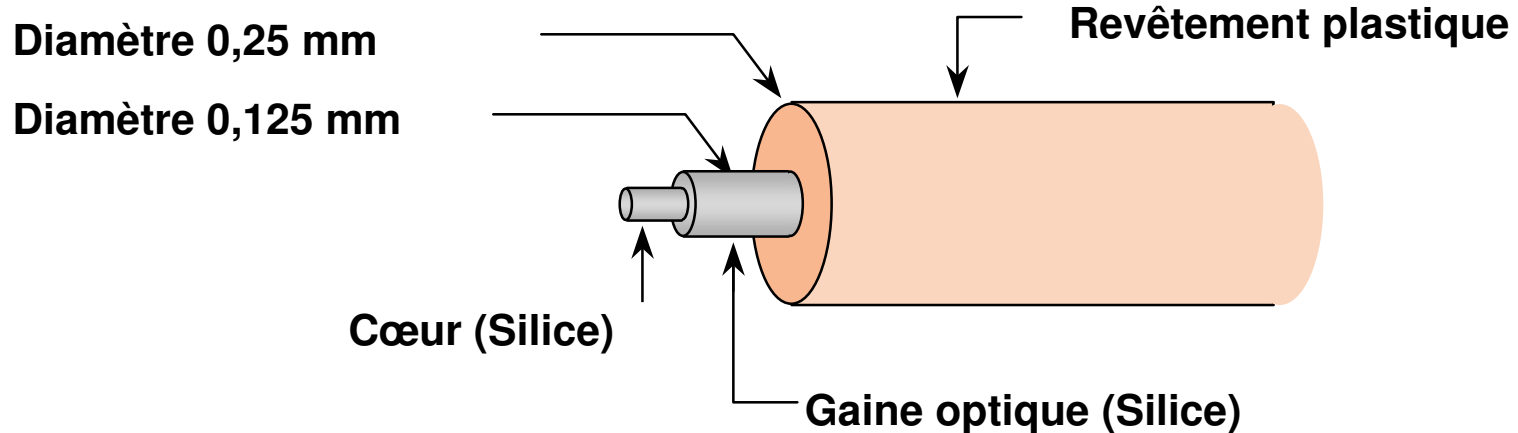


La fibre optique

- **Qu'est-ce qu'une fibre optique ?**
- **Principes de base**
- **Monomode / Multimode**
- **Atténuation, fenêtres de propagation**
- **Principales caractéristiques**
- **Transmission sur fibre optique**
- **Boucle Locale Optique**

La fibre optique



- Le signal lumineux est propagé dans et à proximité du cœur.
- La gaine optique sert essentiellement à amener le diamètre à 125 μ m, pour des raisons mécaniques.
- Le revêtement sert à protéger la fibre optique.

La fibre optique

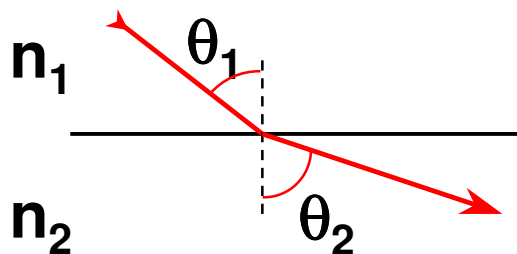
- L'indice de réfraction n :

Dans un matériau transparent, l'indice de réfraction mesure la vitesse de la lumière par rapport à sa vitesse dans le vide

$$v = c/n$$

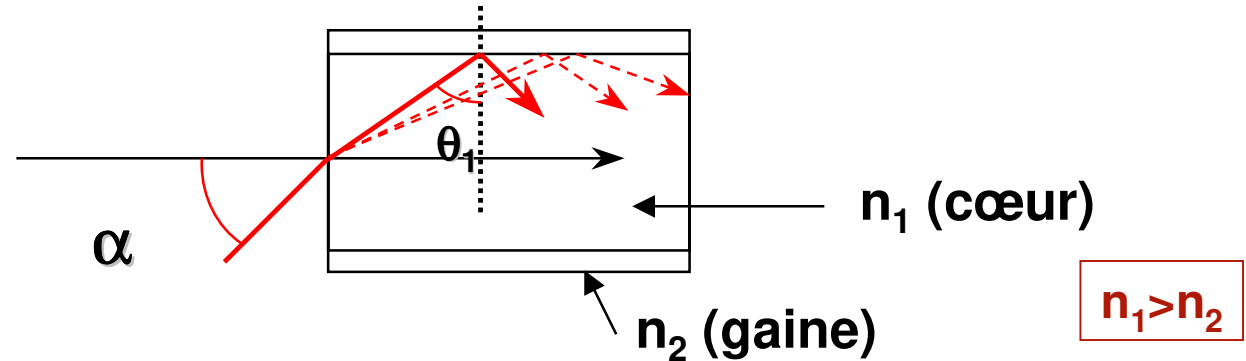
- Loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



Si $n_1 > n_2$ le rayon s'écarte de la normale.
Si $\theta_1 > \arcsin(n_2/n_1)$, il y a réflexion totale.

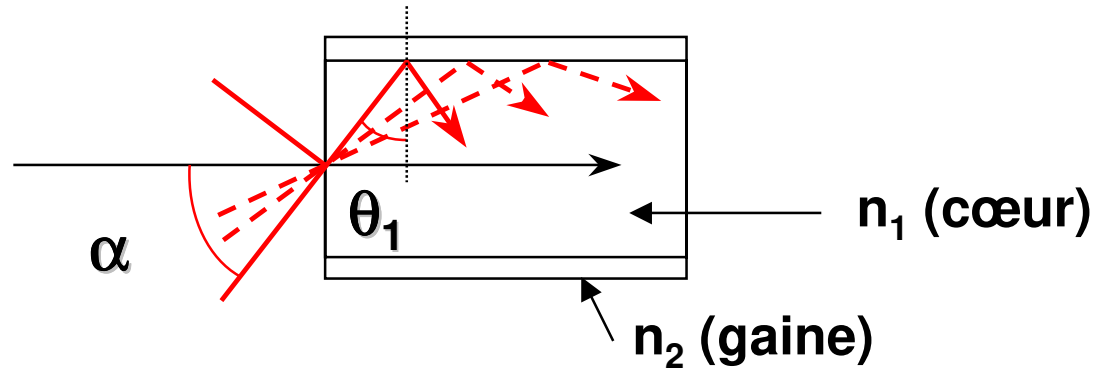
Propagation dans la fibre optique



Condition de guidage dans le cœur : $\theta_1 \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1}$

