

Les réseaux de Bragg dans les fibres optiques : de la photo-inscription aux applications

Laurent LABLONDE
iXFiber, une marque iXBlue

18/11/2015 - 10H45

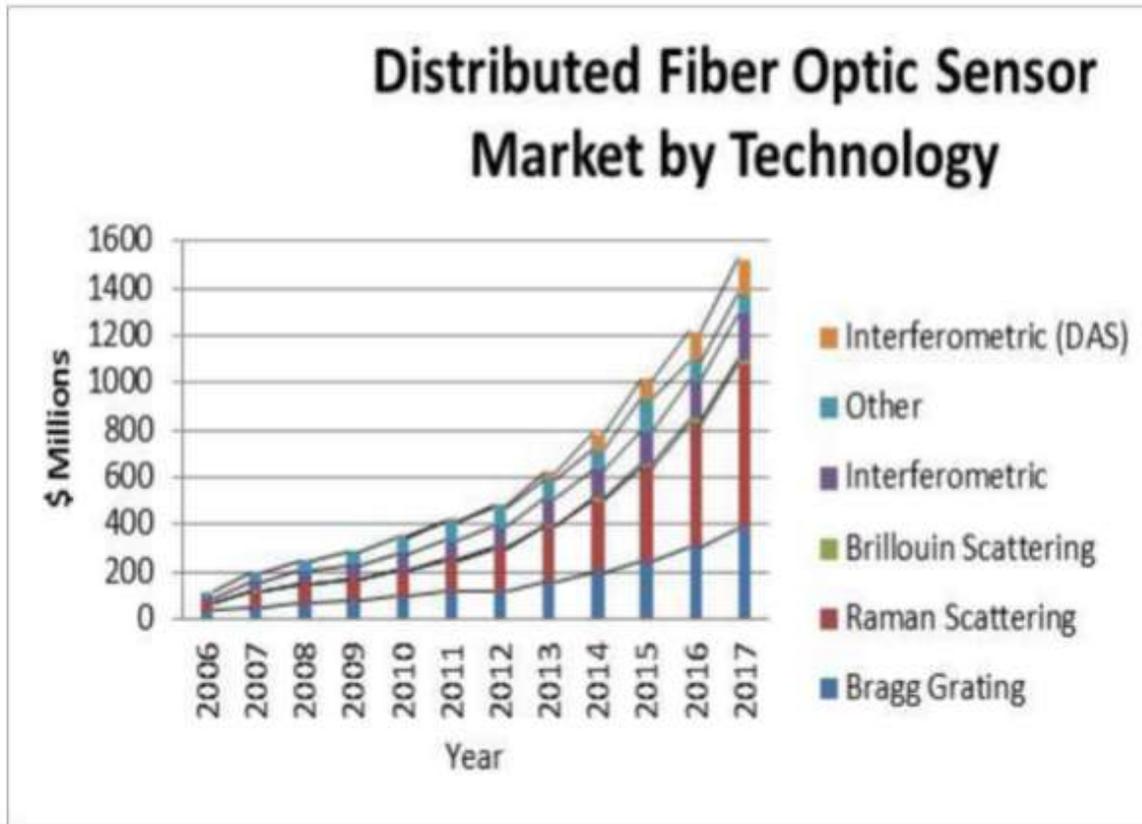
www.ixfiber.com – Rue Paul Sabatier 22300 Lannion +33(0)296041054

light.augmented



Evolution du marché (cas des capteurs à fibre)

Photonic Sensor Consortium Market Survey Report,
http://www.igigroup.com/st/pages/photonic_sensor_report.html



- **Présentation de la société**
- **Introduction aux réseaux de Bragg**
- **Fabrication des réseaux**
- **Applications principales**

Qui sommes-nous ?

Fournisseur de solutions et services pour

- Navigation
- Positionnement
- Imagerie

Dans les milieux suivants

- Terre
- Mer
- Air
- Espace
- Milieux hostiles

7	key facts on iXBlue
	30 years' experience in navigation, positioning, and imaging markets
	Pioneered ultimate performance inertial systems based on fiber-optic gyroscopes (FOG)
	First to deliver full advantage of combined acoustic and sonar signal processing with inertial systems
	Significant market share in global offshore and defense industries
	Preferred supplier of mission-critical space and navy customers with vertical integration advantage
	Serving 1000s of customers in 30+ countries, with over 500 strong professionals
	Global presence, sales offices, training, and 24/7 support

4ème fournisseur mondial de centrales de navigation inertielle



Organisation



Business Unit « Solutions Photoniques »

- 2 sites = Lannion (iXFiber) + Besançon (Photline)
- CA 12M€ (2014)
- 80 pers.
- 1200m² de salles blanches



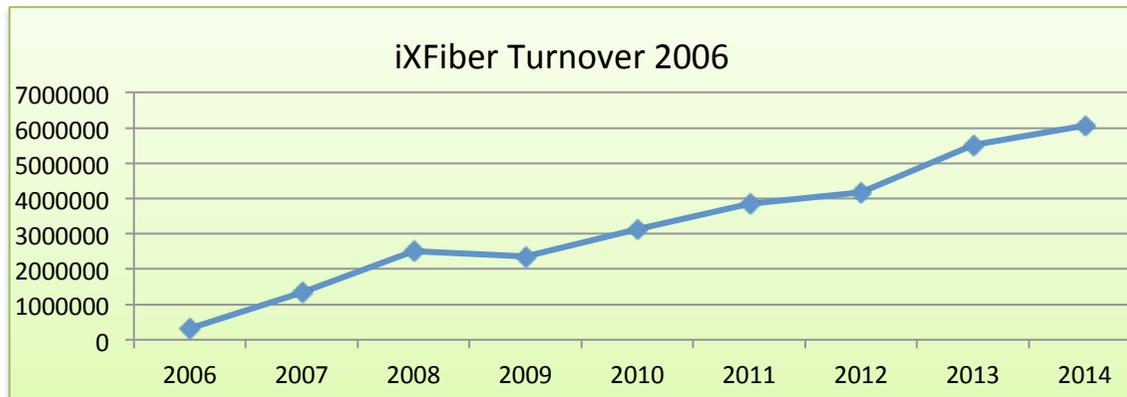
L'activité fibre optique à Lannion (iXFiber)

ID

- Fondation en 2006
- 38 pers.
- CA 6M€

Activités

- Fibres Spéciales
- Composants à fibres
- Systèmes optiques



Survol des produits

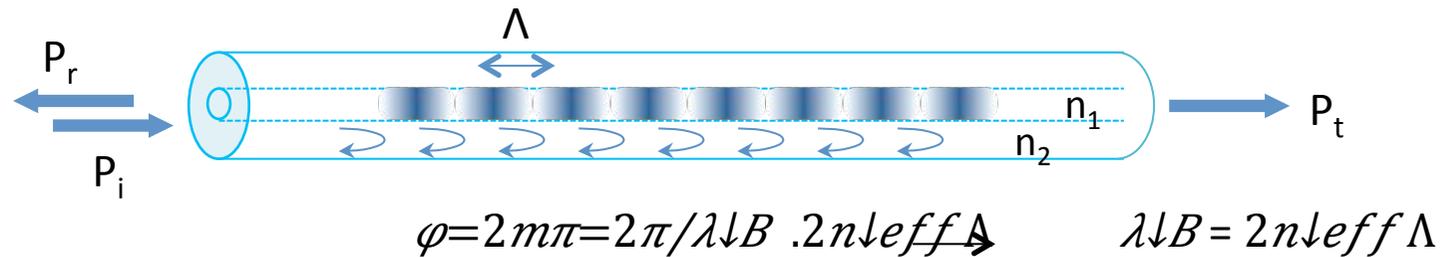


Fibres spéciales → gyros, lasers à fibre, amplis, FBG

Composants → miroirs de lasers, stabilisation des diodes, lasers à fibre DFB, filtrage

