

Nouvelle génération des fibres dopées Terre-rares-performances et applications

Burov E., Pastouret A., Boivin D., Gonnet C. et L.Gasca

Nice, Atelier TR 10-11 Septembre 2012



Prysmian
Group



Sommaire

- **Center R&D de Marcoussis**
- **Télécoms & Terres-rares**
- **Fabrication des fibres dopées TR**
- **Procédé de dopage par NPs**
- **Applications**
- **Perspectives**



Center R&D de Marcoussis

Nous avons plus de 20 ans d'expérience dans le développement des nouvelles fibres dite de spécialité, notamment les fibres dopées terre-rares et surtout Er.



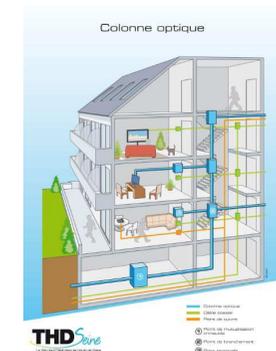
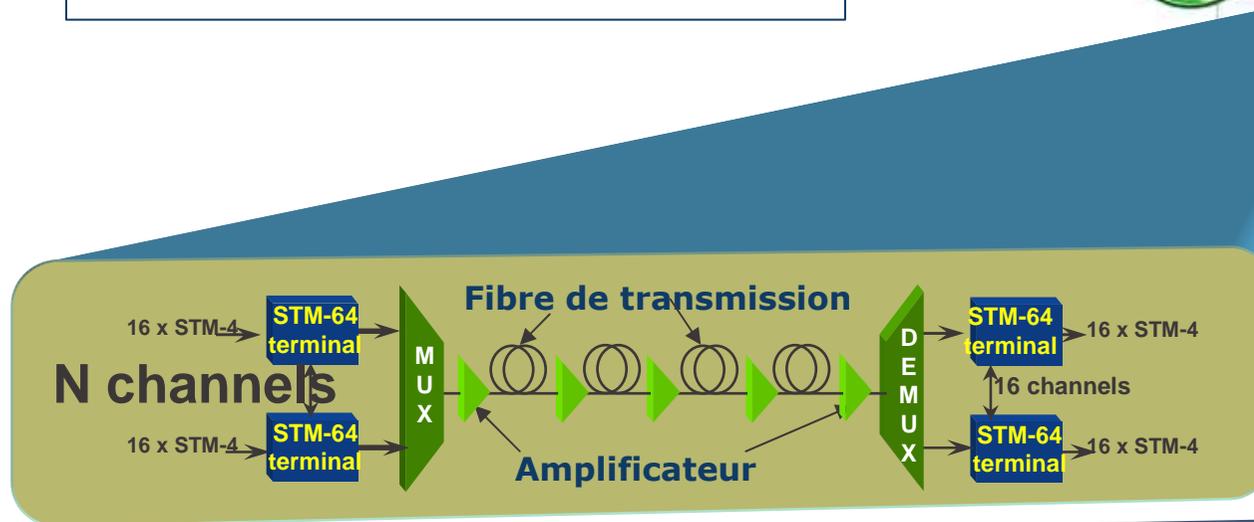
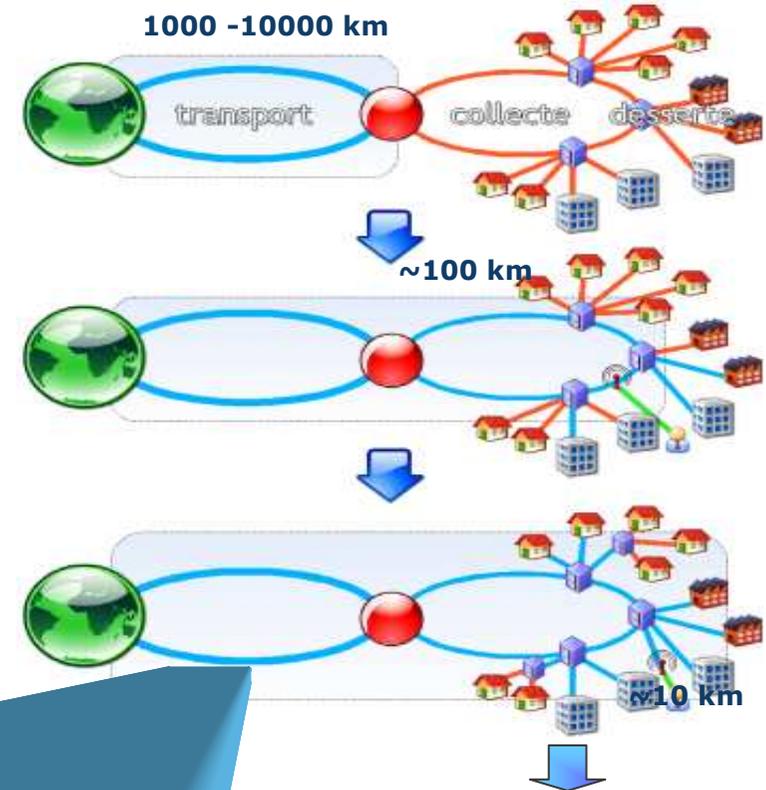
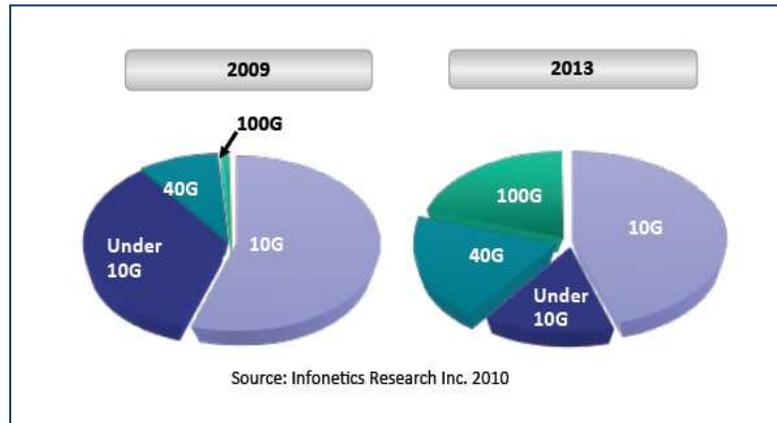
20 personnes



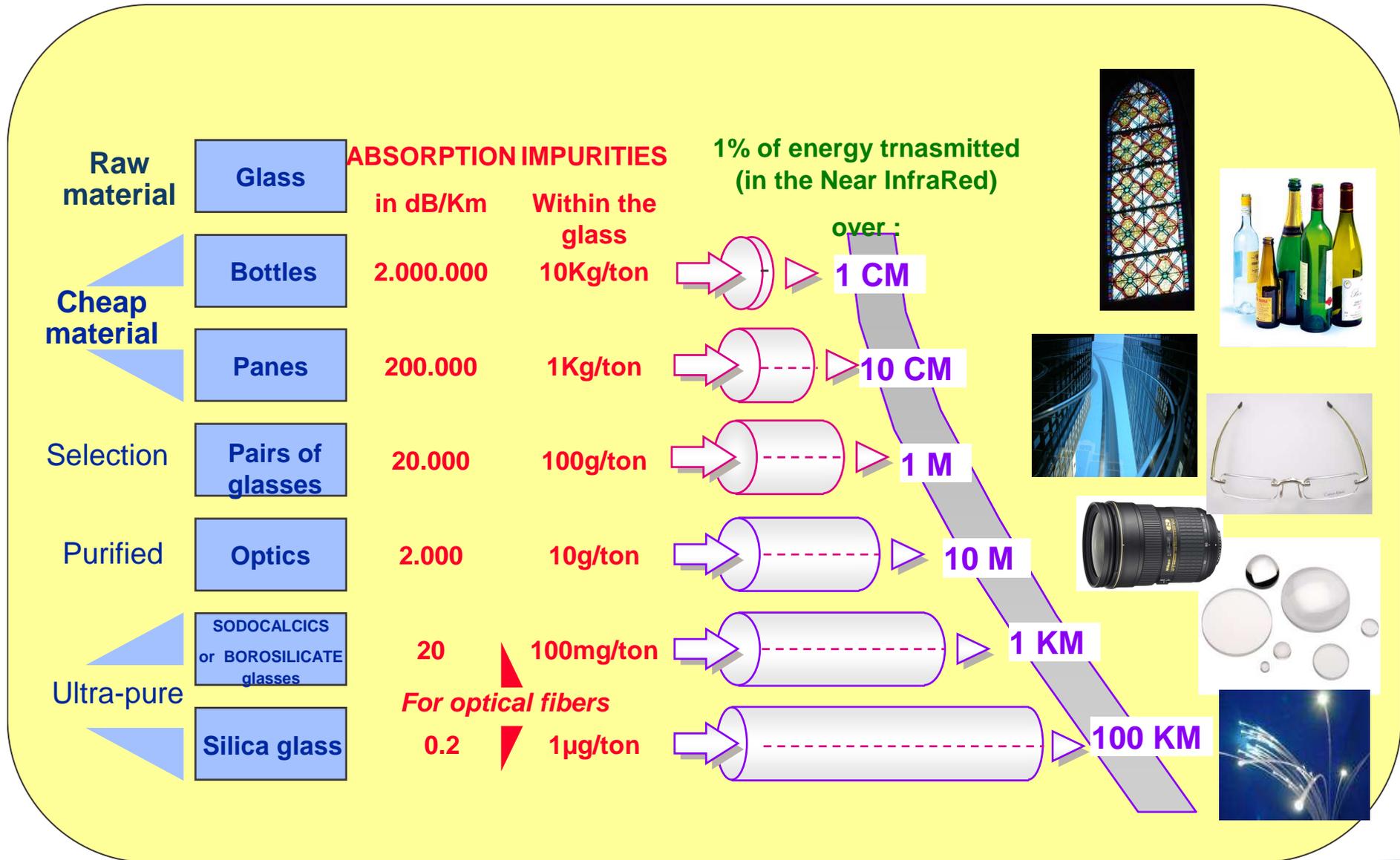
De la conception de la structure et du matériau de la fibre jusqu'au prototype et petite série

Télécoms et Terre-rares

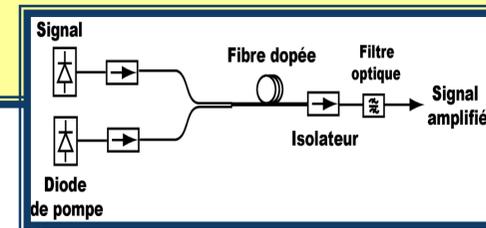
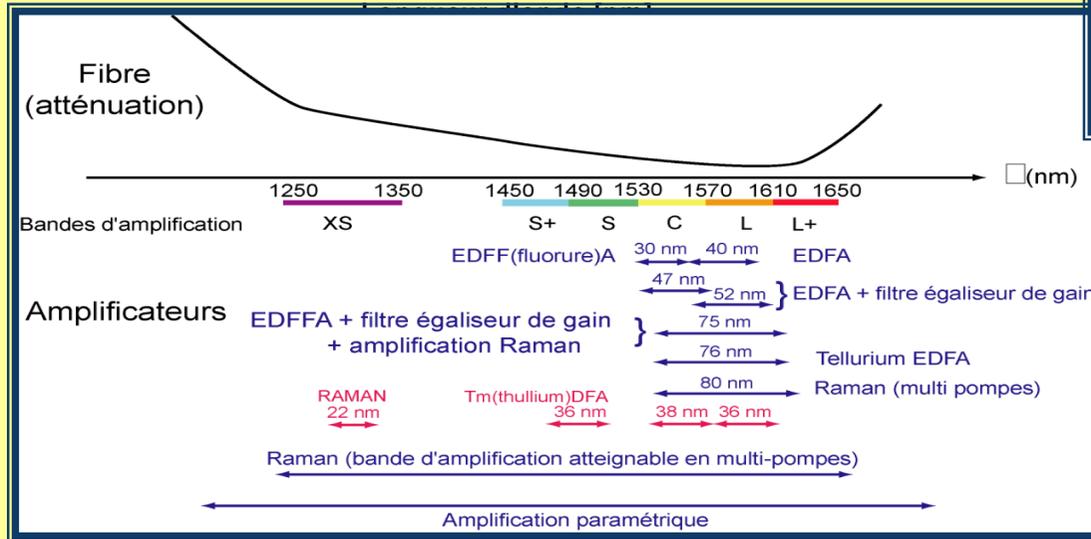
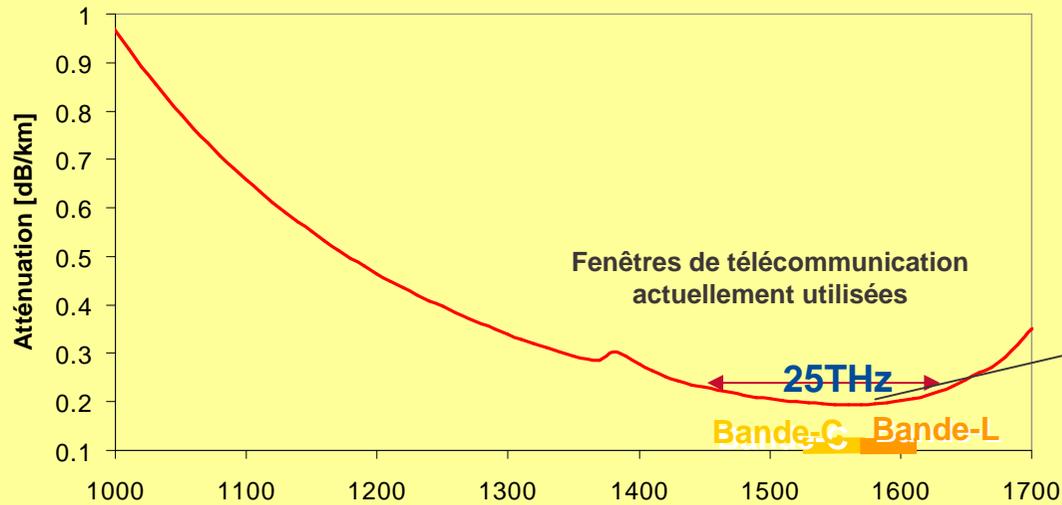
- Nous vivons dans un monde super-connecté



