

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MEMOIRE

présenté en vue de l'obtention du

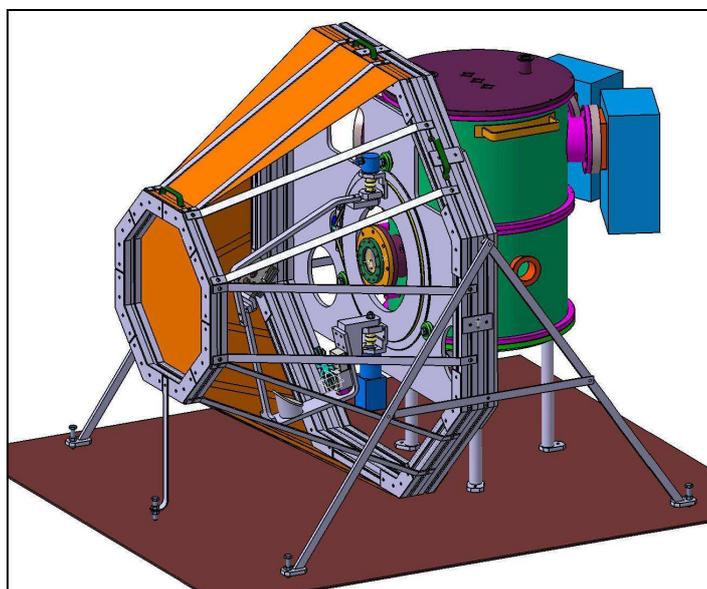
DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.

Spécialité : Instrumentation-mesure

par

Cyrille Delisle

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN
DISPOSITIF DE MESURE DU DIAGRAMME
D'ANTENNE D'UNE CAMERA BOLOMETRIQUE**



Soutenu le 3 juin 2008
devant le jury composé de :

Président : M. Patrick Juncar

Membres : Mme. Annick Razet
M. Mark Plimmer

M. Michel Talvard
M. Louis Rodriguez
M. Pascal Gallais

Professeur CNAM

Maître de conférence CNAM
Maître de conférence CNAM

Chef de projet CEA/Saclay
Chercheur CEA/Saclay
Chercheur CEA/Saclay

Les travaux relatifs au présent mémoire ont été effectués au Commissariat à l’Energie Atomique dans le Service d’Astrophysique, sous la direction de M. Michel Talvard et de M. Louis Rodriguez.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés au Commissariat à l’Energie Atomique (CEA) à Saclay, dans le Service d’Astrophysique (SAp) au sein l’Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l’Univers (IRFU). Je remercie très vivement Pierre-Olivier Lagage et Michel Talvard pour m’avoir donné l’opportunité de réaliser ce mémoire au sein de ce service.

Je tiens à remercier en premier lieu, Louis Rodriguez, Pascal Gallais et Yannick Le Pennec qui m’ont dirigé et suivi tout au long de ce travail. Les nombreux conseils et suggestions qu’ils m’ont apportés m’ont permis de mener à bien ce travail dans des conditions scientifiques et humaines stimulantes.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à toute l’équipe de ce laboratoire, auprès de laquelle j’ai énormément appris : Didier Dubreuil, Olivier Boulade, Eric Doumayrou, Jérôme Martignac, Gilles Durand, Michel Lortholary, Benoît Horeau pour toute leur participation, leurs réponses à mes questions.

J’adresse mes remerciements à Gérard Hamon, Emmanuel Grégoire, Thierry Orduna, pour le soutien technique qu’ils m’ont apporté.

Mes remerciements vont également aux mécaniciens du SIS (Service d’Ingénierie des Systèmes) : Philippe Hardy, Jean-François Millot et Romain Berthier qui ont participé très activement à la partie mécanique du dispositif expérimental.

Enfin, je tiens à souligner qu’il fût très enrichissant et très motivant de travailler au sein de cette équipe très dynamique, à la fois sur le plan scientifique et sur le plan humain.

RESUME

Le sujet de ce travail est la conception et la réalisation d'un dispositif de test pour mesurer le diagramme d'antenne d'une caméra bolométrique, dans le domaine submillimétrique.

Les performances du banc de test que l'on a réalisé permettent de simuler une source ponctuelle qui émet une puissance de 0,23 pW dans une bande de fréquence autour de 660 GHz ($\lambda = 450\mu\text{m}$). La conception mécanique du banc de test permet de déplacer cette source pour éclairer la caméra dans toutes les directions de l'angle solide du demi-espace. L'émission de cette source est modulée pour que l'on puisse la dissocier de l'émission du fond. Le traitement des données identifie le signal dans l'espace des fréquences.

Dans un premier temps, un cahier des charges a été rédigé, à partir de plusieurs entretiens avec l'équipe du laboratoire, pour fixer le design optique et mécanique du banc de test, ainsi que le choix de l'instrumentation. Dans la deuxième partie du stage, le banc de test a été mis en place, la programmation du contrôle-commande du dispositif de mesure a été réalisée sous le logiciel Labview. Des tests préliminaires de performance et de caractérisation du banc de test ont été effectués.

Et enfin, les premières mesures de diagramme d'antenne ont été effectuées sur la caméra P-ArTéMiS. Les données sont traitées à partir de programmes écrits sous le logiciel Matlab, et les premiers résultats ont été interprétés.

Mots clés : Bolomètres, rayonnement submillimétrique, corps noir, miroir parabolique, source ponctuelle, diffraction, tâche d'Airy, signal modulé, diagramme d'antenne, lumière parasite.

ABSTRACT

The subject of this work consists in the designing and setting up of a test device to measure the antenna pattern of a bolometric camera operating in the submillimeter waves.

The performances of the test bench, that we set up, allows to simulate a point light source emitting a power of 0,23 pW in a submillimeter window around 450 μm . The mechanical design of this test bench allows to move this source so as to illuminate the camera in all directions of the solid angle of the half-space. The emission of this source is modulated so it can be separated from the background power. The processing of data identifies the signal in the frequency space.

In a first step, I wrote a schedule of conditions, based on several discussions with the laboratory team, to fix the optical and mechanical design for the test bench, as well as the choice of the instrumentation.

In the second part of the training, the test bench was set up, the programming of the device control for the measurements was carried out under the Labview software. Then preliminary tests of performance and characterization of the test bench were carried out.

And finally, the first measurements of antenna pattern on the P-ArTéMiS camera were performed. The data-processing programs were written under the Matlab software, and the first results were interpreted.

Keywords: Bolometers, submillimeter radiation, black body, parabolic mirror, point light source, diffraction, Airy spot, modulated signal, antenna pattern, stray light.

Table des matières

INTRODUCTION.....	11
1. PRESENTATION DU PROJET ARTEMIS	12
1.1. L'ASTRONOMIE SUBMILLIMETRIQUE.....	12
1.1.1 <i>L'intérêt scientifique du submillimétrique.....</i>	12
1.1.2. <i>Les limitations dues à l'atmosphère terrestre.....</i>	14
1.1.3. <i>Les techniques d'observation</i>	15
1.2. LES BOLOMETRES	15
1.2.1. <i>Un peu d'histoire.....</i>	15
1.2.2. <i>Principe d'un bolomètre.....</i>	16
1.2.3 <i>Equation de base des bolomètres</i>	16
1.2.4 <i>La réponse des bolomètres</i>	17
1.3. LES CAMERAS ARTEMIS	18
1.3.1 <i>Les matrice de bolomètres.....</i>	18
1.3.2. <i>La chaîne de détection.....</i>	20
1.3.3 <i>Le design optique.....</i>	20
2. CONTEXTE DU MEMOIRE CNAM.....	23
2.1. PROBLEMATIQUE.....	23
2.2 CAHIER DES CHARGES	23
2.2.1 <i>Définition des conditions recherchées :</i>	23
2.2.2 <i>Rôle et spécifications de chaque élément du banc de test</i>	24
3. DESIGN ET REALISATION D'UN BANC DE TEST.....	26
3.1 LA SOURCE.....	26
3.1.1. <i>Sa réalisation, sa description, et ses caractéristiques</i>	26
3.1.2. <i>La mesure de température de la source.....</i>	29
3.1.3 <i>La régulation de température.....</i>	29
3.2 LA MODULATION DU SIGNAL.....	31
3.2.1 <i>Le hacheur</i>	31
3.2.2. <i>Prédiction du signal modulé théorique</i>	32
3.2.3 <i>La commande du hacheur</i>	34
3.3. LE MONTAGE OPTIQUE ET LE DESIGN DU BANC DE TEST.....	35
3.3.1. <i>Le miroir parabolique</i>	35
3.3.2. <i>Construction géométrique:.....</i>	37
3.4. LE DEPLACEMENT	38
3.4.1 <i>Description du dispositif mécanique</i>	38
3.4.2 <i>Calcul des couples et choix des moteurs pas à pas</i>	39
3.4.3 <i>Commande des moteurs et résolution des déplacements.....</i>	42
3.4.5 <i>Mesure des déplacements.....</i>	43
3.5. CONTROL COMMANDE ET PROGRAMMATION	44
3.5.1. <i>Description du contrôle-commande</i>	44
3.5.2 <i>Description de la programmation</i>	45
4. TESTS ET PERFORMANCES	46
4.1 ESTIMATION DES ERREURS DE POSITIONNEMENT DU FAISCEAU PARALLELE.....	47
4.2 CARACTERISATION DE L'OPTIQUE DU BANC DE TEST	52
4.2.1 <i>Image d'une source ponctuelle.....</i>	52
4.2.2 <i>Premières résultats expérimentaux.....</i>	55
4.2.3 <i>Caractérisation de la source du banc du test.....</i>	59
4.3 LA PUISSANCE STABILITE ET REPRODUCTIBILITE DE LA SOURCE.....	60
4.3.1 <i>Mesures de stabilité et de reproductibilité</i>	60
4.3.2 <i>Mesures de puissance et comparaison au calcul théorique</i>	61

5. PREMIERES MESURES DE DIAGRAMME D'ANTENNE.....	64
5.1. CHOIX DE LA TAILLE DU TROU SOURCE.....	64
5.1.1. <i>Limite de résolution et tâche de diffraction.....</i>	<i>64</i>
5.1.2. <i>Estimation du rapport signal sur bruit pour différentes tailles de source.....</i>	<i>65</i>
5.2. PREMIERES MESURES ET INTERPRETATION	67
5.2.1. <i>Mesures réalisées</i>	<i>67</i>
5.2.2. <i>Traitement de données et méthode utilisée pour détecter le signal.....</i>	<i>68</i>
5.2.3. <i>Diagramme d'antenne de la matrice.....</i>	<i>70</i>
5.2.4. <i>Diagramme d'antenne d'un pixel.....</i>	<i>74</i>
CONCLUSION.....	75
BIBLIOGRAPHIE.....	76
ANNEXE 1 : DESSIN 3D DU BANC DE TEST ET DE LA CAMERA P-ARTEMIS.....	77
ANNEXE 2 : INSTRUMENTATION DU BANC DE TEST	78
ANNEXE 3 : SYNOPTIQUE DU SCHEMA DE CABLAGE POUR LE CONTROLE COMMANDE DU BANC DE TEST.....	86
ANNEXE 4 : PROGRAMME DES DEPLACEMENTS DU FAISCEAU PARALLELE	85
ANNEXE 5 : CONTROLE-COMMANDE DU BANC DE TEST	86
ANNEXE 6 : CALCUL DE LA SERIE DE FOURIER DE FONCTION PERIODIQUE DU SIGNAL MODULE THEORIQUE	87
ANNEXE 7 : EXPRESSION DE LA DIVERGENCE DU FAISCEAU.....	89
ANNEXE 8 : ETAPES DU TRAITEMENT DES DONNEES.....	90
ANNEXE 9 : TRAITEMENT DES DONNEES ET CHOIX DES PARAMETRES D'ACQUISITION	91
ANNEXE 10 : EXEMPLE DU TRAITEMENT DE DONNEES APPLIQUE SUR UN FICHIER D'ACQUISITION	94

Liste des figures

1.1	Spectre d'émission du corps noir dans la fenêtre submillimétrique.....	12
1.2	Comparaison d'images de la Nébuleuse de l'Aigle, M16.....	13
1.3	Première image obtenue à 450 μm de NGC 3576.....	13
1.4	Simulation de spectres de transmission atmosphérique.....	14
1.5	Schéma de principe du fonctionnement d'un bolomètre.....	16
1.6	Un pixel de la matrice.....	18
1.7	Concept de la matrice de bolomètres.....	19
1.8	Photo de la caméra P-ArTéMiS lors de la mission à KOSMA, mars 2006.....	22
1.9	Schéma de la chaîne de détection.....	20
1.10	Design de l'optique depuis le foyer Nasmyth jusqu'au détecteur.....	21
1.11	Design optique de la caméra P-ArtéMiS lors de la mission P-ArTéMiS/Apex1.....	21
1.12	Courbes de transmissions de la chaîne optique.....	22
2.1	Représentation des ses trajectoires du faisceau de lumière incident.....	24
2.2	Schéma de principe de la solution retenue pour la réalisation du banc de test.....	25
3.1	Dessin de réalisation de la source du banc de test.....	26
3.2	Courbe d'absorption du mélange absorbant (colle Stycast 2850 avec des grains SiC).....	28
3.3	Photo de la réalisation de la source.....	28
3.4	Contrôle de la température de la source.....	30
3.5	Vue de dessus de la modulation du signal (hélice à 6 pales).....	31
3.6	Représentation de la surface de la source recouverte par une pale du hacheur.....	32
3.7	Signal périodique théorique sur une demi-période.....	33
3.8	Module du spectre théorique	34
3.9	Schéma d'alimentation des deux phases du moteur de l'hélice du hacheur.....	35
3.10	Position du point focal du miroir parabolique désaxé de 90°	36
3.11	Disposition du trou source du corps noir au foyer du miroir parabolique.....	36
3.12	Schéma de construction géométrique d'un faisceau parallèle.....	37
3.13	Dispositif de déplacement du faisceau parallèle.....	38
3.14	Distances séparant les centres de gravité des éléments à l'axe de rotation.....	40
3.15	Distance entre les centres de gravité des deux supports et l'axe de rotation.....	41
3.16	Coordonnées du point M, centre du miroir plan.....	43
3.17	Synoptique du contrôle-commande du banc de test.....	44
3.19	Schéma de principe des deux méthodes écrites sous Labview.....	45
4.1	Schéma d'alignement optique du banc de test sur l'axe optique de la caméra.....	46
4.2	Etapes préliminaires aux mesures.....	47

4.3	Faisceau lumineux de la diode laser alignée sur l'axe optique des miroirs.....	48
4.4	Design 3D de la source modulée, des miroirs, du moteur et du plateau rotatif.....	48
4.5	Schéma de principe pour mesurer les déplacements du faisceau parallèle dans le visible.....	49
4.6	Représentation du diagramme des positions du faisceau.....	50
4.7	Erreur relative de positionnement du faisceau parallèle.....	51
4.8	Figure de diffraction d'Airy.....	52
4.9	Simulation Zemax du faisceau parallèle éclairant la caméra	53
4.10	Formation de l'image d'une source à l'infini à travers l'optique de la caméra.....	53
4.11	Mise en évidence de l'élargissement de la tâche d'Airy dans le plan d'observation.....	54
4.12	Disposition du banc de test pour effectuer les mesures sur la caméra P-ArTéMiS.....	55
4.13	Chaîne d'acquisition et de contrôle-commande de la caméra P-ArTéMiS.....	56
4.14	Images des trous source de différentes tailles.....	56
4.15	Résultats d'une série d'acquisitions de la caméra.....	57
4.16	Comparaison de l'image du flux parasite à une image théorique.....	58
4.17	Modifications du corps noir.....	58
4.18	Image restituée par la matrice du trou source de 1 mm.....	59
4.19	Profil d'intensité de l'image du trou source de 1 mm. Intensité normalisée à 1.....	59
4.20	Schéma optique équivalent.....	63
4.21	Distances prises en compte, d_{pale} et d_{source} , pour le calcul des angles solides.....	63
5.1	Angles d'ouverture dans les espaces objet et image.....	64
5.2	Largeurs à mi-hauteur des images pour différentes tailles de trou source.....	65
5.3	Images des trous source et histogrammes des amplitudes.....	66
5.4	Déplacements du faisceau parallèle sur l'axe 0° de -70° à $+70^\circ$	67
5.5	Spectre de référence présentant le maximum de signal.....	69
5.6	Calcul du signal dans l'espace temporelle et dans l'espace des fréquences.....	69
5.7	Mesures de flux total reçu par le détecteur sur l'axe à 0°	70
5.8	Réponse du pixel d'intensité maximale de la matrice pour une position hors champ.....	71
5.9	Caractérisation de la détection pour des angles d'incidences compris entre -5° et $+5^\circ$	71
5.10	Angles limites du champ de vue de la caméra.....	72
5.11	Répartition des amplitudes des pixels de la matrice, pour des incidences élevées.....	73
5.12	Mesures de flux reçu par le pixel (8,8) du détecteur sur l'axe à 0°	74
A.1	Dessin 3D du banc de test aligné sur l'axe optique de la caméra P-ArTéMiS.....	77
A.2	Tracé des rayons d'une source étendue placée au foyer du miroir parabolique.....	87
A.3	La divergence du faisceau parallèle.....	87
A.4	Tracé des rayons d'une source placée au foyer du miroir parabolique.....	88
A.5	Images formées dans le plan placé à distance $d_{\text{écran}}$	88

A.6	Estimation de l'influence de la divergence du faisceau.....	89
A.7	Etapes du traitement de données.....	90
A8	Schéma de principe de reconstruction d'une période d'un signal périodique.....	93

Liste des tableaux

3.1	Calcul des couples exercés.....	43
3.2	Performances des commandes pour déplacer le bras et le plateau.....	45
4.1	Incertitudes types associées à la distance $U_{d_{théorique}}$	52
4.2	Mesures de stabilité et de reproductibilité.....	61
4.3	Comparaison des flux mesurés pour différentes taille de source.....	63
5.1	Comparaison du rapport signal sur bruit pour trois diamètres de source.....	67
5.2	Rapport des intensités des pics des harmoniques au pic fondamental.....	68
5.3	Comparaison des moyennes des valeurs des pixels pour des incidences élevées.....	71
A.1	Résumé des fonctions et performances métrologiques de l'instrumentation.....	78
A.2	: Couples de valeurs recherchées pour fixer les paramètres d'acquisition.....	92

INTRODUCTION

Ce stage s'est déroulé dans le Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Saclay, dans le groupe travaillant sur la détection submillimétrique. Ce service appartient à l'Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (IRFU) qui est rattaché à la Direction des Sciences de la Matière (DSM).

Le projet ArTeMiS (**A**rchitectures de bolomètres pour des **T**élescopes à grand champ de vue dans le domaine sub-**M**illimétrique au **S**ol) a pour objectif de développer des caméras astronomiques sensibles au rayonnement dit "submillimétrique", intermédiaire entre l'infrarouge et les ondes millimétriques, qui pourront notamment équiper un télescope de 12m, APEX (Atacama Pathfinder EXperiment) prototype d'un réseau de grands télescopes actuellement en construction dans le nord du Chili sur le site d'ALMA (Atacama Large Millimeter Array).

Actuellement une caméra prototype, appelée P-ArTéMiS est opérationnelle. Cette caméra opère dans la fenêtre atmosphérique ouverte autour de la longueur d'onde de 450 microns. Elle est constituée d'une mosaïque de bolomètres, des détecteurs mesurant l'énergie du rayonnement par une élévation de température. Elle a été testée avec succès en mars 2006 sur le télescope KOSMA (Kölner Obervatorium für SubMillimeter Astronomie) situé en Suisse au sommet du Gornergrat (3100 mètres). Ces essais satisfaisants constituent la première étape vers des observations astronomiques régulières de la formation des étoiles et de l'évolution des galaxies. Sa technologie est basée sur celle développée par le Service d'Astrophysique du CEA/Saclay et le LETI/LIR¹ du CEA/Grenoble, pour le satellite européen HERSCHEL.

L'objet du travail décrit dans ce manuscrit a été de développer un dispositif expérimental de test pour mesurer le diagramme d'antenne des caméras submillimétriques. Le diagramme d'antenne permet d'avoir une meilleure connaissance de la sensibilité d'une caméra au rayonnement extérieur, et notamment de savoir si de la lumière parasite parvient au détecteur. Pour concevoir ce banc de test, il a fallu répondre à plusieurs questions, notamment : comment éclairer la caméra ? Quelle méthode de traitement de données pour identifier le signal ?

Ce manuscrit est composé de cinq parties. Dans la première partie, je présente le projet ArTéMiS dans son contexte. Dans la seconde et la troisième partie, je décris les phases de conception et de réalisation du banc de test dont j'ai eu la charge. Dans la quatrième partie, je donne les résultats des tests de caractérisation et les performances du banc de test. Enfin, je présente, dans la dernière partie les premières mesures de diagramme d'antenne que j'ai effectuées sur la caméra P-ArTéMiS.

¹ Le LETI : Laboratoire d'Electronique de Technologie et d'Instrumentation, LIR : Laboratoire InfraRouge au CEA Grenoble.

1. PRESENTATION DU PROJET ARTEMIS

1.1. L'ASTRONOMIE SUBMILLIMETRIQUE

1.1.1 L'intérêt scientifique du submillimétrique

Le domaine spectral appelé submillimétrique s'étend de 100 μm à 1 mm. C'est dans ce domaine que les objets froids, dont la température de corps noir est de l'ordre de 10 K (voir figure 1.1) émettent le maximum de leur énergie. Ce sont essentiellement les zones de formation stellaire qui sont concernés par ces observations à ces longueurs d'onde et à différentes échelles spatiales : les cœurs denses pré-stellaires dans notre galaxie, les super amas d'étoiles et les zones de formation d'étoiles par bouffées dans les galaxies proches, mais encore le fond cosmologique infrarouge qui nous permettra de tracer l'histoire de la formation stellaire à l'échelle de l'Univers. D'autres objets sont accessibles à ces longueurs d'onde telles que les disques et les débris de disques protoplanétaires.

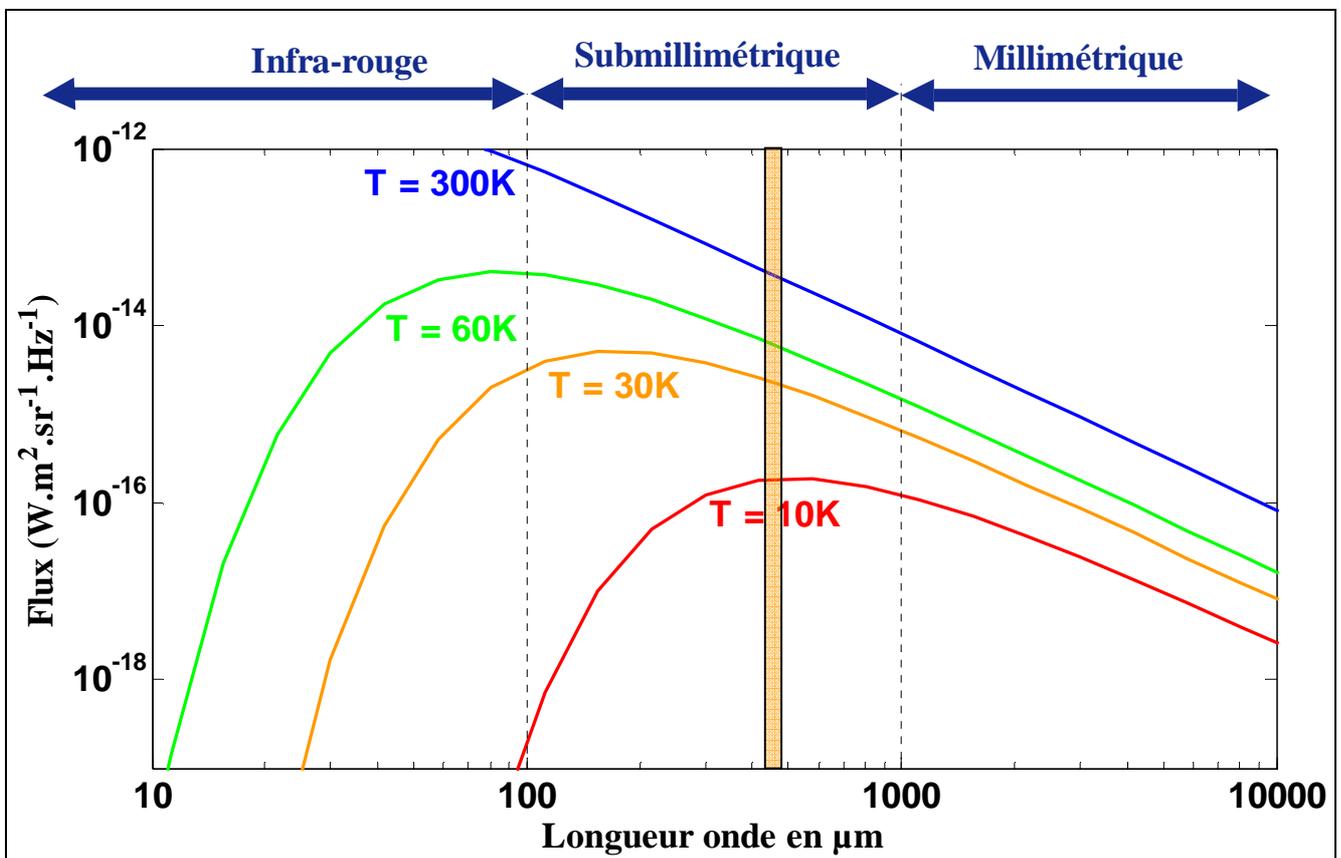


Figure 1.1 : Spectre d'émission du corps noir dans la fenêtre submillimétrique; la bande spectrale centrée autour de 450 μm est représenté en 'orange'

L'objectif de l'étude du rayonnement submillimétrique est notamment de mieux comprendre les toutes premières étapes de la formation des étoiles. J'ai pris deux exemples illustrant l'apport des cartographies réalisées dans le domaine submillimétrique. Le premier est une image de la Nébuleuse de l'Aigle à 850 μm et le second est une région de formation d'étoiles massives NGC 3576, à 450 μm .

- La Nébuleuse de l'Aigle M 16 (figure 1.2) consiste en un petit amas d'une cinquantaine d'étoiles jeunes (moins de 2 millions d'années), très chaudes, illuminant une vaste zone nébulaire, sur laquelle se détachent des nuages opaques de poussières. Il s'agit d'une importante région de formation stellaire, plusieurs régions de formations d'étoiles sont très nettement détectées sur l'image à $850\mu\text{m}$, elles sont très bien définies par les zones d'émission élevées. Alors que l'image prise dans le visible ne permet pas de détecter ces régions.

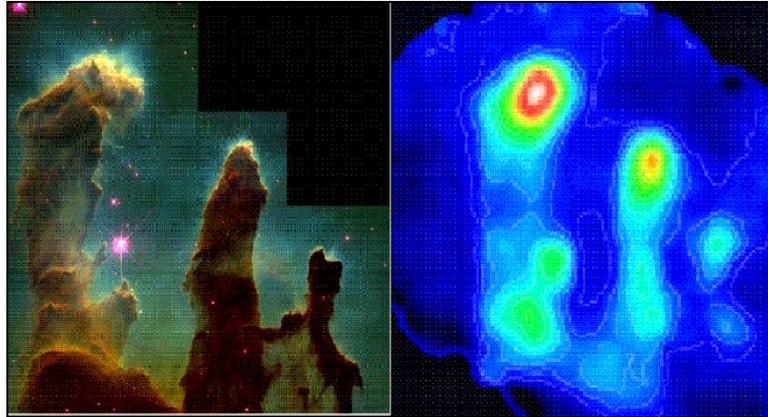


Figure 1.2 : Comparaison d'images de la Nébuleuse de l'Aigle, M16, en visible (HST) et à $850\mu\text{m}$ (SCUBA). [site internet du JCMT].

- Cartographie d'une région de formation d'étoiles massives (figure 1.3), NGC3576, récemment réalisée à $450\mu\text{m}$ avec l'instrument P-ArTéMiS lors de la mission Apex/ArTéMiS en novembre 2007 :

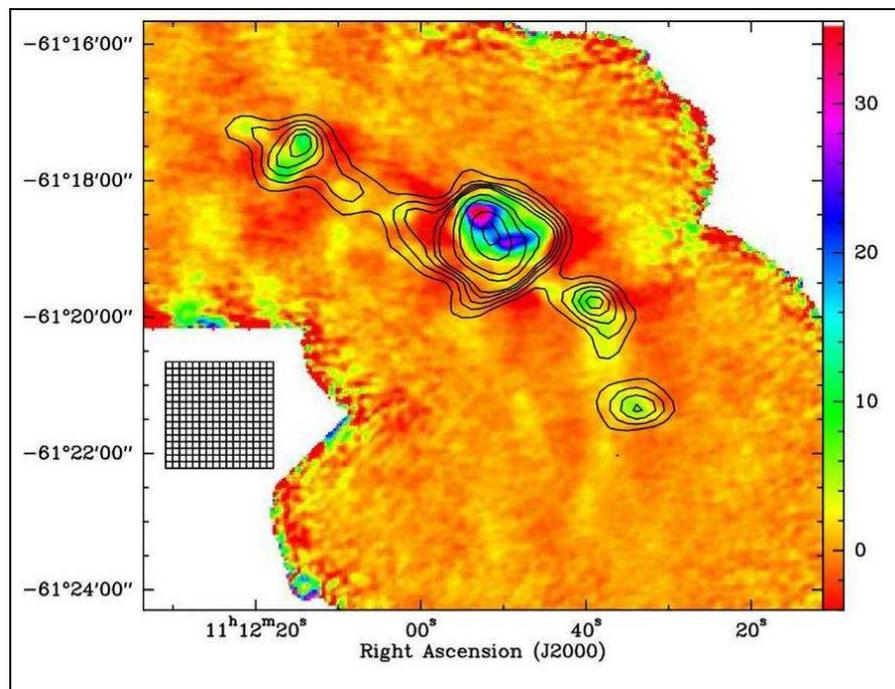


Figure 1.3 : Première image obtenue à $450\mu\text{m}$ de NGC 3576, une région de formation d'étoiles massives. L'image en couleur représente l'émission à 450 microns. Les contours sont l'émission à 1,2 mm qui fut réalisée par sur le SEST (observatoire au Chili)

On notera que l'image obtenue à $450\mu\text{m}$ résout l'émission à 1,2 mm en différentes sous structures. Les condensations les plus brillantes sont des sites où naissent les étoiles massives.

Réaliser des images de ces zones dans le submillimétrique est donc d'un intérêt majeur pour identifier les sites de formation stellaire.

1.1.2. Les limitations dues à l'atmosphère terrestre

Ce paragraphe décrit les différentes contraintes de l'atmosphère qui sont imposées aux observations avec des télescopes au sol dans ce domaine spectral et les moyens de s'en affranchir.

▪ L'absorption du rayonnement

L'atmosphère terrestre, de part sa nature et sa composition, absorbe une grande partie du spectre électromagnétique qui provient de l'espace. Pour le rayonnement submillimétrique, l'absorption atmosphérique ne permet les observations que dans quelques fenêtres (voir figure 1.4).

La transmission atmosphérique est fortement dépendante de la quantité de vapeur d'eau, spécialement dans les bandes spectrales de 200 à 850 μm (figure 1.4), seulement certaines fenêtres sont exploitables pour les observations. Elles ne peuvent être effectuées qu'à partir de sites aux climats froids, secs et stables comme le Pico Veleta en Espagne (2850 m) où est installé le télescope de 30 m de l'IRAM, Mauna Kea à Hawaii (4200 m), le désert d'Atacama au Chili (5200 m) ou encore le plateau antarctique (3000 m).

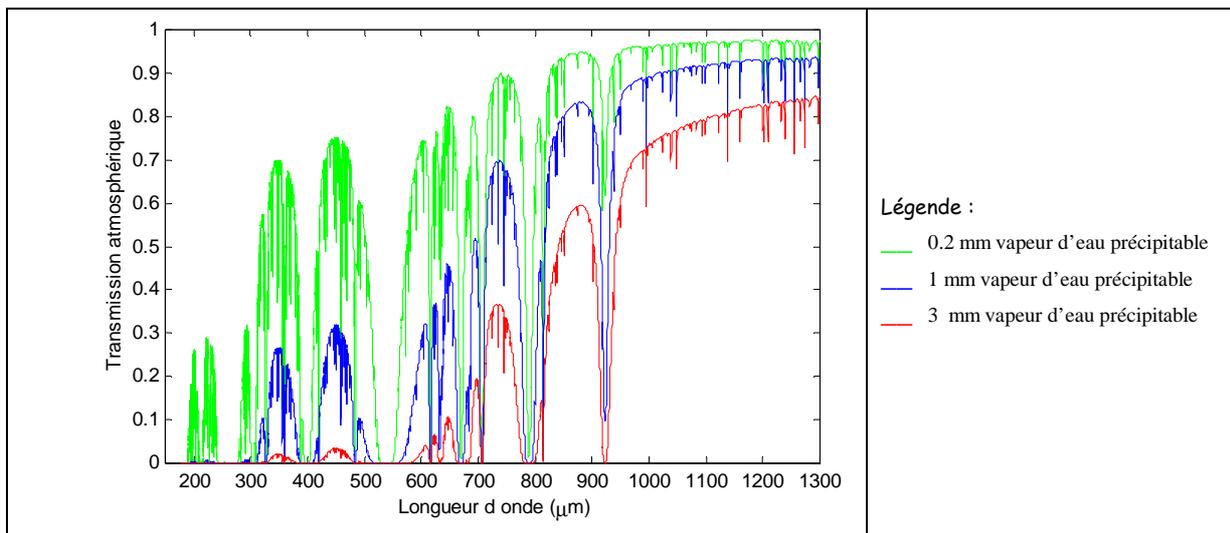


Figure 1.4 : Simulation de spectres de transmission atmosphérique zénithale dans le domaine submillimétrique au sommet du Mauna-Kea pour 0.2 mm, 1 mm et 3 mm de vapeur d'eau précipitable. Données issues du site internet du CSO (CalTech Submillimeter Observatory).

▪ Emission, Bruit de Ciel

L'atmosphère terrestre non seulement absorbe une large partie du spectre submillimétrique mais également émet un rayonnement de corps noir à ces longueurs d'onde. La température de la couche atmosphérique qui émet ce rayonnement est en général estimé à 270K. Le signal astrophysique que l'on cherche à quantifier se trouve ainsi superposé à une intense émission de fond (plus forte de 3 à 4 ordres de grandeur pour des sources astrophysiques typiques) à laquelle sont associées les fluctuations intrinsèques liées au phénomène d'émission.

Cette émission dépend de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. De plus les études de la structure de l'atmosphère montrent que la vapeur d'eau est distribuée sous forme de structures de tailles variées et dont la répartition spatiale fluctue dans le temps sous l'effet des vents. Cela se manifeste par des fluctuations basses fréquences de l'intensité reçue par le détecteur que l'on nomme bruit de ciel ou (sky noise en anglais).

1.1.3. Les techniques d'observation

Pour remédier aux contraintes imposées par l'atmosphère, plusieurs méthodes sont nécessaires.

- **Mesure de l'opacité et étalonnage**

La première étape dans une séquence d'observation submillimétrique depuis le sol consiste à déterminer les conditions atmosphériques du site. La technique la plus utilisée est celle de détermination du "profil d'atmosphère" (skydip en anglais) qui consiste à mesurer l'émission atmosphérique en fonction de l'élévation à l'aide d'un radiomètre. Ce relevé des conditions atmosphériques doit être réalisé régulièrement (en moyenne toutes les heures) pour s'assurer que l'opacité reste compatible avec les conditions d'observation.

Les profils d'atmosphère sont accompagnés de mesures d'étalonnage des détecteurs. Pour cela, il est possible d'utiliser des étalons tels que certaines planètes (Mars, Neptune ou Uranus) ou certains nuages moléculaires. En pratique il est important de réaliser les mesures d'étalonnage avec le même mode opératoire que les observations.

- **Méthodes de Suppression de l'Emission du Fond**

Comme il a été dit précédemment, le signal qui provient de la source à étudier contribue pour très peu au flux total reçu sur le plan focal du télescope. Non seulement l'atmosphère émet comme un corps noir à environ 270 K, mais le télescope lui-même rayonne fortement dans les longueurs d'onde submillimétriques, tout comme l'ensemble de l'instrumentation optique (miroirs secondaires, lentilles éventuelles, filtres, etc...). Pour mesurer un signal très faible par dessus ce fond, il faut donc pouvoir en estimer l'émission et la supprimer par la suite. Plusieurs méthodes de suppression sont utilisées comme par exemple le mouvement du miroir secondaire du télescope (chopping) associé au déplacement du télescope (nodding).

1.2. LES BOLOMETRES

Deux facteurs peuvent expliquer le développement tardif de l'astronomie submillimétrique. D'une part, comme on vient de le voir, l'atmosphère terrestre est pratiquement opaque au rayonnement submillimétrique. D'autre part, c'est un domaine spectral qui se situe entre les limites instrumentales de la radioastronomie et de l'astronomie infrarouge. Il a fallu attendre l'avènement des détecteurs bolométriques pour réellement ouvrir cette fenêtre jusque-là inexplorée.

1.2.1. Un peu d'histoire

Les détecteurs de choix du domaine submillimétrique sont les détecteurs thermiques, et notamment les bolomètres. Le premier bolomètre a été inventé en 1880 par Samuel P. Langley, un astronome américain. Son expérience utilisait le principe connu depuis plusieurs années de la variation de la résistance électrique d'un métal avec la température. Une lamelle de platine fine et noircie constituait l'un des bras d'un pont de Wheatstone. Lorsque cette bande de métal était soumise à un rayonnement lumineux, sa résistance électrique variait, perturbant ainsi l'équilibre du pont. Le signal était observé par un galvanomètre, permettant d'obtenir des précisions de l'ordre de 10 μ K sur la température du corps étudié. Le principe simple du bolomètre de Langley est toujours d'actualité. L'évolution naturelle a consisté à optimiser tous les paramètres intervenant dans ses performances.

1.2.2. Principe d'un bolomètre

Par définition, un bolomètre est un capteur thermométrique d'énergie. Autrement dit, il a pour fonction d'absorber une énergie incidente (rayonnement ou particules) et de mesurer celle-ci grâce à l'élévation locale de température causée par l'absorption.

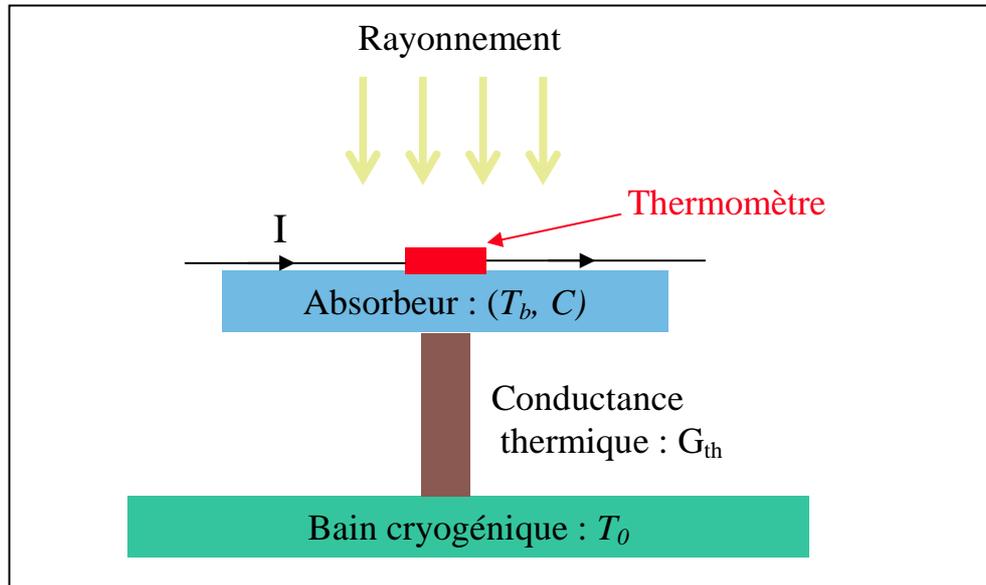


Figure 1.5 : Schéma de principe du fonctionnement d'un bolomètre

L'énergie d'un rayonnement incident (ou d'une particule) est absorbée par un matériau absorbeur (bleu clair). L'élévation de température résultante est mesurée par un senseur thermique dont la résistance varie avec la température. Une fuite thermique assurée par la conductance thermique G_{th} , permet l'évacuation de la chaleur vers un puits à température constante et définit la constante de temps du dispositif.

Le bolomètre infrarouge et submillimétrique est donc un détecteur quadratique puisqu'il mesure la puissance du rayonnement. De plus, son principe ne se limite pas qu'à ce domaine mais permet en théorie de détecter le rayonnement électromagnétique depuis les rayons X jusqu'au millimétrique (par extension, le terme luminosité bolométrique en astrophysique définit la luminosité sur l'ensemble du spectre électromagnétique).

1.2.3 Equation de base des bolomètres

Le fonctionnement d'un bolomètre est régi par le bilan thermique de l'ensemble de ses éléments, deux puissances appliquées contribuent à l'élévation de température du bolomètre : la puissance photonique P_{phot} et la puissance électrique P_J . Pour éviter la saturation du détecteur, l'énergie "stockée" dans la capacité calorifique C est évacuée via la fuite thermique de conductance

$G_{th} = \frac{1}{R_{th}}$, vers une source froide de température T_0 . Comme la conductance dépend de la température, il est souvent utile de définir une conductance moyenne, $\overline{G_{th}}$ définie entre T_b et T_0 .

Le bilan thermique des puissances "entrantes" et "sortantes" permet donc d'écrire :

$$P_{phot} + P_J = C \frac{dT_b}{dt} + \overline{G_{th}} (T_b - T_0) \quad (1.1)$$

Il s'agit de l'équation de base du bolomètre. La résolution de cette équation différentielle du premier ordre montre que pour l'absorption d'une certaine puissance, la température du bolomètre croît asymptotiquement vers une température d'équilibre.

De façon à optimiser son fonctionnement, les éléments constitutifs d'un bolomètre doivent présenter certaines caractéristiques :

- Ils doivent posséder une très faible capacité calorifique afin de maximiser l'élévation en température pour une énergie incidente donnée. La masse de l'absorbant et du thermomètre doit donc être la plus petite possible, et cet ensemble doit être porté à la plus basse température possible car la capacité calorifique décroît avec la température. C'est l'une des raisons de l'utilisation des basses températures pour les bolomètres.

- La partie centrale doit également être isolée thermiquement de son support afin que la chaleur absorbée produise une élévation de température importante et concoure ainsi à une meilleure sensibilité ($\Delta T = P_{\text{photon}} R_{th}$ où R_{th} est la résistance thermique en K/W). Les matériaux supportant la structure centrale du détecteur doivent donc être isolants (cas des semiconducteurs pour lesquels la résistance thermique est proportionnelle à T^{-3}). En pratique, il doit tout de même exister une fuite thermique entre l'absorbant et une source froide afin d'évacuer l'énergie stockée sous forme de chaleur autrement que par rayonnement. La présence de cette résistance thermique a pour conséquence une constante de temps thermique définie par :

$$\tau_{th} = R_{th} C = \frac{C}{G_{th}} \quad (1.2)$$

Un compromis doit donc être trouvé entre sensibilité du détecteur et rapidité de réaction.

- L'aspect électro-thermique est également un point clé du bolomètre. Le senseur thermique lié à l'absorbant doit être bien-entendu le plus sensible possible. Il est défini généralement par son coefficient de réponse en température, α [K^{-1}] :

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1.3)$$

où R est la résistance électrique du thermomètre.

Ce coefficient est négatif dans le cas des bolomètres à senseur thermique de type semiconducteur (leur résistance augmente lorsque la température diminue), et positif dans le cas des bolomètres supraconducteurs.

1.2.4 La réponse des bolomètres

La réponse en tension d'un bolomètre est définie par $s = \frac{dV}{dP}$ en [$V.W^{-1}$] où dV est le signal aux bornes de la résistance bolométrique correspondant à l'absorption d'une puissance photonique, dP .

La réponse peut-être définie ainsi :

$$S \cong \frac{dR}{dT} \frac{1}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (1.4)$$

où ω est la pulsation de la variation de puissance du signal

Avec cette relation, on voit que diminuer la conductance thermique a pour effet d'augmenter la sensibilité. Cependant cela aura aussi pour effet d'augmenter le temps de réponse du bolomètre.

Cette relation montre bien qu'il y a un compromis à trouver entre la sensibilité de la réponse et sa rapidité.

1.3. LES CAMERAS ARTEMIS

Le projet baptisé ArTeMiS (*Architectures de bolomètres pour des Télescopes à grand champ de vue dans le domaine sub-Millimétrique au Sol*) a pour objectif, à terme, la réalisation de deux caméras grand champ dans le domaine submillimétrique. Ces caméras opèreront pour l'une à 200, 350, 450 μm et pour l'autre à 800 et 1200 μm , appelées respectivement ArTeMiS-1 et ArTeMiS-2. Leur plan focal comprendra plusieurs matrices de 16×16 bolomètres (256 pixels). Actuellement, une caméra prototype appelée P-ArTéMiS, est opérationnelle, celle-ci comporte dans son plan focal un détecteur qui est une matrice de 16×16 bolomètres.