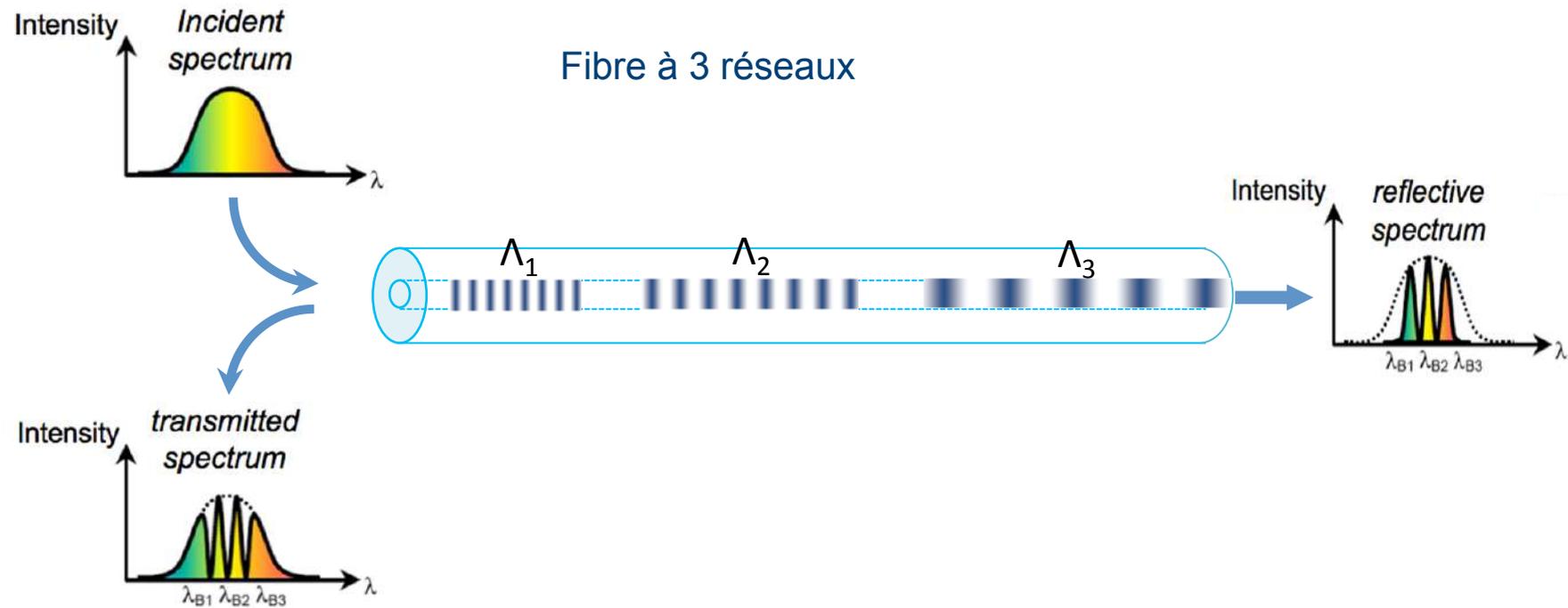
Introduction

Le réseau de Bragg

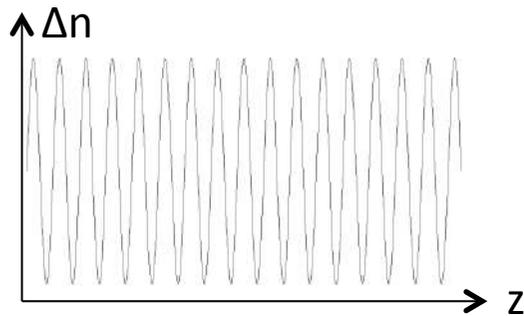


- Modification quasi-sinusoidale et permanente de l'indice de réfraction du cœur de la fibre.
- Réseau obtenu par une grille d'illumination (typ. : franges UV)
- Permet l'échange d'énergie entre modes de propagation
- Composants sélectifs en longueur d'onde : miroirs, filtres
- Condition de résonance du couplage entre modes guidés : $\lambda \downarrow B = 2n \downarrow eff \Lambda$

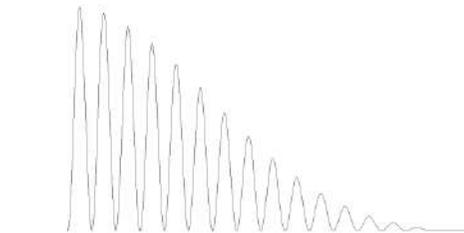
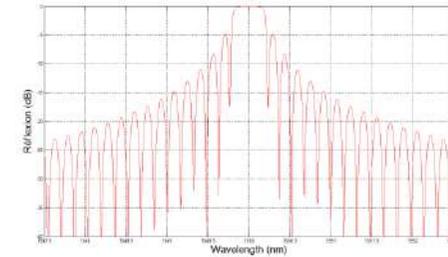
Réponse d'un multiplex de réseaux de Bragg



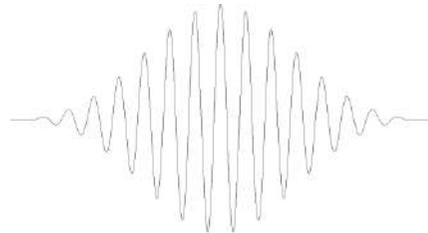
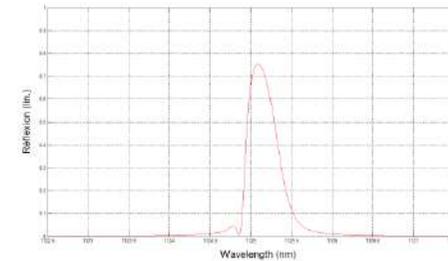
Les différents types de réseaux



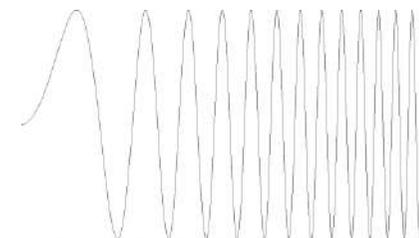
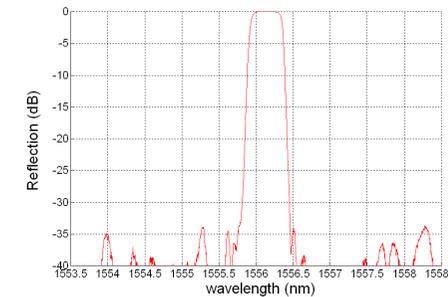
uniforme



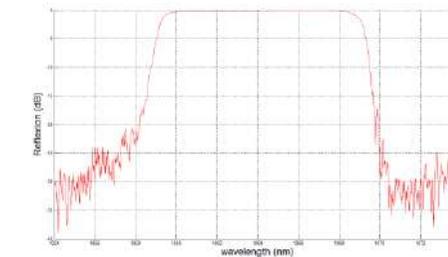
**amplitude et
moyenne variable
(1/2 gaussienne)**



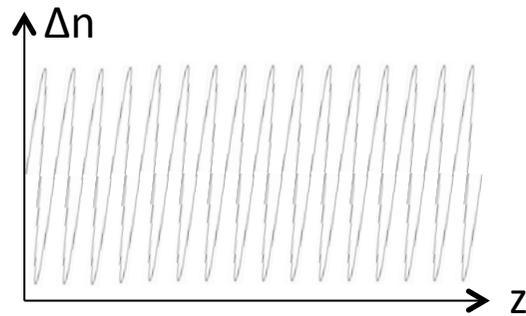
**amplitude variable
(apodisé)**



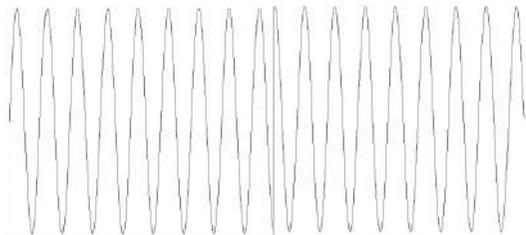
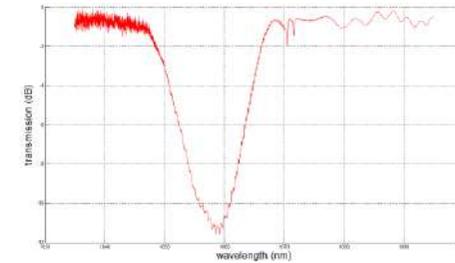
**pas variable
(chirped)**



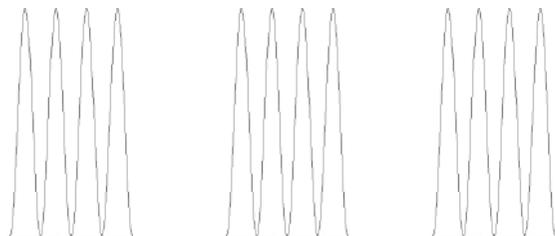
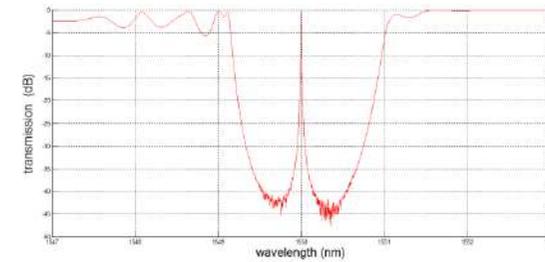
Les différents types de réseaux



