

AMPLIFICATEURS OPTIQUES

■ 1. INTRODUCTION

- *Liaisons longues distances, haut débit*
- *Déploiement des amplis optiques*
- *Caractéristiques de gain et puissance de saturation*
- *Principales utilisations ASO – EDFA*
- *Comparaison des caractéristiques*

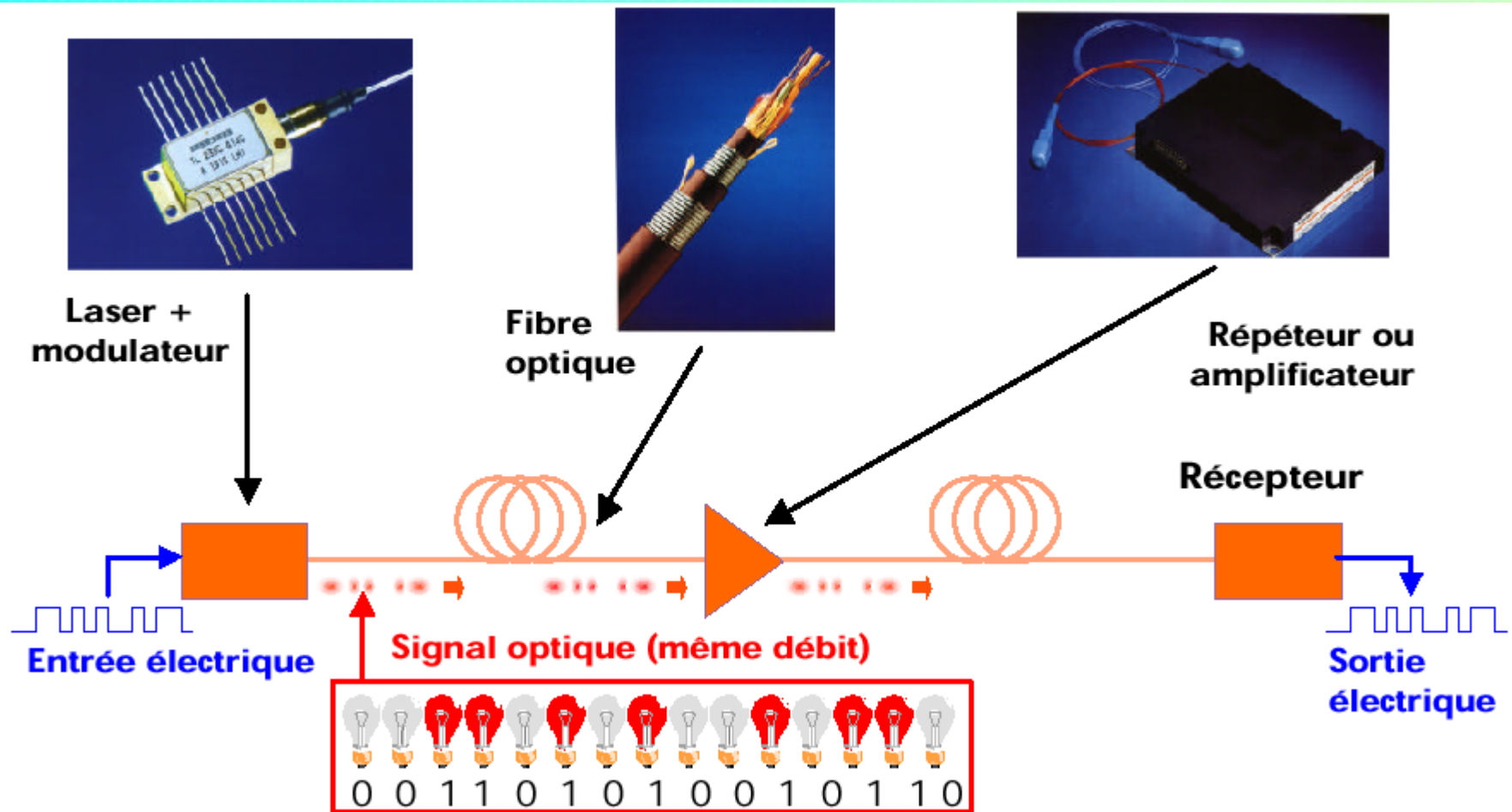
■ 2. AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR (AOS)

■ 3. AMPLI A FIBRE OPTIQUE DOPEE ERBIUM (EDFA)

- *Dopage d'une FO monomode*
- *Structure d'un EDFA*
- *Pompage optique, sections efficaces, gain petit signal*
- *Emission spontanée amplifiée ESA, densité spectrale d'ESA*
- *Bruit dans les EDFA, facteur de bruit, mesure du facteur de bruit.*
- *Amplificateur en ligne, distance optimum, accumulation du bruit.*
- *Amplification en WDM, platitude du gain.*

■ 4. AMPLIFICATION RAMAN

LIAISON LONGUE DISTANCE HAUT DEBIT



- **Avant l'apparition des EDFA, on utilisait des régénérateurs opto-électroniques:**
 - Détection du signal, remise en forme électronique, amplification et ré-émission dans le tronçon suivant de fibre optique.
 - Limitation du débit par la faible vitesse des composants électroniques.
- **Première introduction des EDFA en 1995-96**
 - TAT-12,13 liaison trans-atlantique; TPC-5 entre les USA et le Japon
 - Composants purement optiques, ne requièrent aucun circuit électronique rapide
 - Le signal n'est pas détecté, mais simplement amplifié optiquement.
 - La méthode est insensible (transparente) au format des données et au débit.
- **Le passage de la régénération à l'amplification a permis une augmentation spectaculaire de la capacité des systèmes**
 - Avènement du WDM
 - La liaison peut être « up-gradée » sans modifier l'infrastructure existante.

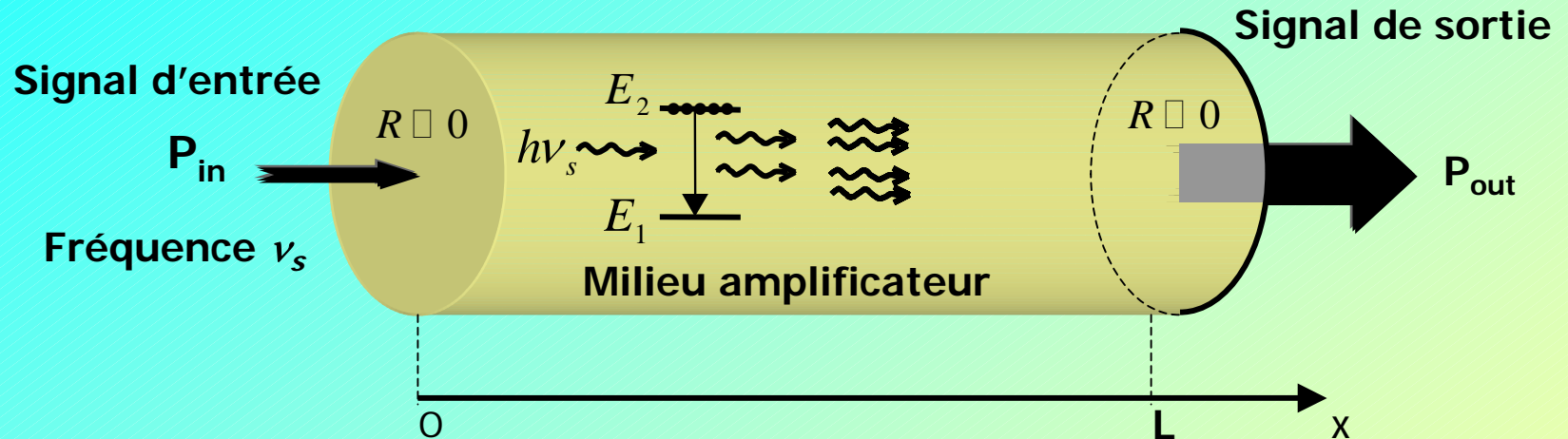
LIAISONS TRANSATLANTIQUES

Année	Nom	Pas entre répéteurs	Débit	Nombre voies eq. téléphone	Technologie
1956	TAT-1	70 km	Analogique	36	Coaxial Liaison Electrique.
1970	TAT-7	12 km	Analogique	4 000	Coaxial Liaison Electrique.
1988	TAT-8	40 km	280Mbit/s	4 375	Fibre 1.3 μm Liaison Opto-Elec.
1991	TAT-9	120 km	560Mbit/s	8 750	Fibre 1.5 μm Liaison Opto-Elec.
1995	TAT-12/13	45 km	5Gbit/s	78 125	Ampli. optique liaison optique
2000	TAT-14	50 km	160Gbit/s	2 500 000	WDM liaison optique

PRINCIPES DE BASE

- **UN AMPLI OPTIQUE N'EST RIEN D'AUTRE QU'UN LASER SANS CONTRE-REACTION OPTIQUE**
- **LE GAIN EST OBTENU DANS LE MILIEU ACTIF PAR INVERSION DE POPULATION SOUS L'EFFET DU POMPAGE (OPTIQUE OU ELECTRIQUE)**
- **LE GAIN OPTIQUE EST FONCTION**
 - **DE LA FREQUENCE (LONGUEUR D'ONDE) DU SIGNAL INCIDENT.**
 - **DE L'INTENSITE DU FAISCEAU AU POINT CONSIDERE**

GAIN PETIT SIGNAL



■ MILIEU AMPLIFICATEUR :

- La couche active dans une structure de type diode laser.
- Une fibre optique dopée avec des ions erbium, pompée optiquement.

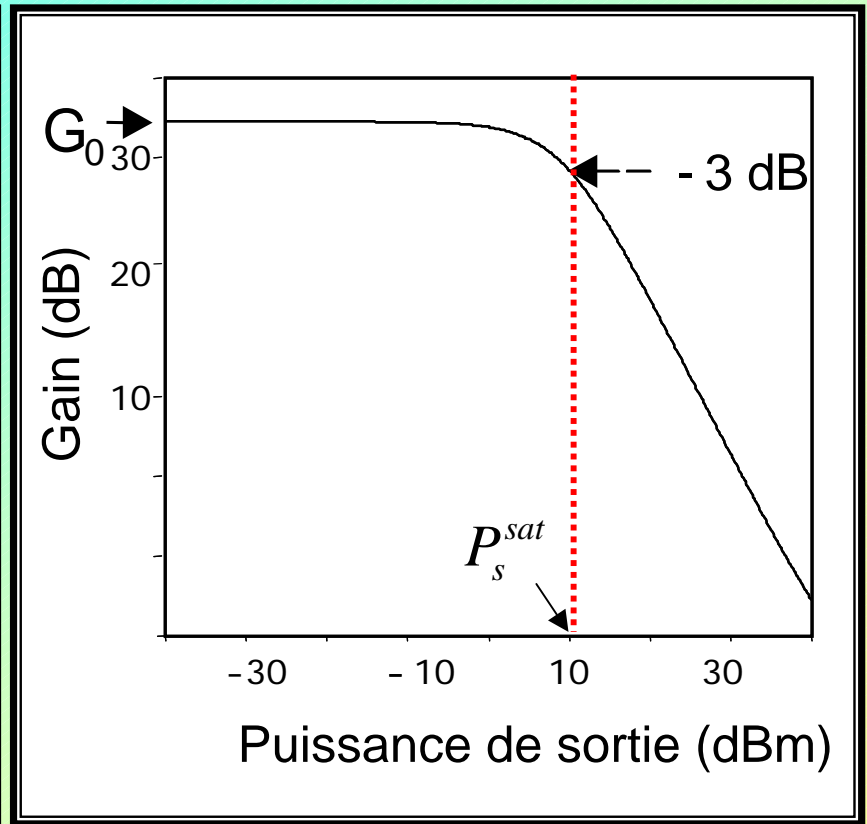
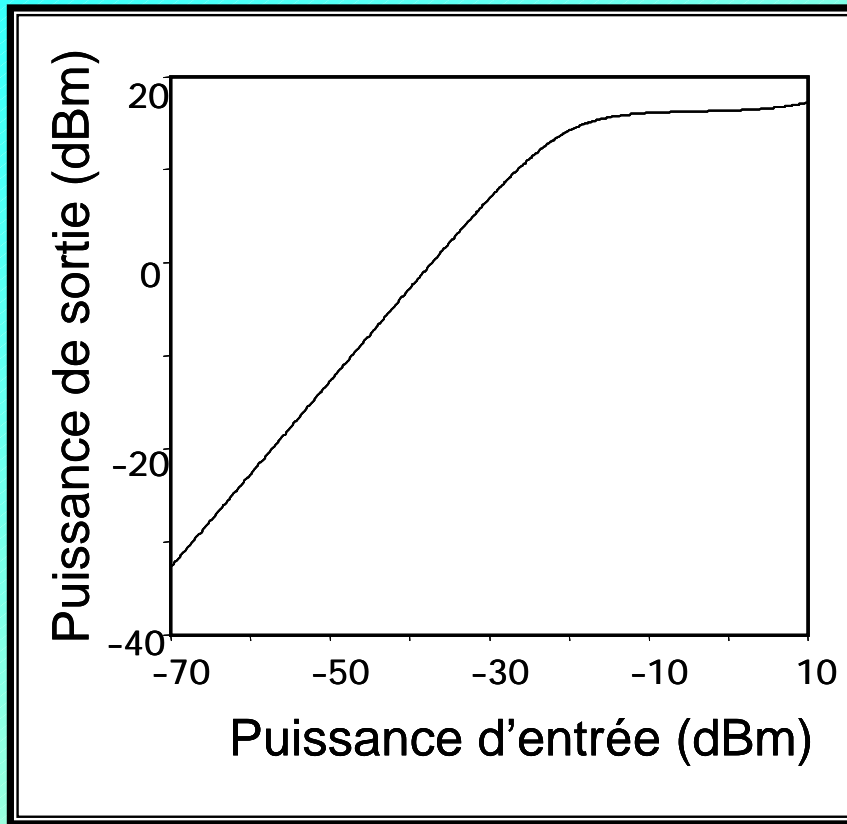
$$P_{sig}(x) = P_0 \exp(gx)$$

- **GAIN PETIT SIGNAL G_0** : l'onde incidente n'effectue qu'un seul passage dans le milieu car toutes les réflexions ont été éliminées.

