
Syntonisation de cavités laser avec un réseau à pas variable

M. Duval, G. Fortin, V. Zambon, N. McCarthy et M. Piché

Département de physique, de génie physique et d'optique,
Centre d'optique, photonique et lasers (COPL)
Université Laval, Québec, Qc, Canada, G1K 7P4



Les 15 ans du COPL
7 juin 2004



Introduction

- Les lasers accordables trouvent de multiples applications dans les domaines des communications optiques, de la spectroscopie, de la métrologie, de la télédétection et des télécommunications.
- On souhaite que ces lasers présentent une large plage continue d'accordabilité en longueur d'onde et une émission monomode à raie spectrale étroite.
- À l'heure actuelle, plusieurs types de lasers présentent des propriétés d'accordabilité; citons
 - les lasers à colorant,
 - les lasers à l'état solide,
 - les lasers à semi-conducteurs et
 - les lasers à fibre.

Lasers accordables typiques ...

- Les **lasers à colorant** typiques peuvent être accordés sur une plage de longueur d'onde d'environ 30 à 40 nm [1]. En changeant de type de colorant, un même laser peut être opéré sur diverses plages de longueur d'onde. La syntonisation se fait à l'aide d'éléments dispersifs tels des prismes, des réseaux de diffraction et des lames biréfringentes. L'utilisation de plusieurs éléments dispersifs dans une cavité en anneau permet d'obtenir une émission monomode longitudinale très étroite.
- Les **lasers à l'état solide** accordables comportant les caractéristiques les plus intéressantes sont le laser à alexandrite ($\text{Cr:BeAl}_2\text{O}_4$), le laser à saphir dopé au titane ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$), les lasers au fluorure dopés au chrome (Cr:LiSAF , Cr:LiSGAF ou Cr:LiCaF) et le Cr:YAG .
 - laser à l'alexandrite accordable de 700 à 820 nm
 - laser à saphir accordable de 660 à 1170 nm [2,3]
 - lasers au fluorure accordables
 - de 780 à 1000 nm pour le laser Cr:LiSAF [4],
 - de 720 à 840 nm pour le laser Cr:LiCaF [5].
 - laser Cr:YAG accordable de 1335 à 1635 nm.
- Dans les **lasers à rétroaction distribuée**, la réflexion de Bragg le long du réseau inscrit dans la structure même du milieu de gain du laser conduit à une rétroaction très sélective en longueur d'onde. La longueur d'onde peut être accordée très précisément par le contrôle de la température du milieu de gain, ce qui ne permet d'obtenir qu'une plage d'accord de 2 à 4 nanomètres.

... lasers accordables typiques

- Les **lasers à fibre dopée à l'erbium** ont une longueur d'onde d'émission comprise entre 1500 et 1620 nm [6]. Ces lasers sont surtout utilisés pour les télécommunications. On les accorde avec des filtres interférentiels.

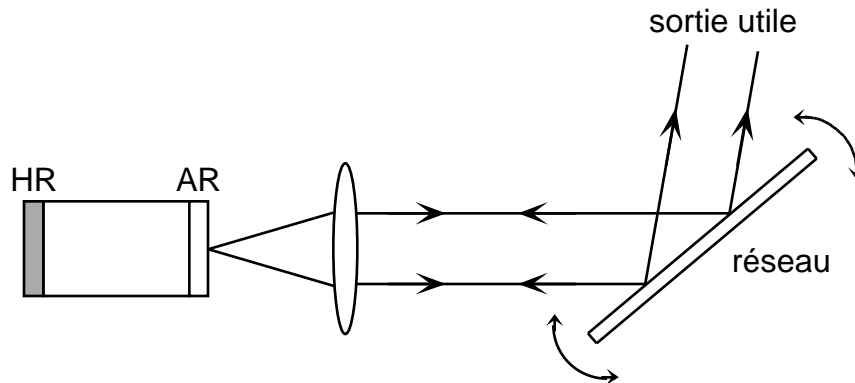
* * *

- Les **diodes laser en cavité externe** démontrent des performances parmi les meilleures en ce qui a trait à la plage d'accordabilité, à la puissance de sortie, à la faible largeur de raie et au faible niveau de bruit.
- Elles sont très avantageuses si on les compare par exemple aux lasers à colorant dont la grande taille et la complexité en réduisent l'intérêt.
- L'utilisation d'une diode laser avec une cavité externe permet de rendre la longueur d'onde accordable par l'ajout d'un élément dispersif et d'obtenir un affinement de la largeur de raie dû à l'allongement de la cavité résonante.
- De plus, la combinaison d'une diode laser et d'une cavité externe permet une grande flexibilité dans le choix des paramètres et des caractéristiques d'émission et d'accordabilité.

Configurations de cavités externes ...

