Etude et développement d'un déphaseur achromatique pour l'interférométrie en frange noire

Frank Brachet

▶ **To cite this version:**

Frank Brachet. Etude et développement d'un déphaseur achromatique pour l'interférométrie en frange noire. Astrophysique [astro-ph]. Université Paris Sud - Paris XI, 2005. Français. NNT : . tel-00011990

HAL Id: tel-00011990
https://theses.hal.science/tel-00011990

Submitted on 20 Mar 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Institut d'Astrophysique Spatiale

École Doctorale d'Astronomie et d'Astrophysique d'Île de France

Étude et développement d'un déphaseur achromatique pour l'interférométrie en frange noire

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 14 décembre 2005

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Paris-Sud (XI)

(Spécialité Astrophysique et Techniques Spatiales)

par

Frank Brachet

Composition du jury

Président :	Pr.	Alain Abergel	IAS
Rapporteurs :	Pr.	François Reynaud	IRCOM
	Dr.	Vincent Coudé du Foresto	LESIA
Examinateurs :	Ing.	Jean-Michel Le Duigou	CNES
	Ing.	Marc Barillot	Alcatel Alenia Space
Directeur de thèse :	Dr.	Alain Léger	IAS

Faisons (re-)connaissance

Loin de toute prétention, il me semblait naturel que les lecteurs des quelques pages qui suivent en sachent un peu plus sur mon parcours. L'astronomie y a une place importante, tout comme un certain nombre de rencontres, bienvenues au moment des choix d'orientation de mon projet professionnel.

L'ASTRONOMIE s'est immiscée dans ma vie (un peu par curiosité, il est vrai) en 1986, à l'âge de neuf ans. Première découverte du ciel, suivie de deux années de flottement, ... Mais le virus est bien installé et l'astronomie amateur reprend très vite sa place (merci Maman), pour ne plus la quitter. La photographie vient s'y ajouter à l'âge de quinze ans, accompagnée, tout naturellement, des premières tentatives en astrophotographie. Malgré un goût prononcé pour les sciences, ce n'est qu'en 1994 que j'ai pris la décision que l'astronomie serait au cœur de mon projet professionnel. Ce choix fait suite à une première rencontre marquante, lors d'une visite à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP). Alain Vin, alors ingénieur opticien sur le site, me montre à quel point ce métier a de l'importance dans le domaine de l'astrophysique. J'étais alors loin de penser qu'à la même époque deux chercheurs suisses accumulaient, au même endroit, les mesures qui permettraient une découverte primordiale ...

L'année suivante, c'est par l'entremise de cette même personne que j'appréhende, pour la première fois, le monde de l'astronomie professionnelle, lors d'une nuit d'été passée à naviguer entre les coupoles de l'OHP. D'un point de vue scolaire, les TIPE, en classes préparatoires, sont ensuite l'occasion de s'intéresser à l'interférométrie, mais les exoplanètes et Darwin sont encore loin.

La deuxième rencontre importante de ce parcours se nomme Olga Lado-Bordowsky, professeur d'optique et d'instrumentation à l'ENSSAT. Présente lors de mon entretien d'entrée dans cette école, elle m'a suivi tout au long de mes trois années de formation d'ingénieur, et même au-delà ... Elle sera partie prenante d'un retour à l'OHP en 2001, pour, cette fois-ci dans le cadre d'un projet d'initiative personnelle, étudier pendant une semaine l'instrumentation optronique du site. À l'issue de mon stage de fin d'études au CNES, premiers pas dans la vie active, je suis diplômé ingénieur en optronique. Souhaitant compléter cette formation par des connaissances en astrophysique instrumentale, je poursuis en DEA à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP).

C'est là que se produira, en 2002, une troisième rencontre, celle d'Alain Léger, qui deviendra mon directeur de thèse pendant ces trois dernières années. Les exoplanètes sont à la mode, mais Darwin est, de loin, le projet le plus ambitieux qui y soit associé, par les technologies auxquelles il fait appel. C'est le début d'un projet personnel de trois ans, où les "mésaventures expérimentales" (pléonasme ?) du banc SYNAPSE s'estompent heureusement assez vite, lorsque les premières franges (noires, nécessairement !) font leur apparition.

Bonne lecture

Frank Brachet

Remerciements

Mes remerciements les plus sincères à Alain Léger, pour avoir assuré la direction de ma thèse et pour m'avoir donné la chance de participer, à mon échelle, à cette formidable aventure que peut représenter la mission Darwin. En me donnant accès à plusieurs colloques internationaux durant cette thèse, il m'a également permis de faire mes premières armes lors de présentations orales toujours stimulantes et m'a initié aux différents aspects de la recherche.

Merci à chacun des membres de mon jury de thèse, pour s'être rendu disponible en une période pourtant chargée. Une pensée toute particulière pour François Reynaud et Vincent Coudé du Foresto, qui ont bien voulu "rapporter" cette thèse, dont les résultats expérimentaux ont connu quelques rebondissements.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres de l'équipe Darwin de l'IAS, au premier rang desquels Marc Ollivier, qui a bien voulu "sacrifier son poisson rouge" (selon ses dires) pour corriger ce manuscrit – je vous laisse deviner en quelle couleur – et l'agrémenter de ses remarques implacables, mais toujours constructives. Sa bonne humeur permanente, nos avis partagés et ses blagues, sans cesse renouvelées, resteront un excellent souvenir.

Merci ensuite à Alain Labèque, pour avoir mené ce projet jusqu'à son but et avoir permis, par sa connaissance des asservissements, d'obtenir les résultats tant attendus.

Merci à Bruno Chazelas pour ses conseils avisés et pour m'avoir notamment aidé à "aligner les petites croix vertes" et "à coincer la bulle" durant quelques semaines d'alignements à la station. Bon courage pour la suite, qu'elle soit pleine d'interférences !

L'équipe Darwin ne serait enfin pas complète sans Thierry Lépine, même s'il est désormais un peu loin, et Claude Valette, qui s'est vaillamment occupé de la capricieuse caméra CIRCUS et m'a très gentiment déchargé de sa maintenance cryogénique.

Un énorme merci à Véronique Hervier et Claude Lizambert, du service électronique de l'IAS, pour leur patience durant les longues heures de mise au point de l'alimentation du corps noir. Le relais, si j'ose dire, est bien passé à Joël Charlet, à qui je dois, entre autres, la réalisation du boîtier d'asservissement analogique et quelques réparations imprévues. Merci pour tout.

Merci encore à Fernand Sarriaud, Denis Barbet et Bruno Crane, cette fois-ci de l'atelier de mécanique de l'IAS, pour avoir accepté de réaliser, corriger, voire re-corriger les dizaines de pièces sorties de mon imagination et m'avoir fait découvrir des aspects inconnus de la mécanique. Sans eux, SYNAPSE aurait eu bien du mal à produire la moindre frange … Je n'oublierai pas, bien sûr, Jean-Pierre Moalic, du Bureau d'Études, sans qui la mécanique principale de l'interféromètre n'aurait pas vu le jour.

Une procédure de réglage optique se doit d'être simple et efficace. Difficile de dire qu'elle l'est aujourd'hui (n'est-ce pas Bruno !), mais je ne saurais imaginer ce qu'elle aurait pu être sans l'idée de Guy Artzner d'utiliser un pentaprisme comme équerre optique. Qu'il en soit ici remercié !

Merci à Sylvain Pau, de l'observatoire de Meudon, pour son exceptionnelle disponibilité (à tout point de vue !) pour remettre à niveau la caméra CIRCUS et ses trésors d'ingéniosité pour la doter de temps d'intégration acceptables et d'un obturateur digne de ce nom (merci *Ebay* !).

SYNAPSE doit beaucoup à tous les stagiaires qui se sont succédés pour le mettre au point, ainsi que la caméra CIRCUS : Fannie Lestriez, Bruno Pellet, David Charalampous, Florent Reix, Mathilde Marcone, pour ne citer qu'eux. Leurs interventions sur des points particuliers du banc et leur aide précieuse ont été bien salutaires pendant l'élaboration des systèmes de contrôle. Merci à toutes et tous !

Ils m'ont accueilli, nous nous sommes souvent croisés, nous avons discuté, plus ou moins sérieusement, mais toujours dans la bonne humeur. Leur aide n'a jamais fait défaut durant ces quelques années,

en cas d'inondation (qui plus est, si elle vient du plafond !) comme de canicule. Je veux ici remercier l'ensemble du personnel de la station d'étalonnage de l'IAS, avec une mention spéciale pour Philippe Duret. Merci pour son soutien durant les heures de mesure passées à la station, son intérêt pour Darwin et les franges noires et sa maîtrise (?) de la climatisation.

Une pensée pour tout le personnel administratif de l'IAS, qui m'a facilité les commandes de matériel et retours de déplacements, et m'a toujours accueilli chaleureusement. Un grand merci également à Annie Cusimano, pour son aide lors du bilan financier de cette thèse.

Un salut amical à tous les thésards, post-docs, et autres buveurs de café croisés durant ces années. Là encore, mention spéciale aux locataires successifs de la pièce 211 bis, Alexandre (bien sûr), Bruno (encore lui !), Antonio, Nestor, l'imprévisible Predrag, sans oublier la machine à café, dont je n'ai pourtant jamais bu la moindre goutte !

D'une façon générale, que toutes les personnes qui ont croisé mon chemin durant ces années trouvent ici mes remerciements les plus sincères.

D'un point de vue plus personnel, je voudrais saluer ici Olga Lado-Bordowsky et Alain Vin, véritables fils conducteurs de mon projet professionnel et je n'aurais, enfin, pas assez de mercis pour toutes celles et tous ceux qui m'ont entouré et soutenu durant toutes ces années, bien au-delà des trois dernières et quelle que soit la distance : Mum, mes grands-parents, Caroline ma sœur et mes deux nièces, Philippe mon oncle ... et, bien évidemment, Laëtitia, qui a eu la patience de m'épauler, notamment durant les nombreux week-ends où ce manuscrit a pris forme.

Pour finir, une "note" de reconnaissance pour Andrea, Dolorès, Dido, Lisa, Lene, Emiliana, Chris, Tim, Tom, Tam (euh, non !) et bien d'autres encore, qui m'ont accompagné musicalement pendant les heures (journées ?) de mise au point des programmes LabVIEW et de mesures passées religieusement à la station d'étalonnage.

Mentions spéciales

Les travaux réalisés durant cette thèse n'auraient pas vu le jour sans le co-financement de ma bourse de thèse par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et *Alcatel Alenia Space* et les participations de l'École Doctorale d'Astronomie et d'Astrophysique d'Île de France, du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Paris-Sud.

À M. et L.

Table des matières

Faisons (re-)connaissance **i**

Introduction **xv**

Table des figures **1**

Liste des tableaux **5**

1 À la recherche de la vie dans l'Univers **7**

1.1 De l'astronomie à l'exobiologie 7

1.1.1 Pluralisme ... vous avez dit pluralisme ? 8

Des atomes innombrables, des univers infinis 8

Le calme avant la tempête 9

De la métaphysique à l'astrophysique 10

1.1.2 Quelques précisions 11

Une discipline, ou des disciplines 11

Et la vie, dans tout ça ? 11

Quels ingrédients pour quelle recherche ? 12

1.2 La quête de la vie extraterrestre 14

1.2.1 Approches globales 14

1.2.2 Une approche pas-à-pas 15

1.3 La recherche de planètes extrasolaires 17

1.3.1 Vers une caractérisation statistique : les méthodes de détection indirecte 17

1.3.2 La liste s'allonge et se diversifie 19

1.3.3 Instrumentation du proche avenir : Terres en vue ! 20

Depuis le sol 20

Depuis l'espace 21

2 Vers un interféromètre spatial : la mission Darwin **23**
2.1 Enjeux et motivations . . . 23
2.2 Contraintes observationnelles . . . 24
2.2.1 Des objets si lointains . . . et si proches ! . . . 24
2.2.2 Pour du contraste, c'est du contraste ! . . . 25
2.2.3 Autres contraintes et conséquences . . . 25
2.3 Choix de la bande spectrale d'observation . . . 27
2.4 Concepts instrumentaux . . . 29
2.5 La mission Darwin . . . 31
2.5.1 Un interféromètre spatial . . . un peu spécial . . . 31
2.5.2 Différentes configurations . . . 33
Notion de fuites stellaires . . . 33
Croix d'Angel et dérivés . . . 35
Évolution des configurations . . . 35
Quelques mots sur TPF-I . . . 39
2.5.3 Aspects scientifiques . . . 39
Capacités spectroscopiques . . . 39
Mode imagerie . . . 40
2.5.4 Aspects techniques . . . 41
Principe du vol en formation . . . 41
Système de recombinaison . . . 42
2.5.5 Développements technologiques nécessaires . . . 44
GENIE, l'interféromètre terrestre . . . 45
SMART-3, un démonstrateur technologique . . . 45
FINCH, le simulateur de Darwin . . . 45
Installation d'Interférométrie Cryogénique . . . 45
Expériences interférométriques en laboratoire . . . 46
Métrologie optique . . . 46
Déphaseurs achromatiques, le projet NULLTIMATE . . . 47
Suiveur de franges . . . 47
Lignes à retard optiques . . . 48
Matrices de détecteurs linéaires en infrarouge thermique . . . 48
Fibres optiques monomodes . . . 48
Optique intégrée . . . 48
Technologies avancées de couplage avec des fibres optiques . . . 49

3 Contraintes optiques et performances **51**
3.1 Rappels d'interférométrie . . . 51
3.2 Contraintes en lumière monochromatique . . . 53
3.2.1 Contrainte sur l'amplitude des ondes à recombiner . . . 53
3.2.2 Contrainte sur la phase des ondes à recombiner . . . 54
3.3 Contraintes en lumière polychromatique . . . 54
3.4 Bilan de performances théorique . . . 56
3.4.1 Performances en termes d'égalité d'intensité . . . 56
3.4.2 Performances en termes de différence de marche . . . 56
3.4.3 Performances en termes de qualité de front d'onde . . . 57
3.4.4 Bilan des pronostics . . . 58

4 Les déphaseurs achromatiques **59**
4.1 De la nécessité de l'achromatisme . . . 59
4.2 Les différentes méthodes de déphasage achromatique . . . 60
4.2.1 Lames dispersives . . . 60
4.2.2 Passage par un foyer optique . . . 61
4.2.3 Retournement du champ électrique . . . 63
4.2.4 Réseaux sub-lambda . . . 64
4.2.5 Rhomboèdres de Fresnel . . . 65
4.2.6 Rhomboèdres composites . . . 65
4.2.7 Autres méthodes . . . 67
Optique intégrée . . . 67
Traitements multicouches . . . 67
Coronographie à 4 quadrants . . . 67
4.3 Étude détaillée de la méthode des lames dispersives . . . 68
4.3.1 Plusieurs solutions possibles . . . 68
4.3.2 La solution des prismes coulissants . . . 69
Principe et mise en équation . . . 69
Dimensionnement . . . 70
4.3.3 Choix du matériau . . . 72
Les différents critères de choix . . . 72
Capacité d'achromatisme et choix du matériau . . . 73
4.3.4 Méthodes de calcul du point de fonctionnement optimum . . . 73

Méthode multi-longueurs d'onde 73
Approximation des variations de l'indice du matériau 74
Minimisation de l'écart quadratique moyen du déphasage à π 75
Modélisation du déphasage lié aux lames dispersives 76
Comparaison des différentes méthodes 77
4.3.5 Influence du parallélisme des prismes 78
4.3.6 Influence de la température 79
4.3.7 Décalage des faisceaux et dispersion 81
4.4 Recherche pratique du point de fonctionnement 82
4.4.1 Simulation de cartographies 82
4.4.2 Balayages en différence de marche 84
4.4.3 Minimisation des fuites stellaires 85

5 Le banc d'interférométrie achromatique SYNAPSE 89
5.1 Du monochromatique au polychromatique 90
5.2 État de l'art 90
5.3 Expérience polychromatique en laboratoire 93
5.3.1 Généralités 93
Objectifs 93
Chaîne de mesure 94
Environnement : la station d'étalonnage 95
Longueurs d'onde de travail 95
5.3.2 La source infrarouge 95
Un "corps noir" à 2000 K 95
Alimentation, asservissement et refroidissement du corps noir 97
5.3.3 Mise en forme des faisceaux : de l'intérêt des fibres optiques 98
Rappels sur les fibres optiques 98
Pourquoi utiliser une fibre en amont ? 100
Pourquoi utiliser une fibre en aval ? 100
Caractéristiques des fibres utilisées 100
Injection et extraction des fibres 101
5.3.4 Séparation et recombinaison des faisceaux 102
De l'intérêt de la symétrie 102
Principe des séparatrice et recombinatrice de type Serabyn 104
5.3.5 Éléments optiques 106
Quelques difficultés liées à l'interférométrie à haut contraste 106

Principe des séparatrices prismatiques 106
Séparatrice et recombinatrice Serabyn avec lames prismatiques 107
Étude du traitement 50 / 50 et contraintes associées 109
Lignes à retard 112
Déphaseur achromatique 112
Filtrage spectral 114
5.3.6 Métrologie laser 114
Description du système 115
Données métrologiques et asservissement 117
5.3.7 Système anti-vibratoire 117
Principe 117
Validation du système 118
5.3.8 Détection monopixel 119
5.3.9 Détection matricielle : la caméra CIRCUS 128 120
Le cryostat de CIRCUS et ses servitudes 121
La cible AMBER 128 122
Électronique de commande de CIRCUS 123
Adaptation de CIRCUS 124
5.3.10 Enceinte thermalisée 126
5.4 Rendement et bilan photométrique de l'interféromètre 127
5.4.1 Transmission théorique de l'interféromètre 127
5.4.2 Bilan photométrique théorique 130
5.5 Interfaçage électronique du banc SYNAPSE 131
5.5.1 Exposé du problème et objectifs généraux 131
5.5.2 Détails et contraintes liés aux différentes fonctions 131
Déplacement "grossier" du prisme coulissant et de la ligne à retard 132
Déplacement "fin" du prisme coulissant et de la ligne à retard 132
Acquisition du signal du détecteur monopixel 133
Gestion de la détection synchrone 133
5.5.3 Asservissement en différence de marche 133
Acquisition et gestion des données métrologiques 134
Traitement des données métrologiques 134
Génération de la commande de correction 135
Fréquence d'asservissement 135
5.5.4 Contraintes globales et architecture choisie 136
Bilan des contraintes 136
Architecture choisie pour l'électronique de contrôle 136

La philosophie et les contraintes du "temps réel" . . . 138
Architecture des programmes LabVIEW . . . 139
Les différentes étapes de mise au point : *it's a long way* . . . 141

6 De la théorie à la pratique : mesures et résultats 147
6.1 Mise en œuvre de SYNAPSE . . . 147
6.1.1 Implantation de la chaîne de mesure . . . 147
6.1.2 Procédure de réglage . . . 148
6.1.3 Bilan photométrique réel . . . 151
Étalonnage du détecteur . . . 151
Mesures . . . 153
6.1.4 Profil du faisceau . . . 154
6.2 Mesures du taux de réjection . . . 156
6.2.1 Protocole de mesure . . . 156
Mise en route de SYNAPSE . . . 156
Localisation du point de fonctionnement . . . 157
6.2.2 Accord théorie / pratique . . . 158
6.2.3 Mesures sans filtrage modal . . . 161
6.2.4 Stabilité de la frange noire . . . 161
Mesures temporelles . . . 162
Tentatives d'explications . . . 162
6.3 Performances de l'asservissement en différence de marche . . . 167
6.4 Améliorations du système . . . 168
6.5 Perspectives . . . 170

Conclusion 171

Annexes 173

A Procédure de réglages du banc SYNAPSE 175

B Mise en équation du déphaseur achromatique à prismes 181

C Liste des acronymes 187

D Liste des principales notations **191**

E Liste des publications et communications **195**

F Photographies de SYNAPSE **197**

G Bilan de la conduite du projet de recherche **201**

G.1 Contexte et objectifs du projet de recherche . . . 201

G.2 Conduite et gestion du projet de recherche . . . 203

G.2.1 Ressources humaines . . . 203

G.2.2 Ressources financières . . . 203

G.2.3 Ressources matérielles au laboratoire . . . 204

G.3 Déroulement du projet de recherche . . . 204

G.3.1 Quelques étapes . . . 204

G.3.2 Quelques difficultés 205

G.4 Bilan du projet de recherche . . . 206

G.4.1 Bilan financier . . . 206

Équipements et fonctionnement . . . 206

Coûts salariaux . . . 208

G.4.2 Bilan personnel . . . 209

Compétences développées . . . 209

On repart pour trois ans ? . . . 210

Bibliographies **213**

Bibliographie : "À la recherche de la vie dans l'Univers" **214**

Bibliographie : "Vers un interféromètre spatial : la mission Darwin" **216**

Bibliographie : "Les déphaseurs achromatiques" **219**

Bibliographie : "Le banc d'interférométrie achromatique SYNAPSE" **221**

Bibliographie : "De la théorie à la pratique : mesures et résultats" **223**

Introduction

La détection, il y a maintenant dix ans, de la première planète extrasolaire autour d'une étoile analogue à notre Soleil a ouvert la voie à une nouvelle discipline, l'exoplanétologie. Cette découverte, confirmée par un fourmillement de nouvelles planètes depuis ce jour, a également relancé une quête beaucoup moins récente, celle de la vie dans l'Univers. D'ici quelques années, l'observation directe d'une exoplanète tellurique devrait être possible, suivie par le premier spectre de son éventuelle atmosphère. Dès lors, les premiers éléments de réponse à l'"antique" question de la solitude de l'Homme dans l'Univers pourraient bien se profiler à l'horizon ...

Pour y parvenir, il faudra avoir surmonté un véritable défi, car, vu de la Terre, l'écart angulaire séparant une exoplanète de son étoile est très faible (même si cette étoile est une des plus proches de nous), et la différence de luminosité entre elles, pour ainsi dire, astronomique ! L'enjeu n'est, en effet, ni plus ni moins que d'"éteindre", par une technique particulière, la lumière provenant d'une étoile autour de laquelle la ou les exoplanètes, tant convoitées, sont en orbite, pour ne laisser entrevoir que la lumière de celle(s)-ci.

Le coronographe interférentiel de Bracewell, ou interféromètre en frange noire, représente une solution prometteuse dans cette perspective et devrait servir de base à la mission spatiale Darwin, dédiée à la recherche et à l'analyse spectroscopique des planètes extrasolaires, en particulier telluriques, pour y détecter des bio-signatures. Cette thèse constitue une contribution à l'une des étapes de cette aventure : la validation du concept instrumental de l'interférométrie en frange noire.

Ce manuscrit est divisé en six chapitres. Le premier introduit la question de la recherche de la vie dans l'Univers, ainsi que les différentes approches de cette véritable quête, qui a victorieusement débuté par celle des premières planètes extrasolaires. La mission spatiale Darwin est ensuite présentée de façon détaillée dans une deuxième partie. C'est dans le contexte de cette mission que s'inscrit le travail expérimental présenté ici. Le troisième chapitre évoque les contraintes optiques liées à la technique interférométrique utilisée pour Darwin. L'extinction de la lumière de l'étoile repose sur un élément optique essentiel : un déphaseur achromatique. La quatrième partie s'intéresse donc plus particulièrement à l'une des solutions possibles pour ce dispositif. Les performances de celui-ci ont été testées sur le banc de mesure SYNAPSE, dont le développement est décrit dans le cinquième chapitre. Enfin, le sixième présente les résultats obtenus et quelles améliorations pourraient être apportées.

Le lecteur trouvera en annexe un descriptif de la procédure de réglage du parallélisme des optiques du banc SYNAPSE. Bien que représentative des difficultés rencontrées dans le domaine de l'interférométrie en général, elle aurait inutilement alourdi le texte. Figurent également, entre autres, une liste des acronymes et notations utilisés dans ce manuscrit et des communications écrites et orales venues ponctuer cette thèse. Pour finir, une petite visite guidée du banc SYNAPSE en photographie est proposée, avant un bilan complet de ce projet de recherche.

Table des figures

1.1 Simulations des spectres de différentes espèces et de celui de la Terre. 13
(a) Spectre de la vapeur d'eau. 13
(b) Spectre de l'ozone. 13
(c) Spectre du dioxyde de carbone. 13
(d) Spectre thermique de la Terre. 13
1.2 Zones habitable et continûment habitable autour du Soleil. 17
1.3 Missions spatiales de détection d'exoplanètes par la méthode des transits. 21
(a) La mission CoRoT. 21
(b) La mission Kepler. 21

2.1 Comparaison des spectres du Soleil et de la Terre. 26
2.2 Principe de l'interférométrie en frange noire. 32
2.3 Carte de transmission de l'interféromètre de Bracewell. 33
2.4 Différentes configurations étudiées pour l'interféromètre spatial Darwin. 34
2.5 Variation angulaire de la transmission d'un interféromètre. 35
(a) Comparaison de la transmission d'un interféromètre de Bracewell et d'une GAC. . . 35
(b) Comparaison des fuites stellaires d'un interféromètre de Bracewell et d'une GAC. . 35
2.6 Satellite-télescope et satellite de recombinaison de la mission Darwin. 37
(a) Satellite-télescope. 37
(b) Satellite de recombinaison. 37
2.7 L'observatoire spatial Darwin. 38
2.8 Configuration dite en "nœud papillon". 38
(a) Répartition des télescopes sur la configuration. 38
(b) Sous-interféromètres correspondants (GAC). 38
(c) Carte de modulation. 38
2.9 Configurations de la mission TPF-I. 39
(a) Configuration OASES de la proposition originale. 39
(b) Configuration linéaire en double Bracewell modulés. 39
(c) Configuration en X. 39
2.10 Variations des sources de signal et de bruit selon la longueur d'onde. 40
2.11 Points de Lagrange du système Terre-Soleil. 41
(a) Gradients gravitationnels autour des points de Lagrange. 41
(b) Répartition géométrique des points de Lagrange. 41

4.1 Exemple de déphaseur à lames dispersives. 61
4.2 Déphasage et fuites stellaires obtenues grâce à la méthode des lames dispersives. 62
(a) Déphasage pour un matériau. 62

(b) Fuites stellaires pour un matériau. 62
(c) Domaine spectral de validité. 62
4.3 Vue de dessus d'un déphaseur de π avec passage par un foyer optique. 63
(a) Version "œil de chat" et triple plan. 63
(b) Version confocale et double plan. 63
4.4 Déphaseur de π à retournement du champ électrique. 64
(a) Géométrie et comportement en polarisation. 64
(b) Configuration avec recombinaison intégrée. 64
(c) Configuration à deux périscopes. 64
4.5 Déphaseur à réseaux sub-lambda. 65
(a) Géométrie du dispositif. 65
(b) Réseaux sub-lambda en réflexion, dans un déphaseur achromatique. 65
4.6 Dispositifs à rhomboèdres de Fresnel. 66
(a) Rhomboèdre de Fresnel traditionnel. 66
(b) Déphaseur achromatique de π basé sur ce principe. 66
4.7 Dispositifs à rhomboèdres composites. 66
(a) Géométrie et comportement en polarisation. 66
(b) Déphaseur achromatique de π basé sur ce principe. 66
4.8 Coronographe à quatre quadrants. 68
4.9 Déphaseur à prisme coulissant. 70
4.10 Faisceau parasite principal du déphaseur à prisme coulissant de SYNAPSE. 71
4.11 Faisceaux parasites réels du déphaseur à prisme coulissant de SYNAPSE. 72
4.12 Variation d'incidence sur les prismes déphaseurs. 78
4.13 Taux de réjection en fonction de l'incidence sur les prismes déphaseurs. 79
4.14 Influence de la température sur les performances en termes de réjection. 80
(a) Variations de l'indice du CaF2 avec la température. 80
(b) Variations du taux de réjection en fonction de la température. 80
(c) Positions du point de fonctionnement en fonction de la température. 80
(d) Variations du taux de réjection en fonction de la température. 80
4.15 Décalage entre les faisceaux en entrée et en sortie des prismes déphaseurs. 82
4.16 Cartographie autour du point de fonctionnement. 83
(a) Cartographie vue de profil. 83
(b) Cartographie vue de dessus. 83
4.17 Balayage en différence de marche autour du point de fonctionnement. 85
4.18 Balayages en différence de marche pour différentes épaisseurs différentielles. 86

5.1 Comparaison des principaux résultats en interférométrie en frange noire. 92
5.2 Schéma général du banc SYNAPSE. 94
5.3 Source de lumière du banc SYNAPSE. 96
(a) Schéma de principe (coupe). 96
(b) Vue éclatée, en fonctionnement. 96
5.4 Montée en température du corps noir. 97
5.5 Architecture de la régulation électronique du corps noir. 97
5.6 Stabilité en température du corps noir. 98
5.7 Pertes de transmission des fibres en verre fluoré en bandes K et L. 101
(a) Fibre monomode en bande K. 101
(b) Fibre monomode en bande L. 101
5.8 Système d'injection du banc SYNAPSE. 103

(a) Schéma de principe (coupe). . . . 103
(b) Vue d'artiste, avec les ensembles optomécaniques. . . . 103
5.9 Lame séparatrice "classique", à faces parallèles. . . . 104
5.10 Interféromètre de Mach-Zehnder, recombinatrice et séparatrice de type "Serabyn". . . . 105
5.11 Schéma de la séparatrice prismatique. . . . 107
5.12 Séparatrice Serabyn avec lames prismatiques. . . . 108
5.13 Recombinatrice Serabyn avec lames prismatiques. . . . 108
5.14 Interférogramme de la séparatrice S2. . . . 109
5.15 Réflexion et de transmission des traitements séparateurs pour la bande K. . . . 110
5.16 Réflexion et de transmission des traitements séparateurs pour la bande L. . . . 111
5.17 Réflexion et de transmission des traitements séparateurs pour le visible. . . . 111
5.18 Ensemble des lignes à retard du banc SYNAPSE. . . . 113
(a) Schéma de principe. . . . 113
(b) Vue d'artiste, avec les faisceaux infrarouges. . . . 113
(c) Vue d'artiste, avec les faisceaux de métrologie. . . . 113
5.19 Déphaseur achromatique à lames prismatiques du banc SYNAPSE. . . . 114
(a) Schéma de principe. . . . 114
(b) Photographie du déphaseur. . . . 114
5.20 Courbes de transmission des filtres spectraux. . . . 116
(a) Filtre en bande K. . . . 116
(b) Filtre en bande L. . . . 116
5.21 Système anti-vibratoire. . . . 118
5.22 Spectres de vibrations avec et sans filtrage actif. . . . 119
5.23 Courbe de transmission du filtre froid du détecteur monopixel. . . . 120
5.24 Chaîne de détection monopixel du banc SYNAPSE. . . . 121
(a) Schéma de principe. . . . 121
(b) Vue d'artiste. . . . 121
5.25 La caméra CIRCUS 128. . . . 122
(a) Chaîne de mesure complète. . . . 122
(b) Photographie de la caméra sur son support. . . . 122
5.26 Courant d'obscurité de la caméra CIRCUS, en fonction de sa température. . . . 123
5.27 Rendement de la caméra CIRCUS, en fonction de sa température. . . . 124
5.28 Temps d'intégration maximal de la caméra CIRCUS, en fonction de sa température. . . . 125
5.29 Asservissement en différence de marche implanté sur le banc SYNAPSE. . . . 134
5.30 Synoptique de l'électronique de contrôle du banc SYNAPSE. . . . 137
5.31 Architecture générale des programmes "temps réel" en LabVIEW. . . . 139
5.32 Architecture des programmes LabVIEW du PC Hôte. . . . 140
5.33 Architecture des programmes LabVIEW du PXI. . . . 142
5.34 Chronogramme théorique, avec synchronisation sur une horloge externe. . . . 144
5.35 Chronogramme mesuré, avec synchronisation sur une horloge externe. . . . 145
5.36 Chronogramme théorique, avec synchronisation sur une horloge interne. . . . 146

6.1 Quelques étapes de la procédure de réglage de SYNAPSE. . . . 149
(a) Autocollimation d'une surface optique, *via* le pentaprisme. . . . 149
(b) Réglage des lignes à retard, dans la première procédure. . . . 149
6.2 Configuration utilisée pour l'étalonnage du détecteur. . . . 152
6.3 Bilan photométrique du banc de SYNAPSE. . . . 153
6.4 Balayage horizontal du faisceau en sortie d'interféromètre. . . . 155

6.5 Balayage vertical du faisceau en sortie d'interféromètre. 155
6.6 Ajustement du profil du faisceau en sortie d'interféromètre. 156
6.7 Étapes de recherche du point de fonctionnement. 159
(a) 1er balayage : recherche des franges d'interférences. 159
(b) 2e balayage : localisation de la frange noire. 159
(c) 3e balayage : optimisation de la frange noire. 159
(d) ne balayage : égalisation des franges "grises". 159
6.8 Comparaison entre les balayages théorique et pratique. 160
6.9 Balayage en différence de marche à incidence non nulle sur le prisme coulissant. 161
6.10 Balayage en différence de marche sans filtrage modal. 162
6.11 Enregistrement temporel du signal interférométrique. 163
6.12 Enregistrement "longue durée" du signal interférométrique sans asservissement. 164
6.13 Données de métrologie sans asservissement. 165
6.14 Enregistrement "longue durée" du signal interférométrique avec asservissement. 166
6.15 Enregistrement "courte durée " des données de métrologie avec asservissement. 167
6.16 Enregistrement "longue durée " des données de métrologie avec asservissement. 168
6.17 Spectre des données de métrologie avec et sans asservissement. 169

F.1 Mise en œuvre du banc SYNAPSE. 198
(a) . . . en mars 2002. 198
(b) . . . en juin 2002. 198
(c) . . . en septembre 2003. 198
F.2 L'interféromètre SYNAPSE. 199
F.3 Sous-systèmes du banc SYNAPSE. 200
(a) Le corps noir. 200
(b) Le système de détection monopixel. 200
(c) La séparatrice S2. 200
(d) Le déphaseur achromatique et les lignes à retard. 200
(e) L'enceinte du banc et son système de chauffage. 200

Liste des tableaux

1.1 Caractéristiques du système planétaire autour de l'étoile Gliese 876. 20

2.1 Comparaison des signatures spectrales détectables dans le visible et l'infrarouge thermique. 28
2.2 Comparaison des seuils de détection dans le visible et l'infrarouge thermique. 29
2.3 Comparaison des spécifications d'une mission de caractérisation de planètes habitables, suivant le domaine de longueur d'onde. 30
2.4 Principales spécifications de la mission spatiale Darwin. 43

3.1 Pronostics des performances du banc SYNAPSE. 58

4.1 Comparaison des méthodes de calcul du point de fonctionnement. 77
4.2 Termes du modèle de Sellmeier de la fluorine (CaF2). 77
4.3 Termes du modèle de Sellmeier de la fluorine (CaF2) en fonction de la température. 81

5.1 Principaux résultats obtenus en "interférométrie en frange noire" à travers le monde 93
5.2 Caractéristiques techniques des fibres en verre fluoré du banc SYNAPSE. 102
5.3 Bandes de longueurs d'onde astronomiques. 115
5.4 Caractéristiques de la cible AMBER 128. 123
5.5 Réflexions de Fresnel des principaux matériaux du banc SYNAPSE. 128
5.6 Termes du modèle de Sellmeier du saphir (Al2O3). 128
5.7 Facteurs de transmission des sous-systèmes du banc SYNAPSE. 130

6.1 Étalonnage du détecteur monopixel. 153

G.1 Évaluation du coût matériel du banc SYNAPSE. 207
G.2 Coûts salariaux durant les trois ans de ma thèse sur le banc SYNAPSE. 208

Chapitre 1

À la recherche de la vie dans l'Univers

Sommaire

1.1 De l'astronomie à l'exobiologie 7
1.1.1 Pluralisme ... vous avez dit pluralisme ? 8
1.1.2 Quelques précisions 11
1.2 La quête de la vie extraterrestre 14
1.2.1 Approches globales 14
1.2.2 Une approche pas-à-pas 15
1.3 La recherche de planètes extrasolaires 17
1.3.1 Vers une caractérisation statistique : les méthodes de détection indirecte . 17
1.3.2 La liste s'allonge et se diversifie 19
1.3.3 Instrumentation du proche avenir : Terres en vue ! 20

AVANT d'aborder les aspects scientifiques et techniques qui concernent le cœur de cette thèse et bien avant de parler d'interférométrie en frange noire, nous allons tâcher, dans ce premier chapitre, de replacer le sujet dans un contexte beaucoup plus général, celui de la recherche de la vie dans l'Univers. On sait maintenant depuis dix ans qu'il existe d'autres systèmes planétaires que le Système Solaire, mais combien de planètes ont-elles réussi à réunir autant de conditions favorables à l'apparition de la vie ?

Par-delà les convictions personnelles de chacun, et surtout grâce à celles de quelques-uns, une discipline à part entière est née il y a quelques années. L'exobiologie se propose d'étudier les êtres vivants et les conditions de leur apparition en dehors – du grec *exô* – de la Terre. La première étape est, bien sûr, une recherche locale, parmi les huit autres planètes entourant le Soleil. Néanmoins, ce domaine s'est également élargi aux planètes en dehors du Système Solaire. C'est pourquoi, après un rapide historique des conditions dans lesquelles est née cette nouvelle science du Vivant, nous reviendrons rapidement sur les principales techniques utilisées dans la recherche d'exoplanètes.

1.1 De l'astronomie à l'exobiologie

Cette partie ne se veut en aucun cas exhaustive et d'une précision épistémologique rigoureuse, mais doit plutôt être envisagée comme un panorama de l'évolution des pensées ayant mené l'Homme de simples croyances à des méthodes plus scientifiques. Elle est largement inspirée de l'excellent livre de Mayor & Frei (2001) et du livre *Sur les traces du vivant* (Gargaud et al., 2003).

1.1.1 Pluralisme ... vous avez dit pluralisme ?

À la lumière de nos connaissances actuelles sur l'Univers, si, depuis sa création, la Terre était restée l'unique biotope d'un espace aussi vaste, ce serait un "beau gâchis d'espace"[1] ! Au-delà des convictions personnelles, force est de constater que notre Univers est constitué de plusieurs milliards de galaxies et qu'elles abritent elles-mêmes plus d'une centaine de milliards d'étoiles[2]. Statistiquement, sachant que toutes les étoiles et les systèmes planétaires naissent, à peu de choses près, de la même façon à partir des mêmes lois de la physique, la probabilité qu'une planète autour de l'une de ces étoiles ait vu se développer une autre forme de vie n'est donc pas totalement nulle ... Après, faut-il également une part de hasard, c'est une autre question, à laquelle nous ne tenterons sûrement pas de répondre ici.

Cette question du pluralisme des mondes est tout sauf récente. Quand l'homme a-t-il pris conscience de sa place dans l'Univers et s'est-il interrogé sur la nature de ces étoiles qu'il contemplait durant des nuits entières ? Difficile à dire. Toutefois, si l'on considère les traces laissées derrière elles par les civilisations sumériennes ou babyloniennes, de nombreux indices tendent à montrer que cela remonte à plusieurs millénaires avant J.-C. Mais il faut attendre la civilisation grecque pour que les premiers écrits sur le sujet nous parviennent.

Des atomes innombrables, des univers infinis

Anaximandre de Milet (v. 610-546 av. J.-C.) fut l'un des premiers astronomes et philosophes grecs et l'initiateur de ce qui deviendra une véritable tradition pluraliste du cosmos. Il ne reste que des fragments[3] de ses écrits, qui nous ont, pour la plupart, été rapportés par ses contemporains ou ses disciples. Pour lui, comme pour son farouche opposant Héraclite (v. 576-480 av. J.-C.), la Nature (*Phusis*) est tout ce qui existe et tout est en devenir. Cicéron rapporte ainsi :

> « [Anaximandre] dit, en effet, que l'infinité de la nature est ce dont toutes choses sont engendrées. »

Néanmoins, autant pour l'un cette Nature se structure en un monde unique (monisme), autant pour l'autre les mondes sont innombrables (pluralisme). Ce sont alors deux pures spéculations, mais, en tant que telles, rien ne peut les départager à l'époque. Pour Anaximandre, la Nature étant infinie (*apeiron*), puisqu'en tout, pourquoi ne pourrait-elle engendrer qu'un seul monde ? Il énonce qu'elle peut en engendrer d'innombrables, aussi bien dans l'espace que dans le temps. Cette fois-ci, ses propos sont rapportés par Simplicius :

> « Ceux qui ont posé les mondes infinis en quantité, comme les disciples d'Anaximandre, de Leucippe, de Démocrite, et plus tard les Épicuriens, ont pensé qu'ils naissent et périssent à l'infini, sans cesse les uns venant à l'existence et d'autres périssant. »

Il s'exprime également sur l'apparition de la vie sur Terre. La Nature étant infinie, elle n'est pas vivante, mais elle est le principe et la source de tous les vivants. Mais s'il pense que la vie est apparue dans la mer primitive, il admet un processus de génération spontanée. Spéculations, spéculations ... Pourtant, il envisage déjà la mutabilité des espèces et que l'homme pourrait être un parasite issu d'espèces marines, dont la sortie des eaux aurait permis le développement.

---

[1] En référence à une célèbre (!) phrase prononcée par Jodie Foster dans le film "Contact" : *it would be a great waste of space* ... où elle jouait, sous le nom de Ellie Arroway, le personnage de Jill Tarter, fervente partisane de l'existence de la vie extraterrestre.

[2] On estime le nombre de galaxies dans l'Univers connu à 10^{11}, celui des étoiles de notre Galaxie (la Voie Lactée), à environ $1,6.10^{11}$.

[3] Les citations concernant Anaximandre sont extraites du livre de Marcel Conche (Conche, 1991).

Selon ses propres écrits,

> « Les premiers animaux sont nés dans l'humide, enveloppés d'écorces épineuses. Croissant en âge, ils abordèrent sur des lieux plus secs, et, quand leur écorce se fut brisée, ils modifièrent leur genre de vie en peu de temps. »

À partir des idées d'Héraclite, Platon (v. 427-348 / 347 av. J.-C.) voit le monde, toujours unique, comme un système indépendant, ayant ses propres étoiles et planètes, dont une terre et un soleil. Son élève Aristote (384-322 av. J.-C.) place une Terre immobile, au centre d'un Univers clos. Assez réductrice comme vision ... Épicure (341-270 av. J.-C.) n'hésite pas à en prendre l'exact contrepoint en se basant sur la philosophie atomiste de Démocrite d'Abdère. À partir du moment où le monde est constitué d'une infinité de particules insécables (*a-tomos*), qui s'unissent et se désunissent au gré du hasard, il n'est aucune raison pour que celles-ci se soient regroupées dans un monde unique. Dans sa célèbre *Lettre à Hérodote*, il écrit donc[4]

> « L'Univers est infini [ ]. Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'Univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents ... [ ] La quantité d'atomes propres à servir d'éléments, ou, autrement dit, de causes à un monde, ne peut être épuisée par la constitution d'un monde unique, ni par celle d'un nombre infini de mondes, qu'il s'agisse d'ailleurs de tous les mondes semblables aux nôtres, ou de tous les mondes différents. »

Il ira même encore plus loin, s'affirmant comme un des précurseurs de l'exobiologie, en affirmant, toujours dans le même ouvrage

> « On doit admettre que dans tous les mondes, sans exception, il y a des animaux, des plantes et tous les êtres que nous observons [ ]. »

Le calme avant la tempête

Ces idées pour le moins révolutionnaires vont peu à peu tomber dans l'oubli jusqu'à la fin du Moyen-Âge, ou, tout au moins, vont-elles s'expatrier quelque temps. La *Syntaxe mathématique* de Ptolémée (190-120 av. J.-C.), véritable recueil de plusieurs générations de connaissances astronomiques grecques, ne sera ainsi traduite par les arabes qu'au VIIIe siècle, qui en profiteront pour la rebaptiser *Almageste*[5]. Pendant ce temps, la religion fait son œuvre d'uniformisation en Europe et a déclaré le savoir grec, païen. Ces idées ne sont pourtant pas perdues et il ne s'agit que d'une accalmie. Au gré des conquêtes arabes en Espagne, elles vont se diffuser à nouveau en Europe, augmentées des connaissances musulmanes, grâce à des hommes comme Thomas d'Aquin, l'un des disciples d'Albert Le Grand, celui-là même qui n'hésitait pas à déclarer au XIIIe siècle

> « Existe-t-il plusieurs mondes ou n'en existe-t-il qu'un ? Cette question est sans nul doute l'une des plus nobles et des plus exaltantes que soulève l'étude de la Nature. »

Que dirait-il aujourd'hui des exoplanètes ? Toute la difficulté était, en cette époque sombre, de concilier les idées grecques avec les dogmes religieux. Mais l'*Almageste* de Ptolémée reste une sorte de "livre de cuisine (sphérique !)" pour tenir compte des mouvements excentriques des planètes par rapport au cercle parfait. C'est pourquoi Nicolas Copernic (1473-1543) va proposer de placer le Soleil au centre du système, dans son ouvrage *De revolutionibus orbium celestum*[6]. Jamais un ouvrage ne fut aussi bien nommé ... car pour une révolution, ce fut une révolution !

[4]Les citations qui suivent sont extraites du livre de Mayor & Frei (2001).

[5]Il s'agit de la contraction de *Ketab Al Mageste*, qui signifie "le plus grand des livres", en arabe. Peu étonnant, sachant qu'il compte treize volumes !

[6]Les révolutions des sphères célestes.

C'est la fin de la cosmologie aristotélicienne, mais le début d'une véritable tempête, car certaines idées sont bien établies et il faudra œuvrer quelques siècles pour les détrôner. Grâce à Copernic, l'univers change d'aspect, ou plus exactement de taille, puisque le Système Solaire ne devient qu'un minuscule point dans le cosmos. Avec la mise en place de l'Inquisition, défendre le pluralisme devient une pratique de plus en plus risquée. Le nombre d'adeptes diminue, mais le pluralisme voit surgir l'un de ses plus fervents défenseurs en la personne de Giordano Bruno (1548-1600). Celui qui serait considéré aujourd'hui comme un "agitateur" l'a si bien défendu, notamment dans son ouvrage *De l'infini, de l'univers et des mondes*, qu'il l'a payé de sa vie, finissant sur le bûcher, après avoir été excommunié pas moins de trois fois ! Mais le virus est là, et il n'est pas près de disparaître.

De la métaphysique à l'astrophysique

La métaphysique et l'astrophysique, et plus généralement la science, ont en commun une recherche de la vérité. Mais, pour le philosophe Marcel Conche, là où la science donne des connaissances et cherche des preuves, la métaphysique expose des arguments spéculatifs. La vérité scientifique, quand elle existe, est unique, alors que les vérités métaphysiques sont multiples. De ce point de vue, le XVIIe siècle va marquer une véritable rupture.

En inventant la lunette astronomique en 1610, Galilée (1564-1642) fait passer le pluralisme de la communauté des philosophes à celle des scientifiques. L'apparition de l'observation astronomique ajoute des milliers d'étoiles à celles observables jusque-là à l'œil nu. Autant de "nouvelles" étoiles autour desquelles il est possible d'imaginer de nouveaux mondes. Pour l'astronome allemand Johannes Kepler (1571-1630), la présence de vie sur certaines planètes est possible, notamment Jupiter, suite aux observations de Galilée, mais de là à dire qu'il existe d'innombrables mondes habités ... il ira pourtant jusqu'à imaginer une vie extraterrestre dans son ouvrage *Somnium*[7].

Le philosophe et mathématicien René Descartes (1596-1650) considère, dans son *Discours de la méthode*, chaque étoile comme un soleil pouvant être entourée de planètes. Isaac Newton (1642-1727), en pluraliste convaincu, soutient la présence de systèmes planétaires autour des étoiles et l'existence d'une vie extraterrestre supérieure à la nôtre, même si celle-ci est dominée par des anges ou des "demi-dieux". Toujours des spéculations ... C'est au physicien hollandais Christiaan Huygens (1629-1695) que l'on doit la première tentative de résoudre la question du pluralisme par des méthodes scientifiques. Il sera d'ailleurs l'un des premiers à vouloir "tordre le cou" à l'anthropocentrisme

> « N'hésitons pas, nous, à admettre avec les principaux Philosophes de notre temps, que la nature des étoiles et celle du Soleil est la même. D'où résulte une conception du monde beaucoup plus grandiose que celle qui correspond aux vues antérieures plus ou moins traditionnelles. Car qu'est-ce qui empêche que chacune de ces étoiles ou Soleils a des Planètes autour d'elle et que ces planètes à leur tour sont pourvues de Lunes ? »

L'idée se vulgarise, notamment avec Bernard Le Bovier de Fontenelle (1657-1757), et ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, publiés en 1686. Le livre est un véritable succès à l'époque et le pluralisme devient une idée largement répandue et admise par une grande majorité, philosophes et scientifiques y compris. Pourtant, il reste une hypothèse, sans observable ...

Au XVIIIe siècle, les plus grands noms de l'astronomie, Olbers, Herschel, Bode et même Arago, sans parler du génial vulgarisateur Camille Flammarion, vont "se frotter" à la question du pluralisme, voire affirmer que la vie est présente ailleurs que sur la Terre. En parallèle, les connaissances de la vie terrestre avancent à grands pas, avec le développement de la biologie. La "génération spontanée" ne tient pas longtemps lorsque Darwin propose sa "théorie de l'évolution" à la fin du XIXe siècle. C'est le début de la planétologie et la spectroscopie permet les premières caractérisations d'atmosphères de planètes.

[7] Le Songe.

Les observations progressent, les débats font rage, mais les spéculations deviennent bien trop souvent de la science ... fiction. Il faudra attendre le XXe siècle pour que les scientifiques disposent enfin des instruments leur permettant d'ajouter des observations concrètes à ces idées et pour que l'exobiologie puisse être envisagée comme une science à part entière.

1.1.2 Quelques précisions

Une discipline, ou des disciplines

S'il est bien un domaine transdisciplinaire dans la science actuelle, c'est l'**exobiologie**, terme qui serait apparu en 1960 sous l'impulsion de Joshua Lederberg. Les anglo-saxons proposeront quelques années plus tard de préciser le terme en y redonnant à l'astronomie une part plus importante et inventeront les termes de "*bioastronomy*" et d'"*astrobiology*". L'exobiologie touche à tout, de l'origine des systèmes planétaires à celle des molécules des êtres vivants et de la vie sur Terre, des planètes extrasolaires aux traces de vie, présentes et passées, sur d'autres corps du Système Solaire ou des nouveaux systèmes stellaires. La liste est longue et les "candidats-exobiologistes" sont nombreux. Pourtant, il n'y a sûrement pas d'exobiologiste à proprement parler, puisque peuvent prétendre à ce titre autant d'astronomes, de chimistes, de physiciens, de géologues, de théoriciens que de biologistes (bien sûr !). Chacun apporte sa pierre à l'édifice, soumettant au crible des autres disciplines les scénarios qu'il a élaboré grâce aux connaissances dans sa spécialité. Un crible implacable, pour des scénarios qui resteront des hypothèses, car on ne peut ni remonter le temps, ni (certainement pour quelques années encore) aller sur place. On pourrait donc définir l'exobiologie comme la science ayant pour objet l'étude des origines de la vie, de son évolution et de sa distribution éventuelle dans l'Univers. Cela englobe donc également l'étude des structures et des processus liés à la vie et celle des matériaux organiques d'origine extraterrestre (au sens propre du terme).

Et la vie, dans tout ça ?

Avant de se lancer dans une quelconque recherche de la vie dans l'Univers, encore faut-il être capable, dans une approche cartésienne, de définir l'objet-même de cette recherche. Et dès le début, les choses se compliquent ! En effet, la vie terrestre est la seule référence connue que nous ayons à notre disposition pour définir les caractéristiques et les signatures du vivant. Alors, comment sortir de l'anthropocentrisme ? Paradoxalement, la vie est présente partout sur Terre, du fin fond des fosses abyssales aux grottes les plus souterraines et aux milieux les plus inhospitaliers et nous en sommes une des formes les plus évoluées. Et pourtant, rien de plus difficile, pour nous, que de déterminer quels critères permettent de discriminer un être vivant d'un être inanimé. Chacun, dans sa spécialité scientifique, y va de sa définition. Toutefois, depuis quelques années est apparu un relatif consensus.

Pour le biologiste, la brique de base de la vie, c'est la cellule. Au départ, celle-ci avait sûrement pour seul "projet"[8] d'assurer sa survie en croissant et en se multipliant. Le tout en transmettant un maximum d'informations, sans trop de pertes. **Réplication** et **reproduction** sont donc deux étapes primordiales. Ensuite, tout se complexifie. C'est bien là une autre caractéristique de la vie. Les cristaux, bien qu'ils croissent et reproduisent leur structure, ne sont pas assez complexes pour s'adapter à de légères modifications de leur environnement. La vie serait donc caractérisée par ses capacités de reproduction, d'**évolution** et d'**homéostasie**, cette faculté à maintenir un certain équilibre structurel et fonctionnel, tout en luttant contre un équilibre thermodynamique synonyme d'extinction. Et les virus, alors ? S'ils peuvent évoluer, se répliquer, comme tous les organismes symbiotiques, il leur faut à la base des cellules vivantes à parasiter ...

[8] En référence au concept de téléonomie cher à Jacques Monod, pour qui un être vivant est caractérisé par la notion de projet.

Il faut noter que l'environnement joue un rôle essentiel, en imposant des contraintes strictes au développement et à l'évolution des êtres vivants. Il ne fait aussi quasiment plus de doutes qu'une macromolécule doit porter cette information et jouer les chefs d'orchestre durant ces étapes. Il est de coutume de dire que la Nature est bien faite. Une chose est sûre, c'est que la vie y contribue beaucoup, car elle est efficace et sait s'adapter[9]. En tout cas, la vie est belle !

Quels ingrédients pour quelle recherche ?

La vie, telle que nous la connaissons est d'une incroyable complexité et diversité. Toute la difficulté pour la caractériser revient à limiter le nombre d'*a priori*. Parmi ceux-ci, la vie terrestre est basée sur la **chimie du carbone**. Avec ses liaisons tétravalentes, cet élément offre une multitude de combinaisons moléculaires et se trouve en abondance sur Terre[10] et dans le milieu interstellaire. Si l'on prend comme postulat que les lois de la physique, et de la chimie, sont les mêmes partout dans l'Univers, le carbone est très certainement une brique essentielle du vivant.

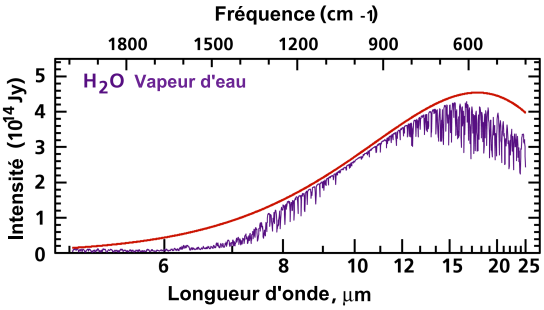
Grâce aux progrès de l'exobiologie, on sait également que la **molécule d'eau** a joué un rôle considérable dans l'apparition de la vie sur notre planète. L'eau est, entre autres, un solvant puissant, qui facilite grandement les réactions chimiques, notamment grâce à la photolyse (Owen, 1980). Et au niveau de l'atmosphère, que faut-il ? Le même Owen suggère l'**oxygène** comme traceur de vie. Il est vrai que par ordre d'abondance, on trouve dans la biosphère : de l'oxygène, du carbone, puis de l'hydrogène et de l'azote. Qui plus est, moins de 1 ppm de cet oxygène proviendrait de processus abiotiques, le reste provenant de la photosynthèse qui nécessite, au passage, du **dioxyde de carbone** (CO_2). En pointant les instruments de la sonde Galileo, aujourd'hui arrivée aux confins du Système Solaire, vers la Terre, Carl Sagan a cherché à mettre en évidence des "biosignatures". Il en a conclu que l'oxygène, présent en abondance et associé avec du méthane, suggérait des sources biologiques. De plus, la détection d'un pigment absorbant dans le rouge et ne correspondant à aucune signature minérale, venait appuyer une origine photosynthétique de O_2. La molécule de O_2 est également une bonne candidate, car elle possède une raie caractéristique dans le visible, vers 790 nm. Arnold et al. (2002) ont d'ailleurs observé le spectre de la lumière visible et proche infrarouge de la Terre réfléchie par la Lune (la fameuse "lumière cendrée"). Outre les signatures de O_2 et de O_3, la réflexion par la végétation a alors été mise en évidence.

Plutôt que la signature directe de l'oxygène, Angel et al. (1986) proposèrent de rechercher celle de l'ozone (O_3). L'ozone est produit, en présence d'oxygène, par l'unique réaction chimique atmosphérique $O+O_2+M \rightarrow O_3+M$, où M est un composé quelconque. Sa signature est particulièrement nette dans l'infrarouge thermique, à 9,6 µm. La relation O_2 / O_3 est logarithmique (Léger et al., 1993), il faut donc dix fois moins d'oxygène pour observer deux fois moins d'ozone. Il est donc possible d'utiliser la signature infrarouge de O_3 comme un traceur d'atmosphère oxygénée. La figure 1.1 représente les contributions de ces différentes espèces au spectre de la Terre dans l'infrarouge thermique.

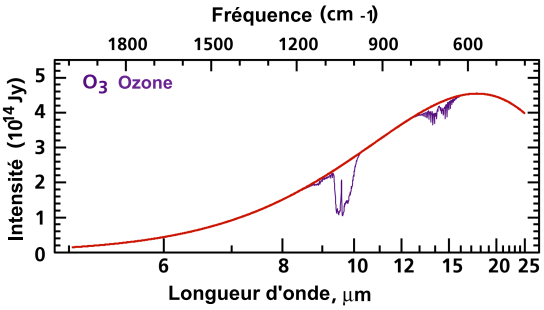
De l'oxygène, de l'eau, du dioxyde de carbone, un peu d'énergie lumineuse ou de chaleur et la vie apparaît ? Pas si sûr ... Mais il faut bien prendre des hypothèses de travail et les critères $\{O_3, H_2O, CO_2\}$ dans l'infrarouge thermique et $\{O_2, H_2O, CO_2\}$ dans le visible semblent les plus réalistes. Reste à les détecter ...

[9] Sur ce point, la théorie constructale, qui vise à expliquer les choix complexes de la Nature comme résultant d'une recherche du rendement maximal sous la contrainte des lois de la physique, pourrait bien fournir des arguments importants d'ici quelques années.

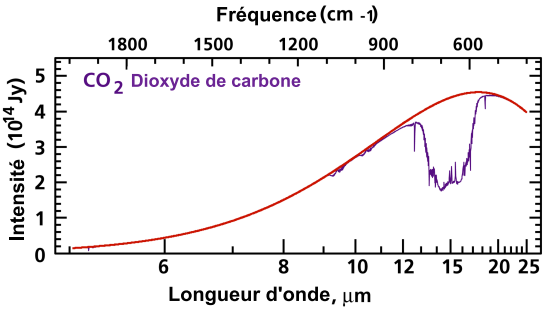
[10] Le silicium est, quant à lui, 135 fois plus abondant que le carbone sur Terre. Il a donc été envisagé comme une autre solution. Sauf que la liaison silicium-silicium est moitié moins forte que la liaison carbone-carbone, limitant la longueur des chaînes moléculaires que nous observons chez les êtres vivants.



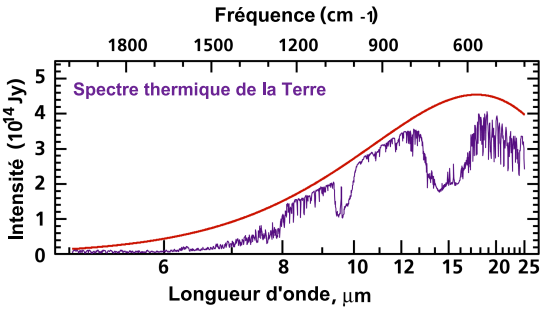
(a) Spectre de la vapeur d'eau.



(b) Spectre de l'ozone.



(c) Spectre du dioxyde de carbone.



(d) Spectre thermique de la Terre.

FIG. 1.1: Simulations des spectres de différentes espèces et de celui de la Terre (Beichman et al., 1999). La courbe supérieure continue représente le corps noir équivalent, à la température de 300 K.

1.2 La quête de la vie extraterrestre

Il faut attendre les années soixante pour qu'un scientifique du nom de Frank Drake ose formaliser de façon rigoureuse la quête de la vie, et même de civilisations, extraterrestres[11]. En formulant son équation devenue célèbre (Drake, 1961), il a fait évoluer le débat du pluralisme en proposant d'estimer, sur la base de différents critères d'effectifs, de proportion et de durée de vie, le nombre de civilisations intelligentes dispersées dans l'espace.
Cette équation a pour expression

$$N_{\text{civilisations}} = N_* \cdot f_{\text{planètes}} \cdot f_{\text{habitables}} \cdot f_{\text{vie}} \cdot f_{\text{technologique}} \cdot \frac{t_{\text{civilisation}}}{t_*} \tag{1.1}$$

où l'on désigne successivement par :

$N_{\text{civilisations}}$: le nombre de civilisations nous envoyant des signaux, dans la Galaxie ;
N_* : le nombre d'étoiles dans la Galaxie (typiquement $1,6.10^{11}$) ;
$f_{\text{planètes}}$: le nombre moyen de planètes par étoile ;
$f_{\text{habitables}}$: la probabilité qu'une planète soit habitable ;
f_{vie} : la probabilité qu'elle abrite effectivement une forme de vie ;
$f_{\text{technologique}}$: la probabilité que la vie ait évolué vers une civilisation technologique émettant des signaux dans la Galaxie ;
$t_{\text{civilisation}}$: la durée de vie de la civilisation technologique émettant des signaux dans la Galaxie ;
t_* : la durée de vie de l'étoile.

L'intérêt de cette approche purement statistique est surtout la décomposition en questions élémentaires qu'elle suggère. Force est de constater que jusqu'ici, nous sommes la seule civilisation connue de l'échantillon statistique nécessaire, ce qui ne suffit pas pour affirmer qu'aucun des termes n'est nul. Néanmoins, en 1950, lors d'une visite du laboratoire de Los Alamos, Enrico Fermi a fait remarquer que si l'on suppose qu'aucun terme n'est nul, étant donnée l'estimation du facteur N_* en tête d'équation, $N_{\text{civilisations}}$ devrait être considérable. D'où sa conclusion que ces civilisations devraient déjà nous avoir rendu visite et son interrogation finale : "Mais où sont-ils ?"

Malgré les progrès accomplis à ce jour par l'astrophysique, la question de Fermi est toujours en suspens (Prantzos, 2003). Beaucoup d'inconnues subsistent dans l'équation de Drake et elle peut tout juste suggérer quelques pistes de recherche ...

1.2.1 Approches globales

À tout seigneur tout honneur, la première approche pour rechercher la vie intelligente dans l'Univers, de façon scientifique, est due à Frank Drake lui-même. Son hypothèse de travail reste malgré tout assez osée, puisqu'il part du principe que si la vie existe ailleurs, alors cette vie a des chances d'être intelligente. Par conséquent, elle a nécessairement développé des moyens de communication, notamment dans le domaine des radiofréquences, pour "explorer l'Univers, détecter, se signaler à, ou communiquer avec d'autres civilisations intelligentes" (Cornet & Stride, 2003). Avant même de proposer sa célèbre équation, il se lance dans le projet *Ozma*[12] pour tenter de capter des signaux provenant d'une civilisation "avancée". *Ozma* ne durera qu'un an et finira bredouille ... Il sera suivi par un programme beaucoup plus ambitieux

[11] Frank Drake n'a "osé" communiquer cette équation que suite à un exposé de Cocconi & Morrison (1959).
[12] En référence au *Magicien d'Oz*.

(et médiatisé), *Search for Extra Terrestrial Intelligence* (SETI) (Tarter, 1998), dont l'ambassadrice la plus connue est, sans nul doute, la très convaincante Jill Tarter[13].

L'écoute systématique d'éventuels signaux extraterrestres se fait simultanément sur plusieurs millions de canaux grâce aux plus grands radiotélescopes répartis sur Terre, dont le plus emblématique est sûrement celui d'Arecibo, sur l'île de Porto-Rico. Seulement, un tel programme coûte cher et en 1993, le programme, jusqu'ici public, doit passer sur des fonds privés pour continuer. Les donateurs étant assez généreux, deux projets coexistent. Le projet *Phœnix* surveille 1 000 étoiles de type solaire, âgées d'au moins trois milliards d'années et situées dans un rayon de 200 années-lumière du Soleil. Toujours grâce à Arecibo, le projet *Serendip* est plus global, puisqu'il scrute, grâce à une "antenne-parasite" placée sur l'antenne secondaire du radiotélescope d'Arecibo, l'ensemble des cibles visées par la communauté astrophysique utilisant l'instrument. La quantité phénoménale de données accumulée requiert un nombre tout aussi gigantesque de machines pour leur dépouillement. *Internet* fournira la solution et ce sera la naissance de l'un des plus grands programmes de traitements de données : *SETI@Home*, auquel tout un chacun peut participer ...

Aujourd'hui, près de onze programmes sont actifs et surveillent environ 700 étoiles (Tarter, 2003), mais aucun n'a eu de signal extraterrestre confirmé.

Cependant, pour communiquer, dans le sens d'établir un contact, avec une civilisation intelligente, il y a deux étapes, qui ne doivent pas nécessairement se succéder. La première est passive, il s'agit d'"écouter", comme le propose le programme SETI, la seconde est active, autrement dit "se manifester". Les humains ont commencé, sans nécessairement s'en rendre compte[14], à se signaler dès le début de leur développement technologique. Depuis près de soixante-dix ans, une partie de nos ondes radios s'est échappée vers l'espace et, bien qu'extrêmement atténuées, elles pourraient être captées par d'autres civilisations "à l'écoute". De façon plus active, Arnold (2005) a récemment proposé de créer des transits artificiels devant la Terre. Le problème, c'est qu'il faudrait disposer des masques (voiles) gigantesques au niveau des ceintures d'astéroïdes, ce qui exigerait un investissement considérable ... Les idées ne manquent pas, les fonds, un peu plus.

1.2.2 Une approche pas-à-pas

Nul doute que si un signal extraterrestre devait être détecté et confirmé, ce serait un événement considérable, et certains ont déjà commencé à imaginer la conduite à tenir. Néanmoins, dans cette attente, une approche raisonnable est d'échelonner la recherche de la vie ailleurs sous la forme de différentes étapes. Cette approche peut se formuler comme une somme de questions, où la progression se fait pas-à-pas, une réponse claire à une question étant une condition *sine qua non* pour passer à la suivante. Elle est guidée par la recherche de formes de vie telles que nous les connaissons sur Terre, selon les critères que nous avons énoncés au paragraphe 1.1.2.

[13] Ce programme a été renommé aujourd'hui *Electromagnetic SETI*, car de nouvelles idées ont germé à partir du projet original. D'autres programmes sont dans les "cartons", comme le *Solar System Search for Extra Terrestrial Intelligence* (S^{3}ETI), le *Search for Extra Terrestrial Artifacts* (SETA) ou encore le *Search for Extra Terrestrial Visitation* (SETV). Parmi eux, le S^{3}ETI vise à "rechercher des signaux artificiels électromagnétiques ou optiques dans le Système Solaire", partant du principe que ces civilisations extraterrestres avancées sont déjà en train d'explorer le milieu interstellaire. Il se propose, dans ce but, d'utiliser notamment le *Allen Telescope Array* (ATA).

[14] Il faut l'espérer, car parmi les premières émissions humaines, qui nous servent aujourd'hui d'ambassadrices dans l'espace, figurent les (tristement) célèbres images des jeux olympiques de Munich ...

Parmi ces questions, les principales sont les suivantes :

1. Existe-t-il d'autres planètes en dehors du Système Solaire ?
2. Parmi ces planètes, combien sont des planètes géantes, combien sont des planètes de la taille de la Terre ?
3. Dans ces planètes telluriques, certaines sont-elles habitables (nous expliquerons ce terme en détails) ?
4. Combien de ces planètes ont-elles des chances d'être habitées ?
5. Parmi ces civilisations, quelles qu'elles soient, quel est leur stade d'évolution ?
6. Et enfin, question subsidiaire, combien de candidats doivent être contactés ? ? ?

Grâce à la mise en œuvre de différentes techniques, plus pointues les unes que les autres, et qui permettent, au passage, d'enrichir considérablement nos connaissances de l'Univers, les réponses à ces questions se profilent peu à peu. Depuis 1995, avec la découverte de la première planète extrasolaire (ou exoplanète) autour d'une étoile analogue au Soleil, 51 Peg, par Michel Mayor et Didier Queloz à l'OHP (Mayor & Queloz, 1995), nous savons que les "astres errants" sont bien plus nombreux que les neuf de notre Système Solaire. Les méthodes de détection indirectes, dont nous parlerons au paragraphe suivant, vont permettre d'établir des statistiques sur la fréquence et les caractéristiques de ces planètes et d'estimer la proportion de planètes telluriques. Combien sont habitables, c'est une autre question ? D'abord, qu'entend-t-on par habitable ?

Nous avons vu que les critères $\{O_3, H_2O, CO_2\}$ ou $\{O_2, H_2O, CO_2\}$ pouvaient être des pistes intéressantes sur la voie de l'habitabilité. Mais attention, leur non-détection ne saurait être une preuve de l'absence de vie. Un des autres critères primordiaux est la température de surface des planètes. Ainsi, la température de surface de la Terre, malgré l'augmentation d'environ 40 % de la luminosité solaire au cours de son histoire (Guinan & Ribas, 2002), est toujours restée dans des limites "raisonnables pour le vivant" (Crowley, 1983). La présence de vie y est sûrement pour beaucoup, et, même si le cas de Vénus est un parfait contre-exemple, la notion de température de surface permet d'introduire celle de "zone habitable" autour d'une étoile.

On peut définir la **zone habitable** (ZH) comme la région autour d'une étoile (ou d'une planète géante) autour de laquelle l'eau peut exister de façon permanente sous forme liquide à la surface d'une planète. Les limites de cette région varient selon de nombreux paramètres, divergence de l'effet de serre, composition chimique de l'atmosphère, albédo ... La luminosité d'une étoile étant croissante au cours de son évolution, les limites de la zone habitable s'éloignent peu à peu. On définit alors une **zone d'habitabilité continue** (ZHC) comme le domaine qui reste habitable durant tout le temps que passe l'étoile sur la séquence principale[15]. La figure 1.2 représente la zone continûment habitable autour du Soleil. Son extension varie essentiellement selon la distance à l'étoile et la masse et le type spectral[16] de celle-ci. Le rayon de blocage est celui en-deçà duquel des phénomènes de résonance apparaissent avec l'étoile. La planète Vénus a sûrement appartenu à la Zone Habitable par le passé, mais pas à la Zone Continûment Habitable.

Il semble aujourd'hui qu'il faille étendre cette définition de l'habitabilité. En effet, cette habitabilité n'est qu'une habitabilité de surface, qui dépend de la luminosité stellaire et de la présence d'une atmosphère. Si l'on considère aujourd'hui les recoins de la Terre où la vie est capable d'aller se cacher, sous

[15] On dit qu'une étoile appartient à la séquence principale lorsqu'elle est placée sur la diagonale du diagramme Hertzsprung-Russell, qui représente la luminosité d'une étoile en fonction de sa température ou de son type spectral.

[16] Historiquement, les étoiles ont été classifiées empiriquement, grâce aux premières observations de spectres stellaires, en sept types spectraux : O,B,A,F,G,K et M. Chacun de ces types est décliné en sous-classes et il existe un moyen mnémotechnique pour se rappeler leur ordre, grâce à la phrase : *Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me !*

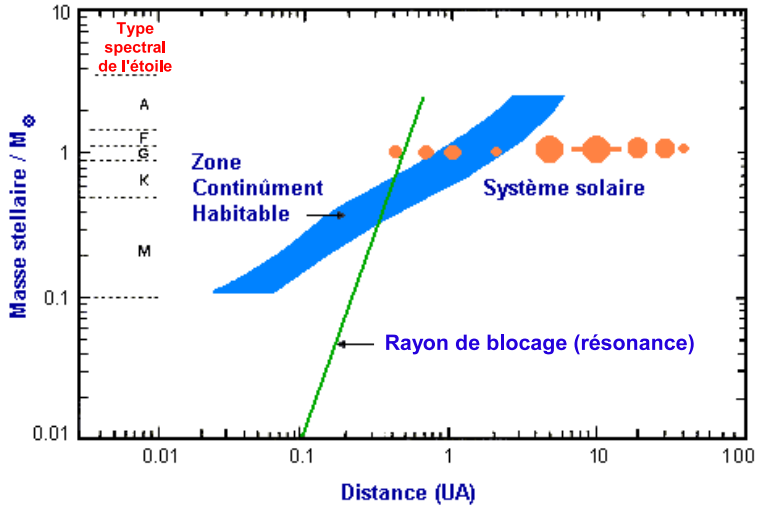


FIG. 1.2: Zones habitable et continûment habitable autour du Soleil (cf. texte pour les définitions) (http ://www.astrosurf.org/lombry/bioastro-recherche-planetes-habitables.htm).

la forme d'**extrêmophiles**[17], il n'est plus possible de limiter les "espaces de jeu" de la vie à la simple surface d'une planète. La lumière n'est pas la seule source d'énergie utilisable pour le développement de la vie, les effets de marée des planètes géantes sur leur satellite doivent également, entre autres, être considérés (cas du satellite de Jupiter, Europe). Mais bien plus que les conditions de maintien de la vie, c'est aussi aux conditions d'émergence de celle-ci qu'il faut s'intéresser, et elles pourraient bien être beaucoup plus exigeantes.

1.3 La recherche de planètes extrasolaires

Dans cette quête progressive de la vie dans l'Univers, nous n'en sommes qu'aux premières réponses. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons dresser un très rapide bilan des progrès accomplis et des méthodes qui les ont permis.

1.3.1 Vers une caractérisation statistique : les méthodes de détection indirecte

Force est de constater que faute de pouvoir aller ou envoyer des sondes spatiales *in situ*, il a bien fallu se rabattre sur des méthodes de détection à distance pour rechercher d'autres planètes.

Ce n'est désormais plus un secret pour personne, le développement de la **spectrovélocimétrie radiale** aura été un élément déterminant pour la détection des premières exoplanètes, bien qu'elle permette en réalité la détection de toute sorte de compagnons. Les Grecs savaient déjà que les étoiles possèdent un mouvement propre dans le ciel, mais il aura fallu attendre l'avènement de cette technique de pointe pour que les exoplanètes nécessitent plus de deux mains pour être comptées. Dans cette technique, il

[17]On appelle "extrêmophile" un organisme qui, soit vit de façon optimale, soit tolère très bien la vie, dans un environnement extrême. Selon les paramètres physico-chimiques considérés, on parle ainsi d'"hyperthermophiles" ou de "psychrophiles" (températures hautes ou basses), d'acidophiles ou d'alcaliphiles (pH faibles ou élevés), de halophiles (salinité élevée), de barophiles (pression élevée (le "thésard" en est un bon représentant !)), ou encore de xérophile (dessiccation), de radiotolérants et de métallotolérants.

s'agit de détecter la composante radiale de ce mouvement. Par effet Döppler-Fizeau[18], le décalage des bandes spectrales de l'étoile peut être mesuré avec une précision de l'ordre d'1 m / s avec les meilleurs instruments actuels, comme *High-Accuracy Radial-velocity Planet Searcher* (HARPS), installé sur le télescope de 3,6 m de l'Observatoire Européen Austral (*European Southern Observatory*) (ESO).

Historiquement, c'est pourtant en cherchant à mesurer l'autre mouvement des étoiles, transversal par rapport à la ligne de visée, que la recherche de planètes extrasolaires a probablement débuté. L'**astrométrie**, qui avait déjà permis la découverte de certaines planètes et astéroïdes du Système Solaire invisibles à l'œil nu, se propose de mesurer, au cours du temps, le mouvement projeté sur le ciel du couple étoile-planète tournant autour de son barycentre. Cette technique requiert une très grande précision de mesure et un acharnement proportionnel. L'illustration la plus flagrante est sans doute le travail de Piet Van De Kamp qui a comparé plus de 2 000 clichés pendant près de 50 ans pour pouvoir annoncer la découverte de deux objets autour de l'étoile dite de Barnard, en hommage à l'astronome américain du même nom (van de Kamp, 1963a,b, 1969). Pour l'heure, ces deux objets n'ont pas encore été confirmés par la méthode des vitesses radiales ...

La découverte des pulsars a elle-aussi donné lieu à des annonces de la présence de planètes en orbite autour d'autres objets que notre cher Soleil. Sauf que, cette fois-ci, ces annonces se sont avérées. Il faut même rendre à César ce qui lui appartient, car les premières exoplanètes ont été détectées par Wolszczan & Frail (1992). La méthode utilisée, le **chronométrage des pulsars**, est toujours indirecte, mais elle est très précise. Il s'agit de mesurer finement (!) les irrégularités temporelles observées dans la période de rotation très courte (de l'ordre de quelques millisecondes) de ces restes d'étoiles. Les deux chercheurs annoncent ainsi avoir détecté pas moins de trois planètes autour du pulsar PSR B 1257+12, dont une de la taille de la Lune. Découverte primordiale, mais ces planètes ont le gros défaut d'être en orbite autour des restes d'une supernova, dans un environnement peu propice à la vie. Pas très affriolant pour les médias ... Wolszczan & Konacki (2005) ont même annoncé récemment la découverte autour de ce pulsar du premier exo-astéroïde ($^1/_{5^e}$ de la masse de Pluton), mais rien n'y fait, la comparaison avec une 51 Peg b autour d'une étoile comme le Soleil n'est pas possible.

Décidément, la méthode la plus efficace semble bien être, jusqu'ici, celle des vitesses radiales, qui a permis[19] la détection de 160 exoplanètes sur 169. La détection de ces planètes résulte du suivi observationnel d'environ 3 000 étoiles de l'environnement solaire (dans un rayon de quelques parsecs[20]) par différentes équipes dans le monde. Ces étoiles sont principalement de type F, G, K et M, pour une plus grande précision de mesure[21]. Seul bémol, cette méthode ne fournit qu'une borne inférieure à la masse de la planète, qui n'est connue qu'à un facteur $\sin(i)$ près (i étant l'angle sous lequel le système est observé, avec $i = 90^\circ$ si le système est vu par la tranche). Par ailleurs, elle est plus sensible aux objets massifs et proche de leur étoile, d'où leur premier surnom de "Jupiter chauds", auquel on préfère aujourd'hui ce-

[18] L'effet Döppler-Fizeau provoque un décalage vers le bleu (resp. le rouge) des longueurs d'onde de la lumière émise par une étoile lorsque celle-ci se rapproche (resp. s'éloigne) de l'observateur. On exprime généralement cette vitesse radiale en mètre par seconde.

[19] À la date du 20 octobre 2005 où est délivré ce "manuscrit", qui devrait d'ailleurs plutôt s'appeler un "tapuscrit", voire un "digituscrit" !

[20] Le parsec (pour *parallax second*) correspond à la distance à laquelle devrait se placer un observateur pour observer le système Soleil-Terre sous un angle de 1 seconde d'arc, soit

1 parsec (pc) = 206 264,8 Unités Astronomiques (U.A.) = $3,0856776.10^{16}$ m = 3,2615638 années-lumière (a.l.).

[21] Les étoiles massives et chaudes, de type O et B, sont hors-échantillon, car, outre qu'elle présentent moins de raies spectrales que les étoiles froides, elles ont une rotation plus rapide, diminuant la précision de mesure de leur vitesse radiale. Elles ont enfin une durée de vie plus courte, qui ne favorise pas la formation de systèmes planétaires.

lui de "Pégasides"[22]. Même s'il est possible aujourd'hui de déconvoluer la distribution en masse de ces exoplanètes, en supposant une équirépartition des inclinaisons de leurs orbites (Santos et al., 2002), les premières statistiques déduites de ces observations ne sont donc pas suffisantes pour être représentatives.

Heureusement, une autre méthode a émergé il y a quelques années, qui consiste à observer les **transits planétaires**. Cette méthode est venue confirmer en 1999 la réalité de ces exoplanètes que l'on commençait à détecter par dizaines. L'observation, par Charbonneau et al. (2000), puis Henry et al. (2000) et enfin Brown et al. (2001), avec le *Hubble Space Telescope* (HST), de l'occultation de l'étoile HD 209458 par une "Pégaside" est venu clore le débat. Le gros avantage de cette méthode est qu'elle permet une mesure précise du rayon et de l'inclinaison de la planète sur son orbite. Conjuguée à la spectrovélocimétrie, elle fournit une valeur précise de la masse et donc du type de la planète observée. Dans le cas de HD 209458b, il a même été possible, grâce à plusieurs observations avec l'instrument STIS du HST d'étudier par spectroscopie plusieurs composés atmosphériques de cette planète (Charbonneau et al., 2002; Vidal-Madjar et al., 2003, 2004) et d'y détecter de l'oxygène et du carbone.

Toutefois, une telle étude requiert un rapport signal à bruit très élevé (5 000 dans ce cas), qui reste inaccessible pour la plupart des autres candidats aux transits. L'étude des atmosphères exoplanétaires en est donc à ses balbutiements et, s'il est naturel qu'elle commence par les planètes géantes détectées jusqu'ici, l'étape suivante sera d'étudier celles des exoplanètes telluriques. Il faut alors garder en tête que la probabilité de transit d'une "Pégaside" est de l'ordre de 10%, en faisant l'hypothèse d'une orientation aléatoire par rapport à un observateur terrestre. Une probabilité relativement élevée, permettant d'améliorer les statistiques, mais qui tombe à 0,5%, si l'on cherche des planètes telluriques.

1.3.2 La liste s'allonge et se diversifie

Pour l'heure[23], 169 exoplanètes ont été détectées, comme nous l'avons dit, essentiellement par vitesses radiales. Il faut noter que seuls trois des candidats du programme de suivi par transits *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE) ont été détectés et confirmés comme ayant des planètes (Udalski et al., 2002). Ces exoplanètes sont réparties en 145 systèmes exoplanétaires, dont 18 sont multiples et dont le plus peuplé, autour de l'étoile 55 Cnc, comporterait 4 planètes. Elles ont respectivement des masses de 0,784 masses de Jupiter (M_{Jup}), 0,217 M_{Jup}, 3,92 M_{Jup} et 0,045 M_{Jup}.

Parmi ces exoplanètes, HD 162020b est une des plus controversées, car, avec un peu plus de 13 M_{Jup}, elle est la plus massive[24]. Cela situe cette planète juste au-dessus de la limite fixée par l'*International Astronomical Union* (IAU), au-delà de laquelle des réactions de fusion du deutérium se produisent et où l'objet a plus de chance d'être une naine brune qu'une planète. Avec une excentricité record de 0,927 pour une période de 111 jours, HD 80606b est une des plus ... excentriques ! Le palmarès de la période de révolution la plus courte revient à OGLE Tr 56b, avec moins de 1,21 jours. Enfin, parmi ces exoplanètes, celle qui possède la masse la plus faible et qui vient donc fixer la limite inférieure à battre dans la course aux planètes telluriques, est Gliese 876d.

Elle fait d'ailleurs partie de l'un des cas les plus intéressants, puisque le système planétaire entourant l'étoile Gliese 876 est un système résonant. Cette étoile de magnitude proche de 10, de type M4V, est

[22] Il est pour habitude en astronomie, de nommer les objets caractéristiques selon le premier découvert. L'un des meilleurs exemples est celui des Céphéïdes.

[23] Toujours à la date du 20 octobre 2005.

[24] Toutes les masses évoquées ici sont données au facteur $\sin(i)$ près, où i est l'inclinaison de l'orbite de la planète, inconnue dans la plupart des cas.

TAB. 1.1: Caractéristiques du système planétaire autour de l'étoile Gliese 876 (d'après Encyclopédie des Planètes Extrasolaires (consultée le 15/10/2005)).

Nom	Gliese 876 b	Gliese 876 c	Gliese 876 d
Masse $*\sin(i)$[1] (M_{Jup})	1,935 ($\pm$ 0,007)	0,56	0,023 ($\pm$ 0.003)
Demi-grand axe (U.A.)	0,20783 ($\pm 3.10^{-5}$)	0,13	0,0208067 ($\pm 5.10^{-7}$)
Période orbitale (jours)	60,94 ($\pm$ 0,013)	30,1	1,9379 ($\pm 7.10^{-5}$)
Excentricité	0,0249 ($\pm$ 0,0026)	0,27	0

[1] i représente l'inclinaison de l'orbite de la planète.

située à 4,7 pc. Son système planétaire est composé de trois planètes, dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 1.1. Il faut noter que la moins massive des planètes de ce système, Gliese 876d, possède, sous l'hypothèse d'une inclinaison de son orbite à 90°, une masse de seulement 5,89 ($\pm$0,54) fois la masse de la Terre. Un récent réajustement des données montrerait qu'avec une inclinaison plus "raisonnable" de 50°, sa masse serait plutôt d'environ 7,53 ($\pm$0,70) masse terrestre (Rivera et al., 2005). Elle resterait malgré tout, à ce titre, la première "super-Terre" découverte à ce jour ... avec une période de moins de deux jours, tout de même, ce qui laisse supposer des phénomènes d'évaporation, comme ceux observés sur HD 209458b !

Les méthodes indirectes ont donc permis de trouver d'autres systèmes planétaires et de découvrir de nouveaux objets, comme les "Pégasides" ou les planètes à forte excentricité. Ne sachant quelle sera la prochaine surprise, qui sait, dans quelques années, peut-être découvrirons-nous des "planètes-océans" (Léger et al., 2004) ? Il convient donc d'enrichir ces statistiques, en caractérisant la masse et les distances de ces exoplanètes géantes, mais aussi en détectant des exoplanètes telluriques et en analysant leur composition.

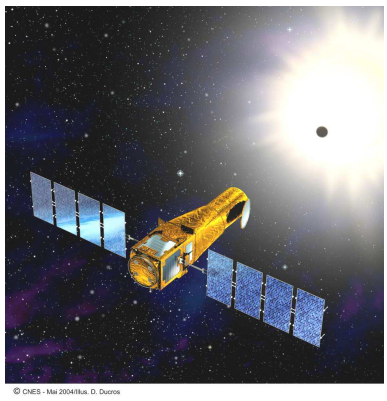
1.3.3 Instrumentation du proche avenir : Terres en vue !

Depuis le sol

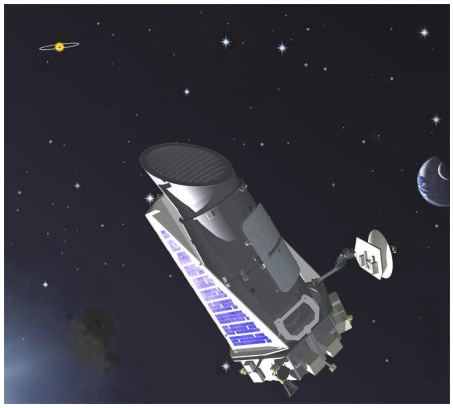
Plusieurs programmes sont en développement, dans chacune des méthodes que nous avons évoquées. Sur le front des vitesses radiales, des instruments comme HARPS permettront d'ici quelques années d'élargir encore un peu le rayon de 50 pc, où la plupart des exoplanètes de très courte période ont été étudiées. Simultanément, des exoplanètes de plus faible masse pourront être détectées, comme des "Uranus chauds", car en orbite à la distance de Jupiter. Cependant, la signature en vitesse radiale d'une planète comme la Terre, sur une orbite vue par la tranche, à 1 U.A. de son étoile, reste de l'ordre de 9 cm / s ...

Des programmes d'astrométrie, toujours au sol, viendront épauler ces instruments avec des dispositifs comme LINC, sur le *Large Binocular Telescope* (LBT), ou les équipements astrométriques du *Very Large Telescope Interferometer* (VLTI) et du *Keck-Interferometer* (Keck-I). Ils devraient atteindre une précision astrométrique de quelques dizaines de microsecondes d'arc. L'une des principales limitations vient de la durée d'observation nécessaire pour couvrir une fraction suffisante de l'orbite de planètes de type Jupiter (masse et distance). L'interférométrie radio à base continentale (VLBI) offre également une précision similaire, tout comme le fera le projet *Atacama Large Millimeter Array* (ALMA). Encore faut-il que les cibles aient le bon goût d'émettre en radio, ce qui limite considérablement l'échantillon potentiel.

Pour ce qui est des transits, David Charbonneau a fait des émules et plus d'une vingtaine de programmes de suivi photométrique sont aujourd'hui en cours (Horne, 2003). Mais si la détection d'exo-



(a) La mission CoRoT (pour Convection, Rotation et Transits) du CNES.



(b) La mission Kepler, de la NASA.

FIG. 1.3: Les différentes missions spatiales de détection d'exoplanètes par la méthode des transits.

planètes géantes est possible, toujours pas de planètes telluriques en vue ! Il faut noter que des projets d'interférométrie en Antarctique sont à l'étude et que les conditions exceptionnelles (à tous points de vue) de ces endroits pourraient permettre d'ici quelques années la détection directe d'exoplanètes, voire la spectroscopie de leurs atmosphères (Swain et al., 2003; Coudé du Foresto et al., 2004). Mais c'est surtout avec les instruments de seconde génération pour le *Very Large Telescope* (VLT), comme *Planet Finder*, une optique adaptative de pointe couplée à un imageur haute dynamique, que l'observation directe d'exoplanètes depuis le sol devrait faire des progrès considérables (Mouillet et al., 2003).

Depuis l'espace

À plus court terme, la détection d'exoplanètes telluriques semble passer par l'espace. En astrométrie, il faudra attendre les missions Gaia (ESA) et SIM[25] (NASA) pour gagner un facteur dix en précision et pouvoir espérer détecter des objets de faible masse ("super-Terres"), vers 2010.

Pour détecter des exoplanètes telluriques plus accueillantes que celles du pulsar PSR B 1257+12, l'application de la méthode des transits sur des satellites, dans l'espace, apparaît très prometteuse. Par l'observation de 5 champs très denses d'environ 12 000 étoiles sur de longues périodes (cinq mois), la mission Convection, Rotation et Transits (CoRoT) (Fig. 1.3a), sous maîtrise d'œuvre du CNES, donnera en 2007 une information statistique sur l'abondance des planètes telluriques, sur leur taille, leur période et la distance à leur étoile (Rouan et al., 1998). Complétée par des études en vitesses radiales, ces statistiques s'étendront à la masse des objets. L'année suivante, la mission Kepler (Fig. 1.3b) de la NASA (Borucki et al., 1997), très similaire à CoRoT, devrait compléter ces informations[26]. Même si leur rôle est essentiellement d'enrichir les statistiques, ces missions devraient rendre accessible la détection d'exoplanètes telluriques de type "super-Terres".

[25] Si la "re-conquête" de la Lune ne vient pas trop perturber ce programme.

[26] La mission Eddington, de l'Agence Spatiale Européenne (*European Space Agency*) (ESA) (Favata & Pace, 2001), qui aurait dû succéder à CoRoT, est aujourd'hui très fortement remise en cause pour de raisons budgétaires et de concurrence directe avec Kepler.

Au terme de cette partie, il apparaît que la recherche de la vie dans l'Univers est une quête de très longue haleine. En tant que telle, elle requiert une méthode scientifique progressive, suivant les avancées permises par la technologie, que ce soit en astrophysique ou dans tous les domaines concernés par l'exobiologie. Si les premières étapes sont aujourd'hui franchies, elles n'ont pas nécessairement eu le même retentissement sur le grand public que les premiers pas de l'Homme en dehors de la Terre. La faute, peut-être, au manque d'images marquantes liées à ces découvertes. Mais si l'on en juge par la médiatisation un peu plus importante qu'à connue la première image d'exoplanètes (2M1207b, (Chauvin et al., 2004)), il ne fait aucun doute que la découverte d'autres formes de vie en dehors de la Terre serait beaucoup plus retentissante.

