



Récents développements en lidar cohérent

Ecole d'été lidar

Juin 2010

Claudine Besson, Agnès Dolfi-Bouteyre, Julien Totems,
Guillaume Canat, Véronique Jolivet, Matthieu Valla



retour sur innovation

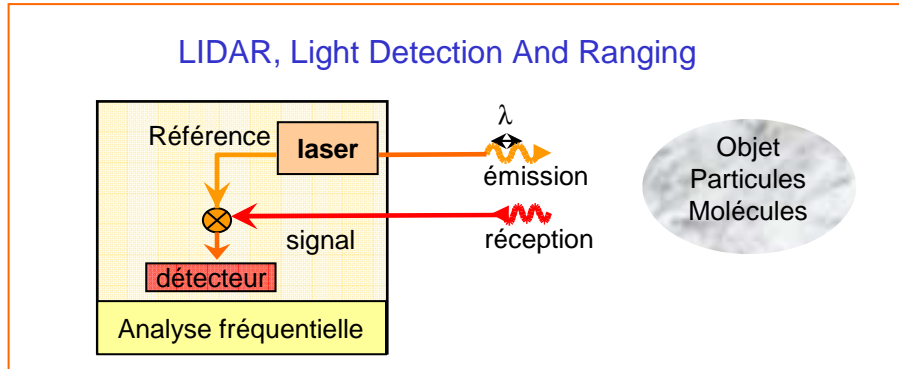
Plan

- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- La vibrométrie laser:
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Plan

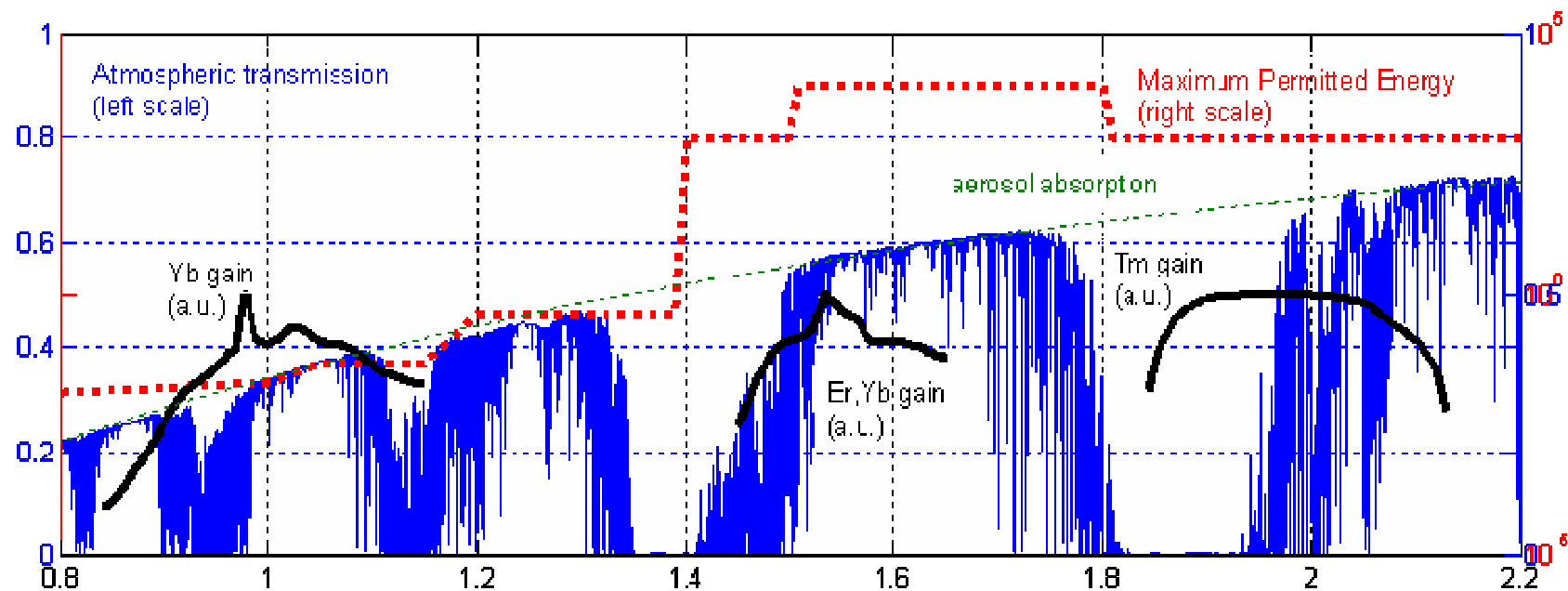
- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- La vibrométrie laser:
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Besoin en source à grande brillance spectrale pour le lidar hétérodyne



- Spécifications:
 - Longueur d'onde à sécurité oculaire ($1,5\mu\text{m}$)
 - Bonne qualité de faisceau
 - Haute énergie ($\sim 1000 \mu\text{J}$), haute puissance crête (1kW)
 - Spectre fin (analyse cohérente)
- La technologie fibrée possède des avantages:
 - Composants issus des développements du secteur des télécommunications
 - Robustesse (tests lidar en vol dès 2003, DALHEC)

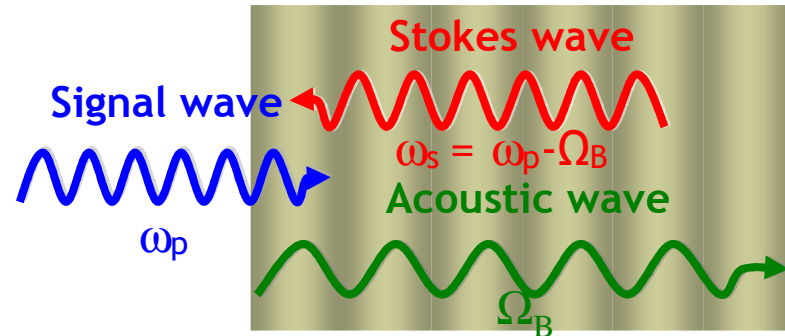
Intérêt des sources fibrées



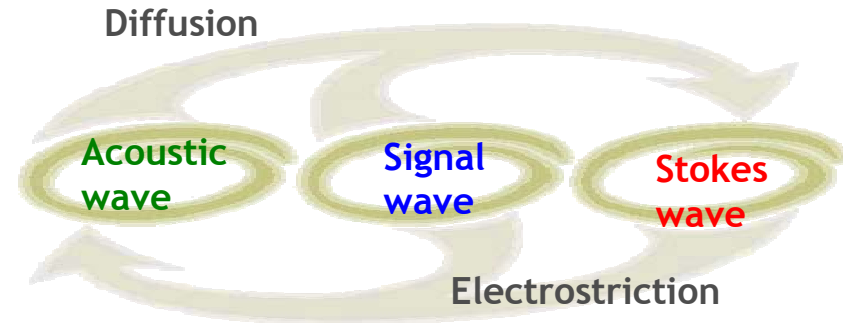
Intérêt des sources fibrées

	Points positifs	Points critiques
Portées élevées (jusqu'à quelques dizaines de km)	Bonne qualité de faisceau même à P_{MOY} élevée (dissipation thermique efficace)	P_{CRETE} très limitée nécessitant des structures spéciales
Compacité et applications embarquées sur porteur avion ou satellite	Bon rendement (80% Yb; 30-50% Er:Yb)	Etendue géométrique limitée pour coupler la pompe. Dopage Er:Yb délicat en raison de la présence de P (indice élevé)
Formes complexes (modulation d'amplitude ou de phase, agilité...)	Intégration monolithique des fonctions ("tout fibré")	
Agilité spectrale (accordabilité en λ , finesse de raie)	Grâce à l'architecture oscillateur maître amplifié (MOPFA)	

Diffusion Brillouin Stimulée dans les fibres optiques

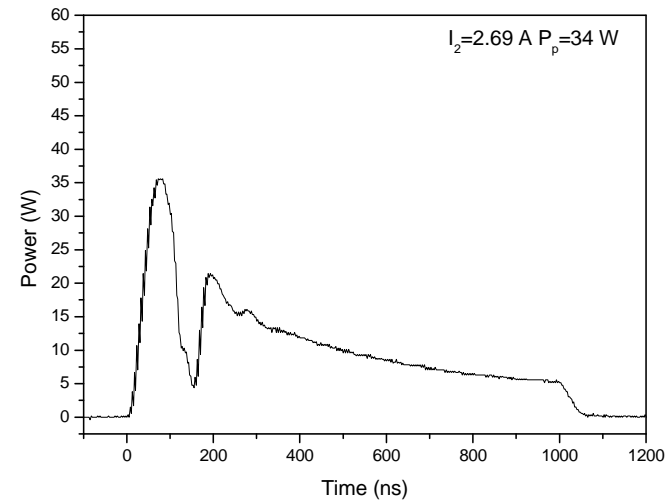


$$I = \frac{P}{A_{eff}} \text{ élevée}$$



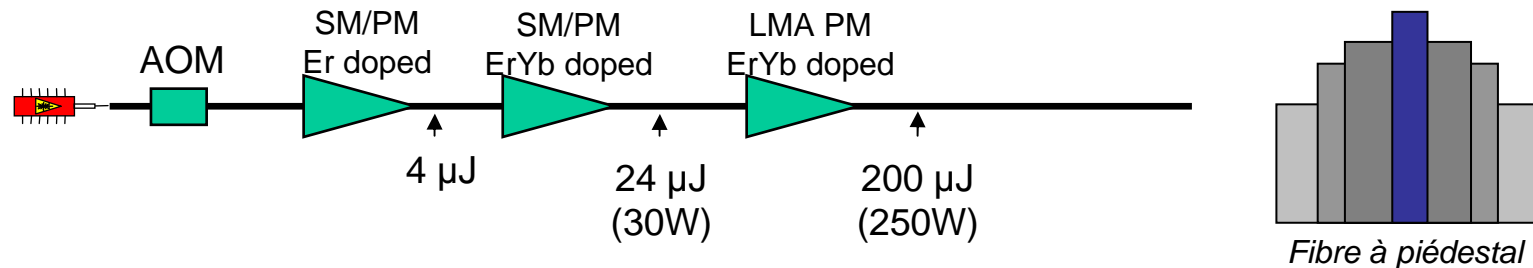
$$P_{seuil} \approx 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$

Modélisation de l'effet Brillouin dans les fibres:
 Évolution de la forme d'impulsion au fur et à mesure que la puissance crête croît

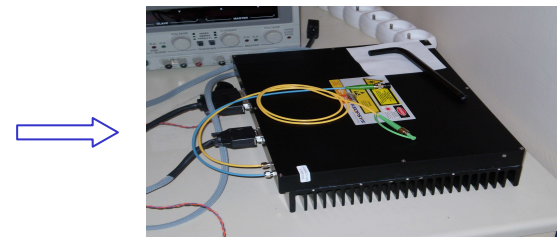


Sources à grande brillance spectrale

Développement de chaînes MOPA fibrées = sources pour les applications LIDAR



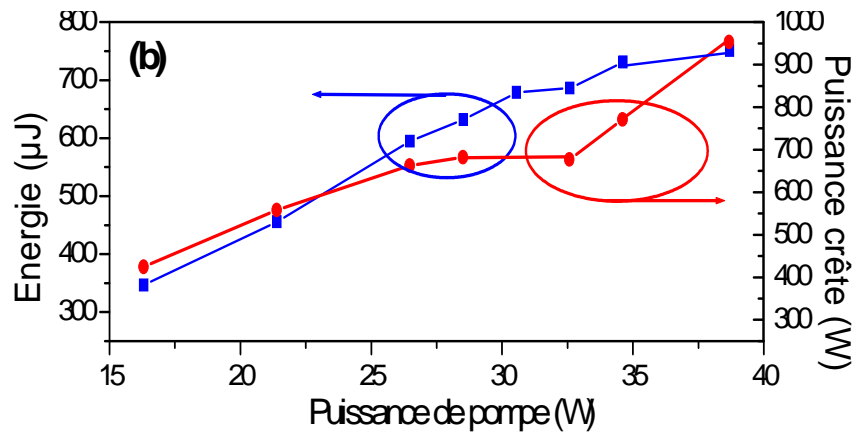
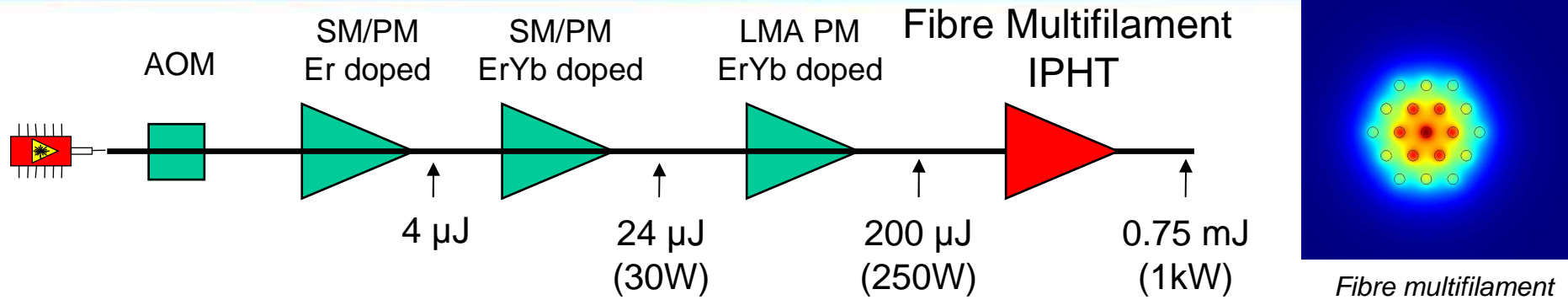
Energie:	100 μ J
Durée d'impulsion:	800 ns
PRF:	12 kHz



