



Caractérisation du patron d'interférence bidimensionnel d'un Fabry-Pérot

Félix Desroches et Mathieu Marquis

Département de Physique, de Génie Physique et d'Optique,
Université Laval, Québec, QC G1K 7P4, Canada;
felix.desroches.1@ulaval.ca, mathieu.marquis.2@ulaval.ca

Reçu le 23 avril 2024

Abstract

L'interférométrie est un outil essentiel en mesure de spectres lumineux et les interféromètres Fabry-Perot sont particulièrement utiles par leur utilisation de miroirs afin d'obtenir une longueur de cavité accrue[1]. La caractérisation de la finesse d'un montage avec interféromètre Fabry-Perot permet de quantifier l'élargissement causé par l'instrument en fonction de la position dans le patron bidimensionnel observé. La diminution de la finesse radialement du centre vers le bord du patron est attendu et cet effet a été observé. En effet, la finesse maximale de la région centrale pour l'interféromètre utilisé est de (15.7 ± 0.9) et diminue jusqu'à atteindre (2.9 ± 0.2) à la limite de la région visible. Un patron secondaire impliquant qu'une partie du patron est contaminée par une erreur systématique a également été observé et ce double patron a été attribué à l'inclinaison des miroirs réfléchissants. Finalement, la caractérisation de l'ensemble du plan focal de l'interféromètre Fabry-Perot offre la quantification du biais du montage permettant l'observation de sources bidimensionnelles élargies, comme effectué en astrophysique.

Introduction

L'interférométrie est sans aucun doute un des outils optiques les plus répandus, dont l'utilisation remonte au milieu du 19^e siècle[2]. Les patrons d'interférence formés, par combinaison de sources de lumière provoquant l'addition ou la soustraction de l'intensité lumineuse, peuvent être mesurés et analysés pour faire l'étude de divers phénomènes, notamment la détection d'ondes gravitationnelles ou la mesure de la composition d'étoiles, de galaxies ou de nébuleuses[3]. Dû à leur haute précision, les interféromètres Fabry-Pérot (FPI) sont régulièrement utilisés en astrophysique pour mesurer la composition spectrale d'objets lointains. De plus, la capacité à reformer le cube spectral d'une source continue et non homogène en utilisant le patron d'interférence bidimensionnel (2D) rend l'analyse d'objets tels que les nébuleuses possibles. Cependant, chaque FPI possède une erreur propre, une fonction instrumentale qui implique un élargissement des raies observées, qu'il faut caractériser avant d'obtenir des mesures utilisables avec l'appareil. Dépendamment du domaine d'étude, la fonction instrumentale prend parfois la forme d'une carte d'un écart-type qui doit être soustraite quadratiquement aux largeurs de chaque pixel d'observations afin d'obtenir l'élargissement propre à la source. Cependant, il est plus général de mesurer la finesse de l'appareil en fonction de la

position sur le patron d'interférence, ce qui permet ainsi la mesure du biais de l'instrument et l'évaluation de l'élargissement réel de sources, non causé par le montage utilisé.

Méthodologie

Afin de caractériser la finesse du FPI, un laser Hélium-Néon à 632.8 nm a été utilisé comme source monochromatique. La finesse peut être obtenue avec $\mathcal{F} = (\Delta x_{pics})(FWHM)^{-1}$ sachant que Δx_{pics} correspond à la distance entre les pics d'ordre m et $m + 1$ et que $FWHM$ correspond à la largeur à mi-hauteur d'un pic. Puisqu'une mesure de précision instrumentale est désirée, il faut assurer un alignement optimal entre la source et l'interféromètre. La condition d'alignement utilisée dans cette étude était telle qu'il devait être possible de distinguer la translation des modes composant le laser dans la lecture d'un oscilloscope visualisant le signal au centre du patron d'interférence. La mise en place d'une lentille asphérique entre le laser et l'interféromètre afin d'augmenter la taille du faisceau a permis de contrôler la taille du patron sur le capteur de la caméra et donc de réguler la résolution de l'image obtenue. De plus, la lentille convergente d'une caméra est placée de façon à ce que l'image enregistrée corresponde au plan focal du système optique. Pour des raisons de sécurité laser, un filtre OD2, déter-



