

Instrumentation



Objectifs

- ❑ Présenter les principaux paramètres de fonctionnement du lidar
- ❑ Donner des éléments techniques permettant de concevoir un lidar
- ❑ Introduire une modélisation des performances
- ❑ Présenter quelques performances en fonction des paramètres instrumentaux
- ❑ Exposé centré sur lidar atmosphérique

Deux grandes familles de lidar

- Lidar à détection directe
 - le signal est reçu sur un détecteur quadratique (courant proportionnel à la puissance)

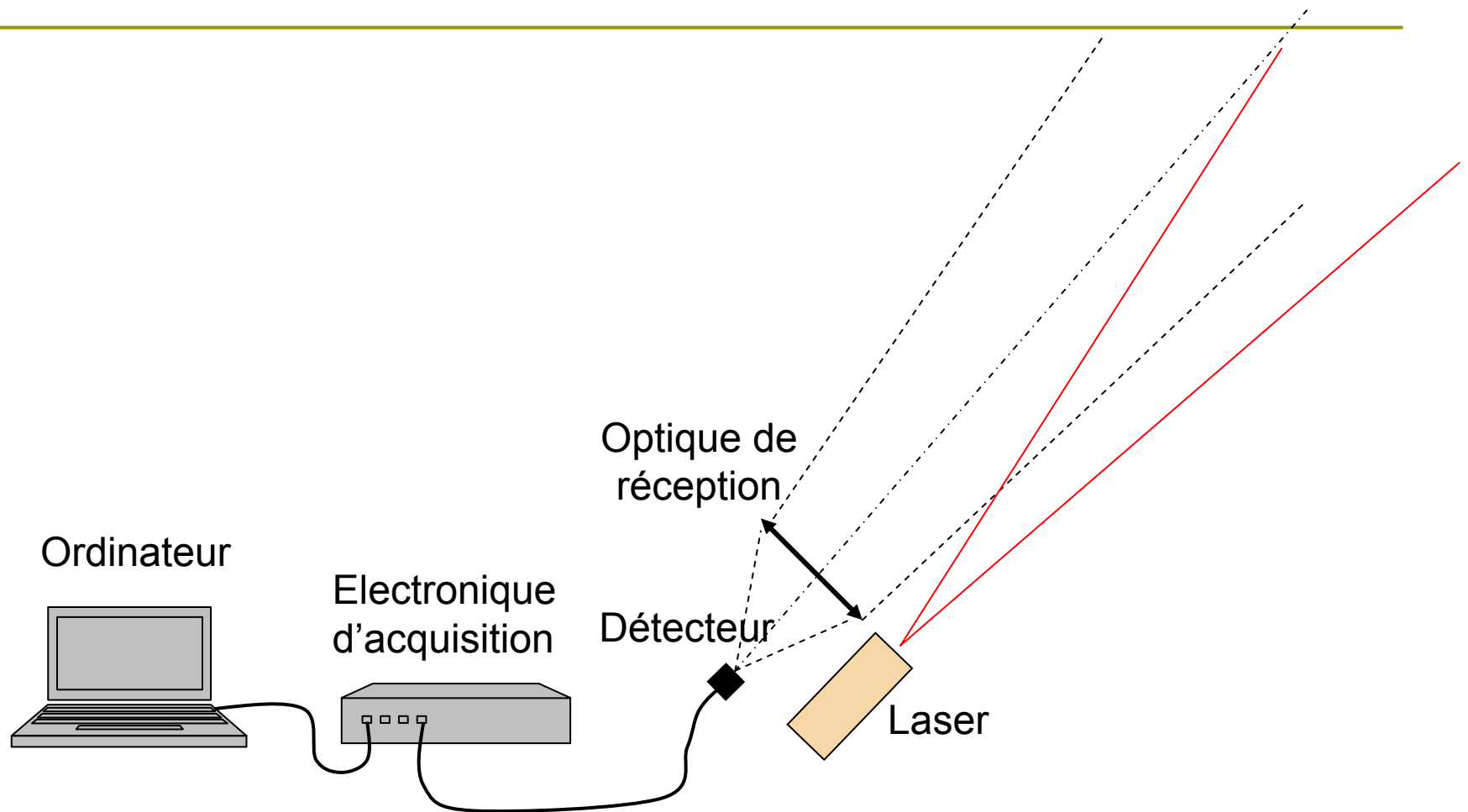
 - Lidar à détection hétérodyne
 - le signal est mélangé avec un oscillateur local sur le détecteur, courant proportionnel au champ électrique (information de fréquence)
- ⇒ Exposé en 2 parties

Instrumentation



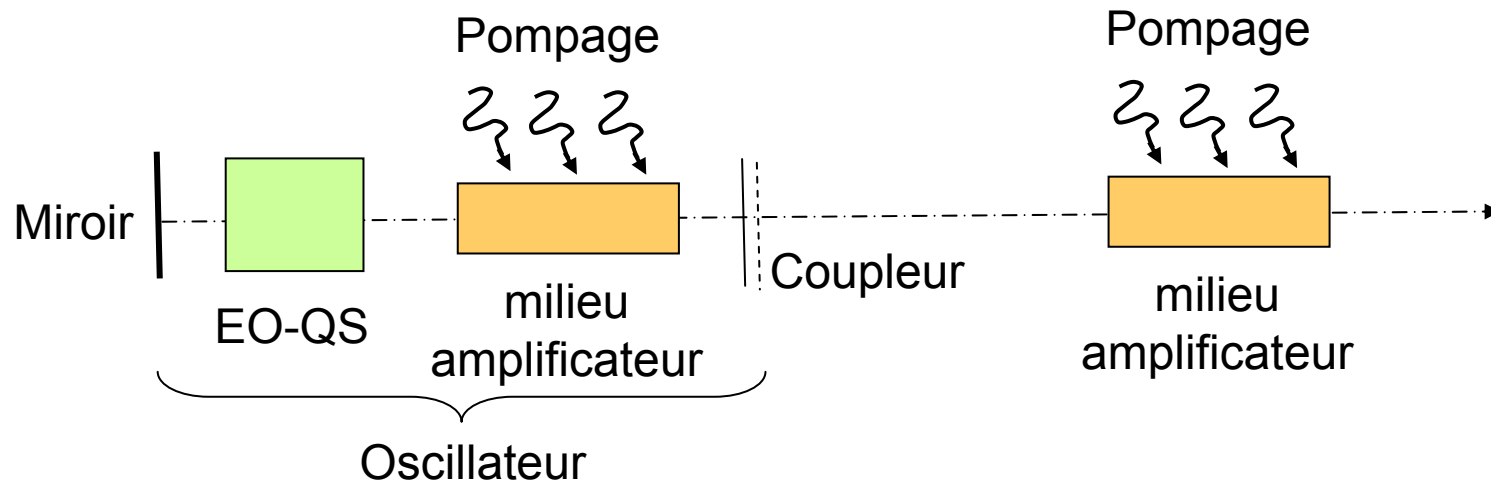
Partie 1. Lidar à détection directe

Schéma d'ensemble



Source Laser

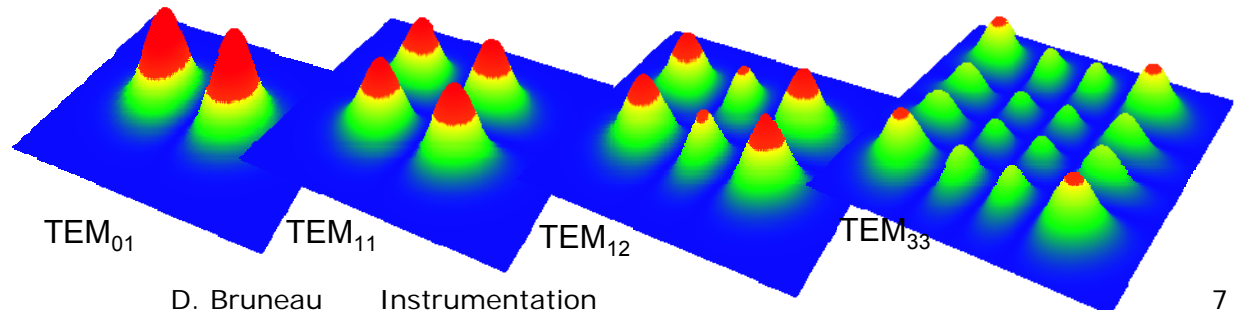
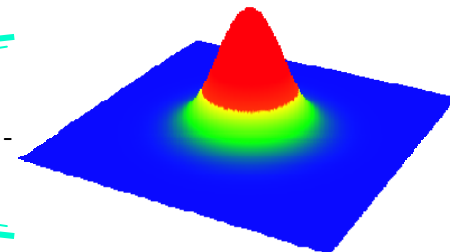
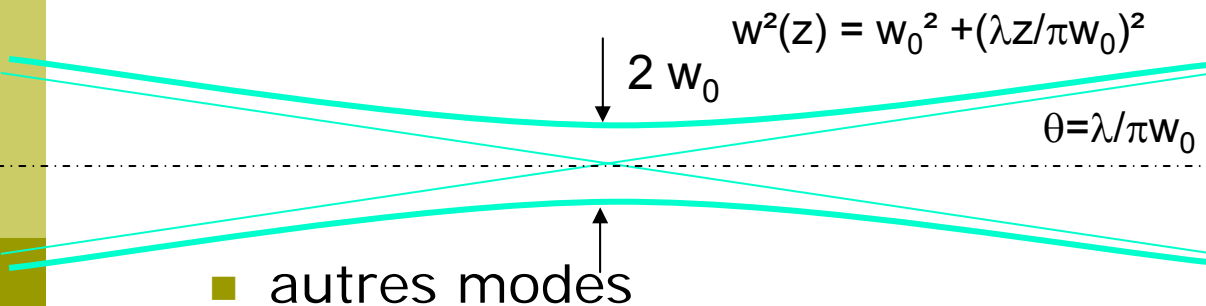
- But: générer des impulsions lumineuses énergétiques (> 1 mJ) d'une durée (1 – 100 ns) compatible avec la résolution en distance
- Principe
 - Excitation d'un milieu amplificateur (généralement solide) par pompage (généralement optique) \Rightarrow stockage d'énergie
 - Extraction de l'énergie sous forme d'impulsion lumineuse dans une cavité résonante, bloquée puis déclenchée par un dispositif électro-optique (Q-Switch)
 - Eventuellement amplification de l'énergie après émission par l'oscillateur (MOPA)



Modes de la cavité

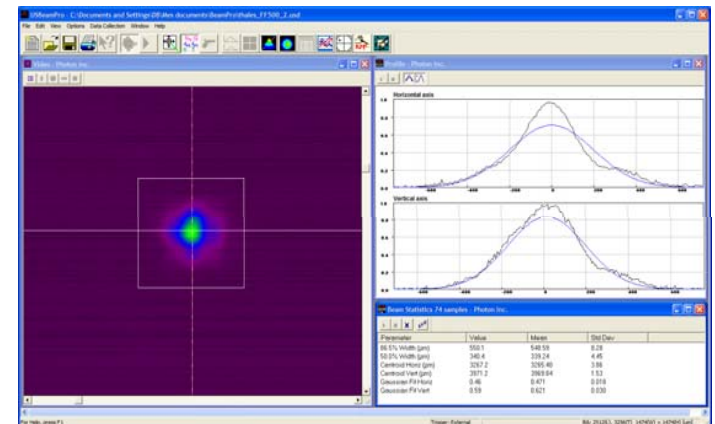
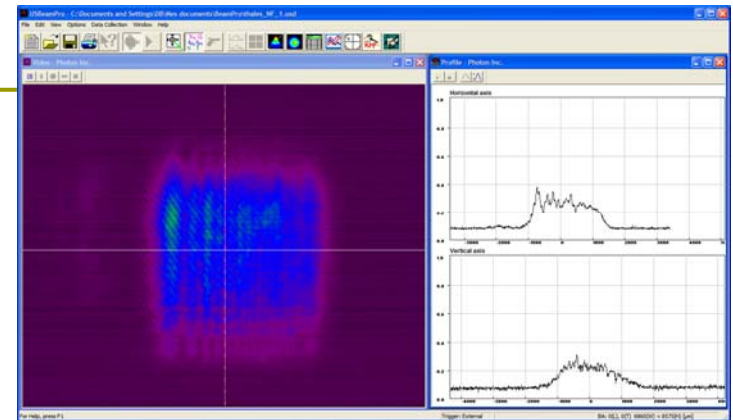
- Sélection spatiale (modes transverses)
 - mode propres de la propagation dans la cavité
 - mode fondamental TEM₀₀ Gaussien

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi\omega^2(z)} e^{-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}}$$



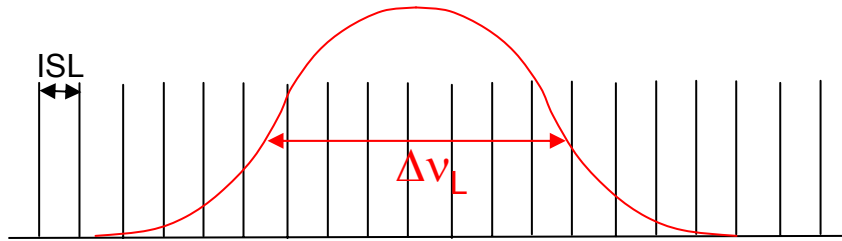
Qualité de faisceau

- ❑ Faisceau laser multimode ou imparfaitement Gaussien
 - pratiquement tous les faisceaux sont sensiblement Gaussien à l'infini mais avec une divergence > faisceau TEM₀₀ de même waist
 - si ω_0 est le rayon et θ la divergence contenant 86 % de l'énergie du faisceau réel:
$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0}$$
 - les M² des faisceaux réels vont de 1,1-1,2 à qq dizaines
 - Energie extraite plus importante pour les faisceaux très multimodes
 - Bon compromis énergie / qualité avec coupleur à réflectivité variable (ou miroir Gaussien ou GRM)



Propriétés spectrales

□ Modes de résonance de la cavité



- ISL intervalle spectral libre (exprimé en fréquence)

$$ISL = \frac{c}{L}$$

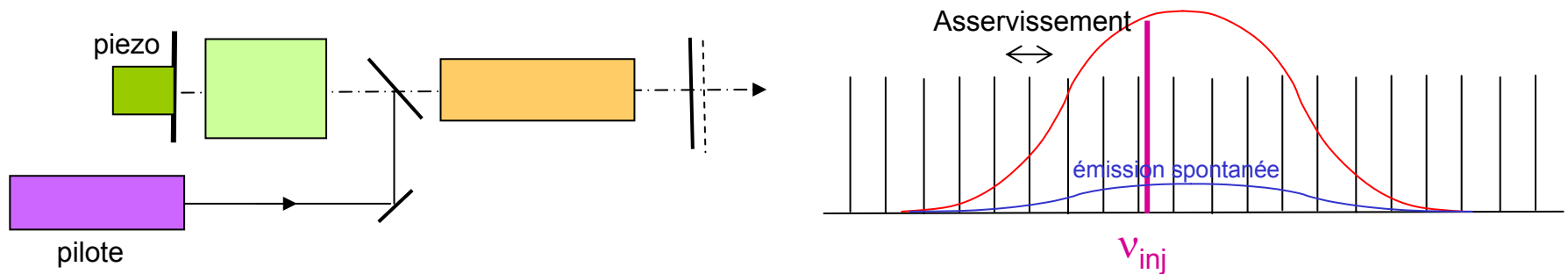
L = longueur optique de la cavité pour 1 AR (cavité linéaire) ou 1 boucle (cavité en anneau)

Δν_L largeur spectrale produit gain-perte du milieu amplificateur et des éléments optiques de la cavité (miroirs, filtres ...)

- Nombre de modes $N_m = \Delta\nu_L / ISL$ (valeurs typiques ISL ~ qq 100 MHz, Δν_L ~ qq GHz ⇒ qq dizaines de modes)
- Largeur spectrale d'un mode $\delta\nu_m \sim 1/2\tau_L$, τ_L durée d'impulsion

Emission monomode

- Pour certaines applications (Haute Résolution Spectrale, Vent, DIAL) il peut être nécessaire d'avoir une émission spectralement très fine.
- Injection d'une émission laser continue et monomode (laser pilote) dans la cavité.



- La cavité est accordée de manière à ce qu'un de ses modes soit sur la fréquence injectée (asservissement de la longueur de cavité par miroir piézo)
 - La puissance injectée est bien supérieure à l'émission spontanée sur laquelle démarre normalement l'oscillation laser
 - L'émission à la fréquence d'injection croît beaucoup plus vite que pour les autres modes et sature (extrait l'énergie stockée dans) le milieu amplificateur
 - les autres modes n'ont pas le temps d'être amplifiés
- ⇒ l'émission est monomode

Milieux amplificateurs

□ Gaz

■ Exciplexes (KrF, XeCl, ...)

- émission UV (248 nm, 308 nm, ...)
- pompage par décharge électrique
- forte puissance moyenne (qq 100 W)
- haute cadence (qq 100 Hz)
- encombrement et maintenance contraignants

□ Colorants

- émission visible accordable
- pompage par laser visible
- maintenance contraignante (toxicité)
- remplacés par les OPO

□ Lasers solides

- cristaux
- fibres

Cristaux dopés Néodyme

- Forte émission stimulée à ~ 1060 nm
 - autres émissions: 940 nm, 1120 nm, 1320 nm, 1440 nm
- Bonne durée d'état excité (stockage d'énergie important)
- laser 4 niveaux (seuil bas)
- Pas d'absorption parasite
- Pompage par lampe flash ou par diode laser AlGaAs à ~ 810 nm

Cristaux dopés Néodyme

- **YAG** ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
 - isotrope, bonne conductibilité thermique, bonne résistance mécanique, bonne qualité optique mais lentille thermique et dépolarisation importantes
 - émission à 1064 nm
 - durée de vie état excité : 230 μs
 - ⇒ pompage flash ou diode QCW, impulsions de forte énergie (~ 100 mJ) à 10 – 100 Hz

- **YLF** (YLiF_4)
 - biréfringent, conductibilité thermique moyenne, bonne résistance mécanique, bonne qualité optique, peu de lentille thermique, pas de dépolarisation.
 - 2 émissions 1047 nm et 1053 nm suivant polarisation
 - durée de vie état excité : 485 μs
 - ⇒ pompage flash ou diode QCW, impulsions de forte énergie (~ 100 mJ) à 10 – 30 Hz

- **YVO₄**
 - isotrope, bonne conductibilité thermique, bonne résistance mécanique, qualité optique correcte en petit volume
 - émission à 1064 nm
 - durée de vie état excité : 90 μs , très forte émission stimulée
 - ⇒ pompage diode CW, impulsions de faible énergie (~ 1 mJ) à 1 - 10 kHz

Nd:YAG déclenché

- Performances (lasers commerciaux)
 - Pompage flash
 - émission @ 1064 nm → 400 mJ en 5 ns @ 20 Hz
 - Pompage par diodes QCW
 - émission @ 1064 nm → 200 mJ en 10 ns @ 100 Hz
 - Pompage par diodes CW
 - émission @ 1064 nm ~1 → 20 mJ / 1- 100 ns @ 10 kHz

Autres cristaux

- Ruby ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)
 - longueur d'onde laser 694 nm
 - fortes bandes d'absorption visible + durée de stockage élevée \Rightarrow pompage par flash très efficace
 - système 3 niveaux \Rightarrow niveau de pompage très élevé
 - forte énergie (> 100 mJ) faible cadence (~ 1 Hz)
- Alexandrite ($\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$)
 - cristal vibronique, longueur d'onde laser accordable (700 – 800 nm, max @ 750 nm)
 - fortes bandes d'absorption visible + durée de stockage assez élevée \Rightarrow pompage par flash efficace
 - faible section efficace d'émission stimulée + absorption dans l'état excité \Rightarrow faible gain \Rightarrow niveau de pompage élevé
 - forte énergie (> 100 mJ) cadence réduite (~ 10 Hz)
- Ti; Saphir ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)
 - cristal vibronique, longueur d'onde laser accordable (670 – 1070 nm, max @ 800 nm)
 - bande d'absorption dans le vert mais durée de stockage (3 μs) faible \Rightarrow pompage par flash peu efficace \Rightarrow pompage par laser (Nd: YAG doublé pour impulsif)
 - très forte section efficace d'émission stimulée \Rightarrow fort gain
 - énergie moyenne (qq 10 mJ) cadence limitée par laser de pompe

Lasers à fibre (déclenchés)

- ❑ Pompage continu par diodes
- ❑ Taux de répétition très élevé
- ❑ Puissance moyenne élevée (bonne gestion thermique)
- ❑ Puissance crête limitée par effets non-linéaires
- ❑ Grande durée d'impulsion

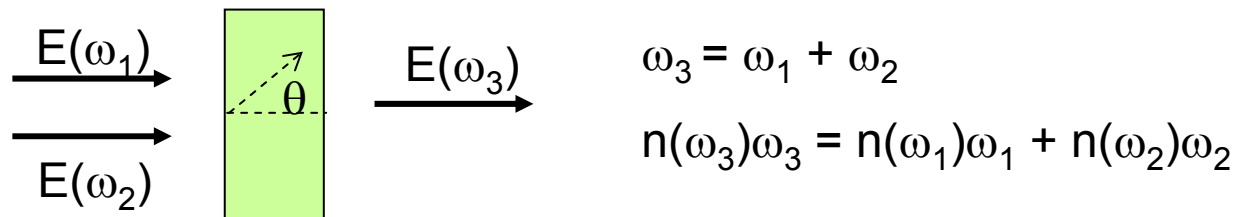
- ❑ Dopage Yb
 - longueur d'onde 1,07 μm
 - énergie \rightarrow 1 mJ en 100 ns @ 20 kHz (20 W moyens)

- ❑ Dopage Er
 - longueur d'onde 1,55 μm
 - énergie \rightarrow 0,5 mJ en 100 ns @ 10 kHz (5 W moyens)

Conversion de fréquence

□ Cristaux non-linéaires

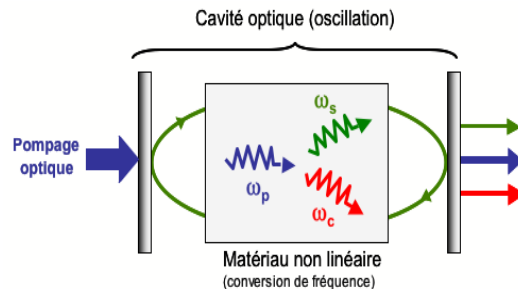
- LiNbO_3 , KDP, KTP, BBO, ...



- Doublage, triplage, quadruplage de fréquence
- Emission visible et UV à partir du proche IR
- Accord de phase par effet de dispersion et biréfringence dépend de θ et de T
- ⇒ la divergence du faisceau limite le rendement de conversion (typ. 50% pour doublage 25% pour triplage, 15% pour quadruplage)

Oscillateur Paramétrique Optique

□ Cristal non-linéaire dans cavité résonante



$$\omega_p = \omega_s + \omega_c$$

$$n(\omega_p)\omega_p = n(\omega_s)\omega_s + n(\omega_c)\omega_c$$

- A partir d'un laser de pompe visible ou UV, permet d'obtenir une émission accordable dans le visible ou le proche IR
- Mêmes cristaux, même nécessité d'accord de phase que pour la conversion de fréquence. Un léger désaccord de phase limite le gain de l'OPO mais le rendement peut rester élevé.
- Cavité résonante pour signal seul (SROPO) ou signal et complémentaire (plus efficace mais plus instable)
- Cavités imbriquées doublement résonante (DROPO) permet d'obtenir une émission monomode (si la pompe est monomode)

Emission Raman stimulée

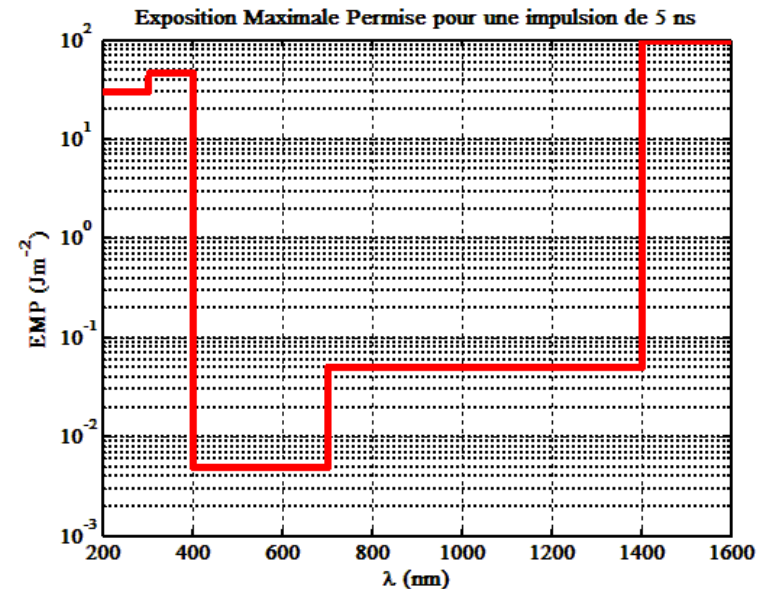
- Diffusion non élastique par création ou annihilation de phonons



- Décalage en fréquence (non accordable)
 - gaz: H_2 , CO_2 , CH_4 , ... $\Delta\omega$ de 1000 à 4000 cm^{-1}
 - cristaux $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$, ... $\Delta\omega$ autour de 1000 cm^{-1}
 - Emission stimulée à forte intensité incidente
- ⇒ Gain $G(z) \propto I(\omega_0, z)$; $I(\omega_0 + \Delta\omega, z) = I(\omega_0 + \Delta\omega, 0)e^{G(z)z}$

Sécurité oculaire

- Norme NF EN 60825-1
- Exposition Maximale Permise (EMP) œil nu
 - Très dépendante de la longueur d'onde (50 mJ/m² dans le visible, 100 J/m² en IR > 1400 nm)
 - Faible dépendance en durée d'impulsion (dans le domaine d'utilisation lidar)
 - Dépendance en nombre d'impulsions observées: $N^{-1/4}$
- Distance Nominale de Risque Oculaire
 - Exemple: Laser 50 mJ en 5ns / 20Hz / expo 0,25 s, Φ 5cm, divergence 0,5 mrd, sans atténuation atmosphérique



lambda (nm)	1550	1064	532	355
DNRO (km)	0,1	9	28	0,2

Optique de réception

- ❑ Rôle: collecter la lumière rétrodiffusée
 - ⇒ grande ouverture (typ. 10-100 cm)

- ❑ Qualité d'image relativement peu critique (tâche de diffusion généralement bien supérieure à la limite de diffraction)

- ❑ Système dioptrique
 - ❑ simple mais assez encombrant
 - ❑ chromatisme
 - ❑ diamètre ≤ 10 cm
- ❑ Système catadioptrique
 - ❑ obturation centrale
 - miroir concave simple, focalisation sur fibre
 - Type Newton
 - Type Cassegrain

Exemples de télescopes

Newton:

