

ISOGAL : Relevé multi-longueur d'onde infrarouge du coeur invisible de la Voie Lactée¹

Alain Omont & La Collaboration ISOGAL

*Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, 98bis Bd Arago,
F-75014 Paris*

Abstract. The ISOGAL project is a survey of the stellar populations, structure, and recent star formation history of the inner disk and bulge of the Galaxy. ISOGAL combines $15\ \mu\text{m}$ and $7\ \mu\text{m}$ ISOCAM observations with DENIS IJK_s data to determine the nature of a source, its luminosity and its mass-loss, and the interstellar extinction. It has observed $\sim 16\ \text{deg}^2$ with a sensitivity $\sim 10\text{--}20\ \text{mJy}$, detecting $\sim 10^5$ sources, mostly AGB stars, red giants and young stars.

1. Introduction

Le programme ISOGAL est un relevé multi-longueur d'onde à haute résolution spatiale de la Galaxie interne (Omont et al. 2002, Schuller et al. 2002). En combinant les données à 7 et $15\ \mu\text{m}$ d'ISOCAM aux données K($2.15\ \mu\text{m}$), J($1.2\ \mu\text{m}$) et I($0.8\ \mu\text{m}$) du relevé DENIS, les principaux objectifs de cet important programme du satellite ISO sont l'étude des populations stellaires de la Galaxie interne et de leur répartition spatiale, ainsi que de l'émission diffuse infrarouge du milieu interstellaire.

Les données d'ISOCAM sont deux ordres de grandeur plus sensibles que celles d'IRAS, avec une résolution spatiale 10 fois meilleure, ce qui permet d'atteindre des sensibilités de $10\text{--}15\ \text{mJy}$ dans les champs typiques observés. Généralement, environ 90% des sources ISOCAM peuvent être associées à une source infra-rouge proche du relevé DENIS. Les cinq longueurs d'onde d'ISOGAL-DENIS permettent normalement une détermination fiable de la nature des sources et de leur rougissement interstellaire. Si une large fraction des sources détectées seulement

¹Cet article est basé sur des observations d'ISO, un programme de l'ESA utilisant des instruments financés par des états membres (spécialement par les états responsables de ces instruments : France, Allemagne, Pays-Bas et Royaume Uni), avec la participation de l'ISAS et de la NASA.

par les observations à $7\ \mu\text{m}$, plus profondes, sont des géantes rouges de la première branche (RGB), les étoiles de la branche asymptotique des géantes (AGB) sont majoritaires dans les sources à $15\ \mu\text{m}$. Leur luminosité est un peu supérieure à celle du sommet de la branche RGB et la plupart ont une perte de masse plus ou moins importante. Outre quelques étoiles d'avant-plan de la série principale, ISOGAL a aussi détecté un bon nombre de jeunes étoiles à disque ou enveloppe poussiéreuse. On s'attend aussi à ce que les quelques cent mille étoiles ISOGAL comprennent diverses sources exceptionnelles qui sont encore très loin d'être identifiées pour la plupart.

Les relevés dans l'infrarouge proche, 2MASS (Skrutskie et al. 1997) et DENIS (Epchtein et al. 1997), sont généralement nettement plus sensibles qu'ISOGAL pour détecter la plupart de ces étoiles, en particulier celles sans poussière quand l'extinction n'est pas extrêmement grande. Mais l'infrarouge proche seul est très limité pour démêler les effets de l'émission circumstellaire du rougissement interstellaire. Seuls les relevés spatiaux dans l'infrarouge moyen comme ISOGAL, MSX (Egan et al. 1998, Price et al. 2001) ou SIRTIF et ASTRO-F dans le futur, sont à même de recenser les étoiles AGB à perte de masse et d'identifier un grand nombre de jeunes étoiles.

2. Observations et traitement des données

Les observations d'ISOGAL se sont étendues de janvier 1996 à avril 1998, c'est à dire pratiquement durant toute la durée de la mission ISO. Les champs observés ont été choisis de façon à échantillonner le disque galactique interne (principalement $-45^\circ < l < +45^\circ$, $-1^\circ < b < +1^\circ$). Leur répartition est régulière, mais beaucoup plus serrée au centre que vers l'extérieur du disque. Un problème majeur fut d'éviter les très fortes sources susceptibles de saturer les détecteurs d'ISOCAM. Les observations ont été ainsi distribuées dans des petits champs $l \times b$ rectangulaires évitant les fortes sources IRAS à $12\ \mu\text{m}$. La plus grande partie du relevé a été effectuée avec les paramètres standard suivants, optimisant la rapidité de la cartographie : filtres à bande large d'ISOCAM, LW3, $12\text{--}18\ \mu\text{m}$ ou LW2, $5\text{--}8.5\ \mu\text{m}$; pixels de $6''$; images élémentaires de $3' \times 3'$ se recouvrant à moitié ; très courte durée d'intégration, comparable aux temps morts. Cependant une stratégie spéciale (filtres plus étroits, LW9, LW6 ou LW5, pixels de $3''$) a permis de relever la limite initiale des sources à éviter (de $F(12\ \mu\text{m}) < 6\ \text{Jy}$ à $F(12\ \mu\text{m}) \lesssim 20\ \text{Jy}$) de façon à étendre les observations à quelques régions de formation stellaire et au voisinage (pas trop proche) du Centre Galactique. Quelques champs supplémentaires ont aussi été ajoutés dans les derniers mois de la mission, dans le disque entre $+50^\circ$ et $+105^\circ$ et dans le bulbe. De plus 18 champs de $3' \times 3'$ ont été observés

dans le mode spectroscopique CVF d'ISOCAM (5–16 μm), fournissant des spectres à basse résolution de près de $2 \cdot 10^4$ pixels.

