

Rapport de stage

Optique de haute résolution polychromatique pour une expérience d'atomes froids

Romain Cazali
Juin 2019 – Juillet 2019

Résumé : *Ce stage a eu pour objectif de caractériser les performances d'un système optique d'imagerie et de focalisation. Ce système permettra à la fois de réaliser une imagerie à haute résolution et de manipuler les atomes de strontium froids. La réalisation d'un prototype de ce système a permis de caractériser ses performances et les tolérances de placement des lentilles. Cette caractérisation a abouti à la mise en place d'un protocole fiable de placement des optiques sur l'expérience d'atomes froids pour laquelle il ne sera plus possible d'évaluer les performances du système optique.*

Mots-clés : *Optique, tâche d'Airy, imagerie, atomes froids*

Stage encadré par : Martin Robert de Saint Vincent

Mail : <martin.robertdesaintvincent@univ-paris13.fr>
Université Paris XIII Paris Nord Villetaneuse, Laboratoire de physique des lasers.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Les objectifs du montage	3
1.2	Le montage et le travail à réaliser	4
2	Les performances théoriques du système et ses limitations	5
2.1	La limite de diffraction	5
2.2	Les aberrations géométriques	6
3	Le montage utilisé en imagerie	6
3.1	Les méthodes d'évaluation des performances	7
3.2	Une méthode efficace d'alignement	10
3.3	La tolérance en angle	11
4	Le montage utilisé en focalisation	13
4.1	Rayon d'Airy	14
4.2	La courbure et le critère de Strehl	16
4.3	La dépendance en angle	18
5	Conclusion	20
6	Annexe	21
6.1	Protocoles de construction.	21
6.2	Matériel utilisé durant ce stage	21

1 Introduction

1.1 Les objectifs du montage

Le but actuel de l'équipe Strontium est de fabriquer un gaz dégénéré d'atomes dans un potentiel périodique généré à l'aide de lasers. Le comportement des atomes dans de tels systèmes est analogue au comportement des électrons dans un réseau en matière condensée. Le fermion utilisé est le ^{87}Sr qui a pour particularité d'avoir un spin élevé ($9/2$) et donc un grand nombre d'états de spin (10). Le montage optique auquel je m'intéresse dans ce stage permettra d'une part de réaliser une imagerie du nuage d'atomes, d'autre part de focaliser de la lumière sur le réseau d'atomes.

Le premier objectif est d'effectuer une imagerie de la densité d'atomes et de la vitesse des atomes. Puisque les atomes ne seront espacés que de 250 nm dans le réseau, il n'est pas possible de les résoudre individuellement. Le principe de la mesure de densité est d'éclairer le nuage avec un faisceau laser à une longueur d'onde absorbée par le strontium (461 nm) puis d'effectuer le rapport entre l'intensité envoyée et l'intensité reçue. La loi de Beer-Lambert permet alors de remonter à la densité d'atome. Pour la mesure de vitesse, on laisse le nuage d'atomes s'étaler en coupant le piège optique, les atomes sont alors dans un régime de chute libre et leur position à l'instant t ne dépend que de leur vitesse initiale. L'imagerie permettra donc de remonter à la distribution initiale de vitesse. Celle-ci sera alors à comparer avec la distribution de Fermi.

Le second objectif est de pouvoir focaliser un laser à 532 nm sur la zone la plus petite possible. Cette focalisation a deux motivations : détecter le spin d'un atome individuellement ou manipuler le spin d'un atome individuellement. La focalisation de la lumière sur un atome va déplacer ses niveaux d'énergie et ce d'autant plus que l'intensité lumineuse est forte. On obtient alors des atomes dont les niveaux d'énergie dépendent de leur position sur le réseau. Ensuite, si on éclaire l'échantillon avec une longueur d'onde qui est en résonance uniquement avec un atome situé exactement sur le pic d'intensité de la tâche de focalisation, alors on peut faire faire une transition à ce seul atome du réseau. Un paramètre très important qui va être exploité est que les niveaux d'énergie des atomes dépendent de leur spin. En conséquence, en parcourant le réseau avec le faisceau focalisé, on peut permettre la transition uniquement des atomes d'un spin choisi. Ensuite, l'atome excité peut être ré excité par un autre laser. De fil en aiguille, on peut transférer certains atomes vers un état de spin déterminé. Ceci permet à terme d'étudier des configurations particulières des spins.

Cette possibilité de faire transiter un unique atome vers un niveau excité choisi permet également d'envisager qu'on puisse le détecter. Une première façon de faire consiste à exciter un atome vers des niveaux où on pourra le faire fluorescer. Si on détecte une lumière, alors on pourrait alors dire qu'à la position où on a envoyé le laser, il y avait un atome d'un certain spin. En parcourant tout l'échantillon avec différentes fréquences adaptées à différents spins, on pourrait alors dresser une carte des spins. La deuxième façon qui permettrait de détecter l'atome, serait de ioniser l'atome qui vient d'être excité. Des détecteurs et un champ électrique bien placés permettraient alors de détecter soit l'ion, soit l'électron, voir les deux. On pourrait alors effectuer le même raisonnement que pour la première méthode de détection, et à terme dresser une carte des spins dans le réseau.

Une difficulté technique se rajoute à ce montage : les deux faisceaux qui permettent le refroidissement laser des atomes doivent être réfléchis à travers le hublot et l'objectif de focalisation/imagerie. Les faisceaux ont une longueur d'onde de 461 nm et 689 nm respectivement. Ils doivent passer dans un premier temps polarisés circulaire gauche sur les atomes, pour revenir circulaire droit. Cette opération s'appelle la rétro-réflexion. Le problème est que l'objectif est conçu pour corriger les aberrations d'un faisceau qui est collimaté du côté extérieur, et focalisé du côté de l'enceinte, alors que ces deux faisceaux seront au contraire collimatés du côté de l'enceinte. L'objectif n'est pas de corriger ce problème mais d'observer ce qui arrive au faisceau, avec pour espoir de garder les bonnes polarisations et un faisceau à peu près uniforme. Ce travail ne sera pas effectué durant ce stage.

Afin de réaliser à la fois l'imagerie, la focalisation, et la rétro-réflexion, l'équipe a acheté un objectif spécial. Celui-ci est traité anti-reflet pour les trois longueurs d'onde utilisées (461 nm, 532 nm et 689 nm), et est corrigé en aberration pour les deux longueurs d'onde de focalisation et d'imagerie (461 nm et 532 nm), bien que la focale de 100 mm diffère très légèrement entre les deux longueurs d'onde. Cette focale a été choisie pour viser le coeur de l'enceinte ultra-vide où se trouvent les atomes. Cet objectif a dû être fait sur mesure à cause de la présence d'un hublot entre le vide et l'objectif et de sa grande

ouverture numérique ($on = 0.2$). On verra dans la section 2 pourquoi le hublot, la grande focale et la grande ouverture numérique rendent cet objectif sur mesure nécessaire.

1.2 Le montage et le travail à réaliser

A terme, le montage (figure 1) consiste principalement en l'objectif (f_0) qui permettra de collecter la lumière pour l'imagerie (en bleu) et de focaliser de la lumière sur les atomes (en vert).

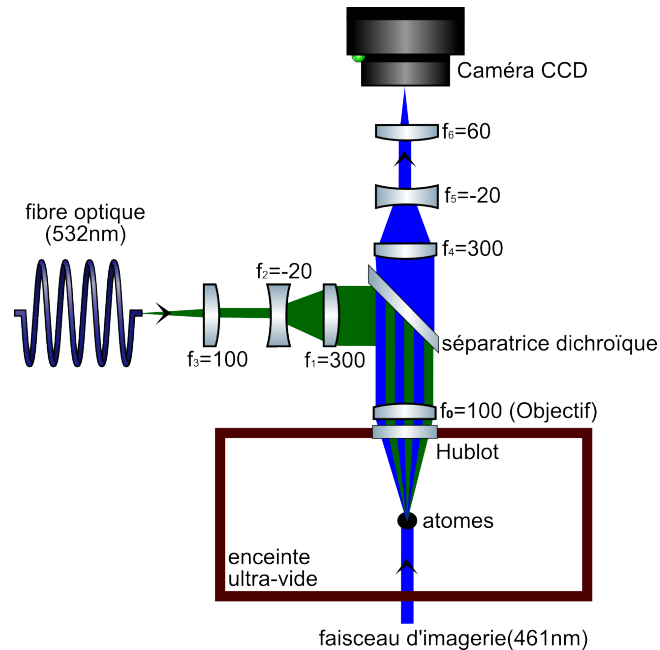


FIGURE 1 – Montage tel qu'il est prévu sur l'expérience. Les distances ne sont pas à l'échelle et les focales sont exprimées en mm. Un faisceau d'imagerie bleu vient éclairer les atomes, la lumière est ensuite collectée par l'objectif. Puis, la lentille f_4 est placée de façon à refocaliser le faisceau avec une ouverture numérique plus faible. Les lentilles f_5 et f_6 permettent d'effectuer une magnification par 3 avant que la caméra CCD n'enregistre l'image. Le faisceau vert provient d'une fibre optique et diverge à la sortie de celle-ci. La lentille f_3 permet de collimater le faisceau. Les lentilles f_2 et f_1 forment un télescope qui permet d'élargir le faisceau à un diamètre de 50 mm. Enfin l'objectif focalise ce faisceau sur l'échantillon à l'intérieur de l'enceinte ultra-vide.

Le faisceau d'imagerie (en bleu) éclaire les atomes par dessous, à l'aide d'un faisceau d'imagerie collimaté. L'objectif f_0 permet de collecter la lumière diffusée par les atomes. La lentille f_4 permet de refocaliser la lumière tout en ayant effectué une magnification par 3. Les lentilles f_5 et f_6 permettent de magnifier de nouveau par 3. Enfin la caméra CCD enregistre l'image du nuage d'atomes. Le faisceau de focalisation (en vert) sort d'une fibre optique. Une première lentille f_3 permet de le collimater. Les lentilles f_2 et f_1 permettent d'élargir le faisceau d'un facteur 15. Le faisceau, alors d'un diamètre de 50 mm, est diaphragmé à 40 mm par l'objectif f_0 qui focalise la lumière sur l'échantillon.

Bien que cet objectif soit très performant, on ne peut pas le placer sans prendre des précautions auparavant. En effet, d'autres lentilles sont utilisées sur le montage, et ne sont pas d'aussi bonne facture. Les performances du montage avec toutes les lentilles ont peu de chance d'être aussi bonnes que celles de l'objectif seul.