- Pour un amplificateur de longueur L :

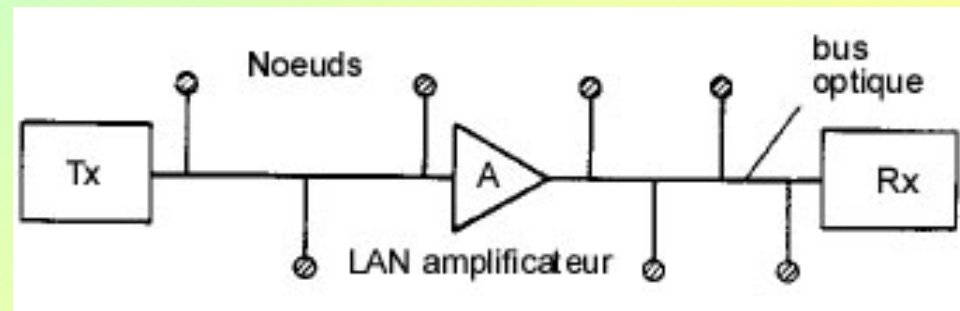
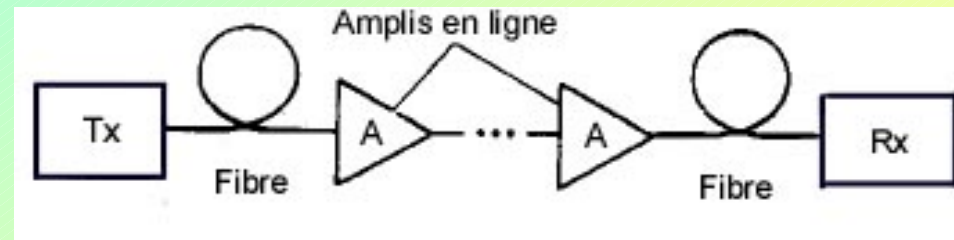
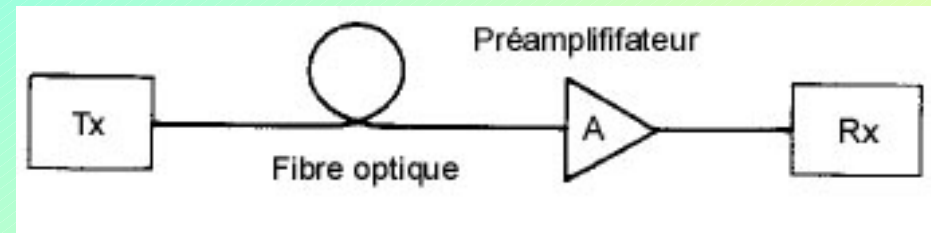
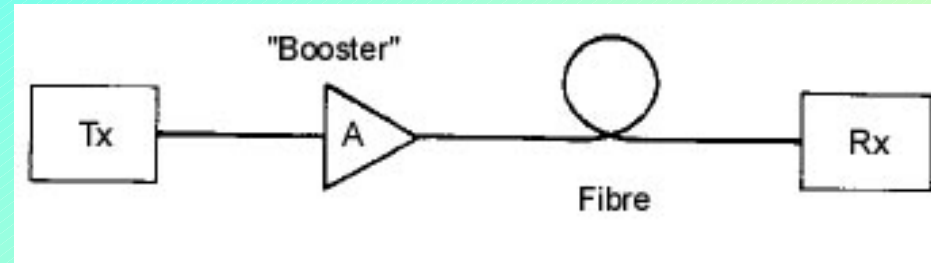
$$G_0 = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp(gL)$$

GAIN ET PUISSANCE DE SATURATION



PRINCIPALES APPLICATIONS

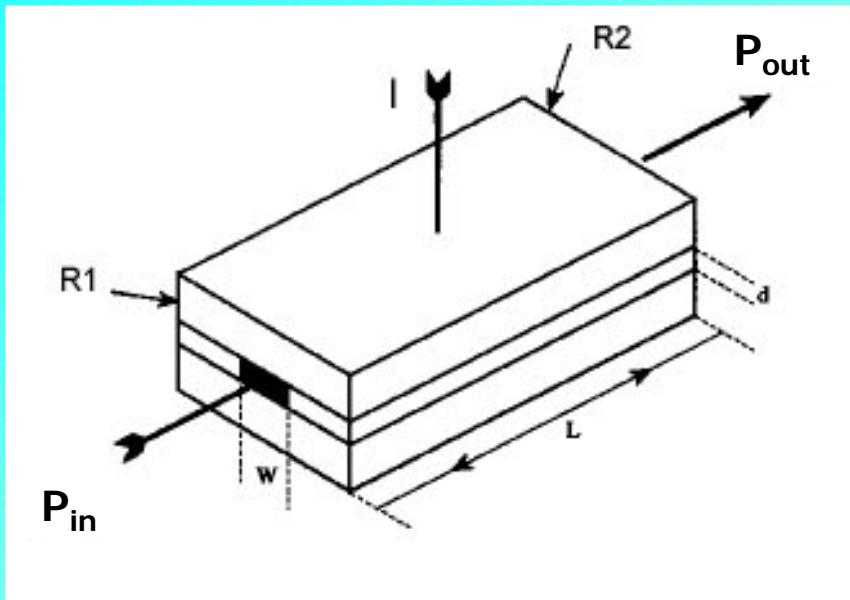
- « Booster »: Augmenter la puissance injectée dans la fibre optique.
- Préamplificateur: placé devant une photodiode pin améliore le rapport signal/bruit
- Ampli de ligne : compense les pertes en ligne.
- Compense les pertes dues à la distribution du signal optique entre les différents nœuds.



CARACTERISTIQUES DES AOS ET DES EDFA

	AMPLI OPTIQUE SEMICONDUCTEUR	AMPLI FIBRE DOPE Er
Gain (dB)	30 - 35	30 - 35
Facteur de bruit (dB)	6 - 8	< 4
Sens. polarisation	Forte (des solutions)	Faible
Pertes d'insertion	> 3 dB	0,5 dB
Diaphonie entre canaux	Importante	Faible
Puissance de saturation		> 20 dBm

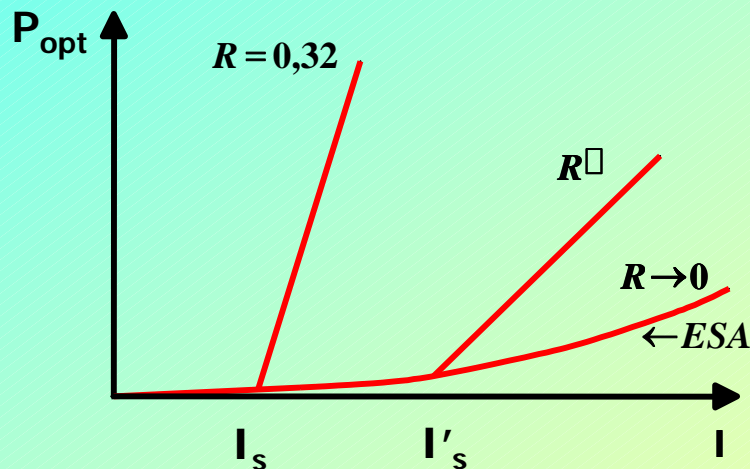
STRUCTURE D'UN AOS



- Un AOS possède la même structure qu'une diode laser.
- Afin d'éliminer la ré-injection de lumière dans le milieu actif, les faces sont traitées anti-reflet.

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

- L'intensité du courant de seuil I_s augmente lorsque R diminue.
- Des réflectivités inférieures à 10^{-3} sont obtenues, ce qui empêche le laser d'osciller.



AMPLIFICATEURS OPTIQUES

■ 1. INTRODUCTION

- *Liaisons longues distances, haut débit*
- *Introduction des amplis optiques*
- *Caractéristiques de gain et puissance de saturation*
- *Principales utilisations ASO – EDFA*
- *Comparaison des caractéristiques*

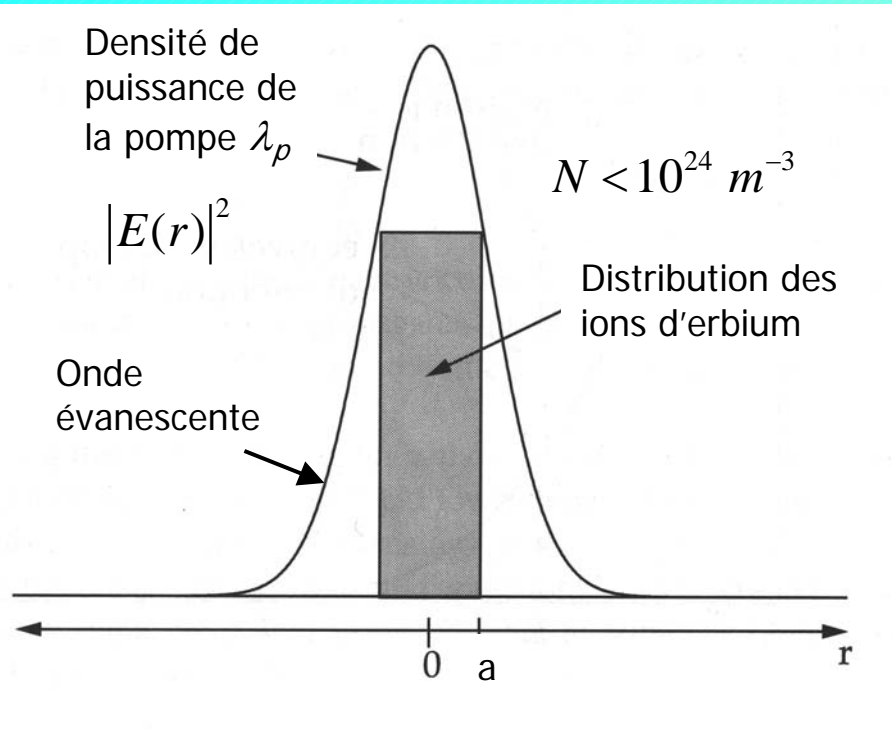
■ 2. AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR (AOS)

■ 3. AMPLI A FIBRE OPTIQUE DOPEE ERBIUM (EDFA)

- *Dopage d'une FO monomode*
- *Structure d'un EDFA*
- *Pompage optique, sections efficaces, gain petit signal*
- *Emission spontanée amplifiée ESA, densité spectrale d'ESA*
- *Bruit dans les EDFA, facteur de bruit, mesure du facteur de bruit.*
- *Amplificateur en ligne, distance optimum, accumulation du bruit.*
- *Amplification en WDM, platitude du gain.*

■ 4. AMPLIFICATION RAMAN

DOPAGE D'UNE FIBRE MONOMODE



Exemple de dopage uniforme dans le cœur d'une fibre optique monomode. La fibre qui est monomode à λ_{pompe} est automatiquement monomode à λ_{signal} .

