

Procédés de synthèse de verres de silice dopée et de fibres optiques micro-structurées au sein de la plateforme FiberTech Lille

Cassez A., Bigot L., Bouwmans G., El Hamzaoui H., Bouazaoui M., Kinowski C., Robbe O., Bernard R., Douay M.

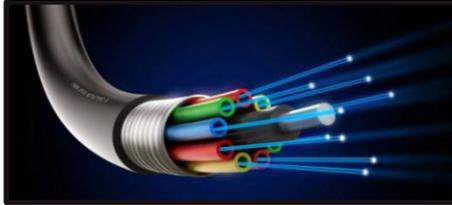
Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules

Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée

Université de Lille Sciences et Technologies – CNRS

Introduction

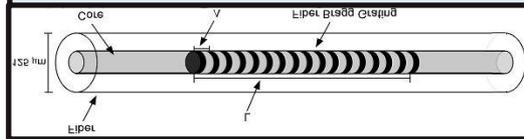
Fibres Telecom
(les plus connues)



Fibres actives
(lasers et amplificateurs)



Capteurs
(pression, température...)



Médecine
(endoscopie...)



Fibres passives
(éclairage...)



	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Optical Fiber (in millions of kilometers)	147	162	159	172	182	190	204
Unit Price (US\$)	9.00	8.75	9.00	8.50	8.50	8.50	8.75
Total	1.32	1.42	1.43	1.46	1.55	1.62	1.79
Fiber Cable Hardware	2.1	2.4	2.43	2.62	2.79	2.92	3.04
Total Fiber, Cable and Hardware	3.42	3.82	3.86	4.08	4.34	4.54	4.83

Prévisions de production établies par Corning en 2011.

⇒ **Fibres optiques :**

- ⇒ **Nombreux champs d'application**
- ⇒ **Marché en pleine expansion**
- ⇒ **Fibres essentiellement à base de silice**

Choix de la silice

⇒ Critères de choix du matériau pour la fabrication de fibres optiques :

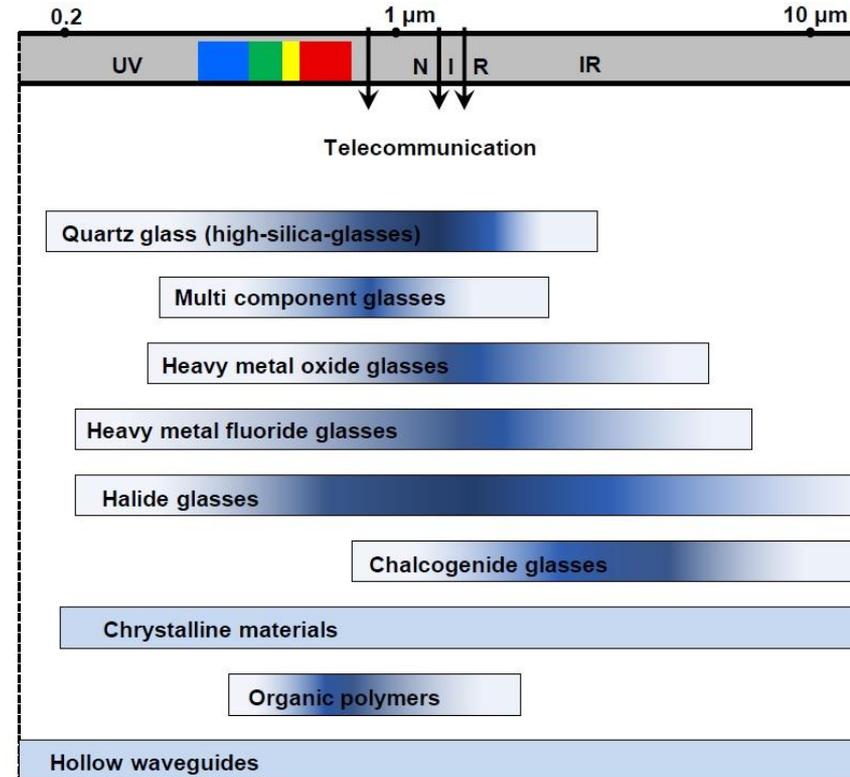
- Zone de transmission.
- Pertes optiques.
- Maîtrise de l'indice de réfraction.
- Stabilité chimique et physique.
- Capacité d'industrialisation et de réalisation.

⇒ De nombreux matériaux ont été testés pour la réalisation de fibres optiques (gaz, liquide, cristaux, polymères...).

⇒ Cas des fibres optiques : le meilleur matériau ne vaut rien s'il ne peut être fibré!

⇒ Verres :

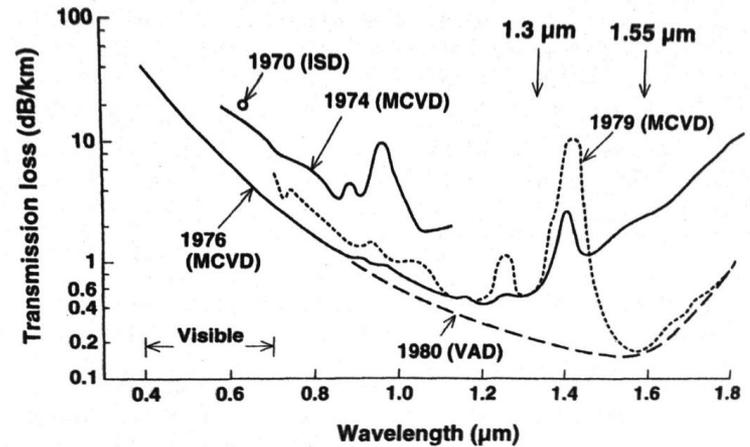
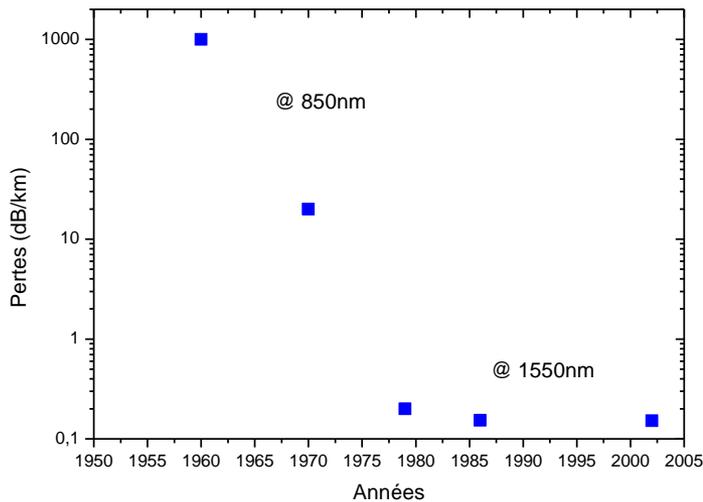
- réunissent beaucoup des critères de choix.
- faciles à fabriquer à l'échelle industrielle.
- hautement transparents.
- modification de leur indice de réfraction.



Zones de transmission de quelques matériaux utilisés pour la réalisation de fibres optiques

Choix de la silice

- ⇒ 1936 : brevet japonais montrant que la silice peut être utilisée comme support des communications optiques.
- ⇒ 1965 : simulations montrant que les pertes par absorption seraient réduites en dessous de 20dB/km avec un bon contrôle de la pureté du verre ($[m\text{étaux}] < 1 \text{ ppm}$).
- ⇒ 1970 : réalisation par Corning d'une fibre à 20dB/km (seuil de l'époque) ce qui a lancé des recherches massives sur le sujet.
- ⇒ 1980 : minimum d'atténuation à 0,2 dB/km. (record actuel = 0,1419 dB/km - 2017).



Evolution des pertes des fibres optiques à base de silice.

La silice :

- Verre d'oxyde transparent dans le visible et le proche IR.
- Très bonne stabilité chimique et mécanique.
- Contrôle de son indice de réfraction en la dopant avec d'autres oxydes.
- Incorporation possible d'éléments actifs (terres rares, nanoparticules...).
- Matières premières bon marché.

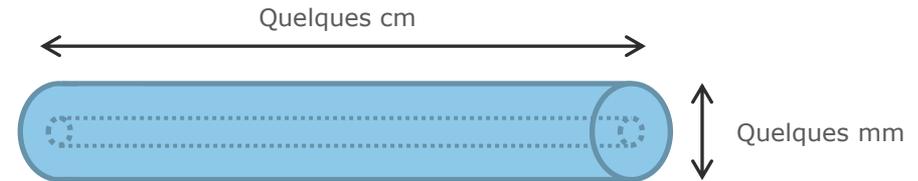
Obtentions de barreaux de silice dopés et optiquement actifs :

Préforme : *Industrie*

- ⇒ Éléments de verre (cylindre ou barreau) homothétiquement identiques à la fibre optique.
- ⇒ Plusieurs dizaines de cm de longueur et plusieurs dizaines de mm de diamètre.



Préforme industrielle



Au laboratoire

Contraintes de fabrication :

- ⇒ Éléments de verre pouvant être étirés et/ou incorporés à des assemblages verriers.
- ⇒ Cylindre (tube ou barreau) de quelques cm de longueur et quelques mm de diamètre.
- ⇒ Contrôle du procédé : défauts de fabrication, homogénéité géométrique, circularité.
- ⇒ Compatibilité avec la phase de fibrage ($T \approx 2000^{\circ} C$).

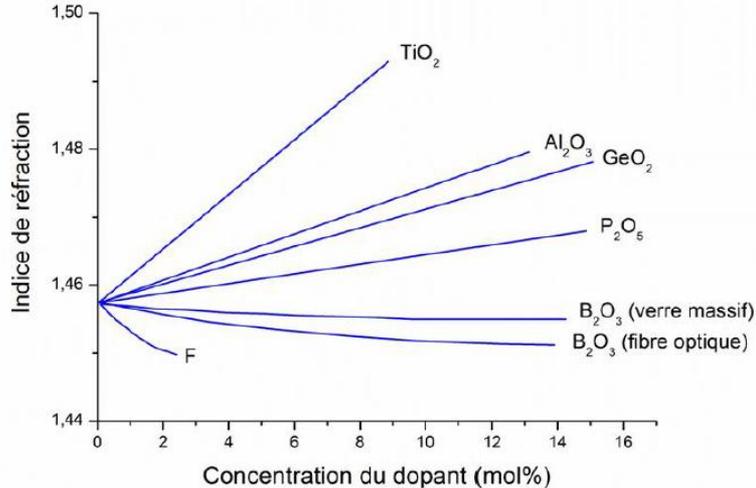
Contraintes optiques :

- ⇒ Pertes optiques.
- ⇒ Maîtrise de l'indice de réfraction.
- ⇒ Photodarkening (laser).

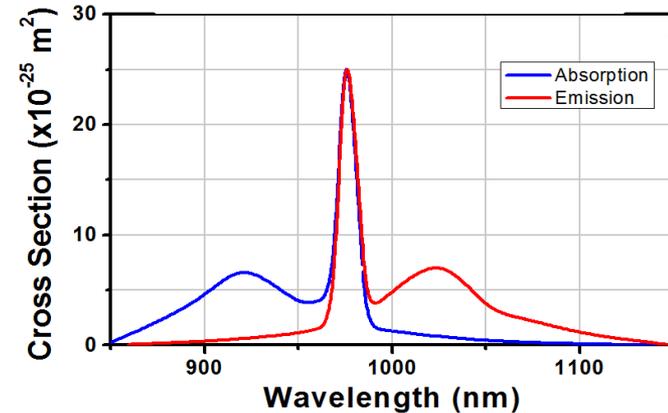
Méthodes de fabrication : objectifs

Modification des propriétés optiques

- ⇒ Modification de la composition chimique du verre.
- ⇒ Problématiques liées au guidage (maîtrise de l'indice).
- ⇒ Problématiques liées à l'activité optique des verres.



