



**HAL**  
open science

# Étude des conditions physiques dans les disques protoplanétaires par interférométrie. Théorie, instrumentation et premières observations.

Fabien Malbet

► **To cite this version:**

Fabien Malbet. Étude des conditions physiques dans les disques protoplanétaires par interférométrie. Théorie, instrumentation et premières observations.. Astrophysique [astro-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. tel-00189697

**HAL Id: tel-00189697**

**<https://theses.hal.science/tel-00189697>**

Submitted on 21 Nov 2007

**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.

# Diplôme d'habilitation à diriger des recherches

## ÉTUDE DES CONDITIONS PHYSIQUES DANS LES DISQUES PROTOPLANÉTAIRES PAR INTERFÉROMÉTRIE. THÉORIE, INSTRUMENTATION ET PREMIÈRES OBSERVATIONS.

**Fabien MALBET**

Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble  
UMR 5571 UJF/CNRS

Habilitation soutenue le 26 octobre 2007 à Grenoble

### **Composition du jury :**

Claudine Kahane	présidente
Claude Catala	rapporteur
Daniel Rouan	rapporteur
Alain Léger	rapporteur
Magali Deleuil	examinatrice
Daniel Bonneau	examineur

Université Joseph Fourier, Grenoble I



## Résumé

Les étoiles se forment lors de l'effondrement de nuages de gaz et de poussière. Dans l'environnement proche de l'étoile naissante la matière se concentre dans un plan équatorial que l'on appelle disque protoplanétaire. Les astronomes pensent que les planètes se forment au sein de cette masse de gaz et de poussière orbitant autour de l'étoile. Pour sonder ces disques à des échelles correspondant aux orbites des futures planètes, il convient d'observer dans l'infrarouge à très haute résolution spatiale. L'interférométrie infrarouge est donc un outil idéal pour étudier les conditions physiques des disques protoplanétaires. Dans ce mémoire, je décris les premiers pas de l'interférométrie infrarouge, depuis la mise au point des petits interféromètres PTI et IOTA jusqu'à la construction de l'instrument AMBER au foyer de l'interféromètre du VLT. Je décris aussi les résultats d'une piste de recherche technologique particulièrement attrayante dans le cas de l'interférométrie infrarouge et issue des technologies des autoroutes de l'information : l'optique intégrée appliquée à la combinaison de plusieurs faisceaux en astronomie. Je montre ensuite comment à partir des observations obtenues à partir de ces instruments, il est possible de contraindre la physique des disques autour des étoiles jeunes. Grâce à la résolution spectrale nouvellement disponible sur ces instruments, pour la première fois nous pouvons séparer des phénomènes physiques aussi différents que l'accrétion de matière sur l'étoile et l'éjection de particules par des vents dont l'origine précise est encore mal connue. Les résultats présentés dans ce mémoire ont été obtenus principalement à partir d'observations sur les systèmes jeunes FU Ori et MWC 297 effectuées par AMBER sur le VLTI, mais aussi par les petits interféromètres infrarouges PTI et IOTA. Je développe aussi les travaux de modélisation de la structure verticale des disques associés afin de montrer la richesse des renseignements obtenus. Finalement je trace les contours d'un programme de recherche qui permettra tout d'abord de maximiser le retour astrophysique sur un instrument comme le VLTI, puis d'obtenir de premières images interférométriques de ces environnements circumstellaires. Je propose aussi la réalisation d'un instrument de seconde génération qui permettra de fournir des images interférométriques détaillées de ces sources compactes par synthèse d'ouverture.

## Abstract

Stars are forming when clouds of gas and dust collapse. In the close environment of the new star, the matter is concentrated in an equatorial plane which is called protoplanetary disk. The astronomers think that planets are formed within this mass of gas and dust orbiting around the star. To probe these disks at scales corresponding to the orbits of the future planets, it is necessary to observe at very high spatial resolution in the infrared wavelength domain. Infrared interferometry is therefore an ideal tool to study the physical conditions in protoplanetary disks. In this document, I describe the first steps of infrared interferometry, from the beginning of the small interferometers PTI and IOTA until the construction of the AMBER instrument at the focus of the VLT Interferometer. I describe also the results of a technological research track, particularly attractive in the case of infrared interferometry, and coming from the information freeway : the integrated optics applies to the combination of several beams in astronomy. I show then how from observations obtained from these instruments, it is possible to constrain the physics of disks around young stars. Thanks to the spectral resolution recently available on these instruments, for the first time, we can separate the physical phenomena as different as accretion of matter onto the star and the ejection of particles by winds whose precise origin is still not well known. The results presented in this document were obtained mainly from observations on the young systems FU Ori and MWC 297 and performed by AMBER on the VLTI but also by the small infrared interferometers PTI and IOTA. I tackle also the modeling of the vertical structure of those disks in order to show the wealth of obtained information. Finally I draw the contours of a research program that will allow first the VLTI astrophysical return to be maximized, and then the first interferometric images of these circumstellar environments to be obtained. I also propose to build a second generation instrument for the VLTI which will bring detailed interferometric images by aperture synthesis of these compact sources.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte astrophysique de la formation stellaire . . . . .	1
1.2 Modèles physiques de disques . . . . .	6
1.3 L'interférométrie pour sonder le cœur des disques . . . . .	7
1.4 Organisation du mémoire . . . . .	8
<b>2 Instrumentation interférométrique</b>	<b>11</b>
2.1 Premiers pas en interférométrie infrarouge . . . . .	12
2.2 Optique guidée : fibres monomodes et optique planaire . . . . .	16
2.3 L'instrument AMBER sur le VLTI . . . . .	21
2.4 Vers la spectro-imagerie : de VITRUV à VSI . . . . .	26
<b>3 Des modèles aux observations de disques</b>	<b>29</b>
3.1 Structure verticale des disques . . . . .	29
3.2 Premières observations de disques . . . . .	33
3.3 Et autant en emporte le vent . . . . .	38
<b>4 Vers une compréhension de la formation stellaire et planétaire ?</b>	<b>43</b>
4.1 Bilan astrophysique et instrumental . . . . .	43
4.2 Perspectives astrophysiques . . . . .	44
4.3 Perspectives instrumentales . . . . .	46
4.4 Programme de recherche . . . . .	47
<b>Bibliographie</b>	<b>55</b>
<b>Abréviations</b>	<b>63</b>
<b>Curriculum vitae</b>	<b>67</b>
<b>Liste de publications</b>	<b>71</b>



# Chapitre 1

## Introduction

Les étoiles se forment lors de l'effondrement de nuages de gaz et de poussière. Dans les premiers instants de leur formation, ces astres sont entourés d'un cocon de gaz et de poussière qui obscurcit entièrement notre vision dans le domaine d'observation des longueurs d'onde optique. Cependant, lors des premières étapes de leur évolution, les étoiles finissent par se révéler aux observateurs optiques en leur laissant apercevoir, outre l'étoile en train de se constituer, un environnement complexe formé d'un disque circumstellaire, d'un vent bipolaire plus ou moins collimaté et d'un résidu du nuage originel finissant de s'effondrer. Le rayonnement lumineux est alors dominé par le système étoile-disque. C'est au sein de ce disque que les astronomes pensent actuellement que les planètes se forment (Lissauer & Stevenson 2007; Durisen et al. 2007; Papaloizou et al. 2007; Levison et al. 2007). Plus tard, l'enveloppe et le disque finissent par se vider de leur matière. Il ne reste plus que des planétoïdes, les restes de leurs collisions, et éventuellement des planètes de différentes masses. Il en résulte des systèmes planétaires similaires au Système Solaire ou à ceux observés autour de plusieurs dizaines d'autres étoiles (Udry et al. 2007).

Bien comprendre les conditions physiques dans les disques autour des étoiles jeunes, ainsi que tous les phénomènes y étant reliés, est essentiel pour percer le mystère de la formation des systèmes planétaires. Mon principal objectif est d'étudier les conditions physiques dans ces disques protoplanétaires autour des étoiles de type solaire. Des résultats importants ont été obtenus ces dix dernières années et il me paraît important de les rappeler. C'est le but de ce chapitre d'introduction.

### 1.1 Contexte astrophysique de la formation stellaire

Tout d'abord précisons le vocabulaire de la nomenclature des disques, du moins celle que je l'utilise dans ce manuscrit. En effet, je fais la distinction entre trois types de disques dans le domaine de la formation stellaire et planétaire :

- les **disques protostellaires** qui résultent de l'effondrement du nuage géniteur en rotation avant que l'étoile ne naisse (cf. étape *c* de la figure 1.1),
- les **disques protoplanétaires** ou de première génération qui correspondent à l'accumulation de matière dans le plan équatorial du système spiralant vers l'étoile nouvellement formée (cf. étape *d* de la figure 1.1),
- et les **disques planétaires** aussi appelés disques de seconde génération ou disques de débris. Ils se forment en effet lorsque la matière initiale a fini de s'accréter sur la



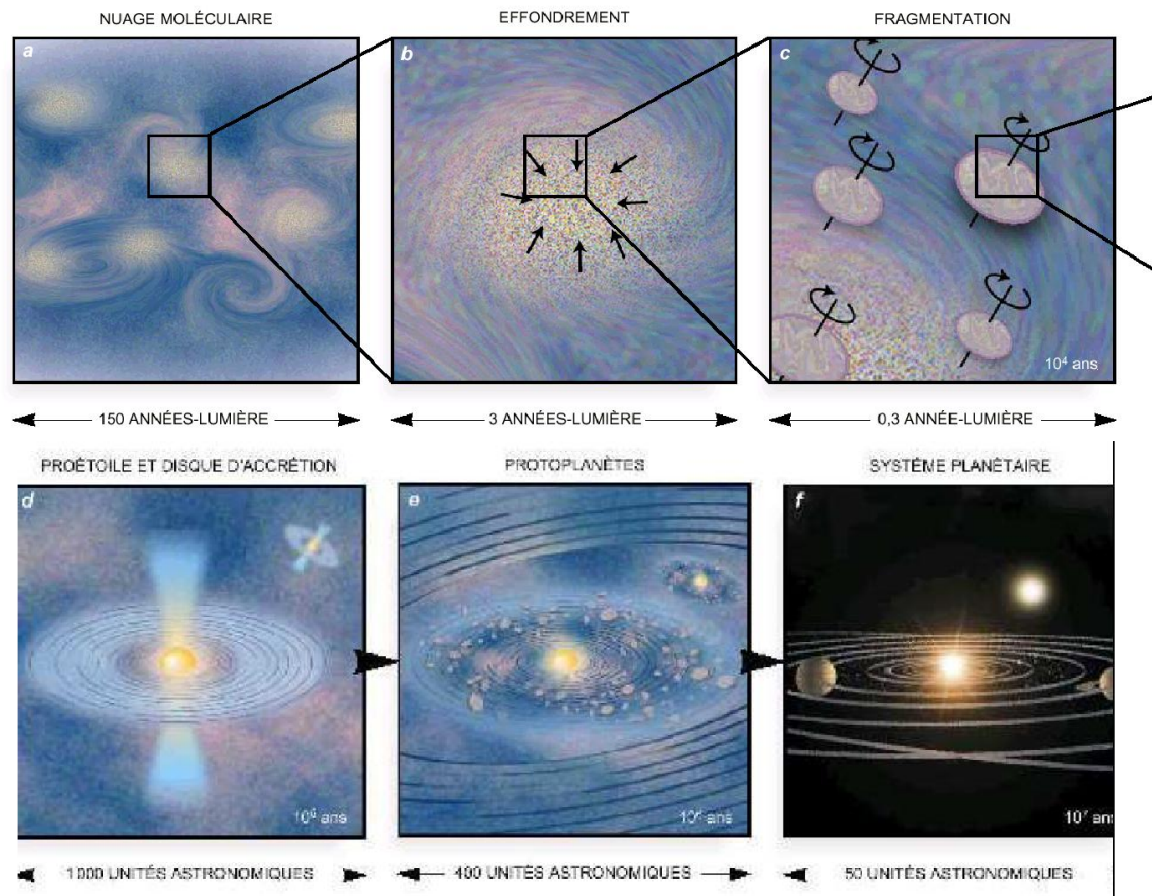


FIG. 1.1 – Scénario de formation des étoiles et des planètes (Bouvier & Malbet 2001).

protoétoile et ils résultent des poussières engendrées par la collision de gros corps (cf. étape *e* de la figure 1.1).

Cette classification est basée en partie sur les propriétés des disques déduites à partir des observations : les cœurs denses protoplanétaires de forme allongée mis en évidence par des observations submillimétriques (di Francesco et al. 2007; Ward-Thompson et al. 2007) ; l'émission thermique de la matière circumstellaire provoquant un excès dans l'infrarouge et la diffusion de la lumière stellaire à travers un disque optiquement mince de poussière (Meyer et al. 2007).

Dans ce mémoire, je me place exclusivement dans le cadre des disques protoplanétaires autour des étoiles T Tauri dites *classiques* de masse solaire et de leurs contreparties de masses intermédiaires, les étoiles dites Ae/Be de Herbig. Ces disques sont potentiellement les matrices de planètes. Ils sont généralement optiquement épais dans les domaines de longueur d'onde optiques et infrarouges ( $0.4 - 20 \mu\text{m}$ ) et dans les raies de CO (mm), mais optiquement minces dans le rayonnement continu du millimétrique. Cependant les couches supérieures de l'atmosphère du disque restent en général optiquement minces vis à vis du rayonnement rasant provenant de l'étoile.

Les disques sont localisés dans une région équatoriale par rapport à l'axe de rotation de l'étoile située entre quelques rayons stellaires et 1000 unités astronomiques (UA). Nous avons affaire principalement à deux origines différentes pour la lumière émise par les

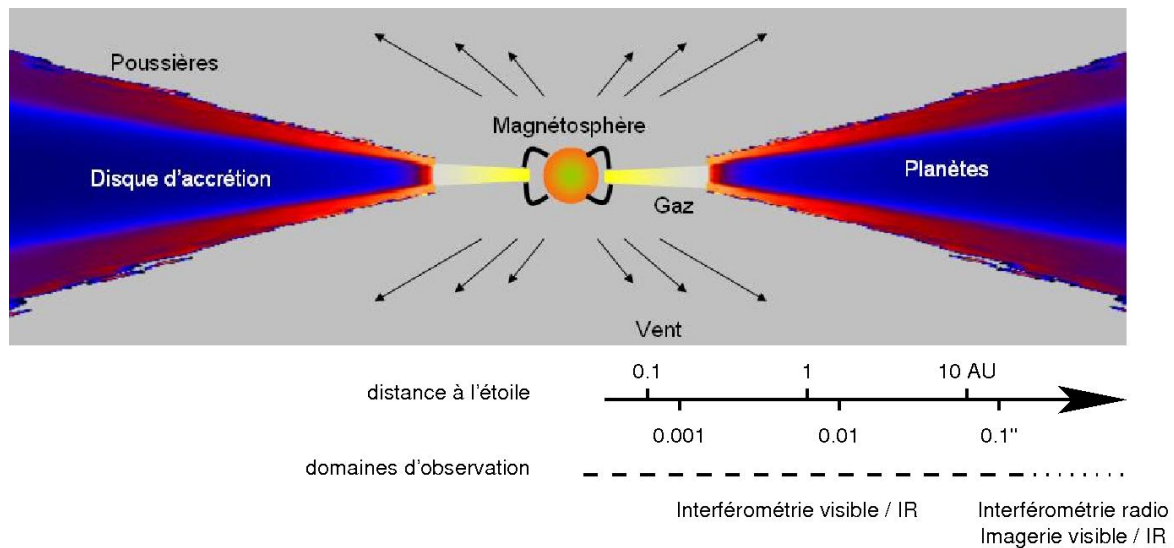


FIG. 1.2 – Domaines d’observation des disques protoplanétaires. Le domaine visible et IR permettent d’imager la lumière stellaire diffusée dans le disque à des distances supérieures à plusieurs dizaines d’UA, tandis que l’imagerie millimétrique donne accès au rayonnement thermique du disque sur des échelles de distance similaires. L’interférométrie optique permet de sonder les disques protoplanétaires dans la partie interne des disques.

disques :

- l’émission thermique issue des processus de chauffage suivants tels que le frottement visqueux du gaz et de la poussière au cours de l’accrétion, absorption de photons stellaires, ...
- l’émission stellaire diffusée dans les couches optiquement minces du disque.

Les différentes techniques observationnelles qui donnent accès aux conditions physiques dans les disques (cf. figure 1.2) sont l’imagerie directe avec le télescope spatial Hubble et avec l’optique adaptative au sol (Watson et al. 2007), ainsi que l’imagerie par synthèse d’ouverture avec l’interférométrie millimétrique (Dutrey et al. 2007). Cependant, comme je l’illustrerai dans le prochain paragraphe, ces observations n’ont pour l’instant été interprétées que par des modèles ad-hoc sans fondements réellement physiques. Je ferai ensuite le point sur les modèles physiques de disques qui n’ont été confrontés pendant très longtemps qu’à un seul type d’observations, la spectrophotométrie. Je rappellerai ensuite comment il est possible d’aller chercher des contraintes au cœur des disques avec des techniques à haute résolution angulaire.

Il convient aussi de préciser ce que l’on entend par *conditions physiques* dans les disques. Il s’agit de la distribution spatiale de la température et de la densité, c’est-à-dire dans un disque axisymétrique pour tout  $r, z$  la valeur de la température  $T(r, z)$  et de la densité de gaz  $\rho(r, z)$ . En effet, les propriétés du disque se déduisent directement de ces quantités. Par exemple, la densité surfacique donnée par :

$$\Sigma(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(r, z) dz \quad (1.1)$$

Plusieurs auteurs travaillent à l’établissement de modèles complets et auto-cohérents de la structure des disques (voir paragraphe 1.2), mais une simplification est souvent nécessaire

lorsqu'on contraint ces modèles par les observations. La première simplification revient à considérer le milieu isotherme, c'est-à-dire pour chaque cylindre de matière situé à la distance  $r$  de l'étoile,  $T(r, z) = T(r)$ . Cela permet de simplifier la distribution verticale de la densité qui devient une loi exponentielle dans le cadre de l'équilibre hydrostatique. Cette distribution verticale au rayon  $r$  est donc fonction de la densité surfacique,  $\Sigma(r)$ , et de la l'échelle locale du disque,  $H(r)$ , qui dépend elle-même de la température  $T(r)$ .

Dans le cadre du modèle standard du disque d'accrétion (Shakura & Sunyaev 1973; Lynden-Bell & Pringle 1974), la distribution radiale de température  $T(r)$  est une loi de puissance dont le coefficient est  $-3/4$ . Si l'on a affaire à un disque évasé, le coefficient de cette loi de puissance peut augmenter jusqu'à la valeur  $-1/2$  (Adams et al. 1988). En général, la densité de surface  $\Sigma(r)$  n'est pas une loi de puissance sur tout le disque à cause des différents domaines d'opacité, mais en faire l'hypothèse simplifie grandement les conditions d'inversion du problème. C'est pourquoi, les observateurs ont pour habitude de paramétrer les lois de température, de densité surfacique et d'échelle locale de hauteur de façon ad-hoc :

$$T(r) \propto r^{-q}, \quad (1.2)$$

$$\Sigma(r) \propto r^{-p}. \quad (1.3)$$

$$H(r) \propto r^{-\alpha}. \quad (1.4)$$

L'émission des raies de CO (Dutrey et al. 1994), optiquement épaisse, est résolue sur des régions externes (500 – 1000 UA). Ce rayonnement ne permet donc pas de contraindre les paramètres physiques dans le disque. Cependant l'étude de la cinématique de ces régions a permis de mettre en évidence le mouvement de rotation de la matière suivant une loi képlérienne.

L'observation de l'émission de la poussière dans le continu millimétrique est plus intéressante puisqu'elle se révèle optiquement mince et est résolue avec une taille de l'ordre de la seconde d'angle (c'est-à-dire 150 UA à la distance des régions de formation stellaire les plus proches). Elle permet donc de contraindre le produit  $\Sigma(r) T(r)$ . Une étude des tailles apparentes des disques en fonction des paramètres  $p + q$  et  $R_{ext}$  aboutit à la conclusion que ces observations impliquent la contrainte  $p + q \leq 2$  (Dutrey et al. 1996).

Le télescope spatial Hubble et l'optique adaptative ont apporté de leur côté les premières preuves directes de la présence de disques autour des étoiles T Tauri (Burrows et al. 1996; Stapelfeldt et al. 1998; Monin & Bouvier 2000). Ces disques sont vus par la tranche, l'étoile centrale étant occultée par le disque. Les seuls photons stellaires qui sont détectés sont ceux diffusés par la couche supérieure de disque. La résolution angulaire obtenue atteint  $0.1''$ . Cette technique donne une information indirecte sur la partie du disque comprise entre 15 UA et 100 UA. Là aussi, inverser les données pour obtenir une distribution spatiale de  $\Sigma(r)$  par exemple s'avère un exercice difficile voir impossible. En revanche l'utilisation de modèles ad-hoc et d'un code de diffusion multiple permet d'expliquer la morphologie des images et notamment la taille de la bande sombre centrale (Stapelfeldt et al. 1998; Krist et al. 2000). Les solutions ne sont cependant pas uniques et il est impossible de différencier un modèle de disque ayant une densité surfacique et une échelle de hauteur faibles d'un modèle avec ces paramètres grands. En effet, l'angle sous lequel est vu la couche supérieure de l'atmosphère est le même.

Les distributions spectrales d'énergie obtenues par spectrophotométrie entre 0.4 et  $100\mu\text{m}$  ont été les premiers éléments déterminants dans l'établissement du paradigme du

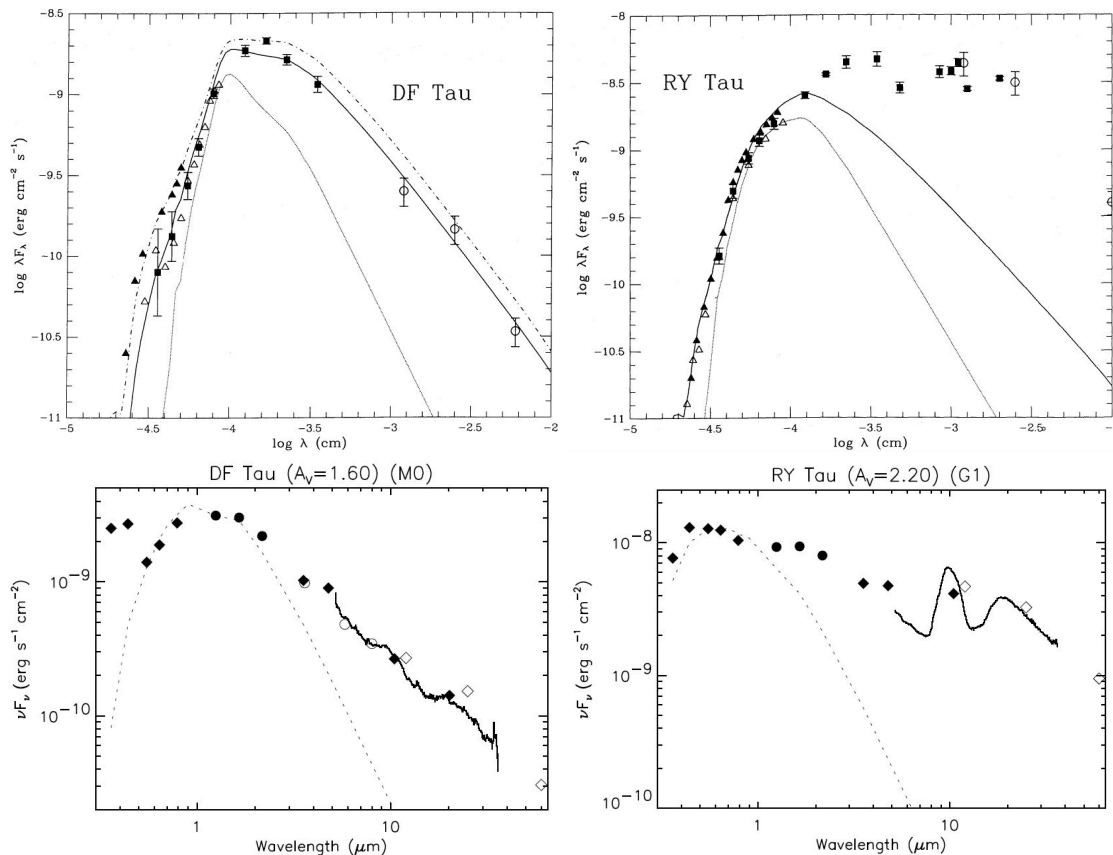


FIG. 1.3 – Distributions spectrales d'énergie (SED) pour deux étoiles jeunes : (a) DF Tau à gauche et (b) RY Tau à droite. La pente des SED dans l'infrarouge moyen et lointain renseigne sur la distribution radiale de température effective dans le disque. En haut, la courbe en pointillé représente la contribution de la photosphère stellaire tandis que la courbe en continu représente l'émission conjointe de l'étoile et d'un disque classique dont la loi de température décroît en  $r^{3/4}$ . En bas les mêmes étoiles observées par Spitzer. D'après Bertout et al. (1988) et Furlan et al. (2006)

disque d'accrétion. La dissipation d'énergie par frottement visqueux lors de l'accrétion de la matière est la seule source plausible directe et indirecte des excès infrarouges et ultraviolets constatés sur la plupart des étoiles T Tauri (Bertout 1989; Ménard & Bertout 1999). Le spectre dérive directement de la distribution radiale de la température  $T(r)$  dans le cas des disques optiquement épais, puisque c'est la somme des spectres de corps noirs émis par les différentes régions du disque.

Suivant la valeur de  $q$ , la pente du spectre est différente. Par exemple, une loi en  $T(r) \propto r^{-3/4}$  donne une pente du spectre infrarouge en  $\lambda^{-4/3}$  (figure 1.3 gauche) tandis qu'une loi en  $T(r) \propto r^{-1/2}$  donne un spectre infrarouge plat (figure 1.3 droite). Cette technique permet de contraindre fortement la distribution radiale de la température  $T(r)$ , mais ne donne pas accès à la géométrie de la source. Un exemple frappant d'ambiguïté que cette technique soulève est l'ajustement de la distribution spectrale d'énergie des étoiles Ae/Be de Herbig par un modèle de disque d'accrétion effectué par Hillenbrand et al. (1992). Or il se trouve que l'observation de ces étoiles par interférométrie infrarouge (Millan-Gabet

TAB. 1.1 – Table résumant les différents modèles de disques autour des étoiles jeunes.

Transfert de rayonnement		Sources de chauffage	
		Rayonnement de l'étoile (disque passif)	Viscosité (disque actif)
0D	1 couche		Shakura & Sunyaev (1973)
			Lynden-Bell & Pringle (1974)
		Adams et al. (1988)	
	2 couches	Chiang & Goldreich (1997, 1999)	
		Lachaume et al. (2003)	
	Dullemond et al. (2001)		
1D	gris		Bell & Lin (1994)
			D'Alessio et al. (1998, 1999)
		Malbet et al. (2001)	
	multi- $\lambda$	Dullemond & Dominik (2004)	
$n$ D	multi- $\lambda$	Wolf et al. (1999) Niccolini et al. (2003) Pinte et al. (2006)	

et al. 2001) a montré que les mesures de visibilité étaient incompatibles avec le modèle de disque. Ces observations ont montré que la géométrie de la source de l'excès infrarouge était sans doute plus proche de celle d'un anneau.

Je montrerai dans le chapitre 3 que, grâce à l'interférométrie infrarouge, nous sommes capables d'apporter de nouvelles contraintes sur les conditions physiques dans les régions internes des disques.

## 1.2 Modèles physiques de disques

Les modèles théoriques de disques d'accrétion en rotation képlérienne datent des années 1970 (Shakura & Sunyaev 1973; Lynden-Bell & Pringle 1974). Ils ont permis de comprendre comment le moment cinétique initial du nuage en rotation pouvait être extrait par la présence de disques ainsi que de prévoir la courbe de distribution spectrale d'énergie. Les premières contraintes sur les conditions physiques dans les disques ont commencé sur la base de ces premiers modèles (voir par exemple Bertout et al. 1988). Ces modèles n'explorent que la distribution radiale de la température et de la densité, la structure au-dessus du plan équatorial étant supposé géométriquement mince et isotherme.

Suite aux travaux d'Adams et al. (1988) qui suggéraient qu'une partie du surplus d'excès infrarouge pouvait venir de la géométrie évasée du disque, un certain nombre de travaux sur la structure verticale ont vu le jour. On peut les classer en trois grandes catégories (voir aussi le récapitulatif de la table 1.1) :

- les modèles numériques qui résolvent numériquement les équations différentielles gouvernant la physique des disques. C'est le cas du modèle de Bell & Lin (1994) qui a permis de comprendre la physique des objets de type FU Orionis (étoiles de type T Tauri, ayant subi une augmentation notable de leur luminosité pendant une période de plusieurs dizaines d'années). De leur côté D'Alessio et al. (1998, 1999) ont traité

une nouvelle source de chauffage du disque constitué de l'éclairement par l'étoile centrale.

- les modèles simplifiés ne considérant qu'un nombre réduit de strates verticales dans les disques permettant un développement plus rapide. Chiang & Goldreich (1997, 1999) ont ainsi développé un modèle à deux couches : une couche interne optiquement épaisse et une couche surchauffée par le chauffage stellaire et produisant un évitement de la surface du disque. Cela a conduit Dullemond et al. (2001) et Dullemond & Dominik (2004) à développer un modèle de disque avec un anneau intérieur surchauffé qui a permis de donner un début d'explication aux mesures interférométriques infrarouges principalement des étoiles Herbig Ae/Be. Cependant Vinković et al. (2003, 2006) ont contesté cette interprétation préférant le scénario d'un disque optiquement épais et d'un halo central.
- les modèles semi-analytiques basés sur les travaux de Hubeny (1990). Il s'agit principalement des nos travaux que je présenterai dans le chapitre 3 commencés lors de ma thèse (Malbet & Bertout 1991; Malbet 1992). Leur caractéristique est de développer un traitement analytique du transfert de rayonnement dans le disque permettant de mieux comprendre l'origine des phénomènes. Le prix à payer est le processus itératif de résolution des équations et donc la sensibilité à certaines instabilités.

Une revue des différents modèles de structure de disques a été présentée de manière succincte par Dullemond et al. (2007). Pour le moment, ces modèles ont principalement cherché à expliquer les courbes de distributions spectrales d'énergie et ponctuellement les images de disques obtenus dans le millimétrique.

Je présenterai dans le chapitre 3 l'état actuel d'avancement de nos travaux de recherche et notamment les possibilités offertes pour interpréter les données obtenues par interférométrie infrarouge.

### 1.3 L'interférométrie pour sonder le cœur des disques

L'état de l'art de l'imagerie dans les longueurs d'onde optiques et millimétriques ne permet de sonder typiquement que des échelles spatiales de l'ordre de 100 à 1000 UA avec une résolution de plusieurs dizaines d'UA. Notre compréhension même des propriétés générales de l'environnement circumstellaire à l'échelle de quelques UA et en deçà reste donc très limitée.

Pour le moment, le seul moyen d'atteindre une résolution angulaire suffisante pour mettre à jour le rayonnement des régions internes des disques est d'utiliser l'interférométrie optique dans les domaines des longueurs d'onde visibles et infrarouges. Un interféromètre formé de deux télescopes séparés d'une centaine de mètres (caractéristiques des équipements actuels) et opérant dans l'infrarouge proche ou moyen entre 1.5 et 10  $\mu\text{m}$  permet de sonder la matière ayant une température comprise entre 300 et 2000 K avec une résolution angulaire de  $\lambda/2B \approx 3 - 26$  millisecondes d'angle (mas), c'est-à-dire une région comprise entre 0.5 et 4UA autour des étoiles situées dans les régions de formation d'étoiles les plus proches aux environs de 150 pc.

Les interféromètres optiques, comme leurs analogues opérant dans les longueurs d'ondes millimétriques, combinent de manière cohérente les ondes électromagnétiques reçues par deux télescopes ou plus. Dans certaines conditions qui s'appliquent à la plupart des sources

astrophysiques, l'amplitude et la phase des interférences mesurées sont reliées à la transformée de Fourier à deux dimensions spatiales de la distribution géométrique de l'intensité de l'objet céleste observé. Pour une description plus complète des principes de l'interférométrie, les lecteurs sont invités à se reporter à l'excellente revue sur le sujet de Monnier (2003), mais aussi aux introductions des mémoires de thèses de Mège (2002), ainsi qu'aux actes des écoles européennes des Houches (Perrin & Malbet 2003) et de Goutelas (Malbet & Perrin 2007).

En 1995, les observations interférométriques étaient limitées aux objets brillants ( $V \leq 5, K \leq 3$ ) et par conséquent il n'était pas possible d'utiliser cette méthode pour sonder l'environnement proche des étoiles jeunes. C'est pourquoi, je me suis investi dans la construction de l'interféromètre PTI (*Palomar Testbed Interferometer*, Colavita et al. 1999) construit sur le Mont Palomar en Californie. Nous avons pu commencer les premières observations de l'objet FU Orionis en 1997 qui nous ont permis d'être les premiers à résoudre spatialement la structure autour d'une étoile jeune (Malbet et al. 1998). Cette observation fut suivie par celle de l'étoile AB Aurigae que nous avons réalisé sur l'interféromètre IOTA (*Infrared and Optical Telescope Array*, Traub et al. 2004) en 1998 (Millan-Gabet et al. 1999). Ces observations furent suivies par plusieurs dizaines d'autres à mesure que les sensibilités des instruments augmentaient.

De retour en Europe, il m'a semblé évident qu'il fallait s'investir dans l'élaboration d'un mode interférométrique du *Very Large Telescope* (VLT) notamment dans l'infrarouge. C'est pourquoi je me suis investi dans la réalisation de l'instrument AMBER sur le VLTI qui nous a permis d'obtenir les premières observations interférométriques de l'environnement d'une étoile jeune, MWC 297, avec une résolution spectrale supérieure à 1500.

Les résultats actuels montrent bien que nous sommes limités par la faible couverture en fréquences spatiales. Cela nous permet de contraindre les modèles décrits ci-dessus par des observations nouvelles, mais pas de changer radicalement de paradigmes, comme l'obtention d'images précises centrées sur ces régions pourrait le permettre. Une étape reste donc à franchir, c'est celle de l'imagerie par synthèse d'ouverture comme cela est fait maintenant de façon routinière par l'interférométrie dans les longueurs d'ondes millimétriques. C'est l'objectif principal de notre proposition de spectro-imageur sur le VLTI bénéficiant des dernières recherches en optique intégrée.

