

Filtres de Šolc Hybrides à Cristaux Liquides Accordables Dédies aux Architectures de Télécommunications Optiques

Rachid HAMDJ*, Abdelhak BOUKHAROUBA*, Salah REDADAA*, Ahcene BOUALLEG*, et Badr-Eddine BENKELFAT**

* *Laboratoire d'Automatique et d'Informatique de Guelma, Université de Guelma, Algérie*

rachidahl@yahoo.com

boukharouba_abdelhak@hotmail.com

redasdz@yahoo.fr

bouadzdz@yahoo.fr

** *Institut TELECOM; TELECOM & Management SudParis; CNRS SAMOVAR UMR 5157;
9 rue Charles Fourier, 91011 Evry Cedex, France*

badr-eddine.benkelfat@int-edu.eu

Résumé: Nous démontrons la possibilité de reconfigurer la longueur d'onde centrale d'un filtre de Šolc hybride à cristaux liquides. Nous exposons également une nouvelle technique permettant de reconfigurer sa bande passante à mi-hauteur, autour d'une longueur d'onde particulière. Cette reconfiguration est réalisée au moyen de cellules à cristaux liquides dont la biréfringence varie lorsqu'une tension électrique est appliquée. L'accordabilité de la bande passante est assurée par «annulation optique» d'un certain nombre d'étages de la structure. Nous avons montré que pour un filtre à 10 étages, la bande passante peut varier de 2,6 à 11,8 nm.

Mots clés: Communications optiques, Cristaux liquides, Filtres accordables, Filtres biréfringents.

INTRODUCTION

La recherche de filtres optiques reconfigurables est une préoccupation permanente de la communauté scientifique depuis déjà plusieurs années. En effet, plusieurs technologies ont été développées dans le but de réaliser des filtres optiques dont les paramètres caractéristiques peuvent être accordables [SAD 1998]. La plupart d'entre elles se sont principalement concentrées sur l'accord de la longueur d'onde centrale pour réaliser la fonctionnalité de sélection dynamique de canaux WDM [HIR 1992] [BEN 2004] et la fonctionnalité de source laser accordable [BEN 2005]. En outre, pour des systèmes WDM avec des débits de transmission différents, d'espacements de canaux différents et/ou de formats de modulation différents, les filtres optiques dont les caractéristiques de filtrage peuvent être variables, sont exigés pour optimiser leur fonctionnement [DOW 2003]. Par conséquent, un filtre optique ayant une bande passante accordable est fortement souhaitable pour réaliser différentes fonctionnalités dans les réseaux WDM métropolitains et d'accès. Plusieurs technologies ont

été alors développées. Un filtre à base de réseaux de guides d'ondes (arrayed-waveguide grating, AWG) ayant une bande passante variable (0.3 nm-10.5 nanomètre) a été rapporté [OKA 1995]. Les réseaux de Bragg (fibre bragg grating, FBG) sont couramment employés et ce en raison de leur excellente caractéristique de filtrage en amplitude [DON 2006]. La bande passante de tels filtres optiques peut être ajustée en changeant la position d'une tête thermique [CRU 1997] [NGO 2006]. Un filtre optique à bande passante variable réalisé dans la technologie MEMS a été également rapporté. L'accord de la bande passante est réalisé avec un mouvement de haut en bas de pistons qui font bouger des micro-miroirs [YU 2004]. Un autre filtre à bande passante variable utilisant la technologie des circuits photoniques planaires (planar lightwave circuit, PLC) a été fabriqué [PAW 1996]. Cependant, ce dernier dispositif présente des pertes d'insertion élevées.

Dans cet article, nous allons démontrer le rôle des cellules à cristaux liquides dans l'accordabilité de la longueur d'onde correspondant au maximum de la

fonction de transmission d'un filtre de Šolc hybride à cristaux liquides. Ces cellules serviront également pour ajuster la bande passante du filtre autour de n'importe quelle longueur d'onde accordée.