Pour cela, il faudra bien plus que quelques photons, avec une caractérisation complète des planètes telluriques candidates. Si l'on considère les flux nécessaires aux analyses spectroscopiques de ces planètes, les méthodes de détection directe seront indispensables d'ici quelques années pour ajouter un peu de "piment" aux statistiques accumulées jusque-là.

Chapitre 2

Vers un interféromètre spatial : la mission Darwin

Sommaire

2.1 Enjeux et motivations 23
2.2 Contraintes observationnelles 24
2.2.1 Des objets si lointains ... et si proches ! 24
2.2.2 Pour du contraste, c'est du contraste ! 25
2.2.3 Autres contraintes et conséquences 25
2.3 Choix de la bande spectrale d'observation 27
2.4 Concepts instrumentaux 29
2.5 La mission Darwin 31
2.5.1 Un interféromètre spatial ... un peu spécial 31
2.5.2 Différentes configurations 33
2.5.3 Aspects scientifiques 39
2.5.4 Aspects techniques 41
2.5.5 Développements technologiques nécessaires 44

DANS cette partie, nous allons dans un premier temps nous intéresser à la définition d'une mission spatiale destinée à détecter des planètes telluriques habitables. Autrement dit, d'après la stratégie que nous avons évoquée précédemment, quel est l'outil nécessaire pour franchir l'étape en cours dans la recherche de la vie dans l'Univers ? La définition de cette mission s'appuie, en première approche, sur les objectifs envisagés et se heurte à différentes contraintes qu'il s'agira de surmonter. Nous verrons dans un second temps dans quelle mesure la mission Darwin, sous ses différents aspects, devrait permettre de progresser considérablement dans cette recherche.

2.1 Enjeux et motivations

D'ici quelques années, les méthodes de détection indirectes (transits, programmes de suivi par vitesses radiales) devraient fournir des statistiques fiables[27] sur la présence de planètes telluriques en orbite autour d'autres étoiles et permettre d'acquérir une quasi-certitude sur leur présence effective et leur nature tellurique. Au-delà, savoir si, parmi ces planètes extrasolaires telluriques, certaines sont habitables,

[27] On entend par-là qu'elles porteront sur un nombre d'échantillons conséquents et sur un ensemble représentatif.

nécessite une caractérisation plus approfondie. Pour cela, le mieux est de disposer d'une **détection directe**[28] pour l'analyse de ces objets, autrement dit, d'en avoir fait une ou plusieurs observations. La première motivation d'une mission spatiale dédiée à parfaire la connaissance des planètes extrasolaires est donc la collecte, sinon d'une véritable image, tout au moins de quelques photons, en provenance des premières planètes telluriques en orbite autour d'étoiles proches.

Une fois acquise la certitude de la présence de planètes telluriques autour d'une étoile, la première étape pour répondre à la question " Est-elle habitable ? " nécessite une étude approfondie du système planétaire dans lequel elle évolue. Combien de planètes en orbite autour de l'étoile considérée sont-elles dans sa zone habitable et constituent ainsi de bonnes candidates ? Combien d'entre elles présentent une atmosphère suffisamment dense et par-dessus tout, quelle est la nature de ces atmosphères ? Autant de questions auxquelles une nouvelle discipline née de ces observations, l'**exoplanétologie**, devrait répondre.

Dès lors apparaît une troisième motivation : la **mise en évidence de potentielles signatures de vie** dans les atmosphères de ces planètes. Suivant la bande de longueur d'onde choisie pour ces observations, différentes molécules pourront être détectées. La bande de longueur d'onde 7-20 µm, apparaît privilégiée, car elle contient, entre autres, les bandes d'absorptions de trois potentiels marqueurs de la vie : H_2O, O_3 et CO_2. Cependant, ces signatures pourraient également, pour la plupart, être détectées dans les bandes spectrales visibles ou ultraviolettes du spectre réfléchi de la planète. Mais ce serait sans compter avec les difficultés majeures qui vont limiter leur faisabilité.

2.2 Contraintes observationnelles

Pour des raisons de photométrie sur lesquelles nous reviendrons par la suite, les premiers objets visés par une mission spatiale recherchant des planètes habitables seront situés, en priorité, dans la "proche banlieue" terrestre. Que l'on ne s'y trompe pas, par "proche banlieue", il faut entendre les étoiles situées dans un rayon de 25 pc autour du Soleil, ce qui représente déjà des distances considérables.

Une liste préliminaire des étoiles-cibles de la mission Darwin a ainsi été établie à partir du catalogue Gliese (Gliese & Jahreiß, 1991). Elle contient environ 800 étoiles de type F, G, K et M dans un rayon de 25 pc autour du Soleil. L'objectif est d'observer parmi elles environ 150 étoiles, sélectionnées en fonction de leur probabilité d'abriter des planètes telluriques[29]. Un échantillon des objets planétaires détectés sera ensuite caractérisé de façon plus approfondie, notamment en termes de masse, d'éléments orbitaux, de composition atmosphérique et de température. Ceci requiert différentes campagnes d'observations, à différentes périodes. Malgré tout, la détection directe de planètes de la taille de la Terre, aussi loin, représente un véritable défi technologique, et ce, pour deux raisons principales.

2.2.1 Des objets si lointains ... et si proches !

La première difficulté vient de la très faible **séparation angulaire** entre la planète que l'on cherche à détecter et son étoile parente, étant donné la très grande distance qui nous sépare de ces objets. Typiquement, un système comme le système Terre-Soleil observé à une distance de 10 pc ne sous-tend qu'un angle de 0,1 seconde d'arc[30]. Qui plus est, pour les planètes situées dans la zone habitable d'étoiles de type K et M, beaucoup plus proche de l'étoile, cette séparation angulaire tombe à des valeurs bien plus

[28] Par détection directe, on entend le recueil de photons provenant de la planète elle-même et donc, discriminés de ceux provenant de l'étoile.

[29] Comme nous l'avons vu, cette probabilité sera estimée à partir des résultats obtenus par les mission de détection indirecte CoRoT et Kepler, ainsi que par les études réalisées au sol par les programmes de suivi d'étoiles par vitesses radiales.

[30] Ce qui correspond, pour l'anecdote, à observer un petit pois coupé en dix (ce qui est déjà un défi en soi ...), à une distance d'un kilomètre.

faibles que 0,1 seconde d'arc. D'où la nécessité d'une très grande résolution spatiale pour l'instrument d'observation. Or la résolution spatiale θ d'un télescope limité par la diffraction, exprimée en radians, est donnée par la relation

$$\theta = \frac{1,22.\lambda}{D} \tag{2.1}$$

où D est le diamètre du télescope et λ la longueur d'onde d'observation. Dès lors, cela nécessite, par exemple, pour des observations dans l'infrarouge thermique, un télescope d'un diamètre de 25 m pour observer une analogue de la Terre située à 10 pc.

2.2.2 Pour du contraste, c'est du contraste !

La seconde contrainte majeure est le **contraste** qui existe entre l'étoile et la planète. La figure 2.1 représente la distribution spectrale d'énergie du Soleil et de la Terre, tous deux observés à une distance de 10 pc, en fonction de la longueur d'onde d'observation (Beichman et al., 1999). Elle peut se diviser en deux parties :

- ➢ La planète constitue un corps noir[31] à la température effective de 300 K (pour lequel la loi de Wien[32] donne une longueur d'onde de 10 µm au maximum d'émission) ; la partie droite du spectre de la planète correspond donc à son émission propre ;
- ➢ D'autre part, une partie du flux de l'étoile, proportionnelle à l'albédo[33] de la planète, est réfléchie par l'atmosphère de celle-ci ; la partie gauche est donc celle d'un corps noir à la température effective de l'étoile (environ 5 777 K) avec un maximum d'émission vers 1 µm.

Cette courbe met en évidence le contraste entre de tels objets. Il est ainsi de l'ordre de 7.10^6 dans l'infrarouge thermique (entre 5 et 20 µm) et 1 000 fois plus important dans le visible ou le proche infrarouge, avec 5.10^9 entre 0,5 et 2 µm. Si l'on privilégie le cas le plus favorable, à savoir l'infrarouge thermique, il s'agit donc de trouver une méthode de détection qui permette d'atténuer de façon sélective la lumière stellaire d'un facteur environ 10^5, tout en transmettant le signal provenant de la planète dans un rayon de quelques dixièmes de seconde d'arc, avec une très grande efficacité compte tenu du faible nombre de photons disponibles.

2.2.3 Autres contraintes et conséquences

À ces deux contraintes principales viennent s'ajouter d'autres perturbations. Jusqu'ici, nous n'avons pas évoqué la possibilité d'observer ces objets depuis le sol. En effet, les observations dans l'infrarouge thermique sont rendues quasiment impossibles du fait de l'intensité du fond du ciel, due à l'émission thermique de l'atmosphère à 300 K, alliée à l'absorption atmosphérique (présence majeure de vapeur d'eau). Seules quelques fenêtres sont utilisables, avec des transmissions très variables et un nombre de molécules accessibles spectroscopiquement très réduit (Léna, 1995). Quant au domaine visible ou proche infrarouge, si l'on parvenait à vaincre le contraste gigantesque que nous avons évoqué, il resterait à s'affranchir de la dégradation naturelle des images liée à la traversée de l'atmosphère. L'optique adaptative a bien fait d'énormes progrès, mais pas encore suffisants pour cette application.

D'où l'intérêt d'une mission spatiale ! Mais d'autres problèmes restent alors à surmonter ...

[31] Voir la notion d'émission de "corps noir" au paragraphe 5.3.2.

[32] La loi de Wien donne la relation entre la température d'un corps noir à la température effective $T_{\text{effective}}$, exprimée en K et la longueur d'onde de son maximum d'émission de photons λ_{max}, exprimée en mètres, soit :

$$\lambda_{\text{max}} = 3,6698.10^{-3} / \text{T}_{\text{effective}}$$

[33] L'albédo est la fraction de rayonnement incident, réfléchie ou diffusée par un corps. On rappelle qu'un corps noir parfait possède un albédo nul.

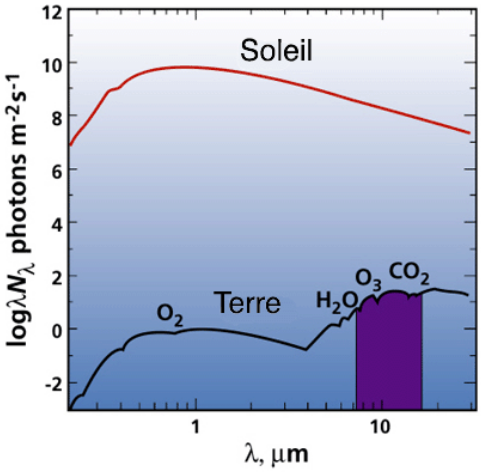


FIG. 2.1: Comparaison des spectres du Soleil et de la Terre, observés à une distance de 10 pc (d'après Beichman et al. (1999)). Sont également représentées les principales signatures de l'oxygène (O_2), de l'ozone (O_3), de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2).

Outre les difficultés classiques liées à l'environnement spatial, la **lumière zodiacale** vient créer un signal parasite additionnel venant compliquer considérablement la détection d'exoplanètes. Il s'agit d'une lumière diffuse, très gênante pour les observations, qui provient de l'éclairage (et donc du chauffage) par le Soleil, des grains de poussières[34] en orbite autour du Soleil, dans un plan de symétrie légèrement incliné ($\approx 3^\circ$) par rapport au plan de l'écliptique. Non seulement ces grains créent une diffusion de la lumière dans le visible, mais, comme ils sont chauffés par l'étoile, ils re-émettent également dans l'infrarouge, avec, en orbite terrestre, un pic d'émission vers 15 μm. Ils se comportent ainsi, pour une orbite proche de la Terre et sur une ligne de visée à 90°, comme une source étendue émettant comme un "corps gris" à la température moyenne de 235 K et d'émissivité $3,8.10^{-7}$ (Léna, 1995).

Réciproquement, les systèmes planétaires recherchés pourront être, eux-aussi, plongés dans des disques de poussières, dont le flux perturbateur sera plus ou moins intense selon l'âge de formation de ces systèmes. Les planètes observées seront donc noyées dans une **lumière exozodiacale** propre au système planétaire auquel elles appartiennent. De grandes incertitudes persistent concernant l'amplitude de ce signal additionnel qui devrait être, *a priori*, assez stable. Des programmes d'observations, au sol, sont prévus dans les prochaines années, afin de parfaire nos connaissances sur les environnements exoplanétaires[35].

Toutes ces contraintes doivent donc être évaluées en détail, en termes de flux relatifs. En effet, selon le domaine d'observation, le **flux** en provenance des planètes observées est très différent. En visible ou proche infrarouge, disons entre 0,5 et 2 μm, le flux d'une planète située à 10 pc atteint difficilement la valeur de 0,3 photons par seconde d'intégration et par mètre carré de surface collectrice de télescope. Cette valeur est extrêmement faible si l'on prend en considération le fait que les observations doivent être conduites avec des rapports signaux à bruits supérieurs à 5. En comparaison, le flux provenant d'un objet

[34]Ces grains de poussières ont trois principaux contributeurs (Beichman et al., 1999) : les débris astéroïdaux (entre 50% et 90%), provenant de leurs collisions et de leur érosion, les débris cométaires (entre 10% et 50%) et les grains interstellaires ($\approx$ 0,1%).

[35]Parmi ces programmes, l'instrument GENIE prévoit l'observation approfondie (Gondoin et al., 2004) de disques circumstellaires (voir le paragraphe 2.5.5 pour plus de détails).

similaire observé entre 6 et 20 µm est d'environ 10 photons par seconde d'intégration et par mètre carré de surface collectrice. D'un point de vue purement radiométrique, le gain se limite donc à un facteur 30, mais il se révèle crucial si l'on considère les différentes "manipulations" optiques que devront subir les photons collectés, si l'on souhaite, par exemple, en faire la spectroscopie.

La minimisation de l'**émission thermique des optiques** est également une spécification très importante de toute mission spatiale d'observation à très haute sensibilité dans l'infrarouge thermique, si l'on choisit cette bande de longueur d'onde. Celle-ci peut être obtenue en refroidissant l'ensemble du train optique à des températures de quelques dizaines de kelvin, mais cette solution est très consommatrice en "carburant" et réduit d'autant la durée d'une mission. Une alternative, malheureusement beaucoup plus coûteuse, consiste à éloigner au maximum le dispositif d'observation des sources de chaleur, la plus importante étant, bien évidemment, le Soleil. De cette façon, un refroidissement passif des instruments est possible, grâce à des radiateurs, et des températures de l'ordre de 40 K peuvent être atteintes. Autre avantage : s'éloigner du Soleil réduit l'influence de la lumière zodiacale !

Enfin, la dernière conséquence, que nous considèrerons ici bien qu'elle soit plus d'ordre technique, vient encore du contraste entre l'étoile et la planète. La très forte réjection de la lumière stellaire requise pour détecter les photons planétaires doit être maintenue avec une très grande **stabilité** durant l'intégralité des observations d'un même objet, qui peut atteindre plusieurs heures. Ceci impose de très fortes spécifications à la fois sur le contrôle des instruments, notamment en termes de vibrations, de stabilité thermique ou de contrôle d'attitude.

Pour finir, il existe une très bonne analogie résumant la plupart de ces contraintes observationnelles : détecter une planète tellurique dans les conditions que nous venons de résumer revient à chercher à observer, depuis la place de la Concorde à Paris, l'équivalent d'un ver luisant placé à 30 cm d'un phare de marine pointé vers l'observateur, le tout en plein cœur de la ville de Marseille. L'échelle de flux entre le ver luisant et le phare de marine donne le contraste ; celle de taille et de distance donne la séparation angulaire ; et enfin, l'ambiance lumineuse en plein cœur de Marseille ou sur la place de la Concorde à Paris, où observer une étoile à l'œil nu devient un défi, représente les lumières zodiacale et exozodiacale.

2.3 Choix de la bande spectrale d'observation

D'après les contraintes observationnelles que nous venons d'aborder, il apparaît que le choix de la bande spectrale d'observation est une étape primordiale dans la définition d'une mission spatiale destinée à la détection de signatures potentielles de vie.

Cette question reste encore, à l'heure actuelle, très discutée. Comme nous l'avons vu sur la courbe 2.1, il est possible, d'un côté, d'observer dans le domaine visible à proche infrarouge autour du maximum de la lumière diffusée par l'étoile. Mais il est également possible d'observer dans l'infrarouge thermique, aux alentours du maximum de l'émission propre de la planète. Sans nous lancer dans un débat passionné sur les avantages et les inconvénients des deux domaines d'observation, il convient plutôt de s'intéresser aux capacités de détection d'une mission dans chacun des deux domaines. Pour une discussion détaillée sur ces aspects, nous renvoyons le lecteur à Ollivier et al. (2003) et Schneider (2003).

Bien plus que les missions d'observation de transits, qui, dans certains cas particuliers, comme HD 209458b, pourront révéler certaines composantes atmosphériques (Charbonneau et al., 2002), la caractérisation complète des planètes observées exige notamment de déterminer la présence ou non d'une atmosphère, ainsi que sa composition, en recherchant le maximum d'espèces moléculaires.

TAB. 2.1: Comparaison des signatures spectrales détectables dans les bandes 0,5-2 µm et 5-20 µm et des résolutions nécessaires (d'après Des Marais et al. (2002) et Selsis (2002)).

	Visible / proche infrarouge (0,5-2 µm)		Infrarouge thermique (5-20 µm)	
Gaz	Signatures spectrales (µm)	Résolution correspondante nécessaire	Signatures spectrales (µm)	Résolution correspondante nécessaire
H_2O	0,72 0,82 0,94 1,13 1,41 1,88	37 35 17 19 10 11	7	10
CO_2	1,05 1,21 1,59	40 34 11	9,31 10,42 14,96	19 16 4
O_2	0,69 0,76 1,27	54 69 72	-[1]	-[1]
O_3	0,58	5	9,65	17
CH_4	0,73 0,79 0,89 1,00 1,69	57 29 32 20 10	7,65 7,98	13 6
NO	-	-	5,4	50
NO_2	-	-	6,2	30
N_2O	-	-	7,8 8,5 17	20 20 3
NH_3	-	-	5,8 8,6 10 11	25 10 20 10
SO_2	-	-	7,4 8,7 20	25 20 3

[1] La molécule O_2 étant homonucléaire, elle n'a pas de signature dans l'infrarouge.

Cette étude spectroscopique sera bien sûr limitée par les faibles rapports signaux à bruits qu'autorisent les flux que nous avons mentionnés pour chacun des domaines, ce qui réduira d'autant les résolutions accessibles. Le tableau 2.1 montre une comparaison des signatures détectables dans la fenêtre 0,5-2 µm (Des Marais et al., 2002) et de celles accessibles dans l'infrarouge thermique (Selsis, 2002), entre 5 et 20 µm, ainsi que les résolutions nécessaires pour chacun de ces domaines de longueurs d'onde. Compte tenu du fait que, dans l'infrarouge thermique, le critère $\{O_3,H_2O,CO_2\}$ est (nécessairement) utilisé au lieu du critère $\{O_2,H_2O,CO_2\}$ choisi pour le visible, cette comparaison montre qu'entre 0,5 et 2 µm, une résolution de 70 est nécessaire pour détecter les signatures les plus importantes, alors que, dans l'infrarouge thermique, une résolution de 20 suffit pour détecter non seulement les signatures les plus importantes, mais aussi des signatures secondaires, utiles pour caractériser les atmosphères[36].

Le tableau 2.2 montre ensuite une comparaison des seuils de détection nécessaires pour la plupart des signatures évoquées précédemment. Il a été établi avec pour hypothèse une résolution de 70 et un rapport signal à bruit de 25 par élément spectral pour la bande (0,5-2 µm) et, dans l'infrarouge thermique, une résolution de 20 et un rapport signal à bruit de 10 par élément spectral. Il apparaît donc que l'infrarouge thermique offre une gamme plus large de signatures accessibles, et ce, dans des conditions de détection moins sévères que dans le visible ou le proche infrarouge.

[36] On rappelle que, du fait qu'elle possède un centre d'inversion, la vibration d'une molécule homonucléaire comme O_2 ne donne lieu à aucune variation de son moment dipolaire électrique, qui reste nul. Cette molécule ne possède donc ni spectre de vibration, ni spectre de rotation en émission ou en absorption. Au total, la molécule de O_2 n'a donc pas de signature dans l'infrarouge.

TAB. 2.2: Comparaison des seuils de détection dans la bande 0,5-2 µm et dans la bande 5-20 µm (d'après Des Marais et al. (2002) et Selsis (2002)).

		Seuils de détection	
Gaz	Abondance terrestre	Visible / proche infrarouge (0,5-2 µm)	Infrarouge thermique (5-20 µm)
H_2O	8000 ppm	10 ppm	1 ppm
CO_2	355 ppm	100 ppm	1 ppm
O_2	≈ 21%	-[1]	3 %
O_3	6 ppm	1 ppm	1 ppm
CH_4	2 ppm	5 ppm	10 ppm
NO_2	0,1-1 ppb	-	100 ppb
NH_3	0,01 ppb	-	10 ppm

[1] La molécule O_2 étant homonucléaire, elle n'a pas de signature dans l'infrarouge.

2.4 Concepts instrumentaux

Le tableau 2.3 résume les principales spécifications d'une mission de caractérisation de planètes habitables, selon le domaine d'observation. Les disparités entre ces spécifications vont ainsi conduire à des concepts instrumentaux très différents selon que l'on souhaite observer dans l'un ou l'autre des domaines de longueurs d'onde.

Dans le visible / proche infrarouge, un télescope monopupille de 5 m de diamètre peut suffire pour détecter des objets à la limite de diffraction, à la longueur d'onde de 2 µm. Avec un miroir dont le diamètre devrait être proche de 6 m, le *James Webb Space Telescope* (JWST)[37], successeur du HST, pourrait convenir. Mais il resterait à vaincre le contraste entre étoile et planète à ces longueurs d'onde.

Plusieurs techniques sont en cours de développement pour atténuer ce contraste de façon suffisante pour observer les objets proches de l'étoile. Ces techniques sont essentiellement basées sur la **coronographie**, et, plus particulièrement, la coronographie par masque de phase (Rouan et al., 2000; Riaud et al., 2001, 2003)).

L'idée consiste, sur la base d'un coronographe de Lyot comme ceux que l'on utilise pour observer le Soleil, à venir occulter artificiellement l'étoile (Lyot, 1931). À ceci près que le masque d'amplitude est remplacé par un masque de phase dans le plan focal image[38]. Tout en réduisant le signal d'un facteur 10^{10} pour les meilleures versions actuelles, et dans des conditions idéales, de tels coronographes permettent également d'observer des objets très proches de l'étoile, situés à l'intérieur-même de la tache de diffraction.

Toujours pour lutter contre les effets de la diffraction, différentes sortes de pupilles ont également été étudiées. Des travaux sur des pupilles carrées ont ainsi déjà été publiés (Spergel & Kasdin, 2001). D'autres ont également proposé des pupilles apodisées gaussiennes (Debes & Ge, 2004; Nisenson & Papaliolios, 2001) ou encore des combinaisons.

[37] Ex-NGST, pour *Next Generation Space Telescope*.
[38] Nous reviendrons plus en détails sur cette technique au paragraphe 4.2.7.

TAB. 2.3: Comparaison des spécifications d'une mission de caractérisation de planètes habitables, entre les bandes 0,5-2 µm et 7-20 µm (d'après (Des Marais et al., 2002) et (Selsis, 2002)).
La résolution requise est déduite des seuils de détection du tableau 2.2, tandis que les rapports signaux à bruits mentionnés sont ceux nécessaires pour distinguer à 3 σ les raies spectrales, en abondance terrestre, par rapport au continuum.

	Visible / proche infrarouge	Infrarouge thermique
Gamme spectrale	0,5-2 µm	7-20 µm
Nombre de photons	0,3 photons.m^{-2}.s^{-1}	10 photons.m^{-2}.s^{-1}
Base / Diamètre de l'instrument (limite de diffraction)	5 m	50 m
Contraste étoile / planète	5.10^9	7.10^6
Résolution spectrale requise	70	20
Rapport signal à bruit (spectro)	25	10

Malgré tout, ces solutions, qui n'ont encore jamais été testées dans l'espace (un coronographe de phase devrait être embarqué pour la première fois sur le JWST en 2011), doivent être accompagnées d'un contrôle rigoureux de la lumière diffusée. Pour espérer détecter des planètes telluriques, il faut que la qualité de surface des optiques utilisées soit très proche de l'angström *rms*, autrement dit de quelques couches atomiques (Quirrenbach, 2005) !

Si l'infrarouge thermique semble présenter des avantages indéniables, il faut toutefois, dans ce domaine de longueurs d'onde, un télescope de 50 m de diamètre pour résoudre les objets que nous recherchons. Difficile à réaliser de façon monolithique, dans l'espace ... en tout cas, impossible avec les techniques actuelles.

Une solution réside dans l'**interférométrie**, qui simule un télescope d'une telle taille à l'aide d'une flotille de petits télescopes. La résolution d'un interféromètre variant comme λ/B, où B est la base de l'interféromètre (soit la plus grande distance entre deux télescopes), la haute résolution devient accessible avec des télescopes élémentaires de taille raisonnable (inférieure à 4 m, soit un diamètre acceptable pour une coiffe de lanceur comme Ariane 5).

Au total, se pose une alternative :

- ➢ un coronographe monopupille ultra-performant, optiquement parlant, pour des observations dans le visible / proche infrarouge ;
- ➢ un interféromètre spatial, pour des observations dans l'infrarouge thermique.

Une alternative ... donc deux missions possibles.

En 1993, une proposition à l'ESA posait les bases de ce que serait un observatoire interférométrique spatial, observant dans l'infrarouge thermique et où les flux récoltés par quatre satellites volant en formation sont recombinés de façon cohérente dans un satellite dédié (Léger et al., 1993). Il s'agit de la mission Darwin, du nom du naturaliste Charles Darwin, "père" de la théorie de l'évolution. Quelques années plus tard, un projet du nom de *Terrestrial Planet Finder* (TPF), faisait son apparition outre-atlantique (Angel & Woolf, 1997), du côté de la NASA, pour rechercher également des exoplanètes habitables.

Mais autant l'ESA a, quasiment dès le début, choisi l'infrarouge thermique, et en particulier la bande 7-20 µm, comme domaine de travail de la mission Darwin, autant les américains de la NASA ont longtemps hésité, repoussant ce choix d'année en année, pour finalement décider ... de ne pas choisir.

Plus exactement, la mission TPF devrait être divisée en deux missions successives, d'abord TPF-C, un coronographe qui observerait dans le visible et le proche infrarouge, puis, quelques années plus tard, TPF-I, un interféromètre de type Darwin, pour compléter les observations dans l'infrarouge thermique. Dans la suite, nous nous concentrerons sur les missions interférométriques[39].

2.5 La mission Darwin

Dans les paragraphes qui suivent, nous allons maintenant présenter de façon détaillée quelles devraient être les caractéristiques de cette mission.

2.5.1 Un interféromètre spatial ... un peu spécial

L'interférométrie permet de résoudre le problème majeur de la résolution spatiale. Mais il faut encore trouver une solution pour "éteindre" le flux de l'étoile dans un rapport proche du contraste étoile / planète.

Dans un article datant de 1978, Bracewell proposa, grâce à un interféromètre et moyennant de l'utiliser dans un mode un peu particulier appelé "interférométrie en frange noire"[40], d'atteindre la très forte réjection de lumière stellaire nécessaire pour détecter directement une exoplanète (Bracewell, 1978). L'année suivante, cette fois-ci avec McPhie, ils sont ainsi les premiers à proposer qu'un interféromètre spatial infrarouge puisse supprimer le flux stellaire en pointant l'étoile sur une frange noire tout en détectant une éventuelle planète en la plaçant sur une frange brillante adjacente (Bracewell & MacPhie, 1979). Et ce en faisant tourner l'interféromètre sur lui-même pour moduler le signal planétaire.

Le principe de l'interférométrie en frange noire est résumé sur la figure 2.2, avec la configuration la plus simple, qui a pris le nom de Bracewell, à deux télescopes. Chaque télescope, qui, individuellement, ne résout pas le système étoile-planète, est pointé dans la direction de l'étoile. La lumière de cette source axiale atteignant les deux télescopes simultanément, la recombinaison de leurs faisceaux crée un système de franges d'interférences, où l'étoile est placée sur la frange centrale brillante. Ceci, à la condition que les faisceaux aient suivi exactement (à quelques nanomètres près) le même chemin optique[41]. Jusqu'ici, il s'agit d'interférométrie classique.

L'idée de Bracewell et McPhie est d'ajouter, de façon artificielle, un déphasage de π dans l'un des bras de l'interféromètre. De cette façon, la lumière de l'étoile est recombinée de façon destructive, sur une frange centrale "noire". Autrement dit, la transmission sur l'axe de visée devient nulle ... En contrepartie, la lumière provenant d'une source située hors de l'axe de visée, et formant un angle θ avec celui-ci, atteint les deux télescopes avec un déphasage additionnel $B.\sin(\theta).\cos(\psi)/\lambda$, où B est la base de l'interféromètre et ψ la coordonnée azimutale de la source sur le ciel.

[39] Bien que les projets Darwin et TPF-I aient de très fortes chances de fusionner (si les ingénieurs de la NASA et de l'ESA parviennent à un accord sur un concept commun !), nous nous contenterons d'étudier, avec plus de détails, la mission Darwin, afin de ne pas égarer le lecteur dans d'innombrables spécifications, qui connaissent, à peu de choses près, autant de variations que le nombre de mois nous séparant de leur lancement ...

[40] À ce sujet, l'"interférométrie en frange noire" devrait plutôt s'appeler "interférométrie en teinte noire", dans la mesure où les observations ne se font pas sur une frange, mais sur la "teinte plate" de l'interféromètre.

[41] Nous reviendrons sur ce point par la suite.

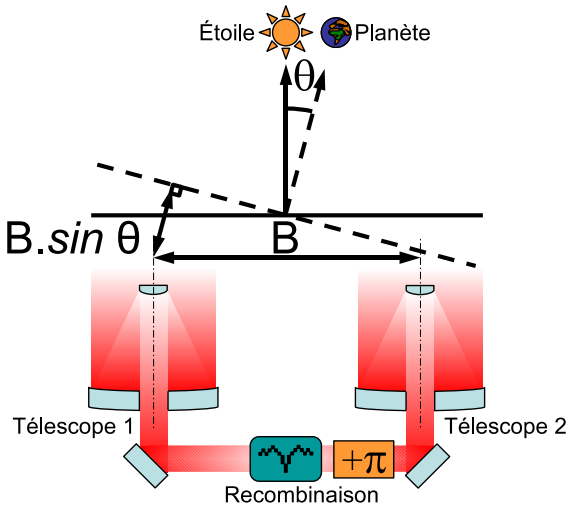


FIG. 2.2: Principe de l'interférométrie en frange noire, inspirée de l'interféromètre de Bracewell.

La carte de transmission d'un interféromètre de Bracewell, en fonction des coordonnées (θ, ψ) est représentée sur la figure 2.3, pour un système Soleil-Terre, observé avec un interféromètre de 10 m de base, à la longueur d'onde de 10 µm. Cette carte de transmission montre que, si l'on choisit une base B appropriée, une planète en orbite peut être observée, grâce à ce dispositif, avec une grande transmission, durant une partie de son orbite, tout en annulant la lumière de l'étoile.

On définit alors le **taux de réjection de l'interféromètre**, que l'on note généralement ρ, comme le rapport entre le maximum de transmission de l'instrument et son minimum, selon la relation

$$\rho \overset{\text{déf}}{=} \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \tag{2.2}$$

Cette notion permet de comparer facilement les performances d'un interféromètre en frange noire avec le contraste entre l'étoile et la (ou les) planète(s) que l'on cherche à détecter. Si l'instrument était parfait, ce taux de réjection serait infini. Mais ce n'est le cas que si les faisceaux recombinés sont strictement identiques[42], en termes d'amplitude, de phase et de polarisation, ce qui reste un cas d'école. Par conséquent, ce taux de réjection reste limité et des fuites stellaires persistent !

La notion de taux de réjection peut être rapprochée de celle de **visibilité**, plus généralement utilisée en interférométrie. On définit la visibilité de franges d'interférences par la relation

$$\mathbb{V} \overset{\text{déf}}{=} \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \tag{2.3}$$

La visibilité est donc, comme le taux de réjection ρ, une grandeur sans unité, comprise entre 0 et 1 (ou 100 %) et maximale pour un instrument parfait. La relation (2.3) devient alors, en introduisant le taux de réjection ρ

$$\mathbb{V} = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \tag{2.4}$$

En d'autres termes, l'obtention de taux de réjection élevés correspond à une visibilité extrêmement proche de 1.

[42] Nous reviendrons sur ces considérations, sous un aspect quantitatif, dans la partie 3.

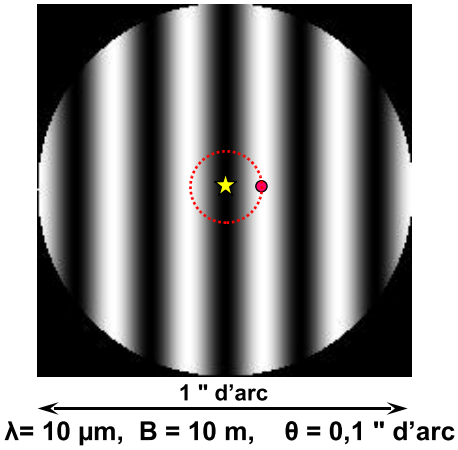


FIG. 2.3: Carte de transmission de l'interféromètre de Bracewell, pour un système étoile / planète séparés par 0,1" d'arc, observé à la longueur d'onde de 10 µm, avec un interféromètre de 10 m de base. L'étoile est centrée sur la frange noire, où la transmission est nulle, tandis que la planète est placée sur la frange brillante adjacente, en ajustant la base de l'interféromètre. Les pointillés représentent la trajectoire de la planète sur la carte de transmission, lors de la rotation de l'interféromètre.

2.5.2 Différentes configurations

Depuis la proposition originale de la mission spatiale Darwin, le nombre de télescopes constituant l'interféromètre et leur configuration n'ont cessé d'évoluer au gré des études de faisabilité. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons d'abord évoquer l'une des limites physiques ayant conduit à la recherche de la configuration la plus performante, à savoir la notion de fuites stellaires. Ensuite, nous allons tenter de dresser un rapide (et non exhaustif) historique de ces configurations, qui seront rassemblées dans la figure 2.4. Il faut noter que la plupart de ces configurations nécessitent un satellite supplémentaire, transportant le laboratoire de recombinaison. La plupart du temps, sauf mention explicite, nous ne compterons pas ce satellite recombinateur dans la description des configurations.

Notion de fuites stellaires

Même avec un interféromètre de Bracewell idéal, l'extension stellaire n'est pas parfaitement nulle. En effet, du fait de sa taille angulaire, l'étoile est partiellement résolue, donnant lieu à un signal de **fuites stellaires**, néfaste pour les observations. L'amplitude de ces fuites stellaires est directement reliée au nombre et à la configuration spatiale des télescopes formant l'interféromètre (Absil, 2001). Elle dépend naturellement des caractéristiques de l'objet observé et varie comme l'inverse du taux de réjection que nous avons défini au paragraphe précédent. Si l'on note θ l'angle de séparation entre l'axe de visée où se trouve l'étoile et l'axe dans lequel on recherche une planète, la transmission d'un interféromètre de Bracewell à deux télescopes (Figure 2.4a) varie en $\sin^2(\theta)$. Compte tenu des faibles angles considérés, on parle généralement d'une transmission fonction de θ^2. Le taux de réjection pouvant être atteint avec une telle configuration suit alors cette variation (Figure 2.5b). Il faut enfin noter que la stabilité de ce signal de fuites stellaires est directement liée à la précision de pointage de l'interféromètre.

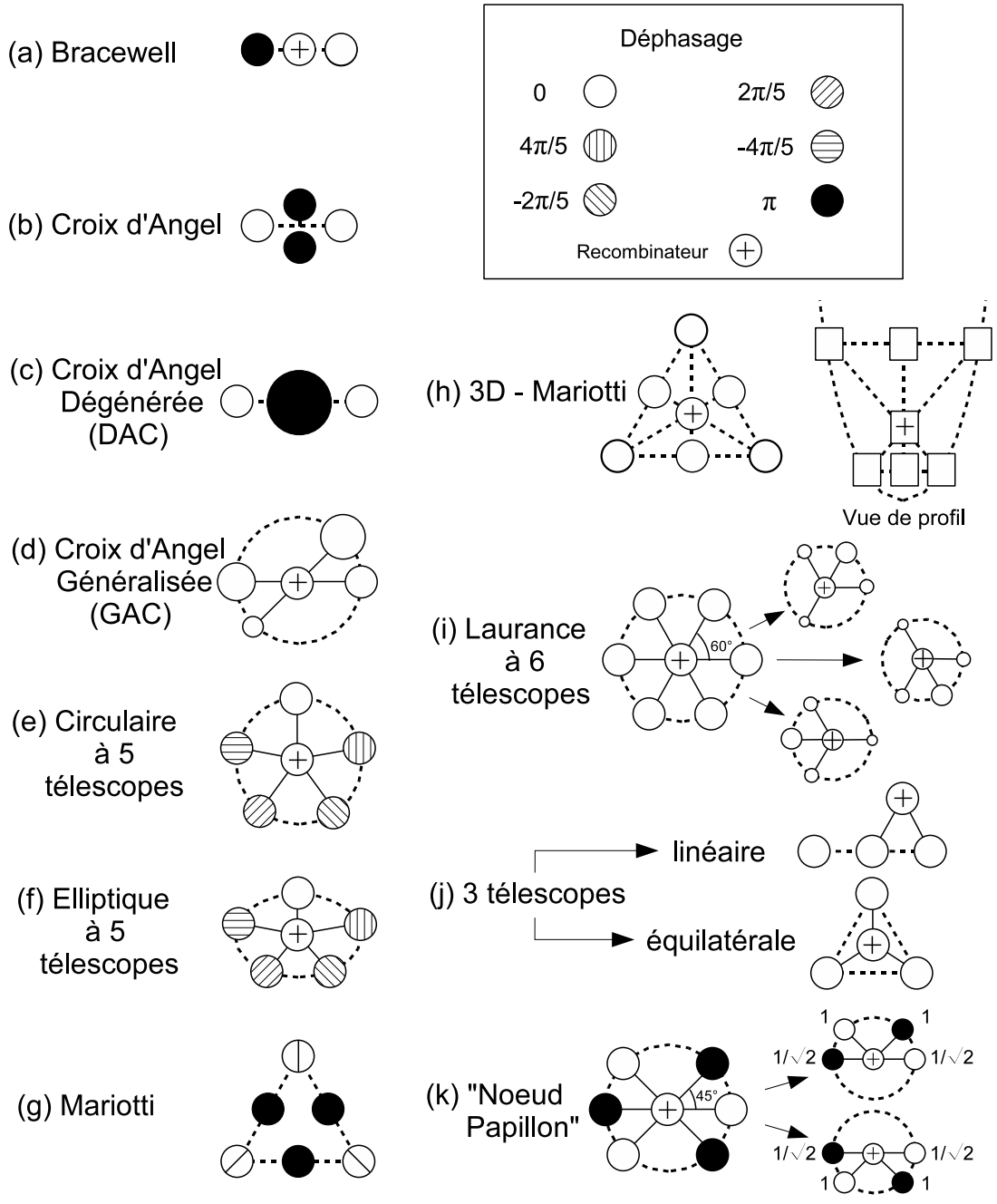
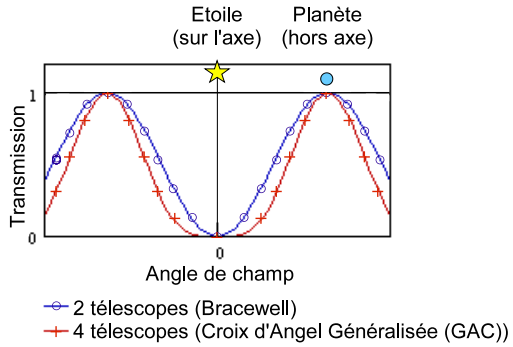
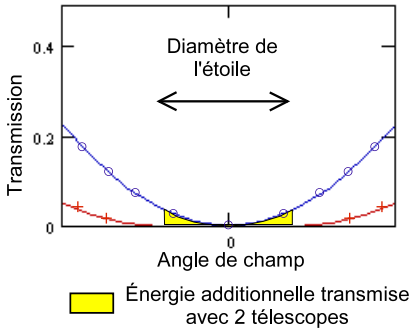


FIG. 2.4: Différentes configurations étudiées pour l'interféromètre spatial Darwin.
Le remplissage des pastilles suggère le déphasage appliqué aux faisceaux, tandis que leur diamètre correspond à la surface du télescope concerné. Pour la configuration dite en "nœud papillon", les valeurs numériques représentent les amplitudes relatives des faisceaux lors de la recombinaison.



(a) Comparaison de la transmission d'un interféromètre de Bracewell et d'une Croix d'Angel Généralisée (GAC).



(b) Comparaison des fuites stellaires d'un interféromètre de Bracewell et d'une Croix d'Angel Généralisée (GAC).

FIG. 2.5: Variation angulaire de la transmission d'un interféromètre.
La transmission avec une GAC est beaucoup plus "plate" autour de l'axe de visée, réduisant d'autant les fuites stellaires.

Croix d'Angel et dérivés

Afin d'améliorer ces performances, on peut augmenter le nombre de télescopes. Depuis la proposition originale de Bracewell en 1978, de nombreuses variantes ont été proposées. En 1990, Angel a ainsi proposé une configuration, appelée "**Croix d'Angel**" (Figure 2.4b), utilisant quatre télescopes disposés en croix[43] (Angel, 1990). Il s'agit en fait d'un double interféromètre de Bracewell, avec une transmission variant comme θ^4 au lieu de θ^2. Comme le montre la figure 2.5a, la carte de transmission reste alors assez plate autour de l'axe de visée, tout en ayant un profil plus raide au bord de la zone d'extinction. La suppression de la lumière stellaire est meilleure, sans que le rayonnement de la planète en soit affecté. Au passage, la largeur de la frange centrale détermine la distance minimale à laquelle une planète pourra être détectée.

Par la suite, de nombreuses configurations ont été dérivées de la croix d'Angel, toujours avec une transmission en θ^4. Parmi ces dérivés, la "**Croix d'Angel Dégénérée**" (DAC) comporte non plus quatre, mais trois télescopes, la surface du télescope central étant le double de celle des autres (Figure 2.4c). Le concept de croix d'Angel a ensuite été étendu, avec les "**Croix d'Angel Généralisées**" (GAC). On désigne sous ce nom toute configuration à quatre télescopes, où les déphasages relatifs sont réduits à 0 et π et dont la transmission varie comme θ^4 (Figure 2.4d). En général, les tailles des télescopes ne sont pas identiques. Pour éviter de trop longues lignes à retard, ils doivent être placés sur un cercle, dans un même plan[44], avec le recombinateur en son centre. La figure 2.5 illustre les apports de la croix d'Angel généralisée par rapport à l'interféromètre de Bracewell classique.

Évolution des configurations

Le premier concept proposé pour la mission Darwin (Léger et al., 1993) faisait appel à quatre télescopes de 1,5 m de diamètre répartis sur une croix d'Angel. Par rapport au concept d'Angel, la réduction du diamètre des télescopes était rendue possible, car la configuration était placée non plus à 1 U.A., mais

[43]Dans la proposition originale, Angel proposait de disposer quatre télescopes de 8 m de diamètre aux sommets d'un carré de 30 m de côté, sur une orbite à 1 U.A.

[44]Ceci pour éviter le couplage thermique entre les différents télescopes.

à 5 U.A., bénéficiant par là-même de la diminution d'un facteur 1 800 de la lumière zodiacale (Absil, 2001). La configuration évolue ensuite vers une constellation asymétrique à cinq télescopes (Léger et al., 1996), disposés sur un cercle, avec un recombinateur central (Figure 2.4e). La transmission est toujours en θ^4, mais les déphasages relatifs doivent être multiples de $\pi/5$ (Mennesson & Mariotti, 1997) et la carte de transmission génère une incertitude sur la position des planètes détectées. Cette configuration est donc modifiée sous la forme d'une ellipse (Figure 2.4f), levant ainsi l'indétermination. Néanmoins, cette nouvelle configuration requiert de longues lignes à retard, complexifiant d'autant la mission.

Afin d'augmenter les capacités de détection d'une planète dans le plan de visée autour de l'étoile et de réduire l'effet du contraste, il est très rapidement apparu souhaitable de générer une **modulation du signal planétaire**. Cela permet ainsi d'abaisser l'exigence en performance de réjection. Cette modulation est d'autant plus indispensable que le signal de la planète est altéré par différentes sources de bruit, plusieurs centaines de fois supérieures en intensité. Parmi ces sources de bruit, on compte les variations des chemins optiques, de l'amplitude des signaux, ou du fond thermique.

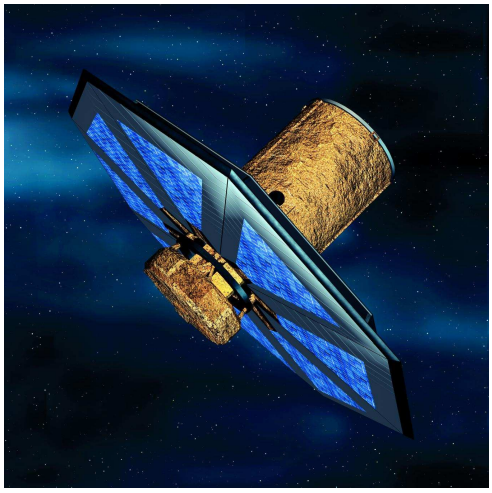
La solution la plus simple consiste à faire tourner la configuration autour de son axe. De la sorte, le signal provenant de la planète est modulé, pendant que celui de l'étoile reste constant. Néanmoins, cette option est très coûteuse en "carburant" et réduit d'autant la durée d'une mission[45]. Par ailleurs, cette opération ne peut se faire qu'à des fréquences très lentes.

Une autre solution est d'introduire une **modulation interne** à la configuration. Pour cela, on cherche à moduler la carte de transmission en isolant deux sous-interféromètres que l'on module entre eux. Il faut donc introduire, avant de les recombiner, un déphasage variable (généralement de $\pm\pi/2$) entre les sorties destructives de deux sous-interféromètres, qui peuvent être des Bracewell, des GACs, des DACs, etc. Il s'agit d'une modulation interne, car elle n'intervient que lors de la recombinaison effective des faisceaux. Cette idée a été proposée par Jean-Marie Mariotti avec une configuration triangulaire à ... six télescopes et des sous-interféromètres de trois télescopes (Figure 2.4g). Grâce à une fréquence de modulation accrue, cette solution a l'avantage d'augmenter la capacité de détection, mais elle complexifie encore la recombinaison des faisceaux.

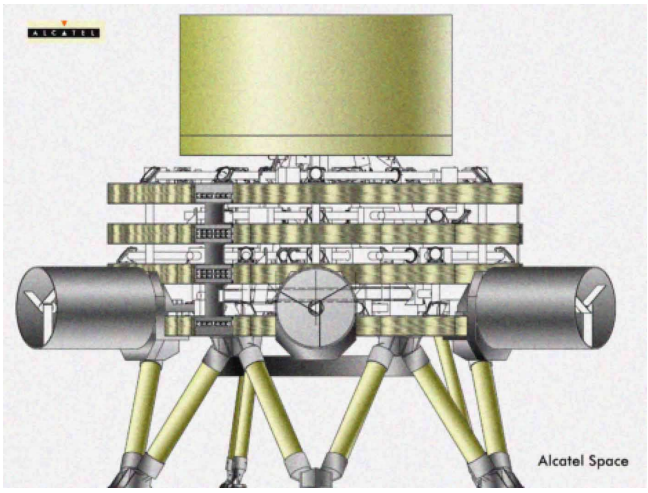
Cette configuration est revisitée en 2000 lors d'une étude système, réalisée par *Alcatel Space Industries* pour l'ESA. Pour simplifier la recombinaison, il est proposé de placer les six télescopes par groupes de trois (DACs), dans deux plans distincts sur un paraboloïde. On ajoute alors également un recombinateur central dans un plan intermédiaire, au foyer du paraboloïde. Cette configuration sera appelée "3D-Mariotti" (Figure 2.4h). Malheureusement, cette disposition crée un couplage thermique important entre les télescopes, l'émission des pare-soleils des satellites d'avant-plan venant contaminer les parties froides des autres durant les observations. Dès lors, les configurations non coplanaires ne seront plus étudiées.

La configuration évolue alors vers une flotille hexagonale de six télescopes (Karlsson & Mennesson, 2000). Cette **configuration**, dite **de Laurance** nous servira de référence pour la suite (Figure 2.4i). Elle a été étudiée en détail durant l'étude-système d'*Alcatel Space Industries* et repose sur un ensemble cette fois-ci planaire de six télescopes de 1,5 m de diamètre. Ces télescopes sont intégrés dans des satellites individuels (Figure 2.6a) volant en formation autour d'un satellite de recombinaison, central (Figure 2.6b). Cet ensemble, représenté sur la figure 2.7 est maintenu dans cette configuration grâce à un huitième satellite chargé, en outre, d'assurer la télémétrie avec la Terre. Le "diamètre" de cet hexagone, qui correspond à la base de l'interféromètre, peut varier entre 50 et 500 m, afin, comme nous l'avons vu, de maximiser la couverture spatiale autour de l'étoile. Chacun des satellites est équipé d'un pare-soleil déployable

[45]Nous ne considérons ici que les solutions faisant appel au vol en formation des différents satellites. Il a également été envisagé de relier les satellites par des "poutres". Il est alors plus facile et moins coûteux, en termes de carburant, de faire tourner l'interféromètre, mais on perd la possibilité de re-configurer la formation.



(a) Satellite-télescope (*ESA*).
Pour rappeler l'échelle, les pare-soleil ont une envergure de 7,4 m.



(b) Satellite de recombinaison, placé au centre de la configuration (*Alcatel Space Industries*).

FIG. 2.6: Satellite-télescope et satellite de recombinaison de la mission Darwin.

de 7,4 m de diamètre et de deux radiateurs passifs permettant de refroidir le train optique à 40 K. Ceci ramène le niveau d'émission thermique venant perturber les observations à un niveau comparable à celui de la lumière zodiacale à 18 µm, en bout de bande spectrale.

En 2001, Anders Karlsson a proposé un nouveau type de modulation, dénommée **modulation inhérente** (Absil et al., 2003). Il s'agit de réaliser une modulation interne, mais sans avoir recours au déphasage additionnel entre les deux sous-interféromètres. Nous n'entrerons pas ici dans les détails de cette technique. Pour plus d'informations, nous invitons le lecteur à se reporter au travail sus-cité. Une étude complète des techniques de modulation a également été effectuée par Absil (2001).

La configuration hexagonale de Laurance est ensuite déclinée sous la forme de la configuration dite en "nœud papillon" (ou "*bow-tie configuration*"), représentée sur la figure 2.8 (D'Arcio & Karlsson, 2004). Cette configuration allie une efficacité de modulation doublée par rapport à la précédente, avec un schéma de recombinaison beaucoup plus simple. Le tout avec un gain d'un facteur quatre sur le temps d'intégration nécessaire pour détecter les exoplanètes et analyser leurs atmosphères par spectroscopie. L'observation de 500 étoiles de la séquence principale serait ainsi possible pendant la même durée de mission, au lieu des 150 initialement prévues.

Pour finir, des configurations réduites à trois télescopes ont été étudiées dernièrement (Karlsson et al., 2004), sous forme linéaire, ou sous la forme d'un triangle équilatéral (Figure 2.4j). Elles permettraient, tout en maintenant des performances similaires moyennant une augmentation du diamètre des télescopes, de réduire la complexité du système. Elle ne permet cependant plus de disposer de satellites redondants, en cas de perte d'un satellite lors du vol en formation.

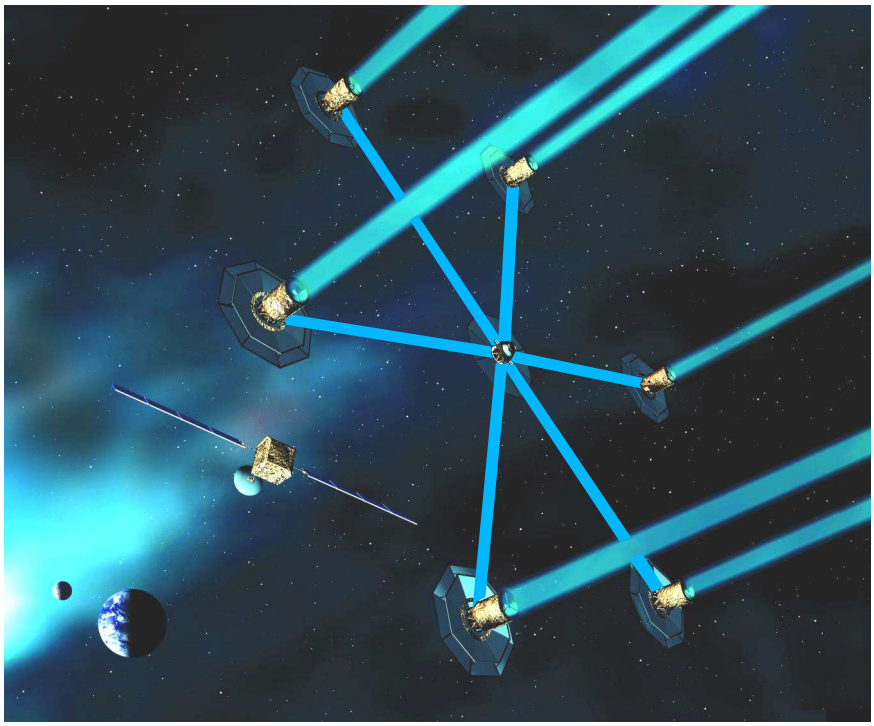
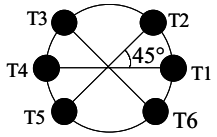
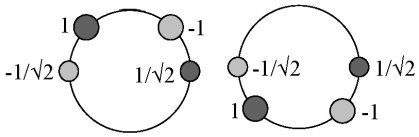


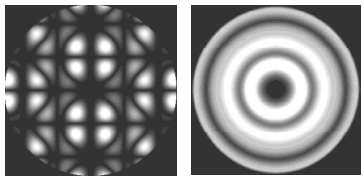
FIG. 2.7: L'observatoire spatial Darwin.
Vue d'artiste de la configuration dite de Laurance, à six télescopes (*ESA*). Chaque télescope pointe dans la direction et reçoit le flux du système étoile-planète. Les six faisceaux sont renvoyés vers le satellite de recombinaison central, qui assure également, avec le huitième satellite, le maintien de la configuration grâce à différents systèmes de métrologie. Ce dernier satellite est finalement chargé de la télémétrie avec la Terre.



(a) Répartition des télescopes sur la configuration.

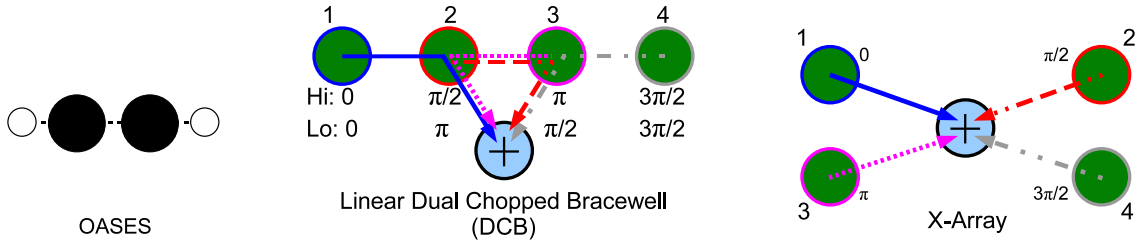


(b) Sous-interféromètres correspondants (GAC), avec leurs amplitudes respectives. Les valeurs négatives indiquent qu'un déphasage achromatique de π a été ajouté.



(c) Carte de modulation.
À gauche, les zones les plus brillantes sont celles où la modulation est la plus efficace, avec un maximum de 65% ; à droite, la même carte, après rotation de l'interféromètre.

FIG. 2.8: Configuration dite en "nœud papillon"(ou "*bow-tie configuration*"), l'une des configurations possibles pour l'interféromètre Darwin (d'après D'Arcio & Karlsson (2004)).



(a) Configuration OASES de la proposition originale.

(b) Configuration linéaire en double Bracewell modulés (DCB), avec un recombinateur excentré.

(c) Configuration en X (*X-Array*).

FIG. 2.9: Principales configurations étudiées pour la mission TPF-I.
Les flèches indiquent les méthodes de recombinaison. Figurent également les déphasages appliqués selon les résolutions souhaitées.

Quelques mots sur TPF-I

Comme nous l'avons dit, la mission TPF-I de la NASA représente, en quelques sortes, l'*alter ego* de la mission Darwin. En parallèle avec les configurations de cette dernière, d'autres études ont donc été menées outre-Atlantique. Dans la proposition originale de la mission TPF-I (Woolf & Angel, 1997), quatre télescopes étaient réunis grâce à une "poutre". Grâce à la superposition de deux interféromètres de Bracewell avec des espacements différents, la réjection varie comme θ^6 dans cette configuration linéaire appelée OASES (Figure 2.9a). Par la suite, de très nombreuses configurations linéaires ont été envisagées. Aux dernières nouvelles (Lawson & Dooley, 2005), deux configurations sont toujours en lice :

- ➢ l'une basée sur la configuration OASES, mais renommée *linear Dual Chopped Bracewell* (DCB) avec un recombinateur excentré (Figure 2.9b). Elle présente l'avantage d'offrir, selon le mode de recombinaison (double Bracewell ou double DAC), deux résolutions. Sa base pourrait varier de 60 à 150 m ;
- ➢ l'autre est une configuration en X, qui n'offre qu'une résolution (Figure 2.9c). Elle a néanmoins l'avantage de pouvoir ajuster la résolution en frange noire (donnée par la base la plus large, donc la diagonale), indépendamment de la résolution en imagerie (sur l'autre côté du rectangle). Cela peut être un avantage pour la détection et l'étude des systèmes planétaires. Sa base serait variable de 40 à 100 m.

2.5.3 Aspects scientifiques

Capacités spectroscopiques

Différentes études, destinées à déterminer les résolutions spectrales accessibles avec un interféromètre, ont déjà été menées pour les missions Darwin et TPF-I (Beichman et al., 1999). Elles prennent en compte les différents facteurs intervenant lors de la détection et qui se traduisent à la fois par un signal parasite et par un bruit additionnels :

- ➢ les fuites stellaires dues à la taille angulaire de l'étoile et à la stabilité de pointage de l'interféromètre ;
- ➢ le fond infrarouge dû à la lumière zodiacale du Système Solaire et à l'émission propre aux télescopes ;
- ➢ l'émission due à la lumière exozodiacale du système observé.

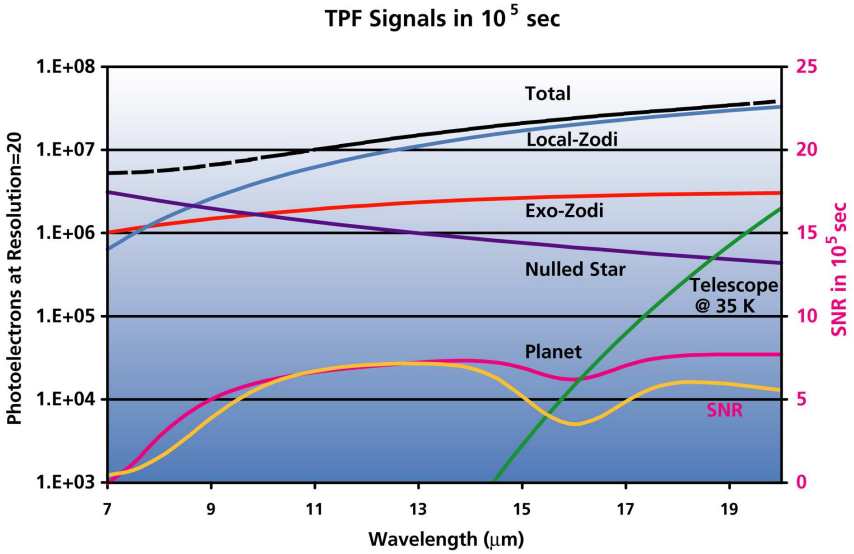


FIG. 2.10: Variations des sources de signal et de bruit selon la longueur d'onde, dans les conditions d'observation de la mission TPF-I, applicables également à la mission Darwin (Beichman et al., 1999). Sont représentées les lumières locales et exozodiacales, les fuites stellaires résiduelles et l'émission propre aux instruments à 35 K. Le rapport signal à bruit résultant est également représenté grâce à l'échelle de droite.

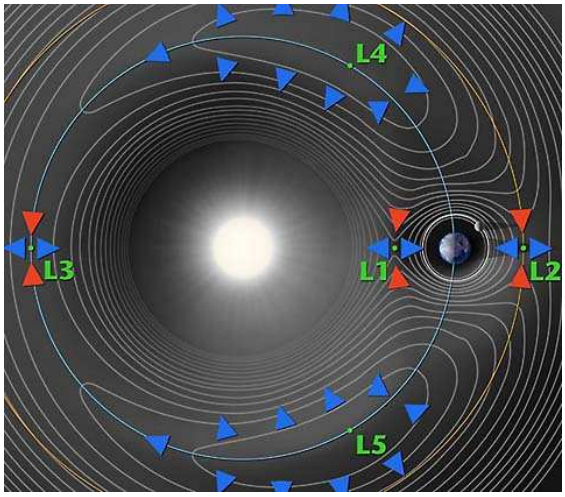
La figure 2.10 illustre ces différentes contributions en termes de signal et de bruit dans les conditions d'observation typiques de la mission spatiale TPF-I, mais qui sont également applicables à la mission Darwin. Ces considérations amènent à une résolution spectrale maximale de l'ordre de 20 à 30.

Mode imagerie

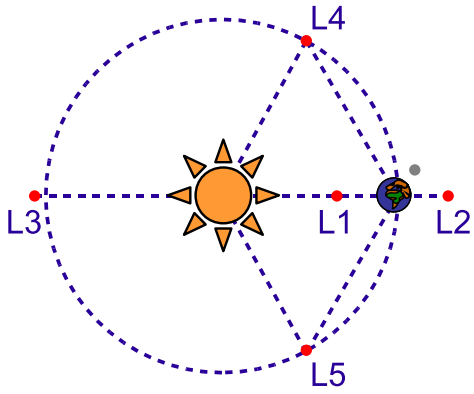
En tant qu'interféromètre placé dans l'espace, il apparaît tout à fait naturel que les capacités d'imagerie de la mission Darwin soient également utilisées. Il existe de très nombreuses raisons en cette faveur. Parmi elles, il faut noter que Darwin s'inscrira comme une nouvelle étape de la longue série d'observatoires infrarouges, tels que IRAS, ISO, Spitzer, ou encore le JWST. D'autre part, vus le coût et les ambitions de cette mission, dans l'hypothèse (désastreuse) où le programme de recherche d'exoplanètes connaîtrait des difficultés, un élargissement du programme d'imagerie serait tout aussi profitable.

D'autant plus que, par sa capacité d'imagerie à haute résolution liée à sa structure d'interféromètre, l'observatoire Darwin devrait offrir, dans le domaine de longueur d'onde proche de 10 μm, des images astrophysiques avec non seulement une sensibilité équivalente à celle du JWST, mais une résolution angulaire dix à cent fois meilleure (Röttgering et al., 2003). En recombinaison constructive classique en plan-pupille, grâce à la synthèse d'ouverture avec une extension maximale de 500 m, Darwin atteindra une résolution angulaire de 4 mas à la longueur d'onde de 10 μm, contre 350 mas avec le JWST. Or, en mode imagerie, le contraste nécessaire pour observer les planètes n'est plus de 10^5, mais de (seulement) 100, puisque le système étoile / planète est résolu. Il en est de même pour les exigences en termes de qualité de front d'onde et de stabilité de chemin optique.

D'un point de vue scientifique, la région spectrale allant de 5 à 20 μm est très riche en signatures de nombreuses espèces moléculaires, ioniques, mais aussi caractéristiques des poussières. Darwin devrait



(a) Gradients gravitationnels autour des points de Lagrange (*NASA*).
Les points L1, L2 et L3 sont des points instables ("selles de cheval"), tandis que les points L4 et L5 sont stables.



(b) Répartition géométrique des points de Lagrange.
L'observatoire spatial Darwin devrait être placé au point L2, à 0,01 U.A. de la Terre, dans une direction opposée en permanence aux deux sources de bruit, notamment thermique, que sont le Soleil et la Terre.

FIG. 2.11: Points de Lagrange du système Terre-Soleil.

ainsi permettre une meilleure compréhension de la **formation et de l'évolution des galaxies à grand décalage vers le rouge**, dont la densité spectrale d'énergie est maximale vers 5 à 10 µm. Les images astrophysiques à haute résolution des **environnements d'étoiles jeunes** autoriseront de véritables cartographies en termes de densité, température ou métallicité. Darwin améliorera ainsi les connaissances concernant les disques d'accrétion, les jets de matière ou encore la formation des planètes extrasolaires.

Un autre domaine d'études accessible est celui des **noyaux actifs de galaxies** (AGN) et des **trous noirs massifs**, objets parmi les plus spectaculaires de l'Univers, mais dont la dynamique et l'évolution restent encore mal connues.

D'une façon générale, des progrès considérables devraient être possibles grâce à l'amélioration de la résolution des images de galaxies distantes, et tous les domaines actuels de la "haute résolution angulaire" sont concernés.

2.5.4 Aspects techniques

Principe du vol en formation

Faire voler six télescopes en formation, comme il est prévu dans la mission Darwin, représente un véritable défi technique. D'autant plus que ceci devra se faire de façon totalement autonome. En effet, pour minimiser les gradients gravitationnels auxquels la formation sera soumise et permettre un refroidissement passif des instruments en s'orientant en permanence dans une direction opposée au couple Terre-Soleil, la flotille devrait être placée au point de Lagrange L2, à quelque 1,5 millions de kilomètres de la Terre (Figure 2.11). Autant dire que toute intervention humaine en cas de perte d'un satellite paraît bien compromise !

Le maintien de la configuration repose essentiellement sur la précision d'un système de métrologie, divisé en différents étages de précision croissante. Il est chargé de limiter les perturbations dues aux

erreurs de pointage, aux différences d'amplitude ou, bien évidemment, aux différences de marche entre chaque couple de satellite. Ces perturbations, parmi d'autres, viennent directement influer sur la réjection de la lumière stellaire permettant d'observer les exoplanètes.

La tâche essentielle qui doit être remplie par ce système de métrologie est d'assurer le cophasage du réseau, en permettant la fermeture des boucles d'asservissement fin des différences de marche. Une des stratégies envisagées est la suivante :

- ➢ Un premier étage fera appel à un **positionnement radio-fréquence** des différents satellites, allié à des techniques goniométriques. La géométrie globale de la formation sera ainsi assurée selon ses trois dimensions, avec une précision de l'ordre du centimètre à la fréquence de 1 Hz ;
- ➢ Ce premier étage sera relayé par une **métrologie laser** issue du satellite de recombinaison central et dirigée vers chacun des six satellites de la formation. Elle fournira une mesure précise de leur position dans le plan de référence défini par le satellite central. Les distances dans ce plan devront être connues avec une précision de 100 µm *rms*, tandis que les distances dans le plan orthogonal (autrement dit hors du plan de la formation) seront mesurées à 1 cm près. L'axe optique des faisceaux de transfert vers le satellite de recombinaison sera stabilisé à 80 mas.$Hz^{-1/2}$;
- ➢ Enfin, un troisième et dernier étage est basé sur un suiveur de franges, asservi sur l'étoile-cible elle-même. Nous reviendrons sur ce système au paragraphe 2.5.5.

Cette métrologie élaborée nécessite un système de correction adapté. Il sera incorporé dans le contrôle d'attitude des différents satellites, qui porte le nom de *Guidance and Navigation Control* (GNC). Les moteurs chargés du contrôle fin seront sûrement des propulseurs à effet de champ (FEEPs pour *Field Electric Emission Propulsor*), bien que d'autres solutions basées sur des jets de gaz froids soient en cours d'étude. Là encore, deux étages de propulsion sont envisagés :

- ➢ l'un de "forte" poussée (1mN), pour manœuvrer les satellites, notamment durant la reconfiguration de la formation ;
- ➢ l'autre de plus grande précision, avec une poussée de quelque 30 µN pour le contrôle fin de l'attitude ou de la distance inter-satellites durant les phases d'observation en frange noire.

Ces derniers assureront également en permanence la compensation des couples mécaniques induits par la variation de la pression solaire.

Système de recombinaison

Le satellite de recombinaison central est constitué d'un grand nombre de sous-systèmes, à la fois pour le cophasage des faisceaux et pour leur recombinaison.

En ce qui concerne la recombinaison des faisceaux lors des observations scientifiques, dans le cas de la configuration dite en "nœud papillon", les six faisceaux issus de chaque télescope ne seront pas recombinés simultanément. Au contraire, la configuration sera divisée en deux sous-interféromètres[46], sous la forme de Croix d'Angel Généralisées (GACs, voir figure 2.4, p. 34). Au sein de chaque GAC, quatre faisceaux sont recombinés dans des rapports d'intensité $1 : {}^{1}/_{\sqrt{2}} : {}^{1}/_{\sqrt{2}} : 1$. Cette méthode permet, avec des télescopes de taille identique[47], d'utiliser des recombinatrices optiques de réflexion-transmission 50 / 50. Des déphasages achromatiques de π sont appliqués à deux des quatre faisceaux recombinés. La modulation est ensuite obtenue en recombinant ces deux GACs avec des déphasages de $\pm {}^{\pi}/_{2}$.

Autres spécifications, et non des moindres, nous avons vu que lors de la recombinaison, les faisceaux doivent être aussi identiques que possible, en termes de phase, d'amplitude et de polarisation. Le tableau 2.4 résume ces spécifications. Nous reviendrons plus en détails sur le calcul de ces valeurs au chapitre 3, qui sont à inclure dans un budget d'erreur réparti sur l'ensemble de ces postes.

[46] Pour d'autres configurations, comme celle de Laurance, la configuration est divisée en trois sous-interféromètres.

[47] Ce point est particulièrement intéressant lorsqu'il s'agit de passer à leur fabrication.

TAB. 2.4: Principales spécifications de la mission spatiale Darwin, pour un taux de réjection moyen de 10^5.

	Spécification pour $\rho = 10^5$
Égalité d'amplitude	1 %
Identité de phase, dont	6.10^{-3} rad
- Différence de marche	6 nm (à 6 µm)
- Front d'onde	$\lambda/1000$ *rms*
Identité de polarisation	quelque[1] 10^{-2}

[1] Selon la configuration et le dispositif de recombinaison.

Comme nous l'avons évoqué lors de la description de l'interféromètre de Bracewell, les erreurs dues à la différence de marche induisent des fluctuations rapides de la position et de la forme instantanées de la carte de transmission. Ceci se traduit par une variation des fuites stellaires particulièrement néfastes au cours du temps d'observation. Afin d'obtenir, et surtout de maintenir, le taux de réjection nécessaire, les différences de marche doivent être contrôlées à mieux que 20 nm *rms* près. Ce budget d'erreur est lui-même réparti en 5 nm pour les fluctuations résiduelles dues au vol en formation et 10 nm pour les dérives optiques internes aux satellites (D'Arcio & Le Poole, 2003). D'une façon générale, la précision requise pour la recombinaison est d'environ 2 nm *rms*. Elle est atteinte à l'aide d'un dispositif suiveur de franges, dont le principe repose sur la recombinaison des faisceaux visible et infrarouge et qui contrôle les dérives de la figure d'interférence ainsi obtenue. Il faut rappeler ici que les systèmes de cophasage et de recombinaison sont physiquement dissociés, ce qui imposera un contrôle d'autant plus sévère.

Les différences de marche globales (distances inter-satellites + différences de chemin optiques) seront corrigées à l'aide de la combinaison des translations des satellites (au moyen des FEEPs) et de lignes à retard de haute précision et faible course (quelques centimètres), internes au satellite de recombinaison. Au total, l'amplitude des faisceaux recombinés devra être égalisée à 1% près, en temps réel. Concernant l'exigeante spécification sur les fronts d'onde, dont les erreurs ne doivent pas dépasser $\lambda/1000$ *rms*, elle sera relâchée grâce à l'utilisation du filtrage modal procuré par des segments de fibres monomodes (Mennesson et al., 2002), en fin de train optique.

En mode imagerie, la configuration qui sera utilisée est très proche de celle employée en mode destructif, à quelques détails près. En effet, les cibles seront bien trop faibles pour servir de référence au système suiveur de franges. Par conséquent, des étoiles de référence hors-axe seront préférées, avec la difficulté de multiplexer les faisceaux de référence et de science sans complexifier outre mesure les trains optiques. Dans la configuration actuelle, la stabilisation des chemins optiques est assurée par un système à référence de phase. Son principe est le suivant : la lumière provenant d'une étoile brillante, située dans un champ d'environ 1,5 minutes d'arc autour de la cible scientifique, est injectée dans l'interféromètre. Les franges d'interférences ainsi formées servent ensuite de référence pour l'asservissement de la différence de marche. Les différences de chemin optique entre les voies scientifique et de référence pouvant atteindre 20 cm, elles devront donc être compensées au moyen de lignes à retard n'agissant que sur la voie de référence. Si un changement dans la géométrie ou l'attitude de la configuration intervient sans que le système de contrôle l'ait détecté, ou si des dérives apparaissent entre les chemins optiques de référence internes et ceux du signal scientifique, il en résultera une mauvaise mesure de la phase au niveau

des franges "scientifiques". Ces effets doivent donc être mesurés de façon très précise et compensés par les lignes à retard.

Par ailleurs, afin de couvrir l'ensemble du plan (u,v)[48] pour reconstruire une image, la configuration de l'interféromètre devrait être modifiée continûment durant l'acquisition, comme pour les interféromètres terrestres. Autrement dit, l'instrument devra pouvoir maintenir la stabilité nécessaire des chemins optiques durant une fraction significative d'une observation (typiquement quelques heures), et ce en visant un champ très pauvre en étoiles.

Les autres différences concernent le schéma optique utilisé pour la recombinaison en mode imagerie. L'étude réalisée par *Alcatel Space Industries* avait montré que le système de recombinaison employé en mode destructif pouvait l'être également en mode imagerie, avec les très légères modifications suivantes :

- ➢ contournement du déphaseur achromatique de π, pour rendre les interférences constructives ;
- ➢ ajout d'un plan focal dédié à l'imagerie, avec une résolution spectrale de 300 ;
- ➢ insertion de lignes à retard additionnelles de faible course dans la voie scientifique, pour assurer une démodulation temporelle des franges d'interférences.

Cette solution présente le gros avantage de minimiser le coût de la mission, au prix d'un chemin optique très complexe pour un simple système d'imagerie. Cette complexité, qui pourrait être évitée par un système dédié, induit une perte de sensibilité d'un facteur 16, accompagnée d'un champ de vue limité à 1 seconde d'arc à la longueur d'onde de 10 µm, pour une résolution de 300 (Volonte et al., 2000). D'autres systèmes de recombinaison spécifiques au mode imagerie sont donc à l'étude. Une première option serait une recombinaison de type Fizeau, en plan-image. Mais il faut alors recombiner les pupilles directement sur les recombinatrices optiques, avec des grandissements comparables. Des systèmes de zooms optiques sont à l'étude pour résoudre ce problème (D'Arcio & Le Poole, 2003). Ils permettraient d'atteindre des champs de 25 secondes d'arc pour une base de 50 m, réduits à 2,5 secondes d'arc lors de l'extension maximale à 500 m. Une autre solution est de type "pupille densifiée", avec des acquisitions échelonnées pour des positions données, réparties dans le plan (u,v).

2.5.5 Développements technologiques nécessaires

L'une des principales conclusions de l'étude réalisée par *Alcatel Space Industries* avait été le manque cruel de maturité des technologies nécessaires à la réalisation de la mission Darwin, dont les autres enjeux et objectifs n'étaient, par ailleurs, pas remis en cause. L'ESA s'est donc lancée dans un programme intensif de développements technologiques, afin que ces techniques aient atteint la maturité nécessaire avant tout lancement de phase de définition.

Les domaines visés sont très larges :

- ➢ technologies relatives à l'optique (déphaseurs achromatiques, fibres optiques, composants en optique intégrée, composants de couplage dans ces guides d'onde, bancs de mesure ultra-stables . . .) ;
- ➢ sous-systèmes complets (suiveur de franges, lignes à retard) ;
- ➢ démonstrateurs en interférométrie en frange noire (*c'est nous !*) ;
- ➢ détecteurs ;
- ➢ simulateur complet de Darwin ;
- ➢ équipements cryogéniques d'envergure pour pouvoir effectuer des tests dans les conditions de Darwin.

Par ailleurs, une seconde phase d'étude système a débuté au second semestre 2005, afin d'évaluer les avancements de ces développements et de confronter les différentes solutions techniques. Nous allons maintenant passer rapidement les différents thèmes de ces développements technologiques en revue (D'Arcio & Karlsson, 2004).

[48] La qualité de l'échantillonnage de l'image fournie par un interféromètre est proportionnelle à sa couverture du plan (u,v), où u et v sont les fréquences spatiales dans le domaine de Fourier.

GENIE, l'interféromètre terrestre

GENIE signifie *Ground-based European Nulling Interferometry Experiment*. Il s'agit d'un interféromètre en frange noire, de type Bracewell, qui prendra place sur le Cerro Paranal au Chili, autour du VLTI. Financé essentiellement par l'ESA et l'ESO, GENIE a pour objectif la recombinaison destructive des faisceaux provenant d'au moins deux des télescopes du VLT, et ce avec un taux de réjection stable de l'ordre de 10^3 à 10^4 sur le ciel, limité par la turbulence atmosphérique (Gondoin et al., 2004).

GENIE permettra, dans un premier temps, de gagner en expérience de conception, de réalisation et de mise en œuvre d'un interféromètre en frange noire. Ensuite, GENIE cataloguera l'ensemble des cibles potentielles de la mission Darwin, afin de déterminer lesquelles ont un disque de poussières circumstellaires trop émissif, empêchant par-là même toute détection d'exoplanètes telluriques. Durant cette étude, GENIE aura la sensibilité nécessaire pour détecter de façon directe des "Jupiters chauds" en orbite autour d'étoiles proches. Tout ceci doit cependant être envisagé au conditionnel, car le projet GENIE se heurte aujourd'hui à des problèmes de coût et pourrait être remis en cause au profit de projets en Antarctique (Coudé du Foresto et al., 2004).

SMART-3, un démonstrateur technologique

Cette petite mission, dont le lancement est prévu vers 2009-2010, est, comme toute mission SMART, un démonstrateur purement technologique, identifié dans le plan *Cosmic Vision* de l'ESA comme une mission de réserve dédiée à une première démonstration d'un interféromètre volant en formation dans l'espace. Les objectifs principaux de cette mission sont :

- ➢ mise en formation de la configuration, après séparation des vaisseaux du véhicule de lancement ;
- ➢ test des différentes manœuvres (pivotement, rotation, redimensionnement de la configuration) ;
- ➢ vol en formation de précision, avec des mouvements différentiels suffisamment faibles pour permettre l'acquisition de franges stellaires.

Cette mission en est au stade d'étude, pour déterminer si elle doit comprendre certains objectifs scientifiques de Darwin, ou se limiter à une démonstration technologique. Elle est aujourd'hui très fortement remise en cause, l'ESA privilégiant désormais les simulateurs au sol.

Le projet Pégase, proposé en réponse à un appel à idée du CNES, pourrait être une alternative intéressante et l'ESA étudie actuellement une participation à ce projet. Il s'agirait de la première mission de vol en formation, et même, au-delà, du premier interféromètre dans l'espace[49]. Cette mission serait destinée à éprouver les techniques en cours de développement (Ollivier et al., 2005), tout en présentant un réel programme scientifique.

FINCH, le simulateur de Darwin

La complexité de la mission Darwin requiert la réalisation d'un simulateur complet de l'ensemble de la chaîne optique, des aspects dynamiques du vol en formation et de leurs interactions. Ce sera *Fast INterferometer Characterisation* (FINCH), un simulateur basé sur un logiciel développé à l'ESO pour le VLTI, tandis que les aspects liés au contrôle seront développés dans une activité de recherche technologique à part entière (Ergenzinger et al., 2004). À la fin de l'année 2005, ce simulateur devrait être disponible et accessible (?) à l'ensemble des acteurs de la mission Darwin.

Installation d'Interférométrie Cryogénique

Aussi appelé *Cryogenic Interferometric Facility* (CIF), cet équipement vise à fournir une infrastructure dédiée aux tests des composants individuels de Darwin et du banc en optique intégrée dans un envi-

[49] Si l'on excepte le *Fine Guidance Sensor* (FGS) embarqué sur le HST (Site internet du Fine Guidance Sensor, 2005)

ronnement cryogénique parfaitement isolé du point de vue sismique et opérant à la température de Darwin, à savoir 40 K. Le CIF offrira un large volume accessible à des équipements atteignant 1,5 x 1 m^2, à une pression de 10^{-5} mbar, et dans un environnement vibratoire bénéficiant d'un contrôle actif. Cette installation devra inclure un simulateur "étoile-planète" représentatif, opérant dans la gamme 0,4-20 µm, ainsi que des systèmes de détection refroidis à 6-8 K, pour la détection des signaux interférométriques destructifs, du suiveur de franges et de la photométrie. Quatre faisceaux, au moins, seront implantés, afin de simuler des configurations ayant une réjection angulaire assez large et des possibilités de modulations étendues. Le site et la date d'implantation de ce dispositif restent encore à préciser.

Expériences interférométriques en laboratoire

Dans le cadre de l'activité *Multiple Aperture Imaging Interferometer* (MAII), deux contrats ont été menés par *Alcatel Space Industries* et *Astrium GmbH* pour concevoir, réaliser et mettre en œuvre un interféromètre en frange noire capable de fournir une réjection élevée et stable de la lumière stellaire. L'objectif de ces activités était de démontrer l'obtention de fuites stellaires stables à hauteur de 4.10^{-5}, la lumière provenant d'une source ponctuelle émettant à 1,55 µm avec une largeur de bande de $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{moyenne}}} = 10\%$. Le proche infrarouge a été choisi étant donné la facilité de trouver des composants standards de haute qualité à des coûts raisonnables. Par ailleurs, ces longueurs d'onde permettent d'effectuer les tests dans des environnements classiques non cryogéniques. Le taux de réjection variant comme λ^{-2}, ces performances correspondent aux spécifications de Darwin, à savoir 10^{-6} à λ = 10 µm. En bande large (5 %), des taux de réjection proches de 6 000 ont été obtenus (Weber, 2004).

La version réalisée par *Astrium GmbH* est basée sur des optiques classiques. La recombinaison s'appuie sur un interféromètre de Sagnac symétrique (Serabyn & Colavita, 2001). Le déphasage achromatique de π peut être introduit de deux façons différentes, à l'aide de périscopes provoquant un retournement du champ électrique, ou grâce à des lames dispersives[50]. Le banc de test d'*Alcatel Space Industries* utilise également des lames dispersives pour la partie déphaseur. Elles permettent aussi de compenser les résidus chromatiques provenant de l'ensemble du banc. La recombinaison repose sur un composant en optique intégrée. Ces deux expériences bénéficient d'un contrôle de la différence de marche avec un stabilité meilleure que 2,2 nm *rms* (0,9 nm *rms* pour *Astrium GmbH*). Au prix d'importants efforts pour réduire les sources de bruit, améliorer la stabilité de l'ensemble et réduire les effets chromatiques résiduels, des résultats très satisfaisants ont été obtenus, avec une réjection atteignant 32 000 pour le banc d'*Astrium GmbH* en bande "large" (2 %) (Flatscher et al., 2003).

Métrologie optique

La précision du vol en formation de la mission Darwin repose sur la détermination fine des positions relatives des différents télescopes. Dans ce but a été lancée l'activité *High-Precision Optical Metrology* (HPOM) pour développer et tester des systèmes de métrologie optique. *Astrium GmbH* a ainsi mis au point divers systèmes (Calvel et al., 2004) : le premier est un système de métrologie laser, qui permet de déterminer la distance absolue entre le satellite de recombinaison et ceux portant les télescopes avec une précision de 32 µm rms, à une fréquence de 10 Hz. Deux solutions différentes ont été testées, l'une faisant appel à un interféromètre à deux longueurs d'onde, l'autre étant basée sur un balayage en fréquence.

Le second composant développé est un capteur de mouvement latéral fin, destiné à la mesure des translations latérales des satellites-télescopes par rapport au satellite de recombinaison. La précision est identique à celle mentionnée ci-dessus. La gamme de mesure est de ± 1 mm et sera complétée par un système plus fin atteignant une résolution de 2 nm.$Hz^{-1/2}$ à une fréquence de 10 Hz. Tous ces systèmes sont, bien sûr, conçus pour être compatibles avec la gamme de mesure de 50 à 500 m de la mission

[50] Voir le chapitre 4, sur les techniques de déphasage achromatique, pour plus de détails.

Darwin, en présence de mouvements relatifs allant jusqu'à 2 mm / s. Ces dernières performances sont en cours de mesure et dans ce but, une chambre à vide thermique a été modifiée de façon à pouvoir simuler des mouvements relatifs de satellites et des distances inter-satellites allant jusqu'à dix mètres.

Dans le cadre de l'activité MAII, la société *SAGEIS-CSO* a également développé un système de métrologie appelé MOUSE II. Une adaptation de ce système pour l'activité Pégase est actuellement sous contrat R&T CNES. L'objectif est d'obtenir une résolution de l'ordre de 50 à 100 nm sur une course de 250 m (Le Duigou et al., 2005).

Déphaseurs achromatiques, le projet NULLTIMATE

L'Institut d'Astrophysique Spatiale, à la tête d'un consortium de neuf laboratoires et entreprises européens, a remporté un appel d'offre portant sur le développement des concepts de déphaseurs achromatiques les plus prometteurs pour la mission Darwin. Ce projet, nommé *NULling Low Temperature Interferometer for Multi-Achromatic phase shifters TEsting* (NULLTIMATE), vise à déterminer les trois solutions les plus abouties et les plus adaptées aux exigences actuelles de la mission Darwin (Labèque et al., 2004). Ces trois déphaseurs doivent permettre d'obtenir un taux de réjection de 10^6 (ou mieux !), dans la bande de longueurs d'onde 6-20 µm (ou, si possible, 4-20 µm), avec une transmission[51] de 95%.

Deux concepts à base de réflexions sur des miroirs métalliques ont été choisis, faisant appel au retournement du champ électrique pour le premier et au passage par un foyer optique pour le second. Ces méthodes ne peuvent produire que des déphasages théoriques de π, ce qui est bien adapté à la configuration dite "nœud papillon" qui pourrait être retenue. La troisième solution sélectionnée est basée sur l'utilisation de lames dispersives, ce qui autorise des valeurs de déphasage différentes de π, qui sont nécessaires, par exemple, pour la modulation inhérente.

La conception détaillée du banc optique et des déphaseurs achromatiques de NULLTIMATE est en cours, pour des tests en environnement cryogénique, à 100 K, dans un spectre continu de 6 à 20 µm.

Suiveur de franges

Le suiveur de franges a la lourde tâche de mesurer les différences de marche entre les différents faisceaux de Darwin. Le signal d'erreur produit alimente l'unité de contrôle des lignes à retard pour la correction des différences de marche. La précision de mesure de ces différences de marche doit atteindre un niveau nanométrique à une fréquence de 10 Hz pour maintenir une forte réjection malgré toutes les perturbations environnementales (déplacements relatifs des satellites, vibrations, effets thermiques). L'activité *DarWin AstRonomical Fringe sensor* (DWARF), dont le contrat a été attribué à une équipe comprenant les Allemands de *Kaiser Threde* et les Français de l'ONERA, a pour objectifs d'identifier les concepts de suiveurs de franges les plus adaptés et de tester les points critiques identifiés (répétabilité des différences de marche, impact des opérations en large bande de longueurs d'onde). L'une des exigences les plus fortes porte sur la capacité de DWARF à mesurer le *tip / tilt*, les défauts de mise au point, l'astigmatisme et la coma des faisceaux (Cassaing et al., 2003; Schmidt et al., 2003).

Le concept sélectionné pour DWARF opère dans le visible, avec la possibilité d'un second canal en proche infrarouge, pour permettre une redondance. Les faisceaux sont combinés dans le plan focal image. Le *tip / tilt*, les défauts de mise au point et les aberrations d'ordre supérieur sont mesurés à partir des franges d'interférences ainsi créées, en utilisant diverses techniques basées sur la phase. Un dispositif de tests à trois faisceaux est en cours de construction. Il incluera un système optique avec lequel le niveau mesuré des aberrations peut être ré-introduit dans l'un des faisceaux, après correction.

[51] De telles performances ne devraient être atteintes qu'avec les solutions à miroirs.

Lignes à retard optiques

Les lignes à retard optiques doivent maintenir et stabiliser l'égalité des chemins optiques entre les faisceaux scientifiques de Darwin, après leur recombinaison. Les principales exigences portent sur la précision de mesure des différences de marche, qui doit être meilleure que 1 nm *rms*, avec une bande passante de 100 Hz et un débattement de $\pm$ 10 mm. Deux contrats sont menés en parallèle par les Néerlandais de *TNO-TPD* et les Suisses de *Contraves*. L'objectif est de concevoir, réaliser et tester des lignes à retard compatibles avec les spécifications optiques de Darwin, dans des conditions de vide thermique et à 40 K (van den Dool et al., 2004). Ces lignes à retard doivent être représentatives, du point de vue de leur forme, de leur adaptation et de leur fonction à celles qui seront implantées sur le satellite de recombinaison.

Matrices de détecteurs linéaires en infrarouge thermique

La technologie actuellement étudiée fait appel aux *Impurity Band Conductor*s (IBCs) à base de Si:As. Ces détecteurs présentent en effet une très bonne efficacité quantique ($\geq$ 50% pour toute la bande de longueur d'onde), un faible bruit de lecture (moins de dix e^- par pixel et par lecture) et un faible courant d'obscurité ($\leq$ 25 $e^-.sec^{-1}.pix^{-1}$). Toutefois, ils nécessitent un refroidissement à quelques kelvins ($\approx$ 6-8 K), ce qui implique un système complexe, coûteux et lourd. Qui plus est, un refroidissement actif peut introduire des vibrations mécaniques, dont il est difficile d'isoler le banc optique. Une équipe d'industriels espagnols (*Acreo*) et belges (IMEC) est en charge d'un contrat destiné à établir et faire la démonstration des performances d'un détecteur ayant les spécifications de Darwin à la température de fonctionnement la plus haute possible. Deux détecteurs, pour une première étape monopixels, doivent être construits et caractérisés. Ils doivent être optimisés pour les canaux spectraux de Darwin aux longueurs d'onde courtes et longues.

Fibres optiques monomodes

Il s'agit d'une des technologies-clés de la mission Darwin. En effet, les propriétés de filtrage optique des fibres optiques permettent d'obtenir, après propagation des faisceaux à travers des segments de fibres monomodes, des fronts d'onde quasiment parfaits pour la recombinaison. Néanmoins, il n'existe pour le moment aucune fibre optique monomode avec une transmission acceptable dans le domaine spectral de Darwin. C'est pourquoi deux contrats ont été menés en parallèle par *Astrium GmbH* et *TNO-TPD* pour identifier les matériaux adéquats, sélectionner les concepts de fibres les plus prometteurs et développer les techniques de fabrication pour la production de fibres optiques monomodes dans l'infrarouge thermique.

