



Fibres polarisantes & Fonctions de filtrage spectral à bande étroite par réseaux de Bragg

Laurent Lablonde, Thomas Villedieu

28 juin 2023, 14H40 – 15H10

Journées thématiques : Fibres Optiques

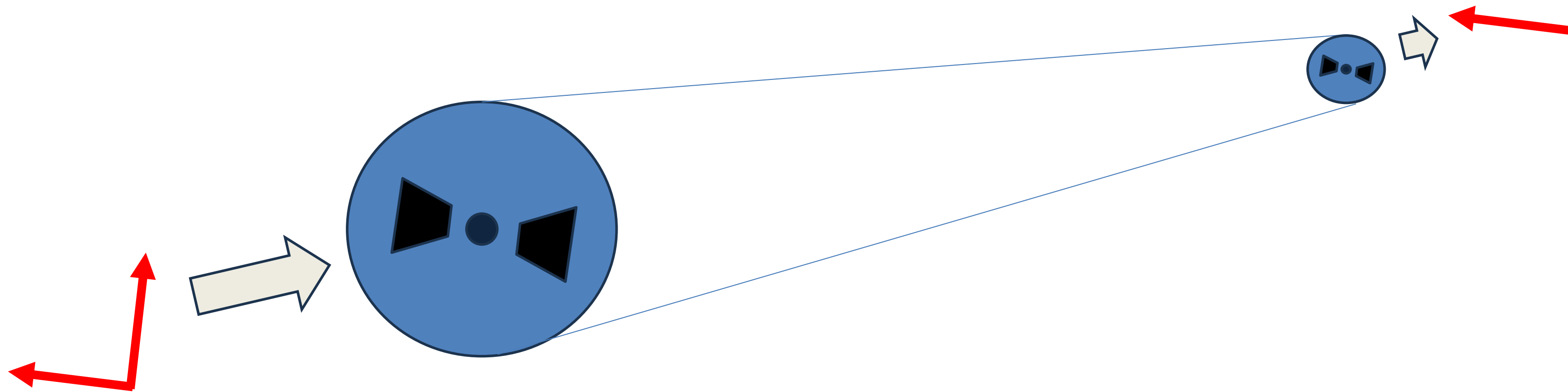
1. Fibres polarisantes

2. Fonctions de filtrage à bande étroite par réseaux de Bragg

FIBRES POLARISANTES

La fibre optique polarisante

- Une fibre optique polarisante (PZ, PolariZing) est une fibre biréfringente conçue pour qu'un seul des deux modes de polarisation soit guidé

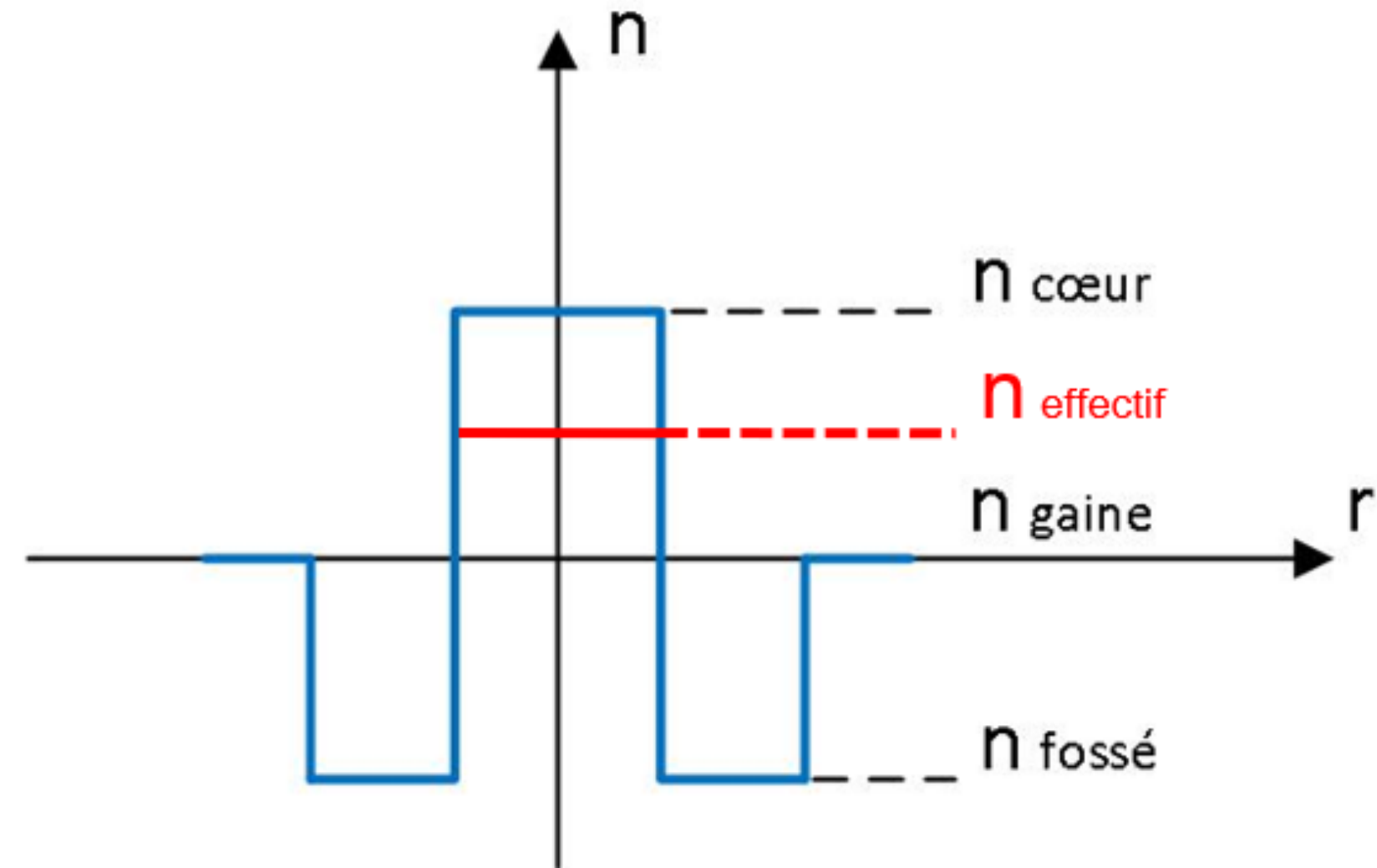


Profil d'indice de réfraction en W

➤ Dépression d'indice qui entoure le cœur de la fibre

➤ **Indice effectif du mode guidé dépend du :**

- recouvrement de son champ électromagnétique
- profil d'indice de réfraction de la fibre



➤ Le recouvrement entre le mode guidé et la dépression d'indice augmente avec la longueur d'onde

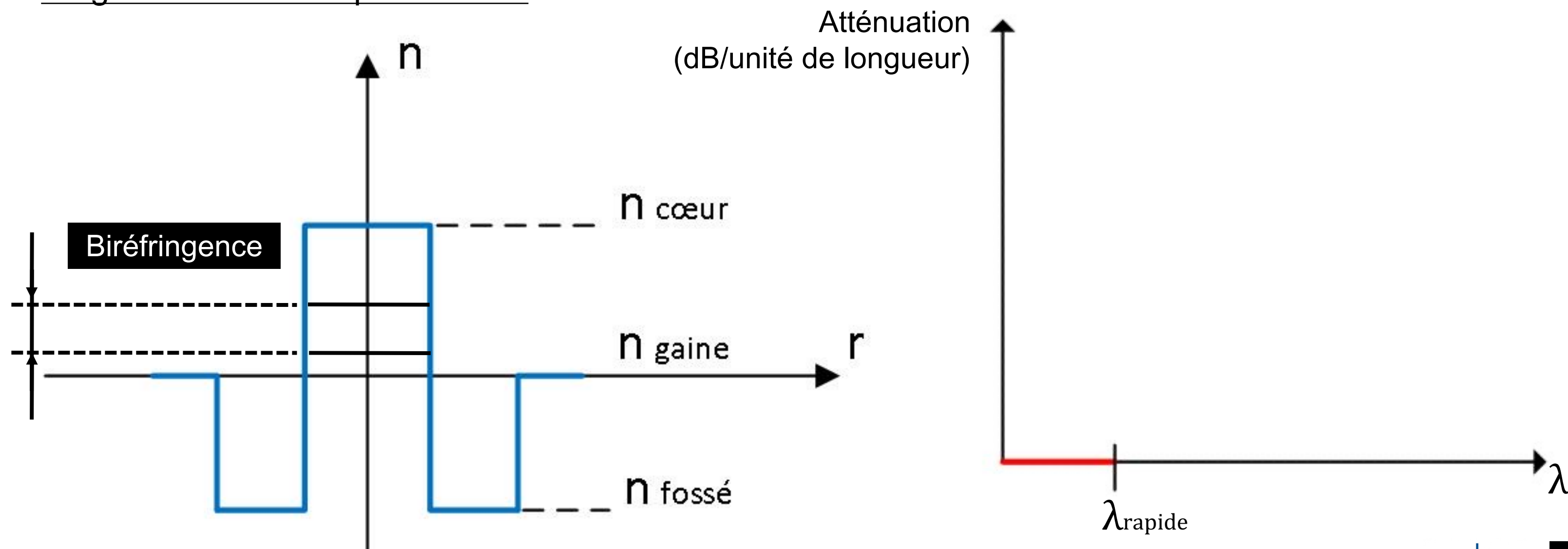
➤ Pour le mode fondamental, pour une certaine longueur d'onde : $n_{\text{effectif}} < n_{\text{gaine}}$

→ Le guidage n'est plus possible, le mode est évanescent et fuit dans la gaine

Biréfringence

- Le mode fondamental est en réalité composé de deux modes de polarisation orthogonaux dégénérés
- Pour réaliser une fibre optique polarisante nous devons lever cette dégénérescence
 - Insertion volontaire d'une biréfringence lors de la fabrication (profil de contrainte)

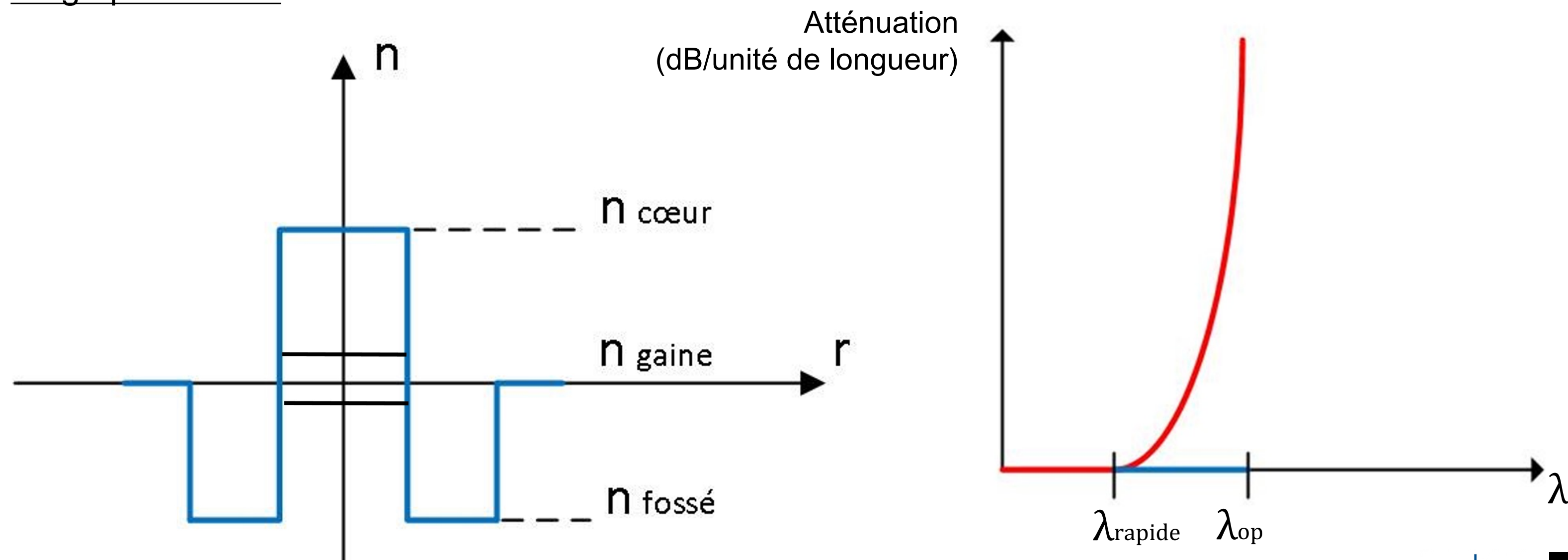
Plage à maintien de polarisation :



Biréfringence

- Le mode fondamental est en réalité composé de deux modes de polarisation orthogonaux dégénérés
- Pour réaliser une fibre optique polarisante nous devons lever cette dégénérescence
→ Insertion volontaire d'une biréfringence lors de la fabrication

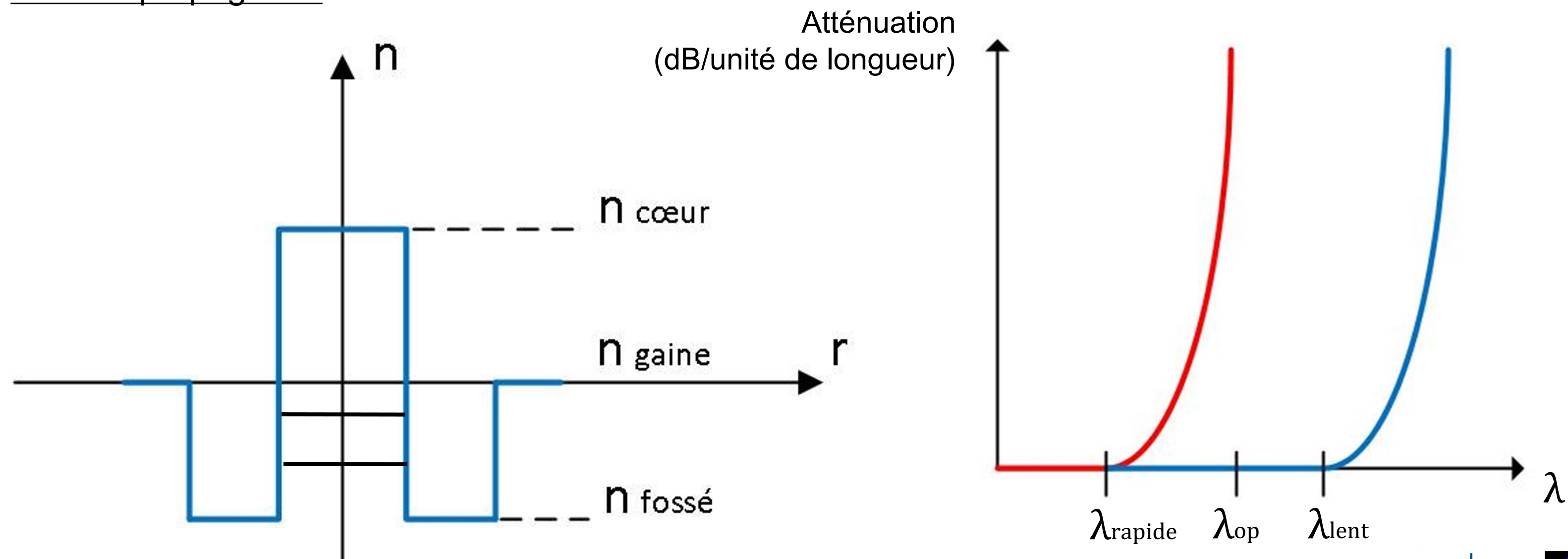
Plage polarisante :



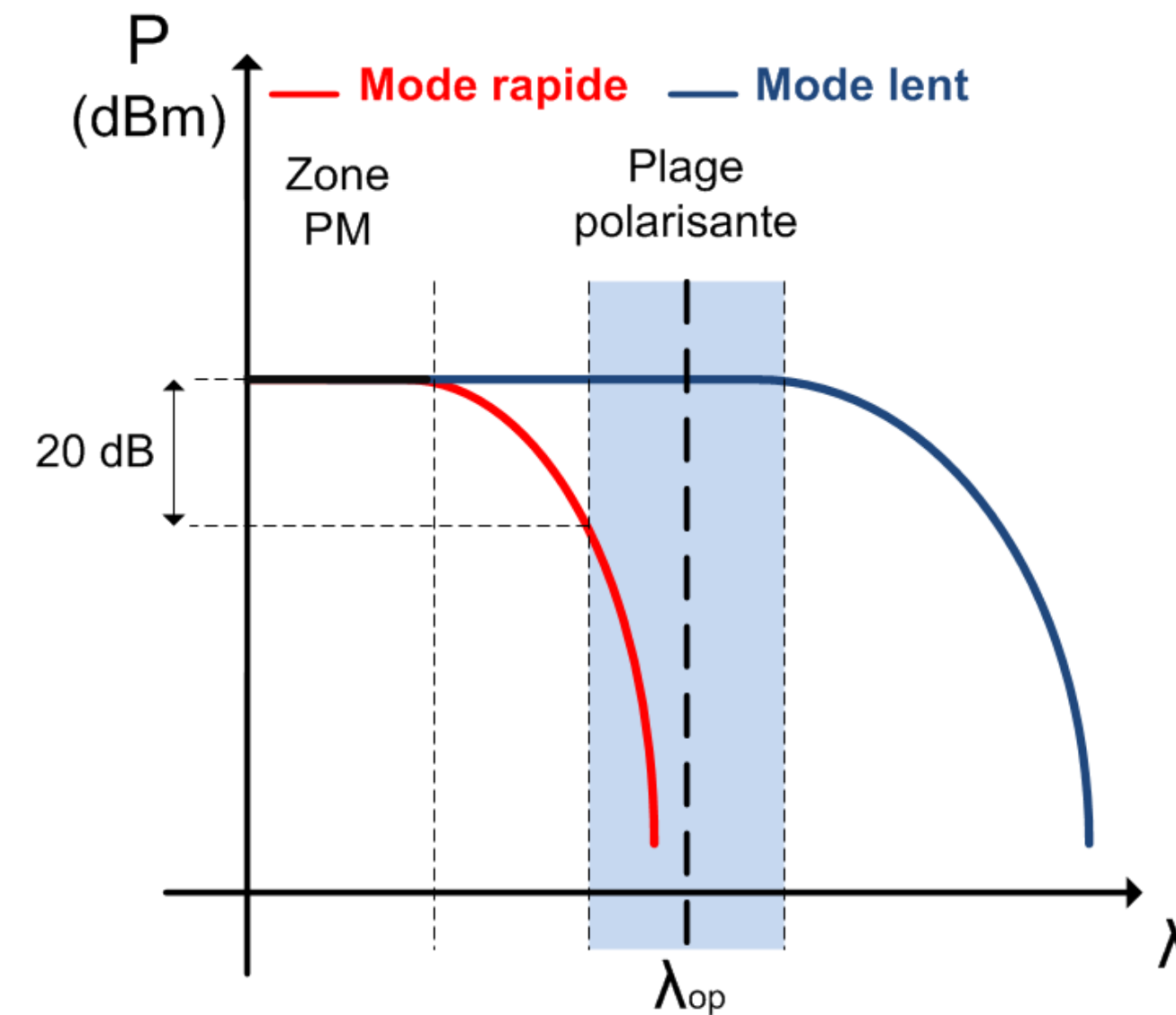
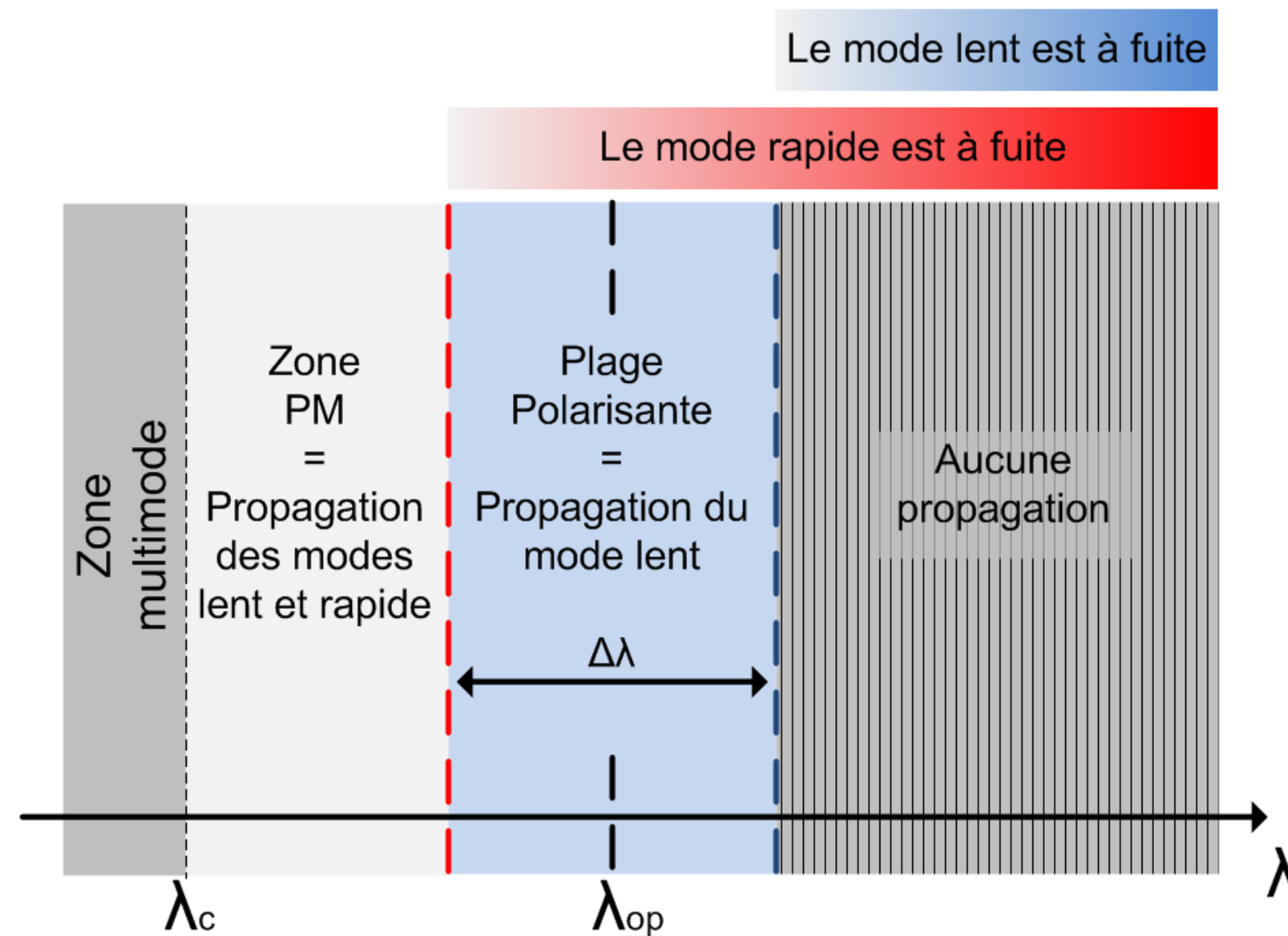
Biréfringence