1.3.1 Les matrice de bolomètres

En 1995, plusieurs équipes du CEA (le LETI/LIR à Grenoble et le IRFU/SAp¹ à Saclay) ont mis au point une nouvelle technologie de matrices de bolomètres pour équiper les plans focaux de l'instrument PACS (photomètre et spectro-imageur) du satellite Hershel, futur observatoire spatial dans le submillimétrique/Infrarouge, dont le lancement est prévu par l'ESA (l'Agence Spatiale Européenne) en 2008.

Le concept du bolomètre du LETI repose sur la double absorption résonante, ne nécessitant ni de cônes de Winston qui sont des collecteurs de lumière, ni de sphères intégrantes. Les matrices de bolomètres sont fabriquées collectivement et contiennent des unités de 256 pixels. Chaque pixel est gravé dans une plaque de silicium. Cette plaque est hybridée à un circuit de lecture via des contacts en Indium (figure 1.6). Cette technologie permet de constituer des plans focaux de plusieurs milliers de pixels.

Pour tirer profit de ces innovations, Les caméras ArTéMiS seront conçues avec ce type de matrices. La caméra P-ArTéMiS est la première étape dans l'application de ces développements.

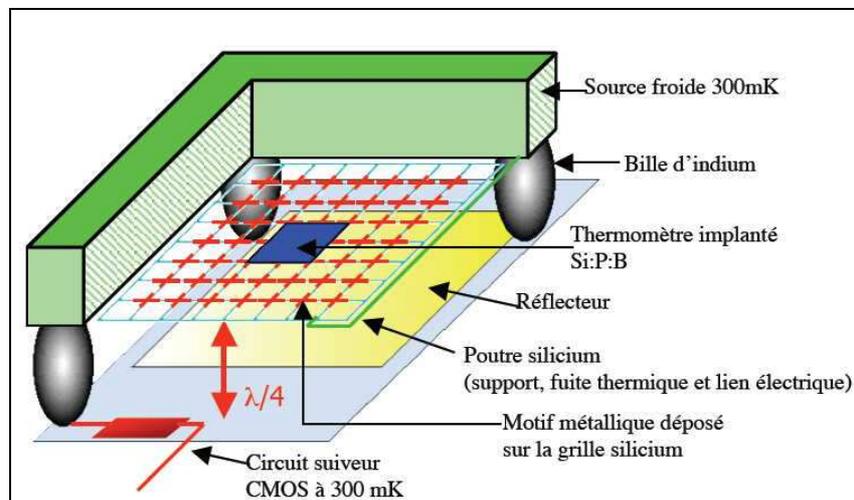


Figure 1.6 : Un pixel de la matrice

Les dimensions d'un pixel, représenté sur la figure 1.6, sont de l'ordre de $750 \mu\text{m} \times 750 \mu\text{m}$. Une matrice est composée de 16×16 pixels.

¹ Le LETI : Laboratoire d'Electronique de Technologie et d'Instrumentation, LIR : Laboratoire InfraRouge au CEA Grenoble ; et l'IRFU : l'Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers, SAp : Service d'Astrophysique au CEA Saclay.

Chaque pixel possède une grille de silicium, réalisée par des techniques de micro-usinage, qui supporte l'élément thermométrique en son centre, ainsi que le métal absorbant (TiN) déposé en couche mince. Cette grille est suspendue par des « poutres » microscopiques en silicium qui font également office de résistance thermique entre la grille et la structure en silicium maintenue à 300 mK. Cette structure a été choisie pour diminuer la masse, la capacité calorifique et la sensibilité aux particules cosmiques.

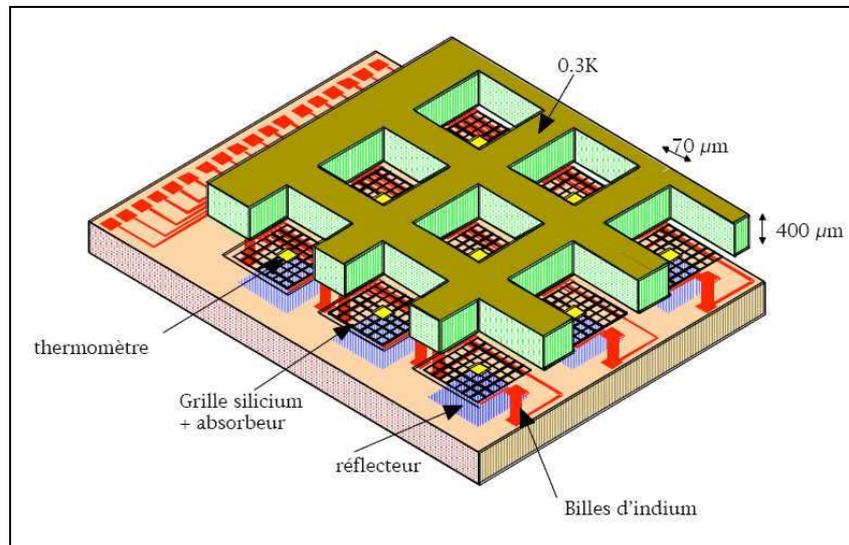


Figure 1.7 : Concept de la matrice de bolomètres

Des billes d'indium permettent de former une cavité quart d'onde dont le fond est recouvert d'un métal réflecteur (l'or dans le cas présent). La composition des ondes entrantes et sortantes engendre deux réseaux d'ondes stationnaires, le premier pour le champ électrique, le second pour le champ magnétique. Alors que la surface du métal est un nœud de champ électrique, elle est aussi un ventre de champ magnétique : ces deux réseaux sont ainsi déphasés de $\lambda/4$. Il existe donc des positions où tout le champ électromagnétique est soit sous forme électrique soit sous forme magnétique. En plaçant le film absorbant au niveau d'un ventre de champ électrique, on peut en principe absorber la totalité de l'énergie lumineuse en "un passage". Une structure parfaitement absorbante à une longueur d'onde donnée est donc constituée d'une surface parfaitement réfléchissante sur laquelle est positionné un "film" métallique distant de $\lambda/4$; l'onde est alors efficacement absorbée par le métal. Des bus électriques en aluminium gravés sur ce réseau acheminent les signaux provenant des pixels vers les circuits de multiplexage.

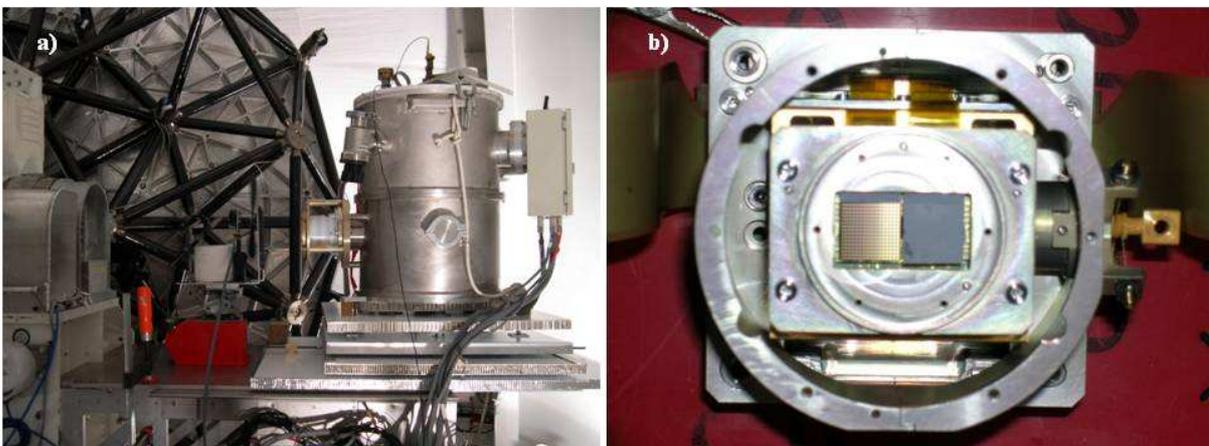


Figure 1.8 : a) caméra P-ArTéMiS positionnée dans la nacelle du télescope KOSMA. b) photo montrant les deux matrices de 16*16 pixels, celle pour le 200 µm (face de gauche) et celle pour le 450 µm (face de droite, recouverte d'une couche de silicium anti-réflexion sur sa surface)

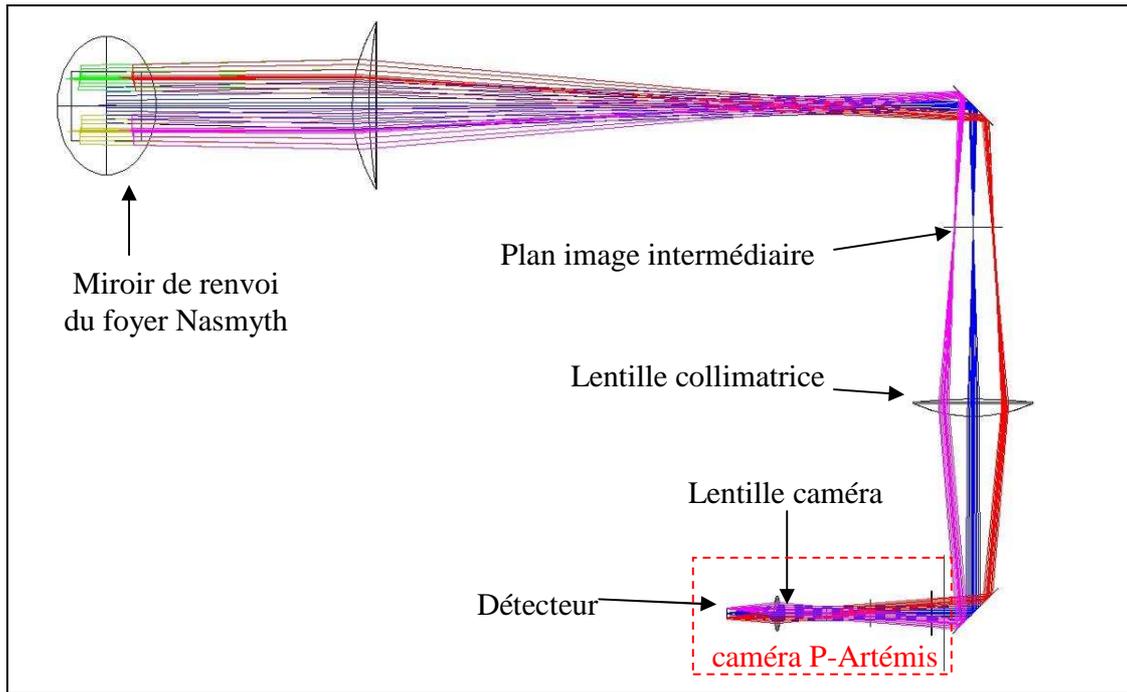


Figure 1.10 : Design de l'ensemble de l'optique depuis le foyer Nasmyth jusqu'au détecteur de la caméra P-Artémis lors de la mission P-ArTéMiS/Apex1

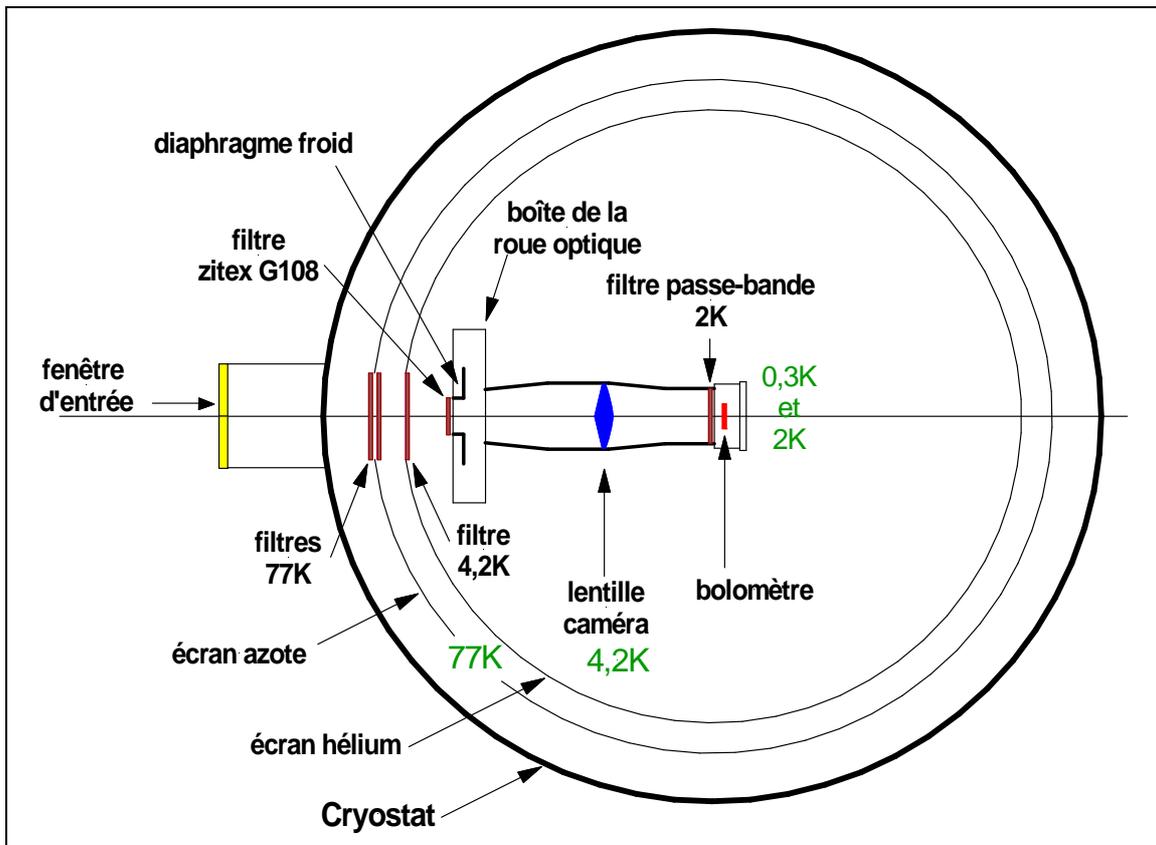


Figure 1.11 : Schéma de la caméra P-Artémis lors de la mission P-ArTéMiS/Apex1

Les mesures qui sont présentées dans ce rapport ont été réalisées sur cette configuration optique de la caméra, désignée par la suite sous le nom de P-ArTéMiS/Apex1. Le chemin optique de cette configuration depuis la fenêtre d'entrée jusqu'au détecteur rencontre :

- à 77K, un filtre pour la réjection de l'infrarouge, appelé 'thermal shader', puis un filtre passe-bas à 909 GHz (330 μ m)
- Puis à 4K, un filtre passe-bas à 810 GHz (370 μ m)
- Un filtre passe-bas, en zitex G108 (matériau de type silicone), placé devant la pupille de sortie, matérialisée par un diaphragme froid (cold stop, en anglais).
- Une roue optique qui permet notamment de placer sur le chemin une lentille d'alignement.
- Une lentille convergente en HDPE (High-density polyethylene) d'épaisseur 10mm
- Et enfin un filtre passe-bande à 660 GHz (450 μ m) placé devant le détecteur.

En faisant le produit des transmissions optiques de chaque filtre, de la fenêtre d'entrée, de la lentille et de la matrice, on accède au coefficient de transmission de la chaîne optique de la caméra. Le calcul donne un coefficient de transmission de 30% à 450 μ m.

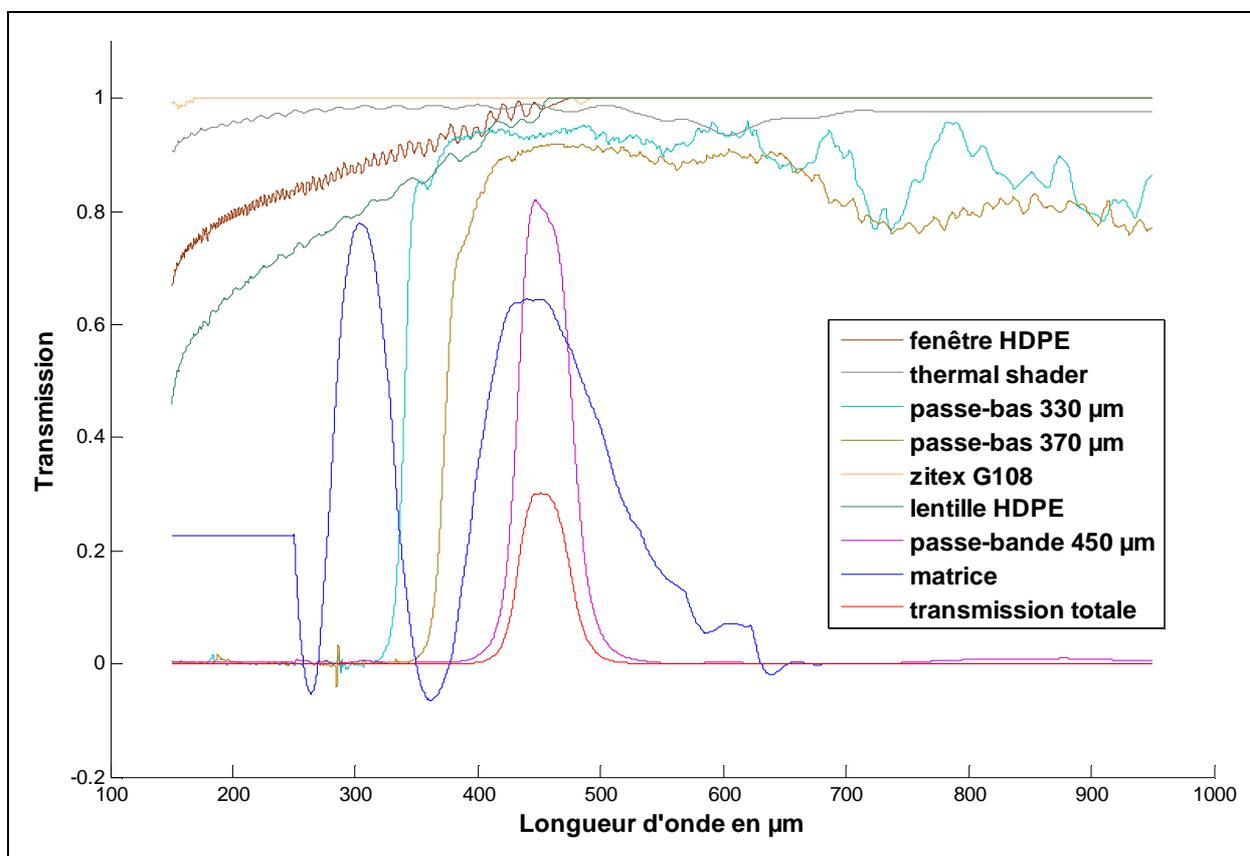


Figure I.12 : Courbes de transmissions individuelles, et courbe de transmission totale de la chaîne optique (courbe en rouge).

2. CONTEXTE DU MEMOIRE CNAM

2.1. PROBLEMATIQUE

La mécanique, la cryogénie et l'optique d'une caméra bolométrique sont conçues pour offrir au détecteur un couplage optimal avec le télescope, et lui éviter d'être parasité par les rayonnements provenant de toutes les directions alentour.

La problématique qui a fait l'objet de ce stage a été de concevoir et de développer un dispositif de test qui soit capable de mesurer le diagramme d'antenne d'un instrument optique observant dans le domaine submillimétrique et plus particulièrement dans la bande de fréquence de la caméra bolométrique P-ArTéMiS, autour de 660 GHz (450 μ m). La connaissance du diagramme d'antenne permet d'une part de mesurer le champ de vue de la caméra et d'autre part pour les angles d'incidence plus grands, de déterminer si d'éventuelles réflexions parasites sont détectées.

Pour répondre à cette problématique, je vais établir un cahier des charges pour la réalisation d'un banc de test. Les questions suivantes doivent être énoncées :

- Comment éclairer la caméra ?
- Quelles doivent être les caractéristiques de la source de lumière ?
- Comment contrôler le fond vu par la caméra ?
- Comment extraire le signal émis par la source de l'émission de fond ?
- Quelle méthode pour traiter les données et identifier le signal émis par la source ?

2.2 CAHIER DES CHARGES

P-ArTéMiS étant la première caméra bolométrique à être testée, nous avons élaboré un cahier des charges du banc de test en prenant en considération les caractéristiques de celle-ci.

2.2.1 Définition des conditions recherchées :

Comment éclairer la caméra pour mesurer son diagramme d'antenne ? Pour répondre à cette question, l'éclairement provenant du banc de test doit être dirigé dans une seule direction vers la fenêtre d'entrée de la caméra, et mobile autour de celle-ci. Chaque direction du demi-espace que voit la caméra est ainsi reconstituée. La méthode va consister à simuler une source à l'infini que l'on va déplacer dans toutes les directions autour de la caméra. Pour cela, on réalisera un éclairement en faisceau parallèle.

Ainsi, pour répondre à la problématique le banc de test devra réaliser les conditions suivantes :

- 1- Eclairer la fenêtre d'entrée de la caméra avec un faisceau de lumière parallèle, de section suffisante pour couvrir toute l'ouverture de cette fenêtre. Le diamètre pris en considération est celui de la fenêtre d'entrée de P-ArTéMiS : 60 mm.
- 2- Contrôler la puissance du faisceau parallèle incident, de telle sorte qu'elle soit stable et reproductible.
- 3- Seul ce faisceau de lumière parallèle éclaire la caméra, qui doit être isolée de tout autre rayonnement externe. On cherchera à rendre le rayonnement du fond uniforme et stable.
- 4- Déplacer ce faisceau de lumière parallèle dans toutes les directions autour du centre de la fenêtre d'entrée de la caméra, comme le montre le schéma de la figure 2.1.

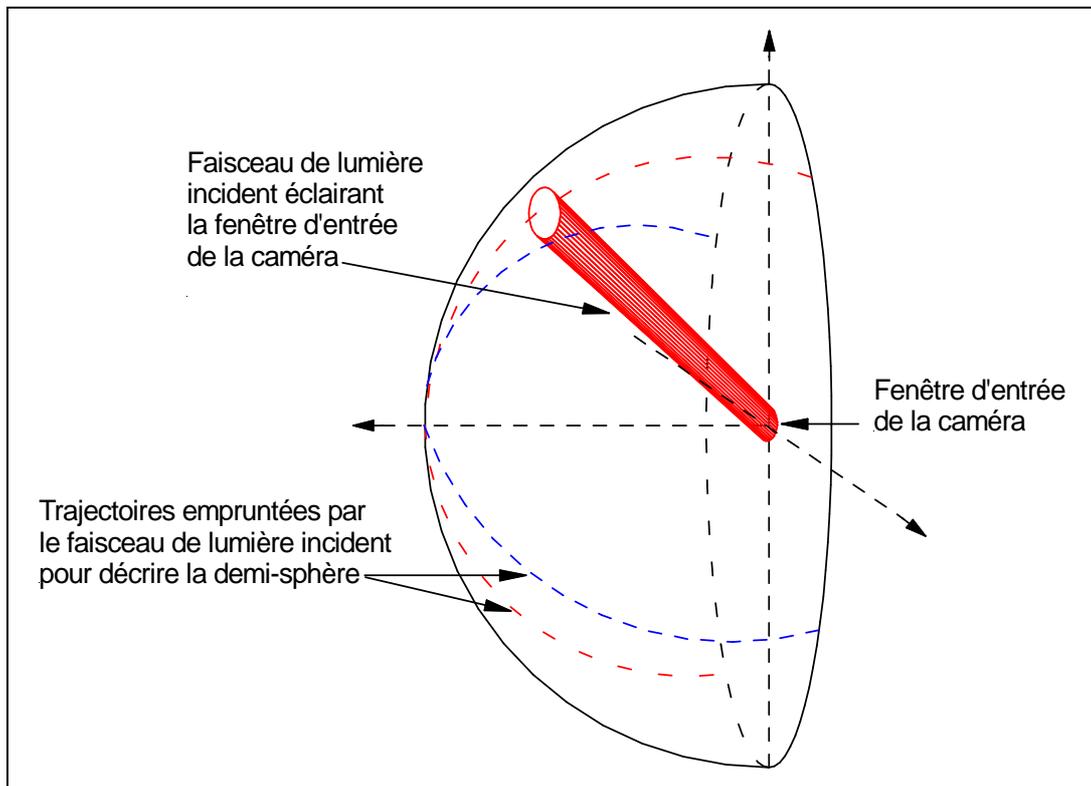


Figure 2.1 : Représentation du faisceau de lumière incident éclairant la fenêtre d'entrée de la caméra, et de ses trajectoires pour décrire l'angle solide du demi-espace (2π stéradian).

2.2.2 Rôle et spécifications de chaque élément du banc de test

Décrivons maintenant les différents sous-ensembles qui composent le banc de test de la solution retenue pour satisfaire aux conditions recherchées du paragraphe 2.2.1. Son schéma de principe est représenté sur la figure 2.2.

↳ Une source de lumière dans la bande spectrale autour de $450 \mu\text{m}$ dont on contrôle la puissance.

Le banc de test doit tout d'abord comporter une source, celle-ci sera détectable si elle est plus chaude ou plus froide que son environnement, j'ai choisi de chauffer cette source. La détection de cette source sera d'autant meilleure que la différence entre la puissance émise par cette source et la puissance du fond est grande.

La puissance émise par cette source dépend de son émissivité, de sa température et de sa surface, trois paramètres qu'il faut donc contrôler.

$$P_{source} = f(\epsilon, T, S) \quad (2.1)$$

- L'émissivité ϵ de cette source devra être proche de 1 dans la bande de fréquence de la caméra. On se rapprochera ainsi de la puissance émise par un corps noir ($P_{réelle} = \epsilon \cdot P_{CN}$)
- Un asservissement de sa température suffisamment fin, de type PID (Proportionnel Intégré Dérivé). Sa température devra être la plus stable possible pendant toute la durée des acquisitions.
- La réalisation de plusieurs diaphragmes de différentes ouvertures dont la taille est imposée par une optique servant à réaliser un faisceau parallèle.

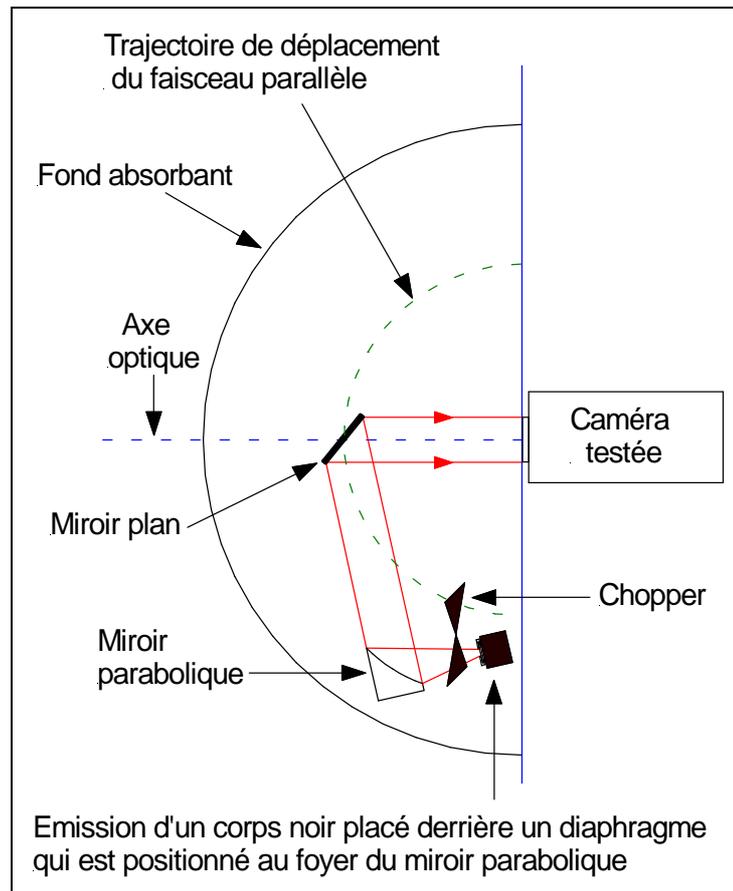


Figure 2.2 : Schéma de principe de la solution retenue pour la réalisation du banc de test

→ Une optique pour réaliser un faisceau de lumière parallèle.

On positionnera le trou source (l'ouverture du diaphragme) au foyer d'une optique collimatrice. Cette optique renvoie l'image de son foyer à l'infini, ainsi les rayons de la source ressortiront parallèles, à condition que la taille du trou source soit petite. Dans la pratique, la taille minimale du trou source sera imposée par la détection du signal, nous réaliserons donc plusieurs trous source de petits diamètres pour rester dans l'approximation d'une source ponctuelle.

J'ai choisi pour cette optique un miroir parabolique hors axe de 90° dont les caractéristiques sont décrites au paragraphe 3.3.1.

→ Un hacheur de signal (chopper, en anglais) dont nous contrôlons la fréquence.

La technique classique consiste à moduler le signal émis par le corps noir, en faisant passer les pales d'une hélice devant le trou source. Ainsi, l'émission de la source sera clairement discriminée par rapport à l'émission du fond : c'est le signal modulé.

→ Un miroir plan

Son rôle est de replier le faisceau parallèle afin d'éviter la présence d'objets qui émettraient directement dans le champ de vue de la caméra, et qui apporteraient un rayonnement parasite. Le corps noir, et le hacheur sont ainsi éloignés du champ de vue de la caméra.

→ Un fond absorbant :

Autre pièce dans le dispositif du banc de test que l'on prévoit, est la réalisation d'une calotte hémisphérique pour constituer le fond vu par la caméra. On va traiter sa surface de la même manière que la source, afin qu'elle ait une émissivité proche de 1. Le rôle de cette calotte est d'obtenir un fond uniforme et d'absorption optimale des rayonnements parasites.

↳ Un contrôle des déplacements mécaniques

Une motorisation des éléments suivants : miroir plan, miroir parabolique, source et hacheur, afin de faire tourner le faisceau parallèle qui éclaire la caméra, dans toutes les directions autour du centre de la fenêtre d'entrée de cette caméra. Les trajectoires décrites par le faisceau parallèle sont alors comme celles illustrées sur la figure 2.1. Le poids et l'encombrement de l'ensemble devront être optimisés afin de réduire les efforts mécaniques et faciliter le choix du dimensionnement des moteurs. La spécification sur la résolution angulaire des déplacements que j'ai choisie, doit être au moins égale au pas d'un pixel du détecteur. La taille du pixel est 0,75 mm et la distance lentille-détecteur est d'environ 60,83 mm. Ce qui impose une spécification sur la résolution angulaire inférieure ou à égale à 0,7°.

↳ Une instrumentation de capteurs de position

Des codeurs magnétiques fixés sur le dispositif de déplacement mécanique, permettront de mesurer les positions angulaires et de connaître ainsi les directions du faisceau parallèle incident qui éclaire la fenêtre d'entrée de la caméra.

3. DESIGN ET REALISATION D'UN BANC DE TEST

3.1 LA SOURCE

3.1.1. Sa réalisation, sa description, et ses caractéristiques

Le dessin de réalisation de la source du banc de test est représenté sur la figure 3.1.

La source est une plaque de cuivre placée dans une cavité étanche, réalisée de manière à avoir les caractéristiques suivantes :

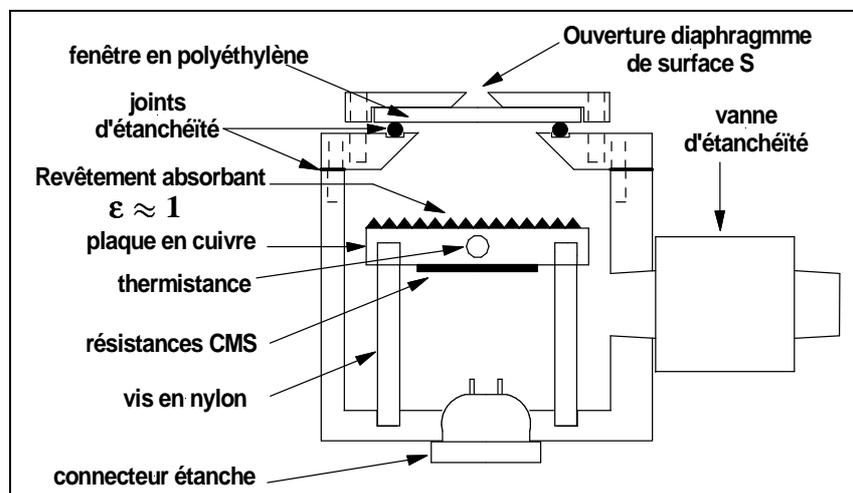


Figure 3.1 : Dessin de réalisation de la source du banc de test

- Une émissivité égale ou très proche de 1 dans la bande de fréquence de la caméra, afin que la brillance de la source soit assimilable à celle d'un corps noir. Pour cela, j'ai recouvert d'un absorbant, composé de grains de silicium et de colle la surface de la plaque de cuivre qui émet vers le diaphragme de la cavité. Cet absorbant couramment utilisé dans le submillimétrique, est efficace à ces longueurs d'onde (voir la courbe d'absorption de la figure 3.2). Ainsi la brillance de la source suit la loi de Planck :

La brillance B_ν d'un corps noir s'exprime comme étant la puissance rayonnée par unité de fréquence, unité d'angle solide et unité de surface :

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad [W.m^2.sr^{-1}.Hz^{-1}] \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fréquence du rayonnement } \nu \text{ (en Hz)} \\ \text{Constante de Boltzmann } k=1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1} \\ \text{Constante de Planck } h=6,63.10^{-34} \text{ J.s} \\ \text{Vitesse de la lumière } c=3.10^8 \text{ m.s}^{-1} \end{array} \right.$$

- Un diaphragme de petite ouverture, pour se rapprocher d'une source ponctuelle. J'ai fait réaliser plusieurs diaphragmes avec des ouvertures allant de 0,5 à 5 mm de diamètre.

- Un environnement sous vide, pour minimiser les pertes thermiques par convection. Le vide est assuré par le serrage d'un joint en viton entre le diaphragme et une fenêtre en polyéthylène, et un second joint au niveau du couvercle. Une vanne a été vissée dans une paroi de l'enceinte. L'étanchéité du raccord de la vanne est faite avec du ruban téflon enroulé sur le filetage conique de cette vanne, ce qui permet d'obtenir un vide primaire de quelques millibars, pour limiter la convection.

- Un encombrement le plus petit possible en raison des contraintes de places dues à la géométrie du dispositif. De plus, comme la source doit être motorisée, son poids doit être faible afin de réduire le plus possible les efforts mécaniques.

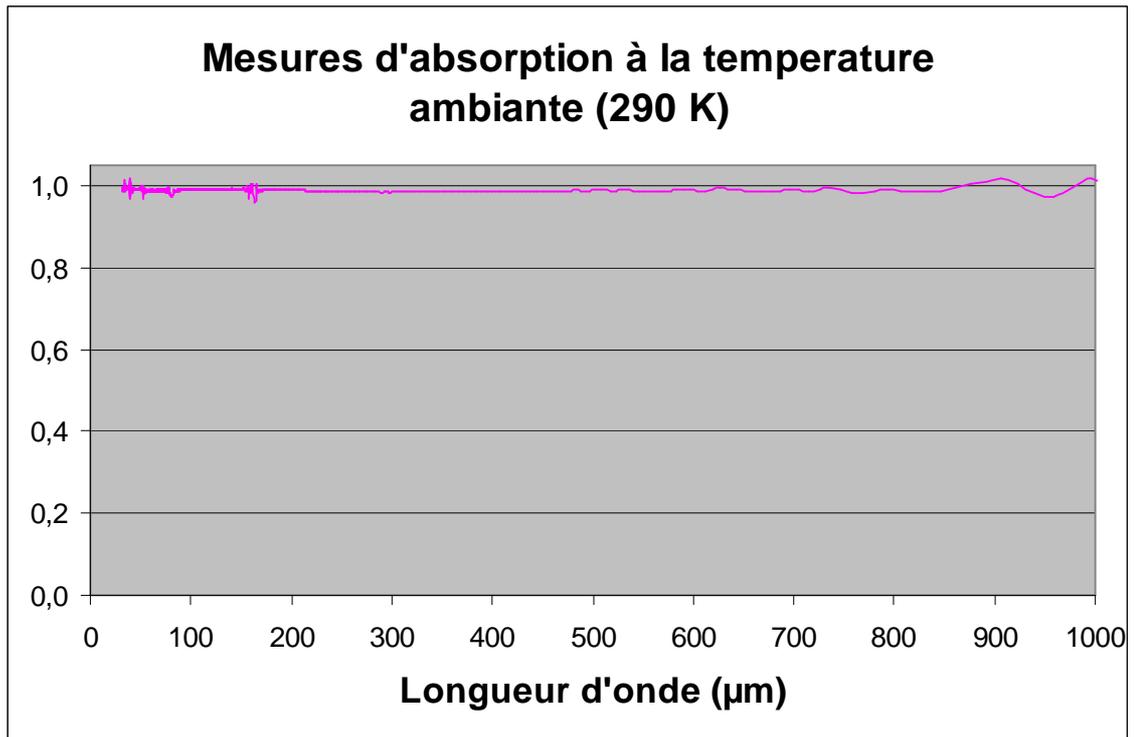


Figure 3.2 : Courbe d'absorption du mélange absorbant utilisé : mélange de colle époxy Stycast 2850 avec des grains de carbure de silicium dont la taille varie entre 400, 500 et 600 μm . Ces résultats ont été obtenus par mesures de réflexion à température ambiante avec un interféromètre de Michelson, sur des échantillons recouvert de cet absorbant

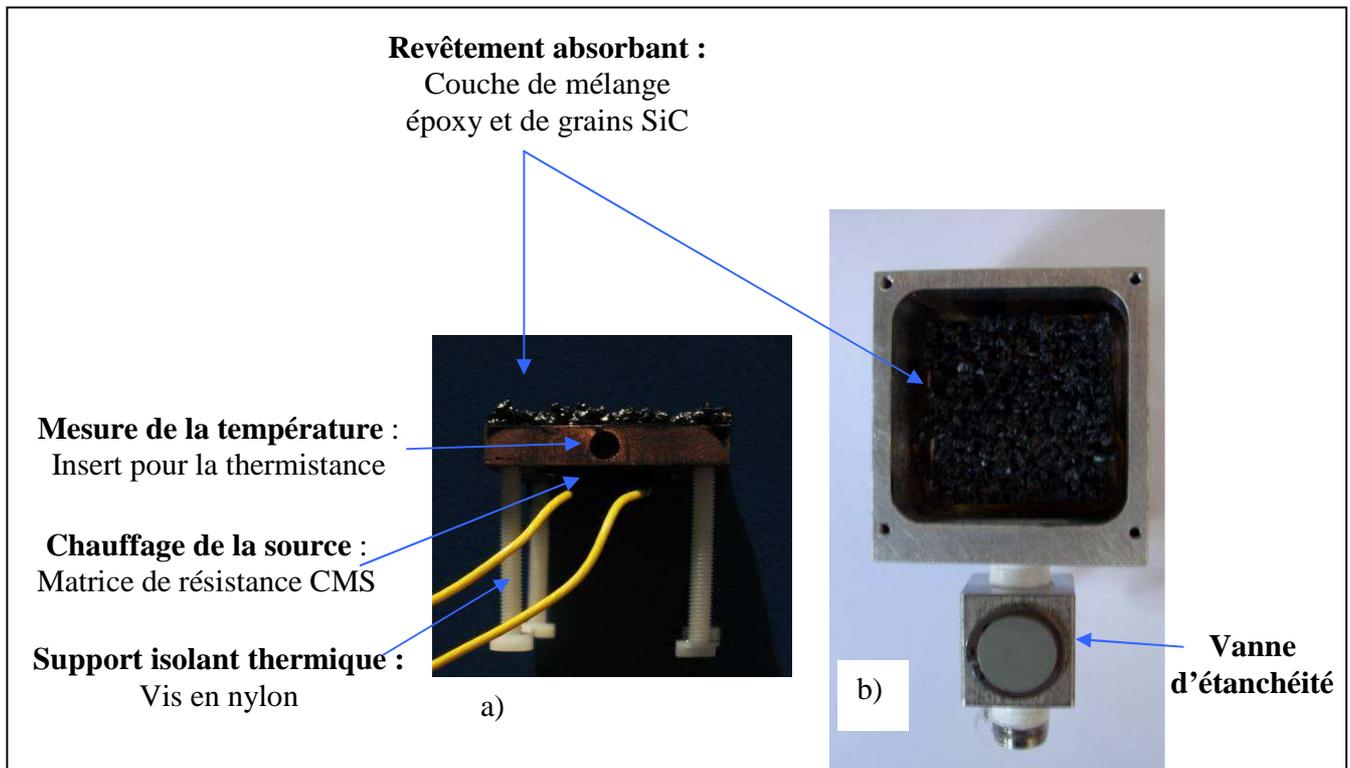


Figure 3.3 : a) Vue de côté de la réalisation de la source
b) Vue de dessus de la cavité du corps noir ouverte

La plaque de cuivre (figure 3.3) est maintenue dans l'enceinte par des vis en nylon, isolant thermique, afin d'éviter les transferts thermiques par conduction entre la plaque de cuivre et les parois de l'enceinte.

La source ainsi réalisée se comporte localement comme un corps noir, placée dans une cavité où les transferts thermiques par convections et par conduction sont minimisés, sa puissance thermique est rayonnée.

3.1.2. La mesure de température de la source

Une thermistance CTN (Coefficient de Température Négatif) est insérée dans un trou radial au centre de la plaque de cuivre, pour mesurer la température de la source. Nous avons choisi la thermistance de référence constructeur Murata NTSA0XV103FE1B0. Les attraits de ce capteur sont sa petite taille (son diamètre est inférieur à 3 mm) et sa vitesse de réponse élevée associée à une très grande sensibilité.

Entre deux températures T_0 et T , exprimées en kelvin, sa résistance vaut :

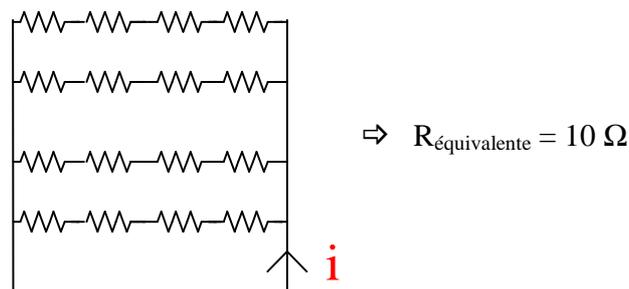
$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \beta = 3900 \text{ K} \\ R(298 \text{ K}) = 10 \text{ k}\Omega \end{cases} \quad (3.2)$$

L'erreur relative sur la mesure de cette résistance, donnée par le constructeur, est proche de 1% sur la plage de mesure 25°C à 125°C. Dans notre application, on lit les valeurs de cette thermistance avec un appareil multimètre Keithley 2000 relié au PC de commande. Cette mesure est récupérée sous le logiciel Labview, via une communication GPIB. Labview permet de lire ainsi directement chaque valeur de température pour chaque mesure de résistance.

Dans ce type de mesure, nous nous intéressons peu à la température absolue mais plutôt à ses variations qui qualifient la stabilité de la régulation.

3.1.3 La régulation de température

Le chauffage de la source est assuré par une matrice de seize résistances CMS, collées au dos de la plaque de cuivre. La colle utilisée est un très bon conducteur thermique (référence Stycast 2850). L'asservissement du courant traversant la matrice de résistances CMS est de type PID (Proportionnel Intégral Dérivé), pour maîtriser le plus finement possible les variations de température de la source.



Matrice de résistance CMS 1210 (dimensions : 3,2×2,5×0,6 mm³)

- Dimensionnement de la source

Les dimensions de la plaque de cuivre (25×25×5 mm³) et la valeur ohmique des résistances (10Ω) ont été choisies afin de pouvoir élever la température de rayonnement au moins jusqu'à 100°C. Dans le calcul qui m'a permis de faire ces choix, j'ai fait l'approximation que toute la surface de la plaque

échange de la chaleur uniquement par rayonnement avec son environnement qui est à température ambiante. Dans cette approximation, toute la puissance électrique se dissipe sous forme de rayonnement. D'après la loi de Stephan, le flux échangé entre la surface S de notre plaque en cuivre et le milieu ambiant s'écrit :

$$R_{\text{électrique}} \times I^2 = \epsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (3.3)$$

où

- $R_{\text{électrique}}$: Résistance totale sur la face arrière de la plaque de cuivre 10Ω
- σ : Constante de Stephan Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
- S : surface de la plaque en cuivre ($2 \times 0,025^2 + 4 \times 0,025 \times 0,005 \text{ m}^2$)
- ϵ : coefficient d'emissivité de la surface ($\epsilon \cong 1$)
- T_s : Température de la surface du corps noir
- T_a : Température ambiante

Pour un courant asservi autour de 500 mA, l'application numérique de ce calcul donne une température théorique de notre corps noir égale à 424,8 K, soit 151,8°C.

Ainsi les caractéristiques électriques de l'alimentation de la matrice de résistances associées à la source ($I=500\text{mA}$ et $R_{\text{électrique}}=10\Omega$) avec les dimensions de la plaque de cuivre choisie ($25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$), permettront de travailler à une température d'au moins égale à 100°C.

- Description du système d'asservissement :

Il est composé d'un système informatique (ordinateur PC) comprenant (cf. figure 3.4.) :

- une carte de communication GPIB reliée à une centrale de mesure Keithley 2000
- une carte de sorties analogiques courant/tension National Instrument PCI-6723
- une carte électronique comprenant deux amplificateurs de courant
- le logiciel Labview pour l'acquisition et la commande.