1. Principe de fonctionnement

La figure 1 illustre le schéma de la structure utilisée pour accorder la longueur d'onde centrale. Il s'agit d'un filtre de Šolc alterné [ŠOL 1965] constitué d'un empilement de N étages hybrides placés entre polariseur (P)/analyseur (A) croisés. Chaque étage hybride est composé d'une lame biréfringente et d'une cellule mince à cristaux liquides (liquid-crystal cell, LCC) dont les axes lent et rapide sont parallèles entre eux. Les axes optiques des étages sont orientés alternativement à $+\alpha$ et $-\alpha$ par rapport à l'axe de transmission du polariseur d'entrée tel que $\alpha = \pi/4N$. Cette valeur de α découle de la condition dynamique relative aux modes orthogonaux TE/TM qui doivent être complètement couplés au niveau de l'analyseur [YAR 1984]. Par conséquent, la fonction de filtrage est obtenue au moyen d'une conversion TE/TM sélective en longueur d'onde. Chaque étage hybride agit donc comme une lame biréfringente demi-onde à la longueur d'onde de fonctionnement appelée ici longueur d'onde centrale.

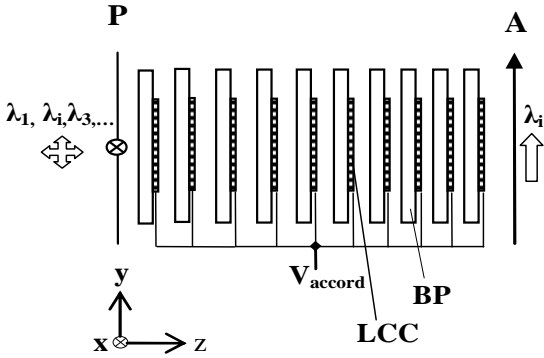


Figure 1. Structure du filtre de Šolc hybride à cristaux liquides constitué de N étages. BP: Lame Biréfringente, LCC: Lame à Cristaux Liquides, V_{accord} : Tension d'accord. P: Polariseur d'entrée, A: Analyseur (Polariseur de sortie)

La fonction de transmission d'un filtre de Šolc alterné peut être calculée en utilisant le formalisme de Jones [YAR 1984] telle que

$$T = \left| \tan(2\alpha) \cos(\chi) \frac{\sin(N\chi)}{\sin \chi} \right|^2 \quad (1)$$

avec

$$\cos \chi = \cos(2\alpha) \sin\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) \quad (2)$$

où Δ représente la différence de marche optique hybride (hybrid optical path difference, HOPD) introduite par un étage du filtre telle que

$$\Delta = \Delta_{\text{BP}} + \Delta_{\text{LCC}} \quad (3)$$

où Δ_{BP} et Δ_{LCC} sont les OPD introduites respectivement par la lame biréfringente et la cellule à cristaux liquides. Celle-ci est utilisée comme un élément d'accord. L'intervalle spectral libre (Free Spectral Range, FSR) du filtre et sa bande passante à mi-hauteur (Full-Width at Half Maximum, FWHM) sont donnés respectivement par [YAR 1984] :

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{\Delta} \quad (4)$$

$$\text{FWHM} = \frac{0.8\lambda^2}{N\Delta} \quad (5)$$

où λ représente la longueur d'onde dans le vide. Les longueurs d'onde λ_i relatives aux maximums de la fonction de transmission satisfont la condition

$$\Delta = (1 + 2k) \frac{\lambda_i}{2} \quad (6)$$

où k est un entier.

2. Principe de l'accordabilité en longueur d'onde

Supposant qu'initialement, la longueur d'onde de fonctionnement $\lambda = \lambda_c$. Le faisceau lumineux incident, dont la polarisation est parallèle à la direction de transmission du polariseur d'entrée, passe par celle-ci, tourne de 90° et par conséquent passe à travers le polariseur de sortie sans atténuation. Si nous nous éloignons de cette longueur d'onde, les étages hybrides ne sont plus demi-ondes et la polarisation devient elliptique. Le faisceau est alors atténué par le polariseur de sortie (Analyseur) et cette atténuation est d'autant plus forte à mesure qu'on s'éloigne de λ_c . Il s'ensuit qu'accorder le dispositif équivaut à corriger cette polarisation elliptique de façon que la transmission du polariseur de sortie soit maximale à $\lambda_i \neq \lambda_c$. Cette accordabilité des maximums de la fonction de transmission du filtre est assurée par l'application d'une tension électrique aux LCC. Ceci a pour effet de reconfigurer la biréfringence introduite par chaque étage du dispositif.