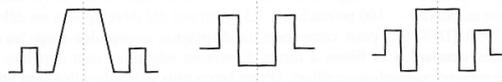
Evolution de l'indice de réfraction en fonction du dopant.



Spectre d'absorption/émission des ions Yb(III) dans le NIR.

⇒ Guidage :

- Incorporation d'oxydes et/ou de fluor.
- Combinaison de dopants possibles.
- Structuration du dopage / gradients selon design.



⇒ Dopages fibres actives :

- Ions :
 - Laser : Yb(III), Tm(III), Nd (III), Bi (?)
 - Amplificateurs : Er(III)
 - Dosimétrie : Cu(I)
- NPs : Au(0) (résonance plasmonique)

⇒ **Effets à combiner dans le verre**

Méthodes de fabrication : Approches classiques

⇒ Principe :

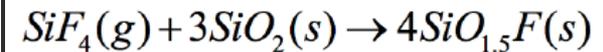
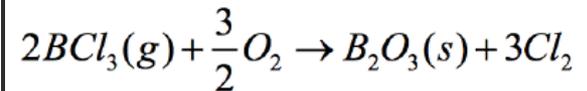
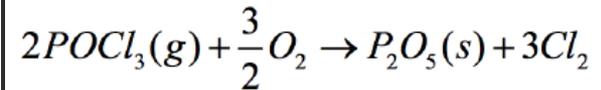
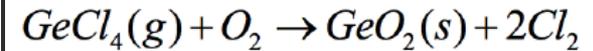
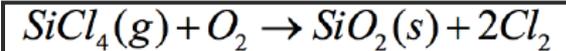
- Oxydation/hydrolyse de vapeurs d'halogénures.
- Haute température.
- Formation de suies sur ou dans un substrat (poreux).
- Post-traitement (imprégnation : fibres actives).
- Phase de densification/vitrification.
- Post traitement : rétreint / fermeture.

⇒ Avantages :

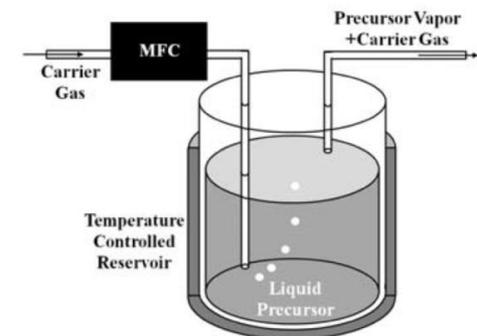
- Synthèse aisée : précurseurs chlorés faciles à vaporiser.
- Pureté contrôlée des précurseurs (>99.999 %).
- Contrôle relativement aisé de l'indice de réfraction et de sa forme.
- Contrôle de la quantité de matière déposée et de la forme du dépôt.

⇒ Quatre techniques de dépôt sont couramment utilisées :

- ⇒ **MCVD** (Modified Chemical Vapor Deposition)
- ⇒ **PCVD** (Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition)
- ⇒ **OVD** (Outside Vapor Deposition)
- ⇒ **VAD** (Vapor-phase Axial Deposition).

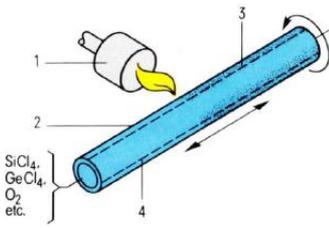
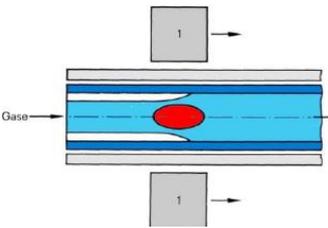
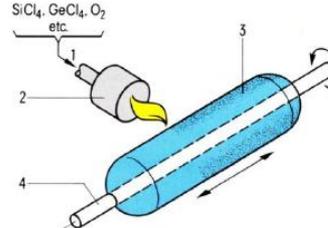
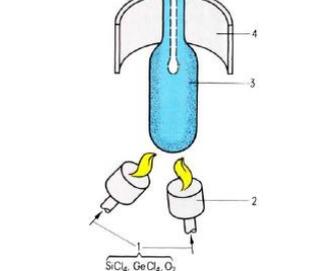


Réactions mises en jeu (CVD).



Principe du bullage d'halogénures.

Méthodes de fabrication : Approches classiques

Procédé	MCVD Modified Chemical Vapor Depositon	PCVD Plasma Chemical Vapor Depositon	OVD Outside Vapor Depositon	VAD Vertical Axial Depositon
Type	Interne	Interne	Externe	Externe
Réactions mises en jeu	Oxydation de chlorures à haute température	Oxydation activée par plasma	Oxydation/Hydrolyse de chlorures (flamme)	Oxydation/Hydrolyse de chlorures (flamme)
Principe de dépôt	Dépôt par thermophorèse de suies sur l'intérieur du tube substrat	Nucléation hétérogène sur la paroi intérieure du tube substrat	Dépôt par thermophorèse de suies sur la cible	Dépôt par thermophorèse de suies sur le germe
Densification	Densification de la couche poreuse simultanément au dépôt	Pas de densification nécessaire	Densification de la préforme poreuse dans une seconde phase	Densification de la préforme poreuse dans une seconde phase
Description				

Récapitulatif des méthodes de fabrication de préformes classiques.

Méthodes développées pour la fabrication de préformes



⇒ **Approches douces**

T ambiante – 1300 ° C

- Sol-Gel
- Sol-Gel / Séchage CO₂ super critique
- Méthode poudre : presse isostatique

⇒ **Approches CVD**

1000 – 1800 ° C

- MCVD
- OVD

Contrôle d'indice

⇒ Dopage process :

- chlorures (CVD).
- fluoration (CVD).
- précurseurs (ex : PO(Et)₃).

⇒ Dopage post-process :

- fluoration sur poreux.
- durant la densification.

Activité optique

⇒ Dopage process :

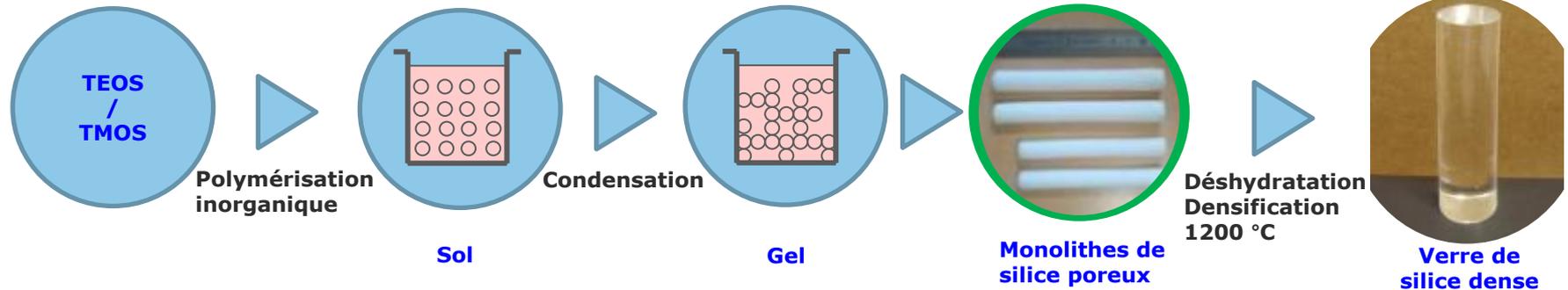
- chélates : Yb(THD)₃, Yb(FOD)₃, Al(acac)₃.
- chlorures : AlCl₃.
- précurseurs : nitrates .

⇒ Dopage post-process :

- imprégnations sels (chlorures, nitrates).
- imprégnations chélates.

Sol-Gel

Synthèse de monolithes SOL-GEL



Sol-Gel

⇒ Procédé :

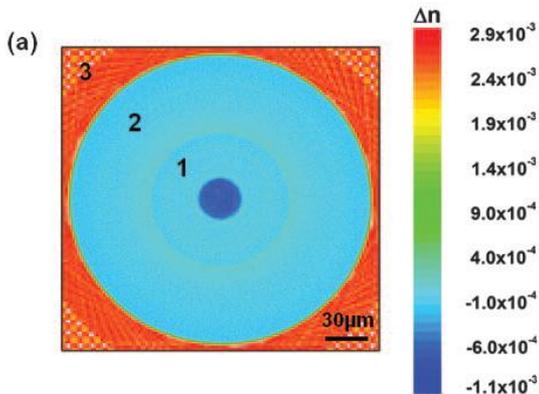
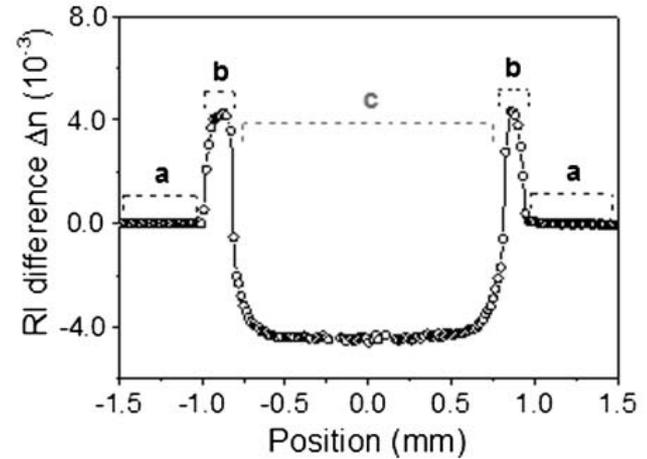
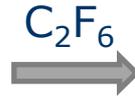
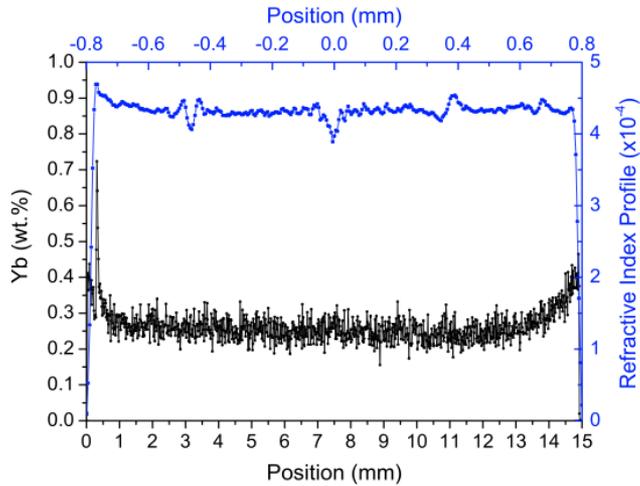
- Porosité contrôlée.
- Silice pure ou dopée Ge, P, F.
- Densification à des $T < 1500$ °C.
- Matériaux de haute pureté.
- Barreau de large diamètre (15 mm de diamètre et jusqu'à 150 mm en longueur).

