

L'importance du verre dans les fibres optiques: *du théorique à la pratique*

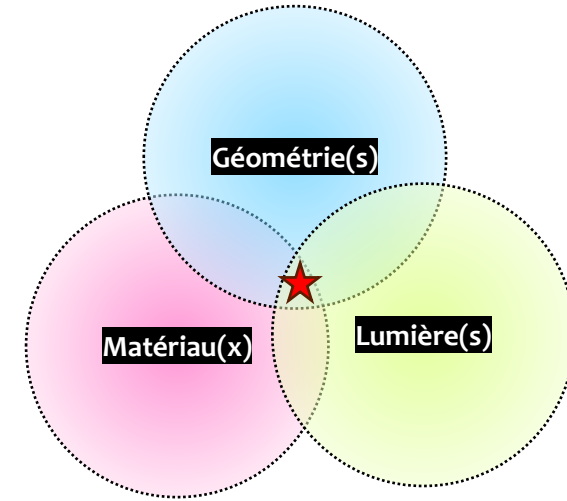
Maxime Cavillon

*Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay (ICMMO), CNRS
Université Paris-Saclay, FRANCE*

Introduction / définition et positionnement

Définition: Une fibre optique est un objet qui **guide la lumière d'un point A vers un point B**.
C'est donc un **guide d'onde** (*waveguide* en anglais)

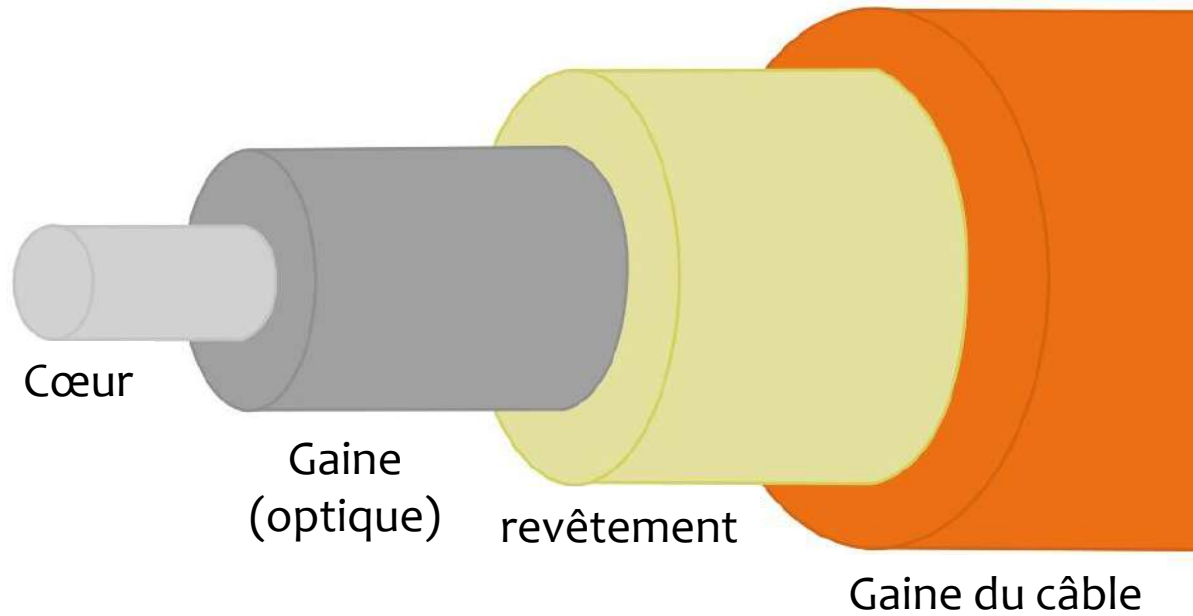
- **1^{ère} fibre (médical / fibroscope):** 1957
- **1^{ère} fibre (télécom):** Début des années 1970
- **≈ 500 Mkmf/an** dans le monde
- **Coût:** 5 à 1000 USD (télécom / spécialité) par km
- **Publications:** **1 article par jour depuis 30 ans** (d'après Web of Science) contenant les mots « optical fiber/fibre » et « glass »
- **Marché des fibres optiques** ≈ 13 md. USD (croissance annuelle de 10% jusqu'en 2030) = **x15 budget annuel du PSG** (2024-2025)



Quelques possibilités...

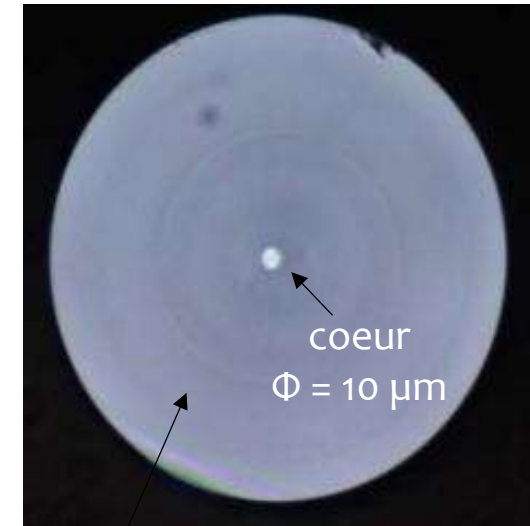
- **Matériaux:** Verre, polymère, cristaux, semi-conducteurs, composites
- **Géométries:** Dimension, symétrie circulaire, microstructure
- **Lumière:** Intensité, phase, polarisation, longueur d'onde
- **Mais aussi... les utilisateurs:** Applications!

Introduction / définition et positionnement



- **Cœur**: Contient un signal lumineux (80-90%)
- **Gaine**: Permet le bon confinement du signal lumineux
- **Revêtement(s)**: Protège la fibre d'éventuelles sollicitations extérieures

Vue transverse
(microscopie optique)



Gaine (optique)
 $\Phi = 125 \mu\text{m}$

Introduction / définition et positionnement



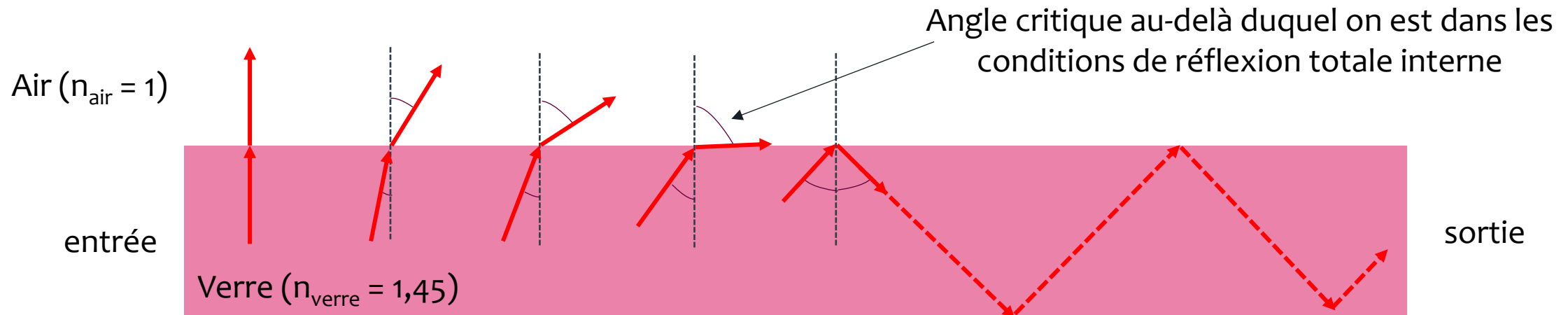
Déni de responsabilité: présentation **non exhaustive et subjective** → en 1h15/30, l'objectif principal est de mettre en valeur **l'importance du verre (et donc ses propriétés)** dans les fibres optiques à travers **quelques exemples ciblés**

Plan de la présentation:

- **I. Guider la lumière dans une fibre** (approches géométrique / ondulatoire, types de fibres)
- **II. La transparence dans les fibres optiques** (origine / approche historique « télécom »)
- **III. La fabrication des fibres optiques** (verres d'oxydes et verres à basses T_g)
- **IV. Lasers à fibre** (spectroscopie, intérêt du choix des matrices vitreuses)
- **V. Fibres dédiées aux hautes puissances** (limiter les effets nonlinéaires, gestion des effets thermiques, verres d'oxydes)
- **VI. Fibres nonlinéaires** (supercontinuum)
- **VII. Fonctionnalisation des fibres optiques** (Réseaux de Bragg, fibres dopées nanoparticules)
- **VIII. Conclusions**

I. Guider la lumière dans une fibre / approche géométrique

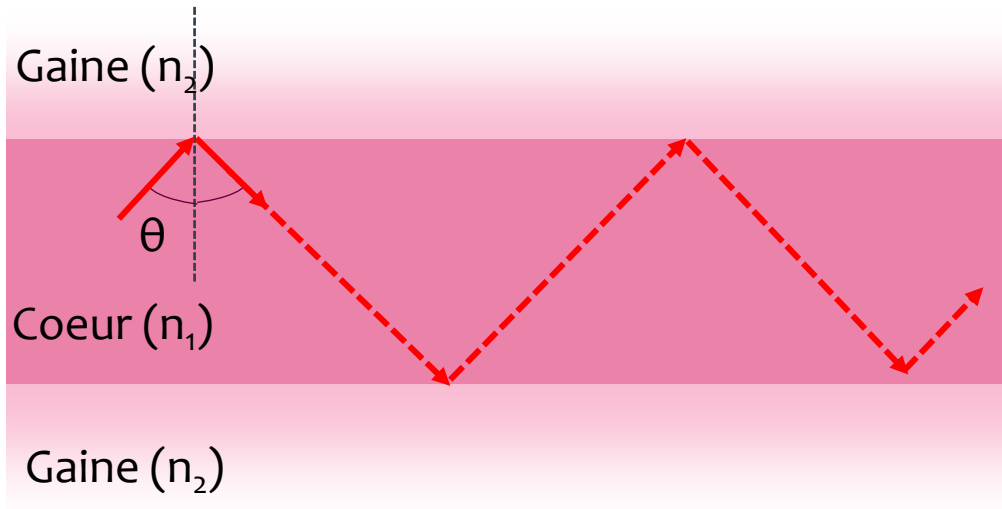
Approche géométrique: principe de la réflexion totale interne (théorie des rayons)



Formule de Snell-Descartes
$$n_{\text{verre}} \sin(i_{\text{verre}}) = n_{\text{air}} \sin(i_{\text{air}})$$

I. Guider la lumière dans une fibre / approche géométrique

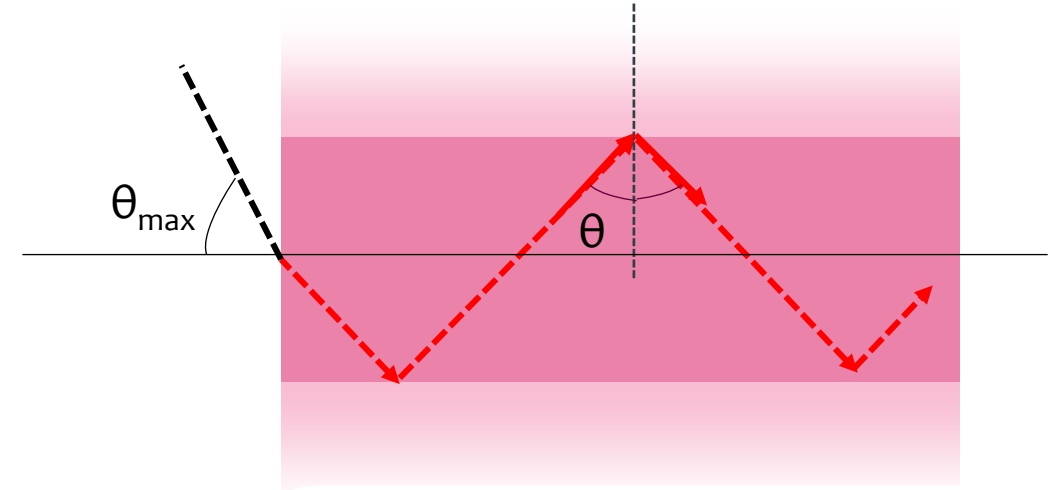
Approche géométrique: principe de la réflexion totale interne (théorie des rayons)



Conditions pour RTI

- $n_1(\text{coeur}) > n_2(\text{gaine})$
- Et que $\theta > \arcsin(n_2/n_1)$

Limite de l'approche géométrique: Dimension du cœur du même ordre de grandeur que la longueur d'onde (λ) → Pour une description plus réaliste, il faut utiliser une **approche ondulatoire**!



Ouverture Numérique (ON ou NA)

- $NA = n_o \sin(\theta_{\max})$
- $NA = \sqrt{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$
- Cône d'acceptance = $2\theta_{\max}$

I. Guider la lumière dans une fibre / optique guidée

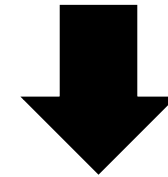
Approche ondulatoire: Décrit fidèlement les modes de propagation dans une fibre optique

Etape 1 – trouver une équation d'onde (et faire quelques hypothèses)

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = i \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} k \mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \cancel{\mathbf{J}} - i \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} k n^2 \mathbf{E} \\ \nabla \cdot (\epsilon_0 n^2 \mathbf{E}) &= \cancel{\sigma} \\ \nabla \cdot (\mu_0 \mathbf{H}) &= 0\end{aligned}$$

$\mathbf{J}$: densité de courant
 σ : densité de charge

Equations de maxwell dans
un verre (**matériau
diélectrique et isotrope**)



Approximation de guidage faible: $n_2 \approx n_1$

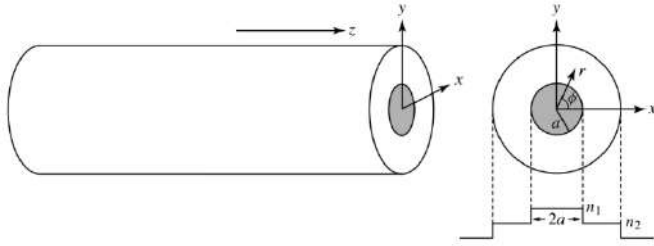
$$(\nabla^2 + k^2 n^2) \mathbf{E} = 0$$

Avec $k = 2\pi/\lambda$

Equation d'onde

I. Guider la lumière dans une fibre / optique guidée

Etape 2 – Appliquer la géométrie « fibre »



Coordonnées cartésiennes $\mathbf{E}(x; y, z) = e(x, y)e^{i\beta z} = e_t + \hat{z}e_z$

Coordonnées cylindriques $\mathbf{E}(r; \Phi, z) = e(r, \Phi)e^{i\beta z} = e_t + \hat{z}e_z$

Transverse

Longitudinale

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \nabla_t^2 \mathbf{E} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = \nabla_t^2 \mathbf{E} - \beta^2 \mathbf{E}$$

$$(\nabla^2 + k^2 n^2) \mathbf{E} = 0 \quad \Rightarrow \quad (\nabla_t^2 + k^2 n^2 - \beta^2) \mathbf{E} = 0$$

Etape 3 – Résoudre cette équation

Idées principales (mode d'emploi):

- On néglige les composantes longitudinales de E et H
- Chercher des valeurs réelles et discrètes de β : Chaque valeur trouvée est une solution appelé un « mode guidé »
- Fonctions de Bessel sont des solutions de cette équation d'onde dans cette géométrie
- Modes LP_{lm} (linearly polarized)

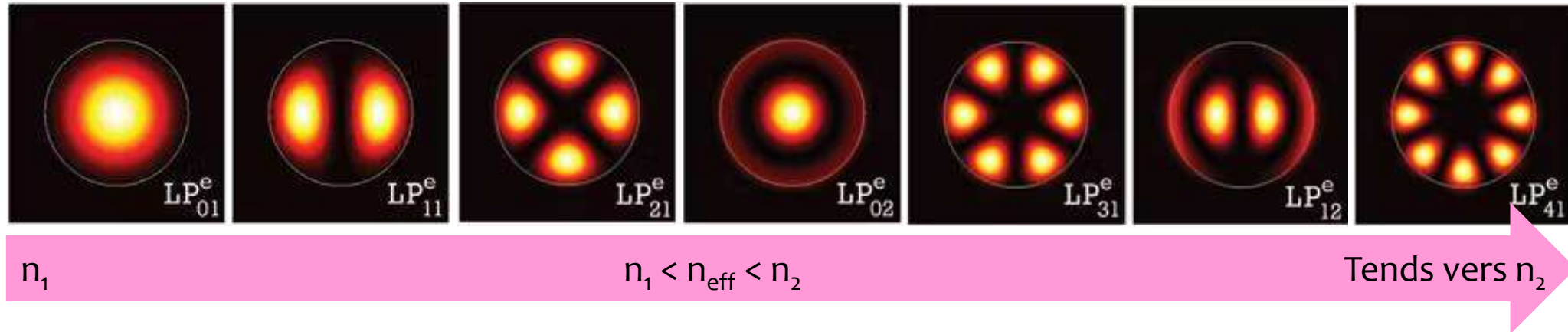
I. Guider la lumière dans une fibre / modes observables (solutions)

$$\beta = n_{eff}k$$

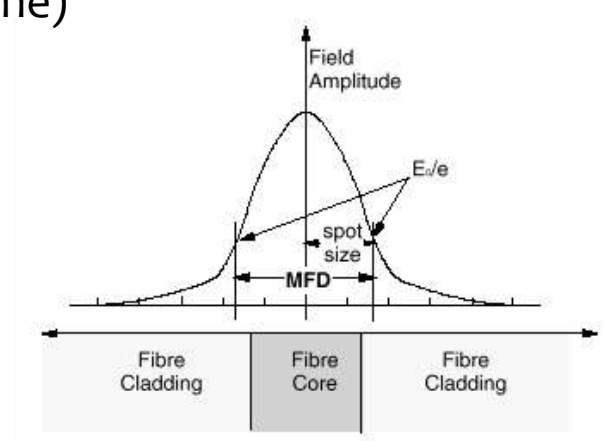
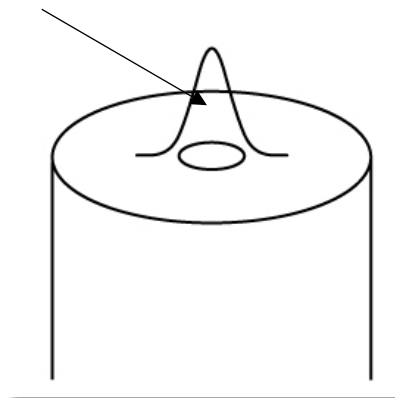
n_{eff} = indice effectif du mode, compris entre n_1 et n_2

β = constante de propagation du mode

Intensité de quelques modes (section transverse de la fibre)



Mode fondamental (approximation gaussienne)



I. Guider la lumière dans une fibre / SMF ou MMF?

Fréquence normalisée (V): Fibre à saut d'indice

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot NA$$

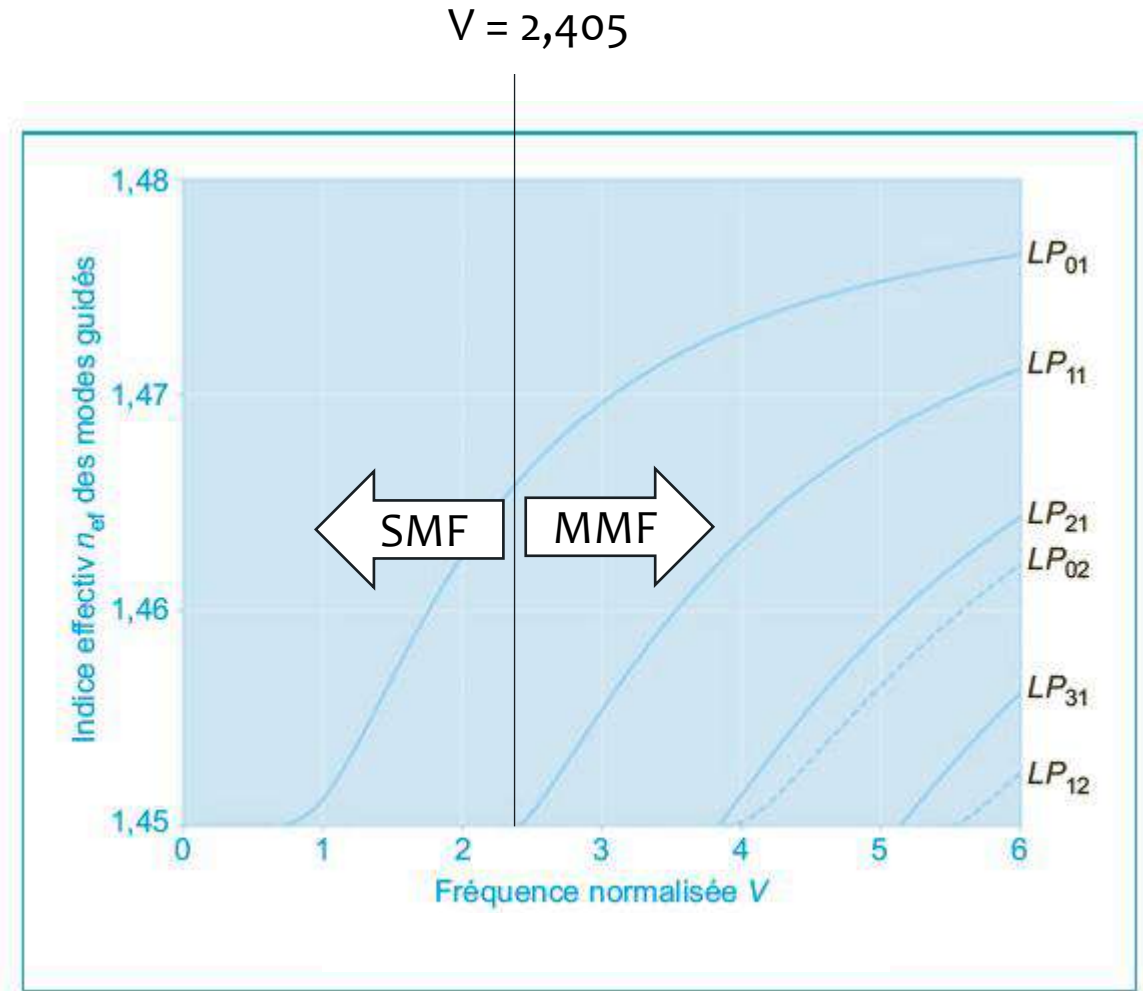
Longueur d'onde

rayon du cœur

Ouverture numérique

$V < 2,405$: Régime monomode (**fibre monomode** ou single mode fiber **SMF**)

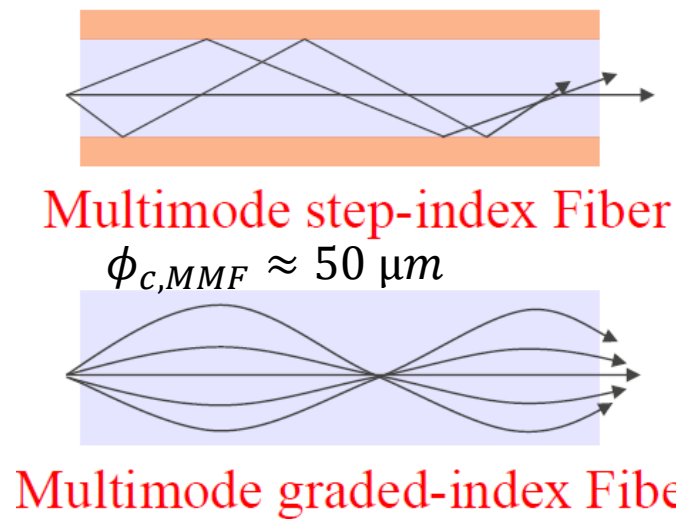
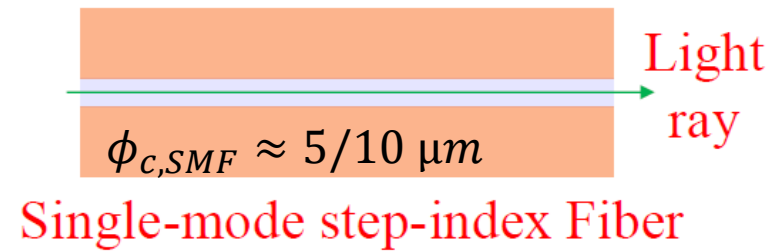
$V > 2,405$: Régime multimode (**fibre multimode** ou multimode fiber **MMF**)



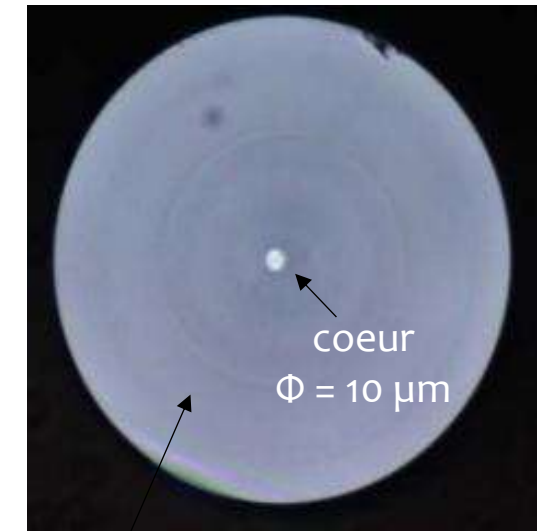
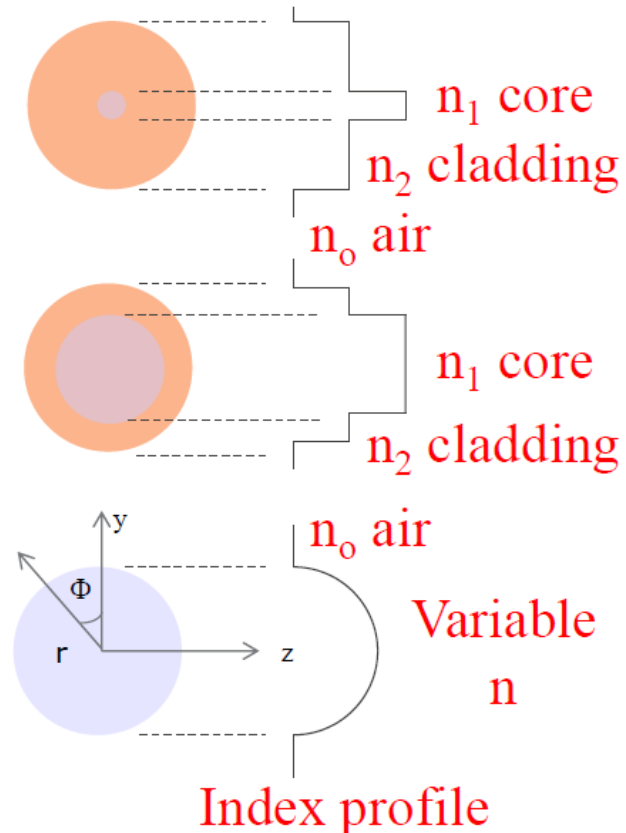
Graphique adapté de L. Bigot, Y. Quiquempois, Techniques de l'Ingénieur (2024)

I. Guider la lumière dans une fibre / SMF ou MMF?

Types de fibres « conventionnelles »:



Multimode graded-index Fiber



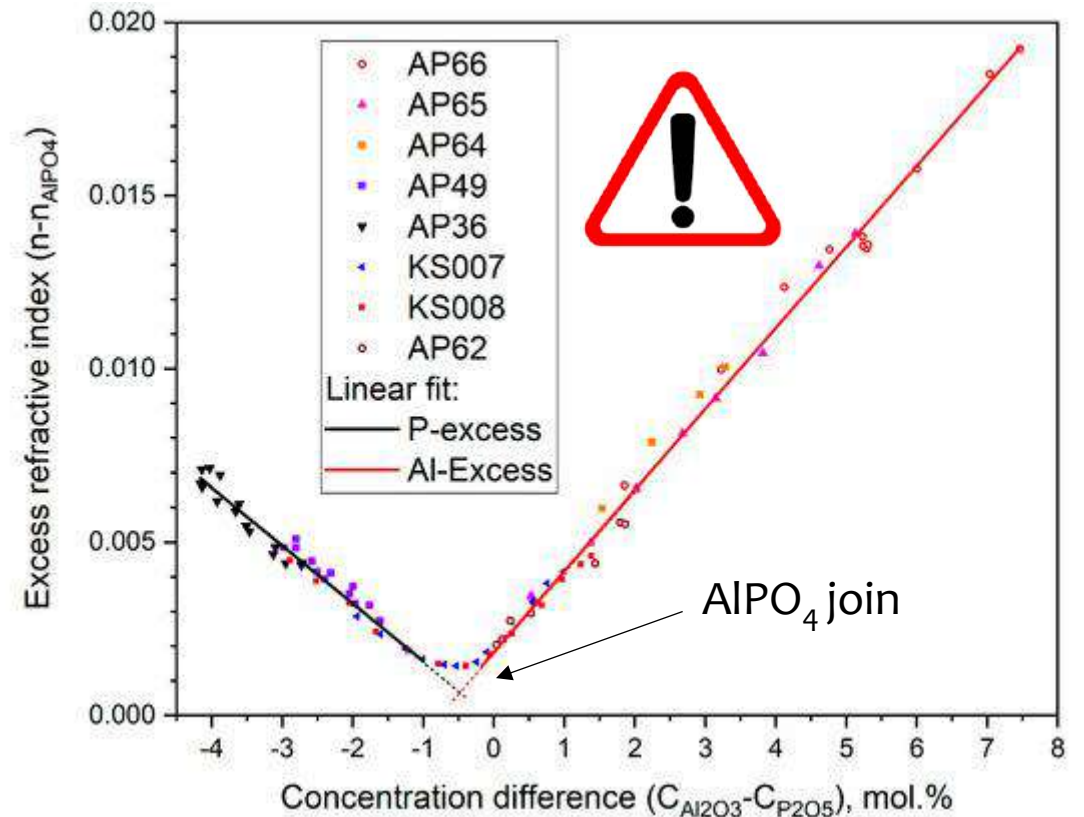
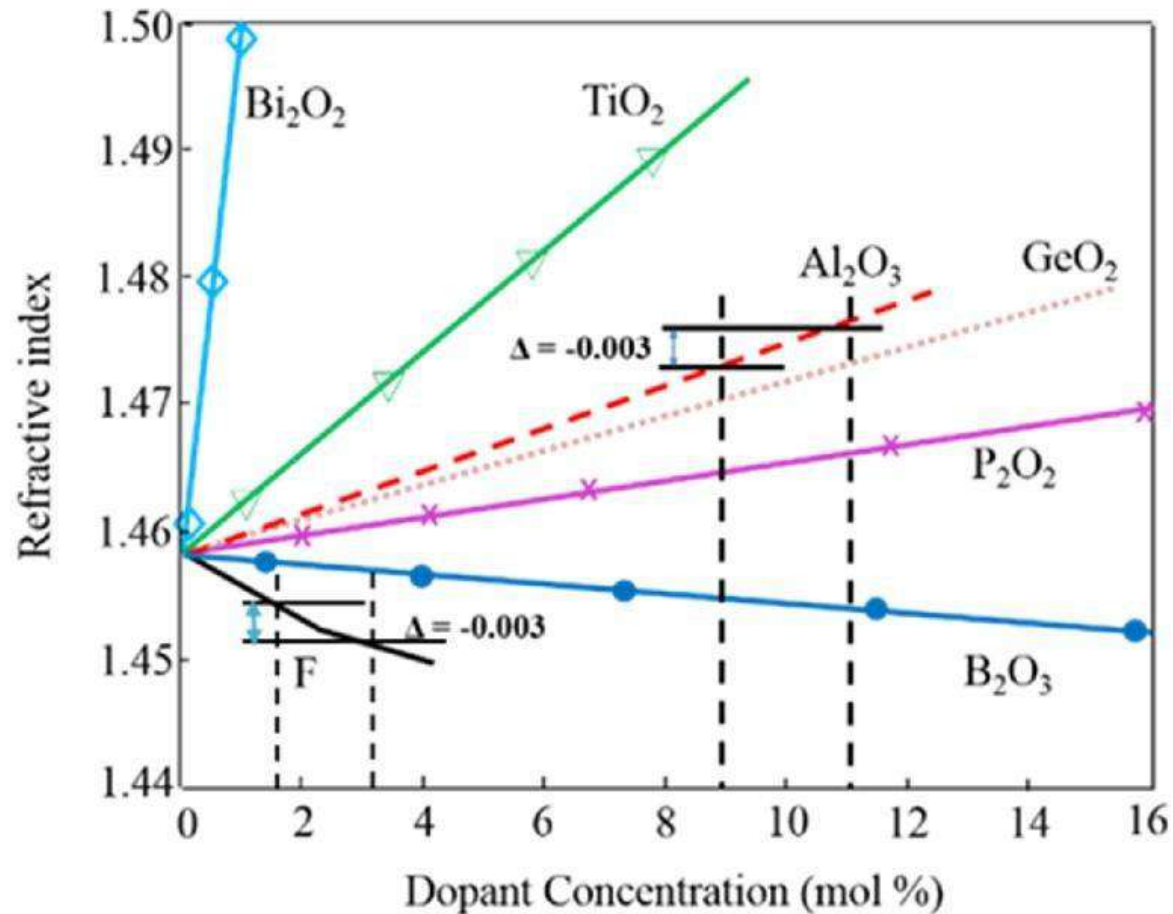
Gaine (optique)
 $\Phi = 125 \mu m$

Gradient d'indice (permet de limiter les effets de dispersion intermodale (= augmenter le débit x100 ou x1000))

L'appellation d'une fibre est avant tout caractérisée par sa **géométrie** et son **profil d'indice**, moins par sa composition.