■ FACTEUR DE RECOUVREMENT Γ

- Le champ électrique du mode fondamental s'étend dans la gaine

$$P_{coeur} = \Gamma P_{opt}$$

■ APPROXIMATION GAUSSIENNE

$$E(r) \propto E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right)$$

- Dopage uniforme dans le cœur de rayon a :

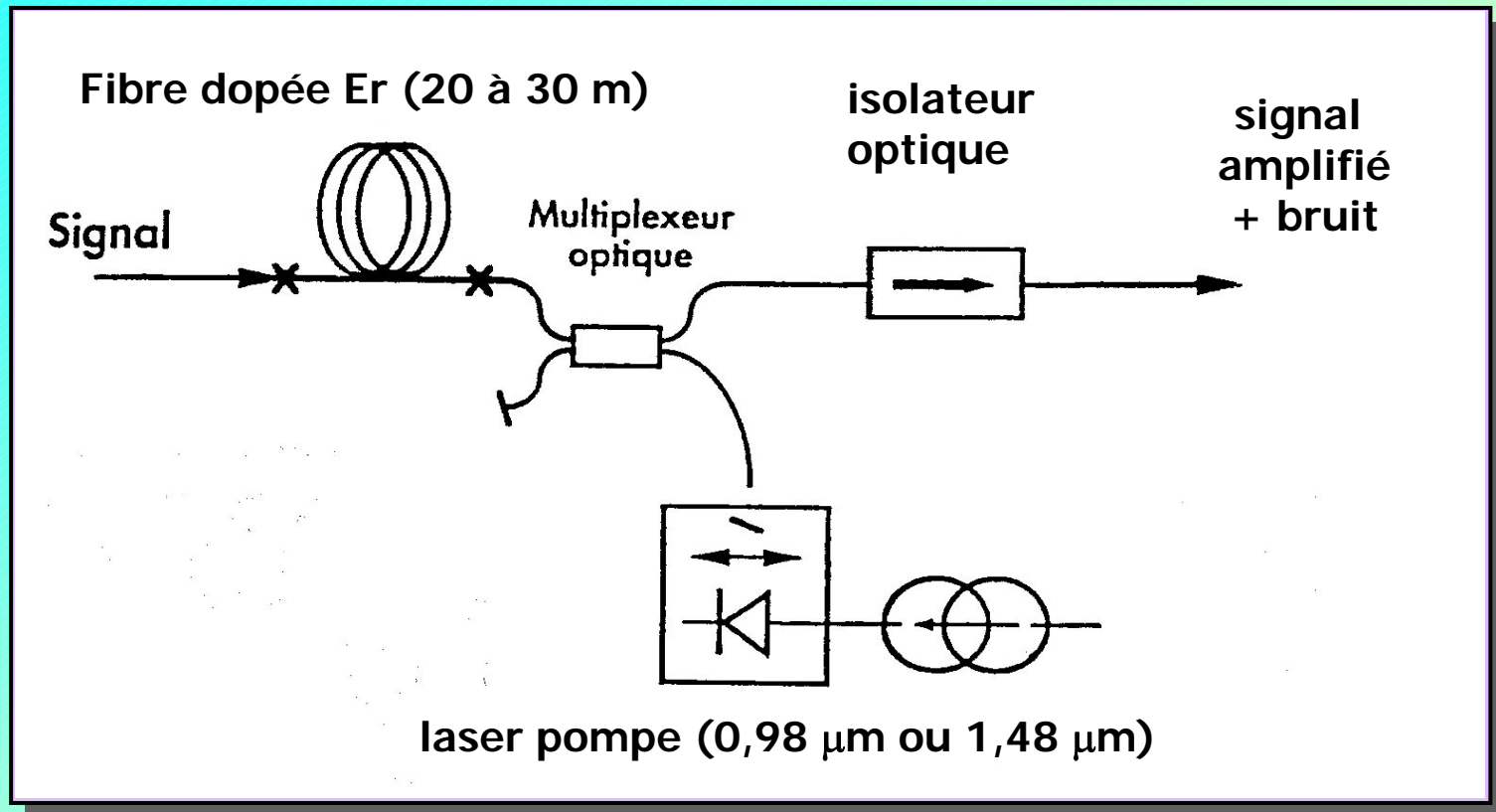
$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{a^2}{w_0^2}\right)$$

- On retrouve dans ce cas particulier l'expression du facteur de confinement.

- Γ dépend de la fréquence du mode :

Γ_p pour la pompe,
 Γ_s pour le signal.

STRUCTURE D'UN EDFA



- Différentes configurations de pompage possibles
 - co-propagatif
 - contra-propagatif (voir la figure)
 - bi-directionnel

POMPAGE OPTIQUE DES EDFA

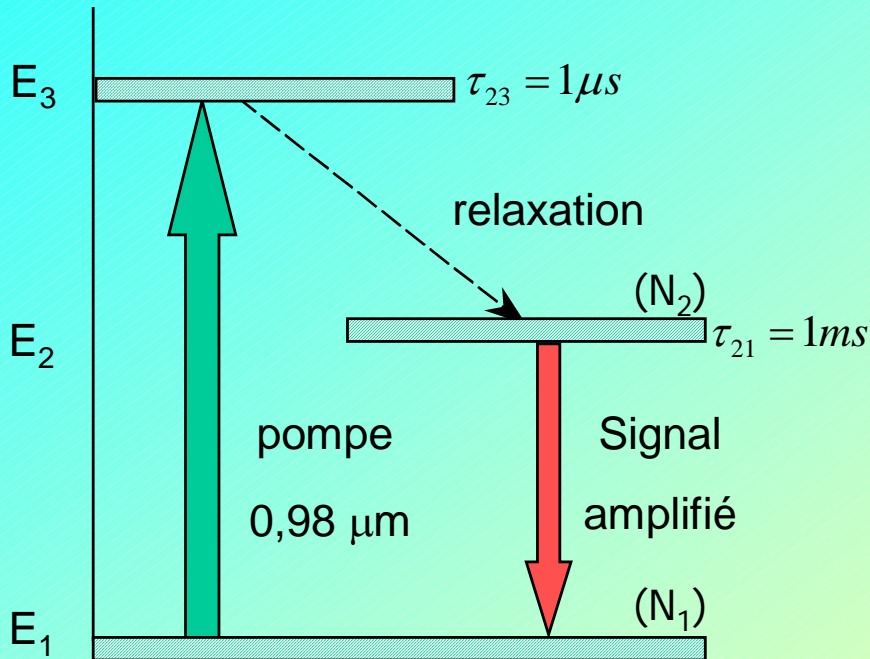
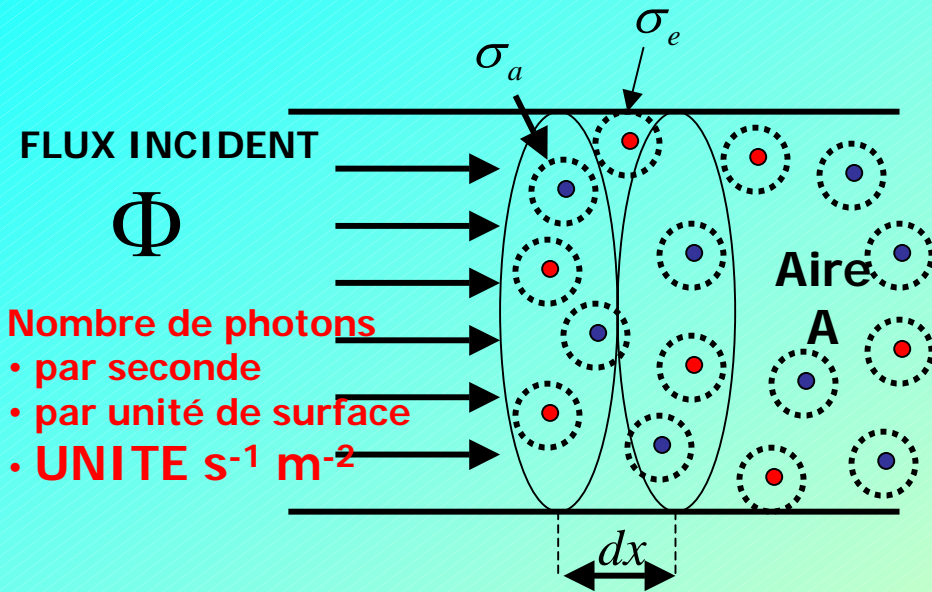


Diagramme des niveaux d'énergie
des ions Er^{3+} dans la silice
Système à trois niveaux

- E_3 : groupe de niveaux à durée de vie très courte permettant le peuplement du niveau E_2 .
- Le pompage se fait entre les niveaux E_1 et E_3 (diode laser émettant autour de $0,98 \mu\text{m}$).
- L'inversion de population $N_2 > N_1$ est réalisée entre les niveaux E_2 et E_1 , pour amplifier le signal autour de $1,55 \mu\text{m}$.

DEFINITION DES SECTIONS EFFICACES



σ_a : section apparente des Ions Er dans l'état fondamental (concentration N_1) vue par les photons



σ_e : section apparente des Ions Er dans l'état excité (concentration N_2) vue par les photons

σ_a et σ_e s'expriment en m^2 .

- Nombre de photons absorbés par seconde dans le volume $dV = A dx$

$$dN_a = \Phi \sigma_a N_1 A dx$$

- Taux d'absorption **unité $s^{-1} m^{-3}$**

$$R_a = \frac{dN_a}{A dx} = \sigma_a \Phi N_1$$

- Taux d'émission stimulée

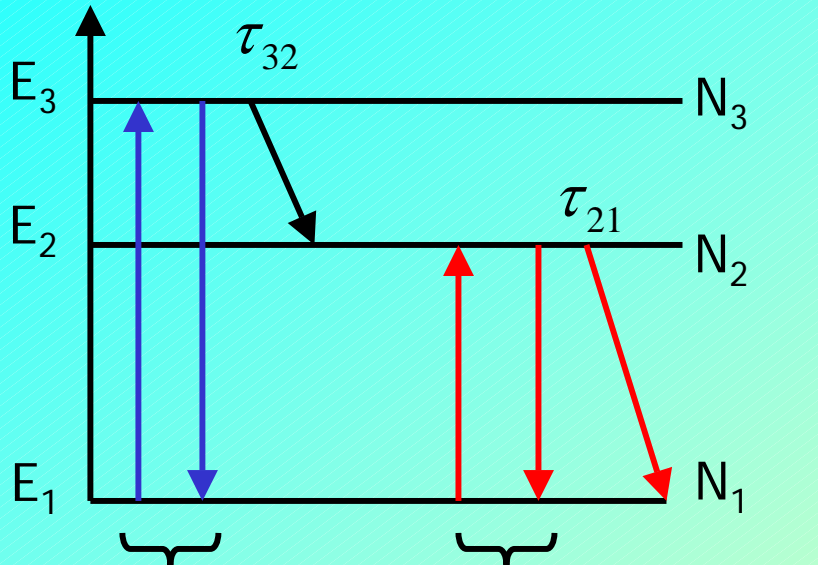
$$R_{st} = \sigma_e \Phi N_2$$

- Flux de photons dans le cœur :

$$\Phi = \frac{P_{opt} \Gamma}{A h \nu}$$

- P_{opt} est la puissance dans la fibre

GAIN PETIT SIGNAL



pompe ($\sigma_p \Phi_p \Gamma_p$)

- Absorption
- Emission stim

$$\phi_p(x) = \frac{P_p(x) \Gamma_p}{A h \nu_p}$$

Signal ($\sigma_s \Phi_s \Gamma_s$)

- Absorption
- Emission stim

$$\phi_s(x) = \frac{P_s(x) \Gamma_s}{A h \nu_s}$$

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad \text{et} \quad N_3 \ll N_1, N_2$$

■ TAUX DE VARIATIONS :

$$dN_1/dt = \sigma_p \Phi_p (N_3 - N_1) + \sigma_s \Phi_s (N_2 - N_1) + \frac{N_2}{\tau_{21}}$$

$$dN_2/dt = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} + \sigma_s \Phi_s (N_1 - N_2)$$

$$dN_3/dt = -\frac{N_3}{\tau_{32}} + \sigma_p \Phi_p (N_1 - N_3)$$

■ EQUILIBRE : $dN_1 = dN_2 = dN_3 = 0$

$$N_2 - N_1 \approx \frac{\sigma_p \phi_p - 1/\tau_{21}}{\sigma_p \phi_p + 1/\tau_{21}} N$$

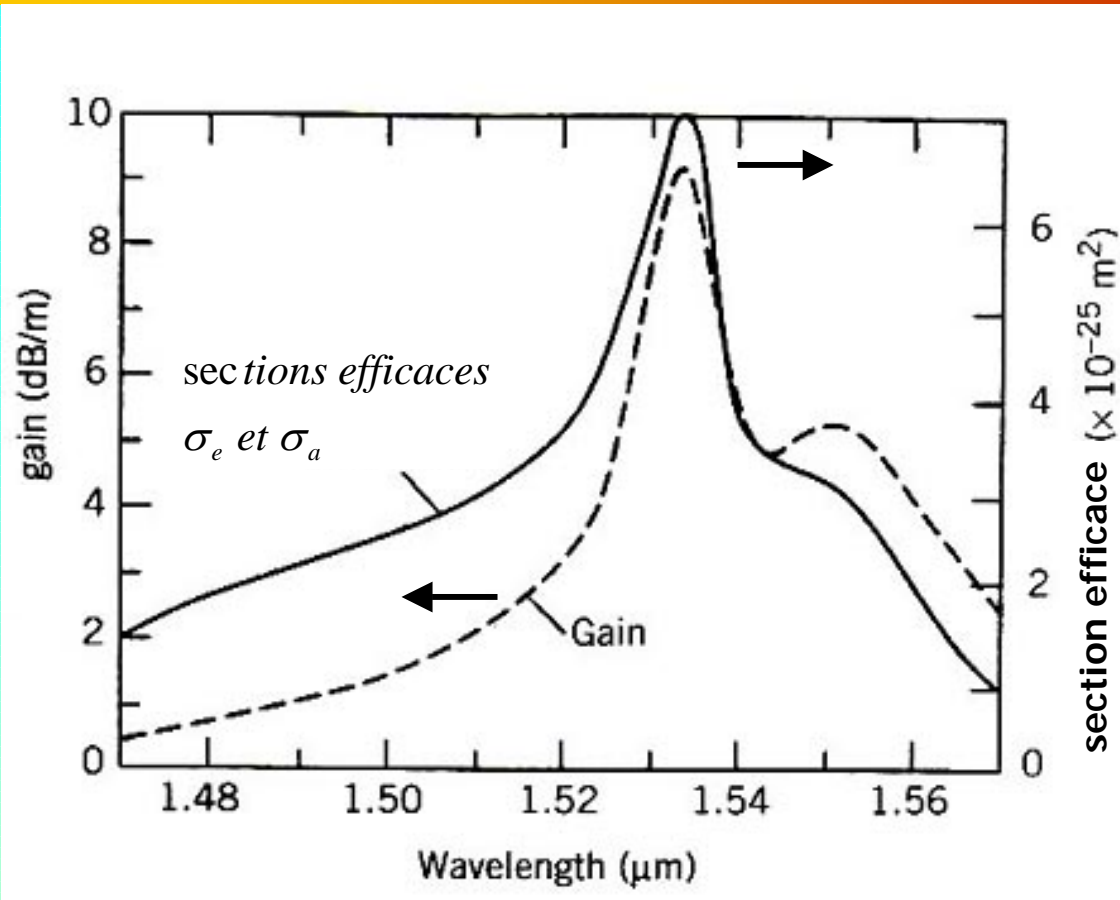
■ NOMBRE DE PHOTONS DU SIGNAL :

$$dN_s = A d\Phi_s \approx \sigma_s \Phi_s (N_2 - N_1) A dx$$

■ GAIN D'UNE FO DE LONGUEUR L :

$$G = \frac{P_s(L)}{P_0} = \exp[(N_2 - N_1) \sigma_s L]$$

SECTIONS EFFICACES DES IONS Er



**Sections efficaces d'émission et d'absorption
et spectre de gain d'une fibre optique en silice dopée Erbium.
L'élargissement des niveaux conduit à la formation de bandes larges.**

