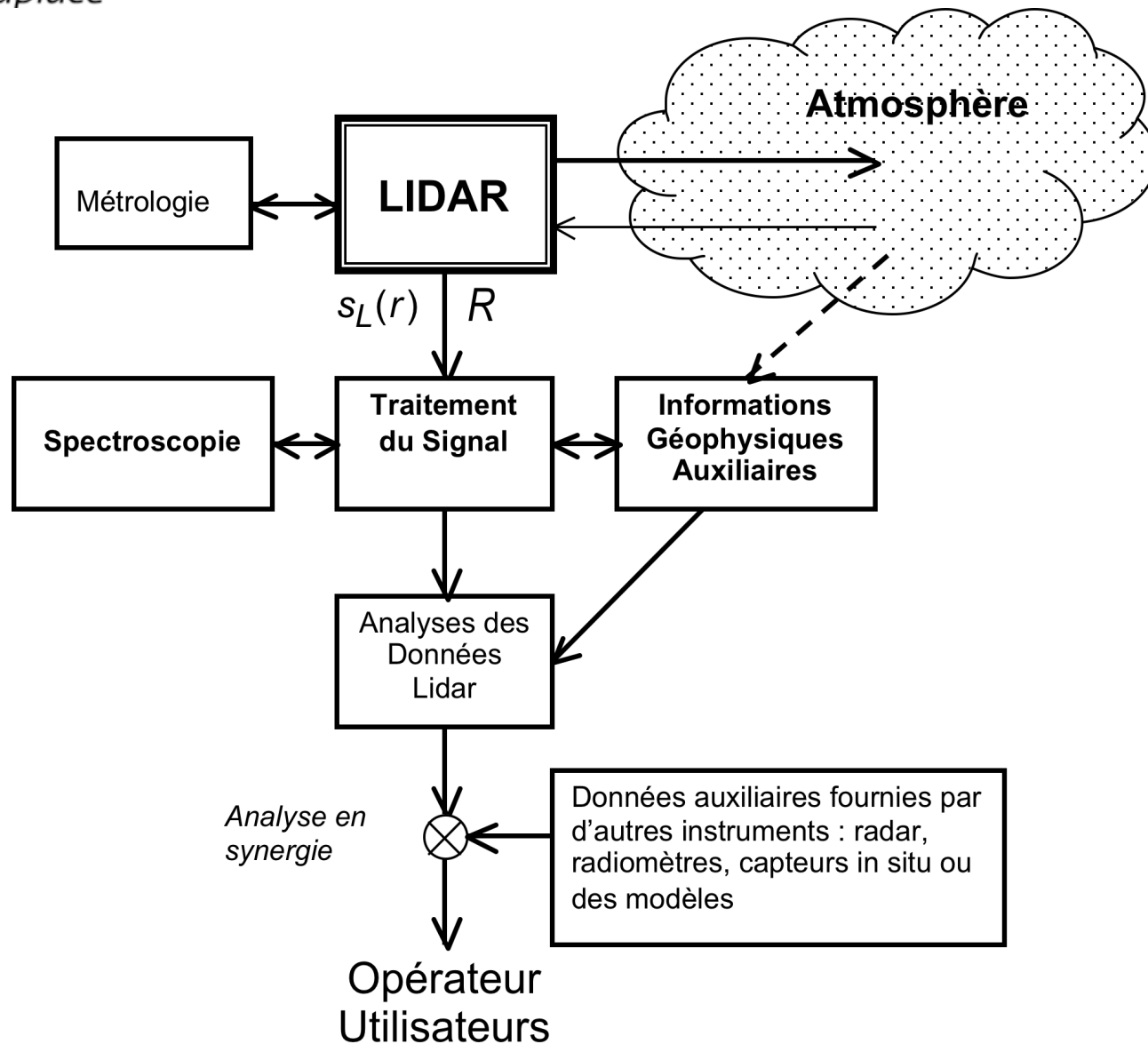
- Le signal est intégré sur une porte de mesure : $\Delta r \Rightarrow (J)$

$$S_L(r, \Delta r) = \frac{c}{2} E A m \Delta r \frac{\beta_\pi(r)}{r^2} \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(y) dy\right] + \text{bruits} \cdot \Delta r$$

- Seconde équation : $\beta_\pi(r) = k \alpha(r)$
- La **signature de la mesure** lidar est la diffusion en intensité, le changement spectral, de polarisation, et l'absorption
- Pour des mesures résolues dans la colonne atmosphérique, on substitue une des deux variables et on résout l'équation (transcendante) soit par itération, soit en écrivant une équation différentielle ou intégrale
- Cibles compactes \Rightarrow énergie (J)

$$S_L(r) = K \frac{1}{r^2} \frac{\rho}{\pi} [T(r)^2] + \text{bruits}$$

Conception et choix : Simulateur lidar



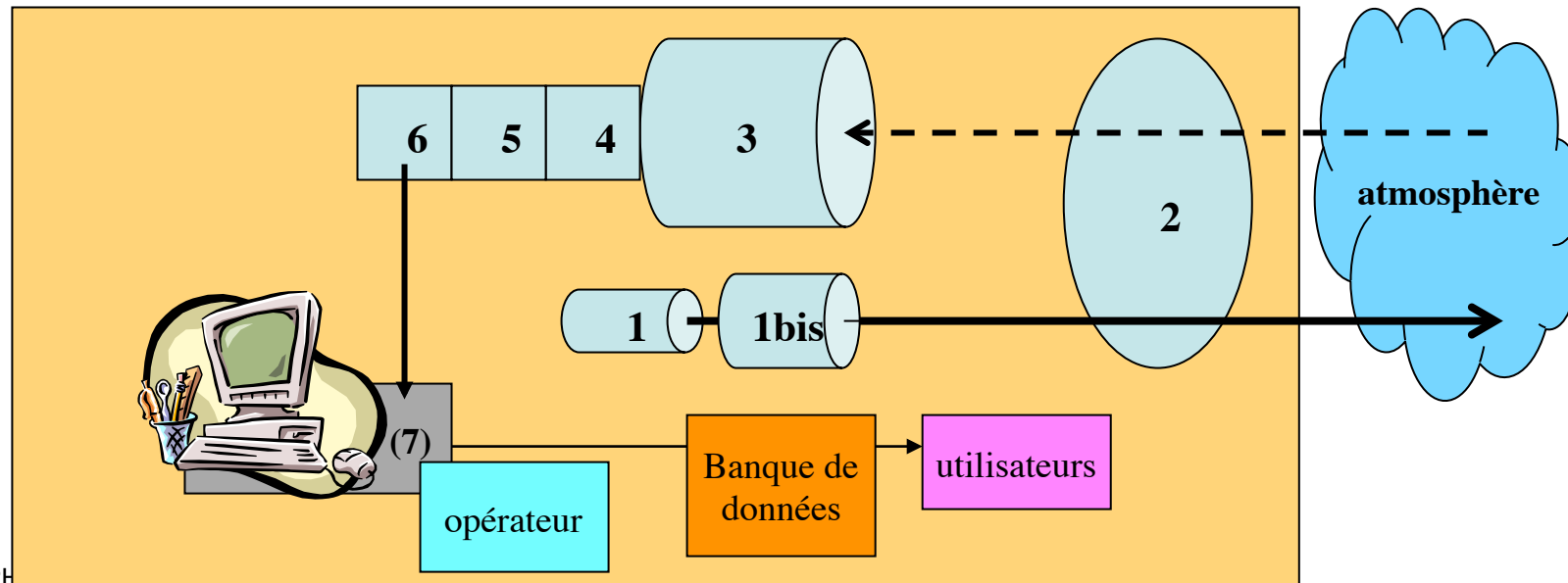


Instrument & Signal Lidar

Instrument Lidar

Principaux sous systèmes :

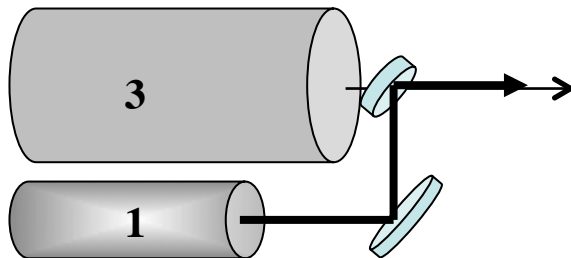
- L' émetteur Laser (1) et l' expandeur de faisceau (1bis)
- L' ensemble opto mécanique (2) pour diriger la ligne de visée
- Le télescope (3) de réception qui collecte la puissance optique diffusée
- Une optique (4) de reprise et de filtrage de la lumière parasite
- Un photodétecteur (5) et une électronique 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, ...



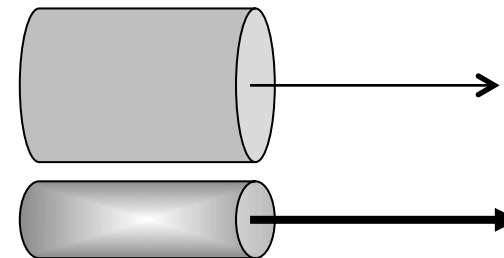
Configuration Lidar

- 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
- L'empreinte du faisceau et la résolution angulaire 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

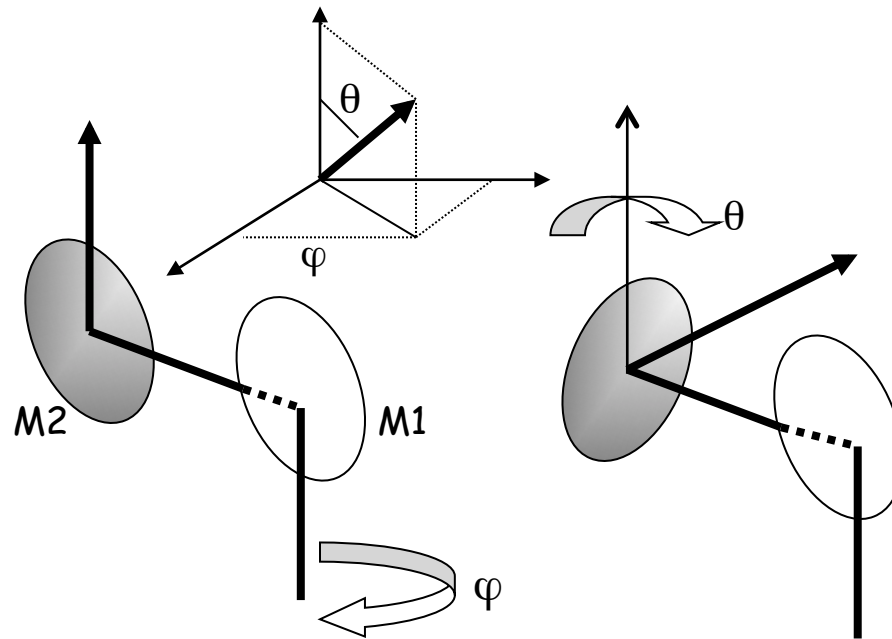
La méthode Lidar utilise les différentes propriétés des lasers pour sonder le milieu atmosphérique :

- Longueur(s) d'onde fixe(s) ou accordable(s)
Stabilité en fréquence : 1 MHz pour mesurer l'effet Doppler
- Mono-chromaticité : 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 μ 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 μ 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