Optique intégrée

La technologie de l'optique intégrée peut être utilisée pour réaliser de nombreuses fonctions optiques intéressantes pour l'interférométrie. Le filtrage modal et la recombinaison des faisceaux à l'aide d'un composant intégré ont été testés avec succès dans le proche infrarouge. Cette activité, confiée aux Français de l'Institut de Microélectronique, Électromagnétisme et Photonique (IMEP), a pour but d'identifier des matériaux propices et de développer des techniques de fabrications pour des composants d'optique intégrée monomodes opérant de 4 à 20 µm. L'étude concerne à la fois des guides d'onde diélectriques conventionnels et des guides d'onde métalliques creux. Avec ces deux concepts, des fonctions de filtrage de front d'onde, de séparation ou de recombinaison de faisceaux seront conçues. Bien que ces composants doivent opérer dans des conditions cryogéniques, ce n'est pas encore une spécification.

Technologies avancées de couplage avec des fibres optiques

Avec des ouvertures circulaires éclairées uniformément et non obstruées, l'efficacité de couplage maximale se limite à 78%, du fait du recouvrement partiel entre le disque d'Airy du faisceau focalisé et le profil approximativement gaussien du mode fondamental guidé par la fibre. Cette étude doit donc rechercher de nouvelles techniques avancées pour produire un couplage stable et efficace, minimisant les pertes d'injection. Trois contrats portent sur ce sujet et sont menés par l'Institut National d'Optique (Canada) (INO), *Contraves / TUW* et *KDA / Sintef* pour identifier et modéliser des concepts de couplage avancés.

Au terme de cette partie, nous avons défini les principales spécifications de la mission Darwin. Certaines sont extrêmement exigeantes en regard des performances des techniques actuelles et ont nécessité la mise en place de programmes de développements technologiques intensifs. Malgré tout, le pas qui reste à franchir pour aboutir au lancement d'un interféromètre spatial comme Darwin est assez conséquent. Il ne pourra être franchi qu'à l'issue de la validation de chaque sous-système, lors de nombreuses expériences de laboratoire. C'est à ce niveau que s'inscrit le travail réalisé dans cette thèse.

Chapitre 3

Contraintes optiques et performances

Sommaire

3.1 Rappels d'interférométrie 51
3.2 Contraintes en lumière monochromatique 53
3.2.1 Contrainte sur l'amplitude des ondes à recombiner 53
3.2.2 Contrainte sur la phase des ondes à recombiner 54
3.3 Contraintes en lumière polychromatique 54
3.4 Bilan de performances théorique 56
3.4.1 Performances en termes d'égalité d'intensité 56
3.4.2 Performances en termes de différence de marche 56
3.4.3 Performances en termes de qualité de front d'onde 57
3.4.4 Bilan des pronostics 58

Si le taux de réjection nécessaire à la détection d'une exoplanète dans l'échantillon d'étoiles visé par la mission Darwin doit être de l'ordre de 10^5, il reste à exprimer ces exigences en termes de spécifications optiques. Celles-ci détermineront les performances statiques nécessaires pour atteindre un tel taux de réjection[52]. Dans un premier temps, nous déterminerons les relations existant entre les différents paramètres optiques et le taux de réjection. Pour cela, nous nous placerons dans le cas simple d'interférences à deux fronts d'onde, en lumière monochromatique. Par la suite, nous verrons ce que deviennent ces relations dans le cas polychromatique.

3.1 Rappels d'interférométrie

L'idée de base de l'interférométrie est de pallier la difficulté de réaliser des télescopes de très grand diamètre (qui plus est, de les envoyer dans l'espace) en "diluant" leur pupille en une multitude de sous-pupilles de diamètre inférieur. On parle ainsi de **synthèse d'ouverture**, car les faisceaux de chacune de ces sous-pupilles sont ensuite recombinés dans un même plan. Moyennant de décrire l'ensemble du plan (u,v) couvert par un télescope géant équivalent en déplaçant les sous-pupilles, tout en conservant une parfaite égalité des chemins optiques, un tel interféromètre permet d'obtenir les mêmes performances en termes de résolution spatiale.

[52] En toute rigueur, il faudrait également étudier les spécifications mécaniques, qui jouent sur la stabilité de ce taux de réjection. Néanmoins, une telle étude requiert un modèle mécano-thermique complet du banc et de ses périphériques, ce qui sort du domaine de cette thèse.

Cette idée a pour origine la fameuse expérience menée par Thomas Young avec deux ouvertures et ayant conduit à la découverte de la théorie ondulatoire de la lumière. Elle permit ensuite à Hyppolyte Fizeau d'en déduire la non moins fameuse relation entre le diamètre angulaire θ de la source observée et la base B (ou distance) séparant les deux sous-pupilles à la longueur d'onde moyenne d'observation λ. Cette relation, plus connue sous le nom de relation de Fizeau, s'écrit

$$\theta = \frac{1,22\,\lambda}{B} \tag{3.1}$$

Les deux (ou plus) faisceaux sont, par exemple, focalisés dans un même plan image, c'est leur superposition qui vient créer les franges d'interférences[53] ; c'est pourquoi cette méthode est appelée **interférométrie plan-image** (ou encore interférométrie de Fizeau). Il est également possible d'utiliser une lame semi-transparente pour superposer ces faisceaux, comme dans les cas très répandus des interféromètres de Michelson ou de Mach-Zehnder. On parle alors d'**interférométrie plan-pupille** (ou encore d'interférométrie de Michelson) et c'est cette technique qui sera utilisée pour notre banc de mesure.

D'un point de vue théorique, le champ électromagnétique de l'onde résultante est la somme algébrique des champs des ondes élémentaires provenant de chaque sous-pupille, ces ondes étant temporellement cohérentes. Si l'on modélise ces champs élémentaires S_k par leurs représentations de Fresnel, soit $S_k = A_k.e^{i\phi_k}$, le champ résultant de la recombinaison de N champs élémentaires s'écrit donc

$$S = A.e^{i\phi} = \sum_{k=1}^{N} A_k.e^{i\phi_k} \tag{3.2}$$

La phase ϕ_k de chaque champ élémentaire contient, d'une façon générale, un terme en $2\pi\delta_k/\lambda$, où δ_k est le chemin optique séparant la sous-pupille du système de recombinaison, ainsi que différents termes représentant les modifications subies par la phase durant ce trajet, comme, par exemple, l'ajout d'un déphaseur.

Considérons maintenant le cas, plus simple, où seules deux sous-pupilles sont recombinées. L'équation (3.2) devient alors

$$S = A.e^{i\phi} = A_1.e^{i\phi_1} + A_2.e^{i\phi_2} \tag{3.3}$$

L'intensité I de l'onde résultante est alors proportionnelle à $|S|^2 = S.S^*$ et peut s'écrire selon l'équation

$$I = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2.|A_1|.|A_2|.\cos(\phi_2 - \phi_1) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}.\cos(\phi_2 - \phi_1) \tag{3.4}$$

Si les deux ondes ont exactement la même intensité I_0, alors l'intensité maximale obtenue en frange brillante, lorsque $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 0$, sera $4.I_0$ et l'intensité minimale, en frange noire, lorsque $\Delta\phi = \pi$, sera nulle. D'où un taux de réjection infini dans le cas parfait. Ce ne sera jamais le cas, car, en pratique, le déphasage $\Delta\phi$ n'est jamais exactement nul, ou exactement égal à π. Il apparaît ainsi que **les principales sources de détérioration du taux de réjection agissent essentiellement sur l'égalité des amplitudes des ondes recombinées et sur la différence entre leurs phases**, qui peut elle-même varier en fonction de différents paramètres.

Nous allons donc maintenant étudier quelles sont les contraintes en termes d'amplitude et de phase sur les ondes à recombiner. Pour cela, et par souci de simplicité, nous nous placerons, dans un premier temps, dans le cas où les ondes recombinées sont monochromatiques.

[53] Elle suppose également une homothétie entre les pupilles d'entrée et de sortie.

3.2 Contraintes en lumière monochromatique

Il s'agit ici de déterminer quel est le taux de réjection ρ pouvant être atteint pour un défaut d'intensité ε_I et une différence de phase $\Delta\phi_0 = \phi_2 - \phi_1$ entre les deux ondes recombinées.

D'une façon générale, nous traduirons le défaut d'intensité ε_I entre les deux ondes recombinées en écrivant que

$$I_2 = I_1(1 + \varepsilon_I) \tag{3.5}$$

D'autre part, nous écrirons la différence de phase sous la forme

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \delta\phi \tag{3.6}$$

où $\Delta\phi_0$ est la valeur du déphasage souhaité et $\delta\phi$ l'erreur de phase introduite entre les chemins optiques. De cette façon, l'équation (3.4) devient

$$I = I_1(2 + \varepsilon_I) + 2.I_1\sqrt{1 + \varepsilon_I}.\cos\left(\Delta\phi_0 + \delta\phi\right) \tag{3.7}$$

L'expression de l'intensité en frange brillante est obtenue pour $\Delta\phi_0 = 0$, soit

$$I_{\max} = I_1(2 + \varepsilon_I) + 2.I_1\sqrt{1 + \varepsilon_I}.\cos\left(\delta\phi\right) \tag{3.8}$$

Réciproquement, en frange noire, lorsque $\Delta\phi_0 = \pi$, on a

$$\begin{aligned} I_{\min} &= I_1(2 + \varepsilon_I) + 2.I_1\sqrt{1 + \varepsilon_I}.\cos\left(\pi + \delta\phi\right) \\ &= I_1(2 + \varepsilon_I) - 2.I_1\sqrt{1 + \varepsilon_I}.\cos\left(\delta\phi\right) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Le taux de réjection ρ s'écrit alors

$$\boxed{\rho = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{2 + \varepsilon_I + 2\sqrt{1 + \varepsilon_I}.\cos\left(\delta\phi\right)}{2 + \varepsilon_I - 2\sqrt{1 + \varepsilon_I}.\cos\left(\delta\phi\right)}} \tag{3.10}$$

3.2.1 Contrainte sur l'amplitude des ondes à recombiner

Nous considèrerons ici que les deux ondes à recombiner sont parfaitement en phase ($\delta\phi = 0$). L'équation (3.10) peut s'écrire sous la forme

$$\rho = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{2 + \varepsilon_I + 2\sqrt{1 + \varepsilon_I}}{2 + \varepsilon_I - 2\sqrt{1 + \varepsilon_I}} \tag{3.11}$$

Le terme ε_I doit tendre vers 0 ; à l'aide d'un développement limité de $(1 + \varepsilon_I)^{\frac{1}{2}}$ à l'ordre 3, la relation entre le taux de réjection et l'inégalité d'amplitude ε_I se réduit à

$$\boxed{\varepsilon_I \approx \frac{4}{\sqrt{\rho}} \quad \text{ou} \quad \rho \approx \frac{16}{(\varepsilon_I)^2}} \tag{3.12}$$

L'obtention d'un taux de réjection de 10^5 suppose donc un égalisation des flux à 1,3% près. Cela nécessite la réalisation de systèmes d'égalisation de flux précis et, surtout, le plus achromatique possible. Ils seront destinés à équilibrer les flux durant les mesures de réjection.

3.2.2 Contrainte sur la phase des ondes à recombiner

Nous considèrerons ici que les deux ondes à recombiner sont parfaitement d'égale intensité ($\varepsilon_I = 0$) et qu'il existe une erreur de phase $\delta\phi$ entre les deux ondes à recombiner. L'équation (3.10) peut alors s'écrire sous la forme

$$\rho = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{1 + \cos\left(\delta\phi\right)}{1 - \cos\left(\delta\phi\right)} \tag{3.13}$$

Le terme $\delta\phi$ doit tendre vers 0 ; à l'aide d'un développement limité de $\cos\left(\delta\phi\right)$ à l'ordre 2, la relation entre le taux de réjection et l'inégalité de phase $\delta\phi$ se réduit à

$$\boxed{\delta\phi \approx \frac{2}{\sqrt{\rho}} \text{ ou } \rho \approx \frac{4}{\left(\delta\phi\right)^2}} \tag{3.14}$$

L'obtention d'un taux de réjection de 10^5 suppose donc des erreurs de phase, en tous points de la recombinatrice de l'interféromètre, inférieures à $6,3.10^{-3}$ rad, soit une vingtaine de minutes d'arc. D'une façon générale, les erreurs d'intensité sont donc beaucoup mieux tolérées que les erreurs de phase en interférométrie. Qui plus est, les erreurs de phase ont des origines multiples (différences d'épaisseur de substrat ou de traitements des séparatrices et recombinatrices, différences de traitements diélectriques des miroirs, différences d'états de polarisation, etc.) et qu'elles se cumulent de façon quadratique tout au long des chemins optiques.

3.3 Contraintes en lumière polychromatique

Pour étudier les contraintes en termes de phase et d'intensité des faisceaux recombinés, nous nous sommes placés dans le cas d'une lumière monochromatique. Pourtant, la mission Darwin observera des étoiles et des planètes, dont la lumière sera bien sûr polychromatique, tout comme celle servant aux mesures sur le banc SYNAPSE. Le cas monochromatique permet toutefois de simplifier la formulation des calculs, tout en restant pertinent, comme nous allons maintenant le voir.

En effet, il est toujours possible de décomposer une onde polychromatique comme la somme d'une infinité d'ondes monochromatiques. Les interférences entre deux ondes polychromatiques peuvent donc s'interpréter comme la somme des interférences entre les couples d'ondes monochromatiques de même longueur d'onde. Il s'agit alors d'une superposition incohérente de ces ondes.

Dès lors, si, comme dans notre cas, on considère une source de type corps noir, l'intensité de l'onde recombinée devient la somme des intensités des ondes monochromatiques recombinées, intégrée sur le domaine spectral $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ considéré et pondérée par la brillance monochromatique du corps noir. Cette dernière est donnée par la loi de Planck, selon la formule

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \tag{3.15}$$

où $B_\lambda(T)$ est exprimée en $\mathrm{W.m^{-2}.m^{-1}.sr^{-1}}$,
λ est la longueur d'onde, exprimée en m,
h la constante de Planck[54],
k la constante de Boltzmann[55] et
c la célérité de la lumière[56].

[54] Constante de Planck : h = $6,62620.10^{-34}$ J.s
[55] Constante de Boltzmann : k = $1,38062.10^{-23}$ $\mathrm{J.K^{-1}}$
[56] Célérité de la lumière : c = $2,99979250.10^{8}$ $\mathrm{m.s^{-1}}$

Cette équation peut également se mettre sous la forme

$$B_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \tag{3.16}$$

avec λ la longueur d'onde, toujours exprimée en m,
$c_1 = 1,19107.10^{-16}$ W.m^2.s^{-1} et
$c_2 = 1,43883.10^{-2}$ m.K.

L'état d'interférence décrit par l'équation (3.7) s'écrit alors

$$I = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_\lambda(T).I_\lambda \, \mathrm{d}\lambda \quad \text{où} \quad I_\lambda = I_1(2+\varepsilon_I) + 2.I_1\sqrt{1+\varepsilon_I}.\cos\left(\Delta\phi_\lambda\right) \tag{3.17}$$

$\Delta\phi$ est devenu $\Delta\phi_\lambda$, car nous considérons désormais des ondes polychromatiques. Par conséquent, l'erreur de déphasage doit être considérée comme dépendant de λ. C'est, d'ailleurs, ce qui fait toute la difficulté de considérer une lumière polychromatique, puisque l'équation (3.17) ne peut plus se calculer de façon analytique.

De même, le taux de réjection pour une lumière polychromatique devient

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_\lambda(T).\left(2+\varepsilon_I + 2\sqrt{1+\varepsilon_I}.\cos\left(\Delta\phi_\lambda\right)\right) \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_\lambda(T).\left(2+\varepsilon_I - 2\sqrt{1+\varepsilon_I}.\cos\left(\Delta\phi_\lambda\right)\right) \mathrm{d}\lambda} \tag{3.18}$$

En pratique, nous calculerons de façon numérique l'état d'interférence pour un déphasage $\Delta\phi_\lambda$ donné. Afin de limiter le nombre de calculs, nous considèrerons alors que l'intensité en frange brillante est très voisine de $4.I_1$, les erreurs de phase et d'amplitude ayant une très faible influence en frange brillante[57]. Par conséquent, l'équation (3.18) sera approximée par la formule

$$\boxed{\rho_{\text{ approx}} = \frac{4.\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_\lambda(T) \, \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_\lambda(T).\left(2+\varepsilon_I - 2\sqrt{1+\varepsilon_I}.\cos\left(\Delta\phi_\lambda\right)\right) \mathrm{d}\lambda}} \tag{3.19}$$

L'avantage de cette formulation est que son numérateur correspond à quatre fois l'intensité d'un corps noir intégrée sur l'ensemble du domaine spectral, valeur qui peut être calculée une fois pour toutes, dans le cas d'un enchaînement de calculs.

Nous avons ainsi établi les expressions donnant la variation du taux de réjection en fonction des principaux paramètres que sont l'amplitude et la phase relatives des deux ondes à recombiner. Plusieurs spécifications optiques se traduisent par des variations de ces paramètres. Nous allons maintenant détailler celles qui ont été fixées durant la phase de conception du banc de mesure SYNAPSE, afin de constituer une sorte de bilan de performances théorique, permettant de prévoir le maximum de taux de réjection pouvant être obtenu avec les spécifications fixées pour ce banc et ses optiques.

[57] Cela suppose également que le terme ε_I est parfaitement indépendant de la longueur d'onde, ou, tout au moins, compensé au premier ordre. Nous verrons dans la suite comment la symétrie du montage optique comportant le déphaseur est essentielle à ce niveau.

3.4 Bilan de performances théorique

Nous allons ici déterminer les "postes optiques" principaux qui auront des conséquences en termes d'inégalités de phase ou d'amplitude. Ces spécifications ont été fixées lors de la conception du banc avec un objectif de 10^5 de réjection. Il est malgré tout nécessaire de les réactualiser en fonction des contraintes de fabrication ou des mesures de contrôle qui ont été effectuées depuis. De cette façon, il est possible, en prenant quelques marges, d'établir le taux de réjection que l'on peut théoriquement atteindre avec le banc SYNAPSE.

Cet exercice est quelque peu périlleux, dans la mesure où il faut supposer chacun des postes comme indépendant des autres. En particulier, nous considèrerons, par exemple, dans le cas des défauts d'intensité, l'ensemble des défauts de phase comme parfaitement égaux ou compensés. Réciproquement, tous les effets de dispersion, d'inégalités d'intensité, etc. seront supposés inexistants lorsque nous considèrerons la phase. Ces hypothèses sont d'autant plus fortes que les calculs en découlant resteront ponctuels (au sens statistique). Par conséquent, il ne faut considérer la valeur finale obtenue que comme purement indicative.

3.4.1 Performances en termes d'égalité d'intensité

Nous avons vu que la contrainte, pour obtenir une réjection de 10^5, est d'égaliser les flux à 1,3% près entre les deux voies de l'interféromètre. Cette spécification est peu contraignante et il est, en pratique, assez facile d'égaliser les flux à 1% près, voire mieux. Cette égalisation est néanmoins manuelle, et effectuée généralement au début d'une série de mesures. Il n'est pas rare que cette valeur évolue au cours de cette série de mesures, pour différentes raisons. L'optimisation du taux de réjection suppose en effet d'actionner différents réglages (rotations et translations des éléments optiques). Ces mouvements n'étant pas parfaits, ils peuvent entraîner de légères variations d'intensité dans l'une ou l'autre des voies. Par conséquent, dans ce bilan de performances théorique, nous considèrerons que les flux ne sont, en permanence, égalisés qu'à 2% près. Le taux de réjection accessible, tout autre paramètre étant parfait, est alors de 4.10^4.

3.4.2 Performances en termes de différence de marche

Sous les hypothèses précédemment citées, les défauts d'inégalité de différence de marche entre les deux voies de l'interféromètre se traduisent directement en termes d'erreur de phase par la relation

$$\Delta\phi = 2\pi\frac{d\,d\,m}{\lambda} \tag{3.20}$$

où $d\,d\,m$ est la différence de marche. Elle permet, combinée à la formule (3.14), de déterminer l'influence de ce paramètre sur le taux de réjection ρ, par la formule

$$\boxed{d\,d\,m \approx \frac{\lambda}{\pi\sqrt{\rho}} \text{ ou } \rho \approx \left(\frac{\lambda}{\pi.d\,d\,m}\right)^2} \tag{3.21}$$

On constate, dès lors, que cette exigence est chromatique, et d'autant plus sévère que la longueur d'onde est courte.

➢ Dans le cas de la mission Darwin, la contrainte pour obtenir une réjection de 10^5 est donc majorée à la longueur d'onde de 6 µm. Si tant est qu'il n'y ait qu'une seule voie chromatique, il faudrait donc, dans le cas le plus simple, égaliser la différence de marche à mieux que 6 nm, tout au long des mesures ;

➢ Dans le cas du banc développé durant cette thèse, comme nous le verrons dans la partie suivante, la longueur d'onde de travail la plus courte est de 2 µm ; à taux de réjection égal, il faut donc atteindre une égalisation des chemins optiques trois fois meilleure, soit à 2 nm près.

Nous verrons par la suite que, malgré tous nos efforts pour parvenir à de telles performances, il n'a pas été possible d'égaliser les chemins optiques à mieux que 7 nm *ptv*. Par conséquent, le taux de réjection accessible, tout autre paramètre étant parfait, est de $8,3.10^3$.

3.4.3 Performances en termes de qualité de front d'onde

Si l'on néglige les turbulences de l'atmosphère entourant le banc d'expérimentation, la qualité des fronts d'onde qui se propagent ne peut être dégradée que par des défauts de polissage des optiques ou par des poussières déposées par la suite. Le dépôt de poussières peut être largement limité en prenant les précautions habituelles pour des expériences d'optique (manipulation avec des gants, sous flux laminaires). Dans notre cas, son implantation en salle propre limite encore ces risques et permet de rendre ce paramètre négligeable. Qui plus est, ces défauts, s'ils sont présents sur quelques optiques, restent locaux et n'interviennent donc qu'à très hautes fréquences.

Ce n'est pas le cas pour les défauts de polissage des surfaces optiques. Ils se traduisent également par des différences de marche locales additionnelles, et donc par des erreurs de phase. Or nous avons vu à quel point ce paramètre était sensible.

Pour décrire la qualité de polissage d'une surface optique, il est d'usage d'exprimer l'amplitude des défauts en fraction de longueur d'onde visible[58] *rms*. La relation (3.21) permet de déduire directement la qualité de front d'onde[59] pic-à-vallée WFE_{ptv}, exprimée en fraction de la longueur d'onde de travail λ, nécessaire pour obtenir une réjection ρ. On peut alors écrire

$$\boxed{WFE_{ptv} \approx \frac{\lambda}{\pi.\sqrt{\rho}} \text{ ou } \rho \approx \left(\frac{WFE_{ptv}}{\pi.\lambda}\right)^2} \tag{3.22}$$

Si l'on effectue une application numérique pour le cas des optiques de la mission Darwin, donc pour une réjection de 10^5, il serait nécessaire de les polir à $\lambda/1000$ *ptv* pour la longueur d'onde la plus exigeante (6 µm), soit, en ramenant cette valeur à des spécifications classiques, à $\lambda_{visible}/100$ *ptv*. Cette spécification est très exigeante en regard des techniques actuelles de polissage.

Qui plus est, il s'agit de la valeur maximum tolérable, cumulée de façon quadratique sur l'ensemble des optiques. Par ailleurs, cette valeur doit être divisée par deux pour les miroirs, du fait de la réflexion doublant les défauts, ce qui signifie un polissage des miroirs de Darwin, de 1,5 m de diamètre, à $\lambda_{visible}/200$ *ptv* en l'absence de filtrage modal !

Pour les optiques de notre banc, qui travaille en proche infrarouge aux alentours de 2 µm, la spécification donnée au fabricant était de polir les optiques à mieux que $\lambda_{visible}/20$ *ptv*. Des mesures effectuées après dépôts des traitements réfléchissants et séparateurs sur l'interféromètre *Zygo* de l'*Institut d'Optique* ont montré la parfaite tenue de ces spécifications. La qualité de front d'onde a été évaluée à $\lambda_{visible}/100$ *rms*, soit environ $\lambda_{visible}/25$ *ptv*.

Ainsi, toujours sans filtrage modal, la qualité de front d'onde des optiques du banc SYNAPSE devrait être suffisante pour atteindre un taux de réjection de 650. Nous verrons que le filtrage modal permet, d'améliorer cette performance d'au moins deux ordres de grandeur. Nous partirons donc sur l'hypothèse d'un taux de réjection, avec filtrage modal, de 6.10^4.

[58] On considère $\lambda_{visible}$ = 632,8 nm, longueur d'onde d'un laser He-Ne classique, car les mesures sont généralement réalisées avec ce genre de matériel, qui est très répandu.

[59] *WaveFront Error* (WFE), en anglais.

3.4.4 Bilan des pronostics

Afin de conclure sur le taux de réjection maximal qui pourrait être atteint avec les hypothèses que nous venons d'énoncer, nous avons supposé que ces contributions sont indépendantes. Elles s'additionnent donc de façon quadratique, tout au long de la propagation des faisceaux. Le tableau 3.1 résume les différents postes étudiés, les hypothèses choisies et enfin l'influence en termes de réjection.

TAB. 3.1: Pronostics des performances du banc SYNAPSE.

Poste	Performances	Taux de réjection
Égalité d'amplitude	2 %	4.10^4
Différence de marche	7 nm	$8,3.10^3$
Front d'onde	$\lambda_{\text{visible}}/_{20} \rightarrow \lambda_{\text{visible}}/_{200}\, ptv$[1]	6.10^4
Global		$2,4.10^4$

[1] Cette spécification dépend de la présence du filtrage modal ou non.

Au total, il devrait être possible d'atteindre un taux de réjection de $2,4.10^4$ avec le banc développé durant cette thèse ! Rendez-vous dans la partie 6 pour le verdict ...

Chapitre 4

Les déphaseurs achromatiques

Sommaire

4.1 De la nécessité de l'achromatisme 59
4.2 Les différentes méthodes de déphasage achromatique 60
4.2.1 Lames dispersives 60
4.2.2 Passage par un foyer optique 61
4.2.3 Retournement du champ électrique 63
4.2.4 Réseaux sub-lambda 64
4.2.5 Rhomboèdres de Fresnel 65
4.2.6 Rhomboèdres composites 65
4.2.7 Autres méthodes 67
4.3 Étude détaillée de la méthode des lames dispersives 68
4.3.1 Plusieurs solutions possibles 68
4.3.2 La solution des prismes coulissants 69
4.3.3 Choix du matériau 72
4.3.4 Méthodes de calcul du point de fonctionnement optimum 73
4.3.5 Influence du parallélisme des prismes 78
4.3.6 Influence de la température 79
4.3.7 Décalage des faisceaux et dispersion 81
4.4 Recherche pratique du point de fonctionnement 82
4.4.1 Simulation de cartographies 82
4.4.2 Balayages en différence de marche 84
4.4.3 Minimisation des fuites stellaires 85

4.1 De la nécessité de l'achromatisme

NOUS avons vu dans la partie 2 que le principe de l'interféromètre de Bracewell, sur lequel est basé la mission spatiale Darwin, repose sur l'introduction d'un déphasage de π entre les deux voies de l'interféromètre. Ce déphasage s'exprime de façon simple en fonction de la différence de marche δ, qui existe ou qui est ajoutée entre les ondes recombinées, sous la forme de l'équation (4.1),

$$\Delta\phi_\lambda = 2\pi.\frac{\delta}{\lambda} \tag{4.1}$$

Si la lumière provenant des étoiles-cibles de cette mission était monochromatique, c'est-à-dire constituée d'une seule longueur d'onde λ, il suffirait donc d'introduire une différence de marche de $\lambda/2$ pour obtenir un déphasage exact de π. Or les étoiles émettent une lumière polychromatique, qui peut certes se décomposer comme une somme d'ondes monochromatiques, mais il faudrait alors une infinité de déphaseurs "monochromatiques" pour que toutes les ondes soient simultanément déphasées de π.

C'est pour la même raison qu'il n'est pas possible de positionner l'étoile que l'on cherche à annuler sur l'une des franges noires adjacentes à la frange centrale brillante d'un interféromètre utilisé en recombinaison classique constructive. Car, pour chaque longueur d'onde constituant la lumière polychromatique, ces franges noires sont situées à des positions différentes.

En d'autres termes, **le déphasage introduit doit être indépendant de la longueur d'onde, c'est-à-dire achromatique**, ou plus exactement quasi-achromatique autour de la valeur de π. En effet, il est d'autant plus difficile d'achromatiser le déphasage que la bande de longueur d'onde est large. Or dans le cas de la mission Darwin, qui vise la bande 6-20 µm, cette largeur[60] atteint $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{moyenne}}} = 100\,\%$. Il s'agit donc là d'un véritable défi, mais nous allons voir maintenant qu'il existe (heureusement) de nombreuses méthodes pour créer un déphasage achromatique de π (Rabbia et al., 2000).

4.2 Les différentes méthodes de déphasage achromatique

4.2.1 Lames dispersives

La méthode des lames dispersives s'inspire directement de celle utilisée par les concepteurs de systèmes optiques pour minimiser les aberrations chromatiques des lentilles. Elle pourrait à ce titre être qualifiée de "méthode à chromatisme compensé". Il s'agit ici d'introduire dans chaque bras de l'interféromètre un certain nombre de lames diélectriques, afin d'obtenir une différence de chemin optique entre les deux voies. Cette différence de marche est ajustée au moyen d'une variation de l'épaisseur des matériaux traversée par les faisceaux et par l'ajout d'une ligne à retard. Le nombre de lames, combiné au choix de leur matériau et de leur épaisseur permet d'obtenir n'importe quelle valeur de déphasage, ce qui représente le principal intérêt de cette méthode dans la perspective de la mission Darwin. Les éventuels faisceaux parasites sont supprimés par l'utilisation de lames prismatiques, au prix d'une dispersion additionnelle. La figure 4.1 montre un exemple d'un tel déphaseur de π.

Dans le cas général, où l'on introduit dans chaque bras de l'interféromètre N paires de lames réalisées dans N matériaux donnés, la différence de chemin optique δ s'écrit

$$\delta = ddm\,.\,n_{\text{air}} + \sum_{i=1}^{N} e_i\,.\left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}_i}(\lambda)\right] \tag{4.2}$$

où ddm est la différence de marche des faisceaux dans l'air, e_i l'épaisseur différentielle entre les deux lames du même matériau i traversées par le faisceau dans chaque voie et $n_{\text{matériau}_i}(\lambda)$ l'indice de ce matériau. Le déphasage correspondant s'écrit

$$\Delta\phi_\lambda = 2\pi.\frac{\delta}{\lambda} = 2\pi.\frac{ddm\,.\,n_{\text{air}} + \sum_{i=1}^{N} e_i\,.\left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}_i}(\lambda)\right]}{\lambda} \tag{4.3}$$

Cette équation comporte deux termes, entre lesquels il va s'agir d'introduire une compensation, afin d'obtenir un déphasage aussi constant que possible. En effet, le terme de différence de marche varie na-

[60] Cette bande de longueur d'onde sera néanmoins sûrement divisée en plusieurs sous-bandes pour différentes raisons, qui sont liées au très faible nombre de matériaux transmettant dans l'intégralité de cette bande de longueurs d'onde et qui interviennent dans les déphaseurs eux-mêmes ou encore dans les fibres optiques qui seront utilisées pour le filtrage modal.

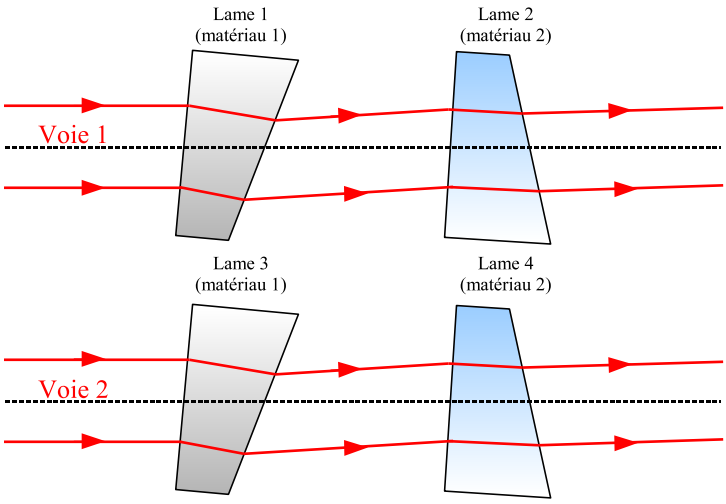


FIG. 4.1: Exemple de déphaseur à lames dispersives constitué de quatre lames prismatiques réalisées dans deux matériaux différents. Les lames sont légèrement inclinées pour supprimer les réflexions parasites.

turellement comme l'inverse de la longueur d'onde. Si l'on néglige le chromatisme de l'air[61], il faut donc trouver un matériau dont l'indice varie de façon linéaire avec la longueur d'onde. Ensuite, il suffira (!) de trouver le multiplet $(e_i, d\,d\,m)$ ajustant au mieux cette compensation chromatique.

Selon le déphasage désiré, l'écart maximal à cette valeur autorisé et, bien évidemment, la largeur du domaine spectral dans lequel ce déphasage doit être achromatique, il est nécessaire d'augmenter le nombre de lames et donc de matériaux pour que cette équation trouve une solution. La figure 4.2c illustre, à ce sujet, l'importance du filtrage spectral dans cette méthode. L'approximation du déphasage de π n'est valable que sur un domaine spectral donné, qui doit être limité par un filtre aussi sélectif que possible, et ne présentant, en particulier, aucun "rebond" en dehors de la bande considérée.

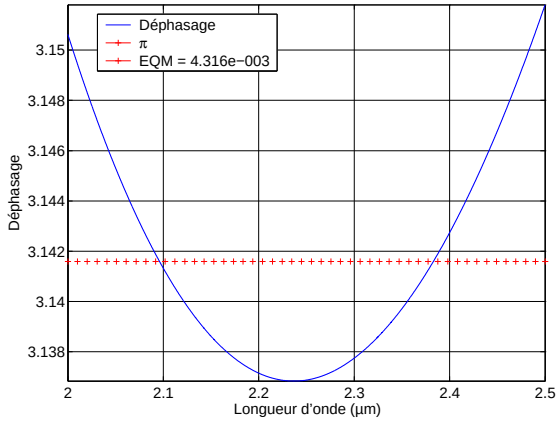
Cette méthode a été testée en laboratoire avec succès par l'équipe d'*Alcatel Space Industries* (Weber, 2004). Le déphaseur achromatique implanté sur le banc de mesure développé durant cette thèse, et dont il sera question au paragraphe 4.3.2, est inspiré de cette méthode.

Dernier point : l'équation (4.2) peut également être développée sous la forme d'un polynôme fonction de la longueur d'onde λ, ce qui permet de mettre en évidence une autre propriété intéressante de la méthode des lames dispersives. Il est possible de compenser un chromatisme résiduel introduit par d'autres composants de l'interféromètre. En effet, un tel chromatisme additionnel peut lui-même s'écrire sous la forme d'un polynôme fonction de λ. Dès lors, il n'agit que comme un facteur supplémentaire dans l'équation (4.2) et se traduit par un autre multiplet-solution.

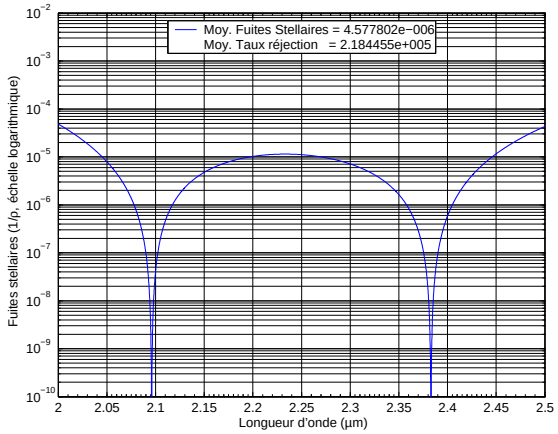
4.2.2 Passage par un foyer optique

Cette méthode, aussi appelée "effet Gouy", du nom de son inventeur, a été démontrée dès 1890 par L. Gouy. Son principe s'appuie sur une propriété intrinsèque de la lumière : toute onde lumineuse, quelle que soit sa longueur d'onde, subit un déphasage de π lorsqu'elle passe par un foyer optique. Si l'on ajoute le fait que cette technique ne fait appel qu'à des miroirs, ce qui garantit une excellente

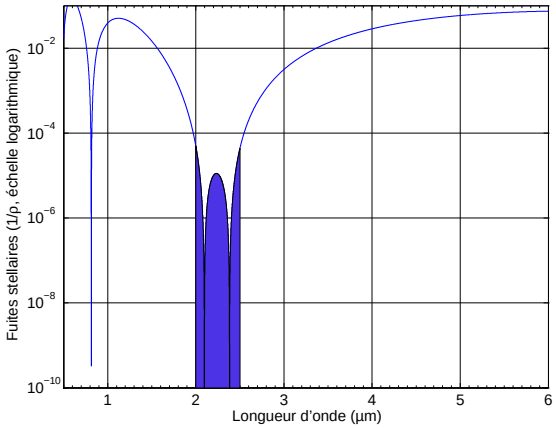
[61] Ce sera une hypothèse de travail dans toute la suite de cette étude.



(a) Déphasage pour un unique matériau.

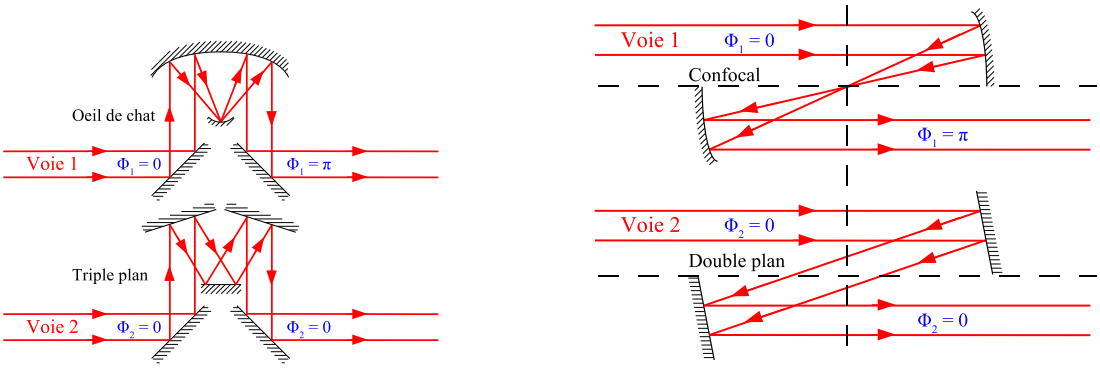


(b) Fuites stellaires pour un unique matériau.



(c) Domaine spectral de validité du déphasage de π pour un unique matériau.

FIG. 4.2: Déphasage et fuites stellaires obtenues grâce à la méthode des lames dispersives, dans un cas idéal.
Le cas présenté fait appel à une unique paire de lames, donc à un unique matériau, en l'occurrence la fluorine (CaF_2). Une sélection rigoureuse du domaine spectral est essentielle. La zone coloriée sur la figure 4.2c correspond à celle représentée sur la figure 4.2b.



(a) Version "œil de chat" et triple plan.

(b) Version confocale et double plan.

FIG. 4.3: Vue de dessus d'un déphaseur de π avec passage par un foyer optique.

transmission au déphaseur, son intérêt pour la mission Darwin devient évident. Ce principe a été repris et testé avec succès, en laboratoire, par l'équipe de Jean Gay et Yves Rabbia (Gay & Rabbia, 1996; Gay, 1996; Baudoz et al., 2000a) sous la forme du Coronographe Interférométrique Achromatique (CIA), un interféromètre de Michelson modifié pour introduire un passage par un foyer dans l'un des bras. Elle a également été évaluée sur le ciel (Baudoz et al., 2000b).

Ce déphaseur s'appuie sur deux sous-systèmes, chacun étant placé dans l'un des bras de l'interféromètre. Il existe deux versions de ce déphaseur :

- ➢ Dans la première (Figure 4.3a), un premier sous-système, aussi dénommé "œil de chat", est constitué d'un miroir primaire parabolique venant focaliser le faisceau sur un miroir secondaire sphérique. Dans la seconde voie, le miroir primaire parabolique est remplacé par deux miroirs plans classiques et laisse la phase de ce faisceau intacte. Il est intéressant de noter que les deux éléments de cette version du déphaseur peuvent être introduits dans des lignes à retard et remplir cette fonction ;
- ➢ Dans la seconde version (Figure 4.3b), le premier sous-système correspond à une version "déployée" de l'"œil de chat", que nous appellerons confocale. Dans le second bras, le système à trois miroirs est remplacé par une paire de miroirs plans.

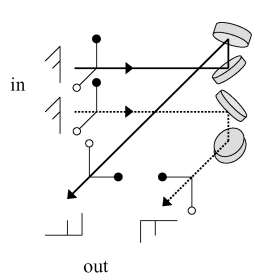
Le principal avantage de cette méthode est la très grande largeur spectrale pouvant être achromatisée, celle-ci ne dépendant que du métal utilisé pour les dépôts des surfaces réfléchissantes. Elle requiert néanmoins une très grande stabilité mécanique du dispositif, ne permet que les valeurs[62] de déphasage π et $\pi/2$. La seconde version, outre une transmission bien meilleure du fait du nombre réduit de miroirs, ne présente pas l'inconvénient de focaliser le faisceau sur une surface optique comme dans la première version. Elle ne peut toutefois plus servir de ligne à retard.

4.2.3 Retournement du champ électrique

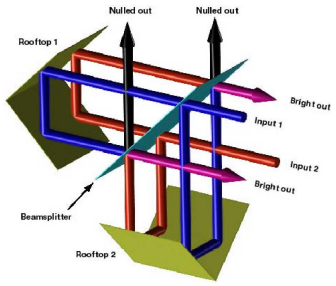
Il s'agit de la seconde méthode ne faisant appel qu'à une combinaison de miroirs pour créer, de façon différentielle[63], un déphasage de π. Son principe consiste à implanter deux miroirs, croisés dans chaque bras, de façon à permuter les polarisations *s* et *p* du faisceau après deux réflexions successives, comme le montre la figure 4.4a. Deux schémas utilisant cette méthode existent. Le premier, représenté sur la figure 4.4b, a été testé par E. Serabyn au *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) (Serabyn & Colavita, 2001). Il

[62] La valeur de $\pi/2$ est obtenue en remplaçant le miroir secondaire sphérique par un miroir cylindrique.

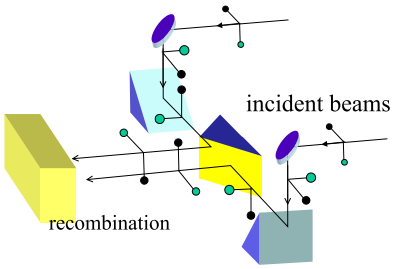
[63] Autrement dit, le déphasage n'est effectif que lors de la recombinaison des deux voies de l'interféromètre.



(a) Géométrie et comportement en polarisation : il s'agit de permuter les polarisations *s* et *p* avant recombinaison (Serabyn & Colavita, 2001).



(b) Configuration utilisée par E. Serabyn, avec recombinaison intégrée (Serabyn, 2003).



(c) Configuration à deux périscopes. Il faut lui ajouter une recombinaison interférométrique (Rabbia et al., 2003).

FIG. 4.4: Déphaseur de π à retournement du champ électrique.

utilise un système de prismes en toit croisés, associés à un couple séparatrice-recombinatrice. Le second, représenté sur la figure 4.4c, fait appel à une paire de périscopes, dont les faisceaux sont recombinés par un interféromètre traditionnel.

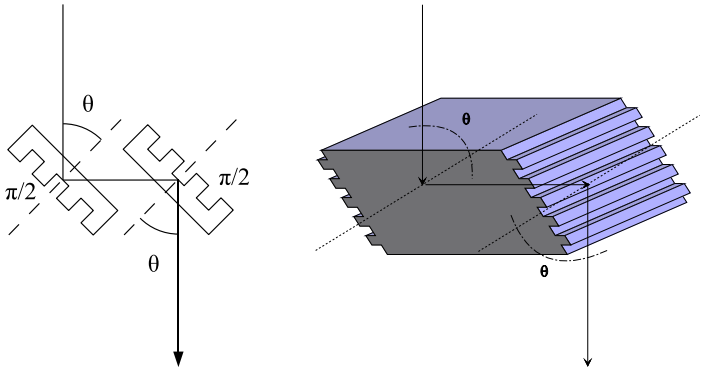
Cette méthode présente les mêmes avantages que le passage par un foyer optique en terme de largeur de bande spectrale pouvant être achromatisée et de transmission optique. Elle nécessite également une très grande stabilité mécanique et introduit un décalage des faisceaux en hauteur.

4.2.4 Réseaux sub-lambda

Cette technique assez récente repose sur l'utilisation de la biréfringence pour créer un déphasage achromatique différentiel de n'importe quelle valeur. L'idée d'employer la biréfringence naturelle des matériaux n'est en elle-même pas nouvelle, puisque les lames dites "quart d'onde" ou demi-onde sont maintenant très courantes dans le commerce. Elle a même été proposée pour créer des déphasages achromatiques (Destriau & Prouteau, 1949; Pancharatnam, 1955; Hariharan, 1996). Néanmoins, le choix de ces matériaux biréfringents dans la bande de longueur d'onde de la mission Darwin est très restreint. Problème auquel vient s'ajouter le fait que ces matériaux ont tous des indices élevés, synonymes de fortes pertes de Fresnel.

D'où l'idée de créer une biréfringence "artificielle" (Mawet et al., 2003), et ce, au moyen de réseaux dits "sub-lambda". Autrement dit, le pas de ces réseaux est plus petit que la longueur d'onde incidente, si bien que seul l'ordre zéro peut se propager et être transmis ou réfléchi par de tels réseaux. Il n'y a pas de diffraction, donc aucune aberration supplémentaire n'est introduite. Par ailleurs, le choix des différents paramètres du réseau permet de rendre la biréfringence artificiellement créée proportionnelle à la longueur d'onde. L'achromatisation de larges domaines de longueur d'onde devient dès lors possible.

Cette méthode pourrait s'avérer très prometteuse, dès que les techniques de gravures de ces réseaux, qui exigent une très grande régularité, seront parfaitement au point. Lors de la réponse à l'appel d'offre du projet NULLTIMATE, Dimitri Mawet, de l'université de Liège, a proposé un déphaseur (Figure 4.5) basé sur les rhomboèdres de Fresnel (que nous verrons au paragraphe suivant) et utilisant des réseaux sub-lambda.



(a) Géométrie du dispositif.

(b) Exemple d'utilisation des réseaux sub-lambda en réflexion, dans un déphaseur achromatique de π basé sur les rhomboèdres de Fresnel.

FIG. 4.5: Déphaseur à réseaux sub-lambda.

4.2.5 Rhomboèdres de Fresnel

Les rhomboèdres de Fresnel sont des dispositifs disponibles, pour le domaine visible, dans le commerce. Leur principe s'appuie sur la propriété de réflexion totale de la lumière lorsqu'elle rencontre une interface sous un angle excédant un angle[64] α_{limite}. Comme le montre la figure 4.6a, un faisceau incident de polarisation linéaire d'azimuth 45° voit sa polarisation devenir circulaire lorsqu'il traverse un tel rhomboèdre, ce qui signifie l'ajout d'un déphasage de $\pi/2$ entre ses deux composantes s et p. Un déphasage de π peut donc être obtenu en cascadant deux rhomboèdres de ce type (Figure 4.6b).

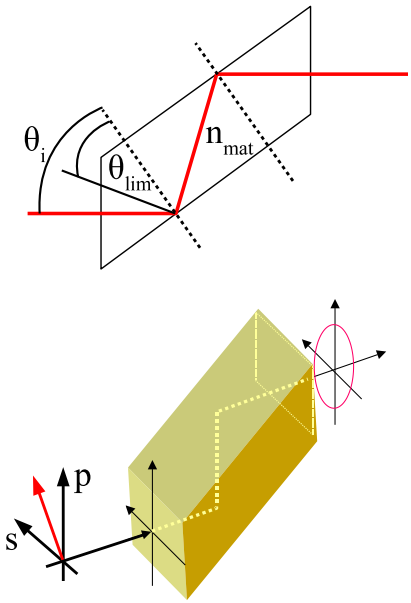
Bien qu'elle offre l'avantage de permettre de régler la valeur du déphasage en choisissant l'angle d'incidence du faisceau, cette méthode reste très sensible aux variations d'indice du matériau, ce qui, compte tenu du volume de matériau nécessaire, devient un inconvénient majeur (Rabbia et al., 2000).

4.2.6 Rhomboèdres composites

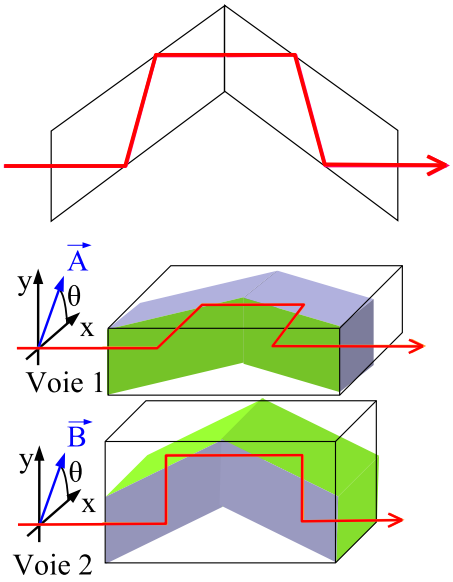
Cette méthode a, à notre connaissance, été proposée pour la première fois par Jean Gay de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA). Elle reste, pour l'heure, à l'état conceptuel, mais permet d'obtenir n'importe quelle valeur de déphasage, et ce, de façon quasi-achromatique (Rabbia et al., 2000). Dans chaque bras de l'interféromètre est inséré un couple de prismes réalisés dans deux matériaux différents. Le déphasage résultant des réflexions totales sur les faces internes des prismes s'applique à l'une des polarisations linéaires lors de la recombinaison. L'idée consiste donc à permuter à la fois les polarisations des faisceaux incidents et les matériaux entre les deux voies, comme le montre la figure 4.7.

Les choix des matériaux et de la géométrie des prismes détermine la valeur du déphasage pouvant être obtenu. Un tel dispositif nécessite néanmoins des traitements anti-reflets appropriés pour éviter les pertes de Fresnel aux interfaces et, comme dans le cas des rhomboèdres de Fresnel, reste limité par l'homogénéité des matériaux pour les volumes considérés.

[64] On rappelle que pour une interface "matériau 1 / matériau 2", d'indices respectifs n_1 et n_2, l'angle d'incidence limite est défini par $\alpha_{\text{limite}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$.

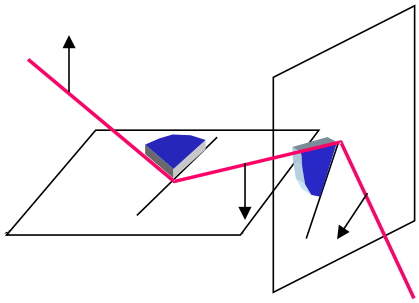


(a) Rhomboèdre de Fresnel traditionnel (géométrie et paramètres fonctionnels, comportement en polarisation).

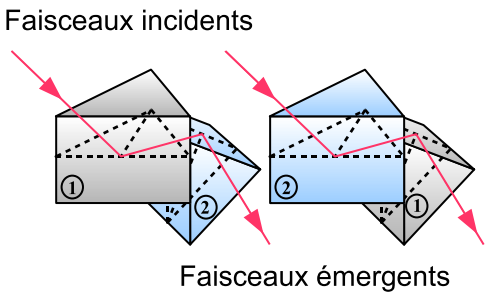


(b) Déphaseur achromatique de π basé sur ce principe (Rabbia et al., 2003).

FIG. 4.6: Dispositifs à rhomboèdres de Fresnel.



(a) Géométrie et comportement en polarisation : il s'agit de jouer sur le plan d'incidence pour obtenir une polarisation *s* lors de la première réflexion et une polarisation *p* lors de la seconde.



(b) Déphaseur achromatique de π basé sur ce principe.

FIG. 4.7: Dispositifs à rhomboèdres composites.

4.2.7 Autres méthodes

Optique intégrée

L'optique intégrée sera très certainement utilisée abondamment dans la version définitive de la mission Darwin, du fait de ses avantages en termes de compacité et de stabilité (Labadie et al., 2005). Elle ne propose en elle-même pas de solution nouvelle pour créer des déphasages achromatiques, mais se présente plutôt comme l'étape finale de miniaturisation des concepts précédemment cités. Seuls quelques concepts de déphaseurs achromatiques peuvent, pour le moment, prétendre à être intégrés. Il s'agit de la méthode des lames dispersives[65] et de celles faisant appel à des réflexions métalliques, comme le retournement du champ électrique ou le passage par un foyer optique. Les principales limitations actuelles sont le manque cruel de guides d'onde monomodes et le choix limité des matériaux dans les longueurs d'onde de la mission Darwin, couplés aux difficultés techniques propres à l'optique intégrée.

Traitements multicouches

L'intérêt des traitements multicouches (ou diélectriques) n'est plus à démontrer dans le domaine de l'optique, que ce soit pour réaliser des traitements anti-reflets de haute performance, des miroirs de haute réflectivité ou encore des filtres passe-bande. Agissant directement sur l'amplitude et la phase des faisceaux incidents, il était donc naturel d'imaginer utiliser ces techniques, aujourd'hui bien maîtrisées, pour la réalisation de déphaseurs achromatiques (Lemarquis & Riaud, 2004). Le principal avantage est que de tels traitements peuvent être directement appliqués sur les miroirs d'un système de recombinaison, simplifiant d'autant la géométrie de l'ensemble. Néanmoins, la précision requise sur les épaisseurs des (très) nombreuses couches de matériaux reste pour le moment problèmatique.

Coronographie à 4 quadrants

Cette méthode, mise en œuvre par l'équipe de Daniel Rouan, de l'Observatoire de Meudon, s'inspire du masque de phase de Roddier (Roddier & Roddier, 1997; Guyon et al., 1999), dans lequel la pastille déphasante de π est remplacée par un masque à quatre quadrants, qui sépare donc le plan focal en quatre secteurs symétriques[66]. Deux de ces quadrants introduisent un déphasage de π au moyen de traitements multicouches, tandis que les deux autres laissent la phase inchangée. Par ce moyen, si une source ponctuelle est parfaitement centrée sur ce masque, elle voit, dans le plan pupille, sa lumière rejetée à l'extérieur de la pupille géométrique du coronographe, grâce à l'ajout d'un diaphragme de Lyot. En revanche, une source secondaire (disons, par exemple, une exoplanète !), légèrement excentrée, deviendra visible, du fait de l'atténuation très rapide de l'effet coronographique hors axe. Le principe complet de ce déphaseur est décrit sur la figure 4.8, extraite de la thèse de Pierre Riaud (Riaud, 2003). Il pourrait être adapté sur un interféromètre de Bracewell en incluant dans chacun de ses bras l'un des quadrants de ce coronographe.

[65] Il s'agit, dans le cas de l'optique intégrée, de jouer non seulement sur le matériau du guide d'onde, mais aussi sur son diamètre et sa longueur.

[66] Récemment, D. Rouan a (re-)découvert que ces secteurs sont les quatre premiers termes des suites de Prouhet-Thué-Morse (Rouan, 2003).

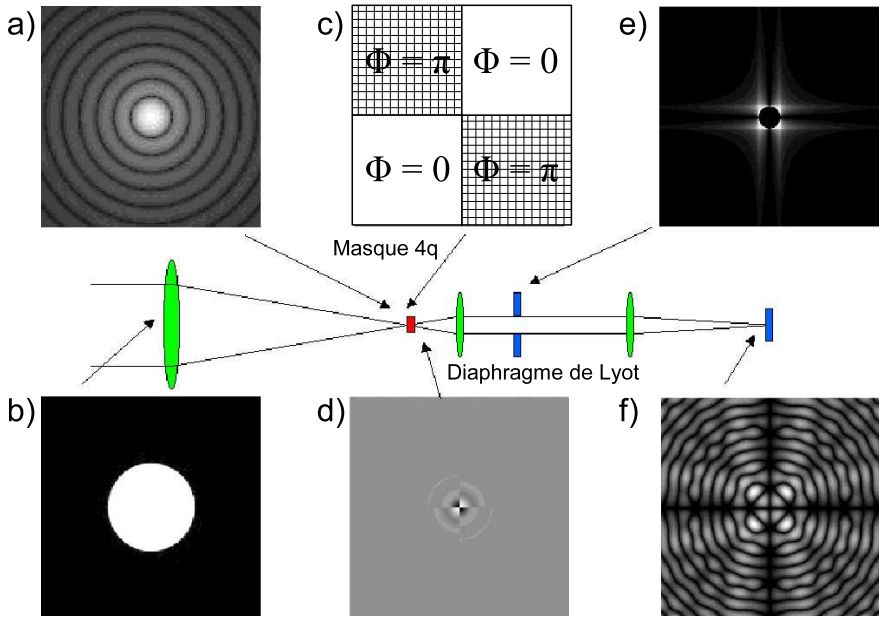


FIG. 4.8: Coronographe à quatre quadrants (d'après Riaud (2003)).
a) Tache d'Airy ;
b) Pupille d'entrée de l'instrument ;
c) Schéma de principe du masque de phase ;
d) Effet du masque sur la tache d'Airy ;
e) Plan pupille du coronographe ;
f) Résidus, en échelle logarithmique, du plan pupille coronographique après filtrage par le diaphragme de Lyot. L'intensité résiduelle du pic central est environ 10^{-6} fois celle du pic stellaire originel.

4.3 Étude détaillée de la méthode des lames dispersives

Nous allons maintenant revenir plus particulièrement sur la méthode des lames dispersives, dans la mesure où le déphaseur achromatique testé expérimentalement dans le cadre de cette thèse y fait appel.

4.3.1 Plusieurs solutions possibles

La méthode des lames dispersives a été étudiée par plusieurs équipes dans le monde, sous différentes formes. Nous avons évoqué au paragraphe 4.2.1 le concept employé par l'équipe d'*Alcatel Space Industries* basée sur la translation de plusieurs lames, réparties dans les deux bras de l'interféromètre. Ces lames sont très faiblement prismatiques, avec un angle au sommet de l'ordre de quelques minutes d'arc. Elles sont également légèrement inclinées pour éviter les rayons parasites dûs aux faces parallèles. Une autre solution (Morgan et al., 2003), combinant la translation et la rotation de lames dispersives, a également été testée dans le domaine visible. Les lames de cette expérience étaient à faces parallèles.

Le concept mis en place sur le banc SYNAPSE fait, quant à lui, appel à des lames prismatiques, avec un angle au sommet de plusieurs degrés. Il est directement inspiré d'un dessin proposé par l'équipe hollandaise de TNO-TPD (Mieremet, 2003). L'idée consiste à placer, tête-bêche, deux prismes, réalisés dans un même matériau, dans chaque voie de l'interféromètre. L'un de ces quatre prismes peut coulisser sur quelques microns pour créer une épaisseur de matériau différentielle.

Pour augmenter les performances en termes de réjection, il faut ajouter un ou plusieurs autres matériaux, ce qui se traduit par des paires de prismes, autrement dit par des déphaseurs supplémentaires. En comparaison avec la méthode testée par *Alcatel Space Industries*, cette solution est plus coûteuse en terme de transmission, puisque le nombre de lames par bras est doublé. Elle requiert donc un choix draconien des matériaux. Dans notre cas, ce ne sera pas un problème, puisqu'un seul matériau est suffisant pour atteindre le taux de réjection souhaité.

Nous reviendrons plus en détail sur la mise en œuvre du déphaseur de SYNAPSE lors de la description complète du banc dans le paragraphe 5.3.5. Nous allons maintenant préciser ses différents paramètres.

4.3.2 La solution des prismes coulissants

Les quatre prismes de ce déphaseur, répartis par paires dans chaque bras de l'interféromètre, utilisent un unique matériau. Seul un de ces prismes, que nous appelerons le prisme coulissant, est mobile dans l'une des voies, pour créer une épaisseur de matériau différentielle. Nous allons maintenant évoquer son principe de fonctionnement et les principales étapes de son dimensionnement.

Principe et mise en équation

Comme nous l'avons évoqué au paragraphe 4.2.1, l'obtention d'un déphasage donné avec un déphaseur à lames dispersives passe par la détermination du multiplet (e_i, ddm). Dans le cas simple où il n'y a qu'un seul matériau, il faut donc déterminer un couple (e, ddm).

Si l'on connaît (ou mesure) la variation de l'indice du matériau choisi en fonction de la longueur d'onde, on pourrait imaginer déterminer les valeurs nécessaires pour cela, puis réaliser la lame optique d'épaisseur adaptée et ne garder que la différence de marche comme paramètre de réglage. Nous verrons dans la suite que la précision requise sur ces deux valeurs est assez drastique et empêche une solution aussi simple[67]. Nous verrons également qu'il n'est pas si aisé de déterminer le **couple de valeurs** (**e**, **ddm**), que nous désignerons, par "analogie électrique", sous le terme de **point de fonctionnement**.

Par conséquent, afin de garder toute latitude de réglage du déphasage, il faudrait disposer d'une lame optique d'épaisseur variable. C'est l'idée de base à l'origine du déphaseur à prismes. En effet, dans l'hypothèse où le système est parfaitement réglé[68], chaque paire de prismes se comporte comme une lame à faces parallèles. Le fait que l'un des prismes puisse coulisser selon son arête principale permet alors d'ajuster l'épaisseur de la lame dans l'un des bras, l'autre épaisseur restant fixe. La figure 4.9 illustre ce principe de fonctionnement.

Si l'on s'intéresse aux chemins optiques de chaque bras, dans le cas (théorique) où toutes les faces des prismes sont rigoureusement parallèles, on constate sur cette figure que la diminution (resp. l'augmentation) de l'épaisseur du matériau traversé dans le prisme coulissant s'accompagne d'une augmentation (resp. diminution) de la différence de marche parcourue dans l'air. Le déphasage entre les deux voies, introduit par un tel dispositif, peut donc s'écrire sous la forme

$$\Delta\phi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}\left[n_{\text{air}}.(ddm + e) - e.n_{\text{matériau}}(\lambda)\right] \tag{4.4}$$

[67] Par ailleurs, une épaisseur fixe suppose une valeur de déphasage fixe, or, dans le cas de la mission Darwin, il est possible que plusieurs valeurs de déphasage soient successivement nécessaires au cours d'une observation.

[68] Cela suppose un parallélisme rigoureux des faces internes et externes, ainsi qu'une incidence parfaitement normale des faisceaux sur les faces des prismes (autant dire, l'impossible !).

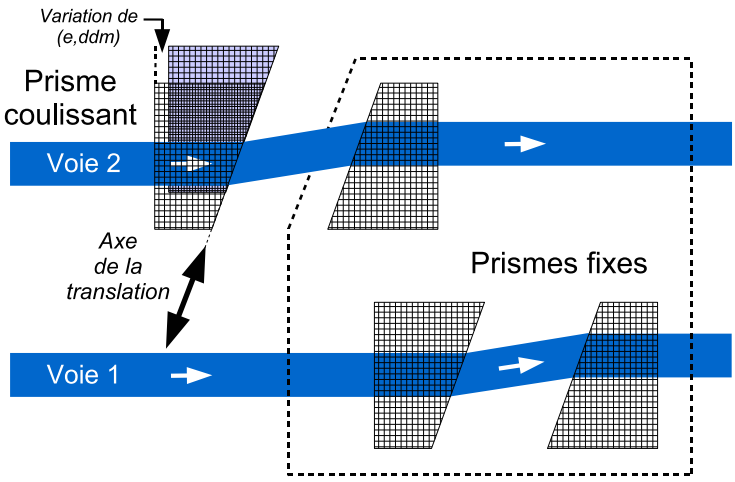


FIG. 4.9: Déphaseur à prisme coulissant.
Trois des quatre prismes sont fixes, le quatrième peut coulisser selon son arête principale pour ajuster l'épaisseur de matériau différentielle. Le choix de cet axe de translation permet d'éviter tout décalage latéral supplémentaire du faisceau.

Il est préférable de regrouper les termes dépendant de e et les termes dépendant de ddm, nous prendrons donc, comme équation de base du déphasage, l'équation suivante

$$\Delta\phi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{ddm\,.\,n_{\text{air}} + e.\left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}}(\lambda)\right]\right\} \tag{4.5}$$

Il s'agit ensuite d'introduire la translation physique qui sera imposée au prisme coulissant pour obtenir une variation de l'épaisseur. On obtient alors, dans le cas d'un déphaseur à prismes,

$$\Delta\phi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{ddm\,.\,n_{\text{air}} + x.\sin\left(\theta_{\text{prisme}}\right).\left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}}(\lambda)\right]\right\} \tag{4.6}$$

où x correspond à la translation nécessaire pour produire une variation d'épaisseur de matériau e à l'aide d'un prisme d'angle au sommet θ_{prisme}. Cette équation ne s'applique, malgré tout, que dans un cas parfait. Nous verrons dans la suite qu'une modélisation rigoureuse de la géométrie du déphaseur sera nécessaire pour étudier les cas plus réalistes où les alignements ne seront pas parfaits. Dans un premier temps, cette équation, qui a le mérite d'être simple, permet, tout de même, d'effectuer les principaux calculs préliminaires qui suivent.

Dimensionnement

Le dimensionnement des prismes, qui a été fait durant la phase de conception du banc, antérieure à cette thèse, comporte le choix des principaux paramètres suivants :

- ➢ le matériau ;
- ➢ la taille de l'arête des prismes ;
- ➢ l'angle au sommet des prismes ;
- ➢ l'épaisseur de la lame d'air séparant les prismes.

Le choix du matériau s'est porté sur la fluorine (CaF_2), mais nous reviendrons sur les raisons de ce choix au paragraphe 4.3.3.

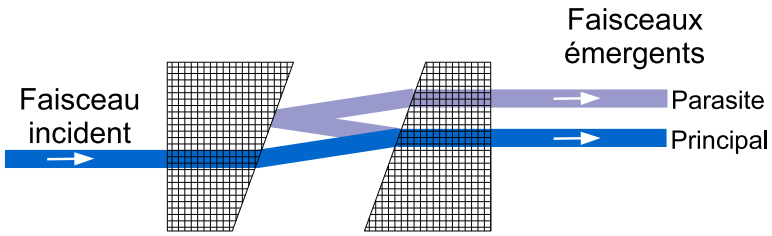


FIG. 4.10: Faisceau parasite principal du déphaseur à prisme coulissant.
Celui-ci revient dans l'axe du faisceau utile, avec un décalage lié à la valeur de l'angle au sommet du prisme et à l'épaisseur de la lame d'air.

Les paramètres dimensionnants étaient, quant à eux :

- ➢ la transmission totale du déphaseur, sur laquelle joue avant tout l'indice, mais aussi, plus faiblement, l'angle des prismes, par l'intermédiaire de la variation angulaire des coefficients de réflexion des faces ;
- ➢ le rejet des faisceaux parasites en dehors du chemin optique utile ;
- ➢ la précision nécessaire sur la translation du prisme coulissant.

Ce dimensionnement a donc été un compromis entre ces différents postes. La transmission du déphaseur est d'autant meilleure et la précision de translation nécessaire d'autant plus faible que l'angle des prismes est faible. Néanmoins, comme le montre la figure 4.10, il est nécessaire que ce dernier soit assez grand, et que la lame d'air soit assez large, pour que le principal faisceau parasite, qui ressort parallèle au faisceau utile, soit suffisamment décalé par rapport à celui-ci. Le choix des paramètres des prismes s'est ainsi porté sur un angle au sommet de 20°, pour une arête de 20 mm. L'épaisseur de la lame d'air a été fixée à 15 mm. De cette façon, la transmission totale du déphaseur[69] s'établit à 88% en bande K et monte même à 89% en bande L. Le décalage entre le faisceau émergent utile et le faisceau parasite principal est théoriquement de 15,7 mm.

En pratique, dans le cas du banc SYNAPSE, pour garder des dimensions raisonnables aux optiques, la distance entre les deux bras du déphaseur a dû être limitée à 30 mm. Compte tenu de l'arête de 20 mm des prismes, et comme le montre la simulation de la figure 4.11, réalisée avec le logiciel *Apilux* de la société O^{++}, le faisceau parasite principal ne ressort pas de la lame d'air et ne vient donc pas perturber le faisceau utile. En revanche, une multitude de faisceaux parasites est générée par les nombreuses réflexions sur les faces internes des prismes. Même si aucun ne revient théoriquement dans l'axe utile, un système d'absorbants a été disposé par précaution entre les deux voies dans le déphaseur.

Il reste à déterminer la précision nécessaire pour le déplacement du prisme coulissant en translation. Pour cela, nous avons vu que le déphasage était lié à la translation x et à la différence de marche $d\,d\,m$ par l'équation (4.6). Si l'on considère les contributions de ces deux paramètres comme indépendantes[70] et le réglage de parallélisme du prisme coulissant comme parfait, l'erreur maximale autorisée sur la translation du prisme est la somme quadratique des erreurs réalisées sur la phase et sur la différence de marche. Nous avons également vu que l'erreur de phase était reliée au taux de réjection ρ par l'équation (3.14) et l'erreur de différence de marche par la relation (3.21).

[69] La représentation de Sellmeier de l'indice du CaF_2 utilisée pour ces calculs est donnée au paragraphe 4.3.4.

[70] Cette hypothèse sera valable dans notre cas, car les faisceaux de métrologie servant à la correction de la différence de marche, ne traversent pas les prismes déphaseurs.

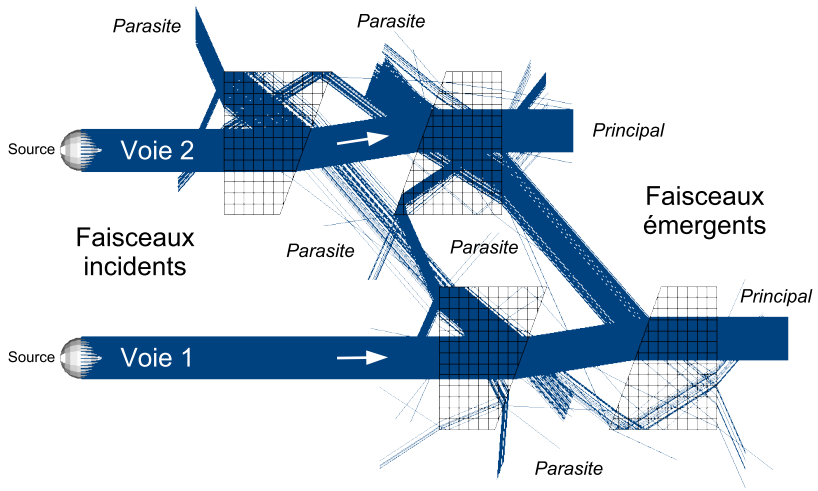


FIG. 4.11: Faisceaux parasites réels du déphaseur à prisme coulissant de SYNAPSE (simulation *Apilux*).

Au total, l'erreur maximale autorisée sur la translation s'exprime sous la forme

$$\delta x = \frac{\lambda_{\text{moyenne}}}{\pi \left| n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}} \right| . \sin\left(\theta_{\text{prisme}}\right)} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tag{4.7}$$

Si l'on applique numériquement cette formule avec les valeurs théoriques nécessaires pour obtenir un taux de réjection de 10^5, la précision la plus exigeante, pour la longueur d'onde de 2 µm, est d'environ 20 nm. Cette précision sera obtenue grâce à une platine piézoélectrique.

Nous allons dans la partie suivante étudier les méthodes permettant d'évaluer les performances de ce déphaseur. Pour certaines, elles sont applicables à d'autres solutions de cette famille de déphaseurs à lames dispersives. C'est pourquoi nous utiliserons l'expression générale approximative du déphasage, ayant pour paramètres les épaisseurs des lames et la différence de marche, plutôt que celle propre à notre déphaseur, qui fait intervenir la translation du prisme.

4.3.3 Choix du matériau

Les différents critères de choix

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que l'indice du matériau est l'un des paramètres cruciaux qui intervient dans les équations permettant de déterminer les coordonnées du point de fonctionnement et le taux de réjection maximal pouvant être atteint. Plusieurs critères interviennent dans le choix de ce matériau :

- ➢ le domaine spectral de travail $[\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}]$;
- ➢ la transmission globale souhaitée pour le déphaseur ;
- ➢ les paramètres physiques du matériau (hygroscopie, dureté, dangerosité en cas de manipulation, ...). Ces paramètres sont importants lors du polissage des optiques et pour la conservation de celles-ci à long terme.

Capacité d'achromatisme et choix du matériau

Plus le domaine spectral de travail sera large, plus il sera difficile de trouver un matériau permettant d'achromatiser le déphasage de π dans les tolérances nécessaires pour obtenir le taux de réjection souhaité.

À partir de l'équation générale (4.5) donnant l'expression du déphasage en fonction de l'épaisseur différentielle e et de la différence de marche ddm, il est possible de déduire la dépendance en longueur d'onde de l'indice du matériau théorique permettant d'obtenir un déphasage de π constant. Cette expression s'écrit

$$n(\lambda) = -\frac{1}{2e}.\lambda + n_{\text{air}}.(ddm + 1) = A.\lambda + B \tag{4.8}$$

Si l'on néglige le chromatisme de l'air, **le matériau idéal présente donc un indice variant linéairement avec la longueur d'onde**. Les paramètres A et B de la droite idéale peuvent être calculés au moyen de la méthode d'approximation des variations de l'indice (exposée au paragraphe suivant), pour chacun des matériaux candidats. Ensuite, on peut prendre comme critère de choix l'écart quadratique moyen entre cette droite et la variation réelle de l'indice du matériau considéré, déterminée à partir d'une équation de Sellmeier fournie par la littérature, ou mesurée expérimentalement sur l'échantillon devant être utilisé.

4.3.4 Méthodes de calcul du point de fonctionnement optimum

Le critère d'optimisation, permettant de déterminer ce que nous appelons le "point de fonctionnement", sera la minimisation des fuites résiduelles provenant de l'étoile visée par l'interféromètre (ou la maximisation du taux de réjection). Ces fuites sont directement liées à la qualité de l'achromatisme de π obtenu sur le domaine de longueur d'onde considéré et sont calculées au moyen de l'équation (3.19), p. 55.

Nous avons vu qu'à partir des équations (4.2) et (4.3), le déphasage introduit par une combinaison de N paires de lames s'écrit approximativement[71] sous la forme :

$$\Delta\phi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{ddm\,.\,n_{\text{air}} + \sum_{i=1}^{N} e_i.\left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}_i}(\lambda)\right]\right\} \tag{4.9}$$

Cette équation décrit un espace à $N+1$ dimensions, dans lequel il est possible de montrer qu'il existe un seul et unique point de fonctionnement optimal, où les fuites stellaires seront minimales. Nous allons maintenant comparer différentes méthodes qui permettent de déterminer, ou tout au moins d'approximer les valeurs des paramètres e_i et ddm en ce point.

Méthode multi-longueurs d'onde

L'idée consiste à imposer $N+1$ longueurs d'onde choisies, dans un premier temps arbitrairement, dans le domaine spectral que l'on souhaite achromatiser, pour lesquelles le déphasage vaut exactement π. Par une méthode classique d'optimisation, basée sur la minimisation des fuites stellaires[72], il faut déterminer les valeurs des longueurs d'onde λ_i recherchées. Les conditions de l'équation (4.10) se traduisent par un système à $N+1$ équations pour $N+1$ inconnues.

$$\forall\, i \leq N, \Delta\phi_{\lambda_i} = \pi \tag{4.10}$$

[71] En toute rigueur, il faudrait prendre en compte les variations des indices de l'air et du matériau avec la température, la pression, l'hygrométrie, etc.

[72] Il s'agit, en pratique, de minimiser l'intégrale de la courbe du déphasage en fonction de la longueur d'onde.

Dans le cas d'un seul matériau, qui nous intéresse directement pour le déphaseur testé sur le banc SYNAPSE, ce système d'équations s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda_1}\left\{ddm.n_{\text{air}}+e.\left[n_{\text{air}}-n_{\text{matériau}}(\lambda_1)\right]\right\}=\pi \\ \frac{2\pi}{\lambda_2}\left\{ddm.n_{\text{air}}+e.\left[n_{\text{air}}-n_{\text{matériau}}(\lambda_2)\right]\right\}=\pi \end{cases} \tag{4.11}$$

La résolution du système (4.11) donne le couple de solution (e, ddm), tel que :

$$\begin{cases} e=\dfrac{\lambda_2-\lambda_1}{2\left[n_{\text{matériau}}(\lambda_2)-n_{\text{matériau}}(\lambda_1)\right]} \\ ddm=\dfrac{\lambda_1\left[n_{\text{matériau}}(\lambda_2)-n_{\text{air}}\right]-\lambda_2\left[n_{\text{matériau}}(\lambda_1)-n_{\text{air}}\right]}{2.n_{\text{air}}\left[n_{\text{matériau}}(\lambda_2)-n_{\text{matériau}}(\lambda_1)\right]} \end{cases} \tag{4.12}$$

La recherche des longueurs d'onde λ_i peut débuter par une répartition équidistante sur le domaine de longueur d'onde considéré. Par la suite, une optimisation successive sur chaque λ_i permet d'obtenir une approximation correcte de la position du point de fonctionnement. Nous verrons une comparaison des différentes méthodes à la fin de cette partie.

Approximation des variations de l'indice du matériau

Une autre méthode permet d'obtenir une bonne approximation des coordonnées du point de fonctionnement. Elle permet ainsi de déterminer des conditions initiales correctes pour une seconde méthode d'optimisation portant sur les deux paramètres que sont l'épaisseur différentielle du matériau et la différence de marche. Du fait des deux paramètres, ces méthodes d'optimisation sont en effet très sensibles aux conditions initiales.

Cette autre méthode consiste simplement à approximer, dans l'expression du déphasage $\Delta\phi_\lambda$, les variations de l'indice du matériau par un ajustement polynomial d'ordre $N-1$ (où N est le nombre de paires de lames) autour de la longueur d'onde centrale. L'équation (4.9) peut alors se re-écrire sous la forme

$$\Delta\phi_\lambda=\frac{2\pi}{\lambda}\left[ddm.n_{\text{air}}+\sum_{i=1}^{N}e_i.\left(\sum_{j=0}^{N-1}A_j.\lambda^j-n_{\text{air}}\right)\right] \tag{4.13}$$

Si l'on applique cette méthode au déphaseur à prismes du banc SYNAPSE, qui ne comporte que deux paires de lames, soit avec un ajustement polynomial d'ordre 1, l'équation (4.13) se réduit à

$$\Delta\phi_\lambda=\frac{2\pi}{\lambda}\left[ddm.n_{\text{air}}+e.(A_0+A_1.\lambda-n_{\text{air}})\right] \tag{4.14}$$

Par conséquent, on a

$$\begin{cases} e &= \frac{1}{2A_1} \\ ddm &= \frac{n_{\text{air}}-A_0}{2A_1.n_{\text{air}}} \end{cases} \tag{4.15}$$

Minimisation de l'écart quadratique moyen du déphasage à π

Nous savons que dans le cas monochromatique, le minimum des fuites stellaires est obtenu lorsque le déphasage entre les deux voies de l'interféromètre vaut exactement π. L'idée consiste donc à transposer cette méthode au cas polychromatique en recherchant à minimiser l'écart quadratique du déphasage par rapport à π sur le domaine de longueur d'onde à achromatiser.
Il s'agit alors de minimiser le facteur Γ dans l'expression

$$\Gamma = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon^2(\lambda, e_i, d\,d\,m)\,\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}} \tag{4.16}$$

où $\varepsilon(\lambda, e_i, d\,d\,m)$ est l'erreur de phase monochromatique par rapport à π et a pour expression

$$\varepsilon(\lambda, e_i, d\,d\,m) = \Delta\phi_\lambda - \pi = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{d\,d\,m\,.\,n_{\text{air}} + \sum_{i=1}^{N} e_i.\left[n_{\text{matériau}_i}(\lambda) - n_{\text{air}}\right]\right\} - \pi \tag{4.17}$$

La minimisation de Γ s'effectue ensuite en annulant les dérivées partielles de Γ par rapport à chacune des variables e_i et $d\,d\,m$. Cela revient, de façon plus simple, à annuler les dérivées partielles de l'intégrale de $\varepsilon^2(\lambda, e_i, d\,d\,m)$ sur le domaine de longueur d'onde. On obtient alors le système d'équations suivant

$$\begin{cases} \forall i \leqslant N, \dfrac{\partial \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon^2(\lambda, e_i, d\,d\,m)\,\mathrm{d}\lambda}{\partial\, e_i} = 0 \\ \dfrac{\partial \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon^2(\lambda, e_i, d\,d\,m)\,\mathrm{d}\lambda}{\partial\, d\,d\,m} = 0 \end{cases} \tag{4.18}$$

Appliqué à notre cas, où $N = 1$, le déphasage approximatif est donné par l'équation (4.5) et le système (4.18) s'écrit

$$\begin{cases} 2\,.\,d\,d\,m\,.\,n_{\text{air}}\,.\left(\dfrac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max}\,.\,\lambda_{\min}}\right) - n_{\text{air}}\,.\ln\left(\dfrac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}\right) + 2\,.\,e\,.\,n_{\text{air}}\,.\,I_3 = 0 \\ 2\,.\,e\,.\,I_1 - I_2 + 2\,.\,d\,d\,m\,.\,n_{\text{air}}\,.\,I_3 = 0 \end{cases} \tag{4.19}$$

où les facteurs I_1, I_2 et I_3 sont des intégrales dépendant uniquement de l'indice du matériau, dont les expressions sont données par

$$\begin{cases} I_1 = \displaystyle\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{(n_{\text{matériau}}(\lambda) - n_{\text{air}})^2}{\lambda^2}\ \mathrm{d}\lambda \\ I_2 = \displaystyle\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{n_{\text{matériau}}(\lambda) - n_{\text{air}}}{\lambda}\ \mathrm{d}\lambda \\ I_3 = \displaystyle\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{n_{\text{matériau}}(\lambda) - n_{\text{air}}}{\lambda^2}\ \mathrm{d}\lambda \end{cases} \tag{4.20}$$

On en déduit les coordonnées du point de fonctionnement approximatif

$$\begin{cases} d\,d\,m = \dfrac{I_1\,.\ln\left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}\right) - I_2\,.\,I_3}{2\left[I_1\frac{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}\,.\,\lambda_{\min}} - n_{\text{air}}\,.\,I_3^2\right]} \\ e = \dfrac{1}{2\,.\,I_1}\left\{I_2 - \dfrac{n_{\text{air}}\,.\,I_3\left[I_1\,.\ln\left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}\right) - I_2\,.\,I_3\right]}{I_1\frac{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}\,.\,\lambda_{\min}} - n_{\text{air}}\,.\,I_3^2}\right\} \end{cases} \tag{4.21}$$

Modélisation du déphasage lié aux lames dispersives

Dans cette méthode, l'idée consiste à développer les variations du déphasage $\Delta\phi_\lambda$ en fonction des principaux paramètres, qui sont, dans le cas du banc SYNAPSE, la longueur d'onde λ, l'épaisseur différentielle e et la différence de marche ddm. Ce déphasage est la somme d'un premier terme dû aux lames dispersives venant compenser un second terme de différence de marche. Plus précisément, si l'on considère la géométrie du déphaseur, le terme provenant des lames dispersives est lui-même la somme des termes propres aux lames (lors de la traversée du matériau) et d'une différence de marche (liée à la variation de l'épaisseur de la lame d'air lors de la translation du prisme[73]). Par conséquent, le déphasage $\Delta\phi_\lambda$ peut s'écrire sous la forme

$$\Delta\phi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}\left[ddm\,.\,n_{\text{air}} + A.\lambda.e + B.e + C.\lambda + D\right] \tag{4.22}$$

où le coefficient D correspond à la différence de marche liée à la translation du prisme coulissant.

Il s'agit donc de déterminer les quatre coefficients A, B, C et D. Pour cela, nous allons, pour une valeur de différence de marche donnée ddm, quelle que soit la longueur d'onde, et en deux épaisseurs différentes e_1 et e_2, effectuer un ajustement polynomial d'ordre 1 du déphasage $\Delta\phi_\lambda$, ou, plus exactement, du produit $\frac{\lambda}{2\pi}.\Delta\phi_\lambda$. L'expression de ce déphasage a été établie à partir d'une mise en équations de la géométrie du déphaseur (nous reviendrons sur ce point au paragraphe 4.3.5). On obtient ainsi le système d'équations suivant

$$\begin{cases} ddm\,.\,n_{\text{air}} + A.\lambda.e_1 + B.e_1 + C.\lambda + D = E_1.\lambda + F_1 \\ ddm\,.\,n_{\text{air}} + A.\lambda.e_2 + B.e_2 + C.\lambda + D = E_2.\lambda + F_2 \end{cases} \tag{4.23}$$

où les termes E_1, F_1, E_2 et F_2 sont issus des développements du déphasage et donc connus, et où l'on peut identifier les termes en λ et les termes constants. Les solutions s'écrivent alors

$$\begin{cases} A = \frac{E_2 - E_1}{e_2 - e_1} \\ B = \frac{F_2 - F_1}{e_2 - e_1} \\ C = \frac{E_1.e_2 - E_2.e_1}{e_2 - e_1} \\ D = \frac{F_1.e_2 - F_2.e_1}{e_2 - e_1} - ddm\,.\,n_{\text{air}} \end{cases} \tag{4.24}$$

Il est ainsi possible d'écrire le déphasage sous la forme de l'équation (4.22). Toujours par identification des termes en λ et des termes constants, on obtient les valeurs de e et ddm nécessaires pour que le déphasage approche π au mieux.

$$\begin{cases} e = \frac{1}{2A} - C \\ ddm = -\frac{1}{n_{\text{air}}}\left(\frac{B(1+C)}{2A} + D\right) \end{cases} \tag{4.25}$$

[73] Cette variation serait nulle si les lames étaient parfaitement parallèles, y compris durant la translation. Ce n'est, bien évidemment, jamais le cas !

TAB. 4.1: Comparaison des méthodes de calcul du point de fonctionnement.

Méthode	e (µm)	ddm (µm)	Taux de réjection	Fuites stellaires	Géométrie
Multi-longueurs d'onde	-91,2340	39,6729	$9,24.10^4$	$1,08.10^{-5}$	Non
Approx. variations d'indice	-90,8721	39,5200	$9,09.10^4$	$1,10.10^{-5}$	Non
E.Q.M. déphasage	-91,0805	39,6080	$9,22.10^4$	$1,09.10^{-5}$	Non
Modélisation du déphasage	-90,8718	39,5198	$9,10.10^4$	$1,10.10^{-5}$	Oui

TAB. 4.2: Termes du modèle de Sellmeier du CaF_2 à T = 297,2 K. La moyenne des résidus de l'ajustement polynomial sur les données expérimentales est proche de 3.10^{-6} (Malitson, 1963).

S_1	S_2	S_3	λ_1	λ_2	λ_3
0,5675888	0,4710914	3,8484723	0,050263605	0,1003909	34,649040

Comparaison des différentes méthodes

Indépendamment du banc de mesure où un tel déphaseur achromatique doit être implanté pour être utilisé, le critère le plus simple pour comparer l'efficacité de ces différentes méthodes reste encore la minimisation des fuites stellaires. En pratique, il s'agit donc de minimiser l'inverse du taux de réjection ρ_{approx}, tel qu'il a été défini par l'équation (3.19), p. 55.

Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus avec chacune des méthodes que nous avons présentées, pour localiser, de façon théorique, le point de fonctionnement d'un déphaseur à prismes fonctionnant en bande K. Nous avons bien évidemment choisi de comparer ces méthodes avec les paramètres du banc de mesure dont il sera question dans cette thèse. Par conséquent, le matériau des prismes est la fluorine (CaF_2).

Pour chaque matériau, la littérature donne, le plus souvent, la variation de l'indice en fonction de la longueur d'onde, sur un domaine plus ou moins large, sous la forme d'une équation dite de Sellmeier (ou de Drude, ou de Maxwell-Helmholtz-Drude), qui est elle-même un ajustement de données expérimentales. Cette équation modélise la dispersion de l'indice d'un matériau et est généralement exprimée sous la forme

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_i \frac{S_i.\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \tag{4.26}$$

Le tableau 4.2 précise, dans le cas de la fluorine, les paramètres du modèle utilisé pour ces calculs. Chacune de ces simulations a été effectuée, tous les autres paramètres étant parfaits, avec une égalité des flux relatifs entre les deux voies de l'interféromètre de 1%. La bande spectrale est délimitée par le filtre réel, qui sera employé sur le banc de mesure. D'une façon générale, nous considèrerons toujours ces paramètres dans les paragraphes qui suivent.

Bien que la dispersion des valeurs de taux de réjection soit inférieure à 1%, l'écart entre les positions atteint plusieurs centaines de nanomètres. D'autre part, bien qu'elle ne donne pas le meilleur résultat, la méthode consistant à modéliser le déphasage présente l'avantage de prendre en compte la géométrie physique du déphaseur. Dès que des variations de géométrie devront être étudiées, nous utiliserons donc

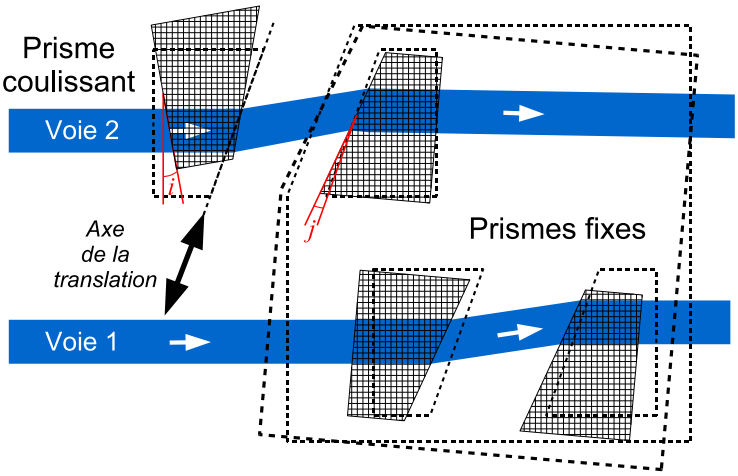


FIG. 4.12: Variation d'incidence sur les prismes déphaseurs.
On ne considère que les variations d'incidence autour de l'axe vertical. Le prisme coulissant est pivoté d'un angle i, mais conserve le même axe de translation. Les prismes fixes sont solidaires sur une même embase et donc pivotés du même angle j.

cette méthode. Pour les autres études, nous resterons sur la méthode multi-longueurs d'onde, qui semble la plus performante au vu des critères de comparaison.

4.3.5 Influence du parallélisme des prismes

Il s'agit ici d'étudier un paramètre du déphaseur à prismes purement géométrique. C'est d'ailleurs cette étude qui a essentiellement motivé la détermination géométrique du déphaseur. En effet, nous avons vu que cette méthode suppose de disposer d'un moyen différent de l'équation (4.6) pour calculer le déphasage. À partir de considérations géométriques simples (mais fastidieuses), basées sur la mise en coordonnées de chacun des points du déphaseur comme intersections de droites, le déphasage introduit par chacune des voies a pu être exprimé en fonction des paramètres que sont la translation du prisme et les incidences des faisceaux sur les prismes de chaque voie. Les calculs détaillés sont disponibles en annexe B.

Dans un souci de simplicité, seules des variations d'angles autour de l'axe vertical ont été considérées, comme le montre la figure 4.12. Nous considèrerons que des variations d'angle dans les autres plans provoquent un comportement similaire du taux de réjection. Cette étude géométrique prend en compte le fait que les trois prismes fixes sont solidaires sur leur embase. Par ailleurs, les valeurs des chemins optiques déduites grâce aux formules calculées ont été vérifiées pour différentes incidences par modélisation, toujours grâce au logiciel *Apilux*.