Les associations systématiques avec les sources DENIS de l'infrarouge proche K, J et I sont une partie importante du programme ISOGAL. Des observations spéciales de DENIS pour les champs ISOGAL, étendues ensuite à tout le bulbe et au disque internes, ont été réalisées à cet effet (Simon et al. en préparation) pour assurer la disponibilité précoce des données de DENIS.

Comme il a été dit, la rapidité du relevé a été quelque peu privilégiée par rapport à la qualité des données. La réduction de ces dernières pose donc divers problèmes pour un certain nombre de raisons : fond infrarouge diffus élevé et très structuré, grande densité de sources fortes provoquant des effets de latence de longue durée dans les détecteurs, temps d'intégration trop courts, sous-échantillonnage des images, manque de redondance, encombrement des champs observés, etc. En conséquence, une chaîne de traitement de données un peu modifiée par rapport au traitement standard avec les logiciels "CIA"² des données d'ISOCAM a été mise au point par C. Alard et F. Schuller, en introduisant en particulier une méthode d'extraction des sources adaptée, avec régularisation de la fonction d'étalement des sources ponctuelles ("psf"). Les détails du traitement des données ISOGAL et de la vérification de leur qualité sont décrits par Schuller et al. (2002).

Le traitement de la première version du catalogue des sources d'ISOGAL associées à celles de DENIS est terminé; il va être disponible prochainement au CDS. Bien qu'on puisse encore attendre dans le futur des améliorations substantielles du traitement des données d'ISOGAL (Milville–Deschênes, en préparation), leur qualité actuelle dans les différents domaines (fiabilité, complétude, photométrie, astrométrie, associations) est suffisante pour permettre une exploitation scientifique systématique.

La limite de complétude en flux a été systématiquement analysée par la méthode des sources artificielles injectées dans les images et vérifiée sur les résultats d'observations multiples de quelques champs. Elle dépend de la densité des sources, du fond diffus et des filtres utilisés. Dans les conditions standard du relevé ISOGAL (filtres larges et pixels de 6"), la limite de complétude à 50% se situe typiquement respectivement à $\sim 15\text{--}20$ mJy selon la densité des sources (magnitudes ~ 9.5 et 9) avec le filtre LW2 à 7 μm . Les valeurs correspondantes avec le filtre LW3 à 15 μm sont de $\sim 8\text{--}13$ mJy (magnitudes 8.5 et 8). La sensibilité est moins

²Les logiciels CIA ont été développés conjointement par le Consortium ISOCAM et la Division Astrophysique de l'ESA

bonne dans les régions à très forte densité et à fond diffus élevé qu'il a fallu observer avec des filtres étroits.

La réalité des sources ponctuelles extraites a été vérifiée sur les observations répétées des mêmes champs ou grâce à leur détection dans une autre bande d'ISOGAL ou de DENIS. Diverses techniques, utilisant en particulier des procédures CIA, ont été appliquées pour éliminer la majorité des artefacts dans les sources ponctuelles, en particulier les répliques des sources fortes liées à la rémanence des détecteurs. Néanmoins la prudence reste de mise en ce qui concerne la réalité des sources les plus faibles sans aucune association dans une autre bande ISOGAL ou DENIS, bien que nombre d'entre elles à $15\ \mu\text{m}$ puissent être des jeunes étoiles.

La précision de la photométrie peut être évaluée, dans les champs à observations multiples et sur les sources artificielles. La précision sur la photométrie (écart-type) est généralement d'environ 0.15–0.20 mag., avec des valeurs plus élevées pour les sources les plus faibles. Malgré les différentes méthodes de calibration (cf Schuller 2002), un biais de 0.1–0.2 reste possible à cause de la difficulté de bien corriger la réponse des détecteurs avec les très courtes intégrations d'ISOGAL.

Les associations entre les sources à 7 et à $15\ \mu\text{m}$, ainsi qu'entre ISOGAL et DENIS, sont un des outils les plus puissants pour discuter leur nature et leurs propriétés. Elles sont aussi utiles pour discuter la qualité des données. Nous avons défini des procédures standard d'association, basées sur le seul critère de proximité des sources, après avoir déterminé et corrigé le décalage général d'astrométrie des deux images à associer. Ces procédures fournissent des indicateurs de la qualité de l'association. Elles limitent automatiquement la densité des sources K_s de DENIS à prendre en compte pour les associations, de façon à limiter la proportion des associations purement accidentelles à quelques pourcents. La bonne qualité du pointage d'ISO permet, après correction des décalages d'ensemble, de réduire l'écart-type de la distance entre sources associées à $\sim 2''$. C'est donc l'ordre de grandeur de la précision de l'astrométrie des source ISOGAL non associées à une source DENIS, dans les champs observés par DENIS ($\delta < +2^\circ$, c'est à dire la plupart des champs). Pour les sources ISOGAL associées à une source DENIS, la grande majorité, elles bénéficient directement de l'excellente astrométrie de DENIS ($\sim 0.2''$, cf Simon et al. en préparation).

