



Stage de deuxième année

Cycle d'Ingénieur Civil des Mines de Saint-Etienne

Vers une structure en trois dimensions des étoiles et du gaz au sein du nuage moléculaire d'Orion-B, une analyse spatiale et cinématique des jeunes objets stellaires



Hein Léo

Juin - Août 2021

TABLE DES MATIÈRES

1.	CONTEXTE	3
1.1.	MOTIVATIONS	3
1.1.1.	PROJET ORION-B	3
1.1.2.	OBJECTIFS DU STAGE	3
1.2.	ETAT DE L'ART	4
1.2.1.	MISSIONS	4
1.2.1.1.	GAIA	4
1.2.1.2.	APOGEE	4
1.2.2.	TRAVAUX	4
1.2.2.1.	KOUNKEL	4
1.2.2.2.	CORNU	5
1.2.2.3.	GAUDEL	5
1.2.2.4.	NISHIMURA	7
1.2.2.5.	LOMBARDI	7
1.3.	PLAN DE TRAVAIL	8
2.	CRÉATION DE CATALOGUES	9
2.1.	OUTILS ET DONNÉES UTILISÉES	9
2.2.	FONCTIONNEMENT	9
2.3.	FILTRAGE DES DONNÉES	9
3.	COMPARAISON DES VITESSES RADIALES	10
3.1.	ORION COMPLET	10
3.1.1.	CATALOGUE ET FILTRAGE	10
3.1.2.	ETUDE QUALITATIVE	11
3.1.3.	ETUDE QUANTITATIVE	14
3.2.	L1630S	18
3.2.1.	CATALOGUE ET FILTRAGE	18
3.2.2.	ETUDE QUALITATIVE	19
3.2.3.	ETUDE QUANTITATIVE	20
4.	ETUDES DES STRUCTURES	22
4.1.	ETUDE DES MOUVEMENTS PROPRES	22
4.2.	ETUDE DES EXTINCTIONS	27
4.3.	ETUDE EN TROIS DIMENSIONS	29
5.	CONCLUSIONS	33
5.1.	OUTILS ET RESULTATS	33
5.2.	POTENTIELLES AMÉLIORATIONS	33
5.3.	SOURCES	34

1. CONTEXTE

1.1. MOTIVATIONS

1.1.1. PROJET ORION-B

Les nuages moléculaires proches tels que le complexe d'Orion sont des régions particulièrement étudiées car les plus adéquates pour tester les théories de la formation des étoiles. En effet, selon le processus actuellement admis par la communauté scientifique et confirmé par l'observation, les étoiles se formeraient en amas à partir de la contraction gravitationnelle d'une nébuleuse, un nuage de gaz et de poussière, qui se fragmente en plusieurs cœurs protostellaires. Ceux-ci se contractent en leur centre en formant une étoile, tandis que la matière en périphérie se retrouve sous forme d'une enveloppe et d'un disque d'accrétion, qui disparaît généralement avec le temps. En outre, les raies moléculaires et les rapports de raies sont couramment utilisés pour déduire les propriétés des régions de formation d'étoiles galactiques et extragalactiques et la nouvelle génération de récepteurs millimétriques transforme presque chaque observation en un relevé de raies. Afin d'exploiter pleinement cette avancée technique dans les études extragalactiques, il est nécessaire de procéder à un étalonnage détaillé des diagnostics de raies disponibles. Le projet Orion-B a donc pour but de développer le nuage moléculaire géant d'Orion B comme modèle local pour l'interprétation des observations de raies moléculaires galactiques et extragalactiques. Ce groupe de recherche se base sur un grand programme de l'Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) qui permet d'imager un champ de 5 degrés carrés à travers le nuage moléculaire d'Orion B, avec une résolution angulaire de 26" et de récolter des données pour au moins 30 lignes moléculaires avec une résolution spectrale de 0.6 km/s. Cependant, le manque d'informations 3D empêche de répondre à des questions clés, comme par exemple : quelle partie de la structure complexe des vitesses est due à la turbulence et quelle partie reflète la présence de structures différentes et non liées le long de la ligne de visée ? Alors que de nombreuses étoiles semblent présenter des signes d'interaction, comment sont-elles situées dans l'espace par rapport aux nuages ?

1.1.2. OBJECTIFS DU STAGE

Avec l'avènement de certaines missions comme Gaia ou APOGEE-2 ainsi que des études spectroscopiques à haute résolution, il est possible de contraindre la structure spatiale et cinématique des étoiles et du gaz pour attribuer une origine spatiale aux lignes d'émission observées. Des étoiles de tous types et de tous âges sont maintenant localisées grâce aux données de parallaxes de Gaia et pour la plupart, des mouvements 3D bien déterminés sont maintenant accessibles. Dans les régions de formation d'étoiles, les jeunes objets stellaires (YSOs) sont particulièrement intéressants. En effet, ils sont encore à proximité de leur lieu de naissance et se déplacent en harmonie avec la matière environnante et donc le nuage, comme le stipule le processus de formation des étoiles présenté dans le paragraphe précédent. Ces objets fournissent ainsi un "pont" entre les vitesses stellaires et interstellaires. Par ailleurs, sur la base de l'énorme ensemble de données concernant les distances stellaires et les propriétés photométriques, il est possible de reconstruire la structure 3D des nuages interstellaires avec une résolution spatiale croissante. Les vitesses radiales des nuages sans YSOs peuvent être obtenues à partir des lignes d'absorption du gaz mesurées dans les spectres d'échantillons d'étoiles situées devant, dans ou derrière les nuages, et calibrées par la comparaison des structures 3D de la poussière et des champs de vitesse. Une étude spatiale et cinématique des YSOs permettrait d'apporter des informations cruciales à la fois sur la validité des données spectroscopiques de l'IRAM et des conclusions vis-à-vis de la structure du nuage d'Orion-B tirées des différents travaux réalisés au sein du projet, mais aussi sur les processus au cœur de la formation des étoiles.

1.2. ETAT DE L'ART

1.2.1. MISSIONS

1.2.1.1. GAIA

Gaia est une mission spatiale visant à dresser une carte tridimensionnelle de la Voie Lactée, révélant ainsi des informations sur sa composition, sa formation et son évolution. Elle fournit des mesures d'une précision suffisante pour produire un recensement stéréoscopique et cinématique d'environ un milliard d'étoiles dans notre Galaxie et dans tout le Groupe local (groupe de plus de 60 galaxies auquel appartient la Voie lactée). Cela représente environ 1 % de la population stellaire galactique. Les dernières données en date de Gaia composent la troisième version qui est divisée en deux parties : la version anticipée appelée Gaia Early Data Release 3 (Gaia EDR3) et la version complète Gaia Data Release 3 (Gaia DR3). L'*early release* a été publiée le 3 décembre 2020 tandis que la version complète des données devrait voir le jour durant le premier semestre de 2022. Les données sont basées sur des informations collectées entre le 25 juillet 2014 et le 28 mai 2017, couvrant une période de 34 mois. À titre de comparaison, la deuxième version, Gaia DR2 était basée sur 22 mois de données et la première, Gaia DR1, sur des observations recueillies au cours des 14 premiers mois de la phase opérationnelle de routine de Gaia. Comme pour les versions précédentes, les données Gaia de la troisième version sont mises à disposition par l'intermédiaire des archives Gaia et de divers centres de données. A noter que les informations de Gaia EDR3 comportent notamment la solution astrométrique complète : positions sur le ciel (ascension droite et déclinaison), parallaxes et mouvements propres pour environ 1,468 milliard de sources, avec une magnitude (décrit la luminosité d'un astre) limite d'environ $G \approx 21$ et une limite brillante d'environ $G \approx 3$.