- Le mode fondamental est en réalité composé de deux modes de polarisation orthogonaux dégénérés
- Pour réaliser une fibre optique polarisante nous devons lever cette dégénérescence
→ Insertion volontaire d'une biréfringence lors de la fabrication

Aucune propagation :



Plage d'utilisation d'une fibre optique polarisante



➤ Elle est capable de polariser et/ou de maintenir l'état de polarisation avec un très bon taux d'extinction (> 50 dB).

Exemples

➤ Polariseurs et lignes à retard

- Utilisation d'une fibre qui nécessite d'être courbée pour être polarisante
- Typiquement 5 m sous test bobinés selon un diamètre de 80 mm
- Elle ne fonctionne pas droite, *elle est alors seulement PM dans cette configuration*

Diamètre de fibre : 80 μm ou 125 μm

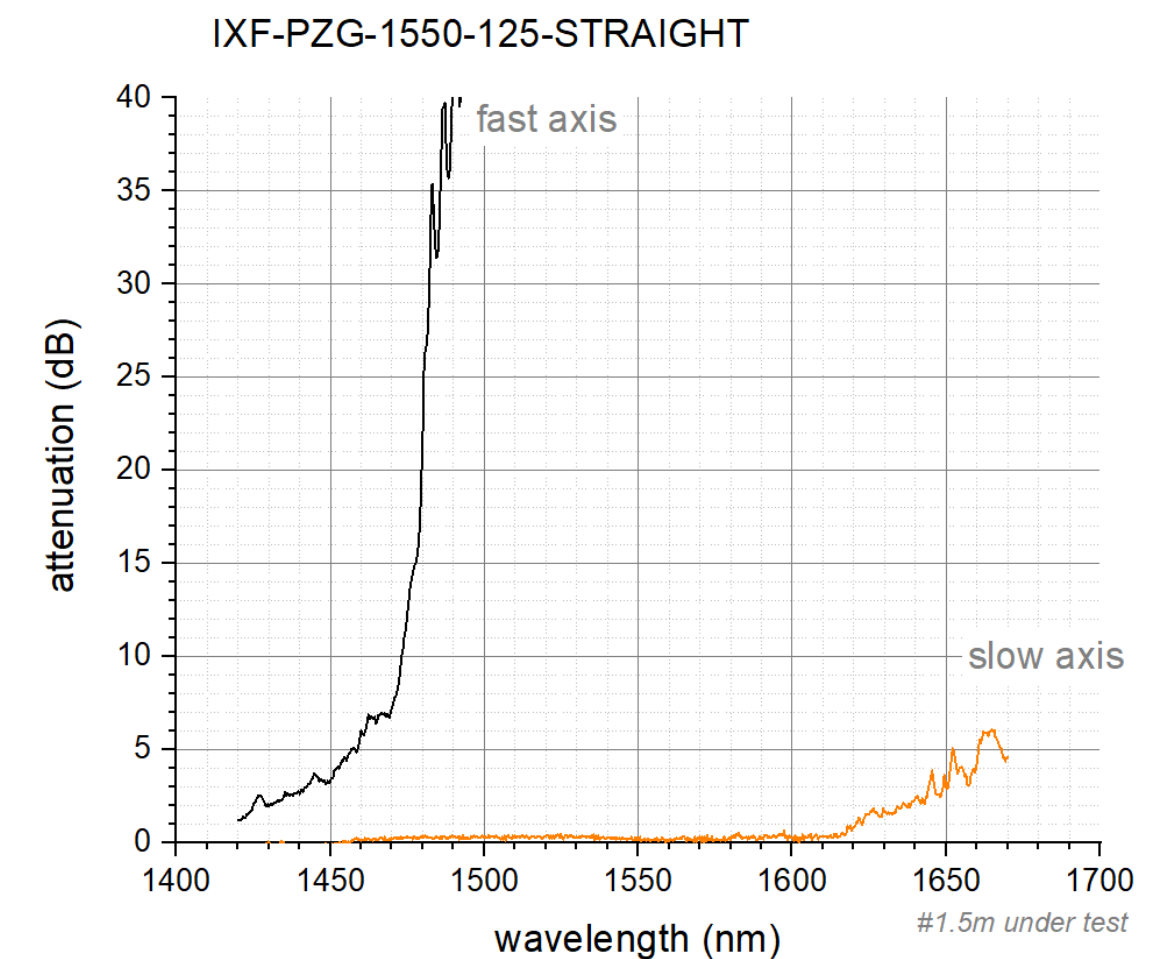
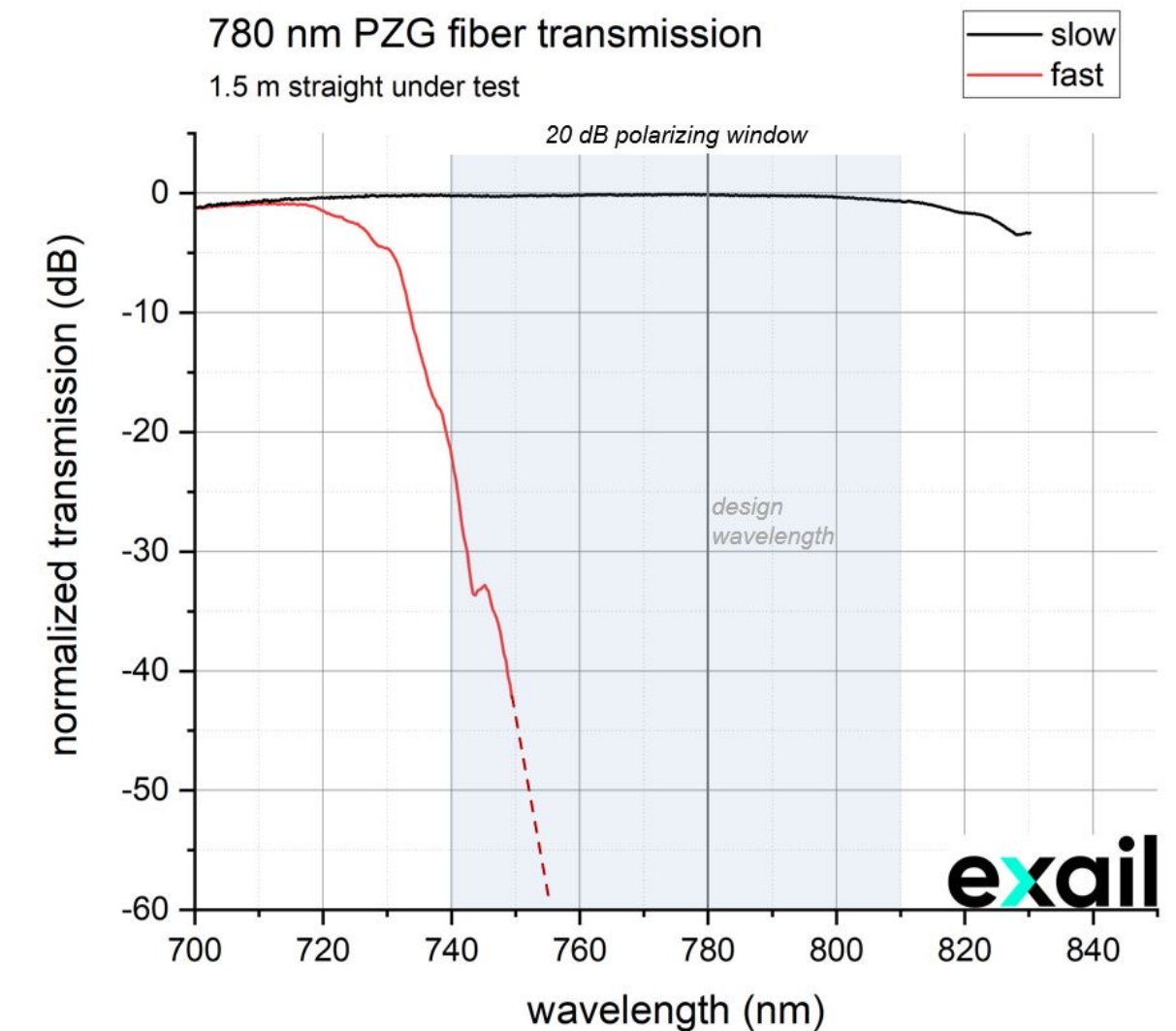
Longueurs d'onde disponibles : 780 nm, 850 nm, 1064 nm, 1310 nm et 1550 nm

➤ Jarretières polarisantes

- Utilisation d'une fibre qui ne nécessite pas d'être courbée pour être polarisante

Diamètre de fibre : 80 μm ou 125 μm

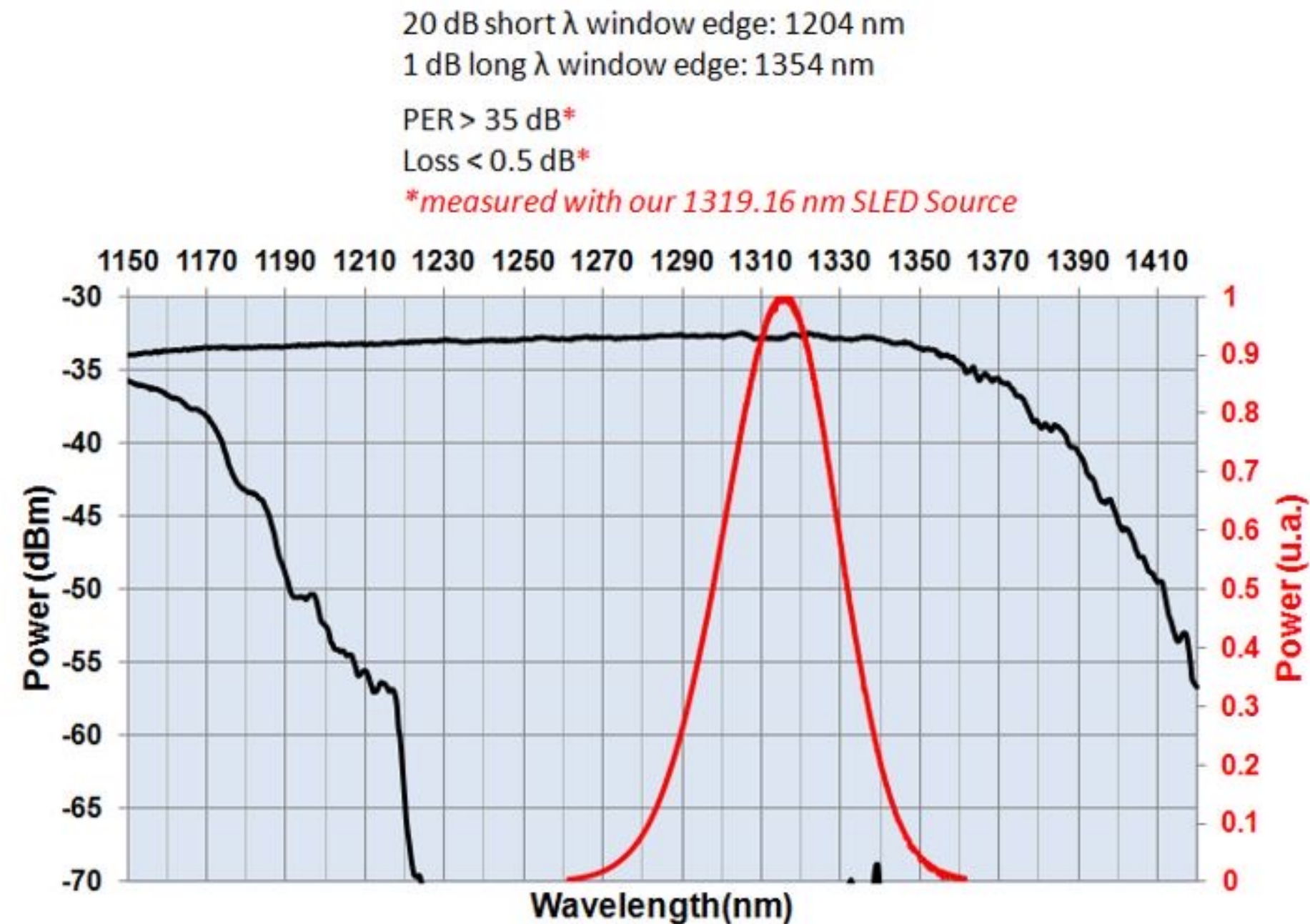
Longueurs d'onde disponibles : 780 nm, 1064 nm et 1550 nm



Applications

► Components for :

- Cold Atom Experiments @780 nm
- Fiber Optic Current Sensors @1310 nm
- Fiber Optic Gyroscopes @820 nm
- Fiber Optic Gyroscopes @1550 nm



FONCTIONS DE FILTRAGE SPECTRAL A BANDE ETROITE PAR RESEAUX DE BRAGG

Techniques de filtrage spectral à bande étroite

➤ Interféromètres de Fabry-Perot

- Ex. : Luna Micron-Optics, Iridian
- Techno tout fibre, accordable par PZT
- BP : 2.8 GHz ou +
- Av. : dimensions
- Inconv. : non flat-top, multi-pics, accordabilité limitée à 1 ISL

➤ Micro-résonateurs en anneaux (PIC)

- Av. : flat-top (cascade)
- Inconv. : couplage plateforme silicium-fibre, multi-pics, accordabilité limitée à 1 ISL.

