



UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT (PARIS VII)

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

par

FRÉDÉRIQUE MOTTE

**Formation d'étoiles
dans les milieux extrêmes de notre Galaxie :
nuages hypermassifs et
flambées de formation d'étoiles OB**

À soutenir publiquement le 20 mai 2015
au CEA de Saclay
devant le jury composé de :

Jean-Philippe BERNARD	Examineur
Jonathan BRAINE	Examineur
Catherine DOUGADOS	Rapporteuse
Fabrice HERPIN	Rapporteur
Jacques LE BOURLOT	Rapporteur
Bertrand LEFLOCH	Examineur

Laboratoire AIM Paris-Saclay (UMR 7158)
Université Paris Diderot – INSU/CNRS – IRFU/DSM/CEA
frederique.motte@cea.fr

Table des matières

1	Résumé de recherches	1
1.1	Résumé de mon parcours scientifique	1
1.2	Conditions initiales de la formation des étoiles de faible masse	2
1.3	Origine de la fonction de masse initiale des étoiles	4
1.4	Des grands programmes <i>Herschel</i> , IRAM et APEX	5
1.5	Formation des étoiles massives	7
1.5.1	Recherche des phases précoces de la formation des étoiles massives	7
1.5.2	Études détaillées des progéniteurs des étoiles massives	8
1.6	Un lien étroit entre la formation du nuage et de leurs étoiles massives	10
1.6.1	Relation entre la structure des nuages et le taux de formation stellaire	10
1.6.2	De la dynamique des nuages à la formation des amas d'étoiles massives	11
1.7	Formation d'un complexe de nuages extrême dans notre galaxie	14
2	Phases précoces de la formation d'étoiles massives : cœurs denses massifs (MDCs)	15
2.1	La formation des étoiles massives à l'aube d' <i>Herschel</i> / High-mass star formation at the dawn of <i>Herschel</i>	15
2.1.1	Revue des théories proposées / Overview of proposed theories	16
2.1.2	Revue des contraintes observationnelles / Overview of observational constraints	18
2.2	Caractérisation des phases précoces de la formation d'étoiles massives / Characteristics of the earliest phases of high-mass star formation	24
2.3	Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	25
3	Activité de formation d'étoiles et régions extrêmes de notre galaxie	59
3.1	Efficacité et taux de formation d'étoiles (SFE et SFR) instantanés / Instantaneous star formation efficiency and rate (SFE and SFR)	59
3.1.1	Définition des SFE et SFR instantanés / Definition of instantaneous SFE and SFR	59
3.1.2	Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	61
3.2	Nuages hypermassifs / Cloud ridges	99
3.2.1	Caractérisation des nuages hypermassifs / Characteristics of cloud ridges	99
3.2.2	Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	100
4	Formation des nuages dans des filaments hypermassifs	115
4.1	Introduction	115
4.1.1	Origine des nuages moléculaires et conditions initiales de la formation stellaire / Origin of molecular clouds and initial conditions for star formation	115
4.1.2	Confrontation des modèles de flots convergents aux observations / Confronting numerical models of converging flows and observations	116
4.2	Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	117
5	Projets et perspectives	161
5.1	Projet FoXCS, "Formation de nuages extrêmes et d'amas d'étoiles : de l'ère d' <i>Herschel</i> à celle d'ALMA"	161

5.2	Directions de recherche renforcées par ma mutation à l'IPAG : physique et chimie du milieu inter-stellaire et évolution des amas d'étoiles jeunes	165
5.3	Confrontation directe entre observations et simulations ou théories	166
5.4	Et à plus long terme...	167
5.4.1	Comment passer de la formation stellaire Galactique à la formation stellaire dans <i>les ga-</i> <i>laxies</i> ?	167
5.4.2	Quel sera le successeur de l'observatoire spatial <i>Herschel</i> ?	173
6	Curriculum vitae complet	175
6.1	Gestion et animation de la recherche	177
6.2	Enseignement, encadrement d'étudiants et diffusion de la culture scientifique	177
6.3	Responsabilités collectives, administration de recherche	178
7	Liste exhaustive des publications	179
7.1	Articles dans des revues à comité de lecture	179
7.2	Articles dans des revues sans comité de lecture	185
7.3	Conférences invitées dans des congrès	185
7.4	Communications à des congrès, symposium	186
7.5	Séminaires et workshops récents	189
7.6	Autre	190
	Bibliographie	197

Chapitre 1

Résumé de recherches

Sommaire

1.1	Résumé de mon parcours scientifique	1
1.2	Conditions initiales de la formation des étoiles de faible masse	2
1.3	Origine de la fonction de masse initiale des étoiles	4
1.4	Des grands programmes <i>Herschel</i>, IRAM et APEX	5
1.5	Formation des étoiles massives	7
1.5.1	Recherche des phases précoces de la formation des étoiles massives	7
1.5.2	Études détaillées des progéniteurs des étoiles massives	8
1.6	Un lien étroit entre la formation du nuage et de leurs étoiles massives	10
1.6.1	Relation entre la structure des nuages et le taux de formation stellaire	10
1.6.2	De la dynamique des nuages à la formation des amas d'étoiles massives	11
1.7	Formation d'un complexe de nuages extrême dans notre galaxie	14

Ce chapitre dresse un panorama de mes études sur la formation des étoiles. Il résume les travaux effectués sur le sujet depuis ma soutenance de thèse, en mai 1998. Je présente succinctement deux des thèmes abordés au début de ma carrière de chercheur, les conditions initiales de la formation des étoiles de faible masse et l'origine de la fonction de masse initiale des étoiles (voir Sects. 1.2–1.3). J'ai choisi de ne pas les développer dans la suite du mémoire car ils m'éloigneraient du thème principal évoqué ici : la formation d'étoiles dans les milieux extrêmes de notre Galaxie. Mon travail plus récent portant sur la formation des étoiles massives, celle des amas d'étoiles OB et celle des nuages qui leur ont donné naissance est brossé ici dans ses grandes lignes (voir Sects. 1.5, 1.6 et 1.7). Ces thèmes de recherche seront décrits plus en détail dans les Chapitres 2, 3 et 4. Les articles que j'ai publiés sur ces sujets (en tant que premier auteur ou second auteur derrière un jeune chercheur que j'encadrais) sont attachés aux chapitres les concernant. Les projets en cours et perspectives à plus long terme sont présentés au Chapitre 5.

La version électronique du mémoire comporte de nombreux liens vers les figures, références et articles. Les liens "hypertexte" sont colorés.

1.1 Résumé de mon parcours scientifique

L'objectif principal de ma recherche est de comprendre le processus de formation des étoiles. Dans ce but, mes travaux sont consacrés à des études observationnelles de cœurs denses, qui représentent les "phases précoces" de la formation stellaire. En vingt ans, mon chemin m'a menée *de la formation d'une étoile de faible masse à la formation des amas d'étoiles massives et des nuages qui leur ont donné naissance.*

Au cours de ma thèse de Doctorat, je me suis attachée à tester la théorie à l'époque dite "standard" de la formation des étoiles de faible masse. J'ai étudié la structure en densité des cœurs denses proto-stellaires et j'en ai déduit des conditions initiales très différentes pour l'effondrement gravitationnel d'un cœur dense isolé ou en amas (voir Sect. 1.2).

En fin de thèse et pendant mes post-doctorats, j'ai étudié la fragmentation de plusieurs proto-amas d'étoiles de notre Galaxie. De manière inattendue, ces résultats ont montré que la fonction de masse initiale des étoiles semblait déterminée par la fragmentation au stade pré-stellaire, c'est-à-dire avant même la création d'un embryon d'étoile (voir Sect. 1.3).

Depuis que je suis chercheur au CNRS, je me suis donné comme objectif de contraindre le processus physique, très mal connu, qui forme les étoiles massives. En recensant les phases précoces de la formation des étoiles massives, j'ai d'abord découvert l'équivalent des proto-étoiles de Classe 0 (proto-étoiles les plus jeunes) et je propose que les analogues massives des cœurs pré-stellaires n'existent pas (voir Sect. 1.5). La découverte de filaments hypermassifs abritant des amas d'étoiles massives et l'étude de leur dynamique et formation suggère que les étoiles massives se forment par accrétion non sphérique et probablement intermittente de flots de gaz (voir Sect. 1.6). Cette vision "dynamique" est en accord avec les théories de flots convergents et met à mal les modèles analytiques de taux de formation stellaire.

En parallèle, je commence à étudier la formation, au sein de la Voie Lactée, des complexes de nuages formant des amas d'étoiles massives (voir Sect. 1.7). Les contraintes obtenues sur la formation, la structure et l'activité stellaire d'un des complexes les plus extrêmes sont utilisées pour tester des modèles de formation d'étoiles et d'évolution des galaxies.

La plupart des travaux observationnels présentés ici ont été obtenus avec les instruments de l'IRAM¹, le satellite *Herschel*² et dans la perspective de données ALMA³ et NOEMA⁴.

1.2 Conditions initiales de la formation des étoiles de faible masse

Les étoiles de faible masse (c'est-à-dire de type solaire) se forment à partir de fragments denses de nuages moléculaires, nommés cœurs denses, qui se contractent puis s'effondrent sous l'effet de la gravitation. Les cœurs denses sont dits proto-stellaires ou pré-stellaires selon qu'ils abritent ou non un embryon stellaire. Le modèle standard des proto-étoiles de faible masse fait des prédictions très précises sur la structure en densité des cœurs proto-stellaires, en fonction de l'âge de l'effondrement (cf. Shu 1977). Au début de mon doctorat, le petit nombre d'objets étudiés avec des méthodes souvent mal adaptées ne permettait pas de conclure à un bon accord, non plus qu'à un fort désaccord avec la théorie standard (p. ex Barsony & Chandler 1993).

L'avènement de caméras de bolomètres très sensibles telles que MAMBO⁵, SCUBA⁶ et SHARC⁷ sur de grands radio-télescopes⁸ permet depuis une vingtaine d'années seulement de sonder les cœurs denses grâce à leur émission du continuum (sub-)millimétrique qui est optiquement mince.

Suivant mon sujet de thèse, nous avons utilisé la caméra MAMBO pour réaliser une étude exhaustive et détaillée

¹L'Institut de RadioAstronomie Millimétrique est soutenu financièrement par l'INSU/CNRS en France, par le MPG en Allemagne et l'IGN en Espagne. L'IRAM gère le radio-télescope de 30 m au Pico Veleta (Grenade/Espagne) et l'interféromètre du Plateau de Bure (Alpes, France) constitué de 6 antennes de 15 m.

²*Herschel* est un télescope spatial de l'ESA qui a été lancé le 14 mai 2009 et a fonctionné jusqu'au 29 avril 2013. À son bord se trouvaient les caméras PACS et SPIRE qui fonctionnaient en mode photométrique à 70, 100 et 160 μm pour l'une et à 250, 350 et 500 μm pour l'autre. Le troisième instrument était le spectromètre HIFI.

³L'interféromètre ALMA (Atacama Large Millimeter Array, Chili) sera constitué de 64 antennes de 12 m, optimisées pour des observations de 450 μm à 3 mm. Avec des lignes de base jusqu'à 10 km, la résolution angulaire attendue est de $2'' - 0.03''$ à 1 mm. ALMA est partiellement opérationnel depuis 2012.

⁴L'interféromètre du Plateau de Bure est en pleine évolution. Il sera renommé NOEMA lorsque le nombre de ses antennes aura doublé (objectif de 12 antennes en 2015) permettant des lignes de bases jusqu'à 1.6 km.

⁵Les caméras MAMBO et MAMBO2 possèdent respectivement 37 et 117 bolomètres. Installées au 30 m de l'IRAM, leur résolution angulaire à 1.2 mm est de $11''$.

⁶La caméra SCUBA fonctionne simultanément à 450 μm et 850 μm et possède 37 (rep. 91) bolomètres. Installée au JCMT, elles proposent une résolution angulaire de $8''$ (resp. $15''$). C'est la caméra SCUBA2, avec davantage de pixels, qui est maintenant utilisée.

⁷SHARC et SHARC II sont des réseaux de 24×1 et 12×32 bolomètres optimisés pour 350/450 μm . Ils sont utilisés au CSO avec une résolution de $11.5''$ et $9''$.

⁸Parmi les radio-télescopes (sub-)millimétriques se trouvent le 30 m de l'IRAM (Institut de RadioAstronomie Millimétrique, Grenade/Espagne), le JCMT (James Clerk Maxwell Telescope, 15 m, Hawaï/USA), le CSO (Caltech Submillimeter Observatory, 10 m, Hawaï/USA), et APEX (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, 12 m, Chili).

des proto-étoiles situées dans des régions où les étoiles se forment de manière isolée (nuage moléculaire du Taureau, globules de Bok) et en amas (nuages de Persée et de ρ Ophiuchi). Pour la première fois, il est possible d'affirmer que la structure en densité des enveloppes du Taureau est en bon accord avec les prédictions du modèle standard. Les globules de Bok ont quant à eux des enveloppes plus denses mais dont la structure radiale est aussi compatible avec ces prédictions. Notre étude montre qu'en revanche, dans les proto-amas de Persée et de ρ Ophiuchi, les enveloppes proto-stellaires sont plus denses et de taille finie. Ces résultats sont publiés dans [Motte & André \(2001a\)](#) et [Motte et al. \(1998\)](#) et ont fait l'objet d'un communiqué de presse de la revue *Astronomy & Astrophysics* (voir Fig. 1.1).

En complément, j'ai participé à des études du continuum millimétrique qui permettent de confirmer que la structure en densité des cœurs pré-stellaires est incompatible avec celle utilisée par le modèle standard. En effet, isolés comme en amas, les cœurs pré-stellaires ne sont pas des sphères singulières mais possèdent une partie centrale de densité plus plate ([André et al. 1996](#); [Ward-Thompson et al. 1999](#)).

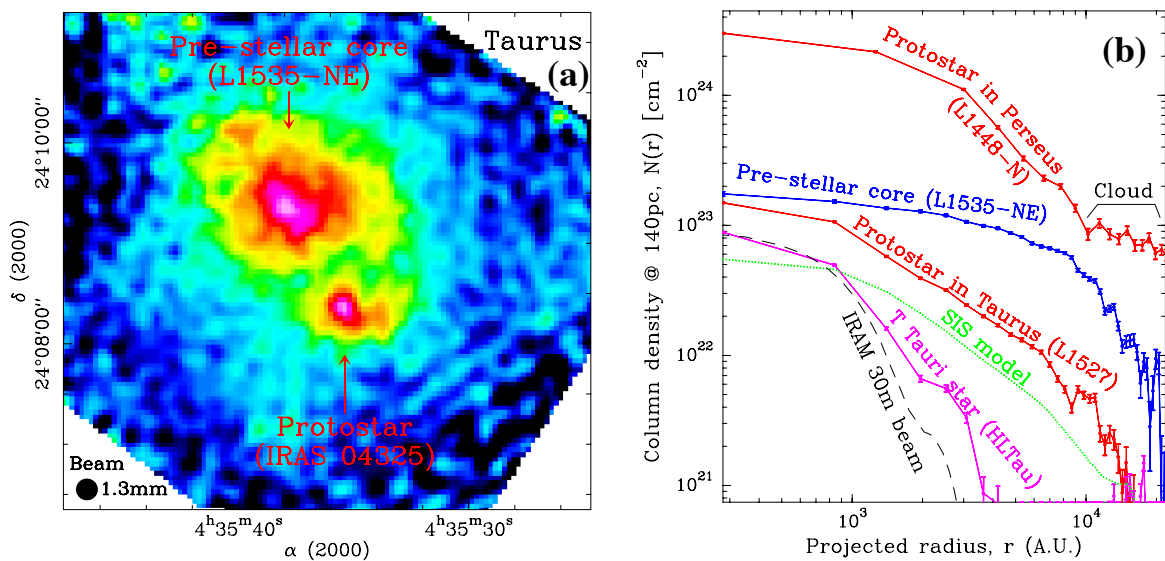


FIGURE 1.1 – Figure adaptée de [Motte & André \(2001a\)](#). (a) Émission continue à 1.3 mm d'objets stellaires jeunes du Taureau. Carte réalisée avec MAMBO au 30 m de l'IRAM.

(b) Profils radiaux de densité de colonne déduits de cartes telles que celle de a. Le modèle de sphère singulière isotherme (SIS, [Shu et al. 1987](#), courbe verte) rend assez bien compte du profil des enveloppes proto-stellaires du Taureau (p. ex. L1527) mais est trop concentré pour représenter la structure des cœurs pré-stellaires (p. ex. L1535-NE). En revanche, les enveloppes des proto-étoiles de Persée (p. ex. L1448-N) ont une densité supérieure d'un ordre de grandeur à celle d'une SIS et leur profil rejoint à une distance finie l'émission du nuage moléculaire.

Les résultats ci-dessus ont une valeur statistique indéniable. Ils permettent de contraindre les conditions initiales de l'effondrement proto-stellaire en déterminant la structure en densité des cœurs denses à l'amorce de l'effondrement gravitationnel :

- *Formation stellaire isolée :*

Dans le Taureau et la plupart des globules de Bok, le cœur dense initial a vraisemblablement une structure proche de celle d'une *sphère singulière isotherme* (loi de densité singulière et auto-similaire). Si ce cœur est soutenu par la seule pression thermique et s'effondre de manière spontanée, la proto-étoile résultante devrait évoluer selon le scénario dit standard.

- *Formation d'étoiles en amas :*

Par contraste, dans Persée et ρ Ophiuchi, le cœur dense initial ressemblerait davantage à une condensation de Bonnor-Ebert (loi de densité bornée avec un plateau central, cf. [Bonnor 1956](#)). En effet, le cœur dense résulte de la fragmentation (\Rightarrow *taille finie*) et n'a probablement pas atteint une concentration singulière lorsque

l'effondrement gravitationnel est induit (\Rightarrow *plateau central*). De plus, l'effondrement est probablement provoqué par une onde qui comprime le cœur dense initial (\Rightarrow *forte densité*). **Le modèle standard ne peut pas décrire l'effondrement gravitationnel dans les proto-amas.** Les modèles dédiés à l'effondrement dynamique d'un cœur dense non singulier et de taille finie (p. ex. Foster & Chevalier 1993) sont probablement plus appropriés.

1.3 Origine de la fonction de masse initiale des étoiles

Les étoiles possèdent une distribution de masse qui semble universelle, la fonction de masse initiale (IMF, voir l'article de revue Scalo 1998). Cette loi peut être déterminée soit au stade pré-stellaire – par la fragmentation ou la fusion de condensations sans étoile –, soit au stade proto-stellaire – par l'accrétion, la fragmentation ou la fusion des enveloppes proto-stellaires. À la fin de mon doctorat, malgré l'intérêt toujours renouvelé de la communauté astrophysique pour ce sujet, l'origine de la fonction de masse initiale des étoiles restait inconnue (p. ex. Elmegreen 2000). Pendant les dix ans précédents, les études observationnelles de la fragmentation des nuages moléculaires concluaient à une structure fractale, impropre à définir l'IMF (p. ex. Williams et al. 2000). Il est en fait nécessaire d'étudier la fragmentation des parties denses de ces nuages (c'est-à-dire les cœurs denses) pour espérer mesurer un spectre de masse caractéristique de la formation stellaire.

Grâce à l'efficacité d'imagerie des caméras de bolomètres MAMBO et SCUBA, nous avons couvert l'ensemble du nuage moléculaire de ρ Ophiuchi et des proto-amas NGC 2068 et NGC 2071 du complexe d'Orion B. Ces toutes premières cartographies “grand-champ” du continuum (sub-)millimétrique permettent d'étudier la fragmentation des cœurs denses avec une résolution angulaire et une sensibilité adaptées.

- Nous y avons découvert des structures qui ont la même taille que les enveloppes proto-stellaires, sont gravitationnellement liées mais restent pré-stellaires, c'est-à-dire sans étoile. Cette nouvelle population d'objets possède un spectre de masse dont la forme rappelle la fonction de masse initiale des étoiles (p. ex. Kroupa et al. 1993, voir Figs. 1.2a-b). C'est encore plus remarquable lorsque l'on compare, dans la même région, le spectre de masse de ces “condensations sans étoiles” et celui des étoiles jeunes (pour ρ Ophiuchi voir Fig. 1.2a). D'autre part, les caractéristiques physiques des condensations pré-stellaires suggèrent qu'elles ont été créées par la fragmentation des parties du nuage dans lesquelles la gravitation domine la turbulence.
- En conséquence, ces condensations sans étoile seraient les précurseurs directs des proto-étoiles et la fragmentation fixerait le réservoir de masse utilisé pour la formation de chaque étoile de l'amas. **Nous proposons que la fonction de masse initiale des étoiles créées en amas est déterminée au stade pré-stellaire de la formation stellaire, par le processus de fragmentation des nuages moléculaires.** Ce résultat a été publié dans Motte et al. (1998) et Motte et al. (2001). Voir la Fig. 1.2.

Les études systématiques que nous avons menées dans ρ Ophiuchi et NGC 2068/2071 sont pionnières. Elles ont initié de nombreuses études concurrentes (p. ex. Johnstone et al. 2000; Alves et al. 2007), des théories semi-analytiques (p. ex. Myers 1998) et des modèles numériques (p. ex. Klessen et al. 2000). Dans la revue Motte & André (2001b), j'en fait la synthèse et je précise les critères nécessaires pour sélectionner de bons candidats progéniteurs des proto-étoiles, c'est-à-dire des structures dans lesquelles l'effondrement proto-stellaire aura lieu. Voir aussi les revues plus récentes de Chabrier (2005) et André et al. (2010).

Notre travail de recherche sur l'origine de l'IMF a aussi servi de justification scientifique principale pour le satellite *Herschel* (cf. André & Motte 2000). Par suite, un des programmes clé du temps garanti *Herschel* s'est donné comme objectifs de confirmer nos résultats et de déterminer la partie très faible masse du spectre de masse pré-stellaire attendu dans les proto-amas d'étoiles. Il s'agit du projet “GouldBelt : Probing the origin of the stellar initial mass function” dirigé par Philippe André. Le consortium GouldBelt est en train de construire des catalogues robustes et complets des condensations pré-stellaires des nuages de la “Gould Belt” (situés à 100–500 pc du Soleil et formant principalement des étoiles de faible masse, p. ex. Taurus et Orion). L'étude préliminaire des spectres de masse de ces condensations pré-stellaires semble confirmer qu'il existe une relation directe entre la masse des condensations pré-stellaires et la masse des étoiles qu'elles forment (Könyves et al. 2010, soumis).

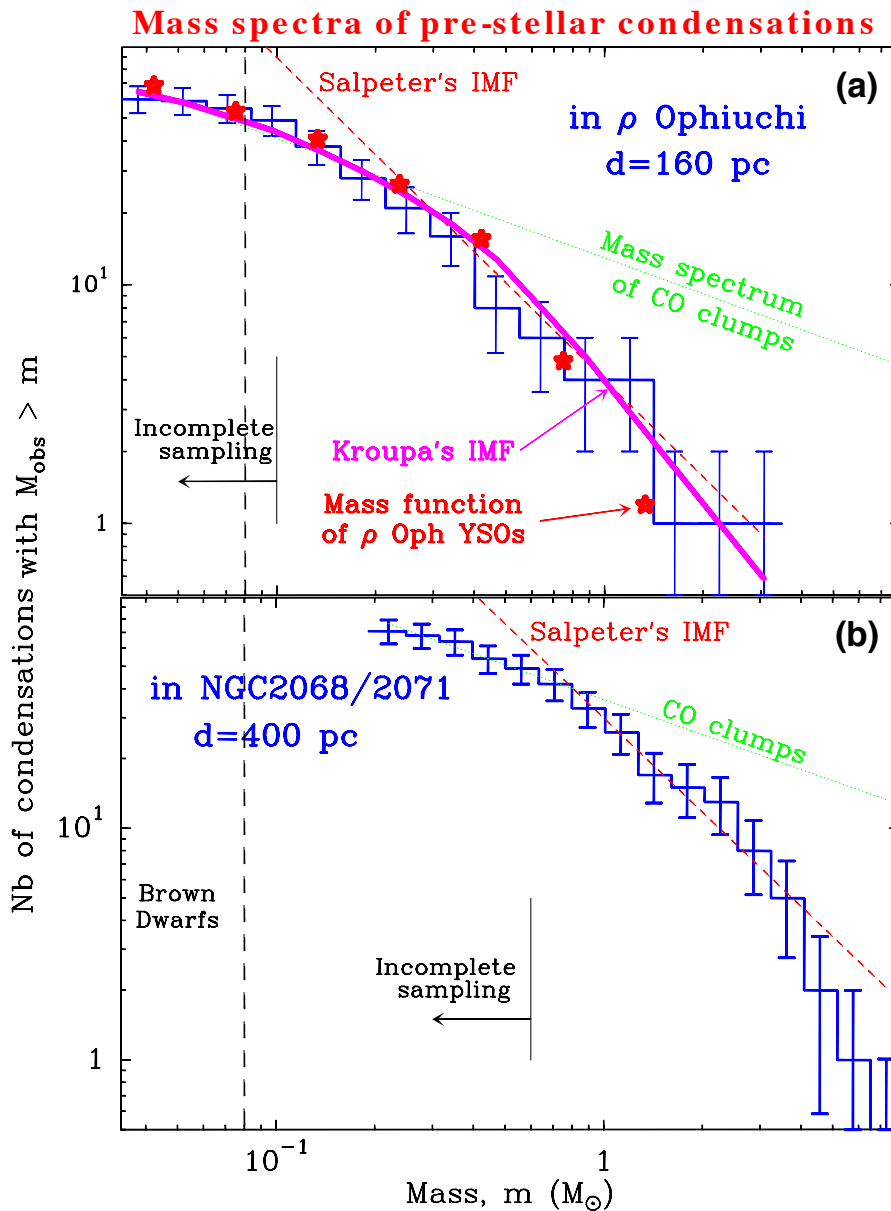


FIGURE 1.2 – Spectres de masse cumulés des condensations pré-stellaires de ρ Ophiuchi (figure **a** adaptée de Motte et al. 1998) et des proto-amas NGC 2068/2071 (figure **b** extraite de Motte et al. 2001). Ces deux spectres diffèrent de la loi fractale obtenue pour les fragments CO (p. ex. Williams et al. 2000). En revanche, leur forme rappelle celle de l'IMF des étoiles de champ (voir Kroupa et al. 1993; Salpeter 1955) et des étoiles jeunes de ρ Oph (Bontemps et al. 2001).

1.4 Des grands programmes *Herschel*, IRAM et APEX

Dès le début de ma thèse, j'ai été une grande utilisatrice des caméras de bolomètres. En attendant mon implication dans le logiciel de réduction de données (IRAM/NIC) et les publications (Motte et al. 1998, 2007, voir Fig. 1.3) qui présentent les plus grandes cartes de nuages moléculaires de leur temps et proposent une nouvelle méthode d'extraction de sources (MRE-GCL). Ainsi, j'ai pu effectuer les premières études statistiques sur les phases précoces de la formation d'étoiles.

- Par suite, j'ai été invitée à participer au grand projet ESO/MPIfR "AtlasGal"⁹ (870 μm Schuller et al. 2009) sur APEX et au grand programme IRAM/NIKA2¹⁰ de Peretto et al. sur le télescope de 30 m. Je suis aussi, dans une moindre mesure, impliquée dans les développements et observations de la caméra ARTEMIS sur APEX (350 μm , André et al.).
- En complément de ces études du continuum (sub)millimétrique avec une résolution angulaire modérée ($\sim 10'' - 20''$), j'ai entrepris des cartographies de raies moléculaires comme avec le grand programme IRAM "W43-HERO" (voir Nguyen Luong et al. 2011b; Nguyen-Luong et al. 2013; Carlhoff et al. 2013). J'ai aussi effectué des études à plus haute résolution angulaire avec les interféromètres IRAM/PdBI (Louvet et al. 2014, en prép.) et ALMA (projet Motte et al. en cours).

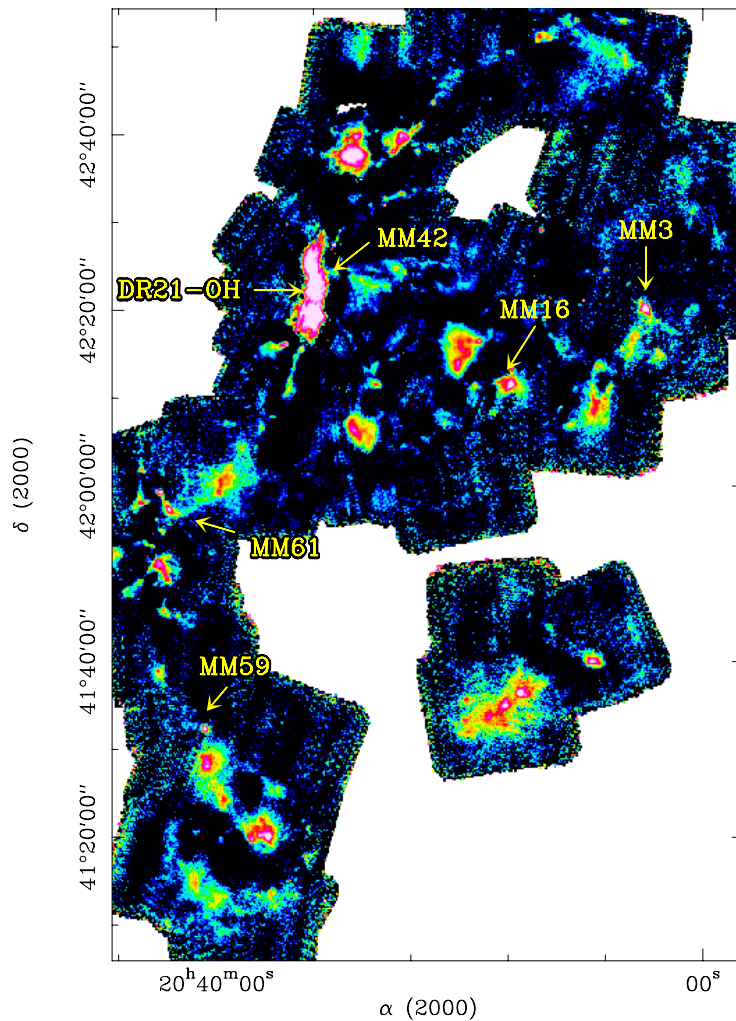


FIGURE 1.3 – Partie centrale du complexe de Cygnus X, correspondant à la moitié des $3^{\circ 2}$ cartographiés à 1.2 mm avec la caméra MAMBO-2. Cette carte est le résultat de 4 missions d'observation au télescope de 30 m de l'IRAM (Motte et al. 2007). Les nouveaux cœurs denses qui sont de bons candidats pour être des proto-étoiles massives analogues des Classe 0s y sont indiqués.

Le laboratoire AIM Paris-Saclay a participé à la réalisation et à l'exploitation scientifique des caméras SPIRE et PACS du satellite *Herschel*. Dans ce cadre il était naturel que je contribue à la préparation, l'analyse et la gestion

⁹ AtlasGal, the APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy a effectué la première cartographie submillimétrique du plan de notre Galaxie

¹⁰ NIKA2 (New Instrument of Kids Arrays) sera la caméra de bolomètres du télescope de l'IRAM à partir de 2016. Elle possèdera 1000 détecteurs à 2 mm, 4000 détecteurs à 1.25 mm et mesurera la polarisation linéaire à 1.25 mm. Son prototype, nommé NIKA, est testé et utilisé depuis 2014.

des programmes clé dédiés à la formation des étoiles. Les activités scientifiques, techniques et de gestion liées à *Herschel* ont correspondu à la majeure partie de mon travail de recherche de ces dix dernières années.

- *Herschel* est un instrument unique pour étudier les phases primordiales de la formation stellaire (massive). Les cœurs pré-stellaires et proto-étoiles massifs qui leur correspondent sont vraisemblablement constitués de gaz froid et dense ($20 - 50$ K, $n_{\text{H}_2} > 10^5 \text{ cm}^{-3}$). Ils émettent donc la majorité de leur luminosité dans le domaine de longueurs d'onde allant de l'infrarouge lointain au sub-millimétrique, domaine parfaitement couvert par les caméras PACS et SPIRE de *Herschel*. Du sol, ce n'est qu'à partir de 2007 que des cartographies en continuum (sub-)millimétrique fournissent péniblement quelques bons candidats pour être des proto-étoiles massives (Motte et al. 2007). Depuis 2009, *Herschel* révolutionne notre connaissance de la formation des étoiles massives grâce notamment au programme clé *Herschel/HOBYS* : "HOBYS : the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects" que je co-dirige avec A. Zavagno (LAM Marseille) et S. Bontemps (LAB Bordeaux) (voir Motte et al. 2010, 2012, et <http://hobys-herschel.cea.fr>).
- Dans le cadre de notre unité de recherche, le projet HOBYS est intéressant de par sa complémentarité avec le programme clé GouldBelt dédié à la formation stellaire de faible masse dont Philippe André assure la direction. Par ailleurs, les complexes moléculaires étudiés pourront servir de modèle miniature pour les régions de formation stellaire des galaxies proches (cartographiées dans le projet co-dirigé par Suzanne Madden) et des galaxies à "haut redshift" (étudiées par les programmes clé extragalactiques dans lesquels David Elbaz, Hervé Aussel, P.-A. Duc, ... sont largement impliqués). C'est une des raisons qui m'ont poussée à organiser une conférence réunissant les communautés galactiques et extragalactiques travaillant sur la formation stellaire : GESF2014, du 8 au 12 septembre 2014 à Marseille (voir <http://cnes.cborg.fr/gesf2014/>)
- Dans le cadre international, l'expérience acquise par le projet HOBYS pour la compréhension des phases précoces de la formation des étoiles massives est très utile pour les autres programmes clé dans lesquels je suis impliquée : GouldBelt (André et al. 2010), ISM (Abergel et al. 2010), Hi-GAL (Molinari et al. 2010) et ColdCores (Juvela et al. 2010).