ORDRES DE GRANDEUR

■ PUISSANCE AU SEUIL D'INVERSION DE POPULATION P_{th} :

- Au seuil $N_1 = N_2$

- Flux de photons de la pompe $\Phi_{th} = \frac{1}{\tau_{21}\sigma_p} = \frac{P_{th}\Gamma_p}{Ah\nu_p}$
- Puissance de la pompe au seuil : $\longrightarrow P_{th} = \frac{Ah\nu_p}{\tau_{21}\sigma_p\Gamma_p}$

- Données : longueur d'onde de pompe $\lambda_p = 0,98 \mu m$; $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-21} cm^2$; $\tau_{21} = 5 ms$; $A = 10 \mu m^2$; $\Gamma_p = 1$. $\longrightarrow P_{th} = 2 mW$

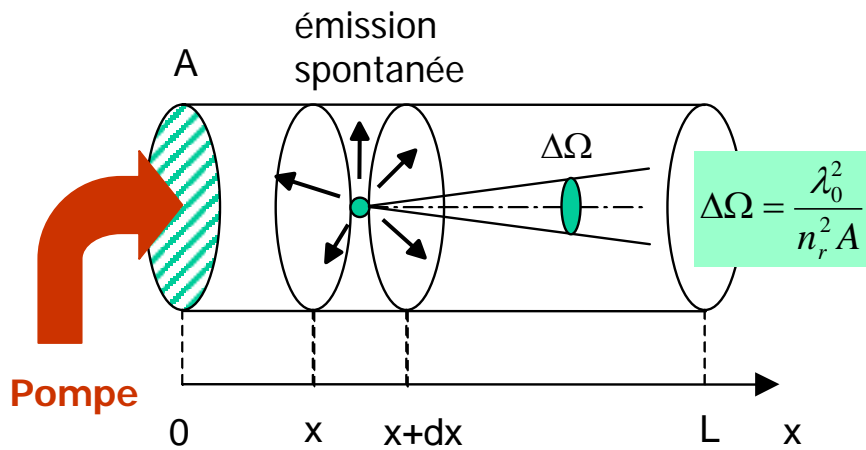
■ GAIN PETIT SIGNAL G_0 :

$$G_0 = \frac{P_s(L)}{P_0} = \exp[(N_2 - N_1)\sigma_s L] \longrightarrow N_2 - N_1 \approx \frac{\sigma_p \phi_p - 1/\tau_{21}}{\sigma_p \phi_p + 1/\tau_{21}} N$$

- Données : $N = 6 \cdot 10^{23} m^{-3}$; $P_p = 20 mW$; $\sigma_s = 7,9 \cdot 10^{-21} cm^2$.
Longueur de fibre $L = 20 m$.

Résultats : $N_2 - N_1 = 5 \cdot 10^{23} m^{-3}$ $\longrightarrow G_0 = 2700$ soit 34,3 dB

DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE D'ESA



Génération de l'émission spontanée ES dans la fibre dopée et amplification de l'ES émise dans le cône d'angle au sommet $\Delta\Omega$.

EMISSION SPONTANEE AMPLIFIEE

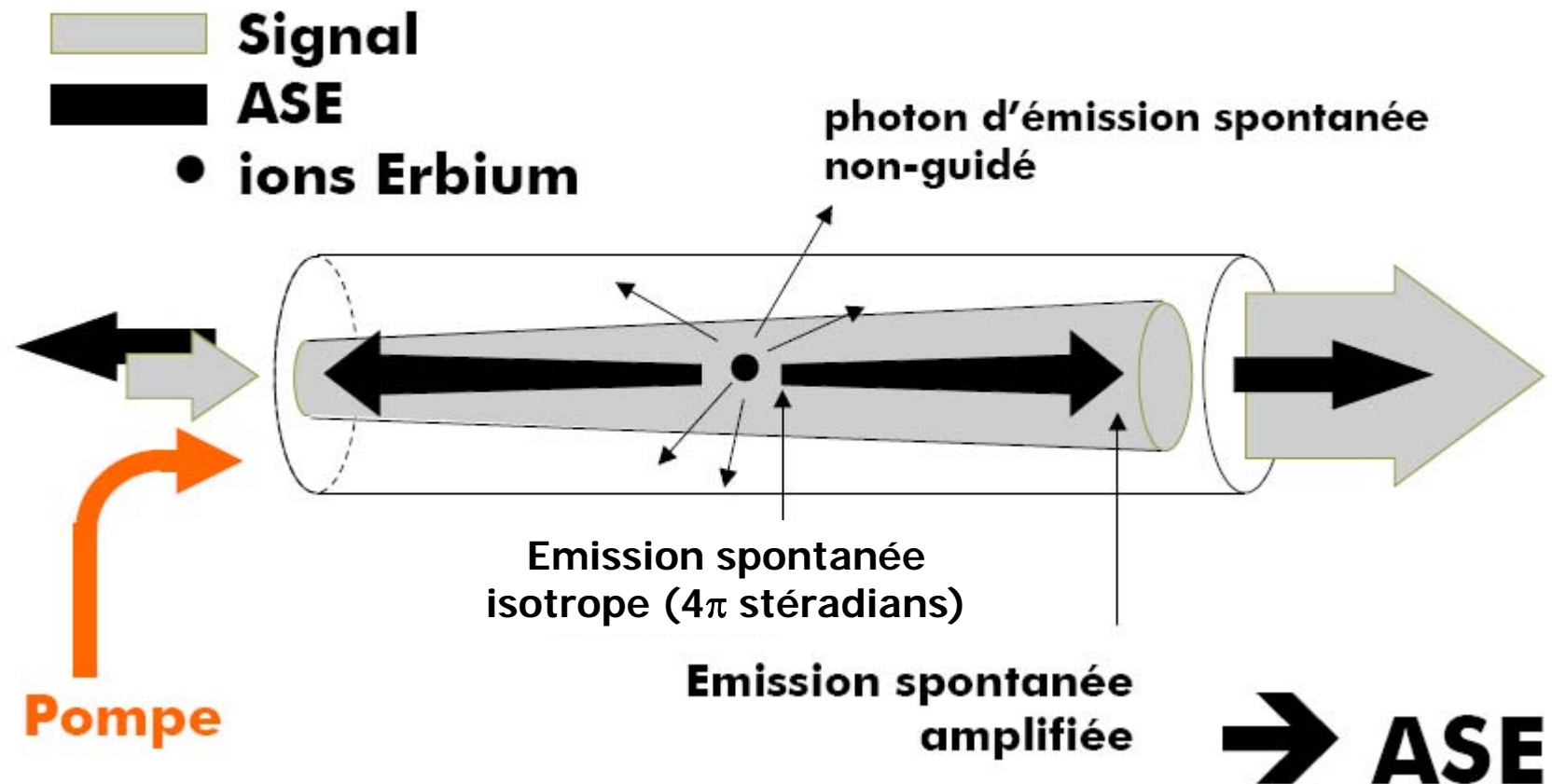
- Rayonnement incohérent non polarisé
- Emission isotrope
- Spectre large > 30 nm
- Taux d'émission spontané R_{sp} augmente proportionnellement à N_2 .

$$R_{sp} = \frac{N_2}{\tau_{21}}$$
- Densité spectrale de puissance d'Emission Spontanée Amplifiée:

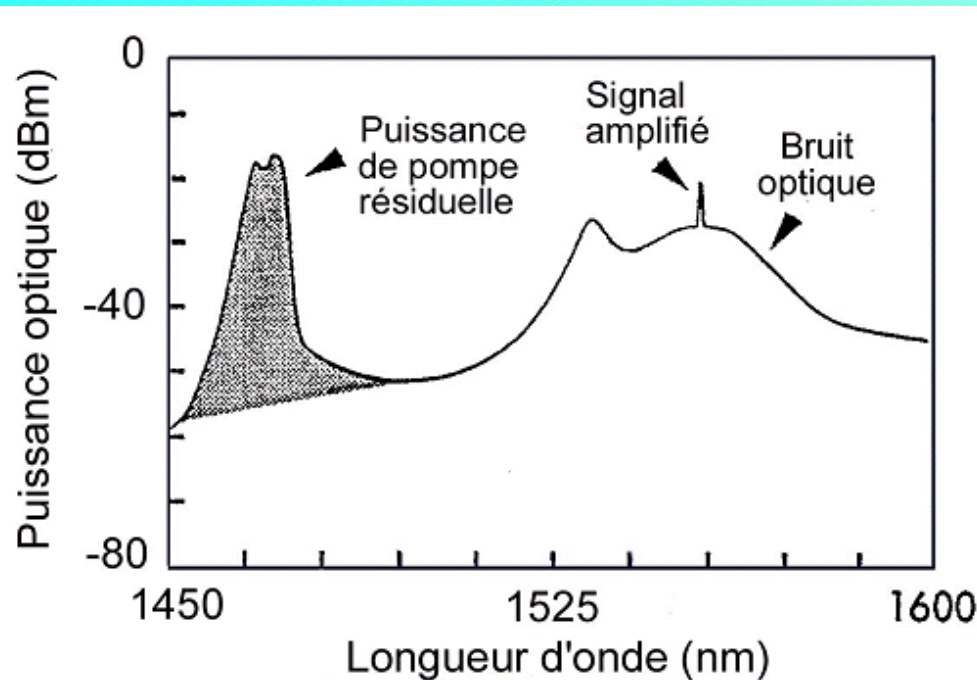
$$D_{ESA} = \frac{dP_{ESA}}{d\nu} = 2 \frac{N_2}{N_2 - N_1} [G(\nu) - 1] h\nu$$

Unité W/Hz ou dBm/Hz

EMISSION SPONTANEE AMPLIFIEE (ASE)



SPECTRE EN SORTIE D'UN EDFA



La densité spectrale de puissance représente la puissance optique mesurée dans la bande passante $\Delta\lambda$ de l'analyseur de spectre.

- Le signal amplifié est superposé à un spectre continu d'ESA
- Le bruit optique généré dans une bande de fréquence $\Delta\nu$ s'écrit

$$\Delta P_{ASE} = 2 n_{sp} [G - 1] h\nu \Delta\nu$$

- n_{sp} est le facteur d'inversion de population

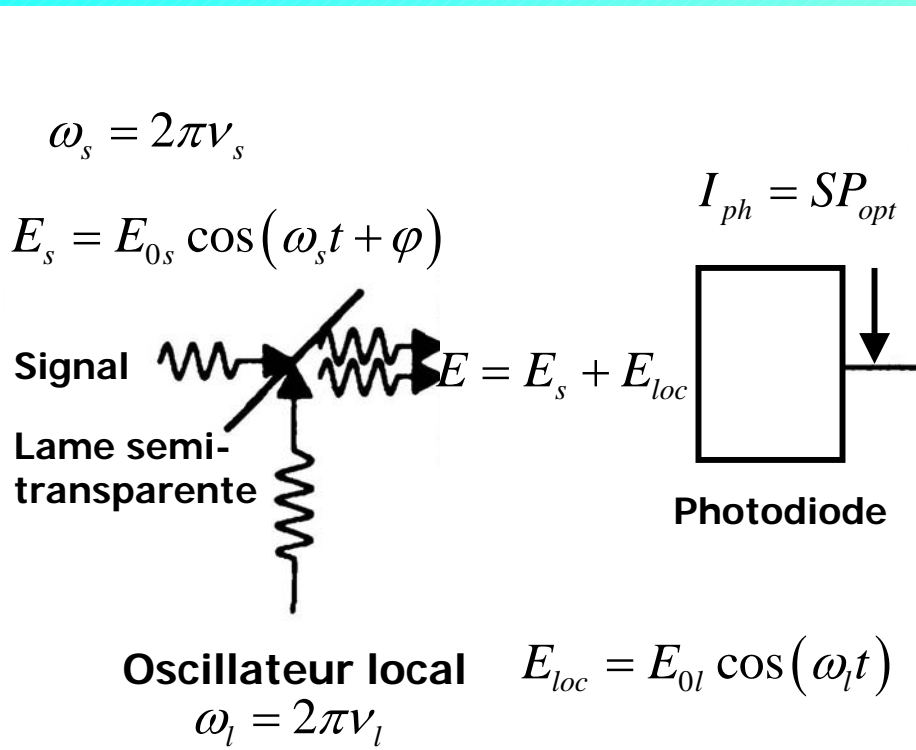
$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$$

- Bruit optique : l'ESA dégrade le rapport signal/Bruit.

- Même calcul pour un AOS, à condition de poser :

$$n_{sp} = \frac{n}{n - n_0}$$

MELANGE HETERODYNE (1/2)



Mélange hétérodyne de deux signaux optiques dans un détecteur « quadratique » (photodiode PIN ou PDA).