I. Guider la lumière dans une fibre / contraste d'indice

Créer un contraste d'indice (dans silice): Ajouts de dopants

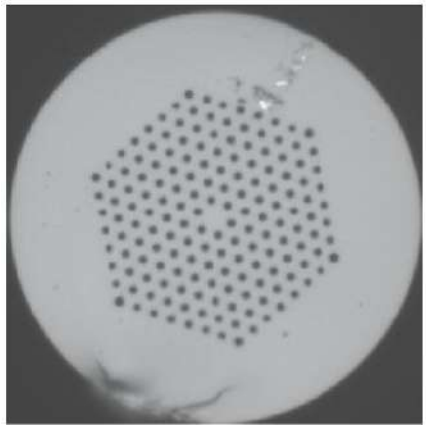


M. E. Likhachev et al., Photonics (2025)

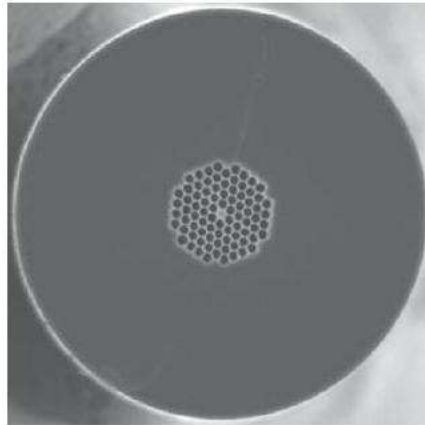
Δn imposé par régime SMF ou MMF notamment, contraintes fabrication (process)
 Δn « typique » des fibres: **SMF** = $5 \cdot 10^{-3}$ et **MMF** = $50 \cdot 10^{-3}$

I. Guider la lumière dans une fibre / Structures!

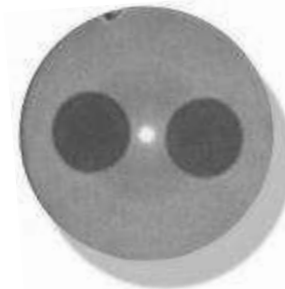
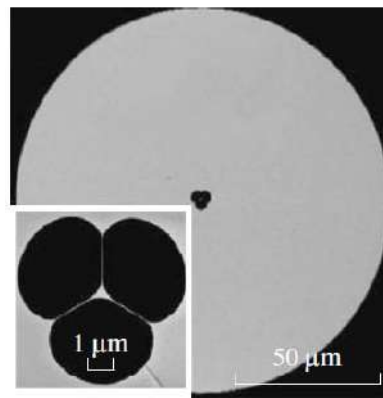
Fibres microstructurées:



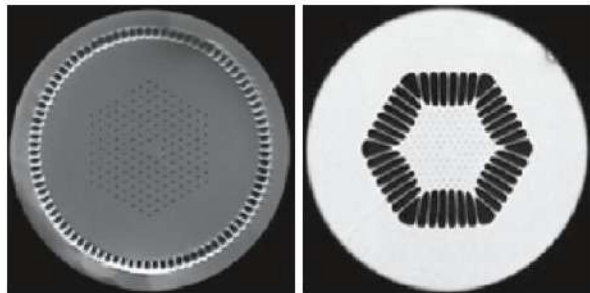
Cœur plein(guidage par RTI)



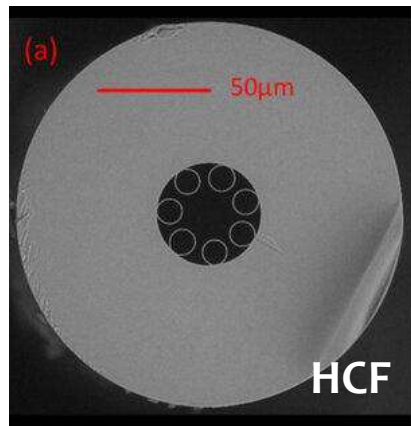
Fibres hautement non linéaires + cœur suspendu



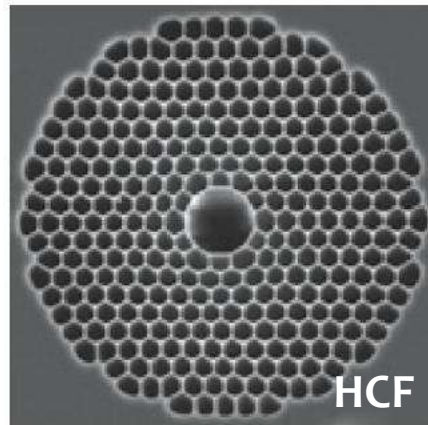
Fibres biréfringentes



« Air/clad » (large diamètre de mode et NA)



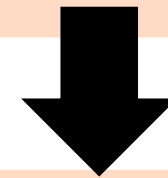
Fibres anti-résonnantes (cœur creux)



Fibres à cœur creux (guidage par bande interdite)

Beaucoup d'intérêts (on y reviendra ponctuellement):

- Faibles pertes (HCF)
- Pompage facilité (large NA)
- Contrôle dispersion (voir suppression?)
- Diminuer / maximiser les effets nonlinéaires (diamètre de mode, contraste cœur/gaine)
- Monomode sur de larges gammes de longueurs d'ondes
- Cœur creux = ajout de substances (liquides / gaz): capteurs
- Contrôle biréfringence



La géométrie offre des degrés de libertés supplémentaires évidents!

F. Poli et al., Springer Series in Material Science (2007)
N. Pisani et al., Int. Journal. of Thermophysics (2022)
A. Chamorovski, J. Comm. Techn. (2013)

II. La transparence dans les fibres optiques

Motivations historique (télécoms):
fibres SiO_2

Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K. C. Kao, B.Sc.(Eng.), Ph.D., A.M.I.E.E., and G. A. Hockham, B.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E.

Synopsis.
PROC. IEE, Vol. 113, No. 7, JULY 1966

information capacity. Physical-realisation aspects are also discussed. Experimental investigation of optical and microwave wavelengths are included.

List of principal symbols

J_n = n th-order Bessel function of the first kind
 K_n = n th-order modified Bessel function of the second kind

boundary conditions imposed by the physical structure, the characteristic equations are as follows:
for HE_{mn} modes

7 Conclusions

Theoretical and experimental studies indicate that a fibre of glassy material constructed in a cladded structure with a core diameter of about λ_0 and an overall diameter of about $100\lambda_0$ represents a possible practical optical waveguide with important potential as a new form of communication medium. The refractive index of the core needs to be about 1% higher than that of the cladding. This form of waveguide operates in a single HE_{11} , E_0 or H_0 mode and has an information capacity in excess of 1 Gc/s. It is completely flexible and calls for a mechanical tolerance of around 10%, which can be readily met in practice. Thus, compared with existing coaxial-cable and radio systems, this form of waveguide has a larger information capacity and possible advantages in basic material cost. The realisation of a successful fibre waveguide depends, at present, on the availability of suitable low-loss dielectric material. The crucial material problem appears to be one which is difficult but not impossible. Certainly, the required loss figure of around 20 dB/km is much higher than the lower limit of loss figure imposed by fundamental mechanisms.

Paper 5033 E, first received 24th November 1965 and in revised form 15th February 1966
Dr. Kao and Mr. Hockham are with Standard Telecommunication Laboratories Ltd., Harlow, Essex, England

PROC. IEE, Vol. 113, No. 7, JULY 1966

frequencies will now be studied in detail. Conclusions are drawn as to the feasibility and the expected performance of such a waveguide for long-distance-communication application.

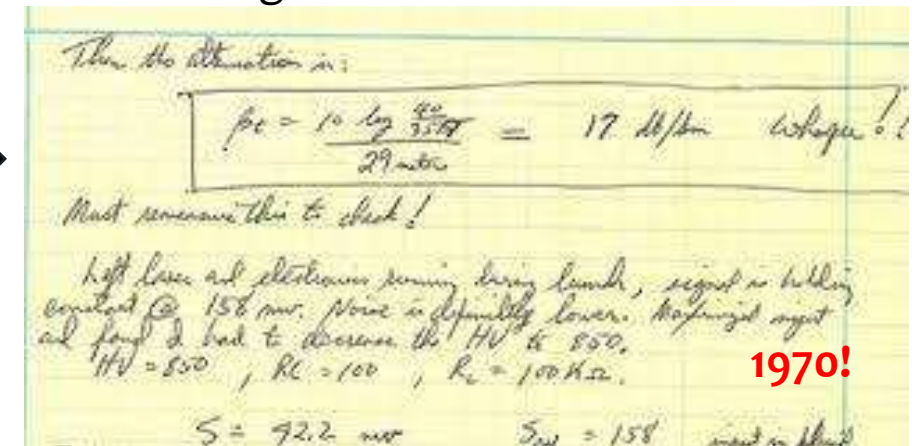


Prix Nobel de Physique
(2009)



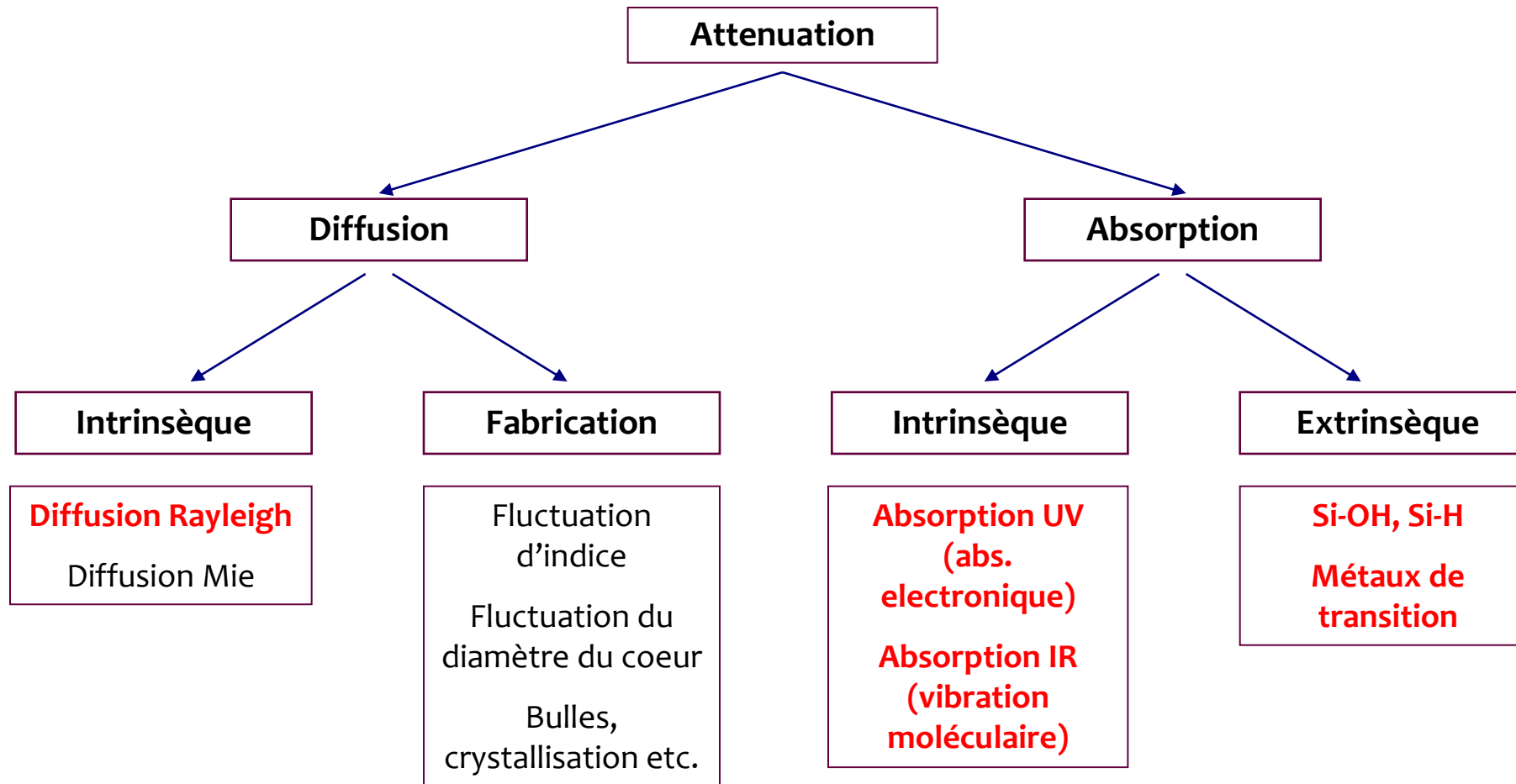
Donald B. Keck, Robert D. Maurer and Peter C. Schultz
Corning Glass Works – USA

Première fibre
« low loss »



1970!

II. La transparence dans les fibres optiques / sources d'atténuation



Cas pour verres riches en SiO_2 !

II. La transparence dans les fibres optiques

Diffusion Rayleigh: Diffusion élastique en $1/\lambda^4$

- Fluctuation locale de densité (**contribution majeure**)

Coefficient Pockels (photo-élastique)

$$p = p_{12} + (2/3) p_{44}$$

Compressibilité

$$\text{adiabatique} \left(-\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \right)_S$$

$$P_{S,\text{densité}}^{\text{Rayleigh}} \propto n^8 p^2 T_f K_S$$

indice de réfraction

température fictive

- Fluctuation locale de composition (ex. verre binaire)

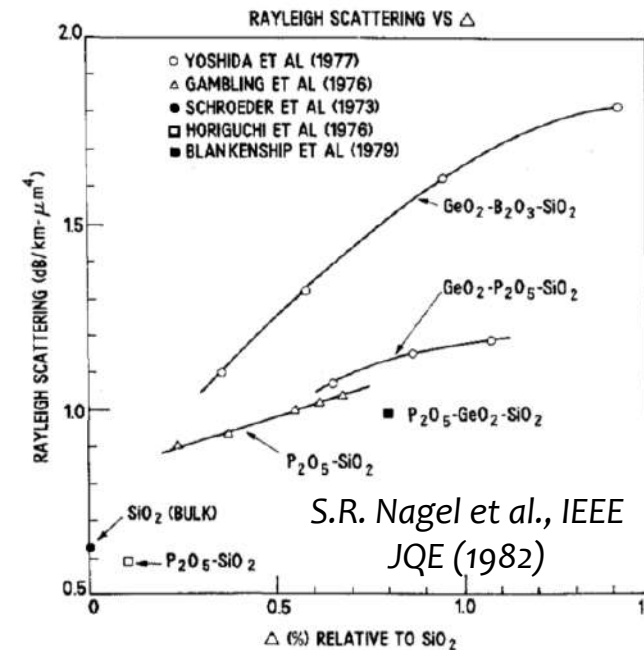
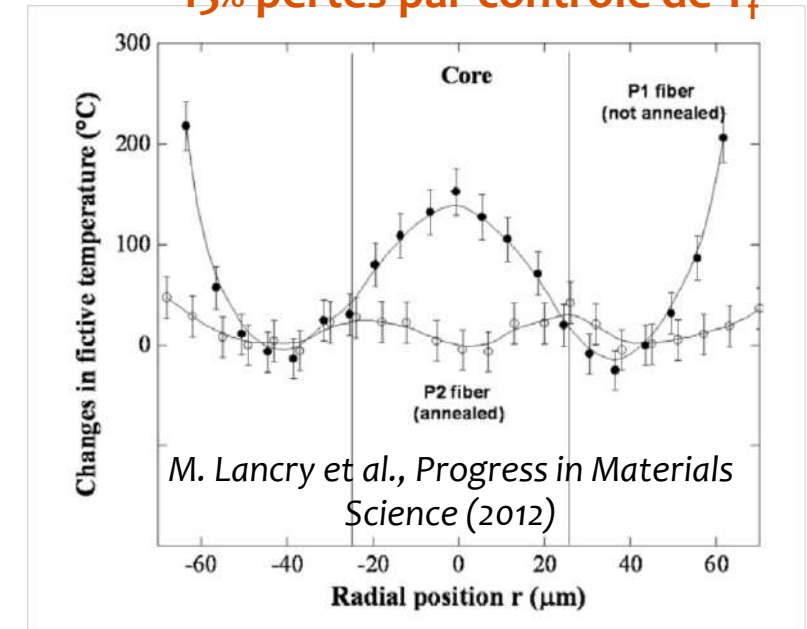
$$P_{S,\text{composition}}^{\text{Rayleigh}} \propto \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial C} \right)_{P,T}^2 \frac{C(1-C)T}{(T - T_s)}$$

Fluctuation constante
dielectrique avec compo

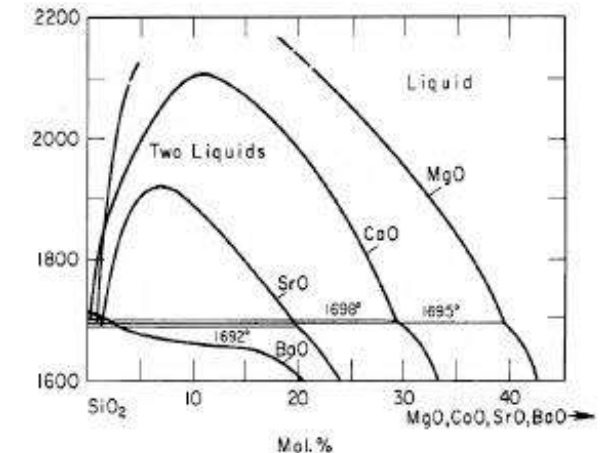
T_s : température de
décomposition spinodale

M.E. Lines, J Appl Phys (1984)

- 15% pertes par contrôle de T_f

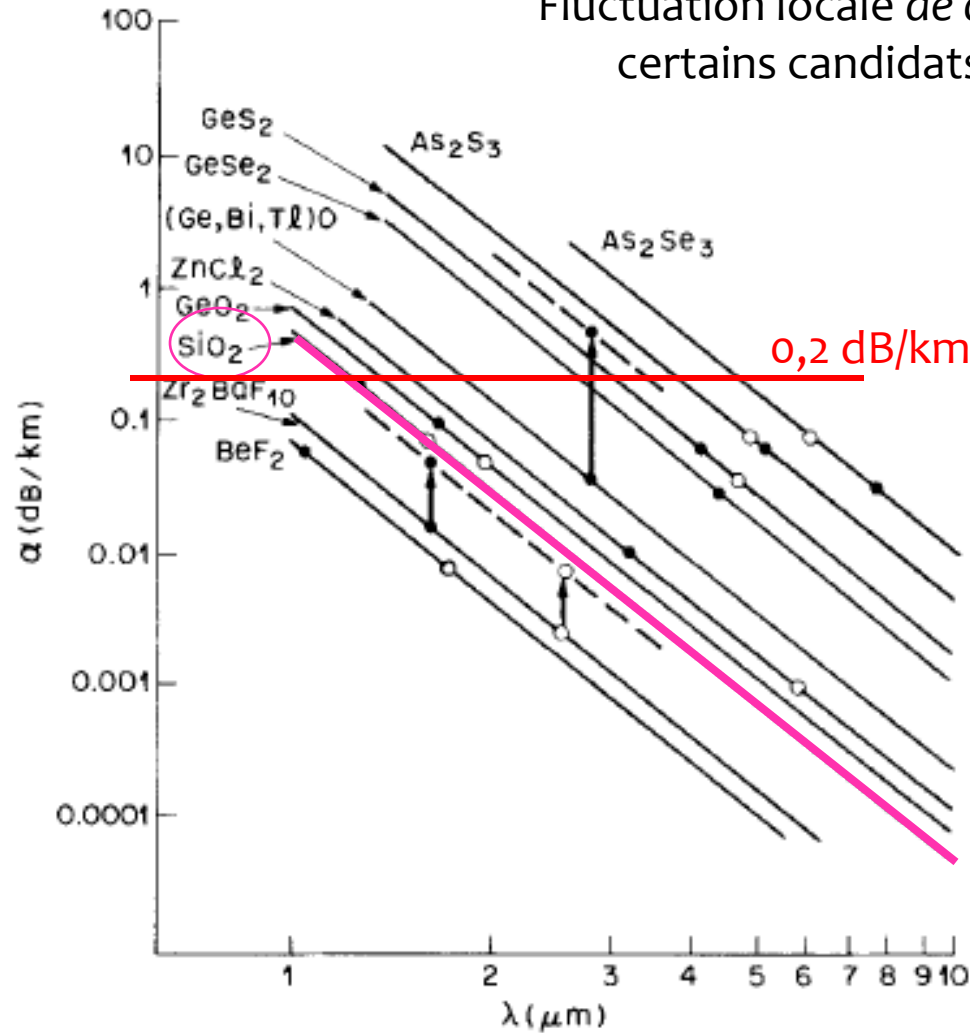


- Très sensible à la compo...

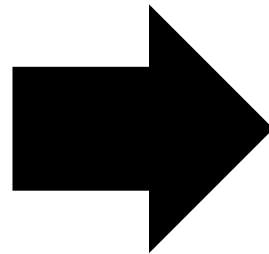


II. La transparence dans les fibres optiques

Fluctuation locale de densité pour
certains candidats (1984!)



0,2 dB/km (valeur typique actuelle)

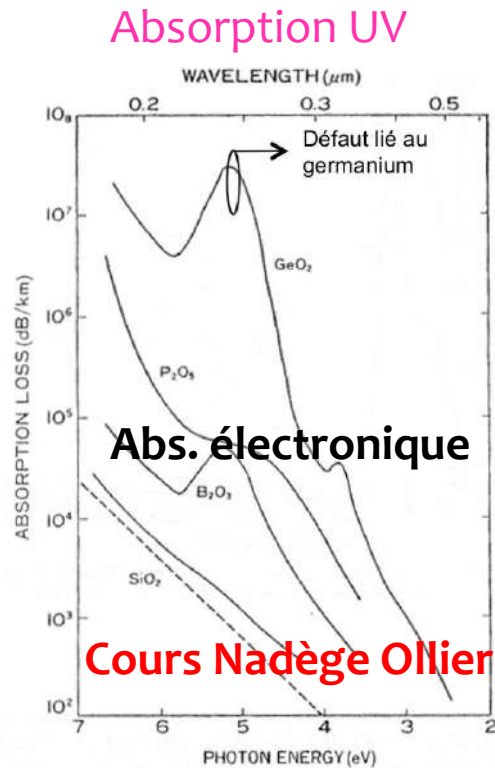
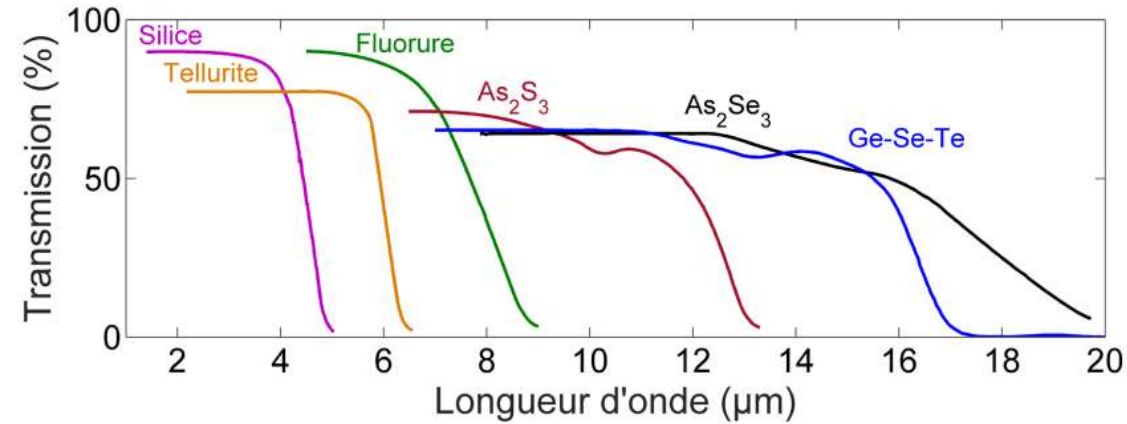


- Mais il n'y a pas que la diffusion Rayleigh...
Absorption intrinsèque et extrinsèque
- Attention tous les verres ont une gamme de transparence (SiO_2 max 3 μm environ)

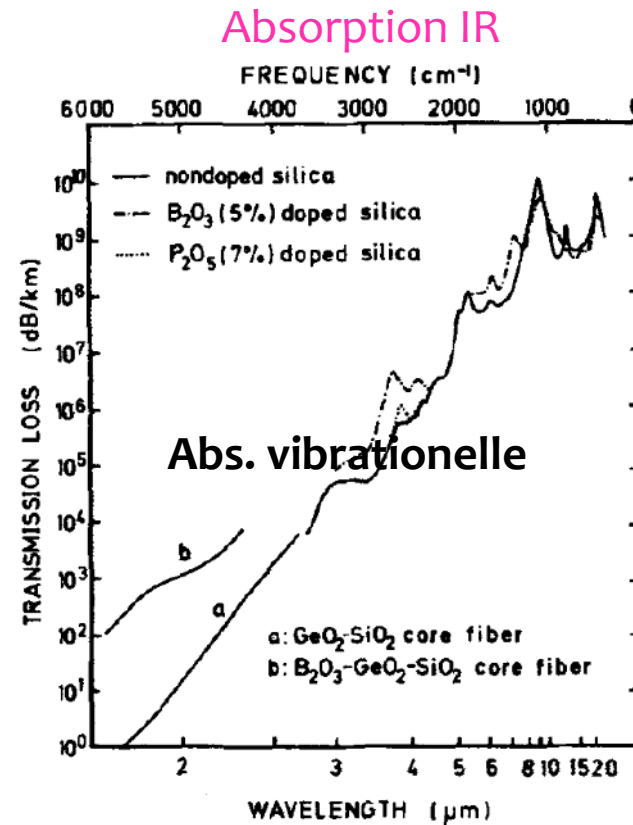
II. La transparence dans les fibres optiques

Absorption intrinsèque: Limite « basse » et limite « haute » :
absorption électronique et vibrationnelle)

Pour la silice:



V. Miya et al., Electron. Lett. (1979)



T. Izawa & N.S. Takeda, Appl. Phys. Lett. (1977)

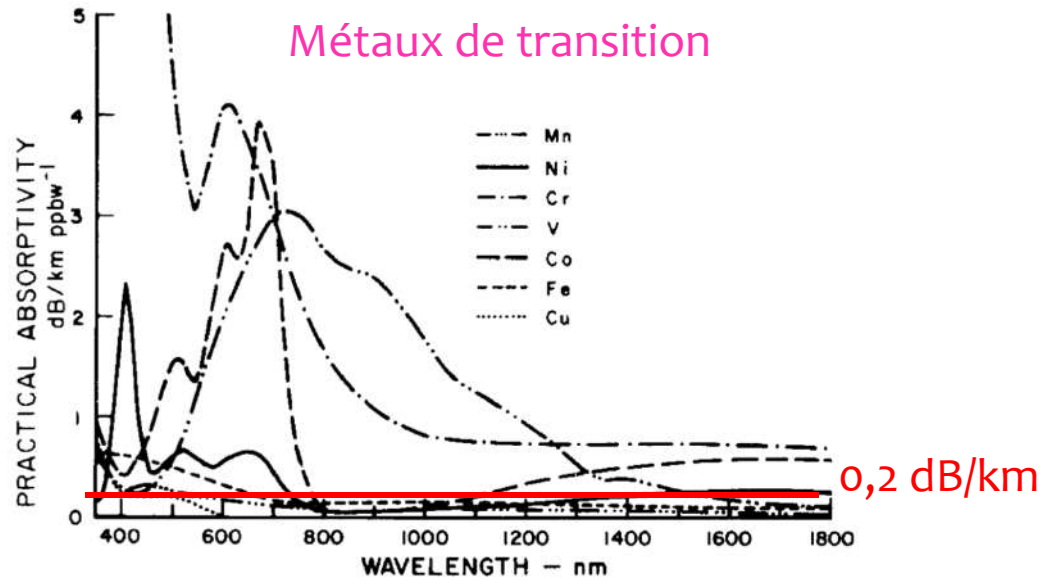
$$A_{UV} \text{ et } A_{IR} \propto e^{\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

$$A_{UV} \sim 0.001 \text{ dB/km (1550 nm)}$$

$$A_{IR} \sim 0.01 \text{ dB/km (1550 nm)}$$

II. La transparence dans les fibres optiques

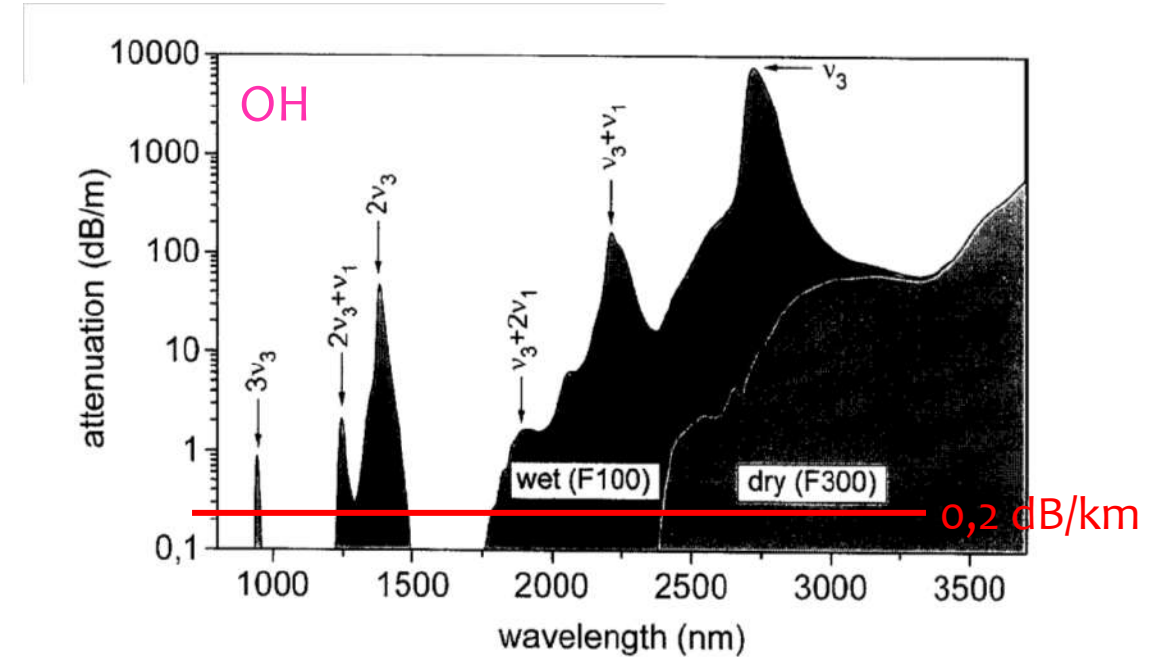
Absorption extrinsèque: impuretés présentes dans le verre



P.C. Schultz, J. Am. Ceram. Soc. (1974)

	Peak wavelength (nm)	One part in 10 ⁹ (dB km ⁻¹)
Cr ³⁺	625	1.6
C ²⁺	685	0.1
Cu ²⁺	850	1.1
Fe ²⁺	1100	0.68
Fe ³⁺	400	0.15
Ni ²⁺	650	0.1
Mn ³⁺	460	0.2
V ⁴⁺	725	2.7

Actuellement <0.001 dB/km at
1550 nm car < 0.1 ppb de Mtx



O. Humbach et al., JNCS (1996)

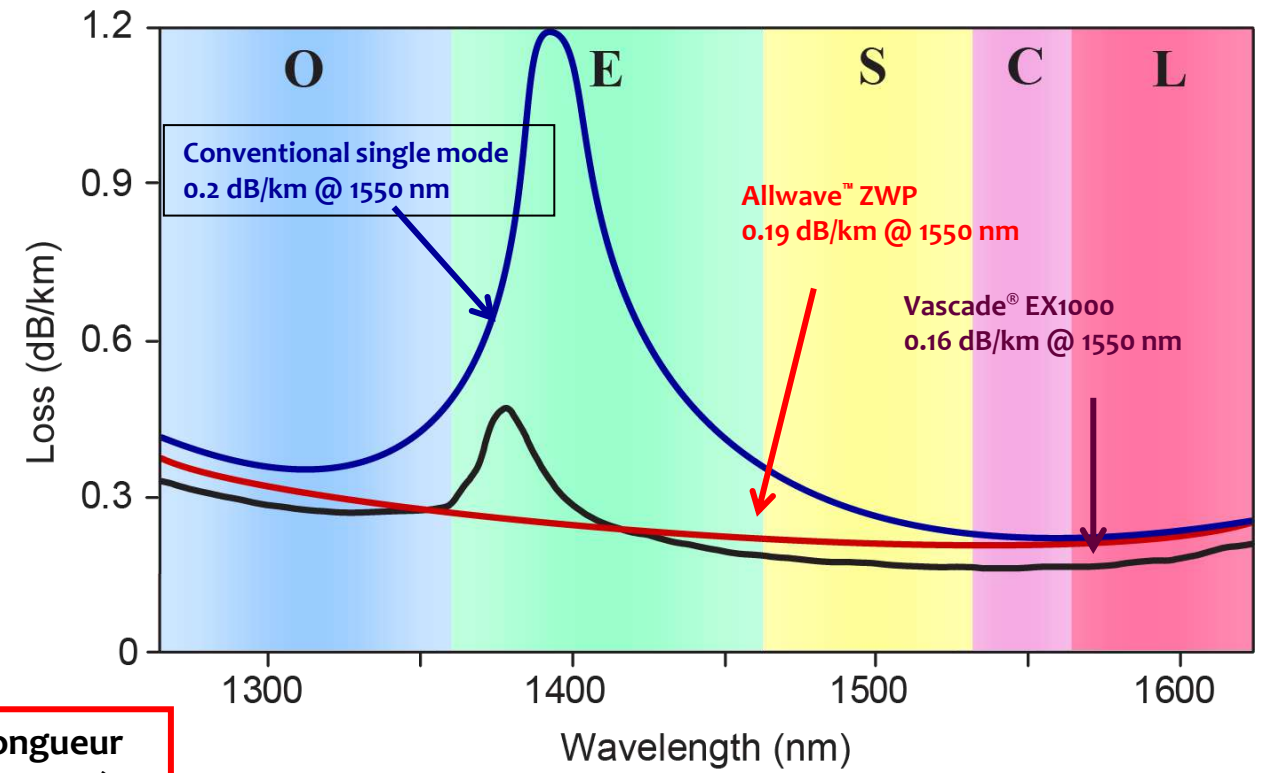
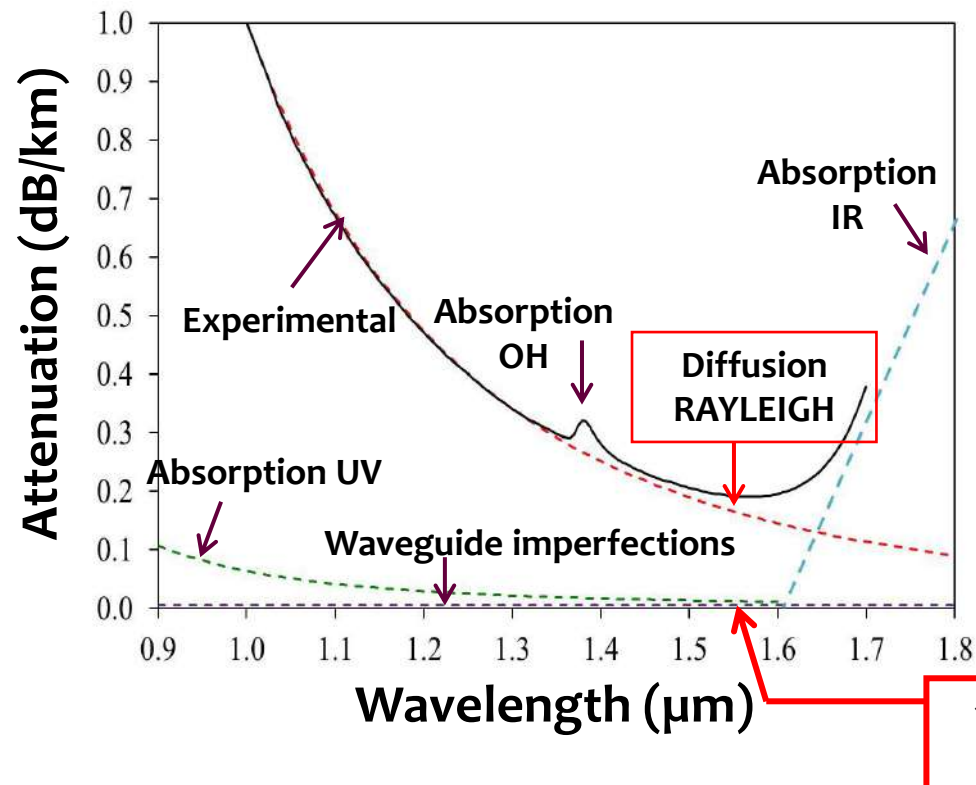
Actuellement <0.001 dB/km at
1550 nm car < 1 ppb de OH

Autres sources d'atténuation (diffusion): Imperfection du guide (interface cœur / gaine, diffusion Mie (défauts $\gg \lambda$) < 0.01 dB/km + pertes par courbures (micro/macro).