~~miné comme suffisant pour les longueurs d'ondes utilisées~~, fut placé directement à la sortie du laser. Il a été vérifié que l'ajout du filtre n'avait aucune incidence sur la mesure obtenue. En effet, la haute sensibilité de la caméra utilisée pour l'enregistrement du patron d'interférence permettait de bien visualiser les franges d'interférence, et ce, sans diminution suite à l'ajout du filtre. L'ensemble du système optique est représenté à la Figure 1. Pour obtenir un bon compromis entre la résolution en pixels (px) permettant une mesure précise de la largeur des maxima de l'image et le nombre de maxima permettant une mesure précise de la distance entre ces derniers, un agrandissement permettant la visualisation de quatre maxima a été choisi. Ce choix correspond au nombre de maxima visualisés au point central du déplacement du miroir dans la cavité, permettant ainsi un intervalle de mesure équivalent dans l'espace temporel et physique. On note finalement que la finesse caractérisée correspond à la combinaison des effets d'élargissement du FPI, de l'imprécision de la caméra et de la largeur naturelle du laser utilisé. Ainsi, il est impératif d'utiliser un laser dont le spectre est le moins étendu possible et les mesures de finesse corresponderont alors à l'entièreté du montage, i.e. FPI et caméra, et non pas seulement à l'interféromètre.

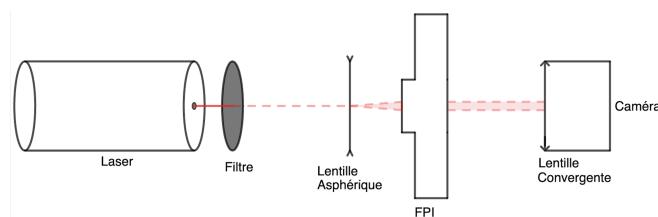


FIGURE 1 – Schéma du montage utilisé lors de l'expérience.

Afin de déterminer la finesse, la distance temporelle entre deux maxima ainsi que la largeur à mi-hauteur en temps ont été mesurés de telle sorte que le ratio des deux quantités donne la finesse en valeur adimensionnelle. Il est également pertinent de mentionner que la présence du capteur au plan focal est essentiel afin de faire converger les faisceaux sur leur maxima respectifs. En effet, si le capteur n'est pas au plan focal, alors les différentes réflexions du FPI, toutes légèrement décalées en positions, apparaissent comme des maxima différents d'intensité moindre tel que montré dans la Figure 2.

Résultats expérimentaux

Grâce aux séquences vidéos enregistrées, illustrant le déplacement spatial des anneaux d'interférence dans le temps à chaque image, un spectre de la luminosité de chaque pixel en fonction de l'image peut être établi. Le spectre obtenu pour deux pixels est présenté à la Figure 3 a) et c). On remarque que quatre ordres d'interférence ont pu être mesurés dans l'étendue du balayage du piézoélectrique. Le spectre en a) illustre les doubles pics en-

générés par la présence du double patron tel que montré à la Figure 2 a) et l'ajustement infructueux d'une gaussienne sur le premier double pic est montré en b), avec un coefficient $R^2 = 0.820$. Étant donné la variation du profil du double pic selon la distance sur le patron, un ajustement de deux gaussiennes n'a pas été effectué, principalement par difficulté de résoudre deux gaussiennes pour des pixels présentant leur superposition quasi-parfaite dans certains cas, et la grande variation de la forme de la gaussienne de plus faible amplitude. Le spectre en c) présente un pixel non affecté par ce deuxième patron et l'ajustement de gaussienne est illustré en d) pour le premier pic. On remarque la bonne correspondance avec l'ajustement grâce à un coefficient $R^2 = 0.989$. L'ajustement gaussien illustré en b) et d) a été réalisé en prélevant exactement un ordre d'interférence en mesurant la distance entre les pics. Avant d'effectuer l'ajustement, la position de chaque pic a été décalée ~~horizontallement~~ à la même image pour tous les pixels afin de pouvoir facilement effectuer la régression peu importe la position de celui-ci. Le spectre a également été décalé ~~verticallement~~ pour que les intensités en l'absence de franges soient considérées nulles. L'ajustement a été effectué avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt et la statistique des moindres carrés.

