



HAL
open science

Conversion de fréquence sensible à la phase utilisant trois ondes pompes dans une fibre optique non-linéaire

Maxime Baillot, Mathilde Gay, Christophe Peucheret, Michel Joindot, Thierry Chartier

► To cite this version:

Maxime Baillot, Mathilde Gay, Christophe Peucheret, Michel Joindot, Thierry Chartier. Conversion de fréquence sensible à la phase utilisant trois ondes pompes dans une fibre optique non-linéaire. 37^e Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG 2017), Jul 2017, Limoges, France. hal-02923585

HAL Id: hal-02923585

<https://hal.science/hal-02923585>

Submitted on 27 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONVERSION DE FRÉQUENCE SENSIBLE À LA PHASE UTILISANT TROIS ONDES POMPES DANS UNE FIBRE OPTIQUE NON-LINÉAIRE

Maxime Baillot, Mathilde Gay, Christophe Peucheret, Michel Joindot, Thierry Chartier

Laboratoire CNRS Foton, Université de Rennes 1, Enssat, F-22305 Lannion, France

thierry.chartier@enssat.fr

RÉSUMÉ

Nous proposons une étude théorique et expérimentale du phénomène de conversion de fréquence sensible à la phase, basé sur le mélange à quatre ondes dans une fibre optique non-linéaire. Nous établissons des relations simples permettant de déterminer facilement les conditions expérimentales permettant la décomposition des composantes en phase et en quadrature d'un signal optique, dans un schéma ne nécessitant que trois ondes pompes.

MOTS-CLEFS : *Mélange à quatre ondes ; conversion de fréquence ; composante en quadrature ; fibres optiques non-linéaires.*

1. INTRODUCTION

Les dispositifs optiques sensibles à la phase du signal suscitent un très grand intérêt grâce notamment à leurs applications potentielles pour le traitement optique du signal pour les systèmes de communication optique. En 2011, R. P. Webb *et al.* ont réalisé un discriminateur de phase à base de mélange à quatre ondes dans un amplificateur à semi-conducteurs [1]. Plus récemment, F. Da Ros *et al.* ont réalisé des expériences similaires dans une fibre optique non-linéaire [2] et un guide optique non-linéaire [3]. Dans tous ces cas, quatre ondes pompes ont été utilisées pour réaliser la conversion de fréquence à base de mélange à quatre ondes ou d'effets non-linéaires du second ordre en cascade. Pour déterminer les valeurs expérimentales des puissances et des phases des ondes pompes permettant le maximum d'efficacité de conversion, une procédure numérique d'optimisation a été implémenté par les auteurs.

A notre connaissance, aucune étude analytique de ce processus de conversion de fréquence sensible à la phase, basé sur le mélange à quatre ondes, n'a été proposée. Dans cette communication, nous proposons un modèle simple permettant de décrire ce phénomène. Nous montrons également que trois pompes suffisent, au lieu des quatre utilisées jusqu'ici. Enfin, nous donnons des relations analytiques simples pour déterminer les conditions expérimentales sur les puissances et les phases des ondes.

2. ÉTUDE THÉORIQUE

Le principe de la conversion de fréquence sensible à la phase dans une fibre optique non-linéaire est présenté sur la figure 1. Quatre ondes pompes cohérentes appelées P1, P3, P5 et P7, séparées du même écart en fréquence $\Delta\omega$, sont injectées dans une fibre optique non-linéaire. Une onde signal, appelée S6, également cohérente avec les ondes pompes, dont la fréquence est équidistante de celles de P5 et P7, est également injectée dans la fibre. En raison du mélange à quatre ondes se produisant dans la fibre optique et en fonction de la phase ϕ_6 du signal S6, un idler I2 ou I4 peut être généré. Par exemple, l'idler I4 est généré pour une phase ϕ_6^0 du signal et l'idler I2 est généré pour $\phi_6^0 + \pi/2$, comme le montre la figure 1. Ce processus permet par exemple la conversion, à différentes longueurs d'onde, des parties réelle et imaginaire (ou composantes en phase et en quadrature) d'un signal optique.

Pour trouver les conditions expérimentales permettant un maximum d'efficacité de conversion sur les deux composantes du signal S6, F. Da Ros *et al.* [2] ont utilisé un programme numérique d'optimisation, basé sur la résolution de l'équation non-linéaire de Schrödinger. Ils ont ainsi pu déterminer les huit conditions initiales pour les pompes (phases et puissances des quatre pompes) et la puissance du signal. Cette étude numérique peut s'avérer consommatrice en termes de temps de calcul et ne garantit pas d'aboutir au jeu de paramètres optimal.

