

Sources et détecteurs pour les liaisons par fibre optique

1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les fibres optiques permettent de transmettre de l'information sous forme de signaux lumineux. Nous allons nous tourner maintenant vers les sources lumineuses les plus adaptées pour injecter ces signaux dans une fibre, et vers les détecteurs nécessaires en bout de fibre pour les recevoir.

Les caractéristiques de la source et du détecteur, associées à celles de la fibre, permettent de déterminer les conditions de transmission d'information (débit, distance de transmission).

2 Notions sur les semi-conducteurs. Diodes.

Il s'avère que les sources et détecteurs les plus appropriés pour une liaison par fibre optique sont essentiellement des diodes fabriquées en matériau semi-conducteur. Cette partie introduit les notions nécessaires à la compréhension de leur fonctionnement.

2.1 Définition d'un semi-conducteur

Comme son nom l'indique, un semi-conducteur est un matériau qui conduit moins bien l'électricité qu'un conducteur (métal), mais mieux qu'un isolant. Alors que la conduction des métaux est largement indépendante de la température, celle des semi-conducteurs en dépend. On rend compte de ces différences en étudiant les niveaux d'énergie accessibles aux électrons du matériau.

Dans un cristal, les niveaux d'énergie sont très resserrés et forment des bandes continues. La dernière bande occupée (celle de plus haute énergie) s'appelle la bande de valence. La bande immédiatement au-dessus de la bande de valence est la bande de conduction. Il faut qu'il y ait des électrons dans la bande de conduction pour que le matériau conduise l'électricité.

Dans un métal, les deux bandes de valence et de conduction se chevauchent. Il y a donc toujours des électrons dans la bande de conduction.

Dans un isolant, les bandes de valence et de conduction sont séparées par une large bande interdite appelée gap. Le gap entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction est généralement supérieur à 6 eV. Il faut apporter beaucoup d'énergie pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Il y a donc peu d'électrons de conduction et le matériau conduit très mal l'électricité.

Dans un semi-conducteur, il y a aussi un gap entre les bandes de valence et de conduction, mais il est plus faible que pour un isolant, de l'ordre de $E_g \sim 1$ eV. Il est alors possible de faire passer un électron de la bande de valence à celle de conduction en apportant un peu d'énergie, par exemple celle d'un photon optique. L'apport d'énergie thermique permet aussi de faire varier sensiblement le nombre d'électrons dans la bande de conduction.

Le silicium Si, le germanium Ge, l'arséniure de gallium AsGa sont des semi-conducteurs.

2.2 Electrons et trous

Lorsqu'on fait passer un électron de la bande de valence à celle de conduction, on crée un électron de conduction. On crée aussi un trou dans la bande de valence : celui-ci peut se déplacer dans le matériau et se comporte une charge positive libre (porteur de charge positif). L'absorption d'une énergie supérieure à E_g crée donc une paire électron-trou.

Un électron et un trou peuvent se recombiner₁ (l'électron retourne dans la bande de valence)

en cédant de l'énergie. Cette énergie peut être libérée sous forme de chaleur, mais aussi sous forme de lumière dans certains semi-conducteurs dits "directs" où il s'avère que cette forme de cession d'énergie est majoritaire. On parle alors d'électro-luminescence.

Si et Ge sont des semi-conducteurs indirects et n'émettent pas de lumière. AsGa émet dans la première fenêtre infrarouge (vers 900 nm). En ajoutant de l'aluminium Al et/ou du phosphore P on obtient des diodes émettant dans le visible. Des composés de As, Ga, P et indium In permettent d'émettre dans la deuxième et troisième fenêtre.

Les valeurs de longueur d'onde émises dépendent de E_g : plus E_g est grande, plus l'énergie du photon émis est grande et plus la longueur d'onde est courte. On a $\lambda = hc/E_g \simeq 1,24/E_g$ où λ est en micromètres et E_g en eV.

2.3 Dopages N et P. Jonction P-N.

Par des procédés physico-chimiques, il est possible de remplacer certains atomes du matériau semi-conducteur par d'autres atomes (impuretés), qui possèdent soit plus soit moins d'électrons que les atomes originaux.

Si les impuretés ont plus d'électrons que les atomes du semi-conducteur, il y a un excès d'électrons et certains se trouvent dans la bande de conduction. On a alors des porteurs de charge majoritaires qui sont négatifs : on parle de dopage N.

Au contraire, si les impuretés ont moins d'électrons que les atomes du semi-conducteur, il y a un excès de trous. Les porteurs de charge majoritaires sont alors positifs et on parle de dopage P.