## 1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est l'occasion d'exposer les résultats sur la région centrale des disques protoplanétaires obtenus lors de mes dix dernières années de recherche. Bien sûr ces résultats sont le fruit d'un travail d'équipe mené avec mes collaborateurs et les étudiant(e)s que j'ai eu la chance d'encadrer.

Le plan du mémoire suit l'ordre inverse des sujets traités dans l'introduction pour montrer comment il est possible de remonter aux conditions physiques dans les disques protoplanétaires grâce à l'interférométrie optique. Étant donné la nature du mémoire et sa longueur limitée à une cinquantaine de pages, je me limite aux étapes et aux résultats principaux de ces recherches. Plus de détails pourront être trouvés dans les cinq articles suivants, les plus représentatifs de mon travail :

- Malbet F., Benisty M., De Wit W., et al., 2007, *A&A* **464**, 43, *Disk and wind inter-*

- action in the young stellar object MWC 297 spatially resolved with VLTI/AMBER*
- Malbet F., Lachaume R., Berger J. P., et al., 2005, *A&A*, **437**, 627, *New insights on the AU-scale circumstellar structure of FU Orionis*
  - Malbet F., Lachaume R., and Monin J.-L., 2001, *A&A* **379**, 515, *The vertical structure of T Tauri accretion disks II. Physical conditions in the disk.*
  - Malbet F., Kern P., Schanen-Duport I., et al. 1999, *A&AS* **138**, 119, *Integrated optics for astronomical interferometry. I. Concept and astronomical applications*
  - Malbet F. and Bertout C., 1995, *A&AS* **113**, 369, *Detecting T Tauri disks with optical long-baseline interferometry*

et bien sûr aussi le papier AMBER général : Petrov, Malbet, Weigelt, et al. 2007, *A&A*, **464**, 1, *AMBER, the near-infrared spectro-interferometric three-telescope VLTI instrument.*

J'expose dans le chapitre 2 les moyens instrumentaux que nous avons mis en œuvre au cours des années. Je décris brièvement la première génération d'interféromètres infrarouges PTI et IOTA que j'ai utilisés, puis les efforts de recherche en traitement de données pour l'interférométrie. Je présente ensuite l'instrument AMBER, ou plutôt le projet puisque c'est beaucoup plus qu'un simple instrument. Finalement j'aborde rapidement la feuille de route technologique que nous avons suivie pour apporter de nouvelles façons de concevoir la recombinaison interférométrique avec la technologie d'optique intégrée que P. Kern et moi-même avons lancée en 1996. Celle-ci arrive maintenant à maturité grâce aux travaux de l'équipe IONIC et nous permet de proposer le projet VSI, un instrument imageur pour le VLTI.

Dans le chapitre 3 j'insiste d'abord sur les modèles de structure verticale des disques protoplanétaires développés en parallèle dans le cadre de la thèse de R. Lachaume. Les résultats obtenus et les perspectives dégagées permettent de mieux comprendre la physique des disques. Je concrétise ensuite les travaux décrits dans les chapitres précédents par l'obtention de résultats sur deux objets jeunes en particulier : FU Orionis et MWC 297. C'est l'occasion d'exposer ma stratégie d'observation des prochaines années.

Finalement, le chapitre 4 me permet de tirer quelques conclusions, et, de dresser une liste non exhaustive de perspectives à court et moyen terme aussi bien au niveau de l'instrumentation, de l'observation que de la modélisation des disques protoplanétaires. Je me pose finalement la question de savoir si nous allons vers une compréhension de la formation stellaire et planétaire des étoiles de type solaire.





# Chapitre 2

## Instrumentation interférométrique

Ce n'est pas l'objectif de ce mémoire de présenter le principe et les détails de l'interférométrie optique en astronomie. Je me contenterai donc de donner une explication brève, puis de présenter les instruments sur lesquels j'ai travaillé, tout d'abord le *Palomar Testbed Interferometer* (PTI) avec des séparations de l'ordre de 100m, puis l'*Infrared and Optical Telescope Array* (IOTA) qui est complémentaire avec des séparations inférieures à 40m. Ensuite je détaillerai l'instrument AMBER (*Astronomical Multi-Beam CombineR*) du VLTI, et finalement, je présenterai les travaux de R&D en optique guidée.

La figure 2.1 illustre le principe de l'interférométrie optique en astronomie. Ce n'est pas très différent de ce qui se passe dans le cadre de l'expérience des fentes d'Young. La lumière émise par une source (ici astrophysique et située infiniment loin), se propage et le front d'onde incident atteint les différents télescopes qui forment l'interféromètre. Le front d'onde est donc échantillonné par les ouvertures des télescopes en de multiples fronts d'onde. Les différents faisceaux individuels se propagent jusqu'au détecteur où ils sont superposés d'une manière ou d'une autre. C'est là qu'ils forment des franges d'interférences dont l'amplitude et la position (appelées aussi amplitude et phase de la visibilité complexe) dépendent à la fois de la distribution d'intensité de la source et de la position des différents télescopes. En mesurant ces amplitudes et ces phases on obtient des informations sur la nature de l'objet avec une résolution spatiale de l'ordre de  $\lambda/B$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $B$  est la séparation des télescopes. Dans le proche infrarouge on peut atteindre théoriquement des résolutions de l'ordre de quelques millisecondes d'angle (mas), ce qui correspond à séparer les phares d'une automobile observée depuis la Lune !

La partie située entre l'échantillonnage du front d'onde par les télescopes et la détection des franges n'est pas aussi simple que ce qui est représenté sur la figure 2.1. C'est ce qui constitue l'interféromètre : les télescopes, les trains optiques, d'éventuels correcteurs de la turbulence atmosphérique (compensateurs de *tip-tilt* ou optique adaptative), des lignes à retard pour compenser les différences de chemin optique entre les différents bras de l'interféromètre dus à la position de l'astre ou à la turbulence atmosphérique, des compresseurs de faisceaux, des compensateurs de réfraction différentielle, des filtres spatiaux, éventuellement un dispositif disperseur et une matrice de détecteurs (cf. la revue très complète de Monnier 2003).

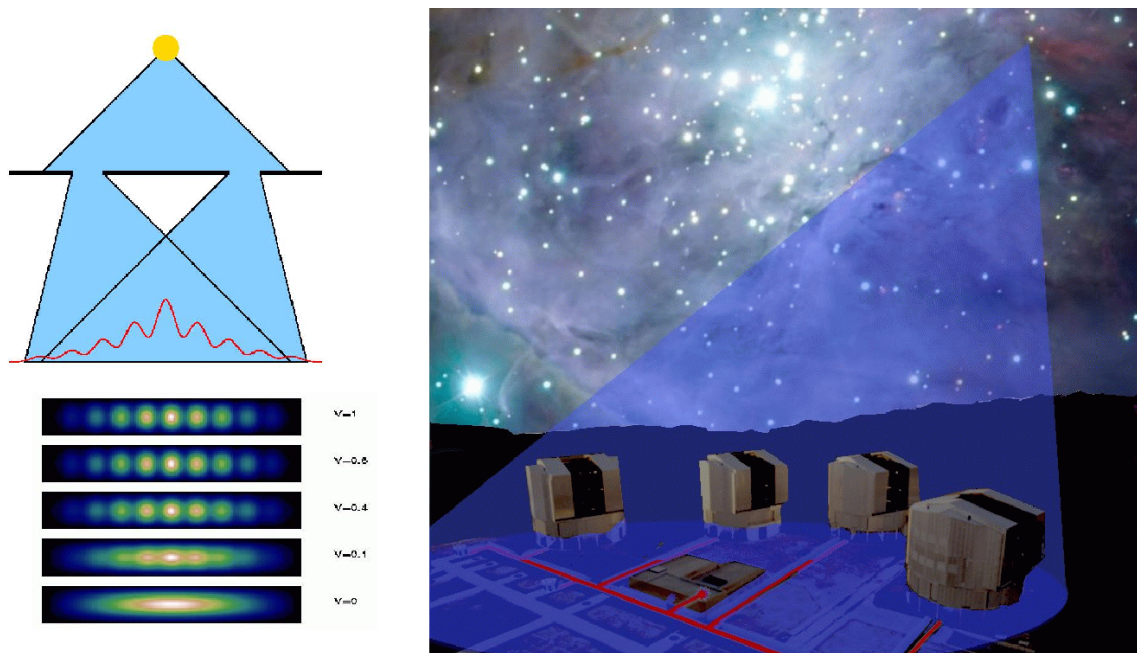


FIG. 2.1 – Principe de l’interférométrie optique en astronomie. En haut à gauche, une représentation de l’interféromètre optique sous forme d’expérience des fentes d’Young. À droite le *Very Large Telescope Interferometer* de l’ESO éclairé par le front d’onde émis par la source astrophysique observée. En bas, à gauche, les interférences observées sur le détecteur de l’instrument. Celles-ci peuvent avoir différents contrastes en fonction de la forme de la source et de la séparation des télescopes (le contraste décroît de haut en bas).

## 2.1 Premiers pas en interférométrie infrarouge

### 2.1.1 Interféromètre du Mont Palomar (Pti)

Pendant les années 1993 et 1994, lors de mon séjour post-doctoral au *Jet Propulsion Laboratory*, j’ai fait le choix d’orienter mon travail vers un aspect plus instrumental. J’ai participé à la conception et à la réalisation de l’interféromètre *Palomar Testbed Interferometer* (PTI) installé au mont Palomar (Colavita et al. 1999). Cet interféromètre est un prototype destiné à démontrer la faisabilité technique d’un interféromètre à double entrée. Cet instrument était destiné à effectuer de l’astrométrie avec une résolution allant de 40 à 100 microsecondes d’arc. Il était aussi prévu un mode imagerie. Cet instrument a été installé sur le Mont Palomar au printemps 1995 et a pu être aussi utilisé pour d’autres programmes que la recherche d’exoplanètes. Je me suis naturellement occupé de l’aspect étoiles jeunes et disques protoplanétaires (cf. chapitre 3) au moins pour les premières observations en plus de ma participation purement technique (Colavita et al. 1994).

Les caractéristiques principales du PTI sont :

- trois sidérostats de 40 cm opérant dans le proche infrarouge dans les bandes *H* et *K*.
- les télescopes sont placés sur un triangle presque équilatéral d’environ 100 m de côté et placé respectivement au nord (N), au sud (S) et à l’ouest (W).
- les faisceaux sont recombinaés par paires et de façon non simultanée. Un aiguillage permet de passer facilement entre les bases NS, WS à NW.



FIG. 2.2 – Palomar Testbed Interferometer (PTI)

- chaque station possède une table optique sur laquelle est placé un compresseur de faisceaux, suivi soit d'une lame séparatrice soit d'un masque coronographique situés dans un plan focal afin de collecter deux faisceaux optiques éventuellement séparés d'une distance inférieure à 1 minute d'arc.
- les faisceaux sont ensuite envoyés vers le bâtiment central via des tubes sous vide pour éviter toute turbulence horizontale.
- les faisceaux pénètrent chacun dans une ligne à retard à deux entrées qui permet de compenser les retards optiques sidéral et atmosphérique.
- les faisceaux primaires sont envoyés directement sur la table de recombinaison principale.
- les faisceaux secondaires sont envoyés dans des lignes à retard différentielles puis sur une table de recombinaison séparée.
- Les deux tables de recombinaison ont à peu près les mêmes fonctionnalités : elles prélèvent une partie des faisceaux pour les envoyer dans les senseurs d'angle d'arrivée, puis recombine de façon coaxiale les faisceaux provenant de deux télescopes séparés. Chaque table possède deux sorties.
- les faisceaux combinés pénètrent dans des fibres monomodes en verre fluoré. Les sorties de fibres sont imagées pour une voie sur un seul pixel en lumière blanche et pour l'autre voie sur un spectrographe à basse résolution (environ égale à 80).
- une métrologie permet de mesurer les différences de marche des deux interféromètres ainsi que la différence de marche entre les interférogrammes mesurés sur les deux tables. Cette différence correspond à la mesure astrométrique de la phase de l'objet par rapport à une étoile de référence.
- un système de contrôle en temps réel permet de suivre les étoiles aussi bien en *tip-tilt* qu'en différence de marche stabilisant ainsi l'interféromètre pour la détection secondaire en général la plus faible.
- la détection se fait en utilisant une modulation temporelle des franges sous forme de rampes d'amplitude correspondant à la période de la frange de la longueur d'onde la plus grande.

- le détecteur était un détecteur NICMOS. Le système de lecture spécifique du détecteur a été développé de telle sorte que le temps de lecture est différent pour chaque pixel. Il dépend de la longueur d’onde effective imagée sur le pixel et donc est d’autant plus long que la longueur d’onde est grande. Ce temps de pose dure le temps nécessaire à la ligne à retard pour scanner la longueur correspondante à la longueur d’onde. Ainsi le temps de pose pour le pixel détectant le signal à  $2.25\mu\text{m}$  est 1.5 fois plus long que le temps de pose pour le pixel correspondant à  $1.5\mu\text{m}$ .
- le signal est échantillonné 4 fois pour mesurer les 4 quadratures du signal  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , et  $D$ . Ainsi le sinus de la frange est proportionnel à  $D - B$  et le cosinus à  $C - A$ . Le flux est proportionnel à  $A + B + C + D$ .
- le logiciel de réduction de données permet de traduire le flux mesuré sur les pixels en terme d’observables interférométriques.

J’ai personnellement mis au point la caméra d’acquisition automatique et j’ai défini la géométrie de l’interféromètre (longueur des lignes de bases et positions des sidérostats). J’ai aussi participé à la mise en place de l’instrument et aux premiers tests. Pendant cette période, mais aussi pendant les observations effectuées sur des étoiles jeunes, je n’ai pas utilisé le montage dual et donc l’infrastructure secondaire. J’ai pu utiliser PTI dès 1997 en compagnie de J.-P. Berger et P. Mège pour observer les deux étoiles jeunes les plus brillantes, FU Orionis et Z Canis Majoris. Le PTI a été ensuite utilisé intensivement par mes collègues américains, R. Akeson et J. Eisner, qui ont augmenté le nombre d’étoiles de Herbig et d’étoiles T Tauri observées. Le PTI semble maintenant avoir atteint ses limites. La fermeture d’IOTA (voir section suivante) a permis à l’équipe du JPL de récupérer notre recombineur en optique intégrée IONIC3 ainsi que sa caméra PICNIC. Très récemment des franges ont été obtenues avec ce nouvel instrument ouvrant la possibilité de réaliser des images par synthèse d’ouverture.

### 2.1.2 Interféromètre du Mont Hopkins (Iota)

L’instrument *Infrared and Optical Telescope Array* (IOTA) est un interféromètre conçu par les équipes du *Smithsonian Astrophysics Observatory*, de *Harvard University* et l’*University of Massachusetts* (Carleton et al. 1994). L’équipe interférométrie du *Département de Recherche Spatiale* de l’Observatoire de Paris-Meudon menée par J.-M. Mariotti a conclu un accord de collaboration avec l’équipe IOTA au début des années 1990 pour y installer un instrument fabriqué à partir de fibres optiques appelé *Fiber-Linked Unit for Optical Recombination* (FLUOR). Ayant passé deux années de thèse dans le même laboratoire que J.-M. Mariotti, j’étais au courant de ce développement (cf. section 2.2.2). Par conséquent, lorsque le consortium d’instituts opérant IOTA lança le premier appel à proposition, j’y répondis volontiers afin de préparer l’observation d’étoiles jeunes (cf. chapitre 3).

Dans un premier temps, ma contribution à IOTA fut réduite à faire fonctionner l’instrument, à observer et aussi à former J.-P. Berger, alors étudiant, aux observations interférométriques. C’est ainsi qu’en collaboration avec R. Millan-Gabet, nous avons observé AB Aurigae (Millan-Gabet et al. 1999). Puis advint le temps de tester les composants d’optique intégrée que nous avons développés au LAOG (cf. 2.2.2). Finalement lorsque l’interféromètre s’enrichit d’une troisième station, notre contribution fût plus quantitative par le biais de la fourniture de l’instrument de recombinaison IONIC3 (cf. section 2.2.2). Puis le programme *étoiles jeunes* a pu reprendre cette fois sous la houlette de la troïka :



FIG. 2.3 – Infrared and Optical Telescope Array (IOTA)

J.-P. Berger, R. Millan-Gabet et J. Monnier, qui ont notamment publié deux articles sur les premières clôtures de phase sur des objets jeunes (Millan-Gabet et al. 2006b; Monnier et al. 2006b).

L'interféromètre IOTA dans sa version la plus avancée était composé des éléments suivants que je décris ci-dessous en suivant le parcours de la lumière depuis son arrivée sur les télescopes jusqu'au détecteur :

- 3 sidérostats de 40 cm de diamètre localisés dans des cahutes mobiles comprenant chacune un compresseur de faisceaux qui permet de transmettre le faisceau réduit à quelques centimètres dans un tube sous vide relié au bâtiment central.
- ces cahutes sont équipées d'essieux et de roues. Elles peuvent se déplacer sur des rails afin de changer la configuration de l'interféromètre. Il y a deux séries de rails positionnés en forme de L dont la grande barre de 35 m de long est dirigée vers le Nord-Est et la petite barre de 15 m de long vers le Sud-Est. Les cahutes peuvent être mise en station tous les 5 m ou tous les 7 m dans la direction Nord, et, seulement tous les 5 m pour la direction Sud. Le déplacement des cahutes s'effectue à la main. Il faut environ une après-midi pour changer de position.
- les faisceaux entrent ensuite dans un tuyau et se propagent dans le vide jusqu'à la table de recombinaison. Par conséquent l'optique de relais et les lignes à retard sont sous vide ce qui permet de ne pas avoir à compenser la réfraction longitudinale.
- il existe deux types de lignes à retard. Une ligne à retard permet de compenser des grandes différences de chemin optique et qui doit rester immobile pendant les observations (mais on peut la déplacer entre deux observations). Une autre ligne à retard ne peut compenser que 2 mètres de retard optique mais de façon continue pendant les observations. Cette dernière fonctionne sur coussin d'air.
- les trois faisceaux compensés des retard optiques dûs à la position de la source sortent du réservoir sous vide sur la table de recombinaison.
- en ce qui concerne l'instrument de recombinaison, j'ai utilisé tout d'abord la première table optique infrarouge. Elle était composée d'une lame séparatrice, d'une modulation de chemin optique et d'un détecteur infrarouge NICMOS construit par R. Millan-Gabet. J'ai aussi utilisé l'instrument à base de coupleurs en fibres optiques FLUOR mis en œuvre par V. Coudé du Foresto et J.-M. Mariotti mais sur des étoiles

évoluées plus brillantes.

- un système de contrôle permet de faire fonctionner IOTA avec la table optique infrarouge et un autre avec FLUOR. Un nouveau système de contrôle a été installé lorsqu'un troisième télescope a été ajouté.
- une partie du signal stellaire peut être prélevée dans le visible et envoyée sur un détecteur composé de quatre quadrants permettant de stabiliser les images des étoiles.
- la table de recombinaison actuelle IONIC3 comporte un composant en optique intégrée à trois voies alimenté par trois fibres optiques monomodes. Des paraboles hors axes injectent le flux stellaire dans les fibres. La recombinaison s'effectue par paires avec des fonctions X asymétriques.
- la modulation des franges suit le même principe que pour la table optique infrarouge ou FLUOR. Les franges sont scannées sur plusieurs dizaines de micromètres et échantillonnées au moins 4 fois par franges. On obtient donc des interférogrammes complets en un scan.
- un système de mesure de la clôture d'interférogramme permet de maintenir les franges dans l'amplitude des modulateurs.

Je ne développe pas dans ce paragraphe nos contributions instrumentales qui se sont concentrées surtout sur l'instrument de recombinaison IONIC décrit plus loin (section 2.2.2). Il est important de signaler tout de même qu'IOTA a joué un rôle majeur dans notre compréhension des techniques interférométriques, ainsi que pour former une demi-douzaine d'étudiants : J.-P. Berger, D. Ségransan, P. Haguenauer, E. Tatulli, C. Gil, J.-B. Le Bouquin, M. Benisty, E. Herwats,... IOTA a aussi été le lieu d'accueil privilégié pour le postdoc de J.-P. Berger, nous permettant d'avoir une base solide pour mettre en œuvre nos tests de composants, puis l'instrument IONIC3. Malheureusement le site a définitivement fermé en juillet 2006. Les différentes pièces optiques ont été déménagées sur d'autres sites comme PTI ou CHARA.

## 2.2 Optique guidée : fibres monomodes et optique planaire

Suite à mon expérience sur PTI et IOTA, je me suis naturellement tourné vers l'interférométrie en optique guidée d'autant plus que cette technique est particulièrement adaptée aux mesures de précisions. J'ai donc amorcé des travaux de traitement du signal en collaboration avec A. Chelli qui se sont concentrés sur la spécificité de l'optique guidée. J'ai aussi lancé avec P. Kern une action de recherche instrumentale sur l'optique guidée.

### 2.2.1 Analyse théorique du signal en interférométrie monomode

Mieux comprendre l'interférométrie de manière globale et la formation du signal interférométrique en particulier est une brique indispensable dans ma démarche. Sur ce sujet j'ai eu la chance de codiriger avec A. Chelli, les thèses de P. Mège, d'E. Tatulli, et de participer aux travaux de F. Millour et d'O. Hernandez.

Notre objectif était de mettre à plat l'interférométrie monomode telle qu'elle est pratiquée de plus en plus souvent en astronomie net notamment avec des guides d'onde monomodes. Ce type d'interférométrie, introduite en 1981 par C. Froehly qui a proposé pour la

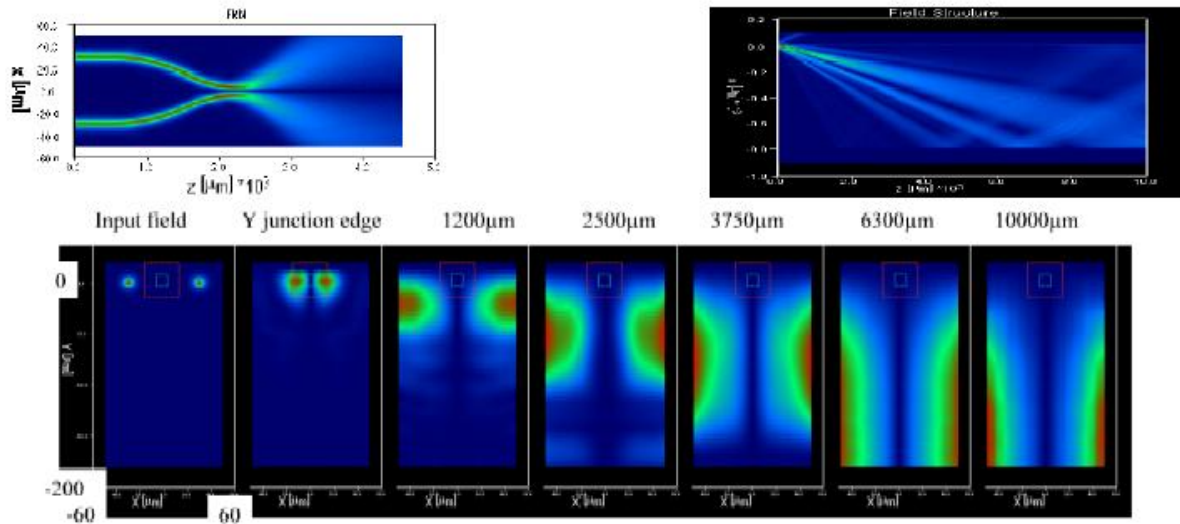


FIG. 2.4 – Simulation d’une jonction Y dans la cadre de l’étude MAII qui montre les modes rayonnés (Labadie et al. 2003; Weber et al. 2003).

première fois l’utilisation de fibres optiques monomodes, a donné des résultats étonnants en précision sans que l’on connaisse encore en détail comment cela fonctionne. L’analogie souvent faite avec le filtrage spatial optique par un trou est très réductrice. Nos axes de travail ont été multiples :

- formation du signal interférométrique
- calcul du rapport signal-à-bruit permettant de connaître la précision attendue
- connaissance de la longueur de guide nécessaire pour faire disparaître les modes rayonnés

Le troisième point est d’une importance capitale pour AMBER (cf. section 2.3.2), mais aussi pour un instrument comme DARWIN (cf. figure 2.4) dont toute la stratégie est basée sur le filtrage spatial. Il faut comprendre qu’à l’époque, la connaissance sur ce sujet était purement expérimentale, voire empirique.

Un de nos résultats a été obtenu en modélisant les effets de la turbulence atmosphérique, partiellement corrigée par une optique adaptative, sur l’injection de la lumière soit dans un guide d’onde monomode ou soit dans un trou. Nous nous sommes aperçus qu’il existait 2 régimes que l’on peut décrire en fonction du rapport de Strehl de l’image. Pour les faibles rapport de Strehl, l’emploi d’un guide monomode donne toujours un meilleur rapport signal-à-bruit et c’est le contraire à haut rapport de Strehl. Pour AMBER, mais aussi pour FLUOR, le point de croisement se situe entre 0.6 et 0.9. Cette valeur du rapport de Strehl n’est jamais atteinte par ces deux instruments et par conséquent la technique qui consiste à utiliser le filtrage spatial est toujours optimal. Ce comportement a d’ailleurs été vérifié expérimentalement par le PTI qui opère avec une fibre optique sur ses deux voies. Cela reste pourtant un sujet de débat avec nos collaborateurs anglais dans VSI (cf. section 2.4).

Un autre axe de recherche que j’ai développé avec P. Mège et A. Chelli, est de comprendre comment se traduit la présence d’une structure étendue à la résolution des télescopes individuels dans le signal interférométrique. Cela se traduit par la présence d’un biais et d’une erreur supplémentaire en présence de turbulence atmosphérique. Malheureu-



sement, cette partie des travaux n'a pas été publiée dans un journal à comité de revue mais reste accessible uniquement dans la thèse de Mège (2002).

Ces travaux se sont prolongés au LAOG avec la publication de plusieurs articles (Tatulli et al. 2004; Tatulli & LeBouquin 2006; Le Bouquin & Tatulli 2006) ainsi que les thèses d'E. Tatulli et de J.-B. Le Bouquin. Ce sont aussi ces travaux de traitement du signal qui ont fourni une motivation importante pour créer le centre J.-M. Mariotti (JMMC).

## 2.2.2 Optique intégrée pour l'interférométrie

Depuis 1997, nous avons analysé avec P. Kern un nouveau type de technologie qui tire avantage des guides d'onde optique monomodes, principe proposé par Froehly (1982), mis en œuvre sur le ciel avec l'instrument FLUOR (Coudé du-Foresto & Ridgway 1992)– tout en améliorant la qualité de la mesure et la compacité de l'instrument (Kern et al. 1997). Ce développement s'appuie sur le potentiel de l'optique intégrée que P. Kern et moi-même avons mis en avant lors de la conférence AstroFib'96 en octobre 1996, et notamment de l'optique planaire (Benech 1997), diffusion ionique (Schanen Duport et al. 1994; Schanen-Duport et al. 1997) ou gravure sur silicium (Mottier 1997) qui permet d'envisager un instrument complet sur une plaquette de verre ou de silicium de la taille d'une allumette. Ce type d'instrument présente de nombreux avantages : il est monomode et donc conserve les propriétés énoncées ci-dessus ; il est stable et donc insensible aux variations des paramètres extérieurs (notamment la température) ; il possède une capacité de maintien de polarisation permettant de traiter proprement les états de polarisation de la lumière ; la complexité du schéma de recombinaison est reportée en amont au moment de la conception du circuit optique ; et de par sa petite taille et de par le type de matériau utilisé il est peu onéreux au moment de la production.

Grâce à sa petite taille, ce type de composant peut être inséré directement devant le détecteur dans un cryostat, ce qui réduit les sources de fond thermique (cryostat aveugle). Grâce à cette technique novatrice issue du savoir-faire du pôle grenoblois (IMEP– ex-LEMO, LETI, LAOG), il est possible de fournir une instrumentation fiable, précise et bon marché aux grands interféromètres comme le VLTI mais aussi aux futurs interféromètres spatiaux. Cette technique a cependant eu besoin d'être d'abord validée en laboratoire puis sur les interféromètres existants. Nous avons publié une série d'articles *Integrated optics for astronomical interferometry* sur ces recherches :

- I. Concept and astronomical applications (Malbet et al. 1999)
- II. First laboratory white-light interferograms (Berger et al. 1999)
- III. Optical validation of a planar optics two-telescope beam combiner (Haguenauer et al. 2000)
- IV. First measurements of stars (Berger et al. 2001)
- V. Extension to the  $K$  band (Laurent et al. 2002)
- VI. Coupling the light of the VLTI in  $K$  band (Lebouquin et al. 2006)

Des collaborations se sont établies avec des industriels locaux pour soutenir nos actions, avec GEEO pour produire à terme des composants sur verre fiabilisés, et avec CSO spécialiste du contrôle et de la mesure optique par technique interférométrique et avec le CEA Grenoble / LETI pour des composants gravés en silicium sur silice. J'ai participé à l'encadrement de J.-P. Berger avec P. Kern. J.-P. Berger a effectué une partie de sa thèse sur l'interférométrie en optique intégrée. Dans l'équipe, nous avons accueilli la thèse de P. Haguenauer dirigée



FIG. 2.5 – Composants d’optique intégrée à trois télescopes suivant la technique de gravure de silice sur silicium (LETI, gauche) et suivant la technique d’échange d’ions sur verre (IMEP, droite).

par P. Kern ainsi que celle de E. Laurent codirigée par I. Schanen-Duport et P. Kern.

Après une étude système résumée par Malbet et al. (1999), nous avons suivi plusieurs pistes. Tout d’abord nous avons voulu tester les composants au laboratoire. Ce fut fait avec la thèse de J.-P. Berger pour les recombineurs à deux télescopes et celle de P. Haguenaer pour ceux à trois télescopes. Nous avons montré que la technologie fonctionnait et que l’on obtenait des résultats prometteurs, voire de premier plan (Berger et al. 1999; Haguenaer et al. 2000).

Une deuxième étape a consisté à tester des composants sur le ciel avec un interféromètre existant. Nous avons commencé avec G12T pour lesquels j’ai effectué les premiers tests en 1998, mais il fallait impérativement un compensateur de tip-tilt qui a été réalisé ensuite par l’IRCOM (Huss et al. 2003). Une seconde campagne a montré qu’il y avait un gain d’un facteur environ 5 quand le tip-tilt était en fonction (cf. thèse de P. Haguenaer, Haguenaer 2001). Nous avons développé un instrument entièrement cryogénisé qui permettait d’avoir le composant d’optique intégrée et le détecteur dans le cryostat (Rousselet-Perraut et al. 2000).

Entre-temps la collaboration avec l’interféromètre IOTA nous a permis d’obtenir les premières franges sur le ciel en novembre 2000 (Berger et al. 2001). La caméra infrarouge utilisée ainsi que les compensateurs de tip-tilt étant plus sensibles que la solution développée pour G12T, notre tâche a été facilitée. Nous avons donc abandonné la piste G12T et la solution ambitieuse dans un cryostat pour nous concentrer sur la validation sur le ciel avec

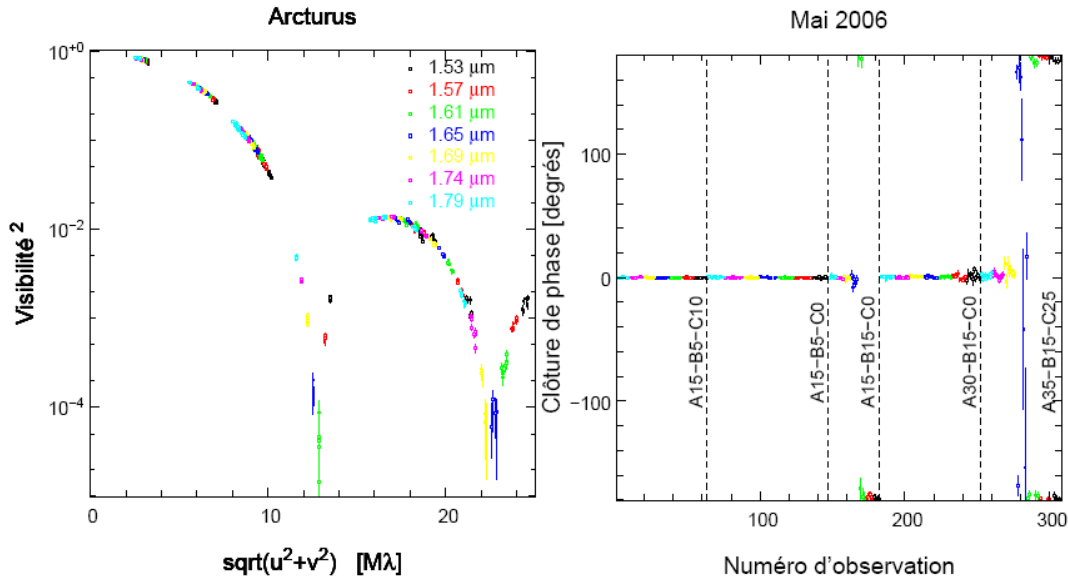


FIG. 2.6 – Arcturus observée avec IOTA/IONIC3 par Lacour (2007). Notez les faibles visibilités obtenues, la qualité de la phase de clôture et la précision des mesures.

IOTA.