- Quelles sont les performances réelles du montage ?
- Quelle est la sensibilité des lentilles sur leur positionnement ?
- Quel est son champ transverse ?
- Quel est la profondeur sur laquelle ce montage reste performant ?

Sont autant de questions auxquelles il est nécessaire de répondre avant d'installer l'objectif dans le montage final. Il sera également nécessaire de trouver un protocole qui permettra de placer les lentilles sur le montage final. En effet, il ne sera plus possible d'analyser les performances du système une fois monté sur l'expérience d'atomes froids. Le but de mon stage est de répondre à un maximum de ces

questions. Pour cela, j'ai réalisé un prototype du montage, en simulant le hublot par une plaque de silice. L'avantage de ce prototype est d'avoir accès au champ lumineux qui se situera dans l'enceinte ultra-vide sur l'expérience. Par ailleurs, le laser à 532 nm n'étant pas encore disponible, j'ai réalisé tous les montages à une seule longueur d'onde (461 nm). Les lentilles utilisées étant des doublets achromatiques, on espère que les performances à 461 nm sont représentatives de celles à 532 nm.

2 Les performances théoriques du système et ses limitations

Avant de se lancer dans les expériences, il est bon de se plonger dans le détail des difficultés auxquelles nous allons être confrontés. Il existe deux limites principales à un montage optique monochromatique. La première est la présence de diffraction, la seconde est la présence d'aberrations géométriques.

2.1 La limite de diffraction

La diffraction est due à la nature ondulatoire de la lumière. Elle se manifeste dès lors qu'un faisceau lumineux rencontre un objet. Dans notre système, un faisceau laser rencontre sur sa route une lentille, ou plus exactement le bord de la lentille qui agit de la même façon qu'un diaphragme circulaire. Deux situations nous intéressent ici : la focalisation du faisceau par une lentille et l'image d'un objet par cette même lentille avec un montage d'imagerie impliquant une seconde lentille avec espacements $f - 2f - f$. Dans le cas de la focalisation, la diffraction par une lentille circulaire résulte en la formation d'une tâche d'Airy au niveau du point focal de la lentille. L'intensité lumineuse de cette tâche s'exprime grâce à la fonction spéciale J_1 de Bessel sous la forme suivante [1] :

$$I(r) = I_0 \left(\frac{2J_1\left(\frac{\pi dr}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi dr}{\lambda f}} \right)^2 \quad (1)$$

Avec :

- I_0 l'intensité maximale de la figure
- d le diamètre d'ouverture du diaphragme (ou de la lentille selon le cas)
- $\lambda = 461$ nm la longueur d'onde de la lumière.
- $f = 100$ mm la longueur focale de la lentille.

Cette fonction présente plusieurs points d'annulation dont le premier définit le rayon d'Airy qui correspond au rayon de la tâche centrale. Connaissant le premier point d'annulation de la fonction de Bessel précédente, on obtient l'expression de ce rayon :

$$r \simeq \frac{1.22\lambda f}{d} \quad (2)$$

Pour ce montage, la plus grande ouverture possible est $d=40$ mm, ce qui donne $r = 1.4 \mu\text{m}$. Notre système ne peut donc fondamentalement pas focaliser la lumière sur un rayon plus petit. Cette limite est la borne inférieure de ce qu'il nous est possible de faire. La présence d'autres lentilles sur le montage pourrait augmenter ce rayon en diaphragmant de nouveau le faisceau. Ce problème a été évité dans la conception du montage : l'objectif diaphragme à 40 mm le faisceau qui a un diamètre de 50 mm juste avant lui.

La seconde utilisation de notre lentille, à savoir faire une imagerie, est également limitée par la diffraction. Le système utilisé est constitué de l'objet suivi d'une lentille à distance f_1 , puis d'un espacement de $f_1 + f_2$ avec la lentille suivante. L'image se forme alors dans le plan focal de la deuxième lentille. Ce système d'imagerie de la forme $f_1 - f_1 + f_2 - f_2$ a l'avantage de faire l'image non seulement de l'objet en intensité, mais aussi de reproduire le même champ lumineux dans le plan image que celui qui était présent dans le plan objet.

Si on fait l'image d'un point par un tel système, on n'obtient pas un point comme dans l'approximation de l'optique géométrique, mais une tâche d'Airy dont le rayon est identique au cas précédent, au facteur de magnification du système d'imagerie près. La traduction mathématique du fait que l'image d'un point est une tâche pour un objet, est que l'image est le produit de convolution de l'objet par la

tâche d'Airy. On considère que deux points distants d'un rayon d'Airy environ pourront être résolus (critère de Rayleigh). Cette limite de résolution est également une limite fondamentale qu'on ne peut pas contourner. La meilleure résolution atteignable avec l'objectif est donc de l'ordre de $1.4 \mu\text{m}$.

2.2 Les aberrations géométriques

Si la diffraction est une limite fondamentale, les aberrations géométriques, elles, proviennent de la forme même des lentilles que nous utilisons. La forme la plus utilisée (car la moins chère et la plus facile à fabriquer) est la forme plan-convexe (le côté convexe de forme sphérique). Le problème est qu'une lentille sphérique ne focalise pas les faisceaux lumineux en un point. La distance à laquelle se croiseront deux faisceaux dépend de leur distance par rapport à l'axe optique. La distance focale n'est donc pas bien définie. On appellera le plan focal le plan où les rayons forment la plus petite tâche. L'image d'un point est donc une tâche dont la forme et la taille dépendent de l'alignement des optiques ainsi que de la forme des optiques. En général, il n'y a pas de moyen simple de calculer ce rayon de la même façon que le rayon d'Airy. On a alors recours à un logiciel de tracé de rayons lumineux (Zemax). Malgré tout, dans le cas particulier d'une lentille sphérique, il existe une formule qui permet de calculer le rayon de la tâche d'aberration géométrique au niveau du plan focal, dans le cas d'une lentille plan-convexe [2]. Ceci permet d'avoir une assez bonne intuition de ces aberrations.

$$r_g = 0.54 \times f \times \text{on}^3 \quad (3)$$

Avec :

- f la focale de la lentille
- $\text{on} = \sin(\alpha)$ l'ouverture numérique de la lentille, où α est l'angle entre l'axe optique et le rayon le plus extrême passant dans la lentille .

On voit tout de suite la difficulté du montage : on utilise à la fois une grande ouverture numérique et une grande longueur focale ! Les aberrations sont donc particulièrement fortes pour une lentille sphérique de cette focale et de cette ouverture numérique. Si on utilisait une lentille plan-convexe dans ce montage, on aurait $r_g = 0.4 \text{mm}$. Pour palier ce problème, il est possible de fabriquer des lentilles asphériques (très chères) ou d'utiliser plusieurs lentilles sphériques bien agencées dont les aberrations se compensent. C'est le cas de l'objectif sur mesure. Il utilise également l'espacement entre ses différentes lentilles pour corriger au mieux les aberrations. Dans le reste du montage, on utilise des doublets achromatiques constitués de deux lentilles sphériques accolées. Ces doublets sont conçus pour limiter les aberrations chromatiques. Celles-ci ne nous concernent pas ici puisque la lumière utilisée est monochromatique. Mais il s'avère que ces doublets corrigent également les aberrations sphériques et permettent d'augmenter l'ouverture numérique à laquelle le montage est limité par diffraction. On considère que le focus est de bonne qualité si tout les rayons qu'on tracerait avec les lois de l'optique géométrique se situent à l'intérieur de la tâche d'Airy du système. Il est inutile de vouloir réduire le rayon d'aberration bien en dessous du rayon d'Airy puisqu'on ne verrait aucune amélioration. Lorsqu'un système respecte ce critère de qualité, on dit qu'il est limité par diffraction.

Le logiciel zemax permet à la fois de tracer les rayons selon les lois de l'optique géométrique et la tâche d'Airy dans le plan focal. La simulation de notre montage d'après les designs des lentilles utilisées montre qu'il est bel et bien limité par la diffraction. Cependant, les imperfections de fabrication pourraient rendre le système moins performant que la simulation.

En conclusion, les aberrations géométriques ont tendance à étaler la tâche d'Airy de façon plus ou moins symétrique en fonction de l'origine de l'aberration. On peut avoir les défauts inhérents à la forme de la lentille, les défauts dus à un mauvais placement des optiques et les défauts issus de la fabrication. Dans le cas où le montage ne donne pas les performances attendues par Zemax, on remettra d'abord en cause le placement des lentilles, puis la qualité des doublets achromatiques. L'objectif est quant à lui considéré comme parfait en comparaison aux autres lentilles.

3 Le montage utilisé en imagerie

Les tests du montage d'imagerie m'ont permis d'aligner le mieux possible les différentes lentilles.

Le montage que j'ai réalisé est représenté sur la figure 2. J'ai utilisé une fibre optique pour amener de la lumière sur le montage. En sortie de celle-ci, j'ai placé une lentille permettant de collimater le faisceau. Ce faisceau collimaté va alors éclairer une mire Thorlabs en transmission qui jouera le rôle d'objet. La lumière diffractée par la mire est ensuite recueillie par le hublot et l'objectif f_0 , dont l'ouverture numérique est de 0,2. On rajoute ensuite une lentille f_1 de focale 300. Ce système permet d'effectuer une magnification par 3 et de diviser l'ouverture numérique par 3 ($on = 0.067$). Diminuer l'ouverture numérique permet de réduire les aberrations géométriques comme le montre la formule 3. Une tâche d'Airy fait donc $4.2 \mu\text{m}$ et donne la plus petite distance résoluble dans notre plan image. Cette distance est plus petite qu'un pixel de la caméra ($7.4 \mu\text{m}$). Pour ne pas être limité par la pixellisation, on rajoute une nouvelle magnification par 3 à l'aide des lentilles f_2 de focale -20 et f_3 de focale 60 utilisées dans un montage $f_2 - f_2 + f_3 - f_3$. Cette magnification a de nouveau divisé l'ouverture numérique par 3, et on s'attend donc à une diminution des problèmes liés aux aberrations géométriques pour ces lentilles. On obtient alors une tâche d'Airy de $13 \mu\text{m}$, ce qui vaut un peu moins que deux pixels sur la caméra. La limite par pixellisation est donc du même ordre que la limite par diffraction. Ce montage sera utilisé sur l'expérience finale.

