

TELECOM205 - Projet de synthèse : système de communications
D3 - Optical point-to-point system performance

Vincent, Antonin

Contents

1	Propagation dans une fibre	2
2	Modèle de système simplifié <i>back-to-back</i> (B2B)	4
3	Modèle de système avec propagation dans une fibre de 100 km	7
4	Performances en modulation directe	9
5	Solution pour transmettre 10 Gbps à 100 km	11
5.1	Changer la longueur d'onde du laser :	11
5.2	Ajouter des tronçons de fibre :	12

1 Propagation dans une fibre

Pour cette partie nous simulons la propagation d'un signal dans une fibre optique. Deux phénomènes majeurs sont à prendre en compte.

- l'atténuation en amplitude, paramétrée avec α en dB/km , le coefficient d'atténuation
- la dispersion chromatique, paramétrée par le coefficient de dispersion D en $ps/nm/km$ et S la pente de dispersion en $ps/nm^2/km$

Soit sig le signal en entrée de la fibre et soit L la longueur de la fibre en km . On a en sortie de la fibre une atténuation en amplitude de $\text{att} = 10^{-\frac{\alpha}{20}L}$.

Pour la dispersion chromatique on utilise la fonction de transfert associée dans le domaine de Fourier : $H_{CD}(\Delta w) = e^{-i(\beta_2 \frac{\Delta w^2}{2} + \beta_3 \frac{\Delta w^3}{6})L}$ avec $\beta_2 = -\frac{D\lambda^2}{2\pi c}$ et $\beta_3 = \frac{S\lambda^4}{4\pi^2 c^2}$ où $D_\lambda = D_{\lambda_0} + S(\lambda - \lambda_0)$

On va donc faire les étapes suivantes :

- Appliquer l'atténuation d'amplitude selon sig.att
- Appliquer la dispersion chromatique. Pour cela on va passer le résultat précédent dans le domaine de Fourier puis le multiplier par H_{CD} pour toutes les fréquences avant de repasser dans le domaine temporel et obtenir le signal de sortie

Les valeurs suivantes ont été prises (fibre SSMF): $D = 17ps/nm/km$ et $S = 0.057ps/nm^2/km$ et $\alpha = 0.2dB/km$, les valeurs classique pour un laser à 1550nm et une fibre monomode standard. On considérera un laser à 1550nm donc $D_\lambda = D_{\lambda_0} = 17ps/nm/km$

Attention les unités jouent un rôle très important, on oubliera pas de bien les gérer ce point. Pour cela dans le code qu'on utilise, on convertira D en $s/m/km$ soit $17e^{-3}$ et de même avec S soit $0.09e6$ puis pareil avec $\lambda = 1550e-9m$. En effet la présence de puissance dans les calculs ne permet pas de conserver les nm et autres.

On considère dans notre cas un laser centrée autour de la fréquence 0, ce qui permettra d'avoir des $\Delta w = w$ car $w_0 = 0$. Pour cela, en calculant le fft du signal, on utilisera ensuite `fftshift` pour centrer le signal en zéro. De même pour passer dans le domaine temporel on utilisera `ifftshift` puis `ifft` sur le signal dans le domaine de fourier.

Pour la construction des w on va simplement prendre des autant de fréquences que de nombres de points voulus (notons N ce nombre de point), entre $-\frac{F_e}{2}$ et $\frac{F_e}{2}$ où F_e est la fréquence d'échantillonnage.

Pour trouver la fréquence d'échantillonnage il faudra prendre 2 fois la fréquence maximale du signal (théorème de Shannon).

Il peut être utile de la calculer dans certains cas. Par exemple pour une porte de largeur T , on sait que sa TF donne un sinus cardinal où le lobe principale est entre $-\frac{1}{T}$ et $\frac{1}{T}$. On prendra donc $F_e = \frac{2}{T}$. Or dans ce cas T correspondra au temps symbole. Le cas d'une porte correspond au cas d'une impulsion par exemple. Dans ce cas, $\Delta f = \frac{2}{T}$

Pour un cosinus surélevé de facteur d'excès ρ et de période T_s on aura une bande de largeur $\frac{1+\rho}{T_s}$ comprise entre $\pm \frac{1+\rho}{2T_s}$ donc $F_e = \frac{1+\rho}{T_s}$.

On cherche le nombre de zéro à placer au début et à la fin du signal pour éviter les effets de bord. En effet, si l'étalement du à la dispersion est trop fort on va se retrouver avec des effets du bord du fait de la fft. Pour cela, on sait que, $\Delta\tau = LD\Delta\lambda$ où $\Delta\lambda = \frac{c\Delta f}{f^2}$, avec $\Delta\tau$ l'étalement dans le domaine temporel. On a donc $\Delta\tau = LD\frac{\Delta f\lambda^2}{c}$. Ainsi, on peut calculer $\Delta\tau$ puis en multipliant par la fréquence symbole on a le nombre de point où il y aura un étalement (on prend bien sûr la partie entière supérieure de ce nombre de point). Le signal devra commencer au nombre de points trouvés + 1

En prenant $F_{\text{symb}} = \frac{1}{T} = 3.03 \times 10^{10}$ pour une impulsion de largeur 1 (vecteur de zéros sauf entre t et $t+1$ où on met la valeur 1), soit une impulsion de type porte, on obtient la figure suivante :