⇒ Dopage en solution :

- Terres rares, bismuth, métaux,...
- Bonne homogénéité du dopage, adéquate pour la production de lasers à fibre.
- Niveau de dopage contrôlé en ions terres rares.
- Faible atténuation (< 40 dB/km à 1200 nm).

Exemple :

- ⇒ Dopage Ytterbium (III) de barreaux.
- ⇒ Contrôle de l'indice par fluoruration durant la densification.



- ⇒ Indice homogène.
- ⇒ Ajustements possibles en fonction des conditions de fluoruration.

⇒ **Brevet déposé**

Profil d'indice 2D obtenu après fluoruration (mesure IFA).

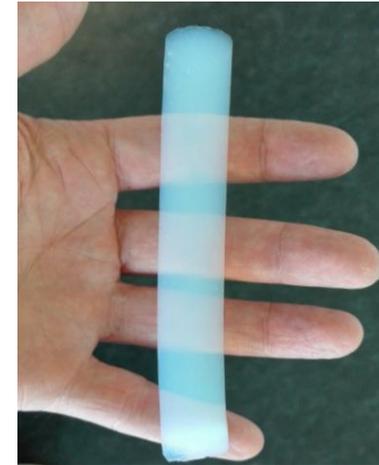
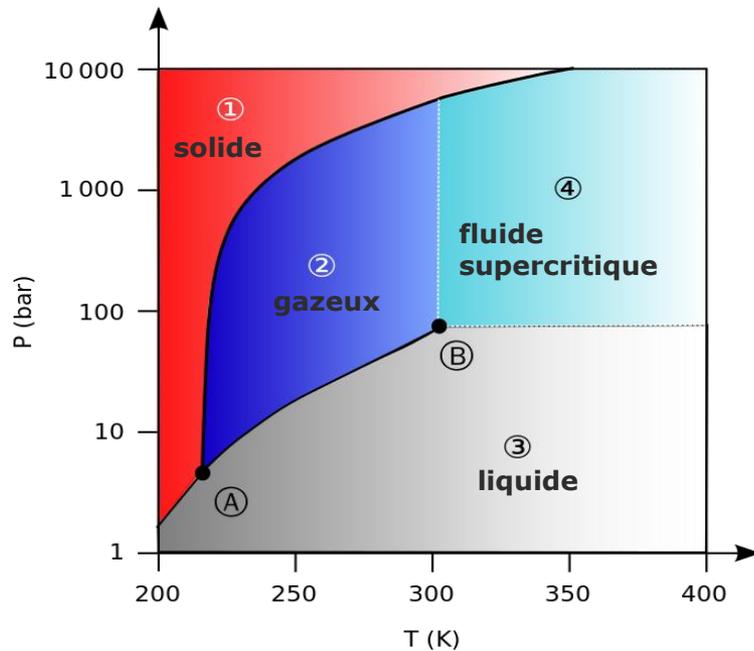
Sol-Gel / Séchage supercritique

⇒ Objectifs :

- Réalisation de barreaux sol-gel rapidement et de manière reproductible.
- Réalisation de fibres fortement dopées pour la réalisation de lasers de forte puissance (Yb).

⇒ Intérêt du séchage en condition supercritique :

- Elimination du solvant sans effondrement de la structure poreuse.
- Réalisation de barreaux sol-gel : 3 semaines (au lieu de 6 mois en condition non SC).



Exemple de monolithe séché SC.

Sol-Gel / Séchage supercritique

⇒ Moyens :

- Développement d'un pilote unique en Europe.
- 2 réacteurs (A40 et A41) : T_{\max} 150°C, P_{\max} 300 bars)
- 1 réacteur (A42) pour le séchage en milieu alcool/eau supercritique (T_{\max} 600°C, P_{\max} 300 bars).



Réacteur A42

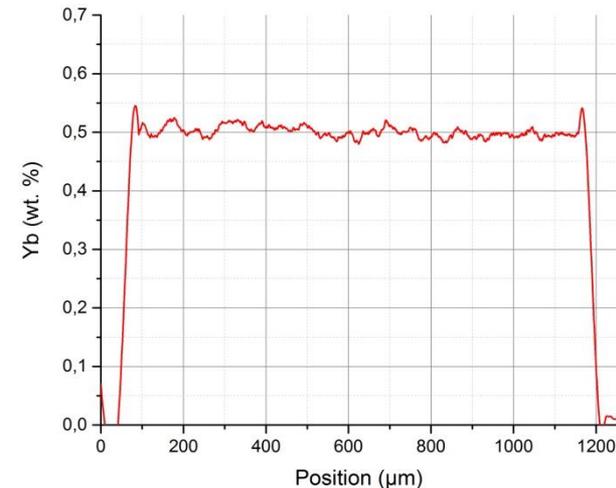
Réacteur A40

Réacteur A41

⇒ Résultats :

- Mise au point de nouvelles synthèses sol-gel compatibles avec un séchage en milieu CO_2 supercritique.
- Dopage des sols (entre 0,5 et 1%) par différents précurseurs d'erbium ou d'ytterbium (nitrate, THD).
- Mise au point du protocole de densification pour les aérogels non dopés.
- Tests en cours pour les échantillons dopés à l'ytterbium.

⇒ **Dopage homogène (Yb : 0,5 wt. %)**



Concentration en Yb mesuré sur un monolithe SC densifié.

Presse isostatique

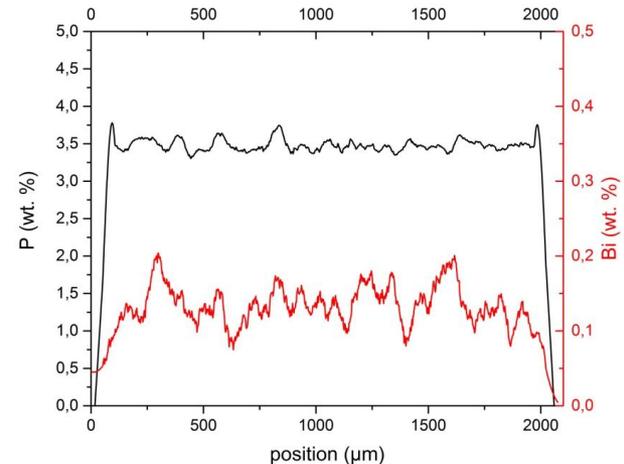
⇒ Principe :

- Broyage des poudres (broyeur planétaire).
- Mélange homogène + contrôle de la granulométrie.
- Imprégnation (dopants actifs/passifs) + évaporation.
- Compression à haute pression du mélange de poudres.
- Obtention d'un poreux (porosité < 20%).
- Densification (semblable au sol-gel).



⇒ Avantages :

- Choix des constituants à incorporer à la silice.
- Imprégnation par sels d'ions actifs.
- Contrôle de la pureté.
- Dopage radial homogène.
- Accès à de nombreuses compositions.



Concentrations en Bi et P mesurées sur un échantillon compressé

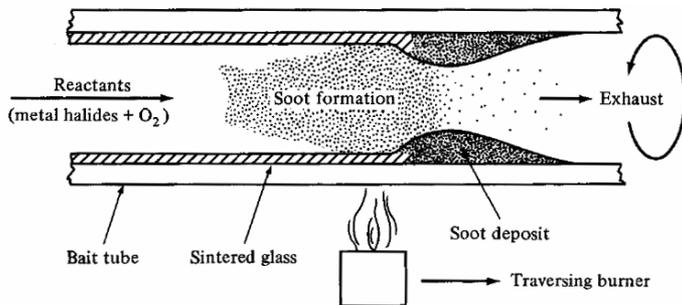
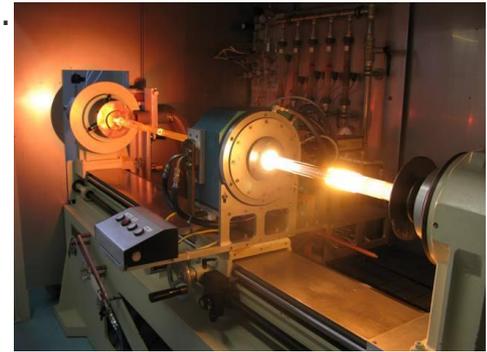
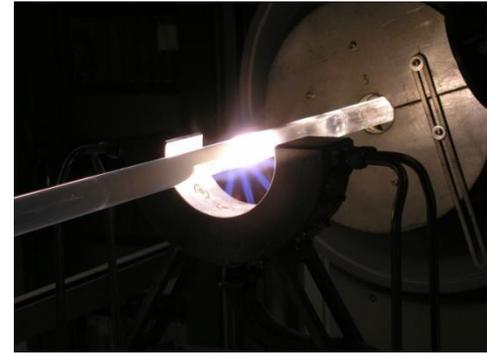
MCVD

MCVD :

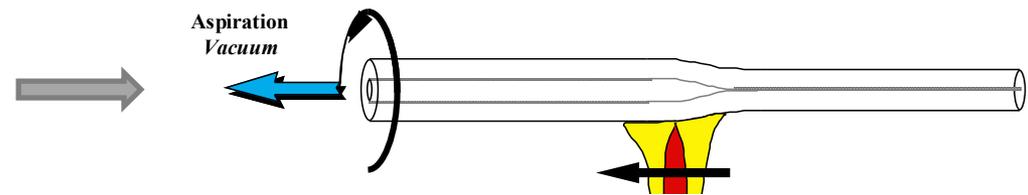
- Pas à proprement parlé une méthode originale (développée en 1973).
- Procédé la plus utilisé dans le monde \Rightarrow incontournable.

Principe :

- Oxydation de précurseurs chlorés (halogénures) à l'intérieur d'un tube de silice.
- Haute température (1500-1600° C)
- Chalumeau (MCVD) ou four (FCVD).
- Contrôle et structuration de l'indice par ajout de dopants en cours de process.
- Vitriification de suies.
- Retreint /fermeture.



Dépôt



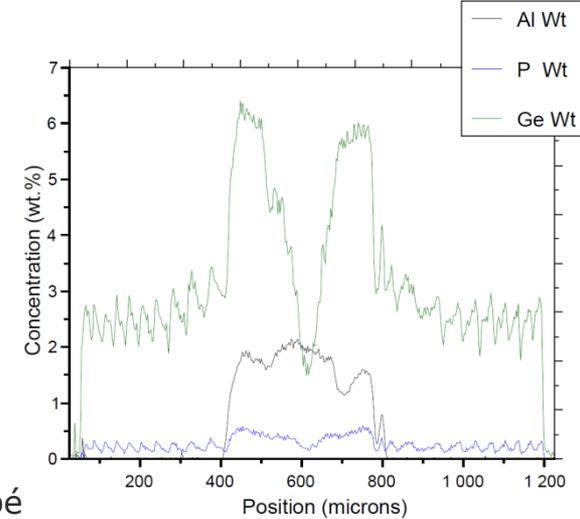
Rétreint / Fermeture

Structuration de l'indice :

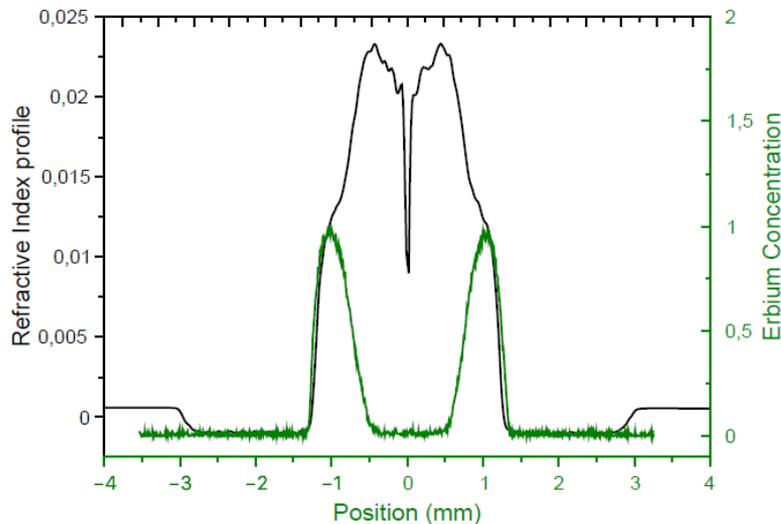
- Réalisation de préformes à profils d'indice complexes.
- Possibilité d'introduire de fortes concentrations de dopants.