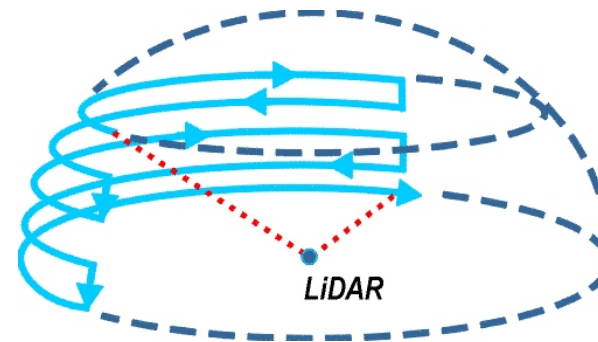
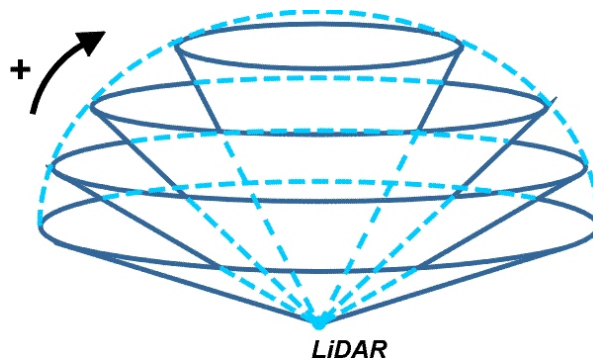
Composant	Fonction
Laser	Émission pulsée, énergie par impulsion
Opto-mécanique	Miroirs pour déplacer la ligne de visée
Télescope	Diamètre, champ de vue, réflectivité ≈ 1
Optique de reprise & filtre optique	Filtre pour éliminer le fond de scène. Transmission limitée. Filtre interférentiel, Fabry-Perot, 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

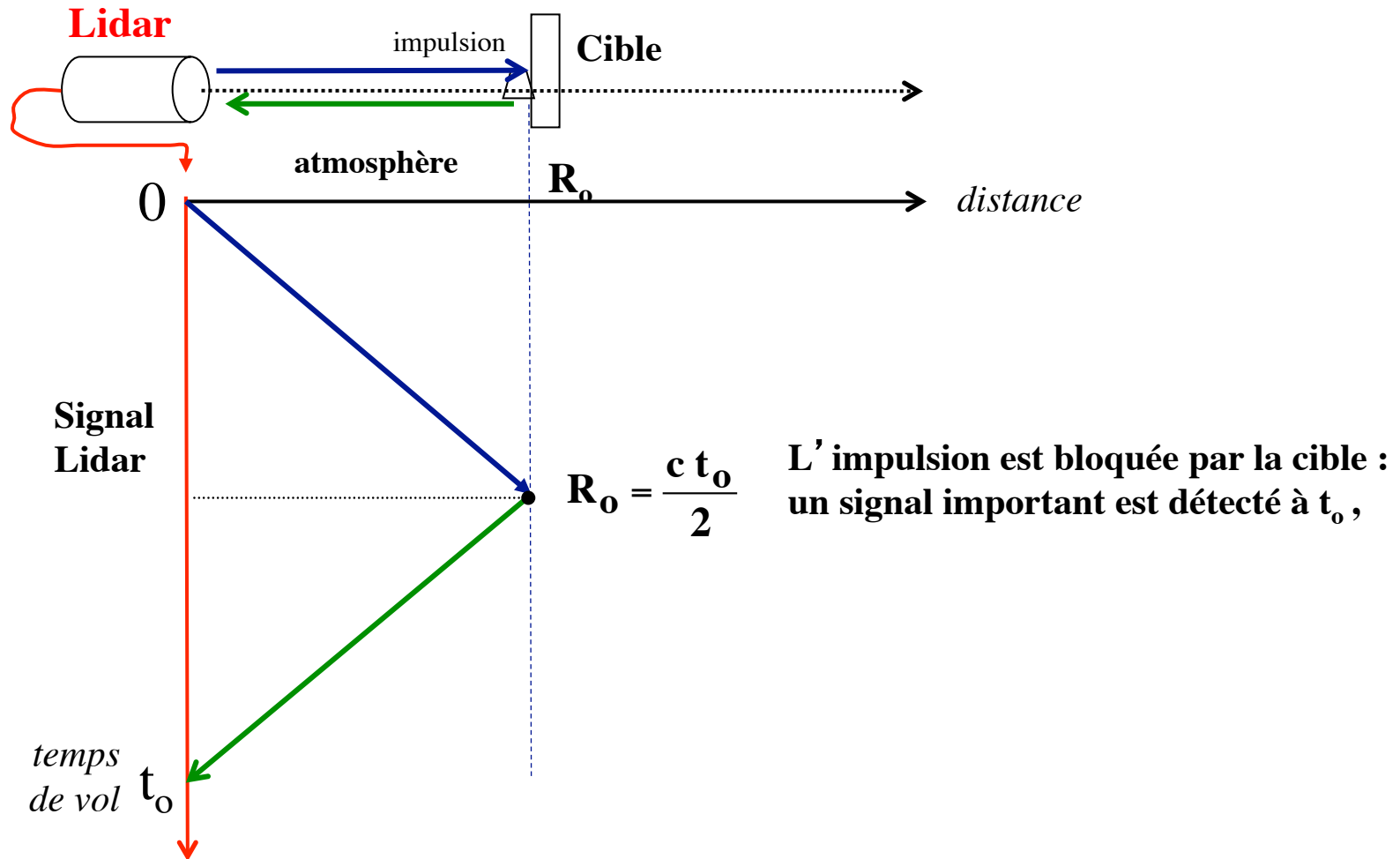


Balayage Conique

Balayage en Trame



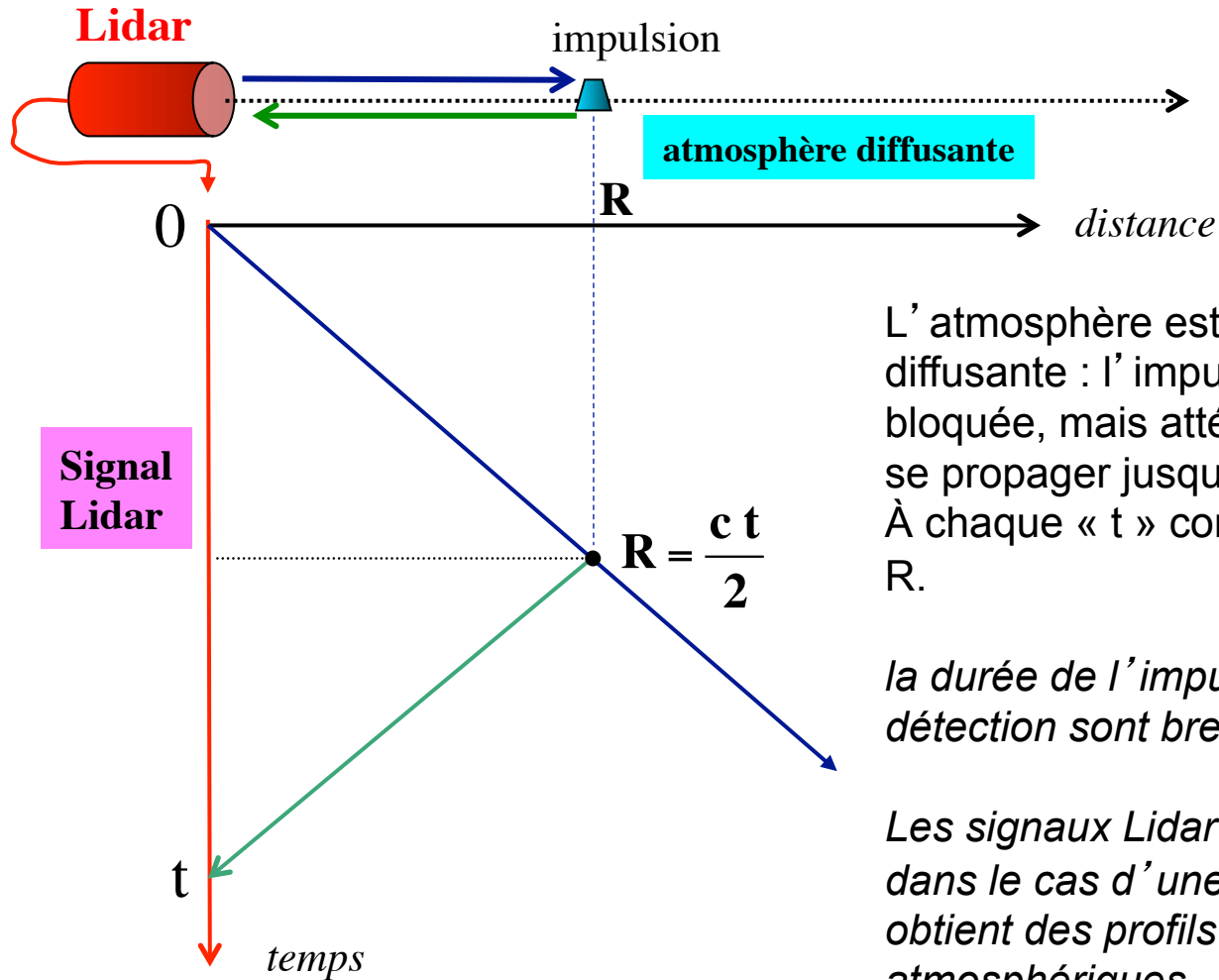
MESURE DE DISTANCE (TÉLÉMÉTRIE) ÉMISSION PULSÉE & CIBLE DURE



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.

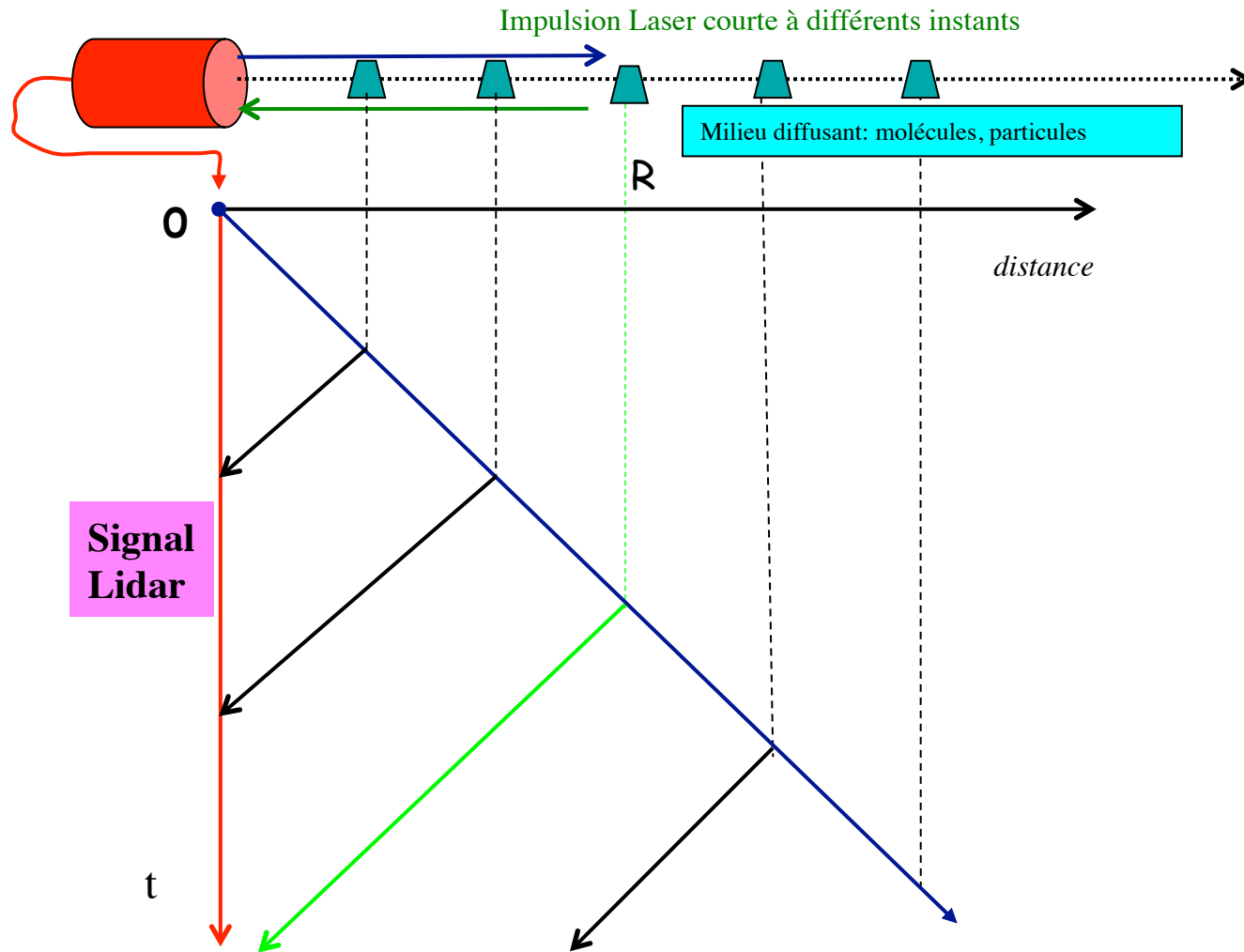
la durée de l'impulsion et le temps de détection sont brefs