3. Les produits ISOGAL

Outre les données standard disponibles dans les archives d'ISO, la Collaboration ISOGAL est en train de publier des produits plus élaborés, en particulier pour les sources stellaires, à partir du traitement de données décrit ci-dessus. Une première version va être disponible sous peu au CDS

en bénéficiant des outils VizieR. Les données actuelles, images et surtout catalogue de sources ponctuelles (PSC) multi- λ ISOGAL-DENIS, sont décrites dans le "Supplément Explicatif" publié par Schuller et al. (2002), avec une discussion de leur qualité et des méthodes de réduction.

Comme nous l'avons dit, les images actuelles disponibles sont juste de simples produits du traitement ISO/CIA : images mosaïquées avec la méthode dite "d'inversion" du traitement de la dépendance temporelle du signal des détecteurs. Néanmoins, leur astrométrie a été améliorée par recalage sur celle de DENIS.

Le catalogue PSC ISOGAL comporte actuellement cinq longueurs d'onde (15, 7, 2.15, 1.25 et 0.8 μm) avec les associations avec DENIS dans les bandes K_s , J et I quand celles-ci sont disponibles. Il contient plus de 10^5 sources dont 35% ont une association 7-15 μm (43% dans les champs observés à la fois à 7 et à 15 μm) et 79% une association avec DENIS K_s (près de 90% dans les champs observés par DENIS). Puisque dans de nombreux cas, pour diverses raisons, les images observées à 7 et 15 μm ne coïncident pas, le catalogue est organisé en trois classes de "champs" découpés à partir des images : ceux qui ont été observés à la fois à 7 et 15 μm et ceux qui ne comportent qu'une de ces longueurs d'onde. Chaque champ est un rectangle $l \times b$ complètement observé et les sources trop proches des bords, "en dent de scie", de l'image ont été écartées. Quand il existe plusieurs observations ISOGAL pour un même champ, dans un des deux domaines de longueur d'onde donnée, une seule est incluse dans le catalogue. Des indicateurs de qualité sont fournis pour chaque source, ainsi que pour les associations. Seules les sources avec une qualité minimale sont publiées.

4. Milieu interstellaire

4.1 Images ISOGAL et condensations sombres

Les images ISOGAL présentent une riche structure à haute résolution de l'émission diffuse interstellaire à 7 et 15 μm . Elles renferment donc une précieuse information sur les porteurs de cette émission, composés polycycliques aromatiques, "PAHs", à 7 μm , très petits grains de poussière à 15 μm , ainsi que sur l'intensité du rayonnement ultraviolet interstellaire. On peut trouver dans les "Astronomy Pictures of the Day" deux cas particulièrement intéressants parmi ces images : la région bien connue de formation stellaire M 16 a été observée à 7 μm avec le filtre LW6 qui maximise l'émission des PAHs. L'image composite³ 7/15 μm est particulièrement spectaculaire par les détails extraordinairement

³<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap010914.html>

vaporeux de l'émission des PAHs. Dans ce cas les émissions à 7 et 15 μm sont très disjointes spatialement, alors que dans la plupart des images ISOGAL, il y a une bonne correspondance des structures de l'émission diffuse à 7 et 15 μm . La figure⁴ montre une mosaïque d'images ISOGAL du voisinage du Centre Galactique dans le filtre étroit LW5 qui minimise au contraire l'émission des PAHs. Cette image, comme la plupart des images ISOGAL, comporte des zones particulièrement sombres de forme globulaire ou filamentaire. Elles s'interprètent naturellement (Pérault et al. 1996, Hennebelle et al. 2001) comme des régions à très forte extinction interstellaire, opaques même avec la très faible extinction des longueurs d'onde d'ISOGAL ($A_v \gtrsim 30$). De telles condensations sombres sont également visibles dans les images infrarouges du satellite MSX dans tout le disque Galactique (Egan et al. 1998). La densité de leur gaz ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$) et leurs masses ($\gtrsim 10^3 M_\odot$) sont telles qu'il doit s'agir dans la plupart des cas de condensations proto-stellaires typiques, probablement déjà engagées dans le processus initial de formation stellaire, bien qu'il ne soit souvent pas encore possible d'y identifier de jeunes étoiles. Hennebelle et al. (2001) ont fait l'inventaire de telles condensations sombres dans tous les champs ISOGAL et ont discuté leurs propriétés. Teyssier et al. (2002) ont amorcé l'étude de leur contenu en gaz moléculaire par une étude détaillée d'une dizaine de ces condensations dans diverses raies millimétriques.