Sources CREDOS, FIDELIO, Windcube 200S

M.Valla « Etude d'un lidar Doppler impulsif à laser Erbium fibré pour des mesures de champ de vent dans la couche limite de l'atmosphère », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (2005)

Sources à grande brillance spectrale: résultats avec fibres « multifilament »



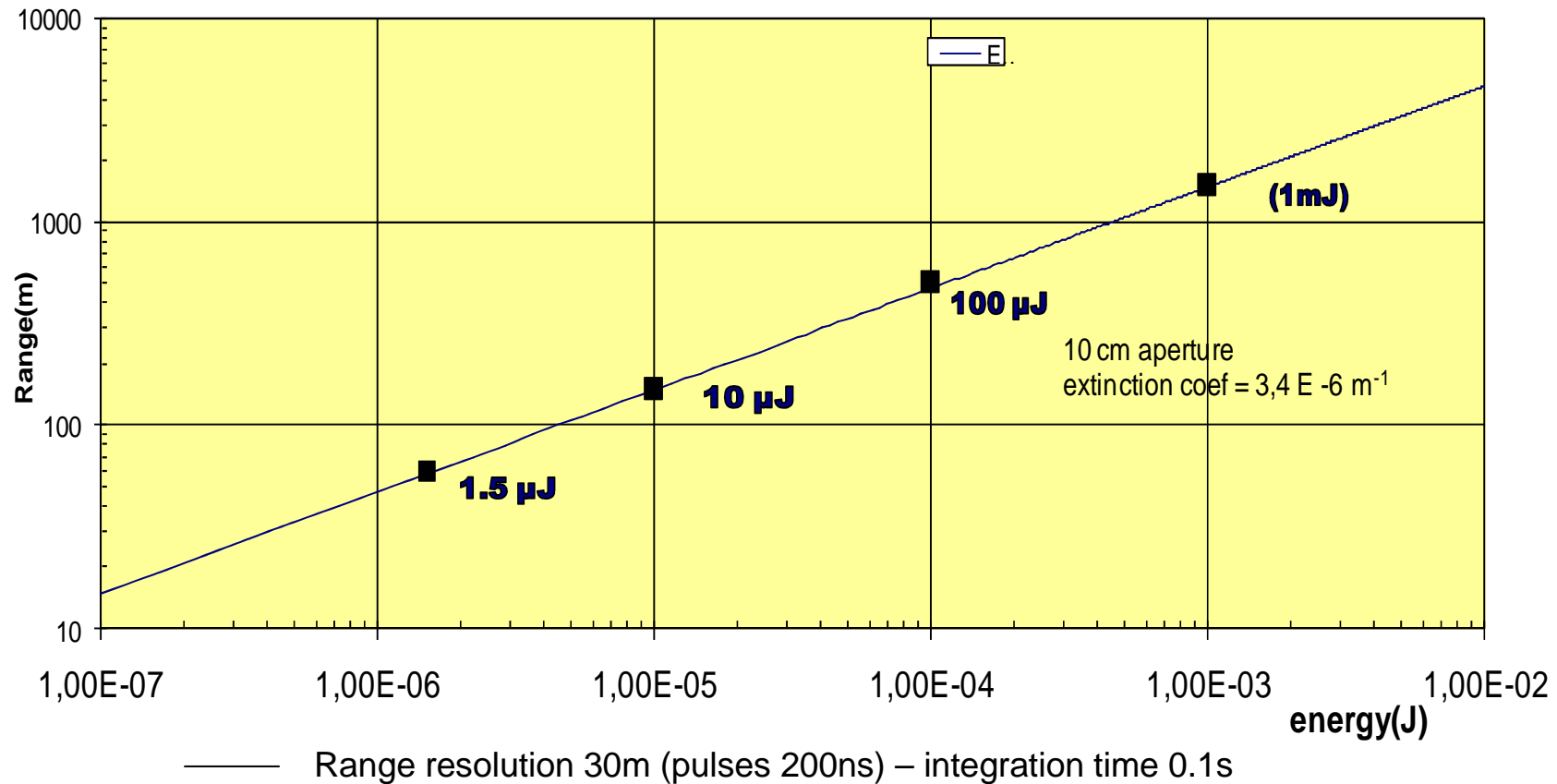
Résultats

- Haute stabilité
- $M^2=1.3$
- Puissance crête record (1kW)

G. Canat, S. Jetschke, S. Unger, L. Lombard, P. Bourdon, J. Kirchhof, V. Jolivet, A. Dolfi, and O. Vasseur, "Multifilament-core fibers for high energy pulse amplification at 1.5 μm with excellent beam quality," Opt. Lett. 33, 2701-2703 (2008)

Evolution de la portée du lidar impulsif (cartographie du vent)

1.5 μm pulsed Lidar range as a function of laser energy



A.Dolfi-Bouteyre, G.Canat, M.Valla, B.Augère, C.Besson, D.Goular, L.Lombard, J.P.Cariou, A.Durecu, D.Fleury, S.Broumiche, S.Lugan, B.Macq: "Pulsed 1.5 micron lidar for axial aircraft wake vortex detection based on high brightness large core fiber amplifier – J. Select. Tops. 15, P. 441 (2009)

Plan

- **Les nouvelles sources laser**
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - **Exploitation des non-linéarités des fibres dopées**
- Interêt de la technologie fibrée: exemple
- La vibrométrie laser:
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

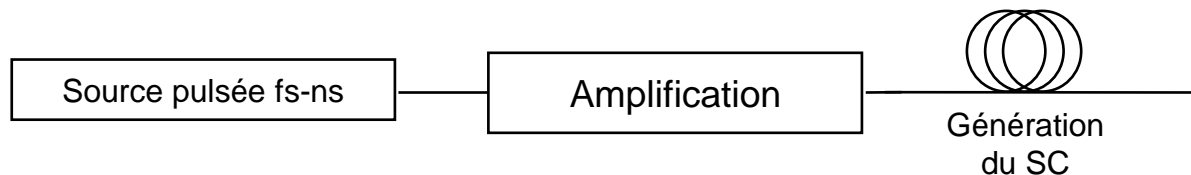
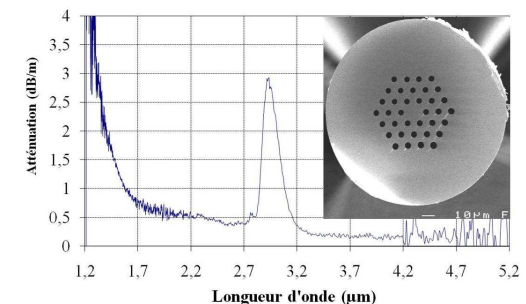
exploitation des non linéarités des fibres dopées (1/3)

- Aller dans l'IR moyen = disposer de matériaux transparents dans cette bande, savoir fabriquer des fibres (dopées) à partir de ces matériaux, connaître leurs caractéristiques physiques intrinsèques
→ comment fabriquer des matériaux transparents efficaces ?
- les sources puissantes disponibles sont en bande I

Exploitation des effets NL dans les fibres spéciales:

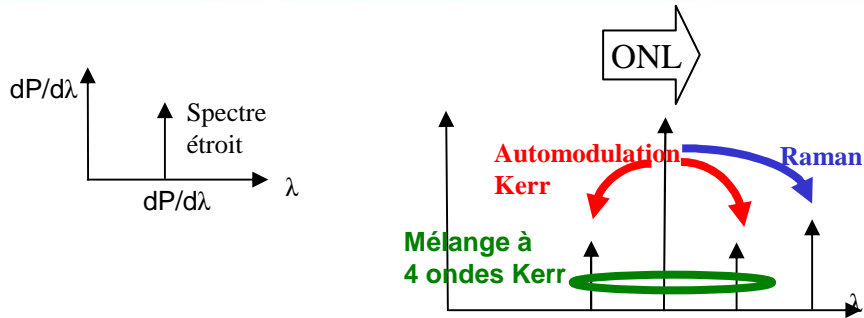
- sources fibrées en bande II dans les verres chalcogénures, verres fluorés, oxydes lourds
- amplification paramétrique dans les fibres infrarouges
- sources fibrées de forte puissance crête à 2 μm
- sources fibrées supercontinuum en bande II

Fibre microstructurée

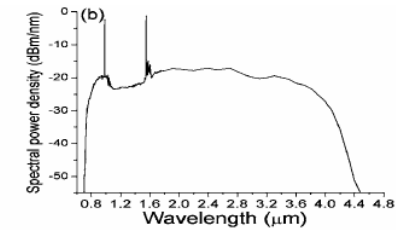


Non linéarités des fibres dopées (2/3)

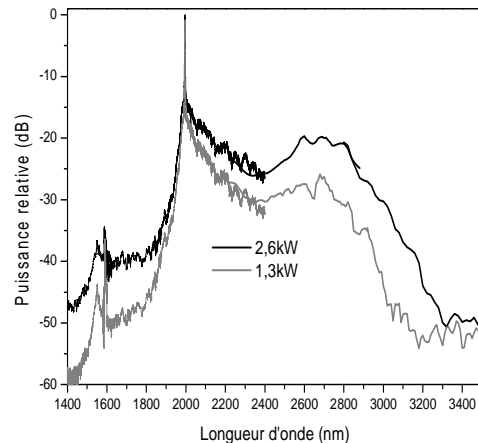
Laser superK dans l'IR moyen



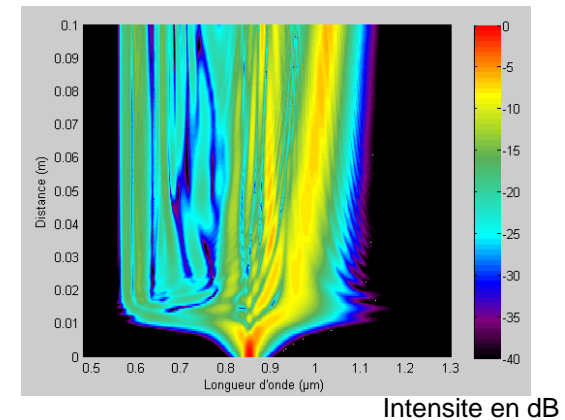
Continuum de lumière
« blanche »



Impulsion « fine spectralement » à une longueur d'onde adéquate (régime de dispersion anormale) → élargissement sous l'effet des non linéarités



En bande 3-5 μm:
le ZBLAN (verre fluoré) est transparent jusqu'à 5 μm

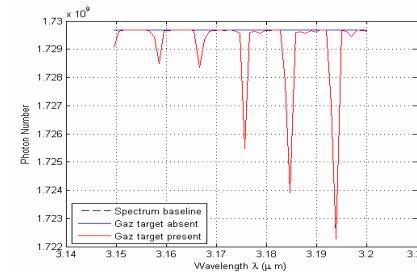
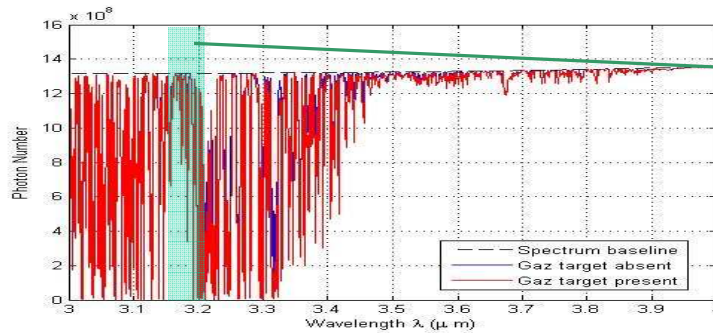


Modélisation de l'évolution spatiale du spectre d'émission

Modélisation de l'émission obtenue avec une fibre ZBLAN
Duhant et Al. soumis à JNOG 2010

Non linéarités des fibres dopées (3/3)

Lidar à source superK

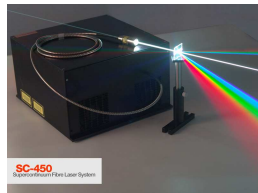
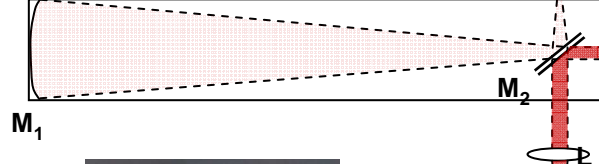


Zoom sur 3.15-3.20 μm: avec et sans gaz

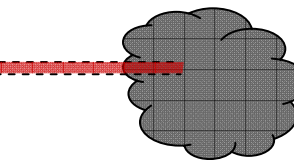
Analyseur de spectre optique + détecteur