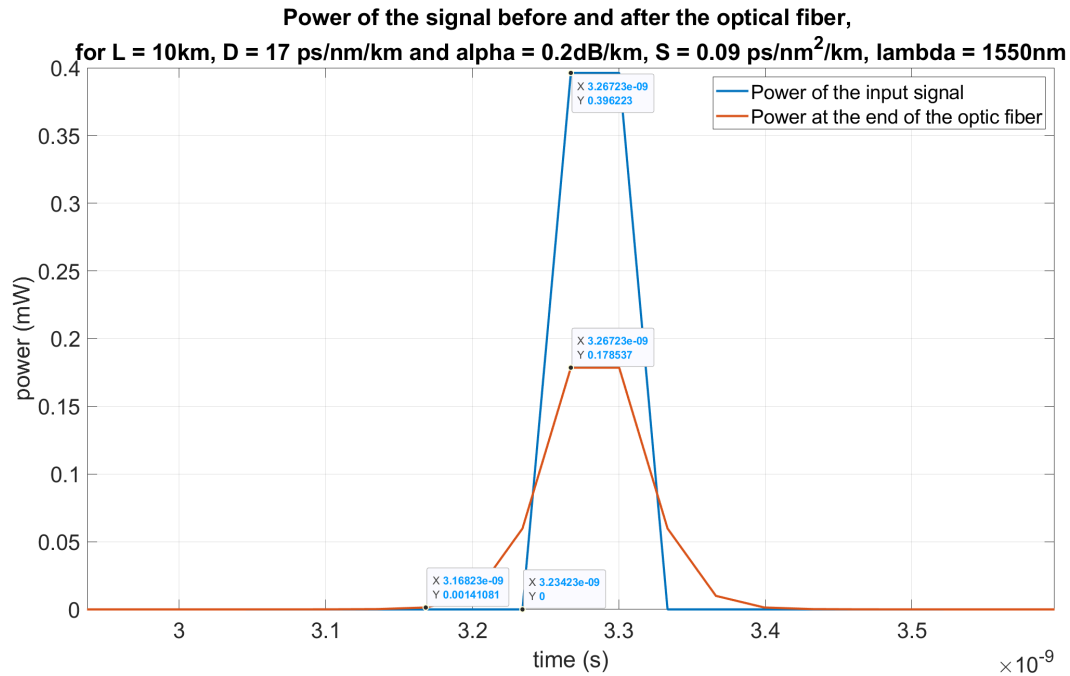


Figure 1: Puissance en entrée et en sortie d'une fibre optique

Le calcul théorique donne un $\Delta\tau$ de 8.25×10^{-11} en prenant $\Delta f = \frac{2}{T}$ (impulsion de type porte). Sur la courbe on mesure un $\Delta\tau$ de 6.6×10^{-11} , l'écart avec la théorie s'expliquant par la discrétisation des points (en réalité le point le plus à gauche n'est pas à zéro, l'impulsion est légèrement plus grande sur la figure mais il n'y a pas de point correspondant au zéro. Ce point est entre deux points de mesure). Il faudra donc au moins $\lceil \Delta\tau \times F_{\text{sympb}} \rceil = 3$ zéros avant de commencer le signal. Donc ici pour ne pas avoir d'effet de bord, le 1 du vecteur de zéros doit se trouver au minimum à $t = 4$ (en terme de nombre de points du vecteur, pas en terme de temps. Cela serait donc au temps $\frac{t}{T}$)

Reste à voir si l'amplification correspond. Pour cela on se place dans un cas sans dispersion (donc réduction de la fréquence symbole d'un facteur 10 dans notre cas) et on va comparer la puissance au niveau du pic avant et après la fibre

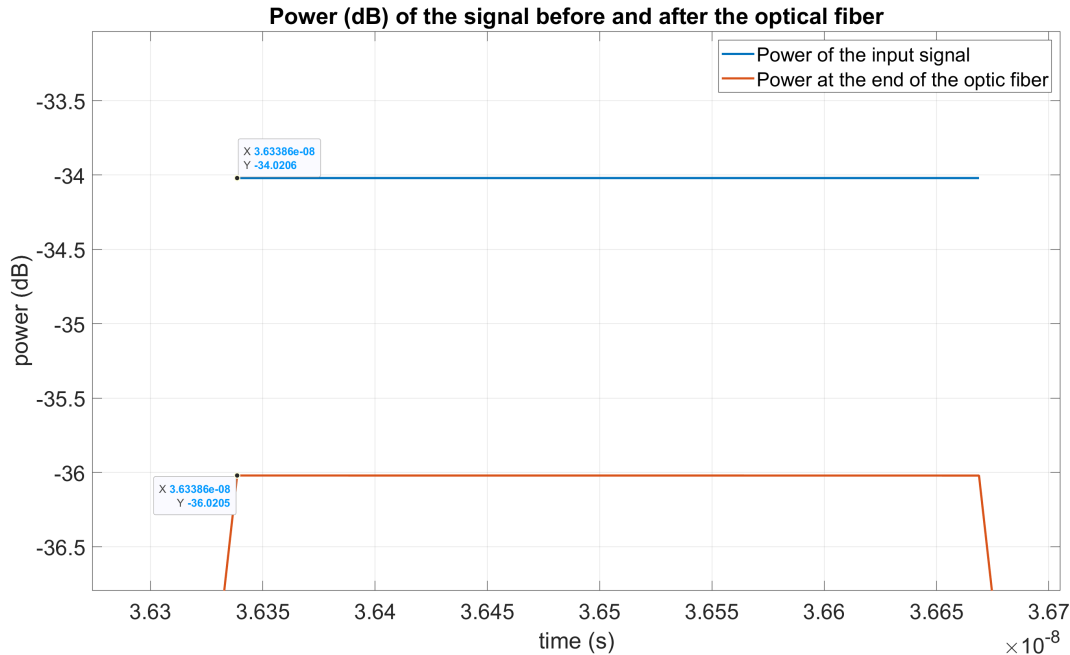


Figure 2: Zoom sur la puissance du pic en entrée et en sortie d'une fibre optique, $L=10\text{km}$, $\alpha = 0.2\text{dB/km}$

On perçoit bien une différence de -2dB entre l'entrée et la sortie de la fibre optique ce qui correspond à ce qu'on devrait avoir ($L \times \alpha = 10 \times 0.2 = 2\text{dB}$)

2 Modèle de système simplifié *back-to-back* (B2B)

Le principe de cette étape est de modéliser un émetteur avec modulation externe (*External Modulation Laser* ou MLT) et un récepteur à photodétection directe. La modulation sera ici du *on-off-keying* (OOK), avec $R_b = 2.5\text{Gbps}$ puis $R_b = 2.5\text{Gbps}$. On cherchera à obtenir la puissance optique requise dans chaque cas pour obtenir un BER inférieur à 10^{-3} puis 10^{-6} , sans égalisation ni codes correcteurs.

Les paramètres de simulation choisis sont :

- Le nombre de bits transmis, qui doit être suffisant pour pouvoir mesurer un BER de 10^{-6} . Nous avons choisi de transmettre 10^7 bits.
- Le débit symbole, qui est égal au débit binaire dans le cas d'une modulation OOK (un seul bit transmis par symbole). Ce sera aussi la bande passante du récepteur.

Le principe du script est simplement de faire varier la puissance sortant l'émetteur et de calculer le BER à la sortie du récepteur. Nous avons pour cela utilisé une boucle `parfor`, pour paralléliser la simulation sur plusieurs cœurs du CPU. Nous avons dans un premier temps tracé les courbes sur une vaste plage de variation de puissance, que nous avons réduite pour déterminer avec plus de précision le BER et la puissance requise pour passer les deux seuils demandés.