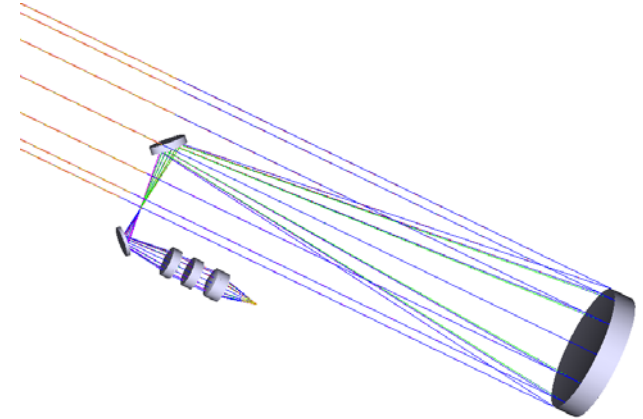
primaire parabolique Φ 100 mm Rcc 890 mm

secondaire plan 11 x 16 mm

Focale résultante 445 mm

Encombrement 420 mm

Obturation 4 %



Cassegrain:

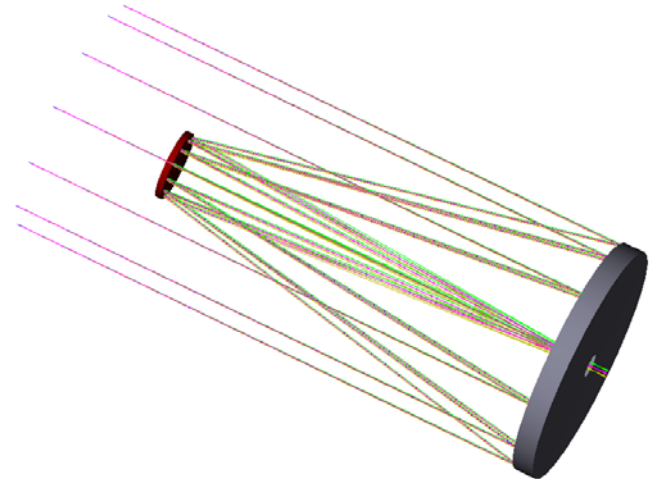
primaire sphérique Φ 300 mm Rcc 1500

secondaire elliptique Φ 90 mm Rcx 600

Focale résultante 2250 mm

Encombrement 550 mm

Obturation 9 %



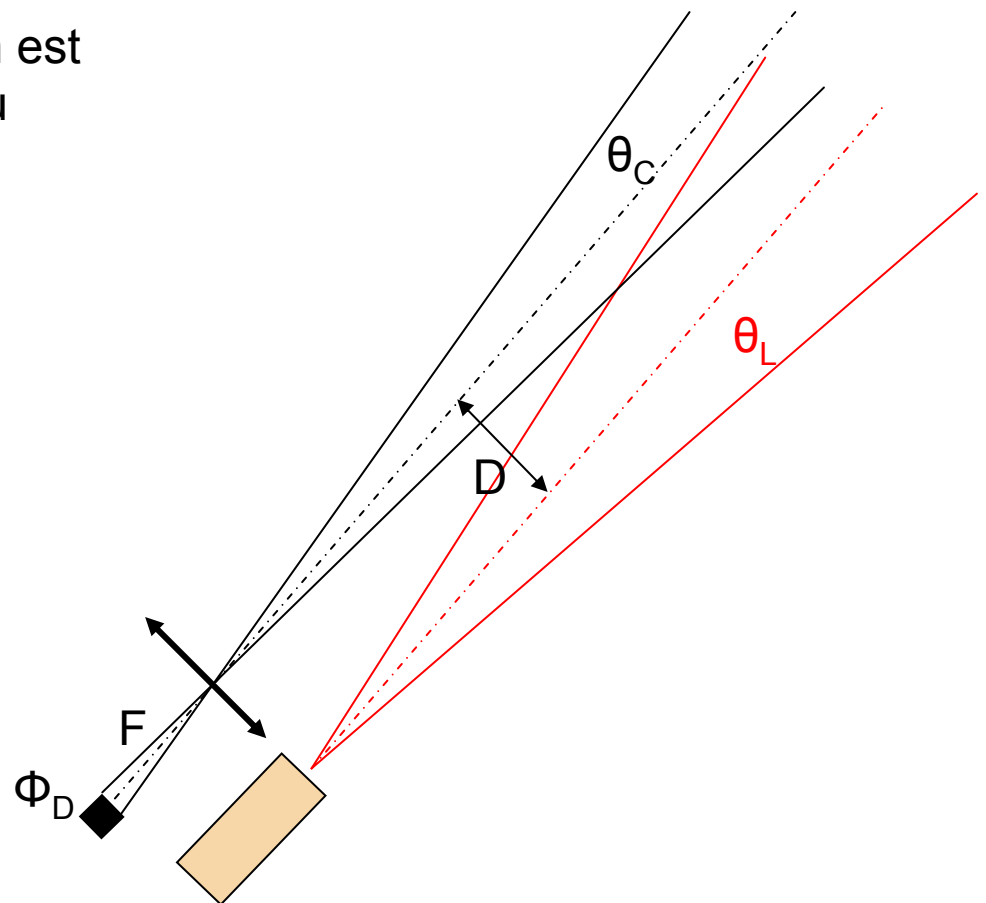
Fonction de recouvrement (ou Facteur géométrique)

- Le champ de l'optique de réception est limité par un diaphragme (surface du détecteur par exemple) à la valeur angulaire :

$$\theta_C = \frac{\Phi_D}{2F}$$

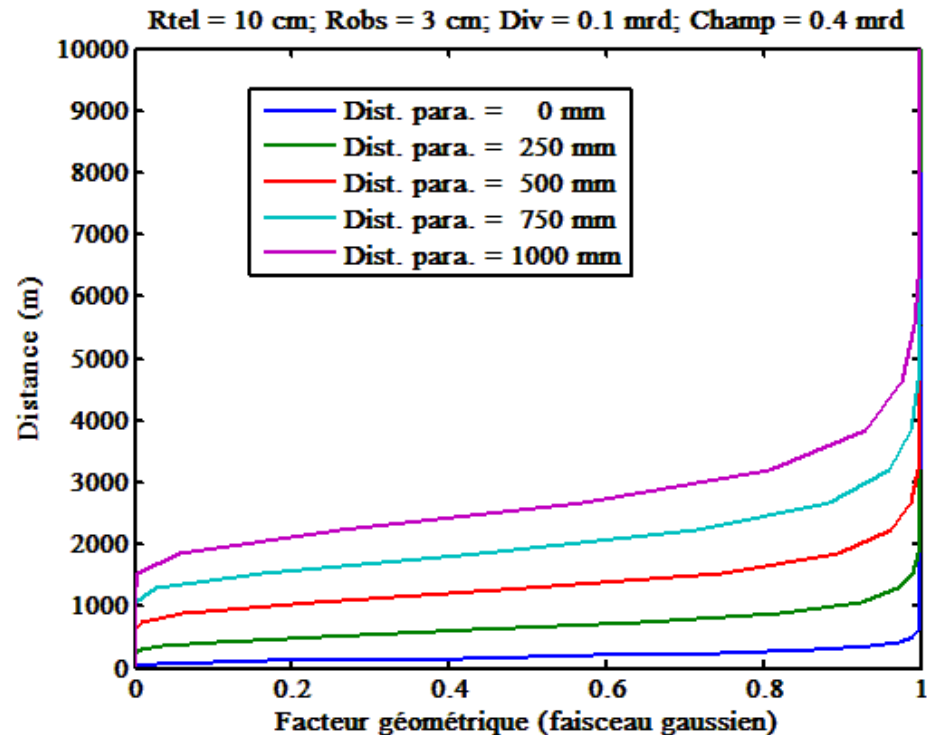
- Le laser est placé à la distance D de l'axe de l'optique de réception.
- Son faisceau à une divergence propre θ_L (demi-angle)

⇒ Fonction de recouvrement $O(R)$ variable avec la distance



Choix de la fonction de recouvrement

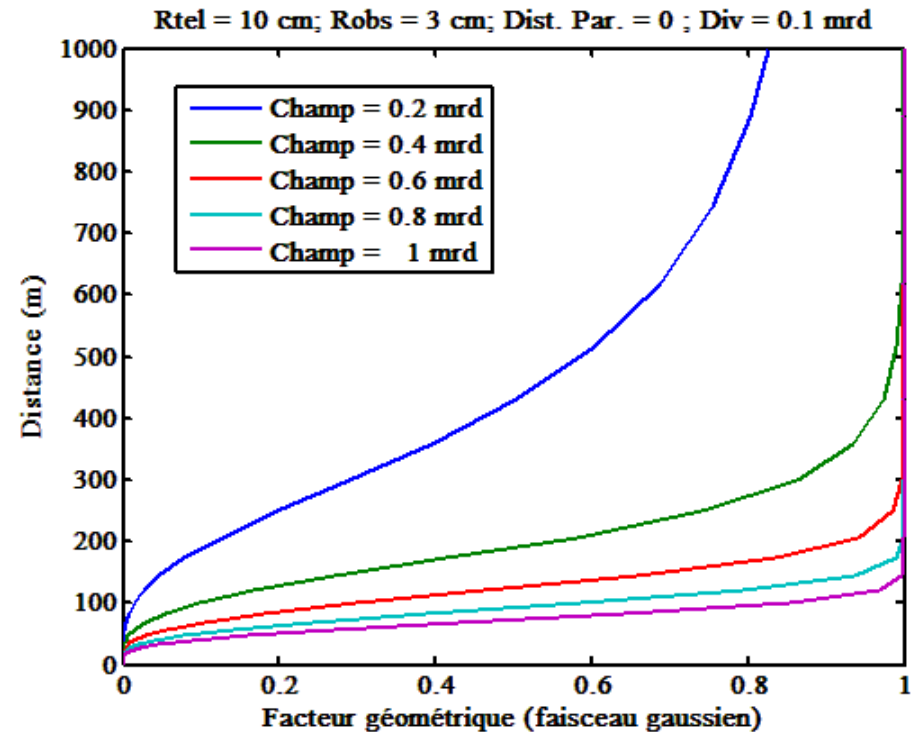
- Paramètres fixes:
 - Ouverture télescope: 20 cm
 - Divergence laser $\theta_L = 0,1$ mrd
 - Champ $\theta_C = 0,4$ mrd
- Paramètre variable
 - distance de parallaxe D



- Une faible parallaxe permet un sondage proche du lidar.
- Une parallaxe élevée permet de réduire la dynamique du signal et d'éviter la saturation du détecteur.

Choix de la fonction de recouvrement

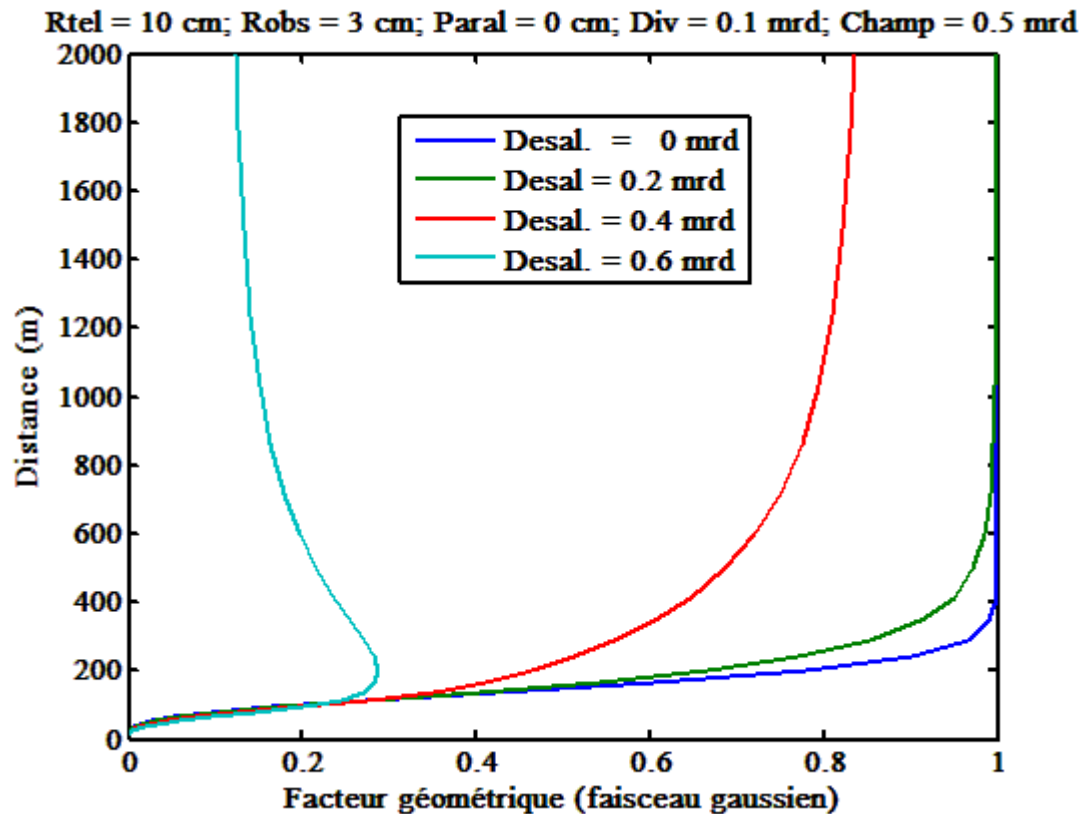
- Paramètres fixes:
 - Ouverture télescope: 20 cm
 - Divergence laser $\theta_L = 0,1$ mrd
 - distance de parallaxe $D = 0$
- Paramètre variable
 - Champ θ_C



- Pour sonder les couches très proches du lidar, il est nécessaire d'augmenter le champ.

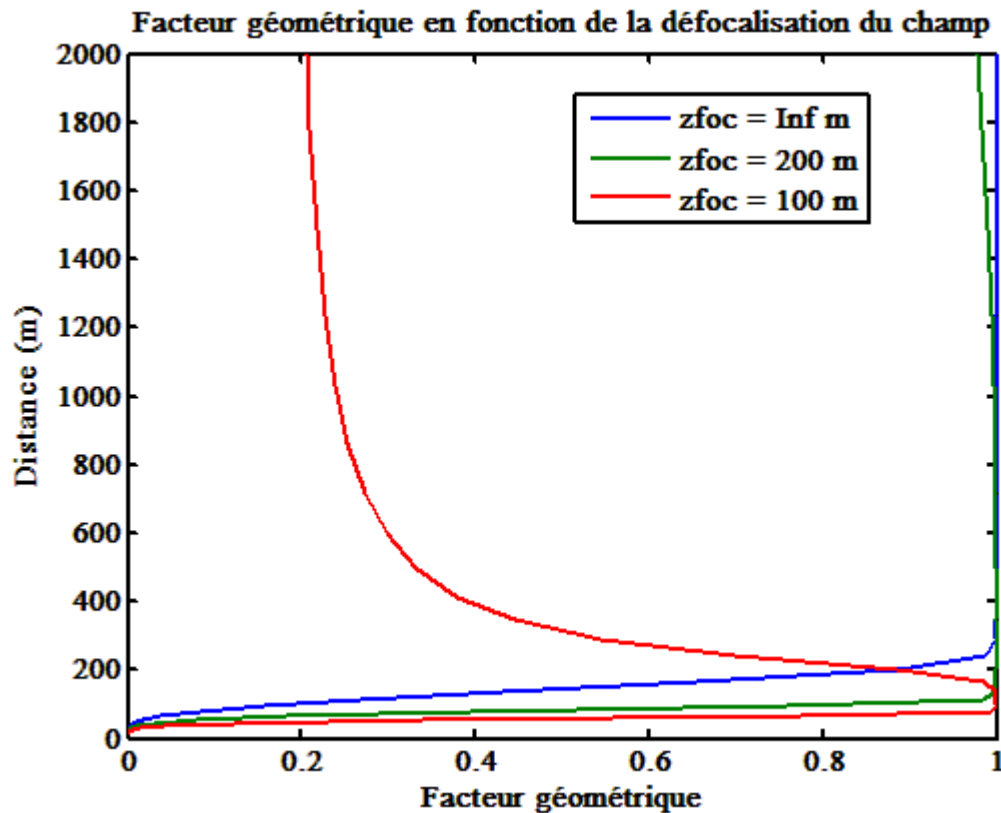
Sensibilité au désalignement

- Système co-axial, $D_{tel} = 20 \text{ cm}$, $\theta_C = 0,5 \text{ mrd}$, $\theta_L = 0,1 \text{ mrd}$



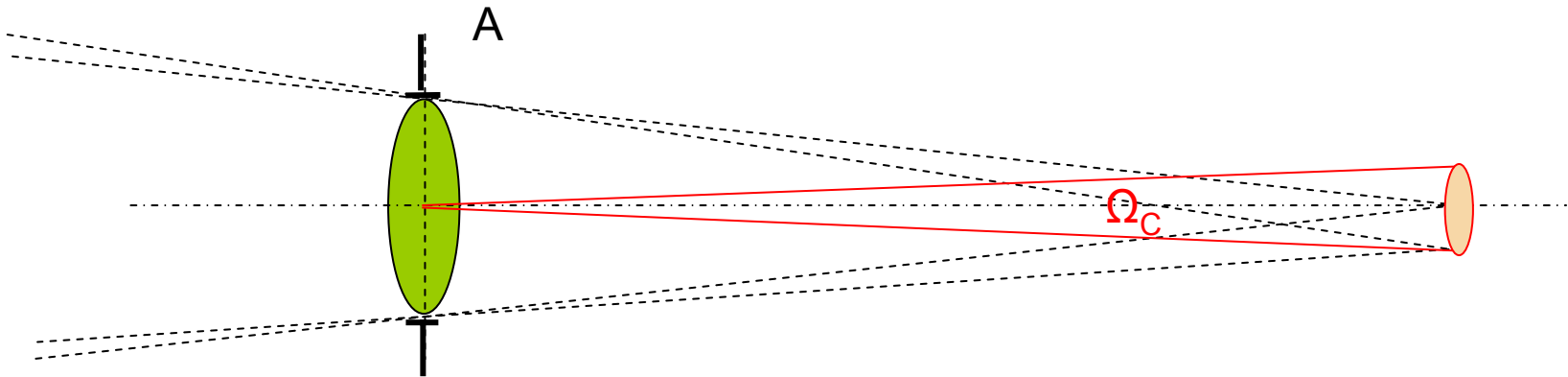
Sensibilité à la défocalisation

- Système co-axial, $D_{tel} = 20 \text{ cm}$, $\theta_C = 0,5 \text{ mrd}$, $\theta_L = 0,1 \text{ mrd}$



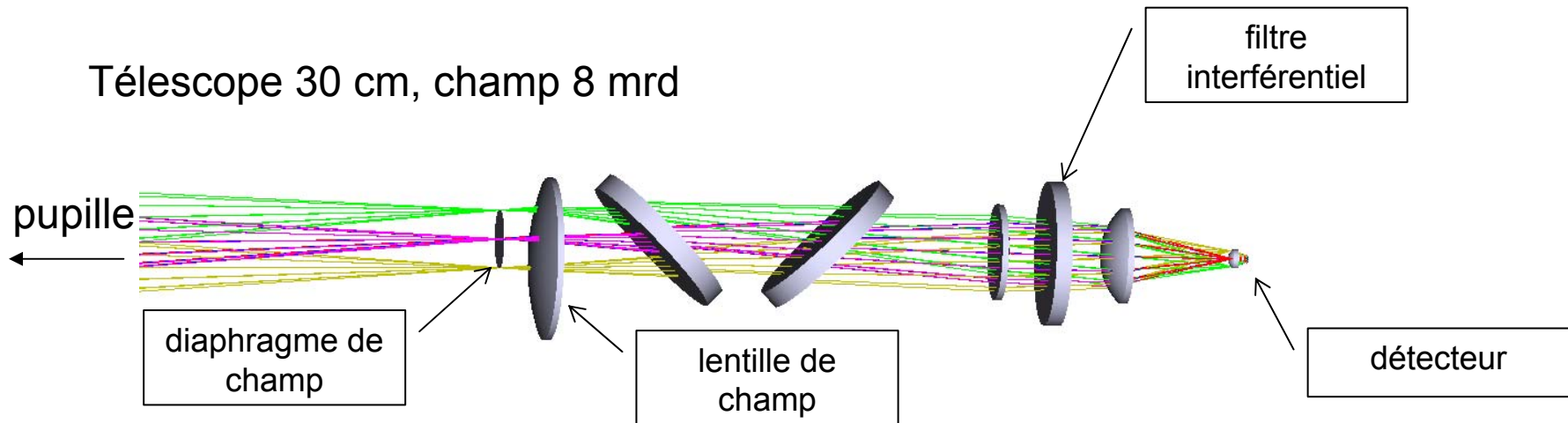
Etendue géométrique

- ❑ La pupille est le plus petit diaphragme vu du centre de l'objet (champ).
- ❑ Si l'instrument est bien construit la pupille est le miroir primaire du télescope et reste identique pour tous les points du champ (pas d'œil de chat).
- ❑ L'étendue géométrique du système optique est le produit de la surface collectrice (pupille) A par l'angle solide de champ (vu de la pupille) Ω_C
- ❑ L'étendue géométrique se conserve dans tout l'instrument, quelque soit le dispositif optique (sauf utilisation d'un fibre).



Conservation de l'étendue géométrique

- Avec Télescope de 20 cm de diamètre et champ de 0,5 mrd (demi-angle)
 - Focalisation sur détecteur avec optique F/1
⇒ Diamètre détecteur > 200 μm
 - Focalisation sur fibre ON = 0,22
⇒ Diamètre fibre > 450 μm



Signal lidar

Ordre de grandeur de la puissance reçue

- Lidar sol, troposphère, 50 mJ @ 532 nm, Télescope 20 cm, configuration co-axiale, champ 0,5 mrd
 - Signal optique faible, entre 1 μ W et 0,1 nW, soit entre 100 et 10^7 photons/ μ s/tir en air clair de 0 à 10 km
 - Dynamique importante $> 10^4$ dans les basses couches

- Lidar sol, stratosphère, 100 mJ @ 532 nm, Télescope 1 m, configuration bi-axiale, champ 0,2 mrd
 - < 1 photon/ μ s/tir @ 50 km
 - Dynamique plus réduite (dans la zone d'intérêt)

- Lidar spatial, 400 km, 100 mJ @ 532 nm, Télescope 1 m
 - Signal entre 1 pW et 100 pW dans la troposphère soit entre 1 et 100 photons/ μ s/tir en air clair
 - Dynamique assez réduite, sauf sol et nuages

Fond radiatif

- Pour les longueurs d'ondes $< 10 \mu\text{m}$, hors IR thermique, la source radiative principale est la diffusion du soleil sur l'atmosphère ou le sol
- Dépend des conditions atmosphériques (nuages, aérosols, humidité), de l'angle solaire, de l'angle de visée ...
 - ⇒ modèle de transfert radiatif
- Ordre de grandeur des luminances du ciel en air clair:
 - qq $10^{-2} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ autour du visible (350 – 800 nm)

Fond radiatif

□ Puissance reçue

$$P_F = T_R L_F \pi A \theta_C^2 \delta\lambda$$

- T_R transmission lidar à la réception
- L_F luminance du fond
- $\delta\lambda$ largeur spectrale de réception

□ Télescope 20 cm, champ 0,5 mrd, $T_R = 0,5$

$$L_F = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1} \Rightarrow P_F = 0,6 \text{ nW nm}^{-1}$$

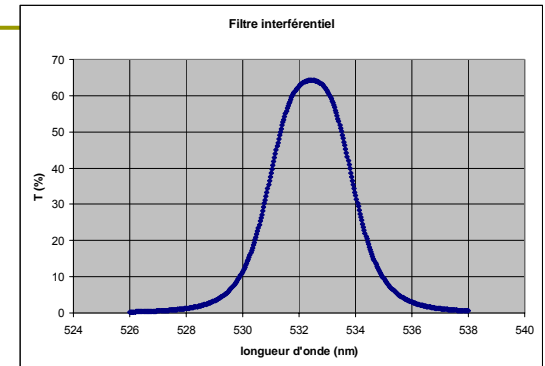
⇒ Filtrage spectral

Filtre interférentiel

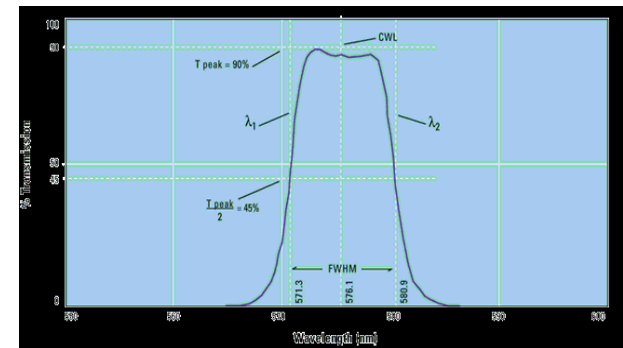
□ Filtre interférentiel (Fabry-Perot en couches minces)

- $\Delta\lambda$ de 0,15nm à qq 10 nm, T_R de 0,3 à 0,9
- 1, 2, 3 ...n cavités (sommet plus large, flancs plus raides)
- sensibilité angulaire
- tolérance fabrication λ_{max} de 0,1 nm à qq nm
 $\Rightarrow \lambda_{max} > \lambda_{laser}$ puis accord angulaire
- sensibilité en température 0,015 – 0,03 nm/°C
 \Rightarrow régulation thermique pour usage hors laboratoire
- tolérance en divergence qq 10 mrd

$$\theta_D < n \sqrt{\frac{2\Delta\lambda}{\lambda}}$$



Filtre 2 cavités (Andover)



Filtre 3 cavités (Omega)

Fabry-Perot

□ Fabry-Perot

$$T(\lambda) = \frac{T_{Max}}{1 + \left(\frac{2F}{\pi} \sin \frac{\varphi}{2}\right)^2}, \quad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2ne \cos \theta_0$$

■ Intervalle spectral libre $ISL = \frac{\lambda^2}{2ne}$

■ largeur totale à mi-hauteur $\Delta\lambda = \frac{ISL}{F}$

■ F, finesse $F = (F_R^{-2} + F_Q^{-2} + F_D^{-2} + \dots)^{-1/2}$

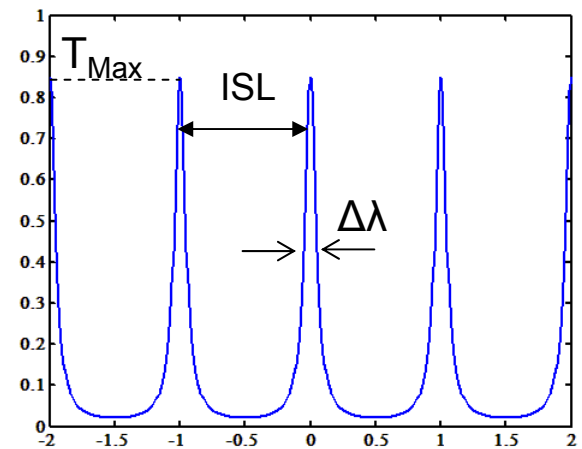
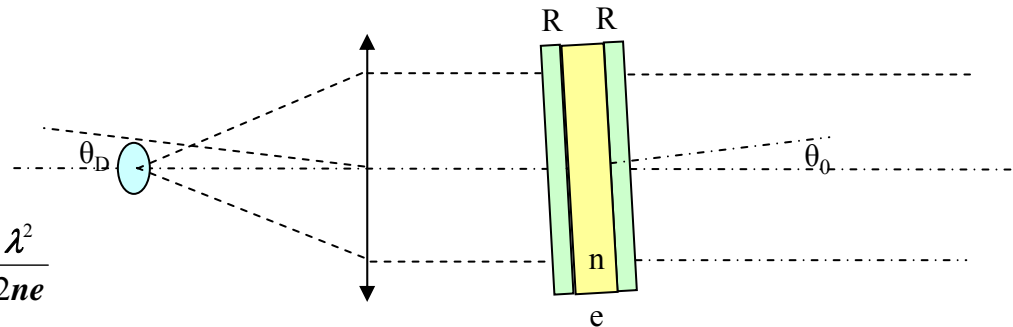
□ F_R finesse de réflexion $F_R = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$

□ F_Q finesse de qualité des lames à λ/N_Q $F_Q = \frac{N_Q}{2}$

□ F_D finesse de divergence $F_D = \frac{\lambda}{ne\theta_D^2}$

■ Transmission maximale

$$T_{Max} = \frac{F}{F_R}$$



Fabry-Perot

□ Exemple de filtrage par Fabry-Perot

- $\lambda = 532 \text{ nm}$
- $e = 0,5 \text{ mm}, n = 1 \Rightarrow \text{ISL} = 0,28 \text{ nm}$
- associé à filtre interférentiel $0,15 \text{ nm}$ ($T \sim 45\%$)
- $R = 93\% \Rightarrow F_R = 43$
- $N_Q = 100 @ 633 \text{ nm} \Rightarrow F_Q = 42$
- $\theta_D = 4 \text{ mrd} \Rightarrow F_D = 67$

$\Rightarrow F = 27 \quad \Delta\lambda = 10 \text{ pm} \quad T_{\text{Max}} = 63 \%$

□ Conservation de l'étendue géométrique

- Télescope $20 \text{ cm}, \theta_c = 0,5 \text{ mrd}$

\Rightarrow **Diamètre utile 25 mm**

- Compatibilité avec largeur spectrale du laser ?
- Accord spectral ?