Un algorithme PID sous Labview régule la tension d'alimentation de la matrice de résistance CMS, à partir de la réponse de la thermistance, en comparant celle-ci à une température de consigne.

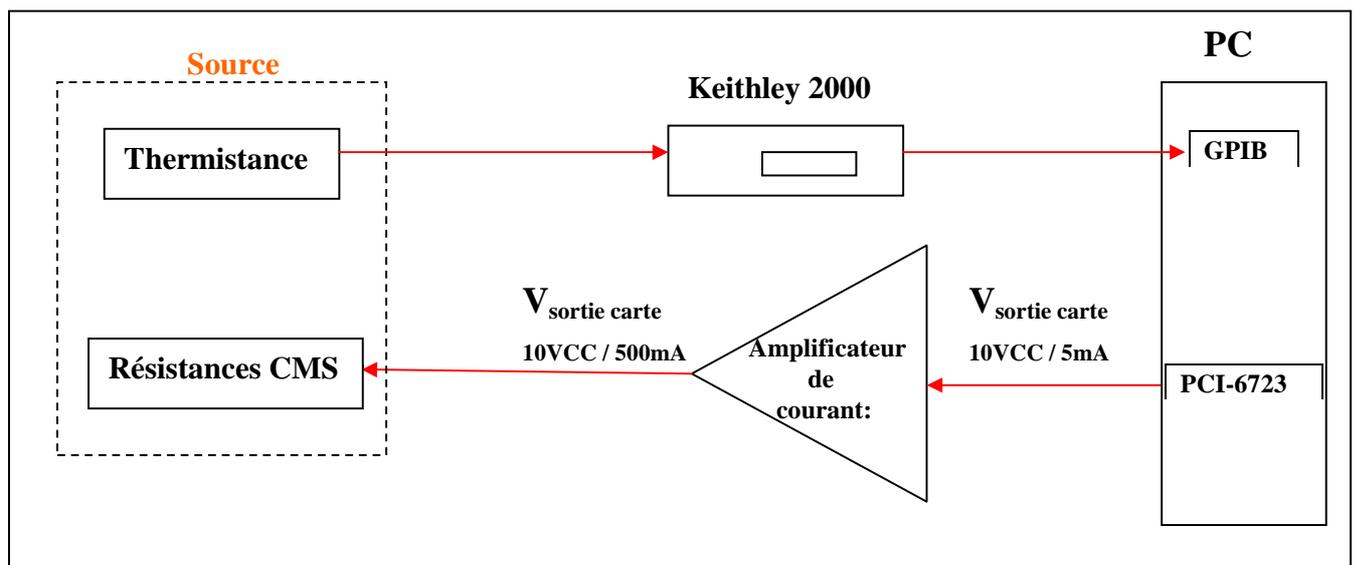


Figure 3.4 : Contrôle de la température de la source

3.2 LA MODULATION DU SIGNAL

3.2.1 Le hacheur

Pour pouvoir extraire le signal du fond, le mode d'acquisition est effectué par modulation d'amplitude ("chopping" en anglais). L'utilisation d'un hacheur permet de créer de petites variations de flux par-dessus de l'émission de fond. Le traitement du signal est alors rendu plus facile. Ce hacheur est une hélice. La fréquence du signal modulée du corps noir correspond à la fréquence de passage de deux pales de l'hélice, on a la relation suivante :

$$F_{\text{Signal modulé}} = n_{\text{pales}} \times F_{\text{hélice}} \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} F_{\text{Signal modulé}} : & \text{fréquence du signal modulé} \\ n_{\text{pales}} : & \text{nombre de pales du chopper} \\ F_{\text{hélice}} : & \text{fréquence de rotation l'hélice} \end{array} \right.$$

Dans notre application, la fréquence du signal modulé doit être comprise entre 4 Hz et 10 Hz, d'une part, parce que le moteur utilisé (Portescap P310) présente des accoups pour une fréquence du signal modulé inférieure à 4 Hz, et d'autre part parce que la bande passante du détecteur de la caméra se dégrade au-delà de 10 Hz. Le hacheur qui a été choisi est une hélice composé de six pales (figure 3.5).

Le choix optimal de la fréquence du signal modulé est déterminé à partir de la méthode utilisée pour le traitement des données dont l'explication est détaillée en annexe 9, ainsi qu'au paragraphe 4.3.2 (choix des paramètres d'acquisition).

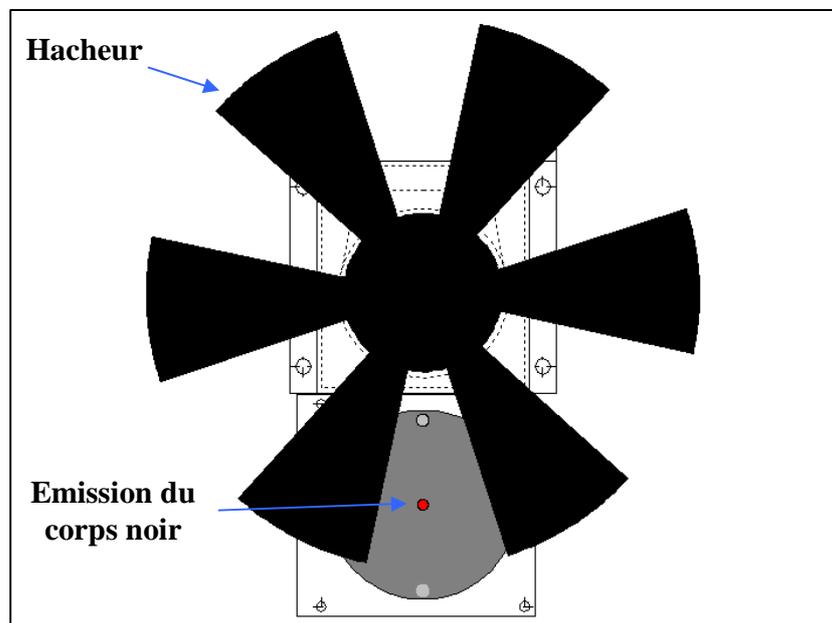


Figure 3.5 : Vue de dessus du dispositif de modulation du signal (hélice à 6 pales)

3.2.2. Prédiction du signal modulé théorique

Dans ce paragraphe, l'idée est d'estimer la fonction périodique théorique du signal modulé, à partir de la géométrie du hacheur et du trou source. Sur la figure 3.6, sont représentés le trou source, par un cercle de rayon 'r', la distance MO qui sépare l'axe de rotation du hacheur du centre du trou source, et l'angle de rotation 'α' des pales du hacheur.

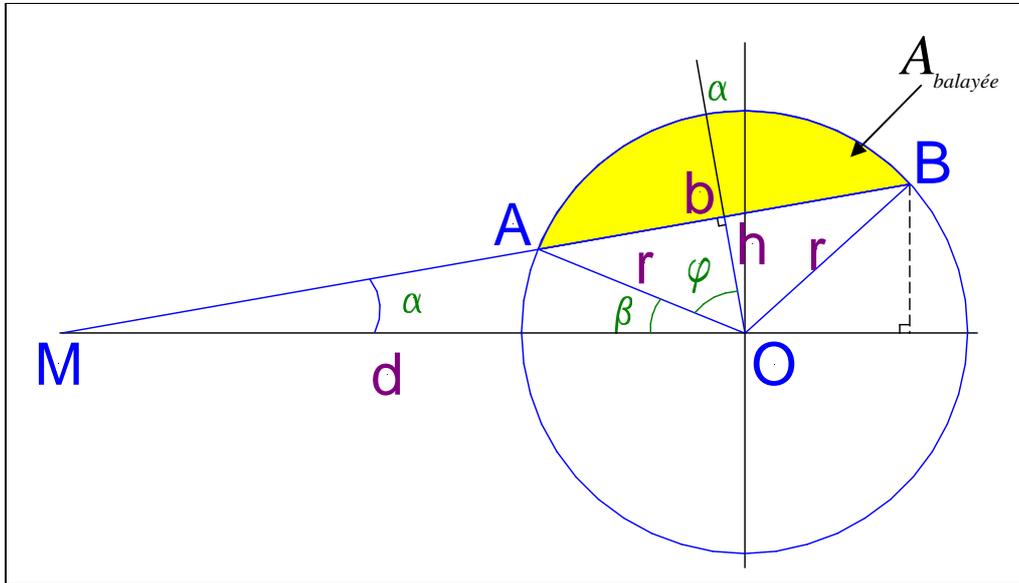


Figure 3.6 : Représentation de la vue de dessus de la surface du trou source balayée par une pale du hacheur en fonction de l'angle de rotation α. Les distances b et h sont respectivement la base et la hauteur du triangle OAB.

L'intensité du rayonnement entre deux pales, varie entre son maximum et son minimum pour une rotation de la pale du hacheur correspondant à une variation de l'angle 'α' ; respectivement entre $+\arcsin(r/d)$ et $-\arcsin(r/d)$. Ce qui correspond à une demi-période du signal modulé, et à une variation de l'angle φ entre 0 et π, puisque α et φ sont liés ainsi :

$$\varphi = \arccos\left(\frac{d}{r} \sin \alpha\right) \quad (3.5)$$

Après simplification, on trouve l'expression suivante pour l'aire balayée :

$$A_{\text{balayée}} = r^2 \cdot \left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right) \quad (3.6)$$

On peut alors exprimer l'équation mathématique du signal modulé en fonction de l'angle φ, sur la première demi-période entre 0 et π. Ainsi

$$\begin{cases} s(\varphi) = A_{\text{cercle}} - A_{\text{balayée}} \\ s(\varphi) = r^2 \cdot \left[\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right] \end{cases} \quad (3.7)$$

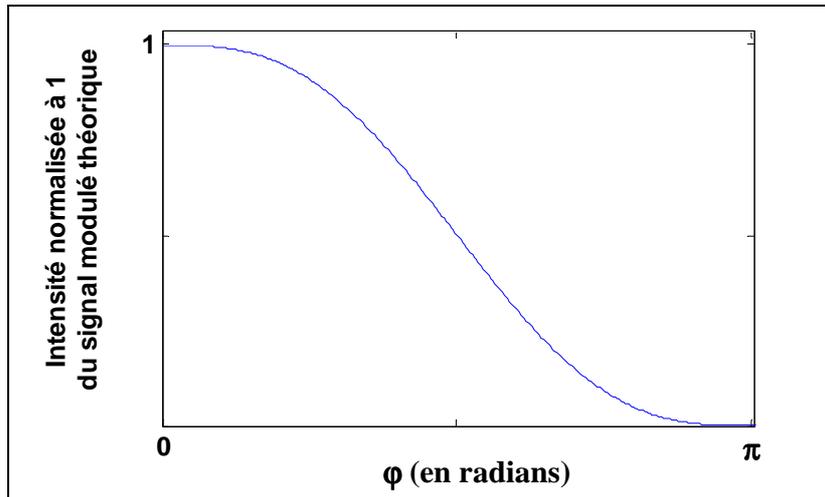


Figure 3.7 : Evolution de l'intensité du signal théorique sur une demi-période

On en déduit l'expression théorique du signal modulé sur une période complète 2π :

$$s(\varphi) = \begin{cases} r^2 \cdot \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) & \text{si } \varphi \in [0; \pi] \\ -r^2 \cdot \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) & \text{si } \varphi \in [\pi; 2\pi] \end{cases} \quad (3.8)$$

Ce signal périodique n'étant pas un sinus pur, sa transformée de Fourier comportera des harmoniques, qu'il faudra prendre en compte lors du traitement de ce signal dans l'espace des fréquences.

Le développement de la série de Fourier de ce signal permet de connaître ses harmoniques ainsi que leur amplitude. Après développement, le calcul (annexe 6) donne les résultats suivants :

$$s(t) = \frac{\pi \cdot r^2}{2} - \frac{16 \cdot r^2}{\pi} \cdot \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{\cos[2\pi \cdot (2p+1) \cdot F_0 \cdot t]}{(2p+1)^2 (2p-1)(2p+3)} \quad (3.9)$$

Dans l'espace des fréquences, on peut écrire le spectre ainsi :

$$S(f) = \frac{\pi \cdot r^2}{2} - \frac{8 \cdot r^2}{\pi} \cdot \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{1}{(2p+1)^2 (2p-1)(2p+3)} \delta(f - (2p+1)F_0) \quad (3.10)$$

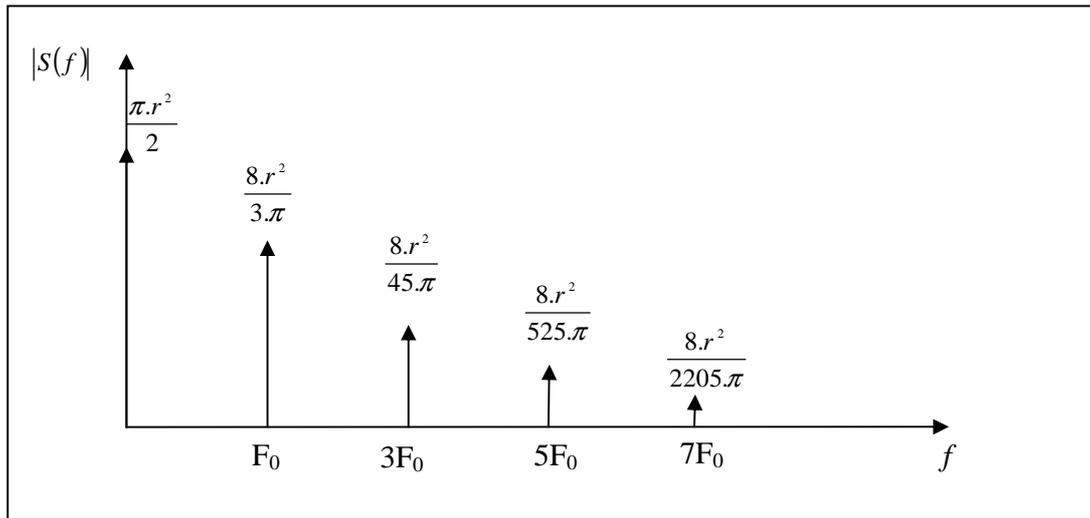


Figure 3.8 : Module du spectre du signal modulé théorique

La transformée de Fourier de cette fonction périodique du signal théorique est composée d'harmoniques de rang impair, dont il faudra tenir compte dans le calcul du signal modulé.

3.2.3 La commande du hacheur

Le hacheur est entraîné par un petit moteur pas à pas, Portescap P310. Ce moteur est commandé par deux tensions sinusoïdales qui oscillent entre -10V et +10V, de même fréquence, et déphasées de 90°. La figure 3.9 montre le rapport entre le déplacement du moteur et la fréquence des deux tensions en quadrature alimentant ses bobines. Sur une période, le moteur se déplace de quatre pas, et comme celui-ci fait un tour complet au bout de 60 pas (ce sont les caractéristiques de ce moteur pas-à-pas), la fréquence de rotation de l'hélice du hacheur ($F_{hélice}$) et la fréquence des deux tensions sinusoïdale (F_{sinus}) vérifient ainsi le rapport suivant :

$$F_{hélice} = \frac{4}{60} \times F_{sinus} \quad (3.11)$$

Comme le hacheur comporte six pales, la fréquence du signal modulé vaut :

$$F_{Signal\ modulé} = \frac{2}{5} \times F_{sinus} \quad (3.12)$$

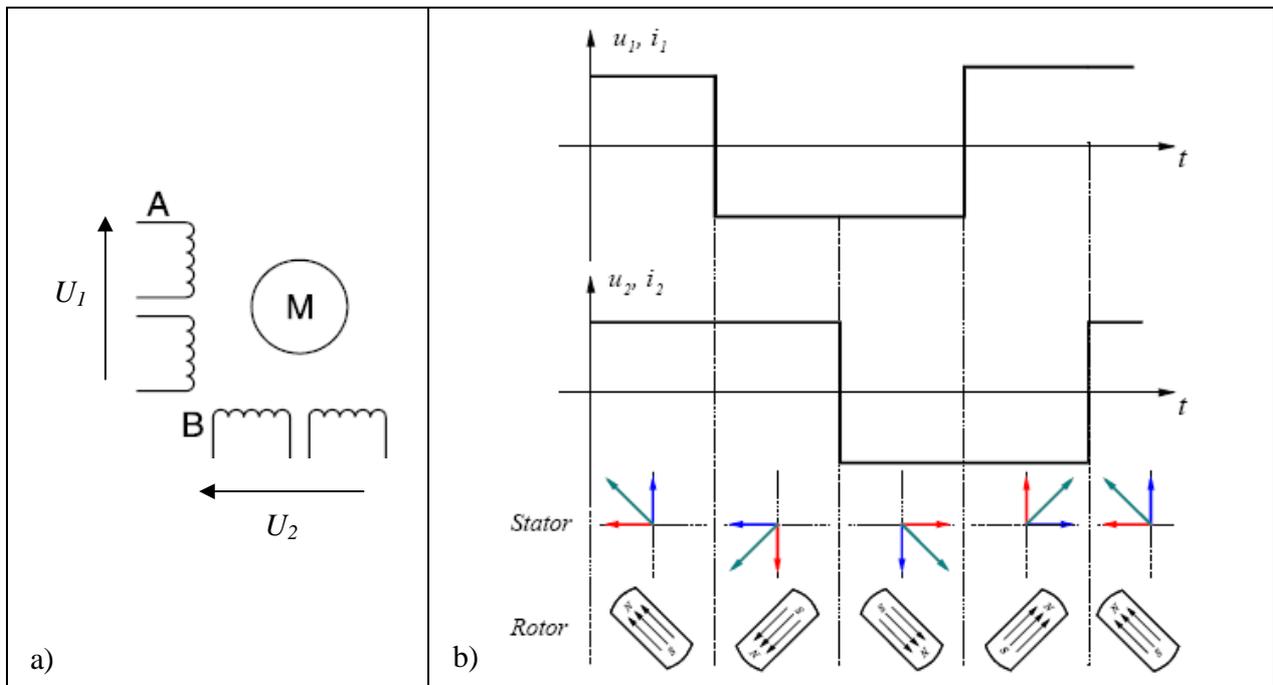


Figure 3.9 : a) Alimentation des deux phases du moteur de l'hélice du hacheur, b) Schéma de principe du déplacement du moteur, lorsque ses bobines sont alimentées par deux tensions en quadrature de phases. Expérimentalement ces deux tensions sont sinusoïdales.

3.3. LE MONTAGE OPTIQUE ET LE DESIGN DU BANC DE TEST

3.3.1. Le miroir parabolique

J'ai choisi d'utiliser le miroir parabolique Oriel Instruments modèle 45347. Ses caractéristiques répondent au cahier des charges, la taille de l'ouverture de la parabole est de 63,5 millimètres. De plus il est hors axe à 90°, ce qui facilite le placement du trou source de notre corps noir avec son hacheur au foyer du miroir.

La figure 3.10 représente le tracé des rayons qui convergent au point focal de ce miroir, ce sont les rayons qui sont parallèles à l'axe principal de la parabole. Le rayon incident qui touche le centre du miroir et qui est parallèle à l'axe principal, tourne exactement de 90° pour atteindre le point focal. La distance entre le point situé à la surface de la parabole au centre de l'ouverture, et le point focal est appelée longueur focale effective (*EFL*) et représente exactement deux fois la longueur focale de la parabole.

Cependant, parce que la source n'est ponctuelle, le faisceau en sortie du miroir parabolique n'est pas 'parfaitement' parallèle, mais divergent. L'angle de divergence α du faisceau en sortie du miroir parabolique dépend de la taille du trou source :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{R}{EFL}\right) \quad (3.13)$$

Avec R le rayon du trou source; et EFL la distance focale effective du miroir parabolique (Voir en annexe 7 le tracé des rayons d'une source étendue placée au foyer du miroir parabolique). Le choix de la taille du trou source est un compromis entre obtenir un faisceau de faible divergence en sortie de miroir parabolique, et avoir un flux détectable issu de la surface du trou source.

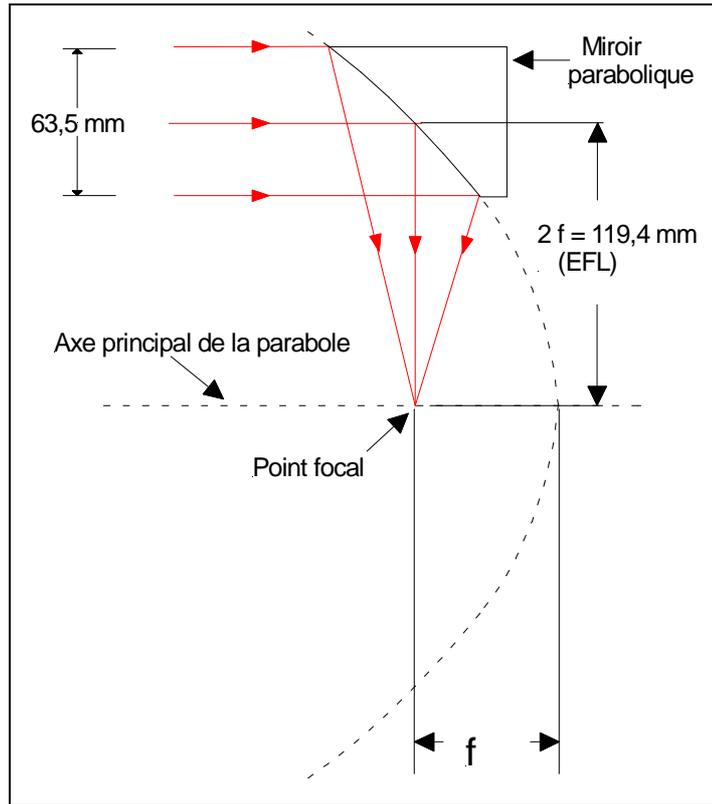


Figure 3.10 : – Position du point focal du miroir parabolique désaxé de 90° , longueur focale f et longueur focale effective $2f$.

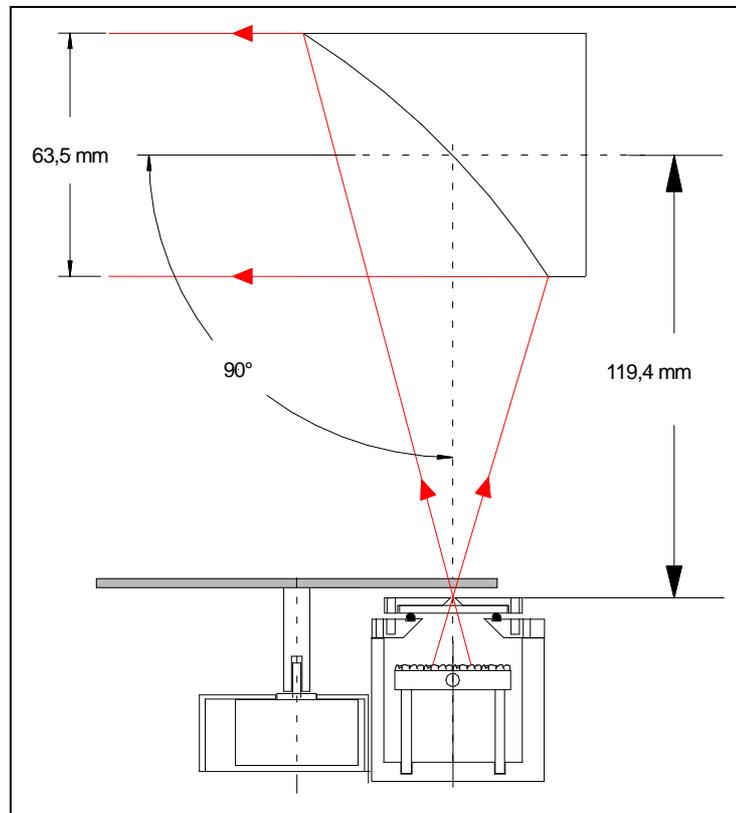


Figure 3.11 – Disposition du trou source du corps noir au foyer du miroir parabolique désaxé de 90° (Oriel Instrument, référence model n°45347).

3.3.2. Construction géométrique:

Si on éclaire la fenêtre d'entrée avec le montage de la figure 3.12, l'enceinte du corps noir et le hacheur se trouvent à proximité du champ de vue de l'axe optique de la caméra. Or on cherche à éviter la présence d'objets émissifs dans le champ de vue de la caméra. Dans l'idéal, seul le faisceau parallèle provenant du trou source du corps noir doit être vu par la caméra. Pour éviter ces risques de rayonnements parasites, on a préféré replier le faisceau parallèle issu du miroir parabolique en utilisant un miroir plan.

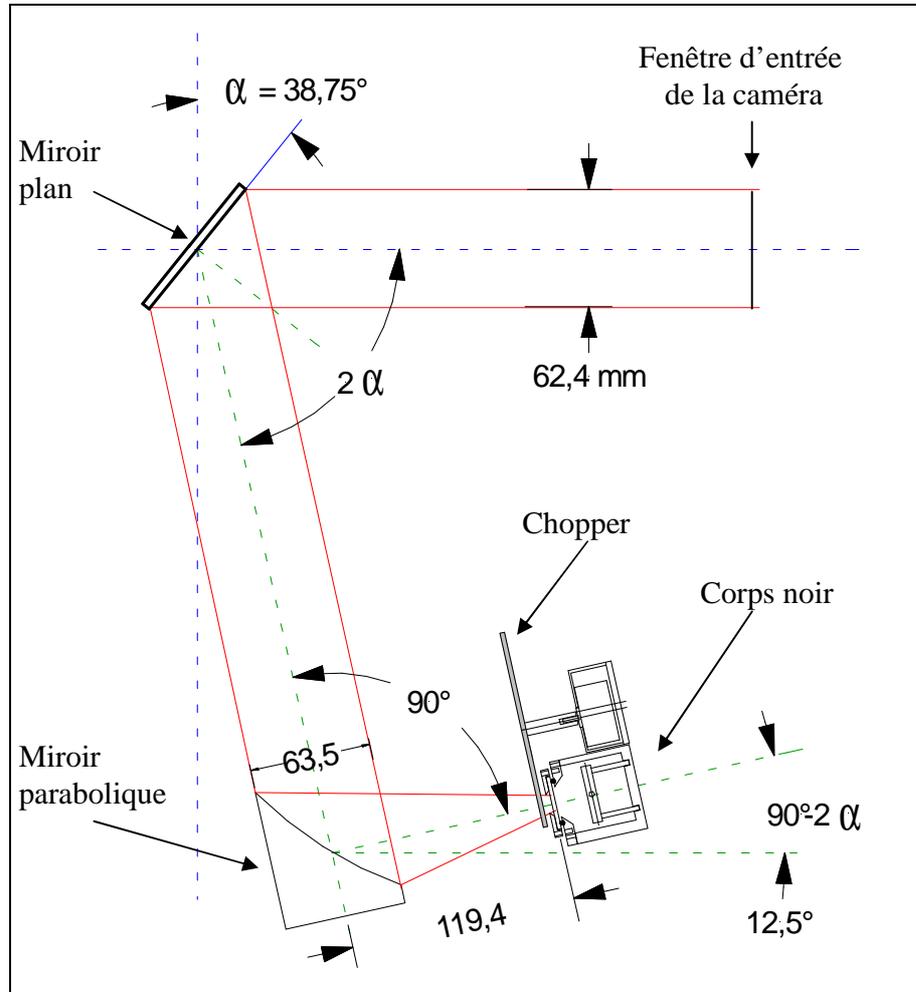


Figure 3.12 : Schéma de construction géométrique d'un faisceau parallèle éclairant la fenêtre d'entrée de la caméra

La taille de ce miroir plan a été choisie de manière à ce que la projection du faisceau parallèle sur la fenêtre d'entrée de la caméra couvre entièrement celle-ci, en tenant compte de son inclinaison.

Le critère est le diamètre de la fenêtre d'entrée de la caméra: 60 mm.

Le diamètre du miroir plan devra donc satisfaire la relation suivante :

$$\Phi_{\text{miroir plan}} \times \cos \alpha \geq \Phi_{\text{fenêtre d'entrée}} \quad (3.14)$$

Pour cela on a choisi un miroir plan de diamètre de 80 mm avec un angle d'inclinaison α de $38,75^\circ$ par rapport à la verticale.

On a ainsi rempli les conditions optiques pour rendre quasi-parallèle le faisceau du rayonnement issu du trou source de notre corps noir et éclairer la fenêtre d'entrée de la caméra sur toute son ouverture.

Intéressons nous maintenant au dispositif mécanique pour assembler ces ensembles et pour le déplacer dans tout l'angle solide 2π sr.

3.4. LE DEPLACEMENT

3.4.1 Description du dispositif mécanique

La conception mécanique retenue est un système de rotation d'un "bras" autour deux axes (noté X et Z sur la figure 3.13). Les déplacements sont comparables à ceux d'un compas que l'on ferait tourner autour de deux axes. Les trajectoires décrites par le sommet du compas sont celles d'une demi-sphère.

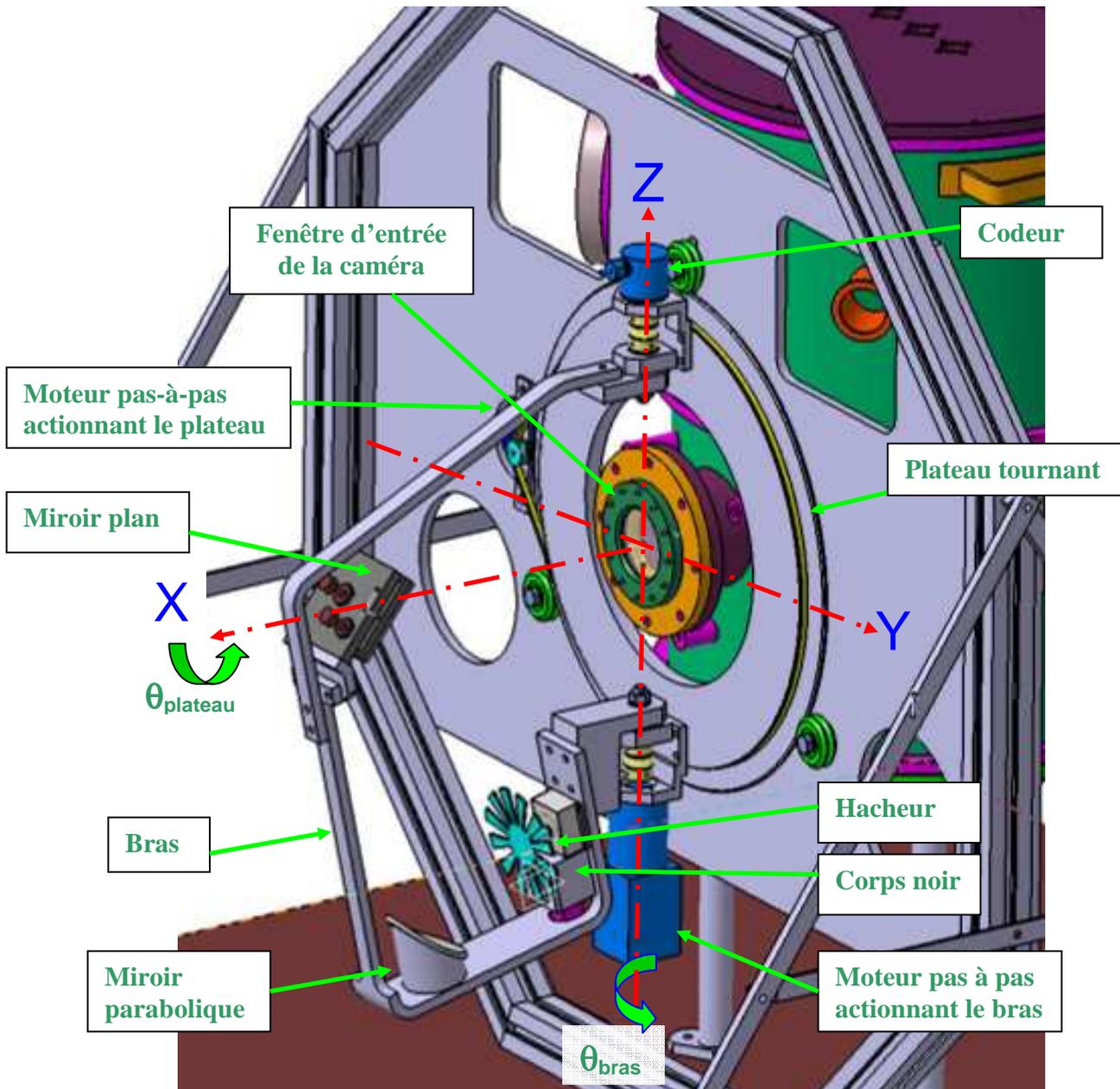


Figure 3.13 : Dispositif de déplacement du faisceau parallèle autour du centre de la fenêtre d'entrée de la caméra

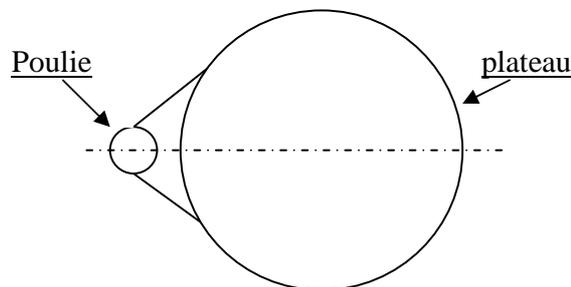
Le dispositif mécanique est composé des éléments suivants :

- ↳ Un "bras" en forme de compas, composé d'un support en "L" et d'un second support en "U". Ce bras tourne autour deux axes (voir figure 3.13) :
 - L'axe transverse au plateau tournant (axe Z), dont le déplacement est assuré par un premier moteur pas-à-pas.
 - L'axe optique (axe X) de la caméra, par la rotation d'un plateau tournant. Celui-ci est monté sur trois roues de guidage. Une courroie crantée relie ce plateau à une poulie entraînée par un petit moteur pas-à-pas qui assure la rotation de ce plateau autour de l'axe optique.
- ↳ Le corps noir, le hacheur, le miroir parabolique et le miroir plan. Tous ces éléments sont fixés sur le bras du dispositif.
- ↳ Les déplacements du faisceau de lumière parallèle sont mesurés par deux codeurs :
 - Un codeur fixé sur un axe solidaire du bras permet de mesurer les déplacements autour de l'axe transverse.
 - Un second codeur fixé sur l'axe du petit moteur pas à pas commandant le plateau, permet de mesurer les déplacements autour de l'axe optique.

3.4.2 Calcul des couples et choix des moteurs pas à pas

↳ Moteur déplaçant le plateau

Le couple du moteur qui assure le déplacement du plateau n'a pas besoin d'être élevé. En effet, ce moteur entraîne une poulie qui elle-même entraîne le plateau grâce à une courroie crantée, créant ainsi un rapport de réduction important : $R=23$.



$$R = \frac{R_{\text{plateau}}}{R_{\text{poulie}}} = \frac{200}{8,7} \approx 23$$

De plus, il n'y a pas de contrainte d'encombrement autour du plateau. Il est possible de rajouter un contre-poids, si besoin est pour équilibrer les forces qui s'exercent autour de l'axe de rotation du plateau.

Ces deux points ont permis de choisir un moteur peu encombrant dont le couple est faible.

Le moteur pas à pas choisi est celui du fabricant McLennan, de référence P542M481UG11L82 (référence Radiospares : 351-4625), dont le couple de maintien est de 0,1 Nm.

↳ Moteur déplaçant le bras

Le choix de ce moteur est un peu plus délicat car il contrôle le bras qui supporte : le miroir plan, le miroir parabolique, le corps noir, le hacheur, et leur support. Ces éléments placés chacun à une certaine distance de l'axe du moteur créent un couple que le moteur devra compenser (figure 3.14 et 3.15). La contribution de chacun des éléments est donnée dans le tableau 3.1.

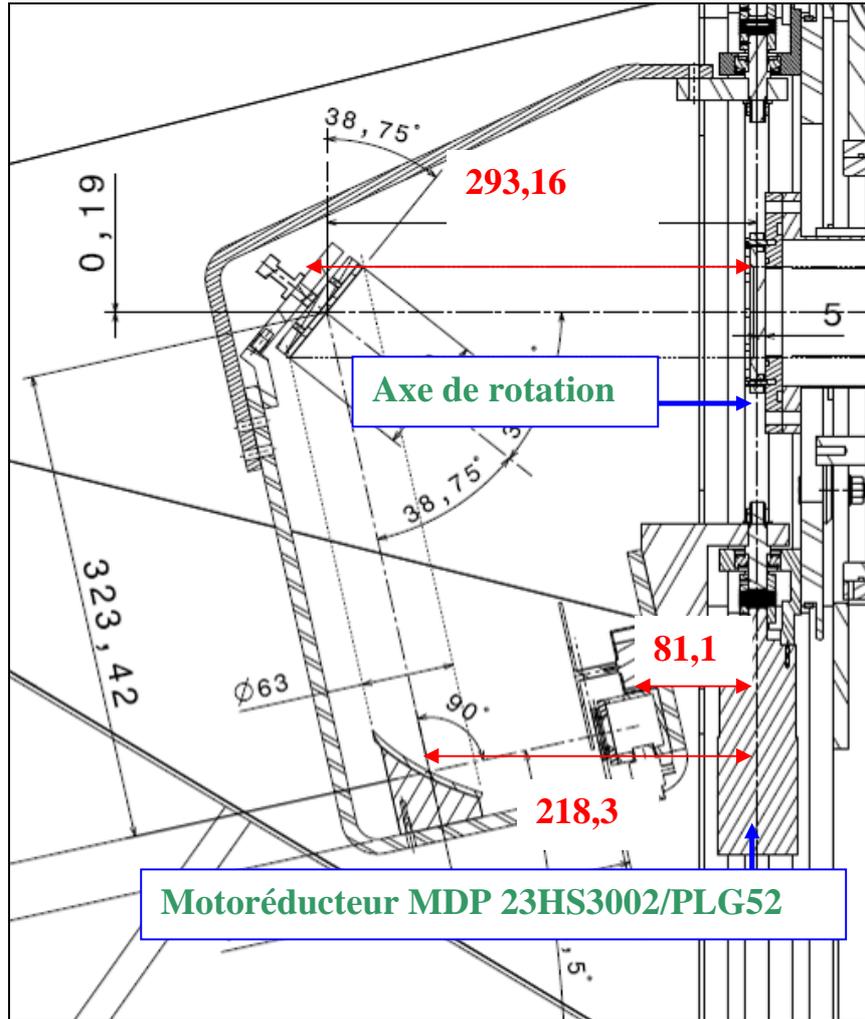


Figure 3.14 : Distances (représentées en rouge sur le dessin) séparant les centres de gravité des éléments (miroir plan, miroir parabolique, hacheur, et corps noir) à l'axe de rotation du moteur pas à pas.

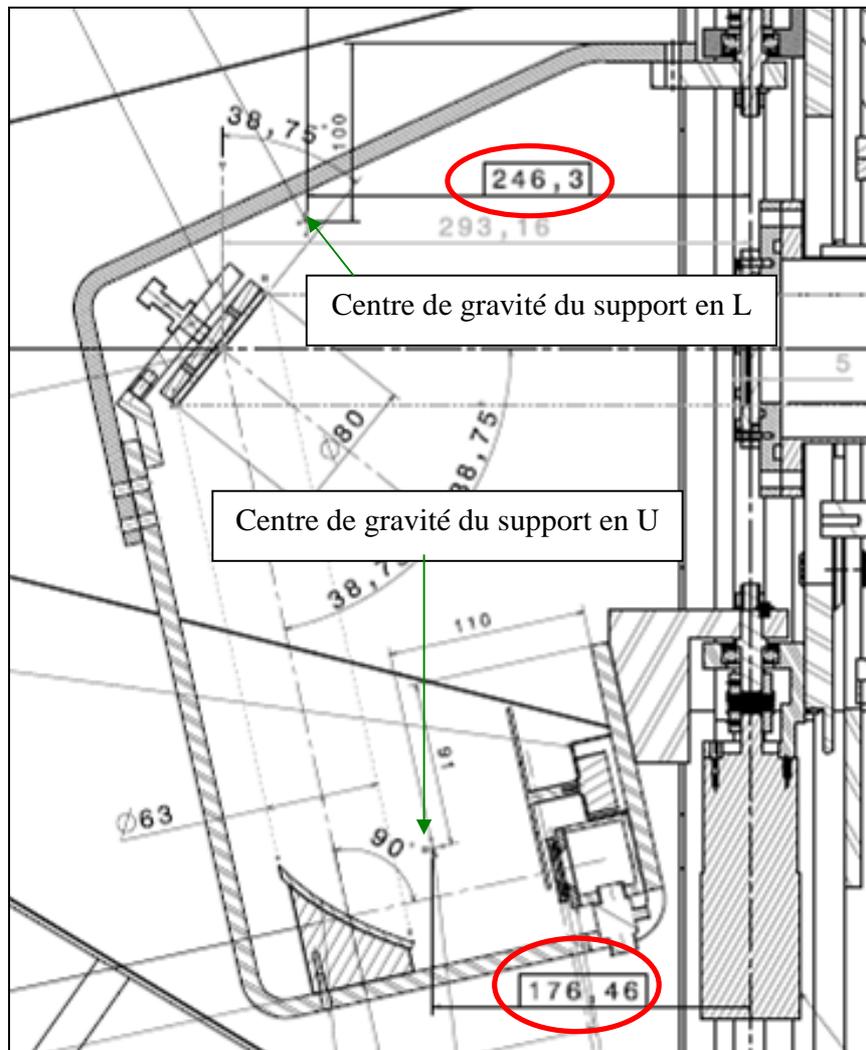


Figure 3.15 : Distance entre les centres de gravité des deux supports en L et en U et l'axe de rotation du moteur.

Elément	Poids (en g)	Distance (en m)	Couple (en N.m)
Miroir plan et le trait-point-plan	413,6	0,293	1,2
Miroir parabolique	145,7	0,218	0,3
Hacheur et son moteur	95,2	0,081	0,1
Corps noir	228,4	0,081	0,2
Support en L	380	0,246	1,0
Support en U	762	0,176	1,3
Somme des couples :			4,1

Tableau 3.1 : Couple exercé par chacun des éléments (les deux miroirs, le corps noir, le hacheur, et les supports constituant le bras), calculé à partir de leur poids et de la position de leur centre de gravité par rapport à l'axe de rotation de ce moteur

Le couple total C_{total} exercé autour de l'axe du moteur par ces éléments est donc : 4,1 N.m.

Pour assurer les déplacements de l'ensemble des éléments et de leur support, j'ai choisi le moteur pas à pas du fabricant MDP de référence 23HS3002/PLG52. Celui-ci est monté avec un réducteur qui lui permet de délivrer un couple de maintien jusqu'à 8 Nm, apportant une marge de sécurité d'un facteur 2.

3.4.3 Commande des moteurs et résolution des déplacements

Pour la commande de ces deux moteurs, j'ai recherché des fabricants de contrôleurs de moteurs pas à pas répondant à deux critères principaux. D'une part il faut qu'ils soient adaptés aux caractéristiques des courants d'alimentation des bobines de ces deux moteurs et d'autre part que les instructions de commandes puissent être envoyées via une interface de communication à partir du logiciel Labview. Ce deuxième point est nécessaire car il permettra au contrôle-commande du banc de test de communiquer facilement avec celui de la caméra qui a été entièrement programmé sous l'environnement Labview. Les séquences d'acquisition pourront ainsi être automatisées à partir de la caméra.

↳ Contrôle des déplacements du bras autour de l'axe transverse (moteur MDP) :

Le moteur MDP est un moteur comportant 200 pas par tour. Il est monté sur un réducteur dont le rapport est 20,25. Le contrôleur que j'ai utilisé est le TMC-IDX 4803 (fabricant : Trinamic Motion Control, fournisseur : Farnell). Celui-ci permet de commander le moteur en résolution micro-pas. J'ai paramétré les déplacements en résolution de 16 μ pas. Donc un tour complet de 360° du moteur est divisé en 64800 μ pas ($200 \times 20,25 \times 16 = 64800$). L'angle de déplacement du moteur correspond à l'angle de déplacement du bras.

Les instructions de commande de ce contrôleur sont envoyées via une liaison RS 485.

↳ Contrôle des déplacements du plateau autour de l'axe optique (moteur McLennan) :

Le moteur qui entraîne la rotation du plateau grâce à la transmission de la courroie, est un moteur comportant 48 pas par tour. Il est monté sur un réducteur de rapport 25. Le contrôleur utilisé est le Greenwich Instruments GSM4 (fournisseur : Farnell). Il permet de commander le moteur en résolution demi-pas. Donc un tour complet de 360° du moteur est divisé en 2400 demi-pas ($48 \times 25 \times 2 = 2400$).

Il faut tenir compte du rapport de réduction entre le plateau et la poulie pour connaître la correspondance entre l'angle de déplacement de ce moteur et l'angle de déplacement du plateau. Ce rapport est de 23, ce qui signifie que le plateau tourne d'un demi-tour (180°) lorsque la poulie tourne de 11,5 tours, cela correspond à envoyer une commande de déplacement au moteur de 27600 demi-pas ($2400 \times 11,5 = 27600$).

Les instructions de commande de ce contrôleur sont envoyées via une liaison RS 232.

- Courses maximales des déplacements du plateau et du bras

La course maximale du plateau est 180°, cela est suffisant pour décrire toutes trajectoires.