Préformes optiquement actives :

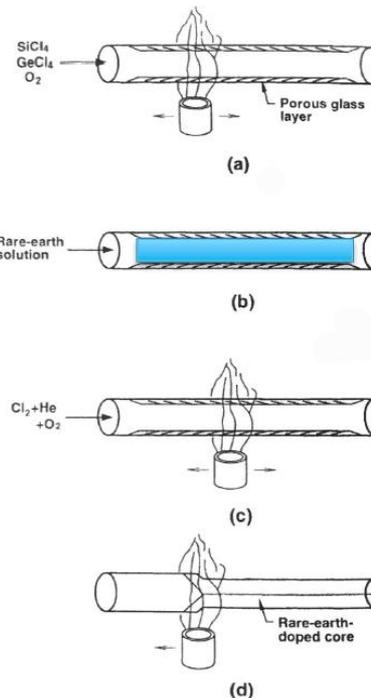
- Dépôt d'une plusieurs couches de suies à haute porosité.
- Arrêt du process, démontage et remplissage du tube par une solution dopé
- Solutions de chlorures (YbCl₃, ErCl₃, AlCl₃...) dans l'éthanol.
- Vidange, séchage et vitrification des couches imprégnées.
- Rétreint et fermeture de la préforme.



Exemple de structuration de RIP



Exemple de fibre dopée Erbium (dopage en anneau)



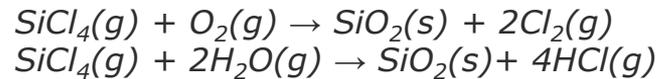
Outside Vapor Deposition :

- Inventée dans les années 1970 par Corning.
- Contrairement au MCVD, très peu décrite dans la littérature.

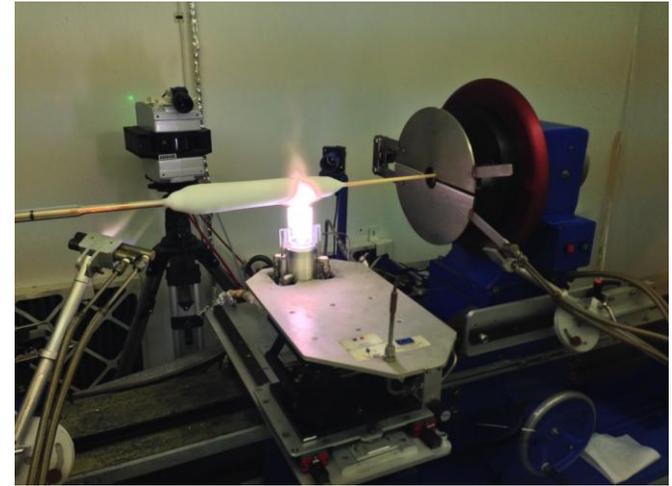
Principe : procédé en 2 étapes

Dépôt :

- Oxydation/hydrolyse de précurseurs chlorés (halogénures).

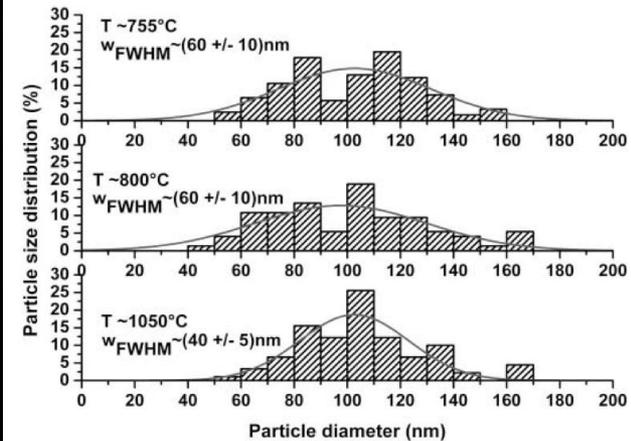
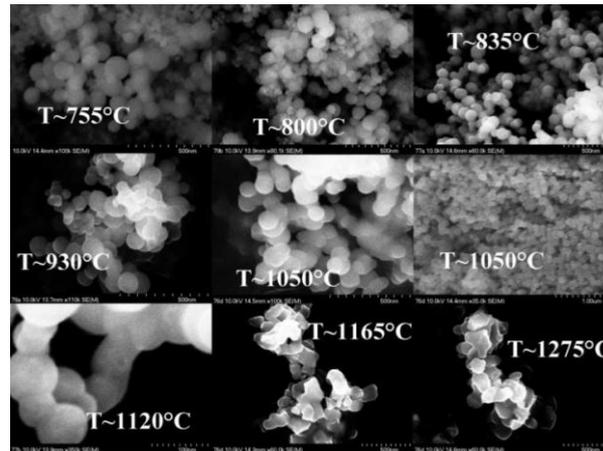


- Chalumeau H₂/O₂.
- Formation de suies et dépôt sur une cible en alumine par thermophorèse.
- Rotation et translation de la cible pour constituer un volume de silice poreux (plusieurs centaines d'Å/R).



Poreux:

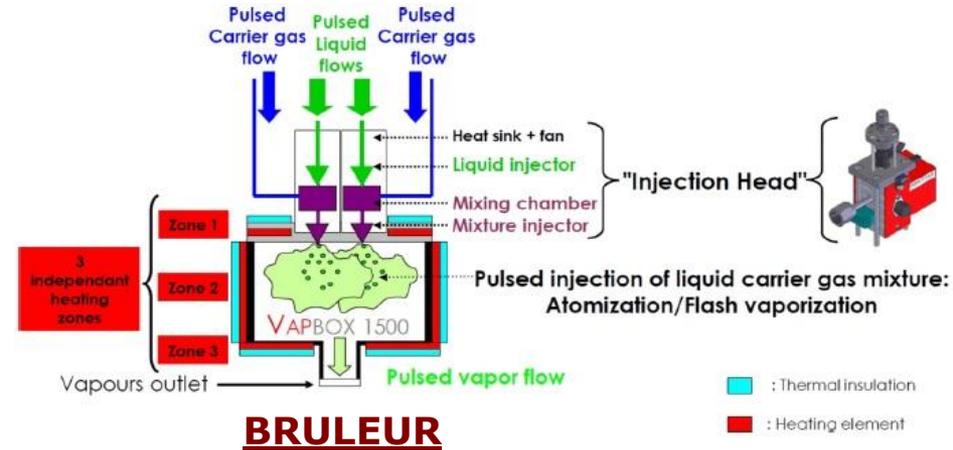
- Densité comprise entre 0,2 et 0,5.
- Taille des particules ≈ 100 nm.



Introduction des éléments actifs :

⇒ Vaporisation flash :

- Solutions de chélates dissouts en milieu organique.
- Vaporisation d'un spray dans une cuve de mélange.
- Balayage sous atmosphère inerte jusqu'au brûleur.



⇒ Sublimation :

- Procédé utilisé par Corning.
- Utilisation de chélates : $\text{Yb}(\text{THD})_3$, $\text{Yb}(\text{FOD})_3$...
- Sublimation possible de AlCl_3 .
- Vapeurs emportées sous courant d'He jusqu'au brûleur.
- Premières synthèses en cours de réalisation.

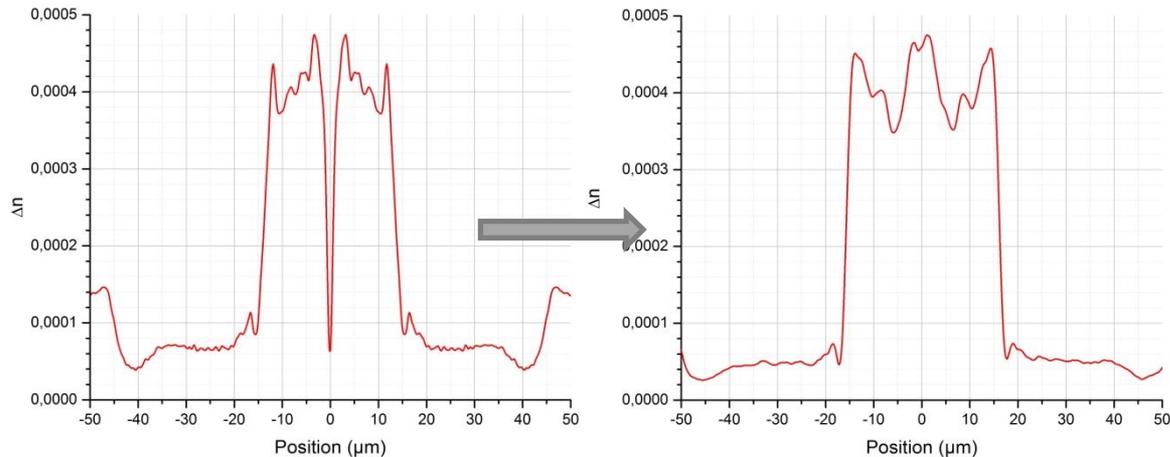
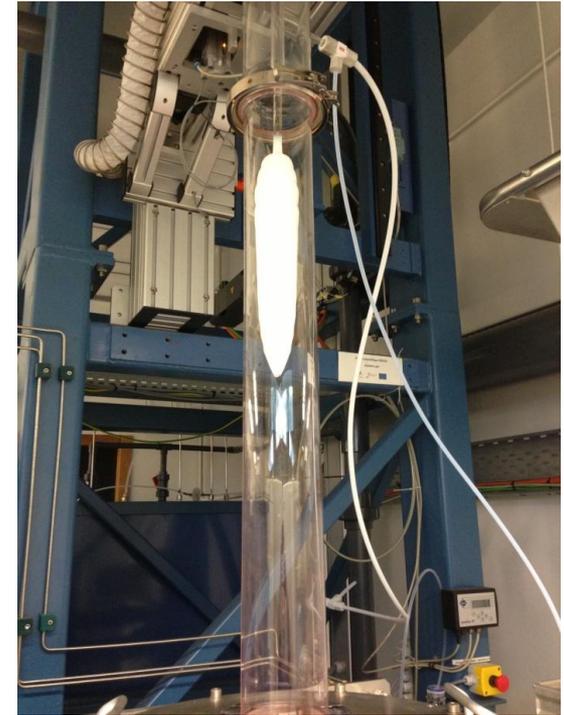


Densification :

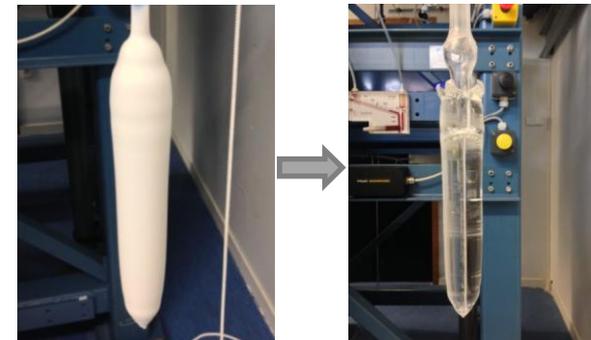
- Retrait de la cible en alumine.
- Déshydratation et purification sous courant de Cl_2 (élimination $-\text{OH}$).
- Possibilité de modulation de l'indice par introduction de C_2F_6 (ou SiF_4).
- Densification ($T \approx 1500^\circ \text{C}$).
- Obtention d'un tube dopé dans la masse.