1.5 Formation des étoiles massives

Nous connaissons mal le processus physique qui permet la formation des étoiles dites massives ou OB, c'est-à-dire ayant une masse supérieure à $8 M_{\odot}$. Comme les étoiles de faible masse, les étoiles massives se forment dans les cœurs denses des complexes moléculaires. Cependant, lorsque l'embryon d'étoile atteint $8 M_{\odot}$, il émet un fort rayonnement UV qui chauffe puis ionise le gaz dans lequel il se trouve. La région H II ainsi créée a la capacité de freiner l'accrétion de masse, il s'ensuit que le scénario de formation des étoiles de faible masse n'est pas applicable ici (p. ex. Stahler et al. 2000).

Il n'existe pas encore de théorie acceptée, pas plus que de séquence évolutive empirique établie pour décrire la formation des étoiles massives (voir par exemple la revue Motte & Hennebelle 2009). Comme les phases précédant la formation d'une région H II sont les plus mal connues, j'ai entrepris la recherche et la caractérisation de ces phases dites précoces.

1.5.1 Recherche des phases précoces de la formation des étoiles massives

Dans les années 2000, l'observation systématique de sources *IRAS* lumineuses ayant des couleurs rouges a permis d'établir des échantillons de proto-étoiles massives "lumineuses en infrarouge", c'est-à-dire évoluées. Pendant mon post-doctorat en Allemagne, j'ai participé à la plus citée de ces études du continuum millimétrique : Beuther et al. (2002). En 2005-2010, les objets stellaires plus jeunes que sont les analogues massifs des proto-étoiles de Classe 0 et les condensations pré-stellaires restaient encore à découvrir. Depuis, une population de Classe 0s massives a été identifiée (Bontemps et al. 2010) mais l'existence même d'analogues massifs des condensations pré-stellaires est sujette à débat (p. exp. Motte et al. 2007).

C'est par la cartographie complète et non biaisée des complexes moléculaires formant des étoiles massives que l'on peut espérer trouver ces objets. Du sol, le continuum (sub-)millimétrique est l'outil le plus efficace mais l'imagerie grand-champ qui est nécessaire requiert des projets observationnels de longue haleine comme AtlasGal (Schuller et al. 2009). In fine, le satellite *Herschel* est l'outil rêvé pour mener ce type de projets (voir Sect. 1.5).

- Nous avons mené dans Cygnus X la première étude non biaisée de la formation des étoiles massives (Motte et al. 2007, voir Fig. 1.3). Nos résultats suggèrent, pour la première fois et de façon surprenante, que **les temps de vie des phases pré-stellaires des étoiles massives sont bien plus courts que ceux observés pour les étoiles de faible masse**. Nous avons aussi proposé des critères observationnels pour sélectionner des proto-étoiles encore très jeunes (voir aussi le proceeding invité Motte et al. 2008). Nommés “infrared-quiet massive dense cores”, ces objets consistent en un embryon stellaire de masse $<8 M_{\odot}$ enfoui dans un cœur dense massif ($>50 M_{\odot}$).
- Afin de confirmer ce résultat pionnier sur les temps de vie pré-stellaire, nous avons poursuivi l’étude systématique au sol des complexes moléculaires qui forment des étoiles massives à des distances inférieures à 3 kpc. Ce sont les régions sélectionnées pour le programme clé *Herschel* HOBYS, elles forment des étoiles de $\sim 10 - 40 M_{\odot}$. Ce projet sol consiste en la cartographie de dizaines de degrés carrés avec les caméras MAMBO-2 et SIMBA¹¹.
La première de ces études porte sur le complexe moléculaire NGC 6334-6357, elle est décrite dans l’article (Russeil et al. 2010). Des observations complémentaires en raies moléculaires (émission SiO traçant des flots puissants) et infrarouge moyen très sensibles (flux *Spitzer*/MIPS à $24 \mu\text{m}$) ont montré que les “infrared-quiet massive dense cores” de cette région étaient presque tous des proto-étoiles massives, pas des cœurs denses pré-stellaires/sans étoile. **Ces résultats confirment que les temps de vie des phases pré-stellaires de la formation des étoiles massives sont très courts, voire qu’elles n’existent pas sous forme de condensations de petite taille, isolées de leur environnement** (définition utilisée dans le cadre de la formation des étoiles de faible masse, voir Sect. 1.3).
- J’ai très activement participé au développement d’un logiciel capable d’extraire, simultanément à plusieurs longueurs d’onde *Herschel* (70, 160, 250, 350 et $500 \mu\text{m}$), des sources compactes enfouies dans un environnement complexe (leur nuage moléculaire parent). Le logiciel *getsources* (voir Men’shchikov et al. 2010, 2012) a longuement été testé sur des données réelles et simulées. Depuis un an, nous sommes en mesure de construire les catalogues robustes de cœurs denses massifs présents dans les complexes moléculaires HOBYS.
- Nous avons mené une étude systématique avec *Herschel* de l’ensemble des complexes moléculaires proches (1–3 kpc) qui forment des étoiles massives : HOBYS (voir Motte et al. 2010, 2012). La Fig. 1.4 présente la première image obtenue pour le programme clé HOBYS et illustre la richesse de ces données. L’étude des régions du Cygne et de NGC 6334 ne révèle pas de cœurs pré-stellaires massifs (Hennemann et al. en prép. ; Tigé et al. en prép.), confirmant ce que nous proposons dès 2007. **Les résultats HOBYS suggèrent que les proto-étoiles massives se forment à partir de proto-étoiles de masse intermédiaire situées au sein d’un filament hypermassif** (Hennemann et al. en prép.), en plein accord avec les études dynamiques du Sect. 1.5.
- Je participe au grand projet “AtlasGal” (Schuller et al. 2009) qui a effectué la première cartographie submillimétrique du plan de notre Galaxie. AtlasGal a fourni l’échantillon complet des phases précoces de la formation des étoiles massives dans notre Galaxie (Csengeri et al. 2014) grâce à une méthode d’extraction de sources basée sur celle que j’avais mise au point (MRE-GCL, voir Motte et al. 2003, 2007). Cette étude est complémentaire des nôtres car elle n’identifie pas les proto-étoiles individuelles mais permet d’étudier les progéniteurs d’étoiles plus massives que $40 M_{\odot}$. Csengeri et al. (2014) confirment que les proto-étoiles massives ne peuvent pas se former à partir de structures massives de taille analogue aux cœurs pré-stellaires de faible masse.

1.5.2 Études détaillées des progéniteurs des étoiles massives

Une fois les proto-étoiles massives recensées, nous cherchons à les caractériser afin de contraindre la physique de la formation des étoiles massives. Nos premières études portent sur les cœurs denses “infrared-quiet” du Cygne qui représentent **d’excellents analogues massifs des proto-étoiles de Classe 0**.

- **La luminosité bolométrique des proto-étoiles** est un paramètre crucial pour construire la séquence évolutive de la formation des étoiles massives. Pour estimer celle des objets nouvellement découverts dans le

¹¹ La caméra SIMBA est une copie de la caméra MAMBO qui possède 37 bolomètres. Installée au SEST, sa résolution angulaire à 1.2 mm était de $24''$.

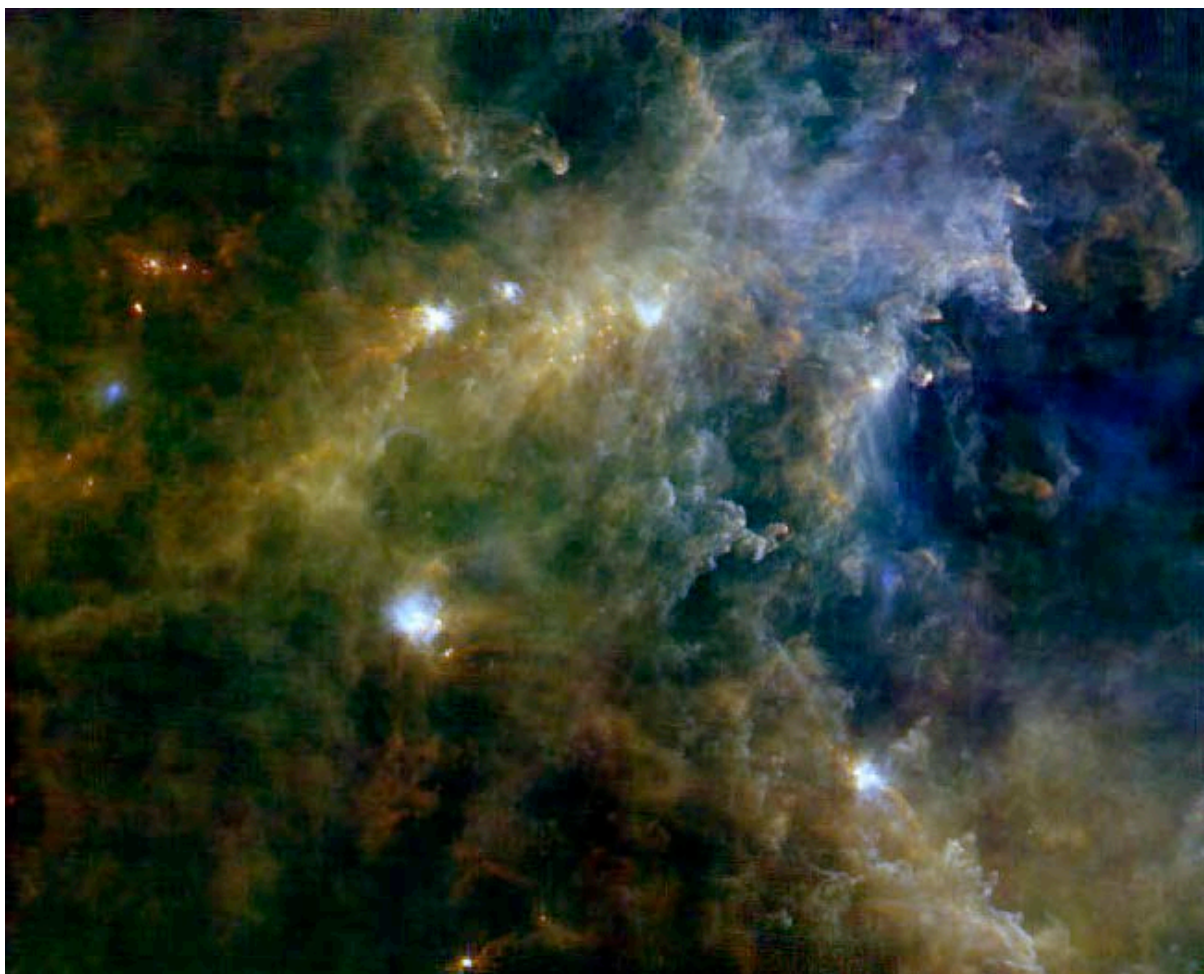


FIGURE 1.4 – Image 3 couleurs (PACS 70 μm / PACS 160 μm / SPIRE 250 μm) du complexe moléculaire de la Rosette. Ces données *Herschel* ont été obtenues pour le programme-clé HOBYS et sont publiées dans [Motte et al. \(2010\)](#); [Hennemann et al. \(2010\)](#) et [Schneider et al. \(2010b, 2012\)](#).

Cygne, nous avons effectué des observations complémentaires en continuum submillimétrique avec la caméra SHARC-II (350 μm , projet Louvet et al.), en infrarouge moyen avec le satellite *Spitzer*¹² (projet “Legacy” Hora et al.), ainsi bien sûr qu’avec *Herschel* (projet HOBYS). Les résultats de Hennemann et al. (en prép.) confirment que **les objets “infrared-quiet” du Cygne contiennent bel et bien des proto-étoiles très jeunes (équivalentes à des Classe 0s) qui ont le potentiel de former des étoiles massives.**

- Nous avons étudié les cœurs denses “infrared-quiet” les plus massifs du Cygne avec l’interféromètre du Plateau de Bure afin de séparer les proto-étoiles individuelles et estimer leurs taux d’accrétion via la puissance de leurs flots. Une dizaine de proto-étoiles de Classe 0 massives a été identifiée, avec un taux de sous-fragmentation peu élevé et une ségrégation en masse relativement forte ([Bontemps et al. 2010](#), voir Fig. 1.5). **Cette forte concentration de la masse, le fait qu’aucun cœur pré-stellaire n’a été découvert et les diagrammes évolutifs protostellaires** (Luminosité versus Masse et Puissance des flots versus Masse) **favorisent un processus d’accrétion forte mais sporadique, comme celle attendue lors de collision de flots de gaz** ([Duarte-Cabral et al. 2013](#), voir aussi Sect. 1.6).

¹² La caméra MIPS du satellite *Spitzer* permet des observations à 24 et 70 μm avec une résolution de 6” et 20”.

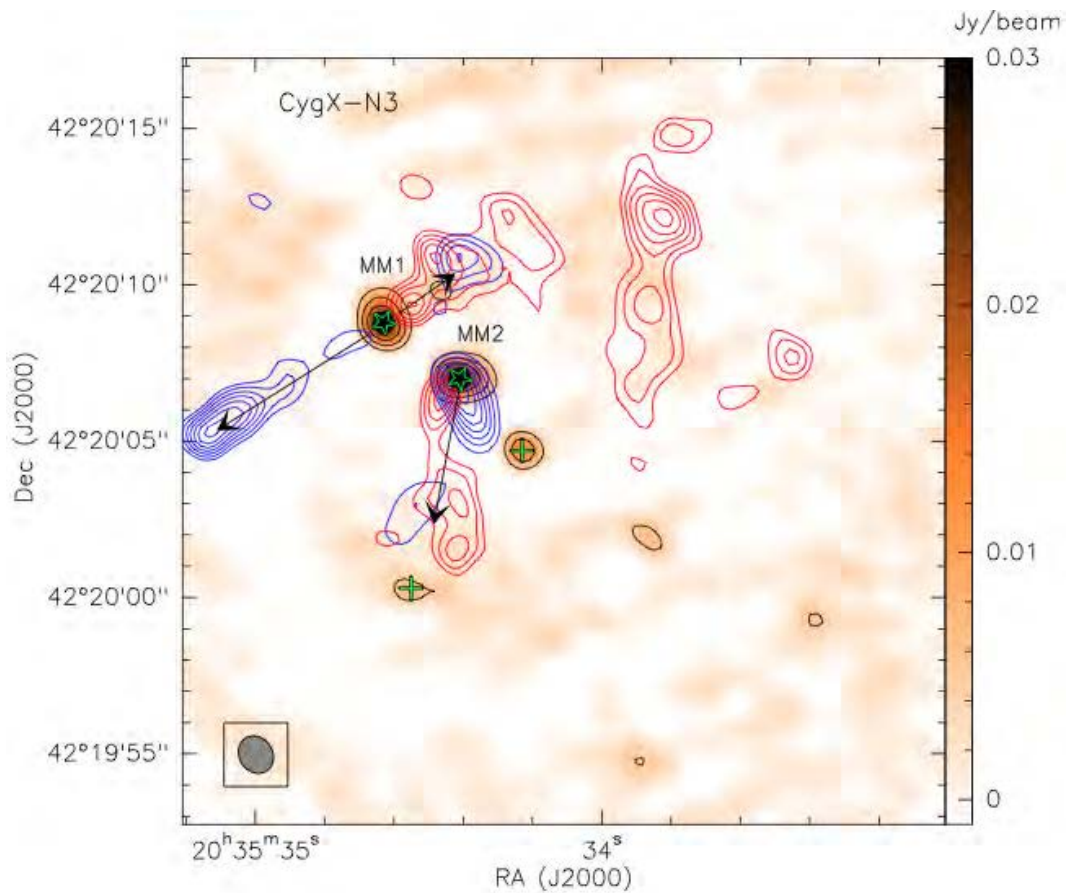


FIGURE 1.5 – Deux proto-étoiles massives de Classe 0 observées dans le Cygne avec l’IRAM PdBI (figure extraite de [Duarte-Cabral et al. 2013](#)). L’émission continuum à 1 mm (échelle de couleur) trace l’enveloppe protostellaire. Les émissions dans les ailes de raies ^{12}CO à hautes et basses vitesses (contours rouges et bleus) localisent les lobes rouges et bleus des flots protostellaires.

1.6 Un lien étroit entre la formation du nuage et de leurs étoiles massives

En théorie, les étoiles massives pourraient se former par accrétion de la masse d’un cœur massif sur un embryon d’étoile simple, c’est-à-dire selon le même scénario que les étoiles de faible masse mais avec une accrétion d’un à deux ordres de grandeur plus puissante (p. ex. [McKee & Tan 2002](#); [Hosokawa & Omukai 2009](#)). Autrement, les étoiles massives pourraient être le résultat de la collision de flots de matière au sein d’un large proto-amas/puits gravitationnel ou même de la fusion de plusieurs proto-étoiles de faible masse (p. ex. [Bonnell & Bate 2006](#); [Hartmann et al. 2012](#)). Cette seconde famille de modèles propose qu’il existe un lien très étroit entre la formation des étoiles massives et les caractéristiques de leur nuage parent. Pour résoudre cette controverse, nous avons commencé l’étude de la structure, de la dynamique et de l’activité de formation d’étoiles des nuages HOBYS ainsi que de celles de la région extrême W43.

1.6.1 Relation entre la structure des nuages et le taux de formation stellaire

Les données photométriques d’*Herschel* ont une sensibilité et une dynamique spatiale inégalée (voir p. exp. Fig. 1). Nous pouvons donc contraindre très efficacement la structure en (colonne de) densité des nuages cartographiés. L’un des résultats les plus inattendus de la mission *Herschel* a été de révéler l’importance et l’omniprésence de filaments interstellaires (p. exp. [André et al. 2010](#); [Arzoumanian et al. 2011](#); [Hill et al. 2011](#)).

- Un des faits marquants du programme clé HOBYS est la découverte de filaments hypermassifs (“ridges” en

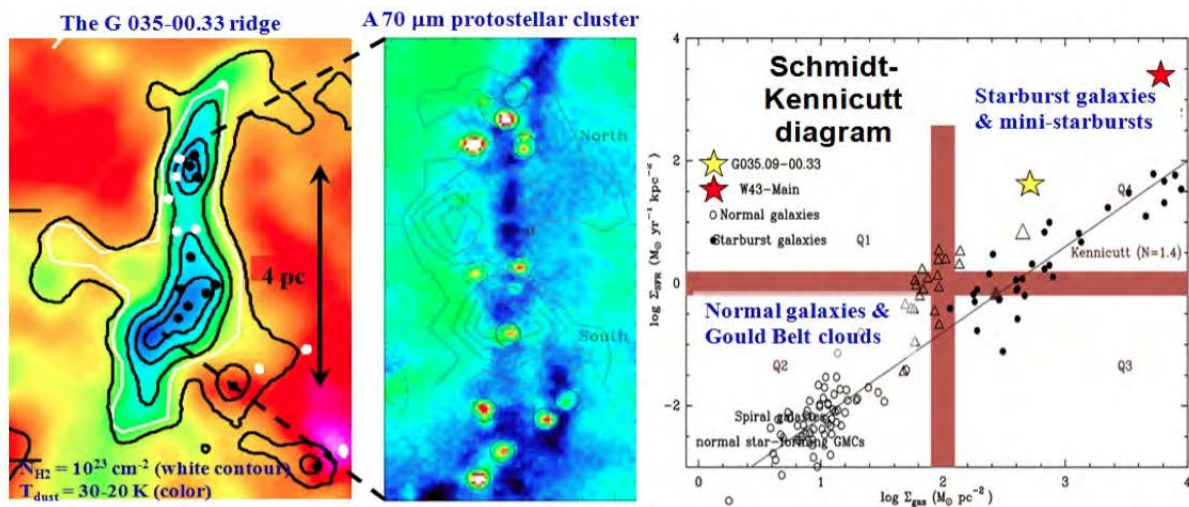


FIGURE 1.6 – Le filament hypermassif G035-00.33 et son amas d’étoiles massives en formation (Gauche). La densité et l’activité de formation stellaire des filaments hypermassifs les qualifient de régions “mini-starburst (Droite, étoiles jaune et rouge) sur un diagramme Schmidt-Kennicutt. Figures extraites de [Nguyen Luong et al. \(2011a\)](#) et [Nguyen Luong et al. \(en prép.\)](#).

anglais), définis comme des nuages à très haute densité ($>10^5 \text{ cm}^{-3}$ sur plusieurs pc^3) qui sont les sites privilégiés pour former des étoiles massives ([Hill et al. 2011](#); [Nguyen Luong et al. 2011a](#); [Nguyen-Luong et al. 2013](#); [Hennemann et al. 2012](#), voir Fig. 1.6). L’existence de filaments hypermassifs est prédite par les modèles dynamiques de formation des nuages, les flots convergents se transformant en des flots d’accrétion principalement guidés par la gravité. **Ces filaments hypermassifs seraient le résultat de la fusion de plusieurs filaments et continueraient à être nourris par le gaz de filaments moins denses en chute libre** (p. exp. [Schneider et al. \(2010a\)](#), voir Fig. 1.7).

- Ces régions coïncident avec des régions appelées “mini-starburst”, car elles présentent des taux de formation d’étoiles (en anglais “SFR”) dignes des galaxies à flambées de formation d’étoiles mais sur des échelles de temps et d’espace qui sont plusieurs ordres de grandeur plus petites ([Motte et al. 2003](#); [Nguyen Luong et al. 2011a](#); [Louvet et al. 2014](#), voir Fig. 1.6). Pour calculer les SFRs, nous avons introduit le concept de taux de formation d’étoiles instantané/présent, calculé à partir de l’activité de formation stellaire des $\sim 10^5$ dernières années mesurée via le nombre de proto-étoiles observées. Il complète le taux de formation d’étoiles intégré sur plus de 10^6 ans, estimé à partir du nombre d’étoiles T. Tauri, de l’émission de régions H II ou de l’impact des étoiles OB sur le milieu interstellaire.
- **La concentration du gaz dans les filaments hypermassifs est extrême puisqu’elle est équivalente à celle des cœurs pré-stellaires proches de s’effondrer mais qu’elle couvre des volumes dix à cent mille fois plus grands.** Nous avons utilisé cette concentration extrême pour tester les modèles de taux de formation d’étoiles en vogue en 2005–2013 (voir p. exp. la revue faite par [Federrath & Klessen 2012](#)). Ces modèles supposent que le milieu interstellaire se densifie, puis que certaines zones (les condensations pré-stellaires) s’effondrent sur elles-mêmes sans plus interagir avec le nuage environnant. Cet effondrement proto-stellaire “local” est en désaccord avec la formation d’étoiles en amas au sein d’un filament hypermassif. Nous montrons que les théories analytiques dont celle proposée par [Hennebelle & Chabrier \(2013\)](#) ne permettent pas de représenter correctement l’activité de formation stellaire dans W43-MM1 ([Louvet et al. 2014](#)).

1.6.2 De la dynamique des nuages à la formation des amas d’étoiles massives

Plus que la structure en densité, c’est la dynamique du nuage parent / filament hypermassif et son effondrement menant à la formation des étoiles massives qui peut contraindre les modèles mentionnés plus haut.

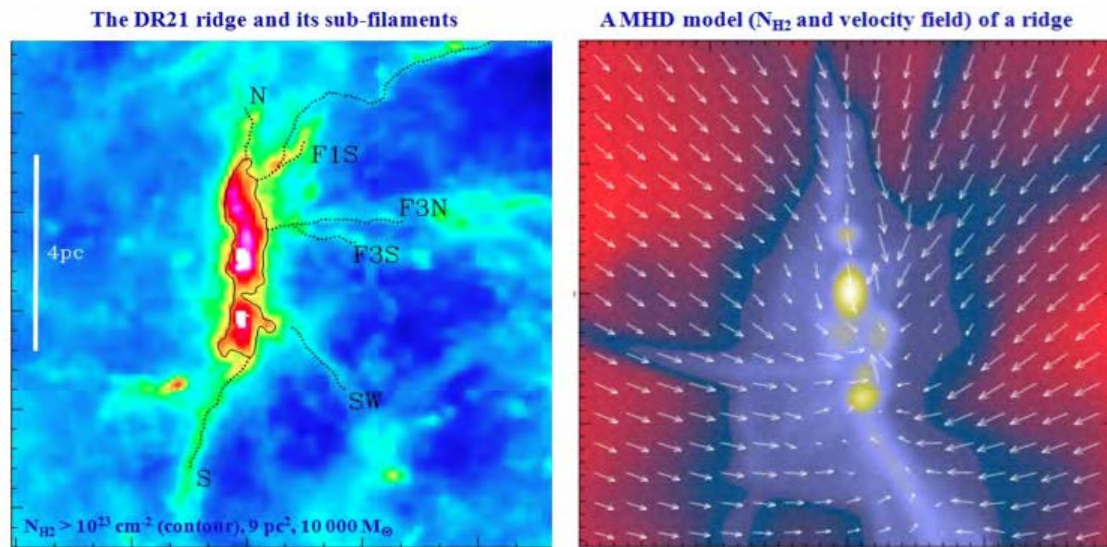


FIGURE 1.7 – Le filament hypermassif DR21 dans le Cygne et son réseau de filaments le nourrissant (Gauche) comparé à des simulations magnéto-hydrodynamiques faites par P. Hennebelle (Droite). Figures extraites de [Hennemann et al. \(2012\)](#) et [Schneider et al. \(2010a\)](#).

- Dans le cadre de projets IRAM 30 m hétérodynes (Schneider et al., W43-HERO et Bontemps et al.), nous avons cartographié les filaments hypermassifs des régions Cygnus X et W43 à l'aide de raies moléculaires traçant les milieux denses (comme HCO^+ et N_2H^+). Ces études suggèrent que **les parties denses de ces complexes moléculaires se contractent sur plusieurs parsecs avec des vitesses supersoniques puis sous forme de flots de gaz qui s'entremêlent**. Ces résultats sont présentés dans [Schneider et al. \(2010a\)](#); [Csengeri et al. \(2011b,a\)](#) et Motte et al. (en prép.). Des effondrements globaux sont observés dans d'autres régions massives (p. exp. [Galván-Madrid et al. 2010](#); [Peretto et al. 2013](#)) et sont cohérents avec les simulations (e.g. [Schneider et al. 2010a](#); [Smith et al. 2013](#), voir Fig. 1.7). La structure perpendiculaire des filaments hypermassifs semble conserver la mémoire de leur compression rapide, ne permettant pas l'évacuation du moment angulaire : leur profil radial est généralement plus pentu (Didelon, Motte, et al. soumis).
- Si cette contraction à grande échelle (>1 pc) du nuage moléculaire/ effondrement global provoque l'effondrement gravitationnel des proto-étoiles (à des échelles $\sim 0.01 - 0.1$ pc), le taux d'accrétion sera cent fois plus élevé que celui des étoiles de faible masse ($\sim 10^{-3} M_\odot/\text{an}$). **La contraction rapide des proto-amas permettrait donc la formation des étoiles massives par le seul processus d'accrétion**. Selon les modèles qui proposent la collision de flots convergents pour former les nuages moléculaires, leurs parties à haute densité sont nourries par des flots d'accrétion guidés par la gravité (p. exp. [Heitsch & Hartmann 2008](#)). C'est exactement ce qui est observé à petite échelle par [Csengeri et al. \(2011b,a\)](#); [Henshaw et al. \(2014\)](#) et Louvet et al. (en prép.).
- L'interaction entre les flots de matière qui convergent vers les filaments hypermassifs et les sites de formation stellaire est observée grâce à des émissions moléculaires caractéristiques de choc lent. Il s'agit de l'émission de CH_3CN ([Csengeri et al. 2011a](#)) ou de SiO ([Nguyen Luong et al. 2011a](#); [Nguyen-Luong et al. 2013](#); [Sanhueza et al. 2013](#); [Duarte-Cabral et al. 2014](#)). Le long du filament hypermassif W43-MM1, la grande majorité de l'émission SiO est associée à la formation du nuage par choc lent et non aux flots proto-stellaires (Louvet et al. en prép.). Des modèles de choc sont utilisés pour comprendre où se trouvent les molécules de SiO avant et après le choc pour, in fine, **mieux suivre l'accrétion de gaz** ([Nguyen-Luong et al. 2013](#), [Gusdorf et al. en prép.](#)).

En conclusion, la découverte de filaments hypermassifs abritant des amas d'étoiles massives et l'étude de leur dynamique et formation suggèrent que les étoiles massives se forment par accrétion non sphérique et probablement intermittente de flots de gaz. Cette vision "dynamique" est en accord avec les théories de flots convergents et/ou dirigés par la gravité et met à mal les modèles analytiques de taux de formation stellaire.

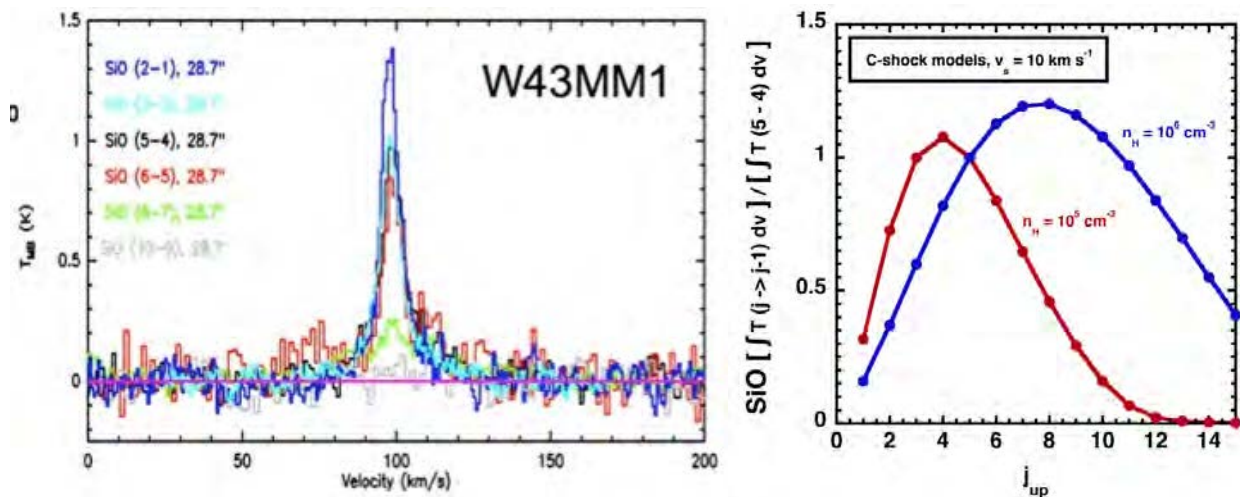
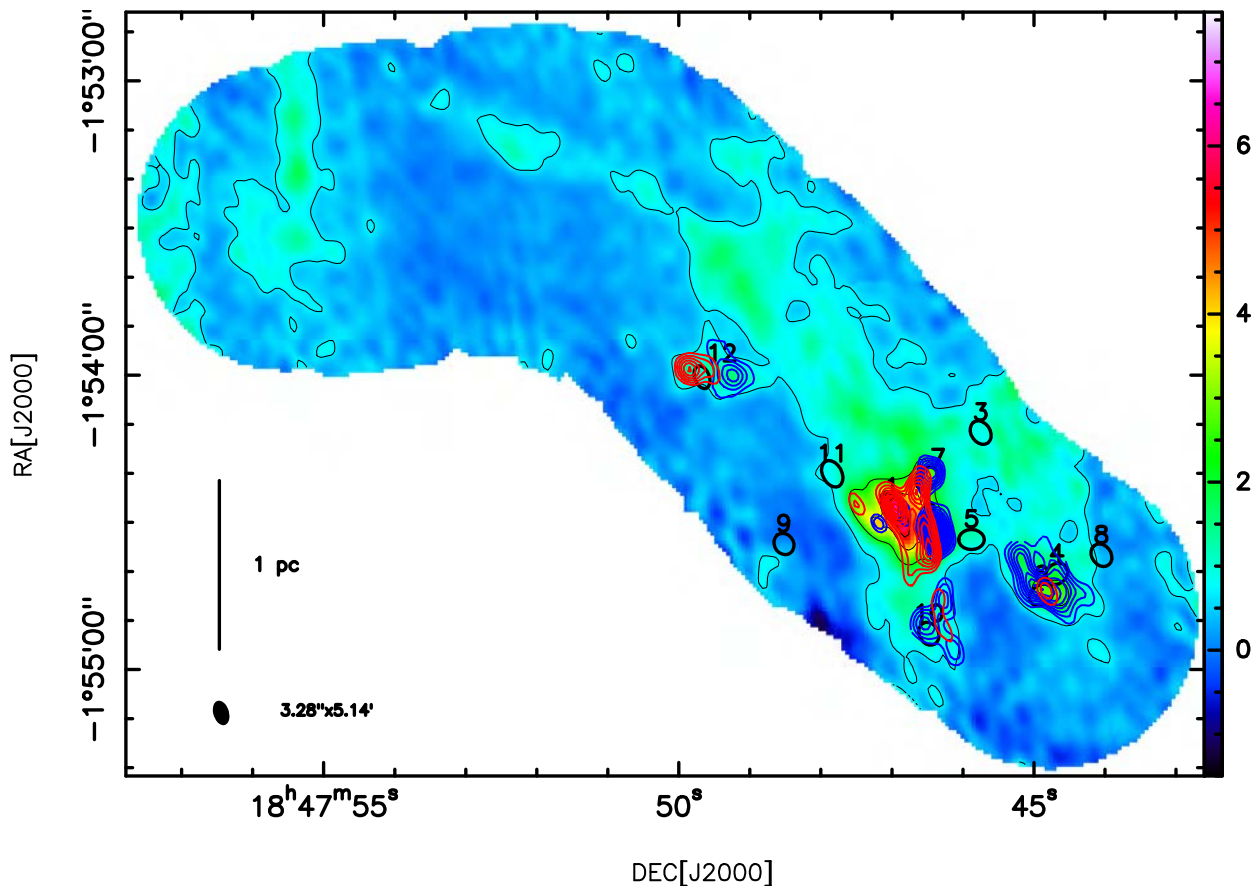


FIGURE 1.8 – **Haut**) Emission SiO étendue le long du filament hypermassif W43-MM1, considérée comme la signature du choc basse vitesse associé à l'interaction de nappes de gaz au sein de W43-MM1. **Bas-gauche**) Plusieurs transitions de la molécule SiO. **Bas-droite**) Modèles de choc d'Antoine Gusdorf permettant notamment de contraindre la densité et la vitesse du gaz pré-choc. Figures extraites de Louvet et al. (en prép.) et Gusdorf et al. (en prép.). Voir aussi [Nguyen-Luong et al. \(2013\)](#).

