

→ GD , JLM , CK , AC
et affirmer!

PROPOSITION ET JUSTIFICATION SCIENTIFIQUE POUR

UN INTERFEROMETRE DEDIE AU DOMAINE INFRAROUGE

Table des matières

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1 | Introduction | 2 |
| 2 | Objectifs Scientifiques | 5 |
| 2.1 | Enveloppes Circumstellaires | 5 |
| 2.2 | Formation d'Etoiles | 10 |
| 2.3 | Systèmes Binaires | 11 |
| 2.4 | Proto Planètes | 12 |
| 2.5 | Structure Galactique | 12 |
| 3 | Contraintes Instrumentales | 13 |
| 3.1 | Choix du Site | 13 |
| 3.2 | Taille des Télescopes | 14 |
| 3.3 | Nombre de Télescopes | 14 |
| 3.4 | Infrastructure | 15 |
| 4 | Conclusion | 16 |
| | Références | 17 |
| | Légendes des figures | 18 |
| | Figures | 20 |

Document rédigé par S. Guilloteau

grâce à des discussions et documents fournis (principalement) par

C. Bertout, D. Bonneau, F. Casoli, D. Downes, E. Falgarone, P. Léna

J.M. Mariotti, B. Pégourié et C. Perrier

1 Introduction

Les premiers succès expérimentaux obtenus par l'équipe du CERGA avec l'I2T dans le visible et à $2.2\mu\text{m}$ puis plus récemment avec le GI2T (télescopes boules de 1.5m) ne sont certainement pas étrangers à l'intense floraison de projets d'interféromètres à laquelle la communauté internationale a assisté ces dernières années. Ces projets extrêmement variés dans leurs principes et dans leurs ambitions, peuvent être classés suivant des catégories très différentes. Nous retiendrons ici deux lignes de partage possibles qui marquent les oppositions : Visible/Infrarouge et Sol/Espace.

Un récent colloque ESA/NASA (Cargèse 1984) a mis en évidence l'immense potentiel qui s'ouvrirait à un interféromètre spatial du type TRIO en raison de sa très grande sensibilité et des très grandes bases qui peuvent être utilisées. En comparaison les interféromètres au sol payent le prix imposé par la turbulence atmosphérique qui limite de façon draconienne :

- La taille des télescopes élémentaires du réseau si l'on veut encore conserver la cohérence du front d'onde sur chacune des pupilles
- le temps d'intégration "instantané", nécessaire pour figer les figures de franges brouillées par les différences de marche aléatoires introduites par la turbulence.

A long terme, l'avenir de la très haute résolution spatiale visible (une base de 1 km à $\lambda = 0.5\mu\text{m}$ résoud des structures spatiales de $10^{-4}''$) se situe dans l'espace. Mais en raison des coûts élevés, le nombre de télescopes élémentaires restera probablement modeste (2 à 4) et les possibilités d'imagerie d'un tel système seront limitées. Au sol par contre, ces possibilités peuvent parfaitement être exploitées par un réseau dense (8 à 16 télescopes) de petites pupilles ($< 50\text{ cm}$) ; ce type d'instrument devrait donner accès sur les sources les plus brillantes à la cartographie avec une résolution typique de la milli seconde d'arc.

Quand la longueur d'onde augmente, ce tableau se modifie considérablement pour deux raisons :

- Le gain en sensibilité apporté par la satellisation diminue car on devient très rapidement limité par l'émission thermique des télescopes (en excluant la possibilité dans un avenir proche d'un interféromètre spatial IR cryogénisé).

- La dépendance chromatique des paramètres clés liés à la turbulence atmosphérique fait que les contraintes se relâchent rapidement [1]

A court terme un interféromètre IR au sol pourrait donc être constitué de "grands" télescopes (1.5m correspond à une pupille limitée par la diffraction à $3.8\mu\text{m}$ dans un bon site) en nombre relativement modeste. 3 est un minimum si l'on veut exploiter les possibilités de clôture de phase, l'optimum se situant dans la fourchette 4 à 6. La base peut atteindre sans problème 60 m (déjà exploitée à l'I2T du CERGA) et devrait pouvoir être étendue à 300 m sans difficulté majeure. Le domaine de longueur d'onde pourrait également être assez large : la région où l'émission thermique domine commence à $3\mu\text{m}$ environ, mais pour exploiter au mieux le domaine de sensibilité spectrale des détecteurs actuels, la limite doit être repoussée à $2.2\mu\text{m}$. A l'autre extrémité, il faut pour des raisons astrophysiques évidentes inclure la fenêtre $10\mu\text{m}$ et si possible celle à $20\mu\text{m}$.

Pour finir, nous donnons quelques repères quantitatifs. Le tableau suivant résume les performances attendues en résolution angulaire. Il donne pour les deux bases discutées dans le texte 60 et 300 m le diamètre angulaire d'une source correspondant au premier zéro de la fonction de visibilité et (entre parenthèses) le diamètre correspondant à une baisse de contraste de 25 % en mas (milli secondes d'arc).

| | 2.2 μm | 3.5 μm | 5.0 μm | 10 μm |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 60 m | 9.4 (3.6) | 14.9 (5.7) | 21.3 (8.2) | 42.7 (16.4) |
| 300 m | 1.9 (0.7) | 3.0 (1.1) | 4.3 (1.6) | 8.5 (3.3) |

Très grossièrement, on voit que la taille des objets optimum pour cet instrument se situe autour de 10 mas.

