

# Modélisation et caractérisation du miroir optique à boucle non-linéaire (NOLM)

Nous avons déjà présenté dans le premier chapitre les différentes fonctions optiques à base de SOA utilisées pour réaliser des opérations de régénération du signal du type 2R et 3R.

L'utilisation de structures interférométriques permet d'avoir une fonction de transfert abrupte ainsi que deux zones non-linéaires permettant de régénérer simultanément les « 1 » et les « 0 ».

L'interféromètre de Mach-Zehnder (MZI) est largement utilisé pour ses performances en régénération<sup>159</sup>.

En ce qui concerne le NOLM, plusieurs études lui sont consacrées dans la littérature pour sa capacité à réaliser des fenêtres de transmission temporelle très courtes<sup>160</sup>.

Cette fonction a permis la réalisation d'opération de régénération sur les formats impulsionnels courts de type soliton<sup>161</sup>, avec des fibres hautement non-linéaires<sup>162</sup> sur des signaux RZ à 10 Gbit/s<sup>163</sup>.

Nous distinguons deux modes de fonctionnement du NOLM, qu'il soit utilisé en réflexion ou bien en transmission. Le fonctionnement de ces deux modes est, comme nous allons le voir dans cette partie, très différent et les résultats obtenus avec chacun d'eux seront plus ou moins bien adaptés à une utilisation en configuration système.

Dans cette partie, nous avons modélisé, puis caractérisé, par la simulation le NOLM dans ce contexte de régénération tout-optique du signal.

La fonction optique à modéliser est constituée d'un interféromètre possédant à l'intérieur de son unique bras un élément non-linéaire (en ce qui nous concerne, un SOA présentant une dynamique de gain non-linéaire).

Le SOA fonctionne en configuration pompe / sonde. Le schéma de principe simplifié du NOLM est présenté sur la Figure 64. La configuration utilisée est la boucle de Sagnac fibrée, dont le centre de l'élément non-linéaire (SOA) est décalé d'une distance  $\Delta_L$  par rapport au centre de la boucle.

Si  $\Delta_L = 0$ , le NOLM est dit symétrique

Si  $\Delta_L \cong 0$ , le NOLM est dit asymétrique

Si  $\Delta_L \gg 0$ , le NOLM est dit hautement asymétrique

Pour un champ de sonde injecté dans l'interféromètre, le NOLM est en réflexion sur la sortie A, et en transmission sur la sortie B.

D'autre part, le SOA étant utilisé en configuration pompe / sonde, le NOLM utilisé pour la régénération est un convertisseur en longueur d'onde.

## 2.1 Les équations de base

Nous allons dans cette partie rappeler le fonctionnement élémentaire et le formalisme du NOLM<sup>164,165</sup>. La présence de l'élément non-linéaire va provoquer un déphasage instantané entre les champs co et contrapropagatifs, basé sur le principe du couplage phase / amplitude dans les SOA<sup>139</sup>.

Nous allons donc modéliser les fonctions de transfert du NOLM pour les deux types de configuration : réflexion et transmission, puis nous nous intéresserons à l'expression du déphasage introduit à la modulation du gain par le signal de pompe dans le SOA.

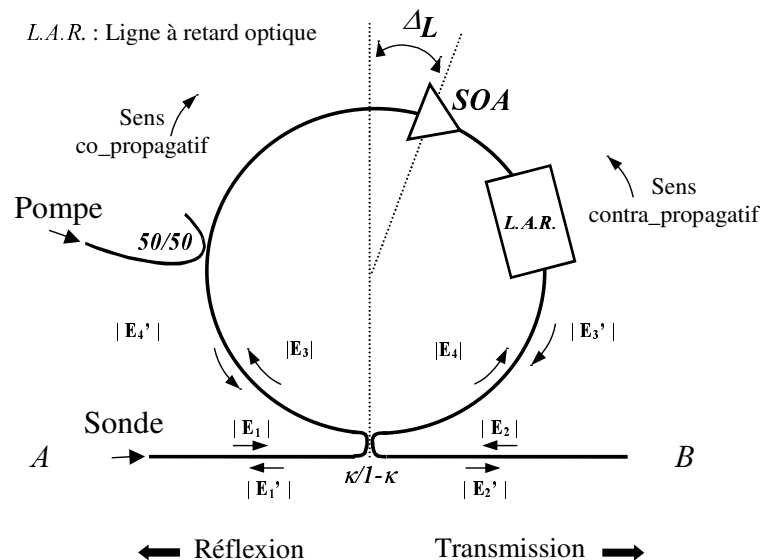


Figure 64 : Schéma de principe du NOLM

Le coupleur d'entrée possède un coefficient de couplage en intensité théorique  $K \cong 0,5$ . Nous discuterons plus loin de l'influence que peut avoir une incertitude importante sur la valeur du coefficient de couplage, sur les performances du NOLM et notamment sur son taux d'extinction.

La Figure 65 introduit la caractéristique matricielle d'un coupleur  $K$  idéal (non dissipatif et insensible à la polarisation).

Le déphasage introduit par le couplage de  $E_1$  vers  $E_3$  est nul ( $\exp(0) = 1$ ) et celui introduit de  $E_1$  vers  $E_4$  vaut  $\pi/2$  ( $\exp(\pi/2) = i$ ).  $E_4$  est donc retardé par rapport à  $E_3$ .

Le coefficient de couplage en intensité de la lumière d'un bras sur l'autre est supposé symétrique et vaut  $(1-K)$ .

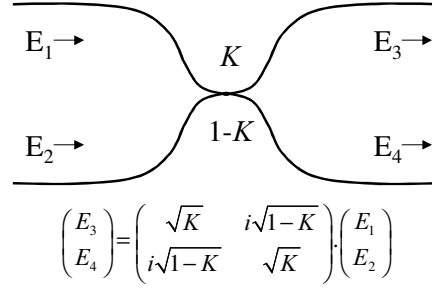


Figure 65 : Représentation matricielle d'un coupleur de coefficient de couplage  $K$

Les champs entrant dans le NOLM sont exprimés sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \\ i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Les champs dans le NOLM vont être amplifiés dans le SOA (nous ne tenons pas compte des pertes dans la fibre).

Nous supposons dans un premier temps que la pompe est nulle et que le déphasage entre les champs co et contra-propagatifs est nul. Nous distinguons néanmoins les gains co et contra vu respectivement par les champs co et contra dans un souci de compréhension du fonctionnement du NOLM :

$$\begin{pmatrix} E_3' \\ E_4' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{G_{co}} \\ \sqrt{G_{contra}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

Etant donné la topologie du NOLM, le déphasage subi lors du premier passage dans le coupleur va être compensé lors du deuxième passage. La matrice pour le deuxième passage dans le coupleur s'écrit :

$$\begin{pmatrix} E_1' \\ E_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \\ \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_3' \\ E_4' \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

La matrice de passage dans le NOLM, pour un coupleur sans perte de coefficient de couplage  $K$  est donnée par l'équation (3.32). Nous ne tenons compte d'aucun déphasage entre les champs co et contra-propagatifs en dehors du SOA et chacun des champs va subir un gain propre, fonction de la topologie du dispositif (position du SOA). Nous ne considérons pas dans l'écriture matricielle la propagation du champ dans la boucle qui se traduit par un terme multiplicatif  $\exp(-j\omega t_d)$  avec  $t_d$  le temps de propagation dans la boucle :

$$\begin{pmatrix} E_1' \\ E_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \\ \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{G_{co}} \\ \sqrt{G_{contra}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \\ i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

En configuration pompe / sonde, le champ de sonde  $E_S$  est injecté en A, et aucun champ n'est injecté en B. Nous définissons  $E_T$  le champ de sortie en réflexion et  $E_R$  le champ de sortie en transmission.

Nous utilisons les notations suivantes :  $\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_S \\ 0 \end{pmatrix}$  et  $\begin{pmatrix} E_1' \\ E_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_T \\ E_R \end{pmatrix}$

$$\begin{pmatrix} E_R \\ E_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \\ \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{G_{co}} \\ \sqrt{G_{contra}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \\ i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_S \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Nous pouvons noter que dans le cas idéal d'un coupleur 3 dB parfait,  $K = 0,5$ , en l'absence d'élément non-linéaire, c'est à dire sans déphasage ni différence de gain ( $G_{co} = G_{contra} = 1$ ) à l'intérieur de la boucle :

$$\begin{pmatrix} E_R \\ E_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2i\sqrt{0.5 \times (1-0.5)} & (2 \times 0.5 - 1) \\ (2 \times 0.5 - 1) & 2i\sqrt{0.5 \times (1-0.5)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_S \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} iE_S \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

alors, le NOLM fonctionne en configuration « Miroir » et toute la lumière est réfléchi :  $E_R \neq 0$  et  $E_T = 0$

## 2.2 Modulation de la phase dans le NOLM

Nous allons nous intéresser au fonctionnement du NOLM lorsque la pompe n'est plus nulle entraînant une modulation du gain dans le SOA.

La modulation du gain va provoquer une modulation de la phase dans le SOA :

$$\varphi(\tau) = -\frac{\alpha}{2} \cdot h(\tau) \quad (3.35)$$

$h(\tau)$  comme le gain local dans le SOA intégré sur sa longueur.

$\alpha$  est le coefficient d'élargissement spectral ou le paramètre de « chirp » puisqu'il traduit la dérive de fréquence provoquée par la densification du milieu dans lequel se propage la lumière<sup>166,167</sup>.

Dans le cadre particulier de la physique des lasers à semi-conducteurs, ce paramètre est plus connu sous le nom de coefficient de Henry<sup>168</sup>. Il traduit le couplage phase / amplitude dans les lasers et amplificateurs à semi-conducteurs.

Dans ces conditions, toute modulation du gain du SOA subi par les champs co et contra-propagatifs dans le NOLM va entraîner une modulation de leur phase.

La notion de gain complexe est introduit dans la relation (3.33), afin de prendre en considération la modulation de la phase dans les SOA  $\{G_a = G_a(\tau) \cdot \exp(i\varphi_a(\tau))\}$  :

$$\begin{pmatrix} E_R \\ E_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{1-K} & \sqrt{K} \\ \sqrt{K} & i\sqrt{1-K} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{G_{co}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{co}(\tau)) \\ \sqrt{G_{contra}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{contra}(\tau)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{K} \cdot E_S \\ i\sqrt{1-K} \cdot E_S \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

Dans le cas où le centre de l'amplificateur est décalé du centre de la boucle d'une distance  $\Delta_L$ , les champs co et contra-propagatifs ne vont pas subir le même gain ni le même déphasage.

Le chronogramme de la Figure 66 permet de suivre la progression des champs dans le NOLM. La pompe compresse le gain pendant un temps déterminé (inférieur à 100 ps pour fonctionner correctement avec un signal de pompe à 10 Gbit/s). Nous nous plaçons dans le

cas de figure où le champ de pompe est co-propagatif dans le NOLM et le SOA est décentré de telle sorte que le champ contra-propagatif subisse le gain / déphasage de l'amplificateur en premier comme le montre la Figure 64.

Le temps de propagation pour parcourir  $\Delta_L$  est :

$$\frac{T}{2} = \frac{n \cdot \Delta_L}{c} \quad (3.37)$$

Le champ co-propagatif va voir un gain modulé dans le SOA donné par  $G_{co}(\tau)$ . Le champ contra ne verra que la fin de la compression dynamique du gain. La position du SOA est donc une donnée très importante dans le fonctionnement du NOLM.

Le temps de propagation dans la boucle est  $t_d$  (entre les deux passages dans le coupleur).