Télescope de réception



Source laser à supercontinuum



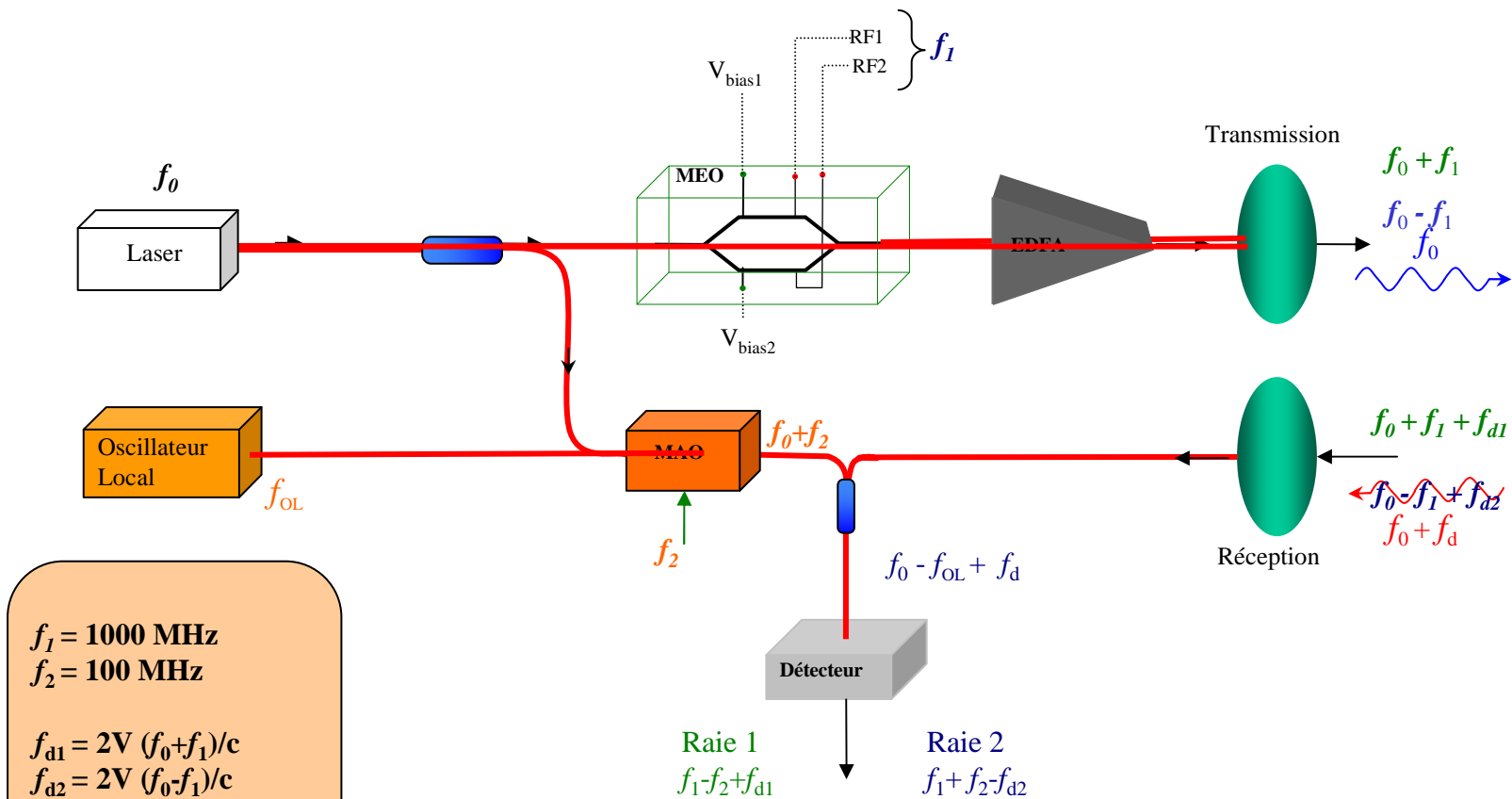
Mélange de gaz à détecter

J. Troles, Q Coulombier, M. Duhant, G. Canat, P. Toupin, L. Calvez, G. Renversez, F. Smektala, Jean Luc Adam, D. Mechin, L. Brilland., "Low loss microstructured chalcogenide fibers for large non linear effects", en preparation pour Opt. Expr. Special issue on chalcogenide glasses (2011)

Plan

- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- **Interêt de la technologie fibrée: exemple**
- La vibrométrie laser:
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Lidar-radar: lidar bifréquence



$f_1 = 1000 \text{ MHz}$
 $f_2 = 100 \text{ MHz}$
 $f_{d1} = 2V (f_0 + f_1)/c$
 $f_{d2} = 2V (f_0 - f_1)/c$
Vr: Vitesse radiale de la cible

Principe lidar bifréquence:

Émission: modulation en hyper d'une onde laser pour générer 2 raies proches qui portent le même bruit de phase

Réception: mélange hétérodyne, séparation des deux signaux par filtrage hyperfréquence, démodulations I/Q en bande de base, corrélateur complexe

$$900 \text{ MHz} + f_{d1} \quad 1100 \text{ MHz} - f_{d2}$$

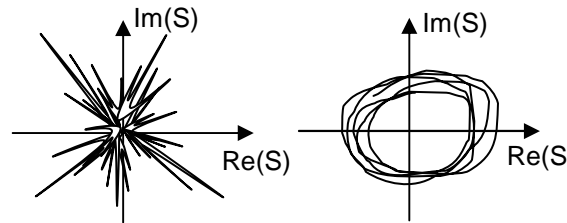
$$\frac{2V_r}{\lambda}$$

Lidar-radar: lidar bifréquence

$$S = \langle S_1 \cdot S_2^* \rangle \propto s(t) \cdot \exp(2\pi j(f_{d1} - f_{d2})t) \quad f_{d1} - f_{d2} = \frac{-4V_r f_1}{c}$$

Extraction de la phase:

$$\varphi = 2\pi(2f_1)2\frac{V_r}{c}t$$



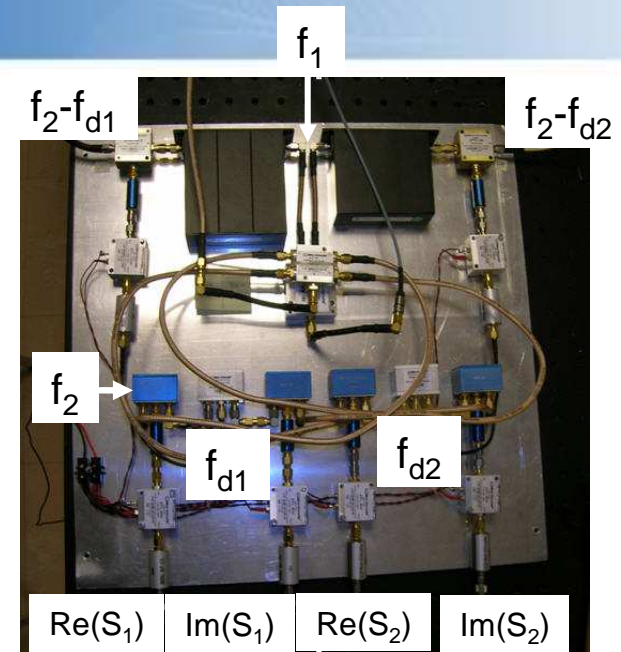
L'estimation sur la vitesse s'exprime par:

$$V_r = \frac{c}{8\pi f_1} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

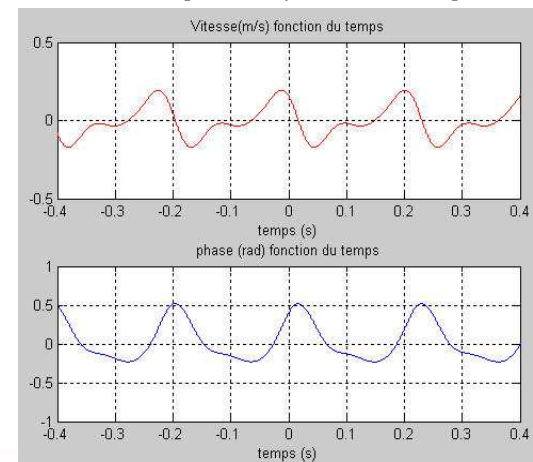
Intérêts:

- Élimination de bruits corrélés
- Effet Brillouin repoussé
- Insensibilité aux fumées ou aérosols
- Possibilité de mesure **Télémétrie-Doppler**

→ L'architectures de type radar transposées au lidar permet des fonctionnalités nouvelles (ex. Télémétrie-Doppler)



Vitesse et phase en fonction du temps

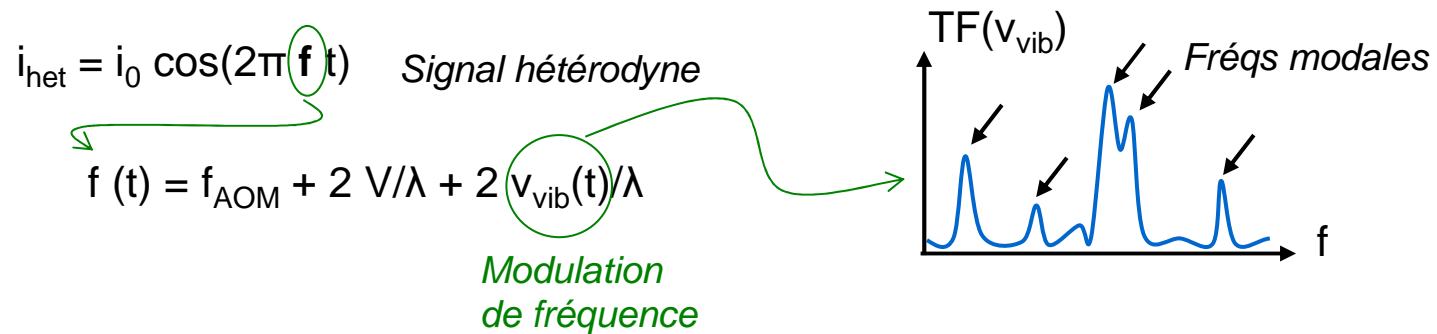
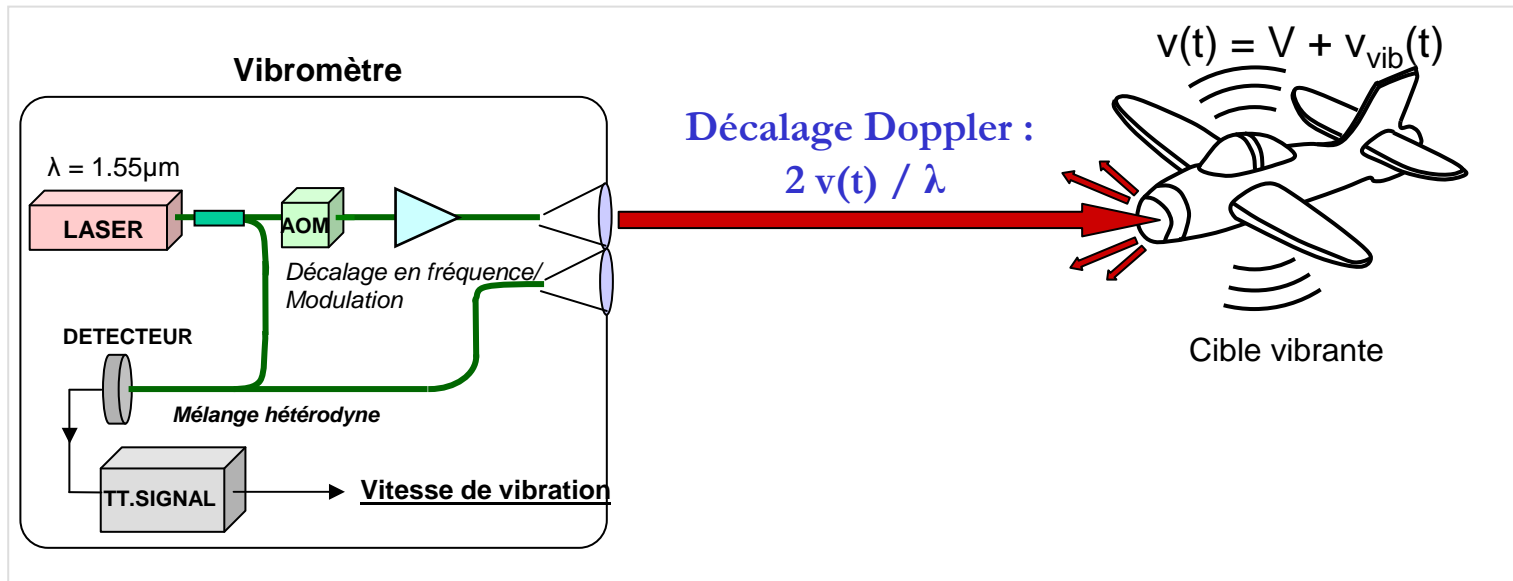


Plan

- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- **La vibrométrie laser:**
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Principe (1/3)

- Rappel du principe



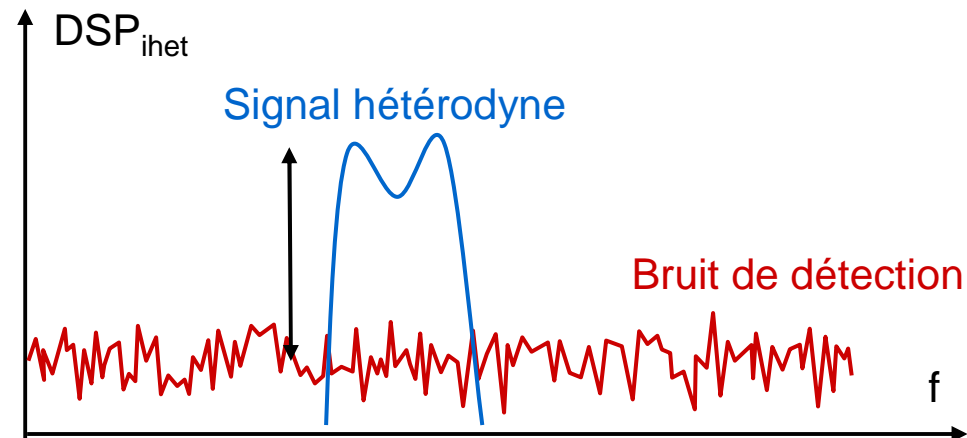
Principe (2/3)