La Figure 1 donne la magnitude d'un corps noir de cette taille et à différentes températures (courbes pleines). Les barres horizontales donnant les limites de détection de franges sur une pose instantanée [2]. Un point important est que la stabilité de phase n'étant pas assurée le gain par temps d'intégration est très faible ($\propto T^{1/4}$). Un long temps d'intégration sur une source améliorera donc la précision des mesures mais fort peu la magnitude limite. Il existe cependant une exception intéressante, celle où dans le champ observé une structure brillante non résolue forme une référence de phase : l'intégration permet alors de repousser largement les magnitudes limites. Nous donnons en pointillés les valeurs pour une heure d'intégration. Nous avons également reporté sur la Figure 1 quelques objets (noyaux cométaires, sources compactes dans les nuages moléculaires, noyaux de galaxies de Seyfert).

2 Objectifs Scientifiques

2.1 Enveloppes circumstellaires et étoiles évoluées

L'étude des enveloppes circumstellaires des géantes rouges est de partie prenante de deux grandes branches de l'astrophysique actuelle: la physico-chimie des poussières et la physique du phénomène de perte de masse, les deux étant intimement liées.

L'importance de ces deux domaines est due pour une bonne part à leur implication très forte dans les cadres plus généraux de la physique stellaire et galactique: le taux de perte de masse observé (jusqu'à 10^{-4} M_{\odot} /an pour une étoile de 1 à 10 M_{\odot}) étant suffisamment fort pour être non seulement un des principaux paramètres d'évolution sur la branche des géantes, mais aussi faire de ces objets les principaux générateurs de poussières interstellaires.

Bien qu'il semble établi que l'action de la pression de radiation sur les poussières soit une des principales sources d'impulsion de ce vent [3], le mécanisme précis reste encore mal connu, entraînant une forte imprécision sur la détermination des grandeurs physiques associées. Pour un même objet, les valeurs du taux de perte de masse données dans la littérature peuvent varier de deux ordres de grandeurs. Cette situation tient largement au fait que, de par leur forte interdépendance, les caractéristiques géométriques et physiques de l'enveloppe de poussières (dont la bonne connaissance détermine la fiabilité des résultats) ne sont pas déductibles de façon univoque de la seule étude du spectre de ces objets. La haute résolution spatiale non seulement permet de déduire certaines de ces caractéristiques, mais apporte aussi des informations fondamentales sur le comportement optique des grains.

Pour une étoile entourée d'une enveloppe d'épaisseur optique modérée ($\tau < 1$) et pour des longueurs d'onde supérieures à $1 \mu\text{m}$, la lumière détectée en dehors du disque stellaire provient, au fur et à mesure que la longueur d'onde augmente, d'abord de la composante de la lumière

stellaire diffusée par les grains, ensuite de l'émission thermique des poussières elles-mêmes. La transition entre les zones où domine telle ou telle source de rayonnement se situe vers $\lambda=6\mu\text{m}$ pour les étoiles oxygénées, $\lambda=2\mu\text{m}$ pour les étoiles carbonées. Cette différence d'origine physique de la lumière circumstellaire se traduit par une variation importante de la dimension de la région émettrice dont l'évolution en fonction de la longueur d'onde est schématiquement représentée Figure 2.

Dans la première zone (où domine la composante diffusée), on observe une augmentation régulière du diamètre angulaire de l'objet [4,5]. Cet effet est dû à l'isotropisation de l'indicatrice de diffusion des poussières au fur et à mesure que le rapport entre la taille des grains et la longueur d'onde décroît. Selon que l'objet observé sera carboné (condensation de grains de graphite ou carbone amorphe) ou oxygéné (condensation de grains de silicates), selon la taille des grains et leur état de surface (caractéristiques auxquelles les propriétés de diffusion sont beaucoup plus sensibles que les propriétés d'absorption), l'évolution du diamètre angulaire avec la longueur d'onde différera notablement entre 1 et 7 μm . A titre d'exemple, la Figure 3 (reproduite de [5]) montre cette variation pour 3 objets oxygénés (NML Cyg, AFGL 915, et VY CMa) et 2 objets carbonés (IRC+10216 et CIT 6). La différence de comportement est évidente et illustre clairement l'intérêt de ces mesures pour l'étude des enveloppes circumstellaires. L'étude précise de cette évolution permet en effet de remonter à certaines caractéristiques géométriques des grains comme leur dimension fractale et, par là, d'apporter des informations sur leur mode de croissance [6].

Aux plus grandes longueurs d'onde, où la lumière en provenance de l'enveloppe a pour origine l'émission thermique des poussières, les mesures à haute résolution spatiale permettent de déterminer le rayon de condensation du matériau circumstellaire r_1 . La connaissance de celui-ci est capitale pour comprendre précisément le processus de condensation des grains et contraindre les modèles théoriques de nucléation, particulièrement délicats à construire du fait de notre ignorance des propriétés physiques des tout petits grains (quelques \AA). A titre d'exemple, une précédente étude portant sur des objets oxygénés a permis

d'établir que ce rayon variait systématiquement avec les caractéristiques de l'étoile centrale (rayon r_* et température T_* , Figure 4) et que cette variation était explicable en termes de théorie de la condensation [7]. L'établissement de telles lois empiriques concernant différents types d'objets constitue une étape importante pour la compréhension des conditions d'apparition des poussières circumstellaires.

De ces mesures sont également déductibles les conditions physiques à la base du "vent de grains", augmentant ainsi considérablement la fiabilité des déterminations des taux de perte de masse basées sur les mesures dans l'infra-rouge de l'excès de radiation dû aux poussières.

En plus de ces considérations générales sur la physique des enveloppes circumstellaires, plusieurs points spécifiques peuvent d'ores et déjà être mentionnés comme objectifs de l'interférométrie infrarouge.