➤ Systèmes à base de réseau de diffraction

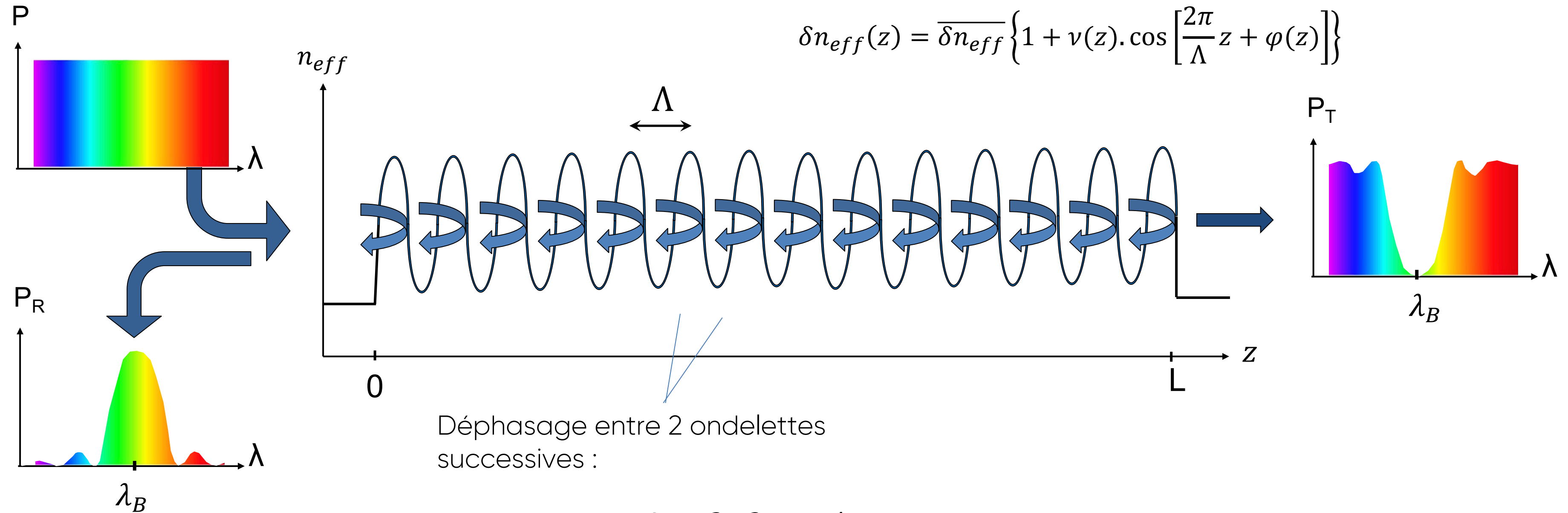
- Ex. : EXFO, SANTEC, ALNAIR
- Interface manuelle ou IHM
- BP : 4 GHz ou +
- Av. : filtre accordable, réglage BP et éventuellement profil
- Inconv. : encombrement, partie mobile, prix élevé

➤ Filtre à diffusion Brillouin stimulée

- Inconv. : difficile à intégrer, prix élevé

➤ Et FBG

Le réseau de Bragg



$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}} \left\{ 1 + v(z) \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}$$

Déphasage entre 2 ondelettes successives :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 2n_{eff} \cdot \Lambda}{\lambda}$$

Recombinaison en phase si $\Delta\varphi = 2m\pi$

$$\lambda = \lambda_B = \frac{2n_{eff} \cdot \Lambda}{m}$$

[1] R.C. Alferness, M.D. Joyner, M.D. Divino, M.J.R. Martyak, L.L. Bull, « Narrowband grating resonator filters in InGaAsP/InP waveguides », Appl. Phys. Lett. 46, No.3 1986

Largeur de bande passante

➤ Relation :

Largeur de bande entre les deux 1^{er} zéros
(FBG uniforme) :

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_B} = \frac{2}{N}$$

➤ Exemple :

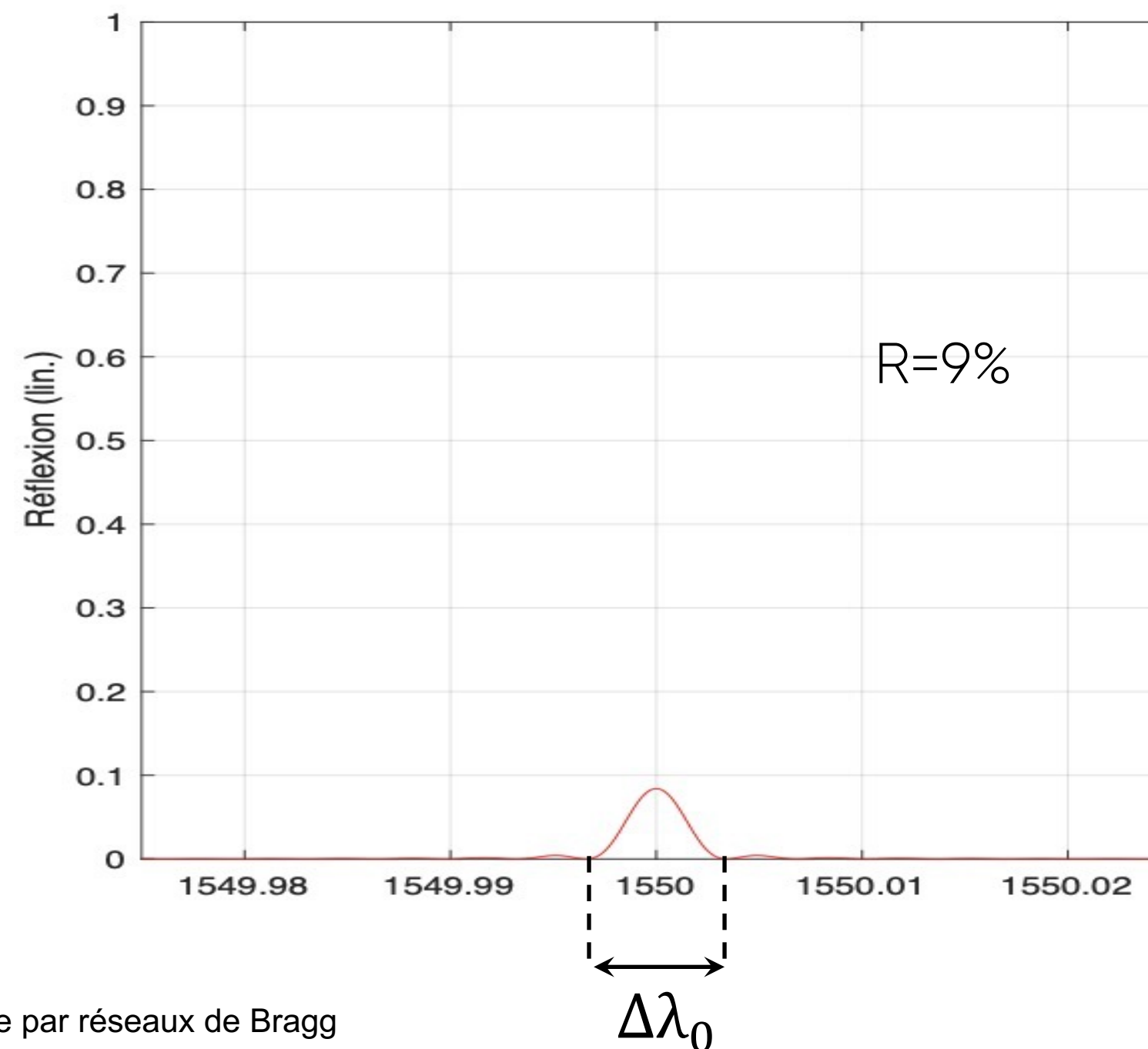
Réseau faible : $\overline{\delta n_{eff}} \cdot v \ll \frac{\lambda_B}{L}$

$L = 24 \text{ cm}$

$\kappa = 0.12 / \text{cm}$

$N = 448100 \text{ traits}$

$\Delta\lambda_0 = 6.9 \text{ pm}$



Largeur de bande passante

➤ Relation :

Largeur de bande entre les deux 1^{er} zéros
(FBG uniforme) :

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_B} = \frac{2}{N}$$

➤ Exemple :

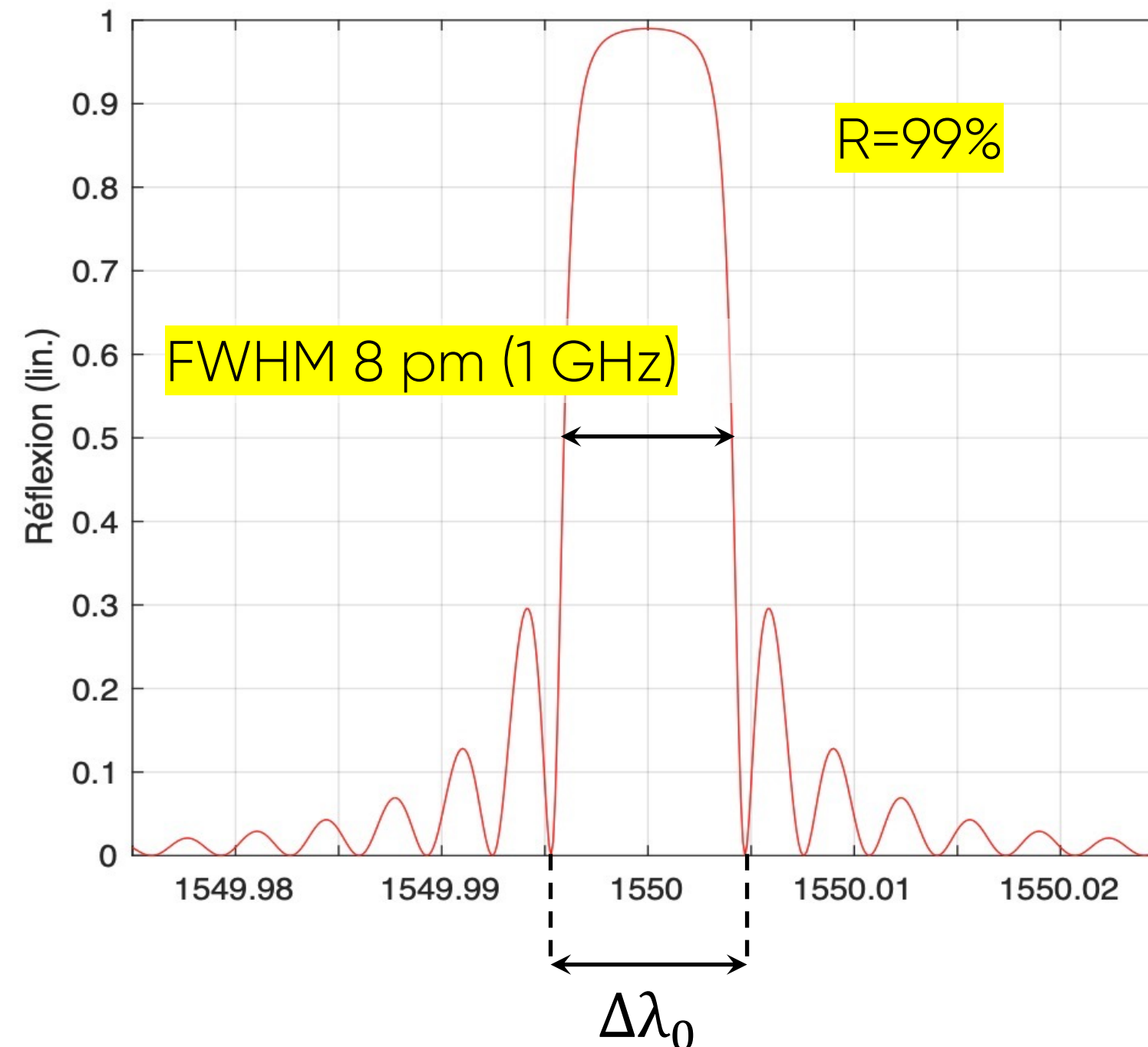
Réseau fort : $\overline{\delta n_{eff}} \cdot v \ll \frac{\lambda_B}{L}$

L = 24 cm (masque indisponible)

$\kappa = 1.2$ /cm

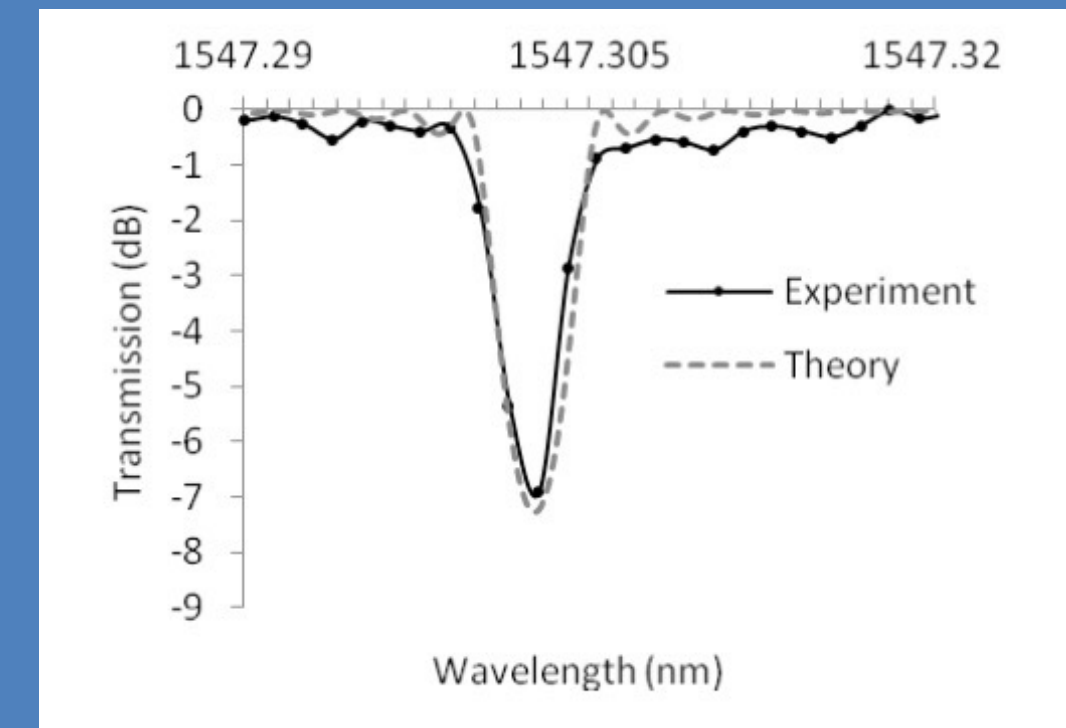
N = 448100 traits

$\Delta\lambda_0 = 9.4$ pm

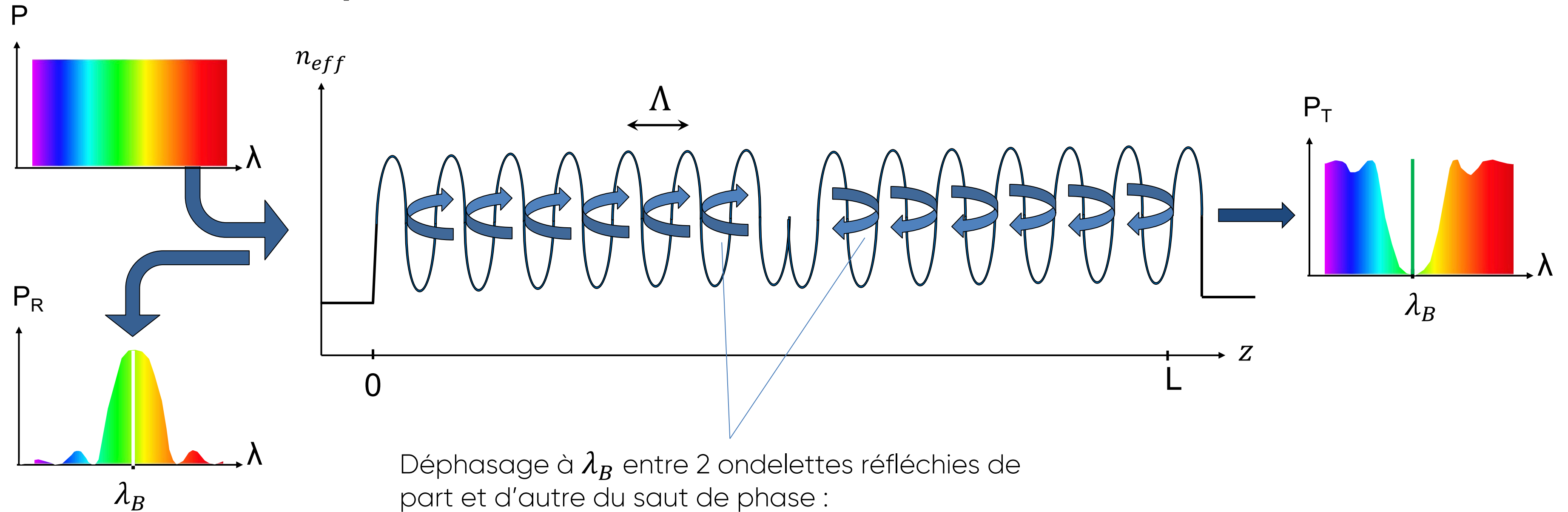


Cas particulier : FBG très longs
(interféromètre EOPM)

[1] M. Gagné, S. Loranger, J. Lapointe, R. Kashyap,
« Fabrication of high quality, ultra-long fiber Bragg
gratings: up to 2 million periods in phase ». *Optics
Express*, Vol. 22, No.1, 2013



Le réseau à saut de phase



$$\Delta\varphi = 2.m.\pi$$

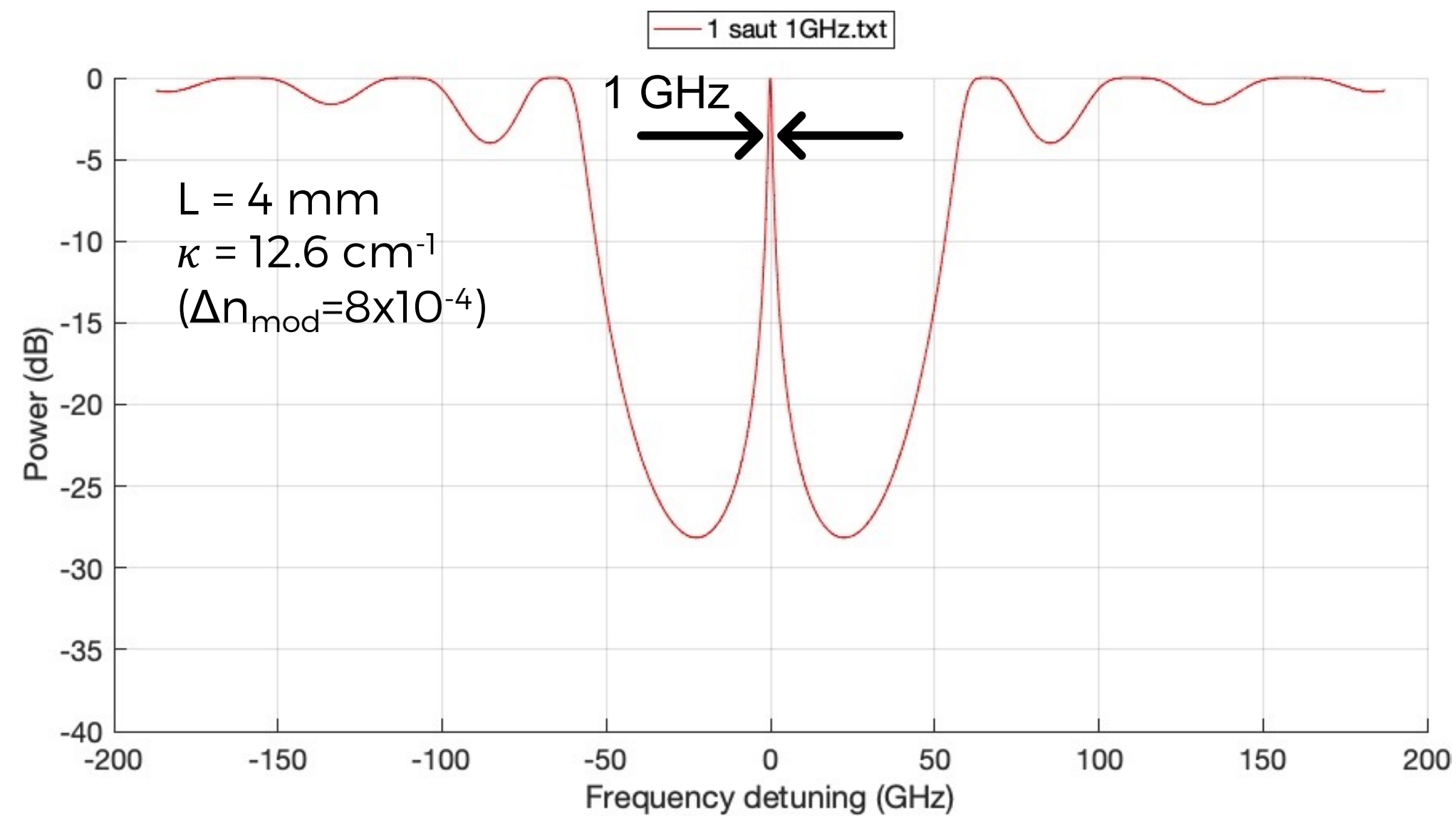
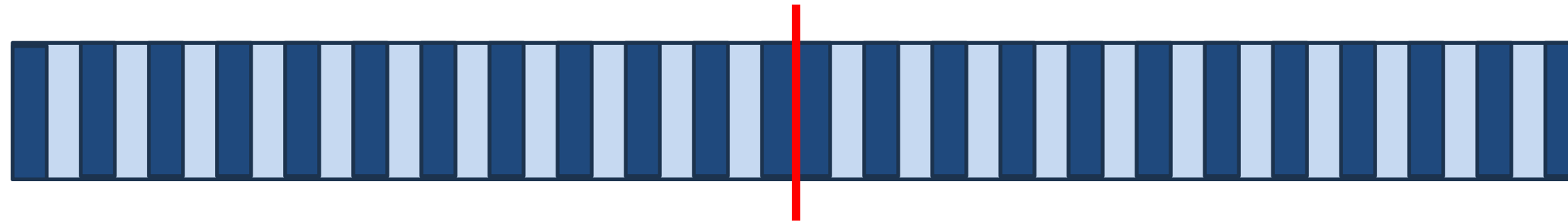
Recombinaison en phase -> résonateur de Fabry-Perot distribué