- Définitions

Rapport porteuse à bruit :

$$\text{CNR} = \frac{P_{\text{signal hétérodyne}}}{P_{\text{bruit de détection}}}$$

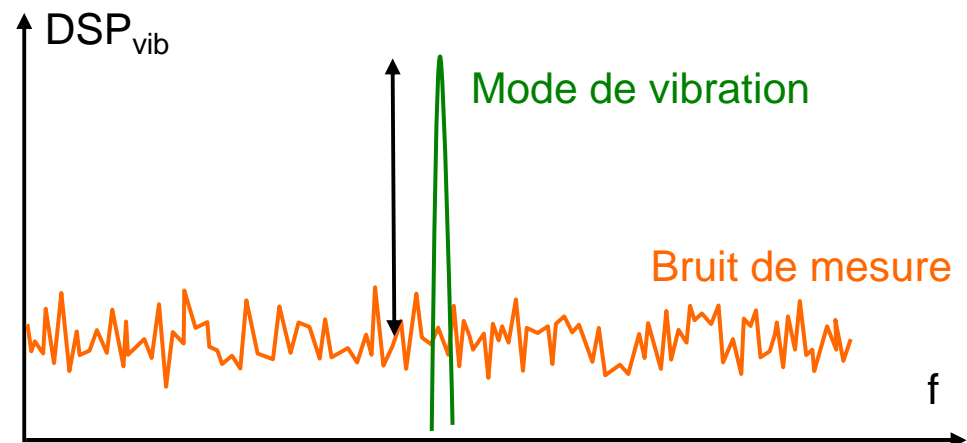
Carrier to Noise Ratio
Force signal reçu (avant démodulation)



Rapport signal à bruit (sur vibration) :

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{vibration}}}{P_{\text{bruit mesure}}}$$

Signal to Noise Ratio
Qualité signal démodulé (après démodulation)



Principe (3/3)

$$i_{het} = i_0 \cdot M(t) \cos(2\pi f_{MAO}t - 2\pi f_{dop}t + \Phi_{distance}(t) + \Phi_{vib}(t) + \Phi_b(t)) + i_b(t)$$

- Modèle gaussien (OL, signal)
- Troncature limitée ($R_{pup} = \sqrt{2} \cdot \sigma_L$)
- En faisceau collimaté
- Pupille emission=pupille réception
- Ondes Signal et OL identiques sur les pupilles emission et reception

$$\langle i_{het}^2 \rangle = 4S^2 T_{atmAR} \rho T_{ins} \cdot P_s P_{ol} \cdot \pi \frac{\sigma_L^2}{Z^2} \cdot \eta_{het}$$

$$\eta_{het} = \eta_{turb} \cdot \eta_{speckle} \cdot \eta_{polar}$$

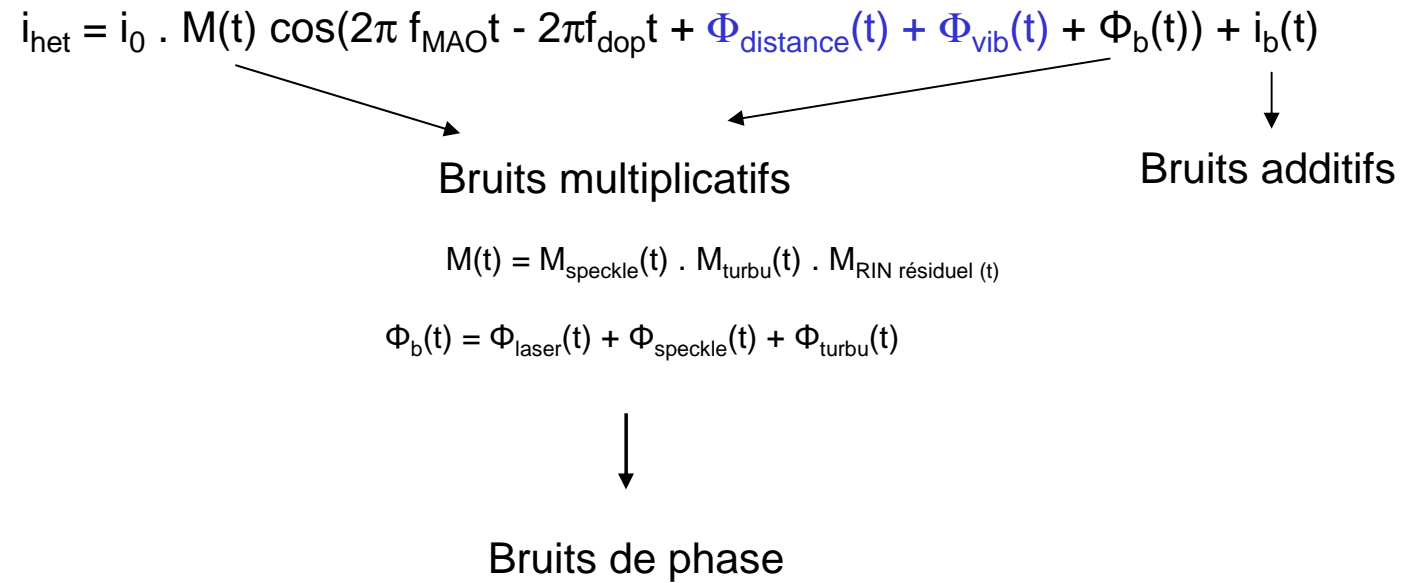
$$\eta_{turb} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_L^2}{S_o^2(Z)} + \frac{k^2 \sigma_L^4}{4Z^2}}$$

So(Z): longueur de cohérence transverse
après propagation turbulente sur une distance Z
 σ_L : rayon gaussien à 1/e²

$$\frac{1}{2} \leq \eta_{polar} \leq 1$$

$$\eta_{speckle} \approx \frac{1}{2}$$

Bruits (1/5)



Les bruits additifs (2/5)

Bruits électroniques:

$$\langle i_{b,elec}^2 \rangle = \langle i_{therm}^2 \rangle + \langle i_{amp}^2 \rangle + \langle i_{acq}^2 \rangle = (S.nep)^2 . B + \frac{4k_b T}{R_c} F . B$$

Bruits optiques:

$$\langle i_{b,opt}^2 \rangle = \langle i_{shot}^2 \rangle + \langle i_{RIN}^2 \rangle = 2eSB.P_{ol} + 10^{0,1.RIN} . S^2 . P_{ol}^2 . B$$

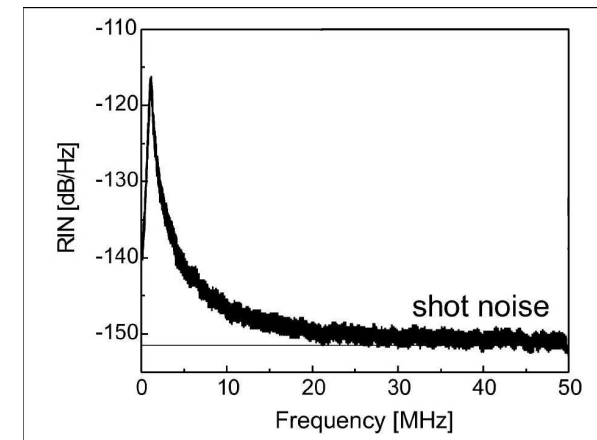


Détection équilibrée

$$\langle i_b^2 \rangle = 2eSB.P_{ol} + (S.nep)^2 . B + \frac{4k_b T}{R_c} F . B + 10^{0,1.RIN} . S^2 . P_{ol}^2 . B$$

$$RIN = \frac{\langle \Delta P^2 \rangle}{\langle P(t) \rangle^2}$$

Spectre de RIN - laser à fibre Er-Yb



Bruit de phase dû au speckle (3/5)

$$i_{het}(t) = I_o(t) \cdot \cos(\omega_{MAO}t - \omega_{doppler}t + \varphi_{vibration}(t) + \varphi_{speckle}(t) + \varphi_{turbulence}(t) + \varphi_{laser}(t))$$

$$f = f_{MAO} + \frac{2V_{Dop}}{\lambda} + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [\varphi_{vibration}(t) + \varphi_{speckle}(t) + \varphi_{turbulence}(t) + \varphi_{laser}(t)]$$



Longueur de cohérence (longitudinal) $L_{spec} = \frac{\lambda Z^2}{r^2}$

Longueur de cohérence (transverse) $D_{spec} = \frac{\lambda Z}{4r^2}$

Z: distance laser-cible
r: rayon tache laser sur la cible
 Ω : vitesse angulaire cible

Évolution temporelle du speckle dû à la rotation:

- Défilement/translation de la figure de speckle
- Évanouissement
- Élargissement Doppler (différentiel entre les diffuseurs)

Application numérique:

$\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

$R_p = 10 \text{ cm}$

$Z = 10 \text{ km}$

$\Omega = 0,01 \text{ rd/s}$

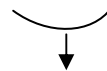
$$B_{trans} = \frac{2 \cdot Z \cdot \Omega}{\lambda Z} \approx 4 \text{ kHz}$$

P.Gatt, T.P.Costello, C.L.Vogt, C.M.Stickley: "Laser radar spectrum of a rotating random surface", Vol. 1936, SPIE (1993)

Bruit de phase dû à la turbulence (4/5)

$$i_{het}(t) = I_o(t) \cdot \cos(\omega_{MAO}t - \omega_{doppler}t + \varphi_{distance}(t) + \varphi_{vibration}(t) + \varphi_{speckle}(t) + \varphi_{turbulence}(t) + \varphi_{laser}(t))$$

$$f = f_{MAO} + \frac{2V_{Dop}}{\lambda} + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [\varphi_{vibration}(t) + \varphi_{speckle}(t) + \varphi_{turbulence}(t) + \varphi_{laser}(t)]$$



Le piston de la turbulence induit une imprécision de mesure de vitesse
Le bruit de phase est coloré et brouille préférentiellement les basses fréquences

Spectre de puissance de la phase turbulente \equiv bruit de vitesse dû au piston

$$S_p(\omega) = \frac{10,9 \cdot Vp^{\frac{5}{3}} \cdot C_n^2 \cdot Z}{\omega^{\frac{2}{3}}}$$

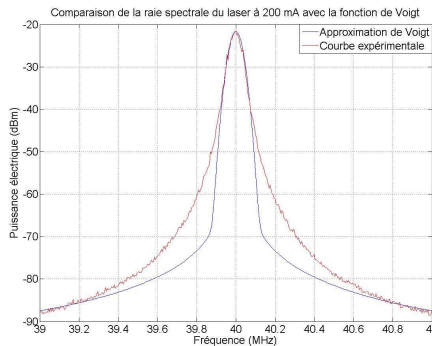
P.Gatt,S.W.Henderson,J.Thomson,D.L.Bruns: « *Micro doppler lidar signals and noise mechanisms: theory and experiment* » Vol. 4035, SPIE (2000).

Bruit de phase du laser (5/5)

$$i_{het}(t) = I_o(t) \cdot \cos(\omega_{MAO}t - \omega_{doppler}t + \varphi_{vibration}(t) + \varphi_{speckle}(t) + \varphi_{turbulence}(t) + \varphi_{laser}(t))$$

$$f = f_{MAO} + \frac{2V_{Dop}}{\lambda} + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [\varphi_{vibration}(t) + \varphi_{speckle}(t) + \varphi_{turbulence}(t) + \varphi_{laser}(t)]$$

Largeur de raie « long terme » :



$$S_E(\omega) \approx \underbrace{M \cdot \frac{\kappa/\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + \kappa^2}}_{\text{Partie Lorentzienne}} + \underbrace{(1 - M) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\sigma^2}\right]}_{\text{Partie Gaussienne}}$$

$$L_{coh} = \frac{c}{\pi \cdot \Delta\nu}$$

Fluctuations de la fréquence laser pendant le temps d'aller-retour (Variance d'Allan) :