- LE BRUIT D'UN EDFA EST GÉNÉRÉ PAR LE MÉLANGE HÉTÉRODYNE ENTRE LE SIGNAL ET L'ESA.

- Puissance optique

- Onde plane, surface A

$$P_{opt} = \langle \vec{E} \times \vec{H} \rangle A = \frac{A}{Z_0} \langle |\vec{E}|^2 \rangle$$

- Détecteur quadratique

$$I_{ph} = \frac{\eta q}{h\nu} P_{opt} = SP_{opt} = \frac{SA}{Z_0} \langle |\vec{E}|^2 \rangle$$

- Valeur moyenne sur une durée égale au temps de réponse du détecteur

$$E = E_{0s} \cos(\omega_s t + \varphi) + E_{0l} \cos(\omega_l t)$$

$$\begin{aligned} \langle |\vec{E}|^2 \rangle &= \langle E_{0l}^2 \cos^2(\omega_l t) \rangle + \langle E_{0s}^2 \cos^2(\omega_s t + \varphi) \rangle \\ &\quad + 2E_{0l}E_s \langle \cos(\omega_l t) \cos(\omega_s t + \varphi) \rangle \end{aligned}$$

MELANGE HETERODYNE (2/2)

$$\langle \cos(\omega_l t) \cos(\omega_s t + \varphi) \rangle = \left\langle \frac{1}{2} \cos[(\omega_l + \omega_s)t + \varphi] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_l - \omega_s)t - \varphi] \right\rangle$$

- Premier terme : période du signal \ll temps de réponse \rightarrow moyenne nulle
- Deuxième terme : ν_l et ν_s sont des fréquences voisines, le signal est dans la bande passante du détecteur

$$F_i = \nu_l - \nu_s < \Delta F_e$$

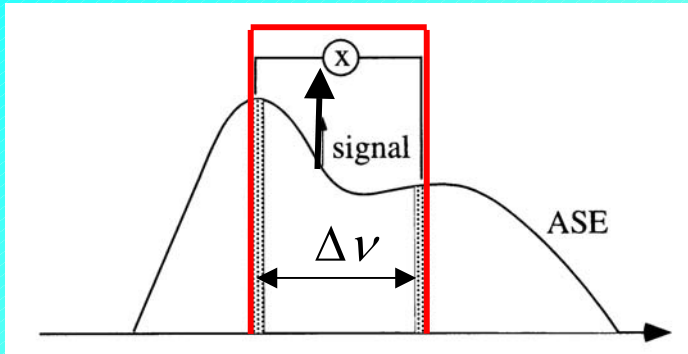
$$P_{opt} = \frac{A}{Z_0} \langle |\vec{E}|^2 \rangle = \frac{A}{Z_0} \left[\frac{1}{2} E_{ol}^2 + \frac{1}{2} E_{os}^2 + E_{ol} E_{os} \cos\{(\omega_l - \omega_s)t - \varphi\} \right]$$

$$P_{opt} = P_l + P_s + 2\sqrt{P_l P_s} \cos[(\omega_l - \omega_s)t + \varphi]$$

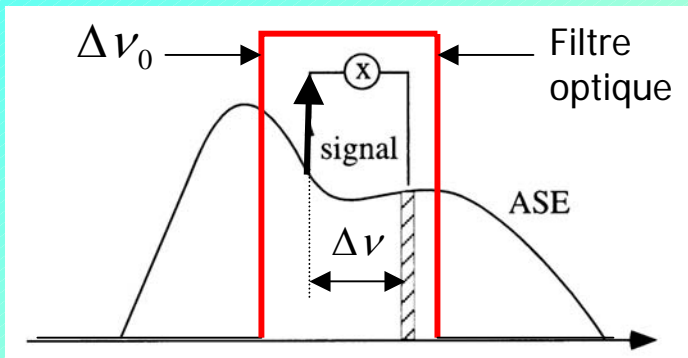
$$I_{ph} = S \left\{ P_l + P_s + 2\sqrt{P_l P_s} \cos[(\omega_l - \omega_s)t + \varphi] \right\}$$

- **Le courant de la photodiode comporte trois termes proportionnels à :**
 - la puissance optique de l'oscillateur local
 - la puissance optique du signal
 - un terme de battement entre le signal et l'oscillateur local
 - La détection hétérodyne est utilisée pour la détection à la fréquence intermédiaire F_i d'un signal de faible puissance.

BRUITS PROPRES AUX AMPLIS OPTIQUES



Battement spontané - spontané



Battement signal - spontané

On décompose l'ESA en bandes spectrales étroites, chaque bande pouvant donner un battement avec le signal ou avec une autre bande.

- La photodiode : un détecteur quadratique

$$I_{ph} = \frac{\eta q}{h\nu} \left[E_{sig}^2 + E_{spon}^2 + 2E_{sig}E_{spon} \right]$$

- Premier terme: intensité du signal amplifié
 - Génère un bruit de « grenaille »
- Second terme : génère un signal de battement spon – spon aux fréquences $< \Delta\nu_0$

$$\sigma_{sp-sp}^2 = 4q^2 (G-1)^2 n_{sp}^2 \Delta\nu_0 \Delta F_e$$

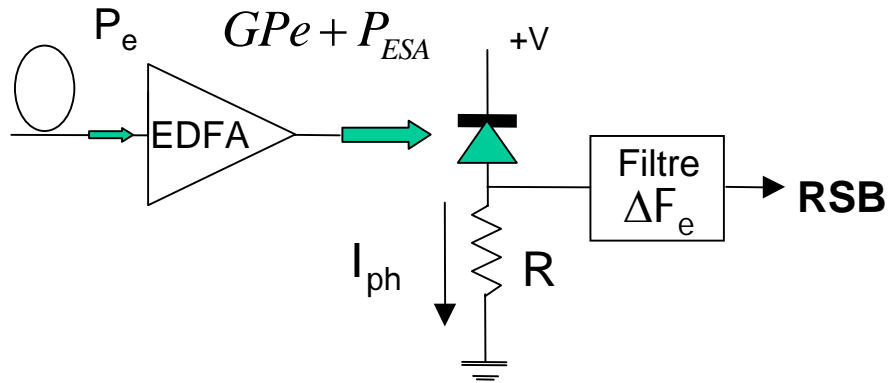
- Ce terme est proportionnel à la bande passante optique $\Delta\nu_0$ (filtrage)
- ΔF_e Bande passante électrique $\Delta F_e \ll \Delta\nu_0$

- Troisième terme : battement entre le signal amplifié et différentes composantes spectrales de l'ESA

$$\sigma_{sig-sp}^2 = 4q S P_e G (G-1) n_{sp} \Delta F_e$$

- C'est de loin le terme prédominant.
- Ne peut être réduit par filtrage optique

FACTEUR DE BRUIT D'UN EDFA



Principe de la mesure du facteur de bruit avec une photodiode pin

Sensibilité de la photodiode en A/W

$$S = \frac{I_{ph}}{P_{incid}} = \frac{\eta q}{h\nu}$$

- Facteur de bruit F_n : dégradation du rapport signal à bruit (RSB).

$$F_n = \frac{(RSB)_{entrée}}{(RSB)_{sortie}}$$

- Le RSB est mesuré avec la pin placée successivement avant puis après l'EDFA.
- Bruit de grenaille (photo-génération des paires électron/trou) :

$$\sigma_s^2 = 2q(I_{ph} + I_{obs})\Delta F_e$$

- Bruit thermique (théorème de Nyquist)
 - Généré dans la résistance de charge
 - indépendant du signal
 - Variance du courant

$$\sigma_T^2 = \frac{4kT}{R} \Delta F_e$$

CALCUL DU FACTEUR DE BRUIT

- Bruits additifs non corrélés $RSB = \frac{\text{Puissance du signal}}{\text{Puissance du bruit}} = \frac{R I_{ph}^2}{R \sum \sigma^2}$

- On suppose un détecteur idéal : bruit thermique négligeable

- **Avant amplification:**

$$(RSB)_{\text{entrée}} = \frac{I^2}{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} \square \frac{(SP_e)^2}{2qSP_e\Delta F_e}$$

- **A la sortie de l'amplificateur (avec $G > 30$ dB)**

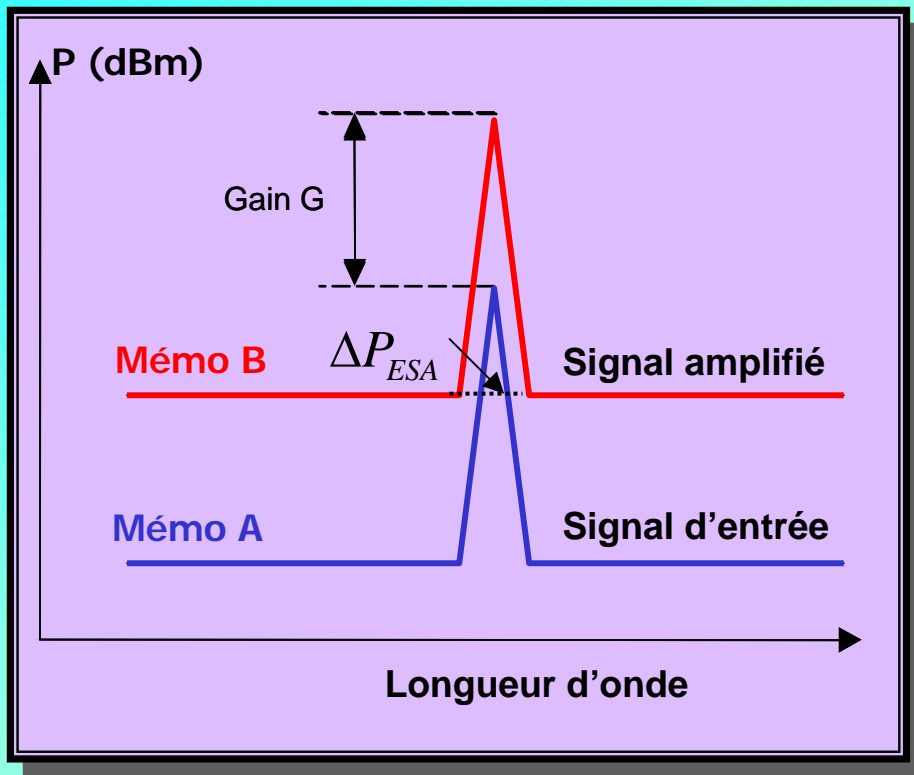
$$(RSB)_{\text{sortie}} = \frac{I^2}{\sigma_{\text{sig-sp}}^2 + \sigma_{\text{sp-sp}}^2 + \sigma_s^2 + \sigma_T^2} \square \frac{(SGP_e)^2}{4qSP_eG(G-1)n_{sp}\Delta F_e}$$

- Soit : $F_n = \frac{(SNR)_{\text{entrée}}}{(SNR)_{\text{sortie}}} = 2 \frac{G-1}{G} n_{sp}$

- Pour $G \gg 1$:

$$F_n \square 2 n_{sp}$$

MESURE DU FACTEUR DE BRUIT



Enregistrement des spectres du signal d'entrée et du signal amplifié avec un analyseur de spectre optique de bande passante $\Delta\lambda$.

■ UTILISATION D'UN ANALYSEUR DE SPECTRES OPTIQUES

■ Signal d'entrée :

- laser accordable autour de $1,55 \mu m$
- Mémoire A de l'analyseur de spectre optique (ASO)

■ Signal amplifié : mémoire B

■ Mesure directe du gain G

■ Mesure de ΔP_{ESA} sous le pic, dans la bande passante $\Delta\lambda$ de l'ASO.