Détection

□ Détecteurs photoniques

- conversion des photons en électrons (photoélectrons)
- rendement quantique η = probabilité de créer un photoélectron pour chaque photon incident (avant amplification)
- Gain interne G , multiplication du nombre de photoélectrons dans le détecteur avec facteur de bruit F
- Sensibilité (en A/W) du détecteur

$$S = G \frac{\eta q \lambda}{hc}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

- Photomultiplicateur (PM) @ 532 nm: $\eta = 20\%$, $G = 10^5$
 $\Rightarrow S = 8 \cdot 10^3 \text{ A/W}$
- Photodiode avalanche (APD) @ 1064 nm; $\eta = 40\%$, $G = 100$
 $\Rightarrow S = 34 \text{ A/W}$

Détection

- Courant en sortie de détecteur: $I = S.P$
 - PM ($G = 10^5$): I de 10 mA à $< 1 \mu\text{A}$
 - APD: I de $30 \mu\text{A}$ à $< 1 \text{nA}$

- Intégration du signal dans une porte de durée δt correspondant à une résolution en distance $\delta R = (c/2)\delta t$ et à une bande passante $B = 1/(2\delta t)$

- Nombre de photoélectrons créés dans la porte (avant amplification)
$$N_s = \frac{\eta\lambda}{hc} \delta P_s$$

Sources de bruit

- Bruit de signal
 - bruit quantique
 - bruit de tavelure (speckle)
- Bruit du fond radiatif
- Bruit détecteur
 - bruit quantique du courant d'obscurité
- Bruit électronique
 - bruit de la chaîne d'amplification
- Bruit de numérisation

Bruit de signal

- Variance du nombre de photoélectrons dans la porte:

- bruit quantique $\text{var}(N_s)_Q = FN_s$

- bruit de tavelure $\text{var}(N_s)_T = \frac{N_s^2}{M}$

- M est le nombre de tavelures

$$M \approx \left(\frac{\delta t}{\tau_c} \right) \left(\frac{\pi A \theta_L^2}{\lambda^2} \right)$$

Bruit de signal (total):

$$\text{var}(N_s) = FN_s + \frac{N_s^2}{M}$$

- On peut exprimer cette variance en fonction de la puissance optique du signal lidar reçu:

$$\text{var}(P_s) = \frac{Fhc}{\lambda\eta\delta t} P_s + \frac{P_s^2}{M}$$

Bruit du fond radiatif

- Pour le fond radiatif le nombre de tavelures peut être considéré comme infini.
- Variance en puissance optique:

$$\text{var}(P_F) = \frac{Fhc}{\lambda\eta\delta t} P_F$$

Bruit du détecteur

- Courant d'obscurité en sortie de détecteur I_{obs} génère un bruit dont la variance en nombre de photoélectrons est

$$\text{var}(N_D) = \frac{FI_{obs}\delta t}{Gq}$$

- Exprimé en puissance optique incidente:

$$\text{var}(P_D) = \left(\frac{hc}{\eta\lambda}\right)^2 \frac{FI_{obs}}{Gq\delta t} = \frac{NEP^2}{2\delta t}$$

- NEP = « Noise Equivalent Power » ($\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)

$$NEP = \sqrt{\frac{\text{var}(P_D)}{B}} = \frac{hc}{\eta\lambda} \sqrt{\frac{2FI_{obs}}{Gq}}$$

- $D = 1/NEP$, « Défectivité »

Performances détecteurs

Type	domaine (nm)	dim. (mm)	η (%)	Gain	S A/W	Iobs nA	F	Cd pF	NEP fWHZ ^{-1/2}
PM	300-600	Φ 8	20 - 40	$\rightarrow 10^6$	$\rightarrow 10^5$	4	1,2	1	0,5
PM	600-800	Φ 8	10 - 15	$5 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^4$	2	1,2	1	0,6
PM refroidi (-90°C)	1000-1600	8 x 3	1	10^6	$3.5 \cdot 10^3$	40	1,2	1	10
Si-APD	500-800	Φ 0,2	75	100	50	0,05	4	1,5	2
Si-APD	500-800	Φ 3	75	60	30	1	4	50	10
Si- APD	1064	Φ 1,5	40	100	34	100	4	3	100
InGaAs-APD	1000-1600	Φ 0,2	80	10	9	8	4	1,5	30

Chaîne électronique comptage

□ Détection par comptage

- But: détecter l'impulsion créée par chaque photoélectron et la discrétiser (discriminateur)
- Seuil discriminateur qq 10 mV – 100 mV
- Bande passante > 100 MHz
- Intérêt :
 - si discriminateur bien fait: pas sensible au bruit de l'amplificateur ni au facteur de bruit du détecteur ($F = 1$)
- Inconvénient:
 - sature rapidement < ~ 100 c/ μ s
 - dynamique limitée

⇒ adaptée aux faibles signaux (lidar stratosphère)

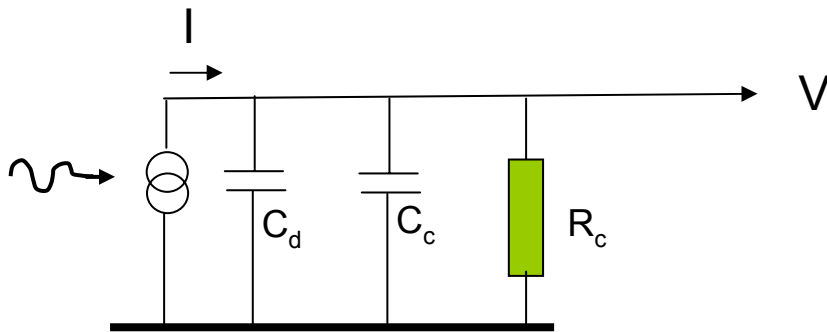
Chaîne électronique analogique

□ Détection analogique

- But: transformer le courant sortant du détecteur en une tension d'entrée pour le Convertisseur Analogique Numérique (CAN)
- Gamme entrée CAN 0,1 mV – qq V
- Bande passante qq 10 MHz
- Quand la sensibilité du détecteur est élevée (PM), une simple résistance de charge est suffisante, sinon il est nécessaire d'utiliser un amplificateur transimpédance (APD).

⇒ Bruit supplémentaire

Résistance de charge



R_c résistance de charge

C_d capacité détecteur (qq pF)

C_c capacité câblage (qq pF)

$$V = R_c I \quad B_D = \frac{1}{2\pi R_c (C_d + C_c)}$$

□ Idéalement $B_d = 1/(2\delta t)$

■ si $\delta t = 40 \text{ ns}$ ($\delta R = 6 \text{ m}$) $C_d + C_c = 10 \text{ pF} \Rightarrow R_c \sim 1 \text{ k}\Omega$

□ PM, $I = 1 \mu\text{A} \Rightarrow V = 1 \text{ mV}$ correct

□ APD, $I = 1 \text{ nA} \Rightarrow V = 1 \mu\text{V}$ insuffisant

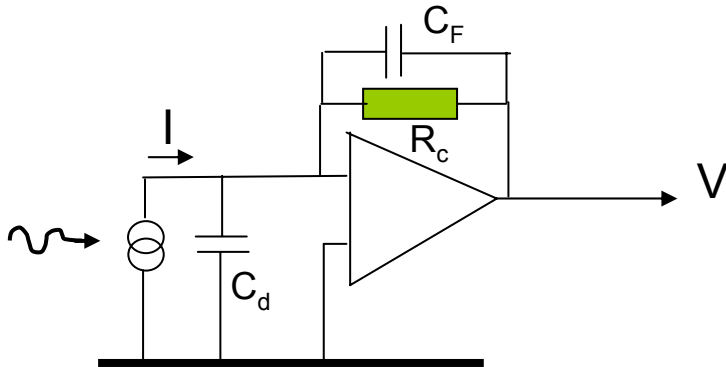
□ Bruit en courant :

$$\text{var}(I_E) = \frac{4kT}{R_c} \frac{1}{2\delta t}$$

□ Bruit en puissance:

$$\text{var}(P_E) = \frac{\text{var}(I_E)}{S^2} = \left(\frac{hc}{\eta q \lambda G} \right)^2 \frac{4kT}{R_c} \frac{1}{2\delta t}$$

Amplificateur transimpédance



R_c résistance de charge

C_d capacité détecteur (qq pF)

C_F capacité de filtrage (< pF)

$$V = R_c I \quad B_D = \frac{1}{2\pi R_c C_F}$$

- Idéalement $B_d = 1/(2\delta t)$
 - si $\delta t = 40 \text{ ns}$ ($\delta R = 6 \text{ m}$) $C_F = 0,1 \text{ pF} \Rightarrow R_c \sim 100 \text{ k}\Omega$
 - APD, $I = 1\text{nA} \Rightarrow V = 0,1 \text{ mV}$ suffisant

- Bruit en courant:

$$\text{var}(I_E) = \left(\frac{4kT}{R_c} + I_N^2 + \left(\frac{E_N}{R_c} \right)^2 \left(1 + \frac{C_D^2}{3C_F^2} \right) \right) \frac{1}{2\delta}$$

- Bruit en puissance

$$\text{var}(P_E) = \frac{\text{var}(I_E)}{S} = \left(\frac{hc}{\eta q \lambda G} \right)^2 \left(\frac{4kT}{R_c} + I_N^2 + \left(\frac{E_N}{R_c} \right)^2 \left(1 + \frac{C_D^2}{3C_F^2} \right) \right) \frac{1}{2\delta}$$

I_N, E_N bruits en courant et tension de l'amplificateur

Bilan Détecteur + Préampli

- Préampli (OPA 657)
 - $I_N = 1,3 \text{ fA}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, $E_N = 4,8 \text{ nV}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$
- $\delta t = 40 \text{ ns}$, $B = 12,5 \text{ MHz}$

Détecteur	domaine (nm)	S A/W	C _d pF	R _c kΩ	C _F pF	σ (Pd) pW	σ (Pe) pW	σ (Pd+Pe) pW
PM	300-600	10 ⁵	1	1	10	1,8	0,2	1,8
PM	600-800	3.5 10 ⁴	1	1	10	2	0,6	2
PM refroidi (-90°C)	1000-1600	3.5 10 ³	1	10	1	35	1,4	35
Si-APD 0,2 mm	500-800	50	1,5	100	0,1	7	41	42
Si-APD 3 mm	500-800	30	50	100	0,1	35	1600	1600
Si- APD	1064	34	3	100	0,1	350	155	380
InGaAs- APD	1000-1600	9	1,5	100	0,1	106	230	250

Bruit du CAN

- Numérisation sur n bits ($n = 8 - 16$)
- $V_{\text{LSB}} = V_{\text{Max}} / 2^n$, tension de l'incrément de numération (Lower Significant Bit)
- SNR du CAN

$$SNR_{\text{CAN}} = 20 \log \left(\frac{V_{\text{Max}}}{\sigma(V)} \right)$$

- Bruit supplémentaire:

$$\text{var}(P_{\text{CAN}}) = \left(\frac{hc}{\eta q \lambda G} \right)^2 \left(\frac{V_M}{R_C 10^{SNR_{\text{CAN}}/20}} \right)^2$$

Bruit total

□ Détection analogique

$$\text{var}(\mathbf{P}_T) = \text{var}(\mathbf{P}_S) + \text{var}(\mathbf{P}_F) + \text{var}(\mathbf{P}_D) + \text{var}(\mathbf{P}_E) + \text{var}(\mathbf{P}_{CAN})$$

□ Détection par comptage

- idem avec

$$\text{var}(\mathbf{P}_E) = \text{var}(\mathbf{P}_{CAN}) = 0$$

□ On peut écrire cette variance sous la forme:

$$\text{var}(\mathbf{P}_T) = \frac{Fhc}{\lambda\eta\delta t} (\mathbf{P}_S + \mathbf{P}_B) + \frac{\mathbf{P}_S^2}{M}$$

avec

$$\mathbf{P}_B = \frac{\lambda\eta\delta t}{Fhc} [\text{var}(\mathbf{P}_F) + \text{var}(\mathbf{P}_D) + \text{var}(\mathbf{P}_E) + \text{var}(\mathbf{P}_{CAN})]$$

Rapport Signal à Bruit

- Rapport Signal à Bruit ou Signal to Noise Ratio (SNR)

- pour 1 tir

$$SNR(N_{tir} = 1) = \frac{P_s}{\sqrt{\text{var}(P_T)}}$$

- pour N tirs

$$SNR(N_{tir}) = \sqrt{N_{tir}} SNR_1$$

- Précision relative d'une mesure de puissance

$$\frac{\sigma(P_s)}{P_s} = \frac{1}{SNR}$$

Optimisation du SNR

□ Cas idéal (Shot Noise Limit)

- $P_B = 0$, pas de bruits, pas de fond
- $\eta = 1$, $F = 1$
- $M = \infty$

$$SNR_{SNL} = \sqrt{\frac{\lambda \delta t}{hc}} P_S$$

□ Puissance optimale avec bruit:

$$P_S = \sqrt{\frac{hc}{\eta \lambda \delta t}} F M P_B$$

- ne peut s'obtenir qu'à une distance donnée mais permet de savoir sur quels paramètres il vaut mieux jouer pour optimiser la mesure (énergie, nombre de tirs etc...)

Modélisation de performances

□ Pour quoi faire ?

- dimensionner les différents paramètres (laser, télescope ...) en fonction des objectifs d'observation
- faire des compromis entre différents paramètres
- établir une référence de performances à comparer avec les essais réels pour les valider ou rechercher des défauts

Signal lidar

Puissance reçue

□ Equation lidar

$$P_s(R) = \frac{c}{2} T_{inst} E \frac{A}{R^2} O(R) \beta(R) \exp\left(-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right)$$

- P_s puissance optique du signal reçu par le détecteur,
- R range (distance de la cible),
- c vitesse de la lumière
- T_{inst} transmission instrumentale (émission-réception)
- E énergie émise par impulsion
- A surface collectrice (pupille télescope)
- O fonction de recouvrement
- β coefficient de rétrodiffusion
- α coefficient d'extinction

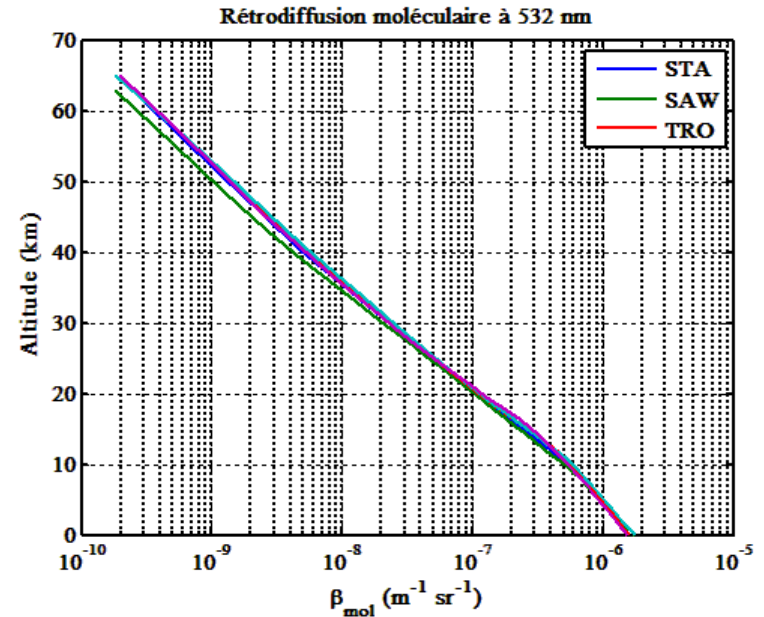
Diffuseurs atmosphériques

□ Molécules

$$\beta_{mol}(z) = \frac{p(z)}{kT(z)} \sigma_{mol}$$

$$\alpha_{mol} = \frac{8\pi}{3} \beta_{mol}$$

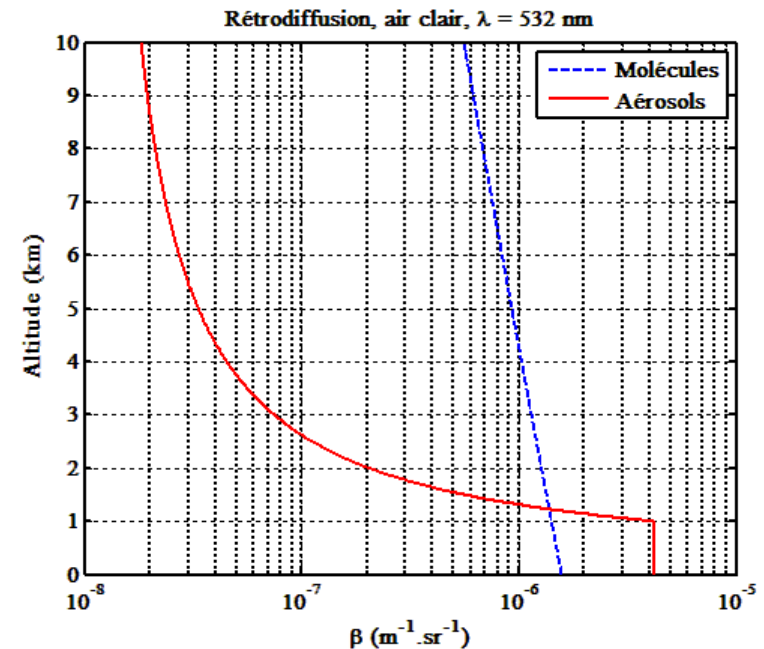
- z altitude
- p pression
- T température
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
- $\sigma_{mol} = 5,45 \cdot 10^{-32} (\lambda_0/\lambda)^4 \text{ m}^2$
 - $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$
 - λ longueur d'onde d'émission (nm)



Diffuseurs atmosphériques

□ Aérosols

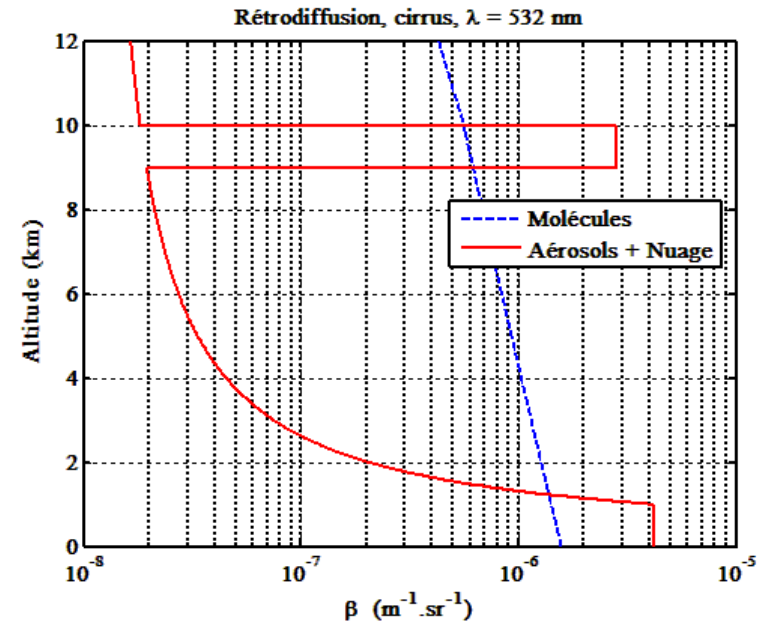
- distribution très variable mais concentration notable principalement dans les basses couches (CLA), plus faible (plusieurs ordres de grandeur) au dessus, sauf cas de transport d'aérosols désertiques ou volcaniques par exemple
- dépendance en longueur d'onde très variable, on admet grossièrement $\lambda^{-1,3}$
- rapport α/β également variable suivant composition (particules désertiques, suies etc..) valeur typique: 50



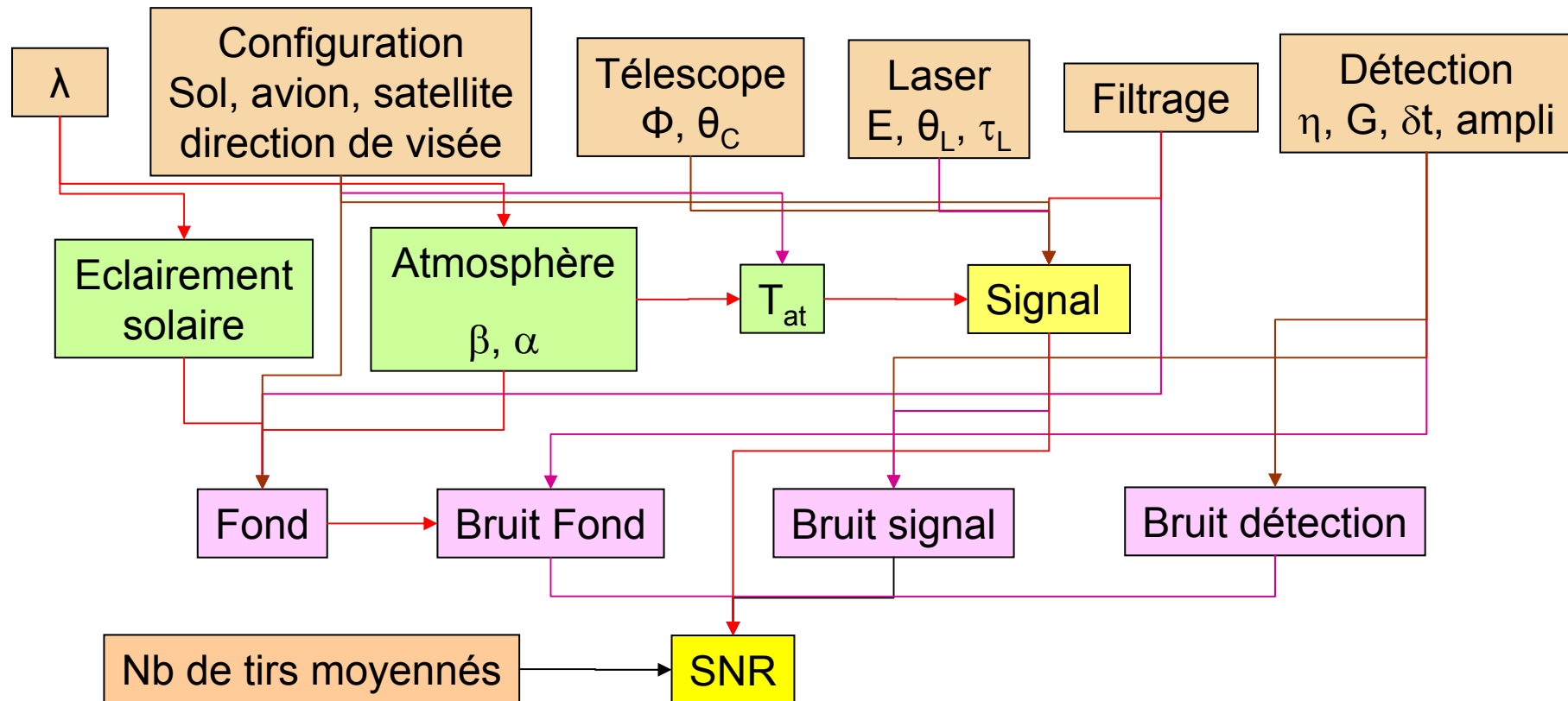
Diffuseurs atmosphériques

□ Nuages

- Distribution très variable, en altitude (du sol à 20 km) et en β (de 10^{-7} à 10^{-1} m^{-1})
- Faible dépendance en λ
- Rapport α/β entre 15 et 20

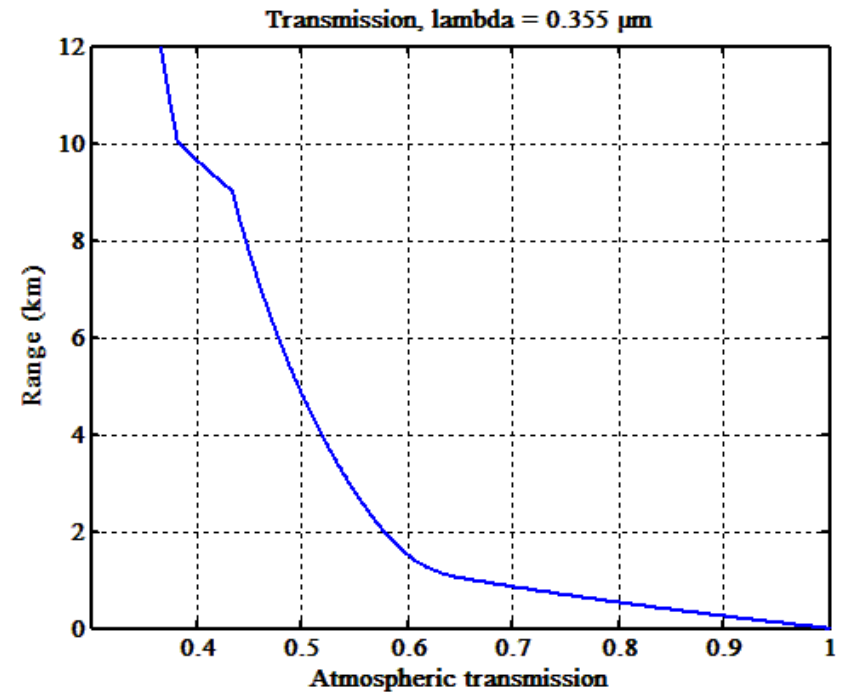
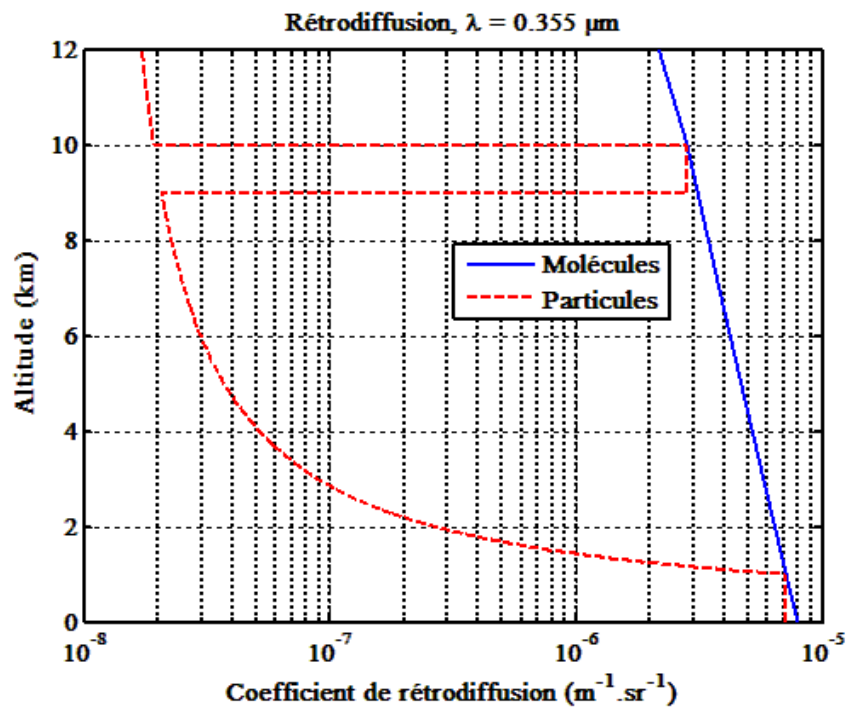