Génération d'une BP étroite à λ_B [1]

Réponse spectrale FBG à 1 saut de phase

➤ Bande-passante de 1 GHz

$$\Delta\varphi = 2.\pi$$

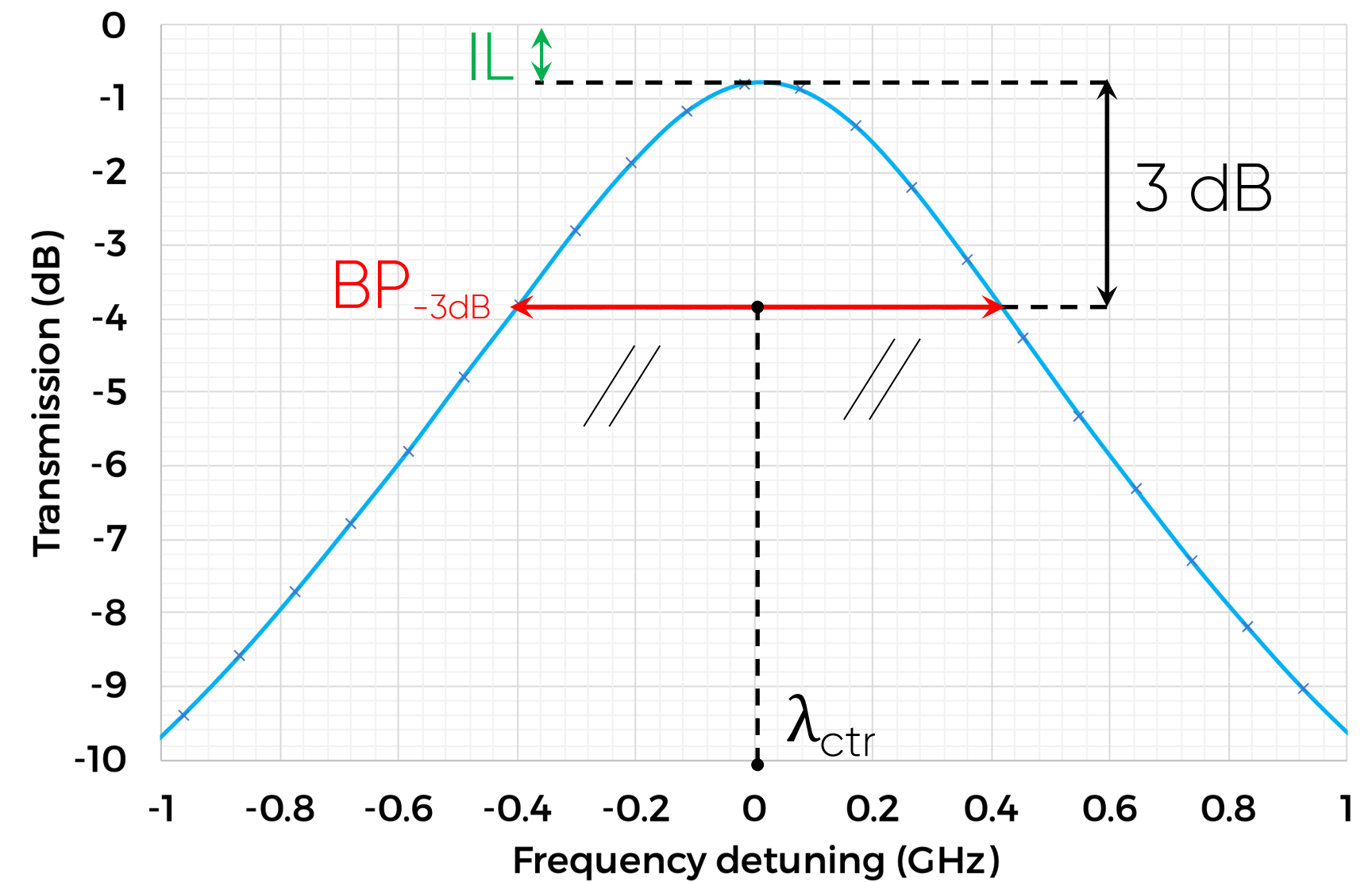
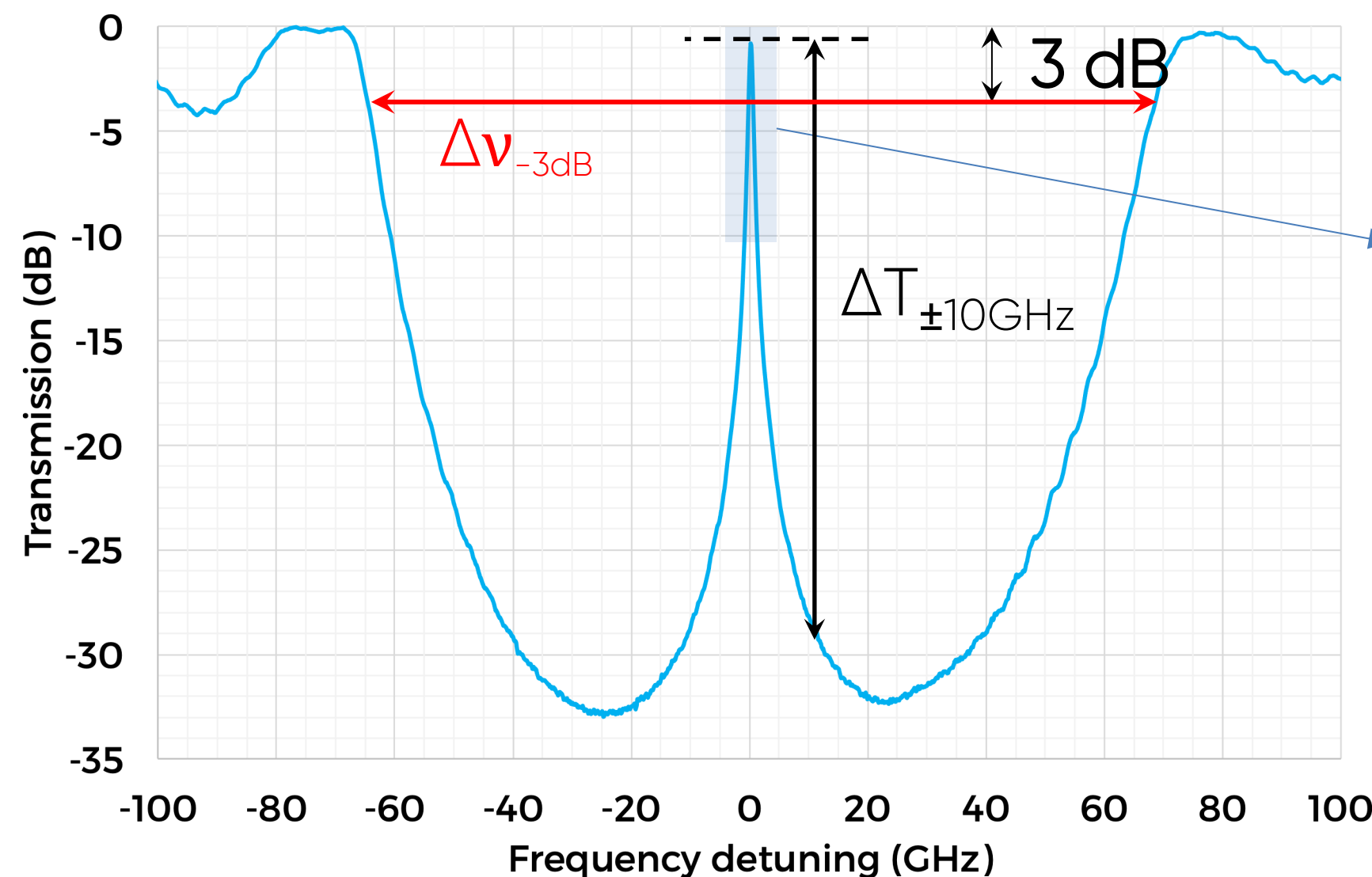


Rappel :

1 GHz \equiv 8 pm à $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Caractéristiques d'un filtre à bande étroite (saut de phase)

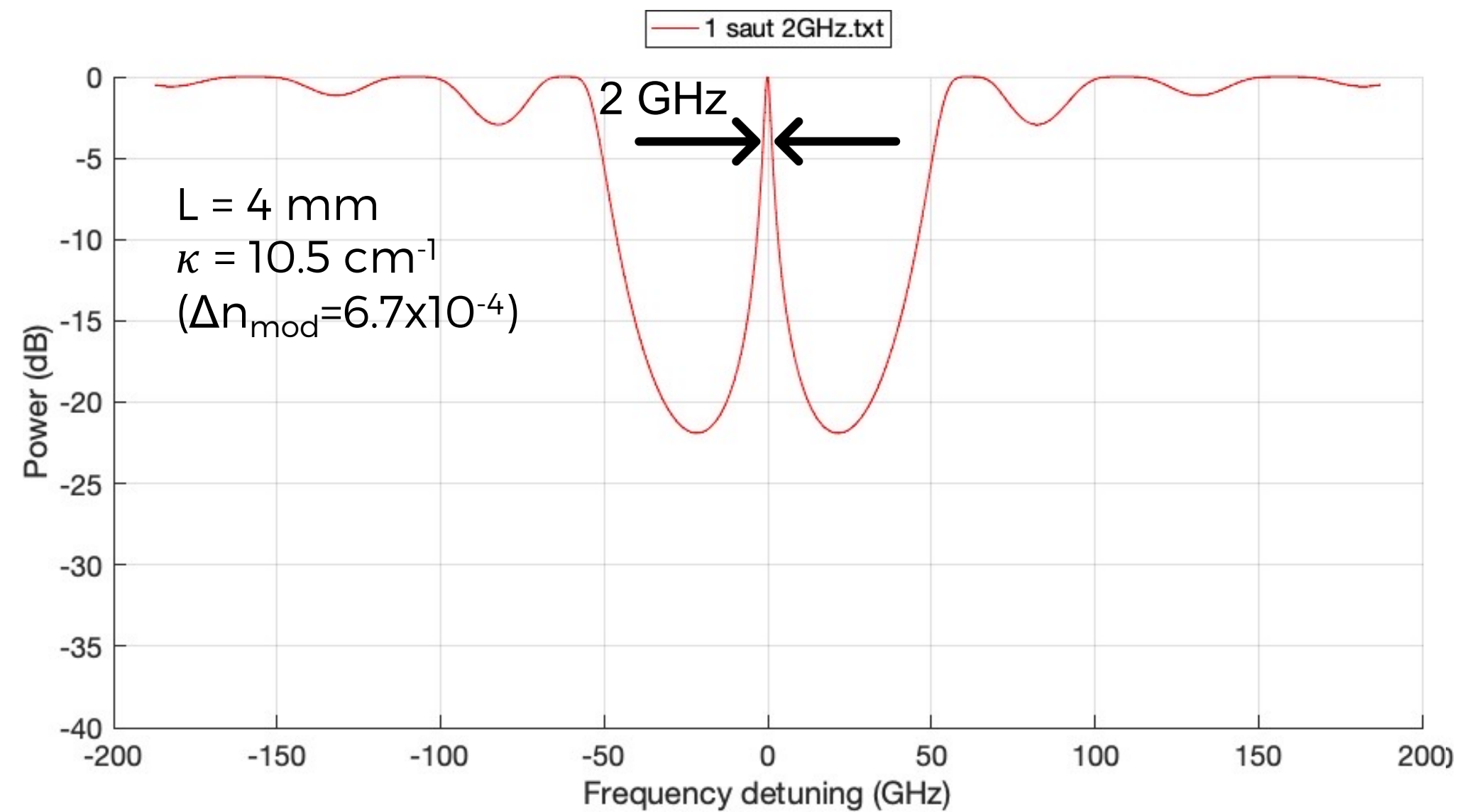
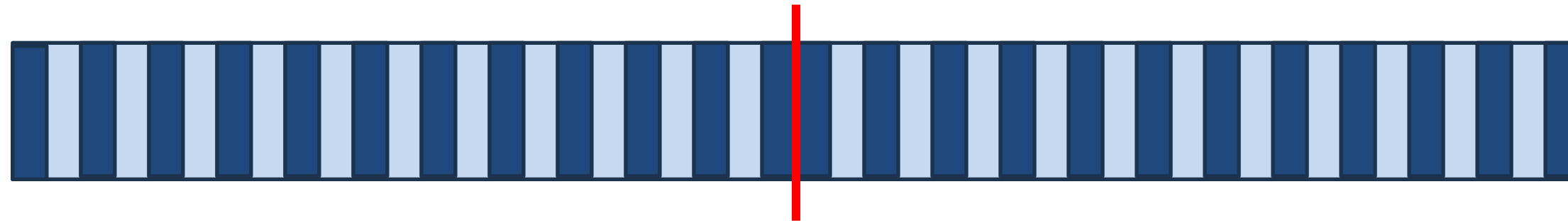
- Type de fibre SM, PM, gamme λ d'utilisation
- L : longueur du réseau
- κ : facteur de couplage du réseau



Réponse spectrale FBG à 1 saut de phase

➤ Bande-passante de 2 GHz

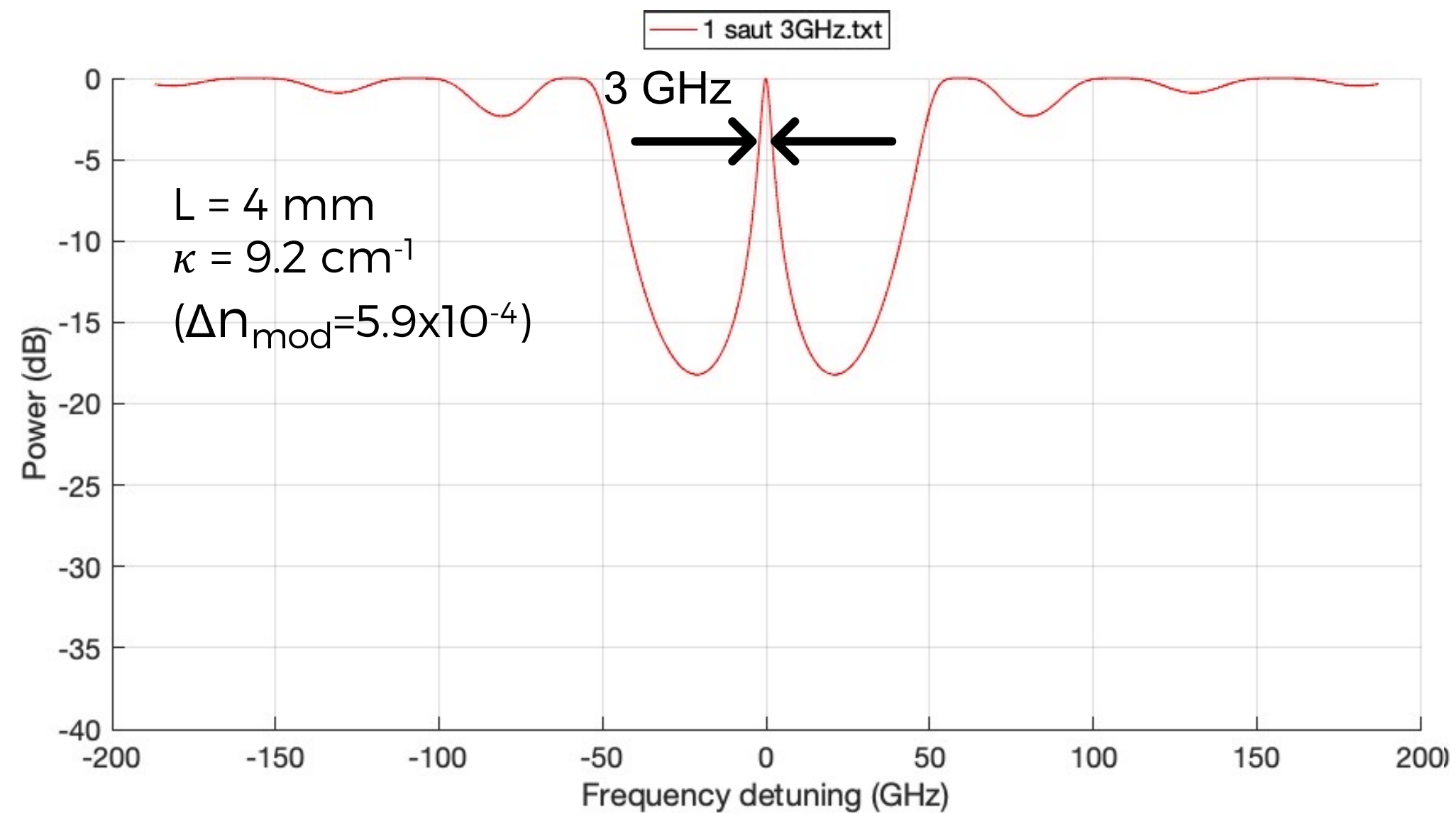
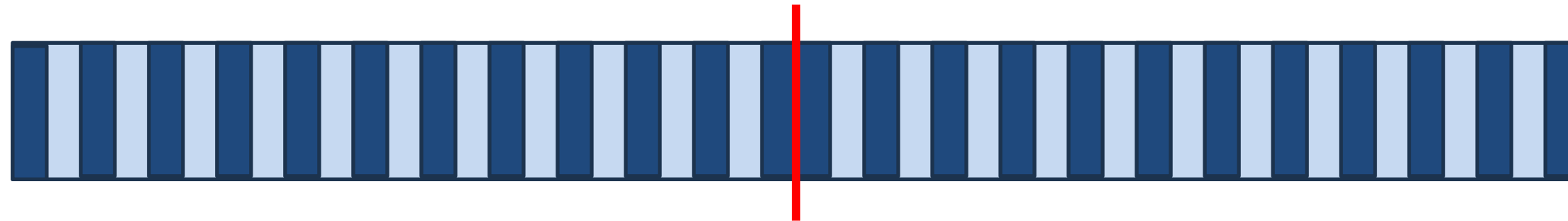
$$\Delta\varphi = 2.\pi$$



