

---

# La fibre : de zéro en Rézo

Un petit tour d'horizon pour n1a en détresse

Hugo Levy-Falk

Avec les conseils de Gabriel Detraz

**Nocturnes FedeRez 2021**



20 Novembre 2021

---

## Outline

---

- ➊ Introduction : C'est quoi, et pourquoi on les utilise ?
  - ➋ Mais du coup c'est quoi une fibre ?
  - ➌ Victime des modes
  - ➍ Perdez votre signal avec ces techniques secrètes (les informaticiens le détestent)
  - ➎ Multiplexer pour plus de vitesse
  - ➏ Conclusion
-

---

**Introduction : C'est quoi, et pourquoi on les utilise ?**

---



# Un canal de communication

---





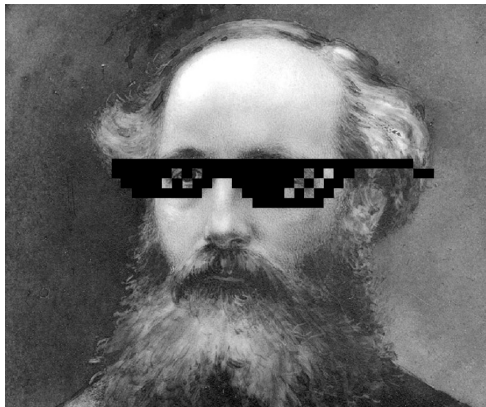
MARQUE

**Fibre Orange : Connectez toute la famille à la vitesse de la lumière**

(Non)

---

Le signal électrique se propage à la vitesse  
du champ électrique dans le conducteur:  
 **$\approx 200000 \text{ km/s}$  dans le cuivre.**



## Mais pourquoi alors ?

---

### Pour un lien type ADSL

(*Asymmetric digital subscriber line* : demandez à vos aînés)

- Sensibilité aux perturbations électromagnétiques;
- Atténuation pour 1km  $\approx 13.81dB$  (signal divisé par 24 !)

**Conséquence** : Besoin de répéteurs/correcteurs, débit faible : 23Mbit/s sur 1km.



## Mais pourquoi alors ?

---

### Pour un lien type ADSL

(*Asymmetric digital subscriber line* : demandez à vos aînés)

- Sensibilité aux perturbations électromagnétiques;
- Atténuation pour 1km  $\approx 13.81dB$  (signal divisé par 24 !)

**Conséquence** : Besoin de répéteurs/correcteurs, débit faible : 23Mbit/s sur 1km.

### Pour une fibre multimode OM2 de chez fs

(on va voir après ce que c'est)

- Pas de sensibilité aux perturbations électromagnétiques;
- Atténuation pour 1km  $\approx 1dB$  à 1300nm (signal divisé par 1.26 (!!))

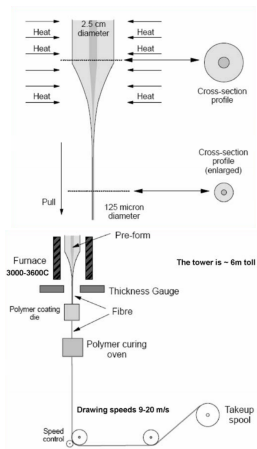
→ On va pouvoir diminuer les erreurs et le nombre de répéteurs.

---

**Mais du coup c'est quoi une fibre ?**

---

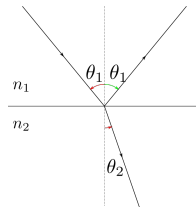
# Une fibre



Source : H. Dutton, "Understanding Optical Communications", IBM, Ch. 6

Loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



Total Internal Reflection si :  $\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 > 1$



---

## **Victime des modes**

---

# Une explication simple, qui marche pour les grosses fibres



- Chaque angle peut-être compris comme un "mode" de transmission.
- Les angles acceptables sont donnés par

$$NA = n \cdot \sin(\alpha_{\text{Max}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$



- Chaque "mode"  $m$  a un indice de réfraction effectif  $n_m = n_1 \sin \alpha_m$ .  
→ Première idée de dispersion (on y reviendra)

## La vraie vie est compliquée.

Il faut résoudre les équations de Maxwell.