Modèle de performances



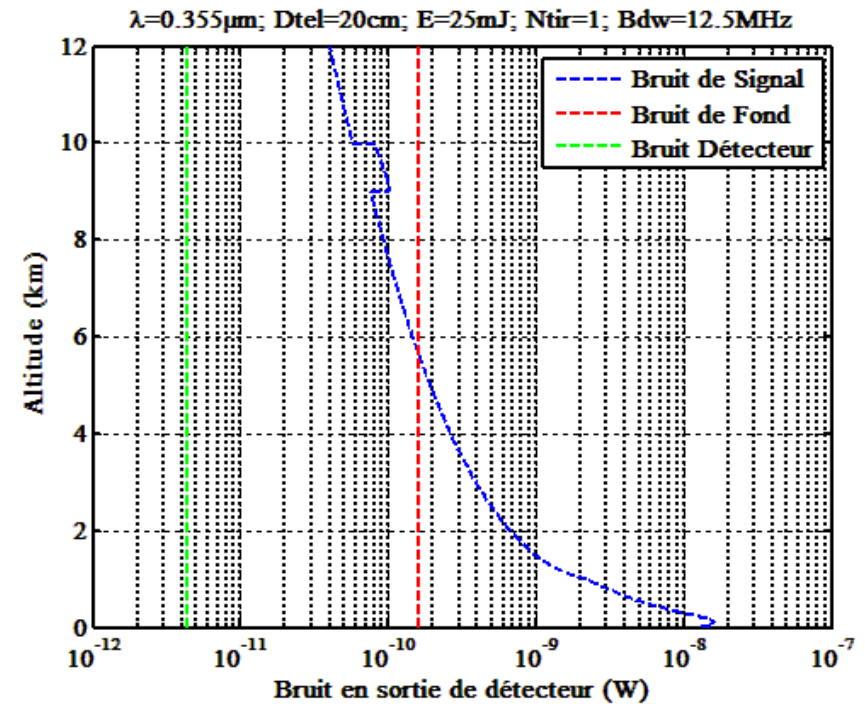
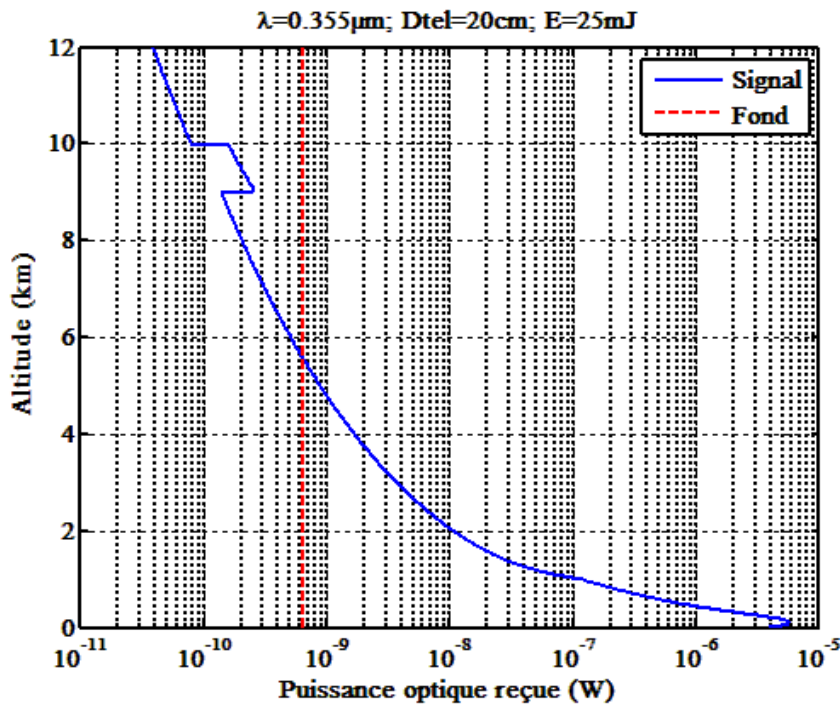
Lidar sol 355 nm

□ Visée verticale



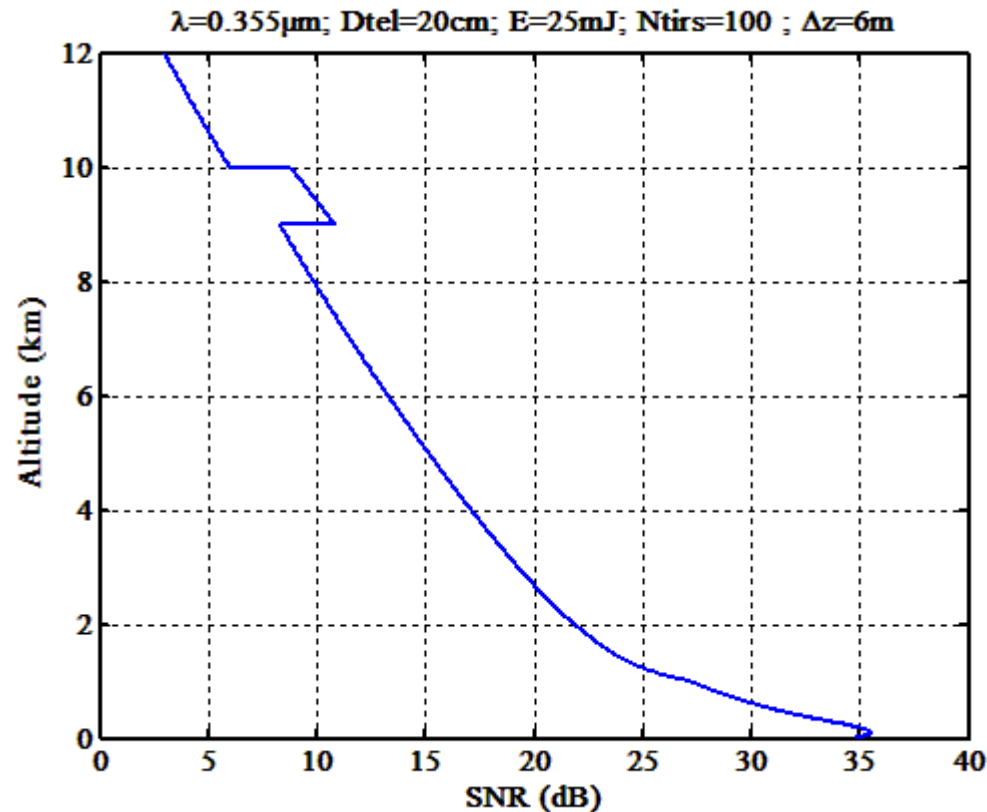
Lidar sol 355 nm

- Télescope 20 cm, Energie 25 mJ (0,5 W @ 20 Hz)
- Filtre 5nm, T 25 % Détection PM, $\delta R = 6$ m



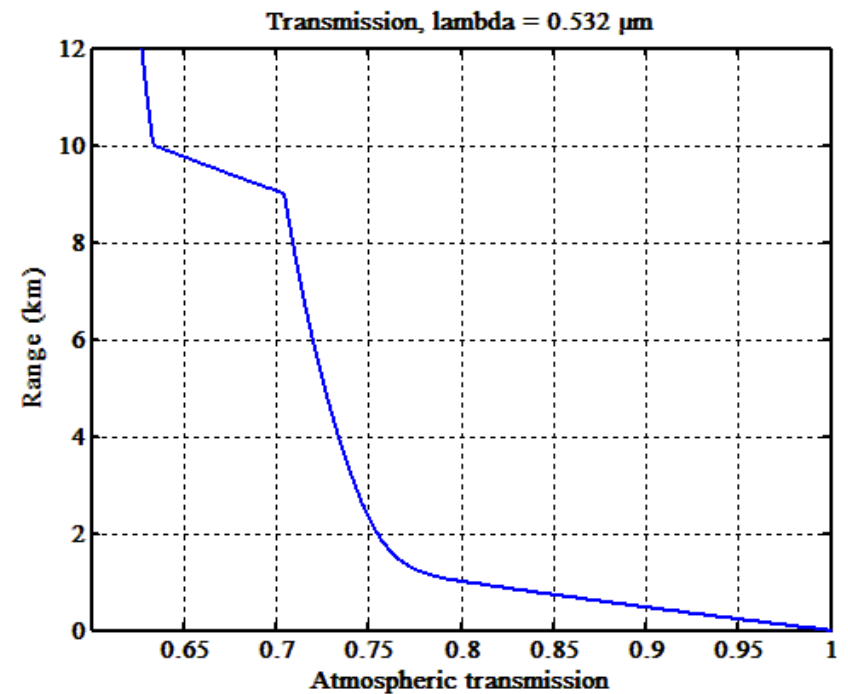
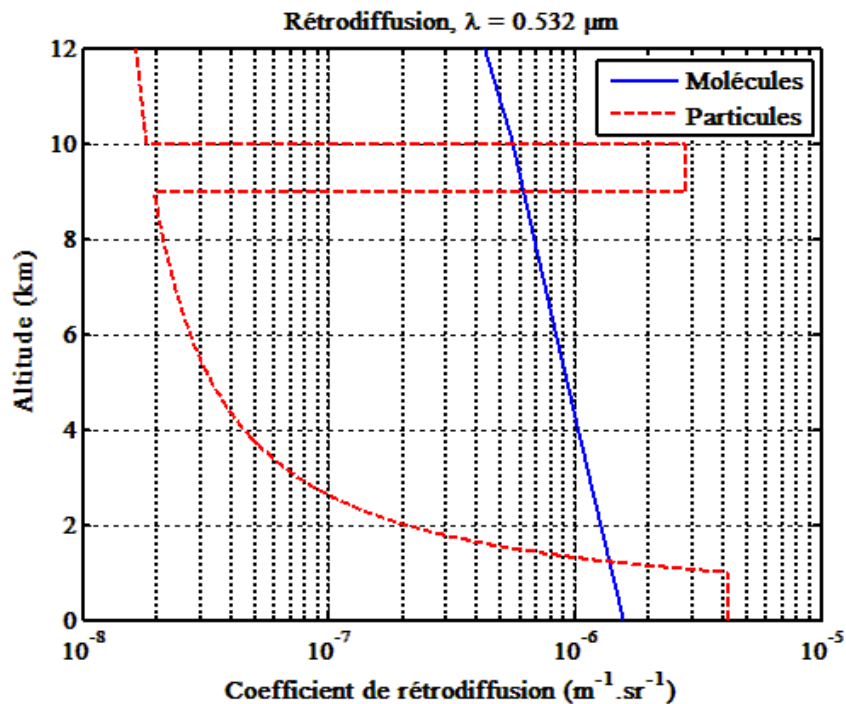
Lidar sol 355 nm

- SNR sur 100 tirs moyennés (5s @ 20 Hz)



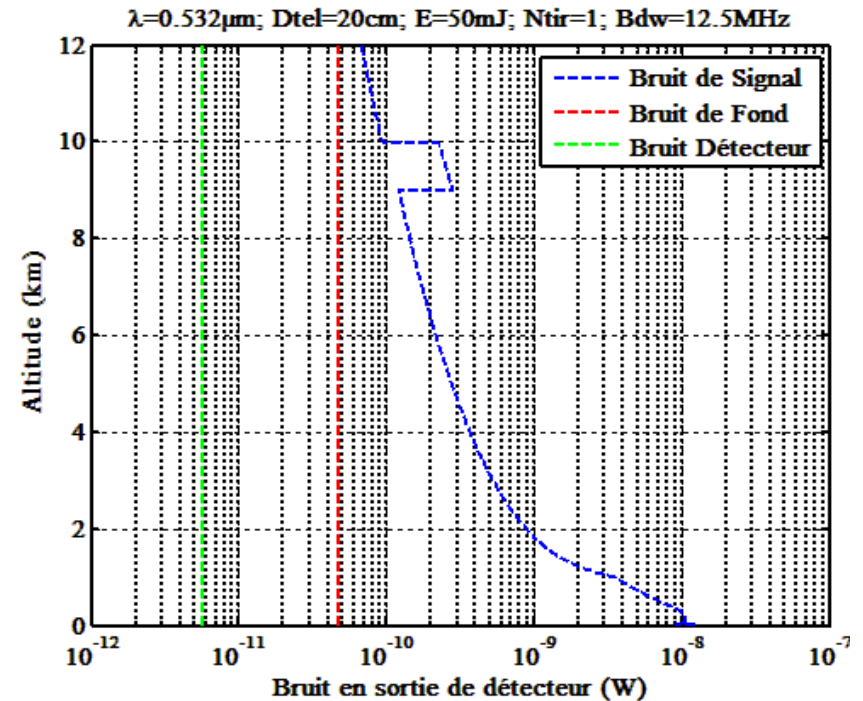
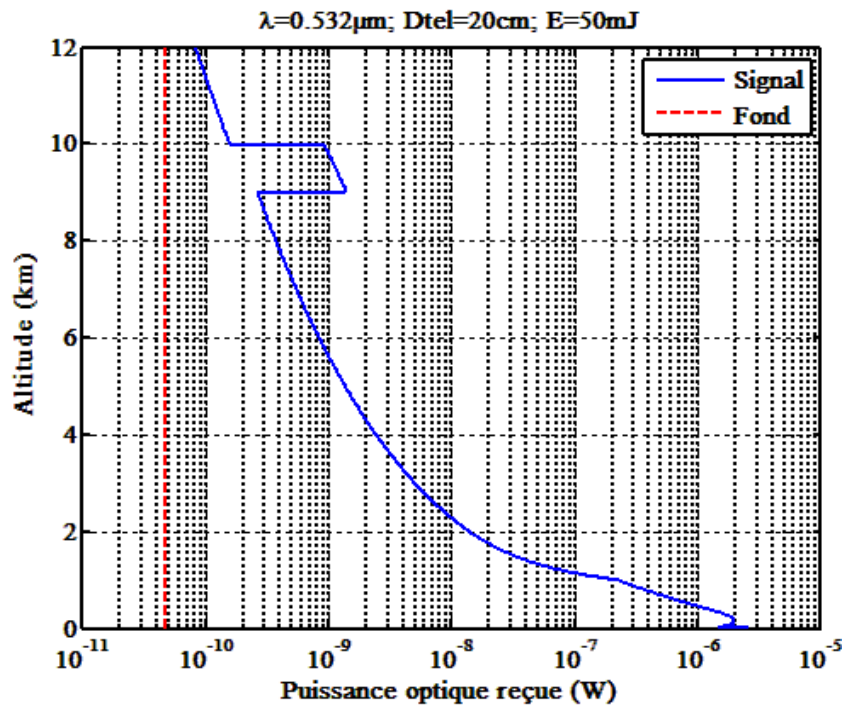
Lidar sol 532 nm

□ Visée verticale



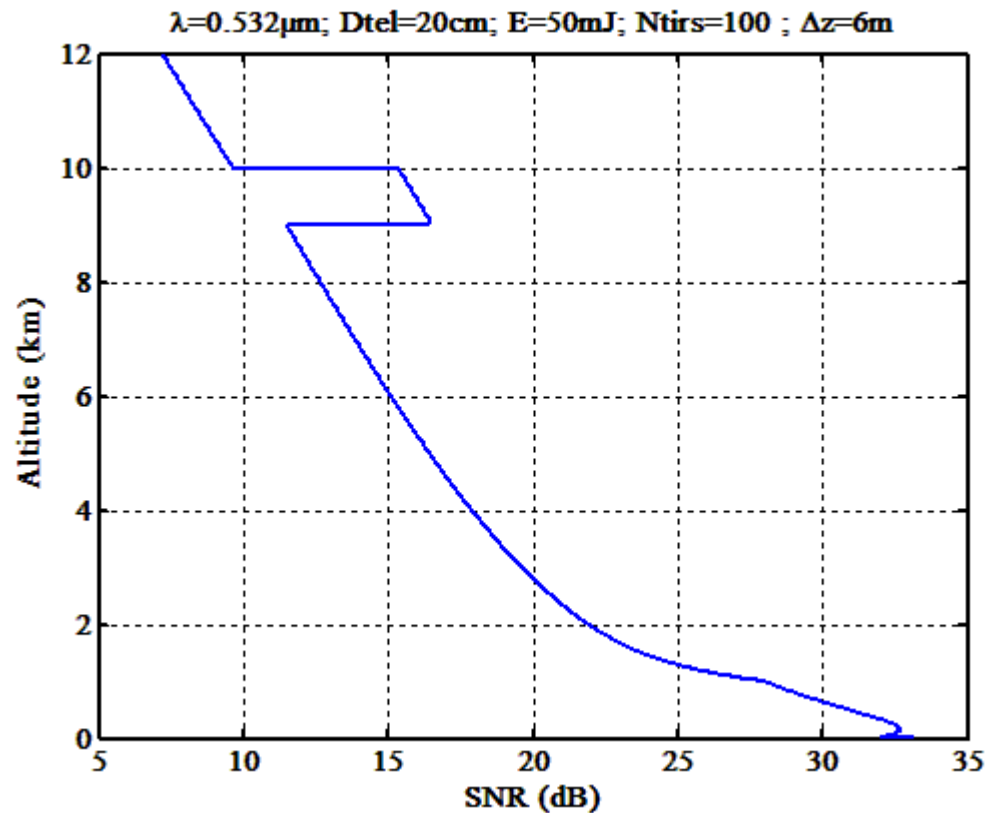
Lidar sol 532 nm

- Télescope 20 cm, Energie 50 mJ (1W @ 20 Hz)
- Filtre 0,5 nm, T 45 %, Détection PM, $\delta R = 6$ m



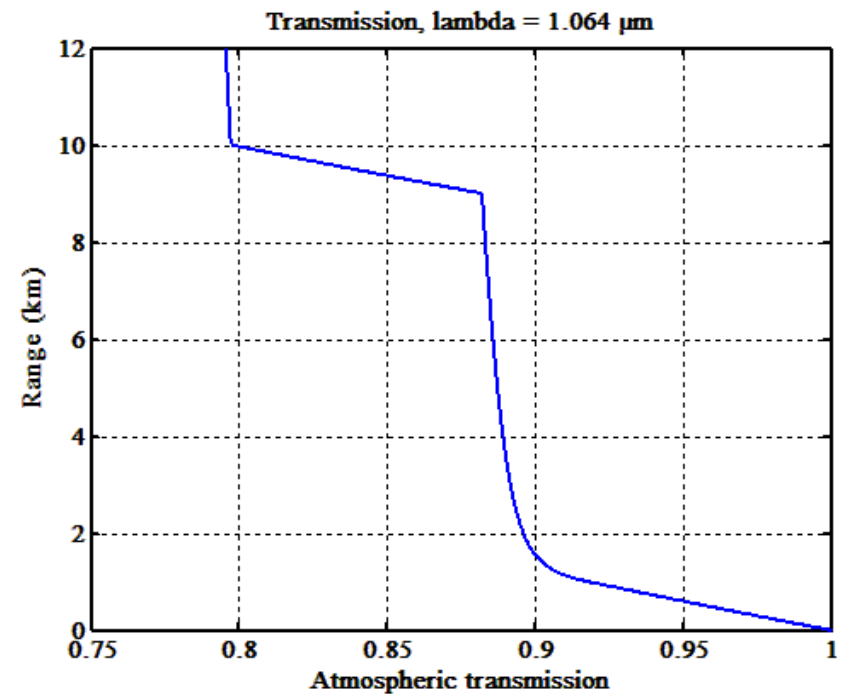
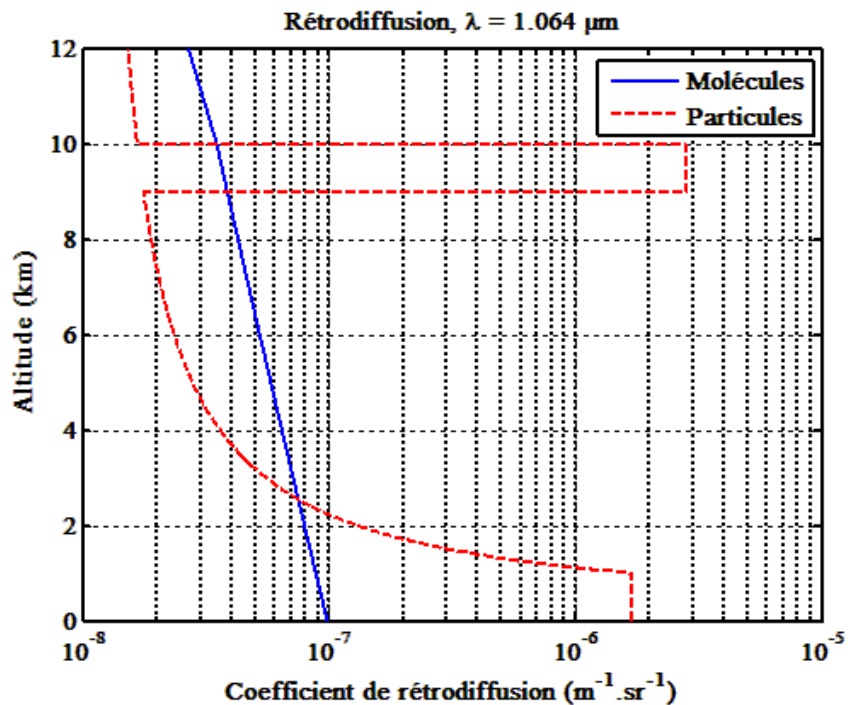
Lidar sol 532 nm

- SNR sur 100 tirs moyennés (5s @ 20 Hz)



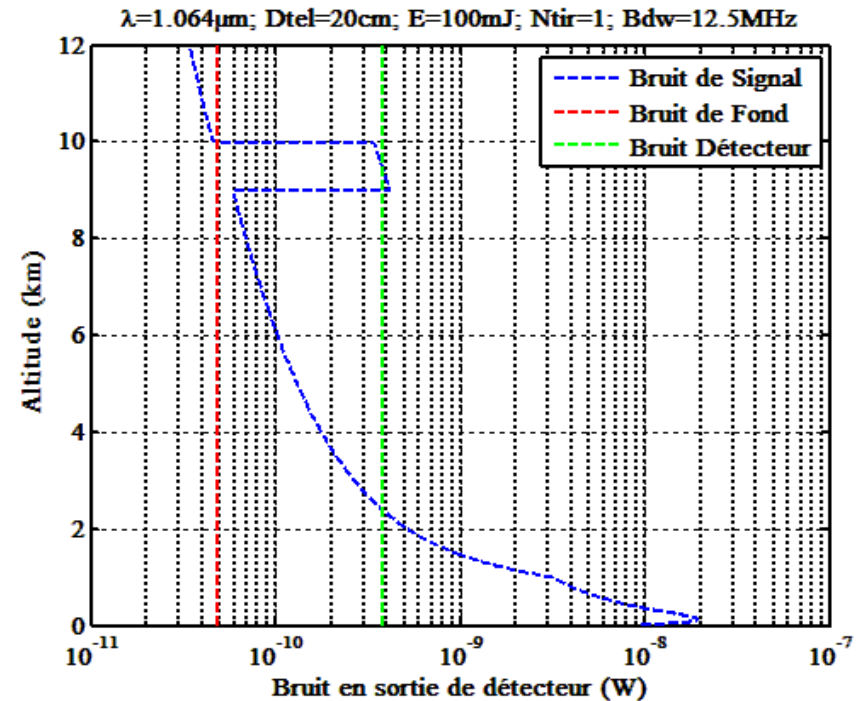
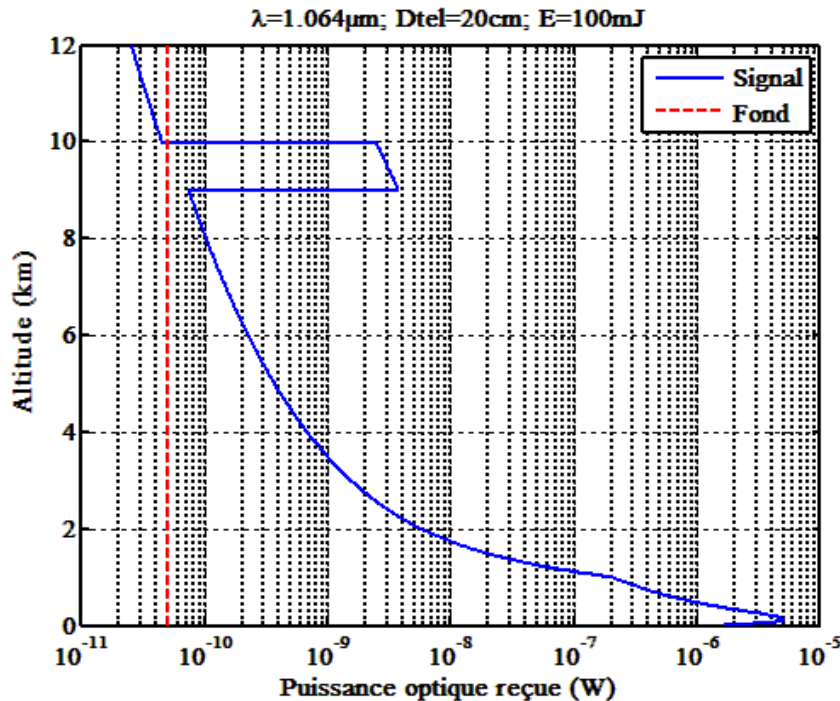
Lidar sol 1064 nm