Post-traitement :

- Défauts liés au trou central (attaque HF).
- Fermeture / étirage (tour de fibrage).



Traitement du défaut central (attaque HF)



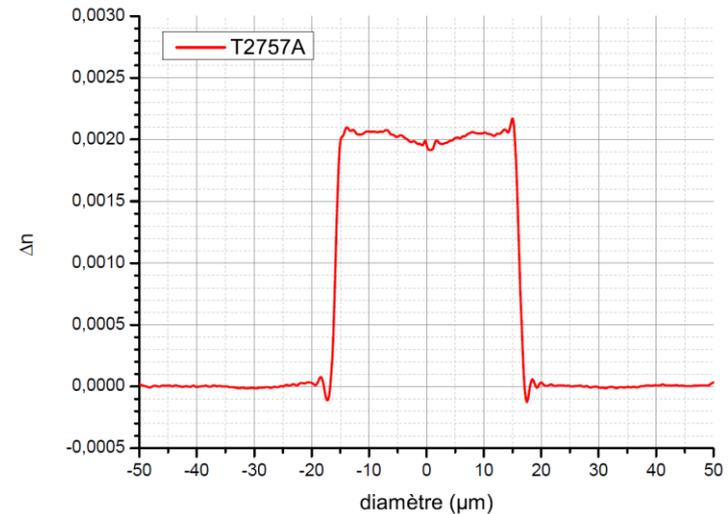
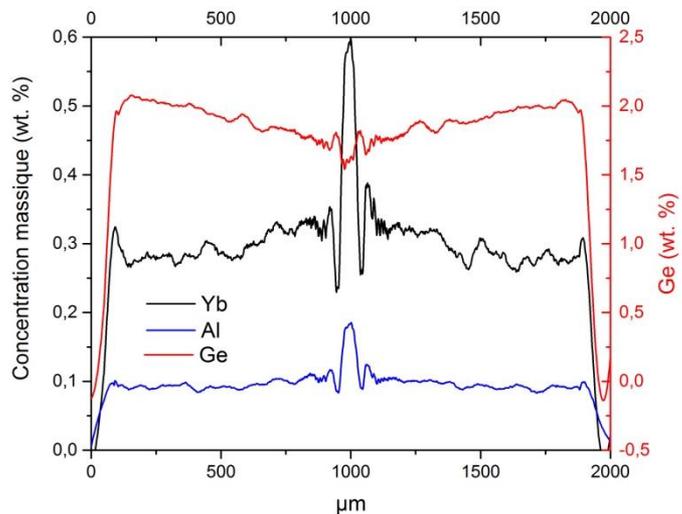
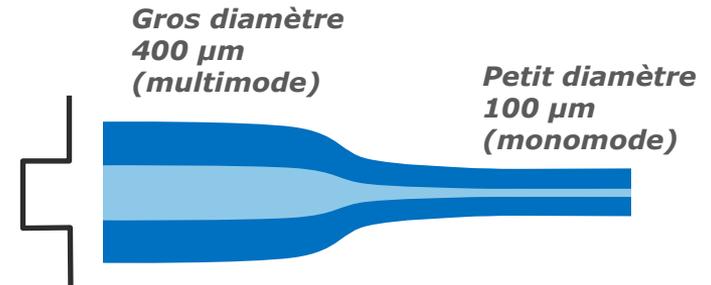
⇒ Dopage Yb pour réalisation de fibres effilées (tapers).

Objectifs :

- ⇒ Réalisation de barreaux Δn fixé = $+ 2.10^{-3}$ / silice.
- ⇒ Contrôle radial de la distribution en ions actifs.

Résultat :

- ⇒ Dopage Yb (III) : concentration = 0,3 wt. % ($\alpha = 250$ dB/m @ 976 nm).
- ⇒ Contrôle de l'indice : $\Delta n = +2.10^{-3} \pm 1.10^{-4}$: dopage GeO_2 et Al_2O_3 .
- ⇒ Pertes : 20 dB/km @ 1200 nm.



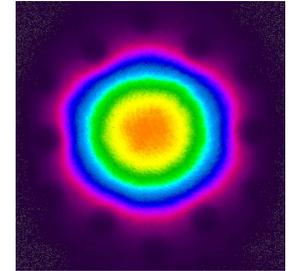
Concentrations en Yb, Ge et Al sur préforme étirée

Indice de réfraction déterminé après fibrage (30/200 µm)

⇒ Dopage Yb pour réalisation de fibres à large aire effective de mode (LMA).

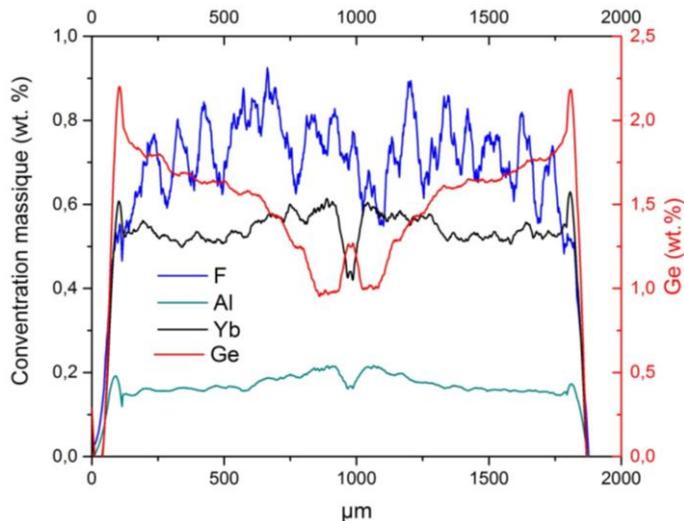
Objectifs :

- ⇒ Réalisation de lasers de forte puissance.
- ⇒ Fabrication de barreaux Δn fixé = 0 / silice.
- ⇒ Contrôle radial de la distribution en ions actifs.

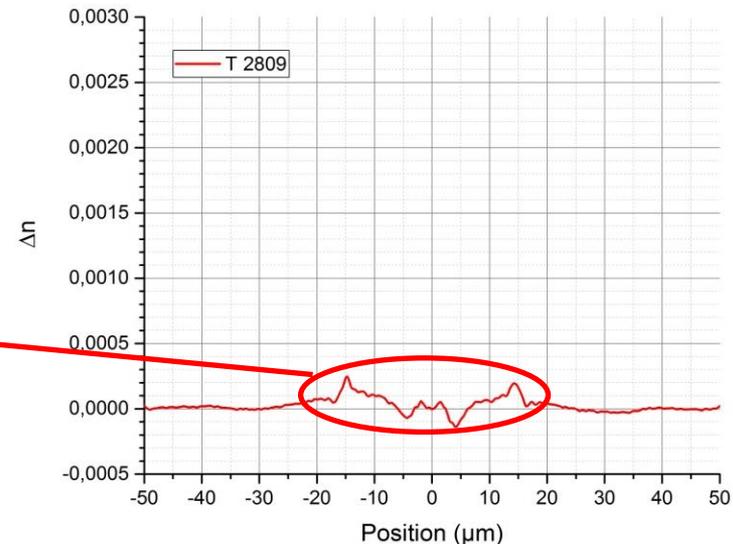


Résultats :

- ⇒ Dopage Yb (III) : concentration = 0,55 +/- 0,05 wt. % ($\alpha = 450$ dB/m @ 976 nm).
- ⇒ Contrôle de l'indice : $\Delta n = 0 +/- 2.10^{-4}$: dopage GeO_2 , Al_2O_3 et, F).
- ⇒ Effets compensés des différents dopants en périphérie.
- ⇒ Diffusion du Fluor compensée par un gradient positif de Ge.



Concentrations en Yb, Ge, F et Al sur préforme étirée



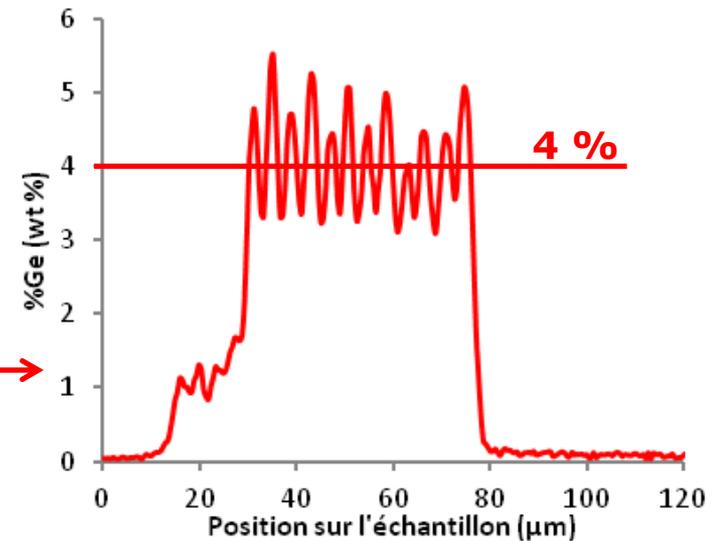
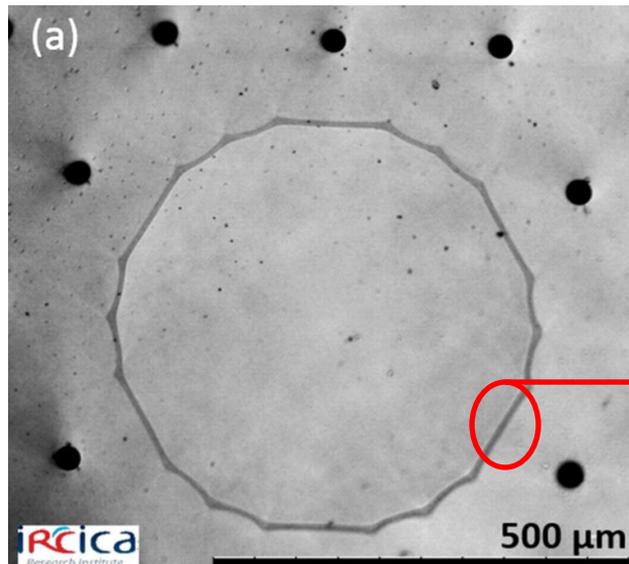
Indice de réfraction déterminé après fibrage (30/200 μm)

⇒ Réalisation de couches minces dopées Germanium

Exemple dépôt « top-hat ».