II. La transparence dans les fibres optiques / bilan



Bilan sur l'atténuation dans la silice



Il existe un minimum d'atténuation autour de 1,55 μm pour des fibres en silice: « fenêtre télécom »

II. La transparence dans les fibres optiques / autres systèmes

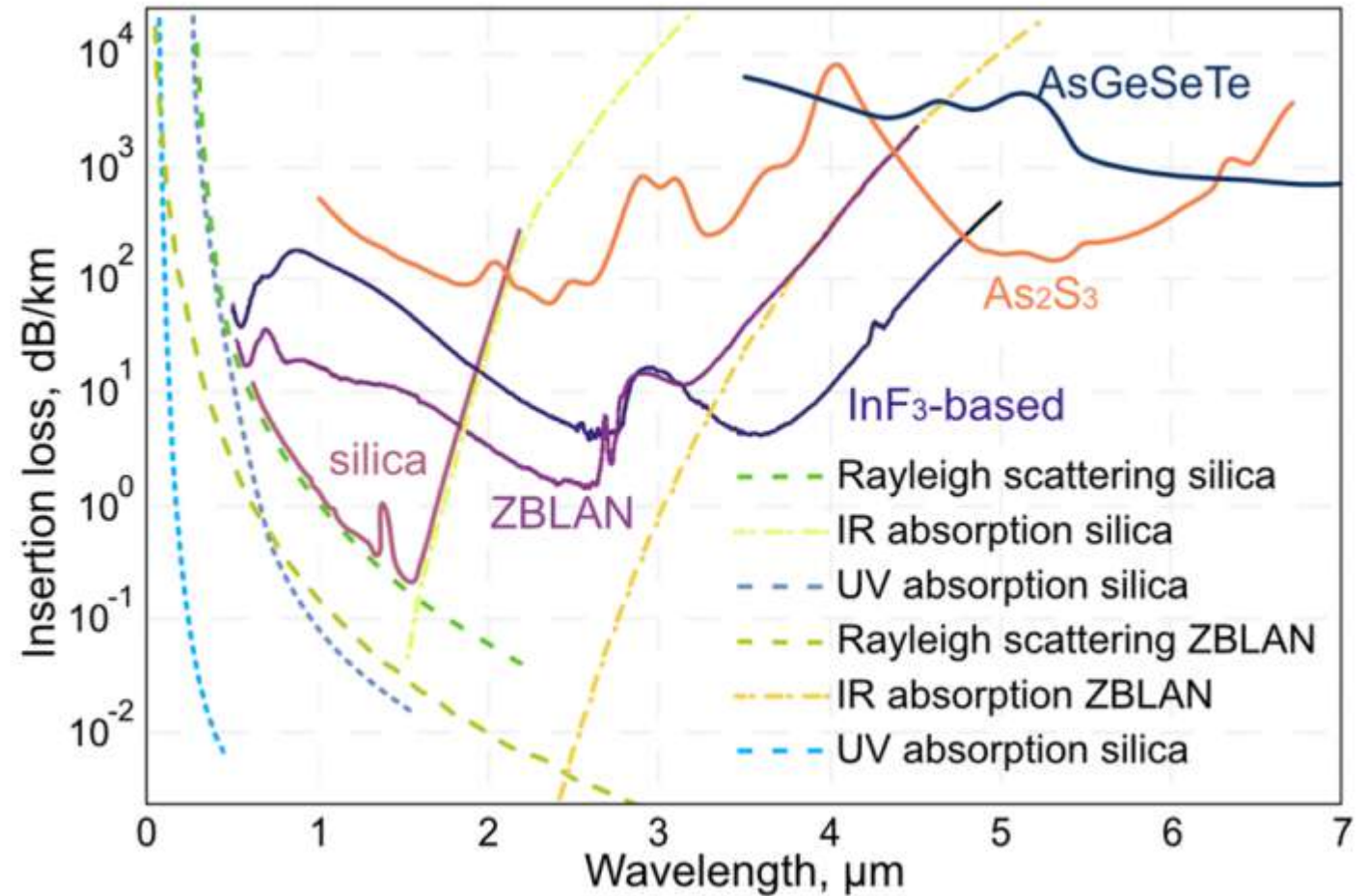
Transparence: Pratique $\neq$ théorique : Très lié aux techniques de fabrication (impuretés)!

Pertes minimales théoriques:

ZrF₄: 0.01 dB/km @ 2.4 μ m

Tellurite glasses: 0.0035 dB/km @ 3.02 μ m

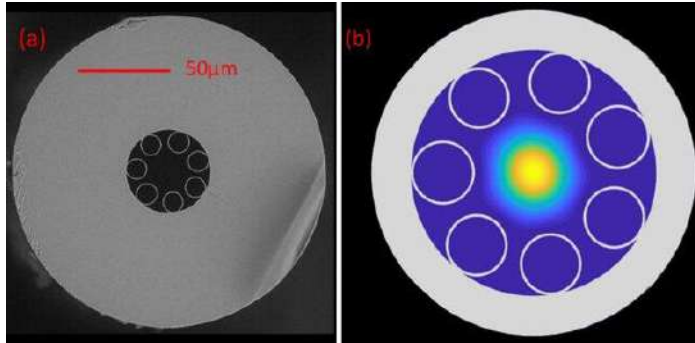
Sulfide-based chalcogenides: 4 dB/km @ 5.3 μ m



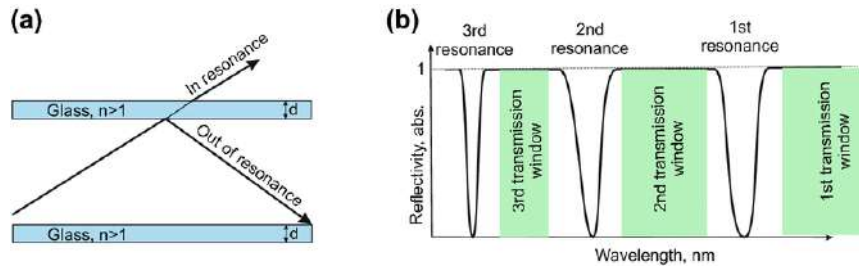
K. Grebnev et al., APL Photonics (2024)

II. La transparence dans les fibres optiques / faire mieux avec moins?

Fibres à cœur creux anti résonnantes

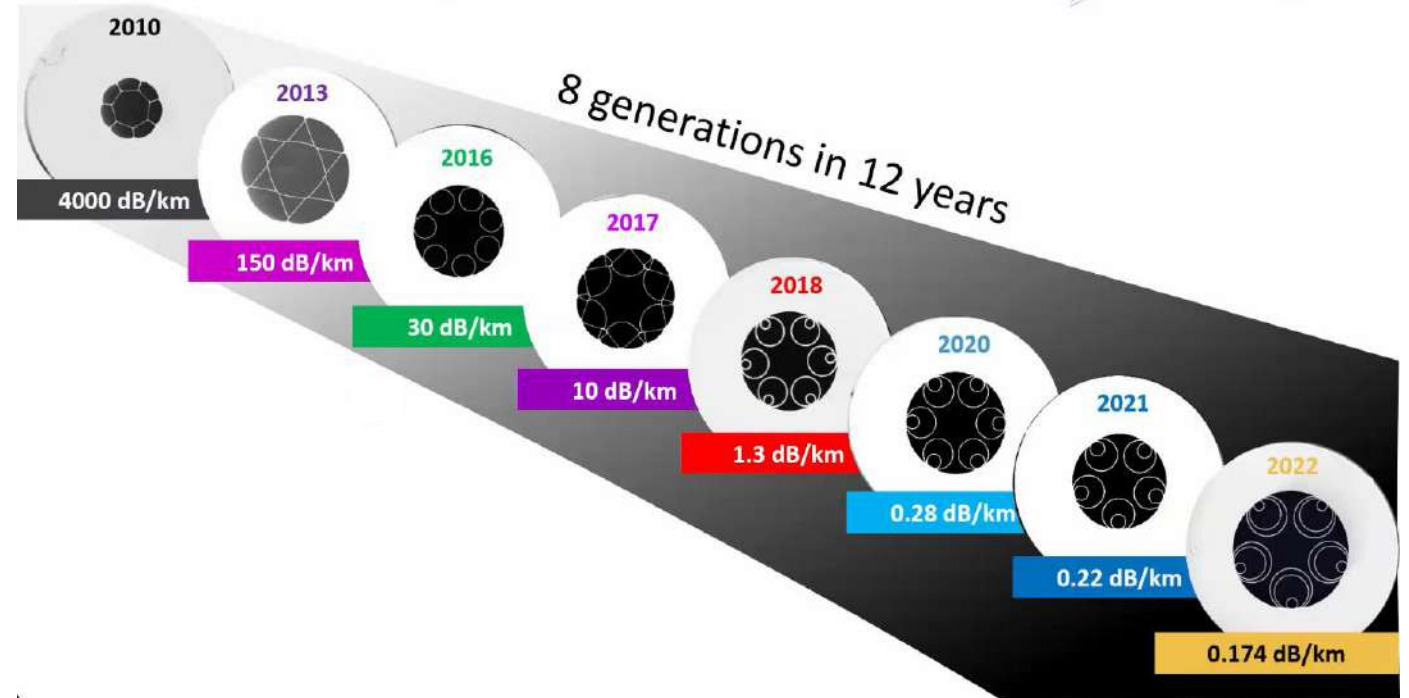


Principe du Fabry-Perot



$$\lambda_{res,m} \sim \frac{2d}{m} \sqrt{n^2 - 1}, \text{ avec } m = 1, 2, \dots$$

Antiresonant HCFs @ ORC



- Faible latence (air versus verre!): **30% plus rapide**
- pas/peu de dispersion, **1-2 ps/(nm·km)**
- Pertes en théorie plus faibles que SiO₂ (**suite**)
- Pas/peu d'effets nonlinéaires

II. La transparence dans les fibres optiques / faire mieux avec moins?

DNHCF (double nested hollow core fiber): Moyenne de $0.08 \pm 0.03 \text{ dB/km}$

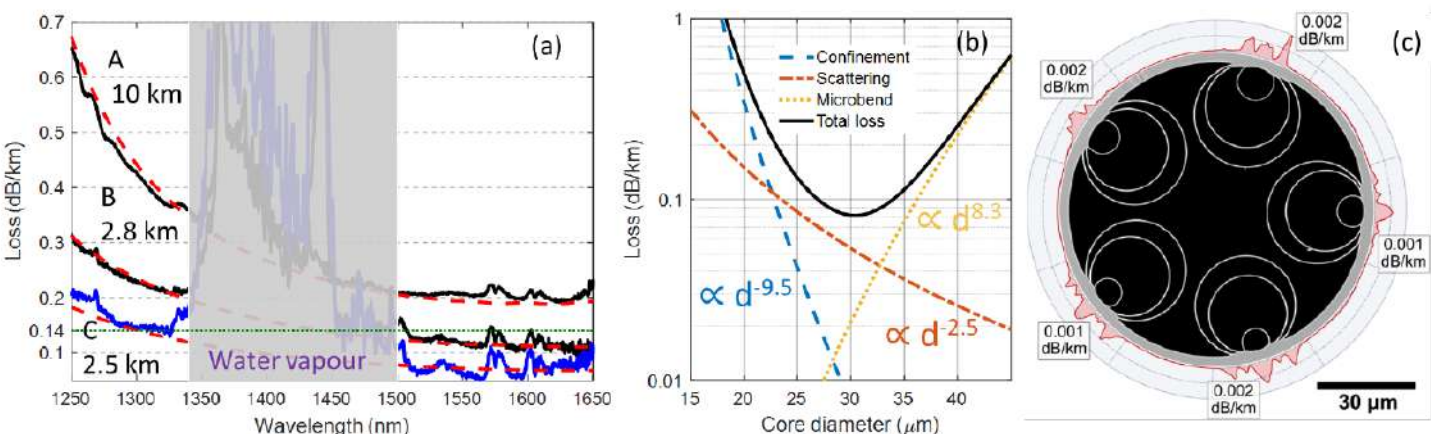


Fig. 1. (a) Measured (solid) and simulated (dashed) loss of fibers used for design optimization (A,B) and optimum design fiber (C); (b) Core size optimization; (c) SEM image of fabricated DNANF C, overlaid with the simulated azimuthal leakage components.

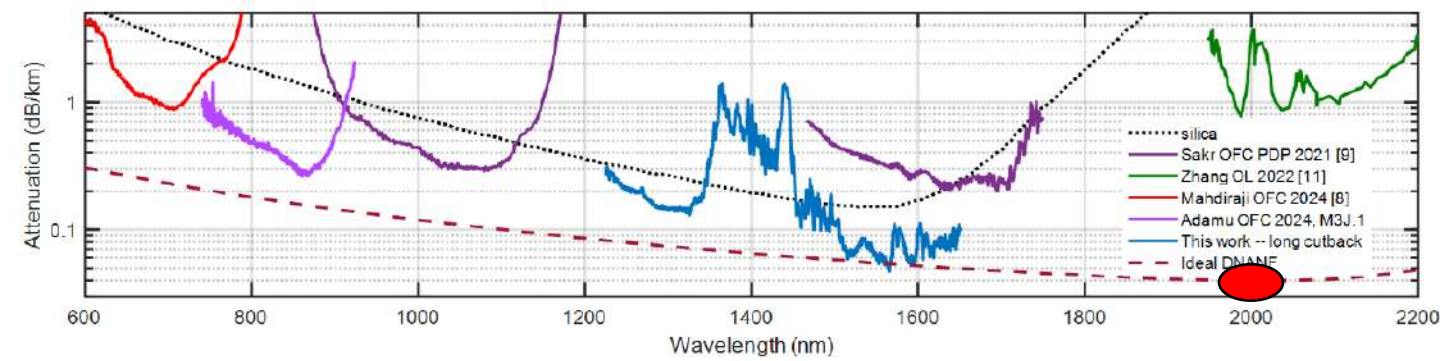


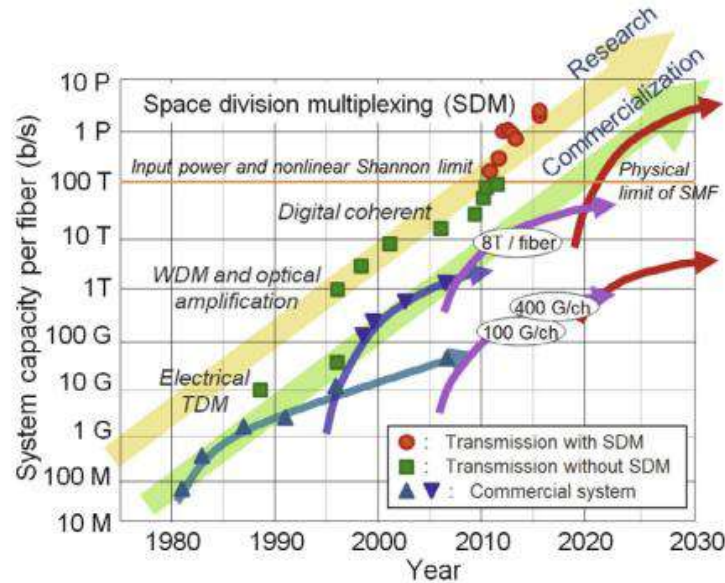
Fig. 3. Measured fiber loss of DNANF C (blue trace), compared to state-of-the-art NANF and DNANF fibers. The black dotted trace shows the intrinsic loss limit for pure silica core SMF and the red dotted trace shows the precited achievable loss for current DNANFs.

1% de puissance lumineuse résiduelle après...	
Attenuation (dB/km)	
0,2	100 km
0,15	133 km
0,08	250 km

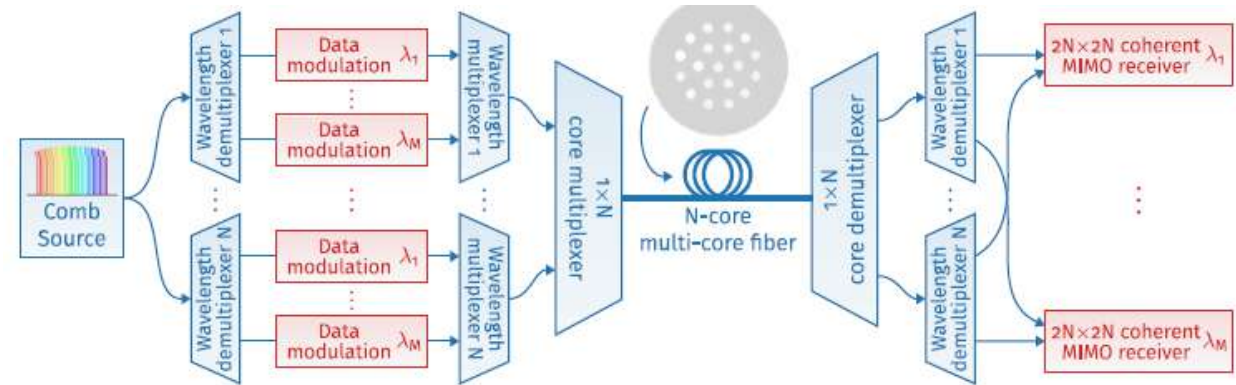
Minimum théorique 0,01 dB/km @ 2 μm avec optimisation du cœur (65 μm) => 2000 km !

II. La transparence dans les fibres optiques / stratégie haut débit!

Transparence +... débit! Quelques stratégies pour maximiser le débit dans les fibres optiques

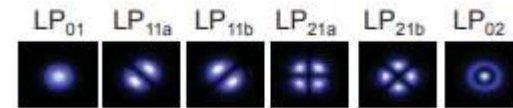
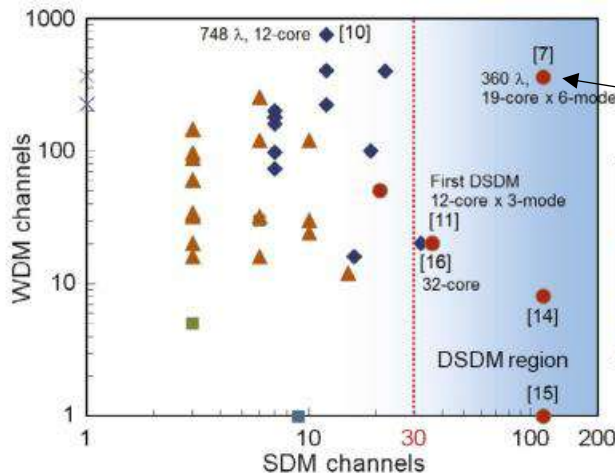


Multiplexage en longueur d'onde (WDM) et spatial (SDM)

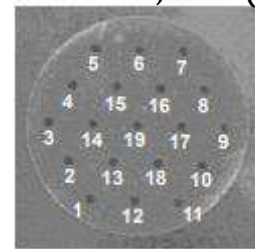


M.V.D. Hout, et al., Nature communications (2024)

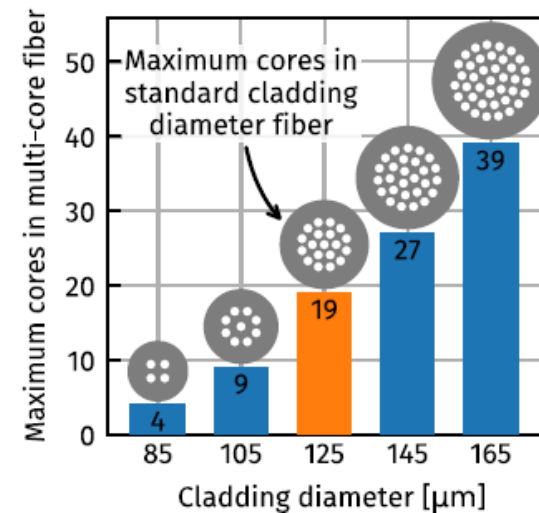
T. Mizuno, Y. Miyamoto, Optical Fiber Technology (2017)



D. Soma et al., IEEE (2015)



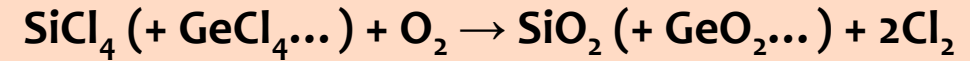
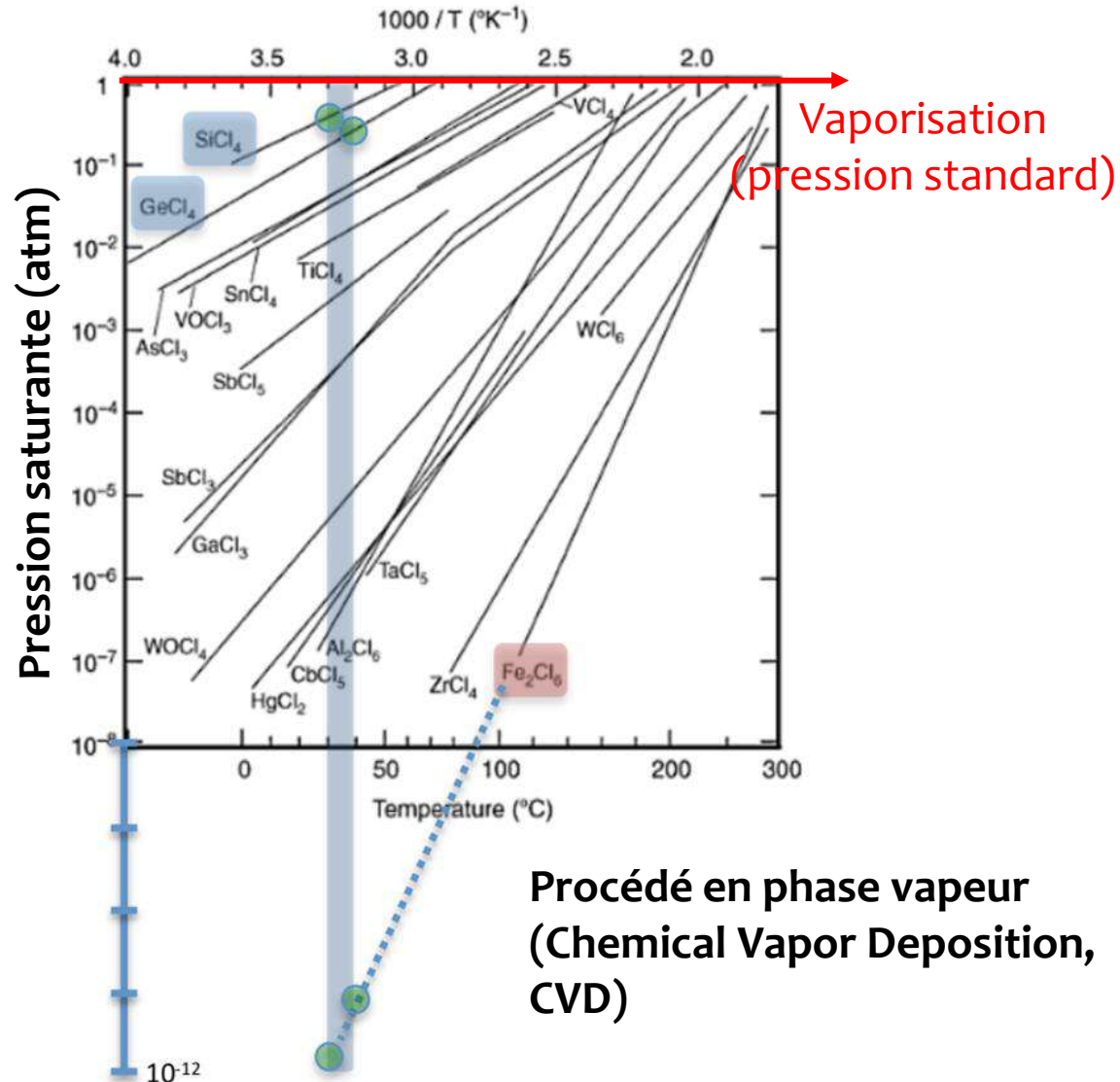
2.05 Pbit/s (360 WDM, C band, 9,8 km)



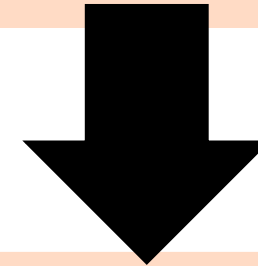
- 1 Pb/s = 11 000 films (4K) en 1 seconde !
- Attention: Le débit c'est bien mais la distance c'est... bien aussi (produit « BxL »)!

III. La Fabrication des fibres optiques / Sélectivité des précurseurs par phase vapeur

Objectif (historique): Minimiser les pertes = composés très purs!



- Excellente selectivité des composés en phase vapeur (12 ordres de grandeur!)
- Réaction à haute température $\gg 1000^\circ\text{C}$
- Réaction d'hydrolyse $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$ bien connue dès années 1930 (Corning)

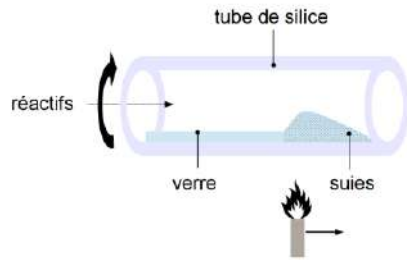


2 étapes de fabrication:

- 1) Fabrication de la préforme
- 2) Etirage de la fibre

III. La Fabrication des fibres optiques / fibres de silice

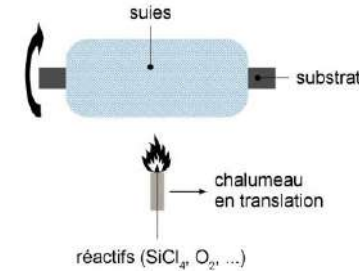
Etape 1: Fabrication de la préforme



1974 : MCVD, AT&T Bell Labs
J.B. Mc Chesney, P.B. O'Connor

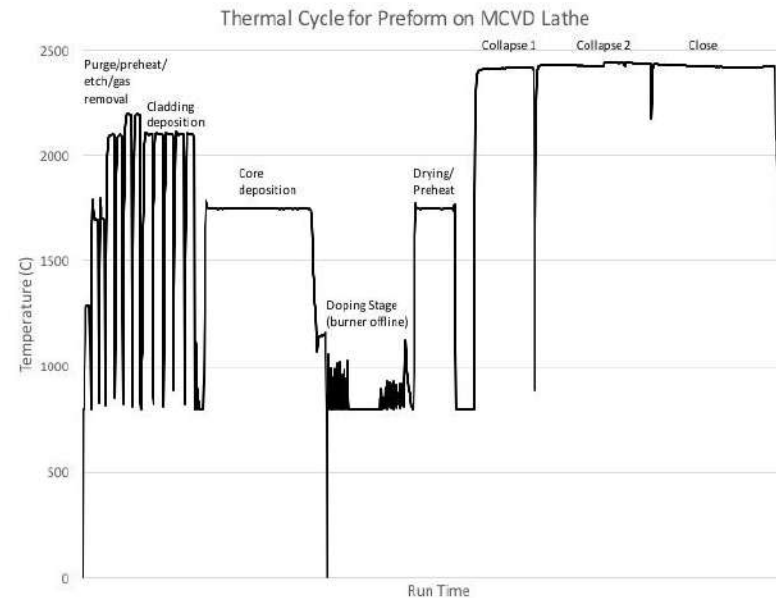
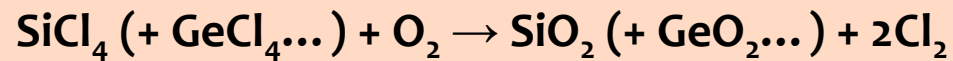
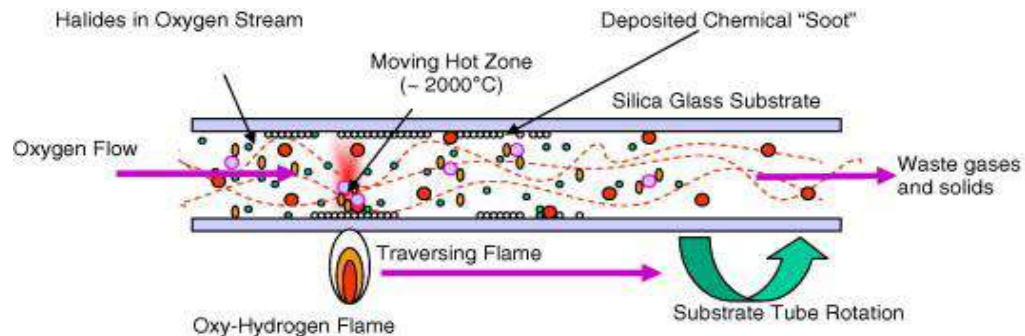


1977 : VAD, NTT
T. Izawa *et al.*



1972 : OVD, Corning
D.B. Keck, P.C. Schultz F. Zimar

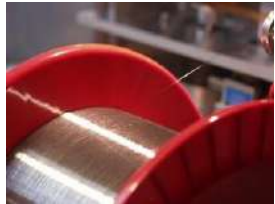
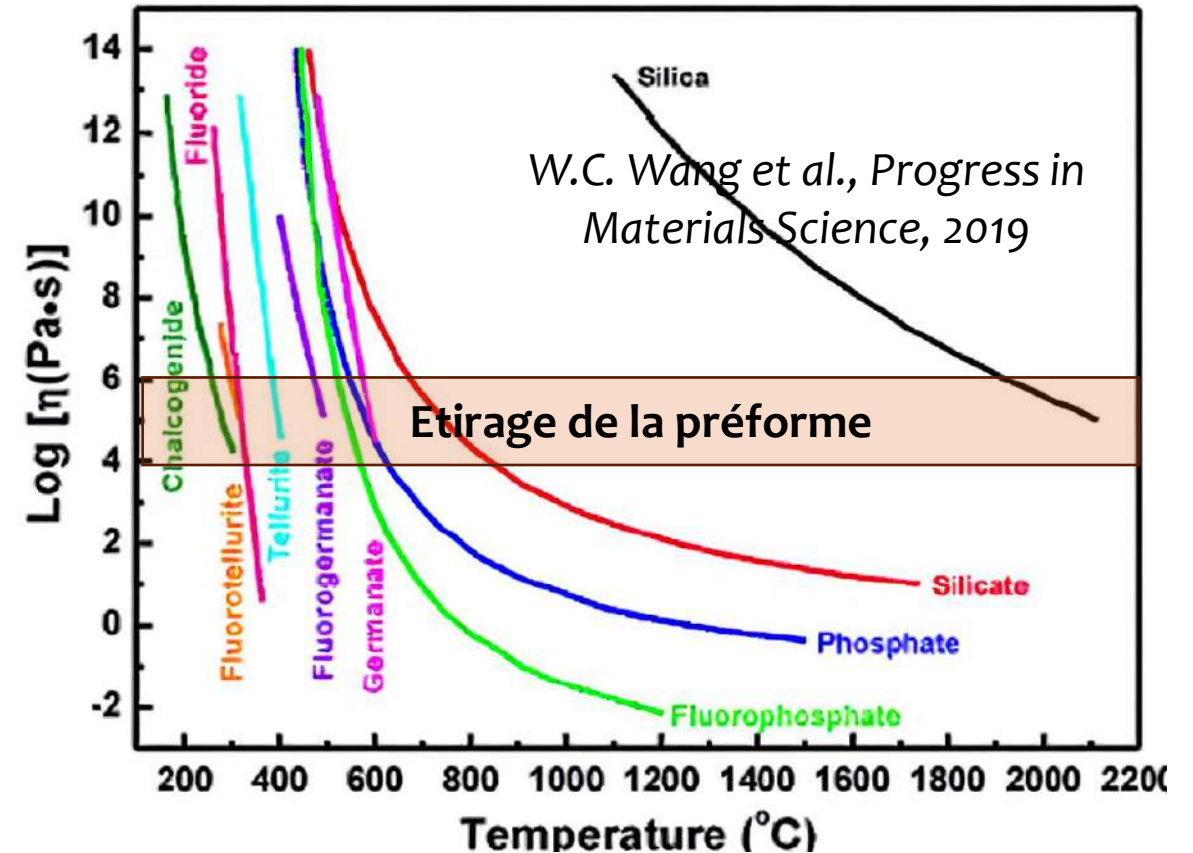
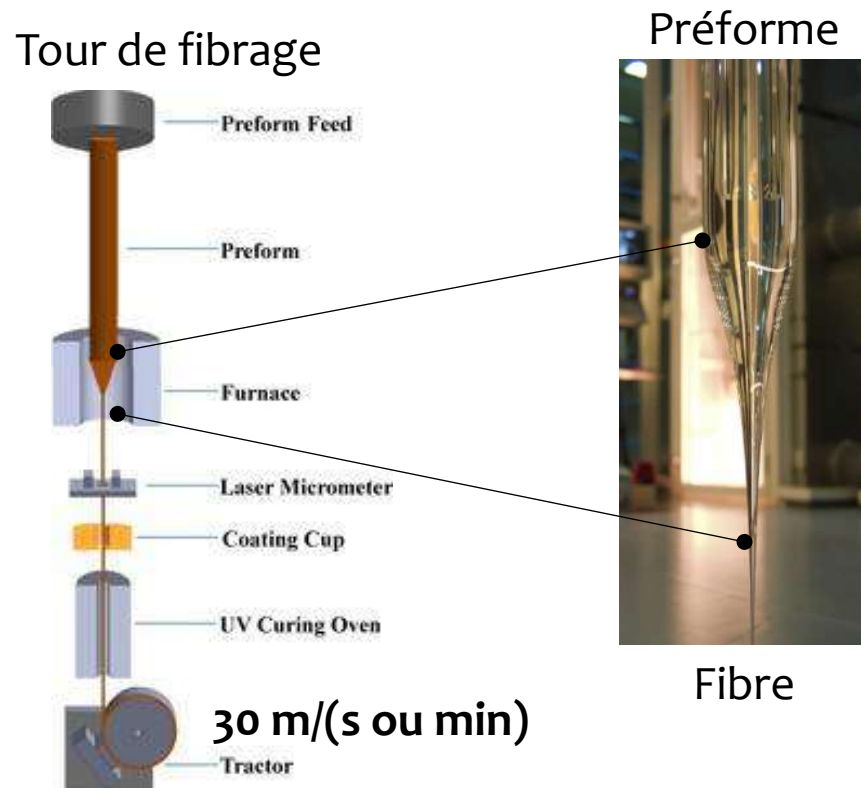
Procédé MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition)