□ Visée verticale



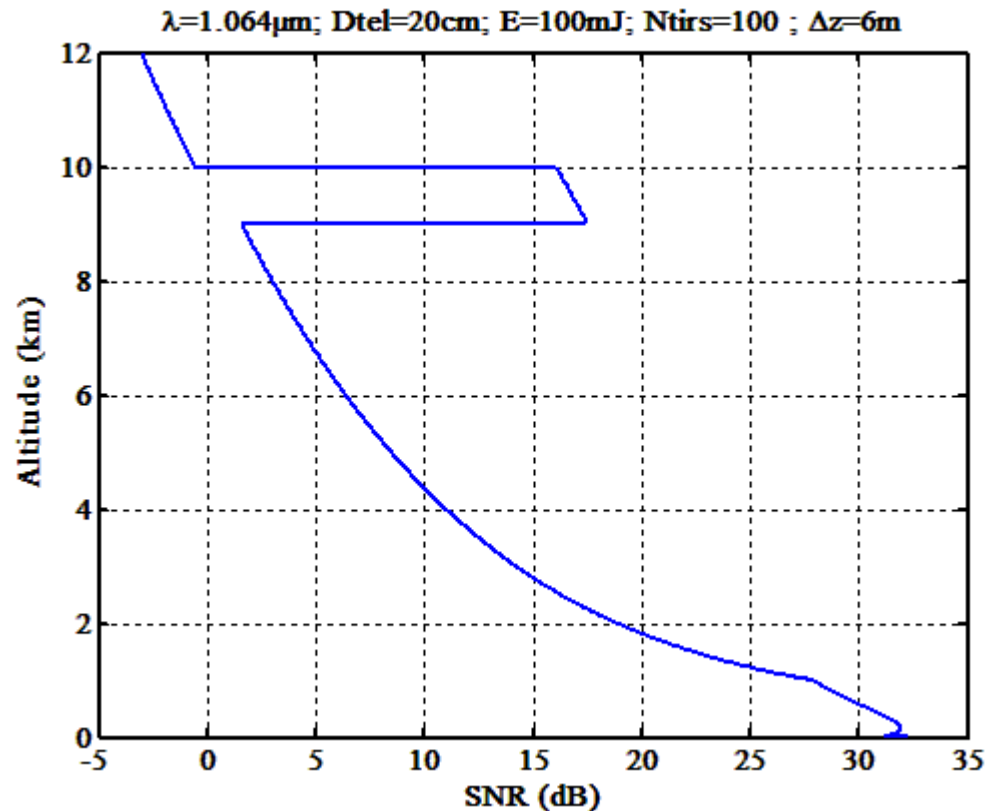
Lidar sol 1064 nm

- Télescope 20 cm, Energie 100 mJ (2W @ 20Hz)
- Filtre 1 nm, T 45%, Détection Si-APD, $\delta R = 6$ m



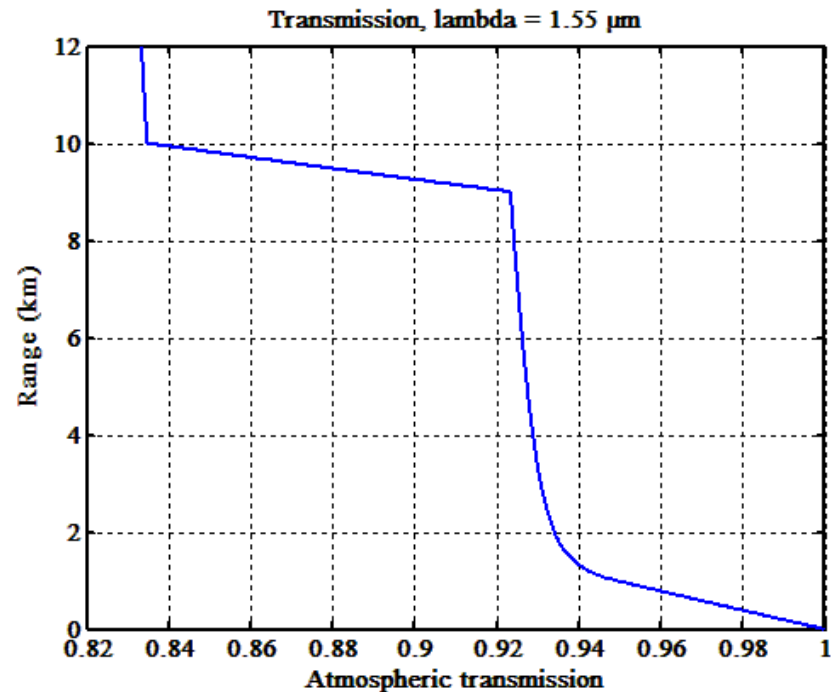
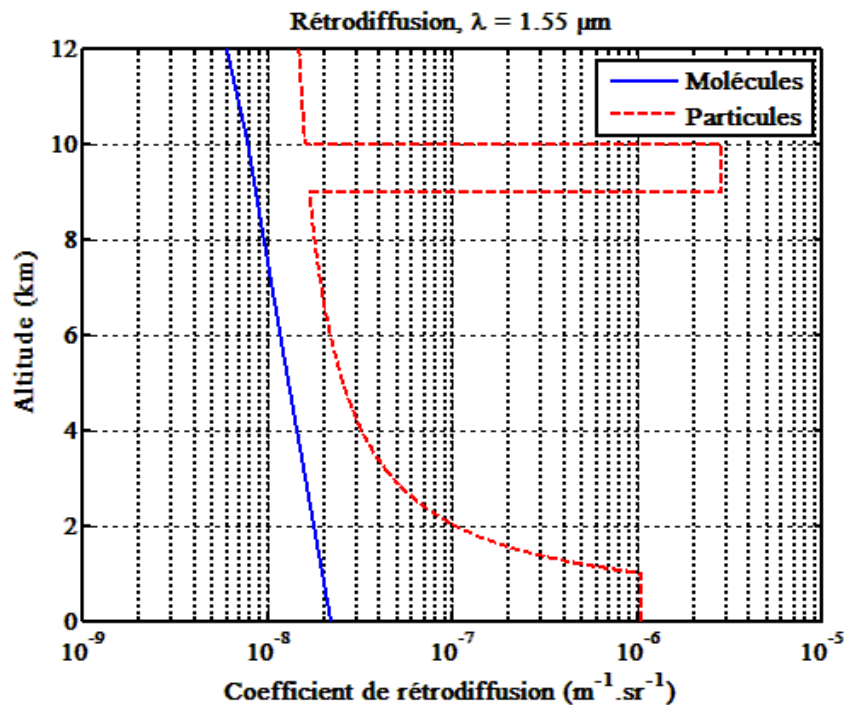
Lidar sol 1064 nm

- SNR sur 100 tirs moyennés (5s @ 20 Hz)



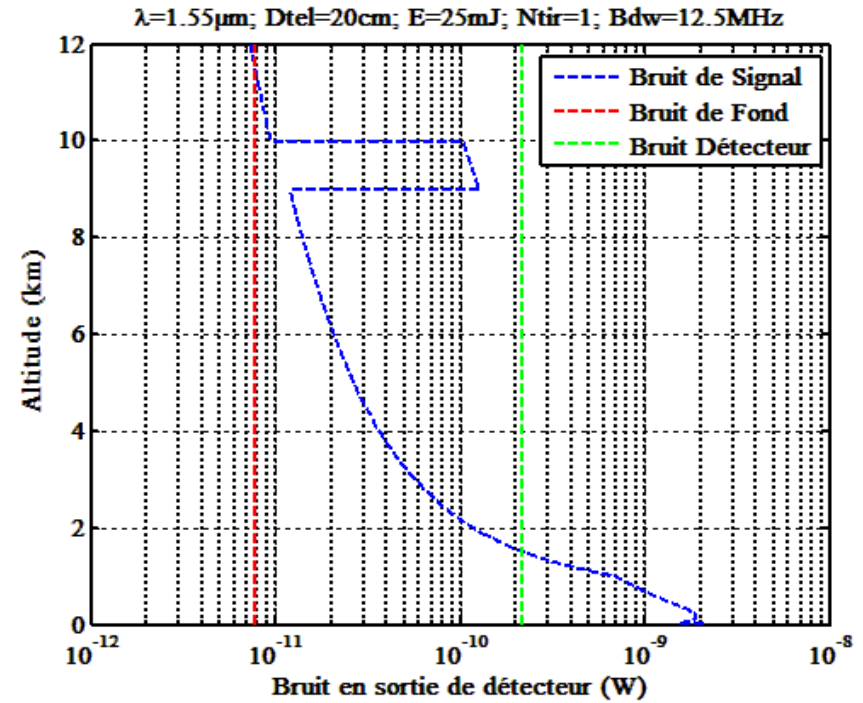
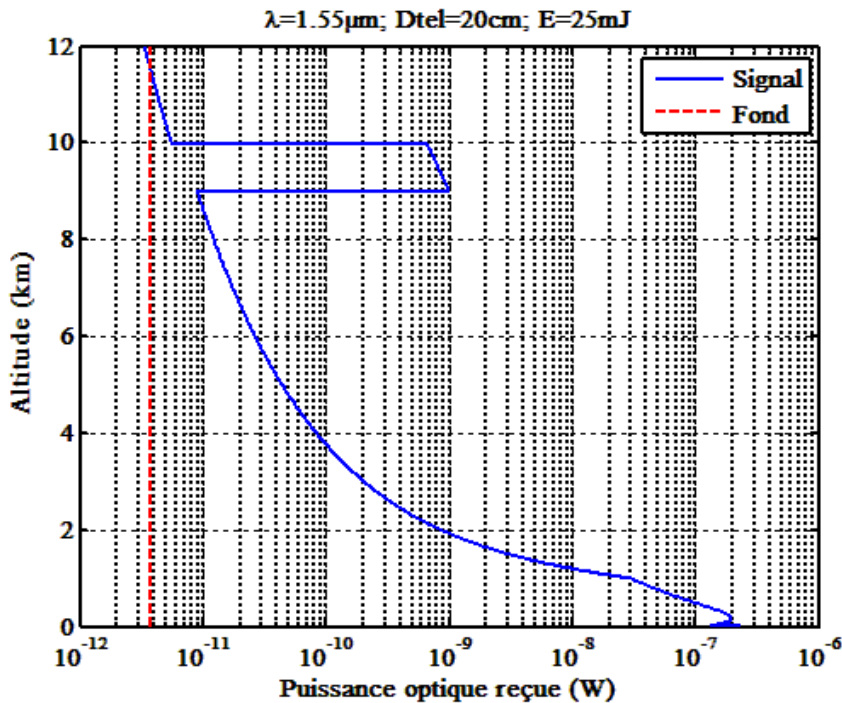
Lidar sol 1550 nm

□ Visée verticale



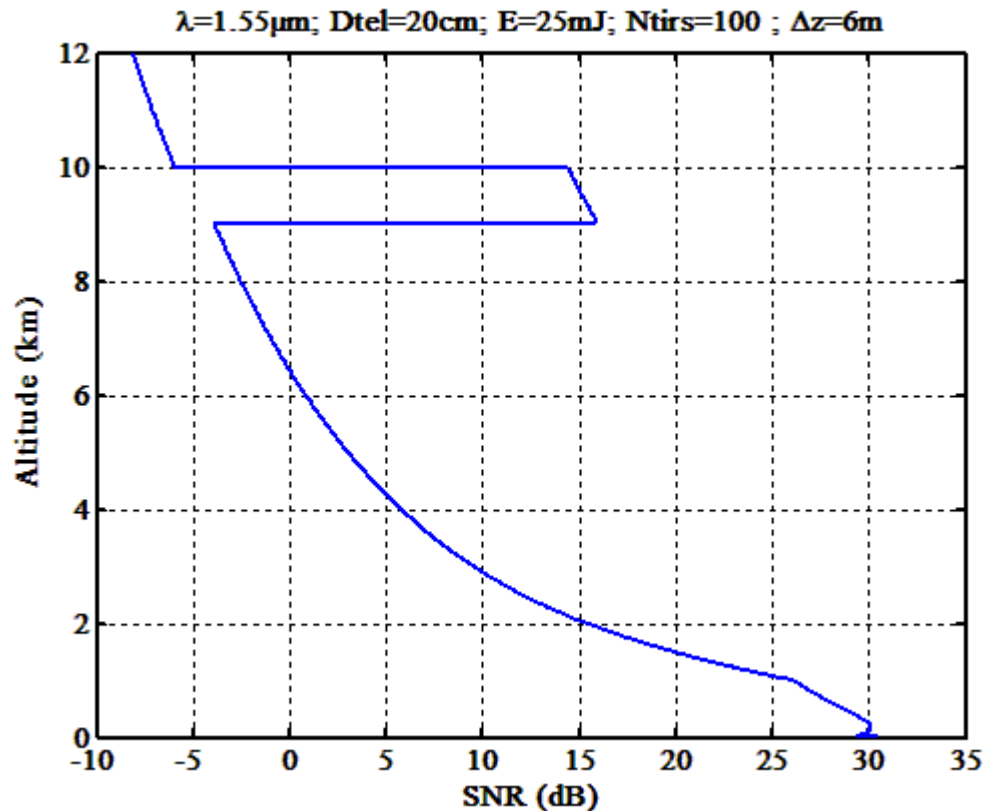
Lidar sol 1550 nm

- Télescope 20 cm, Energie 25 mJ (0,5 W @ 20 Hz)
- Filtre 1 nm, T 45%, Détection InGaAs-APD, $\delta R = 6$ m



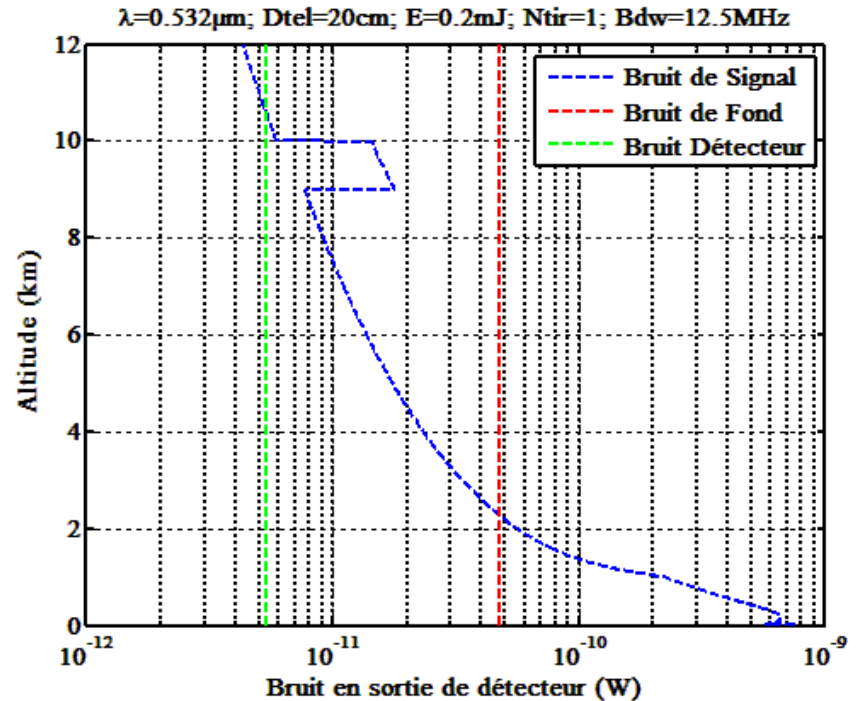
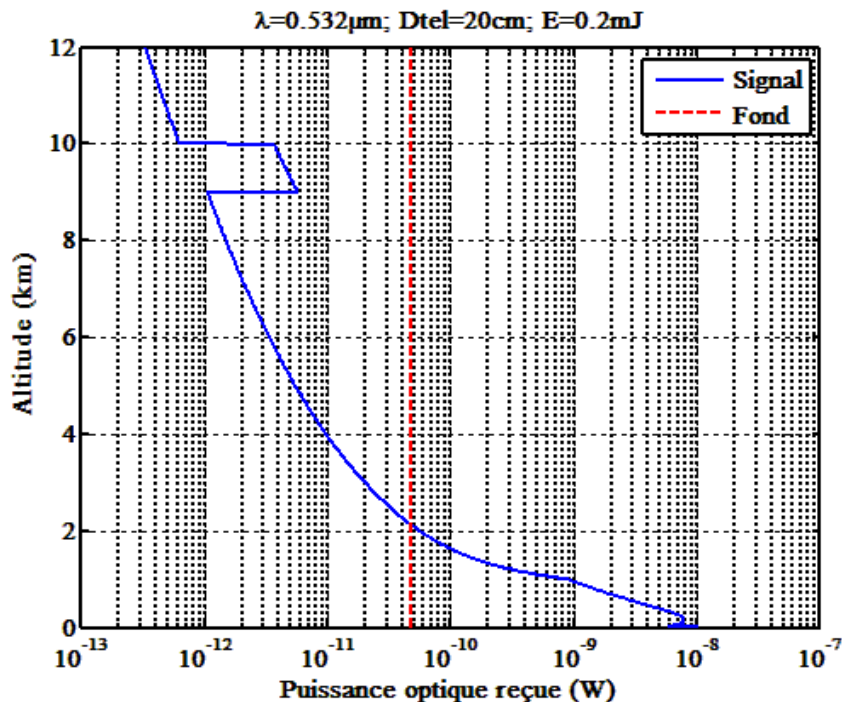
Lidar sol 1550 nm

- SNR sur 100 tirs moyennés (5s @ 20 Hz)



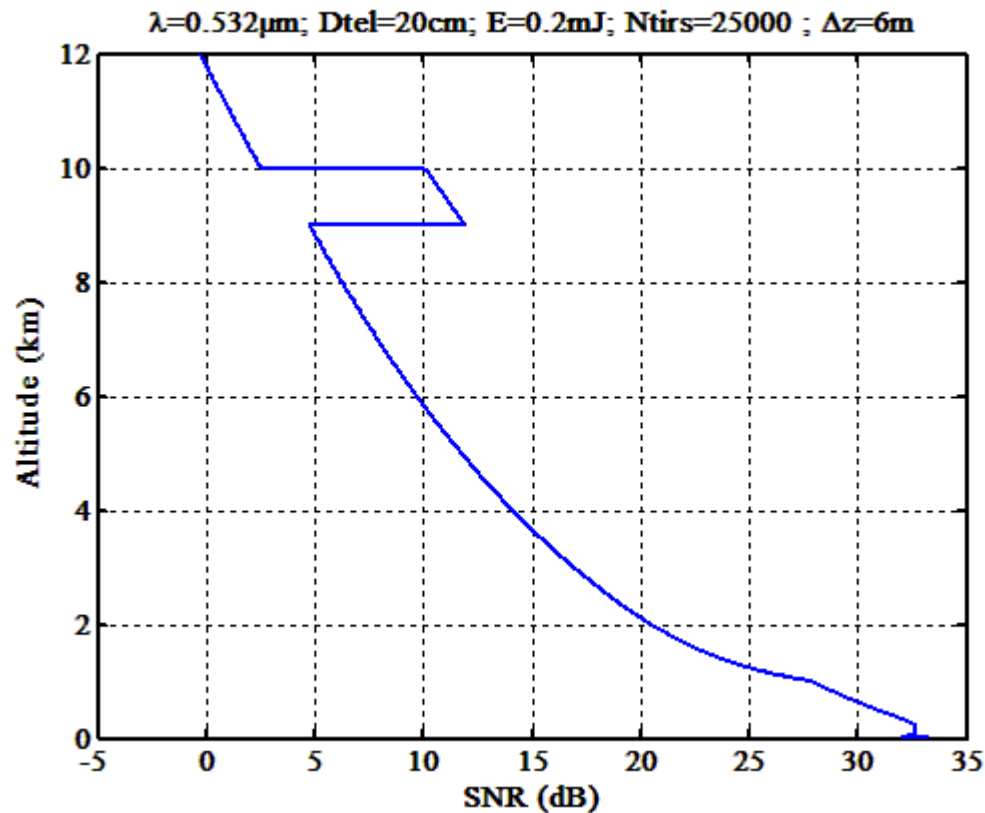
Microlidar sol 532 nm

- Télescope 20 cm, Energie 0,2 mJ (1W @ 5kHz)
- Filtre 0,5 nm, T 45 %, Détection PM, $\delta R = 6$ m



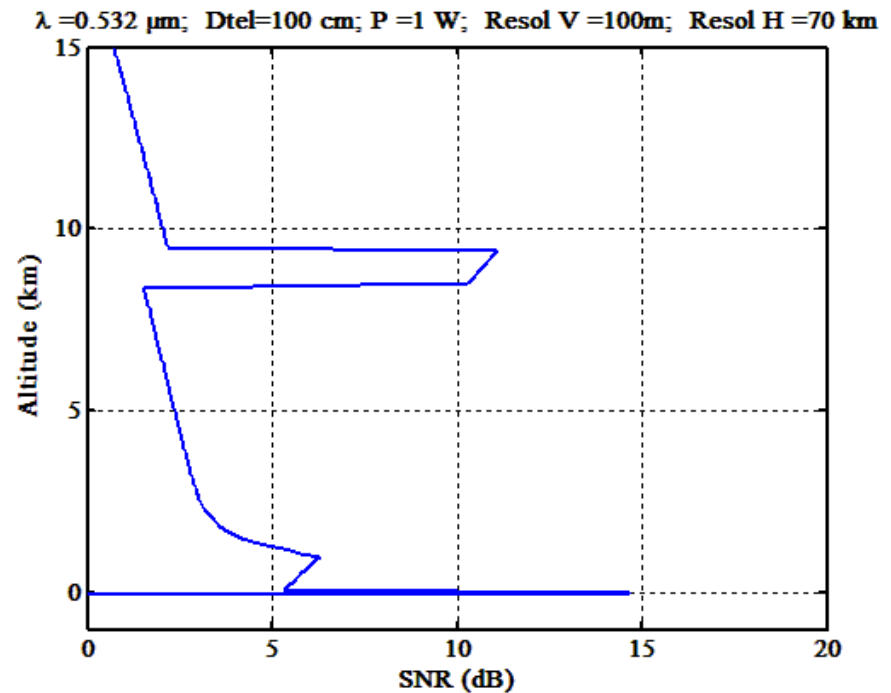
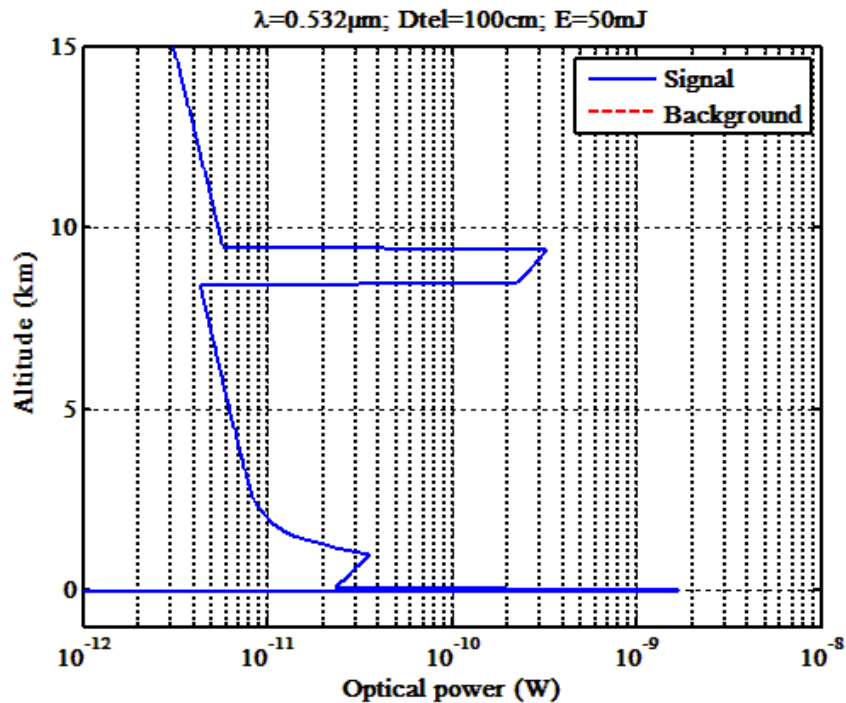
Microlidar sol 532 nm

- SNR sur 25000 tirs moyennés (5s @ 5 kHz)



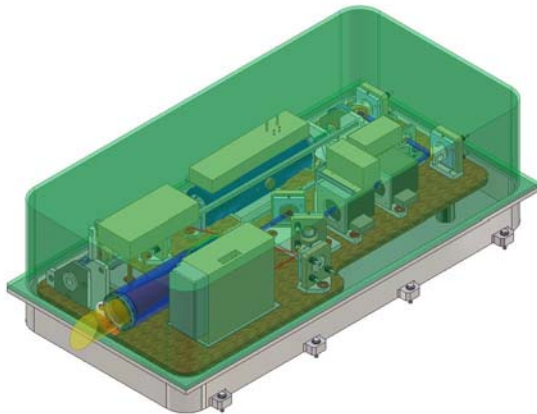
Lidar spatial 532 nm

- Altitude 400 km, Telescope 100 cm, Energie 50 mJ / 20Hz
- Filtre 0,03 nm, T 50 %, Détection PM, $\delta R = 100$ m, 200 tirs



Laser LNG

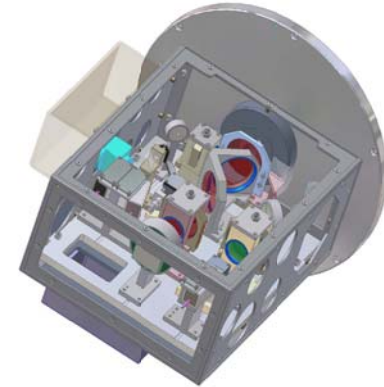
	Energie @ 20 Hz (mJ)	Pulse duration (ns)	Linewidth (MHz)	Divergence after beam expander (mrd)
1064 nm	50	8	~ 120	5.6
532 nm	10	7	160	4
355 nm	50	6	~ 200	0.16