La figure 2 représente l'évolution mesurée de la différence de marche optique Δ_{LCC} de la cellule à cristaux liquides (Cristal Liquide nématique E63 de E. Merck Chemicals, Allemagne) pour différentes valeurs de la tension V_{LCC} appliquée (signal carré de fréquence 10 kHz). Ces mesures sont utilisées comme données d'entrées lors de la modélisation de l'accordabilité de la longueur d'onde centrale ou celle de la bande passante à mi-hauteur.

L'accordabilité continue du dispositif est assurée par la LCC dont la Δ_{LCC} varie de la valeur D_{max} à D_{min} quand la tension appliquée V_{LCC} augmente de la valeur V_{min} à V_{max} . Quand V_{LCC} varie entre 2 V et 14 V, la LCC opère en régime quasi-linéaire. Alors sa biréfringence est linéaire en fonction de la tension appliquée et son OPD peut être approchée par,

$$\Delta_{LCC} = \beta \cdot V_{LCC} \quad (7)$$

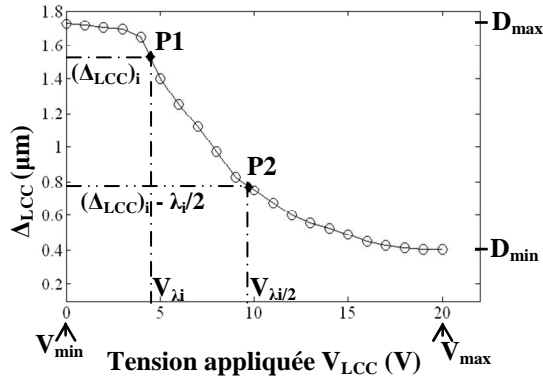


Figure 2. Evolution mesurée de la différence de marche optique Δ_{LCC} de la cellule à cristaux liquides en fonction de la tension appliquée.

où β (en $\mu\text{m}/\text{V}$) est la pente dans la région linéaire de la courbe de la biréfringence en fonction de la tension appliquée.

La plage d'accord (tuning range, $\delta\lambda$) est une fonction linéaire de la variation $\delta(\Delta_{LCC})$ de la différence de marche optique introduite par la section active du dispositif [BEN 2004] [BEN 2005] telle que

$$\delta\lambda = \frac{\text{FSR}}{\lambda} \cdot \delta(\Delta_{LCC}) \quad (8)$$

La figure 3 illustre le résultat de simulation de l'accordabilité en longueur d'onde d'un filtre à dix étages. Quand la tension appliquée augmente et atteint la valeur V_{λ_i} , alors $\Delta_{LCC} = (\Delta_{LCC})_i$. Le pic d'ordre $(2k+1)$, où k est un entier, se déplace vers les petites longueurs d'onde sans variation du FSR tel que,

$$\lambda_i = \lambda_c + \alpha \cdot V_{LCC} \quad (9)$$

où α représente le taux d'accord exprimé en nm/V . On note que les tensions de fonctionnement découlent de la relation

$$\alpha = \frac{\delta\lambda}{\delta V_{LCC}} = \frac{\beta}{k} \quad (10)$$

et par conséquent, la plage d'accord $\delta\lambda$ est limitée par les caractéristiques électrooptiques des LCCs. Cependant, quand $V_{LCC} > 14$ V, on n'est plus dans le régime linéaire, et le pic d'ordre $(2k+1)$ s'immobilise et cesse de se déplacer vers les petites longueurs d'onde indiquant alors la limite de l'accordabilité.