(OVD)

III. La Fabrication des fibres optiques / fibres de silice

Etape 2: Etirage de la fibre



- **OVD/VAD**: Grosses préformes (volumes important)
- **MCVD (PCVD aussi)**: bon contrôle du profile d'indice, taille préformes limitées
- Techniques ajouts terres rares: Dépôt en phase vapeur, en solution, dépôt couches atomiques etc.
- **Très grande pureté permise** (cf partie « transparence »)

III. La Fabrication des fibres optiques / fibres de silice

Compositions « typiquement possibles » par CVD

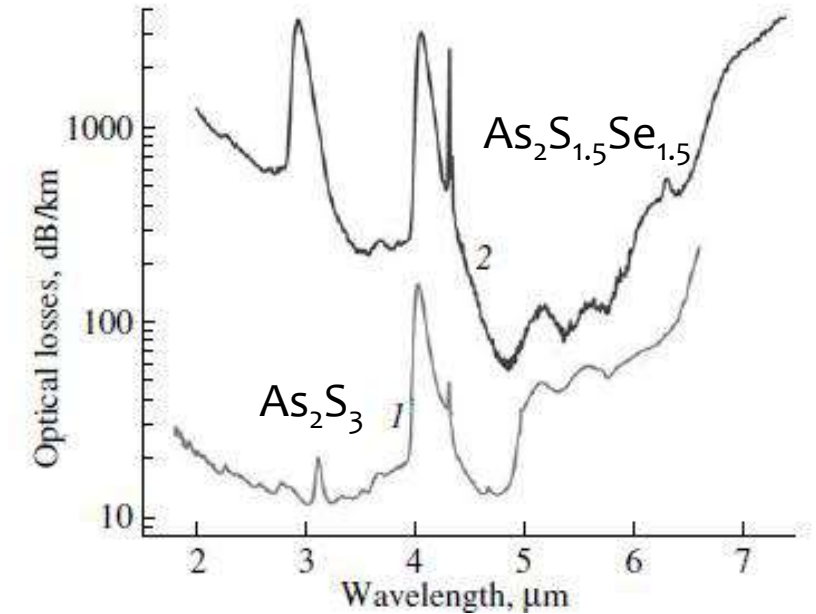
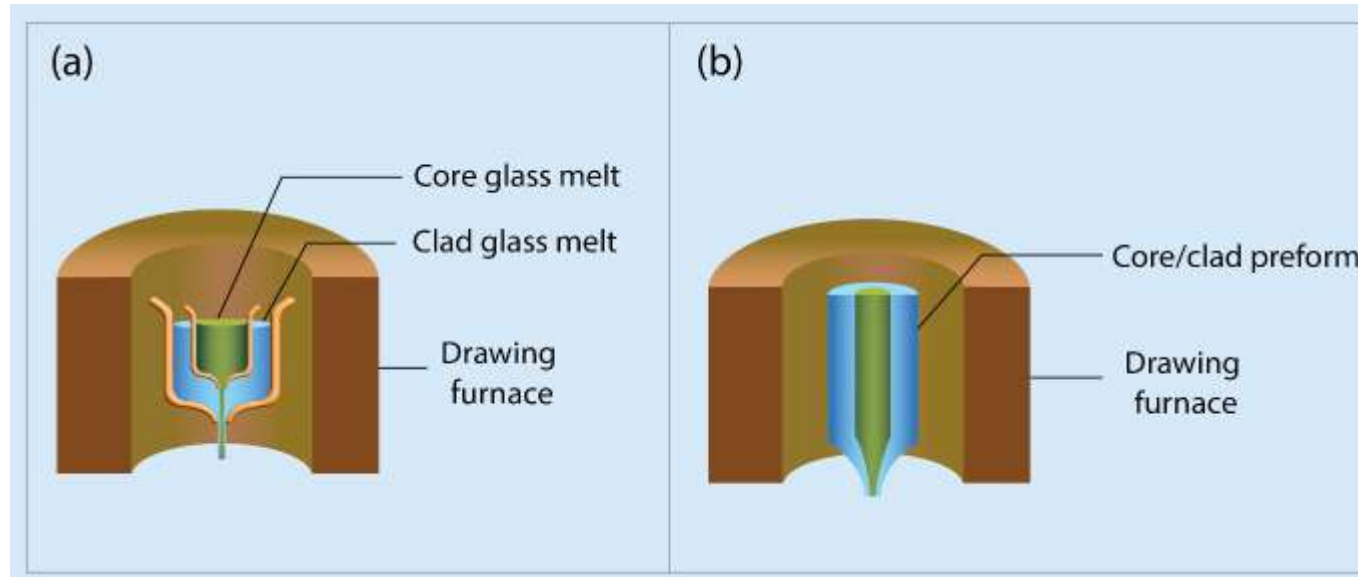
Dopant into SiO ₂		Concentration (mol.%)			
GeO ₂	Formateurs / intermédiaires			97 ²⁷	
Al ₂ O ₃		9.5 ²⁸	20 (Al ₂ O ₃ + P ₂ O ₅) ²⁹	6 ³⁰	10 ^{31,32}
P ₂ O ₅		10 ²⁹			0.6 SnO ₂ + 9 P ₂ O ₅ ³³
B ₂ O ₃			17 ³⁴		
Sesquioxides (other than B ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , or rare-earth oxides, RE ₂ O ₃)		20 Ga ₂ O ₃ + 10 Ta ₂ O ₅ ³⁵	3 Ga ₂ O ₃ + 1.4 BaO ³⁶	5 ^a Ga ₂ O ₃ ³⁷	
Pentoxides (other than P ₂ O ₅)					
RE ₂ O ₃		11 ³⁸			
Alkali oxides (AO)		>20 ppm ³⁹		<7 ⁴⁰	0.2 AO + 0.2 AE ^{41,c}
Alkaline earth (AE) oxides		<2 (BaO) ⁴²			
ZrO ₂			>5 ⁴³		
TiO ₂			20 ^{44,a}		
Transition metals			0.1 ^{45b}		
Ta ₂ O ₅			1.5 ⁴⁶		
SnO ₂			0.15 ⁴⁷		
Sb ₂ O ₅			2.8 ⁴⁸		

Relativement limitée dans l'ajout des dopants (nature et quantité)

III. La Fabrication des fibres optiques / verres basse T_g

Verres à basse T_g (ou avec une teneur en SiO_2 réduite)

Procédé en 1 étape: Double crucible method



Faibles pertes 12 dB/ km @3.0 μm

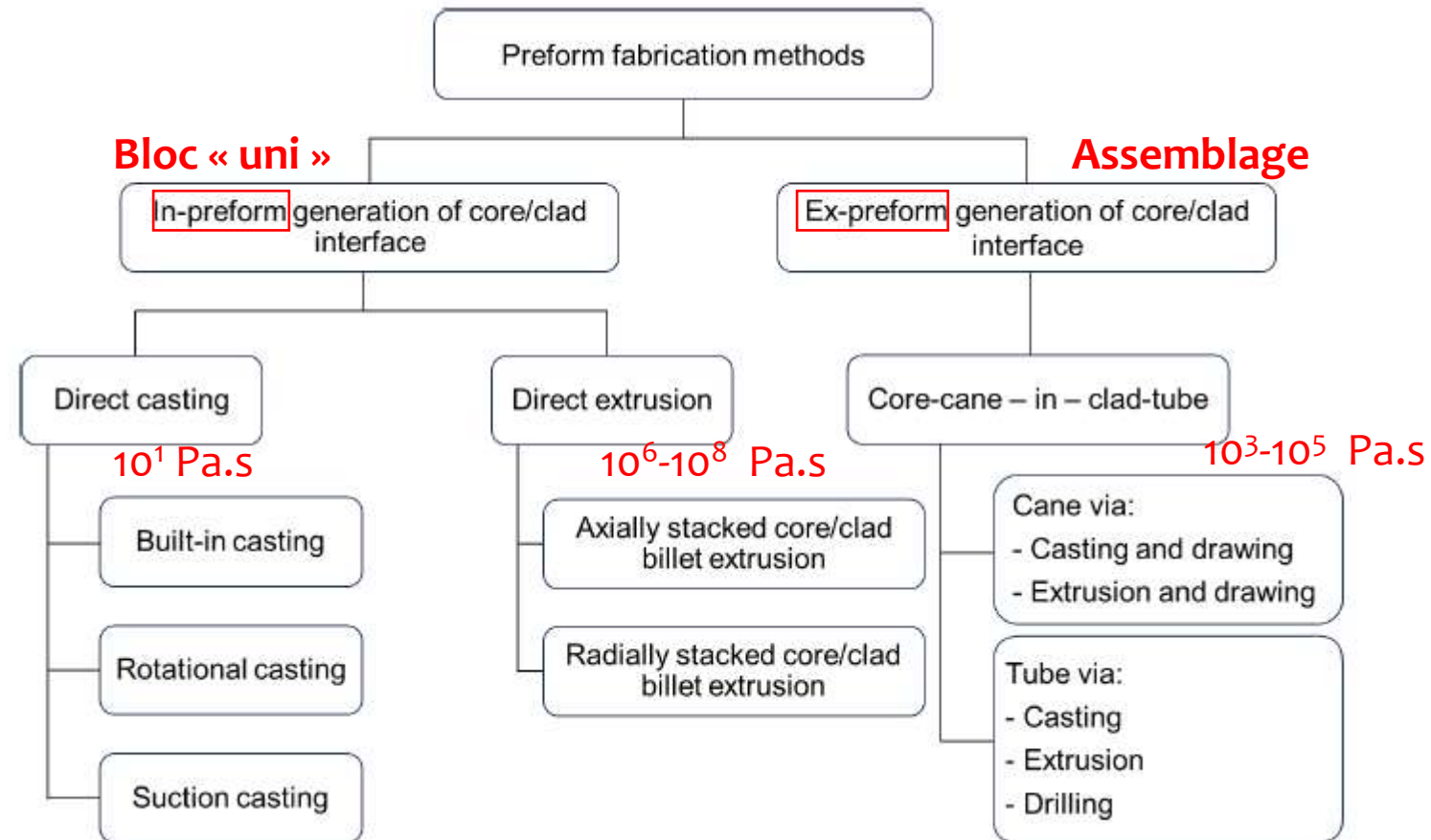
- Souvent pertes importantes attribuées aux impuretés du creuset, mais pas toujours
- Difficile de maîtriser car 2 liquides en parallèle

G. E. Snopatin et al., *Inorganic Materials* (2009)

E. Salih et al., *Optical Materials* (2025)

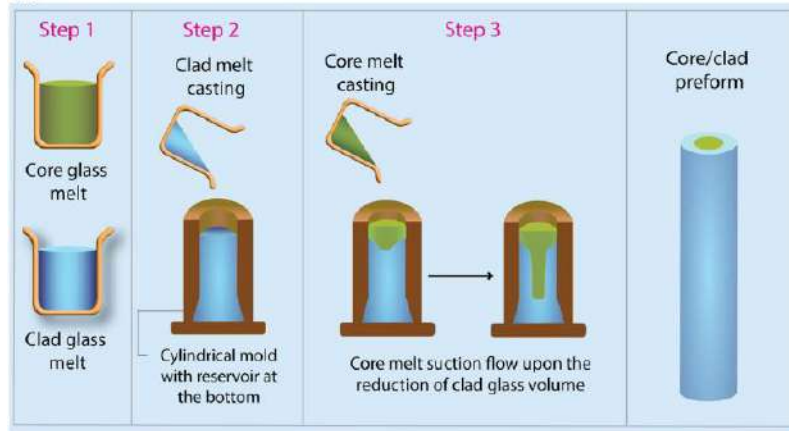
III. La Fabrication des fibres optiques / verres basse T_g

Procédés en 2 étapes: Fabrication de la préforme « variable » / tirage de la fibre « commun »

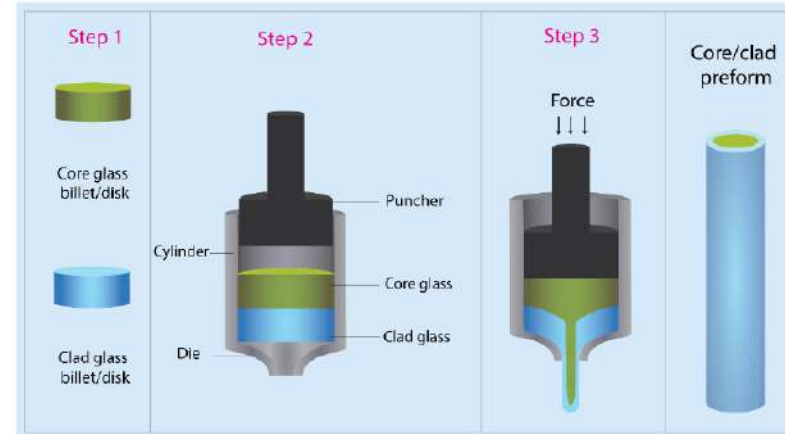


III. La Fabrication des fibres optiques / verres basse T_g

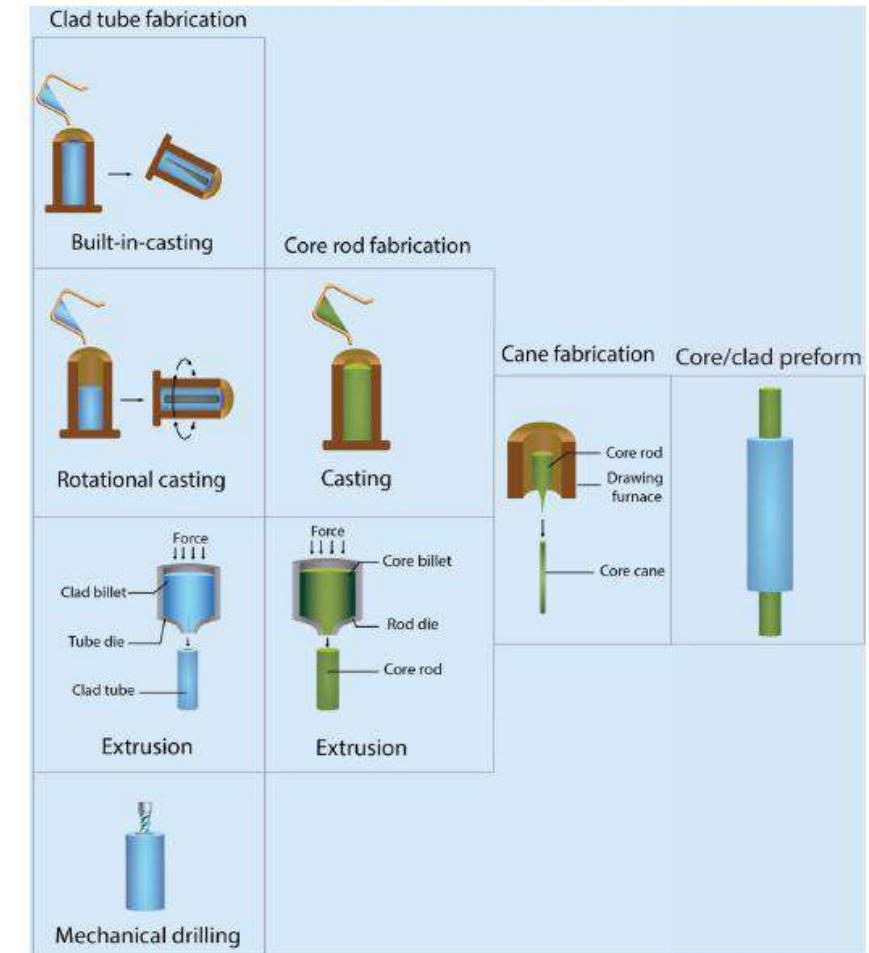
Exemple « casting / moulage »



Exemple « extrusion »



Exemple « core / clad assembly »
« Rod in tube »

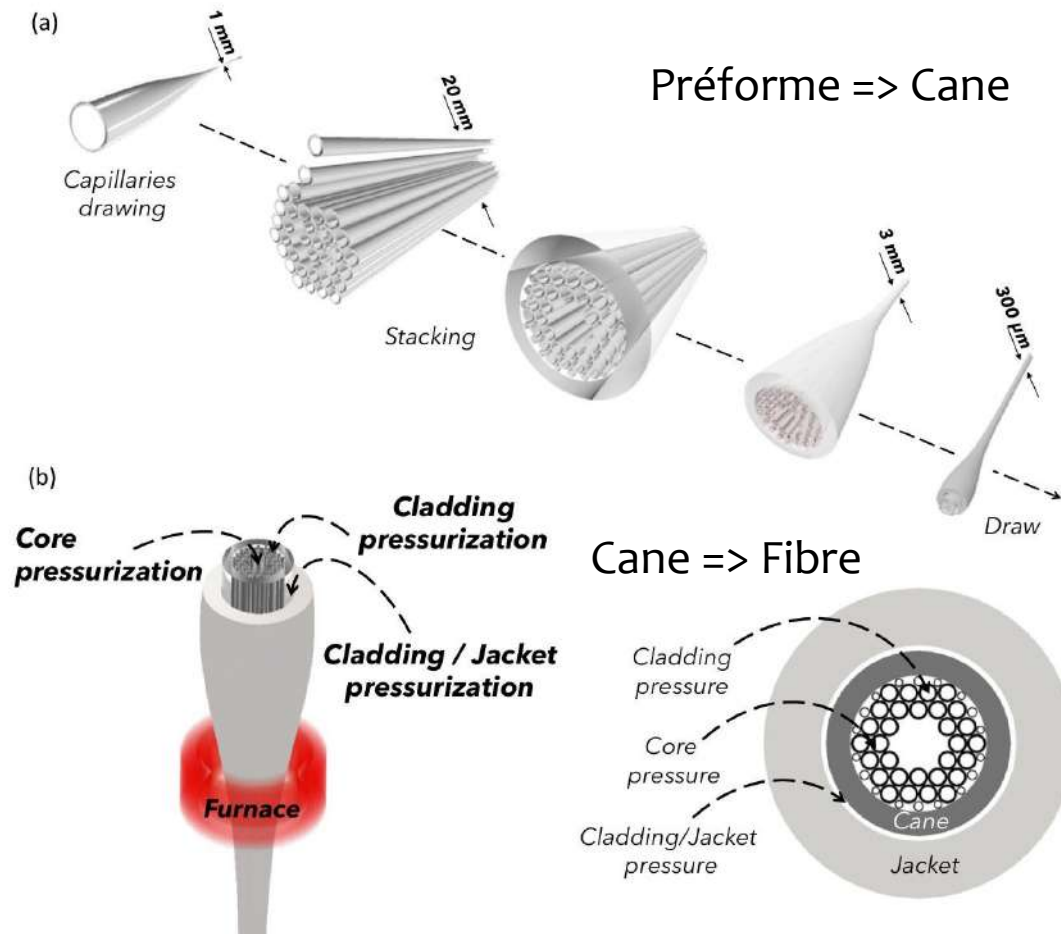


- **Direct casting:** meilleur interface cœur/gaine
- **Extrusion:** plus haute visco donc limite effets de cristallisation
- **Core/clad assembly:** Bon contrôle des dimensions cœur/gaine

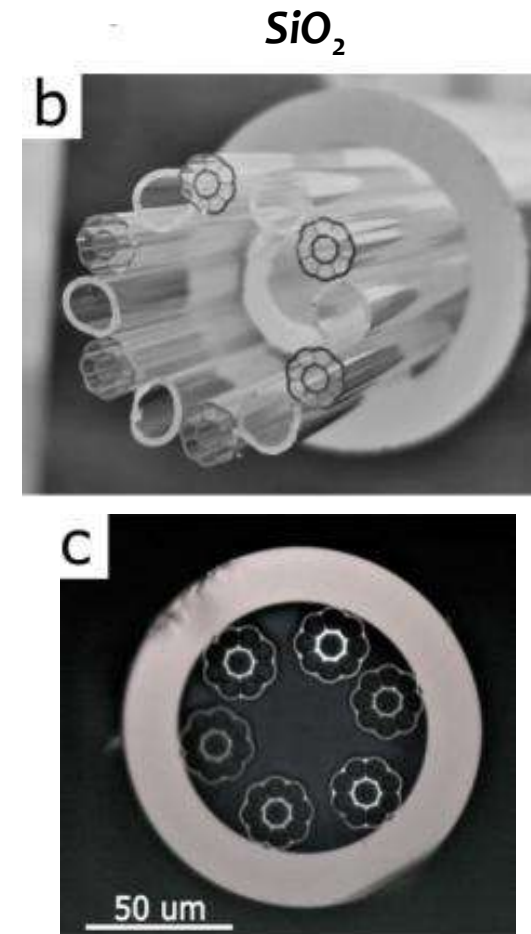
Cours Laurent Calvez

III. La Fabrication des fibres optiques / fibres microstructurées

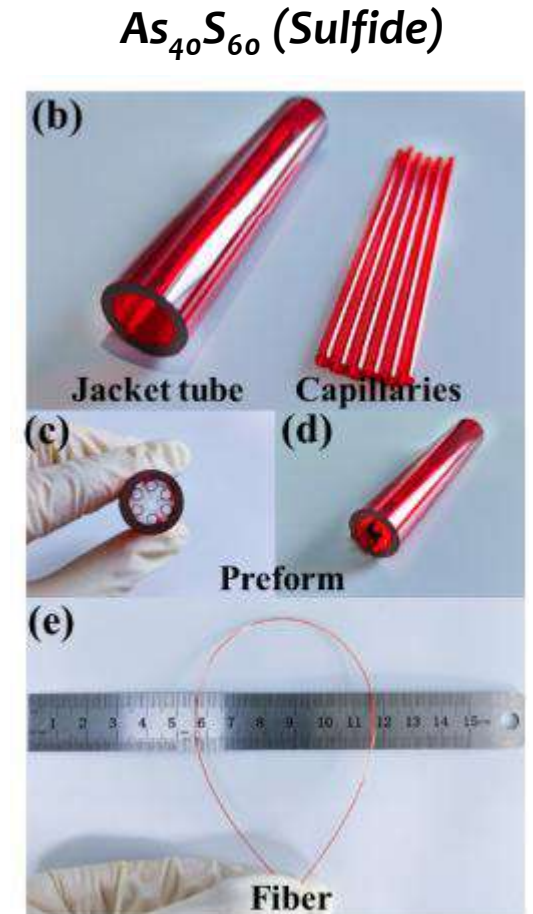
Procédé stack and draw



https://www.unilim.fr/platinom/technical-domains/gb_fibrage/?lang=en



L. R. Murphy et al., Optics Express (2022)

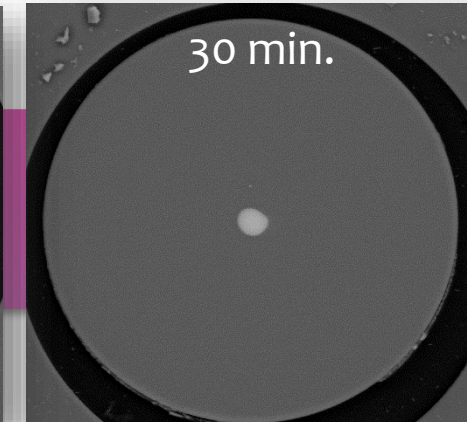
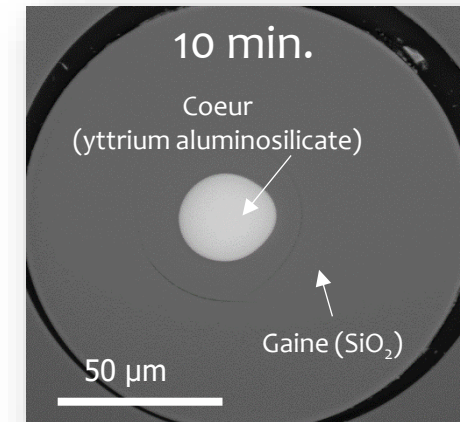
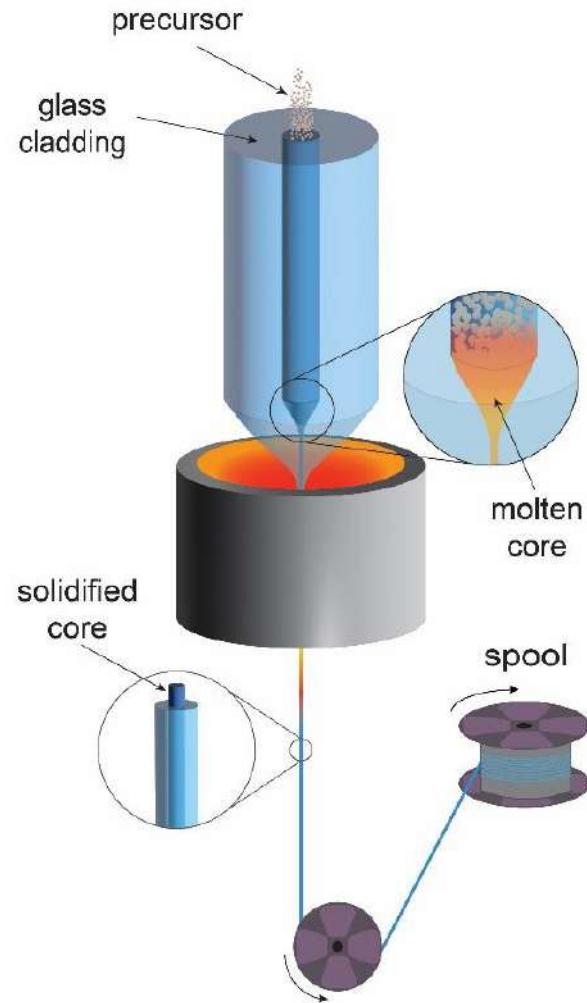


Y. Chang et al., Optics Express (2024)

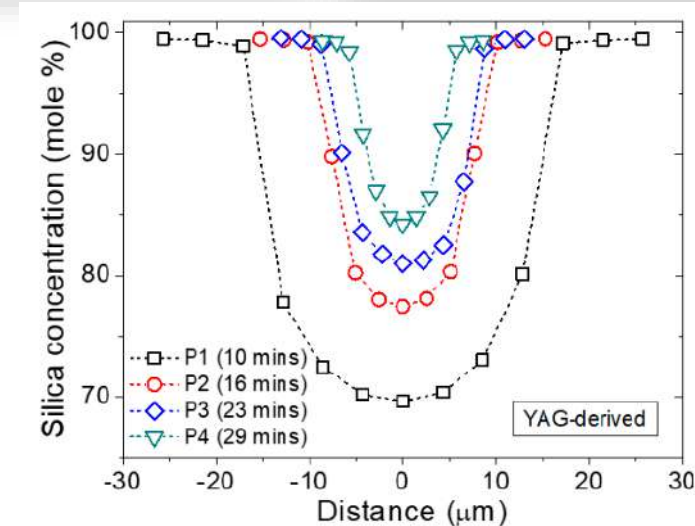
Géométries très complexes, nécessite une étape intermédiaire (préforme – cane – fibre) + pression

III. La Fabrication des fibres optiques / verres d'oxydes

Méthode « molten core »



Draw time



J. Ballato, P. Dragic, JACerS (2013)
M. Cavillon et al., Materials, (2019)

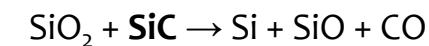
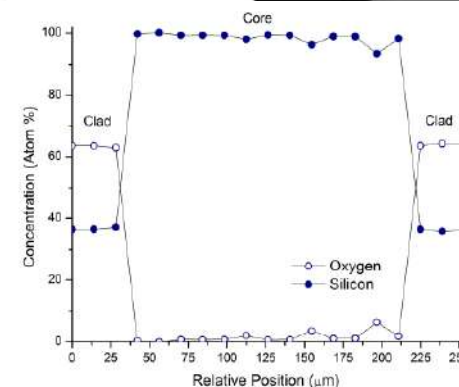
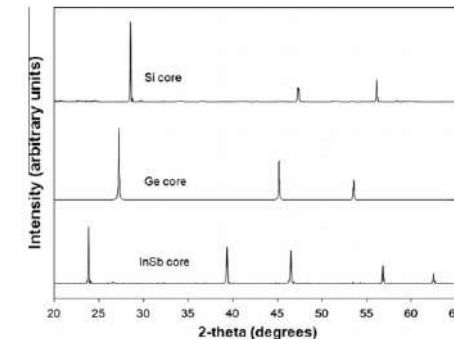
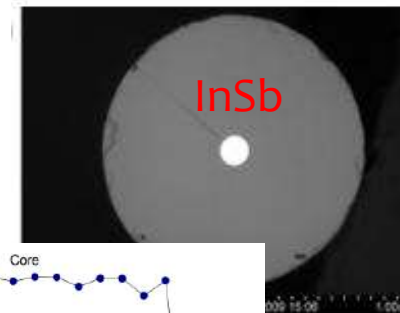
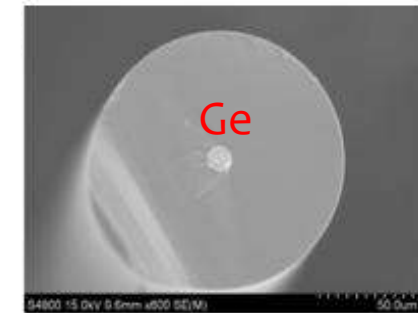
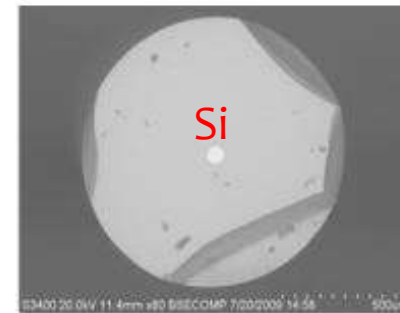
Grande flexibilité de compositions, réactivité permise, mais fluctuation de composition, pureté des précurseurs etc (typ. quelques dB/m)

III. La Fabrication des fibres optiques / verres d'oxydes

Fibres semiconductrices: Optique, électronique, thermo-électrique, optoélectronique, thermoelectric, optoelectronic, optique nonlinéaire etc.