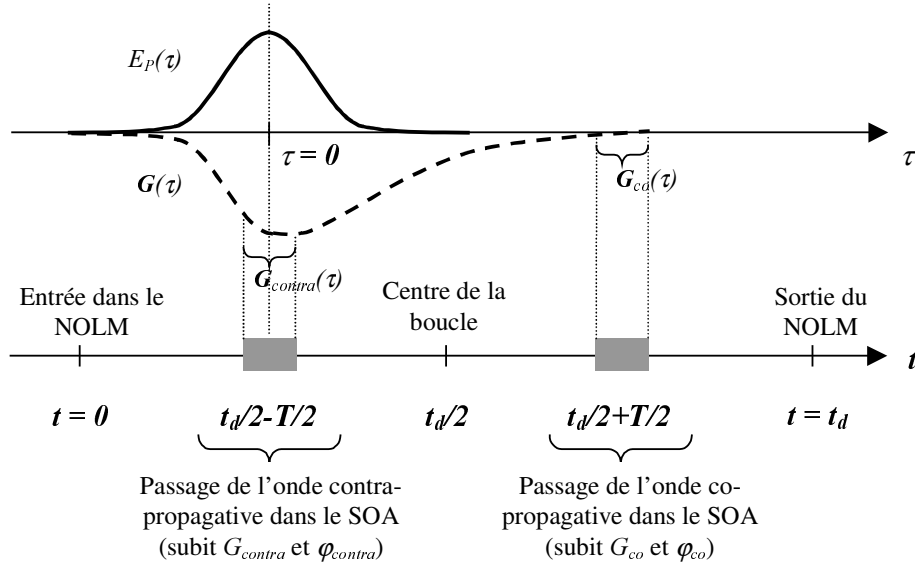


Figure 66 : Chronogramme dans le NOLM

La relation temporelle entre le référentiel de la boucle ( $t$ ) et le référentiel de l'impulsion de pompe ( $\tau$ ) est la suivante :

$$\tau = t + \frac{t_d}{2} - \frac{T}{2} \quad (3.38)$$

Nous nous plaçons dans le référentiel de l'impulsion saturante de pompe  $E_P(\tau)$ . Dans le cas de figure présenté, la distance du SOA par rapport au centre est de l'ordre de 100 ps. Le NOLM est hautement asymétrique. Les gains co et contra-propagatifs sont très différents et le déphasage entre les champs de sonde co et contra-propagatifs sera donc important.

En développant (3.36) nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} E_R \\ E_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{K \cdot (1-K)} \cdot \left[ \sqrt{G_{co}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{co}(\tau)) \cdot E_S + \sqrt{G_{contra}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{contra}(\tau)) \right] \cdot E_S \\ K \cdot \sqrt{G_{co}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{co}(\tau)) \cdot E_S - (1-K) \cdot \sqrt{G_{contra}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{contra}(\tau)) \cdot E_S \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

En introduisant les notations suivantes :

$$\Delta G_{SOA} = \frac{G_{co}(\tau)}{G_{contra}(\tau)} \quad (3.40)$$

$$\Delta \varphi_{SOA} = \varphi_{co}(\tau) - \varphi_{contra}(\tau)$$

Nous obtenons les relations du NOLM en champ :

$$\begin{cases} E_R = i\sqrt{K(1-K)} \cdot \sqrt{G_{contra}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{contra}(\tau)) \left[ 1 + \sqrt{\Delta G_{SOA}} \cdot \exp(-i\Delta\varphi_{SOA}) \right] \cdot E_S \\ E_T = \sqrt{G_{contra}(\tau)} \cdot \exp(-i\varphi_{contra}(\tau)) \left[ (K-1) + K \cdot \sqrt{\Delta G_{SOA}} \cdot \exp(-i\Delta\varphi_{SOA}) \right] \cdot E_S \end{cases} \quad (3.41)$$

Puis les relations du NOLM en intensité ( $I_S = E_S \times E_S^*$ )

$$\begin{cases} I_R = K(1-K) \cdot G_{contra}(\tau) \cdot \left[ 1 + 2\sqrt{\Delta G_{SOA}} \cdot \cos(\Delta\varphi_{SOA}) + \Delta G_{SOA} \right] \cdot I_S \\ I_T = G_{contra}(\tau) \cdot \left[ (K-1) \cdot \left\{ (K-1) + 2K \cdot \sqrt{\Delta G_{SOA}} \cdot \cos(\Delta\varphi_{SOA}) \right\} + K^2 \cdot \Delta G_{SOA} \right] \cdot I_S \end{cases} \quad (3.42)$$

En reprenant les équations (3.35) et (3.8), puis (3.40), nous obtenons l'expression de la phase :

$$\Delta \varphi_{SOA}(\tau) = \varphi_{co}(\tau) - \varphi_{contra}(\tau) = -\frac{\alpha}{2} \cdot [h_{co}(\tau) - h_{contra}(\tau)] = \frac{\alpha}{2} \cdot \ln \left[ \frac{G_{contra}(\tau)}{G_{co}(\tau)} \right]$$

$$\Delta \varphi_{SOA}(\tau) = -\frac{\alpha}{2} \cdot \ln [\Delta G_{SOA}] \quad (3.43)$$

#### Remarques :

Nous ne tenons pas compte des pertes du dispositif: pertes dans la boucle, pertes au coupleur, pertes de propagation des champs dans la boucle. Ces grandeurs ont été négligées pour ne pas alourdir les équations.

## 2.3 Caractérisation statique du NOLM

Cette partie est basée sur une étude théorique des paramètres du NOLM qui seront utiles à la compréhension générale de la fonction appliquée à la régénération optique. Les grandeurs physiques étudiées concernent l'influence du taux de couplage du coupleur d'entrée / sortie du NOLM sur le taux d'extinction du signal de sortie. Les différents régimes de fonctionnement du NOLM selon qu'on module la phase ou le gain et selon qu'on utilise la configuration « transmission » ou « réflexion » seront introduits.

Pour ce faire, il convient de garder les hypothèses du paragraphe précédent pour appliquer les équations (3.42) et (3.43).

En régime de fonctionnement normal, le SOA du NOLM génère un bruit d'émission spontanée partiellement incohérent qui va générer en sortie du NOLM un bruit d'émission spontanée dont la puissance moyenne est constante. Nous avons pris en compte ce bruit dans les simulations, sa valeur est de l'ordre de - 30dBm.

### 2.3.1 Influence du coupleur sur le taux d'extinction

Nous considérons le NOLM dans sa configuration « miroir », c'est à dire que la sonde est continue et qu'il n'y a pas de pompe optique (le SOA fonctionne en régime linéaire).

Nous ne faisons varier que la valeur du coefficient de couplage du coupleur d'entrée / sortie.

La Figure 67 met en évidence l'influence du coefficient de couplage sur la puissance optique en sortie du NOLM<sup>169</sup>

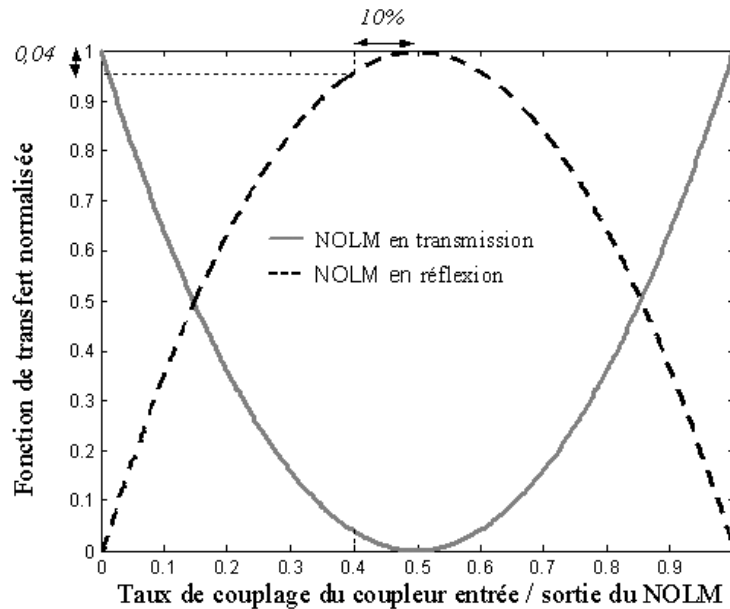


Figure 67 : Influence du taux de couplage du coupleur du NOLM en fonctionnement linéaire

Le NOLM en transmission est comme prévu éteint alors qu'il est ouvert en réflexion. La variation du taux de couplage va modifier la répartition de la puissance entre les deux configurations.

Nous observons aussi qu'une variation de 10% du taux de couplage, qui pourrait éventuellement être due à une incertitude (exagérée) sur la valeur du coupleur n'entraîne qu'une variation sur la puissance de l'ordre de 4%.

Nous nous plaçons maintenant dans le cas d'un fonctionnement non-linéaire du NOLM, c'est à dire que le SOA fonctionne en régime non-linéaire de gain et de phase.

La Figure 68 simule l'influence du taux de couplage en régime dynamique de phase et de gain. En faisant varier le déphasage entre les champs co et contra-propagatifs de  $(-\pi/4)$  à  $(-5.\pi/4)$ , la différence de gain correspondant à un coefficient phase / amplitude donné ( $\alpha = 5$ ) va varier de 1,4 à 0,2.

Sur la Figure 68 (a), nous regardons la fonction de transfert du NOLM en fonction du déphasage entre les champ co et contra propagatif. En transmission ( $I_T$ ), la fonction de transfert toujours inférieur à 1 alors qu'en réflexion ( $I_R$ ) elle peut être supérieure à 1. Par contre, la fonction de transfert descend beaucoup plus bas en transmission qu'en réflexion. On peut noter qu'on est limité en transmission par le bruit du SOA (-30 dBm).

Le NOLM en transmission va « s'éteindre » avec une plus grande efficacité. Nous verrons plus loin que ce résultat se traduit par un meilleur taux d'extinction du NOLM en transmission.

La Figure 68 (b) simule la sensibilité du NOLM soumis à une variation du taux de couplage du coupleur d'entrée / sortie.

Nous observons qu'on a une très grande sensibilité du NOLM en transmission au taux de couplage alors que le NOLM en réflexion y est parfaitement insensible.

Pour se ramener à un cas concret, une variation de 2% du coefficient de couplage autour de 0,5 (valeur permettant d'avoir la meilleure transmission) va entraîner une variation de 3dB du taux d'extinction du signal en transmission. Cette valeur de 2% correspond aux valeurs données par les fabricants pour les coupleurs fibrés classiques obtenus par fusion / étirage (fibre à maintien de polarisation ou non).

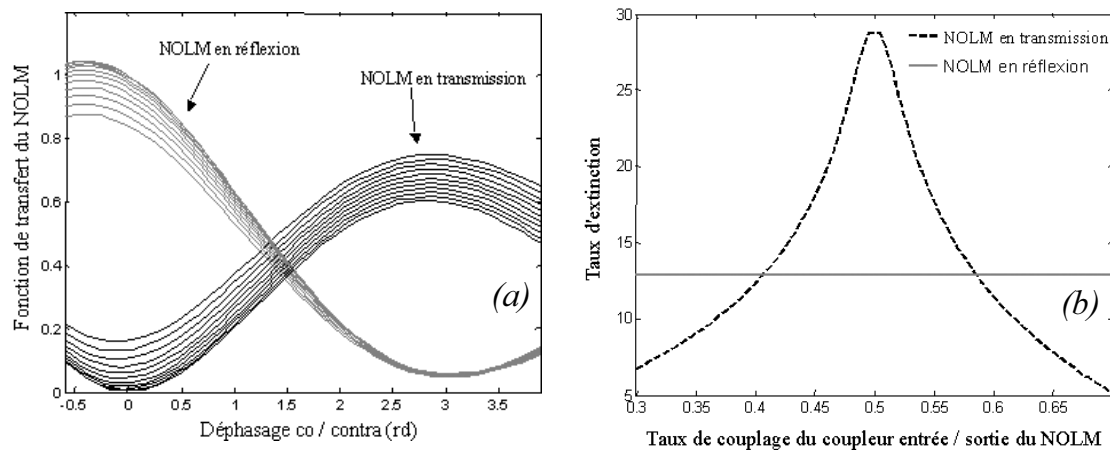


Figure 68 : Influence du taux de couplage sur le NOLM en configuration de modulation de phase

Un taux d'extinction de 28 dB du NOLM en transmission est obtenue avec une puissance de bruit en sortie du NOLM de -30 dBm. La contribution de l'émission spontanée (incohérente) qui va « s'échapper » de l'interféromètre tend à réduire la valeur du taux d'extinction du NOLM en transmission.