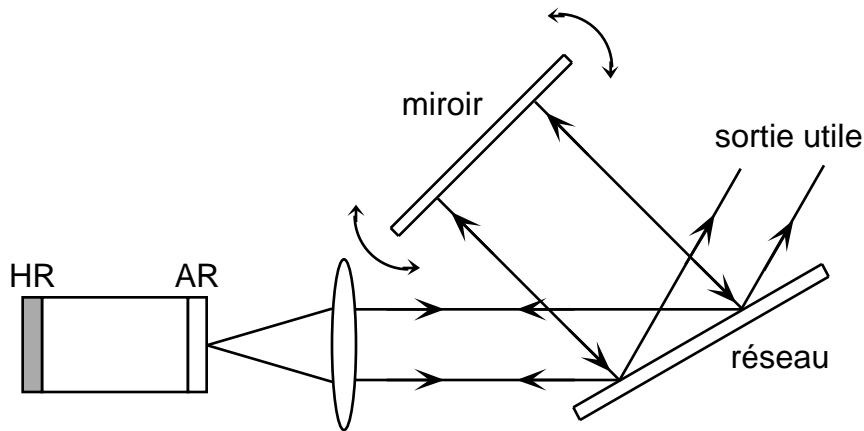
- Les composantes qui constituent un laser en cavité externe typique sont un milieu amplificateur, une cavité résonante, un élément sélectif en longueur d'onde et, souvent, une ou des lentilles.
- Dans le cas d'une **diode laser** en cavité externe, la face intracavité de la diode doit être recouverte d'une couche antiréfléchissante; la diode laser agit alors comme milieu amplificateur.
- La plupart des lasers en cavité externe utilisent un **réseau de diffraction** comme élément sélectif en longueur d'onde. La longueur d'onde qui est recouplée le plus efficacement dans l'axe de la cavité laser s'empare d'une large fraction du gain et domine en puissance.
- Certaines configurations de cavités externes utilisent, en plus du réseau de diffraction, d'autres éléments comme un étalon ou des prismes afin d'augmenter la sélectivité spectrale.
- Les deux configurations les plus répandues de lasers utilisant un réseau en cavité externe sont la **configuration de Littrow** [7, 8] et la **configuration de Littman/Metcalf** [9, 10]. Un exemple de diode laser dans chacune de ces configurations est montré ci-après.

... cavités externes (configuration de Littrow) ...



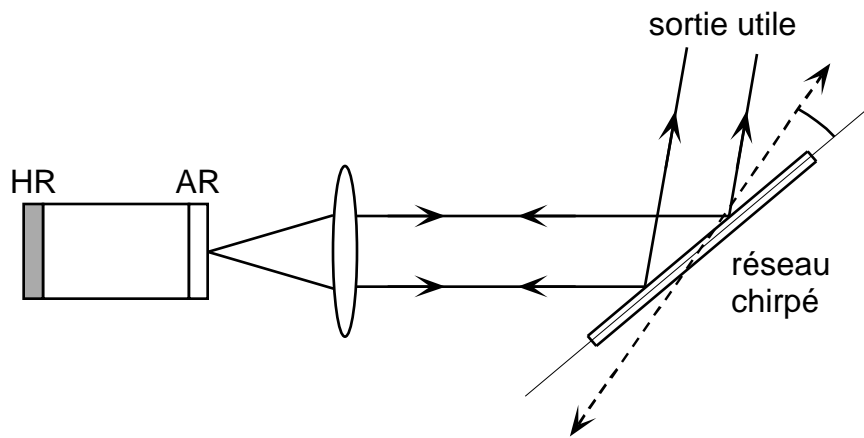
- Le faisceau est réfléchi partiellement à l'ordre 0 (réflexion spéculaire), tandis qu'une autre partie est réfléchi à l'ordre -1, en direction de la diode laser.
 - Condition de **Littrow**: l'angle d'incidence est choisi de façon à ce que la direction de l'ordre -1 soit exactement anti-parallèle à la direction du faisceau incident.
-
- Le faisceau à l'**ordre 0** constitue la sortie utile alors que le faisceau réinjecté dans le laser (**ordre -1**) favorise l'établissement d'un mode longitudinal dominant.
 - L'accord en longueur d'onde d'un laser en configuration de Littrow est généralement obtenu par une rotation du réseau. Il est possible de choisir un point de pivot distant du réseau de manière à obtenir une accordabilité continue [11], c'est-à-dire sans saut de mode.
 - Le principal désavantage de la méthode d'accord par rotation du réseau est que l'angle du faisceau de sortie (ordre 0) change à mesure que le réseau est tourné.
 - On peut sortir le faisceau par la face arrière mais avec une perte d'efficacité.

... cavités externes (configuration de Littman/Metcalf)



- La partie du faisceau réfléchi à l'ordre 0 du réseau constitue la sortie utile du laser, tandis que l'autre partie est diffractée à l'ordre -1 vers le miroir.
 - La lumière incidente sur le miroir est rétro-réfléchi vers le réseau qui la redirige vers la diode laser.
- L'accord s'effectue par une rotation du miroir autour d'un point de rotation fixe, le réseau demeurant alors immobile.
 - Avantages:
 - angle constant du faisceau de sortie (ordre 0) lors de l'accord en λ ,
 - meilleure sélection spectrale à cause des deux réflexions sur le réseau.
 - Désavantages:
 - les trois réflexions entraînent des pertes dans la cavité résonante,
 - ceci limite la plage d'accordabilité et la puissance de sortie,
 - l'alignement est plus critique que dans la configuration de Littrow.