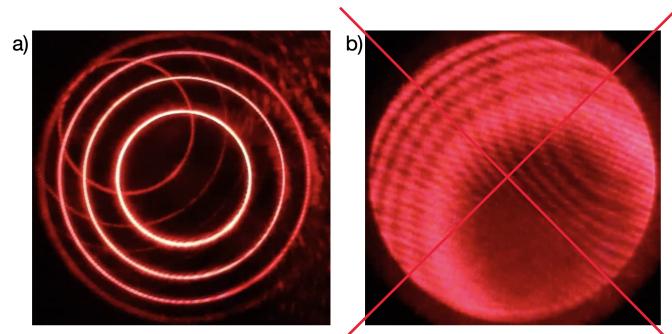


FIGURE 2 – Patron d'interférence d'un FPI pour une source monochromatique à 632.8 nm : a) pour la position du capteur au niveau du plan focal correspondant à une calibration adéquate du système et b) pour la position du capteur hors du plan focal correspondant à une calibration inadéquate du système résultant par la visibilité d'effets de diffraction majeurs.

En ajustant une gaussienne sur le premier pic du profil pour tous les pixels, la largeur à mi-hauteur de cette gaussienne a été extraite et sa valeur est présentée à la Figure 4 a). La distance entre les pics, illustrée en b), a été obtenue en moyennant la distance entre les trois premiers pics de chaque pixel. Le quatrième pic n'a pas été considéré étant donné qu'il n'est pas visible pour les pixels. Une incertitude de deux images a été considérée pour la distance moyenne entre les pics étant donné l'ambiguïté de la position de ceux-ci, tel que vu à la Figure 3. Les deux cartes de la Figure 4 présentent des données mesurées en termes d'image vidéo (frame) et ont donc les mêmes unités.

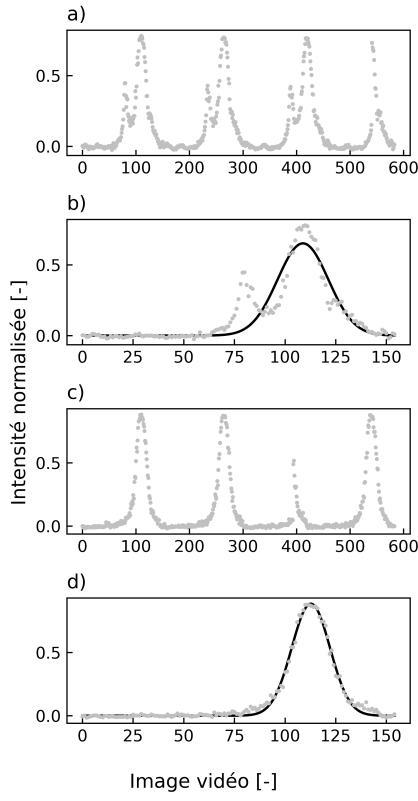


FIGURE 3 – Spectres de luminosité normalisée en fonction de la *frame* obtenus pour différents pixels. L'intensité est normalisée à chaque image, ce qui explique l'amplitude des pics obtenus. a) spectre provenant d'un pixel affecté par le deuxième patron (doublez pics), voir Figure 2. b) ajustement de gaussienne sur le premier double pic du spectre a). c) spectre provenant d'un pixel non affecté par le deuxième patron (simples pics). d) ajustement gaussien sur le premier pic du spectre c).