La puissance de sortie du NOLM en transmission sera donc très sensible aux variations du coefficient de couplage, ce qui va accroître la sensibilité du dispositif à la polarisation. Le NOLM en réflexion est par contre insensible (théoriquement) au coefficient de couplage et par conséquent aux variations de polarisation sur la sonde.

### 2.3.2 Influence du déphasage et de la modulation de gain dans le NOLM

Nous rappelons que la modulation du gain est due à la présence de la pompe. Le déphasage entre les champs co et contra-propagatifs est dû d'une part à la modulation du gain mais aussi à la position du SOA dans le NOLM.



Dans les équations du NOLM-SOA, il apparaît que le rapport des gains co et contra-propagatifs et la différence de phase jouent un rôle important sur la comportement du dispositif. Ces contributions sont corrélées par le coefficient de couplage phase / amplitude.

Dans cette partie, nous avons donc regardé l'influence de la corrélation entre ces deux effets pour les deux configurations du NOLM, réflexion et transmission. L'expression utilisée est donnée par la formule (3.42).

Nous avons alors pu représenter le contraste des franges d'interférences dans le NOLM pour les configurations transmission et réflexion. Le contraste des franges est défini ainsi :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Sur la Figure 69 (a), nous avons tracé en représentation linéaire le contraste des franges d'interférences en sortie du NOLM en faisant varier le rapport  $\Delta G_{SOA}$  et ce pour les deux configurations en indiquant le rapport entre le gains co et contra correspondant au déphasage pour  $\alpha = 5$ .

Sur la Figure 69 (b), nous avons représenté les mêmes résultats en échelle logarithmique pour les deux configurations. Les contributions de la phase et du gain sont toujours corrélées (et  $\alpha = 5$ ).

A partir de la fonction de transfert normalisée, nous en avons déduit le contraste de la fonction de transfert du NOLM pour les deux configurations. Pour une bonne lecture des courbes, il est important de noter que le contraste maximum (0 dB) correspond au maximum de puissance en sortie de l'interféromètre : ce maximum est obtenu en réflexion pour un déphasage nul.

La courbe montre bien qu'en réflexion, pour un rapport de gain de 5 dB, on obtient une extinction d'environ 17 dB correspondant à un déphasage de  $\pi$ .

Par contre, en transmission, le contraste est bien meilleur puisque l'extinction n'est limitée dans notre simulation que par le bruit du SOA.

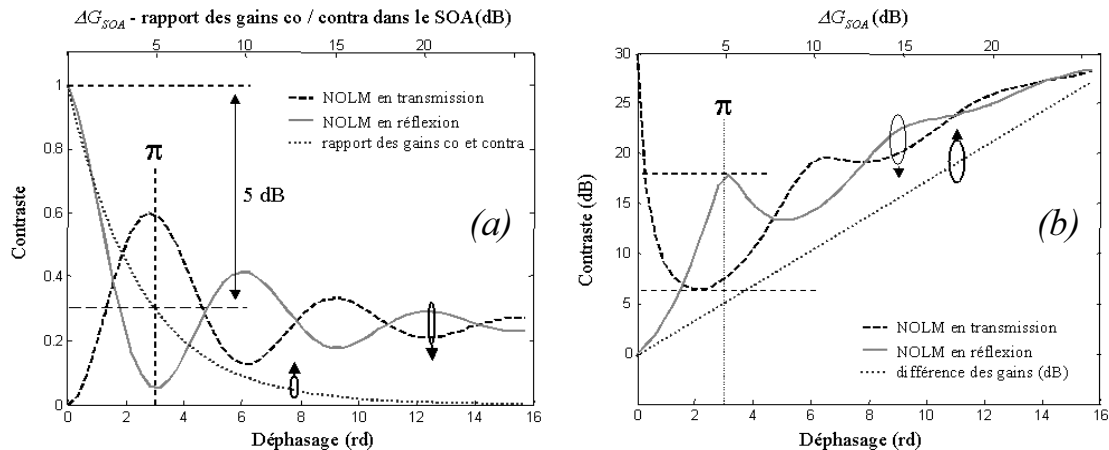


Figure 69 : Corrélation gain / phase dans le NOLM

Nous pouvons déjà comparer les deux configurations à partir de ces résultats :

**la configuration NOLM en réflexion** : en combinant déphasage et compression de gain, on peut obtenir un contraste qui va augmenter avec la valeur du déphasage.

Cette configuration permet une sensibilité moindre aux fluctuations de la phase dans l'interféromètre puisque pour un déphasage de  $\pi$ , le NOLM est éteint (puissance en sortie faible).

**la configuration NOLM en transmission** : le gain sur la sonde est systématiquement plus faible mais en régime de faible modulation gain/phase ( $< 3$  dB), le NOLM peut transmettre un taux d'extinction très important. Nous avons vu dans le premier chapitre toutes les applications pour le traitement tout-optique du signal de cette fonction optique largement étudiée dans la littérature. Citons toutefois les travaux théoriques concernant la régénération<sup>170</sup> et le démultiplexage OTDM<sup>171</sup>.

En contrepartie, cette configuration sera beaucoup plus sensible aux variations de phase puisque plus le déphasage est important et plus la puissance en sortie est importante.

Sur la Figure 70, nous mettons en évidence l'importance de la valeur attribuée au coefficient phase amplitude pour la simulation du NOLM.

Dans un premier temps, nous avons une relation linéaire entre le déphasage et la compression du gain dont la valeur correspond à  $\alpha$ . Sur la Figure 70 (a), pour avoir un déphasage de  $\pi$  dans le NOLM, il faut lorsque  $\alpha = 5$ , une différence de gain de 5 dB environ.

En régime de compression dynamique, en supposant que le  $\alpha$  reste constant pendant tout le processus de compression du gain dans le SOA, nous donnons sur la Figure 70 (b) la compression du gain correspondant à un déphasage de  $\pi$  pour différentes valeurs de  $\alpha$ .

Cette dernière courbe permet de retrouver expérimentalement la valeur moyenne (temporelle) de  $\alpha$  en mesurant le taux de compression du gain dans le SOA nécessaire pour générer une frange d'interférence en sortie du NOLM (un maximum et un minimum d'intensité consécutifs).

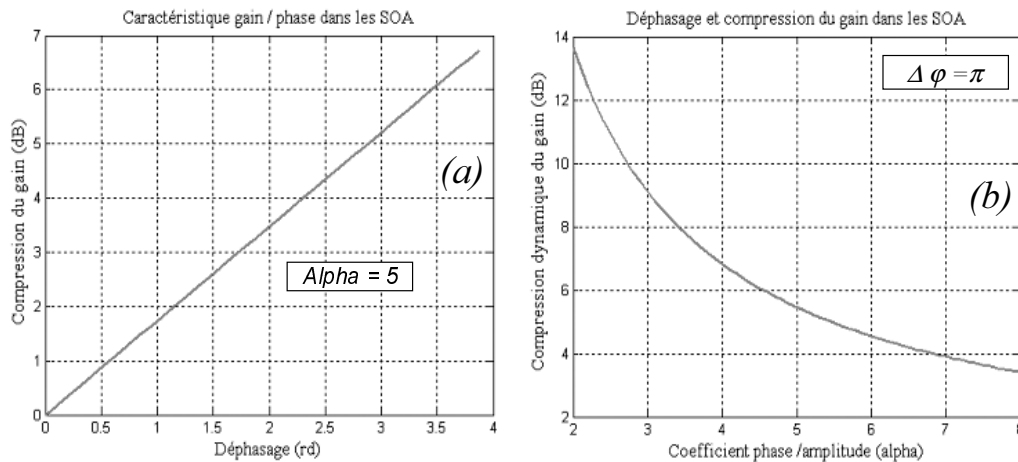


Figure 70 : Relations entre phase et compression du gain dans les SOA

## 2.4 Caractérisation dynamique du NOLM

Dans cette partie, nous présentons les performances du NOLM en configuration pompe / sonde pour la régénération 2R et 3R.

Nous allons présenter les résultats de simulation pour différents formats de signal (RZ et NRZ), pour les deux configurations possibles du NOLM (en réflexion et en transmission) et nous essaierons de prévoir le comportement du NOLM en présence de bruit optique sur la commande. Cette étude a pour objectif de bien prévoir le comportement de cette fonction tout-optique complexe dans un environnement système et d'évaluer son potentiel régénératif. Nous nous limiterons au fonctionnement du NOLM à 10 Gbit/s pour pouvoir comparer les résultats de simulations à l'expérience.

### 2.4.1 Fonction de transfert du NOLM

Nous allons utiliser le modèle complet du NOLM qui prend en compte la topologie du dispositif à savoir le décalage du SOA par rapport au milieu de l'interféromètre. Ce décalage correspond à un retard entre les champs co et contra-propagatifs, qui va provoquer le déphasage du NOLM (les champs co et contra ne vont pas subir la même différence de gain ni le même déphasage).

Pour étudier le fonctionnement du NOLM en régime dynamique, on utilise pour simuler le signal de pompe des impulsions de type « sécante hyperbolique » d'une largeur à mi hauteur de 30 ps et possédant un taux d'extinction de 25 dB.

La sonde est pour l'instant continue et sa puissance est de  $-10$  dBm. Le courant de polarisation du SOA est 300 mA. Pour avoir un taux de compression du gain du SOA suffisant, nous avons pris une puissance (crête) de pompe de 3 dBm (dans le SOA).

Nous rappelons que le NOLM est un interféromètre qui par construction est en configuration « miroir » (toute la sonde est réfléchi) si la différence de entre les champs co et contra-propagatifs est nulle.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à une compression du gain constant dans le SOA tel que le taux de compression vaut 6 dB.

Nous avons fait varier le retard entre les champs co et contra dans le NOLM, ce qui correspond à faire varier la position du SOA dans le NOLM.

Les résultats sont présentés sur la figure suivante.

Sur la Figure 71 (a), nous présentons le taux d'extinction de la sonde en transmission et en réflexion en fonction du retard entre le champ co et le champ contra-propagatif dans le NOLM. L'expression du retard de propagation  $T$  est donnée par la formule (3.37).

Nous avons aussi représenté le taux de compression du gain dans le SOA (précisément  $-Tc$ ) pour comparer l'influence de la modulation du gain par rapport à la contribution du déphasage dans l'interféromètre.