1.7 Formation d'un complexe de nuages extrême dans notre galaxie

Nous avons commencé à étudier la structure et la dynamique d'un des complexes moléculaires parmi les plus actifs en formation d'étoiles de notre galaxie, W43. J'ai notamment initié un grand programme IRAM : "W43-HERO : Origins of molecular clouds and star formation in W43" (Motte, Schilke et al., voir <http://www.iram-institute.org/EN/content-page-292-7-158-240-292-0.html>) utilisant la caméra hétérodyne HERA et le récepteur EMIR sur le télescope de 30 m. Son objectif final est de contraindre la théorie des flots convergents et de quantifier son efficacité pour la formation des étoiles massives dans W43.

- Dans le cadre de W43-HERO, nous avons identifié le complexe de nuages moléculaires associé au filament hypermassif W43-MM1. Nous avons aussi montré que ce complexe est extrême pour ce qui est de sa concentration de gaz à haute densité ainsi que de son taux de formation d'étoiles. Nous proposons que toutes ces caractéristiques atypiques soient liées à la position de ce complexe moléculaire au bout de la barre galactique de la Voie Lactée (Nguyen Luong et al. 2011b). La distance de W43 a ensuite été confirmée par une étude à meilleure résolution angulaire (Carlhoff et al. 2013) et une estimation de distance basée sur des mesures de parallaxe (Zhang et al. 2014).
- Nous avons ensuite étudié la formation du complexe moléculaire W43 le long du bras galactique Scutum-Crux jusqu'à ce qu'il fasse la jonction avec la longue barre de notre galaxie (étude sur 10–500 pc, Motte et al. 2014). Nous confirmons qu'il se situe bien au bout de la barre galactique, dans une zone d'accumulation de gaz, aussi observée dans les simulations numériques de (Renaud et al. 2013, en prép.). Nous avons aussi suivi la formation du gaz d'hydrogène moléculaire (H_2 tracé par l'émission ^{12}CO) à partir du gaz d'hydrogène neutre ($H\ I$) et montré que le modèle simple de Krumholz et al. (2009) n'est pas adapté à ce nuage structuré et non homogène. Une étude de nos concurrents et néanmoins collaborateurs confirme ce résultat avec des données de meilleure résolution corrigées de l'extinction (Bihl et al. soumis à A&A).

L'expérience acquise sur W43 montre, qu'à l'heure d'aujourd'hui, nous devons comprendre la formation des nuages moléculaires dans notre galaxie si notre objectif est de comprendre la formation d'étoiles de façon statistique aussi bien que dans ses cas les plus extrêmes.

Chapitre 2

Phases précoces de la formation d'étoiles massives : cœurs denses massifs (MDCs)

Sommaire

2.1 La formation des étoiles massives à l'aube d'<i>Herschel</i> / High-mass star formation at the dawn of <i>Herschel</i>	15
2.1.1 Revue des théories proposées / Overview of proposed theories	16
2.1.2 Revue des contraintes observationnelles / Overview of observational constraints	18
2.2 Caractérisation des phases précoces de la formation d'étoiles massives / Characteristics of the earliest phases of high-mass star formation	24
2.3 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	25

After a short introduction of our knowledge on high-mass star formation at the dawn of *Herschel* (see Sect. 2.1), I will shortly explain how we do characterize its earliest phases (see Sect. 2.2) and give my related publications (see Sect. 2.3).

2.1 La formation des étoiles massives à l'aube d'*Herschel* / High-mass star formation at the dawn of *Herschel*

We review the theories and observations of high-mass star formation emphasizing the differences with those of low-mass star formation. We hereafter describe the progress expected at the dawn of *Herschel*, thanks notably to Key Programs dedicated to the earliest phases of high-mass star formation.

High-mass stars, also called OB stars, have luminosities larger than $10^3 L_{\odot}$, spectral types B3 or earlier, and stellar masses roughly spanning the range $10 - 100 M_{\odot}$. From their birth to their death, high-mass stars are known to play a major role in the energy budget of galaxies via their radiation, their wind, and the supernovae. Despite that, the formation of high-mass stars remains an enigmatic process, far less understood than that of their low-mass (solar-type) counterparts.

Theoretically, the copious UV flux emitted by a stellar embryo of more than $8 M_{\odot}$ heats and ionizes its parental molecular cloud, leading to the formation and development of a hot core and an H II region. These physical and chemical feedback processes are difficult to treat but must be added in analytical and numerical simulations classically used for low-mass star formation. These further difficulties, summing up with those associated with the star formation process itself, have long delayed any effort in this direction.

Observationally, the main difficulty arises from the fact that high-mass stars are fewer in number than low-mass stars (see the shape of the IMF in, e.g., Fig. 1.2 of Chapter 1). Therefore, molecular clouds able to form high-mass stars are statistically more remote (typically at $d_{\text{Sun}} > 1$ kpc) than those of well-studied low-mass star-forming regions. Current observational studies of high-mass star formation therefore suffer from a lack of spatial resolution and from our bare knowledge of remote star-forming regions.

The ten years before *Herschel* launch have seen an increasing interest in approaching the issue of the formation of high-mass stars, from both the theoretical and observational sides. Here we review the progress that was made in this domain and that led to *Herschel* programs.

2.1.1 Revue des théories proposées / Overview of proposed theories

One of the main differences between the formation of high-mass and low-mass stars is that the radiation field of a massive protostar plays a more important role. Indeed, the massive stellar embryo strongly heats the gas and even prevents further matter accretion through its radiation pressure. From a theoretical point of view, this implies that the radiative transfer must be treated in parallel to the hydrodynamics. This represents a severe complication mainly responsible for the limited numbers of theoretical studies of this process.

Here is presented a short introduction to the theory of high-mass star formation. The reader interested in this topic will find more complete reviews in [Zinnecker & Yorke \(2007\)](#) and [Beuther et al. \(2007\)](#). In the following we exclusively focus on studies specific to the formation of massive stars, keeping in mind that most of them are modified versions of theories developed for the formation of low-mass stars (see, e.g., Sect. 1.2). We first describe the basic principles used to estimate the largest stellar mass that one expects to form in the presence of radiative forces. We then present the various numerical simulations and alternative scenarios which have been performed and proposed to explain the formation of high-mass stars.

2.1.1.1 Basic principles and simple estimates

The first estimates of the largest stellar mass that can possibly be assembled are due to [Larson & Starrfield \(1971\)](#) and [Kahn \(1974\)](#). The principle of their analysis is to compare the radiative pressure of a massive stellar embryo to the ram pressure induced by the gravitational collapse of its surrounding massive cloud, in its inner and outer parts. If the luminosity of the central star becomes high enough, the radiation pressure may become important and prevent further accretion onto the central object. Since the radiation pressure is acting on the dust grains, one has to assume that the frictional coupling between the gas and the dust is sufficiently strong so that forces acting on the dust grains are transmitted to the gas.

In the inner part of the collapsing cloud, the temperature becomes high and the dust grains evaporate. There is thus a dust shell whose inner edge is located at the radius, r , where the grains evaporate. At this radius, the radiation pressure is $L_{\star}/4\pi r^2 c$, where L_{\star} is the stellar luminosity and c the speed of light. The dynamical pressure is ρu^2 , where ρ is the density and u the infall speed which is given by $u^2 \simeq 2GM_{\star}/r$, where G is the gravitational constant and M_{\star} the mass of the protostar. This leads to the ratio of radiative to ram pressures :

$$\Gamma = \frac{L_{\star}/4\pi r^2 c}{\rho u^2} \simeq 1.3 \times 10^{-11} \frac{L_{\star}/L_{\odot}}{(M_{\star}/M_{\odot})^{1/2}} r^{1/2}. \quad (2.1)$$

Using an analytic estimate for the temperature inside the cloud and based on the assumption that the grains evaporate at a temperature of ~ 1500 K, [Larson & Starrfield \(1971\)](#) estimate the radius of the shell to be :

$$r \simeq 2.4 \times 10^{12} \frac{(L_{\star}/L_{\odot})^{1/2}}{(M_{\star}/M_{\odot})^{1/5}} \text{ cm} \simeq 3.3 \frac{(L_{\star}/10^3 L_{\odot})^{1/2}}{(M_{\star}/8 M_{\odot})^{1/5}} \text{ AU}. \quad (2.2)$$

It follows from Eqs. 2.1–2.2 that

$$\Gamma \simeq 2 \times 10^{-5} \frac{(L/L_{\odot})^{6/5}}{(M/M_{\odot})^{3/5}}. \quad (2.3)$$

For a stellar mass of $20 M_{\odot}$, corresponding to a luminosity of about $4 \times 10^4 L_{\odot}$, Γ roughly equals unity. Therefore, according to [Larson & Starrfield \(1971\)](#), the mass at which radiative pressure impedes accretion is around $20 M_{\odot}$.

In the outer part of the collapsing cloud, the radiative pressure becomes equal to $\chi L/4\pi r^2 c$, where χ is the opacity due to dust grains and averaged over the stellar spectrum. The estimate done by [Larson & Starrfield \(1971\)](#)

is uncertain since the above expression entails the dust opacity and since the grains properties were poorly known by the time of their study. A more accurate estimate has been done by [Wolfire & Cassinelli \(1987\)](#) by using the optical properties and composition of the mixture of dust grains proposed by [Mathis et al. \(1977\)](#). Assuming an accretion rate of $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ in a $100 M_{\odot}$ cloud, Wolfire & Cassinelli show that Γ is larger than one for any reasonable value of the radiation temperature. They conclude that building a massive star with the “standard” dust grain mixture (cf. [Mathis et al. 1977](#)) is difficult and requires reducing the grain abundance by large factors ($\sim 4\text{--}8$). They thus propose, as a solution to the high-mass star formation problem, that the dust abundance could be locally decreased by an external shock or an internal ionization front.

2.1.1.2 Radiative hydrodynamical simulations

Multidimensional numerical simulations have been performed, treating the radiation and the dynamics self-consistently. In these studies, it has been assumed that the radiation arises from both the accretion and the stellar luminosity. While the former is dominant during the earliest phase of the collapse, the latter rapidly becomes more important. Since computing the radiative transfer is in general a difficult problem, these calculations have made the diffusion approximation (e.g. [Mihalas & Mihalas 1984](#)). We will see below that the frequency dependence of the dust opacity which was neglected in Sect. 2.1.1.1 is an important issue.

One of the main motivations of these calculations is to determine whether the presence of a centrifugally supported optically thick disk, inside which the radiative pressure would be much reduced, may allow to circumvent the radiation pressure problem.

Bidimensional multi-wavelengths calculations

Bidimensional axisymmetric numerical simulations have been performed by [Yorke & Sonnhalter \(2002\)](#) in the frequency dependent case (using 64 intervals of frequency) and in the gray case (one single interval of frequency). The cloud they consider is centrally peaked, has a thermal over gravitational energy ratio of about 5% initially, and is slowly rotating. They have explored 3 different cases corresponding to 30, 60, and $120 M_{\odot}$ cores.

The fiducial run corresponds to a $60 M_{\odot}$ core treated in the frequency-dependent case. After $\sim 10^5$ yr, the central core has a mass of about $13.4 M_{\odot}$ and the surrounding cloud remains nearly spherical. After $\sim 2 \times 10^5$ yr, the mass of the central core is about $28.4 M_{\odot}$ and the cloud starts to depart from the spherical symmetry. In particular, the infall is reversed by radiative forces in the polar region while the star continues to accrete material through the equator where the opacity is much higher. This effect which has first been proposed by [Nakano et al. \(1995\)](#) and [Jijina & Adams \(1996\)](#) is known as the “flashlight effect”. Once the stellar mass has grown to about $33.6 M_{\odot}$, the central star is no longer accreting although $30 M_{\odot}$ of gas is still available within the computational grid. The infall is then reversed in every directions indicating that the radiative forces are effectively preventing further accretion.

If instead of a multi-frequency treatment, the gray approximation is made, the early evolution is similar but becomes notably different after $\sim 2.5 \times 10^5$ yr. In particular, there is no evidence of any flow reversal. Instead the material flows along a thin disklike structure, supported in the radial direction by both centrifugal and radiative forces. At the end of the simulation, the mass of the central star is about $20.7 M_{\odot}$.

When the mass of the cloud is initially $30 M_{\odot}$, all the mass of the cloud is finally accreted onto the central star. For a cloud mass of $120 M_{\odot}$, as soon as a stellar mass of $32.9 M_{\odot}$ has been accreted, reversed flows develop in the polar direction but the central object continues to accrete an additional $10 M_{\odot}$ via an equatorial flow through a disklike structure.

Tridimensional calculations

Tridimensional calculations have been performed by [Krumholz et al. \(2007\)](#) using the gray approximation for the radiative transfer. Their initial conditions (aimed at reproducing the model of [McKee & Tan \(2003\)](#)) consist in a centrally peaked $100 M_{\odot}$ cloud with a density profile proportional to r^{-2} . The initial turbulence within the cloud is sufficient to ensure an approximate hydrostatic equilibrium. Turbulent motions first delay the onset of collapse but, as the turbulence decays, the cloud starts to collapse. Comparison is made with runs for which a barotropic equation of state (EOS) is used (an isothermal EOS for most of the gas but an adiabatic EOS at high densities).

In particular, [Krumholz et al. \(2007\)](#) find that, when the radiative transfer is taken into account, the gas temperature inside the cloud is higher than in the barotropic case, by factors up to 10, which are depending on the cloud density. Moreover, while the morphology of the flows in the radiative and barotropic cases are similar on large scales, they are significantly different on small scales. Because of the lack of thermal support, the gas in the isothermal run is much more filamentary, disks are flatter, filaments have smaller radii, and shock structures are

thinner. As a consequence, the cloud is fragmenting much less when radiation is taken into account than when a barotropic equation of state is used. In the radiative transfer case, only a few condensations are indeed able to survive, the others being sheared apart in the protostellar disk.

2.1.1.3 Alternative scenarios

Competitive accretion

The above-mentioned calculations have been performed in the context of a monolithic collapse, that is to say considering the collapse of a single, initially centrally-peaked cloud. In the alternative scenario of competitive accretion, several stellar embryos are building up their mass within a common cloud also called protocluster (Bonnell et al. 1997, 2001). The accretion of the protostars depends on their location : it is strong at the cloud center where the gas density is high while it is weak near the cloud edge where less gas is available. The accretion also depends on the mass of the stars since the most massive stars are able to attract more gas and therefore increase further their accretion domain. **The specificity of the competitive accretion compared to a monolithic collapse is that the gas is not assumed to be gathered before the star formation begins.** In fact, competitive accretion provides the main physical mechanism to gather the matter. In the scenario of the competitive accretion, high-mass stars are forming in the center of the protoclusters. Indeed, the gravitational force of the protocluster inside which stars are competitively accreting attracts a significant fraction of the gas (and the stars) towards the cluster center.

An observational and theoretical study of a $\sim 10^3 M_{\odot}$ clump in NGC 2264 suggests an intermediate situation between the competitive accretion and the massive turbulent core model (Peretto et al. 2006, 2007). The NGC 2264 clump seems indeed to be globally collapsing while well-defined condensations independently develop and collapse. Moreover, the gravitational merging of a few Class 0 protostellar cores may be occurring in the center of the massive clump.

Stellar collisions and mergers

In this scenario, originally proposed by Bonnell et al. (1998), the massive stars form by the coalescence of a large number of low-mass protostars. The original motivations for proposing stellar collisions as a formation process for massive stars was, first, to circumvent the radiative pressure effect and, second, to explain the large number of massive stars in dense stellar clusters. Today, the first problem is known to be alleviated by the flashlight effect (see Sect. 2.1.1.2) whereas the second remains for a few exceptional cases of high-mass star formation.

To estimate the star density required for the stellar collisions to be important, it is necessary to compare the collision time scale and the stellar evolution time. The former can be estimated using the stellar collision time per star (Binney & Tremaine 1987). Typical stellar densities of about $10^7 - 10^8 \text{ pc}^{-3}$ are required to set reasonable values of the mass, size, and velocity dispersion for the stellar collision partners. Non-equal mass encounters, circumstellar disks, and binary components could decrease this number to about 10^6 pc^{-3} , but **such stellar density is highly unlikely to be the general case of high-mass star-forming sites.**

2.1.2 Revue des contraintes observationnelles / Overview of observational constraints

2.1.2.1 Open questions

The fundamental unknown of high-mass star formation remains the physical process leading to stellar masses larger than $8 M_{\odot}$. As explained in Sect. 2.1.1, there are two competing families of models based on either accretion or coalescence with currently a slight advantage for the accretion scenarios. Observations can help end this debate by giving strong constraints on the evolutionary sequence and the initial conditions of OB star formation. We summarize below our limited knowledge of these topics and list related open questions at the dawn of *Herschel* (see also Beuther et al. 2007).

What is the evolutionary sequence leading from molecular clouds to OB stars ?

Unlike for low-mass stars (see e.g. Shu et al. 1987; André et al. 2000), there is no observational evolutionary sequence which is firmly established for massive young stellar objects (massive YSOs). Several attempts to derive evolutionary scenarios have been made by using three types of diagnostics :

1. The theoretical development of an H II region has triggered the empirical classification from initially hypercompact H II (HCH II) regions to ultra-compact H II (UCH II) regions, compact H II regions, and then classical/developed H II regions (see Keto 2003, and references therein) ;

2. Since the warm inner parts of high-mass protostellar envelopes evolve with time, the physical and chemical properties of a hot core (e.g., its size, temperature, molecular abundances, and associated masers) can in principle be used as a clock (e.g. [Helmich & van Dishoeck 1997](#); [Garay & Lizano 1999](#));
3. Inspired by the sequence from Class 0 to Class I observed for low-mass protostars (e.g. [André et al. 2000](#)), the ratio of submillimeter to bolometric luminosity has also been employed for OB-type protostellar objects (e.g. [Molinari et al. 1998](#); [Motte et al. 2003](#)).
4. Following these empirical diagnostics, objects associated with the first phase of high-mass star formation have been called massive starless or pre-stellar cores, massive cold molecular cores, or even infrared-dark clouds. In the subsequent phase, they have been named massive protostars, high-mass protostellar objects, or hot molecular cores. The better-known final phase would correspond to H II regions being from hypercompact to classical. Unfortunately, the above evolutionary scenarios are not quantitative enough to constrain models of high-mass star formation. Most of the questions related to the earliest phases of this process (i.e. the two first phases mentioned above) remain : What are their lifetimes ? How do their luminosity and spectral energy distributions (SEDs) evolve with time ? ...

What are the initial conditions of OB star formation ?

Since the earliest phases of high-mass star formation have long escaped observations, the characteristics of the initial cloud core or cloud structure that will form a high-mass star remain unknown. Here are a few basic questions we need to answer : Do singular massive pre-stellar cores exist ? Are these hotter, denser, more turbulent, more magnetized, or more dynamic than their low-mass analogs ? Do their characteristics permit the development of accretion rates ~ 100 times higher than those of lower-mass protostars ? Will they allow an effective coalescence of protostars in their inner parts ?

Besides, since high-mass star-forming regions are more exposed to shock waves (powered by, e.g., OB stellar winds and ionization fronts), the formation of high-mass stars may be more commonly triggered than that of low-mass stars. When the impact of external triggers on clouds is constructive (see [Elmegreen 1998](#), for a review), how does the initial high-mass pre-stellar core/clump form ? and do external disturbances precipitate its collapse ?

In the following, we review the major studies that have searched for the precursors of H II regions and describe the *Herschel* key programs dedicated to high-mass star formation. For a meaningful comparison of the massive YSOs identified by these studies (see Table), we choose to use the terminology recommended by [Williams et al. \(2000\)](#) : “clumps” are ~ 1 pc cloud structures, “dense cores” have ~ 0.1 pc and “condensations” ~ 0.01 pc sizes.

TABLE 2.1 – Comparison of millimeter cloud structures of a few reference studies

	HMPOs clumps	IRDCs clumps	Cygnus X dense cores	Low-mass dense cores	ρ Oph condens.
Diameter (pc)	0.5	0.5	0.13	0.08	0.007
Mass (M_{\odot})	290	150	91	4.7	0.15
n_{H_2} (cm^{-3})	8×10^3	6×10^3	2×10^5	3×10^4	2×10^6
d_{Sun} (kpc)	0.3-14	1.8-7.1	1.7	0.14-0.44	0.14
References	(1)	(2)	(3)	(4), (5)	(5)

References : (1) [Beuther et al. \(2002\)](#); (2) [Rathborne et al. \(2006\)](#); (3) [Motte et al. \(2007\)](#); (4) [Ward-Thompson et al. \(1999\)](#); (5) [Motte et al. \(1998\)](#).

2.1.2.2 Galaxy-wide surveys of high-luminosity YSOs

Newborn massive stars that have developed an H II region are strong free-free emitters at centimeter wavelengths and have thus been studied in great details for several decades (see the review by, e.g., [Churchwell 2002](#)). In 1989, Wood & Churchwell started searching for the youngest H II regions by using the Galaxy-wide survey of high-luminosity infrared sources provided by *IRAS*. They applied the color-color criteria illustrated in Fig. 2.1 to select red *IRAS* sources that could correspond to young stellar objects with a stellar embryo more massive than $8 M_{\odot}$. The

resulting catalog contains 1646 sources spread near and far across the Galaxy. Most of these sources are indeed UCH II regions but some of them could even be in the earlier protostellar phase.

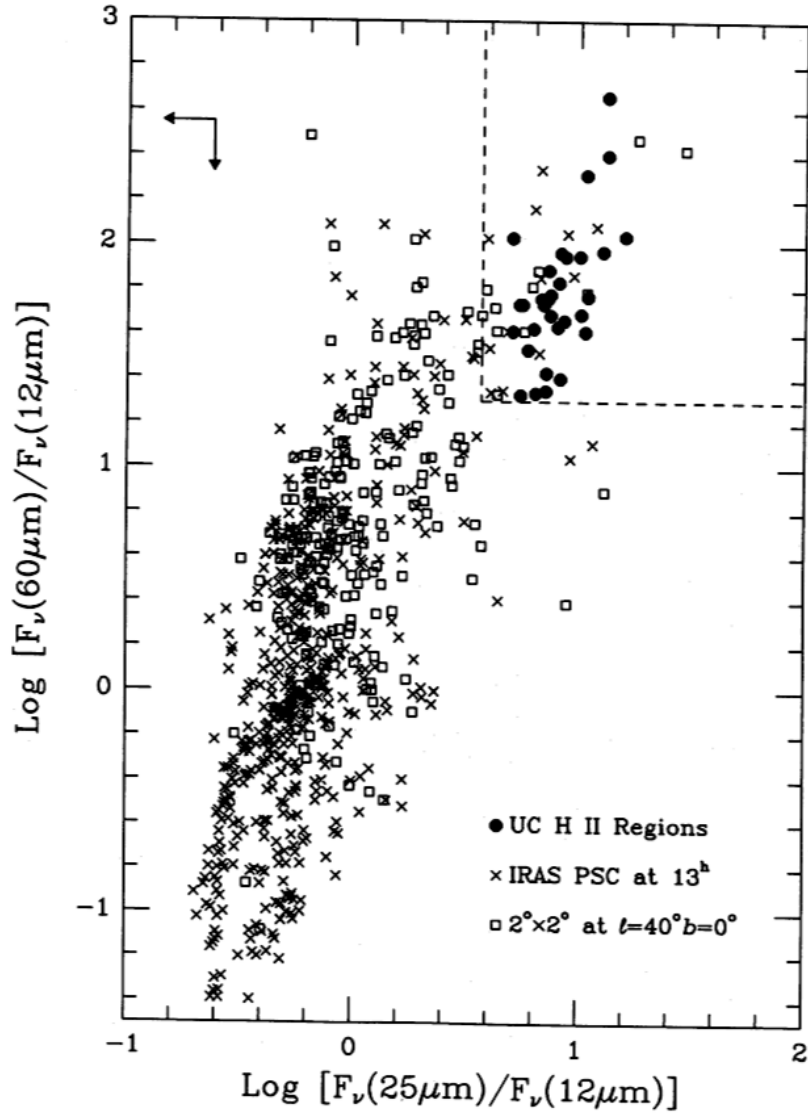


FIGURE 2.1 – Taken from Wood & Churchwell (1989) : Color-color diagram for part of the *IRAS* point sources catalog and a few well-known UCH II regions. The upper-right box locates sources satisfying the color-color criteria of Wood & Churchwell (1989) : $\text{Log}(F_{60}/F_{12}) > 1.3$ and $\text{Log}(F_{25}/F_{12}) > 0.57$.

Several authors have searched for protostellar objects within the Wood & Churchwell catalog of *IRAS* sources (e.g. Bronfman et al. 1996; Plume et al. 1997; Molinari et al. 2000; Beuther et al. 2002). They have investigated their association with dense gas through for example CS or millimeter continuum detection, with a hot core through detection of complex molecules or masers emission, and checked the absence of any H II region via no or weak emission at centimeter wavelengths. The best-studied sample of Sridharan/Beuther contains 69 objects called HMPOs (for High-Mass Protostellar Objects) which are located at 300 pc to 14 kpc from the Sun. Following the terminology of Williams et al. (2000), the median HMPO (see Table 2.1) is a “clump”, i.e. a ~ 1 pc cloud structure hosting individual protostars and starless cores with expected 0.01–0.1 pc sizes. As usual with *IRAS*-selected samples, the *IRAS* sources are either closely or only loosely associated with the cloud clumps called here HMPOs. The former HMPOs are thus good candidates to contain high-luminosity infrared protostars while the nature of the latter remains to be determined.

As shown above, our understanding of high-mass star formation has been, for long, exclusively based on follow-up studies of bright sources found by *IRAS*. However, if the high-mass star formation process goes through cold, low-luminosity phases reminiscent of those of low-mass pre-stellar cores and Class 0s (cf. André et al. 2000), our knowledge has long been biased against these earliest phases. The two following sections summarize the discoveries made in this area.

2.1.2.3 First discoveries of massive infrared-quiet YSOs

The first sources which were identified as good candidates for being infrared-quiet precursors of high-mass stars have been found by two methods :

- The first one uses high-density tracers, often submillimeter continuum, to map the surroundings of massive YSOs associated with well-known H II regions, H₂O or CH₃OH masers, or *IRAS* sources. Many of these mappings have serendipitously revealed dense and massive cloud fragments which remain undetected at mid-infrared wavelengths (e.g. Motte et al. 2003; Hill et al. 2005; Klein et al. 2005; Sridharan et al. 2005; Beltrán et al. 2006; Thompson et al. 2006). These studies are evidently plagued by very low-number statistics and large inhomogeneity since the cloud fragments identified this way have sizes ranging from 0.1 pc to more than 1 pc.
- A second method is to search for sources seen in absorption against the diffuse mid-infrared background of square degrees images taken by the *ISO*, *MSX*, and *Spitzer* satellites. Indeed, these absorption features, often called InfraRed Dark Clouds (IRDCs), could be the footprints of cold cloud structures as generally confirmed by maps of high-density cloud tracers (see, e.g., Fig. 2.2). These IRDCs surveys provide large samples of infrared-quiet sources generally located at large and inhomogeneous distances from the Sun (e.g. Pérault et al. 1996; Egan et al. 1998; Carey et al. 2000; Hennebelle et al. 2001; Rathborne et al. 2006). Even in the most recent study by Rathborne et al. (2006), the selected sources (called in their paper IRDCs cores) have the size of clumps that could harbor several infrared-quiet protostars and/or pre-stellar cores (see Table 2.1).

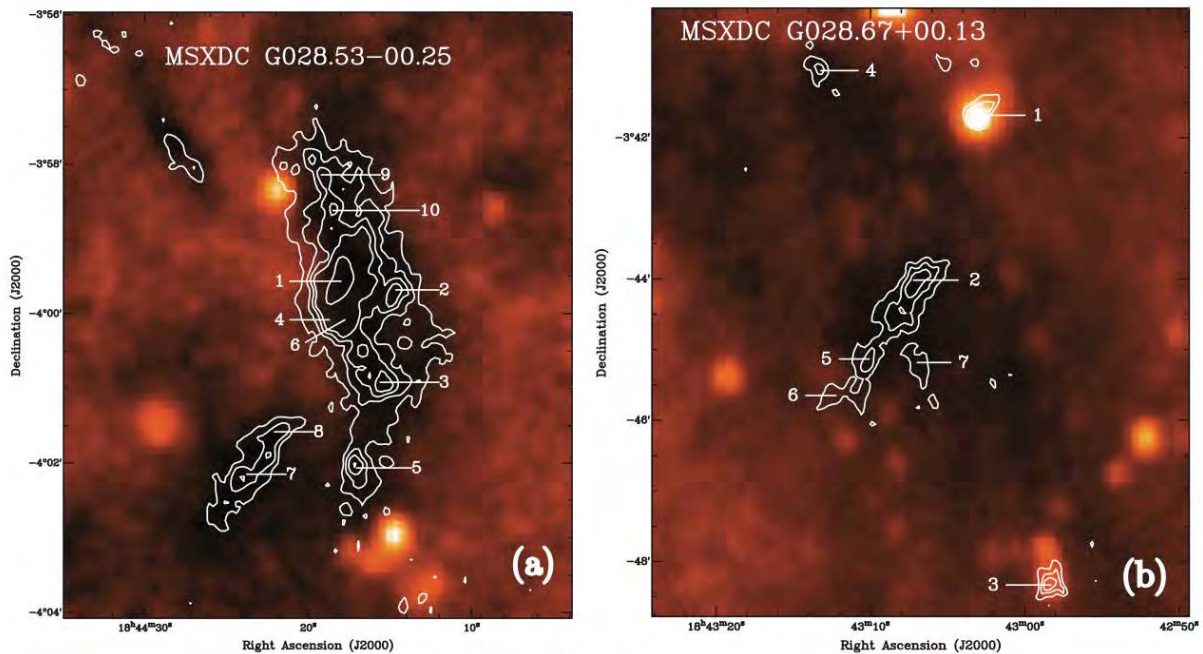


FIGURE 2.2 – Taken from Rathborne et al. (2006) : Two InfraRed Dark Clouds detected in *MSX* 8 μm images (color scale) as absorption features and confirmed by *MAMBO-2* 1.2 mm continuum emission (contours) as filamentary clouds splitting into several clumps.

The sources identified above are definitively colder than the high-luminosity infrared sources discussed in Sect. 2.1.2. They could be either starless clumps or infrared-quiet protostellar objects, depending on the existence of protostellar activity signatures such as outflows, hot cores, or masers. Given their large size and moderate mass (see Table 2.1), many of them are probably not dense enough to form high-mass stars in the near future. In summary, at the dawn of *Herschel*, no high-mass pre-stellar core was yet convincingly identified by the above methods and only a handful of sources were studied with enough spatial resolution, SED coverage, and follow-up studies to qualify as high-mass equivalent of Class 0 protostars (Hunter et al. 1998; Molinari et al. 1998; Sandell 2000; Garay et al. 2002; Sandell & Sievers 2004).

2.1.2.4 Imaging survey of entire complexes forming OB stars : unbiased census of both infrared-quiet and infrared-bright massive YSOs

To make progress, one needed to search, in a systematic and unbiased way, for high-mass analogues of pre-stellar cores, Class 0 and Class I protostars. If they exist, they should be small-scale (0.01 – 0.1 pc) cloud fragments particularly dense (volume-averaged density $n_{\text{H}_2} = 10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$) to permit the formation of one massive star. They thus should be best detected via far-infrared or (sub)millimeter dust continuum, which happens to be the wavelengths domain of *Herschel* (see Fig. 2.3 Left). To achieve sufficient spatial resolution and statistics, it was judicious to focus on the closest molecular cloud complexes which are actively forming OB stars. Actually, S. Bontemps identified eight such complexes by using CO surveys and a near-infrared extinction image of our Galaxy which was built from the stellar reddening measured by 2MASS (Schneider et al. 2011). Since these complexes are located at intermediate distances (0.7 to 3 kpc), their study ensures reasonable spatial resolution with (sub)millimeter facilities (HPBW= 11'' with MAMBO-2, 9'' with SHARC-II, 18'' with LABOCA, and 8'' with ArTéMiS) and the SPIRE and PACS imagers of *Herschel* (HPBW= 6'' – 36''). Moreover, the amount of molecular gas contained in these cloud complexes should statistically allow studying the precursors of OB stars with masses up to $50 M_{\odot}$. Therefore, multi-tracer studies of such complexes were expected to provide, with ~ 0.1 pc spatial resolution, more statistically significant and more homogeneous samples of massive YSOs than any of the studies mentioned above.