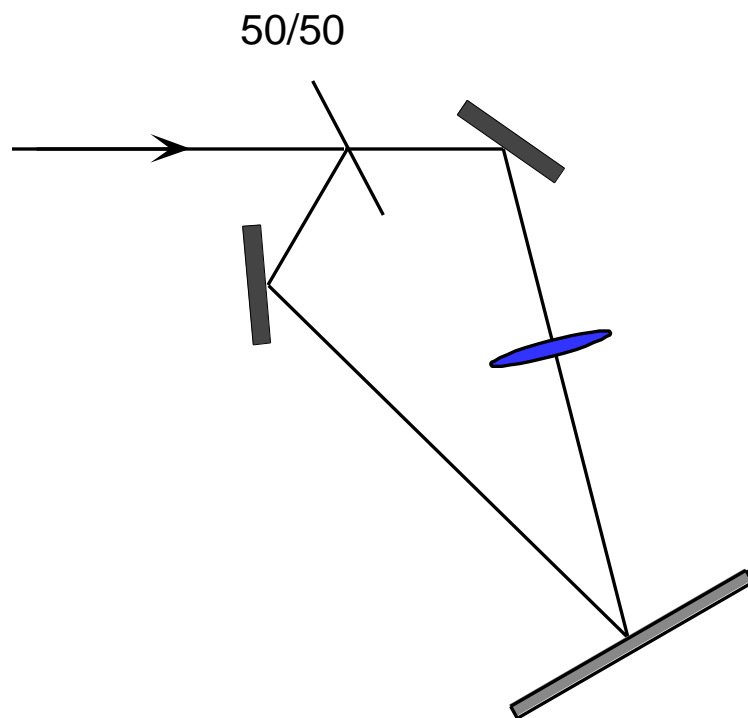
Nouveau schéma de laser accordable



- Les **réseaux "chirpés"** (réseaux avec un pas qui varie le long de la surface) que nous avons réalisés ont permis de mettre au point une nouvelle méthode d'accord de la longueur d'onde utilisant la configuration de Littrow.
- L'accord en longueur d'onde peut alors s'effectuer par une simple translation du réseau plutôt que par une rotation.
- La translation du réseau à pas "chirpé" permet de conserver un angle constant pour le faisceau de sortie.
- Idéalement, l'axe de translation doit être choisi de manière à respecter certaines conditions de focalisation; il comporte une composante principale parallèle au gradient du pas et une composante secondaire le long de la normale du réseau.
- Le **pas (ou période) du réseau** est le paramètre Λ .

Réseaux à pas variable ...

- Nous avons développé une technique de fabrication de **réseau "chirpé"** dans nos laboratoires.
- Cette technique est basée sur une méthode holographique impliquant l'interférence de deux faisceaux gaussiens cohérents sur un substrat recouvert d'une couche de résine photosensible [12, 13].



- Le **"chirp"** (ou la variation spatiale du pas) est induit en imposant une courbure supplémentaire au front d'onde d'un des deux faisceaux d'écriture.
- Sans la lentille (sans chirp), le pas est donné par

$$p(x) = \frac{\lambda_e}{2 \sin \theta_e}$$

λ_e : longueur d'onde d'écriture

$2 \theta_e$: angle entre les faisceaux d'écriture

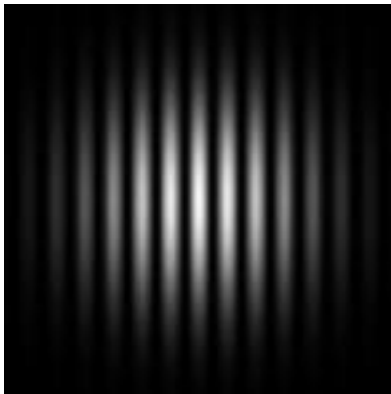
x : position sur le réseau

... réseaux à pas variable

- La figure d'interférence produite par les deux faisceaux est transformée en un relief correspondant, après développement de la résine. Les figures d'interférence sont montrées ci-dessous.

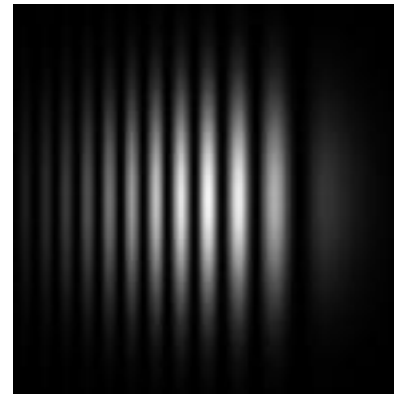
avec un pas constant

(obtenu avec des faisceaux d'écriture de rayons de courbure égaux)



avec un pas variable

(obtenu avec des faisceaux d'écriture de rayons de courbure différents)



