

# ÉTUDE DU BRUIT RELATIF D'INTENSITÉ DE LASERS MULTIMODES DOUBLÉS EN FRÉQUENCE

Rodolphe Collin, Thierry Chartier

Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-22305 Lannion, France

rodolphe.collin@enssat.fr

## RÉSUMÉ

Nous étudions théoriquement le bruit relatif d'intensité (RIN) de lasers multimodes après doublage de fréquence. Nous montrons une augmentation de plus de 6 dB du RIN à basse fréquence après doublage de fréquence en raison d'un couplage entre les fluctuations des modes de plus faible intensité et l'intensité des modes les plus forts. Le doublage de fréquence fait également ressortir la signature de la compétition entre les modes.

**MOTS-CLEFS :** *Bruit relatif d'intensité ; Lasers multimodes ; Doublage de fréquence*

## 1. INTRODUCTION

Le bruit relatif d'intensité (RIN) de lasers doublés en fréquence présente une augmentation à basse fréquence par rapport au RIN avant doublage. L'origine de cette augmentation n'est pas parfaitement identifiée dans la littérature [1, 2]. S'il est assez aisé de montrer que cette augmentation est de 6 dB pour un laser monomode, elle peut être supérieure à 6 dB dans le cas d'un laser multimode. Nous avançons ici des éléments de réponse à travers une étude analytique puis numérique du phénomène.

## 2. ÉTUDE ANALYTIQUE DU PROCESSUS DE DOUBLAGE ET SON IMPACT SUR LE RIN

L'intensité d'un laser à la fréquence angulaire  $\omega$  peut s'écrire  $I_\omega = \langle I_\omega \rangle + \delta I_\omega(t)$ , où  $\langle I_\omega \rangle$  représente la valeur moyenne et  $\delta I_\omega(t)$  les fluctuations de l'intensité. Le RIN du laser se définit alors par

$$\text{RIN}_\omega(\nu) = \frac{\langle |\tilde{\delta I}_\omega(\nu)|^2 \rangle}{\langle I_\omega \rangle^2}, \quad (1)$$

où  $\tilde{\delta I}_\omega(\nu)$  est la transformée de Fourier de  $\delta I_\omega(t)$ . Nous modélisons le processus de doublage par la mise au carré du champ électrique. Dans le cas d'un laser monomode, il est aisé de montrer que le RIN du champ après doublage s'écrit

$$\text{RIN}_{2\omega}(\nu) = \frac{\langle |\tilde{\delta I}_{2\omega}(\nu)|^2 \rangle}{\langle I_{2\omega} \rangle^2} = 4 \frac{\langle |\tilde{\delta I}_\omega(\nu)|^2 \rangle}{\langle I_\omega \rangle^2} = 4\text{RIN}_\omega(\nu), \quad (2)$$

où  $\tilde{\delta I}_{2\omega}(\nu)$  est la transformée de Fourier des fluctuations du champ doublé à la fréquence  $2\omega$  et  $\langle I_{2\omega} \rangle$  la valeur moyenne de l'intensité à  $2\omega$ . Ainsi, le RIN d'un champ laser monomode après doublage est supérieur de 6 dB au RIN avant doublage.

Nous avons mené l'étude analytique d'un champ laser à 2 modes et étudié son RIN avant et après doublage. En faisant l'hypothèse que les bruits des deux modes sont non corrélés et en restreignant notre étude aux basses fréquences, nous montrons que le RIN après doublage s'écrit

$$\text{RIN}_{2\omega\text{bf}}(\nu) = 4 \frac{(\langle I_1 \rangle + 2\langle I_2 \rangle)^2 \langle |\tilde{\delta I}_1(\nu)|^2 \rangle + (2\langle I_1 \rangle + \langle I_2 \rangle)^2 \langle |\tilde{\delta I}_2(\nu)|^2 \rangle}{(\langle I_1 \rangle^2 + \langle I_2 \rangle^2 + 4\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle)^2}, \quad (3)$$

où  $\langle I_1 \rangle$  et  $\langle I_2 \rangle$  sont les intensités moyennes de chacun des modes avant doublage et  $\tilde{\delta I}_1(\nu)$  et  $\tilde{\delta I}_2(\nu)$  les transformées de Fourier des fluctuations de chacun des modes avant doublage. À partir de cette expression, nous définissons trois rapports : le rapport entre les intensités moyennes avant doublage

$\alpha = \langle I_1 \rangle / \langle I_2 \rangle$ , le rapport entre les RIN de chaque mode avant doublage  $\gamma = \text{RIN}_1 / \text{RIN}_2$  et le rapport entre les RIN à basse fréquence du champ total après et avant doublage  $\Gamma = \text{RIN}_{2\omega\text{bf}} / \text{RIN}_{\omega\text{bf}}$ . La figure 1 représente l'évolution de  $\Gamma$  (en dB) en fonction de  $\alpha$  pour plusieurs valeurs de  $\gamma$  (en dB).