⇒ Dépôt d'une couche très fine dopée GeO_2 à Δn fixé ($2 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}$).

⇒ On garde la cible (silice non dopée ultra-pure).



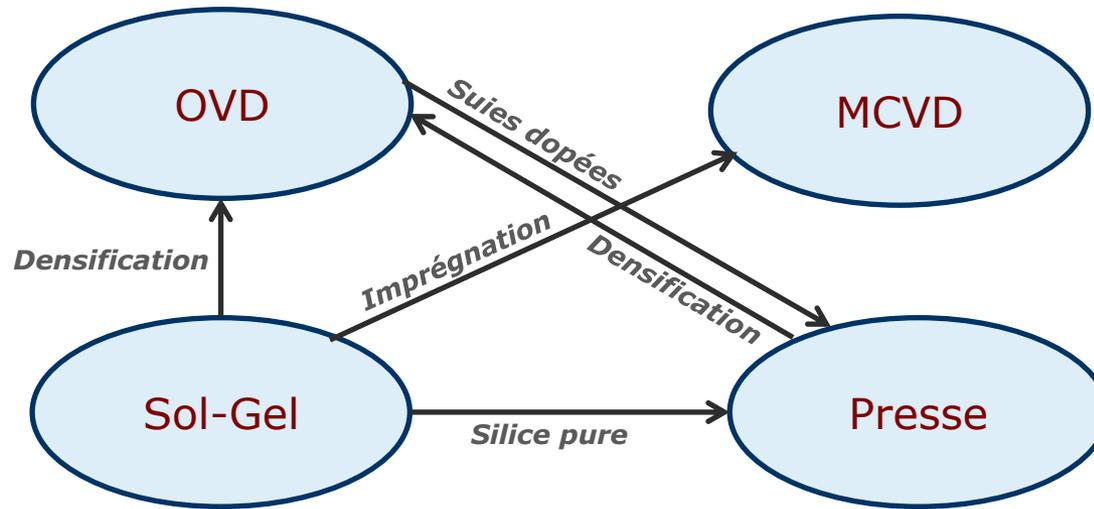
⇒ Exemple : dépôt correspondant à 50 μm dopés à 4 wt. en Ge.

⇒ Structuration multicouche typique des dépôts OVD.

Fibertech : méthodes d'élaborations de verres

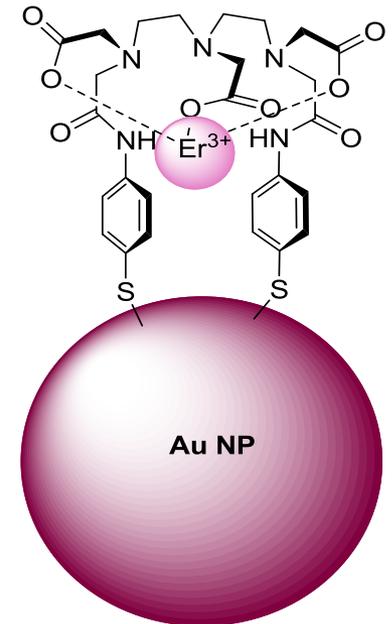


⇒ Croisement des techniques possibles :



⇒ Elaboration de nouveaux moyens de dopages :

- ⇒ Synthèses de nouveaux chélates.
- ⇒ Nanoparticules.

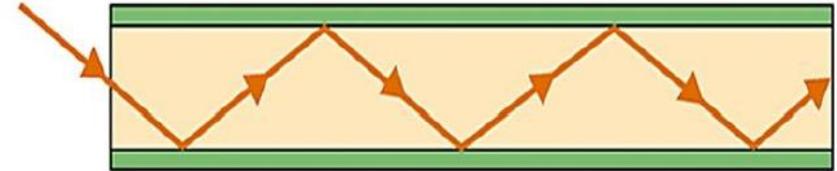


Complexe d'Er greffé à une NP d'Au

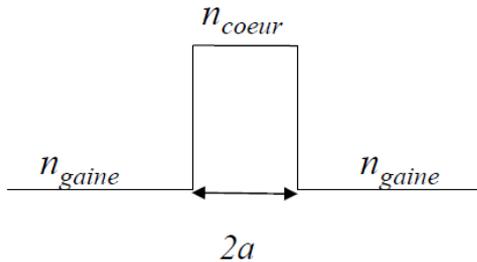
Fibres conventionnelles : mécanisme de guidage

Mécanismes de guidage

- ⇒ Réflexion totale à l'interface cœur/gaine ⇒ Réflexion totale interne (RTI).
- ⇒ Nécessite que $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine}}$



Fibre à saut d'indice



Fibre à gradient d'indice

A cross-sectional diagram of a graded-index fiber. The core has a parabolic refractive index profile, starting at n_1 at the center and decreasing to $n_2 = n_{\text{gaine}}$ at the edges. The core width is $2a$.
$$n^2(r) = n_1^2 \left(1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right) \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

Fabrication de la fibre correspondante

- ⇒ Réalisation d'une préforme (cf. approches classiques) = homothétie de la fibre.
- ⇒ Tirage en fibre optique.

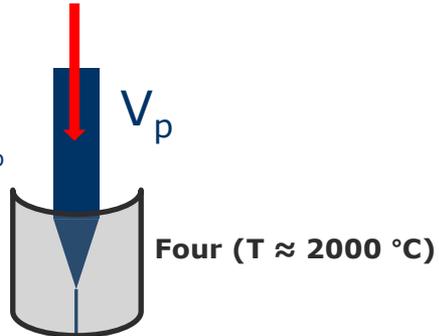
Fibres conventionnelles : fabrication

Conservation de la matière :

$$\phi_f^2 \times V_f = \phi_p^2 \times V_p$$

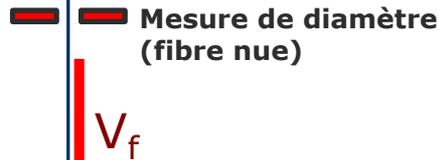
Préforme :

- Diamètre ϕ_p
- Vitesse V_p



Fibre :

- Diamètre ϕ_f
- Vitesse V_f



Ordres de grandeur :

- ϕ_p : quelques dizaines de mm
- ϕ_f : 125 μm
- V_p : 3 mm/min
- V_f : 1000 m/min
- Taille de la tour : 15-20 m

Four résistif graphite

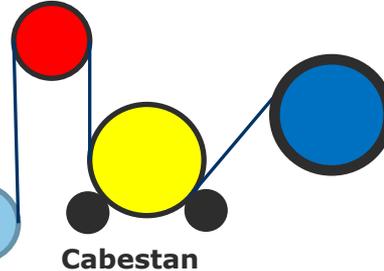
Application revêtement

**Polymérisation
Réticulation
(UV, four)**

**Mesure de diamètre
(fibre revêtue)**

**Poulies
de renvoi**

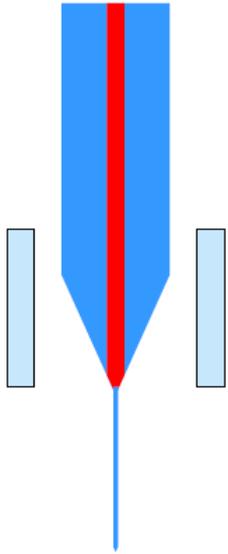
Mesure de tension de fibrage



Mécanismes d'entraînement de la fibre

Fibres conventionnelles : fabrication

Alternative utilisée sur la plateforme : méthode rod in tube



Cœur = matériau étiré à caractériser
Tube = gaine d'indice connu

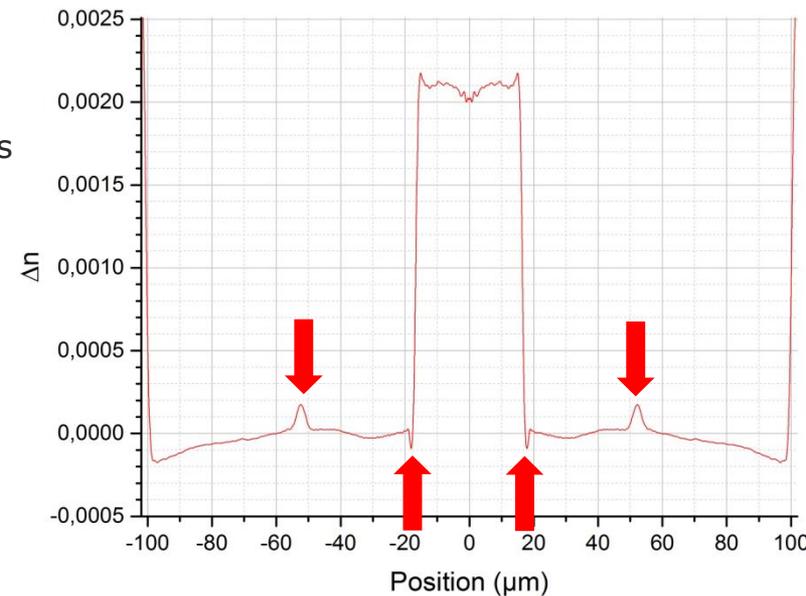
Avantages :

- Très flexible en termes de diamètres.
- Réalisation rapides de fibres par manchonnages.
- **Caractérisations rapides des matériaux élaborés :**
 - *Pertes, indice, effets de fibrages (tension)*
 - *Photoluminescence, efficacité laser, comportement modal...*

Inconvénients :

- Structure basique.
- Pertes et artefacts d'indice aux interfaces

⇒ **Méthode très utilisée en première approche**

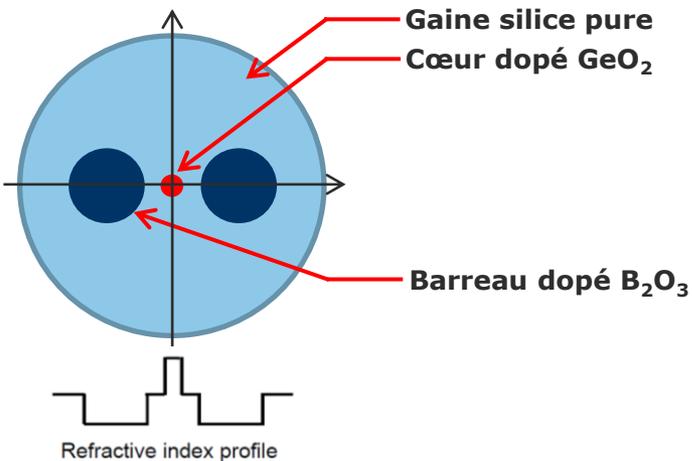


Contraintes et histoire thermique

Effets des dopants sur les propriétés mécaniques :

- Augmentation de l'indice avec la température (dépend de la composition du verre).
- Modification des propriétés thermomécaniques du verre (coefficient d'expansion thermique).