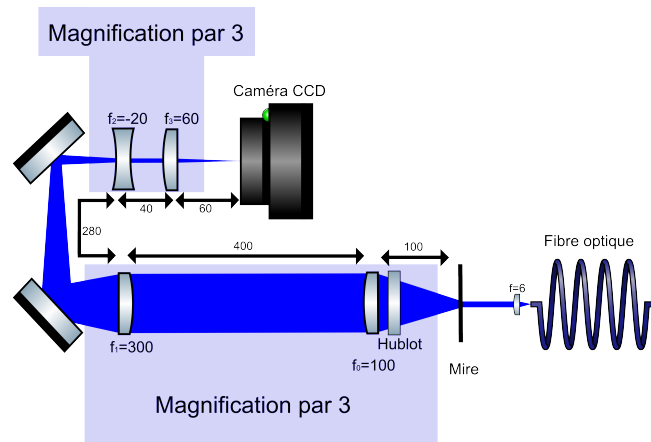


FIGURE 2 – Montage d'imagerie réalisé pour évaluer ses performances. Les distances et les focales des lentilles sont exprimées en mm. La fibre optique est une source de lumière collimatée à l'aide d'une lentille. Ce faisceau collimaté permet d'illuminer une mire en transmission. La lumière diffractée est ensuite recueillie par l'objectif f_0 . Puis une lentille de focale $f_1 = 300$ mm permet de refocaliser la lumière en effectuant une magnification par 3. Le système f_2 et f_3 permet une nouvelle magnification par 3. Enfin, la lumière est focalisée sur la caméra CCD qui enregistre l'image. Sur ce schéma, toutes les distances et focales de lentilles sont exprimées en mm. On utilise systématiquement des montages de la forme $f_0/f_0 + f_1/f_1$ pour réaliser l'image du champ électrique et pas seulement de l'intensité.

3.1 Les méthodes d'évaluation des performances

La méthode la plus simple pour déterminer les performances du montage aurait été d'avoir une mire avec des lignes de plus en plus fines et de voir à partir de quel taille on ne distingue plus deux traits voisins. Cependant, les traits les plus fins de la mire que j'avais à ma disposition font $2.2 \mu\text{m}$ de large, espacés de $2.2 \mu\text{m}$, ce qui est supérieur à la meilleure résolution atteignable ($1.4 \mu\text{m}$). Le montage permet de résoudre ces traits et il est difficile de savoir à quel point le montage est bon. Pour voir si le montage est utilisé au mieux de ses capacités en ouverture maximale, j'ai rajouté un diaphragme entre la lentille f_1 et l'objectif f_0 . Ceci m'a permis de voir l'évolution de l'image en fonction de l'ouverture du diaphragme. Elle m'a semblé s'améliorer jusqu'à la pleine ouverture de celui-ci. On peut même voir les défauts de fabrication de la mire (ils ne sont pas bien résolus, mais visibles). Cependant, il me faut un critère plus quantitatif et surtout plus objectif.

J'ai donc simulé l'image que je suis censé voir (sans les effets de pixellisation) en effectuant le produit de convolution d'une tâche d'Airy par un créneau à 3 périodes (ce qui correspond à la mire)(figure 3). A partir de ceci, j'ai récupéré les valeurs maximales d'un pic et la valeur minimale entre deux pics

pour calculer le contraste avec la formule suivante :

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4)$$

Avec :

- I_{max} la valeur maximale de l'intensité sur l'image
- I_{min} la valeur minimale de l'intensité sur l'image

Le résultat se trouve en trait plein sur la figure 7. On voit que pour une ouverture du diaphragme de 40 mm on doit avoir un contraste de 94% (calculs faits sans tenir compte de la pixellisation). Les variations de contraste sont assez faibles à grande ouverture, mais sont potentiellement visibles.

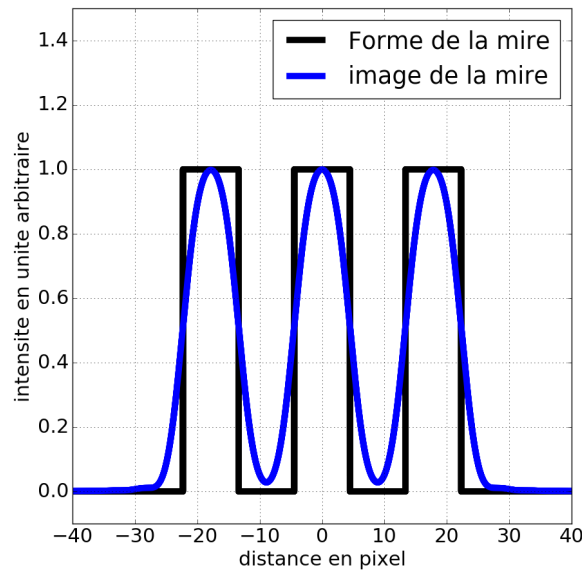


FIGURE 3 – Simulation de la forme que devrait avoir l'image. En noir, la forme de la mire. En bleu, le résultat du produit de convolution de la forme de la mire par une tâche d'Airy.

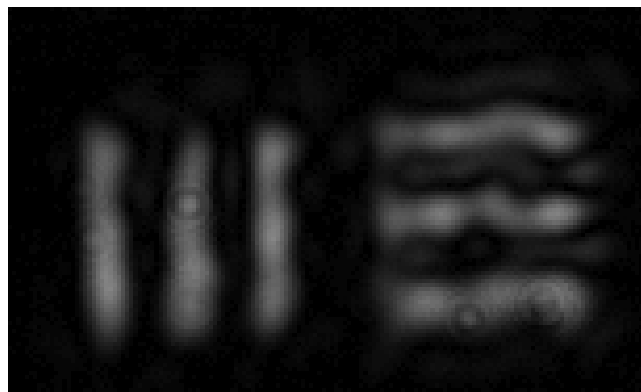


FIGURE 4 – Photo de la mire. Le diamètre d'ouverture vaut 34 mm. On distingue clairement qu'il y a des défauts sur les lignes verticales et horizontales. La mise au point est faite sur la ligne verticale (à gauche), la ligne horizontale est un peu hors du focus, ce qui témoigne de la présence d'astigmatisme.

N'ayant pas tenu compte de la pixellisation pour le calcul théorique, j'ai remplacé la magnification par 3 par une magnification par 10 à l'aide d'un objectif de microscope de la marque Mitutoyo suivi d'une lentille de focale 200. Un rayon d'Airy fait alors 5.5 pixels sur la caméra ; on s'affranchit alors de la limite par pixellisation. J'ai ensuite pris des photos de la mire à différentes ouvertures du diaphragme (figure 4). Pour mesurer le diamètre du diaphragme, j'ai utilisé un pied à coulisse, une mesure au vernier permettant d'assurer une bonne précision sur l'ouverture du diaphragme. Pour mesurer le contraste,

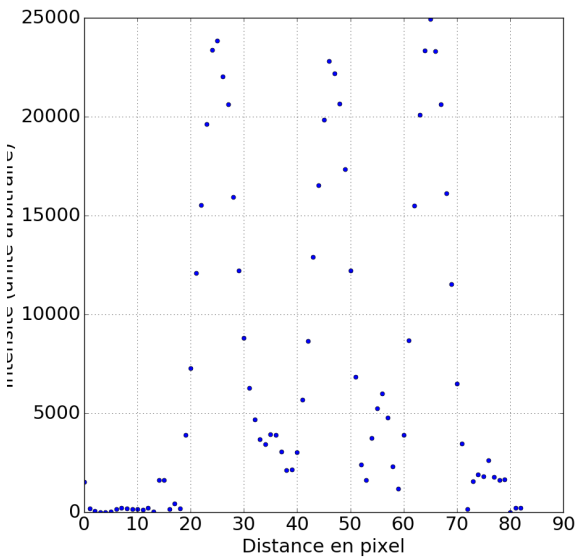


FIGURE 5 – Vue en coupe des traits verticaux de l’image de la figure 4. On peut voir la présence de légers pics au niveau du minimum d’intensité. Ceux-ci sont plus ou moins importants selon la position de la coupe sur l’image. J’ai volontairement pris la coupe où les rebonds sont les plus importants.

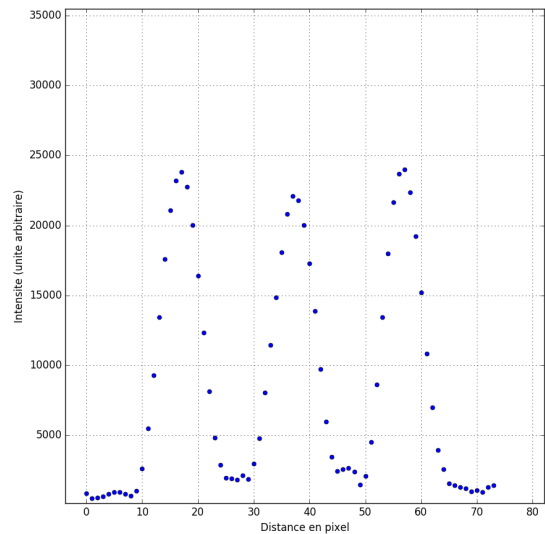


FIGURE 6 – Vue en coupe des traits verticaux de l’image de la figure 4 en utilisant une moyenne verticale. On peut voir la persistance de légers pics au niveau du minimum d’intensité.

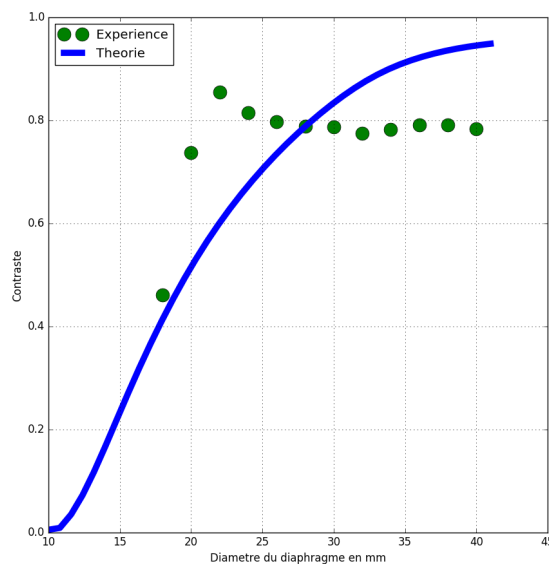


FIGURE 7 – Contraste en fonction de l’ouverture du diaphragme. En trait bleu, le tracé théorique sans tenir compte de la pixellisation. En points verts, le contraste expérimental en utilisant la magnification par 10 pour éviter les effets de la pixellisation. Le contraste expérimental est presque constant, ce qui peut provenir d’erreurs de focalisation ou d’aberrations géométriques. Les incertitudes n’ont pas pu être évaluées pour le contraste.

j'ai d'abord effectué une coupe en intensité de l'image (figure 5). La moyenne des trois maxima, et la moyenne des deux minima donne le contraste. Cependant, cette valeur variait beaucoup en fonction de la position à laquelle j'effectuais la coupe. J'ai donc utilisé le logiciel imageJ pour effectuer une moyenne verticale de l'intensité sur l'ensemble de la raie verticale avant de mesurer le contraste (et la même chose pour les raies horizontales). La coupe moyennée se trouve sur la figure 6. Cette méthode ne m'a pas permis de récupérer l'écart-type associé à chaque point issue de la moyenne. Je n'ai donc pas pu évaluer les incertitudes.