4.2 Extinction interstellaire

La loi d'extinction interstellaire dans l'infrarouge moyen est encore l'objet de sérieuses incertitudes. En particulier, Lutz et al. (1996) ont trouvé, pour des lignes de visée proches du Centre Galactique, des valeurs de l'extinction autour de 7 μm beaucoup plus grandes que la courbe classique d'extinction interstellaire (Draine & Lee 1984). ISOGAL fournit de nombreuses occasions d'évaluer l'extinction à 7 et à 15 μm . La comparaison de l'opacité à 7 et 15 μm des condensations sombres a permis à Hennebelle et al. (2001) d'estimer le rapport des extinctions interstellaires dans les bandes spectrales larges LW2 et LW3 d'ISOGAL. Ce rapport, ~ 0.7 , est en accord raisonnable avec la valeur classique généralement admise (Draine & Lee 1984) pour la plupart des champs d'ISOGAL du disque Galactique, en dehors des lignes de visée proches du Centre Galactique. Pour ces dernières le rapport semble plus élevé.

A côté de son effet sur l'émission diffuse infrarouge, l'extinction interstellaire affecte fortement les magnitudes des étoiles, spécialement dans l'infrarouge proche. Il en résulte à la fois un puissant moyen de sonder la

⁴<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap000629.html>

matière interstellaire dans les régions de forte extinction et la nécessité de bien corriger ses effets pour analyser les populations stellaires. Nous avons utilisé les données JK de DENIS pour dresser une carte de l'extinction interstellaire dans la direction du coeur du bulbe (Schultheis et al. 1999). Les étoiles ISOGAL fournissent une méthode pour tester la valeur de l'extinction, moyennée sur la bande des filtres d'ISOCAM utilisés, sur de nombreuses lignes de visée du disque Galactique à très forte extinction. La méthode la plus simple et la plus directe est de mesurer le rapport $J-K/K-7$ en admettant une valeur constante pour J_0-K_0 des étoiles RGB et AGB à perte de masse modérée détectées par ISOGAL (cf Section 5.2). Cette méthode a été appliquée par exemple par Jiang et al. (2002) à la ligne de visée du champ ($\ell = -18.63$, $b = 0.35$) où la distribution des extinctions et la qualité des données sont particulièrement favorables. La valeur trouvée pour \bar{A}_7/A_V dépend de celle de A_K/A_V ; elle est proche des résultats de Draine et Lee (1984) et Mathis (1990). Une évaluation de \bar{A}_{15}/A_V à partir du diagramme $J-K_S/K_S-15$ est très difficile à cause des valeurs très fortes et variées de $(K_S-[15])_0$ pour de nombreuses étoiles.

5. Populations stellaires

5.1 Géantes rouges

Les deux classes dominantes de loin parmi les sources ISOGAL sont :

1. à $7 \mu\text{m}$ les géantes rouges sur la première branche des géantes (RGB), près de son sommet ;
2. à 7 et à $15 \mu\text{m}$ celles de la branche asymptotique des géantes (AGB) (Fig. 1), plus lumineuses que le sommet de la branche RGB.

Les premières forment un groupe plus homogène et aux propriétés plus simples que les étoiles AGB. Ces géantes rouges constituent ainsi le meilleur échantillon parmi les sources ISOGAL pour sonder la structure galactique et la vieille population stellaire qui prédomine. La très faible extinction à $7 \mu\text{m}$ rend précieux de tels témoins pour l'étude des régions les plus obscurcies du disque et du bulbe galactiques internes. Mais leur usage nécessite une certaine élaboration pour les raisons suivantes : les corrections d'extinction ne sont pas négligeables, même si elles restent assez faibles (typiquement ~ 0.5 mag.). L'incertitude sur la distance des sources demeure un problème majeur. Dans le disque, elle autorise seulement une analyse à deux dimensions, avec juste un aperçu grossier en profondeur grâce au rougissement corrélé aux structures interstellaires connues. Pourtant, dans la direction du Centre Galactique, la densité stellaire très piquée du bulbe central domine suffisamment celle des structures d'avant-plan et d'arrière-plan pour permettre une étude détaillée

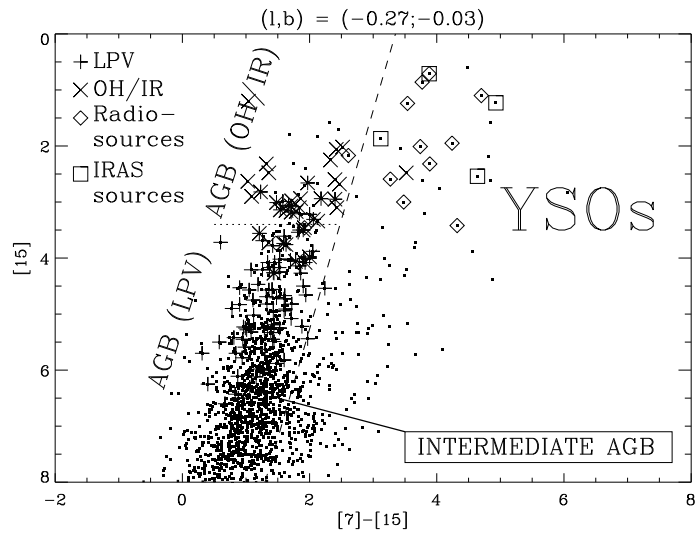


Figure 1.: *Diagramme magnitude/couleur 15/7-15 μm des sources du champ ISOGAL, $(l,b) = (-0.27,-0.03)$ très proche du centre galactique, où sont visibles les domaines des principales classes de sources ISOGAL à 15 μm , comme le confirment les diverses sources identifiées (reproduite de Schuller et al., en préparation).*

des structures centrales de distance bien définie, comme l'a montré par exemple Alard (2001) dans l'infrarouge proche. De plus dans le disque, l'incertitude sur la distance empêche toute discussion des âges stellaires basée sur les luminosités des étoiles AGB, contrairement au bulbe central, et même une distinction claire entre géantes rouges RGB et étoiles AGB.