■ Le facteur d'inversion n_{sp} se déduit de la relation:

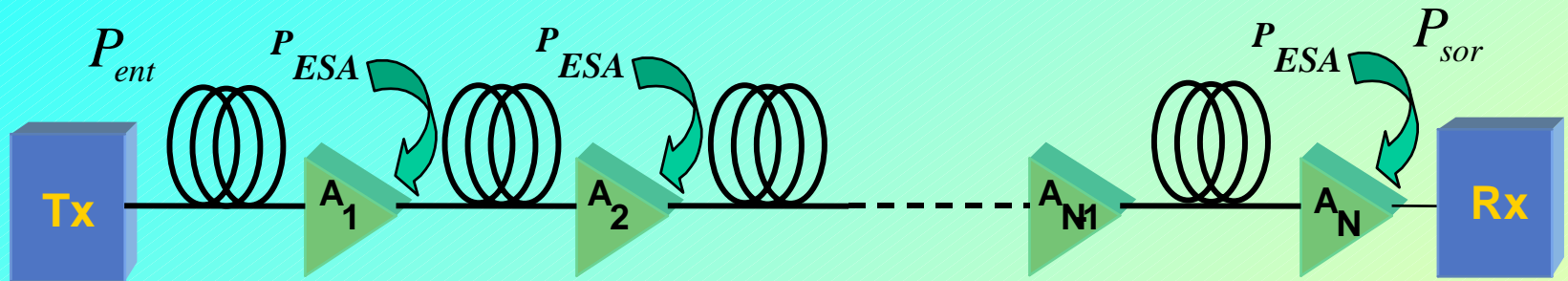
$$\Delta P_{ASE} = 2 n_{sp} [G - 1] h\nu \Delta\nu$$

■ d'où

$$F_n \approx 2 \frac{G-1}{G} n_{sp} = \frac{\Delta P_{ESA}}{G h\nu \Delta\nu}$$

AMPLIFICATION EN LIGNE

T : Atténuation des différents tronçons



$$P_{s1} = G_1 P_{e1}$$

$$P_{s2} = G_2 T(P_{s1})$$



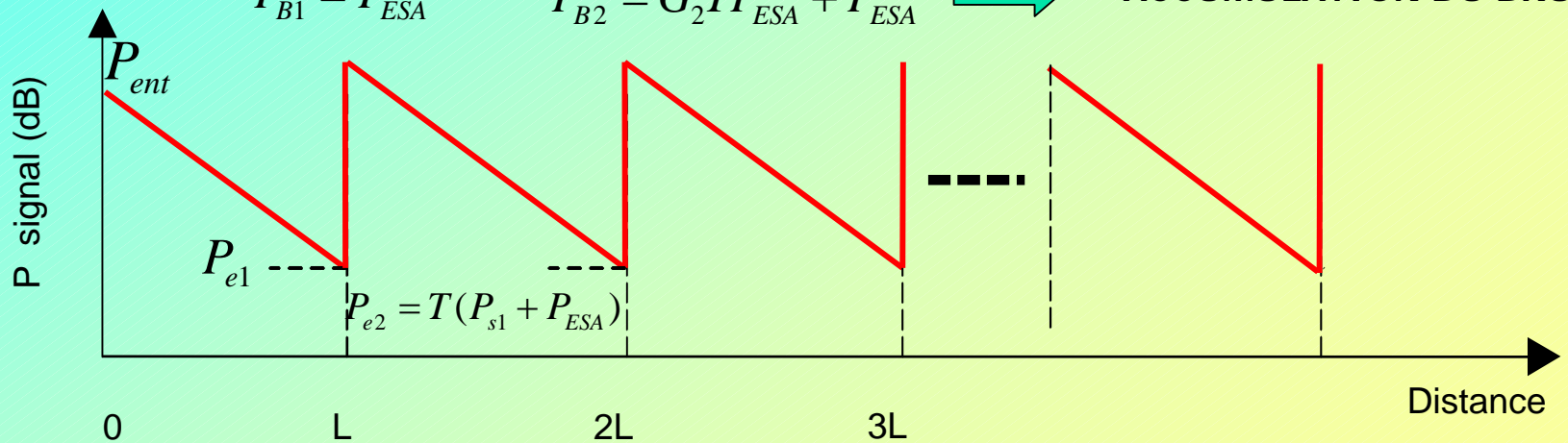
PUISSANCE DU SIGNAL

$$P_{B1} = P_{ESA}$$

$$P_{B2} = G_2 T P_{ESA} + P_{ESA}$$



ACCUMULATION DU BRUIT



ACCUMULATION DU BRUIT

- **CAS PRATIQUE USUEL** : $TG = 1$ (avec $G1 = G2 = \dots = G$)
 - Exemple $T = 0.01$ et $G = 100$.
- La puissance du signal remonte à un niveau constant après chaque ampli.
 - La puissance reçue est égale à la puissance émise :

$$P_{sor} = P_{ent}$$

- Puissance du bruit après N amplificateurs :

$$P_{BN} = NP_{ESA}$$

- Dégradation du rapport signal/Bruit dans une cascade d'amplificateurs

DISTANCE ENTRE AMPLIFICATEURS

- **NOMBRE D'AMPLIFICATEURS N** : La longueur L_{tot} de la liaison étant donnée on peut :

- Mettre peu d'EDFA de fort gain
- Beaucoup d'EDFA de faible gain

$$T_{tot} = T^N; \quad G_{tot} = G^N$$

$$T_{tot} G_{tot} = 1 \Rightarrow T^N G^N = 1$$

- **CALCUL DU RSB** :

- Prédominance du bruit de battement signal-spontané au détecteur

$$RSB = \frac{I_{sor}^2}{N \sigma_{sig-sp}^2} = \frac{S P_{ent}}{4 N q (G-1) n_{sp} \Delta F_e}$$

- Soit :

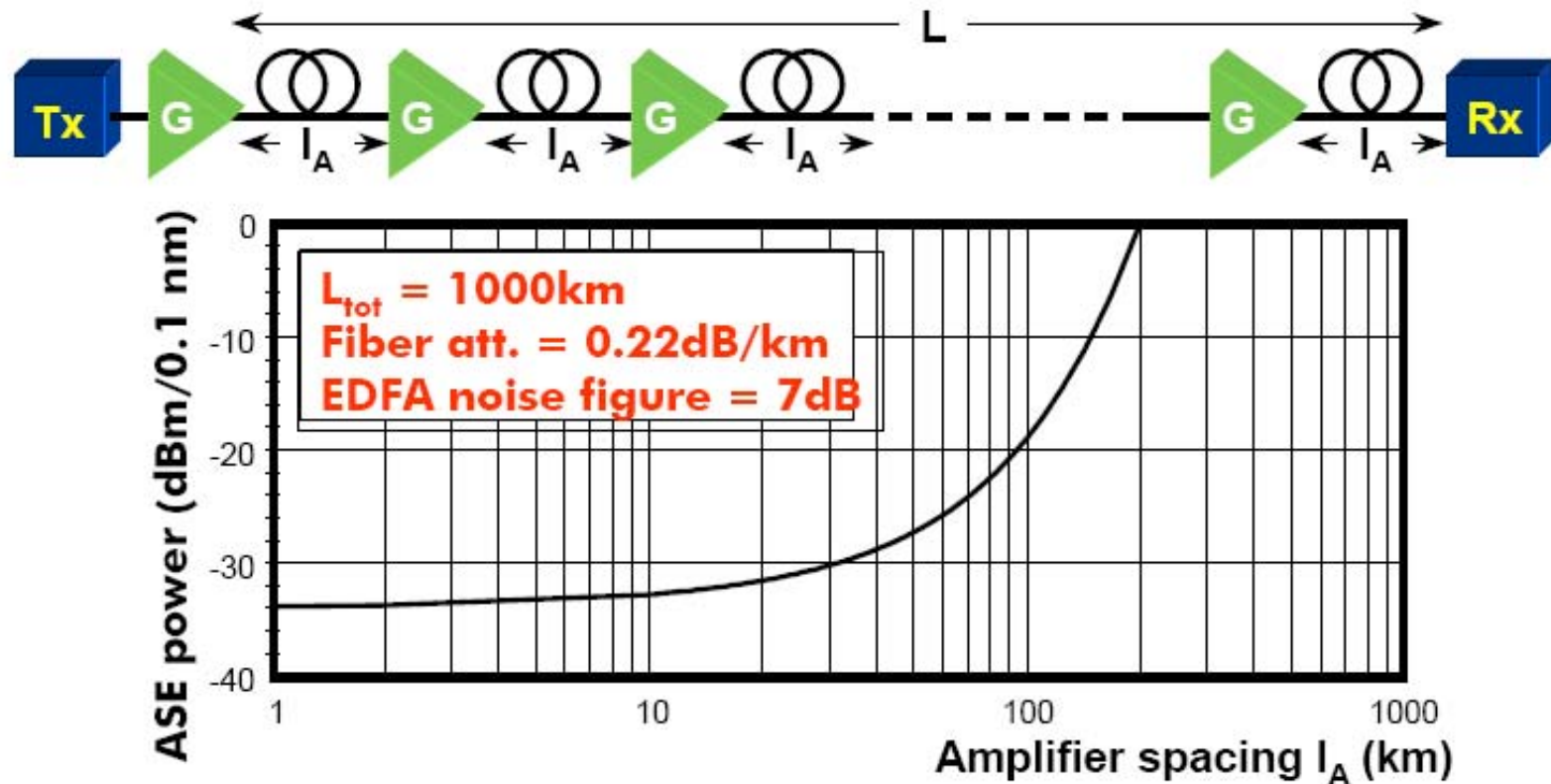
$$RSB = \frac{S P_{ent}}{4 q n_{sp} \Delta F_e \text{Ln}(G_{tot})} \frac{\text{Ln}(G)}{G-1} \quad \Rightarrow \quad \text{Fonction décroissante de } G$$

- **LE RSB EST MEILLEUR SI ON AUGMENTE LE NOMBRE D'EDFA ET QUE L'ON DIMINUE LE GAIN**

- Aspect économique
- Passage à la limite $N \rightarrow \infty$ et $G \rightarrow 1 \Rightarrow RSB_{\max} = \frac{P_{ent}}{4 n_{sp} h \nu \Delta F_e \text{Ln}(G_{tot})}$

- Le meilleur RSB est obtenu avec une amplification répartie (Ampli RAMAN)

EXEMPLE DE SIMULATION



→ Le bruit d'ASE croît avec la distance entre amplificateurs

FORMULE PRATIQUE DU RSB

■ EXPRESSION DU RSB :

$$RSB = \frac{I_{sor}^2}{N \sigma_{sig-sp}^2} = \frac{S P_{sor}}{4 N q (G-1) n_{sp} \Delta F_e}$$

■ REMPLAÇONS :

- photodiode idéale $\eta = 1$

$$S = \frac{I_{sor}}{P_{sor}} = \frac{q}{h\nu}$$

- Facteur de bruit

$$F_n \approx 2 n_{sp}$$

- Puissance à l'entrée des EDFA :

$$P_e = \frac{P_{sor}}{G} \approx \frac{P_{sor}}{G-1}$$

$$\left. \begin{array}{l} S = \frac{I_{sor}}{P_{sor}} = \frac{q}{h\nu} \\ F_n \approx 2 n_{sp} \\ P_e = \frac{P_{sor}}{G} \approx \frac{P_{sor}}{G-1} \end{array} \right\} RSB = \frac{P_e}{2 h \nu \Delta F_e} \times \frac{1}{N F_n}$$

- Signal NRZ (équipartition des « 1 » et des « 0 ») : absence de bruit sur la valeur « 0 ».

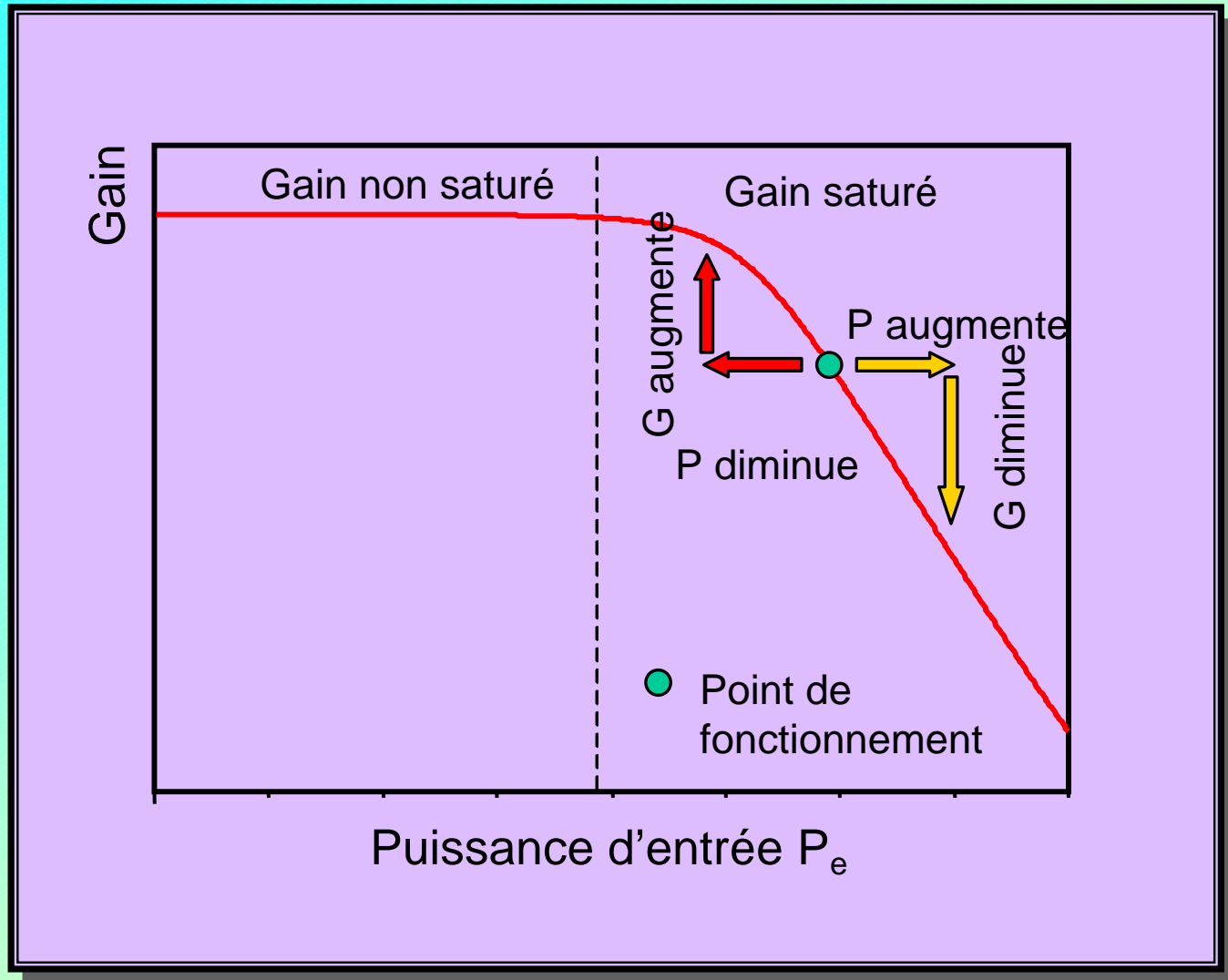
■ RSB_{opt} dans la bande optique $\Delta\nu_o$ (0,1 nm)