Il se passe des choses intéressantes lorsqu'on met en contact un semi-conducteur dopé N avec un autre dopé P. On forme alors une jonction P-N (une diode). Au abords de la jonction, les paires électron-trou se recombinent et créent ainsi une zone isolante (zone de charge d'espace) sans charge électrique. La jonction possède alors une capacité (isolant entre deux conducteurs=condensateur).

Appliquons une tension aux bornes de cette jonction :

- Si le pôle positif du générateur est en N et le pôle négatif en P, les porteurs de charge de chaque semi-conducteur sont attirés par l'électrode attachée à ce semi-conducteur. La zone isolante s'élargit et aucun courant ne peut passer. On dit que la jonction est polarisée en inverse. Le fait d'empêcher le passage du courant dans un sens fait que la jonction P-N est une diode.

Lors de la polarisation en inverse, si un photon optique crée une paire électron-trou, les deux sont séparés et dirigés vers leur électrode respective. Il y a alors un courant qui passe. La mesure de ce courant renseigne sur l'intensité lumineuse. On a réalisé alors une photodiode.

- Si on inverse les pôles du générateur, la diode est polarisée en direct. Les électrons de N traversent la zone de charge d'espace et P pour aller vers l'électrode qui les attire. De même, les trous vont dans l'autre sens. Il y a donc un courant global. Beaucoup de paires électron-trou se rencontrent et peuvent se recombiner. On peut alors avoir émission de lumière. On a réalisé une diode électro-luminescente (DEL ou LED en anglais).

3 Sources d'un système à fibre optique

3.1 Choix de la source

On peut noter neuf critères pour une source dont la lumière doit être injectée dans une fibre optique :

1. petite surface émissive
2. source directive (diagramme de rayonnement compatible avec l'ouverture numérique de la fibre)
3. longueur d'onde adaptée aux fenêtres de transmission de la fibre
4. faible largeur spectrale pour limiter la dispersion chromatique
5. puissance élevée (il y a une forte atténuation à l'injection et au transport sur grande distance)
6. temps de montée faible (passage rapide d'une intensité faible à une intensité élevée)
7. être facilement modulable
8. être fiable (longueur d'onde et puissance qui varient très peu dans le temps)
9. être économique

3.2 La DEL

3.2.1 Emission spontanée. Electroluminescence d'une jonction P-N.

On a vu dans la section précédente qu'une jonction P-N polarisée en direct permet l'émission de lumière au sein de la jonction par recombinaisons de paires électron-trou. Cette émission de lumière est l'analogie de l'émission spontanée pour un atome. On appelle efficacité quantique interne η_i le pourcentage de recombinaisons qui donnent lieu à l'émission d'un photon.

Le nombre de photons produits par unité de temps est proportionnel au nombre d'électrons qui traversent la jonction, c'est à dire I/e où I est l'intensité électrique qui traverse la diode : $N_{photons} = \eta_i I/e$.

Les photons émis ont une énergie $E = h\nu \simeq E_g$, et la puissance lumineuse émise à l'intérieur de la jonction est $P_i = \eta_i E_g I/e$.

Comme on a aussi $P_i = \eta_i P_{\text{électrique}} = \eta_i UI$ où U est la tension aux bornes de la diode, on en déduit $U = E_g/e$ qui est en électronique la tension seuil de la diode. On voit que la tension aux bornes de la diode est fixée, et qu'il faut piloter la diode en courant pour ajuster la puissance lumineuse.

3.2.2 Caractéristiques d'une DEL

Rendement optique et rendement externe L'émission de lumière au sein de la jonction est isotrope. Il faut cependant que la lumière puisse arriver à l'extérieur : elle ne pas être absorbée dans la jonction (coefficient de transmission T_1) et être transmise par le dioptre de sortie ce qui nécessite d'avoir une incidence inférieure à celle de réflexion totale ($n_1 = 3,5$ dans un semi-conducteur et $n = 1$ dans l'air donc $i_L = 16,6^\circ$, ce qui est faible. Pour une émission isotrope, il y a $T_2 = 2\%$ de chances d'être dans la bonne direction) puis de ne pas être réfléchi sur le dioptre (coefficient de transmission $T_3 \simeq 0,7$).

Le rendement optique est $\eta_{opt} = T_1 T_2 T_3$, et le rendement externe est $\eta_{ext} = \eta_i \eta_{opt}$ qui donne le pourcentage de photons qui sortent de la DEL par rapport au nombre de recombinaisons en son sein.

Le rendement optique est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$. Comme la puissance interne P_i peut-être de l'ordre de 100 mW, la puissance émise par une DEL est de l'ordre de 0,5 mW.

Diagramme de rayonnement Le diagramme de rayonnement suit une loi de Lambert : $P(\theta) = P_0 \cos \theta$ où la direction $\theta = 0$ est celle de l'axe de la DEL.