Il a fallu paramétrer le laser à modulation externe en choisissant une modulation de type *I*. La puissance choisie dépend de la variable itérative de la boucle `parfor` (ici *ii*).

```
1 params_tx = make_emlaser('modulation', 'I', 'P_opt_dBm', power_dbm(ii));
2 params_rx = make_photodetector();
```

Listing 1: Paramétrage du laser à modulation externe

Le photodétecteur requiert que l'on indique un niveau de bruit supplémentaire qui viendrait s'ajouter lors de la transmission. Étant donné qu'il n'y a pas de pré-amplificateur optique au sein de la chaîne de transmission (la fibre est de longueur

nulle dans le système B2B), aucune source de bruit ne viendrait monter le plancher de bruit dans la fibre. Ainsi, on règle le paramètre de ce bruit à 0.

Le calcul du BER est assez simple dans ce cas de figure : la modulation étant OOK, un simple détecteur à seuil permet de calculer l'état du bit à partir d'un niveau de puissance optique (simulé). Le seuil choisi est la moyenne de l'ensemble du vecteur du signal reçu. La détermination de la valeur du BER utilise la fonction native `biterr` de Matlab.

```
1 thres = mean(sig_rx);
2 sig_rx_demod = double(sig_rx>thres);
3 [nb_errs(ii), ratio_ber(ii)] = biterr(sig_bb_ook, sig_rx_demod);
```

Listing 2: Démodulation OOK et calcul du BER

On va tracer en fonction de la puissance au récepteur, qui correspond ici à la puissance du signal (pas de bruit dans notre cas et système B2B).

Après exécution sur une machine d'INFRES, qui présente de meilleures performances et possède un grand nombre de cœurs CPU, nous obtenons la figure suivante :

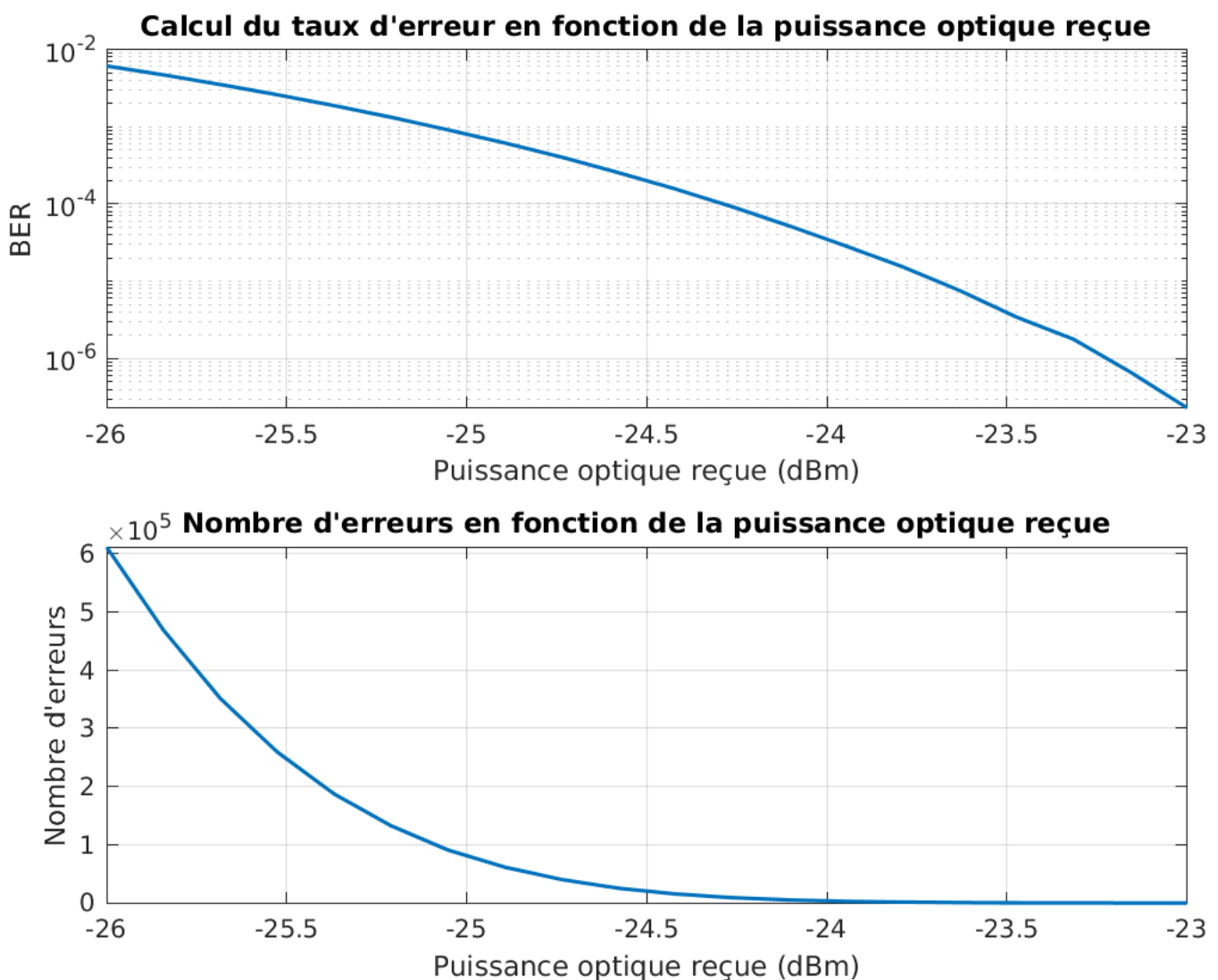


Figure 3: BER en fonction de la puissance du laser

Ainsi, dans le cas du système *back-to-back* avec un débit de 2,5 Gsym/s, la puissance requise à l'émission pour atteindre un BER de 10^{-3} est de -25,9 dBm, tandis qu'elle doit être de -23,2 dBm pour atteindre un BER de 10^{-6} .