On suppose  $\mathbf{E}(x, z, t) = \mathbf{E}(x, t)e^{i\omega t - i\beta z}$

- Si on se place en 1D, on a

$$\frac{d^2 \mathbf{E}(x)}{dx^2} + n^2(x)k_0^2 \mathbf{E}(x) = \beta^2 \mathbf{E}(x) \quad (2)$$

- Ce qui se rapproche énormément de l'équation de Schrodinger indépendante du temps !

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad (3)$$

Avec  $V(x) \longrightarrow -n(x)k_0^2 \hbar^2 / 2m$

Et en pratique, c'est pire... Il faut résoudre en coordonnées cylindriques.

En supposant la séparation des variables ( $E_z(r, \phi, z) = \mathcal{R}(r)\mathcal{F}(\phi)\mathcal{Z}(z)$ ), on a 3 équations qui ressortent :

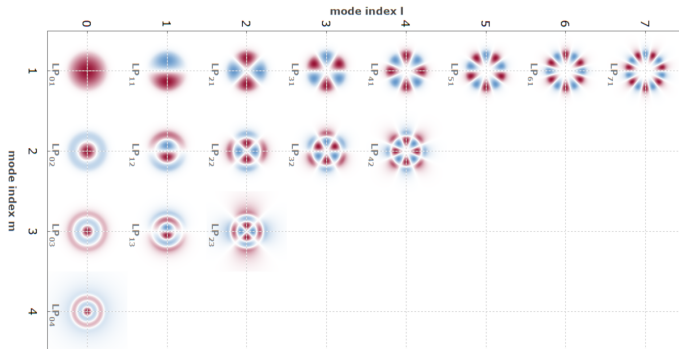
$$\frac{\partial^2 \mathcal{Z}(z)}{\partial z^2} = -\beta^2 \mathcal{Z}(z) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \mathcal{F}(\phi)}{\partial \phi^2} = -m^2 \mathcal{F}(\phi) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \mathcal{R}(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathcal{R}(r)}{\partial r} + \dots \\ & \dots + \left( n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) \mathcal{R}(r) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

# La vraie vie est compliquée. (mais jolie)

Certains modes particuliers sont appelés des modes propres (en pratique on observe une combinaison de ces modes).



Source : [rp-photonics.com](http://rp-photonics.com)

## La vraie vie est compliquée. (mais jolie)

---

La fréquence de coupure (fréquence limite des modes propagés)

$$V = k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \text{NA} \frac{2\pi}{\lambda} \times d$$

Nombre de modes

- pour du saut d'indice :  $m \approx \frac{V^2}{2}$
- pour du gradient d'indice :  $m \approx \frac{V^2}{4}$



---

**Perdez votre signal avec ces techniques secrètes (les informaticiens le détestent)**

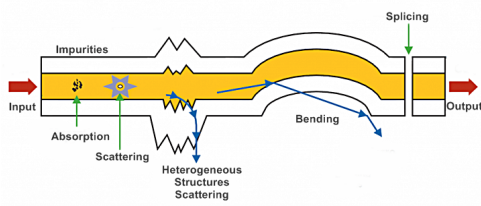
---

# Les facteurs de perte

## L'atténuation

Il y a aussi des pertes à cause :

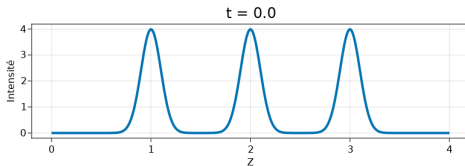
- De l'absorption;
- Des courbures macro;
- Des pertes de couplages de fibres;
- Pertes de scattering...



Source : [community.fs.com](https://community.fs.com)

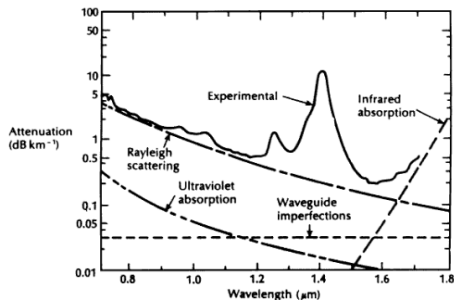
## La dispersion

Globalement, tout ce qui va faire qu'un pulse va s'élargir au cours du temps.