Ce n'est pas une émission très directive. On emploie les DEL pour injecter une fibre multi-mode d'assez grande ouverture numérique, ou alors on emploie un lentille pour focaliser la lumière.

Largeur spectrale Sous l'action de la température, la variation d'énergie des photons émis autour de E_g est $\Delta E \sim 3kT$ où $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann. A température ambiante, $T \sim 300$ K et $\Delta E \sim 0,07$ eV.

On a alors une largeur spectrale $\Delta \lambda$ telle que $\Delta \lambda / \lambda = \Delta E / E_g \sim 0,07$ car $E_g \sim 1$ eV.

Si $\lambda = 600$ nm, $\Delta \lambda = 40$ nm. La largeur spectrale d'une DEL est donc de quelques dizaines de nm.

Temps de montée Le temps de montée d'une DEL est assez long, de l'ordre de 10 ns.

Caractéristique courant-tension C'est celle d'une diode.

Caractéristique puissance lumineuse-courant Il s'agit d'une droite passant par l'origine, avec une pente de l'ordre de 10 mW/A, jusqu'à quelques mW, valeur limitée par l'échauffement de la diode.

Applications Avec des fibres optiques, les DEL sont employées pour les transmissions de courte distance et pour les signaux analogiques.

3.3 La diode laser

3.3.1 Généralités

Une diode laser consiste en un milieu actif au milieu d'une jonction P-N. Elle émet une longueur d'onde voisine de $\lambda = hc/E_g$, mais qui dépend de la température.

On a déjà vu que l'émission spontanée de lumière est associée à la recombinaison d'une paire électron-trou. L'absorption est la création d'une paire électron-trou par absorption de l'énergie d'un photon, et l'émission stimulée est l'émission d'un photon lors d'une recombinaison électron-trou en présence d'un autre photon incident : les deux photons sont alors identiques.

Comme pour un laser, l'émission stimulée permet d'amplifier l'onde incidente si il y a inversion de population. L'inversion de population consiste à obtenir davantage d'électrons de conduction que d'électrons de valence. Cela peut se faire lorsque l'intensité qui traverse la diode est assez forte, c'est à dire lorsqu'il y a assez d'électrons de conduction. Le pompage est donc assuré par l'application d'un courant extérieur, dont la valeur doit être supérieure à une valeur seuil I_{seuil} pour réaliser l'inversion de population.

La cavité est réalisée en clivant les parois du milieu actif. Comme son indice est d'environ 3,5, le coefficient de réflexion des dioptries semiconducteur/air est $R = (3,5 - 1)^2 / (3,5 + 1)^2 = 0,31$. Ce n'est pas très élevé, mais il y a un gain très fort dans les diodes laser qui permet de compenser les pertes et d'amorcer les oscillations laser.

3.3.2 Modes longitudinaux

Comme l'amplification a lieu dans une cavité résonnante, la détermination des modes longitudinaux se fait comme pour un laser classique. L'intervalle spectral libre est donné par $\Delta \nu = c / (2nL)$ où L est la longueur de la cavité, de l'ordre de 300 μm . On trouve $\Delta \nu \simeq 1,4 \cdot 10^{11}$ Hz. En longueur d'onde, l'intervalle spectral libre est $\Delta \lambda = \lambda^2 / (2nL) \simeq 0,3$

nm pour $\lambda \sim 800$ nm.

La courbe de gain est d'allure gaussienne, d'une largeur à mi-hauteur de l'ordre de 2 nm et contient donc une dizaine de modes.

Dans certaines diodes laser dites "DFB" (Distributed FeedBack), on intègre un réseau de Bragg dans la cavité. Son rôle est de sélectionner une seule longueur d'onde. On obtient alors une diode laser monomode, dont la lumière aura une faible dispersion chromatique lors de la propagation dans une fibre optique (intéressant pour la propagation en fibre monomode avec un haut débit).

3.3.3 Caractéristiques

Caractéristique puissance lumineuse-intensité La puissance lumineuse émise est quasi-nulle pour $I < I_{seuil}$, et dépend linéairement de I pour $I > I_{seuil}$. L'ordre de grandeur de I_{seuil} est la dizaine de mW, mais sa valeur augmente lorsque la température augmente. La pente de la droite est en revanche indépendante de T .

On peut asservir la diode en puissance, en température ou en intensité. A I constante, la diode va s'échauffer et la puissance émise diminuera. A P constante sans réguler T , comme la diode va s'échauffer, I devra augmenter et on risque d'endommager la diode. Si on maintient la température de la diode constante et qu'on l'asservit en puissance, on obtient une puissance stable dans le temps.