Réponse spectrale FBG à 1 saut de phase

➤ Bande-passante de 3 GHz

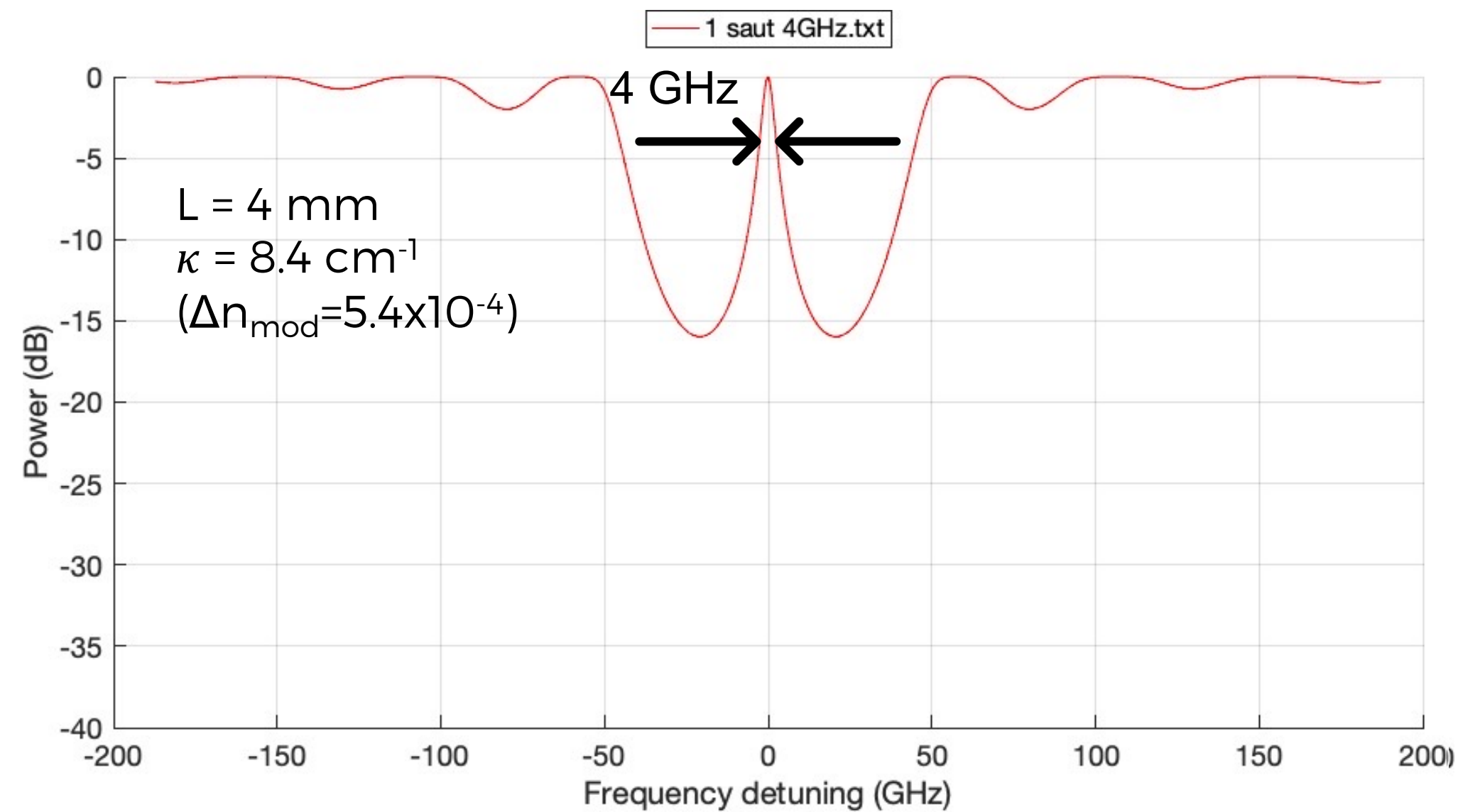
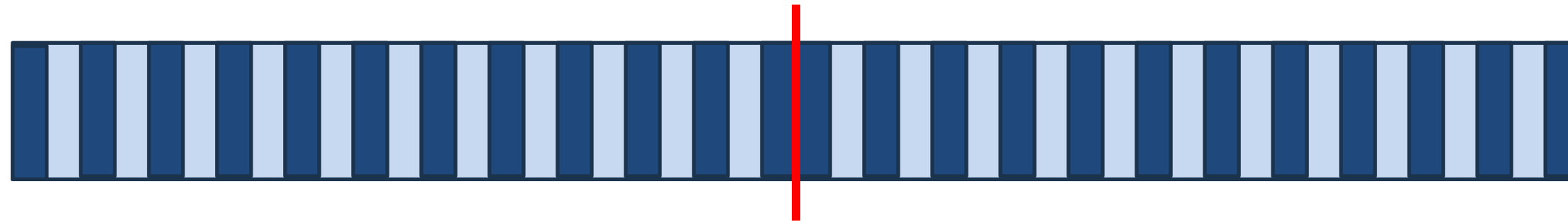
$$\Delta\varphi = 2.\pi$$



Mise en forme spectrale

➤ Bande-passante de 4 GHz

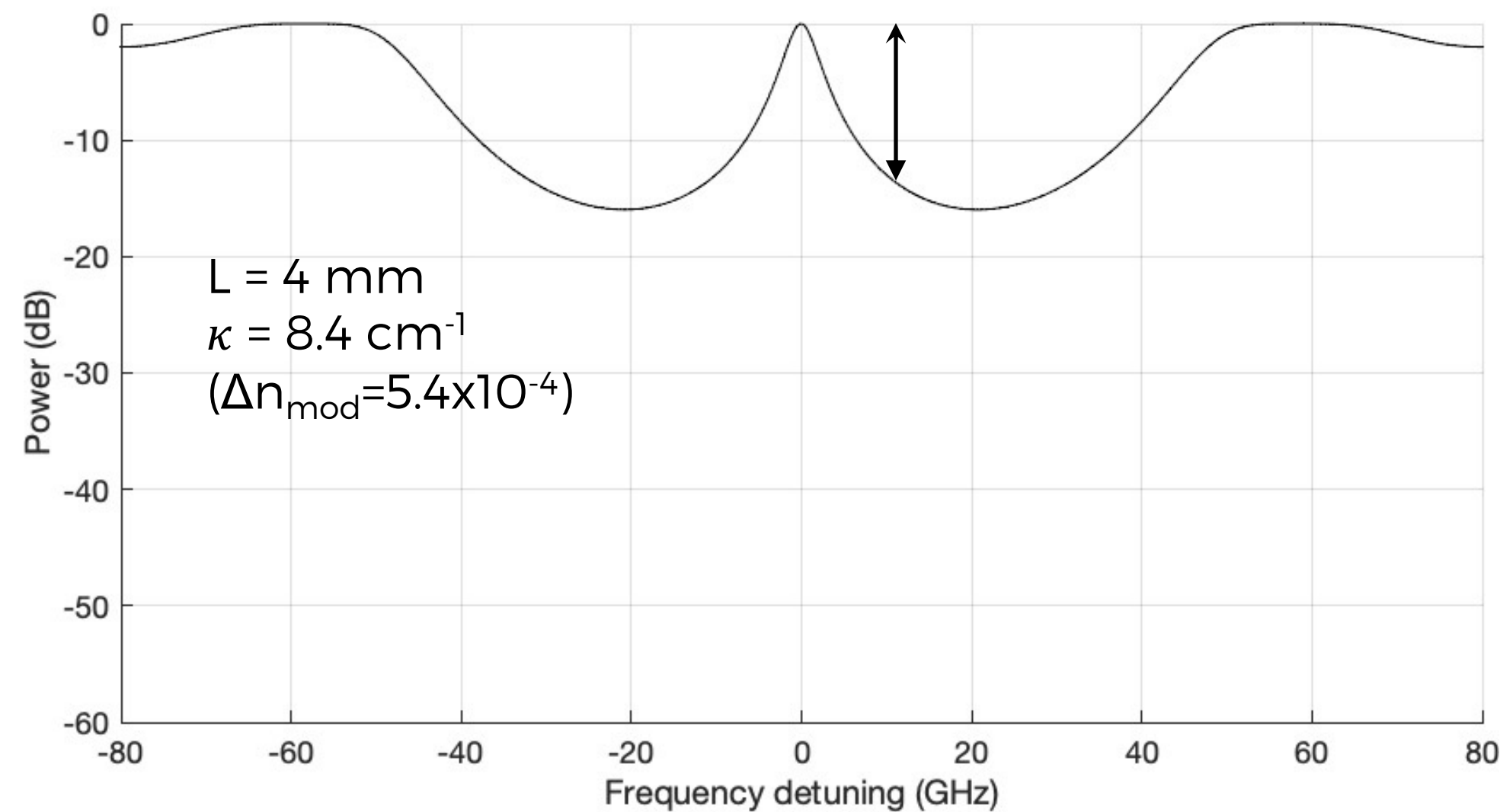
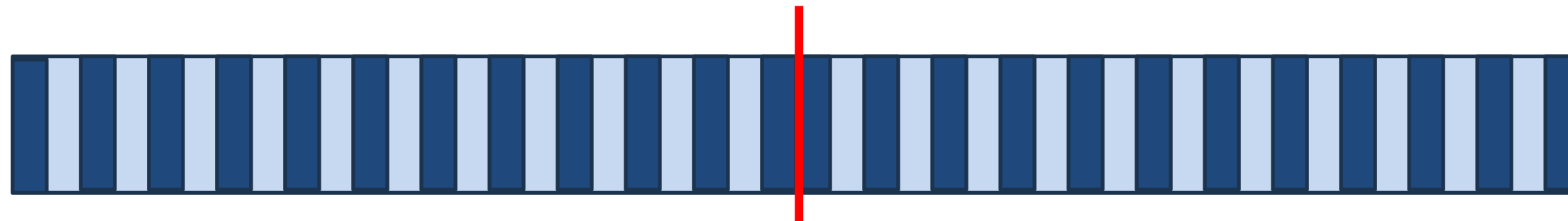
$$\Delta\varphi = 2.\pi$$



Optimisation de la réponse spectrale

➤ Comment améliorer la qualité du filtre ?

$$\Delta\varphi = 2.\pi$$



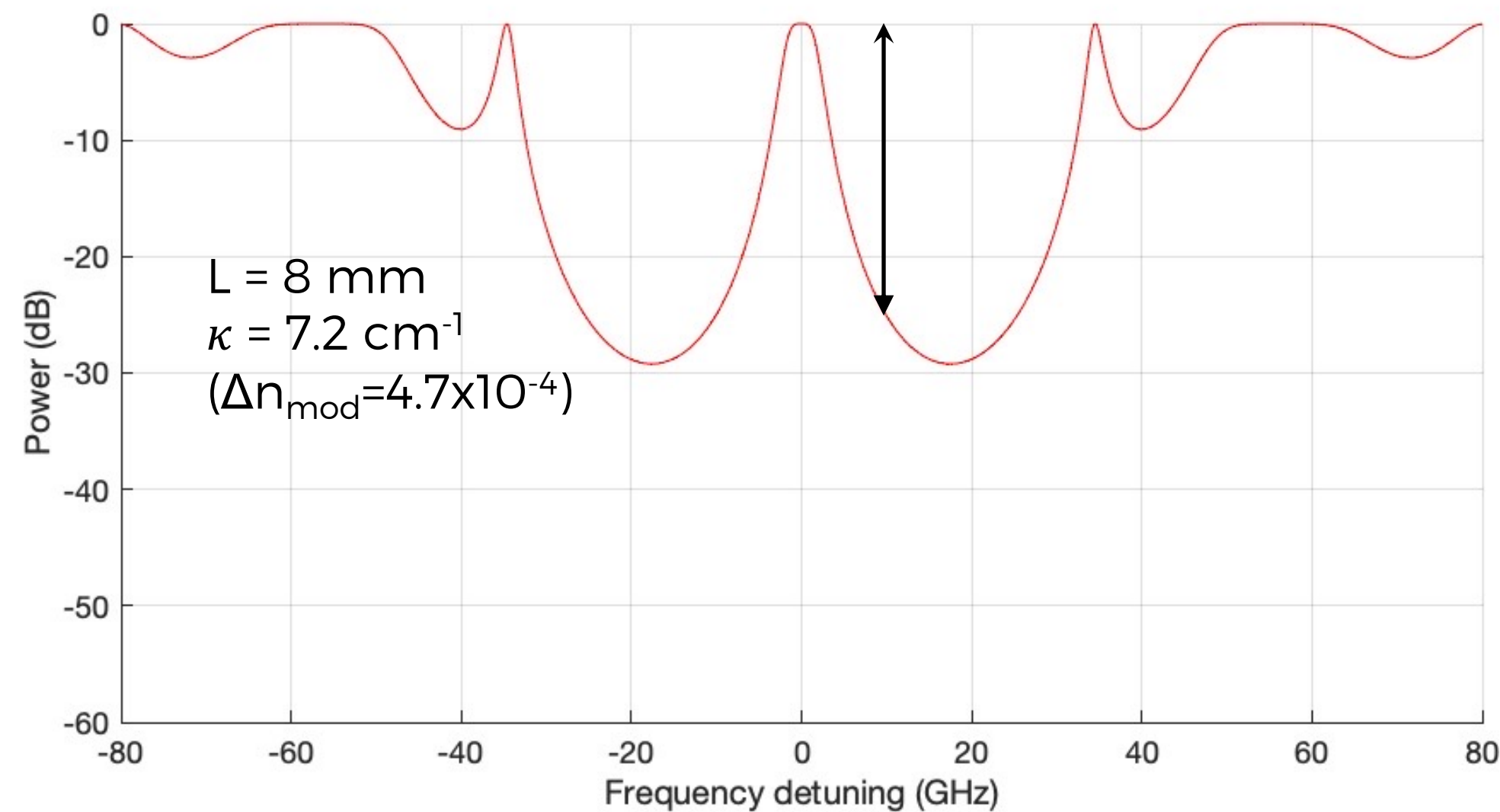
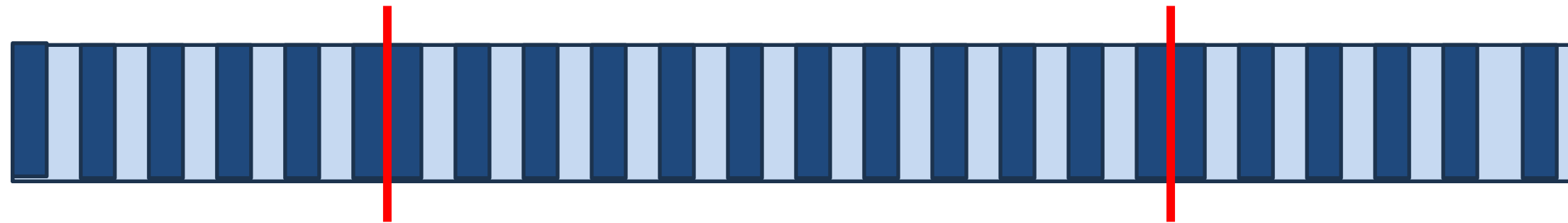
$$\Delta T_{10 \text{ GHz}} = 13 \text{ dB}$$

$$s = 0.16$$

Optimisation de la réponse spectrale

► Filtre à 2 sauts de phase

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = 2.\pi$$



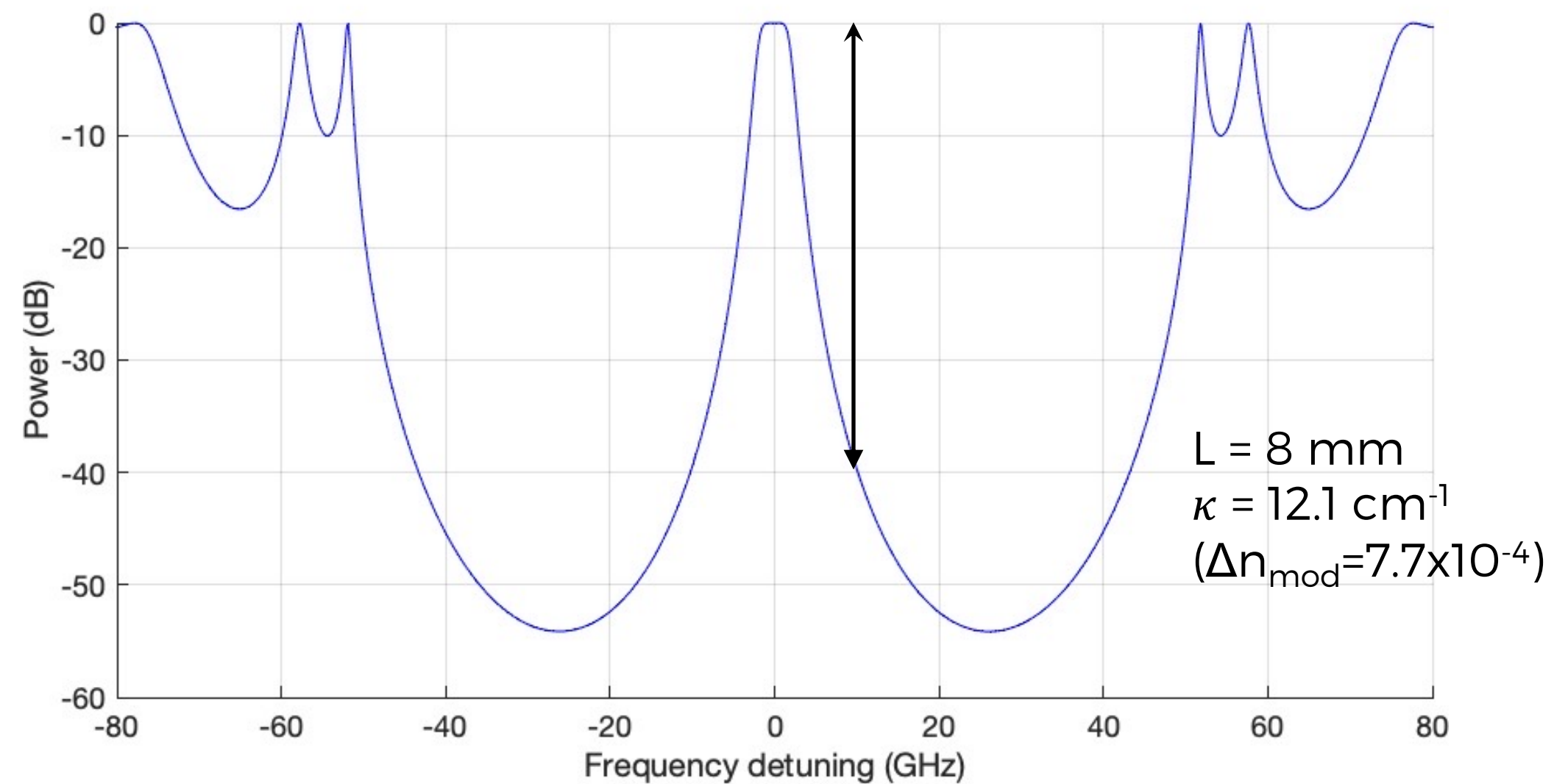
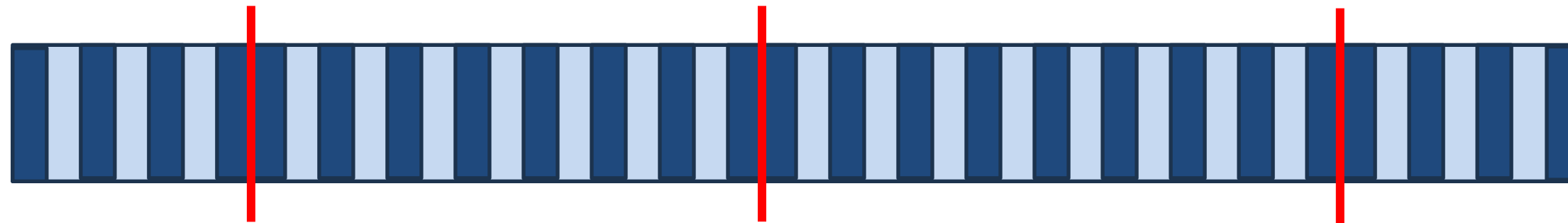
$$\Delta T_{10 \text{ GHz}} = 25 \text{ dB}$$