Fibre de transmission

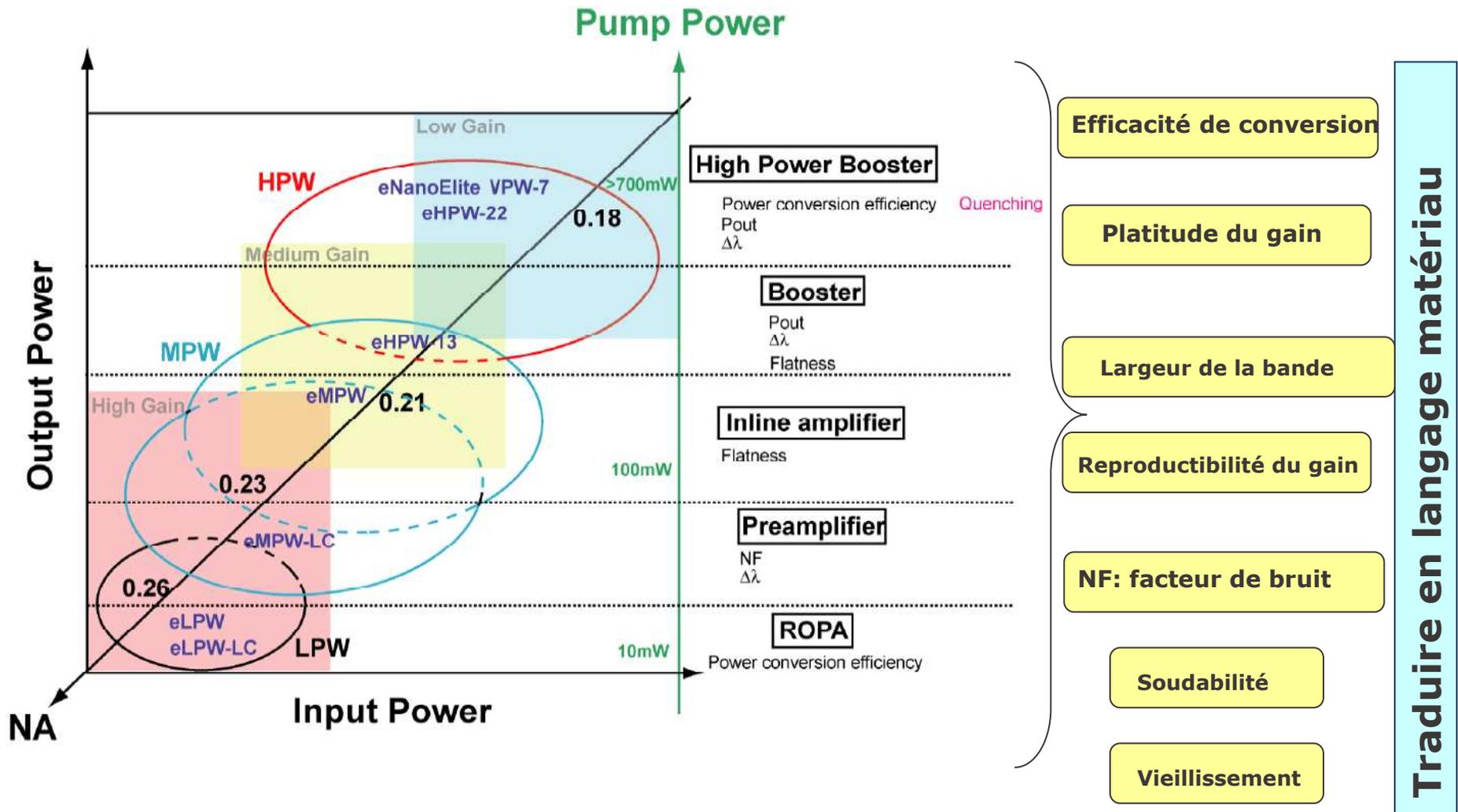


Fibre de transmission

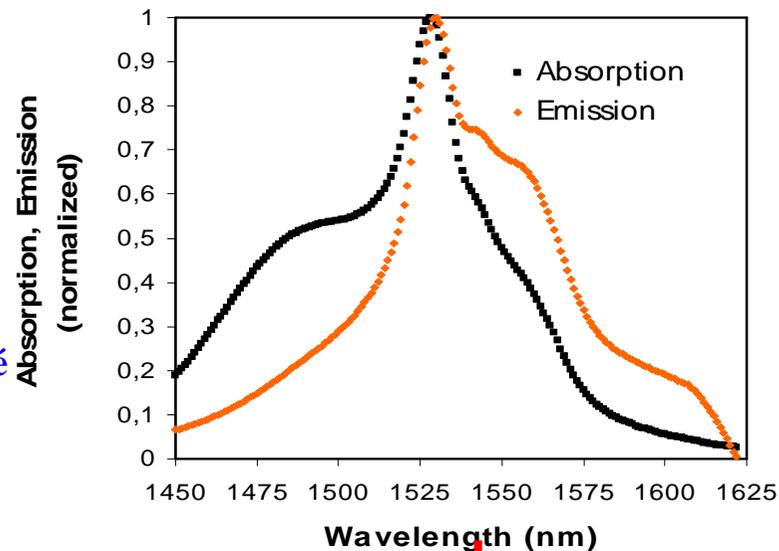
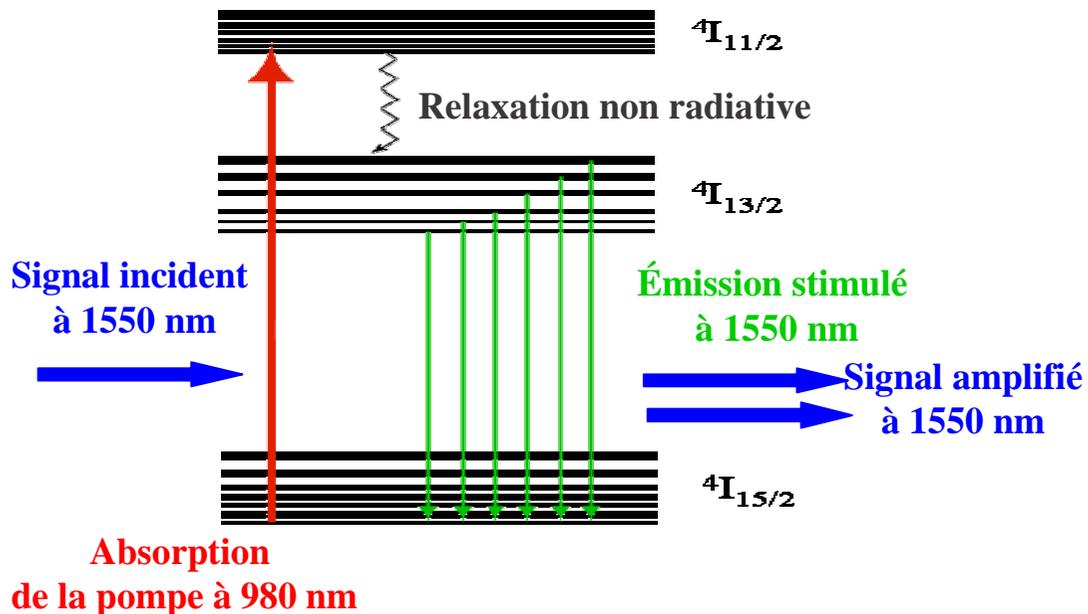


Road map famille EDF

La fibre unique idéale pour toutes les applications n'existe pas.



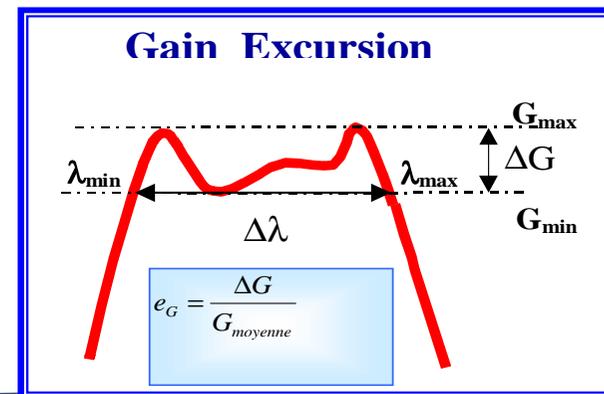
Principe d'amplification du signal par Er (EDFA)



Gain d'amplification

Largeur de la bande de gain $\Delta\lambda$ qui correspond à la gamme de longueur d'onde où le gain est supérieur au gain minimum de cette bande

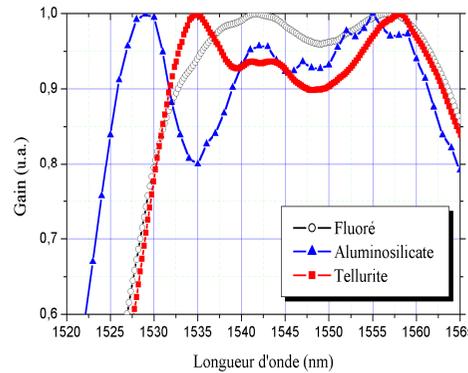
Excursion du gain $\Delta G/G$



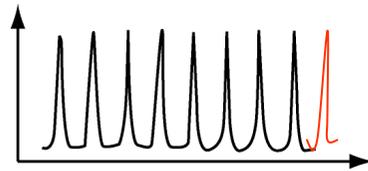
Traduire les besoins en langage matériau