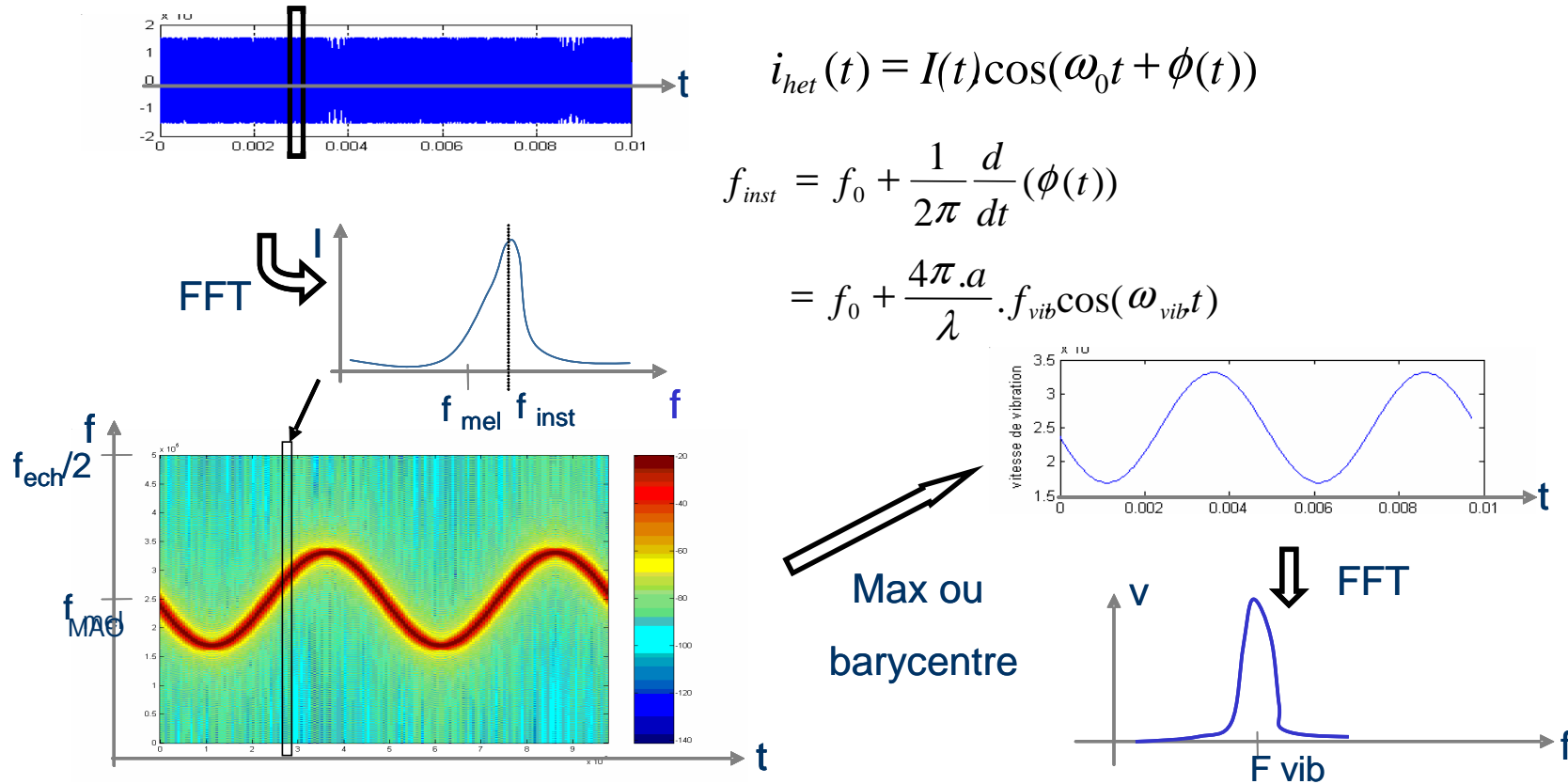
$$\Delta\nu_{eff} < \sigma_{Vvib} < B_m$$

- A. Yariv, P. Yeh, « *Optical electronics in modern communications* », Oxford University Press, USA, Sixth edition (2006)
- M. Harris, G.N. Pearson, J.M. Vaughan, D. Letalick, C. Karlsson, « *The role of laser coherence length in continuous wave coherent laser radar* », J. Mod. Opt., Vol. 45, n°8 (2002)

Plan

- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- **La vibrométrie laser:**
 - Principe de la mesure
 - **Traitement du signal**
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Traitement de signal: le spectrogramme



$$i_{het}(t) = I(t)\cos(\omega_0 t + \phi(t))$$

$$f_{inst} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}(\phi(t))$$

$$= f_0 + \frac{4\pi \cdot a}{\lambda} \cdot f_{vib} \cos(\omega_{vib} t)$$

Démodulation de phase avec le spectrogramme

- Bonne résistance au Doppler « lent » (bulk)
- Temps de calcul modérés
- Adapté quand le bruit de speckle domine

V.Jolivet, « *Etude théorique et expérimentale de la vibrométrie laser à longue distance par lidar cohérent* » Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI

Échantillonnage optimal

Cible à la distance Z, de vibration monofréquence d'amplitude a, de fréquence f_{vib} :

$\Phi_{distance}(t) + \Phi_{vib}(t) = \mu \cdot m(t)$ avec l'indice de modulation: $\mu = \frac{4\pi a}{\lambda}$

Signal modulant: $m(t) = \cos(2\pi \cdot f_{vib} t) + \frac{Z}{a}$

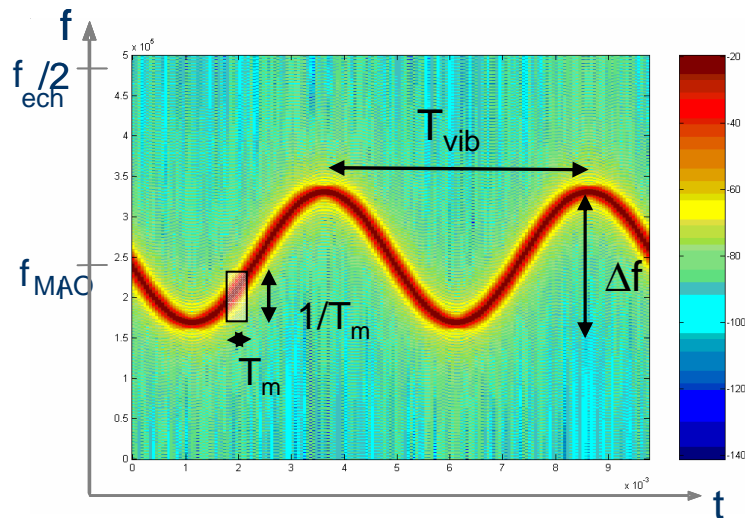
Excursion en fréquence crête: $\Delta f = \mu \cdot f_{vib}$

Loi de Carson: $B_m = 2 (f_{vib} + \Delta f)$

$B_m = 2 f_{vib} (\mu + 1)$

Modulation bande étroite $\mu < 1$

Modulation bande large $\mu > 1$

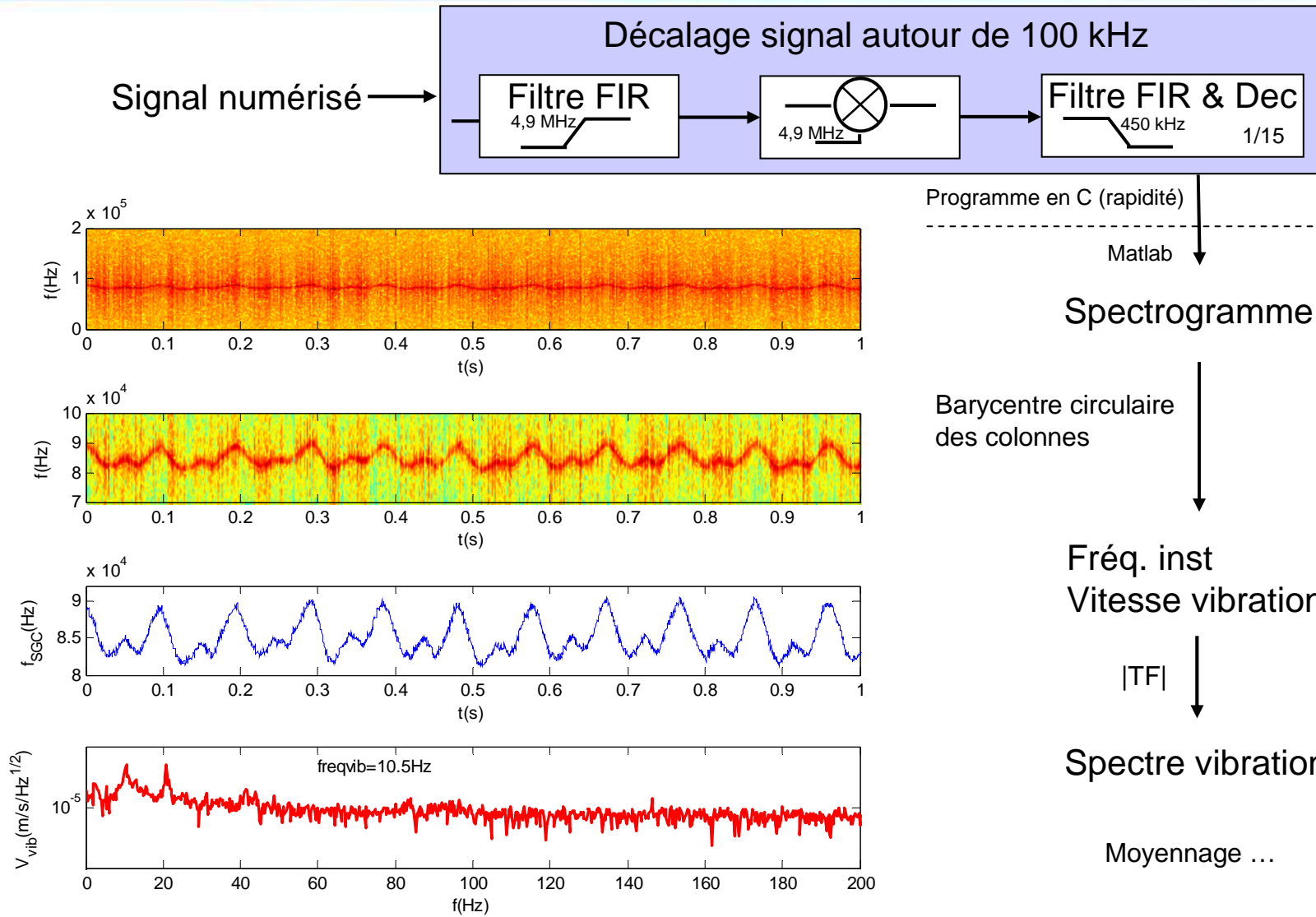


$1/T_m \ll \Delta f$

$T_m \ll T_{vib} = 1/f_{vib}$

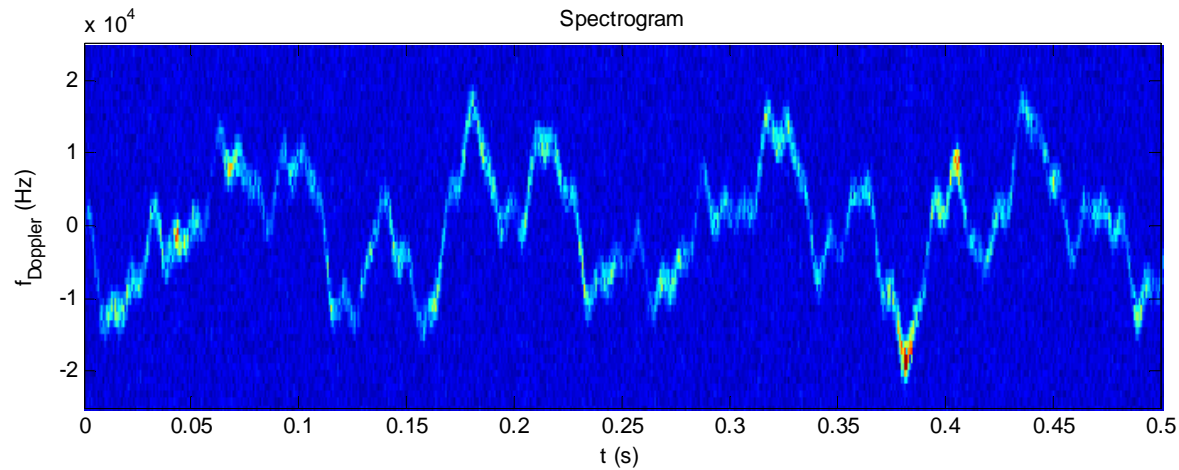
$\frac{1}{\mu \cdot f_{vib}} \ll T_m \ll \frac{1}{f_{vib}}$

Traitement du signal

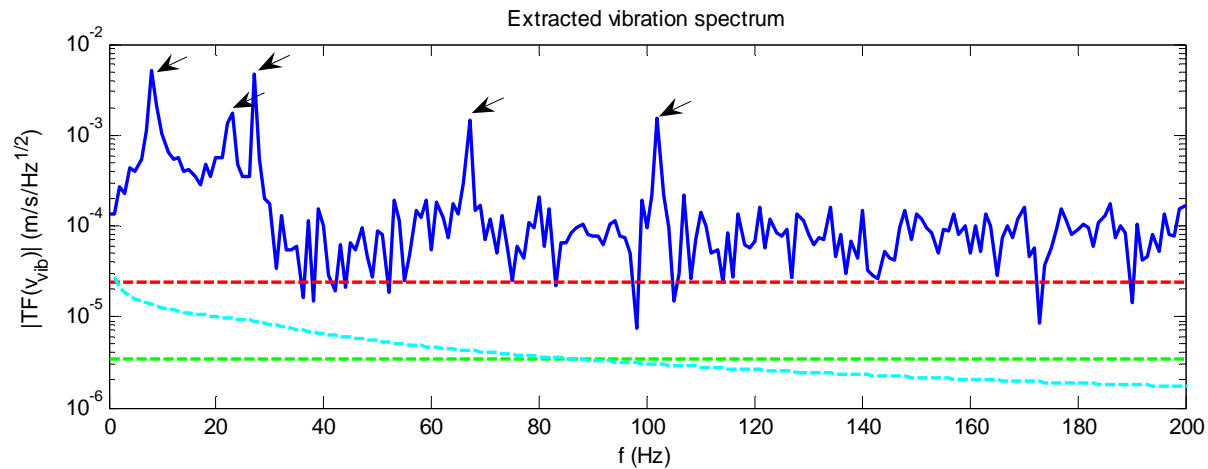


Spectrogramme en bande large $\mu \gg 1$

type ID cible – $B=1\text{MHz}$, 5 modes de vibration

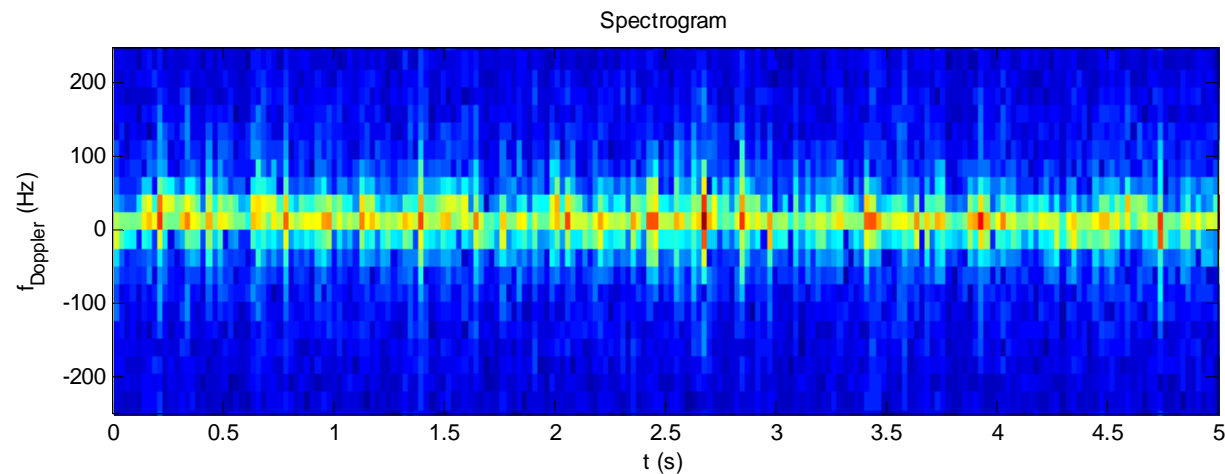


$Z = 10\text{km}$
 $\text{CNR} = 0\text{dB}$
 $\text{Cn}2 = 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$
 $B_{\text{speckle}} = 4\text{kHz}$