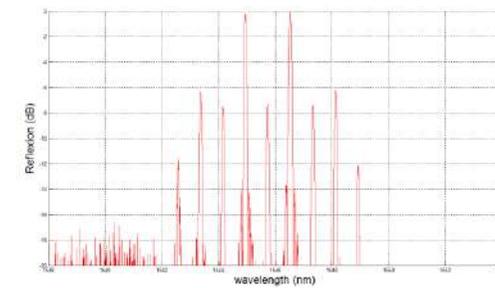
modulation inclinée



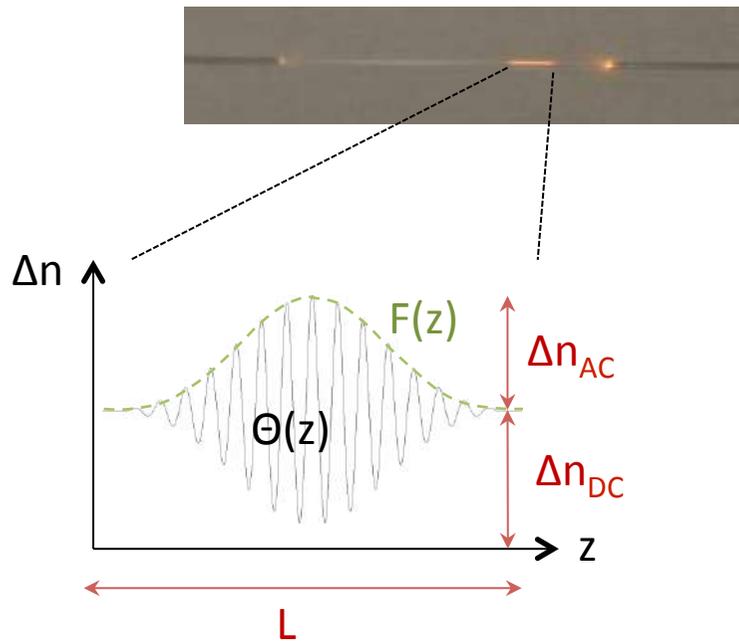
saut de phase



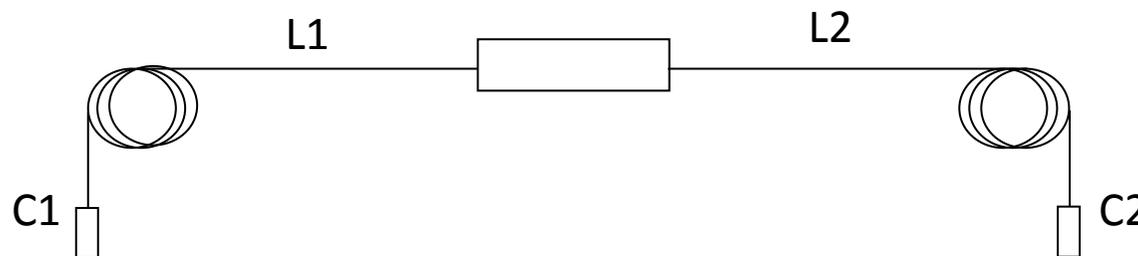
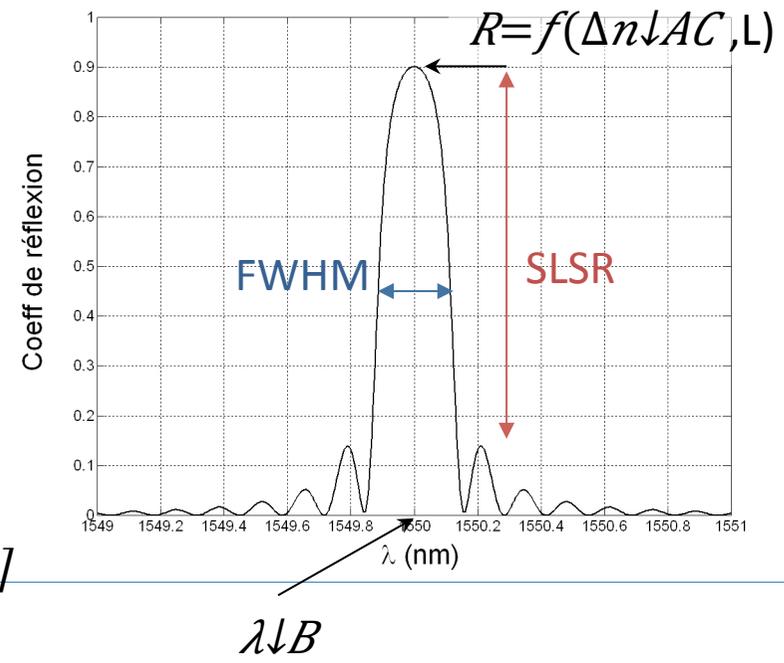
échantillonné



Paramètres et caractéristiques principales



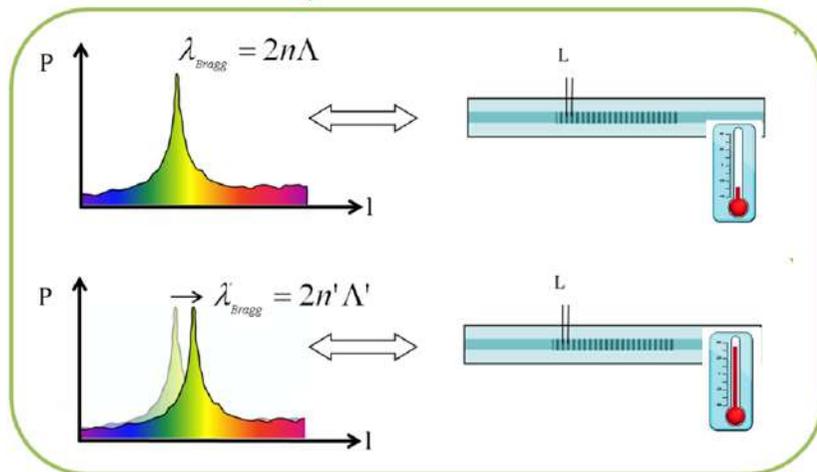
$$n(z) = \Delta n_{DC} + \Delta n_{AC} \cdot F(z) \cdot \cos\left[2\pi/\Lambda z + \Theta(z)\right]$$



Sensibilité des réseaux de Bragg

- Longueur d'onde caractéristique du réseau : $\lambda_B = 2 \cdot n \cdot \Lambda$
- Variation : $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = a \cdot \Delta T + b \varepsilon + c \cdot \Delta P$

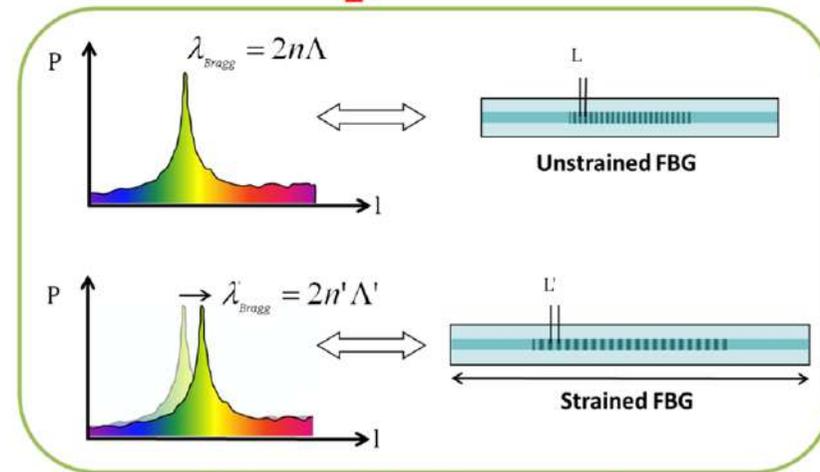
$$a = \alpha + \xi$$



Réponse à une variation de température

@1.55μm : 12 pm/°C

$$b = 1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})]$$



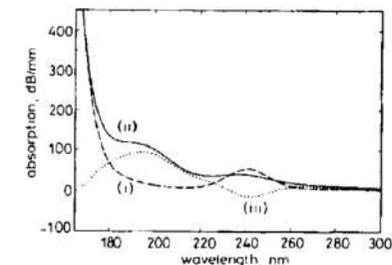
Réponse à l'allongement

1.2 pm/ppm d'allongement

Fabrication des réseaux

Photosensibilité : origine et paramètres

- Photosensibilité induite par l'incorporation de Ge (fibres std)
- Désorganisation de la matrice crée des bandes d'absorption
- Avec Ge, précurseurs ayant un pic d'absorption à 240nm
- Modifications des bandes d'absorption -> Δn
- La croissance d'indice photoinduite dépend de :
 - Matériau, conditions d'élaboration
 - La source d'inscription : longueur d'onde, intensité ou fluence, durée d'impulsion, taux de répétition
 - Température de la fibre, état de contrainte
 - Pré-traitement : H₂, D₂, pré-insolation,

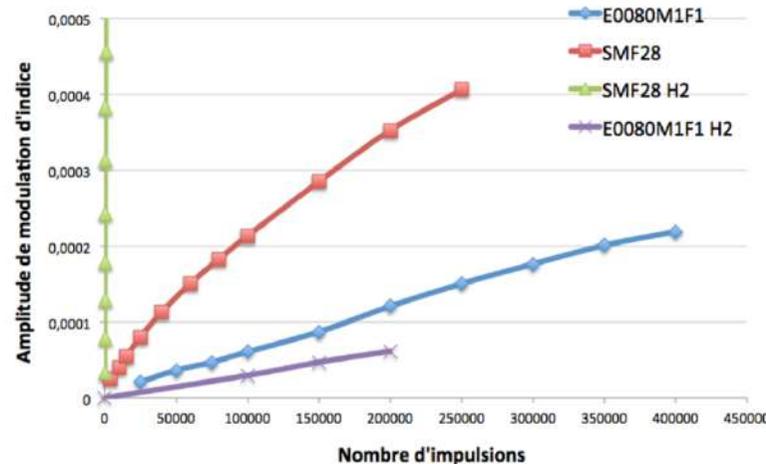


R.M Atkins et al (1993)

UV spectra of 3 mol% germania MCVD core before and after UV exposure
(i) UV absorption of MCVD core prior to UV exposure
(ii) UV spectrum of MCVD core after 30 min UV exposure
(iii) UV spectral changes induced by 30 min UV exposure

Caractéristiques de croissance des réseaux de Bragg de type I

- Croissance monotone de l'indice
- Fibre Ge-SiO₂ + H₂ : croissance plus rapide à 193nm qu'à 248 nm mais saturation
- Mécanisme à 1 photon (H₂, dopage fort), à 2 photons (sans H₂)
- La dynamique de croissance augmente avec la fluence ou l'intensité
- Photosensibilité UV observée dans de nombreux verres de silice : silice dopée Ge, P, N,...