La figure 4.13 représente les variations du taux de réjection selon l'incidence des faisceaux sur le prisme coulissant et sur les prismes fixes du déphaseur. Le point de fonctionnement, ici pour la bande K, a été évalué par modélisation du déphasage géométrique puis ajusté par une optimisation portant sur l'épaisseur du prisme et visant à minimiser l'intégrale des fuites stellaires. L'influence de l'incidence sur les trois prismes fixes apparaît ainsi légèrement plus importante que celle du prisme coulissant. Il faut noter ici que les centres de rotation des prismes sont différents. Au final, on constate que plusieurs minutes d'arc sont acceptables, ce qui facilitera d'autant les réglages du déphaseur nécessaires avant les mesures.

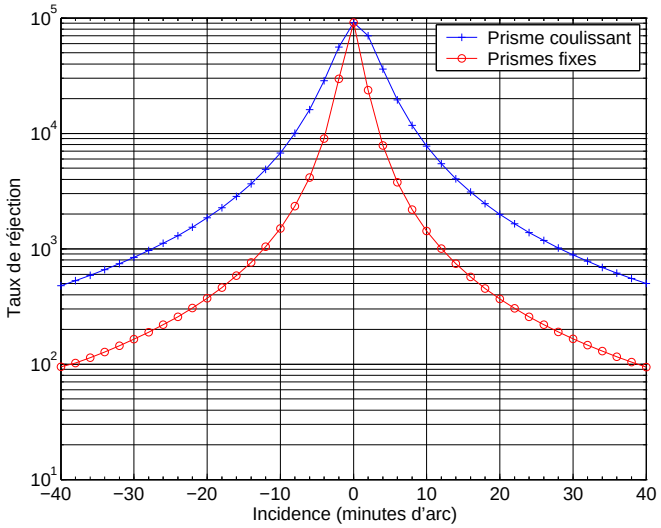


FIG. 4.13: Variation du taux de réjection en fonction de l'incidence sur les prismes déphaseurs. Le point de fonctionnement, ici pour la bande K, a été évalué par modélisation du déphasage géométrique puis ajusté par une optimisation portant sur l'épaisseur du prisme et visant à minimiser l'intégrale des fuites stellaires.

4.3.6 Influence de la température

S'il est important de déterminer le point de fonctionnement où les performances en termes de réjection seront optimales, les coordonnées de ce point restent des coordonnées théoriques. Elles dépendent directement d'une multitude de paramètres, en fonction du matériau employé ou de l'environnement d'utilisation du déphaseur, quand les deux ne sont pas liés.

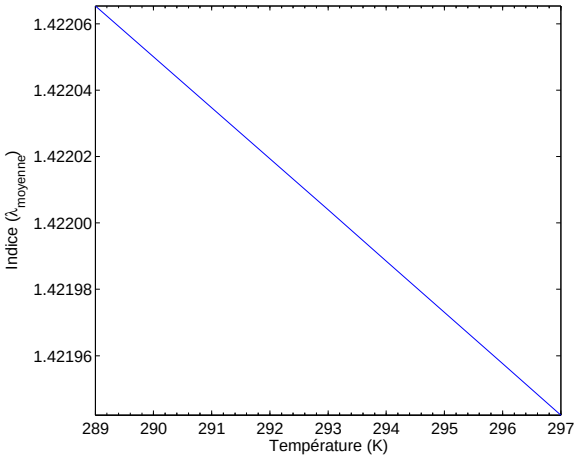
Pour ce qui est de l'indice du matériau, il dépend ainsi non seulement de l'homogénéité de l'échantillon utilisé pour tailler les prismes, mais aussi des conditions de température, d'humidité, de pression, etc. de l'environnement dans lequel sont effectuées les mesures. Nous avons vu au paragraphe 4.3.4 les termes de l'équation qui a été utilisée jusqu'ici. Cette équation ne prend pas en compte la plupart de ces paramètres environnementaux.

Tropf (1995) a proposé un modèle pour la fluorine, faisant intervenir les variations de température. Le tableau 4.3 précise les paramètres de ce modèle, dans lequel les termes S_i de l'équation (4.26) sont exprimés, en fonction de la température T sous la forme

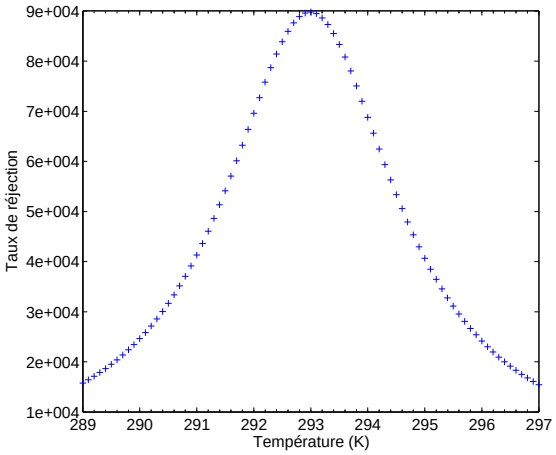
$$S_i = \sum_{n=0}^{4} S_{i,n}.T^n \tag{4.27}$$

Grâce à ce modèle, il est possible d'étudier, au premier ordre, l'influence de la température sur la position du point de fonctionnement et sur le taux de réjection maximal pouvant être obtenu. Dans cette étude, réalisée pour la bande K, la différence de flux relatifs entre les deux voies de l'interféromètre est fixée à 1%.

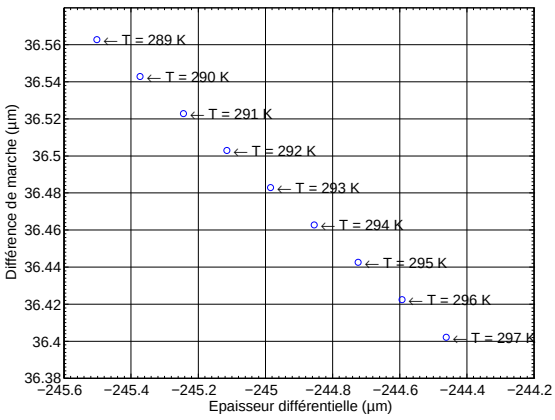
La figure 4.14 rassemble les résultats de ces simulations. On constate, dans un premier temps, que, pour les variations d'indice de la figure 4.14a, à point de fonctionnement fixe, le taux de réjection accuse une perte de l'ordre de 10% pour une variation de température excédant $\pm 0,7$°C (4.14b). Il faudra donc garantir une stabilité thermique du déphaseur meilleure que le degré. En revanche, si la position du point de fonctionnement est optimisée pour chaque température grâce à la méthode multi-longueurs d'onde, on constate que celle-ci varie de plusieurs centaines de nanomètres (4.14c) et suit globalement les variations



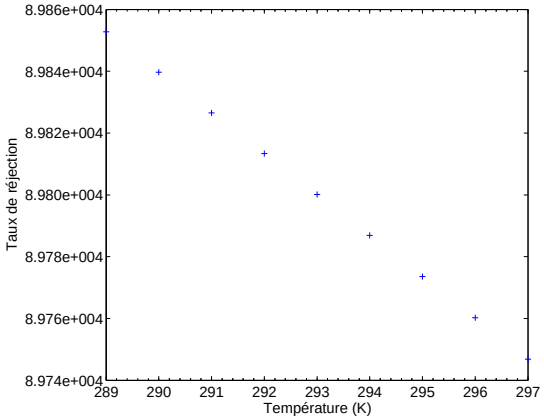
(a) Variations de l'indice du CaF2 avec la température.



(b) Variations du taux de réjection en fonction de la température, sans optimisation.



(c) Positions du point de fonctionnement en fonction de la température, après optimisation.



(d) Variations du taux de réjection en fonction de la température, après optimisation.

FIG. 4.14: Influence de la température sur les performances en termes de réjection.
Pour cette simulation, réalisée pour la bande K, la position du point de fonctionnement, sauf pour la figure 4.14b, est optimisée pour chaque température grâce à la méthode multi-longueurs d'onde et la différence de flux relatifs entre les deux voies de l'interféromètre est fixée à 1%.

TAB. 4.3: Termes du modèle de Sellmeier du CaF_2 en fonction de la température.
La moyenne des résidus de l'ajustement polynomial sur les données expérimentales est proche de $\pm 1.10^{-5}$ (Tropf, 1995).

	Termes du modèle de Sellmeier					
n	S_1	S_2	S_3	λ_1	λ_2	λ_3
Mesures à température ambiante, T = 297,2 K (Malitson, 1963)						
-	0,5675888	0,4710914	3,8484723	0,050263605	0,1003909	34,649040
Modèle dépendant de la température, pour $93,2 \leq T \leq 473,2$ K						
0	0,5815944	0,4622821	3,8729462	0,050263605	0,1003909	34,649040
1	$7,75880.10^{-5}$	$-6,01264.10^{-5}$	$5,33254.10^{-4}$	-	-	-
2	$-8,02380.10^{-7}$	$5,95505.10^{-7}$	$-4,77551.10^{-7}$	-	-	-
3	$1,68964.10^{-9}$	$-1,30859.10^{-9}$	$1,23826.10^{-8}$	-	-	-
4	$-1,35186.10^{-12}$	$1,06935.10^{-12}$	$-1,10489.10^{-11}$	-	-	-

de l'indice. Dès lors, du fait de l'optimisation possible entre l'épaisseur différentielle et la différence de marche, les performances en termes de taux de réjection restent très proches, puisque les variations n'excèdent pas 0,1% pour $\pm 4^{\circ}$ autour de la température ambiante "habituelle" de 293 K. La "mobilité" du point de fonctionnement est donc un atout non négligeable des méthodes de déphasage faisant appel à un chromatisme compensé, si la stabilité thermique du montage ne peut être garantie.

4.3.7 Décalage des faisceaux et dispersion

Du fait qu'ils se comportent comme une lame à faces parallèles d'épaisseur variable, les prismes déphaseurs présentent les mêmes inconvénients en termes de décalage des faisceaux et de dispersion chromatique. Qui plus est, l'épaisseur de cette lame fictive étant assez importante, ces paramètres se devaient d'être étudiés.

La figure 4.15 présente, en fonction de la longueur d'onde, le décalage entre le faisceau incident et le faisceau émergent de l'une des voies du déphaseur à prismes. On constate que ce décalage est d'environ 2,72 mm en bande K et retombe à environ 2,66 mm en bande L. En revanche, on peut également déduire de cette courbe que, si le décalage entre la teinte plate en visible (par exemple obtenue avec un laser He-Ne) et celle en bande K restera de l'ordre de 100 µm, il atteindra presque 250 µm en bande L.

Il faut enfin noter que, à condition que le parallélisme des prismes soit parfait, ce décalage est identique dans les deux voies de l'interféromètre, et ce, quelle que soit la position de la translation du prisme coulissant. Concernant la dispersion absolue créée entre les longueurs d'ondes extrêmes par l'épaisseur des lames équivalentes, la figure 4.15 présente une dispersion absolue d'environ 20 µm en bande K, et d'environ 60 µm en bande L. Là encore, cette dispersion absolue est théoriquement identique entre les deux voies de l'interféromètre et ne devrait pas, au premier ordre, limiter les performances escomptées. D'autre part, nous verrons que l'utilisation d'un filtrage modal est un atout non négligeable de ce point de vue.

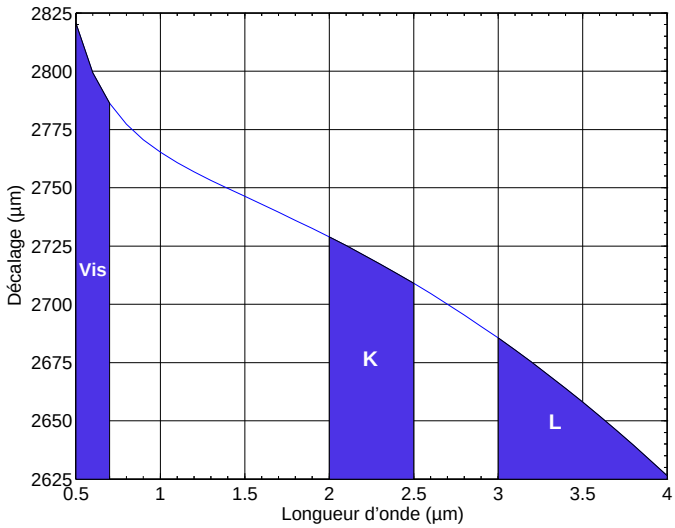


FIG. 4.15: Décalage entre les faisceaux en entrée et en sortie des prismes déphaseurs.

4.4 Recherche pratique du point de fonctionnement

Plusieurs méthodes nous ont permis de déterminer la position théorique du point de fonctionnement (e, ddm). Néanmoins, sauf à utiliser des systèmes de réglages (et de contrôle) extrêmement coûteux, il n'est pas possible de positionner, au dixième de nanomètre près, les translations du prisme coulissant et de la ligne à retard. Cela supposerait, d'autre part, que ces mouvements soient purs dans les limites de quelques secondes d'arc. Par conséquent, les valeurs théoriques déterminées au paragraphe 4.3.4 ne peuvent rester qu'indicatives pour la recherche du point de fonctionnement. Il faut donc envisager une méthode de recherche prenant en compte ces aspects physiques et se baser sur des mesures relatives.

Pour cela, il est nécessaire de déterminer l'allure de l'espace à deux paramètres autour de ce point de fonctionnement. Plusieurs simulations ont donc été menées, afin d'évaluer la résolution des translations nécessaires dans cette recherche et de limiter autant que possible la durée de la localisation du point de fonctionnement.

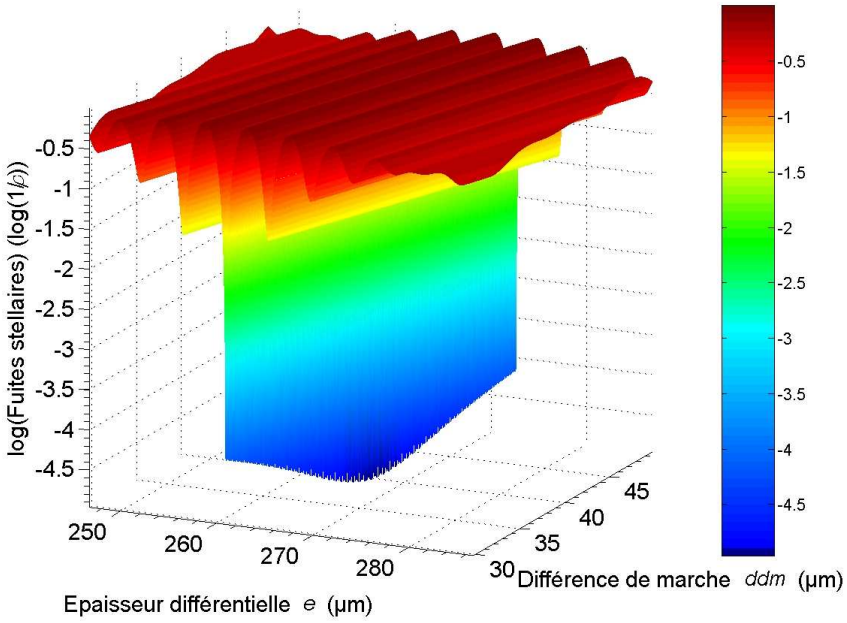
4.4.1 Simulation de cartographies

Afin de déterminer cet espace, on effectue une cartographie autour du point de fonctionnement, en faisant varier les deux paramètres (e, ddm). Pour cela, l'état interférométrique des faisceaux est calculé au moyen de l'équation (3.19) vue au paragraphe 3.3, dans laquelle le déphasage $\Delta\phi_\lambda$ prend l'expression de l'équation (4.6).

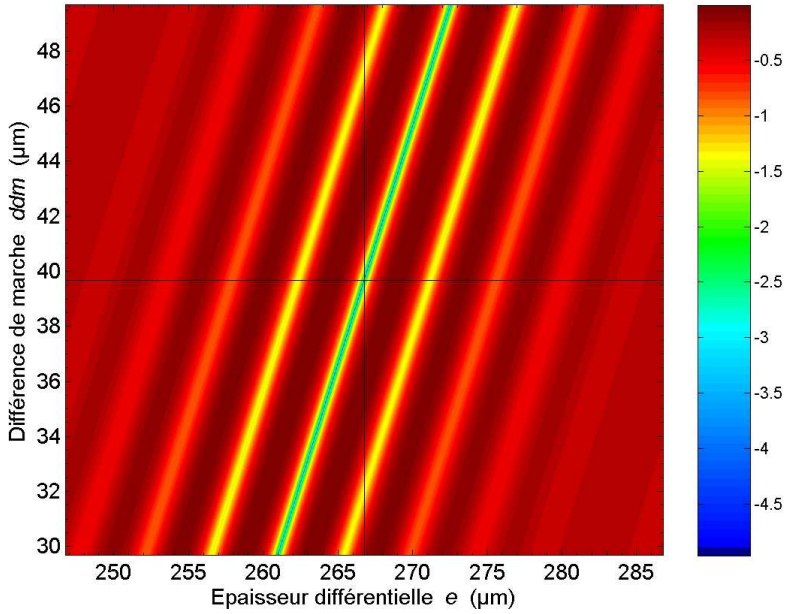
La figure 4.16 représente une telle simulation[74], avec une source de type corps noir à 2 000 K et un défaut d'égalité relative des flux ε_I de 1%. Sur la figure 4.16b, la translation x du prisme coulissant (directement proportionnelle à l'épaisseur différentielle entre les prismes) a été portée en abscisses, tandis que les ordonnées représentent la différence de marche ddm. Enfin, le point de fonctionnement est centré et l'échelle des couleurs figure les différences d'intensité.

On observe, dans un premier temps, la présence de systèmes de franges linéaires, plus ou moins contrastées selon la proximité au point de fonctionnement théorique. La frange présentant l'intensité la plus faible correspond à la frange noire, où le taux de réjection sera maximal (et donc les fuites stellaires,

[74]Pour l'anecdote, la réalisation de cette cartographie de 2 000 x 2 000 points demande environ 5 heures de calcul sur un PC équipé d'un processeur Pentium IV cadencé à 3,2 GHz et doté d'1 Go de RAM.



(a) Vue de profil.



(b) Vue de dessus.

FIG. 4.16: Cartographie de l'espace (e, ddm) autour du point de fonctionnement, en termes de fuites stellaires.
La résolution en x est de 20 nm, pour une résolution en ddm de 10 nm. La source est un corps noir à 2 000 K, l'égalité des flux relatifs de 1%. Les fuites stellaires sont représentées en échelle logarithmique, après normalisation au maximum des franges brillantes.

minimales). Un système de franges est présent, que le déplacement soit effectué uniquement selon x ou uniquement selon la ddm. Par conséquent, comme il est plus facile, en pratique, de n'agir que sur un mouvement plutôt que d'en combiner deux, la recherche des franges devrait être facilitée.

Dans un second temps, si l'on représente cette même courbe en trois dimensions (Figure 4.16a), il apparaît que la frange noire, qui semble linéaire en x et ddm, ne l'est pas en intensité. La frange noire présente donc elle-même un unique minimum, qui correspond en pratique au point de fonctionnement. Il faut noter qu'étant donné les ordres de grandeur considérés entre frange brillante et frange noire, cette simulation, qui fait intervenir des calculs d'intégrales, doit être menée avec une très bonne précision. En effet, si la précision n'est pas suffisante, la figure 4.16a peut sembler montrer la présence d'hypothétiques minima secondaires, d'intensités relatives très proches et qui aurait grandement contrarié la recherche du point de fonctionnement s'ils avaient existé. Fort heureusement, ce point est unique, ce qui sera confirmé par les mesures expérimentales.

4.4.2 Balayages en différence de marche

Toujours dans l'objectif de localiser le point de fonctionnement, il apparaît naturel de commencer, dans une première étape, par localiser les systèmes de franges linéaires, puis, en seconde étape, la frange noire, pour, dans une troisième étape, rechercher son minimum.

L'efficacité de cette recherche est, bien évidemment, tributaire du nombre de points de mesure nécessaires pour atteindre l'objectif recherché. La précision exigée sur la différence de marche est supérieure d'un facteur dix à celle nécessaire sur la translation du prisme. Afin de limiter les débattements durant la recherche (synonymes, compte tenu de la précision des translations, d'éventuels "*tilt*s" additionnels et néfastes), il a donc été choisi d'effectuer des balayages en différence de marche, correspondant à des coupes de la figure 4.16 pour une épaisseur de prisme donnée.

La courbe 4.17 représente un tel balayage réalisé avec une résolution de 10 nm pour l'épaisseur e correspondant au point de fonctionnement. La recherche du système de franges débute d'un point quelconque dans cet espace[75]. Par définition, pour éviter de "manquer" les franges durant un tel balayage, le pas minimal de recherche selon un axe doit être inférieur à l'interfrange de ce système selon ce même axe. Celui se détermine facilement en considérant que le déphasage entre deux franges vaut 2π. On écrit donc, pour l'interfrange en différence de marche

$$\forall\, k \in \mathbb{C},\quad \frac{2\pi}{\lambda_{\text{moyenne}}}\, i_{ddm} = 2k\pi \;\text{ soit, pour } k = 1,\;\; i_{ddm} = \lambda_{\text{moyenne}} \tag{4.28}$$

Par conséquent, pour une longueur d'onde moyenne, dans le domaine spectral à achromatiser, de 2,2 µm, on pourra choisir comme pas de recherche un pas de 2 µm. À titre purement informatif, l'interfrange selon l'axe de translation du prisme s'exprime comme

$$\begin{aligned} \forall\, k \in \mathbb{C},\quad \frac{2\pi}{\lambda_{\text{moyenne}}}\, i_x . \sin\left(\theta_{\text{prisme}}\right) . \left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}}(\lambda)\right] &= 2k\pi \\ \text{soit, pour } k = 1,\quad i_x &= \frac{\lambda_{\text{moyenne}}}{\sin\left(\theta_{\text{prisme}}\right) . \left[n_{\text{air}} - n_{\text{matériau}}(\lambda)\right]} \end{aligned} \tag{4.29}$$

Cela montre que, l'interfrange étant inférieur, le pas de recherche, selon cet axe, devrait être également inférieur et la recherche d'autant plus longue. Il y a donc tout intérêt à effectuer la localisation des franges grâce à la différence de marche.

En remarque finale, il faut noter qu'il y a, en toute logique, selon le point de départ de la recherche, une chance sur deux de partir dans le sens permettant de trouver à coup sûr le système de frange.

[75] Nous verrons de quelle façon le point de départ a été rendu "le moins quelconque possible" durant les mesures, au paragraphe 6.2.1.

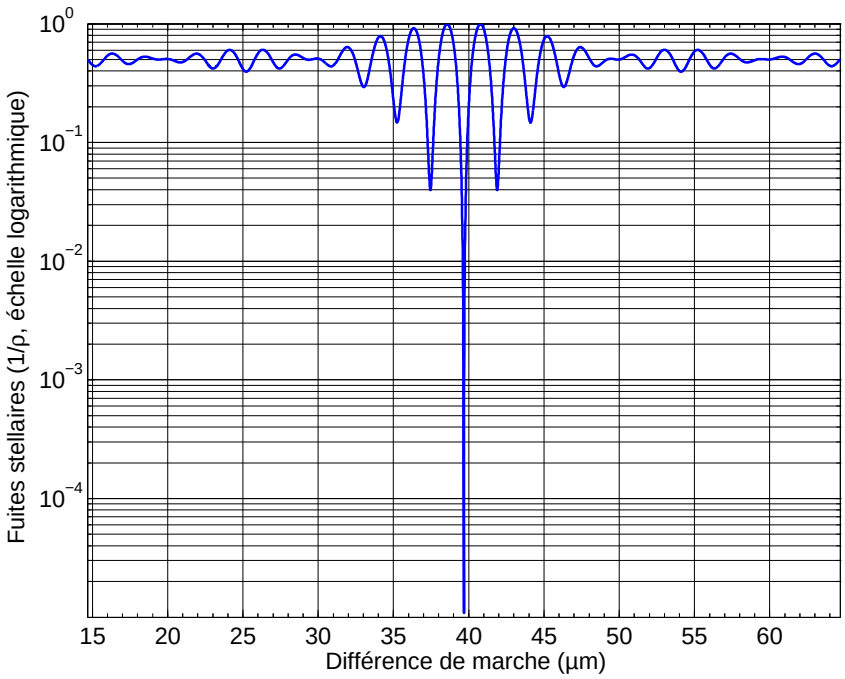


FIG. 4.17: Balayage en différence de marche, pour l'épaisseur différentielle correspondant au point de fonctionnement.
La résolution en différence de marche est de 10 nm. La source est un corps noir à 2 000 K, l'égalité des flux relatifs de 1%. Les fuites stellaires sont représentées en échelle logarithmique, après normalisation au maximum des franges brillantes.

4.4.3 Minimisation des fuites stellaires

Une fois que le système de franges a été localisé, il s'agit d'affiner le réglage des paramètres (e, ddm) jusqu'au minimum de cette frange noire, afin de minimiser les fuites stellaires. Nous avons vu que la frange noire semble linéaire en (e, ddm). Il existe donc une relation entre ces deux paramètres le long de la frange noire.

Malheureusement, nous avons également vu que l'expression des fuites stellaires en un point est exprimée, en fonction de l'état d'interférence, au moyen d'une intégrale qui fait également intervenir le flux provenant d'un corps noir (donné par l'équation (3.16), p. 55). Il n'a pas été possible de déterminer une solution analytique à cette intégrale. Par conséquent, la relation entre e et ddm n'a pas pu être exprimée simplement.

Il est malgré tout possible d'approcher cette expression en prenant pour hypothèse que le déphasage le long de la frange noire est très proche de π. D'après la méthode "multi-longueurs d'onde", cette hypothèse n'est, *a priori*, valable que pour deux longueurs d'onde dans le domaine spectral à achromatiser. Elle permet néanmoins d'exprimer une équation approximative de la frange noire, sous la forme

$$ddm.n_{\text{air}} + x.\sin\left(\theta_{\text{prisme}}\right)\left[n_{\text{air}} - \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} n_{\text{matériau}}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}\right] = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{4} \tag{4.30}$$

Des simulations basées sur cette équation ont montré que l'approximation n'était pas assez précise pour permettre une localisation fine du point de fonctionnement. De plus, cette équation n'est que théo-

rique, puisqu'elle dépend de la représentation choisie pour les variations de l'indice du matériau. Elle n'aurait donc pas été valable pour le matériau réel utilisé.

Une solution, en pratique, aurait été de réaliser au minimum trois balayages successifs pour différentes valeurs de l'épaisseur différentielle, afin de déterminer expérimentalement une expression de la relation e / ddm. Cela suppose néanmoins que le signal mesuré soit d'une très bonne stabilité. Nous verrons qu'en pratique, une telle méthode ne pouvait pas fonctionner sur notre banc.

Finalement, plutôt que de se limiter à la profondeur frange noire, le critère qui sera utilisé pour localiser expérimentalement le point de fonctionnement sera la **symétrie des franges "grises" adjacentes à la frange noire**. Cette propriété provient du fait que les franges d'interférences se déplacent, en fonction des paramètres e et ddm, par rapport à une enveloppe fixe. Cette enveloppe correspond à la transformée de Fourier du filtre utilisé pour délimiter la bande spectrale. Il s'agit donc de centrer les franges d'interférences sur cette enveloppe. La figure 4.18 montre l'allure de ces franges pour deux balayages réalisés à des épaisseurs différentielles inférieure et supérieure à celle du point de fonctionnement. On constate ainsi que les franges "grises" ne sont parfaitement symétriques que lorsque le point de fonctionnement est parfaitement déterminé. Les franges sont alors parfaitement centrées sur l'enveloppe.

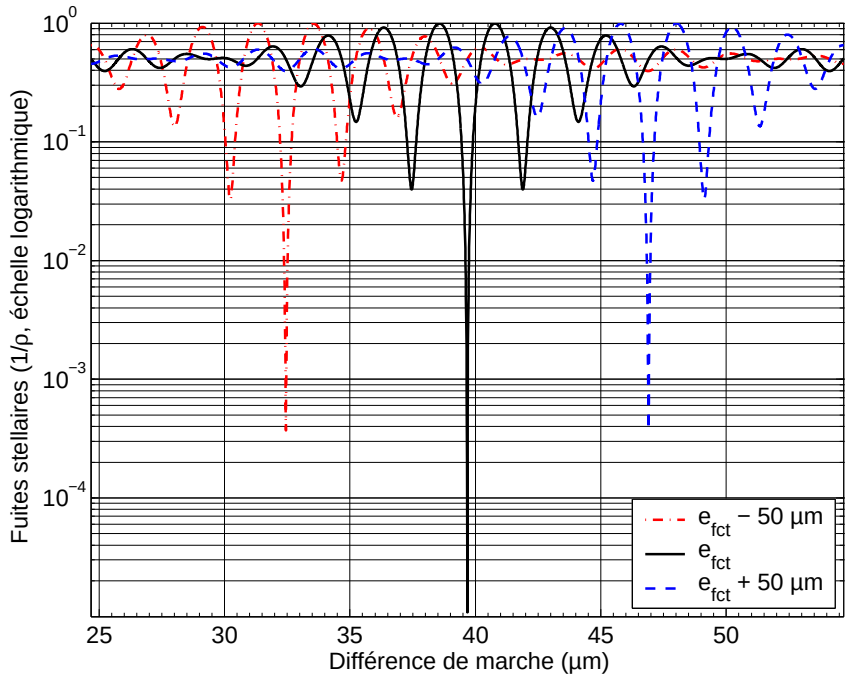


FIG. 4.18: Balayages en différence de marche pour différentes épaisseurs différentielles.
e_{fct} est l'épaisseur différentielle correspondant au point de fonctionnement. La résolution en différence de marche est de 10 nm. La source est un corps noir à 2 000 K, l'égalité des flux relatifs de 1%. Les fuites stellaires sont représentées en échelle logarithmique, après normalisation au maximum des franges brillantes.
Une dissymétrie caractéristique des franges "grises", adjacentes à la frange noire, apparaît dès que l'on s'écarte du point de fonctionnement en termes d'épaisseur différentielle. Elle correspond à un décentrage des franges d'interférences sur l'enveloppe donnée par la transformée de Fourier du filtre spectral.

Dans la partie qui suit, nous allons voir comment ce déphaseur achromatique à prismes, ainsi que les méthodes de réglage que nous venons d'énoncer, ont été mis en pratique dans le cadre d'un banc complet d'interférométrie en frange noire, le banc SYNAPSE.

Chapitre 5

Le banc d'interférométrie achromatique SYNAPSE

Sommaire

5.1 Du monochromatique au polychromatique 90
5.2 État de l'art 90
5.3 Expérience polychromatique en laboratoire 93
5.3.1 Généralités 93
5.3.2 La source infrarouge 95
5.3.3 Mise en forme des faisceaux : de l'intérêt des fibres optiques 98
5.3.4 Séparation et recombinaison des faisceaux 102
5.3.5 Éléments optiques 106
5.3.6 Métrologie laser 114
5.3.7 Système anti-vibratoire 117
5.3.8 Détection monopixel 119
5.3.9 Détection matricielle : la caméra CIRCUS 128 120
5.3.10 Enceinte thermalisée 126
5.4 Rendement et bilan photométrique de l'interféromètre 127
5.4.1 Transmission théorique de l'interféromètre 127
5.4.2 Bilan photométrique théorique 130
5.5 Interfaçage électronique du banc SYNAPSE 131
5.5.1 Exposé du problème et objectifs généraux 131
5.5.2 Détails et contraintes liés aux différentes fonctions 131
5.5.3 Asservissement en différence de marche 133
5.5.4 Contraintes globales et architecture choisie 136

PARMI les objectifs de la mission Darwin figurent l'obtention et le maintien de la réjection du flux stellaire durant les temps d'intégration nécessaires pour permettre l'observation et la caractérisation de chacune des planètes en orbite autour de celle-ci. Cette réjection, qui dépend de la longueur d'onde, varie entre 10^5 pour les plus courtes longueurs d'onde (6-7 µm) et 5.10^4 pour l'autre extrême de cette bande, vers 20 µm (Chazelas et al., à paraître).

La validation du principe de l'interférométrie en frange noire pour la mission Darwin passe donc par la démonstration, au sol, en laboratoire, de l'obtention de forts contrastes, stables sur de longues périodes. Ce n'est que lorsque cet enjeu technologique, qui n'est (et c'est là le défi !) qu'un parmi d'autres, aura été surmonté que la transposition des expériences de laboratoire sur des satellites pourra être envisagée.

Depuis 1995, l'équipe Darwin de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) a entrepris le développement de bancs optiques d'interférométrie à haut contraste. Un premier banc, opérant dans l'infrarouge thermique à 10 µm, a ainsi permis d'obtenir un taux de réjection monochromatique stable de 10^3 à la fin de la thèse de Marc Ollivier (Ollivier, 1999; Ollivier et al., 2001). Néanmoins, nous avons également vu, au paragraphe 4.1, qu'un tel résultat ne peut constituer qu'une étape (bien entendu indispensable) vers Darwin ; le réel enjeu technologique est de maintenir ce contraste simultanément pour l'ensemble des longueurs d'onde de 6 à 18 µm, c'est-à-dire de façon polychromatique. Le saut à franchir est tel qu'il a demandé la conception d'un nouveau banc interférométrique, disposant de composants achromatiques.

Dans cette partie, nous allons détailler les éléments du banc d'expérience polychromatique baptisé SYNAPSE, pour ***SY**mmetric **N**uller for **A**chromatic **P**hase **S**hifters **E**valuation*. Celui-ci a été mis en place à l'IAS depuis quatre ans pour la validation de différentes solutions de déphaseurs achromatiques.

5.1 Du monochromatique au polychromatique

La principale difficulté, lors du passage de mesures en longueur d'onde monochromatique à des mesures polychromatiques, provient du fait que tous les matériaux réfractifs qui constituent un banc optique sont, dans une certaine mesure, chromatiques. Leurs propriétés optiques dépendent donc directement de la longueur d'onde. Par exemple, pour une simple lame à faces parallèles, là où un faisceau monochromatique, comme celui issu d'un laser, ne subira qu'une translation liée à l'indice du matériau, différent de celui de l'air, un faisceau polychromatique subira une dispersion chromatique.

Appliqué dans le cas d'un interféromètre, où une telle lame peut servir de séparatrice assurant une division d'amplitude, le faisceau transmis sera donc dispersé, contrairement au faisceau réfléchi. Résultat : le chromatisme induit une dissymétrie des deux voies ainsi créées. L'effet de ce chromatisme différentiel doit donc être particulièrement pris en compte lors de la conception du banc optique.

5.2 État de l'art

L'interférométrie en frange noire fait l'objet, à travers le monde, d'une concurrence (saine mais) acharnée, où chacun essaie de se rapprocher des exigences des missions Darwin et TPF-I, tout en se contentant de conditions de mesures acceptables en comparaison des technologies disponibles actuellement. Certaines équipes travaillent ainsi dans le domaine visible ou le proche infrarouge, notamment grâce à la disponibilité des composants développés pour les télécommunications. L'autre avantage des courtes longueurs d'onde est d'être moins sensibles à l'environnement thermique des bancs de mesure. Voici un récapitulatif (non exhaustif) des principaux résultats obtenus en frange noire ces dernières années. Bien que les fuites stellaires soient une grandeur plus "physique", nous exprimerons ces performances en termes de taux de réjection, pour des commodités de lecture. Nous mentionnerons également, le cas échéant, la largeur de bande utilisée, exprimée en %.

➢ Mesures dans le domaine visible :

Dans les domaines de longueurs d'onde visible, l'équipe de Morgan (Morgan et al., 2003) n'a pu obtenir mieux qu'une réjection d'environ 150, entre 600 et 800 nm (28 %). Les Néerlandais de TNO-TPD ont, pour leur part, obtenu des résultats corrects avec une réjection de 5.10^3 à l'aide d'un laser He-Ne (monochromatique), résultat amélioré jusqu'à 350 000 en lumière polarisée (Bokhove et al., 2003). En bande plus large, entre 500 et 750 nm (24 %), cette réjection chute à 500 et n'est améliorée que jusqu'à 900 en lumière polarisée.

➢ Mesures en proche infrarouge :

Sur un autre banc, les Néerlandais de TNO-TPD, en collaboration avec *Astrium GmbH*, cette fois-ci à la longueur d'onde "télécom" de 1,55 µm (2 %), ont obtenu des taux de réjection de 36 000 et de 60 000 en monochromatique à 1,3 µm, maintenu sur environ 30 minutes (Vink et al., 2003) et porté à 408 000 en lumière polarisée (Flatscher et al., 2003). L'équipe d'*Alcatel Space Industries* a également obtenu de bons résultats en proche infrarouge, à la longueur d'onde de 1,57 µm, puisqu'avec une largeur de bande de 80 nm (5 %), la réjection atteint environ 6 000 (Weber, 2004).

➢ Mesures en infrarouge thermique :

C'est paradoxalement dans cette gamme de longueur d'onde, la plus proche de la bande de Darwin et la plus exigeante en termes d'environnement thermique, que les meilleurs résultats ont été obtenus. Si une réjection de l'ordre de 1 500 a été obtenue par Marc Ollivier durant sa thèse (Ollivier, 1999) avec un laser CO_2 (monochromatique), les équipes les plus performantes dans ce domaine de longueur d'onde sont, sans conteste, américaines. Après avoir réalisé des réjections de 10^6 avec un laser à 10,6 µm (Martin et al., 2003), l'équipe de Gene Serabyn, au JPL, a étendu ce domaine successivement jusqu'à 18 % en lumière polarisée, avec une réjection de 1 250 (Serabyn, 2003), puis jusqu'à 29 % avec une réjection de 7 700, cette fois-ci en lumière non polarisée (Mennesson et al., 2003). La palme revient, malgré tout, à l'équipe de James Wallace, qui a obtenu, sur un banc interférométrique dont plusieurs parties seront placées sous vide d'ici peu, des réjections de 10 000 avec une largeur de bande de 30 % autour de 10 µm (Wallace et al., 2004).

➢ Observations sur le ciel :

Peu d'équipes ont jusqu'ici appliqué l'interférométrie en frange noire à des observations sur le ciel. Les performances sont, en effet, bien inférieures à celles obtenues en laboratoire. Il faut, malgré tout, citer les travaux de P.M. Hinz (Hinz et al., 1998), qui a simulé un interféromètre de Bracewell grâce à deux segments (télescopes de 1,8 m de diamètre) du *Multiple Mirror Telescope* (MMT) et l'application du Coronographe Interférométrique Achromatique sur le ciel (Baudoz et al., 2000). Enfin, le meilleur résultat, qui montre les progrès incessants dans le domaine de l'interférométrie en frange noire, a été obtenu cette année par l'équipe de G. Serabyn du JPL. Une réjection de l'ordre de 1 000 a été atteinte sur le ciel, avec les télescopes Keck (Serabyn et al., 2004).

Et les résultats du banc SYNAPSE, dans tout ça ? Nous vous laissons découvrir sa position sur la figure 5.1, qui rassemble ces résultats en les comparant à l'objectif de la mission Darwin, sur la base du rapport $\Delta\lambda * \lambda_{\text{centrale}} / (\Delta\lambda * \lambda_{\text{centrale}})_{\text{Darwin}}$. Les valeurs associées figurent dans le tableau 5.1.

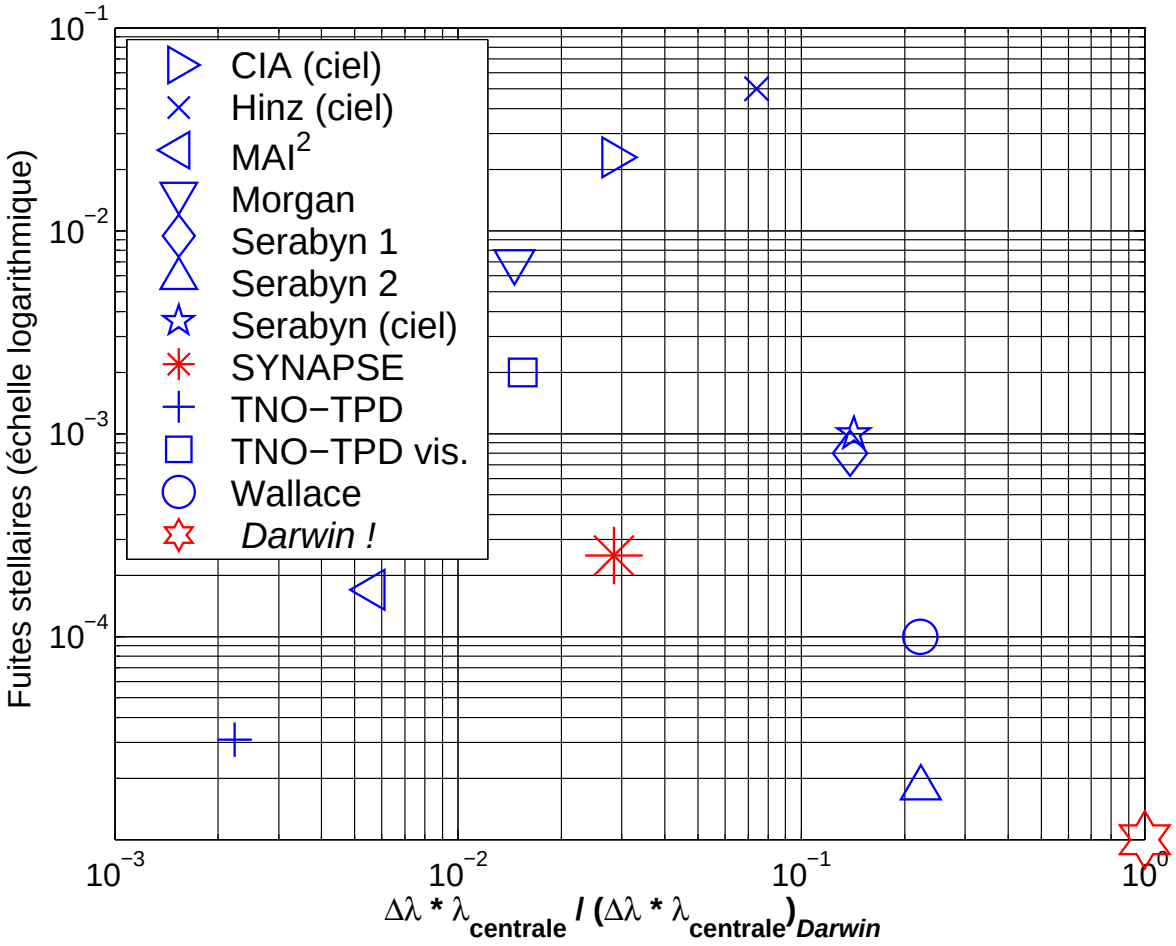


FIG. 5.1: Comparaison des principaux résultats en interférométrie en frange noire, sur la base du rapport $\Delta\lambda * \lambda_{\text{centrale}} / (\Delta\lambda * \lambda_{\text{centrale}})_{\text{Darwin}}$.

TAB. 5.1: Principaux résultats obtenus en "interférométrie en frange noire" à travers le monde et comparaison avec la mission Darwin.

	Équipe / Notation	$\lambda_{centrale}$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{centrale}}$	Pol.	Fuites stellaires	Taux de réjection	Référence
Vis.	Morgan	700 nm	28 %	Non	7.10^{-3}	150	Morgan et al., 2003
	TNO-TPD Mono.	632,8 nm	Mono	Non	2.10^{-4}	5 000	Bokhove et al., 2003
				Oui	$2,9.10^{-6}$	350 000	
	TNO-TPD	650 nm	24 %	Non	2.10^{-3}	500	
				Oui	$1,1.10^{-3}$	900	
NIR	TNO-TPD Astrium	1,55 µm	2 %	Non	$2,8.10^{-5}$	36 000	Flatscher et al., 2003
		1,3 µm	Mono	Non	$1,7.10^{-5}$	60 000	
				Oui	$2,5.10^{-6}$	408 000	
	Alcatel MAII	1,54 µm	Mono	Oui	$1,3.10^{-6}$	770 000	Weber, 2004
		1,57 µm	5 %	Non	$1,7.10^{-4}$	6 000	
	SYNAPSE	2,2 µm	18 %	Non	$2,5.10^{-4}$	4 000	*Voir paragraphe 6.2 !*
TIR	Ollivier	10,6 µm	Mono	Oui	7.10^{-4}	1 500	Ollivier, 1999
	Serabyn 1	10,6 µm	Mono	Non	1.10^{-6}	1 000 000	Martin et al., 2003
	Serabyn 2	10,7 µm	18 %	Oui	$5.9.10^{-5}$	17 000	Mennesson et al., 2003
	Serabyn 3	10,7 µm	29 %	Non	$1,3.10^{-4}$	7 500	Mennesson et al., 2003
	Wallace	10,3 µm	30 %	Non	1.10^{-4}	10 000	Wallace et al., 2004
Ciel	CIA	2,2 µm	18 %	Non	$2,3.10^{-2}$	45	Baudoz et al., 2000
	Hinz	10,3 µm	10 %	Non	5.10^{-2}	20	Hinz et al., 1998
	Keck	11 µm	20 %	Non	$\approx 1.10^{-3}$	≈ 1000	Serabyn et al., 2004
Pour un objectif de ...							
Ciel !	Darwin / TPF-I	13 µm	108 %	Non	1.10^{-5}	100 000	

5.3 Expérience polychromatique en laboratoire

5.3.1 Généralités

Objectifs

Le principal objectif du banc SYNAPSE est d'obtenir une forte réjection sur une bande de longueur d'onde de l'ordre de 20%. Cet objectif passe par le test de différentes solutions de déphasage achromatique, objectif de cette thèse, qui nécessite lui-même la mise en place d'une chaîne de mesure complète.

Outre l'obtention d'une forte réjection, le banc SYNAPSE vise à démontrer qu'il est possible de maintenir ce fort contraste sur de longues périodes. En effet, les temps d'intégration permettant l'étude spectroscopique des atmosphères de planète par la mission Darwin atteindront plusieurs heures. L'analyse des différentes sources de dérive de la réjection obtenue constitue donc le dernier objectif.

Chaîne de mesure

Comme nous l'avons évoqué, la solution la plus simple pour mettre en place un interféromètre en frange noire consiste à simuler un interféromètre de Bracewell. Pour cela, le banc SYNAPSE doit comporter :

- ➢ une source lumineuse pour simuler l'étoile, accompagnée d'un dispositif de mise en forme des faisceaux ; ce dernier fournit un faisceau collimaté, du diamètre souhaité, prêt à être injecté dans le montage optique ;
- ➢ un dispositif optique de séparation, destiné à créer les faisceaux provenant des deux télescopes ; ces faisceaux doivent être aussi identiques que possible ;
- ➢ un dispositif optique ajoutant un déphasage de π à l'un de ces deux faisceaux ; il s'agit du déphaseur achromatique à proprement parler ;
- ➢ un dispositif de réglage de la différence de marche entre les deux voies de l'interféromètre ;
- ➢ un dispositif de recombinaison de ces faisceaux, créant un système de franges d'interférences pouvant être réglé en "teinte plate" ;
- ➢ un système de détection performant, permettant la mesure du contraste entre frange brillante et frange noire.

Avant de revenir beaucoup plus en détail sur chacune des solutions choisies pour ces différents éléments, la figure 5.2 rassemble les principaux sous-systèmes de la chaîne de mesure que représente le banc SYNAPSE. Pour donner un ordre de grandeur, l'encombrement de cet ensemble est d'environ 3 m^2, auxquels il faudra ajouter la caméra matricielle et tous les contrôleurs électroniques externes, ainsi que les ordinateurs de commande. Au total, une pièce de 25 m^2 est occupée par cette expérience.

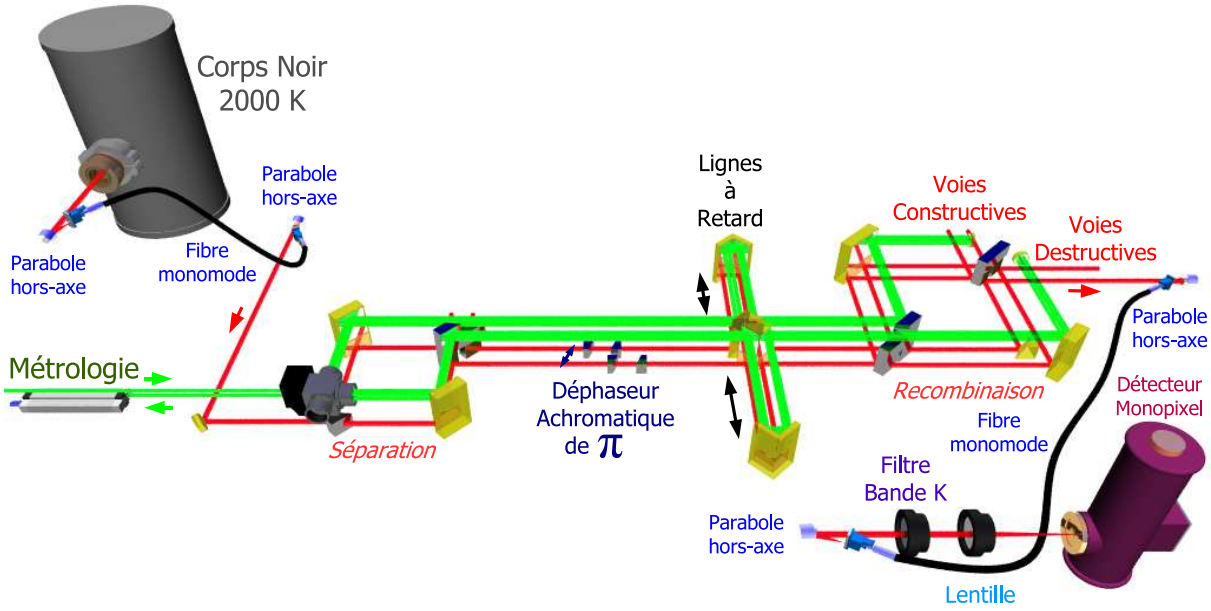


FIG. 5.2: Schéma général du banc SYNAPSE, de la source (en haut, à g.), jusqu'au détecteur (en bas, à dr.). Les faisceaux de la partie inférieure correspondent aux voies scientifiques, tandis que les faisceaux supérieurs sont ceux de la voie métrologique.

Environnement : la station d'étalonnage

Comme le précédent banc de mesure, SYNAPSE est placé dans un environnement de travail particulier, à savoir la "salle des marbres" de la station d'étalonnage. La station d'étalonnage de l'IAS comporte principalement trois salles, dont un grand hall accueillant les différentes cuves permettant l'étalonnage, dans les conditions les plus proches de l'espace, des instruments destinés à être implantés sur des satellites. L'étalonnage d'un instrument est la phase finale de son développement, où l'on étudie de manière approfondie ses réactions à l'environnement spatial. On le soumet alors à différentes conditions de température, de pression et, lorsque l'accélérateur de particules proche de l'IAS fonctionnait encore, à différents rayonnements.

La "salle des marbres" est une salle annexe au hall principal de la station, qui est de classe[76] 100 000. À l'origine, cette salle était de classe 10 000, mais elle a été déclassée. L'avantage qui en découle (outre la possibilité de travailler sans blouse intégrale, ce qui n'est pas négligeable !) est qu'elle est équipée de flux laminaires de classe 100, garantissant une très grande propreté des optiques. Cela comporte malgré tout également quelques inconvénients, liés à la présence de nombreux systèmes de pompage, créant des vibrations, au sous-sol de la station. L'environnement sonore est également peu favorable. Il faut ajouter que, la climatisation accusant quelques années, plusieurs pannes ont eu lieu durant les périodes estivales, dont certaines ont eu des conséquences irrémédiables sur les traitements optiques.

Longueurs d'onde de travail

Bien que la précédente expérience ait été effectuée dans l'infrarouge thermique à 10 µm, plusieurs critères ont guidé le choix de la bande de longueurs d'onde vers le proche infrarouge :

- ➢ un compromis entre le souhait de rester dans l'infrarouge thermique pour être au plus proche des bandes d'observation de la mission Darwin et celui de travailler dans un environnement à 300 K (générant par conséquent un important bruit thermique) pour éviter de complexifier le banc en devant le refroidir ;
- ➢ la volonté de n'utiliser, dans un premier temps, qu'un seul matériau pour le déphaseur à lames dispersives, réduisant ainsi le domaine de longueurs d'onde ;
- ➢ la disponibilité de fibres optiques monomodes dans les bandes 2 à 2,5 µm et 3 à 4 µm, permettant de tester les effets du filtrage modal.

Par le choix des matériaux du banc SYNAPSE, et en mettant à part les performances en terme de réjection, ainsi que la disponibilité de sources intenses et de détecteurs sensibles à certaines longueurs d'onde, celui-ci peut fonctionner plus généralement du visible jusqu'à environ 8 µm.

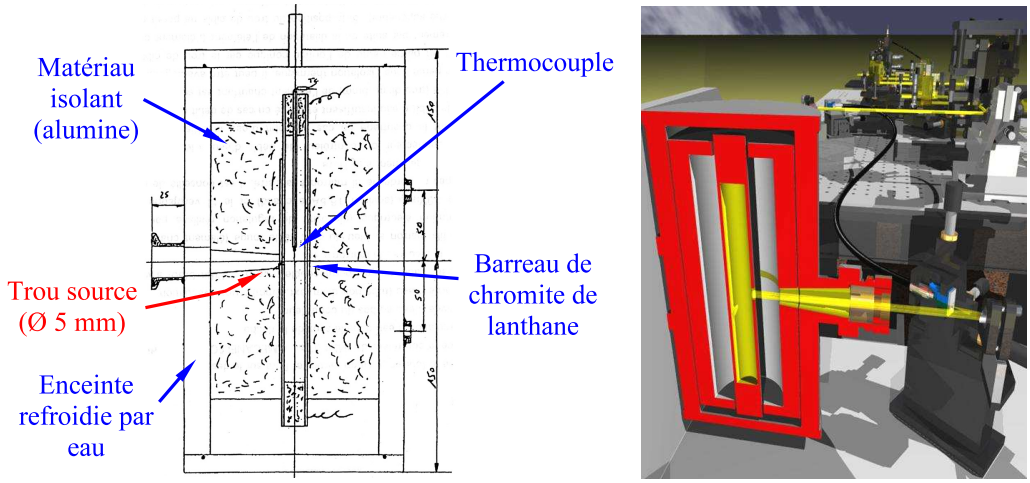
5.3.2 La source infrarouge

Un "corps noir" à 2000 K

La contrainte de travailler à température ambiante, ajoutée à la réjection devant être atteinte en frange noire, impliquent des flux très faibles détectés en sortie de banc. Comme il était préférable de tester les déphaseurs achromatiques de façon continue sur les bandes de longueurs d'onde choisie, l'utilisation d'un laser accordable, qui aurait pu apporter une solution en terme de flux, n'était pas possible.

Le choix s'est donc porté sur un "corps noir" de forte émissivité, qui est, plus exactement, un four électrique. Son élément chauffant est une baguette de Pyrox, dont les constituants principaux sont l'oxyde de chrome et l'oxyde de lanthane (chromite de lanthane). Ce composé céramique présente la particularité

[76] Cela garantit que le nombre de poussières par pied cube ne dépasse pas 100 000, contre plusieurs millions dans un environnement classique. Cette performance est obtenue grâce à un système de ventilation filtré et requiert le port permanent de surbottes, d'une blouse et d'une charlotte.



(a) Schéma de principe (coupe).

(b) Vue éclatée, en fonctionnement.

FIG. 5.3: Source de lumière du banc SYNAPSE, un corps noir à 2 000 K.

d'être à la fois réfractaire, avec une température de fusion proche de 2 500 ℃, et conducteur électrique dès la température ambiante, avec une résistivité pratiquement constante à partir de 500 ℃. Il est particulièrement bien adapté pour une source infrarouge, puisque, contrairement à la plupart des matériaux utilisés dans ce genre de source (comme le tungstène), son émissivité reste proche de 1 dans l'infrarouge proche (alors que celle du tungstène chute à 0,1 dès 2 µm). Le gain en termes de flux entre ce matériau d'émissivité 1, chauffé à 2 000 K, et un filament de tungstène d'émissivité 0,1 chauffé à 3000 K, est d'environ 30%.

Ce barreau creux, de 20 mm de diamètre, est percé d'un trou de 5 mm de diamètre faisant office de trou source. Si ce n'est son émissivité qui ne vaut pas exactement 1, il s'agit bien d'un corps noir dans la mesure où les faisceaux ne sortent de la cavité qu'après de multiples réflexions. Il n'est donc pas possible de reconstituer l'"histoire" de chacun des rayons et le faisceau résultant est bien spatialement incohérent.

Sa température optimale de fonctionnement est de 1 760 ℃ (soit environ 2 000 K). La température qui sera utilisée dans cette expérience est volontairement inférieure d'une cinquantaine de degrés, car la température de l'élément chauffant à proximité de ce point de fonctionnement peut varier très brutalement de quelques degrés. Compte tenu du fait qu'à cette température, le Pyrox devient plastique, le barreau est disposé verticalement dans la cavité, afin de limiter les déplacements du trou source, comme le montre la figure 5.3. Néanmoins, les mesures de dérive de flux ont montré qu'un déplacement résiduel existait. La mise en place d'un diaphragme a partiellement réglé ce problème.

Les longueurs d'onde émises par l'élément chauffant de ce four à la température de 2 000 K varient selon la relation de Planck, donnée par l'équation (3.15), vue p. 54. La puissance disponible s'écrit donc comme l'intégrale de $B_\lambda(T)$ sur le domaine de longueurs d'onde, soit

$$F(T) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_\lambda(T)\,\mathrm{d}\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{\mathrm{d}\lambda}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \tag{5.1}$$

Si l'on prend l'exemple de la bande s'étendant de 2 à 2,5 µm, avec un corps noir à 2 000 K, on obtient une puissance d'environ $4,4.10^4\,\mathrm{W.m^{-2}.sr^{-1}}$. Cette valeur peut paraître gigantesque, mais elle doit être tout de suite relativisée, car elle est exprimée en $\mathrm{W.m^{-2}.sr^{-1}}$. Elle devra donc être multipliée par l'étendue de faisceau de l'interféromètre, qui sera très faible, comme nous le verrons par la suite, lors du bilan de puissance du banc.

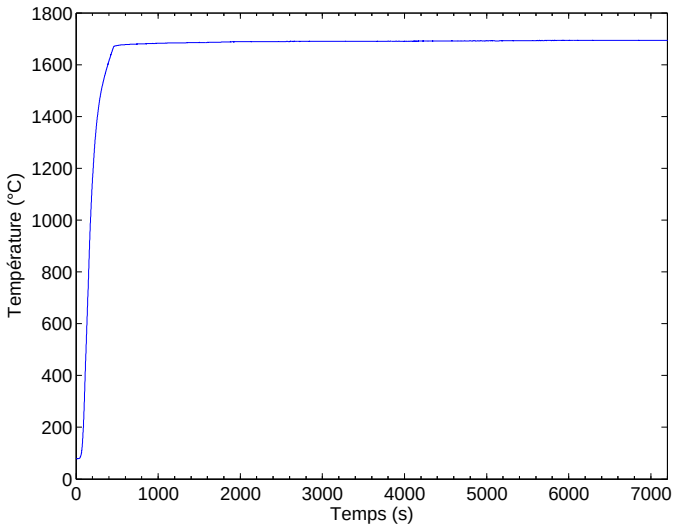


FIG. 5.4: Montée en température du corps noir.
Il faut environ 1h30 pour que la stabilité de la température soit meilleure que 2°.

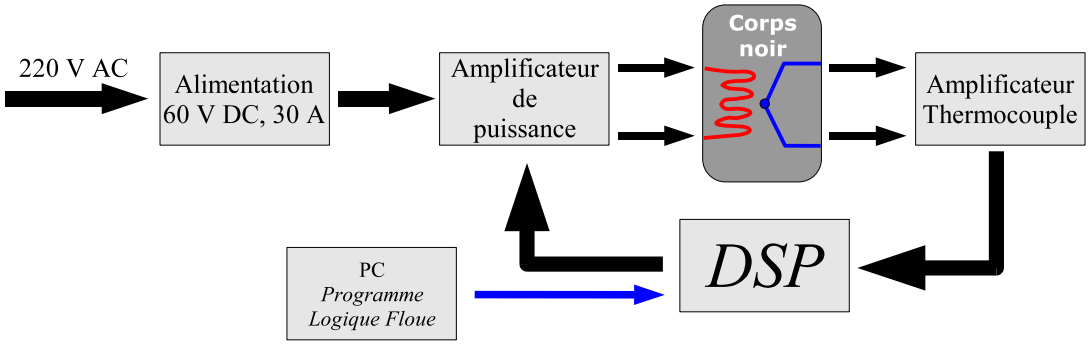


FIG. 5.5: Architecture de la régulation électronique du corps noir.

Alimentation, asservissement et refroidissement du corps noir

Ce corps noir a nécessité le développement d'une électronique propre, développement qui a été effectué par Véronique Hervier, pour la partie numérique, et Claude Lizambert, pour la partie analogique, tous deux du Service Électronique de l'IAS. La température de ce corps noir est maintenue autour d'une consigne au moyen d'une régulation basée sur la tension mesurée par un thermocouple au sein du barreau chauffant. L'architecture de cette régulation est représentée sur la figure 5.5. Les programmes chargés par l'intermédiaire du PC dans la mémoire du DSP ont été codés, pour l'anecdote, en logique floue[77]. La figure 5.6 illustre la stabilité en température obtenue après environ 2h30. Elle montre une dérive d'environ 0,4° / h (10^{-4} ° / s).

[77] Et, à ce titre, ils le sont restés pour nous !

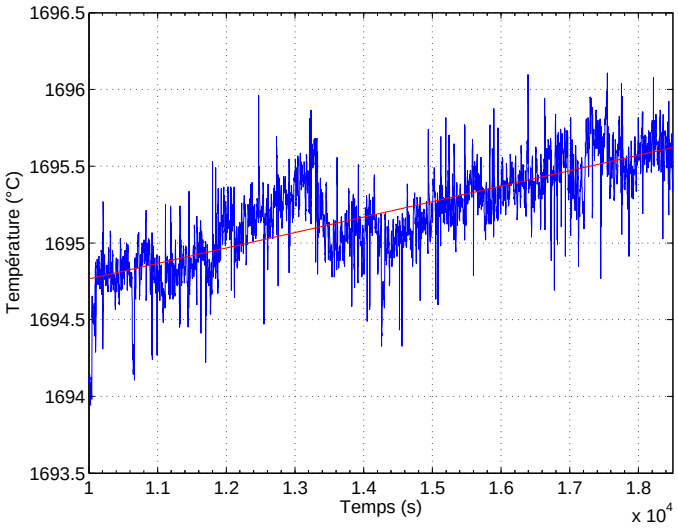


FIG. 5.6: Stabilité en température du corps noir, après environ 2h30 de chauffe. Une dérive d'environ 0,4° / h (10^{-4} ° / s) est visible.

Le four électrique et son électronique de régulation seront refroidis durant leur utilisation par une circulation d'eau. Cette circulation vient refroidir le radiateur disposé sur l'amplificateur de puissance de l'électronique de régulation, puis l'enceinte du corps noir et enfin le hublot de sortie du corps noir. Entre le barreau de Pyrox et l'enceinte du corps noir est également placée une couche d'isolant constituée d'alumine. Au total, malgré un barreau chauffé à 2 000 K, la température extérieure de l'enceinte du corps noir reste inférieure à la température ambiante.

Nous venons de déterminer la source lumineuse qui sera utilisée pour simuler le flux provenant de l'étoile, ainsi que le domaine de longueurs d'onde des mesures. Il faut maintenant collimater ce faisceau afin qu'il ait le diamètre, le profil et la direction nécessaires pour pouvoir être injecté correctement dans le banc de mesure.

5.3.3 Mise en forme des faisceaux : de l'intérêt des fibres optiques

Pour l'injection du faisceau dans l'interféromètre et son extraction, nous allons bénéficier des alliés précieux que sont les fibres optiques, et plus particulièrement les fibres monomodes. Mais l'utilisation que nous allons en faire est assez éloignée de leur application classique dans le domaine des télécommunications. Avant de décrire l'utilité de ces composants, voici quelques rappels de leurs caractéristiques principales.

Rappels sur les fibres optiques

Transporter l'énergie ou l'information contenue dans un faisceau optique sur de longues distances, voilà quelles ont été, à l'origine, les motivations des développements des fibres optiques, essentiellement dans le domaine des télécommunications. Les fibres optiques sont des guides d'ondes diélectriques, formés généralement de cylindres concentriques. Il existe des **fibres à saut d'indice**, dont le cylindre central, appelé cœur, est réalisé dans un premier matériau. Il est entouré d'un second cylindre, la gaine, fabriquée dans un second matériau. L'indice de réfraction de la gaine, inférieur d'environ 1% à celui

du cœur, permet un confinement de la lumière par réflexion totale à l'interface cœur / gaine[78]. Le diamètre total d'une fibre optique étant de l'ordre de quelques centaines de microns, la gaine est elle-même enveloppée dans différentes couches de matériaux ne jouant pas de rôle optique, mais augmentant la résistance mécanique de la fibre.

Outre le choix de ces matériaux, la géométrie de la fibre détermine quels seront les modes[79] pouvant se propager dans le guide. Un mode se propagera effectivement dans une fibre si et seulement si l'angle d'incidence du rayon associé avec l'axe optique de la fibre satisfait à la condition de réflexion totale à l'intérieur de la fibre, qui, durant la propagation, ramène les rayons vers l'axe de celle-ci.

Il existe donc un angle maximal α défini par l'équation (5.2), où n_{coeur} est l'indice du matériau constituant le cœur de la fibre et n_{gaine} celui de la gaine.

$$\text{O.N.} \overset{\text{déf.}}{=} \sin(\alpha) = \frac{\sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2}}{n_{air}} \tag{5.2}$$

Le sinus de cet angle est généralement appelé **ouverture numérique**, noté O.N., avec $0{,}1 < \text{O.N.} < 0{,}6$. Il représente une caractéristique importante propre à chaque fibre. Cette condition détermine également un cône, appelé **cône d'acceptance**, de demi-angle au sommet α, dans lequel tous les rayons seront transmis (leurs modes seront guidés). Les autres rayons (dont les modes seront dits radiatifs, car leur énergie sera dissipée) se verront réfractés ou réfléchis par la gaine à partir d'une certaine distance, qui sera un facteur de qualité de la fibre.

À cette condition de couplage angulaire vient naturellement s'ajouter une condition liée au diamètre du cœur. Plus le diamètre du cœur sera petit devant la longueur d'onde, plus il sera difficile d'injecter la lumière dans le guide. Cette notion va définir le caractère modal de la fibre. De façon qualitative, si $a \gg \lambda$, la fibre laissera se propager plusieurs modes et sera dite **multimode**. Si $a \ll \lambda$, un seul mode pourra se propager et on parlera de fibre **monomode**, les dimensions transversales et la longueur d'onde étant voisines, le formalisme doit alors faire appel à la diffraction. Cette distinction peut être quantifiée en faisant appel à la notion de **fréquence normalisée** (ou **fréquence réduite**) notée V, donnée par l'équation (5.3), où a est le rayon de la fibre et λ la longueur d'onde moyenne.

$$V \overset{\text{déf.}}{=} \frac{2\pi a}{\lambda} . \frac{\sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2}}{n_{air}} \tag{5.3}$$

Une fibre sera donc monomode et ne laissera se propager en son cœur qu'un seul mode si $V < 2{,}405$. Par ailleurs, pour $V < 1.2$, le guidage n'est pas suffisamment assuré. La limite supérieure de V au-delà de laquelle, pour un diamètre de cœur donné, un second mode est guidé, détermine la **longueur d'onde de coupure** d'une fibre monomode. Étant donné ces deux limites, une fibre sera généralement considérée comme monomode pour les longueurs d'onde situées entre $1{,}1.\lambda_c$ et $1{,}6.\lambda_c$, où λ_c est la longueur d'onde de coupure donnée par l'équation (5.4).

$$\lambda_c \overset{\text{déf.}}{=} \frac{2\pi a}{2{,}405} . \frac{\sqrt{n_{coeur}^2 - n_{gaine}^2}}{n_{air}} = \frac{2\pi a}{2{,}405} . (\text{O.N.}) \tag{5.4}$$

Pour conclure ce rappel des propriétés des fibres optiques monomodes, il faut aussi considérer que l'efficacité du filtrage modal dépend directement de la longueur de la fibre (Coudé du Foresto, 1994). La

[78] Il existe également des *fibres à gradient d'indice*, la fibre n'est constituée que d'un seul cylindre, dans lequel l'indice varie continûment du centre vers la périphérie.

[79] Les modes correspondent à une distribution de champ discrète, chaque champ étant lié à l'un des rayons lumineux composant le faisceau incident sur la fibre. Chaque mode, associé à un spectre d'onde plane, est en réalité une solution des équations de Maxwell dans le guide, selon sa géométrie.

gaine ayant un diamètre fini, il faut une certaine distance de propagation pour que les modes non guidés soient éteints dans celle-ci. Quand sa longueur le permet, il y a donc également intérêt à lui donner la forme la moins rectiligne possible, afin de provoquer l'atténuation des modes secondaires dans la gaine.

Pourquoi utiliser une fibre en amont ?

Dans notre application, la particularité la plus intéressante des fibres monomodes est que cet unique mode correspond également à une étendue de cohérence[80]. L'étendue de faisceau[81] associée à ce mode est le produit de la surface S du faisceau ainsi défini par l'angle solide Ω sous-tendu par celui-ci, soit $S.\Omega \approx \lambda^2$. Une fibre optique monomode procure donc un excellent **filtrage modal**, indépendant des fréquences spatiales de l'onde incidente et, par conséquent, beaucoup plus efficace que le **filtrage spatial** classique d'un simple trou (Mennesson et al., 2002). Cette efficacité est d'autant plus la bienvenue que celle d'un trou filtrant est inversement proportionnelle à son diamètre, entraînant une perte de flux considérable, or le flux dispensé par le corps noir est assez faible.

Malgré cet avantage essentiel, la réduction de l'étendue du faisceau injecté dans l'interféromètre présente l'inconvénient de rendre plus difficiles les réglages optiques du banc. Comme les fibres transmettent l'énergie visible de façon multimode, la solution consistera à injecter en lieu et place du corps noir un laser He-Ne[82].

Une fibre optique monomode sera donc placée en amont de l'interféromètre lui-même, afin de **sélectionner une étendue de cohérence de λ^2**.

Pourquoi utiliser une fibre en aval ?

Le filtrage modal produit par une fibre monomode peut aussi s'interpréter comme le fait que la forme du front d'onde en sortie de fibre est indépendante de celle en entrée de celle-ci. La forme du front d'onde émergent n'est donc liée qu'au seul mode propagatif de la fibre optique. Par conséquent, il est très intéressant d'implanter un dispositif identique au précédent, autrement dit une seconde fibre optique monomode, de façon symétrique en aval du banc, afin d'acheminer le flux jusqu'au système de détection du signal. Ce filtrage modal est enfin d'autant plus intéressant que le nombre d'optiques en amont est assez conséquent.

Le seul défaut non filtré par cette fibre est le piston différentiel, mais il est, en pratique, ajusté au moyen d'une ligne à retard. En conséquence, la présence d'une fibre optique monomode en sortie de l'interféromètre permet de **relâcher fortement les contraintes de qualité optique des surfaces** ou encore les défauts de pointage, au prix de quelques pertes de couplage, malgré tout, et à condition de rester couplé avec la fibre (Mennesson et al., 2002). Ces propriétés de filtrage ont pour la première fois été testées sur le banc monochromatique prédécesseur du banc SYNAPSE (Ollivier, 1999) et ont tout naturellement été reprises sur ce dernier banc.

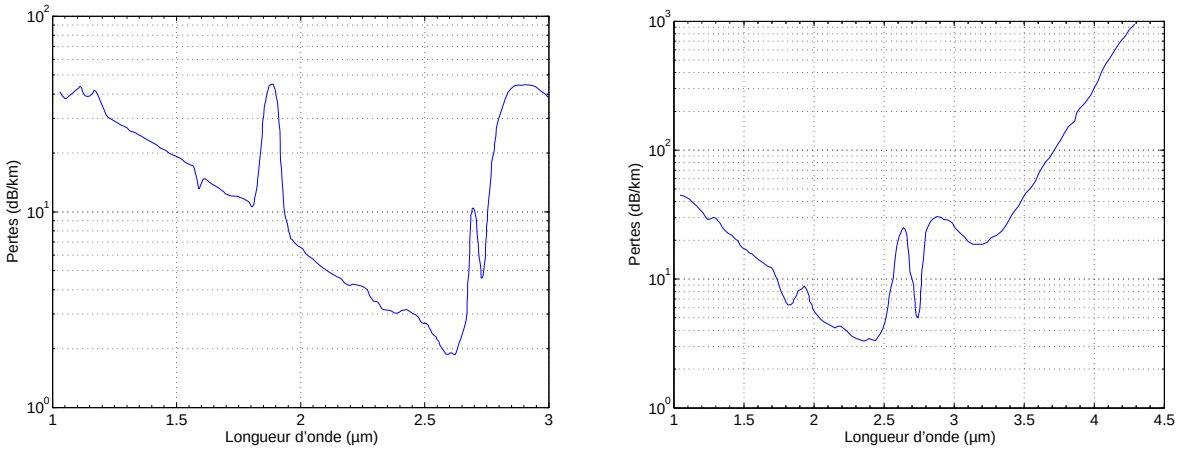
Caractéristiques des fibres utilisées

Les principaux obstacles à l'utilisation des fibres optiques monomodes tiennent aux difficultés de fabrication (il faut une longueur suffisante) et à la disponibilité de matériaux adaptés à cette fabrication

[80] Comme son nom l'indique, l'étendue de cohérence correspond à la surface sur laquelle les vecteurs d'onde constituant le rayonnement illuminant une surface donnée, bien qu'y parvenant avec des orientations différentes, peuvent être considérés comme cohérents (il existe une relation de phase entre deux points quelconque du faisceau).

[81] Pour une démonstration complète de cette propriété, voir (Léna, 1995).

[82] Le corps noir émet également dans le visible, mais le flux lumineux en sortie de fibre n'est pas suffisant pour être utilisé lors des réglages. En pratique, pour un observateur plongé dans l'obscurité, le faisceau visible ne peut plus être distingué à l'œil nu après la séparatrice S_2 (voir figure 5.12).



(a) Fibre monomode en bande K.

(b) Fibre monomode en bande L.

FIG. 5.7: Pertes de transmission de la fibre en verre fluoré en bandes K et L (*Le Verre Fluoré*). Les pics d'absorption vers 1,9 µm et vers 2,9 µm sont dûs aux interactions avec les ions OH, dont la présence est inévitable dans les fibres optiques.

dans la bande de longueur d'onde utilisée. Dans notre cas, ce dernier point a contribué à dicter le choix de la bande K et de la bande L. Ces fibres doivent également posséder une transmission suffisante pour ne pas entraîner de pertes trop importantes.

Les fibres utilisées sur le banc SYNAPSE proviennent de l'entreprise française *Le Verre Fluoré* située à Bruz, en Bretagne, qui a développé, depuis maintenant plusieurs années, une expertise dans le domaine des fibres optiques monomodes réalisées dans les matériaux du même nom. Ces fibres font donc appel aux verres fluorés pour le matériau de leur cœur, les rendant transparentes de l'ultraviolet ($\approx$ 200 nm) jusqu'au proche infrarouge (jusqu'à environ 9 µm). Elles ont à ce sujet été utilisées sur l'instrument VINCI implanté sur le VLTI. Malgré une faible dispersion chromatique, leurs pertes de transmission restent assez élevées (plusieurs dB / km), comme le montrent les courbes 5.7a et 5.7b de transmission des fibres destinées à la bande K et à la bande L. Ceci s'explique par la persistance d'impuretés et de défauts extrinsèques dans les matériaux utilisés. Dans notre cas, si ces pertes restent acceptables ($\approx$ 4 dB / km), de l'ordre de 0,1% en bande K pour une fibre de 1 m de longueur, elles sont plus importantes en bande L, avec une atténuation[83] d'environ $\approx$ 45 dB / km, soit environ 1%, toujours pour 1 m. Les autres caractéristiques des fibres du banc SYNAPSE sont résumées dans le tableau 5.2.

Injection et extraction des fibres

Que ce soit pour l'injection ou l'extraction des faisceaux dans ces fibres monomodes, le choix s'est porté vers l'utilisation de paraboles hors-axe. L'angle hors-axe a été choisi afin de minimiser les aberrations et d'adapter le cône ainsi formé au cône d'acceptance de la fibre. Il a donc pour valeur 35°. Du fait que les fibres sont à l'extérieur de l'interféromètre, avant séparation et après recombinaison des faisceaux, l'exigence en termes de qualité de surface a pu être restreinte à $\lambda_{\text{visible}}/4$. Ces paraboles en aluminium ont été fabriquées par usinage diamant par la société anglaise *Phoenix Optical Glass Limited* et ont été traitées par un dépôt d'or non protégé pour en améliorer la réflectivité en infrarouge.

[83] On définit l'atténuation d'une fibre, généralement exprimée en dB / km, par la formule : $A = \frac{1}{L}\log\left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}\right)$, où L est la longueur du guide et P_{in} (resp. P_{out}) les puissances d'entrée (resp. de sortie).

TAB. 5.2: Caractéristiques techniques des fibres en verre fluoré du banc SYNAPSE.

	Bande K	Bande L
Diamètre de cœur	$\varnothing_{\text{coeur}} = 2.a = 6,5$ µm	$\varnothing_{\text{coeur}} = 2.a = 11$ µm
Diamètre de gaine	$\varnothing_{\text{gaine}} = 125$ µm	$\varnothing_{\text{gaine}} = 125$ µm
Ouverture Numérique	O.N. = 0,23	O.N. = 0,2
Fréquence normalisée	V = 2,135	V = 1,97
Rayon du *waist*[84]	$\omega_0 \approx 3,9$ µm	$\omega_0 \approx 7$ µm
Longueur d'onde de coupure	$\lambda_{\text{coupure}} = 1,95$ µm	$\lambda_{\text{coupure}} = 2,85$ µm
Domaine monomode	$2,15$ µm$< \lambda < 3,12$ µm	$3,14$ µm$< \lambda < 4,56$ µm
Longueur totale	1 m	1 m

Au niveau de l'injection, il s'agit dans un cas de focaliser le faisceau issu du corps noir pour l'insérer dans la fibre et, dans l'autre, de focaliser les faisceaux recombinés dans l'interféromètre. Nous verrons, à ce sujet, lors d'un bilan photométrique complet du banc au paragraphe 5.4.2, l'influence des pertes par couplage et des réflexions de Fresnel à ces interfaces. Pour ce qui est de l'extraction, il s'agit de collimater le faisceau provenant du corps noir pour créer un faisceau utilisable dans l'interféromètre. Du fait des caractéristiques de la fibre, que nous avons évoquées auparavant, le faisceau injecté dans l'interféromètre a un diamètre à $1/e^2$ d'environ 5 mm. Symétriquement, l'extraction de la fibre de sortie a pour objectif de disposer d'un faisceau collimaté pouvant être ensuite focalisé sur un détecteur, qu'il soit monopixel ou matriciel.

Les fibres du banc SYNAPSE étant monomodes, le profil transversal du faisceau à l'extraction est quasi-gaussien. Parmi les cinq degrés de liberté de réglage de la sortie de fibre au foyer de chaque parabole, la translation jouant sur la mise au point (*focus*) permettra par la suite de positionner le *waist*[84] du faisceau à un endroit particulier du banc.

Pour terminer sur la mise en forme des faisceaux, la figure 5.8 représente le système d'injection du faisceau provenant du corps noir dans la fibre d'entrée en amont de l'interféromètre.

5.3.4 Séparation et recombinaison des faisceaux

Après avoir décrit l'ensemble des éléments en amont de l'interféromètre, il est temps de présenter le cœur du sujet, à savoir l'interféromètre lui-même.

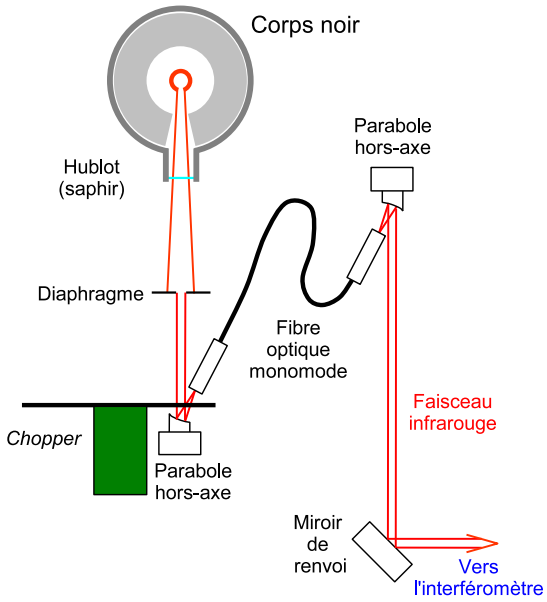
De l'intérêt de la symétrie

La configuration sélectionnée pour cette seconde expérience de laboratoire est, à l'instar de la première expérience monochromatique, basée sur une architecture de type interféromètre de Mach-Zehnder, comme celle indiquée sur la figure 5.10a avec une séparatrice, deux miroirs et une recombinatrice.

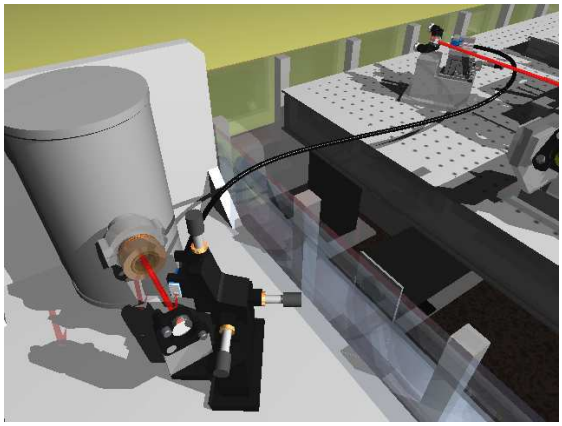
Parmi les éléments cités ci-dessus, la séparatrice a pour rôle de créer les deux faisceaux identiques et la recombinatrice, de les faire interférer. Ces deux éléments optiques reçoivent la plupart du temps un trai-

[84] Durant sa propagation, la structure quasi-gaussienne du faisceau implique qu'il ne reste pas de diamètre constant. Il existe un resserrement du diamètre du faisceau, qui passe de convergent à divergent. Ce point de transition est appelé *waist* et une approximation de son rayon est donnée par la formule de Marcuse :

$$\frac{\omega_0}{a} \approx 0,650 + 1,619.V^{-\frac{3}{2}} + 2,879.V^{-6}$$



(a) Schéma de principe (coupe).



(b) Vue d'artiste, avec les ensembles optomécaniques.

FIG. 5.8: Système d'injection du banc SYNAPSE, en amont de l'interféromètre.

tement semi-réfléchisssant[85] afin d'équilibrer au maximum la division d'amplitude qu'ils provoquent et donc la répartition des flux dans chacune des deux voies ainsi créées. L'égalité stricte des trajets optiques parcourus par les faisceaux issus de la séparatrice assure la formation d'interférences non localisées à la sortie de la recombinatrice[86] S2. Cette architecture va servir de base, mais uniquement de base, pour le banc SYNAPSE.

En effet, la recombinaison destructive des deux faisceaux créés, comme le propose l'interférométrie en frange noire, exige une symétrie très élevée (sinon parfaite) entre les deux voies de l'interféromètre. Autrement dit, chaque faisceau doit posséder la même "histoire" avant déphasage de π et avant recombinaison. Il n'est donc pas possible d'introduire un dispositif de déphasage dans chaque bras de cet interféromètre, puisque, dans le cas simple de la figure 5.10a, l'un des faisceaux subit une réflexion puis une transmission, tandis que l'autre subit d'abord la transmission puis la réflexion. Cet inconvénient est inhérent à la nature des séparatrices classiques.

Dans le cas d'une séparatrice classique à faces parallèles (Fig. 5.9), le faisceau incident est divisé en deux faisceaux émergents, mais l'un est réfléchi, tandis que l'autre subit une transmission. Il y a donc deux changements successifs de milieu, voire, le plus souvent, trois changements, puisque la face d'entrée subit généralement un dépôt d'une fine couche de métal ou de matériau diélectrique, afin d'augmenter son coefficient de réflexion. Il en résulte un chromatisme différentiel inévitable.

Il fallait donc concevoir une solution symétrique pour créer deux faisceaux identiques. La méthode la plus simple consiste à effectuer une division de front d'onde. Elle exige néanmoins de disposer d'un flux très important, comme celui d'un laser, étant donné les pertes qu'elle entraîne. Le flux émis par le corps noir étant assez faible en comparaison avec un laser, une autre solution a été choisie, qui passe par

[85] Ce n'est pas obligatoire, il est possible de ne faire appel qu'aux réflexions de Fresnel, mais celles-ci dépendent directement du choix du matériau et permettent difficilement une répartition 50 / 50.

[86] Voir figures 5.12 et 5.13 pour la nomenclature des optiques.

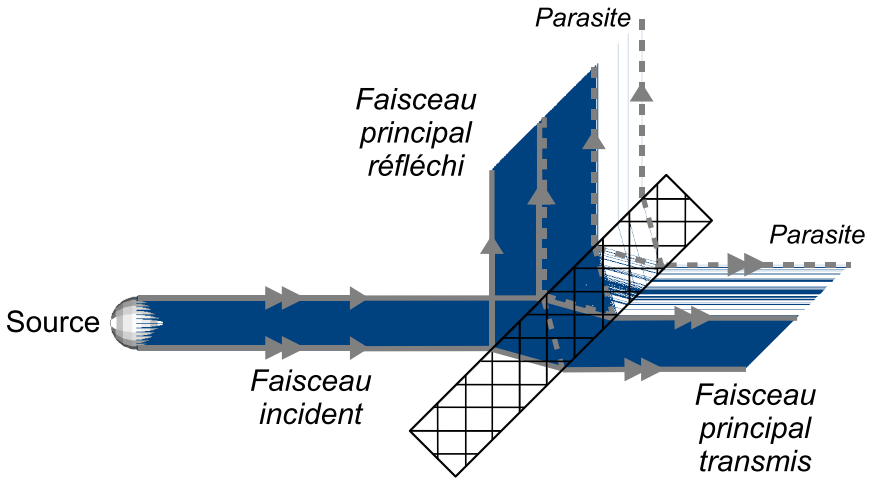


FIG. 5.9: Lame séparatrice "classique", à faces parallèles.
La face d'entrée de la lame reçoit généralement un traitement diélectrique afin d'augmenter sa réflectivité. Le faisceau incident est divisé en un faisceau réfléchi et en un faisceau transmis, mais du fait des réflexions aux différentes interfaces (air / diélectrique, diélectrique / substrat, substrat / air), de nombreux faisceaux parasites (représentés en pointillés) viennent se superposer aux faisceaux "utiles" (traits continus) et perturber leur phase (simulation *Apilux*).

le remplacement de la séparatrice et de la recombinatrice par deux systèmes optiques plus complexes. Ce sont en réalité deux interféromètres de Mach-Zehnder, modifiés, afin d'être les plus symétriques possibles.

Principe des séparatrice et recombinatrice de type Serabyn

Cette configuration a été proposée par Serabyn & Colavita (2001), du JPL. À l'origine, il s'agit d'une **recombinatrice achromatique**, dont le schéma est basé sur un interféromètre de Mach-Zehnder classique où l'on serait venu insérer un miroir supplémentaire. Son objectif est de recombiner deux faisceaux de façon aussi symétrique que possible, en termes d'amplitude, de phase et de polarisation.

Dans le schéma de la figure 5.10b, si l'on note :
- ➢ r le coefficient de réflexion des séparatrice et recombinatrice côté traitement 50 / 50 ;
- ➢ t le coefficient de transmission de la face traitée à l'interface substrat / "traitement 50 / 50" ;
- ➢ t' le coefficient de transmission de la face traitée à l'interface "traitement 50 / 50" / substrat.

alors les faisceaux recombinés ont une amplitude respectivement proportionnelle aux produits $t\,r$ et $r\,t'$. La recombinaison est donc d'autant meilleure que les coefficients t et t' sont égaux, ce qui suppose que les lames soient identiques. Or les coefficients t et t' sont, par nature, inégaux.

Cette inégalité des transmissions peut être aggravée par une différence entre les traitements 50 / 50 des séparatrice et recombinatrice, c'est pourquoi l'ensemble des lames a reçu un dépôt de silicium lors de l'évaporation d'une même cuve de traitement. Cette transmission varie également avec la nature et l'épaisseur du matériau traversé. Dans le cas du banc SYNAPSE, cela s'est traduit, dans un premier temps, par un usinage des lames dans le même lingot de fluorine (CaF_2) et un polissage final commun des lames. Ces précautions ne garantissent pas une égalité d'épaisseur à quelques nanomètres, comme requis pour obtenir des franges d'interférences très contrastées, mais le déphaseur achromatique à lames

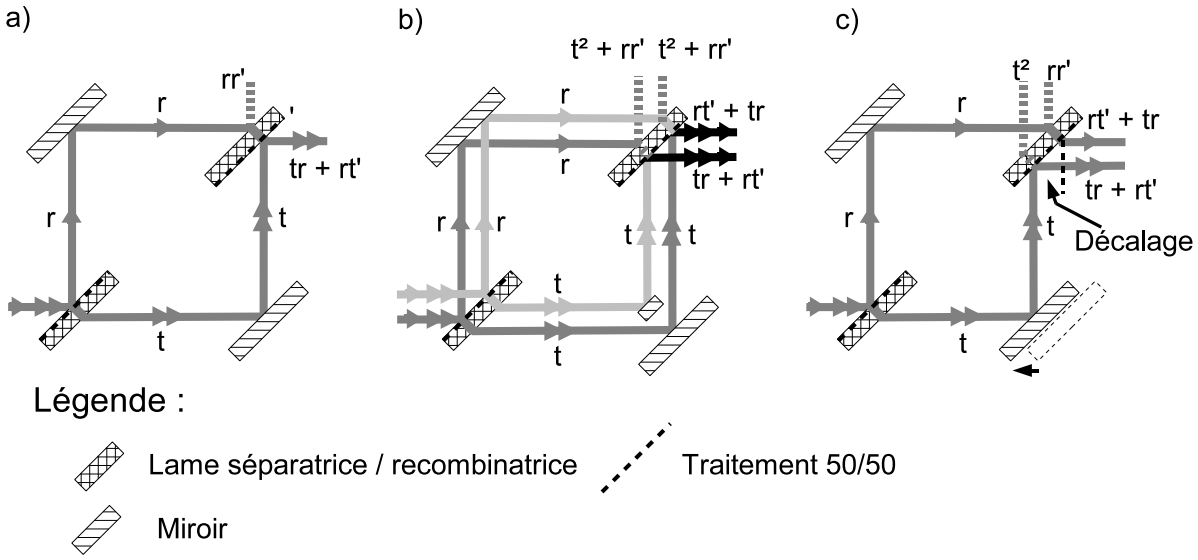


FIG. 5.10: Interféromètre de Mach-Zehnder, recombinatrice et séparatrice de type "Serabyn". Pour chaque système sont représentés les coefficients de transmission de chaque voie :
a) Interféromètre de Mach-Zehnder "classique" ;
b) Principe de la recombinatrice de type "Serabyn" ;
c) Principe de la séparatrice extrapolée de la recombinatrice de type "Serabyn".

que nous avons testé, et sur lequel nous reviendrons dans la suite, constitue un réel atout, dans la mesure où il utilise strictement le même matériau.

