



Fibres optiques actives et passives

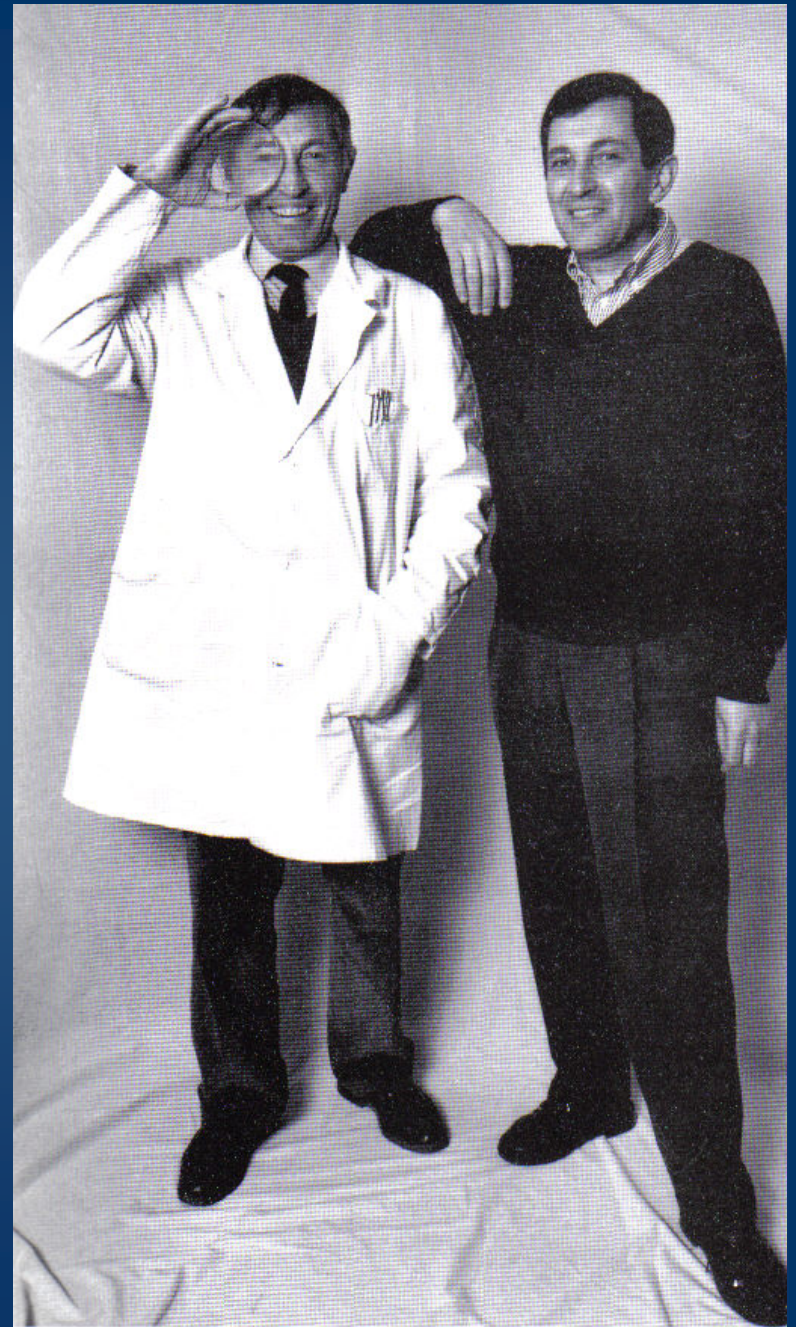
Marcel Poulain

Université de Rennes 1



Sommaire :

- 1 Introduction**
- 2 Aspects fondamentaux**
- 3 Fibres passives**
- 4 Interférométrie astronom.**
- 5 Fibres actives**
- 6 Conclusion**





INTRODUCTION



Fibres Optiques: une concept ancien ...



Les Egyptiens, les Grecs, les Vénitiens savaient “filer le verre”



En 1854 John Tyndall établit le principe de la réflexion totale



La transmission de lumière à travers une fibre de verre émergea avec l'éclairage électrique (“fontaines de lumière”).



Les règles simples de l'optique géométrique imposent la géométrie “cœur-gaine” pour un guidage optimum



La longueur des fibres est limitée par les pertes optiques.

Avec des pionniers



Divers brevets sont déposés au XX^{ème} siècle



En 1967 N. S. Kapany publie un livre intitulé:
Fiber Optics: principle and applications



Il y décrit les principales applications actuelles,
les capteurs à fibres optiques, les fibres de chalcogénures,
la thermographie infrarouge



Et même l'amplification optique!

Un concept qui allait révolutionner les télécoms



Parmi d'autres, Corning entame des recherches sur les fibres optiques de silice vers 1965



L'objectif de pertes inférieures à 20 dB/km (80% de transmission sur 50 m) apparaît utopique



Cet objectif est d'abord atteint avec la CVD (1970) puis pulvérisé (<0.2 dB/km) avec la MOCVD (1980).



La technologie des fibres optiques autorise des débits d'information énormes sur des distances considérables

Et devenir un enjeu industriel majeur...



Des liaisons transocéaniques



L'amplification optique permet de régénérer le signal



Les besoins explosent avec la transmission d'images et avec internet



Les réseaux se développent et s'interconnectent à tous les niveaux: sous marin, continental, urbain, local...



Les capacités de production excèdent les dizaines de millions de km

...jusqu'à l'effondrement de la bulle télécom



Crise des télécoms en 2001: les marchés s'effondrent!



Les techniques concurrentes (co-ax, sans fil) améliorent leurs performances



Les réseaux se trouvent en surcapacité. Les besoins avaient été surestimés...



Les sites de production ferment, les faillites se succèdent.



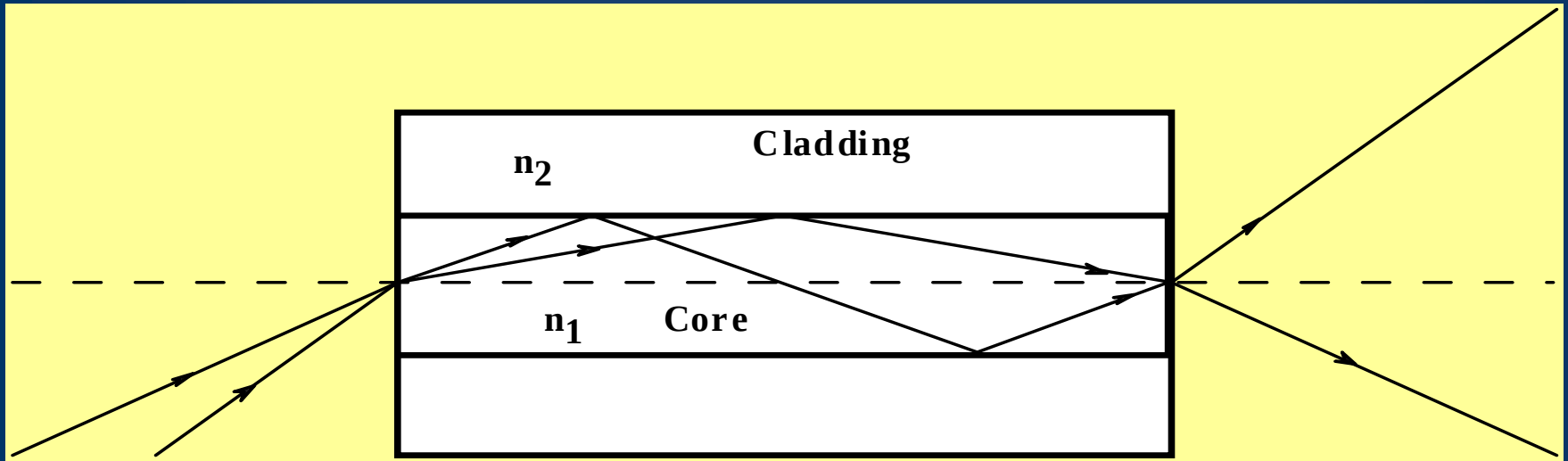
Et pourtant les fibres optiques conservent un bel avenir...



ASPECTS FONDAMENTAUX



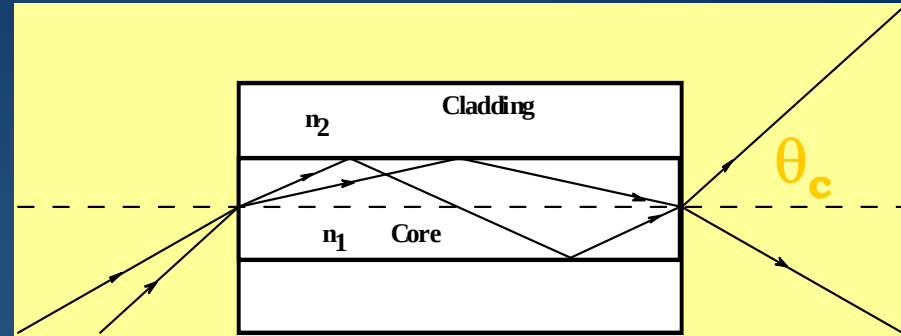
Structure d'une fibre



La fibre comporte deux verres d'indices différents: n_1 (cœur) $>$ n_2 (gaine). Le guidage s'effectue par réflexion totale à l'interface cœur/gaine

Caractéristiques d'une fibre

L'angle d'entrée/sortie maximal θ_c définit ON, l'ouverture numérique:

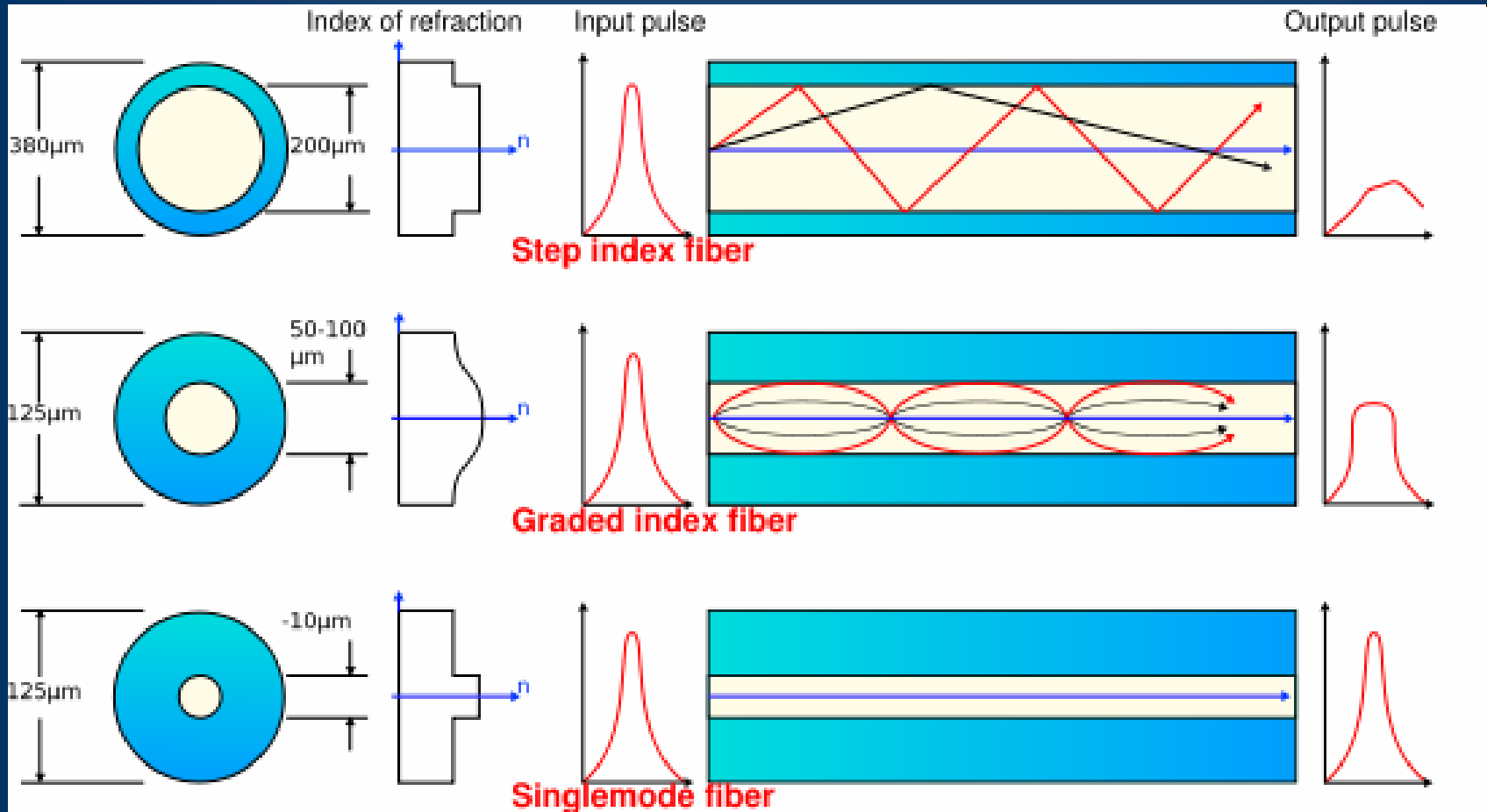


$$ON = \sin\theta_c = (n_2^2 - n_1^2)^{1/2}$$

Un nombre limité de rayons peuvent se propager. Ils correspondent à des modes de propagations.