$F/pulse^2$ 193nm : 23 mJ/cm²

Méthodes interférométriques

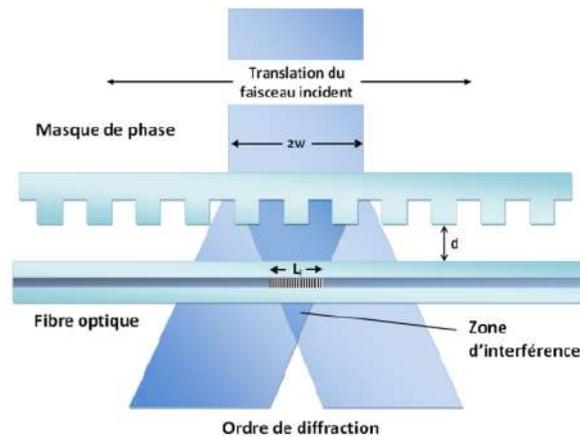
- Lasers cohérents
- λ_B accordable

Méthodes de lithographie

- Masque de phase
- $\lambda_B \approx$ figée par le pas du masque
- Peu de contraintes sur la cohérence des sources
- « Sculpture » du profil de réseau (amplitude et phase)

Méthodes pas par pas

Le banc à masque de phase



- λ inscription:

- 193, 248 nm : fluence/pulse de 300 mJ/cm², durée 10 nsec
- 244 nm CW : 300 W/cm²

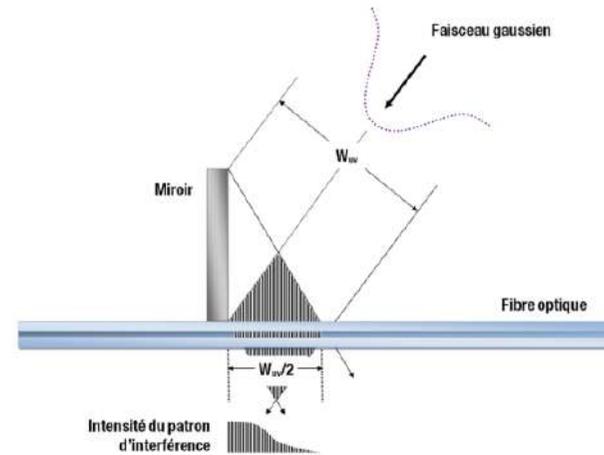
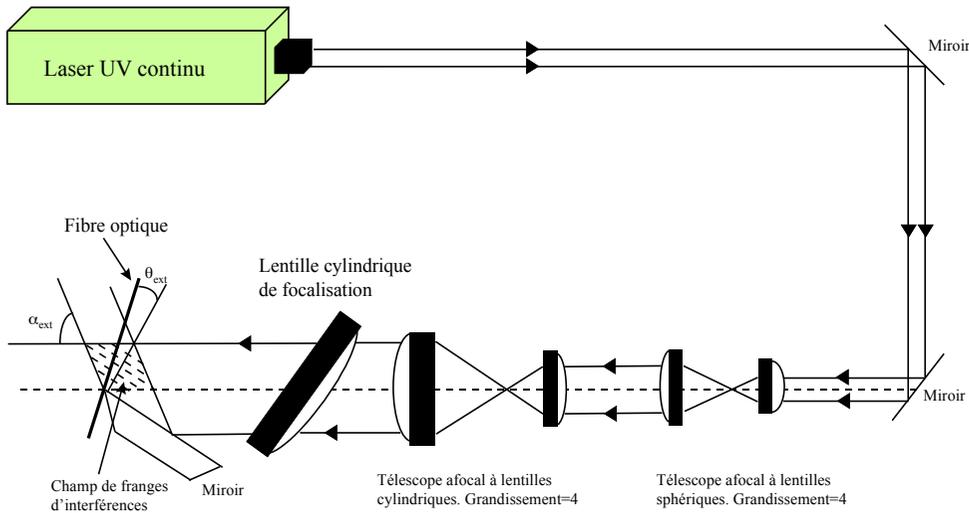
- Chirp élevé, saut de phase (masque)

- Chirp faible, sauts de phase distribués (translateur piezo)

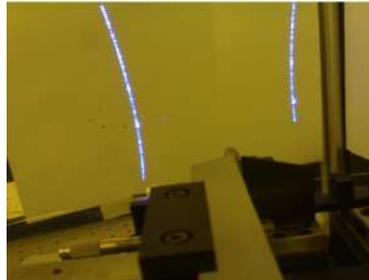
+ Tous profils, répétabilité, faible sensibilité aux vibrations, très tolérant (source).

⊖ Le pas du masque fige $\lambda \downarrow B$, long. masque \approx 10cm max, coût, usure (UV Excimer), proximité masque-fibre, pollution gravure

L'interféromètre à miroir de Lloyd



- λ inscription: 244 nm CW : 300 W/cm²

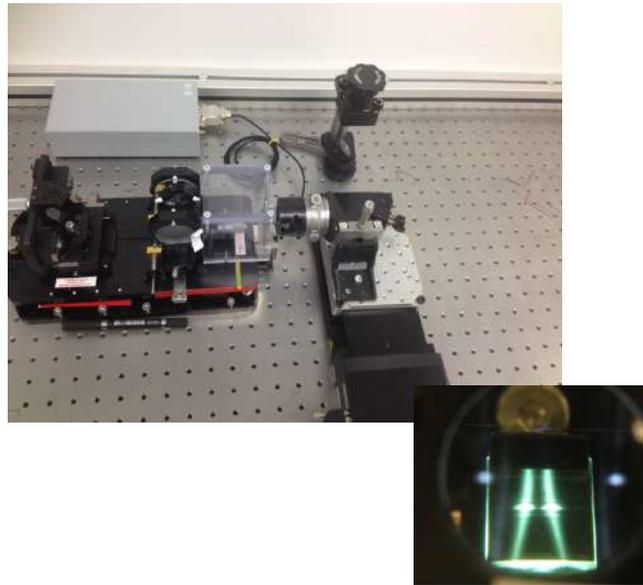
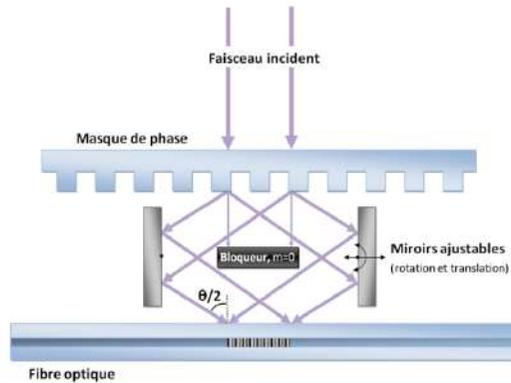


Flexibilité $\lambda \downarrow B$



Sensible aux instabilités, limité aux profils uniforme et pseudo-gaussien, cohérence spatiale et temporelle de la source

L'interféromètre de Talbot



- λ inscription: 213 nm (5^{ème} harmonique, laser Nd:VO4 Q-switché)