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

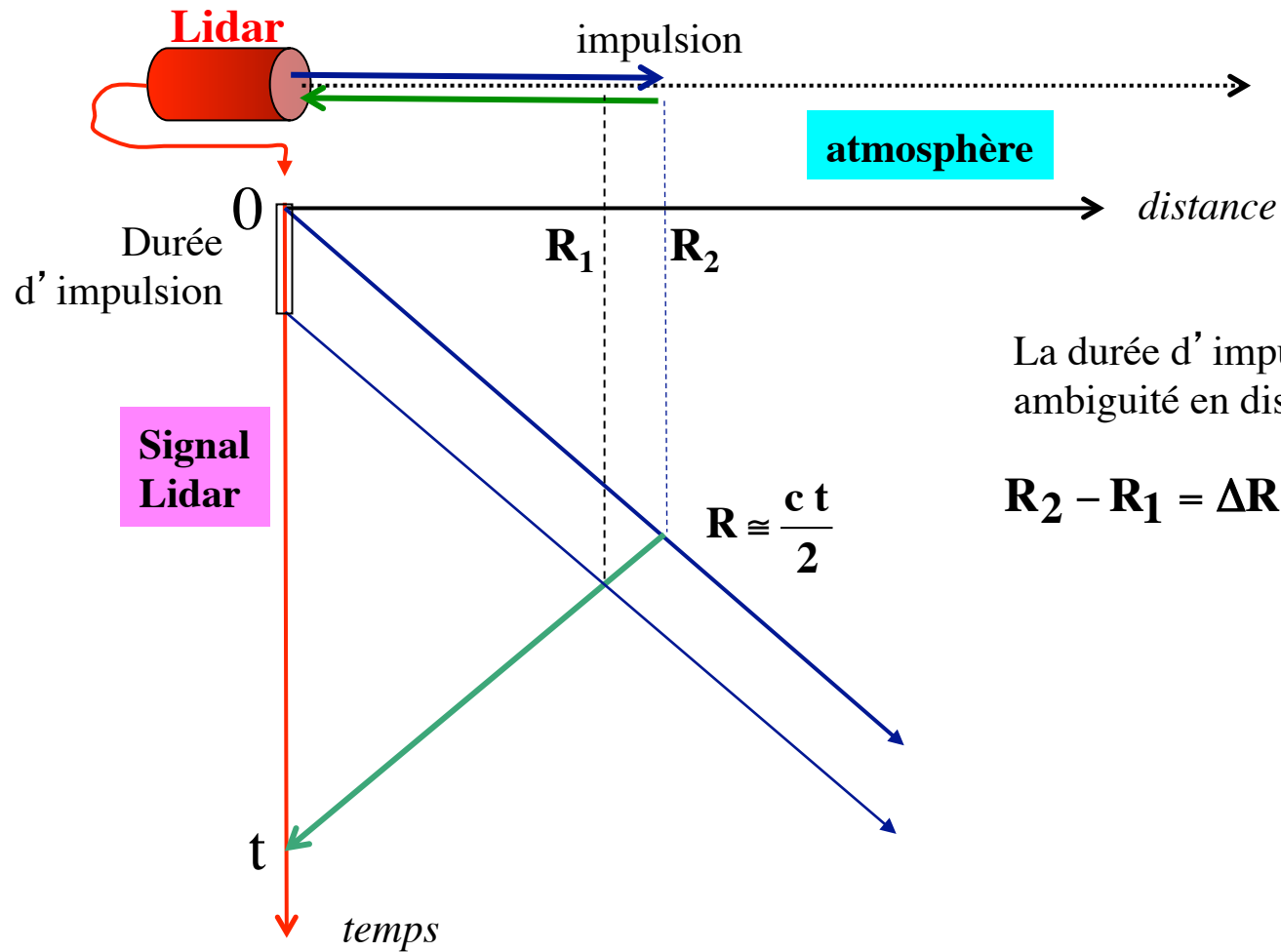
ÉMISSION PULSÉE & DIFFUSEURS MICROSCOPIQUES

MOLÉCULES & PARTICULES



AMBIGUITÉ EN DISTANCE

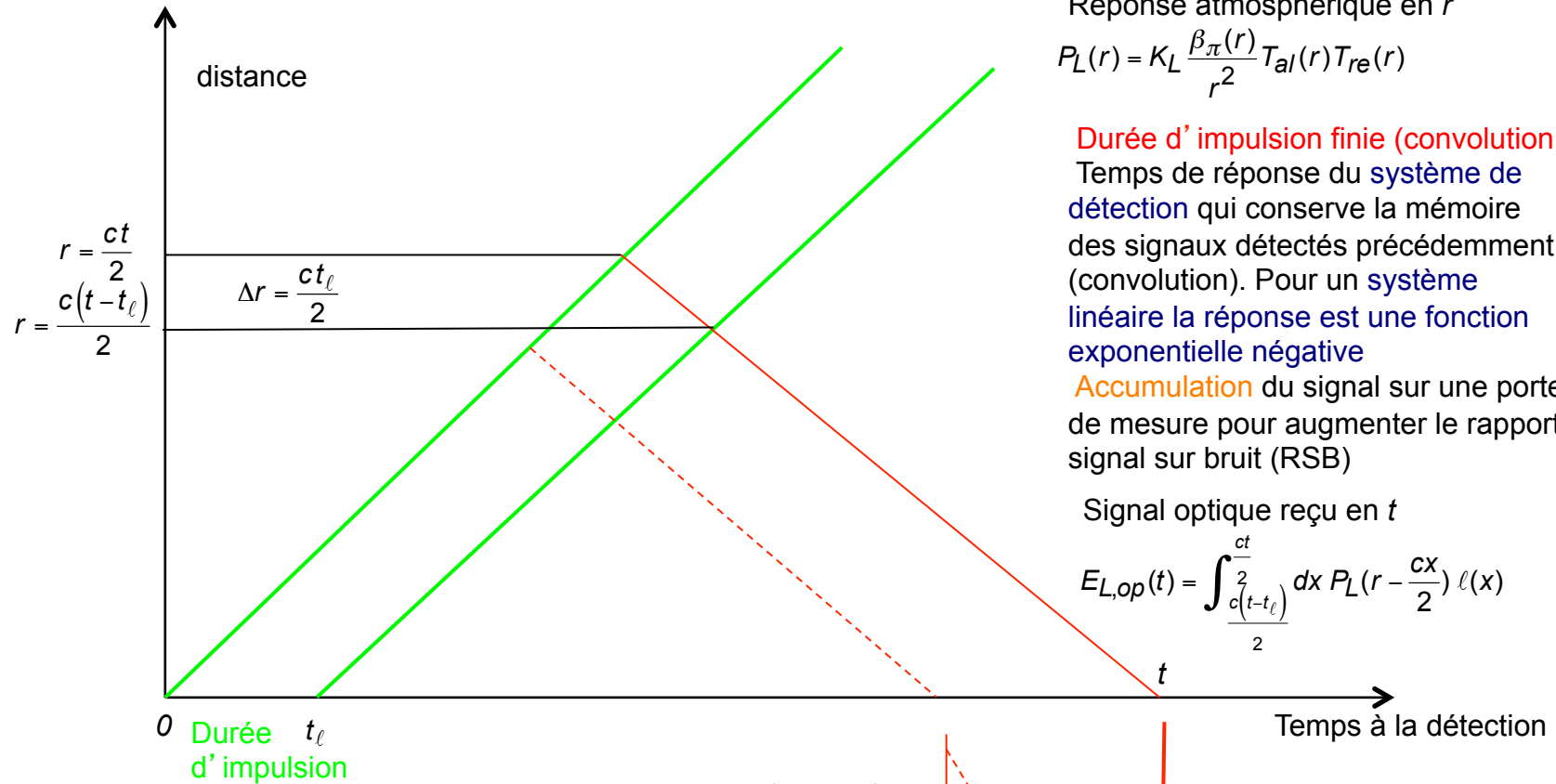
Durée d'impulsion



La durée d'impulsion conduit à une ambiguïté en distance ΔR

$$R_2 - R_1 = \Delta R = \frac{c t_l}{2}$$

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**

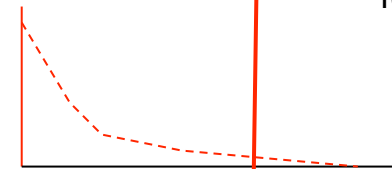
Accumulation du signal sur une porte de mesure pour augmenter le rapport signal sur bruit (RSB)

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 $E_{L,nu}(i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} E_{L,el}(t) dt$