Spectrogramme en bande étroite $\mu < 1$

Type sismologie – $B=100$ kHz, 5 modes de vibration

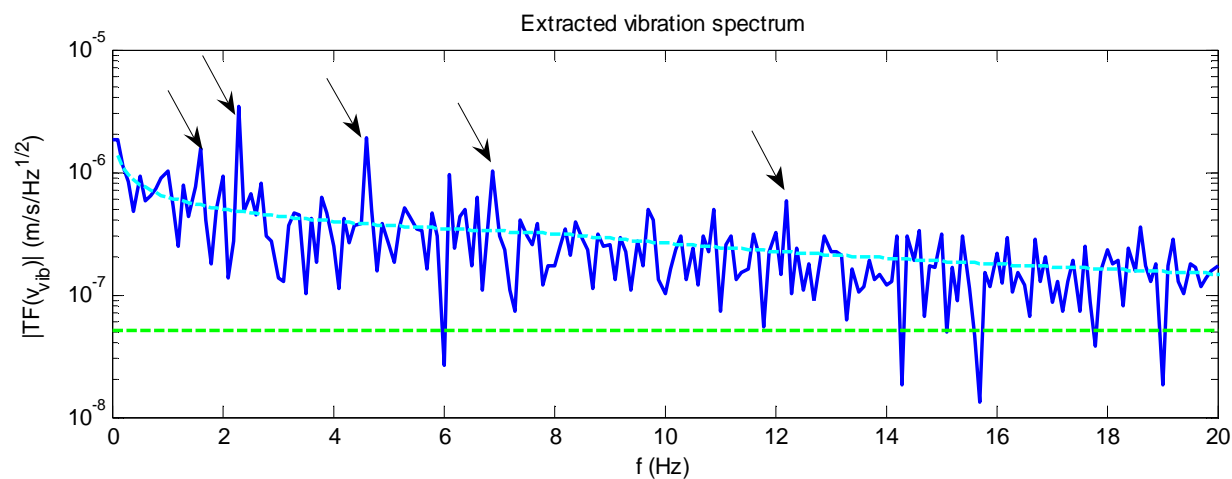


$Z = 2$ km

$CNR = 10$ dB

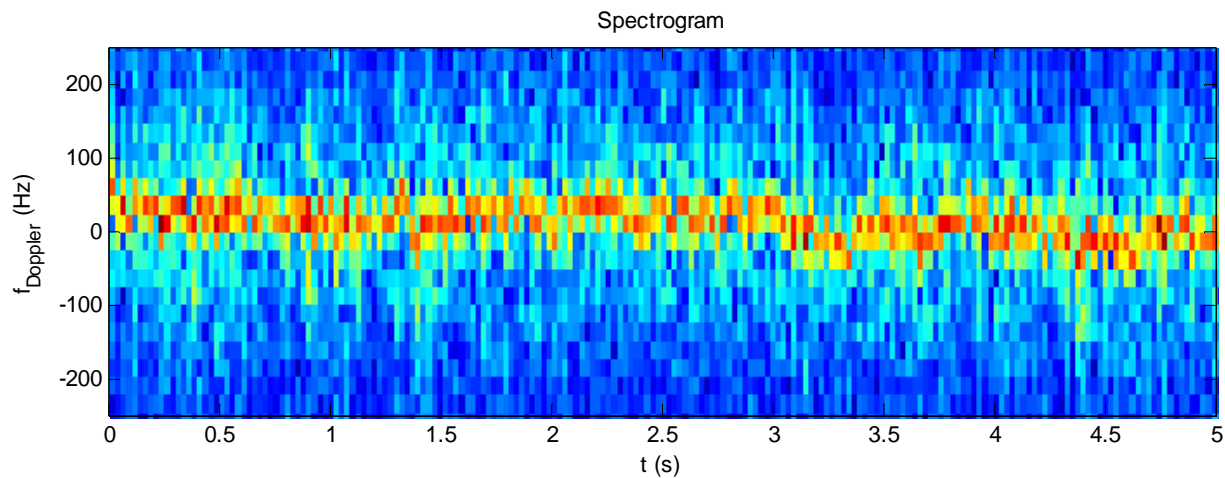
$Cn2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

$V_p = 3$ m/s

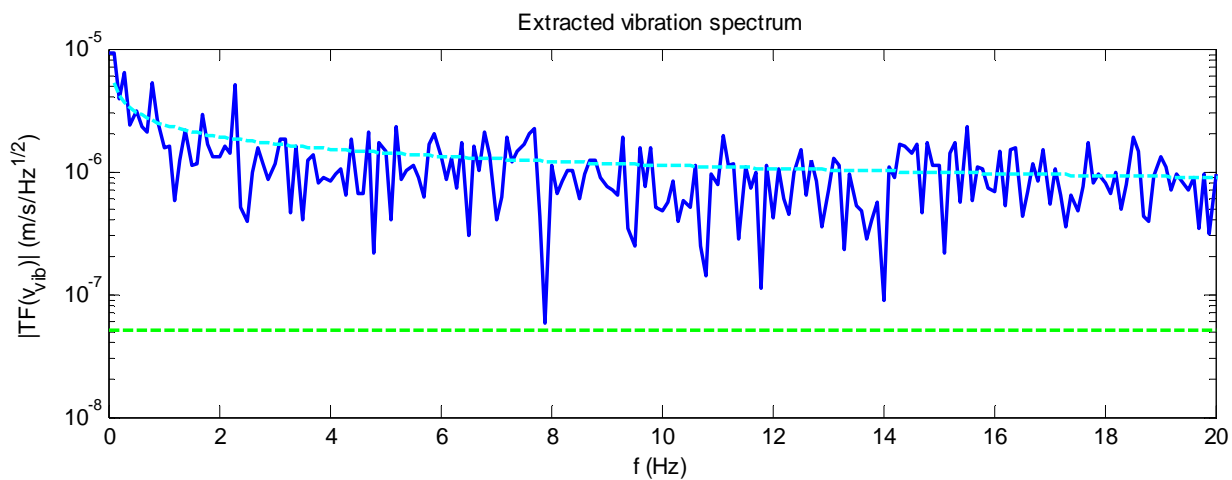


Spectrogramme en bande étroite $\mu < 1$

Type sismologie– B=100 kHz, 5 modes de vibration



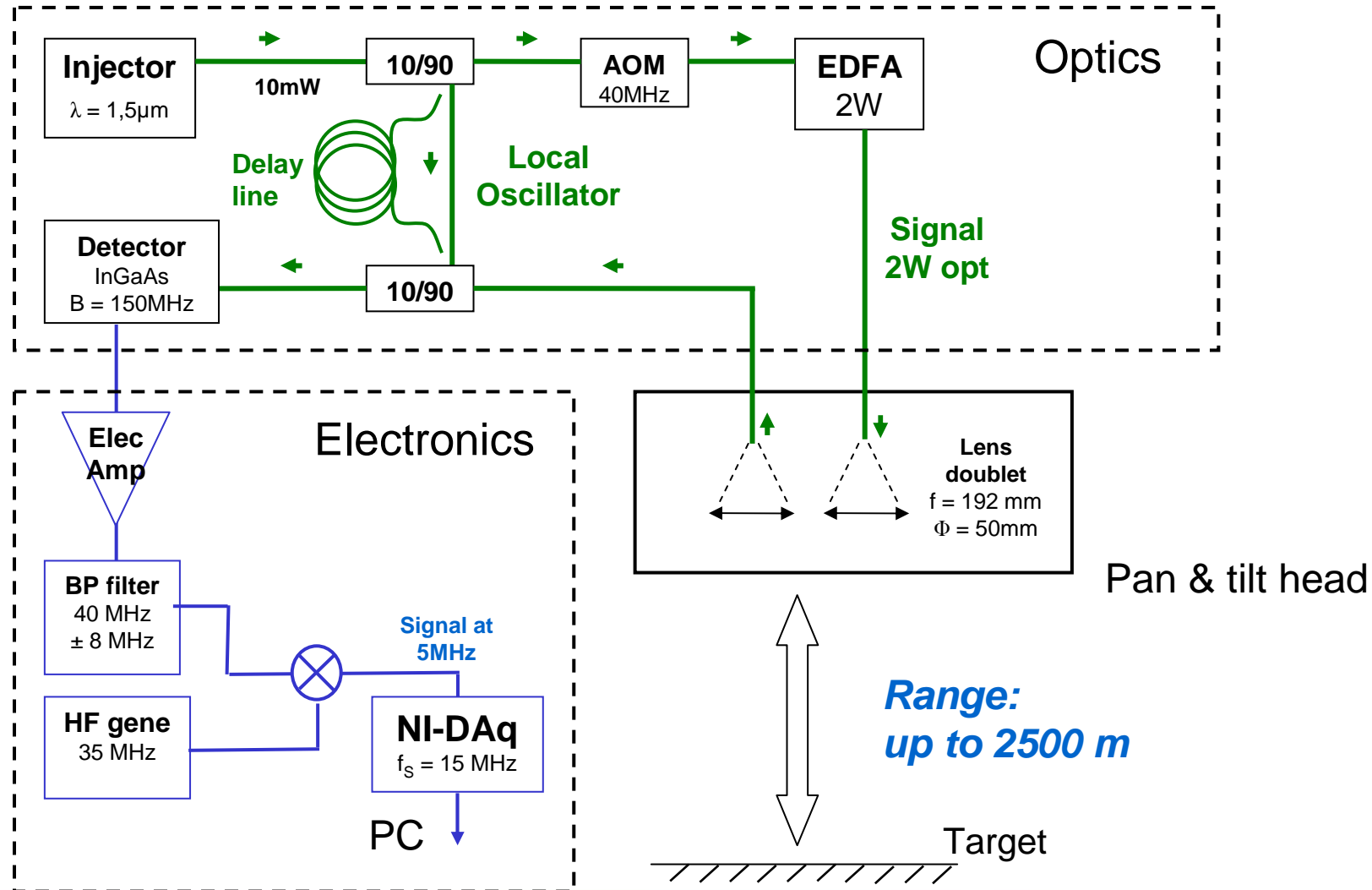
Z = 2 km
CNR = 10 dB
 $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$
 $V_p = 10 \text{ m/s}$