Une difficulté supplémentaire provient de ce que, spécialement dans les champs du bulbe central, la magnitude du sommet de la branche RGB, $[7] \sim 8-8.5$, n'est pas très loin de la sensibilité limite d'ISOGAL, de sorte qu'une correction de complétude doit être appliquée et que le domaine utile de magnitude est réduit à $\sim 1-1.5$ mag. Du fait de ces limitations, la plus grande utilité des données ISOGAL pour l'étude des structures galactiques internes réside dans leur combinaison avec l'infrarouge proche de 2MASS ou DENIS, pour bien étalonner les corrections de l'extinction dans les régions les plus obscurcies, tout en bénéficiant de la gamme plus étendue de sensibilité de l'infrarouge proche. Cette analyse va pouvoir être mise en oeuvre avec la disponibilité du catalogue d'ISOGAL.

5.2 Étoiles AGB et Luminosité

La luminosité des étoiles AGB est un très bon diagnostic de l'âge des populations stellaires. Si la distance et l'extinction sont connues, la combinaison des flux des cinq bandes DENIS et ISOGAL permet une bonne détermination de la luminosité de toutes les étoiles évoluées parmi les sources ISOGAL, c'est à dire de la grande majorité de celles-ci. En fait, pour la plupart d'entre elles, exceptées les plus rouges, la seule magnitude dérougie K_0 fournit une bonne évaluation de la luminosité, puisque la correction bolométrique à la magnitude K est pratiquement constante et égale à ~ 2.8 pour toutes les géantes rouges et étoiles AGB à perte de masse faible ou modérée détectées par ISOGAL.

Les problèmes principaux pour déterminer avec précision la fonction de luminosité de ces sources ISOGAL du bulbe galactique sont alors l'identification des sources d'avant-plan (et d'arrière-plan), la détermination de l'extinction interstellaire sur la ligne de visée de la source, l'estimation des effets provenant des incertitudes sur la photométrie et sur la métallicité et la correction de l'incomplétude des comptages.

Une première identification des sources d'avant-plan est obtenue en regardant simplement la distribution des valeurs de J-K pour un champ ISOGAL (cf par exemple Omont et al. 1999, Schultheis et al. 1999). Pour une ligne de visée du bulbe, la distribution des comptages de sources est fortement piquée pour une valeur $(J-K)_B$ qui correspond à l'extinction moyenne sur la ligne de visée jusqu'au bulbe central. Une minorité des sources ont clairement des valeurs de J-K inférieures au gros de la distribution parce qu'elles sont devant une partie des couches de poussière sur la ligne de visée du bulbe. Mais, selon la disposition des dernières couches de poussière dans le disque, un certain nombre de sources en avant du bulbe, mais proches de celui-ci, ne peuvent pas être distinguées de celles du bulbe par la seule valeur de leur extinction. De plus il est évidemment impossible de distinguer les étoiles du bulbe de celles du disque central dans la région où ceux-ci se recouvrent.

L'extinction dans le visible A_v sur la ligne de visée d'une étoile donnée peut ainsi être déduite avec une bonne précision de ses magnitudes J et K, soit juste à partir de la valeur

$$J - K = J_0 - K_0 + A_J - A_K$$

en admettant une valeur pour $J_0 - K_0$, ou, mieux, à partir d'une isochrone K/J-K (cf par exemple Schultheis et al. 1999). Pourtant cette méthode n'est pas applicable aux étoiles AGB très rouges où $(J-K)_0$ est incertain en présence de perte de masse importante. On peut alors utiliser une autre couleur telle que K-7 (van Loon et al. 2002); mais $(K-7)_0$ peut

aussi être affecté par la poussière circumstellaire, de plus, même pour des couleurs purement photosphériques, sa valeur n'est pas aussi bien établie que pour $(J-K)_0$. Une méthode encore plus simple, mais plus incertaine, est d'admettre que de telles étoiles AGB très rouges ont la même extinction interstellaire que la moyenne des étoiles DENIS plus bleues de leur voisinage immédiat, comme on la détermine par exemple dans la carte générale de l'extinction du bulbe (Schultheis et al. 1999). Il faut aussi souligner que dans les régions de très forte extinction ($A_v \gtrsim 25$), un grand nombre d'étoiles AGB peuvent avoir une valeur de J supérieure à la limite de détection de DENIS; pour déterminer A_v , on peut alors essayer de remplacer $J-K$ par la valeur $H-K$ de 2MASS (cf Alard 2001) ou par $K-7$ (Jiang et al. 2002, van Loon et al. 2002).