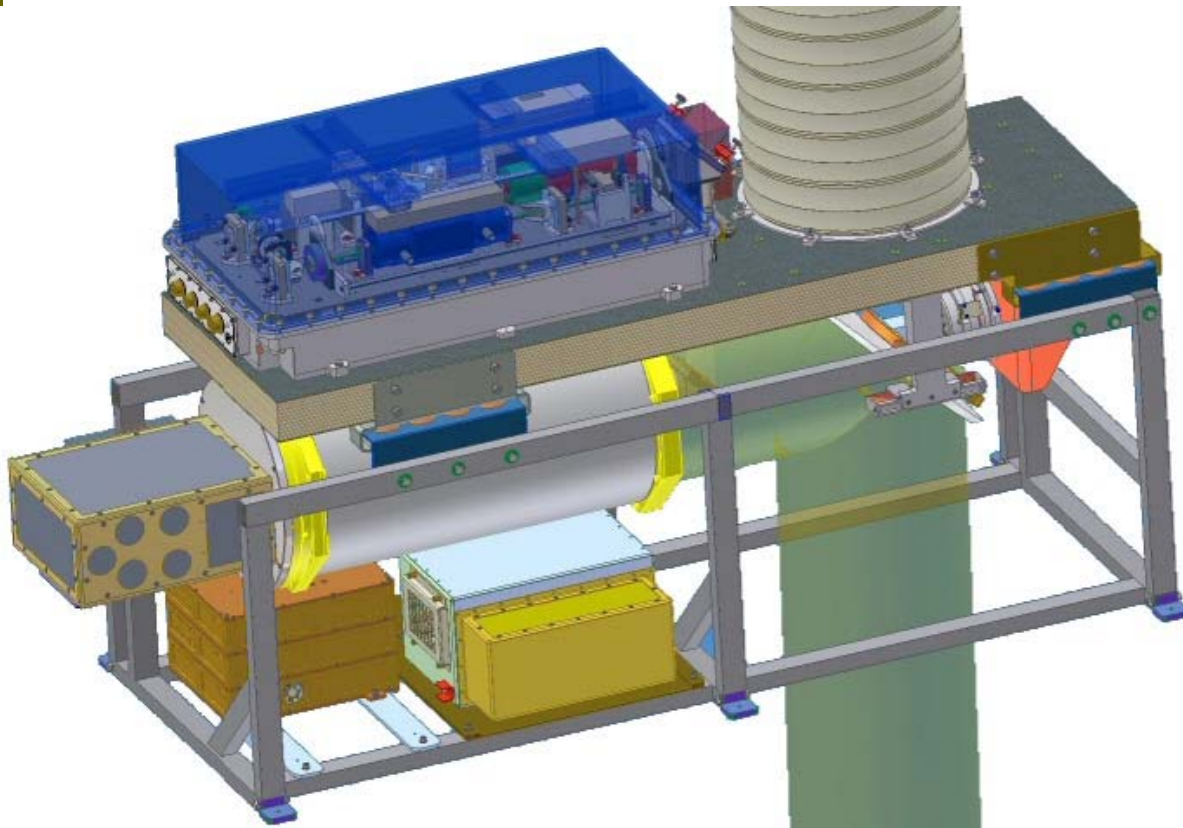
Réception LNG

	FOV (mrd)	Filter bandwidth / transmission	Detector
1064 nm	8	1 nm / 30%	APD Perkin-Elmer C30659-1060
532 nm	6	0.2 nm / 25%	PM Hamamatsu H6780-02
355 nm // and \perp	0.5	5 nm / 25%	PM Hamamatsu H6780-04

Detection bandwidth 5 MHz
Digitization : 16 bits / 25 MHz



Ensemble LNG



- Optical bench (+ frame):
 - length 1.8 m
 - width 0.65 m
 - height 0.95 m
 - weight 130 kg

- Electronics rack
 - length 0.6 m
 - width 0.6 m
 - height 1 m
 - weight 110 kg

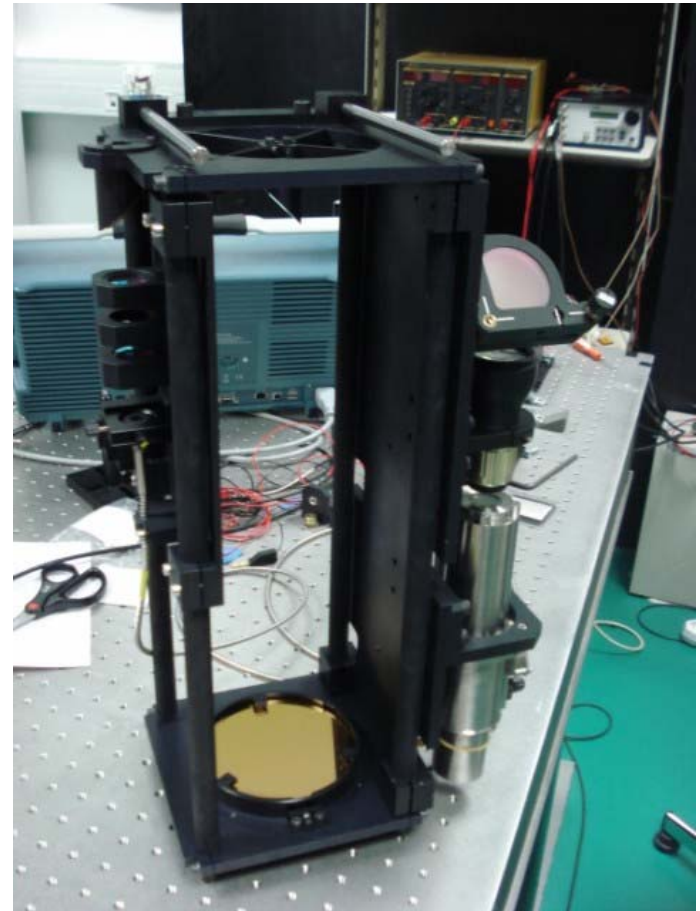
- Total
 - weight 270 kg (with cables)
 - Consumption: 2.2 kVA

LNG dans ATR 42



Lidar MARBLL

- ❑ Laser Thalès Nd:KGW
30 mJ / 1Hz
- ❑ Pas de refroidissement
- ❑ Télescope Newton 10 cm,
champ 0,5 mrd
- ❑ Transport signal par fibre
- ❑ Détecteur Si:APD
- ❑ Mesure Doppler par
Mach-Zehnder



Instrumentation

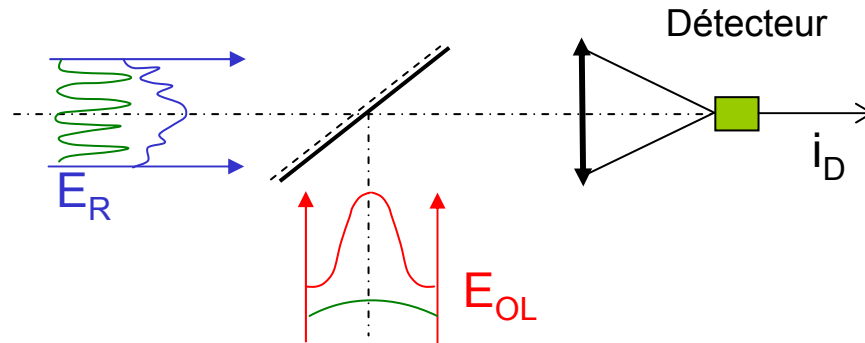


Partie 2. Lidar à détection hétérodyne

Détection hétérodyne

Principe

Interférence de l'onde reçue avec celle d'un oscillateur local (OL)



E_R onde partiellement cohérente, amplitude et phase variables, fréquence ν_R

E_{OL} onde cohérente (Gaussienne), amplitude et phase déterminés, fréquence ν_{OL}

$$i_D(t) = S \left(P_{OL} + P_R + 2\sqrt{\gamma_H P_{OL} P_R} \cos[2\pi\nu_H t + \varphi(t)] \right)$$

$$P_R = \int_D \langle E_R(x) E_R^*(x) \rangle dx$$

$$P_{OL} = \int_D \langle E_{OL}(x) E_{OL}^*(x) \rangle dx$$

fréquence de battement $\nu_H = \nu_R - \nu_{OL}$ dans le domaine RF (MHz)

Signal hétérodyne

□ Passage dans une résistance de charge R_C

□ Echantillonnage du signal à la fréquence F_E

□ Filtrage autour de la fréquence ν_H

$$v_H(t) = 2R_C S \sqrt{\gamma_H P_{OL} P_R} \cos(2\nu_H t + \varphi)$$

□ Calcul de la puissance moyenne dans une fenêtre $\Delta t = N/F_E$

$$\langle v_H^2(t) \rangle = 2R_C^2 S^2 \gamma_H P_{OL} P_R(t)$$

□ Calcul du spectre de puissance dans la fenêtre de N points

$$V_H^2(\nu) = |\mathbf{TF}(v_H(t))|^2$$

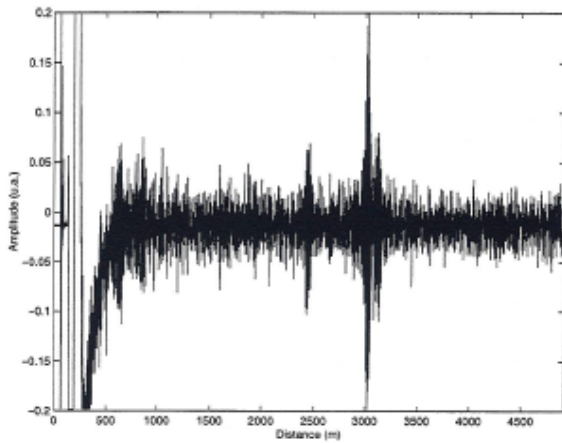
Signal hétérodyne

- Valeurs typiques:
 - largeur spectrale laser (monomode) $\Delta\nu_L \sim 1$ MHz
 - bande de détection hétérodyne $B_H = F_E / 2 \sim$ qq 10 MHz
 - ⇒ sensible uniquement à la diffusion particulaire
(le signal diffusé par les molécules a une largeur spectrale de l'ordre du GHz)

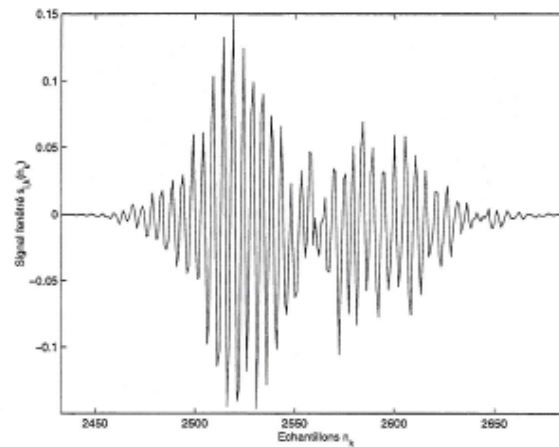
- Du fait de la phase aléatoire φ , la sommation directe des signaux est inutile.

Exemple de signaux

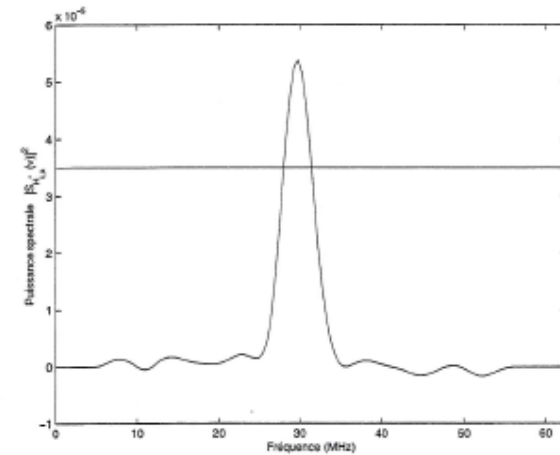
Signal hétérodyne,
enregistrement complet



Signal hétérodyne,
fenêtré



Signal hétérodyne,
spectre dans fenêtré



Rendement hétérodyne

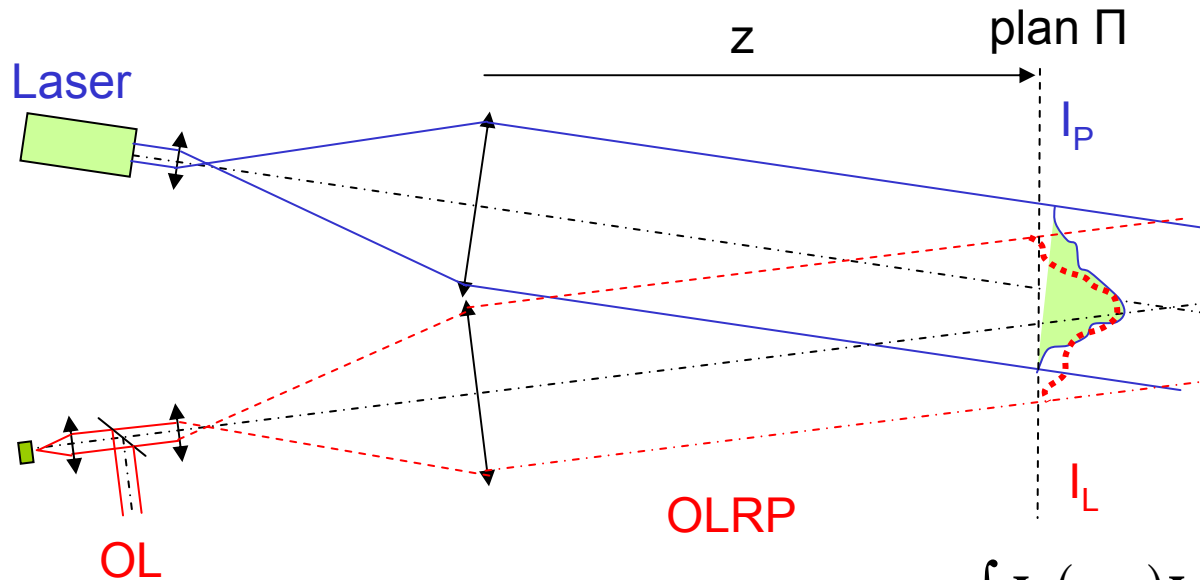
□ Calcul dans le plan du détecteur

$$\gamma_H = \frac{\iint \langle E_R(x)E_R^*(x') \rangle E_{OL}^*(x)E_{OL}(x') dx dx'}{P_{OL}P_R}$$

- E_R obtenu après propagation aller, diffusion incohérente, puis propagation retour.
- dépend :
 - de la distance
 - des différentes troncatures du faisceau
 - des distorsions de front d'onde
- difficile à calculer

Rendement hétérodyne

- Calcul dans le plan de diffusion
 - Oscillateur local retro-propagé (OLRP)



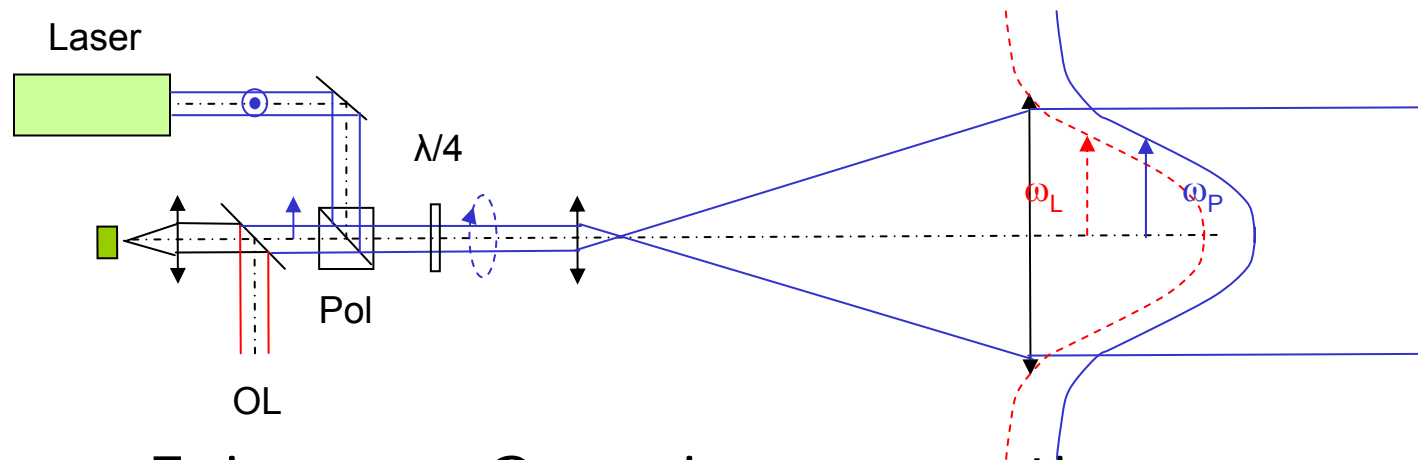
$$\eta(z) = \frac{(\lambda z)^2}{A} \frac{\int_{\Pi} I_L(x, z) I_P(x, z) dx}{\int_{\Pi} I_L(x, z) dx \int_{\Pi} I_P(x, z) dx}$$

Optimisation du rendement

- ❑ Laser monomode $M^2 \sim 1$
- ❑ Rendement hétérodyne croît quand la taille du faisceau laser croît
 - ⇒ effet de troncature par la pupille du télescope d'émission
 - ⇒ réduction de la transmission T_p
 - ⇒ Rendement système: $\eta_S = \eta_H T_p$
- ❑ Télescope sans obturation
- ❑ Qualité optique proche de la limite de diffraction
- ❑ Alignement OL / Laser critique
 - ⇒ un seul télescope émission-réception (système monostatique)

Optimisation rendement

□ Système monostatique



- Faisceaux Gaussiens, η_S optimum pour $\omega_L = \omega_P = 0,4D_{Tel} \Rightarrow \eta_H = 0,6 T_P = 2/3 \eta_S = 0,4$
- En réalité (défauts optiques) $\eta_H \sim 0,1$

Influence de la turbulence d'indice

□ r_c , rayon de cohérence sur la pupille du télescope (rayon a_T)

■ En l'absence de turbulence: $r_{c,0}$

■ Contribution de la turbulence : $r_{c,t}$

$$r_{c,t}(z) = \left[1,46 \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \int_0^z C_n^2(z') \left(1 - \frac{z'}{z}\right)^{5/3} dz' \right]^{-3/5}$$

□ $C_n^2 \sim 10^{-15} - 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ dans la CLA

■ Diminution du rendement hétérodyne

$$\eta_H \propto \left(1 + \frac{a_T^2}{r_{c,0}^2} + \frac{a_T^2}{r_{c,t}^2} \right)^{-1/2}$$

□ limite le diamètre de télescope

□ favorise les grandes longueur d'ondes

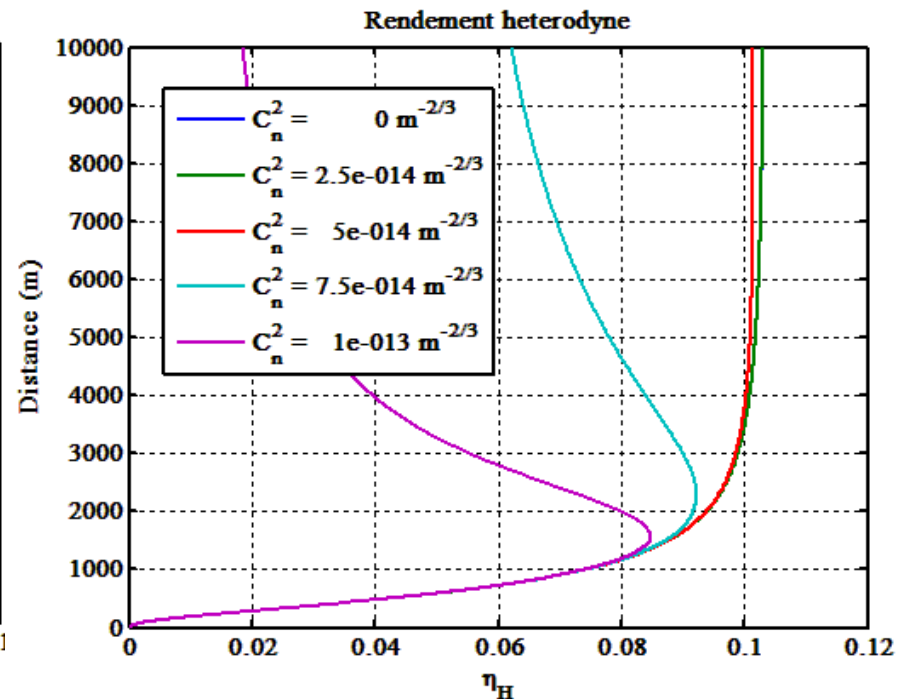
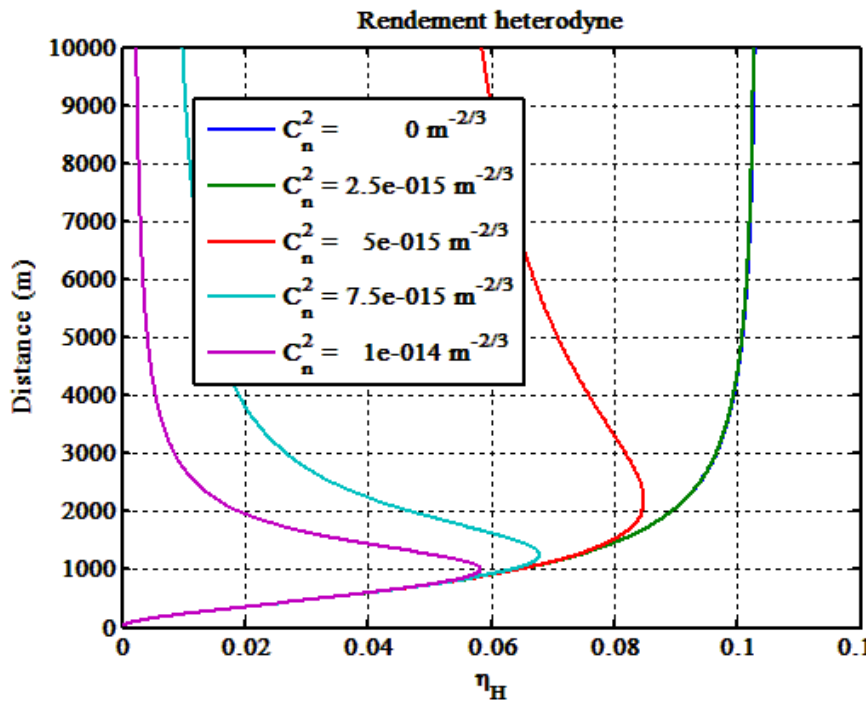
Influence de la turbulence d'indice

$\lambda = 2 \mu\text{m}$, $D_{\text{tel}} = 5 \text{ cm}$,

C_n^2 sur 100m

$\lambda = 10 \mu\text{m}$, $D_{\text{tel}} = 10 \text{ cm}$,

C_n^2 sur 100m



Bruit en courant

□ Bruit total en hétérodyne

$$\text{var}(i_B) = 2qB_H [S(P_{OL} + P_B + P_R) + I_{obs}] + \text{var}(i_E)$$

- $\text{var}(i_E)$ donné par la même expression qu'en détection directe
- Pour des puissance modérées de l'OL (~ 1 mW), $2qB_H SP_{OL}$ est bien supérieur aux autres termes

$$\text{var}(i_B) \approx 2qB_H SP_{OL}$$

CNR

- Le CNR (Carrier to Noise Ratio) est défini comme le rapport de la puissance moyenne du signal à celle du bruit

$$CNR = \frac{\langle i_H^2 \rangle}{\text{var}(i_B)}$$

- Avec le bruit de l'OL prédominant on a:

$$CNR = \frac{\gamma_H}{qB_H} S \langle P_R \rangle = \frac{\gamma_H \eta \lambda}{hcB_H} \langle P_R \rangle$$

- équivalent à la limite du « shot noise », au terme $\gamma_H \eta$ près

Bruit de tavelure

- ❑ Le signal hétérodyne ne correspond qu'à une seule tavelure spatiale (celle qui se superpose à l'OL)
- ❑ Sur une durée d'impulsion laser τ_L (une tavelure temporelle) le signal varie avec une PDF

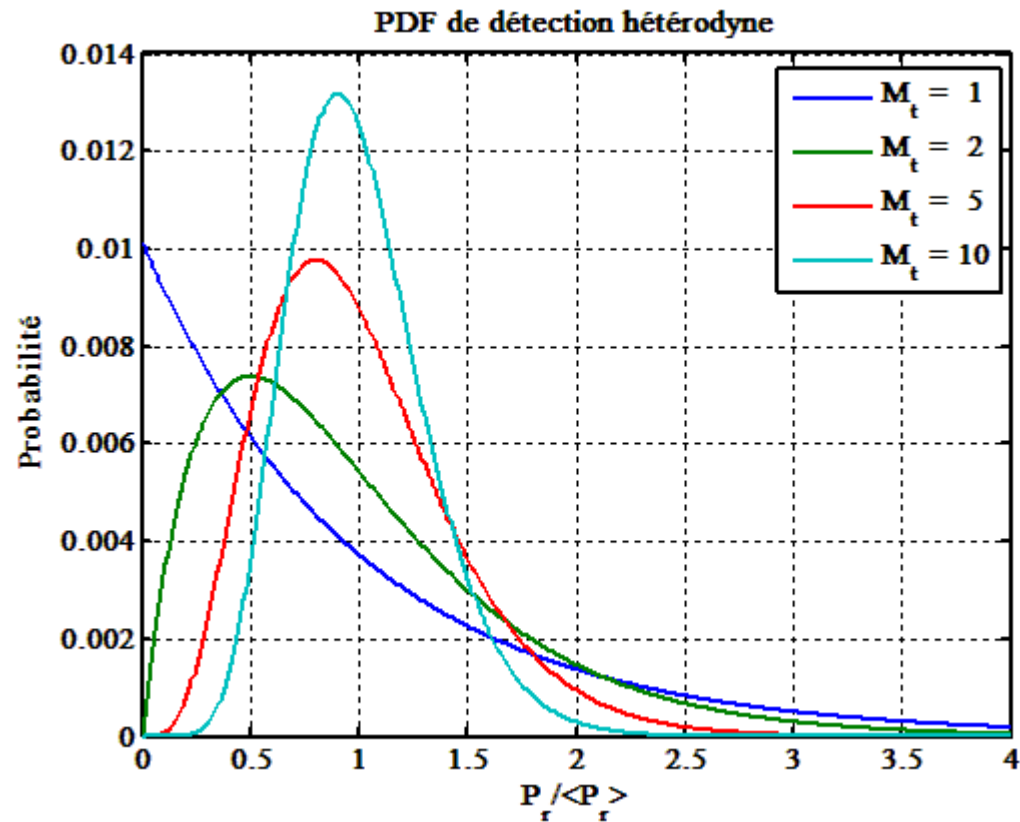
$$p\left(\frac{P_R}{\langle P_R \rangle}\right) = \exp\left(-\frac{P_R}{\langle P_R \rangle}\right)$$

- ❑ Sur une fenêtre $\Delta t = M_t \tau_L$ la PDF devient

$$p\left(\frac{P_R}{\langle P_R \rangle}\right) = \frac{M_t^{M_t}}{\Gamma(M_t)} \left(\frac{P_R}{\langle P_R \rangle}\right)^{M_t-1} \exp\left(-M_t \frac{P_R}{\langle P_R \rangle}\right)$$

Bruit de tavelure

- Probabilité de puissance détectée, dans une fenêtre $M_t \tau_L$ et sur 1 tir



SNR

- ❑ Le SNR inclut le bruit apporté par l'OL (CNR) et la statistique de puissance due aux tavelures
- ❑ Dans une fenêtre $M_t \tau_L$, pour 1 tir:

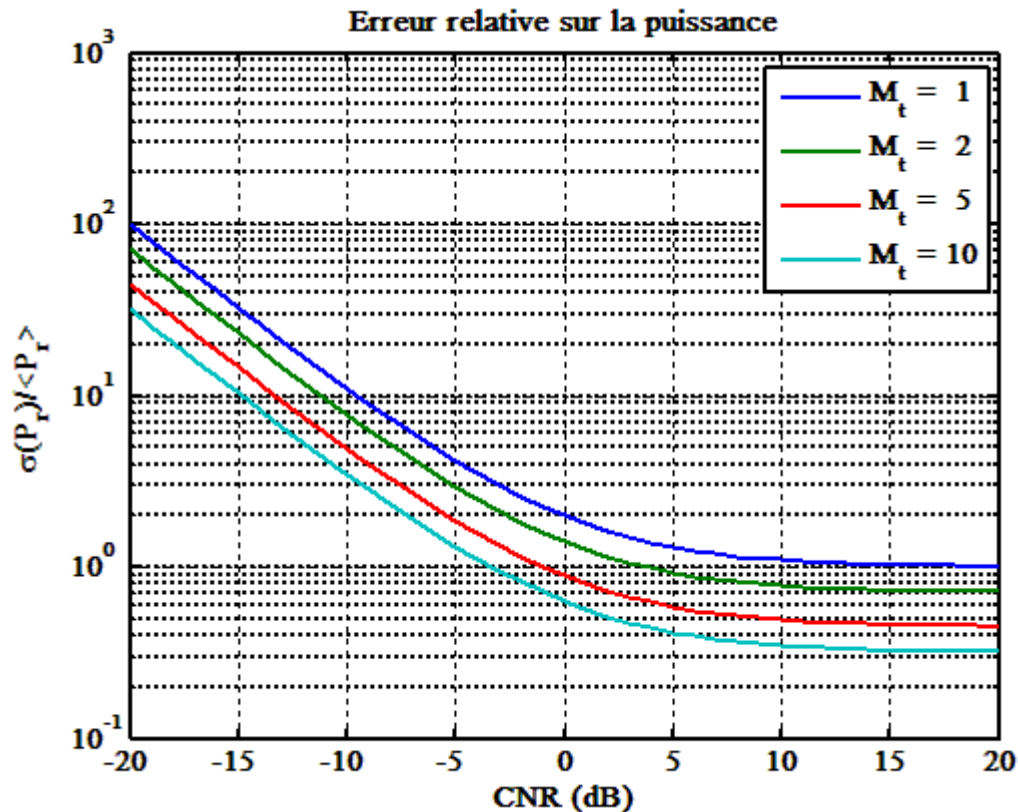
$$SNR = \sqrt{M_t} \left(\frac{CNR}{1 + CNR} \right)$$

- ❑ Incertitude relative sur la puissance:

$$\frac{\sigma(P_R)}{\langle P_R \rangle} = \frac{1}{SNR} = \frac{1}{\sqrt{M_t}} \left(1 + \frac{1}{CNR} \right)$$

Erreur relative sur la puissance

- Dans une fenêtre $M_t \tau_L$, pour 1 tir



Erreur sur la fréquence

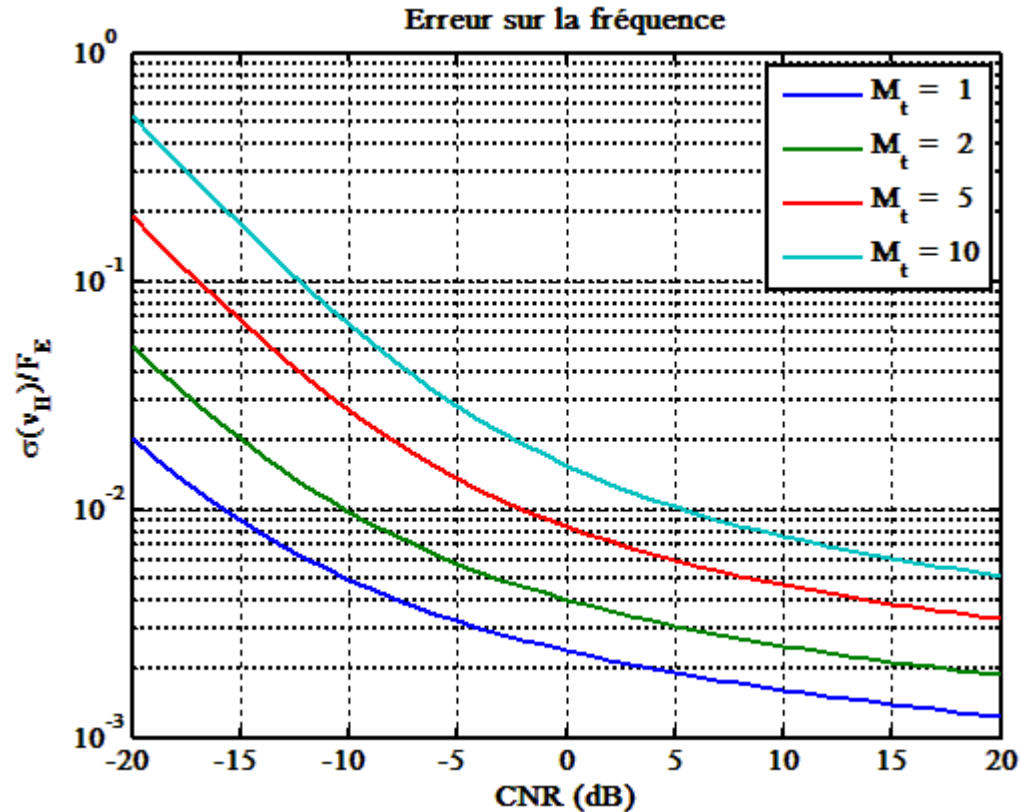
- Fréquence d'échantillonnage F_E
- Fenêtre $\Delta t = N F_E$
- M_t tavelures dans la fenêtre
- Estimateur de Levin

$$\frac{\sigma(v_H)}{F_E} = \frac{M_t}{N^{3/2} \sqrt{CNR}} \frac{1}{\sqrt{g_1(\alpha_1)}}$$

avec

$$\alpha_1 = \frac{N}{M_t} \frac{CNR}{\sqrt{2\pi}} \quad g_1(\alpha_1) = \frac{\alpha_1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2 \exp(-x^2)}{1 + \alpha_1 \exp(-x^2/2)} dx$$

Erreur sur la fréquence



- $N = 128$ (pts dans la fenêtre)

Domaine spectral de la DH

- ❑ Sensible uniquement aux particules (sondage basses couches ou transport aérosols, nuages)
- ❑ Laser monomode, $M^2 \sim 1$
- ❑ Télescope proche de la limite de diffraction
- ❑ Alignement sensibilité interférométrique
- ❑ Grande longueur d'onde (moins sensible à la turbulence d'indice)
- ❑ Peu d'exigences sur le détecteur (contrairement à la détection directe)

⇒ domaine IR ($1,5 \mu\text{m} \rightarrow 10 \mu\text{m}$)

Stratégie de mesure en DH

□ Mesure de puissance

- Energie émise telle que $\text{CNR} \sim 1$ à une distance choisie
- Durée d'impulsion nettement plus faible que la résolution en distance (M_t élevé)
- Cadence élevée pour moyenner un grand nombre de tirs

□ Mesure de fréquence (Doppler)

- Durée d'impulsion proche de la résolution en distance (M_t faible)
- Energie émise telle que $\text{CNR} \sim M_t$ à une distance choisie
- Cadence élevée non nécessaire

Lasers pour HD

- 3 principaux types:
 - Laser CO₂ ($9 \mu\text{m} < \lambda < 10 \mu\text{m}$)
 - Laser Ho ($2,05 \mu\text{m} < \lambda < 2,1 \mu\text{m}$)
 - Laser Er ($1,5 \mu\text{m} < \lambda < 1,6 \mu\text{m}$)

- Produits commerciaux:
 - Très peu de lasers monomodes impulsionnels
 - OL / injecteurs CW plus courants

Laser CO₂

- ❑ Longueur d'onde principale 10,6 μm
 - plusieurs autres raies entre 9 μm et 11 μm
- ❑ Pompage par décharge électrique
- ❑ Fort gain, fort stockage d'énergie, bon rendement
- ❑ Grand volume (encombrant)
- ❑ Emission de forte énergie (> 100 mJ) basse cadence (qq Hz)
- ❑ Matériaux optiques: Si, Ge, ZnSe

Laser Ho

- ❑ Accordable de 2,05 μm à 2,1 μm
- ❑ Fort stockage d'énergie
- ❑ Faible gain
- ❑ Cristaux massifs : YAG ou YLF (ou LuLiF)
 - Co-dopage Tm-Ho
 - ❑ Pompage par diodes du Tm @ 780 nm puis transfert d'énergie
 - ❑ Gain limité par « up-conversion »
 - ❑ Energie émise de 10 mJ @ 200 Hz à 1 J @ 2 Hz
 - Dopage Ho seul
 - ❑ Pompage @ 1940 nm par laser CW Tm:Fibre (pompé par diodes)
 - ❑ Moins de « up-conversion »
 - ❑ Energie émise de 70 mJ @ 50 Hz à 10 mJ @ 5 kHz (en préparation)

Laser Er

- Laser Er: Fibre (monomode)
 - Accordable entre 1,5 μm et 1,6 μm
 - Pompage par diode CW @ 980 nm
 - Bon contrôle thermique
 - Bon stockage d'énergie
 - Limitation de la puissance crête par Brillouin stimulé
 - Energie émise 0,1 mJ @ >10 kHz

Détecteurs

- InGaAs (1,5 μm \rightarrow 2 μm)

- $\eta \sim 75 \%$
- $S \sim 1 \text{ A/W}$
- $B_H \rightarrow 1 \text{ GHz}$

- HgCdTe (10 μm)

- $\eta \sim 75 \%$ \searrow 50 % qd P \nearrow
- $S \sim 6 \text{ A/W}$ \searrow 4 A/W
- $B_H \rightarrow 100 \text{ MHz}$

- Bruit OL prédominant qd

$$P_{OL} > \frac{\text{var}(i_E)}{2qS}$$

- $\text{var}(i_E)$ dominé par l'amplification

$$\sqrt{\text{var}(i_E)} \approx 10 \text{ pA} / \sqrt{\text{Hz}}$$

$\Rightarrow P_{OL} > 0,3 \text{ mW}$ @ 1,6 – 2 μm

$\Rightarrow P_{OL} > 0,1 \text{ mW}$ @ 10 μm

Exemple de télescope

Télescope Afocal Hors-Axe:

primaire parabolique Φ 100 mm Rcc 1000

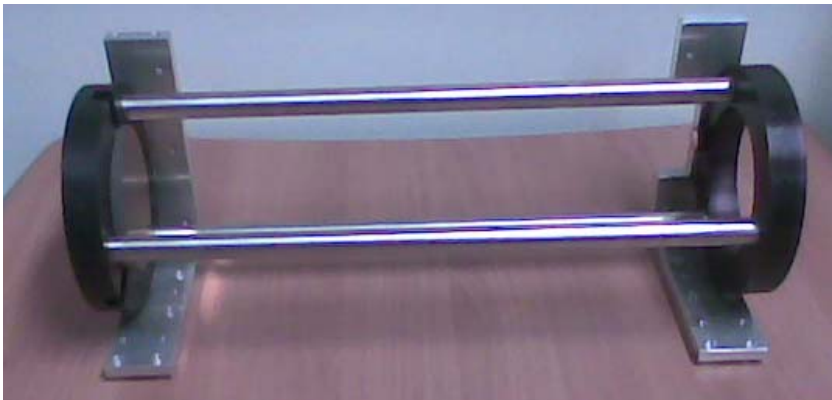
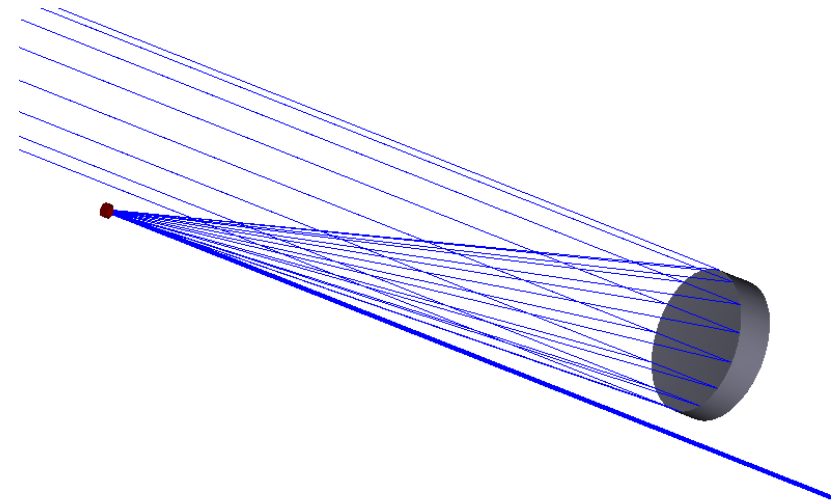
secondaire parabolique Φ 10 mm Rcx 25

Grossissement résultant $\times 40$

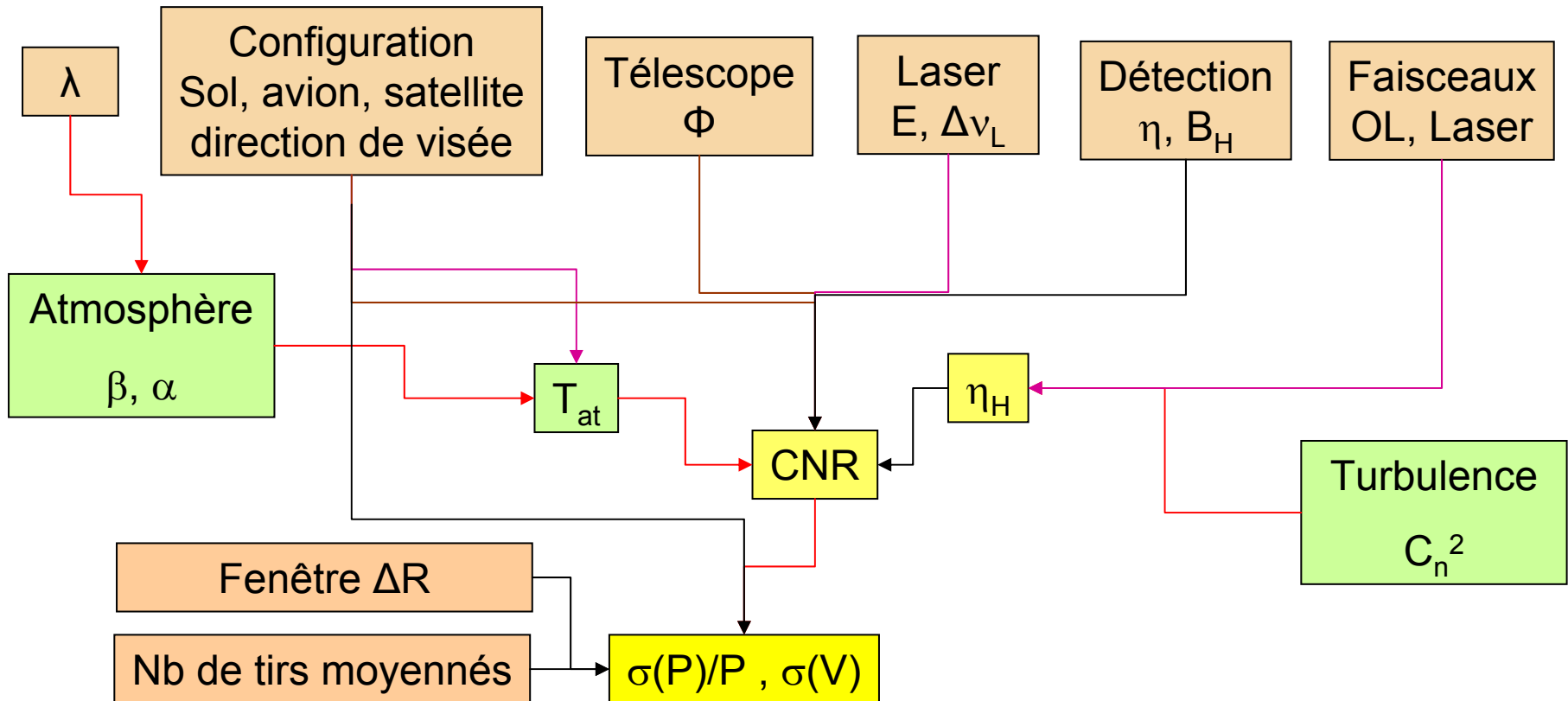
Encombrement 500 mm

Sans obturation

Qualité front d'onde $\lambda/4$ @ 2 μm

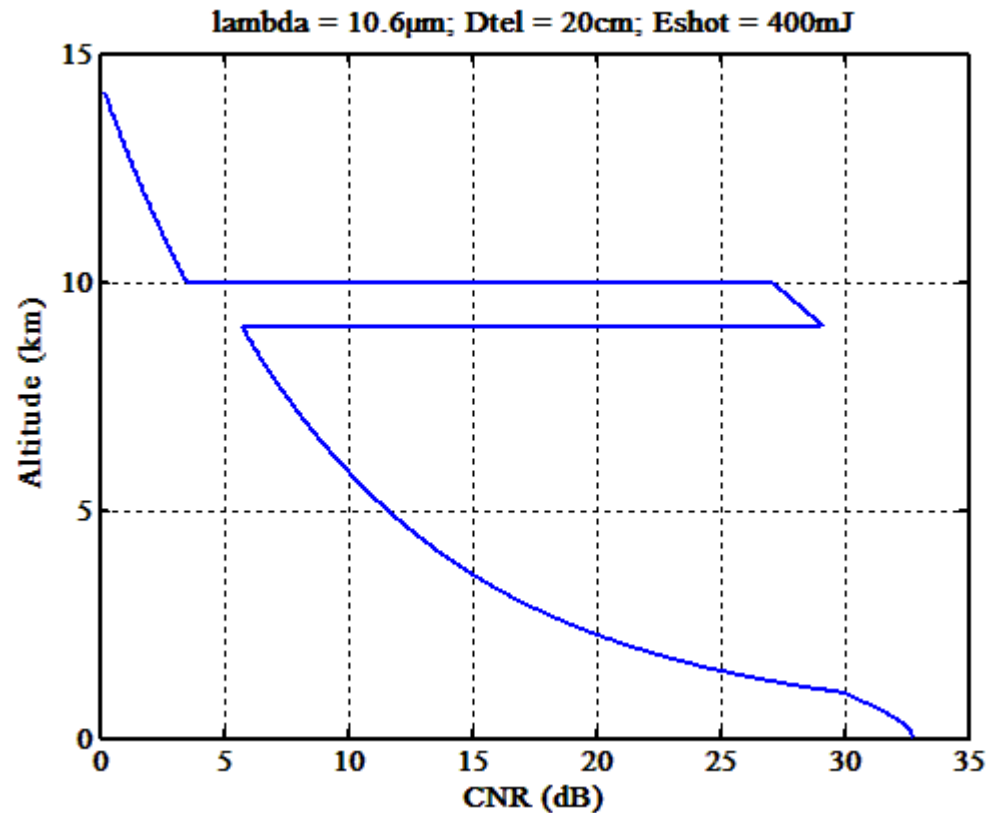


Modèle de performances



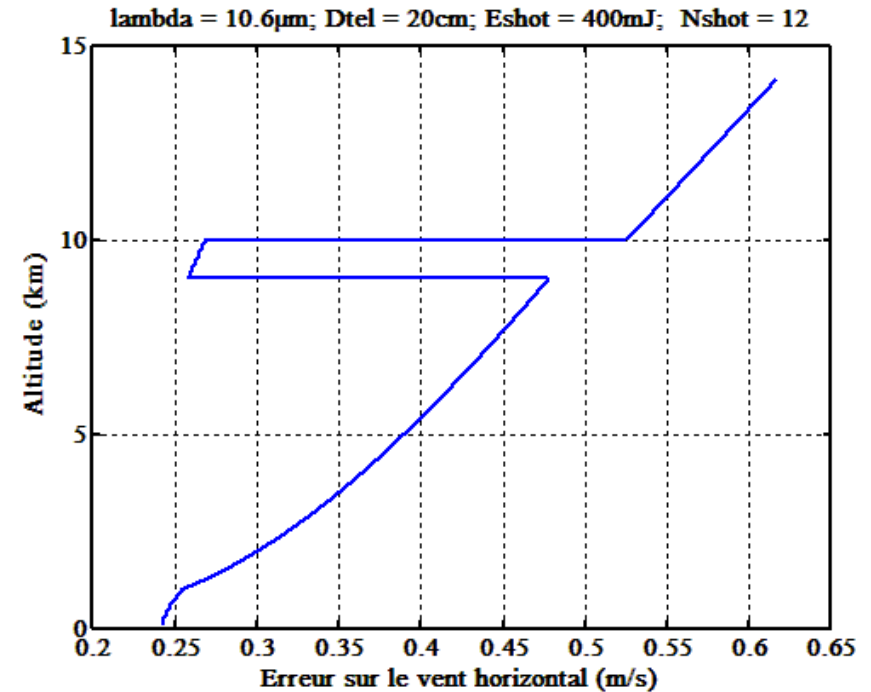
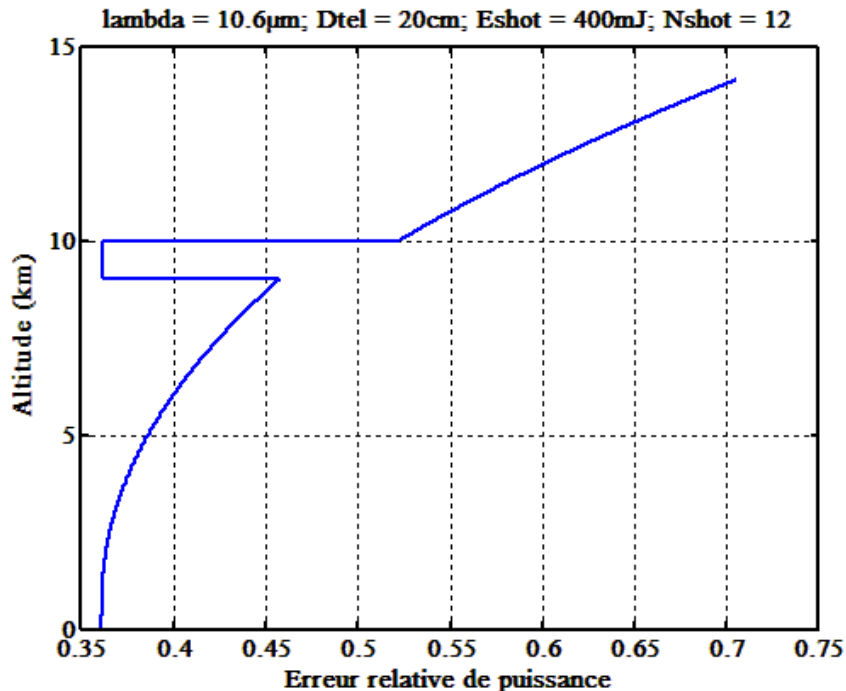
Lidar sol 10 μm

- $E = 400 \text{ mJ} / 4\text{Hz} (1,6 \text{ W}), \Delta\nu_L = 1\text{MHz}, D_{\text{Tel}} 20 \text{ cm}, \eta_H = 0,1$



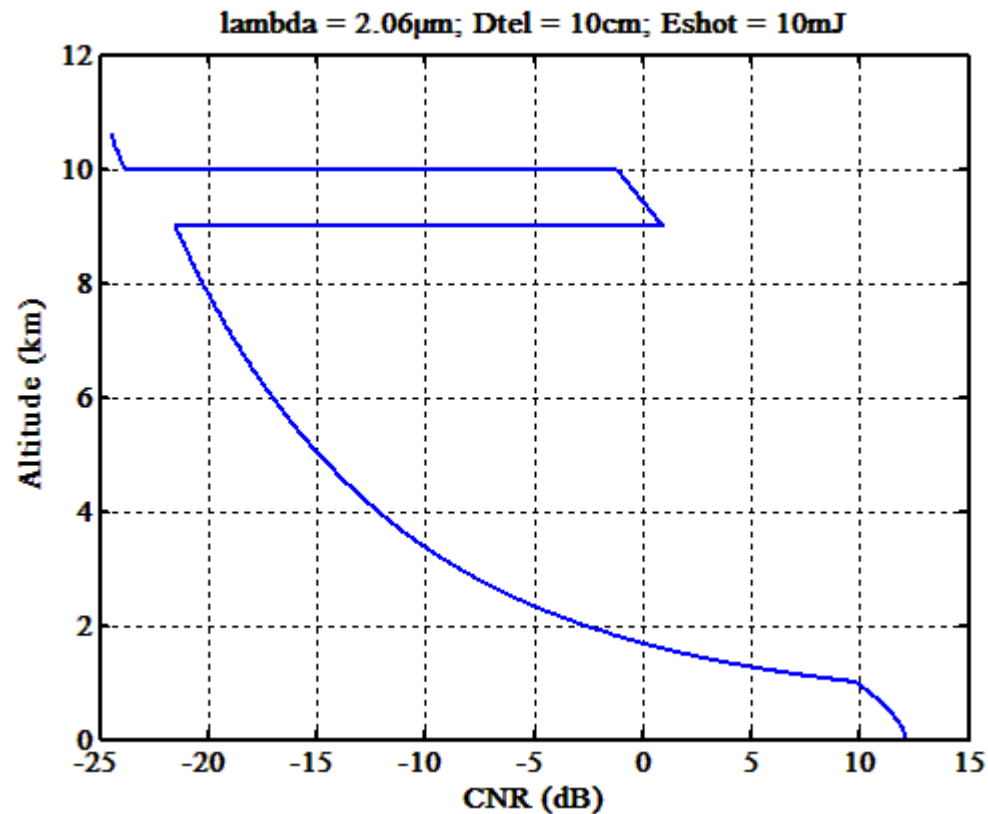
Lidar sol 10 μm

- $E = 400 \text{ mJ} / 4\text{Hz} (1,6 \text{ W}), \Delta\nu_L = 1\text{MHz}, D_{\text{Tel}} 20 \text{ cm}, \eta_H = 0,1$
- $\Delta R = 100 \text{ m}, \text{visée } 45^\circ, N_{\text{tir}} = 12 (3\text{s})$



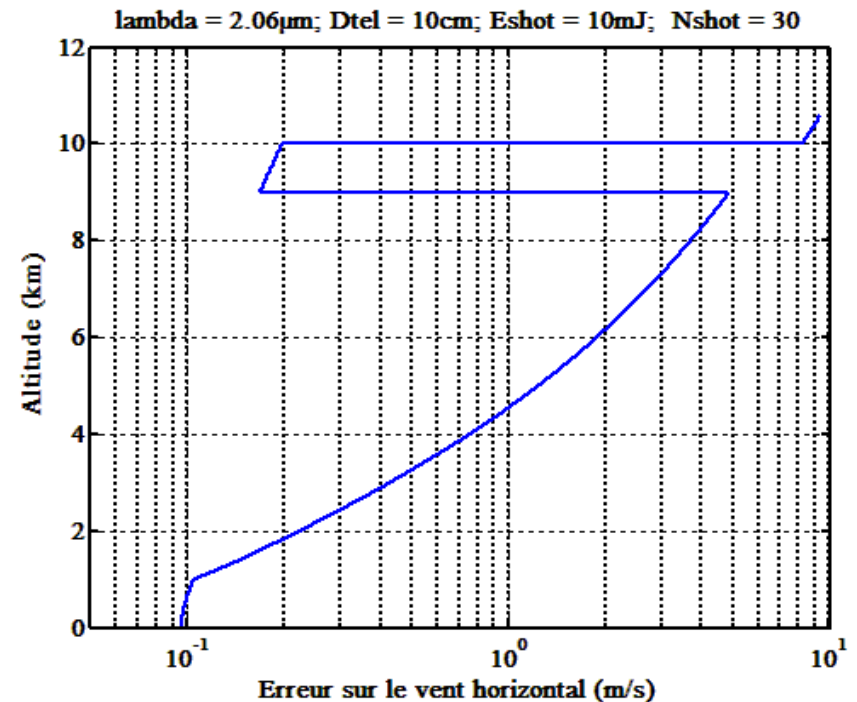
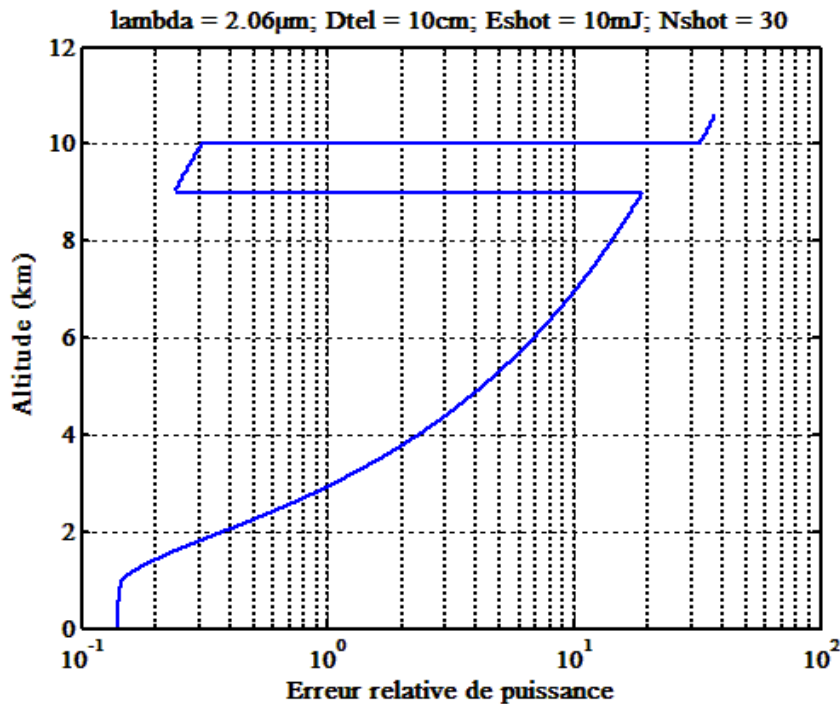
Lidar sol 2 μm