Mais revenons à la "recombinatrice Serabyn". Comme un interféromètre de Mach-Zehnder classique, elle crée simultanément des faisceaux destructif et constructif, mais, du fait de sa structure, ils vont par paire. Cette particularité constitue le principal inconvénient de cette solution, puisqu'elle entraîne une perte de la moitié du flux. Les deux faisceaux constructifs, d'amplitudes respectivement proportionnelles[87] à rr' et t^2 peuvent être utilisés pour un asservissement supplémentaire, même si cela n'a pas été le cas sur le banc SYNAPSE.

Le dernier avantage de cette recombinatrice est qu'il est possible d'en extrapoler ... une **séparatrice symétrique**. Toujours, sur la base d'un interféromètre de Mach-Zehnder classique, cette fois-ci sans miroir supplémentaire, l'idée consiste à décaler physiquement l'un des miroirs, afin que les faisceaux ne soient pas recombinés par la recombinatrice, mais subissent malgré tout ses effets optiques (réflexion ou transmission). Cette "séparatrice Serabyn", représentée sur la figure 5.10c crée donc deux faisceaux aussi identiques que possible. On peut rappeler à ce stade que ces deux faisceaux correspondraient à ceux provenant de deux télescopes de la mission Darwin ou d'un interféromètre de Bracewell.

[87] r' est le coefficient de réflexion de la face non traitée des séparatrice et recombinatrice.

Il faut aussi noter que ce décalage (Fig. 5.10c) de l'un des miroirs se retrouve naturellement en termes de chemin optique. Cette différence de chemin optique entre les deux faisceaux issus de la "séparatrice Serabyn" est égale à la distance séparant leurs axes optiques. Bien que cette distance soit exactement compensée lors de l'utilisation d'une "recombinatrice Serabyn", elle ne l'est pas entre ces deux éléments. Voilà pourquoi les éléments optiques du déphaseur achromatique et des lignes à retard seront décalés d'une voie à l'autre.

Si l'on fait un bilan, **le banc SYNAPSE est un interféromètre de Mach-Zehnder, formé d'une séparatrice, de deux miroirs et d'une recombinatrice, mais la séparatrice et la recombinatrice du banc SYNAPSE sont elles-mêmes deux interféromètres de Mach-Zehnder modifiés.** Néanmoins, au sein de ces interféromètres, les séparatrice et recombinatrice ont également un dessin particulier, que nous allons détailler maintenant, en nous intéressant aux différents éléments optiques du banc.

5.3.5 Éléments optiques

Quelques difficultés liées à l'interférométrie à haut contraste

L'obtention de franges très contrastées passe, comme nous l'avons dit, par une très grande rigueur dans la symétrie des deux voies de l'interféromètre. Malgré le schéma particulier adopté pour SYNAPSE, cette symétrie n'est naturellement pas totale à l'échelle des éléments optiques. Dans un premier temps, les imperfections dans l'équivalence des chemins optiques se traduisent par un chromatisme différentiel néfaste pour le contraste. Ce chromatisme est, par exemple, lié à la transmission des faisceaux par les matériaux constituant les éléments optiques transmissifs. Nous venons de voir le problème des lames séparatrices à faces parallèles. Seule la symétrie de la "séparatrice Serabyn" peut venir contrebalancer ce phénomène, puisqu'elle garantit que les deux faisceaux de sortie ont subi une réflexion ET une transmission.

L'autre obstacle au fort contraste, rencontré très souvent en optique, vient des faisceaux parasites. Toujours dans le cas d'une séparatrice classique à faces parallèles, celle-ci se comporte comme une cavité de Fabry-Perot et vient créer une multitude de faisceaux parasites, comme le montre la figure 5.9. Si la lame n'a pas une épaisseur suffisante, ces faisceaux parasites peuvent se superposer aux faisceaux "utiles" et venir détruire le contraste lors de la recombinaison[88].

Enfin, un dernier problème vient de la dispersion chromatique introduite par la traversée du matériau. Le faisceau étant polychromatique, donc composé d'une multitude de longueurs d'onde élémentaires, chacune d'elle subit une réfraction différente lors de la transmission. Le faisceau transmis est donc dispersé latéralement. En pratique, cette dispersion est très faible, de l'ordre de quelques dizaines de microns[89], la symétrie de la "séparatrice Serabyn", bien que ne résolvant pas ce problème, assure l'équivalence pour les deux faisceaux.

Principe des séparatrices prismatiques

La "séparatrice Serabyn" apportant une solution pour le problème du chromatisme différentiel, il reste à en trouver une pour réduire l'influence des faisceaux parasites. L'attention s'est donc portée, durant la conception du banc SYNAPSE (qui est antérieure à cette thèse), sur une solution pour limiter les faisceaux parasites. Dans une séparatrice à faces parallèles, le décalage entre les faisceaux principaux et les faisceaux parasites est proportionnel à l'épaisseur de la lame. Dans un premier temps, une séparatrice

[88] Du fait qu'ils ont subi des réflexions et transmissions supplémentaires, les faisceaux parasites, d'amplitude décroissante, ne sont en effet bien évidemment pas dans le même état en terme de phase.

[89] Voir paragraphe 4.3.7.

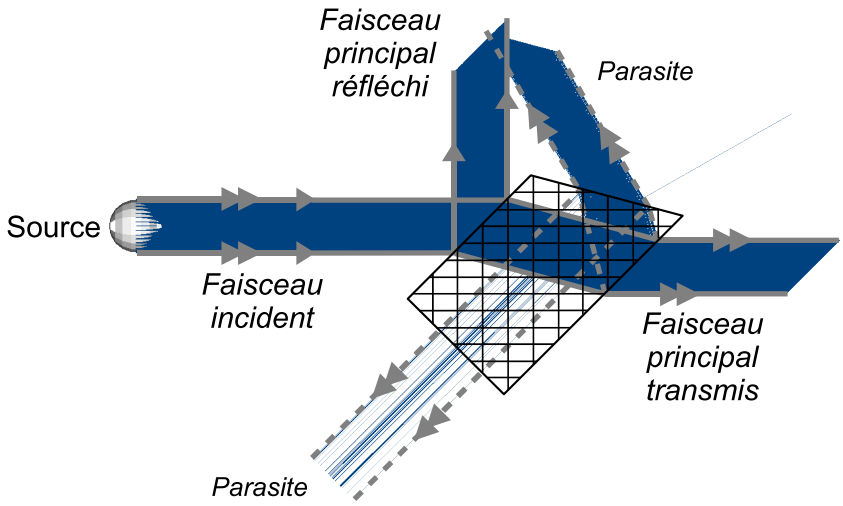


FIG. 5.11: Schéma de la séparatrice prismatique.
Les faisceaux parasites sont soit rejetés sur un axe non parallèle à l'axe optique "utile", soit rejetés sur l'axe du prisme (simulation *Apilux*).

"épaisse" a donc été considérée, afin d'écarter ces faisceaux. Rapidement, cette idée ne s'est pas révélée suffisante et une solution géométrique a été envisagée. Elle a abouti au dessin de la figure 5.11, proposé par Alain Labèque et Predrag Sekulic.

Cette géométrie prismatique permet de rejeter les principaux faisceaux parasites dans l'axe du prisme et d'assurer leur innocuité, moyennant la mise en place des caches absorbants adéquats. Il faut noter que la distance entre l'axe du faisceau et le biseau du prisme a une grande importance pour déterminer les performances de cette séparatrice. Durant la phase de réglage du banc optique, il faudra donc vérifier scrupuleusement que le faisceau n'est pas trop éloigné du biseau, ou, au contraire, qu'il n'est pas vigneté.

La géométrie de cette séparatrice présente donc un grand nombre d'avantages, auxquels il faut ajouter celui de pouvoir être utilisée avec n'importe quel matériau. Cela n'est pourtant pas totalement vrai, car il faut que celui-ci puisse être fabriqué puis usiné dans des épaisseurs suffisantes.

Séparatrice et recombinatrice Serabyn avec lames prismatiques

À partir du prisme élémentaire de la figure 5.11, il est possible, en faisant appel à des techniques d'adhérence moléculaire, d'assembler sur une même "poutre" les prismes nécessaires pour les deux voies de la "recombinatrice Serabyn" tout en garantissant le parallélisme de leurs faces (voir photographie en Annexe F.3c). C'est la solution qui a été choisie pour le banc SYNAPSE.

On obtient de cette façon une séparatrice complète (Figure 5.12), ainsi qu'une recombinatrice équivalente (Figure 5.13). Malgré tout, cette solution introduit une contrainte supplémentaire dans le choix de leur matériau. En effet, il doit pouvoir être adhéré, et ce, de façon durable, ce qui exclut les matériaux hygroscopiques. Dans notre cas, le matériau choisi a été la fluorine (CaF_2), pour ses propriétés de transmission dans le proche infrarouge et dans le visible (permettant l'injection d'un laser d'alignement). De plus, pour le fabricant des éléments optiques (à l'époque *Stigma Optique*, devenu ensuite *Cybernétix* et enfin *Winlight System*), le polissage de ce matériau et son adhésion moléculaire étaient facilités.

Afin de garantir un excellent parallélisme des faces de ces lames, elles ont subi un polissage final commun, après leur adhésion. Nous verrons également par la suite que cette option a introduit une

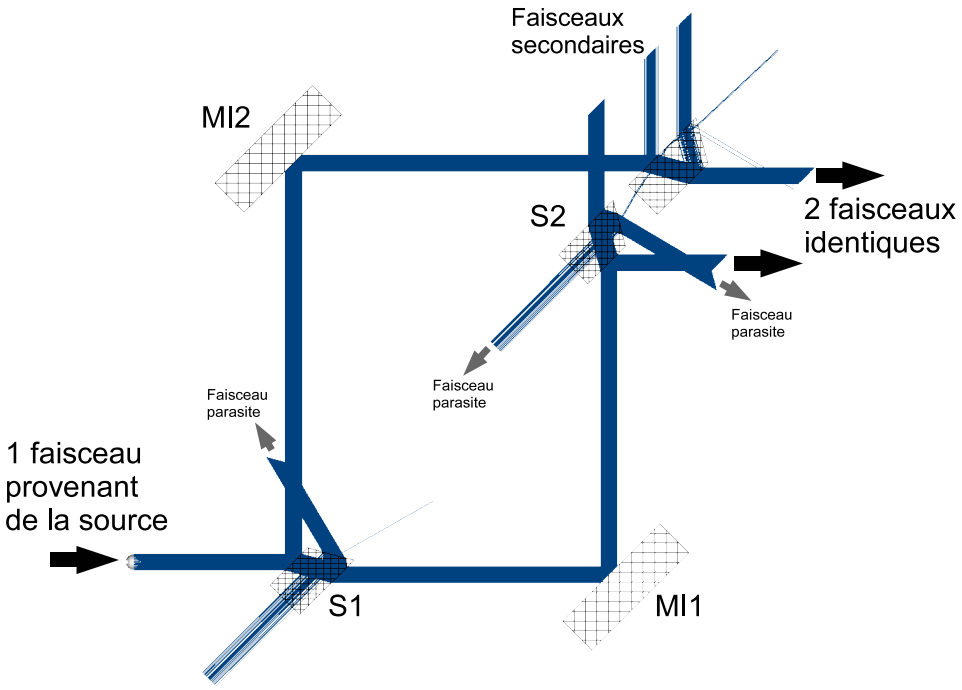


FIG. 5.12: Séparatrice Serabyn avec lames prismatiques.
Les faisceaux parasites sont désaxés et peuvent être piégés grâce à des éléments absorbants (simulation *Apilux*).

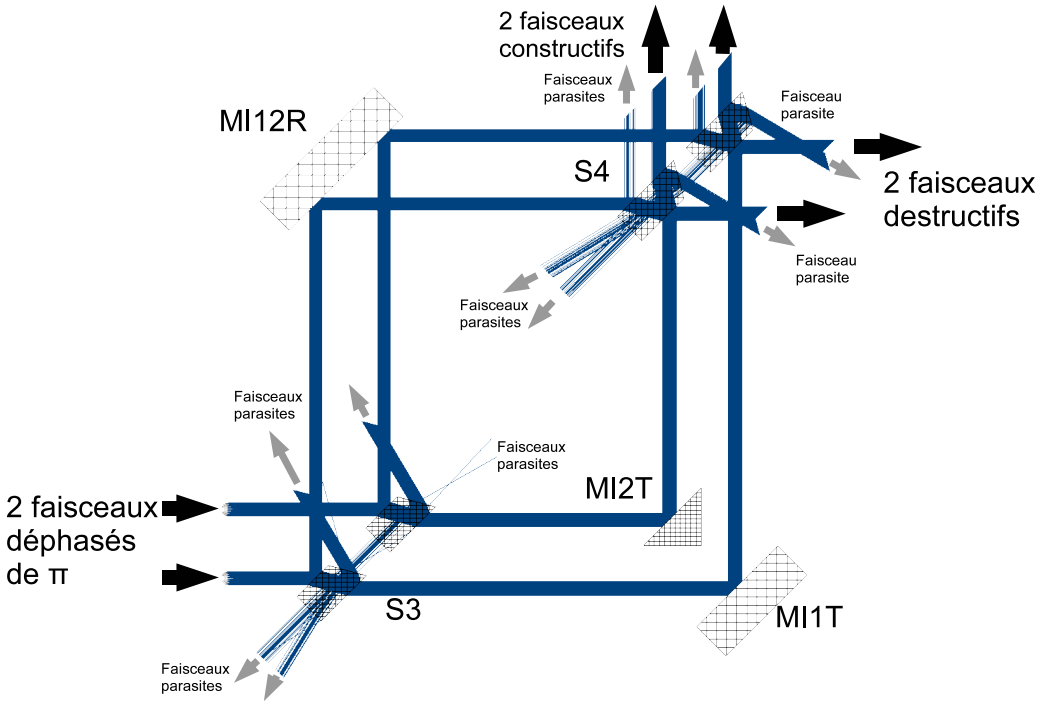


FIG. 5.13: Recombinatrice Serabyn avec lames prismatiques.
Les faisceaux parasites sont désaxés et peuvent être piégés grâce à des éléments absorbants (simulation *Apilux*).

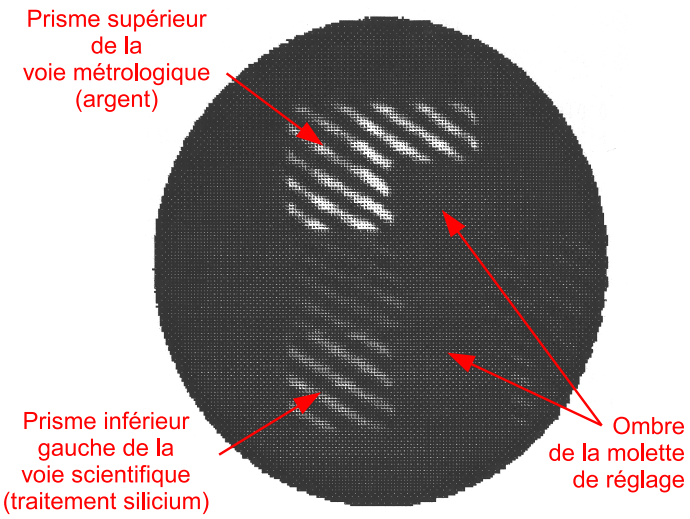


FIG. 5.14: Interférogramme de la séparatrice S2, réalisé à l'aide de l'interféromètre *Zygo* de l'*Institut d'Optique*.
Alors que les franges entre le prisme inférieur gauche de la voie scientifique et de la "poutre" centrale sont parfaitement alignées, un très faible "*tilt*" s'ajoute sur le prisme supérieur de la voie métrologique, du fait de l'épaisseur du traitement en argent. Ce constat sera confirmé lors des visées d'alignement pour le réglage du banc.

contrainte au niveau du choix du matériau du déphaseur achromatique. En pratique, la fluorine est légèrement hygroscopique et, étant donné l'environnement hygrométrique très variable (!) du banc de mesure, plusieurs des prismes des séparatrices ont dû être re-adhérés au cours de cette thèse ...

Étude du traitement 50 / 50 et contraintes associées

Le choix des traitements 50 / 50 devant être appliqués sur les séparatrices et recombinatrices s'est effectué durant la phase de conception du banc SYNAPSE, qui a précédé cette thèse. Nous ne donnerons donc que les principaux arguments ayant conduit à ces choix, qui ont été dictés par des simulations effectuées grâce au logiciel de couches minces *MacLeod* de la société *Thinfilm Center*.

Plusieurs solutions se présentaient initialement, basées sur des traitements diélectriques multicouches, sur des traitements diélectriques monocouches ou sur des traitements métalliques. Les traitements diélectriques multicouches ont rapidement été écartés du fait, entre autres, des sauts de phase importants qu'ils génèrent. Une étude approfondie des traitements métalliques a montré que les épaisseurs de matériau déposé nécessaires étaient de quelques dizaines d'angström[90], qui plus est avec une précision d'épaisseur de l'ordre de l'angström, voire inférieure. Face aux risques de voir se former des ilôts agglomérés sur les substrats et devant l'impossibilité des fournisseurs de garantir de telles précisions, cette solution a dû être abandonnée.

Il restait donc la solution du dépôt diélectrique monocouche, imposant le choix d'un unique matériau. Compte tenu du substrat en fluorine (CaF_2), le matériau sélectionné a été le silicium. Une difficulté est venue s'ajouter du fait de l'assemblage des prismes de chaque séparatrice par adhérence moléculaire. En effet, les dépôts de silicium sont généralement réalisés à des températures de l'ordre de 300 à 400°C, totalement proscrites pour des optiques en CaF_2 adhérées. Il a donc fallu adapter les simulations à un dé-

[90] On rappelle que : 1 angström = 10^{-10} m = 0,1 nm soit quelques couches atomiques.

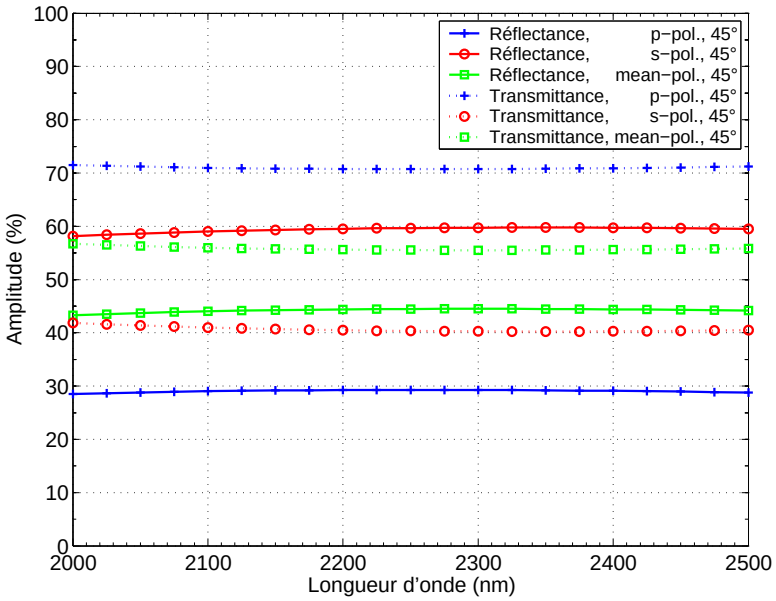


FIG. 5.15: Coefficients de réflexion et de transmission des traitements séparateurs pour la bande K. La réflexion moyenne atteint 42%, tandis que la transmission approche 58%, en polarisation moyenne, ce qui est le cas avec un corps noir. La somme vaut 100%, puisque le silicium n'absorbe pas dans cette gamme de longueur d'onde (simulation *MacLeod*).

pôt de silicium à environ 60°C, induisant naturellement des changements d'indices. Pour donner un ordre d'idée, l'indice classique du silicium est d'environ 3,45 à 2,2 µm, alors que celui du silicium déposé en couche mince et à froid est proche de 2,68. L'épaisseur de silicium nécessaire pour un traitement aussi équilibré que possible s'est ainsi avérée de l'ordre de 120 nm[91]. Mais la répartition n'atteint pas exactement 50/50, comme le montre la figure 5.15. En pratique, cette valeur de l'épaisseur n'est pas exactement celle qui a été déposée. En effet, les traitements de ce type requièrent une très grande expérience (assez proche de la "cuisine") et cette valeur a été affinée par la personne de la société *Schott-Guinchard* ayant réalisé les dépôts des optiques de SYNAPSE. Malgré tout, on peut estimer que les valeurs des coefficients de réflexion r et de transmission t sont assez proches de la théorie.

Le rendement d'une séparatrice Serabyn est, comme nous l'avons vu proportionnel au produit rt. D'après la figure 5.15, en bande K, celui-ci reste proche de 24%. Si l'on ajoute, comme dans notre application, une recombinatrice Serabyn, on obtient un rendement global des traitements diélectriques seuls[92] d'environ 6% en bande K. Dans la seconde bande de longueurs d'onde du banc SYNAPSE, la bande L, de 3 à 4 µm, le rendement d'une séparatrice Serabyn est réduit à 23% et le rendement global à un peu plus de 5%, comme le montre la figure 5.16.

La figure 5.17 montre les coefficients de réflexion et de transmission de ces traitements aux longueurs d'onde visibles. Il faut ainsi noter que le rendement en visible et notamment à 633 nm chute à 0,1%. Fort heureusement, il sera, malgré tout, suffisant pour permettre l'alignement au moyen d'un laser He-Ne de 10 mW. Nous reviendrons sur le rendement photométrique du banc SYNAPSE à la fin de ce chapitre.

[91] Cette valeur a été optimisée pour la polarisation moyenne en bande K.

[92] Il faudra y ajouter les pertes par réflexions de Fresnel aux interfaces avec le substrat.

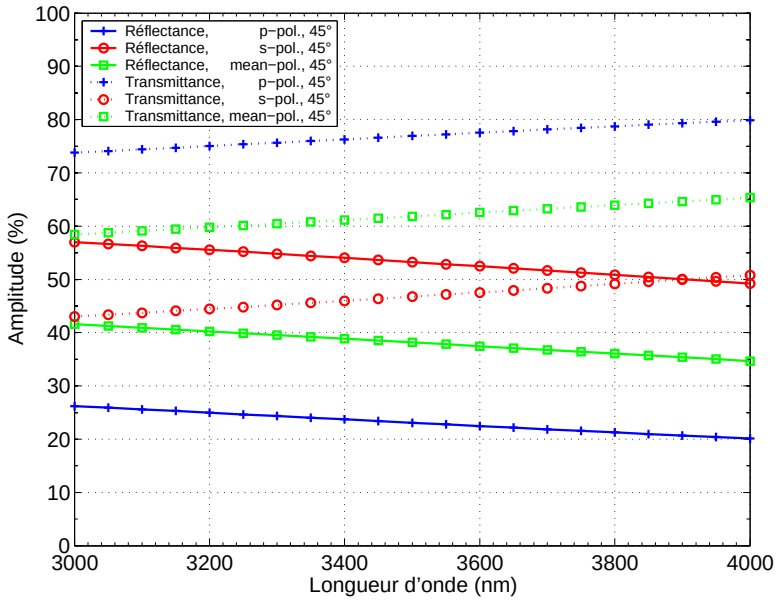


FIG. 5.16: Coefficients de réflexion et de transmission des traitements séparateurs pour la bande L. La réflexion moyenne atteint 39%, tandis que la transmission approche 61%. La somme vaut toujours 100%, puisque le silicium n'absorbe pas dans cette gamme de longueur d'onde (simulation *MacLeod*).

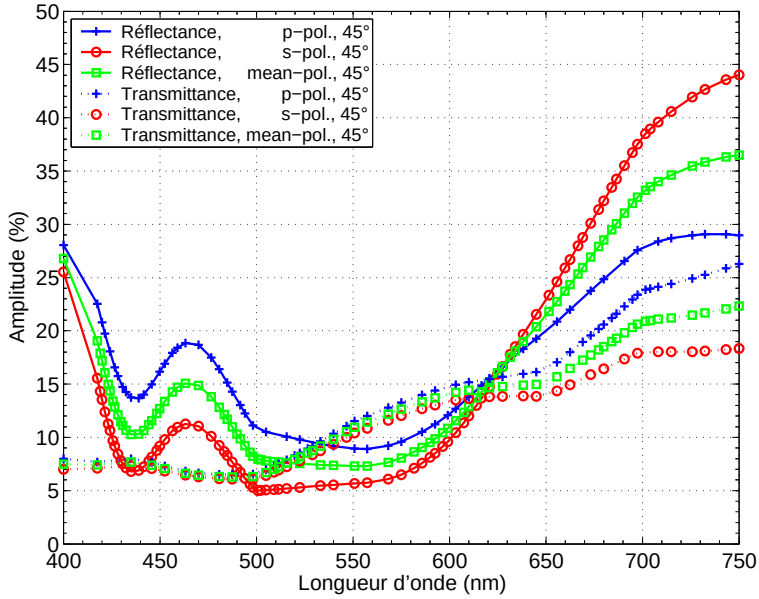


FIG. 5.17: Coefficients de réflexion et de transmission des traitements séparateurs pour le visible. La réflexion moyenne atteint 15%, tout comme la transmission (simulation *MacLeod*).

Lignes à retard

Bien que nous cherchions à assurer la plus grande symétrie entre les deux voies de l'interféromètre, nous avons également vu qu'il était nécessaire, pour localiser le point de fonctionnement, de pouvoir ajuster la différence de marche sur quelques centaines de microns. Pour ce faire, deux lignes à retard, une par bras de l'interféromètre (elles seront désignées, dans la suite, par LR1 dans la voie 1 et LR2 dans la voie 2), ont été implantées entre la séparatrice et la recombinatrice Serabyn.

Pour ce genre d'éléments optiques, il est généralement fait appel à des systèmes à "œil de chat" (comme ce fut le cas pour l'expérience précédente) ou à des "coins de cubes", afin de garantir le parallélisme des faisceaux incidents et émergents. Dans notre cas, compte tenu des faibles déplacements à effectuer et de la précision des éléments optomécaniques employés (platine de translation *Micro-Contrôle* et platine piézoélectrique *Polytech Physik Instrumente*), il a été possible de relâcher la contrainte sur l'un des axes (tangage) et, par conséquent, de simplifier le dessin des optiques. En effet, la précision des alignements doit être maximale lorsque le point de fonctionnement a été trouvé, c'est-à-dire dans une configuration statique de la platine de translation grossière de LR1. Or c'est celle-ci qui a la précision de guidage la moins bonne en tangage, avec un mouvement mesuré de l'ordre de 20 secondes d'arc. Dès lors, seule la platine piézoélectrique de LR2 est en mouvement pour asservir la différence de marche. Elle possède la particularité d'être extrêmement précise en tangage et roulis, grâce à sa structure déformable, usinée dans la masse.

Par conséquent, les éléments des lignes à retard ont été remplacés par des prismes en toit complémentaires, creux d'un côté de la ligne à retard et pleins de l'autre. Les prismes en toit creux (ou *rooftop*s, ou dièdres) sont constitués de deux miroirs en *Zérodur* assemblés à angle droit par adhérence moléculaire, en prenant leur complémentaire, le prisme plein, comme référence. Ceci assure une très grande précision dans le parallélisme des faisceaux. L'ensemble des deux lignes à retard est représenté sur la figure 5.18.

Déphaseur achromatique

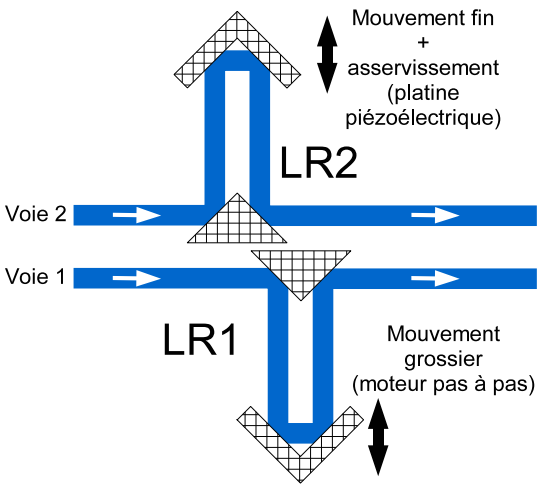
Le banc SYNAPSE a été conçu, à l'origine, pour permettre le test de plusieurs déphaseurs achromatiques. Pour cela, l'interféromètre a été divisé en trois sous-systèmes, organisés sur des bancs miniatures, que nous appellerons par la suite *breadboard*s (même si la traduction littérale de "planche à pain" pourrait avoir son charme !).

Sur le premier *breadboard* est disposé l'interféromètre de Mach-Zehnder constituant la séparatrice du montage. Le *breadboard* central comporte ensuite le déphaseur achromatique et les deux lignes à retard. Enfin, un troisième *breadboard* supporte le second interféromètre de Mach-Zehnder, à savoir la recombinatrice du montage. De cette façon, la structure du banc SYNAPSE a été rendue modulable. Pour tester une solution de déphasage différente, il suffit donc de changer le *breadboard* central[93].

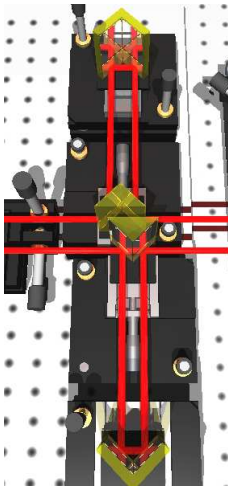
À l'origine, parmi les nombreuses solutions évoquées au paragraphe 4.2, une solution à lames dispersives, puis un déphaseur faisant appel à un passage par un foyer optique et enfin un déphaseur à quatre quadrants devaient être successivement étudiés sur le banc. Le développement du banc lui-même ayant pris un certain retard (!), l'accent a été mis, dans un premier temps, sur le déphaseur à lames dispersives.

Comme évoqué auparavant, ce déphaseur n'utilise qu'un seul matériau, à savoir la fluorine (CaF_2). Nous avons vu au paragraphe 4.3.3 les différents critères ayant guidé ce choix. Dans notre cas, un autre critère est venu s'ajouter, celui de pouvoir compenser d'éventuels défauts d'épaisseur des séparatrice et recombinatrice, qui, nous l'avons vu, devaient être, elles-mêmes, réalisées en fluorine pour d'autres raisons.

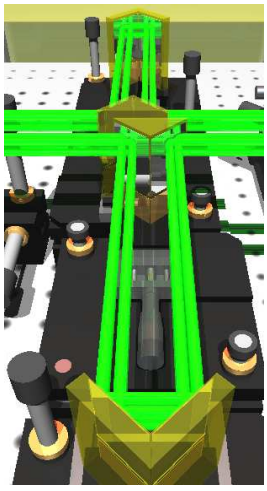
[93] En pratique, nous verrons qu'avec la méthode d'alignements utilisée, il faut également reprendre les réglages du banc complet.



(a) Schéma de principe.



(b) Vue d'artiste, avec les faisceaux infrarouges, occupant la partie inférieure des miroirs.



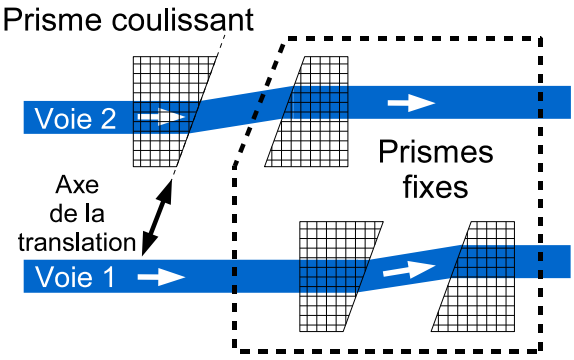
(c) Vue d'artiste, avec les faisceaux de métrologie (quatre par voie), occupant la partie supérieure des miroirs.

FIG. 5.18: Ensemble des lignes à retard du banc SYNAPSE.
Le prisme en toit de LR1 se déplace sur une platine *Micro-Contrôle* de 25 mm de course, avec une résolution de 0,1 µm, au moyen d'un moteur pas à pas. Le prisme en toit de LR2 est disposé sur une platine piézoélectrique *Polytech Physik Instrumente* de 15 µm de course, avec une résolution théorique de 0,1 nm. Cette platine assure également l'asservissement en différence de marche.

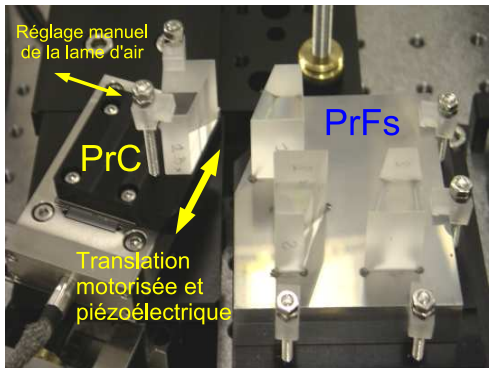
Le déphaseur est constitué de quatre prismes, répartis par paires dans chaque bras de l'interféromètre. Comme nous l'avons dit, seul un de ces prismes doit être mobile dans l'une des voies, pour créer une épaisseur de matériau différentielle. Ce prisme sera par la suite dénommé "PrC" (pour "prisme coulissant"), tandis que les trois autres prismes seront notés "PrFs" (pour "prismes fixes"). En effet, pour limiter le nombre de réglages à l'intérieur du déphaseur et grâce au faible écart physique (30 mm) entre les deux voies de l'interféromètre, ces trois prismes ont été réunis sur une même plaque d'aluminium, sur laquelle ils ont été placés sous contrôle interférométrique, puis collés[94].

Le prisme PrC est, quant à lui, disposé sur une plaque individuelle, servant d'interface avec les systèmes de translation. Ces derniers sont au nombre de deux. Le premier fait appel à une platine de translation *Micro-Contrôle* motorisée par un moteur pas-à-pas, pour les mouvements grossiers avec une résolution de 0,1 µm. Par-dessus cette platine est fixée une platine piézoélectrique *Physik Instrumente*, d'une résolution de quelques dixièmes de nanomètre. Le parallélisme des faces de PrC avec celles des prismes fixes a bien évidemment dû être ajusté durant la phase d'alignement du banc. Grâce à une troisième platine de translation manuelle, orthogonale aux précédentes, l'épaisseur de la lame d'air entre PrC et son prisme fixe peut également être réglée. L'ensemble est représenté sur la figure 5.19.

[94] Un contrôle (imprévu) effectué après un an et demi passés sur le banc, a montré la parfaite stabilité de cette solution.



(a) Schéma de principe.



(b) Photographie du déphaseur, représentant, à gauche, le prisme PrC sur ses différents supports et, à droite, la platine commune aux trois prismes fixes.

FIG. 5.19: Déphaseur achromatique à lames prismatiques du banc SYNAPSE.
Le prisme PrC est translaté selon son arête principale grâce à une platine *Micro-Contrôle*, avec une résolution de 0,1 µm sur laquelle est superposée une platine piézoélectrique *Polytech Physik Instrumente* de 15 µm de course, avec une résolution théorique de 0,1 nm. Cet ensemble est lui-même disposé sur une seconde platine de translation manuelle, pour le réglage de la lame d'air entre PrC et son prisme fixe.

Filtrage spectral

Du fait du choix des matériaux des éléments optiques (CaF_2 pour les séparatrices, recombinatrices et prismes déphaseurs) et des traitements (or non protégé pour les miroirs et silicium pour les traitements semi-réfléchissants), l'interféromètre du banc SYNAPSE transmet du visible à 7 µm[95]. Nous avons vu que la disponibilité de fibres optiques monomodes avait en partie limité ce domaine aux bandes [2,15 µm ; 3,12 µm] et [3,14 µm ; 4,56 µm].

Afin de faire correspondre ces bandes à des bandes de longueur d'onde utilisées classiquement en astronomie et rappelées dans le tableau 5.3, un filtrage spectral a été ajouté pour limiter les domaines de mesure respectivement à la bande K et à la bande L. Cette sélection s'effectue par la mise en place de filtres adaptés. Ces filtres ont été fabriqués par la société anglaise *Northumbria Optical Coatings*. Leurs courbes de transmission sont représentées sur la figure 5.20. "Notre" bande K sera donc définie par la largeur à mi-hauteur du filtre correspondant, soit [2,08 µm ; 2,40 µm] ou 2.24 µm ±0.16, d'où une largeur de 14%. "Notre" bande L sera, quant à elle, définie comme [3,13 µm ; 3,68 µm] ou 3.4 µm ±0.28, d'où une largeur de 16%).

5.3.6 Métrologie laser

Afin de garantir un contraste élevé durant toutes les mesures, la différence de marche doit être contrôlée à l'échelle du nanomètre. Une voie métrologique devait donc être ajoutée à la voie infrarouge. Cette voie métrologique fait appel à un interféromètre de marque *Agilent* de type Michelson, capable de mesurer des variations de chemin optique avec une résolution théorique de 0,3 nm dans son mode "quatre passages". Il existe en effet plusieurs configurations possibles pour cet interféromètre, qui peut travailler

[95] En théorie, la fluorine transmet d'environ 0,15 µm à 9 µm, mais, en pratique, des processus d'absorption multiphonons se produisent à 7,7 µm, 8,5 µm et 9 µm.

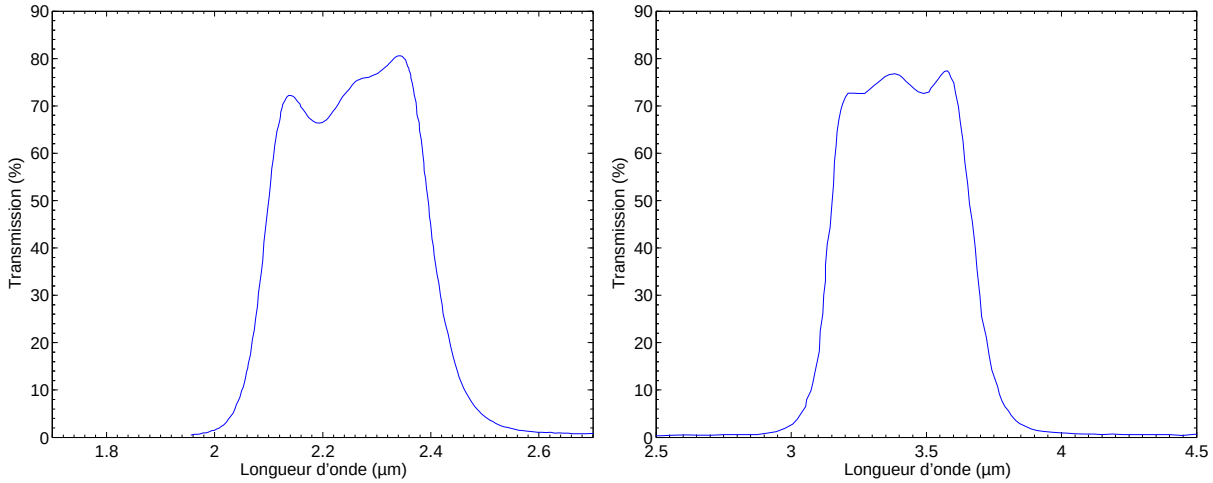
TAB. 5.3: Bandes de longueurs d'onde astronomiques.
Historiquement, elles correspondent au système de magnitudes photométriques et sont adaptées aux fenêtres de transmission atmosphériques (Sources : Léna (1995) et Cox (2000)).

Dénomination	$\lambda_{\text{centrale}}$ (µm)	$\Delta\lambda$ (µm)	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{centrale}}}$	Nature
U	0,360	0,068	19%	Ultraviolet
B	0,440	0,098	22%	Bleu
V	0,550	0,089	16%	Visible
R	0,700	0,220	31%	Rouge
I	0,900	0,240	27%	
J	1,215	0,260	21%	
H	1,654	0,290	18%	
K_s	2,157	0,320	15%	
K	**2,179**	**0,410**	**19%**	
L	**3,547**	**0,570**	**16%**	
L'	3,761	0,650	17%	Infrarouge
M'	4,780	0,220	5%	
M	4,769	0,450	10%	
8,7	8,756	1,200	14%	
N	10,472	5,190	50%	
11,7	11,653	1,200	10%	
Q	20,130	7,800	39%	

avec un seul bras (dans ce cas, l'autre est remplacé par un rétroréflecteur solidaire de la séparatrice principale), ou avec deux bras en configuration Mach-Zehnder (donc simple passage) ou Michelson (quadruple passage). Nous utiliserons cette dernière configuration, car c'est dans celle-ci que la meilleure résolution est atteinte.

Description du système

Ce système complet est composé essentiellement d'un laser He-Ne, d'un récepteur et d'une séparatrice (que nous appellerons "séparatrice *Agilent*" par la suite). Le principe de la mesure implique quatre allers-retours du faisceau dans chaque bras de l'interféromètre. Pour des raisons de transmission, les deux voies, métrologique et infrarouge, ont dû être dissociées : elles sont donc physiquement superposées, et la voie métrologique ne traverse pas le déphaseur achromatique, notamment car il induit un décalage variable des faisceaux. Les deux voies se propagent, malgré tout, au plus près l'une de l'autre et effectuent un parcours identique (à l'exception de la séparatrice S1, dont le support est, malgré tout, commun avec celui de la "séparatrice *Agilent*", et du déphaseur) jusqu'à la dernière recombinatrice, où la voie métrologique est réfléchie sur deux miroirs refermant le Michelson, tandis que la voie infrarouge est recombinée.



(a) Filtre en bande K.

(b) Filtre en bande L.

FIG. 5.20: Courbes de transmission des filtres spectraux (*Northumbria Optical Coatings*).

Le principe de mesure est relativement complexe, puisque la "séparatrice *Agilent*" fait subir à chaque faisceau des décalages horizontaux et verticaux grâce à des coins de cube intégrés à sa structure, tout en agissant sur leurs polarisations. Le trajet optique, qui fait donc appel à quatre allers-retours, ne fait intervenir pas moins de 16 réflexions et 19 transmissions sur chaque bras. Par conséquent, il a fallu surdimensionner la puissance du laser source, afin de garantir un rapport signal à bruit correct sur la mesure[96]. Il s'agit d'un laser He-Ne accordé thermiquement et stabilisé en fréquence. Il émet par effet Zeeman, sous l'action d'un aimant permanent placé autour de la cavité, deux longueurs d'ondes polarisées circulairement, orthogonales, dans le rouge, à 2,4 et 3 MHz de la fréquence centrale correspondant à la longueur d'onde de 632,991354 nm. Le diamètre du faisceau de sortie peut être réglé entre 3 et 6 mm.

L'implantation de cette voie métrologique a également eu une conséquence majeure sur les optiques. Les miroirs de la voie infrarouge ayant reçu un traitement en or, leur réflectivité n'était pas optimale pour le visible. Il a donc fallu diviser les traitements de chaque miroir en une partie inférieure en or non protégé[97] pour l'infrarouge et une partie supérieure en argent protégé pour la métrologie.

Le principe de fonctionnement de la voie métrologique est basé sur le décalage Döppler introduit sur les deux bras de l'interféromètre par une différence de marche. À chaque mesure, le faisceau laser est transmis et réfléchi à travers les optiques du montage, où les composantes polarisées horizontalement et verticalement sont séparées. Chacune des composantes se propage, grâce à un décalage vertical introduit par des coins de cubes, quatre fois selon l'une des voies de l'interféromètre, puis revient jusqu'à un récepteur, contenant un photodétecteur et un pré-amplificateur. Le photodétecteur est muni d'un analyseur, de sorte que les interférences entre les deux faisceaux ne peuvent se former auparavant. Du fait du mouvement relatif des éléments optiques, celui-ci détecte la différence de fréquence entre les deux composantes et génère un signal de mesure. La fréquence de ce signal est comparée avec la fréquence de référence provenant du laser au moyen d'une électronique externe.

[96] Afin de limiter la transmission de vibrations au banc de mesure, du fait du fort diamètre des câbles d'alimentation de ce laser, celui-ci a dû être placé sous le banc optique. Le faisceau est donc transmis à ce dernier au moyen d'un système périscopique faisant appel à trois miroirs.

[97] Le traitement en or n'a reçu aucune protection afin de garantir son innocuité en terme de phase sur les faisceaux. L'inconvénient qui en découle est que ces traitements sont, de ce fait, extrêmement sensibles aux rayures et aux poussières, et qu'ils ne peuvent pas être nettoyés.

Si la distance entre les optiques externes était fixe, les fréquences de mesure et de référence seraient égales. Comme la vitesse relative de déplacement des optiques ne cesse de varier du fait des vibrations de la table, des turbulences subies par les faisceaux, etc., la fréquence de mesure change par décalage Döppler. Cette variation entre les fréquences de mesure et de référence est utilisée par le système électronique pour en déduire la distance relative parcourue.

Données métrologiques et asservissement

Le signal électrique issu du récepteur est en effet traité par une carte d'acquisition implantée sur un PC. Une interface sous DOS permet de visualiser instantanément les variations de différence de marche et inclut un système d'asservissement avec une sortie analogique[98]. Cette carte fournit également les données métrologiques, sous forme codée sur 32 bits, à une fréquence de 10 MHz. Chacun de ces 2^{32} pas correspond à 0,3 nm. Il est donc possible, grâce à ce système, de mesurer des différences de marche allant jusqu'à environ 1,3 m, avec une résolution de 0,3 nm. En pratique, nous n'utiliserons qu'une très faible partie de ces capacités, de l'ordre de 30 mm. Ce sont ces données que nous exploiterons pour réaliser un asservissement de la différence de marche. Nous reviendrons plus en détail sur le principe et la mise au point de cet asservissement au paragraphe 5.5.3.

5.3.7 Système anti-vibratoire

Principe

Afin que l'asservissement en différence de marche n'agisse qu'en bout de chaîne, sur des niveaux les plus faibles possibles, l'accent a été mis sur une isolation maximale du banc optique du point de vue des vibrations. Pour cela, ce ne sont pas moins de **quatre étages de découplage** qui ont été mis en place, soit trois de plus que dans la précédente expérience monochromatique.

Le premier étage est constitué par un "**marbre**"[99] de 4300 x 900 x 250 mm^3, soit près de 2,6 tonnes, disposé sur six pieds pneumatiques, assurant un premier filtrage passif. L'expérience précédente ayant montré que les modes propres de ce "marbre" pouvaient être très néfastes sur les mesures de réjection, il a été décidé d'ajouter un second banc sur ce "marbre". Il constituera le troisième étage d'isolation.

Le deuxième étage est, en effet, un **système d'isolation active** de marque *Newport*, inséré entre le "marbre" et le second banc optique. Il est constitué de trois pieds, gérés électroniquement par un contrôleur externe. La structure de ces pieds comporte différents éléments, dont un élastomère destiné à supporter la charge utile, dans lequel la structure mobile se déplace de façon pendulaire. Les déplacements latéraux sont amortis par système de pendule mobile dans un bain visqueux, interne aux pieds. Enfin, ces pieds comportent un élément actif sous la forme d'un piézoélectrique contrôlé électroniquement par un asservissement externe. Sa course maximale est de 10 µm. Le signal d'erreur dû aux mouvements verticaux est fourni par un géophone interne au pied.

Le troisième et le quatrième étage sont constitués du second banc optique et des trois *breadboards* destinés à faciliter le re-agencement des éléments du banc. Ils sont également de marque *Newport*. Ce banc et ces *breadboards* comportent une structure en nid d'abeille, avec un amortissement interne, pour un filtrage passif. L'ensemble de ces éléments est représenté sur la figure 5.21.

[98] Ce système "clé en mains" aurait pu être utilisé pour notre application, s'il n'avait présenté l'inconvénient rédhibitoire de ne pas utiliser la pleine résolution de la mesure.

[99] En réalité, ce "marbre" est en granit rose de Ploumanac'h !

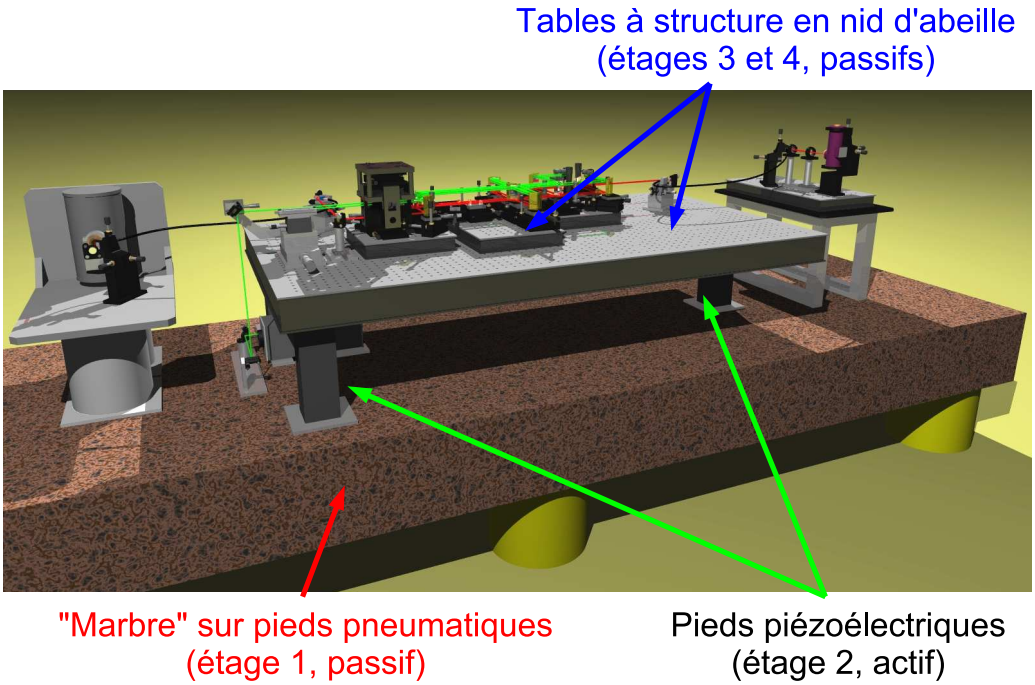


FIG. 5.21: Systèmes anti-vibratoires installés sur le banc SYNAPSE (vue d'artiste) :
∗ Le premier étage est constitué par un "marbre" de 2,6 tonnes, disposé sur six pieds pneumatiques, assurant un premier filtrage passif ;
∗ Le deuxième étage repose sur trois pieds, dont la structure comporte, outre un élément en élastomère, un pendule mobile dans un bain visqueux et des piézoélectriques contrôlés électroniquement par un asservissement externe ;
∗ Les troisième et quatrième étages sont un second banc à structure en nid d'abeille, supportant les *breadboards* de même nature.

Validation du système

D'après les données constructeur, l'élastomère, qui a une fréquence propre d'environ 20 Hz selon la charge supportée, est efficace pour les fréquences au-dessus de 28 Hz, avec une atténuation de - 40 dB par décade. En deçà, sur l'axe vertical, le système actif vient prendre le relais, avec environ - 15 dB à 1 Hz, - 30 dB à 10Hz et - 20 dB de 15 à 35 Hz. Pour l'axe horizontal, le pendule a une fréquence propre de 1 Hz et commence à filtrer à 1,4 Hz avec une atténuation de - 35 dB par décade. Au total, chacun des éléments de ces pieds couvre un domaine de fréquence spécifique et c'est leur addition qui rend ce système efficace.

Afin de vérifier ces performances, nous avons effectué des mesures de vibrations, à l'aide de l'interféromètre de métrologie installé sur le banc. Il faut bien noter que l'interféromètre mesure principalement des déplacements longitudinaux. Seules les composantes horizontales des autres déplacements entrent en jeu. La figure 5.22 représente la comparaison de deux spectres des données métrologiques enregistrés avec et sans les pieds piézoélectriques actifs. L'asservissement de la différence de marche est éteint durant les mesures et l'amplitude des vibrations est de l'ordre de 15 nm pic-pic. L'atténuation est essentiellement visible entre 2 et 50 Hz, avec un gain d'un facteur 100 sur certaines fréquences. Il ne s'agit ici que d'illustrer qualitativement l'efficacité de ce dispositif. Compte tenu des conditions de mesure, il n'est pas envisageable de traduire ces mesures en termes plus classiques de microaccélérations.

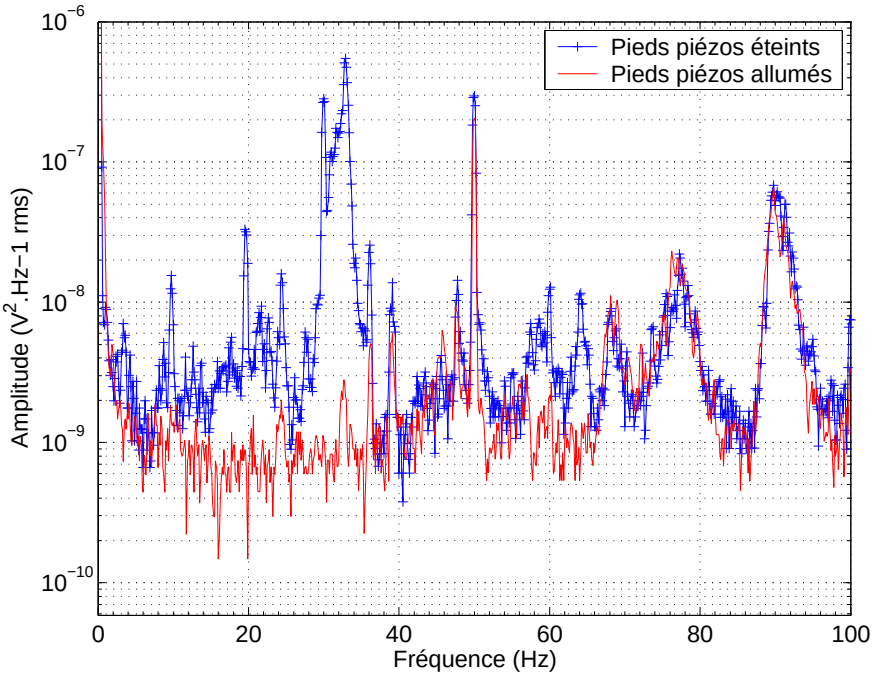


FIG. 5.22: Spectres de vibrations avec et sans le filtrage actif, fourni par les pieds piézoélectriques. L'atténuation est essentiellement visible entre 2 et 50 Hz, avec un gain d'un facteur 100 sur certaines fréquences.

5.3.8 Détection monopixel

Les mesures de réjection sur le banc SYNAPSE peuvent être effectuées au moyen de deux systèmes de détection différents. Dans un premier temps, du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de sa bonne détectivité, un détecteur monopixel du commerce a été utilisé pour l'ensemble des mesures, dont nous parlerons dans la partie 6. Par la suite, une caméra matricielle sera employée afin d'améliorer ces mesures.

Ce détecteur monopixel fabriqué par la société américaine *Electro-Optical Systems* (EOS) possède une surface active en InSb de 0,25 mm de diamètre. Il est muni d'un filtre froid transmettant entre 1,8 µm et 3,2 µm selon la courbe 5.23. Par conséquent, il n'a pu être utilisé qu'en bande K. Son cryostat d'environ 20 cm de hauteur est rempli d'azote liquide et possède une autonomie d'environ 12 heures. Facile à mettre en œuvre, il est opérationnel environ 15 minutes après remplissage. Malgré sa simplicité, ce détecteur possède une Puissance Équivalente de Bruit (PEB) (ou *Noise Equivalent Power* (NEP)) de 6.10^{-14} W.Hz$^{-1/2}$, soit une détectivité[100] spécifique $D^* = 4.10^{11}$ cm.Hz$^{1/2}$.W^{-1} (ou Jones).

Ce détecteur est positionné sur un support mécanique mobile sur trois axes. La chaîne de détection "monopixel" en aval de l'interféromètre est complétée par le filtre spectral de sélection de la bande de longueur d'onde de la mesure et par une lentille de focalisation. La focale de cette lentille est de 100 mm, ce qui donne une image d'environ 150 µm au foyer. La figure 5.24 représente la chaîne de détection "monopixel" en aval de l'interféromètre.

[100] On rappelle que la détectivité spécifique D^* est reliée au NEP par la relation $D^* = \frac{\sqrt{A}}{\text{NEP}}$, où A est la surface de détection.

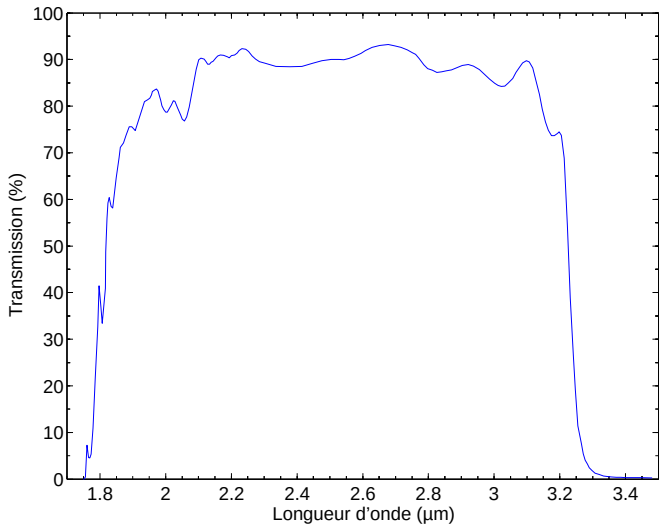


FIG. 5.23: Courbe de transmission du filtre froid du détecteur monopixel (*Electro-Optical Systems*).

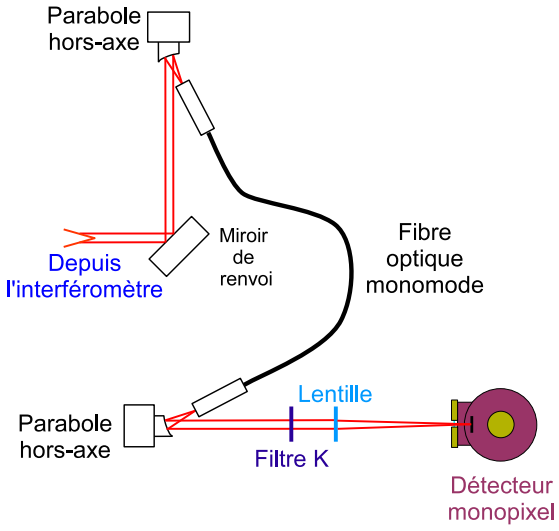
La moyenne du signal d'obscurité de ce détecteur est de l'ordre de 3 µV, avec un écart-type de 2.10^{-6} pour un signal en frange brillante de 21 mV. Par conséquent, comme nous le verrons lors du bilan photométrique dans la partie 5.4.2, le taux de réjection pouvant être atteint en utilisant ce détecteur sera limité par son courant d'obscurité, à une valeur d'environ 10 000.

Ce détecteur est doté d'un pré-amplificateur d'un gain de 10, qui fournit un signal sous la forme d'une tension continue en 0-10 V. Afin de réduire l'influence de l'environnement thermique, le signal scientifique est modulé à l'aide d'un ... modulateur (*chopper*). Ce signal est enfin démodulé au moyen d'une détection synchrone, qui fournit un signal utilisable en 0-10 V. Dernière remarque : ce détecteur, qui sera utilisé pour la plupart des mesures, possède un champ de vue de 10°.

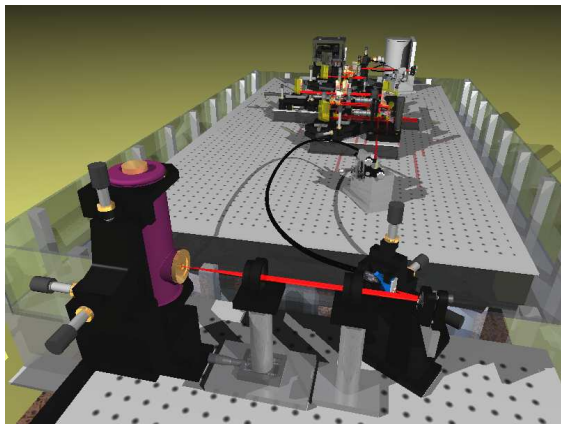
5.3.9 Détection matricielle : la caméra CIRCUS 128

Bien que nous ne cherchions, dans cette expérience, qu'à mesurer les rapports de flux entre une frange brillante et une frange noire, ce qui ne requiert, en principe, qu'un seul pixel de détection, il peut être très intéressant de disposer d'un détecteur matriciel de plus grande taille. Néanmoins, un tel dispositif est généralement beaucoup plus complexe (et cela se vérifie dans notre cas) qu'un détecteur monopixel. Pourtant, moyennant une combinaison optique adaptée, la possibilité ne serait-ce que d'imager les faisceaux, afin de vérifier le réglage en "teinte plate", justifie à elle-seule cet investissement. Surtout si ce détecteur est plus performant en termes de détectivité ...

Le détecteur matriciel utilisé pour les mesures plus pointues avec le banc SYNAPSE est la caméra CIRCUS, développée il y a quelques années à l'Observatoire de Paris-Meudon (Normand, 1994). **CIRCUS** signifie Caméra InfraRouge Courte longueur d'onde pour Utilisation au Sol. Cette caméra ne possédait à l'origine qu'une matrice 32 x 32 pixels, prototype de celle qui serait utilisée plus tard dans la conception de la caméra ISOCAM. Elle a été utilisée de 1987 à 1989 sur le *Canada-France-Hawaï Telescope* (CFHT). Depuis 1990, elle est dotée d'une matrice 128 x 128 pixels et a été progressivement remise à niveau pour acquérir une nouvelle architecture électronique, optique, informatique et mécanique. Accessoirement, elle a également été renommée CIRCUS 128, mais, par souci de simplicité, nous continuerons de l'appeler CIRCUS par la suite. Nous allons maintenant détailler succinctement les principales caractéristiques de ce qu'il faut bien appeler le "système CIRCUS".



(a) Schéma de principe.



(b) Vue d'artiste (de g. à dr., le détecteur monopixel sur son support, la lentille de focalisation, le filtre spectral et la parabole hors-axe de focalisation, sur son support opto-mécanique, en arrière-plan, l'interféromètre.).

FIG. 5.24: Chaîne de détection monopixel du banc SYNAPSE.

Le cryostat de CIRCUS et ses servitudes

Le cryostat de la caméra CIRCUS comporte deux cuves (interne et externe), séparées entre elles et vis-à-vis de l'environnement extérieur par un vide d'isolement. La cible à proprement parler se situe dans le tiers inférieur de ce cryostat, au niveau de sa partie la plus froide. Dans la partie la plus basse se situe l'électronique, qui n'est pas refroidie.

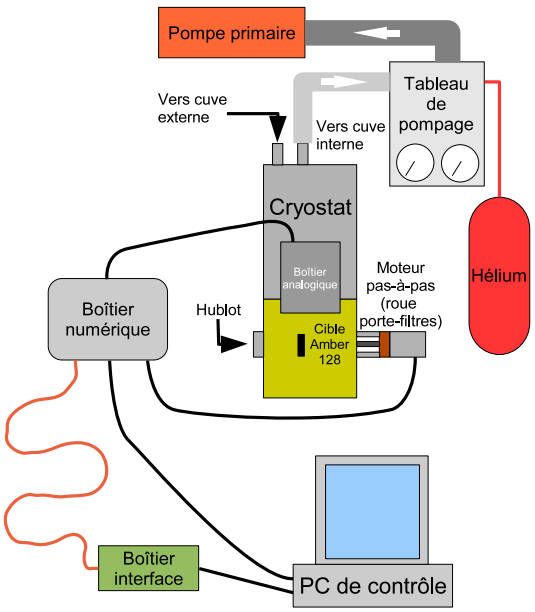
À l'origine, ce cryostat devait fonctionner avec de l'azote liquide (LN_2) dans la cuve externe et de l'hélium liquide (LHe) dans la cuve interne, ce qui lui permettait de fonctionner de 77 K jusqu'à environ 4 K[101]. Depuis sa remise à niveau, il existe un optimum en terme de température de fonctionnement qui permet d'éviter le remplissage d'hélium, plus contraignant que l'azote liquide. En effet, comme nous le verrons lors de l'étude de la cible, sa température de prédilection se situe désormais vers 50 K. Sans avoir recours à l'hélium, il faut donc, malgré tout, abaisser la température de l'azote de la cuve interne, ce qui est possible en le solidifiant par pompage[102].

Le cryostat est enfin équipé d'un moteur pas-à-pas, qui lui est lié mécaniquement et permet d'actionner une roue porte-filtres, ainsi que de sondes de températures. La roue porte-filtres comporte 14 positions, dont seulement 6 sont exploitables[103]. Les filtres disponibles sont donc les suivants : M, L', K, H, J, ainsi qu'une position obturée, qui peut servir pour effectuer une image d'obscurité. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux filtres K et L'.

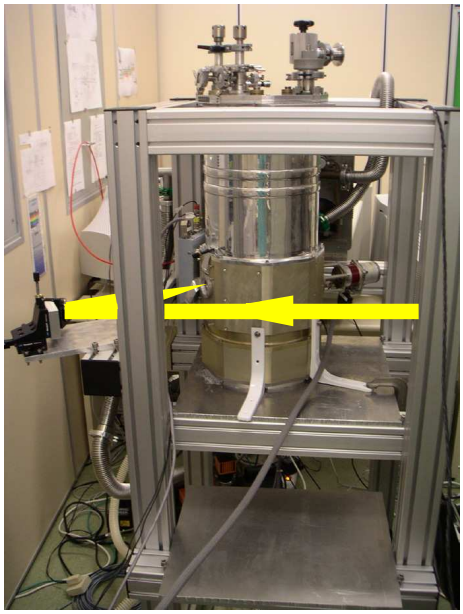
[101] CIRCUS a déjà fonctionné, durant sa "première vie", à l'hélium, ce qui garantit sa robustesse ; il faut également noter qu'il existe un "clone" de CIRCUS, prénommé CAMIRAS, qui fonctionne à l'hélium pour être utilisée dans l'infrarouge thermique. C'est cette dernière caméra qui devrait être employée pour le banc NULLTIMATE, successeur de SYNAPSE.

[102] Cette particularité offrait la possibilité de fixer la caméra CIRCUS directement au foyer d'un télescope, puisque, l'azote étant solidifié, elle devenait insensible aux variations d'inclinaison de celui-ci.

[103] Pour les autres emplacements, il n'est pas certain que des filtres soient actuellement en place, et ces informations n'ont malheureusement pas été documentées.



(a) Chaîne de mesure complète, avec l'ensemble du système de pompage et du contrôle électronique.



(b) Photographie de la caméra sur son support (à g., la parabole hors-axe de focalisation, à dr., le moteur pas-à-pas commandant la roue porte-filtres).

FIG. 5.25: La caméra CIRCUS 128.

Les sondes de température sont intégrées en différents points du cryostat[104] et ont nécessité, durant la remise à niveau, la mise en place d'un boîtier de commande, réalisé par D. Charalampous et F. Reix durant leur stage de licence (Charalampous & Reix, 2004). Les quatre tensions issues de ce boîtier et correspondant aux quatre sondes de température sont mesurées au moyen d'une carte d'acquisition CAN *National Instruments* AT-MIO 16XE-10 intégrée dans un ordinateur de type PC. Un programme LabVIEW permet de visualiser les températures associées et de les enregistrer, ce qui est utile notamment durant les phases de descente et de remontée en température.

Ce cryostat a nécessité la réalisation d'un support adapté, notamment pour maintenir à proximité un tableau de pompage, permettant de gérer la mise en place du vide dans la cuve interne, ainsi que sa remise à la pression ambiante par injection d'hélium. Ce pompage se fait grâce à une pompe primaire (la solidification de l'azote intervient à une pression d'environ 126 mbar, qui correspond à une température d'environ 63 K, mais il est possible de continuer à pomper jusqu'à l'obtention de la température souhaitée) ; afin d'éviter toute transmission de vibrations jusqu'au banc de mesure, le support du cryostat est totalement découplé du banc SYNAPSE et la pompe a été placée au sous-sol de la station d'étalonnage. L'ensemble du cryostat et de son support sont représentés sur la figure 5.25.

La cible AMBER 128

Cette cible a été implantée lors de la remise à niveau de la caméra, en remplacement d'une cible 32 x 32 pixels. Constituée de 128 x 128 photodiodes en InSb, elle est sensible de 1 à 5,5 µm. Sa lecture est effectuée de façon séquentielle, donc comme celle d'un capteur CCD, avec un circuit hybridé

[104] Au nombre de quatre, elles sont situées dans la garde externe, dans la garde interne et dans deux zones de fonctionnement assez peu définies, mais proches de la cuve interne, au vu des indications qu'elles fournissent.

TAB. 5.4: Caractéristiques de la cible AMBER 128.

Taille du pixel	- surface réelle	50 x 50 µm
	- surface utile	40 x 40 µm
Taille de la cible		6,4 x 6,4 mm
Capacité maximale des puits		4.10^7 phe$^-$
Bruit de lecture		900 e$^-$ *rms* / pixel
Détectivité spécifique	- à 80 K	4.10^{11} cm.Hz$^{1/2}$.W^{-1}
(données constructeur)	- à 60 K	5.10^{12} cm.Hz$^{1/2}$.W^{-1}

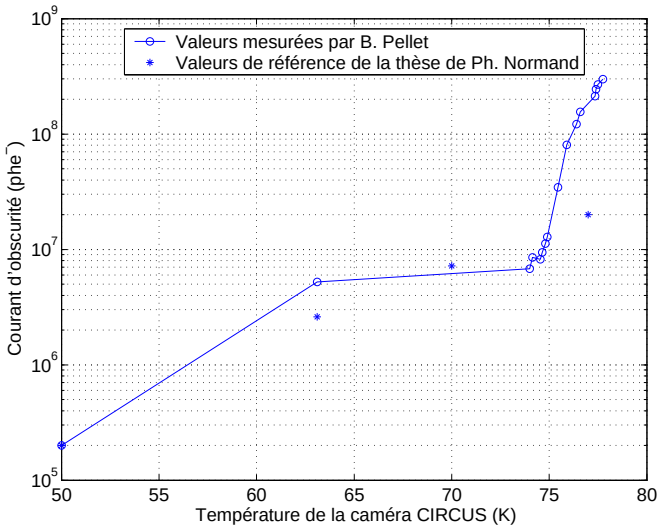


FIG. 5.26: Variation du courant d'obscurité en fonction de la température de la caméra (Pellet, 2003).

"photodiodes InSb / circuit de lecture silicium". La lecture se fait par stockage des photoélectrons dans une partie de la cible au bout d'un certain temps d'intégration, avant émission, deux lignes par deux lignes, sur des sorties analogiques, après passage par des registres et des amplificateurs. Ceux-ci sont situés sur l'un des bords de la matrice, ce qui explique le fort gradient de courant d'obscurité (directement lié à la température, puisque découlant de l'agitation thermique des électrons) observé à 77 K d'un bord à l'autre de la cible. Les caractéristiques de la cible sont rassemblées dans le tableau 5.4. Le courant d'obscurité de la cible AMBER 128 varie énormément avec la température de celle-ci. La courbe de la figure 5.26 illustre cette variation (Pellet, 2003). En tenant compte des variations du rendement quantique de la cible avec la température, il est possible de déterminer un optimum de température de fonctionnement. La figure 5.27 représente le rapport du rendement quantique sur la racine du courant d'obscurité, et correspond ainsi au rapport signal à bruit mesurable lorsque le courant d'obscurité est dominant.

Électronique de commande de CIRCUS

Nous ne détaillerons pas les différents éléments constituant la chaîne d'acquisition de la caméra CIRCUS, nous contentant d'énumérer ses composants et leurs différentes fonctions. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur au rapport de stage de Bruno Pellet (Pellet, 2003).

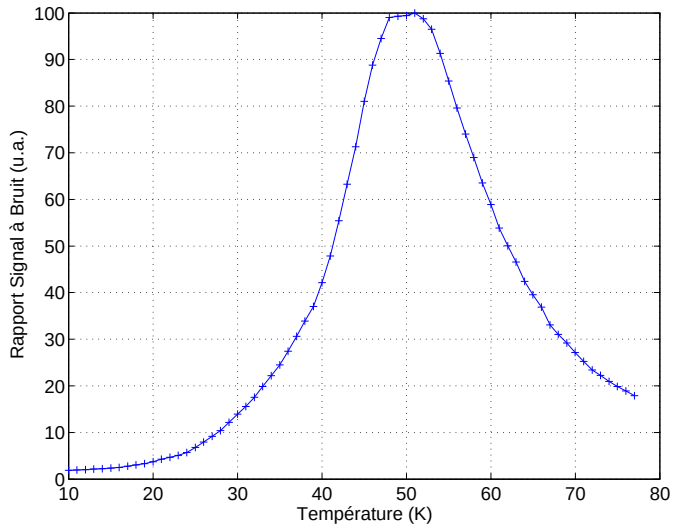


FIG. 5.27: Variation du rendement de la caméra CIRCUS, en fonction de sa température, pour un courant d'obscurité dominant (Pellet, 2003).

Ce système est constitué des éléments suivants :

- ➢ un boîtier analogique recueillant les signaux issus de la cible AMBER et lié mécaniquement au cryostat, puisqu'au plus proche de la cible ;
- ➢ un boîtier numérique gérant :
  - ∗ les horloges de la cible ;
  - ∗ les commandes de gain et de temps d'intégration, transmises par port série depuis un PC de contrôle ;
  - ∗ la commande de position du moteur pas-à-pas, transmise, elle-aussi, par port série depuis le PC de contrôle ;
  - ∗ l'envoi des données de la matrice sur une fibre optique.
- ➢ un boîtier interface, chargé de décoder les données arrivant par la fibre optique et de les encoder sur 16 bits, avant envoi vers le PC d'acquisition, le tout accompagné d'une horloge de synchronisation ;
- ➢ un PC d'acquisition et de visualisation, équipé d'une carte d'acquisition *National Instruments* PCI-DIO 32HS, dotée de 32 entrées numériques.

Adaptation de CIRCUS

Avant sa remise à niveau, la caméra CIRCUS était utilisée pour des applications d'imagerie classique en astronomie. Outre le fait que peu d'informations ont subsisté de ces applications durant les quelques années où CIRCUS est restée inutilisée, plusieurs de ses caractéristiques techniques ont été modifiées, mais n'ont, à l'époque, pas été documentées. Parmi celles-ci, la gestion des temps d'intégration a dû être reprise de façon conséquente, afin d'adapter CIRCUS à notre application.

En effet, lors des premiers tests, les temps d'intégration étaient réglables sur 64 valeurs comprises entre 576 µs et 36 ms. Connaissant la grande capacité des puits, la raison de la limitation des temps d'intégration à ces très faibles valeurs est restée inconnue (et incomprise, sauf si CIRCUS n'était utilisée qu'à 77 K, ce qui limite grandement son intérêt !). Toujours est-il qu'ils étaient largement insuffisants pour des applications de détection à très haute dynamique, comme l'interférométrie en frange noire ! La courbe de la figure 5.28 montre, en fonction de la température de la caméra, la variation du temps d'in-

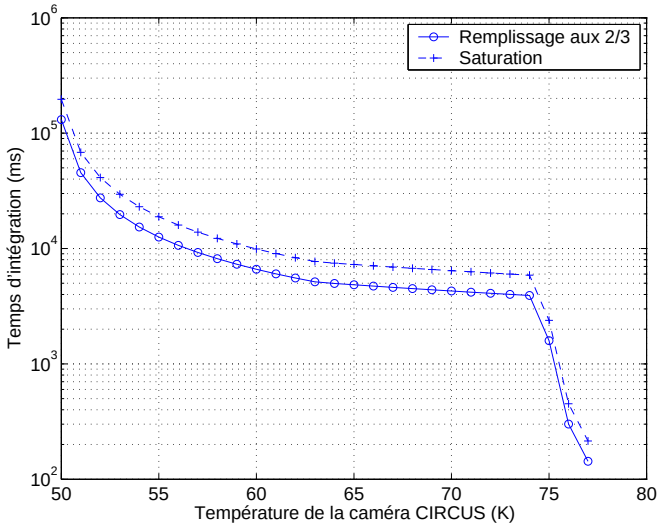


FIG. 5.28: Variation du temps d'intégration maximal pouvant être utilisé pour remplir aux deux tiers les puits, en l'absence de tout signal scientifique, en fonction de la température de la caméra.

tégration maximal pouvant être utilisé pour remplir aux deux tiers les puits, en l'absence de tout signal scientifique. Elle a été calculée à partir de la courbe expérimentale de variation du courant d'obscurité avec la température de la caméra (Figure 5.26).

On constate que des temps d'intégration de plusieurs secondes sont accessibles sans saturer la cible, à condition de descendre sous les 77 K. Grâce à une modification du facteur de multiplication de la période élémentaire de 576 µs (avec l'aide de Sylvain Pau, de l'observatoire de Paris-Meudon), les temps d'intégration peuvent désormais être réglés de 1,2 ms à 9,4 s. Cela permet à la fois des temps d'intégration très courts pour le signal en frange brillante et pour l'alignement des faisceaux (puisque l'on dispose quasiment d'un mode vidéo) et des temps d'intégration plus longs, avec un incrément d'un facteur deux, pour le signal en teinte noire.

Lors de l'acquisition d'une image à l'aide d'un capteur de type *Charged Coupled Device* (CCD), il est d'usage d'effectuer un pré-traitement, afin de limiter l'influence du détecteur et de l'environnement sur l'image finale. Pour ce faire, on a l'habitude de soustraire de l'image une image d'obscurité (ou *dark*), afin d'éliminer l'influence du bruit thermique propre au détecteur. Ensuite, l'image résultante est normalisée grâce à une seconde image, dite "de champ plat", réalisée avec un éclairement uniforme de la cible[105].

Ce pré-traitement est résumé dans la formule (5.5), où l'on ajoute un gain afin de rétablir le niveau moyen de l'image résultante.

$$\text{image résultante} = \text{gain} \times \frac{\text{image brute} - \text{image d'obscurité}}{\text{image de champ plat} - \text{image d'obscurité}} \tag{5.5}$$

Dans notre application, seule la soustraction d'une image d'obscurité sera utilisée, devant la difficulté d'obtenir un fond uniforme dans les longueurs d'onde infrarouges. À ce sujet, cette image d'obscurité ne sera pas réalisée, en ordre de marche, à partir de la position obturée de la roue porte-filtre, car elle représente une surface froide et nécessite une rotation de la roue porte-filtre qui prend plusieurs secondes. L'objectif étant de supprimer l'influence thermique de l'environnement de la caméra, il a été choisi d'im-

[105] Jadis, cette image (aussi appelée *flat field*) était obtenue en pointant le télescope collecteur vers la coupole de l'observatoire. Étant donnée sa proximité, elle représentait une surface uniforme très correcte.

planter plutôt un obturateur externe, placé au plus près du corps noir. De la sorte, en position obturée, l'image acquise représente l'environnement vu par la caméra jusqu'à l'obturateur, à 300 K, ce qui comprend donc l'ensemble des optiques de l'interféromètre. L'image brute est ensuite acquise en position ouverte et l'on vient soustraire l'image précédente. L'utilisation d'un obturateur permet d'atteindre des périodes allant jusqu'au hertz, avec pré-traitement instantané.

L'ensemble de ces modifications a débouché sur la réalisation d'une interface de contrôle, programmée sous LabVIEW. Celle-ci est destinée à la gestion :

- ➢ de la visualisation des images (continue ou ponctuelle) et de leurs statistiques (moyenne, écart-type, histogramme) ;
- ➢ du choix du temps d'intégration, du gain vidéo et du filtre utilisé. Ces opérations sont effectuées par envoi de commandes hexadécimales par port série ;
- ➢ de l'enregistrement des images brutes et d'images d'obscurité ;
- ➢ de la soustraction automatique d'une image d'obscurité, afin d'améliorer le rapport signal à bruit.

L'enregistrement des images se fait en format FITS, un format courant en astronomie, qui permet d'intégrer dans un entête, lié à chaque image, ses principales caractéristiques (temps d'intégration, gain, filtre, objet, conditions, etc.). Il est possible d'enregistrer les images ponctuellement "à la volée", ou bien sous la forme d'une série prédéfinie, avec une période donnée.

5.3.10 Enceinte thermalisée

Nous avons vu que la température ne jouait qu'assez faiblement sur les performances théoriques du déphaseur achromatique à prismes (cf. paragraphe 4.3.6). En revanche, il en est tout autrement pour la stabilité thermique de l'environnement du banc. En effet, elle détermine directement la nature des turbulences susceptibles de venir perturber la propagation des faisceaux.

D'un point de vue pratique, les turbulences à grande échelle sont supprimées, sur le banc SYNAPSE, par la mise en place d'une enceinte de protection. Il s'agit d'une enceinte en plexiglas de 10 mm d'épaisseur. Elle limite la couche d'air au-dessus du banc à environ 30 cm. Cette enceinte a été utilisée précédemment sur le banc développé durant la thèse de Marc Ollivier, où elle a montré son efficacité. Malgré tout, cette enceinte étant, par définition, limitée verticalement, elle ne permet pas d'atteindre une stabilité complète de l'atmosphère environnant le banc. Toutes les sources de chaleur éventuelles ont été placées en dehors de l'enceinte (sauf le laser de métrologie, qui est placé sous le banc optique pour les raisons évoquées auparavant, mais celui-ci est lui-même stabilisé thermiquement et il n'entraîne pas de dégagement de chaleur sensible). Il est toutefois impossible d'empêcher la mise en place de cellules de convection au-dessus du banc, du fait de la formation d'un gradient thermique vertical, orienté vers le bas (instabilités de Rayleigh-Bénard).

La solution utilisée sur le banc monochromatique a consisté à contrer ce gradient thermique orienté vers le bas en imposant un gradient inverse. Pour cela, un système de chauffage, basé sur des résistances planes, a été placé sur le dessus du couvercle de l'enceinte. Bien que la majeure partie de la chaleur soit dissipée dans l'air par convection, l'autre partie se répartit par conduction de façon relativement homogène. De cette façon, on obtient une stratification thermique de l'air contenu dans l'enceinte et donc une réduction des phénomènes de turbulence.

5.4 Rendement et bilan photométrique de l'interféromètre

5.4.1 Transmission théorique de l'interféromètre

L'objectif de cette partie est de déterminer de façon aussi complète que possible la transmission globale du banc polychromatique. Ce paramètre intervient en effet de façon non négligeable dans les calculs de rapports signaux à bruit que l'on peut obtenir avec les différents détecteurs.

Réflexions de Fresnel

Dans le calcul de rendement qui suit vont intervenir différents termes liés aux réflexions de Fresnel se produisant, pour une incidence donnée, aux interfaces entre deux matériaux. Bien que les coefficients de réflexion et de transmission des séparatrice et recombinatrice aient été déterminés au paragraphe 5.3.5, nous aurons également besoin des caractéristiques des traitements en or, des éléments optiques en CaF_2 et enfin de ceux en saphir (Al_2O_3). Nous allons donc déterminer, dans un premier temps, les coefficients de réflexion et de transmission pour différentes interfaces, sous les incidences utilisées dans le banc SYNAPSE.

Pour cela, nous faisons appel aux équations de Fresnel, qui établissent les coefficients de réflexion r_s (resp. r_p) et de transmission t_s (resp. t_p) de chacune des polarisations s et p d'un faisceau, à l'interface entre un matériau d'indice n_1 et un matériau d'indice n_2.

$$\begin{cases} r_s = \dfrac{n_1.\cos(i) - n_2.\cos(e)}{n_1.\cos(i) + n_2.\cos(e)} \\ t_s = 1 + r_s \\ r_p = \dfrac{n_2.\cos(i) - n_1.\cos(e)}{n_2.\cos(i) + n_1.\cos(e)} \\ t_p = \dfrac{n_1}{n_2}\left(1 + r_p\right) \end{cases} \tag{5.6}$$

Le paramètre i est l'angle d'incidence du faisceau sur cette interface, tandis que l'angle e est l'angle d'émergence du faisceau réfléchi ou transmis. Son cosinus est obtenu grâce à l'équation de Snell-Descartes $n_1.\sin(i) = n_2.\sin(e)$ et vaut

$$\cos(e) = \sqrt{1 - \sin^2(e)} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2.\sin^2(i)} \tag{5.7}$$

Comme nous travaillons avec une lumière naturelle, non polarisée, nous ne distinguerons pas, dans la suite, chacune des deux polarisations. Par conséquent, les coefficients de réflexions et de transmission que nous utiliserons sont les moyennes des valeurs de r_s, r_p, t_s et t_p, calculées, sur l'ensemble du domaine de longueur d'onde considéré, par les relations

$$\begin{cases} R = \dfrac{\overline{|r_s|^2 + \left|r_p\right|^2}}{2} \\ T = 1 - R \end{cases} \tag{5.8}$$

Le tableau 5.5 résume les valeurs des réflexions de Fresnel pour les principaux matériaux intervenant dans les éléments optiques du banc SYNAPSE, en interface avec l'air, dont l'indice a été pris égal à 1.

L'indice de réfraction du CaF_2 a été calculé à partir de la représentation de Sellmeier donnée dans le tableau 4.2, p. 77. Toujours selon l'expression de l'équation (4.26), p. 77, celle utilisée pour le saphir (Al_2O_3) est donnée par le tableau 5.6. L'indice de l'Or a, quant à lui, été interpolé parmi les valeurs

TAB. 5.5: Réflexions de Fresnel des principaux matériaux du banc SYNAPSE (Klocek, 1991).

		Visible			Bande K			Bande L		
		Incidence			Incidence			Incidence		
	Indice moyen	0°	20°	45°	0°	20°	45°	0°	20°	45°
Saphir (Al_2O_3)	1,733	7,7%		8,9%	7,2%		8,4%	6,6%		7,8%
Fluorine (CaF_2)	1,423	3,2%	3,2%	4,1%	3,0%	3,1%	4%	2,9%	3,0%	3,8%
Or non protégé	0,992 + 13,808 i			75%			97,8%			98,1%
Verre Fluoré	1,519				4,2%			XXX		

TAB. 5.6: Termes du modèle de Sellmeier du saphir (Al_2O_3) (Klocek, 1991)

S_1	S_2	S_3	λ_1	λ_2	λ_3
1,023798	1,058264	5,280792	0,06144819	0,11065939	17,92656130

issues du Palik (1985). Ne disposant que d'une seule valeur pour l'indice du cœur des fibres en verre fluoré, nous considèrerons les réflexions de Fresnel identiques pour le visible.

Traitement des séparatrices

Nous avons vu au paragraphe 5.3.5 le rendement (coefficient de réflexion * coefficient de transmission) du traitement 50 / 50 des séparatrice et recombinatrice symétriques pour les différentes bandes de longueur d'onde qui nous intéressent. Pour chaque traversée d'une séparatrice ou d'une recombinatrice, le faisceau subit en réalité une réflexion (respectivement une transmission) par le traitement en silicium de la séparatrice S1, puis les pertes de Fresnel par transmission au travers du CaF_2 sous une incidence de 45°. Le rendement $RT_{\text{séparatrice}}$ d'un couple de séparatrices symétriques s'écrira donc

$$RT_{\text{séparatrice}} = \left(1 - R_{\text{fluorine}_{45°}}\right)^2 . RT_{50/50} \tag{5.9}$$

Transmission du système d'injection

Après émission par le corps noir, le faisceau traverse successivement, sous incidence normale, puis à 45°, deux hublots en saphir[106]. Il est ensuite réfléchi par une parabole hors-axe traitée en or non protégé, puis il subit, sous incidence quasi-normale[107], les réflexions de Fresnel en entrée de fibre, que nous avons calculées au paragraphe précédent.

La fibre d'injection monomode prélève une étendue de cohérence $G = S.\Omega \approx 4,88.10^{-12}$ m^2. Bien que le rapport focale / diamètre de la parabole soit proche de 2 et que nous utilisions une source étendue, ce qui supposerait un couplage quasi-parfait (Coudé du Foresto, 1994), un cas un peu moins favorable

[106] Le hublot en saphir placé à 45° sert à l'injection du faisceau laser d'alignement visible.

[107] Afin d'éviter le retour du faisceau dans l'axe de la fibre, l'entrée de celle-ci est généralement clivée avec un angle très faible. N'ayant pas de confirmation ni de valeur pour cet angle, nous considèrerons l'incidence comme normale.

sera considéré avec un couplage $\eta_{\text{couplage}} = 0,9$. La transmission des fibres est excellente, de l'ordre de $\tau_{\text{fibre}} = 99,97\%$ en bande K.

En sortie de fibre, le faisceau subit une nouvelle fois les réflexions de Fresnel et une réflexion sur une parabole hors-axe traitée en or non protégé. L'injection dans l'interféromètre se fait finalement par l'intermédiaire d'un miroir en or non protégé.
Au total, la transmission du système d'injection peut donc s'écrire

$$\tau_{\text{injection}} = \left(1 - R_{\text{saphir}_{0°}}\right)^2 . \left(1 - R_{\text{saphir}_{45°}}\right)^2 . R_{Or}^3 . \left(1 - R_{\text{Fresnel}_{\text{fibre}}}\right)^2 . \eta_{\text{couplage}} . \tau_{\text{fibre}} \tag{5.10}$$

Transmission du premier interféromètre de Mach-Zehnder

La transmission du premier interféromètre de Mach-Zehnder se calcule à partir du rendement des couples (séparatrice + recombinatrice) symétriques, multiplié par les deux réflexions sur les traitements en or non protégé des miroirs MI1 et MI2.
La transmission du premier interféromètre de Mach-Zehnder peut donc s'écrire

$$\tau_{\text{MZ1}} = R_{Or}^2 . RT_{\text{séparatrice}} \tag{5.11}$$

Transmission du déphaseur

Chaque faisceau subit quatre réflexions de Fresnel sur le CaF_2, deux sous incidence normale et deux à 20°(angle des prismes).
La transmission du déphaseur peut donc s'écrire

$$\tau_{\text{déphaseur}} = \left(1 - R_{\text{fluorine}_{0°}}\right)^2 . \left(1 - R_{\text{fluorine}_{20°}}\right)^2 \tag{5.12}$$

Transmission des lignes à retard

Chaque faisceau subit quatre réflexions sur des miroirs en or non protégé, à 45°.
La transmission des lignes à retard peut donc s'écrire

$$\tau_{\text{LAR}} = R_{\text{Or}}^4 \tag{5.13}$$

Transmission du second interféromètre de Mach-Zehnder

La transmission du second interféromètre de Mach-Zehnder est, par la symétrie du montage, identique à celle du premier. À ceci près que celui-ci crée deux sorties destructives et que nous n'en utilisons qu'une pour la détection. Par conséquent, la moitié du flux est ici perdue. En revanche, lors des mesures physiques sur le banc, il faudra prendre garde à la quantité mesurée. En effet, chaque voie destructive est la moitié du flux cumulé des deux voies de l'interféromètre, donc le facteur $1/2$ ne devra pas être pris en compte.
La transmission du second interféromètre de Mach-Zehnder peut donc s'écrire

$$\tau_{\text{MZ2}} = R_{Or}^2 . RT_{\text{séparatrice}} . \frac{1}{2} \tag{5.14}$$

Transmission du système d'extraction

La transmission du système d'extraction est strictement identique à celle du système d'injection, là encore du fait de la symétrie du montage. Il faut toutefois supprimer les deux réflexions sur les hublots en saphir.

$$\tau_{\text{extraction}} = R_{\text{Or}}^3 . \left(1 - R_{\text{Fresnel}_{\text{fibre}}}\right)^2 . \eta_{\text{couplage}} . \tau_{\text{fibre}} \tag{5.15}$$

TAB. 5.7: Facteurs de transmission des sous-systèmes du banc SYNAPSE.