Si le cœur de la fibre est assez petit, un seul mode est possible. La fibre est alors monomode.

Types de Fibres



Autres types de fibres

Multimode

Mono mode

A maintien de polarization

Faible biréfringence

Dopée aux terres rares

Double-gaine

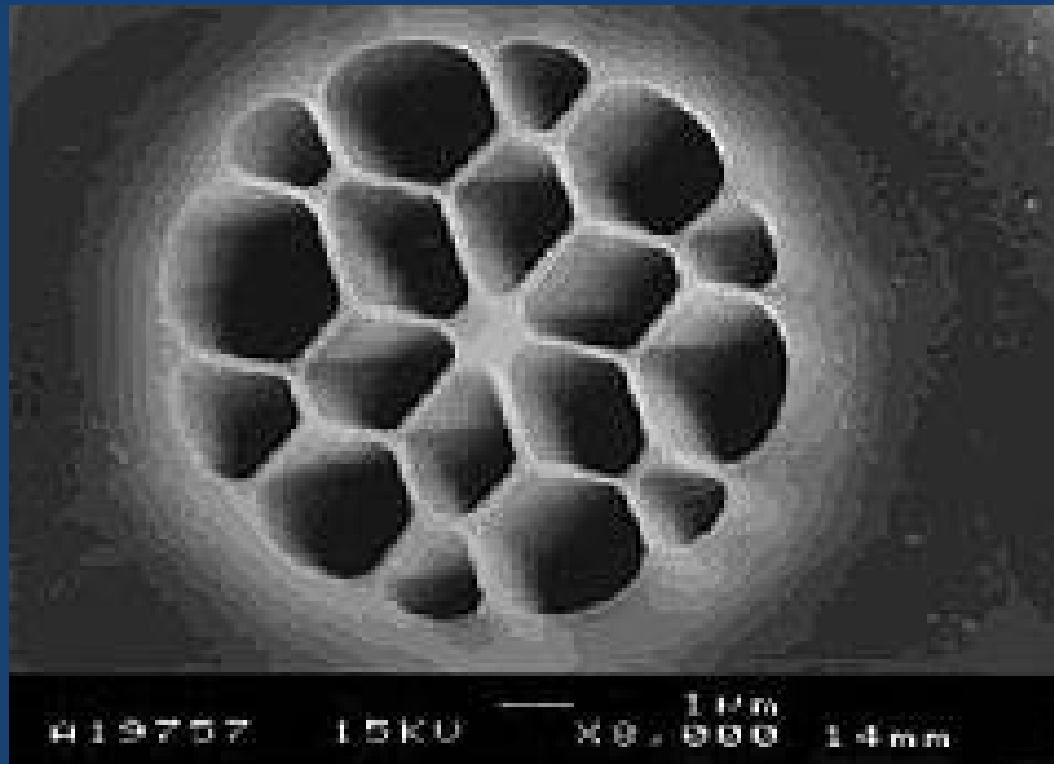
En forme de D,

Ring-core (M-shaped)

Forte Ouverture Numérique

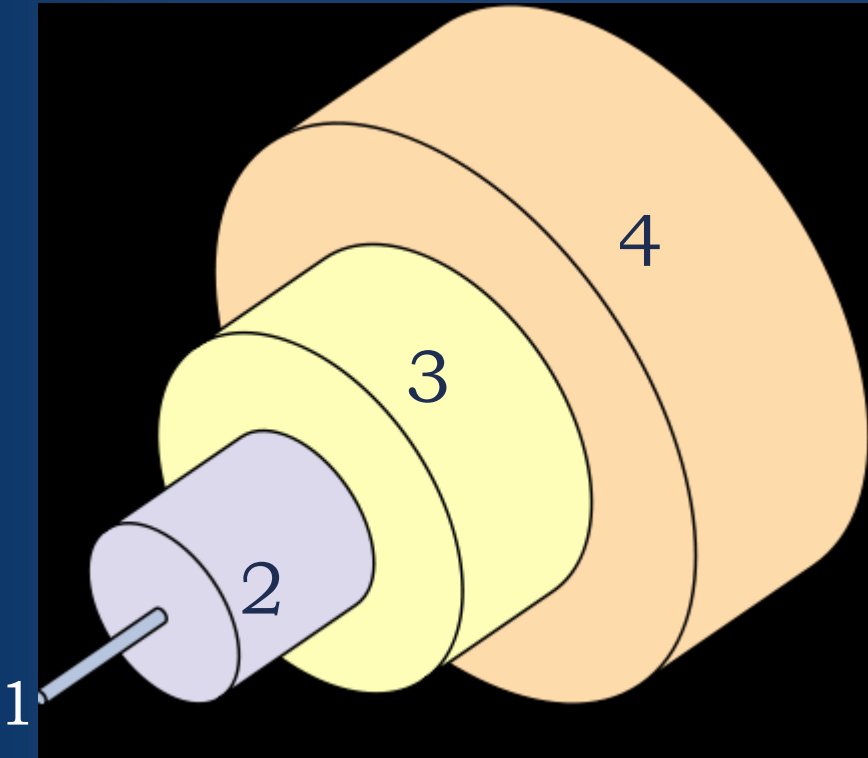


Fibres microstructurées



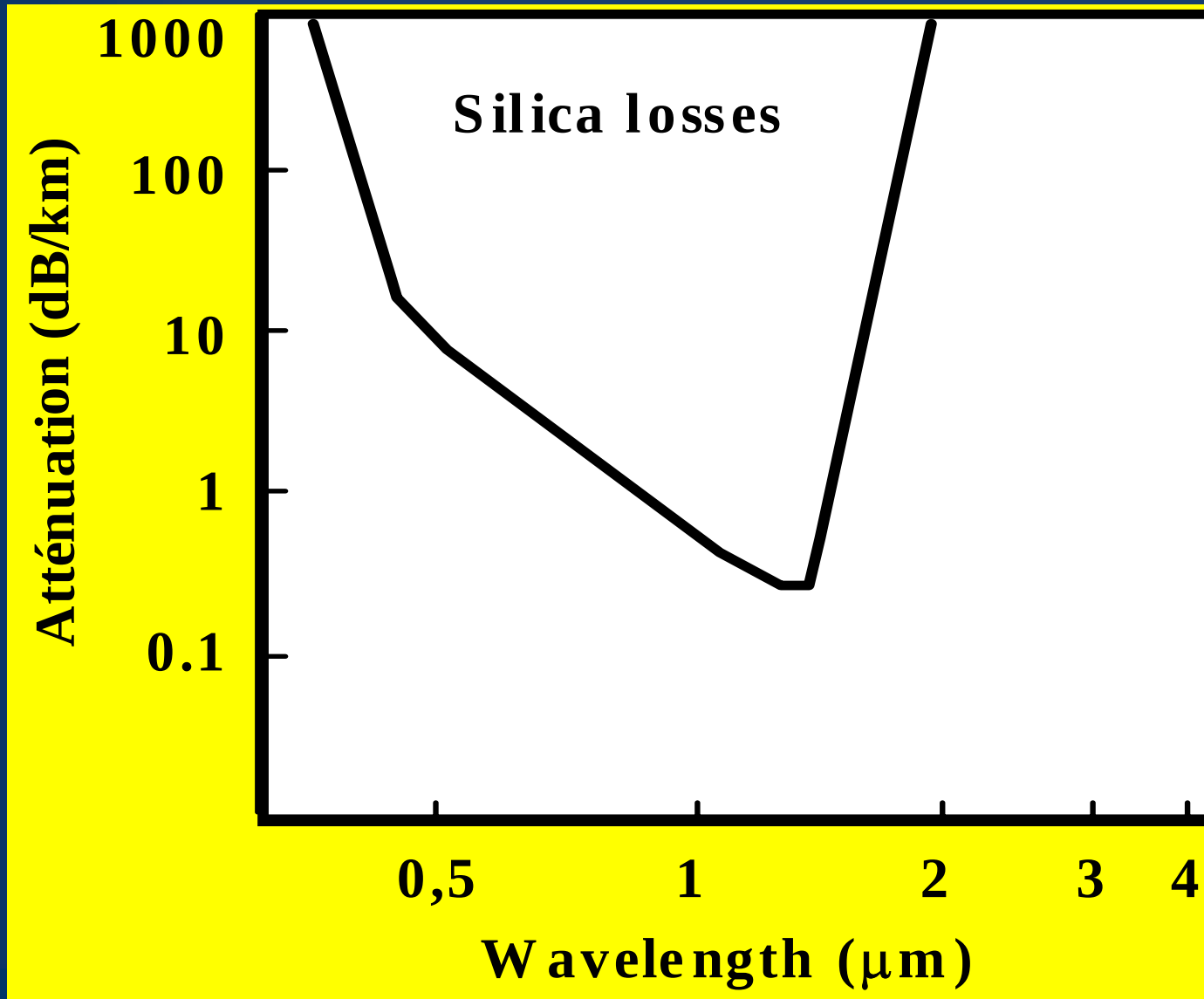
L'introduction de cavités dans la fibre permet à certains modes de se propager dans le coeur