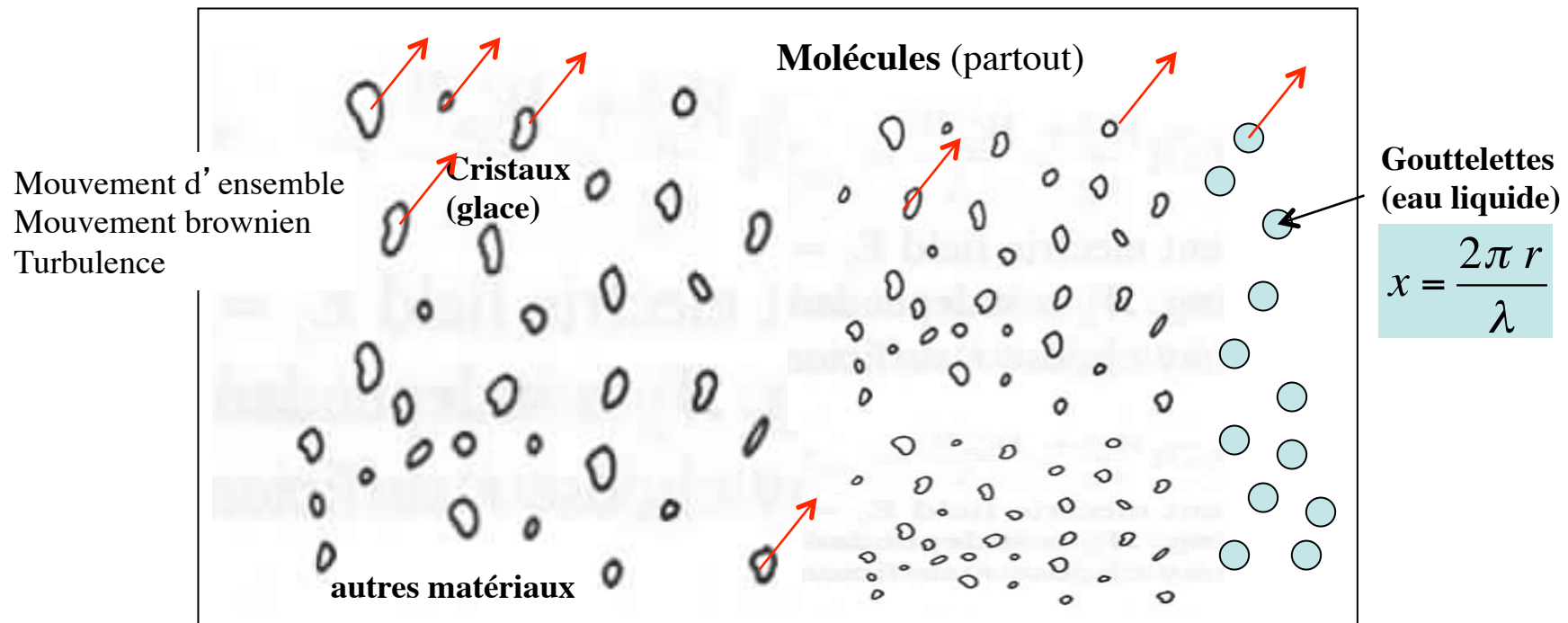
Spectroscopie

Milieu atmosphérique

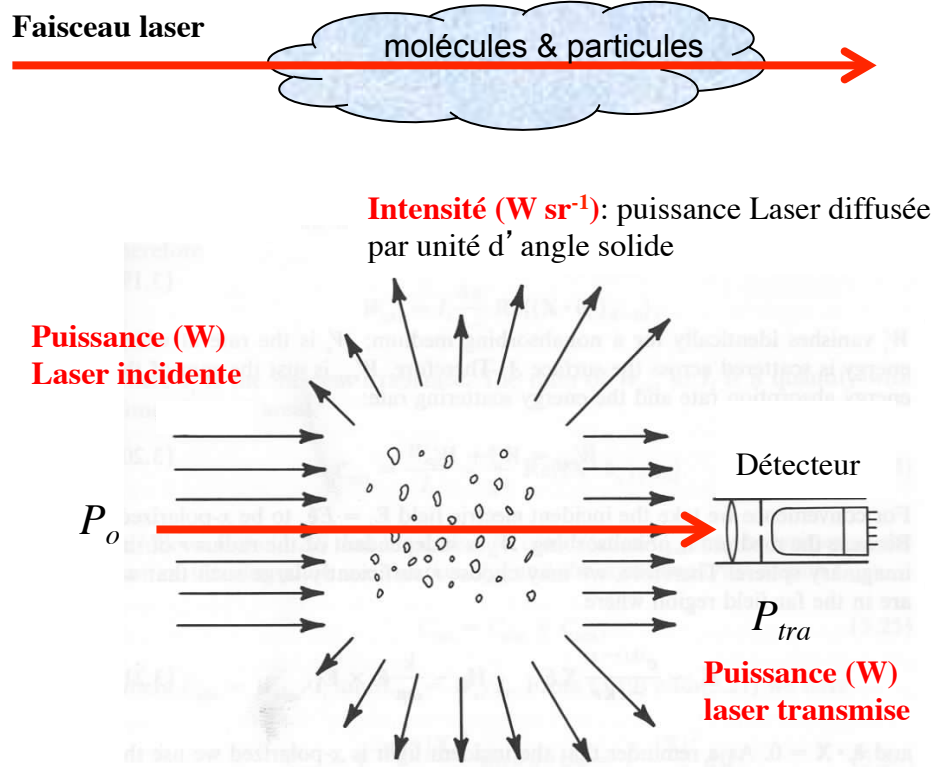
Le milieu atmosphérique est constitué de molécules: N₂, O₂, Ar, vapeur d'eau, et de particules microniques (0.1 à 10 μm) en suspension : aérosols, gouttelettes, cristaux, hydrométéores

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



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 ϖ 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 $\alpha(x) = \sum_i \sigma_i N_i$ $N = \sum_i N_i$

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

$$\delta(0, x) = \int_0^x \alpha(y) dy = \int_0^x (\alpha_e(y) + \alpha_a(y)) dy = \int_0^x \left(\sum_i \alpha_{e,i}(y) + \sum_j \alpha_{a,j}(y) \right) dy$$

- 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

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

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

$$\text{concentration } \beta_{\varpi}(x) = d\sigma/d\varpi N(x) \Rightarrow \beta_{\varpi}(x) = \sum_i \beta_{\varpi,i}(x) = \sum_i \left. \frac{\partial\sigma}{\partial\varpi} \right|_i N(x)$$

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

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

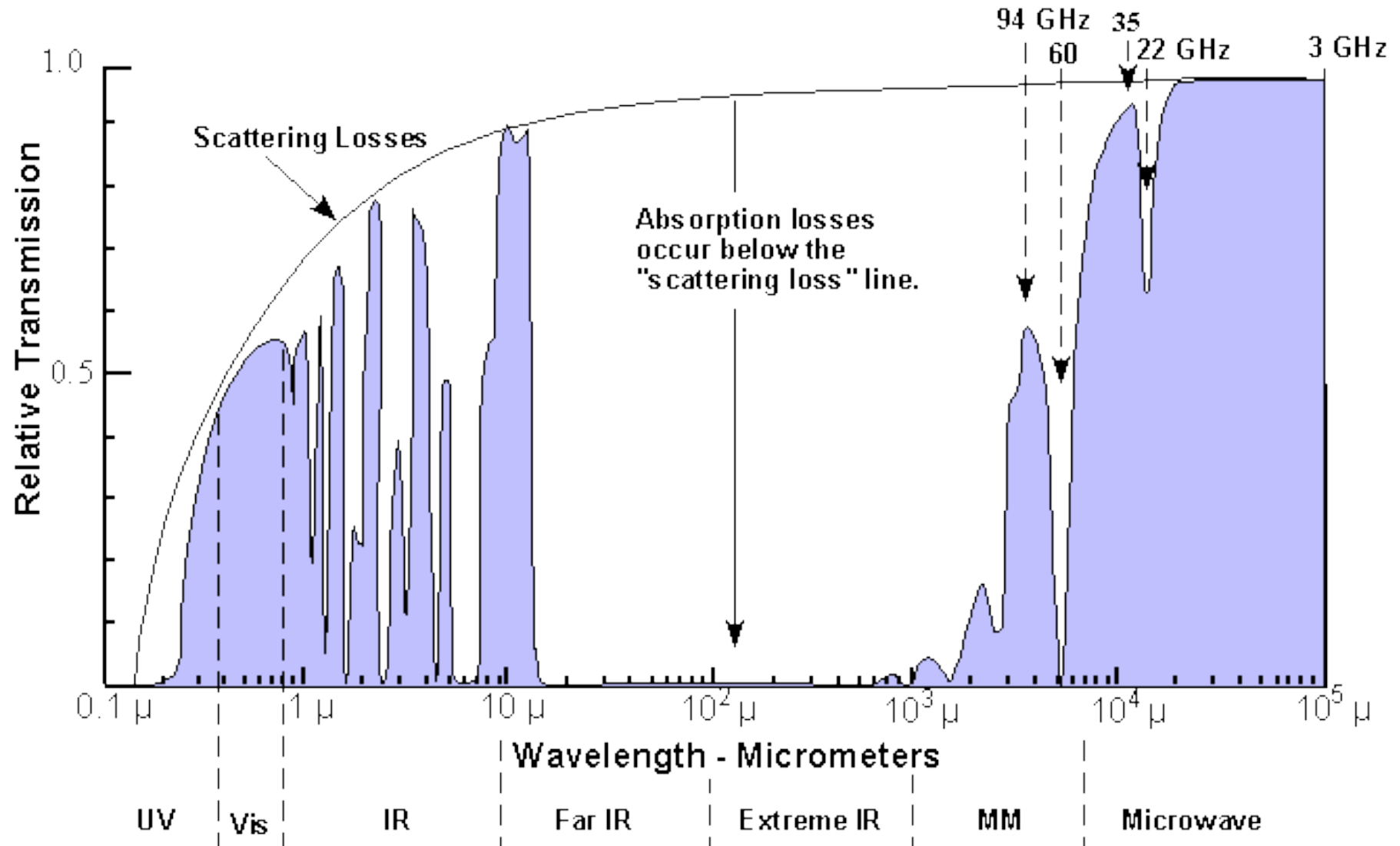
- En lidar on utilise la rétrodiffusion à 180° ou $\pi \Rightarrow \beta_{\pi}(x)$
- On peut relier les 2 coefficients par une relation linéaire

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

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

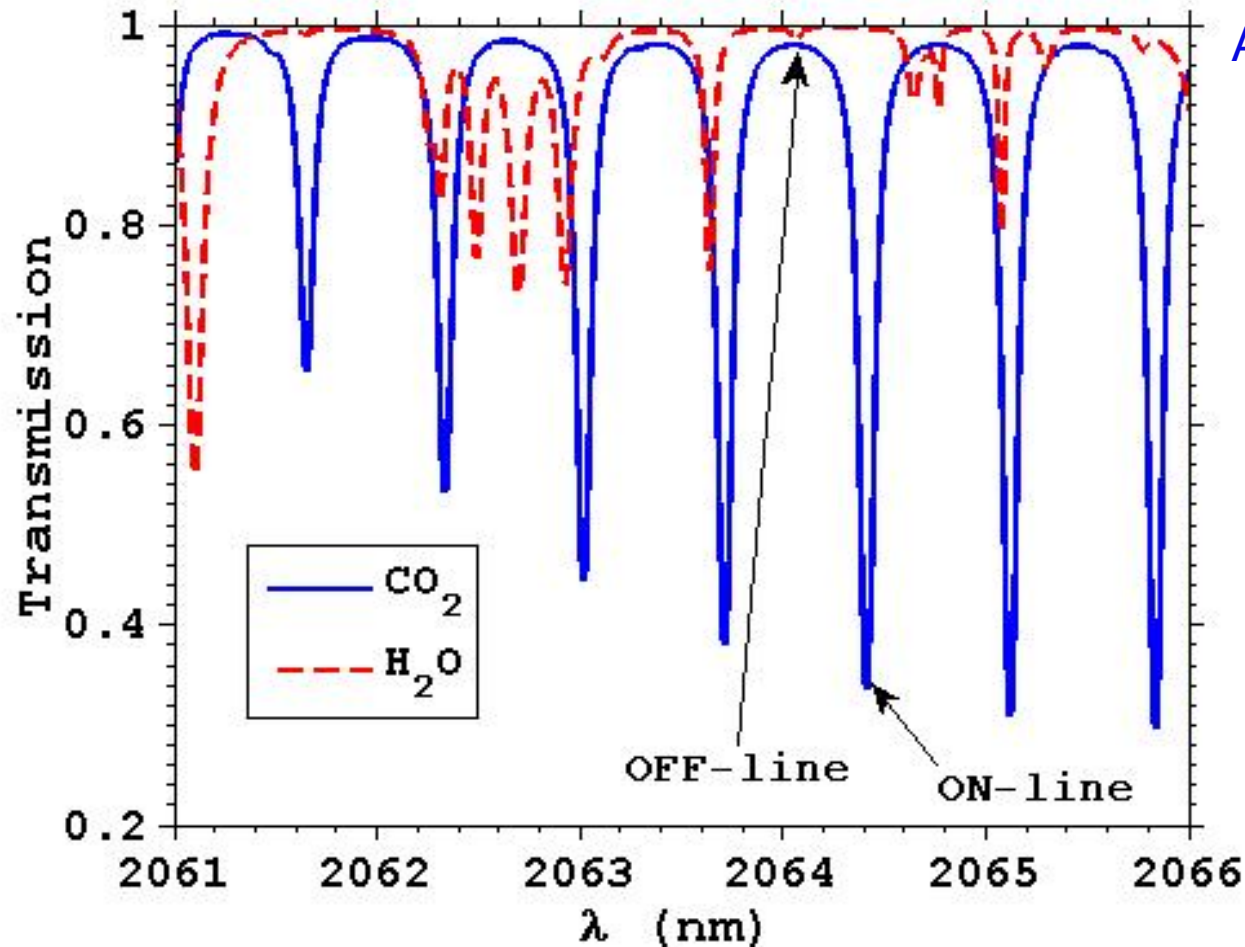
- Rapport de diffusion particules/molécules

