

Condensations pré-stellaires au seuil de l'effondrement dans les nuages interstellaires

Les premiers stades d'une étoile

La masse d'une étoile détermine son évolution ultérieure et notamment sa durée de vie. Or, si l'on connaît maintenant bien la répartition en masse des étoiles qui arrivent sur la séquence principale, on ne connaît toujours pas la cause de cette répartition. A quel moment de leur formation les étoiles « décident-elles » d'avoir telle ou telle masse ? Pour répondre ces questions, il faut plonger au cœur des nuages moléculaires de notre galaxie et étudier en leur sein des protoétoiles et condensations « pré-stellaires », c'est-à-dire des étoiles encore en phase de gestation. Au cours de la dernière décennie, avec l'avènement de caméras performantes dans les domaines infrarouge et (sub)millimétrique, des progrès observationnels importants ont été accomplis (voir revue de André, Ward-Thompson, & Barsony 2000). En particulier, il est maintenant possible d'observer simultanément les étoiles pré-séquence principale (âges de l'ordre de 10^6 à 10^7 ans), les protoétoiles (10^4 à 10^5 ans) et les condensations pré-stellaires des nuages moléculaires les plus proches. Une telle étude n'est possible que pour les étoiles de moins de quelques masses solaires, qui ne perturbent pas à grande échelle leur nuage parent par des vents intenses et un fort flux ionisant. Ceci permet de reconstruire de manière empirique la généalogie de la formation des étoiles "de type solaire".

Ph. André et ses collègues ont ainsi entrepris depuis plusieurs années un ambitieux programme de cartographie à grand champ (plusieurs degrés carrés) dans l'infrarouge moyen ($7 \mu\text{m}$ et $15 \mu\text{m}$) et le (sub)millimétrique ($850 \mu\text{m}$ et 1.3mm) de plusieurs amas stellaires en formation, notamment dans les complexes de ρ Ophiuchi, du Serpent, d'Orion et de la Couronne Australe.

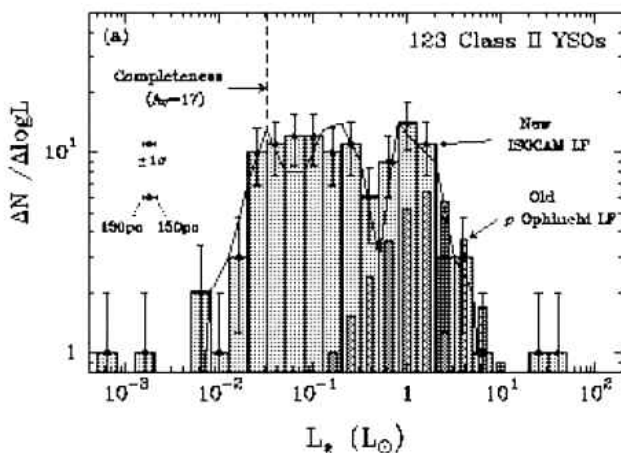


Figure 1. Fonction de luminosité des 123 objets stellaires de type T détectés avec ISOCAM à $7 \mu\text{m}$ et $15 \mu\text{m}$ dans le nuage de ρ Ophiuchi (Bontemps et al. 2001). Cette fonction de luminosité (histogramme clair) est complète jusqu'à $L^* \sim 0.03$ luminosité solaire (L_\odot) alors que la fonction de luminosité déterminée avant les observations ISO (histogramme sombre) était incomplète en dessous de $L^* \sim 2 L_\odot$. ISOCAM a permis un recensement 10 fois plus profond des étoiles T Tauri enfouies dans les nuages proches.

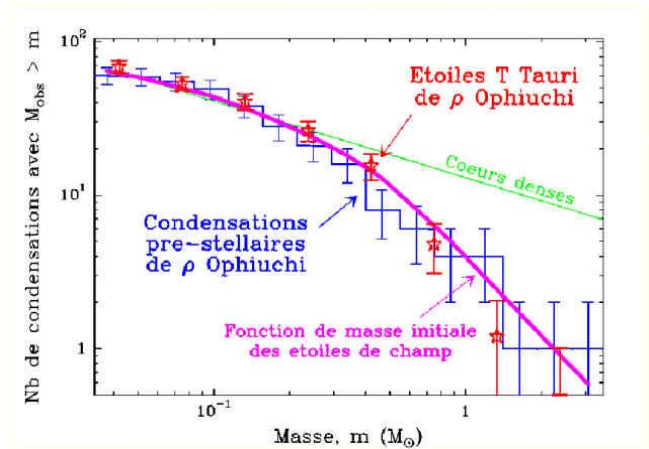


Figure 2 : Distribution de masse des 60 condensations pré-stellaires identifiées par Motte, André, & Neri (1998) dans la mosaïque du nuage de ρ Ophiuchi à 1.3mm (en bleu). Cette distribution est semblable au spectre de masse des 120 étoiles T Tauri enfouies recensées par Bontemps et al. (2001) avec ISOCAM dans la même région (en rouge), ainsi qu'à la fonction de masse initiale des étoiles de champ (courbe rose). En revanche, ces trois distributions de masse diffèrent sensiblement de la répartition de masse observée pour les coeurs denses du nuage (courbe verte).