Diagramme de rayonnement La zone active au milieu de la jonction P-N s'appelle aussi le ruban. Sa face de sortie est rectangulaire. A cause de la diffraction, la divergence du faisceau est plus grande dans la direction étroite du ruban que dans la direction large. Les ordres de grandeur sont une divergence d'environ 10° parallèlement au ruban et d'environ 30° perpendiculairement au ruban, mais ça peut varier beaucoup d'une diode laser à une autre. Dans une direction donnée (par exemple parallèle au ruban), la répartition d'intensité est gaussienne. Mais l'allure du faisceau en sortie de diode est elliptique et non pas circulaire.

Temps de montée Le temps de montée est inférieur à 0,2 ns.

Dépendance de la longueur d'onde en fonction de T La longueur d'onde émise augmente avec la température. Une variation typique est de l'ordre de $0,15$ nm/ $^\circ$ C. La longueur d'onde est donc ajustable avec la température (avantage), mais il faut faire attention à maintenir la température constante lors de l'emploi d'une diode laser pour envoyer un signal par fibre optique (inconvenient).

Applications Les diodes laser multimodes sont employées avec des fibres optiques monomodes à une longueur d'onde de 1300 nm.

Les diodes laser monomode sont employées avec des fibres optiques monomodes à une longueur d'onde de 1550 nm. Cette fenêtre est étroite et nécessite des sources de faible largeur spectrale.

4 Détecteurs dans les systèmes à fibre optique

Nous avons déjà vu qu'une jonction P-N polarisée en inverse était une photodiode, capable de détecter de la lumière de longueur d'onde $\lambda < \lambda_c = hc/E_g$. Dans cette partie, deux réalisations pratiques de photodiodes seront étudiées : les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche (PDA).

4.1 Choix du détecteur

Le détecteur doit satisfaire à six critères :

1. réponse spectrale adaptée
2. bonne sensibilité (A/W)
3. rapide
4. peu sensible aux paramètres extérieurs
5. peu encombrant
6. bon rapport performances/prix

Les détecteurs thermiques sont trop lents pour les applications télécom. D'autres détecteurs ont de trop grandes dimensions (photomultiplicateur, par exemple). Les photodiodes PIN et à avalanche correspondent bien au cahier des charges.

4.2 Photodiode PIN

Une photodiode PIN est une jonction P-N au milieu de laquelle on a placé un semi-conducteur intrinsèque I, c'est à dire très pur et non dopé. L'intérêt de l'intrinsèque est de permettre la formation de paires électron-trou sans qu'il y ait recombinaison de l'électron ou du trou avec un autre porteur de charge avant d'arriver dans la zone N ou P. Un courant a donc le temps de se propager. L'intrinsèque permet aussi de diminuer la capacité de la jonction, et donc de diminuer son temps de réponse.

4.2.1 Création de paires électron-trou

Une paire électron-trou peut être créée par un photon incident s'il possède une énergie supérieure à E_g , c'est à dire une longueur d'onde $\lambda < hc/E_g$. Ce photon est alors absorbé. Soit α le coefficient d'absorption du matériau. La puissance lumineuse atteignant la profondeur x est $P(x) = P_0 e^{-\alpha x}$ où P_0 est la puissance incidente. α est une fonction de λ . Le matériau peut absorber presque tout le rayonnement incident si sa profondeur est assez grande. Cependant, une trop grande profondeur peut aussi occasionner de la gêne (voir plus loin). On choisit l'épaisseur en fonction de α à la longueur d'onde pour laquelle on optimise la photodiode.

La jonction PIN étant polarisée en inverse, les électrons sont collectés dans N et les trous dans P.

4.2.2 Rendement quantique

Le rendement quantique est

$$\eta = \frac{\text{nombre d'électrons collectés}}{\text{nombre de photons incidents}}$$

Sur la photodiode se trouve un traitement anti-reflet pour diminuer le coefficient de réflexion R à la longueur d'onde d'optimisation. La puissance lumineuse absorbée est $P_a = (1 - R)(1 - e^{-\alpha x})P_0$. On a alors $\eta \simeq (1 - R)(1 - e^{-\alpha x})$ en négligeant les électrons produits qui ne sont pas collectés.

4.2.3 Sensibilité

Les électrons et les trous qui sont collectés créent un courant d'intensité I dans la diode. La sensibilité de la photodiode est $S = I/P_0$ en A/W.