Exemple de la fibre Panda :



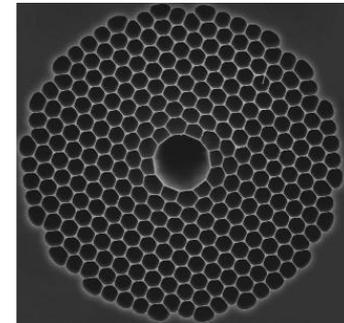
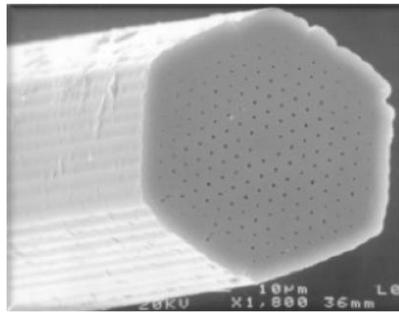
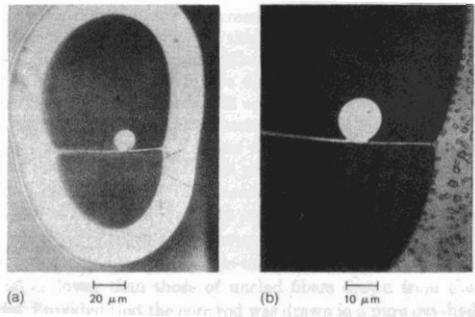
- ⇒ Préforme MCVD percée.
- ⇒ Introduction de 2 barreaux dopés Bore selon un axe de polarisation.
- ⇒ Dopage B₂O₃ ⇒ augmentation du coefficient thermique d'expansion.
- ⇒ Rétractation plus importante durant le fibrage.
- ⇒ Génération d'un stress ⇒ biréfringence.

Tension au fibrage :

- ⇒ Ultime variable d'ajustement de l'indice au fibrage.
- ⇒ Contrôle de la tension via la température.
- ⇒ Température élevée ⇒ faible tension.
- ⇒ Fortes contraintes induites à fortes tensions.
- ⇒ Contrôle très fin de l'indice.

Fibres optiques micro-structurées (FOM)

- 1974** Première réalisation d'une fibre air/silice (Bell labs).
- 1987** Description de l'effet de bande interdite photonique.
- 1996** Première réalisation d'une fibre micro-structurée (Université Bath).
- 1998** Première fibre à bandes interdites photonique (Université Bath).
- 1997-2003** Développement d'outils de modélisation adaptés.
- 1999-2004** Arrivée de nombreux acteurs académiques et industriels.
- depuis 2005** Utilisation industrielle de fibres micro-structurées.



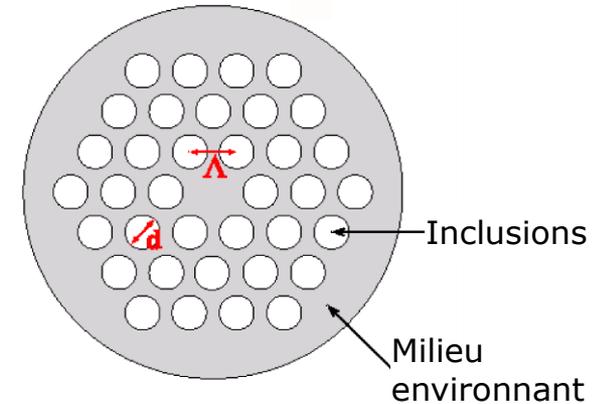
L'idée initiale (début des années 1990) était de transposer le concept de bandes interdites au domaine de la photonique.

FOM : caractéristiques et propriétés de guidage

Caractéristiques :

- le diamètre d des inclusions de la gaine.
- l'espacement Λ entre deux inclusions.
- le nombre N de couronnes.
- au moins deux indices n_b et n_h des inclusions et du milieu environnant.

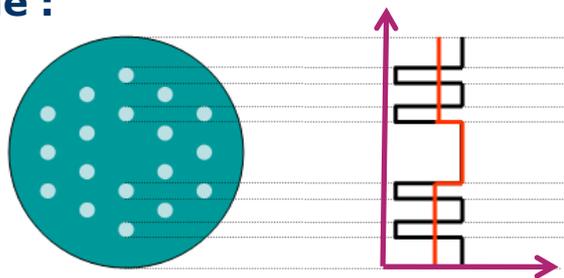
mais aussi : la nature, la forme des inclusions, la symétrie du réseau...



Avantages :

- Permet l'incorporation de matériaux dopés, même de bas indice.
- L'espace des paramètres géométriques est immense.
- Les contrastes d'indice possibles varient de moins de 1% à 300% (air/silice).

Guidage :



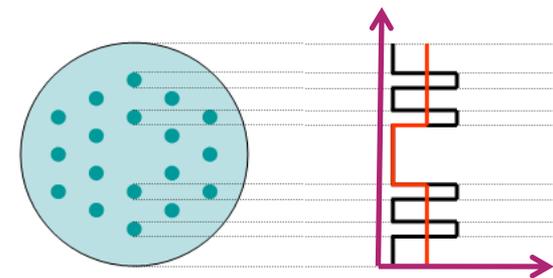
Coupe transverse

Indice de réfraction

Exact (en noir)
Equivalent (en rouge)

$$n_{\text{coeur}} > n^{\text{moyen}}_{\text{gaine}}$$

⇒ guidage par RTI modifiée (RTIM)



Coupe transverse

Indice de réfraction

Exact (en noir)
Equivalent (en rouge)

$$n_{\text{coeur}} < n^{\text{moyen}}_{\text{gaine}}$$

⇒ guidage par Bande Interdite Photonique (BIP)

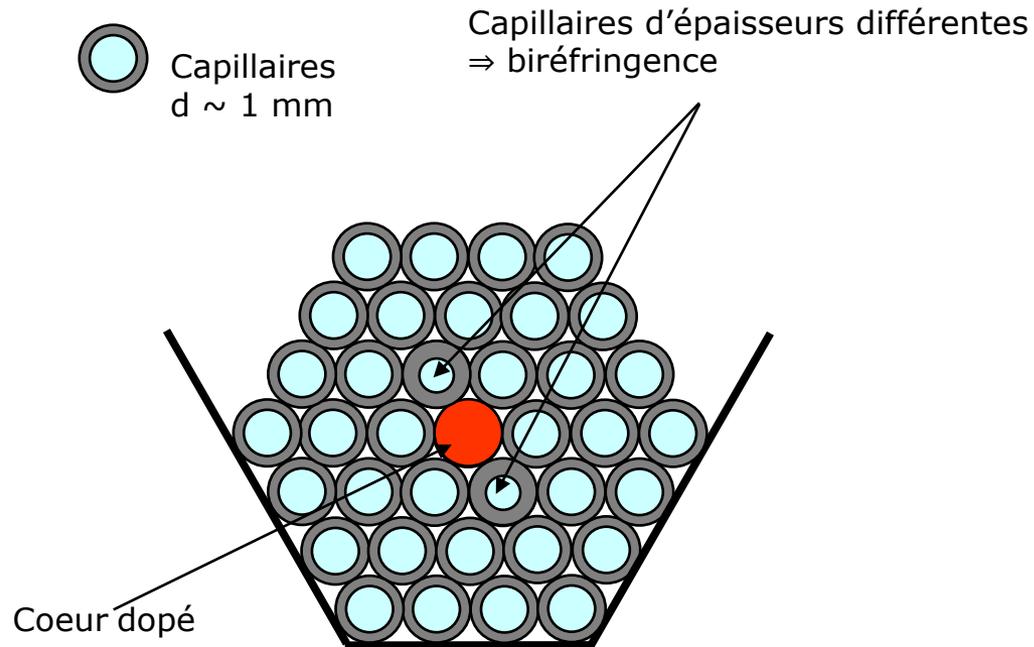
FOM : Fabrication

Méthodes de fabrications de FOM :

- Dépendent du design souhaité (géométrie et matériau).
- Plateforme de fabrication.
- Silice : méthode la plus répandue = Assemblage et étirage (Stack and draw).

Stack and draw :

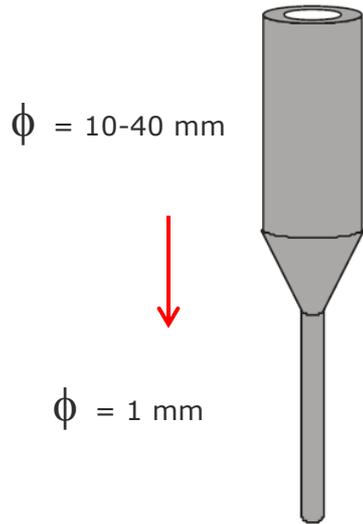
Principe :



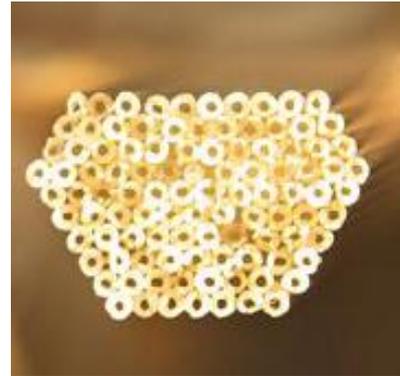
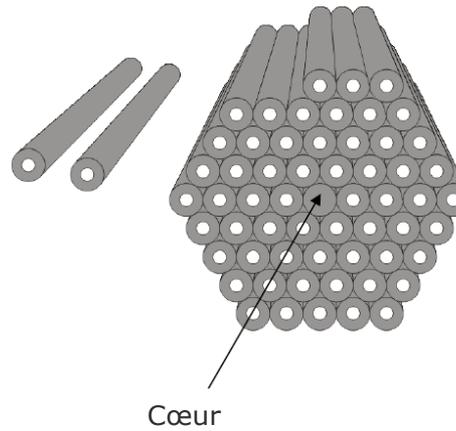
FOM : Fabrication

Mise en œuvre :

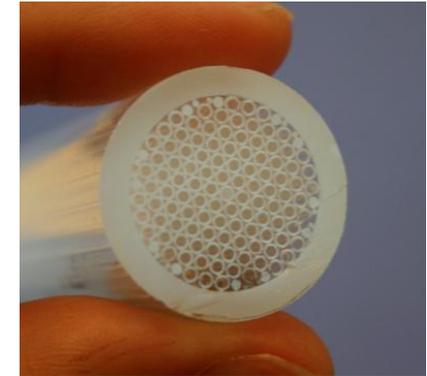
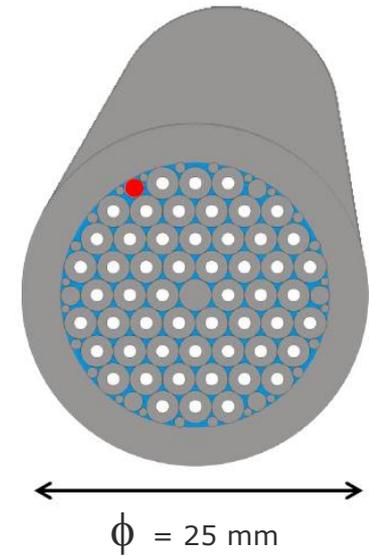
Étirage de barreaux ou tubes constituant le maillage



Assemblage des capillaires et du cœur



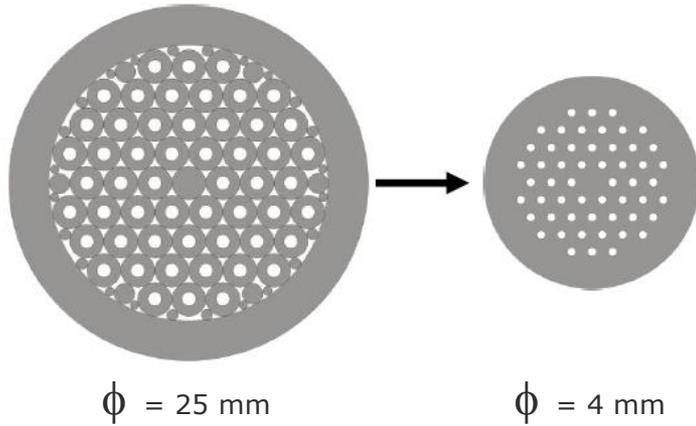
Insertion dans un tube manchon et ajustement avant étirage de l'ensemble