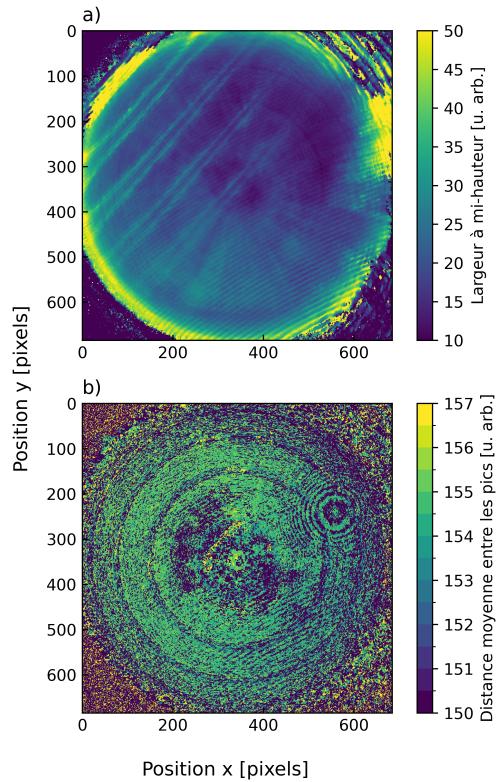


FIGURE 4 – Données nécessaires au calcul de la finesse provenant de l'ajustement gaussien. a) largeur à mi-hauteur en *frames* du premier pic, tel que montré en exemple à la Figure 3 b) et d). L'élargissement dû à l'ajustement imparfait provenant du patron secondaire est visible dans la partie supérieure gauche de l'image. b) distance moyenne entre les pics, en *frames*, mesurée avec les trois premiers pics de chaque pixel. Un artefact circulaire concentrique est visible dans la partie supérieure droite.

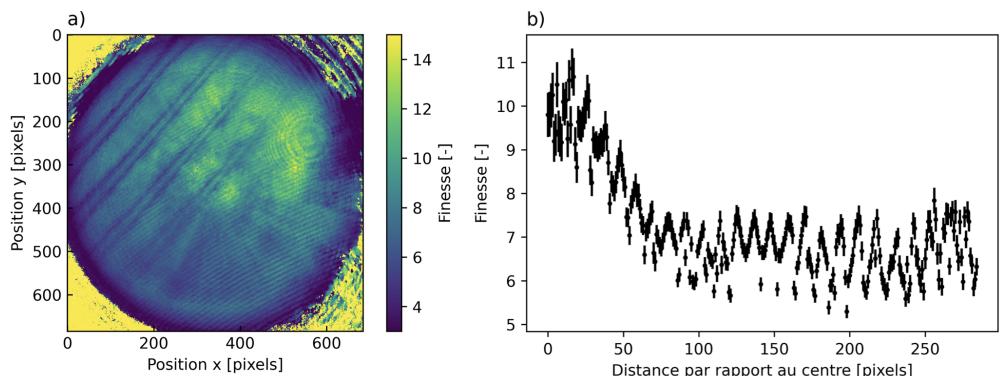


FIGURE 5 – Finesse du FPI pour plusieurs distances calculée à partir des cartes de la Figure 4. a) finesse 2D du patron d'interférence. b) finesse en fonction de la distance avec le centre du patron, prélevée sur la droite $x = 348$ de $y = 365$ à $y = 650$ sur le patron 2D. Cette droite minimise les artefacts du deuxième patron. L'incertitude sur la finesse provient de la matrice de covariance de l'ajustement gaussien et d'une incertitude de ± 2 images pour la distance entre les pics.

La finesse pour le patron 2D est présentée à la Figure 5 a). La sous-figure b) illustre la finesse en fonction de la distance d avec le centre de l'interférogramme pour une projection verticale partant du centre du patron ($d = 0$) vers le bas du patron ($d = 285$). Sur une région d'intérêt circulaire concentrique avec l'interférogramme de 314 px de rayon, des finesse extrémales de 15.7 ± 0.8 et 2.9 ± 0.2 respectivement aux pixels (528, 306) et (295, 642) ont été obtenus. Dans un rayon de 70 px au centre du patron, la finesse maximale est de 14.5 ± 0.6 au px (305, 300).

Analyse

L'analyse de la carte de l'intensité en fonction de la position et du temps révèle un dédoublement du patron d'interférence tel que vu à la Figure 2 a). Ce patron secondaire est plausiblement causé par une seconde transmission déplacée physiquement par l'inclinaison des plans réflectifs du FPI. En effet, les FPIs sont créés avec des plaques de verres dont les côtés forment un faible angle (*wedges*) afin de minimiser l'interférence dans la plaque de verre par le décalage des faisceaux réfléchis^[4]. Cependant, il est possible qu'une partie de la lumière soit réfléchie dans la plaque de vitre pour revenir vers le capteur avec un léger décalage spatial. Pour vérifier cette théorie, il faudrait être en mesure de physiquement tourner le FPI ou, du moins, sa cavité. Si le patron secondaire se déplace à la même mesure que l'interféromètre, alors ce dernier est causé par l'angle dans le matériel, autrement une nouvelle explication devra être formulée. Indépendamment de la cause de ce deuxième patron d'interférence, ses effets sont visibles dans l'ensemble des résultats.