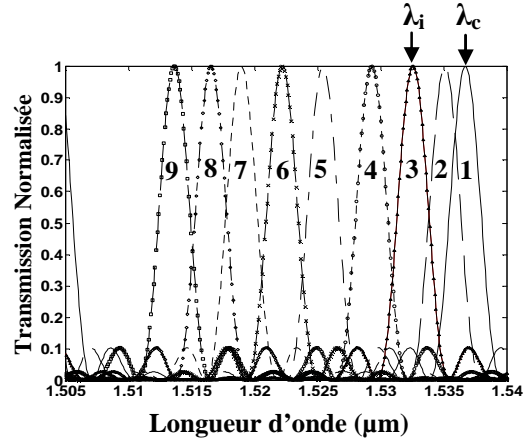


Figure 3. Accordabilité calculée de la longueur d'onde centrale d'un filtre de Šolc à 10 étages pour des tensions d'accord V_{accord} 1: 1.536 μm , 2 V; 2: 1.535 μm , 4 V; 3: 1.532 μm , 4.5 V; 4: 1.529 μm , 5 V; 5: 1.525 μm , 6.5 V; 6: 1.522 μm , 7.5 V; 7: 1.519 μm , 8.5 V; 8: 1.516 μm , 9.5 V; 9: 1.513 μm , 12 V.

La figure 4 illustre la caractérisation expérimentale de l'accordabilité en longueur d'onde d'un filtre à dix étages. Chaque étage est constitué d'une lame de calcite avec une biréfringence $\delta n_{BP} = 0,156$ (à $\lambda = 1,55$ μm) et une épaisseur géométrique $e_{BP} = 447$ μm , et d'une lame à cristaux liquides en phase nématique ayant une biréfringence maximale $\delta n_{LCC} \sim 0,2$ (à $\lambda = 1,55$ μm) et une épaisseur géométrique $e_{LCC} = 7$ μm .

Comme le FSR ne dépend pas du nombre d'étages mais plutôt de la différence de marche optique hybride Δ , il est égale dans ce cas à $\text{FSR} = 34$ nm. La plage d'accord théorique disponible est par conséquent évaluée à $\delta\lambda \sim 34$ nm. La bande passante FWHM vaut 2,7 nm. L'accordabilité continue du filtre à 10 étages est obtenue avec une OPD de la cellule à cristaux liquides telle que 0.412 $\mu\text{m} \leq \Delta_{LCC} \leq 1.725$ μm pour une tension appliquée $2 \leq V_{LCC} \leq 14$ V. Quand la tension d'accord V_{LCC} augmente, le maximum de la fonction de filtrage se déplace vers les petites longueurs d'onde sans variation du FSR qui est égale à environ 34 nm (Cf. figure 4).

Un taux d'accord $\alpha \sim 3$ nm/V peut être obtenu avec $\beta = 0.137$ $\mu\text{m}/\text{V}$. La valeur mesurée de α est de ~ 2.41 nm/V et celle de la plage d'accord est $\delta\lambda \sim 29$ nm. L'écart avec la valeur théorique (34 nm) est dû au fait que le point de fonctionnement ne se situerait pas sur la partie linéaire de la caractéristique optique des lames à cristaux liquides.