Sinon le rayon est réfracté dans la gaine de la fibre

Propagation dans la fibre optique

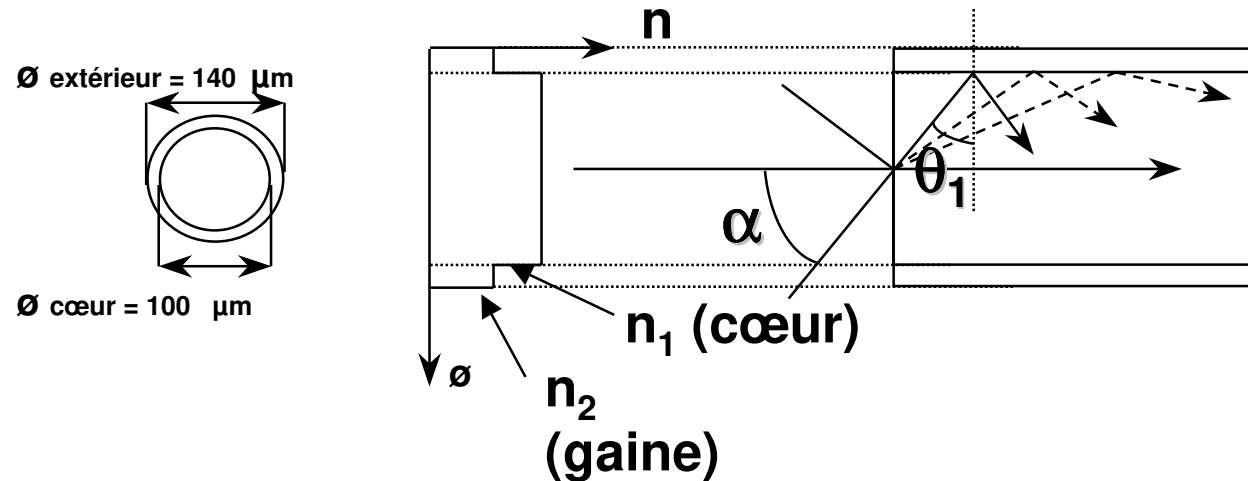


Angle d'incidence maximal à l'entrée de la fibre,
soit l'ouverture du cône d'acceptance,
appelée ouverture numérique ON :

$$\text{ON} = \sin \alpha_{\max} = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{1\text{lim}} \right) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

La fibre optique multimode

Fibre à saut d'indice multimode

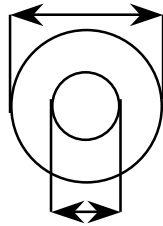


Indice de réfraction dans le cœur n_1 constant

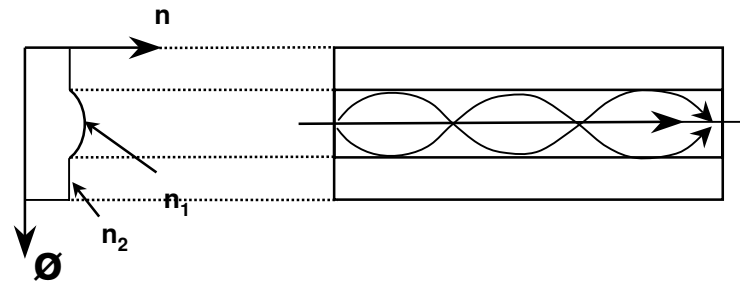
La fibre optique multimode

Fibre à gradient d'indice multimode

\varnothing extérieur = 125 μm



\varnothing cœur = 50, 62.5 ou 85 μm



L'indice du cœur diminue suivant une loi parabolique depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-gaine.

La diminution de l'indice fait que la lumière se propage plus vite, ce qui réduit la dispersion intermodale.

La fibre optique multimode

Propagation multimode

On définit le paramètre V (fréquence normalisée) avec a : rayon du cœur ($V < 2.405$ si monomode)

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

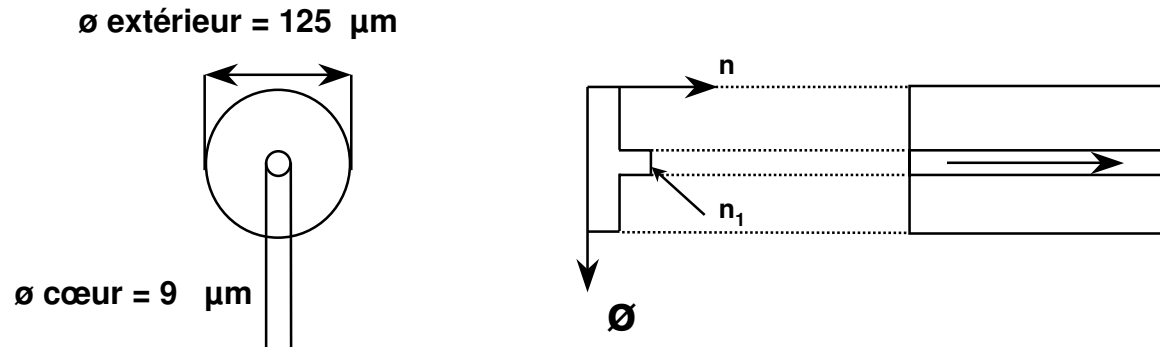
Le nombre de modes M est donné par : $M = \frac{V^2}{2}$ (approximation vraie pour un grand nombre de modes)

dans une fibre à saut d'indice

⇒ Le rayon lumineux a plusieurs manières de se propager dans le cœur de la fibre, chaque mode ayant une vitesse de propagation propre (vitesse suivant l'axe de propagation)

La fibre optique monomode

Fibre à saut d'indice monomode



Sélection d'un seul mode de propagation se propageant au voisinage de l'axe

La fibre optique multi/monomode

- La fibre multimode :

A été la première utilisée.

Est facile à utiliser (gros cœur ~ tolérances élevées) mais a une limitation intrinsèque de bande passante.

⇒ Réservée aux courtes distances : réseaux informatiques.

- La fibre monomode :

A une bande passante pratiquement infinie (en théorie) mais requiert des composants chers et des tolérances faibles.

⇒ Est devenue la solution universelle des systèmes de télécommunications.

Diamètre de mode

- **Diamètre de mode ($2W_0$) :**
 - La lumière est guidée par le cœur. Mais, en monomode, une partie importante de la puissance est transmise dans la gaine.
 - Le profil de puissance lumineuse est à peu près "gaussien", id est en forme de cloche $I=I_0\exp-2r^2/w_0^2$.
 - Le diamètre de mode est le diamètre de la courbe à $1/e^2$, soit environ mi-hauteur.
- **C'est pourquoi l'épaisseur de la gaine est importante dans les fibres monomodes.**
- **Le diamètre de mode varie avec la longueur d'onde.**

Longueur d'onde de coupure

Le guidage du mode varie avec la longueur d'onde :

- Aux grandes longueurs d'onde le mode est guidé.
- Aux courtes longueurs d'onde, le mode est guidé **mais** des modes d'ordre supérieur sont guidés aussi.