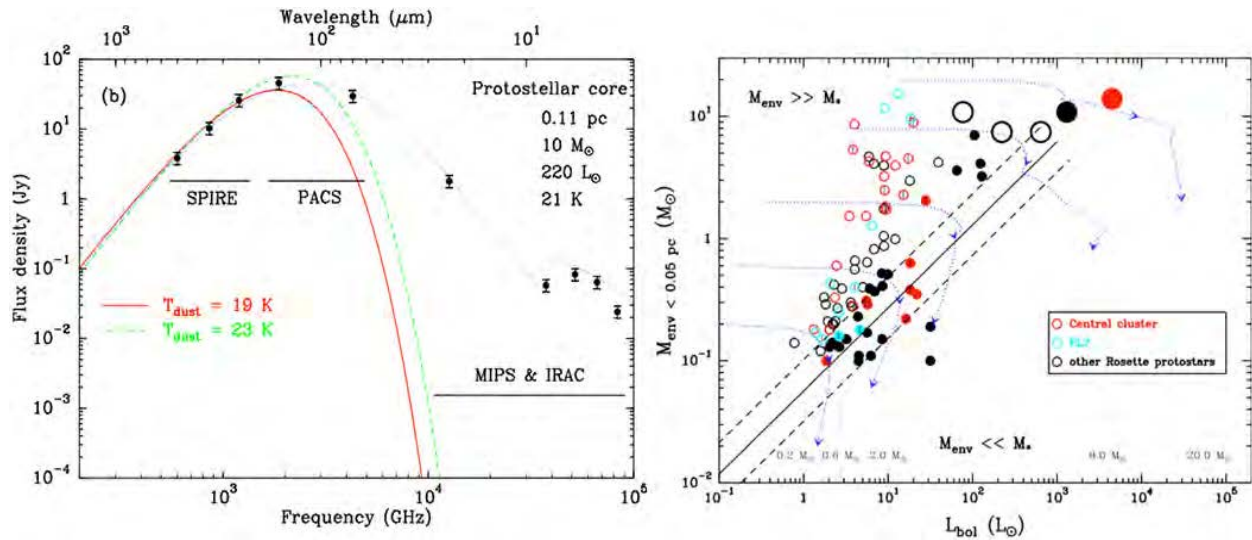


FIGURE 2.3 – A typical spectral energy distribution (SED) built from SPIRE+PACS/*Herschel* and MIPS+IRAC/*Spitzer* measurements (Left). The Mass-Luminosity diagram of Rosette protostars compared to evolutionary tracks of Duarte-Cabral et al. (2013) (Right). Figures are extracted from Motte et al. (2010) and Henne-mann et al. (2010).

Among the most active star-forming complexes at less than 3 kpc, Cygnus X is the one that has caught most of the attention. According to Schneider et al. (2006), this massive ($4 \times 10^6 M_{\odot}$) molecular complex is tightly associated with several OB associations (the largest being Cyg OB2) and is located at only 1.4 kpc from the Sun. The high-density clouds of Cygnus X have been completely imaged in millimeter continuum, CS, and N_2H^+

and then compared with mid-infrared images of *MSX*. Numerous follow-up observations of the best candidate progenitors of high-mass stars have been performed to constrain their characteristics and evolutionary status. The millimeter imaging survey of the entire Cygnus X molecular complex has revealed hundreds of massive dense cores, among which ~ 42 probable precursors of high-mass stars (see Fig. 1 of Motte et al. 2007, or Fig. 1.3). In terms of size and density, these dense cores are indeed intermediate cloud structures between “clumps” like IRDCs or HMPOs and “condensations” (see Table 2.1). The Cygnus X dense cores have higher density than their low-mass counterparts (see Table 2.1), making them good candidate sites for high-mass star formation. The *MSX* fluxes emitted by the Cygnus X dense cores have been used to separate high-luminosity ($> 10^3 L_{\odot}$) infrared YSOs and massive infrared-quiet objects. Surprisingly, SiO outflow measurements have shown that all the infrared-quiet cores of Cygnus X are harboring (at least) one massive infrared-quiet protostar. Finally, Motte et al. (2007) qualify 17 cores as good candidates for hosting massive infrared-quiet protostars, while up to 25 cores potentially host high-luminosity infrared protostars. Interestingly enough, no starless core was found within this first unbiased and homogeneous sample of high-mass YSOs.

Since the Motte et al. (2007) sample is derived from a single molecular complex and covers every embedded phase of high-mass star formation, it gives the first statistical estimates of their lifetime (see Table 2.2). Estimated relatively to the known age and numbers of OB stars in Cyg OB2, the lifetimes of high-mass protostars and pre-stellar cores in Cygnus X are $\sim 3 \times 10^4$ yr and $< 10^3$ yr. In rough agreement with their free-fall time estimates, these statistical lifetimes are one and two order(s) of magnitude smaller, respectively, than what is found in nearby, low-mass star-forming regions (Kirk et al. 2005; Kenyon & Hartmann 1995). These results further suggest that high-mass pre-stellar and protostellar cores are in a highly dynamical state, as expected in a molecular cloud where turbulent processes dominate.

TABLE 2.2 – Lifetime/age estimates of massive YSOs in Cygnus X

	Pre-stellar cores	IR-quiet protostars	IR protostars	H II regions	OB stars
Statistical lifetime	$\leq 8 \times 10^2$ yr	1×10^4 yr	2×10^4 yr	6×10^5 yr	2×10^6 yr
Free-fall time	$\sim 9 \times 10^4$ yr	8×10^4 yr			
Low-mass lifetimes	2×10^5 yr	2×10^4 yr	2×10^5 yr		

2.1.2.5 *Herschel* key programs dedicated to the earliest phases of high-mass star formation

At the dawn of *Herschel*, studying the cold earliest stages of high-mass star formation started to become a “hot topic”. *Herschel* was perfectly suited for such studies thanks to its broad wavelength coverage of cold SEDs (see Fig. 2.3 Left), its unprecedented resolution at far-infrared wavelengths, its high scanning speed, and its spectral access to line diagnostics for H II regions and photo-dissociation regions, as well as H₂O cooling lines. Three Guaranteed Time and one major Open Time Key Programs are worth mentioning :

- “HOBYS” (the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects) is a Guaranteed Time Key Program jointly proposed by the SPIRE and PACS consortia, and the *Herschel* Science Centre (see <http://starformation-herschel.iap.fr/hobys/>). Coordinated by Motte, Zavagno, and Bontemps, it is the only *Herschel* Key Program which is exclusively dedicated to high-mass star formation. Its wide-field photometry part with both SPIRE and PACS aimed at making the census of massive YSOs in the richest molecular complexes at less than 3 kpc. This survey provides the statistical base to derive the lifetimes of massive YSOs (see Sect. 2.1.2 for Cygnus X). SPIRE-PACS unprecedented wavelength coverage gives robust measurements of the basic properties (bolometric luminosity and mass) of each YSO. This is crucial to build quantitative evolutionary diagrams such as the $M_{\text{env}} - L_{\text{bol}}$ diagram for lower mass young stellar objects (e.g. André & Montmerle 1994). The “HOBYS” project multiplies by more than 10 the number of high-mass analogs of Class 0 protostars known to date (see Sect. 2.1.2.3). In complement, the detailed spectroscopic and photometric part of the “HOBYS” Key Program studies with PACS clear examples of triggered star formation (Deharveng et al. 2005). The selected regions are hot photo-dissociation regions and were observed with SPIRE in a companion Key program (cf. Abergel et al., using both spectroscopic and photometric modes). The combination of these observations characterizes the second generation of massive YSOs and constrains the initial conditions of star formation at the periphery of developed H II regions. Such detailed studies on individual

sources allows us to better understand the positive feed-back of massive stars on their surrounding clouds. The larger view obtained with the SPIRE and PACS imaging surveys of the molecular complexes selected for “HOBYS” allows us to assess the impact of external triggers and, in particular, the importance of the collect and collapse scenario (Elmegreen & Lada 1977).

- “WISH” (Water in Star-forming regions with *Herschel*) is a Key Program dedicated to water lines which was proposed by the HIFI consortium and coordinated by van Dishoeck. Water is a very important chemical specie which is only observable from space. It plays an important role in the cooling of the high-density interstellar medium and is expected to be one of the best tracers of the physical properties and kinematics in the innermost regions of the collapsing envelopes. Both low- and high-mass protostars were observed with HIFI and PACS in the spectrometric mode. In particular, as many as 24 massive YSOs at different evolutionary stages were extensively studied, for the first time, in water lines (high-mass star formation part, coordinated by van der Tak, Herpin, and Wyrowski).
- “The earliest phases of low- and high-mass star formation” (by Krause et al.) is a Key Program aimed at characterizing the physical conditions of selected low- and high-mass YSOs through small SPIRE and PACS maps. Among their goals, they planned to derive 3D models of pre-stellar cores and protostars, as well as survey the low-mass star population forming in the vicinity of high-mass protostars or UCH II regions.
- “Hi-GAL” (the *Herschel* infrared Galactic Plane Survey by Molinari et al. 2010) is one of the largest open time key programs since it imaged the whole Galactic plane with SPIRE and PACS. The near-infrared to millimeter Galactic surveys such as Spitzer-GLIMPSE (Benjamin et al. 2003) or AtlasGal (Schuller et al. 2009) have demonstrated the richness of large-scale views of star formation throughout our Galaxy. Hi-GAL provides a complete survey of massive YSOs ranging from the scale of dense cores (~ 0.1 pc) to that of clouds (~ 10 pc) and located in various environments (solar neighborhood, Galactic center, molecular ring, interarm). Among other things, Hi-GAL gives access to the global properties of star formation such as the star formation rate throughout the Galaxy or the statistical importance of external triggers.

With the advent of the *Herschel* satellite and the ALMA interferometer we entered a very promising era for the studies of the earliest phases of star formation. Large-scale imaging surveys complemented by high-resolution studies already did and will continue revolutionize our knowledge of high-mass star formation.

2.2 Caractérisation des phases précoces de la formation d'étoiles massives / Characteristics of the earliest phases of high-mass star formation

Our current understanding of the physical process at the origin of high-mass stars remains rather schematic, especially concerning the earliest phases. Like low-mass stars in $\sim 1 M_{\odot}$ dense cores, high-mass stars form in massive dense cores (MDCs) within molecular cloud complexes. Unlike low-mass stars, however, the copious UV flux emitted by the forming OB star heats and ionizes its surroundings, creating an HII region. High-mass protostellar objects (HMPOs, Beuther et al. 2002) have first been selected as bright IRAS sources embedded within massive envelopes. They are now recognized as containing evolved high-mass protostars, i.e. the analog of low-mass class I protostars. Ten high-mass class 0 protostars have been found by us (Bontemps et al. 2010) within IR-quiet MDCs. The latter were defined by us as 0.1 pc and 10^5 cm^{-3} cloud fragments with no or weak mid-infrared emission but clear signposts of high-mass protostellar activity (Motte et al. 2007; Zavagno et al. 2010, see attached article). The controversy remains about the existence of high-mass analogs of pre-stellar cores, since infrared dark clouds (IRDCs) are numerous (e.g. Peretto & Fuller 2010) but only a few harbor starless, massive, and dense-enough cores (Motte et al. 2007, 2010; Russeil et al. 2010, see attached article).

Kinematical studies of MDCs and their parental clouds/ridges led by the Saclay group have recently reported gravitational streams and shearing motions in a few high-mass star-forming regions (on $10 - 0.1$ pc scales; Schneider et al. 2010a; Csengeri et al. 2011a; Peretto et al. 2013; Louvet et al. in prep.). The picture which thus starts to emerge shows that OB stars form through very dynamical processes such as supported by theoretical works : (1) a powerful accretion driven by a high degree of turbulence (e.g. McKee & Tan 2002; Hosokawa & Omukai 2009) or (2) colliding flows initiated by competitive accretion or cloud formation (e.g. Bonnell & Bate 2006; Hartmann et al. 2012). The structure and kinematics observed for a few ridges currently seem to favor the colliding flows scenario (see Chap. 3 and Fig. 3.3). The *Herschel* HOBYS survey first aims at improving the statistics of

the ground-based sub-millimeter studies mentioned above to draw a definite and detailed evolutionary sequence for high-mass star formation (see Fig. 2.3 Right). The HOBYS consortium starts publishing definitive catalogs of young stellar objects found within HOBYS molecular complexes. Preliminary results published in the A&A Special Issue for *Herschel* first highlights, and those that will soon be published, are in agreement with the idea that the lifetime of pre-stellar cores is decreasing as the final mass of the star is increasing (Motte et al. 2010; Hennemann et al. in prep.; Tigé et al. in prep.).

Combined with *Spitzer* measurements, *Herschel* allows us, for the first time, to obtain precise physical characteristics (envelope mass and dust temperature, bolometric luminosity and submillimeter-to-bolometric luminosity ratio) of MDCs. Such measurements are crucial to characterize the various phases of high-mass star formation through Mass versus Luminosity evolutionary diagrams (e.g. Hennemann et al. 2010, see Fig. 2.3 Right). Given the limited (spatial) resolution of *Herschel* data, one needs to statistically extrapolate the 0.03 pc high-mass protostars properties from the measured characteristics of 0.1 pc MDCs. For this, we use the few tens of known high-mass protostars as rough models (e.g. Bontemps et al. 2010). But, follow-up interferometric studies are mandatory to identify individual protostars within massive dense cores. Interestingly, Duarte-Cabral et al. (2013) compared a population of IRAM Plateau de Bure protostellar cores with *Herschel* luminosities to protostellar evolutionary tracks (like those shown in Fig. 2.3 Right) and found evidence of an intermittent accretion rate.

2.3 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic

In summary, Motte et al. (2007) made the first ground-based survey of a complete molecular complex (read it here). Then, Motte et al. (2010) (read it here) and Hennemann et al. (2010) (read it here) analyzed the star formation content of the Rosette molecular cloud from the first *Herschel*/HOBYS image taken during the demonstration-phase. A handful of articles are currently prepared on MDC samples of molecular complexes covered by HOBYS (Tigé et al. in prep.; Rayner et al. in prep.; Bontemps et al. in prep.; Nguyen Luong et al. in prep.).

Chapitre 3

Activité de formation d'étoiles et régions extrêmes de notre galaxie

Sommaire

3.1 Efficacité et taux de formation d'étoiles (SFE et SFR) instantanés / Instantaneous star formation efficiency and rate (SFE and SFR)	59
3.1.1 Définition des SFE et SFR instantanés / Definition of instantaneous SFE and SFR	59
3.1.2 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	61
3.2 Nuages hypermassifs / Cloud ridges	99
3.2.1 Caractérisation des nuages hypermassifs / Characteristics of cloud ridges	99
3.2.2 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	100

3.1 Efficacité et taux de formation d'étoiles (SFE et SFR) instantanés / Instantaneous star formation efficiency and rate (SFE and SFR)

3.1.1 Définition des SFE et SFR instantanés / Definition of instantaneous SFE and SFR

Spitzer/IRAC legacies have measured SFRs in a direct and indirect way by either counting pre-main sequence stars (also called T Tauris) or integrating the diffuse mid-infrared PAH emission attributed to the luminosity impact of recently formed OB stars on the cloud. The first method was successfully applied by the c2d survey of nearby (<500 pc) low-mass star-forming regions (e.g. [Heiderman et al. 2010](#)). The second method was used when the angular resolution was not sufficient for counting purposes, for example in galaxies (e.g. [Wu et al. 2005](#)) and more recently for W43 ([Nguyen Luong et al. 2011b](#), see also [Eden et al. 2012](#) using 70 μm from Hi-GAL). If the star formation activity varies with time, these two methods, based on $\sim 10^6$ years-old T Tauri and OB stars, would measure “recent-past SFRs”.

In fact, one needs to count protostars to evaluate the “present-day” star formation activity, meaning the star formation developing for a few 10^5 yr only. HOBYS identifies massive dense cores hosting protostars in ten molecular cloud complexes (see Sect. 2.2), soon making it possible to measure the “present-day SFR” of the Milky Way on 1 pc to 100 pc scales, up to 3 kpc from the Sun. On moderate spatial scales (1 – 10 pc), the measurement of the “present-day SFR” has already been done for the W43-main cloud ([Motte et al. 2003](#)) and the G035.39-00.33 ridge ([Nguyen Luong et al. 2011a](#)). They both are preferential sites for the formation of high-mass stars clusters in their host complex (see e.g. Figs. 3.1) and have star formation rate densities $\Sigma_{\text{SFR}} \sim 10 - 100 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ on 1 – 10 pc² areas, worthy of starburst galaxies, usually defined by $\Sigma_{\text{SFR}} > 1$ (see Fig. 3.1 Right). For this reason, the W43-main and IRDC G035.39-00.33 ridges were called mini-starburst regions, i.e. miniature and instantaneous models of starburst galaxies.

The SFE is logically continuously increasing with the gas density (e.g. [Hennebelle & Chabrier 2011](#)). Analytical theories in fact argue for the SFE/SFR to be measured as a function of the free-fall time, which itself directly

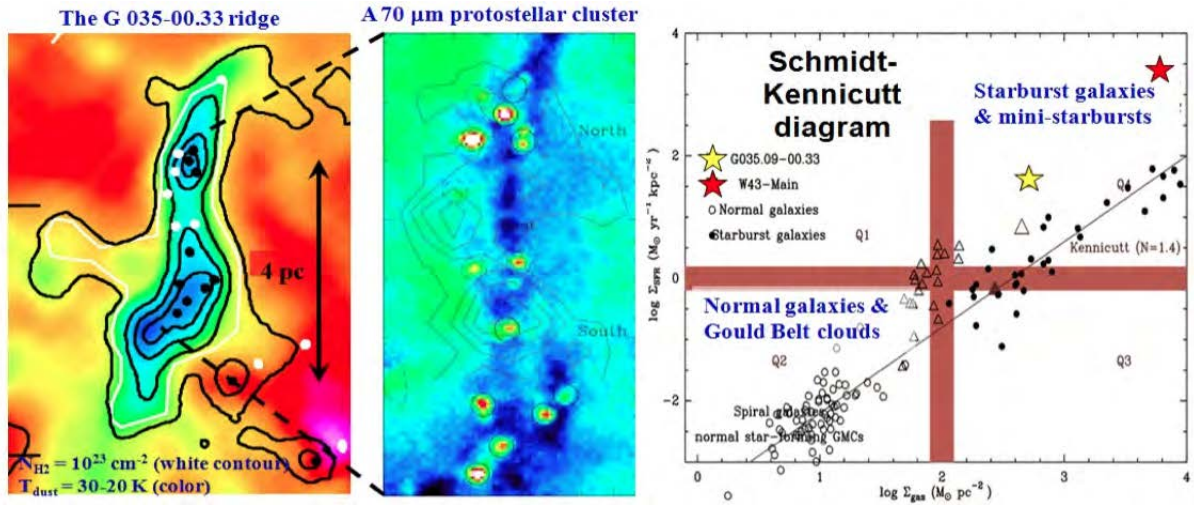


FIGURE 3.1 – Le filament hypermassif G035-00.33 et son amas d'étoiles massives en formation (Gauche). La densité et l'activité de formation stellaire des filaments hypermassifs les qualifient de régions “mini-starburst (Droite, étoiles jaune et rouge) sur un diagramme Schmidt-Kennicutt. Figures extraites de [Nguyen Luong et al. \(2011a\)](#), en prép.).

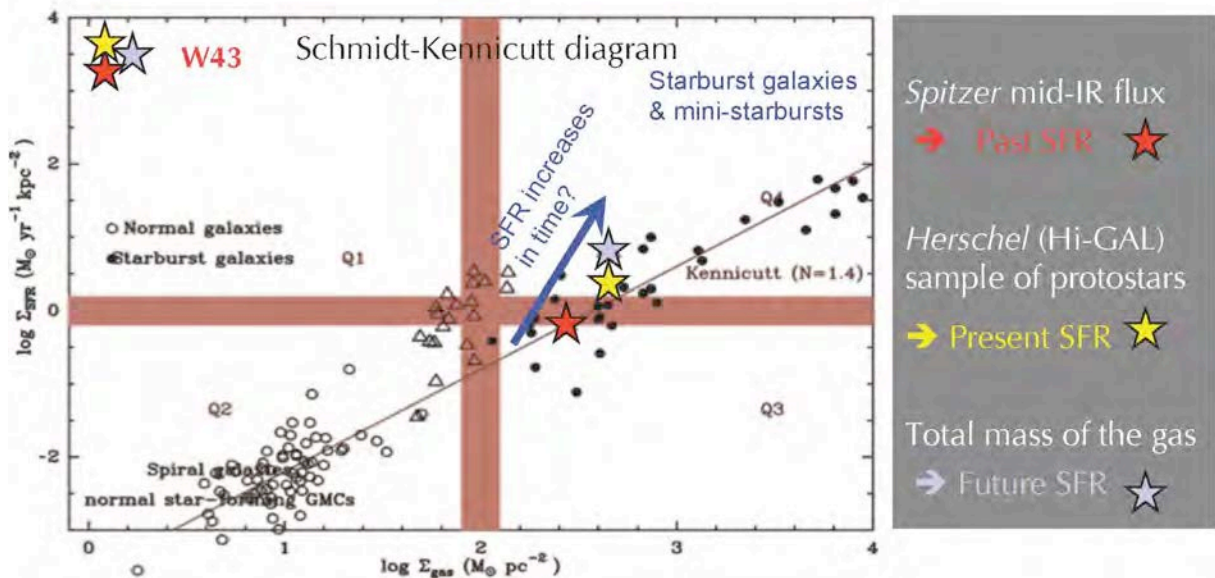


FIGURE 3.2 – History of star formation in the W43 molecular complex traced by the SFR estimates made from *Spitzer*, *Herschel*, and molecular line surveys. Measures are extracted from [Nguyen Luong et al. \(2011b\)](#) and [Nguyen Luong et al.](#) (in prep.).

depends on the cloud density (e.g. [Krumholz & McKee 2005](#); [Padoan & Nordlund 2011](#)). We however propose that the mini-starburst events we observe follow the formation of the ridge through colliding flows ([Nguyen Luong et al. 2011a](#); [Nguyen-Luong et al. 2013](#)). Indeed, short mini-bursts of star formation are to be expected after a fast episode of cloud formation (e.g. [Vázquez-Semadeni et al. 2008](#)) or, equivalently, for a cloud under compressive turbulent forcing ([Federrath & Klessen 2012](#)). Since in this scenario the star formation should gradually settle within ridges, we should measure and [Louvet et al. \(2014\)](#) did already measure very different SFR levels depending on the evolutionary status of the ridge. This is true for our “present-day SFR” estimates, whose timescale, over which the SFR is integrated, remains much shorter than the ridge formation timescale ($\sim 10^6$ yr). This new research

line is necessary to make a significant step forward in our understanding of the local SFR history and its relation to cloud formation and/or OB star feedback. It is the main scientific driver of the ANR FoXCS (Motte & Zavagno), which we submitted in October 2014.

On large scales (~ 100 pc), the HOBYS and W43 surveys are necessary steps toward Galaxy-wide studies of high-mass star formation. In the end, we should be able to globally investigate SFE and SFRs in the closest Galactic arm and at the tip of the Galactic bar, using angular resolution and tracers suited for the direct counting of stars in their making. For the W43 molecular cloud complex, an increase of the star formation activity has been suggested in (Nguyen Luong et al. 2011b, in prep.), using *Spitzer*, *Herschel*, and cloud mass measurements (see Fig. 3.2). This SFR rise could be the consequence of the fact that clouds are currently forming, rather efficiently, within this complex.

3.1.2 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic

The following papers are providing measurements of instantaneous SFE and SFR for :

- the W43-Main cloud ($\sim 10^6 M_{\odot}$, 10 pc) : [Motte et al. \(2003\)](#) ([read it here](#))
- the IRDC G035.39-00.33 ridge ($\sim 10^4 M_{\odot}$, 1 pc) : [Nguyen Luong et al. \(2011a\)](#) ([read it here](#))
- the W43-MM1 ridge ($\sim 10^5 M_{\odot}$, a few pc) : [Louvet et al. \(2014\)](#) ([read it here](#))

In [Motte et al. \(2003\)](#), we invented the term “mini-starburst” to qualify the W43-Main cloud, which experiences a short but very efficient phase (i.e. a burst) of star formation. On smaller scales, [Nguyen Luong et al. \(2011a\)](#) and [Louvet et al. \(2014\)](#) showed that cloud ridges also qualify as “mini-starburst”. Figure 3.1 Right is gathering the measurements we have done of their star formation activity and mass and locate them in a Schmidt-Kennicutt diagram.

3.2 Nuages hypermassifs / Cloud ridges

3.2.1 Caractérisation des nuages hypermassifs / Characteristics of cloud ridges

One of the most unexpected results of the *Herschel* mission was in revealing the importance and ubiquity of interstellar filaments (e.g. André et al. 2010; Arzoumanian et al. 2011; Hill et al. 2011). They were known from molecular line surveys but can, for the first time here, be 1) quantitatively studied thanks to sensitive column density and temperature images and 2) directly compared with the protostellar population. Our HOBYS group has developed a definite expertise in building clean and reliable column density maps, in identifying and analyzing cloud ridges, and in properly extracting protostars from their surroundings (see e.g. Hill et al. 2012; Hennemann et al. 2012; Men'shchikov et al. 2012). Among the HOBYS highlights is the discovery of “mini-starburst ridges” defined as high-density dominating elongated clumps supersessionally contracting and which are the preferential sites to form massive stars (see Figs. 3.1 Left-Center). The existence of ridges is predicted by dynamical models of cloud formation such as colliding flows simulations (e.g. Heitsch et al. 2008; Federrath et al. 2010). The densest ridges should coincide with the precursors of “young massive clusters” that will become bound stellar clusters (e.g. Ginsburg et al. 2012).

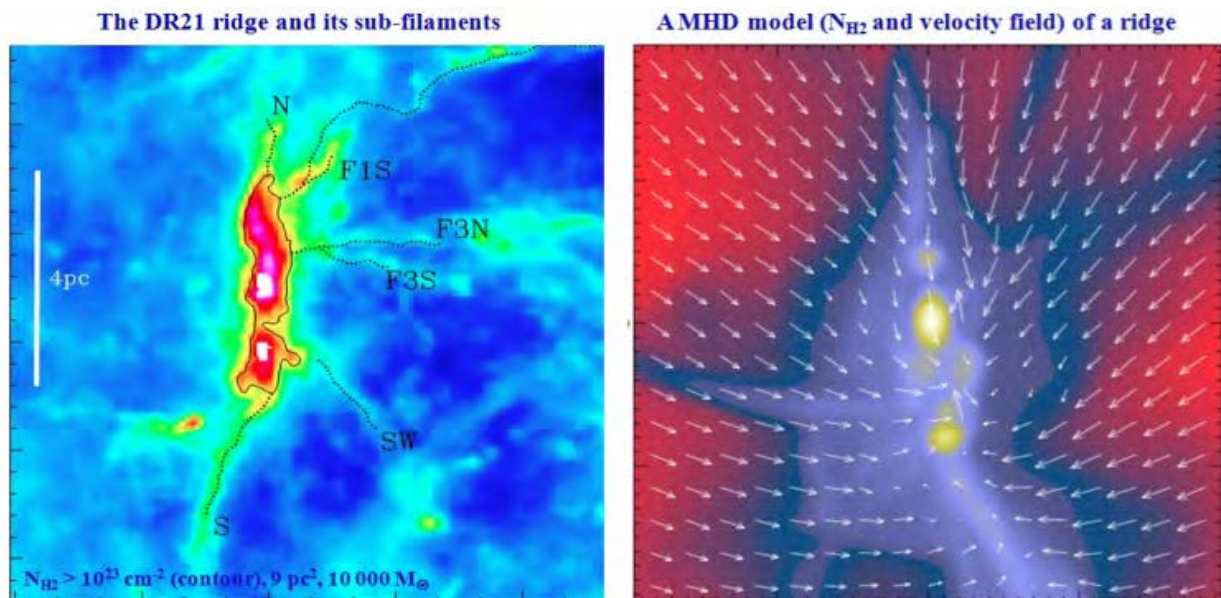


FIGURE 3.3 – The DR21 ridge and its feeding sub-filaments network (Left), compared to numerical MHD simulations made by P. Hennebelle (Right). Figures are extracted from Hennemann et al. (2012) and Schneider et al. (2010a).

In more details, Hill et al. (2011) studied the Vela C molecular cloud complex and defined the central ~ 3 pc-long filament with column density above 10^{23} cm^{-2} as a “ridge” (see Fig. 3.3 Left). They showed that the Vela C ridge represents a gravitational well that is dominating and shaping its surroundings, in marked contrast to other more typical filaments (e.g. Arzoumanian et al. 2011). In parallel, Hennemann et al. (2012) analyzed the structure of the ridge, previously identified by us as hosting a cluster of ~ 20 high-mass protostars (Motte et al. 2007; Bontemps et al. 2010). Hennemann et al. (2012) confirmed the DR21 ridge is fed by and formed through the merging of several sub-filaments already forming stars (see Fig. 3.3 Left), in agreement with the kinematical study of Schneider et al. (2010a) and predictions by Dale & Bonnell (2011). The identification of other ridges is in process using both HOBYS and Hi-GAL data (Nguyen-Luong et al. 2013; Hill et al. in prep.). Based on *Herschel* studies, Hill et al. (2011), Hennemann et al. (2012), and Nguyen Luong et al. (2011a) proposed that the ridges found in three of the ten HOBYS regions could have been formed by dynamical scenarios such as converging flows (see Figs. 3.3 Right). Minier et al. (2013) used numerical simulations to show that the ionization of a very nearby H II region/OB cluster could be the main process responsible for shaping the Vela C ridge (see Figs. 3.4).

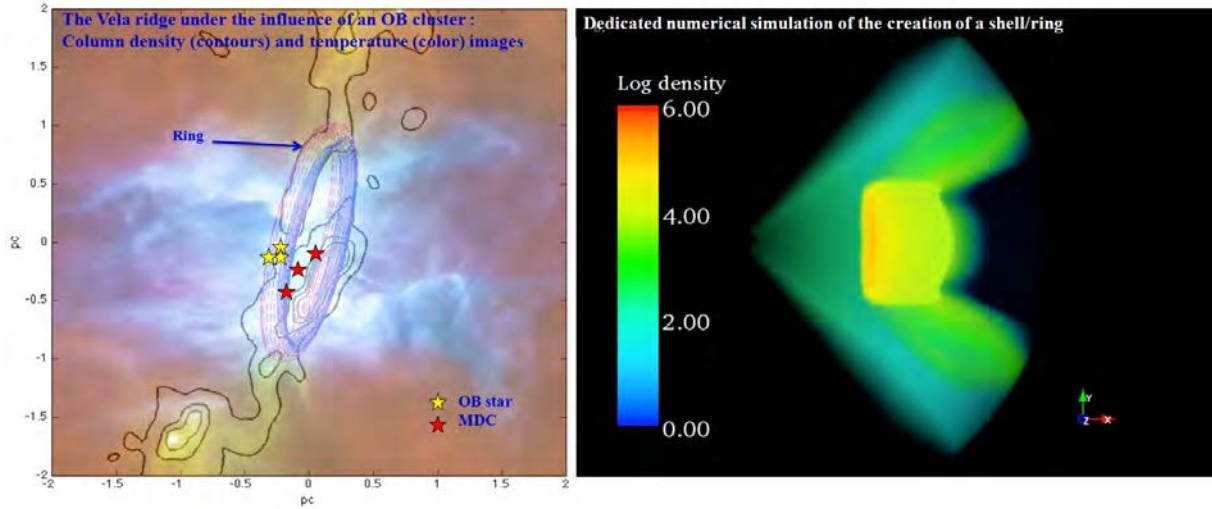


FIGURE 3.4 – The Vela C ridge under the influence of the bipolar HII region RCW 36. Contours show the column density deduced from *Herschel* observations. The matter is confined within a ring, signature of the initial filamentary shape of the dense gas cloud or ridge (Left). Cut through the plane of the ridge after ionization reshapes. The bipolar shape appears clearly as well as accumulation of matter pushed by ionization (Right). From [Minier et al. \(2013\)](#).

In any case, whatever the origin of the additional pressure (arising from colliding flows or ionization and superseding the thermal and micro turbulence pressure), those dynamical scenarios for cloud and then subsequent star formation are consistent with the lack of high-mass pre-stellar cores (e.g. [Motte et al. 2007, 2010](#); [Russeil et al. 2010](#)). In parallel to these *Herschel* structural studies, we have investigated the kinematics of three ridges identified as such from HOBYS data ([Hennemann et al. 2012](#); [Nguyen-Luong et al. 2013](#)). A long-term survey of Cygnus X and an IRAM large program on W43 has shown that the DR21, W43-MM1, and W43-MM2 ridges are all undergoing global collapse on the ridge scale with supersonic inward velocities ($1 - 2 \text{ km s}^{-1}$ over $1 - 10 \text{ pc}^2$; [Schneider et al. 2010a](#); Motte et al. in prep.). Such infall motions, sometimes called gravitational focusing, are expected both in colliding flows and ionization compression models (e.g. [Vázquez-Semadeni et al. 2005](#); [Tremblin et al. 2012](#)). We have started comparing the density structure of these ridges with numerical simulations by P. Hennebelle ([Schneider et al. 2010a](#), ; see Fig. 3.3 Right). We have also started studying the accretion shock created by the infall of sub-filaments on ridges through SiO imaging and detailed shock modeling ([Nguyen-Luong et al. 2013](#), ; Louvet et al. in prep.). In the following, Chapter 4 presents our current knowledge of cloud and ridge formation.

3.2.2 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic

In short, [Hill et al. \(2011\)](#) ([read it here](#)) discovered the importance of ridges for the formation of (clusters of) high-mass stars. Then, [Hennemann et al. \(2012\)](#) ([read it here](#)) and [Nguyen-Luong et al. \(2013\)](#) given in Sect. 4.2 characterized the densest filaments of the Cygnus X and W43 complexes. The complete census of cloud ridges within the molecular complexes covered by HOBYS is currently prepared by Hill et al. (in prep.).