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS																	
1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson
		58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium		
		90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium		

Possibilité de fabriquer des fibres
autres (ex, cristallisées, SC)



III. La Fabrication des fibres optiques / verres d'oxydes

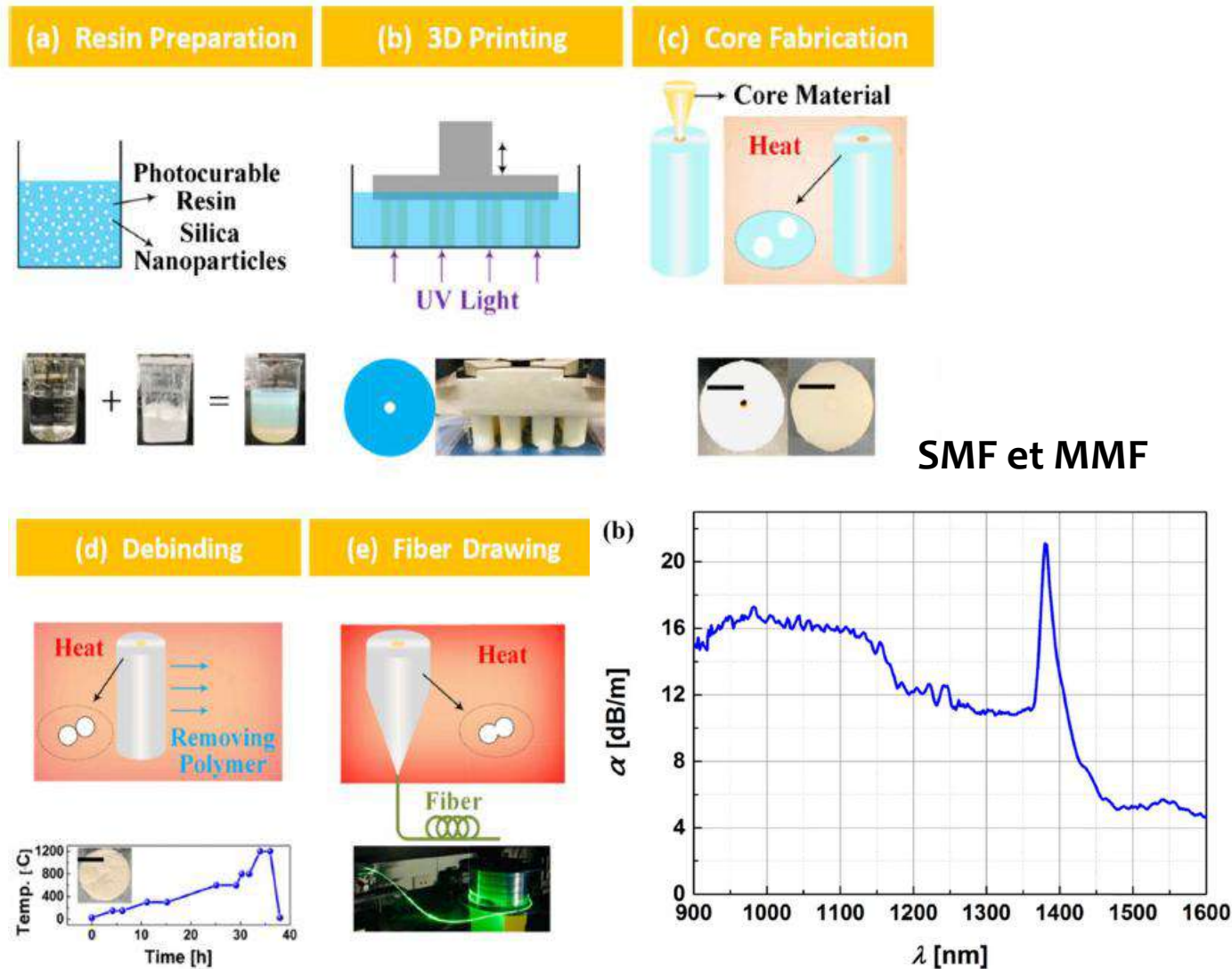
Dopant into SiO ₂	Maximum concentration by fabrication method (mol. %)		
	<i>Vapor deposition</i>	<i>Powder sintering</i>	<i>Molten core</i>
Al ₂ O ₃	8	8 ⁵⁵⁸	54 ³⁷⁴
Fluorine	2	2 ⁵⁵⁸	8 ⁵⁵⁹
Rare earth oxide	2	6 (Yb ₂ O ₃) ⁵⁵⁸	10 (Yb ₂ O ₃) ^a
Alkaline earth oxides	<2 (BaO) ⁴²		18 ³⁷⁶ (BaO)
Ta ₂ O ₅	<1 ⁴⁶		7 (+8 mol. % Al ₂ O ₃) ^a
Li ₂ O	0.2 ⁴¹		6.5 ³¹⁷

^aUnpublished results by the authors.

Grande flexibilité de compositions au détriment d'autres propriétés (pertes, contrôle du procédé de fibrage, etc.)

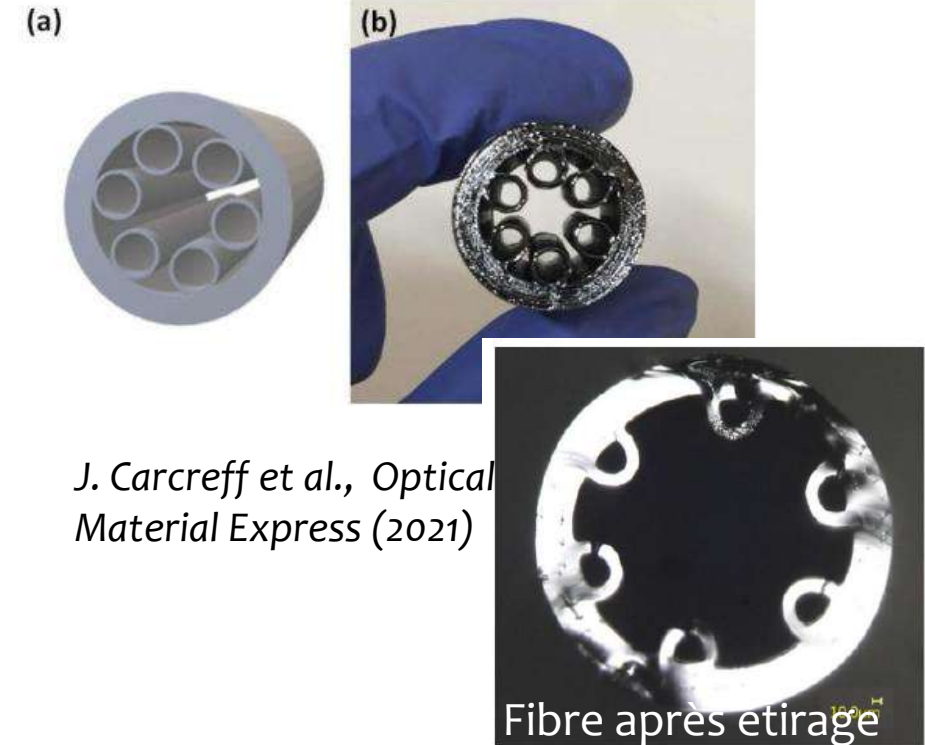
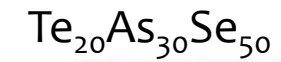
Process RUPUSIL (frittage d'un verre dopé RE), K. Schuster et al., Adv. Opt. Techn. 2014)

III. La Fabrication des fibres optiques / impression 3D!



Y. Shu et al., *Optics Letters* (2019)

Préforme (imprimée en 3D)

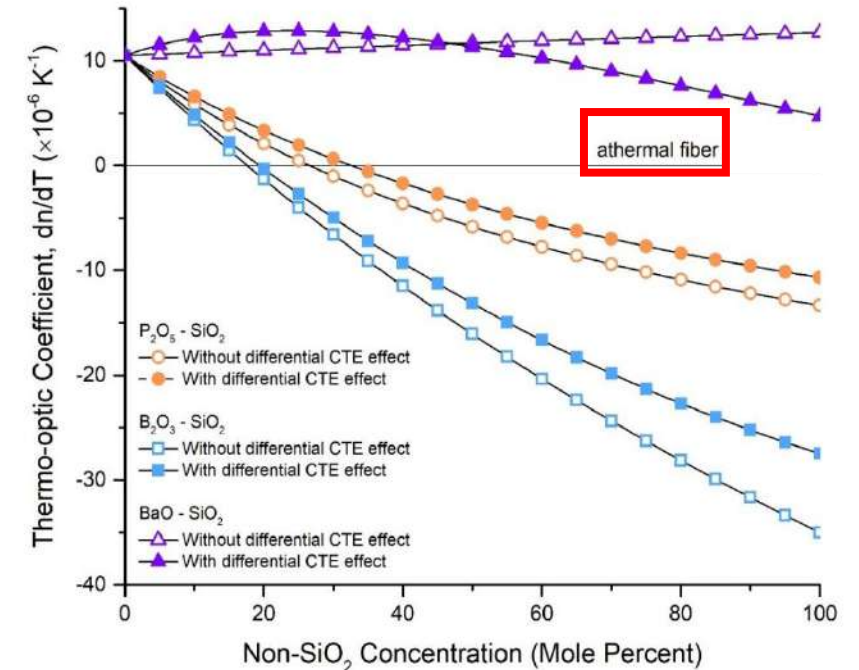
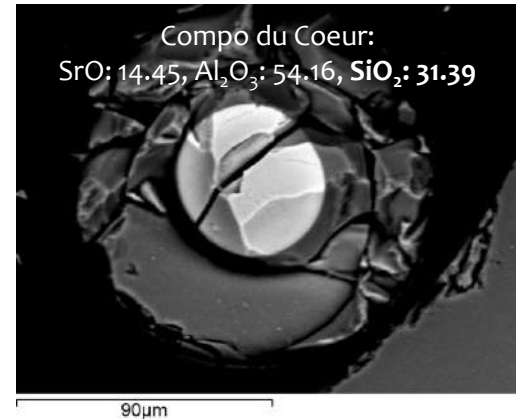
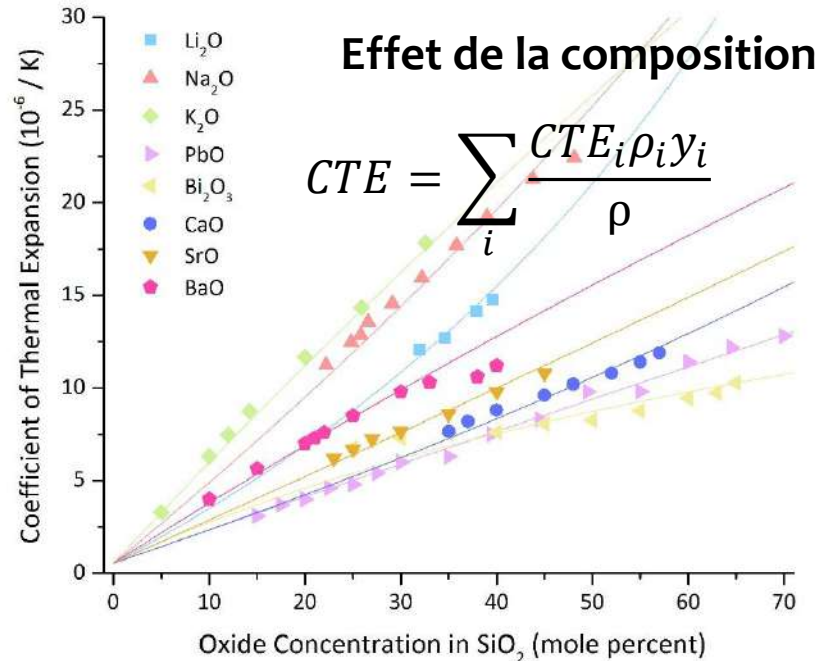


J. Carcreff et al., *Optical Material Express* (2021)

Cours Yves Quiquempois

III. La Fabrication des fibres optiques / Coefficient d'expansion thermique (CTE)

Importance CTE: La variation du coefficient d'expansion thermique est limitante par rapport aux concentrations accessibles (fracture, changement des propriétés)

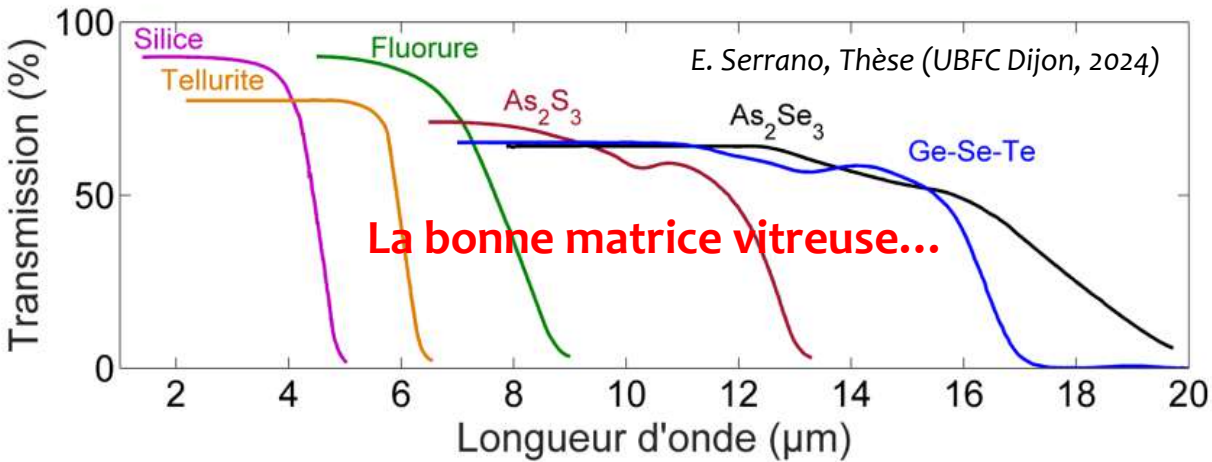
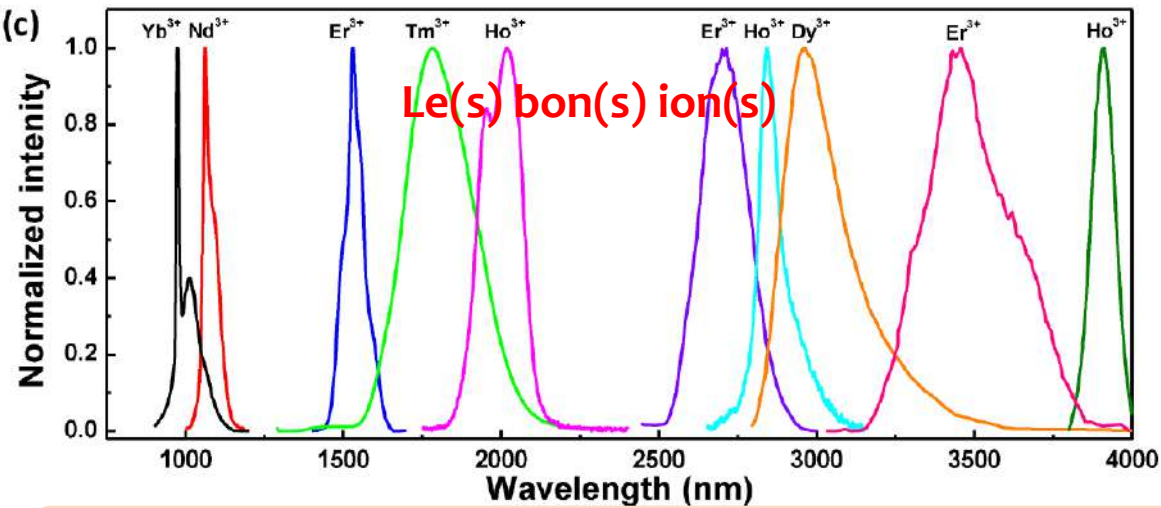


$$n_i(T) = n_{0,i} + \frac{dn}{dT_i} (T - T_0) + \frac{n_{0,i}^3}{2} (\alpha_{core} - \alpha_{clad})(T - T_0) \left[2 \left(p_{12,i} - \nu(p_{11,i} + p_{12,i}) \right) + (p_{11,i} - 2\nu_i p_{12,i}) \right]$$

Solutions: « Couches tampons » dans les préformes, maîtrise du profile de température

IV. lasers à fibre / longueur d'onde, ion(s), applications

Gamme de longueur d'onde	Dopants (terres rares seulement)	Applications / quelques exemples
UV (150–400 nm)	Ce ³⁺ , Gd ³⁺ , Nd ³⁺ (conversion de fréquence)	Micro-usinage, stérilisation, photolithographie...
Visible (400–700 nm)	Pr ³⁺ , Tb ³⁺ , Eu ³⁺ , Dy ³⁺	Affichage / éclairage / Médical (dermato / ophtalmo)
1 µm	Nd ³⁺ , Yb ³⁺	Traitement des matériaux (découpe, soudage), militaire, contre mesure optique / LIDAR (haute puissance)
1,5 µm	Er ³⁺ , Er ³⁺ /Yb ³⁺	Télécommunications
2 µm	Tm ³⁺ , Ho ³⁺ , Tm ³⁺ /Ho ³⁺	"Eye-safe" LIDAR, médecine (chirurgie), défense, télédétection (CH ₄ , CO ₂ , explosifs TNT), imagerie thermique / militaire, signatures chimiques (ex: drogues, polluants)
3 µm	Er ³⁺ , Ho ³⁺ , Dy ³⁺	
> 3 µm (jusqu'à 12 µm)	Ho ³⁺ , Dy ³⁺ , Pr ³⁺	



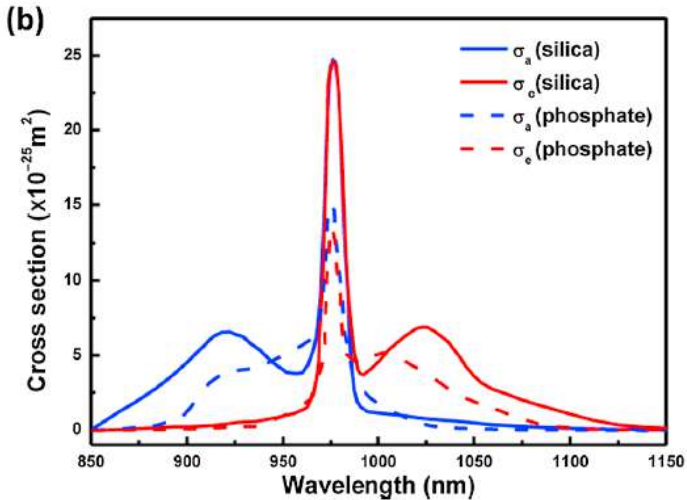
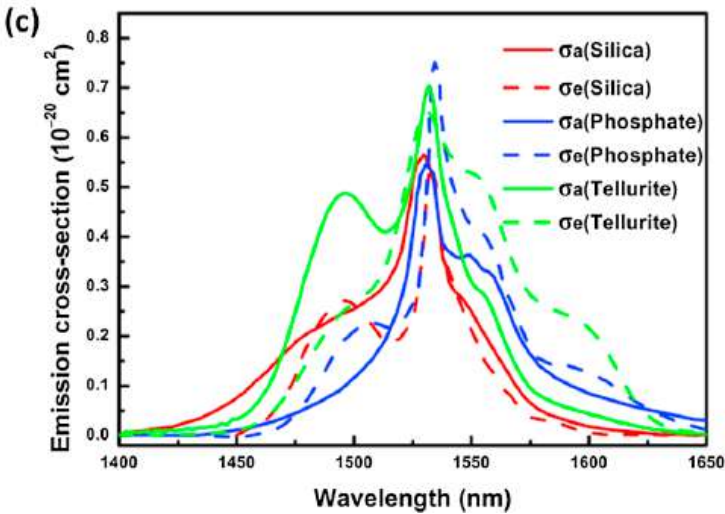
Transparence (même relative) mais pas que: Intensité lumineuse, solubilité RE, pertes, fabrication, toxicité, etc...

D'après W.C. Wang et al., Progress in Materials Science (2019)

IV. lasers à fibre / choix de la matrice vitreuse

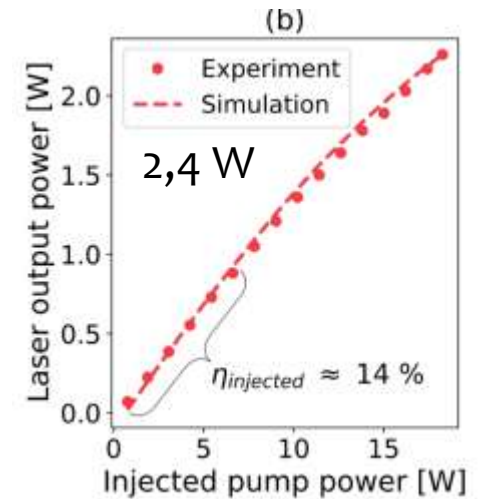
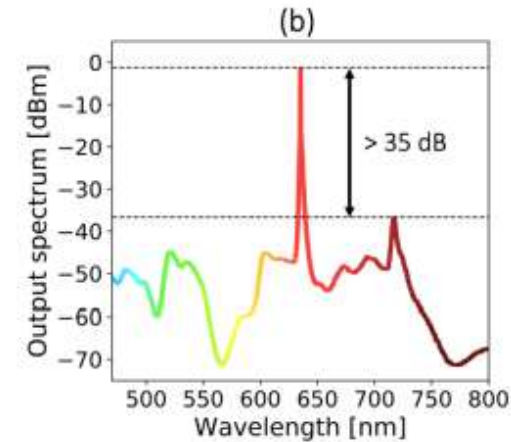
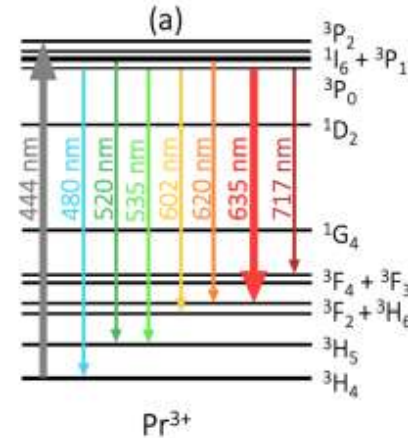
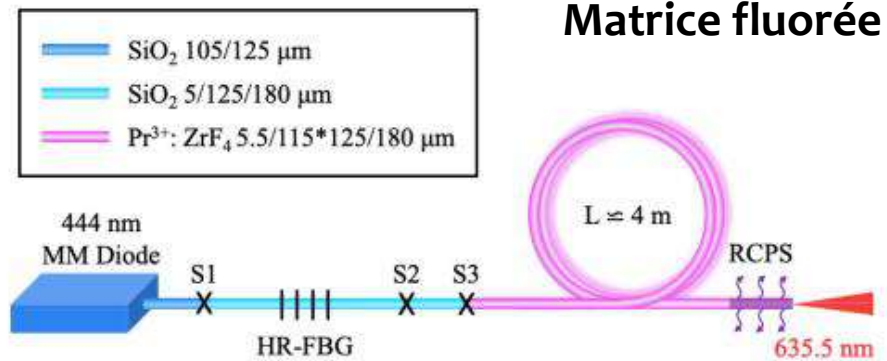
Propriétés	Silice	Phosphate	Germanate	Tellurite	Fluorure	Chalco
Énergie de phonon maximale (cm ⁻¹)	1 100	1 200	900	700	500	350
Solubilité des terres rares (10 ²⁰ ions/cm ³)	0,1	10	7,6	10	10	0,1 mol%
Transition vitreuse (Tg, °C)	1 250	270-770	390-450	280-430	270-300	300-440
Paramètre de décroissance multiphonon (s ⁻¹)	1,4 × 10 ¹⁵	5,4 × 10 ¹⁵	3,4 × 10 ¹⁶	6,3 × 10 ¹⁶	1,59-1,88 × 10 ¹⁰	10 ⁶
Perte de fibre (dB/km)	0,2 @ 1,55 µm	4 000 @ 1,31 µm	2 340 @ 1,49 µm	20 @ 3 µm	15 @ 1,5 µm	0,4 @ 6,5 µm
Plage de transmission (µm)	0,2-2,5	0,2-4	0,38-5	0,4-5	0,2-7	0,4-11

- Limite solubilité: pb de transfert d'énergie (**extinction / désexcitation non radiative**)
- Rapport des **sections efficaces d'émission / absorption** important pour maximiser l'efficacité laser (Er³⁺ / Tm³⁺: silica = 0.6·10⁻²⁰ cm² : Tellurites = 1.5·10⁻²⁰ cm²).

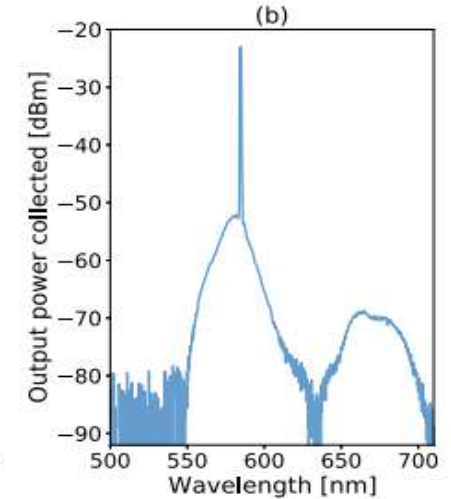
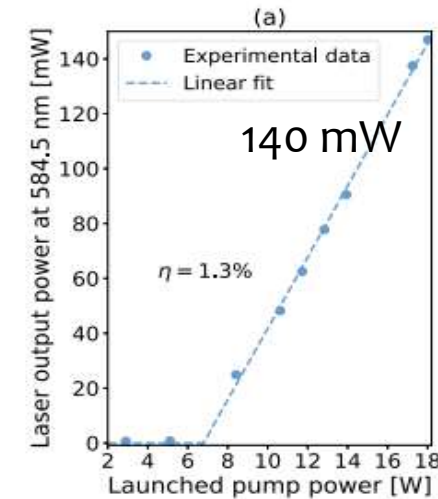
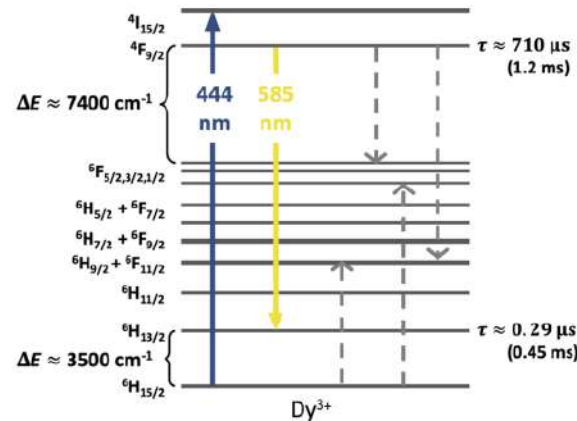


W.C. Wang et al., Progress in Materials Science (2019)
Fu et al., Journal of the Optical Society of America B (2017)

IV. lasers à fibre / dans le visible (biomédical, télécom, métrologie)

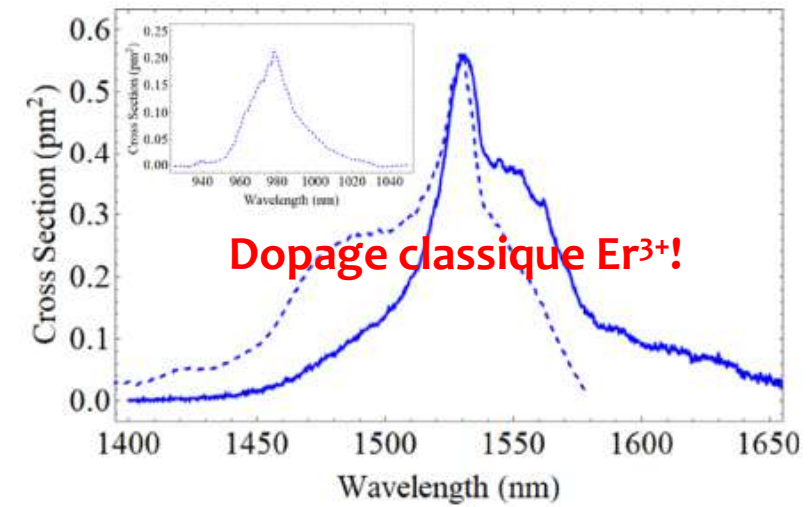
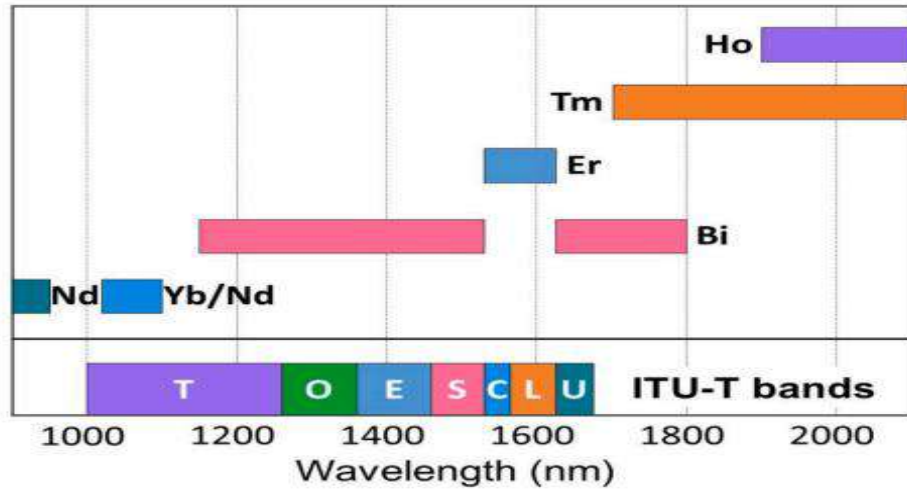


Matrice aluminosilicate

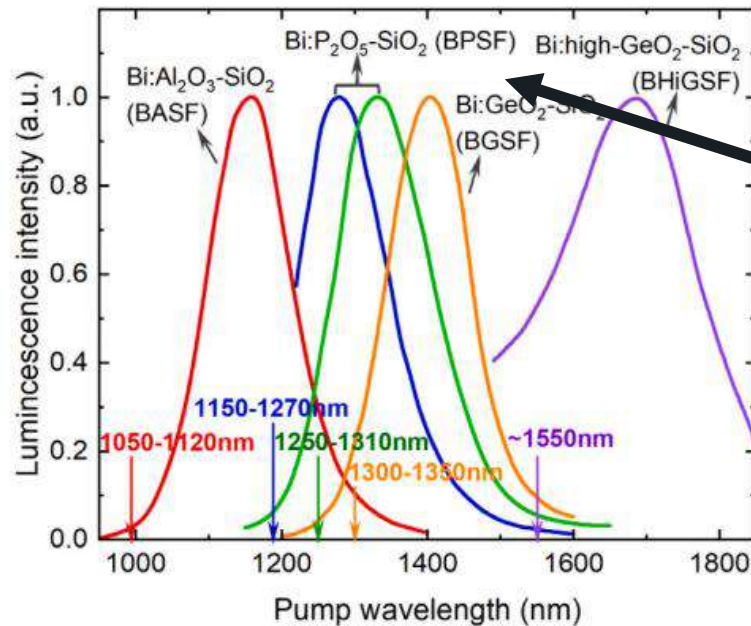


Challenges: Photo-noircissement (centres colorés), énergie de phonon élevée (silicates), hautes puissances (possible cristallisation), etc.