Après avoir calculé le contraste à différentes ouvertures de diaphragme pour les raies verticales, j'ai obtenu la figure 7. Ce résultat est surprenant pour plusieurs raisons. La première est qu'on constate une différence assez forte avec la théorie : le contraste n'augmente pas jusqu'à 94% mais reste constant autour de 80%. La deuxième est plus surprenante : le contraste est meilleur que la théorie en dessous d'une ouverture de 26 mm. Pour des ouvertures supérieures à 26 mm la qualité de l'image est en fait dégradée par des rebonds qui apparaissent en bord d'objet. L'origine de ces rebonds est probablement due à un mauvais placement des lentilles. Je n'ai pas su déterminer leur origine exacte.

Sur la photo 4, on voit apparaître un signe d'aberrations. On voit aisément que les raies horizontales sont moins bien résolues que les raies verticales. Il est possible de faire la focalisation parfaitement sur l'une des deux directions mais pas les deux en même temps. Ceci révèle la présence d'un astigmatisme, qui est du à un défaut d'alignement en angle. Cette origine du problème est claire lors de l'étude des angles dans la partie 3.3.

Bien que la comparaison à la théorie soit difficile, je peux au moins comparer les expériences entre elles et voir la dégradation du contraste facilement. Ceci permettra d'obtenir des résultats plus exploitables pour les performances en angles.

Il semblerait que les performances de la lentille en imagerie ne soient pas significativement meilleures avec une ouverture supérieure à 22 mm selon mes résultats expérimentaux.. La seule chose certaine, c'est que les mires de $2.2 \mu\text{m}$ sont parfaitement résolues pour les diamètres d'ouverture compris entre 22 mm et 40 mm. Pour mieux tester ce système, il aurait fallu une mire avec des raies plus fines. (Malheureusement, je n'ai pas pu m'en procurer.)

3.2 Une méthode efficace d'alignement

J'ai testé deux méthodes d'alignement des optiques.

La première consiste à envoyer un petit faisceau sans mire dans le montage. Le principe était de faire en sorte que le faisceau garde la même direction, et ne soit pas dévié lorsque je rajoute une lentille. Le problème avec cette méthode est qu'il est possible d'avoir une lentille décentrée sur l'axe optique, et avec un angle tout en ne déviant pas le faisceau. Cette méthode peut donc poser problème pour avoir à la fois un bon placement en angle et un bon centrage. Rajouter un miroir accolé à la lentille et aligner son reflet sur le faisceau d'arrivée permettrait de résoudre le problème (ce que je ne faisais pas). Mais les lentilles utilisées ont permis une méthode plus simple d'utilisation.

La seconde méthode exploite le fait que les lentilles utilisées sont composées de plusieurs lentilles. Bien que traitées anti-reflet, elles reflètent une partie de la lumière. L'idée a donc été d'aligner les reflets des lentilles sur le faisceau d'entrée. Le hublot lui, n'est pas traité anti-reflet. Il est donc facile d'aligner son reflet sur le faisceau d'entrée. Étant entièrement plan, ce hublot ne pose pas de question de positionnement latéral. Ce simple reflet permet de l'aligner parfaitement en angle. Pour l'objectif qui possède 3 lentilles, j'ai pu voir 5 reflets dont l'intensité totale était de l'ordre de 2% de l'intensité d'entrée. Un mauvais alignement en angle et un mauvais centrage (vertical ou horizontal) résulte en la formation de plusieurs reflets. Il suffit donc de réussir à aligner ces 5 reflets sur le faisceau d'entrée pour être certain d'avoir un très bon alignement et un très bon centrage. La lentille f_1 possède également 2 reflets, que j'ai pu superposer au faisceau d'entrée. Les lentilles suivantes ne permettent pas d'utiliser cette méthode car le faisceau n'est plus assez intense en raison de son élargissement. J'ai donc aligné les dernières lentilles en utilisant la première méthode.

Ceci a décuplé ma précision et m'a permis d'améliorer considérablement mes résultats expérimentaux. Pour avoir une idée de cette précision, j'ai considéré qu'on peut superposer les deux faisceaux de lumière à 0.5 mm près (diamètre du faisceau utilisé), voir mieux. Sachant qu'il y a environ 20 cm entre la lentille et le faisceau laser (taille qu'on peut augmenter si nécessaire) on obtient une précision

en angle de environ 0.07 degré. Ceci s'avérera suffisant pour aligner les optiques.

3.3 La tolérance en angle

Maintenant que j'ai obtenu une bonne précision sur le placement des lentilles, je peux tester leurs sensibilité en angle. Dans cette partie, j'ai voulu tester le montage final tel qu'il sera sur l'expérience et ai donc remis la magnification par 3. Afin de tester uniquement les lentilles les plus sensibles et donc les plus pertinentes, j'ai utilisé le logiciel zemax. Pour estimer la sensibilité en angle, j'ai fait varier l'angle jusqu'à ce que des rayons sortent de la tâche d'Airy. J'ai obtenu les résultats suivants résumés dans le tableau ci-dessous :

	Hublot	$f_0(100)$	$f_1(300)$	$f_2(-20)$
Tolérance(en degré)	0.6	0.1	0.2	1.5

Les trois optiques les plus sensibles sont donc le hublot, la lentille f_1 de focale 300 et l'objectif f_0 . Ce sont les trois optiques que j'ai testées expérimentalement. Cette ordre de sensibilité est cohérent avec la diminution de l'ouverture numérique utilisée. On observe que la sensibilité aux angles, et donc à des aberrations géométriques, est d'autant plus importante que l'ouverture numérique utilisée est grande.

Pour cela, j'ai utilisé des montures Thorlabs (KS2T pour l'objectif, KM100B/M pour le hublot et une monture de miroir KM200 pour la lentille f_1) qui possèdent une vis de TIR=80. Ceci signifie que la vis parcourt 1 pouce (= 25.4 mm) en 80 tours. Connaissant la longueur entre la vis et le support, je connais donc l'angle obtenu par tour. (0.24 degré pour f_1 et l'objectif, 0.36 degrés pour le hublot). J'ai ensuite relevé le contraste pour différents angles.

Pour cette mesure, une complication est apparue : le contraste n'est pas toujours le même selon l'axe horizontal ou vertical. Il est possible de faire la mise au point successivement suivant l'axe vertical et l'axe horizontal et d'obtenir un excellent contraste. Ceci révèle la présence d'un astigmatisme, d'autant plus qu'on voit l'effet apparaître lorsque l'angle augmente et disparaître lorsqu'on retourne à un angle nul. Cependant, pour l'imagerie finale, il faudra résoudre le mieux possible à la fois les objets verticaux et horizontaux. Par conséquent, pour toutes les mesures de contraste qui suivent, je me suis placé au meilleur compromis entre la netteté verticale et la netteté horizontale.

Les trois graphiques (8, 10 et 9) montrent que le contraste diminue peu à peu lorsque l'angle augmente en valeur absolue. La tolérance correspond à la petite zone où le contraste reste à peu près constant. J'ai choisi de prendre la tolérance comme la zone sur laquelle il n'y a pas de baisse mesurable du contraste. On relève des tolérances expérimentales supérieures aux tolérances théoriques (voir tableau ci-dessous). Ceci peut s'expliquer par la taille trop importante des raies de la mire, la qualité de l'image n'étant pas meilleure en pleine ouverture que celle avec une ouverture de 22 mm. On peut penser qu'avec une mire plus fine, on aurait une tolérance plus petite.

	Hublot	$f_0(100)$	$f_1(300)$	$f_2(-20)$
Tolérance théorique (en degré)	0.6	0.1	0.2	1.5
Tolérance expérimentale (en degré)	1	0.4	0.7	non mesurée

A présent que j'ai obtenu les tolérances en angles sur les optiques, je peux conclure sur l'utilité de la méthode d'alignement de la partie 3.2. Une précision de l'ordre de 0.1 degré est suffisante pour placer ces optiques dans ce montage d'imagerie, pour une résolution d'au moins $2.2 \mu\text{m}$.

Pour le montage en imagerie, il reste encore à évaluer la largeur de champ et la profondeur sur laquelle il est possible de résoudre la mire. J'ai effectué ces deux mesures de façon qualitative en raison de quelques difficultés.

Pour le champ transverse, j'ai déplacé la mire horizontalement puis j'ai recentré l'image sur la caméra à l'aide des deux miroirs situés entre la lentille f_1 et f_2 . J'ai observé une dégradation visible du contraste au bout de environ 1.5 mm. Puis, j'ai déplacé la mire dans l'autre sens et réajusté l'image à l'aide des miroirs. Le problème est que cette opération m'a donné une image dégradée alors que la mire était de nouveau centrée. Ainsi, je ne peux pas affirmer que la grandeur que j'ai mesurée est réellement le champ transverse du système.