Chapitre 4

Formation des nuages dans des filaments hypermassifs

Sommaire

4.1 Introduction	115
4.1.1 Origine des nuages moléculaires et conditions initiales de la formation stellaire / Origin of molecular clouds and initial conditions for star formation	115
4.1.2 Confrontation des modèles de flots convergents aux observations / Confronting numerical models of converging flows and observations	116
4.2 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic	117

It seems more and more obvious that one needs to understand how clouds are forming to predict their ability to form massive stars as well as their global star formation activity. We started studying a molecular cloud complex, which is among the most extreme of the Milky Way and is thus a good test-case for models. Section 4.1 sets the theoretical background of the studies we made in papers presented in Sect. 4.2.

4.1 Introduction

4.1.1 Origine des nuages moléculaires et conditions initiales de la formation stellaire / Origin of molecular clouds and initial conditions for star formation

The term “converging flows” refers to the convergence of H I streams that can naturally be driven by gas motions within Galactic arms (e.g. Dobbs 2008). For a decade, numerical models have investigated the capability of such colliding flows (Warm Neutral Medium) to form cold structures through shocks (Cold Neutral Medium) (e.g. Vázquez-Semadeni et al. 1996; Hennebelle & Pérault 1999; Ballesteros-Paredes et al. 1999). But it is only very recently that these models have simulated the thermal transition from the atomic to the molecular phase ($H\text{ I} \rightarrow H_2$) with proper heating and cooling functions (e.g. Audit & Hennebelle 2005; Heitsch et al. 2005). Several groups are now aiming at studying in detail the formation of molecular clouds with the resolution down to star formation scales thanks to 3D numerical simulations including gravity, magnetic field, thermal and dynamical instabilities (Heitsch & Hartmann 2008; Banerjee et al. 2009, see Fig. 4.1).

The theory of converging flows is the first one that can explain star formation self-consistently. Previous attempts had mostly ad-hoc assumptions for the injection of turbulence and the strength of magnetic field as well as ad-hoc conditions at box limits (e.g. Padoan & Nordlund 1999; Klessen et al. 2000). Colliding flows are advocated to form molecular clouds and they naturally explain the observed short lifetimes which have, for long, been a problem (e.g. Ballesteros-Paredes et al. 1999). In this framework, molecular clouds are never in equilibrium state as part of the cloud collapses while most of it disperses. The star formation process is predicted to be globally

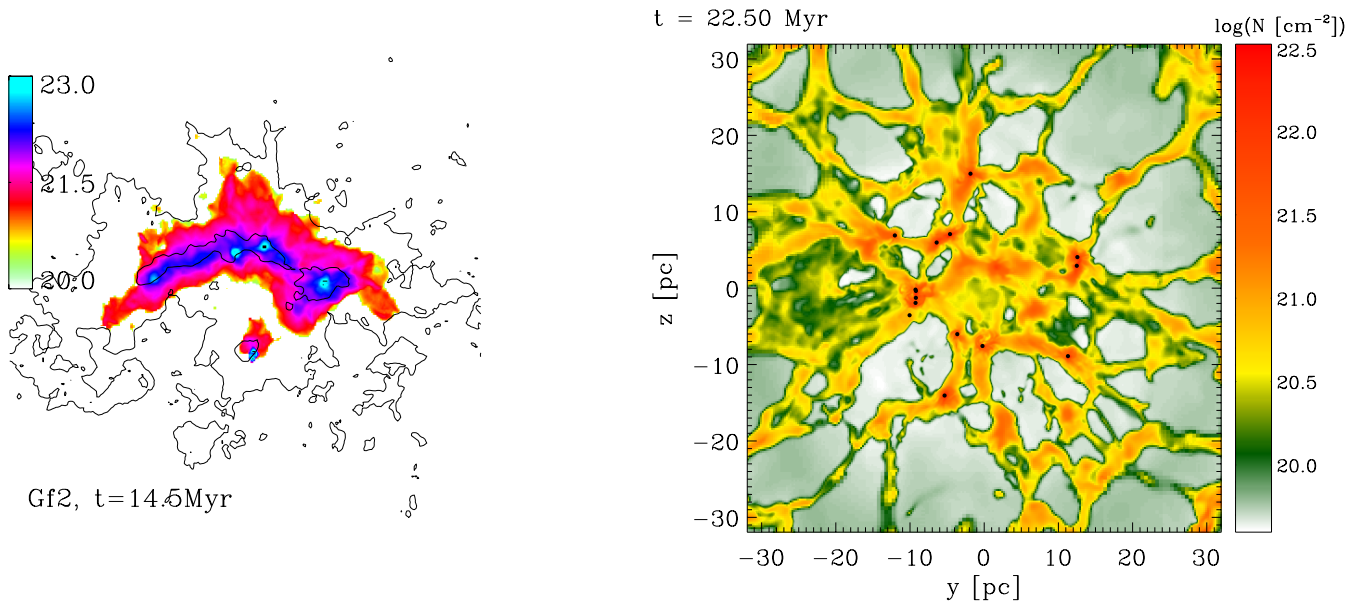


FIGURE 4.1 – Column density maps of a molecular cloud which has been formed by converging flows and harbors star formation seeds. Numerical simulations by **a)** Heitsch & Hartmann (2008) using a non-periodic gravity solver. H I (contours) and CO (colors) gases are seen perpendicular to the inflow. **b)** Banerjee et al. (2009) using an Adaptive Mesh Refinement code. Molecular gas is seen along the inflow.

inefficient but its efficiency is strongly increasing with density. We propose that converging flows could be the framework for the bulk of star formation. An emerging consensus is that high-mass stars are forming in massive high-density cores through a powerful accretion of gas onto a protostellar embryo (e.g. Beuther & Schilke 2004). The exact mechanism of such necessarily high accretion rates is however still unclear : is it caused by a large amount of turbulence (McKee & Tan 2002) ? or global collapse (Peretto et al. 2007) ? or competitive accretion (Bonnell & Bate 2006) ? High-density seeds and the above-mentioned processes would be natural consequences of converging flows. While this seems biased toward high-mass star formation, it is a matter of fact that *the majority of stars in our Galaxy, including low-mass stars, form in clusters around high-mass stars* (Briceño et al. 2007), so this research is fundamental for understanding the dominating star formation mechanism in our Galaxy.

4.1.2 Confrontation des modèles de flots convergents aux observations / Confronting numerical models of converging flows and observations

While the gravo-turbulent models start with static molecular clouds perturbed by some turbulence which is injected in an ad-hoc fashion and continuously replenished, the converging flow models create highly-dynamic molecular clouds with no further injection of turbulence. Establishing univocal signatures of converging flows is however difficult. Since we are not yet at a stage at which we can model the Galaxy down to the level of star-forming clouds, any attempt to model existing clouds is difficult if not futile. We can just hope that we will get the general properties – on scales from the H I flows down to dense molecular cores – right, in terms of density distribution, velocity field, temperature, turbulence, and magnetic field structure. Any observational study, by necessity, thus has to be statistical. In contrast to earlier studies (e.g. Ossenkopf & Mac Low 2002), which looked at the general turbulent structure of non-star forming clouds, studying star-forming regions implies taking into account a hierarchy of processes, from the atomic to molecular cloud transition to very dense, collapsing cores forming star clusters.

4.2 Mes principaux articles sur le sujet / My main publications on this topic

In short, [Nguyen Luong et al. \(2011b\)](#) ([read it here](#)) discovered and characterized the extreme molecular complex W43, which they proposed to be located at the tip of the Galactic long bar. Then, [Motte et al. \(2014\)](#) ([read it here](#)) showed that this ~100 pc complex was formed from cloud agglomeration in the leading part of the Scutum-Crux arm, ahead of the bar. On a few parsec scales, the cloud kinematics suggests that the global infall of the ridge ends up into several layers of cloud (Motte et al. in prep.). Their interaction is proven through bright large-scale SiO emission, which arises from low-velocity shocks ([Nguyen-Luong et al. 2013](#), [read it here](#); Louvet et al. in prep.).

Chapitre 5

Projets et perspectives

Sommaire

5.1	Projet FoXCS, “Formation de nuages extrêmes et d’amas d’étoiles : de l’ère d’<i>Herschel</i> à celle d’ALMA”	161
5.2	Directions de recherche renforcées par ma mutation à l’IPAG : physique et chimie du milieu interstellaire et évolution des amas d’étoiles jeunes	165
5.3	Confrontation directe entre observations et simulations ou théories	166
5.4	Et à plus long terme...	167
5.4.1	Comment passer de la formation stellaire Galactique à la formation stellaire dans <i>les galaxies</i> ?	167
5.4.2	Quel sera le successeur de l’observatoire spatial <i>Herschel</i> ?	173

Grâce aux études que nous avons menées ces 5–10 dernières années, nous pouvons proposer un scénario évolutif pour la formation des étoiles massives (voir la fin de la Sect. 1.6 et la Fig. 5.1). Ce scénario est à confirmer et affiner, comme nous chercherons à le faire au travers de nombreux projets présentés dans les Chapitres 2, 3 et 4. Je ne les rappellerai pas ici mais insisterai plutôt sur la nécessité d’étudier la formation stellaire de façon plus globale (projet FoXCS, Sect. 5.1), sur les projets qui prendront plus d’ampleur lorsque je serai à l’IPAG (voir Sect. 5.2) et sur l’importance de confronter observatoires et modèles (voir Sect. 5.3). Je présenterai aussi quelques projets à plus long terme (voir Sect. 5.4).

5.1 Projet FoXCS, “Formation de nuages extrêmes et d’amas d’étoiles : de l’ère d’*Herschel* à celle d’ALMA”

En octobre 2014 et en collaboration avec Annie Zavagno du LAM de Marseille, j’ai soumis le projet ANR FoXCS dans le cadre des “défis aux frontières de la recherche”. C’est un projet qui entend utiliser l’expertise complémentaire, sur la formation des étoiles massives, de nos deux groupes de chercheurs : ses phases précoces (proto-étoiles et nuages) pour AIM Paris-Saclay et ses phases plus évoluées (régions H II et formation stellaire induite) pour le LAM à Marseille. Il s’agit de poursuivre et de renforcer la collaboration déjà très productive (25 articles en 4 ans) que nous avons avec Annie Zavagno dans le cadre du programme clé *Herschel*/HOBYS

Tentative scenario for the formation of high-mass stars

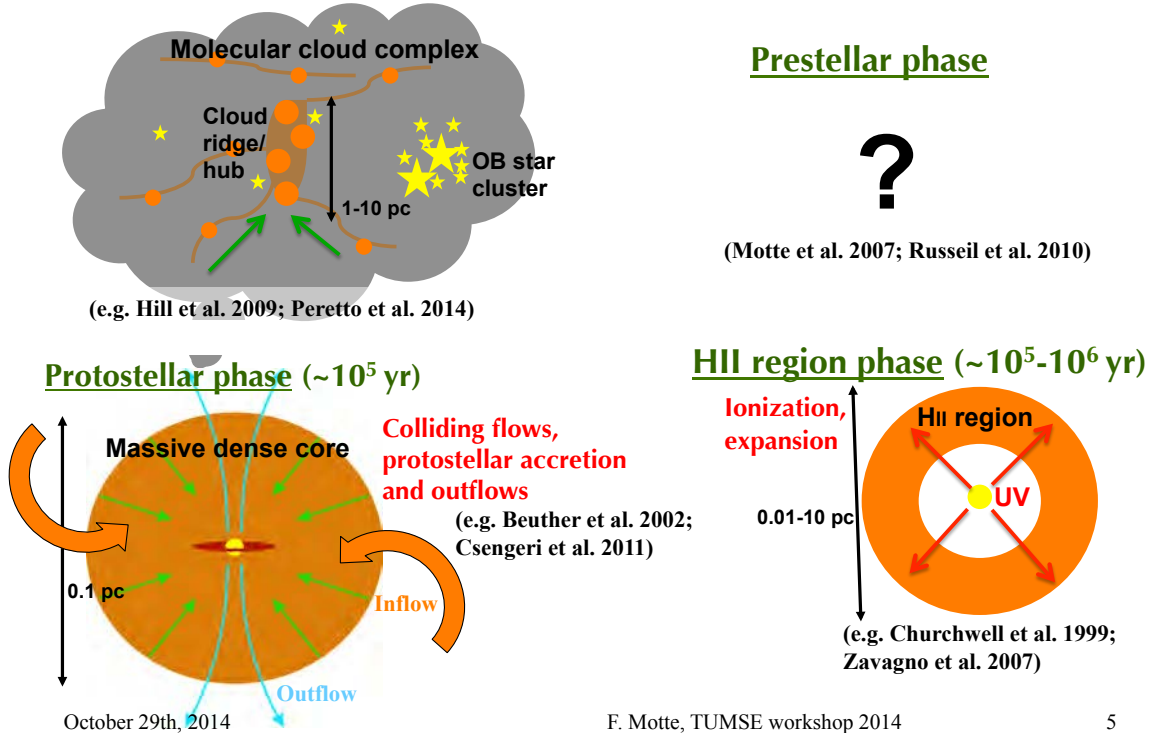


FIGURE 5.1 – Figure schématique de la formation simultanée d’un filament hypermassif et d’une protoétoile massive. Notez que si la structure en densité de ces objets est maintenant bien connue, les flots de matière qui les constituent sont encore mal contraints.

(coordinateurs : Motte, Zavagno, Bontemps). Ce projet ANR avait été soumis en 2013 et était le premier de la liste d’attente à ne pas avoir été financé. Resoumis en 2014, il a été pré-sélectionné mais une fois de plus non financé. Nous avons alors demandé et obtenu un financement des programmes nationaux PNPS et PCMI dans le but de conserver néanmoins la dynamique de notre collaboration Saclay–Marseille et de l’étendre à d’autres laboratoires français (principalement le LAB de Bordeaux et l’ENS de Paris).

Sans l’aide des postdoctorants demandés dans le cadre du projet FoXCS, nous mettrons davantage de temps pour aboutir à nos objectifs de recherche et nous reverrons à la baisse le poids statistique des études que nous entreprendrons. Cependant, la direction de recherche présentée dans le projet FoXCS doit être prise car **c’est une étape nécessaire pour améliorer notre compréhension de l’activité de formation stellaire :**

- 1/ à l’échelle des complexes de nuages moléculaires qui sont des morceaux de bras galactiques et
- 2/ dans les régions les plus extrêmes de notre galaxie pouvant former des amas stellaire dits “de starburst”.

Les grandes étapes que nous aurons à franchir sont présentées sous forme de tâches sur la Fig. 5.2. Nous nous proposons donc de :

- **Continuer à analyser les données multi-longueurs d’onde *Herschel* du programme clé HOBYS** pour mieux caractériser les phases précoces de la formation stellaire massive (masse, luminosité, temps de vie des coeurs denses massifs) et la structure de leur nuage parent (filament hypermassif et coquille de gaz en périphérie des régions H II /étoiles OBs). Il s’agit des tâches “MDCs/2a” et “Cloud Ridge/1a” sur la Fig. 5.2. Les différentes étapes d’analyse qui sont nécessaires pour identifier et caractériser les phases précoces de la formation stellaire massive sont décrites plus en détail dans les Sects. 1.5.1–1.5.2 du Chapitre 1 ainsi que dans le Chapitre 2. La méthodologie proposée pour identifier et étudier la structure des filaments hypermassifs est explicitée à la Sect. 3.2 du Chapitre 3. Les Figs. 2.3 et 3.2 illustrent bien cet aspect.

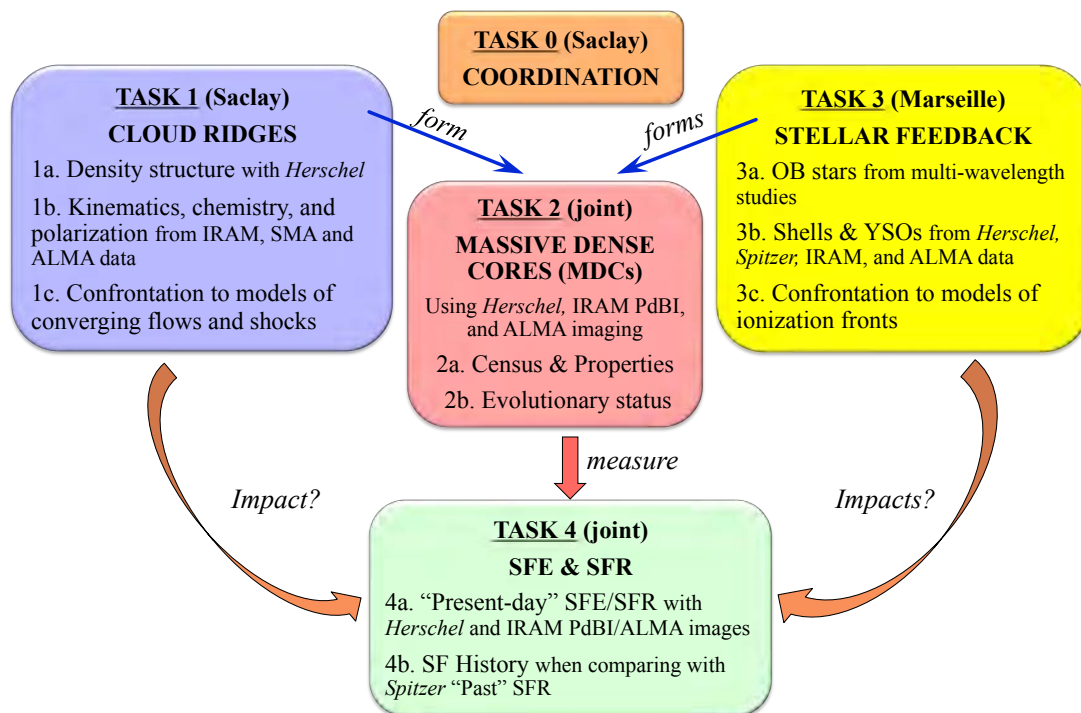


FIGURE 5.2 – Organigramme des différentes tâches proposées dans le cadre du projet FoXCS (Motte & Zavagno) soumis à l’ANR en octobre 2014.

- **Étudier plus en détail les résultats cinématiques et chimiques du grand programme IRAM W43-HERO** et les comparer aux prédictions des modèles dynamiques de formation de nuage ainsi qu’aux modèles de chocs. Il sera aussi nécessaire d’étendre ce genre d’études actuellement faites sur W43 à d’autres filaments hypermassifs identifiés par HOBYS. Il s’agit des tâches “Molecular Ridge/1b-1c” sur la Fig. 5.2. Les différentes étapes d’analyse qui sont nécessaires pour étudier la dynamique des filaments hypermassifs et les chocs en leur sein sont en partie présentées dans la Sect. 3.2 du Chapitre 3. La comparaison avec les simulations de formation de nuage et de chocs ne fait que commencer (voir Figs. 1.7–1.8 et [Nguyen-Luong et al. 2013](#)).
- **Compléter les études *Herschel* grâce à des projets interférométriques avec le Plateau de Bure, NOEMA, et ALMA** pour faire le lien direct entre les filaments hypermassifs de 10 pc, les coeurs denses *Herschel* de 0.1 pc et les proto-étoiles individuelles de 0.01 pc. Il est crucial 1) d’identifier les proto-étoiles massives et 2) d’estimer leur stade d’évolution et leur taux d’accrétion en traçant la dynamique du gaz (“outflow”, “inflow” et chocs) proche des proto-étoiles elles-mêmes. Il s’agit de la seconde partie des tâches “MDCs/2a” et “Cloud Ridge/1b” sur la Fig. 5.2. La Fig. 5.3 donne un exemple d’études interférométriques qui n’atteint pas encore l’échelle des proto-étoiles individuelles mais caractérise déjà le proto-amas contenu dans le ridge W43-MM1 alors que la Fig. 1.5 identifie et caractérise des protoétoiles individuelles mais sur un seul champ de vue (“beam”) du Plateau de Bure. Des études grand-champ et à haute résolution sont la base **d’un sujet de stage M2 et de thèse que Mathilde Gaudel se propose de faire sous ma direction en mars–juin 2015 puis à partir d’octobre 2015**. La première de ces études correspond à un projet ALMA de Cycle 2 sélectionné parmi les 10% meilleurs (Motte et al., “Investigating the origin of the IMF and constraining SFR models in the W43-MM1 mini-starburst ridge”). ([lire le proposal ici](#)).
- **Utiliser les échantillons de proto-étoiles construits par notre groupe pour mesurer les efficacité/taux “instantanés/présents” de formation d’étoiles**. La méthode pour effectuer la tâche “SFE & SFR/4a” sur

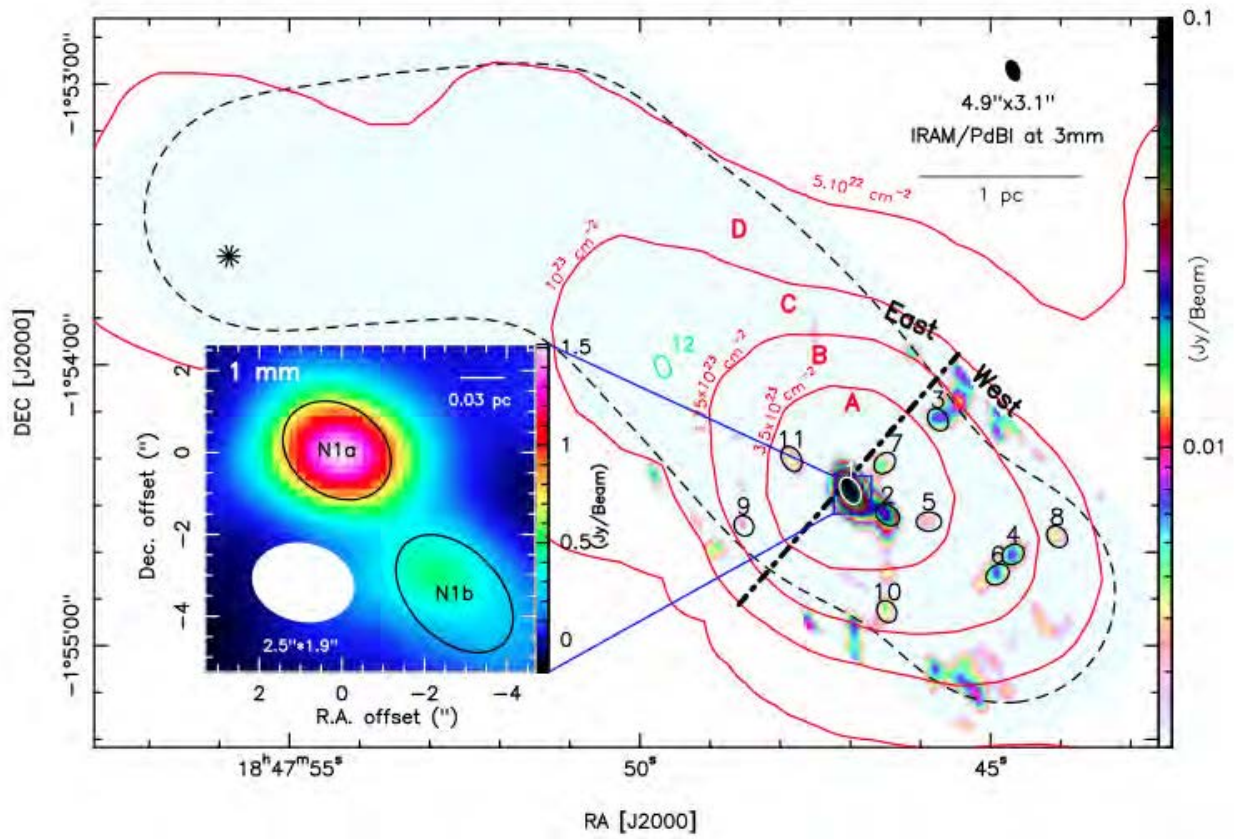


FIGURE 5.3 – Mosaïque interférométrique obtenue au Plateau de Bure sur le filament hypermassif W43-MM1 (Louvet et al. 2014). Un amas de proto-étoiles massives (ellipses noires ou blanches) se forme dans le filament hypermassif (contours rouges).

la Fig. 5.2 est expliquée dans ses grandes lignes dans la Sect. 3.1.1 et en détail dans Louvet et al. (2014). En collaboration étroite avec le groupe d’Annie Zavagno, nous mesurerons l’activité de formation d’étoiles “instantanée”, telle qu’elle est localement, sur les filaments hypermassifs et les coquilles de gaz en périphérie des régions H II. Nous chercherons ainsi à quantifier l’influence constructive/destructive des processus de formation/dispersion du nuage et d’effet en retour des amas d’étoiles OB (voir p. exp. Figs. 3.3-3.4). Sur ce point encore, la comparaison avec les simulations de formation de nuage par flots convergents ou ionisation ne fait que commencer.

- **Comparer le taux de formation d’étoiles “instantané/présent”** mesuré globalement sur chaque complexe moléculaire **avec le taux “intégré/passé”** que l’on peut notamment estimer avec des données *Spitzer* (tâche “SFE & SFR/4b”). Notre objectif final (tâche “SFE & SFR/4b” sur la Fig. 5.2) sera **d’en déduire l’histoire de la formation d’étoiles des nuages moléculaires et de quantifier le lien entre la formation, l’évolution du nuage et son activité de formation d’étoiles** (voir Fig. 3.2).

Le travail observationnel se fera en collaboration étroite avec mes collègues à AIM-Paris Saclay, Pierre Didelon, Anaëlle Maury et Alexander Men’shchikov, et mes ex- étudiants en thèse et postdoctorants Fabien Louvet (UMI Chili), Quang Nguyen Luong (NAO Japon) et Tracey Hill (JAO, Chili). Pour certains aspects du projet FoXCS, je collaborerai aussi avec Sylvain Bontemps et Nicola Schneider (LAB de Bordeaux), Antoine Gusdorf (ENS Paris) et Nicolas Peretto (Université de Cardiff).

Le travail de comparaison avec les théories et simulations se fera quant à lui avec l’aide de Patrick Hennebelle (AIM Paris-Saclay), Antoine Gusdorf et Pierre Lesaffre (ENS Paris) et Pascal Tremblin (Université d’Exeter).

5.2 Directions de recherche renforcées par ma mutation à l'IPAG : physique et chimie du milieu interstellaire et évolution des amas d'étoiles jeunes

J'ai demandé un changement d'affectation pour l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), changement que j'espère effectif en septembre 2015. Par cette mutation, je compte développer de nouvelles collaborations avec les chercheurs de l'IPAG et de l'IRAM, son institut voisin. J'envisage par suite de renforcer certaines de mes thématiques de recherche et même d'en développer de nouvelles. Je voudrais notamment :

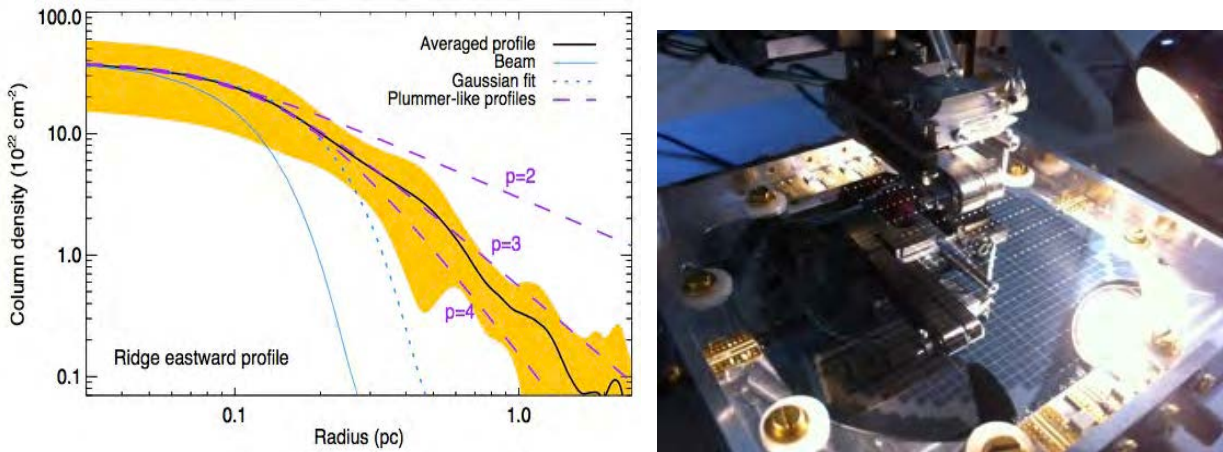


FIGURE 5.4 – a) Profil radial perpendiculaire au filament hypermassif DR21, comparé à la loi classiquement observée pour les filaments moins massifs, $\rho \propto r^{-2}$ (Hill et al. in prep., voir aussi Didelon et al. submitted). Le profil des filaments hypermassifs suggère qu'ils subissent une compression venant de l'extérieur. Ce résultat reste à confirmer car nous supposons ici, à tort, que l'émissivité des poussières reste constante sur les trois ordres de grandeurs de colonne de densité. b) Réseau 2 mm de la caméra de NIKA2 contenant 1000 bolomètres KID. La combinaison des cartes obtenues avec les caméras IRAM/NIKA2 et *Herschel*/SPIRE permettra de contraindre l'émissivité des poussières et donc de mesurer plus proprement le profil radial de la Fig. a.

- **développer mes travaux de recherche en relation avec la physique (structure, dynamique et champ magnétique) du milieu interstellaire**, dans le groupe AstroMol de l'IPAG. Nous utiliserons notamment la caméra NIKA2 (voir Fig. 5.4) dont François-Xavier Désert de l'IPAG est l'“Instrument Scientist”.

Je suis associée à un grand programme NIKA portant sur la formation stellaire (“N2LP”, Peretto et al.). Ses observations devraient nous permettre de contraindre l'émissivité des poussières et par suite de **préciser la structure perpendiculaire des filaments hypermassifs qui ont été compressés par leur effondrement global**.

Je compte aussi proposer des programmes de mesure de polarisation des filaments hypermassifs lorsque NIKA2 et le ballon Pilot seront en service pour **évaluer si le champ magnétique guide les flots de matière vers les proto-étoiles et/ou limite la fragmentation des filaments hypermassifs**.

Les études de dynamique au sein des filaments hypermassifs et jusqu'aux abords des proto-étoiles massives sont difficiles mais primordiales pour contraindre le processus d'accumulation de masse dans ces régions. La proximité avec l'IRAM devrait me permettre de poursuivre et d'intensifier mon travail sur le sujet avec comme objectif de quantifier les flots de matières des échelles de 10 pc à 0.01 pc (voir Fig.5.1).

- **compléter mes travaux de recherche sur la chimie (flots, “hot core” et chocs) du milieu interstellaire**, dans le groupe AstroMol de l'IPAG et avec les chercheurs de l'IRAM. Les experts que sont Cecilia Ceccarelli Bertrand Lefloch, Frédéric Gueth, Aurore Bacmann et Jérôme Pety, nous aideront à **analyser la richesse voire la complexité chimique du gaz contenu dans les filaments hypermassifs** (voir Fig. 5.5). Cette richesse chimique est probablement liée à l'effet combiné de l'assemblage rapide des filaments et de la présence d'amas de proto-étoiles massives. Une meilleure modélisation des réactions chimiques est nécessaire

pour distinguer une émission associée à un choc basse vitesse dans un milieu froid (formation de filament hypermassif), à des chocs haute vitesse en milieu froid (flots bipolaires), et à de l'irradiation du gaz par la luminosité de proto-étoiles et régions H II (hot cores et régions de photodissociation – "PDR").

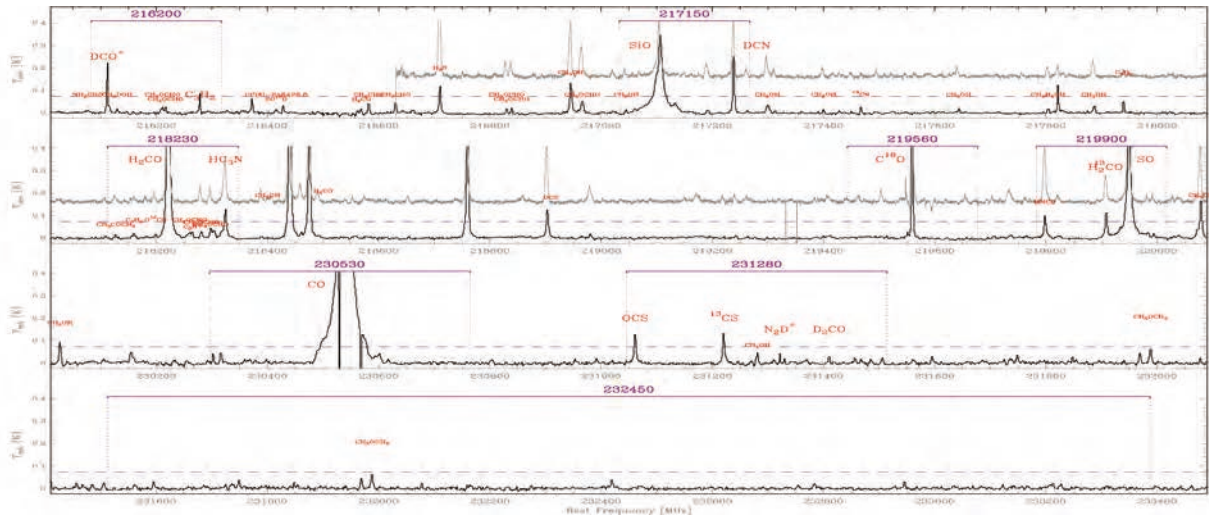


FIGURE 5.5 – Forêt de raies émanant d'une proto-étoile massive de $\sim 10 M_{\odot}$, telle qu'observée au 30 m de l'IRAM (Fechtenbaum et al. en prép.). Certaines de ces raies sont la signature de gaz choqué (tels SiO et SO), d'autres de la présence d'une poche de gaz chaud ("hot core", tel CH₃OH). Ces raies sont autant de moyens de tracer le gaz à différentes distances de l'étoile.