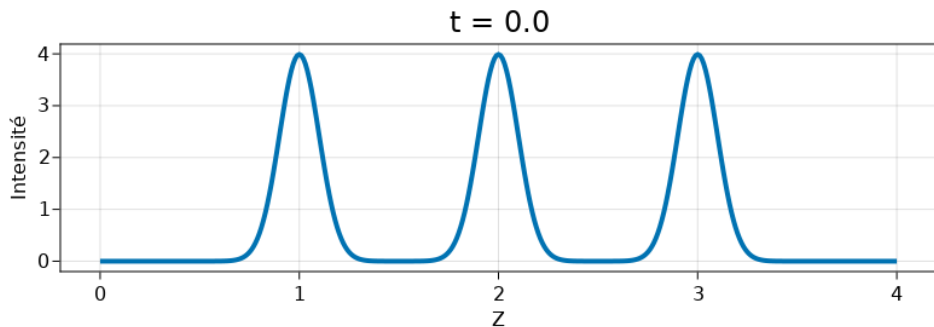
→ C'est un facteur limitant du taux de transfert d'information dans une fibre.  
**Il ne suffit pas d'augmenter la puissance d'émission pour le contrer !**

## L'atténuation : absorption (et scattering)



Longueur d'onde	Fibre	Bit rate	Dist. entre répéteurs
0.85 μm	55 μm, MM 5dB/km	<50Mb/s	<10km
1.3 μm	8 μm, SM 0.4dB/km	<1Gb/s	<200km
1.55 μm	8 μm, SM 0.2dB/km	>1Gb/s (WDM)	<400km

## La dispersion

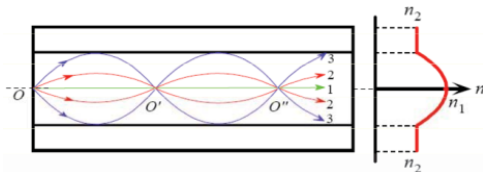


# La dispersion: modale

## Inter-modale

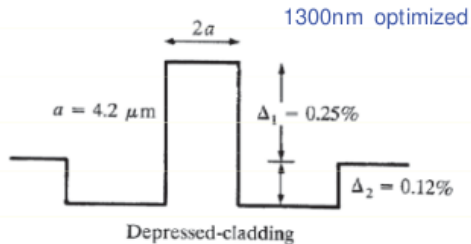


On peut avoir des fibres à gradient d'indice pour limiter cet effet.



## Intra-modale

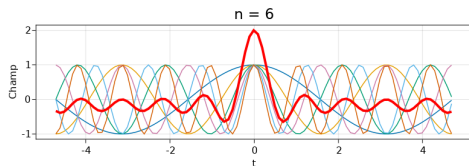
C'est la dispersion due au profil de l'indice de réfraction dans le cœur et le contour.



Source : cours *Fibre Optics Technology* de [Sergei Popov](#)

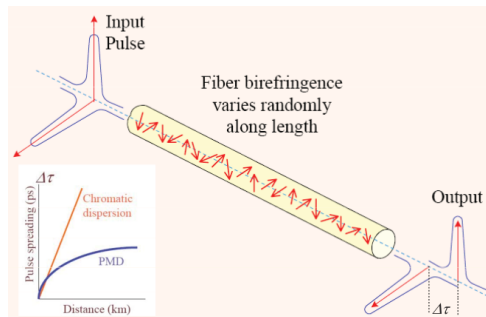
# Autres dispersions

## Du matériau



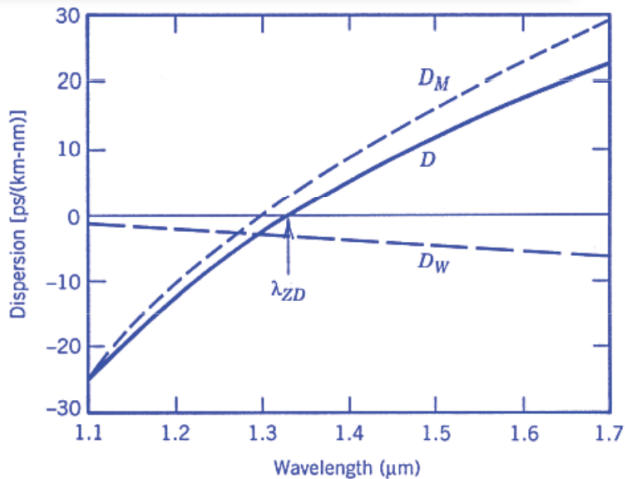
L'indice de réfraction du matériau n'est pas constant, donc toutes les longueurs d'onde ne se déplacent pas à la même vitesse (différence entre vitesse de groupe et de phase).