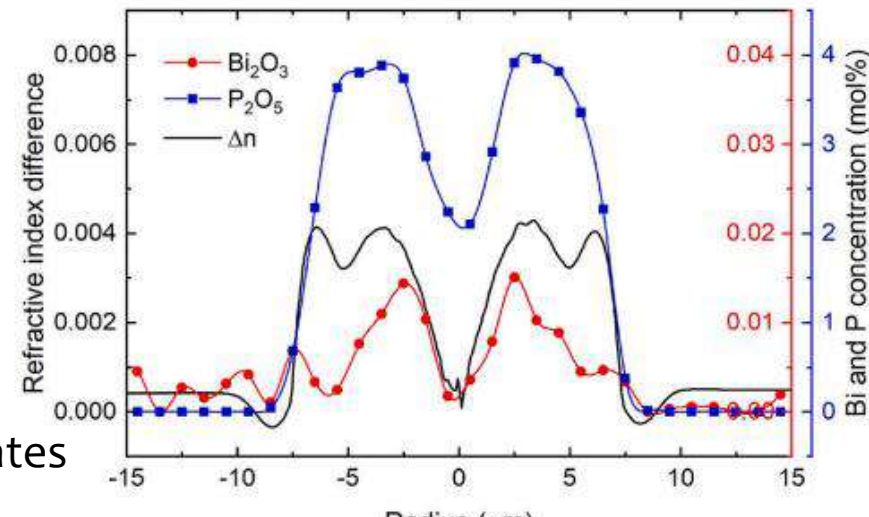
IV. lasers à fibre / Dopage au Bismuth (télécom)



Bi bon candidat pour fibres télécoms: Amplification sur toute la bande spectrale d'intérêt

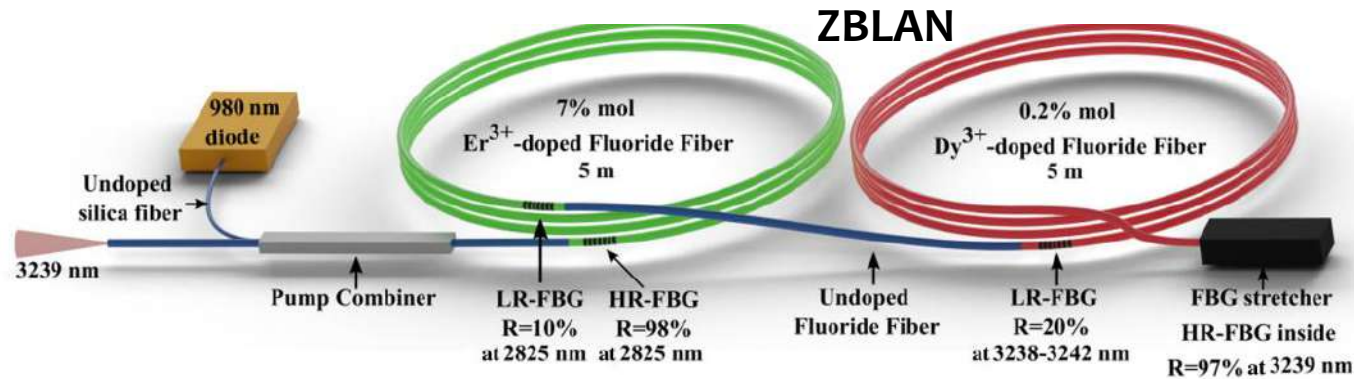


phosphosilicates

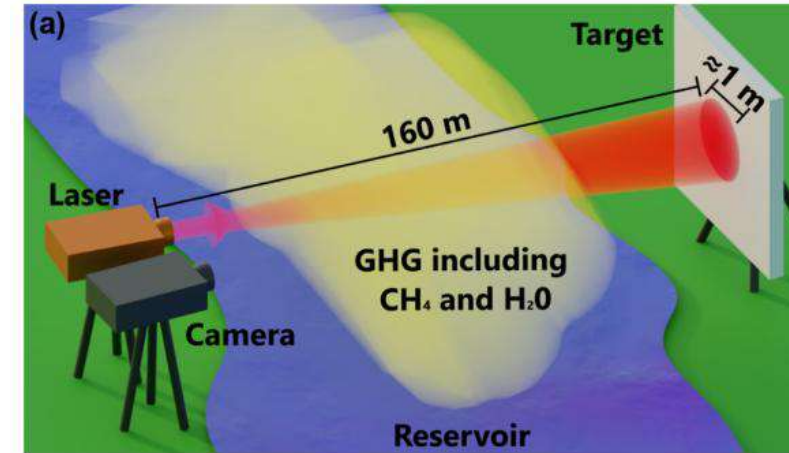


Gains entre 20 et 40 dB et fibres typ. 50 – 400 m (depuis 2011)

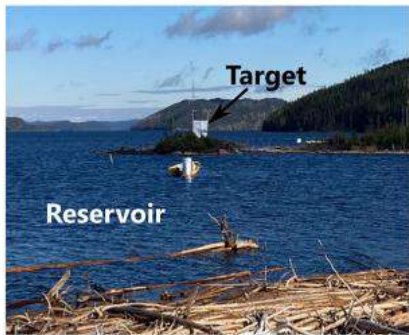
IV. lasers à fibre / un exemple capteur méthane / eau



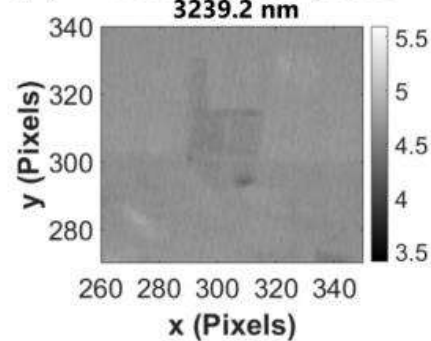
2,55 W
autour de
3,24 μm



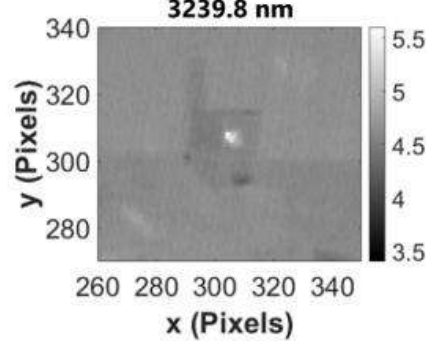
(a)



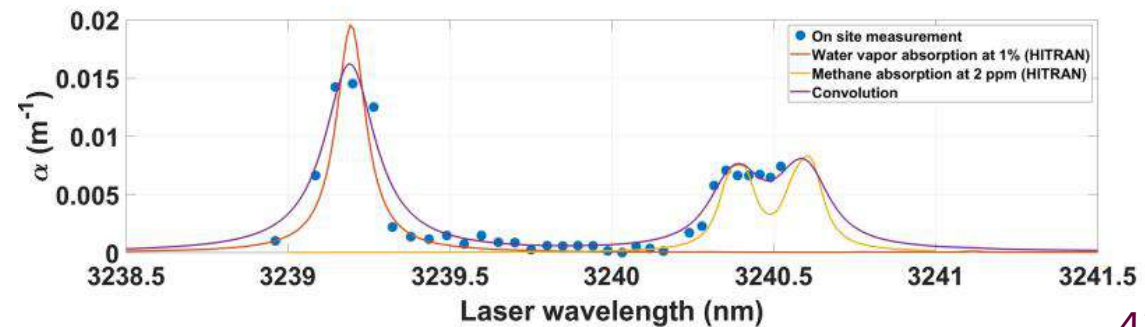
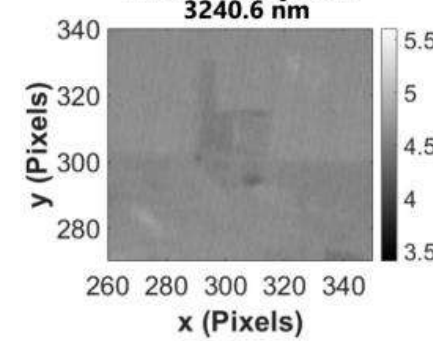
(c) Water vapor peak



Low absorption zone

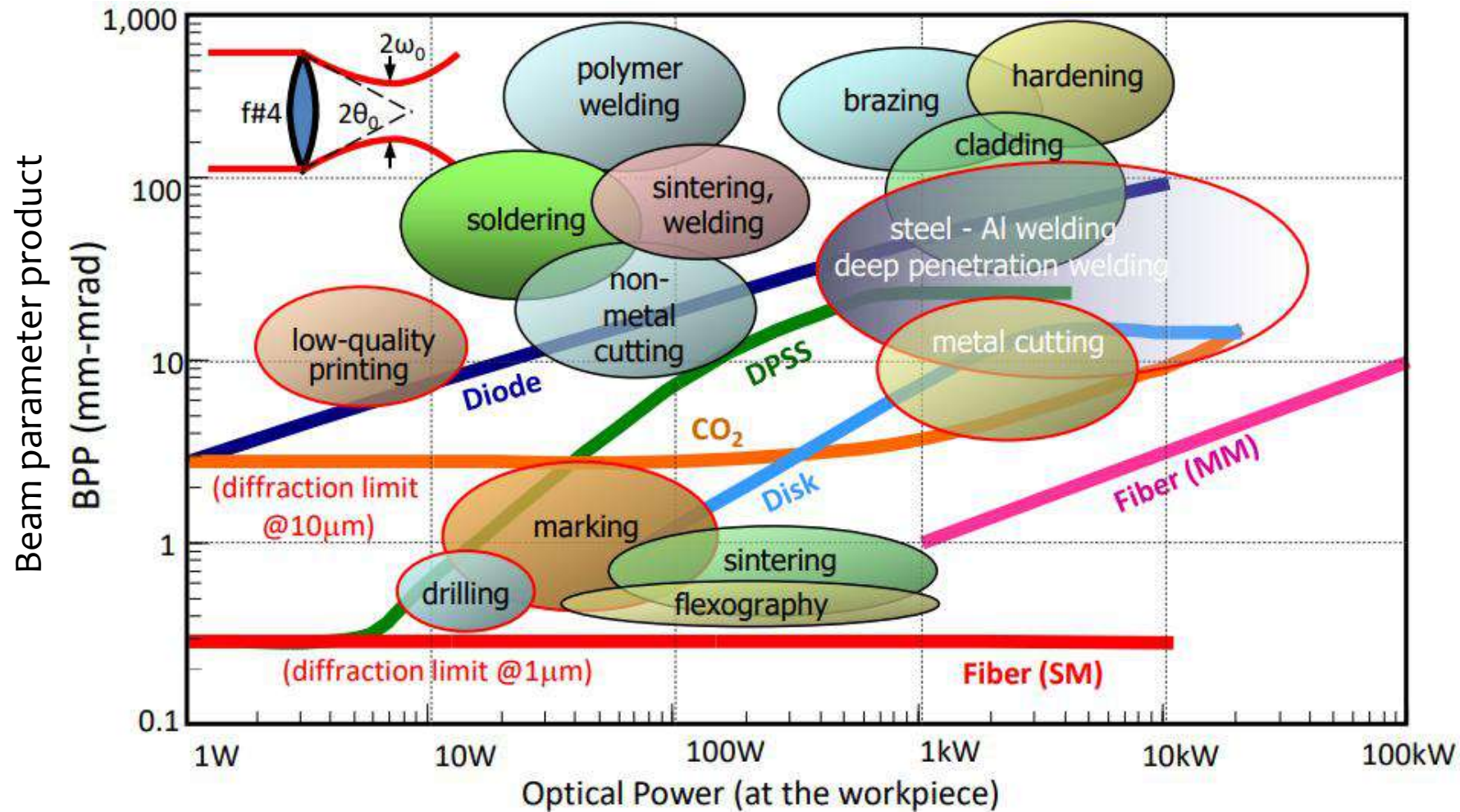


Methane peak

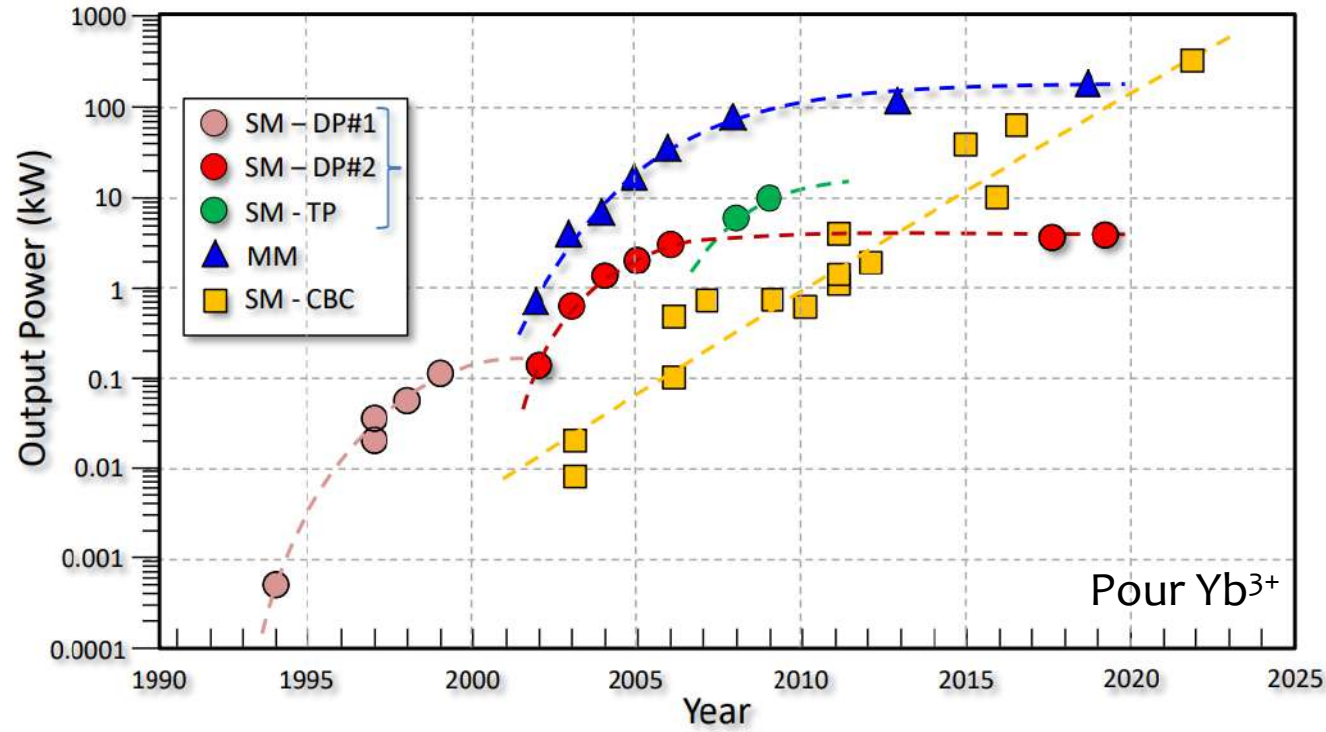


V. Fibres dédiées aux hautes puissances

Quelques applications: micro-usinage (industrie), militaire, médical etc.

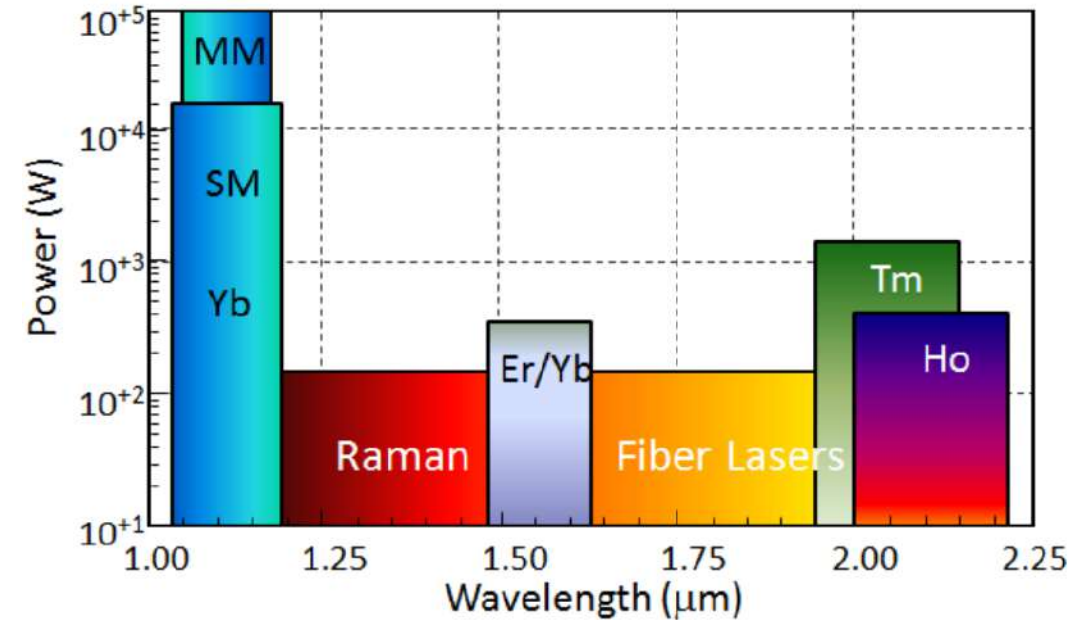
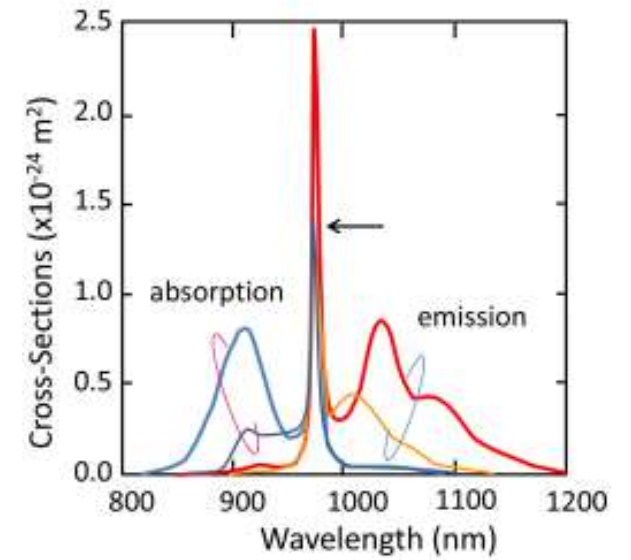


V. Fibres dédiées aux hautes puissances



Différentes conditions d'injection + amplification: multimode (MM) single mode diode-pumped (SM-DP) ; single mode tandem-pumped (SM-TP) ; coherently-beam-combined (CBC) systems

Faible QD pour Yb^{3+} !

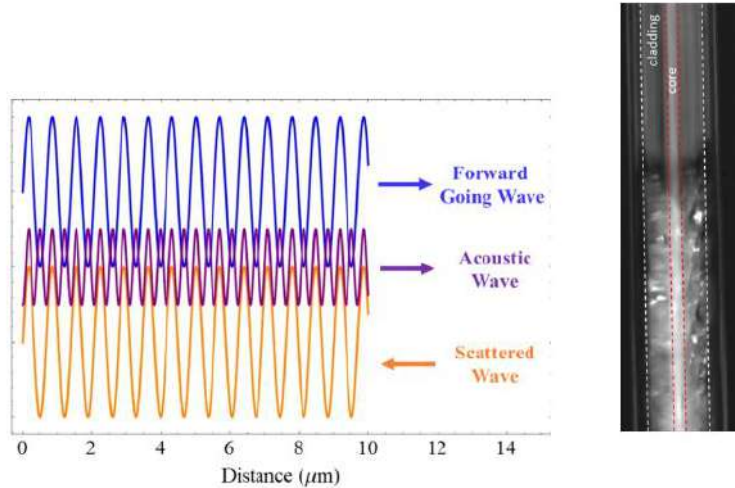


M. N. Zervas, Optica Laser Congress (2023)

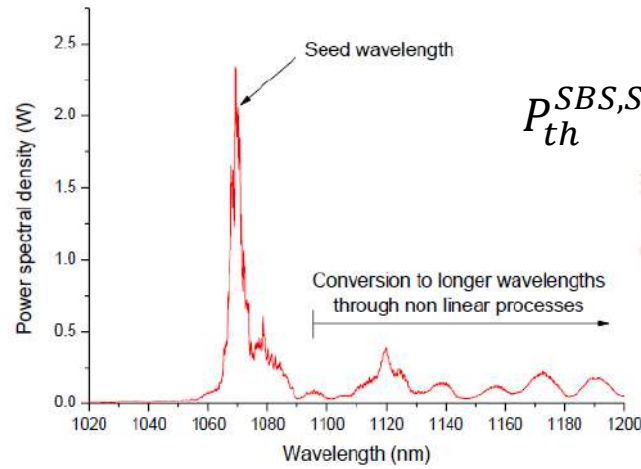
M. N. Zervas, C. A. Codemard, IEEE J. of selected topics in Quantum electronics (2014)

V. Fibres dédiées aux hautes puissances

- Diffusion Brillouin stimulée (SBS)

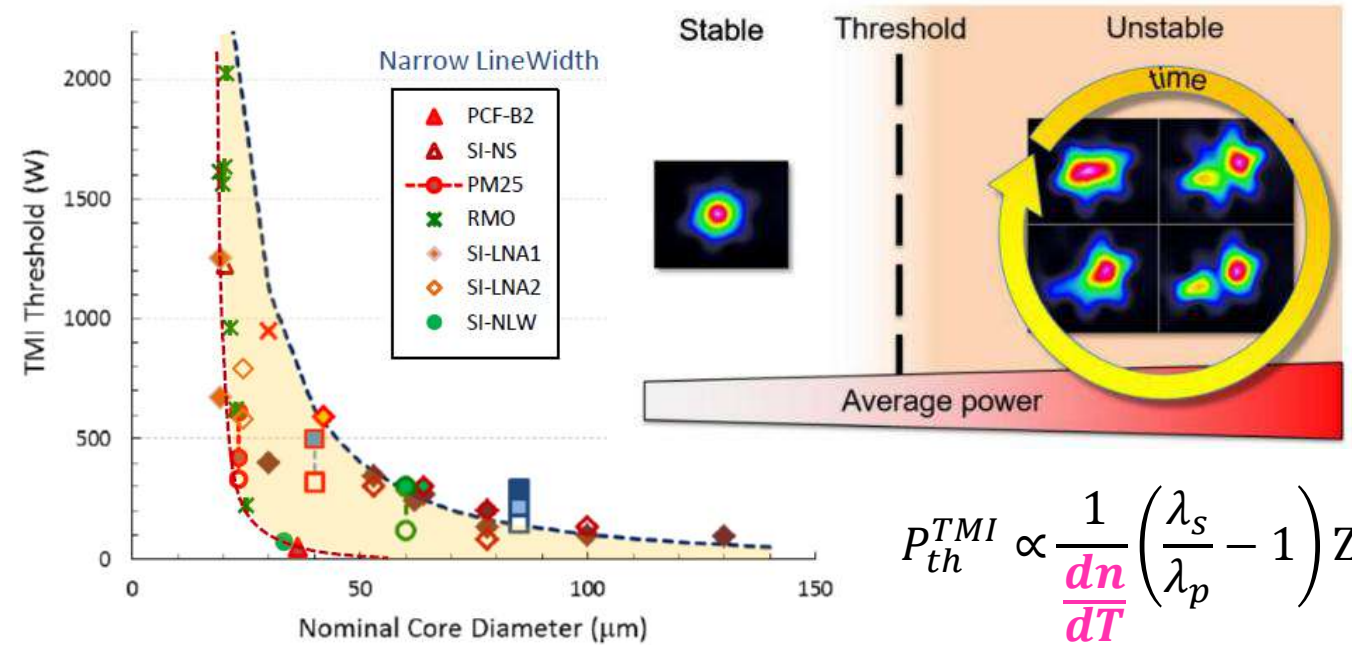


Diffusion Raman stimulée (SRS)



$$P_{th}^{SBS,SRS} \propto \frac{A_{eff}}{(g_R, g_B)L_{eff}}$$

- Transverse mode instability (TMI): Process thermiquement activé (diffusion Rayleigh stimulée)

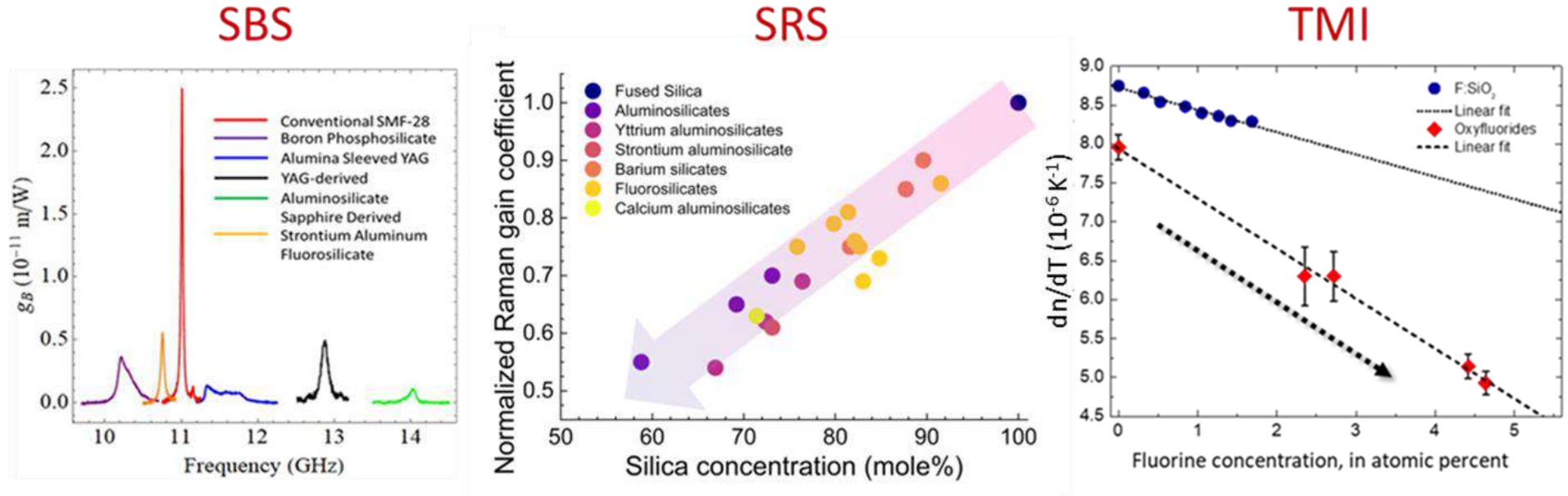


$$P_{th}^{TMI} \propto \frac{1}{\frac{dn}{dT}} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p} - 1 \right) Z$$

Effets liés au n_2 (SPM / FWM) : élargissement spectral, auto-focalisation du faisceau.

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

V. Fibres dédiées aux hautes puissances



$$g_B \propto \frac{n^7 p_{12}^2}{\lambda_p^2 \rho V_a \Delta \nu_B}$$

Le verre a réponse à (presque) tout:

SBS: diminuer les coefficients photoélastiques (Pockels)

SRS: Privilégier verres multicomposés

TMI: ajout de F pour diminuer le coefficient thermo-optique + faible QD!



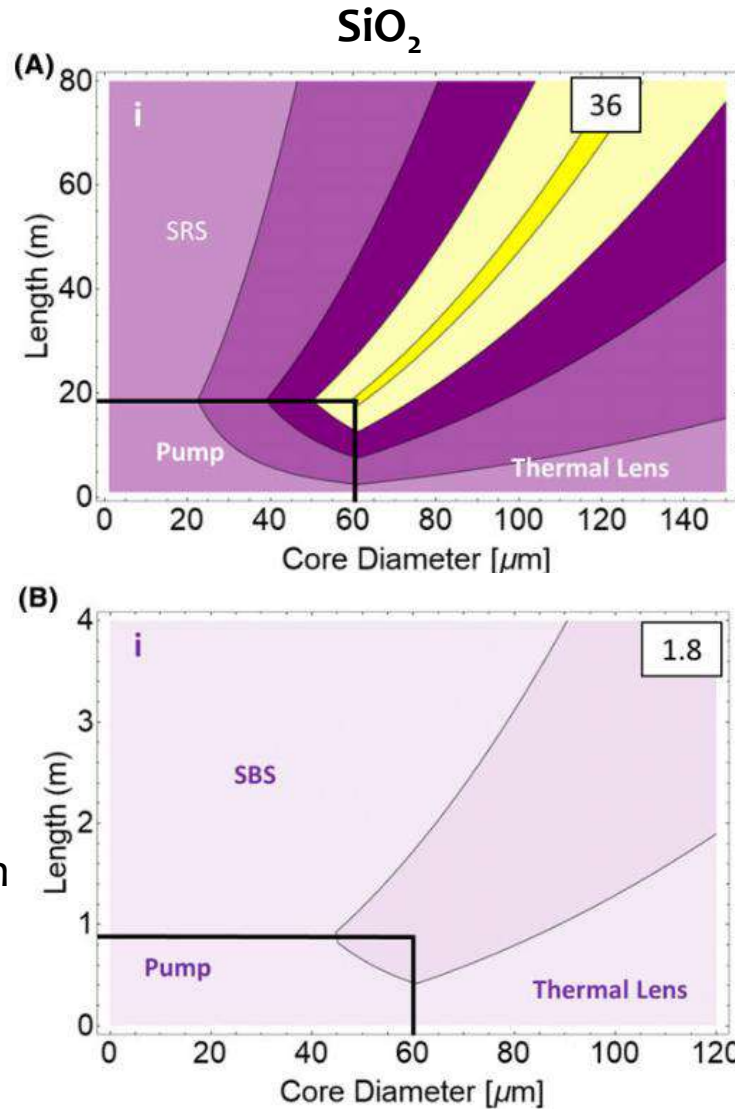
Fibres microstructurées (LMA: large mode area fibers) très utilisées pour augmenter A_{eff} * (non traité ici!)

V. Fibres dédiées aux hautes puissances

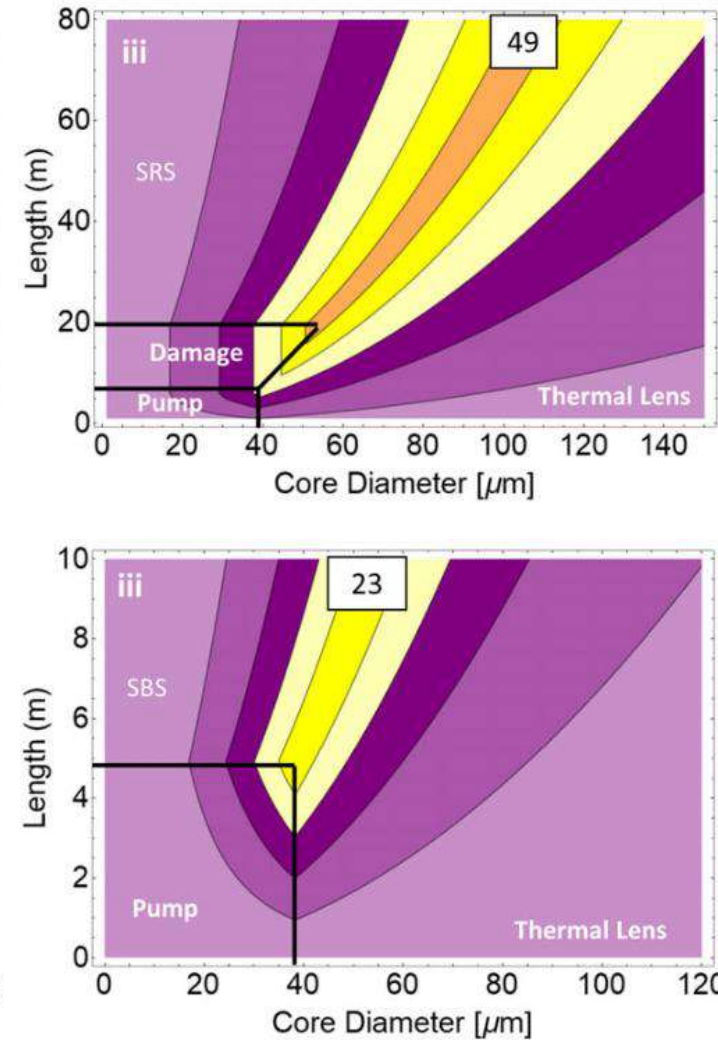
Limité par SRS

Limité par SBS

(Pour narrow linewidth
(i.e., 50 – 100 MHz))



54%Al₂O₃ – 46%SiO₂



$$P_{Out}^{SBS} \approx \frac{17 \cdot A_{eff}}{g_B(\Delta\nu) \cdot L_{eff}}$$

$$P_{Out}^{SRS} \approx \frac{16 \cdot A_{eff}}{g_R \cdot L_{eff}}$$

$$P_{Out}^{damage} = \Gamma^2 \cdot I_{damage} \cdot \pi \cdot a^2$$

$$P_{out}^{pump} = \eta_{laser} \cdot I_{pump} \cdot (\pi \cdot b^2) \cdot (\pi \cdot NA^2)$$

$$P_{out}^{lens} = \frac{\eta_{laser}}{\eta_{heat}} \cdot \frac{\pi \cdot k \cdot \lambda^2}{2 \frac{dn}{dT} \cdot a^2} \cdot L$$

Cas « extrême », mais l'ajout de qq % possibles (par CVD)

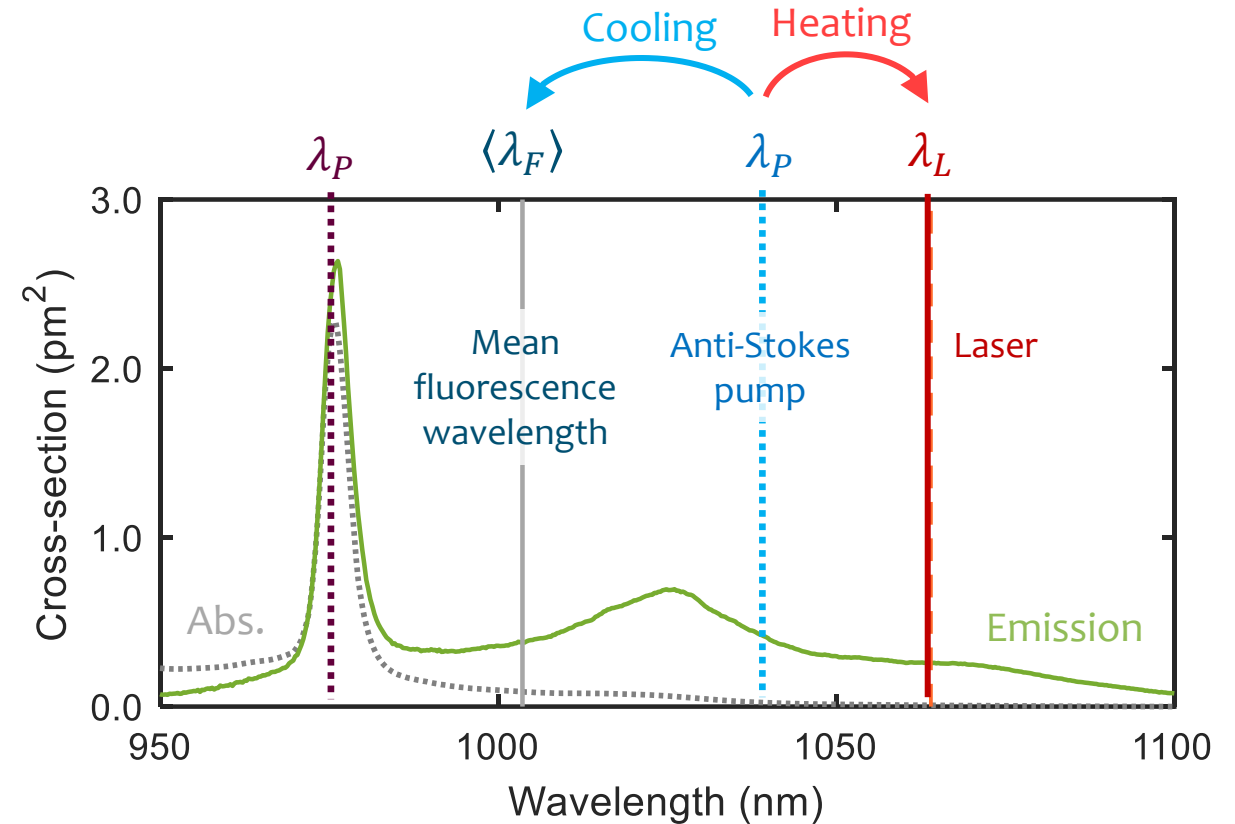
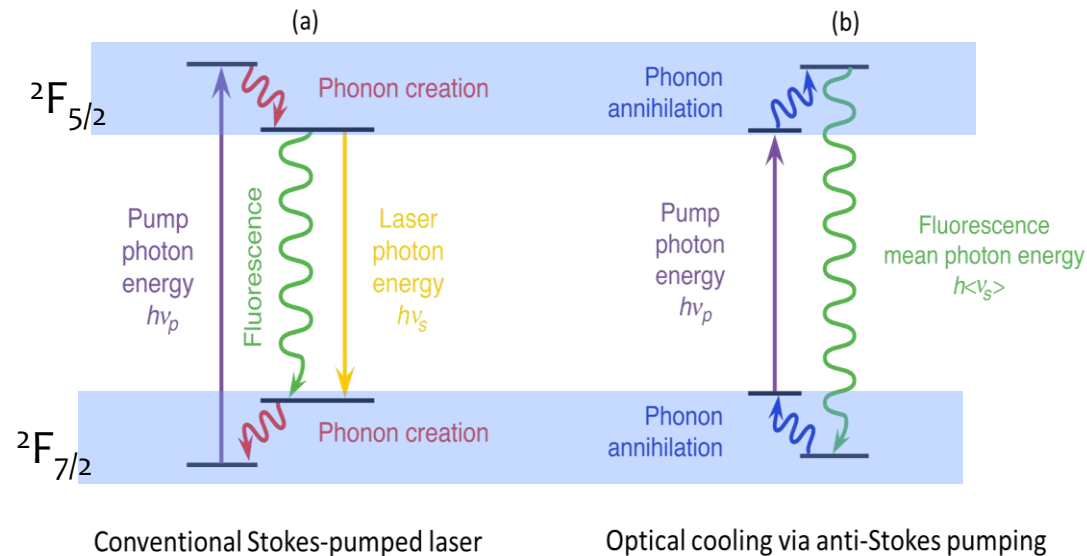
V. Fibres dédiées aux hautes puissances / gestion thermique

Problème: toutes les fibres génèrent de la chaleur (Quantum defect = différence d'énergie pompe / signal): 6% (Yb) jusqu'à Er (60%)

Effets: Limiter puissance laser (effets nonlinéaires « thermiquement activés » = TMI, SF) ; instabilité (puissance, fréquence), destruction revêtement et du milieu amplificateur

Solution: Gestion thermique par pompage anti-stokes!