- **poursuivre mes études sur la formation des amas d'étoiles massives et suivre leur évolution jusqu'à dissipation du gaz**, dans le groupe Odysée de l'IPAG. Nous utiliserons notamment le code hybride de la dynamique du gaz et des étoiles dans les amas jeunes créés par [Estelle Moraux](#) et [Jérôme Bouvier](#) pour simuler le devenir des filaments hypermassifs et de leur flambée de formation d'étoiles. La distribution de masse des proto-étoiles et du moment angulaire dans le filament hypermassif W43-MM1 sera précisément mesurée par les observations ALMA du projet Motte et al. (cycle 2). Nous nous en servons comme conditions initiales pour le code hybride. **Suivre l'évolution du proto-amas extrême W43-MM1 devrait permettre d'évaluer s'il pourrait être le progéniteur d'un amas "starburst" ou même d'un amas globulaire.** Récemment invitée à deux conférences sur ce sujet (ELSC2014 et IAU316), je prends maintenant la mesure de l'importance de faire le lien entre la formation et l'évolution des amas d'étoiles.

5.3 Confrontation directe entre observations et simulations ou théories

Les études ci-dessus se feront avec une attention particulière à confronter théories/simulations et observations. Des comparaisons directes ont commencé dans le cadre de nos études du Cygne et de W43 : voir [Schneider et al. \(2010a\)](#); [Nguyen-Luong et al. \(2013\)](#); [Duarte-Cabral et al. \(2014\)](#); [Louvét et al. \(2014\)](#); [Motte et al. \(2014\)](#).

- Nous collaborons déjà avec [Patrick Hennebelle](#) (AIM Paris-Saclay) et [Ian Bonnell](#) (Université de St Andrews, UK) en utilisant leurs simulations numériques (AMR MHD et SPH) de l'effondrement global des nuages ainsi que les théories analytiques de taux de formation d'étoiles de Hennebelle & Chabrier (voir Fig. 1.7 et Fig. 5.6).
- Nous travaillons aussi en collaboration avec [Fabian Heitsch](#) (Université de Chapel Hill, USA), [Simon Glover](#)

(Université d'Heidelberg, Allemagne) et Florent Renaud (Université de Surrey, UK) pour la formation du complexe moléculaire W43 (Motte et al. 2014) (voir leur Fig. 8 ici).

- Pour la thèse de Fabien Louvet (soutenue en septembre 2014), nous avons développé une collaboration très étroite avec Pierre Lesaffre et surtout Antoine Gusdorf (tous deux au LERMA, ENS Paris) sur les chocs lents à l'origine de la formation des filaments hypermassifs (voir Fig. 1.8).
- Nous sommes en discussion pour entamer une collaboration avec Estelle Moraux afin d'utiliser son code hybride d'évolution d'amas stellaires jeunes.

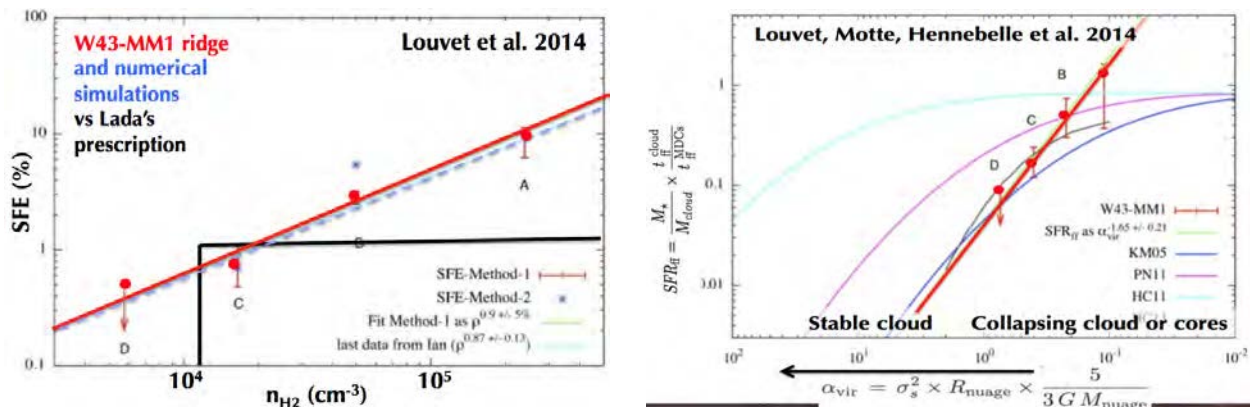


FIGURE 5.6 – Variation de l'efficacité (SFE sur **a**) et du taux (SFR in **b**) de formation stellaire en pénétrant au sein du filament hypermassif W43-MM1 (points et droite rouges) comparée aux tendances observées dans des simulations numériques (droite bleue sur **a**) et modèles analytiques (courbes de couleur sur **b**). Figures modifiées à partir de Louvet et al. (2014).

5.4 Et à plus long terme...

Il est possible d'imaginer de nombreux projets à long terme reliés à la formation des étoiles massives et de leur nuage parent. Je me restreindrai ici à en présenter deux qui me tiennent particulièrement à cœur.

5.4.1 Comment passer de la formation stellaire Galactique à la formation stellaire dans les galaxies ?

Je suis très intéressée à réconcilier les études de formation stellaire galactique avec celles des galaxies proches. Je considère que **les programmes observationnels HOBYS et W43-HERO sont deux étapes primordiales pour comprendre la formation stellaire à des échelles galactiques**. J'ai défendu ce point de vue dans quatre conférences (GSSF2012, RSF2013, EPOS2014, SFaxz2014) et je le ferai encore cet été dans le cadre de l'IAU315. J'étais invitée pour quatre de ces conférences. C'est aussi une des raisons pour laquelle j'ai tenu à organiser la conférence GESF2014 "From Galactic to Extragalactic Star Formation" en septembre 2014 (voir <http://cnes.cborg.fr/gesf2014/>).

Par ailleurs, j'ai démarré un projet avec Florent Renaud (Université de Surrey, UK) pour identifier dans le temps et dans l'espace un complexe de nuages ressemblant à W43. En effet, F. Renaud effectue des simulations de formation de nuages et d'étoiles dans une galaxie spirale ressemblant à la nôtre. Ces simulations pourraient nous aider à mesurer les temps de vie et la probabilité d'une telle accumulation de nuages. Nous chercherons à comprendre quel est l'impact de la barre galactique sur la densification des nuages, leur capacité à former des amas "starburst" et leur devenir.

5.4.2 Quel sera le successeur de l'observatoire spatial *Herschel* ?

A plus long terme, j'envisage de faire tout mon possible pour que la communauté astrophysique internationale étudie sérieusement la possibilité d'inventer un successeur à l'observatoire *Herschel*. En effet, le domaine de longueur d'ondes de l'infrarouge lointain reste inaccessible au sol alors qu'il est primordial pour l'étude des phases précoces tant des étoiles que des galaxies. *Herschel* nous a fourni une base de données extrêmement riche qui continuera à nous livrer de nombreux secrets dans les dix années à venir. Mais, force est de constater que la résolution angulaire des images *Herschel* est limitée, 12'' – 18'' pour les longueurs d'onde traçant l'émission thermique et qui sont hors d'atteinte du sol. **La communauté *Herschel* doit se remotiver et tenter des concepts révolutionnaires pour espérer atteindre une résolution angulaire d'un ordre de grandeur meilleure dans les longueurs d'onde critiques de l'intervalle 100 – 300 μm .**



FIGURE 5.7 – Modèle réduit du télescope déployable TALC dont le concept a été proposé au séminaire de prospective scientifique du CNES en 2014.

Une équipe de chercheurs d'AIM Paris-Saclay (Sauvage, Durand, Rodriguez et al.) s'est récemment mobilisée pour tenter de répondre à ce besoin. Ils ont proposé un concept de télescope annulaire et déployable, de 20 mètres de diamètre, nommé "TALC : a Thinned Aperture Light Collector for space far-infrared studies" (Durand et al. 2014; Sauvage et al. 2014, voir Figs. 5.7-5.8). Je suis associée au projet TALC et j'ai rédigé une partie de l'argumentaire scientifique soumis au CNES en 2014, dans le cadre de l'appel à idées du séminaire de prospective scientifique.

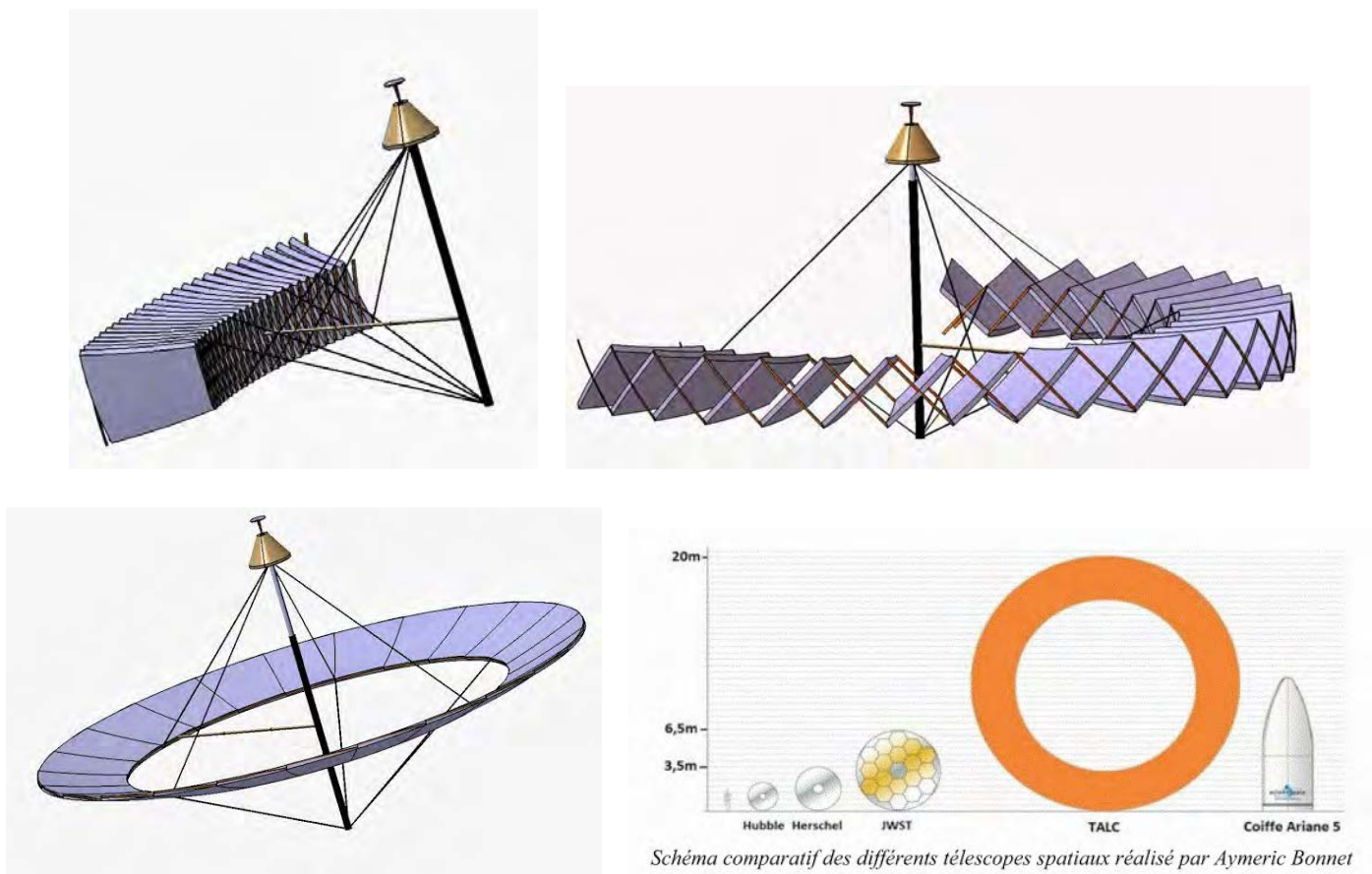


Schéma comparatif des différents télescopes spatiaux réalisé par Aymeric Bonnet

FIGURE 5.8 – Processus de déploiement des panneaux du télescope annulaire TALC : **a)** panneaux repliés au moment du décollage, **b)** déploiement des panneaux dans l'espace, **c)** panneaux en place pour constituer un anneau de 3 mètres de largeur sur 20 mètres de diamètre, **d)** comparaison de la taille du télescope TALC par rapport à celle des miroirs d'*Herschel* (5 à 6 fois plus petit que TALC), du *JWST* ainsi qu'à la taille de la coiffe d'Ariane 5.

Chapitre 6

Curriculum vitae complet

Sommaire

6.1 Gestion et animation de la recherche	177
6.2 Enseignement, encadrement d'étudiants et diffusion de la culture scientifique	177
6.3 Responsabilités collectives, administration de recherche	178

- État civil :* **MOTTE** (nom à usage administratif : CONRUYT-MOTTE)
Frédérique, Claire
 Née le 24 novembre 1971 à Gap (Hautes-Alpes) ; **43 ans**.
 Nationalité Française ; Mariée ; Trois enfants (nés en 2003, 2006 et 2009).
- Fonction :* **Chargée de Recherche de 1^{ère} classe** au CNRS depuis octobre 2008 (**6 ans**) dans le groupe "Formation des étoiles et milieu interstellaire" de l'unité AIM Paris-Saclay dirigée par Anne Decourchelle.
 Périodes d'inactivité entre 1994 et 2014 : total de ~2 ans (maternités et maladie du dos).
 Changement d'affectation (pour l'IPAG) demandé pour septembre 2015.
 Prime d'excellence scientifique attribuée en 2013–2015.
- Laboratoire :* **Astrophysique Instrumentation Modélisation** (AIM Paris-Saclay)
 Unité mixte de recherche IRFU/CEA-INSU/CNRS-Université Paris VII (UMR 7158), CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
 Tél. : 01 69 08 92 55 ; Fax : 01 69 08 65 77 ;
 E-mail : frederique.motte@cea.fr ; <http://frederique.motte.free.fr/>.
- Études :*
- Études primaires et secondaires à Gap (Hautes Alpes), **Bac C** en 1989.
 - **DEUG A** de l'université Joseph Fourier (Grenoble I) de 1989 à 1991.
 - **Licence** et **Maîtrise** de Physique-Recherche de l'université Grenoble I de 1991 à 1993.
 - **DEA** d'Astrophysique et Techniques Spatiales des universités de Paris VII et Paris XI en 1993-1994.
 - **Magistère** de Physique de l'université Grenoble I de 1991 à 1994.
 - **Thèse de Doctorat** de l'université Paris Sud (Paris XI), spécialité Astrophysique et Techniques Spatiales, sous la direction de Philippe André et **soutenue le 7 mai 1998**.
-

- Activité professionnelle passée :*
- **Allocataire de recherche** de l'université de Paris XI de novembre 1994 à mai 1998
 - **Moniteur** à l'UFR de Physique de l'université Grenoble I de 1995 à 1997.
 - **Post-doctorant** au Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Bonn, Allemagne) de juin 1998 à septembre 2000
 - **Post-doctorant** à Caltech (Pasadena, USA) dans le groupe du CSO d'octobre 2000 à septembre 2002
 - **CDD chercheur** du CNRS dans l'unité FRE 2591 (ancien nom de l'UMR 7158) d'octobre 2002 à septembre 2004
 - **Chargée de Recherche de 2^{ème} classe** d'octobre 2004 à septembre 2008
- Productions scientifiques et rayonnement :*
- 104 publications de rang A et 2 articles SPIE**, 15 publications en premier auteur ou derrière un jeune chercheur que j'encadrais.
Plus de 6000 citations dont environ un quart pour des articles en premier auteur.
15 invitations dans des conférences internationales.
- Gestion et animation de la recherche :*
- PI** du programme clé *Herschel/HOBYS* et du grand programme IRAM W43-HERO. Co-responsable de l'**ANR blanche PROBeS** (2008–2012).
Organisation d'une conférence internationale (GESF2014), membre du SOC de trois autres et organisation d'ateliers.
- Responsabilités collectives, administration de recherche :*
- Niveau local** : membre du conseil de laboratoire (2009–2014).
Niveau national :
 - membre de la Section 17 du comité national du CNRS (2008–2012).
 - membre du conseil scientifique du PNPS depuis 2014.
 - membre du GT "Astronomie/Astrophysique" du CNES depuis 2014.
 - examinateur dans le jury de deux thèses, expert extérieur d'une demande de PES.
Niveau international :
 - responsable d'un WP du réseau RTN Constellation (2007–2010).
 - membre du comité d'allocation de temps de télescope ALMA (2012–2014).
- Enseignement et encadrement d'étudiants et jeunes chercheurs :*
- Travaux pratiques de DEUG B de 1995 à 1997. Cours à une école des Houches en 2007. Encadrement de deux stages de M1 et M2.
Direction de deux thèses (soutenues en 2012 et 2014) et deux postdocs (2010–2013).
- Communication grand public :*
- Publications sur des sites et dans des revues de vulgarisation de textes, images et podcasts. Un film documentaire diffusé à la télévision dans le cadre d'*Herschel*.
 Interventions en milieu scolaire.
-

6.1 Gestion et animation de la recherche

J'ai une forte activité d'administration liée à la recherche, en lien direct avec les grands projets observationnels que je coordonne. Mes fonctions actuelles sont :

- Coordinatrice du **programme clé *Herschel*/HOBYS** qui est un grand projet international (~50 chercheurs dans 10 instituts) construit autour de l'élaboration d'une base de données cohérente et complète d'objets stellaires jeunes massifs avec le satellite *Herschel*. Les données ont été prises de 2009 à 2013, la majorité d'entre elles sont encore en cours d'analyse. Le consortium HOBYS a publié 25 articles de rang A, dont 18 où mon nom figure parmi les cinq premiers auteurs.
- Pilote du **grand programme IRAM W43-HERO**, responsabilité partagée avec Peter Schilke de U. Köln (~15 chercheurs dans 5 instituts). Ce projet vise à étudier la structure et la dynamique d'un des complexes moléculaires parmi les plus actifs en formation d'étoiles de notre galaxie. Les données ont été acquises de l'hiver 2009 au printemps 2012, sont réduites et pour la plupart disponibles sur le site de l'IRAM. Cinq articles ont été publiés et un autre a récemment été circulé au sein du consortium W43.

Mes fonctions passées étaient :

- Responsable du **groupe de travail** "From clouds to cores to protostars" **dans le réseau européen** (Marie Curie RTN) **Constellation**, financé de décembre 2006 à novembre 2010. Mon rôle était d'initier, en collaboration étroite avec le numéricien M. Bate de U. Exeter, des comparaisons quantitatives entre observations et simulations de la structure et de la cinématique des complexes moléculaires.
- Responsable en second du **projet d'ANR blanche ProBeS** (Bontemps, Motte, & Zavagno), financé sur la période 2008–2011 et dont l'objectif était de renforcer notre activité de recherche systématique dans notre Galaxie des cibles pour ALMA. J'ai soumis en octobre 2014 un projet ANR FoXCS (Motte & Zavagno) qui propose de quantifier l'impact sur l'activité de formation stellaire de la formation des nuages parents d'une part et de l'effet en retour des amas d'étoiles massives d'autre part.
- Organisatrice principale ("**chair**") du **programme scientifique de la conférence GESF2014** ("From Galactic to Extragalactic Star Formation", 150 personnes) qui a eu lieu à Marseille au Palais du Pharo du 8 au 12 septembre 2014 (voir <http://cnes.cborg.fr/gesf2014/>). J'ai aussi fait partie du comité scientifique d'organisation (**SOC**) de **trois conférences internationales** sur la formation des étoiles massives (septembre 2007, septembre 2010 et juin 2014).
- Organisatrice des **réunions du groupe** "Formation des Etoiles" de 2003 à 2010 et des **réunions** "*Herschel* data reduction" de 2009 à 2010 à AIM Paris-Saclay. Co-organisatrice de **plusieurs ateliers** français autour du programme ANR ProBeS et de nombreux ateliers internationaux dans le cadre des projets *Herschel*/HOBYS et IRAM/W43-HERO.

6.2 Enseignement, encadrement d'étudiants et diffusion de la culture scientifique

Je me suis impliquée dans la formation d'étudiants, de jeunes chercheurs ainsi que dans des activités de communication vers le grand public.

- Pour aider au retour scientifique des projets HOBYS et W43-HERO que je pilote, j'ai encadré **deux étudiants en thèse, Quang Nguyen Luong de novembre 2008 à janvier 2012 (soutenue le 24 janvier 2012) puis Fabien Louvet d'octobre 2011 à septembre 2014 (soutenue le 22 septembre 2014)**. Ils sont tous deux en postdoc (au Japon et Chili) et je continue, à mon grand plaisir, à travailler avec eux. J'ai aussi encadré un stage de Master 2 en 2007 et un stage de Master 1 en 2011.
-

- Les projets PROBeS, HOBYS et W43-HERO ont permis le recrutement **de deux post-doctorants de 3 ans : Martin Hennemann de novembre 2009 à février 2013 et Tracey Hill de février 2010 à février 2013.**
- J'ai effectué des cours de Travaux Pratiques de Physique niveau DEUG B 2^{me} année dans le cadre de mon monitorat à l'Université Joseph Fourier.
- J'ai présenté et rédigé deux cours à l'école des Houches 2007 sur la formation des étoiles de faible masse et massives (durée de 3 heures, conjointement avec le théoricien P. Hennebelle).
- Dans le cadre d'*Herschel*, j'ai publié sur des sites et dans des revues de vulgarisation de nombreux textes, images et podcasts. J'ai aussi été filmée pour documentaire qui sera diffusé à la télévision et je suis intervenu auprès d'une école élémentaire.

6.3 Responsabilités collectives, administration de recherche

J'ai endossé un certain nombre de responsabilités collectives tant au niveau local, national, qu'international.

- **Niveau local**
 - De 2009 à 2013, j'étais la responsable du petit groupe "formation d'étoiles massives" à AIM Paris-Saclay comprenant deux chercheurs permanents (F. Motte et P. Didelon), deux postdoctorants (M. Hennemann et T. Hill), un étudiant en thèse (Q. Nguyen Luong puis F. Louvet) et trois chercheurs attachés (S. Bontemps, V. Minier, N. Schneider).
 - De 2009 à 2013, j'étais membre du conseil de laboratoire d'AIM Paris-Saclay.
- **Niveau national :**
 - De 2008 à 2012, j'ai été membre de la Section 17 du comité national de la recherche scientifique au CNRS.
 - Depuis l'automne 2014, je suis membre du conseil scientifique du programme national de la physique scellaire (CS PNPS)
 - Depuis l'automne 2014, je suis membre du groupe thématique (GT) "Astronomie/Astrophysique" du CNES.
 - J'ai été examinateur dans le jury de thèse de deux doctorants et j'ai été nommée expert extérieur pour évaluer de la demande de prime d'excellence scientifique d'un enseignant-chercheur.
- **Niveau international**
 - Depuis l'automne 2012, je suis membre du comité de sélection des projets ALMA (ARP).
 - J'évalue régulièrement des articles soumis aux journaux A&A, ApJ, MNRAS, PASJ, Nature et sur des proposals JCMT.

Chapitre 7

Liste exhaustive des publications

Sommaire

7.1	Articles dans des revues à comité de lecture	179
7.2	Articles dans des revues sans comité de lecture	185
7.3	Conférences invitées dans des congrès	185
7.4	Communications à des congrès, symposium	186
7.5	Séminaires et workshops récents	189
7.6	Autre	190

Je suis co-auteur de 104 publications de rang A et 2 publications SPIE. 15 de ces publications sont en premier auteur ou derrière un jeune chercheur que j’encadrerais. 42 autres publications correspondent à des articles avec une contribution majeure de ma part (ici pris comme étant parmi les cinq premiers auteurs). Ces publications totalisent plus de 6000 citations dont environ un quart pour des articles en premier auteur.

La reconnaissance de mon travail de recherche peut être estimée par mon “leadership” sur des grands programmes, par les 15 congrès internationaux, les nombreux ateliers et séminaires auxquels j’ai été invitée. J’ai aussi fait partie du comité scientifique d’organisation (SOC en anglais) de quatre conférences internationales dont une en tant qu’organisatrice principale (chair en anglais) du programme scientifique.

7.1 Articles dans des revues à comité de lecture

1. **“Probing the initial conditions of star formation : the structure of the pre-stellar core L1689B”**
André, Ph., Ward-Thompson, D., Motte, F. **1996**, *Astronomy & Astrophysics*, 314, 625-635 (**164 citations**).
2. **“The initial conditions of star formation in the ρ Ophiuchi main cloud : wide-field millimeter continuum mapping”**
Motte, F., André, Ph., Neri, R. **1998**, *Astronomy & Astrophysics*, 336, 150-172 (**695 citations**).
3. **“Discovery of an extremely young accreting protostar in Taurus”**
André, Ph., Motte, F., Bacmann, A. **1999**, *The Astrophysical Journal*, 513, L57-L60 (**103 citations**).
4. **“The initial conditions of star formation. III : millimetre continuum mapping of pre-stellar cores”**
Ward-Thompson, D., Motte, F., André, Ph. **1999**, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 305, 143-150 (**235 citations**).
5. **“Three high-redshift millimeter sources and their radio and near-infrared identifications”**
Bertoldi, F., Carilli, C. L., Menten, K. M., Owen, F., Dey, A. et al., **2000**, *Astronomy & Astrophysics*, 360, 92-98 (92 citations).
6. **“The circumstellar environment of low-mass protostars : a millimeter continuum mapping survey”**
Motte, F., & André, Ph. **2001a**, *Astronomy & Astrophysics*, 365, 440-464 (+5 pages “online”, **245 citations**).

7. **“A SCUBA survey of the NGC 2068/2071 protoclusters”**
Motte, F., André, Ph., Ward-Thompson, D., Bontemps, S. **2001**, *Astronomy & Astrophysics*, 372, L41-L44 (+2 pages “online”, **135 citations**).
8. **“High-mass proto-stellar candidates -II : Density structure from dust continuum and CS emission”**
Beuther, H., Schilke, P., Menten, K. M., Motte, F., Sridharan, T. K., Wyrowski, F. **2002**, *The Astrophysical Journal*, 566, 945-965 (**298 citations**).
9. **“The role of outflows and C shocks in the strong deuteration of L1689N”**
Lis, D. C., Gerin, M., Phillips, T. G., Motte, F. **2002**, *The Astrophysical Journal*, 569, 322-333 (21 citations).
10. **“The environment and nature of the class I protostar Elias 29 : molecular gas observations and the location of ices”**
Boogert, A. C. A., Hogerheijde, M. R., Ceccarelli, C., Tielens, A. G. G. M., van Dishoeck, E. F., Blake, G. A., Latter, W. B., Motte, F. **2002**, *The Astrophysical Journal*, 570, 708-723 (47 citations).
11. **“From massive protostars to a giant H II region : submillimeter imaging of the Galactic ministarburst W43”**
Motte, F., Schilke, P., Lis, D. C. **2003**, *The Astrophysical Journal*, 582, 277-291 (84 citations).
12. **“L183 (L134N) revisited I. The very cold core and the ridge”**
Pagani, L., Lagache, G., Bacmann, A., Motte, F., Cambrésy, L. et al., **2003**, *Astronomy & Astrophysics*, 406, L59-L62 (30 citations).
13. **“L183 (L134N) revisited II. The dust content”**
Pagani, L., Bacmann, A., Motte, F., Cambrésy, L., Fich, M. et al., **2004**, *Astronomy & Astrophysics*, 417, 605-613 (38 citations).
14. **“The young stellar population in the Serpens Cloud Core : An ISOCAM survey”**
Kaas, A. A., Olofsson, G., Bontemps, S., André, Ph., Nordh, L., Hultgren, M., Prusti, T., Persi, P., Delgado, A. J., Motte, F. et al., **2004**, *Astronomy & Astrophysics*, 421, 623-642 (64 citations).
15. **“Multiple protostellar systems. I. A deep near infrared survey of Taurus and Ophiuchus protostellar objects”**
Duchêne, G., Bouvier, J., Bontemps, S., André, Ph., Motte, F. **2004**, *Astronomy & Astrophysics*, 427, 651-665 (82 citations).
16. **“A molecular line survey of Orion-KL in the 350 micron band”**
Comito, C., Schilke, P., Phillips, T. G., Lis, D. C., Motte, F., Mehringer, D., **2005**, *The Astrophysical Journal Supplement*, 156, 127-167 (101 citations).
17. **“Discovery of two new methanol masers in NGC 7538. Locating of massive protostars”**
Pestalozzi, M. R., Minier, V., Motte, F., Conway, J. E. **2006**, *Astronomy & Astrophysics Letter*, 448, L57-L60 (15 citations).
18. **“A multi-wavelength census of star formation activity in the young embedded cluster around Serpens/G3-G6”**
Djuvpik, A. A., André, Ph., Bontemps, S., Motte, F., Olofsson, G., Gáfalk, M., Florén, H.-G. **2006**, *Astronomy & Astrophysics*, 458, 789-803 (21 citations).
19. **“A new view of the Cygnus X region : KOSMA $^{13}\text{CO } 2\rightarrow 1$, $3\rightarrow 2$ and $^{12}\text{CO } 3\rightarrow 2$ imaging”**
Schneider, N., Bontemps, S., Simon, R., Jakob, H., Motte, F., Miller, M., Kramer, C., Stutzki, J. **2006**, *Astronomy & Astrophysics*, 458, 855-871 (+12 pages “online”, 93 citations).
20. **“The initial conditions of star formation in the Ophiuchus main cloud : Kinematics of the protocluster condensations”**
André, Ph., Belloche, A., Motte, F., Peretto, N. **2007**, *Astronomy & Astrophysics*, 472, 519-535 (**126 citations**).
21. **“A multiwavelength study of the S106 region. III. The S106 molecular cloud as part of the Cygnus X cloud complex”**
Schneider, N., Simon, R., Bontemps, S., Comerón, F., Motte, F. **2007**, *Astronomy & Astrophysics*, 474, 873-882 (22 citations).
22. **“The earliest phases of high-mass star formation : a 3 square degree millimeter continuum mapping of the Cygnus X complex”**
Motte, F., Bontemps, S., Schilke, P., Schneider, N., Menten, K. M., Broguière, D. **2007**, *Astronomy & Astrophysics*, 476, 243-1260 (+12 pages “online”, **147 citations**).
23. **“Evidence of triggered star formation in G327.3-0.6. Dust-continuum mapping of an infrared dark cloud with P-ArTéMiS”**
Minier, V., André, Ph., Bergman, P., Motte, F., Wyrowski, F. et al., **2009**, *Astronomy & Astrophysics*, 501, L1-4 (14 citations).