En réalisant soigneusement de telles opérations, en tenant compte des caractéristiques des données dans chaque champ et en les corrigeant en particulier de l'icmplétude, on peut espérer que la combinaison de ces relevés infrarouges actuels pourra améliorer de façon significative la connaissance des étoiles AGB du bulbe interne à très forte extinction et leur utilisation pour la détermination de la distribution des âges des populations stellaires correspondantes.

Diverses données additionnelles sur les étoiles AGB du bulbe sont aussi très utiles pour vérifier l'analyse de ces étoiles dans les relevés infrarouges et pour permettre une interprétation des mélanges de populations. Pour ce dernier propos, une information sur les vitesses ou sur la métallicité est particulièrement importante. On peut espérer disposer bientôt des valeurs des vitesses radiales et d'une indication de la métallicité de telles étoiles, dans les régions pas trop obscurcies du disque interne, par des observations de spectroscopie visible multi-objet, notamment au VLT avec des instruments comme FLAMES/GIRAFFE et d'étendre ensuite de telles mesures à des régions plus obscurcies avec des instruments comme SPIFFI.

L'information sur la variabilité, même faible, de telles étoiles est maintenant disponible dans les régions de faible extinction, grâce aux expériences de recherche de micro-lentilles gravitationnelles telles que MACHOS, EROS ou OGLE. Elles permettent de vérifier que pratiquement toutes ces sources ISOGAL sont des variables à longue période, principalement semi-régulières (cf Alard et al. 2001). De telles données sur la variabilité de très grands échantillons sont une mine précieuse d'information sur les corrélations de la variabilité avec les propriétés infrarouges, la luminosité et la perte de masse. Il serait souhaitable de les étendre aux régions de forte extinction grâce à des programmes de surveillance infrarouge de longue durée de telles régions.

5.3 Perte de masse des étoiles AGB

L'excès d'émission à $15 \mu\text{m}$ par rapport à la température effective de la photosphère montre que, comme pour les sources IRAS à $12 \mu\text{m}$, la majorité des sources ISOGAL à $15 \mu\text{m}$ sont des étoiles AGB à perte de masse relativement forte, dotées d'une enveloppe circumstellaire où se forme de la poussière. ISOGAL permet ainsi une caractérisation de la perte de masse des étoiles AGB à travers toute la Galaxie interne et spécialement dans ses régions centrales très obscurcies.

Cette présence de poussière est directement confirmée par les quelques observations ISOGAL de spectroscopie CVF 5-16 μm (section 2), qui fournissent des informations sur la nature de la poussière par la forme des bandes d'émission dans la région 9-13 μm pour quelques dizaines d'étoiles, principalement dans le bulbe interne (Blommaert et al. en préparation). Ces spectres font apparaître, outre les bandes plus ou moins classiques des silicates, une forte émission dans la région 12-13 μm dans une forte proportion des étoiles. Celle-ci pourrait provenir d'oxydes comme Al_2O_3 comme il a été proposé pour nombre de spectres LRS d'étoiles AGB à perte de masse modérée du voisinage solaire (Sloan et Price 1995, Sloan et al. 1996).

Le taux de perte de masse, M' , peut être calibré à partir de la valeur de l'excès à $15 \mu\text{m}$ fourni par les couleurs $K_0 - [15]_0$ ou $[7]_0 - [15]_0$ (Ojha et al. 2002, Jeong et al. en préparation), comme cela a été modélisé pour l'excès à $12 \mu\text{m}$ d'IRAS par Le Bertre et Winters (1998). Quand la correction d'extinction de la magnitude K est précise, $K_0 - [15]_0$ est un meilleur indicateur de perte de masse que $[7]_0 - [15]_0$. Mais l'indicateur $[7] - [15]$ a le grand avantage d'être très peu sensible à l'extinction et de fournir une valeur approchée du taux de perte de masse sans nécessiter de correction d'extinction. ISOGAL fournit ainsi très simplement l'estimation de la perte de masse de plusieurs dizaines de milliers d'étoiles AGB des régions internes de la Voie Lactée. Leur analyse va donner, pour la première fois dans ces régions obscurcies et encombrées, inaccessibles à IRAS, une vue détaillée et complète de la perte de masse des étoiles AGB et de sa contribution à la réinjection de matière enrichie en éléments lourds dans le milieu interstellaire.

Toute la gamme des taux de perte de masse est représentée entre $\sim 10^{-8}$ et $\sim 10^{-4} M_\odot/\text{an}$. Mais les faibles taux de perte de masse dominant (Omont et al. 1999, Ojha et al. 2002). Ils correspondent généralement à des variables à longue période semi-régulières de courte période et de faible amplitude (Alard et al. 2001). Mais les données ISOGAL donnent également un panorama complet des pertes de masse plus fortes des variables de plus grande amplitude et plus longue période de type Mira (cf Glass et al. 1999, Schuller et al. en préparation) et même OH/IR (Ortiz

et al. 2002). La quasi-totalité de cette vaste gamme de taux de perte de masse contribue de façon significative au taux global de réinjection de masse dans le milieu interstellaire (Ojha et al. 2002).