- $E = 10 \text{ mJ} / 10\text{Hz} (0,1 \text{ W}), \Delta\nu_L = 3\text{MHz}, D_{\text{Tel}} 10 \text{ cm}, \eta_H = 0,1$



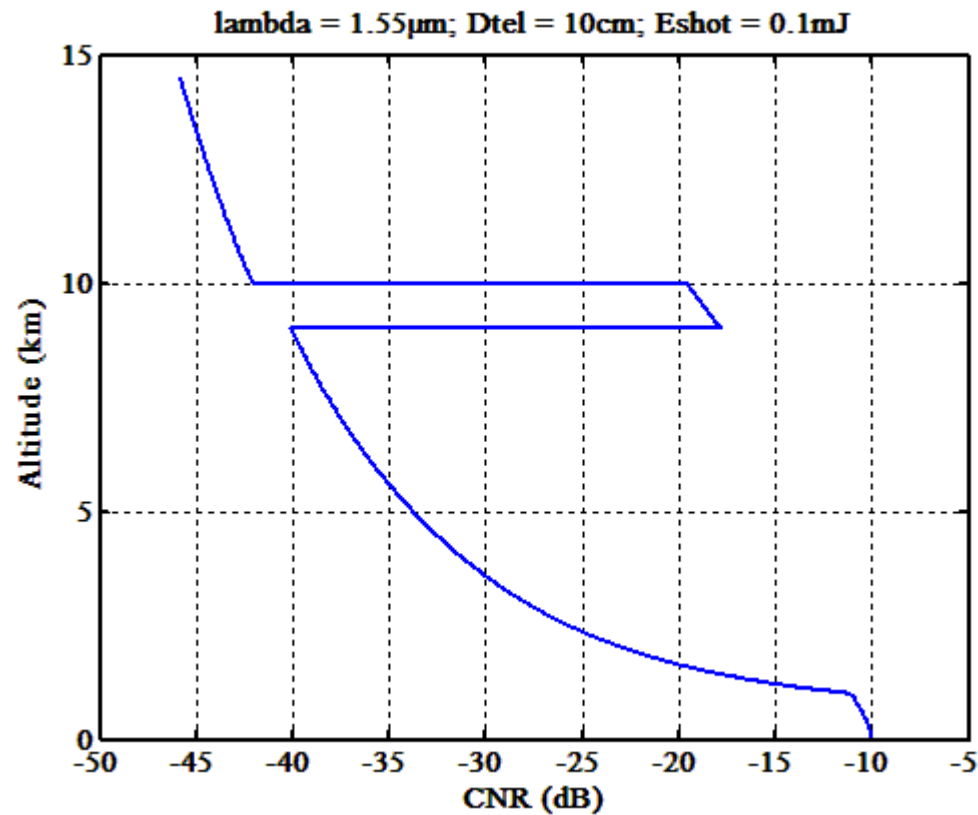
Lidar sol 2 μm

- $E = 10 \text{ mJ} / 10\text{Hz}$ (0,1 W), $\Delta\nu_L = 3\text{MHz}$, $D_{\text{Tel}} = 10 \text{ cm}$, $\eta_H = 0,1$
- $\Delta R = 100 \text{ m}$, visée 45° , $N_{\text{tir}} = 30$ (3s)



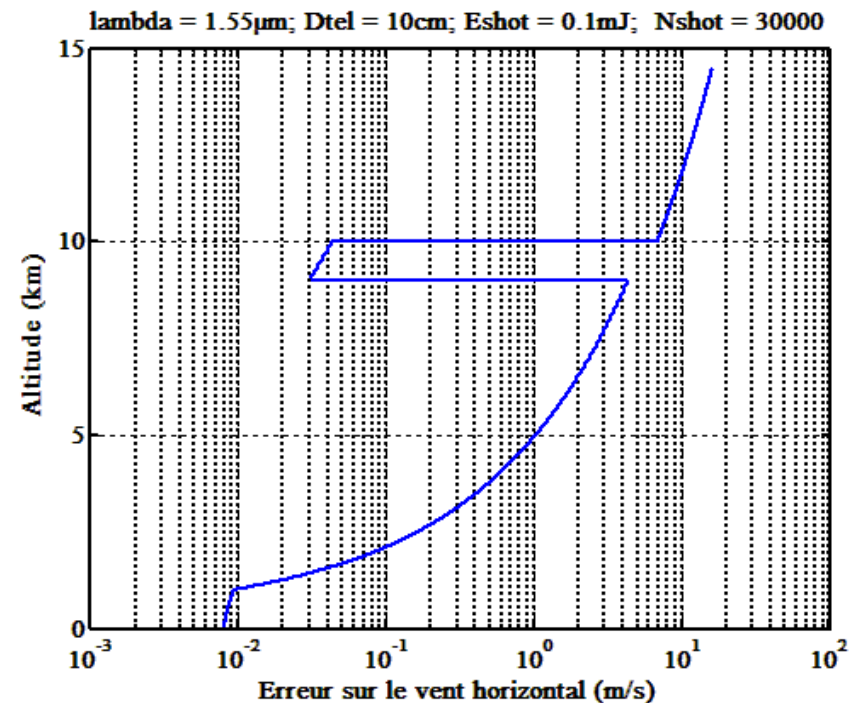
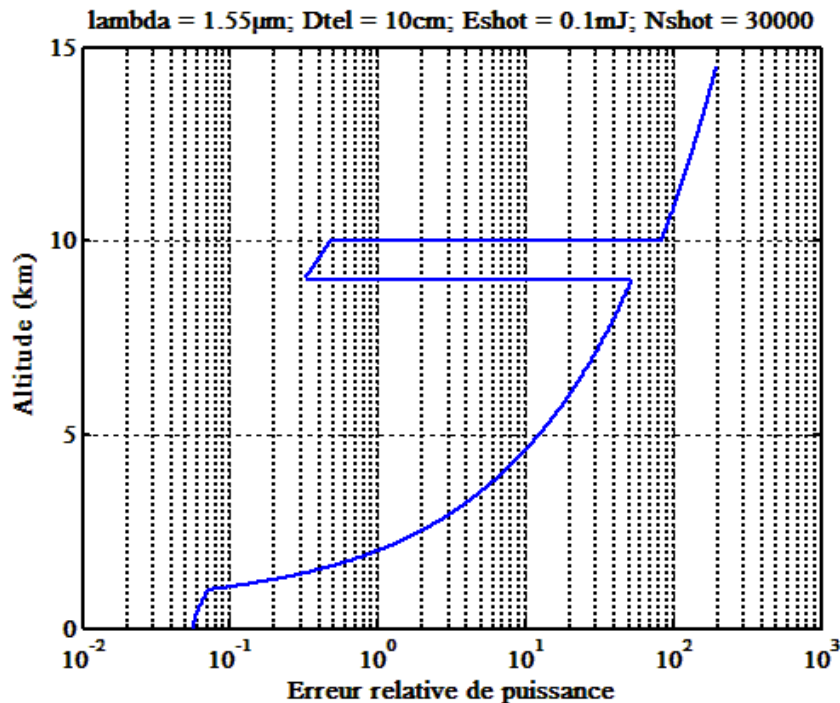
Lidar sol 1,5 μm

- $E = 0,1 \text{ mJ} / 10 \text{ kHz} (1 \text{ W}), \Delta\nu_L = 2\text{MHz}, D_{\text{Tel}} 10 \text{ cm}, \eta_H = 0,1$

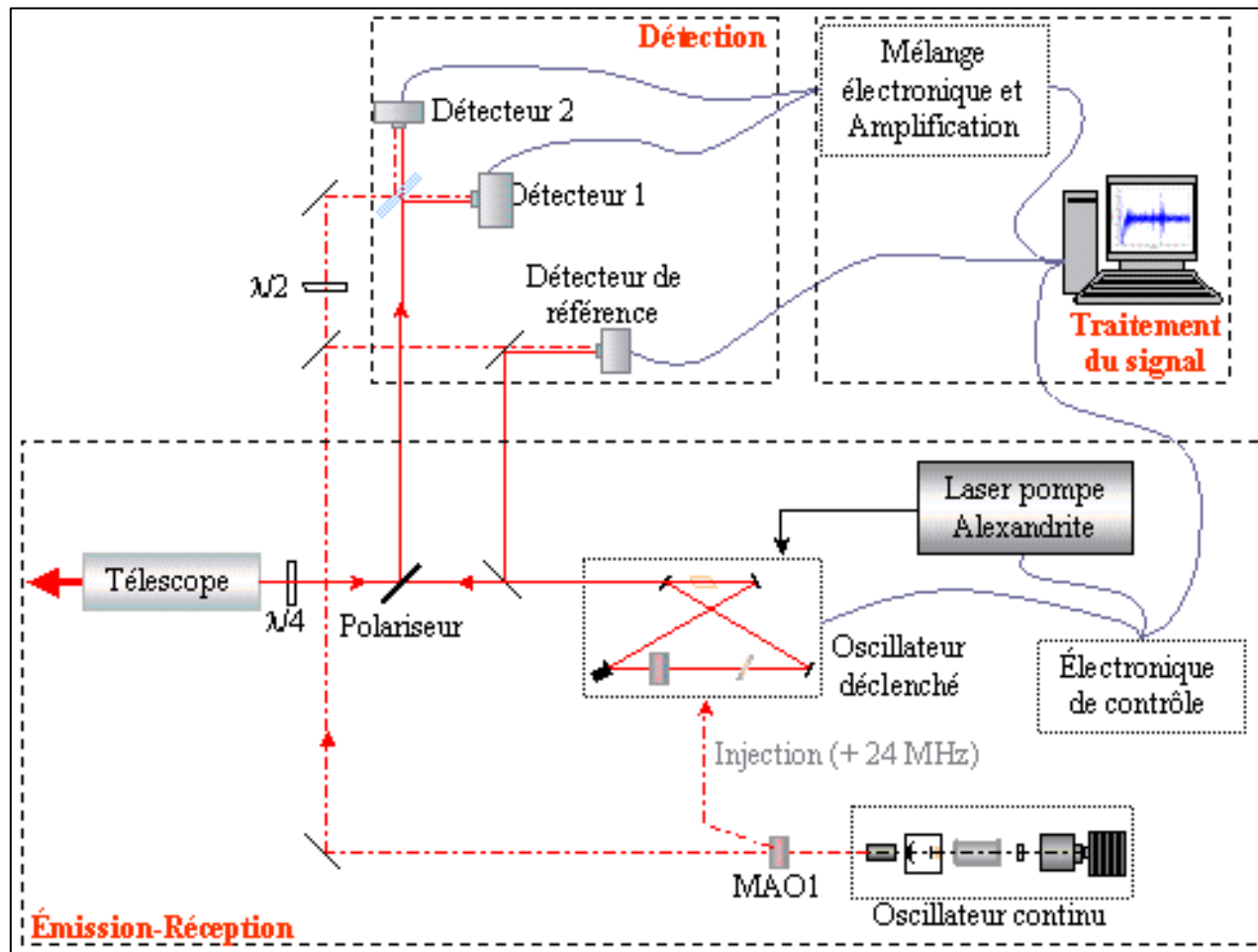


Lidar sol 1,5 μm

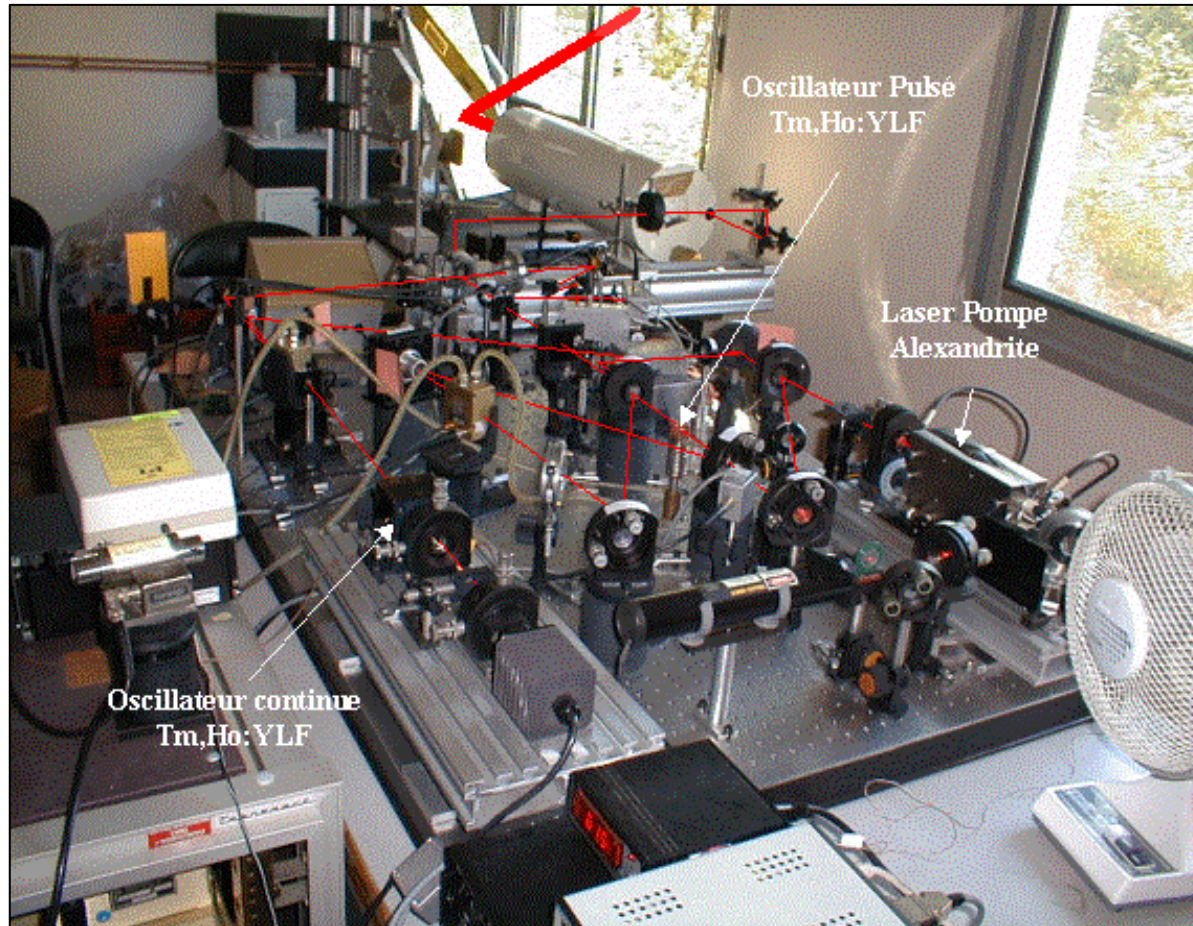
- $E = 0,1 \text{ mJ} / 10 \text{ kHz} (1 \text{ W}), \Delta v_L = 2\text{MHz}, D_{\text{Tel}} 10 \text{ cm}, \eta_H = 0,1$
- $\Delta R = 100 \text{ m}, \text{visée } 15^\circ, N_{\text{tir}} = 30000 (3\text{s})$



Montage expérimental à 2 μm

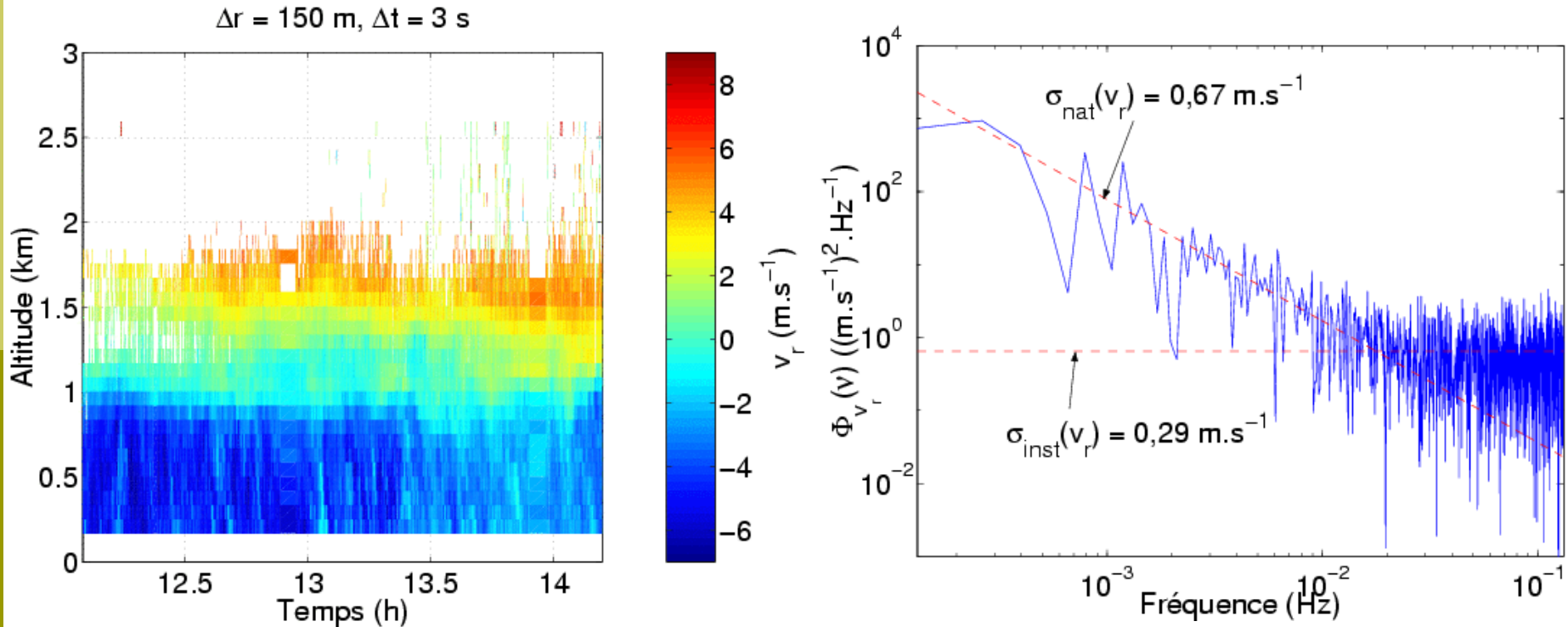


Montage expérimental à 2 μm



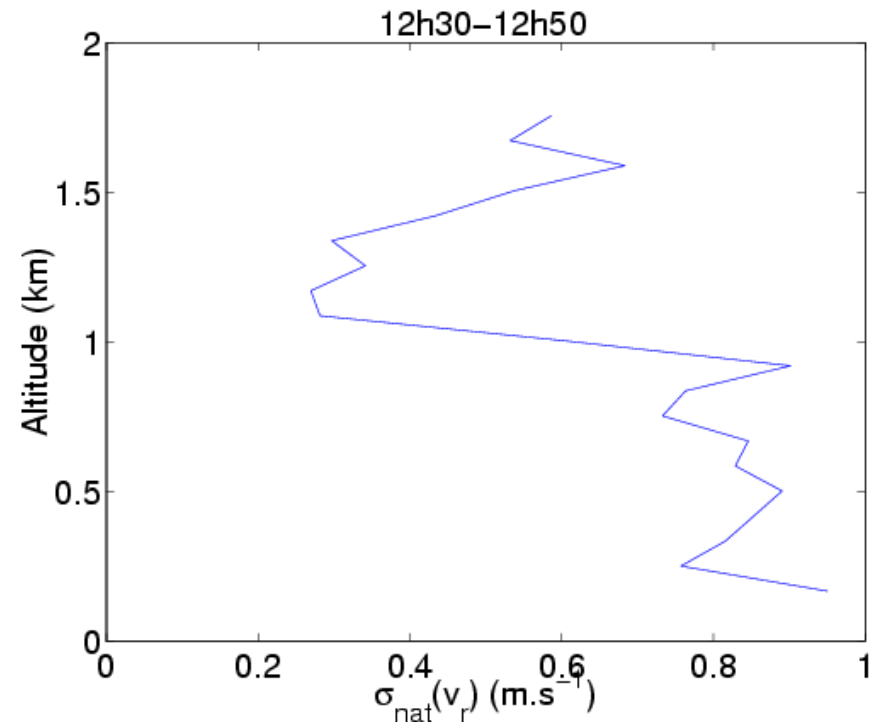
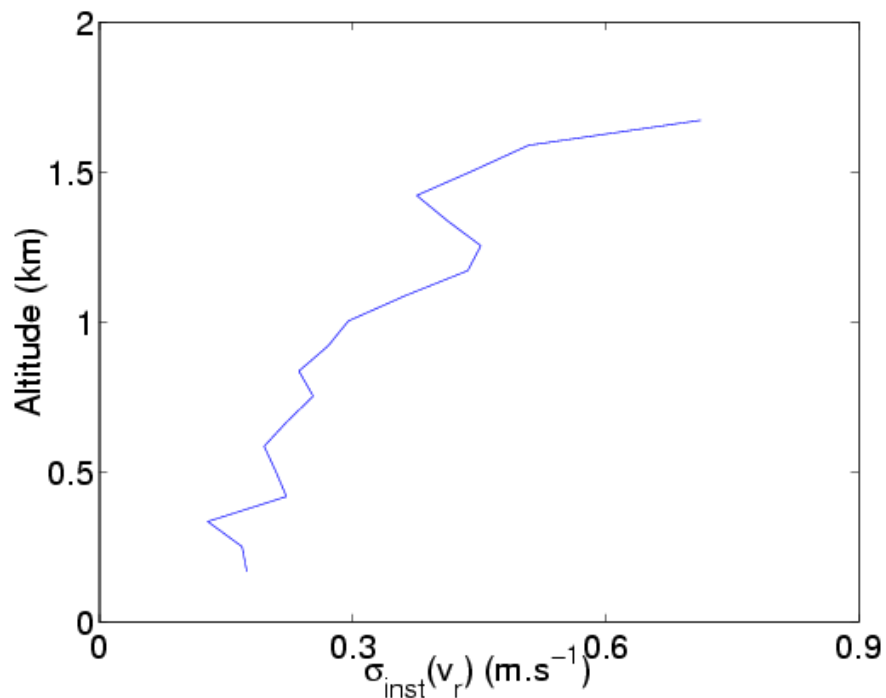
Analyse de performances

Mesures de vent



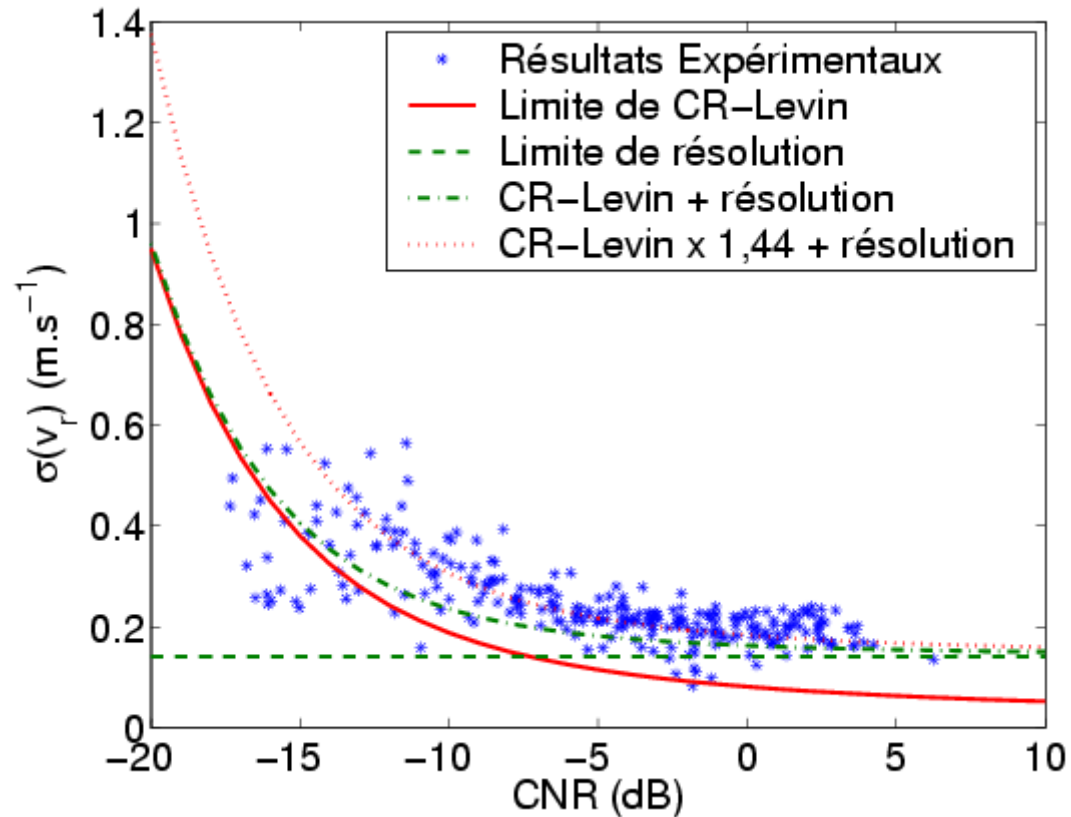
Analyse de performances

Mesures de vent



Analyse de performances

Mesures de vent



Conclusion

□ Détection directe

- mesure de puissance
- optique (laser et télescope) peu critique
- performances détecteurs critiques
- domaine UV-visible-proche IR
- sécurité oculaire critique (sauf UV)

□ Détection hétérodyne

- mesure de fréquence (puissance moins précise)
- qualité optique (laser et télescope) très critique
- performances détecteurs peu critiques
- domaine IR
- sécurité oculaire généralement assurée