La course maximale théorique du bras pour décrire toutes les trajectoires est de $\pm 90^\circ$, mais expérimentalement on a été limité à $\pm 75^\circ$ par l'encombrement de l'hélice du hacheur. Il a donc fallu sécuriser le déplacement du bras à deux niveaux : une protection "hard" assurée par deux contacts fin-de-course pour court-circuiter les phases du moteur MDP à $\pm 75^\circ$. Une protection "soft", au niveau de la programmation Labview, une valeur de seuil haut limite le déplacement du bras à $\pm 75^\circ$.

- Résolution des déplacements du plateau et du bras

On peut estimer les résolutions des déplacements mécaniques à partir des performances des contrôleurs des moteurs pas à pas utilisés pour le bras et le plateau (tableau 3.2).

Rotation (moteur)	Résolution de la commande des moteurs	Résolution correspondante au déplacement du bras et du plateau
Bras (MDP)	$\pm 16 \mu\text{pas}$	$(\theta_{\text{bras}})_{\text{résolution}} = \pm 0,08^\circ$
Plateau (McLennan)	± 1 demi-pas	$(\theta_{\text{plateau}})_{\text{résolution}} = \pm 0,006^\circ$

Tableau 3.2 : Performances des commandes pour déplacer le bras et le plateau

3.4.5 Mesure des déplacements

Les acquisitions des codeurs nous permettent d'avoir accès aux positions angulaires du bras et du plateau. Le déplacement du faisceau parallèle décrit une demi-sphère de rayon égale à la distance d ($d=293,16\text{mm}$). Ainsi on déduit pour chaque acquisition les coordonnées du point central du miroir plan dans le repère $(X ; Y ; Z)$ de la figure 3.16, on a:

$$\begin{cases} X_M = d \cdot \cos \alpha \\ Y_M = d \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ Z_M = d \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} d = 293,16 \text{ mm} \\ \alpha = \theta_{\text{bras}} \\ \beta = \theta_{\text{plateau}} \end{cases}$$

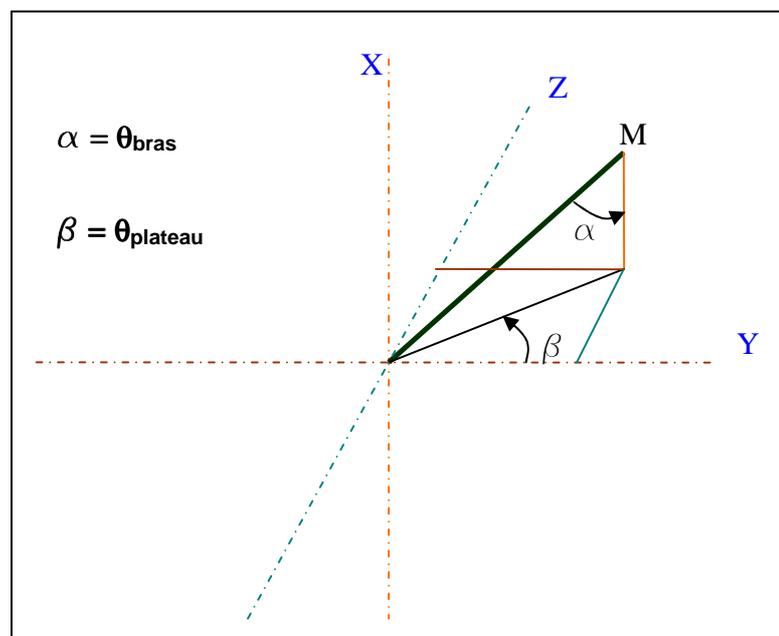


Figure 3.16 : Coordonnées du point M, centre du miroir plan

Ces angles sont mesurés avec des codeurs numériques de 9 bits qui délivrent ainsi une mesure angulaire avec une résolution de $\pm 0,7^\circ$

$$(\text{codeur})_{\text{résolution}} = \frac{360}{2^9} \approx \pm 0,7^\circ \quad (3.15)$$

Cette résolution à $\pm 0,7^\circ$ est acceptable car elle permettra de faire un nombre de points suffisant. Toutefois dans un cas idéal un codeur de 12 bits aurait apporté une résolution de mesure très proche de celle du déplacement, soit $\pm 0,08^\circ$, mais cela n'a pas été possible.

3.5. CONTROL COMMANDE ET PROGRAMMATION

3.5.1. Description du contrôle-commande

La fenêtre de la face avant du VI (Virtual Instrument) réalisé sous le logiciel Labview est présentée en annexe 5. Ce programme permet d'entrer la température du corps noir, la fréquence de modulation et les paramètres de déplacement du faisceau parallèle. Il est interfacé avec le système d'acquisition de la caméra, ce qui permet de contrôler celle-ci depuis le PC de contrôle commande.

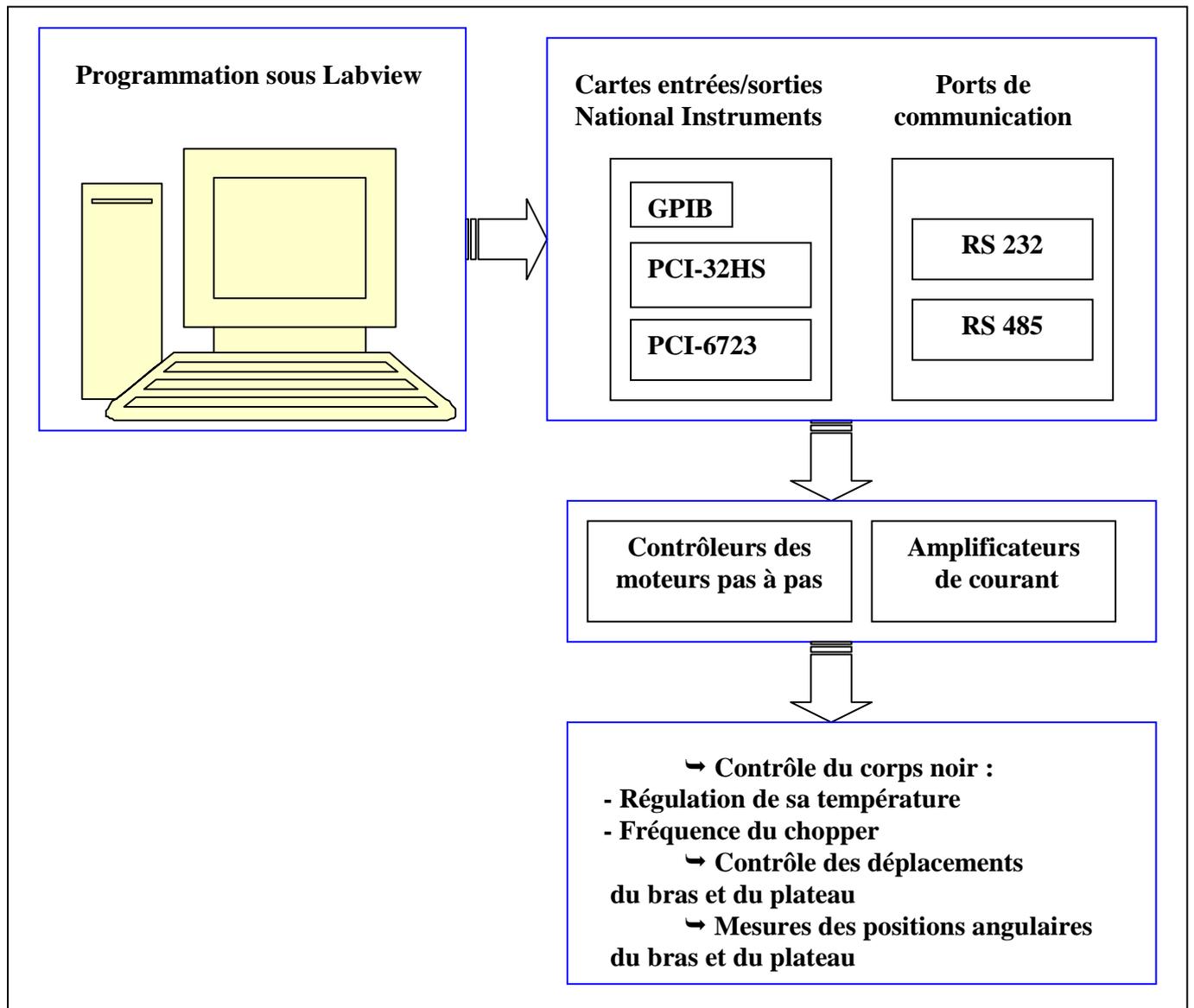


Figure 3.17 : Synoptique du contrôle-commande du banc de test

3.5.2 Description de la programmation

Les déplacements du bras et du plateau du banc de test, permettent de déplacer le faisceau parallèle dans une demi-sphère. Pour balayer l'angle solide du demi-espace, il faut décrire toutes les directions depuis un point quelconque de la demi-sphère jusqu'à son centre, Deux programmes écrit sous Labview utilisent chacun une procédure différente pour décrire toute la demi-sphère.

Ces deux méthodes sont schématisées sur la figure 3.18.

- La première méthode consiste à décrire des cercles autour de l'axe optique avec le déplacement du plateau, pour une position arrêtée du bras

- La seconde méthode consiste à décrire des demi-cercles autour de l'axe transverse avec le déplacement du bras, pour une position arrêtée du plateau.

Cette dernière présente l'avantage de travailler sur un même axe et permet donc de tracer directement le diagramme d'antenne de la caméra sur un axe.

Le VI de la première méthode n'est pas immédiat à écrire car le plateau ne peut faire que des demi-tours, donc le cercle est décrit en deux fois (deux demi-cercles), après repositionnement du bras dans la position opposée (voir en annexe 4 l'algorithme de la 1^{ère} méthode).

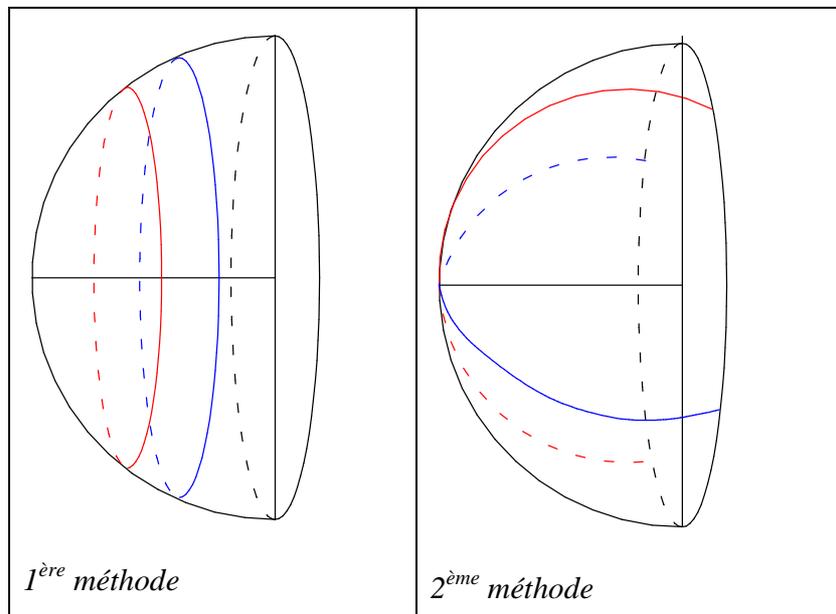


Figure 3.18 : Schéma de principe des deux méthodes écrites sous Labview pour déplacer le centre du miroir plan sur toute la demi-sphère

A ce programme sont associés les sous-VIs de régulation de température du corps noir, de la fréquence du hacheur, du paramétrage, des instructions envoyés aux contrôleurs des moteurs pas à pas et des acquisitions des codeurs qui mesurent la position du faisceau parallèle.

4. TESTS ET PERFORMANCES

Avant toute mesure, il est nécessaire d'aligner l'axe optique du banc de test avec celui de la caméra. Le hacheur et le corps noir sont remplacés par une petite diode laser fixée sur une pièce dimensionnée pour que le faisceau de la diode pointe le centre du miroir parabolique, comme illustré sur la figure 4.1.

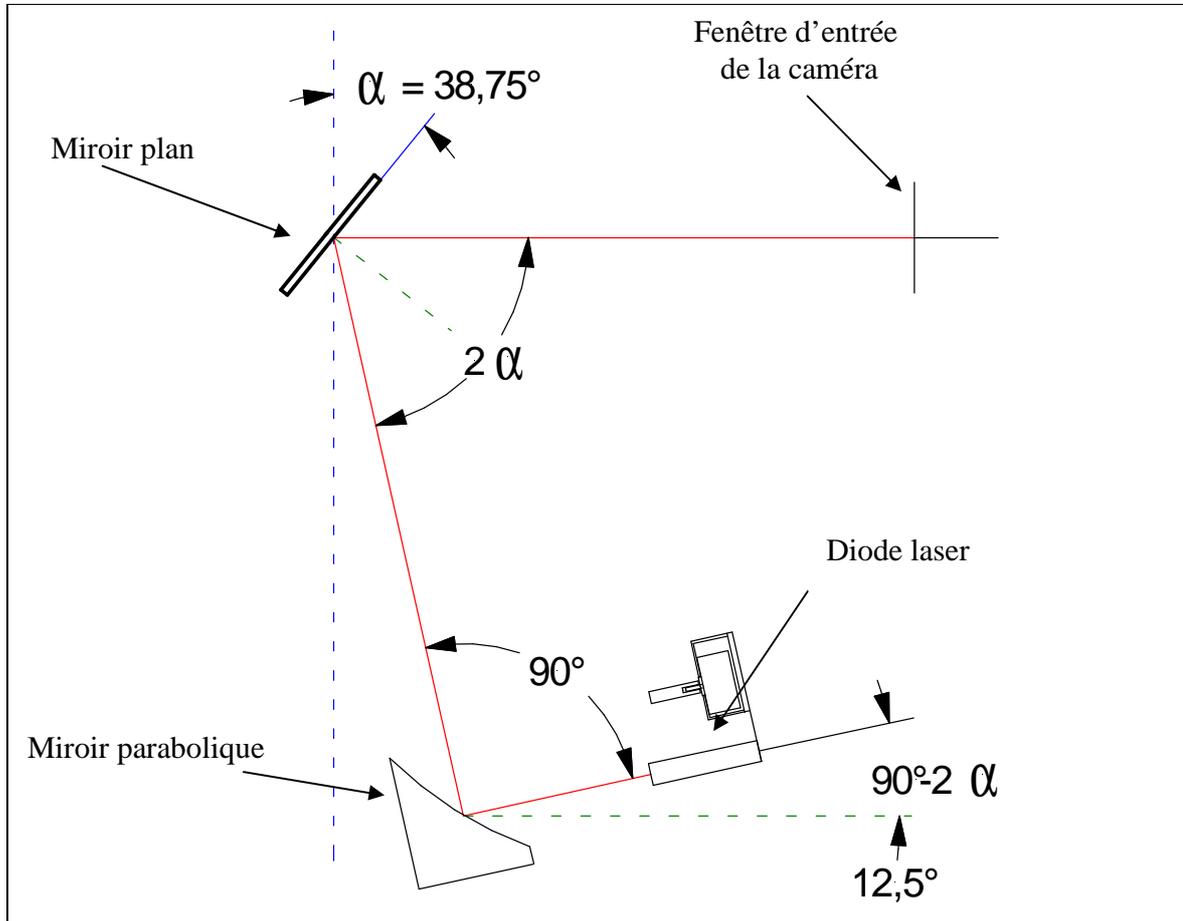


Figure 4.1 : Schéma d'alignement optique du banc de test sur l'axe optique de la caméra

Une feuille de papier quadrillée, positionnée sur le plateau dans un plan perpendiculaire à l'axe optique (figure 4.2.a), permet de connaître la position du centre de l'ouverture du plateau, et de pointer ce point avec le faisceau de la diode laser. La fenêtre d'entrée de la caméra est placée dans le plan contenant l'axe de rotation du moteur du bras. On aligne le faisceau de la diode laser par auto-collimation sur l'axe optique de la caméra, en positionnant un miroir, comme illustré sur la photo de la figure 4.2. On effectue le réglage en jouant sur le trait-point-plan du miroir plan et en ajustant la hauteur des vis du châssis du banc de test.

C'est ainsi que nous avons aligné l'axe optique du banc de test sur l'axe optique de la caméra.

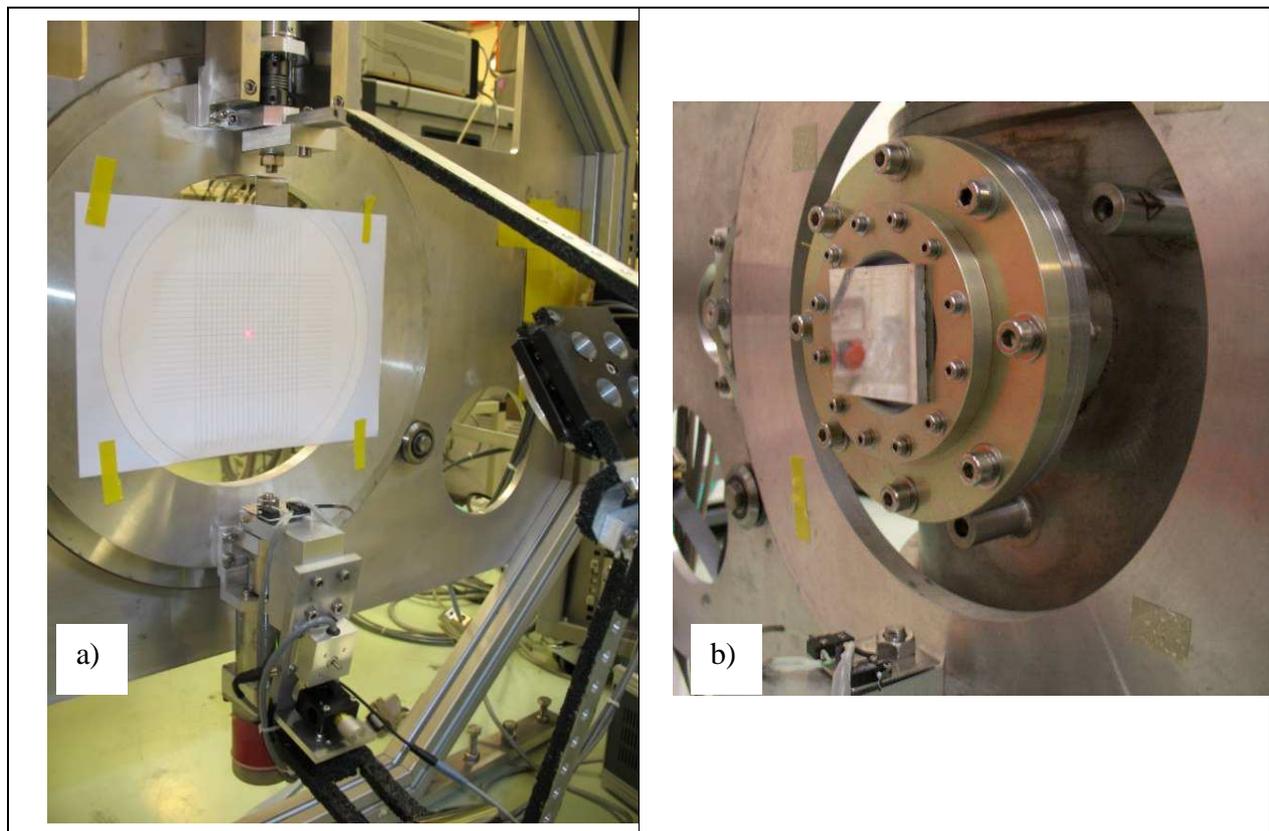


Figure 4.2 : Etapes préliminaires aux mesures : a) Positionnement de l'axe optique du banc de test au centre de l'ouverture du plateau, b) Miroir pour aligner par auto-collimation l'axe optique du banc de test sur celui de la caméra.

4.1 ESTIMATION DES ERREURS DE POSITIONNEMENT DU FAISCEAU PARALLELE

Pour estimer les erreurs de positionnement du faisceau parallèle, on a appliqué une méthode de mesures de l'alignement optique en utilisant le montage avec la diode laser. Cette méthode permet de tracer le diagramme des positions du faisceau parallèle dans un plan de référence.

- Description de la méthode utilisée pour mesurer les positions du faisceau

Une feuille de papier uni sert d'écran. Elle est positionnée dans le plan constitué par la face arrière du plateau (photo de la figure 4.3). Le faisceau de la diode laser forme une tache sur cette feuille. Un appareil photo numérique est positionné derrière la feuille et vise la tache du faisceau laser, et photographie sa position pour plusieurs couples de positions du bras et du plateau. Nous avons effectué les mesures en déplaçant le bras de 10° en 10° entre -60° et $+60^\circ$ par rapport au centre de rotation du faisceau, pour 5 positions du plateau (0° , 36° , 72° , 108° , 144°). A l'aide d'un traitement d'image sous le logiciel Matlab, nous avons calculé les coordonnées $(x_i; y_i)$ du barycentre des tâches pour chaque photo. Cela a permis de tracer le diagramme des positions du faisceau parallèle dans le plan de référence matérialisé par la feuille de papier. Ce diagramme permet de comparer la mesure du déplacement du faisceau parallèle dans un plan de référence à celles calculées de manière théorique à partir des dimensions du dispositif : la position du plan de la feuille (plan de référence), et de l'angle du bras. On peut alors estimer des erreurs relatives de positionnements.

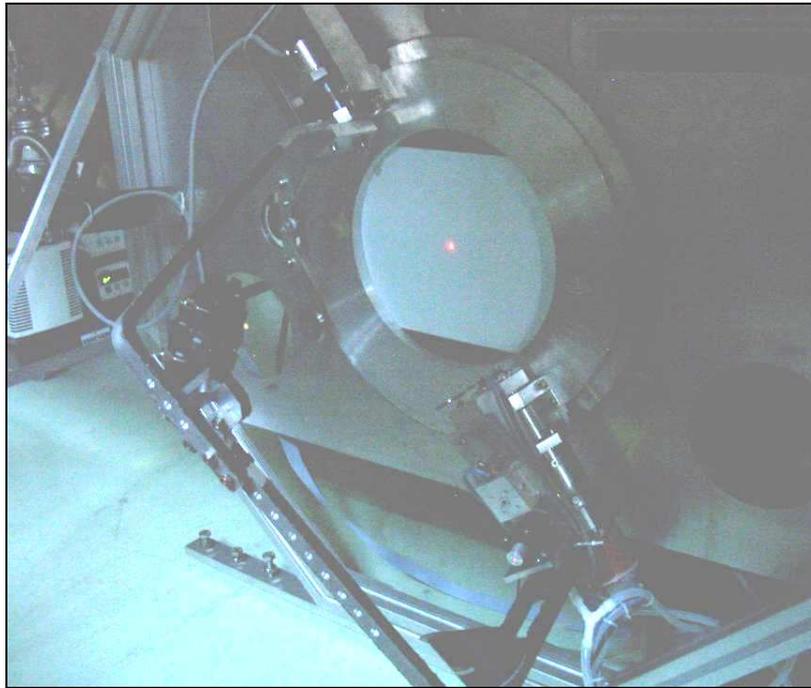


Figure 4.3: Faisceau lumineux de la diode laser alignée sur l'axe optique des miroirs, permettant de mesurer les déplacements dans un plan connu matérialisé par une feuille de papier

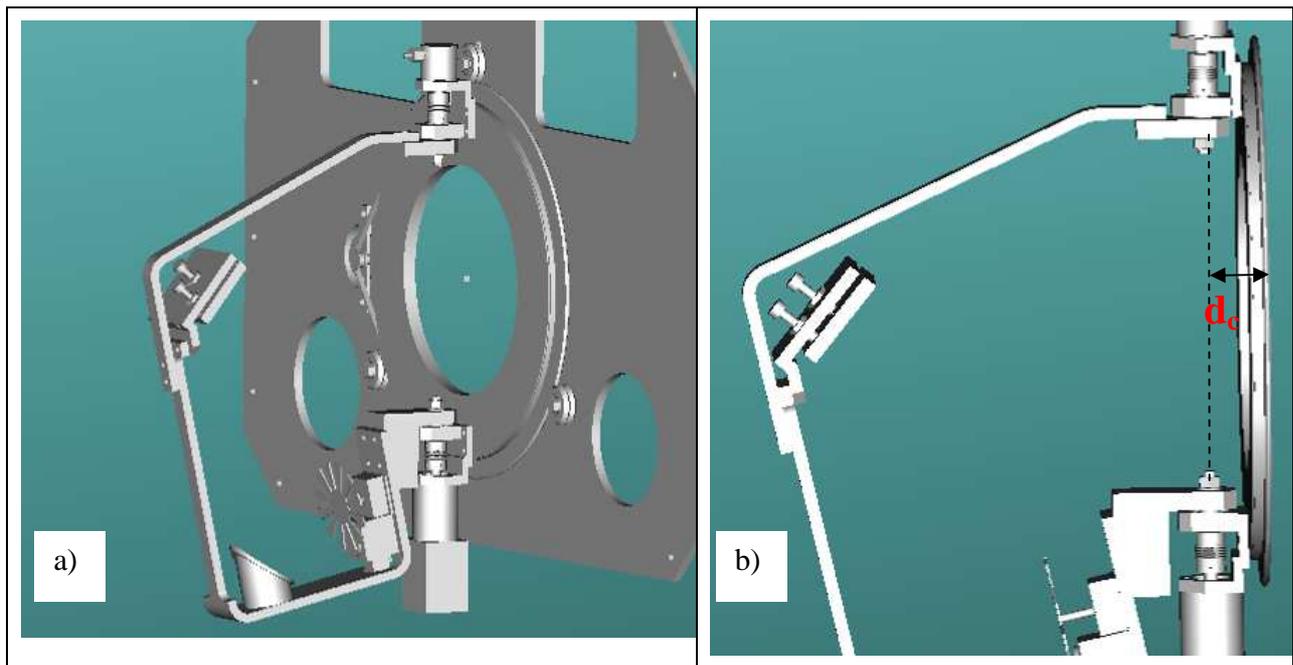


Figure 4.4 : a) Design 3D du bras, des deux miroirs, de la source modulée, du moteur et du plateau rotatif, b) vue 3D de profil montrant la distance " d_c " entre l'axe du moteur et la face arrière du plateau'

- Expression des erreurs relatives de position du faisceau

Appellons d_m et $d_{théorique}$; respectivement les distances mesurées et les distances théoriques sur la feuille de papier de la position du faisceau, α l'angle de déplacement du bras et d_c la distance entre l'axe de rotation du moteur du bras et le plan matérialisé par la feuille.

→ d_m est obtenue à partir du traitement des images de la tâche du faisceau laser formée sur la feuille. Les coordonnées du barycentre de la tâche x_i et y_i donnent accès à d_m .

$$d_m = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (4.1)$$

→ $d_{théorique}$ est obtenue à partir de la connaissance de l'angle α et de la distance d_c

$$d_{théorique} = d_c \times \tan(\alpha) \quad (4.2)$$

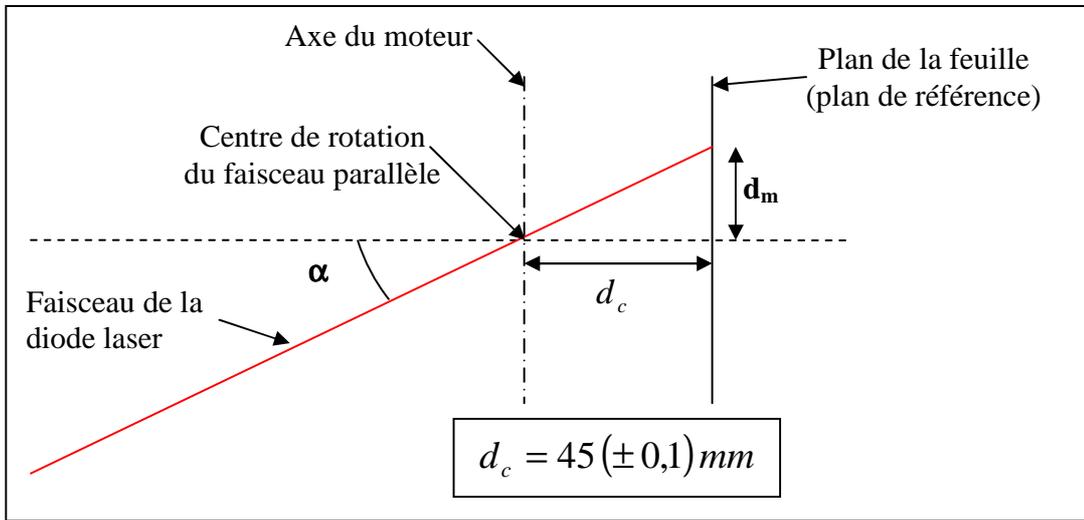


Figure 4.5 : Schéma de principe pour mesurer les déplacements du faisceau parallèle dans le visible

Cette méthode donne une estimation de l'erreur relative des positions du faisceau dans le plan de la feuille, en comparant d_m à $d_{théorique}$:

$$\varepsilon = \left| \frac{d_m - d_{théorique}}{d_{théorique}} \right| \quad (4.3)$$

Cette méthode sera d'autant plus pertinente que α et d_c seront connus avec la plus grande précision possible. Estimons leur incertitude type, ainsi que celle de la distance $d_{théorique}$.

$$\begin{cases} U_{d_c} = \pm 0,1 \text{ mm} & (\text{tolérance générale de la norme d'usinage ISO 2768 mK}) \\ U_{\alpha} = \pm 0,1^{\circ} & (\text{résolution du déplacement mécanique due à la commande du moteur}) \end{cases}$$

$d_{théorique}$ est connue avec une incertitude type $U_{d_{théorique}}$, que l'on peut calculer par la loi de propagation des incertitudes :

$$U_{d_{théorique}} = \sqrt{\left(\frac{\partial d_{théorique}}{\partial d_c} \right)^2 \times U_{d_c}^2 + \left(\frac{\partial d_{théorique}}{\partial \alpha} \right)^2 \times U_{\alpha}^2} \quad (4.4)$$

En calculant les dérivées partielles, et en remplaçant U_{d_c} et U_{α} par leur valeur, on obtient :

$$U_{d_{théorique}} = \sqrt{(\tan^2 \alpha) \times U_{d_c}^2 + \left(\frac{d_c}{\cos^2 \alpha}\right)^2 \times U_{\alpha}^2} \quad (4.5)$$

Position du bras (en °)	$U_{d_{théorique}}$ (en mm)
0	±0,07
10	±0,08
20	±0,09
30	±0,1
40	±0,2
50	±0,2
60	±0,3

Tableau 4.1 : Incertitudes types associées à la distance $U_{d_{théorique}}$ pour les différentes positions du bras.

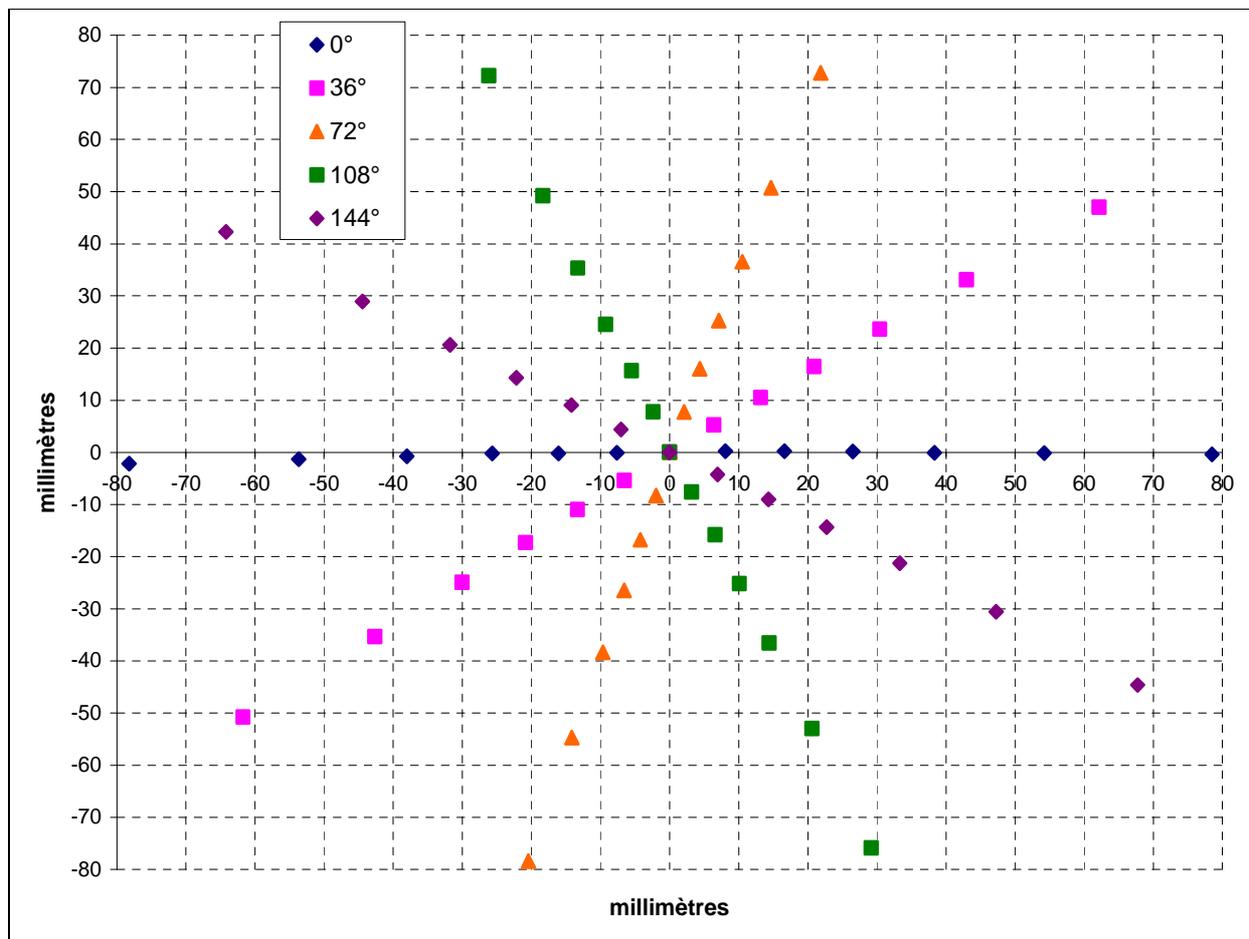


Figure 4.6 : Représentation du diagramme des positions du faisceau, coordonnées $(x_i; y_i)$ du barycentre de la tâche laser photographiée dans le plan de la feuille.

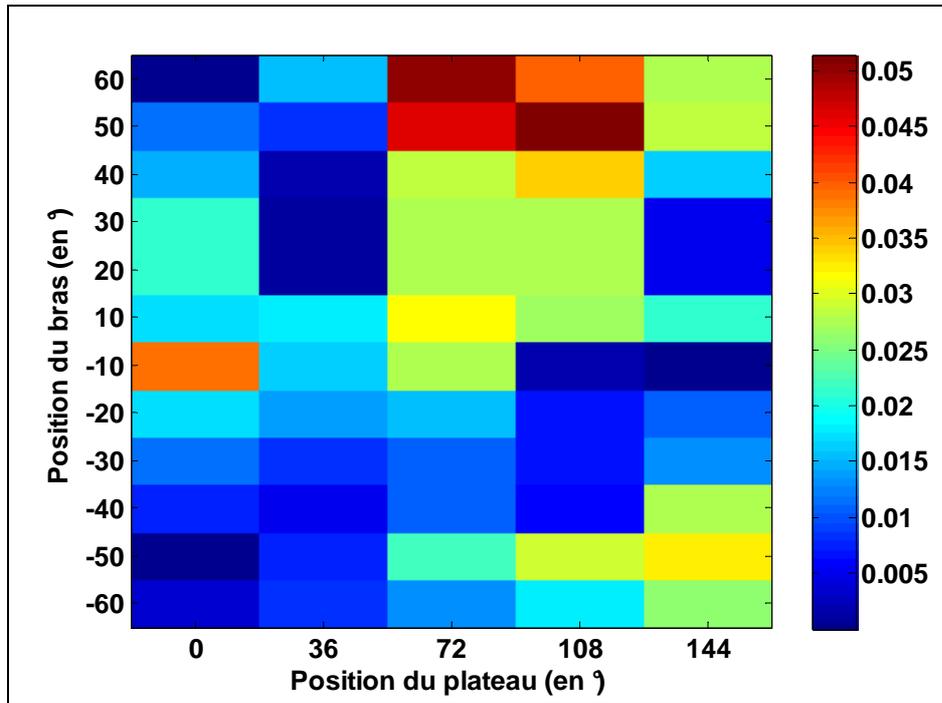


Figure 4.7 : Erreur relative de positionnement du faisceau parallèle $\varepsilon = \left| \frac{d_m - d_{théorique}}{d_{théorique}} \right|$; pour différents couples de positions du bras et du plateau.

Cette méthode permet d'estimer l'évolution des écarts de position du faisceau parallèle éclairant la fenêtre de la caméra. Ces écarts sont faibles et n'excèdent pas 5%. Par ailleurs, ils ne montrent aucune corrélation avec la position.

Cette méthode présente l'avantage de prendre en compte l'ensemble des sources d'erreurs sur l'alignement optique

- le jeu mécanique angulaire du moteur pas à pas commandant le bras,
- les réglages effectués par l'opérateur.

Toutefois, cette méthode est moins précise pour les déplacements importants du bras, du fait que $d_{théorique}$ est connue avec moins de précision.

4.2 CARACTERISATION DE L'OPTIQUE DU BANC DE TEST

Nous avons utilisé la caméra P-ArTéMiS pour caractériser l'optique du banc de test. La méthode consiste à comparer l'image attendue avec l'image mesurée de la source du banc de test, à travers le design optique la caméra dans la configuration P-ArTéMiS/Apex1.

4.2.1 Image théorique d'une source ponctuelle

L'image d'un point objet (ou source ponctuelle), est appelée réponse impulsionnelle, ou PSF (Point Spread Function, en anglais). La répartition de la lumière d'une source ponctuelle diffractée par une pupille circulaire, est la fonction Bessel du premier ordre et est connue sous le nom de figure de diffraction d'Airy :

$$I(x) = \left[\frac{2 \cdot J_1 \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda \cdot f} \cdot x \right)}{\frac{\pi \cdot D}{\lambda \cdot f} \cdot x} \right]^2 \quad (4.6)$$

D diamètre de la pupille de sortie ($D = 21\text{mm}$)
 x distance dans le plan focal entre le centre de la figure de diffraction et le point image géométrique
 λ longueur d'onde ($\lambda = 450\mu\text{m}$)
 f distance focale de la lentille caméra ($f = 67,83\text{mm}$)

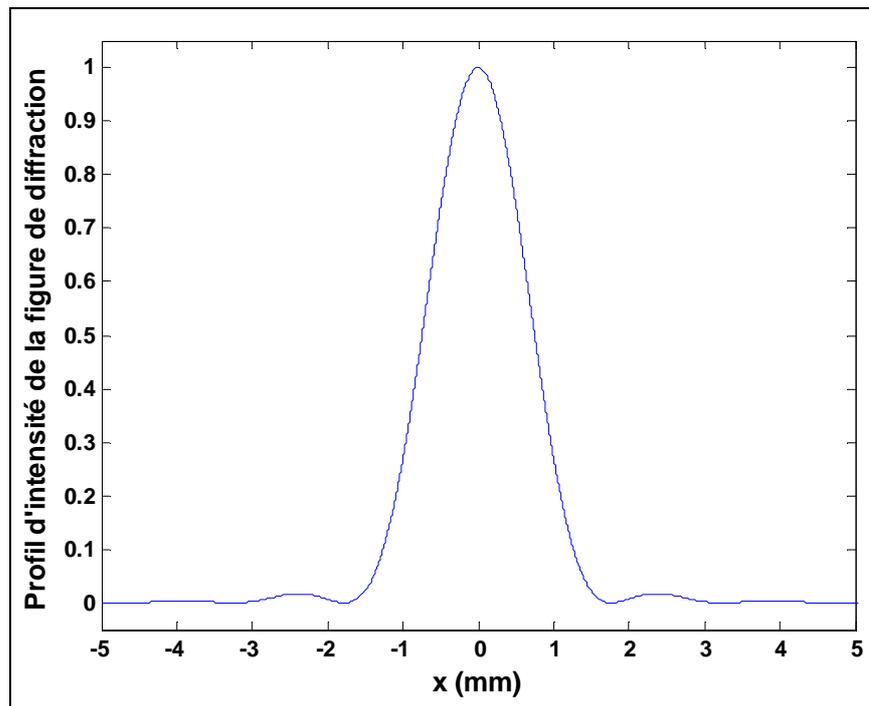


Figure 4.8 : Figure de diffraction d'Airy

Le montage de notre banc (voir schéma optique équivalent en figure 4.20) de test revient à imager un trou source par le système optique constitué d'un élément de collimation (le miroir parabolique de focale $f_1' = 119,4\text{mm}$) et d'un objectif de focalisation (la lentille caméra de focale $f_2' = 67,83\text{mm}$). Le grandissement transversal du système optique est :

$$g_{\text{transversal}} = \frac{f_2'}{f_1'} \quad (4.7)$$

On calcule le produit de convolution de la PSF avec l'image géométrique du trou source.

$$\text{Image du trou source} = PSF \otimes \Pi_{\text{diamètre image trou source}} \quad (4.8)$$

Pour un trou source de 1 mm, le calcul théorique de ce produit de convolution donne une figure de diffraction formée dans le plan focal de la lentille caméra, dont la largeur à mi-hauteur est de 1,5 mm, la taille du pixel est 0,75 mm, d'où :

$$FWHM_{\text{théorique}} \cong 2,0 \text{ pixels} \quad (4.9)$$

Or le détecteur de la caméra n'est pas positionné dans le plan focal, du fait que son optique est couplée à celle du foyer du télescope. La valeur de cette défocalisation est 7,3mm (figure 4.10).

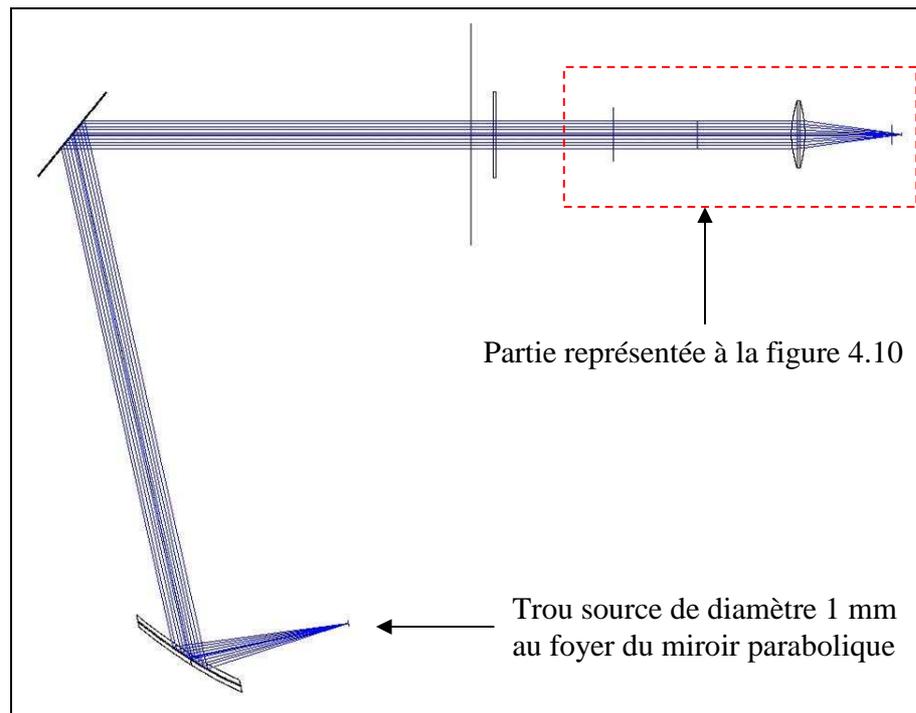


Figure 4.9 : Simulation Zemax du faisceau parallèle éclairant la caméra dans la configuration optique P-Artémis /Apex 1

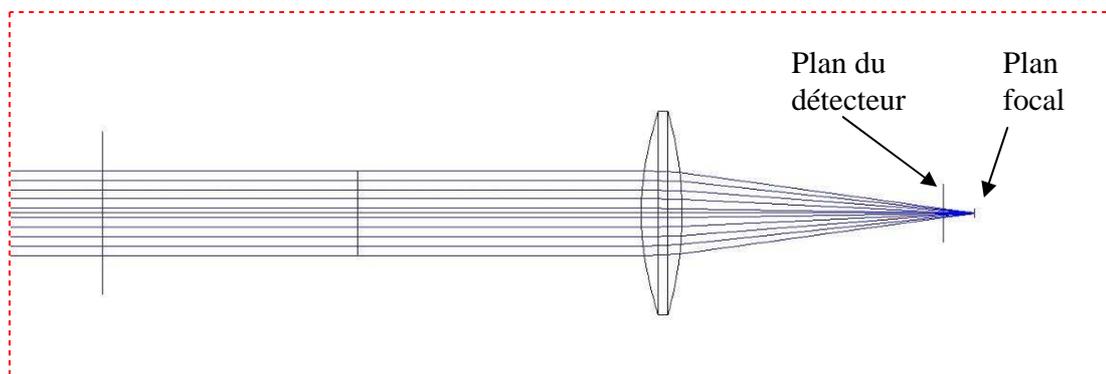


Figure 4.10 : Formation de l'image d'une source à l'infini à travers l'optique de la caméra dans la configuration P-Artémis /Apex 1. La défocalisation est $\epsilon = 7,3$ mm

Pour calculer l'image formée dans le plan du détecteur, il faut tenir compte d'un facteur d'élargissement dû à cette défocalisation.