1.2.1.2. APOGEE

La deuxième génération de la mission Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE-2) observe les données archéologiques contenues dans des centaines de milliers d'étoiles afin d'explorer l'histoire de l'assemblage et l'évolution de la Voie lactée. En effet, les détails de l'évolution de la galaxie sont conservés aujourd'hui dans les mouvements et les compositions chimiques de ses étoiles. APOGEE-2 cartographie les modèles dynamiques et chimiques des étoiles de la Voie lactée à l'aide de données de nombreux télescopes. Un relevé systématique de toutes les composantes stellaires de la Voie lactée est effectué à l'aide d'une spectroscopie à haute résolution, multi-objets et proche infrarouge. APOGEE est unique parmi les grands relevés spectroscopiques car il présente des spectres à haute résolution ($R \sim 22\,500$) sur l'ensemble de la Voie lactée. La version actuelle des données est la version 16 (DR16) et contient 430 000 cibles APOGEE uniques dans 1442 champs obtenus lors de 1 800 000 visites individuelles. Toutes les données obtenues jusqu'en août 2018 sont incluses. DR16 est la première publication de données à inclure les données d'APOGEE-2S, qui a commencé à fonctionner pleinement en avril 2017. Pour toutes les cibles, DR16 fournit notamment les spectres de visite, les vitesses radiales héliocentriques, les spectres combinés et les paramètres atmosphériques stellaires.

1.2.2. TRAVAUX

1.2.2.1. KOUNKEL

Dans l'article: "*The APOGEE-2 Survey of the Orion Star-forming Complex. II. Six-dimensional Structure*", paru en Septembre 2018, Marina Kounkel et l'ensemble des chercheurs ayant participé aux travaux présentent une analyse des données spectroscopiques et astrométriques d'APOGEE-2 et de Gaia DR2 afin d'identifier des structures vers le complexe d'Orion. En appliquant un algorithme de regroupement hiérarchique aux données stellaires, ils identifient des groupes spatialement et/ou cinématiquement distincts de jeunes objets stellaires dont l'âge varie de 1 à 12 millions d'années. Ils étudient également l'histoire de la formation d'étoiles au sein du complexe d'Orion et identifient des sous-amas particuliers. Avec cette méthode, ils reconstituent les

populations plus anciennes dans les régions qui sont actuellement largement dépourvues de gaz moléculaire, telles qu'Orion C et Orion D. Ils présentent les distances, la cinématique et les âges des groupes du complexe et montrent que le groupe d'Orion D est en processus d'expansion alors que d'autre part, Orion B est toujours en processus de contraction. Aussi, dans λ Ori, les mouvements propres sont cohérents avec une expansion radiale due à l'explosion d'une supernova ; l'âge de la trace de l'expansion dépasse l'âge des plus jeunes étoiles formées près des bords extérieurs de la région, et leur formation aurait été déclenchée lorsqu'elles étaient à mi-chemin entre le centre de l'amas et leurs positions actuelles.

1.2.2.2. CORNU

Les jeunes objets stellaires (YSOs) observés sont utilisés pour étudier et caractériser les régions de formation d'étoiles. Dans ce but, des catalogues de candidats YSOs sont compilés à partir de diverses études, en particulier dans l'infrarouge (IR), et des schémas de sélection simples dans les diagrammes couleur-magnitude (CMD) sont souvent utilisés pour identifier les YSOs. Dans l'article "A neural network-based methodology to select young stellar object candidates from IR surveys", David Cornu et Jérôme Montillaud proposent une méthodologie pour la classification des YSOs par machine learning en utilisant les données infrarouges de Spitzer. Ils ont utilisé des réseaux de neurones artificiels (ANN) appliqués aux données de Spitzer pour classer les objets sources ponctuels en candidats YSO de classe 1 (CI), de classe 2 (CII) ou en contaminants. Ils se sont concentrés sur les régions de formation d'étoiles proches (à une distance inférieure à 1000 pc), dont notamment le complexe d'Orion et NGC2264. Ils ont alors constaté que les ANNs peuvent être appliqués efficacement à la classification des YSOs avec un nombre limité de neurones (25). Ils ont observé que les YSOs prédits sont principalement contaminés par des sous-classes rares et sous-contraintes comme les Shocks et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), ou par les autres types d'étoiles largement dominants. Pour chaque objet du catalogue, une probabilité d'appartenance effective à chaque classe de sortie a été définie. Les deux chercheurs ont atteint 90% et 97% de précision sur les YSOs CI et CII, respectivement, pour plus de la moitié d'entre eux. Le catalogue de candidats YSO dans Orion (365 CI, 2381 CII) et NGC2264 (101 CI, 469 CII) prédit par leur ANN final, ainsi que la probabilité d'appartenance à une classe pour chaque objet, est disponible publiquement au Centre de Données astronomique de Strasbourg.

1.2.2.3. GAUDEL

Mathilde Gaudel a appliqué l'algorithme RHOSA (Regularized Optimization for Hyper-Spectral Analysis) permettant de réaliser une décomposition gaussienne des données spectroscopiques de l'IRAM dans le complexe d'Orion. Elle a ainsi pu dégager trois couches de vitesses radiales du nuage : "Orion-B9", "Cloak" et "Main Area" dont les cartes sont affichées ci-dessous.

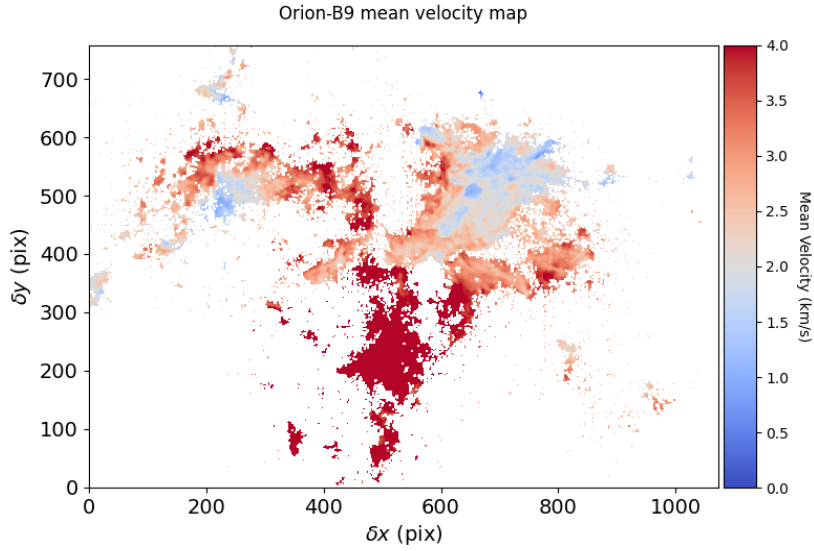


Figure 1 : Carte de Gaudel de la première couche de vitesses radiales moyennes en km/s identifiées dans la région L1630S. C'est la couche Orion-B9 dont l'intervalle de vitesses est délimité par les bornes 0 km/s et 4 km/s.

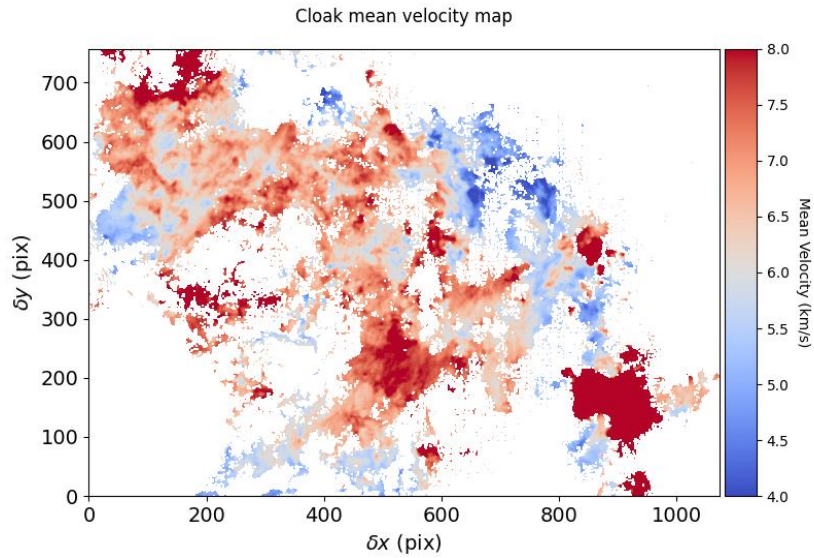


Figure 2 : Carte de Gaudel la seconde couche de vitesses radiales moyennes en km/s identifiées dans la région L1630S. C'est la couche Cloak dont l'intervalle de vitesses est délimité par les bornes 4 km/s et 8 km/s.