Sous-systèmes	Transmission théorique
Injection	0,56
Séparatrice (MZ1)	0,21 (par voie)
Déphaseur	0,88
Lignes à retard	0,92
Recombinatrice (MZ2)	0,11 (par voie)
Extraction	0,78
Interféromètre global	0,008

Transmission globale du banc

En incluant tous les éléments du banc, depuis le système d'injection jusqu'à l'extraction, en passant par les deux interféromètres de Mach-Zehnder, le déphaseur et les lignes à retard, on obtient la transmission globale du banc, qui s'écrit

$$\tau_{\text{globale}} = \tau_{\text{injection}}.\tau_{\text{MZ1}}.\tau_{\text{déphaseur}}.\tau_{\text{LAR}}.\tau_{\text{MZ2}}.\tau_{\text{extraction}} \tag{5.16}$$

soit, sous forme développée,

$$\begin{aligned}\tau_{\text{globale}} = \left(1-R_{\text{saphir}_{0°}}\right)^2.\left(1-R_{\text{saphir}_{45°}}\right)^2.R_{\text{or}}^{14}.\left(1-R_{\text{Fresnel}_{\text{fibre}}}\right)^4.\eta_{\text{couplage}}^4.\tau_{\text{fibre}}^2 \\ .RT_{50/50}^2.\left(1-R_{\text{fluorine}_{45°}}\right)^4.\left(1-R_{\text{fluorine}_{0°}}\right)^2.\left(1-R_{\text{fluorine}_{20°}}\right)^2.\frac{1}{2}\end{aligned} \tag{5.17}$$

soit, en bande K

$$\tau_{\text{globale}} \approx 0,008$$

Dans ce bilan de transmission, nous avons pris soin de considérer l'ensemble des pertes de Fresnel intervenant aux différentes interfaces. Si l'on calcule les pertes dues à ces seules réflexions, on constate qu'elles agissent pour un facteur 2 (transmission $\approx 45{,}6\%$). Vu la faiblesse de la transmission, il fallait donc bien les prendre en compte. Le tableau 5.7 résume les facteurs de transmission des différents sous-systèmes du banc SYNAPSE.

5.4.2 Bilan photométrique théorique

Une fois la transmission globale de l'interféromètre déterminée, il est possible d'effectuer un bilan photométrique complet, afin d'établir le rapport signal à bruit accessible grâce aux différents détecteurs dont nous disposons. Par ailleurs, un tel bilan permet de vérifier si la transmission des différents sous-systèmes est bien conforme aux valeurs théoriques que nous avons établies au paragraphe précédent, en réalisant des mesures de flux en différents points de l'interféromètre. Nous ne calculerons ce bilan que pour la bande K, dont les limites sont fixées par la largeur à mi-hauteur du filtre K, entre 2,08 µm et 2,40 µm.

Nous avons vu au paragraphe 5.3.2 que le flux disponible s'exprime en fonction de la loi de Planck (équation (3.15)). Dans la bande K que nous venons de définir, il s'élève ainsi à $2,85.10^4\,\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$.

Nous avons ensuite vu au paragraphe 5.3.3 que la fibre monomode d'injection ne prélève qu'une étendue de faisceau de $S.\Omega = \lambda^2$. Si l'on prend comme longueur d'onde la moyenne des extrêmes de la bande K, soit $\lambda \approx 2,21\,\mu m$, l'étendue de faisceau prélevée n'est donc que de

$$S.\Omega \approx \left(\frac{\lambda_{min} + \lambda_{max}}{2}\right)^2 \approx 4,88.10^{-12}\,m^2 \tag{5.18}$$

Le flux réellement disponible pour l'injection dans l'interféromètre devient alors

$$F_{CN_{utile}} = F_{CN}.(S.\Omega) \approx 1,39.10^{-7}\,W \tag{5.19}$$

À ce stade, nous avons présenté l'ensemble des éléments du banc d'interférométrie SYNAPSE, mis en place à l'IAS en vue de la caractérisation d'un déphaseur achromatique et effectué un bilan photométrique complet. Il reste maintenant, afin d'utiliser ce banc pour différentes mesures, à évoquer la mise en place des interfaces de contrôle.

5.5 Interfaçage électronique du banc SYNAPSE

5.5.1 Exposé du problème et objectifs généraux

La gestion de l'électronique d'un banc de mesure comme SYNAPSE peut s'effectuer de différentes façons. La plus directe consiste à utiliser ou développer différents contrôleurs, indépendants, et à les conserver tel que. L'avantage immédiat est que chaque élément est dissocié des autres, et que, au prix d'un apprentissage de la "philosophie" propre à chaque contrôleur, le banc peut être assez rapidement mis en œuvre. Cette solution ne peut, malgré tout, être que temporaire, car l'avantage évoqué ci-dessus devient un réel inconvénient quand il s'agit d'enchaîner, de façon rigoureuse, des tâches le plus souvent répétitives. Il faut alors élaborer une véritable interface de contrôle qui rassemble toutes les informations et assure la synchronisation de ces tâches. Elle doit ainsi être capable de dialoguer, quel que soit leur langage, avec les contrôleurs, qu'ils soient commerciaux ou non, tout en offrant à l'utilisateur une interface modulable, transparente (au sens des différents langages de communication sous-jacents) et, si possible, simple d'utilisation. Tout ceci en garantissant une certaine fiabilité ...

Dans le cas du banc SYNAPSE, les diverses fonctions à assurer ont, de plus, des fréquences de répétition variables, qui, comme nous allons le voir, vont se traduire par des priorités très différentes. Ces fonctions sont :

- ➢ le déplacement du prisme coulissant et des lignes à retard. Les déplacements "grossiers" se font à l'aide de moteurs pas à pas, tandis que les plus fins sont confiés à des platines piézoélectriques ;
- ➢ l'acquisition du signal scientifique provenant du détecteur monopixel. Elle doit pouvoir se faire à une fréquence choisie par l'utilisateur ;
- ➢ ce signal analogique est traité au préalable par une détection synchrone. Une fonction de gestion du calibre et de la constante de temps de celle-ci a donc été rapidement ajoutée ;
- ➢ enfin, l'asservissement en différence de marche. Il s'agit de la fonction la plus complexe et elle a des conséquences sur la gestion de toutes les autres fonctions.

5.5.2 Détails et contraintes liés aux différentes fonctions

Nous allons maintenant évoquer les détails de chacune de ces fonctions en précisant, à chaque fois, la fonction à réaliser, la façon matérielle dont elle est mise en œuvre, les contraintes liées à cette fonction et les solutions choisies.

Déplacement "grossier" du prisme coulissant et de la ligne à retard

1. Cette fonction, indispensable pour la recherche du point de fonctionnement évoquée au paragraphe 4.4, vise à déplacer le prisme PrC et la ligne à retard LR1 avec une résolution que nous qualifierons de grossière, bien qu'atteignant 0,1 µm en pratique ;
2. Deux vérins CMA-25 PP, de chez *Newport*, remplissent cette fonction. Ces moteurs pas à pas, complètement intégrés, ont une course de 25 mm couplée à des encodeurs de position. En pratique, la course utile pour le prisme coulissant est réduite à une dizaine de millimètres, au-delà desquels un vignetage du faisceau apparaît. La course nécessaire à la localisation du point de fonctionnement, pour un déphasage de π, n'est, de toute façon, que d'environ 300 µm. En revanche, pour la ligne à retard LR1, la pleine course de 25 mm est utilisable.

   La gestion de ces vérins est assurée par deux contrôleurs ESP 100, qui communiquent avec un ordinateur de contrôle par l'intermédiaire d'une liaison série. Cette communication fait appel à des listes de commandes (ex. : 1PA12.5000 commande le déplacement de l'axe 1 à la "Position Absolue" 12.5000 mm) et de requêtes, ces dernières donnant lieu à l'envoi d'une réponse (ex. : 1TP ? requiert la position du vérin de l'axe 1) ;
3. Plusieurs contraintes sont liées à l'utilisation de ce matériel, au demeurant très performant :
   - ➢ Les encodeurs de ces vérins renvoient une **position théorique absolue**, mais dont la référence est perdue à chaque mise hors tension du contrôleur ESP 100. Le maintien en tension n'étant pas recommandé, la solution choisie consiste à re-initialiser cette position de référence à la butée inférieure du vérin. Cette procédure, qui prend quelques minutes, est à renouveler au début de chaque séance d'utilisation des vérins. Il n'en reste pas moins que la position mécanique de cette butée varie, de façon élastique, à hauteur d'environ 5 µm. Une autre solution aurait consisté à mémoriser la position et le sens de propagation de chaque vérin à la mise hors tension du système, afin de prendre cette dernière position comme référence à la prochaine séance. Elle n'a pas été choisie, car les encodeurs étant mis à zéro malgré tout, il aurait fallu traiter chacune des réponses aux requêtes en fonction de la nouvelle position de référence ;
   - ➢ La seconde contrainte réside dans l'**hystérésys** mécanique de ces vérins qui s'élève à près de 4 µm. La solution a été, pour chaque déplacement, de repérer le sens de propagation nécessaire, afin, en cas d'inversion, de corriger l'écart introduit par cet hystérésys. Typiquement, si le vérin est en position 12.5000 et doit être déplacé en position 11.5000, il lui sera demandé successivement un déplacement en 11.4950 puis un déplacement vers la position finale de 11.5000 mm. De cette façon, le vérin ne travaille que dans le sens naturel de poussée. Cette précision en position est cruciale lors de la réalisation de cartographies demandant des allers-retours des vérins ;
   - ➢ La dernière contrainte vient de la communication par port série, qui n'est pas un modèle de rapidité. Il s'agit d'une contrainte de synchronisation forte, dans la mesure où les requêtes nécessitent des temps d'attente de réponse assez long en regard des autres actions. Il s'agira de la principale limitation à la fréquence des interfaces vers l'utilisateur.

Déplacement "fin" du prisme coulissant et de la ligne à retard

1. Cette fonction complète la précédente pour affiner la position du prisme PrC et de la ligne à retard LR2 avec une résolution qui, cette fois-ci est subnanométrique ;
2. Elle est mise en œuvre au moyen de deux platines piézoélectriques *Physik Instrumente* de 15 µm de course chacune, dotées de capteurs capacitifs. Les étages piézoélectriques intégrés sont alimentés en tension 0-100 V par deux "tiroirs" adaptés, eux-mêmes commandés en tension sous 0-10 V. Par souci d'économie, seul l'un des "tiroirs" de commande possède un asservissement en position

basé sur le capteur capacitif de la platine et destiné à compenser la dérive de plusieurs centaines de nanomètres par seconde observée en boucle ouverte. Dans un premier temps, ce "tiroir" a été dédié à la platine de la ligne à retard, la résolution en position requise pour le prisme étant supérieure d'un facteur 10. En pratique, les développements de l'asservissement de LR2 que nous verrons par la suite ont conduit à l'échange de ces deux "tiroirs", garantissant un maintien en position excellent pour le prisme coulissant ;

3. Le contrôle des "tiroirs" en tension sous 0-10 V, particulièrement simple, n'a pas introduit de contrainte particulière.

Acquisition du signal du détecteur monopixel

1. Il s'agit ici d'acquérir le signal scientifique, résultant de la conversion du flux lumineux, afin de pouvoir l'enregistrer par la suite. Ce signal parvient, après traitement par une détection synchrone, sous la forme d'une tension analogique en 0-10 V délivrée par l'étage d'amplification du détecteur monopixel ;
2. Cette acquisition est dévolue à une carte d'acquisition analogique classique, pour une conversion numérique ultérieure ;
3. Outre le fait que la fréquence d'acquisition doit être aussi déterministe que possible, la principale contrainte vient du fait que l'utilisateur doit pouvoir choisir facilement cette fréquence d'acquisition. Nous reviendrons plus tard sur la façon dont ces deux fonctions ont été programmées.

Gestion de la détection synchrone

1. L'idée consiste, puisque cela est rendu possible par la connectique disponible sur le matériel, de venir gérer le calibre et la constante de temps de la détection synchrone utilisée avec le détecteur monopixel. Cette fonction n'était pas prévue initialement, mais elle s'est très vite montrée utile lors des mesures. Étant donnée la très grande dynamique des signaux entre la frange noire et les franges brillantes, l'acquisition continue lors, par exemple, d'un balayage en différence de marche, nécessite des changements incessants de calibre ; de même, les réglages d'optimisation de niveau de flux nécessitent des interventions physiques en différents endroits du banc situés à des distances variables de la détection synchrone ;
2. La gestion du calibre de la détection synchrone a été rendue possible par le contrôle par port série de la détection synchrone *Stanford Research*. Elle passe par une surveillance continue du signal acquis ; afin que le signal sortant soit maintenu autour de 5 V quel que soit le niveau de signal entrant généré par le détecteur monopixel, une commande de changement de calibre est envoyée dés que le signal entrant est en dehors de la course 2-8 V ;
3. La seule contrainte liée à cette fonction, très pratique par ailleurs, vient de la communication série, toujours aussi lente (environ 230 kb / s).

5.5.3 Asservissement en différence de marche

Cette fonction doit être traitée à part, car elle est, de loin, la plus complexe et la plus contraignante à assurer, puisqu'elle doit garantir une différence de marche de l'ordre du nanomètre entre les deux voies de l'interféromètre. Autrement dit, elle doit maintenir la commande en position de la ligne à retard LR2 autour d'une consigne choisie par l'utilisateur. Plus exactement, comme cela est illustré sur la figure 5.29, il s'agit de gérer successivement, dans une boucle de fréquence élevée (de 1 à quelques kHz) et aussi régulière que possible, l'acquisition des données métrologiques et le traitement de ces données pour en

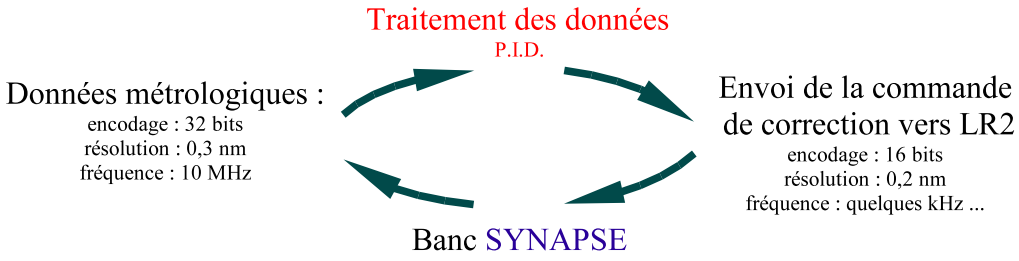


FIG. 5.29: Principe de l'asservissement en différence de marche implanté sur le banc SYNAPSE.

déduire une correction envoyée à la ligne à retard sous la forme d'une tension de commande. Malgré l'apparente (et illusoire) simplicité de cette fonction, nous allons détailler chacune de ces étapes.

Acquisition et gestion des données métrologiques

1. L'objectif est d'acquérir les informations de métrologie et de les rendre exploitables pour un traitement ultérieur ;
2. Le système de métrologie a été décrit en 5.3.6 et nous avons vu que les données de métrologie sont disponibles, en sortie de la carte *Agilent* sous la forme de mots de 32 bits, à une fréquence de 10 MHz. La résolution en différence de marche du système étant de 0,3 nm, la totalité des 32 bits correspond donc à une course de plus de 1,2 m, bien supérieure aux (25 mm + 15 µm) de course dispensés par les deux lignes à retard. Bien que cette course "utile" n'exige que 27 bits de données pour être totalement décrite, ce sont bien les 32 bits qui sont gérés dans les programmes d'asservissement ;
3. La principale contrainte est donc la fréquence d'acquisition qui doit être aussi déterministe et élevée que possible, sachant que les 10 MHz sont à la fois inutiles[108] et hors de portée des systèmes classiques d'asservissement qui ont été développés durant cette thèse. Autre contrainte, le système *Agilent* ne donne pas la longueur de chaque bras de l'interféromètre, il ne renvoie que la différence de ces longueurs, il s'agit donc d'une mesure relative. Autrement dit, mis à part les variations liées à l'environnement, la différence de marche indiquée varie aussi bien du fait d'un mouvement du vérin de LR1 dans le bras 1 que d'un mouvement du piézoélectrique de LR2 dans le bras 2. La différence de marche ne peut heureusement varier que dans une gamme liée aux extrêmes des positions de ces deux mécanismes. Malgré tout, si l'on ajoute que les corrections de différence de marche ne se font que dans la course de 15 µm du piézoélectrique de LR2, toute la difficulté réside dans la gestion de cette gamme de valeurs.

Traitement des données métrologiques

L'idée de l'asservissement étant de générer une commande de correction dans la course du piézoélectrique de LR2, il faut donc convertir, quelle que soit la position des éléments du banc, l'information de différence de marche en une tension 0-10 V équivalente. En pratique, il suffit de connaître, à tout

[108] En pratique, la fréquence de correction de la différence de marche est déterminée par la bande passante des platines piézoélectriques, qui est de l'ordre de 200 Hz.

moment, la position réelle de la platine LR2 en terme de donnée métrologique. Pour cela, une phase d'initialisation a été mise en place pour déterminer une "course métrologique" équivalente à la course de la platine piézoélectrique. Cette phase comporte sept étapes principales :

1. Envoi de la commande 0 V à la platine de LR2 ;
2. Remise à zéro de la carte d'acquisition des données métrologiques ;
3. Enregistrement de la valeur des données métrologiques associée à cette position[109] ; nous appelerons cette valeur "offset *Agilent*" dans la suite ;
4. Envoi de la commande 10 V à la platine de LR2 ;
5. Enregistrement de la valeur des données métrologiques associée à cette position, valeur que nous nommerons "maximum *Agilent*" ;
6. Calcul d'un facteur de conversion "donnée métrologique" / tension ;
7. Envoi d'une commande pour replacer le piézoélectrique à son ancienne consigne.

La "course métrologique" ainsi établie n'est cependant valable, du fait de la nature de la métrologie, que pour une position donnée du vérin de LR1. Elle ne l'est plus dès que celui-ci est déplacé de plus de 15 µm. Par conséquent, la phase d'initialisation, qui ne dure heureusement que quelques centaines d'itérations (soit quelques centaines de millisecondes), est réitérée après chaque déplacement du vérin de LR1 et, plus généralement, dès que la valeur des données métrologiques acquises sort de la "course métrologique".

Une fois cette étape franchie, à chaque itération, la donnée métrologique peut être convertie en une tension équivalente. Soustraite de la tension de consigne en position voulue par l'utilisateur, elle crée alors un signal d'erreur pouvant être traité par les dispositifs classiques d'asservissement que sont les correcteurs Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur (PID), ou encore toute fonction de transfert nécessaire.

Génération de la commande de correction

La dernière étape est enfin la génération de la commande de correction envoyée à la platine piézoélectrique de LR2. Elle s'appuie simplement sur une sortie de la même carte analogique que celle qui gère l'acquisition du signal détecteur. En pratique, une étape de conversion interne numérique vers analogique intervient. Le convertisseur étant encodé sur 16 bits, la résolution en tension ne peut dépasser 152 µV, ce qui implique une résolution de correction en position de 0,2 nm.

Fréquence d'asservissement

En théorie, chaque donnée de métrologie doit donner lieu à une commande de correction. En pratique, comme nous l'avons dit, la fréquence de génération de 10 MHz n'était pas nécessaire dans cette application. Par conséquent, un sous-échantillonnage devait se faire, d'une manière ou d'une autre, dans la chaîne de traitement. Dans un premier temps, il a été choisi de ne prélever ces données qu'à une fréquence de 1 kHz, qui devait être suffisante compte tenu de la bande passante indiquée par le fabricant des platines piézoélectriques (de l'ordre de 200 Hz). Nous verrons dans la suite que certaines modifications ont dû être apportées, venant considérablement compliquer la tâche. Finalement, l'exigence originelle d'une fréquence de 1 kHz la plus déterministe possible a dicté le choix d'un système dit "temps réel" dédié.

[109] Cette valeur n'est, en réalité, qu'une moyenne, puisque la position mesurée varie constamment à hauteur de quelques centaines de nanomètres.

5.5.4 Contraintes globales et architecture choisie

Bilan des contraintes

Nous l'avons vu, le contrôle du banc SYNAPSE nécessite de pouvoir réaliser de très nombreuses fonctions, qui ont, par ailleurs, la particularité d'avoir des temps d'exécution très différents. Ces fonctions doivent également cohabiter avec un asservissement en "temps réel", dont la période doit être aussi régulière que possible. Ces actions diverses doivent finalement pouvoir être enchaînées de façon synchrone durant les mesures. Par exemple, les programmes de contrôle du banc optique doivent permettre la réalisation sinon de cartographies (combinaison de mouvements du prisme et de la ligne à retard), tout au moins de balayages en différence de marche, à une épaisseur de prisme donnée.

Pour illustrer la synchronisation rigoureuse requise, voici les étapes nécessaires à l'acquisition d'*un seul point* d'un balayage en différence de marche[110] :

1. Arrêt de l'asservissement en différence de marche ;
2. Envoi de la commande de déplacement au vérin ;
3. Attente de la fin de déplacement et vérification de la position effective ;
4. Ré-initialisation de la "course métrologique" (cf. étapes citées auparavant) ;
5. Remise en route de l'asservissement autour de l'ancienne consigne piézoélectrique ;
6. Envoi de la commande d'acquisition du signal scientifique ;
7. Envoi de la commande de changement de calibre de la détection synchrone, si nécessaire ;
8. Attente de stabilisation du signal avec ce nouveau calibre (cf. constante de temps) ;
9. Enregistrement du signal scientifique.

Architecture choisie pour l'électronique de contrôle

Face aux contraintes que nous venons d'énoncer (!), l'architecture s'est organisée autour d'un système PXI chargé de centraliser les actions et de gérer les différentes priorités entre les fonctions d'asservissement et d'acquisition du signal scientifique, très exigeantes en terme de régularité, et les autres fonctions, plus secondaires. Le terme PXI[111] désigne en réalité une plate-forme de mesure et d'automatisation industrielles basée sur un bus de transmission de données, très rapide (132 Mb / s), permettant de mettre en relation différentes cartes d'acquisition sur un même châssis. Ses performances en ont fait un standard industriel. Dans la suite, nous désignerons par le terme PXI le châssis sur lequel ces cartes sont regroupées.

La figure 5.30 présente un synoptique récapitulant l'interfaçage électronique du banc SYNAPSE, organisé autour de ce PXI. Pour chacune de ces fonctions est également indiqué le matériel et les gammes de valeurs en jeu.

Le système PXI de *National Instruments* fait appel à un contrôleur de type PC industriel, dont la principale particularité est de ne pas comporter de système d'exploitation (en plus de n'avoir ni souris, ni clavier, ni écran). Cela permet ainsi d'y implanter des programmes dits "temps réel", dont le déterminisme n'est pas perturbé par les nombreuses interruptions que peuvent générer les périphériques d'un système classique. En pratique, les programmes seront donc divisés en programme "RT" (pour *Real-Time*), qui seront téléchargés sur le PXI et contrôlés à distance, depuis un PC "HOST" qui servira à la visualisation et où seront implantés les programmes ... "HOST".

[110] Il s'agit du cas le plus complexe, où le pas en différence de marche dépasse la course du piézoélectrique de la ligne à retard LR2.

[111] *PCI EXtensions for Instrumentation* (PXI), voir http ://www.pxisa.org

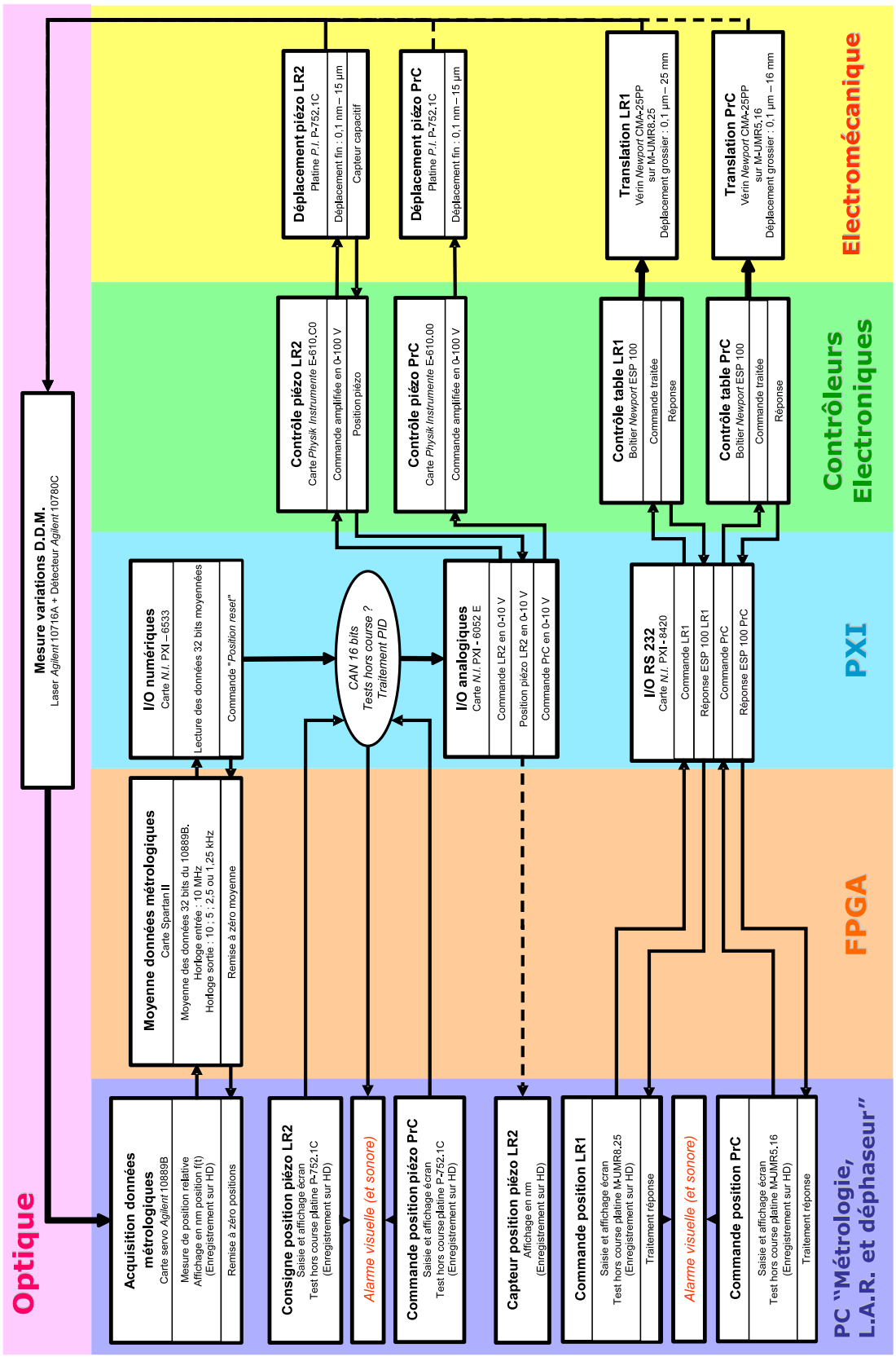


FIG. 5.30: Synoptique de l'électronique de contrôle du banc SYNAPSE.

Le langage de programmation qui gére les cartes d'acquisition de ce PXI est celui du logiciel LabVIEW, tout indiqué puisque fourni par le même fabricant. Le logiciel LabVIEW, bien connu de toute personne ayant à mettre en œuvre des systèmes d'acquisition en instrumentation, cache sous une interface graphique facile à appréhender un outil de développement perfectionné, faisant appel à un langage compilé. Un grand nombre de fonctions de bases sont fournies sous la forme de programmes destinés à différents types d'acquisition et de traitement de données. Ces programmes sont appelés *Virtual Instrument* (VI). Les méthodes de programmation classiques faisant appel à des boucles FOR, WHILE, à des variables locales ou globales, à des structures, etc. sont directement applicables, mais sous une forme graphique.

En effet, ce logiciel présente deux apparences, selon que l'on se situe du côté de l'utilisateur ou du développeur. Pour l'utilisateur, il a l'avantage de fournir une interface (face avant du programme) facile à mettre en œuvre, avec la possibilité d'ajouter rapidement des graphiques en 2D ou en 3D, des boutons d'actions permettant le changement des valeurs des différentes variables, etc. Pour le développeur, le code est affiché sous la forme de diagrammes, où les programmes et les fonctions sont des icones reliés par des "fils", figurant les voies de transits des variables et des données. Dernier détail, mais non des moindres, ce logiciel offre également la possibilité d'ajouter un module "Real-Time", pour l'implantation d'applications "temps réel".

La philosophie et les contraintes du "temps réel"

Contrairement à certaines idées reçues, le "temps réel" n'est pas forcément synonyme de fréquences de travail élevées (plusieurs kHz, voire au-delà), même s'il est fréquent que la fréquence des programmes codés en "temps réel" dépasse le kilohertz. Le "temps réel" doit plutôt être synonyme de déterminisme et c'est pourquoi il est généralement indispensable à haute fréquence. En effet, il n'est nécessaire de programmer en "temps réel" que lorsque des actions doivent être effectuées avec une fréquence la plus régulière possible en réponse à des événements extérieurs ou lorsqu'elles doivent être accomplies de façon cyclique et prédictible. Les techniques de programmation habituelles avec le logiciel LabVIEW doivent donc être modifiées pour assurer ce déterminisme.

Pour ce faire, le module Real-Time de LabVIEW propose cinq niveaux différents de priorités pouvant être attribués aux différentes tâches. La priorité la plus haute, qui garantit un déterminisme maximal, est dite "temps critique". Pour toutes les autres tâches en priorité inférieure, LabVIEW ne peut garantir le temps d'exécution qui lui sera nécessaire. Un seul programme doit donc être placé en priorité "temps critique", tandis que les autres doivent être en priorité inférieure. Il est ainsi très important de déterminer au début de la programmation quelles actions sont critiques et lesquelles ne le sont pas.

Afin de garantir le déterminisme de la partie "temps critique" des programmes, celle-ci doit absolument être dissociée des tâches non critiques, comme, par exemple les tâches de communication ou de visualisation. C'est pourquoi des programmes en "temps réel" ne peuvent être déterministes que s'ils sont implantés sur des machines (ou des cartes de programmation) dédiées, dépourvues de toute interface de type écran, souris, clavier, etc. Le châssis PXI, que nous avons évoqué auparavant, est donc équipé d'un contrôleur particulier, qui correspond en sorte à une carte mère d'ordinateur, qui ne possède qu'une version très "légère" de système d'exploitation. Cette machine n'est malgré tout pas totalement autonome, puisqu'elle peut communiquer avec une machine "hôte", de type PC conventionnel, par l'intermédiaire d'un protocole de communication en TCP / IP. L'architecture globale classique d'un système "temps réel" en LabVIEW est représentée sur la figure 5.31.

En cours d'exécution, le programme "temps critique" a toute priorité sur le processeur du PXI, dès qu'il en a besoin pour exécuter une tâche. Le programme de communication doit donc pouvoir agir sur le programme "temps critique" (pour modifier des paramètres en cours de fonctionnement ou récupérer des données dont la visualisation est nécessaire) de façon non intrusive, autrement dit qui ne perturbe pas

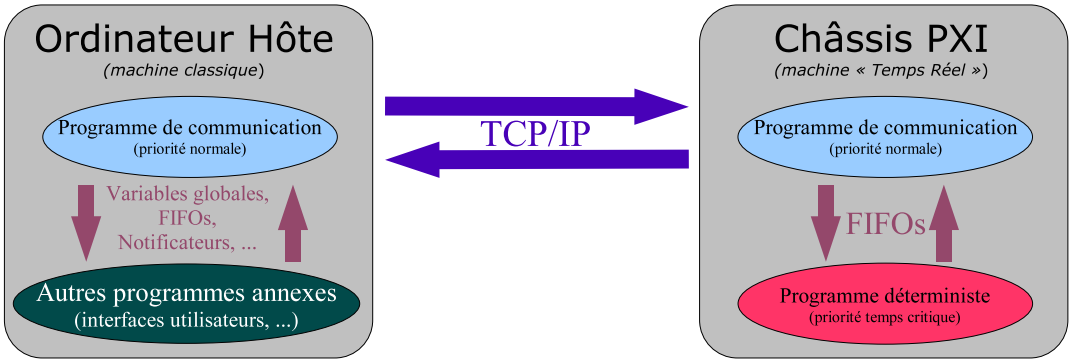


FIG. 5.31: Architecture générale des programmes "temps réel" en LabVIEW.

le déterminisme. Ceci exclut les systèmes classiques de type variables globales, qui sont des ressources partagées[112]. La méthode la plus adéquate fait appel à des FIFOs (de l'anglais *First In, First Out*, ce sont des sortes de mémoires-tampons), qui sont remplies et vidées indépendamment[113] au rythme de chacun des programmes. Cette solution n'engendre aucune perte de donnée[114], elle paraît donc idéale, à ceci près qu'elle entraîne nécessairement un délai entre l'écriture et la lecture, délai dont il faudra tenir compte lors de la synchronisation des tâches.

Cette gestion des programmes sur le PXI par leurs différentes priorités implique que les outils traditionnels de mise au point ("débuggage") disponibles sous LabVIEW et permettant une exécution pas-à-pas, par exemple, ne sont plus utilisables pour les programmes chargés sur le PXI. Les erreurs de programmation les plus évidentes, comme les plus subtiles, ne se manifestent alors que par un arrêt inexpliqué du contrôleur du PXI et par une perte de la communication TCP. Cet arrêt nécessite ensuite, après correction de l'erreur, un redémarrage du PXI. La mise au point des programmes "temps réel" a donc été de longue haleine, chaque modification pouvant remettre en cause les solutions choisies (et qui fonctionnaient) jusque-là, mais nous reviendrons sur ce point par la suite.

Architecture des programmes LabVIEW

L'architecture des programmes réalisés s'est enrichie progressivement. C'est pourquoi elle peut apparaître si compliquée au premier abord. Comme nous l'avons évoqué, elle est duale, avec les programmes "HOST" et les programmes "RT".

La partie des programmes côté PC "HOST", qui gère l'interface utilisateur, est représentée sur la figure 5.32. Cette architecture est organisée autour du programme "HOST_TCP" chargé de la gestion de la communication globale avec le PXI. Ce programme envoie l'information d'arrêt du système et surtout, reçoit l'ensemble des données de contrôle, notamment celle de métrologie. Ce programme agit comme une sorte de console de contrôle et c'est à partir de lui que peuvent être lancées les autres consoles des vérins CMA, des piézos ou encore de l'acquisition. Il permet en outre un enregistrement direct des données de métrologie. En ce qui concerne les déplacements du prisme coulissant et des lignes à retard, la recherche du point de fonctionnement requiert la possibilité de les enchaîner sous la forme de rampe de déplacement sur un axe, comme dans le cas d'un balayage en différence de marche. Il peut aussi être

[112] Si un processus et en train d'écrire dans cette variable, un autre ne pourra pas la lire simultanément. Ce dernier sera donc bloqué pendant ce temps, ce qui nuit au déterminisme.

[113] Ces deux actions restent indépendantes, car chaque FIFO est dupliquée en mémoire.

[114] Dans la mesure où les FIFOs sont de tailles suffisantes pour éviter qu'un programme "rapide" ne soit amené à "écraser" des données, parce que la FIFO de communication n'a pas encore été vidée suffisamment par le programme "lent".

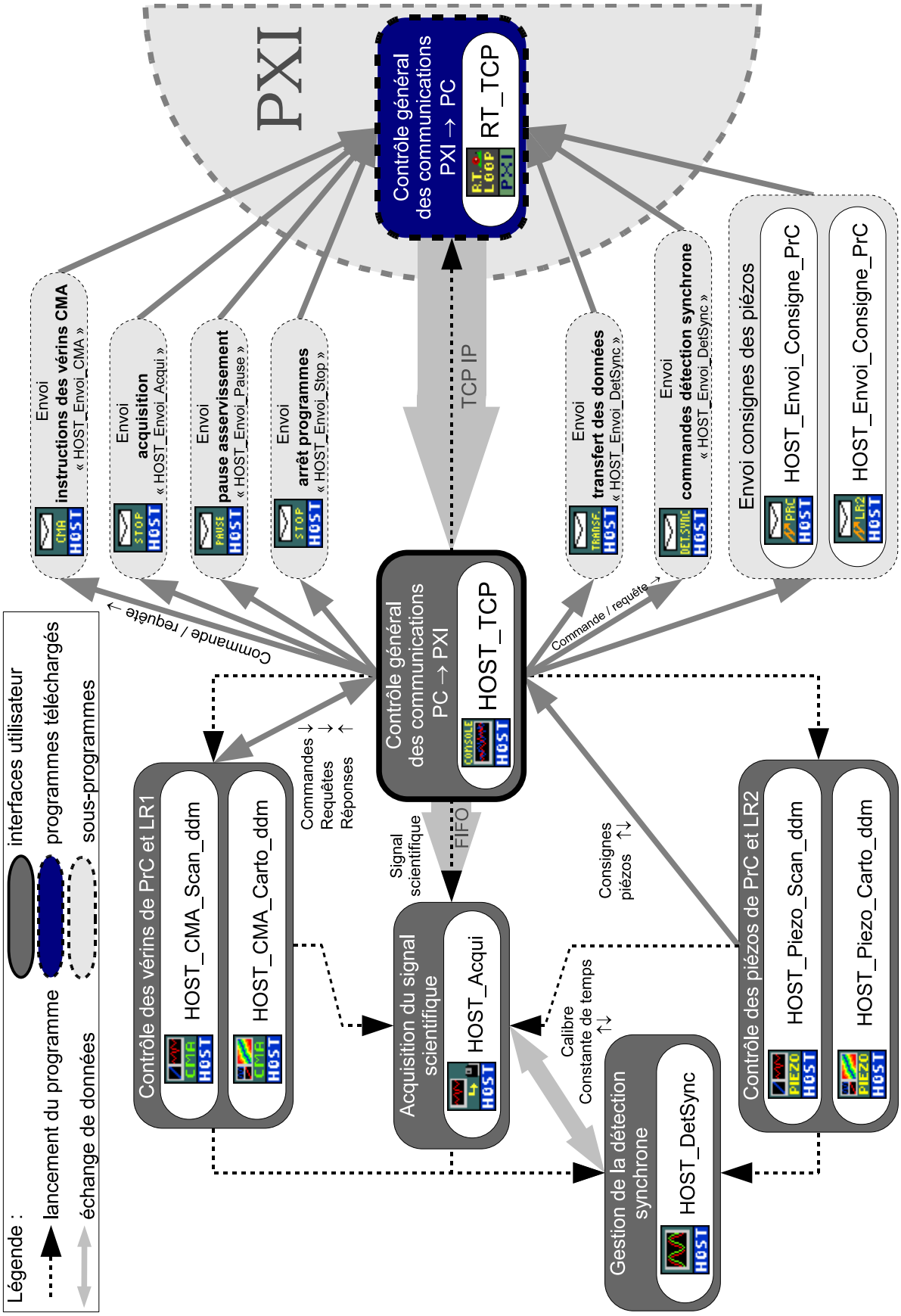


FIG. 5.32: Architecture des programmes LabVIEW du PC Hôte.

nécessaire de combiner les deux mouvements, dans le cas de la réalisation de cartographies autour de ce point de fonctionnement. Au total, ces deux fonctions doivent être disponibles à la fois avec les vérins CMA et avec les platines piézoélectriques. Par conséquent, les consoles de contrôle des vérins CMA et des piézos sont au nombre de quatre, permettant de réaliser des cartographies et des balayages en différence de marche, en plus des fonctions traditionnelles d'envoi de consigne de déplacement.

Côté PXI, l'architecture est plus simple et toujours organisée autour du programme de communication, ici baptisé "RT_TCP". Comme le montre la figure 5.33, le programme "TCL_Agilent" regroupe l'ensemble des tâches critiques (c'est la partie "temps réel" à proprement parler). Les autres programmes chargés sur le PXI ne sont que des sous-programmes (ou "sous-VI") assurant la communication avec les contrôleurs ESP 100 des vérins CMA et avec la détection synchrone. L'ensemble des programmes chargés sur le PXI reste invisible de l'utilisateur en cours de fonctionnement.

Les différentes étapes de mise au point : *it's a long way . . .*

La mise au point d'une telle chaîne de contrôle passe bien évidemment par une série d'étapes, indispensables pour élaborer et valider les différents modules. Cette mise au point a été d'autant plus longue que sont venus s'ajouter une méconnaissance du logiciel LabVIEW, de la philosophie "temps réel" que nous avons évoquée auparavant et enfin du matériel, avec en particulier la chaîne de métrologie. Les diverses étapes ont donc été ponctuées de phases de tests, de formation au "temps réel" et enfin de remises en cause quasiment quotidiennes . . . Fort heureusement, ces itérations ont fini par converger.

Première version : les bases, sans asservissement . . .

Cette première étape, qui correspond au début de cette thèse, était par définition une étape temporaire. Outre le fait qu'elle était indispensable pour fournir des résultats à la fin de la "thèse" précédente, elle a permis de définir quels seraient les différents programmes utiles dans la suite. Réalisée, donc, dans l'urgence, elle n'a pas fait appel au système PXI et n'assurait aucune fonction de lecture des données de métrologie ou d'asservissement de la différence de marche. L'acquisition du seul signal scientifique était confiée à une carte analogique ATMIO-16E de chez *National Instruments*, implantée directement sur un PC classique. Deux des sorties analogiques de cette carte assuraient l'envoi des consignes au *rack* de contrôle des piézos. Le PC gérait également, par ses deux ports série, les communications avec les vérins CMA. Au total, toute ces fonctions étaient manuelles et basiques, et en aucun cas automatisables dans une telle configuration.

Seconde version : premiers pas avec le "temps réel" . . .

L'étape suivante consistait donc, dans un premier temps, à adapter les programmes utilisés jusque-là à la plateforme PXI. Ce saut d'une technologie à une autre a également été étayé de très nombreuses étapes intermédiaires devant aboutir à la réalisation d'une boucle d'asservissement à une fréquence de 1 kHz, cohabitant avec les programmes annexes. Pour la partie analogique, la carte ATMIO-16E a donc été remplacée par son équivalent PXI, la carte analogique PXI-6052E. Concernant les données de métrologie, une carte numérique PXI-6533 a été implantée sur le PXI. Pour les communications avec les vérins CMA, passant par RS-232, une carte PXI-8420, comportant huit ports, a été ajoutée.

Parmi les étapes intermédiaires, la première a consisté à établir la communication avec le PXI, celle-ci se faisant, bien que les machines soient situées dans la même pièce, à distance, par le réseau informatique. Une fois que les fonctions existant jusque-là ont fonctionné sur cette nouvelle plateforme, le travail d'élaboration de la partie asservissement a pu commencer. La principale difficulté a été d'obtenir

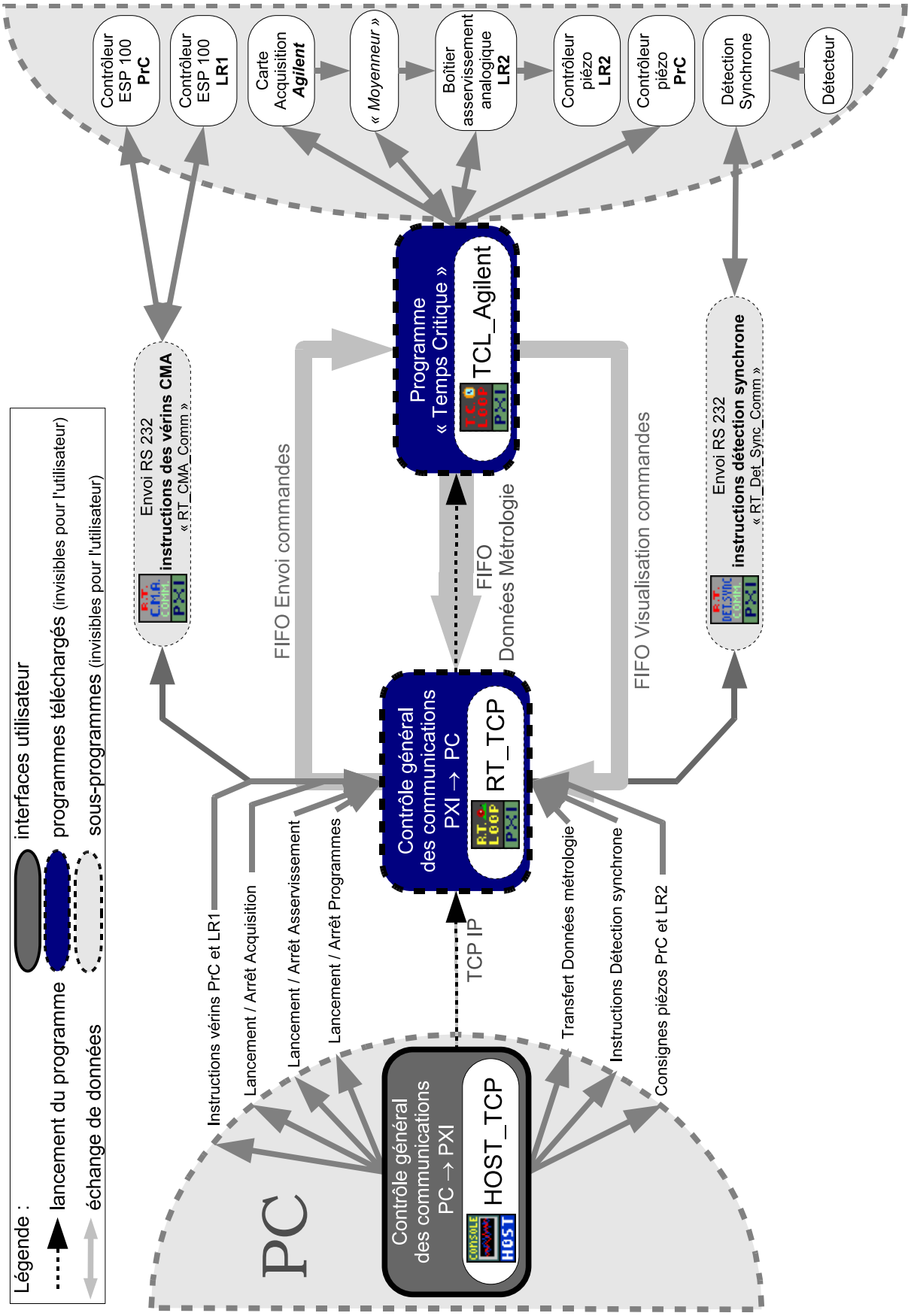


FIG. 5.33: Architecture des programmes LabVIEW du PXI.

une fréquence de boucle de 1 kHz, puis de vérifier que les fonctions existant auparavant fonctionnaient encore.

Comme nous l'avons vu, les données de métrologie sont disponibles à la fréquence de 10 MHz. Comme il est impossible de faire fonctionner l'asservissement à une fréquence aussi élevée, le parti de sous-échantillonner le signal avait été choisi, entraînant nécessairement une perte d'information. Restait le problème de synchronisation de la lecture. En effet, il n'était pas possible non plus de venir synchroniser une boucle de lecture des données à une telle fréquence. Par conséquent, la boucle fonctionnant à 1 kHz était basée sur une horloge interne au PXI. Celui-ci comporte effectivement plusieurs horloges internes, allant jusqu'à 20 MHz. À l'aide de l'un des compteurs de la carte PXI-6052E, il est alors possible de générer n'importe quel fréquence sous multiple.

La découverte d'un bruit important dans la chaîne de métrologie, expliquant les difficultés de réglages de l'asservissement nous ayant occupé durant plusieurs mois, a sonné le glas de cette solution, qui fonctionnait pourtant jusqu'à la fréquence de 2,5 kHz. En effet, la suppression de ce bruit inhérent à la métrologie passait par la mise en place d'un système de "moyennage". Une première solution a consisté à implanter cette moyenne directement de façon numérique dans la boucle temps critique. Elle a fait l'objet de nombreux tests, mais, par définition, une moyenne sur N points se traduit par une division de la fréquence de boucle par N. Il aurait donc fallu augmenter d'un facteur considérable la fréquence de travail de 1 kHz. Au total, la multiplication des tâches de cette boucle se faisant au détriment du déterminisme et de la fréquence maximale pouvant être atteinte, elle a dû être abandonnée.

La réalisation d'un système de "moyennage" externe, basée sur une carte FPGA, a alors été décidée. Cette carte aurait pour fonction de lire (toutes) les données numériques, d'en faire une moyenne arithmétique (non glissante) et de générer une donnée moyennée à des fréquences réglables de 1,25 kHz à 10 kHz. Dans notre application, la fréquence utilisée serait 1,25 kHz.

Troisième version : si on se synchronisait !

En effet, la carte FPGA de "moyennage", que nous appelerons "moyenneur" pour plus de commodité dans la suite, génère désormais les données moyennées accompagnées d'une horloge "utilisable". Par "utilisable", nous entendons avec laquelle il est possible de synchroniser une boucle "temps réel". Cette idée était tout à fait pertinente puisqu'éliminant tout risque de changement d'état d'un bit en cours de lecture ou autre désagrément de ce genre. Elle a néanmoins nécessité une refonte totale de la boucle temps critique.

Afin d'illustrer les subtilités du "temps réel", nous allons rapidement expliquer la technique utilisée pour synchroniser la lecture des données de métrologie avec le "moyenneur". Comme dans la version non synchronisée précédente, une horloge interne est utilisée comme base pour générer, à partir d'un des deux compteurs de la carte PXI-6052E, une seconde horloge. La fréquence de cette seconde horloge est fixée pour être supérieure d'un bon facteur 3 à la fréquence réglée sur le "moyenneur". Le signal d'horloge émis par le "moyenneur" est ensuite acquis sur l'un des ports dédiés de la carte PXI-6533. Cette horloge externe servira de déclenchement pour la lecture d'une donnée numérique, assurant que celle-ci est bien disponible sur les ports de sortie du "moyenneur".

Autrement dit, la boucle temps critique se met en "attente" durant tous les intervalles de temps où une donnée n'est pas disponible. C'est pendant cette période d'attente que pourront être effectuées les tâches non critiques.

L'un des points critiques garantissant une très grande bande passante au système d'asservissement était le délai entre la lecture d'une donnée et l'envoi de la commande de correction. Ce délai devait être le plus faible, mais également le plus déterministe possible. D'autre part, la boucle temps critique a également pour fonction d'acquérir le signal détecteur. Il reste donc deux tâches à déclencher de façon déterministe à partir de l'horloge externe.

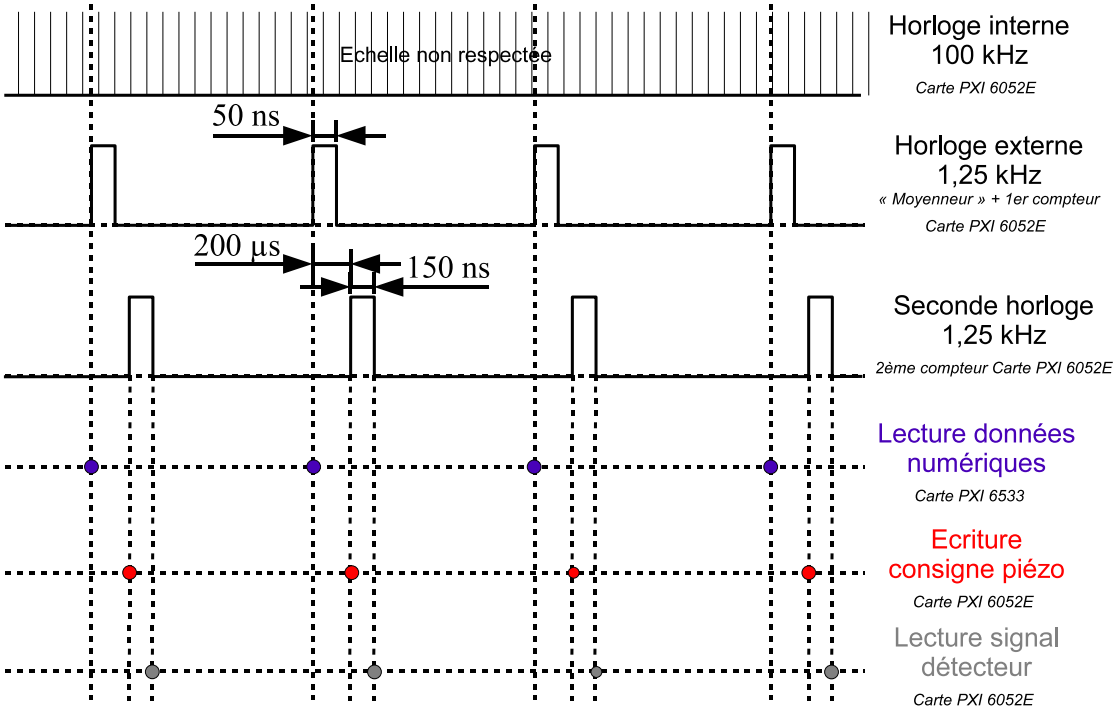


FIG. 5.34: Chronogramme théorique, lorsque les tâches sont synchronisées sur l'horloge externe générée par le "moyenneur".

Pour ce faire, une seconde horloge interne, basée sur le second (et dernier) compteur de la carte PXI-6052E, est générée, avec un délai minimal par rapport au front montant de l'horloge externe du "moyenneur". Ce délai minimal est fixé par le matériel utilisé à 50 ns. La durée de cette seconde impulsion d'horloge étant réglable, l'idée est d'utiliser le front montant pour déclencher l'envoi de la consigne analogique de correction et le front descendant pour déclencher l'acquisition d'un point du signal scientifique. Au total, cette stratégie, rendue possible par les deux compteurs de la carte analogique, peut se traduire sous la forme du chronogramme de la figure 5.34.

Les tests consécutifs, et notamment les mesures de fonctions de transfert du système LabVIEW seul, ont permis de montrer que le délai maximal entre la lecture d'une donnée et l'envoi de la consigne analogique pouvait être réduit à 1,6 µs (Figure 5.34), ce qui devait être suffisant pour notre application. Pour autant, le délai mesuré avec l'ensemble de la chaîne d'asservissement était supérieur à 1 ms, ce qui le rendait inutilisable. En effet, la bande passante de correction se réduisait alors à quelques dizaines de hertz.

Une étude approfondie des sources potentielles de ce problème a montré que la cause était le "moyenneur". Générant la donnée moyennée à la fréquence de 1,25 kHz, il introduisait nécessairement un délai intrinsèque de 800 µs. Il fallait donc le faire fonctionner à une fréquence plus élevée. Cette décision ne fut pas sans conséquence, une nouvelle fois, sur la structure de la boucle temps critique. Celle-ci fonctionnait parfaitement à la fréquence de 1,25 kHz, et même à celle de 2,5 kHz, mais pas au-delà ... Or, les mesures de fonctions de transfert du banc complet ont montré que la fréquence maximale de 10 kHz du moyenneur devait être utilisée. La partie asservissement de la boucle temps critique ne pouvait donc plus être assurée par le PXI et il fut décidé de mettre en place un boîtier analogique chargé de cette seule fonction, réalisé, en pratique, par Joël Charlet, du Service d'Électronique de l'IAS. Cela ne marquait, malgré

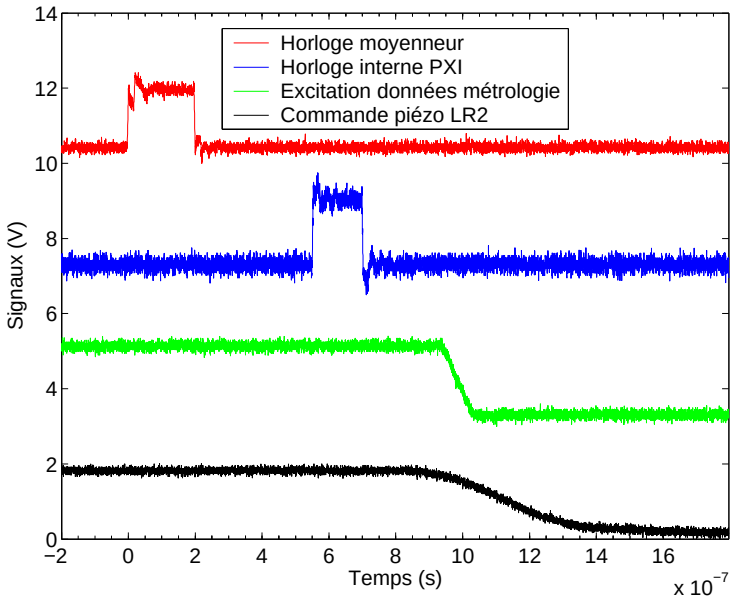


FIG. 5.35: Chronogramme mesuré, lorsque les tâches sont synchronisées sur l'horloge externe générée par le "moyenneur".
Le signal "excitation données métrologie" correspond à la transition d'un bit de poids suffisamment fort, parmi les 32 des données de métrologie, pour que la commande piézo de correction résultante soit facilement mesurable. Il s'agit ici d'évaluer le temps de "réaction" associé à la transition d'un bit (2e signal en partant du bas). Il est donc mesuré entre le front montant de l'horloge du "moyenneur" (4e signal, en partant du bas) et le front correspondant à la correction associée (1er signal, en bas). La correction est en réalité générée ici suite à l'excitation des données métrologiques précédant le front d'horloge (et donc invisible sur ce graphe, seule la suivante est visible). Le temps de "réaction", mesuré entre le front montant de l'horloge du "moyenneur" (4e signal, en partant du bas) et la correction du piézo n'est que de 1,6 µs.

tout, pas la fin du PXI, puisque celui-ci devait être interfacé avec ce boîtier, afin de gérer la "course métrologique", l'acquisition du signal scientifique ou encore la mise en pause de l'asservissement.

Quatrième version : la fin est proche !

Cette étape, qui fut heureusement la dernière, supposait le retour à une horloge interne pour gérer la fréquence de la boucle temps critique. En effet, le moyenneur devait être réglé sur la fréquence 10 kHz, trop élevée pour être utilisée par le PXI. Malgré tout, la structure définitive de cette boucle s'est avérée très proche de la précédente. La seule différence vient du fait qu'elle est désormais basée sur une horloge interne servant à l'acquisition analogique du signal scientifique, devenue seule tâche prioritaire.

Une redistribution des priorités avait ainsi eu lieu, puisque la tâche d'envoi de commande au piézo était devenu une tâche d'envoi de consigne au boîtier d'asservissement. De même, la tâche de lecture des données numériques, utile pour déterminer la "course métrologique", devenait secondaire. Par voie de conséquence, ces données étaient de toute façon à nouveau sous-échantillonnées. Dans cette dernière version, la fréquence de boucle peut donc être fixée indépendamment de celle du moyenneur, la boucle temps critique ne venant prélever une donnée qu'à la fréquence ainsi fixée. Autre avantage, du fait de la suppression des tâches de type PID ou fonction de transfert nécessaires au calcul de la commande

de correction, la fréquence de travail s'en est vue améliorée. Ainsi, la boucle temps critique définitive peut fonctionner, sans perturber les autres fonctions, à la fréquence maximale de 5 kHz. Par conséquent, seule une donnée sur deux est perdue, ce qui peut être utile pour l'analyse fréquentielle des données de métrologie. La figure 5.36 représente le chronogramme théorique de cette nouvelle répartition des tâches.

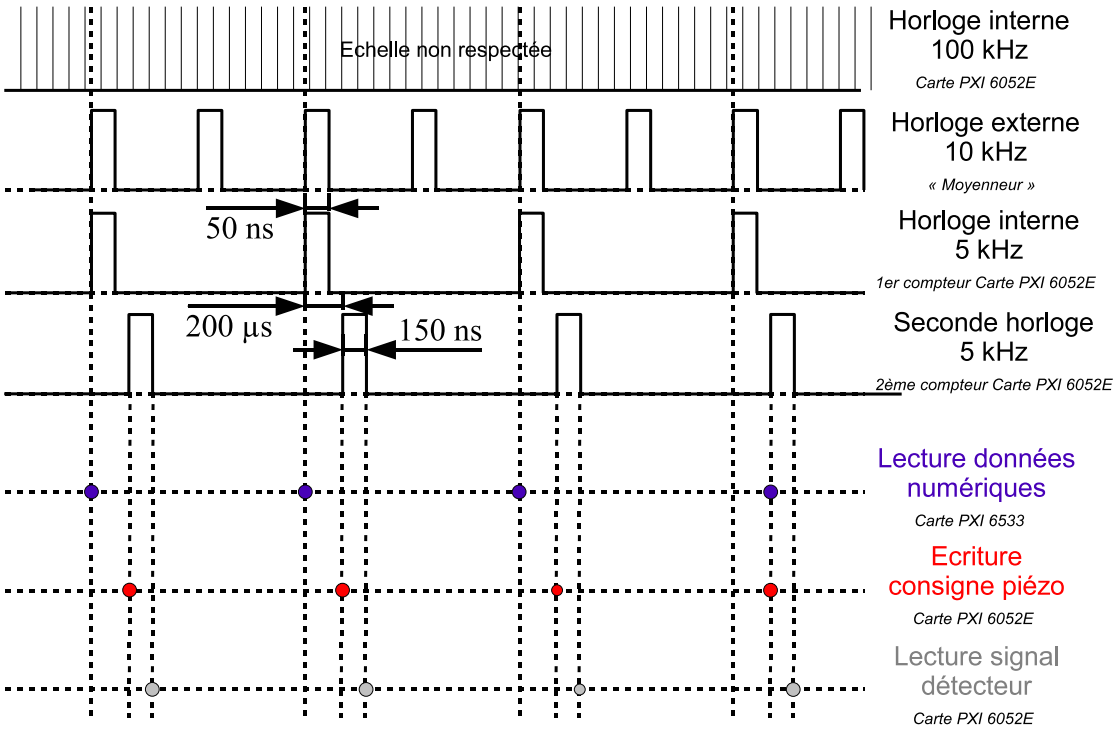


FIG. 5.36: Chronogramme théorique, lorsque les tâches sont synchronisées sur l'horloge interne au PXI. La succession des tâches est identique à celle de la version synchronisée sur l'horloge externe du "moyenneur".

Ce travail de longue haleine a donc permis la mise en place d'un système complet d'asservissement d'une ligne à retard sur les données fournies par la métrologie. De plus, l'interface de contrôle permet, simultanément, d'agir sur chacun des sous-systèmes nécessaires lors des mesures de réjection et d'enregistrer les différents signaux acquis. Au total, au terme de cette partie, le contrat est rempli et nous pouvons aborder, dans la partie suivante, les performances obtenues avec le banc SYNAPSE pour caractériser le déphaseur achromatique à prismes.

Chapitre 6

De la théorie à la pratique : mesures et résultats

Sommaire

6.1 Mise en œuvre de SYNAPSE 147
6.1.1 Implantation de la chaîne de mesure 147
6.1.2 Procédure de réglage 148
6.1.3 Bilan photométrique réel 151
6.1.4 Profil du faisceau 154
6.2 Mesures du taux de réjection 156
6.2.1 Protocole de mesure 156
6.2.2 Accord théorie / pratique 158
6.2.3 Mesures sans filtrage modal 161
6.2.4 Stabilité de la frange noire 161
6.3 Performances de l'asservissement en différence de marche 167
6.4 Améliorations du système 168
6.5 Perspectives 170

DANS cette partie, après avoir résumé brièvement les différentes étapes de mise en place de la chaîne expérimentale, indispensables avant toute mesure, nous allons présenter les résultats obtenus avec le banc SYNAPSE. Nous essaierons ensuite de déterminer les principaux paramètres théoriques et expérimentaux venant limiter ces performances, aussi bien du point de vue de leur valeur pure que de leur stabilité.

6.1 Mise en œuvre de SYNAPSE

6.1.1 Implantation de la chaîne de mesure

La mise en place du banc d'interférométrie, qui ne s'appelait pas encore SYNAPSE, a débuté à l'IAS en avril 2002, lors de mon stage de DEA, dès réception des différentes pièces mécaniques constituant le cœur de l'interféromètre. Celles-ci avaient été conçues par Jean-Pierre Moalic, du bureau d'études mécaniques de l'IAS, en collaboration avec Alain Labèque, chef de projet.

Lors de la mise en place de ces éléments, plusieurs modifications (heureusement légères) ont dû être faites, notamment à cause de l'encombrement des molettes de réglages ou pour rétablir une hauteur égale à chacun des éléments optiques. Elles ont, pour la plupart, été réalisées par Fernand Sarriau, avant son

détachement de l'atelier de mécanique, puis par Denis Barbet.

Malheureusement, la conception du banc s'était arrêtée au niveau de l'interféromètre lui-même et il a donc fallu concevoir les différentes pièces mécaniques supplémentaires, chargées d'accueillir les autres sous-systèmes venant constituer cette chaîne de mesure. Voici une liste non exhaustive des éléments qui ont dû être ajoutés :

- un système de cales et de brides, destinées à maintenir les *breadboards* en place, une fois leur positionnement approximatif effectué ;
- un système de limitation de débattement latéral pour la table reposant sur les pieds piézoélectriques, ceux-ci ne tolérant, en fonctionnement, qu'un débattement total additionnel de 3 mm ;
- un support adapté au corps noir, permettant également la mise en place du système d'injection du faisceau dans la fibre d'injection et du modulateur (*chopper*). Plus tard est venu s'ajouter le dispositif de maintien de diaphragme ;
- les supports de réglage des fibres monomodes, sur trois axes ;
- le support du détecteur monopixel, lui-aussi mobile sur trois axes, ainsi que ceux des différents filtres et lentille de focalisation ;
- une tablette "porte-accessoires" sur laquelle a été disposé le système de détection, reliée au banc par l'intermédiaire de la fibre optique d'extraction ;
- l'ensemble d'injection périscopique du faisceau métrologique et le support du détecteur de la métrologie ;
- sans oublier le dispositif servant au réglage de parallélisme des optiques, dont nous reparlerons au paragraphe suivant.

Au total, ce sont un peu plus d'une centaine de pièces qui ont été conçues par mes soins durant cette thèse et qui ont ensuite été fabriquées soit à l'IAS, soit en sous-traitance.

La mise en place des optiques, après traitement, a été effectuée en juillet 2002. Celle du refroidissement par eau du corps noir a eu lieu les mois suivants. En parallèle, l'élaboration d'une procédure de réglage du parallélisme des optiques avait débuté.

6.1.2 Procédure de réglage

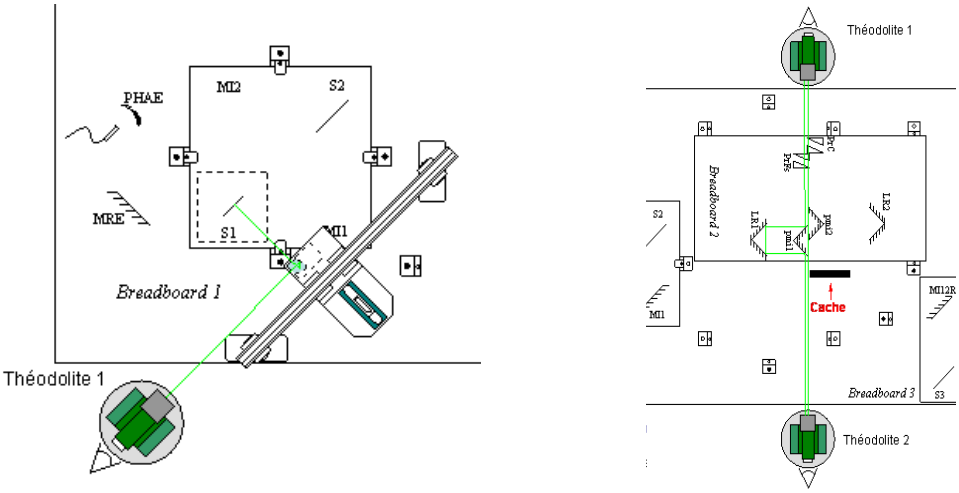
Le banc SYNAPSE fait intervenir pas moins de 14 surfaces optiques. Sauf à avoir une chance inouïe, que tout expérimentateur sait hautement improbable, il n'est pas possible d'obtenir, au moyen des seuls positionnements mécaniques[115], une précision de parallélisme suffisante pour former des interférences en sortie de recombinatrice, même à l'aide d'un laser.

Cette procédure n'avait pas été envisagée durant la phase de conception du banc. Elle a donc été élaborée et en partie testée, pour sa première version, durant mon stage de DEA (Brachet, 2002). À l'origine, la procédure faisait appel essentiellement à trois éléments :

- deux **théodolites-autocollimateurs**[116] DKM-2 de marque *Kern*, permettant de réaliser des autocollimations sur des surfaces polies, avec une résolution d'une seconde d'arc ;
- un **pentaprisme**, permettant, sous certaines conditions, le renvoi d'un faisceau émergent à 90° du faisceau incident sur sa face d'entrée, quelle que soit sa direction azimutale. Ce pentaprisme

[115] Leur précision atteint difficilement, dans le cas du banc SYNAPSE, le dixième de millimètre.

[116] Les théodolites-autocollimateurs sont des instruments optiques de haute précision, dont une variante bien connue est utilisée le plus souvent par les géomètres pour des mesures de géodésie. Ceux-là servent à fixer la direction de la normale à une surface par rapport à une direction de référence. Cette direction de référence est donnée par la gravité, puisque préalablement à toute autocollimation, l'axe vertical du théodolite est fixé grâce à un niveau à bulle (nous parlerons, dans la suite, de la "mise en station" du théodolite). Le théodolite projette à l'infini une croix d'alignement qui doit pouvoir se réfléchir sur la surface à aligner. Le réglage s'effectue en faisant coïncider cette croix réfléchie avec un réticule visible dans le viseur.



(a) Autocollimation d'une surface optique, *via* le pentaprisme.

(b) Réglage des lignes à retard, dans la première procédure.

FIG. 6.1: Quelques étapes de la procédure de réglage de SYNAPSE.

est placé sur un support dédié, relié mécaniquement à une platine *Newport* mobile sur trois axes, comme celle utilisée sur le banc, à l'aide de butées différentielles. Cette platine peut elle-même être translatée sur un rail en X[117]. La précision de réglage atteint ainsi la seconde d'arc. Le tout se situe, en ordre de marche, à environ 30 cm au-dessus du banc, d'où le nom de "portique" donné à ce dispositif. De cette façon, il est possible d'aligner la plupart des éléments du banc malgré les (innombrables) molettes de réglages.

À partir de la direction de la séparatrice S1, fixée grossièrement à 45° par rapport au bord du banc de mesure, l'idée de base consistait à **régler chacun des sous-systèmes de l'interféromètre séparément, de proche en proche, l'une des surfaces réglées servant de référence pour passer au sous-système suivant**. Dans un premier temps, un théodolite était donc "mis en station" sur un côté du banc de mesure, dans une position telle qu'il puisse viser, à travers le pentaprisme, chacune des optiques du premier Mach-Zehnder, par une simple translation du support du pentaprisme.

Le théodolite ainsi placé sert ensuite de référence pour régler le premier Mach-Zehnder. Le pentaprisme est positionné successivement en vis-à-vis de chaque surface à régler (Figure 6.1a). Ensuite, après que l'**autocollimation de la face d'entrée de ce pentaprisme** avec le théodolite a été ajustée au moyen des réglages de sa platine, il faut jouer sur ceux de la platine supportant l'optique à régler pour superposer la "croix de retour" à la fois sur celle du pentaprisme et sur le réticule du viseur. L'intensité de la "croix de retour" varie en fonction du coefficient de réflexion de la face observée. Autant le réglage d'un miroir est assez aisé, autant une séparatrice, traitée en silicium, ou la face non traitée d'un prisme en CaF_2 est plus difficile à autocollimater[118].

Toute la difficulté consistait à maintenir, ou tout au moins retrouver, l'**horizontalité du pentaprisme** entre deux translations. Cette condition est indispensable pour que le pentaprisme joue son rôle d'équerre optique de façon correcte (Brachet, 2002). L'hypothèse de pouvoir autocollimater la face de sortie du pentaprisme ne résista pas aux premiers tests car, étant donné la réfraction due au matériau de celui-ci

[117]La précision de ce rail n'est pas suffisante pour garder l'autocollimation de la face d'entrée du pentaprisme entre deux translations, mais elle l'est pour garder la "croix de retour" dans le champ du théodolite, ce qui est très appréciable lors de la phase de réglage.

[118]Cf. tableau 5.5, p. 128.

et l'absence (volontaire) de traitement anti-reflets, ce ne sont pas une, mais une demi-douzaine de "croix de retour" de la face de sortie qui étaient visibles, bien que très atténuées. Il a donc fallu ajouter un quatrième élément au dispositif de réglage, en l'occurrence un **niveau à bulle** EDA, d'une résolution de 0,1 mm par mètre, soit, dans notre cas, de 2 secondes d'arc. Celui-ci, placé sur un support solidaire du pentaprisme et de façon orthogonale à sa face de sortie[119], servira de référence pour régler à nouveau l'orientation du pentaprisme entre deux translations.

Jusqu'ici, nous n'avons pas encore évoqué le **réglage du *breadboard* supportant le déphaseur achromatique et** surtout, **les deux lignes à retard**. Or, ce sont bien elles qui vont poser le plus de problèmes ...

En effet, ce sont les seuls éléments du banc présentant des faces dans une direction différente de celles des optiques des Mach-Zehnder. Dans un premier temps, il avait été choisi de les régler séparément des Mach-Zehnder, en plaçant leur *breadboard* transversalement par rapport au banc de mesure (Figure 6.1b).

À l'aide des deux théodolites placés en vis-à-vis, avec un axe de visée passant entre les deux lignes à retard, il était possible de régler non seulement celles-ci par transmission, mais également les prismes du déphaseur, par autocollimation.

Cette version initiale de la procédure de réglage a permis la réalisation des premières mesures de réjection. Elle n'était, malgré tout, pas satisfaisante pour plusieurs raisons :

- ➢ La répartition des flux dans les deux voies de l'interféromètre n'était pas identique à 1% près, comme le suppose l'utilisation de séparatrice et de recombinatrice de type "Serabyn" (cf. 5.3.4). Cette "égalité" devait être rétablie au mieux en diminuant le flux le plus élevé, sinon en jouant sur l'orientation des lignes à retard, au détriment de la polarisation ;
- ➢ Dans la procédure elle-même, le réglage des lignes à retard de façon transversale supposait une parfaite horizontalité du banc lors de la rotation du *breadboard* pour sa mise en place définitive ;
- ➢ La direction du faisceau par rapport aux surfaces optiques n'était réglée qu'après coup ;
- ➢ La voie métrologique était très difficile à régler indépendamment de la voie scientifique.

Pour ces différentes raisons, et parce qu'après la première campagne de mesures, les optiques avaient été fortement déréglées, la procédure de réglages a été largement remaniée au cours de cette thèse. Pour cette nouvelle procédure, décrite en annexe A, il s'agissait essentiellement d'obtenir un réglage des lignes à retard dans leur position définitive, la méthode utilisée pour les Mach-Zehnder ayant fait ses preuves. Afin d'éviter l'utilisation d'une "triangulation"[120] à l'aide de deux théodolites[121], il fallait abandonner la principale contrainte qui avait été fixée pour élaborer la première procédure. Celle-ci supposait que toutes les optiques étaient en place avant les réglages, afin de pouvoir renouveler cette procédure "à tout moment".

Une fois cette contrainte supprimée, il était possible d'envisager l'utilisation d'un **miroir de référence externe au banc**, placé sur le trajet des faisceaux métrologique et scientifique définitifs. Par chance[122], ce miroir a pu être placé dans le hall de la station d'étalonnage, à une distance de 10 m du banc de mesure. L'idée est d'utiliser ce miroir pour ajouter durant les réglages la contrainte suivante : maintenir, en permanence, l'autocollimation des faisceaux "utiles" *via* ce miroir.

Cette nouvelle procédure ne comporte ainsi pas moins de 29 étapes (!) et nécessite environ 5 jours de réglages[123]. La dernière étape est basée sur l'obtention d'une "teinte plate" à l'aide du laser He-Ne

[119] Cette orthogonalité n'est qu'approximative, mais elle n'entre pas en jeu, car il ne s'agit que de reproduire la même direction de la face de sortie entre deux translations.

[120] On entend par là la fermeture d'un triangle dont les sommets sont les deux théodolites et l'optique à régler, par des rotations successives des théodolites.

[121] Ceux-ci ont environ trente ans d'âge (ce qui, en soi, n'est pas un problème) et n'ont pas été re-étalonnés depuis leur fabrication (ce qui en est un !).

[122] Il en faut un peu, de temps en temps, en expérimentation !

[123] Cette durée est valable lorsque "tout se passe bien", ce qui suppose une bonne stabilité de la température et que le miroir

colinéaire au faisceau scientifique, ce qui est une condition nécessaire (mais non suffisante) à la présence de franges d'interférences en infrarouge. De plus, cette procédure garantit la possibilité d'un réglage de la voie métrologique. Cette méthode est enfin validée par le fait que les flux des deux voies sont égaux à 1% près, en fin de réglage. En d'autres termes, étant donné le cumul d'erreurs entre chaque optique, la précision de parallélisme des optiques atteinte par cette méthode doit être de l'ordre de 30 secondes d'arc à l'intérieur d'un Mach-Zehnder, mais ne doit pas dépasser 10 minutes d'arc entre les sous-ensembles optiques. En pratique, nous verrons que ces valeurs sont suffisantes au vu des performances escomptées.

6.1.3 Bilan photométrique réel

À partir des facteurs de transmission établis au paragraphe 5.4.1, il est possible, moyennant de les adapter aux conditions physiques de mesure (encombrement du dispositif de détection essentiellement), de confronter les mesures pratiques au bilan photométrique théorique. Du point de vue des réglages du banc, une telle comparaison permet également de confirmer, ou non, le bien-fondé des méthodes employées.

Étalonnage du détecteur

Pour réaliser ce bilan photométrique, il est inutile de se placer en condition d'interférences des deux faisceaux recombinés. Par conséquent, le signal mesuré sera d'amplitude suffisante pour que nous puissions n'utiliser que le détecteur monopixel. Par ailleurs, il est le seul à pouvoir, du fait de sa petite taille, être placé aux différents points de mesure de l'interféromètre, directement sur le banc.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 5.3.8, la chaîne de mesure du détecteur monopixel implique notamment l'utilisation d'une détection synchrone et d'une lentille de focalisation. Lors du bilan photométrique, il faut donc prendre en compte :

- ➢ le modulateur (ou *chopper*), réglé à une fréquence de 270 Hz[124], qui provoque une perte de la moitié du flux ;
- ➢ le filtre K, dont la transmission moyenne est de 65 % ;
- ➢ le filtre froid du détecteur monopixel, dont la transmission moyenne est de 88 % ;
- ➢ la lentille de focalisation, en CaF_2, qui induit des pertes de Fresnel.

La transmission $\tau_{\text{détection}}$ de ce que nous appellerons, dans la suite, le système de détection, s'écrit donc

$$\tau_{\text{détection}} = \frac{1}{2}.\tau_{\text{filtre K}}.\tau_{\text{filtre détecteur}}.\left(1 - R_{\text{fluorine}_{0°}}\right)^2 \approx 27,7\% \tag{6.1}$$

Le signal mesuré est traduit en une tension 0-10 V par la détection synchrone et il faudra multiplier cette tension par le calibre en cours. Il reste à établir une équivalence entre cette tension et le flux réel mesuré, en déterminant le gain du détecteur monopixel et de son pré-amplificateur.

Pour cela, le détecteur a été placé en vis-à-vis du corps noir, à une distance D donnée. Comme le montre la figure 6.2, il est muni du filtre de sélection de la bande K, mais les mesures sont faites sans la lentille de focalisation, afin d'éviter une saturation du détecteur. Un "jeu" de diaphragmes calibrés a été interposé sur le chemin optique, de façon à faire varier l'angle solide sous-tendu par le détecteur. Contrairement aux conditions de mesure "normales" avec l'interféromètre, la fibre ne va pas déterminer l'étendue de faisceau vue par le détecteur. C'est le diamètre du diaphragme qui va fixer le diamètre réel de la source, vu par le détecteur.

---

de référence ou les théodolites ne sont pas accidentellement déplacés d'un jour sur l'autre. Sinon, retour à l'étape précédente obligé et délais rallongés d'autant, généralement dans la limite d'un facteur 2.

[124]Cette fréquence a été choisie suffisamment élevée pour éliminer le maximum de basses fréquences et suffisamment basse pour ne pas générer trop de vibrations sur le marbre de mesure. Par ailleurs, elle évite, bien évidemment, soigneusement les harmoniques du 50 Hz.

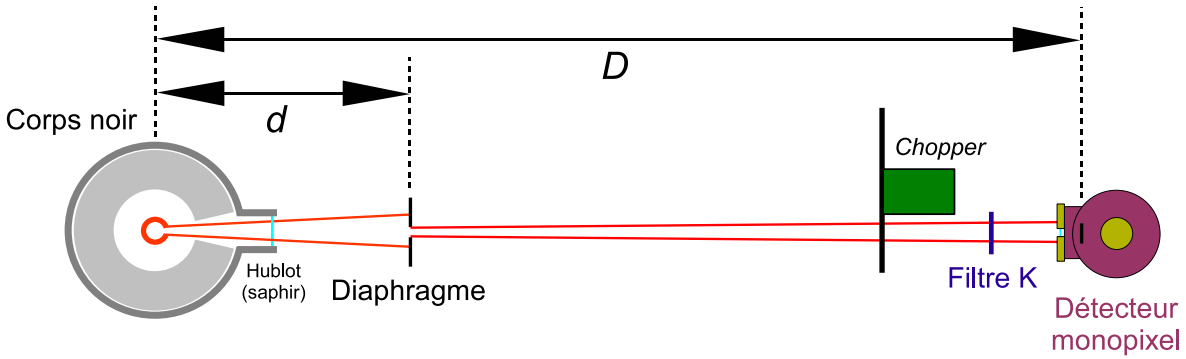


FIG. 6.2: Configuration utilisée pour l'étalonnage du détecteur.

Ce diaphragme doit avoir un diamètre inférieur au diamètre du trou percé dans le barreau chauffant, afin d'être sûr que la surface servant de source est à une température uniforme[125]. Si l'on note :

- ➢ D la distance entre le centre du barreau et le détecteur (dans notre cas, 1 m) ;
- ➢ d celle entre le centre du barreau et le diaphragme (dans notre cas, 100 mm) ;
- ➢ $\varnothing_{\text{diaphragme}}$ le diamètre physique du diaphragme (dans notre cas, il varie de 2 à 4 mm).

alors le diamètre réel de la source, $\varnothing_{\text{réel}_{\text{source}}}$, vu par le détecteur s'exprime comme

$$\varnothing_{\text{réel}_{\text{source}}} = \left(\frac{D-d}{D}\right).\varnothing_{\text{diaphragme}} \tag{6.2}$$

Il reste à définir l'étendue de faisceau, $S'.\Omega'$, réellement vue par le détecteur ; elle s'écrit

$$S'.\Omega' = \pi.S_{\text{détecteur}}.\sin^2(\alpha) \tag{6.3}$$

où $S_{\text{détecteur}}$ et α sont respectivement l'aire du détecteur et l'angle sous lequel il voit la source. Ces deux paramètres sont définis par

$$\begin{cases} S_{\text{détecteur}} = \pi\left(\dfrac{\varnothing_{\text{détecteur}}}{2}\right)^2 \\ \alpha = \arctan\left(\dfrac{\varnothing_{\text{réel}_{\text{source}}}}{2D}\right) \end{cases} \tag{6.4}$$

En termes de transmission, cette chaîne de mesure d'étalonnage doit prendre en compte les pertes de Fresnel dues aux deux hublots en saphir, en plus du facteur de transmission du système de détection que nous avons calculé précédemment. Nous définirons donc une transmission d'étalonnage qui s'écrit

$$\begin{aligned} \tau_{\text{étalonnage}} &= \frac{1}{2}.\left(1-R_{\text{saphir}_{0°}}\right)^2.\left(1-R_{\text{saphir}_{45°}}\right)^2.\tau_{\text{filtre K}}.\tau_{\text{filtre détecteur}}.\left(1-R_{\text{fluorine}_{0°}}\right)^2 \\ &\approx 20,7\,\% \end{aligned} \tag{6.5}$$

Au total, la puissance mesurée sur le détecteur s'exprime comme

$$P_{\text{étalonnage}} = F_{\text{CN}}.\left(S'.\Omega'\right).\tau_{\text{étalonnage}} \tag{6.6}$$

Après une optimisation des réglages, la tension délivrée par le détecteur est mesurée et comparée à la puissance théorique tenant compte des transmissions de la chaîne optique. Le tableau 6.1 rassemble

TAB. 6.1: Étalonnage du détecteur monopixel.

Diamètre du diaphragme (mm)	Tension mesurée (mV)	$P_{\text{étalonnage}}$ (W)	Gain mesuré (V / W)
2	2,3	$0,96.10^{-9}$	$2,39.10^{6}$
3	5,3	$2,16.10^{-9}$	$2,44.10^{6}$
4	9,2	$3,85.10^{-9}$	$2,39.10^{6}$

Emplacement de la mesure (sortie de)	Puissance théorique (W)	Puissance mesurée (W)
Fibre d'injection	$1,1.10^{-8}$	$7,9.10^{-9}$
MZ1	$2,3.10^{-9}$	$1,8.10^{-9}$
LAR	$1,9.10^{-9}$	$1,5.10^{-9}$
MZ2	$7,9.10^{-10}$	$6,1.10^{-10}$
Fibre d'extraction	$6,1.10^{-10}$	$2,1.10^{-10}$

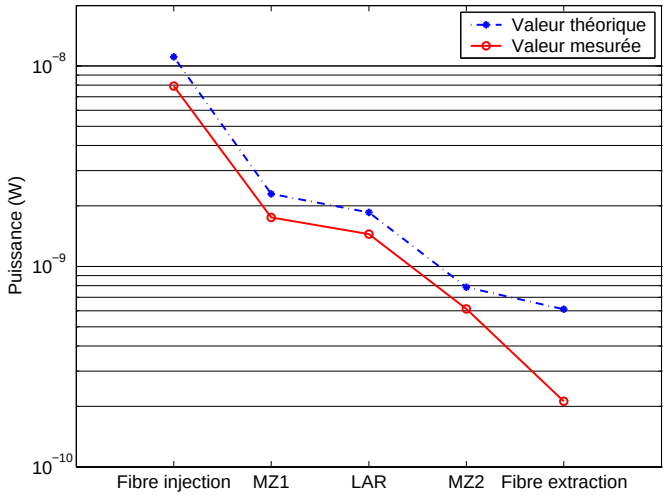


FIG. 6.3: Bilan photométrique du banc de SYNAPSE en bande K. Les principales pertes se situent au niveau du couplage avec les fibres optiques monomodes d'injection et d'extraction.

ces mesures. Le gain moyen mesuré est donc d'environ $G \approx 2,4.10^{6}\,\text{V.W}^{-1}$. À titre de comparaison, la (maigre) documentation fournie par le constructeur donne un gain de $3.10^{6}\,\text{V.W}^{-1}$. La valeur mesurée est donc en très bon accord.

Mesures

Le bilan photométrique s'appuie sur des mesures successives :

- ➢ en sortie de la fibre d'injection ;
- ➢ après la séparatrice (1er Mach-Zehnder) ;
- ➢ en sortie de ligne à retard ;
- ➢ après la recombinatrice (2e Mach-Zehnder) ;
- ➢ en sortie de la fibre d'extraction.

Le tableau et le graphe de la figure 6.3 résument les résultats de ces mesures. Les principaux écarts proviennent du couplage avec les fibres optiques monomodes et, en particulier, celle d'extraction. Nous verrons par la suite que ce couplage est effectivement très sensible et variable dans le temps. D'une façon générale, s'agissant de photométrie, les écarts observés restent tout à fait acceptables.

[125] L'observation du barreau du corps noir en fonctionnement avec un verre fumé permet de distinguer le trou percé dans le barreau, ce qui signifie que les bords de ce trou ne sont pas à la même température que son centre. Il est donc primordial de ne prélever le flux qu'au centre de ce trou.

6.1.4 Profil du faisceau

De la méthode, toujours de la méthode ... Par conséquent, avant de commencer d'éventuelles mesures de réjection, il vaut mieux vérifier qu'aucun des faisceaux n'est vigneté durant sa propagation. Pour cela, deux méthodes possibles.

La première, la plus naturelle, consiste à utiliser le détecteur matriciel dont nous disposons, à savoir CIRCUS. Le problème est qu'un telle mesure nécessite de descendre à 50 K, pour avoir un rapport signal à bruit suffisant et que, compte tenu des difficultés d'alignement rencontrées pour obtenir une image correcte avec ce détecteur, son utilisation ne permet pas d'exclure un éventuel vignetage indépendant du banc.

La seconde méthode, qui a, dès lors, été employée, fait appel au détecteur monopixel. Il s'agit de translater le support du détecteur pour réaliser un balayage centré, verticalement et horizontalement, sur le maximum de flux du faisceau. Pour cela, la cible du détecteur est d'abord placée manuellement au centre du faisceau, par maximisation du flux, en jouant sur les deux axes de translation du support du détecteur. Cette mesure s'effectuant sans la lentille de focalisation[126], il n'est pas nécessaire de régler le troisième axe. Afin d'automatiser la procédure et que les pas de déplacements soient réguliers, il faut ensuite remplacer l'une des molettes horizontale ou verticale par le vérin CMA-25-PP de la ligne à retard[127] LR2. Qui plus est, de tels balayages peuvent être effectués sur l'axe horizontal, mais aussi sur l'axe vertical.

De cette façon, en occultant successivement chacune des voies de l'interféromètre, on obtient un profil du faisceau, mettant en évidence les vignetages les plus importants, qui se traduiraient par des inégalités de flux entre les deux voies impossibles à rattraper par réglage. Cette étape préliminaire facilite l'ajustement du recouvrement latéral des faisceaux sur les deux axes, paramètre qu'une simple maximisation des flux ne permet pas de régler. En théorie, il faudrait réitérer ces opérations à plusieurs distances de la recombinatrice, afin de s'affranchir d'un *tilt* éventuel des faisceaux. En pratique, le détecteur étant placé à environ 300 mm de la recombinatrice lors de ces mesures, une seule itération (de trois balayages) s'est avérée suffisante pour obtenir des interférences avec un contraste permettant d'envisager le couplage avec la fibre pour des mesures plus fines.

Les figures 6.4 et 6.5 représentent les balayages, sur l'axe horizontal puis sur l'axe vertical, des faisceaux sur chaque voie, après réglage de leur superposition. La superposition latérale ne se règle que grâce aux translations des miroirs MI2T et MI12R, puisque les *tilts* ont été ajustés durant la procédure de réglage. Les mesures sont effectuées avant réglage de la différence de marche pour trouver le point de fonctionnement. Par conséquent, le flux des deux voies recombinées est bien la somme arithmétique des flux de chaque voie[128].

Comme on pouvait s'y attendre, le faisceau issu de la fibre monomode d'injection est globalement gaussien. La figure 6.6 montre un ajustement de ce profil par une gaussienne du type

$$F(r) = I_0.e^{\frac{-(r-r_0)^2}{2\sigma^2}} \tag{6.7}$$

où $(I_0; r_0; \sigma) = (3,57.10^{-5}; 4,75; 1,11)$. La largeur à mi-hauteur $FWHM$, donnée par l'équation (6.8) est donc de 2,6 mm, tandis qu'à $1/e^2$, elle atteint 4,45 mm.

$$FWHM \overset{\text{déf.}}{=} 2\sigma\sqrt{2.\ln(2)} \tag{6.8}$$

[126]En effet, la cible de ce détecteur ayant un diamètre de 250 µm, elle est bien trop grande pour échantillonner l'image fournie par la lentille.

[127]Il faut alors veiller à maintenir le prisme en toit à une position équivalente, afin d'éviter une variation (minime) de la direction du faisceau.