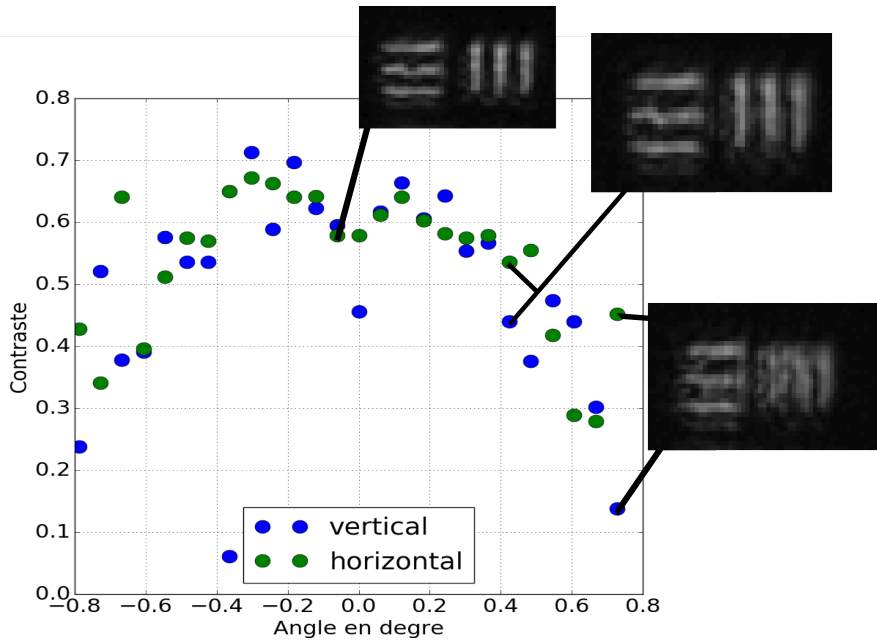


FIGURE 8 – Contraste de la mire de pas $2.2 \mu\text{m}$ en fonction de l’angle de l’objectif. L’objectif est déplacé en angle avec un pas de 0.06 degré (un pas = un quart de tour de vis) grâce à une monture KS2T Thorlabs. On constate une baisse mesurable du contraste au bout de 0.4 degré environ, ce qui donne la précision à laquelle il faut placer l’objectif.

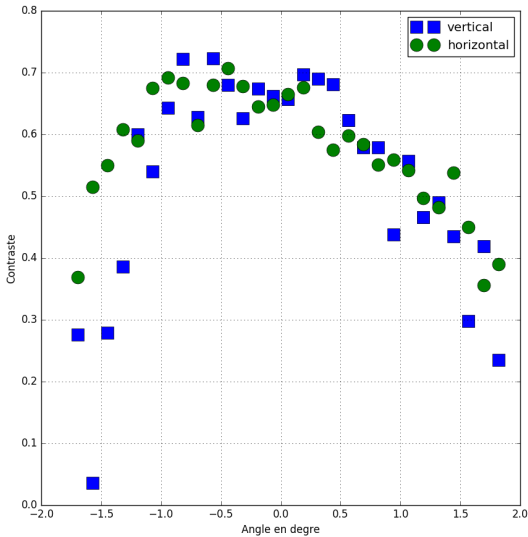


FIGURE 9 – Contraste de la mire de pas $2.2 \mu\text{m}$ en fonction de l’angle de la lentille f_1 . Le pas en angle est de 0.12 degré (un pas = un demi tour de vis). On obtient une baisse du contraste pour un angle de environ 0.7 degré. Ce qui donne la précision à laquelle il faut placer la lentille f_1 .

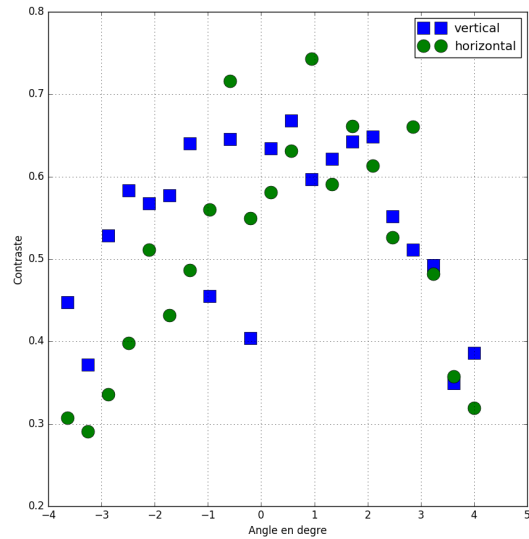


FIGURE 10 – Contraste de la mire de pas $2.2 \mu\text{m}$ en fonction de l’angle du hublot. Le pas en angle est de 0.36 degré (un pas = un tour de vis). On obtient une baisse du contraste pour un angle de environ 1 degré ; ce qui donne la précision à laquelle il faut se placer par rapport au hublot (On ne peut pas le déplacer ou l’orienter sur le montage final).

Pour la profondeur, j’ai déplacé la mire dans le sens de l’axe optique, puis j’ai déplacé la caméra pour récupérer la mise au point. La difficulté d’exploitation des résultats provient du fait que la magnification change en fonction de la position de la mire (d’un facteur 2 environ). L’image très

petite (mire la plus proche de l'objectif) est limitée par pixellisation, et les images plus grandes ont un meilleur contraste puisqu'elles ne sont plus limitées par pixellisation. Il m'a semblé que les images étaient assez propres sur une distance de environ 3 mm (le constructeur donne 5 mm pour l'objectif). La profondeur de champ du système doit être de cet ordre de grandeur, mais il manque un critère plus objectif.

4 Le montage utilisé en focalisation

Après avoir obtenu les performances du système d'imagerie, il faut évaluer celles du système utilisé en focalisation. Le principe du montage est globalement le même, sauf que la lumière parcourt les lentilles en sens inverse. Ce montage est a priori plus exigeant puisqu'il n'y a pas de limite matérielle comme la taille des traits de la mire. La plupart des lentilles sont les mêmes pour les deux montages de focalisation et d'imagerie et sont utilisées avec le même espacement entre elles. De plus, celles qui sont en commun sont les lentilles les plus sensibles. Le montage de focalisation apporte donc des informations sur le montage d'imagerie et réciproquement. Les principes de mesure et l'évaluation des performances en focalisation apporteront donc des informations complémentaires à celles obtenues avec le système d'imagerie.

J'ai réalisé le schéma figure 11 pour focaliser la lumière avec la lentille. La lentille f_3 de focale 100 en sortie de fibre permet de collimater la lumière. Ce faisceau est alors élargi par les lentilles f_2 et f_1 de focales -20 et 300 d'un facteur 15. L'iris placé avant la lentille f_2 permet de ne sélectionner que le centre du diaphragme, et donc la partie la plus uniforme de celui-ci. Le but de cette opération est d'obtenir le front d'onde le plus plan et uniforme possible avant l'objectif. L'objectif diaphragme le faisceau sur sa partie la plus uniforme puis le focalise. Un miroir a été ajouté pour des raisons de contraintes spatiales, celui-ci est de grande qualité ($\lambda/10$) et ne devrait donc pas rajouter d'aberrations. La tâche d'Airy qui se forme a un rayon de l'ordre du micromètre et la caméra CCD a des pixels de $7.4 \mu\text{m}$. Il a donc fallu rajouter une magnification pour l'observer. Dans un premier temps j'ai utilisé un objectif de microscope haut de gamme et de grande ouverture numérique (0.25) de la marque Mitutoyo combiné à une lentille de focale 200 mm afin d'effectuer une magnification par 10. L'ouverture numérique est divisée par 10 en sortie de ce système et laisse penser qu'il n'y aura pas d'aberrations causée par le système d'imagerie. Ensuite, les lentilles f_5 et f_6 de focales -20 et 60 permettent de magnifier de nouveau par 3. Une tâche d'Airy de $1.4 \mu\text{m}$ de rayon a donc un rayon de $42 \mu\text{m}$ sur la caméra, ce qui correspond à cinq pixels.

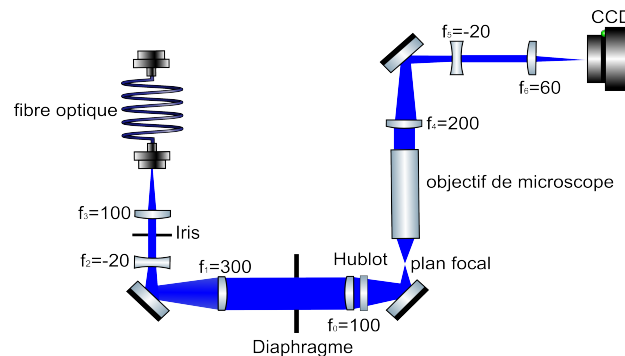


FIGURE 11 – Montage de focalisation. Toutes les focales sont exprimées en mm. La lentille f_3 permet de collimater le faisceau en sortie de fibre. Les lentilles f_2 et f_1 permettent d'élargir le faisceau d'un facteur 15. L'objectif focalise alors la lumière dans le plan focal. Le système composé de l'objectif de microscope, des lentilles f_4 , f_5 et f_6 permettent d'effectuer une imagerie du plan focal avec une magnification par 30.

Pour ce montage, j'ai testé les deux méthodes d'alignement que j'ai décrites dans la partie 3.2. La première méthode n'ayant pas été très concluante, je n'ai utilisé qu'une magnification par 10 au lieu d'une magnification par 30 afin d'éviter des aberrations dues au placement des deux dernières lentilles (difficiles à placer expérimentalement). Pour la seconde méthode, plus concluante, j'ai utilisé la magnification par 30. La comparaison des deux méthodes va permettre de bien identifier les effets

des aberrations géométriques.

4.1 Rayon d’Airy

De la même façon que pour le système d’imagerie, il a fallu quantifier les performances du système. L’idée la plus simple est d’évaluer le rayon d’Airy expérimentalement et de le comparer à la valeur théorique. Pour cela, j’ai mis un diaphragme devant l’objectif f_0 afin d’augmenter le rayon d’Airy et surtout de m’assurer que je vois bien une tâche d’Airy et pas une tâche due à des aberrations géométriques. J’ai pris le profil de cette tâche sur les images expérimentales que j’ai fitté par la fonction d’Airy 1D suivante.

$$I(x) = I_0 \left(\frac{2J_1(a(x - x_0))}{a(x - x_0)} \right)^2 + b \quad (5)$$

Les paramètres x_0 et b tiennent compte du centrage de la tâche et du fond de détection respectivement. Le paramètre a permet d’ajuster la largeur de la tâche d’Airy et de retrouver le rayon d’Airy. Avec python on obtient les figures 12 et 13 :

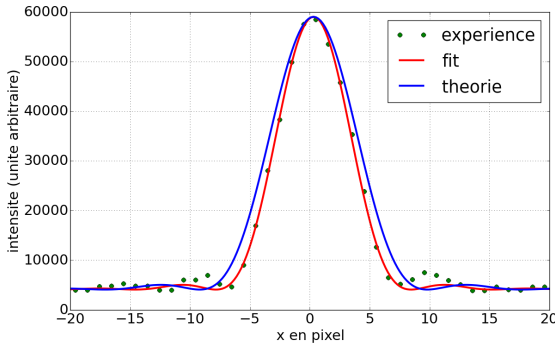


FIGURE 12 – Tâche d’Airy avec l’imagerie $\times 10$ et la première méthode d’alignement, en vert les points expérimentaux, en rouge le fit et en bleu la courbe théorique sans paramètres ajustables autres que l’intensité I_0 , la position centrale x_0 et l’offset b . Le diamètre d’ouverture vaut 8 mm. La courbe expérimentale possède des rebonds très importants par rapport à la courbe théorique, ce qui montre la présence d’aberrations géométriques. Le rayon d’Airy expérimental est inférieur au rayon d’Airy théorique. Ceci est sans doute dû à une erreur de magnification dont l’origine est un mauvais placement des optiques.