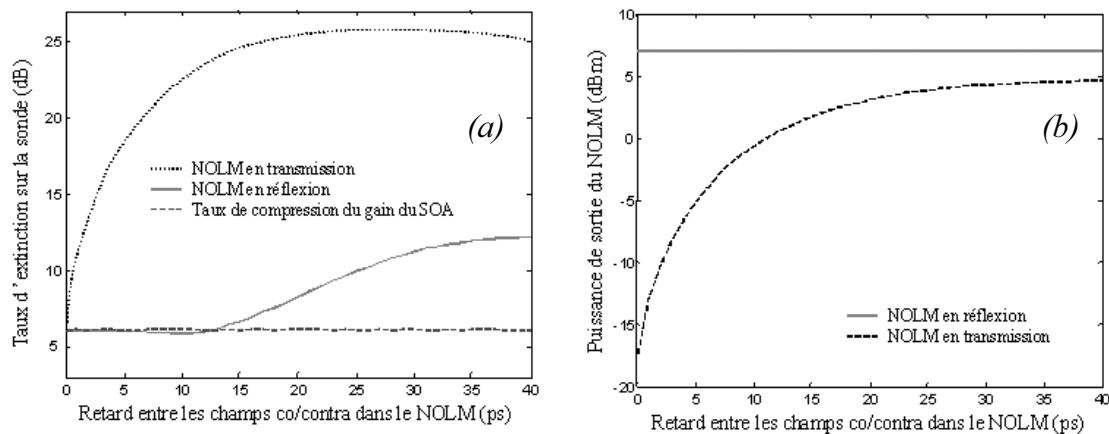


Figure 71 : Comparaison entre la configuration NOLM en réflexion et NOLM en transmission

Ainsi, nous remarquons qu'en transmission, il faut un retard de propagation de quelques dizaines picosecondes pour ouvrir le NOLM complètement (taux d'extinction de 25 dB). Les fluctuations du taux d'extinction sont dues à la faible précision de la mesure numérique du signal en transmission. Elles vont dans le sens d'une importante sensibilité de cette configuration du NOLM, à la phase et à la différence de gain dans le SOA entre les champs co et contra-propagatifs.

En réflexion, le NOLM est toujours ouvert mais le taux d'extinction optimum de la sonde modulée (12 dB) va être atteint pour un retard de l'ordre de 30 ps. La stabilité du taux d'extinction de la sonde en réflexion est due au fait que la forme du signal est principalement donnée par la forme de la compression du gain (la contribution de la phase étant moins importante).

La Figure 71 (b) présente la puissance de sortie du NOLM pour les deux types de configuration. Le NOLM en réflexion étant toujours « ouvert », la puissance optique en sortie sera toujours plus importante et très peu sensible aux variations de la phase.

C'est pour cette condition essentielle que l'étude du NOLM a été réalisée en configuration « réflexion ».

Nous présentons maintenant la fonction de transfert du NOLM. Nous conservons les mêmes configurations pour le SOA. Nous faisons varier la puissance crête des impulsions de pompe en entrée. La Figure 72 présente les résultats de simulations pour plusieurs retards co / contra propagatifs dans le NOLM.

Nous observons nettement que le retard entre les champs co et contra-propagatifs à l'origine du déphasage dans l'interféromètre, va avoir une influence importante sur la non-linéarité de la fonction de transfert. Cette dernière étant un élément fondamental pour les propriétés régénératives de la fonction optique comme nous l'avons déjà souligné à plusieurs reprises.

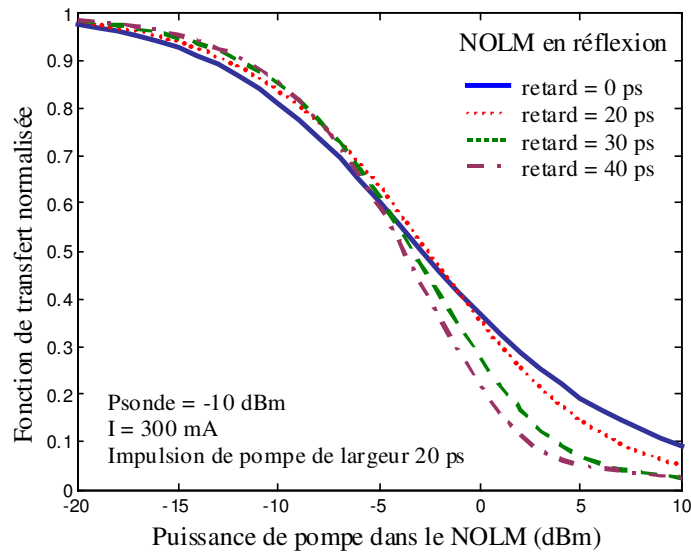


Figure 72 : Fonction de transfert du NOLM en configuration « réflexion »

Plus le déphasage est important et plus la non-linéarité de la fonction de transfert est accentuée. Nous allons voir dans la partie suivante que le déphasage va provoquer une déformation plus ou moins importante en fonction du format des données en entrée.

Enfin, pour un retard nul, nous retrouvons la fonction de transfert du SOA. A cette condition, la modulation de la lumière dans l'interféromètre ne dépend que de la modulation du gain, le déphasage entre les champs co et contra-propagatifs étant nul.

## 2.4.2 Transmission des données en configuration système

Deux formats de données sont proposés pour les transmissions optiques à haut débit. Le format NRZ est comme nous l'avons déjà vu le format standard pour les transmissions à 10 Gbit/s. Notre travail étant destiné à réaliser des fonctions optiques pouvant être utilisées à des débits supérieurs (40 Gbit/s), il est important de tester le NOLM avec un format RZ, (format mieux adapté aux très haut débits).

Nous allons donc réaliser des simulations pour le format RZ et NRZ sur la pompe en entrée.

Il convient aussi de les tester en fonctionnement 2R (sonde continue) et 3R (sonde impulsionnelle correspondant à une horloge optique).

Pour cela, nous avons développé au laboratoire modèle numérique permettant de simuler le fonctionnement du NOLM en configuration système. Les résultats obtenus dans cette partie proviennent de ce modèle qui a pour caractéristique de simuler tous les types de fonctionnement décrits précédemment. Il intègre le bruit d'émission spontanée de l'amplificateur à semi-conducteurs. Il prend en compte la puissance de saturation du SOA.

Grâce à cette outil, nous souhaitons dans un premier temps simuler la forme temporelle des signaux en sortie du NOLM afin de déterminer ses points de fonctionnement pour la régénération du signal, à savoir un bon taux d'extinction de sortie et un format compatible avec un environnement système. Cette étape passe par l'analyse du diagramme de l'œil.

L'objectif de cette étude est de déterminer des fenêtres temporelles de transmission compatibles avec le fonctionnement 3R, c'est à dire plus larges que les impulsions de sonde.

Nous avons d'autre part eu recours à la mesure du facteur Q pour évaluer les dégradations sur le diagramme de l'œil, principalement dues à la distorsion du signal au travers du NOLM. Notre propos dans cette partie n'étant pas le transfert du bruit, le signal de pompe en entrée possède un très bon OSNR. Le taux d'extinction du signal en entrée est lui de 20 dB.

La mesure relative du facteur Q permet de dégager des points de fonctionnement (ou fenêtres de transmission) correspondant à une amélioration du taux d'extinction ou une faible distorsion des niveaux de « 1 » et / ou de « 0 ». Un bon facteur Q en sortie du NOLM correspondra à un bon taux d'extinction et à une faible distorsion du signal, soit, une fenêtre de transmission temporelle de bonne qualité.

Les simulations sont réalisées pour un taux de compression du gain du SOA de 10 dB (correspond à une puissance de pompe >10 dBm en ce qui concerne nos dispositifs optiques). La puissance de sonde est de -10 dBm et la puissance de saturation du gain du SOA de -20 dBm.

Deux types de pompe sont injectées dans le NOLM, d'une part un signal NRZ classique à 10 Gbit/s et d'autre part un signal RZ à 10 Gbit/s d'impulsions de largeur 30 ps. Nous avons limité notre étude sur ces deux types de formats utilisés au laboratoire et présentés sur les Figure 73 (a) et (b)).

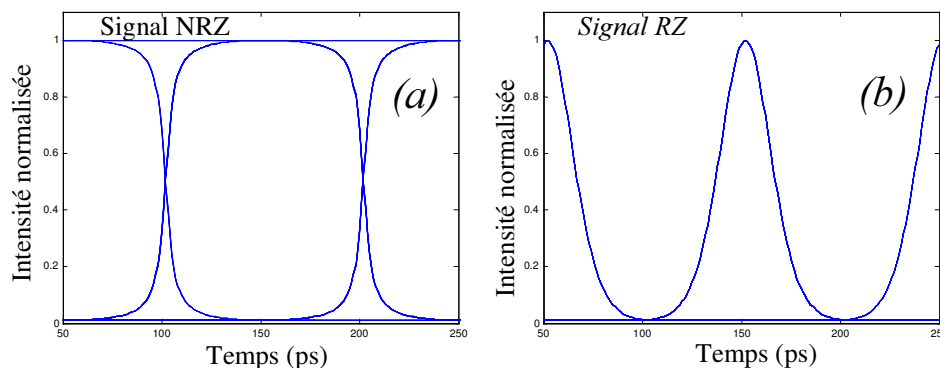


Figure 73 : Formats de pompe utilisés pour la simulation du NOLM en environnement système

Tous les paramètres utilisés lors de la simulation numérique, ont été déjà explicités dans ce chapitre relatif aux modélisations du SOA et du NOLM. Nous conservons les mêmes valeurs pour les paramètres de simulation du SOA (en particulier  $I = 300$  mA). Pour le NOLM, nous prenons un coefficient de couplage du coupleur entrée / sortie de 0,52 (pour rester dans une configuration réaliste).

#### a) Fonctionnement 2R avec pompe NRZ du NOLM en réflexion

Il s'agit du fonctionnement le plus simple puisqu'il ne nécessite pas d'horloge et que le format NRZ est le format « standard » pour les transmissions de type WDM.

La Figure 74 nous montre pour une séquence donnée le comportement des différentes composantes physiques entrant dans le fonctionnement du NOLM.

L'impulsion de pompe correspond au format NRZ à 10 Gbit/s (largeur temporelle de 100 ps) présentée sur la Figure 74 (a).

Le gain dans le SOA vu par les contributions co et contra-propagatives de la sonde pour un retard co / contra de 15 ps est présenté sur la Figure 74 (b). On peut aussi y voir le déphasage entre les champs co / contra correspondant.

Sur la Figure 74 (c), nous observons le signal en sortie du NOLM en réflexion et en transmission.

Le NOLM en transmission, ne conserve pas le motif des données puisqu'il est essentiellement sensible à la phase.

Par contre, en réflexion, on remarque que le signal conserve globalement le format et inverse la polarité des données de pompe.

Il est important de rappeler que le NOLM-SOA n'est pas un système conservatif du fait de la non-linéarité du gain dans les SOA (la somme des puissances de sortie du NOLM en configuration réflexion et transmission n'est pas égale à la puissance de sonde en entrée).