On a $I = N_e e$ où N_e est le nombre d'électrons collectés par seconde et e la charge électrique d'un électron, et aussi $P_0 = N_{phot} hc/\lambda$ où N_{phot} est le nombre de photons incidents par seconde. On trouve alors

$$S = \frac{N_e}{N_{phot}} \frac{e}{hc} \lambda = \eta \frac{e}{hc} \lambda$$

4.2.4 Temps de réponse

Le temps de réponse d'une photodiode dépend de deux paramètres : sa capacité C (temps de réponse associé RC où R est la résistance de charge, le constructeur le donne généralement pour $R = 50\Omega$), et le temps de transit t_t que met un électron pour aller de l'endroit où il est produit à la zone de collection.

La capacité C augmente avec la surface de la diode et diminue avec l'épaisseur de la zone I. Par contre t_t augmente avec l'épaisseur de la zone I. Il faut donc une photodiode de petite surface (pas trop pour qu'elle puisse capter un signal), et de longueur optimisée (absorption, C , t_t).

4.2.5 Courant d'obscurité I_0

Même en l'absence de lumière, un courant traverse la photodiode. On l'appelle courant d'obscurité (dark current en anglais). Son origine est double : il y a un courant de fuite lorsqu'on polarise la diode en inverse, et il y a aussi un courant d'origine thermique (une paire électron-trou peut être créée sous l'effet de la température). Ce courant est généralement faible, mais empêche la mesure de faibles puissances lumineuses.

4.2.6 Bruit

Pour un même éclairage de la photodiode, le courant produit fluctue. Ce bruit a diverses origines. On peut modéliser les fluctuations quadratiques moyennes du courant par $\langle i^2 \rangle = 2eIB.P.$ où $B.P.$ est la bande-passante de la photodiode.

4.2.7 Caractéristiques de quelques photodiodes

Photodiode au Si Elle permet de détecter des longueurs d'onde dans le visible et dans l'infrarouge jusqu'à $\lambda_c = 1000$ nm. On peut donc capter des signaux dans la première fenêtre de travail.

Sa sensibilité maximale est de 0,6 A/W et son courant d'obscurité est inférieur à 5 nA. Elle est également peu coûteuse et ses performances sont très bonnes.

Photodiode au Ge Elle permet de détecter des longueurs d'onde dans l'infrarouge jusqu'à 1600 nm. On peut travailler dans la deuxième et troisième fenêtre avec un tel capteur.

Sa sensibilité maximale est de 0,7 A/W mais son courant d'obscurité est élevé : 500 nA.

Pour cette raison, on a tendance à lui préférer les photodiodes au GaInAs, plus performantes, qui détectent jusqu'à 1700 nm avec une sensibilité maximale de 0,8 A/W et surtout un courant d'obscurité inférieur à 5 nA.

4.3 Photodiode à avalanche (PDA)

Si on veut capter des signaux très faibles avec une photodiode PIN, il faut ajouter derrière un amplificateur électronique, qui est source de bruit et réduit le rapport signal sur bruit

S/N (Signal/Noise en anglais). Pour améliorer le rapport signal sur bruit, la PDA utilise un préamplificateur intégré.

Le principe est le suivant : on applique une forte tension inverse à une jonction P-N, de sorte que les atomes du semi-conducteur soient au seuil d'ionisation. (Remarque : Si la tension inverse était légèrement plus forte, les atomes seraient ionisés et des électrons circuleraient librement malgré la tension inverse: c'est l'effet Zener à la base des diodes Zener. Si on ne prend pas de précautions particulières, ce courant détruit la diode par effet Joule.) Lorsque une paire électron-trou est créée par absorption d'un photon, les deux porteurs de charge sont fortement accélérés vers leur zone de collection respective. Au passage, ils entrent en collision avec des atomes en leur cédant un peu d'énergie, ce qui suffit à les ioniser et une nouvelle paire électron-trou est créée. Ces deux paires peuvent en créer d'autres et il y a un effet d'avalanche. Au final, un seul photon peut avoir créé un courant détectable. On note M le nombre moyen de paires électron-trou engendrées par une seule paire initiale.

Ces photodiodes permettent donc de mesurer de très faibles signaux lumineux, ce qui est intéressant car les signaux en bout d'une longue fibre optique sont peu intenses.

En pratique, la partie P de la jonction P-N est constituée d'un empilement de couches dopées P avec différentes concentrations d'impuretés.

La longueur d'onde de coupure, la sensibilité et le courant d'obscurité sont les mêmes pour une PDA que pour une photodiode PIN.

4.3.1 Gain

Le gain M d'une PDA dépend du matériau, de la tension inverse et parfois de la température. Il faut donc parfois stabiliser une PDA en température.

$M \sim 100$ pour une PDA au Si avec une tension inverse de 200 V. Pour une PDA au Ge, $M \sim 10$ pour une tension inverse de 25 V. Et pour une PDA au GaInAs, $M \sim 20$ pour une tension inverse de 150 V.

L'intensité à travers une PDA est M fois celui à travers une photodiode identique à faible tension inverse.