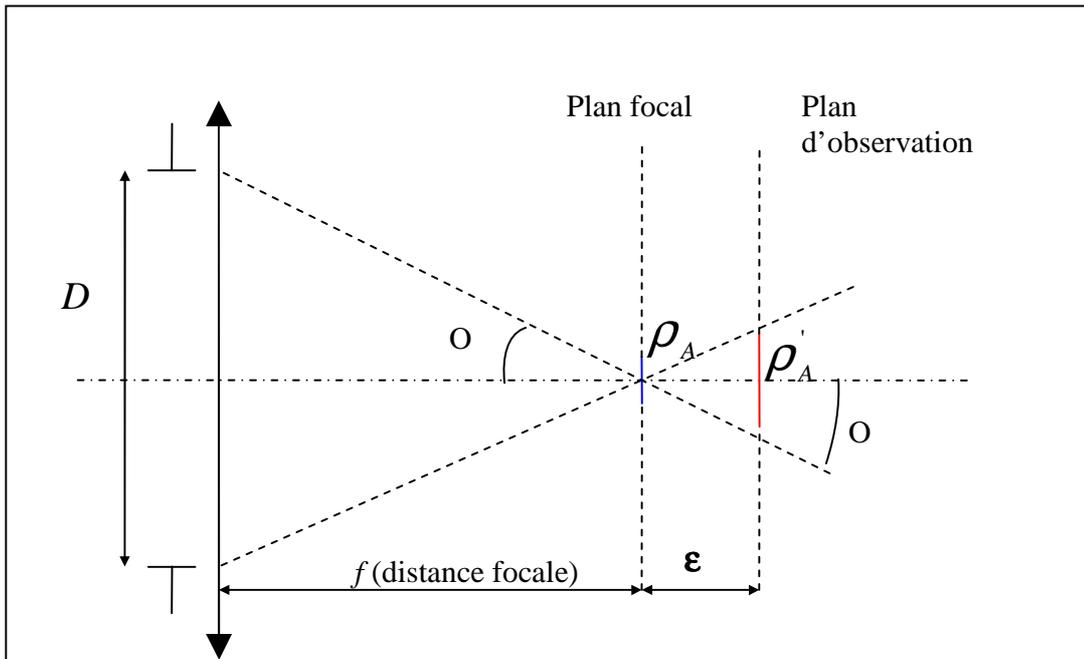


Figure 4.11 : Mise en évidence de l'élargissement de la tâche d'Airy dans le plan d'observation

Le facteur d'élargissement peut être calculé, en première approximation, en utilisant la relation suivante :

$$\tau = \frac{\sqrt{\rho_A'^2 + \rho_A^2}}{\rho_A} \quad (4.10)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \rho_A \text{ diamètre de la tâche d'Airy dans le plan focal} \\ \rho_A' \text{ diamètre de la tâche d'Airy dans le plan d'observation} \end{array} \right.$

L'angle d'ouverture O de l'optique de la caméra, s'exprime ainsi :

$$O \approx \tan(O) = \frac{D}{2.f} = \frac{\rho_A'}{2.\varepsilon} \quad (4.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f = 67,83 \text{ mm} \\ D = 21 \text{ mm} \\ \varepsilon = 7,3 \text{ mm} \end{array} \right.$$

On en déduit τ la valeur du facteur d'élargissement :

$$\rho_A = 2,44 \times \lambda \times \frac{f}{D}$$

$$\rho_A' = \frac{\varepsilon \times D}{f}$$

$$\tau = \frac{\sqrt{\rho_A'^2 + \rho_A^2}}{\rho_A} \approx 1,18$$

On trouve un facteur d'élargissement de l'ordre de 18%. On s'attend à mesurer une largeur à mi-hauteur de la figure de diffraction dans le plan du détecteur de 2,36 pixels.

4.2.2 Premières résultats expérimentaux

- Préparation du banc de test et de la caméra

Les opérations préliminaires aux mesures sont

- l'alignement du banc de test sur l'axe optique de la caméra (montage avec la diode laser, figure 4.2)
- la préparation du corps noir (mise sous vide, et température stabilisée),
- la mise en place du fond uniforme (conformément à la photo de la figure 4.12)
- la mise en opération de la caméra à tester.

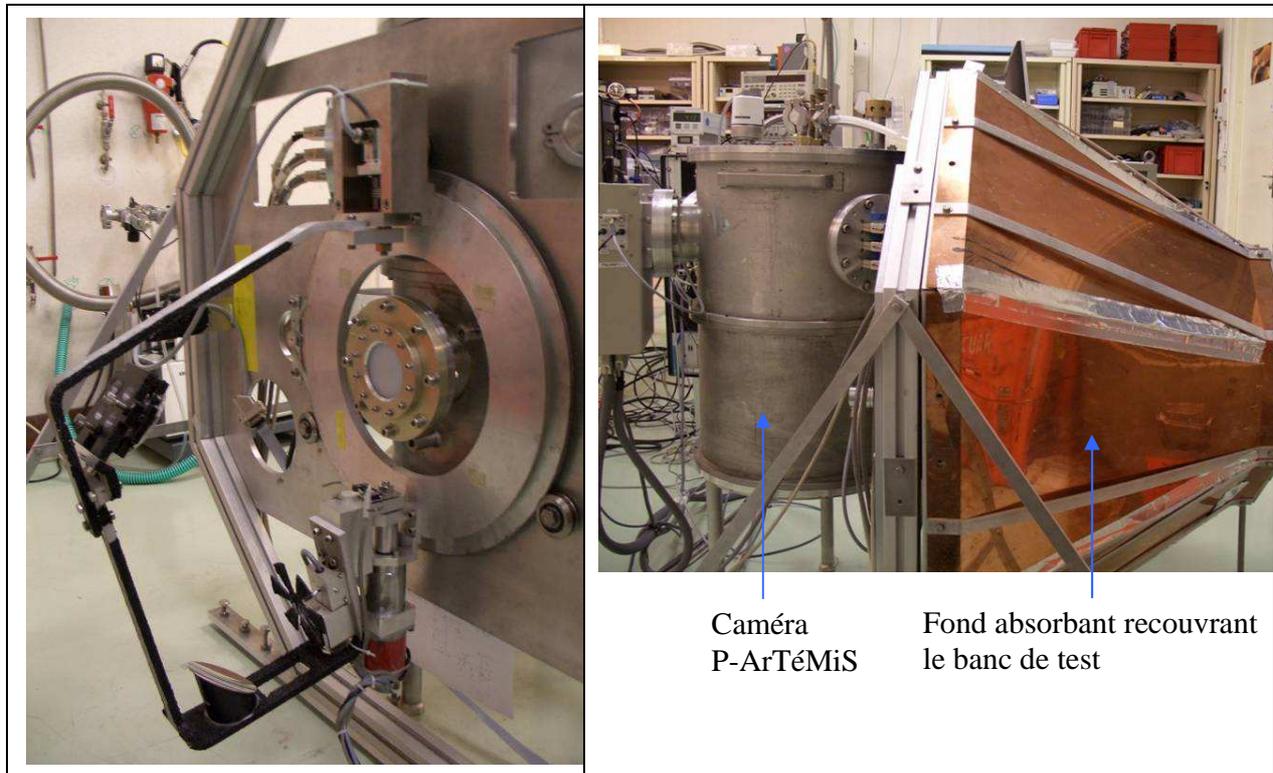


Figure 4.12 : Disposition du banc de test pour effectuer les mesures sur la caméra P-ArTéMiS

Les deux systèmes d'acquisition, celui du banc de test et celui de la caméra, communiquent entre eux, via un programme Labview qui permet de coordonner les acquisitions de la caméra et les commandes du banc de test (déplacements du faisceau parallèle, température de régulation du corps noir). A chaque acquisition, un fichier texte est généré dans lequel les informations suivantes sont enregistrées :

- positions angulaires du bras et du plateau,
- température du corps noir,
- taille du trou source,
- la fréquence du hacheur,
- le nombre d'images,
- le nom du fichier de données,
- un commentaire éventuel peut être ajouté par l'utilisateur.

- Traitement des données et choix des paramètres d'acquisition

Les images restituées correspondent aux variations de flux de la source modulée par dessus l'émission de fond. La méthode choisie pour le traitement de ces données est liée au choix des paramètres d'acquisition, celle-ci est expliquée en détail dans les annexes 8 et 9.

Les paramètres qui ont été choisis sont :

- La fréquence du hacheur : 5,6 Hz
- Le nombre d'images : 900

La fréquence de la caméra est 40 Hz (paramètre fixe).

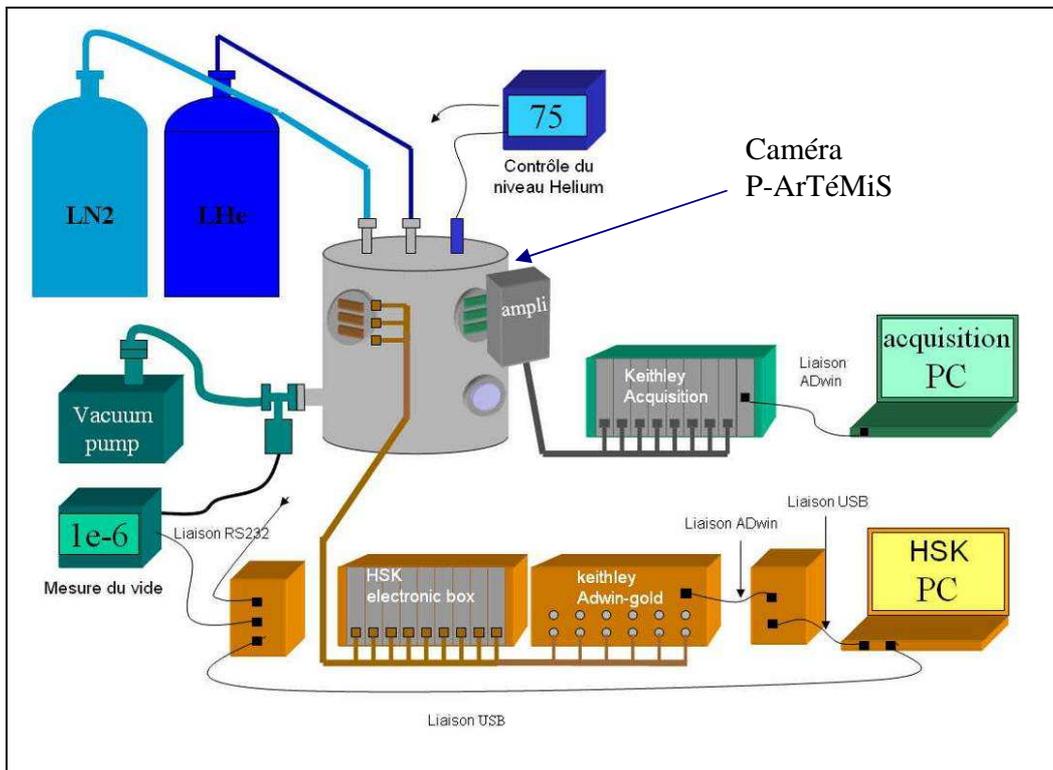


Figure 4.13 : Chaîne d'acquisition et de contrôle-commande de la caméra P-ArTéMiS

- Premières images

Les premières images restituées, présentées sur la figure 4.14, ont toutes présenté un problème, car on s'attendait à observer l'image d'une source ponctuelle. Or sur ces images un signal prédominant apparaît sur le signal du fond : c'est celui du corps noir, et de la lumière parasite autour de ce signal, qu'il a fallu identifier et corriger.

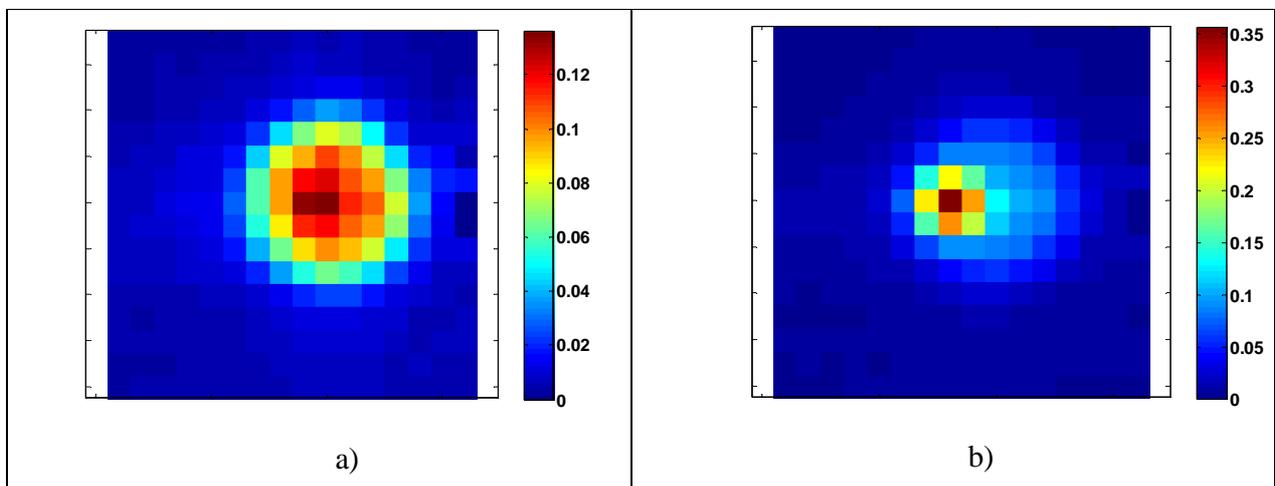


Figure 4.14 : Images des trous source de différentes tailles a) 1 mm, b) 2,7 mm

- Recherche de l'origine de la lumière parasite

Le signal restitué par les images est donc entaché de la somme d'un signal parasite, d'où :

$$Signal = \left| \Phi_{corps_noir} + \Phi_{parasite} \right| \quad (4.12)$$

La valeur absolue est due au fait que le calcul du signal modulé par la méthode du traitement de donnée utilisée ne peut jamais être négatif.

Une expérience a consisté à refroidir le diaphragme de la source, sans refroidir les pales du hacheur, puis à suivre l'évolution du signal de la matrice pendant la remontée en température du diaphragme. Les résultats sont présentés figure 4.15. Une thermistance fixée sur le diaphragme a permis de relever sa température, et une série d'acquisition à été lancé en automatique.

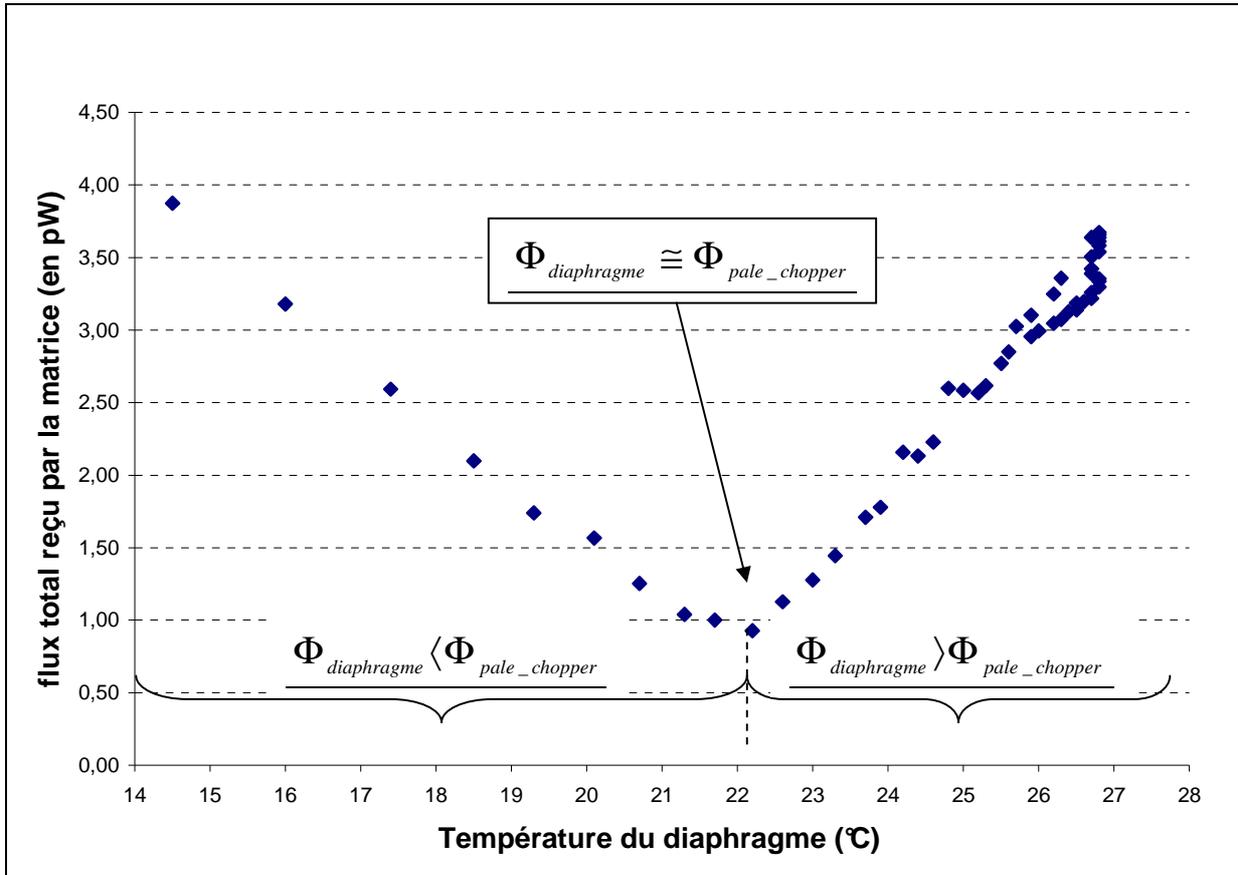


Figure 4.15 : Résultats d'une série d'acquisitions de la caméra lancée après avoir refroidi le diaphragme du corps noir. Cette courbe montre le flux reçu par la matrice en fonction de la remontée en température du diaphragme.

Ces résultats mettent en évidence que le flux parasite observé sur les images est dû à l'échauffement du diaphragme du corps noir. L'image obtenue au flux minimale sur la courbe de la figure 4.11 (à une température du diaphragme d'environ 22,2°C) est bien conforme à celle d'un trou source, cette image est présentée en figure 4.18.

Le flux parasite est égal à :

$$\Phi_{\text{parasite}} = \Phi_{\text{diaphragme}} - \Phi_{\text{pale_chopper}} \quad (4.13)$$

Nous avons recherché à obtenir l'image du flux parasite. Pour cela à partir de la courbe du flux de la matrice de la figure 4.15, on a soustrait numériquement deux images, celle où la température du diaphragme est montée jusqu'à environ 27,0°C à celle où la température est de 22,2°C. On a ensuite comparé cette image à l'image simulée avec le logiciel Zemax du diaphragme (figure 4.16). Le résultat avec la simulation Zemax montre une dissymétrie, que l'on retrouve sur l'image du flux résiduel. Ceci confirme que le diaphragme émet un flux supérieur à celui des pales du hacheur, donc qu'il s'échauffe.

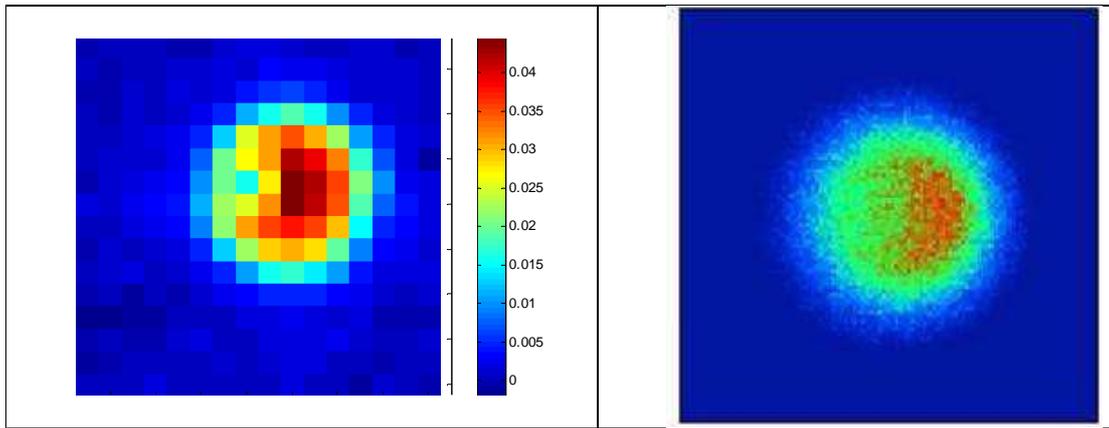


Figure 4.16 : Comparaison de l'image du flux parasite à une image théorique du diaphragme simulée avec le logiciel Zemax

Les conclusions de ses premières mesures nous ont amené à modifier la boîte source pour s'affranchir du flux parasite.

- Modifications de la boîte source

Nous avons placé une plaque de cuivre très fine, d'épaisseur 1 mm, pour faire écran au rayonnement provenant du corps noir. Cette plaque de cuivre, insérée entre le diaphragme et la fenêtre en polyéthylène, est refroidie par une arrivée de gaz (Azote) en continue, des deux côtés de l'enceinte de la boîte source.

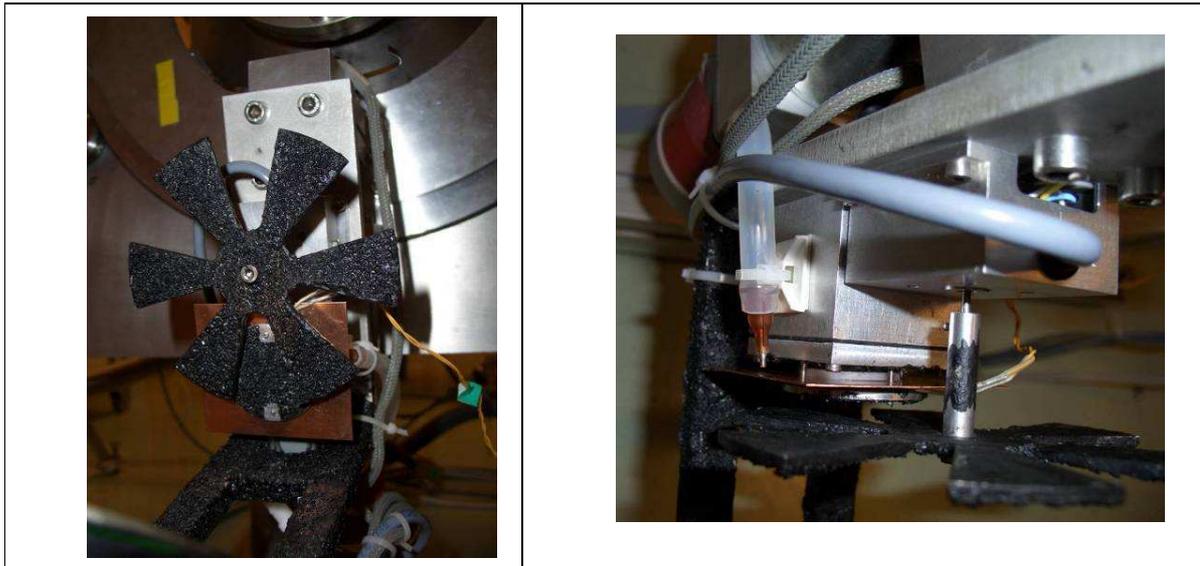


Figure 4.17 : Modification du corps noir : refroidissement du diaphragme par une circulation de gaz (Azote) en continue et fixation d'une très fine plaque en cuivre.

Le rayonnement issu de la source n'éclaire plus le diaphragme et celui-ci voit sa température stabilisée à la température ambiante.

4.2.3 Caractérisation de la source du banc du test

Après modifications du corps noir, les images obtenues sont celles de la source. Pour le trou source de 1mm, l'image restituée par le détecteur est présentée sur la figure 4.18, et son profil d'intensité sur la figure 4.19.

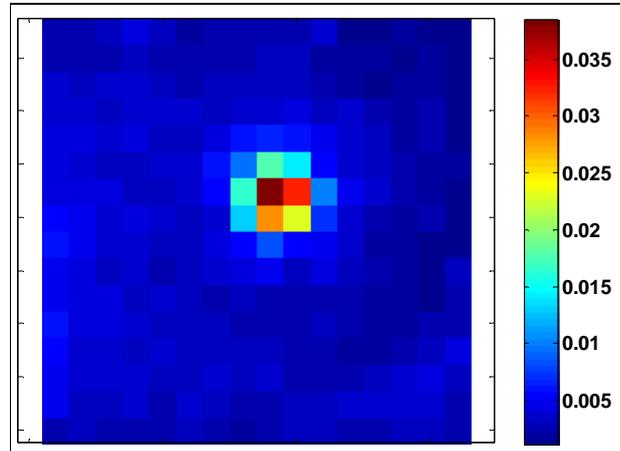


Figure 4.18 : Image restituée par la matrice du trou source de diamètre 1 mm

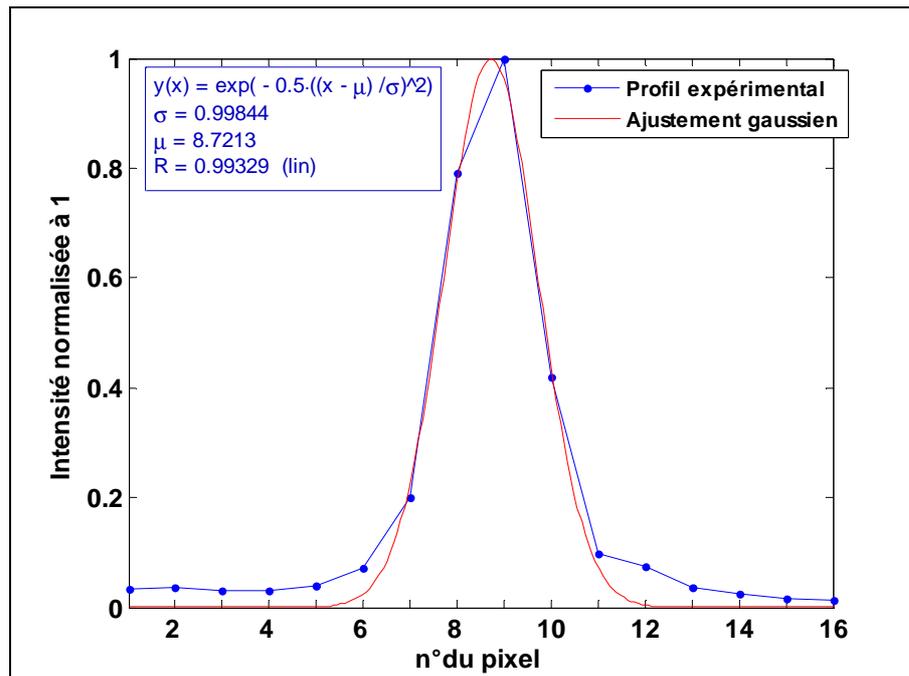


Figure 4.19 : Profil d'intensité de l'image du trou source de 1 mm. Intensité normalisée à 1

Pour mesurer la largeur à mi-hauteur, le profil d'intensité de l'image est ajusté par une fonction gaussienne suivant une loi normale, car c'est une bonne approximation d'un profil d'intensité. La fonction gaussienne normalisée a pour expression :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.14)$$

L'ajustement par cette fonction, obtenu avec Matlab, donne la moyenne centrée μ et l'écart-type σ :

$$\begin{cases} \sigma = 0,998 \text{ pixel} \\ \mu = 8,721 \end{cases}$$

On déduit la largeur à mi-hauteur mesurée :

$$FWHM_{\text{expérimental}} = 2\sqrt{2 \cdot \ln(2)} \cdot \sigma \cong 2,355 \cdot \sigma \cong 2,35 \text{ pixels} \quad (4.15)$$

Ce résultat expérimental est en accord avec le calcul prédictif du paragraphe 4.2.1.

On vient par conséquent de montrer que les résultats sont cohérents et que le banc de test est capable de simuler une source ponctuelle à l'infini en éclairant en faisceau parallèle. L'autre point que ce résultat a permis de vérifier est le pas d'échantillonnage de l'optique de la caméra P-ArTéMiS dans la configuration optique lors de la mission Apex1. La figure de diffraction formée dans le plan du détecteur, est échantillonnée selon le critère de Shannon.

4.3 LA PUISSANCE STABILITE ET REPRODUCTIBILITE DE LA SOURCE

4.3.1 Mesures de stabilité et de reproductibilité

Les essais en température ont montré qu'on peut réguler la température du corps noir jusqu'à une température d'environ 125 °C. Tous les essais ont été réalisés à une même température afin de les comparer entre eux. Nous avons choisi 100 °C car c'est une température suffisamment élevée sans être aux limites de fonctionnement du système. Les tests de stabilité de la régulation de la température du corps noir à 100 °C ont montré des fluctuations maximales de $\pm 0,2$ °C autour de la température de consigne.

Pour estimer la stabilité et la reproductibilité des mesures, deux séries de cinq acquisitions sur deux journées ont été effectuées dans les mêmes conditions.

	Date, heure	intensité de la tâche image (pW)	Ecart-type des mesures (pW)
1	20/9/07 11:51:49 AM	0,276	0,004
2	20/9/07 12:10:37 PM	0,264	0,003
3	20/9/07 4:37:19 PM	0,257	0,003
4	20/9/07 5:23:06 PM	0,278	0,004
5	20/9/07 7:13:41 PM	0,261	0,003
6	21/9/07 11:53:18 AM	0,265	0,003
7	21/9/07 12:14:24 PM	0,264	0,003
8	21/9/07 2:10:46 PM	0,271	0,004
9	21/9/07 7:10:16 PM	0,265	0,003
10	21/9/07 7:20:13 PM	0,266	0,004
	Moyenne	0,267	
	Ecart-type	0,006	

Tableau 4.2 : Série de 10 acquisitions effectuées dans les mêmes conditions : température de régulation du corps noir 100 °C, trou source 1 mm, position de la source dans l'axe optique de la caméra, paramètres d'acquisition identiques: 900 images, fréquence du hacheur 5,6 Hz.

Le résultat des mesures de cette série de 10 acquisitions, donne une valeur moyenne de 0,27 pW à $\pm 0,01$ pW en prenant deux fois l'écart-type comme incertitude-type associée.

Ce qui représente une reproductibilité des mesures à environ $\pm 4\%$ pour le flux d'une source de 0,27 pW.

4.3.2 Mesures de puissance et comparaison au calcul théorique

Pour vérifier la puissance de la source, nous avons effectué cinq acquisitions dans les mêmes conditions, le seul paramètre ayant varié est la taille du diaphragme.

Diamètre du trou source $\Phi_{\text{trou source}}$ (mm)	Valeurs expérimentales (pW)	Valeurs théoriques (pW)
1	0,273 +/-0.006	0,23
2	0,973 +/-0,006	0,92
2,7	1,68 +/-0,006	1,67
3,5	2,62 +/-0,01	2,80
5	5,78 +/-0,01	5,72

Tableau 4.3 : Comparaison des flux mesurés pour différentes tailles de source. Les acquisitions sont effectuées dans les mêmes conditions : température de régulation du corps noir 100 °C, position de la source dans l'axe optique de la caméra, paramètres d'acquisition identiques: 900 images, fréquence du hacheur 5,6 Hz.

- Valeurs expérimentales

Pour estimer le flux émis par le trou source, j'ai considéré comme valeur expérimentale l'intensité des pixels contenus dans la tâche image. J'ai sommé le carré de 25 pixels centré autour du pic d'intensité maximale. J'ai encadré ces mesures avec une incertitude élargie en prenant $\pm 2\sigma$. Le calcul de l'écart-type de l'intensité de la tâche image est la somme quadratique des écart-types de chacun de ces 25 pixels.

- Valeurs théoriques calculées

Le détecteur de la caméra voit le flux de la source modulé par les pales du hacheur.

$$P_{\text{détectée}} = P_{\text{source ON}} - P_{\text{source OFF}} \quad (4.16)$$

$$P_{\text{détectée}} = \tau_{\text{opt}} \times \varepsilon \times S_{\text{trou source}} \times \left(\Omega_{\text{source}} \times \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_{\nu}(\text{source}) \cdot d\nu - \Omega_{\text{pales}} \times \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_{\nu}(\text{pales}) \cdot d\nu \right) \quad (4.17)$$

Coefficient de transmission optique : $\tau_{\text{opt}} = 0,3$

Emissivité : $\varepsilon \approx 1$

Surface du trou source : $S_{\text{trou source}} = \pi \times \Phi_{\text{trou source}}^2 / 4$

Angle solide sous lequel un point de la source éclaire la section du miroir parabolique délimitée par le faisceau utile : Ω_{source}

Angle solide sous lequel un point de la pale éclaire la section du miroir parabolique délimitée par le faisceau utile : Ω_{pale}

Brillance émise par la source $B_{\nu}(\text{source})$

Brillance émise par la pale $B_{\nu}(\text{pale})$

Bande de fréquence de la caméra [$\nu_1 = 635 \text{ GHz}$; $\nu_2 = 705 \text{ GHz}$]

Dans ce calcul, je suppose que les pales du hacheur et le diaphragme sont à la même température. Ainsi, le signal modulé résulte de la différence de température entre la source et les pales du hacheur.

Pour le calcul de l'angle solide, j'ai appliqué la conservation de l'étendue de faisceau à travers tout le système optique des éléments. Le diamètre du faisceau utile D est celui de la pupille de sortie, le diaphragme froid (cold stop en anglais), soit 21 mm (voir figure 4.20). Les distances considérées d_{source} et d_{pale} sont représentées en figure 4.21.

$$\Omega_{source} = \pi \left(\frac{D}{2d_{source}} \right)^2 \quad (4.18)$$

$$\Omega_{pale} = \pi \left(\frac{D}{2d_{pale}} \right)^2 \quad (4.19)$$

{
 Diamètre de la pupille de sortie : $D = 21$ mm
 Distance entre la source et le centre du miroir parabolique : $d_{source} = 129,4$ mm
 Distance entre la pale et le centre du miroir parabolique : $d_{pale} = 115,4$ mm

Pour le calcul de la brillance de la source et de la pale, j'ai intégré sur la bande de fréquence de la caméra, entre $\nu_1 = 635\text{GHz}$ ($475 \mu\text{m}$) et $\nu_2 = 705\text{GHz}$ ($425 \mu\text{m}$).

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} B_{\nu}(source) \cdot d\nu = \int_{635 \cdot 10^9}^{705 \cdot 10^9} \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{source}}\right) - 1} \cdot d\nu \quad (4.20)$$

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} B_{\nu}(pale) \cdot d\nu = \int_{635 \cdot 10^9}^{705 \cdot 10^9} \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{pale}}\right) - 1} \cdot d\nu \quad (4.21)$$

{
 Température de la source : $T_{source} = 373$ K
 Température de la pale : $T_{pale} = 296$ K
 Constante de Boltzmann : $k = 1,38 \cdot 10^{23}$ J.K⁻¹
 Constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s
 Vitesse de la lumière : $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹

La comparaison entre le calcul théorique du flux reçu par le détecteur et le flux mesurée, donne des écarts situés entre quelques pourcents et inférieurs à 6%. Ce qui est satisfaisant. Excepté pour le trou source de 1 mm l'écart est plus important, 18%, ce qui peut s'expliquer par la dégradation du rapport signal sur bruit pour les faibles flux.

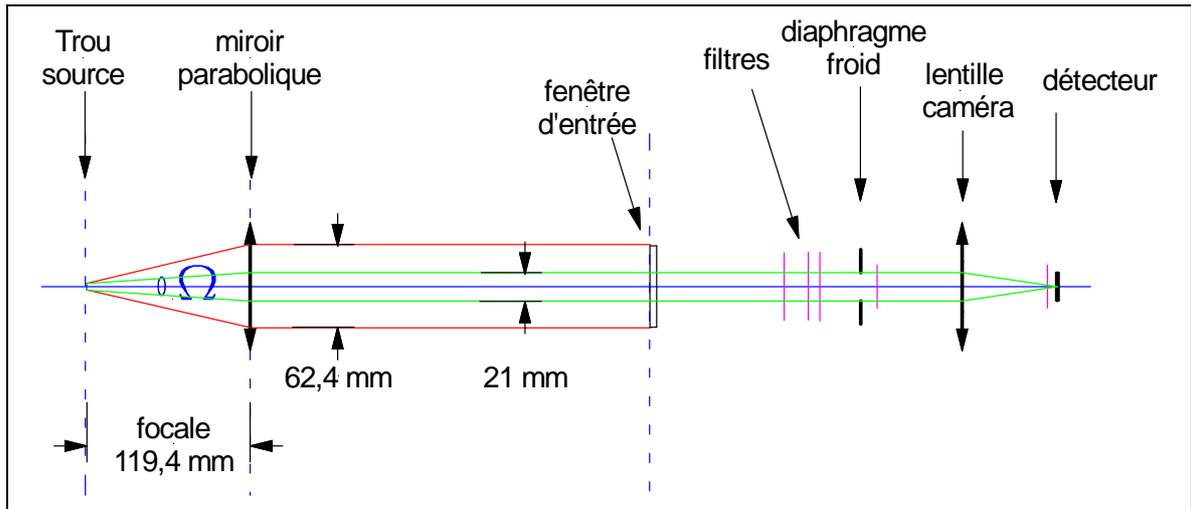


Figure 4.20 : Schéma optique équivalent

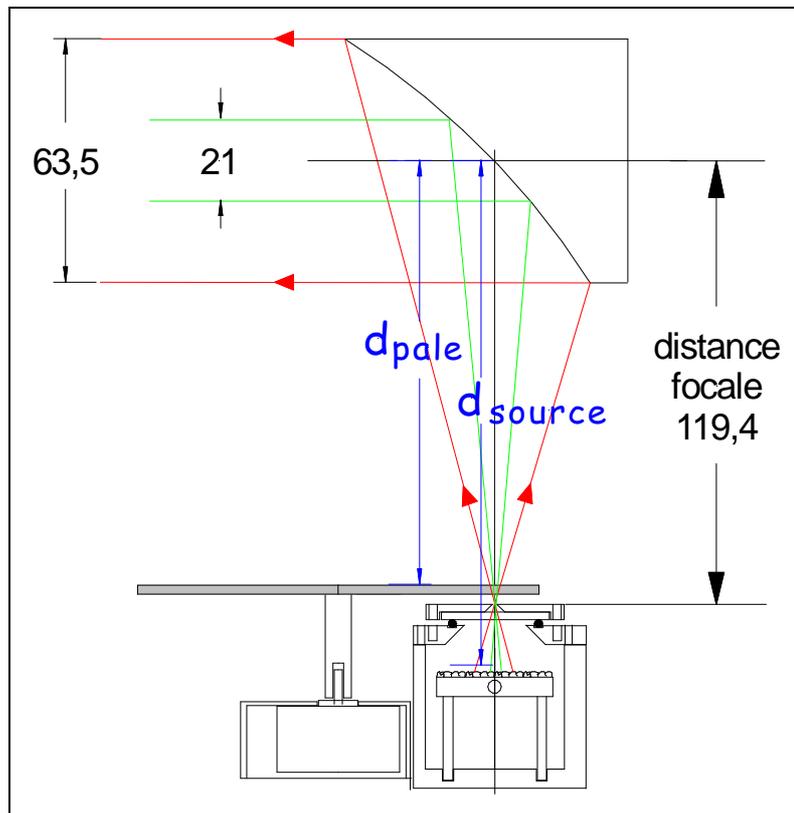


Figure 4.21 : Distances prises en compte, d_{pale} et d_{source} , pour le calcul des angles solides.

5. PREMIERES MESURES DE DIAGRAMME D'ANTENNE

5.1. CHOIX DE LA TAILLE DU TROU SOURCE

Le choix de la taille du trou source résulte d'un compromis entre obtenir un faisceau de faible divergence en sortie de miroir parabolique, et avoir un flux détectable issu de la surface du trou source. Nous avons d'abord fait des mesures avec un diaphragme de 0,5 mm, mais le signal a été insuffisant pour ressortir l'image de ce trou source. Essayons de trouver un critère de choix du diamètre du trou source basé sur les caractéristiques de l'instrument à tester.

5.1.1. Limite de résolution et tâche de diffraction

Pour définir la taille maximale de la source, et avoir le compromis recherché, un rapport signal sur bruit optimal pour une source qui reste de taille suffisamment petite pour que son image soit encore une figure de diffraction dans le plan focal de la caméra, nous avons pris comme critère d'avoir une image non résolue mais proche de la limite de résolution.

Pour qu'une image soit résolue sa taille minimale doit être au moins égale à deux fois le rayon de la tâche d'Airy ($\Phi \geq 1,22\lambda / D$). Nous avons calculé la taille de la source qui donnerait une image proche de cette limite.

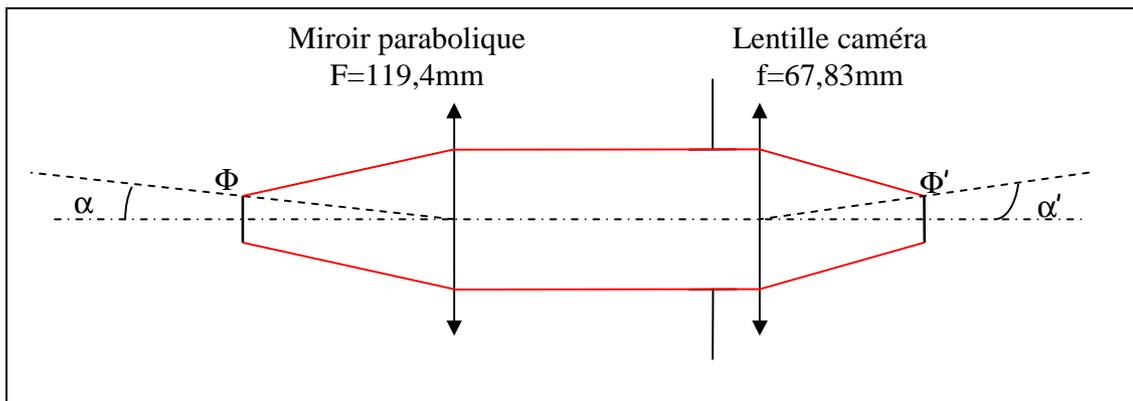


Figure 5.1 : Angles d'ouverture dans les espaces objet et image

Les angles α et α' sont petits, donc :

$$\frac{\Phi}{F} = \frac{\Phi'}{f} \quad (5.1)$$

D'où la condition sur la taille de l'objet (diamètre du trou source) pour avoir une taille image résolue :

$$\Phi \geq \frac{F}{f} \times \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot f}{D} \quad (5.2)$$

$$\Phi \geq \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot F}{D} \quad (5.3)$$

On trouve :

$$\Phi \geq 3,1 \text{ mm}$$

Donc pour un diamètre de source supérieur ou égal à 3,1 mm, les images sont résolues. J'ai pu vérifier cette valeur théorique, avec des mesures réalisées sur cinq trous source de diamètre 1 ; 2 ; 2,7 ; 3,5 et 5 mm, et j'ai mesuré les largeurs à mi-hauteur des profils d'intensité des images obtenues.

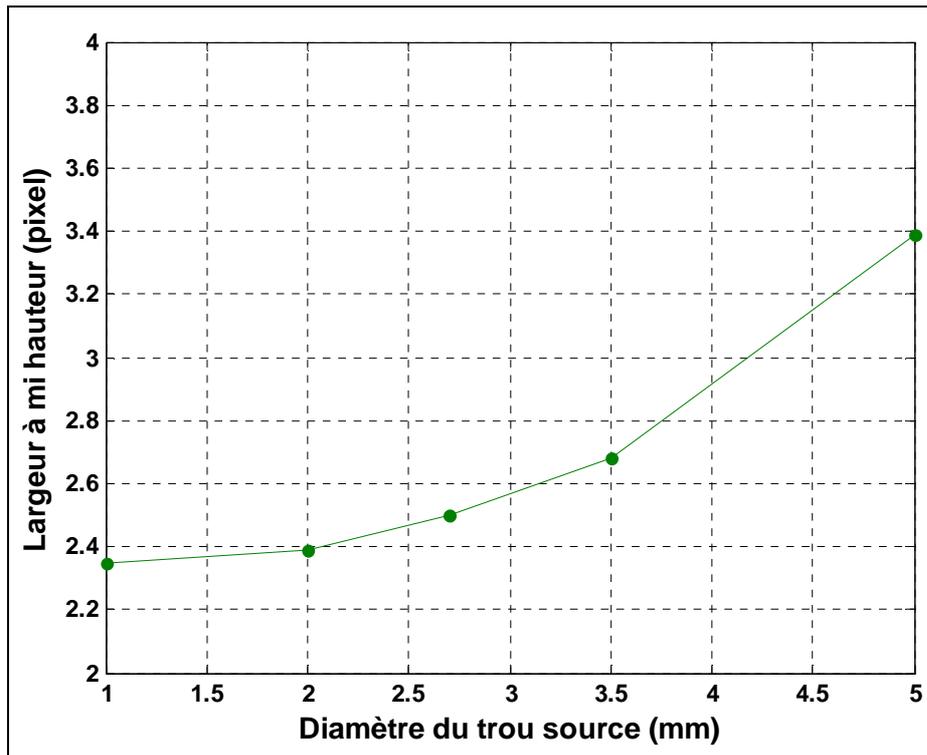


Figure 5.2 : Largeurs à mi-hauteur des images pour différentes tailles de trou source

En utilisant ce critère, on choisira de faire les mesures avec un trou source de diamètre 2,7 mm, puisque que l'on obtient le compromis recherché : un maximum de signal tout en restant avec un profil d'intensité proche de celui d'une figure de diffraction dans le plan focal de la lentille caméra.