La longueur d'onde de coupure est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode.

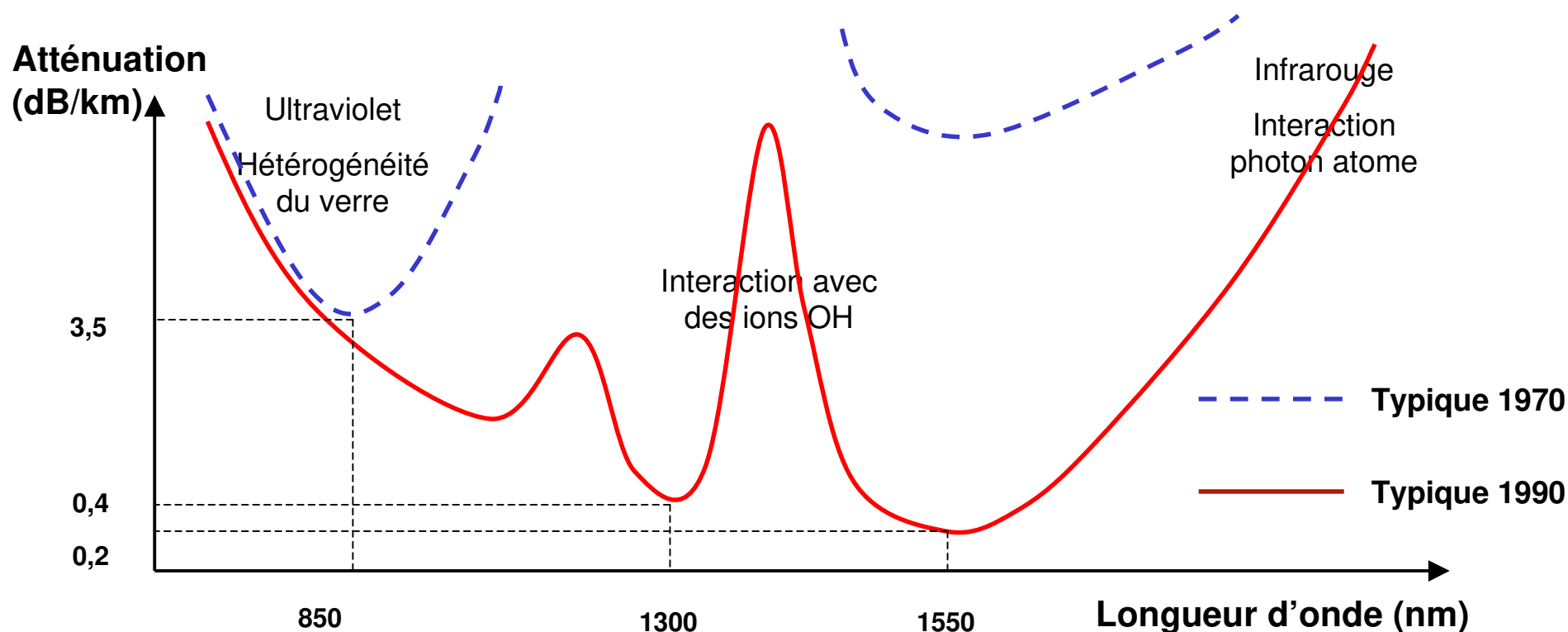
$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2,404} a. \text{ON}$$

a = rayon du cœur

- En dessous de λ_c le mode fondamental perd de l'énergie au profit de modes d'ordre supérieur.

Atténuation / Longueur d'onde

La mesure d'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'onde.



Fenêtre de transmission

- La première fenêtre (0.8-0.9 μm) :
 - Atténuation élevée (~ 3 dB/km)
 - Composants très bon marché (Diodes LED)

⇒ n'est utilisée qu'en multimode.
- La deuxième fenêtre (1.28-1.33 μm) :
 - Lasers disponibles depuis longtemps et peu chers
 - Atténuation raisonnable (0,33 dB/km)
 - **Dispersion chromatique nulle**

⇒ est encore largement utilisée.

Fenêtre de transmission

La troisième fenêtre (1.525-1.625 μm) :

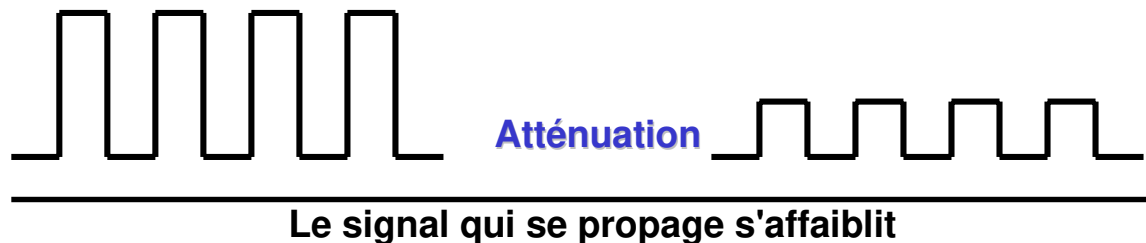
- **Atténuation minimale (0,2 dB/km)**
 - **Lasers et amplificateurs performants (mais assez chers)**
 - **Existence de systèmes très performants (DWDM)**
 - **Deux sous-bandes : C 1525-1565 nm, L 1565-1625 nm**
- ⇒ C'est la fenêtre de choix pour quasiment toutes les applications modernes.**

On sait faire des fibres à "dispersion décalée" et même des fibres à "dispersion plate" entre 1,3 et 1,55 μm

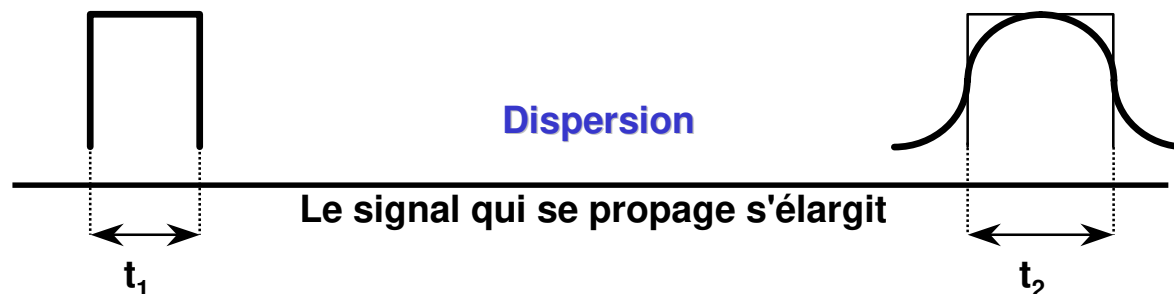
La fibre optique

Deux effets limitent la capacité de transmission :

-Atténuation : une partie du signal, sous forme de lumière, est perdue



- Dispersion chromatique: le signal reçu est déformé par rapport au signal émis (dégradation)



Atténuation

Au cours de la propagation dans la fibre, la puissance décroît selon la loi :

$$P(z) = P_{in} e^{-\alpha z}$$

α est le coefficient d'atténuation en Neper/m.