Structure d'une fibre télécom



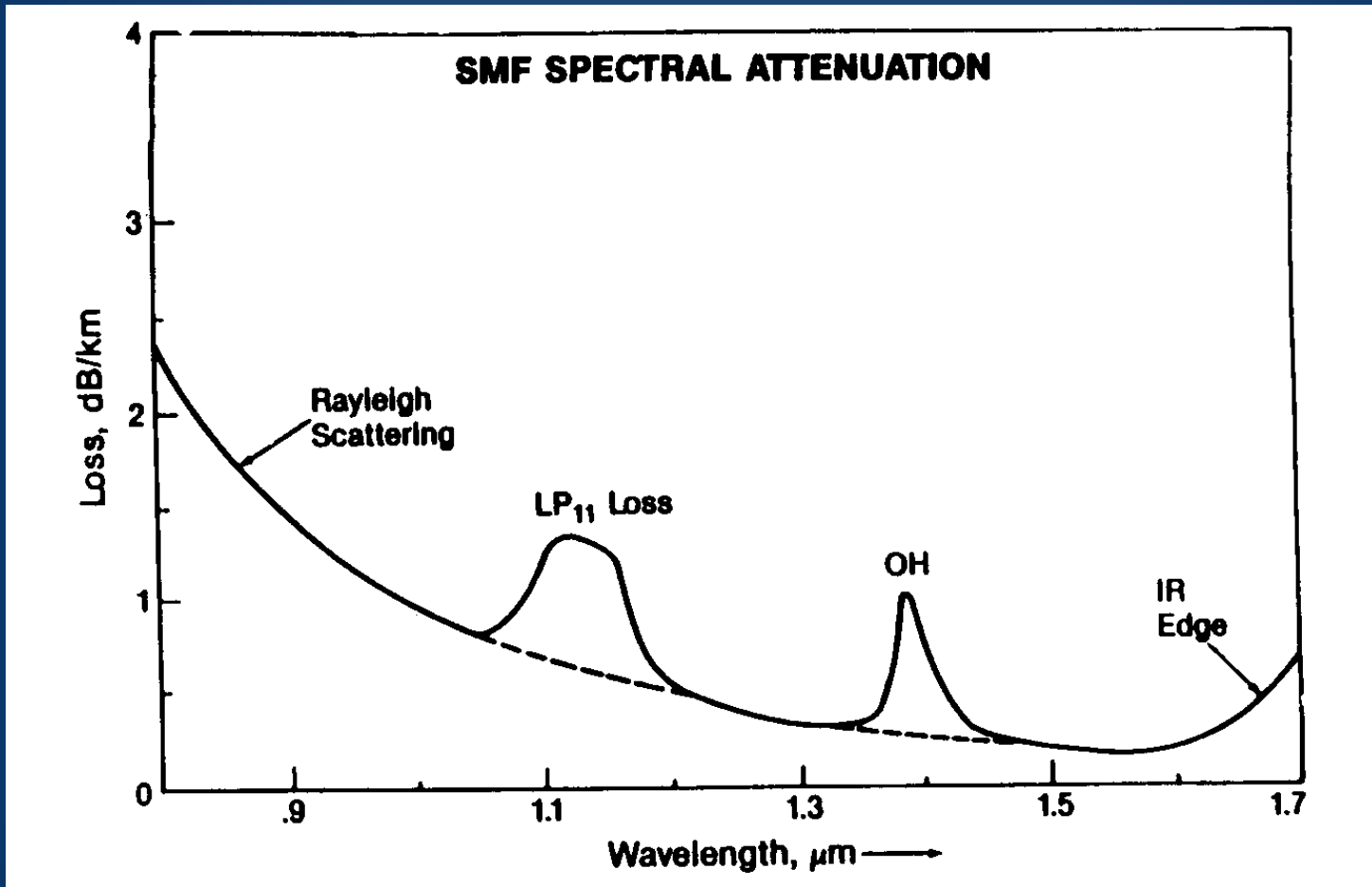
1 Cœur (5-10 μm) 2 Gaine optique (125 μm)
3 et 4 revêtements (mou et dur)

Pertes Optiques théoriques: Silice



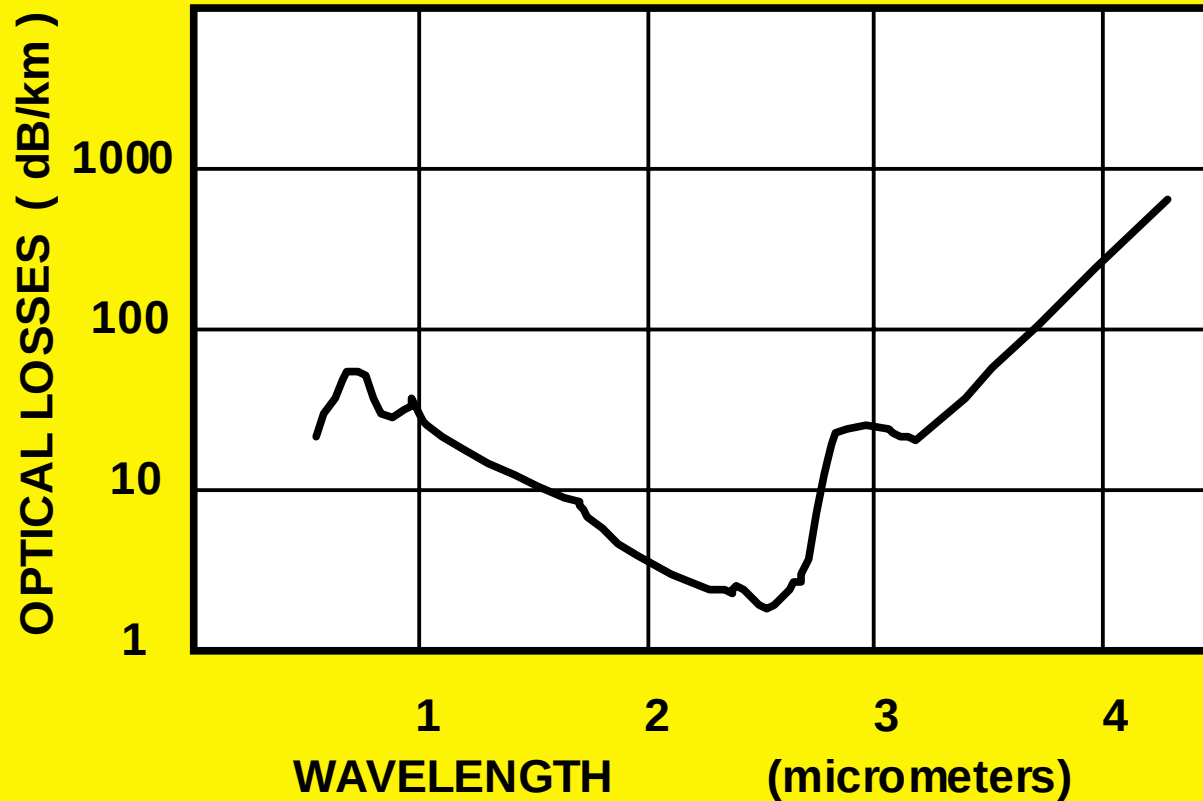
Transmission optique réelle

Courbe typique d'une fibre de silice monomode



Transmission optique: verre fluoré

Pertes optiques typiques d'une fibre multimode



Transmission optique: fibres

Pertes optiques typiques d'une fibre monomode

Ø coeur / Ø gaine : 6.5 / 125 µm

λ de coupure : 1.9 µm

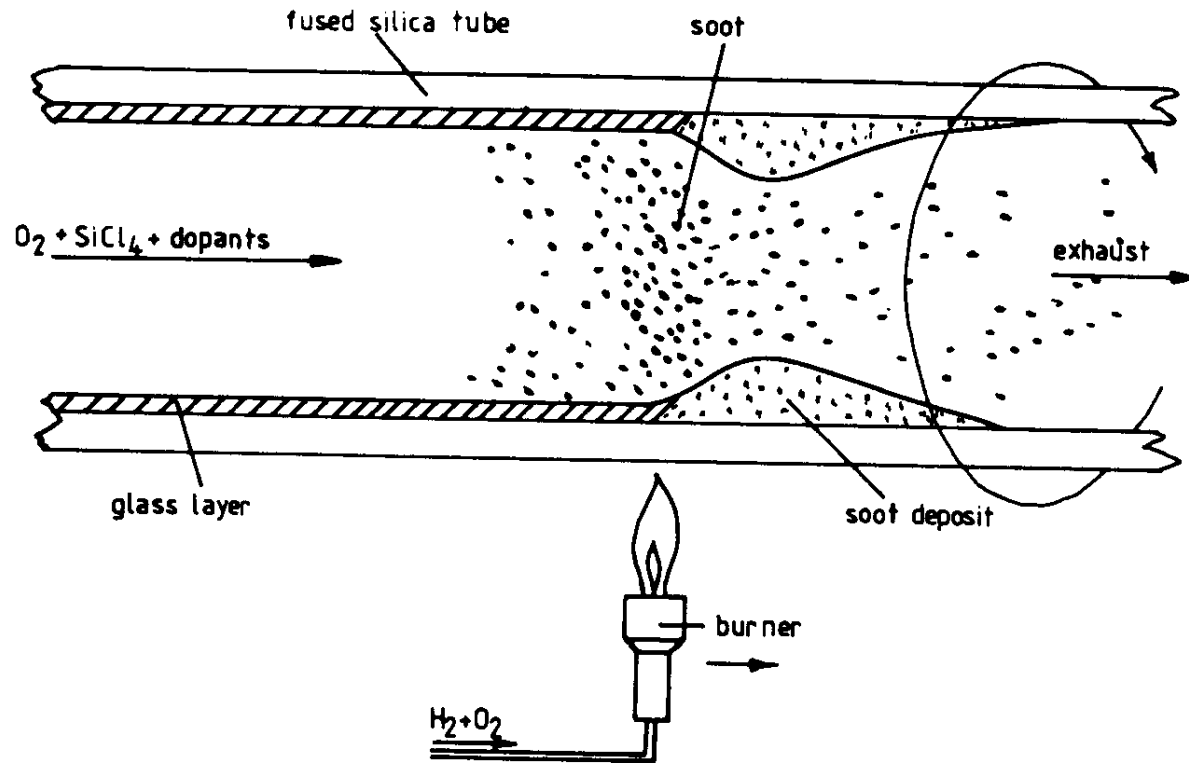
Atténuation à 2.5 µm : 5 dB / km

Atténuation à 3.2 µm : 20 dB / km

IRguide -1 SM[1.9] 6.5/125



Préformes de silice par MCVD



Fibres en verre fluoré

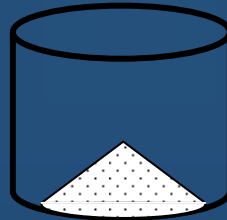
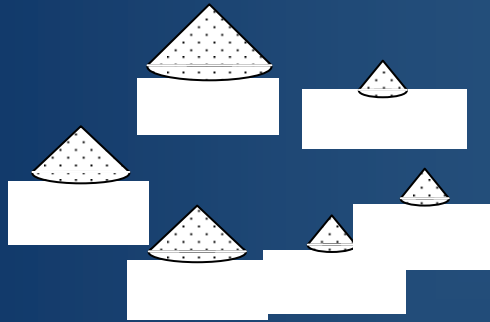
Poudres

Fusion

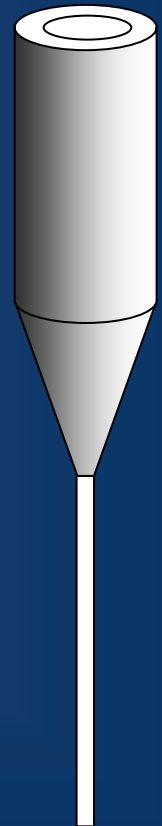
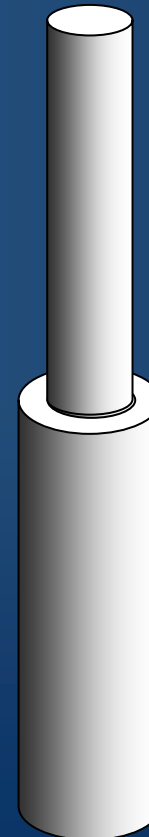
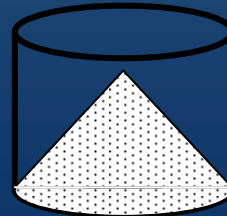
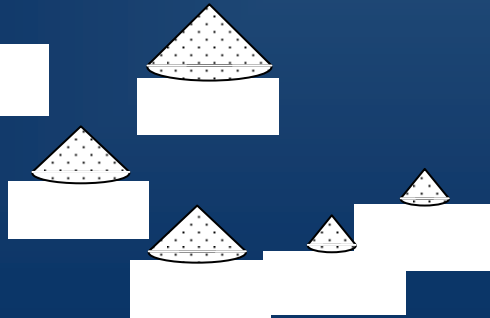
Préforme