4.3.2 Courant d'obscurité

$I_0 = MI_t + I_f$ où I_t est le courant thermique, lui aussi amplifié. Le courant de fuite I_f n'est pas amplifié.

4.3.3 Bruit

Le gain M est une valeur moyenne du nombre m de paires électron-trou engendrées par une paire initiale. La valeur moyenne $\langle m^2 \rangle$ est alors supérieure à M^2 et s'écrit approximativement $\langle m^2 \rangle = M^{2+x}$ avec $x \leq 1$. Les fluctuations d'intensité ont une valeur quadratique moyenne proportionnelle à $\langle m^2 \rangle$ car l'intensité varie proportionnellement à m .

On a alors $\langle i^2 \rangle = 2eI_S M^{2+x}$ avec I_S l'intensité à faible tension inverse.

Pour une PDA au Ge, on a la pire situation $x = 1$. On lui préfère donc ici aussi une PDA au GaInAs avec $x = 0,7$. Pour une PDA au Si, $x = 0,5$, ce qui est bon. Inconvénient d'une PDA au Si : la forte tension inverse. On la réserve donc à des besoins spécifiques.

4.3.4 Temps de réponse

Le temps de réponse d'une PDA est le double de celui d'une PIN équivalente (il faut le temps que les avalanches se fassent, malgré la plus grande vitesse des porteurs de charge).

5 Liaison par fibre optique

5.1 Cahier des charges

- On veut transmettre un signal analogique ou numérique
- Le débit d'information à transmettre est déterminé par la bande-passante $B.P.$ en Hz pour l'analogique et le débit B_r en bits/s pour le numérique.
- La qualité de l'information à l'arrivée est caractérisée par le rapport signal sur bruit S/N pour l'analogique et le taux d'erreur sur les bits (TEB) pour le numérique.
- Longueur de liaison, en présence ou non de répéteurs (amplification du signal et remise en forme).
- Le prix.

5.2 Bilan de bande passante

Le bilan de bande passante permet de s'assurer que le système de télécommunication est capable de transporter la quantité d'information requise.

5.2.1 Temps de montée requis

On appelle T_s le temps de montée requis pour la liaison par fibre optique.

Pour un signal analogique, $T_s = 0,35/B.P.$.

Pour un signal numérique :

- $B.P. = B_r$ en codage RZ (le signal est remis à 0 avant d'envoyer chaque bit) : $T_s = 0,35/B_r.$
- $B.P. = B_r/2$ en codage NRZ (le signal est laissé tel quel avant d'envoyer le bit suivant) : $T_s = 0,70/B_r.$
- A noter que le codage RZ permet d'envoyer des impulsions de largeur constante, ce qui est avantageux quand il y a de la dispersion. Ce codage est privilégié pour le haut débit.

5.2.2 Temps de montée de la source T_{so}

Pour une DEL, T_{so} est de l'ordre de quelques dizaines de ns.

Pour une diode laser, il est au plus de l'ordre de la ns et descend à quelques dizaines de ps. Le temps de montée d'une source est indiqué par le fabriquant.

5.2.3 Temps de montée de la fibre T_{fo}

T_{fo} est le délai dû aux dispersions modale et chromatique.

On le mesure soit à partir de l'élargissement d'une impulsion gaussienne, soit en disant que c'est le temps mis pour passer de 10% à 90% de la puissance en sortie si on applique un échelon à l'entrée de la fibre.

Le temps de montée augmente proportionnellement à la longueur de la fibre, tout comme la bande passante décroît comme l'inverse de cette longueur.

5.2.4 Temps de montée du détecteur T_{do}

Le temps de réponse du détecteur dépend de deux effets : l'effet capacitif qui donne une durée $t_{d1} = 2,2RC$ où R est la résistance de charge (généralement 50Ω) et C la capacité de la photodiode; et le temps de transit t_t . On a $T_{do} = \sqrt{t_{d1}^2 + t_t^2}$.

Cette durée est comprise entre 0,1 ns et 10 ns pour une photodiode PIN, et entre 0,2 ns et 5 ns pour une PDA.

5.2.5 Temps de montée total T_T

$$T_T = \sqrt{T_{so}^2 + T_{fo}^2 + T_{do}^2}$$

On doit avoir $T_T \leq T_s$. Si $T_T \ll T_s$, on augmente T_T en augmentant R , donc T_{do} : cette opération permet de diminuer le bruit.

5.3 Bilan énergétique

En plus de pouvoir transporter la quantité d'information requise, le système doit aussi permettre d'assurer la qualité du transfert de l'information. La qualité est directement liée au rapport signal sur bruit S/N (système analogique) ou au taux d'erreur sur les bits TEB (système numérique).