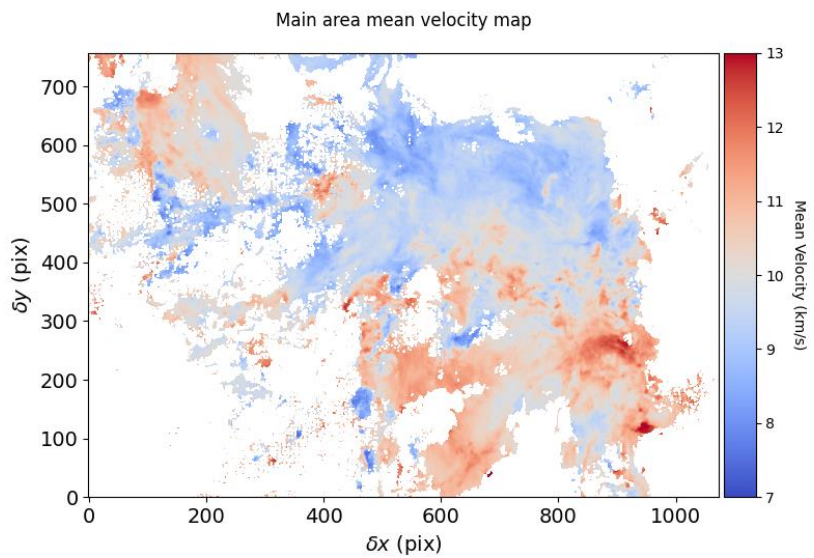


Figure 3 : Carte de Gaudel la troisième couche de vitesses radiales moyennes en km/s identifiées dans L1630S. C'est la couche Cloak dont l'intervalle de vitesses est délimité par les bornes 7 km/s et 13 km/s.

1.2.2.4. NISHIMURA

Dans l'article "*Revealing the physical properties of molecular gas in Orion with a large scale survey in $J=2-1$ lines of ^{12}CO , ^{13}CO and C^{18}O* " d'Atsushi Nishimura et al., paru en Décembre 2014, sont présentées des images entièrement échantillonnées de l'émission de $^{12}\text{CO}(J=2-1)$, $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ et $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ dans toute la zone des nuages moléculaires géants d'Orion A et B. Ils explorent le formalisme du gradient de vitesse important pour déterminer la densité et la température du gaz en utilisant les combinaisons de lignes de $^{12}\text{CO}(J=2-1)$, $^{13}\text{CO}(J=2-1)$, et $^{13}\text{CO}(J=1-0)$. Un des aspects de leur travail a été de comparer les propriétés dérivées du gaz avec la distribution des jeunes objets stellaires obtenue avec le télescope Spitzer pour étudier la relation entre les propriétés du gaz et l'activité de formation d'étoiles dans cette région. Ils ont constaté que la densité du gaz et l'efficacité de la formation d'étoiles sont bien corrélées positivement, ce qui indique que les étoiles se forment efficacement dans la région de gaz dense. La carte ci-dessous est tirée de ces travaux et représente les vitesses radiales du gaz dans le complexe d'Orion.

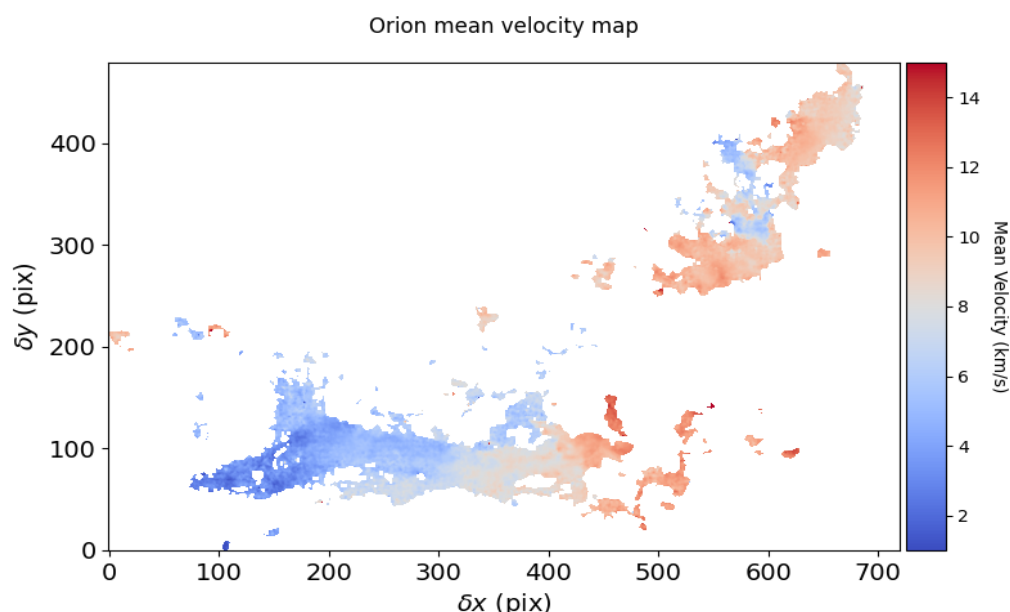


Figure 4 : Carte de Nishimura des vitesses radiales du nuage de gaz du complexe d'Orion complet.

1.2.2.5. LOMBARDI

Dans l'article "*Herschel-Planck dust optical-depth and column-density maps*", Marco Lombardi et al. présentent des cartes de densité de colonne et de couleur-température du complexe d'Orion à haute résolution et à haute gamme dynamique en utilisant une combinaison de cartes d'émission de poussière de Planck, de cartes d'émission de poussière de Herschel et de cartes d'extinction de poussière NIR de 2MASS. Les cartes de densité de colonne combinent la robustesse des cartes d'extinction de la poussière dans l'infrarouge proche de 2MASS avec la résolution et la couverture des cartes d'émission de la poussière de Herschel et de Planck et constituent les cartes de densité de colonne de la plus haute gamme dynamique jamais construites pour l'ensemble du complexe d'Orion. Ci-dessous est présentée une carte de densité de colonne tirée de ces travaux, restreinte à la région "Main Area".