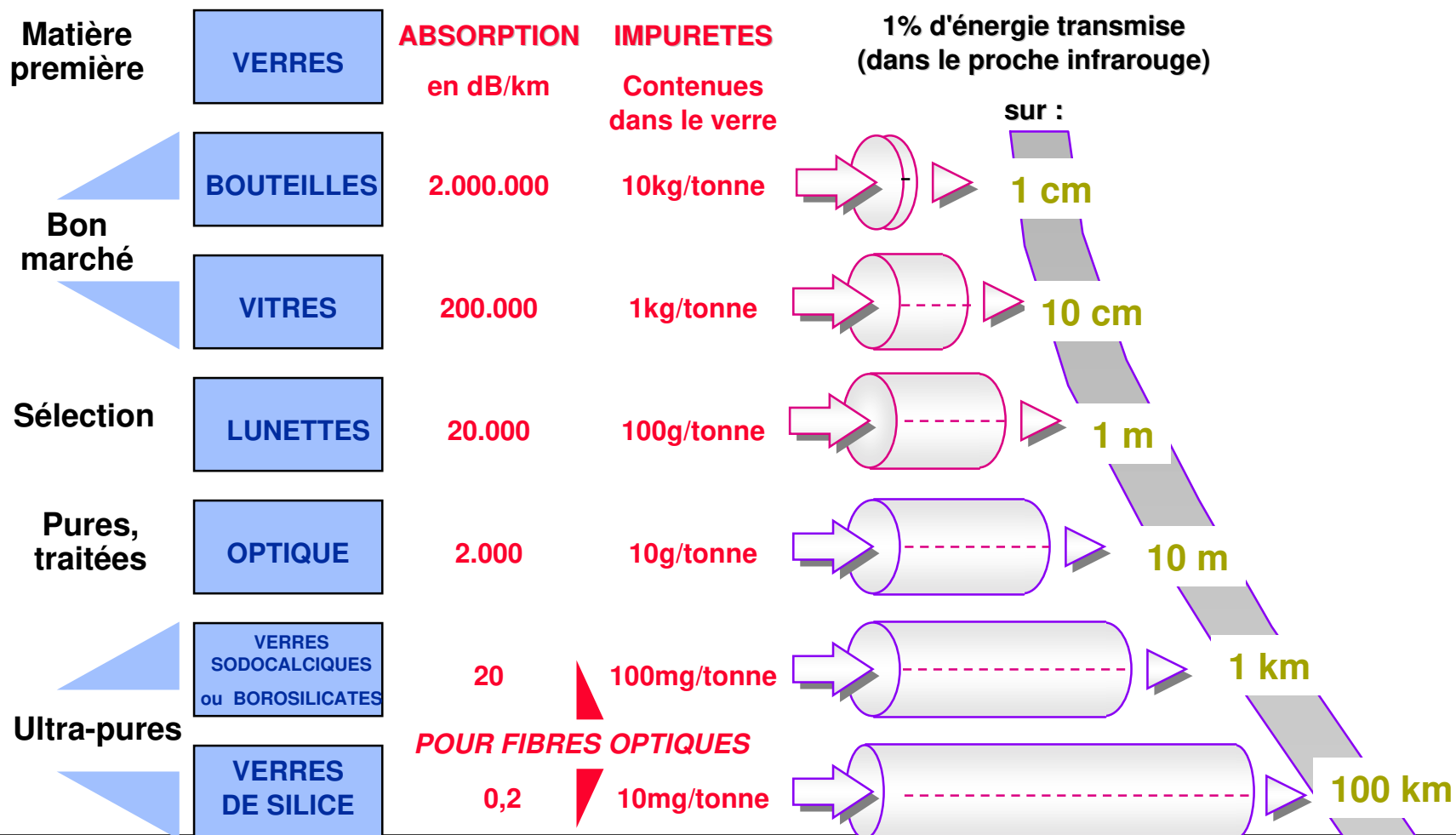
On définit plutôt l'atténuation en dB/km :

$$A = \frac{1}{L} 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

La relation entre A et α est :

$$A_{\text{dB/km}} = 4,34 \cdot 10^3 \alpha_{\text{m}^{-1}}$$

Atténuation



Pertes par effet de courbure

- **Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse du mode peut échapper au guidage, et se perdre dans la gaine.
Ce phénomène s'appelle «pertes par courbure».**
- **Il est le plus sensible aux grandes longueurs d'onde.**
- **La mesure de sensibilité à la courbure se fait en mesurant le supplément d'atténuation d'une fibre bobinée sur petit diamètre (75 mm 100 tours, méthode normalisée ITU)**

Pertes par microcourbures

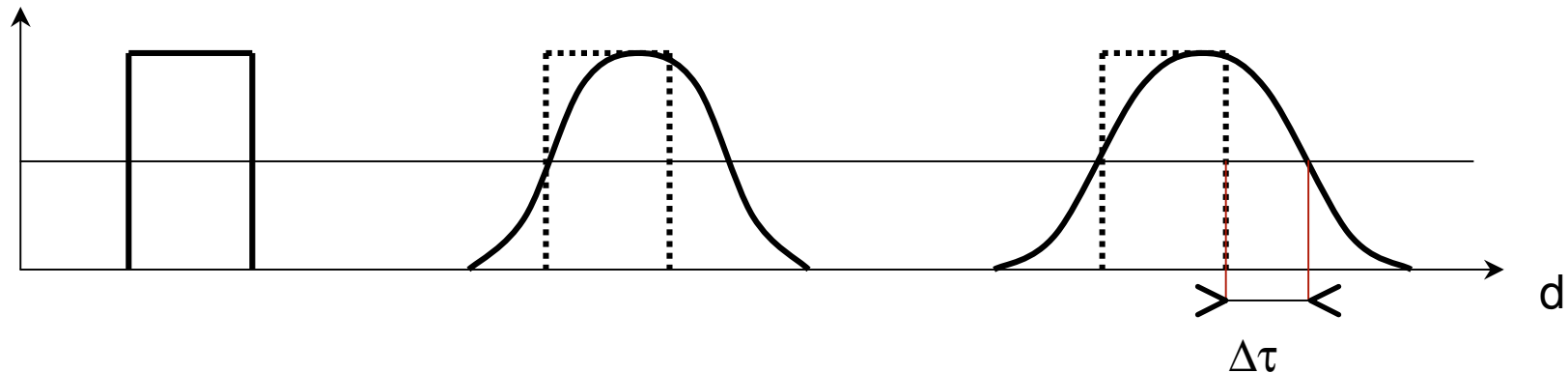
Les pertes par microcourbure apparaissent lors de la fabrication des câbles lorsque des contraintes mécaniques provoquent des microdéformations de la fibre, entraînant des pertes de lumière. Elles sont à peu près indépendantes de la longueur d'onde.