Plan

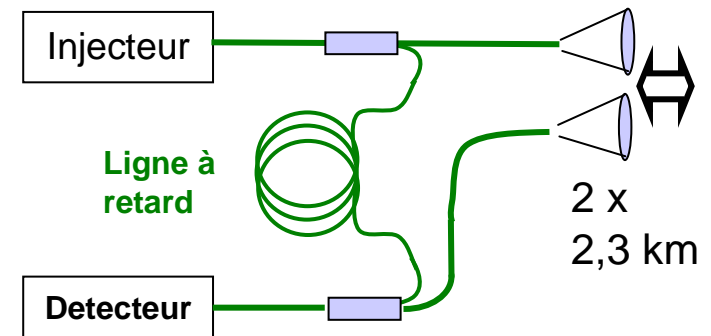
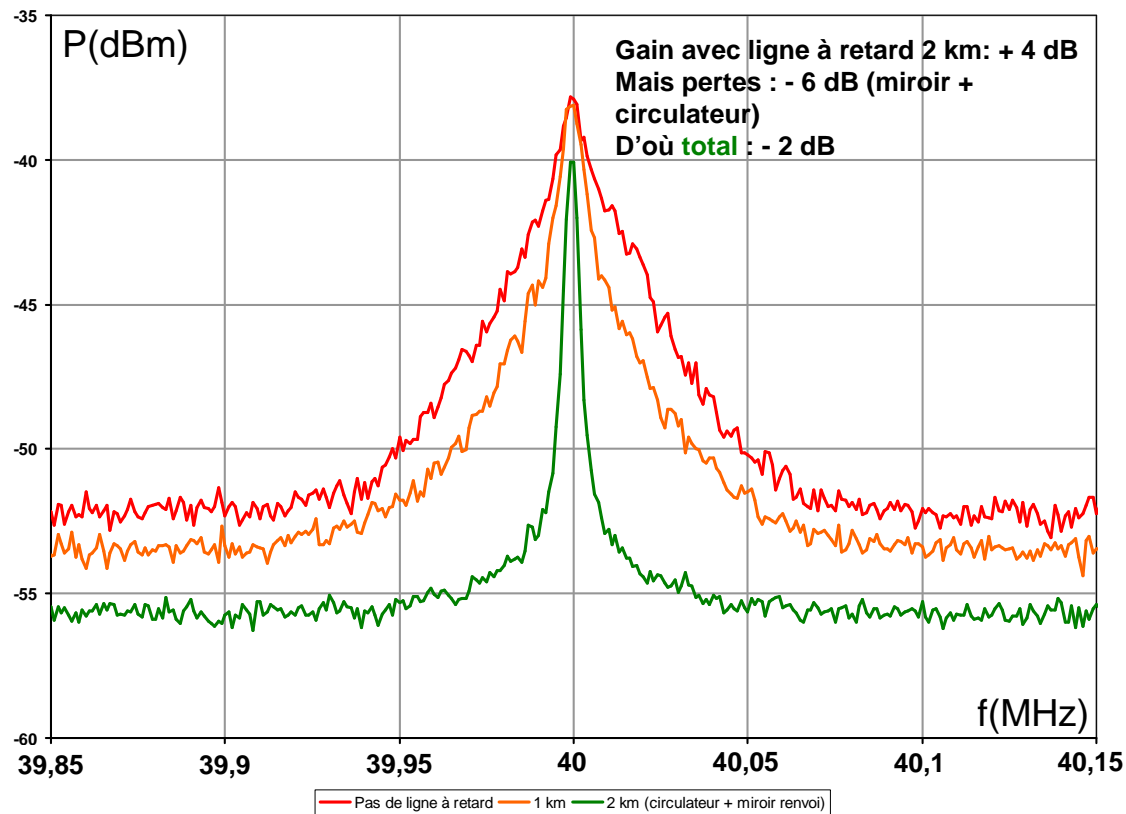
- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- **La vibrométrie laser:**
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - **Le hardware**
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Exemple d'architecture fibrée



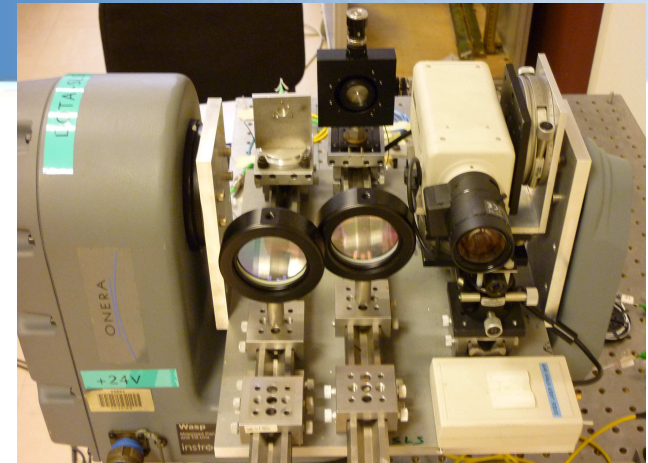
Compensation de la largeur de raie laser

élargissement du pic hétérodyne → Ligne à retard



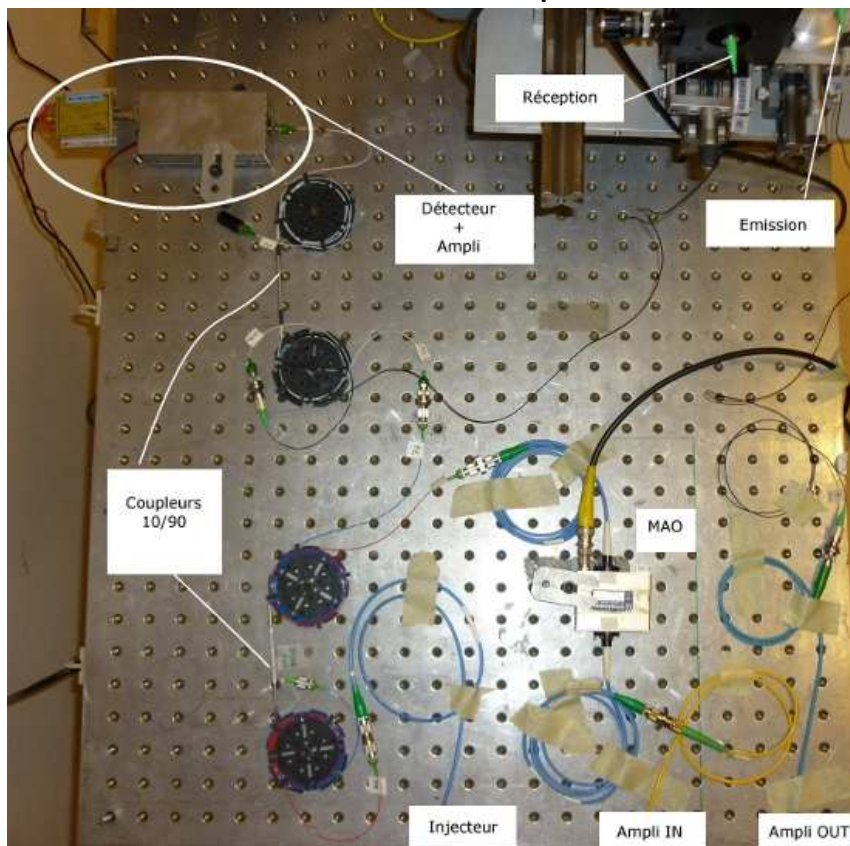
Idéalement, 3km de fibre nécessaires

Architecture du vibromètre Devisage et de la chaîne de traitement analogique



Tête optique

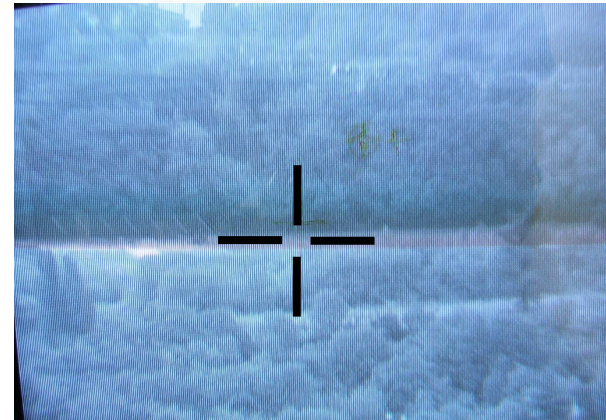
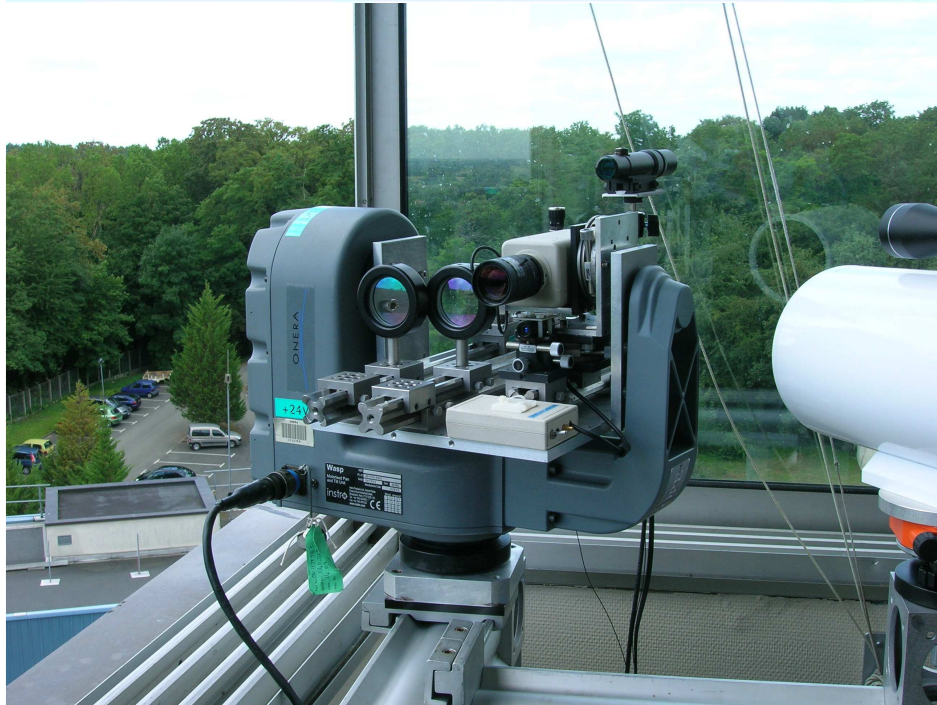
Architecture dépliée



Mise en rack



Installation expérimentale



Plan

- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- **La vibrométrie laser:**
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - **Application au diagnostic sismique**
 - Application à l'identification d'objet

Diagnostic sismique (1/4)

Objectifs:

Utiliser un vibromètre laser pour analyser les modes de vibration de bâtiments

Enjeu: sécurité de personnels

Méthode:

Mesure de la réponse vibratoire du bâtiment excité par le fond sismique avant et après un séisme

- Modification des modes propres
- Diagnostic d'endommagement



Intérêt de la mesure à distance

- Surveillance de plusieurs bâtiments de grande hauteur dans une ville
- Le personnel ne s'approche pas (\neq des sismomètres)



Diagnostic sismique (2/4)

Le vibromètre doit répondre aux spécifications suivantes :

- Fréquences à mesurer : entre 0 et 30 Hz
- Vitesse de la vibration : entre quelques dizaines et quelques centaines de $\mu\text{m/s}$
 - Pendant un séisme la vitesse de vibration peut aller jusqu'à 0,1 cm/s
 - En bruit de fond, la vitesse de vibration est de l'ordre de 10 $\mu\text{m/s}$
- La résolution spectrale nécessaire est de 0,1 Hz

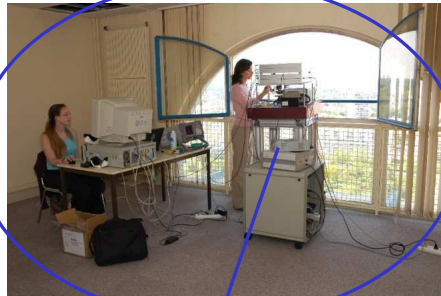
$$\mu \approx 0,4 \quad B_m \approx 80 \text{ Hz}$$

⇒ Traitement en bande étroite

Les points durs à résoudre:

- Recouvrement OL/Signal
- Bruit de phase de la turbulence (BF)
- Largeur de raie laser

Diagnostic sismique (3/4)



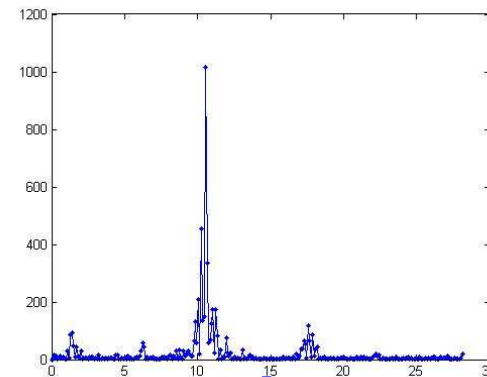
Architecture fibrée 1,5 μm

- Compacte
- Facilité d'alignement
- Fiabilité des composants

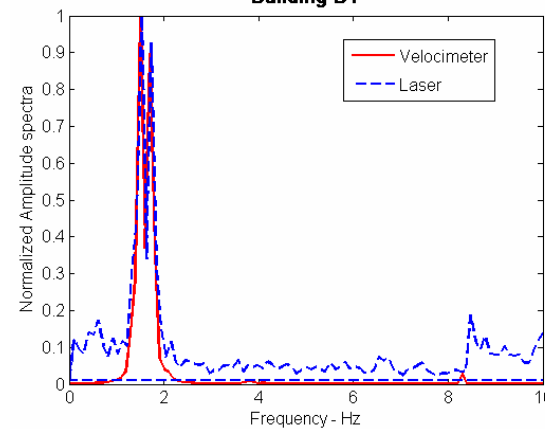
Diagnostic sismique (4/4)

Traitement:
• spectrogramme
• sommation

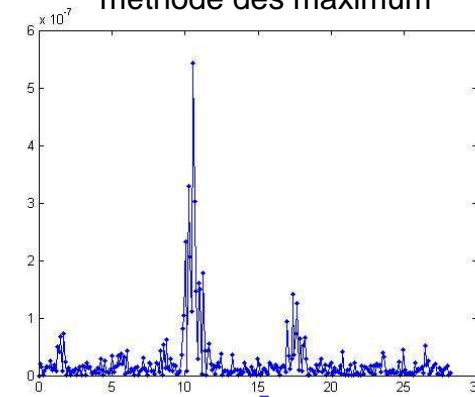
spectre de fréquence avec la méthode des barycentres



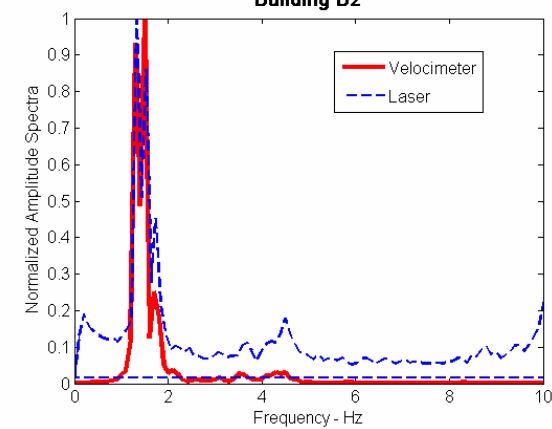
Building B1



spectre de fréquence avec la méthode des maximum



Building B2



- Validation croisées vibromètre-sismomètre (mesures simultanées)
- Projection x,y,z des mesures sismomètre selon la ligne de visée lidar
- Comparaison