Reste alors le cas pour 10 Gsym/s :

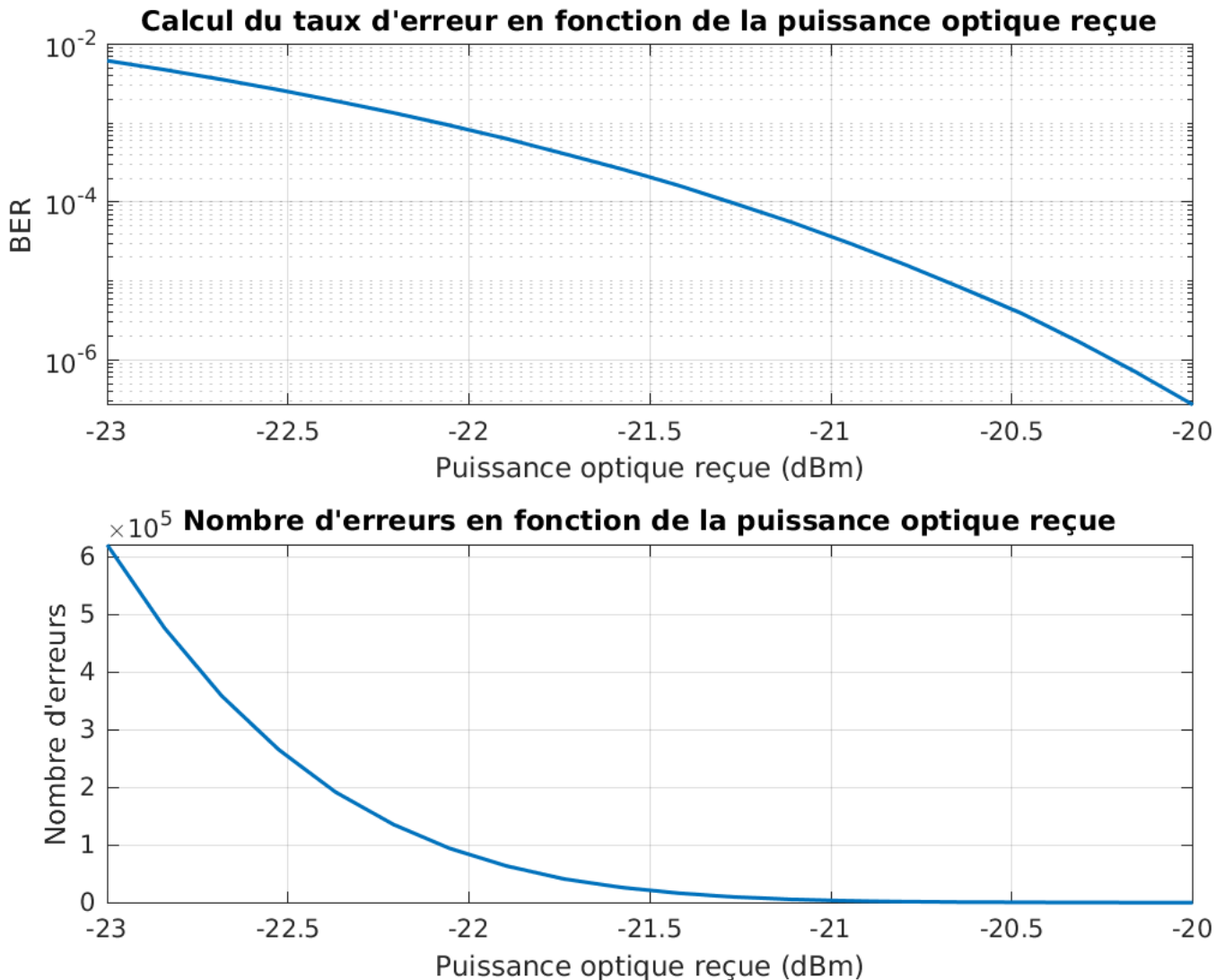


Figure 4: BER en fonction de la puissance du laser

Dans cette situation, la puissance requise pour atteindre les mêmes BER que précédemment est de -22,2 dBm pour un BER de 10^{-3} et -20,2 dBm pour 10^{-6} .

Ainsi, on constate qu'augmenter le débit nécessite d'augmenter la puissance pour avoir les mêmes performances en erreurs. Cela s'explique surtout par l'augmentation de la bande passante de la photodiode du récepteur, qui passe de 2,5 à 10 GHz.

3 Modèle de système avec propagation dans une fibre de 100 km

Pour une fibre on rappelle (voir les expressions dans la partie 1) que l'on a $B^2 L \leq \frac{c}{2D\lambda^2}$ avec B le data rate, L la longueur de la fibre et D le coefficient de dispersion chromatique. Cela permet de donner une borne supérieure sur la longueur maximale atteignable pour une fibre optique. Dans notre cas ($\lambda = 1550nm$) on a $L_{max} = 587km$ pour $2.5Gbit/s$ et $L_{max} = 36.7km$ pour $10Gbit/s$, ce sont du moins les valeurs théoriques.

On obtient les différentes courbes pour les débits voulus :