$$s = 0.39$$

Optimisation de la réponse spectrale

► Filtre à 3 sauts de phase

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_3 = 2.\pi$$



$$\Delta T_{10 \text{ GHz}} = 40 \text{ dB}$$

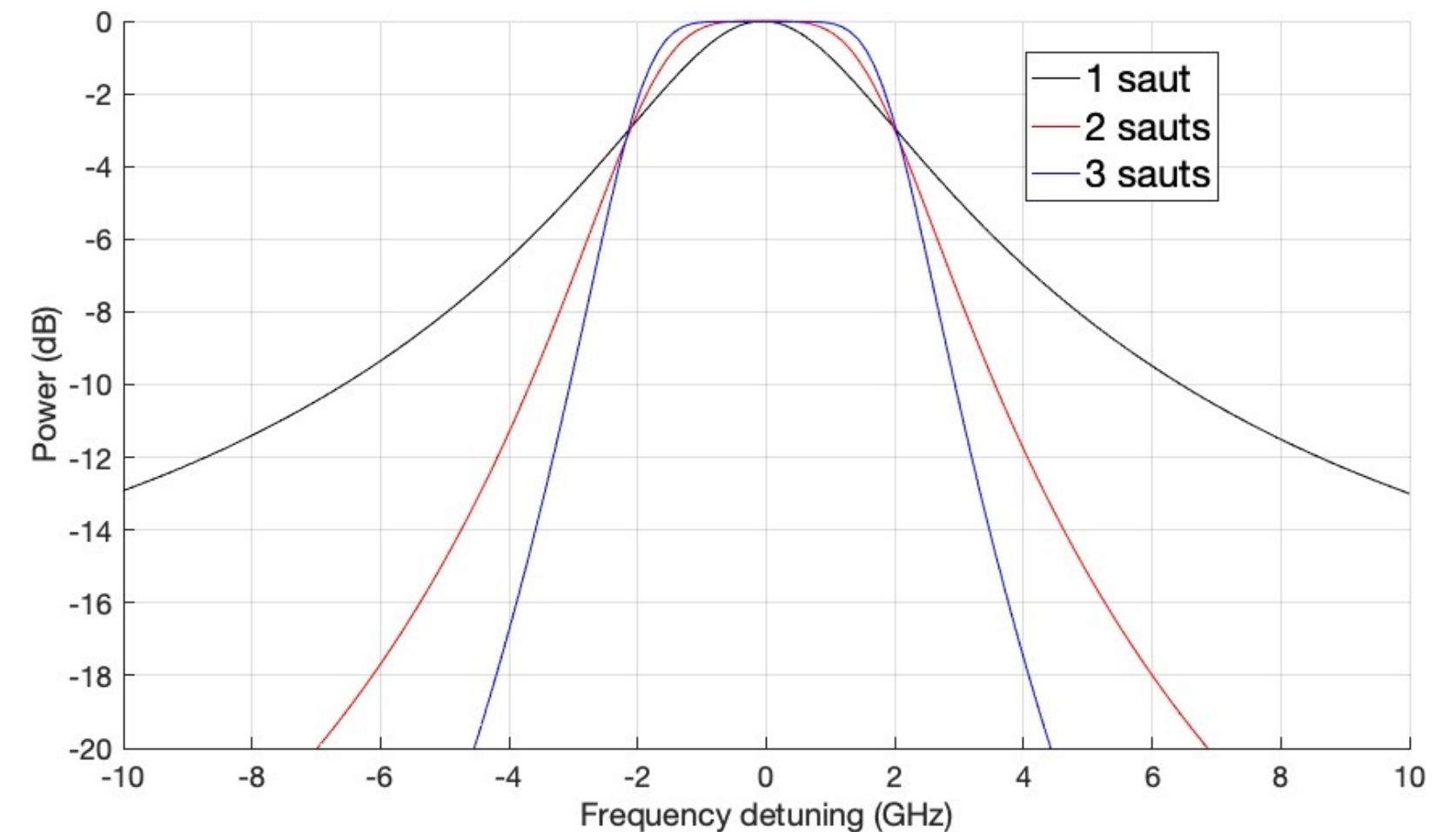
$$s = 0.55$$

Optimisation de la réponse spectrale

► Avantages/Inconvénients avec plusieurs sauts de phase

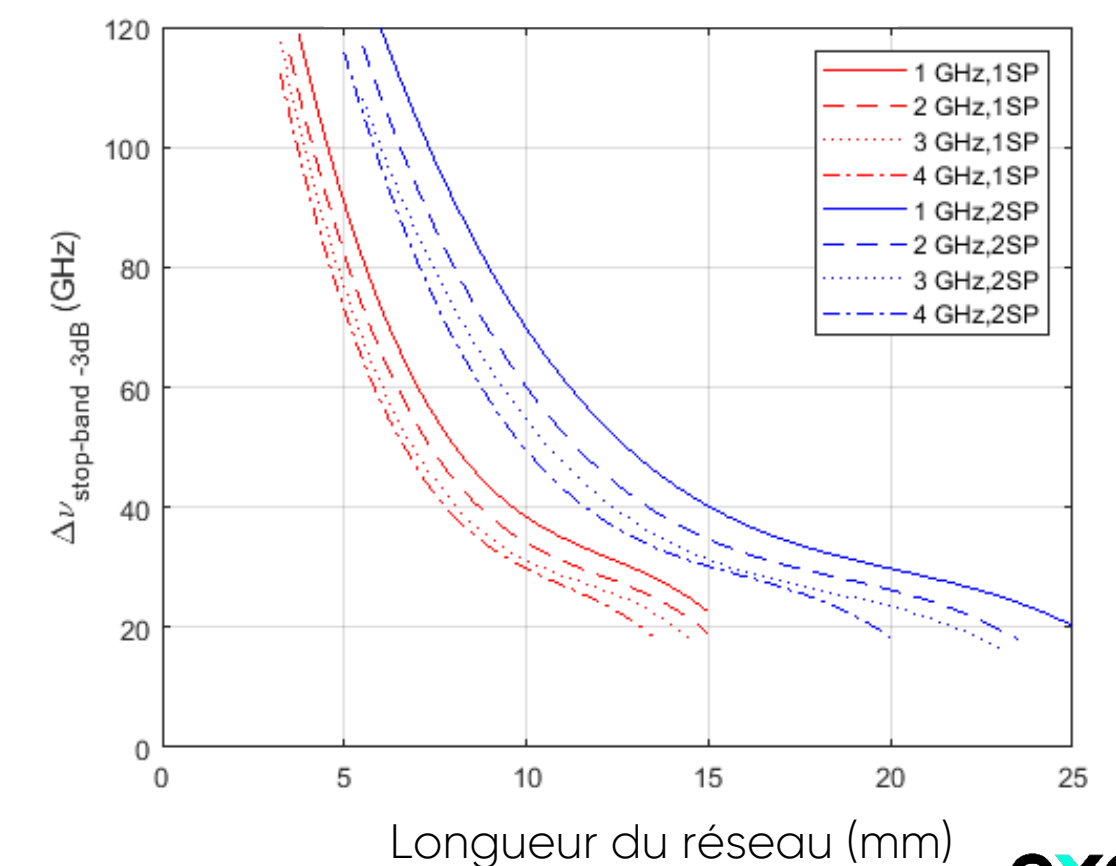
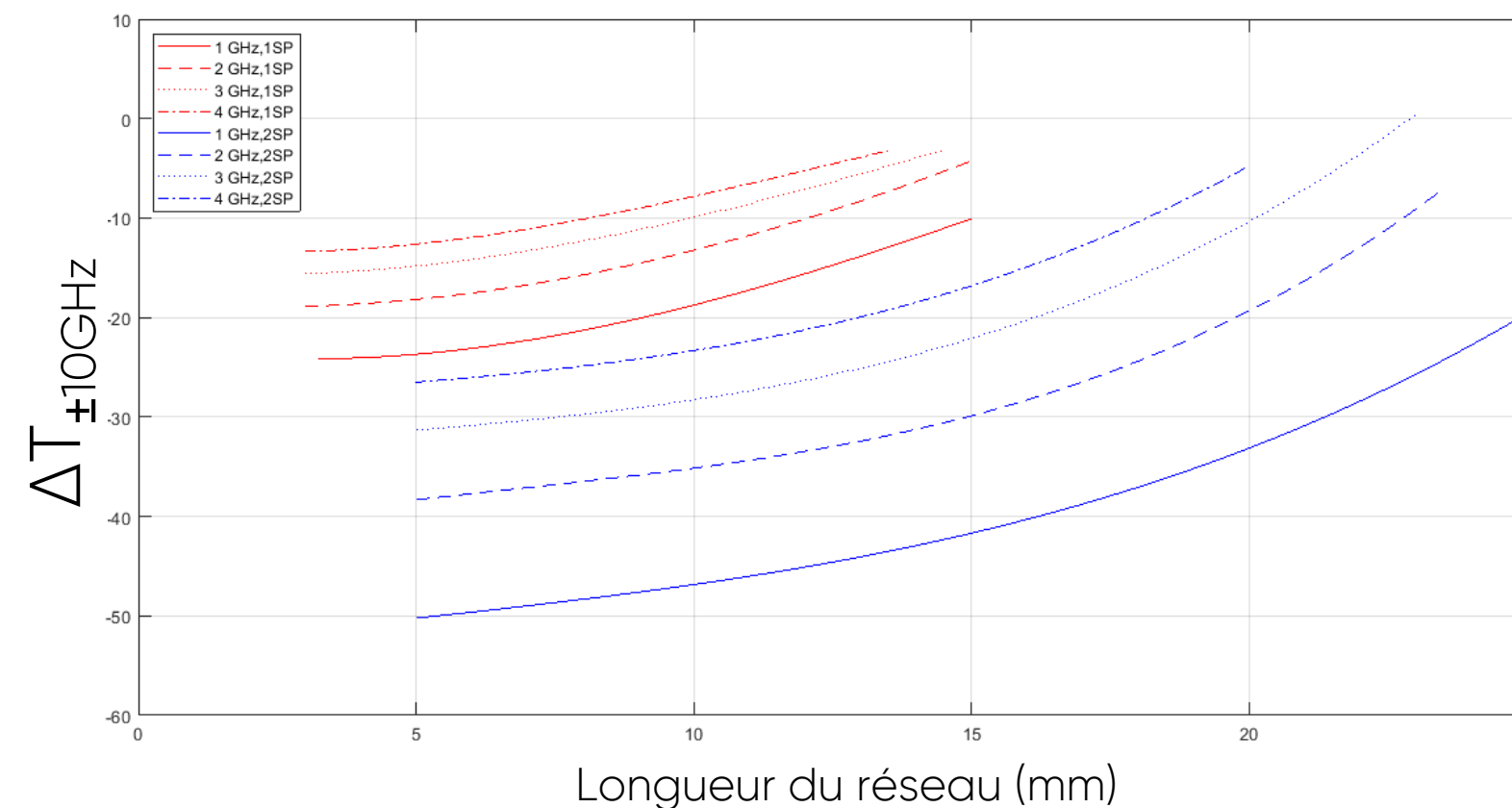
Avantages :

- on améliore la réjection du filtre $\Delta T_{10\text{GHz}}$, d'autant plus que
- on élargit la bande d'atténuation
- filtre plus « flat-top » donc réduction de la sensibilité au glissement fréquentiel.



Inconvénients :

- à L fixe il faut augmenter κ
- plus difficile à fabriquer

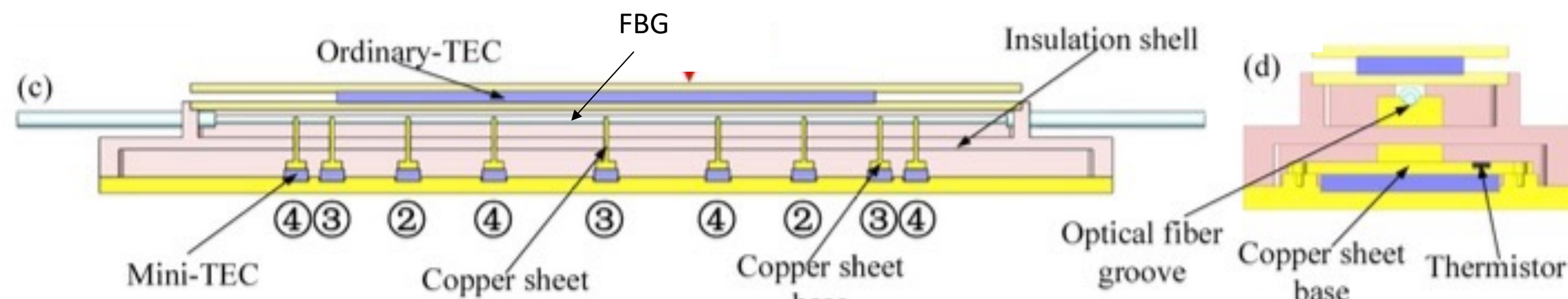
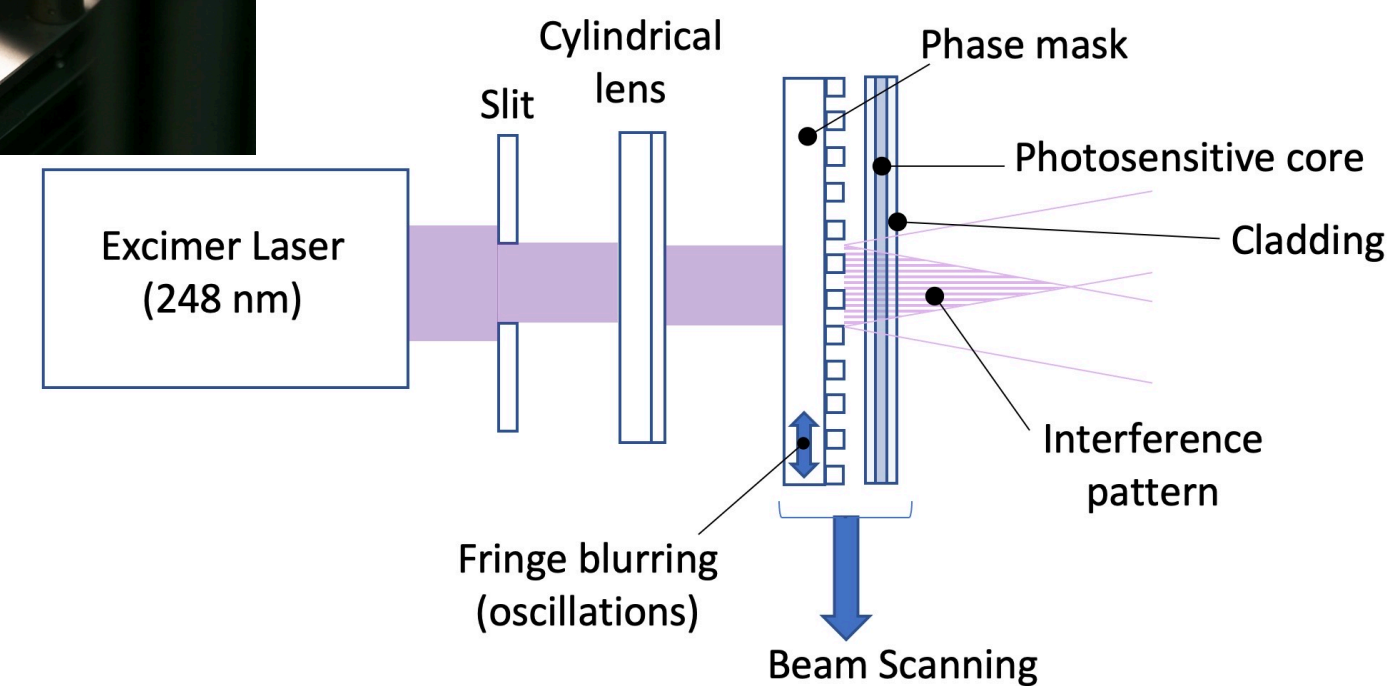
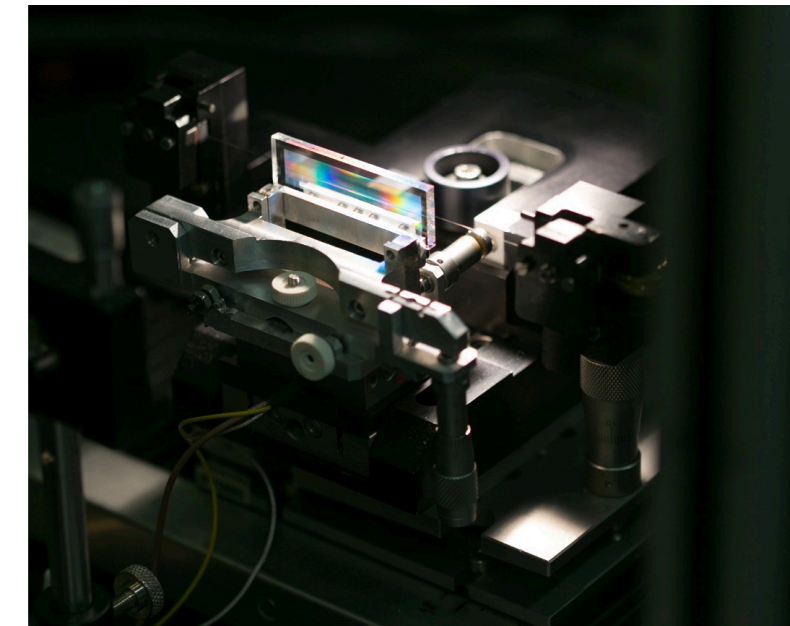


Différents procédés de réalisation

➤ Photoinscription par masque de phase (UV, Fs)

➤ Réalisation du saut de phase :

- Durant la photoinscription :
 - Saut de phase intégré dans la gravure du masque
 - Décalage du masque / fibre
- A posteriori :
 - UV post-processing [2]
 - Laser CO₂
 - Mini-TEC [3]