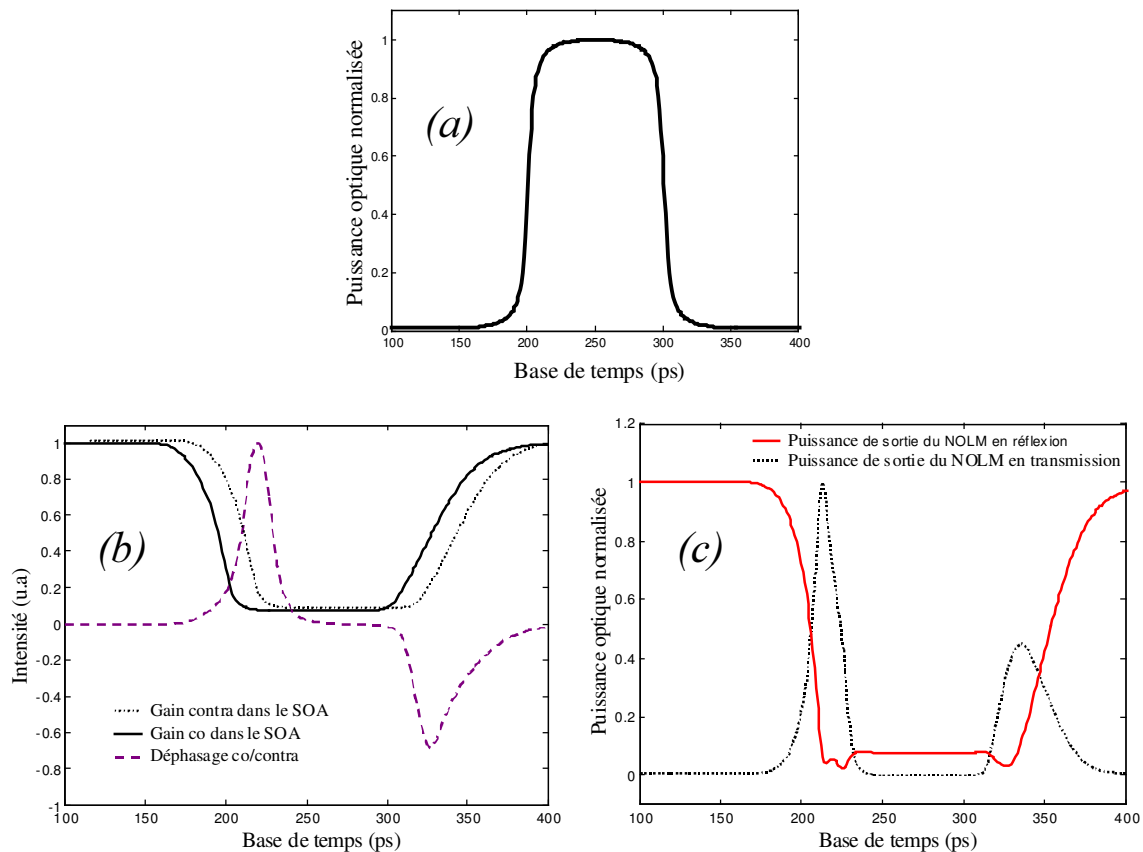


Figure 74 : Principe du fonctionnement 2R-NRZ

Dans la suite de l'étude, nous allons privilégier la configuration réflexion du NOLM pour sa faible sensibilité aux variations de phase et sa conservation (partielle) du format des données sur la pompe.

Nous avons fait varier le retard entre les champs co et contra-propagatifs (revient à modifier la différence de phase instantanée comme nous l'avons déjà vu), pour essayer d'évaluer les dégradations du signal en terme de format de transmission et de qualité de transmission. Il faut toujours garder en mémoire que plus le retard est grand et plus les non-linéarités sur la fonction de transfert sont importantes et plus la qualité de la fonction optique régénératrice sera bonne en terme de prise de décision et de transfert du bruit.

Les résultats de cette simulation sont présentés sur la Figure 75. Ils présentent le diagramme de l'œil, le facteur Q et le taux d'extinction du NOLM en réflexion. Le diagramme de l'œil donne une information qualitative de la transmission simulée.

Nous effectuons une mesure numérique pour une position particulière dans l'œil (précisée sur les figures). Pour cette position on évalue la qualité de la fenêtre de transmission obtenue via la mesure du taux d'extinction (qui correspondra au taux d'extinction du signal de sortie) et la mesure du facteur Q (permet de donner une idée de la qualité du signal de sortie traduite par l'ouverture du diagramme de l'œil).

La mesure du facteur Q permet alors de déterminer les améliorations ou les dégradations du signal de sortie, permettant d'identifier des fenêtres de transmission. Le facteur Q n'implique pas nécessairement dans notre étude, une dégradation par le bruit. Dans ces conditions, le signal de pompe est non bruité puisque le transfert du bruit n'est pas le propos de cette partie. Le taux d'extinction en entrée est de 20 dB et l'OSNR de 40 dB/0,1nm. Le facteur Q en entrée est de 50.

Sur ces résultats, on peut apprécier que la mauvaise qualité du diagramme de l'œil due aux distorsions du signal dans le NOLM est corroborée par un facteur Q faible à taux d'extinction constant. La simulation permet donc de prendre en compte les dégradations ou bien les améliorations subies dans la fonction optique et de qualifier ses propriétés en terme de régénération.

Le taux de compression du gain du SOA est de 10 dB, la puissance théorique de sortie du NOLM en réflexion est de 6 dBm.

Avec ce type de dispositif, nous avons un taux d'extinction de sortie relativement faible entraînant un facteur Q lui aussi assez faible pour une fonction régénératrice. Le facteur Q en entrée est lui très grand (45) puisqu'on considère un signal sans bruit en excès (OSNR de 40 dB/0,1 nm) et un taux d'extinction de 20 dB.

Pour un signal de pompe non bruité en entrée, l'OSNR de sortie dépend du bruit d'émission spontanée du SOA.

Le taux d'extinction de sortie est donné par le taux de compression du gain du SOA.

Nous pouvons admettre que pour cette configuration, le NOLM ne va pas pouvoir améliorer le taux d'extinction.



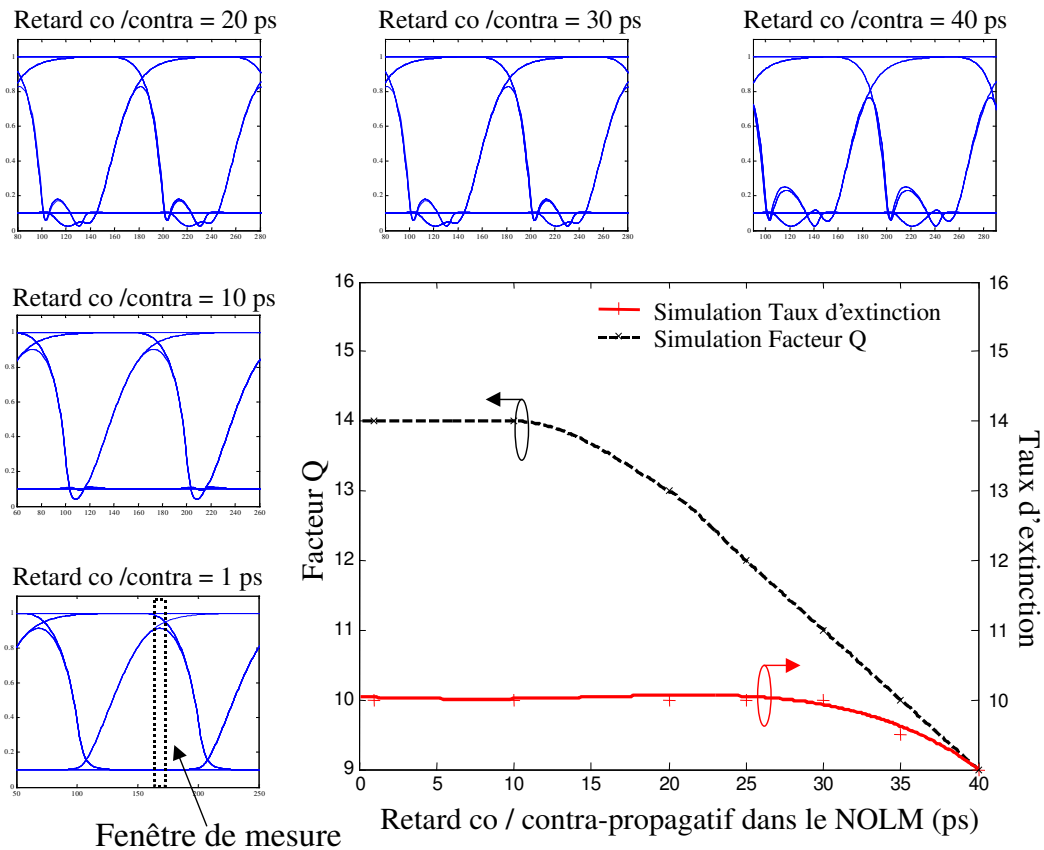


Figure 75 : Caractérisation dynamique du NOLM en réflexion, en configuration système (2R-NRZ)

b) Fonctionnement 2R avec pompe RZ du NOLM en réflexion

Nous avons vu dans la partie précédente que le fonctionnement 2R n'était pas très performant en terme de régénération. Par contre, son étude est fondamentale pour comprendre le fonctionnement dynamique du NOLM. La sonde continue (fonctionnement 2R) permet de « lire » la contribution du gain et de la différence de phase (introduite par le retard co/contre-propagatif) et de déterminer des fenêtres de transmission potentielles.

Le taux d'extinction en entrée est de 20 dB et l'OSNR de 40 dB/0,1nm. Le facteur Q en entrée est de 50.

La Figure 76 nous montre l'évolution du format de la sonde en fonction du retard co/contre-propagatif. Les résultats en terme de qualité de format NRZ sont catastrophiques mais laissent néanmoins envisager un très bon comportement en fonctionnement 3R (cas de figure où la sonde serait une horloge impulsionnelle) qui permettrait de passer outre les distorsions engendrées par la compétition gain/phase dans le NOLM.

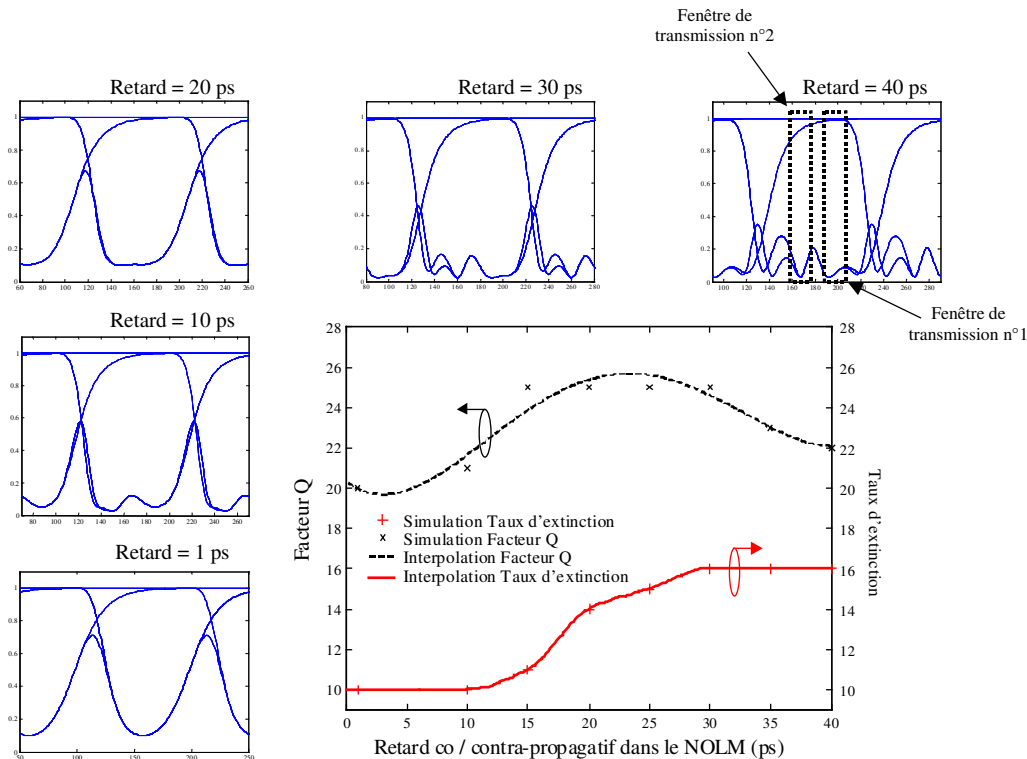


Figure 76 : Caractérisation dynamique du NOLM en réflexion, en configuration système (2R-RZ)

Nous nous plaçons dans les mêmes conditions que pour la simulation précédente. Le facteur Q va augmenter en même temps que le taux de compression, laissant apparaître une nouvelle fenêtre de transmission. Les performances deviennent alors très intéressantes car on a en sortie un taux d'extinction autour de 15 dB, ce qui pourrait rendre ce dispositif très attractif par rapport aux autres types de régénérateurs (Cf. les valeurs relevées lors de l'état de l'art présenté dans le premier chapitre).