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



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 CO₂ et H₂O

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

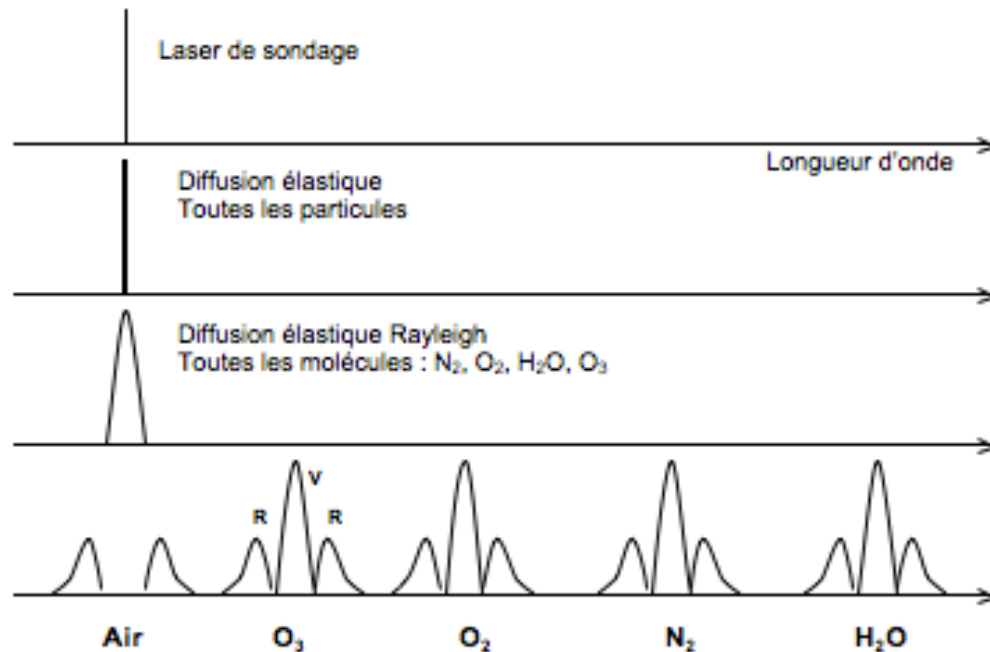
Attention: interférences !



Diffusion par les molécules

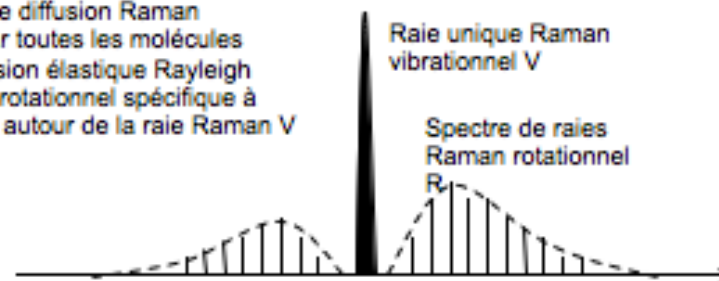
- Diffusion élastique & diffusion inélastique
- Rayleigh
 - Intensité
 - Indicatrice de diffusion
 - Spectre
- Brillouin
- Raman
 - Vibrationnel
 - Rotationnel

Spectre de Diffusion



Diffusions inélastiques Raman

- Raie unique de diffusion Raman vibrationnel (V) spécifique à chaque molécule
- Spectre de raie de diffusion Raman rotationnel (R) par toutes les molécules autour de la diffusion élastique Rayleigh
- Diffusion Raman rotationnel spécifique à chaque molécule autour de la raie Raman V



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 ν_0 (λ_0), $\delta\nu$ demie largeur à 1/e, $\Delta\nu$ demie largeur à mi-hauteur

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

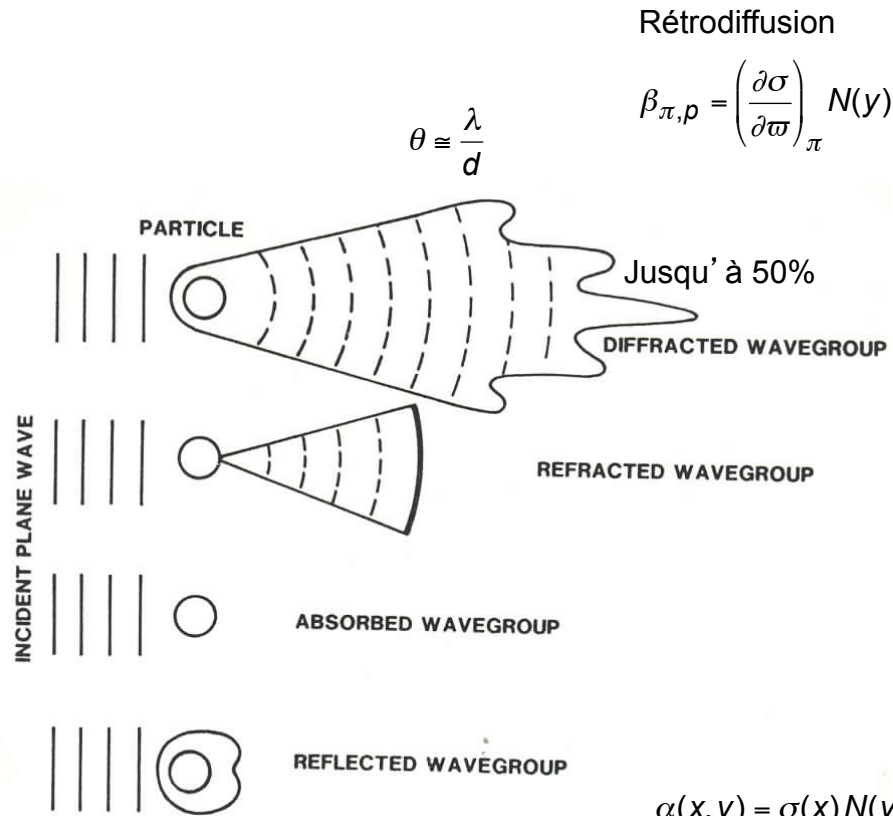
$$\delta\nu = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad \delta\nu(\text{MHz}) = \frac{676}{\lambda(\mu\text{m})} \quad \Delta\nu = 2\sqrt{\ln 2} \delta\nu$$



Diffusion par les Particules

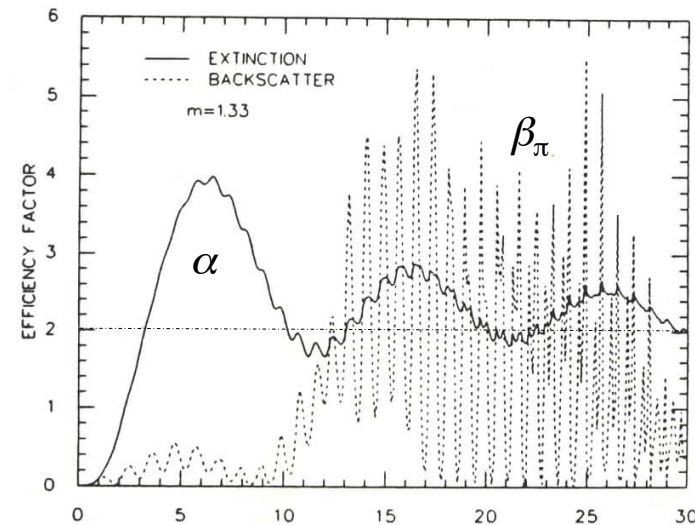
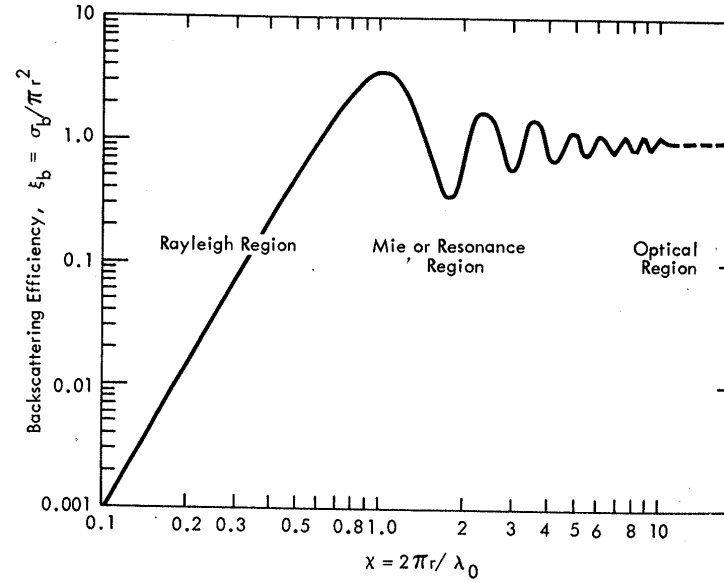
- Diffusion élastique & diffusion inélastique
- Mie
 - Intensité
 - Indicatrice de diffusion
- Raman
 - Vibrationnel

Diffusion de « Mie »



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

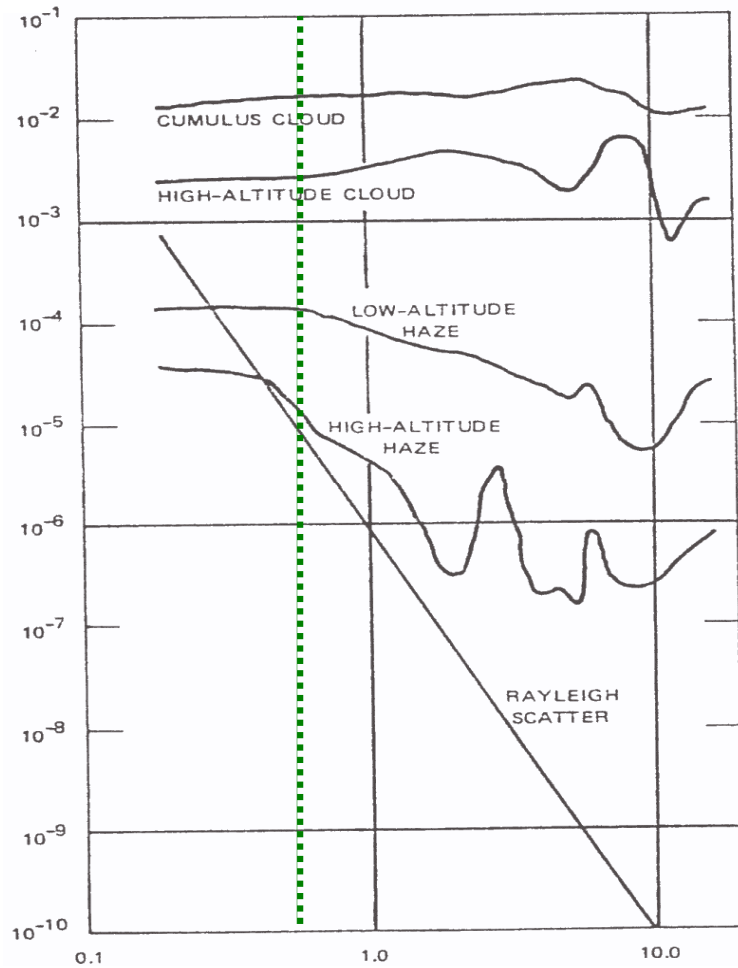
$$\sigma_p(x) = Q_{ext,p}(x, m) (\pi r_p^2)$$