Le paramètre fondamental est le seuil de détection, c'est à dire le flux énergétique minimal qui doit arriver sur le détecteur pour que le signal de sortie ait le S/N ou le TEB requis.

Les pertes d'énergie proviennent de l'atténuation dans la fibre optique, des connexions et des divers couplages.

5.3.1 Seuil de détection P_{0m}

Le seuil de détection est une puissance lumineuse. Il est d'usage de l'exprimer non pas en W mais en dBm : $P(dBm) = 10 \log(P(mW))$. Dans la suite de cette partie, les puissances seront en dBm.

Selon l'utilisation du signal récupéré, S/N peut varier de 20 dB à 70 dB (système analogique). Pour un système numérique, on choisit souvent TEB=10⁻⁹.

Le seuil de détection dépend bien sûr de TEB ou S/N, mais aussi de la bande passante ou du débit, de la puissance moyenne de la source et du photodétecteur utilisé.

5.3.2 Puissance émise par la source P_s

Signal analogique La puissance émise est modulée avec la modulation m : $P = P_{moy}(1 + m \sin(\omega t))$. La puissance de la source à prendre en compte est la puissance efficace ou puissance énergétique moyenne modulée $P_s = (P_{max} - P_{moy})/\sqrt{2} = mP_{max}/((m + 1)\sqrt{2})$.

Exemple : une DEL émet $P_{max} = 1,1$ mW avec une modulation $m = 0,7$. Calculer la puissance énergétique moyenne modulée qu'elle émet, en mW puis en dBm. Réponse : 0,32 mW; -5 dBm.

Signal numérique Si le signal est émis avec un rapport cyclique 0,5 (égale probabilité d'états haut et bas), alors $P_s = 0,5P_{max}$.

5.3.3 Bilan de puissance

On note globalement D_T les pertes par couplage ou connexion de fibres.

On note A les pertes par atténuation dans la fibre.

Compte-tenu de la puissance de la source et des pertes, on prend une marge de sécurité M

pour déterminer la puissance minimale en bout de fibre. Il faut que le seuil de détection soit légèrement inférieur à cette puissance minimale :

$$P_{0m} \leq P_s - M - (D_T + A)$$

où toutes les puissances sont en dBm et les pertes en dB.

On peut en faire une représentation graphique sur un graphe puissance en dBm-distance parcourue. Voir la figure 1.

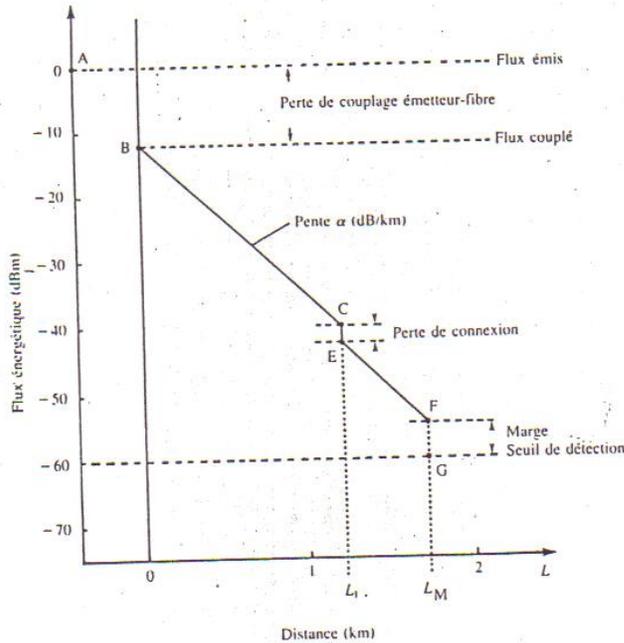


Figure 1: Variation de la puissance en dBm le long d'un système à fibres optiques.

5.3.4 Exemple

On choisit pour source une diode laser de longueur d'onde $\lambda = 850$ nm, de puissance maximale $P_{max} = 5$ mW.

La fibre est à gradient d'indice, d'ouverture numérique 0,2. Cela correspond à une perte de puissance à l'injection de 11 dBm. Sa longueur est 1,2 km. Son atténuation est à déterminer. Le détecteur est une PDA, de capacité $C=100$ pF.

On cherche à transmettre un signal vidéo à 110 Mbits/s, avec un $TEB=10^{-9}$. En s'aidant de la figure 2, on peut en déduire le seuil de détection. En prenant une marge de 5 dBm, quelle doit être l'atténuation maximale de la fibre optique en dB/km ?

Avec la figure 2, on trouve un seuil de détection $P_{0m} = -50,5$ dBm.

Puissance de la source $P_s = 0,5 \times 5$ mW = 2,5 mW = 4 dBm.