Variations Temporelles : Les observations récentes d'un disque de poussières autour de Bételgeuse [8] et de variations possibles de son émission à $10 \mu\text{m}$ [9] semblent montrer que les propriétés des poussières peuvent varier sur une échelle de temps de un an.

Bandes Spécifiques : Dans les étoiles oxygénées (Miras ou OH/IR), il serait probablement intéressant d'obtenir des mesures de diamètres dans les bandes spécifiques correspondants aux silicates, aux glaces d'eau et d'ammoniac. Les températures de condensation des ces divers composés étant fort différentes, on peut espérer mettre en évidence les variations de diamètres associées, au moins dans les objets les plus proches. Dans les étoiles carbonées, une étude dans les bandes des hydrocarbures polyaromatiques (PAH) ($3.4 \mu\text{m}$) serait spécifiquement intéressante, car elle permettra peut être de décider si ces "molécules" sont les précurseurs des poussières carbonées, ou au contraire formées par collisions et cassures de poussières plus grosses.

Objets particuliers : Un cas particulier d'étoiles potentiellement intéressantes concerne les Wolf-Rayet. En raison de leur grande luminosité intrinsèque, la zone de condensation des poussières doit être

plus grande. Mais ces étoiles sont aussi en moyenne plus lointaines que les géantes et supergéantes M envisagées ci-dessus.

Masers SiO : Certains modèles actuels envisagent les masers SiO traçant les cellules de convection géantes dans la photosphère de l'étoile, alors que dans X Cygni, des observations à haute résolution spectrale de CO et des considérations cinématiques indiquent que SiO viendrait d'une couche spécifique ayant une température de 800 K, à une distance de 10 rayons stellaires (200 mas) [10]. L'étude de la bande des silicates peut aussi fournir des indications sur les mécanismes d'excitation des masers SiO. En effet la mesure effective des tailles des masers SiO sera bientôt à la portée de l'interférométrie à très grande base en millimétrique. La comparaison entre l'étendue des régions masers et la zone de condensation des silicates peut jouer un rôle clé dans la détermination des processus de pompage. De plus, l'interférométrie infrarouge peut aussi fournir une indication du flux à 3.5 μm disponible pour le pompage radiatif dans les bandes de vibration de SiO.

Mécanismes d'accélération : Les mécanismes d'accélération des enveloppes sont encore mal connus. Des observations des raies moléculaires infrarouge dans plusieurs types d'étoiles (H_2O dans R Leo [11], CO dans dans IRC+10216 [12]) révèlent plusieurs composantes cinématiques, suggestives soit de l'éjection de couches séparées, soit de l'existence de zones d'accélération distinctes. Les molécules utilisées peuvent cependant être affectées par d'éventuels problèmes d'opacité ou d'abondance et donc sélectionner préférentiellement certaines couches de l'enveloppe. L'interférométrie infrarouge offre la possibilité de mesurer la densité projetée de poussières en fonction de la distance à l'étoile centrale, et donc indirectement, la vitesse d'éjection en fonction de la distance.

Structure Stellaire, Miras : L'interférométrie infrarouge permettra la mesure de diamètre de nombreuses étoiles de type Mira ou OH/IR. La répétition fréquente de telles mesures doit permettre l'étude directe des corrélations luminosité-diamètre prédites par les modèles de structure stellaire. Pour fixer les ordres de grandeur, le diamètre de X Cygni en

optique est de 20 mas. De plus, des mesures spectroscopiques des raies de CO à 2 et 4.6 μm semblent indiquer que cette étoile est caractérisée par une photosphère en pulsation régulière, entourée d'une enveloppe complexe [10]. La mesure des variations de diamètre et des variations associées de température effective est envisageable.

Morphologie, bipolarité : Deux "coeurs" d'enveloppes sont actuellement suffisamment résolus par les méthodes d'interférométries des tavelures en IR proche IRC+10216 et VYCMa. Ces deux étoiles présentent une asymétrie certaine, et un modèle plus compliqué à trois composantes a même été invoqué pour expliquer les observations IRC+10216. Pour toutes les autres enveloppes étudiées, la résolution spatiale est insuffisante pour mesurer une éventuelle asymétrie à la même échelle [13]. L'existence de telles asymétries est troublante en regard de la symétrie des parties externes des enveloppes étudiées par les raies d'émission millimétriques. A l'opposé, dans le cas d'objets d'apparence bipolaire connue (CRL2688 par exemple), l'interférométrie permettra de savoir jusqu'à quelle échelle cette bipolarité existe. Il peut y avoir là un moyen de révéler quelle fraction des enveloppes stellaires sont dues à des mécanismes d'éjection déclenchés par des étoiles doubles.

De ce qui précède, il apparait qu'une bonne résolution angulaire est un atout important dans l'étude de la physique des enveloppes des étoiles évoluées. La nouvelle génération de grands appareils à synthèse d'ouverture devrait apporter une importante moisson de résultats dans ce domaine. En effet, les objets que nous considérons ici sont suffisamment brillants pour que ce soit leur dimension angulaire qui limite les observations, et non leur luminosité à la longueur d'onde considérée. Le diamètre d'une étoile géante typique située à 1 kpc varie entre quelques 10 mas pour $\lambda=2\mu\text{m}$ à environ 100 mas pour $\lambda=10\mu\text{m}$. Suivant Allen [14] les géantes rouges de type spectral M représentent environ $10^{-5} M_{\odot}/\text{pc}^3$, soit un nombre d'objets potentiellement observables de l'ordre de quelques 10^3 .