Les images à $7 \mu\text{m}$ et $15 \mu\text{m}$, obtenues avec ISOCAM dans le cadre du programme central d'ISO, ont été analysées par S. Bontemps et coll. Plus de 200 sources infrarouges ont été détectées avec ISOCAM. Un petit nombre d'entre elles sont des « protoétoiles infrarouges » approchant de la fin de la

phase d'accrétion (la masse de leur enveloppe, en effondrement gravitationnel, a été presque entièrement utilisée pour former l'étoile centrale). La grande majorité des sources vues par ISO sont des étoiles de type T Tauri. Les données ISOCAM permettent de déterminer la fonction de luminosité de ces étoiles pré-séquence principale avec une sensibilité inégalée jusque-là. La [Figure 1](#) montre l'exemple de la fonction de luminosité obtenue pour les quelque 120 objets de type T Tauri détectés dans le nuage de ρ Ophiuchi (Bontemps et al. 2001). Cet échantillon, complet jusqu'à environ 0.03 Luminosité solaire, est plus de deux fois plus nombreux que celui qui était connu avant les observations ISO. La [répartition de masse](#) trouvée (jusqu'à environ 0.06 masse solaire, c'est dire jusqu'au régime des naines brunes) ([Figure 2](#)) est compatible, aux incertitudes statistiques près, avec la « fonction de masse initiale » (« IMF ») des étoiles de champ de notre Galaxie. Cela indique que la masse des étoiles de type solaire se détermine avant le stade T Tauri, et évolue peu par la suite.

En parallèle, l'équipe a commencé à cartographier les mêmes régions dans le continuum sub-millimétrique avec des caméras bolométriques équipant le télescope de 30 m de l'IRAM (Grenade) et le JCMT (Hawaï).

La [Figure 3](#) montre notamment la mosaïque de la région NGC 2068/2071 dans le complexe moléculaire d'Orion B obtenue à 850 μm avec le JCMT (Motte et al. 2001). Les images en longueurs d'onde sub-millimétriques révèlent un grand nombre de condensations froides, toutes invisibles en infrarouge. Des observations complémentaires dans des raies moléculaires comme $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ indiquent que ces condensations sont des fragments de nuage suffisamment denses pour que les forces de gravité finissent par l'emporter sur la pression thermique interne, conduisant inéluctablement à leur effondrement en protoétoiles (Belloche, André, & Motte 2001). Des indices de contraction gravitationnelle rapide ont d'ailleurs été observés en direction de certains de ces objets. A titre d'illustration, la [Figure 2](#) montre le spectre de masse obtenu par Motte, André, & Neri (1998) pour les condensations du nuage de ρ Ophiuchi dans le cadre de la thèse de F. Motte (1998).

Cette répartition de masse ressemble beaucoup à la fonction de masse initiale des étoiles de notre Galaxie, ainsi qu'à la distribution de masse trouvée avec ISOCAM pour les étoiles T Tauri ([Figure 1](#)). En revanche, elle diffère notablement de la répartition de masse observée, à plus grande échelle, pour les nuages et coeurs denses de nuage. Ces résultats montrent que la structure du milieu interstellaire cesse d'être auto-similaire ou fractale à l'échelle des condensations pré-stellaires.

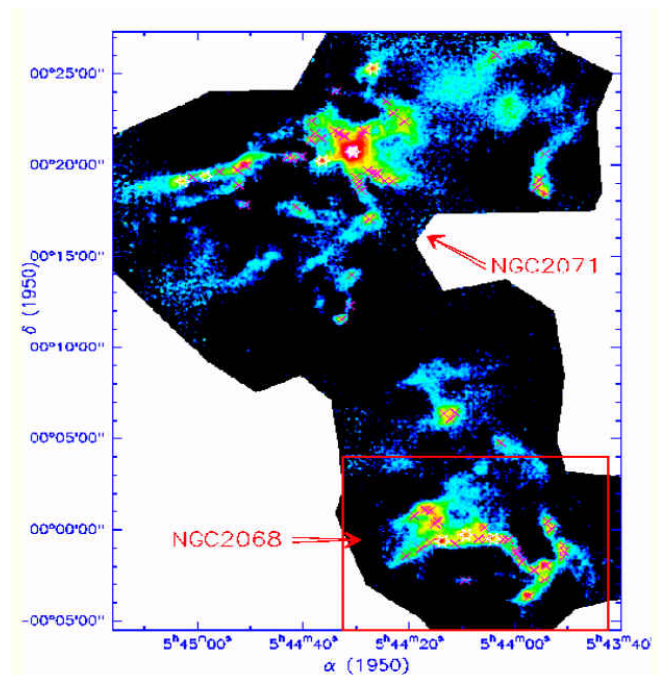


Figure 3 : Mosaïque de la région de formation d'étoiles NGC 2068/2071 dans le complexe moléculaire d'Orion B, obtenue en émission continue des poussières à 850 μm par Motte et al. (2001) au moyen du télescope JCMT et de la caméra de bolomètres SCUBA. Cette image fournit un recensement complet des condensations pré-stellaires plus massives que $\sim 0.6 M_{\text{Jodot}}$ dans le proto-amas d'étoiles NGC 2068/2071 (distant de $d = 400 \text{ pc}$).

De plus, ils suggèrent que la masse des étoiles se détermine très tôt, par fragmentation du nuage interstellaire parent. Si cette conclusion se confirme, on pourrait s'attendre à des variations notables

de la fonction de masse initiale des étoiles selon les conditions physiques locales (par exemple température, pression ...) dans les autres galaxies.

Ph. André et ses collaborateurs ont également pu montrer que la distribution radiale de densité dans les enveloppes circumstellaires des protoétoiles dépend de la nature de leur environnement. En particulier, si la structure en densité des enveloppes protostellaires isolées est bien décrite par le modèle d'effondrement gravitationnel spontané proposé par F. Shu et al. en 1987, la structure circumstellaire des protoétoiles se formant dans des amas comme ρ Ophiuchi s'en écarte notablement, ce qui suggère un effondrement plus dynamique, induit par des perturbations extérieures telles que celles produites par des étoiles jeunes voisines. Ceci montre pour la première fois que l'environnement des étoiles en formation peut partiellement contrôler le processus même de cette formation.