+ Flexibilité $\lambda \downarrow B$, tous profils

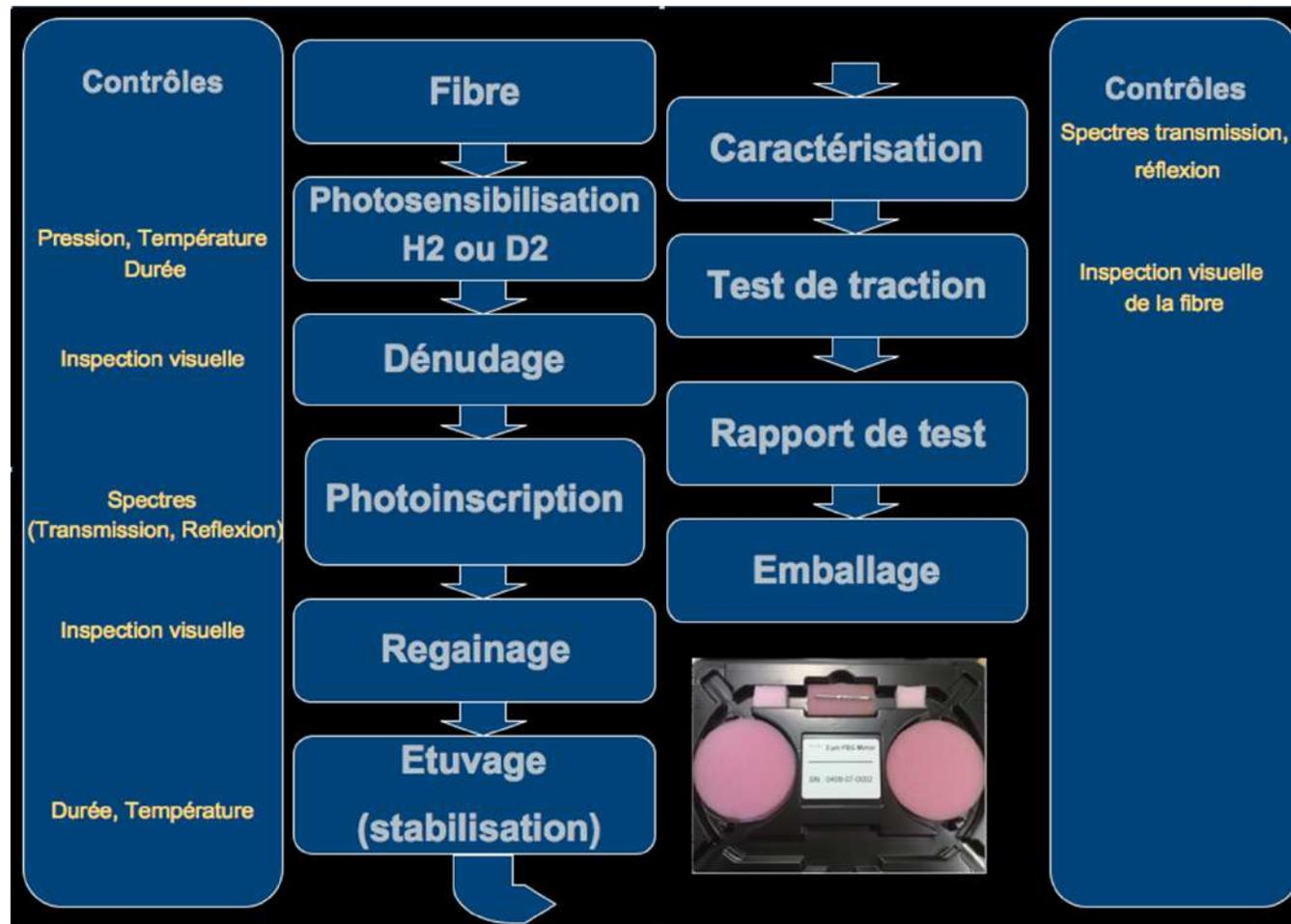
- ⊖ Précision des réglages, un peu sensible aux instabilités, assez tolérant pour la source

Les équipements

- Postes d'hydrogénation
- Bobineuses
- 7 postes de photoinscription
- Bancs de traitement de fibre : dénudage, recoat, soudeuses PM
- Moyens de caractérisation :
 - réponse spectrale : 600 – 2400nm (Sources ASE, SC + ASO)
 - sensibilité thermique, déformation, proof test, PER
 - thermographie sous flux
- Atelier de packaging
- Collecte temps réel des données de production (MES), traçabilité



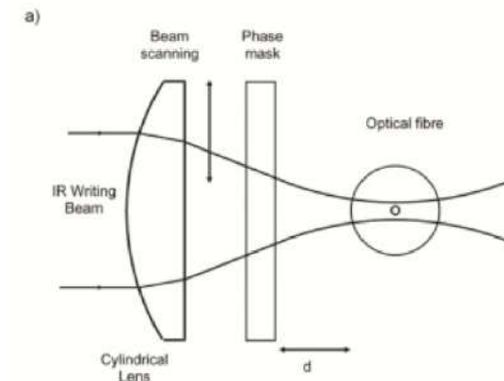
Le procédé de fabrication typique



Nouvelles techniques de photoinscription

■ Inscription par laser femto-seconde :

- Principe : Impulsions ultra-brèves et ultra-puissantes -> mécanismes d'ionisation non-linéaire
- Nature : compaction (impulsions modérées), claquage optique (élevées), formation de micro-trous
- Techniques : masque de phase, point-à-point
- Avantage : fibre non photosensible, pas de pré-traitement
- Fs-IR : inscription à travers le revêtement polymère



■ Inscription durant le fibrage :

- Méthode : inscription sur la tour par Talbot, avant l'application du revêtement
- Avantage : rapidité d'exécution, résistance mécanique de la fibre
- Inconv. : réflectivité limitée (10% evn.), fibre d'atténuation élevée

■ Réseaux régénérés :

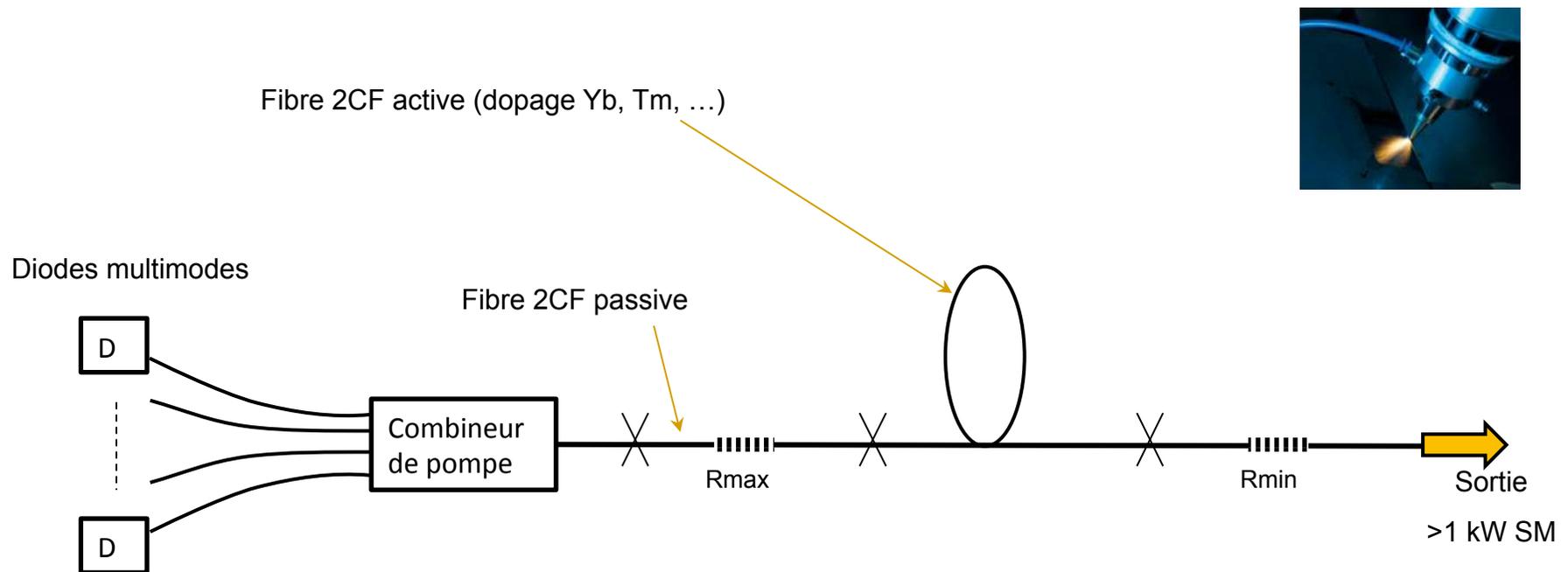
- Modification structurelle
- Méthode : inscription d'un réseau graine suivi d'un traitement HT
- Réseaux stables même à 600°C



Quelques applications et contraintes associées

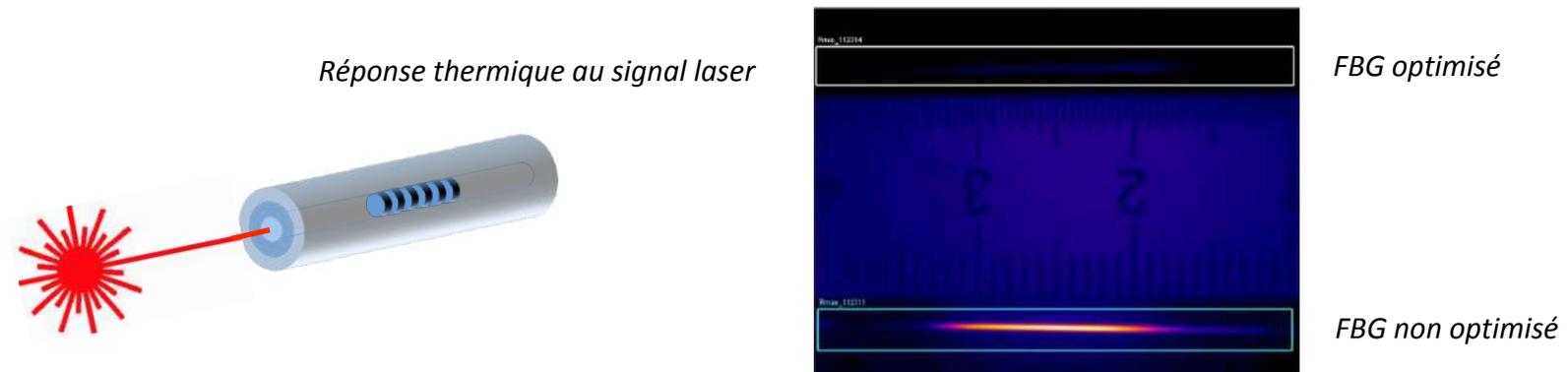
Les miroirs pour lasers à fibre de puissance