Largeur de la bande

Platitude du gain



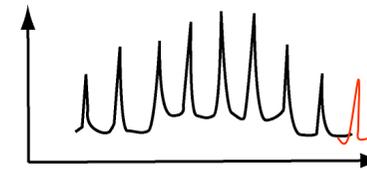
Input Spectrum



EDF

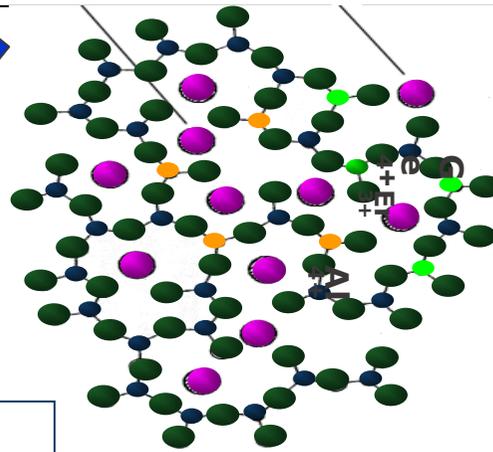


Output Spectrum



Contrôler l'Environnement Er

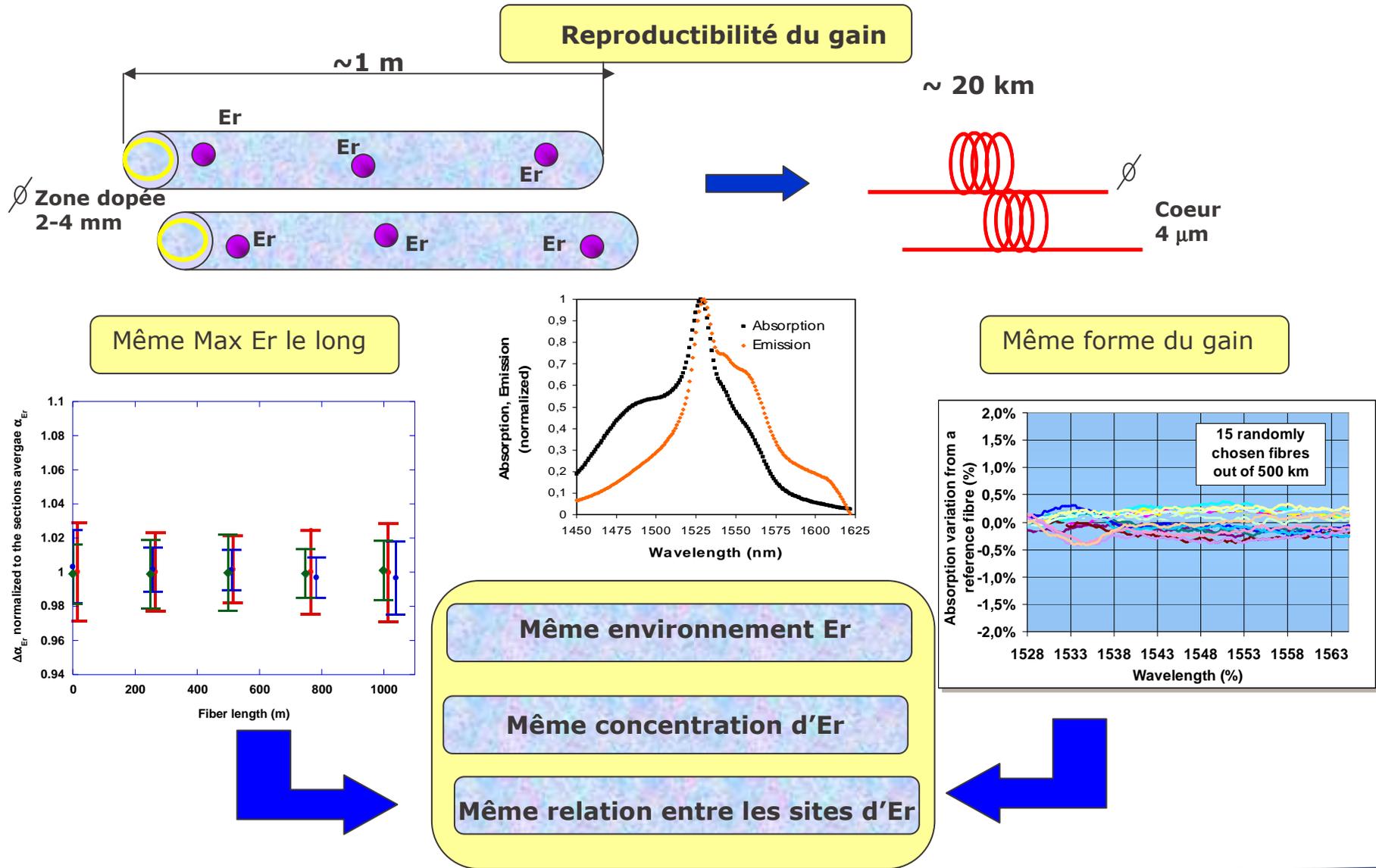
Composition du verre (dopage)



Structure de la matrice

Collaboration: LPCML, Univ. Lyon

Traduire les besoins en langage matériau



Traduire les besoins en langage matériau

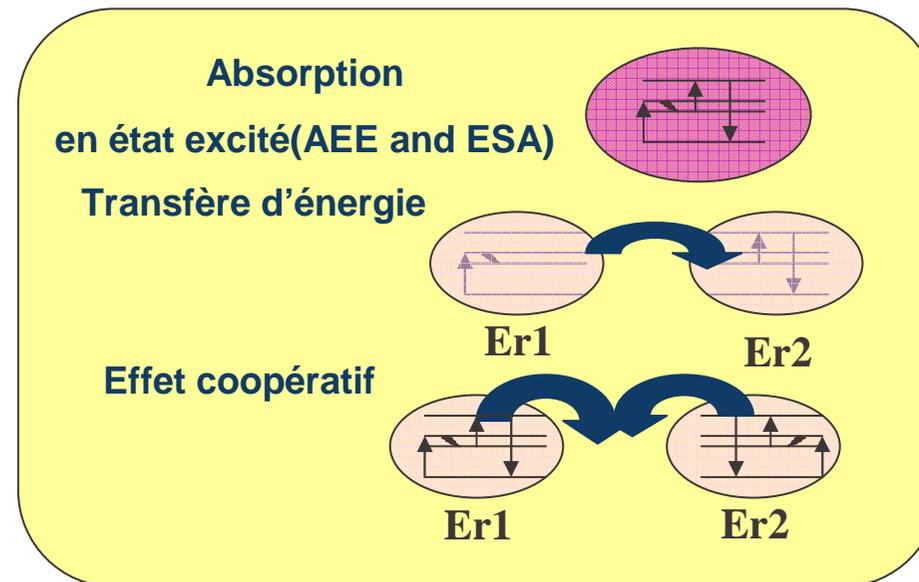
Efficacité de conversion

$$PCE = \frac{P_{signal,out} - P_{signal,in}}{P_{pump}}$$

Photon perdu par rapport à photon utilisé pour l'amplification

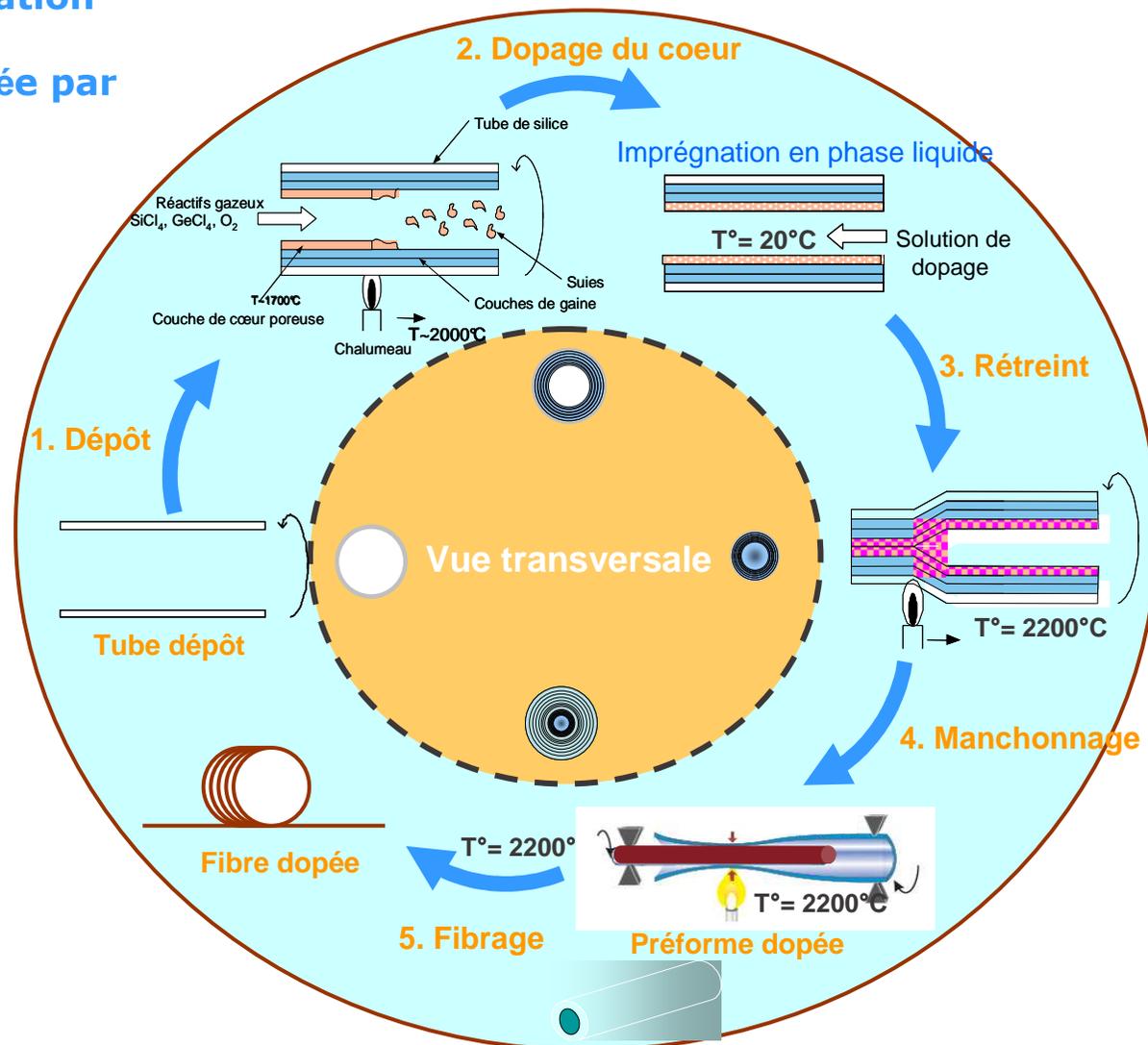
Distance entre Er~Er

Energie des phonons de la matrice



Fabrication de fibres optiques dopées

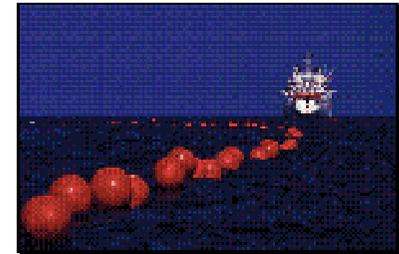
Procédé de fabrication d'une fibre optique dopée par MCVD



Conventional technology

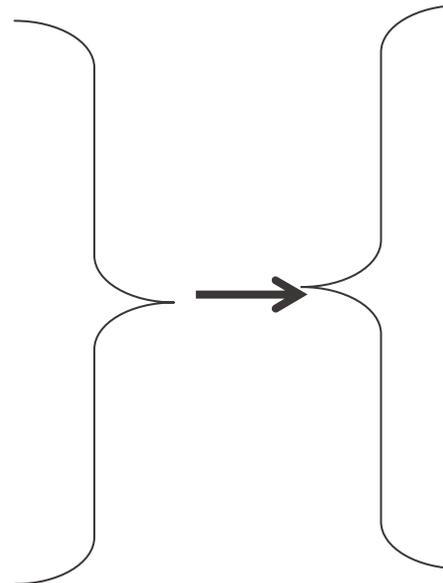
Advantages :It works!