Ces pertes dépendent aussi bien de la fibre elle-même que du revêtement.

Elles augmentent très vite lorsque le diamètre de la fibre diminue.

La dispersion chromatique

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation.



La fibre se comporte comme un filtre passe-bas.

Dispersion intermodale

Une des causes de l'élargissement d'une impulsion est la dispersion intermodale. L'énergie lumineuse injectée à l'entrée de la fibre est répartie entre différents modes.

Les différents modes se propagent dans le cœur avec la vitesse :

$$v_m = \frac{c}{n_1} \sin \theta_m$$

v_m : composante suivant l'axe de propagation de la vitesse

mode le plus lent : $\theta = \theta_{\text{lim}}$, alors $v_{\text{min}} = c/n_1 \cdot \sin \theta_{\text{lim}}$

mode le plus rapide : $\theta = \pi/2$ alors $v_{\text{max}} = c/n_1$

après un trajet d'une distance L , le décalage est :
pour une fibre à saut d'indice.

$$\Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{n_1(n_1 - n_2)}{n_2}$$

Dispersion chromatique

La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde. Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques.

Il y a deux causes à prendre en compte :

- l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (dispersion matériau)**
- la vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (dispersion guide d'onde)**

Dispersion chromatique

Pour une largeur spectrale $\Delta\lambda$ et un coefficient de dispersion chromatique $M(\lambda)$ donnés, la valeur maximale du produit

(débit binaire x longueur de fibre)

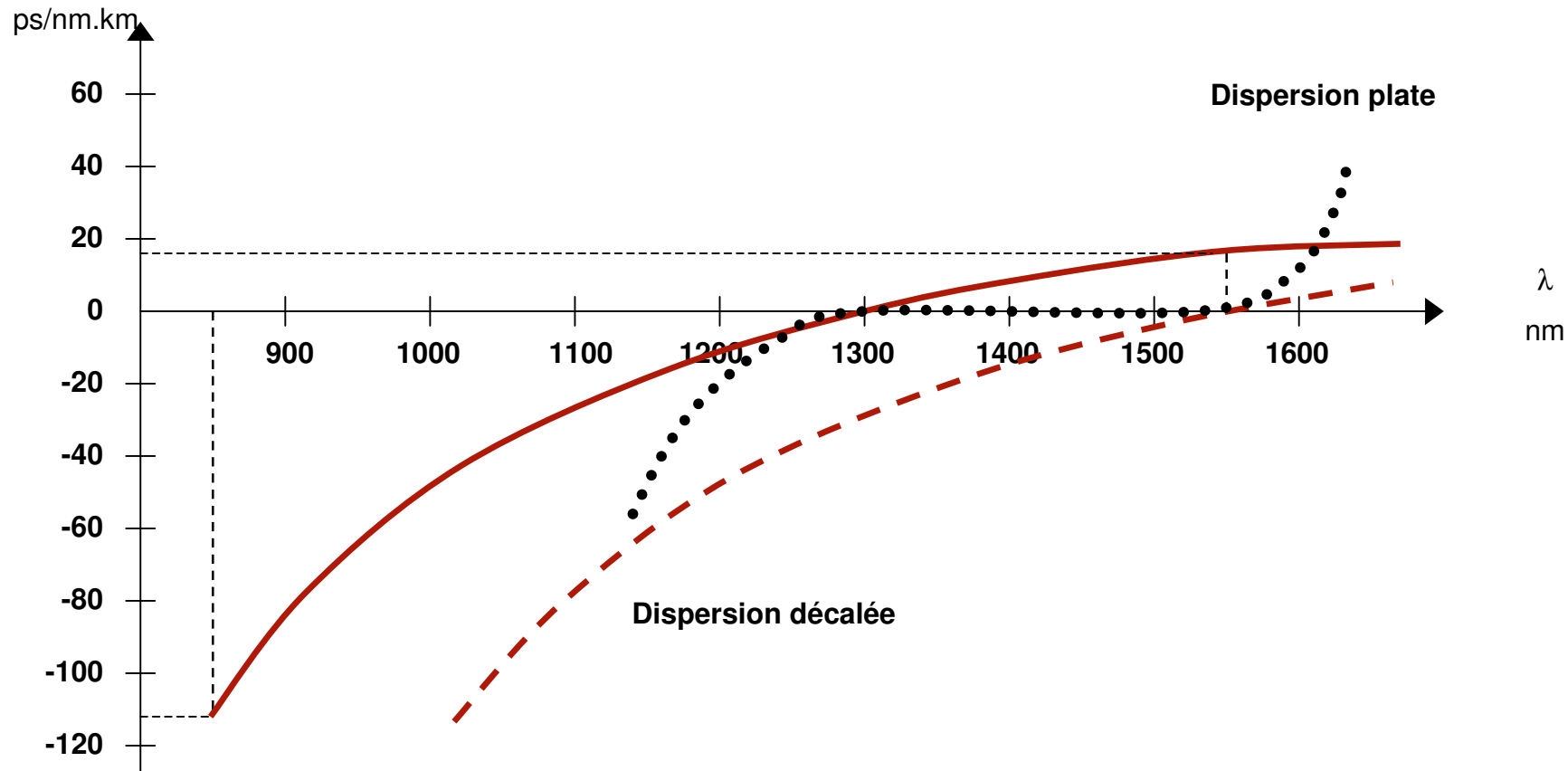
est :

$$(B.L)_{\max} = \frac{1}{2M(\lambda).\Delta\lambda}$$

Ordre de grandeur :

La fibre monomode normalisée G652, qui équipe 85% du réseau, a un coefficient de dispersion chromatique $M(\lambda) = 3,5 \text{ ps}/(\text{km.nm})$ dans le domaine spectral $[1,288-1,359] \mu\text{m}$. Pour cette même fibre, à $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $M(\lambda)$ passe à $17 \text{ ps}/(\text{km.nm})$

Dispersion chromatique



Bande passante des fibres

Fibres monomodes

$$B = \frac{0,35}{M(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L}$$

Fibres multimodes à saut d'indice

$$B = \frac{B_0}{L^\gamma}$$

Fibres multimodes à gradient d'indice

$$B = \frac{1}{\sqrt{\frac{L^{2\gamma}}{B_0^2} + \frac{M^2(\lambda) \cdot \Delta\lambda^2 \cdot L^2}{0,35^2}}}$$

$\Delta\lambda$, B_0 et γ sont fournis par le constructeur

Les effets non linéaires

La puissance lumineuse injectée dans la fibre est si élevée ($40 \text{ mW}/80 \mu\text{m}^2$ soit plus de $600 \text{ W}/\text{mm}^2$) et les niveaux de perturbation acceptables si faibles que l'on ne peut plus négliger les effets non linéaires.