Pour 2.5Gbit/s on obtient la figure suivante

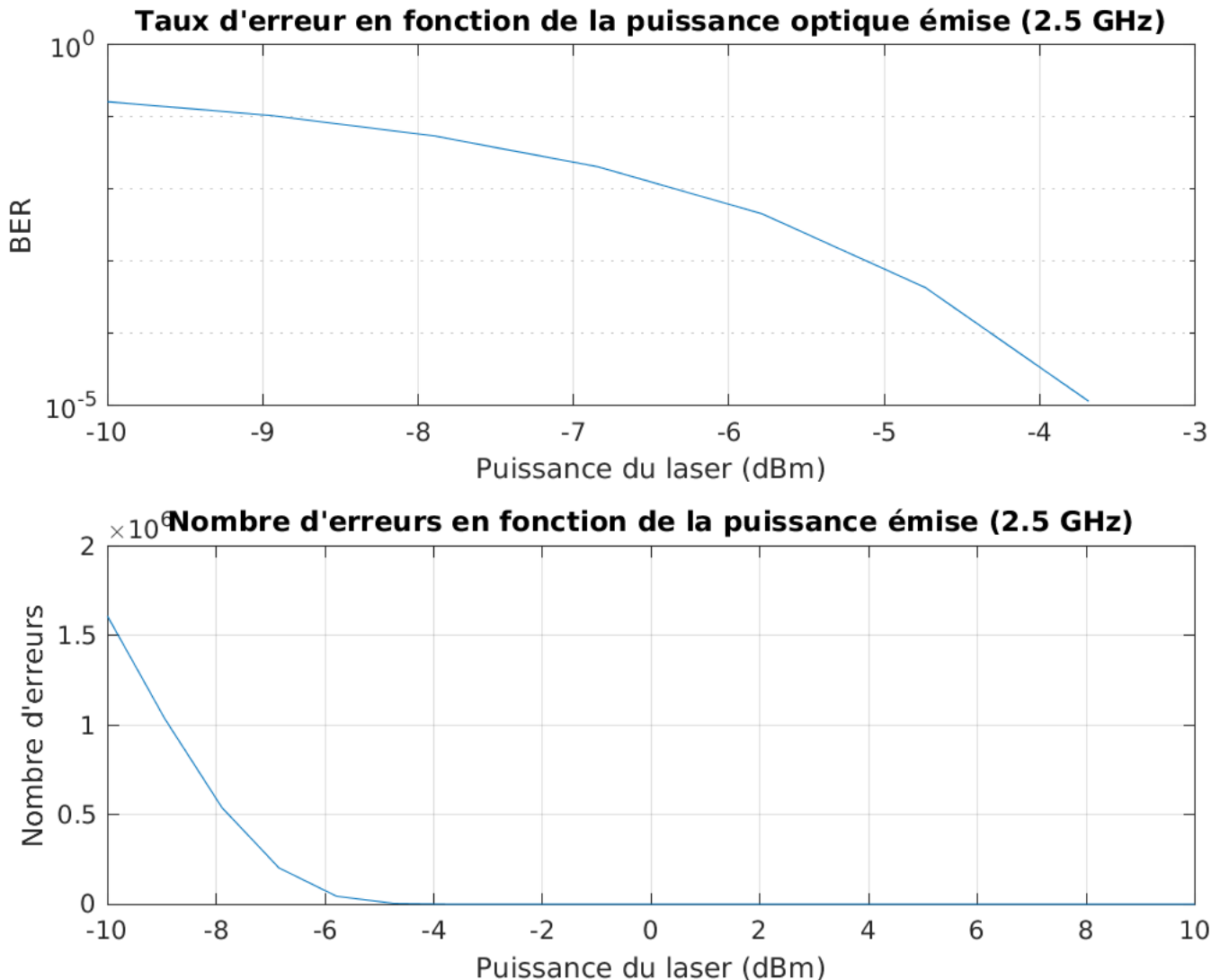


Figure 5: BER en fonction de la puissance dans le système B2B, à 2.5Gbit/s

On arrive à atteindre 10^{-3} , pour une puissance de -2,3dBm mais la précision des calculs pour atteindre 10^{-6} est trop faible pour savoir si on atteint cette valeur. On voit bien qu'on a de la perte de performance par rapport au système B2B.

Pour 10Gbit/s on obtient la figure suivante

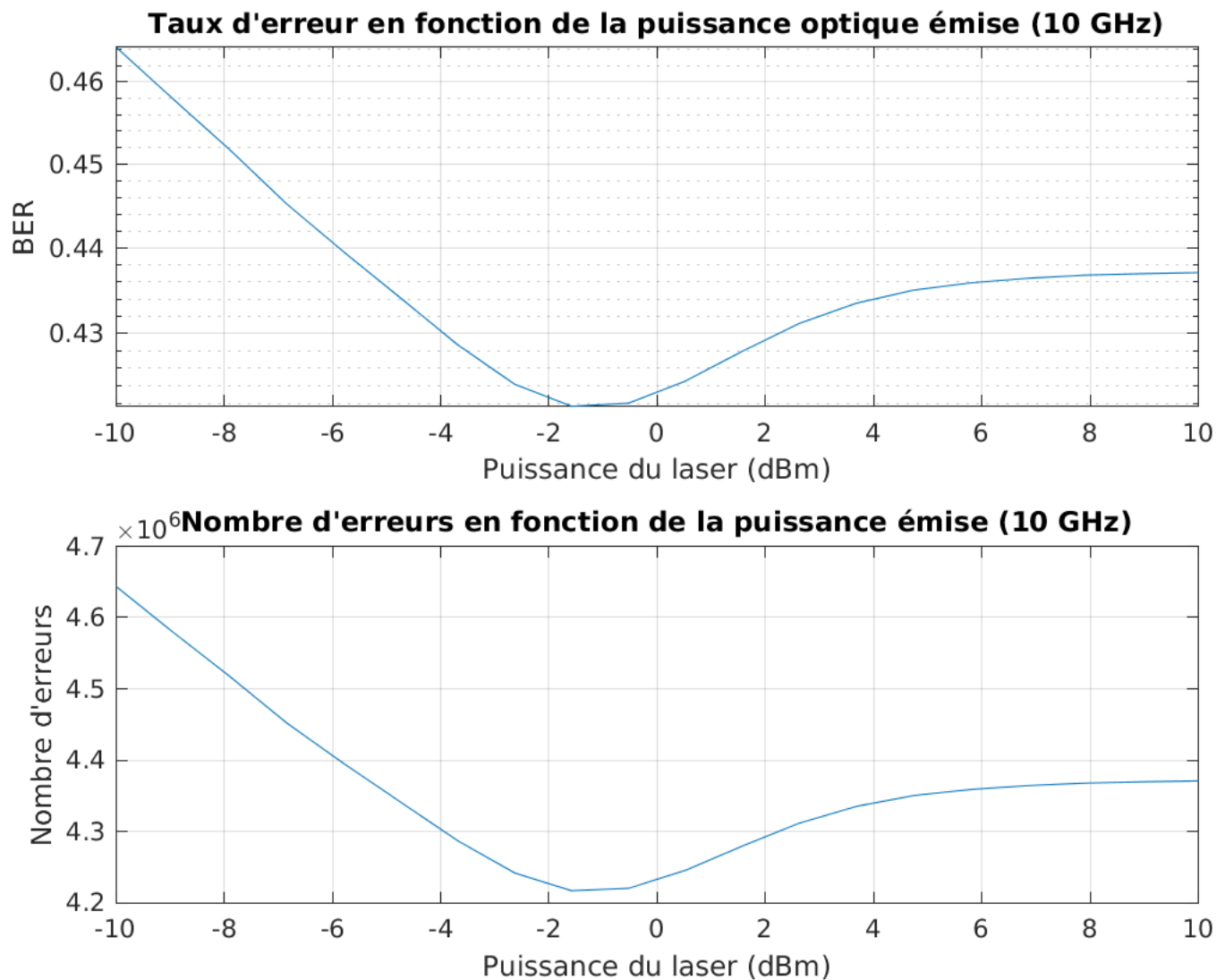


Figure 6: BER en fonction de la puissance dans le système B2B, à 10Gbit/s

On voit qu'il est impossible d'atteindre les BER voulus avec 10Gbit/s et 100km, cela ne marche pas. L'explication théorique est au début de la partie suivante (on aurait théoriquement une distance maximale de 36.7km).