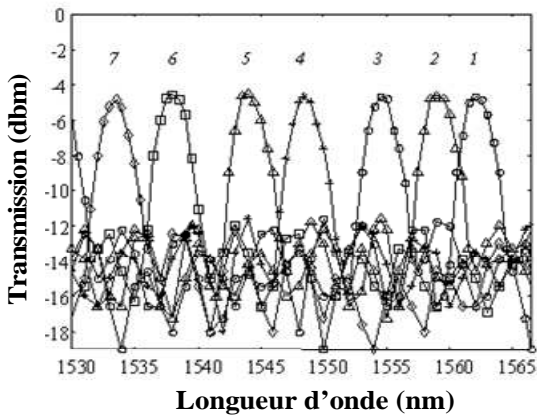


Figure 4. Test d'accordabilité en longueur d'onde du filtre à 10 étages

3. Principe de l'accordabilité de la bande passante

Dans le but d'accorder la FWHM autour de n'importe quelle longueur d'onde λ_i qui vérifie l'équation (9) dans la bande utile, nous pouvons faire varier dans (5) le nombre d'étage N par ce que nous avons appelé « l'annulation optique » des étages biréfringents. Il s'agit de transformer M étages hybrides demi-ondes (M paire et $M \leq (N-2)$) en lames biréfringentes ondes à la longueur d'onde λ_i . Evidemment, les $(N-M)$ étages restants agissent en lames demi-ondes à λ_i . En plus, il est nécessaire d'ajuster leur angle α à $\pi/4(N-M)$ pour assurer un couplage à 100% entre les modes orthogonaux au niveau du polariseur de sortie. La nouvelle configuration engendrée est équivalente à un filtre Šolc alterné composé de $(N-M)$ étages. Il est intéressant de noter que quoique le processus de l'annulation optique soit complètement réalisé pour λ_i , un soin particulier doit être accordé aux autres longueurs d'onde. En particulier, quand les M étages hybrides sont ondes à la longueur d'onde centrale λ_i , ils sont demi-onde à une autre longueur d'onde λ_1 . En plus, les états de polarisation de λ_i et λ_1 sont orthogonaux au niveau de l'entrée des M étages optiquement annulés. Dans le but de stopper cette dernière longueur d'onde avec un maximum de contraste après être passée à travers les M étages, sa polarisation doit être perpendiculaire à l'axe de transmission du polariseur de sortie. Ceci est réalisé par la rotation des M étages annulés de telle sorte que leurs axes principaux soient soit parallèles à l'axe de transmission du polariseur d'entrée, soit orientés alternativement à un angle $+\pi/4$ et $-\pi/4$ par rapport à ce dernier.

Afin de transformer un étage hybride en une lame onde à λ_i , selon les équations (3) et (6), une valeur de $\lambda_i/2$ doit être ajoutée à l'HOPD qui devient alors

$$\Delta = 2 \cdot k \cdot \lambda_i \quad (11)$$

où k est un entier. Ceci est obtenu en ajustant la tension appliquée aux M cellules à cristaux liquides de telle manière que leur OPD bascule entre les

valeurs $\Delta_{LCC} = (\Delta_{LCC})_i$ et $\Delta_{LCC} = (\Delta_{LCC})_i - \lambda_i/2$ et se déplace du point (P1) au point (P2) sur la courbe de la figure 2. Il est bon de noter que comme

$$(\Delta_{LCC})_i - \frac{\lambda_i}{2} \gg D_{\min} \quad (12)$$

le processus d'accordabilité de la FWHM peut être effectué autour de n'importe quelle longueur d'onde dans la plage d'accord $\delta\lambda$.

4. Exemple de filtre hybride à 10 étages accordable en bande passante

Dans cette partie, nous allons montrer la faisabilité de la technique de l'annulation optique par la simulation d'un filtre de Šolc hybride à 10 étages. La structure est modélisée en utilisant des lames biréfringentes commerciales ainsi que les données expérimentales relatives au cristal liquide de la figure 2. Chaque lame de calcite a une biréfringence de 0.156 (à $\lambda=1.550 \mu\text{m}$) et une épaisseur géométrique de $447 \mu\text{m}$. Elle est couplée à une cellule à cristaux liquides d'épaisseur $7.5 \mu\text{m}$ dont l'OPD varie de $D_{\max} = 1.725 \mu\text{m}$ à $D_{\min} = 0.412 \mu\text{m}$ quand la valeur crête à crête de la tension appliquée V_{LCC} augmente de $V_{\min} = 0$ à $V_{\max} = 20 \text{ V}$ (Cf. figure 2) [BEN 2004]. Quand V_{LCC} atteint $V_{\lambda_i} = 4.5 \text{ V}$, alors $\Delta_{LCC} = (\Delta_{LCC})_i = 1.532 \mu\text{m}$ ce qui donne une HOPD de $71.264 \mu\text{m}$. Ces lames hybrides sont demi-ondes à $\lambda_i = 1.532 \mu\text{m}$ et ondes à $\lambda_1 = 1.549 \mu\text{m}$. Par ailleurs, durant le processus de l'accordabilité de la FWHM autour λ_i , la HOPD des deux premières lames hybrides demi-ondes ne change pas. La tension appliquée correspondante demeure fixe et égale à V_{λ_i} .