Les valeurs ont été obtenues avec une fenêtre de mesure de 10 ps. Les fenêtres de transmission mises en évidence (permettant de réaliser une régénération de bonne qualité) ne sont donc valables que pour une largeur de 10 ps. Nous n'avons pas réalisé une étude poussée sur cet aspect, l'objectif étant de dégager un comportement général du NOLM en configuration système.

### c) Fonctionnement 3R avec pompe NRZ du NOLM en réflexion

Nous reprenons dans cette partie le format NRZ avec une sonde impulsionnelle d'impulsions de largeur 30 ps, d'OSNR de 40 dB/0,1 nm et de taux d'extinction de 30 dB (horloge optique à 10 GHz). Sur la Figure 77, on distingue deux fenêtres de transmission possibles que nous avons réussi à mettre en évidence en fonctionnement 3R.

Le taux d'extinction en entrée est de 20 dB et l'OSNR de 40 dB/0,1nm. Le facteur Q en entrée est de 50.

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 77. Ils mettent eux aussi en évidence une seconde fenêtre de transmission en fonctionnement 3R, décalée de la fenêtre de transmission « naturelle » obtenue en fonctionnement 2R.

Les résultats obtenus donnent un très bon taux d'extinction (13 dB) et pour un facteur de qualité de 16. Avec ce type de configuration, le problème du faible taux d'extinction du NOLM semble résolu mais on réalise avec cette configuration un changement de format NRZ-RZ difficile à utiliser dans le contexte général de la régénération en ligne des signaux. Cette opération pourrait être néanmoins très utile pour homogénéiser les réseaux tout-optiques.

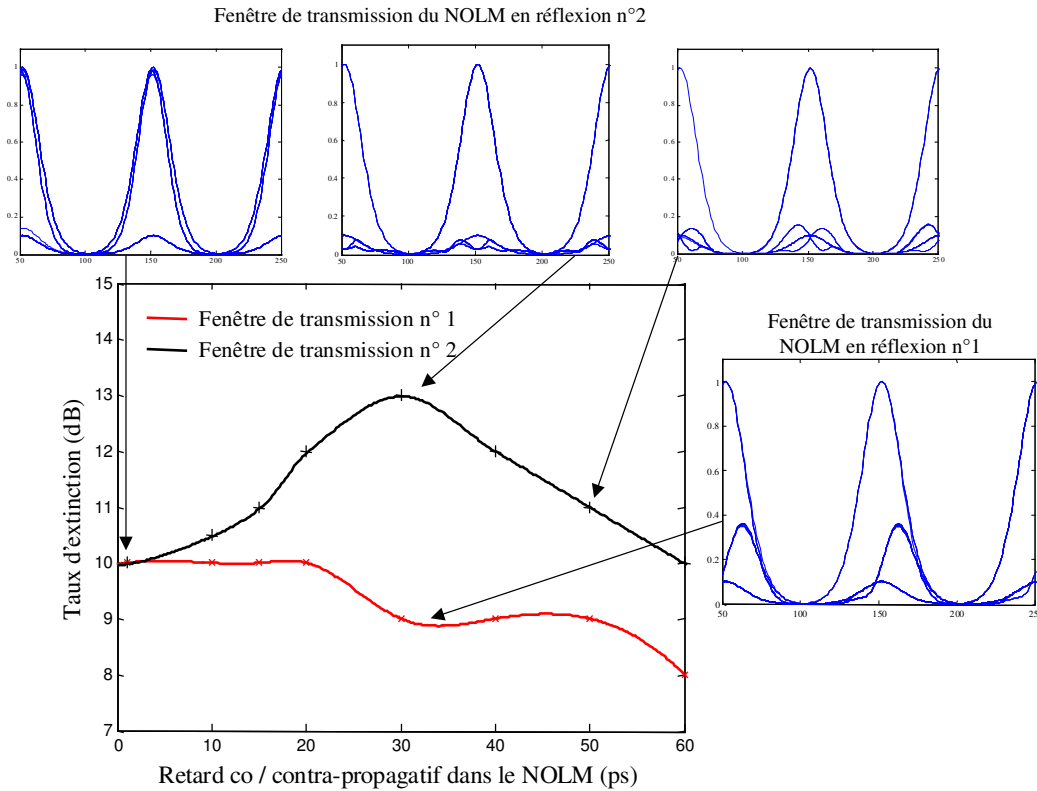


Figure 77 : Caractérisation dynamique du NOLM en réflexion, en configuration système (3R-NRZ)

#### d) Fonctionnement 3R avec pompe RZ

Cette configuration est sans doute la mieux adaptée aux réseaux de télécommunications à très haut débit puisqu'elle conserve le format RZ en entrée et en sortie. Elle fonctionne avec un format impulsionnel, lui aussi adapté à la technique OTDM largement présentée dans ce rapport.

C'est dans cette configuration que nous avons obtenu les meilleurs résultats de simulation. Nous avons repris la fenêtre de transmission n°2 pour une pompe RZ dans laquelle nous avons fait passer une horloge optique. Le taux de compression du gain du SOA est toujours de 10 dB et le retard co/contra propagatif variable. Les résultats sont présentés sur la Figure 78. Nous avons mis en évidence un taux d'extinction de 16 dB (celui de la pompe en entrée est de 20 dB), un facteur Q de 39 (il est de 45 en entrée), pour un retard co/contra-propagatif dans le NOLM de 30 ps. La fonction de transfert correspondant à cette configuration présente une forte non-linéarité (Cf. Figure 72).

Ces résultats du NOLM en réflexion sont très encourageants pour des applications de régénération du signal. Nous pouvons d'ores et déjà considérer que cette fonction est capable

de régénérer le taux d'extinction et le rapport signal à bruit optique (via la conversion de longueur d'onde).

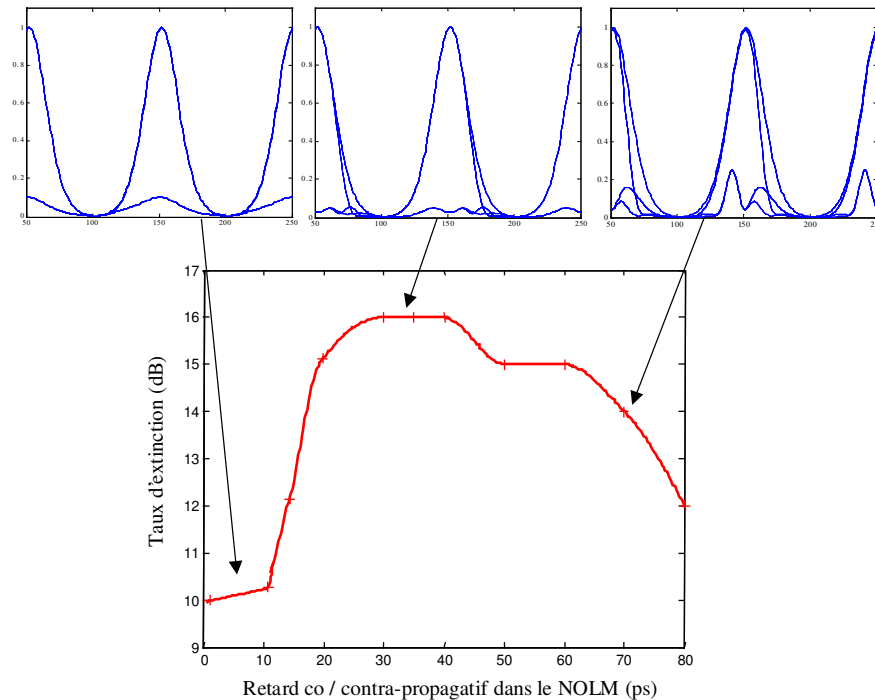


Figure 78 : Caractérisation dynamique du NOLM en réflexion, en configuration système (3R-RZ)

Nous avons également obtenu un résultat très intéressant en transmission pour cette configuration. Le NOLM en transmission sera beaucoup moins stable en système (du fait de sa grande sensibilité aux variations de phase en terme de forme du signal et puissance de sortie) que le NOLM en réflexion. Il convient de noter ses performances à titre de comparaison :

Pour un taux de compression de 10 dB du gain du SOA, pour un retard co/contra de 30 ps, on a un taux d'extinction de 28 dB et un facteur Q de 41 (il est de 45 en entrée).

En supposant une meilleure stabilité du NOLM en transmission, on pourrait mettre à profit de telles performances pour réaliser des opérations de régénération 3R avec des impulsions très courtes (la fenêtre de transmission étant beaucoup plus courte pour le NOLM en transmission du fait des distorsions apportées par la contribution importante du déphasage).

### 3 Comparaison des performances des régénérateurs étudiés

Nous avons comparé deux types de régénérateurs relativement peu étudiés dans la littérature pour leur propriétés de régénération du signal dans les communications sur fibres optiques à très haut débit ( $> 10$  Gbit/s) :

- i) Le double étage de SOA (DE-SOA) est une configuration originale basée sur l'amélioration du taux d'extinction du signal modulé en sortie d'un SOA grâce à une accentuation de la compression du gain sur la sonde grâce à un deuxième étage de SOA.
- ii) Le NOLM en configuration réflexion est un dispositif interférométrique qui va utiliser sa dépendance en phase pour accentuer dans certaines conditions d'utilisation (3R) ses capacités de régénération. Nous avons donc comparé deux types de fonctions optiques à base de SOA dans un environnement système grâce à notre logiciel de simulation développé au laboratoire. Les simulations seront complétées par des résultats expérimentaux présentés dans le chapitre 4.

#### 3.1 Le Double-Etage de SOA

Ce dispositif original est basé sur le principe du double passage des données dans les SOA. Si nous considérons qu'une compression du gain du SOA produite par un « 1 » de pompe va générer un « 0 » sur la sonde, le taux d'extinction sur la sonde modulée en sortie ne va pas pouvoir être plus grand que le taux de compression du gain. Ce qui engendre un taux d'extinction limité dans les SOA pour la régénération tout-optique du signal. La solution trouvée à cette limitation est que le « 1 » de pompe comprime le gain d'un autre SOA, au moment exact où passe dans ce SOA la sonde modulée par ce même « 1 » de pompe dans le SOA précédent.

Le schéma de principe du double étage de SOA est présenté sur la Figure 79.

Pour faire fonctionner ce dispositif, il est nécessaire que les trajets optiques 1 et 2 soient égaux (condition réalisée avec la ligne à retard optique #2) pour que le même « 1 » de pompe comprime le gain des deux SOA lors du passage de l'impulsion de sonde. Le signal en sortie du double-étage va voir sa puissance varier instantanément en fonction de la puissance de pompe. On peut écrire la relation de principe suivante.

$$P_{\text{sortie(}DE-SOA)} = P_{\text{Sonde en entrée}}(t) \times G_{SOA\#1}(t) \times G_{SOA\#2}(t) \quad (3.44)$$

Le gain du SOA est une fonction de la puissance de pompe. Pour un régime impulsionnel (3R) comme décrit sur la Figure 79, on considère les impulsions de la pompe et les impulsions de l'horloge optique synchrones. Cette condition est réalisée grâce à la ligne à retard #1.