Pour cette partie on veut voir l'évolution du BER en fonction de la distance, tout en gardant une puissance de réception constante sur 100km. Pour cela, vu que nous ne sommes pas dans un cas prenant du bruit en compte, on va juste envoyer un signal avec une puissance qui augmente, afin de corriger les pertes dans la fibre. Pour cela, on va prendre une puissance de référence. Prenons -1.5dBm (permet d'avoir à 2.5Gbit/s un BER de 8×10^{-3}). Puis on va ajouter un terme de compensation d'atténuation dans la fibre c'est à dire $+\alpha L$. Ainsi chaque puissances à la réception seront identiques. On obtient le résultat suivant :

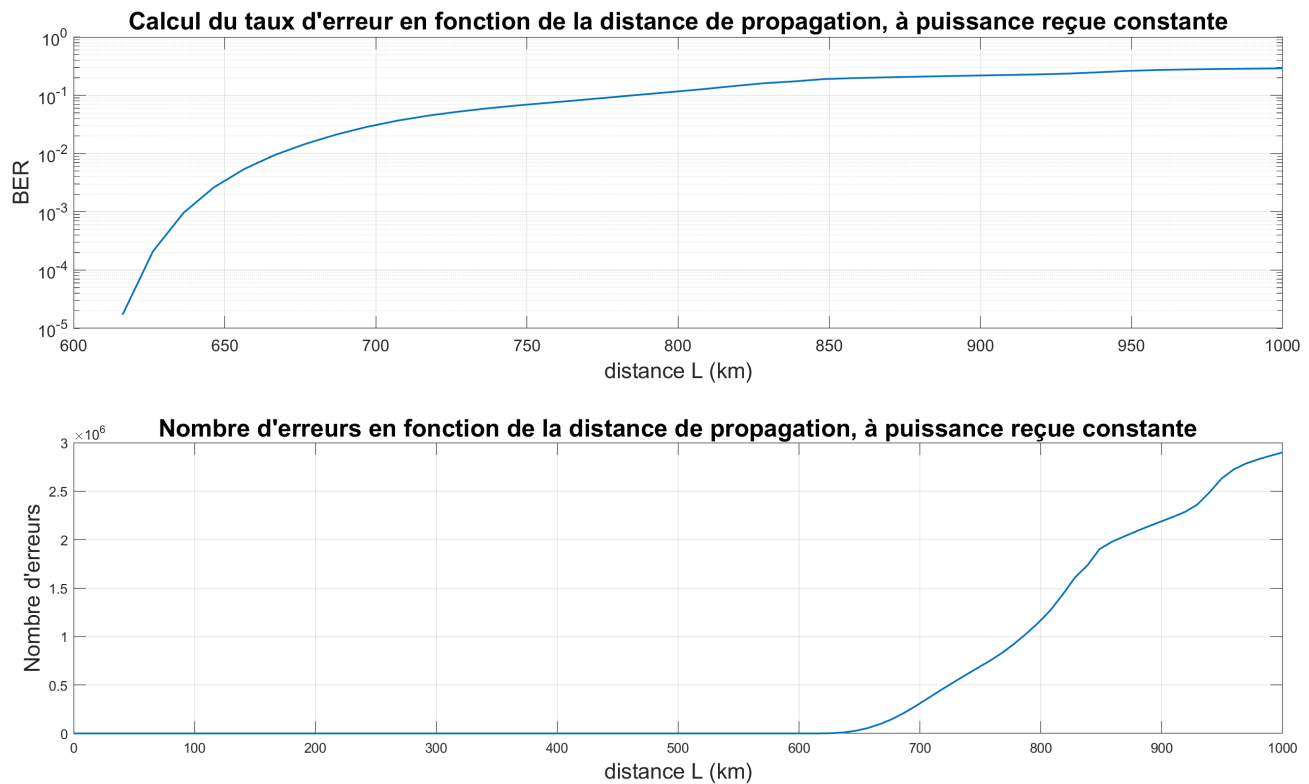


Figure 7: BER en fonction de la distance pour une puissance de réception constante, à 2.5Gbit/s

On remarque que le BER calculé avant 600km est nulle donc n'apparaît pas sur la courbe. Cependant passé cette limite, le BER augmente. Avec un vecteur plus long (mais un temps de calcul long), on avait un BER de 10^{-6} à 610km. Ainsi une il est possible d'avoir un BER non nul un peu avant 610km mais la précision des calculs ne permet pas de le voir, c'est ce qui pourrait expliquer l'écart avec la théorie (587km).

Ce qui provoque l'augmentation du BER n'est donc pas seulement la puissance du signal qui diminue mais bien la dispersion chromatique qui va confondre les symboles et provoquer la perte d'information.

4 Performances en modulation directe

On va cette fois utiliser des fonctions différentes selon :

```
params_tx = make_laser_simple('v', c/lambda, 'B_e', Fsymb);
params_rx = make_photodetector('B_e', Fsymb);
```

où `make_laser_simple` permet de construire la structure du laser. v correspond à la fréquence optique que l'on prend ici pour $\lambda = 1550nm$ (et $c = 3.0e8$). F_{symb} correspond au débit de 1Gbit/s ici.

On utilisera ensuite la fonction de simulation de la modulation direct :

```
TX_optical_dml(sig_bb_ook, Tsymb, params_tx);
```

Cette fonction prend en entrée `sig_bb_ook` qui est le signal en A. Ainsi, comme pour la modulation externe on va générer un signal de 0 et de 1 grâce à `randn` (pour une OOK). Il faut alors passer dans le domaine des courants. Pour cela, il faut que les courants soient au delà du courant seuil du laser, obtenu par la fonction `make_laser_simple`. Notons I_s ce courant, qui vaut ici 7mA. Ce courant va nous servir à régler le courant AC qui correspond au contraste entre le courant attribué pour

un symbole 0 et un courant attribué au symbole 1. Pour cela, nous faisons : $\{0; 1\} \times 100I_s + I_s$ pour régler le courant. Le $+I_s$ permet de ne pas avoir un niveau nul pour le symbole 0. Nous ajoutons alors un courant de biais, comparable à la composante continue, que l'on note I_{DC}

Le signal est alors mis sous la forme de courant. En le passant dans TX_optical_dml, il va ensuite être sur-échantillonné afin de représenter la largeur des symboles, c'est pour ça que le symbole généré tout au début doit être de faible taille (on doit multiplier la taille initiale par un facteur 4505).