Fibre

Coeur



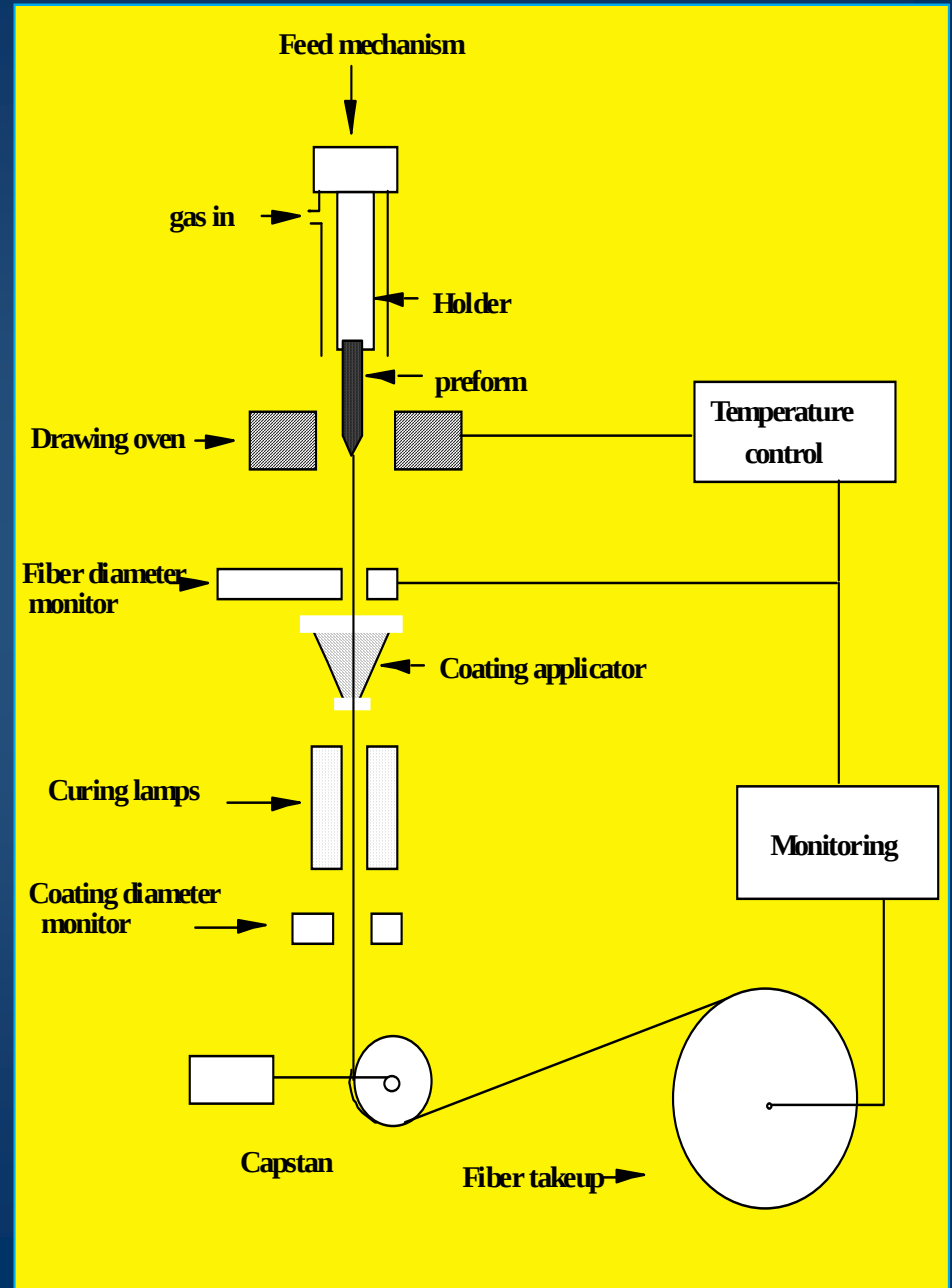
Gaine



Fibrage

On tire des fibres à partir de préformes ultrapures en ambiance très propre et très sèche.

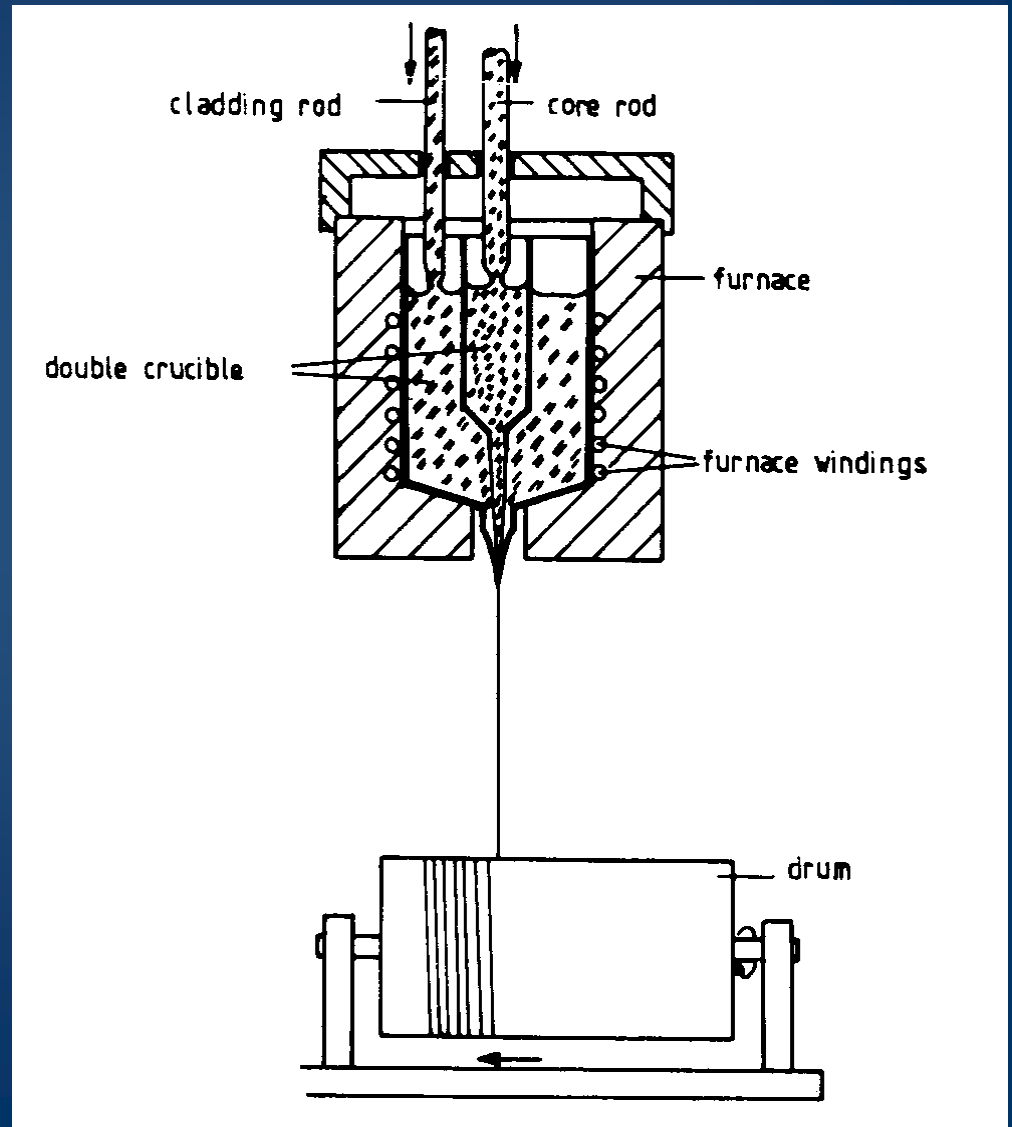
C'est la qualité de la préforme qui détermine dans une très large mesure les caractéristiques optiques et physiques de la fibre.

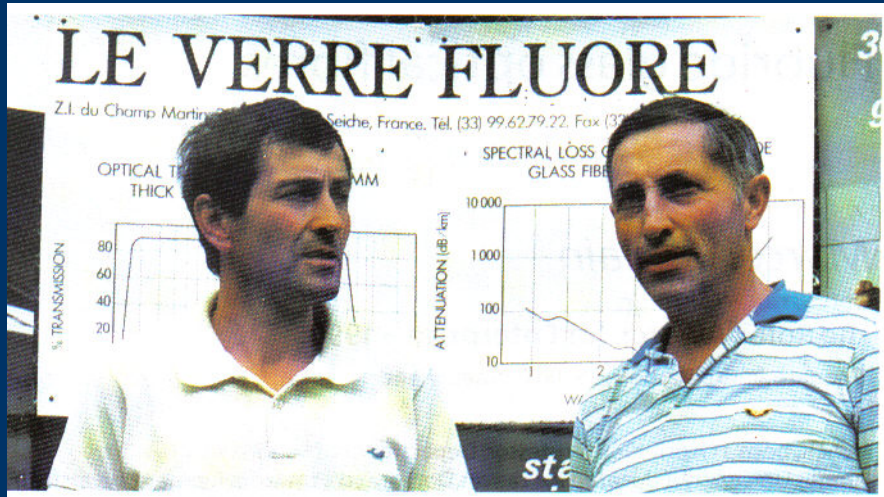


Fibrage avec un double creuset

La méthode du double creuset s'applique aux verres à température de fusion modérée.

Elle convient aux verres d'oxydes, de chalcogénures, mais s'applique mal aux fluorures car le contrôle de la viscosité est difficile.





APPLICATIONS

Champs d'applications



L'application majeure concerne les télécommunications: la fibre sert à transporter un signal binaire.



Avec la diminution du prix des fibres, de nombreuses autres applications ont émergé.



On distingue celles où les fibres servent seulement à véhiculer un signal lumineux (fibres “passives”)



Et celles où la fibre génère un nouveau signal optique: Ce sont alors des fibres “actives”;

Télécommunications

(en bref)



Les principales spécifications se rapportent à l'atténuation optique, au débit et à la qualité du signal



La longueur d'onde correspond à une “bande” comprise entre 1,3 et 1,6 microns



La fibre est monomode et la dispersion totale doit être nulle pour un rapport signal/bruit optimum



On réalise un multiplexage en longueur d'onde pour atteindre des débits très élevés

Télécommunications

(suite)



De nombreux composants additionnels sont requis: Sources, détecteurs, modulateurs, multiplexeurs, etc...



La nécessité de régénérer le signal ou de le distribuer aboutit à la mise en oeuvre d'amplificateurs optiques



Ceux ci font appel à des fibres actives, mais aussi à des amplis “Raman” et des réseaux photoinscrits



Le vieillissement et la fiabilité des fibres et composants a fait l'objet d'études approfondies.

Applications: fibres passives



Spectroscopie à distance



Thermométrie en utilisant l'émission thermique IR



Interférométrie, capteurs à fibres



Transmission de puissance laser

Spectrométrie déportée



Principe: au lieu d'apporter l'échantillon au spectro, on va chercher le signal *in situ* et en temps réel



On utilise des fibres multimodes pour un maximiser le flux



La silice convient pour le spectre visible et proche IR



Les fibres en verre fluoré permettent d'opérer jusqu'à $5\text{ }\mu\text{m}$ et les fibres de chalcogénures au delà

Transmission de flux laser



Des puissances importantes sont transmises dans la zone de transparence. Mais les défauts sont critiques !!!



On utilise aussi des fibres multimodes pour abaisser la densité de puissance



La silice convient pour les lasers visibles (Ar) et proche IR
En particulier le YAG:Nd ($1.06\ \mu\text{m}$) et YAG:Ho ($2\ \mu\text{m}$)



Les fibres en germanate et en verre fluoré sont adaptées au laser YAG:Er ($2,94\ \mu\text{m}$) pour usage médical et aux plus grandes longueurs d'onde.