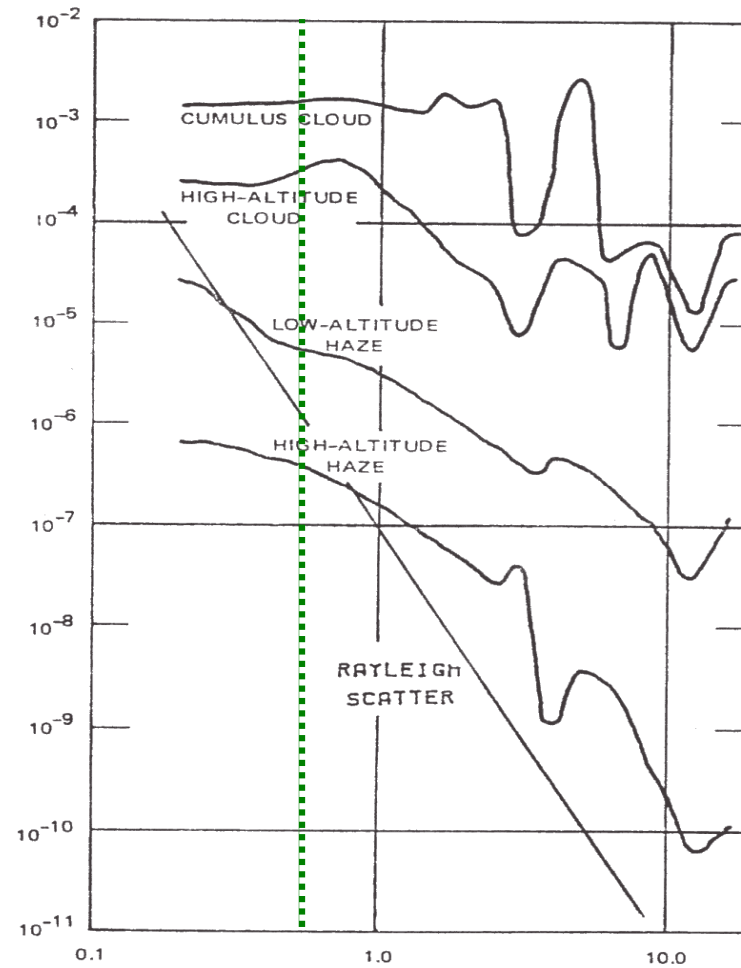
eau

Extinction & Rétrodiffusion

σ : Coefficient d'extinction (par diffusion)



β : Coefficient de rétrodiffusion



Longueur d'onde (μm)



Dépolarisation

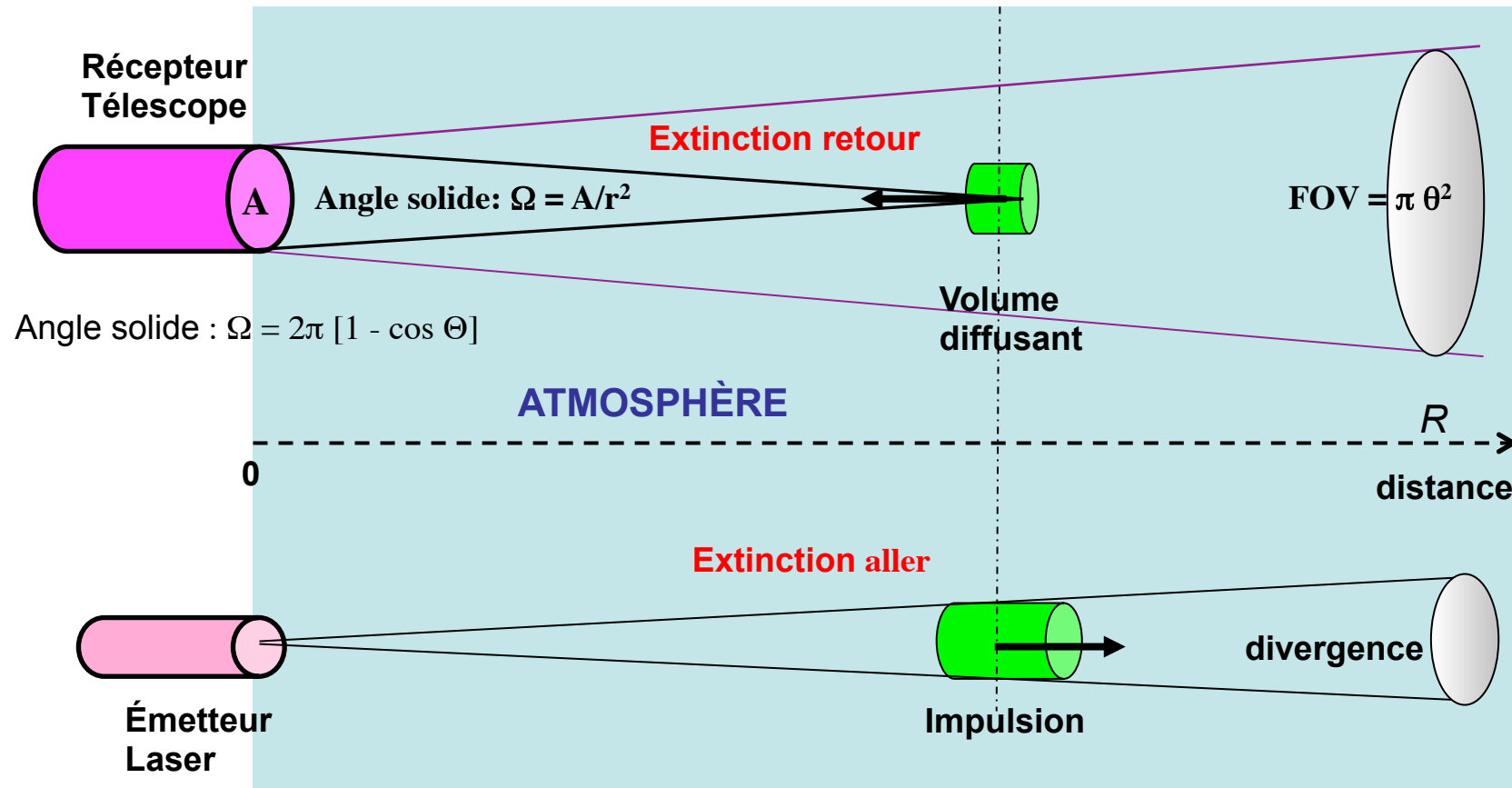
- La lumière laser diffusée peut être dépolarisée
- Si la lumière laser est polarisée linéairement, la lumière diffusées est elliptique
- Les particules sphériques ne dépolarisent pas
- Les cristaux : plaquettes, colonnes hexagonales, etc, dépolarisent par réflexion frustrée (suivant les lois de Fresnel)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



Bilan Liaison & Équation Lidar

Lidar = Bilan Optique

Énergie laser \Rightarrow Puissance reçue



GÉOMÉTRIE DU PROBLÈME DIRECT

Diagramme de diffusion

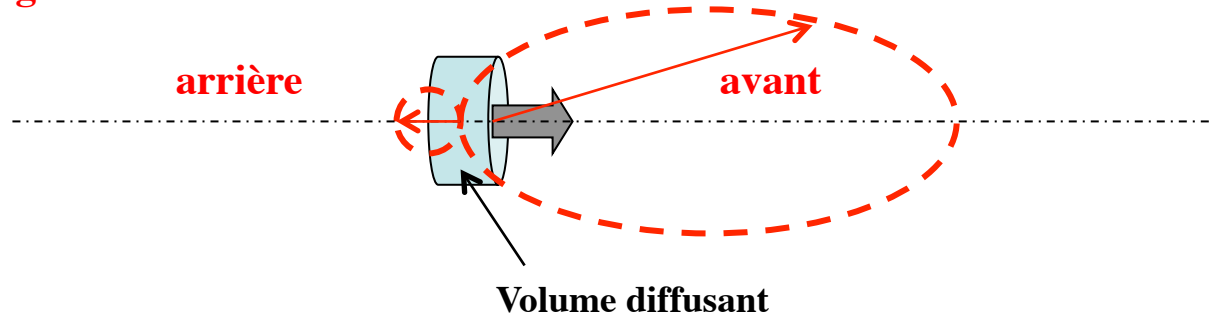
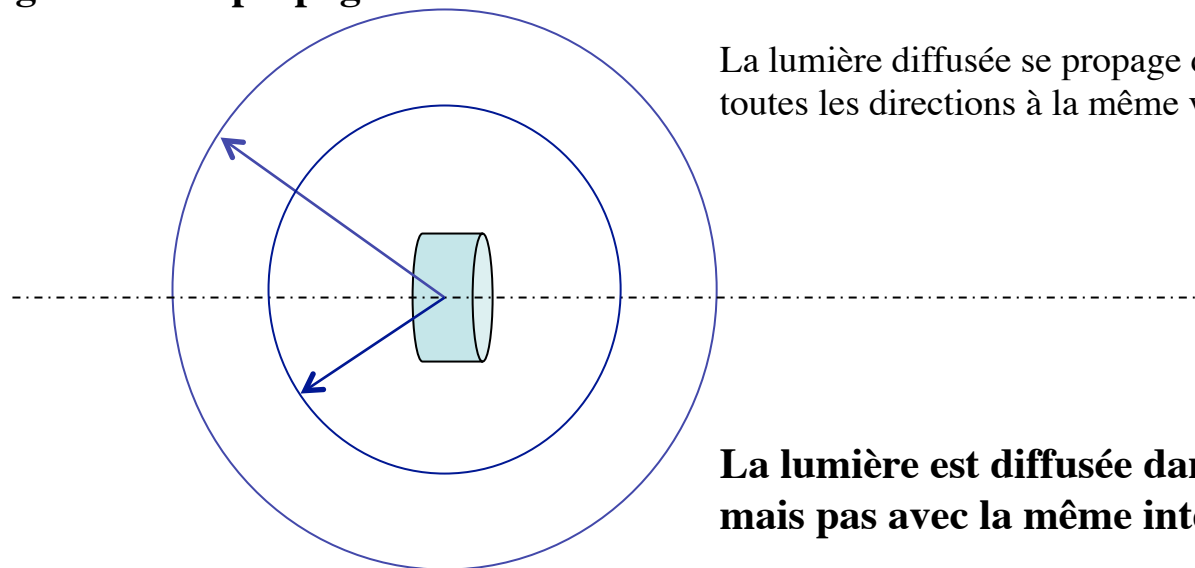