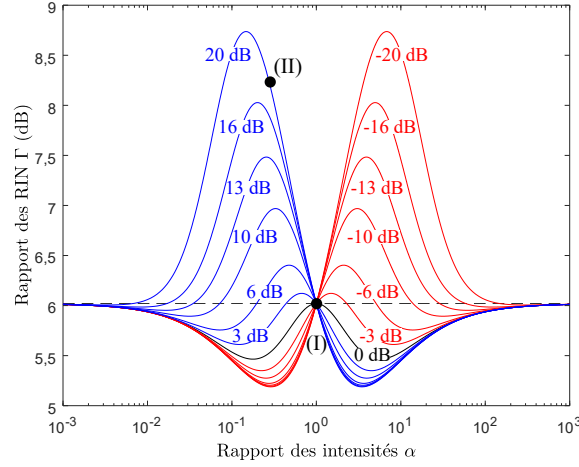


FIGURE 1 : Rapport  $\Gamma$  des RIN en fonction de  $\alpha$  pour plusieurs valeurs de  $\gamma$  (notées sur la figure).

Nous remarquons une augmentation du RIN du champ doublé par rapport au RIN du champ non doublé ( $\Gamma > 0$  dB). Cette augmentation peut être supérieure à 6 dB dans le cas où  $\alpha < 1$  et  $\gamma > 1$  ou  $\alpha > 1$  et  $\gamma < 1$ . Ceci indique qu'une augmentation du RIN supérieure à 6 dB peut produire lorsque le mode ayant la plus faible intensité moyenne possède le RIN le plus élevé. Elle s'explique, d'après la relation (3), par le couplage entre les fluctuations d'un mode et l'intensité de l'autre mode.

### 3. ÉTUDE NUMÉRIQUE DU DOUBLAGE D'UN LASER MULTIMODE

Afin de confirmer cette étude analytique, nous avons développé un système d'équations d'évolution d'un laser à fibre multimode qui tient compte du bruit du laser à travers l'ajout de forces de Langevin sur chaque équation du système. Afin de pouvoir étudier le doublage de fréquence extra-cavité, nous résolvons numériquement ce système en amplitude et en phase pour chaque mode. Une fois le système résolu, nous simulons le doublage de fréquence en élevant au carré le champ laser multimode. Il est alors possible de comparer le RIN du champ total avant et après doublage.

Dans un premier temps, nous étudions le cas d'un laser à deux modes afin de comparer les résultats avec ceux de l'étude analytique précédente. La figure 2 montre les RIN d'un laser à deux modes dans deux cas différents. Dans le premier cas [figure 2 a)], les deux modes sont identiques en termes d'intensité et de bruit. Nous trouvons une augmentation du RIN à basse fréquence de 6 dB comme prévu par l'étude analytique [point (I) de la figure 1]. Dans le second cas [figure 2 b)], les deux modes sont différents en intensité moyenne et en RIN ( $\alpha = 0,25$  et  $\gamma = 20$  dB) et nous observons une augmentation de 8,3 dB du RIN à basse fréquence après doublage. Cette augmentation concorde avec l'étude analytique précédente [point (II) de la figure 1]. Nous avons donc montré que l'étude analytique menée pour un laser à deux modes est confirmée par l'étude numérique. Une augmentation du RIN après doublage de fréquence de plus de 6 dB est en effet observée dans le cas où les modes présentent un différentiel de RIN et en particulier lorsque le mode ayant l'intensité moyenne la plus faible possède le RIN le plus élevé.

La figure 3 illustre les résultats de simulation dans le cas d'un laser à 15 modes. Comme précédemment, nous présentons deux cas : les modes équilibrés [figure 3 a)] puis déséquilibrés [figure 3 b)]. Nous observons un comportement similaire au cas à 2 modes : l'augmentation du RIN à basse fréquence est de plus de 6 dB lorsque les modes sont déséquilibrés. Cela rejoint les résultats obtenus avec l'étude analytique à 2 modes et nous l'attribuons au même phénomène, à savoir un couplage entre les RIN des modes les plus faibles et les intensités des modes les plus forts. Nous observons également l'apparition