- Today long haul optical transmission is relying on this technology
- Draka is estimating than **50% of the world transoceanic** communications are relying on Draka's Erbium doped fiber and photosensitive fiber technologies
- More than **5000 km of qualified EDF** already supplied by Draka for C and L bands amplifiers



Drawbacks

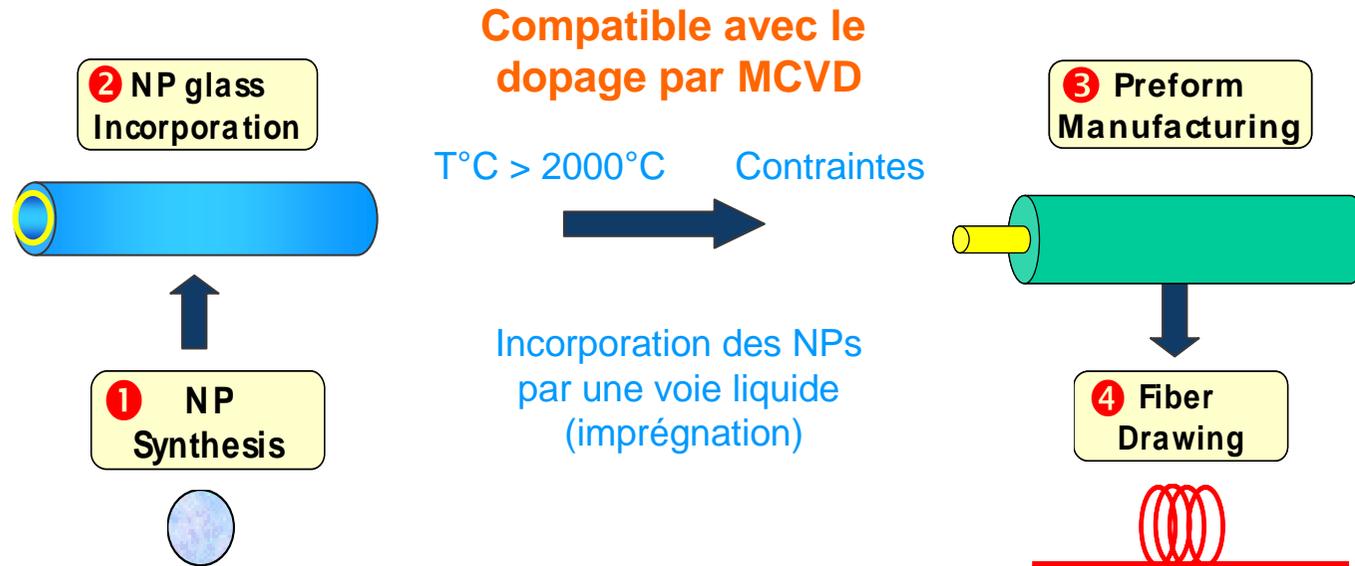
- Largely based on random processes: soaking solution, a mixture of Erbium and Erbium co-dopant salts
- Erbium co-dopants (mainly Al) is influencing the optogeometric parameters of the fiber



- Poor control of the Erbium ions dispersion in the matrix
- Difficulty to optimise the Erbium ions environment
- Constant trade-off between opto-geometric parameters and Er ion spectroscopy

Le concept de dopage par nanoparticule

Vue schématique



Dopage NP par le procédé MCVD

Concept de base:

- Contrôle des propriétés optiques de la terre rare par la matrice des NPs
- Contrôle des propriétés optogéométriques par la matrice du coeur de la fibre

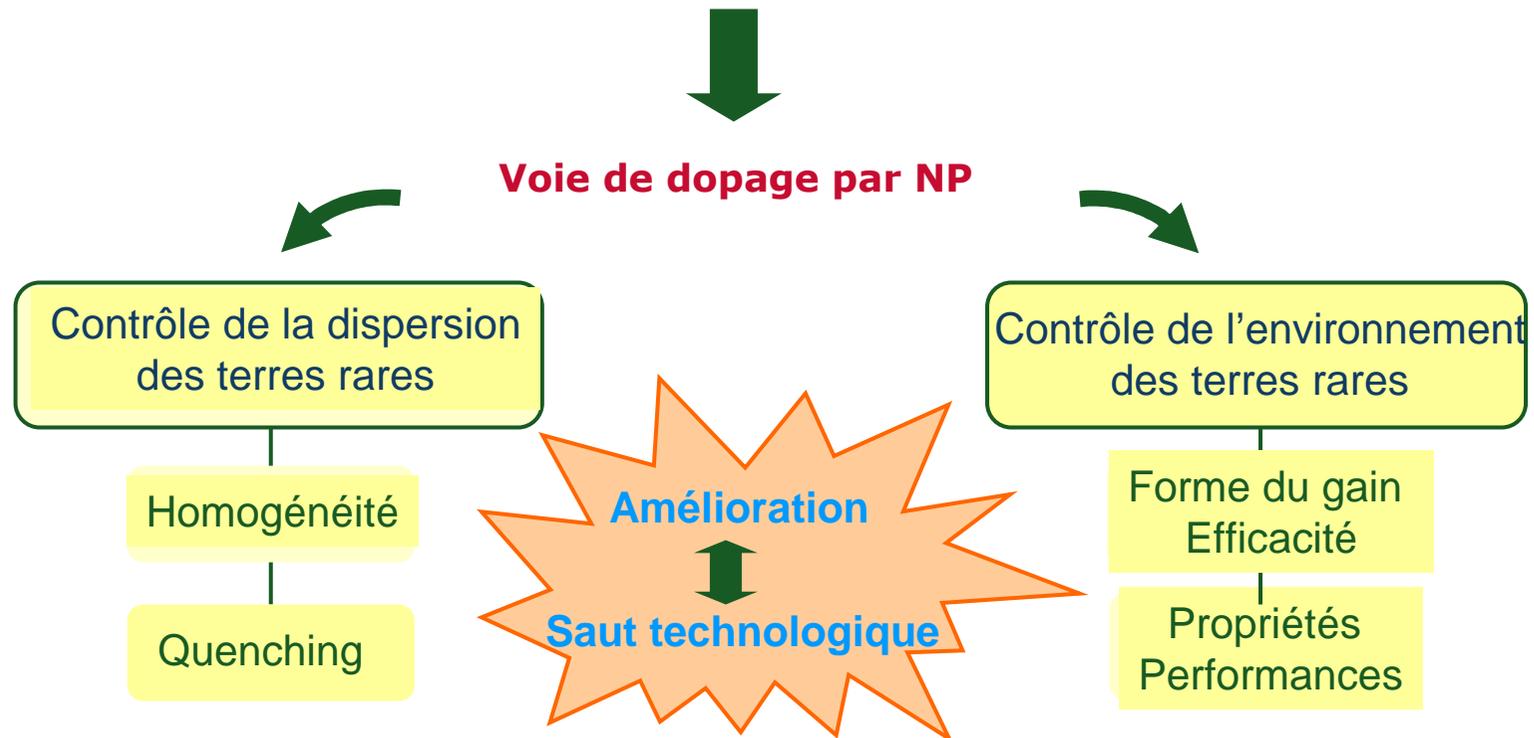
La NP peut être vue comme une matrice sub-micronique optimisée pour améliorer la réponse optique des ions de terre rare qui y sont piégés

Le concept de dopage par nanoparticule

Avantages potentiels

Voie de dopage classique

- Aléatoire (sels de terre rare et d'aluminium dissous)
- Pas ou peu de contrôle sur la dispersion et l'environnement des terres rares



Applications du procédé nanoparticules

Alcatel R&I (étude) → Améliorer de dopage des fibres dopées Er

2002-2006

- EDFAs bas coût (court terme)
- Platitude et largeur du gain (moyen terme)
- Nouvelles bandes d'amplification (long terme)

Draka R&D (voie alternative) → Développer les fibres de spécialités

2007-2012

- Apports par rapport au procédé de dopage « standard »
- Elargissement aux terres rares en général (amplificateurs, lasers)
- Ouverture aux applications hors télécom (nouveaux marchés)

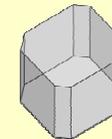


Le concept de dopage par nanoparticule

Mise en oeuvre: ex dopage NP Al_2O_3 /TR

Synthèse de NPs dopées par co-precipitation en milieu aqueux de sels de Al et d'ions de terre rare à pH contrôlé (chimie douce)

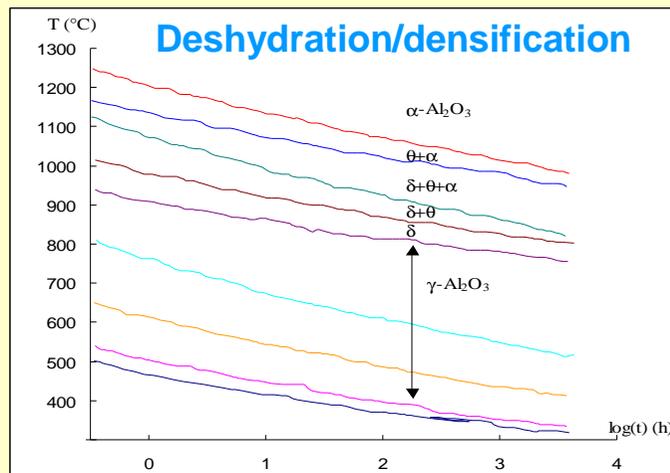
- NPs de taille et composition contrôlées
- Suspensions stables dans l'eau



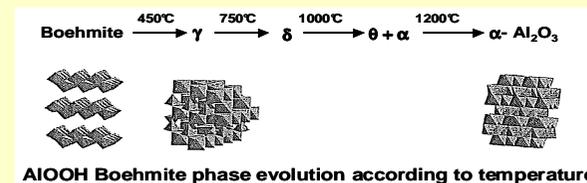
AlOOH/TR
(5-25nm)

Collaboration Université Paris 6 , UMR 7574, Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris

Renforcement de la structure des NPs par traitement thermique avant vitrification de la couche dopée ➔ **Preserver l'intégrité des NPs**



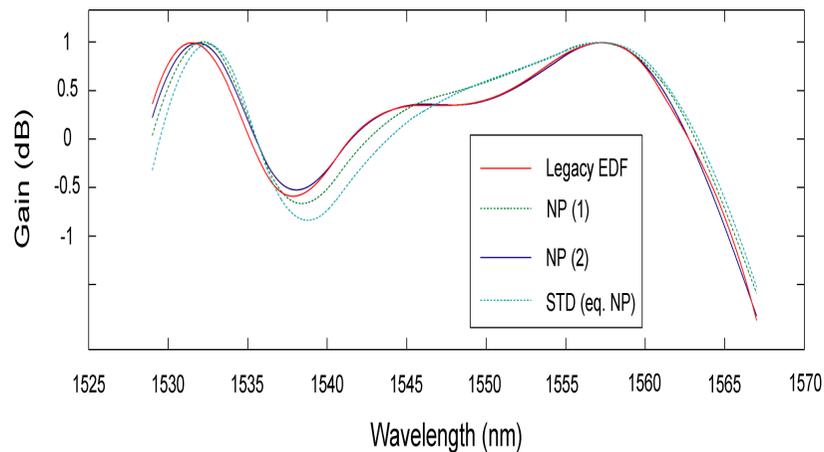
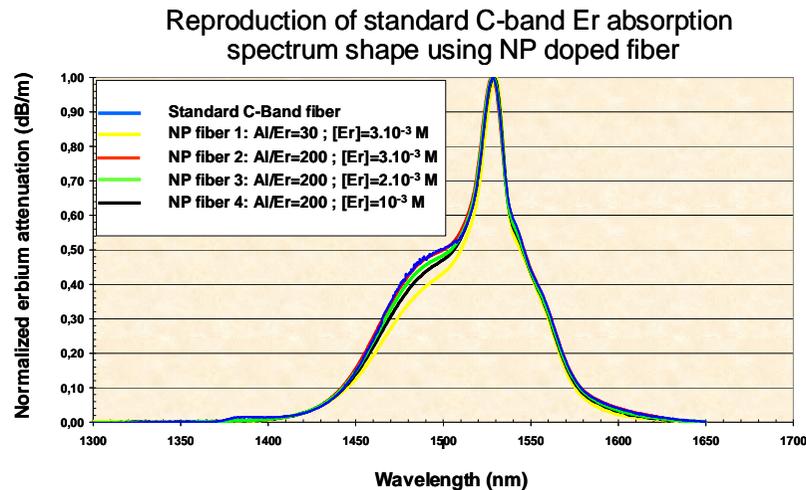
Transformations successives $\text{AlOOH} \Rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$



- Transformations irréversibles
- Phase $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ thermostable
- Réalisé sur tour MCVD
- Aptitude à résister aux conditions de fabrication ($T^\circ\text{C}$, stress) de la fibre

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

Absorption, gain, pertes / fibre EDF standard



Pour une matrice de coeur donnée

Absorption Er

- Forme ajustée par le rapport Al/Er
- αEr_{Max} ajustée par la [NP]
- Pertes de fond < 2dB/km à 1200nm

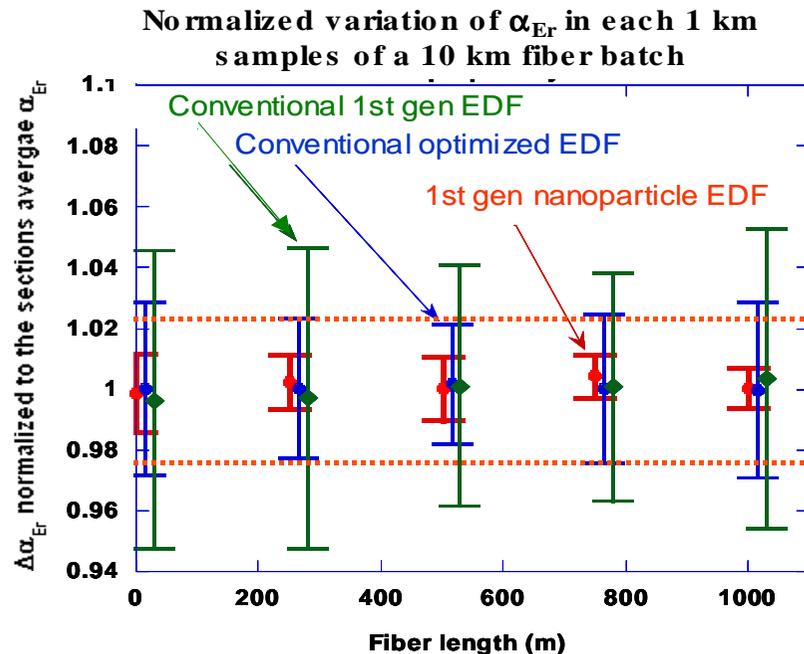
Gain

- Forme dépend de la nature des NPs
- Gain type WDM:
 - Al/Er=200, [Er]= 2.10^{-3} M
 - [Al] ~ 3 wt%
- Forme intermédiaires possibles