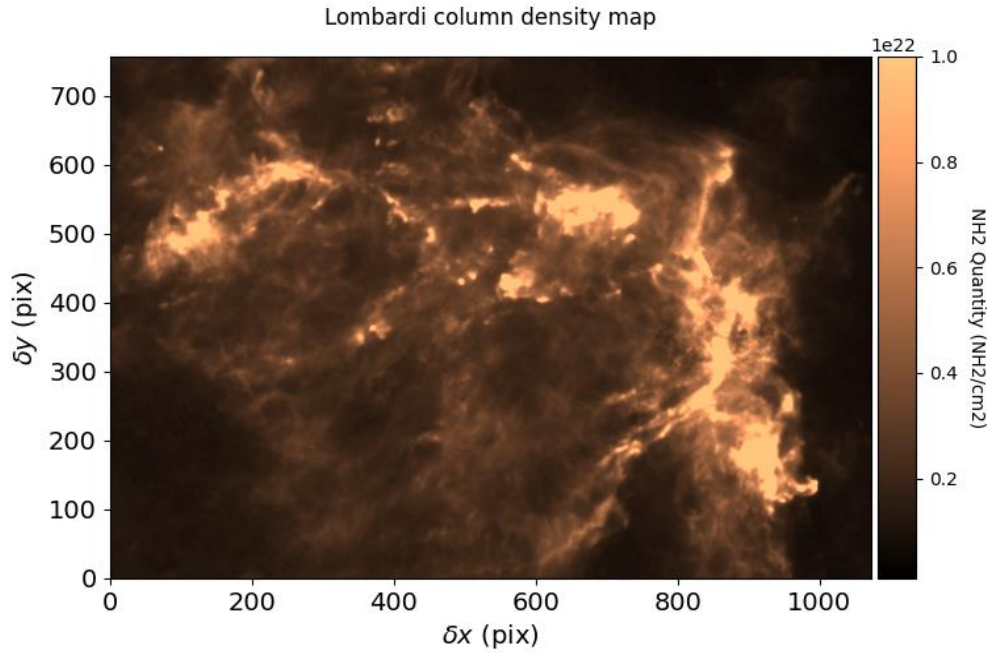


Figure 5 : Carte des colonnes de densité du gaz de Lombardi dans la région L1630S.

1.3. PLAN DE TRAVAIL

La première étape de ce travail a été de créer un catalogue d'objets jeunes dans la région d'Orion, regroupant des données utiles à l'étude de leurs positions et mouvements. La démarche est détaillée dans la partie suivante. Ensuite, il a fallu créer des outils de filtrage pour sélectionner les objets adéquats au sein du catalogue. Grâce à cela, nous avons pu comparer les données de nos objets jeunes avec celles des cartes présentées plus tôt, à savoir les cartes de vitesses radiales moyennes de Gaudel et Nishimura, ainsi que la carte de colonne de densité de Lombardi. Nous avons aussi mis l'accent sur l'aspect qualitatif de l'étude en permettant de représenter les YSO graphiquement, que ce soit en 2D, par superposition avec les cartes ou non, ou même en 3D pour encore mieux appréhender la structure du nuage et le comportement de ces objets. Une motivation majeure à travers ce projet a aussi été de pouvoir laisser à disposition des outils flexibles et réutilisables par le groupe après la fin de mon stage. Ainsi, il y a de nombreuses façons de créer le catalogue en question et de filtrer les différentes données, toutes décrites en détail dans la documentation technique. Dans la suite de ce rapport nous présenterons et justifierons la manière avec laquelle nous avons procédé pour tenter d'obtenir un maximum d'informations des jeunes objets stellaires dans le complexe d'Orion, et tout particulièrement dans L1630S.

2. CREATION DE CATALOGUE

2.1. OUTILS ET DONNÉES UTILISÉES

Le point de départ pour la création de notre catalogue de données est l'article de David Cornu présenté dans la première partie. Nous avons choisi de nous baser sur son catalogue puisqu'il propose une classification en objets jeunes récente dans notre région d'intérêt, le complexe d'Orion. Ce dernier nous permet dans un premier temps d'obtenir une liste de très bons candidats au titre de jeune objet stellaire dans Orion. Toutefois, nous devons le coupler à d'autres catalogues nous communiquant des informations sur leurs localisations et leurs mouvements. Nous nous sommes alors basés sur deux relevés présentés dans la première partie : Gaia EDR3 pour les données sur les parallaxes et les mouvements propres, ainsi que le catalogue de Kounkel, dérivant du catalogue APOGEE-2, pour les données sur les vitesses radiales et les extinctions. Ainsi, en croisant ces catalogues, il est possible d'obtenir une liste de jeunes objets stellaires ainsi que les données des différents paramètres d'intérêt. A noter que nous avons étudié un autre catalogue issu des relevés APOGEE-2, celui de Jonsson (cf article "*APOGEE-2 data from DR16*") utilisable pour la création du catalogue mais que nous n'avons pas retenu, jugeant les données de Kounkel plus adéquates.

2.2. FONCTIONNEMENT

Une fois le choix de nos catalogues de départ fait, nous devons choisir l'aspect du catalogue final ainsi que définir la sélection des YSOs. Nous avons choisi d'y placer un maximum d'objets, quitte à ce que leurs données soient incomplètes, demandant un filtrage postérieur à la création du catalogue. C'est pourquoi il regroupe non seulement les objets trouvés dans les trois catalogues de départ, et donc avec des données dites « complètes » mais aussi ceux retrouvés dans au moins un des deux catalogues complémentaires à celui de Cornu, avec donc cette fois des données « partielles ». En particulier, nous avons dans ce catalogue des objets issus du catalogue de Cornu pour lesquels nous connaissons les données de Gaia (parallaxes et mouvements propres) mais pas celles de Kounkel (vitesses radiales et extinction) et inversement. Ces objets viennent compléter ceux pour lesquels nous avons toutes les informations. Le catalogue de David Cornu donne pour chaque objet une probabilité qu'il soit un YSO de classe I, un YSO de classe II ou un autre objet ainsi que la classification associée sur laquelle nous nous sommes basés. Ensuite, comme décrit précédemment, nous avons sélectionné les paramètres d'intérêt dans chaque catalogue et réduit la localisation à la région d'Orion. Comme le catalogue de Kounkel se base sur des relevés réalisés antérieurement à la sortie du catalogue de Gaia EDR3, certains objets ont vu leurs données être modifiées. En effet, certains potentiels YSOs ont subi des changements de nomenclature alors que d'autres corps se sont entre-temps avérés être des objets doubles. Ainsi nous avons décidé d'écarter ces étoiles, car même si nous avons pu les séparer et leur attribuer les données correspondantes, elles peuvent ne pas être assez justes et fausser les analyses. Ensuite, nous avons pu mettre en place un code Python pour réaliser une partie du travail, complété par l'outil Xmatch du CDS. L'aspect technique de la réalisation du catalogue ainsi que les différentes possibilités sont décrits en détail dans la documentation technique.

2.3. FILTRAGE DES DONNÉES

Une fois le catalogue obtenu, il faut pouvoir gérer les données incomplètes et filtrer les objets selon certains de leurs paramètres. Nous avons mis en place trois types de filtrage : un filtrage selon la distance à laquelle se trouve l'objet, selon sa vitesse radiale et un double filtrage selon ses mouvements propres, un premier selon l'ascension droite et un second selon la déclinaison. Pour chacun d'entre eux, le principe est le même. Des bornes inférieures et supérieures et donc un intervalle sont définies pour ne laisser intervenir que les objets dont les données sont dans ce dernier. A cela, il est possible d'ajouter un filtrage sur l'erreur de mesure du paramètre en définissant une erreur limite acceptée. Ainsi, le filtrage exclura tous les objets dont l'erreur sera supérieure à

cette erreur limite. A noter qu'à chaque fois qu'un filtrage est effectué sur un paramètre en particulier, tous les objets n'ayant pas de donnée sur ce paramètre sont automatiquement écartés. Ces filtres permettent notamment de rejeter les données aberrantes mais aussi de restreindre le domaine d'étude, ce qui peut être pratique pour certains affichages. A ce stade, les données sont prêtes pour la réalisation des différentes études comparatives.

3. COMPARAISON DES VITESSES RADIALES

3.1. TRAVAUX DE NISHIMURA

3.1.1. CATALOGUE ET FILTRAGE

Afin de comparer les vitesses radiales des YSOs avec les données obtenues par spectroscopie (^{13}CO), nous avons dû créer un catalogue adéquat à partir du catalogue de candidats de David Cornu. Aucun seuil de probabilité n'a été fixé, ni aucune restriction de localisation au-delà de la région d'Orion complète. Toutefois, des filtrages selon la distance probable et la vitesse radiale ont dû être réalisés pour écarter les potentielles données parasites. Nous avons uniquement conservé les candidats situés entre 300 et 500 pc avec une précision d'au plus 50 pc, assurant que la majeure partie des objets soit bien située dans le complexe d'Orion. Aussi, certaines données de vitesses radiales paraissent aberrantes et s'écartent du comportement général qui ressort des données, c'est pourquoi nous avons éliminé les objets présentant des vitesses en dessous de 1 km/s, au-dessus de 16 km/s, et avec une erreur supérieure à 0.5 km/s. Le graphique suivant présentant les données brutes appuie ce dernier choix.