On cherche donc à voir l'impact de I_{DC} dans notre cas. Il est à noter que le facteur $100I_s$ permet de gérer le contraste, c'est à dire l'écart entre les symboles 0 et 1. Le contraste doit être suffisamment élevé afin de pouvoir différencier efficacement les symboles et avoir un résultat probant une fois le signal arrivé sur le Rx (photo-diode). C'est l'ouverture que l'on voit sur un diagramme de l'oeil. Ainsi en faisant varier $100I_s$ (pas nécessairement lié à I_s , ce choix a été fait par simplicité) on pourra regarder l'évolution du BER en réception, BER qui diminuera avec l'augmentation du contraste.

L'impact de I_{DC} se verra au niveau de la puissance du signal reçu au niveau de la photodiode. En effet, de manière théorique (et c'est ce que l'on cherche à retrouver ici), la réponse en modulation du laser est un filtre passe bas que l'on représente comme suit :

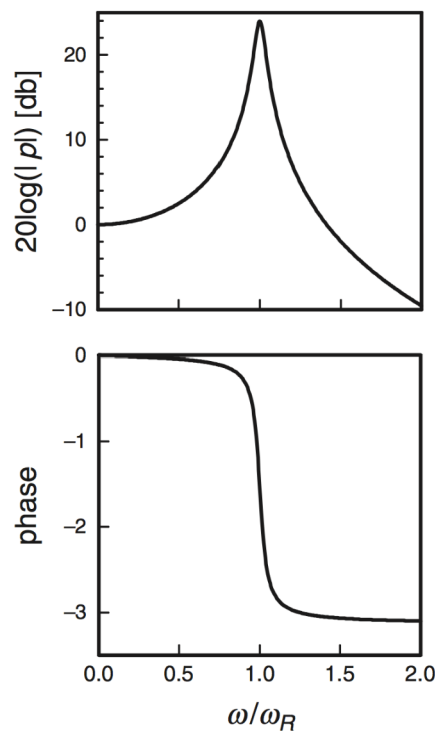


Figure 8: Laser's modulation response

où ω_R correspond à la fréquence de résonance du laser, qui évolue en $\sqrt{I_{DC}}$ (en réalité en $I - I_s$ avec I le courant de biais mais on a déjà ajouté I_s par défaut au signal, ce qui revient à seulement prendre en compte I_{DC} , que l'on considère comme seul courant de biais). Pour retrouver la correspondance entre ω_R et I_{DC} , il faut revenir aux équations du laser ($\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_e} - A(N - N_0)P$ et $\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau_p} + \frac{\beta_{sp}N}{\tau_e} + A(N - N_0)P$).

Ainsi, en augmentant le courant I_{DC} on s'attend à être dans la zone de coupure du passe bas donc à avoir une puissance entre les symboles plus faibles. On va avoir un effondrement de la réponse en modulation. En ayant un I_{DC} faible on va se retrouver dans la zone où se situe le pic, ce qui provoquera des relaxations (régime oscillatoire au changement entre un 0 et un 1)

On va donc tracer des courbes pour trois types de courant de biais : un très faible (nul), un moyen et un très élevé (pas utilisé du tout en réel, ceci est juste pour accentuer des effets possibles). On filtrera moins donc effondrement de la réponse) Pour un signal [0101000010] on va obtenir la courbe suivante :

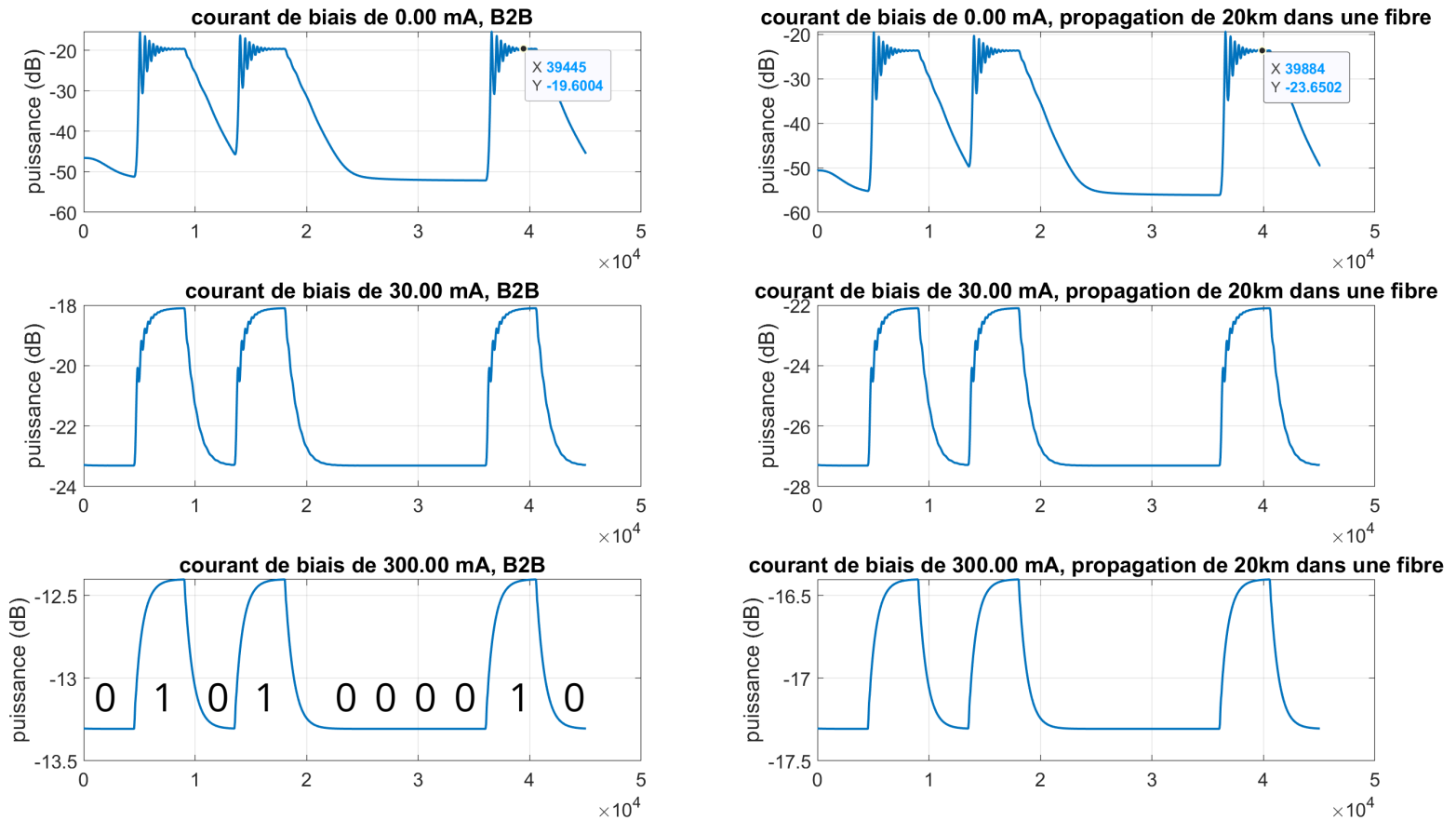


Figure 9: Puissance des différents symbole du signal en sortie du laser, avec différents courant de biais, en back to back ou sur une propagation de 20km