Nous avons entamé ensuite la caractérisation d'un composant 3 voies. Nous sommes intervenus sur IOTA alors que l'équipe sur place installait un troisième télescope et changeait l'environnement pour avoir accès à une quantité appelée clôture de phase. Leur plan initial était d'utiliser l'interféromètre avec un recombineur en optique de volume. Par manque de temps et aussi grâce à la facilité d'implantation d'une solution optique intégrée, c'est finalement celle-ci qui a permis à IOTA de voir ses premières franges avec trois télescopes. C'est donc un très beau résultat pour les performances de l'optique intégrée à 3 télescopes (voir aussi la figure 2.6), mais aussi pour la facilité d'usage de ces recombineurs. Les premiers résultats de clôture de phase ont été publiés :

- Monnier et al. (2004) ont réalisé la première image avec IOTA à 3 télescopes grâce au composant IONIC3. Cette image est celle de  $\lambda$  Virginis une binaire spectroscopique précédemment connue. Le papier permet aussi de contraindre les paramètres de la binaire sous-jacente au système Wolf-Rayet WR 140.
- Kraus et al. (2005) ont reconstruit des images de la célèbre binaire Capella ( $\alpha$  Aurigae) avec une résolution de  $5.4 \times 2.6$  mas permettant de suivre l'orbite sur un arc de 14 degrés de long.
- Millan-Gabet et al. (2006b) ont rapporté la présence d'une émission non centrée sur le centre du système stellaire jeune AB Aurigae détectée grâce à la mesure déterminante de la clôture de phase.
- Monnier et al. (2006a) ont observé 14 étoiles jeunes avec IOTA et ont montré que 6 d'entre elles avaient une signature de clôture de phase non nulle indicatrice d'une asymétrie dans la structure de leur milieu circumstellaire.
- Monnier et al. (2006b) ont observé avec IOTA la nova récurrente RS Ophiuci qui a explosé le 12 février 2006. Les observations effectuées à différentes époques montrent que les visibilités ne baissent pas au cours du temps ce qui semble paradoxal par

rapport au scénario communément admis d'une boule de feu en expansion<sup>1</sup>.

- Ragland et al. (2006) ont observé 56 étoiles proches de la branche asymptotique des géantes. Ils ont trouvé que 30% d'entre elles avaient un signal de phase de clôture non nul. Ceci tendrait à montrer qu'une grande partie de ces étoiles ont un environnement circumstellaire non sphérique<sup>2</sup>.

Pour augmenter le nombre de télescopes, nous avons démarré des collaborations avec d'autres interféromètres. Les plus appropriés sont le VLTI et CHARA. Nous avons commencé par collaborer avec l'équipe du VLTI. En effet l'ESO souhaitait avoir accès à la bande  $H$  avec leur instrument de test VINCI. Nous avons proposé une solution simple qui consistait à remplacer la boîte de recombinaison à fibres MONA par un composant d'optique intégrée. Le tout n'était pas optimisé pour cette bande mais a permis à l'ESO de voir concrètement les avantages de l'optique intégrée. J'ai encadré la partie réduction de données effectuée par J.-B. Le Bouquin pour valider l'installation du composant à Paranal par une publication (Lebouquin et al. 2006). CHARA est un interféromètre à 6 télescopes où J.-P. Berger a travaillé en tant que post-doctorant.

Nous avons aussi commencé à explorer la possibilité d'étendre l'optique intégrée aux longueurs d'onde thermiques avec DARWIN comme application, ce qui a été fait lors d'un contrat avec l'ESA et lors de la thèse de L. Labadie soutenue en décembre 2004. Bien que suivant ces développements de près, j'ai préféré me consacrer à d'autres tâches.

## 2.3 L'instrument Amber sur le Vlti

Les observations interférométriques dans l'infrarouge sont essentielles pour progresser dans le domaine des étoiles jeunes. C'est pourquoi j'ai été à l'origine de l'étude d'une voie IR sur le GI2T, VIRGID, qui a fait l'objet d'un rapport technique de l'Observatoire de Grenoble en décembre 1995 (Malbet et al. 1995). Ce rapport a permis de rassembler le DESPA et l'Observatoire de la Côte d'Azur avec l'Observatoire de Grenoble sur un concept d'instrument IR sur la table REGAIN, qui a été appelé IVOIRE (Malbet & Gay 1996). Ce projet a été accueilli favorablement par le PNHRAA mais à cause des restrictions budgétaires le PNHRAA a préféré reporter son aide après la fin de la réalisation de la table REGAIN. Finalement avec le redémarrage du VLTI, ce projet a été retardé, puis remplacé par l'instrumentation du VLTI.

### 2.3.1 Le Very Large Telescope Interferometer

Le *Very Large Telescope* fut le grand projet européen des années 1980-2000. Il a consisté à proposer une surface collectrice équivalente à 16 m de diamètre (pas encore égalée) originellement sur un concept d'un télescope unique. Cependant suite aux difficultés techniques de réalisation, il a été décidé de construire 4 télescopes de 8 m de surface équivalente, une aubaine pour les interférométristes européens. Suite à leurs recommandations, les quatre

---

<sup>1</sup>Des observations AMBER (cf. section 2.3.3) ont permis de montrer que la matière en expansion avait une géométrie très allongée.

<sup>2</sup>Il est intéressant de noter que, suite au communiqué de presse du *Keck Observatory*, cette observation a fait l'objet d'un encadré dans le numéro de septembre 2006 de *Ciel et Espace* où il est précisé que les indications données par IOTA pourraient trouver leur origine par la présence de planètes en orbite de ces étoiles en fin de vie. Comme quoi tout mène aux exoplanètes!

télescopes ont été placés dans une disposition trapézoïdale permettant de maximiser la couverture du plan  $(u, v)$ . En parallèle, la communauté interférométrique rêvait déjà d'un réseau de *petits* télescopes afin de réaliser de l'imagerie par synthèse d'ouverture comme cela se faisait dans les longueurs d'onde radio. C'est comme cela qu'est né le réseau VISA (*VLT Interferometer Sub-Array*) en complément du réseau VIMA (*VLT Interferometer Main Array*) composé des 4 grands télescopes. Ce fut la première fois qu'un observatoire moderne était construit en intégrant directement les fonctionnalités interférométriques (tunnels pour les lignes à retard, stations pour les télescopes auxiliaires,...).

Cependant ce rêve s'est arrêté un sombre jour de décembre 1993, lorsque l'ESO a décidé de remettre à plus tard le mode interférométrique à cause de problème de trésorerie. Tous les développements interférométriques ont été stoppés, même si les études papiers ont pu continuer.

En 1995, suite notamment à la pression de la France et de l'Allemagne<sup>3</sup>, le comité ISAC (*Interferometry Science Advisory Committee*) après une évaluation des objectifs scientifiques du VLTI, a recommandé à l'ESO de redémarrer le développement du VLTI le plus rapidement possible avec une approche par phase (Paresce et al. 1996). L'accent a été mis sur l'infrarouge où il est plus facile de lutter contre les effets de la turbulence atmosphérique. Le groupe technique VLTI de l'ESO élaborera alors un nouveau plan d'implantation du VLTI (von der Lühe 1997). L'accord tripartite qui liait l'ESO avec le CNRS et la société Max-Planck (MPG) pour le financement d'un 3<sup>e</sup> télescope auxiliaire et d'une 3<sup>e</sup> ligne à retard a été renégocié pour permettre le démarrage du VLTI le plus rapidement possible. L'objectif était d'obtenir des premières franges sur deux télescopes unitaires (8m) dès l'an 2000 (ce qui a été le cas en mars 2001 avec VINCI) et ensuite d'exploiter les télescopes auxiliaires<sup>4</sup> à partir de 2002. L'instrumentation focale fut à la charge des instituts intéressés dont faisait partie le LAOG.

En septembre 1996, la communauté interférométrique française s'est réunie à Lyon pour décider des efforts que la France pouvait consacrer à la réalisation d'instruments travaillant dans l'infrarouge. Un groupe de travail a été créé en vue de proposer une ébauche d'instrument pouvant travailler entre 0.6-2.5 microns et pouvant aussi servir à la voie IR de GI2T dans la suite du projet IVOIRE. Deux autres groupes de travail se sont formés : sur le mode astrométrique et sur l'optique adaptative nécessaire à l'interférométrie dans le visible (GI2T et VLTI/AT) et dans l'IR (VLTI/UT).

Au printemps 1997, une réunion a regroupé les principaux partenaires de l'ESO pour le VLTI : DESPA, OCA, LAOG, CRAL pour la France, MPEGarching, MPIFR Bonn, MPIA Heidelberg pour l'Allemagne ainsi que des observateurs italiens et hollandais pour discuter du plan d'instrumentation du VLTI, qui a été finalement adopté en juillet 1997 au terme des comités de l'ESO. Ce plan comprenait :

**Amber** : un instrument 1-2.5 microns puis étendu à 0.6-2.5 microns pouvant recombinaison jusqu'à 3 faisceaux et avec une résolution spectrale jusqu'à 10000. Le projet AMBER a commencé en septembre 1997, avec deux laboratoires français investis dans ce projet : le LAOG et l'OCA associé au LUAN, en compagnie d'un laboratoire italien (OAA : Observatoire d'Arcetri) et d'un laboratoire allemand (MPIFR : l'institut Max-Planck

<sup>3</sup>Nous ne pourrions qu'être éternellement reconnaissant à P. Léna en France et à R. Genzel en Allemagne pour avoir contribué de manière essentielle à convaincre l'ESO et ses partenaires de redémarrer le VLTI le plus rapidement possible.

<sup>4</sup>En fait le premier AT n'a été installé qu'en 2004 et le quatrième fin 2006.

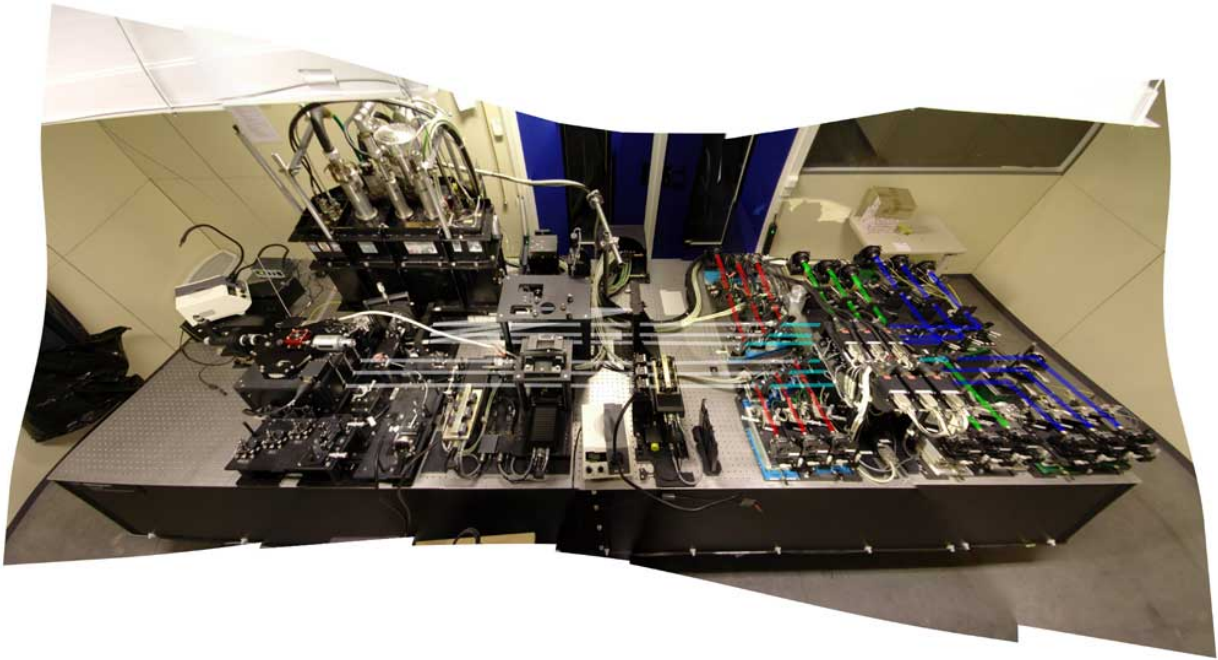


FIG. 2.7 – Vue générale de l'instrument AMBER lors de son intégration à Grenoble.

pour la radioastronomie à Bonn).

**Midi** : instrument 10 microns pouvant recombinaison 2 faisceaux piloté par l'Institut Max-Planck d'Astronomie (MPIA) d'Heidelberg, avec contribution de la Hollande et du LESIA à Paris, et l'expertise de chercheurs de l'OCA.

**Prima** : instrument donnant accès à un double champ permettant d'observer en référence de phase et en mode astrométrique. Le projet PRIMA a fait l'objet en 1999 d'une complète reconfiguration. L'ESO a pris la responsabilité de cet instrument dont les facilités communes sont offertes à AMBER et MIDI pour effectuer de la référence de phase. La partie astrométrique a été repoussée à une échéance plus lointaine vers fin 2007 quand une métrologie plus précise aura été installée.

Dans ce contexte, je me suis investi sur l'instrument AMBER dont l'un des objectifs principaux est l'étude des régions de formation stellaire. Dès le premier groupe de travail, j'ai eu la responsabilité de coordonner les différents travaux de conception.

### 2.3.2 Le projet Amber

Le projet AMBER a donc débuté en 1997. La construction de l'instrument s'est achevée fin 2003 et l'installation à Paranal s'est effectuée en mars 2004 avec l'obtention de la première lumière. Une série de tests a été effectuée avant son ouverture à la communauté scientifique en avril 2006.

En tant que *Project Scientist* sur AMBER, j'ai eu la responsabilité de veiller à ce que l'instrument soit adapté aux objectifs astrophysiques visés. Les trois programmes clés d'AMBER sont :

- l'étude des environnements circumstellaires des étoiles jeunes
- l'étude de la partie centrale des noyaux actifs de galaxies

– la détection du rayonnement des planètes extrasolaires de type Jupiters chauds. Le premier objectif qui correspond à mon expertise scientifique (cf. chapitre 3). C'est non seulement un objectif relativement facile à réaliser avec AMBER, mais AMBER nous permettra de faire de grand progrès dans ce domaine, car le nombre de bases sur le VLTI est très important et car la sensibilité nous permet d'étudier un grand nombre d'étoiles jeunes. Les AGN nous ont permis de fixer la sensibilité maximale que nous voulions atteindre, à savoir  $K = 11$ . Le programme exoplanètes a défini la précision instrumentale souhaitée et par conséquent la stabilité de l'instrument. Un objectif de précision de la phase de l'ordre de  $10^{-4}$  rad a été fixé. Le travail du groupe de définition de l'instrument (IGR pour *Interferometric Group*) a été synthétisé dans l'*Instrument Analysis Report* (Malbet et al. 2000c), pour partie dans un article SPIE (Malbet et al. 2003b) et pour une autre dans un des articles de la série A&A (Robbe-Dubois et al. 2007). Nous avons traité des problèmes atmosphériques (dispersion transversale due à la réfraction atmosphérique, dispersion longitudinale due à la dispersion spectrale du chemin optique dans les lignes à retard dans l'air, turbulence atmosphérique, optique adaptative, piston atmosphérique, etc), du filtrage spatial, de l'effet des fibres optiques, de l'algorithme de réduction des données, de la calibration des données, de la spécification de certains éléments optiques, du calcul du rapport signal-à-bruit, du calcul des magnitudes limites de l'instrument.

### 2.3.3 Exploitation scientifique

Depuis 2000, j'assume la présidence du groupe scientifique<sup>5</sup> d'AMBER. Dans un premier temps, en collaboration avec A. Richichi et les membres du groupe scientifique d'AMBER (SGR), nous avons rédigé le *Science Analysis Report* (Malbet et al. 2000b) qui nous a permis de vérifier qu'AMBER permettait des avancées significatives dans presque tous les domaines de l'astrophysique, des objets du système solaire aux études extragalactiques avec bien sûr un fort impact sur la physique stellaire. Après la première revue de projet, j'ai organisé le travail de SGR pour préparer la stratégie d'observation pour AMBER. Nous avons raffiné les scénarios d'observation en vue d'en faire profiter les futurs utilisateurs d'AMBER et notamment ceux du consortium AMBER détenteurs du temps garanti.

Une part importante de mon travail a justement été d'organiser un appel à idées d'observation au sein du consortium AMBER. L'idée est triple : préparer les futurs utilisateurs d'AMBER, récolter les premières idées en vue du programme de temps garanti et assurer une meilleure coordination entre les équipes des différents instituts. Cet appel à idées a été lancé pendant l'été 2001. Nous avons reçus 102 propositions qui ont été expertisées par le groupe scientifique, puis j'ai demandé à ce que des collaborations soient organisées pour éviter une dispersion et redondance des efforts et mieux préparer le temps garanti sur les sujets suivants : les étoiles de la branche asymptotiques des géantes, les étoiles Miras, les binaires évoluées, les étoiles symbiotiques, les céphéides, les disques autour des étoiles jeunes, les environnements proches des étoiles Ae/Be de Herbig, les jets des étoiles pré-séquence principale, les binaires jeunes, les exoplanètes, les étoiles massives, les environnements des étoiles à raies d'émission (Be et B[e]) et les études extragalactiques. En juillet 2005, une remise à jour du programme de temps garanti a été demandée par l'ESO, ce qui a produit

<sup>5</sup>A. Richichi, ancien président du groupe scientifique ayant pris congé de l'Observatoire d'Arcetri pour l'Eso.

le *Large GTO programme* AMBER (doc VLT-LIS-AMB-15830-0007; Malbet et al. 2003a) accessible à l'adresse suivante :

[http://amber.obs.ujf-grenoble.fr/article.php3?id\\_article=42](http://amber.obs.ujf-grenoble.fr/article.php3?id_article=42)

Il faut noter que lors de la mise en place d'AMBER, nous avons mis en lumière des déficiences de l'infrastructure du VLTI. Après plusieurs missions et investigations spécifiques de notre part (en particulier celle d'octobre 2004), l'ESO a fini pris conscience que l'infrastructure souffrait de défauts (vibrations,...) qui diminuaient non seulement les capacités d'AMBER mais aussi des autres instruments. Depuis cette période, l'ESO a mis en place une *Interferometry Task Force* pour être sûr que tous les éléments du VLTI soient testés et fonctionnent dans les spécifications. Le contrecoup de cette analyse, c'est que notre accès aux télescopes a été d'autant plus réduit. Cette situation devrait s'améliorer dans le futur d'autant qu'au sein du JMMC, des actions ont été entreprises pour essayer de compenser partiellement ces défauts par des traitements spécifiques.

Dans le cadre de sa thèse, E. Tatulli a exploré les calculs de signal-à-bruit et leur implication dans la détermination des paramètres d'un modèle appliqué aux observations. Il a aussi développé toute la théorie du signal dans AMBER sous la direction d'A. Chelli et de moi-même (Tatulli et al. 2007b). Il s'agissait de généraliser le traitement de type ABCD dans le cas d'AMBER et d'un nombre quelconque de mesures. Cela s'est fait sur la base des développements théoriques d'A. Chelli sur les *ondes porteuses*. Tout le principe repose sur le fait qu'après un passage dans des fibres monomodes, la forme du signal est déterministe, seules son amplitude et sa phase varient. A mon avis ce papier restera une référence pour tous les interférométristes.

J'ai proposé aux collègues d'AMBER de regrouper les premiers résultats d'AMBER avec les papiers descriptifs de l'instrument dans un numéro spécial de A&A, ce qui a été accepté avec enthousiasme à la fois par l'équipe AMBER et par l'éditeur de A&A, C. Bertout. Cela a permis de cristalliser et de donner une visibilité particulière au travail effectué sur AMBER. Voici en quelques mots les résultats obtenus :

1. Petrov et al. (2007) décrivent l'instrument, comment il a été spécifié et aussi les performances attendues comparées à celles mesurées.
2. Robbe-Dubois et al. (2007) présentent l'étude de conception de l'instrument ainsi que l'analyse optique du système.
3. Tatulli et al. (2007b) établissent les principes de réduction de données de l'instrument AMBER et décrit comment cela est implanté.
4. Malbet et al. (2007) révèlent le premier résultat obtenu pendant le premier *commissioning* en mai 2004. C'est un résultat important dans le domaine de formation des étoiles que je développerai dans la section 3.3.1.
5. Tatulli et al. (2007a) ont analysé la seconde observation d'étoile jeune menée dans le cadre du GTO AMBER. Lui aussi fait l'objet d'une description plus complète dans la section 3.3.2.
6. Meilland et al. (2007b) rapportent les observations effectuées sur l'étoile Be  $\alpha$  Arae et qui montrent pour la première fois de façon précise la nature képlérienne du mouvement de rotation du milieu circumstellaire autour de l'étoile grâce à l'étude de la phase différentielle. Cette étude s'est faite dans le cadre du *Science Demonstration Time*.



7. Meilland et al. (2007a) analysent l'étoile Be  $\kappa$  CMa, à peine résolue mais les mesures ne permettent pas de quantifier la loi de rotation.
8. Domiciano de Souza et al. (2007) ont observé et ont pu comparer les tailles de l'environnement circumstellaire de l'étoile B[e] CPD -27°5874 à la fois sur AMBER dans le proche infrarouge et sur MIDI dans l'infrarouge moyen. Cette étude s'est faite aussi dans le cadre du *Science Demonstration Time*.
9. Weigelt et al. (2007) ont fait un travail minutieux d'examen de toutes les informations fournies par AMBER dans différentes raies de  $\eta$  Carinae, une étoile très massive qui éjecte beaucoup de masse. La géométrie bipolaire de cette éjection a pu être mise en évidence reproduisant à petite échelle ce que l'on voit à plus grande échelle dans la nébuleuse de l'Homonculus.
10. Millour et al. (2007) ont étudié le seul système binaire des premières campagnes. Celui-ci constitué d'une étoile O et d'une étoile Wolf-Rayet est un cas d'école, puisque la signature de la binaire se voit dans les raies caractéristiques de la Wolf-Rayet. Cela a permis de préciser la distance du système, et le résidu de l'ajustement pourrait être une signature de la collision vent / vent entre les deux étoiles.
11. Chesneau et al. (2007) ont observé la célèbre nova récurrente RS Ophiuci juste 5.5 jours après un sursaut violent. La morphologie mesurée par AMBER est compatible avec celle imagée en radio 13.8 jours plus tard si on considère que l'expansion de matière se fait principalement de manière bipolaire. Cette étude s'est faite dans le cadre du temps discrétionnaire du directeur.

Nous sommes maintenant dans la phase de solidification de l'instrument AMBER de telle sorte que l'on passe la *Preliminary Acceptance Chile* et que la responsabilité de l'instrument soit intégralement transmise à l'ESO.

## 2.4 Vers la spectro-imagerie : de Vitruv à Vsi

Le VLTi est un site unique au monde qui a été pensé depuis le début pour l'interférométrie optique longue base. Le site inclut 4 télescopes de 8m (UTs) fixes et actuellement 4 télescopes auxiliaires de 2m (ATs) mobiles. La première génération d'instruments (MIDI et AMBER) donne accès à la combinaison de 2 ou 3 télescopes, entre 1 et 20 microns avec une résolution spectrale allant jusqu'à 10000. Les observables sont principalement des visibilités ou des phases relatives, ainsi qu'une clôture de phase pour AMBER. Cependant pour des régions complexes, comme les zones d'accrétion-éjection des disques d'étoiles jeunes, ou des amas d'étoiles, une capacité d'imagerie supérieure est nécessaire. En recombinaison la lumière provenant de 6 à 8 télescopes sur un plateau de 200m de diamètre, on obtient une capacité d'imagerie équivalente à celle de l'interféromètre radio du Plateau de Bure de l'IRAM avec ses 6 antennes en terme de couverture du plan des fréquences spatiales.

L'interférométrie optique moderne date de Labeyrie (1975a,b) et très peu d'instruments ont mis en œuvre l'imagerie par synthèse d'ouverture : dans un premier temps COAST (Baldwin et al. 1996) et NPOI (Benson et al. 1997) avec seulement 3 télescopes, puis IOTA/IONIC3 (cf. Sect. 2.2.2). La principale raison est la difficulté de la recombinaison interférométrique en optique classique. Avec la technologie d'optique intégrée, il est envisageable de recombinaison 8 télescopes sur des puces optiques de quelques centimètres

carrés (Berger et al. 2000a). J'ai donc engagé toute l'équipe interférométrique du LAOG pour travailler sur l'ébauche d'un projet qui utilise cette technique afin de proposer un instrument VLT de seconde génération (Malbet et al. 2002; Kern et al. 2003; Malbet et al. 2004, 2005a, 2006) que nous avons initialement baptisé VITRUV. Celui-ci, par le biais de notre collaboration avec l'équipe du laboratoire Cavendish de Cambridge, s'est enrichi d'un suiveur de franges et est devenu VSI pour *VLT spectro-imager*. Les détails de ce projet de recherche sont exposés dans la partie programme de recherche du chapitre 4.

Ce qu'il faut retenir de cette aventure scientifique et humaine, c'est qu'à force de créativité et de persévérance, on peut voir aboutir le rêve d'obtenir des images interférométriques par synthèse d'ouverture qui semblait irréalisable quelques années auparavant. L'histoire n'est pas encore finie et il faudra sans doute encore beaucoup d'efforts pour arriver à utiliser l'interférométrie comme une technique standard d'imagerie. Cependant dans ce parcours, il y aura sans aucun doute des niches pour avancer sur les sujets astrophysiques liés à la formation des étoiles et des planètes. C'est ce que je vais essayer de montrer dans les chapitres suivants.



# Chapitre 3

## Des modèles aux observations de disques

La présence de disques autour des étoiles jeunes est suggérée par de nombreuses observations. L'excès infrarouge peut être expliqué par l'émission thermique d'un disque dont les sources d'énergie seraient la dissipation de chaleur par frottement visqueux et le chauffage du disque par le rayonnement de l'étoile centrale. L'excès ultraviolet est alors interprété comme provenant de la zone intermédiaire entre le disque et l'étoile que l'on appelle la couche limite. Les raies interdites montrent qu'il existe un vent stellaire, dont la composante rouge est par ailleurs obscurcie par le disque. La polarisation et sa distribution spatiale sont encore un autre indice qui montre que la présence d'un disque ou d'une enveloppe fortement aplatie de poussière est nécessaire.

### 3.1 Structure verticale des disques

J'ai entrepris au cours de ma thèse un travail théorique pour modéliser l'environnement circumstellaire des étoiles jeunes qui soit auto cohérent et qui rende compte de l'accrétion et du chauffage du disque par l'étoile (Malbet & Bertout 1991). Le transfert de rayonnement est traité de manière analytique dans le cas gris (Malbet 1992). Cette théorie, qui permet de calculer la distribution de la température et de la densité en tout point  $(r, z)$  de l'environnement circumstellaire des étoiles jeunes, n'est intéressante que lorsqu'on la compare aux observations.

En 1999 et 2000, j'ai réactivé cette partie de mon travail de telle sorte que les modèles soient prêts lorsque les observations interférométriques seront disponibles avec AMBER. Il fallait donc s'occuper du rayonnement thermique. Ce travail a pris deux formes : une reprise en main de l'outil de simulation et un travail d'exploration des observables plus particulièrement liés à l'interférométrie : les mesures de visibilité et de clôture de phase.

Les modèles qui sont utilisés par les observateurs pour interpréter leur données sont souvent des modèles ad-hoc qui paramétrisent les distributions de densité surfacique et celle de la température effective en lois de puissance afin d'y calculer un transfert de rayonnement plus ou moins sophistiqué. Les paramètres sont ensuite ajustés au plus près des mesures. Cependant cette façon de faire ne permet pas de valider le contenu physique des observations. Une autre approche consiste à partir d'une description rigoureuse ou du

moins connue des processus physiques en œuvre de telle sorte que l'on puisse reconstruire un scénario plausible des conditions physiques. Évidemment, ce travail doit s'effectuer en posant des hypothèses réalistes que l'on doit valider a posteriori.

Une des premières étapes est de savoir comment traiter le transfert de rayonnement. Dans le cas des disques, il a été montré que ce qui domine le transfert de rayonnement, c'est le transfert vertical par rapport au transfert horizontal. Le rapport des flux échangés dans les directions horizontale et verticale est directement proportionnel au carré du rapport  $H/r$ , où  $H$  est l'échelle de hauteur caractéristique du disque et  $r$  est la distance à l'étoile. Dans le cas des disques qui ne sont pas auto gravitants (c'est-à-dire pour qui la masse du disque est très inférieure à la masse de l'étoile), l'échelle de hauteur est très petite devant la distance à l'étoile. Par conséquent, on peut de façon réaliste faire l'hypothèse que le transfert de rayonnement se fait principalement le long de la verticale, tandis que le flux radial est régi par les lois de l'accrétion.

Une première approche consiste à ne considérer que les quantités moyennées suivant la verticale. Shakura & Sunyaev (1973) et Lynden-Bell & Pringle (1974) ont calculé les distributions radiales de température effective et de densité. La hauteur du disque est calculée de façon approximative par la valeur de l'échelle de hauteur du disque. Ce modèle a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, mais ne permet pas de reproduire des subtilités dues au changement d'opacité optique. Ce modèle, que l'on peut appeler "modèle standard" a permis à Bertout et al. (1988) et Basri & Bertout (1989) d'interpréter les distributions spectrales d'énergie (SED) d'un certain nombre d'objets et de modéliser la zone d'interface entre le disque et l'étoile. Cela m'a permis aussi de prédire la forme attendue des courbes de visibilité due à la présence d'un disque (Malbet & Bertout 1995) et ainsi de démontrer la faisabilité d'observations interférométriques.

Une seconde approche consiste à effectuer de façon exacte le calcul de transfert suivant la verticale. C'est ce que j'appelle le modèle à une dimension. En effet la dimension radiale reste contrainte par les mêmes lois physiques que celles explicitées par Lynden-Bell & Pringle (1974) et Shakura & Sunyaev (1973), et, constitue plus une donnée analytique d'entrée qu'un vrai calcul de transfert. La dimension azimutale n'entre pas en jeu à partir du moment où l'on considère une géométrie axisymétrique. Par conséquent le transfert peut se traiter de manière quasi analytique comme expliquée dans la section 3.1.1.

Cependant, comme expliqué ci-dessous, il subsiste quelques difficultés de mise en œuvre notamment lorsque l'on traite le chauffage du disque par l'étoile. En partant des résultats donnés par les modèles analytiques 1D (Malbet & Bertout 1991), Chiang & Goldreich (1997) ont proposé de simplifier le traitement en ne traitant que deux couches dans le disque : une couche interne enfouie dans la zone équatoriale du disque et une couche de surface qui est influencée par le chauffage externe dû au rayonnement de l'étoile centrale.

### 3.1.1 Modèle à une dimension

Lorsque j'ai repris en main le code de simulation de la structure verticale en 1999, un certain nombre de problèmes étaient restés en suspend : le sous-programme de calcul de l'équilibre hydrostatique n'avait pas été validé, le calcul des facteurs d'Eddington avait été calculé de façon approximative en faisant l'hypothèse d'un rayonnement isotropique. Grâce au stage de DEA d'E. di Folco, nous avons pu avancer sur le premier point et avoir à disposition un programme qui tourne de manière éprouvée. En septembre 1999, avec

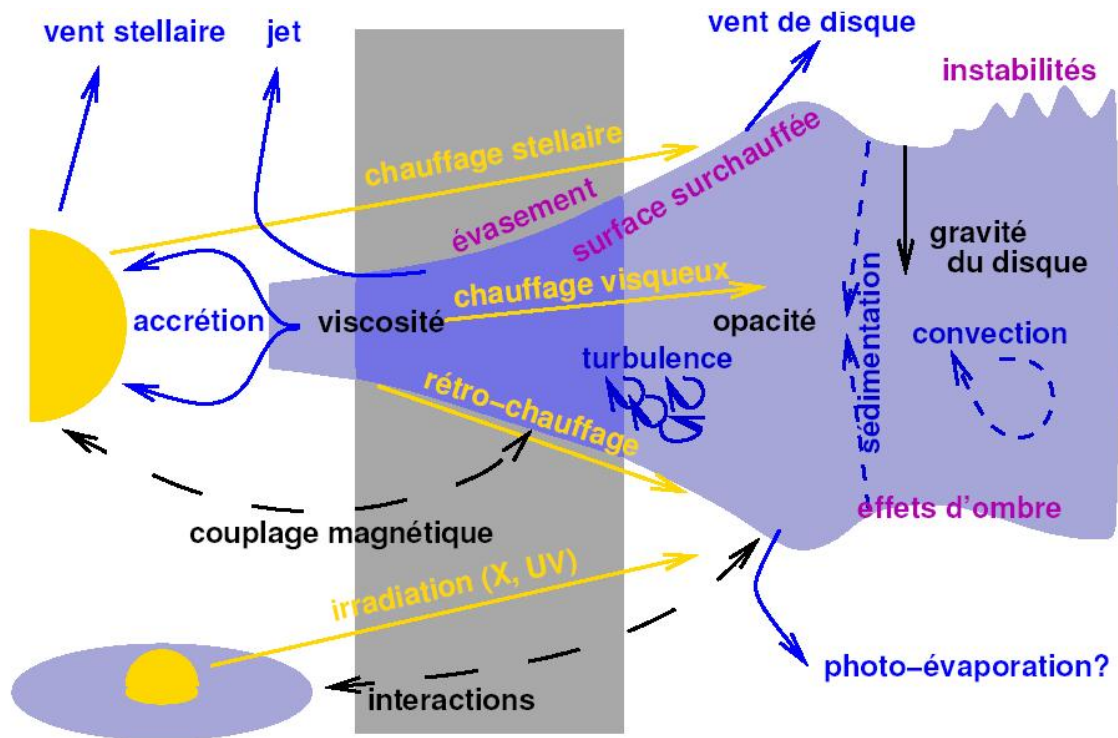


FIG. 3.1 – Phénomènes physiques présent dans les disques protoplanétaires (d'après R. Lachaume).

J.-L. Monin nous avons décidé de prolonger ce travail par une thèse centrée sur ce sujet. C'est R. Lachaume qui s'est investi dans ce travail sous ma responsabilité et en collaboration avec J.-L. Monin. Cela nous a permis de revenir aux bases de la simulation et d'aborder le problème des facteurs d'Eddington. R. Lachaume a ainsi pu vérifier que les hypothèses sur la nature isotropique du rayonnement dans le disque étaient loin d'être fausses.

Ce travail de fond nous a permis de publier un article sur les bases théoriques de la simulation (Malbet et al. 2001). L'accent a été mis sur le formalisme utilisé qui permet d'avoir un traitement semi analytique par rapport à ce qui existe ailleurs dans la littérature existante. Nous avons travaillé aussi sur l'effet de chauffage par les régions centrales qui ont longtemps été mise en avant pour expliquer l'origine de l'excès infrarouge. Un des résultats importants présentés dans l'article est que la température au centre du disque correspond à la moyenne, au sens des flux, des températures associées à chaque phénomène de dissipation d'énergie (cf. figure 3.1).

Nous avons buté sur une instabilité de calcul pour inclure le chauffage par l'étoile centrale dans les calculs numériques. Une des raisons provient du fait que la solution isotherme utilisée dans l'initialisation des itérations est peut-être éloignée du résultat final.