En effet, la deuxième source est la cause des franges d'interférences linéaires larges en haut à gauche présentes aux Figures 4 a) et 5 a). De tels résultats sont sans surprise puisque la superposition des franges implique un élargissement de ces dernières, ce qui se traduit en une finesse réduite, et la somme de deux ondes sphériques produit une onde plane, ce qui explique la linéarité des artefacts. Le patron secondaire est également la cause du second cercle en haut à droite aux Figures 4 b) et 5 a). Encore une fois, ces résultats sont plausibles puisque l'interférence implique le décalage de la gaussienne ajustée et donc une variation de l'espacement entre les franges. Le fait que ce patron concentrique apparaisse à droite est toutefois étonnant.

La Figure 5 b) montre le comportement attendu pour la finesse, c'est-à-dire le fait que celle-ci est maximale avec une valeur de 14.5 ± 0.6 au centre et qu'elle diminue avec la distance jusqu'à atteindre un minimum de 2.9 ± 0.2 à la frontière du patron observé. Cet effet *centre-bord* est prédict par la propagation d'un faisceau gaussien, dont la taille augmente avec la distance qu'il parcourt. La largeur croissante du pic suivant la distance avec le centre provient donc du parcours additionnel devant être par-

couru par le faisceau pour être à un angle supérieur.

Il découle des interférences secondaires observées que la présence de plus d'un patron fausse significativement les mesures et que la finesse est diminuée. Cependant, la caractérisation de la finesse et de l'erreur avec le patron secondaire implique que des mesures subséquentes où les deux patrons sont situés à la même position, ce qui serait attendu de toute mesure si la cause est bien la présence de *wedge*, pourraient être corrigées et analysées correctement. Bien que la présence d'interférence entre les deux patrons implique une oscillation de la finesse telle que montrée à la Figure 5 b), il est certain que la région centrale est plus précise dans ses résultats dû à la finesse significativement plus élevée que dans les régions extrémiales, allant jusqu'au double de la valeur des sillons d'interférence.

Conclusions

L'ensemble des résultats permet de conclure que la source principale d'imprécision du FPI est la présence d'un patron secondaire, plausiblement causé par les *wedges* dans le mécanisme optique de l'appareil. Indépendamment de la cause de cette erreur, la Figure 5 a) montre la correction à apporter entre la mesure centrale (i.e. habituelle) et les mesures prises pour toute autre position dans le plan focal. La Figure 2 explicite l'importance de positionner le capteur au plan focal du système optique sans quoi il est impossible de résoudre les différentes franges. Finalement, la Figure 3 montre le spectre typique d'un FPI impliquant qu'une méthode bidimensionnelle permet d'obtenir les mesures habituellement prises au centre seulement. Afin d'améliorer la méthode, il est impératif de trouver une technique permettant de retirer le second patron d'interférence mesuré, et ce, numériquement ou optiquement, de façon à pouvoir obtenir un signal sans interférence secondaire. L'obtention de la carte d'erreur du FPI est primordiale lorsqu'il est question de l'analyse d'une source quelconque puisqu'elle permet la recréation du cube spectral non biaisé.

Références

- ¹J. BAKER, *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)* (Elsevier, 2005).
- ²C. LAB, *What is an Interferometer?*, [https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer#:~:text=Because%20of%20their%20wide%20application,caused%20by%20gravitational%20waves%20\(a.](https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer#:~:text=Because%20of%20their%20wide%20application,caused%20by%20gravitational%20waves%20(a.)
- ³R. W. POGGE, B. ATWOOD, P. L. BYARD, T. P. O'BRIEN, B. M. PETERSON, N. J. LAME et J. A. BALDWIN, « The Ohio State Imaging Fabry-Perot Spectrometer (IFPS) », *pasp* **107**, 1226 (1995).
- ⁴D. A. SOLOMAKHA, « EQUAL-INCLINATION FRINGES IN A FABRY-PEROT INTERFEROMETER WITH A WEDG », *Springers* **11**, 86 (1968).