Capteurs à fibres optiques



Le concept de mesure d'une grandeur physique à partir du signal optique d'une fibre est assez ancien (cf Kapany)



On peut agir sur l'intensité du signal (modulation d'intensité)



Des capteurs "chimiques" utilisent des absorptions ou émissions caractéristiques



On peut aussi recourir à l'interférométrie

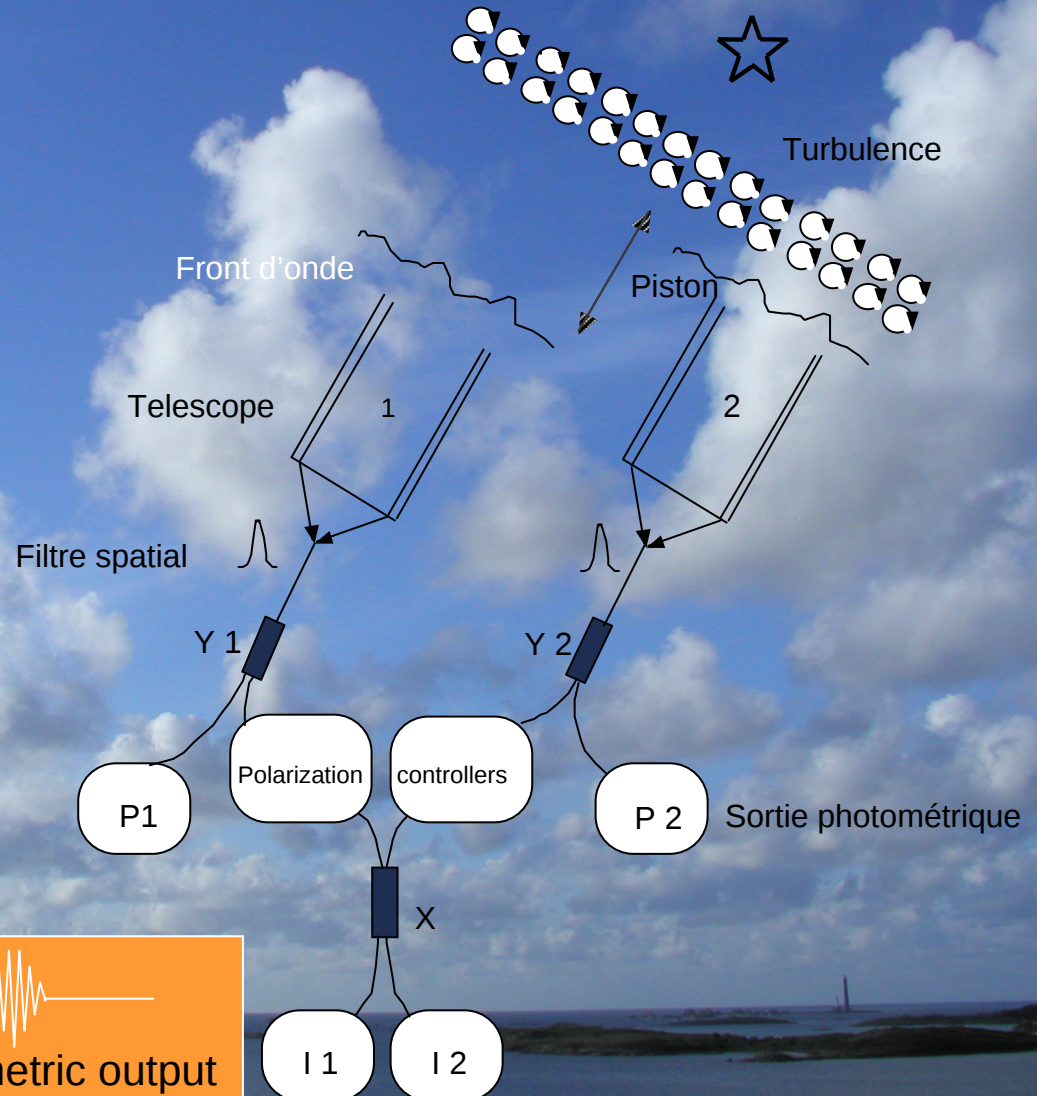


Interférométrie Astronomique

Interférométrie astrale

Le programme FLUOR -1

Combinaison de faisceaux
à large bande [bande K :
2-2.4 μm]



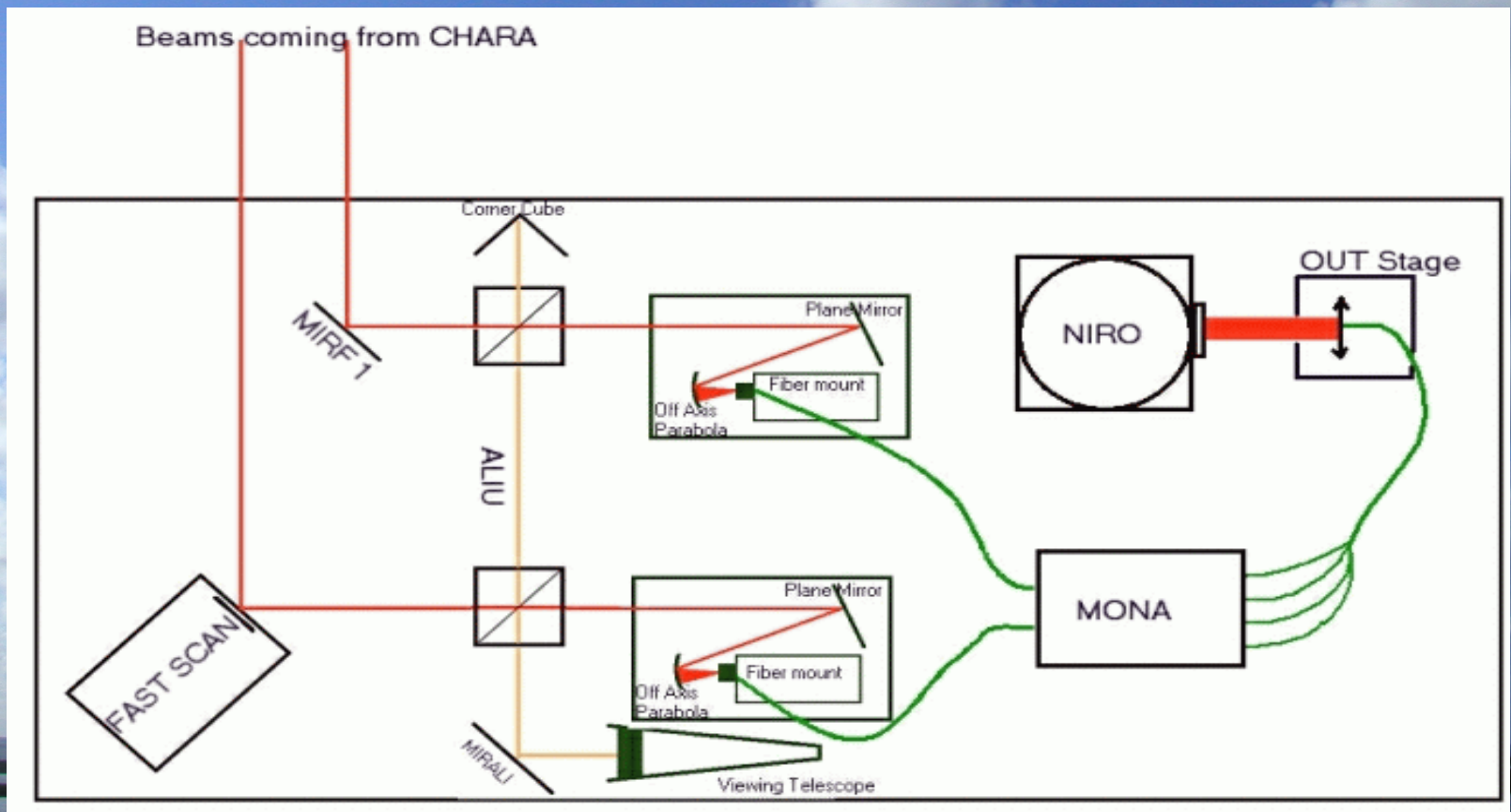
Application des fibres

Le projet FLUOR - 2

(Fiber Link Unit for Optical Recombination)

Installé au Center for High Angular Resolution Astronomy (CHARA)

Mount Wilson, California





Fibre en verre fluoré: Application The FLUOR Project-3



The four large
telescopes of the
VLT



The VLT Array on the Paranal Mountain



Application des fibres- 2

OHANA -1

Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy

Projet : recombinaison des faisceaux des 7 télescopes installés au sommet de Mauna Kea (Hawaïi) pour construire le plus grand et le plus sensible interféromètre jamais réalisé

M a u n a K e a V L T I



UKIRT - 3.5 m

Subaru- 8.3 m

Keck 1 & 2-10 m

IRTF - 6m

Gemini - 8.1m

CHFT - 3.6m

North East summit

Applications: fibres actives



Sources ASE (Emission spontanée)



Lasers fibrés



Lasers fibrés rouge, vert et bleu par “up conversion”



Amplification optique @ 1.3 , 1.4 et 1.55 μm



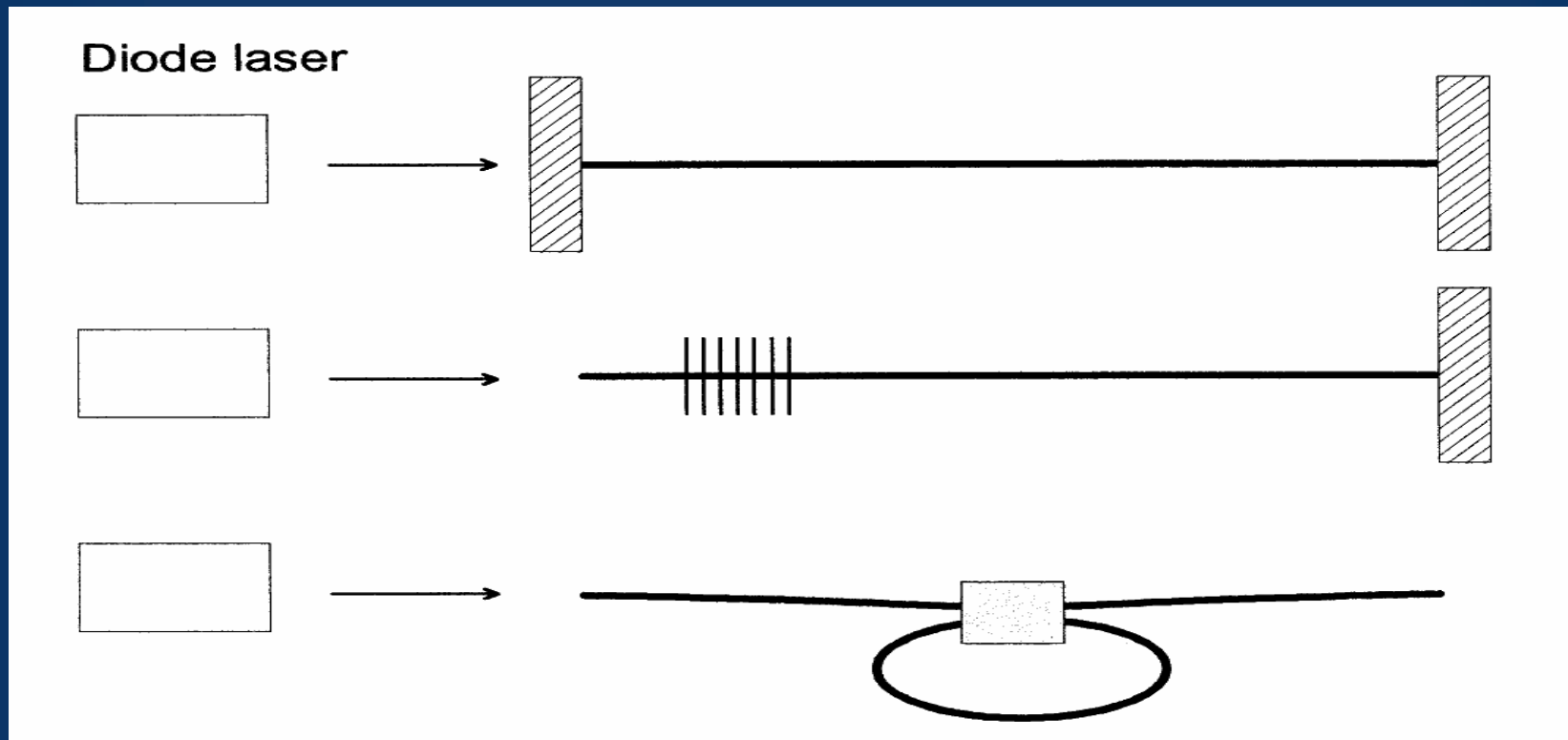
Supercontinuum et effets non linéaires

Lasers fibrés

Les lasers fibrés ont plusieurs gros avantages :