Le processus de l'annulation optique des M étages hybrides ($M \leq 8$) est réalisé à l'aides des LCC dont l'OPD commute entre deux valeurs $(\Delta_{LCC})_i = 1.532 \mu\text{m}$ et $(\Delta_{LCC})_i - \lambda_i/2 = 0.766 \mu\text{m}$ quand la tension d'accord appliquée commute respectivement entre $V_{\lambda_i} = 4.5 \text{ V}$ et $V_{\lambda_i/2} = 9.7 \text{ V}$ (Cf. figure 2).

La figure 5 illustre la variation calculée de la FWHM en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs du nombre M d'étages annulés. Quand la tension V_{λ_i} est appliquée au huit LCC, leurs OPD sont égales à $\Delta_{LCC} = (\Delta_{LCC})_i$. Alors, les HOPDs des huit étages hybrides sont conformément à l'équation (3) égales à $\Delta = (1+2k) \cdot \lambda_i/2$ où k est un entier. Par conséquent, ces étages hybrides sont demi-ondes à λ_i et aucun d'entre eux n'est annulé optiquement par rapport à la longueur d'onde centrale

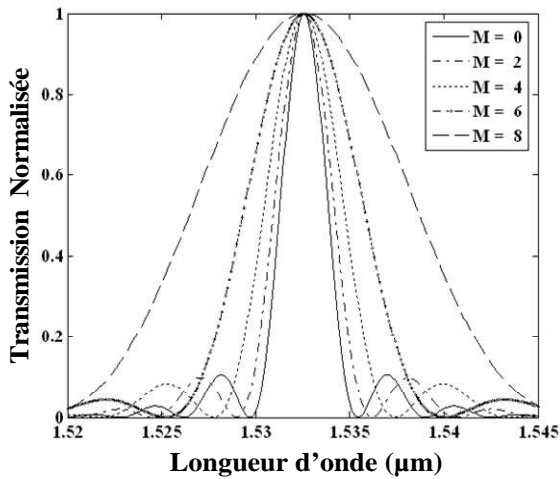


Figure 5. Variation de la FWHM en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs du nombre d'étages M annulés optiquement. Cas des polariseurs croisés.

λ_i ($M = 0$). Le résultat est équivalent à la transmittance d'un filtre Šolc alterné classique à 10 étages avec une FWHM de 2.6 nm (ligne continue sur la figure 5). Si la tension $V_{\lambda_i/2}$ est appliqué à ces huit LCC, leurs OPDs sont égales à $\Delta_{LCC} = (\Delta_{LCC})_i - \lambda_i/2$. Les HOPDs des huit étages hybrides sont telles que $\Delta = 2 \cdot k \cdot \lambda_i$ où k est un entier. Cela signifie que les huit étages hybrides deviennent ondes à λ_i et sont optiquement annulés par rapport à λ_i ($M = 8$). La structure résultante est équivalente à un filtre Šolc alterné à deux étages.

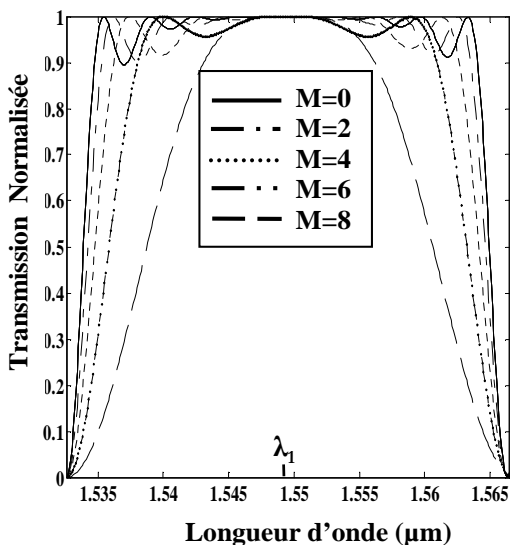


Figure 6. Variation de la FWHM en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs du nombre d'étages M annulés optiquement. Cas des polariseurs parallèles. La longueur d'onde centrale est $\lambda_1 = 1.549 \mu\text{m}$

La FWHM correspondante est par conséquent élargie à son maximum et est égale à 11.8 nm (ligne en pointillée sur la figure 5). Maintenant, si nous voulons avoir des valeurs intermédiaires pour la bande passante à mi-hauteur, nous pouvons annuler optiquement 2, 4 et 6 étages hybrides ce qui donne

respectivement une FWHM de 3.2, 4.2 et 6.4 nm.