### 3.1.2 Modèle à deux couches

Suite à ce résultat, R. Lachaume a développé un modèle simplifié à deux couches isothermes s'inspirant des travaux de Chiang & Goldreich (1997) mais basé sur notre approche semi analytique qui s'est avéré très intéressant (Lachaume et al. 2003).

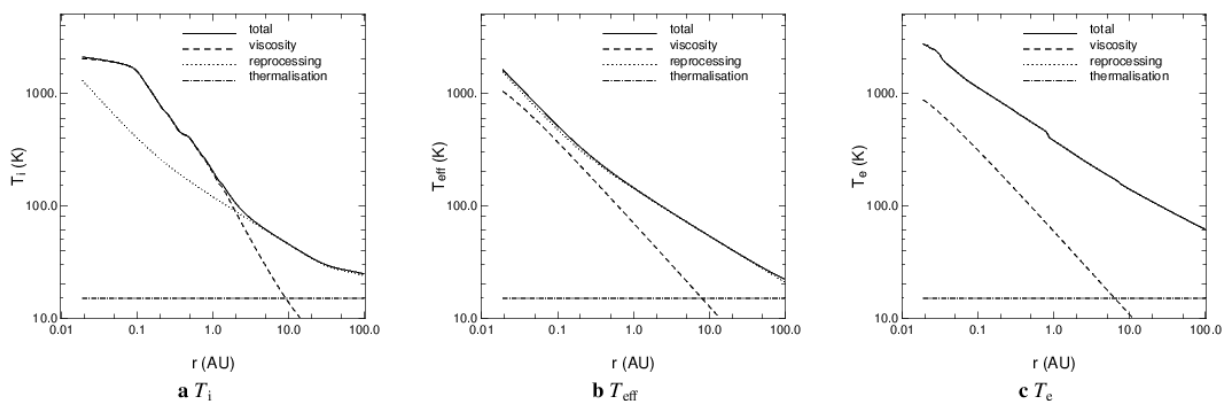


FIG. 3.2 – Différentes contributions de chauffage dans un disque d'étoile T Tauri apparaissant dans les profils radiaux de la température du disque. A gauche : température dans le plan équatorial; au centre : température effective; à droite : température de surface. On peut voir que dans la partie interne du disque (en deçà 2 unités astronomiques) la température équatoriale est dominée par le chauffage visqueux, alors que la température de surface est dominée par la chauffage stellaire. D'après Lachaume et al. (2003).

En effet dans le développement simplifié du modèle à deux couches, nous sommes capables de calculer la valeur de la température pour la couche centrale interne et la couche supérieure surchauffée. Ces températures suivent la propriété trouvée dans la formulation générale et une conséquence intéressante est que l'angle d'évasement de la couche est la somme pondérée (par les températures effectives) des angles d'évasement correspondant aux différents processus de chauffage. Nous sommes donc capables de prédire que dans la zone centrale du disque, là où les phénomènes de dissipation visqueuse dominant, l'angle d'évasement de la couche supérieure est contrainte par le taux d'accrétion et l'opacité tandis qu'aux rayons extérieurs, cet angle est contraint par le chauffage par l'étoile centrale (cf. figure 3.2). Par ailleurs R. Lachaume a montré que ce modèle est tout à fait cohérent avec les modèles développés par d'autres auteurs, sauf pour les zones où il y a de l'ombre créée par les rayons internes.

### 3.1.3 Calculs d'observables interférométriques

Grâce au calcul de la structure verticale des disques et à l'élaboration d'un code numérique qui permet de calculer des cartes de densité et de température en tout point de l'environnement circumstellaire des étoiles jeunes, il devient possible d'envisager une compréhension générale des phénomènes observés aussi bien en photométrie, en spectroscopie infrarouge, en polarimétrie et en imagerie à haute résolution angulaire.

Un de nos objectifs sera notamment de comprendre quels sont les impacts des différentes configurations du VLTI sur la reconstruction d'image. En 1994-1995, le modèle de disque d'accrétion standard géométriquement plat et optiquement épais (Malbet & Bertout 1995, cf. figure 3.3) nous permet de prédire les valeurs de visibilité attendues. En 1999-2000, grâce à la disponibilité du code de structure verticale, avec R. Lachaume, nous avons pu étendre ce travail au modèle complet. Pour la première fois nous avons pu calculer un modèle réaliste de rayonnement thermique. Nous nous sommes aperçus que les images

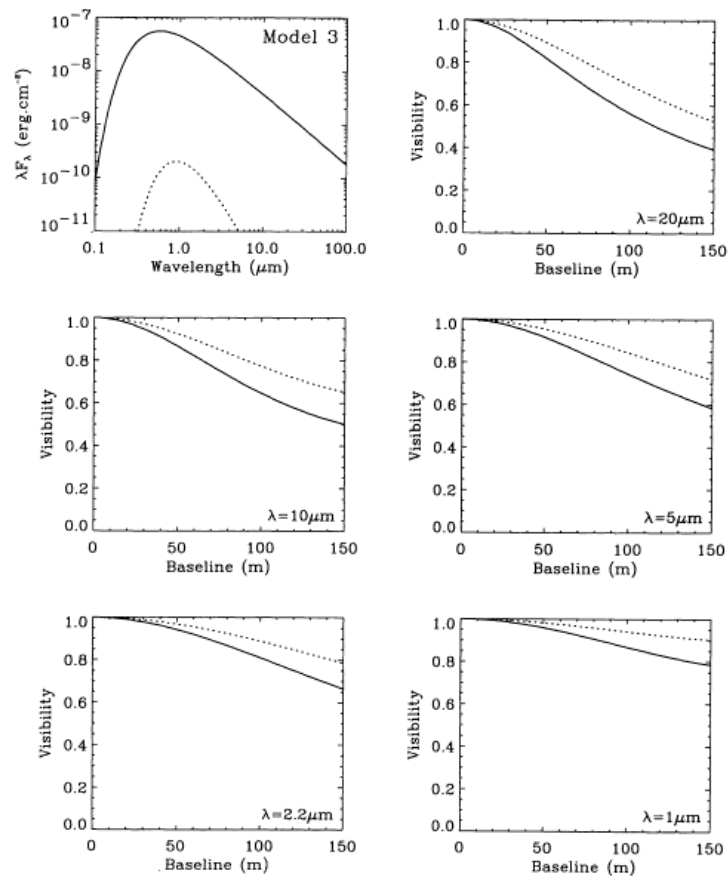


FIG. 3.3 – Visibilités attendues d’une étoile de type FU Orionis avec le VLTI à différentes longueurs d’onde.

n’étaient plus centro-symétriques. Or il se trouve que la clôture de phase, une observable interférométrique accessible lorsqu’on peut combiner plus de trois télescopes est très sensible à ce paramètre. Ce travail a fait l’objet d’une présentation à une conférence (Malbet et al. 2000a).

Le modèle simplifié à deux couches décrit dans la section précédente, nous permet d’obtenir simultanément des distributions spectrales d’énergie et des visibilités. Nous avons utilisé ce modèle pour contraindre les paramètres de deux étoiles jeunes de faible masse : SU Aur et FU Ori observée par Akeson et al. (2000, 2002) et par Malbet & Berger (2001). Le modèle n’a pas marché pour T Tau N probablement à cause d’une mauvaise calibration de la visibilité due à la présence d’une contribution de T Tau S et mal calibrée (Akeson et al. 2002).

## 3.2 Premières observations de disques

À partir de ce travail de prédiction de visibilités, j’ai initié avec J.-P. Berger des observations avec les trois interféromètres infrarouges existants (cf. chapitre 2) : le *Palomar Testbed Interferometer* (PTI), le *Infrared and Optical Telescope Array* (IOTA) et le *Very Large Telescope Interferometer* (VLTI). En parallèle, j’ai participé au *Science Demonstra-*



tion Time du VLTI sur MIDI2t donc pris part aux observations d'étoiles jeunes.

### 3.2.1 L'environnement proche de FU Orionis

Une cible de choix pour effectuer les premières observations de l'environnement d'objets jeunes a été FU Orionis, car c'est une des étoiles jeunes les plus brillantes avec Z Canis Majoris. En plus, les étoiles de type FU Orionis font partie d'une catégorie rare des objets jeunes, pour lesquels nous pensons que ce sont des étoiles de type T Tauri (c'est-à-dire de masse inférieure à celle du Soleil) entouré d'un disque d'accrétion qui a subi récemment une augmentation subite de son taux d'accrétion (Hartmann & Kenyon 1996). Pendant la période de sursaut, l'éclat du système augmente rapidement de plusieurs magnitudes suivi ensuite d'un déclin lent de sa brillance. La luminosité du disque domine l'émission à toutes les longueurs d'onde et on s'attend donc à ce qu'elle soit bien modélisée par un disque d'accrétion standard (cf. section 3.1) avec une loi de distribution radiale de la température en  $r^{-3/4}$ . En principe donc, l'ensemble de ces objets constitue un laboratoire idéal pour tester la validité du modèle standard d'accrétion. Ceci est d'autant plus vrai, qu'une explication alternative du phénomène FU Orionis existait pour rendre compte des propriétés optiques de ces objets. En effet, Petrov & Herbig (1992) et Herbig et al. (2003) interprétaient ces propriétés par la présence d'une chromosphère extrêmement active autour d'une étoile super-géante en rotation rapide. Le débat a duré plus d'une décennie entre G. Herbig et L. Hartmann, jusqu'à ce que nous apportions des éléments irréfutables.

J'ai commencé avec les premières observations de l'étoile FU Orionis dès que PTI est devenu opérationnel. Cependant, la sensibilité de l'instrument n'était pas encore suffisante pour permettre une mesure facile. Cette observation a été très délicate, mais j'ai pu quand même détecter des franges, ce qui fut une première mondiale dans le domaine. Cela a permis aussi de pousser PTI aux limites de sa sensibilité à l'époque. Ce résultat (Malbet et al. 1998) rapidement publié a essuyé quelques critiques car nous n'avions qu'un point de mesure.

L'ampleur de la campagne d'observation que nous avons menée par la suite est sans précédent. Nous avons observé pendant 42 nuits sur une période de 7 ans. Nous avons recueilli 287 points de mesure en  $K$  et en  $H$  sur PTI sur le seul objet FU Orionis. Par ailleurs, en 1998-1999, nous avons recueilli des données d'une très bonne qualité (Berger et al. 2000b) qui nous ont permis non seulement de confirmer le résultat de 1997 (Malbet et al. 1998), mais aussi de mieux contraindre l'environnement de FU Orionis :

- nous avons confirmé la baisse de visibilité de FU Orionis en  $K$  à 110 m ainsi qu'en  $H$  qui est attribuable à la présence d'un disque d'accrétion
- nous avons détecté une variation de visibilité entre 21 et 38 m, ainsi qu'une oscillation à 110 m qui est bien expliquée par la présence d'un point lumineux non résolu.

Cela montre que l'interférométrie est un outil qui n'a aucun équivalent pour contraindre la physique à l'intérieur de l'unité astronomique centrale des étoiles jeunes.

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication (Malbet et al. 2005b) dans A&A qui est à ce jour la seule qui regroupe autant de données interférométriques sur un seul objet jeune. Nous avons montré sans aucune ambiguïté que seul le scénario comportant une étoile T Tauri entouré d'un disque extrêmement lumineux dû à un fort taux d'accrétion pouvait rendre compte de nos mesures. En effet, les paramètres du disque d'accrétion sont très bien contraints. Cependant, le modèle de disque ne permet pas à lui seul d'interpréter la

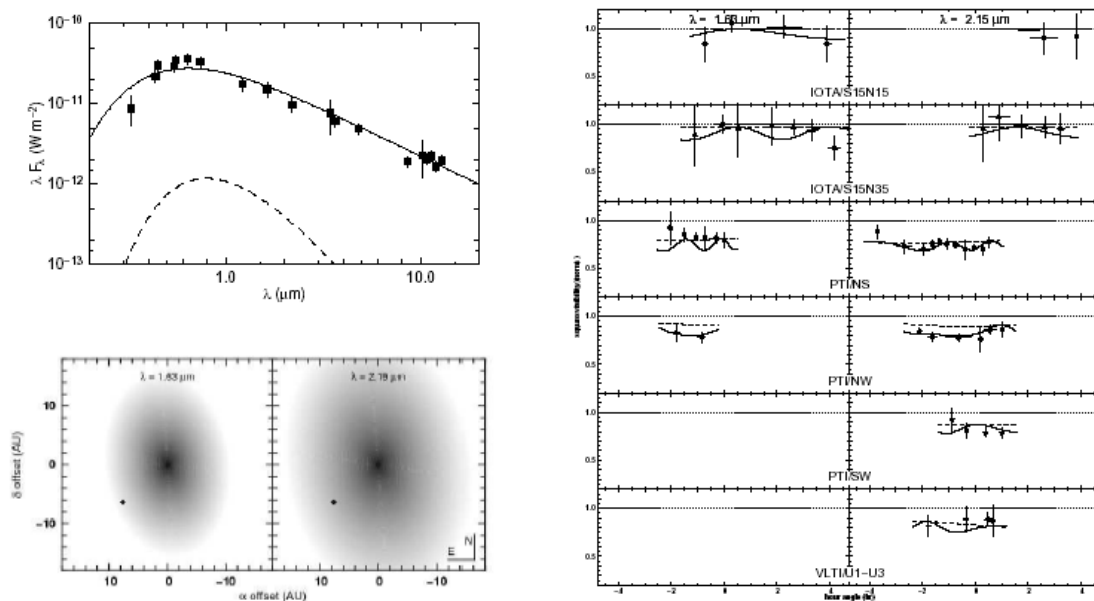


FIG. 3.4 – Observations de FU Orionis. Les symboles correspondent aux visibilités moyennées sur 30 mn de temps. Les courbes en trait plein représentent le meilleur ajustement au modèle de disque d'accrétion, les courbes en pointillé au même modèle mais complété par la présence d'un point chaud. En haut à gauche : distribution spectrale d'énergie et courbe de meilleur ajustement. La courbe en pointillé correspond à la contribution de l'étoile complètement dominée par celle du disque. Panneau de droite : visibilités en fonction de l'angle horaire, pour chaque ligne de base en  $H$  et  $K$ . La contribution du disque est en ligne pointillée. En bas à gauche, image synthétique en échelle logarithmique. D'après Malbet et al. (2005b).

présence d'une variation de la visibilité sur une ligne de base. Nous proposons donc une interprétation spéculative sur la nature du point lumineux non résolu. Étant donné qu'il semble se déplacer de façon linéaire avec les années, nous pensons que ce point lumineux non résolu pourrait être un compagnon stellaire qui aurait été à l'origine de l'accroissement d'accrétion qui aurait eu lieu en 1937 et expliquerait l'accroissement de luminosité de cet objet de 6 magnitudes.

Trois autres objets de type FU Orionis ont été observés depuis dans la bande  $K$  : V1057 Cyg, (PTI : Wilkin & Akeson 2003, KI : Millan-Gabet et al. 2006a), V1515 Cyg et Z CMa-SE (KI: Millan-Gabet et al. 2006a). Contrairement au cas de FU Ori décrit ci-dessus, ces trois objets apparaissent plus résolus dans le proche infrarouge que ce qui était attendu d'une loi de température en  $r^{-3/4}$ . Cependant il n'est pas non plus possible d'ajuster simultanément les visibilités mesurées et la SED avec une loi de puissance quelconque. Ces objets sont connus pour posséder de larges excès dans l'infrarouge moyen par rapport à ce qui est attendu d'un disque et attribués à la présence d'une enveloppe (Kenyon & Hartmann 1991) ou de l'absorption par les parties externes du disque du flux émis par les parties chaudes internes (Lachaume 2004). Les faibles valeurs de la visibilité peuvent donc être interprétées comme la présence de flux dans la bande  $K$  réparti sur des échelles correspondant au champ de vue des interféromètres (50 mas en bande  $K$  pour

KI). Par conséquent, contrairement aux attentes initiales, la complexité de l'environnement circumstellaire de la plupart des étoiles de type FU Orionis nécessiteront des observations avec un grand nombre de lignes de base et à plusieurs longueurs d'onde pour distinguer les contributions des différents ingrédients et discriminer entre les différents modèles de disque.

### 3.2.2 Nature de l'émission autour des étoiles Ae/Be de Herbig

Une des grandes révélations des observations interférométriques a été de découvrir que les visibilités étaient beaucoup plus faibles qu'attendues autour des étoiles Ae/Be de Herbig. Dans ces objets la matière circumstellaire gravite autour d'une étoile jeune de masse intermédiaire (entre 2 et 10 masse solaires, cf. revue par Natta et al. 2000). Un nombre important de ces objets sont accessibles avec les petits interféromètres comme PTI et IOTA (du moins avec des détecteurs avancés). Par conséquent il a été possible de mener la première campagne statistique sur une classe d'étoiles jeunes.

J'ai participé personnellement à l'observation du premier objet de cette classe, AB Aurigae avec IOTA et PTI (Millan-Gabet et al. 1999). AB Aur est apparu clairement résolu dans les bandes *H* et *K* avec une ligne de base de 38 m, avec un diamètre caractéristique de 0.6 UA pour l'émission proche infrarouge beaucoup plus grand que le diamètre de 0.2 UA prédit par les modèles de disques ajustant les SED (Hillenbrand et al. 1992). Ce résultat plutôt surprenant a été confirmé par le *survey* mené par Millan-Gabet et al. (2001) qui a trouvé des tailles caractéristiques allant de 0.6 à 6 UA pour des étoiles de type spectral allant de A2 à A9.

à cause de la couverture limitée en angle de position des lignes de base, la géométrie précise de ces objets reste pour une bonne part inconnue. Pour le peu d'objets où les données à plusieurs angles sont disponibles, celles-ci suggèrent que la géométrie du milieu circumstellaire est circulaire. Cependant, comme les tailles caractéristiques trouvées en bande *H* étaient quasiment identiques à celles trouvées en bande *K*, cela signifie que le gradient de température dans les disques est très élevé, surtout dans les régions où l'émission proche infrarouge est la plus intense, c'est-à-dire dans les régions internes.

Tuthill et al. (2001) ont imagé LkH $\alpha$  101, une étoile jeune extrêmement lumineuse, à la limite de diffraction du télescope Keck et ont montré que celle-ci possédait un anneau asymétrique interprété comme le bord interne du disque illuminé par l'étoile chaude. Comme la taille de cet anneau était beaucoup plus grand que ce que l'on attendait du bord interne des disques d'étoiles jeunes, les auteurs ont suggéré qu'il existait une cavité interne optiquement mince qui aurait repoussé les limites de sublimation de la poussière plus loin dans le disque.

Ainsi Monnier & Millan-Gabet (2002) ont suggéré que le même phénomène se produisait dans les étoiles Ae/Be de Herbig et ont donc calculé le rayon d'un anneau de matière qui pourrait interpréter les visibilités mesurées sur ces étoiles. Ils ont placé les tailles caractéristiques dans un diagramme représentant la taille caractéristique de l'anneau en fonction de la luminosité des étoiles (cf. figure 3.5) et ont trouvé que celles-ci étaient corrélées avec la luminosité et suivaient une loi en  $L_*^{1/2}$ . En utilisant des propriétés de poussières réalistes, ces auteurs ont montré que ces tailles étaient en accord avec des rayons de sublimation de la poussière composée de grains relativement grands ( $\geq 1 \mu\text{m}$ ) et des températures de su-

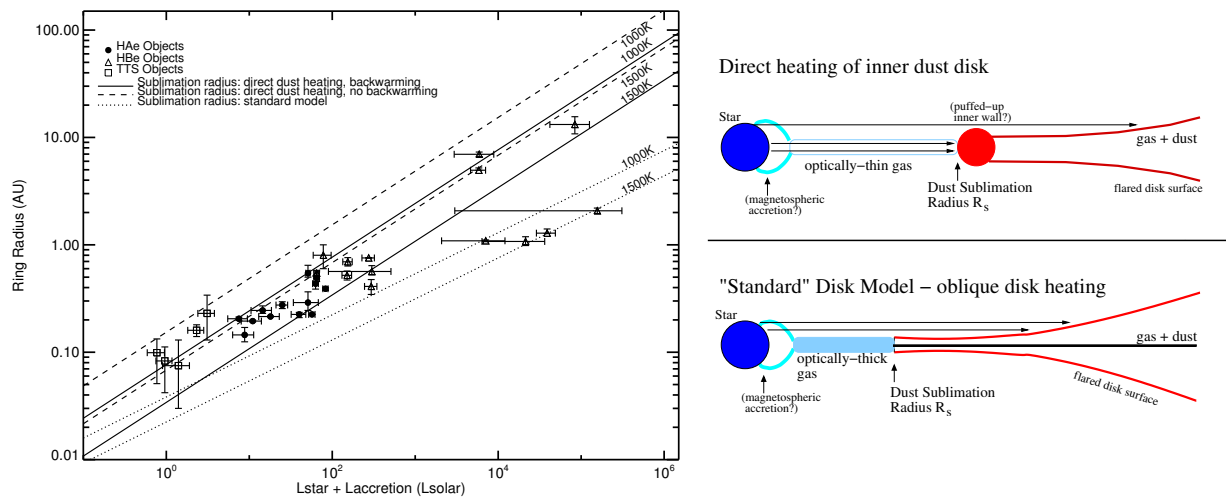


FIG. 3.5 – Diagramme représentant les tailles estimées du milieu circumstellaire autour des étoiles Ae/Be de Herbig et de quelques étoiles T Tauri en fonction de la luminosité centrale (c'est-à-dire incluant la luminosité de l'étoile et celle du choc d'accrétion). Les droites continues et en tireté correspondent au modèle de disque avec un bord interne surchauffé (schéma en haut à droite), tandis que les droites en pointillé au modèle de disque standard avec chauffage oblique des couches supérieures (schéma en bas à droite). D'après Millan-Gabet et al. (2007).

blimation comprises entre 1000 K et 2000 K<sup>1</sup>. Les objets les plus lumineux (de type spectral HBe) semblent avoir des tailles caractéristiques en bon accord avec le modèle de disque canonique laissant penser que pour ceux-ci le disque s'étend jusqu'à l'étoile.

Parallèlement à ces résultats, Natta et al. (2001) ont avancé la possibilité que les parties des disques puissent être optiquement minces au rayonnement de l'étoile de telle sorte que le bord interne soit illuminé de manière efficace par l'étoile et soit sur-lumineux, en vue d'interpréter un excès de flux dans les courbes de SED aux alentours de 3 – 5 μm. Le modèle simple d'émission de corps noir d'un mur interne vertical a été amélioré par une modélisation plus sophistiquée incluant des phénomènes physiques supplémentaires : le transfert de rayonnement et la structure verticale du bord interne du disque provoquant éventuellement une augmentation locale de l'échelle de hauteur du disque pouvant être à l'origine d'une zone non éclairée par l'étoile (Dullemond et al. 2001), une profondeur optique et une échelle de hauteur du gaz contenu à l'intérieur de la cavité Muzerolle et al. (2004) et une courbure convexe du bord interne prenant en compte la dépendance en densité de la température de sublimation de la poussière (Isella & Natta 2005).

Il est intéressant de constater que le même genre d'interprétation a été avancé pour les environnements des étoiles de plus faible masse que sont les étoiles T Tauri Akeson et al. (2000, 2002, 2005). En effet les tailles caractéristiques ont été trouvées plus grandes que ce que nous avons prédit (Malbet & Bertout 1995). Cependant à l'explication précédente, il convient d'ajouter la luminosité d'accrétion (Muzerolle et al. 2003) qui serait libérée lors

<sup>1</sup>En fait, si on fait l'hypothèse que les grains peuvent rayonner sur tous les angles solides, la température est comprise entre 1000 K et 1500 K, tandis que dans le cas d'un rayonnement sur une moitié de ces angles, alors la température est comprise entre 1500 K et 2000 K

de la chute de la matière sur la surface de l'étoile en plus de la luminosité des étoiles.

Je profite de cette discussion pour faire ressortir un point troublant : notre équipe (J.-P. Berger, R. Lachaume et moi-même) avons été pratiquement les seuls à tenter d'ajuster à la fois les SED et les visibilités sur de vraies données. Les autres auteurs ont continué à traiter séparément les SED et les mesures interférométriques, ainsi qu'à se contenter d'utiliser une relation sommaire entre la valeur des visibilités et une taille caractéristiques bien mal définie. De plus à chaque fois que nous avons essayé d'interpréter les données obtenues (sur FU Ori, MWC 297, mais aussi SU Aur, cf. Lachaume et al. 2003), nous avons réussi à trouver un ensemble de paramètres satisfaisants. Par ailleurs, le modèle d'anneau interne surchauffé est aussi remis en question par Vinković et al. (2006) et la taille des barres d'erreur des mesures dans le cas des étoiles T Tauri peut autoriser toutes les interprétations.

Personnellement, je pense que les phénomènes sont plus compliqués que ceux décrits dans les explications simples données ci-dessus et ce n'est qu'une modélisation complète avec un ensemble de données suffisant qui permettra de connaître la nature exacte du milieu circumstellaire autour des étoiles jeunes. Il me semble que les différentes modélisations ne sont pas exclusives.

### 3.3 Et autant en emporte le vent

Avec l'avènement de l'instrument AMBER sur le VLTI (cf. section 2.3), il est possible de prolonger les études sur les disques vers l'étude de l'origine des vents. En effet, la résolution spectrale d'AMBER couplée à la sensibilité due aux grands diamètres des télescopes du VLTI, permettent d'observer des étoiles jeunes dans des régions spectrales où le continu donnera des informations sur les propriétés de la poussière localisée autour de l'étoile, mais aussi où des raies caractéristiques du gaz sont présentes. C'est le cas notamment de la région aux alentours de  $2.165 \mu\text{m}$  où se trouve la raie Brackett  $\gamma$  de l'hydrogène atomique.

Au cours du *commissioning* AMBER (cf. section 2.3), nous avons observé l'étoile jeune MWC 297 car elle possède une raie  $\text{Br}\gamma$  assez intense nous permettant de calibrer spectralement AMBER. Ces observations ont eu lieu lors du premier *commissioning* avec seulement 2 télescopes. Nous avons détecté au sein de la raie  $\text{Br}\gamma$  une baisse de visibilité qui correspond à une taille environ 40% supérieure à la taille du disque émettant le rayonnement continu.

#### 3.3.1 MWC 297

Revenons à la mesure du continu. Avec W.-J. de Wit, nous avons essayé de reproduire les mesures de visibilité et la SED avec un modèle canonique (Malbet & Bertout 1995). En collaboration avec A. Isella de l'OAA, nous avons aussi testé un modèle de disque dont le bord interne est surchauffé. Nous avons constaté que le modèle standard pouvait tout à fait interpréter à la fois les visibilités obtenues dans le continu, mais aussi la SED, tandis que le modèle plus sophistiqué ne le permettait pas. Il est vrai que MWC 297 est un objet de type précoce (B1.5e), mais cela confirme l'opinion que j'énonçais plus haut. à chaque fois que j'ai eu l'occasion d'utiliser un modèle de disque, il n'était pas besoin d'invoquer de phénomènes complémentaires. D'ailleurs dans le cas de MWC 297, nous avons utilisé les mesures obtenues par R. Millan-Gabet et collaborateurs et nous avons trouvé que la mesure AMBER bien que moins précise se trouvait sur la courbe (cf. figure 3.6). Avec W.-J. de Wit,

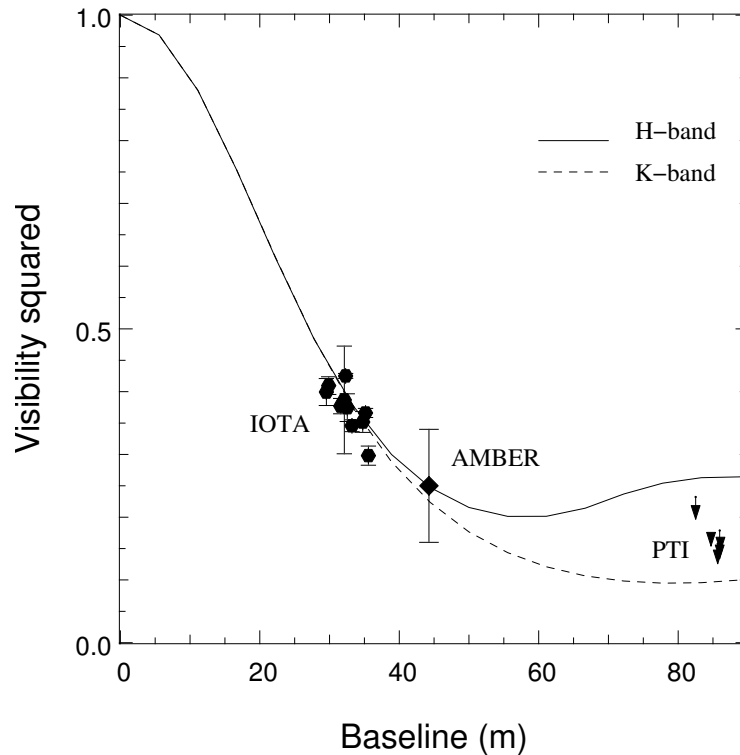


FIG. 3.6 – Visibilités mesurées sur MWC 297 avec IOTA et AMBER, et, modélisées avec un modèle de disque standard. D’après Malbet et al. (2007).

nous avons essayé de contraindre les paramètres du disque. Ce sont principalement les mesures à différents angles d’IOTA représentées sur la figure 3.6 qui nous ont permis de contraindre l’inclinaison du disque.

MWC 297 est connue pour posséder un vent Drew et al. (1997). Avec AMBER, nous avons détecté la raie de  $\text{Br}\gamma$  aux alentours de  $2.165 \mu\text{m}$  avec la résolution moyenne ( $\sim 1500$ ). Cette observation ne permet pas de résoudre complètement la raie, mais nos collègues italiens du consortium AMBER possédaient une mesure spectroscopique obtenue avec la résolution spectrale de 8900 d’ISAAC sur le VLT (cf. partie gauche de figure 3.7). Celle-ci permet de résoudre la raie qui exhibe soit deux pics à basse vitesse ou bien la présence d’une absorption quasiment au centre de la raie.

Pour modéliser l’émission dans la raie de  $\text{Br}\gamma$  nous avons sollicité nos collègues niçois qui possèdent un modèle de vent d’étoiles chaudes Stee & de Araujo (1994). Cependant, pour interpréter de façon complète les données, il a fallu associer le résultat de la modélisation du disque au modèle du vent. En effet, autant dans le continu, le vent ne contribue à l’émission que de façon très infime et donc peut être négligé, autant dans la raie le continu contribue de façon équivalente au flux que le vent (rapport raie/continu égal à environ 2.1). De plus si le disque existe et est optiquement mince, alors il va masquer certaines parties du vent à l’observateur. C’est ce que nous avons représenté sur le schéma de la figure 3.8. A. Meilland et P. Stee ont incorporé les contraintes géométriques dans le code SIMECA et ont réussi à trouver un ensemble de paramètres qui permettent à la fois d’interpréter le spectre ISAAC et les visibilités AMBER (cf. figure 3.7). La résolution spectrale des données AMBER n’est pas suffisante pour mettre à jour les changements à l’intérieur de la raie et

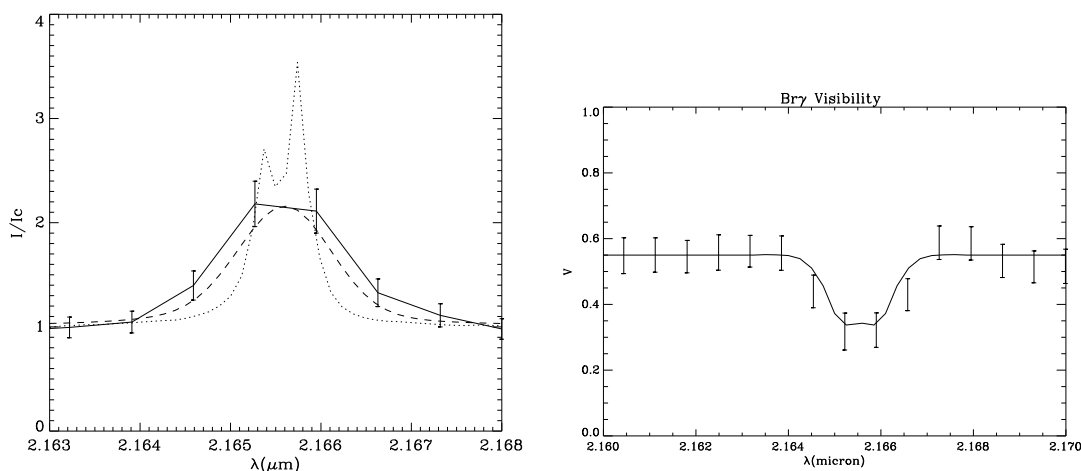


FIG. 3.7 – Spectre de MWC 297 mesuré avec AMBER et ISAAC autour de la raie Br $\gamma$  (à gauche). Visibilités mesurées sur la même couverture spectrale (à droite).

donc localisé précisément l'origine de la forme en double pic du spectre ISAAC. On peut cependant interpréter cette forme comme la conséquence de la présence du disque. En effet, comme on le constate sur le schéma de la figure 3.8, en séparant les contributions provenant de l'hémisphère de gaz qui se déplace vers l'observateur de celle s'en éloignant, l'effet du disque est de soustraire une partie de l'émission vers le bleu et d'ajouter une contribution supplémentaire décalée vers le rouge. C'est sans doute pour cela que le pic rouge est plus grand que le pic bleu dans le spectre. On voit aussi sur la figure que ce modèle ne reproduit pas bien la forme de l'aile de raie rouge.

Ce résultat (Malbet et al. 2007), outre le fait que c'est le premier résultat astrophysique d'AMBER, est une première au niveau mondial dans le domaine des étoiles jeunes, car aucun autre instrument ne possède une telle résolution spectrale. Il permet d'envisager de contraindre les mécanismes d'accrétion-éjection au sein des disques des étoiles jeunes.

### 3.3.2 HD 104237

Nous avons aussi obtenu des mesures sur une autre étoile de Herbig, l'étoile HAe HD 104237. Celle-ci est plus faible que MWC 297, et le rapport raie sur continu n'est plus que de 1.35. Les mesures sont par conséquent de moins bonne qualité. De plus, à cause des problèmes de vibrations des UTs, nous n'avons pas pu calibrer le continu de HD 104237 correctement et nous avons préféré utiliser la valeur donnée par un modèle reproduisant correctement la SED.