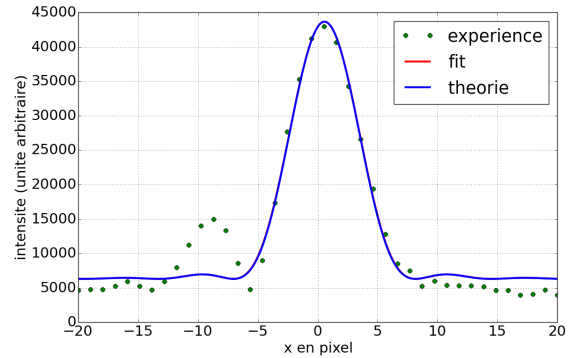


FIGURE 13 – Tâche d’Airy avec l’imagerie $\times 30$ et la méthode d’alignement des reflets, en vert les points expérimentaux, en rouge le fit et en bleu la courbe théorique sans paramètres ajustables autres que l’intensité I_0 , la position centrale x_0 et l’offset b . Le diamètre d’ouverture vaut 30 mm. La courbe expérimentale possède des rebonds très importants par rapport à la courbe théorique, en particulier sur la partie gauche de la figure, ce qui montre la présence d’aberrations géométriques.

On constate que les points expérimentaux ne correspondent pas parfaitement au profil d’une tâche d’Airy à cause des rebonds qui ont une intensité trop importante (figure 12) et sont très asymétriques (figure 13). Ceci est la preuve de la présence d’aberrations géométriques. Une autre différence importante entre théorie et expérience, est que le rayon d’Airy expérimental est inférieur au rayon d’Airy théorique dans le cas de la première méthode d’alignement. Ceci s’explique par une erreur de magnification due à une erreur de placement de l’objectif de microscope et de la lentille f_4 . Par la suite, j’ai effectué le même fit pour différentes valeurs d’ouverture du diaphragme et j’ai tracé le rayon d’Airy obtenu en fonction de l’ouverture du diaphragme. (figures 14 et 15).

Pour la première méthode (figure 14), on observe systématiquement un rayon d’Airy inférieur au rayon théorique pour les petites ouvertures. Ceci confirme l’hypothèse d’une erreur de magnification. Pour des ouvertures plus importantes, on constate une déviation entre la théorie et l’expérience, vers un diamètre de 20 mm environ. Le rayon d’Airy cesse de diminuer et commence même à augmenter. C’est

la marque des aberrations géométriques. Ce montage n'était pas plus performant si on augmentait l'ouverture au-delà de 20 mm.

Pour la seconde méthode (figure 15 et zoom sur la figure 16), il n'y a pas d'erreur de magnification visible. La théorie et l'expérience sont en accord jusqu'à la pleine ouverture. Les performances du montage augmentent jusqu'à la pleine ouverture et sont très proches de celles de la théorie.

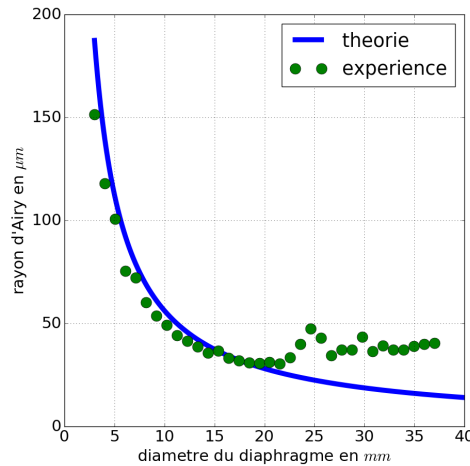


FIGURE 14 – Rayon d'Airy en fonction de l'ouverture du diaphragme pour la première méthode d'alignement. A faible ouverture, les points expérimentaux sont en dessous de la courbe théorique, ce qui s'explique par une erreur de magnification. Au-delà d'une ouverture de 20 mm le rayon d'Airy ne diminue plus, et augmente même un peu. Ceci montre la présence d'aberrations géométriques. Les barres d'erreurs sont comprises dans la taille des points.

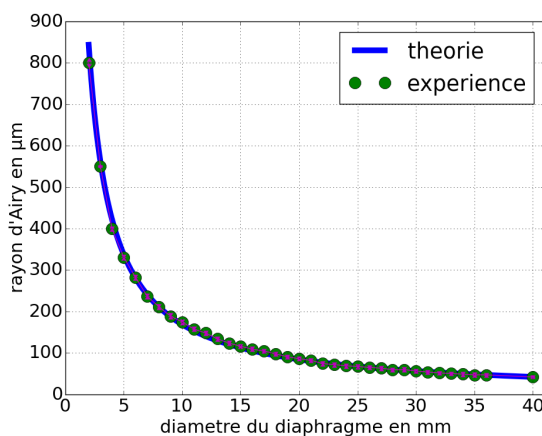


FIGURE 15 – Rayon d'Airy en fonction de l'ouverture du diaphragme avec la méthode d'alignement des reflets. Théorie et expériences sont en accord jusqu'à la pleine ouverture. Les barres d'erreurs sont comprises dans la taille des points.

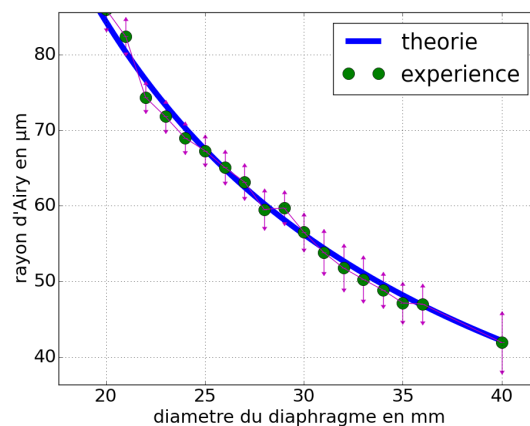


FIGURE 16 – Zoom sur la figure précédente, avec les barres d'erreurs visibles.

Bien que les rayons d'Airy correspondent à la théorie, les formes des tâches d'Airy ne correspondent pas tout à fait à la théorie. D'une part il y a des rebonds plus importants que la théorie, d'autre part ces rebonds ne sont pas symétriques. Il est logique que l'asymétrie des rebonds vienne d'aberrations géométriques. Cependant, le fait que ces rebonds soient trop importants et surtout présents même pour des petites ouvertures du diaphragme est surprenant. J'ai deux hypothèses pour ce dernier problème : la première est simplement que je n'ai pas su me placer parfaitement au focus avec la caméra, ce qui

expliquerait que les rebonds expérimentaux soient aussi importants. La seconde est que mon placement de lentille ne permet pas d'avoir un front d'onde entièrement plan à son arrivée sur l'objectif.

Pour tester la première hypothèse, j'ai tout simplement choisi un diamètre d'ouverture du diaphragme et fait changer la position de mon système d'imagerie en bougeant l'objectif de microscope à l'aide d'une platine de translation. Je n'ai pas retouché aux optiques situées derrière l'objectif de microscope puisque le faisceau est collimaté à la sortie de celui-ci. Le déplacement du focus est de l'ordre de 10 micromètres, ce qui est de toutes façons bien plus petit que ma précision de placement des lentilles. Je me suis placé au minimum des rebonds mais ceux-ci sont restés plus importants que la théorie.

Pour tester la seconde hypothèse, il me faudrait tester la planéité du front d'onde. L'idée est de se débarrasser des optiques qui pourraient déformer le front d'onde. Pour cela nous pourrions retirer toutes les optiques et placer la fibre optique nue à une distance suffisante pour que le front d'onde soit plan. Pour évaluer cette distance, j'ai utilisé le logiciel Zemax. Le résultat est qu'il faut placer la fibre à environ 15 m pour que l'objectif soit limité par diffraction. On pourrait alors voir si les rebonds changent avec la position de la fibre. Bien que je n'ai pas pu réaliser cette expérience, ce travail sous Zemax montre qu'il faut que le faisceau diverge moins que 10^{-3} radian, ce qui se traduit par une variation de 1 mm du diamètre du faisceau sur une distance de 1m. La collimation de ce faisceau est donc assez sensible et ne doit pas être négligée si on veut atteindre la limite par diffraction.

En conclusion, j'ai une méthode d'analyse des performances du système en focalisation qui permet de retrouver avec une bonne précision le rayon d'Airy et ceci même lorsque de la lumière est en partie dispersée dans les anneaux de la tâche. La quantité de lumière dans l'anneau central est moins bonne en pratique que ce que laissent penser les résultats de ma méthode d'exploitation expérimentale. Cette méthode a tout de même permis d'affirmer que le système utilisé en pleine ouverture est proche de ce qu'on devrait obtenir selon la théorie.

On a également pu voir à quelle point la méthode d'alignement des reflets donne de meilleurs résultats expérimentaux. Pour la suite, je n'ai utilisé que cette méthode.

4.2 La courbure et le critère de Strehl

Le but de cette partie est de développer des méthodes d'exploitation des images qui permettront de vraiment connaître la performance du montage par rapport à ce qui est attendu sur l'expérience. Dans le cadre de l'expérience sur les atomes, le critère important est d'avoir une grande différence d'intensité entre deux points distants de 250 nm. Ceci sera d'autant plus vrai que la courbure au sommet de la tâche d'Airy sera importante et que l'intensité sera forte. Pour obtenir une courbure donnée, on souhaite utiliser l'intensité la plus faible possible. Le critère pertinent est donc le rapport de la courbure sur l'intensité. Ce qui compte est donc la forme du pic central ainsi que la quantité de lumière que le système parvient à mettre à l'intérieur du cercle central de la tâche d'Airy.