- Simples et tout solide**
- Gain élevé**
 - Faible seuil**
 - Grand rendement**
 - Faibles pertes intrinsèques**
 - Grande longueur d'interaction**
 - utilisation de transitions faibles**
 - Grande largeur de bande**
 - Accordabilité**
 - Courtes impulsions**
- Insensibilité thermique**
- Compatibilité avec les fibres et les composants optiques intégrés.**

Cavités pour lasers fibrés



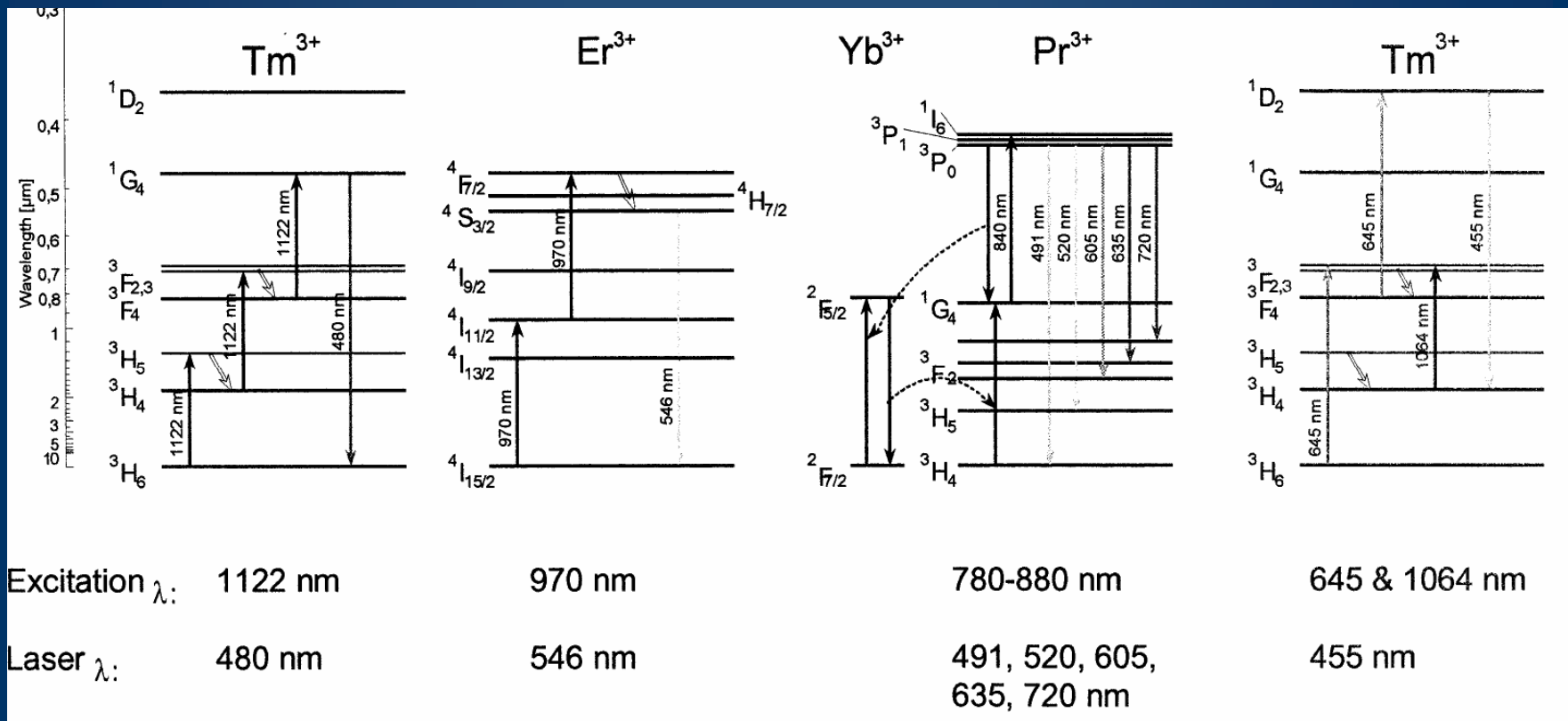
On utilise de préférence des réseaux de Bragg photoinscrits pour remplacer les miroirs.

Emission laser dans les fibres de ZBLAN :

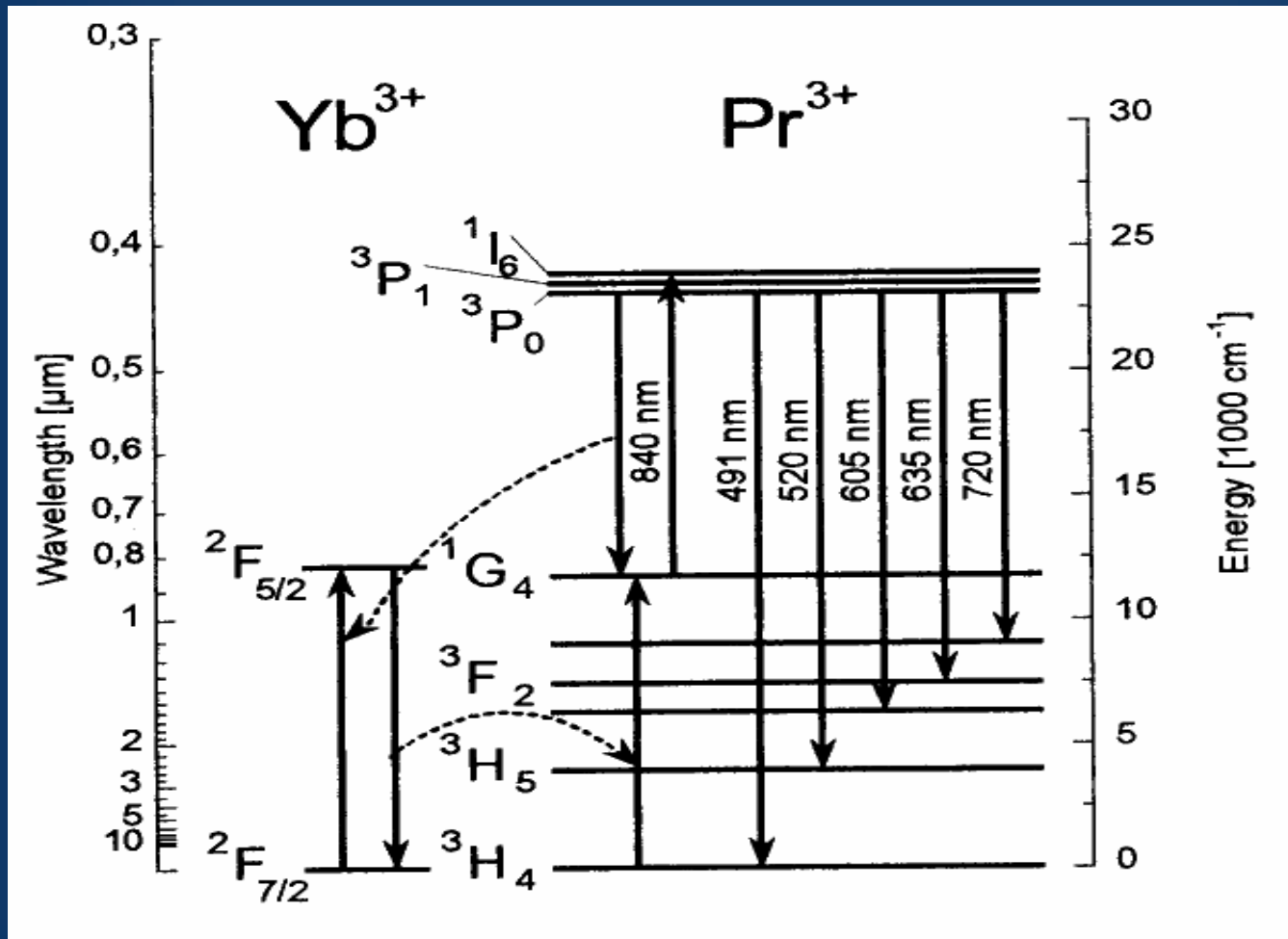
Emission laser classique par pompage à une longueur d'onde plus courte que celle d'émission. Par exemple:

Emission μm	Ln³⁺	Pump nm	Laser	
0.478	Dy	457	Ar	FSU Iena
0.575	Dy	457	Ar	FSU Iena
0.85	Er	488	Ar	FT
1.0	Er	488	Ar	FT
1.05	Nd	514	Ar	BT
1.55	Er	488	Ar	FT
1.97	Tm	795	LD	U. Southampton
2.08	Ho	488	Ar	BT
2.35	Tm	676	Kr	FT
2.7	Er	488	Ar	FT
2.78	Er	792	LD	U Illinois
2.9	Ho	640	Dye	U. Brunswick

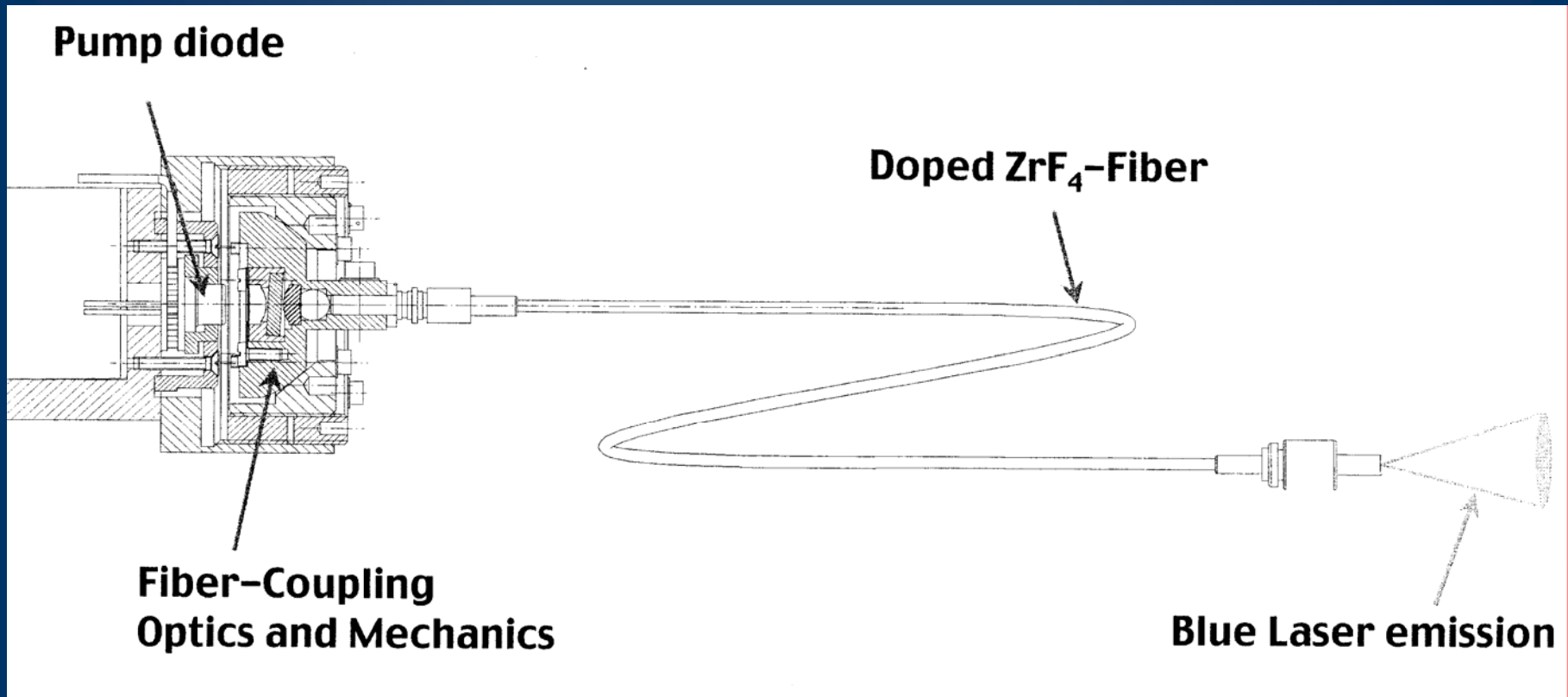
Schemas de pompage en conversion ascendante d'énergie (“up-conversion”)