24. “**ATLASGAL - The APEX telescope large area survey of the galaxy at 870 μm** ”
Schuller, F., Menten, K. M., Contreras, Y., Wyrowski, F., Schilke, P. et al., **2009**, *Astronomy & Astrophysics*, 504, 415-427 (166 citations).
 25. “**Toward understanding the formation of multiple systems. A pilot IRAM-PdBI survey of Class 0 objects**”
Maury, A. J., André, Ph., Hennebelle, P., Motte, F., Stamatellos, D., Bate, M., Belloche, A., Duchêne, G., Withworth, **2010**, *Astronomy & Astrophysics*, 512, 40-54 (80 citations).
 26. “**Hi-GAL : the *Herschel* infrared Galactic Plane Survey**”
Molinari, S., Swinyard, B., Bally, J., Barlow, M., Bernard, J.-P., Martin, P., Moore, T., Noriega-Crespo, A., Plume, R., Testi, L., Zavagno, A. et al., **2010**, *PASP*, 122, 314 (121 citations).
 27. “**The earliest phases of high-mass star formation : the NGC 6334-NGC 6357 complex**”
Russeil, D., Zavagno, A., Motte, F., Schneider, N., Bontemps, S., Walsh, A. J., **2010**, *Astronomy & Astrophysics*, 515, 55-72 (27 citations).
 28. “**Circumstellar Structure Around Evolved Stars in the Cygnus-X Star Formation Region**”
Kraemer K. E., Hora, J. L., Egan, M. P., Adams, J., Allen, L. E. et al., **2010**, *The Astrophysical Journal*, 139, 2319-2329 (8 citations).
 29. “**Initial highlights of the HOBYS key program, the *Herschel* imaging survey of OB young stellar objects**”
Motte, F., Zavagno, A., Bontemps, S., Schneider, N., Hennemann, M. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L77 (83 citations).
 30. “**Physical properties of the Sh2-104 H II region as seen by *Herschel***”
Rodón, J. A., Zavagno, A., Baluteau, J.-P., Anderson, L. D., Polehampton, E. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L80 (12 citations).
 31. “**Star formation triggered by the Galactic H II region RCW 120 : First results from the *Herschel* Space Observatory**”
Zavagno, A., Russeil, D., Motte, F., Anderson, L. D., Deharveng, L. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L81 (42 citations).
 32. “***Herschel*-SPIRE spectroscopy of G29.96-0.02 : Fitting the full SED**”
Kirk, J. M., Polehampton, E., Anderson, L. D., Baluteau, J.-P., Bontemps, S. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L82 (8 citations).
 33. “**The *Herschel* view of star formation in the Rosette molecular cloud under the influence of NGC 2244**”
Schneider, N., Motte, F., Bontemps, S., Hennemann, M., di Francesco, J. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L83 (28 citations).
 34. “***Herschel* observations of embedded protostellar clusters in the Rosette Molecular Cloud**”
Hennemann, M., Motte, F., Bontemps, S., Schneider, N., Csengeri, T. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L84 (24 citations).
 35. “**The *Herschel* first look at protostars in the Aquila Rift**”
Bontemps, S., André, Ph., Könyves, V., Men'shchikov, A., Schneider, N., Maury, A., Peretto, N., Arzoumanian, D., Attard, M., Motte, F. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L85 (64 citations).
 36. “***Herschel* observations of the W43 “mini-starburst”**”
Bally, J., Anderson, L. D., Battersby, C., Calzoletti, L., Digiorgio, A. M. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L90 (24 citations).
 37. “**Small-scale structure in the Rosette molecular cloud revealed by *Herschel***”
di Francesco, J., Sadavoy, S., Motte, F., Schneider, N., Hennemann, M. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L91 (20 citations).
 38. “**A *Herschel* study of the properties of starless cores in the Polaris Flare dark cloud region using PACS and SPIRE**”
Ward-Thompson, D., Kirk, J. M., André, Ph., Saraceno, P., Didelon, P. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L92 (40 citations).
 39. “**Galactic cold cores : *Herschel* study of first Planck detections**”
Juvela, M., Ristorcelli, I., Montier, L. A., Marshall, D. J., Pelkonen, V.-M. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L93 (19 citations).
 40. “**Evolution of interstellar dust with *Herschel* First results in the photodissociation regions of NGC 7023**”
Abergel, A., Arab, H., Compiègne, M., Kirk, J. M., Ade, P. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L96 (20 citations).
-

41. **“A *Herschel* study of YSO evolutionary stages and formation timelines in two fields of the Hi-GAL survey”**
Elia, D., Schisano, E., Molinari, S., Robitaille, T., Anglés-Alcázar, D. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L97 (36 citations).
42. **“Mapping the column density and dust temperature structure of IRDCs with *Herschel*”**
Peretto, N., Fuller, G. A., Plume, R., Anderson, L. D., Bally, J. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L98 (42 citations).
43. **“The physical properties of the dust in the RCW 120 H II region as seen by *Herschel*”**
Anderson, L. D., Zavagno, A., Rodón, J. A., Russeil, D., Abergel, A. et al. **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L99 (33 citations).
44. **“Clouds, filaments and protostars : the *Herschel* Hi-GAL Milky Way”**
Molinari, S., Swinyard, B., Bally, J., Barlow, M., Bernard, J.-P. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L100 (216 citations).
45. **“From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF : Initial highlights from the *Herschel* Gould Belt survey”**
André, Ph., Men’shchikov, A., Bontemps, S., Könyves, V., Motte, F. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L102 (322 citations).
46. **“Filamentary structures and compact objects in the Aquila and Polaris clouds observed by *Herschel*”**
Men’shchikov, A., André, Ph., Didelon, P., Könyves, V., Schneider, N., Motte, F., Bontemps, S., Arzoumanian, D., Attard, M., Abergel, A. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L103 (94 citations).
47. **“*Herschel*-SPIRE observations of the Polaris flare : structure of the diffuse interstellar medium at the sub-parsec scale”**
Miville-Deschênes, M.-A., Martin, P. G., Abergel, A., Bernard, J.-P., Boulanger, F. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L104 (48 citations).
48. **“The Aquila prestellar core population revealed by *Herschel*”**
Könyves, V., André, Ph., Men’shchikov, A., Schneider, N., Arzoumanian, D., Bontemps, S., Attard, M., Motte, F., Didelon, P., Maury, A. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L106 (97 citations).
49. **“*Herschel*-SPIRE spectroscopy of the DR21 molecular cloud core”**
White, G. J., Abergel, A., Spencer, L., Schneider, N., Naylor, D. A. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L114 (8 citations).
50. **“SPIRE spectroscopy of the prototypical Orion Bar photodissociation region”**
Habart, E., Dartois, E., Abergel, A., Baluteau, J.-P., Naylor, D. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L116 (35 citations).
51. **“First detection of the methylidyne cation (CH⁺) fundamental rotational line with the *Herschel*/SPIRE FTS”**
Naylor, D. A., Dartois, E., Habart, E., Abergel, A., Baluteau, J.-P. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L117 (19 citations).
52. **“Dynamic star formation in the massive DR21 filament”**
Schneider, N., Csengeri, T., Bontemps, S., Motte, F., Simon, R. et al., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 520, 49-69 (96 citations).
53. **“A *Spitzer* View of Star Formation in the Cygnus X North Complex”**
Beerer, I. M., Koenig, X. P., Hora, J. L., Gutermuth, R. A., Bontemps, S. et al., **2010**, *The Astrophysical Journal*, 720, 679-693 (20 citations).
54. **“Fragmentation and mass segregation in the massive dense cores of Cygnus X”**
Bontemps, S., Motte, F., Csengeri, T., Schneider, N., **2010**, *Astronomy and Astrophysics*, 524, 18-30 (66 citations).
55. **“Gas dynamics in massive dense cores in Cygnus X”**
Csengeri, T., Bontemps, S., Schneider, N., Motte, F., Dib, S., **2011**, *Astronomy and Astrophysics*, 527, 135 (49 citations).
56. **“The link between molecular cloud structure and turbulence”**
Schneider, N., Bontemps, S., Simon, R., Ossenkopf, V., Federrath, C., Klessen, R. S., Motte, F., André, Ph., Stutzki, J., Brunt, C., **2011**, *Astronomy and Astrophysics*, 529, 1 (53 citations).
57. **“W43, the closest molecular complex of the Galactic Bar”**
Nguyen Luong, Q., Motte, F., Schuller, F., Schneider, N. Bontemps, S. et al., **2011**, *Astronomy and Astrophysics*, 529, 41 (42 citations).
58. **“Characterizing interstellar filaments with *Herschel* in IC 5146”**
Arzoumanian, D., André, Ph., Didelon, P., Könyves, V., Schneider, N. et al., **2011**, *Astronomy and Astrophysics*, 529, L6 (147 citations).

-
59. **“A 100 pc Elliptical and Twisted Ring of Cold and Dense Molecular Clouds Revealed by *Herschel* Around the Galactic Center”**
Molinari, S., Bally, J., Noriega-Crespo, A.; Compiègne, M., Bernard, J. P. et al., **2011**, *The Astrophysical Journal*, 735, L33 (79 citations).
 60. **“Filaments and ridges in Vela C revealed by *Herschel* : from low-mass to high-mass star-forming sites”**
Hill, T., Motte, F., Didelon, P., Bontemps, S., Minier, V. et al., **2011**, *Astronomy and Astrophysics*, 533, 94 (77 citations).
 61. **“Convergent flows and low-velocity shocks in DR21(OH)”**
Csengeri, T., Bontemps, S., Schneider, N., Motte, F., Gueth, F., Hora, J., **2011**, *The Astrophysical Journal Letters*, 740, L5 (30 citations).
 62. **“The *Herschel* view of massive star formation in G035.39-00.33 : a dense and cold filament of W48 undergoing a mini-starburst”**
Nguyen Luong, Q., Motte, F., Hennemann, M., Hill, T., Rygl, T. L. J. et al., **2011**, *Astronomy and Astrophysics*, 535, 76 (37 citations).
 63. **“Statistical study of OB stars in NGC 6334 and NGC 6357”**
Russeil, D., Zavagno, A., Adami, C., Anderson, L. D., Bontemps, S., Motte, F., Rodón, J. A., Schneider, N., Ilmane, A., Murphy, K. J. **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 538, 142 (14 citations).
 64. **“The *Herschel* view of the on-going star formation in the Vela-C molecular cloud”**
Giannini, T., Elia, D., Lorenzetti, D., Molinari, S., Motte, F. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 539, 156 (21 citations).
 65. **“Galactic structure based on the ATLASGAL 870 μ m survey”**
Beuther, H., Tackenberg, J., Linz, H., Henning, Th., Schuller, F. et al., **2012**, *The Astrophysical Journal*, 747, 43 (20 citations).
 66. **“*Herschel* Observations of a Potential Core Forming Clump : Perseus B1-E”**
Sadavoy, S. I., di Francesco, J., André, Ph., Pezzuto, S., Bernard, J.-P. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 540, 10 (15 citations).
 67. **“Search for starless clumps in the ATLASGAL survey”**
Tackenberg, J., Beuther, H., Henning, Th., Schuller, F., Wienen, M. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 540, 113 (27 citations).
 68. **“Cluster-formation in the Rosette molecular cloud at the junctions of filaments. How the spatial and density structure affect star formation”**
Schneider, N., Csengeri, T., Hennemann, M., Motte, F., Didelon, P. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 540, L11 (75 citations).
 69. **“Galactic cold cores. III. General cloud properties”**
Juvela, M., Ristorcelli, I., Pagani, L., Doi, Y., Pelkonen, V.-M. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 541, 12 (19 citations).
 70. **“The Pipe Nebula as seen with *Herschel* : formation of filamentary structures by large-scale compression ?”**
Peretto, N., André, Ph., Könyves, V., Schneider, N., Arzoumanian, D. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 541, 63 (45 citations).
 71. **“The Dust Properties of Bubble H II Regions as seen by *Herschel*”**
Anderson, L. D., Zavagno, A., Deharveng, L., Abergel, A., Motte, F. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 542, 10 (18 citations).
 72. **“A multi-scale, multi-wavelength source extraction method : *getsources*”**
Men’shchikov, A., André, Ph., Didelon, P., Motte, F., Hennemann, Schneider, N., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 542, 81 (35 citations).
 73. **“The M 16 molecular complex under the influence of NGC 6611 *Herschel*’s perspective of the heating effect on the Eagle Nebula”**
Hill, T., Motte, F., Didelon, P., White, G. J., Marston, A. P. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 542, 114 (15 citations).
 74. **“Globules and pillars seen in the [CII] 158 micron line with SOFIA”**
Schneider, N., Güsten, R., Tremblin, P., Hennemann, M., Minier, V. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 542, L18 (13 citations).
 75. **“The spine of the swan : A *Herschel* study of the DR21 ridge and filaments in Cygnus X”**
Hennemann, M., Motte, F., Schneider, N., Didelon P., Hill, T. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 543, L3 (58 citations).
-

76. **“Ammonia of cold high-mass clumps discovered in the inner Galactic disk by the ATLASGAL survey”**
Wienen, M., Wyrowski, F., Schuller, F., Menten, K. M., Walmsley, C. M., Bronfman, L., Motte, F., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 544, 146 (33 citations).
 77. **“Interstellar matter and star formation in W5-E. A *Herschel* view”**
Deharveng, L., Zavagno, A., Anderson, L. D., Motte, F., Abergel, A. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 546, 74 (18 citations).
 78. **“*Herschel* observations of B1-bS and B1-bN : two first hydrostatic core candidates in the Perseus star-forming cloud”**
Pezzuto, S., Elia, D., Schisano, E., Strafella, F., di Francesco, J. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 547, 54 (21 citations).
 79. **“Resolving the Vela C ridge with P-ArTéMiS and *Herschel*”**
Hill, T., André, Ph., Arzoumanian, D., Motte, F., Minier, V. et al., **2012**, *Astronomy and Astrophysics*, 548, L6 (7 citations).
 80. **“Recent star formation in the Lupus clouds as seen by *Herschel*”**
Rygl, K. L. J., Benedettini, M., Schisano, E., Elia, D., Molinari, S. et al., **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 549, L1 (12 citations).
 81. **“*Herschel* view of the Taurus B211/3 filament and striations : Evidence of filamentary growth ?”**
Palmeirim, P., André, Ph., Kirk, J., Ward-Thompson, D., Arzoumanian, D. et al., **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 550, 38 (61 citations).
 82. **“Ionisation impact of high-mass stars on interstellar filaments. A *Herschel* study of the RCW 36 bipolar nebula in Vela C”**
Minier, V., Tremblin, P., Hill, T., Motte, F., André, Ph. et al., **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 550, 50 (10 citations).
 83. **“*Herschel* Observations of the W3 GMC : Clues to the Formation of Clusters of High-Mass Stars”**
Rivera-Ingraham, A., Martin, P. G., Polychroni, D., Motte, F., Schneider, N. et al., **2013**, *The Astrophysical Journal*, 766, 85 (11 citations).
 84. **“What determines the density structure of molecular clouds ? A case study of Orion B with *Herschel*”**
Schneider, N., André, Ph., Könyves, V., Bontemps, S., Motte, F., et al. **2013**, *The Astrophysical Journal Letters*, 766, L17 (38 citations).
 85. **“The *Herschel* view of the massive star-forming region NGC 6334”**
Russeil, D., Schneider, N., Anderson, L. D., Zavagno, A., Molinari, S., et al. **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 554, 42 (17 citations).
 86. **“First results from the *Herschel* Gould Belt survey in Taurus”**
Kirk, J.M., Ward-Thompson, D., Palmeirim, P., André, Ph., Griffin, M. J., et al. **2013**, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432, 1424-1433 (14 citations).
 87. **“Global collapse of molecular clouds as a formation mechanism for the most massive stars”**
Peretto, N., Fuller, G. A., Duarte-Cabral, A., Avison, A., Hennebelle, P. et al. **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 555, 112 (25 citations).
 88. **“*Herschel* Reveals Massive Cold Clumps in NGC 7538”**
Fallscheer, C., Reid, M. A., Di Francesco, J., Martin, P. G., Hennemann, M., et al. **2013**, *The Astrophysical Journal*, 773, 102 (6 citations).
 89. **“CO outflows from high-mass Class 0 protostars in Cygnus-X”**
Duarte-Cabral, A., Bontemps, S., Motte, F., Hennemann M., Schneider N. et al. **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 558, 125 (15 citations).
 90. **“Low-velocity shocks traced by extended SiO emission along the W43 ridges : witnessing the formation of young massive clusters”**
Nguyen Luong, Q., Motte, F., Carlhoff, P., Louvet, F., Lesaffre, P. et al. **2013**, *The Astrophysical Journal*, 775, 88 (15 citations).
 91. **“Two Mass Distributions in the L 1641 Molecular Clouds : The *Herschel* connection of Dense Cores and Filaments in Orion A”**
Polychroni, D., Schisano, E., Elia, D., Roy, A., Molinari, S., et al. **2013**, *The Astrophysical Journal Letters*, 777, L33 (9 citations).
 92. **“MALT90 : the Millimetre Astronomy Legacy Team 90 GHz Survey”**
Jackson, J.M., Rathborne, J.M., Foster, J.B., Whitaker, J.S., Sanhueza, P., et al. **2013**, *PASA*, 30, 57 (12 citations).
-

93. “Pillars and globules at the edges of H II regions. Confronting *Herschel* observations and numerical simulations”
Tremblin P., Minier V., Schneider N., Audit E., Hill, T. et al. **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 560, 19 (2 citations).
94. “Large scale IRAM 30 m CO-observations in the giant molecular cloud complex W43”
Carlhoff, P., Nguyen Luong, Q., Schilke, P., Motte, F., Schneider, N., et al. **2013**, *Astronomy and Astrophysics*, 560, 24 (11 citations).
95. “Reconstructing the density and temperature structure of prestellar cores from *Herschel* data : A case study for B68 and L1689B”
Roy, A., André, Ph., Palmeirim, P., Attard, M., Könyves, V., et al. **2014**, *Astronomy and Astrophysics*, 562, 138 (8 citations).
96. “Ionization compression impact on dense gas distribution and star formation. Probability density functions around H II regions as seen by *Herschel*”
Tremblin, P., Schneider, N., Minier, V., Didelon, P., Hill, T., et al. **2014**, *Astronomy and Astrophysics*, 564, 138 (8 citations).
97. “Properties of starless and prestellar cores in Taurus revealed by *Herschel* : SPIRE/PACS imaging”
Marsh, K. A., Griffin, M. J., Palmeirim, P., André, Ph., Kirk, J., et al. **2014**, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439, 3683 (2 citations).
98. “The ATLASGAL survey : a catalog of dust condensations in the Galactic plane”
Csengeri, T., Urquhart, J. S., Schuller, F., Motte, F., Bontemps, S., et al. **2014**, *Astronomy and Astrophysics*, 565, 75 (9 citations).
99. “A *Herschel* and BIMA study of the sequential star formation near the W 48A H II region”
Rygl, K. L. J., Goedhart, S., Polychroni, D., Wyrowski, F., Motte, F., et al. **2014**, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440, 427 (0 citation).
100. “Class 0 Protostars in the Perseus Molecular Cloud : A Correlation Between the Youngest Protostars and the Dense Gas Distribution”
Sadavoy, S. I., Di Francesco, J., André, Ph., Pezzuto, S., Bernard, J.-P., et al. **2014**, *The Astrophysical Journal*, 787, 18 (6 citations).
101. “The Dependence of Protostellar Luminosity on Environment in the Cygnus-X Star-forming Complex”
Kryukova, E., Megeath, S. T., Hora, J. L., Gutermuth, R. A., Bontemps, S., et al. **2014**, *The Astronomical Journal*, 148, 11 (4 citations).
102. “SiO emission from low- and high-velocity shocks in Cygnus-X massive dense clumps”
Duarte-Cabral, A., Bontemps, S., Motte, F., Gusdorf, A., Csengeri, T., et al. **2014**, *Astronomy and Astrophysics*, 570, 1 (0 citation).
103. “The W43-MM1 mini-starburst ridge, a test for star formation efficiency models”
Louvet, F., Motte, F., Hennebelle, P., Maury, A., Bonnell, I., et al. **2014**, *Astronomy and Astrophysics*, 570, 15 (3 citations).
104. “The formation of the W43 complex : constraining its atomic-to-molecular transition and searching for colliding clouds”
Motte, F., Nguyen Luong, Q., Schneider, N., Heitsch, F., Glover, S., et al. **2014**, *Astronomy and Astrophysics*, 571, 32 (5 citations).

7.2 Articles dans des revues sans comité de lecture

1. “TALC : a new deployable concept for a 20m far-infrared space telescope”
Durand, G. A., Sauvage, M., Bonnet, A., Rodriguez, L. R., Ronayette, S., et al. **2014**, *SPIE Proc.*, 9143, 1A.
2. “The science case and data processing strategy for the Thinned Aperture Light Collector (TALC) : a project for a 20m far-infrared space telescope”
Sauvage, M., Chaniel, P., Durand, G. A., Rodriguez, L. R., Starck, J.-L., et al. **2014**, *SPIE Proc.*, 9143, 1B.

7.3 Conférences invitées dans des congrès

1. “Wide-field (sub)millimeter continuum surveys of protoclusters : clues to the origin of the IMF”
Motte, F., & André, Ph. **2001**, dans : From Darkness to Light, Cargèse (France), Montmerle & André (eds.), ASP Conference Series, vol. 243, p. 301.

2. **“Massive Infrared-Quiet Dense Cores : Unveiling the Initial Conditions of High-Mass Star Formation”**
Motte, F., Bontemps, S., Schneider, N., Schilke, P., Menten, K. M. **2008**, dans : Massive Star Formation : Observations confront Theory, Heidelberg (Germany), Beuther, Linz, & Henning (eds.), ASP Conference Series, vol. 387, p. 22-29.
3. **“The formation of low-mass stars with *Herschel*”**
Hennebelle¹, P., & Motte, F. **2008**, dans : Astronomy in the submillimeter and far infrared domains with the *Herschel* Space Observatory, Les Houches (France), Pagani & Gerin (eds.), EAS Publications Series, 34, 177-193.
4. **“Our knowledge of high-mass star formation at the dawn of *Herschel*”**
Motte, F., & Hennebelle, P. **2008**, dans : Astronomy in the submillimeter and far infrared domains with the *Herschel* Space Observatory, Les Houches (France), Pagani & Gerin (eds.), EAS Publications Series, 34, 195-211. Voir <http://fr.arxiv.org/abs/0806.0703>.
5. **“Initial highlights of HOBYS, The *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects”**
Motte, F., Zavagno, A., Bontemps, S. et al. **2010**, dans : ESLAB 2010 : *Herschel* First Results Symposium, ESA, Noordwijk (Netherlands).
6. **“Initial highlights of HOBYS, The *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects”**
Hennemann², M. & Motte, F. **2010**, dans : COSPAR 2010, 38th scientific assembly, Bremen (Allemagne).
7. **“Protostellar Clusters revealed by the HOBYS *Herschel* survey of massive cloud complexes”**
Hennemann³, M. & Motte, F. **2010**, dans : *Herschel* and the formation of stars and planetary systems, Göteborg (Sweden).
8. **“Gould-Belt & HOBYS, two *Herschel* key programs of star-forming regions within 3 kpc : Results on cloud structure, low- to high-mass star formation”**
Motte, F. et al. **2011**, dans : The Milky Way In The *Herschel* Era : Towards A Galaxy-Scale View Of The Star Formation Life-Cycle, Rome (Italy).
9. **“HOBYS and W43, two more steps towards a Galaxy-wide understanding of high-mass star formation”**
Motte, F. et al. **2012**, dans : Galactic Scale Star Formation : Observation meets Theory, Heidelberg (Germany).
10. **“The HOBYS Key Program : When *Herschel* links high-mass star formation to cloud structure”**
Motte, F. et al. **2012**, dans : SF2A 2012, Nice (France), Boissier S., de Laverny, P., Nardetto, N., Samadi, R., Valls-Gabaud, D., Wozniak H. (eds.), p. 45-50.
11. **“Mini-starburst ridges and present-day SFR in HOBYS, the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects”**
Motte, F. et al. **2013**, dans : The universe explored by *Herschel*, ESA, Noordwijk (Netherlands).
12. **“From filamentary clouds to fibers feeding individual cores : how do filaments impact cloud and star formation ?”**
Motte, F. et al. **2014**, dans : Early Stages of Star Formation 2014 (EPOS2014), Ringberg (Germany).
13. **“High-mass star formation : From dynamical clouds to violent feeding of individual cores”**
Motte, F. **2014**, Revue au Meeting de l’ANR TUMSE, Montpellier (France).
14. **“Clusters of high-mass protostars : From extreme clouds to minibursts of star formation”**
Motte, F. et al. **2014**, dans : Early Life of stellar Clusters (ELSC2014), Copenhagen (Denmark).
15. **“HOBYS and W43, two more steps toward a Galaxy-wide understanding of high-mass star formation”**
Motte, F. et al. **2014**, dans : Star Formation across space and time (SFast2014), ESA, Noordwijk (Netherlands).

Conférences invitées pour l’année 2015 :

1. IAU symposium 315 (“From interstellar clouds to star-forming galaxies : universal processes?”), in relation with the IAU General Assembly, Honolulu, USA.
2. IAU symposium 316 (“Formation, Evolution, and Survival of Massive Star Clusters”), in relation with the IAU General Assembly, Honolulu USA.

7.4 Communications à des congrès, symposium

1. **“Density structure of protostellar envelopes”**
Motte, F., André, Ph., Neri, R. **1996**, dans : The Role of Dust in the Formation of Stars, Garching (Germany), Siebenmorgen & Kaufl (eds.), ESO Astrophysics Symposia, p. 47.

¹Présentation présentée de façon conjointe.

²Présentation préparée par mes soins mais présentée par M. Hennemann (problème de dos).

³Présentation préparée par mes soins mais présentée par M. Hennemann (problème de dos).

2. **“New millimetre observations of pre-stellar cores”**
Ward-Thompson, D., André, Ph., Motte, F. **1996**, dans : The Role of Dust in the Formation of Stars, Garching (Germany), Siebenmorgen & Kaufl (eds.), ESO Astrophysics Symposia, p. 79.
3. **“Small-scale dust continuum structure in the ρ Ophiuchi cloud cores”**
Motte, F., André, Ph. Neri, R. **1997**, dans : Low Mass Star Formation - from Infall to Outflow, Chamonix (France), Malbet & Castets (eds.), IAU Symposium n° 182, p. 27.
4. **“Small-scale dust continuum structure in the ρ Ophiuchi cloud cores : 1.3 mm continuum mapping compared with ISOCAM 7 μ m/15 μ m images”**
Motte, F., André, Ph. Neri, R., Abergel, A. **1998**, dans : Star Formation with the Infrared Space Observatory, Lisbon (Portugal), Yun & Liseau (eds.), ASP Conference Series, vol. 132, p. 163.
5. **“ISOPHOT observations of pre-stellar cores”**
Ward-Thompson, D., André, Ph., Motte, F. **1998**, dans : Star Formation with the Infrared Space Observatory, Lisbon (Portugal), Yun & Liseau (eds.), ASP Conference Series, vol. 132, p. 195.
6. **“SiO emission around IRAS16293-2422”**
Loinard, L., Castets, A., Ceccarelli, C., Motte, F. **1998**, dans : The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, Zermatt (Switzerland), Ossenkopf (ed.), abstract book of the 3rd Cologne-Zermatt Symposium, p. 150.
7. **“Dust observations of the initial conditions of star formation”**
André, Ph., Bacmann, A., Motte, F., Ward-Thompson, D. **1999**, dans : The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, Zermatt (Switzerland), Ossenkopf (ed.), proceeding book of the 3rd Cologne-Zermatt Symposium, p. 241.
8. **“The structure of protostellar dense cores : a millimeter continuum survey”**
Motte, F., & André, Ph. **1999**, dans : The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, Zermatt (Switzerland), Ossenkopf (ed.), proceeding book of the 3rd Cologne-Zermatt Symposium, p. 249.
9. **“The initial conditions of star formation : observations of prestellar cores and young protostars”**
André, Ph., Motte, F., Bacmann, A., Belloche, A. **1999**, dans : Star Formation 1999, Nagoya (Japan), Nakamoto (ed.), Nobeyama Radio Observatory Symposia, p. 145.
10. **“IRAM 30m continuum surveys of star-forming regions”**
André, Ph., Motte, F., Neri, R. **2000**, dans : Imaging at Radio through Submillimeter Wavelengths, Tucson (USA), Mangum & Radford (eds.), ASP Conference Series, vol. 217, p. 152.
11. **“FIRST and the earliest stages of star formation”**
André, Ph., & Motte, F. **2000**, dans : Star formation from the small to the large scale, ESTEC (The Netherlands), Favata, Kaas, & Wilson (eds.), 33rd ESLAB Symposium (ESA SP-445), p. 219.
12. **“Protoclusters forming low mass stars”**
André, Ph., & Motte, F. **2001**, dans : Science with the Atacama Large Millimeter Array, Wootten (ed.), ASP Conference Series, vol. 235, p. 11.
13. **“The youngest accreting protostars : implications for collapse models”**
André, Ph., Motte, F., Belloche, A. **2001**, dans : From Darkness to Light, Cargèse (France), Montmerle & André (eds.), ASP Conference Series, vol. 243, p. 209.
14. **“Kinematics of millimeter pre-stellar condensations in the ρ Ophiuchi protocluster”**
Belloche, A., André, Ph., Motte, F. **2001**, dans : From Darkness to Light, Cargèse (France), Montmerle & André (eds.), ASP Conference Series, vol. 243, p. 313.
15. **“L134N Revisited”**
Pagani, L., Pardo, J.-R., Fich, M., Motte, F., Stepnik, B. **2002**, dans : Infrared and Submillimeter Space Astronomy, Toulouse (France), Giard, Bernard, Klotz, & Ristorcelli (eds.), EDP Science, p. 145.
16. **“Massive star formation in the Galactic mini-starburst W43”**
Motte, F., Schilke, P., Lis, D. C. **2002**, dans : The Earliest Phases of Massive Star Birth, Boulder (USA), Crowther (ed.), ASP Conference Series, vol. 267, p. 393.
17. **“L134N (L183) Revisited”**
Pagani, L., Pardo, J.-R., Stepnik, B., Motte, F., Apponi, A. J., Fich, M., Teyssier, D., Cambrésy, L. **2003**, dans : Chemistry as a Diagnostic of Star Formation, Waterloo (Canada), Curry & Fich (eds.), p. 73.
18. **“A line survey of Orion-KL in the 350 μ m band”**
Comito, C., Schilke, P., Phillips, T. G., Lis, D. C., Motte, F., Mehringer, D. M. **2003**, dans : Chemistry as a Diagnostic of Star Formation, Waterloo (Canada), Curry & Fich (eds.), p. 270.
19. **“Fragmentation and Kinematics of the NGC2068 Protocluster”**
André, Ph., Belloche, A., Motte, F. **2003**, dans : Star Formation at High Angular Resolution, Sydney (Australia), IAU Symposium n° 221, p 180

20. **“Radiospectroscopical search for molecule delivery and induced chemistry in the Earth atmosphere during the Leonids meteor shower”**
Despois, D., Ricaud, P., Schneider, N., Urban, J., Lautie, N., Selsis, F., Biver, N., Crovisier, J., Lis, D., Chamberlin, R., Phillips, T., Motte, F., Pardo, J.-R., Miller, M., Jenniskens, P. **2003**, dans : SF2A-2003, Bordeaux (France), Combes, Barret, Contini, & Pagani (eds.), EDP Science, p. 69.
21. **“The earliest stages of high-mass star formation : a complete survey of the Cygnus X complex”**
Bontemps, S., Motte, F., Schneider, N., Schilke, P. **2003**, dans : SF2A-2003, Bordeaux (France), Combes, Barret, Contini, & Pagani (eds.), EDP Science, p. 78.
22. **“L183 (L134N), dust, gas and depletion”**
Pagani, L., Apponi, A. J., Bacmann, A., Cambrésy, L., Fich, M., Lagache, G., Miville-Deschenes, M.-A., Motte, F., Pardo, J.-R. **2003**, dans : SF2A-2003, Bordeaux (France), Combes, Barret, Contini, & Pagani (eds.), EDP Science, p. 195
23. **“L183 (L134N), dust, gas and depletion”**
Pagani, L., Apponi, A. J., Bacmann, A., Cambrésy, L., Fich, M., Lagache, G., Miville-Deschenes, M.-A., Motte, F., Pardo, J.-R. **2004**, dans : The dense interstellar medium in galaxies, Zermatt (Suisse), Pfalzner, Kramer, Staubmeier, & Heithausen (eds.), Springer Proc. 91, p. 439.
24. **“Survey for high-mass protostars in Cygnus X”**
Bontemps, S., Motte, F., Schneider, N., Schilke, P. **2004**, dans : The dense interstellar medium in galaxies, Zermatt (Suisse), Pfalzner, Kramer, Staubmeier, & Heithausen (eds.), Springer Proc. 91, p. 623.
25. **“The earliest phases of massive star formation within entire molecular cloud complexes”**
Motte, F., Bontemps, S., Schilke, P., Lis, D. C., Schneider, N., Menten, K. M. **2005**, dans : Massive star birth : a crossroads of astrophysics, Cesaroni, Churchwell, Felli, Walmsley (eds), IAU 227, 151.
26. **“The Earliest Stages of High Mass Star Formation - Methanol Maser Insights”**
Minier, V., André, Ph., Motte, F., Peretto, N., Booth, R. S., Conway, J. E., Pestalozzi, M. R., Burton, M. G., Hill, T., Longmore, S. N., Purcell, C. R., Walsh, A. J., Cesaroni, R., Herpin, F., de Buizer, J. M., Elitzur, M. **2005**, dans : Protostars and Planets V, Hawaii, p. 8055
27. **“L183 (=L134N) revisited”**
Pagani, L., Apponi, A. J., Bacmann, A., Cabrit, S., Cambrésy, L., Lagache, G., Motte, F., Pardo, J.-R. **2005**, dans : The dusty and molecular universe : a prelude to *Herschel* and ALMA, Paris (France), Wilson A. (ed.), ESA SP-577, p. 403.
28. **“Survey for OB protostars”**
Bontemps, S., Motte, F., Schneider, N. **2005**, dans : SF2A-2005, Strasbourg (France), Casoli, Contini, Hameury, Pagani (eds.), EDP Science, p. 287.
29. **“High-mass star formation : new results and observational prospects”**
Minier, V., André, Ph., Motte, F., **2005**, dans : SF2A-2005, Strasbourg (France), Casoli, Contini, Hameury, Pagani (eds.), EDP Science, p. 405.
30. **“High Mass Star Forming Gas in Cygnus X : The Molecular and Spitzer View of the DR21 Region”**
Simon, R., Schneider, N., Bontemps, S., Brunt, C., Motte, F. **2006**, dans : The Spitzer Space Telescope : New Views of the Cosmos, L. Armus and W.T. Reach (eds.), ASP Conf. Series, Vol. 357, p. 153.
31. **“Massive star formation in NGC 6334–NGC 6357 : Preliminary results”**
Russeil, D., Zavagno, A., Motte, F., Bontemps, S., Schneider, N. **2008**, dans : SF2A-2008, Paris (France), Charbonnel, Combes, & Samadi (eds.), EDP Science, online at <http://proc.sf2a.asso.fr>, p. 535.
32. **“The Spitzer Survey of Cygnus-X and Infrared Dark Clouds”**
Hora, J. L., Bontemps, S., Megeath, S. T., Schneider, N., Motte, F., Carey, S., Simon, R., Keto, E., Smith, H. A., Allen, L. E., Gutermuth, R., Fazio, G. G., Adams, J. D. et al. **2009**, dans : AAS Meeting 213, 356.01, Bulletin of the American Astronomical Society, vol. 41, p. 498.
33. **“Circumstellar Structure Around Evolved Stars in the Cygnus-X Star Formation Region”**
Kraemer K. E., Hora, J. L., Egan, M. P., Adams, J., Allen, L. E., Bontemps, S., Carey, S. J., Fazio, G. G., Gutermuth, R., Keto, E., Megeath, S. T., Mizuno, D. R., Motte, F., Price, S. D., Schneider, N., Simon, R., Smith, H., **2009**, dans : AAS Meeting 213, 356.01, Bulletin of the American Astronomical Society, vol. 41, p. 467.
34. **“From Clouds to Young Stellar Objects and back again : the all-in-one view from the *Herschel* infrared Galactic Plane Survey”**
Molinari, S., Abergel, A. ; Rivera-Ingraham, A. ; Noriega-Crespo, A., Traficante, A. et al., **2010**, dans : COSPAR 2010, 38th scientific assembly, Bremen (Germany), E14-0026-10 (Oral).
35. **“The APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy (ATLASGAL)”**
Schuller, F., Beuther, H., Bontemps, S., Bronfman, L., Carlhoff, P. et al. **2011**, dans : The Messenger, vol. 141, p. 20-23

36. “**Initial highlights of the *Herschel* imaging survey of OB young stellar objects (HOBYS)**”
Hill, T., Motte, F., Bontemps, S., Zavagno, A., Schneider, N. et al. **2010**, dans : SF2A 2010, Marseille (France), Boissier S., Heydari-Malayeri M., Samadi R. & Valls-Gabaud D. (eds.), p. 225
37. “**HOBYS’ view of Vela C and W48 : a ridge and a mini-starburst**”
Hill, T., Nguyen Luong, Q., Motte, F., Didelon, P., Minier, V., et al. **2011**, dans : The 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, Chiang Mai (China), NARIT Conference Series, Komonjinda S., Kovalev Y., & Ruolo D. (eds.), vol. 1, p.
38. “**ATLASGAL : the APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy**”
Wyrowski, F., Schuller, F., Menten, K. M., Bronfman, L., Henning, T. et al. **2011**, dans : The 5th Zermatt ISM-Symposium Conditions and Impact of Star Formation : New Results with *Herschel* and Beyond, Zermatt (Switzerland), EAS Publications Series, vol. 52, p. 129-134.
39. “**Star formation in the Rosette molecular cloud under the influence of NGC 2244**”
Schneider, N., Motte, F., Bontemps, S., Hennemann, M., Tremblin, P. et al., **2011**, dans : The 5th Zermatt ISM-Symposium Conditions and Impact of Star Formation : New Results with *Herschel* and Beyond, Zermatt (Switzerland), EAS Publications Series, vol. 52, p. 305-306.
40. “**Filaments, ridges and a mini-starburst - HOBYS’ view of high mass star formation with *Herschel***”
Hill, T., Motte, F., Didelon, P. et al., **2012**, dans : From Atoms to Pebbles : *Herschel’s* view of Star and Planet Formation", Grenoble (France), Augereau J.-C. (eds.), electronic publication.
41. “**From the filamentary structure of the ISM to prestellar cores to the stellar IMF : First results from the *Herschel* Gould Belt Survey**”
André, Ph., Men’shchikov, A., Könyves, V., Schneider, N., Arzoumanian, D. et al. **2012**, dans : From Atoms to Pebbles : *Herschel’s* view of Star and Planet Formation", Grenoble (France), Augereau J.-C. (eds.), electronic publication.
42. “**HOBYS observations of ridges and filaments, and the evolution of massive dense cores**”
Hennemann, M., Motte, F., Schneider, N. et al., **2013**, dans : The labyrinth of star formation, in press.
43. “**Star formation rates and cloud structures in high-mass star-forming regions**”
Nguyen Luong, Q., Motte, F. et al., **2013**, dans : The labyrinth of star formation, in press.