Pour évaluer la courbure, j'ai réutilisé le fit précédent avec la fonction d'Airy (figure 13) mais j'ai contraint le fit sur les points qui se situent sur le pic central de la tâche. J'ai fixé l'offset à la valeur calculée sur un fit avec plus de points. Python ajuste donc beaucoup plus la tâche d'Airy sur les points du sommet de la tâche, ce qui permet de s'assurer qu'on récupère bien la courbure. Pour évaluer cette courbure théoriquement, j'ai effectué un développement limité de la fonction d'Airy.

$$I(x) = I_0 \left(1 - \left(\frac{\pi dx}{2\lambda f}\right)^2\right) \quad (6)$$

D'où on tire immédiatement l'expression de la courbure théorique :

$$Courbure = I_0 \left(\frac{\pi d}{2\lambda f}\right)^2 \quad (7)$$

On constate que la courbure augmente avec le carré du diamètre, ce qui permet de voir aisément les effets de la variation du diamètre à grande ouverture. L'intensité peut être choisie de façon arbitraire sur mon montage en changeant l'intensité du faisceau incident ou les paramètres de la caméra. J'ai évalué la quantité $Courbure/I_0$ pour faciliter la comparaison entre la théorie et l'expérience. J'ai ainsi obtenu la figure 17. On obtient la confirmation que la courbure au niveau du sommet de la tâche d'Airy

correspond à celle de la théorie. Ce résultat est très similaire à celui obtenu avec le rayon d'Airy, ce qui s'explique par le fait que la fonction de fit utilisée est la même. La seule différence est que la courbure est calculée sur un peu moins de points pour coller le plus possible à la courbure au centre du pic. Ceci ne nous apporte pas de renseignements capitaux que nous n'avions pas avec le tracé du rayon d'Airy en fonction du diamètre mais apporte la confirmation que la courbure au centre de la tâche est proche de la courbure théorique en pleine ouverture.

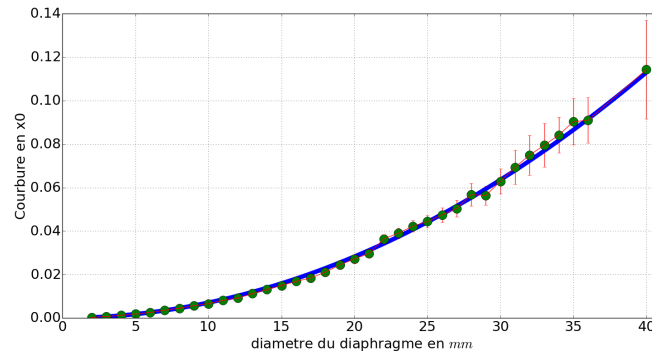


FIGURE 17 – Courbure en x_0 normalisée par l'intensité du pic en fonction du diamètre du diaphragme. La courbe continue est la courbure théorique normalisée par I_0 .

Le deuxième critère consiste à évaluer la quantité de lumière qui arrive dans la tâche centrale, par rapport à la quantité de lumière maximale qui peut aller au centre en théorie. Ce critère s'appelle le rapport de Strehl. Pour l'évaluer, j'ai sommé l'intensité de tous les pixels qui se situent à l'intérieur d'un cercle dont le rayon vaut le rayon d'Airy, que j'appelle I_{in} . Puis j'ai sommé l'intensité de tous les pixels qui se situent à l'intérieur d'un cercle de rayon cinq fois plus grand, ce que j'appelle I_{tot} . Le rapport $\frac{I_{in}}{I_{tot}}$ donne la fraction de lumière contenue dans le pic central. Pour éviter des problèmes liés au fond de détection de la caméra, j'ai retiré la moyenne d'une zone sans lumière à l'image. Enfin, j'ai normalisé cette fraction par la fraction théorique de lumière qui se situe dans le rayon d'Airy. La fraction théorique vaut 83.9% [3]. Le tracé de cette quantité est présenté sur la figure 18.

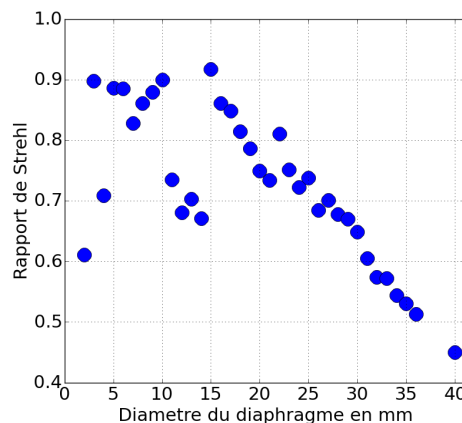


FIGURE 18 – Rapport de Strehl en fonction de l'ouverture du diaphragme. On constate que le rapport de Strehl diminue lorsque le diamètre augmente. Ceci traduit la présence de rebonds de plus en plus importants. On voit que ce problème apparaît dès les petites ouvertures de diaphragme et empire lorsqu'on dépasse une ouverture de 15 mm

Ce dernier critère nous montre que bien que la tâche d'Airy possède une courbure et un rayon très proche de la théorie mais il manque plus de 50% de la lumière dans le pic central. Il reste donc une marge assez importante d'amélioration possible du montage.

4.3 La dépendance en angle

Pour évaluer la dépendance en angle de façon pertinente, il faut se demander quels sont les critères les plus importants entre le fait de garder une bonne courbure et d’avoir le plus de lumière possible dans la tâche centrale. Il s’avère que le premier est plus décisif que le second. Si on veut pouvoir exciter un seul atome sans exciter ses voisins, le plus important est que la différence entre leurs niveaux d’énergie soit la plus grande possible. Dans le cas où la courbure diminue trop, il n’est plus possible de sélectionner un seul atome. En revanche, même si on perd de la lumière, on peut toujours augmenter l’intensité du laser. En pratique, il n’est pas souhaitable d’avoir une intensité trop importante. Ainsi, le critère le plus important est celui de la courbure normalisée par l’intensité du pic, sans que le rapport de Strehl ne soit à négliger complètement.

Pour le critère de courbure, j’ai réutilisé la méthode développée dans la partie précédente. Et, en faisant varier l’angle du hublot, de la lentille f_1 et de l’objectif f_0 de la même façon que dans la partie 3.3 j’obtiens les figures 19,20 et 21.

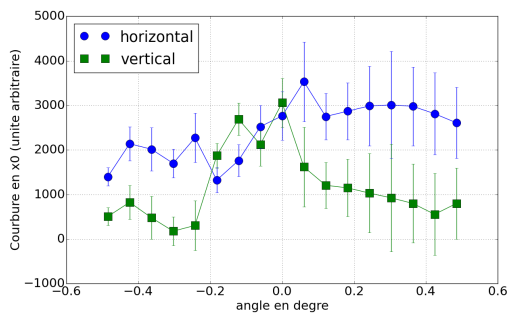


FIGURE 19 – Courbure en x_0 en fonction de l’angle de l’objectif. La courbe verticale donne une tolérance de environ 0.15 degré. La courbe horizontale ne permet pas de conclure. Je retiens la valeur de 0.15 degré comme la tolérance de l’objectif.

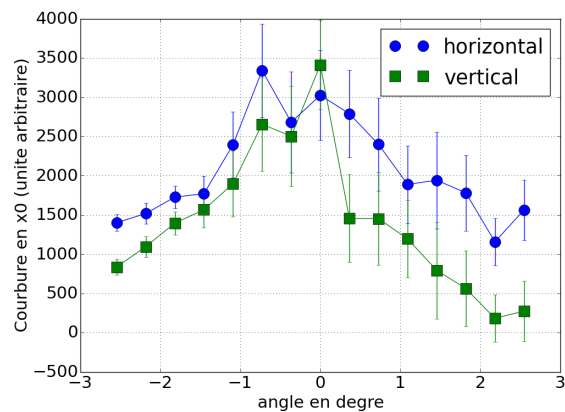


FIGURE 20 – Courbure en x_0 en fonction de l’angle du hublot. La courbure verticale donne une tolérance de environ 0.5 degré et la courbure horizontale donne une tolérance de environ 0.7 degré. Je retiens la plus petite valeur comme étant la tolérance du hublot.

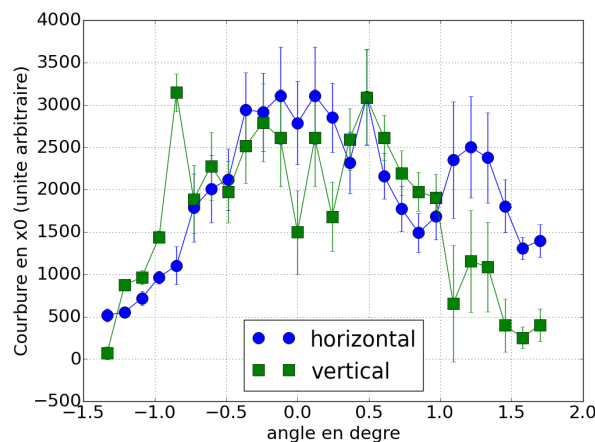


FIGURE 21 – Courbure en x_0 en fonction de l’angle de la lentille f_1 . Les courbes verticales et horizontales donnent une tolérance de environ 0.5 degré.

Ensuite, j’ai tracé le rapport de Strehl en fonction des angles (figures 22, 26 et 24) . J’ai également simplement tracé l’intensité I_0 en fonction de l’angle. Les paramètres d’éclairciment (intensité du laser) et de capture de la lumière (sensibilité de la caméra) ont été maintenus constants pendant ces mesures.

Si la valeur de l'intensité n'a pas de sens, les variations de cette valeur sont aussi un indicateur de la perte de luminosité à l'intérieur de la tâche, qui est donc à comparer avec le rapport de Strehl (figures 23, 27 et 25).

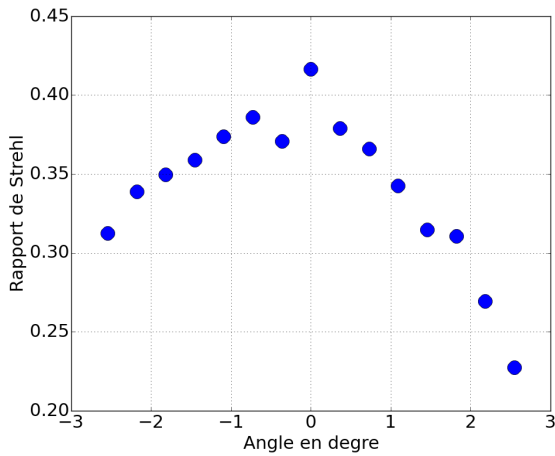


FIGURE 22 – Rapport de Strehl en fonction de l'angle du hublot. La tolérance est de l'ordre de 0.8 degré avant que la perte de luminosité soit nette.