Tout d'abord on aperçoit bien la différence en terme de puissance entre une transmission B2B (back to back) ou après 20 km dans une fibre : perte de 4 dB de puissance ($\alpha \times L = 0.2 \times 20 = 4dB$).

Plus le courant de biais va augmenter, plus l'écart de puissance va diminuer : de 70dB entre le niveau haut et le niveau bas à 0mA, à 5dB pour 30mA, à moins de 1dB pour 300mA. On perçoit donc bien l'effondrement pour un grand courant de biais.

Pour le courant de biais le plus faible, on voit au niveau du changement de courant (entre un 0 et un 1), des relaxations qui montrent que nous sommes au pic du laser visible sur sa TF. De ce fait, on n'arrive pas à redescendre autant pour une transition entre un 1, un 0 et un 1 (voir au début des figures), le signal est trop important dans cette partie.

On a donc bien retrouvé ce que la théorie prédisait.

5 Solution pour transmettre 10 Gbps à 100 km

Le plus grand problème repose sur la dispersion chromatique. Pour corriger ça plusieurs solutions sont possibles, au nombre de 2 (détection cohérente non implémentée ici du fait de soucis de code).

5.1 Changer la longueur d'onde du laser :

En passant à une longueur d'onde différente on va avoir des performances différentes. Par exemple en prenant $\lambda = 1330nm$ on va se trouver à un point où la dispersion chromatique devient nulle. Les nouveaux coefficients de la fibre seront donc : $D = 0ps/nm/km$, $\alpha = 0.5$ (car on peut faire des fibres supprimant les pics d'absorptions OH⁻, ce qui fait qu'on n'augmente pas plus le coefficient d'atténuation), S ne change pas ($0.9ps/nm^2/km$).

Dans le code il faudra changer une petite portion en mettant ces valeurs :

```
alpha = 0.5; % atténuation en dB/km
D = 0; % Dispersion en ps/nm/km
S = 0.09; % Pente de dispersion en ps/nm^2/km
lambda = 1330; % nm
c=3.e8;
```

Le suite du code ne changera pas. Pour atteindre un BER suffisant avec cette méthode il vaut une puissance d'entrée de 31 dBm ce qui est très élevé (pour cela on prend la puissance minimale permettant d'avoir un BER en dessous de 10^{-3}). En effet ce type de fibre présente une atténuation d'amplitude plus élevée, qu'il faut compenser. Cela représenterait une consommation de 136W.

5.2 Ajouter des tronçons de fibre :

La fibre de 100km ajoute une grande dispersion chromatique de $DL\lambda$. Il faut alors ajouter une dispersion 'négative' (dans le sens opposé) pour compenser. Pour cela on va ajouter une fibre compensatrice. On va prendre une fibre DCF où $D = -80\text{ps/nm}^2/\text{km}$, $S = -0.5\text{ps/nm/km}$ et $\alpha = 0.5\text{dB/km}$. On va ajouter des portions de cette fibre pour compenser la dispersion. Les fibres ne sont pas linéaires (même si la simulation informatique ne prend pas en compte cela) et donc il faut choisir où placer la fibre DCF. Pour cela, comme la surface effective A_{eff} des fibres DCF est plus petite que celle des fibres SSME, on a plus d'effets non linéaires dans une DCF. Pour éviter ces impacts on va devoir mettre la DCF en bout de fibre afin que le signal en entrée soit moins puissant et ainsi avoir moins d'effets non linéaires.

Généralement, la fibre DCF est mise en bobine à l'arrivée (par exemple bobine de fibre DCF suffisamment grande pour compenser la dispersion chromatique). Cette bobine ne rentre pas en compte dans la distance de 100km car n'ajoute pas de distance à parcourir.

Ici on veut 100km en comptant les deux fibres (nous supposons que la longueur de la fibre DCF compte dans les 100km, ce qui se sépare un peu du réel). On doit donc avoir, en notant 1 la fibre SFM et 2 la fibre DCF, $l_1 D_1 + l_2 D_2 = 0$ soit $l_1 = -l_2 \frac{D_2}{D_1}$ où $l_1 + l_2 = 100$. On a donc $l_1 = (100 - l_1) \frac{80}{17} \Rightarrow l_1 = \frac{100 \frac{80}{17}}{1 + \frac{80}{17}} = 82,47\text{km}$ (en comptant seulement la bobine on devrait avoir $l_2 = 100 \frac{17}{80} = 21.25\text{km}$ et $l_1 = 100\text{km}$. Avec cette solution on est perdant en consommation de puissance et en puissance d'entrée nécessaire car on augmente les longueurs de fibres. Cependant on gagne sur la mise en place : moins de travaux nécessaires car on tend seulement une fibre)

On va donc faire une fibre SSFM de longueur 82,47km puis une fibre DCF de 17,53km. Cela correspond à modifier le code en

```
sig_fiber_out = propag_optical(0.2,17,0.09,lambda,82.47, 2*Fsymb,sig_opt_tx); %Fibre SSFM
sig_fiber_out = propag_optical(0.5,-80,-0.5,lambda,17.53, 2*Fsymb,sig_fiber_out); %Fibre DCM
```

où sig_fiber_out est le signal entrant dans le photodetector et sig_opt_tx le signal en sortie du laser.

On obtient alors le bon laser pour une puissance de 6dBm, ce qui s'explique par le fait qu'on a une atténuation plus faible sur plus de 80% de la fibre optique. La consommation totale est de 10.50W. On gagne en consommation par rapport à la première solution. Cependant il n'est pas à oublier les coups de l'installation (2 fibres optiques), la justesse du raccordement entre les fibres et des éventuels effets non linéaires, non pris en compte dans notre modèle.