Plan

- Les nouvelles sources laser
 - Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
 - Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
- Intérêt de la technologie fibrée: exemple
- **La vibrométrie laser:**
 - Principe de la mesure
 - Traitement du signal
 - Le hardware
 - Application au diagnostic sismique
 - Application à l'identification d'objet

Identification (1/4)

Objectif: identifier un objet lointain par sa signature vibratoire

Exploitation des modes de vibration de structure (basses fréquences)

Fréquences à mesurer: 10 à 100 Hz

Vitesses de vibration \approx cm/s

$\mu \approx 130$ $B_m \approx 25$ kHz

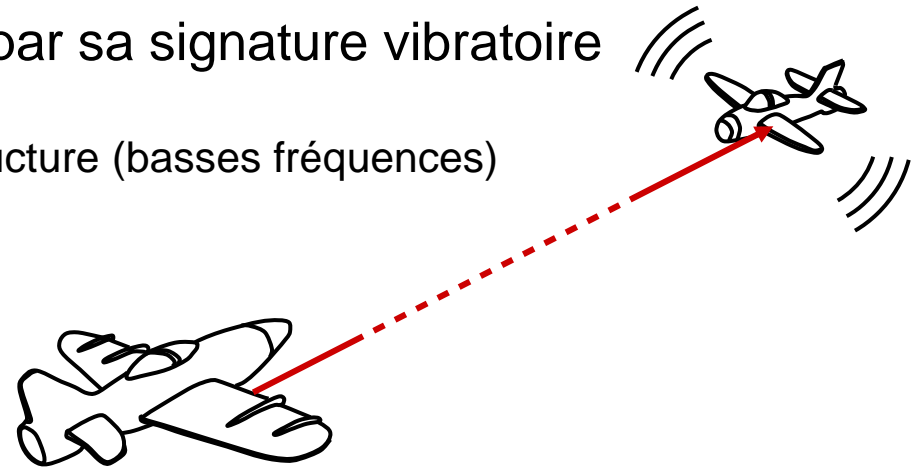
→ Traitement en bande large

Faible signal (longue portée) – bruit de phase dominé par le speckle

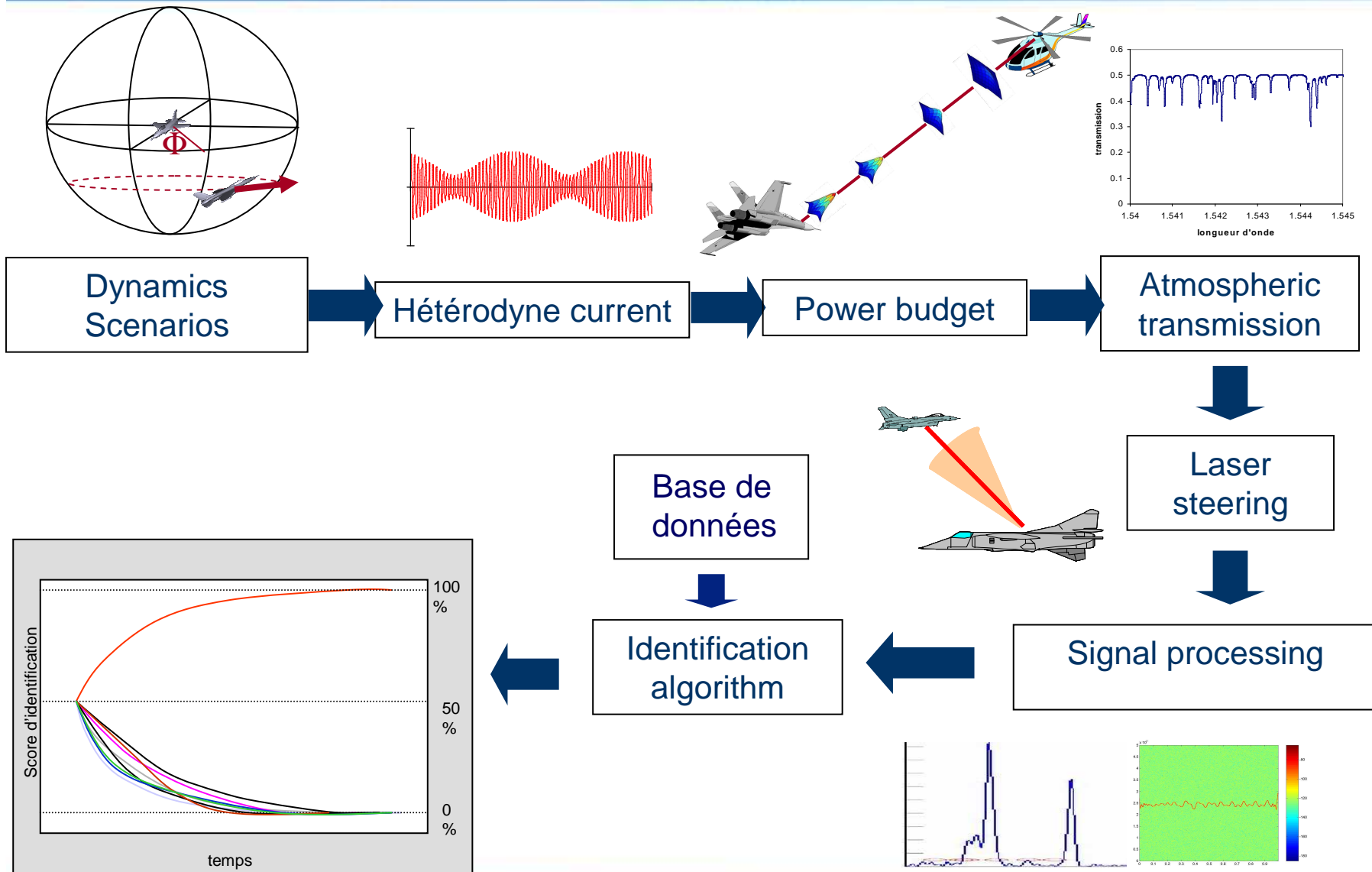
Questions posées:

- Quelles sont les performances d'un vibromètre laser?
- La vibrométrie laser peut-elle restituer des vibrations complexes?
- Quelle est la robustesse d'algorithmes d'identification lorsqu'il y a extinction de fréquences (point de visée)

V.Jolivet, J.Fournier, X.Normandin, J.P.Cariou: "*Feasibility of air target identification using laser radar vibrometry*", SPIE Vol.5803, (2005).

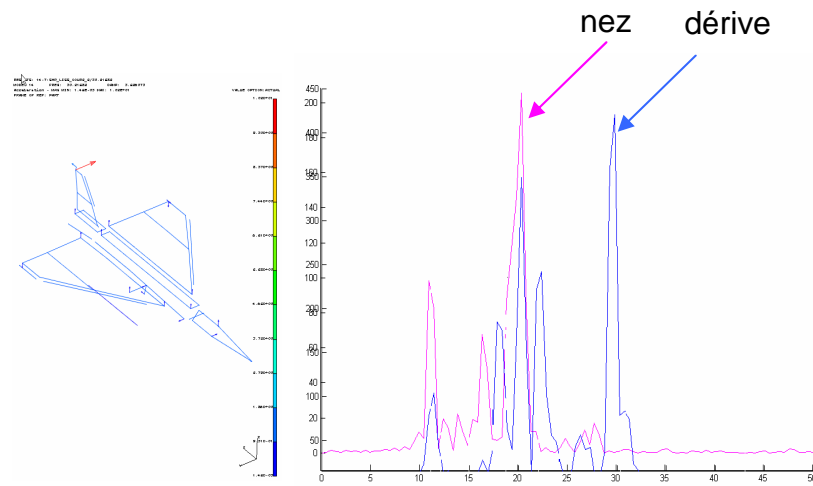
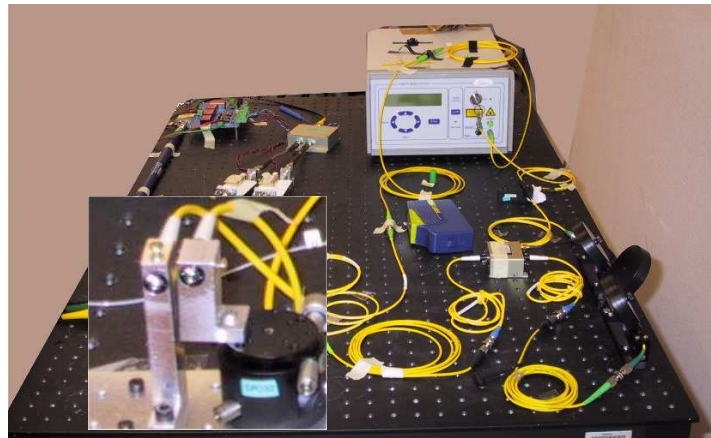


Identification (2/4): principe

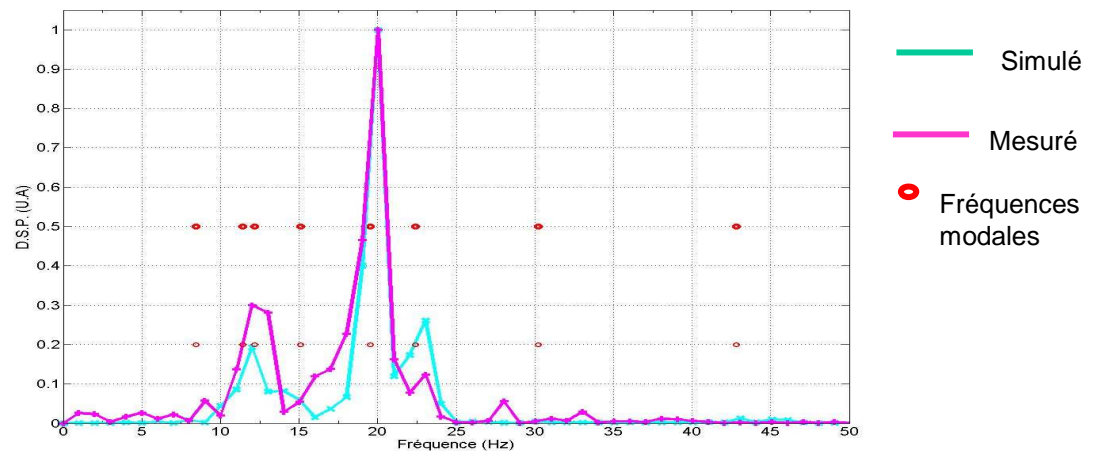


Identification (3/4)

Validation partielle du modèle à l'aide de mesures sur maquette

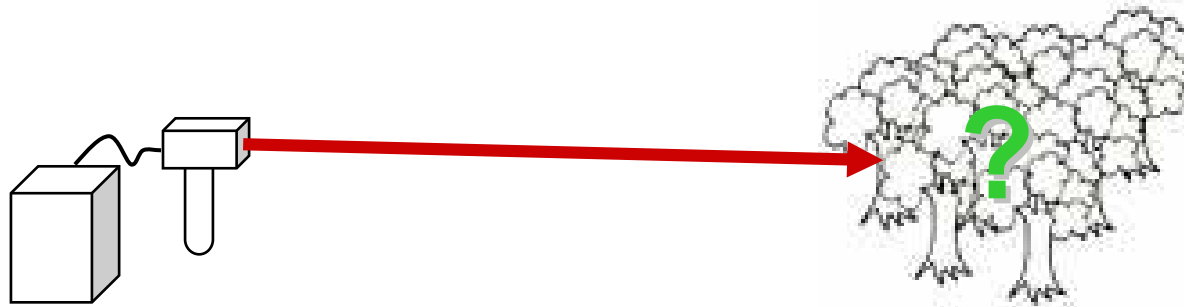


Mode at 30 Hz

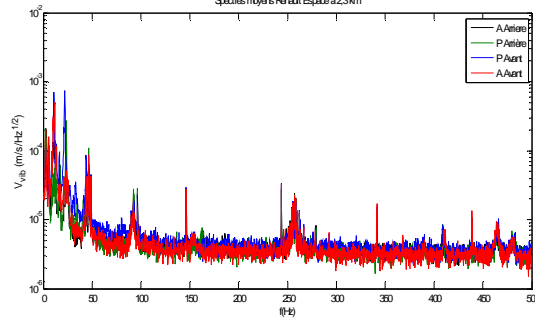


Identification (4/4)

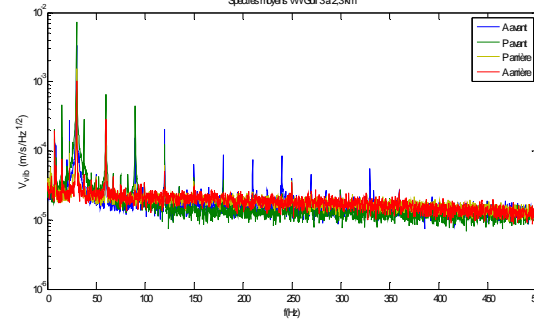
Objectif: identifier un objet camouflé par sa signature vibratoire



Spectres moyens Renault Espace à 23km



Spectres moyens VW Golf à 23km



Merci de votre attention