Dans ce cas précis, nous trouvons que la visibilité ne chute pas dans la raie de Br $\gamma$ . E. Tatulli a essayé de rendre compte de ce phénomène en modélisant une émission attendue de la raie à différentes distances de l'étoile.

La figure 3.9 indique que l'émission de la raie Br $\gamma$  ne peut pas être localisée au niveau du rayon de corotation et que par conséquent l'origine de cette raie n'est probablement pas magnétosphérique. Par contre les mesures sont compatibles avec une émission qui proviendrait des mêmes régions que l'émission de la poussière.



FIG. 3.8 – Schéma de l’environnement de MWC 297 tel que vu par AMBER. D’après Malbet et al. (2007).

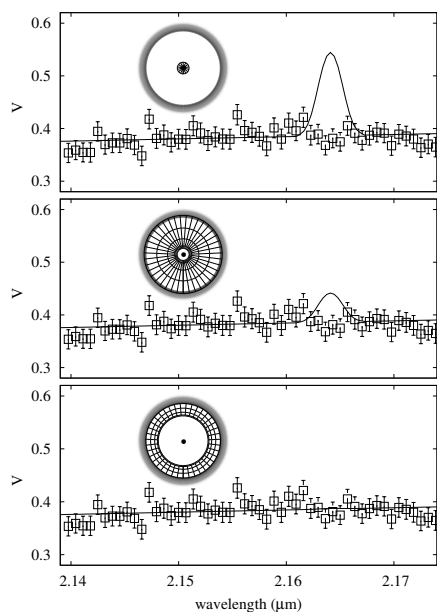


FIG. 3.9 – Visibilités obtenues sur HD 104237. Modélisation à gauche par l’accrétion de l’hydrogène au niveau du rayon de corotation, et à droite au niveau du disque (Tatulli et al. 2007a).





# Chapitre 4

## Vers une compréhension de la formation stellaire et planétaire ?

### 4.1 Bilan astrophysique et instrumental

L'interférométrie optique dans le domaine infrarouge proche et moyen a résolu spatialement l'environnement circumstellaire d'un grand nombre<sup>1</sup> d'objets stellaires jeunes de types différents dans les dix dernières années (cf. les revues de : Millan-Gabet et al. 2007; Malbet 2007). Bien que les observables soit relativement élémentaires dans la plupart des cas (visibilités en bande large), elles ont apporté des informations nouvelles fondamentales (tailles caractéristiques et premier aperçu morphologique) qui ont permis de contraindre la nature de ces milieux circumstellaires. La combinaison avec la résolution spectrale a commencé à livrer ses premiers résultats spectaculaires. On peut résumer ainsi les principaux résultats auxquels j'ai pu contribuer :

- FU Ori qui est le prototype d'une classe d'objets jeunes pour lesquels le disque d'accrétion domine l'émission semble bien décrit par le modèle canonique d'accrétion et bien contraint à la fois par les visibilités et le spectre photométrique.
- La plupart des objets de type spectral le plus précoce (HBe) semble aussi en accord avec les modèles de disque protoplanétaires canoniques. Un exemple est l'objet MWC 297 qui a été observé par AMBER et pour lequel nous avons pu interpréter les différents résultats dans ce cadre-là. Un exemple discordant est l'objet LkH $\alpha$  101, le seul à avoir été imagé à la limite de résolution d'un télescope de 10m.
- Les étoiles Ae et Be de Herbig et les étoiles T Tauri, les tailles caractéristiques sont plus grandes que celles prédites par le modèle canonique. Ces tailles sont fortement corrélées à la luminosité de l'objet central et sont interprétées comme celles du bord interne des disques d'accrétion à des distances compatibles avec les températures de sublimation de la poussière. C'est le cas de l'objet AB Aur. Ces observations ont été à l'origine des développements de nouveaux modèles avec des bords internes surchauffés, mais ces modèles n'ont pas encore réussi à modéliser à la fois les visibilités et les spectres photométriques.
- Des disques jeunes ont été aussi résolus dans l'infrarouge moyen avec MIDI sur le VLTI avec des tailles caractéristiques qui sont corrélées avec un excès infrarouge. Cette

---

<sup>1</sup>Environ 60 objets publiés à cette date.

corrélation semblerait renforcer une classification basée sur le degré d'évasement des disques.

- La spectroscopie dans la raie des silicates s'est révélée un outil puissant pour sonder la minéralogie de la poussière dans les disques. Ces silicates semblent apparaître plus ordonnés cristallographiquement dans les parties internes des disques.
- La spectroscopie dans l'infrarouge proche sur des raies de gaz atomique a permis de séparer les contributions venant des parties internes des disques de celles provenant d'un vent.

Cette moisson a pu être possible par une implication forte dans l'instrumentation interférométrique de ces quinze dernières années :

- tout d'abord sur les petits interféromètres infrarouges PTI et IOTA qui nous ont permis de faire des *premières* sur les objets jeunes que sont FU Ori ou AB Aur.
- ensuite sur l'équipement de l'ESO dans le VLTI. Ma principale contribution a été de mener à bien la réalisation de l'instrument AMBER et de son exploitation scientifique.
- finalement sur une R&D innovante qu'est l'optique intégrée qui pourra se traduire dans des instruments de nouvelle génération notamment pour accéder à de l'imagerie interférométrique.

Je suis fier d'avoir pu contribuer modestement à l'essor de ce domaine et d'avoir formé une génération de jeunes chercheurs moteurs dans le domaine. Les efforts ne doivent cependant pas s'arrêter là, et déjà j'entrevois des perspectives multiples tant astrophysiques qu'instrumentales que je me propose de développer dans les sections suivantes.

## 4.2 Perspectives astrophysiques

Les observations interférométriques résumées ci-dessus ont permis pour la première fois de sonder les régions internes des environnements proches des jeunes étoiles. Même si ce travail a motivé des efforts supplémentaires à notre vision classique de ces régions comme l'introduction d'un bord interne surchauffé ou de distributions spatiales de poussière changeant avec la distance à l'étoile, il n'en reste pas moins que les développements théoriques nécessiteront des observations interférométriques encore plus précises et plus nombreuses, ainsi que des ensembles de données plus complets.

En effet, l'origine exacte de l'émission infrarouge n'a pas été complètement établie pour un certain nombre de sources. Vinković et al. (2003) considèrent notamment que la dispersion des mesures dans le diagramme tailles-luminosités des étoiles Ae/Be de Herbig indique que le modèle de bord interne brillant ne permet pas d'interpréter toutes les données avec un ensemble cohérent de paramètres. Ils proposent un modèle alternatif composé d'un disque et d'un halo où l'émission proche infrarouge serait dominée par celle du halo. Vinković et al. (2006) montrent en outre que ce type de modèle est capable de reproduire les SED, en incluant aussi l'excès proche infrarouge. Ils rallument donc le débat *disque versus enveloppe* de la dernière décennie.

Les propriétés précises du fameux bord interne surchauffé ont besoin d'être établies. Les hypothèses sur la taille des grains et sur la densité de matière ont un impact direct sur la position du bord interne via la température de sublimation de la poussière. De plus, dans ce scénario, les étoiles Ae/Be de Herbig nécessitent une cavité interne optiquement mince et des grains relativement gros ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ), tandis que les objets de plus faible masse

comme les étoiles T Tauri ont besoin d'une partie interne du disque optiquement épaisse et/ou de grains beaucoup plus petits. Cette différence est peut-être due au petit nombre d'étoiles T Tauri observées et aux grandes barres d'erreur associées.

Les effets de l'émission infrarouge proche par le gaz dans les parties internes, et, de la diffusion par la poussière à plus grande échelle doivent être quantifiés en détail à la fois sur les visibilités et sur la spectrophotométrie. En effet des structures à grande échelle sont souvent invoquées pour expliquer les courbes de visibilités vers les petites fréquences spatiales, mais l'origine de ces halos reste encore inconnue.

Il semblerait que les environnements des étoiles jeunes de type spectral précoce et de celles de type plus tardif aient des propriétés différentes dans le proche infrarouge. Ces différences ont déjà été évoquées dans le cas de l'émission millimétrique (absente dans la plupart des étoiles HBe par rapport aux autres étoiles) peut-être dû à une photo-évaporation plus importante (Hollenbach et al. 2000). Les différences de mécanismes d'accrétion ou le lien avec les phénomènes d'éjection peuvent aussi être mis en avant.

En ce qui concerne le cas des objets de type FU Orionis où le chauffage par accrétion domine l'émission thermique, il convient de s'interroger si le modèle canonique s'applique tout le temps et à toutes les longueurs d'onde. Il semblerait que des mesures dans l'infrarouge moyen ne soient pas expliquées par ce modèle (Quanz et al. 2006), et l'observation de la nébuleuse de Mc Neil avec MIDI semble requérir une loi de température relativement plate (Ábrahám et al. 2006).

La structure globale des disques a besoin d'être approfondie. En effet les hypothèses avancées pour expliquer les données en infrarouge proche et les caractéristiques des poussières dans l'infrarouge moyen ainsi que les raies de CO ne sont en général pas cohérentes entre elles. Un tel travail, bien qu'ardu, permettrait sans doute de contraindre encore mieux la structure radiale et verticale des disques d'étoiles jeunes. Finalement, il serait important d'introduire des modèles d'évolution chimiques pour avoir une vision plus générale mais aussi plus précise de ces phénomènes.

Le lien entre l'accrétion et l'éjection convient aussi d'être approfondi plus particulièrement. Connaître la localisation exacte de l'origine des vents et des jets devrait nous permettre de comprendre un peu mieux l'intrication entre ces deux phénomènes et aussi nous indiquer le rôle que joue la magnétosphère dans ces étapes précoces de l'évolution stellaire.

Augmenter le nombre et la qualité des mesures sur tous ces types d'objets est fondamental pour obtenir des observables ne dépendant pas de modèles a priori. C'est pourquoi nous devons essayer de nous procurer des images, les plus objectives possibles, des environnements proches des étoiles, tout en conservant l'information spectrale.

Toutes ces recherches ne peuvent pas être envisagées sans avoir une préoccupation parallèle pour l'instrumentation, qui permettra de mettre en œuvre ces observations. Rester à mi chemin entre les deux domaines (astrophysique et instrumental) peut paraître parfois difficile à gérer, mais permet aussi de porter des projets avec des objectifs astrophysiques radicalement nouveaux. Mon expérience montre qu'il faut être aussi extrêmement vigilant à ce que les besoins astrophysiques soient soigneusement spécifiés pour concevoir les outils les plus appropriés.

### 4.3 Perspectives instrumentales

En se restreignant aux seules perspectives interférométriques, les avancées instrumentales nécessaires dans le court terme se situent à plusieurs niveaux.

Tout d'abord, il est fondamental de finaliser l'instrument AMBER et les autres instruments du VLTI de telle sorte que ceux-ci fassent vraiment partie des outils usuels des astronomes. Cela implique de développer plus encore les formations aux techniques interférométriques, même si elles existent<sup>2</sup> déjà en Europe et aux États-Unis.

Dans le cas d'AMBER, il faut absolument réduire le délai d'observation entre la source astrophysique et son calibrateur pour augmenter l'efficacité des observations. Il faut aussi rendre l'instrument plus stable de telle sorte que n'importe quel opérateur du VLT puisse mener des observations de service. Il est souhaitable d'améliorer dans le même temps la qualité des faisceaux délivrés par le VLTI, mais j'ai confiance que cela se fasse dans le cadre de l'instrument PRIMA à venir et aussi par la mise en place de systèmes d'optique adaptative au foyer des ATs. Finalement, le mode imagerie d'AMBER doit être mis en œuvre aussitôt que possible<sup>3</sup>.

Une des perspectives les plus enthousiasmantes est la compréhension du processus de reconstruction d'images. Cela comprend à la fois la mise au point des algorithmes, mais aussi la définition des contraintes nécessaires quant à la couverture du plan des fréquences spatiales, la précision des mesures de la visibilité, de la phase et de la clôture de phase.

Au niveau instrumental, le cophasage des télescopes doit être mis en œuvre de manière routinière et avec les détecteurs les plus sensibles de telle sorte que l'on arrive à un état équivalent à celui de l'optique adaptative de nos jours. Cela passe très certainement par la mise au point de nouveaux types de suiveurs de franges pouvant s'appuyer sur les dernières technologies (optique intégrée par exemple). Ces mécanismes de cophasage sont indispensables si l'on souhaite observer avec un minimum de résolution spectrale.

Au niveau des projets et au-delà des instruments de seconde génération, je pense qu'il faut se pencher sur ce que peut nous apporter de nouveaux sites d'observation interférométrique. A ce titre, il me semble qu'il faut garder un œil sur le site de l'antarctique et sur les missions spatiales futures comme DARWIN. En effet même si ces instruments sont focalisés sur la détection et la caractérisation de planètes extrasolaires soit par interférométrie de franges noires ou par synthèse d'ouverture, ils peuvent apporter un avantage décisif au domaine des étoiles jeunes. Ces nouveaux sites peuvent aussi permettre d'envisager des bases kilométriques essentielles pour résoudre au plus près les surfaces stellaires.

Une idée, qui me semble aussi très intéressante à creuser, m'a été communiquée par W.-J. de Wit sur l'utilisation des réseaux de télescopes Cherenkov, construits pour la détection des rayons  $\gamma$ . Il s'agit de relancer l'interférométrie d'intensité avec les nouveaux détecteurs ultra rapides de type SSPD. Ce type d'observatoire, comme HESS en Namibie, possède plusieurs télescopes localisés sur une centaine de mètre. Cela pourrait être un moyen de faire de l'imagerie sans les difficultés de recombinaison de l'interférométrie directe. Je dois dire que l'état de mes connaissances sur le sujet n'est pas suffisant pour que je développe plus avant cette idée.

<sup>2</sup>J'ai initié avec G. Perrin et P. Garcia les écoles européennes sur le VLTI qui ont eu lieu aux Houches en 2002 (Perrin & Malbet 2003) et à Goutelas en 2006 (Malbet & Perrin 2007).

<sup>3</sup>J'ai obtenu du temps d'observation avec AMBER pour un programme d'imagerie sur FU Ori au début 2008.

## 4.4 Programme de recherche

Pour poursuivre les directions de recherche que j'ai ébauchées plus haut, j'ai construit un programme de recherche pour les années à venir qui bien sûr n'inclut pas vraiment les perspectives à plus long terme. Ce programme de recherche peut être découpé en trois parties :

- exploitation optimale du VLTI,
- modélisation des environnements protoplanétaires
- vers l'imagerie VLTI avec VSI.

### 4.4.1 Exploitation optimale du Vlti

Le VLTI est une infrastructure qui représente un gros investissement de la part des pays européens au sein de l'ESO. Il est donc important de s'assurer que le retour soit optimisé et je me propose de participer à cet effort dans mon domaine et ceci dans trois directions.

Tout d'abord, je dois mettre en œuvre le plus rapidement possible la partie du programme de temps garanti qui concerne directement les étoiles jeunes. Les *surveys* d'étoiles T Tauri (programme avec en collaboration avec J.-L. Monin), d'étoiles de Herbig (en collaboration avec J.-P. Berger, M. Benisty, E. Tatulli, G. Weigelt, A. Natta,...) doivent être menés en priorité. Les résultats doivent être confrontés au modèle standard et au modèle à deux couches développé avec R. Lachaume, mais aussi au code Monte Carlo de transfert de rayonnement de F. Ménard et de C. Pinte. C'est l'assurance d'avoir de nouvelles données et de tester la validité des modèles. Ensuite et même en parallèle, des observations d'objets particuliers doivent commencer sur des objets archétypes de leur classe, brillants et bien étudiés par d'autres techniques. Il s'agit de FU Ori, Z CMa, T Tau, AB Aur, TW Hya, 51 Oph, ... Un exemple qui illustre ce type de recherche est présenté dans la figure 4.1. Plus tard, quand le mode haute résolution spectrale pourra être utilisé sur des objets faibles grâce au cophasage avec FINITO ou le PRIMA FSU, nous essaierons d'obtenir des informations cinématiques et analyser les caractéristiques des mouvements de matière dans et autour des disques protoplanétaires.

L'obtention de la première image interférométrique d'un disque protoplanétaire autour d'une étoile jeune constitue sans doute mon objectif principal. C'est pourquoi je suis en train de démarrer une thèse cette année sur le sujet avec S. Renard. Je suis convaincu que l'on peut commencer à produire de premières images avec AMBER, même si cela nécessitera pas mal de temps de télescopes. Plus tard, espérons qu'un instrument de seconde génération, comme VSI, permettra d'atteindre cet objectif de façon plus aisée. L'objectif dans un premier temps est d'obtenir des images sur des cibles relativement accessibles : FU Ori et Z CMa.

En dehors de mon domaine, je souhaite encourager l'utilisation d'AMBER pour d'autres objectifs scientifiques comme les exoplanètes, les AGN, l'environnement des étoiles évoluées comme les novae. Je suis pour cela impliqué dans plusieurs programmes avec O. Absil, C. Perrier, R. Petrov, P.-O. Petrucci, H. Sol, O. Chesneau,...

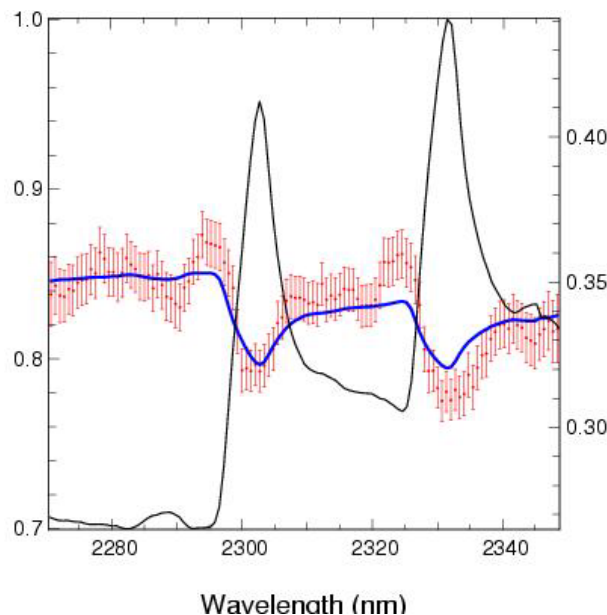


FIG. 4.1 – Visibilités obtenues avec AMBER sur le système jeune 51 Oph lors du programme d’observation 077.C-0706. Le domaine spectral est centré sur les premières bandes de CO. Le spectre de l’objet tel que mesuré par AMBER est superposé sous la forme d’une ligne fine, continue et noire. La courbe plus fine et de couleur bleue correspond aux visibilités calculées à partir d’un modèle de disque uniforme pour rendre compte de l’excès dans les raies superposé aux visibilités du continu. La taille de ce disque uniforme est de 0.2 UA. (Travail en cours avec E. Tatulli).

#### 4.4.2 Modélisation des environnements protoplanétaires

Obtenir plus de contraintes ne suffit cependant pas pour améliorer notre compréhension de ce qui se passe autour des étoiles jeunes. Il faut aussi progresser vers une modélisation plus fine de l’environnement de ces étoiles. Pour cela je propose de développer trois directions de recherche.

Les modèles actuels les plus répandus sont des modèles paramétriques qui ne permettent pas de comprendre l’origine des phénomènes en jeu. Il faut donc partir d’une modélisation de ces processus pour en comprendre les conséquences au niveau des observations. Je souhaite donc poursuivre la simulation du transfert de rayonnement dans les disques mais en approfondissant certains aspects, comme la compréhension des conséquences observationnelles de la modulation d’accrétion suivant la distance, en collaboration avec J. Ferreira. En effet dans les modèles de Ferreira (1997), les conditions physiques sont modifiées dans les parties internes du disque. Il serait donc intéressant de voir ce que ce phénomène a comme conséquence sur les observables interférométriques.

Une deuxième problématique, que je souhaite approfondir, est la modélisation simple mais cohérente d’un environnement complet d’étoile jeune mettant en œuvre à la fois un disque et un vent. Dans notre article sur MWC 297, P. Stee et moi-même avons associé de façon ad-hoc un modèle de disque et un modèle de vent en ne prenant en compte que les effets d’ombre de l’un par rapport à l’autre, mais sans en faire un modèle global et cohérent (cf. la figure 4.2). Je souhaiterais en quelque sorte interfacer le code MCFOST (Pinte

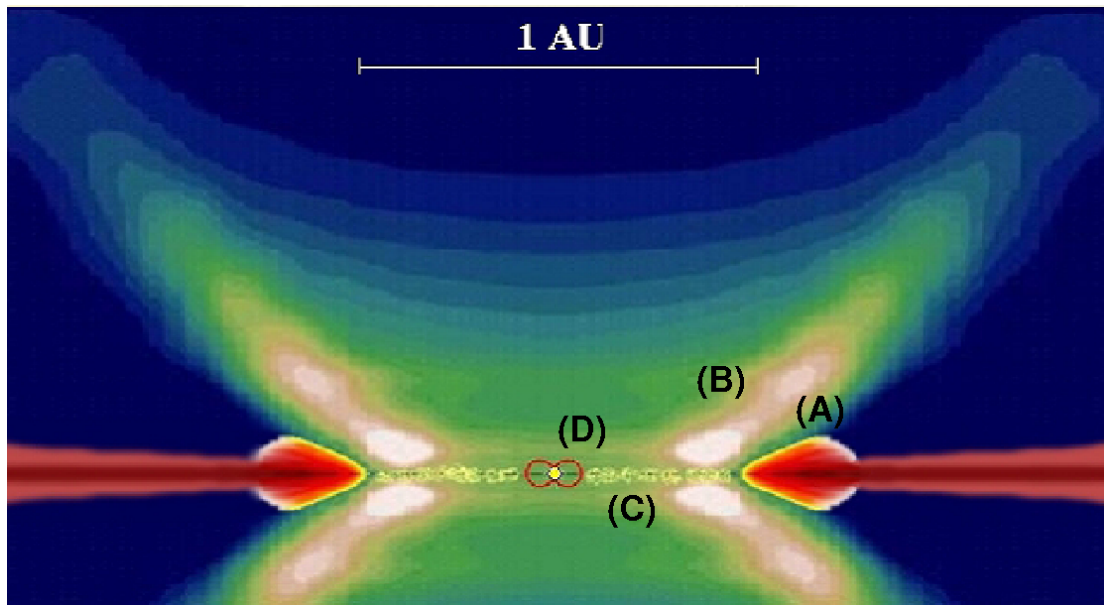


FIG. 4.2 – Représentation graphique d'un modèle de disque et de vent par Isella et al. (2007) pour l'objet HD 104237 combinant le modèle d'anneau d'Isella & Natta (2005) et le modèle de vent de Thiébaud et al. (2003). (A) Le bord interne du disque qui émet plus de 80% de l'émission proche infrarouge ; (B) la région spatialement résolue qui émet la raie Br $\gamma$  est compatible avec un vent diffus se propageant depuis une région du disque située en deçà de 0.45 UA ; (C) le gaz qui subsiste en deçà du rayon de sublimation de la poussière se sédimente dans un disque géométriquement fin ; (D) la magnétosphère qui relie le disque à l'étoile. D'après Isella et al. (2007).

et al. 2006) avec le modèle de disque SIMECA (Stee & de Araujo 1994). Dans un second temps, il faudrait rendre le modèle de vent utilisé pour MWC 297 plus physique et moins paramétrique que celui de SIMECA, pour aboutir à un modèle de transfert de rayonnement complet à l'image des modèles de jets mis en place progressivement par Dougados et al. (2004a,b).

Un autre aspect de la physique des disques que je souhaite développer dans l'avenir est celui concernant les sillons planétaires. En effet dans le cadre de l'appel d'offre du CNES pour le vol en formation, une équipe s'est formée pour proposer le projet PÉGASE d'interféromètre précurseur de DARWIN à 3 télescopes plutôt dédié à la caractérisation des Pégasides (les Jupiters chauds). Une voie différente de l'observation des Pégasides en mode nulleur consiste en la détection de sillons planétaires dans les disques protoplanétaires. À l'occasion du stage de fin d'étude (fin de master 2) d'E. Herwats, je lui ai proposé de réfléchir conjointement à la définition du cas scientifique et aux stratégies les plus appropriées pour leur détection. Nous avons trouvé que l'une de celles-ci correspond à utiliser la couverture spectrale de PÉGASE plutôt que la couverture en ligne de base pour détecter la signature de sillons planétaires due à la présence d'une planète.

Pour illustrer cela, nous avons simulé des sillons de planètes dans des disques en partant d'un modèle standard de disque dans lequel les anneaux du disque correspondant aux sillons n'émettent pas de flux. Le modèle utilisé pour cette simulation est fondé sur le modèle de disque d'accrétion standard (Malbet & Bertout 1995). Les simulations ont été réalisées



pour différents types d'objets stellaires : étoile T Tauri classique, à spectre plat, et étoiles FU Ori. Celles de la figure 4.3 correspondent à des disques de T Tauri à spectre plat (ou disques évasés). Ce travail devra être étendu à DARWIN en mode imagerie et devrait faire prochainement l'objet d'une publication. Pour aller plus loin, il faut prendre des modèles de disque plus réalistes et des simulations SPH comme le font par exemple Varnière et al. (2006) et avec qui nous avons commencé à travailler .

### 4.4.3 Vers l'imagerie Vlti avec Vsi

Le troisième aspect de mon programme de recherche est instrumental. Comme je me suis investi dans AMBER, je souhaite mener à terme le projet d'un instrument de seconde génération du VLTI qui puisse fournir aux astronomes des images interférométriques dans le proche infrarouge issu de nos recherches en optique intégrée (cf. section 2.2). Avec un instrument de ce type, nous aurons accès à une imagerie à très haute résolution angulaire, de l'ordre de quelques millisecondes d'angle environ, ainsi qu'une grande dynamique (de l'ordre de 1 à 100, voire 1000) provenant de la précision obtenue sur les mesures de visibilité et de la couverture en fréquences spatiales. Il y a par ailleurs un lien direct entre les observations interférométriques optiques monomodes et l'interférométrie radio. Comme les objectifs scientifiques sont souvent communs et la résolution spatiale similaire, un tel instrument permet de comparer des images obtenues dans le proche infrarouge avec celles obtenues avec ALMA dans le millimétrique. AMBER nous a montré aussi l'importance de l'information spectrale soulignant qu'il est essentiel de proposer un instrument imageur sans spectroscopie. C'est donc vers un spectro-imageur basé sur la synthèse d'ouverture en interférométrie que se dirigent nos travaux maintenant.

En 2000, quand nous avons défendu ce type de projet, il était encore très tôt. Il fallait (et il faut encore maintenant) batailler contre le scepticisme d'une partie de la communauté. C'est clairement un projet à moyen terme pour une instrumentation VLTI de deuxième génération. Des tests de validation sur le ciel avec deux télescopes et à  $N$  télescopes sont donc nécessaires avant d'envisager la phase de concept. Dans cette phase de validation, nous avons envisagé de proposer des prototypes pour les interféromètres de complexité croissante<sup>4</sup> IOTA (2T), IOTA (3T), VLTI (4T), CHARA (6T), VLTI (6T) et VLTI (8T). L'équipe du LAOG a participé à l'atelier ESO/EII de Garching en avril 2005 avec plus de 6 posters et une double présentation orale des cas scientifiques et du concept. Suite à ces présentations, le STC a réclamé en octobre 2005 que l'ESO lance un appel d'offre d'études de phase A d'une instrumentation de seconde génération du VLTI pour décision au printemps 2006. Nos collègues anglais du laboratoire Cavendish de l'université de Cambridge présentait un projet d'instrument concurrent en optique de volume, BOBCAT, aux objectifs similaires à VITRUV mais sans la résolution spectrale mais avec un suiveur de franges intégré. L'atelier ESO/EII du printemps 2005, qui avait vu l'affrontement des concepts VITRUV et BOBCAT, n'avait pas permis de trancher. Malgré quelques réserves dans l'équipe au LAOG, j'ai proposé à C. Haniff et D. Buscher de joindre nos efforts pour proposer un seul instrument imageur qui reprendrait le meilleur de chaque concept : la résolution spectrale de VITRUV et un suiveur de franges interne comme dans BOBCAT. Nous avons décidé de présenter les deux solutions de recombinaison (optique de volume et optique intégrée) dans la réponse à

<sup>4</sup>La situation a un peu évoluée depuis lors.

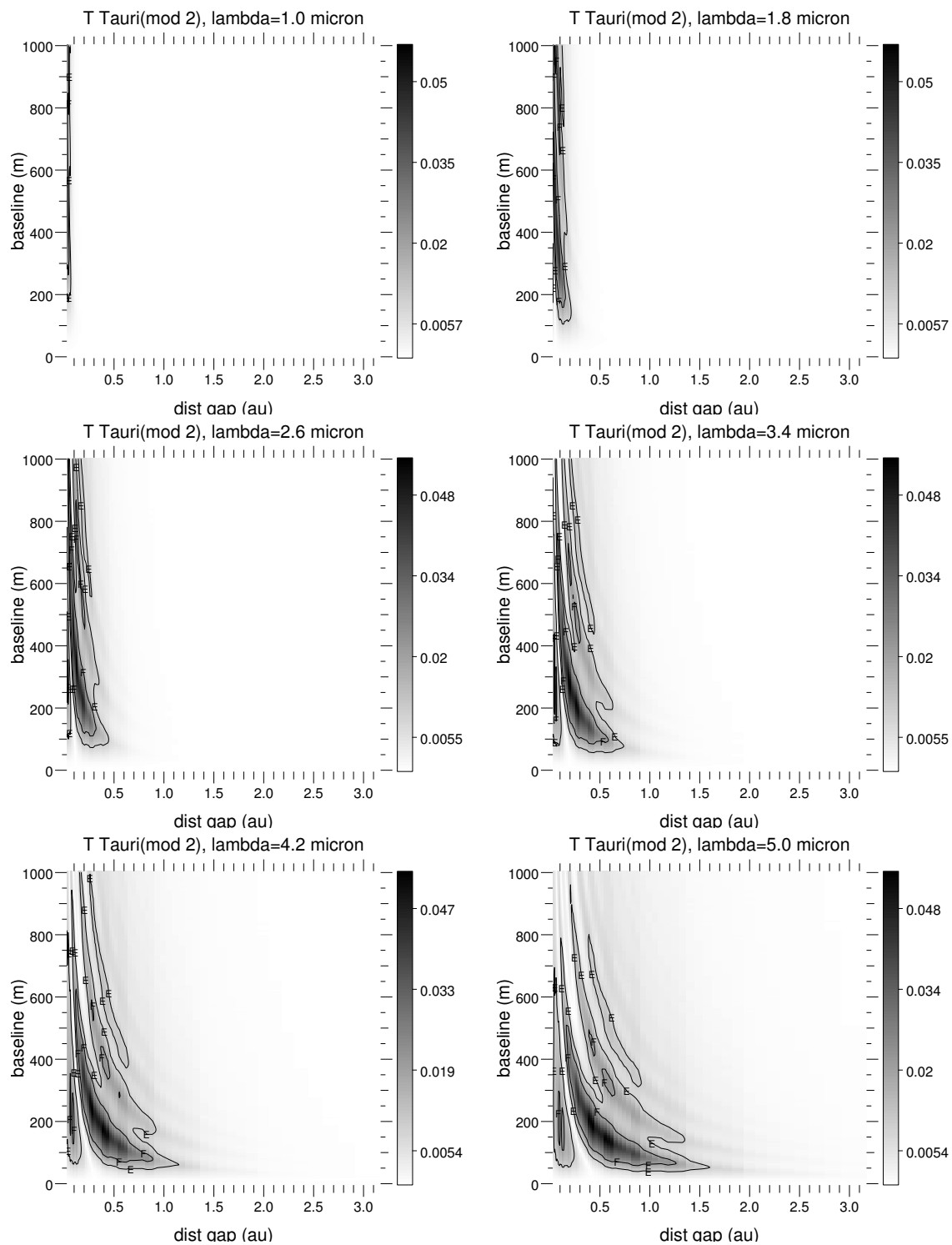


FIG. 4.3 – Modèle de disque de T Tauri à spectre plat. Cartes de détectabilité des sillons dans le disque en fonction de la séparation des miroirs de PÉGASE et de la longueur de ligne de base et pour différentes longueurs d'onde. Les contours correspondent à un seuil de détection de 1% et de 2%. Différence de visibilité des disques avec et sans sillons en fonction de la longueur d'onde et pour différentes lignes de base.

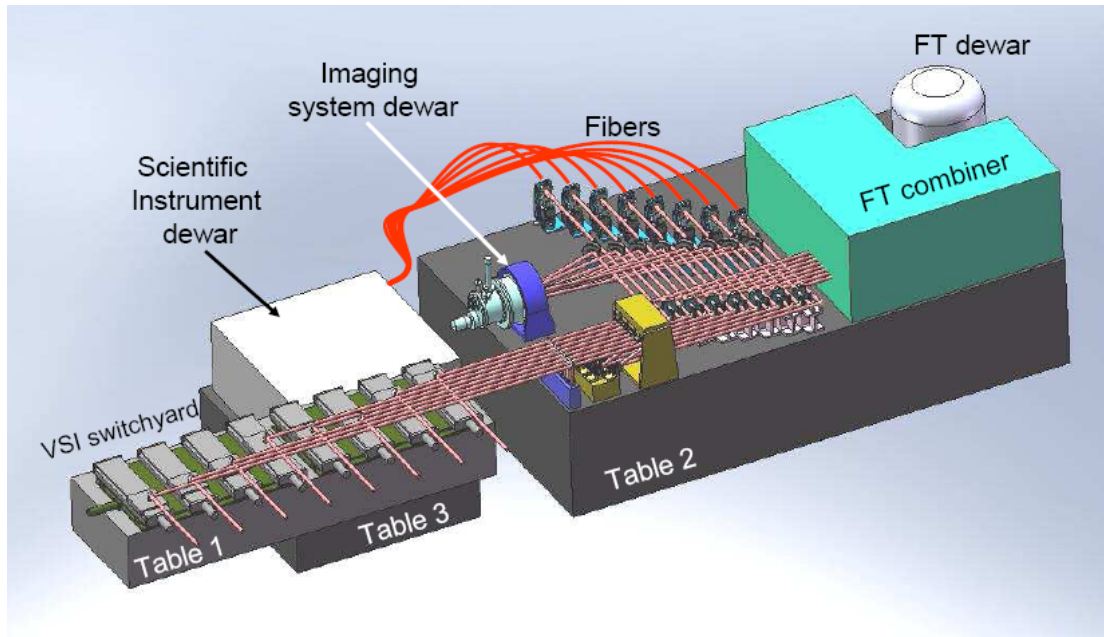


FIG. 4.4 – Vue générale de VSI. Les huit faisceaux du VLT sont dirigés à la fois vers un suiveur de franges et un spectrographe comprenant une puce optique permettant de recombiner 4 ou 6 faisceaux.

appel d'offre avec pour mission de choisir lors de la phase A. Cette proposition, appelée VSI pour VLTI Spectro-Imager, a suscité un intérêt fort en Europe puisqu'au final nous avons rassemblé 8 laboratoires issus de 7 pays européens différents. La phase A est en cours de finalisation.