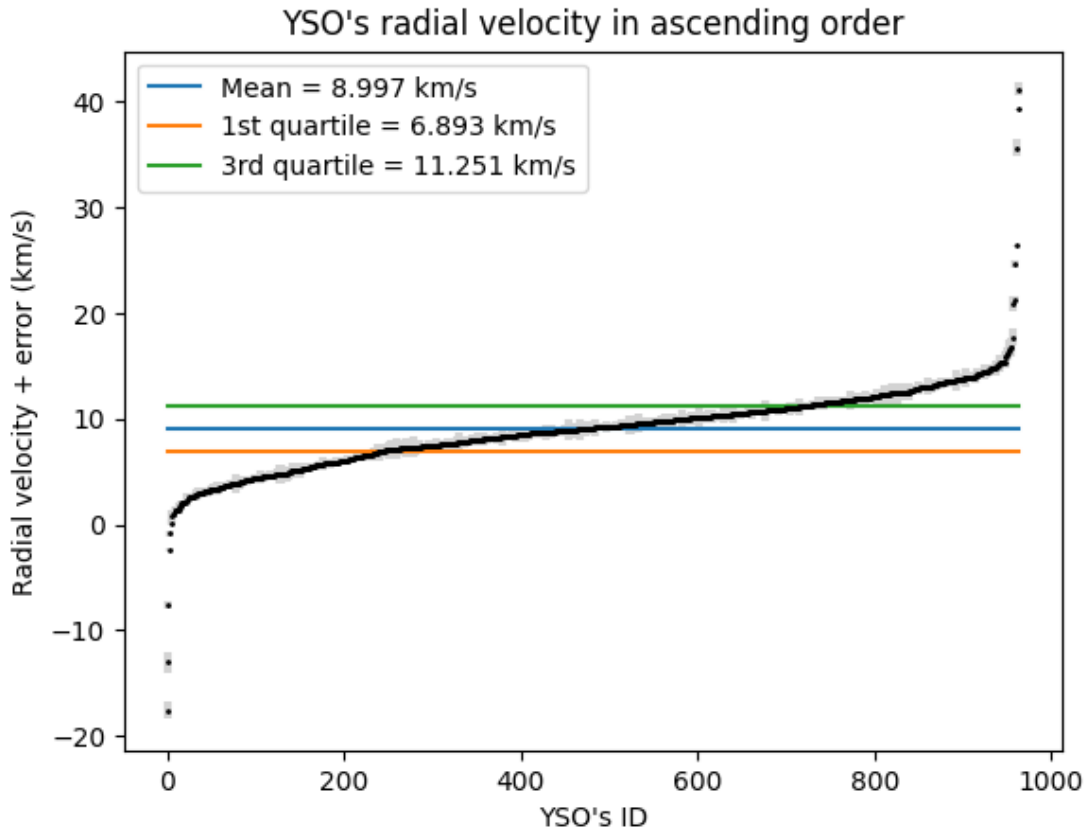
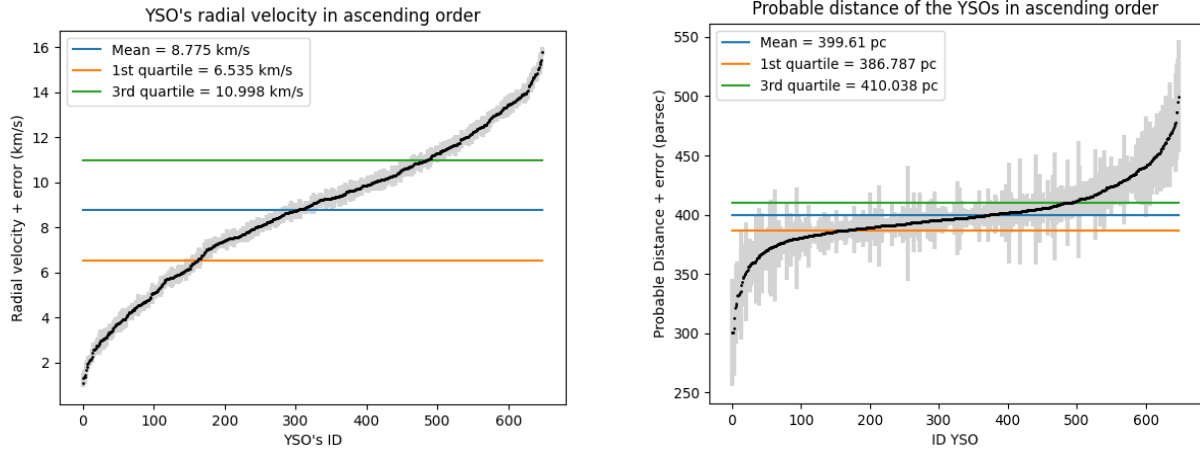


Figure 6 : Distribution croissante avec les erreurs associées des vitesses radiales de l'ensemble des objets de notre catalogue brut dans le complexe d'Orion complet.

Voici ci-dessous la distribution en vitesse radiale et distance probable des 637 objets retenus après filtrage, qui constituent notre catalogue de travail pour cette partie de l'étude.



Figures 7 et 8 : Distributions croissantes des vitesses radiales et des distances probables avec les erreurs associées de l'ensemble des objets de notre catalogue filtré dans le complexe d'Orion complet.

3.1.2. ETUDE QUALITATIVE

En reprenant les travaux de l'article de Nishimura et en particulier la carte des vitesses radiales moyennes d'Orion du ^{13}CO , nous avons pu les développer en y ajoutant les YSOs que nous venons de filtrer, en faisant figurer leurs vitesses radiales selon la même échelle de couleur que celle appliquée à la carte.