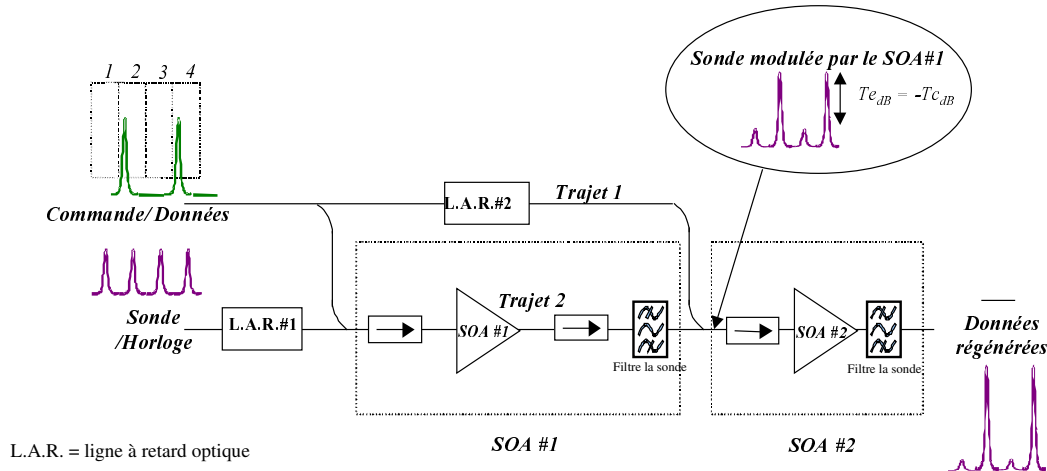


Figure 79 : Schéma de principe du double étage de SOA

Dans ces conditions, nous pouvons tracer la fonction de transfert du DE-SOA en fonction de la puissance de pompe incidente. La caractérisation est obtenue par simulation en faisant varier la puissance crête des impulsions de pompe (même technique que celle utilisée pour déterminer la fonction de transfert du NOLM).

Le taux de compression est traduit par le taux d'extinction de la sonde transmise. Nous rappelons que ce dispositif pompe / sonde permet de lire le gain dans le SOA pour une sonde constante. Les résultats sont présentés sur la Figure 80.

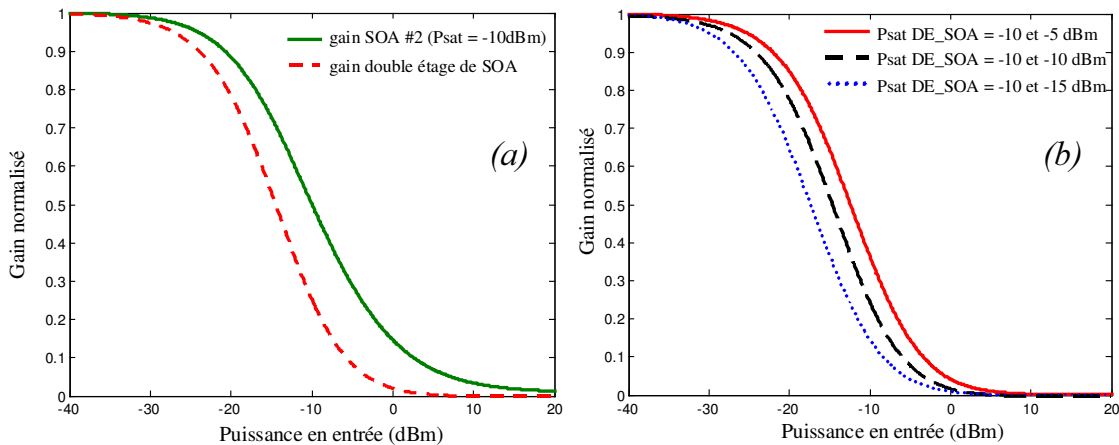


Figure 80 : Fonction de transfert du double-étage de SOA (DE-SOA)

Sur la Figure 80 (a), nous comparons la fonction de transfert du DE-SOA avec celle d'un SOA unique. On a pris pour tous les SOA la même puissance optique de saturation du gain (-10 dBm). Le résultat est très intéressant puisqu'il montre qu'on a une forte amélioration du taux de compression du gain du DE-SOA par rapport au SOA seul (9 dB pour une puissance de pompe de 0 dBm et une amélioration de 15 dB pour une puissance de pompe de 10 dBm).

Théoriquement, le gain linéaire du DE-SOA correspond au carré du gain linéaire du SOA seul (fois deux sur le gain en décibel).

La non-linéarité de la fonction de transfert est fortement accentuée. Ces deux éléments mettent en évidence le grand potentiel du DE-SOA pour la régénération. Nous pouvons signaler que ce dispositif est théoriquement peu sensible à la polarisation.

La Figure 80 (b) correspond aux fonctions de transfert du DE-SOA pour des puissances de saturation du gain du SOA différentes dans les deux SOA. Cette condition est réalisée en injectant des courants de polarisation différents ou bien en injectant une puissance de sonde différente dans les deux SOA. Nous avons pris dans cette simulation des taux de compression du gain identiques (10 dB). Les résultats montrent que l'on ne modifie pas la non-linéarité de la fonction de transfert, ce qui ne permet pas une optimisation de la fonction de transfert comme on a pu le montrer avec celle du NOLM (variations en fonction du déphasage entre les champs co et contra-propagatif dans l'interféromètre).

Nous allons faire une étude comparative des trois dispositifs à base d'amplificateurs à semi-conducteurs pour la régénération : le SOA seul, le Double-Etage de SOA et le NOLM-SOA.

## 3.2 Etude théorique comparative entre NOLM et Double-Etage de SOA

Cette partie a pour objectif d'évaluer les performances de chacune des fonctions optiques en terme de propriétés de régénération des signaux optiques. Chacune est utilisée en configuration pompe / sonde, ce qui est une étape importante pour la réduction du bruit. Nous avons réalisé ces simulations dans les conditions présentées en début de chapitre (Cf. les généralités sur la mesure du bruit).

Nous avons introduit précédemment toutes les notions utiles à cette étude comparative théorique. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence le caractère régénératif des fonctions considérées et d'en faire ressortir les différences éventuelles entre tel ou tel générateur.

Les trois dispositifs sont basés sur l'utilisation des SOA. Nous avons déjà présenté qualitativement la transmission du bruit dans les SOA. Nous pouvons suggérer que les trois fonctions optiques vont globalement avoir à peu de chose près, le même fonctionnement.

### 3.2.1 La fonction de transfert

Tout d'abord, nous pouvons comparer les fonctions de transfert des trois types de fonctions optiques pour la régénération. Leurs simulations ont été réalisées suivant le même procédé (longuement décrit au cours de ce chapitre). Les résultats sont présentés sur la Figure 81. La fonction de transfert du NOLM présentée est obtenue par la simulation pour un retard co / contra\_propagatif de 40 ps.

Le principe reste le même, nous faisons varier la puissance crête d'une impulsion de pompe en entrée (de largeur 30 ps) pour une configuration du SOA données :  $I = 300$  mA,  $P_{sat} = -10$  dBm. Nous mesurons ensuite la puissance optique de la sonde en sortie.

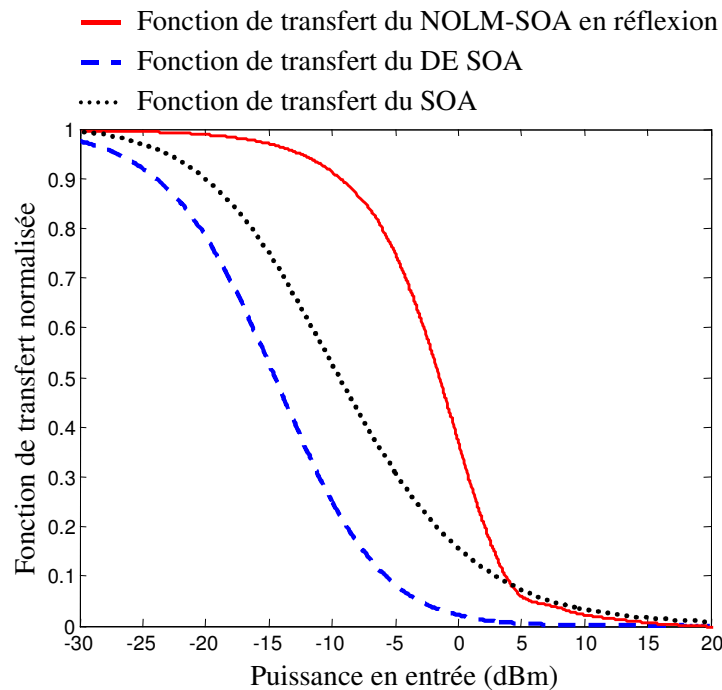


Figure 81 : Comparaison des fonctions de transfert non-linéaires

La fonction de transfert du SOA sera la moins bien adaptée à la régénération puisqu'elle possède un taux d'extinction maximum inférieur aux autres. En réalité, il est quasiment impossible d'y obtenir un taux de compression de 10 dB sans altérer la réponse temporelle de la fonction de transfert. Pour une forte compression du gain, le temps de recombinaison des porteurs de charge va d'autant limiter le taux d'extinction en sortie du SOA que le débit des données est élevé (phénomène de « patterning »). De plus, la non-linéarité de sa fonction de transfert étant la moins importante, ses qualités régénératives seront en deçà de celles des autres dispositifs (NOLM et DE-SOA).

### 3.2.2 Etude de la sensibilité du dispositif aux dégradations en entrée

Les principales dégradations dans les systèmes dit linéaires (effets non-linéaires négligeables) subies par le signal sont :

- Une accumulation du bruit par la présence d'amplificateurs optiques (la dégradation par le bruit optique pourra être mesurée après détection, via le SNR).
- La diminution du taux d'extinction du à l'effet de la dispersion chromatique, de polarisation ou de diaphonie d'origine non-linéaire (XPM, etc). Cette dégradation n'a pas été prise en compte dans la modélisation.

Ces dégradations vont se traduire par une diminution du facteur Q et du SNR.



## a) Sensibilité à la dégradation du SNR

La puissance d'émission spontanée amplifiée est filtrée dans 0,1 nm. Nous ne sommes donc en régime de battement signal / spontané prédominant (nous ne sommes pas limité non plus par le bruit thermique).

A partir des fonctions de transfert de la Figure 81, nous avons étudié le transfert du bruit au travers des fonctions optiques considérées. Généralement, on a accès à la puissance d'entrée, nous avons donc fixé une puissance de pompe de 5 dBm et la puissance de sonde de -10 dBm. Nous avons simulé l'augmentation du bruit en augmentant la variance (du deuxième ordre) du bruit sur le signal optique. Nous reprenons la définition du rapport signal sur bruit proportionnel à l'inverse de la variance dans un cas idéal.

Les résultats concernant le SOA seul sont présentés sur les figures suivantes.

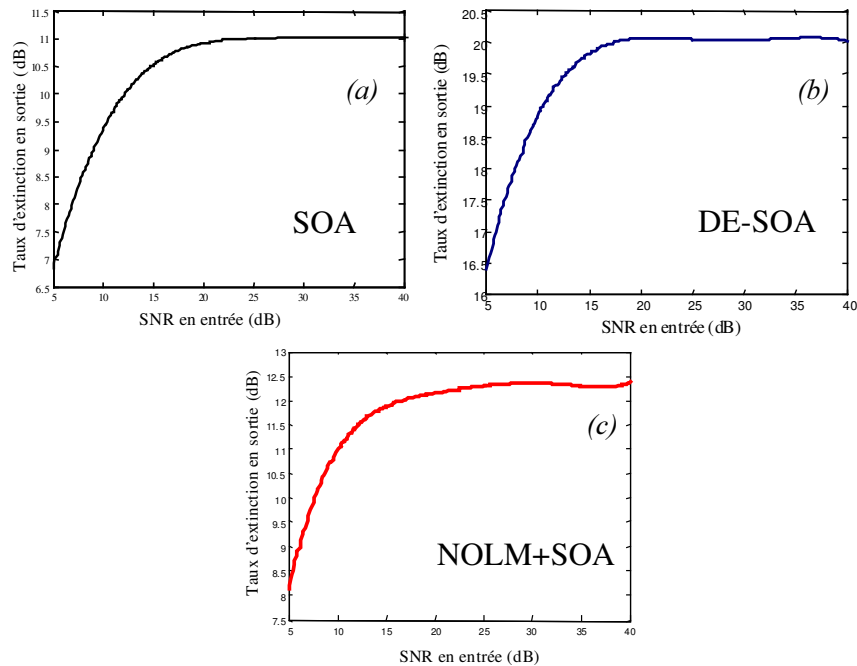


Figure 82 : Sensibilité des fonctions optiques au bruit optique

Cette série de courbes montre une sensibilité des fonctions optiques considérées à la dégradation du SNR en entrée, sensiblement équivalente. La non-linéarité de la fonction de transfert provoque une dégradation non-linéaire du taux d'extinction de la sonde. Pour comprendre ce phénomène, il faut se reporter au paragraphe concernant le transfert du bruit dans les SOA. Nous pouvons dire que la transmission sur la sonde, du bruit des « 0 » de pompe, ne va pas dégrader le SNR jusqu'à une certaine valeur de bruit. Au delà de cette valeur, les densités de probabilité du bruit vont être déformées par la non-linéarité de la fonction de transfert. Cette déformation va tendre à dégrader le taux d'extinction de la sonde en sortie.