## En polarisation



Source : cours *Fibre Optics Technology* de [Sergei Popov](#)

## Pourquoi la bande à $1.300\mu\text{m}$ ?



Source : cours *Fibre Optics Technology* de Sergei Popov

---

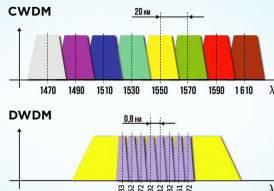
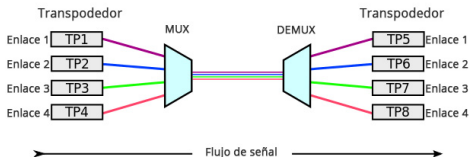
**Multiplexer pour plus de vitesse**

---



# Wavelength Division Multiplexing (WDM)

## Multiplexación por división de onda (WDM)



CWDM (Coarse WDM)

vs

DWDM (Dense WDM)

Source laser ou LED

Source laser + filtre

Max 160km

Beaucoup plus

Moins d'espace et puissance

Plus : il faut refroidir le laser, filtrer etc.

Source : [community.fs.com](https://community.fs.com)

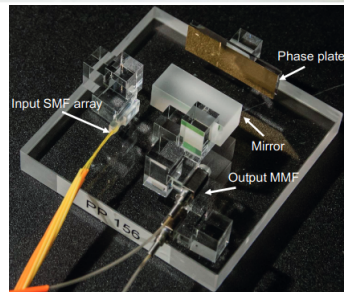
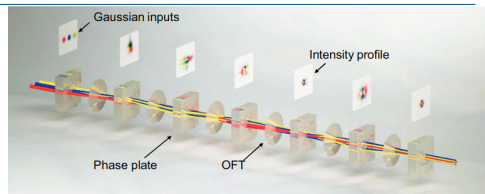
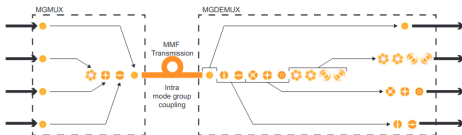
# Idée : multiplexer les modes de propagation

Optics Express Vol. 24, Issue 25, pp. 28594-28605 (2016) • <https://doi.org/10.1364/OE.24.028594>



4×10 Gbit/s bidirectional transmission over 2 km of conventional graded-index OM1 multimode fiber using mode group division multiplexing

K. Lenglé, X. Insou, P. Jian, N. Barré, B. Denolle, L. Bramerie, and G. Labroille



---

## Conclusion

---

## Conclusion: qu'est-ce qu'il faut retenir

---

- On utilise les fibres optiques pour limiter le nombre d'intermédiaires pour transporter le signal.
- On doit mitiger deux effets : l'absorption et la dispersion. Pour mitiger la dispersion, on peut utiliser des fibres monomodes, travailler sur des profils d'indice de réfraction particuliers et sur la matériau.
- Il y a différentes technologies de multiplexage disponibles.

## Conclusion

# Merci pour votre attention !

Je suis une star des réseaux sociaux :



@klafyvel



@klafyvel



Hugo Levy-Falk



hugo@klafyvel.me



Suivre

**AlertePelleteuse**  
@AlertePelleteuz

La pelleteuse, le meilleur ami des réseaux de télécommunication.

📍 Sur tes fourreaux 📅 A rejoint Twitter en mars 2012

525 abonnements 5 356 abonnés



[github.com/Klafyvel/Talk-Nocturnes-Federez-Fibres-Optiques](https://github.com/Klafyvel/Talk-Nocturnes-Federez-Fibres-Optiques)