A côté de cette énorme quantité d'étoiles AGB, les données ISOGAL renferment une riche information sur la poussière interstellaire d'une grande variété d'étoiles particulières, plus ou moins rares, qu'il n'est pas toujours facile d'identifier au sein de la masse des sources ISOGAL. L'inventaire des supergéantes à perte de masse des régions centrales de la Voie Lactée est en cours (Chitre et al. 2002, Schultheis et al. 2002b); celui des nébuleuses planétaires démarre (Gorny et al. en préparation). On peut prévoir qu'il va s'étendre aux proto-nébuleuses planétaires (PPN) et autres objets post-AGB, plus rares, aux étoiles symbiotiques à enveloppe de poussière, aux étoiles B[e], etc. Un programme de spectroscopie visible est également en cours (Schultheis et al. 2002a) pour caractériser les sources ISOGAL d'avant-plan très proches, principalement de type spectral précoce, à excès à $15\ \mu\text{m}$ caractéristique de la présence de poussière circumstellaire; la plupart sont de jeunes étoiles, souvent du type de Herbig Ae/Be; quelques-unes pourraient avoir des disques de débris du type de β Pictoris, ou, exceptionnellement, être des objets post-AGB.

6. Jeunes étoiles

Les jeunes étoiles à disque ou cocon de poussière sont, avec les étoiles AGB, la deuxième grande classe de sources à excès dans l'infrarouge moyen et lointain identifiées par IRAS. Mais l'infrarouge assez lointain, à 25 ou $60\ \mu\text{m}$ dans IRAS, est généralement essentiel pour les distinguer des étoiles AGB, grâce à l'excès d'émission lié à la présence de grandes quantités de poussière froide. L'absence de longueur d'onde supérieure à $15\ \mu\text{m}$ dans les données d'ISOGAL est un handicap sérieux pour y identifier les objets jeunes parmi la masse des étoiles AGB beaucoup plus nombreuses. Le principal critère disponible à cet effet reste un très grand excès à $15\ \mu\text{m}$ dans les couleurs $[7]-[15]$ (Fig. 1) ou $K_0-[15]$, mais il demeure imparfait : quelques jeunes étoiles peuvent avoir des valeurs de ces couleurs comparables à celles de la masse des étoiles AGB; inversement, quelques étoiles AGB à extrêmement forte perte de masse, comme certaines étoiles OH/IR, présentent un très fort excès à $15\ \mu\text{m}$ dans la zone des valeurs généralement caractéristiques des objets jeunes. De plus l'imperfection des données rend les critères plus flous : la non-coïncidence fréquente de la date des observations à 7 et à $15\ \mu\text{m}$ perturbe la valeur de $[7]-[15]$ pour les étoiles AGB fortement variables; le déroutement précis de la magnitude K est difficile pour ces objets de couleurs intrinsèques incertaines et beaucoup d'objets sont trop rouges pour être détectés en K par DENIS ou 2MASS; l'imprécision de la photométrie

d'ISOGAL pour les sources les plus faibles peut rendre la réalité de leur fort excès à $[15] \mu\text{m}$ incertaine. Des critères supplémentaires sont donc généralement nécessaires pour confirmer l'identification des objets jeunes parmi les sources ISOGAL (sauf ceux à extrêmement fort excès à $15 \mu\text{m}$) : extension de la source, association à une région de formation stellaire bien caractérisée, association à une source radio, excès d'infrarouge lointain dans les données MSX ou IRAS, spectroscopie infrarouge (ou visible), etc.

Le cas des jeunes étoiles les plus lumineuses et donc les plus massives ($F(15\mu\text{m}) \lesssim 0.3 \text{ Jy}$, $L \gtrsim 2500 L_{\odot}$ à 5 kpc, soit $M \gtrsim 10 M_{\odot}$) vient d'être systématiquement discuté par Felli et al. (2000, 2002). Ils ont montré que le critère $[7]-[15] > 1.8$ permet d'isoler le gros des candidats avec une probabilité supérieure à $\sim 50\%$ d'être jeune, tandis que $[7]-[15] > 2.5$ exclut quasi-certainement de les confondre avec des étoiles AGB (OH/IR). 715 sources LW2/LW3 du catalogue ISOGAL répondent au premier critère et sont donc majoritairement des jeunes étoiles lumineuses. Il faut rajouter quelques objets de flux comparable à $15 \mu\text{m}$ mais qui ne sont pas détectés à $7 \mu\text{m}$ et qui sont aussi probablement pour la plupart jeunes. La majorité de ces jeunes étoiles ISOGAL massives sont situées dans l'anneau moléculaire ou le bulbe central.

Le catalogue ISOGAL contient en outre un certain nombre de jeunes étoiles moins massives plus proches, principalement dans les bras spiraux proches à 1 ou 2 kpc. Leur couleur $[7]-[15] \gtrsim 1.2$ est semblable à celle des jeunes étoiles étudiées systématiquement dans les principales régions de formation stellaire encore plus proches par le programme central d'ISOCAM (Nordh et al. 1996, Bontemps et al. 2001). Comme on l'a mentionné, leur identification à coup sûr est plus difficile dans beaucoup de champs ISOGAL, mais des groupements de telles sources apparaissent clairement dans certains champs où d'autres évidences de formation stellaire sont souvent connues, comme dans M16. L'inventaire général de ces jeunes étoiles ISOGAL de masse relativement faible (quelques masses solaires) reste à faire.