2.2 Formation d'étoiles

Dans le domaine de la formation d'étoiles, l'interférométrie infrarouge est probablement l'un des meilleurs moyens pour l'étude des proto-étoiles et de leur environnement. L'environnement présumé d'une proto-étoile ressemble aux enveloppes des étoiles évoluées. Seules la cinématique et l'origine du matériau sont différentes, mais ceci a peu d'influence sur la structure de l'émission infrarouge.

En interférométrie des tavelures, on peut citer la détection de disques "proto-planétaires" autour de HL Tauri [15] et de R Mon, et la mise en évidence d'un disque de poussières dans Orion IRC2 [16]. La détection par le satellite IRAS de disques de poussières "protoplanétaires" autour d'étoiles plus évoluées comme Beta Pictoris ou encore Véga [17] est aussi un problème relié.

Un interféromètre infrarouge permettrait essentiellement d'agrandir le nombre d'objets accessibles, en donnant accès aux régions de formation plus lointaines et donc à un échantillon beaucoup plus vaste de types d'objets et d'environnements. Une trentaine d'objets représentant des étoiles très jeunes encore enfouies dans des nuages moléculaires denses sont actuellement identifiés ; aucun ne semble être une véritable proto-étoile au sens strict. Tous ces objets ont des tailles caractéristiques de 10 à 30 mas (sur la base de leur flux et de leur température de couleur). De même, BN est entouré d'une région HII de 80 mas de diamètre [18] et des observations spectroscopiques dans l'IR proche [19] semblent indiquer des régions d'accrétion et d'éjection de tailles quelques mas.

La plupart des étoiles jeunes semblent passer par une phase de formation de flots moléculaires [20]. Ces flots sont observés en radioastronomie millimétrique, essentiellement grâce à la molécule ^{12}CO . Beaucoup d'entre eux ont une morphologie bipolaire (Figure 5), mais le mécanisme de focalisation n'est pas encore déterminé. Il reste possible que le vent stellaire soit lui-même anisotrope, mais les observations les

plus récentes de L1551 en radio et en infrarouge prouveraient plutôt que le flot est focalisé très près de l'étoile par un disque, probablement un reste du disque d'accrétion. Les observations infrarouge [21] utilisent une méthode d'entropie maximum pour reconstruire une image avec une résolution effective de $0.6''$ à $2\mu\text{m}$. La structure observée, de taille $5''$, est effectivement allongée perpendiculairement au flot (Figure 6). Il pourrait s'agir de l'intérieur d'un disque évidé. Les observations radio [22] ont une résolution de $0.15''$, et montrent deux pics séparés de $0.30''$ superposés à une émission étendue plus faible (Figure 7). Ceci peut être interprété comme le bord intérieur ionisé par choc d'un disque d'accrétion (Figure 8).

De tels disques sont peut-être présents dans la majorité des flots bipolaires connus à ce jour, soit environ une centaine d'objets. Les dimensions du disque de L1551 sont de l'ordre de 50 UA (bord intérieur) à 1000 UA (extension totale). De tels disques pourraient donc être mis en évidence par interférométrie infrarouge jusqu'à des distances de quelques kpc.

2.3 Systèmes binaires

T Tauri s'est révélée récemment dotée d'un compagnon détectable seulement en Infrarouge [23], et plus récemment encore d'un deuxième compagnon détecté en optique. La résolution actuelle par interférométrie des tavelures en infrarouge est tout juste suffisante pour pouvoir détecter ce second compagnon encore énigmatique qui semble toutefois de nature stellaire [24]. La fréquence des systèmes binaires est un problème éventuellement relié aux mécanismes de formation de flots bipolaires, et de façon plus générale au problème de dissipation du moment angulaire dans les phases de formation d'étoiles.

Il est ainsi paradoxal que jusqu'à présent, T Tauri mis à part, les observations d'étoiles en formation (ou très jeunes) révèlent soit l'existence de systèmes multiples marginalement liés (groupe de régions H_{II} compactes, de sources d'infrarouge proche ponctuelles), soit des

disques massifs autour d'objets enfouis [16], alors qu'une étude statistique faite sur les étoiles les plus proches de type solaire [25] montre que les 3/4 de ces étoiles appartiennent à des systèmes multiples. La moitié ont un compagnon de masse comparable, les autres soit un compagnon de type naine brune, soit un système planétaire.

2.4 Proto-Planètes

L'étude à très haute résolution des disques similaires à ceux de Véga et Beta Pictoris (en particulier la recherche de tels disques autour d'autres étoiles) peut être à la limite des possibilités d'un interféromètre infrarouge. C'est en effet l'un des rares cas où l'on peut gagner en sensibilité par intégration en mesurant la phase grâce à l'étoile. Des essais par interférométrie des tavelures peuvent déjà indiquer si des structures fines existent ou non.

2.5 Structure Galactique

La mesure systématique du diamètre apparent d'étoiles M supergéantes peut constituer un étalon de distance galactique indépendant de modèles de courbes de rotation. L'avantage par rapport à des mesures similaires dans le visible est dû à l'influence de l'extinction interstellaire qui décale vers l'infrarouge proche le maximum d'émission des étoiles. Avec l'avènement d'Hipparcos, la calibration d'une telle relation doit être possible jusqu'à 2 kpc.

3 Contraintes Instrumentales

Les objectifs scientifiques mentionnés ci-dessus conduisent à proposer la construction d'un instrument spécifique doté d'assez grands télescopes (rendus indispensables par la volonté d'observer jusqu'aux longueurs d'ondes de 10 à 20 μm), situés sur un bon site, avec une ligne de base allant au moins jusqu'à 300 m. Le caractère dédié de l'instrument est rendu nécessaire par le grand nombre d'objets potentiellement étudiables ainsi que par leur variété. Le peu de temps disponible sur le VLT en mode interférométrique ne suffirait pas à assurer le minimum d'observations nécessaire. Au contraire, le VLT doit être réservé aux seuls projets qui nécessitent l'utilisation de très grands collecteurs; en infrarouge ceci concerne principalement les noyaux de galaxies actifs vers 10 et 20 μm .