Diagramme de propagation



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

Bilan Optique

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

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

Application Numérique

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 : $= 50 \Omega$

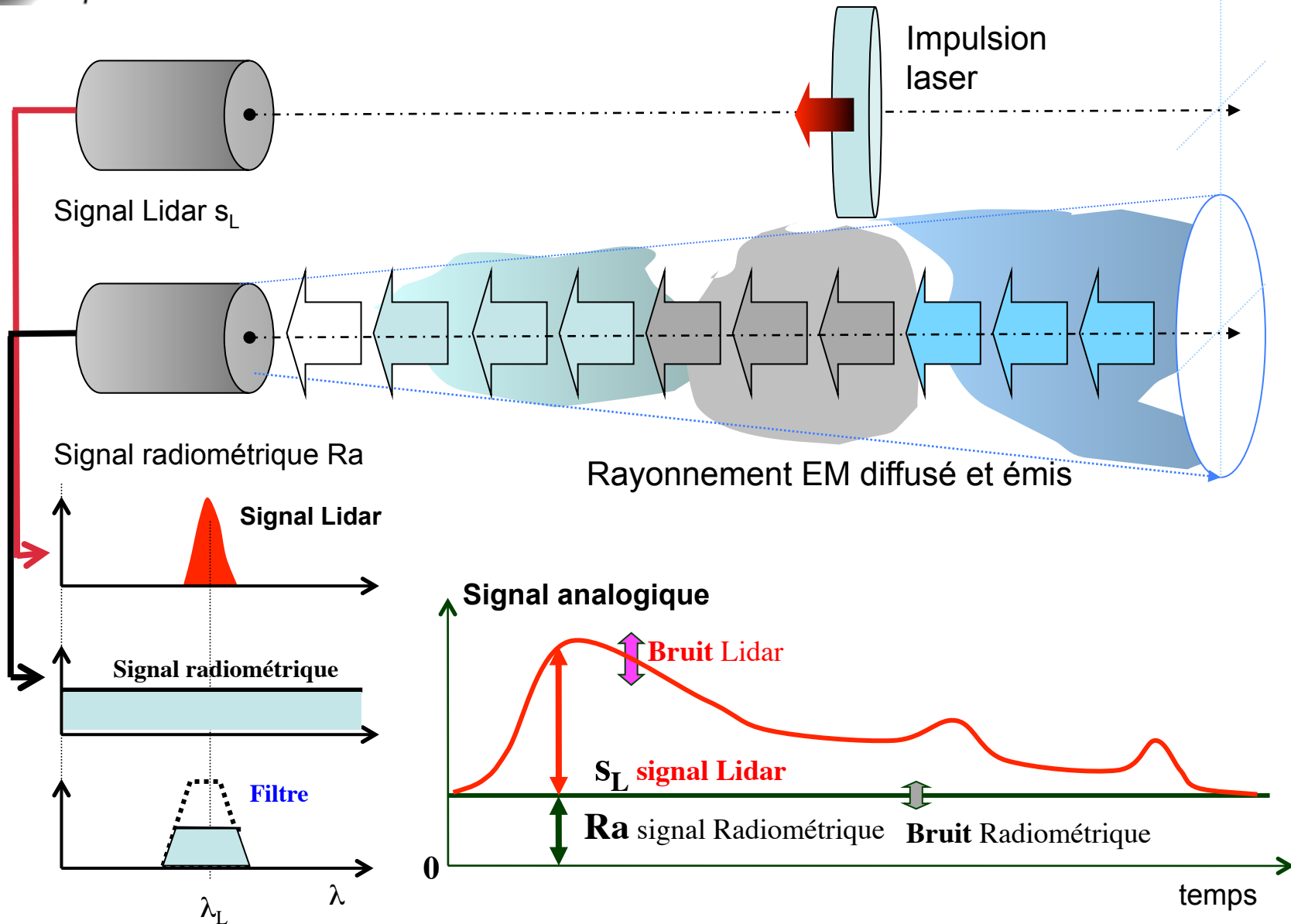
Propagation & Atmosphère

- 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 ⁻¹)	Photons par μs	Photo électrons μs^{-1}	Courant électrique	tension
3 km	$6.7 \cdot 10^{-9}$ (6,7 nW)	$1,8 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^3$	0,29 mA Courant analogique	14 mV
20 km	$5.6 \cdot 10^{-11}$ (56 pW !)	$1,5 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^2$	15 Comptage photoélectrons	2,4 μA	0,12 mV

DD = Signaux Utile & Parasite



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 (m²) : surface du télescope

L (W m⁻² nm⁻¹ sr⁻¹) : 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)

θ (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 μm) – nuages d' eau liquide de basse altitude
- $L \sim 10^{-3}$ à $10^{-2} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ pour T= 200 - 300 K

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

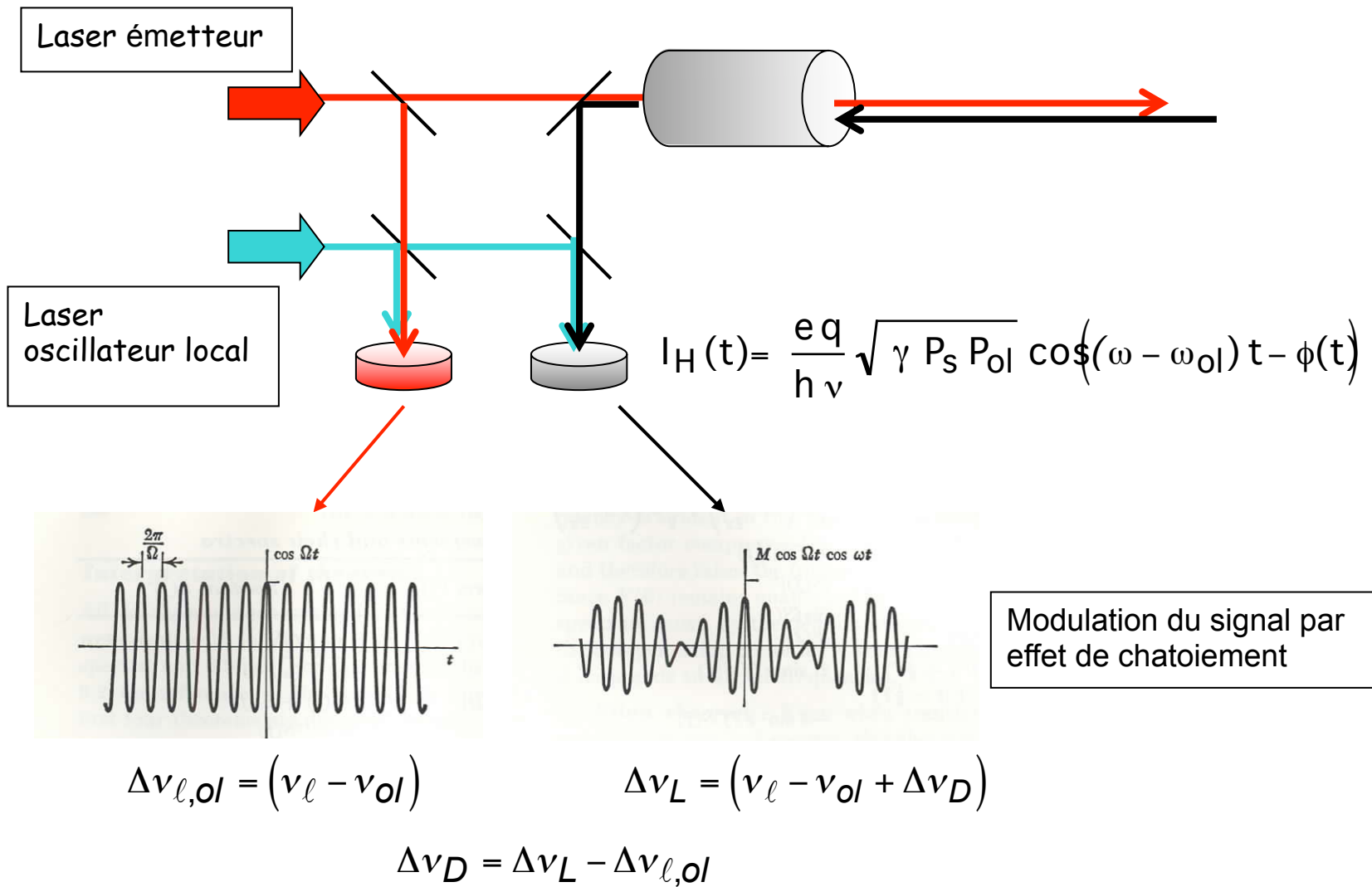
Distance 20 km $P_L = 5,6 \times 10^{-11} \text{ W}$

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)

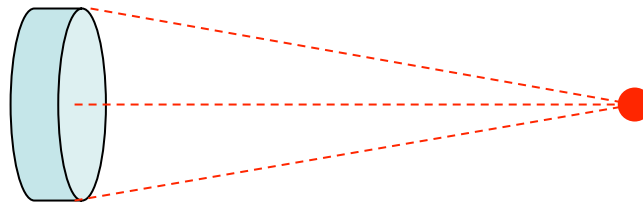
Détection Hétérodyne



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

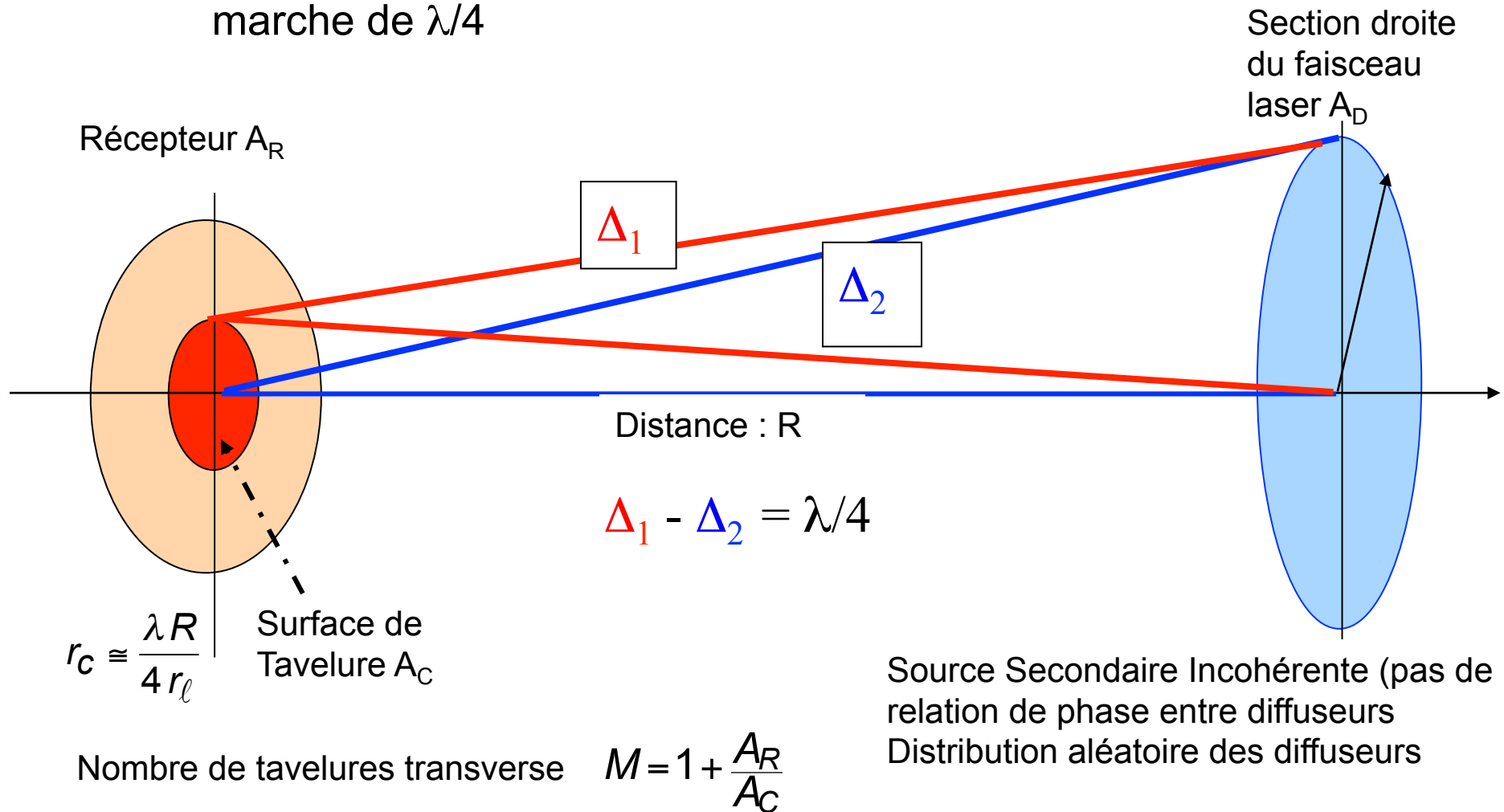
Nombre M de tavelures
(speckles) sur le récepteur