- Accès aux hautes puissances par conversion de brillance



Les miroirs pour lasers à fibre de puissance

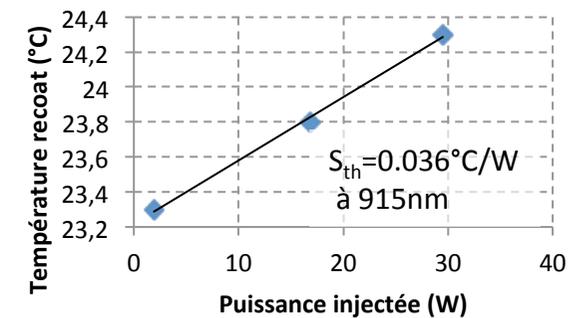
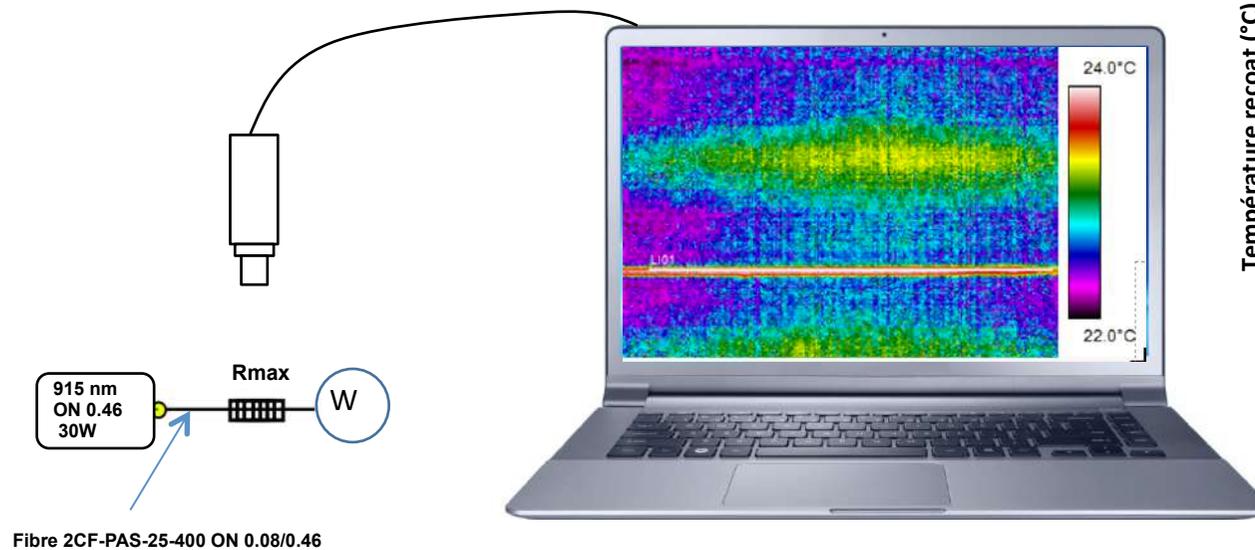
- **Le FBG est une source potentielle d'échauffement dans un laser de puissance**
- **2 sources d'échauffement :**
 - dans la gaine multi (pompe) : contamination et délamination du recoat
 - dans le cœur (signal laser) : bandes d'absorption photo-induites, diffusion par le réseau.
- **Solutions contre l'échauffement:**
 - Pour la pompe : soin particulier apporté au dénudage, nettoyage et recoat, qualité de surface du recoat pour la dissipation par conduction
 - Pour le réseau : fibre non hydrogénée, homogénéité de l'indice de réfraction photoinduit dans le cœur.



Les miroirs pour lasers à fibre de puissance

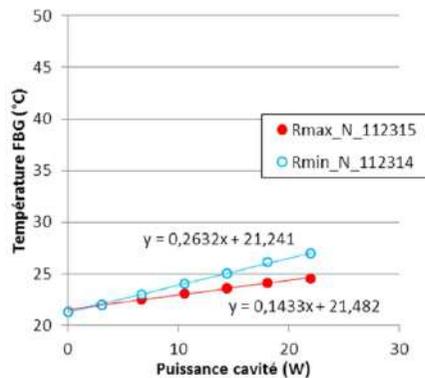
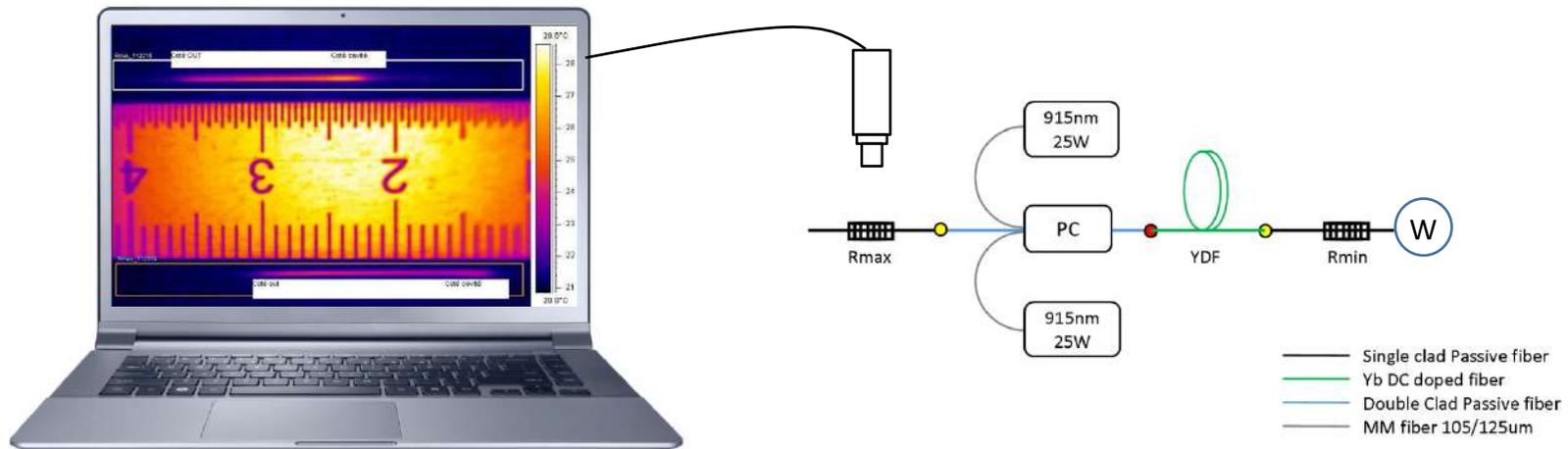
Echauffement par la pompe multimode

- L'atténuation est trop faible pour une mesure directe → évaluation par thermographie IR
- Signature de la fibre seule : suspension dans l'air (air sans mouvement)
- Mesure de la pente thermique effectuée sur chaque pièce produite

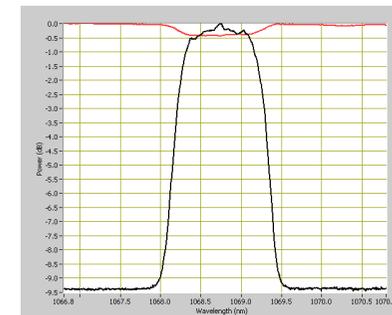
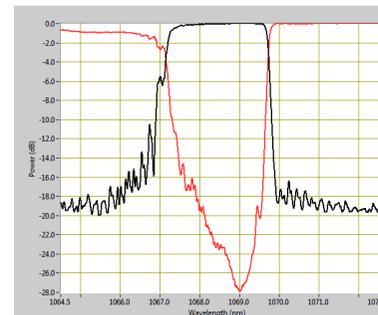


Les miroirs pour laser à fibre de puissance

- Echauffement par le signal
 - L'atténuation est trop faible pour une mesure directe → évaluation par thermographie IR
 - Signature de la fibre seule : suspension dans l'air (air sans mouvement)
 - Détermination du process par mesure de pente thermique effectuée sur fibre passive 12/125 μm ON 0.07 (assemblage simplifié)