Il n'y a pas de connecteurs et les pertes à l'injection sont 11 dBm. Avec une marge de 5 dBm, on trouve

$$-50,5 \leq 4 - 5 - 11 - A \Rightarrow A \leq 38,5 \text{ dB}$$

Pour une fibre de 1,2 km, il faut une atténuation inférieure à $38,5/1,2=32$ dB/km.

Remarques :

- Si on prend une fibre ayant une atténuation de 9 dB/km, on peut augmenter la distance jusqu'à 4 km.
- Si on avait une photodiode PIN, le seuil de détection serait monté à -28 dBm. Il faudrait alors utiliser une fibre ayant une atténuation linéique inférieure à 13 dB/km.

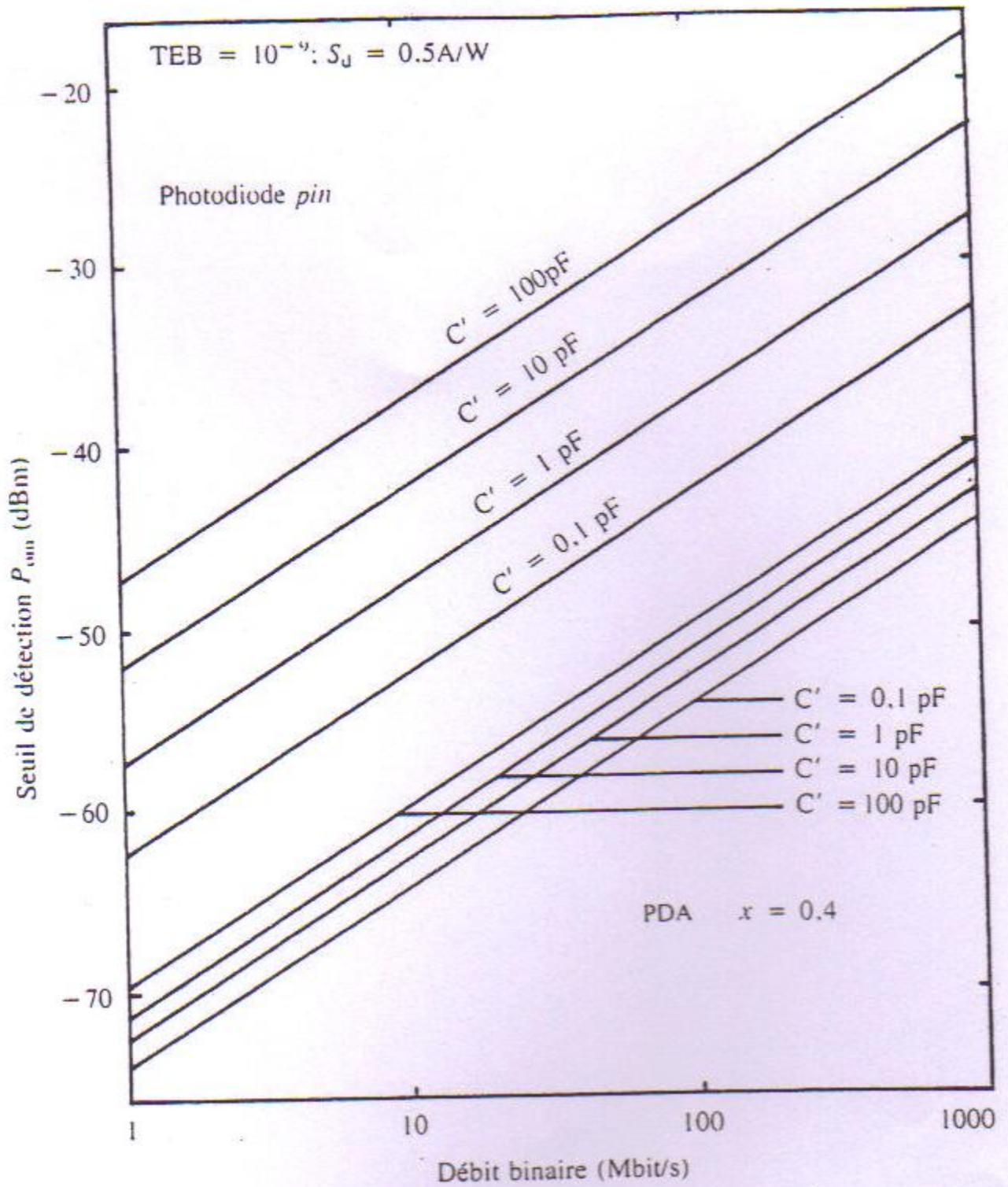


Figure 2: Seuil de détection en fonction du débit et du détecteur.