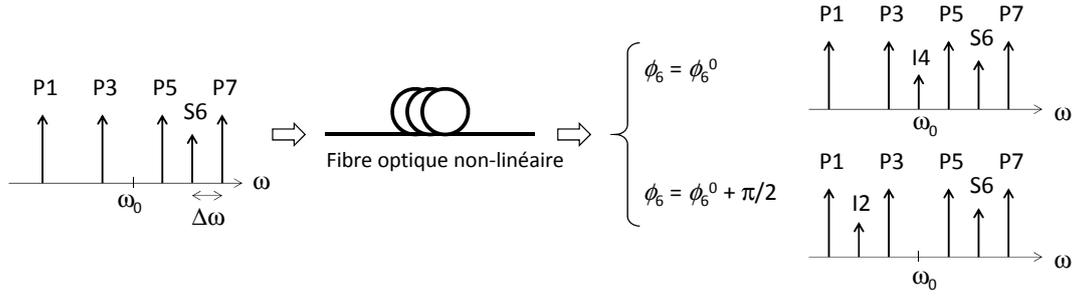


FIGURE 1 : Principe de la conversion de fréquence sensible à la phase dans une fibre optique non-linéaire.

Nous proposons ici une mise en équations du phénomène en utilisant, au départ, un modèle de mélange à quatre ondes impliquant sept ondes [4]. Nous montrons qu'en éliminant la pompe P5, en faisant des approximations usuelles telle que par exemple la non déplétion des ondes pompes et en négligeant la dispersion de la fibre, nous aboutissons aux équations d'évolution suivantes pour les amplitudes lentement variables A_2 et A_4 des idlers I2 et I4 :

$$\frac{dA_2}{dz} = 2i\gamma(A_1A_7A_6^* + A_3A_6A_7^*), \quad (1)$$

$$\frac{dA_4}{dz} = 2i\gamma(A_3A_7A_6^* + A_1A_6A_3^*), \quad (2)$$

où z est la coordonnée longitudinale le long de la fibre, γ le coefficient non-linéaire de la fibre, A_1 , A_3 et A_7 les amplitudes lentement variables des ondes pompes et A_6 l'amplitude lentement variable de l'onde signal. On remarque que les équations d'évolution de chaque idler contiennent deux termes pouvant s'additionner ou se soustraire suivant la valeur de leur phase relative. Il est alors possible de trouver facilement les conditions sur les puissances et les phases des ondes pour que seul l'idler I4 soit généré pour une phase initiale ϕ_6^0 du signal S6 (I2 restant absent) et que seul l'idler I2 soit généré pour une phase initiale $\phi_6^0 + \pi/2$ (I4 restant absent). Ces conditions sont les suivantes :

$$P_1 = P_3 = P_7, \quad (3)$$

$$\phi_1 = 6\phi_6^0 - 5\phi_7 + 2k'\pi, \quad (4)$$

$$\phi_3 = 4\phi_6^0 - 3\phi_7 + (2k + 1)\pi, \quad (5)$$

où $P_i (= |A_i|^2)$ et ϕ_i (avec $i = 1, 3, 7$) sont respectivement les puissances et les phases des ondes pompes. Nous obtenons donc des conditions initiales peu restrictives et très faciles à mettre en œuvre dans une configuration où uniquement trois pompes sont nécessaires.

3. DÉMONSTRATION EXPÉRIMENTALE

Nous générons, à partir d'un peigne de fréquences séparées de 20 GHz et d'un filtre optique programmable, trois ondes pompes et une onde signal dont nous faisons varier indépendamment les puissances et les phases. Leur spectre est représenté sur les figures 2(a)-(b). La fibre optique non-linéaire utilisée, d'une longueur de 500 m, a un coefficient non-linéaire égal à $10.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Sa longueur d'onde de dispersion nulle est 1548 nm et sa pente de dispersion $0.006 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$. Les valeurs initiales des puissances et des phases des ondes pompes et signal que nous avons prises pour la démonstration sont résumées dans le tableau 1.