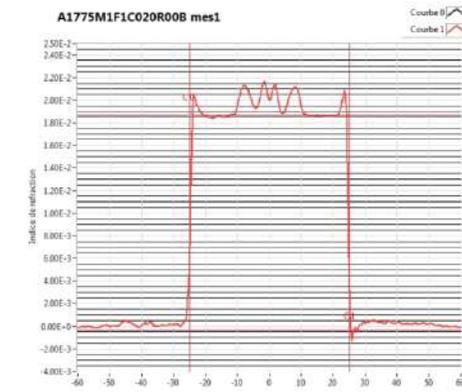
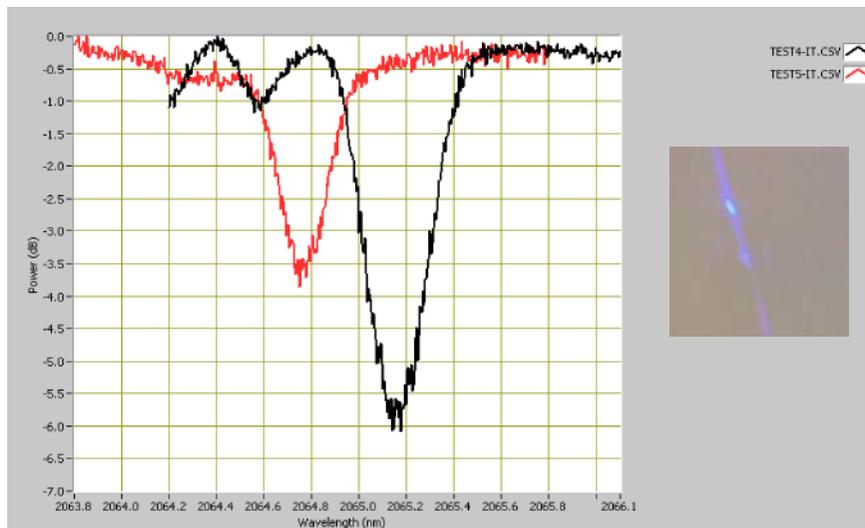


$S_{th} = 0.14$ et $0.26^\circ\text{C}/\text{W}$
à 1068nm



Miroir sur fibre active 2CF PM LMA @ 2 μm

- Inscription directement sur la fibre active
- Photosensibilité induite par piedestal
-



Conditions de photo-inscription :

Laser : Excimer @ 248 nm

Taille de faisceau : 2 x 0.3 mm environ

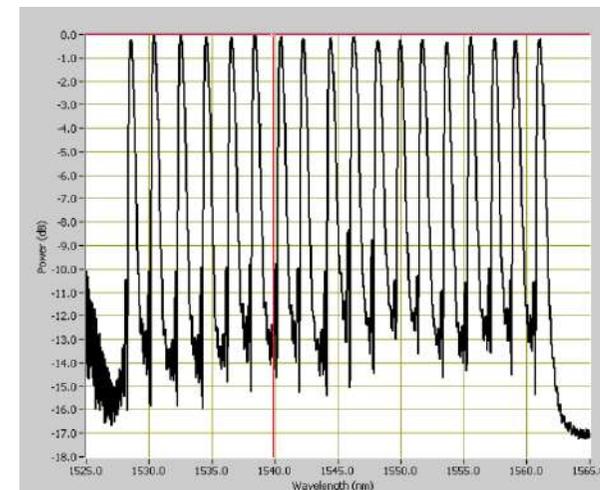
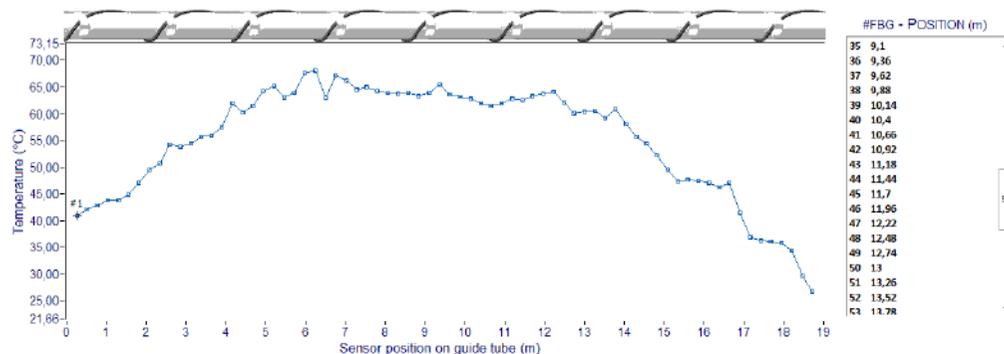
Pmoy ordre -1/1 : 75/75 mW (pulses 10 ns, 200 Hz)

Profil de réseau : uniforme, long. 6 mm

Vitesse : 5 $\mu\text{m/s}$ (test4), 10 $\mu\text{m/s}$ (test5)

Les capteurs à réseaux de Bragg

- Transducteur
- Capteur température ($12\text{pm}/^\circ\text{C}$), déformation ($1.2\text{ pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$), pression ($-0.5\text{ pm}/\text{bar}$)
- Multipoint (quasi-distributed), multiplexage en λ
- Résolution : 0.1°C , $1\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$, 1 cm
- Rapide (ms), low-cost si qq points, potentiellement robustes
- Applications : oil & gas, RDM composites, shape-sensing
- Type FBG : I , réseaux uniformes ou apodisés

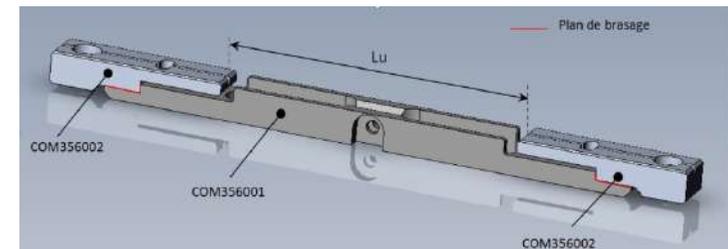
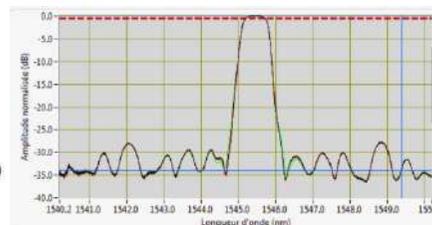
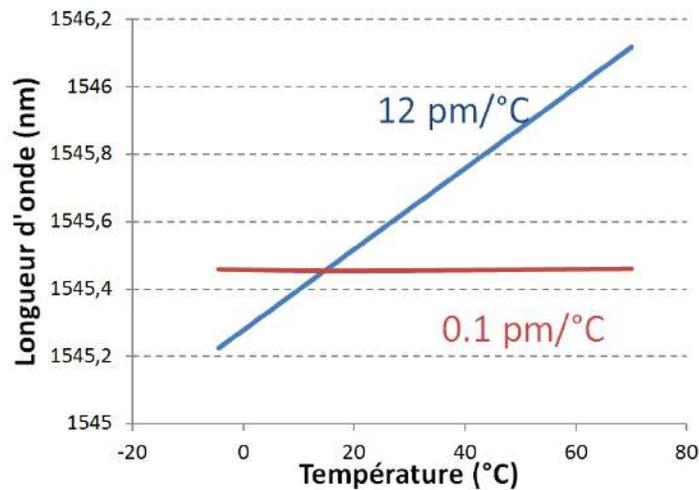
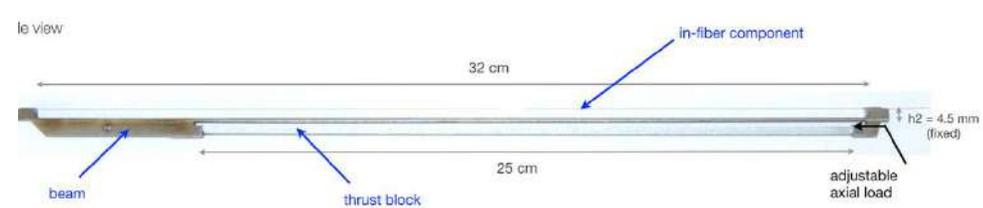
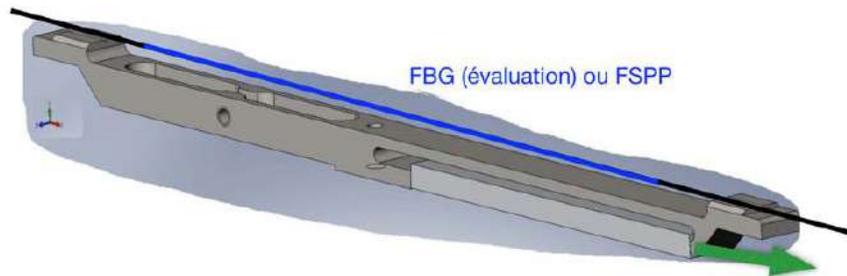


Stabilisation des filtres à la température extérieure

- Compensation de la sensibilité thermique de λ_B par la sensibilité à l'élongation
- Support de fibre : assemblage dissimilaire (coefficient de dilatation négatif)
- Stabilisation $< 1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$
- Compatibilité spatiale : fixation de la fibre par brasure