- Avec la lentille (avec chirp), le pas (x) est donné par

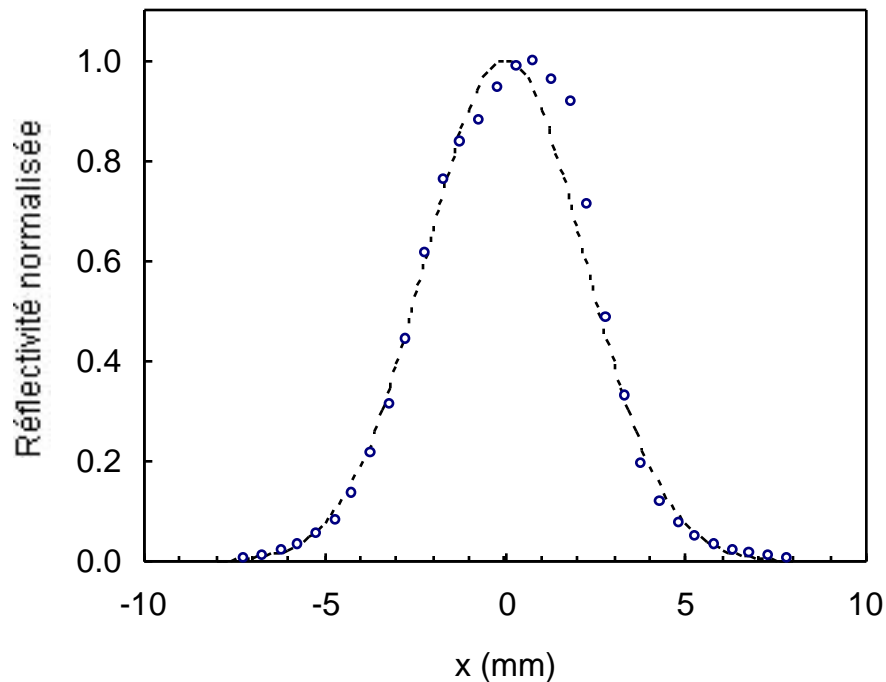
$$(x) = e \left| \frac{1}{R_{e1}} - \frac{1}{R_{e2}} x \cos^2 e - 2 \sin e \right|^{-1}$$

R_{e1} et R_{e2} : rayons de courbure des deux faisceaux d'écriture

Caractérisation des réseaux à pas variable ...

Profil de réflectivité dans l'ordre -1

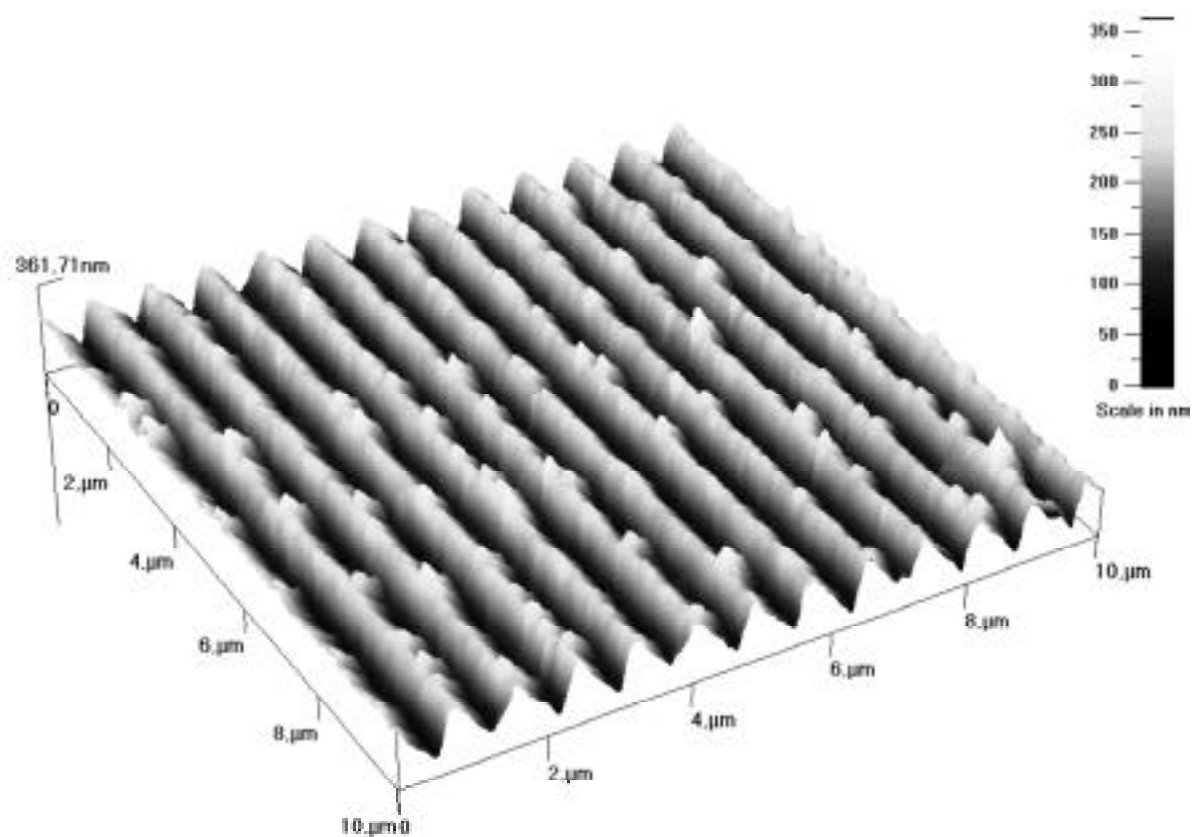
- Les réseaux à pas variable que nous avons fabriqués ont été caractérisés aux longueurs d'onde de 633, 675 et 840 nm.
- Les profils de réflectivité obtenus dans l'ordre -1 sont des fonctions gaussiennes, reflétant le profil des faisceaux d'écriture. Courbe gaussienne en pointillé.