Résultats

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

Homogénéité



L'homogénéité du dopage Er est mesurée en comparant le maximum d'absorption de l'Er ($\alpha_{Er_{Max}}$) à chaque extrémité d'un échantillon

Echantillons de fibre de longueur entre 250m et 1km

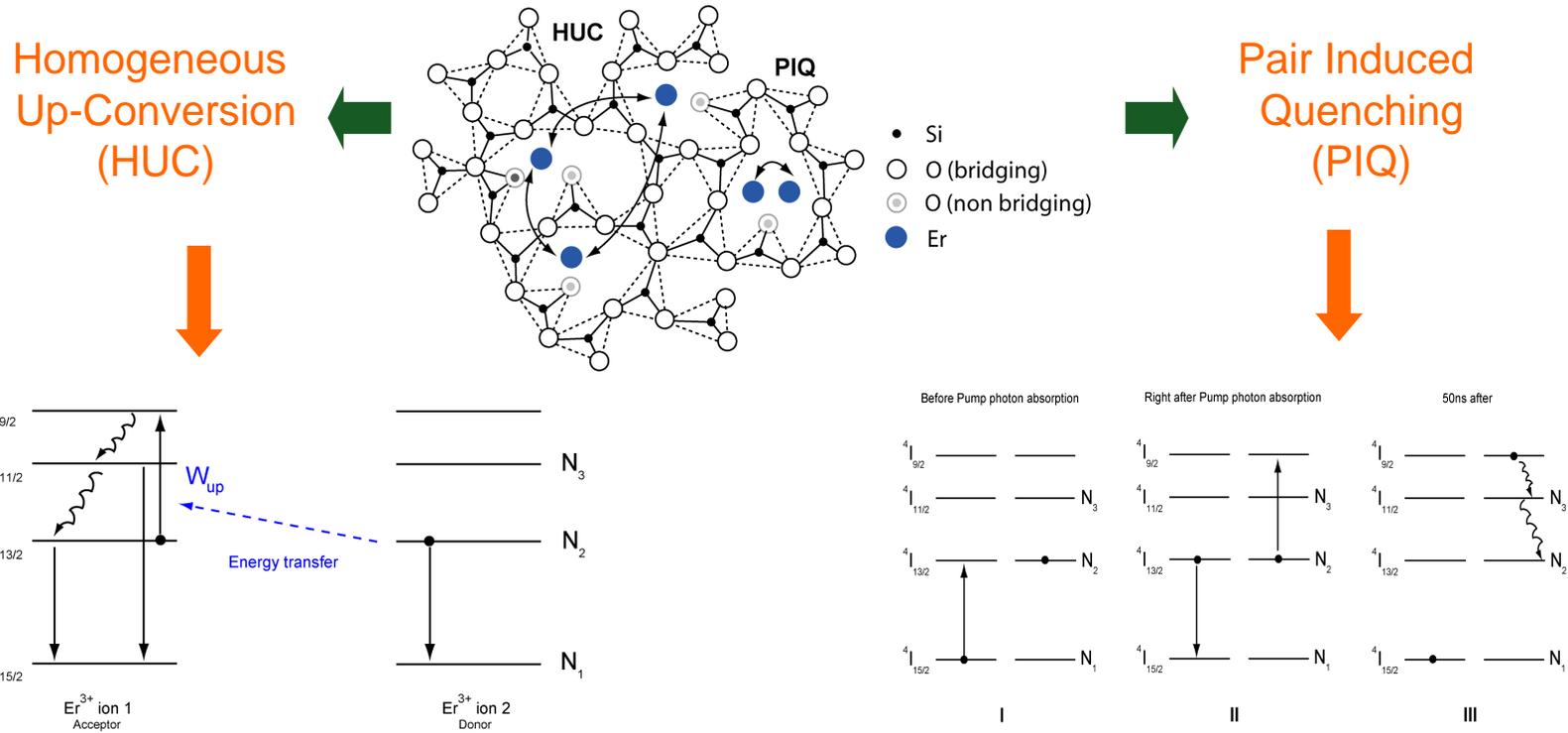
Fluctuation du $\alpha_{Er_{Max}} < 2\%$ pour 100% des échantillons jusqu'à une longueur de 1km

L'analyse statistique montre que les fibres Er dopées NP présentent une homogénéité de dopage Er supérieure aux fibres conventionnelles

➡ Impact significatif sur le coût de caractérisation des fibres Er (-25%)

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

Quenching Transferts d'énergie entre ions Er

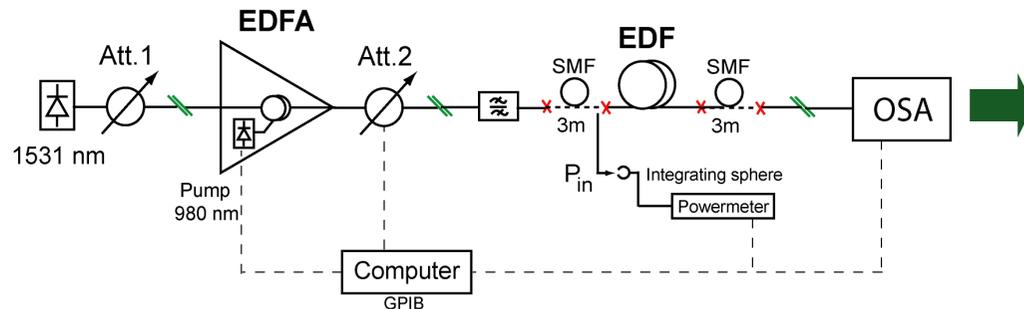


- Relié au W_{up}
- Dépend de la [Er] et de la matrice
- Er-Er < ~2nm

- Relié au % de paires Er
- Dépend de la [Er] et du procédé de fabrication
- Er-Er < ~0.4nm

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

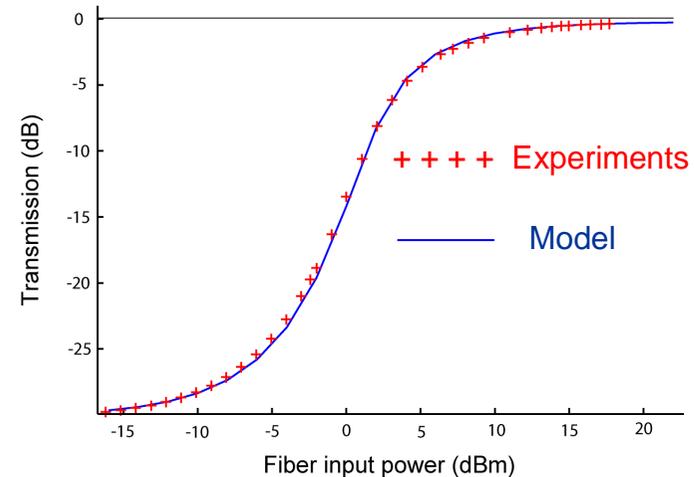
Quenching Caractérisation et modélisation du HUC et du PIQ



Banc optique basé sur la mesure de l'insaturation de l'absorption à 1531nm

Caractérisation du quenching

- W_{up} et % paires Er extraits de la courbe expérimentale $Trans_{1531nm} = f(P_{signal})$
- Les équations de propagation (pompe, signal, bruit) sont résolues numériquement pour un W_{up} et un % paires Er donnés
- Possibilité de comparer des fibres et des procédés en terme de quenching

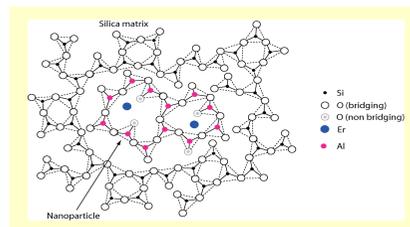
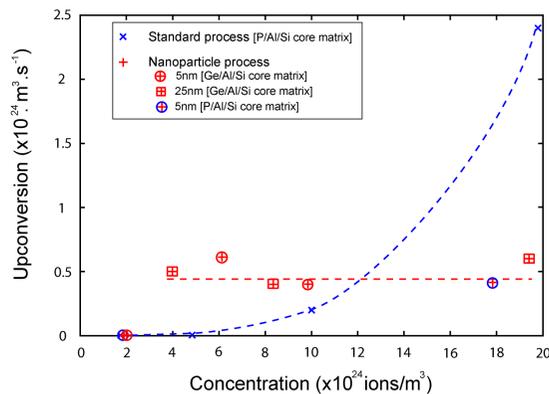


Modélisation du quenching

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

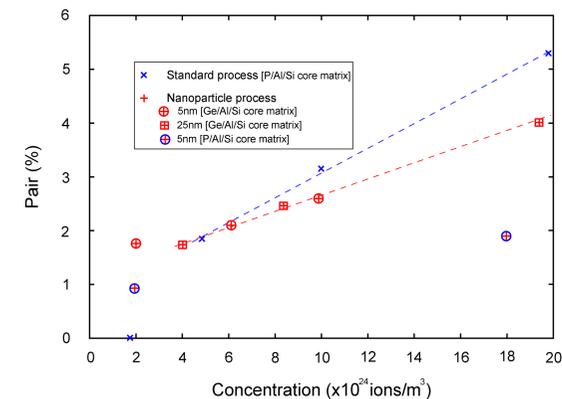
Quenching Comparaison entre procédé NP et procédé standard

Evolution du Wup



Environnement et dispersion des Er³⁺ dépendent de la composition des NPs

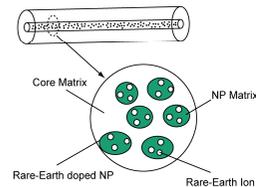
Evolution du % paires Er



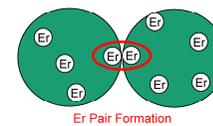
➤ Wup (HUC) pratiquement indépendant de la [Er] dans les fibres dopées NP

➤ Possibilité d'éliminer le HUC par ajustement du rapport Al/Er des NPs

a/ NP doping process:



b/ Inter-NP PIQ:

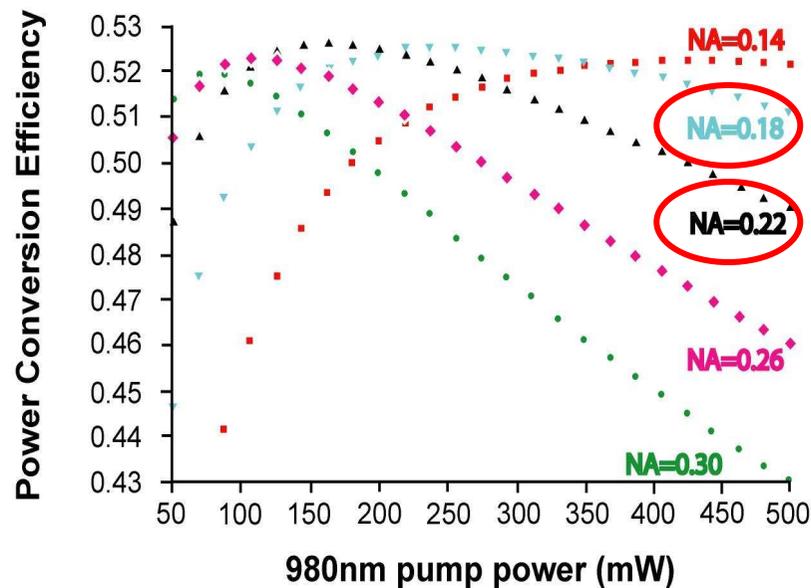


➤ Formation limitée de paires Er en fonction de la [Er] dans les fibres dopées NP

➤ Possibilité d'éliminer le PIQ en améliorant le design des NPs

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

Ouverture numérique



Pour une matrice de NP donnée

- L'ON de la fibre peut être ajustée par la composition de la matrice du cœur sans modifier significativement le gain
- Le dopage par NP permet d'accéder à des ON de l'ordre de 0.16 à 0.18.
- Le recouvrement Er /pompe est également amélioré grâce au profil de distribution radial des ions Er