Cas pour Yb^{3+}



V. Fibres dédiées aux hautes puissances / gestion thermique

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{max} = \left(\frac{\tau_{rad}}{\tau(N_{Yb})} h\nu_p - h\langle\nu_f\rangle \right) \frac{\sigma_p^a}{\sigma_p^a + \sigma_p^e} \frac{\pi a^2}{\tau_{rad}} N_{Yb} + P_p(z)(\alpha_{ba})$$

Radiative lifetime (green arrow to τ_{rad})
 Core area (purple arrow to πa^2)
 Yb conc. (green arrow to N_{Yb})
 Total lifetime (orange arrow to $\tau(N_{Yb})$)
 Pump photon energy (red arrow to $h\nu_p$)
 Mean fluorescence photon energy (blue arrow to $h\langle\nu_f\rangle$)
 Background losses (pink arrow to $P_p(z)(\alpha_{ba})$)

Quenching lifetime:

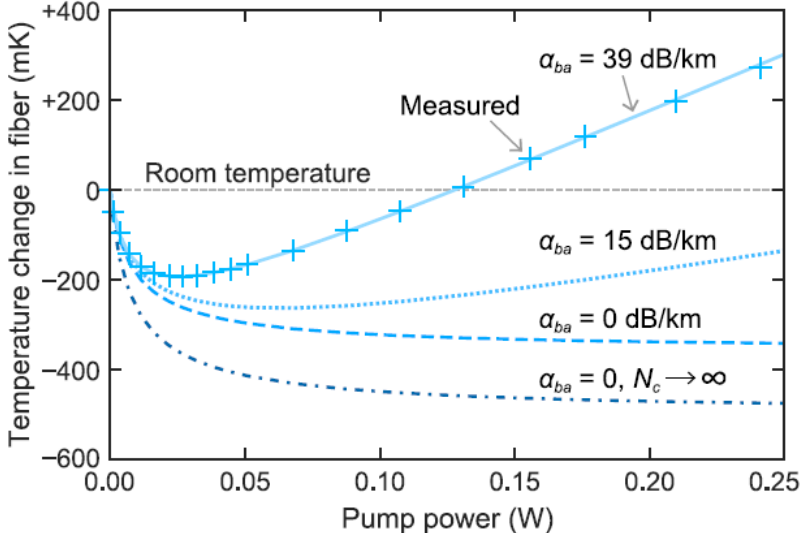
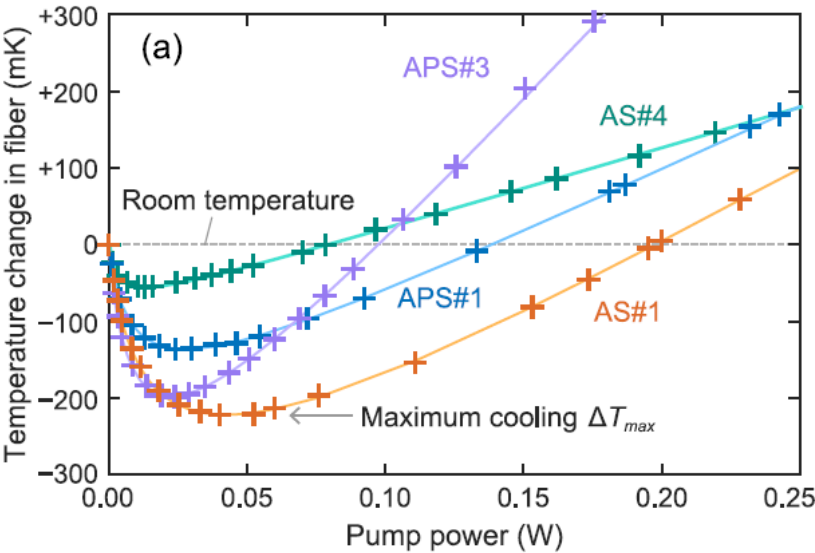
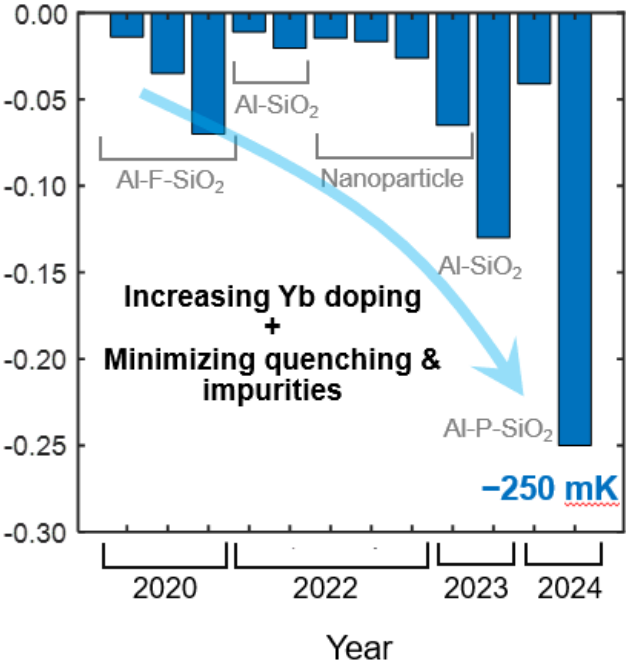
$$\tau_q(N_{Yb}) = \frac{2\pi}{9} \tau_{rad} \left(\frac{N_c}{N_{Yb}} \right)^2$$

N_c = critical quenching concentration

Pour maximiser le refroidissement il faut:

- Optimiser la difference d'énergie entre pompe et fluorescence
- Pas d'extinction par concentration ($\tau = \tau_{rad}$)
- Yb concentration importante
- Peu de pertes
- Large surface de Coeur
- Courte durée de vie radiative

V. Fibres dédiées aux hautes puissances / gestion thermique



Fiber	AS#1 ^b	AS#2 ^c	AS#3	AS#4 ^d	APS#1	APS#2	APS#3	APS#4
Yb (<i>N</i> ₀)	2.4 wt. %	2.1 wt. %	1.3 wt. %	1.7 wt. %	3.0 wt. %	6.0 wt. %	4.7 wt. %	4.2 wt. %
Al	0.9 wt. %	2.4 wt. %	2.8 wt. %	2.1 wt. %	1.3 wt. %	1.2 wt. %	4.0 wt. %	7.2 wt. %
P	0.0 wt. %	0.0 wt. %	0.0 wt. %	0.0 wt. %	7.0 wt. %	12.4 wt. %	11.8 wt. %	12.8 wt. %
Core radius	10.4 μm	3.9 μm	5.6 μm	4.1 μm	8.4 μm	7.4 μm	7.6 μm	8.0 μm
NA ^a	0.07	0.10	0.18	0.17	0.15	0.20	0.16	0.10
⟨λ _F ⟩ ^a	1002 nm	1007 nm	1007 nm	1006 nm	996 nm	997 nm	1000 nm	1002 nm
τ _{rad} ^d	0.90 ms	0.83 ms	0.86 ms	0.85 ms	1.51 ms	1.45 ms	1.35 ms	1.03 ms

^aNA: numerical aperture, ⟨λ_F⟩: mean fluorescence wavelength, τ_{rad}: radiative lifetime. ^bAS#1 included 1.0 wt. % fluorine.

^cAS#2 is a CaF₂-nanoparticle-doped fiber. ^dAS#4 is a BaF₂-nanoparticle-doped fiber.

Intérêt de passer aux aluminophospho-silicates (améliore la solubilité des terres rares)

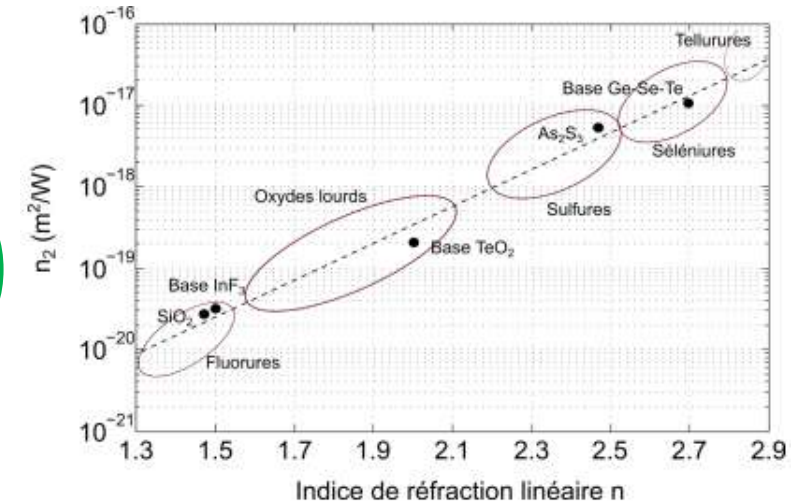
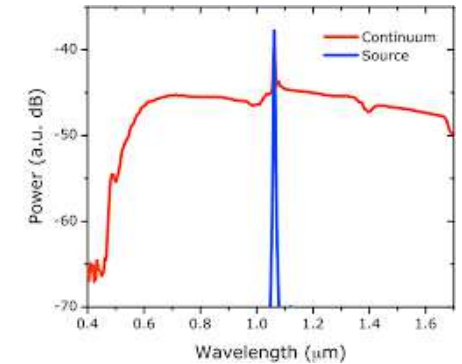
VI. Fibres hautement nonlinéaires / exemple des supercontinuum

Cours Marc Dussauze

Intérêt: Sources brillantes + cohérentes sur une très large bande spectrale
→ Tomographie par cohérence optique (imagerie), microscopie médicale, spectroscopie (ex: détection de molécules, polluants etc.), photonique ultra rapide, capteurs optiques.

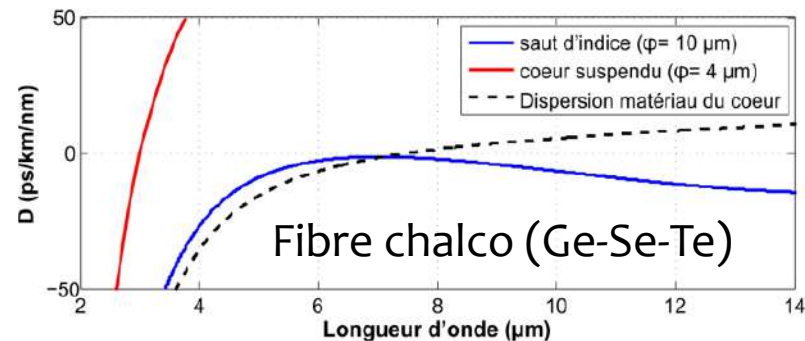
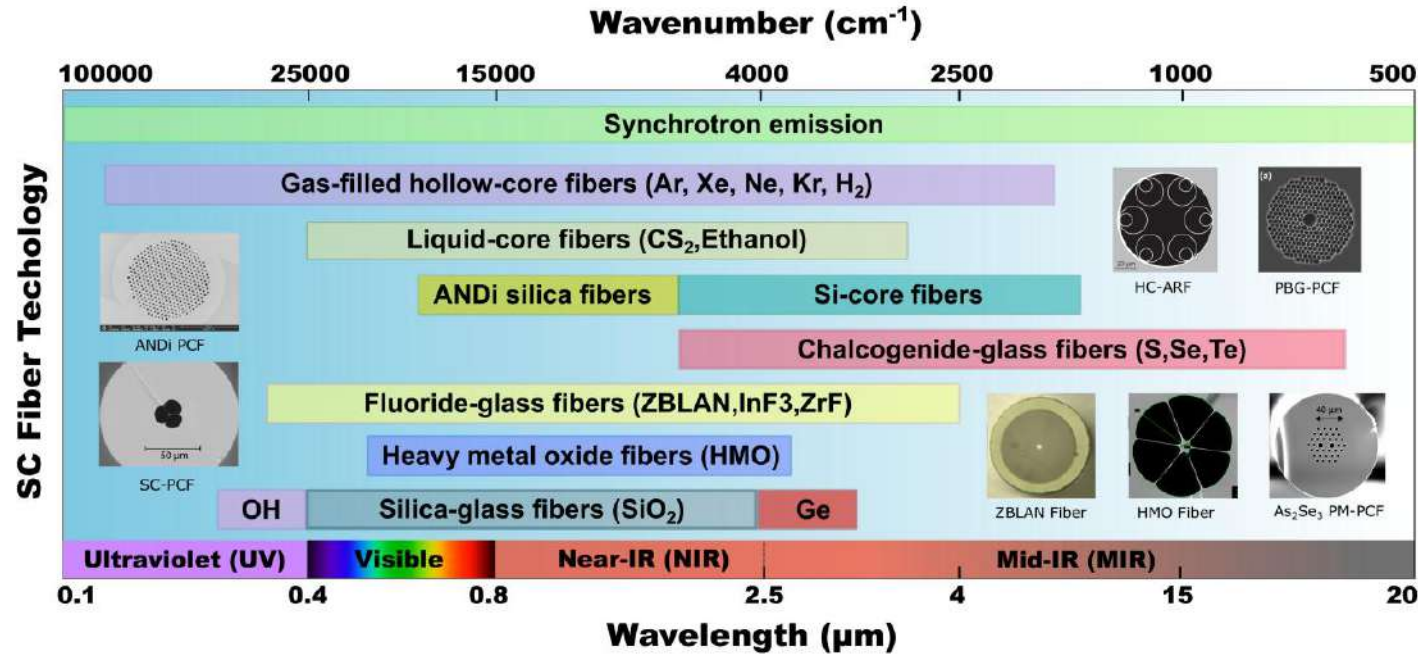
Equation nonlinéaire de Schrödinger généralisée (pour impulsions ultra brèves)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \underbrace{-\frac{\alpha}{2}A}_{\text{Absorption (pertes)}} + \underbrace{\sum_{k \geq 2} \beta_k \frac{\partial^k A}{\partial t^k} \frac{i^{k+1}}{k!}}_{\text{Dispersion}} + \underbrace{i\gamma \left(1 + i\tau_{shock} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(A \int_0^{+\infty} R(t') \times |A(t-t')|^2 dt' \right)}_{\text{Nonlinéarités de la fibre (SPM, SRS)...}}$$
$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$$

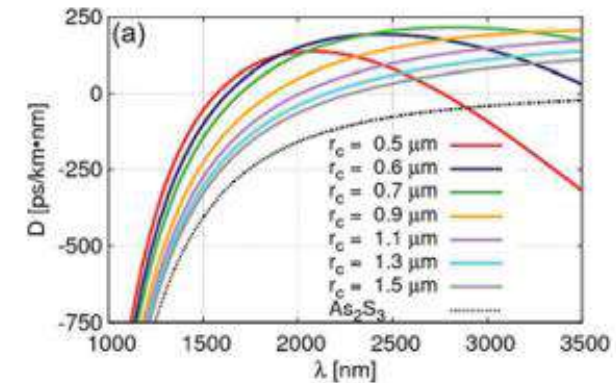
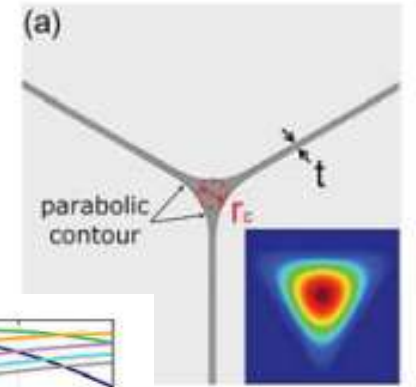


Verre nonlinéaire (chalco >> silice $n_2 \times 1000$!) et A_{eff} petit (fibres microstructurées avec excellent contrôle de la dispersion) + transparence!

VI. Fibres hautement nonlinéaires / exemple des supercontinuum



Contrôle de la dispersion (fibres à cœur suspendu)



$t = 0.45 \mu\text{m}$

La dispersion contrôle fortement les phénomènes mis en jeu lors de l'élargissement spectral !

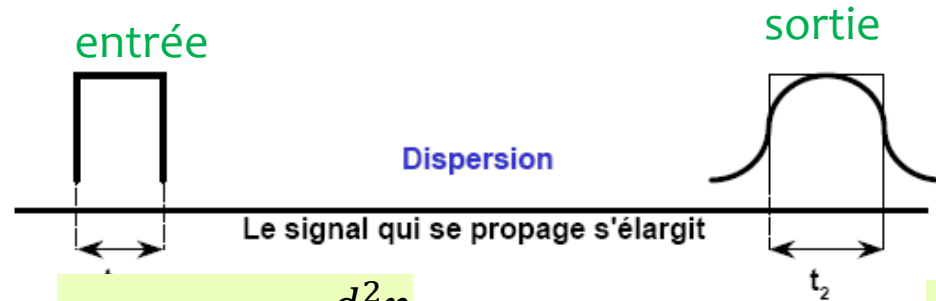
T. Sylvestre et al., *Journal of the Optical Society of America B* (2021)

E. Coscelli et al., *IEEE Photonics journal* (2015)

E. Serrano, *Thèse UBFC, Dijon* (2025)

VI. Fibres hautement nonlinéaires / dispersion

Contrôle de la dispersion: Motivations historique (télécoms): Minimiser la dispersion = Augmenter le débit

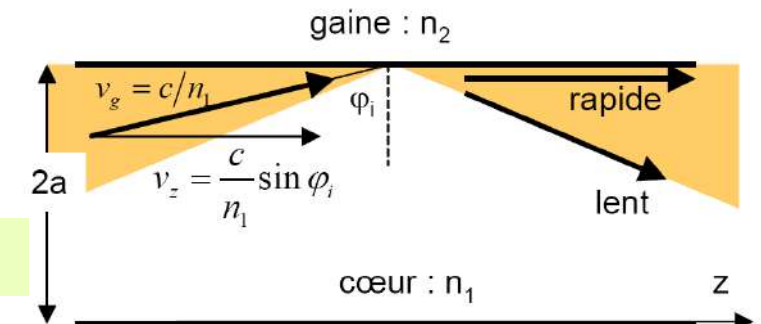
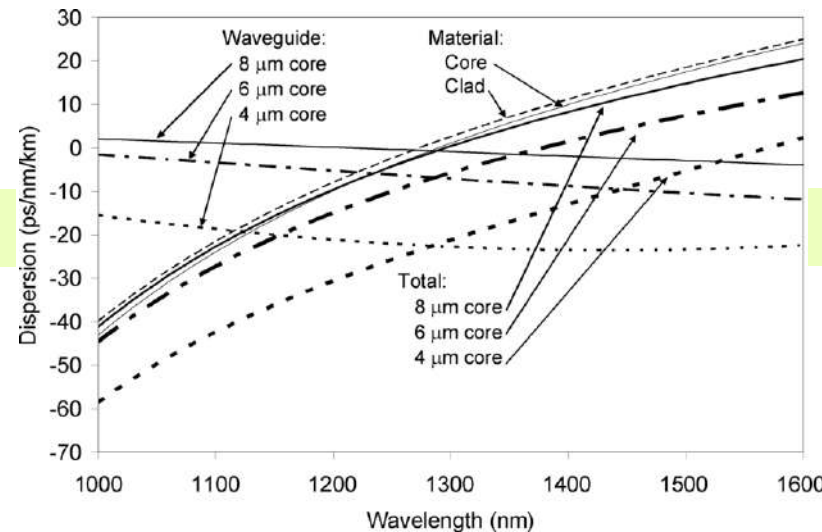
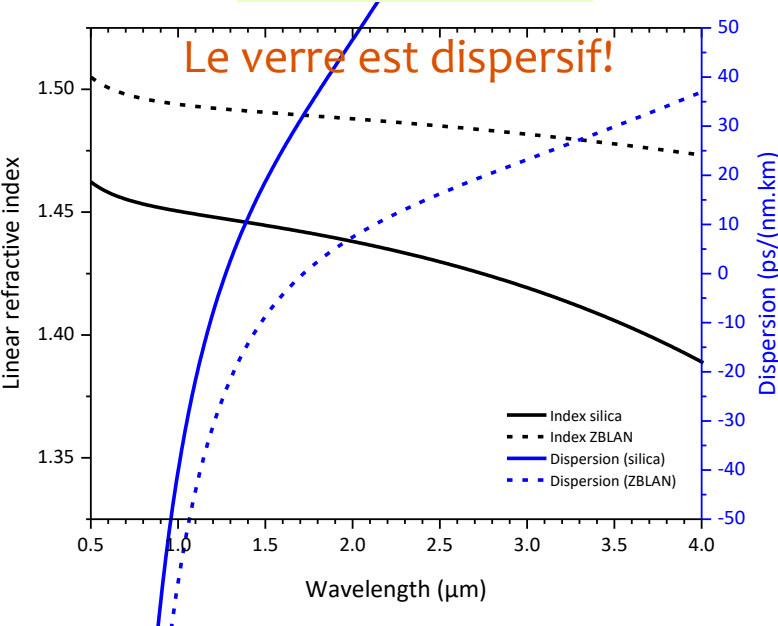


$$Dispersion = D_{milieu} + D_{guide} + D_{modale}$$

$$D_{milieu} \propto -\lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

$$D_{guide} \propto -\frac{\lambda}{a^2 n}$$

$$D_{modale} \propto \Delta t$$



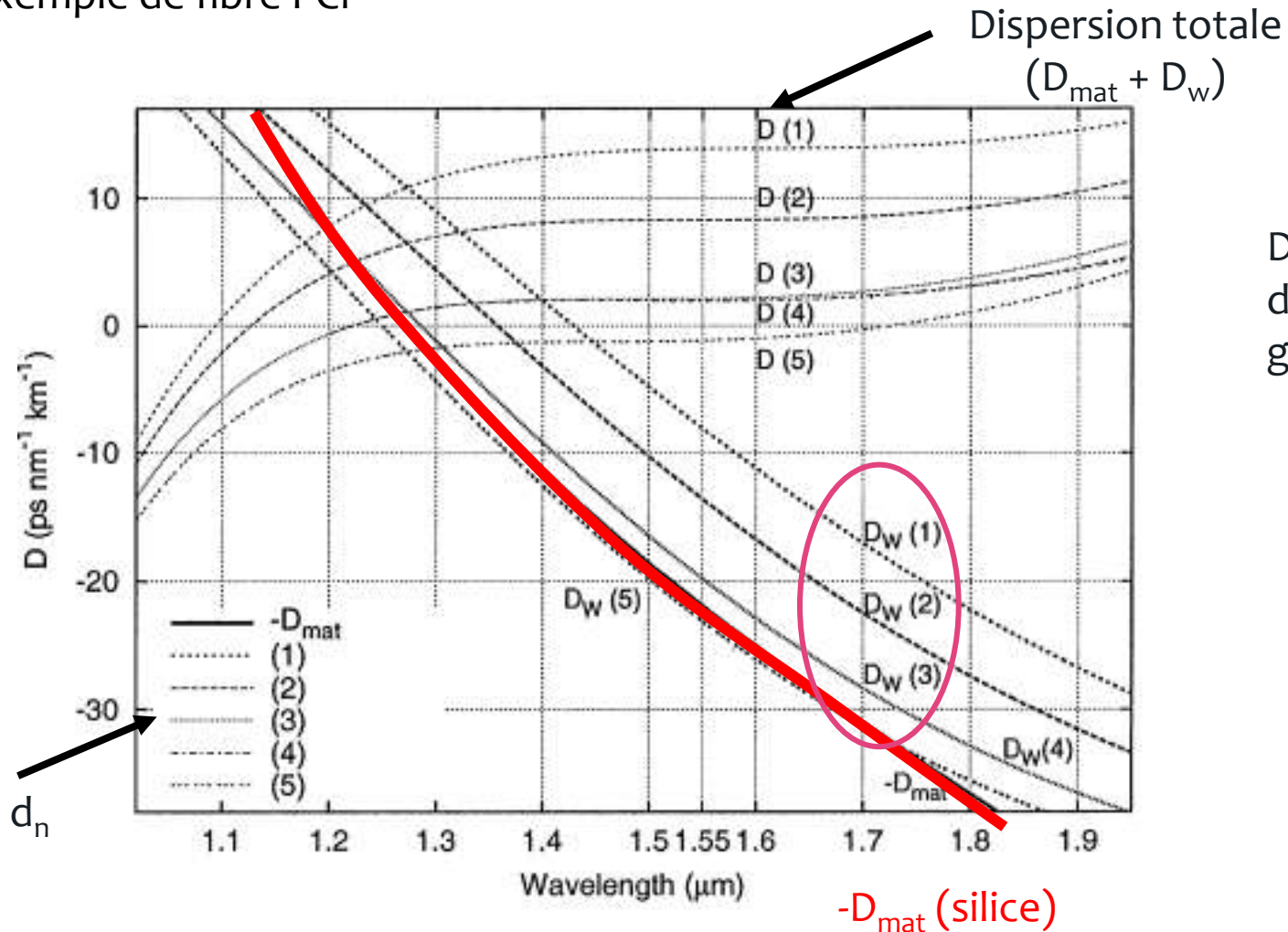
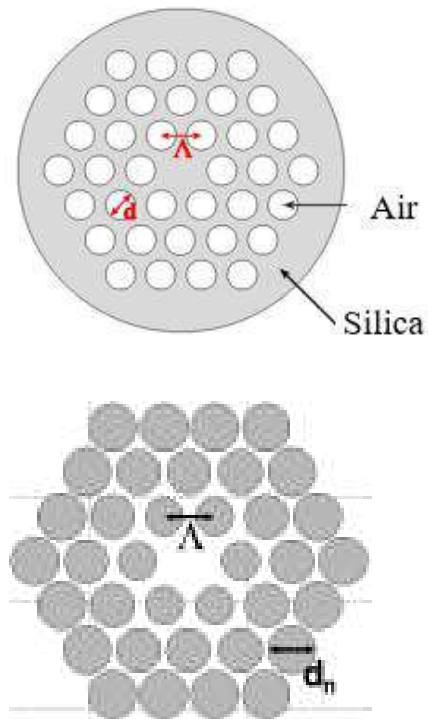
$$\Delta t = t_{\text{long}} - t_{\text{rapide}} = (L \cdot n_1 \cdot \Delta) / c$$

$$\text{Avec } \Delta = (n_1 - n_2) / n_2$$

Possibilité de minimiser la dispersion (ou de la contrôler / décaler) via le matériau ET la géométrie de la fibre (+ profile d'indice)

VI. Fibres hautement nonlinéaires / dispersion

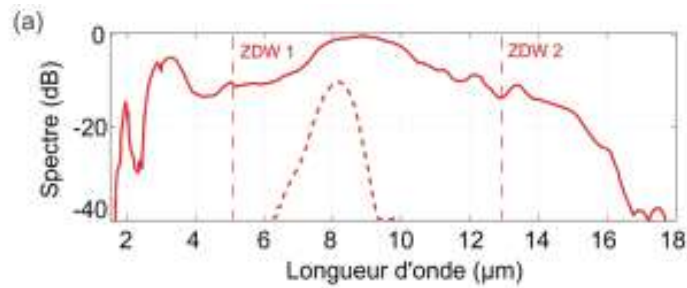
Contrôle de la dispersion: Un exemple de fibre PCF



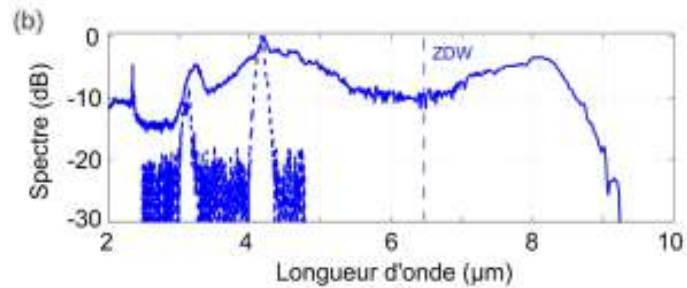
D_w = dispersion du guide (aka géométrie!)

La microstructure de la fibre amène des degrés de liberté supplémentaires sur le contrôle de la dispersion

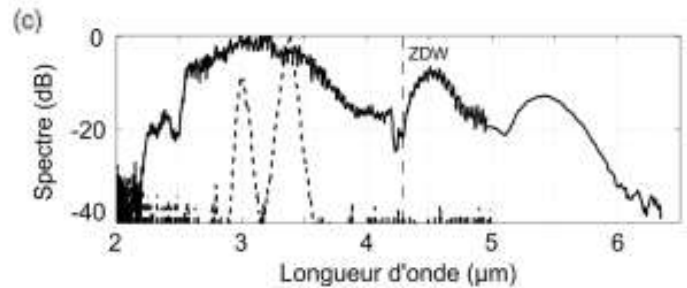
VI. Fibres hautement nonlinéaires / dispersion



Fibre à saut d'indice (12 μm de coeur)
Coeur $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{60}\text{Te}_{20}$ / Gaine $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{70}\text{Te}_{10}$



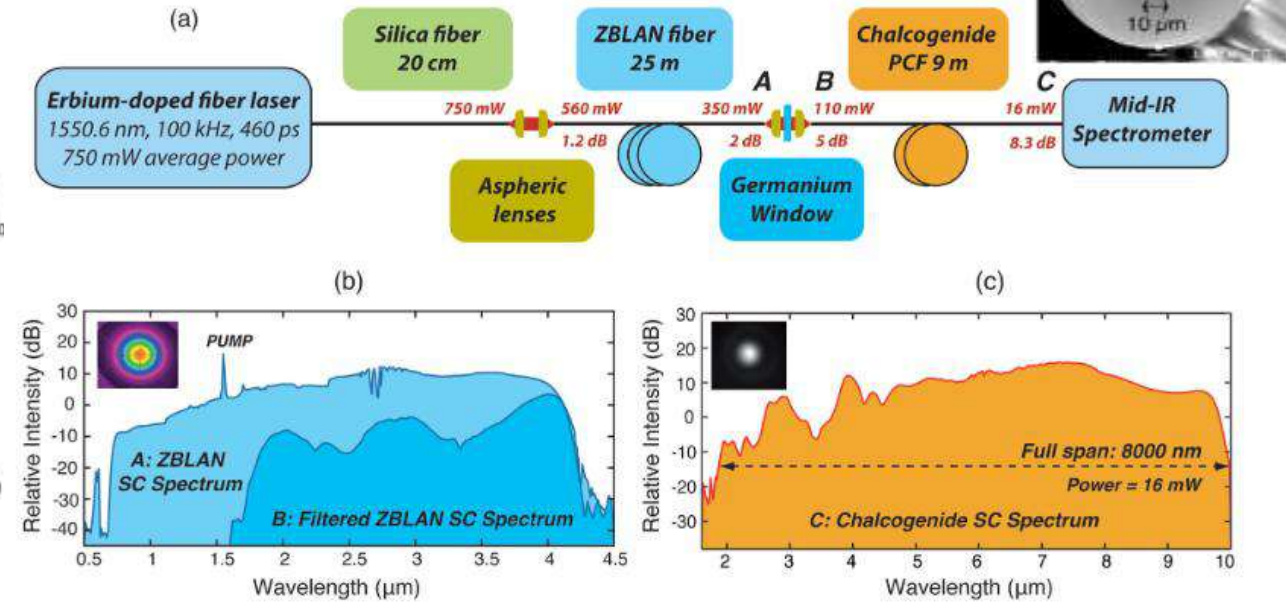
Fibre à saut d'indice (14 μm de coeur)
Coeur $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{60}\text{Te}_{20}$ / Gaine $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{70}\text{Te}_{10}$



Fibre à coeur suspendu (9 μm de coeur)
 $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{70}\text{Te}_{10}$

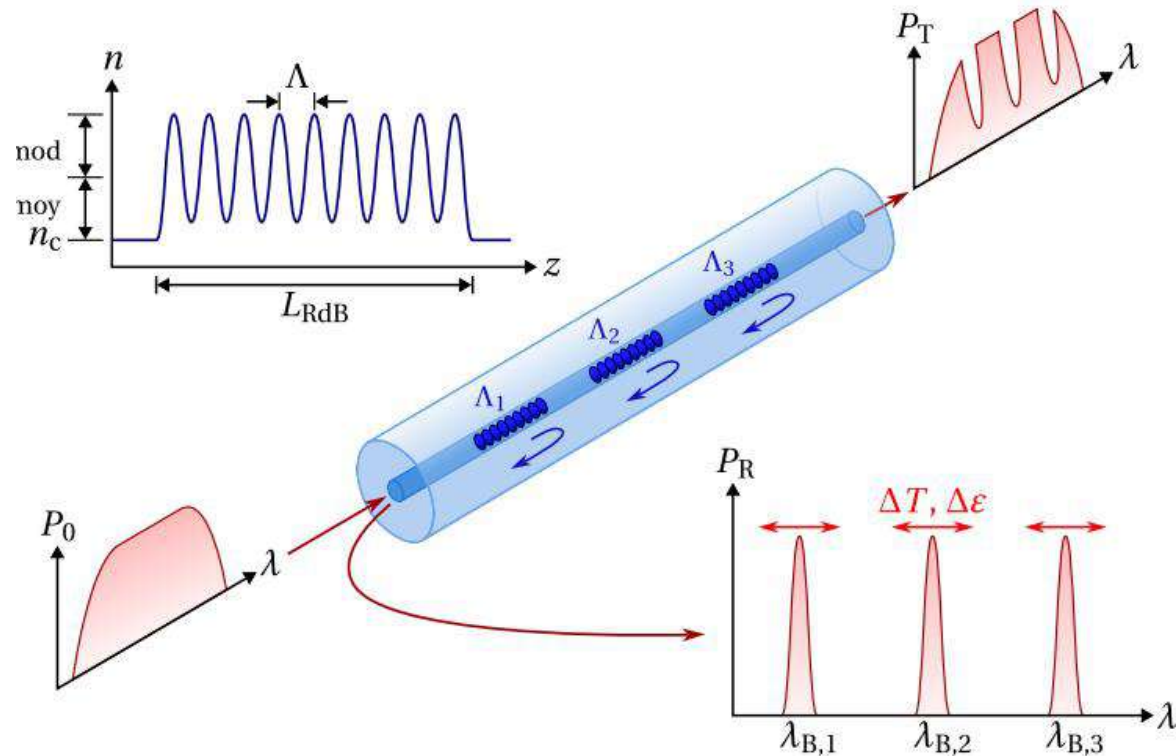


Système de fibres « en cascade »



VII. Fonctionnaliser une fibre optique / exemple des réseaux de Bragg

FBG = Fiber Bragg Gratings (Capteurs à réseaux de Bragg)



Longueur d'onde de Bragg

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

Réflectivité du réseau:

$$R_m(L, \lambda) = \tanh^2(\kappa_m L_{FBG})$$

$$m|\kappa_m(z)| = \frac{\eta_n \pi \Delta n_{mod}(z)}{\lambda_B}$$

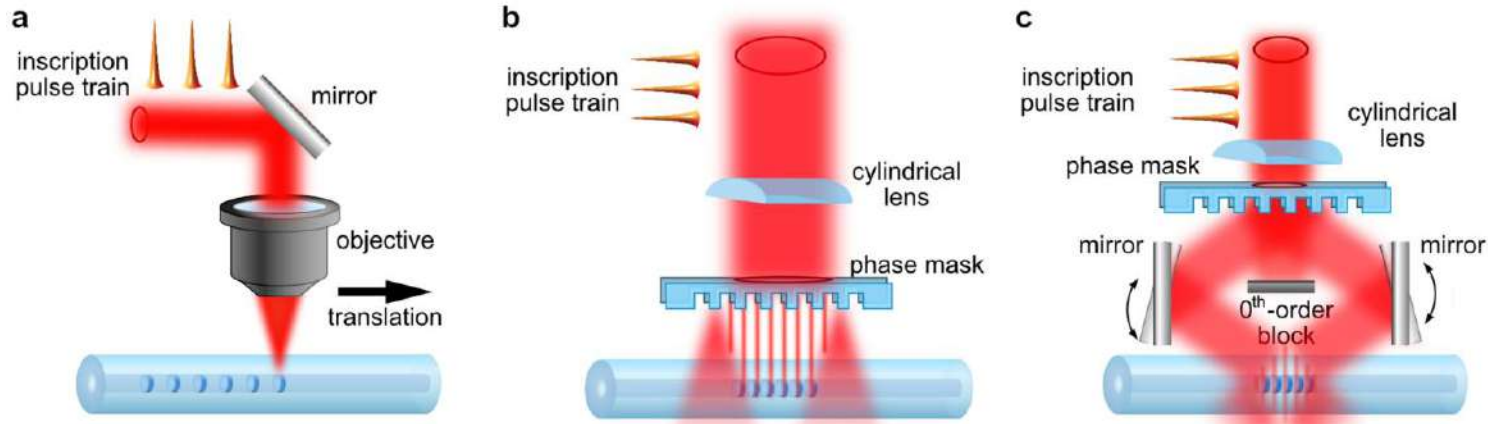
Facteur de recouvrement (0 à 1)

Contraste d'indice

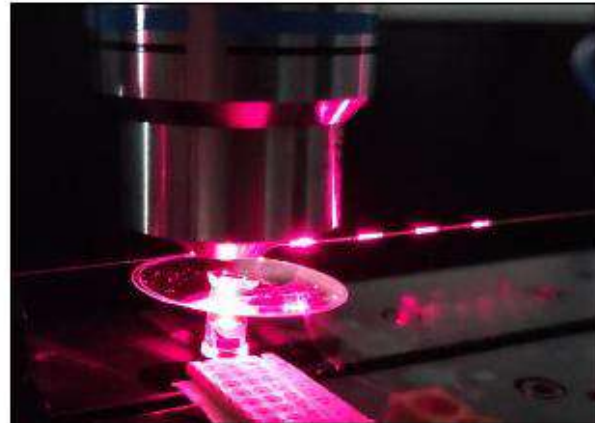
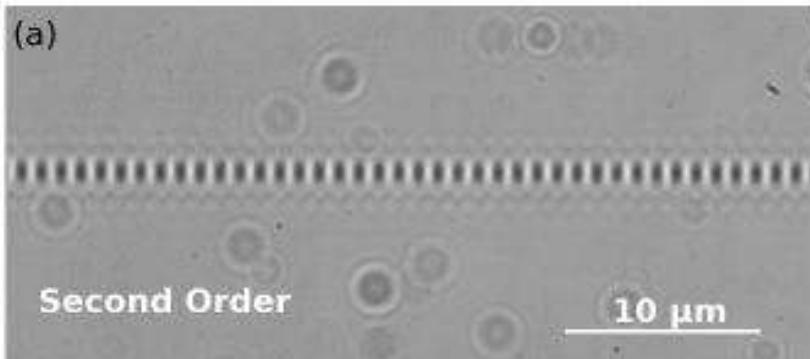
Applications (non exhaustif!): Multiplexage /
démultiplexage, mesure de température / déformation /
pression / lasers (miroirs réflecteurs) etc.