Nous rappelons que ce comportement n'est valable qu'en configuration pompe / sonde, pour laquelle, la sonde « propre » en entrée et va améliorer le rapport signal sur bruit en sortie du régénérateur.

Ces résultats théoriques sont corroborés par la Figure 83 suivante, qui exprime le facteur Q en entrée (pompe portant les données) par rapport au facteur Q en sortie (sonde modulée).

Nous constatons que l'insensibilité du signal de sortie aux dégradations linéaires du signal d'entrée n'est vraie, que si la variance du bruit optique ne dépasse pas une certaine valeur. Le seuil de dégradation du signal de sortie va dépendre des éléments constituant les différents dispositifs.

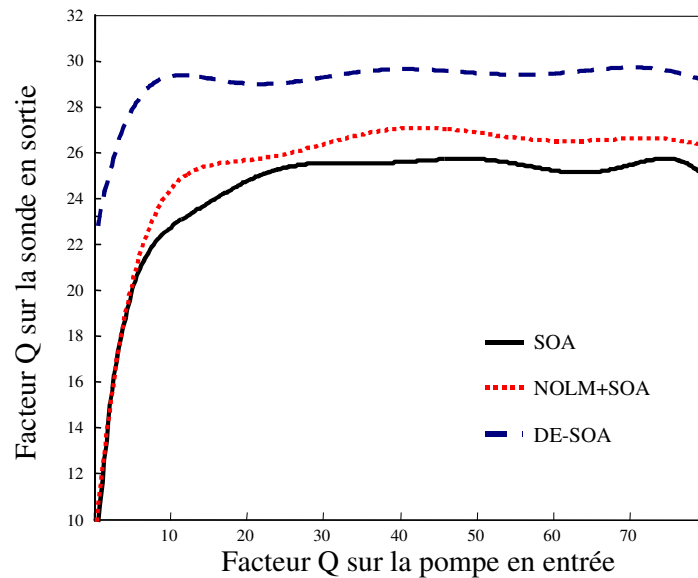


Figure 83 : Sensibilité des fonctions optiques à la dégradation du facteur  $Q$

Globalement, ces résultats tendent à mettre en évidence le comportement régénératif basé sur une faible sensibilité des fonctions optiques non-linéaires à l'accumulation du bruit en entrée, tant que celle-ci n'est pas trop importante.

La forme de la fonction de transfert est prépondérante dans ce processus puisqu'elle va déterminer le taux d'extinction du signal de sortie et le seuil de dégradation par le bruit.

Nous n'avons pas retenu de valeur numérique de ces résultats de simulation, mais seulement un aspect qualitatif (tendance du phénomène).

Nous pouvons résumer le principe de régénération : le SNR en sortie doit être supérieur au SNR en entrée, ou bien, le taux d'extinction en sortie doit être supérieur à celui en entrée (cas des absorbants saturables).

#### b) Sensibilité à la dégradation du taux d'extinction

Nous avons avec le même outil de simulation fait varier le taux d'extinction de la pompe en entrée des portes non-linéaires. La puissance de pompe reste de 5 dBm et les niveaux de bruit sur la pompe et sur la sonde en entrée sont constants. L'OSNR du signal d'entrée est de 40 dB/0,1 nm. La puissance d'émission spontanée amplifiée est filtrée dans 0,1 nm. Les résultats sont indépendants du format de modulation de pompe et la sonde est continue.

Les résultats obtenus vont dans le même sens que les précédents. La sensibilité à la dégradation du taux d'extinction en entrée des trois dispositifs considérés, permet d'évaluer leur capacité à régénérer le signal.

Les Figure 84 (a), (c), (e) montrent que la dégradation du taux d'extinction en entrée doit être importante pour espérer avoir un taux d'extinction de sortie supérieur à celui d'entrée.

Pour le DE-SOA, un taux d’extinction de 10 dB en entrée donne théoriquement un taux d’extinction de 14 dB en sortie, alors que le NOLM donne un taux d’extinction de 11 dB. Nous pouvons donc dire qu’en terme de régénération du taux d’extinction, le DE-SOA semble meilleur.

Ces résultats vont dans le bon sens pour le NOLM et le double étage de SOA puisqu’un régénérateur est sensé améliorer le taux d’extinction. En revanche, un SOA seul aura un taux d’extinction de sortie toujours inférieur à celui en entrée.

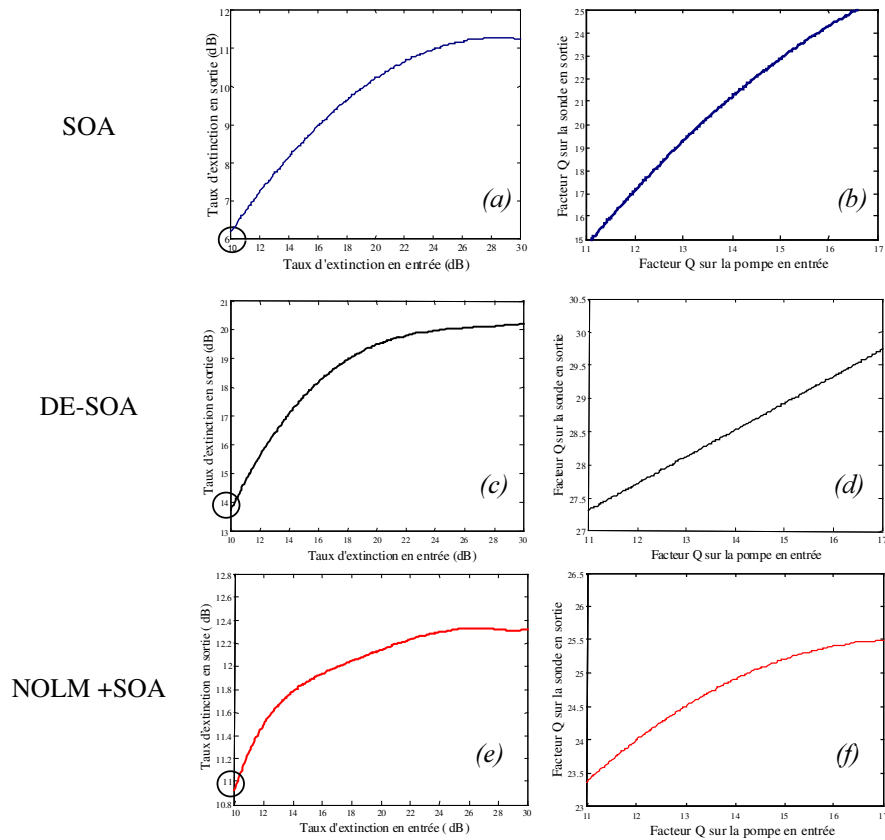


Figure 84 : Sensibilité des fonctions optiques au taux d’extinction

Concernant le facteur Q, dont l’étude est présentée sur les Figure 84 (b), (d), (f), nous constatons que dans tous les cas de figure, le facteur Q en sortie est supérieur au facteur Q en entrée. Cette observation ne peut-être valable qu’en régime de saturation croisée du gain (seul régime étudié dans la thèse).

# Conclusion

Ce chapitre entièrement dédié à la simulation nous a permis de mettre en évidence les propriétés de trois fonctions optiques basées sur le même principe physique (mais déclinées sous trois formes différentes) susceptibles de régénérer le signal dans le contexte des télécommunications optiques à très haut débit. Tout d'abord, nous avons pu réaliser un logiciel de simulation prenant en compte les grandeurs physiques présentes dans le processus de régénération à base d'amplificateurs à semi-conducteurs. L'objectif était de simplifier autant que faire se peut, tous les phénomènes physiques tels que la dynamique du gain des SOA, l'émission spontanée dans les SOA, l'interférométrie à deux ondes, afin d'avoir un programme de simulation adapté aux systèmes de télécommunications. Les fonctions optiques étant relativement complexes, il était important d'avoir un outil souple et performant.

Nous avons pu analyser le processus de transformation du bruit d'entrée et du taux d'extinction d'entrée dans les dispositifs à base de SOA que nous avons considérés. Nous avons étudié leur sensibilité aux dégradations du signal d'entrée (taux d'extinction et facteur Q). Les résultats obtenus grâce aux simulations ont permis de comprendre les différentes étapes du processus de régénération, ainsi que d'en évaluer les performances.

Tout d'abord, la configuration pompe / sonde dans un SOA permet de minimiser le transfert du bruit présent sur les « 0 » du signal de pompe. Le niveau de bruit d'émission spontanée est fixé par la puissance optique des « 0 » de pompe dans le cas d'un très bon taux d'extinction en entrée, mais va diminuer au passage d'un « 1 » de pompe.

- L'origine du bruit sur les « 1 » de sonde est principalement due à l'émission spontanée du SOA.
- L'origine du bruit sur les « 0 » de sonde est due au transfert du bruit de la pompe sur la sonde.

En utilisant une fonction optique à base de SOA (DE-SOA ou NOLM) possédant une seconde non-linéarité de transmission en régime de compression du gain du SOA, il est aussi possible de minimiser le bruit sur les « 1 » de pompe. Dans ces conditions, la régénération des « 1 » et les « 0 » du signal peuvent-être réalisées simultanément.

Nous avons un régénérateur optique optimum en terme de qualité du signal (facteur Q) lorsque le signal en sortie est meilleur qu'en entrée. Cette condition n'est satisfaite que si le taux d'extinction du signal de sortie est suffisant. Il est donc nécessaire de réaliser cette condition pour prétendre disposer d'une fonction optique régénératrice.

Des trois dispositifs étudiés, il ressort que le Double-Etage de SOA est parfaitement apte à satisfaire les conditions de régénération. Il suffit de bien régler les puissances de pompe, sonde et courant de polarisation pour avoir un régénérateur robuste.

Le NOLM est lui plus complexe en terme de fonctionnement, il est donc difficile de caractériser parfaitement sa fonction de transfert (qui dépend principalement de la position du

SOA dans le NOLM). Nous avons montré qu'en l'utilisant en configuration « réflexion », il était possible d'avoir une fonction de transfert présentant une meilleure non-linéarité (seuil plus abrupt qu'un SOA seul). Il a été montré par ailleurs qu'on pouvait avoir des fenêtres de transmissions d'au moins 20 ps de large, possédant un taux d'extinction supérieur à 15 dB. Ainsi, nous pouvons espérer obtenir avec le NOLM en réflexion, des performances très intéressantes en régénération 3R.

Nous pouvons insister sur le fait que nous avons principalement étudié la configuration « originale » du NOLM en réflexion par rapport à la configuration « historique » du NOLM en transmission.

En configuration 2R, la dégradation du signal de sortie sera due à la déformation du format sous l'influence du gain du SOA et de la contribution de la phase dans le NOLM.

Une caractérisation expérimentale de ces fonctions optiques est présentée dans le chapitre suivant. Elle va permettre de vérifier les hypothèses faites sur le potentiel régénératif des fonctions optiques, à l'issue de l'étude des résultats de simulation.