L'ouverture numérique (ON) de la fibre dopée fixe la puissance de pompe à laquelle l'efficacité de conversion de puissance (PCE) est maximale

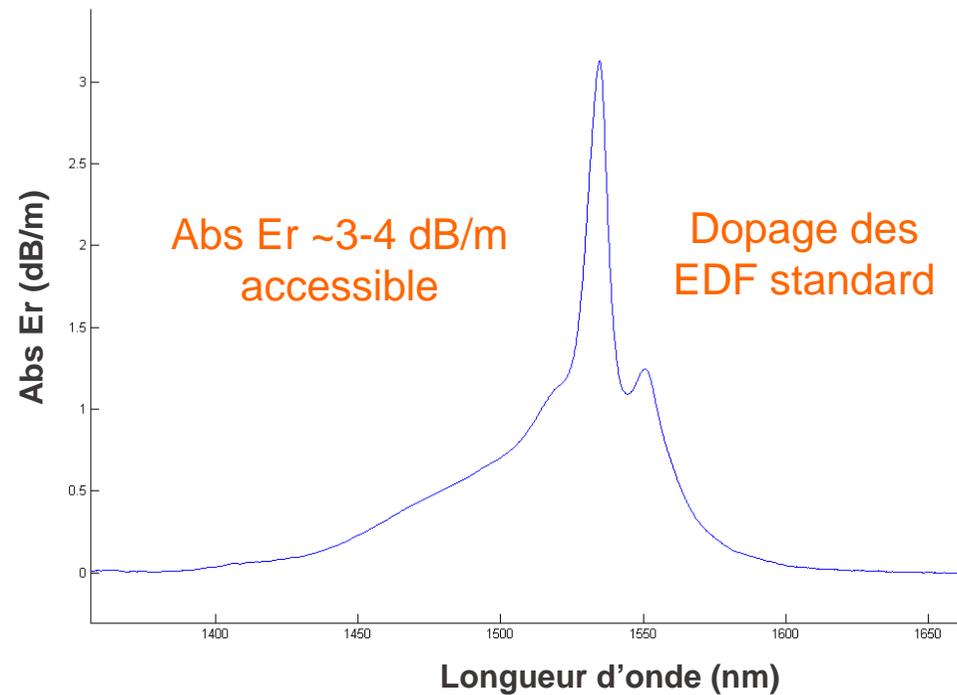
Si ON diminue, la PCE max se décale vers les plus grandes puissances de pompe

Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

Incorporation Er

Les voies de dopage en phase liquide classiquement utilisées pour la fabrication des EDF nécessitent la présence d'Al pour permettre l'incorporation d'Er en matrice silicate

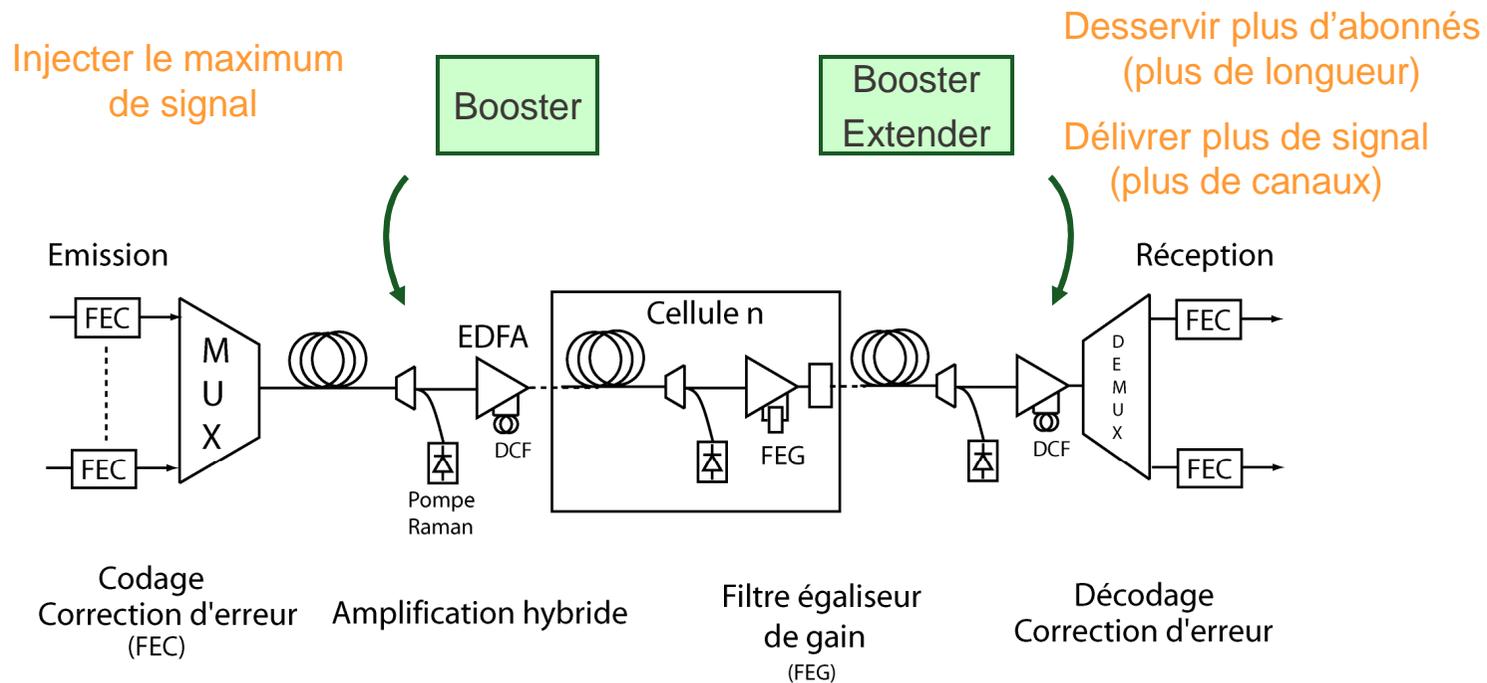
- La voie de dopage par NP permet d'incorporer l'Er en l'absence d'Al
- Incorporation de NP de SiO₂/Er dans une matrice germanosilicate



Résultats

1^{ère} application produit: high power EDF (boosters)

- Booster:**
- EDFA placé en début ou en fin de ligne
 - Redimensionner un système sans avoir à le redesigner



Exemple de système de transmission terrestre WDM longue distance

- Problématique:**
- Amplifier un signal déjà élevé: 12-19dBm => 20-25dBm
 - Puissance de saturation la plus élevée possible (efficacité)

1^{ère} application produit: high power EDF (boosters)

$P_{in}=12\text{dBm}$	$P_{out}=18\text{dBm}$		$P_{out}=23\text{dBm}$		$P_{out}=24\text{dBm}$	
	STD	NP	STD	NP	STD	NP
NF (dB)	7.95	7.78	7.49	7.42	7.45	7.41
Flatness (dB)	0.62	0.33	4.16	4.32	5.03	5.17
Current (mA)	445	412	1707	1550	2400	2100

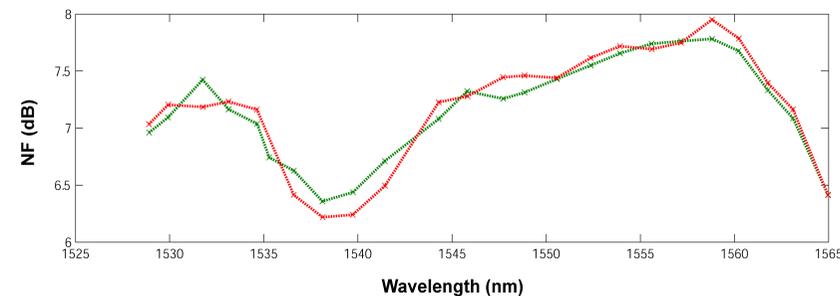
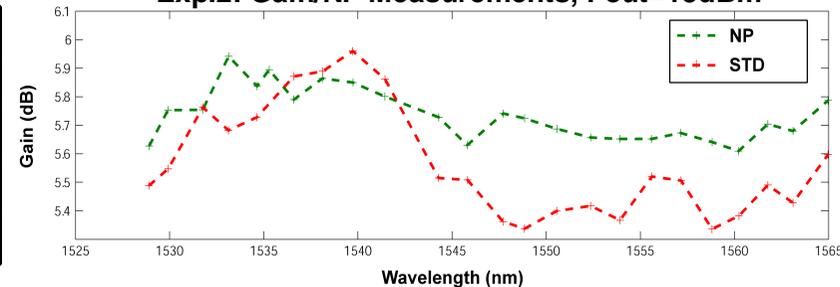
➤ Amélioration de l'efficacité de conversion pour les EDF dopés NP/ EDF standard: **Effet NP**

- 7% à 18%
- Effet augmente avec la puissance

➤ Plusieurs avantages déjà identifiés:

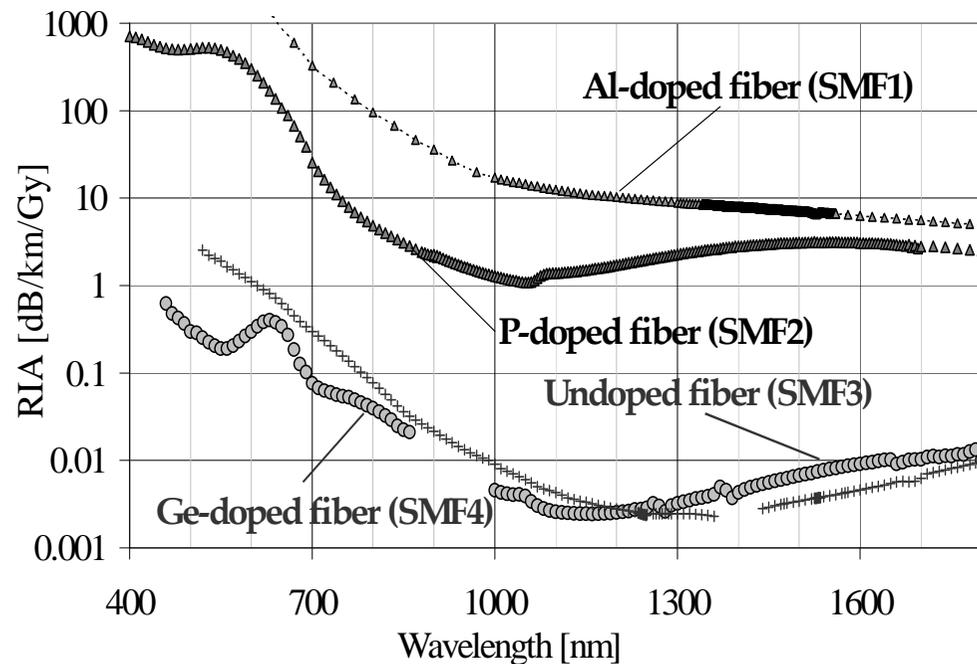
- Atteindre des points de fonctionnement supérieurs avec les pompes les plus performantes actuelles (~750mW) ➡ Jusqu'à 27dBm en puissance de sortie
- Relâcher les contraintes sur la pompe : coût et consommation énergétique
- Possibilité de designer des configurations EDFA 2 étages avec une seule pompe

Exp.2: Gain/NF Measurements, P_{out}=18dBm



2^{ème} application produit: EDF radhard

- Radhard:
- Fibre optique destinée à être utilisée dans un environnement radiatif
 - Spatial, centrales nucléaires, militaire, labs physique, ...
 - Induit des pertes importantes aux longueurs d'ondes d'utilisation



- La composition de la fibre a un rôle primordial dans la résistance aux radiations (débit, dose)