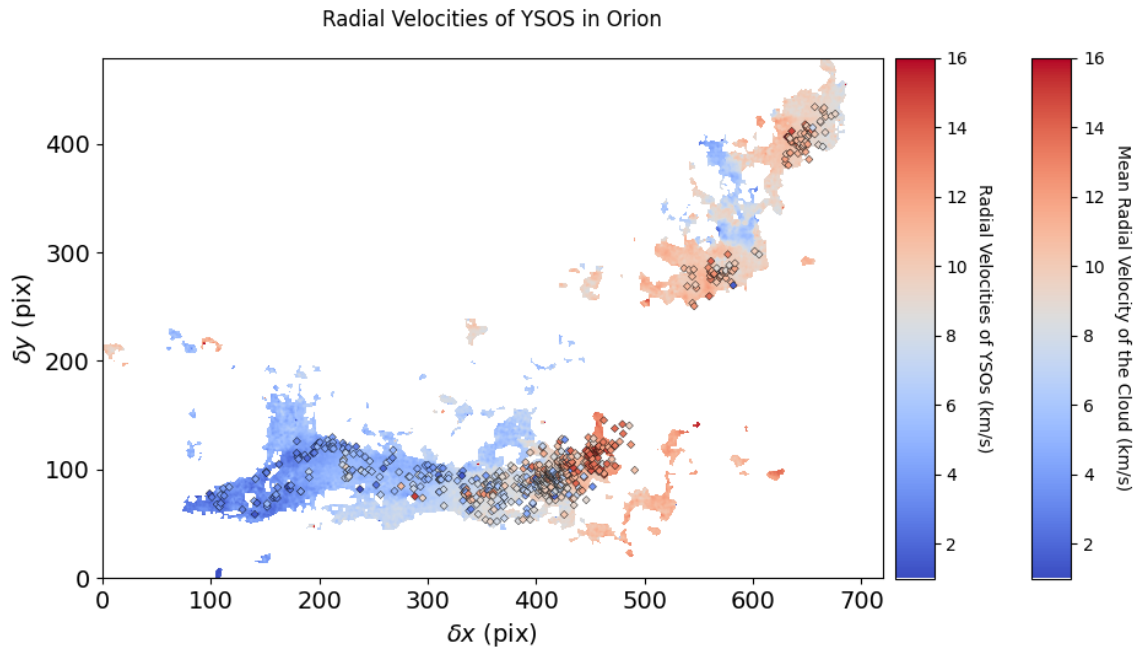
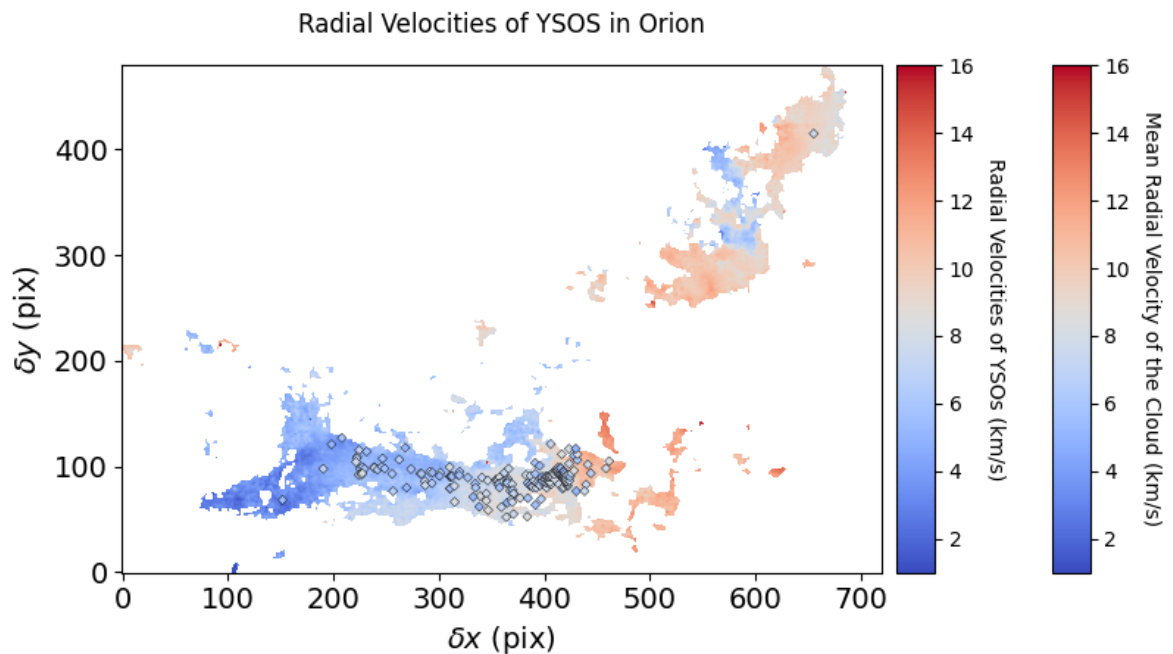
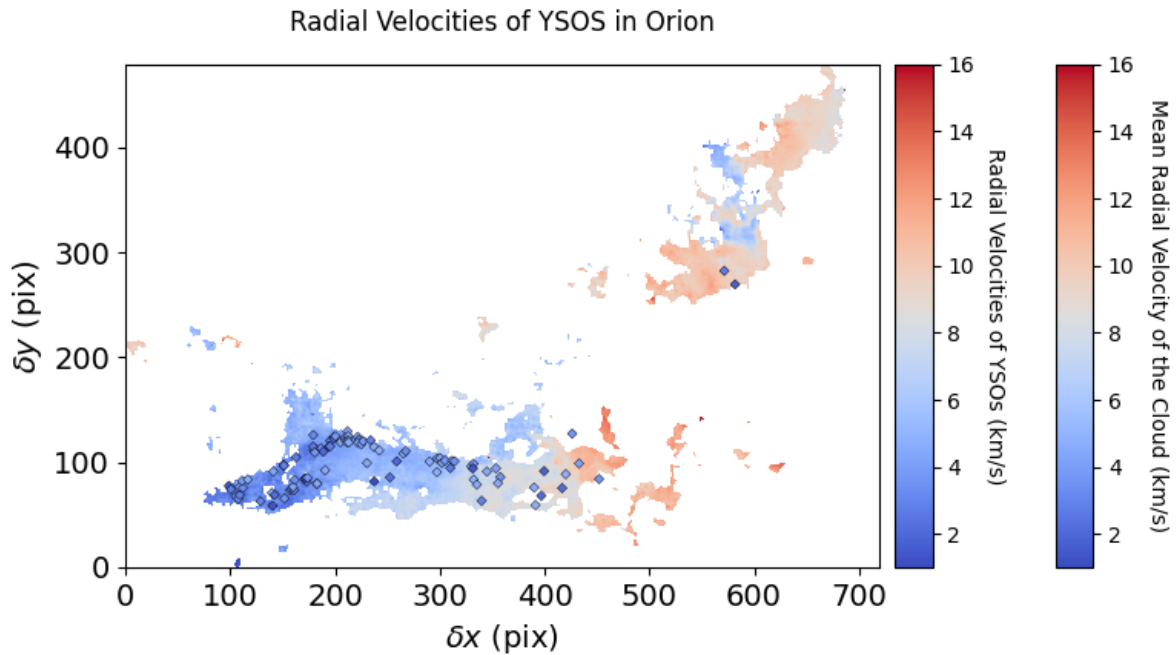
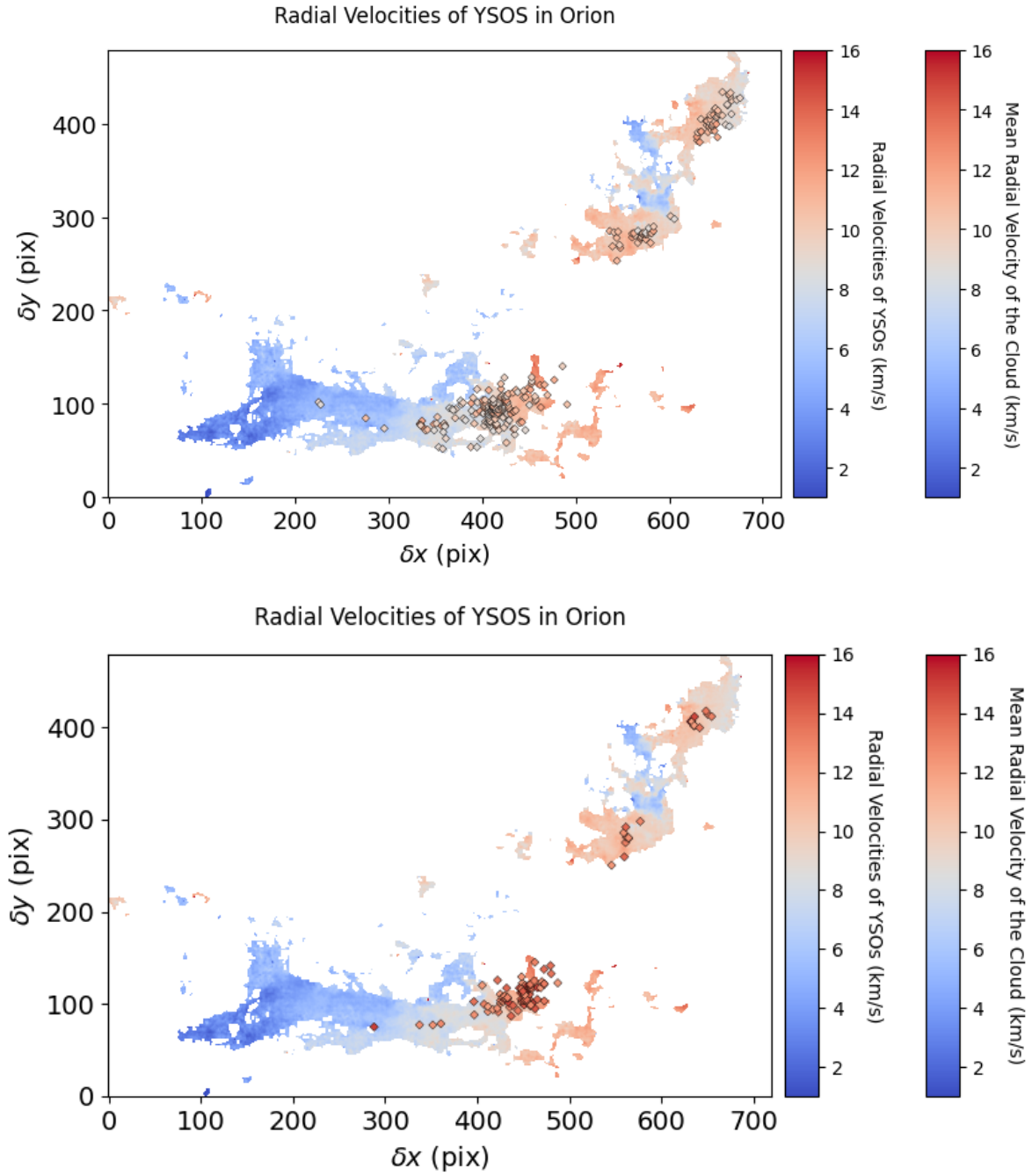