5.1.2. Estimation du rapport signal sur bruit pour différentes tailles de source

Les images des trois diamètres de source 1 ; 2 et 2,7 mm sont représentées en figure 5.3 et le rapport signal sur bruit de la détection de ces images sur l'ensemble de la matrice, est estimé de la manière suivante :

$$R = \frac{S - n \cdot \mu_{fond}}{\sqrt{n} \times \sigma_{fond}} \quad (5.4)$$

S est le signal, c'est la somme des amplitudes des pixels contenus la tâche image

n est le nombre de pixels contenus dans la tâche image

μ_{fond} est la moyenne des pixels du fond de la matrice

σ_{fond} est le bruit spatial des pixels du fond de la matrice,

Les paramètres μ_{fond} et σ_{fond} sont estimés par un ajustement gaussien de la répartition des amplitudes des pixels du fond (figure 5.3).

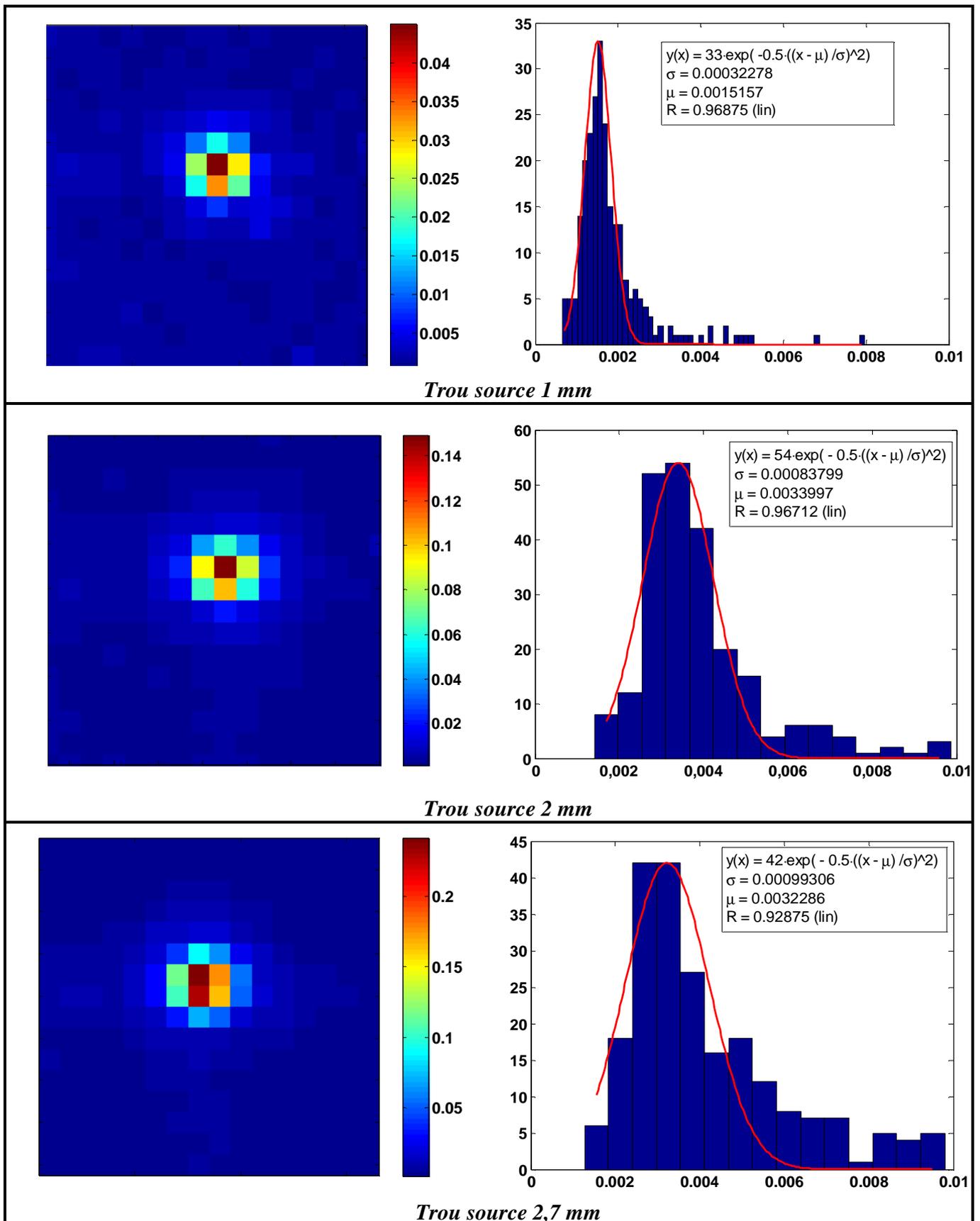


Figure 5.3 : Images des trous source (sur la colonne de gauche) et histogrammes des amplitudes de ces images (sur la colonne de droite). Valeurs exprimées en pW.

Diamètre du trou source (en mm)	Intensité des pixels de la tâche image (en pW)	Moyenne du signal des pixels du fond de la matrice (en pW)	Bruit spatial des pixels du fond de la matrice (en pW)	Rapport signal sur bruit
1	0,27	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	143,8
2	0,95	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	206,4
2,7	1,69	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	324,1

Tableau 5.1 : Comparaison du rapport signal sur bruit pour trois diamètres de source.

Le rapport signal sur bruit est amélioré d'un facteur de 1,4 quand on passe d'un diamètre de 1 mm à 2 mm; puis d'un facteur 2,3 lorsque l'on passe à un diamètre de 2,7 mm.

5.2. PREMIERES MESURES ET INTERPRETATION

5.2.1. Mesures réalisées

Une série d'acquisitions a été effectuée sur la caméra avec le design optique de P-ArTéMiS/Apex1, sur l'axe horizontal de -70° à $+70^\circ$. Les paramètres d'acquisition sont les mêmes que ceux appliqués pour l'étude du paragraphe 4.3.

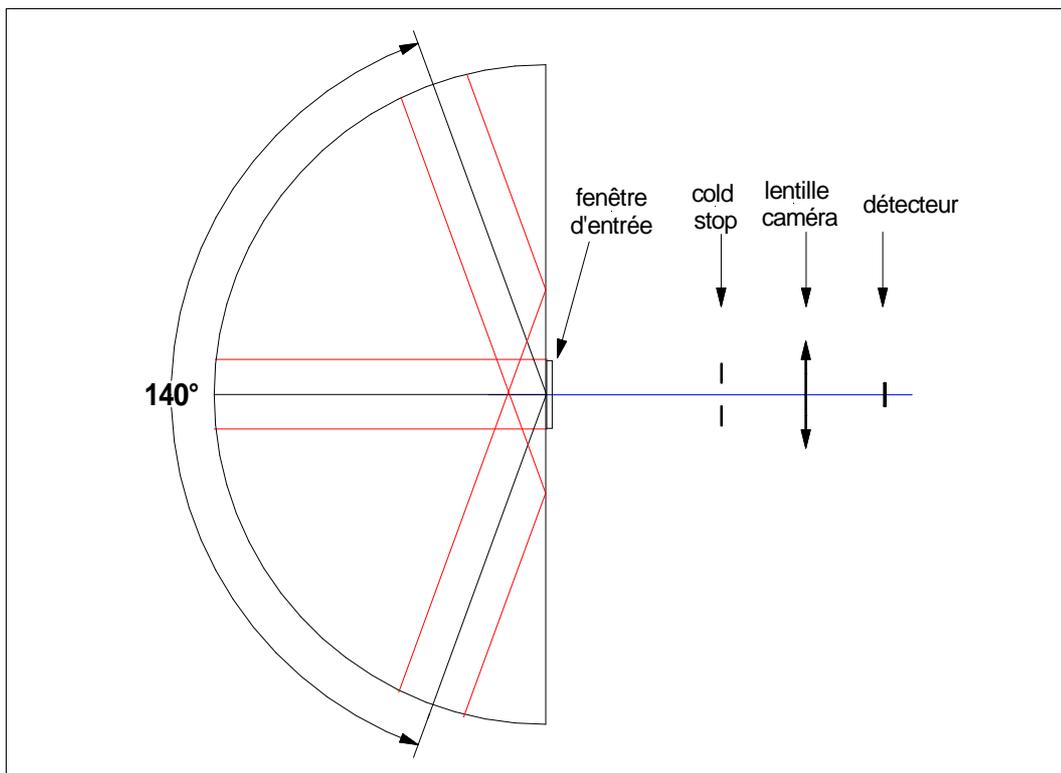


Figure 5.4 : Déplacements du faisceau parallèle sur l'axe horizontal (axe à 0°) de -70° à $+70^\circ$, réalisés par exécution d'un programme qui synchronise les acquisitions de la caméra avec les déplacements du faisceau parallèle.

5.2.2. Traitement de données et méthode utilisée pour détecter le signal

- Description de la méthode pour traiter le signal :

La série de mesures réalisée et décrite au paragraphe 5.2.1 va permettre de mesurer le diagramme de détection de la caméra sur un axe. Le traitement de données à appliquer doit être capable de restituer le signal modulé, quelque soit la direction du faisceau qui éclaire la caméra. Ce traitement doit notamment nous informer si de la lumière parvient encore au détecteur lorsque le faisceau éclaire en dehors du champ de vue de la caméra. Le signal que nous recherchons est modulé à la fréquence 5,6 Hz.

La méthode utilisée va consister à traiter les données dans l'espace des fréquences, à partir du calcul de la transformée de Fourier des séquences temporelles de chaque pixel. Cette méthode présente l'avantage d'être sélective, elle permet d'extraire les pics propres au signal modulé, et de remonter ainsi à la puissance émise par le corps noir que voit chaque pixel de la matrice.

Le signal modulé n'est pas un sinus pur, il faut prendre en compte ses harmoniques. Le traitement de données va ainsi extraire le pic fondamental à 5,6 Hz qui correspond à la fréquence de modulation du corps noir par le hacheur ainsi que les pics de ses harmoniques jusqu'à l'ordre 7. Ce choix du nombre d'harmoniques a été déterminé à partir d'un spectre de référence présentant le maximum de signal. Ce spectre en fréquence est celui du pixel le plus intense, à partir de l'image du trou source lorsque le faisceau éclaire la caméra dans l'axe optique. Il est représenté à la figure 5.5. Le tableau 5.2 range par ordre décroissant l'énergie contenue dans les pics de ses harmoniques jusqu'à l'ordre 7. Il apparaît qu'au delà du rang 7, l'énergie des pics des harmoniques est noyée dans le bruit de fond du spectre.

On détermine également le facteur d'échelle de conversion, entre l'amplitude des séquences temporelles et l'intensité des pics dans le domaine fréquentiel, en prenant pour référence ce même spectre de fréquence. On peut ainsi reconstruire les images des amplitudes de chaque image en pW à partir de ce traitement de données (figure 5.6).

f (Hz)	f ₀ (5,6)	3f ₀ (16,8)	5f ₀ (12*)	2f ₀ (11,2)	4f ₀ (17,6*)	7f ₀ (0,8*)	6f ₀ (6,4*)
f/f ₀	1	0,15	0,045	0,037	0,021	0,016	0,01

Tableau 5.2 : Rapport des intensités des pics des harmoniques au pic fondamental. * Les fréquences 12 ; 17,6 ; 0,8 et 6,4 Hz, correspondent au repliement dans le spectre 0-20 Hz, des fréquences respectives : 28 ; 22,4 ; 39,2 et 33,6 Hz.

Ainsi pour chaque position, on calcule le spectre total en additionnant les 256 spectres de la matrice. Le flux total est la somme des 7 premières harmoniques de la fréquence Fo.

- Estimation de la valeur moyenne du niveau de fond des spectres et de sa dispersion à 2σ :

Pour chacune des positions, on peut estimer le niveau de fond moyen à partir de l'histogramme du spectre total. Chaque distribution des fréquences de chaque spectre total, présente un ensemble de valeurs que l'on peut ajuster par une gaussienne. La valeur moyenne et l'écart-type cette gaussienne sont une estimation du niveau moyen du fond du spectre et de sa dispersion.

On compare le flux total au cette valeur moyenne de bruit multiplié par 7, puisque le flux total est la somme des 7 valeurs du spectre total.

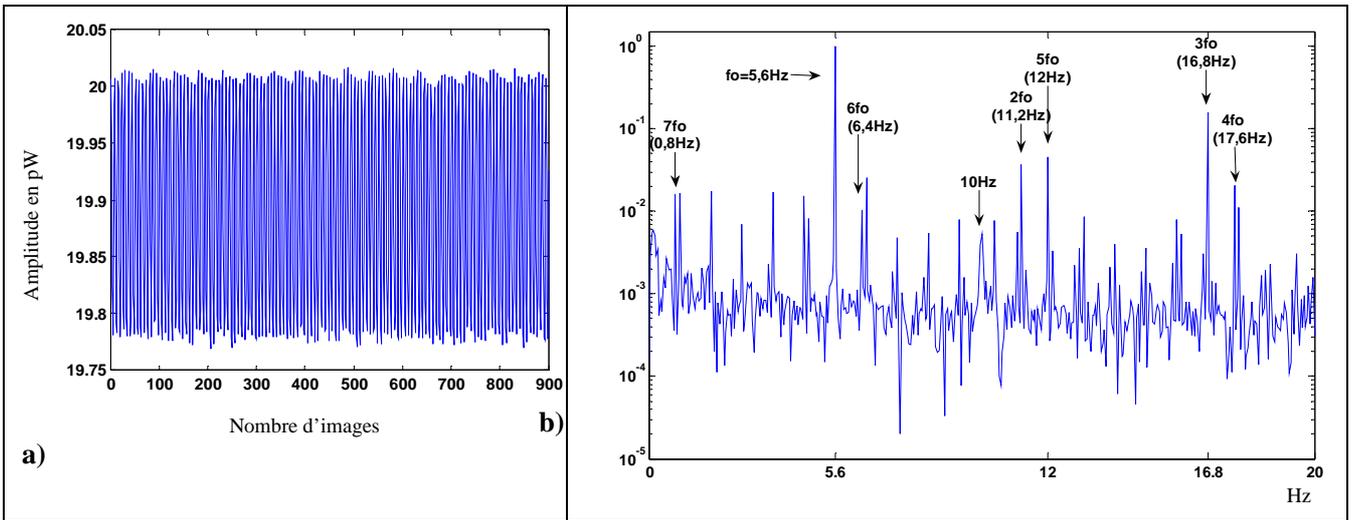


Figure 5.5 : Séquence temporelle du pixel d'intensité maximale (a) et sa transformée de Fourier (b) ; les harmoniques et la fréquence de modulation sont indiqués sur le spectre.

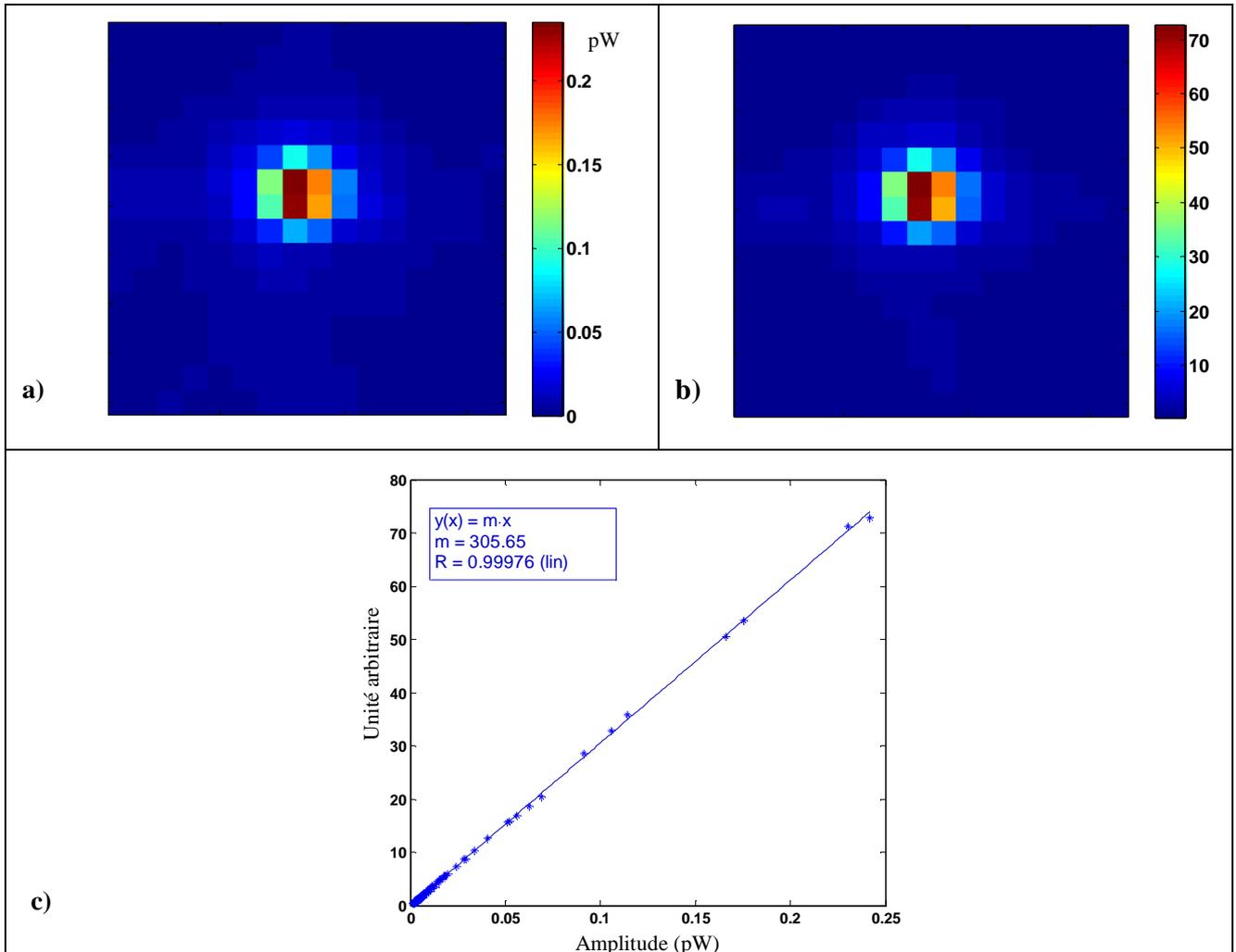


Figure 5.6 : a) Images des amplitudes calculées à partir des séquences temporelles ; b) Images des amplitudes calculées à partir des pics des spectres obtenus dans l'espace de Fourier ; c) Signal dans l'espace de Fourier en fonction du signal dans l'espace temporel. La pente de la droite est le facteur d'échelle à appliquer pour convertir en pW les amplitudes calculées dans l'espace de Fourier.

5.2.3. Diagramme d'antenne de la matrice

Le flux total que reçoit le détecteur lorsque le faisceau parallèle se déplace autour du centre de la fenêtre de la caméra sur l'axe horizontal, est représenté sur la figure 5.5. Ce signal est comparé au niveau de fond moyen des spectres, ainsi qu'au niveau à 2σ au-dessus de celui-ci

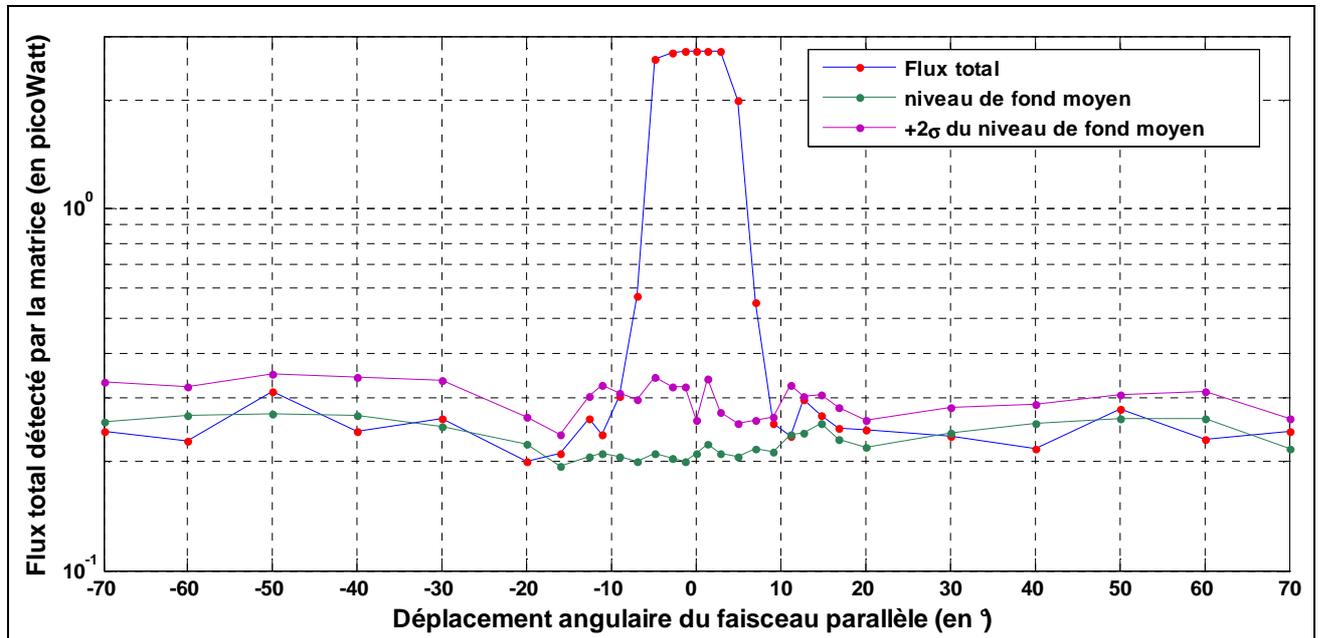


Figure 5.7 : Mesures de flux total reçu par le détecteur sur l'axe à 0° ; représentation pour toutes les incidences de -70° à $+70^\circ$.

En considérant les valeurs du flux total reçu par le détecteur (figure 5.5) et les images de la matrice (figure 5.7 et 5.8 et 5.10), on peut décrire plusieurs domaines de détection :

- Réponses du détecteur aux faibles incidences :
 - Entre $[-5^\circ ; +5^\circ]$ (quatre positions sont représentées sur la figure 5.6), la détection est caractérisée par une tâche qui est l'image de la source ponctuelle à l'infini simulée par le faisceau parallèle du banc de test.
 - Pour les angles limites, en bord de matrice (deux exemples sont présentés sur la figure 5.7), correspondant aux intervalles $]-5^\circ ; -10^\circ[$ et $] +5^\circ ; +10^\circ[$; l'image de la source n'est plus intégralement imagée sur le détecteur. On ne distingue que les bords de la tâche image. On est en limite de champ.
- Réponses du détecteur aux incidences supérieures à 10° :

Pour ces incidences, il n'y a plus de signal qui parvient au détecteur, les valeurs des pixels fluctuent autour d'une puissance de bruit de l'ordre de $1 \text{ fW.Hz}^{-1/2}$. On regroupe la distribution de ces amplitudes sous une gaussienne, ce qui permet d'estimer leur dispersion autour d'une valeur moyenne (voir figure 5.10 et tableau 5.2).

Position du faisceau	Moyenne des amplitudes ($\text{fW} \cdot (\text{Hz})^{-1/2}$)	Ecart-type à $\pm 2\sigma$ ($\text{fW} \cdot (\text{Hz})^{-1/2}$)
+11°	0,9	0,4
+20°	0,9	0,4
+30°	0,8	0,6
+40°	0,8	0,4
+50°	1,0	0,6
+60°	0,8	0,6
+70°	0,9	0,6

Tableau 5.2 : Comparaison des moyennes des valeurs des pixels du détecteur pour des incidences supérieures à 10°.

Sur l'ensemble des spectres, on retrouve un pic dominant à 10 Hz, qui correspond au repliement de la fréquence 50 Hz, du bruit instrumental, sur la fenêtre spectrale 0-20 Hz (voir figure 5.8).

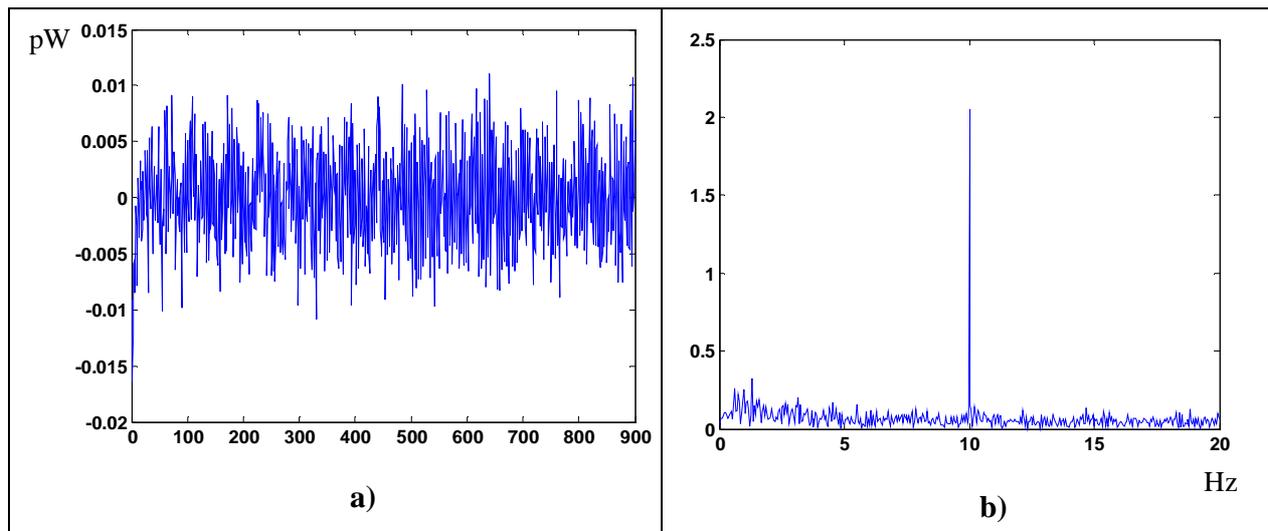


Figure 5.8 : Réponse du pixel d'intensité maximale ($3 \text{ fW} \cdot (\text{Hz})^{-1/2}$), de la matrice pour la position +20° du faisceau parallèle (figure 5.8). a) sa séquence temporelle ; b) la transformée de Fourier de sa séquence temporelle.

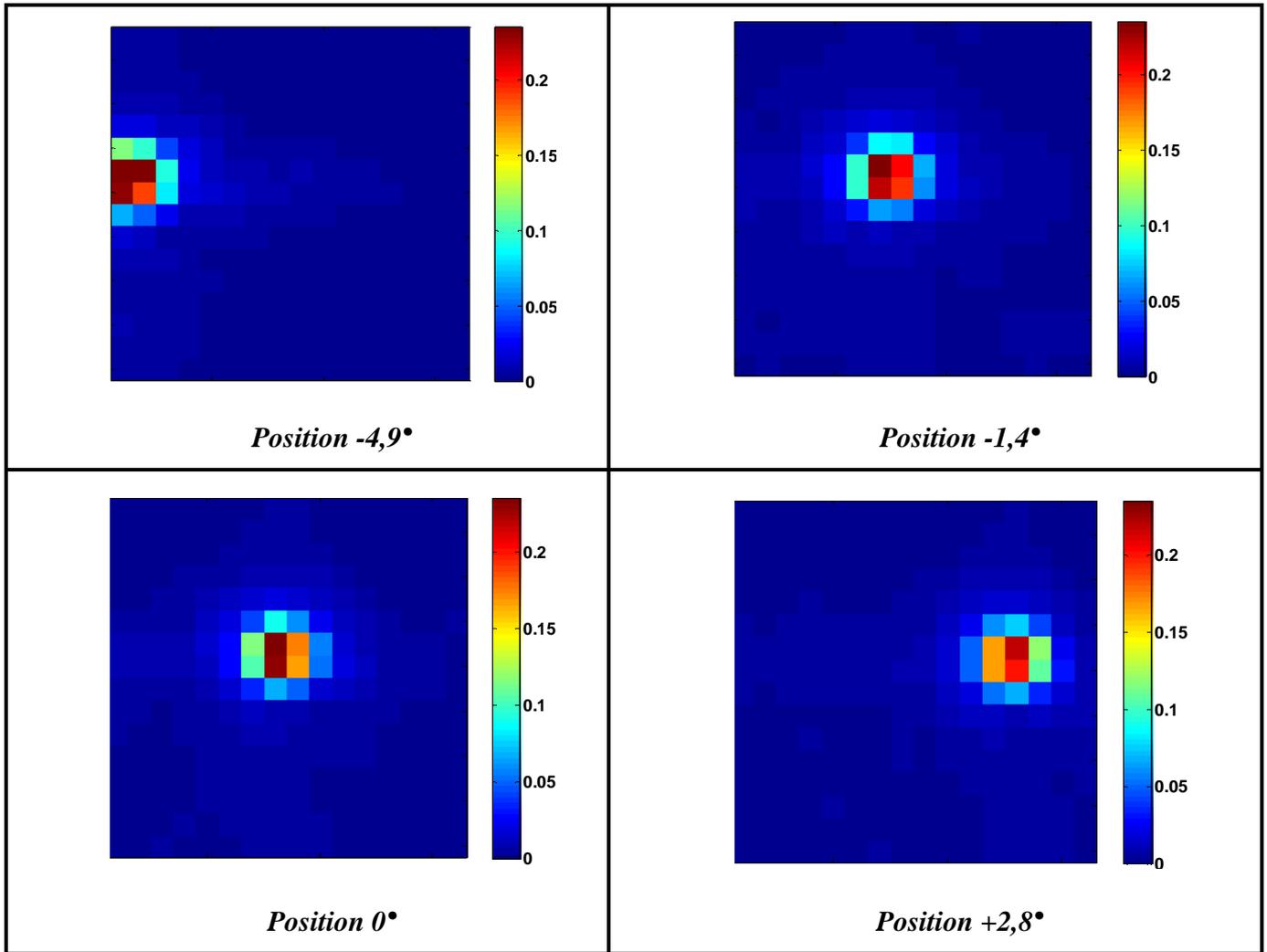


Figure 5.9 : Images de la source ponctuelle à l'infini simulée par le faisceau parallèle, pour des angles d'incidences compris entre -5° et $+5^\circ$ sur l'axe horizontal. Valeurs exprimées en pW.

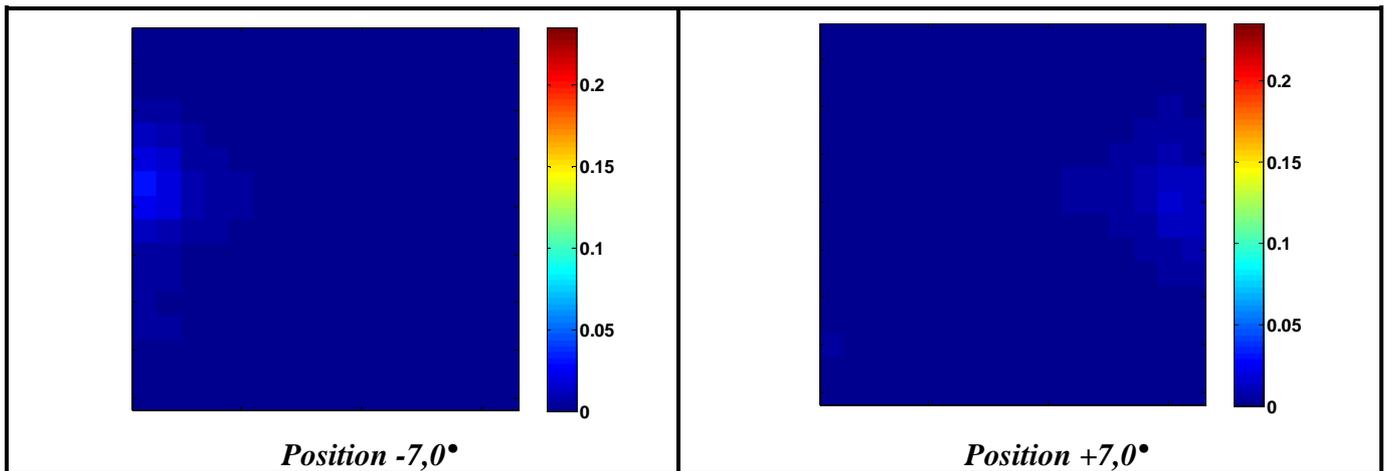
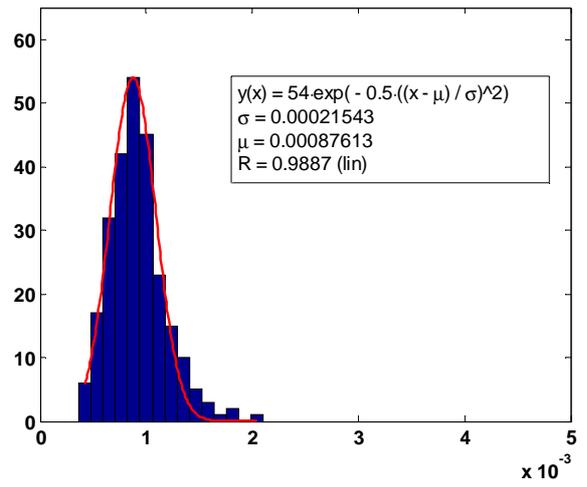
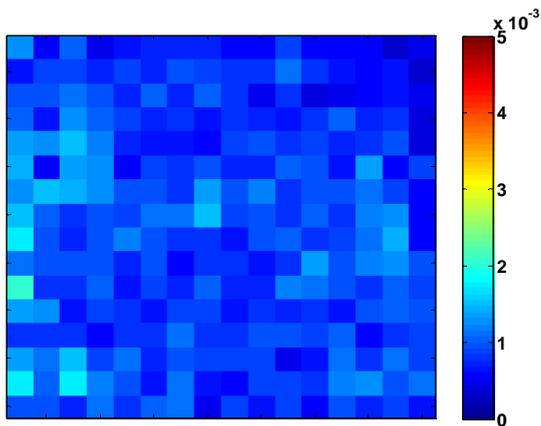
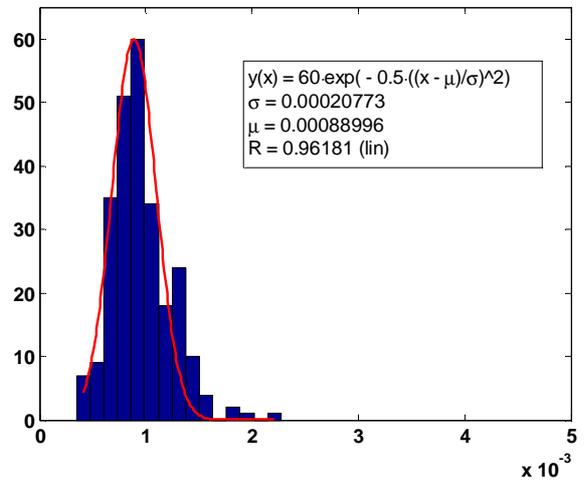
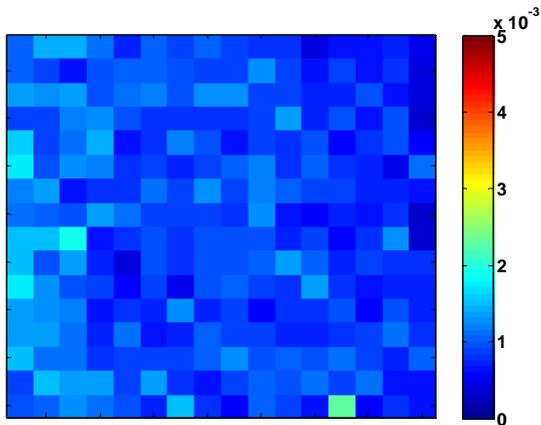


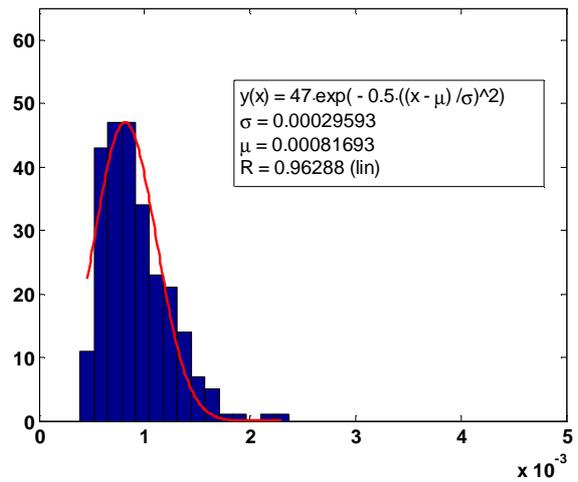
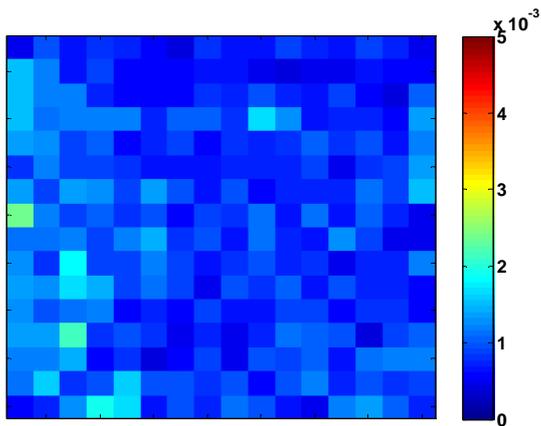
Figure 5.10 : Angles limites du champ de vue de la caméra. Le faisceau d'incidence du faisceau parallèle, pour lesquels a source n'est plus détectée correctement. Valeurs exprimées en pW.



Position +11°



Position +20°



Position +30°

Figure 5.11 : Répartition des amplitudes des pixels de la matrice, pour des incidences élevées du faisceau parallèle. Valeurs exprimées en pW.

5.2.4. Diagramme d'antenne d'un pixel

Les images restituées par le détecteur, mises les unes à la suite des autres, entre -70° et $+70^\circ$, donnent accès au diagramme d'antenne de chaque pixel. J'ai représenté celui du pixel (8,8) en figure 5.12. Ce profil correspond en quelque sorte à l'échantillonnage, au pas du déplacement du faisceau parallèle, de la tâche image du trou source formée dans le plan du détecteur. J'ai comparé cette courbe expérimentale à une simulation théorique. Cette simulation est le résultat d'un calcul théorique de chaque image que voit le détecteur. Elle rend compte de l'effet de la taille du pixel sur la restitution du profil d'intensité de la tâche d'Airy. Le calcul est la projection d'une image théorique de la figure d'Airy, sur une autre image simulant la taille des pixels de la matrice. L'écart entre les deux courbes théorique et expérimentale est dû au fait que le plan du détecteur n'est pas dans le plan focal, ce qui explique que l'on observe un élargissement.

La courbe expérimentale du diagramme de détection du pixel (8,8), a été obtenue avec la méthode du traitement de données décrite au paragraphe 5.2.2. La courbe de niveau de fond moyen ainsi que son écart-type, ont été déterminés à partir d'un ajustement gaussien de l'histogramme pour chaque spectre de fréquence du pixel (8,8).

La courbe à 2σ du niveau de bruit des spectres, permet de discriminer les valeurs qui sortiraient du fond de la distribution des amplitudes des pics du spectre. Au dessous de cette courbe, les amplitudes restent dans le bruit de fond des spectres.

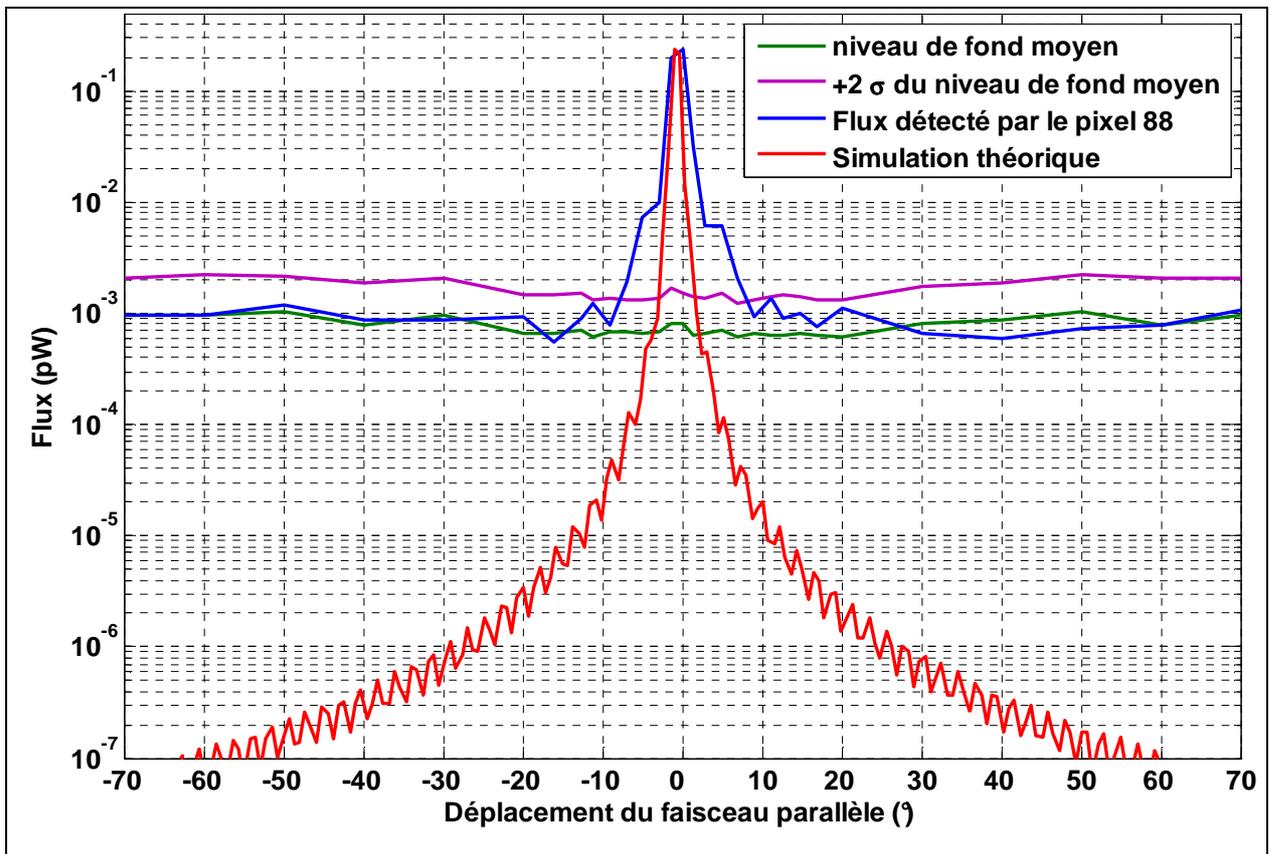


Figure 5.12 : Diagramme d'antenne vue par le pixel 88 de la matrice sur l'axe horizontal entre -70° et $+70^\circ$.

En tenant compte du niveau de détection de cette courbe, on peut dire que l'on ne détecte pas de lumière parasite et de plus qu'un pixel est capable de détecter un flux jusqu'à $2 \text{ fW} \cdot (\text{Hz})^{-1/2}$ d'une source émettant à $0,2 \text{ pW} \cdot (\text{Hz})^{-1/2}$.

CONCLUSION

Le travail réalisé et les résultats obtenus :

Ce rapport retrace les différentes phases de la vie du projet dont j'ai eu la charge. L'objectif est la réalisation d'un dispositif de test pour effectuer des mesures de diagramme d'antenne de la caméra bolométrique P-ArTéMiS. J'ai décrit et explicité ces différentes étapes, depuis la conception jusqu'à la mise en application.

Dans la phase de caractérisation du banc de test, je me suis servi de la caméra P-ArTéMiS, dans sa configuration ArTéMiS/Apex1, pour effectuer plusieurs tests de validation. Les résultats de ces tests ont été probants. Ils ont permis de caractériser l'optique du banc et de montrer qu'il éclaire en faisceau parallèle à $450\mu\text{m}$.

On peut également noter que, de part sa conception, ce dispositif peut d'être adapté à d'autres longueurs d'onde moyennant quelques modifications simples.

Nous avons utilisé ce banc de test pour faire des mesures préliminaires du diagramme d'antenne de la caméra P-ArTéMiS. Nous avons ainsi tracé le diagramme de détection de cette caméra selon un axe. Ces résultats ont montré qu'il n'y avait pas de réflexion parasite.

En plus de sa fonction originelle, ce dispositif peut servir de moyen de test pour déterminer les performances optiques de la caméra soumise au test, moyennant une optique intermédiaire pour focaliser l'image de la source ponctuelle dans le plan du détecteur. On peut alors mesurer certaines caractéristiques, telle que le pas d'échantillonnage à partir de la PSF restituée par le détecteur.

En guise de conclusion, le laboratoire est désormais doté d'un dispositif de test, permettant d'effectuer des mesures de diagramme d'antenne dans la bande submillimétrique. On a vu que ce banc pouvait également permettre de faire des mesures des performances optiques de la caméra qu'il éclaire.