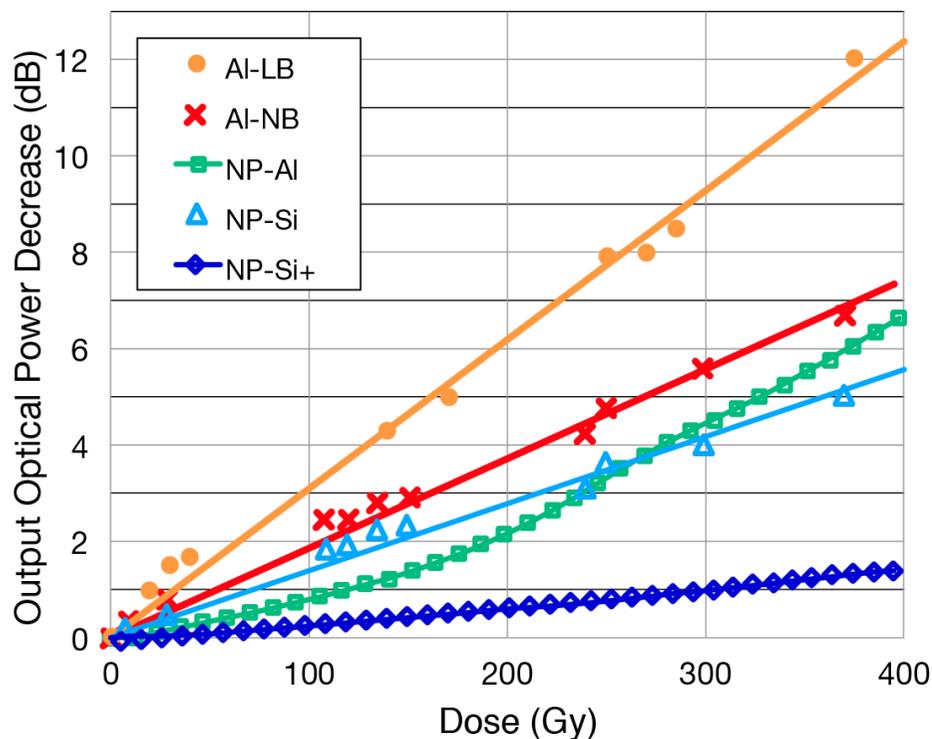
Al et P: dramatique sur les pertes sous irradiation

- Les meilleurs résultats sont obtenus avec des fibres ayant une matrice germanosilicate ou silice

- Problématique:
- Nécessite d'Al dans les EDF: Incorporer l'Er et élargir le gain
 - Assurer à la fois la résistance aux radiations et les propriétés de gain

Résultats

Fiber Name	Er abs. (dB/m)	Al. (wt%)	Opt. Length (m)	RIA 980 nm (dB/m/Gy)	RIA 1550 nm (dB/m/Gy)
AI-NB	4.7	<1	25	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-4}$
AI-LB	12.3	6-8	6	$2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$
NP-AI	23	4-6	2.5	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$
NP-Si	2	0	45	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
NP-Si+	3.2	0	22	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$



Low [Al] leads to low RIA

NP process permits ultra-low RIA

Best fiber is low [Al] and short length

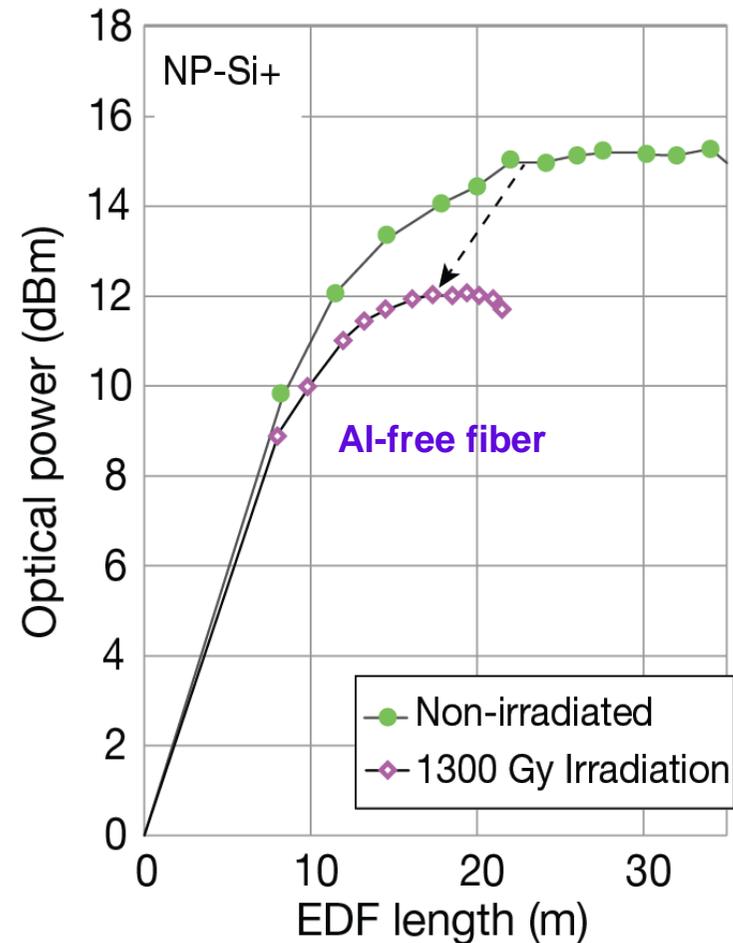
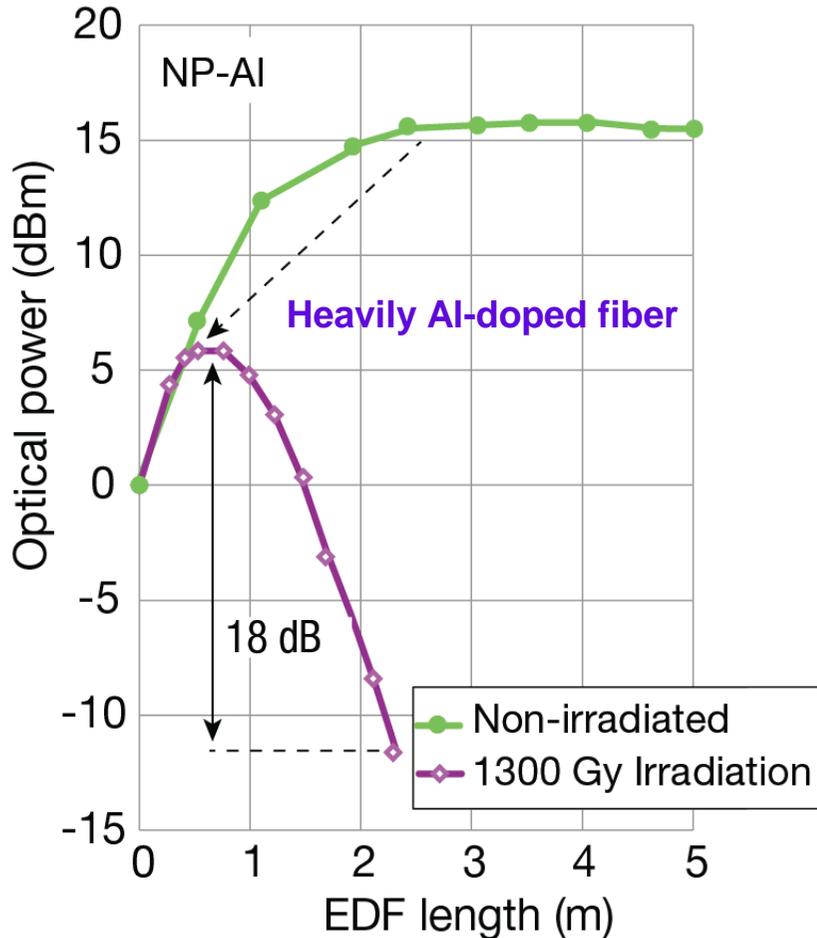
Confirmation of Gusarov rule...
weighed by RIA value

At comparable [Al], NP technology provides better tolerance

Singular behaviour for NP-AI !

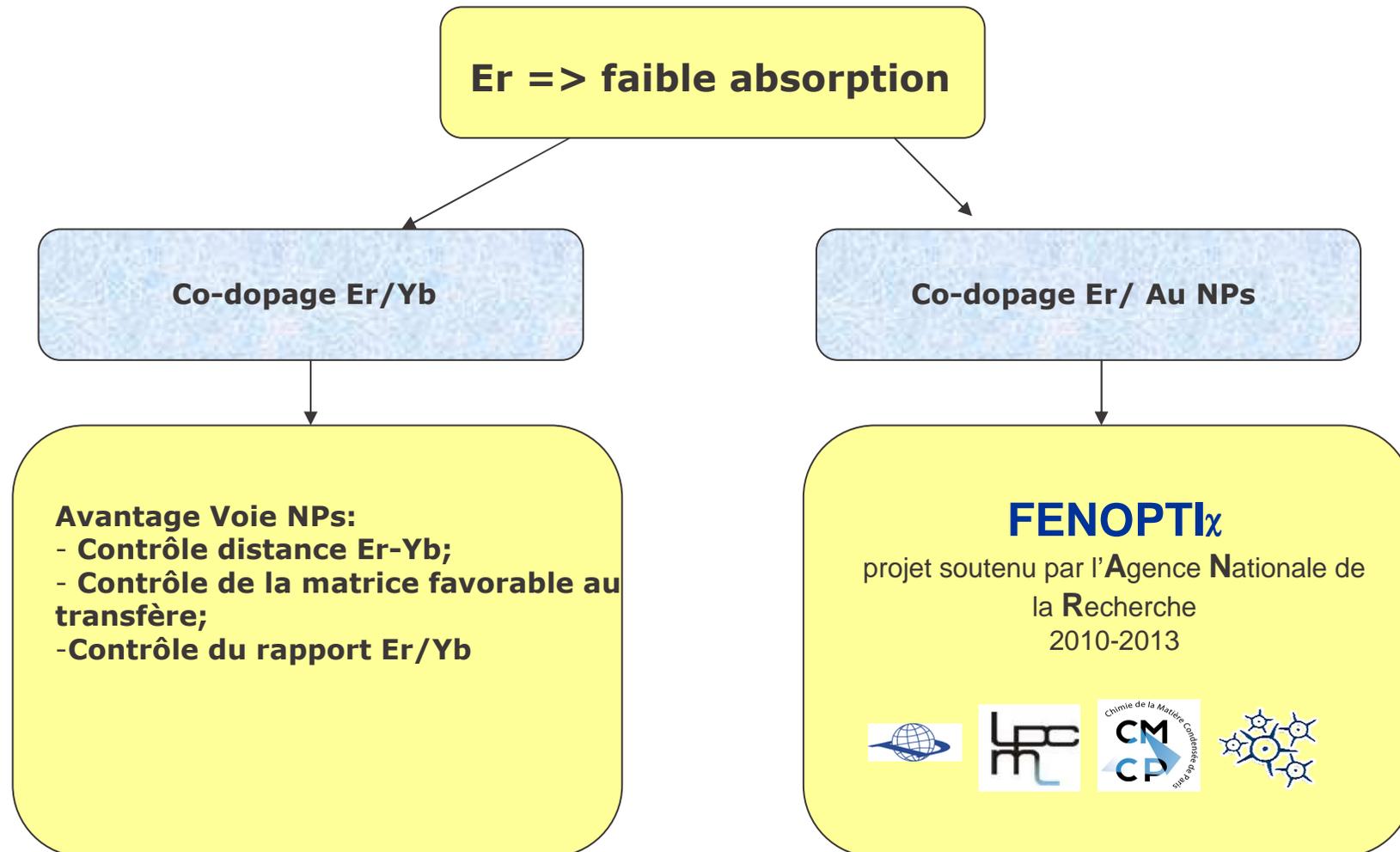
Resultas

Optimal Length Evolution pre/post irradiation



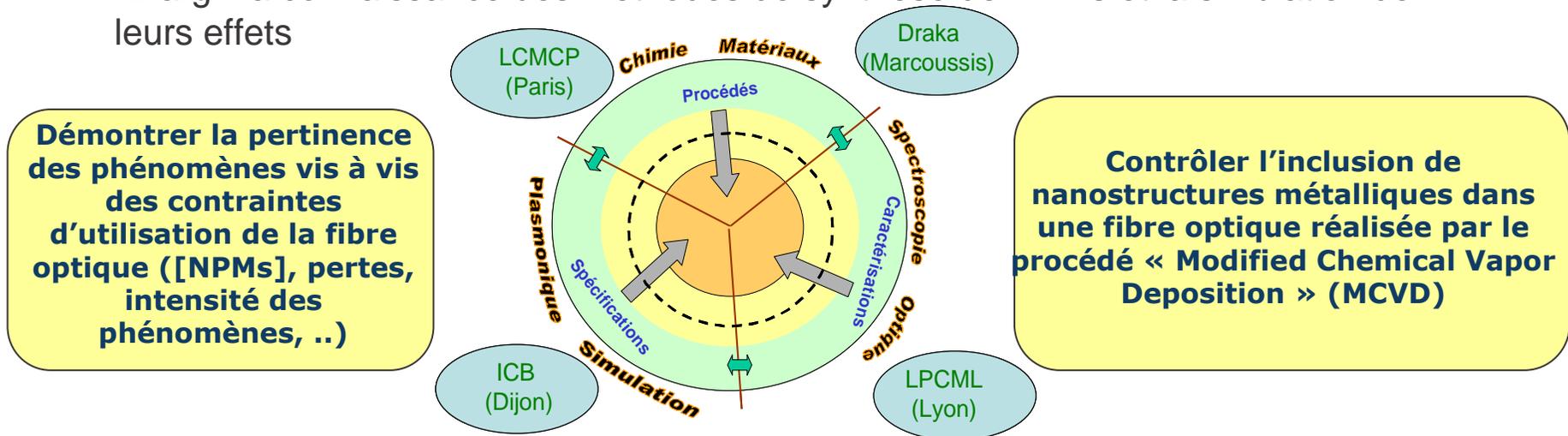
Optimal length of a RH amplifier should be chosen considering the post irradiation optimal length (and not the pre irradiation one !)