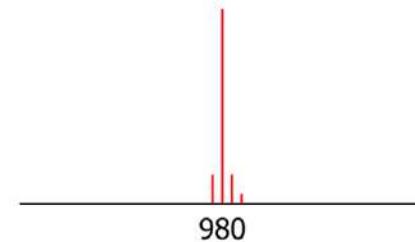
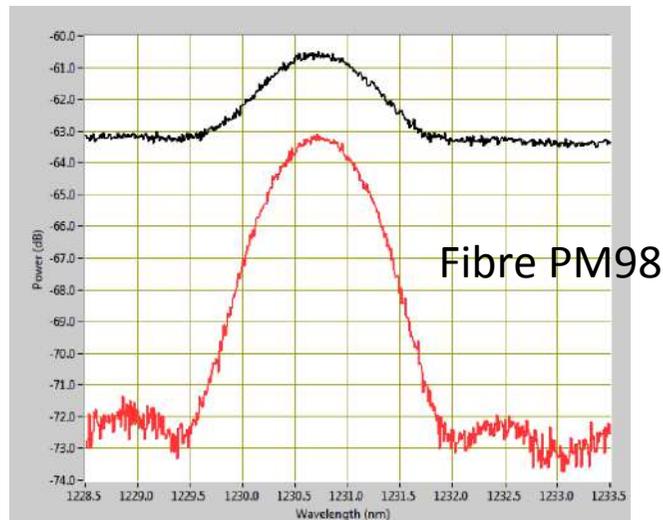
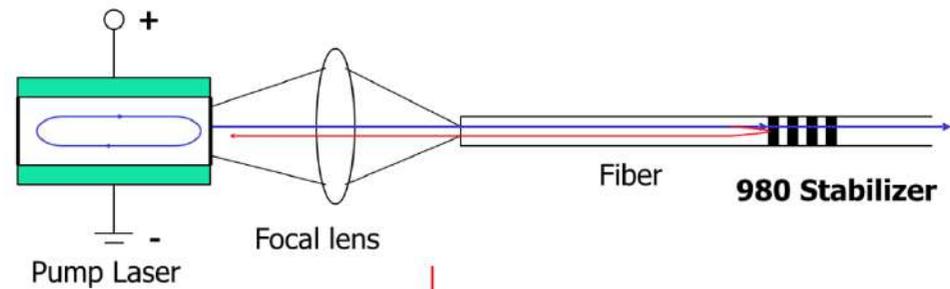
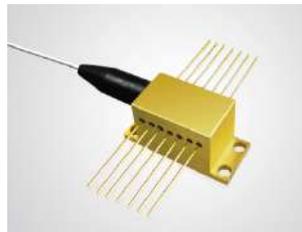


Package standard : 55 x 5 x 5 mm



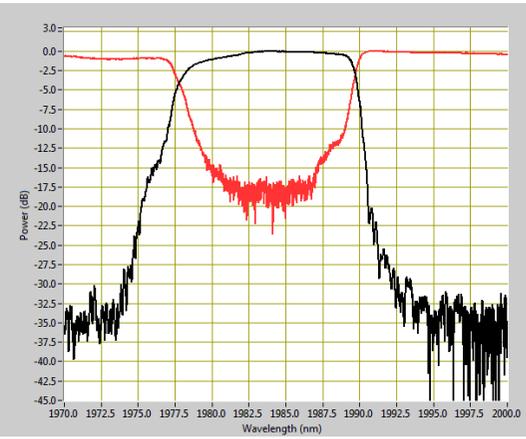
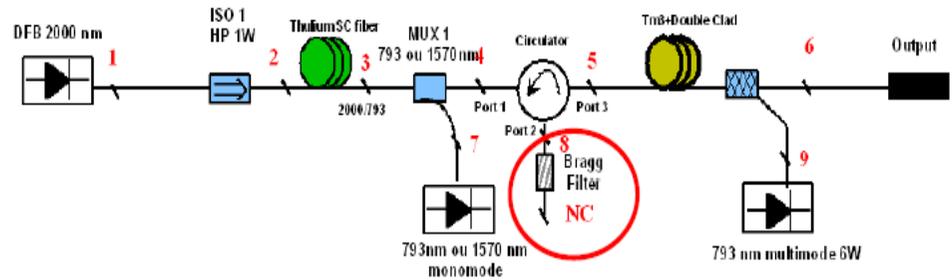
Les stabilisateurs de diode laser

- Verrouillage de la longueur d'onde d'une diode monomode
- Sélection mode longitudinal par contre-réaction optique par FBG
- FBG uniforme ou quasi-uniforme $\lambda = 10\%$ à $\lambda_B = 0.97, 1.1, 1.48 \dots \mu\text{m}$
- Réseaux bas-coût, concurrence sur les prix.



Filtrage d'ESA

- Fibre : 2CF-PAS-PM-6-130-0.21
- Réseau chirpé, profil tanh , $\Delta n_{AC} \approx 10^{-3}$



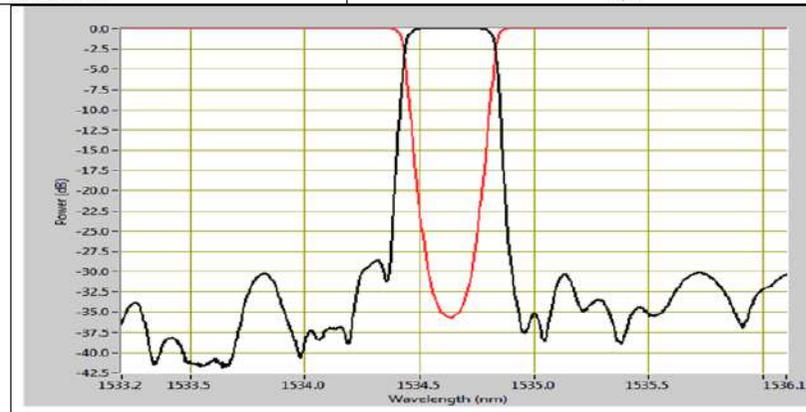
Edge Filter

- Fibre : SMF28
- Réseau apodisé (profil numérique), $\Delta n_{AC} \approx 10^{-3}$

Specifications

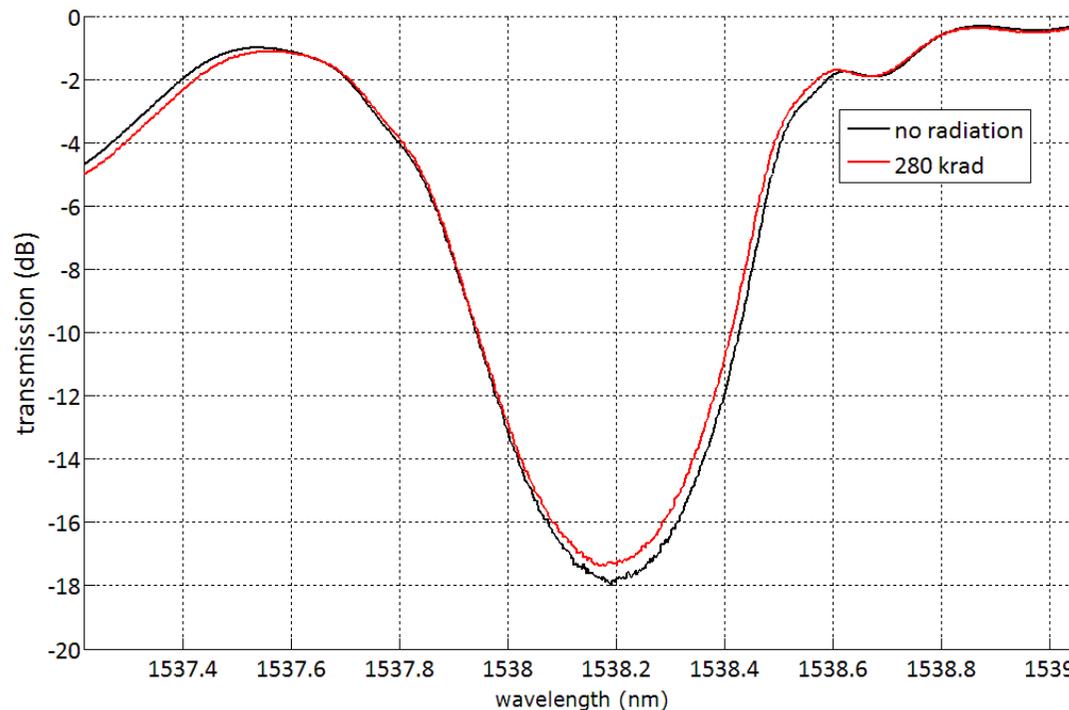
Fiber Type : SMF28
 FBG Type :
 Athermal package : 55 mm x 5 mm x 5 mm Blue Anodized Aluminum

Parameter	Unit	Specifications	Tolerance	Measured
Center wavelength defined @ -3dB	nm	1534.64	± 0.02	1534.64
Referenced to	Vacuum			
Reflection bandwidth @ -1dB	nm			0.37
Peak reflectivity	%	> 99		99.97
Isolation à 80pm de la réflectivité à -1 dB côté grandes λ	dB	> 20		28.51
Isolation à 80pm de la réflectivité à -1 dB côté petites λ	dB	N/A		29.07
Excess loss @ 1510 nm	dB	≤ 0.8		0.26
Thermal Stabilization	pm/°C	< 2		0.8
Polarization axis	N/A			



FBG dans fibre à cœur silice

- Croissance de réseau à 193 nm
- Cœur Vraiment pur ?



Transmission characteristic of a grating before and after γ -irradiation

2.5 mm grating written in a pure silica-core fiber and irradiated by a ^{60}Co source. No Bragg peak shift is recorded after the run (dose rate : 1 krad/h).



Merci de votre attention

Des questions ?