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

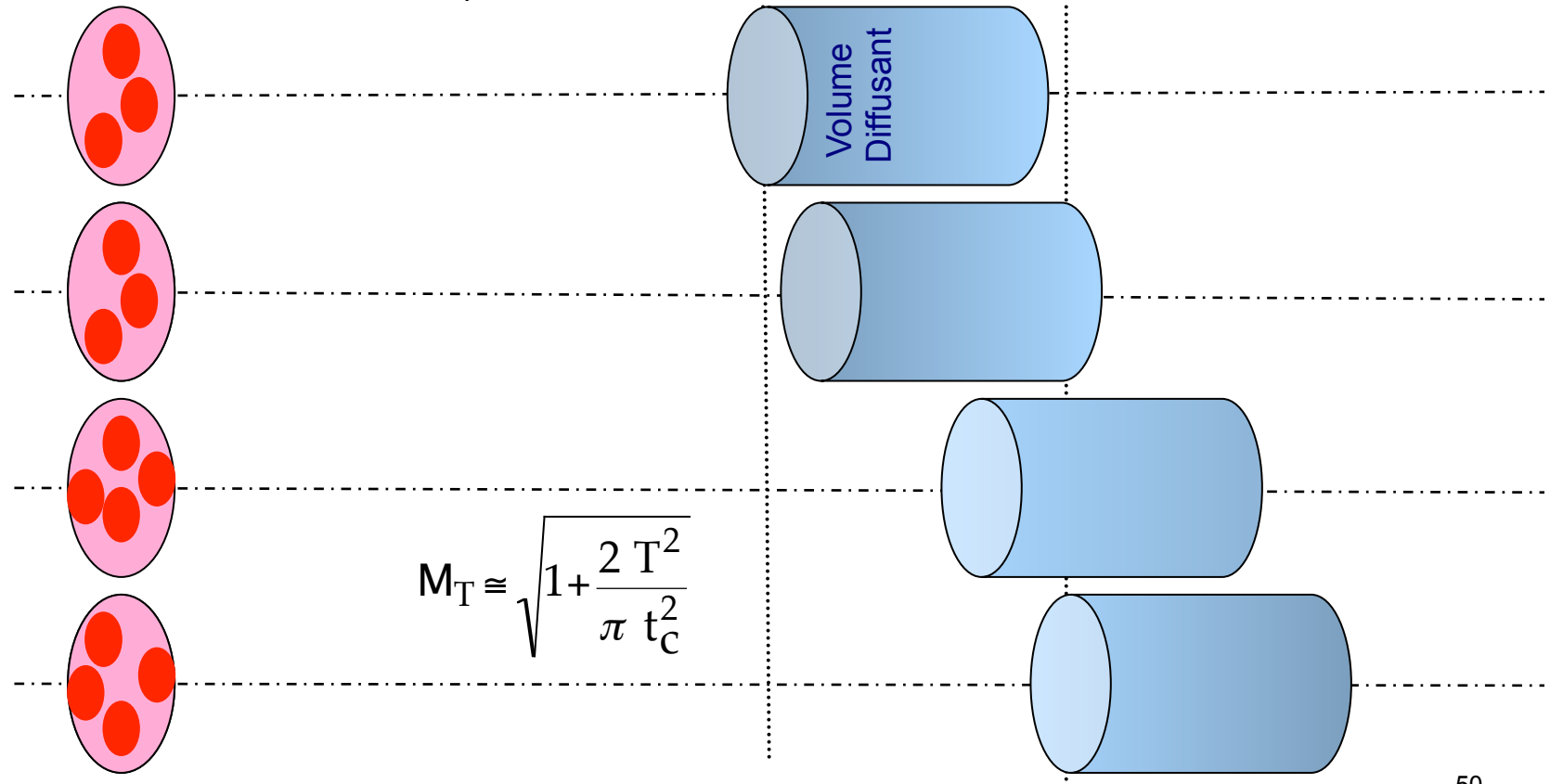
Cohérence Transverse

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



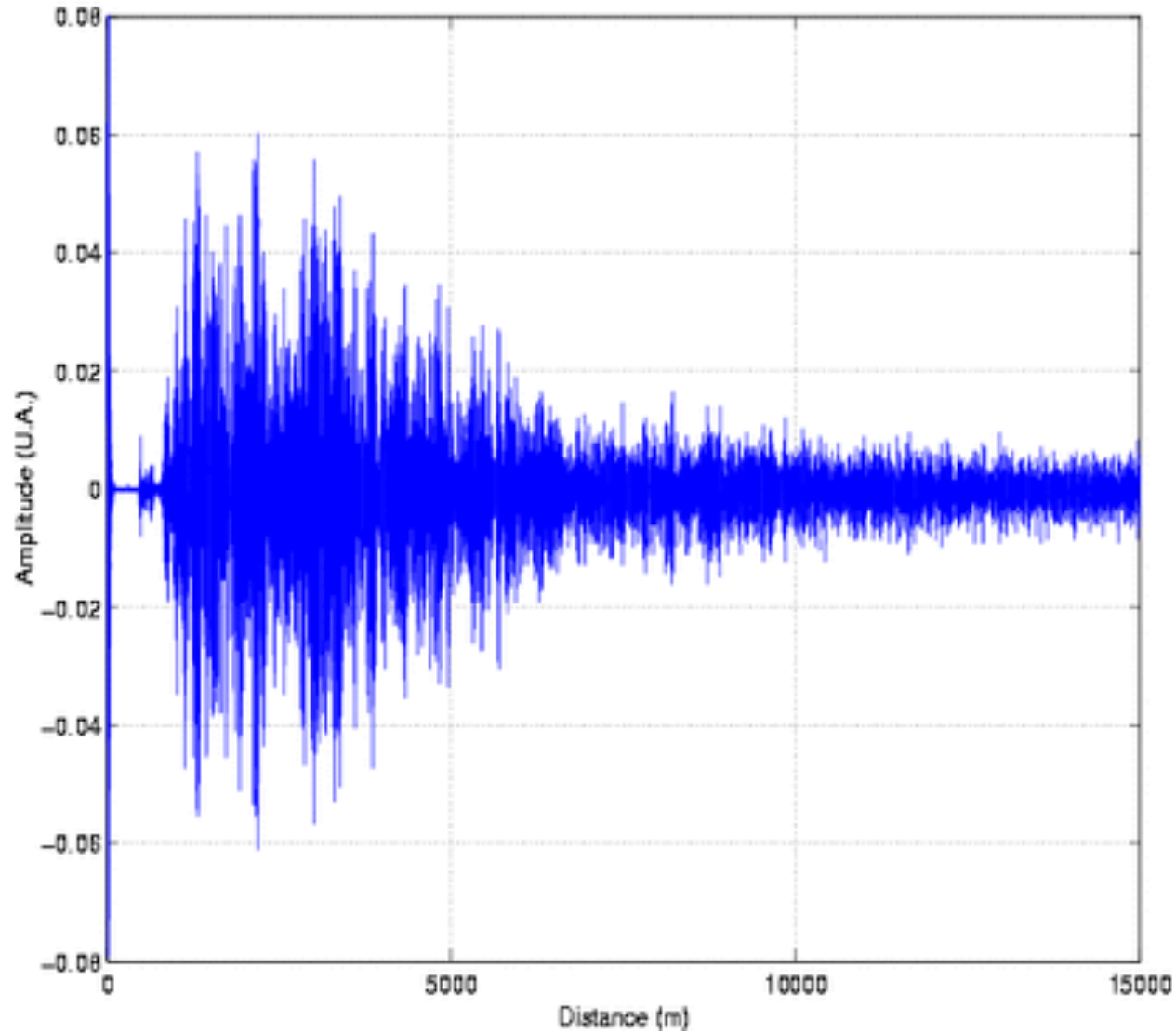
Cohérence Longitudinale

- 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



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 $p_M(y) = \sqrt{\frac{M}{2\pi}} \exp\left\{M(1 + \ln y - y)\right\}$

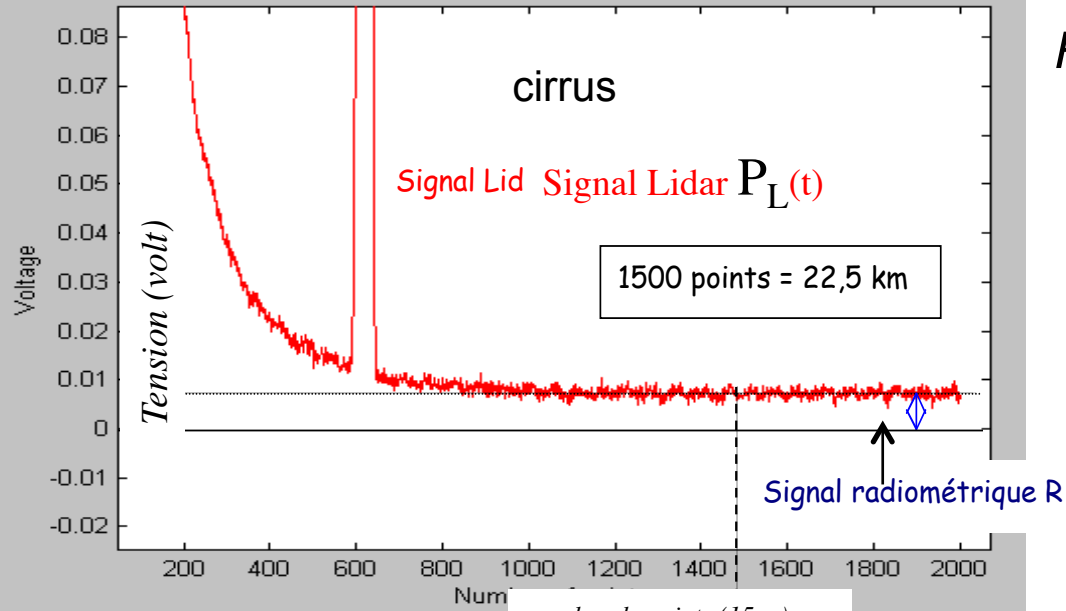
- Approximation $\ln(y) = 1 + \varepsilon$

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 : $\overline{i_g^2} = 2eI BG$**
- Bruit Johnson
- Amplificateur
- Courant noir

Rapport Signal sur Bruit

SIGNAL LIDAR À 532 nm



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