L'effet non linéaire prépondérant dans la silice qui vient affecter la propagation est l'effet Kerr : l'indice de réfraction varie avec le flux de la puissance.

Pour augmenter la distance de régénération et/ou accroître le débit, il faut réduire la dispersion des impulsions : grâce aux effets optiques non linéaires de la fibre, il est possible de générer des solitons dont la principale caractéristique est de conserver une forme constante au cours de la propagation.

L'invariance de forme du soliton résulte du fait que le chirp de fréquence créé par la dispersion de temps de groupe est très exactement compensé par celui dû à l'effet Kerr.

Fiabilité de la fibre optique

La silice est un matériau «fragile» : \Rightarrow ce terme scientifique signifie qu'il n'a pratiquement pas de déformation élastique.

La fibre optique silice résiste à des tractions très élevées (> 5 kg), une résistance bien supérieure à celle de l'acier.

La présence de défauts fragilise la fibre (il suffit d'un défaut de $0.5 \mu\text{m}$ pour qu'une traction de 1kg environ casse la fibre)

La plupart des défauts se produisent lors de la fabrication de la fibre, la fibre est ensuite protégée par le revêtement.

Pour cette raison, la fibre est testée en totalité à 1 % d'allongement (environ 1 kg) pour éliminer ces défauts.

Vieillessement de la fibre optique

La corrosion par l'humidité d'une fibre de silice non protégée la rend très cassante en quelques heures. Le revêtement est donc étudié pour protéger la silice.

La résistance au vieillissement est mesurée par un facteur «n», facteur de durée de vie sur une échelle logarithmique. Il est mesuré selon des normes internationales :

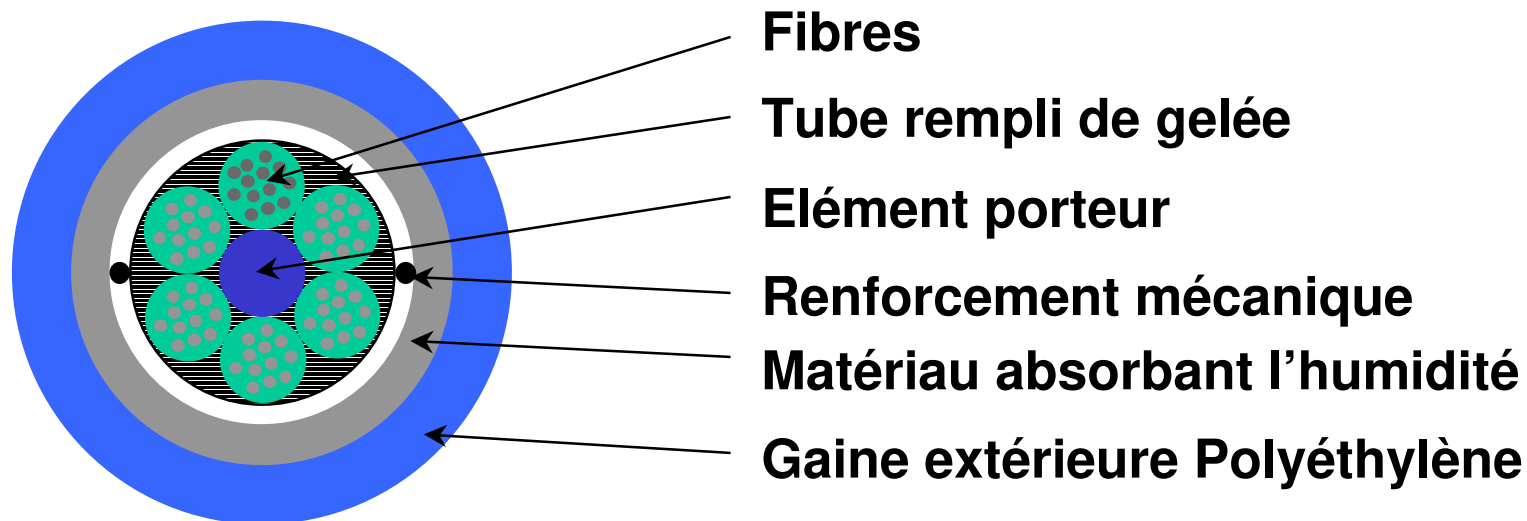
- n statique, lorsque les charges appliquées sont statiques.
- n dynamique, mesuré sous charge variable (croissante).
- On évalue la variation de la durée de vie en fonction de la charge appliquée et on extrapole dans le temps.

Les règles de l'art actuelles garantissent largement 25 ans de durée de vie.

L'expérience montre que la plupart des ruptures effectivement rencontrées (plus de 95%) sont dues à des travaux de Génie Civil.

Câblage

- La technique de câblage la plus utilisée aujourd'hui est le tube. Un câble typique est représenté :



- La fibre est posée en long dans des tubes remplis d'une gelée de pétrole, qui la protège de l'humidité. De nombreux types de câbles peuvent être réalisés par assemblage de ces tubes.

Raccordement

- La technique de base utilisée pour l'épissurage est la soudure par arc électrique. Des connecteurs sont utilisés seulement dans les terminaux.
- De nombreux modèles commerciaux de soudeuses existent sur le marché, elles se groupent en deux types principaux :
 - Les soudeuses passives : les fibres dénudées sont placées dans des «V» de positionnement fixes. La qualité dépend alors beaucoup :
 - De la précision du diamètre extérieur
 - De la concentricité cœur/fibre
 - Les soudeuses actives, où les «V» de positionnement sont mobiles et leur position ajustée pour optimiser le positionnement du cœur (en général par injection/détection)
- Dans les deux cas, la qualité de la soudure dépend beaucoup de la coupe, de la propreté de la fibre et de l'état de la soudeuse.