Les figures 2(a) et 2(b) représentent les spectres en sortie de la fibre non-linéaire pour deux valeurs de la phase ϕ_6 du signal. Pour $\phi_6 = 0$, seul l'idler I4 est généré par effet de mélange à quatre ondes alors que l'idler I2 n'est pas généré. Pour $\phi_6 = \pi/2$, c'est la situation inverse qui se produit. La figure 2(c) représente les variations de puissance des idlers I2 et I4 en fonction de la phase du signal S6 dans le cas

	Pompe P1	Pompe P3	Pompe P7	Signal S6
Puissance (dBm)	3.1	2.8	2.7	2.8
Phase (rad)	0	π	0	-

TABLE 1 : Puissances et phases des ondes pompes et signal à l'entrée de la fibre non-linéaire.

expérimental et dans le cas théorique où nous résolvons le système (1)-(2). Nous démontrons ainsi une mise en œuvre simple de la conversion de fréquence sensible à la phase permettant la décomposition en quadrature d'un signal optique dans un schéma à trois pompes.

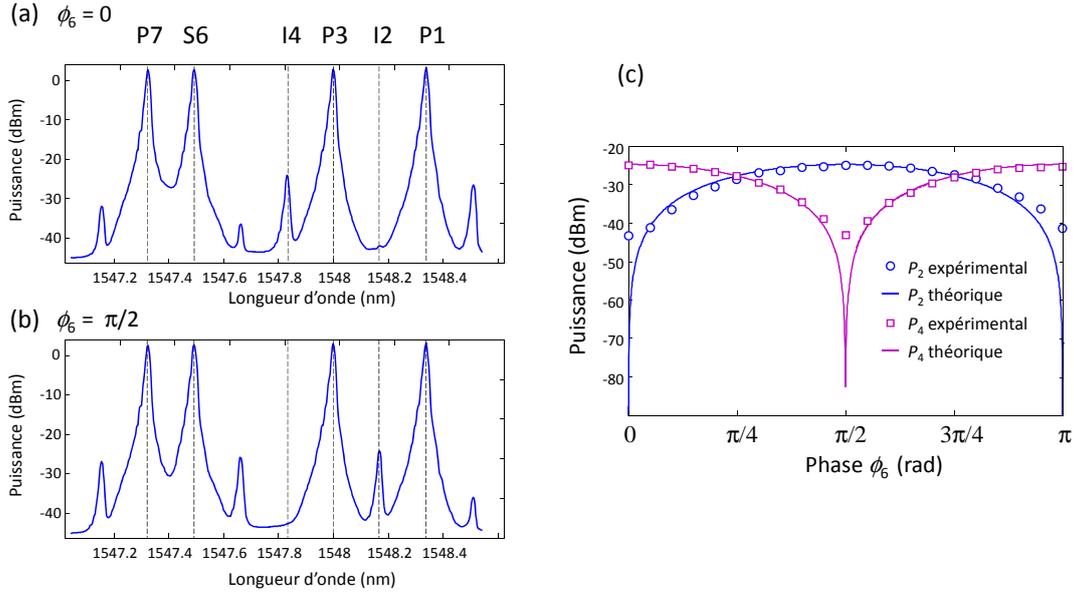


FIGURE 2 : Spectres en sortie de fibre pour $\phi_6 = 0$ (a) et $\phi_6 = \pi/2$ (b). Puissance des idlers en fonction de la phase du signal ϕ_6 (c).

CONCLUSION

Nous avons proposé un modèle simple pour décrire le phénomène de conversion de fréquence sensible à la phase, basé sur le mélange à quatre ondes dans une fibre optique non-linéaire, dans un schéma à trois pompes. Nous avons ainsi pu établir des relations analytiques simples permettant de déterminer les conditions initiales sur les puissances et les phases des ondes pompes. Nous avons fait la démonstration expérimentale du processus de conversion de fréquence en utilisant ces conditions.

RÉFÉRENCES

- [1] R. P. Webb, J. M. Dailey, R. J. Manning, and A. D. Ellis, "Phase discrimination and simultaneous frequency conversion of the orthogonal components of an optical signal by four-wave mixing in an SOA," *Opt. Express* **19**, 20015-20022 (2011).
- [2] F. Da Ros, K. Dalgaard, L. Lei, J. Xu, and C. Peucheret, "QPSK-to-2xBPSK wavelength and modulation format conversion through phase-sensitive four-wave mixing in a highly nonlinear optical fiber," *Opt. Express* **21**, 28743-28750 (2013).
- [3] F. Da Ros, K. Dalgaard, Y. Fukuchi, J. Xu, M. Galili, and C. Peucheret, "Simultaneous QPSK-to-2xBPSK wavelength and modulation format conversion in PPLN," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26**, 1207-1210 (2014).
- [4] M. Baillet, M. Gay, C. Peucheret, M. Joindot, and T. Chartier, "Phase quadrature discrimination based on three-pump four-wave mixing in nonlinear optical fibers," *Opt. Express* **24**, 26930-26941 (2016).