7.5 Séminaires et workshops récents

1. “Ground-based submm studies & *Herschel* key projects of Galactic star formation”
novembre 2004, workshop “FIR to Millimetre Dust Properties : From the Laboratory to Space” à Saclay.
2. “The earliest phases of high-mass star formation in the entire Cygnus X complex”
avril 2005, séminaire au CSO.
3. “Unbiased submm continuum surveys of entire high-mass star-forming complexes”
mai 2005, workshop franco-australien “High-mass star formation” à Paris.
4. “The earliest phases of high-mass stars within entire molecular cloud complexes”
octobre 2005, séminaire au CESR à Toulouse.
5. “Présentation introductive sur les proto-étoiles”
novembre 2005, atelier ALMA/PNPS à Montpellier/
6. “The earliest phases of high-mass stars within entire molecular cloud complexes”
janvier 2006, séminaire à l’institut Max-Planck de radioastronomie à Bonn.
7. “The earliest phases of high-mass stars within entire molecular cloud complexes”
février 2006, séminaire à l’institut Max-Planck d’astronomie à Heidelberg.
8. “Efficacité de formation stellaire dans les nuages moléculaires de la Voie Lactée : La formation d’étoiles y est-elle toujours calme ?”
mars 2006, séminaire multi-échelles de AIM à Saclay.
9. “Que connaissons-nous actuellement des proto-étoiles massives ? Le point de vue observationnel...”
avril 2007, atelier PNPS “Formation des étoiles OB : Spécificités, observations et modélisations à l’horizon 2015” à Bordeaux.
10. “What is the demographics of star formation in our Galaxy and others ? The global study of massive star-forming complexes in our Galaxy”
juillet 2007, ESO workshop “12 Questions on Star and Massive Star Cluster Formation” à Garching.
11. “High-mass star formation within the NGC6334-6357 molecular complex”
novembre 2007, Rencontre annuelle du réseau PNPS “Formation des étoiles massives et leurs effets sur le milieu inter-stellaire : vers *Herschel* et ALMA” à Saclay.

12. "From extended emission to compact sources in (sub)millimeter images"
novembre 2007, Workshop du grand programme ESO/Max-Planck "AtlasGal : the APEX Telescope Large Area Survey of the GALaxy" à Bonn.
13. "Requirements and plans for data processing of the Gould Belt and HOBYS guaranteed time key programs of the *Herschel*"
juillet 2008, ESA workshop "*Herschel* Key Project Coordination and Science Exploitation" à l'ESTEC.
14. "High-mass protostars and pre-stellar cores at the dawn of *Herschel* and ALMA"
juillet 2008, EPoS2008 meeting "The Early Phase of Star Formation : The Future of the Field" à Ringberg (Allemagne), voir <http://www.mpia.de/homes/stein/EPoS2008>.
15. "High-mass protostars and prestellar cores at the dawn of *Herschel* and ALMA"
septembre 2008, ALMA workshop "The Birth and Feedback of Massive Stars, Within and Beyond the Galaxy", Charlottesville (Etats-Unis), voir <http://www.cv.nrao.edu/php/meetings/massive08>.
16. "Herschel imaging survey of OB Young Stellar objects"
décembre 2009, workshop on "*Herschel* Science Demonstration Phase Initial Results", Madrid (Espagne). Présenté par S. Bontemps.
17. "The W43 molecular complex"
mai 2011, ATLASGAL Consortium Meeting à Bonn (Allemagne).
18. "Introduction of the Large Program goals and associated projects" et "The W43 Large Program in the context of starformat"
juin 2011, Consortium Meeting of the W43 IRAM Large Program combined with the Starformat Meeting à Paris (France).
19. "Formation des étoiles : la révolution d'*Herschel*"
septembre 2011, Inauguration de la salle Galilée du CEA à Saclay (France).
20. "Cloud structure and OB star formation as seen by HOBYS, the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects"
juillet 2011, SFB Kolloquium à Köln (Allemagne),
décembre 2011, Séminaire de l'IPAG à Grenoble (France) puis
janvier 2012, MPIA Kolloquium à Heidelberg (Allemagne).
21. "Linking the formation of molecular clouds and high-mass stars : the W43 case study"
juillet 2012, EPoS2012 meeting "The Early Phase of Star Formation : Assembling Pieces of the Missing Paradigm" à Ringberg (Allemagne).
22. "*Herschel* introduces the "present-day SFR" concept and links high SFR to mini-starburst ridges"
juillet 2012, EPoS2012 meeting "The Early Phase of Star Formation : Assembling Pieces of the Missing Paradigm" à Ringberg (Allemagne).
23. "Cloud structure and OB star formation as seen by HOBYS, the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects"
avril 2013, Cold core meeting, Toulouse (France),
juillet 2013, Anglo-French meeting on high-mass star formation à Leeds (Royaume Uni).
24. "OB star formation as seen by HOBYS, the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects"
présenté par S. Bontemps, **juillet 2013**, Anglo-French meeting on high-mass star formation à Leeds, Royaume Uni.
25. "Ridges, MDCs, and instantaneous SFR in HOBYS"
janvier 2014, *Herschel*/SAG3 consortium meeting 2014, IAS Orsay (France).
26. "Linking the formation of molecular clouds and high-mass stars : the W43 case study"
avril 2014, ISM Jamboree between IAS and AIM à IAS Orsay (France).
27. "HOBYS and W43, two more steps toward a Galaxy-wide understanding of high-mass star formation"
mars 2014, Seminar de CITA à Toronto (Canada),
mars 2014, Séminaire à l'université de Cardiff (Royaume Uni),
octobre 2014, Séminaire de l'IPAG à Grenoble (France), puis
octobre 2014, Séminaire de l'IAP à Paris (France).

7.6 Autre

"Structure des cœurs denses proto-stellaires : une étude en continuum millimétrique"

Motte, F. 1998, *Thèse de Doctorat*.

Mise en place de grands programmes observationnels, projets ANR et organisation de conférence internationale

1. **“HOBYS : the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects”**
Coordinateurs : Motte, F., Zavagno, A., Bontemps, S., **avril 2007**, programme clé du temps garanti *Herschel* utilisant 85 heures de temps garanti SPIRE, 20 heures de temps garanti PACS et 26 heures de temps garanti du *Herschel* Science Center, voir <http://hobys-herschel.cea.fr>.
2. **“Proto-OB Stars (PROBES) : identifying in Galaxy-wide surveys the targets for ALMA”**
Projet blanc financé par l'ANR à hauteur de 400 000 Euros et liant 3 partenaires : LAB/Obs. Bordeaux, AIM/Sap CEA-Saclay et LAM/Obs. Marseille. Responsables : Bontemps, S., Motte, F., Zavagno, A., **2008–2012**.
3. **“W43-HERO : Origins of molecular clouds and star formation in W43”**
Coordinateurs : Motte, F. & Schilke, P., **mars 2009**, grand programme IRAM utilisant 150 heures d'observations au télescope de 30 m, voir <http://www.iram-institute.org/EN/content-page-292-7-158-240-292-0.html>.
4. **“Investigating the origin of the IMF and constraining SFR models in the W43-MM1 mini-starburst ridge”**
Projet ALMA Cycle 2 par Motte, F., Bontemps, S., Louvet, F., Maury, A., Nguyen Luong, Q. et al., **décembre 2013**, sélectionné parmi les 10% meilleurs et demandant 8.1 heures de temps ALMA, du temps ACA et TP.
5. **“GESF2014 : From Galactic to Extragalactic Star Formation”**
Organisatrice principale (chair) du programme scientifique de GESF2014, une conférence internationale visant à réunir les communautés galactiques et extragalactiques travaillant sur la formation stellaire. 150 personnes à Marseille, au Palais du Pharo **du 8 au 12 septembre 2014**, voir <http://cnes.cborg.fr/gesf2014/>.
6. **“FoXCS : Formation of eXtreme Clouds and Star clusters : from *Herschel* to ALMA eras”**
Projet ANR soumis au défi “Aux frontières de la recherche” liant AIM/Sap CEA-Saclay et LAM/Obs. Marseille. Responsables : Motte, F. & Zavagno, A., **soumis en octobre 2014**.

Activités de communication, notamment vers le grand public

1. **“L'effondrement des nuages”**
Ph. André, F. Motte et S. Bontemps, dans : Vie et moeurs des étoiles, *Dossier Hors-Série Pour La Science n° 30*, **janvier 2001**, p. 66-67, <http://www.pourlascience.com/>.
2. **“Star formation : new insight gained from extensive millimeter-wave mapping of forming stars”**
Motte, F., André, Ph., Rostas, F., Bertout, C. **2001**, *Astronomy & Astrophysics press release*, **2001-1**, <http://wwwusr.obspm.fr/bertout/press/2001-1/Release2001-1.html>.
3. **“Surprenante population d'étoiles jeunes et massives dans la région du Cygne”**
Motte, F., **octobre 2007**, fait marquant du Service d'Astrophysique du CEA, voir http://www-dapnia.cea.fr/Sap/Phoceva/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=2136.
4. **“Formation des étoiles massives”**
Podcast sur le *Herschel* programme HOBYS par Frédérique Motte.
Voir <http://herschel.cea.fr/fr/galerie/index.htm>.
5. **“*Herschel* sonde les pouponnières de la Rosette”**
d'après une interview de F. Motte dans : *Ciel et Espace n° 477*, **février 2010**, p. 26.
6. **“The ‘Pillars of Creation’ as observed by *Herschel*”**
dans COSPAR2012, Space science, par Hill, T. & Motte, F.
7. **“Images HOBYS fournies au grand public”**
Mise à disposition des cartes 3-couleurs *Herschel* des régions Rosette, RCW120, M16, Vela, Cygnus X, W44 et W3 sur le site ESA <http://oshi.esa.int>. L'image de la nébuleuse de la Rosette a été une des images *Herschel* les plus utilisées dans les journaux non scientifiques, pour les cartes de vœux, affiches de conférences et la décoration de nos laboratoires. Les images de Rosette, M16 et Cygnus X ont aussi été publiée dans “Astronomical Picture of the Day” sur le site <http://apod.nasa.gov>.
8. **“Petites animations HOBYS à destination du grand public”**
Les images de Rosette, M16, et Vela ont été utilisées pour de petits films présentés à la presse et proposés pour le grand public sur <http://www.dailymotion.com/video/>. Un film présentant la région de M16 est passé dans une émission scientifique de la BBC en janvier 2012.
9. **“Communiqués à destination du grand public”**
Des faits marquants ont été écrits pour les régions de Rosette, Vela, M16, Cygnus X, DR21, W44, W48 publiés sur le site web HOBYS (<http://hobys-herschel.cea.fr>) et le site de l'ESA (<http://oshi.esa.int>) et le site *Herschel* Français (<http://www.herschel.fr/presse/index.php>). Des articles ont été écrits pour les revues d'astronomie amateur Ciel & Espace en janvier 2011, octobre 2011, janvier 2013, dans La Recherche en avril 2011 et dans Science & Vie en juillet 2011.

10. **“Intervention en milieu scolaire”**

Introduction à l’astronomie et au métier de chercheur, 7 heures d’exposés et d’encadrement de travaux pratiques dans deux classes d’élémentaire en 2013.

11. **“Film documentaire”**

Intervention dans un film documentaire de 52 minutes sur le thème des grands défis actuels en cosmologie et en astrophysique. Ce film sera diffusé en mars 2015 sur la chaîne Encyclo du Cable puis sur RMC Découverte et devrait ensuite être distribué dans un exemplaire du journal Science et Vie.

Bibliographie

- Abergel, A., Arab, H., Compiègne, M., et al. 2010, *A&A* , 518, L96 [7](#)
- Alves, J., Lombardi, M., & Lada, C. J. 2007, *A&A* , 462, L17 [4](#)
- André, P., Men'shchikov, A., Bontemps, S., et al. 2010, *A&A* , 518, L102+ [7](#), [10](#), [99](#)
- André, P., Men'shchikov, A., Könyves, V., & Arzoumanian, D. 2010, in *Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 6, Computational Star Formation*, 255–262 [4](#)
- André, P. & Montmerle, T. 1994, *ApJ* , 420, 837 [23](#)
- André, P. & Motte, F. 2000, in *33rd ESLAB symposium, Vol. 445, Star formation from the small to the large scale.*, ed. F. Favata, A. Kaas, & A. Wilson, 219 [4](#)
- André, P., Ward-Thompson, D., & Barsony, M. 2000, *Protostars and Planets IV*, 59 [18](#), [19](#), [21](#)
- André, P., Ward-Thompson, D., & Motte, F. 1996, *A&A* , 314, 625 [3](#)
- Arzoumanian, D., André, P., Didelon, P., et al. 2011, *A&A* , 529, L6 [10](#), [99](#)
- Audit, E. & Hennebelle, P. 2005, *A&A* , 433, 1 [115](#)
- Ballesteros-Paredes, J., Hartmann, L., & Vázquez-Semadeni, E. 1999, *ApJ* , 527, 285 [115](#)
- Banerjee, R., Vázquez-Semadeni, E., Hennebelle, P., & Klessen, R. S. 2009, *MNRAS* , 398, 1082 [115](#), [116](#)
- Barsony, M. & Chandler, C. J. 1993, *ApJ* , 406, L71 [2](#)
- Beltrán, M. T., Brand, J., Cesaroni, R., et al. 2006, *A&A* , 447, 221 [21](#)
- Benjamin, R. A., Churchwell, E., Babler, B. L., et al. 2003, *PASP* , 115, 953 [24](#)
- Beuther, H., Churchwell, E. B., McKee, C. F., & Tan, J. C. 2007, *Protostars and Planets V*, 165 [16](#), [18](#)
- Beuther, H. & Schilke, P. 2004, *Science*, 303, 1167 [116](#)
- Beuther, H., Schilke, P., Menten, K. M., et al. 2002, *ApJ* , 566, 945 [7](#), [19](#), [20](#), [24](#)
- Binney, J. & Tremaine, S. 1987, in *Galactic dynamics*, Princeton Univ. Press., 747 [18](#)
- Bonnell, I. A. & Bate, M. R. 2006, *MNRAS* , 370, 488 [10](#), [24](#), [116](#)
- Bonnell, I. A., Bate, M. R., Clarke, C. J., & Pringle, J. E. 1997, *MNRAS* , 285, 201 [18](#)
- Bonnell, I. A., Bate, M. R., & Zinnecker, H. 1998, *MNRAS* , 298, 93 [18](#)
- Bonnell, I. A., Clarke, C. J., Bate, M. R., & Pringle, J. E. 2001, *MNRAS* , 324, 573 [18](#)
- Bonnor, W. B. 1956, *MNRAS* , 116, 351 [3](#)
- Bontemps, S., André, P., Kaas, A. A., et al. 2001, *A&A* , 372, 173 [5](#)
- Bontemps, S., Motte, F., Csengeri, T., & Schneider, N. 2010, *A&A* , 524, A18 [7](#), [9](#), [24](#), [25](#), [99](#)
- Briceño, C., Preibisch, T., Sherry, W. H., et al. 2007, *Protostars and Planets V*, 345 [116](#)
-

- Bronfman, L., Nyman, L.-A., & May, J. 1996, *A&AS* , 115, 81 [20](#)
- Carey, S. J., Feldman, P. A., Redman, R. O., et al. 2000, *ApJ* , 543, L157 [21](#)
- Carlhoff, P., Nguyen Luong, Q., Schilke, P., et al. 2013, *A&A* , 560, A24 [6](#), [14](#)
- Chabrier, G. 2005, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 327, *The Initial Mass Function 50 Years Later*, ed. E. Corbelli, F. Palla, & H. Zinnecker, 41 [4](#)
- Churchwell, E. 2002, *ARA&A* , 40, 27 [19](#)
- Csengeri, T., Bontemps, S., Schneider, N., Motte, F., & Dib, S. 2011a, *A&A* , 527, A135 [12](#), [24](#)
- Csengeri, T., Bontemps, S., Schneider, N., et al. 2011b, *ApJ* , 740, L5 [12](#)
- Csengeri, T., Urquhart, J. S., Schuller, F., et al. 2014, *A&A* , 565, A75 [8](#)
- Dale, J. E. & Bonnell, I. 2011, *MNRAS* , 414, 321 [99](#)
- Deharveng, L., Zavagno, A., & Caplan, J. 2005, *A&A* , 433, 565 [23](#)
- Dobbs, C. L. 2008, *MNRAS* , 391, 844 [115](#)
- Duarte-Cabral, A., Bontemps, S., Motte, F., et al. 2014, *A&A* , 570, A1 [12](#), [166](#)
- Duarte-Cabral, A., Bontemps, S., Motte, F., et al. 2013, *A&A* , 558, A125 [9](#), [10](#), [22](#), [25](#)
- Durand, G., Sauvage, M., Bonnet, A., et al. 2014, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 9143, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 1 [173](#)
- Eden, D. J., Moore, T. J. T., Plume, R., & Morgan, L. K. 2012, *MNRAS* , 422, 3178 [59](#)
- Egan, M. P., Shipman, R. F., Price, S. D., et al. 1998, *ApJ* , 494, L199+ [21](#)
- Elmegreen, B. G. 1998, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 148, *Origins*, ed. C. E. Woodward, J. M. Shull, & H. A. Thronson, Jr., 150 [19](#)
- Elmegreen, B. G. 2000, *ApJ* , 530, 277 [4](#)
- Elmegreen, B. G. & Lada, C. J. 1977, *ApJ* , 214, 725 [24](#)
- Federrath, C. & Klessen, R. S. 2012, *ApJ* , 761, 156 [11](#), [60](#)
- Federrath, C., Roman-Duval, J., Klessen, R. S., Schmidt, W., & Mac Low, M.-M. 2010, *A&A* , 512, A81 [99](#)
- Foster, P. N. & Chevalier, R. A. 1993, *ApJ* , 416, 303 [4](#)
- Galván-Madrid, R., Zhang, Q., Keto, E., et al. 2010, *ApJ* , 725, 17 [12](#)
- Garay, G., Brooks, K. J., Mardones, D., Norris, R. P., & Burton, M. G. 2002, *ApJ* , 579, 678 [22](#)
- Garay, G. & Lizano, S. 1999, *PASP* , 111, 1049 [19](#)
- Ginsburg, A., Bressert, E., Bally, J., & Battersby, C. 2012, *ApJ* , 758, L29 [99](#)
- Hartmann, L., Ballesteros-Paredes, J., & Heitsch, F. 2012, *MNRAS* , 420, 1457 [10](#), [24](#)
- Heiderman, A., Evans, II, N. J., Allen, L. E., Huard, T., & Heyer, M. 2010, *ApJ* , 723, 1019 [59](#)
- Heitsch, F., Burkert, A., Hartmann, L. W., Slyz, A. D., & Devriendt, J. E. G. 2005, *ApJ* , 633, L113 [115](#)
- Heitsch, F. & Hartmann, L. 2008, *ApJ* , 689, 290 [12](#), [115](#), [116](#)
- Heitsch, F., Hartmann, L. W., Slyz, A. D., Devriendt, J. E. G., & Burkert, A. 2008, *ApJ* , 674, 316 [99](#)
- Helmich, F. P. & van Dishoeck, E. F. 1997, *A&AS* , 124, 205 [19](#)
- Hennebelle, P. & Chabrier, G. 2011, *ApJ* , 743, L29 [59](#)
-

- Hennebelle, P. & Chabrier, G. 2013, *ApJ* , 770, 150 [11](#)
- Hennebelle, P. & Pérault, M. 1999, *A&A* , 351, 309 [115](#)
- Hennebelle, P., Pérault, M., Teyssier, D., & Ganesh, S. 2001, *A&A* , 365, 598 [21](#)
- Hennemann, M., Motte, F., Bontemps, S., et al. 2010, *A&A* , 518, L84+ [9](#), [22](#), [25](#)
- Hennemann, M., Motte, F., Schneider, N., et al. 2012, *A&A* , 543, L3 [11](#), [12](#), [99](#), [100](#)
- Henshaw, J. D., Caselli, P., Fontani, F., Jiménez-Serra, I., & Tan, J. C. 2014, *MNRAS* , 440, 2860 [12](#)
- Hill, T., Burton, M. G., Minier, V., et al. 2005, *MNRAS* , 363, 405 [21](#)
- Hill, T., Motte, F., Didelon, P., et al. 2011, *A&A* , 533, A94 [10](#), [11](#), [99](#), [100](#)
- Hill, T., Motte, F., Didelon, P., et al. 2012, *A&A* , 542, A114 [99](#)
- Hosokawa, T. & Omukai, K. 2009, *ApJ* , 691, 823 [10](#), [24](#)
- Hunter, T. R., Neugebauer, G., Benford, D. J., et al. 1998, *ApJ* , 493, L97 [22](#)
- Jijina, J. & Adams, F. C. 1996, *ApJ* , 462, 874 [17](#)
- Johnstone, D., Wilson, C. D., Moriarty-Schieven, G., et al. 2000, *ApJ* , 545, 327 [4](#)
- Juvela, M., Ristorcelli, I., Montier, L. A., et al. 2010, *A&A* , 518, L93 [7](#)
- Kahn, F. D. 1974, *A&A* , 37, 149 [16](#)
- Kenyon, S. J. & Hartmann, L. 1995, *ApJS* , 101, 117 [23](#)
- Keto, E. 2003, *ApJ* , 599, 1196 [18](#)
- Kirk, J. M., Ward-Thompson, D., & André, P. 2005, *MNRAS* , 360, 1506 [23](#)
- Klein, R., Posselt, B., Schreyer, K., Forbrich, J., & Henning, T. 2005, *ApJS* , 161, 361 [21](#)
- Klessen, R. S., Heitsch, F., & Mac Low, M.-M. 2000, *ApJ* , 535, 887 [4](#), [115](#)
- Könyves, V., André, P., Men'shchikov, A., et al. 2010, *A&A* , 518, L106 [4](#)
- Kroupa, P., Tout, C. A., & Gilmore, G. 1993, *MNRAS* , 262, 545 [4](#), [5](#)
- Krumholz, M. R., Klein, R. I., & McKee, C. F. 2007, *ApJ* , 656, 959 [17](#)
- Krumholz, M. R. & McKee, C. F. 2005, *ApJ* , 630, 250 [60](#)
- Krumholz, M. R., McKee, C. F., & Tumlinson, J. 2009, *ApJ* , 693, 216 [14](#)
- Larson, R. B. & Starrfield, S. 1971, *A&A* , 13, 190 [16](#)
- Louvet, F., Motte, F., Hennebelle, P., et al. 2014, *ArXiv* :1404.4843 (resubmitted to *A&A*) [6](#), [11](#), [60](#), [61](#), [164](#), [166](#), [167](#)
- Mathis, J. S., Ruml, W., & Nordsieck, K. H. 1977, *ApJ* , 217, 425 [17](#)
- McKee, C. F. & Tan, J. C. 2002, *Nature* , 416, 59 [10](#), [24](#), [116](#)
- McKee, C. F. & Tan, J. C. 2003, *ApJ* , 585, 850 [17](#)
- Men'shchikov, A., André, P., Didelon, P., et al. 2010, *A&A* , 518, L103+ [8](#)
- Men'shchikov, A., André, P., Didelon, P., et al. 2012, *A&A* , 542, A81 [8](#), [99](#)
- Mihalas, D. & Mihalas, B. W. 1984, *ApJ* , 283, 469 [17](#)
- Minier, V., Tremblin, P., Hill, T., et al. 2013, *A&A* , 550, A50 [99](#), [100](#)
- Molinari, S., Brand, J., Cesaroni, R., & Palla, F. 2000, *A&A* , 355, 617 [20](#)
-

- Molinari, S., Swinyard, B., Bally, J., et al. 2010, *A&A* , 518, L100+ 7, 24
- Molinari, S., Testi, L., Brand, J., Cesaroni, R., & Palla, F. 1998, *ApJ* , 505, L39 19, 22
- Motte, F. & André, P. 2001a, *A&A* , 365, 440 3
- Motte, F. & André, P. 2001b, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 243, *From Darkness to Light : Origin and Evolution of Young Stellar Clusters*, ed. T. Montmerle & P. André, 301 4
- Motte, F., André, P., & Neri, R. 1998, *A&A* , 336, 150 3, 4, 5, 19
- Motte, F., André, P., Ward-Thompson, D., & Bontemps, S. 2001, *A&A* , 372, L41 4, 5
- Motte, F., Bontemps, S., Hennemann, M., et al. 2012, in *SF2A-2012 : Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, ed. S. Boissier, P. de Laverny, N. Nardetto, R. Samadi, D. Valls-Gabaud, & H. Wozniak, 45–50 7, 8
- Motte, F., Bontemps, S., Schilke, P., et al. 2007, *A&A* , 476, 1243 5, 6, 7, 8, 19, 23, 24, 25, 99, 100
- Motte, F., Bontemps, S., Schneider, N., Schilke, P., & Menten, K. M. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 387, *Massive Star Formation : Observations Confront Theory*, ed. H. Beuther, H. Linz, & T. Henning, 22 8
- Motte, F. & Hennebelle, P. 2009, in *EAS Publications Series*, Vol. 34, *EAS Publications Series*, ed. L. Pagani & M. Gerin, 195–211 7
- Motte, F., Nguyễn Luong, Q., Schneider, N., et al. 2014, *A&A* , 571, A32 14, 117, 166, 167
- Motte, F., Schilke, P., & Lis, D. C. 2003, *ApJ* , 582, 277 8, 11, 19, 21, 59, 61
- Motte, F., Zavagno, A., Bontemps, S., et al. 2010, *A&A* , 518, L77+ 7, 8, 9, 22, 24, 25, 100
- Myers, P. C. 1998, *ApJ* , 496, L109 4
- Nakano, T., Hasegawa, T., & Norman, C. 1995, *ApJ* , 450, 183 17
- Nguyen-Luong, Q., Motte, F., Carlhoff, P., et al. 2013, *ApJ* , 775, 88 6, 11, 12, 13, 60, 99, 100, 117, 163, 166
- Nguyen Luong, Q., Motte, F., Hennemann, M., et al. 2011a, *A&A* , 535, A76 11, 12, 59, 60, 61, 99
- Nguyen Luong, Q., Motte, F., Schuller, F., et al. 2011b, *A&A* , 529, A41 6, 14, 59, 60, 61, 117
- Ossenkopf, V. & Mac Low, M.-M. 2002, *A&A* , 390, 307 116
- Padoan, P. & Nordlund, Å. 1999, *ApJ* , 526, 279 115
- Padoan, P. & Nordlund, Å. 2011, *ApJ* , 730, 40 60
- Péroult, M., Omont, A., Simon, G., et al. 1996, *A&A* , 315, L165 21
- Peretto, N., André, P., & Belloche, A. 2006, *A&A* , 445, 979 18
- Peretto, N. & Fuller, G. A. 2010, *ApJ* , 723, 555 24
- Peretto, N., Fuller, G. A., Duarte-Cabral, A., et al. 2013, *A&A* , 555, A112 12, 24
- Peretto, N., Hennebelle, P., & André, P. 2007, *A&A* , 464, 983 18, 116
- Plume, R., Jaffe, D. T., Evans, II, N. J., Martín-Pintado, J., & Gómez-González, J. 1997, *ApJ* , 476, 730 20
- Rathborne, J. M., Jackson, J. M., & Simon, R. 2006, *ApJ* , 641, 389 19, 21
- Renaud, F., Bournaud, F., Emsellem, E., et al. 2013, *MNRAS* , 436, 1836 14
- Russeil, D., Zavagno, A., Motte, F., et al. 2010, *A&A* , 515, A55+ 8, 24, 100
- Salpeter, E. E. 1955, *ApJ* , 121, 161 5
- Sandell, G. 2000, *A&A* , 358, 242 22
-

- Sandell, G. & Sievers, A. 2004, *ApJ* , 600, 269 [22](#)
- Sanhueza, P., Jackson, J. M., Foster, J. B., et al. 2013, *ApJ* , 773, 123 [12](#)
- Sauvage, M., Chaniel, P., Durand, G. A., et al. 2014, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 9143, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 1 [173](#)
- Scalo, J. 1998, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 142, *The Stellar Initial Mass Function (38th Herstmonceux Conference)*, ed. G. Gilmore & D. Howell, 201 [4](#)
- Schneider, N., Bontemps, S., Simon, R., et al. 2006, *A&A* , 458, 855 [22](#)
- Schneider, N., Bontemps, S., Simon, R., et al. 2011, *A&A* , 529, A1 [22](#)
- Schneider, N., Csengeri, T., Bontemps, S., et al. 2010a, *A&A* , 520, A49+ [11](#), [12](#), [24](#), [99](#), [100](#), [166](#)
- Schneider, N., Csengeri, T., Hennemann, M., et al. 2012, *A&A* , 540, L11 [9](#)
- Schneider, N., Motte, F., Bontemps, S., et al. 2010b, *A&A* , 518, L83+ [9](#)
- Schuller, F., Menten, K. M., Contreras, Y., et al. 2009, *A&A* , 504, 415 [6](#), [7](#), [8](#), [24](#)
- Shu, F. H. 1977, *ApJ* , 214, 488 [2](#)
- Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. 1987, *ARA&A* , 25, 23 [3](#), [18](#)
- Smith, R. J., Shetty, R., Beuther, H., Klessen, R. S., & Bonnell, I. A. 2013, *ApJ* , 771, 24 [12](#)
- Sridharan, T. K., Beuther, H., Saito, M., Wyrowski, F., & Schilke, P. 2005, *ApJ* , 634, L57 [21](#)
- Stahler, S. W., Palla, F., & Ho, P. T. P. 2000, *Protostars and Planets IV*, 327 [7](#)
- Thompson, M. A., Hatchell, J., Walsh, A. J., MacDonald, G. H., & Millar, T. J. 2006, *A&A* , 453, 1003 [21](#)
- Tremblin, P., Audit, E., Minier, V., Schmidt, W., & Schneider, N. 2012, *A&A* , 546, A33 [100](#)
- Vázquez-Semadeni, E., González, R. F., Ballesteros-Paredes, J., Gazol, A., & Kim, J. 2008, *MNRAS* , 390, 769 [60](#)
- Vázquez-Semadeni, E., Kim, J., & Ballesteros-Paredes, J. 2005, *ApJ* , 630, L49 [100](#)
- Vázquez-Semadeni, E., Passot, T., & Pouquet, A. 1996, *ApJ* , 473, 881 [115](#)
- Ward-Thompson, D., Motte, F., & Andre, P. 1999, *MNRAS* , 305, 143 [3](#), [19](#)
- Williams, J. P., Blitz, L., & McKee, C. F. 2000, *Protostars and Planets IV*, 97 [4](#), [5](#), [19](#), [20](#)
- Wolfire, M. G. & Cassinelli, J. P. 1987, *ApJ* , 319, 850 [17](#)
- Wood, D. O. S. & Churchwell, E. 1989, *ApJ* , 340, 265 [20](#)
- Wu, H., Cao, C., Hao, C., et al. 2005, *ApJ* , 632, L79 [59](#)
- Yorke, H. W. & Sonnhalter, C. 2002, *ApJ* , 569, 846 [17](#)
- Zavagno, A., Russeil, D., Motte, F., et al. 2010, *A&A* , 518, L81+ [24](#)
- Zhang, B., Moscadelli, L., Sato, M., et al. 2014, *ApJ* , 781, 89 [14](#)
- Zinnecker, H. & Yorke, H. W. 2007, *ARA&A* , 45, 481 [16](#)
-