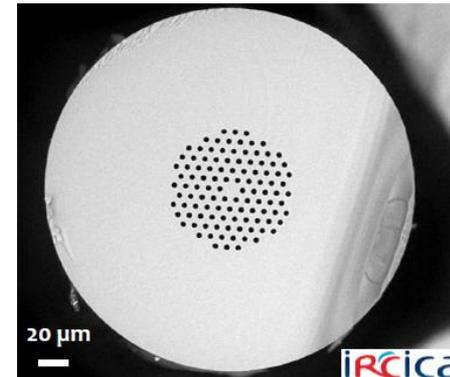
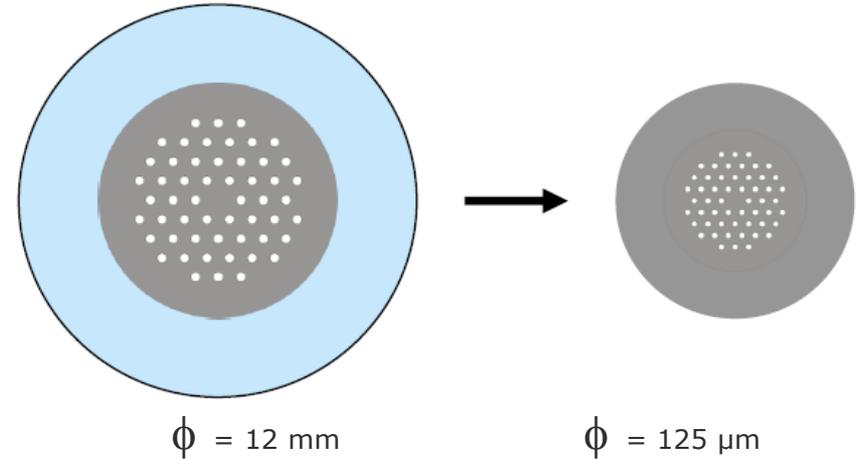
FOM : Fabrication

Mise en œuvre :

Etirage du « stack » :
Préforme primaire microstructurée



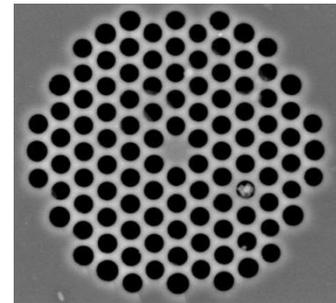
Manchonnage :
Fibrage d'une préforme secondaire



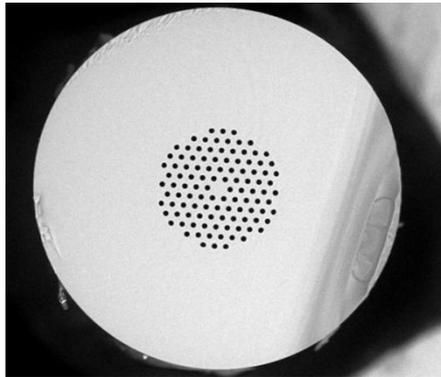
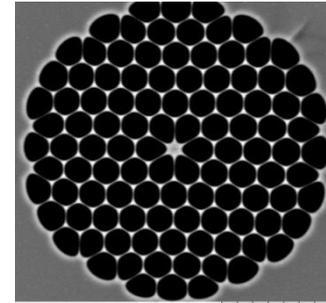
FOM : Exemples de réalisation

⇒ Réalisation de fibres air/silice.

- ⇒ Grande flexibilité sur le contrôle de l'indice en jouant sur la taille des trous d'air.
- ⇒ Maintien d'un ΔP dans les trous durant le fibrage.
- ⇒ Modification de l'indice moyen de gaine.
- ⇒ Fibres à cœur creux.

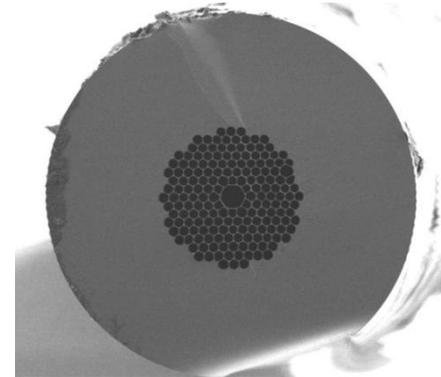


Augmentation ΔP



Cœurs dopés :

- ⇒ Matériaux issus de la centrale.
- ⇒ Dopages passifs.
- ⇒ Dopages actifs.



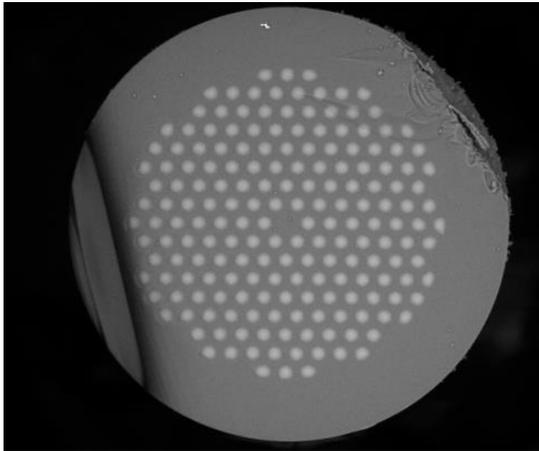
Cœurs creux :

- ⇒ Transport de puissance.
- ⇒ Interaction fluide/lumière exacerbée
- ⇒ Capteurs, lasers, métrologie....

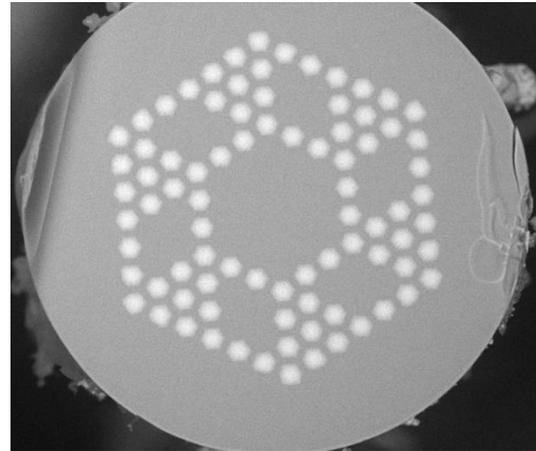
FOM : Exemples de réalisation

⇒ Réalisation de fibres toute solide.

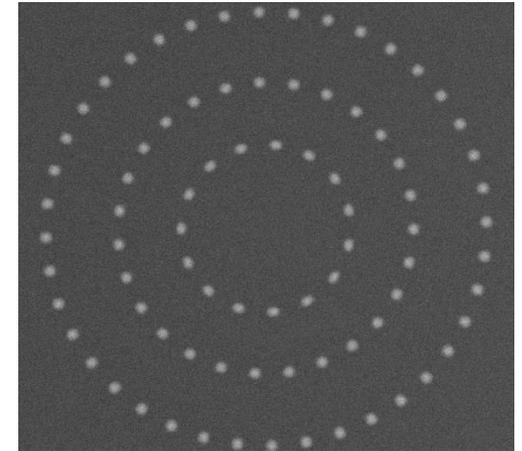
- ⇒ Possibilité de doper activement le cœur (Yb, Er....) ⇒ matériaux actifs de la centrale.
- ⇒ Possibilité de rendre le cœur photosensible ⇒ photo-inscription de réseaux de Bragg.
- ⇒ Profiter des effets non-linéaires de la silice pure ou dopée (Ge, P, nanoparticules ...).



Fibre BIP 2D



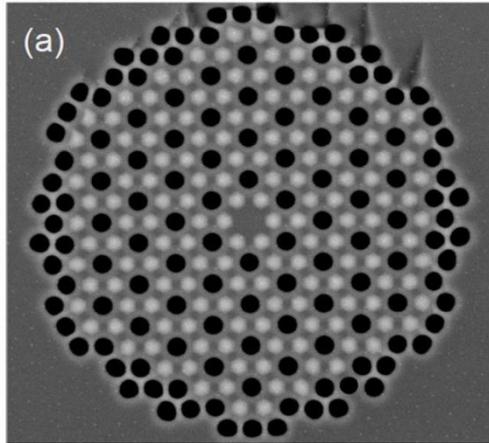
**Fibre BIP 2D
hétérostructurée**



Fibre Bragg pixelisée

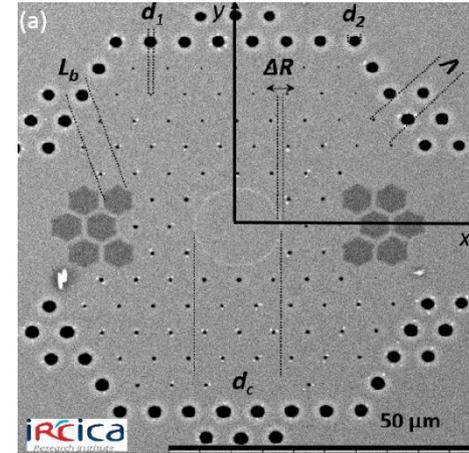
FOM : Exemples de réalisation

⇒ Réalisation de fibres hybrides.



Fibre hybride type (I)

- ⇒ Réductions des pertes des modes guidés par BIP.
- ⇒ Guidage par BIP à courtes λ et par RTIM à grandes λ .



Fibre à mode plat

- ⇒ Structuration de l'indice de gaine.
- ⇒ Différentes tailles de trous d'air.
- ⇒ Réalisation d'un cœur spécifique (cf. OVD).
- ⇒ Micro-structuration des contraintes.
- ⇒ Introduction de 2 x 6 barreaux dopés Bore.
- ⇒ Travail sur versions actives du cœur.

Conclusion

⇒ **FIBERTECH LILLE** une plateforme originale pour :



- ⇒ L'élaboration de matériaux à visée photonique.
- ⇒ Développements d'approches originales de fabrication silice dopée.
- ⇒ Méthodes complémentaires.
- ⇒ Développements continus de nouvelles voies de dopages (NPs, chélates...).

Capable d'alimenter en matériaux spécifiques

- ⇒ Une plateforme complète d'équipements de fibrage.
- ⇒ Forte d'une expérience de plus de 15 ans dans le domaine.
- ⇒ Des méthodes et procédés de fabrication matures.

⇒ **Ensemble unique en France au cœur de nombreux projets :**

- ⇒ **Nombreuses ANRs.**
- ⇒ **CPER Photonics 4 Society.**
- ⇒ **Projet Structurant des Pôles de Compétitivité : Filière Française de Fibres optiques pour les lasers de l'industrie du Futur.**

Procédés de synthèse de verres de silice dopée et de fibres optiques micro-structurées au sein de la plateforme FiberTech Lille

Cassez A., Bigot L., Bouwmans G., El Hamzaoui H., Bouazaoui M., Kinowski C., Robbe O., Bernard R., Douay M.

Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules

Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée

Université de Lille Sciences et Technologies – CNRS