$$RSB_{opt} = \frac{P_e}{h\nu \Delta\nu_o} \times \frac{1}{N F_n}$$

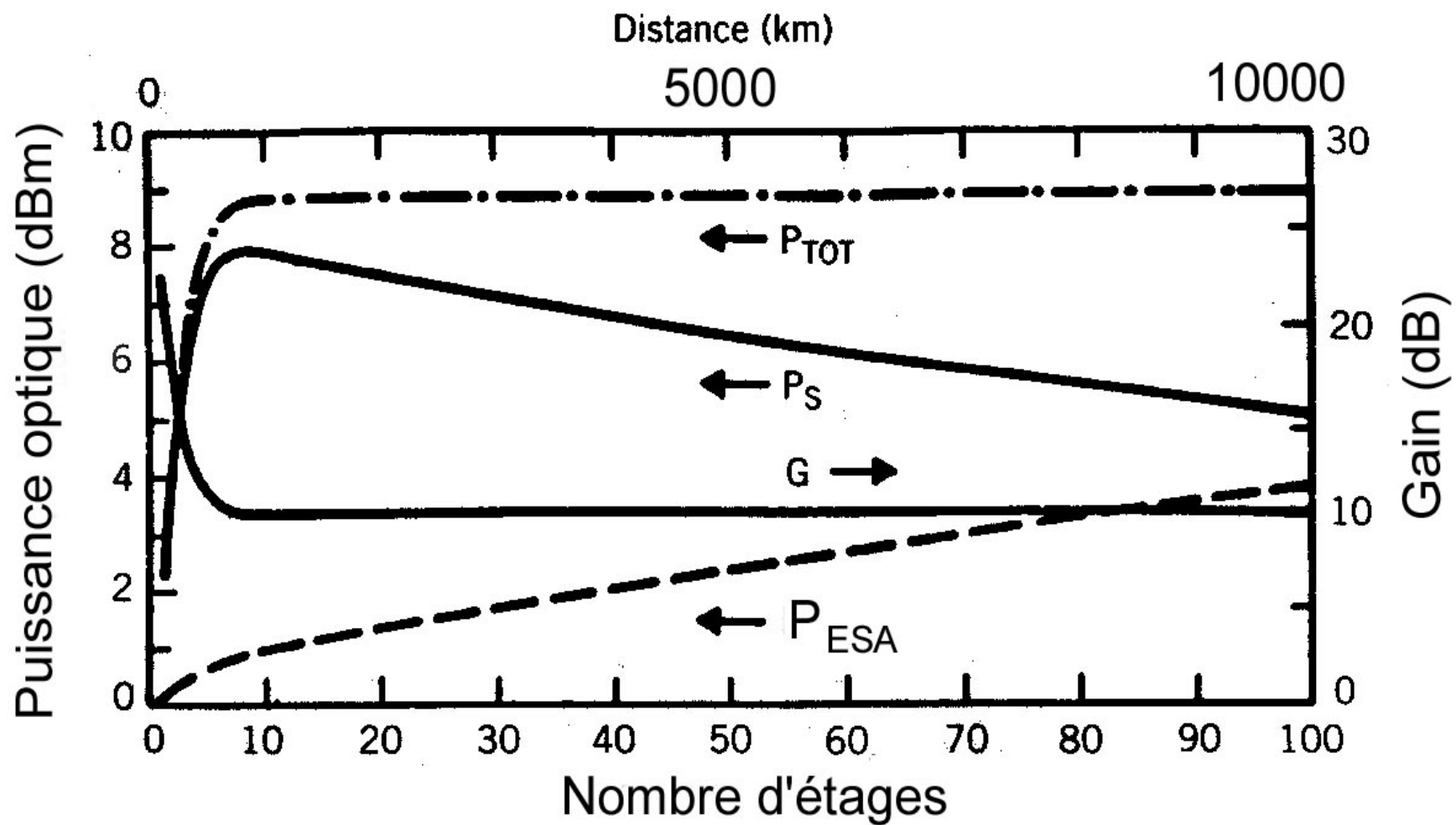
- **Vérifier en exercice :** $\lambda = 1,55 \mu m$; $\Delta\nu = 0,1 nm$; RSB en dB et P_e en dBm

$$(RSB_{opt})_{dB} = (P_e)_{dBm} - (F_n)_{dB} - 10 \log_{10}(N) + 58 dBm$$

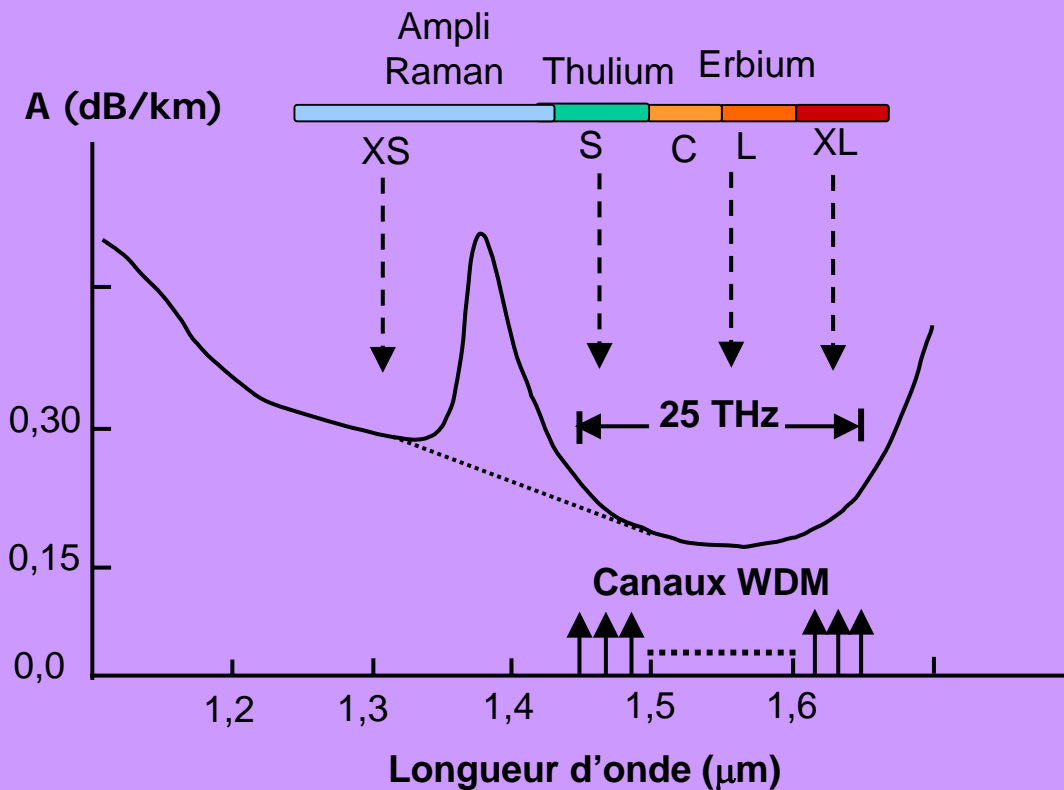
AUTO-REGULATION DU GAIN



EVOLUTION DES PUISSANCES EN LIGNE

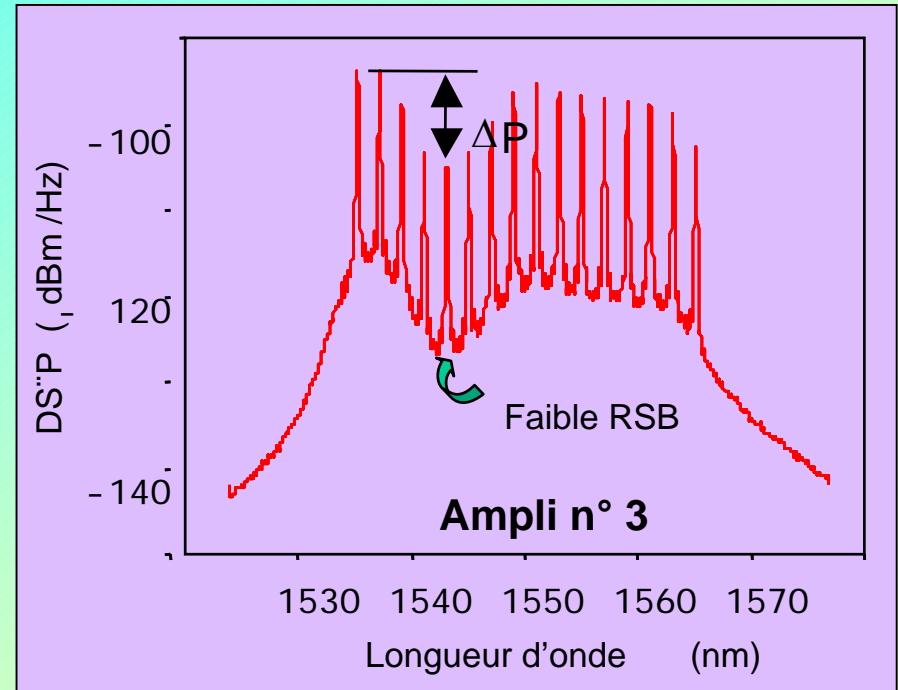
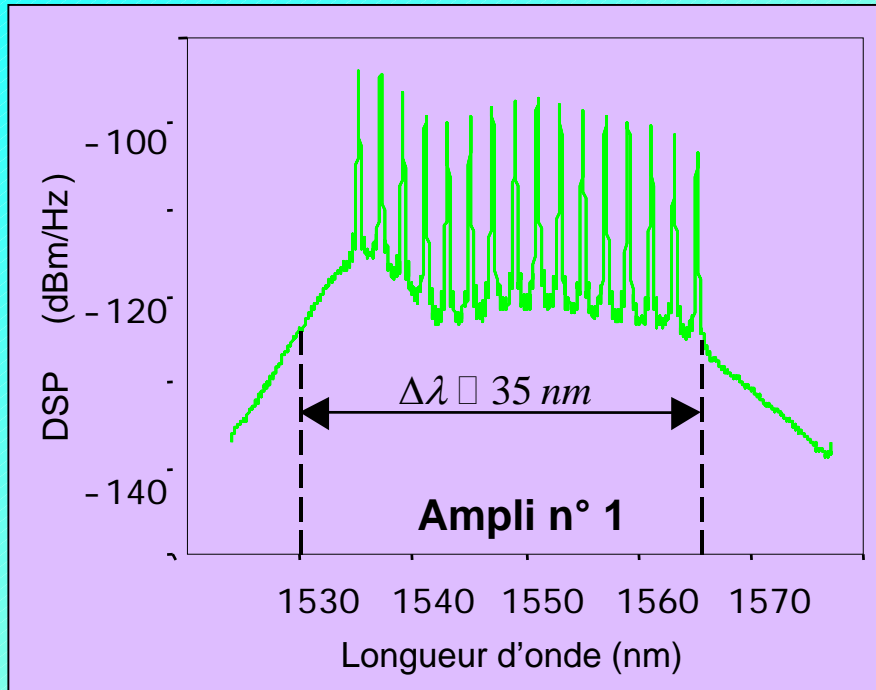


AMPLIFICATION EN WDM



- Large fenêtre autour de 1,55 μm
- Quatre Bandes de fréquences
 - C : 1530 – 1570 nm
 - L : 1570 – 1610 nm
- Possibilités dans la fenêtre à 1,3 μm
 - Amplification Raman dans la bande XS :

"PLATITUDE" DU GAIN EN WDM



- Simulation: Amplificateurs de ligne – distance entre amplis $L = 100 \text{ km}$
 - Ampli 1: spectre du signal amplifié après 100 km
 - Ampli 3 : spectre après 300 km
- Le gain n'est pas constant dans la bande passante
- Diverses solutions (dopage de la fibre : fluor, Al, ..., égalisation par filtre optique, pré égalisation des canaux)

■ 1. INTRODUCTION

- *Liaisons longues distances, haut débit*
- *Introduction des amplis optiques*
- *Caractéristiques de gain et puissance de saturation*
- *Principales utilisations ASO – EDFA*
- *Comparaison des caractéristiques*

■ 2. AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMICONDUCTEUR (AOS)

■ 3. AMPLI A FIBRE OPTIQUE DOPEE ERBIUM (EDFA)

- *Dopage d'une FO monomode*
- *Structure d'un EDFA*
- *Pompage optique, sections efficaces, gain petit signal*
- *Emission spontanée amplifiée ESA, densité spectrale d'ESA*
- *Bruit dans les EDFA, facteur de bruit, mesure du facteur de bruit.*
- *Amplificateur en ligne, distance optimum, accumulation du bruit.*
- *Amplification en WDM, platitude du gain.*