La faisabilité d'un interféromètre infrarouge à été démontrée par les expériences pionnières du CERGA (I2T et GI2T). Le passage au stade d'un interféromètre opérationnel (c'est à dire utilisable non seulement par ses concepteurs et constructeurs mais aussi par toute la communauté astronomique) semble donc nécessaire.

3.1 Choix du site :

La qualité de seeing et la transparence requise pour l'observation aux plus grandes longueurs d'onde ($> 10 \mu\text{m}$) imposent un site de haute montagne et excluent le site actuel du CERGA. D'autre part, en raison du caractère novateur de l'instrument, il est indispensable de choisir un site proche, donc situé en France métropolitaine, et disposant d'une infrastructure scientifique existante. Compte tenu de la nécessité de lignes de base supérieures à 300 m, il existe en France (et même en Europe continentale) un seul site répondant à ces critères : le plateau de Bure où sont installés l'interféromètre millimétrique de l'IRAM et le radiotélescope millimétrique français POM2.

Les tout premiers mois d'exploitation de POM2 sont extrêmement

encourageants en ce qui concerne la transparence atmosphérique. Malgré la période défavorable (été chaud) de nombreuses nuits et matinées ont vu des quantités de vapeur d'eau précipitable nettement inférieures à 3 mm.

3.2 Taille des télescopes :

1.5 m semble un excellent compromis entre la simplicité des observations dans l'infrarouge proche (interférométrie multi-speckle) et la sensibilité à 20 μm . Le coût unitaire de tels télescopes doit rester modéré. Notons aussi qu'il est inutile de prévoir des télescopes de qualité optique car les expériences purement infrarouge sont en nombre suffisant pour justifier le projet. Se réserver la possibilité d'observations en optique ne semble justifié que si aucun surcoût sensible n'en résulte. Seuls des télescopes de la classe 8 m permettraient des projets inaccessibles à des télescopes de 1.5 m. Le VLT devrait suffire à effectuer les meilleurs de ces projets.

3.3 Nombre de télescopes :

Ce n'est pas uniquement un problème financier. En effet, un grand nombre de télescopes n'est pas aussi intéressant qu'en radioastronomie en raison de l'impossibilité d'analyser toutes les lignes de base sans diviser les faisceaux issus de chaque télescope avec la perte de sensibilité résultante. De plus seul le MMT a actuellement montré la possibilité de phaser plus de 2 pupilles, ceci n'ayant pas encore été réalisé avec des montures indépendantes.

En pratique un petit nombre (3 à 6 maximum) de télescopes semble suffisant. Beaucoup d'astrophysique intéressante peut déjà se réaliser avec deux télescopes seulement. Le projet étant très modulaire, on peut envisager les étapes suivantes :

- 1) premières exploitations scientifiques avec deux télescopes
- 2) adjonction de deux télescopes supplémentaires permettant d'observer simultanément deux lignes de base. Cette configuration permet de simplifier au maximum le schéma optique des tables interférométriques tout en explorant l'intérêt de la simultanéité d'observation de deux

visibilités.

3) adjonction progressive des lignes de base non exploitées après étude de tables interférométriques adaptées, premiers essais d'utilisation de relations de clôture de phase permettant de véritables synthèses d'images.

4) achèvement de l'instrument par adjonction des 2 derniers télescopes et des tables interférométriques correspondantes.

Chaque nouvelle étape pourrait se réaliser dans un cadre international par adjonction de nouveaux partenaires. Notons aussi que la modularité de l'instrument et la relative légèreté des télescopes laisse envisager le déménagement sur un site éventuellement meilleur après la phase 3, quand tous les problèmes instrumentaux critiques seront résolus.

3.4 Infrastructure :

Le choix du site de Bure réduit considérablement les coûts d'infrastructure. Toutefois, il semble difficile d'envisager l'exploitation des deux interféromètres (millimétrique et infrarouge) sur les mêmes voies de transport déjà réalisées. La difficulté essentielle tient aux échelles de temps des deux instruments. L'interféromètre millimétrique nécessite des temps d'intégration relativement long et est avant tout destiné à faire des synthèses de peu d'objets. Au contraire, l'interféromètre infrarouge nécessite des temps d'intégration très courts, mais observera beaucoup de plus de sources. Une même configuration millimétrique sera typiquement conservée pendant 1 mois au moins, comparé à tout au plus quelques jours pour l'infrarouge. Cette différence empêche pratiquement l'utilisation de voies communes, à moins d'accepter des contraintes très sévères pour l'un et l'autre instrument, pouvant résulter dans la perte des meilleurs moments d'observation en quantités importantes. Toutefois, les terrassements principaux ayant déjà été effectués et les télescopes infrarouge étant très légers en comparaison des antennes millimétriques, le coût de voies parallèles pour l'infrarouge peut rester dans des limites raisonnables.

4 Conclusion

Il semble qu'un tel projet soit actuellement dans une phase similaire à celle où se trouvait l'IRAM 3 ans avant signature des accords ayant conduit à sa création, avec cependant de nombreux avantages :

- un coût très largement inférieur
- une modularité quasi totale
- une faisabilité technique démontrée tant au point de vue télescopes que détecteurs et tables interférométriques
- une avance Française sensible dans le domaine
- et surtout un contexte scientifique nettement mieux défini

Le coût de la première phase du projet semble suffisamment peu élevé pour permettre à la France de s'y engager sans avoir à attendre le résultat de tractations internationales toujours longues et délicates. Tout retard conduirait le projet dans la même situation que l'interféromètre millimétrique de l'IRAM : un projet (européen) scientifiquement très intéressant mais qui ne serait plus ni unique, ni même le premier en son genre.