[128]Le faible écart entre les maxima des flux recombinés, entre les balayages horizontaux et verticaux, s'explique par le fait que le flux émis par le corps noir a quelque peu augmenté durant les quelques minutes séparant leurs réalisations (cf. figure 5.6, p.98)

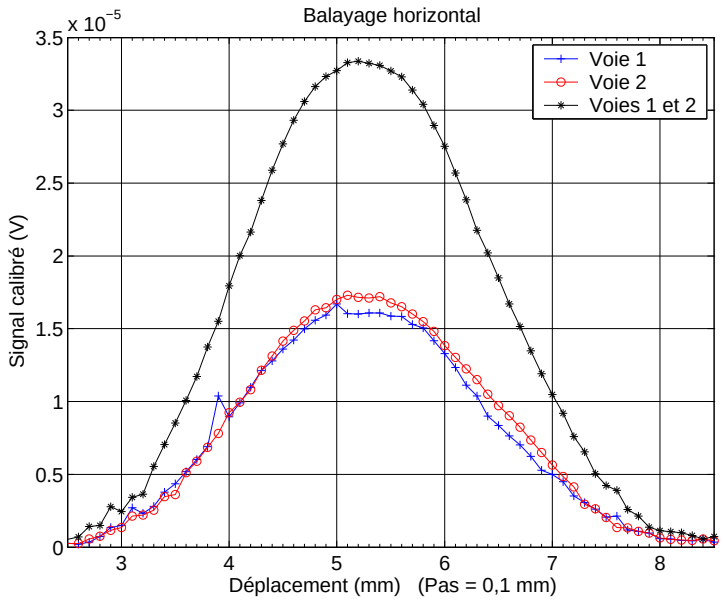


FIG. 6.4: Balayage horizontal du faisceau en sortie d'interféromètre.
Le pas d'échantillonnage est légèrement inférieur à la taille de la cible, puisqu'il est de 100 µm. Malgré quelques "accidents", les faisceaux de chaque voie ne montrent aucun vignetage important. Le flux total correspond à la somme arithmétique des flux des voies individuelles, les conditions d'interférences n'ayant pas été recherchées.

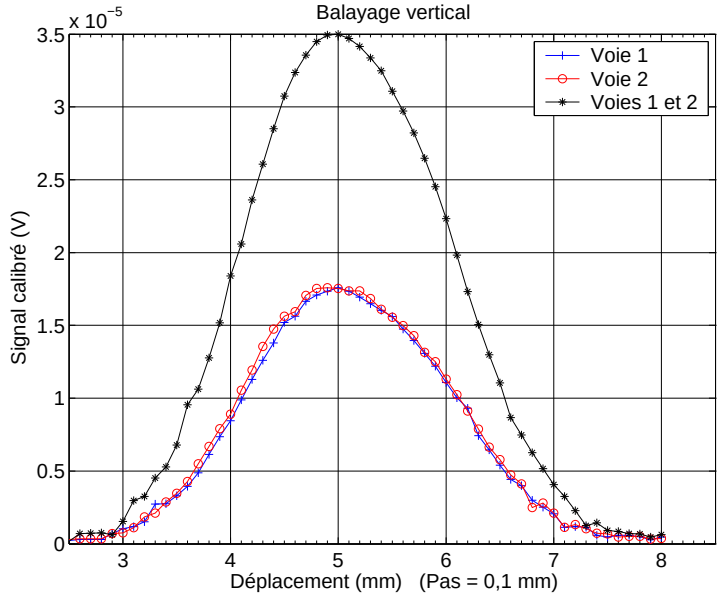


FIG. 6.5: Balayage vertical du faisceau en sortie d'interféromètre. Le pas d'échantillonnage est toujours de 100 µm. Une petite dissymétrie apparaît, avec un vignetage du bas des faisceaux. Il est probablement dû au support de sortie de la fibre d'injection, mais est sans conséquence sur les mesures.

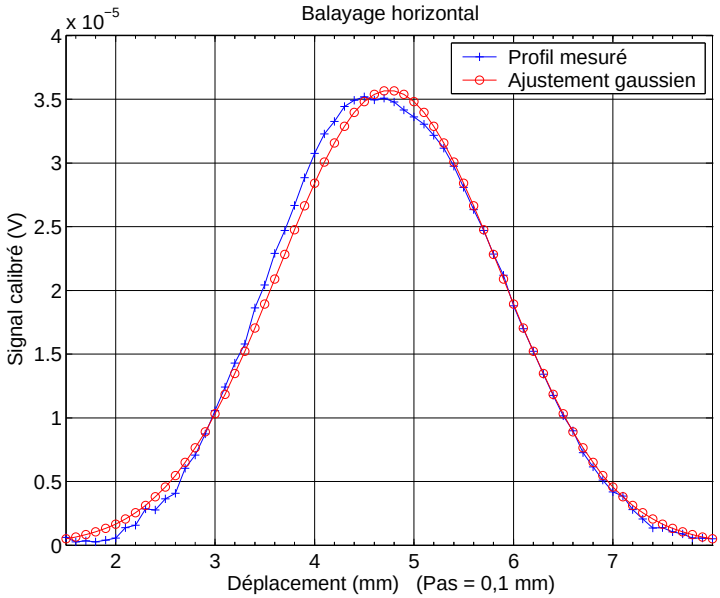


FIG. 6.6: Ajustement du profil du faisceau en sortie d'interféromètre. La largeur à mi-hauteur vaut 2,6 mm, tandis que celle à $1/e^2$ atteint 4,45 mm.

6.2 Mesures du taux de réjection

6.2.1 Protocole de mesure

Mise en route de SYNAPSE

D'un point de vue pratique, il faut environ deux heures pour que le banc de mesure SYNAPSE soit opérationnel et puisse fournir des franges d'interférences exploitables. Ce délai important provient de la nécessité d'attendre que le flux provenant du corps noir soit suffisamment stable pour effectuer des mesures. La procédure classique est donc la suivante :

1. Mise en route de la circulation d'eau nécessaire au refroidissement du corps noir et de l'amplificateur de puissance ;
2. Lancement du programme de mise en chauffe du corps noir et du programme de contrôle de la température sous LabVIEW ;
3. À partir de là, l'attente commence, donc l'expérimentateur en profite pour effectuer le remplissage du détecteur monopixel avec l'azote liquide (de cette façon, celui-ci sera stable en température au début des mesures) ;
4. Mise en route du laser de métrologie, qui nécessite environ cinq minutes pour être stable en température et permettre une mesure ;
5. Mise en route des différents contrôleurs (vérins grossiers, rack piézo, détection synchrone, modulateur (*chopper*)) ;
6. Mise en route du PXI et téléchargement des programmes de contrôle ;
7. Une fois le laser stabilisé, réglage, si nécessaire, de l'alignement des faisceaux de métrologie, jusqu'à ce que le rapport signal sur bruit soit suffisant pour que les mesures soient stables ;
8. Lancement des programmes LabVIEW et vérification des données de métrologie ;

9. Lorsque la température "nominale" du corps noir est atteinte (environ 1h30 après le lancement), début des réglages d'égalisation des flux entre les deux voies. Nous avons vu au paragraphe 3.2.1 que cette égalité doit être meilleure que 2 %. Si les mesures sont effectuées sans fibre (ce sera le cas au début), cette exigence est atteinte sans difficulté, car il s'agit d'une propriété naturelle du banc, du fait de l'emploi de séparatrice et recombinatrice symétriques. Sinon, le couplage des flux avec la fibre monomode complique sérieusement la tâche et il faut retoucher légèrement les réglages du second Mach-Zehnder.

Dès lors, le banc est opérationnel pour débuter la recherche du point de fonctionnement. Celle-ci s'effectue selon une procédure combinant les aspects théoriques vus au paragraphe 4.4 et des aspects plus pratiques liés aux contraintes expérimentales.

Localisation du point de fonctionnement

Au terme de la procédure de réglage et après avoir réalisé différents balayages des faisceaux en sortie de recombinatrice, l'interféromètre est réglé en teinte plate pour le visible. Malheureusement, ce n'est pas nécessairement le cas pour les longueurs d'onde du proche infrarouge, où nous souhaitons effectuer des mesures de réjection. En effet, la longueur de cohérence (temporelle) L_c d'une source de largeur spectrale $\Delta\lambda_{1/2}$, centrée sur la longueur d'onde λ_0, est donnée par la formule

$$L_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda_{1/2}} \tag{6.9}$$

Pour une source quasi-monochromatique, comme le laser He-Ne utilisé en fin de procédure de réglage, elle est donc de plusieurs mètres, mais celle d'un faisceau en bande K est inférieure à 10 µm. D'autre part, nous avons vu que la transmission de l'interféromètre dans le visible était largement insuffisante pour espérer effectuer un réglage avec le flux provenant du corps noir. Par conséquent, il reste deux paramètres à ajuster pour que la cohérence temporelle des deux faisceaux atteigne la valeur escomptée pour voir apparaître des franges d'interférences. Ces deux paramètres sont, bien sûr, l'épaisseur de matériau différentielle introduite par le prisme et la différence de marche.

Un premier réglage grossier de la translation du prisme est obtenu grâce à une cale placée en appui sur le prisme fixe en vis-à-vis du prisme coulissant. Celui-ci est translaté jusqu'à venir lui-même en appui sur cette cale. De cette façon, la différence d'épaisseur peut être considérée comme inférieure à 500 µm. Pour la différence de marche, une simple mesure des distances est réalisée entre les éléments de chaque ligne à retard. La précision atteint difficilement là encore les 500 µm, mais nous verrons qu'elle est suffisante pour fortement dégrossir les réglages.

À partir de là, comme nous l'avons évoqué au paragraphe 4.4, la méthode devient itérative, au moyen de balayages en différence de marche.

- ➢ **Un balayage en différence de marche, avec un pas de 2 µm**[129] permet de localiser les franges d'interférences, grâce au vérin de déplacement grossier (Exemple figure 6.7a). Le taux de réjection mesuré varie généralement entre 2, dans un cas très défavorable et 200 dans le cas le plus favorable, où un pas d'échantillonnage a exactement concordé avec la frange noire ;
- ➢ Toujours avec celui-ci, **un nouveau balayage**, sur une course inférieure et, cette fois-ci, **avec un pas de 0,1 µm**, affine la localisation de la frange noire (Exemple figure 6.7b). Comme durant ces premières étapes, les platines piézoélectriques du prisme et de la ligne à retard LR2 ont été automatiquement placées à mi-course, il suffit ensuite de venir positionner le vérin grossier au minimum de la frange noire[130], pour pouvoir continuer avec une résolution inférieure en utilisant les réglages piézoélectriques.

[129] On rappelle que ce pas a été choisi très légèrement inférieur à l'interfrange.

[130] Cette option est toujours proposée, en fin de balayage, par le programme de contrôle des vérins de déplacement grossier.

- ➢ À ce stade, **le critère de recherche devient la profondeur de la frange noire**, autrement dit le taux de réjection lui-même. Cette recherche se fait en faisant varier l'épaisseur différentielle créée par le prisme et en réitérant deux, sinon les trois balayages précédents pour chaque changement. La première étape consiste à déterminer le sens des déplacements. Selon la précision du réglage initial, cette recherche est plus ou moins rapide (Exemple figure 6.7c) ;
- ➢ Enfin, comme nous l'avons expliqué au paragraphe 4.4.3, quand le taux de réjection dépasse environ 1 000, étant donné les instabilités de la réjection du fait des vibrations, des turbulences, etc. il est nécessaire de compléter ce critère de recherche, en observant la différence de profondeur des deux franges "grises" adjacentes à la frange noire, autrement dit le **centrage des franges d'interférences sur l'enveloppe**. En effet, le critère déterminant réellement le point de fonctionnement est bel et bien l'égalité des réjections sur ces deux franges "grises" (Exemple figure 6.7).

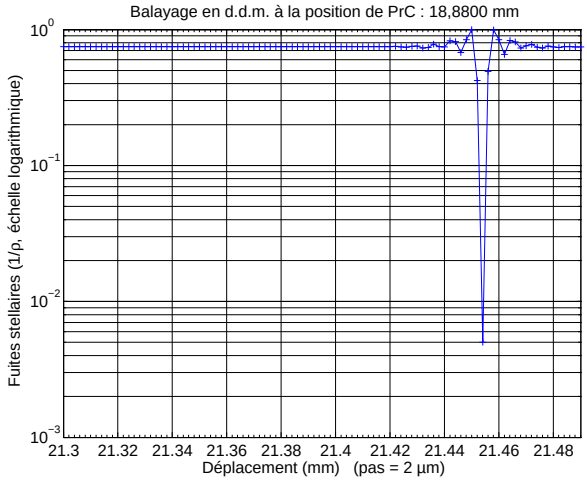
La figure 6.7 présente des exemples de ces étapes, dans un cas typique. Le premier balayage, de recherche des franges, montre une réjection de 200. Pour le second, pourtant plus fin, il retombe à 90. Heureusement, il remonte à environ 1 500 au balayage suivant, pour culminer à 4 300 au point de fonctionnement. Sur toutes ces courbes, l'axe des abscisses représente le déplacement de la ligne à retard. Attention, il est égal à la moitié de la différence de marche effectivement ajoutée entre les chemins optiques !

6.2.2 Accord théorie / pratique

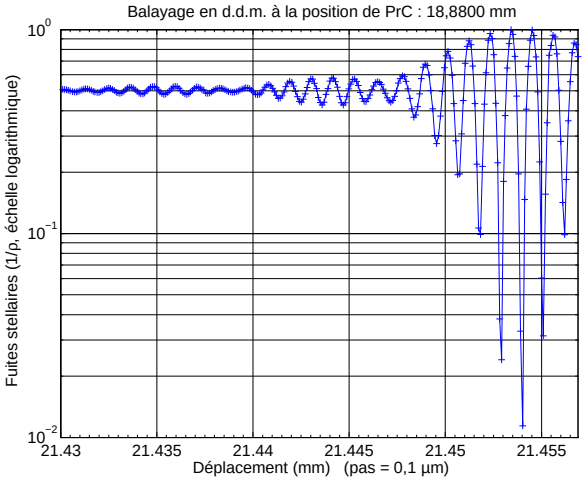
Nous avons vu au paragraphe 4.4.2 l'allure théorique des balayages en différence de marche pour une épaisseur de prisme donnée. Il est intéressant de comparer cette allure théorique avec celle mesurée en pratique. La figure 6.8 représente le meilleur balayage en différence de marche mesuré sur le banc SYNAPSE, en bande K. Le taux de réjection mesuré atteint 4 500, après correction du courant d'obscurité du détecteur. Les flux relatifs étaient égaux à mieux que 1% lors de la mesure, ce qui est assez rare pour être mentionné. La courbe théorique correspondante a été superposée à cette mesure expérimentale, avec l'hypothèse que le minimum de la frange noire expérimentale est exactement située au point de fonctionnement. Il s'agit de la courbe idéale, pour une égalité parfaite des flux relatifs. D'une façon générale, il y a accord entre la théorie et la pratique, tout au moins pour la frange noire. En effet, la profondeur des franges "grises", adjacentes à la frange noire, est étonnamment supérieure en pratique. La courbe théorique de la figure 6.8 étant une courbe idéale, cette disparité ne provient pas de l'inégalité des flux relatifs. S'agissant d'une mesure du rapport entre l'intensité des franges, puisque le signal a été normalisé au maximum des franges brillantes, la température réelle du corps noir, qui n'est pas exactement de 2 000 K, n'est pas en cause. La largeur du domaine spectral réel, fourni par le filtre en bande K, ne peut pas plus être incriminée, dans la mesure où la simulation est effectuée avec les valeurs de transmission données par le fournisseur (cf. figure 5.20, p. 116).

Parmi les nombreuses hypothèses pouvant être émises, on peut imaginer une variation de l'incidence du prisme par rapport au réglage théorique. La figure 6.9 représente une telle simulation, avec un prisme coulissant désaxé autour de l'axe vertical, d'un angle d'1°. Le point de fonctionnement a été réévalué grâce à la méthode de modélisation du déphasage, qui prend en compte ce paramètre géométrique. Si la profondeur de la frange noire est bien inférieure, se rapprochant ainsi de la mesure, il apparaît qu'un tel angle, dont la valeur est assez élevée par rapport au réglage escompté avec la procédure mise en place, provoque plus une dissymétrie des franges "grises" qu'une augmentation homogène de leurs valeurs. Cette hypothèse doit donc être écartée.

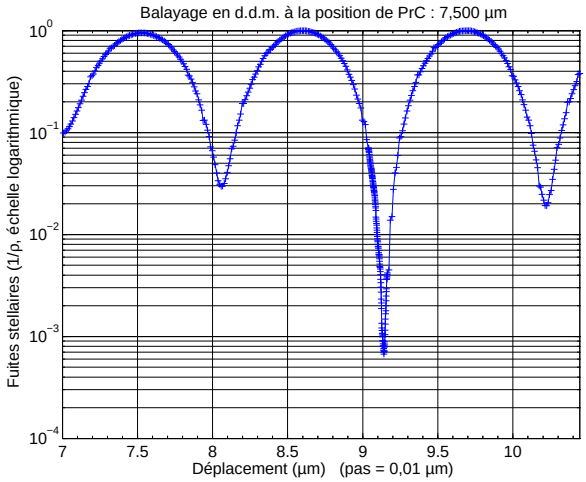
Une dernière hypothèse repose sur une différence entre l'indice du CaF_2 utilisé en pratique et l'indice modélisé par l'équation de Sellmeier du tableau 4.2. Malheureusement, cela exigerait des mesures de



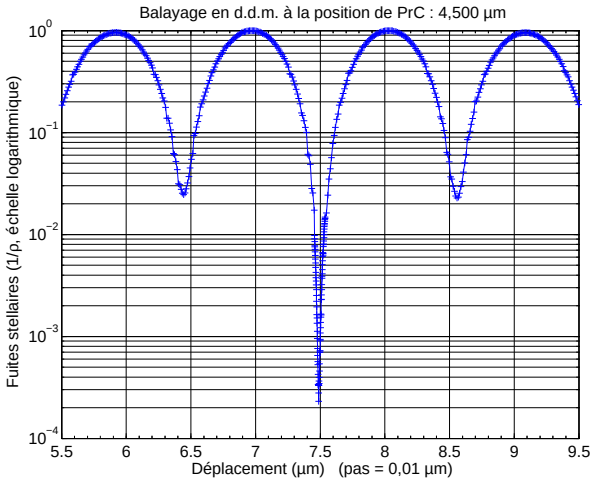
(a) 1er balayage : recherche des franges d'interférences.



(b) 2e balayage : localisation de la frange noire.



(c) 3e balayage : optimisation de la frange noire.



(d) ne balayage : égalisation des franges "grises".

FIG. 6.7: Étapes de recherche du point de fonctionnement.

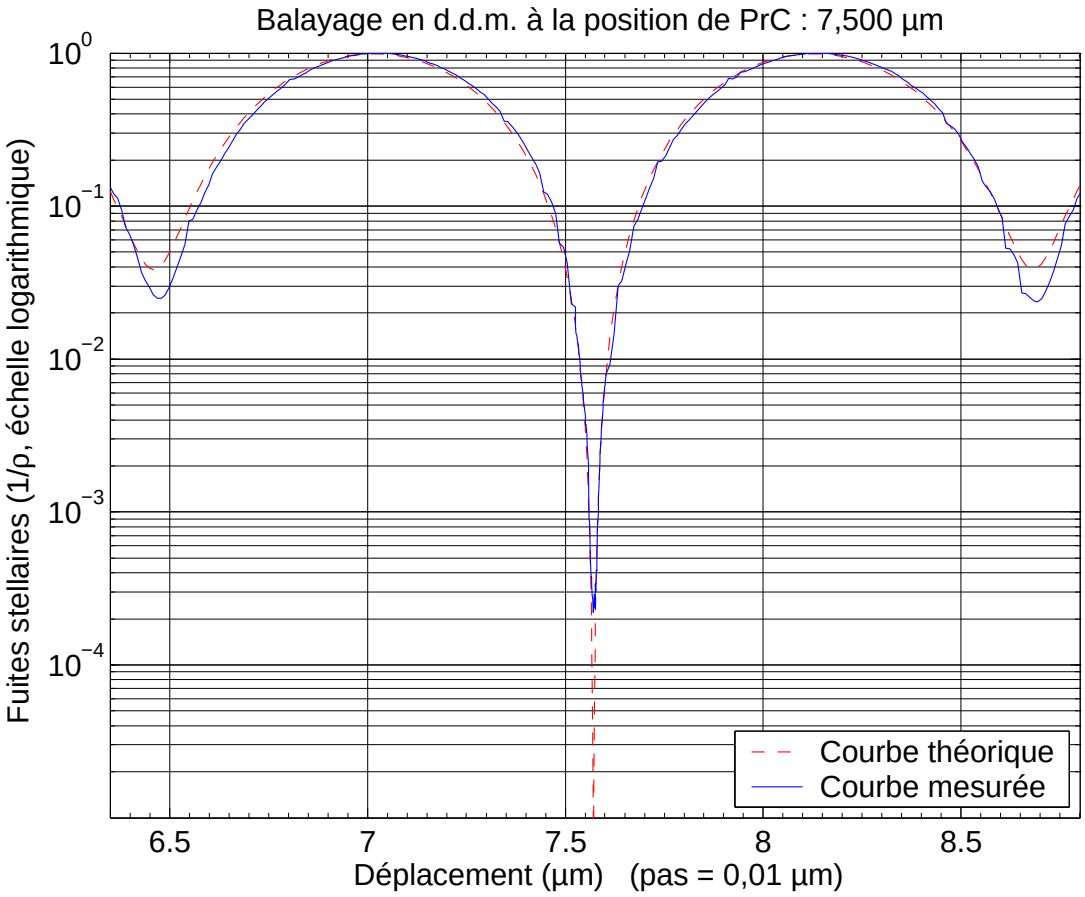


FIG. 6.8: Comparaison entre les balayages théorique et pratique, au point de fonctionnement.
Les fuites stellaires ont été normalisées au maximum des franges brillantes. La courbe théorique (en pointillés) a été ajustée avec l'hypothèse que le minimum de la frange noire expérimentale est exactement située au point de fonctionnement. Il s'agit de la courbe idéale, pour une égalité parfaite des flux relatifs. La courbe expérimentale (en trait plein) a été corrigée du courant d'obscurité du détecteur. Le taux de réjection mesuré atteint 4 500, les flux relatifs étant égaux à mieux que 1% lors de la mesure.

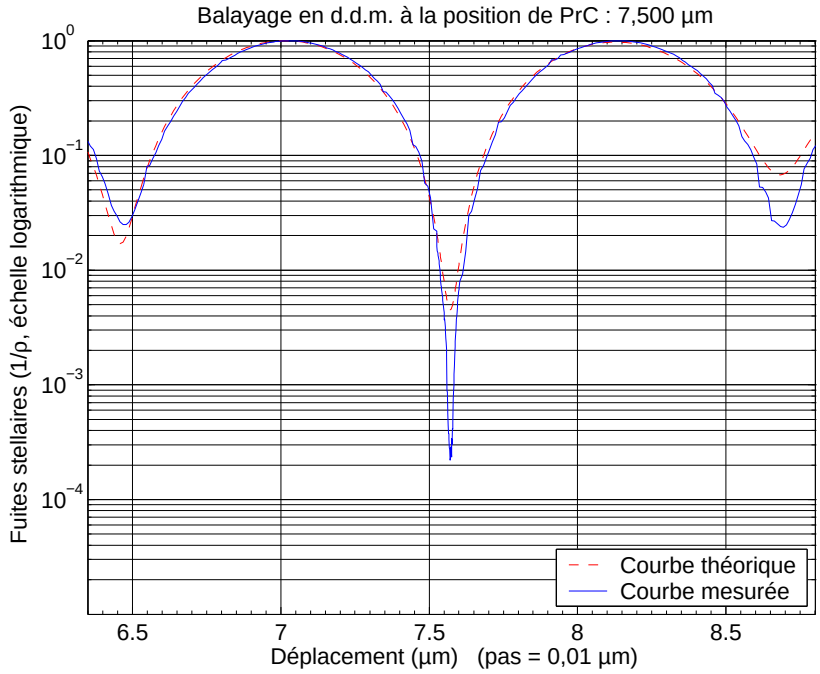


FIG. 6.9: Balayage en différence de marche pour une incidence non nulle sur le prisme coulissant. L'angle d'incidence vaut ici 1°, valeur est assez élevée par rapport au réglage escompté avec la procédure mise en place. Les franges "grises" deviennent dissymétriques, ce qui ne permet pas d'expliquer leur profondeur théorique inférieure à celle mesurée en pratique.

haute précision[131] de l'indice réel du matériau employé pour la fabrication des prismes du déphaseur et aucune n'a été réalisée. Cela restera donc une hypothèse ...

6.2.3 Mesures sans filtrage modal

Dans sa thèse et par ses mesures de taux de réjection en lumière monochromatique, Marc Ollivier avait montré l'importance cruciale du filtre par un guide d'onde monomode en sortie d'interféromètre. Les mesures effectuées sur le banc SYNAPSE viennent confirmer ce point de façon évidente. La figure 6.10 représente le meilleur taux de réjection obtenu par balayage en différence de marche sans recours à la fibre monomode d'extraction. Le taux de réjection maximal reste inférieur à 40, ce qui est très loin des performances théoriques du banc sans filtrage modal, que nous avons évaluées à 650.

6.2.4 Stabilité de la frange noire

Même si les balayages en différence de marche sont un moyen très utile pour localiser efficacement le point de fonctionnement, ils ne fournissent qu'une valeur instantanée du taux de réjection lors du passage en frange noire.

Il faut donc, une fois ce point de fonctionnement parfaitement localisé, étudier la stabilité à long terme des fuites stellaires. Pour cela, il s'agit simplement d'enregistrer le signal acquis par le détecteur lorsque la platine piézoélectrique de la ligne à retard asservie est placée au minimum de la frange noire, localisé lors d'un balayage antérieur.

[131] Les indices de la fluorine calculés à partir des deux représentations de Sellmeier utilisées dans cette thèse ne diffèrent, pour une longueur d'onde moyenne de 2,2 µm, que de $2,4.10^{-4}$.

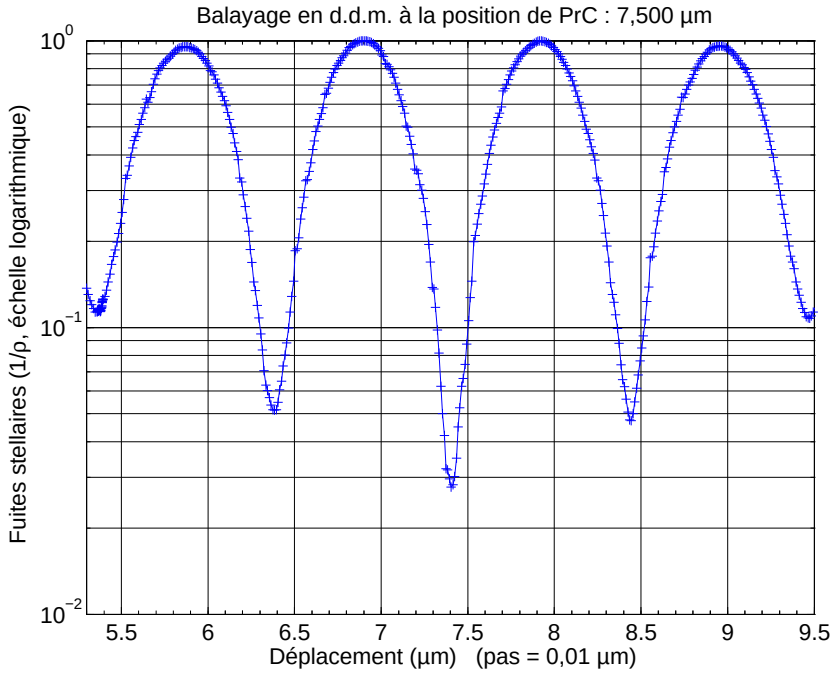


FIG. 6.10: Balayage en différence de marche sans filtrage modal.
Le taux de réjection, au point de fonctionnement, reste inférieur à 40.

Mesures temporelles

D'une façon générale, on représente habituellement sur un même graphe la frange brillante, puis la frange noire après translation manuelle, et enfin le courant d'obscurité du détecteur, permettant d'évaluer la marge de la mesure par rapport au minimum détectable. La figure 6.11 représente l'un des meilleurs enregistrements temporels du signal interférométrique. Le taux de réjection moyen, sans retouche de la différence de marche durant l'acquisition, atteint environ 3 700, avec un niveau moyen supérieur d'un facteur 2,4 au niveau moyen du signal d'obscurité du détecteur. On atteint donc les limites du détecteur monopixel qui a été utilisé pour cet enregistrement. Malgré tout, l'écart-type du taux de réjection est de l'ordre de 850 (22%), ce qui est considérable.

Plus que l'obtention d'un meilleur taux de réjection, l'étude temporelle s'est donc poursuivie par la recherche des sources d'instabilité. Pour cela, des enregistrements de plus longue durée ont été effectués, dans les mêmes conditions expérimentales.

Sur la figure 6.12 est représenté un enregistrement du signal interférométrique durant environ dix minutes. Bien que le taux de réjection, sans retouche de la différence de marche durant l'acquisition, reste autour de 4 000, avec un écart-type de 715 (18%), durant les 100 premières secondes, les fuites stellaires accusent une importante dérive par la suite, avec une perte d'un facteur 4.

Tentatives d'explications

La première hypothèse qui vient à l'esprit en observant l'enregistrement de la figure 6.12, pour expliquer cette dérive, est qu'elle provient des variations de la différence de marche durant l'enregistrement, notamment sous l'effet des changements de température de l'enceinte. Il faut en effet plusieurs heures pour que l'atmosphère dans celle-ci se stabilise sous l'effet du chauffage et les variations dans l'égalité des flux relatifs obligent actuellement de fréquentes ouvertures de l'enceinte.

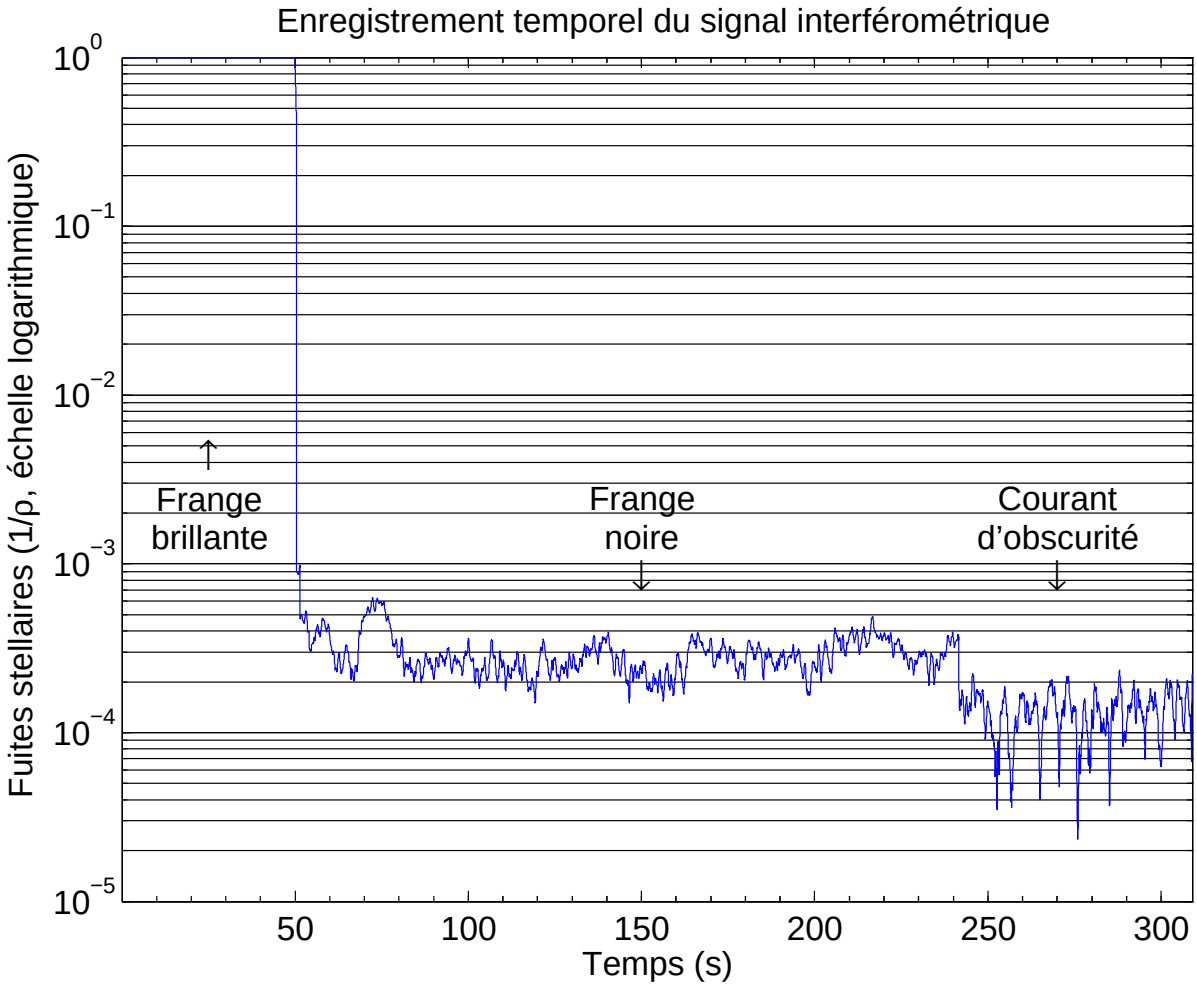


FIG. 6.11: Enregistrement temporel du signal interférométrique.
Cette courbe représente le signal interférométrique acquis sur l'une des voies destructives de SYNAPSE, après filtrage modal par la fibre monomode. La mesure a été enregistrée en bande K à une fréquence de 40 Hz, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche. La transition entre frange brillante ($0s \leq temps \leq 50s$) et frange noire ($50s \leq temps \leq 240s$) a été effectuée manuellement (et volontairement) au moyen de la ligne à retard, sans asservissement de la différence de marche. Le courant d'obscurité ($240s \leq temps \leq 310s$) a été enregistré en obturant le détecteur au moyen d'un miroir. Le taux de réjection moyen, sans retouche de la différence de marche durant l'acquisition, atteint environ 3 700, pour un écart-type de l'ordre de 850 (22%). Le niveau moyen de la réjection est supérieur d'un facteur 2,4 au niveau moyen du signal d'obscurité du détecteur.

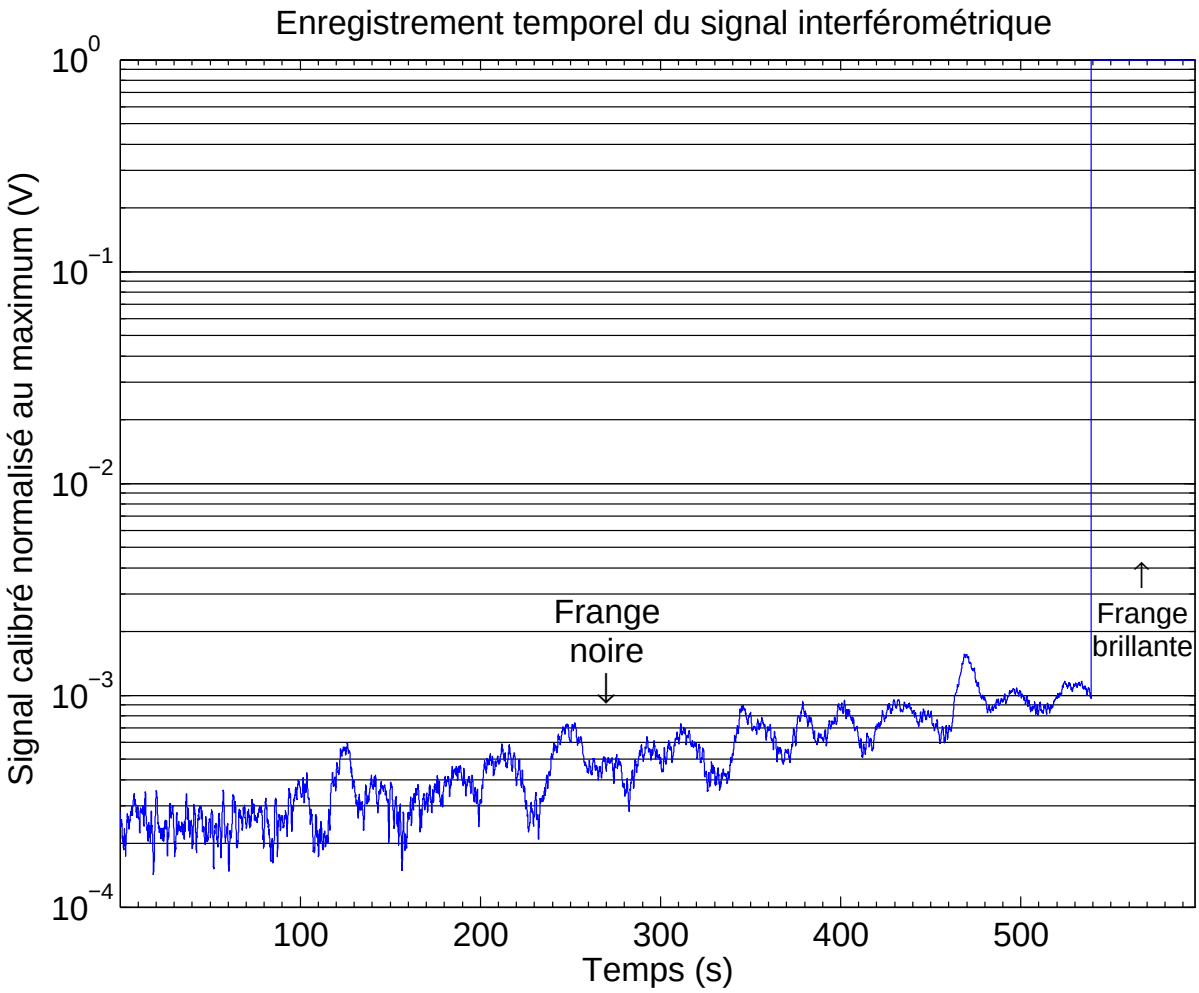


FIG. 6.12: Enregistrement "longue durée" du signal interférométrique sans asservissement.
Cette courbe représente le signal interférométrique acquis sur l'une des voies destructives de SYNAPSE, après filtrage modal par la fibre monomode. La mesure a été enregistrée en bande K à une fréquence de 40 Hz, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche. La transition entre la frange noire ($0\text{s} \leq \text{temps} \leq 540\text{s}$) et la frange brillante ($540\text{s} \leq \text{temps} \leq 600\text{s}$) a été effectuée manuellement (et volontairement) au moyen de la ligne à retard, **sans asservissement de la différence de marche**. Le taux de réjection, sans retouche de la différence de marche durant l'acquisition une fois sa valeur optimisée, reste autour de 4 000 durant les 100 premières secondes, avec un écart-type de 715 (18%). Ensuite, les fuites stellaires accusent une importante dérive.

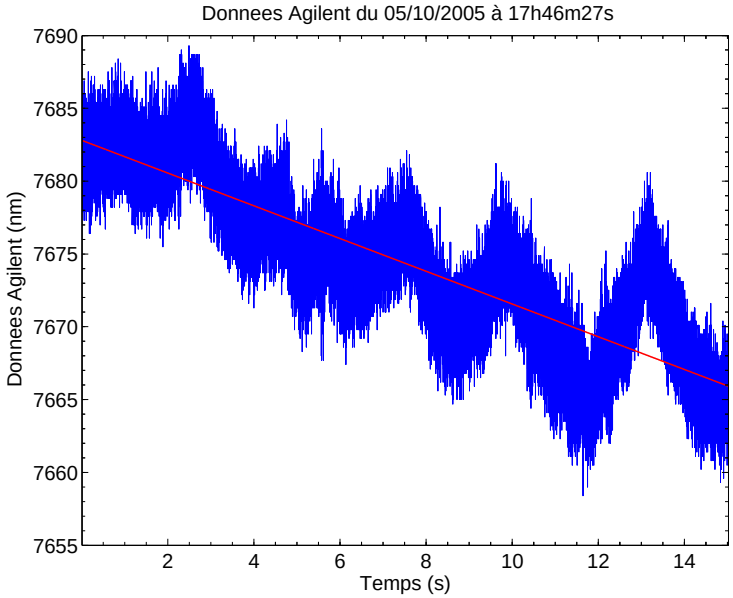


FIG. 6.13: Données de métrologie **sans asservissement**.
Cette courbe représente les variations de différence de marche enregistrées sur la voie métrologique de l'interféromètre à une fréquence de 4 kHz, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche. Une courbe de tendance a été superposée aux données. Elle montre une dérive moyenne d'environ 1,1 nm / s.

La figure 6.13 représente un enregistrement des données de métrologie consécutif[132] à cette mesure. Elle montre une dérive moyenne d'environ 1,1 nm / s. Si l'on rapporte cette dérive à la durée de l'enregistrement de la figure 6.12, cela correspond à une différence de marche additionnelle par rapport à celle du point de fonctionnement de 550 nm. Ceci implique que le point de mesure serait "remonté" le long de la frange noire durant la mesure. Le conditionnel est de rigueur, car cet enregistrement ne dure que 15 secondes et il n'est pas exclu que la dérive observée se soit inversée au-delà de l'enregistrement présenté. En effet, d'après la courbe de la figure 6.8, avec un tel décalage, l'état d'interférence devrait être quasiment revenu à la frange brillante adjacente, ce qui n'est pas le cas ...

Par ailleurs, un second enregistrement, cette fois-ci avec asservissement de la différence de marche, a été réalisé quelques minutes plus tard. Il est représenté sur la figure 6.14, mais, étant donné son allure, sa durée a été limitée à environ cinq minutes. En effet, bien que les conditions environnementales aient été très proches durant les deux enregistrements, la dérive des fuites stellaires avec asservissement est très nettement supérieure à celle mesurée sans celui-ci. Elle atteint ainsi près d'un facteur 20 sur un temps deux fois moins important.

Afin de comparer rigoureusement les deux réalisations, la figure 6.15 représente un enregistrement similaire des données de métrologie durant la mesure. La plupart des basses fréquences ont disparu, à l'exception d'une dérive très basse fréquence, de l'ordre de 70 pm / s. Celle-ci correspond, rapporté à la durée de l'enregistrement des fuites stellaires avec asservissement, à un décalage d'environ 20 nm. Le taux de réjection devrait donc avoir perdu environ un facteur 15 et être donc "redescendu" jusqu'à environ 300. Ici, l'accord est presque correct.

[132] Pour des raisons de débit de données, il n'était pas possible, à l'époque, d'enregistrer les deux paramètres simultanément.

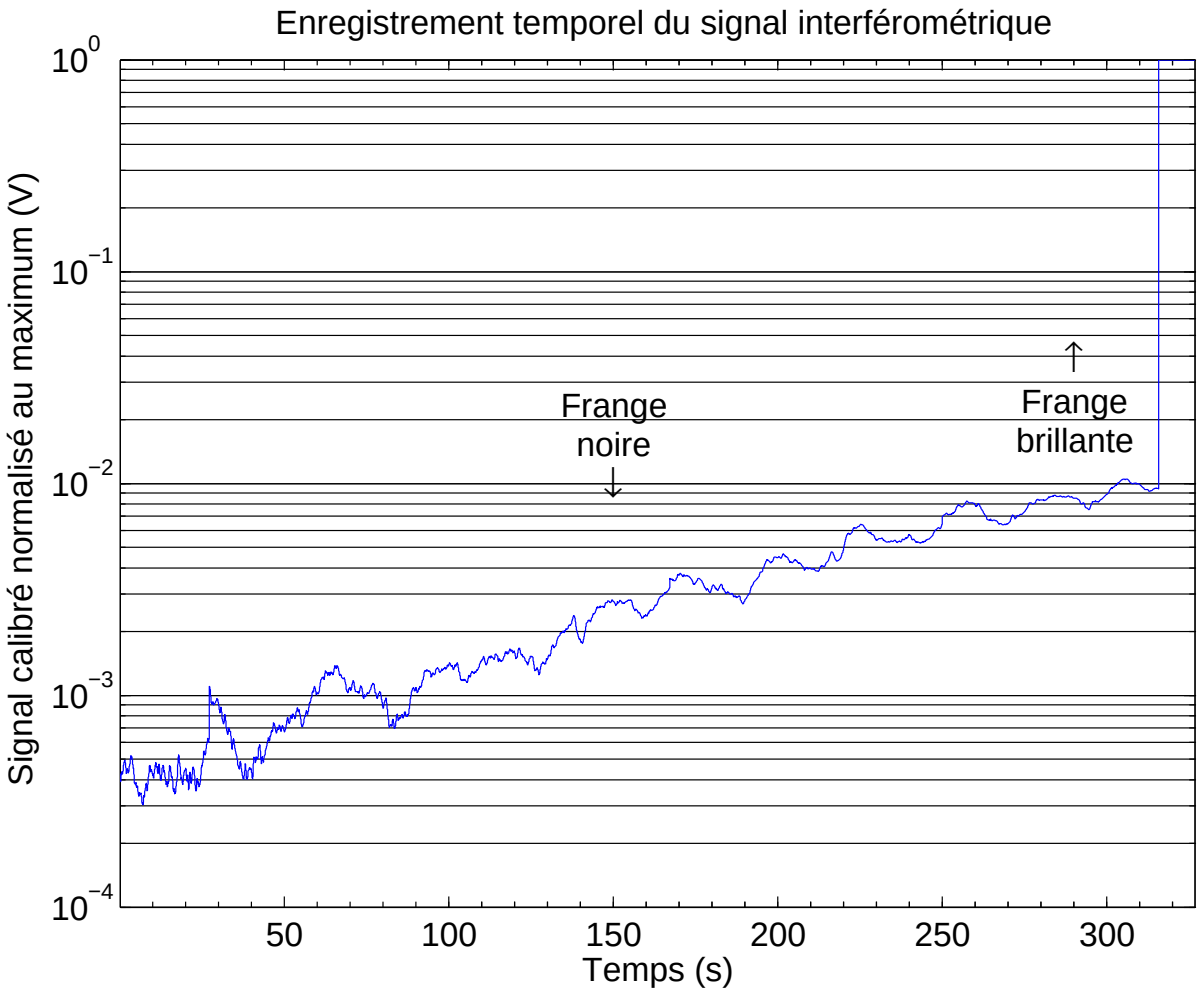


FIG. 6.14: Enregistrement "longue durée" du signal interférométrique avec asservissement.
Cette courbe représente le signal interférométrique acquis sur l'une des voies destructives de SYNAPSE, après filtrage modal par la fibre monomode. La mesure a été enregistrée en bande K à une fréquence de 40 Hz, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche. La transition entre la frange noire ($0s \leq$ temps $\leq 300s$) et la frange brillante ($300s \leq$ temps $\leq 330s$) a été effectuée manuellement (et volontairement) au moyen de la ligne à retard, **avec asservissement de la différence de marche**. Le taux de réjection, sans retouche de la différence de marche durant l'acquisition une fois sa valeur optimisée, reste autour de 2 400, avec un écart-type de 300 (13%), durant seulement les 20 premières secondes. Ensuite, les fuites stellaires accusent une importante dérive.

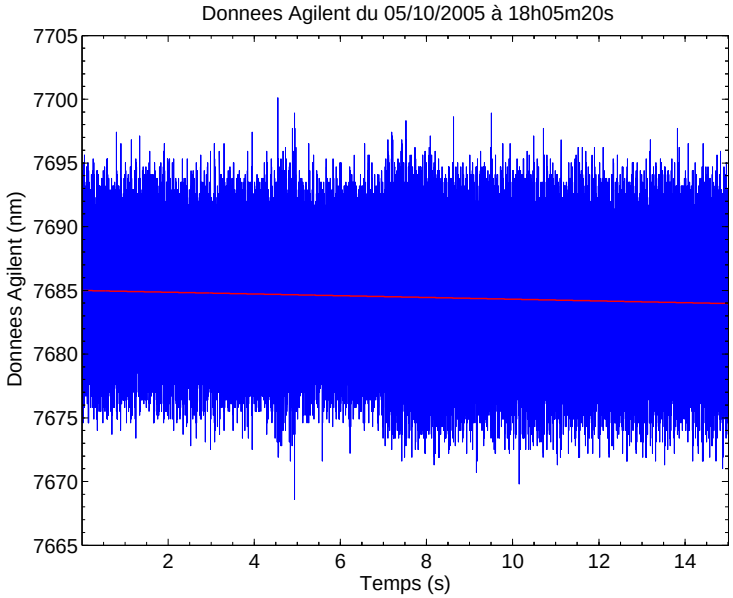


FIG. 6.15: Données de métrologie **avec asservissement**.
Cette courbe représente les variations de différence de marche enregistrées sur la voie métrologique de l'interféromètre à une fréquence de 4 kHz, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche. Une courbe de tendance a été superposée aux données. Elle montre une dérive moyenne d'environ 70 pm / s, ce qui est, certes, faible, mais suffisant pour "perdre" le point de fonctionnement.

Au vu des mesures effectuées sur le banc SYNAPSE, il faut supposer que les conditions de la mesure réalisée sans asservissement étaient extrêmement favorables pour expliquer la stabilité supérieure à l'enregistrement avec asservissement de la différence de marche.

Étant donné les problèmes d'instabilités rencontrés, aucune mesure en bande L n'a été menée à ce jour. Il reste, malgré tout, que **la meilleure performance obtenue en bande K est d'un taux de réjection de 4 000, maintenu durant environ deux minutes, avec un écart-type de 715 (18%)**.

6.3 Performances de l'asservissement en différence de marche

Les dérives observées dans la différence de marche asservie ont conduit, suite aux mesures évoquées au paragraphe précédent, à un ré-étalonnage du dispositif d'asservissement analogique. Des mesures de la fonction de transfert du système complet (réponse à une excitation de type "bruit blanc", envoyée sur la platine piézoélectrique de la ligne à retard LR2, observée dans les données métrologiques) ont, en effet, montré que celle-ci avait changé depuis la mise en place du dispositif quelques semaines auparavant. Cette évolution est très certainement due aux démontage puis remontage des optiques nécessaires lors de la procédure de réglage du banc SYNAPSE, qui a été réalisée entre temps.

Une modification des paramètres du boîtier a donc été effectuée et a permis de retrouver les performances originelles du système. La figure 6.16 présente un enregistrement des données métrologiques sur près de deux heures. On constate que la différence de marche crête-crête est réduite à 11 nm, pour une valeur *rms* de seulement 1,6 nm. La dérive est ainsi réduite à 0,2 nm / h, ce qui est une performance tout à fait acceptable.

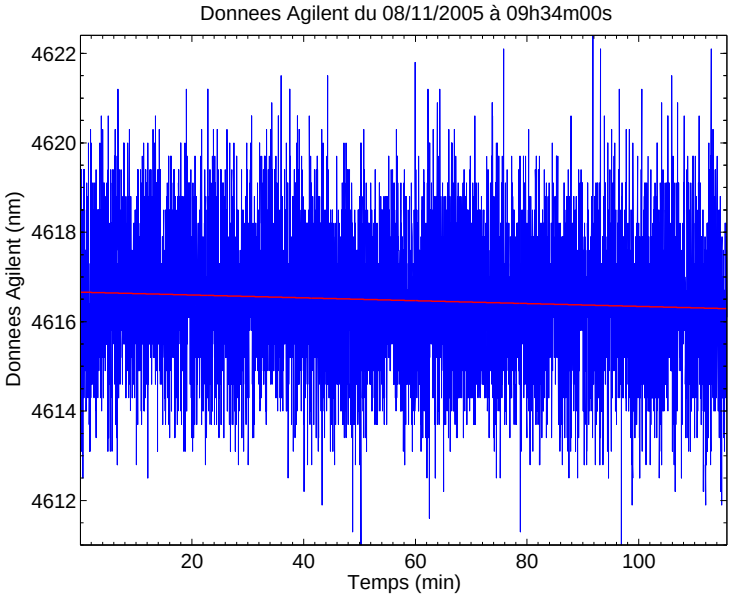


FIG. 6.16: Données de métrologie **avec asservissement**.
Cette courbe représente les variations de différence de marche enregistrées sur la voie métrologique de l'interféromètre durant près de deux heures, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche depuis plus de 12 h. Une courbe de tendance a été superposée aux données. Elle montre une dérive moyenne de seulement 0,2 nm / h.

La figure 6.17 illustre enfin le domaine fréquentiel de correction de l'asservissement en différence de marche, avec les spectres des données de métrologie pour la bande $[0; 100\,\text{Hz}]$. La bande passante de l'asservissement peut ainsi être évaluée à environ 40 Hz.

Malgré ces améliorations, d'autres mesures de réjection ont ensuite confirmé les premières, à savoir que la stabilité est meilleure sans qu'avec l'asservissement de la différence de marche. Bien que celui-ci fonctionne aujourd'hui parfaitement, il semblerait donc qu'il n'agisse pas de façon correcte sur les variations de différence de marche vues par les faisceaux scientifiques. En tout état de cause, il semble donc, mais cela reste à confirmer, que la distance (imposée par la nature du système) entre la voie métrologique et la voie scientifique tende à amplifier les dérives naturelles observées sans asservissement. D'autres méthodes de mesure de la différence de marche réelle sont donc à envisager.

6.4 Améliorations du système

Au vu des mesures présentées au paragraphe 6.2.4, un certain nombre de paramètres peuvent être améliorés. La priorité est, dans un premier temps, d'améliorer la stabilité de la réjection obtenue. Une fois cette stabilité acquise, la position du point de fonctionnement pourra être affinée plus facilement, d'où un gain possible sur le niveau-même de cette réjection.

- ➢ La stabilité mécanique de certains systèmes du banc SYNAPSE est à remettre en cause.
  - ∗ Pour obtenir les résultats précédents, les vérins à la fois piézoélectriques et manuels qui équipaient la platine supportant la dernière recombinatrice *S*4, ont dû être remplacés. En effet, ces vérins n'étaient pas totalement adaptés à la platine *Newport* utilisée et occasionnaient un jeu dans les réglages. Après remplacement de ces butées par des molettes manuelles adaptées, l'égalisation des flux, d'un jour sur l'autre, était plus stable. La précision requise pour le cou-

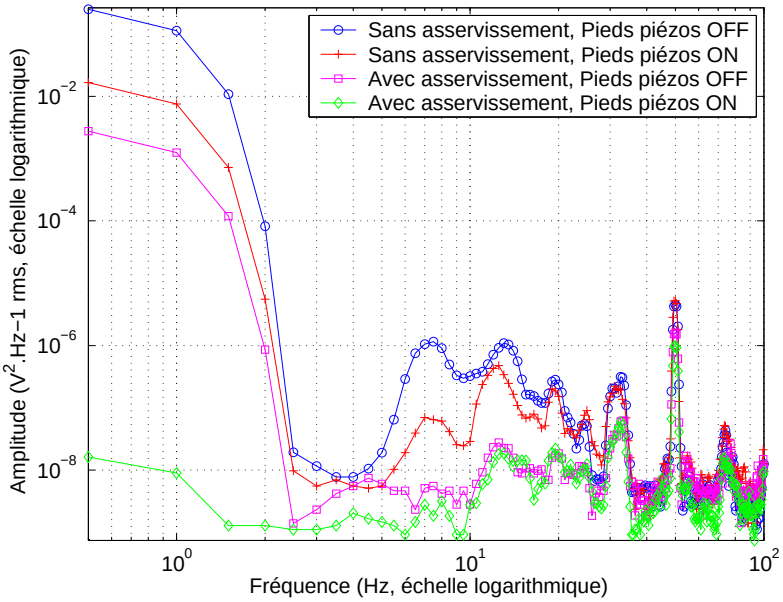


FIG. 6.17: Spectre des données de métrologie avec et sans asservissement.
Cette courbe représente les spectres des données métrologiques représentatives des variations de différence de marche, l'enceinte du banc étant fermée et le chauffage en marche. L'action de correction de l'asservissement et des pieds piézoélectriques actifs est clairement visible pour les fréquences inférieures à 50 Hz. D'autre part, la bande passante de l'asservissement peut ainsi être évaluée à 40 Hz.

plage dans la fibre monomode des faisceaux recombinés nous amène à penser qu'une refonte plus complète de cette platine devrait être envisagée ;

* D'autre part, toujours d'un point de vue mécanique, le support d'injection dans la fibre de sortie ne semble pas totalement adapté à la fibre que nous utilisons. Les fibres en verre fluoré étant très fragiles, elles sont munies d'une gaine mécanique rigide. Cette rigidité entraîne un bras de levier important sur le chariot permettant de positionner la fibre au foyer de la parabole, d'où une sensibilité accrue aux réglages. Il semblerait que le support employé soit plus adapté à des fibres optiques "classiques", beaucoup plus souples. Une solution pourrait être d'inverser les rôles, en déplaçant la parabole par rapport à la fibre ;
* Enfin, la fixation des optiques, gardée volontairement souple, afin de ne pas introduire de contraintes sur les surfaces, révèle peut-être, cette fois-ci, un manque de rigidité. Des mesures de différence de marche effectuées sur le banc en diffusant certaines fréquences acoustiques, au moyen d'un haut-parleur, ont montré la présence d'une demi-douzaine d'harmoniques de la fréquence d'excitation dans le spectre des données métrologiques. Cette grande sensibilité acoustique pourrait conduire à une insonorisation plus poussée de l'enceinte du banc ;

➢ La stabilisation thermique de l'enceinte du banc, grâce au chauffage installé dans sa partie supérieure, est tributaire de la stabilité des flux relatifs. Un chauffage d'au moins 12 heures est nécessaire pour obtenir une stabilité acceptable, or de nombreuses interventions sont indispensables actuellement pour effectuer une mesure. Ce paramètre pourrait jouer très fortement sur les résultats obtenus ;

➢ Au niveau de la détection, les limites du détecteur monopixel étant pratiquement atteintes, le passage vers la caméra CIRCUS, qui n'a pas eu lieu jusqu'ici pour des raisons pratiques, semble

inévitable. Cela demande une logistique plus importante durant les mesures, mais la visualisation des mouvements relatifs des faisceaux sur des images pourrait aider à la localisation des sources de dérives ;

6.5 Perspectives

Une fois la stabilité des mesures améliorée, il est envisagé de disposer un prisme dans le faisceau recombiné, afin de **disperser les franges** sur la matrice de la caméra CIRCUS. De cette façon, il sera possible de quantifier plus précisément le degré d'achromaticité fourni par le déphaseur à prismes.

D'autre part, le **test d'un second déphaseur** devrait commencer au début de l'année 2006. Il s'agit d'un déphaseur achromatique faisant appel au passage par un foyer optique, comme celui présenté au paragraphe 4.3, p. 63. L'implantation de ce nouveau déphaseur suppose une reconfiguration de l'interféromètre en aval des lignes à retard, ainsi qu'une adaptation conséquente de la procédure de réglages des optiques.

Il faut noter enfin que le déphaseur actuel à prismes sera maintenu en place, mais réglé en teinte plate brillante (déphasage quasiment nul). De cette façon, il permettra de compenser les différences d'épaisseur des lames séparatrice et recombinatrice.

Conclusion

La première étape de la recherche de la vie dans l'Univers est aujourd'hui bel et bien franchie. La liste des "mondes", tant convoités depuis l'Antiquité, ne cesse de s'allonger et de se diversifier. D'ici quelques années, nous devrions disposer des outils nécessaires pour passer à l'étape suivante. Il s'agira de détecter des exoplanètes telluriques et de déterminer si elles seraient susceptibles d'abriter la vie, en mettant en évidence des biosignatures dans leurs atmosphères. La vie s'y épanouira-t-elle effectivement, avec une diversité comparable à celle qu'elle développe sur notre planète, ce que la "jeune" discipline qu'est l'exobiologie ne cesse de démontrer ? Difficile à dire, voire impossible à affirmer ... mais la recherche d'exoplanètes a, jusqu'ici, été riche de surprises.

La mission Darwin devrait nous fournir dans quelques années une multitude d'indices sur la formation des systèmes planétaires, leur diversité et leurs capacités d'offrir à la vie un espace de jeu confortable. Elle représente un formidable instrument dans cette quête. Mais un tel instrument se mérite et des solutions techniques ingénieuses devront avoir été développées pour entrevoir les atmosphères de ces planètes.

L'interférométrie en frange noire est un outil puissant, mais aussi très exigeant. Le banc de mesure SYNAPSE développé dans cette thèse en est un exemple. La méthode des lames dispersives, par sa flexibilité, apparaît comme une solution de premier choix pour créer le déphasage achromatique nécessaire à la réjection du flux de l'étoile. Cette solution nous a permis de démontrer qu'un taux de réjection de quelques milliers pouvait être atteint en bande K.

Mais bien plus que l'obtention du contraste maximal demandé pour la mission Darwin, qui plus est sur une bande spectrale beaucoup plus large, c'est la stabilité de cette valeur qui sera déterminante durant les observations. Les photons exoplanétaires sont, à tout point de vue, très chers, mais c'est à ce prix que l'Homme pourra peut-être, un jour, savoir s'il peut se sentir un peu moins seul dans l'Univers ...

Annexes

Annexe A

Procédure de réglages du banc SYNAPSE

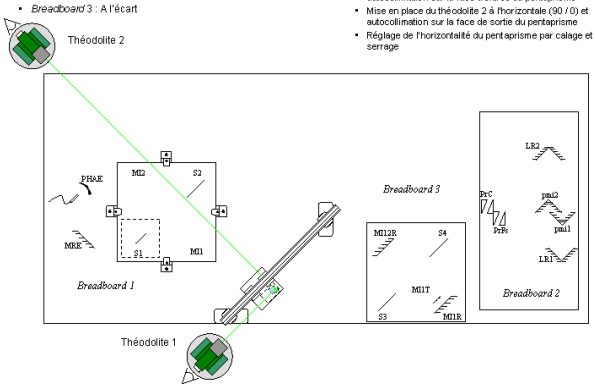
Etapes préliminaires :

- Positionnement grossier des *breadboards*.
- Réglage de l'injection du faisceau infrarouge dans la fibre optique monomode (maximisation du flux en sortie de fibre), en injectant le laser HeNe de 10 mW.
- Réglage de l'extraction de la fibre par projection à grande distance, jusqu'à obtention d'un faisceau circulaire, dont le *waist* peut être positionné en ne jouant que sur la mise au point de la fibre au foyer de la parabole.

Etape 1 : Réglage de l'horizontalité du niveau à bulle

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart
- *Breadboard* 3 : A l'écart

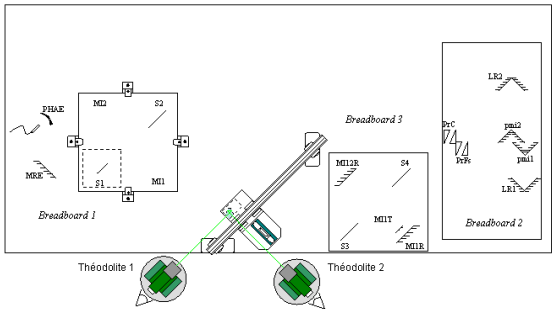
Opérations :
- Mise en place du théodolite 1 à l'horizontale (90 / 0) et autocollimation sur la face d'entrée du pentaprisme
- Mise en place du théodolite 2 à l'horizontale (90 / 0) et autocollimation sur la face de sortie du pentaprisme
- Réglage de l'horizontalité du pentaprisme par calage et serrage



Etape 2 : Étalonnage de l'horizontalité du niveau à bulle

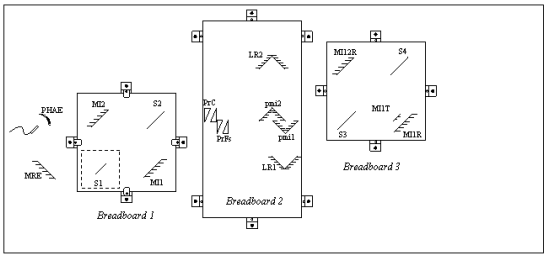
Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart
- *Breadboard* 3 : A l'écart

Opérations :
- Retournement du pentaprisme de 180°
- Théodolite 1 toujours à l'horizontale (90 / 0) et en autocollimation sur la face d'entrée du pentaprisme
- Mise en place du théodolite 2 à l'horizontale (90 / 0) et autocollimation sur la face de sortie du pentaprisme
- Mesure du décalage nécessaire pour ramener la croix du théodolite 2 à l'horizontale (~38")



Etape 3 : Positionnement des *breadboards*

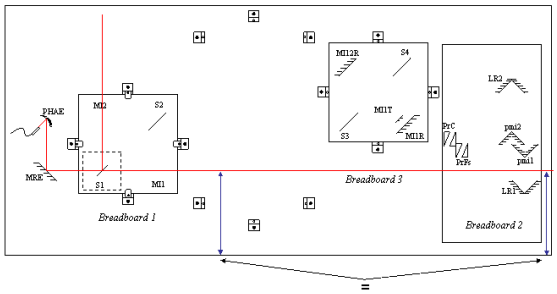
Opérations :
- *Breadboard* 1 : Positionnement en butée sur les cales, mise en place des brides
- *Breadboard* 2 : Positionnement approximatif en butée sur les cales, mais non bridé
- *Breadboard* 3 : Positionnement approximatif en butée sur les cales, mais non bridé



Etape 4 : Parallélisme du faisceau « infrarouge » avec le banc

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, non bridé

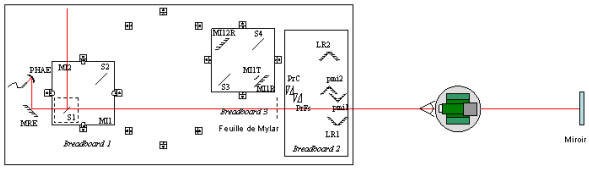
Opérations :
- Injection du laser He-Ne 10 mW, réglage parallélisme du faisceau après MRE



Etape 5 : Hauteur du faisceau « infrarouge »

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, non bridé

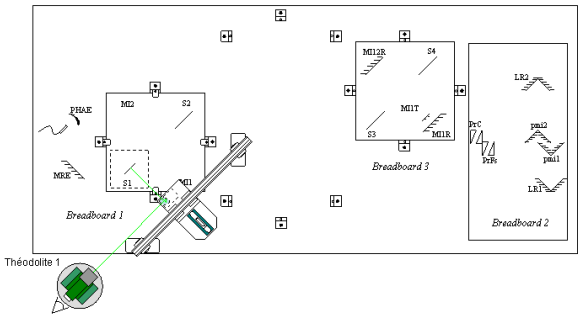
Opérations :
- Injection puis projection du faisceau IR sur un miroir à grande distance
- Réglage de l'élévation de ce miroir par autocollimation avec le théodolite 2 placé devant lui, pour définir l'horizontale
- Mise en place de la feuille de Mylar
- Réglage de la hauteur du faisceau IR après MRE par autocollimation sur ce miroir
- Vérification hauteur de faisceau (= PHAS) en bout de banc



Etape 6 : Réglage de S1

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, non bridé

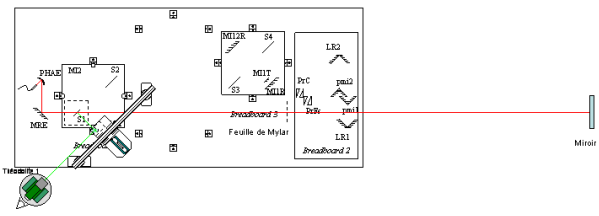
Opérations :
- Mise en place du théodolite à un angle proche de 45° (appréciation visuelle)
- Autocollimation, *via* le pentaprisme, de S1, telle que le niveau à bulle soit horizontal



Etape 7 : Translation de MRE

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, non bridé

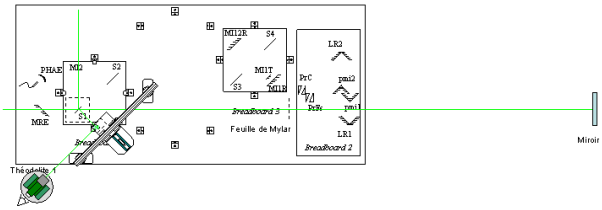
Opérations :
- Injection du faisceau IR
- Mise en place de la feuille de Mylar
- Réglage de la translation de MRE par rapport au biseau de S1 en maintenant l'autocollimation sur le miroir distant
- Vérification qu'il n'y ait pas de vignetage par le support de S1
- Vérification hauteur de faisceau (= PHAS) en bout de banc



Etape 8 : Injection du faisceau métrologique

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, non bridé

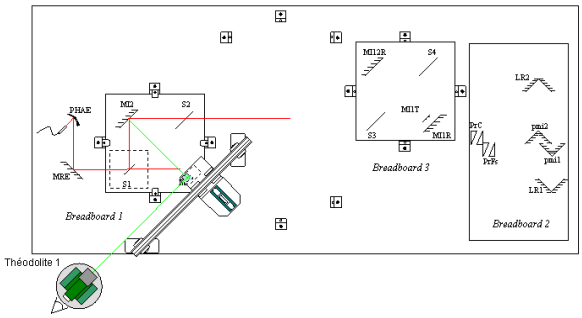
Opérations :
- Mise en place de la séparatrice *Agilent*
- Injection du faisceau métrologique
- Mise en place de la feuille de Mylar
- Réglage du parallélisme du faisceau métrologique avec le bord du banc
- Réglage de la hauteur par autocollimation sur le miroir distant avec une séparation verticale d'environ 38 mm
- Vérification de l'autocollimation de S1 sur le théodolite 1 *via* le pentaprisme



Etape 9 : Mise en place et réglage de MI2

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, non bridé

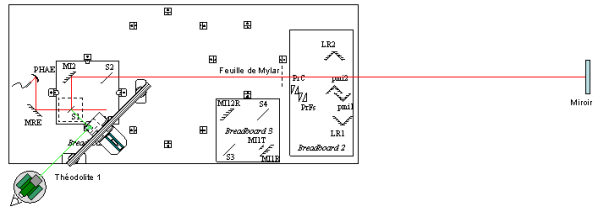
Opérations :
- Mise en place de MI2
- Injection du faisceau infrarouge, réglage de la translation de MI2 par rapport au biseau de S2
- Autocollimation de MI2, *via* le pentaprisme



Etape 10 : Déplacement du miroir distant

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

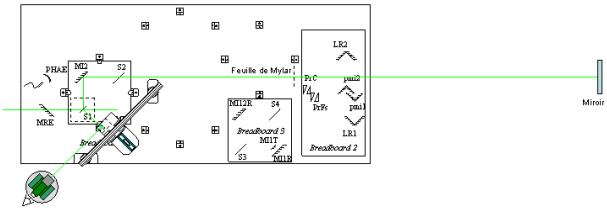
Opérations :
- Déplacement du miroir distant
- Injection puis projection du faisceau IR sur celui-ci
- Mise en place de la feuille de Mylar
- Réglage de ce miroir par autocollimation avec faisceau provenant de MI2, considéré comme horizontal (puisque parallèle à S1)



Etape 11 : Réglage du faisceau métrologique

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

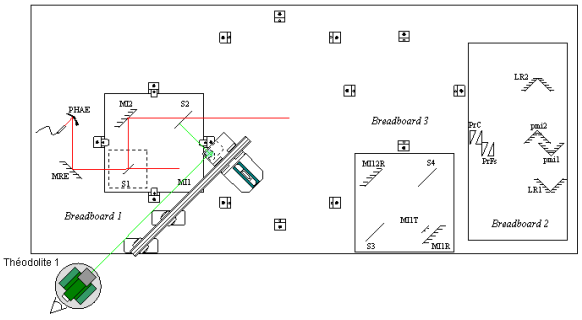
Opérations :
- Injection du faisceau métrologique
- Réglage de la séparatrice *Agilent* jusqu'à autocollimation du faisceau métrologique provenant de MI2, en maintenant l'autocollimation de S1 sur le théodolite 1 *via* le pentaprisme



Etape 12 : Réglage de S2

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

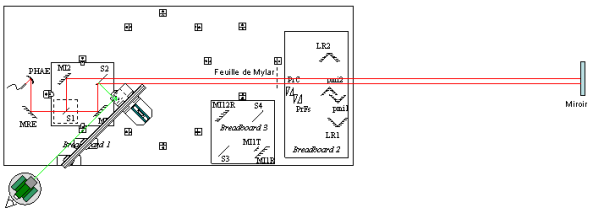
Opérations :
- Autocollimation de S2, *via* le pentaprisme, sur le théodolite 1



Etape 13 : Mise en place et réglage de MI1

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : A l'écart, brides en place de façon approximative
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

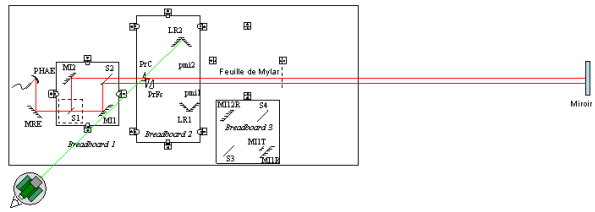
Opérations :
- Mise en place de MI1
- Réglage de MI1 par autocollimation sur le miroir distant



Etape 14 : Réglage des prismes fixes

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

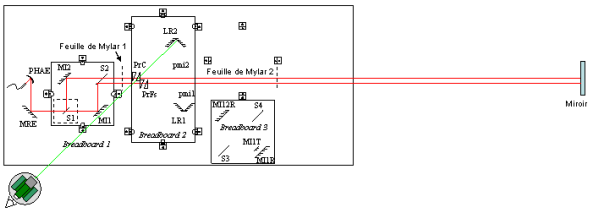
Opérations :
- Mise en place du *breadboard* 2 de façon que les faisceaux IR soit environ à mi-course des prismes
- Suppression des pmis et de PrC
- Réglage des PrFs par autocollimation sur le miroir distant



Etape 15 : Réglage du prisme coulissant

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

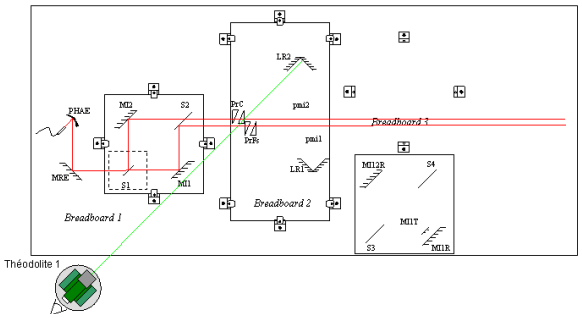
Opérations :
- Mise en place de PrC
- Réduction du diamètre du faisceau par réglage du waist
- Réglage de l'azimuth et de l'un des axes de PrC par autocollimation sur la face d'entrée (1)
- Réglage du dernier axe par autocollimation sur le miroir distant (2)
- Réglage approximatif de l'épaisseur d'air grâce à la translation normale à la face biseautée (~15 mm)



Etape 16 : Réglage de LR2

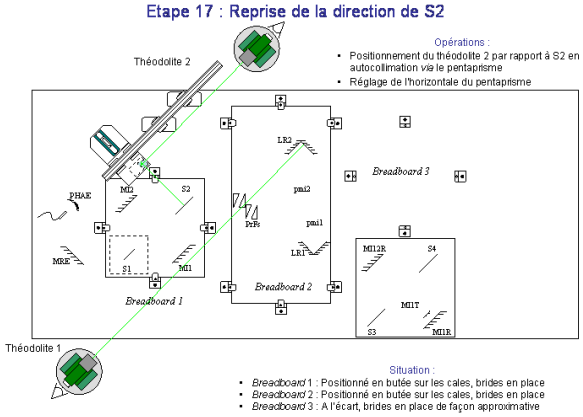
Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

Opérations :
- Autocollimation de LR2 sur le théodolite 1



Etape 17 : Reprise de la direction de S2

Opérations :
- Positionnement du théodolite 2 par rapport à S2 en autocollimation *via* le pentaprisme
- Réglage de l'horizontale du pentaprisme

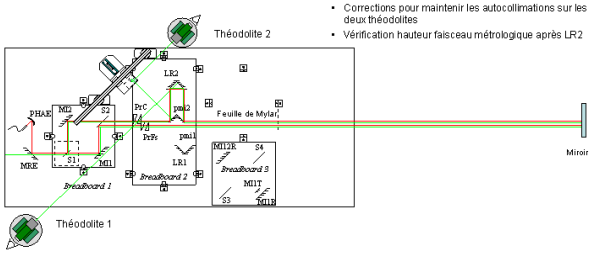


Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

Etape 18 : Réglage de pmi2 et de LR2

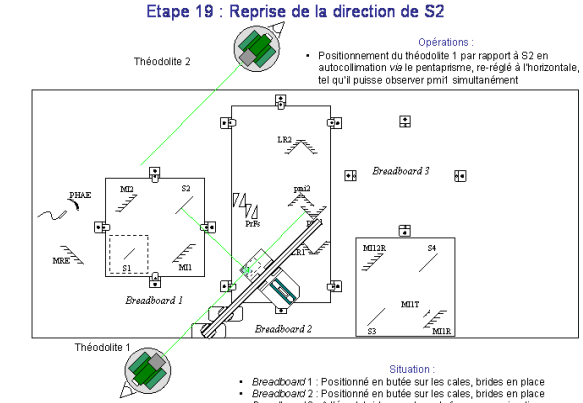
Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

Opérations :
- Mise en place de pmi2
- Autocollimation de pmi2 sur le théodolite 2 *via* le pentaprisme
- Réglage de l'autocollimation du faisceau sur le miroir distant
- Correction pour égaliser la hauteur des faisceaux sur pmi2
- Corrections pour maintenir les autocollimations sur les deux théodolites
- Vérification hauteur faisceau métrologique après LR2



Etape 19 : Reprise de la direction de S2

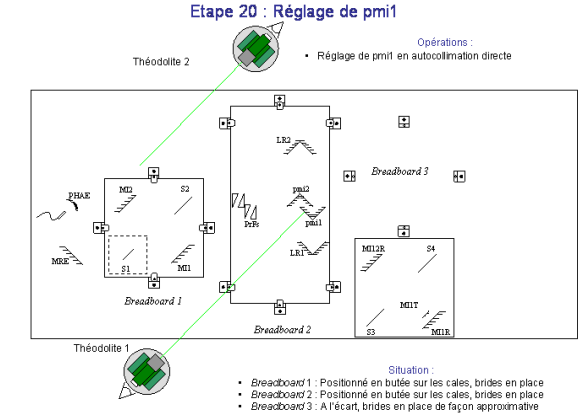
Opérations :
- Positionnement du théodolite 1 par rapport à S2 en autocollimation *via* le pentaprisme, re-réglé à l'horizontale, tel qu'il puisse observer pmi1 simultanément



Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

Etape 20 : Réglage de pmi1

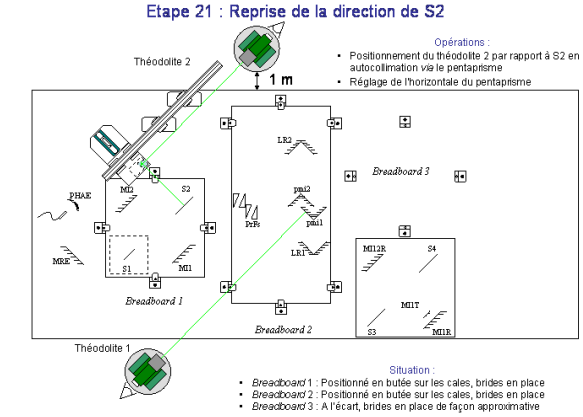
Opérations :
- Réglage de pmi1 en autocollimation directe



Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

Etape 21 : Reprise de la direction de S2

Opérations :
- Positionnement du théodolite 2 par rapport à S2 en autocollimation *via* le pentaprisme
- Réglage de l'horizontale du pentaprisme

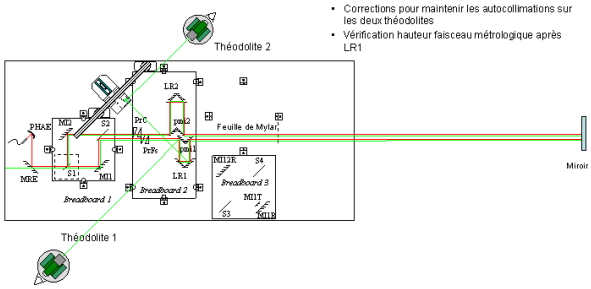


Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

Etape 22 : Réglage de pmi1 et de LR1

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : A l'écart, brides en place de façon approximative

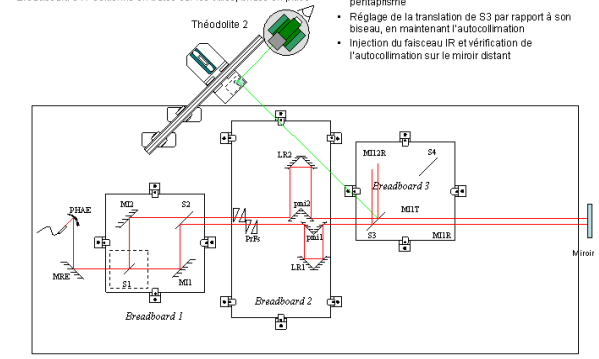
Opérations :
- Mise en place de pmi1
- Autocollimation directe de pmi1 sur le théodolite 1
- Réglage de l'autocollimation du faisceau sur le miroir distant
- Correction pour égaliser la hauteur des faisceaux sur pmi1
- Corrections pour maintenir les autocollimations sur les deux théodolites
- Vérification hauteur faisceau métrologique après LR1



Etape 23 : Réglage de S3

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

Opérations :
- Mise en place du *breadboard* 3
- Autocollimation de S3 sur le théodolite 2 *via* le pentaprisme
- Réglage de la translation de S3 par rapport à son biseau, en maintenant l'autocollimation
- Injection du faisceau IR et vérification de l'autocollimation sur le miroir distant

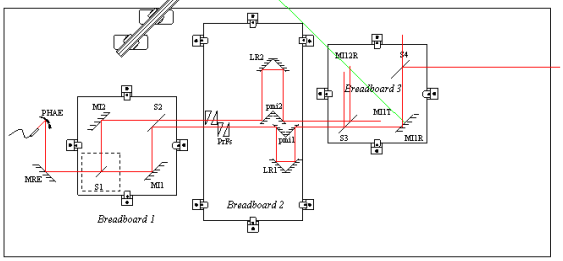


Etape 24 : Réglage de MI1R

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

Théodolite 2

Opérations :
- Mise en place de MI1R
- Autocollimation de MI1R sur le théodolite 2 *via* le pentaprisme
- Réglage de la translation de MI1R par rapport aux biseaux de S4

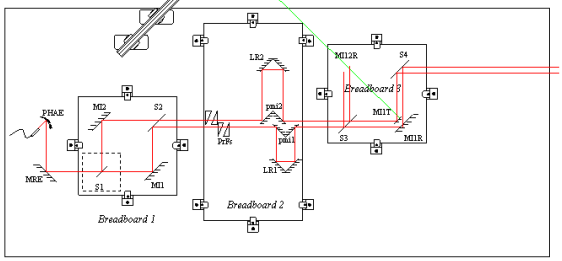


Etape 25 : Réglage de MI1T

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

Théodolite 2

Opérations :
- Mise en place de MI1T
- Autocollimation de MI1T sur le théodolite 2 *via* le pentaprisme
- Réglage de la translation de MI1T par rapport aux biseaux de S4

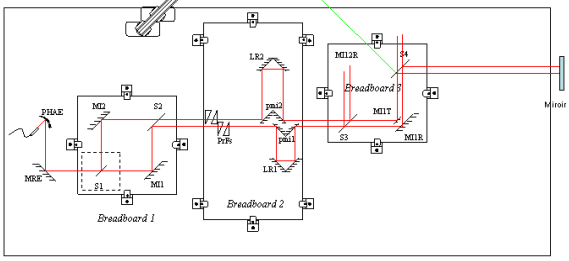


Etape 26 : Réglage de S4

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

Théodolite 2

Opérations :
- Autocollimation de S4 sur le théodolite 2 *via* le pentaprisme
- Vérification de l'autocollimation « relative » des deux faisceaux après déplacement du miroir distant

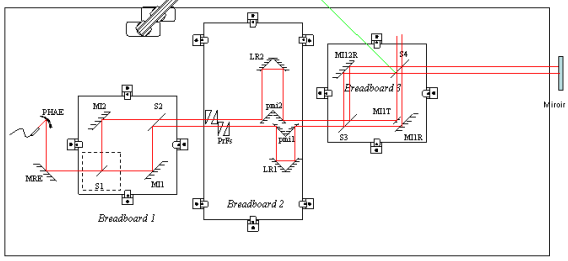


Etape 27 : Réglage de MI12R

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

Théodolite 2

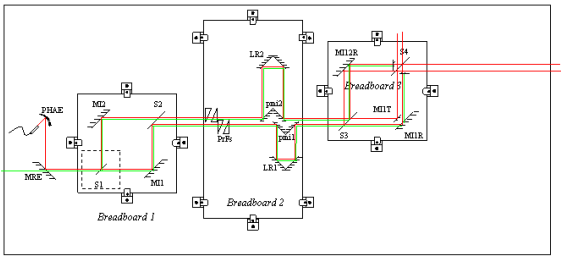
Opérations :
- Mise en place de MI12R
- Réglage de l'orientation de MI12R pour obtenir des franges à l'infini, tout en étant autocollimaté sur le miroir distant
- Réglage de la translation de MI12R par rapport aux biseaux de S4 en maintenant franges et autocollimation



Etape 28 : Réglage de la voie métrologique

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

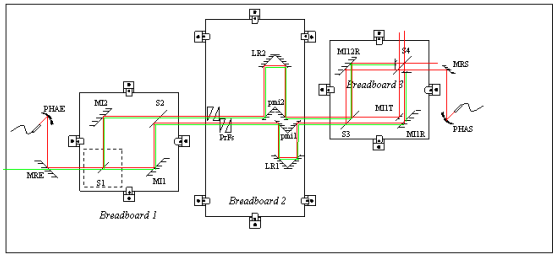
Opérations :
- Mise en place de milm1 et milm2
- Réglage de la voie métrologique en maintenant franges et autocollimation



Etape 29 : Réglage de la parabole de sortie

Situation :
- *Breadboard* 1 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 2 : Positionné en butée sur les cales, brides en place
- *Breadboard* 3 : Positionné en butée sur les cales, brides en place

Opérations :
- Mise en place de MRS et PHAS
- Réglage de l'injection



Annexe B

Mise en équation du déphaseur achromatique à prismes

Il s'agit ici de déterminer la longueur des chemins optiques dans le déphaseur achromatique à prismes, en fonction de l'angle d'incidence du faisceau sur chaque prisme. On ne considère ici que les rotations par rapport à un axe vertical. La figure de la page suivante illustre les notations nécessaires.

Les données concernant la géométrie d'un prisme élémentaire sont les suivantes :

- ➢ B : grande base du prisme (B = 15 mm) ;
- ➢ θ : angle au sommet du prisme ($\theta = 20°$) ;
- ➢ D : hauteur du prisme (D = 20 mm) ;
- ➢ b : petite base du prisme, soit $b = B - D.\tan(\theta)$.

Les données concernant le déphaseur sont les suivantes :

- ➢ e : épaisseur de la lame d'air entre les prismes 1 et 2, et entre les prismes 3 et 4 (e = 15 mm) ;
- ➢ L : distance entre les prismes 1 et 3, en X (L = 30 mm) ;
- ➢ l : distance entre les prismes 1 et 3, en Y (l = 10 mm).

Pour ce qui est des indices, on notera n_{air} l'indice de l'air et $n_{\text{matériau}}$ l'indice du matériau des prismes. On notera enfin, pour les paramètres variables :

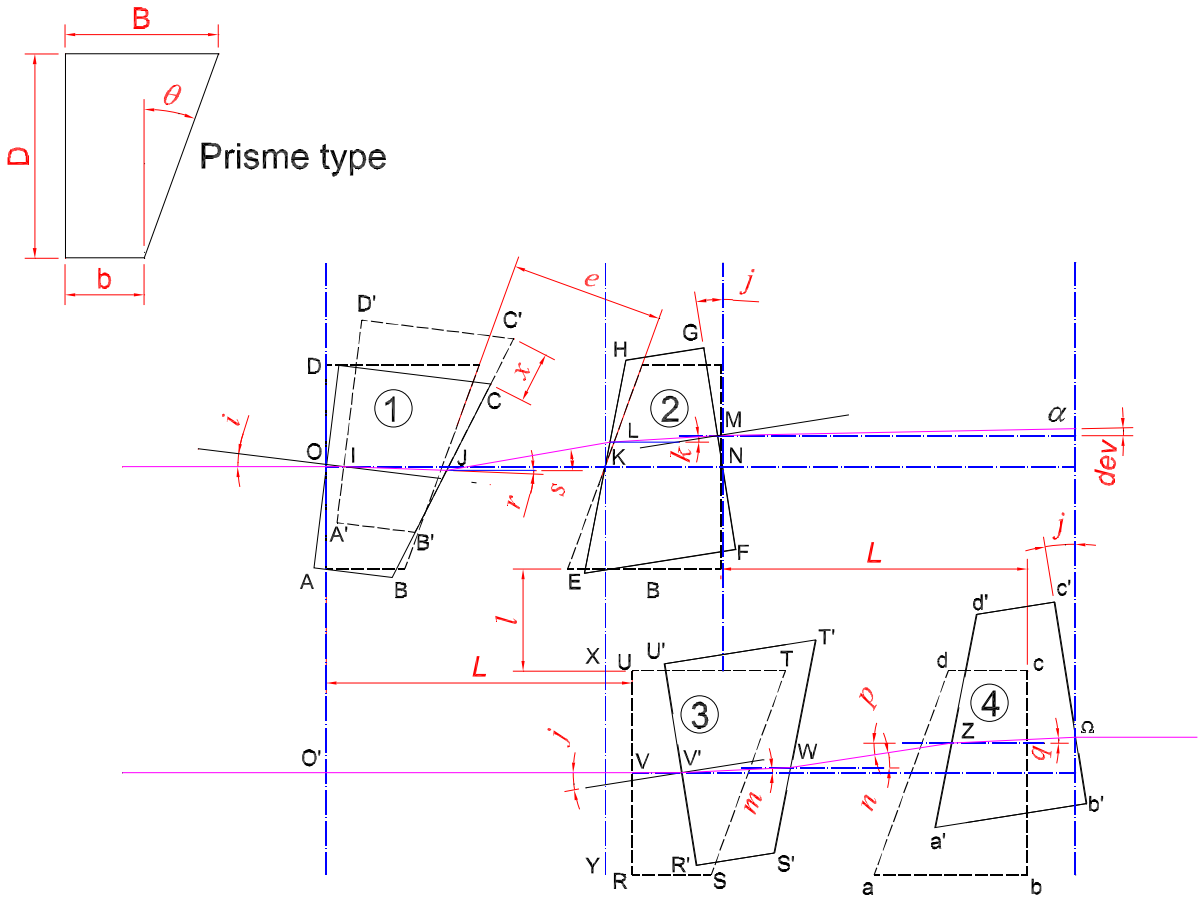
- ➢ x : la translation du prisme coulissant ;
- ➢ i : l'angle de rotation du prisme coulissant PrC autour de la verticale, et par rapport à un pivot situé au centre de la face d'entrée du prisme 1 ;
- ➢ j : l'angle des prismes fixes PrFs autour de la verticale, et par rapport à un pivot situé au centre de la face d'entrée du prisme 2.

La méthode employée considère les points d'impact des faisceaux à chaque interface comme l'intersection de deux droites, celle portant le faisceau et celle portant la face du prisme subissant l'impact. Les équations de ces droites seront déterminées le plus généralement par leur pente et les coordonnées d'un point appartenant à cette droite.

Dans un premier temps, nous considèrerons la voie du prisme coulissant. Il faut, en premier lieu, **déterminer l'angle du faisceau par rapport à l'horizontale pour chaque interface**. Pour cela, nous utiliserons les lois de Snell-Descartes.