Fibres co-dopées Yb / Pr



Laser fibré Pr / Yb



Amplification Optique

L'amplification optique a remplacé les « répéteurs » optoélectroniques.

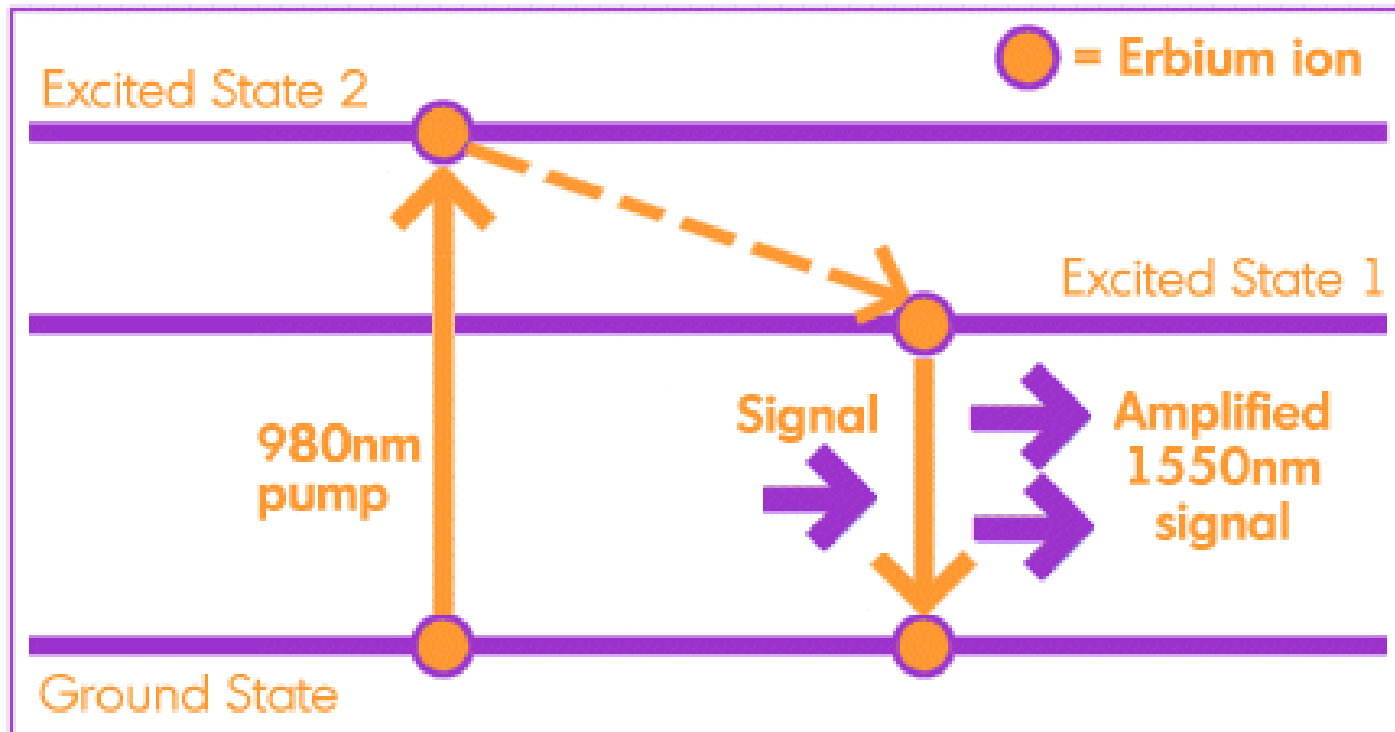
Les amplis optiques à 1,55 nm sont fabriqués à partir de fibres de silice dopée erbium (EDFA)

-Le gain est aplati avec des réseaux de Bragg

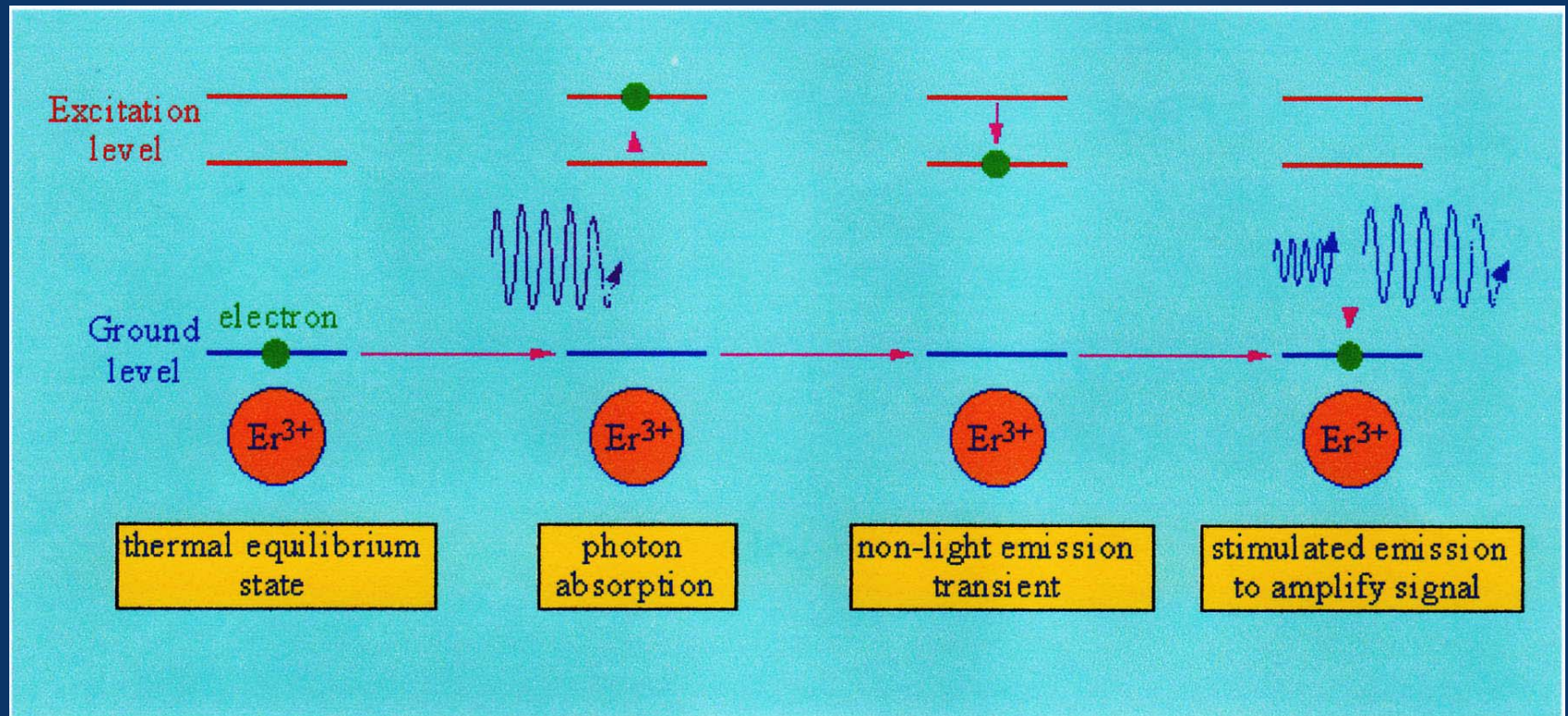
Les amplis « Raman » plus complexes élargissent le domaine spectral

Amplification à 1,5 μm : EDFA

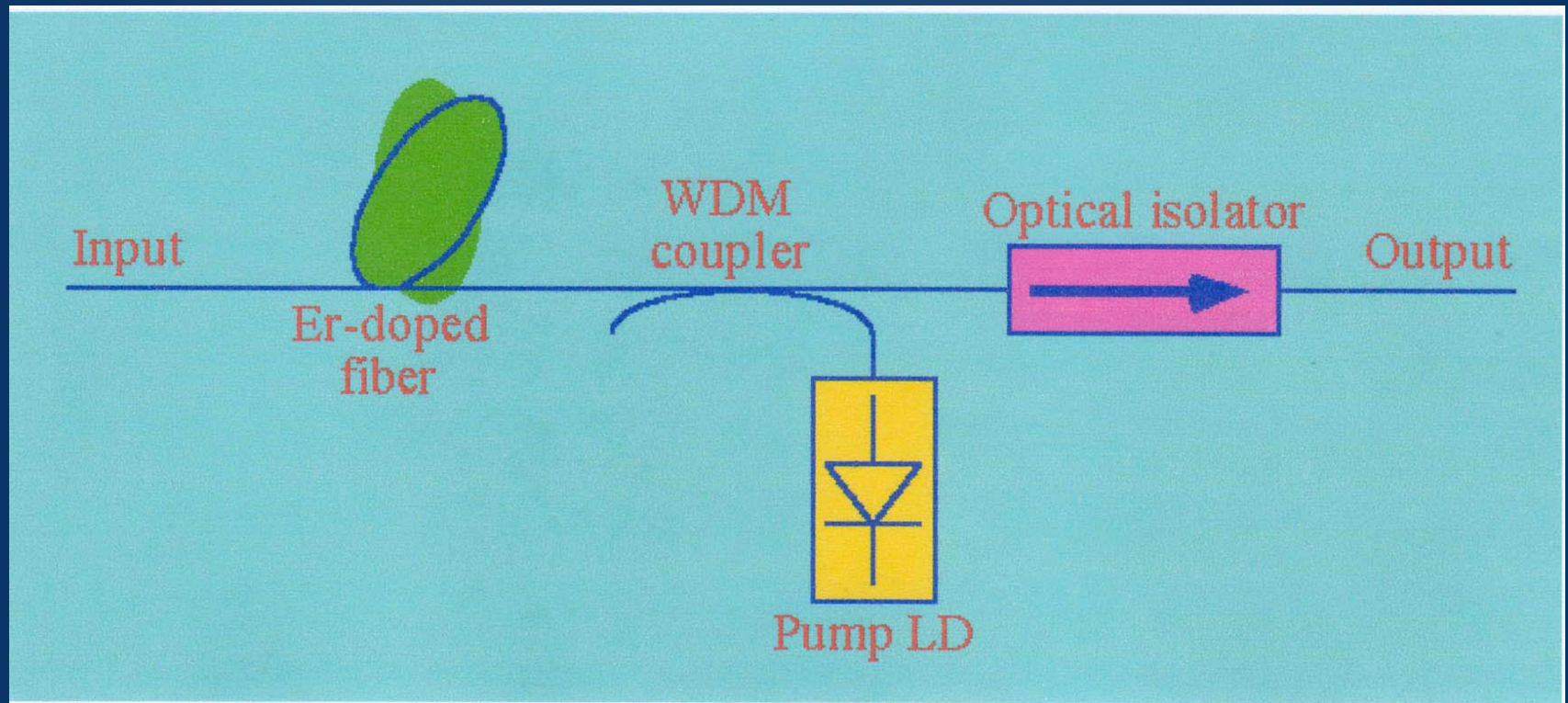
(Erbium Doped Fiber Amplifier)