Objectifs:

- Appliquer la résonance de modes plasmons au domaine des fibres optiques
- Développer la compréhension de l'interaction lumière/nanoparticules métalliques (NPMs)
- Elargir la connaissance des méthodes de synthèse de NPMs et la simulation de leurs effets



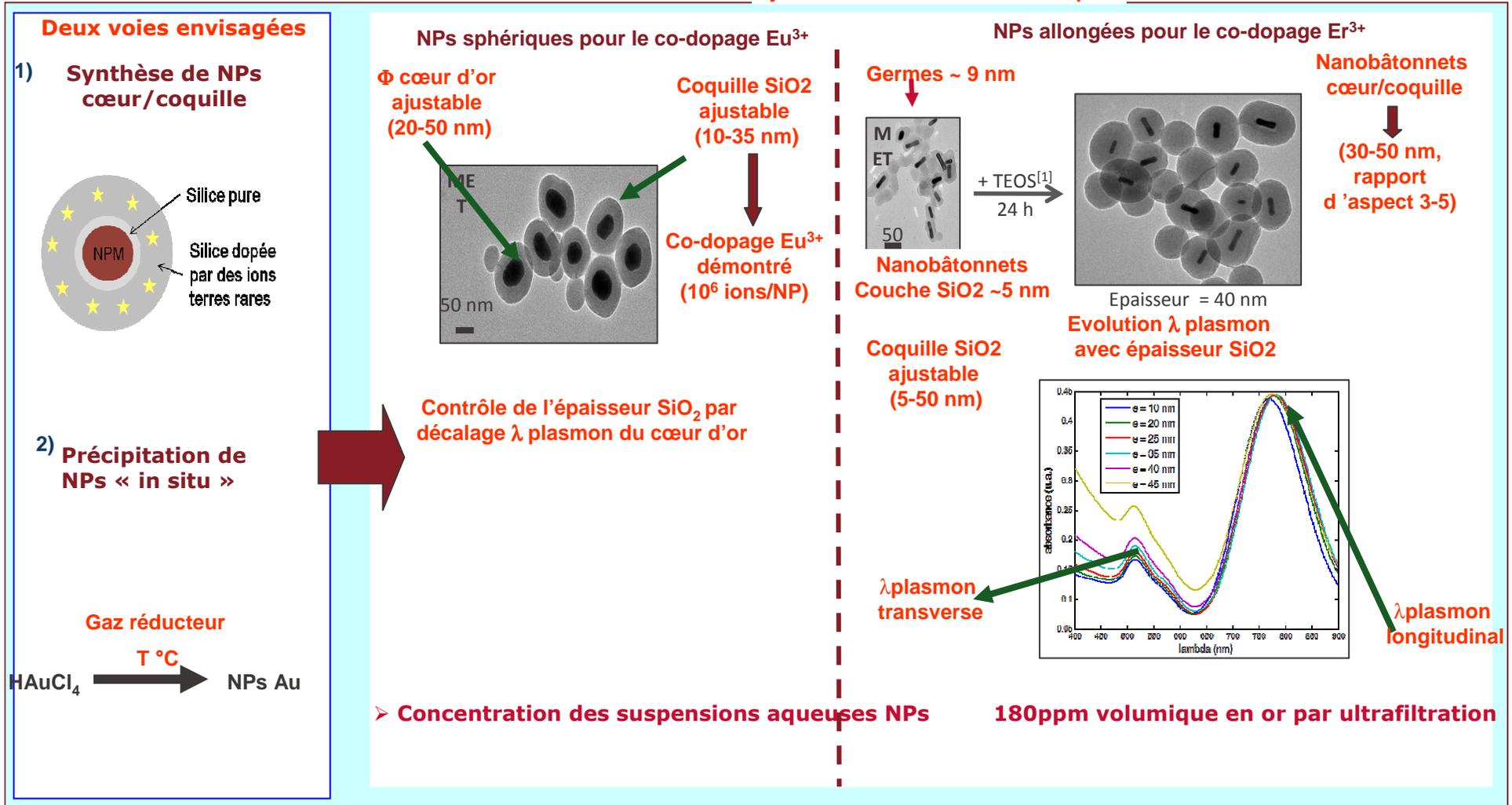
Perspectives:

- Développer le domaine des fibres optiques spéciales
- Favoriser l'émergence de composants optiques de nouvelle génération
- Dévoiler un domaine où le potentiel des nanotechnologies peut constituer un avantage compétitif

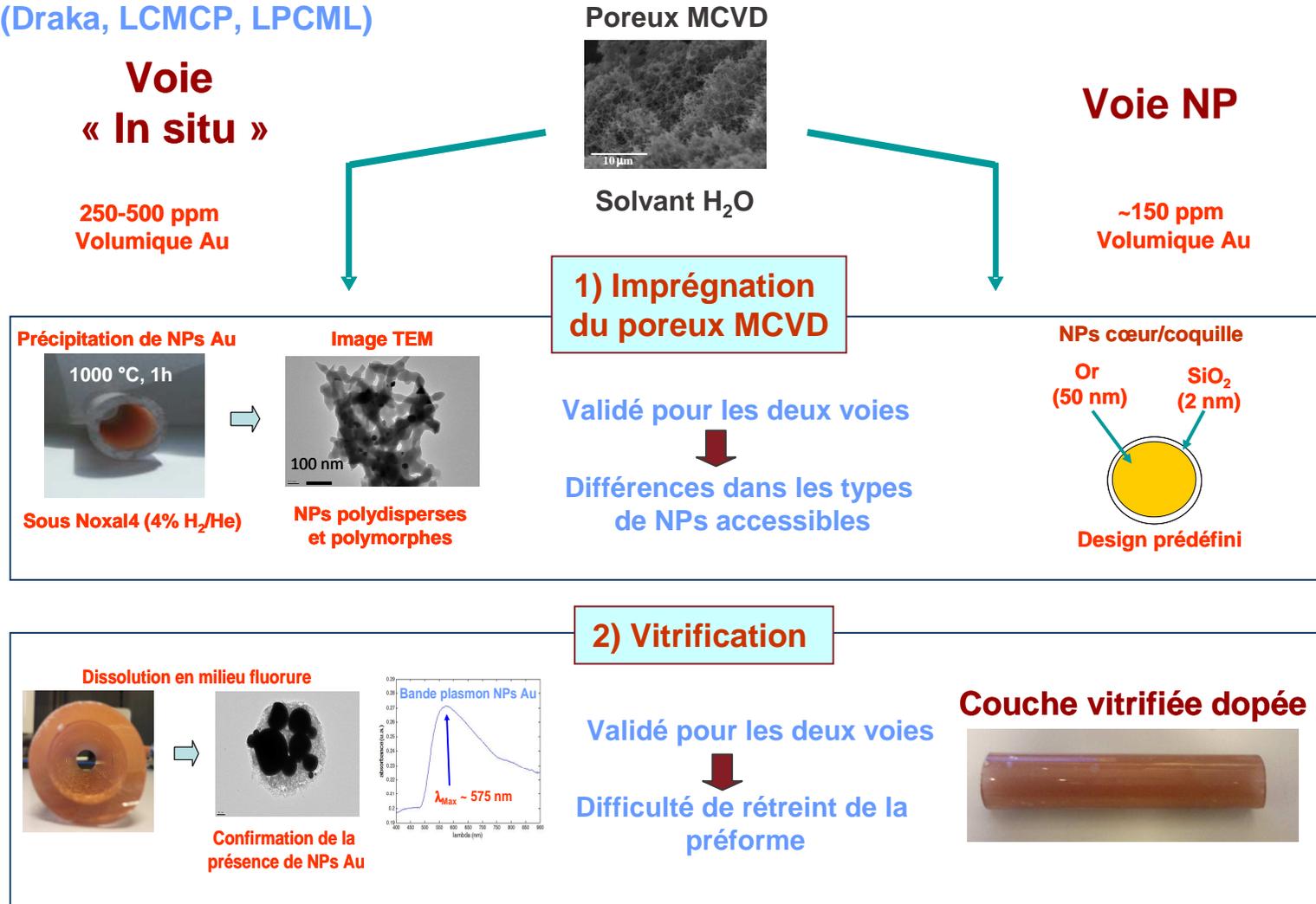
FENOPTIX

Stratégies de dopage - Synthèse de NPs (LCMPC)

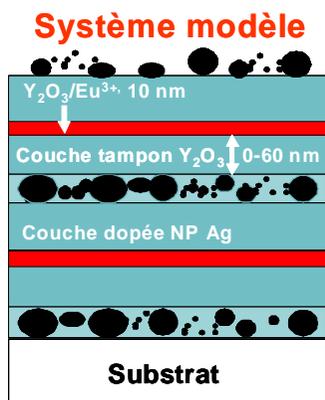
Synthèses de NPs d'or cœur/coquille



Inclusion de NPs dans une préforme et fibre optique (Draka, LCMCP, LPCML)



Exaltation de la fluorescence des ions terre rare



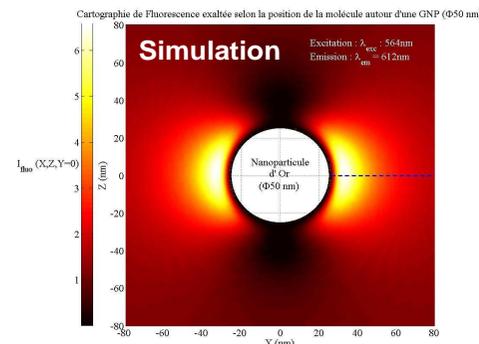
Multicouches PLD
(Laser Deposition)

Corrélation
Expérience/simulation

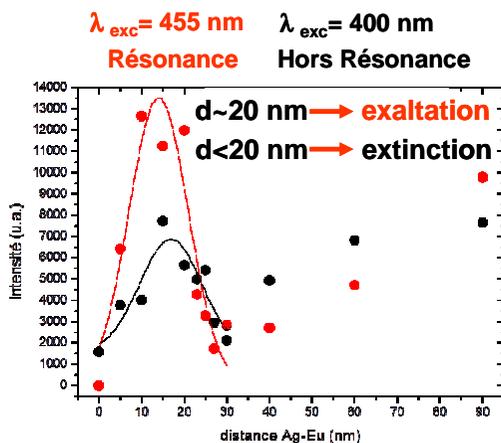


Approche originale

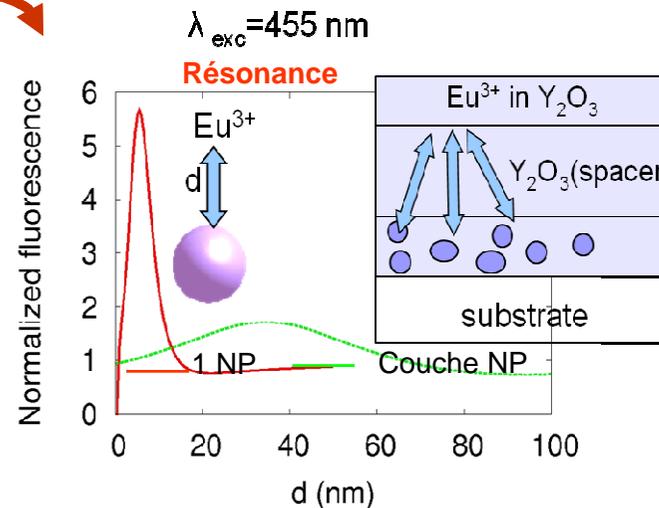
Bon accord
Expérience / Simulation



Exaltation de fluorescence
selon distance NP Au/Eu³⁺



Importance de
contrôler la distance
NP métallique/terre
rare



Autres perspectives

- Amplificateur pour les systèmes à guidage bi-modes; multimode;
- Utilisation des fibres dopée TR pour les applications capteurs

Merci

**Global Presence
Extensive Product Portfolio
Value Innovation
Customer Designed to Spec
Draka Technology Building Blocks**