Par ailleurs, quand les deux polariseurs sont parallèles entre eux, nous pouvons analyser le comportement de cette structure à la longueur d'onde $\lambda_1 = 1.549 \mu\text{m}$. La variation de la FWHM autour de cette longueur d'onde pour différentes valeurs du nombre M est illustrée sur la figure 6. Les réponses en transmission présentent un profil relativement plat (flat top en anglais).

Sur les figures 7 et 8, nous faisons une comparaison entre la technique proposée ici pour accorder la bande passante à mi-hauteur et les résultats concernant les configurations équivalentes de Šolc classiques avec un nombre d'étages variable (voir l'équation 5). La configuration de Šolc permet d'avoir un bon compromis entre le nombre d'étages utilisés, le profil de la réponse et le contraste. Sur la figure 7, nous avons représenté l'évolution de la FWHM en fonction du nombre M qui varie de 0 à 8. Le nombre d'étages dans la configuration classique équivalente de Šolc est alors $(N-M)$ et varie de 10 à 2. Comme nous pouvons le voir, la FWHM augmente au fur et à mesure que M augmente. A l'exception de la légère différence due au fait que les étages ne sont ondes qu'à λ_i , les deux courbes présentent une allure identique. La figure 8 montre que durant le processus de variation de M , le contraste demeure identique à celui correspondant au filtre de Šolc classique équivalent avec respectivement 10, 8, 6, 4 et 2 lamelles biréfringentes. Par ailleurs, comme le nombre d'étages biréfringents ne change pas physiquement durant le processus d'accordabilité de la FWHM, les pertes d'insertion demeurent constantes et correspondent à celles de la structure avec l'empilement de N lamelles biréfringentes.

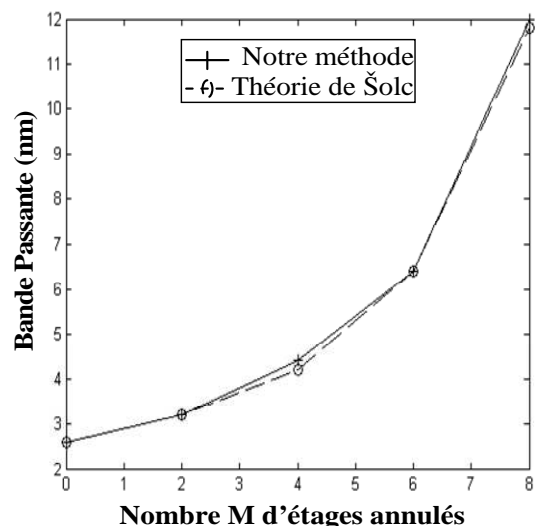


Figure 7. Evolution de la FWHM en fonction du nombre M qui varie de 0 à 8. Le nombre d'étages dans la configuration de Šolc classique équivalente varie alors de 10 à 2. La longueur d'onde centrale est $\lambda_i = 1.532 \mu\text{m}$

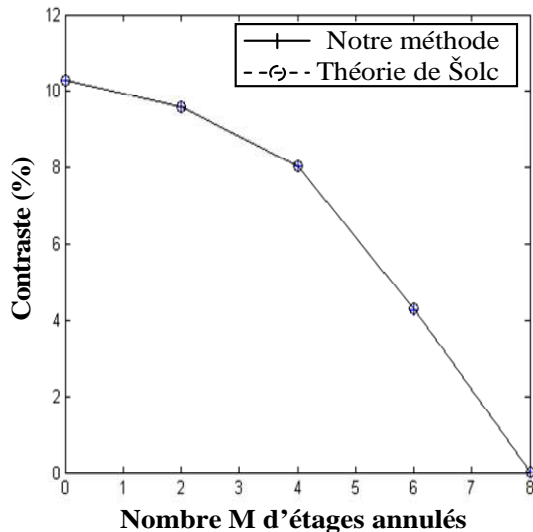


Figure 8. Evolution du contraste en % du maximum de la transmission du filtre pour différentes valeurs du nombre d'étages M annulés optiquement comparé à celui de la configuration de Šolc classique équivalente. La longueur d'onde centrale est $\lambda_i = 1.532 \mu\text{m}$.