... caractérisation des réseaux à pas variable ...

Mesure du pas du réseau $\Lambda(x)$ par AFM

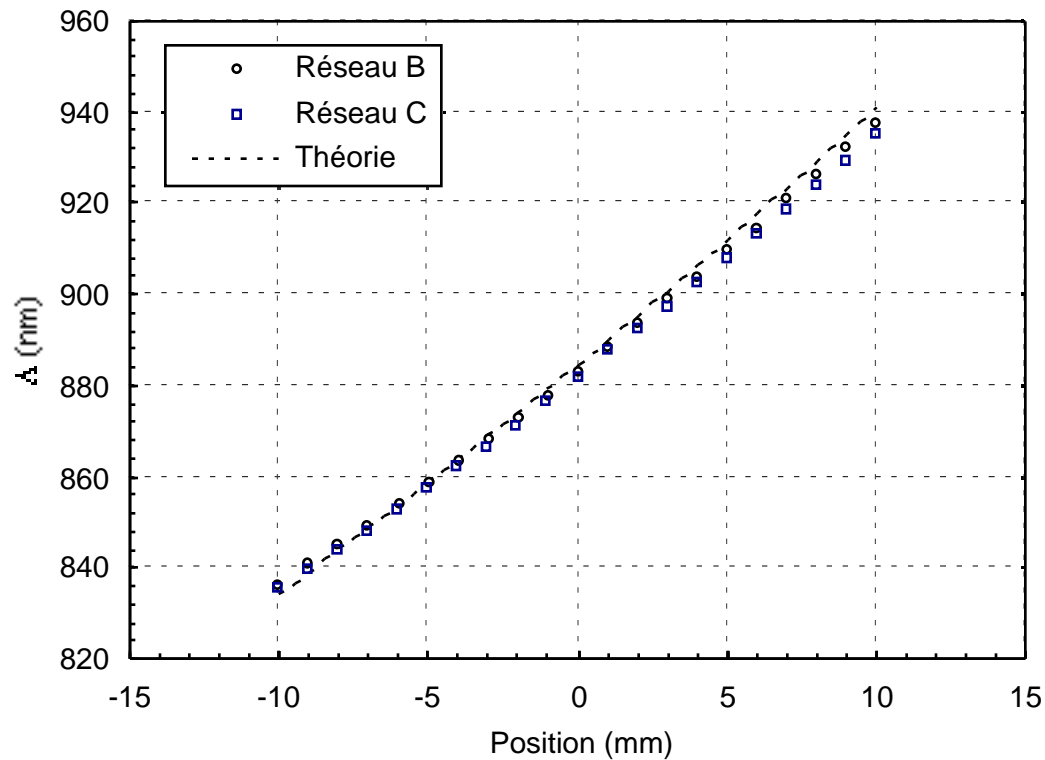
- La surface des réseaux a été imagée avec un microscope à force atomique.



... caractérisation des réseaux à pas variable

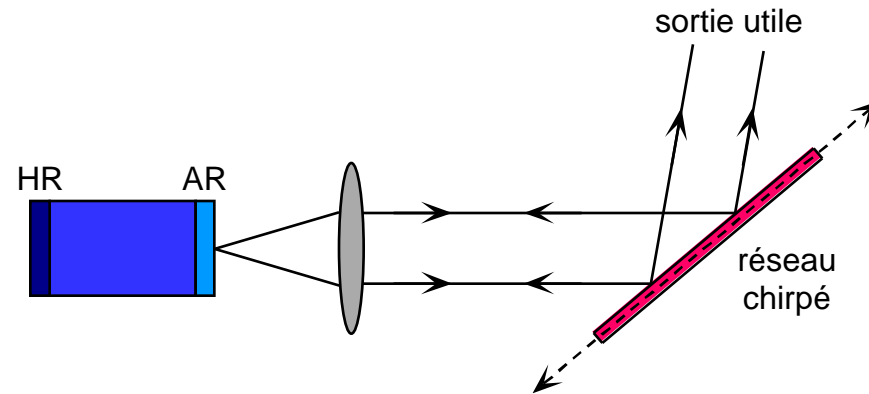
Mesure du pas du réseau $\Lambda(x)$ par diffraction

- Le pas des réseaux B et C a été mesuré en fonction de la position x , à partir de l'angle de déviation de l'ordre -1 par rapport à la normale au réseau, pour une longueur d'onde de 632.8 nm. Courbe théorique en pointillé.