La fibre optique

Applications :

- **Transmissions numériques à haut débit : données informatiques, téléphonie, télécopie, télévision, etc...**
- **Réseaux nationaux et internationaux de télécommunications**
- **Réseaux locaux en environnement bruité**
- **Applications vidéo**

La fibre optique

Avantages :

- **Transmission large bande, et débits binaires élevés**
- **Affaiblissement minimisé : nombre de répéteurs très réduits et fortement espacés (60 km)**
- **Immunité électromagnétique**
- **Faible sensibilité aux facteurs extérieurs (température, humidité...)**
- **Faible encombrement et faible poids**

La fibre optique

Inconvénients :

- Difficultés d'adaptation avec les transducteurs optoélectroniques**
- Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement)**
- Coûts d'exploitation encore élevés et personnel spécialisé**

Transmission sur fibre optique

**Avènement de la fibre optique dans les systèmes sous-marins en 1988,
Fonctionnement au débit de 280 Mbit/s (équivalent de 4000
communications téléphoniques)**

**Cette capacité des systèmes sous-marins a été multipliée par plus de
1000 en 10 ans : 32 x 10 Gbit/s en 2000 (équivalent d'un peu moins
de 4 000 000 de communications téléphoniques)**

**Systemes terrestres mis en service en 2000 : capacité de $N \times 2,5$ Gbit/s
($N = 2$ à 16). Les nouveaux systemes sont étudiés sur la base de 10 Gbit/s
par fibre.**

Transmission sur fibre optique



- La source peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL) et peut être associée à un modulateur externe.
- Les amplificateurs placés à intervalles réguliers peuvent être de 3 types:
 - R : « régénération » (amplification seule)
 - 2R : « régénération-reshaping » (amplification et remise en forme)
 - 3R : « régénération-reshaping-retiming » (amplification et remise en forme et synchronisation)
- Le détecteur est constitué d'une photodiode PIN ou à avalanche
- La lumière est modulée en amplitude par le signal électrique : la puissance émise est une fonction directe de l'amplitude du signal modulant.

Transmission sur fibre optique

Dans les liaisons à haut-débit récentes (plusieurs Gbits/s), une source de très faible étendue spectrale obtenue est utilisée en associant une diode laser DFB (Distributed Feed Back) à un modulateur externe.

La très faible valeur de $\Delta\lambda$ (quelques dixièmes de nm) permet de régénérer le signal par des « EDFA » (Erbium doped fiber amplifier) de type R. Ces amplificateurs purement optiques ont une très large bande passante dans la fenêtre située autour de 1,55 nm.

Transmission sur fibre optique

Soient $f_0(v)$ et $f_1(v)$ les densités de probabilité associées aux fluctuations de tension autour des niveaux logiques « 0 » et « 1 », supposées gaussiennes.

$$f_0(v) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad f_1(v) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(v - V_1)^2}{2\sigma_1^2}\right)$$

La position optimale de décision correspond à la condition :

$$\frac{V_1 - S}{\sigma_1} = \frac{S}{\sigma_0} = Q$$

Le taux d'erreur binaire TEB s'exprime de la manière suivante :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad \text{avec} \quad \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

Transmission sur fibre optique

Approximations utiles :

$$\text{si } Q > \sqrt{2} \Rightarrow \text{TEB} \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)$$

Ordre de grandeur

Pour un TEB de 10^{-9} , on obtient un facteur Q de 6.

Dans le cas le plus simple où $S = 0,5.V_1$, (même bruit pour les 2 niveaux), le rapport signal à bruit au niveau logique « 1 » doit être au moins égal à :

$$\frac{V_1}{\sigma_1} = 2Q = 12 \quad , \text{ soit } 10,8 \text{ dB.}$$

Transmission sur fibre optique

Critères de choix d'une fibre optique :

Les contraintes techniques :

débit binaire B

et les contraintes économiques :

coût et nombre de stations de régénération

fixent le produit B.L

ce qui fixe : la source (largeur spectrale $\Delta\lambda$, puissance)

la fibre (atténuation, coefficient de dispersion D)

La qualité souhaitée fixe le TEB et le paramètre Q , ainsi que la puissance crête nécessaire en sortie de chaque tronçon en fonction du facteur de bruit des ampli de régénérations

Transmission sur fibre optique

Performances actuelles :

Les fibres monomodes qui satisfont aux spécifications de l'UIT ont un coefficient de dispersion maximum D de 3,5 ps/(km.nm), à $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ pour la fibre G652 ou à $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ pour la G653 (fibre à dispersion décalée).

Si la source a une largeur spectrale $\Delta\lambda$ de l'ordre de 0,5 nm, on obtient le produit (débit binaire)x(longueur de fibre) :

$$(BL)_{\max} = \frac{1}{2D\Delta\lambda} \approx 570 \text{ Gbit / s}$$

Transmission à environ 10 Gbit/s pour des distances de 50 à 100 km entre régénérateurs

Transmission sur fibre optique

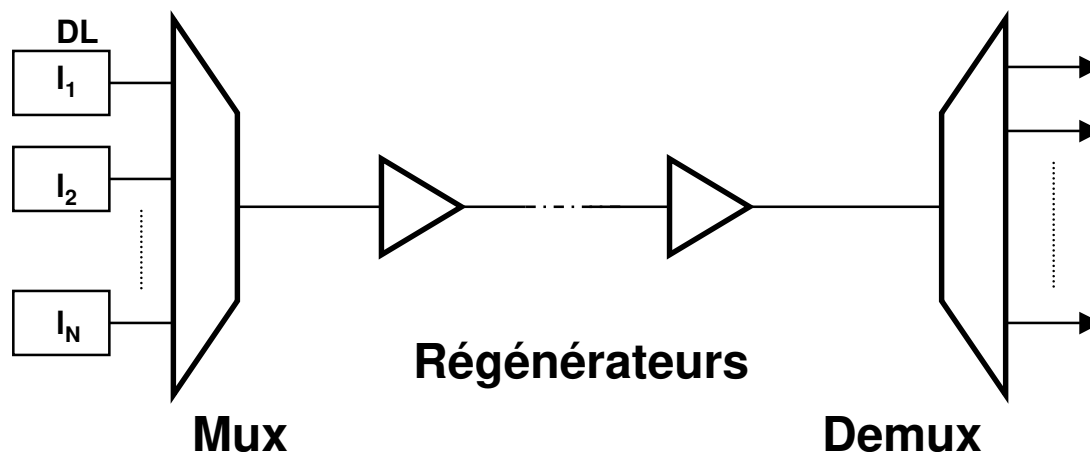
L'amplification optique : des équipements simples qui amplifient la lumière transmise dans les fibres optiques et augmentent sa puissance pour étendre la distance de transmission des systèmes à fibre optique.

Utilisés avant l'émission, à la réception ou tout au long de la ligne.

Aussi, les distances accessibles avec ces types de système ont-elles été prolongées de 150 km à 450 km à 2,5 Gbit/s et jusqu'à 300 km à 32 x 10 Gbit/s

Transmission sur fibre optique

Liaisons de type WDM (Wavelength Division Multiplexing) pour accroître la capacité sont en cours d'installation.



Une seule fibre permet de transmettre N canaux à N longueurs d'onde différentes.

Le mux et le demux sont en techno tout optique, ainsi que les ampli.