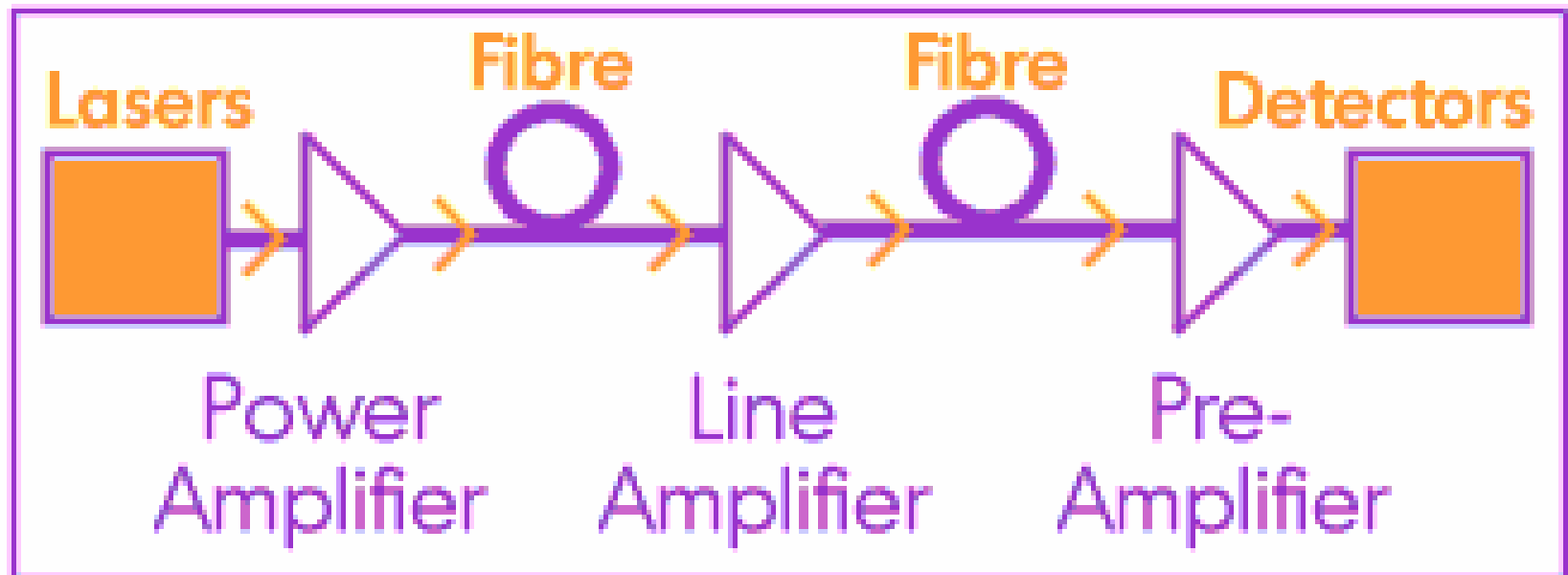
EDFA: Principe



EDFA: Configuration schématique



Amplification Optique et réseau

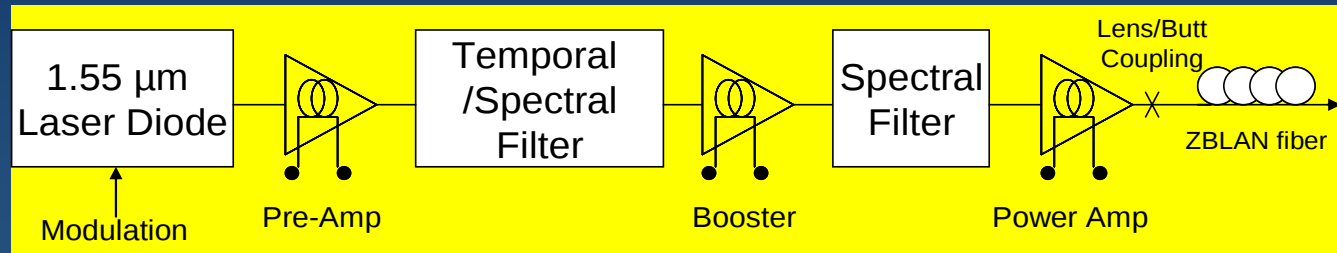


Amplification Optique

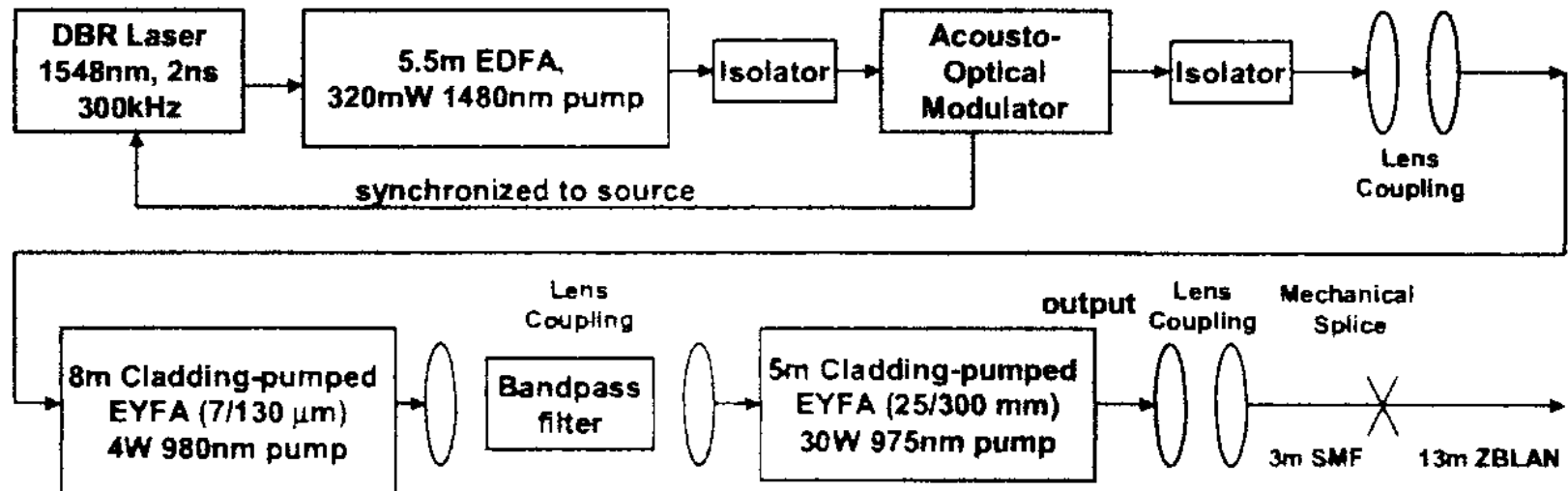
Les amplificateurs optiques en verre fluoré ont été développés aux longueurs d'onde télécom:

- 1.55 μm pour un gain plat et une plus grande bande passante**
- 1.31 μm parce que l'énergie de phonon de la silice est trop grande**
- 1.4 μm (bande S) pour les futurs réseaux basés sur les fibres de silice optimisées**

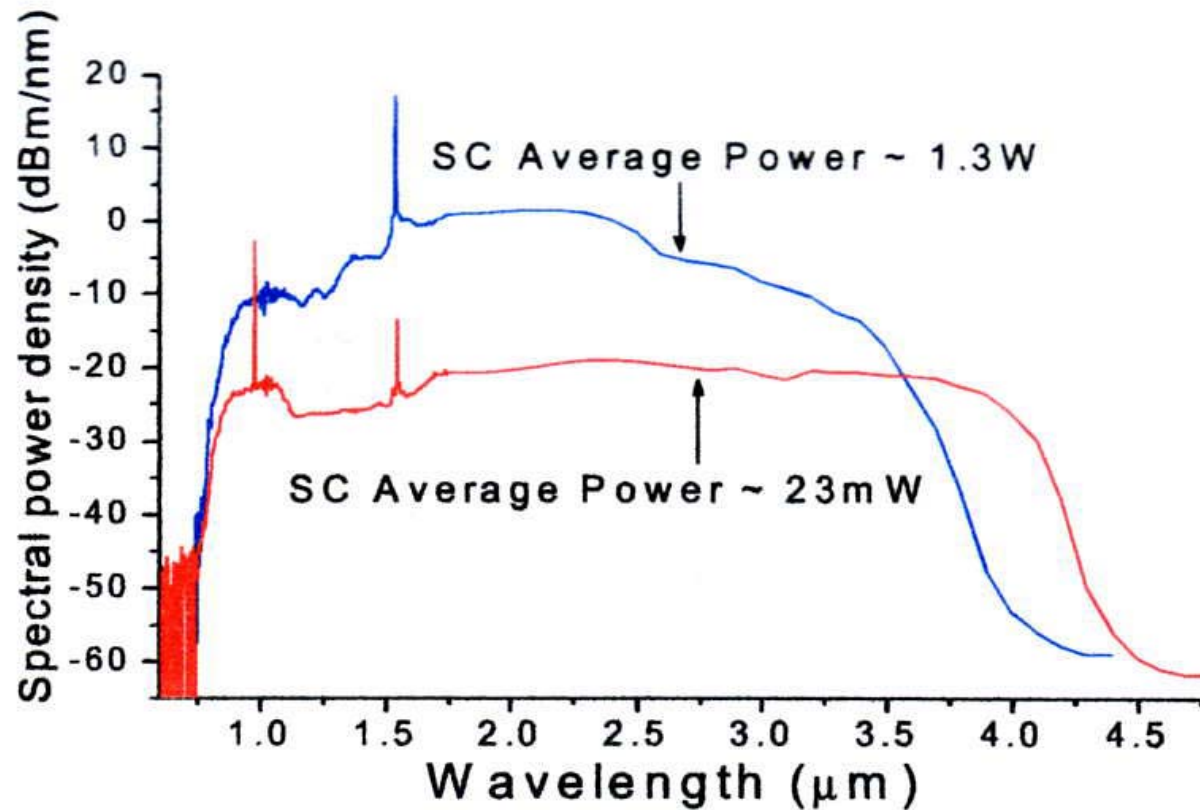
Supercontinuum



De courtes et intenses impulsions laser à 1.55 μm sont envoyées dans une fibre monomode en verre fluoré, générant un continuum par effet non linéaire. Ci-dessous un montage plus performant.



Supercontinuum



Spectres supercontinuum obtenus à haute et basse puissance

CONCLUSIONS



Les fibres optiques de silice ont révolutionné les télécoms



Des fibres sont aussi fabriquées avec des verres spéciaux: germanates, oxydes lourds, fluorures, chalcogénures...



De nombreuses applications se développent avec les fibres passives: capteurs, transmission laser, spectroscopie, dans des secteurs qui vont du laboratoire à l'industrie en passant par le médical et l'astronomie...



Les fibres actives permettent de réaliser des lasers à de très nombreuses longueurs d'onde



L'amplification optique, les effets non linéaires et la génération de supercontinuum complètent ce tableau.