Figure 9 : Carte des vitesses radiales de Nishimura sur laquelle sont disposés les YSO filtrés issus de notre catalogue, selon le même code couleur.

Visuellement, et comme attendu, nous pouvons observer une forte corrélation entre les vitesses radiales des YSOs et celles du gaz. Nous proposons ci-dessous d'observer plus en détail la position des YSOs de notre catalogue de travail en fonction de différents intervalles de vitesses radiales. Les cartes suivantes contiennent les YSOs de notre catalogue de travail ayant respectivement des vitesses radiales entre 1 km/s et 5 km/s, entre 5 km/s et 8.5 km/s, entre 8.5 km/s et 12 km/s, entre 12 km/s et 16 km/s. La corrélation est d'autant plus frappante. Toutefois, une minorité de YSOs semble posséder une vitesse radiale ne correspondant pas du tout à celle de la carte.

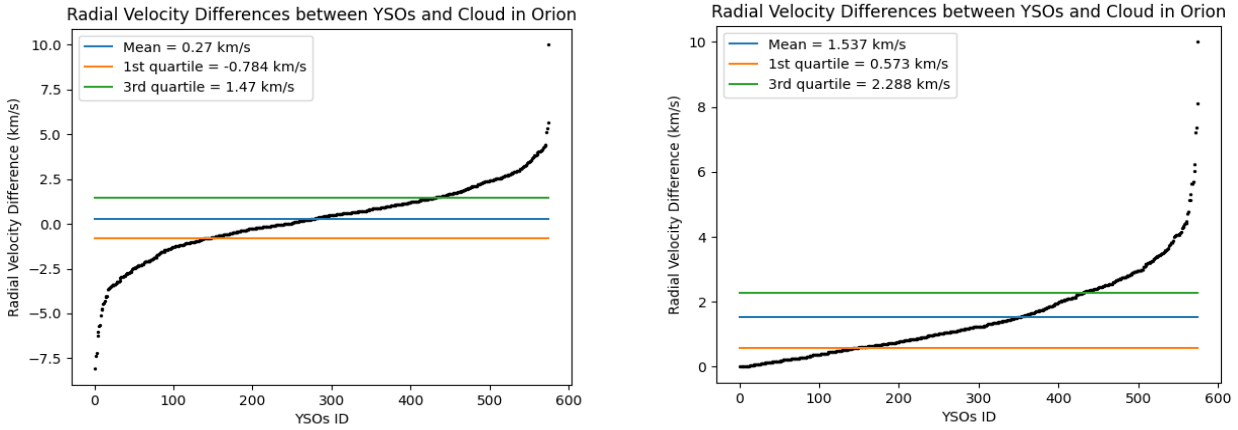




Figures 10 à 13 : Figure 9 séparée en plusieurs intervalles de vitesses radiales. Respectivement entre 1 km/s et 5 km/s, entre 5 km/s et 8.5 km/s, entre 8.5 km/s et 12 km/s, entre 12 km/s et 16 km/s

3.1.3. ETUDE QUANTITATIVE

A partir de cette carte et des données associées, nous pouvons comparer les vitesses radiales des YSOs à celles du gaz au même point. Pour cela, nous avons écarté les objets situés sur un pixel “blanc” puis tracé dans l’ordre croissant la distribution des différences obtenues. Des 648 objets du catalogue de travail, 575 ont permis d’obtenir une donnée de comparaison.



Figures 14 et 15 : Distributions croissantes des différences de vitesses (en valeur absolue à droite) dans le complexe d’Orion complet.

Les résultats semblent dans un premier temps cohérents avec les cartes obtenues précédemment. Nous avons ensuite étudié spatialement ces différences pour potentiellement observer des régions présentant des différences plus importantes que d’autres. Nous avons alors tracé sur la même carte les mêmes objets, avec cette fois un code couleur représentant leurs différences de vitesse radiale avec le gaz.