Apports personnels :

Parmi les apports personnels, citons :

- La gestion et le suivi de projet.
- Les connaissances scientifiques et techniques en mécanique, en optique et en thermique appliquées pour la conception du dispositif de test, le choix des capteurs et la réalisation d'une source ponctuelle de lumière dans une fenêtre spectrale autour de $450\mu\text{m}$.
- La programmation de VI (Virtual Instrument) sous le logiciel Labview pour l'acquisition des mesures, le contrôle commande des instruments par différentes interfaces de communication telles que GPIB, RS232.
- L'écriture des algorithmes pour traiter les données d'acquisition, sous le logiciel Matlab.
- Le travail d'équipe au sein du groupe de détection submillimétrique du Service d'Astrophysique, a été très stimulant.

Ce sujet de ce mémoire m'a permis d'acquérir un grand nombre de connaissances complémentaires à ma formation.

BIBLIOGRAPHIE

- O. Boulade, Performances de la matrice 450 microns à KOSMA, rapport interne référencé SAp-KOSMA-OB-314159 (Février 2007)
- F. Cottet, Traitement des signaux et acquisition de données, Editions Dunod (2002)
- L. Dettwiller, Les instruments d'Optique, Etude théorique, expérimentale et pratique, Editions Ellipses (1997)
- J. Gironnet, Conception d'une caméra adaptée au rayonnement submillimétrique à 450 μm pour des observations au sol avec le télescope KOSMA, Master Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace (2004-2005).
- N. Hurtado, Preparation of a Bolometer Wide Field Imager for Ground Based Submillimetric Telescopes, Master Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace (Septembre 2006)
- P. Lena, Méthodes physiques de l'observation, Editions du CNRS (1986)
- D. Pollock, Countermeasure Systems (Volume 7), The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook (1993)
- V. Revérèt, Etude de faisabilité d'une caméra bolométrique pour l'imagerie à haute résolution spatiale à 1,3 mm de longueur d'onde, pour l'IRAM, thèse (Mai 2004).
- G. Saporta, Probabilités analyse des données et statistique, Editions Technip (2006)
- J. Surrel, Optique instrumentale - Optique de Fourier, Editions Ellipses (1996)
- J.D. Vincent, Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing, Editions Wiley-Interscience (1990)

Annexe 1 : Dessin 3D du banc de test et de la caméra P-ArTéMiS

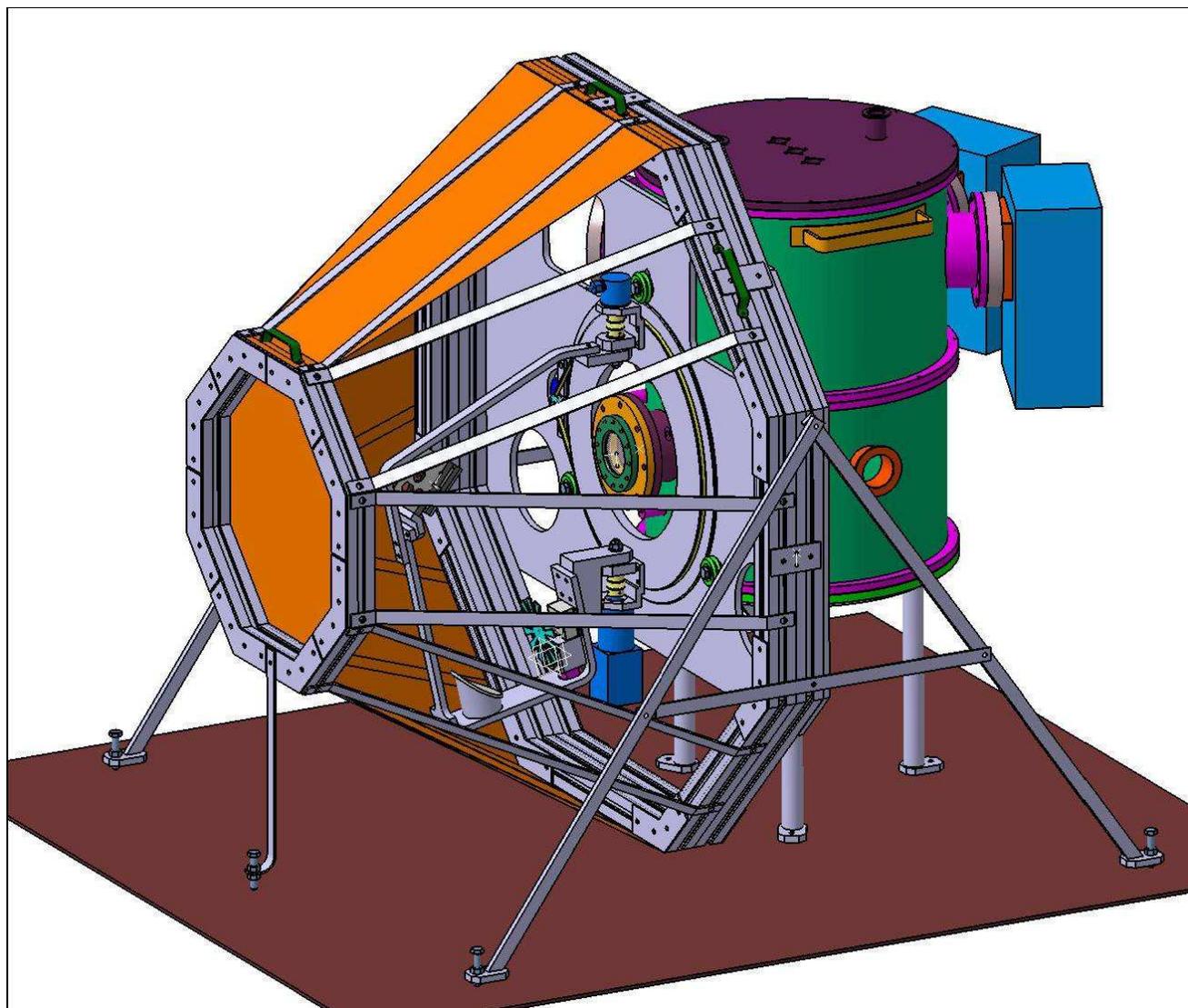


Figure A.1 : Dessin 3D du banc de test, lorsqu'il est aligné sur l'axe optique de la caméra P-ArTéMiS

Annexe 2 : Instrumentation du banc de test

Le tableau A.1. regroupe l'ensemble des performances de l'instrumentation choisie pour composer le banc de test et qui est décrite tout au long du chapitre 3.

Instrumentation choisie :	Performances :	Fonction :
Thermistance CTN 10kOhm à 25°C - Constructeur : Murata - référence : MTSA0XV103FE1B0 - Fournisseur : Radiospares - Asservissement PID programmé sous Labview (carte National Instrument PCI-6723)	<ul style="list-style-type: none"> • Etendue de mesure : de 40°C à 125°C. • erreur sur la mesure : $\frac{\Delta R}{R} \approx \pm 1\%$ • Précision de la régulation $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 	Mesurer et contrôler la température du corps noir.
Codeurs magnétiques monotour, référence BaumerElectric BMSH42SIN05T0900B25: Interface parallèle 9 bits	Dynamique des codeurs : 2 ⁹ ⇒ Résolution sur la mesure de la position du bras : $\pm 0,7 \text{ } ^\circ$ ⇒ Résolution sur la mesure de la position du plateau : $\pm 0,03 \text{ } ^\circ$	Mesurer les positions angulaires du faisceau parallèle.
Contrôleur Trinamic TMC2130-01 associé au moteur pas à pas MDP 23HS3002/PLG52	Résolution du déplacement bras : $16 \text{ } \mu\text{pas} \Leftrightarrow \pm 0,08 \text{ } ^\circ$	Contrôler la rotation du bras
Contrôleur GSM4 associé au moteur pas à pas Mc Lennan, P542M481UG11L82	Résolution du déplacement plateau : $1 \text{ demi-pas} \Leftrightarrow \pm 0,006 \text{ } ^\circ$	Contrôler la rotation du plateau
Moteur pas à pas de petite taille - Constructeur : Portescap - référence : P310	Incertitude-type sur la fréquence hacheur : $\pm 2 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$	Moduler le signal du corps noir.

Tableau A.1 : Fonctions et performances métrologiques de l'instrumentation du banc de test.

Moteur pas à pas déplaçant le bras

Motoréducteur Pas à Pas
Motoréducteur 23HS3002/PLG52
POTENCIA : 1,2 Nm > 24 Nm



SPECIFICATIONS TECHNIQUES

		BIP/0020
Rapport de réduction		20.3
Nombre d'étages		2
Rendement		0.72
Angle de pas	°	0.089
Couple de maintien	Nm	8.0
Courant Nominal par phase	A	2.3

GENERALITES

Nombre de fils		4
Aimants		NdFeB
Classe d'isolation		B
Protection		IP30
Type de réducteur		Planétaire
Paliers		Roulements à billes
Matière des pignons :	.	
étage d'entrée		Delrin
étage de sortie		Métal
Charge axiale maximum	N	500
Jeu axial maximum	mm	0.100
Charge radiale maximum	N	350
à une distance de la face de :	mm	12
Jeu radial	mm	0.090
à une distance de la face de :	mm	25
Force de chassage	N	500
Jeu angulaire à vide	°	1
Jeu angulaire en charge	°	1.8
Température ambiante mini de fonctionnement	°C	20
Température ambiante maxi de fonctionnement	°C	60

Moteur pas à pas déplaçant le plateau :

Geared stepper motor

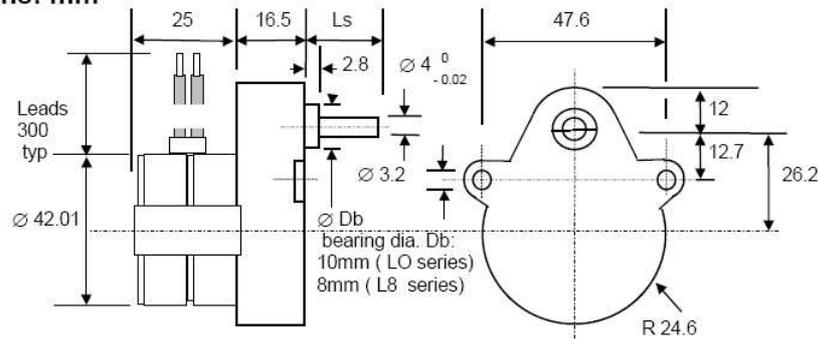
P542-M48 series

The P5-M48 series provides a combination of optimum performance and price for use in instrumentation applications that require digital control of position and speed. Features include:

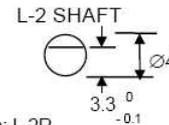
- High performance permanent magnet stepper motor
- Precision Ovoid gearhead incorporating metal gears for optimum torque transmission
- Wide range of standard gear ratio options from stock
- Choice of output shaft options
- Optional integral freewheel and clutch
- Special shaft and gear ratios to meet customer special requirements



Dimensions: mm



Shaft length Ls: plain 20 mm long (L.1 option)
 12.8 mm long with flat (L.2 option) :
 Flat length: 9 mm
 Additional options: Integral Clutch : L.2C
 Integral Freewheel CW version : L.2F & CCW version: L.2R



P542-M48 geared stepper motor performance

Geared Stepper Motor	Ratio	Steps per rev. at output	Holding Torque (Ncm)	Max Working Torque (Ncm)	Typical Working Torque (Ncm)
P542-M48 -G01...	25:6	200	19.8	13.5	6.0
-G03	25:4	300	29.7	20.3	9.0
-G04	25:3	400	39.6	27.0	12.0
-G05	10:1	480	42.9	29.3	13.0
-G06	25:2	600	53.6	36.6	16.3
-G08	50:3	800	71.5	48.7	21.7
-G09	20:1	960	85.8	58.5	26.0
-G11	25:1	1,200	100.0	73.1	32.5
-G14	100:3	1,600	100.0	97.5	43.3
-G16	125:3	2,000	100.0	100.0	54.2
-G17	50:1	2,400	100.0	100.0	65.0
-G19	125:2	3,000	100.0	100.0	72.5
-G21	250:3	4,000	100.0	100.0	90.0
-G23	125:1	6,000	100.0	100.0	100.0
-G27	250:1	12,000	Use P535-M48 series for ratios of 250:1 and above		

Standard Versions:	P542-M482U	P42-M481U	Step rate @
Number of phases	4	4	typical working torque
Rated voltage (L/R Drive)	12	5	L/R : 300 Hz
Current per phase (mA)	230	550	L/4R: 550 Hz
Resistance per phase (Ohms)	52.4	9.1	
Inductance per phase (mH)	51.7	8.1	

Mclennan Servo Supplies Ltd. Tel: +44 (0)8707 700 700 www.mclennan.co.uk



Contrôleur du moteur pas à pas déplaçant le bras :



TMCM-IDX Start



For versions TMCM-IDX 4803 and IDX 7505

You will need

- Your TMCM-IDX stepper motor controller and driver module, either IDX-4803 (48V / 3.5A RMS) or IDX-7505 (75V / 5A RMS)
- A stepper motor with 1A to 3.5A RMS (IDX 4803) or **5A RMS (IDX 7505)** coil current. Pay attention to IDX current regulation.
- RS232 or USB to RS 485 converter with cables supplied
- Step / Direction generator (+5V /0V output)
- Power supply for 12V to 48V / **75V**
- Hypertext program, PC
- Matching cables to connect the motor.

Precautions

- Do not connect or disconnect the motors while powered
- Do not mix up connections or short-circuit pins
- Avoid bundling IO wires with motor power wires, as this may cause noise pickup from the motor.
- Do not exceed the maximum coil current of your stepper motor. Adjust the settings of the TMCM-IDX accordingly. Issue command AC 20 (1/5 max.) first to be safe or adapt the value to your stepper motor.
- Do not exceed the maximum power supply of 48V/ **75V**.
- If running the IDX 7505 at high power for longer time enforce cooling is required. The IDX deactivates itself if it gets too hot.

Starting up:

Start with power supply OFF.

1. Connect RS485 Converter to PC via RS232
2. Connect TMCM-IDX to RS485 Converter
 - RS485 GND to GND (terminal 7 of 14) - recommended
 - RS485 + to one RS485A terminal (terminal 2 of 14)
 - RS485 - to one RS485B terminal (terminal 1 of 14)
3. Connect power supply to TMCM-IDX
 - Power supply (+) to terminal 6 of 6
 - Ground (GND) to terminal 5 of 6
4. Connect stepper motor to 4 pin connector
5. Turn power ON. The LED of the module lights constantly and the motor is powered but in standstill. *If this does not occur switch power OFF and check your connections and power supply.*
6. Start HyperTerminal program (see other side of the sheet for parameters).
7. Issue following commands (current settings on first use):
 - AC x <ENTER> -- x = 0..100
 - AW <ENTER> -- store value

$$x_{max} = \frac{\text{rated motor current}}{\text{max. IDX current}} \cdot 100$$

 - AA 400 <ENTER> -- acceleration
 - AV 50000 <ENTER> -- move with constant velocity
 - AV 0 <ENTER> -- stop motor
8. If Step / Direction interface is desired connect
 - +5V power supply (e.g. term. 10) to terminal 14 (V_{COM}).
 - Step signal to term 11 (0V / 5V analogical to V_{COM}).
 - Direction signal to terminal 12 (0V / 5V signal)
 - GND (e.g. term. 7) to generator GND.
9. For Step / Direction the acceleration has to be set to 0 (default) → AA 0 <ENTER>. Start Step signal (max. 5V, 250kHz). The motor turns. Try out different frequencies and directions.

First steps are made. For other commands see the second page. For full functionality of the TMCM-IDX refer to the TMCM-IDX Manual.

Wiring note: The TMCM-IDX has only screw connectors for easy connection of communication, power supply and motor.

Contrôleur du moteur pas à pas déplaçant le plateau :

Fabricant: UNBRANDED.

Fournisseur : FARNELL, reference 650109.

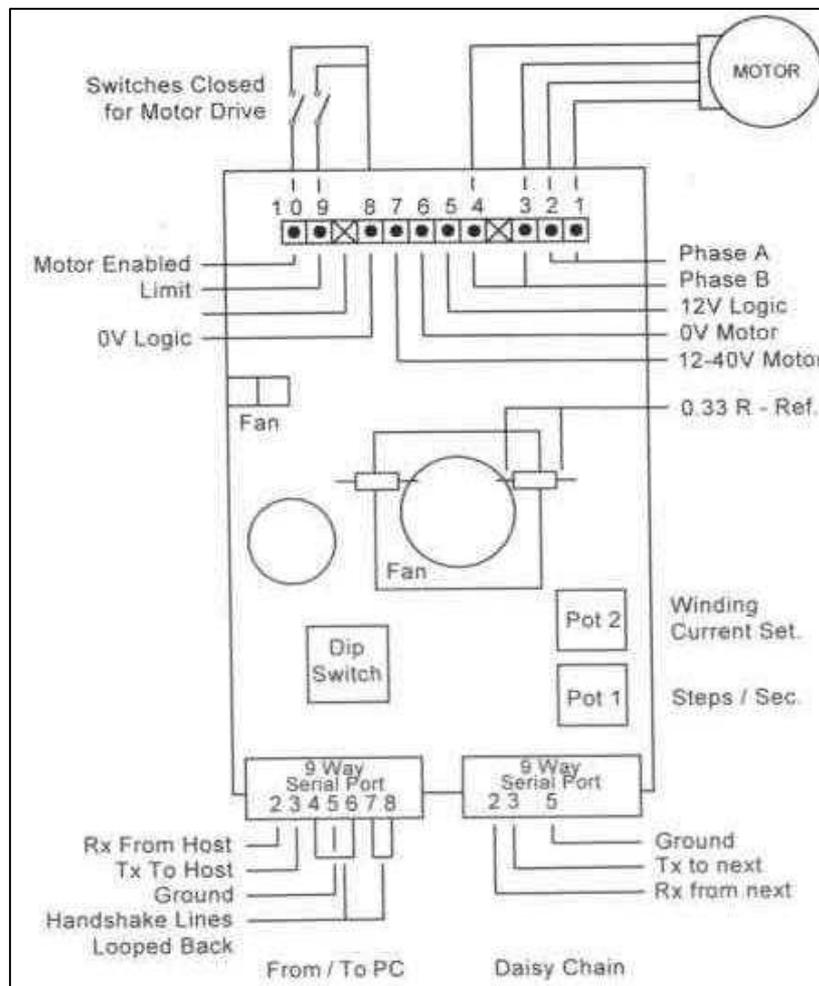
SPECIFICATION

MOTOR DRIVE: 4 or 8 wire bipolar current switching, up to 1.5 ampere / phase Voltage 12 to 40 Volts DC (maximum).

INTERFACE: RS232C 9600 Baud, DTE via 9 pin "D" connector, Tx, Rx & GND active (Null modem) daisy-chained from card to card.

ADDRESS: On board card address selection 0, 1, 2, 3. Software commands include card address.

MOTOR CONTROL: Current, speed, direction, 1/2 current, boost, 1/2 / full step, number of steps (0-99999), ramp (length and slope), limit and enable switch provision.



Lien vers la documentation technique :

<http://www.farnell.com/datasheets/51166.pdf>

Mesures des déplacements angulaires :

Codeur magnétique absolu monotour BMSH – MAGRES parallèle

AUDIN Composants & système d'automatisme

7 bis rue de Tinguieux - 51100 REIMS - France

Tel. 03 26 04 20 21 • Fax 03 26 04 28 20 • <http://www.audin.fr> • E-mail info@audin.fr

Particularités

- Codeur monotour robuste
- Résolution jusqu'à 9 Bit
- Boîtier miniature
- Interface parallèle
- Point zéro programmable



Données générales

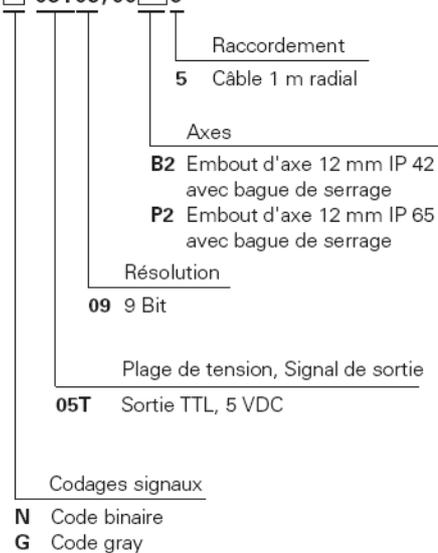
Tension d'alimentation	5 VDC \pm 10% (05T)
Consommation max. (sans charge)	typ. 100 mA
Circuit de sortie	parallèle 5 V
Résolution max.	9 Bit (1 pas de mesure = 42' 11")
Limite d'erreur	\pm 1°
Reproductibilité	0,3°
Fréquence limite	51,2 kHz
Signal d'entrée	zéro (programmé: < 0,4 V, > 2 ms état de repos: 3,3 V ou ouvert)
Sens de rotation	valeurs binaires croissantes vu de la flasque MAGRES et sens de rotation horaire (CW)

Données mécaniques

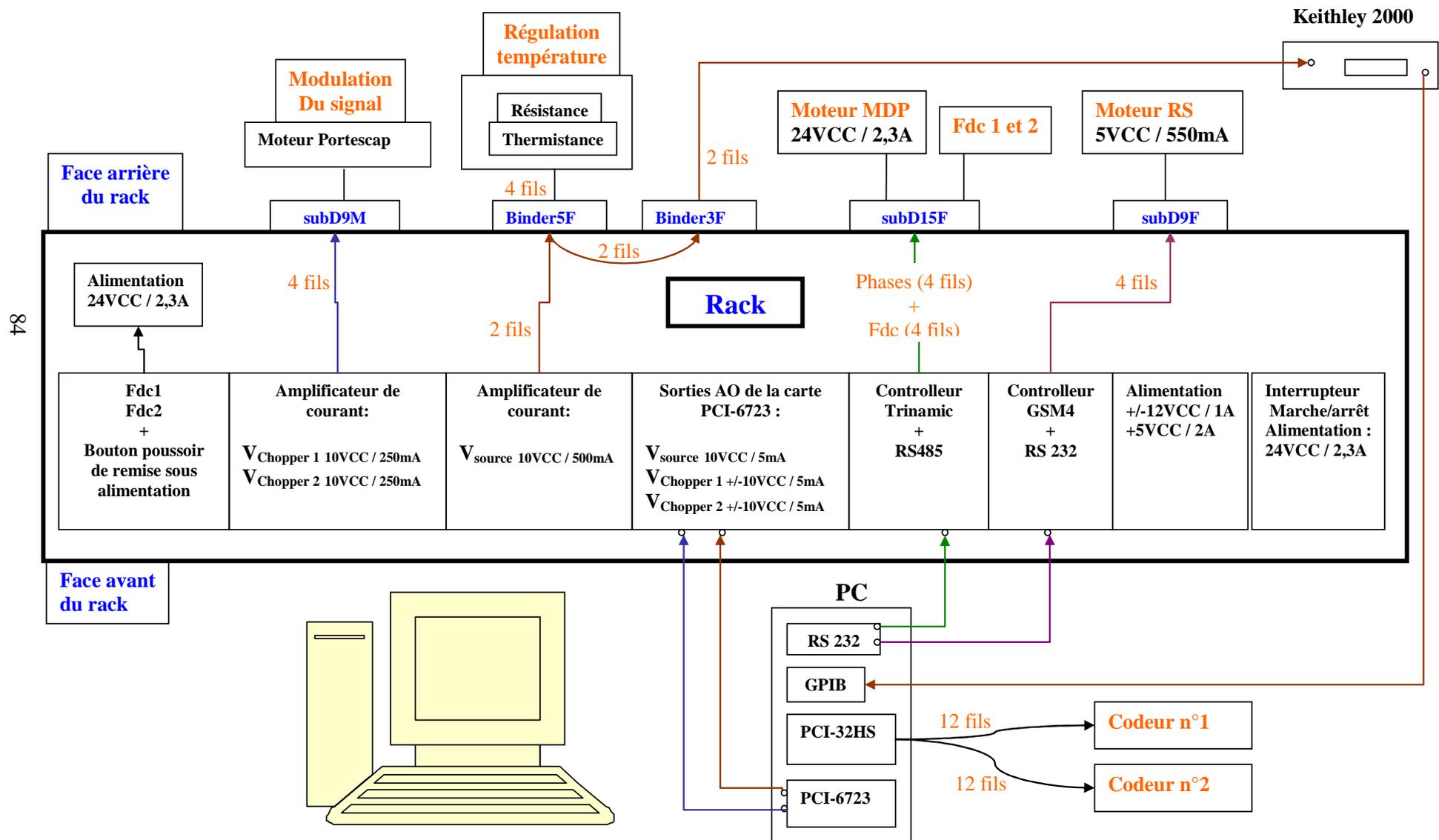
Vitesse max.	12'000 t/min
Moment d'inertie	typ. 12×10^{-7} kgm ²
Couple d'utilisation	typ. 0,93 cNm (3000 t/min / 20 °C)
Durée de vie des roulements	dépend des conditions d'utilisation (typ. 10 ⁹ tours)
Classe de protection max.	axe: IP 42 boîtier: IP 65
Matériau	boîtier: acier/aluminium flasque: aluminium
Poids	env. 120 g

Références de commande

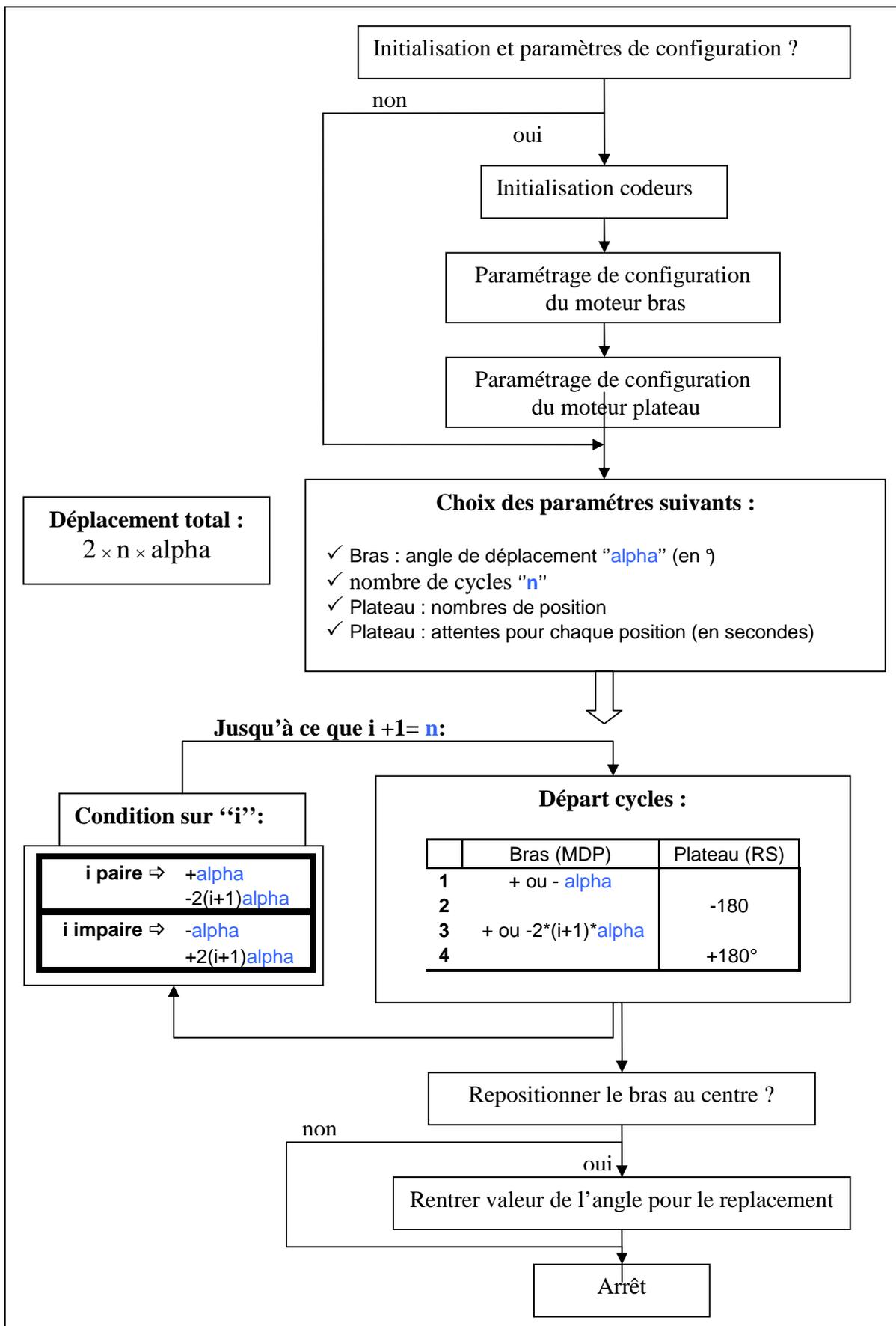
BMSH 42S1 05T09/00 5



Annexe 3 : Synoptique du schéma de câblage pour le contrôle commande du banc de test



Annexe 4 : Programme des déplacements du faisceau parallèle



Annexe 5 : Contrôle-commande du banc de test

Face-avant de Couplage moteurs MDP_RS_25 04 2007.vi

Fichier Édition Affichage Projet Exécution Outils Fenêtre Aide

Police de l'application 13pts

Contrôle de la température de la source

Température de la source thermistance (RS 162 6269) en °C

30,176

Consigne de chauffage en °C

30,00

output : Vconsigne

Modulation du signal de la source

V Chopper 1

Waveform Type: Sine Wave

V Chopper 2

Frequence [Hz]: 8,00

Amplitude [V]: 10,00

phase: 0,00

Différence de phase: 90

Initialisation des codeurs et configuration des moteurs

RAZ du codeur du bras: 0,7

RAZ du codeur du plateau: 0

Configuration du moteur bras

Configuration du moteur plateau

Paramètres des cycles pour le déplacement de la source

angle de déplacement du bras en micropas (2880 μ pas = 1°)

- 2° (5760 μ pas)
- 3° (8640 μ pas)
- 4° (11520 μ pas)
- 5° (14400 μ pas)
- 6° (17280 μ pas)
- 10° (28800 μ pas)
- 20° (57600 μ pas)

Plateau : Attente entre chaque position (valeur en seconde)

0, 2, 5, 10, 15, 20

Plateau : Sélection du nombre de positions

- 2 positions à 90°
- 5 positions à 36°
- 10 positions à 18°
- 20 positions à 9°
- 40 positions à 4,5°

Nombre de cycles: 4

Suivi des déplacements

Sens de déplacement du bras 1.1: Horaire / Anti-horaire

Sens de déplacement du plateau 1.2: Anti-horaire (vers le haut) / Horaire (vers le bas)

Sens de déplacement du bras 1.3: Horaire / Anti-horaire

Sens de déplacement du plateau 1.4: Anti-horaire (vers le haut) / Horaire (vers le bas)

Mesure déplacements

Bras: 0

Plateau: 0

Arrêt lecture codeurs

STOP

Fin des cycles / Repositionnement au centre

stop

STOP

Fin du programme

Démarrer sous vi Face-avant de Coupla... Diagramme de Couplage ... fichiers acquisitions excel... 16:59

Annexe 6 : Calcul de la série de Fourier de la fonction périodique du signal modulé théorique

$$s(\varphi) = \begin{cases} r^2 \cdot \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) & \text{si } \varphi \in [0; \pi] \\ -r^2 \cdot \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) & \text{si } \varphi \in [\pi; 2\pi] \end{cases}$$

Cette fonction est de période $T=2\pi$. Sa décomposition en série de Fourier, se définit comme la somme des fonctions suivantes :

$$s_n(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \cdot \cos(n \cdot 2\pi \cdot F_0 \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot 2\pi \cdot F_0 \cdot t)]$$

Les coefficients a_0 , a_n et b_n sont données par les intégrales suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(\varphi) \cdot d\varphi \\ a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T s(\varphi) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \varphi\right) \cdot d\varphi \\ b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T s(\varphi) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \varphi\right) \cdot d\varphi \end{array} \right\} \text{ pour } n \geq 1$$

Cette fonction est paire, par conséquent tous les coefficients b_n sont nuls.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} s(\varphi) \cdot d\varphi = \frac{r^2}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot d\varphi - \frac{r^2}{2\pi} \cdot \int_{\pi}^{2\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot d\varphi$$

$$a_0 = \frac{r^2}{2\pi} \cdot \left(\frac{\pi^2}{2} - \left(-\frac{\pi^2}{2} \right) \right) = \frac{\pi \cdot r^2}{2}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(\varphi) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi = \frac{r^2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi - \frac{r^2}{\pi} \cdot \int_{\pi}^{2\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi$$

$$a_n = \frac{r^2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi - \frac{r^2}{\pi} \cdot (-1)^n \cdot \int_0^{\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi$$

$$a_n = [1 - (-1)^n] \cdot \frac{r^2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi$$

On en déduit que si n est pair, alors $a_n = 0$; et si n est impaire :

$$a_n = \frac{2r^2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{\sin(2\varphi)}{2} \right) \cdot \cos(n\varphi) \cdot d\varphi$$

$$a_n = \frac{2r^2}{\pi} \left[\underbrace{\pi \int_0^\pi \cos(n\varphi) d\varphi}_{=0} - \int_0^\pi \varphi \cos(n\varphi) d\varphi + \frac{1}{2} \int_0^\pi \sin(2\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi \right]$$

$$a_n = \frac{2r^2}{\pi} \int_0^\pi \varphi \cos(n\varphi) d\varphi + \frac{r^2}{2\pi} \int_0^\pi \{\sin[(n+2)\varphi] - \sin[(n-2)\varphi]\} d\varphi$$

$$a_n = \frac{2r^2}{\pi} \left\{ \left[\frac{\varphi \sin(n\varphi)}{n} \right]_0^\pi - \frac{1}{n} \int_0^\pi \sin(n\varphi) d\varphi \right\} + \frac{r^2}{2\pi} \left[\frac{-\cos[(n+2)\varphi]}{n+2} + \frac{\cos[(n-2)\varphi]}{n-2} \right]_0^\pi$$

$$a_n = \frac{2r^2}{n^2 \pi} [\cos(n\varphi)]_0^\pi + \frac{r^2}{2\pi} \left[\frac{1 - (-1)^n}{n+2} + \frac{1 - (-1)^n}{n-2} \right]$$

$$a_n = \frac{2r^2}{n^2 \pi} [1 - (-1)^n] + \frac{r^2}{2\pi} [1 - (-1)^n] \left(\frac{1}{n+2} - \frac{1}{n-2} \right) = \frac{2r^2}{\pi} [1 - (-1)^n] \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2 - 4} \right)$$

$$a_n = -\frac{8.r^2}{\pi} \left(\frac{1 - (-1)^n}{n^2.(n-2).(n+2)} \right) \text{ puisque } n \text{ est impaire, on a :}$$

$$\begin{cases} a_n = -\frac{16.r^2}{\pi} \left(\frac{1}{n^2.(n-2).(n+2)} \right) & \text{si } n \text{ est impaire} \\ a_n = 0 & \text{si } n \text{ est pair} \end{cases}$$

D'où le développement de la série de Fourier de la fonction $s(\varphi)$:

(avec $\varphi = 2\pi.F_0.t$)

$$s(t) = \frac{\pi.r^2}{2} - \frac{16.r^2}{\pi} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{\cos[(2p+1).(2\pi.F_0.t)]}{(2p+1)^2(2p-1)(2p+3)}$$

$s(\varphi)$ s'écrit jusqu'à l'ordre 7 :

$$s(t) = \frac{\pi.r^2}{2} + \frac{16.r^2}{\pi} \left(\frac{\cos[2\pi.F_0.t]}{3} - \frac{\cos[3.(2\pi.F_0).t]}{45} - \frac{\cos[5.(2\pi.F_0).t]}{525} - \frac{\cos[7.(2\pi.F_0).t]}{2205} \right)$$

Annexe 7 : Expression de la divergence du faisceau

L'image d'une source ponctuelle placée au foyer d'un miroir parabolique est renvoyée à l'infini (rayon en rouge sur la figure A.2), le faisceau en sortie du miroir est parallèle. Si la source est étendue, de rayon R , le faisceau est divergent (rayon en bleu sur la figure A.2). Soit α cet angle de divergence dépend de R et de la distance focale effective du miroir parabolique EFL (Effective Focal Length)

$$\alpha = \arctan\left(\frac{R}{EFL}\right)$$

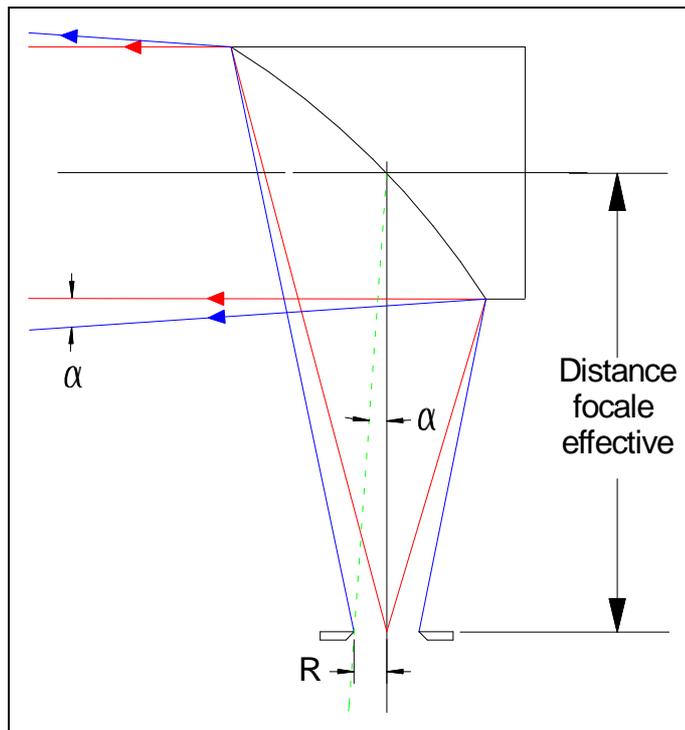


Figure A.2 : Tracé des rayons d'une source étendue placée au foyer du miroir parabolique

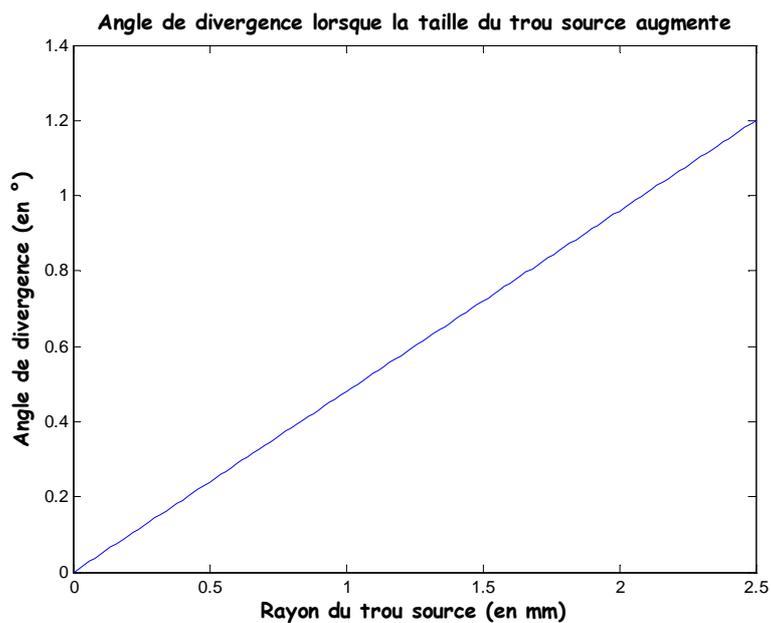


Figure A.3 : Angle de divergence du faisceau suivant la taille du trou source

Annexe 8 : Etapes du traitement des données

La fréquence de la caméra est 40 Hz (paramètre fixe), les paramètres qui ont été choisis pour moduler le signal de la source sont :

- La fréquence du hacheur : 5,6 Hz
- Le nombre d'images : 900

Les étapes du traitement de données pour calculer le signal modulé par le hacheur :

1- L'acquisition restitue une image brute de la puissance reçue par la matrice (figure A.7.a)

2- Traitement des séquences temporelles de chaque pixel, celle-ci correspondent aux variations de flux par-dessus de l'émission de fond.

- Reconstruction de la période hacheur en regroupant un nombre entier de périodes.
- Recherche du maximum et du minimum, calcul des moyennes.
- Calcul de l'amplitude du signal modulé

3- Image de la source

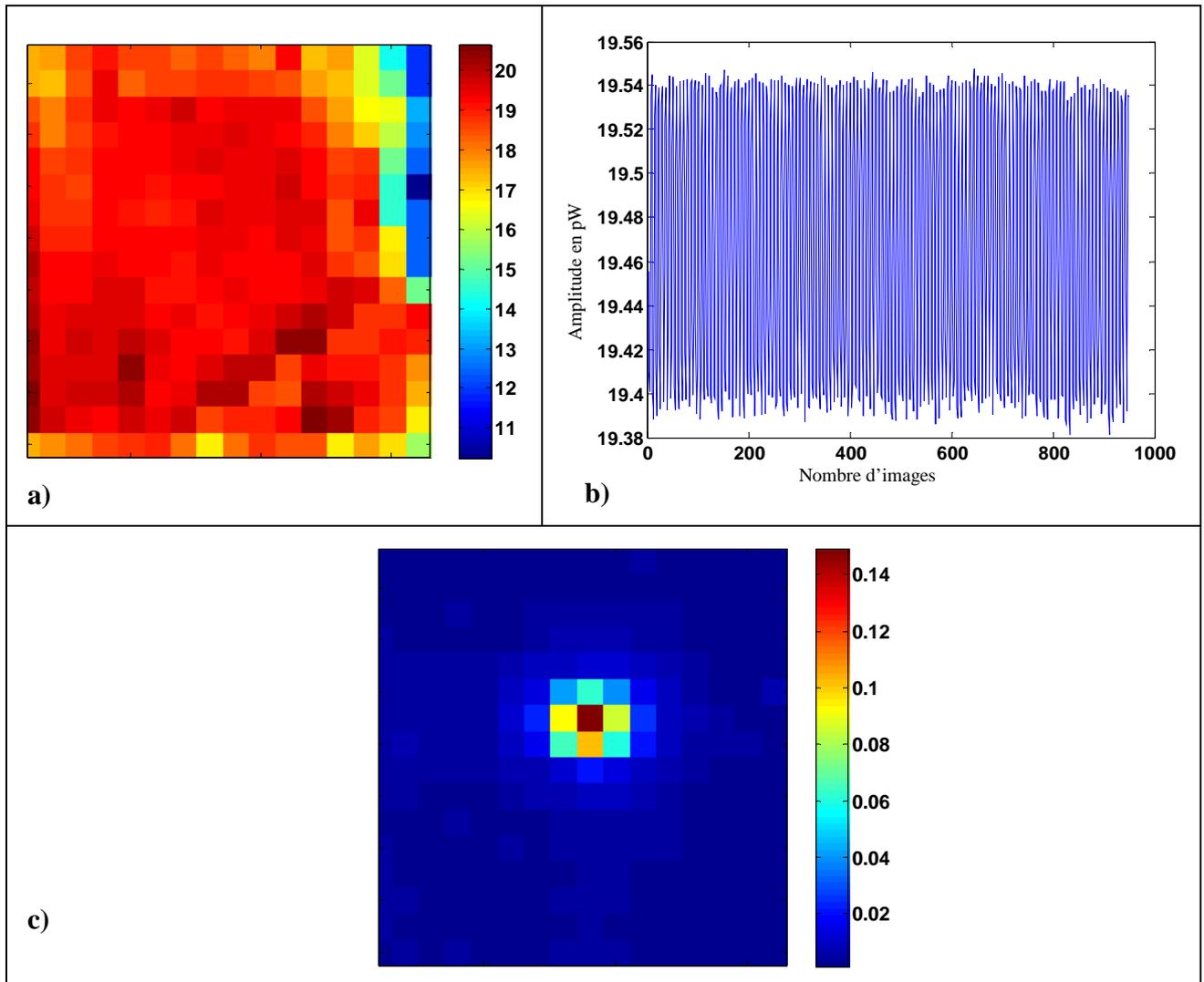


Figure A.7. : Etapes du traitement de données. Figure A.7.a) Image de la puissance incidente reçue par la matrice en laboratoire (en pW) avec la configuration P-ArTéMiS/Apex1, conforme à celle mesurée en laboratoire lors des tests de performance réalisés avant le départ pour la mission Apex de mars 2007. Figure A.7.b) Séquence temporelle du pixel d'intensité maximale, et recherche du maximum et du minimum, calcul de son amplitude, opération répétée pour chaque pixel. Figure A.7.c) images du signal modulé par le hacheur.