VII. Fonctionnaliser une fibre optique / exemple des réseaux de Bragg

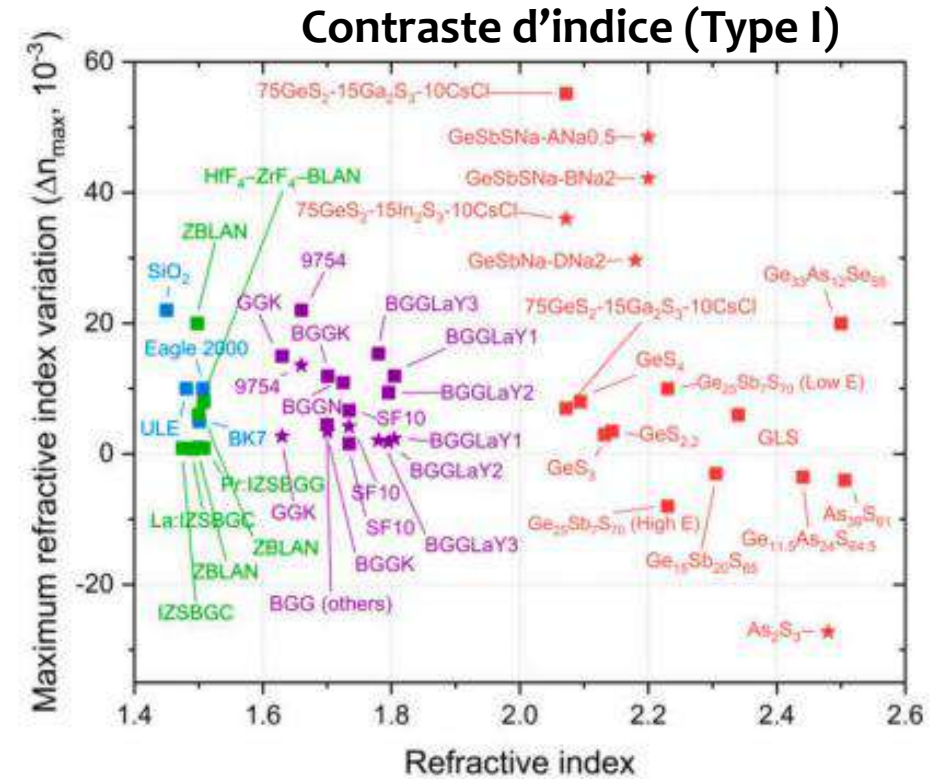
Possibles techniques de fabrication



K. Grebnev et al., APL Photonics (2024)



Il faut un contraste d'indice (cf pres. **Matthieu Lancry: la photostructuration des verres par laser et ses applications**): Par laser femtoseconde (Type I, II, III etc.)



J Ari et al., Optical Materials (2025)

Fonctionnaliser une fibre optique / exemple des FBG

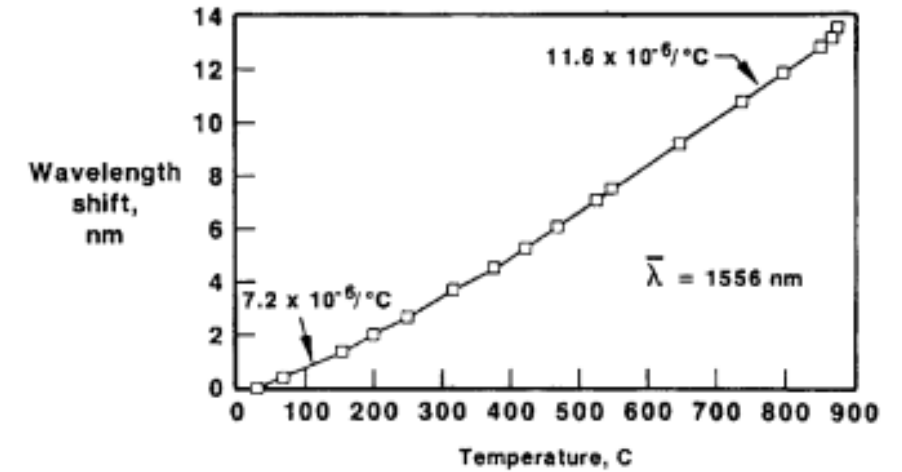
Température

Coefficient thermo-optique

$$\frac{1}{\lambda_B(T)} \frac{d\lambda_B(T)}{dT} = \frac{1}{n_{eff}(T)} \frac{dn_{eff}(T)}{dT} + \frac{1}{\Lambda(T)} \frac{d\Lambda(T)}{dT} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\lambda_B}{dT} \approx 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$$

Indice effectif (pointing to $n_{eff}(T)$)

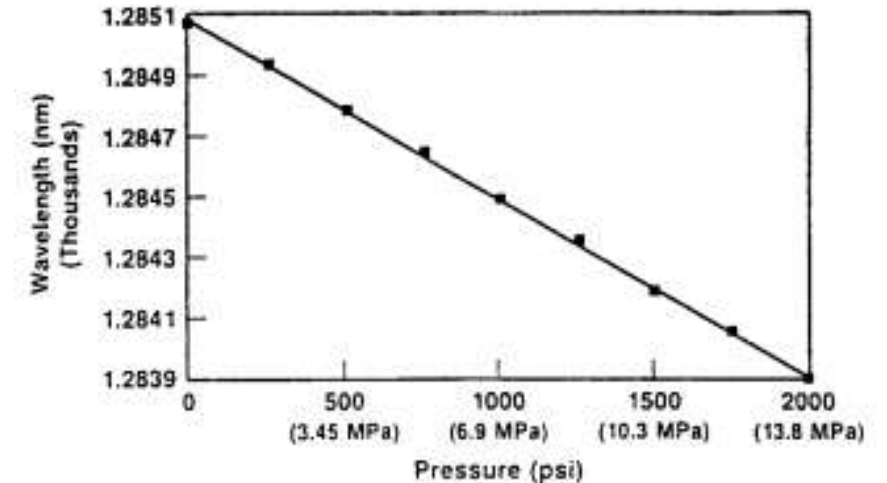
CTE (pointing to $\Lambda(T)$)



Déformation

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right) \varepsilon_z \quad \Rightarrow \quad \frac{d\lambda_B}{d\varepsilon_z} \approx 1 \left(\text{pm} \cdot \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right)$$

coef. Poisson, p_{11} , p_{12} : coefficients photoélastiques! (pointing to p_{12})



Pression

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{P}{E} (1 - 2\nu) \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{d\lambda_B}{dP} \approx -5 \text{ pm}/\text{MPa}$$

La sensibilité dépend des propriétés du verre (et donc de sa composition!)

K. O. Hill et al., Journal of Lightwave Technology (1997)

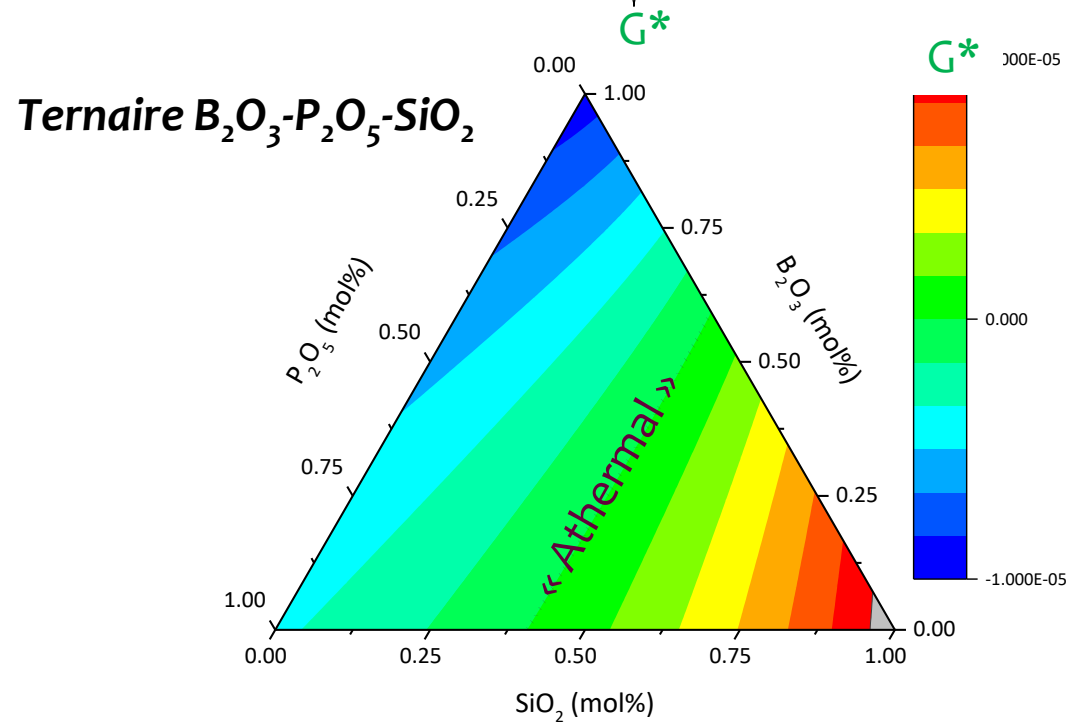
M. Linder et al., Optics Express (2020)

Fonctionnaliser une fibre optique / exemple des FBG

Température: vers des designs « sur mesure » ? Athermal via la composition?

Solution actuelle: conditionnement compensation thermique (ex: -5°C à 70 °C)*

$$\frac{n_{\text{eff}}}{\lambda_B(T)} \frac{d\lambda_B(T)}{dT} = \underbrace{\frac{dn_{\text{eff}}(T)}{dT}}_{G^*} + n_{\text{eff}} \cdot \text{CTE}(T)$$

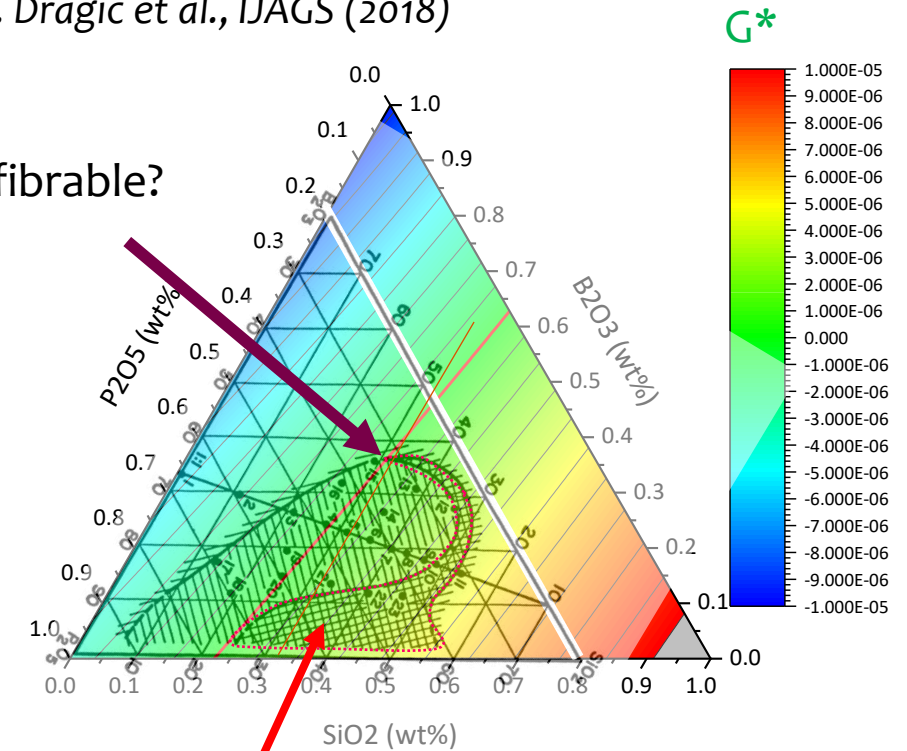


Possiblement rendre des fibres **athermales** avec des choix judicieux de composition (isoler l'effet de la pression par ex.)

Inspiré de D. Richter et al., BGPP conference (2022)
<https://www.atgrating.com/>*

<https://patents.google.com/patent/EP0202751A1/en>
P. Dragic et al., IJAGS (2018)

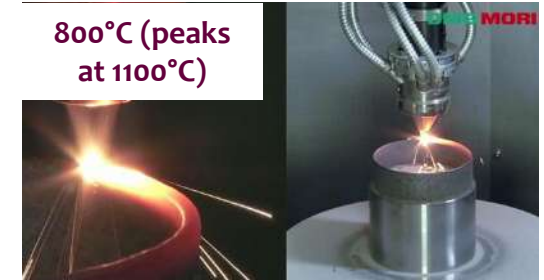
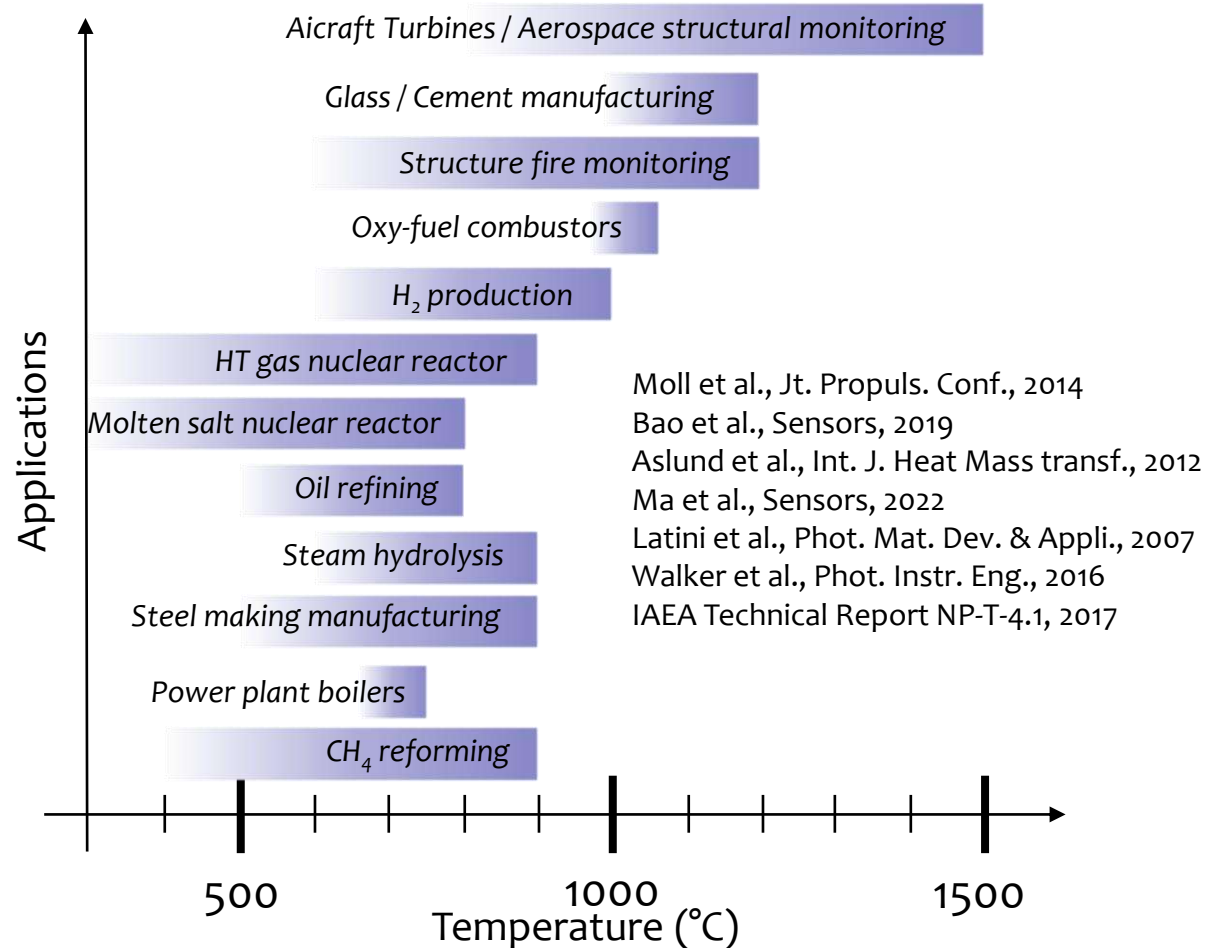
Compo fibrable?



Région vitreuse

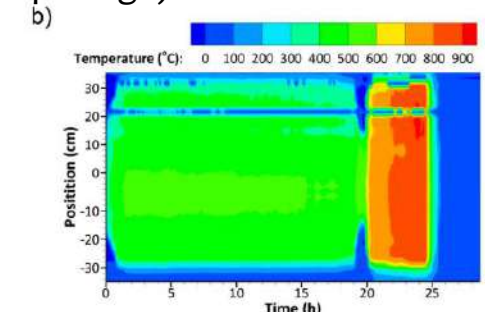
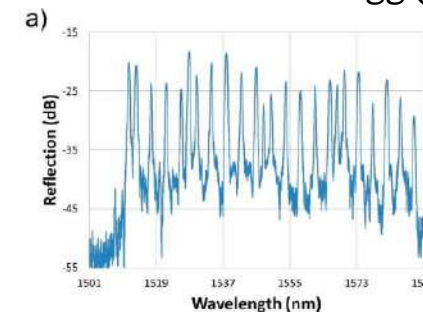
VII. Fonctionnaliser une fibre optique / exemple des réseaux de Bragg

Suivi d'environnements dédiés à la haute température (> 800 °C)



Avantages Fibres optiques versus thermocouples: multiplexage, résistance chimique / radiative / électromagnétique, compacte, léger, flexible etc.

Ex: Réseaux de Bragg (multiplexage) dans un brûleur

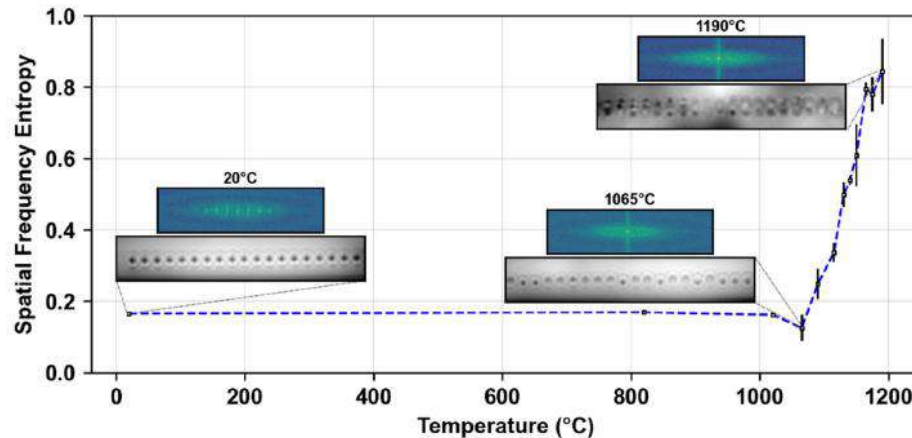
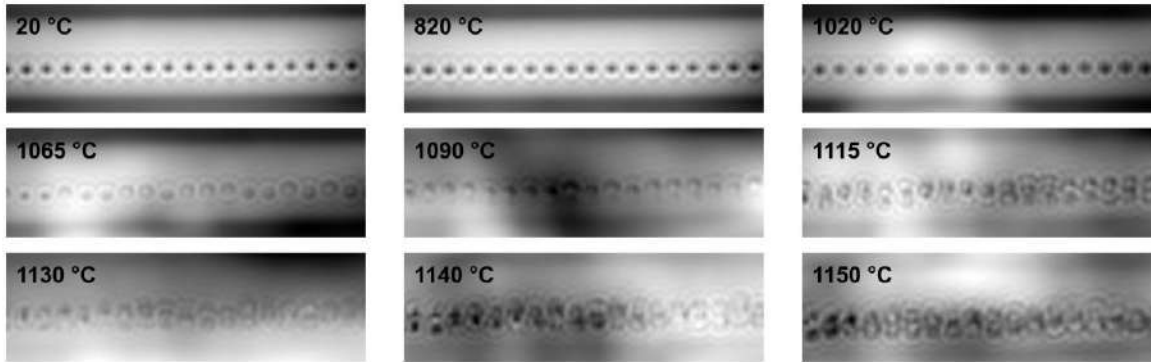


S. J. Mihailov et al., Sensors (2017)

VII. Fonctionnaliser une fibre optique / exemple des réseaux de Bragg

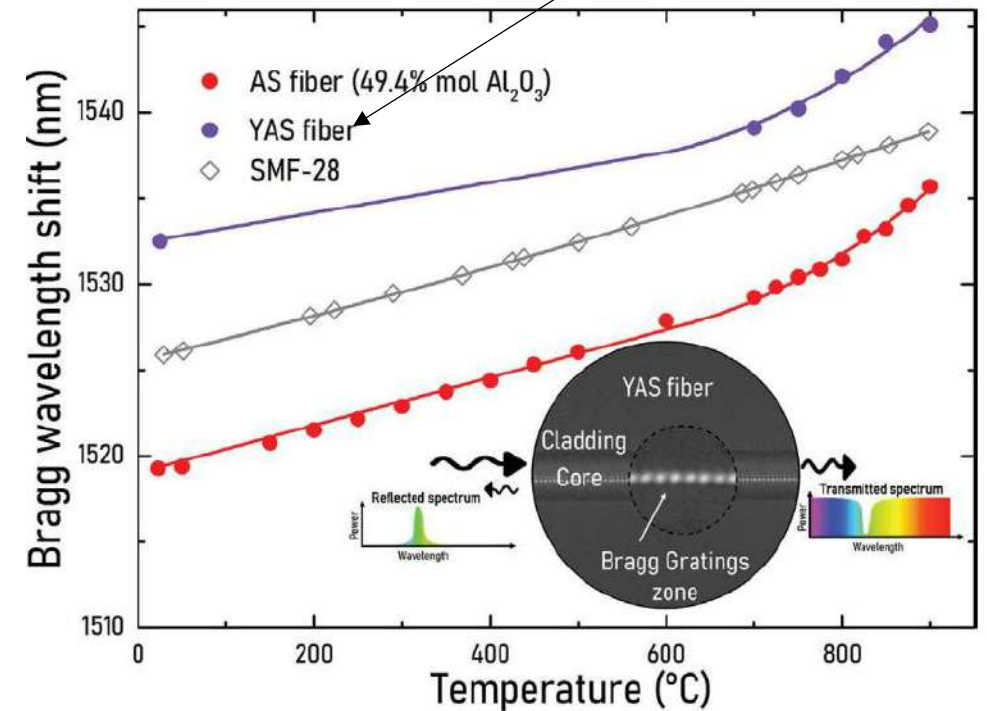
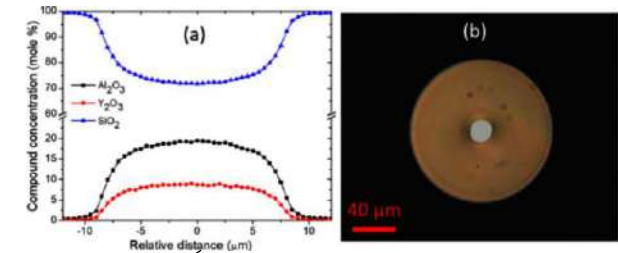
Suivi d'environnements dédiés à la haute température (> 800 °C)

Recuits isochrones (30 min.)



- Dans fibres SMF (dopées GeO_2): 1100 °C pendant plusieurs heures
- $\neq$ matrice permet d'augmenter la sensibilité (ex: aluminosilicates)

M. Sosa et al., Micromachines (2025)

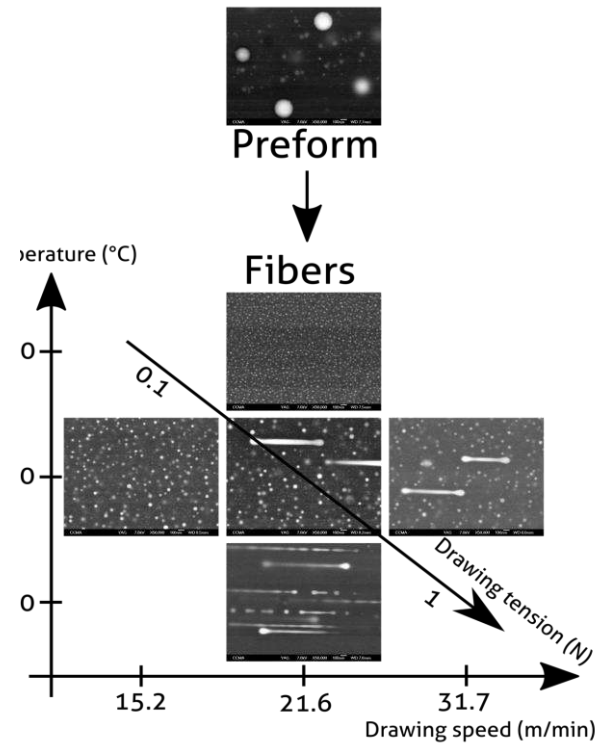
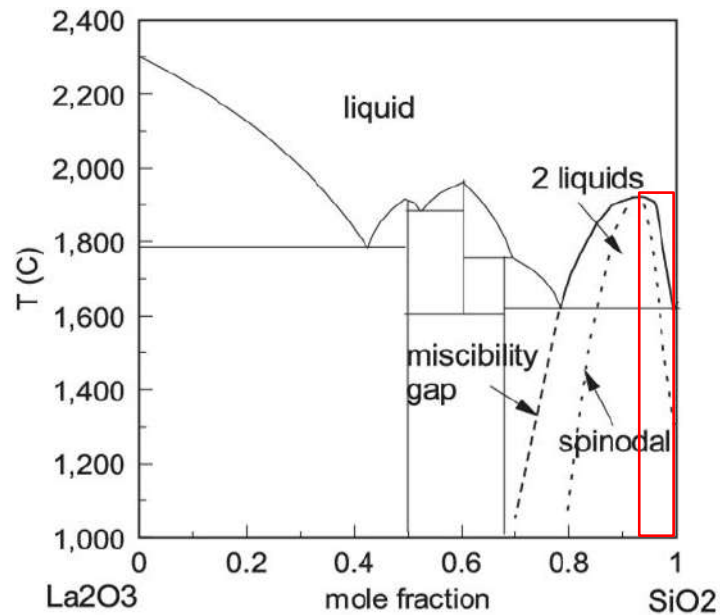


Y. Wang et al., Advanced Optical Materials (2022)

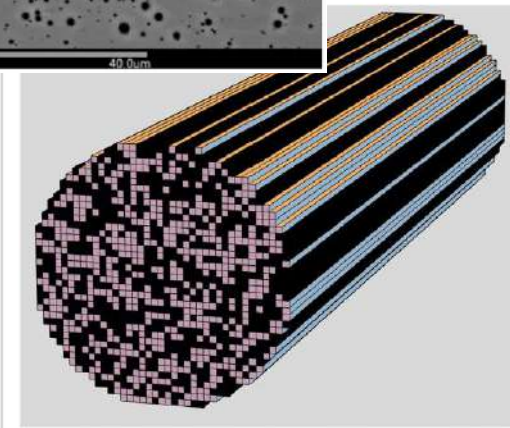
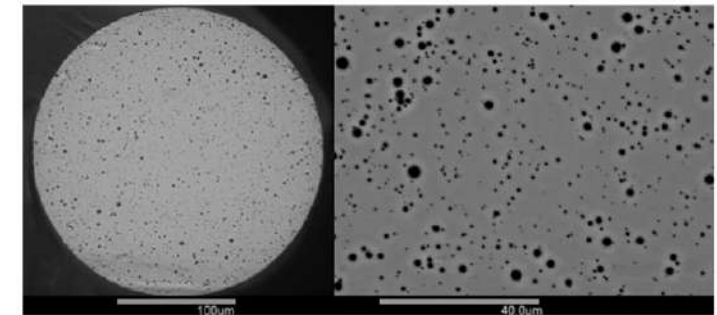
VII. Fonctionnaliser une fibre optique / fibres diffusantes

Intérêts: Lasers aléatoires (images sans Spekle = réduction de la cohérence), émission laser sans cavité, largeur spectrale ajustable, moins sensibles aux perturbations extérieures, capteurs par rétrodiffusion Rayleigh, etc.

Introduction de nanoparticules par dopage en solution (ex: $\text{LaCl}_3 \Rightarrow \text{La}_2\text{O}_3$)



Mais aussi: Transverse Anderson localizing optical fiber (TALOF): confinement de la lumière via des modes localisés (guides d'ondes): résistance accrue aux perturbations extérieurs/



La diffusion permet de fonctionnaliser et de guider la lumière!

W. Blanc et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2011)
Z. Lu et al., *Proc. SPIE Photonics Europe* (2022)
A. Mafi et al., *Frontiers in Physics* (2021)

VIII. Conclusions



Déni de responsabilité: présentation **non exhaustive et subjective** → en 1h15/30, l'objectif principal est de mettre en valeur **l'importance du verre (et donc ses propriétés)** dans les fibres optiques à travers **quelques exemples ciblés**

Non traité (et non complet!):

- **Fibres photosensibles** (dosimétrie / milieux radiatifs / spatial): **Cours Franck Mady**
- **Fibres pour le quantique** : Physique fondamentale, intication quantique (cryptographie)
- **Fibres optiques pour milieux cryogéniques** (spatial, cryogénie industrielle, quantique): Importance du revêtement de la fibre (polyimide, Al/Cu), jusqu'à 1,5 K
- **Capteurs par champ evanescent** (polissage local, attaque chimique, fonctionnalisation de surface)
- **Fibres microstructures à coeurs creux remplies gaz/liquides**: contrôle de la dispersion, spectroscopie / detection de polluants etc.
- **Fibres hybrides** (verre/metal/semi-conducteurs): ex detection optique / chimique / électrique: attention incompatibilité thermique + interfaces: ex Chalco afin de co-tirer avec semi-conducteurs
- **Fibres vortex** (modes avec phase hélicoïdale + front d'onde en spirale appelés AOM): télécom, imagerie Etc...