Utilisation des réseaux à pas variable

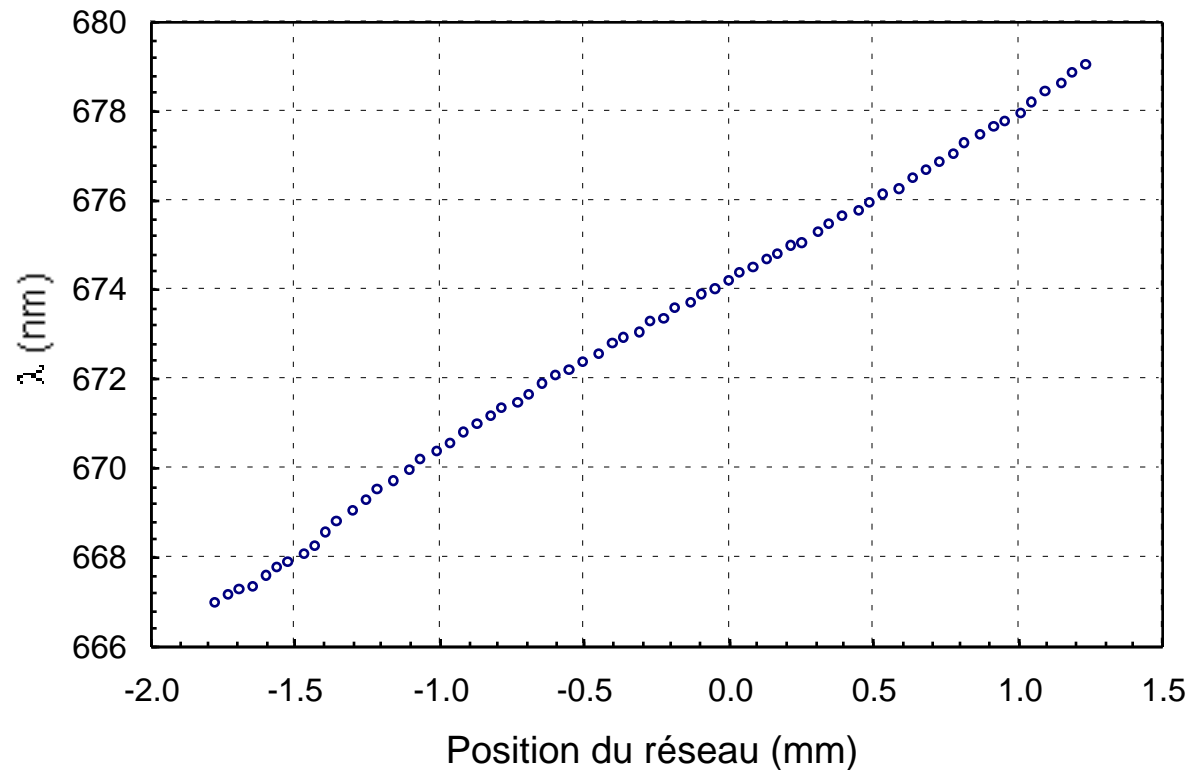
- L'accordabilité produite par ces réseaux a été vérifiée avec deux lasers à semi-conducteurs. Les lasers étaient alors opérés en cavité externe et le réseau chirpé terminait la cavité externe.



- Le premier a pu être accordé sur des longueurs d'onde comprises entre 665 et 680 nm; ce laser émettait initialement de façon monomode longitudinale et monomode latérale.
- Le second laser a pu être accordé entre 828 et 852 nm; l'émission de ce laser, initialement multimode latérale et multimode longitudinale, a été rendue monomode longitudinale avec le réseau.
- Le schéma procure un contrôle plus simple du couplage hors cavité et une réinjection accrue dans la cavité principale.

Accord en longueur d'onde ...

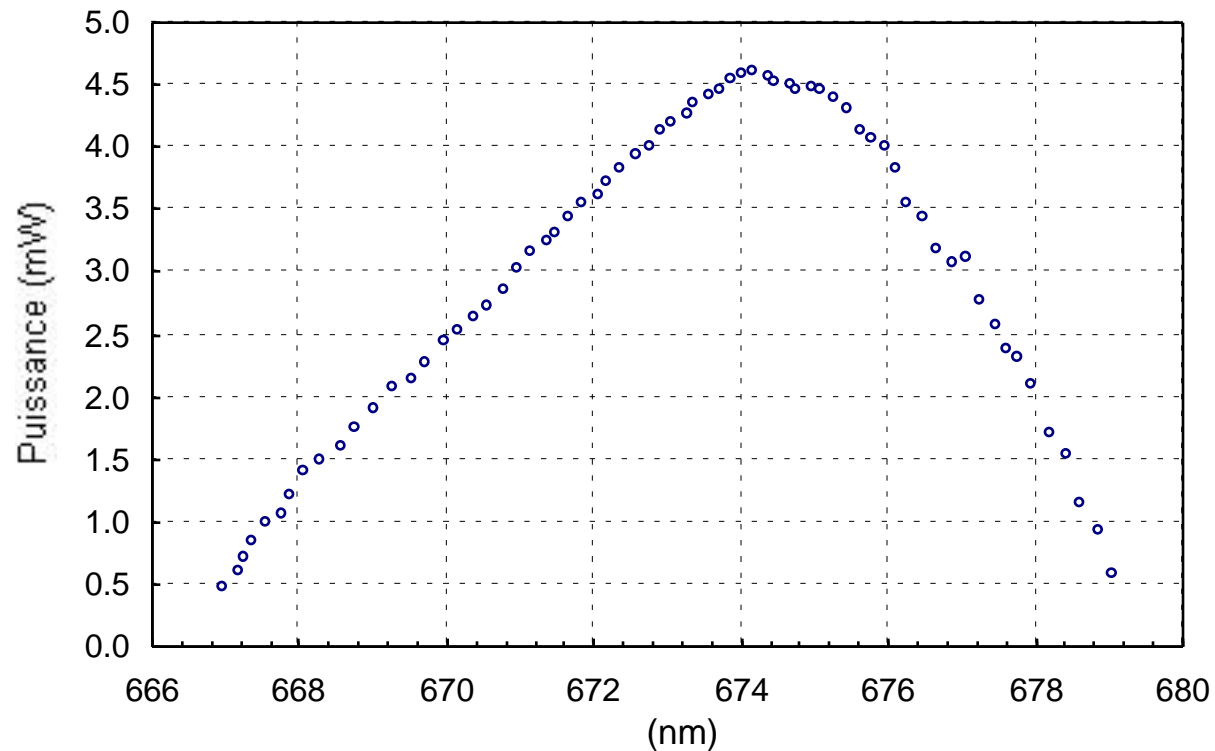
- Longueurs d'onde sur lesquelles la **diode laser visible** (673 nm) peut être accordée par une simple translation du réseau B à pas variable.