Annexe 9 : Traitement des données et choix des paramètres d'acquisition

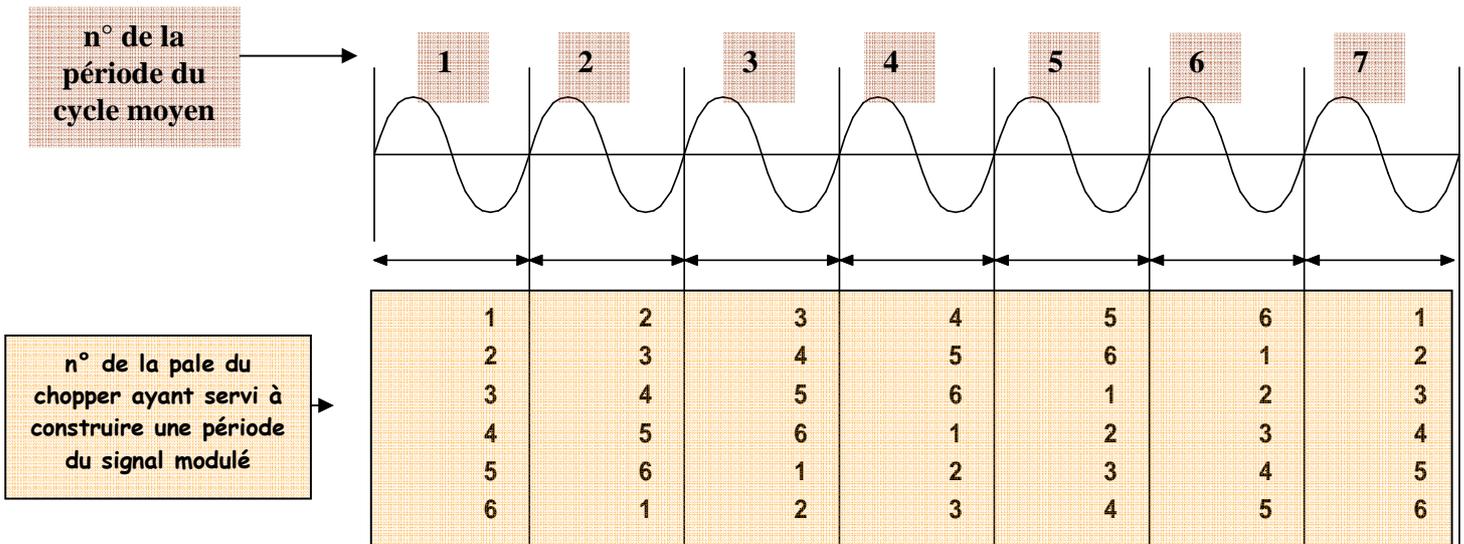
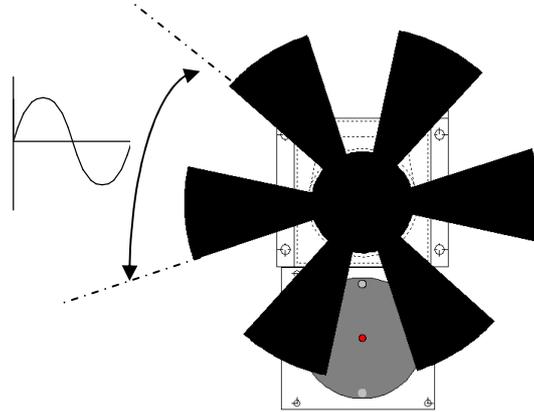
Les paramètres d'acquisition à choisir sont :

- la fréquence du hacheur
- le nombre d'images à acquérir.

Le choix de ces deux paramètres est lié à la méthode du traitement des données. Je choisis de reconstruire la période du signal modulé par les pales du hacheur, à partir d'un regroupement d'un nombre entier de points de la séquence temporelle. Le but est de connaître la période du signal modulé avec davantage de points que le permet la fréquence d'échantillonnage de la caméra 40Hz. Pour déterminer les paramètres d'acquisition, j'ai dû respecter trois conditions :

1^{ère} condition : le nombre d'images (c'est le nombre total de points d'une séquence temporelle) et le nombre de périodes regroupées (ces périodes constituent le cycle moyen) sont choisies afin que chaque période soit construite par chacune des 6 pales du hacheur

En choisissant un nombre entier de périodes, à regrouper pour reconstruire une période du signal modulé, comme étant égal à 7, et en choisissant un nombre d'images égal à un multiple de “ $nb_pales \times nb_entier_{\text{périodes}}$ ”, alors chaque période du signal modulé est construite par chacune des 6 pales du hacheur.



$$\Rightarrow nb_entier_{\text{périodes}} = 7$$

2^{ème} condition : la fréquence du hacheur ne doit pas être un multiple de la fréquence de la caméra.

$$\frac{f_{acquisition}}{f_{chopper}} \neq nb \text{ entier}$$

3^{ème} condition : On cherche à vérifier l'égalité suivante :

$$\frac{\boxed{f_{acquisition}}}{\boxed{f_{Chopper}}} = \frac{\boxed{nb \text{ entier}_{points}}}{\boxed{nb \text{ entier}_{périodes}}} \quad (A.1)$$

 Couple de valeurs connues

 Couple de valeurs recherchées

On connaît la fréquence d'acquisition de la caméra et le nombre entier de périodes à regrouper (déterminés lors de la 1^{ère} condition) :

$$\begin{cases} f_{acquisition} = 40Hz \\ nb_entier_{périodes} = 7 \end{cases}$$

On recherche à l'aide d'un algorithme écrit sous Matlab tous les couples de valeurs vérifiant l'égalité (A.1), le résultat est le suivant :

Fréquence hacheur (Hz)	Nombre entier de points pour reconstruire la période hacheur
4	70
5	56
5,6	50
7	40
8	35
8,75	32
10	28

Tableau A.2 : Couples de valeurs recherchées pour vérifier l'égalité (A.1). Notons que les fréquences 4 Hz, 5 Hz, 8 Hz et 10 Hz sont à rejeter, car ce sont des multiples de 40 Hz (la 2^{ème} condition n'est pas respectée); et que 7 Hz et 8,75 Hz sont moins intéressantes que 5,6 Hz, car moins de points définissent la période reconstituée.

D'où le choix des paramètres d'acquisition :

$$\Rightarrow \begin{cases} nb_entier_{points} = 50 \\ f_{chopper} = 5,6Hz \\ nb_images = n \times 6 \times 50 \end{cases}$$

On choisit $nb_images = 900$ ce qui permet de connaître chaque point du cycle moyen à partir de la moyenne de 18 valeurs.

Simulation sous Matlab de la reconstruction de la période d'un signal sinusoïdal de fréquence 5,6Hz échantillonné à 40Hz

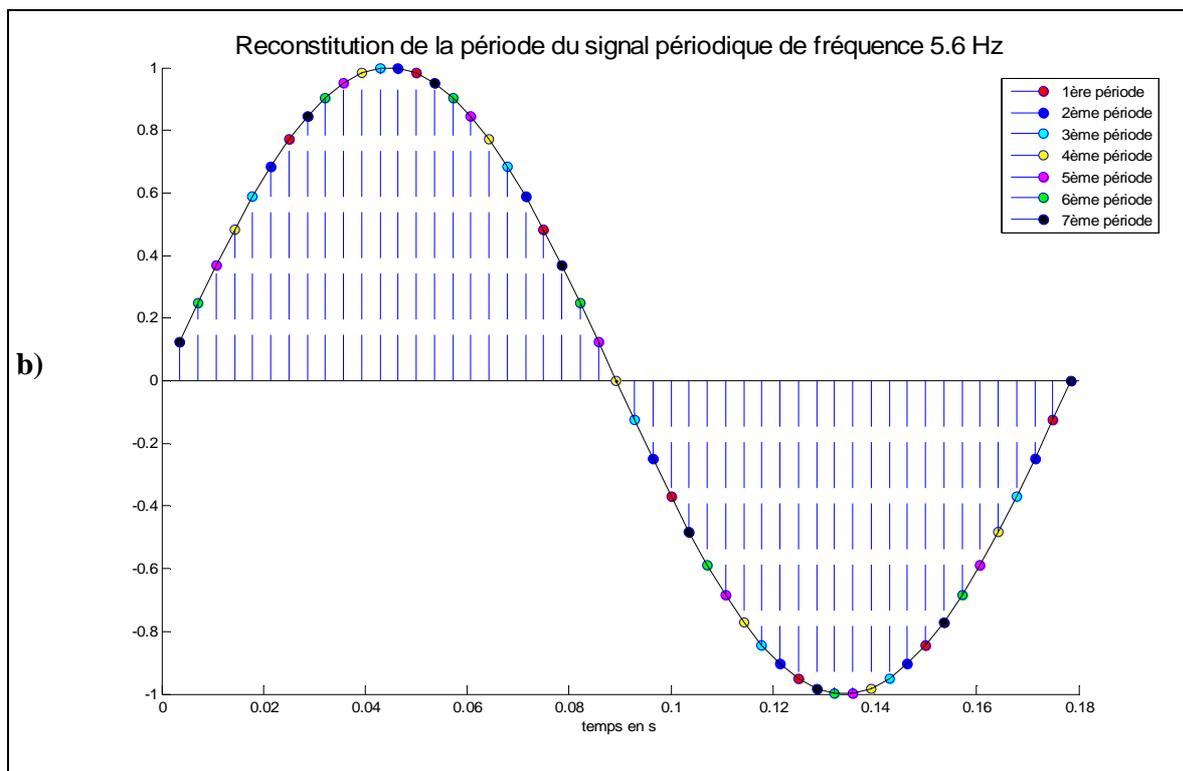
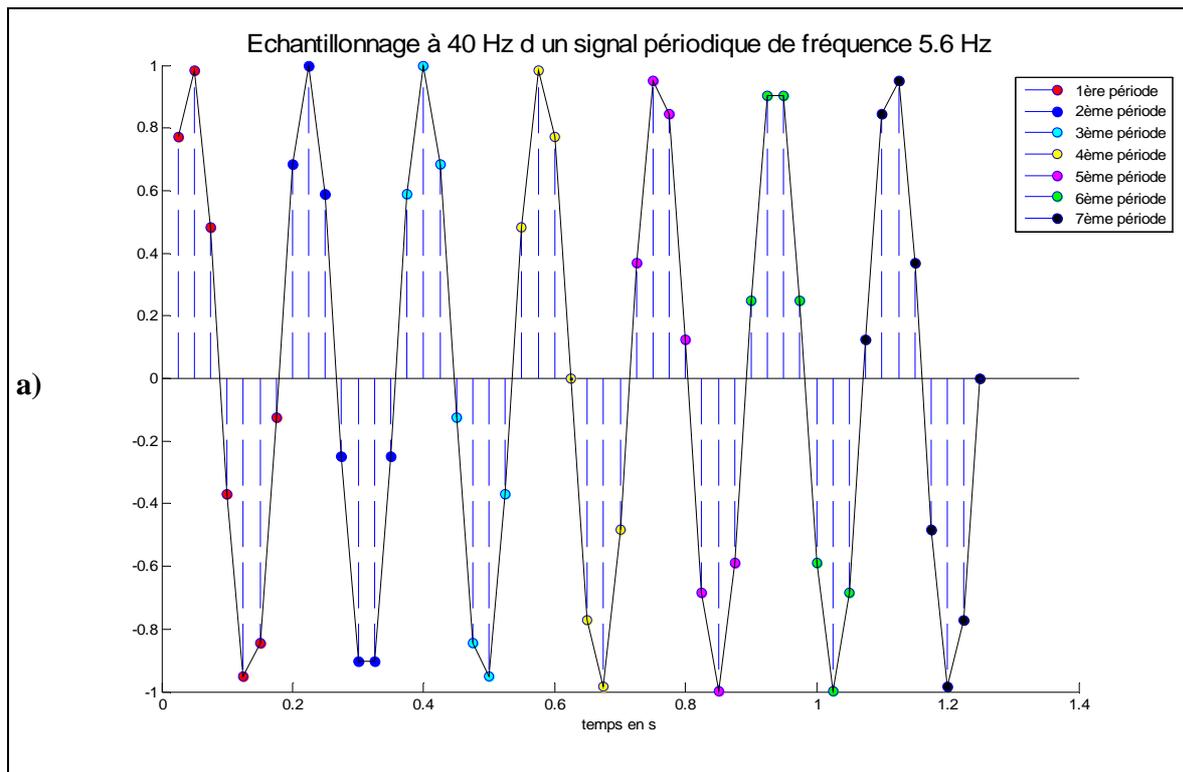


Figure A8 : Schéma de principe de reconstruction d'une période d'un signal de fréquence 5,6Hz :
 a) Signal de fréquence 5,6Hz échantillonné à 40Hz
 b) Reconstruction d'une période à partir de 7 périodes de ce même signal échantillonné à 40Hz.

Annexe 10 : Exemple du traitement de données appliqué sur un fichier d'acquisition

Contenu du programme écrit sous Matlab pour traiter les données

- [Récupération du fichiers FITS contenant les données à traiter](#)
- [Calcul des paramètres pour le traitement des données](#)
- [Calcul de l'amplitude de chaque pixel de la matrice](#)
- [Recherche des coordonnées du pixel ayant l'amplitude maximale](#)
- [Calcul de l'intensité de la tache image](#)
- [Affichage des valeurs caractéristiques en pW](#)
- [Amplitude du signal modulé et puissance incidente reçue par la matrice](#)
- [Création d'une matrice 4D que l'on remplit des séquences temporelles de chaque pixel](#)
- [Image et tracé de la séquence temporelle du pixel d'intensité maximale](#)
- [Profils d'intensité de l'image](#)
- [Superposition des cycles de la séquence temporelle du pixel max](#)
- [Cycle moyen de la séquence temporelle du pixel d'intensité maximale et reconstruction de la période hacheur](#)
- [Calcul du cycle moyen pour tous les pixels](#)
- [Affichage des points ayant servi à calculer la valeur maximale et la valeur minimale du pixel d'intensité maximale](#)
- [Calcul de l'écart-type de l'intensité de la tache image](#)
- [Affichage de l'écart-type du signal de la tache image](#)
- [Image des écart-types des amplitudes de la matrice et image du rapport amplitudes sur écart-types](#)
- [Calcul de la transformée de Fourier du pixel d'intensité maximale](#)
- [Création du fichier FITS de l'image de l'amplitude de la matrice](#)

```
acq='070920_190608' % fichier acquisition psf d'un trou source de diamètre 2 mm
```

Récupération du fichiers FITS contenant les données à traiter

```
directory='D:\Kosma_Data\Acquilt';  
pathname=strcat(directory, '\', acq, '\');  
fichier=strcat(acq, 'pw.fits');  
fc=strcat(pathname, fichier);  
data = fitsread(fc); % on récupère le cube de données provenant du fichier FITS  
taille_cube=size(data);  
nb_images=taille_cube(1,3); % on sort la valeur correspondant au nombre  
d'images contenues dans le fichier FITS
```

Calcul des paramètres pour le traitement des données

```
freq_acq=40;  
freq_chop=5.6;  
R=freq_acq/freq_chop;  
n_periodes_hacheur=1:nb_images;  
ind=find(abs(1-((n_periodes_hacheur*R)./floor(n_periodes_hacheur*R)))<=1E-6);  
n_periodes_hacheur=ind(1,1); % nombre de périodes qui vont servir à  
reconstituer la période hacheur  
n_points_cycle=ind(1,1)*R; % nombre de points pour reconstituer la période  
hacheur  
periodes=fix(nb_images/n_points_cycle);  
periodes_multiple=6*fix(periodes/6);  
n_points_sequence=periodes_multiple*n_points_cycle; % nombre de points utilisés  
n_points_cycle;  
n_cycle=periodes_multiple;  
  
disp( strcat('nombre de périodes qui vont servir à reconstituer la période...  
...hacheur = ', sprintf('%d',n_periodes_hacheur)));  
disp( strcat('nombre de points qui vont servir à reconstituer la période...  
...hacheur = ', sprintf('%d',n_points_cycle)));
```

nombre de périodes qui vont servir à reconstituer la période hacheur =7
nombre de points qui vont servir à reconstituer la période hacheur =50

Calcul de l'amplitude de chaque pixel de la matrice

```
i=0;
j=0;
ima_cube_max=zeros(16,16);
ima_cube_min=zeros(16,16);
ima_cube_amplitude=zeros(16,16);
cycle_somme=zeros(16,16,n_points_cycle);
cycle_moyen=zeros(16,16,n_points_cycle);
ima_pix=zeros(16,16,n_points_cycle,n_cycle);
ima_pix_max=zeros(n_points_cycle,n_cycle); %représentation de séquence
temporelle du pixel max sous forme d'image
ima_pix_max_dis=zeros(n_points_cycle,n_cycle);
dispersion=zeros(16,16);
cycle_moyen_pix=zeros(1,n_points_cycle);
vect=zeros(1,nb_images);
sum=0;

for i=1:16
    for j=1:16
        i; j;
        data(i,j,25:nb_images);
        for nb=1:n_cycle
            cycle_somme(i,j,:)=cycle_somme(i,j,:)+data(i,j,n_points_cycle*(nb-1)+1:n_points_cycle*(nb-1)+n_points_cycle);
            %Pour chaque pixel, on additionne ('superpose') les 18 cycles de
            %50 points (n_points_cycle)
            nb;
        end
        cycle_moyen=cycle_somme/n_cycle; %on fait la moyenne des cycles pour
chaque pixel
        ima_cube_max(i,j)=max(cycle_moyen(i,j,:)); % on sort la valeur max du
cycle moyen
        ima_cube_min(i,j)=min(cycle_moyen(i,j,:)); % on sort la valeur min du
cycle moyen
        amplitude=ima_cube_max(i,j)-ima_cube_min(i,j); % on sort l'amplitude du
cycle moyen, donc du pixel
        ima_cube_amplitude(i,j)=amplitude;
        sum=sum+amplitude; % on somme les amplitudes de chaque pixel
    end
end
```

Recherche des coordonnées du pixel ayant l'amplitude maximale

```
max_amplitude = max(max(ima_cube_amplitude));
[ii,jj]=find(ima_cube_amplitude==max_amplitude);
```

Calcul de l'intensité de la tache image

```
tache_airy=0;
for i=ii-2:ii+2
    for j=jj-2:jj+2
        if ((0 < i) & (i<=16) & (0 < j) & (j<=16))
            tache_airy=tache_airy+ima_cube_amplitude(i,j);
        end
    end
end

MINI=min(ima_cube_amplitude);
MINI=min(MINI);
MAXI=max(ima_cube_amplitude);
MAXI=max(MAXI);
```

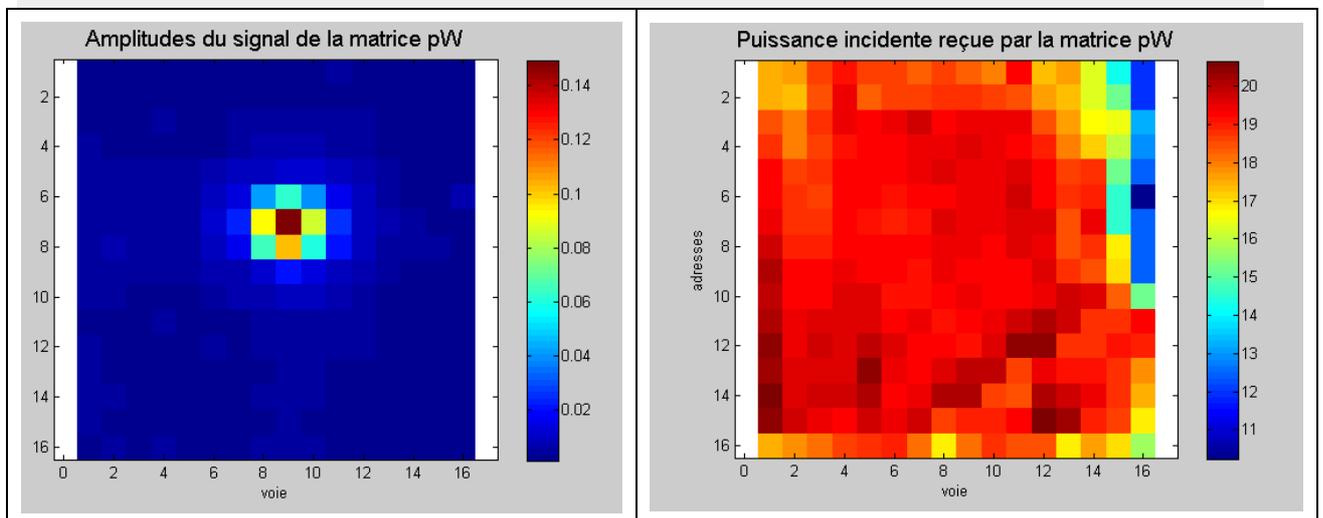
Affichage des valeurs caractéristiques en pW

```
disp( strcat('intensité du pixel minimal           = ',
sprintf('%f',MINI)));
disp( strcat('intensité du pixel maximal         = ',
sprintf('%f',MAXI)));
disp( strcat('intensité de la tâche Airy (25 pixels) = ',
sprintf('%f',tache_airy)));
disp( strcat('flux total reçu par la matrice (256 pixels) = ',
sprintf('%f',sum)));
intensité du pixel minimal           =0.001372
intensité du pixel maximal         =0.149381
intensité de la tâche Airy (25 pixels) =0.934797
flux total reçu par la matrice (256 pixels) =1.832595
```

Amplitude du signal modulé et puissance incidente reçue par la matrice

```
b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Amplitudes du signal de la matrice_ ',...
...acq ),'NumberTitle','off')
ima_cube_amplitude = permute( ima_cube_amplitude, [2 1] );
imagesc(ima_cube_amplitude); colorbar;axis equal
strz=['Amplitudes du signal de la matrice',' pW'];
title(strz,'fonts',14)
xlabel('voie')
ylabel('adresses')
zoom on

b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Puissance incidente reçue par la matrice_ ',...
... acq ),'NumberTitle','off')
ima_cube_min = permute( ima_cube_min, [2 1] );
imagesc(ima_cube_min); colorbar;axis equal
strz=['Puissance incidente reçue par la matrice',' pW'];
title(strz,'fonts',14)
xlabel('voie')
ylabel('adresses')
zoom on
```



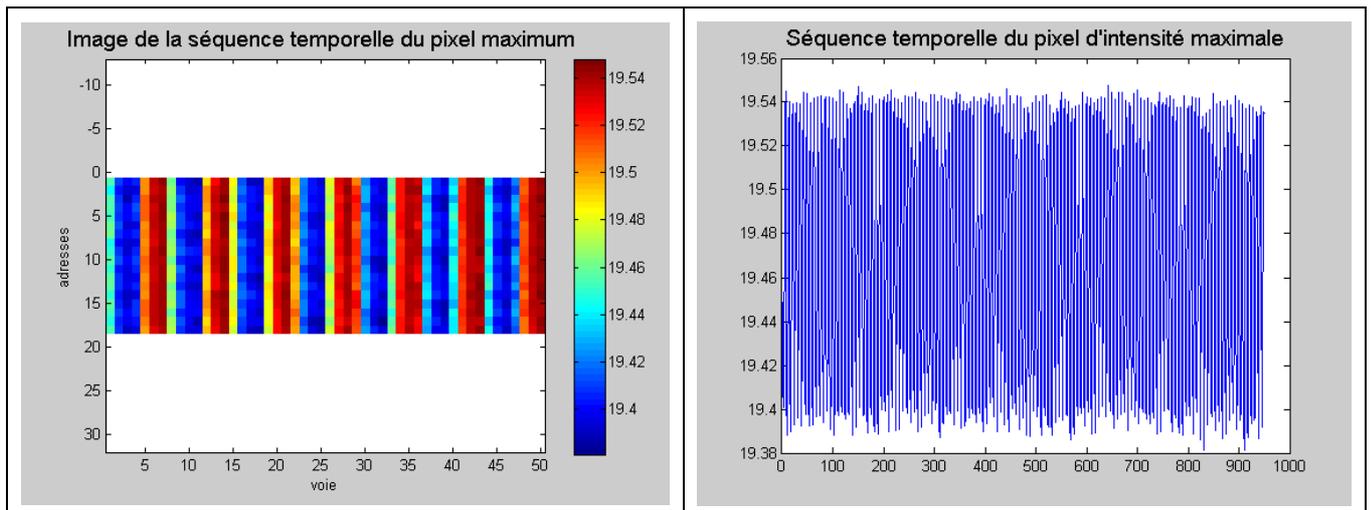
Création d'une matrice 4D que l'on remplit des séquences temporelles de chaque pixel

```
for i=1:16
    for j=1:16
        data(i,j,1:nb_images);
        for nb=1:n_cycle
            ima_pix(i,j,:,nb)=data(i,j,n_points_cycle*(nb-1)...
...+1:n_points_cycle*(nb-1)+n_points_cycle);
        end
    end
end
H=zeros(n_points_cycle,n_cycle); % matrice (50,18)
for i=1:n_points_cycle
    for j=1:n_cycle
        H(i,j)=ima_pix(ii,jj,i,j);
    end
end
ima_pix_max=H;
```

Image et tracé de la séquence temporelle du pixel d'intensité maximale

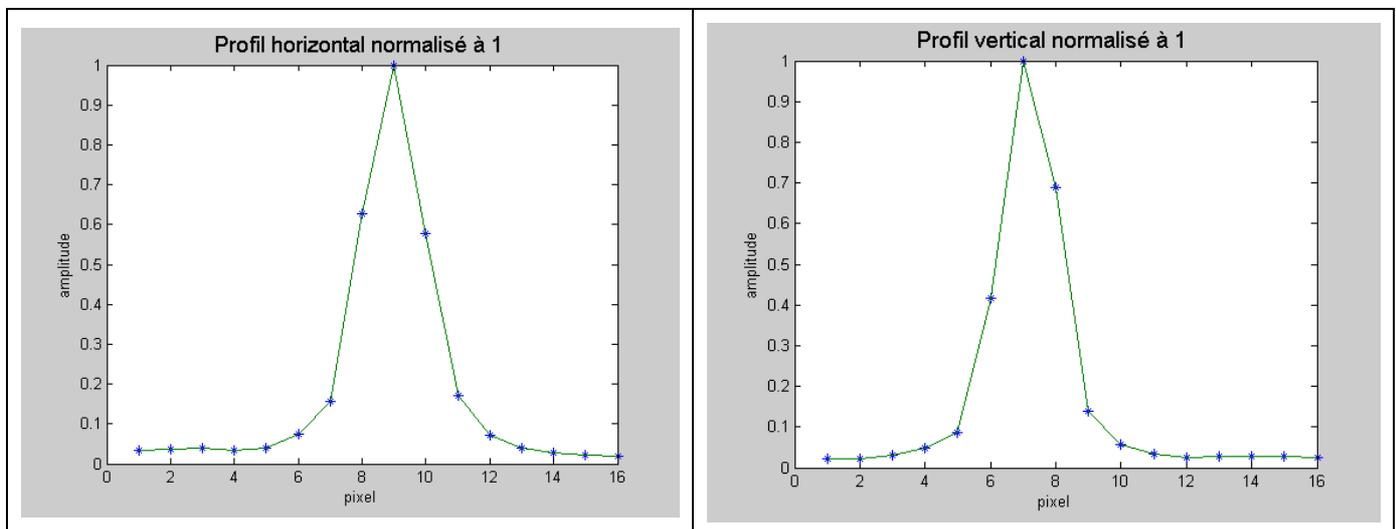
```
b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Image de la séquence temporelle du pixel maximum_ '...
..., acq ), 'NumberTitle', 'off')
ima_pix_max_dis = permute( ima_pix_max, [2 1] );
imagesc(ima_pix_max_dis); colorbar; axis equal
strz=['Image de la séquence temporelle du pixel maximum', ' '];
title(strz, 'fonts', 14)
xlabel('voie')
ylabel('adresses')
zoom on

vect(1:nb_images)=data(ii,jj,1:nb_images);
pixel_maximal=vect(1:nb_images);
b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Séquence temporelle du pixel d'intensité ...
...maximale_ ', acq ), 'NumberTitle', 'off')
title('Séquence temporelle du pixel d'intensité maximale', 'FontSize', 14);
plot(pixel_maximal)
```



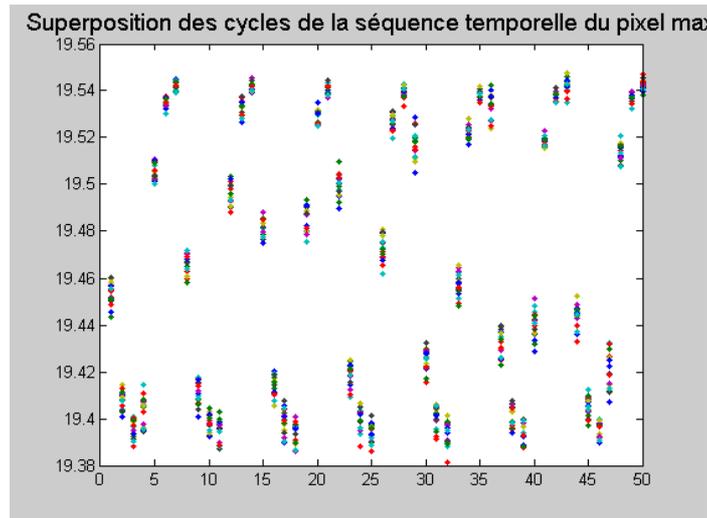
Profils d'intensité de l'image

```
ima_cube_amplitude = permute( ima_cube_amplitude, [2 1] );
pixel(1:16)=1:1:16;
pix_maximal=max(ima_cube_amplitude(:,jj));
a_fig = figure;
set(a_fig, 'Name', strcat('Profil horizontal normalisé à 1 acq_',acq))
plot(pixel(1:16),ima_cube_amplitude(:,jj)./pix_maximal,'*',pixel(1:16),...
...ima_cube_amplitude(:,jj)./pix_maximal);
strz=['Profil horizontal normalisé à 1',' '];
title(strz,'fonts',14)
xlabel('pixel')
ylabel('amplitude')
pix_maximal=max(ima_cube_amplitude(ii,:));
a_fig = figure;
set(a_fig, 'Name', strcat('Profil vertical normalisé à 1 acq_',acq))
plot(pixel(1:16),ima_cube_amplitude(ii,:)./pix_maximal,'*',pixel(1:16),...
...ima_cube_amplitude(ii,:)./pix_maximal);
strz=['Profil vertical normalisé à 1',' '];
title(strz,'fonts',14)
xlabel('pixel')
ylabel('amplitude')
```



Superposition des cycles de la séquence temporelle du pixel max

```
b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Superposition des cycles de la séquence temporelle
du pixel max_', acq ),'NumberTitle','off')
plot(H, '.')
title('Superposition des cycles de la séquence temporelle du pixel
max', 'fonts',14)
```



Cycle moyen de la séquence temporelle du pixel d'intensité maximale et reconstruction de la période hacheur

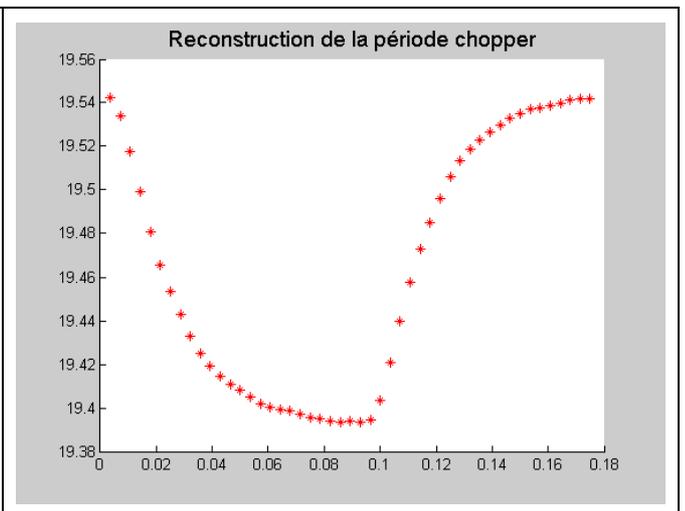
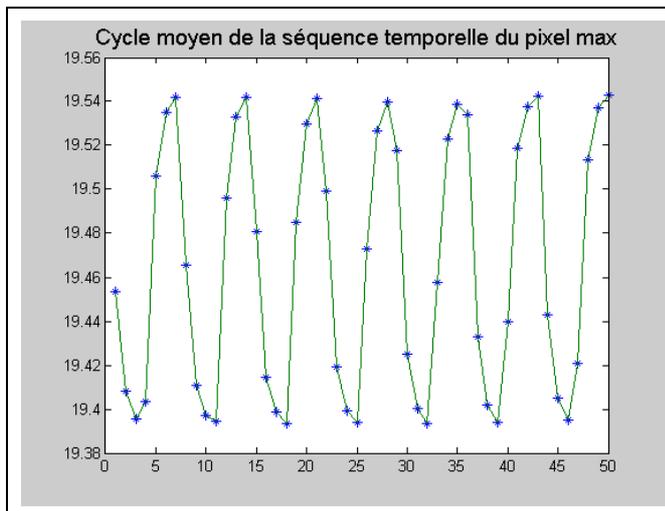
le cycle moyen est composé de 50 points, chacun est obtenu à partir de la moyenne de 18 valeurs

```

cycle_moyen_max = mean(ima_pix_max,2);
figure1 = figure(...
    'Name','Cycle moyen de la séquence temporelle du pixel max',...
    'NumberTitle','off',...
    'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...
    'PaperSize',[20.98 29.68]);
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
box('on');
hold('all');
% Create multiple lines using matrix input to plot
plot1 =
plot(1:n_points_cycle,cycle_moyen_max,'*',1:n_points_cycle,cycle_moyen_max);
set(plot1(1),...
    'LineStyle','none',...
    'Marker','*');
% Create title
title('Cycle moyen de la séquence temporelle du pixel max','FontSize',14);

Fs=40; % fréquence d'échantillonnage de 40 Hz de la caméra
T=1/Fs; % pas d'échantillonnage
t = T:T:50*T;
b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Reconstruction de la période hacheur_ ', acq
), 'NumberTitle', 'off');
title('Reconstruction de la période hacheur','FontSize',14);
hold on % boucle FOR pour reconstruire la période hacheur à partir des 7
périodes
for i=1:n_periodes_hacheur % le nombre de périodes est égale à 7
    a=n_periodes_hacheur*(i-1)+1;
    b=n_periodes_hacheur*(i-1)+n_periodes_hacheur;
    plot(t(1:n_periodes_hacheur)-(i-
1)/(n_periodes_hacheur*Fs),cycle_moyen_max(a:b),'r*');
end

```



Calcul du cycle moyen pour tous les pixels

```

amplitude_matrice=0;
amplitude_bis=0;
posmax=zeros(16,16);
posmin=zeros(16,16);
for i=1:16
    for j=1:16
        cycle_moyen_pix = mean(ima_pix(i,j,1:n_points_cycle,1:n_cycle),4); % on
...calcul le cycle moyen pour chaque pixel
        cycle_moyen_pix=reshape(cycle_moyen_pix,1,n_points_cycle);
        for k=1:n_points_cycle
            if cycle_moyen_pix(1,k)==max(cycle_moyen_pix);
                posmax(i,j)=k; % on recherche la position du maximum pour chaque
...cycle moyen
            end

            if cycle_moyen_pix(1,k)==min(cycle_moyen_pix);
                posmin(i,j)=k; % on recherche la position du minimum pour chaque
...cycle moyen
            end
        end

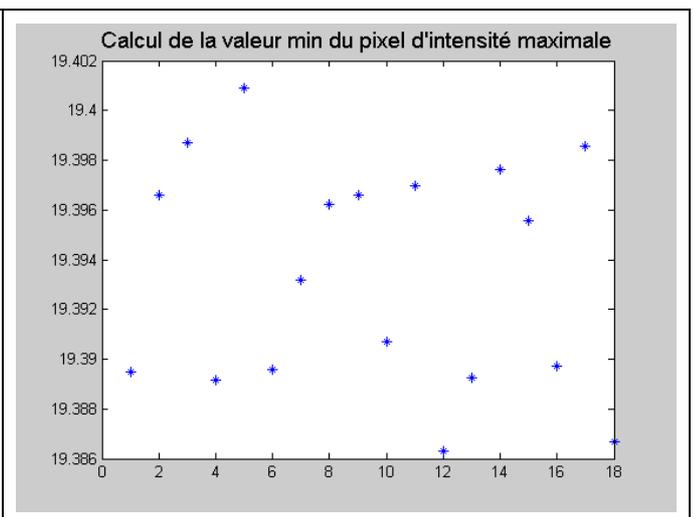
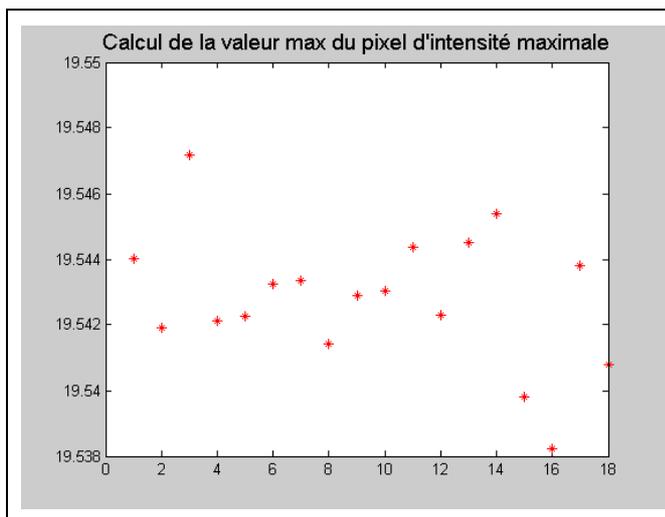
        G=zeros(1,n_cycle);
        H=zeros(1,n_cycle);
        posmax;
        G=ima_pix(i,j,posmax(i,j),1:n_cycle);
        sigma_max=std(G); % on calcul l'écart-type pour chaque maximum de chaque
...cycle moyen
        H=ima_pix(i,j,posmin(i,j),1:n_cycle);
        sigma_min=std(H); % on calcul l'écart-type pour chaque minimum de chaque
...cycle moyen
        amplitude_bis=mean(G)-mean(H);
        amplitude_matrice=amplitude_matrice+amplitude_bis;
        posmax(i,j);
        posmin(i,j);
        dispersion(i,j)=sqrt(sigma_max^2+sigma_min^2);
        % on estime la dispersion sur l'amplitude de chaque pixel
    end
end
G1=zeros(1,n_cycle);
G1(1,:)=ima_pix(ii,jj,posmax(ii,jj),1:n_cycle);

```

Affichage des points ayant servi à calculer la valeur maximale et la valeur minimale du pixel d'intensité maximale

```
figure1 = figure(...
    'Name','Calcul de la valeur max du pixel d'intensité maximale',...
    'NumberTitle','off',...
    'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...
    'PaperSize',[20.98 29.68]);
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
box('on');
hold('all');
% Create plot
plot1 = plot(G1,...
    'Color',[1 0 0],...
    'LineStyle','none',...
    'Marker','*');
% Create title
title('Calcul de la valeur max du pixel d'intensité maximale','FontSize',14);
%posmax(ii,jj)
%posmin(ii,jj)
H1=zeros(1,n_cycle);
H1(1,:)=ima_pix(ii,jj,posmin(ii,jj),1:n_cycle);

figure1 = figure(...
    'Name','Calcul de la valeur min du pixel d'intensité maximale',...
    'NumberTitle','off',...
    'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...
    'PaperSize',[20.98 29.68]);
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
box('on');
hold('all');
% Create plot
plot1 = plot(H1,...
    'LineStyle','none',...
    'Marker','*');
% Create title
title('Calcul de la valeur min du pixel d'intensité maximale','FontSize',14);
```



Calcul de l'écart-type de l'intensité de la tache image

```
%(somme quadratique des écart-types des amplitudes des 25 pixels)
sigma_airy=0;
for i=ii-2:ii+2
    for j=jj-2:jj+2
        if ((0 < i) & (i<=16) & (0 < j) & (j<=16))
            sigma_airy = sigma_airy^2 + dispersion(i,j)^2;
        end
    end
end
sigma_airy = sqrt(sigma_airy);
```

Affichage de l'écart-type du signal de la tache image

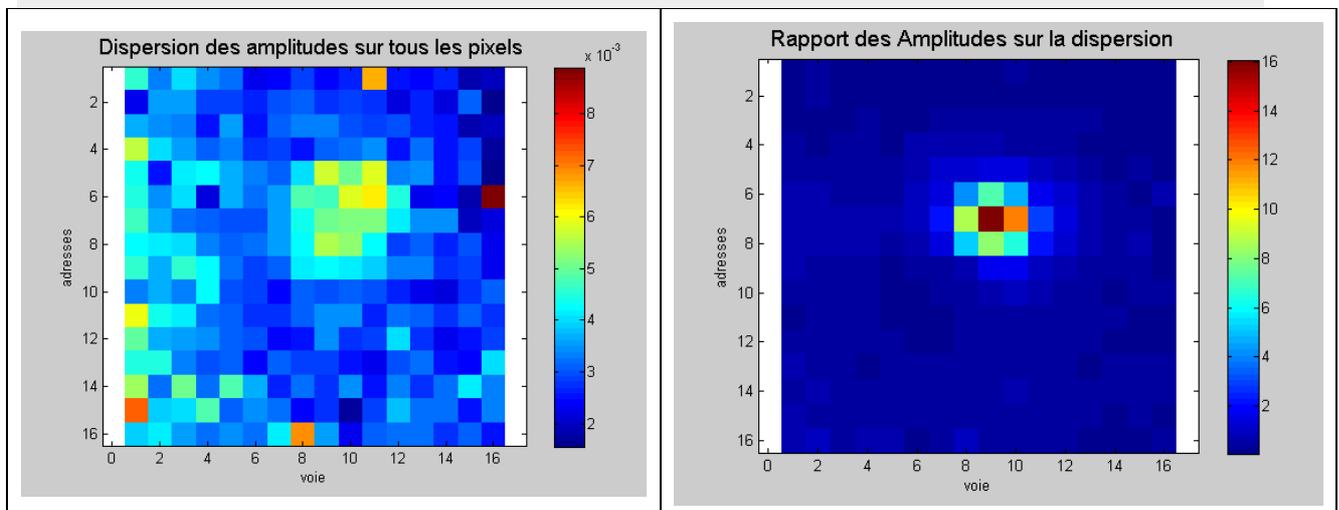
```
disp( strcat('écart-type du signal de la tache image', ' ', sigma_airy));
```

écart-type du signal de la tache image = 0.003882

Image des écart-types des amplitudes de la matrice et image du rapport amplitudes sur écart-types

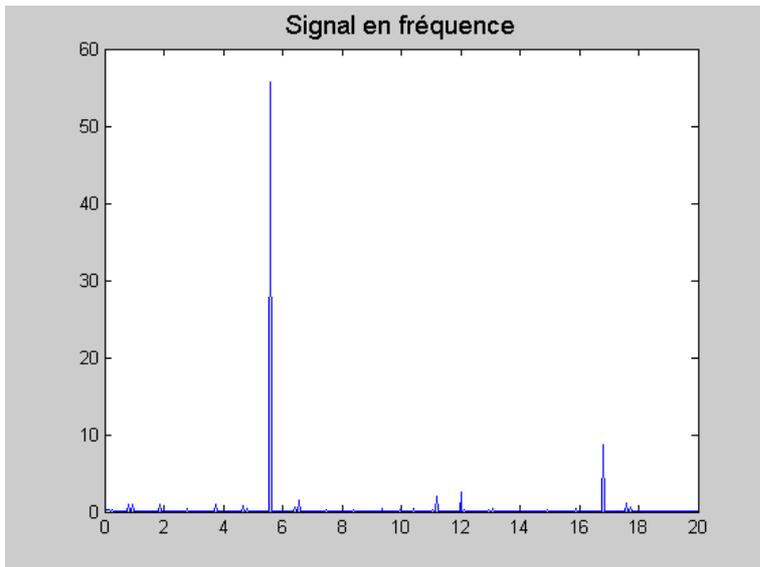
```
b_fig = figure;
set(b_fig, 'Name', strcat('Dispersion des amplitudes sur tous les pixels_ ',
acq ), 'NumberTitle', 'off')
%set(gcf, 'Position', vfig2);
dispersion = permute( dispersion, [2 1] );
imagesc(dispersion); colorbar; axis equal
strz=['Dispersion des amplitudes sur tous les pixels', ' '];
title(strz, 'fonts', 14)
xlabel('voie')
ylabel('adresses')
zoom on

ima_rapport_SB=zeros(16,16);
ima_rapport_SB = ima_cube_amplitude ./ (3.*dispersion);
a_fig = figure;
set(a_fig, 'Name', 'Rapport des Amplitudes sur la dispersion')
ima_rapport_SB = permute( ima_rapport_SB, [2 1] );
%clims=[0.001 0.008]
imagesc(ima_rapport_SB); colorbar; axis equal
strz=['Rapport des Amplitudes sur la dispersion ', ' '];
title(strz, 'fonts', 14)
xlabel('voie')
ylabel('adresses')
zoom on
```



Calcul de la transformée de Fourier du pixel d'intensité maximale

```
vecteur = evalin('base', 'seq_exp');  
Fs=40; % Fréquence d'échantillonnage  
FFT_size=900; % nombre de points de la séquence temporelle  
X=fft(pixel_maximal ,FFT_size);  
f=(0:FFT_size/2)/(FFT_size/2)*Fs/2; % abscisses du spectre entre 0 et Fs/2  
b_fig = figure;  
set(b_fig, 'Name', 'Signal en fréquence de la séquence temporelle du pixel...  
...max')  
plot(f,abs(X(1:FFT_size/2+1)));  
title('Signal en fréquence','fonts',14)
```



Création du fichier FITS de l'image de l'amplitude de la matrice

```
header=makeheader(ima_cube_amplitude); header; pathname='C:\fichiers_fits\  
Nom_fichier_fits=strcat(pathname,acq,'.fits'); Nom_fichier_fits;  
ok=fitswrite(header,ima_cube_amplitude,Nom_fichier_fits);
```