Références

- 1 Roddier 1981, Progress in Optics
- 2 Roddier et Léna 1984, J. of Optics 15 363
- 3 Holtzer T.E., Mc Gregor K.B. 1985, Mass Loss from Red Giants, Astrophysics and Space Science Library, 117 229
- 4 Mariotti J.M., Chelli A., Foy R., Léna P., Sibille F. Tchoutonov G. 1983, Astron. Astrophys. 120 237
- 5 Dyck H.M., Zuckerman B., Leinert C., Beckwith S. 1984 Astrophys. J. 287 801
- 6 Botet R. 1985 Thèse d'état, Université Paris Sud
- 7 Pégourié B. 1985 Thèse d'état, Université Paris 7
- 8 Roddier et Roddier 1985 Astrophys. J. 295 L21
- 9 Bloemhof Danchi et Townes C.H. 1985 Astrophys. J. 229 L38
- 10 Hinkle et al. Astrophys. J. 252 697
- 11 Hinkle and Barnes 1979 Astrophys. J. 227 923
- 12 Sahai and Wootten Astrophys. J. 299 424
- 13 Dyck et al. 1984 Astrophys. J. 287 801
- 14 Allen C.W. 1973, Astrophysical Quantities, the Athlone Press 247
- 15 Beckwith et al. 1984 Astrophys. J. 287 793
- 16 Chelli et al. 1984 Astrophys. J. 280 163
- 17 Auman et al. 1984 astrophys. J. 278 L23
- 18 Moran et al. 1983 Astrophys. J. 271 L31
- 19 Scoville et al. 1984 Astrophys. J. 275 201
- 20 Lada C.J. Ann. Rev. Astron. Astrophys. 23 267
- 21 Strom S.E., Strom K.M., Grasdalen G.L., Capps R.W., DeAnne T. 1986 pré-publication
- 22 Rodriguez L.F., Canto J., Torrelles J.M. 1986 Astrophys. J. 301 L25
- 23 Dyck et al. 1982 Astrophys. J. 255 L103
- 24 Nisenson et al. 1985 Astrophys. J. 297 L17
- 25 Abt 1982, Protostars and Planets I

Légendes des figures

Figure 1 : Sensibilité attendue d'un interféromètre à deux télescopes de diamètre 1.5 m. Les traits horizontaux indiquent la sensibilité obtenue pendant un temps de cohérence de l'atmosphère (0.1s), et ceux en pointillés après une heure d'intégration cohérente (ce qui suppose une source de référence de phase). On voit que les objets du système solaire sont inobservables avec un tel instrument, le noyau de galaxie le plus actif est juste détectable à $5 \mu\text{m}$ (mais pas à 2). Par contre, de nombreux objets jeunes tels que GL2591 sont très facilement observables, de même que les géantes rouges. Les courbes en trait plein indiquent la magnitude d'un corps noir de 10 mas (Les températures de ces corps noirs et les luminosités équivalentes à 1 kpc sont indiquées en bas à droite).

Figure 2 : Evolution schématique du rayon angulaire d'une étoile entourée d'une enveloppe de poussières en fonction de la longueur d'onde. Le trait plein représente le cas d'un objet oxygéné, le trait pointillé celui d'un objet carboné.

Figure 3 : Variation du diamètre avec la longueur d'onde pour 3 objets oxygénés (à gauche) et 2 objets carbonés (à droite).

Figure 4 : Relation empirique entre le rapport des rayons de l'enveloppe et de l'étoile et la température stellaire. Les barres représentent les observations (de haut en bas α Sco α Ori o Ceti et R Leo). Les croix représentent les objets dont les dimensions géométriques ont pu être déduites de modèles. La ligne continue représente le lieu de condensation des poussières tel que déduit de la thermodynamique de la condensation

Figure 5 : Carte du flux bipolaire de L1551. En traits pleins, on a représenté l'aire intégrée de l'émission ^{12}CO entre -6 et 4 km.s^{-1} (aile "bleue") et en pointillés entre 9 et 19 km.s^{-1} (aile "rouge"). La morphologie du flot est clairement bipolaire et centrée sur la source

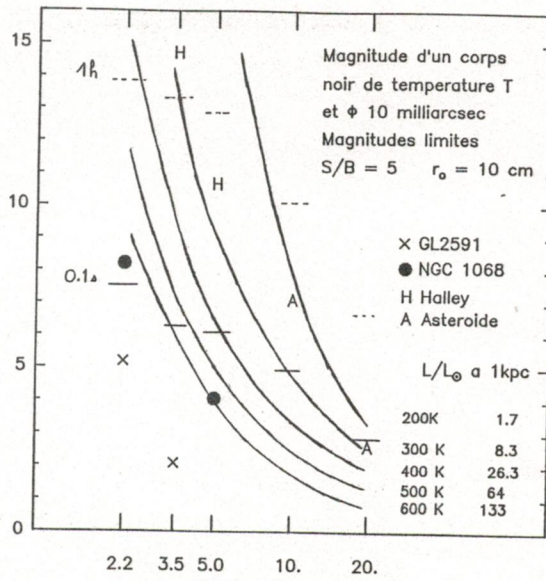
infrarouge L1551-IRS5.