- La syntonisation discrète est attribuée à l'imperfection de la couche anti-refléchissante sur la face de la diode laser .

... accord en longueur d'onde ...

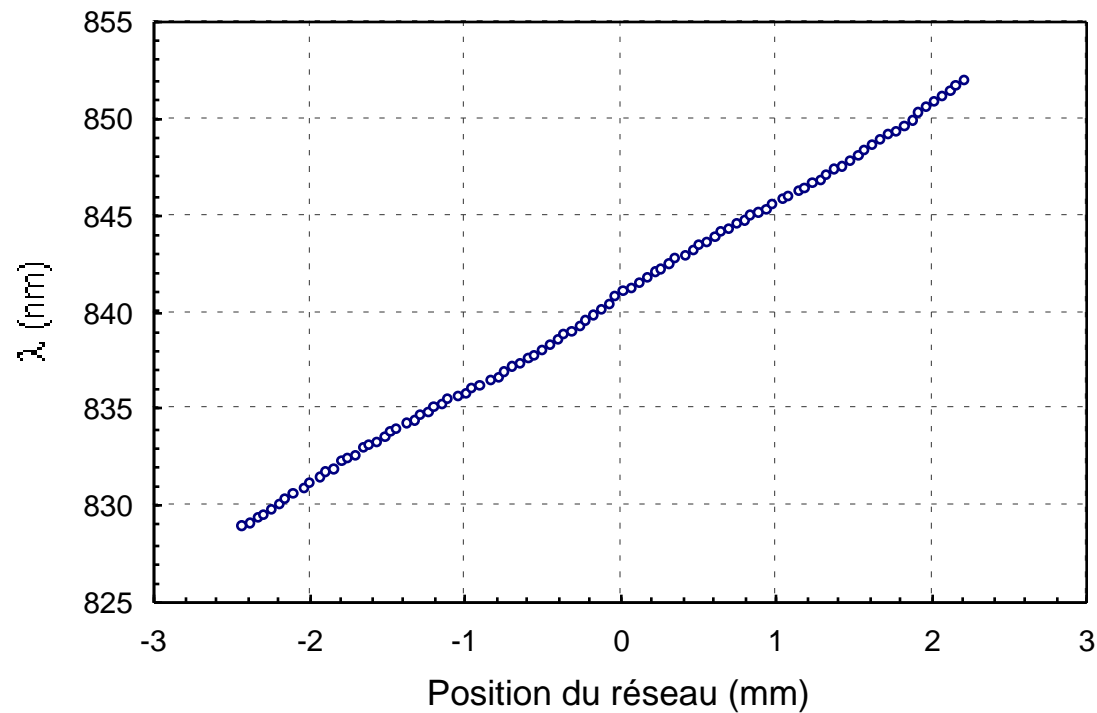
- Puissance émise par la **diode laser visible** (673 nm) aux différentes longueurs d'onde montrées à la page précédente.



- L'accord en longueur d'onde est fait sur 67 modes longitudinaux de la cavité laser.
- Accord sur une plage de 12 nm, par saut moyen de 0.18 nm.

... accord en longueur d'onde ...