Mener à bien VSI est essentiel dans le contexte de mes recherches sur les processus physiques dans les disques. Il est indispensable de poursuivre dans cette direction en associant des collègues ayant des objectifs similaires soit dans ce domaine, soit dans les autres domaines cités auparavant : surfaces stellaires, environnement des étoiles chaudes et des étoiles évoluées, voisinage de noyaux actifs de galaxie, exoplanètes,...

#### 4.4.4 A plus long terme

Je ne veux pas me trop lancer dans des perspectives trop futuristes, voire de la science-fiction, car ce type de démarche n'est pas dans mon caractère. Cependant je souhaite conclure ce mémoire sur des perspectives plus futuristes. En restant dans le domaine entre la formation stellaire et les techniques à très haute résolution, il me semble qu'il faut absolument aller vers des longueurs d'onde plus courtes. Bien sûr le domaine visible est intéressant car c'est un domaine où il y a des traceurs importants comme les raies de l'hydrogène (élément très abondant dans l'univers), mais ma préférence serait d'aller directement dans le domaine des rayons X. Ceci pour plusieurs raisons :

- dans le cadre de la formation stellaire et planétaire, si on se rapproche de la surface stellaire, les phénomènes se produisent à plus haute énergie. Les étoiles jeunes sont connues pour être une source importante de rayons X. Ces derniers sont formés dans les chocs d'accrétion qui apparaissent lorsque la matière tombe sur la surface de

l'étoile.

- pour imager la surface de ces étoiles situées au-delà d'une centaine de parsecs et qui ont un diamètre comparable à celui du soleil, il faut bien gagner un facteur 10 en résolution spatiale. Ce gain est accessible soit en augmentant les lignes de bases soit en travaillant à longueur d'onde plus courte ce qui serait le cas de l'interférométrie rayon X.
- finalement, on peut aussi faire le rapprochement avec les disques d'accrétion des AGN dont le pic d'émission est dans les rayons X. Cependant, pour imager les disques d'AGN de la même manière que je prévois de le faire pour les disques d'étoiles jeunes, il faut passer dans le domaine des rayons X.

Je suis convaincu qu'à terme les astronomes réussiront à faire fonctionner l'interférométrie dans les rayons X. Il y a d'ailleurs déjà un projet de mission spatiale appelé MAXIM<sup>5</sup> qui est proposé par la NASA (Gendreau et al. 2004; Cash & Gendreau 2004). Cela m'intéresserait à terme de me plonger dans cet univers...

---

<sup>5</sup><http://maxim.gsfc.nasa.gov>



# Bibliographie

- Ábrahám, P., Mosoni, L., Henning, T., et al. 2006, *A&A*, 449, L13
- Adams, F. C., Shu, F. H., & Lada, C. J. 1988, *ApJ*, 326, 865
- Akeson, R. L., Boden, A. F., Monnier, J. D., et al. 2005, *ApJ*, 635, 1173
- Akeson, R. L., Ciardi, D. R., van Belle, G. T., & Creech-Eakman, M. J. 2002, *ApJ*, 566, 1124
- Akeson, R. L., Ciardi, D. R., van Belle, G. T., Creech-Eakman, M. J., & Lada, E. A. 2000, *ApJ*, 543, 313
- Baldwin, J. E., Beckett, M. G., Boysen, R. C., et al. 1996, *A&A*, 306, L13+
- Basri, G. & Bertout, C. 1989, *ApJ*, 341, 340
- Bell, K. R. & Lin, D. N. C. 1994, *ApJ*, 427, 987
- Benech, P. 1997, Review on integrated optics technology (Integrated Optics for Astronomical Interferometry), 47–+
- Benson, J. A., Hutter, D. J., Elias, II, N. M., et al. 1997, *AJ*, 114, 1221
- Berger, J.-P., Benech, P., Schanen-Duport, I., et al. 2000a, in *Proc. SPIE Vol. 4006*, p. 986-995, *Interferometry in Optical Astronomy*, Pierre J. Lena; Andreas Quirrenbach; Eds., ed. P. J. Lena & A. Quirrenbach, 986–995
- Berger, J. P., Haguenaue, P., Kern, P., et al. 2001, *A&A*, 376, L31
- Berger, J.-P., Malbet, F., Colavita, M. M., et al. 2000b, in *Proc. SPIE Vol. 4006*, p. 597-604, *Interferometry in Optical Astronomy*, Pierre J. Lena; Andreas Quirrenbach; Eds., ed. P. J. Lena & A. Quirrenbach, 597–604
- Berger, J. P., Rousselet-Perraut, K., Kern, P., et al. 1999, *A&AS*, 139, 173
- Bertout, C. 1989, *ARA&A*, 27, 351
- Bertout, C., Basri, G., & Bouvier, J. 1988, *ApJ*, 330, 350
- Bouvier, J. & Malbet, F. 2001, *Dossier Pour La Science*, 30, 84
- Burrows, C. J., Stapelfeldt, K. R., Watson, A. M., et al. 1996, *ApJ*, 473, 437

- Carleton, N. P., Traub, W. A., Lacasse, M. G., et al. 1994, in Proc. SPIE Vol. 2200, p. 152-165, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge ; Ed., ed. J. B. Breckinridge, 152–165
- Cash, W. C. & Gendreau, K. C. 2004, in Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, Vol. 5491, 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.199, ed. W. A. Traub, 199–+
- Chesneau, O., Nardetto, N., Millour, F., et al. 2007, *A&A*, 464, 119
- Chiang, E. I. & Goldreich, P. 1997, *ApJ*, 490, 368
- Chiang, E. I. & Goldreich, P. 1999, *ApJ*, 519, 279
- Colavita, M. M., Shao, M., Hines, B. E., et al. 1994, in Proc. SPIE Vol. 2200, p. 89-97, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge ; Ed., ed. J. B. Breckinridge, 89–97
- Colavita, M. M., Wallace, J. K., Hines, B. E., et al. 1999, *ApJ*, 510, 505
- Coudé du-Foresto, V. & Ridgway, S. T. 1992, in High-Resolution Imaging by Interferometry, ed. J. M. Beckers & F. Merkle, 731–+
- D’Alessio, P., Calvet, N., Hartmann, L., Lizano, S., & Cantó, J. 1999, *ApJ*, 527, 893
- D’Alessio, P., Canto, J., Calvet, N., & Lizano, S. 1998, *ApJ*, 500, 411
- di Francesco, J., Evans, II, N. J., Caselli, P., et al. 2007, in Protostars and Planets V, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 17–32
- Domiciano de Souza, A., Driebe, T., Chesneau, O., et al. 2007, *A&A*, 464, 81
- Dougados, C., Cabrit, S., Ferreira, J., et al. 2004a, *Ap&SS*, 292, 643
- Dougados, C., Cabrit, S., Ferreira, J., et al. 2004b, *Ap&SS*, 293, 45
- Drew, J. E., Busfield, G., Hoare, M. G., et al. 1997, *MNRAS*, 286, 538
- Dullemond, C. P. & Dominik, C. 2004, *A&A*, 421, 1075
- Dullemond, C. P., Dominik, C., & Natta, A. 2001, *ApJ*, 560, 957
- Dullemond, C. P., Hollenbach, D., Kamp, I., & D’Alessio, P. 2007, in Protostars and Planets V, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 555–572
- Durisen, R. H., Boss, A. P., Mayer, L., et al. 2007, in Protostars and Planets V, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 607–622
- Dutrey, A., Guilloteau, S., Duvert, G., et al. 1996, *A&A*, 309, 493

- Dutrey, A., Guilloteau, S., & Ho, P. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 495–506
- Dutrey, A., Guilloteau, S., & Simon, M. 1994, *A&A*, 286, 149
- Ferreira, J. 1997, *A&A*, 319, 340
- Froehly, C. 1982, in *Scientific importance of high angular resolution at infrared and optical wavelengths; Proceedings of the Conference, Garching, West Germany, March 24-27, 1981. (A83-25826 10-89) Garching, West Germany, European Southern Observatory, 1982, p. 285-293; Discussion, p. 293., 285–293*
- Furlan, E., Hartmann, L., Calvet, N., et al. 2006, *ApJS*, 165, 568
- Gendreau, K. C., Cash, W. C., Shipley, A. F., & White, N. E. 2004, in *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, Vol. 5168, Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy. Edited by Citterio, Oberto; O'Dell, Stephen L. Proceedings of the SPIE, Volume 5168, pp. 420-434 (2004)., ed. O. Citterio & S. L. O'Dell, 420–434*
- Haguenauer, P. 2001, PhD thesis, PhD Thesis, Universite de Grenoble, 2001. 222 p.
- Haguenauer, P., Berger, J.-P., Rousselet-Perraut, K., et al. 2000, *Appl. Opt.*, 39, 2130
- Hartmann, L. & Kenyon, S. J. 1996, *ARA&A*, 34, 207
- Herbig, G. H., Petrov, P. P., & Duemmler, R. 2003, *ApJ*, 595, 384
- Hillenbrand, L. A., Strom, S. E., Vrba, F. J., & Keene, J. 1992, *ApJ*, 397, 613
- Hollenbach, D. J., Yorke, H. W., & Johnstone, D. 2000, *Protostars and Planets IV*, 401
- Hubeny, I. 1990, *ApJ*, 351, 632
- Huss, G., Delage, L., Reynaud, F., Schanen-Duport, I., & Napoleoni, S. 2003, in *Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 338-347 (2003)., ed. W. A. Traub, 338–347*
- Isella, A. & Natta, A. 2005, *A&A*, 438, 899
- Isella, A., Tatulli, E., Natta, A., & Testi, L. 2007, in *Proceedings of the IAU Symposium 243 "Star-disk interaction in young stars", ed. J. Bouvier & I. Appenzeller, Vol. in press*
- Kenyon, S. J. & Hartmann, L. W. 1991, *ApJ*, 383, 664
- Kern, P., Malbet, F., Schanen-Duport, I., & Benech, P. 1997, *Integrated optics single-mode interferometric beam combiner for near infrared astronomy (Integrated Optics for Astronomical Interferometry)*, 195–+
- Kern, P. Y., Malbet, F., Berger, J.-P., et al. 2003, in *Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 312-320 (2003)., ed. W. A. Traub, 312–320*



- Kraus, S., Schloerb, F. P., Traub, W. A., et al. 2005, *AJ*, 130, 246
- Krist, J. E., Stapelfeldt, K. R., Ménard, F., Padgett, D. L., & Burrows, C. J. 2000, *ApJ*, 538, 793
- Labadie, L., Kern, P., Schanen, I., et al. 2003, in *SF2A-2003 : Semaine de l'Astrophysique Francaise*, ed. F. Combes, D. Barret, T. Contini, & L. Pagani, 343–+
- Labeyrie, A. 1975a, *ApJ*, 196, L71
- Labeyrie, A. 1975b, *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 65, 1191
- Lachaume, R. 2004, *A&A*, 422, 171
- Lachaume, R., Malbet, F., & Monin, J.-L. 2003, *A&A*, 400, 185
- Lacour, S. 2007, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI
- Laurent, E., Rousselet-Perraut, K., Benech, P., et al. 2002, *A&A*, 390, 1171
- Le Bouquin, J.-B. & Tatulli, E. 2006, *MNRAS*, 372, 639
- Lebouquin, J.-B., Labeye, P., Malbet, F., et al. 2006, *A&A*, 450, 1259
- Levison, H. F., Morbidelli, A., Gomes, R., & Backman, D. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 669–684
- Lissauer, J. J. & Stevenson, D. J. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 591–606
- Lynden-Bell, D. & Pringle, J. E. 1974, *MNRAS*, 168, 603
- Malbet, F. 1992, PhD thesis, AA(Institut d'Astrophysique de Paris (France) ; Département de Recherche Spatiale, Observatoire de Meudon (France) ; Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire)
- Malbet, F. 2007, in *Proceedings of the IAU Symposium 243 "Star-disk interaction in young stars"*, ed. J. Bouvier & I. Appenzeller, Vol. in press (ArXiv preprint : 0708.3359)
- Malbet, F., Benisty, M., de Wit, W.-J., et al. 2007, *A&A*, 464, 43
- Malbet, F. & Berger, J.-P. 2001, in *SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise*, ed. Societe Francaise d'Astronomie et d'Astrophysique, 457–+
- Malbet, F., Berger, J.-P., Colavita, M. M., et al. 1998, *ApJ*, 507, L149
- Malbet, F., Berger, J.-P., Garcia, P., et al. 2005a, *ArXiv Astrophysics e-prints*
- Malbet, F., Berger, J.-P., Kern, P. Y., et al. 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.439, ed. W. A. Traub, 439–+
- Malbet, F. & Bertout, C. 1991, *ApJ*, 383, 814

- Malbet, F. & Bertout, C. 1995, *A&AS*, 113, 369
- Malbet, F., Chelli, A., & Petrov, R. G. 2000a, in *Proc. SPIE Vol. 4006*, p. 233-242, *Interferometry in Optical Astronomy*, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., ed. P. J. Lena & A. Quirrenbach, 233–242
- Malbet, F. & Gay, J. 1996, *IVOIRE : Insertion d'une voie infrarouge sur REGAIN*, Tech. rep., LAOG/OCA
- Malbet, F., Kern, P., Berger, J.-P., et al. 2002, in *Scientific Drivers for ESO Future VLT/VLTI Instrumentation : Proceedings of the ESO Workshop Held in Garching, Germany, 11-15 Juni 2001*, ESO ASTROPHYSICS SYMPOSIA. ISBN 3-540-43755-X. Edited by J. Bergeron and G. Monnet. Springer-Verlag, 2002, p. 303, ed. J. Bergeron & G. Monnet, 303–+
- Malbet, F., Kern, P., Schanen-Duport, I., et al. 1999, *A&AS*, 138, 135
- Malbet, F., Kern, P. Y., Berger, J.-P., et al. 2006, in *Advances in Stellar Interferometry*. Edited by Monnier, John D. ; Schöller, Markus ; Danchi, William C.. *Proceedings of the SPIE*, Volume 6268, pp. 62680Y (2006).
- Malbet, F., Lachaume, R., Berger, J.-P., et al. 2005b, *A&A*, 437, 627
- Malbet, F., Lachaume, R., & Monin, J.-L. 2001, *A&A*, 379, 515
- Malbet, F., Perrier, C., Mouillet, D., et al. 1995, *VIRGID : Voie infrarouge pour GI2T*, Tech. rep., LAOG
- Malbet, F. & Perrin, G., eds. 2007, *Observation and Data reduction with the Very Large Telescope Interferometer (New Astronomy Reviews (Elsevier Science))*
- Malbet, F., Petrov, R., Driebe, T., et al. 2003a, *AMBER Guaranteed Time Observations*, Tech. rep., ESO
- Malbet, F., Petrov, R. G., Tallon-Bosc, I., et al. 2003b, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub . *Proceedings of the SPIE*, Volume 4838, pp. 1163-1170 (2003)., ed. W. A. Traub, 1163–1170
- Malbet, F., Richici, A., Bloeker, T., et al. 2000b, *AMBER Science Analysis Report*, Tech. rep., AMBER consortium
- Malbet, F., Tallon-Bosc, I., Hofmann, K. H., Mège, P., & Perraut, K. 2000c, *AMBER Instrument Analysis Report*, Tech. rep., AMBER consortium
- Meilland, A., Millour, F., Stee, P., et al. 2007a, *A&A*, 464, 73
- Meilland, A., Stee, P., Vannier, M., et al. 2007b, *A&A*, 464, 59
- Ménard, F. & Bertout, C. 1999, in *NATO ASIC Proc. 540 : The Origin of Stars and Planetary Systems*, ed. C. J. Lada & N. D. Kylafis, 341–+

- Meyer, M. R., Backman, D. E., Weinberger, A. J., & Wyatt, M. C. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 573–588
- Millan-Gabet, R., Malbet, F., Akeson, R., et al. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 539–554
- Millan-Gabet, R., Monnier, J. D., Akeson, R. L., et al. 2006a, *ApJ*, 641, 547
- Millan-Gabet, R., Monnier, J. D., Berger, J.-P., et al. 2006b, *ApJ*, 645, L77
- Millan-Gabet, R., Schloerb, F. P., & Traub, W. A. 2001, *ApJ*, 546, 358
- Millan-Gabet, R., Schloerb, F. P., Traub, W. A., et al. 1999, *ApJ*, 513, L131
- Millour, F., Petrov, R. G., Chesneau, O., et al. 2007, *A&A*, 464, 107
- Monin, J.-L. & Bouvier, J. 2000, *A&A*, 356, L75
- Monnier, J. D. 2003, *Reports of Progress in Physics*, 66, 789
- Monnier, J. D., Barry, R. K., Traub, W. A., et al. 2006a, *ApJ*, 647, L127
- Monnier, J. D., Berger, J.-P., Millan-Gabet, R., et al. 2006b, *ApJ*, 647, 444
- Monnier, J. D. & Millan-Gabet, R. 2002, *ApJ*, 579, 694
- Monnier, J. D., Traub, W. A., Schloerb, F. P., et al. 2004, *ApJ*, 602, L57
- Mottier, P. 1997, *Integrated optics and micro-optics at LETI (Integrated Optics for Astronomical Interferometry)*, 63–+
- Muzerolle, J., Calvet, N., Hartmann, L., & D’Alessio, P. 2003, *ApJ*, 597, L149
- Muzerolle, J., D’Alessio, P., Calvet, N., & Hartmann, L. 2004, *ApJ*, 617, 406
- Mège, P. 2002, PhD thesis, AA(Laboratoire d’astrophysique de Grenoble)
- Natta, A., Grinin, V., & Mannings, V. 2000, *Protostars and Planets IV*, 559
- Natta, A., Prusti, T., Neri, R., et al. 2001, *A&A*, 371, 186
- Nicolini, G., Woitke, P., & Lopez, B. 2003, *A&A*, 399, 703
- Papaloizou, J. C. B., Nelson, R. P., Kley, W., Masset, F. S., & Artymowicz, P. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 655–668
- Paresce, F., Mourard, D., Bedding, T., et al. 1996, *The Messenger*, 83, 14
- Perrin, G. & Malbet, F., eds. 2003, *Observing with the VLT interferometer*
- Petrov, P. P. & Herbig, G. H. 1992, *ApJ*, 392, 209
- Petrov, R. G., Malbet, F., Weigelt, G., et al. 2007, *A&A*, 464, 1

- Pinte, C., Ménard, F., Duchêne, G., & Bastien, P. 2006, *A&A*, 459, 797
- Quanz, S. P., Henning, T., Bouwman, J., Ratzka, T., & Leinert, C. 2006, *ApJ*, 648, 472
- Ragland, S., Traub, W. A., Berger, J.-P., et al. 2006, *ApJ*, 652, 650
- Robbe-Dubois, S., Lagarde, S., Petrov, R. G., et al. 2007, *A&A*, 464, 13
- Rousselet-Perraut, K., Haguenaue, P., Petmezakis, P., et al. 2000, in *Proc. SPIE Vol. 4006*, p. 1042-1051, *Interferometry in Optical Astronomy*, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., ed. P. J. Lena & A. Quirrenbach, 1042–1051
- Schanen Duport, I., Benech, P., & Rimet, R. 1994, *Appl. Opt.*, 33, 5954
- Schanen-Duport, I., Kern, P., & Malbet, F. 1997, *Optical waveguides made by ion exchange for astronomical interferometry applications at the wavelength of 2.2  $\mu\text{m}$  (Integrated Optics for Astronomical Interferometry)*, 99–+
- Shakura, N. I. & Sunyaev, R. A. 1973, *A&A*, 24, 337
- Stapelfeldt, K. R., Krist, J. E., Menard, F., et al. 1998, *ApJ*, 502, L65+
- Stee, P. & de Araujo, F. X. 1994, *A&A*, 292, 221
- Tatulli, E., Isella, A., Natta, A., et al. 2007a, *A&A*, 464, 55
- Tatulli, E. & LeBouquin, J.-B. 2006, *MNRAS*, 368, 1159
- Tatulli, E., Mège, P., & Chelli, A. 2004, *A&A*, 418, 1179
- Tatulli, E., Millour, F., Chelli, A., et al. 2007b, *A&A*, 464, 29
- Thiébaud, E., Garcia, P. J. V., & Foy, R. 2003, *Ap&SS*, 286, 171
- Traub, W. A., Berger, J.-P., Brewer, M. K., et al. 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.482, ed. W. A. Traub, 482–+
- Tuthill, P. G., Monnier, J. D., & Danchi, W. C. 2001, *Nat*, 409, 1012
- Udry, S., Fischer, D., & Queloz, D. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 685–699
- Varnière, P., Blackman, E. G., Frank, A., & Quillen, A. C. 2006, *ApJ*, 640, 1110
- Vinković, D., Ivezić, Ž., Jurkić, T., & Elitzur, M. 2006, *ApJ*, 636, 348
- Vinković, D., Ivezić, Ž., Miroshnichenko, A. S., & Elitzur, M. 2003, *MNRAS*, 346, 1151
- von der Lühse, O. 1997, in *Science with the VLT Interferometer*, ed. F. Paresce, 13–+

Ward-Thompson, D., André, P., Crutcher, R., et al. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 33–46

Watson, A. M., Stapelfeldt, K. R., Wood, K., & Ménard, F. 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil, 523–538

Weber, V., Barillot, M., Haguenaier, P., et al. 2003, in *EAS Publications Series*, ed. C. Aime & R. Soummer, 319–325

Weigelt, G., Kraus, S., Driebe, T., et al. 2007, *A&A*, 464, 87

Wilkin, F. P. & Akeson, R. L. 2003, *Ap&SS*, 286, 145

Wolf, S., Henning, T., & Stecklum, B. 1999, *A&A*, 349, 839

# Abréviations

**Alma** *Atacama Large Millimetric Array*, grand projet interférométrique de l'ESO dans le domaine des longueurs d'onde millimétriques.

**Agn** *Active Galactic Nucleus*, noyau actif de galaxie.

**At** *Auxiliary Telescope*, télescope de 1.8 m du VLT.

**Amber** *Astronomical Multi-BEam Recombiner*, instrument proche infrarouge du VLT recombinaison jusqu'à trois télescopes.

**Ashra** *Action spécifique en haute résolution angulaire*, structure du CNRS pour structurer la discipline.

**Bobcat** *Bulk-Optics Beam Combiner And fringe Tracker*, instrument de seconde génération proposé par nos collègues de Cambridge.

**Cea** *Centre d'études atomiques*, établissement avec lequel nous collaborons à Grenoble et notamment avec l'un de ses départements, le LETI.

**Caup** *Center for Astrophysics of the University of Porto*.

**Coast** *Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope*.

**Chara** *Center for High Angular Resolution Astronomy*, interféromètre de 6 télescopes situés au sommet du Mont Wilson près de Los Angeles en Californie.

**Cnes** *Centre National d'Études Spatiales*, agence spatiale française.

**Cnrs** *Centre National de Recherche Scientifique*, établissement de recherche français auquel j'appartiens.

**Cral** *Centre de Recherche en Astronomie de Lyon*, laboratoire lyonnais.

**Cso** *Compagnie de Senseurs Optiques*.

**Darwin** mission spatiale européenne de recherche et caractérisation de planète tellurique habitable.

**Dea** *Diplôme d'études approfondies*.

**Despa** *Département de recherche spatiale*, ancien nom du LESIA.

**Eii** *European Interferometry Initiative*, association des laboratoires européens intéressés en interférométrie optique.

**Esa** *European Space Agency*, agence spatiale européenne.

**Eso** *European Southern Observatory*, observatoire européen austral qui gère les télescopes européens du Chili et notamment le VLT.

**Finito** *Fringe-tracking Instrument of Nice and Torino*, suiveur de franges pour la première génération d'instrument du VLT.

- Fluor** *Fiber Linked Unit for Optical Recombination*, recombineur fibré proche infrarouge à deux télescopes du DESPA, installé initialement sur IOTA, puis sur CHARA.
- Fost** *FOrmation STellaire et planétaire, naines brunes*, une des 4 équipes du LAOG.
- Fsu** *Fringe Sensor Unit*, senseur de franges
- GeeO** *Groupement d'électromagnétisme expérimental et d'optoélectronique*
- Gi2t** *Grand Interféromètre à 2 Télescopes*, interféromètre français installé sur le plateau du Calern près de Grasse.
- Gril** *Groupe de Recherche et de réalisation Instrumentale de LAOG*, une des 4 équipes du LAOG.
- Gto** *Guaranteed Time Observations*, observations de temps garanti.
- Hess** *High Energy Stereoscopic System*, observatoire situé en Namibie pour la détection de rayons  $\gamma$ .
- Iau** *International Astronomical Union*
- Igr** *Interferometry GRoup*, groupe interférométrique d'AMBER.
- Imep** *Institut de Micro-électronique, Électromagnétisme et Photonique*, laboratoire grenoblois spécialiste d'optique intégrée.
- Iram** *Institut de Radio Astronomie Millimétrique*
- Ircom** *Institut de Recherche en Communications Optiques et Micro-ondes*
- Ionic** *Integrated Optics Near Infrared Combiner*, est le nom générique de nos instruments recombineurs réalisés en optique intégrée.
- Iota** *Infrared and Optical Telescope Array*, interféromètre à trois télescopes installé en Arizona sur le Mont Hopkins près de Tucson.
- Ir** infrarouge
- Isaac** *Infrared Spectrometer And Array Camera*, spectrographe et imageur infrarouge du VLT.
- Isac** *Interferometry Science Advisory Committee*.
- Isi** *Infrared Spatial Interferometer*, interféromètre à trois télescopes fonctionnant dans l'infrarouge moyen et situé sur le Mont Wilson.
- Ivoire** *Insertion d'une VOie Infrarouge sur REgain*, projet d'instrument infrarouge pour le Gi2T.
- Jmmc** *Jean-Marie Mariotti Center*, centre d'expertise française d'interférométrie regroupant une douzaine de laboratoires en France baptisé en mémoire de J.-M. Mariotti.
- Jpl** *Jet Propulsion Laboratory*
- Ki** *Keck Interferometer*, interféromètre américain composé de deux télescopes de 10m.
- Laog** *Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble*, mon laboratoire de recherche.
- Lemo** *Laboratoire d'Electromagnétisme, Micro-ondes et Opto-électronique*, ancien nom du laboratoire IMEP avec qui nous avons collaboré sur les techniques d'optique intégrée.
- Lesia** *Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique*, nouveau nom du DESPA, avec qui nous collaborons.

- Leti** *Laboratoire d'Électronique et de Technologies de l'Information*, laboratoire du CEA à Grenoble avec lequel nous collaborons sur la technique d'optique intégrée.
- Luan** *Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice*, un de nos partenaires dans le projet AMBER.
- Maii** *Multi Aperture Imaging Interferometer*, contrat ESA de réalisation d'un prototype labo d'interféromètre à franges noires
- McFost** Code Monte Carlo de transfert dans les disque développé par F. Ménard et C. Pinte (Pinte et al. 2006).
- Midi** *MID-Infrared instrument for the VLTI*, deuxième instrument du VLTI.
- Mona** unité de recombinaison en optique fibrée de l'instrument VINCI.
- Mpe** *Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik*, laboratoire allemand situé à Garching près de Munich
- Mpg** *Max-Planck Gesellschaft*, équivalent allemand du CNRS.
- Mpia** *Max-Planck-Institut für Astronomie*, laboratoire allemand situé à Heidelberg.
- Mpifr** *Max-Planck-Institut für Radioastronomie* laboratoire allemand situé à Bonn, un de nos partenaires dans l'instrument AMBER.
- Nicmos** *Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer* est un détecteur qui a été développé pour un des instruments du télescope spatial Hubble.
- Npoi** *Navy Prototype Optical Interferometer*
- Oaa** *Osservatorio Astrofisico di Arcetri*
- Oca** *Observatoire de la Côte d'Azur*, un de nos partenaires dans l'instrument AMBER.
- Pégase** projet de mission spatiale précurseur de DARWIN proposé au CNES dans le cadre du vol en formation
- Picnic** mosaïque de détecteurs proche infrarouge
- Pnp** *Programme National de Planétologie*.
- Pnps** *Programme National de Physique Stellaire*.
- Pnhraa** *Programme National de Haute Résolution Angulaire et d'Astrophysique*, ancien nom de l'ASHRA, structure du CNRS pour coordonner les équipes françaises travaillant en haute résolution angulaire.
- Prima** *Phase Reference Imaging and Microarcsecond Astrometry*, instrument du VLTI destiné à l'imagerie par référence de phase et à l'astrométrie.
- Pti** *Palomar Testbed Interferometer*, interféromètre astrométrique situé en Californie sur le Mont Palomar.
- R&d** Recherche et développement.
- Regain** *REcombineur du GrAnd INterféromètre*, instrument du GI2T.
- Simeca** code de transfert paramétrique d'un vent développé par P. Stee (Stee & de Araujo 1994).
- Sed** *Spectral Energy Distribution*, distribution spectrale d'énergie.
- Sf2a** *Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique*.



- Sgr** *Science GRoup*, groupe scientifique d'AMBER.
- Sph** *Smoothed Particle Hydrodynamics*, méthode lagrangienne de calcul utilisé pour la simulation d'écoulement fluide, utilisé pour simuler notamment des écoulements dans des disques.
- Stc** *Science and Techincal Committee*, comité de l'ESO qui conseille sur la science à faire et les instruments à construire.
- Spie** Société américaine d'optique avancée qui organise des conférences en instrumentation astronomique.
- Sspd** *Superconducting Single-Photon Detectors*, nouveaux types de détecteurs.
- Tagi** *Technical Advisory Group for Interferometry*, un comité mis en place à l'ESO.
- Ut** *Unit Telescope*, télescope de 8 m du VLT.
- Vima** *VLT Interferometer Main Array*, réseau interférométrique du VLTI constitué des télescopes de 8m de VLT.
- Vinci** *VLT Interferometer Near-infrared Commissioning Instrument*, premier instrument du VLTI, utilisé pour les premiers tests avec 2 télescopes.
- Virgid** *Voie infrarouge pour G12T*, projet d'un instrument proche infrarouge pour G12T.
- Visa** *VLT Interferometer Sub Array*, réseau interférométrique du VLTI constitué des télescopes de 2m de VLT.
- Vitruv** projet d'instrument de seconde génération pour le VLTI proposé par le LAOG.
- Vlti** *Very Large Telescope Interferometer*, interféromètre européen localisé au nord du Chili sur le Mont Paranal et constitué de 4 télescopes de 8 m et de 4 télescopes de 1.8m.
- Vlt** *Very Large Telescope*, observatoire européen localisé au nord du Chili.
- Vsi** *VLTI Spectro-Imager*, projet d'instrument de second génération pour le VLTI, résultant de la fusion des projets VITRUV et BOBCAT.

# Curriculum vitae

## ÉTAT CIVIL

- Fabien MALBET
- né le 25 novembre 1967 à Fontenay-aux-Roses (92),
- marié, 3 enfants

## TITRES et DIPLÔMES

- École Normale Supérieure 1987-1991
- Agrégation de Sciences Physiques juillet 1991
- Doctorat d’Astrophysique Paris 7, *Environnement circumstellaire des étoiles jeunes*, dir. C. Bertout soutenue en décembre 1992

## DISTINCTIONS

- Lauréat du Prix Jeune Chercheur 2003 de la Société Française d’Astronomie et Astrophysique (SF2A)
- Nominé pour le Prix de l’Ingénieur de l’Année 2005, catégorie “Science” au nom du projet AMBER.