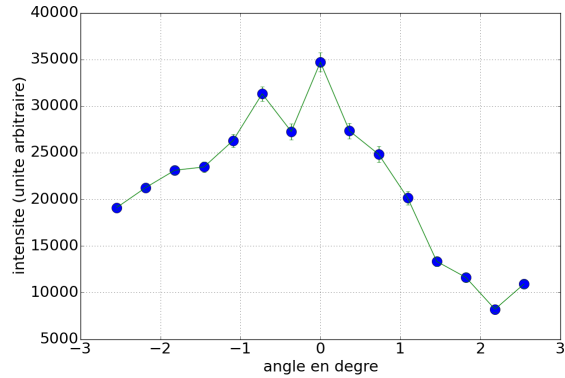


FIGURE 23 – Intensité au centre de la tâche d'Airy en fonction du hublot. Ce graphique est très similaire à celui du rapport de Strehl et donne la même tolérance (environ 0.8 degré).

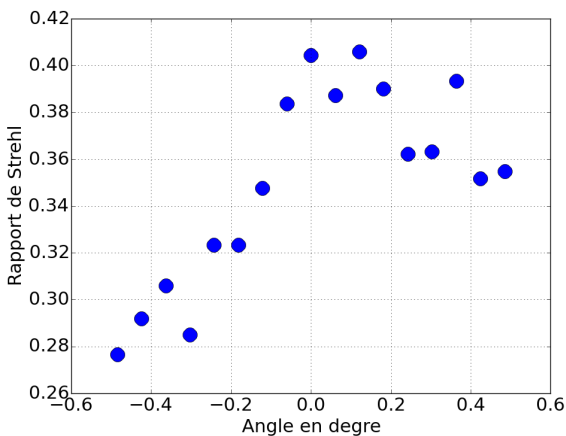


FIGURE 24 – Rapport de Strehl en fonction de l'angle de l'objectif. La perte de luminosité est visible à partir de 0.15 degré.

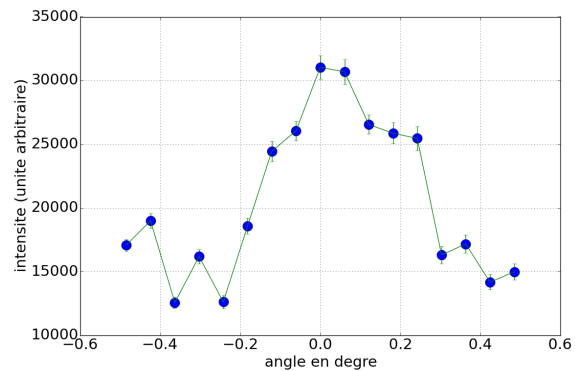


FIGURE 25 – Intensité en fonction de l'angle de l'objectif. L'allure de la courbe est similaire à celle du rapport de Strehl. La perte de luminosité est importante au-delà de environ 0.15 degré.

Le tableau ci-dessous rapporte les différentes tolérances estimées à partir des graphiques précédents.

	Hublot	$f_0(100)$	$f_1(300)$
Tolérance théorique (en degré)	0.6	0.1	0.2
Tolérance en intensité (en degré)	0.8	0.15	0.5
Tolérance rapport de Strehl (en degré)	0.8	0.15	0.6
Tolérance en courbure (en degré)	0.5	0.15	0.5

On peut noter que les différents critères donnent des tolérances assez proches. Ces tolérances ne sont pas précises mais évaluées de façon plutôt pessimiste. Au final, la tolérance la plus critique du montage est celle de l'objectif qui est de l'ordre de 0.15 degré. La précision de la méthode d'alignement des reflets est tout juste suffisante pour placer cette lentille de façon fiable.

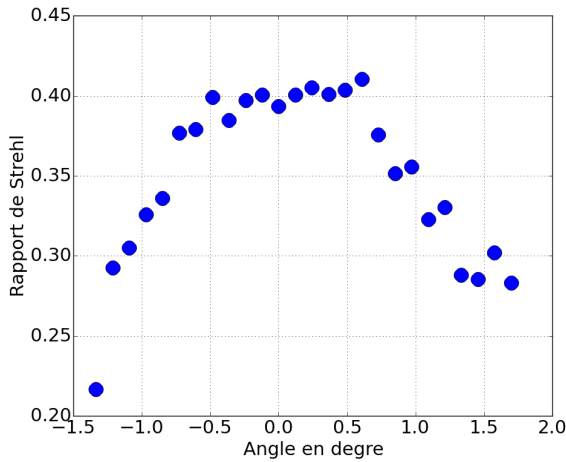


FIGURE 26 – Rapport de Strehl en fonction de l'angle de la lentille f_1 . Un plateau est très clairement visible de -0.7 degré à 0.6 degré. La tolérance est donc d'environ 0.6 degré.

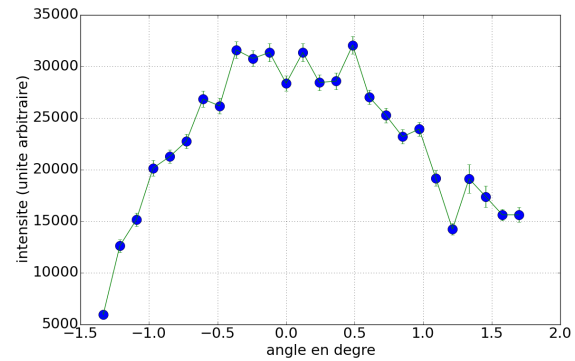


FIGURE 27 – Intensité en fonction de l'angle de la lentille f_1 . La courbe est de nouveau similaire à celle du rapport de Strehl. La tolérance est de l'ordre de 0.5 degré.

5 Conclusion

Le prototype que j'ai monté possède des performances qui ne sont pas optimales mais qui sont déjà très satisfaisantes en vue de son utilisation sur l'expérience d'atomes froids. Le système peut être utilisé sans diaphragme sans perdre en qualité à cause d'aberrations. Les tolérances en angle ont été évaluées dans les deux montages et valent dans le pire des cas 0.15 degré. La méthode d'alignement à l'aide des reflets permet d'avoir une précision suffisante qui garantit un bon placement des optiques et a abouti à une proposition de protocole (voir l'annexe). Cependant, quelques questions sont restées sans réponse ou n'ont pas eu de réponse quantitative. Ainsi la profondeur d'utilisation et la largeur de champ pourraient être mieux évaluées. On ne sait pas si la meilleure performance atteinte est limitée par la qualité des optiques utilisées ou si le montage peut encore être amélioré. Parmi les améliorations possibles, le problème des rebonds très intenses aussi bien en imagerie qu'en focalisation me semble être une bonne piste. Comprendre l'origine de ces rebonds permettraient sans doute d'améliorer le rapport de Strehl du montage. L'expérience de la fibre nue à 15 m pourrait permettre de comprendre l'origine de ces rebonds.

6 Annexe

6.1 Protocoles de construction.

Je détaille les protocoles que je propose pour placer les lentilles sur le montage final. Ce sont les protocoles que j'ai suivi lors de la construction des montages, la seule différence est que je n'ai pas utilisé le faisceau vert pour la focalisation mais le faisceau bleu. Ils ont pour principal défaut de ne pas garantir parfaitement le placement en distance des lentilles f_5, f_6, f_2 et f_3 . En particulier il faut faire attention à ce que le faisceau vert soit collimaté précisément entre la lentille f_1 et l'objectif.

Proposition de protocole pour l'imagerie.

1. Aligner le faisceau d'imagerie bleu collimaté sur le reflet du hublot (car le hublot est fixe). Il faut au moins 20 cm entre le hublot et le faisceau pour garantir un bon placement sur l'ensemble.
2. Placer l'objectif f_0 derrière le hublot à 8.3 mm environ.
3. Aligner les cinq reflets sur le faisceau d'entrée en jouant à la fois sur l'angle et le centrage du faisceau.
4. Ajouter la séparatrice dichroïque.
5. Placer la lentille f_4 de focale 300 mm de façon à collimater le faisceau pour être à la bonne distance. Puis aligner les deux reflets au niveau de l'objectif.
6. Ajouter les lentilles f_5 et f_6 . Je n'avais pas pu voir de reflets donc il faut s'assurer que le faisceau n'est pas dévié. (Pour plus de précision, il est possible d'utiliser un miroir et d'aligner ce reflet en plus.)
7. Je n'ai pas trouvé de méthode plus précise que la règle pour effectuer ce placement en distance.
8. Ajouter la caméra

Proposition de protocole pour la focalisation.

1. Avoir monté le système d'imagerie.
2. Amener le faisceau vert au même endroit que le faisceau d'imagerie à l'aide de au moins deux miroirs pour avoir un degré de liberté en angle et un degré de liberté en centrage.
3. Utiliser les miroirs pour aligner les reflets du hublot et de l'objectif sur le faisceau vert. Le faisceau est alors exactement à la même position que le faisceau d'imagerie en angle et en centrage.
4. Effectuer la même chose pour les lentilles f_1, f_2 et f_3 que pour les lentilles f_4, f_5 et f_6 .
5. Rajouter des diaphragmes (au moins deux) pour garder la position en angle et le centrage du faisceau vert.
6. Aligner le faisceau vert le plus petit possible (grâce au diaphragme) sur la sortie de la fibre optique. Cette opération peut être facilitée par l'utilisation de deux miroirs entre la lentille f_2 et la lentille f_3 .
7. Brancher la fibre optique du faisceau vert dans la sortie de fibre finale.
8. Allumer la fibre verte. Le faisceau doit passer par les diaphragmes et atteindre l'objectif sans réajuster le faisceau à l'aide des miroirs. Ce n'est que dans ce cas que j'ai eu les meilleures performances.

6.2 Matériel utilisé durant ce stage

Ce tableau donne la référence des lentilles utilisées pendant ce stage. Je me réfère au schéma du montage complet (figure 1) pour la numérotation des lentilles.

lentille	f_1 et $f_4 = 300$	f_2 et $f_5 = -20$	$f_3 = 100$	$f_6 = 60$
référence Thorlabs	AC508-300A	ACN127-020-A	AC254-100-A	AC254-60-A

Références

- [1] Fundamental Optics - CVI Melles Griot 2009 Technical Guide, Vol 2, Issue 1, page 20
<http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Fundamental-Optics.pdf>
- [2] Fundamental Optics - CVI Melles Griot 2009 Technical Guide, Vol 2, Issue 1, page 13
<http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Fundamental-Optics.pdf>
- [3] Fundamental Optics - CVI Melles Griot 2009 Technical Guide, Vol 2, Issue 1, page 22
<http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Fundamental-Optics.pdf>