Figure 6 : Image à $2 \mu\text{m}$ de la région autour de L1551 IRS5. La résolution maximale est de $0.6''$ (légèrement variable en fonction du rapport signal sur bruit en raison de la méthode de restauration d'image employée)

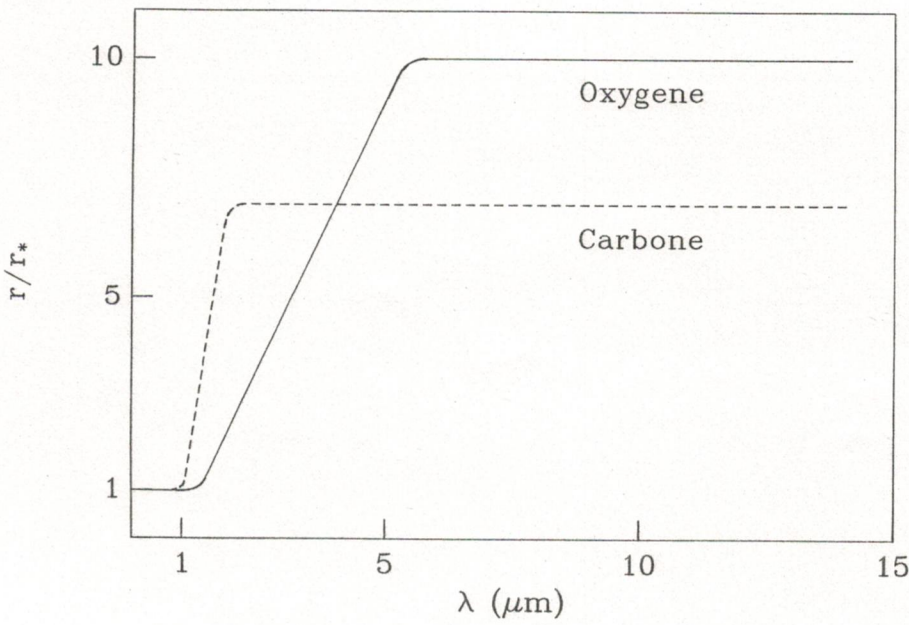
Figure 7 : Carte VLA de L1551 à 2 cm. Haut : résolution $0.15''$ et contours par pas de 0.14 mJy par lobe. Bas : résolution $0.38''$ et contours par pas de 0.28 mJy par lobe.

Figure 8 : Modèle proposé pour l'émission radio près de L1551. Le vent stellaire neutre de l'étoile centrale ionise par choc les bords du tore de gaz moléculaire et de poussières, et est focalisé par ce tore.

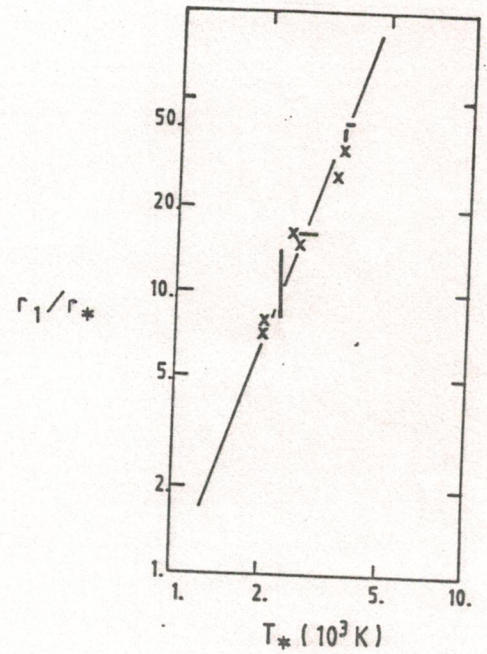
1



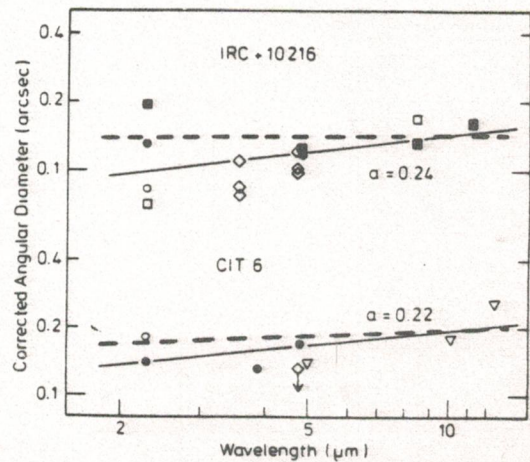
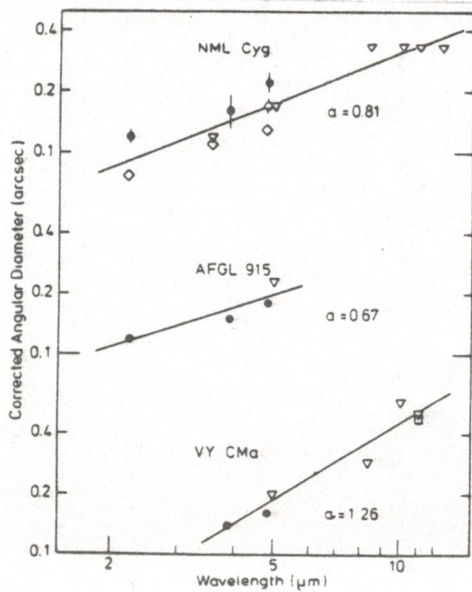
2