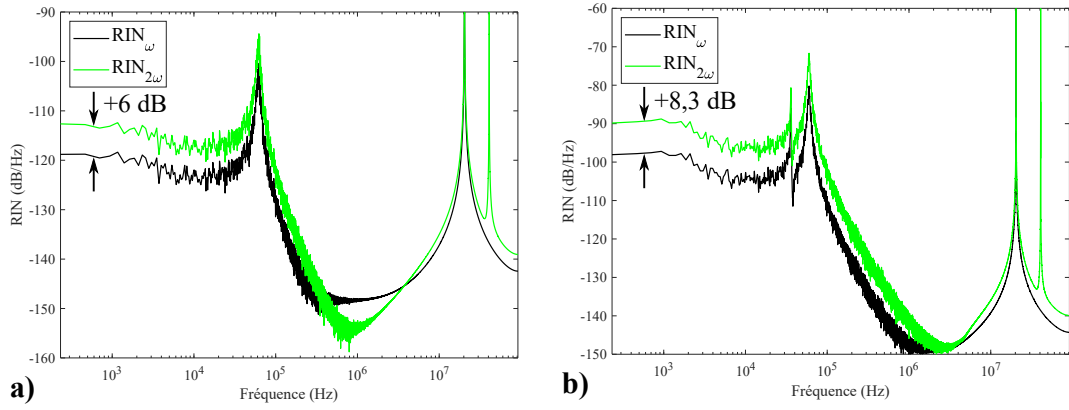


FIGURE 2 : RIN avant et après doublage résultant de simulations numériques pour un laser à 2 modes. **a)** Cas de deux modes équilibrés ( $\alpha = 1$  et  $\gamma = 0$  dB). **b)** Cas de deux modes déséquilibrés ( $\alpha = 0,25$  et  $\gamma = 20$  dB).

d'un pic supplémentaire à basse fréquence sur la figure 3 **a)** après doublage de fréquence. Ce pic n'était pas présent sur le RIN avant doublage. La fréquence de ce pic correspond à celle des échanges d'énergie en antiphase dus à la compétition de modes. Ainsi le doublage de fréquence fait apparaître la signature de la compétition entre les modes dans les cas de lasers multimodes (à partir de 3 modes).

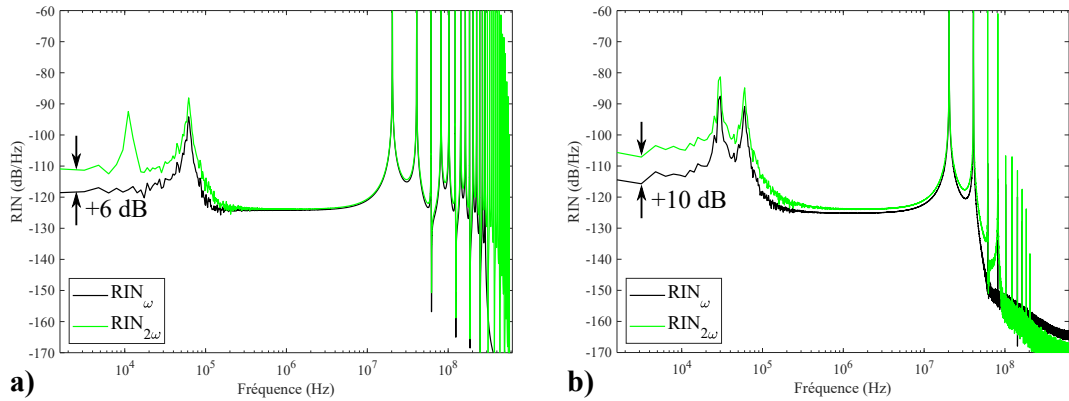


FIGURE 3 : RIN avant et après doublage résultant de simulations numériques pour un laser à 15 modes. **a)** Cas de modes équilibrés. **b)** Cas de modes déséquilibrés.

## CONCLUSION

À l'aide d'une étude analytique, nous avons montré que le RIN d'un laser bimode après doublage de fréquence pouvait présenter une augmentation de plus de 6 dB par rapport au RIN avant doublage. Cette augmentation s'observe lorsque le mode le plus bruyé est le moins intense. Cette étude analytique a été confirmée par des simulations numériques dans le cas d'un laser bimode puis dans le cas d'un laser présentant jusqu'à 15 modes. De plus, nous avons montré que, pour le cas où le laser présente plus de deux modes, le doublage a également pour effet de faire apparaître la signature de la compétition entre les modes (sous la forme d'un pic dû au comportement en antiphase des modes).

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Tawfiq *et al.*, "Intensity noise transfer through a diode-pumped titanium sapphire laser system," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 1–9, Feb 2018.
- [2] U. Eismann *et al.*, "Active and passive stabilization of a high-power UV frequency-doubled diode laser," Jun. 2016.