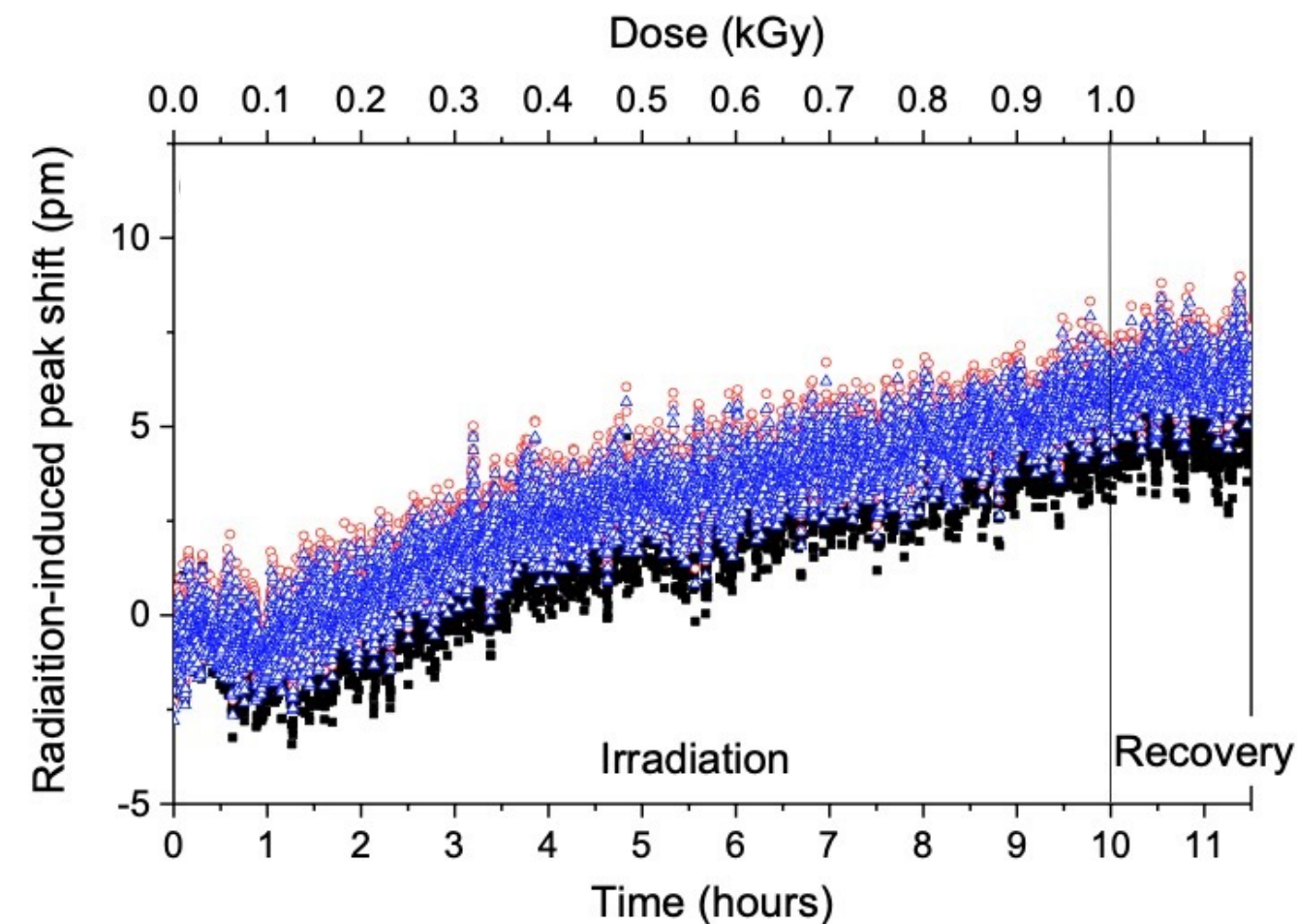
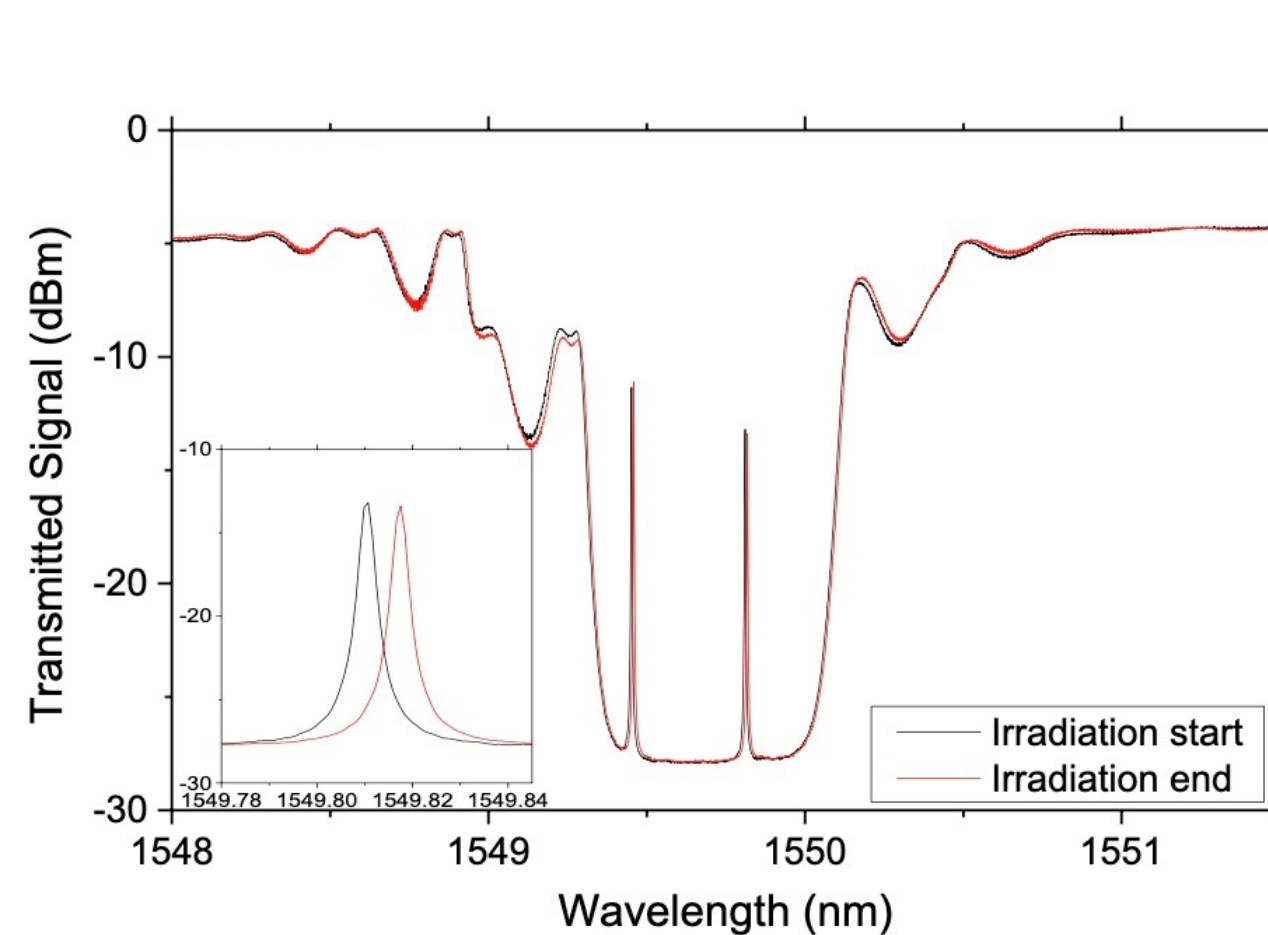
[2] J. Canning, M.G. Sceats, « π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing », *Electronics Letters*, Vol. 30, No.16, 1994

[3] H. Liang, K. Ying, D. Wang, H. Pi, X. Li, Z. Wang, F. Wei, H. Cai, « All-fiber narrow-bandwidth rectangular optical filter with reconfigurable bandwidth and tunable center wavelength », *Optics Express*, Vol. 29, No.8, 2021.

Sensibilité aux radiations (applications spatiales)

➤ Les radiations peuvent entraîner un décalage de la longueur de Bragg (RI-BWS)

- Spectre de transmission avant et après irradiation X (1 kGy, 30 mGy/s, température ambiante)



- En principe : RI-BWS = RI-peak shift
- RI- λ_{peak} +5 pm sur l'exemple ci-joint (passivation de 8H à 120°C)
- Nouveaux essais en cours sur différents types de FBG-PS

[1] A. Morana, E. Marin, S. Girard, L. Lablonde, E. Pinsard, G. Mélin, T. Robin, A. Boukenter, Y. Ouerdane, « Radiation-response of Distributed Feedback (DFB) Bragg gratings for space applications », IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 67, Issue 1, 2020

[2] A. Morana, E. Marin, L. Lablonde, T. Blanchet, T. Robin, G. Cheymol, G. Laffont, A. Boukanter, Y. Ouerdane, S. Girard, « Radiation effects on Fiber Bragg Gratings : vulnerability and hardening studies », Sensors, 22(21), 2022.

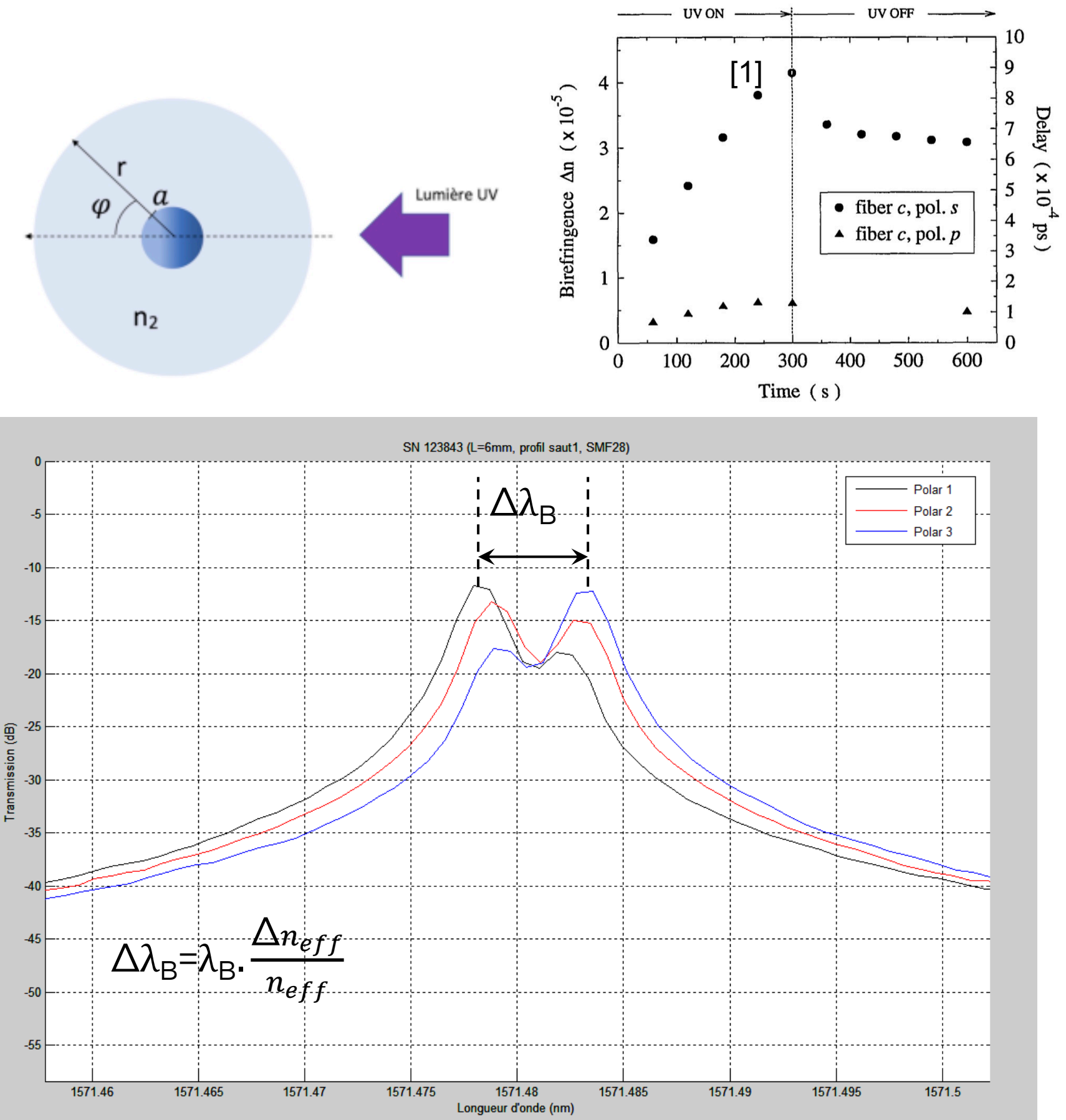
Limitations

➤ Biréfringence dans la fibre à réseau de Bragg

- Biréfringence de phase résiduelle dans la fibre
- Biréfringence induite par le faisceau d'inscription, croît avec κ
 - Réponse anisotrope du matériau à la polarisation de la lumière
 - Asymétrie de l'élévation d'indice dans le cœur (absorption du faisceau UV par le matériau)

➔ Instabilités sur fibre SM : apparition d'une biréfringence photoinduite Δn_{eff} de qq 10^{-6} ce qui correspond à un dédoublement du pic de résonance : deux pics séparés de qq pm

➔ Filtre de BP < 2GHz seulement sur fibre PM (force la réponse sur un axe propre de la fibre).



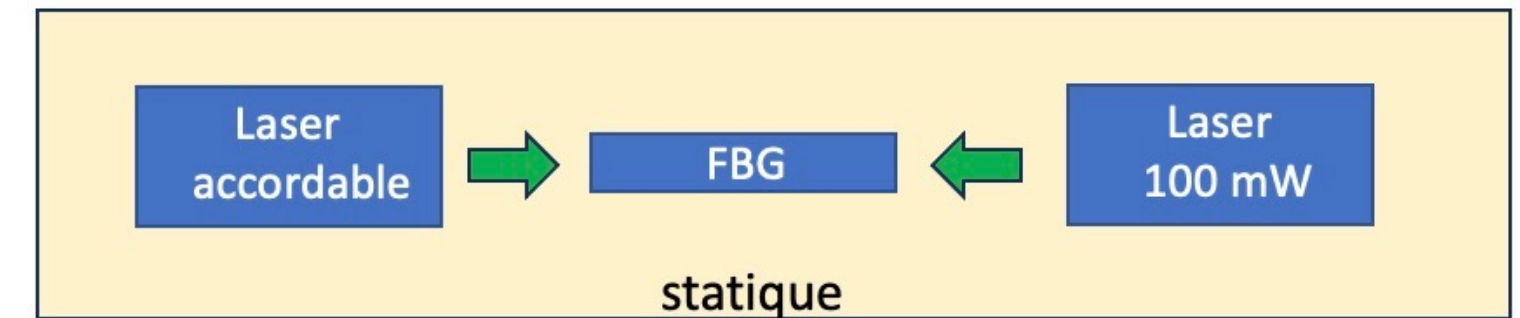
[1] T. Erdogan, V. Mizrahi, "Characterization of UV-induced birefringence in photosensitive Ge-doped silica optical fibers", J. Opt. Soc. Am. B/Vol.11, No. 10, 1994.

[2] K. Dossou, S. LaRoche, M. Fontaine, « Contribution of the transverse asymmetry of the index change to the birefringence of fiber Bragg gratings : a numerical calculation », ECOC, 2001

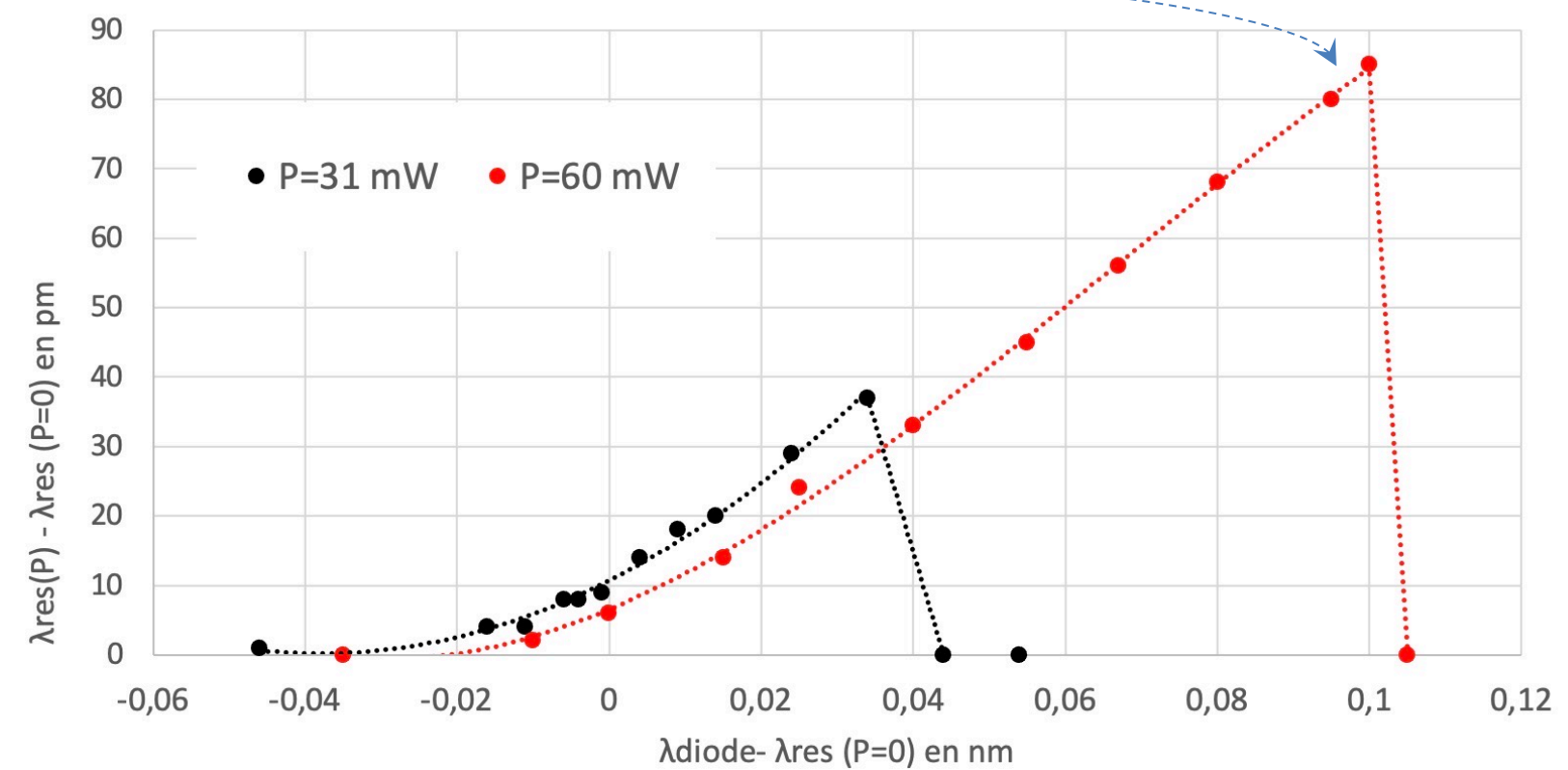
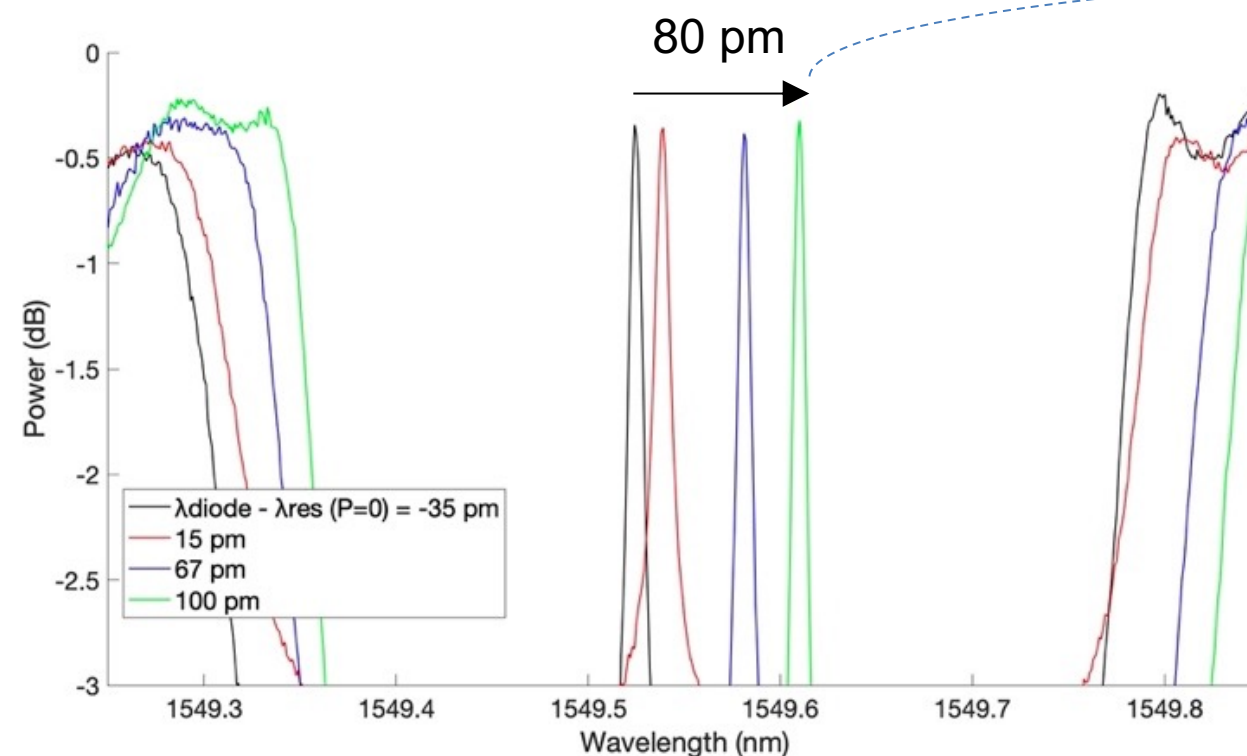
Limitations