## POSITIONS

- Allocataire Moniteur Normalien, Université J. Fourier (Grenoble I), 1991-1992
- JPL Resident Research Associate, National Academy of Science (USA), 1993-1994
- Chargé de Recherche CNRS, 1995-

## INSTITUTS d’ACCUEIL

- Institut d’Astrophysique de Paris et DESPA Observatoire de Paris, 1989-1991
- Laboratoire d’Astrophysique de l’Observatoire de Grenoble, 1991-1992
- Jet Propulsion Laboratory, 1993-1994
- Laboratoire d’Astrophysique de l’Observatoire de Grenoble, 1995-

## THÈMES de RECHERCHE

- Physique des objets stellaires jeunes
- Instrumentation à haute résolution angulaire (coronographie, interférométrie)

### PUBLICATIONS : les cinq articles les plus représentatifs

- Malbet F., Benisty M., De Wit W., et al., 2007, *A&A* **464**, 43, *Disk and wind interaction in the young stellar object MWC 297 spatially resolved with VLTI/AMBER*
- Malbet F., Lachaume R., Berger J. P., et al., 2005, *A&A*, **437**, 627, *New insights on the AU-scale circumstellar structure of FU Orionis*
- Malbet F., Lachaume R., and Monin J.-L., 2001, *A&A* **379**, 515, *The vertical structure of T Tauri accretion disks II. Physical conditions in the disk.*
- Malbet F., Kern P., Schanen-Duport I., et al. 1999, *A&AS* **138**, 119, *Integrated optics for astronomical interferometry. I. Concept and astronomical applications*
- Malbet F. and Bertout C., 1995, *A&AS* **113**, 369, *Detecting T Tauri disks with optical long-baseline interferometry*

### DIRECTION de THÈSES

- Co-directeur de thèse de P. Mège (1998-2002). *Interférométrie avec des guides d'ondes optiques. Théorie et applications.* Thèse soutenue le 15/11/2002.
- Co-directeur de R. Lachaume (1999-2003). *Structure des disques d'accrétion autour des étoiles jeunes de faible masse.* Thèse soutenue le 04/04/2003.
- Co-directeur de thèse d'E. Tatulli (2001-2004). *Traitement du signal en interférométrie monomode dans le cadre du projet AMBER. Application à l'observation interférométrique de l'environnement des étoiles jeunes.* Thèse soutenue le 01/10/2004.
- Co-directeur de thèse de C. Delle Luche sur le traitement de la clôture de phase en interférométrie et son application à l'étude des systèmes multiples (2003-2005). Thèse interrompue au bout de 2 années.
- Directeur de thèse de C. Gil (2001-2006) en cotutelle avec T. Lago et P. Garcia de l'université de Porto. *Interférométrie et ses applications à l'étude de l'environnement proche des étoiles pré-séquence-principale.* Thèse soutenue le 22/12/2006.
- Directeur de thèse en cotutelle avec J. Surdej de l'université de Liège d'E. Herwats (2005-). *Etude de la zone de formation planétaire dans les disques autour des étoiles jeunes par interférométrie optique. Participation à l'étude système d'un instrument interférométrique de seconde génération pour le VLTI.*
- Directeur de thèse de S. Renard (2007-). *Imager les zones de formation des planètes autour des étoiles jeunes dans le cadre de reconstruction d'image pour le VLTI.*

### RESPONSABILITÉS INTERNATIONALES, NATIONALES ET LOCALES

- Principal Investigator de VSI/VITRUV, le spectro-imageur proche infrarouge du VLTI (2006-). Instrument en étude de phase A.
- Project Scientist d'AMBER, l'instrument proche infrarouge du VLTI (1997-)
- Membre du comité ISAC à l'ESO (Interferometry Science Advisory Committee, 1995-1999) et du comité TAGI (Technical Advisory Group for Interferometry, 1998-2000)
- Membre du comité ad-hoc du VLTI Implementation Committee en charge de la prospective VLTI 2005-2015 à l'ESO (2001-2003)
- Membre de l'équipe ESO *Science Demonstration Time* en charge des premières observations du VLTI (2001-)

- Membre du groupe ad-hoc du CNES (2007-).
- Membre du Conseil Scientifique du PNPS (2003-).
- Animateur du sujet fléché *Planètes extrasolaires* au sein du PNP (1999-2002)
- Membre élu (2003-2006) et nommé (1999-2002) du Conseil de Laboratoire du LAOG
- Responsable scientifique des activités interférométriques du LAOG (1998-)

## ORGANISATION de CONFÉRENCES

- Organisation locale (LOC) de la *Semaine de la SF2A 2007*. Grenoble, 2-6 juillet 2007.
- Organisation locale (LOC) du symposium IAU 243 *Star-disk interaction in young stars*. Grenoble, 21-25 mai 2007.
- Organisation avec G. Perrin de l'*EuroSummer School - Observation and Data Reduction with the Very Large Telescope*, Chateau de Goutelas, 4-16 juin 2006 (70 participants), budget de 70,000 Euros financé majoritairement par la Commission Européenne.
- Co-organisateur du workshop *The VLT Challenges for the Future* au colloque JENAM'2002, Porto, 5-7 September 2002.
- Organisation avec E. Lellouch de la Journée PNP à la recherche du premier photon exoplanétaire, Semaine de l'Astrophysique Française, Paris, 28 juin 2002.
- Organisation avec G. Perrin de l'*EuroWinter School - Observing with the Very Large Telescope*, Les Houches, 3-8 février 2002 (70 participants), budget de 70,000 Euros financé majoritairement par la Commission Européenne.
- Organisateur avec L. Testi de *Young Stellar Clusters : the Angular Limit*, Grenoble, 13-15 décembre 2001, la première école du réseau européen *Formation and Evolution of Young Stellar Clusters* (60 participants).
- Co-organisation des journées scientifiques du LAOG les 8-10 novembre 2000 à Évian.
- Organisation locale (LOC) du symposium IAU 182 *Herbig-Haro Flows and the Birth of Low-Mass Stars*. Chamonix, 20-26 janvier 1997 (200 participants). Édition des actes des posters (300 pages).
- Organisation avec P. Kern de la conférence *AstroFib'96 : Integrated Optics for Astronomical Interferometry*, Grenoble, 15-16 octobre 1996 (60 participants). Édition des actes (300 pages).

Participation aux *Science Organizing Committee (SOC)* des conférences suivantes : *The Origins of Stars and Planets : the VLT View*, Garching, 24-27 April 2001 ; *École CNRS sur le VLT*, Nice, 22-25 octobre 2001 ; *Interferometry for Optical Astronomy II (SPIE 4838)*, Hawaii, 22-28 August 2002 ; *New Frontiers in Stellar Interferometry (SPIE-AS05)*, Glasgow, 21-25 juin 2004 ; *From Disks To Planets : New Observations, Models and Theories*, Pasadena, 7-10 March 2005 ; Atelier PNPS *La physique Stellaire avec ALMA*, Montpellier, 14-15 novembre 2005 ; Forum quadriennal du PNPS, Nice, 27-29 septembre 2006 ; Eurosummer VLT school *Circumstellar disks and planets at very high angular resolution*, Porto, Portugal, 28 May - 8 June, 2007.

**ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT**

- Cours *Observing Young Stellar Objects with the Very Large Telescope Interferometer* à la *2nd European School on Jets from Young Stars : High Angular Resolution Observations*, Ile d'Elbe, 4-8 septembre 2006.
- Cours *Adverse effects in optical interferometry* à l'*EuroSummer School - Observation and Data Reduction with the Very Large Telescope*, Goutelas, 5-16 juin 2006.
- Cours *Détection d'exoplanètes par imagerie directe* lors de l'École de Goutelas 2005 "*Formation planétaire et exoplanètes*" (23-27 mai 2005, Chateau de Goutelas, France).
- Cours sur la préparation aux observations à l'école des Houches *EuroWinter School - Observing with the Very Large Telescope*, Les Houches, 3-8 février 2002
- Cours d'*Astrophysique et Haute Résolution Angulaire* au DEA *Astrophysique et Milieux Dilués* de l'université Joseph Fourier (Grenoble I) (2001-2003)
- Organisation des séances de travaux pratiques de l'école VLTI, Nice, 22-25 octobre 2001
- 2 cours à l'École d'été d'Interférométrie Millimétrique de l'IRAM (12-17 juin 2000)
- Intervention dans le cours de Traitement du signal du DEA d'Astrophysique de Grenoble (1999)
- *Mercredis de Meudon*, formation continue des professeurs de l'enseignement secondaire sur la coronographie stellaire (1999)

# Liste de publications

## Publications dans des revues à comité de lecture

1. Zhao M., Monnier J., Torres G., Boden A., Claret A., Millan-Gabet R., Pedretti E., Berger J. P., Traub W., Schloerb F., Carleton N., Kern P., Lacasse M., Malbet F., and Perraut K., 2007, *Astrophysical Journal*, 659, 626, *Physical Orbit for lambda Virginis and a Test of Stellar Evolution Models*
2. Millour F., Petrov R., Chesneau O., Bonneau D., Dessart L., Bechet C., Tallon-Bosc I., Tallon M., Thiébaud E., Vakili F., Malbet F., Mourard D., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Chelli A., Dugué M., Duvert G., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Perraut K., Puget P., Rantakyö F., Robbe-Dubois S., Roussel A., Tatulli E., Weigelt G., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clausse J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Domiciano de Souza A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Hofmann K. H., Kamm D., Kiekebusch M., Kraus S., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Spang A., Stee P., Stefanini P., Tasso D., Testi L., von der Lühse O., Valtier J. C., Vannier M., and Ventura N., 2007, *A&A*, 464, 107, *Direct constraint on the distance of  $\gamma^2$  Velorum from AMBER/VLTI observations*
3. Weigelt G., Kraus S., Driebe T., Petrov R., Hofmann K. H., Millour F., Chesneau O., Schertl D., Malbet F., Hillier J., Gull T., Davidson K., Domiciano de Souza A., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Chelli A., Dugué M., Duvert G., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Perraut K., Puget P., Rantakyö F., Robbe-Dubois S., Roussel A., Tatulli E., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clausse J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Kamm D., Kiekebusch M., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Mourard D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schöller

- M., Solscheid W., Spang A., Stee P., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., Tasso D., Testi L., Vakili F., von der Lüche O., Valtier J. C., Vannier M., Ventura N., Weis K., and Wittkowski M., 2007, *A&A*, 464, 87, *Near-infrared interferometry of eta Carinae with spectral resolutions of 1 500 and 12 000 using AMBER/VLTI*
4. Meilland A., Millour F., Stee P., Domiciano de Souza A., Petrov R., Mourard D., Jankov S., Robbe-Dubois S., Spang A., Aristidi E., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Chelli A., Dugué M., Duvert G., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Malbet F., Perraut K., Puget P., Rantakyro F., Roussel A., Tatulli E., Weigelt G., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clause J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Hofmann K. H., Kamm D., Kiekebusch M., Kraus S., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., Tasso D., Testi L., Vakili F., von der Lüche O., Valtier J. C., Vannier M., and Ventura N., 2007, *A&A*, 464, 73, *An asymmetry detected in the disk of kappa Canis Majoris with AMBER/VLTI*
  5. Tatulli E., Isella A., Natta A., Testi L., Marconi A., Malbet F., Stee P., Petrov R., Millour F., Chelli A., Duvert G., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Dugué M., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Perraut K., Puget P., Rantakyro F., Robbe-Dubois S., Roussel A., Weigelt G., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clause J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Domiciano de Souza A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Hofmann K. H., Kamm D., Kiekebusch M., Kraus S., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Mourard D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Spang A., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., Tasso D., Vakili F., von der Lüche O., Valtier J. C., Vannier M., and Ventura N., 2007, *A&A*, 464, 55, *Constraining the wind launching region in Herbig Ae stars : AMBER/VLTI spectroscopy of HD 104237*
  6. Tatulli E., Millour F., Chelli A., Duvert G., Acke B., Hernandez Utrera O., Hofmann K. H., Kraus S., Malbet F., Mège P., Petrov R., Vannier M., Zins G., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Dugué M., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Perraut K., Puget P., Rantakyro F., Robbe-Dubois S., Roussel A., Weigelt G., Accardo M., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clause J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Domiciano de Souza A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E.,

- Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Kamm D., Kiekebusch M., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Monin J. L., Mouillet D., Mourard D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Spang A., Stee P., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., Tasso D., Testi L., Vakili F., von der Lühe O., Valtier J. C., and Ventura N., 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 464, 29, *Interferometric data reduction with AMBER/VLTI. Principle, estimators, and illustration*
7. Malbet F., Benisty M., de Wit W. J., Kraus S., Meilland A., Millour F., Tatulli E., Berger J. P., Chesneau O., Hofmann K. H., Isella A., Natta A., Petrov R., Preibisch T., Stee P., Testi L., Weigelt G., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Chelli A., Dugué M., Duvert G., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Perraut K., Puget P., Rantakyro F., Robbe-Dubois S., Roussel A., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clausse J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Domiciano de Souza A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Kamm D., Kiekebusch M., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Mourard D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Spang A., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., and Tasso D., 2007, *A&A*, 464, 43, *Disk and wind interaction in the young stellar object MWC 297 spatially resolved with AMBER/VLTI*
8. Robbe-Dubois S., Lagarde S., Petrov R., Lisi F., Beckmann U., Antonelli P., Bresson Y., Martinot-Lagarde G., Roussel A., Salinari P., Vannier M., Chelli A., Dugué M., Duvert G., Gennari S., Glück L., Kern P., Le Coarer E., Malbet F., Millour F., Perraut K., Puget P., Rantakyro F., Tatulli E., Weigelt G., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clausse J. M., Colin J., Connot C., Delage L., Delboulbé A., Domiciano de Souza A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Hofmann K. H., Kamm D., Kiekebusch M., Kraus S., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Mourard D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchettini M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Spang A., Stee P., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., Tasso D., Testi L., Vakili F., von der Lühe O., Valtier J. C., and Ventura N., 2007, *A&A*, 464, 13, *Optical configuration and analysis of the AMBER/VLTI instrument*
9. Petrov R., Malbet F., Weigelt G., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Chelli A., Dugué M., Duvert G., Gennari S., Glück L., Kern P., Lagarde S., Le Coarer E., Lisi F., Millour F., Perraut K., Puget P., Rantakyro F., Robbe-Dubois S., Roussel



- A., Salinari P., Tatulli E., Zins G., Accardo M., Acke B., Agabi K., Altariba E., Arezki B., Aristidi E., Baffa C., Behrend J., Blöcker T., Bonhomme S., Busoni S., Cassaing F., Clausse J. M., Colin J., Connot C., Delboulbé A., Domiciano de Souza A., Driebe T., Feautrier P., Ferruzzi D., Forveille T., Fossat E., Foy R., Fraix-Burnet D., Gallardo A., Giani E., Gil C., Glentzlin A., Heiden M., Heininger M., Hernandez Utrera O., Hofmann K. H., Kamm D., Kiekebusch M., Kraus S., Le Contel D., Le Contel J. M., Lesourd T., Lopez B., Lopez M., Magnard Y., Marconi A., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mathias P., Mège P., Monin J. L., Mouillet D., Mourard D., Nussbaum E., Ohnaka K., Pacheco J., Perrier C., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Richichi A., Robini A., Sacchetti M., Schertl D., Schöller M., Solscheid W., Spang A., Stee P., Stefanini P., Tallon M., Tallon-Bosc I., Tasso D., Testi L., Vakili F., von der Lühse O., Valtier J. C., Vannier M., and Ventura N., 2007, *A&A*, 464, 1, *AMBER, the near-infrared spectro-interferometric three-telescope VLTI instrument*
10. Chesneau O., Nardetto N., Millour F., Hummel C., Domiciano de Souza A., Bonneau D., Vannier M., Rantakyro F., Spang A., Malbet F., Mourard D., Bode M., O'Brien T., Skinner G., Petrov R., Stee P., Tatulli E., and Vakili F., 2007, *A&A*, 464, 119, *AMBER/VLTI interferometric observations of the recurrent Nova RS Ophiuchii 5.5 days after outburst*
  11. Domiciano de Souza A., Driebe T., Chesneau O., Hofmann K. H., Kraus S., Miroshnichenko A., Ohnaka K., Petrov R., Preisbisch T., Stee P., Weigelt G., Lisi F., Malbet F., and Richichi A., 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 464, 81, *AMBER/VLTI and MIDI/VLTI spectro-interferometric observations of the B[e] supergiant CPD-57°2874. Size and geometry of the circumstellar envelope in the near- and mid-IR*
  12. Meilland A., Stee P., Vannier M., Millour F., Domiciano de Souza A., Malbet F., Martayan C., Paresce F., Petrov R., Richichi A., and Spang A., 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 464, 59, *First direct detection of a Keplerian rotating disk around the Be star alpha Arae using AMBER/VLTI*
  13. Ragland S., Traub W., Berger J. P., Danchi W., Monnier J., Willson L., Carleton N., Lacasse M., Millan-Gabet R., Pedretti E., Schloerb F., Cotton W., Townes C., Brewer M., Haguenaue P., Kern P., Labeye P., Malbet F., Malin D., Pearlman M., Perraut K., Souccar K., and Wallace G., 2006, *ApJ*, 652, 650, *First Surface-resolved Results with the Infrared Optical Telescope Array Imaging Interferometer : Detection of Asymmetries in Asymptotic Giant Branch Stars*
  14. Monnier J., Berger J. P., Millan-Gabet R., Traub W., Schloerb F., Pedretti E., Benisty M., Carleton N., Haguenaue P., Kern P., Labeye P., Lacasse M., Malbet F., Perraut K., Pearlman M., and Zhao M., 2006, *ApJ*, 647, 444, *Few Skewed Disks Found in First Closure-Phase Survey of Herbig Ae/Be Stars*
  15. Monnier J., Barry R., Traub W., Lane B., Akeson R., Ragland S., Schuller P., Le Coroller H., Berger J. P., Millan-Gabet R., Pedretti E., Schloerb F., Koresko C., Carleton N., Lacasse M., Kern P., Malbet F., Perraut K., Kuchner M., and Muterspaugh M., 2006, *Astrophysical Journal*, 647, L127, *No Expanding Fireball : Resolving the Recurrent Nova RS Ophiuchi with Infrared Interferometry*
  16. Millan-Gabet R., Monnier J., Berger J. P., Traub W., Schloerb F., Pedretti E., Benisty M., Carleton N., Haguenaue P., Kern P., Labeye P., Lacasse M., Malbet F., Perraut

- K., Pearlman M., and Thureau N., 2006, *Astrophysical Journal*, 645, L77, *Bright Localized Near-Infrared Emission at 1-4 AU in the AB Aurigae Disk Revealed by IOTA Closure Phases*
17. Lebouquin J. B., Labeye P., Malbet F., Jocou L., Zabihian F., Rousselet-Perraut K., Berger J. P., Delboulbé A., Kern P., Glindemann A., and Schöeller M., 2006, *A&A*, 450, 1259, *Integrated optics for astronomical interferometry. VI. Coupling the light of the VLTI in K band*
  18. Kraus S., Schloerb F., Traub W., Carleton N., Lacasse M., Pearlman M., Monnier J., Millan-Gabet R., Berger J. P., Haguenaue P., Perraut K., Kern P., Malbet F., and Labeye P., 2005, *AJ*, 130, 246, *Infrared Imaging of Capella with the IOTA Closure Phase Interferometer*
  19. Malbet F., Lachaume R., Berger J. P., Colavita M., di Folco E., Eisner J., Lane B., Millan-Gabet R., Ségransan D., and Traub W., 2005, *A&A*, 437, 627, *New insights on the AU-scale circumstellar structure of FU Orionis*
  20. Ohnaka K., Bergeat J., Driebe T., Graser U., Hofmann K. H., Köhler R., Leinert C., Lopez B., Malbet F., Morel S., Paresce F., Perrin G., Preibisch T., Richichi A., Schertl D., Schöller M., Sol H., Weigelt G., and Wittkowski M., 2005, *A&A*, 429, 1057, *Mid-infrared interferometry of the Mira variable RR Sco with the VLTI MIDI instrument*
  21. van Boekel R., Min M., Leinert C., Waters L., Richichi A., Chesneau O., Dominik C., Jaffe W., Dutrey A., Graser U., Henning T., de Jong J., Köhler R., de Koter A., Lopez B., Malbet F., Morel S., Paresce F., Perrin G., Preibisch T., Przygodda F., Schöller M., and Wittkowski M., 2004, *Nature*, 432, 479, *The building blocks of planets within the 'terrestrial' region of protoplanetary disks*
  22. Le Bouquin J., Rousselet-Perraut K., Kern P., Malbet F., Haguenaue P., Kervella P., Schanen I., Berger J., Delboulbe A., Arezki B., and Schöller M., 2004, *A&A*, 424, 719, *First observations with an H-band integrated optics beam combiner at the VLTI*
  23. Leinert C., van Boekel R., Waters L., Chesneau O., Malbet F., Köhler R., Jaffe W., Ratzka T., Dutrey A., Preibisch T., Graser U., Bakker E., Chagnon G., Cotton W., Dominik C., Dullemond C., Glazenberg-Kluttig A., Glindemann A., Henning T., Hofmann K. H., de Jong J., Lenzen R., Ligi S., Lopez B., Meisner J., Morel S., Paresce F., Pel J. W., Percheron I., Perrin G., Przygodda F., Richichi A., Schöller M., Schuller P., Stecklum B., van den Ancker M., von der Lühe O., and Weigelt G., 2004, *A&A*, 423, 537, *Mid-infrared sizes of circumstellar disks around Herbig Ae/Be stars measured with MIDI on the VLTI*
  24. Jaffe W., Meisenheimer K., Röttgering H., Leinert C., Richichi A., Chesneau O., Fraix-Burnet D., Glazenberg-Kluttig A., Granato G. L., Graser U., Heijligers B., Köhler R., Malbet F., Miley G., Paresce F., Pel J. W., Perrin G., Przygodda F., Schoeller M., Sol H., Waters L., Weigelt G., Woillez J., and de Zeeuw P., 2004, *Nature*, 429, 47, *The central dusty torus in the active nucleus of NGC 1068*
  25. Monnier J., Traub W., Schloerb F., Millan-Gabet R., Berger J. P., Pedretti E., Carleton N., Kraus S., Lacasse M., Brewer M., Ragland S., Ahearn A., Coldwell C., Haguenaue P., Kern P., Labeye P., Lagny L., Malbet F., Malin D., Maymounkov P., Morel S., Papaliolios C., Perraut K., Pearlman M., Porro I., Schanen I., Souccar

- K., Torres G., and Wallace G., 2004, ApJ, 602, L57, *First Results with the IOTA3 Imaging Interferometer : The Spectroscopic Binaries lambda Virginis and WR 140*
26. Lachaume R., Malbet F., and Monin J. L., 2003, A&A, 400, 185, *The vertical structure of T Tauri accretion discs. III. Consistent interpretation of spectra and visibilities with a two-layer model*
27. Mourard D., Lardiere O., Lopez B., Malbet F., and Stee P., 2003, Ap&SS, 286, 291, *Second generation instrumentation for the VLTI : The french VLTI connection*
28. Malbet F., 2003, Ap&SS, 286, 131, *Probing the close environment of young stellar objects with interferometry*
29. Laurent E., Rousselet-Perraut K., Benech P., Berger J., Gluck S., Haguenaer P., Kern P., Malbet F., and Schanen-Duport I., 2002, A&A, 390, 1171, *Integrated optics for astronomical interferometry. V. Extension to the K band*
30. Malbet F., Lachaume R., and Monin J. L., 2001, A&A, 379, 515, *The vertical structure of T Tauri accretion disks. II. Physical conditions in the disk*
31. Berger J., Haguenaer P., Kern P., Perraut K., Malbet F., Schanen I., Severi M., Millan-Gabet R., and Traub W., 2001, A&A, 376, L31, *Integrated optics for astronomical interferometry. IV. First measurements of stars*
32. Petrov R., Malbet F., Richichi A., Hofmann K. H., Mourard D., and Amber Consortium T., 2001, Academie des Sciences Paris Comptes Rendus, 2, 67, *AMBER : a near infrared focal instrument for the VLTI*
33. Kern P., Berger J. P., Haguenaer P., Malbet F., and Perraut K., 2001, Academie des Sciences Paris Comptes Rendus, 2, 111, *Planar Integrated Optics and astronomical interferometry*
34. Haguenaer P., Berger J. P., Rousselet-Perraut K., Kern P., Malbet F., Schanen-Duport I., and Benech P., 2000, Appl. Opt., 39, 2130, *Integrated Optics for Astronomical Interferometry. III. Optical Validation of a Planar Optics Two-Telescope Beam Combiner*
35. Berger J., Rousselet-Perraut K., Kern P., Malbet F., Schanen-Duport I., Reynaud F., Haguenaer P., and Benech P., 1999, A&AS, 139, 173, *Integrated optics for astronomical interferometry. II. First laboratory white-light interferograms*
36. Malbet F., Kern P., Schanen-Duport I., Berger J. P., Rousselet-Perraut K., and Benech P., 1999, A&AS, 138, 135, *Integrated optics for astronomical interferometry. I. Concept and astronomical applications*
37. Millan-Gabet R., Schloerb F., Traub W., Malbet F., Berger J., and Bregman J., 1999, ApJ, 513, L131, *Sub-Astronomical Unit Structure of the Near-Infrared Emission from AB Aurigae*
38. Colavita M., Wallace J., Hines B., Gursel Y., Malbet F., Palmer D., Pan X., Shao M., Yu J., Boden A., Dumont P., Gubler J., Koresko C., Kulkarni S., Lane B., Mobley D., and van Belle G., 1999, ApJ, 510, 505, *The Palomar Testbed Interferometer*
39. Malbet F., Berger J. P., Colavita M., Koresko C., Beichman C., Boden A., Kulkarni S., Lane B., Mobley D., Pan X., Shao M., van Belle G., and Wallace J., 1998, ApJ, 507, L149, *FU Orionis Resolved by Infrared Long-Baseline Interferometry at a 2 AU Scale*

40. Bertout C., Harder S., Malbet F., Mennessier C., and Regev O., 1996, AJ, 112, 2159, *Photometric Observations of YY Orionis : New Insight Into the Accretion Process*
41. Loiseau S. and Malbet F., 1996, A&AS, 116, 373, *Global astrometry with OSI.*
42. Malbet F., 1996, A&AS, 115, 161, *High angular resolution coronagraphy for adaptive optics.*
43. Malbet F. and Bertout C., 1995, A&AS, 113, 369, *Detecting T Tauri disks with optical long-baseline interferometry.*
44. Malbet F., Yu J., and Shao M., 1995, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 107, 386, *High-Dynamic-Range Imaging Using a Deformable Mirror for Space Coronagraphy*
45. Bouvier J., Malbet F., and Monin J. L., 1994, Ap&SS, 212, 159, *Synthetic images of proto-planetary disks around young stars*
46. Malbet F., Rigaut F., Bertout C., and Léna P., 1993, A&A, 271, L9, *Detection of a 400-AU Disk like Structure Surrounding the Young Stellar Object Z-Canis*
47. Malbet F. and Bertout C., 1991, A&A, 383, 814, *The vertical structure of T Tauri accretion disks. I. Heating by the central star*

## Papiers de revue invités dans des colloques ou écoles

1. Malbet F., 2007, *Inner disk regions revealed by infrared interferometry*, in Proceedings of the IAU Symposium 243 "Star-disk interaction in Young stars", Grenoble May 2007., Vol. 708, p. arXiv :0708.3359
2. Millan-Gabet R., Malbet F., Akeson R., Leinert C., Monnier J., and Waters R., 2007, *The Circumstellar Environments of Young Stars at AU Scales*, in Protostars and Planets V, B. Reipurth, D., p. 539
3. Malbet F., 2006, *Tomorrow optical interferometry : astrophysical prospects and instrumental issues*, in "Visions in Infrared Astronomy", 20-22 March 2006, Paris, in press (arXiv : astro-ph/0609397)
4. Malbet F., Petrov R., Weigelt G., Stee P., Tatulli E., Domiciano de Souza A., and Millour F., 2006, *First astrophysical results from AMBER/VLTI*, in SPIE, Vol. 6268, p. 2
5. Malbet F., 2006, *The detection of planets in discs through IR interferometry*, in Conference "Planet-Disk Connection", July 17-21 2006, Cambridge, UK, Vol. Electronic
6. Malbet F., 2002, *Probing the close environment of young stellar objects with interferometry*, in JENAM'2002 proceedings "The Very Large Telescope Interferometer Challenges for the future", p. 131
7. Malbet F., 2002, *Young stellar objects science with interferometry*, in Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Vol. 4838, p. 554
8. Petrov R., Malbet F., Richichi A., Hofmann K., Mourard D., Agabi K., Antonelli P., Aristidi E., Baffa C., Beckman U., Bério P., Bresson Y., Cassaing F., Chelli A., Dress A., Duvert G., Forveille T., Fossat E., Gennari S., Geng M., Glentzlin A., Kamm D.,

- Lagarde S., Le Coarer E., Le Contel J. M., Le Contel D., Lisi F., Lopez B., Mars G., Martinot-Lagarde G., Mékarnia D., Monin J. L., Mouillet D., Perrier C., Puget P., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Robbe-Dubois S., Rousselet-Perraut K., Sacchetti M., Schoeller M., Tallon-Bosc I., and Weigelt G., 2002, *The near infrared VLTI instrument AMBER*, in "Observing with the VLT interferometer", EuroWinter School, G. Perrin and F. Malbet (eds), Les Houches (France); EAS Publications Series, Vol. 6, p. 111
9. Malbet F., 2001, *Optical interferometry, a sharper view of the sky*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Française, p. 151
  10. Malbet F., 2001, *Observing Young Stellar Objects with the VLT Interferometer*, in The Origins of Stars and Planets : The VLT View. Proceedings of the ESO Workshop held in Garching, Germany, 24-27 April 2001., p. 423
  11. Malbet F., 2001, *Interférométrie longue base visible et infrarouge*, in "Atelier de l'Optique en Astronomie"; Lemonnier J.-P., Ferrari M., and Kern P. (eds.), INSU/CNRS, Grenoble (France), p. 61
  12. Kern P., Berger J. P., Haguenaue P., Malbet F., and Rousselet-Perraut K., 2000, *Planar integrated optics contribution to instrumentation for interferometry*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 974-985, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena; Andreas Quirrenbach; Eds., p. 974
  13. Malbet F., 2000, *Introduction to Optical/Near-Infrared Interferometers*, in IRAM Millimeter Interferometry Summer School 2; Dutrey (ed), Grenoble (France); IRAM, p. 41
  14. Dutrey A., Malbet F., Guilloteau S., Lucas R., Downes D., and Neri R., 2000, *Mm versus Optical Interferometry : a qualitative comparison*, in IMISS2 "IRAM Millimeter Interferometry Summer School 2", A. Dutrey (ed), Grenoble (France); IRAM, p. 241
  15. Ménard F., Malbet F., Monin J. L., Berger J. P., Guilloteau S., Dutrey A., and Duvert G., 1997, *Disks around Young Stars*, in Science with the VLT Interferometer; Paresce F. (ed), Garching (2001); ESO Astrophysics Symposia, Springer, p. 248
  16. Malbet F., 1997, *Phénomènes d'accrétion-éjection dans les étoiles FU Orionis*, in Atelier ADJ "Connexion accrétion-éjection", F. Ménard, S. Cabrit (eds), Grenoble (France); LAOG/Bastianelli-Guirimand, p. 39
  17. Malbet F., 1995, *Disques circumstellaires des étoiles jeunes*, in Atelier PNHRA "Interférométrie visible et infrarouge dans l'espace", F. Vakili, S. Loiseau (eds), Meudon (France), p. 165
  18. Malbet F., 1994, *High Angular Resolution Imaging of Circumstellar Environment of Young Stars*, in Circumstellar Disks, Outflows and Star Formation, Cozumel, Mexico, Nov 28-Dec 2, 1994, Vol. 1, p. 347
  19. Bertout C., Reipurth B., and Malbet F., 1994, *Star Formation Studies with the VLT*, in Science with the VLT, Proceedings of the ESO Workshop held at Garching, Germany, 28 June - 1 July 1994. Edited by Jeremy R. Walsh and Ivan J. Danziger. Berlin : Springer-Verlag, 1995, p. 41

20. Malbet F., 1994, *Disques circumstellaires autour des étoiles jeunes*, in Atelier PNHRA "Programmes astrophysiques pour VISA", J. Bouvier, F. Vakili (eds), Lyon (France), p. 97

## Monographies, thèses

1. Perrin G. and Malbet F. (eds.), 2003, *Observing with the VLT interferometer*, publié par New Astronomy Reviews (Elsevier Science).
2. Garcia P., Glindemann A., Henning T., and Malbet F. (eds.), 2003, *The Very Large Telescope Interferometer - Challenges for the Future* publié par Springer.
3. Perrin G. and Malbet F. (eds.), 2003, *Observing with the VLT interferometer*, publié par EAS Publications Series.
4. Malbet F. and Castets A. (eds.), 1997, *Low Mass Star Formation - from Infall to Outflow*, publié par Bastianelli-Guirimard.
5. Kern P. and Malbet F. (eds.), 1996, *Astrofib'96 : Integrated optics for Astronomical interferometry*, publié par Bastianelli-Guirimard

## Présentations publiées dans des colloques

1. Millour F., Petrov R., Malbet F., Tatulli E., Duvert G., Zins G., Altariba E., Vannier M., Hernandez O., and Li Causi G., 2007, *AMBER on the VLTI : data processing and calibration issues*, in ESO calibration workshop 2007, Garching, Germany (24/01/2007), in press
2. Le Duigou J., Ollivier M., Léger A., Cassaing F., Sorrente B., Fleury B., Rousset G., Absil O., Mourard D., Rabbia Y., Escarrat L., Malbet F., Rouan D., Clédassou R., Delpech M., Duchon P., Meyssignac B., Guidotti P. Y., and Gorius N., 2006, *Pegase : a space-based nulling interferometer*, in SPIE, Vol. 6265, p. 47
3. Schloerb F., Berger J. P., Carleton N., Hagenauer P., Kern P., Labeye P., Lacasse M., Malbet F., Millan-Gabet R., Monnier J., Pearlman M., Pedretti E., Rousselet-Perraut K., Ragland S., Schuller P., Traub W., and Wallace G., 2006, *IOTA : recent science and technology*, in SPIE, Vol. 6268, p. 18
4. Weigelt G., Petrov R., Chesneau O., Davidson K., Domiciano de Souza A., Driebe T., Foy R., Fraix-Burnet D., Gull T., Hillier J., Hofmann K. H., Kraus S., Malbet F., Marconi A., Mathias P., Monin J. L., Millour F., Ohnaka K., Rantakyrö F., Richichi A., Schertl D., Schöller M., Stee P., Testi L., and Wittkowski M., 2006, *VLTI-AMBER observations of Eta Carinae with high spatial resolution and spectral resolutions of 1,500 and 10,000*, in SPIE, Vol. 6268, p. 88
5. Rantakyrö F., Ballester P., Brillant S., Duvert G., Galliano E., Hummel C., Kaufer A., Kiekebusch M., Le Coarer E., Licha T., Malbet F., Mardones P., Millour F., Morel S., Percheron I., Petr-Gotzens M., Petrov R., Richichi A., Rivinius T., Schöller M., Stefl S., Vannier M., Wittkowski M., and Zins G., 2006, *Experiences from the first AMBER open time observations*, in SPIE, Vol. 6268, p. 53