■ 4. AMPLIFICATION RAMAN

DIFFUSION RAMAN

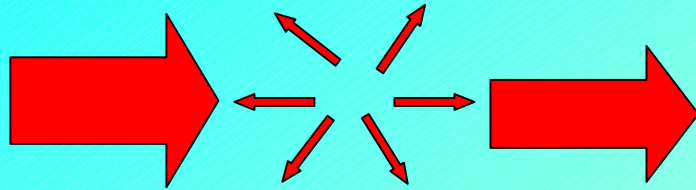


Chandrasekhara Venkata Raman.
Prix Nobel de Physique
en 1930

réf : Wikipédia

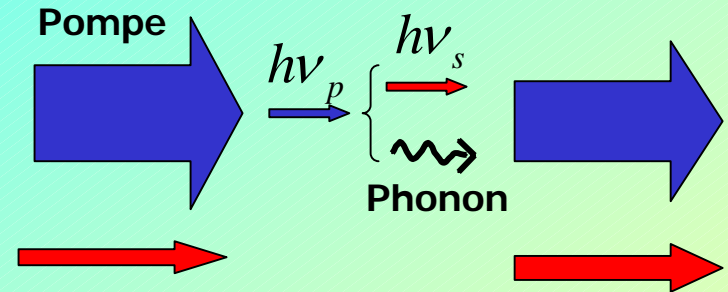
- L'effet Raman, ou la diffusion Raman, est la diffusion inélastique d'un photon sur un atome ou une molécule. Le fait que la diffusion soit inélastique implique qu'il y a un échange d'énergie entre le photon incident et la molécule via la création ou l'annihilation d'un phonon optique. Ainsi, la lumière diffusée n'a pas la même longueur d'onde que la lumière incidente. On distingue deux cas :
- décalage Stokes : la lumière est décalée vers le rouge (plus longue longueur d'onde, plus petite énergie) avec la création d'un phonon.
- décalage anti-Stokes : la lumière est décalée vers le bleu (plus courte longueur d'onde, plus grande énergie) avec l'absorption d'un phonon.
- S'il n'y a pas d'échange d'énergie entre la molécule et le photon incident, alors la diffusion est élastique et la longueur d'onde du photon diffusé n'est pas décalée. On parle alors de diffusion Rayleigh.
- Le décalage en longueur d'onde dépend de la matière et lui est caractéristique : il ne dépend pas de la longueur d'onde d'excitation, ce qui rend possible une analyse de la composition chimique d'un échantillon à partir de la façon dont il diffuse la lumière.
- L'intensité des raies Raman dépend seulement du nombre de molécules dans les différents modes vibrationnels qui leur sont associés. L'utilisation de la distribution de Boltzman permet de rendre compte correctement du rapport d'intensité entre les raies Stokes et anti-Stokes : les modes vibrationnels de basse énergie étant les plus peuplés, les raies Stokes sont plus intenses que les raies anti-Stokes.

EFFET RAMAN STIMULE DANS UNE FO (1/2)



■ DIFFUSION ELASTIQUE (RAYLEIGH)

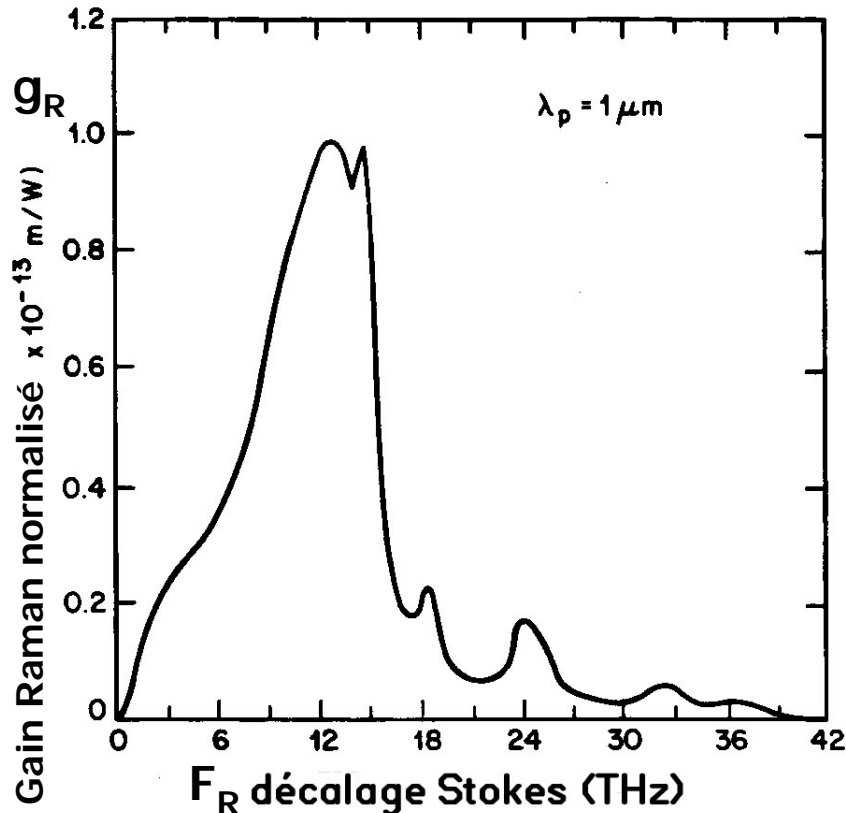
- Variation en $1/\lambda^4$
- Responsable de l'atténuation des FO
- Pas de seuil de puissance.



Signal à la fréquence
de l'onde de Stokes

- EFFET RAMAN STIMULE (SRS)
OBSERVE EN 1962 DANS UNE FIBRE OPTIQUE :
- TRANSFERT DE PUISSANCE VERS
L'ONDE DE STOKES (décalage vers le
« rouge »)
- Effet stimulé par la présence d'un
signal à la fréquence STOKES
- EFFET NON LINEAIRE
 - SEUIL D'INTENSITE : 10 MW/cm^2
 - aire effective $A_{\text{eff}} = 10 \mu\text{m}^2$
puissance de pompe d'environ 1 W

GAIN RAMAN DANS LA SILICE



Décalage Stokes vers les basses énergies dans une fibre optique en silice fondue.

- Décalage de Stokes : $F_R = \nu_p - \nu_s$
- Le gain Raman du signal est proportionnel à l'intensité I_p de la pompe :

$$g(\nu_s) = g_R(F_R) I_p \quad \text{Unité m}^{-1}$$

$$I_p = P_p / A_p \quad \text{Unité W m}^{-2}$$

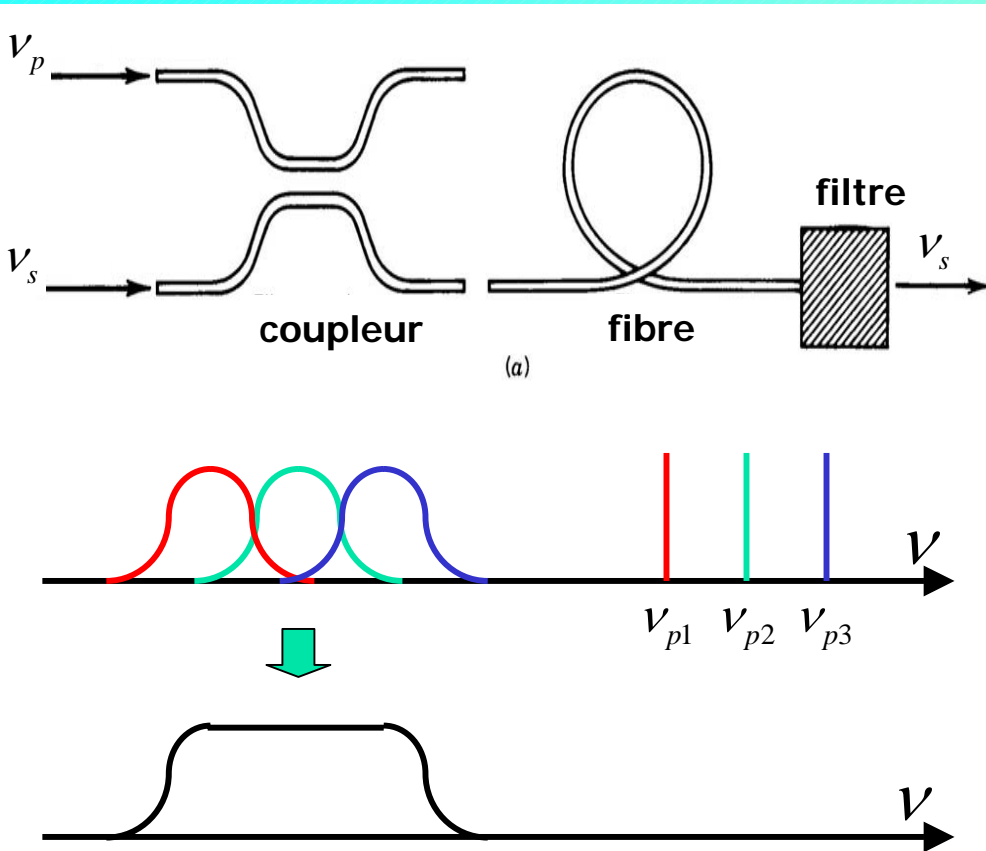
- g_R est maximum pour $F_R = 13 \text{ THz}$ (soit 100 nm autour de 1550 nm).
- Bande passante large $\Delta\nu = 6 \text{ THz}$.
- Puissance optique du signal (on néglige l'atténuation dans la fibre):

$$\frac{dP_s}{dz} = g(\nu_s) P_s = g_R \frac{P_p}{A_p} P_s$$

- Le signal amplifié croît exponentiellement le long de la fibre optique:

$$P_s(z) = P_0 \exp(gz)$$

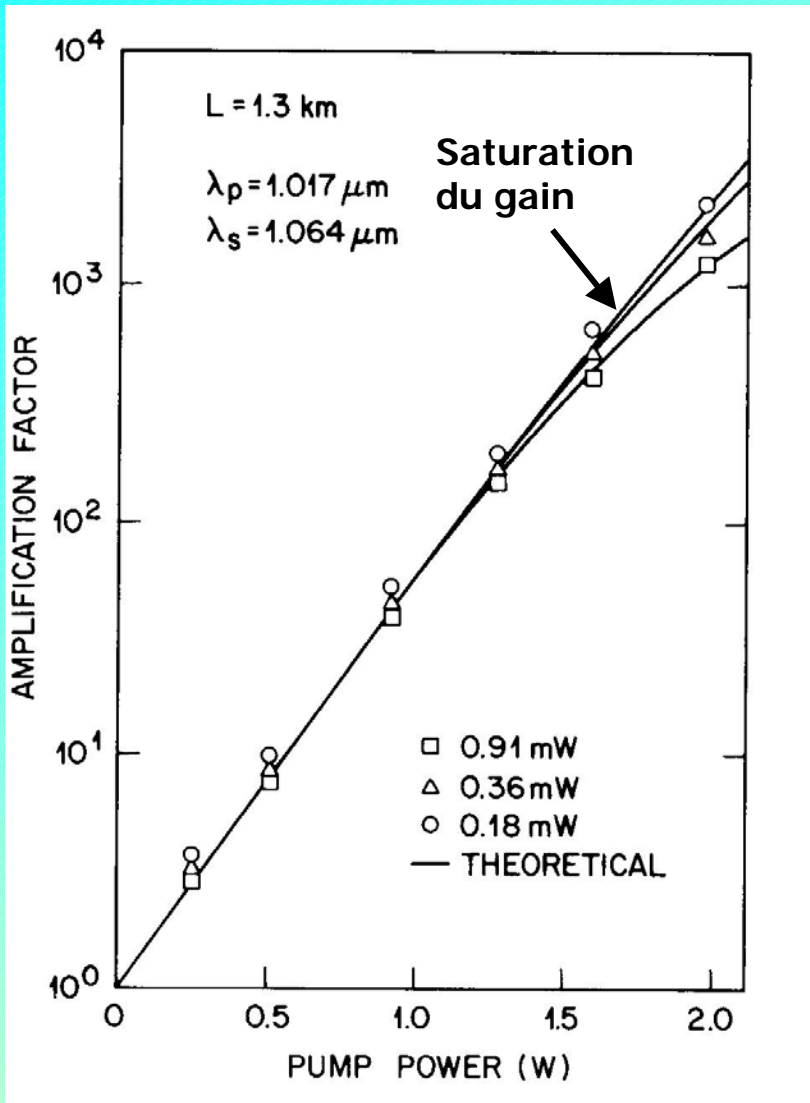
AMPLIFICATION RAMAN DANS UNE FO



- Pompage co-propagatif ou contra-propagatif
- Forte puissance de pompage
- Pas d'inversion de population requise :
 - **Fibre standard de ligne**
- Utilisable dans toutes les bandes
- « Platitude du gain » obtenue en utilisant plusieurs pompes de fréquences voisines.

Génération de l'effet Raman (décalage Stokes uniquement) dans une fibre en silice

AMPLIFICATEUR RAMAN



- Prise en compte de l'atténuation de la pompe et du signal co-propagatif

$$\frac{dP_s}{dz} = g_R \frac{P_{p0} \exp(-\alpha_p z)}{A_p} P_s - \alpha_s P_s$$

- Puissance du signal $P_s(L)$ après une distance L dans la fibre

$$P_s(L) = P_s(0) \exp(g_R I_{P0} L_{eff} - \alpha_s L)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p}$$

- Gain petit signal de l'amplificateur

$$G_0 = \frac{P_s(L)}{P_s(0) \exp(-\alpha_s L)} = \exp\left(g_R \frac{P_{P0}}{A_p} L_{eff}\right)$$

- Saturation du gain à forte puissance, due à la déplétion des photons de la pompe.

CALCUL DU GAIN

- Données : Prendre $\alpha_s = \alpha_p = 1,8 \text{ dB/km}$ au voisinage de $\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$.
Longueur de la fibre $L = 1,3 \text{ km}$.

Convertir α_s et α_p en m^{-1} et Calculer L_{eff}

Calculer G_0 pour une puissance de pompe $P_{p0} = 1 \text{ W}$. L'aire effective est $A_{\text{eff}} = 30 \text{ }\mu\text{m}^2$.