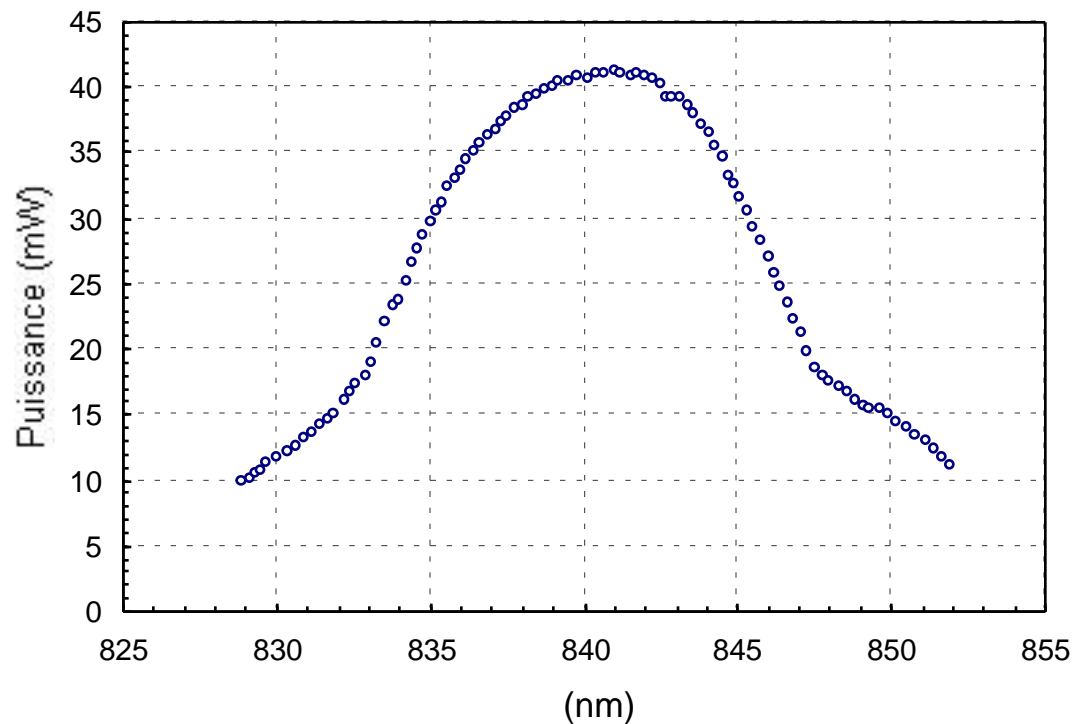
- Longueurs d'onde sur lesquelles la **diode laser infrarouge** (840 nm) peut être accordée par une simple translation du réseau C à pas variable.



- La syntonisation discrète est attribuée à l'imperfection de la couche anti-refléchissante sur la face de la diode laser .

... accord en longueur d'onde

- Puissance émise par la **diode laser infrarouge** (840 nm) aux différentes longueurs d'onde montrées à la page précédente.



- L'accord en longueur d'onde est fait sur 97 modes longitudinaux de la cavité laser.
- Accord sur une plage de 23 nm, par saut moyen d'environ 0.24 nm.

Discussion

- On pourrait améliorer la réflectivité des réseaux en optimisant la profondeur de modulation du relief.
- Avec un laser d'écriture plus puissant et/ou une longueur d'onde plus adaptée à la résine photosensible utilisée, on pourrait écrire des réseaux de plus grande dimension en conservant un temps d'exposition court.
- Une couche anti-réfléchissante de plus faible réflectivité sur la face de sortie de la diode laser favoriserait une syntonisation continue de la longueur d'onde d'émission.
- Les réseaux à pas spatialement variable peuvent être utilisés pour accorder d'autres types de lasers (à fibre, à colorant, à l'état solide).
- Les réseaux à pas variable pourraient être conçus pour être utilisés en transmission, comme filtres spectraux.

Remerciements

**Fonds de recherche
sur la nature
et les technologies**

Québec 



Références

1. W. T. Silfvast, *Laser fundamentals*, Cambridge University Press, New York, 1996.
2. P. F. Moulton, "Tunable solid state laser", Proc. of the IEEE, vol. 80, no. 3, pp. 348-364, 1992.
3. L. G. DeShazer and K. W. Kangas, "Extended infrared operation of a titanium sapphire laser", in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1991 OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, Washington D.C., pp. 296-298, 1987.
4. M. Stalder, B. H. T. Chai and M. Bass, "Flashlamp pumped Cr:LiSrAlF₆ laser", Appl. Phys. Lett., vol. 58, no. 3, pp. 216-218 (1991).
5. S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith, and W. F. Krupke, "LiCaAlF₆:Cr³⁺ : a promising new solid-state laser material", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-24, no. 11, pp. 2243-2252 (1988).
6. M. Sejka, P. Varming, J. Hübner and M. Kristensen, "Distributed feedback Er³⁺-doped fibre laser", Electron. Lett., vol. 31, no. 17, pp. 1445-1446 (1995).
7. P. Zorabedian, W. R. Trunta, "Alignment-stabilized grating-tuned external-cavity semiconductor laser", Opt. Lett., vol. 15, pp. 483-485 (1990).
8. A. C. Fey-den Boer, K. A. H. van Leeuwen, H. C. W. Beijerinck, C. Fort and F. S. Pavone, "Grating feedback in a 810 nm broad-area diode laser", Appl. Phys. B, vol. 63, pp. 117-120 (1996).
9. K. C. Harvey, C. J. Myatt, "External cavity diode laser using a grazing incidence diffraction grating", Opt. Lett., vol. 16, pp. 910-912 (1991).
10. P. Grailovic, A. V. Chelnokov, M. S. O'Neill and D. M. Beyea, "Narrow-linewidth operation of broad-strip single quantum well laser diodes in a grazing incidence external cavity", Appl. Phys. Lett., vol. 60, pp. 2977-2979 (1992).
11. M. de Labachellerie and G. Passadat, "Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers", Appl. Opt., vol. 32, no. 3, pp. 269-274 (1993).
12. C. Budzinski, R. Grunwald, I. Pinz, D. Schäfer and H. Schönnagel, "Apodized outcouplers for unstable resonators", SPIE, Vol. 1500, 264-274 (1991).
13. J.-F. Lepage, R. Massudi, G. Anctil, S. Gilbert, M. Piché, N. McCarthy, "Apodizing holographic gratings for the modal control of diode lasers", Appl. Opt. 36, 4993-4998 (1997).