➤ Attention à la puissance injectée ! (R&T CNES 2023)

- Echauffement inhomogène du FBG (facteur d'intensité)
- Décalage important de λ_{ctr} sans optimisation
- Optimisation par :
 - Process
 - Packaging
 - Régulation



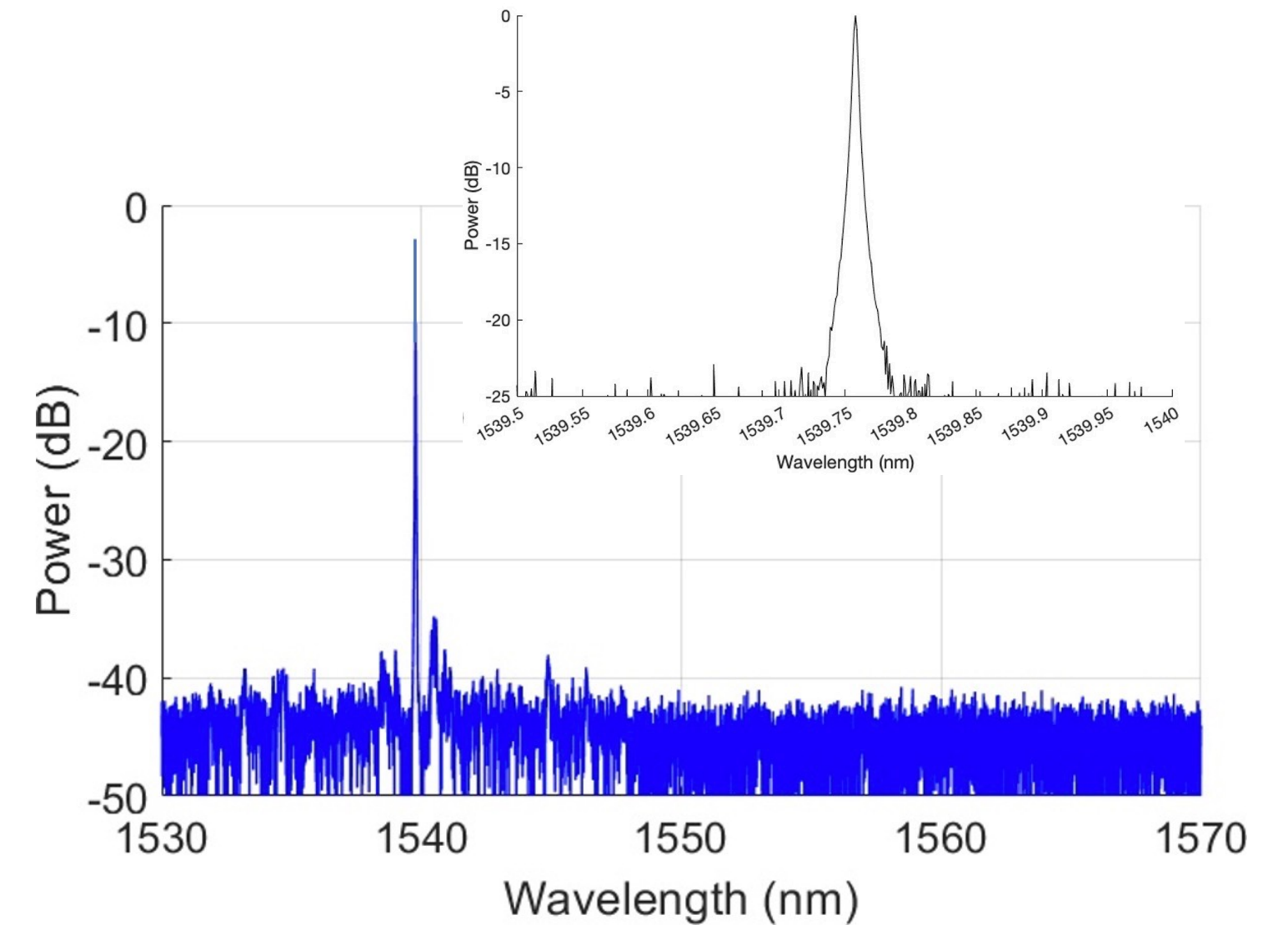
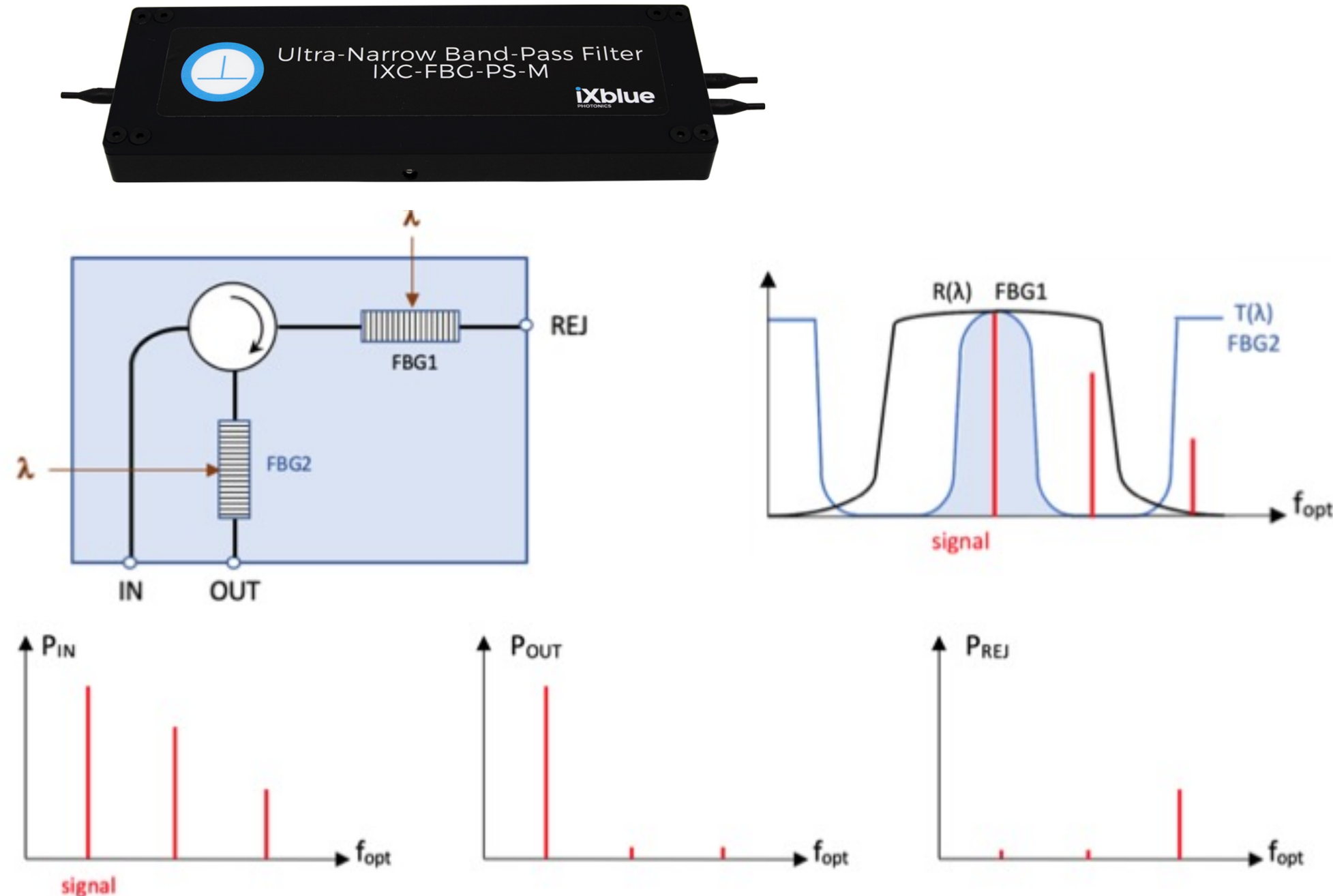
➤ Sans optimisation



Exemple de fonction

➤ Module de filtrage à bande étroite (R&T CNES – 2019)

Une bande-passante étroite dans toute la bande C+L

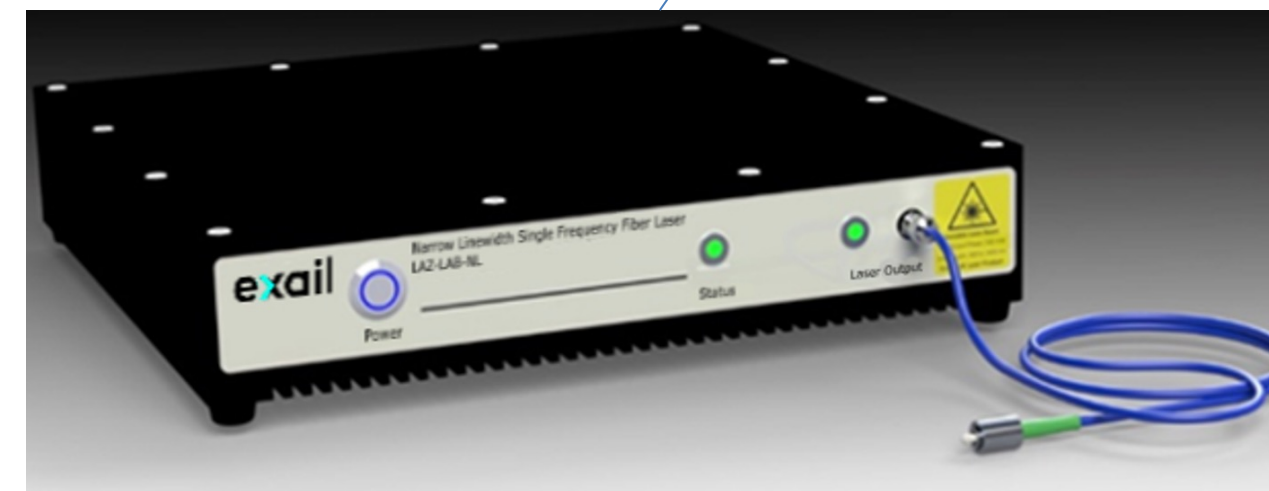
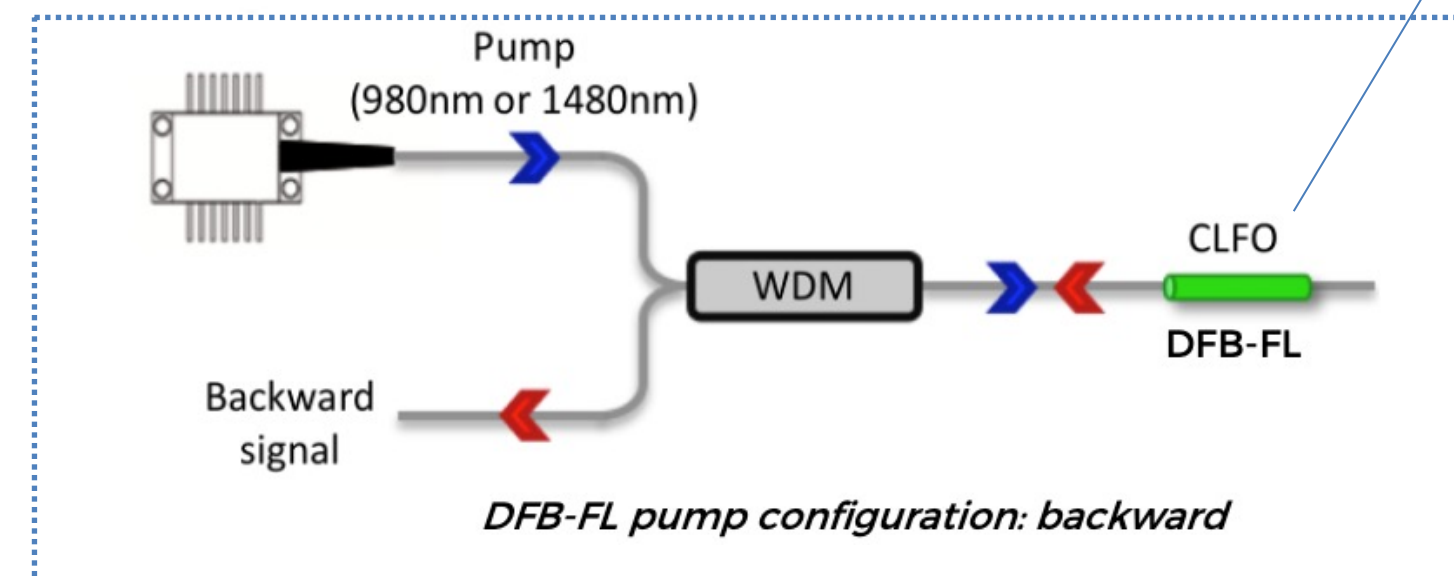
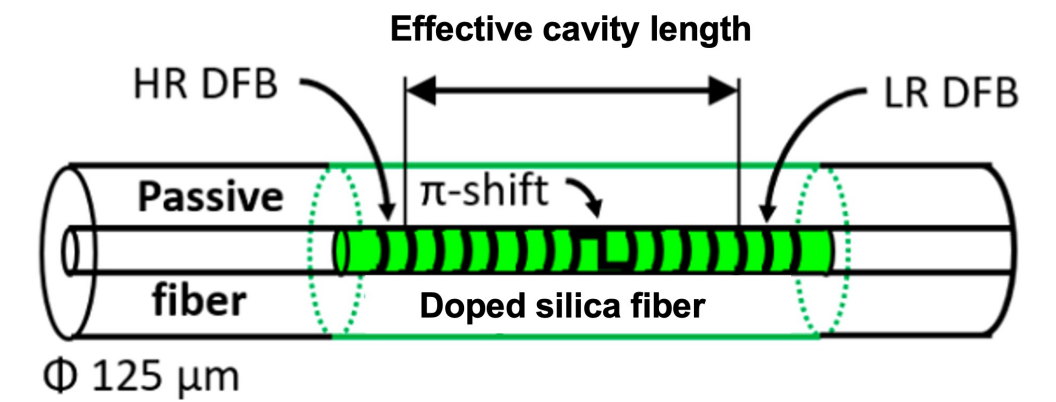
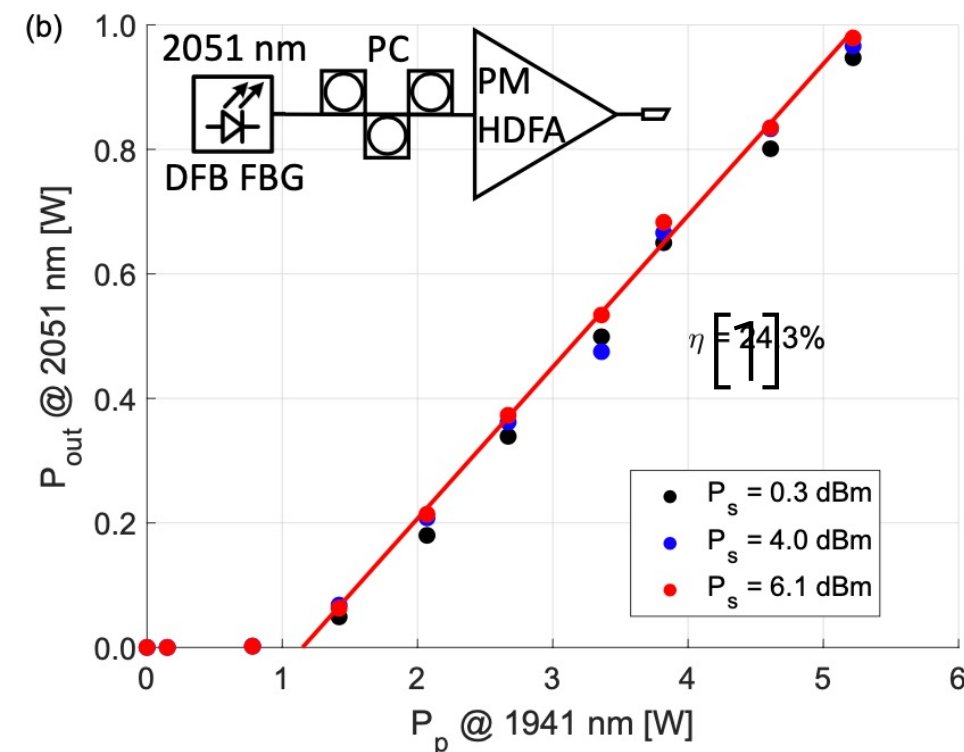


- BP : 1 à 4 GHz
- IL < 4 dB
- Passif et ajustable ± 100 pm (set&forget)
- Athermique

Exemple de fonction

➤ Laser à fibre DFB

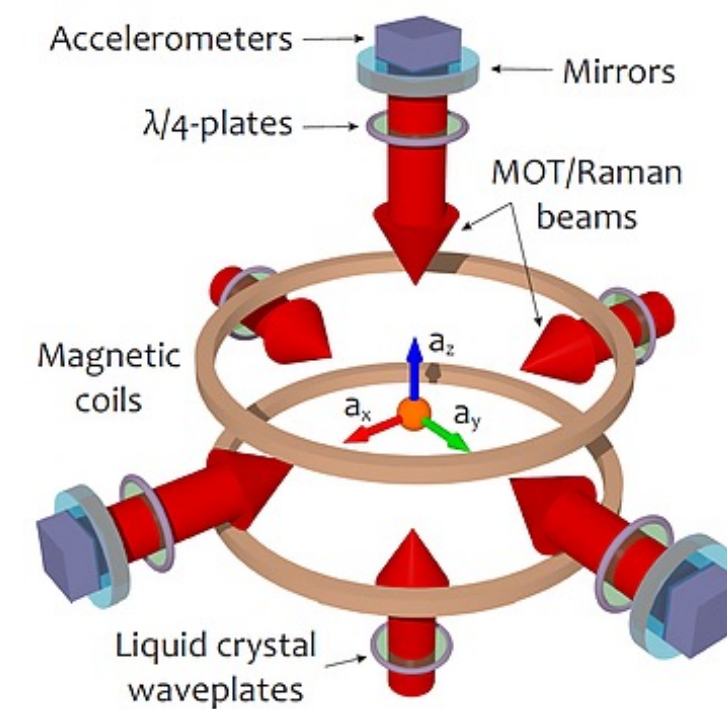
- FBG à saut de phase inscrit sur fibre active photosensible
- Source laser monofréquence à 1 μm , 1.55 μm et 2 μm
- 2 versions @ 1.55 μm : HP et Low Noise
- Accordabilité de 1 nm



[1] D. Traoré, W. Walasik, A. Amavigan, R. E. Tench, J.M. Delavaux, E. Pinsard, « 2051nm narrow linewidth all-fibre DFB laser for Holmium-doped fibre Amplifier applications » ECOC, 2020

Applications

- Emission spontanée amplifiée
- Diffusion Brillouin
- Photonique RF
- Atomes froids
- Spectroscopie
- Interférométrie
- Stabilisation de laser



exail