Remerciements

Le programme DENIS a été partiellement financé par la Commission Européenne dans le cadre des programmes SCIENCE et Capital Humain et Mobilité. Il a été aussi financé par l'INSU/CNRS et le Ministère de la Recherche en France et par divers organismes publics en Allemagne, Autriche, Espagne, Hongrie, Italie, Pays-Bas et Brésil. Ses observations ont été effectuées à l'ESO à La Silla, Chili. Le projet ISOGAL s'est effectué dans le contexte de l'EARA, une Association Européenne pour la Recherche en Astronomie.

Il a bénéficié du soutien du projet 1910-1 du Centre Franco-Indien Pour la Recherche Avancée (CEFIPRA).

Références

- [1] Alard, C., 2001, *A&A* 379, L44
- [2] Alard, C., Alves, D. et al. 2001, *ApJ* 552, 289
- [3] Bontemps, S., André, P., Kaas, A.A., et al. 2001, *A&A* 372, 173
- [4] Chitre, A., Schuller, F., Omont, A. et al., 2002, à soumettre à *A&A*
- [5] Draine, B. & Lee, H., 1984, *ApJ* 285, 89
- [6] Egan, M.P., Shipman, R.F., Price, S.D. et al. 1998, *ApJ* 494, 199
- [7] Epchtein N. et al. 1997, *Messenger* 87, 27
- [8] Felli, M., Comoretto, G., Testi, L., Omont, A., Schuller, F. 2000, *A&A* 362, 199
- [9] Felli, M., Testi, L., Schuller, F. et al., 2002, soumis à *A&A*
- [10] Glass, I.S., Ganesh, S., Alard, C. et al. 1999, *MNRAS* 308, 127
- [11] Hennebelle, P., Pérault, M., Teyssier, D., Ganesh, S. 2001, *A&A* 365, 598
- [12] Jiang, B., Omont, A., Ganesh, Simon, G.; Schuller F., 2002, à soumettre à *A&A*
- [13] Le Bertre T., Winters, J.M., 1998, *A&A* 334, 173
- [14] Lutz D., Feuchtgruber H., Genzel R. et al. 1996, *A&A* 315, L272
- [15] Mathis J., *ARA&A* 28, 37
- [16] Nordh, L., Olofsson, G., Bontemps, S., et al. 1996, *A&A* 315, L185
- [17] Ojha, D., Omont, A., Simon, G. et al. 2002, à soumettre à *A&A*
- [18] Omont A., Ganesh S., Alard C. et al. 1999, *A&A* 348, 755
- [19] Omont A., G. Gilmore, C. Alard, B. Aracil, T. August, J.A.D.L. Blommaert, X. Bertou, B. Caillaud, S. Ganesh, P. Hennebelle, M. Messineo, A. Moneti, D. Ojha, M. Pérault, F. Schuller, G. Simon, A. Soive, L. Testi, M. Unavane, J. van Loon, H.J. Habing, C. Cesarsky, M. Egan, N. Epchtein, M. Felli, I. Glass, F. Guglielmo, S.D. Price, A. Robin, S. Bégon, J. Borsenberger, M. Burgdorf, E. Copet, P. Fouqué, S. Kimeswenger, M. Morris, M. Schultheis, R. Wyse, 2002, à soumettre à *A&A*
- [20] Ortiz, R., Messineo, M., Blommaert, J. et al. 2002, *A&A* sous presse
- [21] Pérault M., Omont A., Simon G. et al. 1996, *A&A* 315, L165
- [22] Price, S.D., Egan, M.P., Carey, S.J., et al. 2001, *AJ* 121, 2819
- [23] Schultheis, M., Ganesh, S., Simon, G. et al. 1999, *A&A* 349, L69
- [24] Schultheis, M., Parthasarathy, M., Omont, A. et al. 2002a, soumis à *A&A*

- [25] Schultheis, M., Lançon, A., Schuller, F. et al. 2002b, à soumettre à A&A
- [26] Schuller, F., Ganesh, S., Moneti, A. et al. 2002, à soumettre à A&A
- [27] Sloan G.C., Price, S.D., 1995, ApJ 451, 758
- [28] Sloan G.C., LeVan, P.D., Little-Marenin, I.R., 1996, ApJ 463, 310
- [29] Schultheis M., Ganesh S., Simon G. et al. 1999, A&A 349, L69
- [30] Testi L., Felli M., Omont A. et al. 1997, A&A 318, L13
- [31] Teyssier, D., Hennebelle, P., Pérault, M., 2002, A&A 382, 624
- [32] Skrutskie, M.F. et al. 1997, in "The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys," p187-195, F. Garzon et al. (eds.), Kluwer (Netherlands).
- [33] van Loon, J. et al. 2002,, à soumettre à MNRAS