- ➢ Angle interne au prisme 1 (OJ) :

$$r = \arcsin\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{matériau}}}\sin(i) - i\right)$$



➢ Angle de sortie du prisme 1 (JL) :

$$s = \arcsin\left(\frac{n_{\text{matériau}}}{n_{\text{air}}}\sin(r+i+\theta)\right) - i - \theta$$

➢ Angle interne au prisme 2 (LM) :

$$k = \arcsin\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{matériau}}}\sin\left(s+\theta-j\right) - \theta + j\right)$$

➢ Angle de sortie du prisme 2 (Mα) :

$$dev = j - \arcsin\left(\frac{n_{\text{matériau}}}{n_{\text{air}}}\sin\left(j-k\right)\right)$$

Par définition, le point O, fixe quelle que soit la translation du prisme, est considéré comme l'origine du chemin optique de la voie PrC. Par conséquent,

$$\left|\begin{array}{l} x_{\text{O}} = 0 \\ y_{\text{O}} = 0 \end{array}\right.$$

Coordonnées du point I, point d'impact du faisceau avec la face d'entrée du prisme 1 :

$$\left|\begin{array}{l} x_{\text{I}} = x.\sin(\theta+i) - x.\cos(\theta+I).\tan(i) \\ y_{\text{I}} = 0 \end{array}\right.$$

La droite (IJ) a pour équation

$$y_{\mathrm{IJ}} = \tan(r).x_{\mathrm{IJ}} - x.\tan(r).\frac{\sin(\theta)}{\cos(i)}$$

On en déduit les coordonnées du point J, point de sortie du faisceau du prisme 1 :

$$\begin{cases} x_{\mathrm{J}} = \dfrac{(B+b).\cos(\theta)}{2.\sin(\theta+i)} - x.\tan(r)\dfrac{\frac{\sin(\theta)}{\cos(i)}}{\frac{1}{\tan(\theta+i)} - \tan(r)} \\ y_{\mathrm{J}} = \tan(r).x_{\mathrm{J}} - x.\tan(r).\dfrac{\sin(\theta)}{\cos(i)} \end{cases}$$

Pour déterminer les coordonnées du point L d'entrée du faisceau dans le prisme 2, nous avons besoin de celles du point K, équivalent à L lorsque l'angle j est nul. On a

$$\begin{cases} x_{\mathrm{K}} = \dfrac{B+b}{2} + \dfrac{e}{\cos(\theta)} \\ y_{\mathrm{K}} = 0 \end{cases}$$

Coordonnées du point L, point d'impact du faisceau avec la face d'entrée du prisme 2 :

$$\begin{cases} x_{\mathrm{L}} = \dfrac{x_{\mathrm{K}} + \left(y_{\mathrm{J}} - \tan(s).x_{\mathrm{J}}\right).\tan\left(\theta - j\right)}{1 - \tan\left(\theta - j\right).\tan(s)} \\ y_{\mathrm{L}} = \tan(s).(x_{\mathrm{L}} - x_{\mathrm{J}}) + y_{\mathrm{J}} \end{cases}$$

Pour déterminer les coordonnées du point M de sortie du faisceau du prisme 2, nous avons besoin de celles du point N, équivalent à M lorsque l'angle j est nul. On a

$$\begin{cases} x_{\mathrm{N}} = x_{\mathrm{K}} + \dfrac{B+b}{2.\cos\left(j\right)} \\ y_{\mathrm{N}} = 0 \end{cases}$$

On en déduit les coordonnées du point M, point de sortie du faisceau du prisme 2 :

$$\begin{cases} x_{\mathrm{M}} = \dfrac{x_{\mathrm{N}} - \tan\left(j\right)\left(y_{\mathrm{L}} - \tan(k).x_{\mathrm{L}}\right)}{1 + \tan\left(j\right).\tan(k)} \\ y_{\mathrm{M}} = \begin{cases} y_{\mathrm{L}} + (x_{\mathrm{N}} - x_{\mathrm{L}}).\tan(k) & \text{si } \ j = 0, \\ \frac{x_{\mathrm{N}} - x_{\mathrm{M}}}{\tan(\mathrm{j})} & \text{sinon.} \end{cases} \end{cases}$$

Il restera, pour évaluer le chemin optique dans le bras PrC, à évaluer les coordonnées du point α, situé à la même abscisse que le point Ω de sortie du faisceau du prisme 4.

Dans un second temps, considérons la voie des prismes fixes. Il faut, là encore, **déterminer l'angle du faisceau par rapport à l'horizontale pour chaque interface**. Pour cela, nous utilisons les lois de Snell-Descartes.

➢ Angle interne au prisme 3 (V'W) :

$$m = \arcsin\left(\frac{n_{\mathrm{air}}}{n_{\mathrm{matériau}}}\sin\left(-j\right) + j\right)$$

➢ Angle de sortie du prisme 3 (WZ) :

$$n = \arcsin\left(\frac{n_{\text{matériau}}}{n_{\text{air}}}\sin\left(m - j + \theta\right)\right) + j - \theta$$

➢ Angle interne au prisme 4 (ZΩ) :

$$q = m$$

L'angle de sortie du prisme 4 est nul, par équivalence des deux prismes à une lame à faces parallèles.

Pour déterminer les coordonnées du point d'entrée du faisceau dans le prisme 3, soit le point V', nous utiliserons celles du point U'. Elles s'écrivent :

$$\left.\begin{aligned} x_{\text{U'}} &= x_{\text{K}} + \left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\sin\left(\chi + j\right)}{\cos\left(\chi\right)} \\ y_{\text{U'}} &= -\left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\cos\left(\chi + j\right)}{\cos\left(\chi\right)} \end{aligned}\right\} \text{ avec } \chi = \arctan\left(\frac{L - x_{\text{K}}}{\frac{D}{2} + l}\right)$$

On en déduit les coordonnées du point V' :

$$\left|\begin{aligned} x_{\text{V'}} &= x_{\text{U'}} + \tan\left(j\right)\left(D + l + y_{\text{U'}}\right) \\ y_{\text{V'}} &= -(D + l) \end{aligned}\right.$$

De même, pour déterminer les coordonnées du point de sortie du faisceau du prisme 3, soit le point W, nous utiliserons celles du point T'. Elles s'écrivent :

$$\left.\begin{aligned} x_{\text{T'}} &= x_{\text{K}} + \left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\sin\left(\chi_2 + j\right)}{\cos\left(\chi_2\right)} \\ y_{\text{T'}} &= -\left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\cos\left(\chi_2 + j\right)}{\cos\left(\chi_2\right)} \end{aligned}\right\} \text{ avec } \chi_2 = \arctan\left(\frac{L - x_{\text{K}} + B}{\frac{D}{2} + l}\right)$$

On en déduit les coordonnées du point W :

$$\left|\begin{aligned} x_{\text{W}} &= \frac{y_{\text{V'}} - \tan(m).x_{\text{V'}} - y_{\text{T'}} + \frac{x_{\text{T'}}}{\tan(\theta - j)}}{\frac{1}{\tan(\theta - j)} - \tan(m)} \\ y_{\text{W}} &= \tan(m).x_{\text{W}} + y_{\text{V'}} - \tan(m).x_{\text{V'}} \end{aligned}\right.$$

Ensuite, pour déterminer les coordonnées du point d'entrée du faisceau dans le prisme 4, soit le point Z, nous utiliserons celles du point d'. Elles s'écrivent :

$$\left.\begin{aligned} x_{\text{d'}} &= x_{\text{K}} + \left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\sin\left(\chi_3 + j\right)}{\cos\left(\chi_3\right)} \\ y_{\text{d'}} &= -\left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\cos\left(\chi_3 + j\right)}{\cos\left(\chi_3\right)} \end{aligned}\right\} \text{ avec } \chi_3 = \arctan\left(\frac{L - x_{\text{K}} + B + \frac{e}{\cos(\theta)}}{\frac{D}{2} + l}\right)$$

On en déduit les coordonnées du point Z :

$$\left|\begin{aligned} x_{\text{Z}} &= \frac{y_{\text{W}} - \tan(n).x_{\text{W}} - y_{\text{d'}} + \frac{x_{\text{d'}}}{\tan(\theta - j)}}{\frac{1}{\tan(\theta - j)} - \tan(n)} \\ y_{\text{Z}} &= \tan(n).x_{\text{Z}} + y_{\text{W}} - \tan(n).x_{\text{W}} \end{aligned}\right.$$

Enfin, pour déterminer les coordonnées du point de sortie du faisceau du prisme 4, soit le point Ω, nous utiliserons celles du point c'. Elles s'écrivent :

$$\left|\begin{array}{l} x_{c'} = x_K + \left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\sin(\chi_4 + j)}{\cos(\chi_4)} \\ y_{c'} = -\left(\frac{D}{2} + l\right)\frac{\cos(\chi_4 + j)}{\cos(\chi_4)} \end{array}\right\} \quad \text{avec} \quad \chi_4 = \arctan\left(\frac{L - x_K + 2.B + \frac{e}{\cos(\theta)} - D.\tan(\theta)}{\frac{D}{2} + l}\right)$$

Il reste à écrire les coordonnées du point Ω. Il faut alors distinguer le cas où l'angle j est nul, du cas où il ne l'est pas :

$$\begin{cases} \left|\begin{array}{l} x_\Omega = L + 2.B + \dfrac{e}{\cos(\theta)} - D.\tan(\theta) \\ y_\Omega = y_Z \end{array}\right\} & \text{si } \ j = 0, \\ \left|\begin{array}{l} x_\Omega = \dfrac{y_{c'} + \frac{l}{\tan(j)}.x_{c'} - y_Z + x_Z.\tan(m)}{\frac{1}{\tan(j)} + \tan(m)} \\ y_\Omega = \tan(m).(x_\Omega - x_Z) + x_Z \end{array}\right\} & \text{sinon.} \end{cases}$$

On peut enfin en déduire les coordonnées du point α, situé à la même abscisse que le point Ω de sortie du faisceau du prisme 4. Elles s'écrivent :

$$\left|\begin{array}{l} x_\alpha = x_\Omega \\ y_\alpha = y_M + (x_\alpha - x_M).\tan(dev) \end{array}\right.$$

Une fois ces coordonnées déterminées, il s'agit d'évaluer la longueur des chemins optiques parcourus par les faisceaux de chaque voie. Pour la voie PrC, nous avons ainsi :

➢ la distance OI s'écrit :

$$OI = \sqrt{(x_I - x_O)^2 + (y_I - y_O)^2}$$

➢ la distance IJ s'écrit :

$$IJ = \sqrt{(x_J - x_I)^2 + (y_J - y_I)^2}$$

➢ la distance JL s'écrit :

$$JL = \sqrt{(x_L - x_J)^2 + (y_L - y_J)^2}$$

➢ la distance LM s'écrit :

$$LM = \sqrt{(x_M - x_L)^2 + (y_M - y_L)^2}$$

➢ la distance Mα s'écrit :

$$M\alpha = \sqrt{(x_\alpha - x_M)^2 + (y_\alpha - y_M)^2}$$

On peut ainsi déterminer le chemin optique (CO) parcouru dans la voie PrC :

➢ dans le matériau :

$$CO_{e_{PrC}} = IJ + LM$$

➢ et dans l'air, sous la forme d'une différence de marche :

$$CO_{ddm_{PrC}} = OI + JL + M\alpha$$

De même, pour la voie PrFs, nous avons :

➢ la distance O'V' s'écrit :

$$\text{O'V'} = \sqrt{(x_{\text{V'}} - x_{\text{O'}})^2 + (y_{\text{V'}} - y_{\text{O'}})^2}$$

➢ la distance V'W s'écrit :

$$\text{V'W} = \sqrt{(x_W - x_{\text{V'}})^2 + (y_{\text{W}} - y_{\text{V'}})^2}$$

➢ la distance WZ s'écrit :

$$\text{WZ} = \sqrt{(x_{\text{Z}} - x_{\text{W}})^2 + (y_{\text{Z}} - y_{\text{W}})^2}$$

➢ la distance ZΩ s'écrit :

$$\text{Z}\Omega = \sqrt{(x_\Omega - x_{\text{Z}})^2 + (y_\Omega - y_{\text{Z}})^2}$$

On peut alors déterminer le chemin optique (CO) parcouru dans la voie PrFs :

➢ dans le matériau :

$$\text{CO}_{\text{e}_{\text{PrFs}}} = \text{V'W} + \text{Z}\Omega$$

➢ et dans l'air, sous la forme d'une différence de marche :

$$\text{CO}_{\text{ddm}_{\text{PrFs}}} = \text{O'V'} + \text{WZ}$$

Le déphasage entre la voie PrC et la voie PrFs peut ainsi s'écrire :

$$\boxed{\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\left[n_{\text{matériau}}.\left(\text{CO}_{\text{e}_{\text{PrC}}} - \text{CO}_{\text{e}_{\text{PrFs}}}\right) + n_{\text{air}}.\left(\text{CO}_{\text{ddm}_{\text{PrC}}} - \text{CO}_{\text{ddm}_{\text{PrFs}}}\right) + d\,d\,m\right]}$$

où $d\,d\,m$ est la différence de marche réglée grâce à la ligne à retard. Ces formules quelque peu "barbares" ont été testées et approuvées au moyen du logiciel *Apilux*.

Annexe C

Liste des acronymes

AGN	Noyaux actifs de galaxies (*Active Galactic Nuclei*)
ALMA	*Atacama Large Millimeter Array*
ATA	*Allen Telescope Array*
CAMIRAS	CAMéra InfraRouge pour l'AStronomie ?
CCD	*Charged Coupled Device*
CFHT	*Canada-France-Hawaï Telescope*
CIA	Coronographe Interférométrique Achromatique
CIF	*Cryogenic Interferometric Facility*
CIRCUS	Caméra InfraRouge Courte longueur d'onde pour Utilisation au Sol
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CoRoT	Convection, Rotation et Transits
DAC	Croix d'Angel Dégénérée (*Degenerated Angel Cross*)
DCB	*linear Dual Chopped Bracewell*
DEA	Diplôme d'Études Approfondies
DSP	*Digital Signal Processor*
DWARF	*DarWin AstRonomical Fringe sensor*
ENSSAT	École Nationale Supérieure de Sciences Appliquées et de Technologie
EOS	*Electro-Optical Systems*
ESA	Agence Spatiale Européenne (*European Space Agency*)
ESO	Observatoire Européen Austral (*European Southern Observatory*)
FEEP	*Field Electric Emission Propulsor*
FGS	*Fine Guidance Sensor*
FIFO	*First In, First Out*
FINCH	*Fast INterferometer Characterisation*
FITS	*Flexible Image Transport System*
FPGA	*Field-Programmable Gate Array*

$FWHM$	largeur à mi-hauteur (*Full Width at Half Maximum*)
GAC	Croix d'Angel Généralisée (*Generalized Angel Cross*)
GENIE	*Ground-based European Nulling Interferometry Experiment*
GNC	*Guidance and Navigation Control*
HARPS	*High-Accuracy Radial-velocity Planet Searcher*
HPOM	*High-Precision Optical Metrology*
HST	*Hubble Space Telescope*
IAP	Institut d'Astrophysique de Paris
IAS	Institut d'Astrophysique Spatiale
IAU	*International Astronomical Union*
IBC	*Impurity Band Conductor*
IMEC	*Interuniversity MicroElectronics Center*
IMEP	Institut de Microélectronique, Électromagnétisme et Photonique
INO	Institut National d'Optique (Canada)
IRAS	*InfraRed Astronomical Satellite*
ISO	*Infrared Space Observatory*
ISOCAM	*Infrared Space Observatory CAMera*
JWST	*James Webb Space Telescope*
JPL	*Jet Propulsion Laboratory*
Keck-I	*Keck-Interferometer*
LBT	*Large Binocular Telescope*
LINC	*LBT INterferometric Camera*
MAII	*Multiple Aperture Imaging Interferometer*
MOUSE	*Metrologic Optical Unit for Space Environment*
MMT	*Multiple Mirror Telescope*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NEP	*Noise Equivalent Power*
NGST	*Next Generation Space Telescope*
NULLTIMATE	*NULling Low Temperature Interferometer for Multi-Achromatic phase shifters TEsting*
OASES	*Outpost for the Analysis and Spectroscopy of Exoplanetary Systems*
OCA	Observatoire de la Côte d'Azur
OGLE	*Optical Gravitational Lensing Experiment*
OHP	Observatoire de Haute-Provence
O.N.	Ouverture Numérique
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques
PEB	Puissance Équivalente de Bruit
PID	Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur
ppm	partie par million (= 10^{-6})

ptv	*pic to valley*
PXI	*PCI EXtensions for Instrumentation*
rms	*root mean square*
SETA	*Search for Extra Terrestrial Artifacts*
SETI	*Search for Extra Terrestrial Intelligence*
S^{3}ETI	*Solar System Search for Extra Terrestrial Intelligence*
SETV	*Search for Extra Terrestrial Visitation*
SIM	*Space Interferometry Mission*
STIS	*Space Telescope Imaging Spectrograph*
SMART	*Small Missions for Advanced Research in Technology*
SYNAPSE	***SY**mmetric **N**uller for **A**chromatic **P**hase **S**hifters **E**valuation*
TIPE	Travaux d'Intérêt Personnel Encadrés
TPF	*Terrestrial Planet Finder*
TPF-C	*Terrestrial Planet Finder Coronagraph*
TPF-I	*Terrestrial Planet Finder Interferometer*
VI	*Virtual Instrument*
VINCI	*VLT INterferometer Commissioning Instrument*
VLBI	*Very Long Baseline Interferometry*
VLT	*Very Large Telescope*
VLTI	*Very Large Telescope Interferometer*
WFE	*WaveFront Error*
ZH	Zone Habitable
ZHC	Zone Continûment Habitable

Annexe D

Liste des principales notations

a	rayon d'une fibre optique, p. 99
B	base d'un interféromètre, p. 52
B_λ	brillance monochromatique d'un corps noir, p. 54
D^*	détectivité spécifique d'un détecteur, p. 119
ddm	différence de marche entre les voies d'un interféromètre, p. 60
$\delta\phi$	inégalité de phase entre les voies d'un interféromètre, p. 53
$\Delta\phi$	déphasage monochromatique, p. 53
$\Delta\phi_\lambda$	déphasage polychromatique, p. 55
δx	précision nécessaire sur la translation du prisme coulissant, p. 72
e	épaisseur différentielle entre deux prismes déphaseurs, p. 60
e_i	épaisseur différentielle entre deux lames dispersives, d'un même matériau i, p. 60
ε	erreur de phase monochromatique, p.75
ε_I	défaut d'égalité d'intensité entre les voies d'un interféromètre, p. 53
i_{ddm}	interfrange en ddm, p. 84
i_x	interfrange en x, p. 84
I_{max}	intensité maximale d'une frange brillante, p. 32
I_{min}	intensité minimale d'une frange noire, p. 32
Γ	écart quadratique moyen de la phase par rapport à π, p.75
λ	longueur d'onde (!)
λ_{c}	longueur d'onde de coupure d'une fibre optique, p. 99
λ_i	longueurs d'onde du modèle de Sellmeier, p. 77
λ_{max}	longueur d'onde maximale d'une bande spectrale, p. 54
λ_{min}	longueur d'onde minimale d'une bande spectrale, p. 54
n	indice de réfraction, p. 77
n_{air}	indice de réfraction de l'air, p. 60
n_{coeur}	indice de réfraction du cœur d'une fibre optique, p. 99
n_{gaine}	indice de réfraction de la gaine d'une fibre optique, p. 99
$n_{\text{matériau}_i}$	indice de réfraction du matériau i d'une lame dispersive, p. 60

L_c	longueur de cohérence temporelle d'une source de lumière, p. 157
$O.N.$	ouverture numérique d'une fibre optique, p. 99
ψ	coordonnée azimutale d'une source sur le ciel, p. 31
R	coefficient de réflexion moyen, p. 127
r	coefficient de réflexion des séparatrice et recombinatrice côté traitement 50 / 50, p. 104
r'	coefficient de réflexion de la face non traitée des séparatrice et recombinatrice, p. 105
r_p	coefficient de réflexion de la polarisation p, à l'interface entre deux matériaux, p. 127
r_s	coefficient de réflexion de la polarisation s, à l'interface entre deux matériaux, p. 127
ρ	taux de réjection, p. 32
ρ_{approx}	taux de réjection approximatif, en lumière polychromatique, p. 55
$S.\Omega$	étendue de faisceau (S surface, Ω angle solide), p. 131
S_i	termes du modèle de Sellmeier, p. 77
$S_{i,n}$	termes du modèle de Sellmeier fonction de la température, p. 79
T	coefficient de transmission moyen, à l'interface entre deux matériaux, p. 127
t	coefficient de transmission de la face traitée des séparatrice et recombinatrice à l'interface substrat / "traitement 50 / 50", p. 104
t'	coefficient de transmission de la face traitée des séparatrice et recombinatrice à l'interface "traitement 50 / 50" / substrat, p. 104
t_p	coefficient de transmission de la polarisation p, à l'interface entre deux matériaux, p. 127
t_s	coefficient de transmission de la polarisation s, à l'interface entre deux matériaux, p. 127
θ	séparation angulaire entre deux objets ou résolution angulaire d'un instrument, pp. 32 et 25
θ_{prisme}	angle au sommet des prismes déphaseurs, p. 70
V	fréquence normalisée (ou réduite) d'une fibre optique, p. 99
$\mathbf{V}$	visibilité, p. 32
WFE	erreur de front d'onde, p. 57
ω_0	rayon du *waist* d'un faisceau, p.102
x	translation du prisme coulissant, introduisant une épaisseur différentielle e, p. 70

Unités et constantes

a.l.	année-lumière	1 a.l. = $9,46.10^{15}$ m
c	célérité de la lumière, p. 54	$c = 2,9997925.10^{8}$ m.s^{-1}
h	constante de Planck, p. 54	$h = 6,62620.10^{-34}$ J.s
k	constante de Boltzmann, p. 54	$k = 1,38062.10^{-23}$ J.K^{-1}
$M_\oplus$	masse de la Terre	1 $M_\oplus$ = 6.10^{24} kg
$M_\odot$	masse du Soleil	1 $M_\odot$ = 2.10^{30} kg = 1.10^{3} M_{Jup} = $3,3.10^{6}$ $M_\oplus$
M_{Jup}	masse de Jupiter, p. 19	1 M_{Jup}= $1,9.10^{27}$ kg = 318 $M_\oplus$
pc	parsec (*parallax second*), p. 18	1 pc = $3,0856776.10^{16}$ m
U.A.	Unité Astronomique	1 U.A. = $1,496.10^{11}$ m

Formulaire

Loi de Wien, p. 25
Brillance monochromatique d'un corps noir, p. 54

Ouverture numérique d'une fibre optique, p. 99
Fréquence normalisée d'une fibre optique, p. 99
Longueur d'onde de coupure d'une fibre optique, p. 99
Atténuation d'une fibre optique, p. 101
Formule de Marcuse (*waist*), p. 102

Relation de Fizeau, p. 52
Détectivité spécifique, p. 119
Équations de Fresnel, p. 127
Largeur à mi-hauteur d'une gaussienne, p. 154
Longueur de cohérence d'une source, p. 157
Loi de Murphy, pp. 69, 71, 76, 95, 112, 143, 147, 151, 157, 162, ...

Quelques ordres de grandeur angulaires ...

°	degré	$1^\circ = 1,7.10^{-2}$ rad	*ou*	2 pleines lunes
'	minute d'arc	$1' = 2,9.10^{-4}$ rad	*ou*	1 nain de jardin vu à 1 km
"	seconde d'arc	$1'' = 4,8.10^{-6}$ rad	*ou*	1 petit pois vu à 1 km
mas	milliseconde d'arc	$1\ \text{mas} = 4,8.10^{-9}$ rad	*ou*	1 petit pois coupé en mille ...

Annexe E

Liste des publications et communications

Présentations orales

"Nulling interferometry for the Darwin mission : polychromatic laboratory test bench",
SPIE New Frontiers in Stellar Interferometry, Glasgow, 21-25 juin 2004.

"Nulling interferometry for the Darwin mission : polychromatic laboratory test bench",
5th International Conference on Space Optics, Toulouse, 30 mars - 2 avril 2004.

Compte-rendus de conférences (*Proceedings*)

"Nulling interferometry for the Darwin mission : polychromatic laboratory test bench",
Conference on "New Frontiers in Stellar Interferometry", Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.991

"Nulling interferometry for the Darwin mission : polychromatic laboratory test bench",
5th International Conference on Space Optics (ICSO 2004), 30 mars - 2 avril 2004, Toulouse, France. Ed. : B. Warmbein. ESA SP-554, Noordwijk, Netherlands : ESA Publications Division, ISBN 92-9092-865-4, 2004, p. 237 - 242

" Polychromatic laboratory test bench for DARWIN / TPF : first results",
Conference on "Towards Other Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets", 22-25 avril 2003, Heidelberg, Allemagne. ESA SP-539, Noordwijk, Netherlands : ESA Publications Division, ISBN 92-9092-849-2, 2003, p. 385 - 387

Posters

"SYNAPSE, interférométrie en frange noire polychromatique pour la mission Darwin",
International Symposium OPTRO 2005, Paris, mai 2005. *Ce poster a obtenu le 2e prix du jury.*

"SYNAPSE, interférométrie en frange noire polychromatique pour la mission Darwin",
Journées CNES Jeunes Chercheurs, Toulouse, sept. 2004. *Ce poster a obtenu le 1er prix du jury.*

"Polychromatic laboratory test bench for DARWIN / TPF : first results",
Conference on "Towards Other Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets", 22-25 avril 2003, Heidelberg, Allemagne.

Publications à comité de lecture

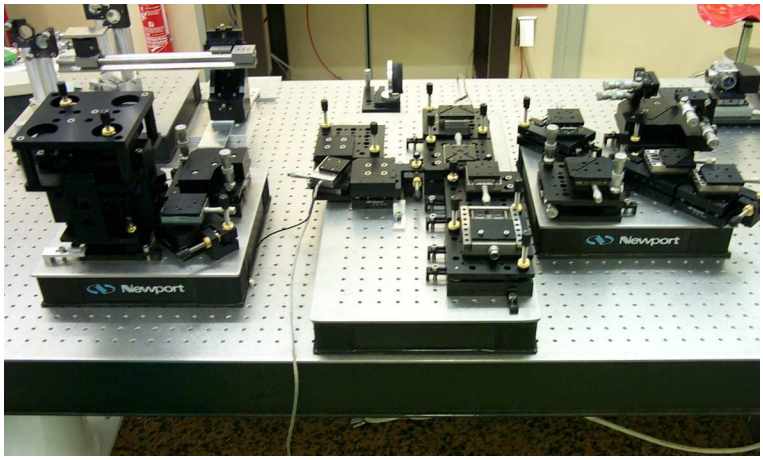
"A new family of planets ? "Oceans-planets"",
Léger A., Selsis F., Sotin C., Guillot T., Despois D., Mawet D., Ollivier M., Labèque A., Valette C., **Brachet F.**, Chazelas B., Lammer H., Icarus, 169, Issue 2, p. 499-504, 2004.

"Instrumental stability requirements for exoplanet detection with a nulling interferometer : variability noise is a central issue",
Chazelas B., **Brachet F.**, Bordé P., Mennesson B., Ollivier M., Absil O., Labèque A., Valette C., Léger A., à paraître dans Applied Optics.

Annexe F

Photographies de SYNAPSE

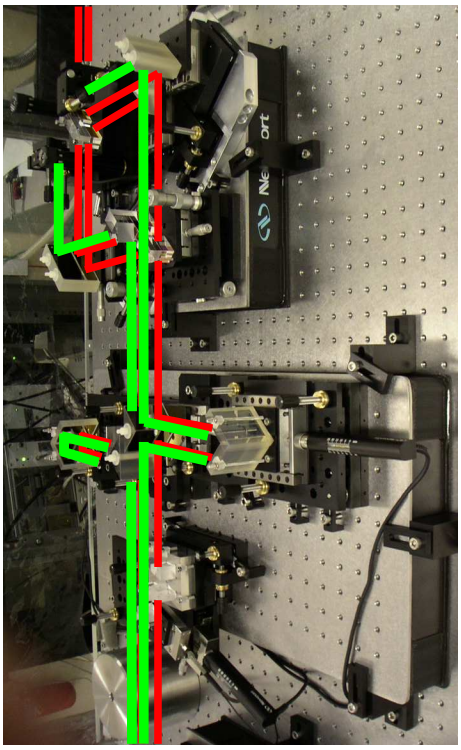
(a) Le banc SYNAPSE, en mars 2002 ...



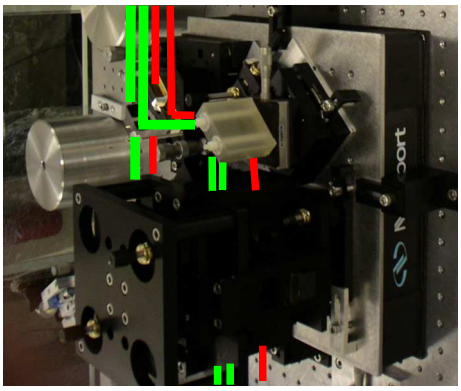
(b) ... en juin de la même année ...

(c) ... et, enfin, un banc optiquement opérationnel, en septembre 2003.

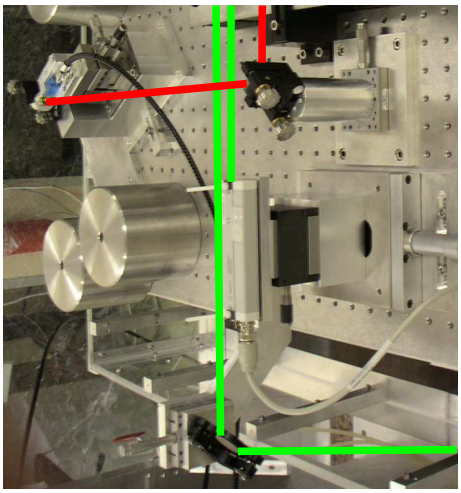
FIG. F.1: Mise en œuvre du banc SYNAPSE.



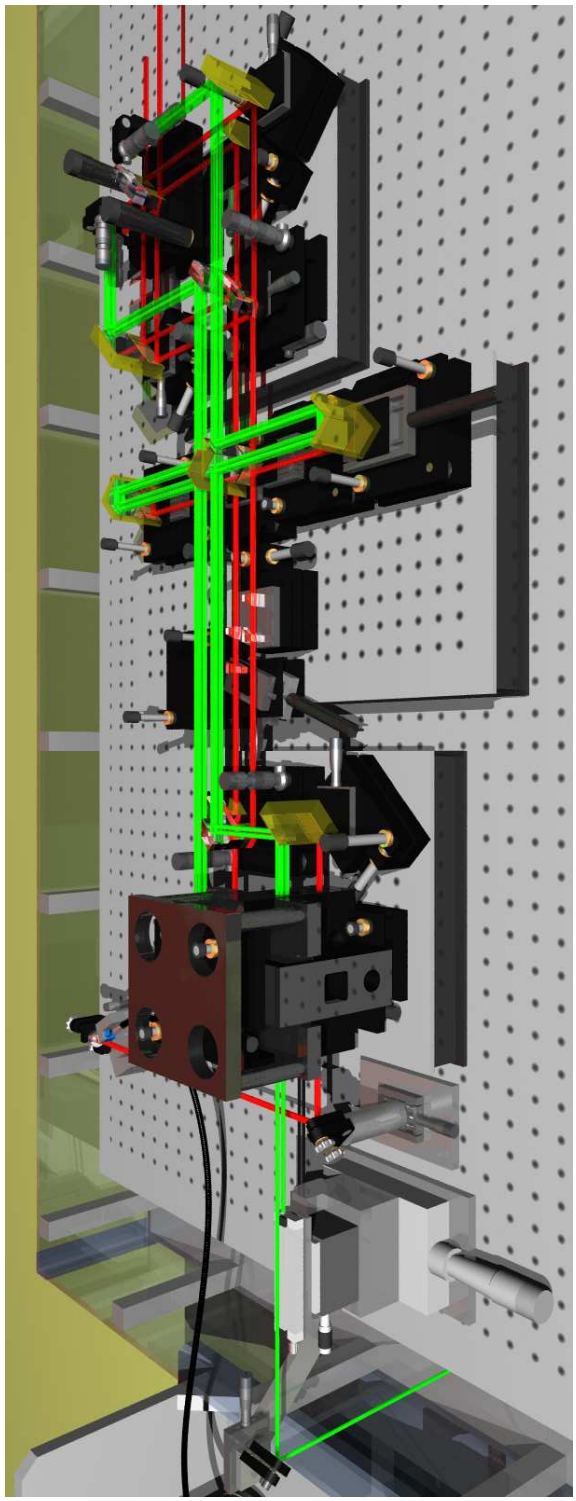
(a) Injection et métrologie



(b) Séparatrice

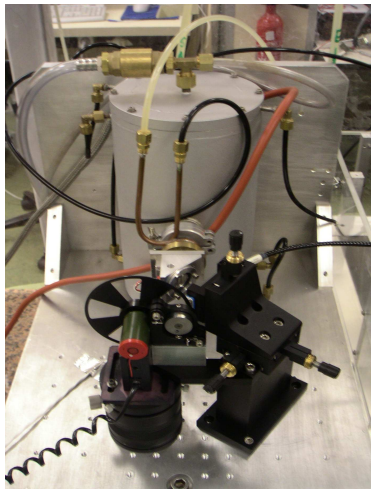


(c) Déphaseur, lignes à retard et recombinatrice

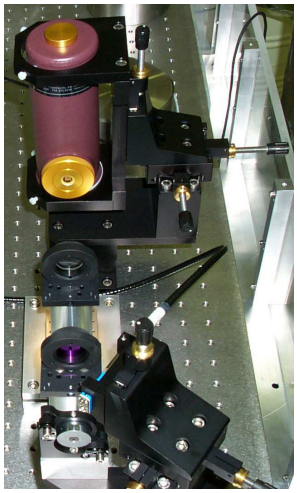


(d) Vue d'artiste du banc complet. En vert, les faisceaux métrologiques, en rouge, les faisceaux scientifiques.

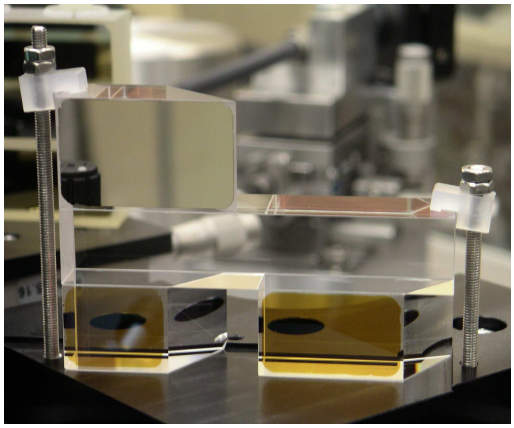
FIG. F.2: L'interféromètre SYNAPSE.



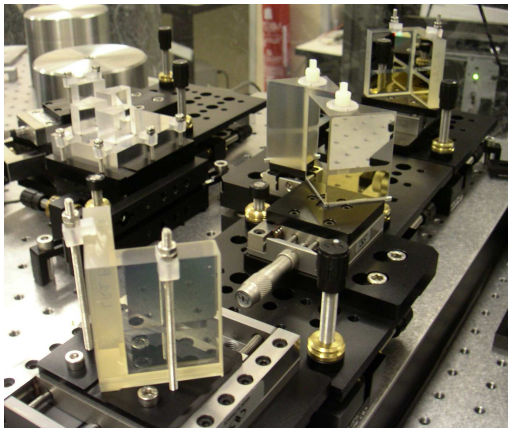
(a) Au premier plan, le modulateur (*chopper*) et le dispositif d'injection du flux dans la fibre optique. Au second plan, le corps noir et son système de refroidissement par eau.



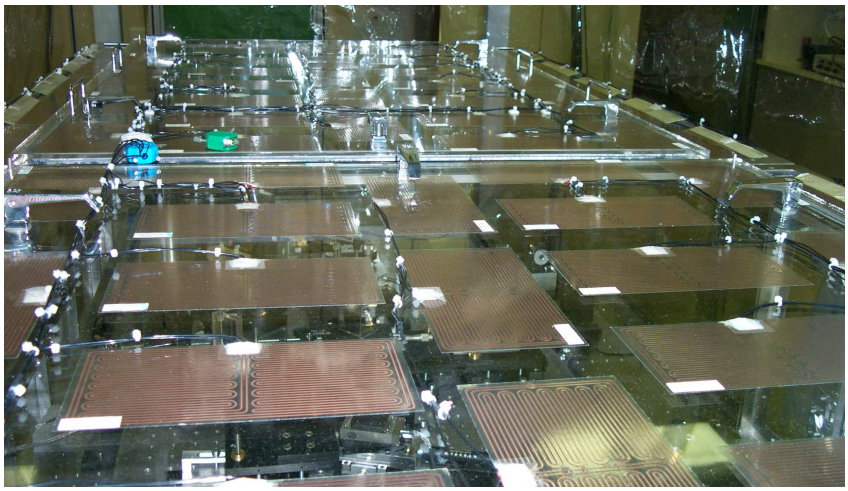
(b) Le système de détection monopixel avec, au premier plan, le filtre spectral, puis la lentille de focalisation puis le détecteur sur son support.



(c) La séparatrice S2, en optique adhérée. Chaque secteur orangé (traitement silicium), sur les prismes de la partie inférieure, correspond à une voie de l'interféromètre.



(d) Au premier plan, les deux lignes à retard. Au second plan, le déphaseur achromatique.



(e) L'enceinte du banc et son système de chauffage.

FIG. F.3: Sous-systèmes du banc SYNAPSE.

Annexe G

Bilan de la conduite du projet de recherche

ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT D'UN DÉPHASEUR ACHROMATIQUE POUR L'INTERFÉROMÉTRIE EN FRANGE NOIRE

Frank Brachet

G.1 Contexte et objectifs du projet de recherche

Bien qu'ayant officiellement débuté en octobre 2002, je considère que ma thèse à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay, sous la direction d'Alain Léger, a été initiée en avril 2002, lors de mon stage de DEA. **L'objectif initial de ma thèse était de tester des méthodes de déphasage achromatique dans le but de valider le principe de la mission spatiale Darwin. Il s'est finalement, comme nous le verrons par la suite, doublé du développement du banc de mesures SYNAPSE, permettant d'évaluer les performances de ce composant.**

La mission Darwin est destinée à l'étude de planètes extrasolaires géantes et telluriques autour d'étoiles proches, pour analyser leurs atmosphères et y détecter d'éventuelles bio-signatures. Le principe proposé pour cette mission est celui de l'interférométrie en frange noire, pour annuler le flux de l'étoile et rendre visible les planètes en orbite autour de celle-ci. Toute la difficulté réside dans le contraste (on parle plutôt de réjection) de plusieurs centaines de milliers qu'il faut pouvoir obtenir et maintenir durant les observations, pouvant durer plusieurs heures.

Dans ce but, un déphaseur de π est introduit dans l'interféromètre pour annuler le flux de l'étoile. Il doit être achromatique dans la bande d'observation de Darwin de 6 à 18 µm. Il existe plusieurs façons de créer ce déphasage achromatique. Cette thèse présente l'étude et le développement de l'une de ces techniques, basée sur des prismes dispersifs, et testée sur le banc polychromatique SYNAPSE (***SY**mmetric **N**uller for **A**chromatic **P**hase **S**hifters **E**valuation*).

Proposée il y a un peu plus de dix ans à l'Agence Spatiale Européenne, la mission Darwin n'est pas encore définitivement retenue en raison des difficultés technologiques qu'elle représente et du coût de développement qu'elle peut représenter. Elle s'inscrit dans le cadre beaucoup plus large de la recherche d'exoplanètes, très en vogue ces dernières années, notamment grâce à la multiplication de ses résultats observationnels, et dans lequel Darwin représente une étape quasiment incontournable. Malgré tout, elle met en œuvre des techniques, notamment optiques, si pointues que l'ensemble des éléments de l'instrument doit être validé lors d'expériences préparatoires en laboratoire.

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) et le Centre National d'Études Spatiales (CNES) ont donc initié différents programmes de recherche technologique (R&T) destinés à conforter les principes envisagés

dans les premières propositions techniques. Parallèlement, suite à la proposition d'une mission similaire aux États-Unis, la mission *Terrestrial Planet Finder* (TPF), différentes équipes se sont lancées dans la démonstration du principe de l'interférométrie en frange noire.

Alain Léger ayant participé à la proposition originale de la mission Darwin, en 1993, il a été tout naturellement à l'origine de la formation d'une équipe Darwin au sein de l'Institut d'Astrophysique Spatiale, en 1996. Cette équipe est elle-même un sous-ensemble de l'"Équipe Planétologie", rebaptisée récemment "Équipe Physique du Système Solaire et des Systèmes Planétaires". Cette équipe est constituée de trois chercheurs (Alain Léger, Marc Ollivier, Claude Valette), d'un ingénieur ayant pris les fonctions de chef de projet (Alain Labèque) et, en moyenne, de deux doctorants. Son domaine d'activités s'étend, outre un travail de développement expérimental pour Darwin, à la préparation scientifique de la petite mission CoRoT. Une thèse, celle de Marc Ollivier, aujourd'hui chercheur dans l'équipe, a été soutenue en 1999. Elle portait sur la conception et le développement d'un premier banc de démonstration d'interférométrie en frange noire, alimenté par une source laser monochromatique. Une autre thèse avait ensuite été initiée, pour concevoir un nouveau banc, cette fois-ci polychromatique, alimenté par un corps noir. La conception, qui impliquait de profondes modifications par rapport au banc précédent, s'est étalée jusqu'au début de mon stage de DEA, en avril 2002.

En effet, suite à mon cursus d'ingénieur en optronique, j'avais effectué un DEA dans la spécialité "Astrophysique et Instrumentations Associées" à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP). Pour mon stage de DEA, j'étais à la recherche d'un sujet expérimental, afin d'acquérir des compétences dans le domaine de l'instrumentation optique plus particulièrement dédiée à l'astronomie. Peu de sujets expérimentaux ont été proposés cette année-là. Le sujet d'Alain Léger présentait à la fois l'avantage d'être dans un domaine des plus pointus, tout en ayant trait au sujet des exoplanètes, qui m'intéressait tout particulièrement. Le choix de mon sujet de thèse a donc été très étroitement lié à celui de mon sujet de stage de DEA, considérant cette période comme une excellente évaluation avant de se lancer dans un projet de trois années.

Durant celui-ci, l'interféromètre, qui ne s'appelait pas encore SYNAPSE, a été mis en place et j'ai élaboré une procédure de réglages, permettant théoriquement d'atteindre une précision d'alignement de quelques secondes d'arc. J'ai également participé à l'élaboration de plusieurs systèmes mécaniques permettant la mise en place des éléments annexes du banc de mesure, comme la source, le détecteur et la métrologie. Quelques mesures de réjection ont ensuite été réalisées dans des conditions particulièrement précaires, et ont permis une validation préliminaire du banc et du déphaseur. Malgré tout, la thèse qui s'achevait alors s'est soldée par un semi-échec, puisqu'elle n'a pas été soutenue ...

C'est dans ce contexte qu'à débuté ma thèse en octobre 2002, avec pour objectif principal une amélioration conséquente des résultats obtenus. Cela passait par une compréhension approfondie des phénomènes observés durant les premières mesures, par une refonte totale des interfaces de contrôle du banc et par la mise en place d'un asservissement en différence de marche, destiné à stabiliser la réjection obtenue. Au total, bien que le banc soit théoriquement opérationnel, la plupart des sous-systèmes devaient être caractérisés en détail, en vue d'une compréhension globale des performances du banc et du déphaseur achromatique. Par la suite, une autre solution de déphaseur devait également être testée sur SYNAPSE, mais nous verrons que cette étape a été repoussée.

G.2 Conduite et gestion du projet de recherche

Avant de décrire brièvement le déroulement de l'expérience, je vais faire un bilan des ressources humaines effectivement disponibles, qui viennent expliquer de nombreux points et délais de ce projet.

G.2.1 Ressources humaines

Comme je l'ai évoqué, l'équipe Darwin est essentiellement composée de six personnes, dont la moitié de chercheurs[133]. Il faut y ajouter différents "satellites", parmi lesquels des membres des services d'électronique, de mécanique et un nombre conséquent de stagiaires. Nous nous sommes efforcés, durant ma thèse, de nous réunir régulièrement, avec une fréquence de l'ordre d'une réunion tous les deux mois. L'objectif de ces réunions était essentiellement de faire des points d'avancement des différents sous-systèmes et de réfléchir à des pistes pour résoudre les points durs.

Pour revenir sur les ressources humaines, il faut noter que leur disponibilité a largement évoluée au cours des trois ans de ma thèse. En effet, la réponse puis le gain d'un appel d'offre de l'ESA pour la création d'un nouveau banc de mesure, NULLTIMATE, intervenue à mi-parcours de ma thèse, a considérablement re-distribué les tâches. Pour les chercheurs, leur contribution a oscillé entre 10 et 30% tout au long du projet. L'ingénieur-chef de projet, consacré à 100% au banc SYNAPSE avant NULLTIMATE, est tout naturellement passé à 40-50% à partir de la réponse à l'appel d'offre. Côté électronicien, nous avons bénéficié de l'équivalent de 20% du temps plein d'une personne, avec une pointe à 30% durant la mise au point de l'alimentation du corps noir au début de ma thèse, compensée par une absence durant six mois vers la fin (départ à la retraite), avant le relais d'une nouvelle personne. Côté mécanique, la réalisation de très nombreuses pièces en interne à l'IAS a été assurée par un mécanicien à mi-temps durant ma première année. Ensuite, quelques interventions ponctuelles ont eu lieu durant le développement du banc. Il faut également mentionner l'intervention d'un électronicien de l'Observatoire de Paris-Meudon durant la remise à niveau de l'électronique de la caméra CIRCUS, à raison d'environ 10% de son temps durant six semaines.

Pour ce qui est des doctorants, j'étais bien évidemment à 100% de mon temps sur SYNAPSE, en collaboration avec mon prédécesseur pendant les premiers six mois. Le gain de l'appel d'offre de NULLTIMATE a entraîné le recrutement d'un second doctorant au début de ma deuxième année. Celui-ci m'a aidé à hauteur de 5% de son temps, essentiellement durant les phases d'alignement du banc.

Dans la pratique, cette structure a globalement bien fonctionné. Bien que nous ayons bénéficié des interventions ponctuelles des techniciens de la station d'étalonnage, où était installé le banc de mesure, il faut noter, malgré tout, que le manque d'un technicien attaché au banc lui-même, et en connaissant tous les "secrets", s'est très souvent fait sentir. Toutefois, l'arrivée, à la fin de ma thèse, d'un nouveau technicien à la station d'étalonnage ayant un intérêt particulier pour Darwin vient quelque peu remédier à ce problème. Je ne saurais que conseiller son implication plus active au sein de l'équipe, notamment pour faire le lien entre les différents doctorants et stagiaires se succédant sur SYNAPSE.

G.2.2 Ressources financières

La précédente expérience développée durant la thèse de Marc Ollivier ayant permis de mettre en œuvre différents financements, cette partie n'a pas constitué de difficultés majeures. D'une façon générale, l'essentiel du banc SYNAPSE a été financé par les budgets de R&T du CNES. Ce même organisme a assuré le financement de la moitié de ma thèse, l'autre moitié étant co-financée par *Alcatel Space*

[133] On pourra méditer, à titre de réflexion pour la pérennité de cette équipe, sur le fait que la moitié de ses membres a plus de soixante ans ...

Industries. Par ailleurs, nous avons bénéficié de quelques financements supplémentaires, dont les Programmes Nationaux (Haute Résolution Angulaire, Planétologie) et le Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'Université Paris-Sud.

Il faut noter qu'un certain nombre de matériels à également été récupéré sur l'expérience antérieure, ce qui a permis d'éviter des dépenses additionnelles.

G.2.3 Ressources matérielles au laboratoire

Durant le développement du banc SYNAPSE, nous avons bénéficié d'une partie des infrastructures du laboratoire, à savoir essentiellement une salle "grise" de la station d'étalonnage, équipée d'un marbre et d'un flux laminaire. À ces équipements lourds viennent s'ajouter un certain nombre d'équipements utilisés ponctuellement, comme des bancs de pompage, ou des consommables (fluides cryogéniques, circulation d'eau, ...). Il est difficile d'évaluer le coût financier de ces ressources, dont la charge est généralement distribuée sur les différentes missions spatiales étalonnées à l'IAS. Malgré tout, une participation annuelle de l'ordre de 10 k€ est (normalement) versée comme contribution à ces frais de fonctionnement.

G.3 Déroulement du projet de recherche

G.3.1 Quelques étapes

Avant de pouvoir envisager l'évaluation des performances du déphaseur achromatique dont il est question, la première priorité de mon début de thèse a été de rendre opérationnel le banc de test SYNAPSE. Dans un premier temps, une **évaluation de la méthode d'alignement des optiques** élaborée durant mon stage de DEA a été effectuée. Elle visait à obtenir une précision de quelques secondes d'arc sur le parallélisme des miroirs et séparatrices du montage. Après la mise au point de la régulation électronique du corps noir servant de source pour l'expérience, l'approvisionnement de différents matériels parmi lesquels un détecteur monopixel devant servir pour les premières mesures et la réalisation de certains plans mécaniques des pièces de support des éléments optiques, nous avons obtenu début décembre 2002 les premières franges à l'aide d'un laser He-Ne.

Après ces **résultats préliminaires**, les efforts se sont concentrés sur la caractérisation et la validation de certains sous-systèmes du banc de mesure, qui avaient été plus ou moins négligés jusque-là, plus que sur l'obtention de nouveaux résultats.

En premier lieu, j'ai étudié en détail le **principe du déphaseur achromatique** implanté sur ce banc, basé sur des lames dispersives. À l'aide d'un prisme coulissant, il est possible de faire varier l'épaisseur du matériau traversé par le faisceau sur l'une des voies de l'interféromètre afin de compenser le chromatisme sur une certaine bande de longueur d'onde ; l'épaisseur du matériau sur l'autre voie restant constante. La différence de marche nulle est, quant à elle, réglée au moyen de deux lignes à retard. Il existe un unique point de fonctionnement permettant d'atteindre le taux de réjection maximal correspondant à une épaisseur de prisme et à une différence de marche données. Des simulations de cet espace à deux paramètres ont conforté cette hypothèse.

La recherche de ce point de fonctionnement constitue néanmoins l'enjeu principal de l'évaluation des performances de ce type de déphaseur. Elle nécessite par conséquent la **mise en place d'un ensemble de procédures**, à différents niveaux de précision, devant permettre, au final, d'obtenir le taux de réjection de quelque 10^4 pour lequel ce banc a été dimensionné. Cette recherche s'appuie, en pratique, sur deux vérins commandant le prisme et la ligne à retard, pour lesquels il a fallu **développer une interface de contrôle**, au moyen du logiciel LabVIEW et de son module *Real-Time* (RT), logiciel qui sera par ailleurs

utilisé pour le contrôle de l'ensemble de l'expérience. Ces réglages sont ensuite affinés grâce à deux platines piézoélectriques, pour lesquelles une interface de commande a également été programmée.

Par ailleurs, l'obtention d'un tel contraste nécessite une stabilité de la différence de marche entre les deux voies de l'interféromètre inférieure à 2 nm. Pour cela, un **asservissement** de l'une des deux lignes à retard sur les données fournies par une voie de métrologie a été ajouté. Sa mise au point devait incomber à un électronicien, mais celui-ci ayant été "aspiré" par un autre projet du laboratoire, j'ai décidé d'en prendre la charge. Cela a demandé un temps considérable, compte tenu de ma méconnaissance à la fois du logiciel de commande et du système commercial utilisé pour la métrologie. Cet asservissement devait être capable de fonctionner jusqu'à une fréquence de l'ordre de quelques kHz pour garantir une bande passante suffisante pour la correction des hautes fréquences (quelques centaines de Hz) constatées dans les analyses fréquentielles des données de métrologie. Cette mise au point a été complexifiée par le fait que les logiciels assurant le contrôle du banc et cet asservissement sont regroupés sur un même matériel, qui doit donc gérer de nombreuses tâches simultanément (contrôle des vérins, des piézos, de la détection synchrone, du détecteur et de l'asservissement en temps réel). À la fin de ma thèse, toutes les fonctions sont opérationnelles, elles ont été automatisées au maximum, mais l'asservissement a dû être déporté sur un boîtier analogique, afin de pouvoir fonctionner à une fréquence de 10 kHz, sans perturber les autres actions. Il permet d'atteindre une différence de marche crête-crête de 7 nm environ, selon les conditions de mesure.

En parallèle, dans le but d'identifier les limitations de la qualité du taux de réjection de 2 000 obtenu jusque-là, j'ai mené une **caractérisation des différents sous-systèmes**. L'étage principal de filtration des vibrations, qui fait appel à un système de pieds piézoélectriques, est en effet un élément primordial pour garantir que les variations du chemin optique se limitent à quelques nanomètres, afin d'être ensuite compensées par l'asservissement de la ligne à retard. D'autre part, une enceinte en plexiglas utilisée sur l'expérience précédente a été adaptée sur le banc. Le chauffage installé sur ses capots supérieurs permet de limiter de façon efficace la formation de turbulences à proximité du banc lors des mesures.

Une **remise à niveau de la caméra CIRCUS**, destinée à remplacer le détecteur monopixel pour les mesures de taux de réjection supérieure à 10 000, a également occupé quelques mois. Outre une refonte complète de la chaîne de mesure autour de ce cryostat et de son système de pompage (pour descendre l'azote jusqu'à solidification et atteindre une température de 50 K), il était nécessaire de procéder à un allongement des temps de poses fournis par l'électronique. La principale difficulté a résidé dans la vétusté de cette électronique et dans le manque de documentation qui s'y rattache.

Plusieurs **campagnes de mesures** sont venues ponctuer cette thèse, dans la bande de longueur d'onde [2 ; 2,5 µm] (bande K). Elles ont permis de préciser la procédure de localisation des franges d'interférences dans l'espace des paramètres (épaisseur différentielle, ddm), jusqu'au minimum de la frange noire, où est mesuré le taux de réjection ultime. Ce n'est que dans les trois derniers mois de ma thèse, grâce à la mise en œuvre de l'asservissement en différence de marche et du chauffage de l'enceinte, que les principaux résultats de ma thèse ont été obtenus. Ils ont malgré tout mis en évidence l'apparition, à court terme, d'instabilités. Des investigations ont alors débuté, notamment au niveau de la stabilité thermique du boîtier analogique d'asservissement et de la stabilité mécanique des éléments optiques.

Au total, ce travail a montré la possibilité d'obtenir des taux de réjection de quelques milliers sur une bande de longueur d'onde d'environ 20% de largeur. Mais bien plus que cette valeur, c'est assurément sur sa stabilité que les efforts devront se porter à l'avenir.

G.3.2 Quelques difficultés ...

Le réglage de la régulation du corps noir, souhaitée au degré près, a connu quelques difficultés, suivies par une panne empêchant toute nouvelle campagne de mesure pendant quelques semaines. Un autre

problème majeur est survenu durant l'été 2002. Une panne de la climatisation de la salle blanche où est disposé le banc de mesure a entraîné une augmentation anormale de l'hygrométrie et de la température de la salle. Cette panne a eu pour conséquence un décollement progressif mais irréversible des traitements en silicium des lames séparatrices de l'interféromètre. Ceux-ci ont dû être re-déposés, d'où un délai supplémentaire de quelques mois. Cette intervention a exigé le démontage des éléments optiques du banc, et donc l'arrêt de la mise au point de l'asservissement. S'en est suivi un remontage et un ré-alignement, ce qui a pris deux semaines.

La mise au point des programmes de contrôle en "temps réel" a nécessité de très nombreux échanges avec le fournisseur du logiciel, à une fréquence très irrégulière, ceux-ci refusant d'effectuer le moindre développement logiciel. Ce d'autant plus que l'objectif visé faisait appel aux ressources les plus complexes du module RT, qui, comme je l'ai déjà mentionné, était dans sa toute première version. Chaque modification impliquait une nouvelle phase de tests, et pouvait amener à remettre en question des opérations qui jusque-là fonctionnaient correctement.

La remise à niveau de la caméra CIRCUS, destinée à remplacer le détecteur monopixel, a également été un travail de longue haleine, devant le manque de documentation l'accompagnant et de personnel connaissant encore le fonctionnement de ce matériel.

Enfin, la recherche des sources d'instabilité de la réjection est d'autant plus complexe qu'il existe une multitude de paramètres associés. Si les turbulences peuvent aujourd'hui être quasiment écartées, il n'en est pas de même pour la stabilité mécanique des éléments optiques. Les réglages d'égalité de flux doivent, par exemple, être refaits toutes les demi-heures pour rester dans la tolérance de 2%. D'autre part, le couplage avec la fibre optique monomode de sortie est extrêmement sensible. En d'autres termes, de nombreux postes devront être revus, voire refondus, pour stabiliser le taux de réjection de 4 000 obtenu, durant plus de quelques minutes.

G.4 Bilan du projet de recherche

G.4.1 Bilan financier

Dans les paragraphes qui suivent, je vais tâcher d'évaluer le coût global de ma thèse, aussi bien d'un point de vue matériel (équipement et fonctionnement) que salarial, sur la période de trois ans qu'a duré ma thèse. Tous les coûts mentionnés sont bruts et ne comprennent aucune taxe.

Équipements et fonctionnement

Dans cette partie, nous allons estimer le coût du matériel utilisé pour la mise en place du banc SYNAPSE. Dans l'hypothèse où il faudrait dupliquer ce banc, l'évaluation présentée dans le tableau G.1 serait une base minimale incompressible des dépenses à engager. Nous verrons ensuite comment le fait qu'un certain nombre d'éléments aient pu être ré-utilisés de l'expérience antérieure et comment le fonctionnement d'une telle expérience viennent grever le budget de façon importante. Le coût total du matériel ayant été investi dans le banc SYNAPSE s'élève ainsi à environ 240 k€.

Néanmoins, pour sa mise en œuvre, un certain nombre de matériels ont été ré-utilisés, notamment en provenance du banc précédent. Parmi ces équipements, il faut citer le marbre optique, le flux laminaire de classe 100 et différents lasers He-Ne ayant servi pour l'alignement des optiques, un certain nombre de miroirs utiles pour toutes les expériences annexes à l'interféromètre, ainsi que l'enceinte chauffée du banc et la caméra CIRCUS, même si elle n'a pas directement servi durant ma thèse. En tout, on peut évaluer les dépenses ayant été évitées à environ 100 k€.

Il faut enfin ajouter le coût de fonctionnement d'une telle expérience. Dans cette catégorie, nous inclurons à la fois l'ensemble des pièces de rechange pour les matériels évoqués ci-dessus, aussi bien

TAB. G.1: Évaluation du coût matériel du banc SYNAPSE.

Ensemble	Sous-systèmes	Éléments	Fournisseur	Coût (€)
Table optique	Table optique	1 table et 3 *breadboard*s	Micro-Contrôle	10 000
		3 pieds piézoélectriques		5 000
Source	Source	Corps noir à 2 000 K	Pyrox	3 500
		Alimentation électricité et eau	Interne IAS[1]	3 000
Optique	Mise en forme des faisceaux et filtrage modal	4 paraboles hors-axe dorées	*Phoenix Optical Glass Ltd.*	5 000
		4 fibres monomodes	Le Verre Fluoré	10 000
	Séparation des faisceaux (MMZ1)	2 miroirs, 2 séparatrices	*Winlight Systems* (ex-Stigma Optique)	8 000
	Déphaseur	4 prismes		11 000
	Lignes à retard	2 prismes en toit pleins, 2 creux		9 000
	Recombinaison des faisceaux (MMZ2)	3 miroirs, 2 séparatrices		9 000
	Traitements	3 évap. (Or, Argent, Silicium)	Schott-Guinchard	6 000
	Filtrage spectral	2 filtres	*Northumbria Optical Coatings*	1 500
	Divers	Quelques miroirs et lentilles	Micro-Contrôle	5 000
Détection	Détection	2 détecteurs monopixels et alimentations	*Electro-Optical Systems*	8 000
		1 modulateur (*chopper)*	*Stanford Research*	1 700
		1 détection synchrone		3 300
Opto-Mécanique	Tous	Tous	Micro-Contrôle	35 000
Mouvements automatisés	Déplacements "grossiers"	2 moteurs pas-à-pas et contrôleurs	Micro-Contrôle	5 000
	Déplacements "fins"	2 platines piézoélectriques et contrôleurs	*Physik Instrumente*	15 000
Mécanique	Interféromètre	Tous	STIM	15 000
	Autres	Tous	Interne IAS[1]	15 000
Informatique	PXI	1 châssis, 1 contrôleur, 3 cartes d'acquisition, 1 licence, ...	*National Instruments*	15 000
	Interface utilisateur	4 ordinateurs, 1 carte d'acquisition	Divers	9 000
Métrologie	Métrologie	Laser, récepteur, séparatrice, carte d'acquisition	*Agilent*	26 000
Asservissement	Boîtier analogique	Boîtier analogique	Interne IAS[1]	2 000
	"Moyenneur"	FPGA	ASCO	4 000
			Total estimé	**240 000**

[1] Évaluation

TAB. G.2: Coûts salariaux durant les trois ans de ma thèse sur le banc SYNAPSE.

Catégorie	Temps dédié	Salaire brut annuel	Coût consolidé	Total brut sur trois ans	Total consolidé sur trois ans
DR 1re classe	30%	102 k€	184 k€	92 k€	165 k€
Astronome-adjoint	10%	50 k€	90 k€	15 k€	27 k€
IR hors classe	70%	94 k€	169 k€	197 k€	355 k€
DR 2e classe	3%	86 k€	155 k€	8 k€	14 k€
Doctorant	**100%**	**18 k€**	**32 k€**	**54 k€**	**97 k€**
Doctorant	5%	18 k€	32 k€	3 k€	5 k€
Projeteur (IE)	5%	59 k€	106 k€	9 k€	16 k€
Électronicien (IR)	15%	66 k€	119 k€	30 k€	53 k€
Électronicien (IE)	15%	47 k€	85 k€	21 k€	38 k€
Électronicien (AI)	15%	45 k€	81 k€	20 k€	36 k€
Mécanicien (T)	25%	35 k€	63 k€	26 k€	47 k€
Mécanicien (AI)	3%	45 k€	81 k€	4 k€	7 k€
Stagiaires	55%	7 k€	13 k€	12 k€	21 k€
			Total estimé	**491 k€**	**881 k€**

que la participation payée par l'équipe Darwin pour le fonctionnement de la station d'étalonnage (soit environ 10 k€ par an) et les missions et colloques auxquels j'ai eu l'occasion de prendre part (soit environ 10 k€). Cette évaluation prend également en compte des frais qu'il aurait été possible d'éviter, mais dont la dépense est intervenue malgré tout, comme, par exemple, les frais de repolissage et de re-traitement des optiques suite à la panne de climatisation s'étant produite à la station d'étalonnage. L'achat d'un premier PXI sous-dimensionné pour l'utilisation souhaitée aurait également pu être évité. Au total, le montant de ces dépenses de fonctionnement peut être évalué à 100 k€.

En d'autres termes, **le coût total du banc SYNAPSE, pour sa mise en œuvre et son fonctionnement durant trois ans, s'élève à environ 440 k€**. On constate donc que cette somme est relativement logique, en regard de la somme des budgets alloués à l'équipe Darwin depuis les débuts de la conception du banc SYNAPSE en 2000, qui s'élève à 500 k€.

Coûts salariaux

Il s'agit ici d'évaluer le coût salarial total des personnes impliquées dans ce projet, en fonction de la catégorie de personnel et du temps consacré au projet. Dans le tableau G.2 sont mentionnés également les coûts consolidés, incluant les charges patronales et un coefficient multiplicatif de 1,8 pour prendre en compte l'environnement fourni par le laboratoire.

En toute logique, le coût salarial principal revient à l'ingénieur chef de projet, suivi par mon directeur de thèse puis par le coût de mon allocation de recherche. À l'exception de ce dernier, pris en charge par

le CNES et *Alcatel Space Industries*, l'intégralité des autres coûts salariaux a été pris en charge par le CNRS, le Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et l'Université Paris-Sud.

La somme totale des dépenses sur le banc SYNAPSE, que ce soit en équipement, en fonctionnement, ou en salaires s'établit donc à un peu plus d'1,3 M€. On peut ici noter qu'il est assez proche de celui du banc précédent, qui avait été évalué à environ 1 M€.

G.4.2 Bilan personnel

Compétences développées

Par sa définition, mon sujet de thèse possédait un caractère expérimental très important. C'est d'ailleurs l'une des raisons principales pour laquelle j'ai choisi de m'engager dans ce projet de trois années. Si la conception du banc SYNAPSE était largement entamée au début de ma thèse, cela n'enlève en rien à la multitude de compétences qu'elle m'a donné l'occasion de développer et que je vais tâcher maintenant de résumer.

La première compétence que je souhaiterais mettre en avant, tient dans la **gestion d'un projet** de cette envergure, étalée sur trois années. Par sa nature expérimentale, l'obtention de résultats en fin de thèse n'est jamais garantie. Or, comme l'a montré le bilan financier, ce sont près de vingt personnes différentes qui sont intervenues sur le banc SYNAPSE, de façon plus ou moins directe. Seul acteur consacré à cette tâche à 100%, j'ai été amené à jouer un rôle fédérateur indispensable pour faire progresser le projet vers son objectif. Il faut ici noter que ces différentes collaborations se sont toutes, sans exceptions, déroulées dans une ambiance agréable, malgré les nombreuses difficultés rencontrées. Je pense ici notamment aux longues semaines de mise au point de l'alimentation du corps noir, dans des conditions paticulièrement précaires à la station d'étalonnage (n'est-ce-pas, Liz ?). Il faut alors gérer les humeurs de chacun et de toute façon, rester optimiste pour voir les choses avancer.

Ce besoin de **coordination**, dont j'ai pris la charge, tient également à l'intervention d'un nombre conséquent de stagiaires, dont j'ai assuré l'encadrement, depuis leurs "premiers pas" sur le banc SYNAPSE ou ses sous-systèmes, jusqu'à leurs soutenance de stages, dans des ambiances plus ou moins heureuses. D'une façon générale, malgré le temps important qu'il a fallu leur consacrer, le bilan est très largement positif et ce point a été particulièrement formateur.

D'un point de vue plus technique, ce projet instrumental a présenté la particularité de faire intervenir de très nombreuses compétences. En premier lieu, la **mise en œuvre de toutes les facettes de l'instrumentation optique**, sous la forme d'un banc de test complet, faisant appel à une source étendue, un système de métrologie pointu jusqu'à des systèmes de détection à très haute dynamique. Cette mise en œuvre s'est bien évidemment accompagnée d'une **étude théorique complète**, indispensable pour comprendre les phénomènes observés durant les mesures. Cela m'a permis de parfaire mes connaissances du logiciel Matlab, que j'avais déjà couramment utilisé pour d'autres simulations durant mon stage d'ingénieur.

La réalisation de campagnes de mesures nécessite enfin une très grande rigueur dans le maintien d'un cahier d'expérience regroupant l'ensemble des conditions de mesure, sans quoi l'analyse *a posteriori* des résultats est quasi-impossible. En somme, il s'agit là d'assurer une certaine **qualité**, dans un sens certes amoindri par rapport à celui que ce terme peut revêtir dans l'industrie, mais qui manque cruellement dans le domaine de la recherche. J'en veux pour preuve les semaines perdues pour retrouver le fonctionnement de la caméra CIRCUS, dont le "sommeil" de quelques années a été dévastateur ...

Même si le manque d'un projeteur dédié à l'expérience (essentiellement parce le projet Darwin n'est pas encore un projet spatial, donc prioritaire dans le plan de charge du laboratoire) s'est fait cruellement sentir au début de ma thèse, cela m'a permis de parfaire mes **connaissances en mécanique, et plus particulièrement en opto-mécanique**. L'utilisation de différents détecteurs a également été l'occasion d'acquérir quelques connaissances en **cryogénie**.

Malgré tout, le principal apport a trait à l'**interfaçage électronique** d'un banc comme SYNAPSE. Au début de ma thèse, je n'avais "pratiqué" le logiciel LabVIEW que durant deux heures de travaux pratiques en école d'ingénieur, deux ans auparavant. Quant au module RT, indispensable pour notre application, il était tout juste disponible sur le marché, et comptait parmi ses défauts de jeunesse, une très grande complexité aujourd'hui corrigée. Au terme de ma thèse, j'ai acquis une formation sur ce logiciel sous sa forme la plus élaborée, à savoir son module temps réel. On peut noter que ce degré de formation est le dernier avant celui de ... formateur LabVIEW ! Il s'agit ici d'une formation très spécialisée, mais il faut voir que :

- ➢ ce logiciel est quasiment incontournable aujourd'hui pour la mise en œuvre de bancs de test faisant intervenir des contrôleurs de matériel de tous horizons ;
- ➢ malgré son principe de programmation graphique, il fait appel à toutes les notions classiques de programmation et demande une très grande rigueur pour assurer une fiabilité correcte lors de l'exécution ;
- ➢ la mise en place d'un ensemble de programmes pour gérer la totalité du banc, simultanément avec un asservissement à haute fréquence, nécessite une approche organisée et globale pour éviter que des tâches secondaires deviennent prépondérantes sur des tâches prioritaires. Ce d'autant plus que la principale difficulté réside dans la synchronisation des différentes actions.

Ces différentes compétences viennent s'ajouter aux **contacts établis avec les fournisseurs** et au **suivi des commandes de matériels**, faisant naturellement suite au choix de ceux-ci, en fonction de tolérances ou de spécifications concertées lors de réunions d'équipe.

Je terminerai en mentionnant le caractère formateur de la **participation à différents colloques**, et notamment à l'école d'exobiologie de Propriano, qui m'a permis de découvrir cette discipline multiple, dont les enjeux sont finalement proches de ceux de la mission Darwin. Que ce soit du point de vue de la préparation des **présentations orales** ou des **posters**, jusqu'à la **rédaction des comptes-rendus de colloques**. Cette tâche de communication, qui s'est ajoutée aux **rapports d'avancement réguliers** à fournir aux organismes finançant ma thèse, ne doit jamais être négligée, car elle permet de faire des points sur les actions accomplies et sur le travail restant, afin de corriger les éventuelles dérives. Il faut ici conclure avec la rédaction de mon manuscrit, qui, commencée en janvier 2005 à raison de quelques heures par *week-end*s (dérivant naturellement vers leur totalité vers la fin !), s'est parfaitement déroulée en parallèle avec les mesures jusqu'en octobre 2005.

On repart pour trois ans ?

S'engager dans une thèse représente un réel investissement personnel durant trois années, avec un rythme de travail nécessairement croissant. De ce point de vue, je l'ai vraiment vécu comme un projet personnel étalé sur trois ans. Fort heureusement, ce projet était extrêmement varié dans ses applications, avec toujours en toile de fond la recherche d'exoplanètes, dont l'actualité sans cesse renouvelée ne peut que re-motiver, si l'en est besoin, tout chercheur expérimental en mal de résultats.

Étant donné le caractère très formateur d'un tel projet, je pense que, si c'était à refaire, je me relancerais dans une telle aventure. Néanmoins, je pense que je tâcherais de lui donner un aspect "projet" beaucoup plus prononcé, en essayant d'établir des cahiers des charges précis, quelques plannings et des échéances plus marquées. En effet, par leur nature de recherche technologique et l'absence (pour le moment) de date de lancement fixe venant imposer une échéance donnée, les développements pour la

mission Darwin ont bien du mal à paraître prioritaires face aux autres expériences à caractère spatial développées au sein de l'IAS.

Je terminerai en mentionnant l'expérience de trois ans que j'ai pu acquérir en développant le banc SYNAPSE. Même si elle peut paraître très spécialisée, dans la mesure où l'interférométrie en frange noire possède peu d'applications en dehors de l'astronomie, la mise en œuvre d'un banc de mesure de cette complexité reste extrêmement formatrice en termes de méthodologie, de gestion du temps, de travail en équipe, de rigueur et de connaissance de soi. Autant de qualités qui trouvent des applications dans pratiquement tous les domaines.

Bibliographies

Bibliographie : "À la recherche de la vie dans l'Univers"

Angel J.R.P., Cheng A.Y.S., Woolf N.J., Jul. 1986, Nature, 322, 341

Arnold L., Sep. 2005, ArXiv Astrophysics e-prints

Arnold L., Gillet S., Lardière O., Riaud P., Schneider J., Sep. 2002, A&A, 392, 231

Beichman C., Woolf N., Lindensmith C., 1999, The Terrestrial Planet Finder (TPF), JPL 99-3, NASA, URL http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_book/index.cfm

Borucki W.J., Koch D.G., Dunham E.W., Jenkins J.M., 1997, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 153–+

Brown T.M., Charbonneau D., Gilliland R.L., Noyes R.W., Burrows A., May 2001, ApJ, 552, 699

Charbonneau D., Brown T.M., Latham D.W., Mayor M., Jan. 2000, ApJ, 529, L45

Charbonneau D., Brown T.M., Noyes R.W., Gilliland R.L., Mar. 2002, ApJ, 568, 377

Chauvin G., Lagrange A.M., Dumas C., et al., Oct. 2004, A&A, 425, L29

Cocconi G., Morrison P., 1959, Nature, 184, 844

Conche M., août 1991, Anaximandre. Fragments et témoignages, Presses Universitaires de France, collection Épiméthée

Cornet B., Stride S.L., Apr. 2003, Contact In Context, URL http://cic.setileague.org/cic/v1i2/s3eti-ata.pdf

Coudé du Foresto V., Swain M.R., Vakili F., Schneider J., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.186, 186–+

Crowley T.J., 1983, Review Geophys. Space Phys., 21, 828

Drake F.D., 1961, Physics Today, 14, 40

Encyclopédie des Planètes Extrasolaires, consultée le 15/10/2005, URL http://www.obspm.fr/planets

Favata F., Pace O., Feb. 2001, ESA Bulletin, 105, 46

Gargaud M., Despois D., Parisot J.P., Reisse J., août 2003, Les traces du vivant, Presses Universitaires de Bordeaux

Guinan E.F., Ribas I., 2002, In : ASP Conf. Ser. 269 : The Evolving Sun and its Influence on Planetary Environments, 85–+

Henry G.W., Marcy G.W., Butler R.P., Vogt S.S., Jan. 2000, ApJ, 529, L41

Horne K., 2003, In : ASP Conf. Ser. 294 : Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets, 361–370

Léger A., Pirre M., Marceau F.J., Sep. 1993, A&A, 277, 309

Léger A., Selsis F., Sotin C., et al., Jun. 2004, Icarus, 169, 499

Mayor M., Frei P.Y., Jan. 2001, Les nouveaux mondes du cosmos. À la découverte des exoplanètes, Éditions du Seuil

Mayor M., Queloz D., Nov. 1995, Nature, 378, 355

Mouillet D., Fusco T., Lagrange A.M., Beuzit J.L., 2003, In : EAS Publications Series, 193–199

Owen T., 1980, In : ASSL Vol. 83 : Strategies for the Search for Life in the Universe, 177–+

Prantzos N., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 215–218

Rivera E.J., Lissauer J.J., Butler R.P., et al., Nov. 2005, ApJ, 634, 625

Rouan D., Baglin A., Copet E., et al., 1998, Earth, Moons and Planets, 81, 79

Santos N.C., Mayor M., Queloz D., Udry S., Dec. 2002, The Messenger, 110, 32

Swain M.R., Coudé du Foresto V., Fossat E., Vakili F., 2003, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement, 2, 207

Tarter J., Dec. 1998, Bulletin of the American Astronomical Society, 30, 1333

Tarter J., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 31–38

Udalski A., Zebrun K., Szymanski M., et al., Jun. 2002, Acta Astronomica, 52, 115

van de Kamp P., Jun. 1963a, AJ, 68, 296

van de Kamp P., Sep. 1963b, AJ, 68, 515

van de Kamp P., Aug. 1969, AJ, 74, 757

Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Désert J.M., et al., Mar. 2003, Nature, 422, 143

Vidal-Madjar A., Désert J.M., Lecavelier des Etangs A., et al., Mar. 2004, ApJ, 604, L69

Wolszczan A., Frail D.A., Jan. 1992, Nature, 355, 145

Wolszczan A., Konacki M., 2005, In : Aspen 2005 conference on Astrophysics, Planet Formation and detection, URL http://www.astro.northwestern.edu/AspenW05/Talks/Wolszczan.pdf

Bibliographie : "Vers un interféromètre spatial : la mission Darwin"

Absil O., 2001, Nulling interferometry with IRSI-Darwin : detection and characterization of Earth-like exoplanets, Master's thesis, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées

Absil O., Karlsson A., Kaltenegger L., Feb. 2003, In : Interferometry in Space. Edited by Shao, Michael. Proceedings of the SPIE, Volume 4852, pp. 431-442 (2003)., 431–442

Angel J.R.P., Woolf N.J., Jan. 1997, ApJ, 475, 373

Angel R., 1990, In : The Next Generation Space Telescope, 81–+

Beichman C., Woolf N., Lindensmith C., 1999, The Terrestrial Planet Finder (TPF), JPL 99-3, NASA, URL http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_book/index.cfm

Bracewell R.N., Aug. 1978, Nature, 274, 780

Bracewell R.N., MacPhie R.H., Apr. 1979, Icarus, 38, 136

Calvel B., Cabeza I., Cabral A., et al., Jun. 2004, In : ESA SP-554 : 5th International Conference on Space Optics, 501–507

Cassaing F., Baron F., Schmidt E., et al., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 389–392

Charbonneau D., Brown T.M., Noyes R.W., Gilliland R.L., Mar. 2002, ApJ, 568, 377

Coudé du Foresto V., Swain M.R., Vakili F., Schneider J., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.186, 186–+

D'Arcio L., Karlsson A., Jun. 2004, In : ESA SP-554 : 5th International Conference on Space Optics, 213–221

D'Arcio L., Le Poole R., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 393–398

Debes J.H., Ge J., Jul. 2004, PASP, 116, 674

Des Marais D.J., Harwit M.O., Jucks K.W., et al., Jun. 2002, Astrobiology, 2, 153

Ergenzinger K., Kersten M., Sesselmann R., et al., Sep. 2004, In : Optimizing Scientific Return for Astronomy through Information Technologies. Edited by Quinn, Peter J. ; Bridger, Alan. Proceedings of the SPIE, Volume 5497, pp. 226-236 (2004)., 226–236

Flatscher R., Sodnik Z., Ergenzinger K., Johann U., Vink R., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 283–291

Gliese W., Jahreiß H., 1991, Preliminary Version of the Third Catalogue of Nearby Stars, Tech. rep., NASA

Gondoin P.A., Absil O., den Hartog R.H., et al., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.775, 775–+

Karlsson A., Mennesson B.P., Jul. 2000, In : Proc. SPIE Vol. 4006, p. 871-880, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Léna ; Andreas Quirrenbach ; Eds., 871–880

Karlsson A.L., Wallner O., Perdigues Armengol J.M., Absil O., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.831, 831–+

Labèque A., Chazelas B., Brachet F., et al., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.999, 999–+

Lawson P., Dooley J., 2005, Technology Plan for the Terrestrial Planet Finder Interferometer, JPL 05-5, NASA, URL http://planetquest.jpl.nasa.gov/Navigator/library/tpfI414.pdf

Le Duigou J.M., Berthon J., Poupinet A., Pujol L., May 2005, In : International Symposium OPTRO 2005. Edited by ESA, 297

Léger A., Mariotti J.M., Puget J.L., Rouan D., Schneider J., 1993, DARWIN : Mission concept for the ESA Horizon 2000+ program., ESA

Léger A., Mariotti J.M., Mennesson B., et al., Oct. 1996, Icarus, 123, 249

Léna P., 1995, Astrophysique, Méthodes physiques de l'observation. Deuxième édition, InterEditions, CNRS Editions

Lyot B., 1931, C.R. Acad. Sci. Paris, 193, 1169

Mennesson B., Mariotti J.M., Jul. 1997, Icarus, 128, 202

Mennesson B., Ollivier M., Ruilier C., Mar. 2002, Optical Society of America Journal A, 19, 596

Nisenson P., Papaliolios C., Feb. 2001, ApJ, 548, L201

Ollivier M., Selsis F., Léger A., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 241–246

Ollivier M., Le Duigou J.M., Mourard D., et al., Dec. 2005, In : SF2A-2005 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, 123–+

Quirrenbach A., Feb. 2005, ArXiv Astrophysics e-prints

Röttgering H.J.A., D'Arcio L., Eiroa C., Labbé I., Rudnick G., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 299–308

Riaud P., Boccaletti A., Rouan D., Lemarquis F., Labeyrie A., Sep. 2001, PASP, 113, 1145

Riaud P., Boccaletti A., Baudrand J., Rouan D., Jun. 2003, PASP, 115, 712

Rouan D., Riaud P., Boccaletti A., Clénet Y., Labeyrie A., Nov. 2000, PASP, 112, 1479

Schmidt E., Cassaing F., Hofer S., et al., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 575–577

Schneider J., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 205–213

Selsis F., Nov. 2002, In : ESA SP-518 : Exo-Astrobiology, 365–370

Serabyn E., Colavita M.M., Apr. 2001, Applied Optics, 40, 1668

Site internet du Fine Guidance Sensor, 2005, URL http://www.stsci.edu/hst/fgs/design/interferometer, consulté le 15/10/2005

Spergel D., Kasdin J., Dec. 2001, Bulletin of the American Astronomical Society, 33, 1431

van den Dool T., Kamphues F., Fouss B., et al., Sep. 2004, In : Ground-based Instrumentation for Astronomy. Edited by Moorwood, Alan F. M. ; Iye, Masanori. Proceedings of the SPIE, Volume 5495, pp. 39-50 (2004)., 39–50

Volonte S., Laurance R., Whitcomb G., Karlsson A., Fridlund M., 2000, DARWIN, The InfraRed Space Interferometer, Concept and Feasibility Report, ESA-SCI(2000)-12, ESA

Weber V. Étude de l'interféromètre à frange noire MAII. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Jun. 2004

Woolf N.J., Angel J.R.P., 1997, In : ASP Conf. Ser. 119 : Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions, 285–+

Bibliographie : "Les déphaseurs achromatiques"

Baudoz P., Rabbia Y., Gay J., Jan. 2000a, A&AS, 141, 319

Baudoz P., Rabbia Y., Gay J., et al., Aug. 2000b, A&AS, 145, 341

Destriau M., Prouteau J., 1949, "J. Phys. Radium", 10, 53

Gay J., 1996, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série IIb, 325, 51

Gay J., Rabbia Y., 1996, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série IIb, 322, 265

Guyon O., Roddier C., Graves J.E., et al., Oct. 1999, PASP, 111, 1321

Hariharan P., Nov. 1996, Optical Engineering, 35, 3335

Labadie L., Broquin J.E., Kern P., et al., Jan. 2005, In : Cryogenic Optical Systems and Instruments XI. Edited by Heaney, James B. ; Burriesci, Lawrence G. Proceedings of the SPIE, Volume 5905, pp. 80-90 (2005)., 80–90

Lemarquis F., Riaud P., Feb. 2004, In : Optical Design and Engineering. Edited by Mazuray, Laurent ; Rogers, Philip J. ; Wartmann, Rolf. Proceedings of the SPIE, Volume 5250, pp. 349-356 (2004)., 349–356

Malitson I.H., Nov. 1963, Appl. Opt., 2, 1103

Mawet D., Lenaerts C., Moreau V., et al., Feb. 2003, In : High-Contrast Imaging for Exo-Planet Detection. Edited by Alfred B. Schultz. Proceedings of the SPIE, Volume 4860, pp. 182-191 (2003)., 182–191

Mieremet A. Nulling interferometry for direct exo-planet detection. Thèse de doctorat, Technical University of Delft, May 2003

Morgan R.M., Burge J.H., Woolf N.J., Feb. 2003, In : Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 644-655 (2003)., 644–655

Pancharatnam S., 1955, "Proc. Indian Acad. Sci.", 41, 137

Rabbia Y., Gay Y., Bascou E., 2000, In : ICSO'2000 - Conférence Internationale d'Optique Spatiale, Toulouse, France, Déc. 5-6-7, 2000) CNES Eds., 389–400

Rabbia Y., Gay J., Rivet J.P., Schneider J.L., Mar. 2003, In : ESA SP-522 : GENIE - DARWIN Workshop - Hunting for Planets

Riaud P. Coronographie à masque de phase : applications aux télescopes et interféromètres au sol et dans l'espace. Thèse de doctorat, Université de Paris VI - Pierre et Marie Curie, janv. 2003

Roddier F., Roddier C., Jul. 1997, PASP, 109, 815

Rouan D., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 565–568

Serabyn E., Feb. 2003, In : Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 594-608 (2003)., 594–608

Serabyn E., Colavita M.M., Apr. 2001, Applied Optics, 40, 1668

Tropf W.J., May 1995, Optical Engineering, 34, 1369

Weber V. Étude de l'interféromètre à frange noire MAII. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, juin 2004

Bibliographie : "Le banc d'interférométrie achromatique SYNAPSE"

Baudoz P., Rabbia Y., Gay J., et al., Aug. 2000, A&AS, 145, 341

Bokhove H., Kappelhof J.P., Vink H.J.P., Vosteen L.L.A., Sodnik Z., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 367–369

Charalampous D., Reix F. Mise en œuvre de la caméra CIRCUS 128 sur le banc d'expérimentation IAS/DARWIN. Rapport de stage, Université Paris XI, mai-juin 2004

Chazelas B., Brachet F., Bordé P., et al., à paraître, Instrumental stability requirements for exoplanet detection with a nulling interferometer : variability noise is a central issue (soumis à Appl. Opt.)

Coudé du Foresto V. Interférométrie astronomique infrarouge par optique guidée monomode. Thèse de doctorat, Université Paris VII, juil. 1994

Cox A.N., 2000, Allen's Astrophysical Quantities (4th edition), chap. 7.5, Springer

Flatscher R., Sodnik Z., Ergenzinger K., Johann U., Vink R., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 283–291

Hinz P.M., Angel J.R.P., Hoffmann W.F., et al., Jul. 1998, In : Proc. SPIE Vol. 3350, p. 439-447, Astronomical Interferometry, Robert D. Reasenberg ; Ed., 439–447

Klocek P., 1991, Handbook of infrared materials, chap. 6, Marcel Dekker, Inc.

Léna P., 1995, Astrophysique, Méthodes physiques de l'observation. Deuxième édition, InterEditions, CNRS Editions

Martin S.R., Gappinger R.O., Loya F.M., et al., Nov. 2003, In : Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets. Edited by Coulter, Daniel R. Proceedings of the SPIE, Volume 5170, pp. 144-154 (2003)., 144–154

Mennesson B., Ollivier M., Ruilier C., Mar. 2002, Optical Society of America Journal, 19, 596

Mennesson B., Crawford S.L., Serabyn E., et al., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 525–528

Morgan R.M., Burge J.H., Woolf N.J., Feb. 2003, In : Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 644-655 (2003)., 644–655

Normand P. Mise en œuvre d'une caméra pour l'infrarouge proche : CIRCUS. Spectro-imagerie à 3,3 microns du milieu interstellaire extragalactique et galactique. Interprétation des résultats dans l'hypothèse PAH. Thèse de doctorat, Université Paris VII, Sep. 1994

Ollivier M. Coronographie interférentielle pour la mission Darwin. Thèse de doctorat, Université Paris XI, déc. 1999

Ollivier M., Mariotti J.M., Léger A., et al., May 2001, A&A, 370, 1128

Palik E., 1985, Handbook of optical constants of solids, 1

Pellet B. Mise en œuvre de la caméra CIRCUS 128 sur le banc d'expérimentation IAS/DARWIN. Rapport de stage, Université Paris XI, mars-août 2003

Serabyn E., Feb. 2003, In : Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 594-608 (2003)., 594–608

Serabyn E., Colavita M.M., Apr. 2001, Appl. Opt., 40, 1668

Serabyn E., Booth A.J., Colavita M.M., et al., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.806, 806–+

Vink H.J.P., Doelman N.J., Flatscher R., Sodnik Z., Oct. 2003, In : ESA SP-539 : Earths : DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, 641–645

Wallace J.K., Babtiwale V., Bartos R., et al., Oct. 2004, In : New Frontiers in Stellar Interferometry, Proceedings of SPIE Volume 5491. Edited by Wesley A. Traub. Bellingham, WA : The International Society for Optical Engineering, 2004., p.862, 862–+

Weber V. Étude de l'interféromètre à frange noire MAII. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, juin 2004

Bibliographie : "De la théorie à la pratique : mesures et résultats"

Brachet F. Participation à une expérience de démonstration de la faisabilité de la mission Darwin. Mémoire de D.E.A., Université Paris XI, avril-juillet 2002

ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT D'UN DÉPHASEUR ACHROMATIQUE POUR L'INTERFÉROMÉTRIE EN FRANGE NOIRE

La mission Darwin de l'*Agence Spatiale Européenne*, envisagée à l'horizon 2015, a pour objectifs principaux l'étude de planètes extrasolaires géantes et telluriques autour d'étoiles proches, pour analyser leurs atmosphères et y détecter d'éventuelles bio-signatures. Le principe proposé pour cette mission est celui de l'interférométrie en frange noire, basée sur le coronographe interférentiel de Bracewell, pour annuler le flux de l'étoile et rendre visible les planètes en orbite autour de celle-ci.

Les difficultés technologiques de Darwin exigent, avant une application spatiale, la validation de chacun des éléments de l'instrument, lors d'expériences préparatoires en laboratoire. Parmi ces difficultés, le déphaseur de π introduit dans l'interféromètre pour annuler le flux de l'étoile, doit être achromatique dans la bande d'observation de Darwin de 6 à 18 µm. Il existe plusieurs façons de créer ce déphasage achromatique. Cette thèse présente l'étude et le développement de l'une de ces techniques, basée sur des prismes dispersifs, et testée sur le banc polychromatique SYNAPSE.

Après une présentation des enjeux planétologiques et exobiologiques de la mission Darwin, nous introduisons les différentes techniques de déphasage achromatique. Le concept à base de lames dispersives prismatiques est ensuite détaillé, ainsi que les différentes étapes de développement du banc SYNAPSE, fonctionnant en proche infrarouge. Nous montrons enfin que ce banc a permis de maintenir un taux de réjection de 4 000 (soit des fuites stellaires de $2,5.10^{-4}$) sur l'ensemble de la bande K (entre 2 et 2,5 µm) durant plusieurs minutes. Ces résultats montrent également que, bien plus que le niveau absolu de réjection sur la totalité de la bande spectrale de Darwin, l'enjeu réside dans sa stabilité durant les observations.

Mots-clés : interférométrie en frange noire ; mission Darwin ; planètes extrasolaires ; instrumentation infrarouge ; haute résolution angulaire.

****

STUDY AND DEVELOPMENT OF AN ACHROMATIC PHASE SHIFTER FOR NULLING INTERFEROMETRY

The Darwin mission is a project of the European Space Agency that should allow around 2015 the search for extrasolar planets and a spectral analysis of their atmospheres to detect gases and particularly tracers of life. The basic concept of the instrument is a Bracewell nulling interferometer. It allows the high angular resolution and high dynamic range necessary to cancel the light coming from the star to keep the planetary one.

The Darwin mission technological keypoints require preliminary laboratory experiments to validate each element before any space application. Among these, the π achromatic phase shifter included in the interferometer to cancel the starlight has to be achromatic in the whole Darwin spectral band from 6 to 18 µm. There are many solutions to create this phase shift. This work presents the study and development of one of these techniques based on dispersive prisms and tested on the polychromatic test bench SYNAPSE.

After an introduction of Darwin stakes, both from an exoplanetological and exobiological point of view, we introduce different achromatic phase shifter techniques. The concept based on prismatic dispersive plates is then detailed, along with the development of the SYNAPSE test bench working in near infrared. We finally show that this bench allowed to maintain rejection ratio better than 4 000 (corresponding to a $2,5.10^{-4}$ stellar leaks level) in the whole K band (from 2 to 2,5 µm) during several minutes. These results also show that more than the absolute rejection ratio needed in the whole Darwin spectral band, their stability will be the real stake during observations.

Keywords : nulling interferometry ; Darwin mission ; extrasolar planets ; infrared instrumentation ; high angular resolution.

****

FRANK BRACHET - Institut d'Astrophysique Spatiale - 14 décembre 2005