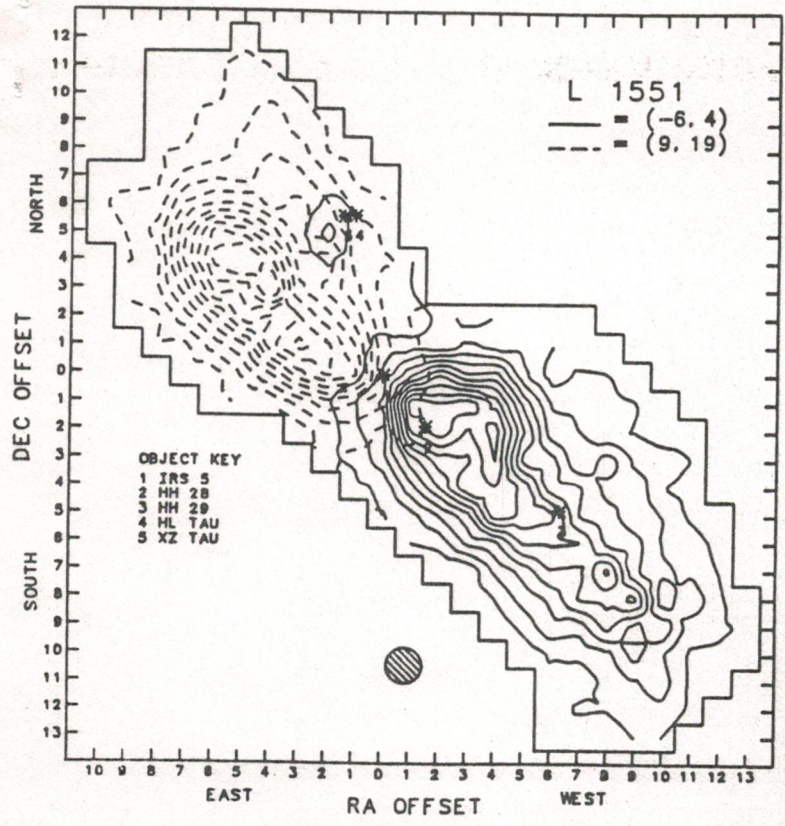
4



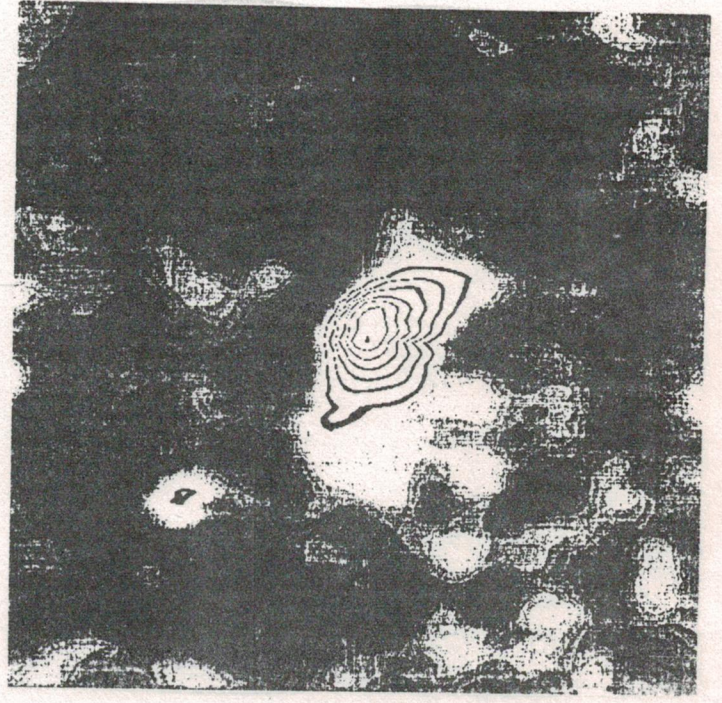
3



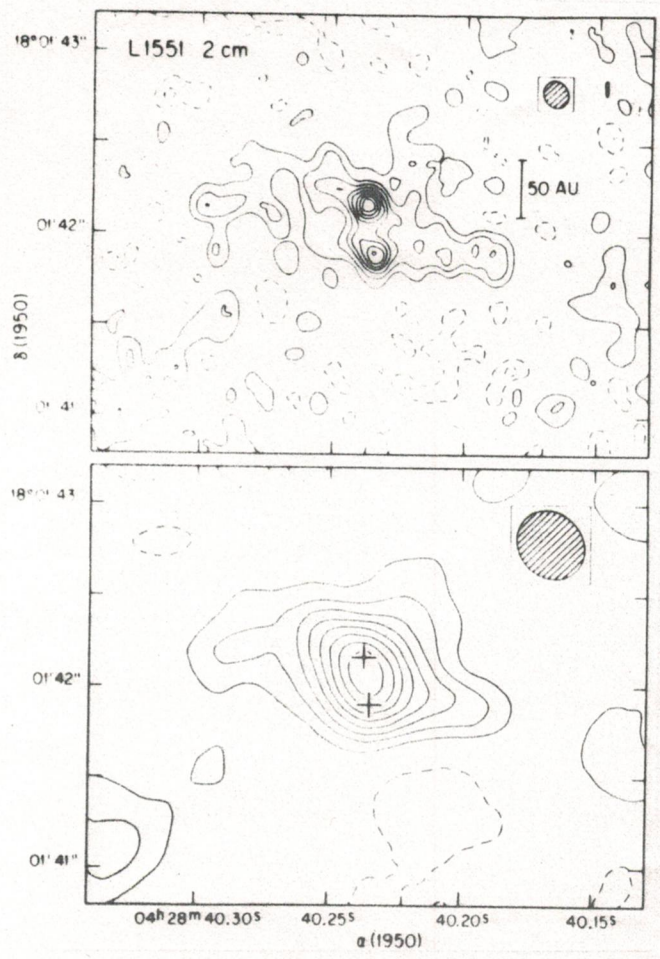
5



6



7



8