5. Conclusion

Nous avons démontré la possibilité de reconfigurer la longueur d'onde centrale d'un filtre de Šolc hybride à cristaux liquides ainsi que sa bande passante à mi-hauteur, autour d'une longueur d'onde particulière. Cette reconfiguration est réalisée au moyen de cellules à cristaux liquides dont la biréfringence varie lorsqu'une tension électrique est appliquée. Nous avons montré que pour un filtre à 10 étages, la bande passante peut varier de 2,6 à 11,8 nm. Le contraste demeure identique à celui du filtre de Šolc classique équivalent. Ceci représente, à notre connaissance, la première technique d'accordabilité de bande passante reportée pour les filtres biréfringents.

Référence

- [BEN 2004] BADR-EDDINE BENKELFAT, QIN ZOU, AND BRUNO VINOUEZE, "Low-voltage continuous tunable hybrid filter for tailored optical-bandwidth operation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol 16, pp. 1098-1100, 2004.
- [BEN 2005] B.-E. BENKELFAT, Y. GOTTESMAN, R. HAMDI, AND M. CHEIKH-BLED, "Continuously tunable single-frequency fiber laser based on novel hybrid Šolc filter", in *Photonic Materials, Proceeding of SPIE*, Vol 5840, pp. 774-780, 2005.
- [CRU 1997] J.L. CRUZ, A. DIEZ, M.V. ANDRES, A. SEGURA, B. ORTEGA, L. DONG, "Fibre Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields", *Electron. Lett.*, Vol 33, pp. 235-236, 1997.
- [DON 2006] XINYONG DONG, P. SHUM, XIUFENG YANG, M.F. LIM AND C.C. CHAN,

"Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter with chirped-fiber Bragg gratings", *Opt. Commun.*, Vol 259, pp. 645-648, 2006.

[DOW 2003] J.D. DOWNIE, AND A. BOH RUFFIN, "Analysis of signal distortion and crosstalk penalties induced by optical filters in optical networks", *J. Lightwave Technol.*, Vol 21, pp. 1876-1886, 2003.

[HIR 1992] K. HIRABAYASHI, AND T. KUROKAWA, "A tunable polarization-independent liquid-crystal Fabry-Perot interferometer filter", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol 4, pp. 740-742, 1992.

[NGO 2006] N.Q. NGO, S.Y. LI, L.N. BINH AND S.C. TJIN, "A phase-shifted linearly chirped fiber Bragg grating with tunable bandwidth", *Opt. Commun.*, Vol 260, pp. 438-442, 2006.

[OKA 1995] K. OKAMOTO, M. ISHII, Y. HIBINO AND Y. OHMORI, "Fabrication of variable bandwidth filters using arrayed-waveguide gratings", *Electron. Lett.*, Vol 31, pp. 1592-1594, 1995.

[PAW 1996] E. PAWLOWSKI, K. TAKIGUCHI, M. OKUNO, K. SASAYAMA, A. HIMENO, K. OKAMOTO AND Y. OHMORI, "Variable bandwidth and tunable centre frequency filter using transversal-form programmable optical filter", *Electron. Lett.*, Vol 32, pp. 113-114, 1996.

[SAD 1998] D. SADOT AND E. BOIMOVICH, "Tunable Optical Filters for Dense WDM Networks", *IEEE Commun. Mag.* Vol 36, pp. 50-55, 1998.

[SOL 1965] I. ŠOLC, "Birefringent chain filters", *J. Opt. Soc. of Am.*, Vol 55, pp. 621-625, 1965.

[YAR 1984] A. YARIV AND P. YEH, "Optical waves in crystals propagation and control of laser radiation", Wiley, New York, 1984.

[YU 2004] KYOUNGSIK YU; SOLGAARD, O., "Tunable Optical Transversal Filters Based on a Gires-Tournois Interferometer With MEMS Phase Shifters", *J. of Selec. Top. in Quant. Elect.*, Vol 10, pp. 588-597, 2004.