6. Benisty M., Berger J. P., Jocou L., Malbet F., Perraut K., Labeye P., and Kern P., 2006, *The VSI/VITRUV combiner : a phase-shifted four-beam integrated optics combiner*, in SPIE, Vol. 6268, p. 73
7. Malbet F., Kern P., Berger J. P., Jocou L., Garcia P., Buscher D., Rousselet-Perraut K., Weigelt G., Gai M., Surdej J., Hron J., Neuhäuser R., Le Coarer E., Labeye P., Le Bouquin J., Benisty M., and Herwats E., 2006, *VSI : a milli-arcsec spectro-imager for the VLTI*, in SPIE, Vol. 6268, p. 30
8. Stee P., Meilland A., Vannier M., Millour F., Domiciano de Souza A., Malbet F., Martayan C., Petrov R., and Spang A., 2006, *New results from the VLTI on massive hot stars : First direct detection of a Keplerian disk around alpha Arae*, in SF2A-2006 : Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics Eds. : D. Barret, F. Casoli, G. Lagache, A. Lecavelier, L. Pagani, p.507, p. 507
9. Ollivier M., Le Duigou J. M., Mourard D., Absil O., Cassaing F., Herwats E., Escarrat L., Chazelas B., Allard F., Clédassou R., Du Foresto V., Delpech M., Duchon P., Guidotti P. Y., Léger A., Leyre X., Malbet F., Rouan D., and Udry S., 2006, *PEGASE : a DARWIN/TPF pathfinder*, in Direct Imaging of Exoplanets : Science, p. 241
10. Tatulli E., Benisty M., Malbet F., and AMBER Consortium t., 2005, *Disk and wind interaction in MWC 297 spatially resolved with VLTI/AMBER*, in SF2A-2005 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 315
11. Ollivier M., Le Duigou J. M., Mourard D., Absil O., Cassaing F., Herwats E., Escarrat L., Allard F., Clédassou R., Coudé Du Foresto V., Delpech M., Duchon P., Guidotti P. Y., Léger A., Leyre X., Malbet F., Rouan D., and Udry S., 2005, *PEGASE... towards DARWIN*, in SF2A-2005 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 197
12. Lawson P. and Malbet F., 2005, *Optical Long Baseline Interferometry News*, in American Astronomical Society, Vol. 207
13. Petrov R., Millour F., Chesneau O., Weigelt G., Bonneau D., Stee P., Kraus S., Mourard D., Meilland A., Malbet F., Lisi F., Kern P., Beckmann U., Lagarde S., Gennari S., Lecoarer E., Driebe T., Accardo M., Robbe-Dubois S., Ohnaka K., Busoni S., Roussel A., Zins G., Behrend J., Ferruzi D., Bresson Y., Duvert G., Nussbaum E., Marconi A., Feautrier P., Dugué M., Chelli A., Tatulli E., Heininger M., Delboulbé A., Bonhomme S., Schertl D., Testi L., Mathias P., Monin J. L., Gluck L., Hofmann K., Salinari P., Puget P., Clausse J. M., Fraix-Burnet D., Foy R., and Isella A., 2005, *First AMBER/VLTI observations of hot massive stars*, in In "The Power of Optical/IR Interferometry : Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation, Allemagne (2005) in press", astro-ph/0509208
14. Gil C., Malbet F., Schoeller M., Chesneau O., and Leinert C., 2005, *Observations of 51 Ophiuchi with MIDI at the VLTI*, in "The Power of Optical / IR Interferometry : Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation", Garching, April 4-8, 2005. Preprint astro-ph/0508052
15. Malbet F., Berger J. P., Garcia P., Kern P., Perraut K., Benisty M., Jocou L., Herwats E., Lebouquin J. B., Labeye P., Le Coarer E., Preis O., Tatulli E., and Thiébaud E., 2005, *VITRUV - Imaging close environments of stars and galaxies with the VLTI at*

- milli-arcsec resolution*, in "The Power of Optical/IR Interferometry : Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation", Allemagne (2005), Vol. in press (astro-ph/0507233)
16. Malbet F., Benisty M., De Wit W., Kraus S., Meilland A., Millour F., Tatulli E., Berger J. P., Chesneau O., Hofmann K. H., Isella A., Petrov R., Preibisch T., Stee P., Testi L., and Weigelt G., 2005, *Disentangling the wind and the disk in the close surrounding of the young stellar object MWC297 with AMBER/VLTI*, in "The Power of Optical/IR Interferometry : Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation", Allemagne (2005), Vol. in press (astro-ph/0507226)
  17. Garcia P., Berger J. P., Corradi R., Forveille T., Harries T., Henri G., Malbet F., Marconi A., Perraut K., Petrucci P. O., Schrijver K., Testi L., Thiébaud E., and Wolf S., 2005, *VITRUV - Science Cases*, in The Power of Optical/IR Interferometry : Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation", Garching, (preprint astro-ph/0507580), in press
  18. Weigelt G., Beckert T., Beckmann U., Driebe T., Foy R., Fraix-Burnet D., Hofmann K. H., Kraus S., Malbet F., Mathias P., Marconi A., Monin J. L., Petrov R., Schertl D., Stee P., and Testi L., 2005, *Near-infrared Interferometry with the AMBER Instrument of the VLTI.*, in *Astronomische Nachrichten*, Vol. 326, p. 572
  19. Berger J., Monnier J., Pedretti E., Millan-Gabet R., Malbet F., Perraut K., Kern P., Benisty M., Haguenaue P., Labeye P., Traub W., Carleton N., Lacasse M., Meimon S., Brechet C., Thiébaud E., and Schloerb P., 2005, *GW Orionis : A T-Tauri Multiple System Observed with AU-scale Resolution*, in *Protostars and Planets V*, Proceedings of the Conference held October 24-28, 2005, in Hilton Waikoloa Village, Hawai'i. LPI Contribution No. 1286., p.8398, p. 8398
  20. Benisty M., Malbet F., de Wit W., Kraus S., Meilland A., Millour F., Tatulli E., Berger J. P., Chesneau O., Hofmann K. H., Isella A., Petrov R., Preibisch T., Stee P., Testi L., Weigelt G., and Consortium A., 2005, *MWC297 : Disk and Wind Spatially Resolved with VLTI/AMBER*, in *Protostars and Planets V*, Proceedings of the Conference held October 24-28, 2005, in Hilton Waikoloa Village, Hawai'i. LPI Contribution No. 1286., p.8395, p. 8395
  21. Baudoz P., Rouan D., Schneider J., Leger A., Ollivier M., Absil O., Leyre A., Mourard D., Nary Man C., Rousset G., Cassaing F., Allard F., Malbet F., Udry S., and Martin E., 2004, *The PEGASE project : characterisation of "Pegasi planets" and Brown Dwarfs*, in *SF2A-2004 : Semaine de l'Astrophysique Francaise*, p. 123
  22. Rousset-Perraut K., Le Coarer E., Gil C., Kern P., Arezki B., Delboulbe A., Duvert G., Gluck L., Magnard Y., Malbet F., Millour F., Tatulli E., Zins G., Accardo M., Antonelli P., Beckmann U., Behrend J., Bresson Y., Busoni S., Lagarde S., Lisi F., Petrov R., Robbe-Dubois S., and Roussel A., 2004, *AMBER integration and laboratory performances*, 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.1398, p. 1398
  23. Ragland S., Traub W., Berger J. P., Millan-Gabet R., Monnier J., Pedretti E., Schloerb P., Carleton N., Haguenaue P., Kern P., Labeye P., Lacasse M., Malbet F., and Rousset-Perraut K., 2004, *Characterizing closure-phase measurements at*



- IOTA*, 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.1390, p. 1390
24. Le Bouquin J. B., Berger J. P., Labeye P., Tatulli E., Malbet F., Rousset-Perraut K., and Kern P., 2004, *Comparison of integrated optics concepts for a near-infrared multi-telescope beam combiner*, 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.1362, p. 1362
  25. Jocou L., Benisty M., Berger J. P., Lecoarer E., Haguenaer P., Kern P., Rousset-Perraut K., and Malbet F., 2004, *A laboratory interferometer simulator for integrated optics combiners qualification*, 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.1351, p. 1351
  26. Labeye P., Berger J. P., Salhi M., Demolon P., Rousset-Perraut K., Malbet F., and Kern P., 2004, *Integrated optics components in silica on silicon technology for stellar interferometry*, 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.667, p. 667
  27. Malbet F., Berger J. P., Kern P., Rousset-Perraut K., Petrucci P. O., Menard F., Chelli A., Duvert G., Lebouquin J. B., Tatulli E., Labeye P., Schanen-Duport I., Thiebaut E., Garcia P., and Carvalho I., 2004, *VITRUV, a second-generation VLTI instrument for aperture synthesis imaging with eight telescopes*, 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.439, p. 439
  28. Millour F., Tatulli E., Chelli A., Duvert G., Zins G., Acke B., and Malbet F., 2004, *Data reduction for the AMBER instrument*, 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.1222, p. 1222
  29. Robbe-Dubois S., Petrov R., Lagarde S., Antonelli P., Bresson Y., Roussel A., Mourard D., Malbet F., Millour F., Zins G., Delboulbe A., Duvert G., Gluck L., Kern P., Le Coarer E., Rousset-Perraut K., Tatulli E., Beckmann U., Heining M., Weigelt G., Lisi F., Stefanini P., Accardo M., Gil C., Vannier M., Haddad N., Housen N., Kiekebusch M., Mardones P., Puech F., Rantakyro F., Richichi A., and Schoeller M., 2004, *The VLTI focal instrument Amber : results of the first phase of the alignment, integration, and verification in Paranal*, 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.1089, p. 1089
  30. Vannier M., Petrov R., Schoeller M., Antonelli P., Bresson Y., Duvert G., Gil C., Glindemann A., Lagarde S., Lecoarer E., Lopez B., Morel S., Malbet F., Millour F., Rousset-Perraut K., Rantakyro F., and Robbe-Dubois S., 2004, *Design and tests for the correction of atmospheric and instrumental effects on color-differential phase with AMBER/VLTI*, 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.577, p. 577

31. Tatulli E., Thiebaut E., Malbet F., and Duvert G., 2004, *Imaging young stellar objects with AMBER on the VLTI*, 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.117, p. 117
32. Malbet F., Driebe T., Foy R., Fraix-Burnet D., Mathias P., Marconi A., Monin J. L., Petrov R., Stee P., Testi L., and Weigelt G., 2004, *Science program of the AMBER consortium*, 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.1722, Vol. 549, p. 1722
33. Guyon O., Ridgway S., Aime C., Boccaletti A., Beuzit J. L., Galicher R., Kern P., Kotani T., Lagrange A. M., Lyon R., Malbet F., Murakawa K., Otsubo M., Rouan D., Soummer R., Suto H., Tamura M., and Woodruff R., 2004, *Pupil Remapping Coronagraph (PRC) : a high-performance coronagraph for a small-size visible Terrestrial Planet Finder*, in Microwave and Terahertz Photonics. Edited by Stohr, Andreas ; Jager, Dieter ; Iezekiel, Stavros. Proceedings of the SPIE, Volume 5487, pp. 1304-1311 (2004)., p. 1304
34. Haguenaer P., Schanen-Duport I., Kern P., Barillot M., Laurent E., Rousselet-Perraut K., Berger J. P., and Malbet F., 2003, *Integrated Optics and Astronomical Instrumentation*, in ESA SP-522 : GENIE - DARWIN Workshop - Hunting for Planets
35. Haguenaer P., Schanen-Duport I., Kern P., Barillot M., Laurent E., Rousselet-Perraut K., Berger J. P., and Malbet F., 2003, *Integrated Optics and Astronomical Instrumentation*, in ESA Special Publication, Vol. 522
36. Kern P., Malbet F., Berger J. P., Haguenaer P., Schanen-Duport I., Labeye P., Perraut-Rousselet K., Arezki B., Delboulbé A., Jocou L., Perrier-Bellet C., Traub W., Millan-Gabet R., Monnier J., Pedretti E., Glindemann A., Kervella P., di Folco E., and Gitton P., 2003, *Increasing the imaging capabilities of the VLTI using integrated optics*, in Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 312-320 (2003)., p. 312
37. Lai O., Ridgway S., Berger J. P., Dougados C., Coude du Foresto V., Guyon O., Lachaume R., Magnier E., Malbet F., Menard F., Mourard D., Perrin G., Sol H., Warren S., and Woillez J., 2003, *OHANA : representative science objectives*, in Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub . Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 1410-1423 (2003)., p. 1410
38. Menard F., Dougados C., Lachaume R., Malbet F., and Berger J. P., 2003, *OHANA and star formation : probing deep into the accretion/ejection mechanism*, in Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub . Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 1403-1409 (2003)., p. 1403
39. Berger J. P., Haguenaer P., Kern P., Rousselet-Perraut K., Malbet F., Gluck S., Lagny L., Schanen-Duport I., Laurent E., Delboulbe A., Tatulli E., Traub W., Carleton N., Millan-Gabet R., Monnier J., Pedretti E., and Ragland S., 2003, *An integrated-optics 3-way beam combiner for IOTA*, in Interferometry for Optical Astronomy II. Edited by Wesley A. Traub . Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 1099-1106 (2003)., p. 1099

40. Petrov R., Malbet F., Weigelt G., Lisi F., Puget P., Antonelli P., Beckmann U., Lagarde S., Le Coarer E., Robbe-Dubois S., Duvert G., Gennari S., Chelli A., Dugue M., Rousselet-Perraut K., Vannier M., and Mourard D., 2003, *Using the near infrared VLTI instrument AMBER*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub . Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 924-933 (2003)., p. 924
41. Mege P., Malbet F., and Chelli A., 2003, *Interferometry with single mode waveguide*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 329-337 (2003)., p. 329
42. Chelli A., Duvert G., Bonneau D., Perrin G., Thiebaut E., Mourard D., Petrov R., Cruzalebes P., Lopez B., Malbet F., Daigne G., and Ollivier M., 2003, *Jean-Marie Mariotti Center for Interferometry*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 144-151 (2003)., p. 144
43. Malbet F., Bloecker T., Foy R., Fraix-Burnet D., Mathias P., Marconi A., Monin J. L., Petrov R., Stee P., Testi L., and Weigelt G., 2003, *Astrophysical potential of the AMBER/VLTI instrument*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub . Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 917-923 (2003)., p. 917
44. Arnold L., Lagrange A. M., Mourard D., Riaud P., Ferrari M., Gillet S., Kern P., Koechlin L., Labeyrie A., Lardiere O., Malbet F., Perrin G., Rousset G., and Tallon M., 2003, *High angular resolution in 2010-2020 : a comparison between possible post-VLT/VLTI instruments*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 134-143 (2003)., p. 134
45. Traub W., Ahearn A., Carleton N., Berger J. P., Brewer M., Hofmann K. H., Kern P., Lacasse M., Malbet F., Millan-Gabet R., Monnier J., Ohnaka K., Pedretti E., Ragland S., Schloerb F., Souccar K., and Weigelt G., 2003, *New Beam-Combination Techniques at IOTA*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub. Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 45-52 (2003)., p. 45
46. Malbet F., Petrov R., Tallon-Bosc I., Hofmann K. H., Mourard D., Forveille T., Casaing F., Reynaud F., Tallon M., Mege P., and Rousselet-Perraut K., 2003, *System analysis of the AMBER instrument on VLTI*, in *Interferometry for Optical Astronomy II*. Edited by Wesley A. Traub . Proceedings of the SPIE, Volume 4838, pp. 1163-1170 (2003)., p. 1163
47. Lachaume R., Malbet F., and Monin J. L., 2003, *A two-layer accretion disc model : interpreting spectra and optical visibilities*, in SF2A-2003 : Semaine de l'Astrophysique Française, p. 535
48. Malbet F. and Perrin G., 2003, *Exercise 5 Observing program preparation*, in EAS Publications Series, p. 177
49. Malbet F., 2003, *Exercise 3 Signal-to-noise calculations with the AMBER and MIDI instruments*, in EAS Publications Series, p. 145
50. Tatulli E., Malbet F., Chelli A., Mege P., and Duvert G., 2003, *Detection of Yso's with Single Mode Interferometers.*, in IAU Symposium, p. 75P

51. Perrin G. and Malbet F., 2003, *Foreword*, in EAS Publications Series, p. D3
52. Duvert G., B erio P., and Malbet F., 2002, *ASPRO, a software to prepare observations with optical interferometers*, in Observatory Operations to Optimize Scientific Return III. Edited by Quinn, Peter J. Proceedings of the SPIE, Volume 4844, pp. 295-299 (2002)., p. 295
53. Tatulli E., Mege P., Chelli A., and Malbet F., 2002, *SNR on visibilities for fibered interferometers*, in SF2A-2002 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 233
54. Haguenauer P., Kern P., Rousselet-Perraut K., Malbet F., Berger J. P., and Laurent E., 2002, *Planar integrated optics, instrumental solutions for interferometry*, in SF2A-2002 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 193
55. Arnold L., Lagrange A., Mourard D., Riaud P., Ferrari M., Gillet S., Kern P., Koechlin L., Labeyrie A., Lardi ere O., Malbet F., Perrin G., Rousset G., and Tallon M., 2002, *High Angular Resolution in 2010-2020 : Possible post-VLT/VLTI Instruments and R and D priorities*, in SF2A-2002 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 155
56. Lachaume R., Malbet F., and Monin J. L., 2002, *A two-layer circumstellar disc model : interpreting spectra and visibilities*, in SF2A-2002 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 457
57. Malbet F., Kern P., Berger J. P., Haguenauer P., Perraut K., and Perrier C., 2002, *VLTI Imaging Instrument Using the Full Potential of the Interferometric Array*, in Scientific Drivers for ESO Future VLT/VLTI Instrumentation Proceedings of the ESO Workshop held in Garching, Germany, 11-15 June, 2001. p. 303., p. 303
58. Tatulli E., Chelli A., Malbet F., and Duvert G., 2001, *Modelling of Astrophysical Observables for the Very Large Telescope Interferometer*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 589
59. Mege P., Malbet F., and Chelli A., 2001, *Stellar Interferometry with optical waveguides*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 581
60. Laurent E., Kern P., Schanen I., Rousselet-Perraut K., Haguenauer P., Berger J. P., Malbet F., and Berruyer P., 2001, *Integrated Optics components for astronomical interferometry in the K band*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 613
61. Berger J., Haguenauer P., Kern P., Perraut K., Malbet F., Schanen I., Severi M., Millan-Gabet R., and Traub W., 2001, *Integrated optics : first measurements of stars.*, in 198th American Astronomical Society Meeting, Vol. 33, p. 881
62. Petrov R., Malbet F., Weigelt G., Lisi F., Puget P., Antonelli P., Beckman U., Lagarde S., Le Coarer E., Robbe-Dubois S., Rousselet-Perraut K., Martinot-Lagarde G., and Dugu e M., 2001, *Principle and potential of the near infrared VLTI focal instrument AMBER*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 615
63. Haguenauer P., Kern O., Rousselet-Perraut K., Berger J. P., Malbet F., and Laurent E., 2001, *Planar integrated optics for astronomical interferometry*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 473
64. Malbet F. and Berger J. P., 2001, *The nature of the circumstellar matter around FU Orionis*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 457

65. Lachaume R., Malbet F., and Monin J. L., 2001, *Constraining T-Tauri disk models with interferometric measurements*, in SF2A-2001 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, p. 211
66. Mege P., Malbet F., and Chelli A., 2000, *Spatial filtering in AMBER*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 299-307, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 299
67. Malbet F., Chelli A., and Petrov R., 2000, *AMBER performances : signal-to-noise ratio analysis*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 233-242, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 233
68. Mouillet D., Duvert G., Forveille T., Hofmann K. H., Malbet F., Sacchetti M., and Schertl D., 2000, *AMBER data structure, processing, and calibration*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 261-268, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 261
69. Duvert G., Mouillet D., Malbet F., Berio P., Forveille T., Aristidi E., Hofmann K. H., and Mege P., 2000, *AMBER data simulator*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 217-223, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 217
70. Richichi A., Bloeker T., Foy R., Fraix-Burnet D., Lopez B., Malbet F., Stee P., von der Luehe O., and Weigelt G., 2000, *Science opportunities with AMBER, the near-IR VLTI instrument*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 80-91, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 80
71. Haguenauer P., Severi M., Schanen-Duport I., Rousselet-Perraut K., Berger J. P., Duchene Y., Lacolle M., Kern P., Malbet F., and Benech P., 2000, *Planar optics three-telescope beam combiners for astronomical interferometry*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 1107-1115, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 1107
72. Rousselet-Perraut K., Haguenauer P., Petmezakis P., Berger J. P., Mourard D., Ragland S., Huss G., Reynaud F., LeCoarer E., Kern P., and Malbet F., 2000, *Qualification of IONIC (integrated optics near-infrared interferometric camera)*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 1042-1051, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 1042
73. Laurent E., Schanen-Duport I., Malbet F., and Taillades G., 2000, *Infrared waveguides for interferometry applications*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 1090-1101, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 1090
74. Berger J. P., Benech P., Schanen-Duport I., Maury G., Malbet F., and Reynaud F., 2000, *Combining up to eight telescope beams in a single chip*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 986-995, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 986
75. Berger J. P., Malbet F., Colavita M., Segransan D., Millan-Gabet R., and Traub W., 2000, *New insights into the nature of the circumstellar environment of FU Ori*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 597-604, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 597
76. Ollivier M., Mariotti J. M., Sekulic P., Michel G., Leger A., Bouchareine P., Brunaud J., Coude du Foresto V., Mennesson B., Borde P., Amy-Klein A., Vanlerberghe A.,

- Lagage P. O., Artzner G., and Malbet F., 2000, *Nulling interferometry for the DARWIN mission : experimental demonstration of the concept in the thermal infrared with high levels of rejection*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 354-358, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 354
77. Malbet F., Lachaume R., Monin J. L., and Berger J. P., 2000, *Probing the inner part of protoplanetary disks with the VLTI*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 243-251, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 243
78. Robbe-Dubois S., Antonelli P., Beckmann U., Bresson Y., Gennari S., Lagarde S., Lisi F., Malbet F., Martinot-Lagarde G., Rabbia Y., Rebattu S., Reynaud F., Rousselet-Perraut K., and Petrov R., 2000, *AMBER : optical design and expected performance*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 224-232, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 224
79. Petrov R., Malbet F., Richichi A., Hofmann K. H., Mourard D., Agabi K., Antonelli P., Aristidi E., Baffa C., Beckmann U., Berio P., Bresson Y., and Cassaing F., 2000, *AMBER : the near-infrared focal instrument for the Very Large Telescope Interferometer*, in Proc. SPIE Vol. 4006, p. 68-79, Interferometry in Optical Astronomy, Pierre J. Lena ; Andreas Quirrenbach ; Eds., p. 68
80. Robbe-Dubois S., Antonellei P., Beckmann U., Bresson Y., Gennari S., Lagarde S., Lisi F., Malbet F., Martinot-Lagarde G., Petrov R., Rabbia Y., Rebattu S., and Rousselet-Perraut K., 2000, *AMBER, The VLTI Near-Infrared Instrument : Optical Design and Expected Performance*, in ESA SP-451 : Darwin and Astronomy : the Infrared Space Interferometer, p. 215
81. Richichi A., Malbet F., Hofmann K. H., and Petrov R., 2000, *AMBER, the VLTI Near-Infrared Instrument : Design, Status and Scientific Applications*, in ESA SP-451 : Darwin and Astronomy : the Infrared Space Interferometer, p. 51
82. Rousselet-Perraut K., Stadler E., Feautrier P., Le Coarer E., Petmezakis P., Haguenaue P., Kern P., Malbet F., Berger J. P., Schanen-Duport I., Benech P., and Delage L., 1999, *The Integrated Optics Near-infrared Interferometric Camera (IONIC)*, in ASP Conf. Ser. 194 : Working on the Fringe : Optical and IR Interferometry from Ground and Space, p. 344
83. Haguenaue P., Rousselet-Perraut K., Kern P., Malbet F., Berger J. P., Schanen-Duport I., and Benech P., 1999, *A planar optics beam combiner for stellar interferometry*, in ASP Conf. Ser. 194 : Working on the Fringe : Optical and IR Interferometry from Ground and Space, p. 337
84. Berger J. P., Schanen-Duport I., El-Sabban S., Benech P., Severi M., Pouteau P., Rousselet-Perraut K., Haguenaue P., Duchêne Y., Malbet F., and Kern P., 1999, *Planar Integrated Optics Beam Combiners for Astronomical Aperture Synthesis*, in ASP Conf. Ser. 194 : Working on the Fringe : Optical and IR Interferometry from Ground and Space, p. 264
85. Ollivier M., Léger A., Sekulic C., Brunaud J., Artzner G., Mariotti J. M., Michel G., Coudé Du Foresto V., Mennesson B., Bouchareine P., Lépine T., and Malbet F., 1999, *Nulling Interferometry for the DARWIN Mission - Laboratory Demonstra-*

- tion Experiment*, in ASP Conf. Ser. 194 : Working on the Fringe : Optical and IR Interferometry from Ground and Space, p. 443
86. Berger J., Rousselet-Perraut K., Kern P., Malbet F., Schanen-Duport I., Nabias L., and Benech P., 1998, *Integrated optics components for interferometric beam combination*, in Proc. SPIE Vol. 3350, p. 898-905, Astronomical Interferometry, Robert D. Reasenberg; Ed., p. 898
  87. Wallace J., Boden A., Colavita M., Dumont P., Gursel Y., Hines B., Koresko C., Kulkarni S., Lane B., Malbet F., Palmer D., Pan X., Shao M., Vasisht G., van Belle G., and Yu J., 1998, *Palomar Testbed Interferometer*, in Proc. SPIE Vol. 3350, p. 864-871, Astronomical Interferometry, Robert D. Reasenberg; Ed., p. 864
  88. Schanen-Duport I., El-Saban S., Berger J. P., Kern P., Malbet F., and Rousselet-Perraut K., 1998, *Optique intégrée planaire et interférométrie astronomique : éléments de recombinaison*, in 18èmes journées nationales d'optique guidées (JNOG), Marly-Le-Roi (France), p. 79
  89. Hofmann K. H., Petrov R., Malbet F., and Richichi A., 1998, *Amber : the near infrared – red focal instrument for the VLTI*, in Astronomische Gesellschaft Meeting Abstracts, p. 6
  90. Berthet M. P., Kern P., Puget P., and Malbet F., 1997, *Coupling optical fibers with detector matrices*, in Integrated Optics for Astronomical Interferometry, p. 287
  91. Kern P., Malbet F., Schanen-Duport I., and Benech P., 1997, *Integrated optics single-mode interferometric beam combiner for near infrared astronomy*, in Integrated Optics for Astronomical Interferometry, p. 195
  92. Schanen-Duport I., Kern P., and Malbet F., 1997, *Optical waveguides made by ion exchange for astronomical interferometry applications at the wavelength of 2.2 μm*, in Integrated Optics for Astronomical Interferometry, p. 99
  93. Berger J. P., Malbet F., Kern P., Nabias L., Schanen I., Benech P., and Perraut K., 1997, *Integrated Optics Applied to Astronomical Aperture Synthesis : II First Laboratory results*, in ICSO'97 (International Conference on Space Optics). CNES, Toulouse (France)
  94. Nabias L., Schanen I., Berger J. P., Kern P., Malbet F., and Benech P., 1997, *Integrated Optics Applied to Astronomical Aperture Synthesis : III Simulation of components optimized for astronomical interferometry*, in ICSO'97 (International Conference on Space Optics). CNES, Toulouse (France)
  95. Kern P., Malbet F., Berger J. P., Schanen I., Nabias L., and Benech P., 1997, *Integrated Optics Applied to Astronomical Aperture Synthesis : I. General Concept for ground and Space based applications*, in ICSO'97 (International Conference on Space Optics). CNES, Toulouse (France)
  96. Malbet F., Petitjean P., and Henri G., 1997, *AGN Models and Fringe Visibilities*, in Science with the VLT Interferometer, p. 102
  97. Bertout C., Harder S., Malbet F., Mennessier C., and Regev O., 1997, *Photometric observations of YY Orionis*, in IAU Symp. 182 : Herbig-Haro Flows and the Birth of Stars, p. 288P

98. Malbet F., 1997, *Detecting disks around young stellar objects with infrared interferometers*, in NATO ASIC Proc. 501 : High angular resolution in astrophysics, p. 371
99. Ménard F. and Malbet F., 1997, *Adaptive optics imaging of the pre-main sequence star YY Orionis*, in NATO ASIC Proc. 501 : High angular resolution in astrophysics, p. 365
100. Malbet F., Liu D., Yu J., and Shao M., 1995, *Space adaptive optics coronagraphy*, in Proc. SPIE Vol. 2478, p. 230-238, Space Telescopes and Instruments, Pierre Y. Bely ; James B. Breckinridge ; Eds., p. 230
101. Loiseau S., Malbet F., and Yu J., 1995, *Global astrometry with OSI*, in Proc. SPIE Vol. 2477, p. 259-266, Spaceborne Interferometry II, Robert D. Reasenberg ; Ed., p. 259
102. Colavita M., Shao M., Hines B., Wallace J., Gursel Y., Malbet F., Yu J., Singh H., Beichman C., Pan X., Nakajima T., and Kulkarni S., 1994, *ASEPS-0 Testbed Interferometer*, in Proc. SPIE Vol. 2200, p. 89-97, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge ; Ed., p. 89
103. Malbet F., Shao M., and Yu J., 1994, *Active optics and coronagraphy with the Hubble Space Telescope*, in Proc. SPIE Vol. 2201, p. 1135-1144, Adaptive Optics in Astronomy, Mark A. Ealey ; Fritz Merkle ; Eds., p. 1135
104. Malbet F., Monin J. L., and Bouvier J., 1992, *Imaging circumstellar disks around young stars by multi-aperture interferometry*, in ESA SP-354 : Targets for Space-Based Interferometry, p. 111
105. Rigaut F., Combes M., Dougados C., Léna P., Mariotti J. M., Saint-Pé O., Alloin D., Malbet F., Bertout C., Gallais P., and Gehring G., 1992, *Astrophysical Results with COME-ON*, in Progress in Telescope and Instrumentation Technologies, p. 479
106. Malbet F., 1992, *A Coronagraph with Adaptive Optics*, in Progress in Telescope and Instrumentation Technologies, p. 531

## Articles dans des revues sans comité de lecture

1. Malbet F., Petrov R., Weigelt G., Chesneau O., Domiciano de Souza A., Meilland A., Millour F., and Tatulli E., 2007, The Messenger, 127, 37, *First AMBER/VLTI Science*
2. Malbet F., Petrov R., and Rantakyro F., 2007, The Messenger, 127, 33, *AMBER, the Near-Infrared Instrument of the VLTI*
3. Malbet F. and Petrov R., 2006, SPIE Newsroom, 3610, *First results from the AMBER/VLTI near-infrared spectro-interferometer*
4. Bouvier J. and Malbet F., 2001, Dossier Pour La Science, 30, 84, *L'environnement des étoiles jeunes*
5. Malbet F., 2001, Pour La Science, 283, 64, *L'interférométrie, une technique européenne*
6. Petrov R., Malbet F., Richichi A., and Hofmann K. H., 1998, The ESO Messenger, 92, 11, *AMBER, the near-infrared / red VLTI focal instrument*



7. Paresce F., Mourard D., Bedding T., Beletic J., Haniff C., Leinert C., Malbet F., Mariotti J. M., Mozurkewich D., Mundt R., Petitjean P., Quirrenbach A., Rheinheimer T., Richichi A., Rottgering H., Von der L u e O., and Waters R., 1996, The ESO Messenger, 83, 14, *A new start for the VLTI*
8. Malbet F., 1992, The ESO Messenger, 67, 46, *A coronagraph for COME-ON, the VLT adaptive optics prototype*
9. Malbet F., 1992, Journal des Astronomes Francais, 43, 32, *Un disque marginalement resolu autour de Z Canis Majoris.*
10. Malbet F., L ena P., and Bertout C., 1991, The ESO Messenger, 66, 32, *A large disk-like structure around the young stellar object Z CMA*

## Rapports techniques

1. Malbet F., 2003, *AMBER Commissioning plan*, in VLT-PLA-AMB-15830-7002, ESO Preliminary Acceptance Europe
2. Malbet F., 2003, *AMBER Guaranteed Time Observations*, in Technical Report VLT-LIS-AMB-15830-0007, ESO Preliminary Acceptance Europe
3. Henning T., Malbet F., and Quirrenbach A., 2003, *White paper on VLTI Policy*, in Technical Report from, Ad-hoc Committee of the VLTI Implementation Committee
4. Malbet F., 2001, *AMBER call for proposals*, in Technical Report A, AMBER Science Group
5. Malbet F., 2001, *AMBER Users Manual*, in Technical Report VLT-MAN-AMB-15830-0001, ESO Final Design Review
6. Malbet F., 2001, *AMBER Scientific Instrument Operation Plan*, in Technical Report VLT-PLA-AMB-15830-0005, ESO Final Design Review
7. Malbet F., Richichi A., Bloeker T., Foy R., Fraix-Burnet D., Lopez B., Petitjean P., Petrov R., Stee P., and Weigelt G., 2000, *AMBER Science Analysis Report*, in Technical Report VLT-SPE-AMB-15830-00000-0003, ESO Preliminary Design Review
8. Malbet F., Tallon-Bosc I., Hofmann K. H., M e e P., and Perraut K., 2000, *AMBER Instrument Analysis Report*, in Technical Report VLT-TRE-AMB-15830-00000-0001, ESO Preliminary Design Review
9. Malbet F., Petrov R., and Schoeller M., 2000, *AMBER Technical Specifications*, in Specifications, Technical Report VLT-SPE-ESO-15830-2074, ESO Preliminary Design Review
10. Malbet F., Petrov R., Beckmann U., Le Coarer E., Lisi F., Mouillet D., Perraut K., Richichi A., Robbe S., and Sacchetti M., 1999, *AMBER, The near infrared interferometric instrument*, in Technical Report AMB-REP-004, ESO Conceptual Design Review
11. Petrov R., Malbet F., Antonelli P., Feautrier P., Gennari S., Kern P., Lisi F., Monin J. L., Mouillet D., Puget P., Richichi A., and Rousset G., 1998, *AMBER, The near infrared / red VLTI focal instrument*, in Technical Report AMB-REP-003, ESO VLTI Steering Committee

12. Malbet F., Perrin G., Petrov R., Richichi A., and Schoeller M., 1997, *The imaging and spectroscopic VLTI focal instrument*, in Technical Report AMB-REP-002, ESO Interferometry Science Advisory Committee (ISAC)
13. Malbet F., 1997, *Groupe TGE 1997 - Haute résolution angulaire hors radio*, in Technical report, Institut National des Sciences de l'Univers
14. Malbet F., Petrov R., Tallon M., Coudé du Foresto V., Reynaud F., and Mékarnia D., 1997, *Étude préliminaire de l'instrument proche-infrarouge / rouge du VLTI et de GI2T*, in Technical Report AMB-REP-001, Programme National Haute Résolution Angulaire en Astrophysique (PNHRAA)
15. Malbet F., 1996, *IVOIRE : Insertion d'une voie infrarouge sur REGAIN*, in Technical report, Programme National Haute Résolution Angulaire en Astrophysique (PNHRAA)
16. Malbet F., Perrier C., Mouillet D., Monin J. L., Ménard F., Lagrange A. M., Kern P., Forveille T., Chalabaev A., and Bouvier J., 1995, *VIRGID : Voie infrarouge pour GI2T*, in Technical Report 005, Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble (LAOG)