Transmission sur fibre optique

Exemple de système WDM pour liaisons transocéaniques (Source Alcatel) :

$N = 32$ longueurs d'onde régulièrement espacées de $1,6 \text{ nm}$ ($D_n = 100 \text{ GHz}$) dans la fenêtre spectrale $1528\text{-}1568 \text{ nm}$.

Le débit binaire par canal est $B = 2,488 \text{ Gbit/s}$ et les régénérateurs sont espacés de 200 km .

La puissance d'un module d'émission est d'une dizaine de mW .

Transmission sur fibre optique

Plus généralement, les systèmes WDM (Source Alcatel) offrent une capacité potentielle de :

40 à 400 Gbit/s par paire de fibre et bientôt 680 Gbit/s, en fonction de la longueur de la liaison, en multiplexant de 8 à 40 canaux à 2,5 Gbit/s ou 10 Gbit/s chacun.

Un câble peut contenir jusqu'à 4 paires de fibres (et bientôt 8 paires), donc la capacité totale peut atteindre 1,6 Tbit/s.

Transmission sur fibre optique

Efforts actuels de recherche et développement :

augmentation de la capacité totale des systèmes WDM,

en augmentant soit :- le nombre de canaux

- le débit de chaque canal

Des essais en laboratoire ont permis de compacter plus de cent longueurs d'onde sur une seule fibre.

Des essais sont réalisés pour transmettre des débits de 40 Gbit/s par longueur d'onde.

Boucle locale optique

Les technologies optiques concernent les gros débits, donc les gros Clients (grands comptes et les zones industrielles).

Avantages :

- limitation en bande passante quasi-nulle,
- technologie éprouvée et fiable, baisse du coût des composants

Inconvénient : Coût du déploiement si le câble à fibre optique n'est pas déjà installé.

Boucle locale optique

Desserte d'une zone urbaine sous forme d'anneau :

Boucle multi-clients, mais aussi boucle locale professionnelle pour l'échange de données dans l'entreprise ou pour les collectivités locales

Rq : la boucle locale optique peut se combiner avec des liaisons d'extrémités sur technologie cuivre xDSL.

Boucle locale optique

Métronet : le réseau métropolitain de télécommunications de l'agglomération Grenobloise :

1- Réaliser un réseau de télécommunications à haut débit, en fibres optiques, à l'échelle de l'agglomération.

2- Favoriser l'émergence d'une offre riche de services de télécommunications au bénéfice des entreprises.

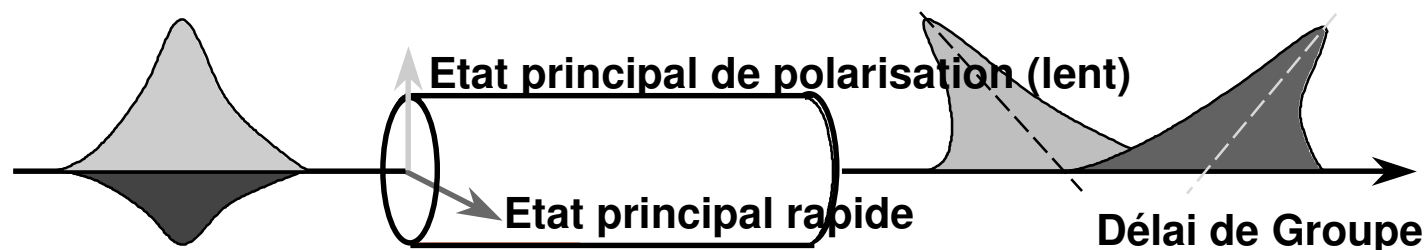
3- Limiter la multiplication des perturbations liées aux chantiers de télécommunications.

Soit : 5 000 km de fibres optiques

110 points à connecter, 50 km de fourreaux

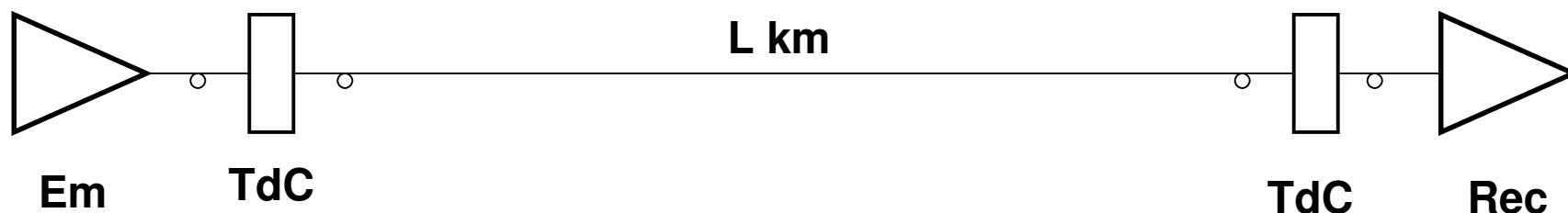
Dispersion de polarisation

- La fibre monomode véhicule en fait deux sous-modes propres orthogonaux.



- Si la fibre n'est pas parfaitement circulaire, les deux modes peuvent se propager à des vitesses différentes.
- la dispersion qui en résulte est un phénomène aléatoire décrit statistiquement dans le temps et dans l'espace.

Budget de liaison optique



$$P_e = \text{dBm}$$

$$P_{\text{rec}} = \text{dBm (min et max)}$$

$$\text{Nb de connecteurs} = 2 \text{ à } 0,5 \text{ dB}$$

$$\text{Nombre d'épissures} = L/4 \text{ à } 0,075 \text{ dB}$$

$$\text{Affaiblissement câble} = 0,23 \text{ ou } 0,35 \text{ dB/km. } L$$

$$\text{Marge de réparations} = 0,015 \text{ dB/km}$$

$$\text{Marge système} = 2 \text{ dB}$$

N.B. : Il convient de vérifier que le récepteur n'est jamais saturé

Budget de liaison optique

Dispersion chromatique :

Il faut vérifier que la bande passante B de la fibre est au moins égale à $0,7 R$, où R est le débit en ligne. En monomode:

$$B = \frac{0,35}{M(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L}$$

avec $M(\lambda) = 3,5$ ou 18 ps/nm.km selon la longueur d'onde

$\Delta\lambda$ = largeur spectrale (en nm) du laser, fournie par le constructeur

L = longueur de la fibre en km

Bibliographie

- Cours B7 « Optoélectronique et télécommunications optiques »
G. Hincelin, J-C. Dudek, CNAM
- Revue « Optique et Photonique », mars 2000,
« Réseaux optiques : l'offre globale d'Alcatel », pp.24-27.
- Revue des télécommunications d'Alcatel, 3ème trimestre 2000,
« Composants optiques pour le nouveau millénaire », pp.221-231.
- Electronique International, Dossier : «La photonique affole les réseaux télécoms» par P. Coutance et P. Arlot, 26 octobre 2000.