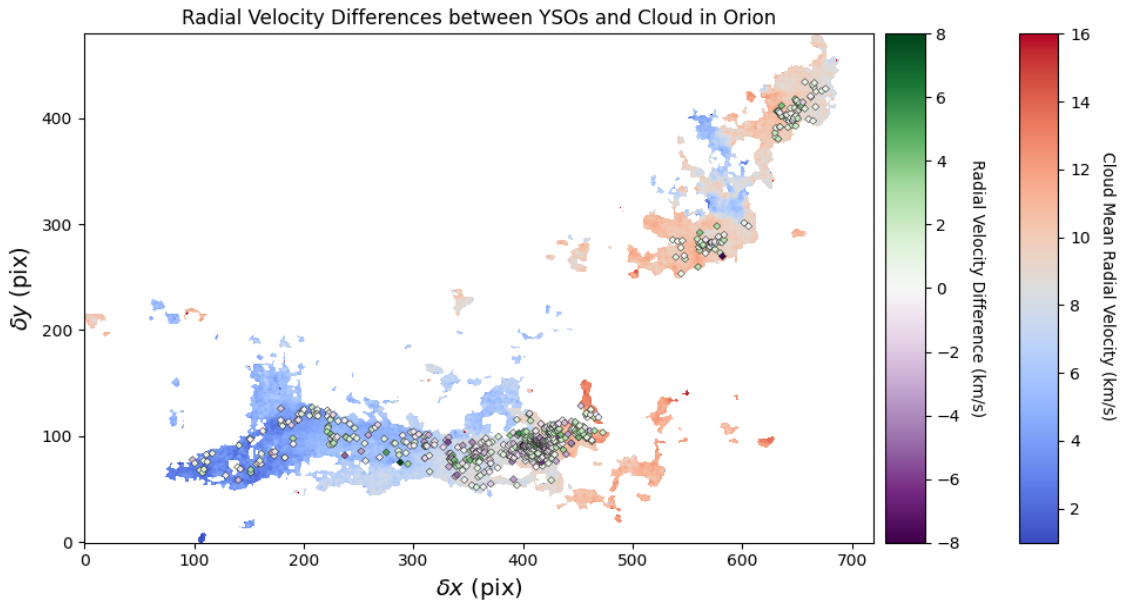
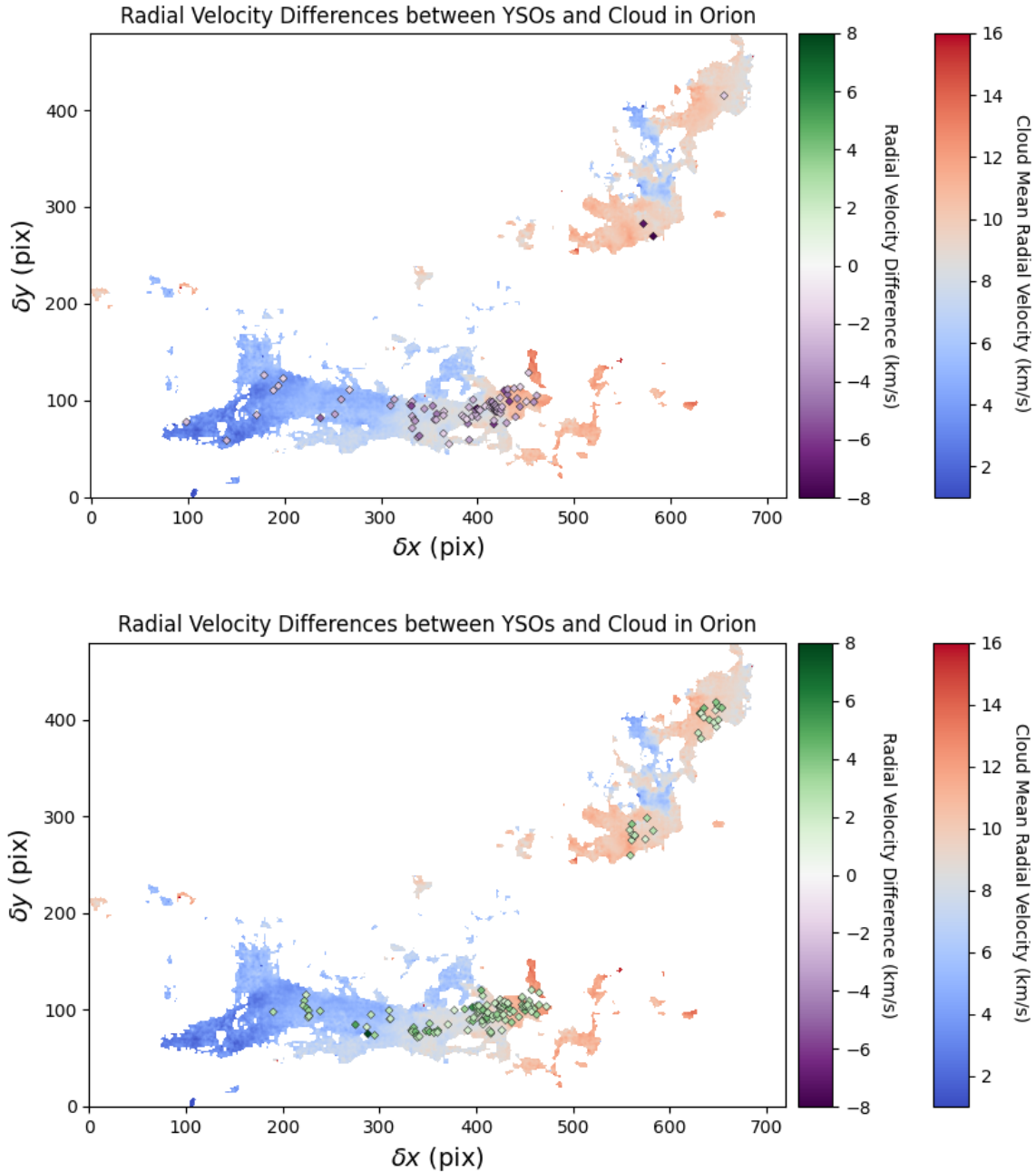


Figure 16 : Carte des vitesses radiales de Nishimura sur laquelle sont disposés les YSOs avec un code couleur représentant la différence entre la vitesse radiale de l’objet et celle du gaz au même point.

Plusieurs observations intéressantes peuvent être faites sur cette carte. Premièrement, les YSOs situés dans la zone de faibles vitesses radiales du gaz dans le nuage d'Orion A semblent présenter des différences relativement faibles au vue de leurs couleurs très proches du blanc. Par ailleurs, dans les régions de fortes vitesses au sein du nuage d'Orion-B, la plupart des objets présentent des différences positivement élevées. Aussi, la majeure partie des points violets, présentant donc des différences négatives importantes, semble très localisée dans le nuage d'Orion A. Pour tenter de se convaincre un peu plus de ces observations nous affichons ci-dessous uniquement les objets présentant respectivement des différences en vitesse radiale inférieures à 1.5 km/s et supérieures à 1.5 km/s.



Figures 17 et 18 : Figure 16 pour laquelle uniquement les YSO présentant une différence respectivement de moins de 1.5 km/s et de plus de 1.5 km/s ont été sélectionné.

Alors que les objets dans Orion-B sont bien conformes aux observations, nous pouvons voir des similitudes entre les deux cartes dans le nuage d'Orion-A. En effet, une région de fortes différences se dégage, qu'elles soient négatives ou positives. Pour approfondir, nous réalisons des cartes semblables avec cette fois-ci des différences en valeurs absolues.

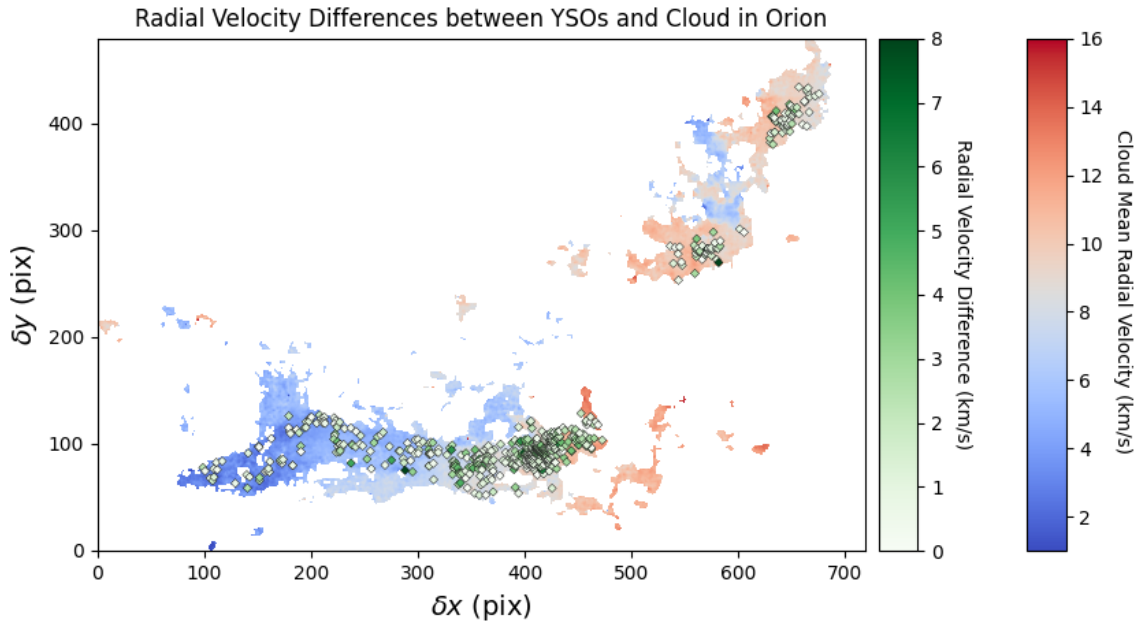
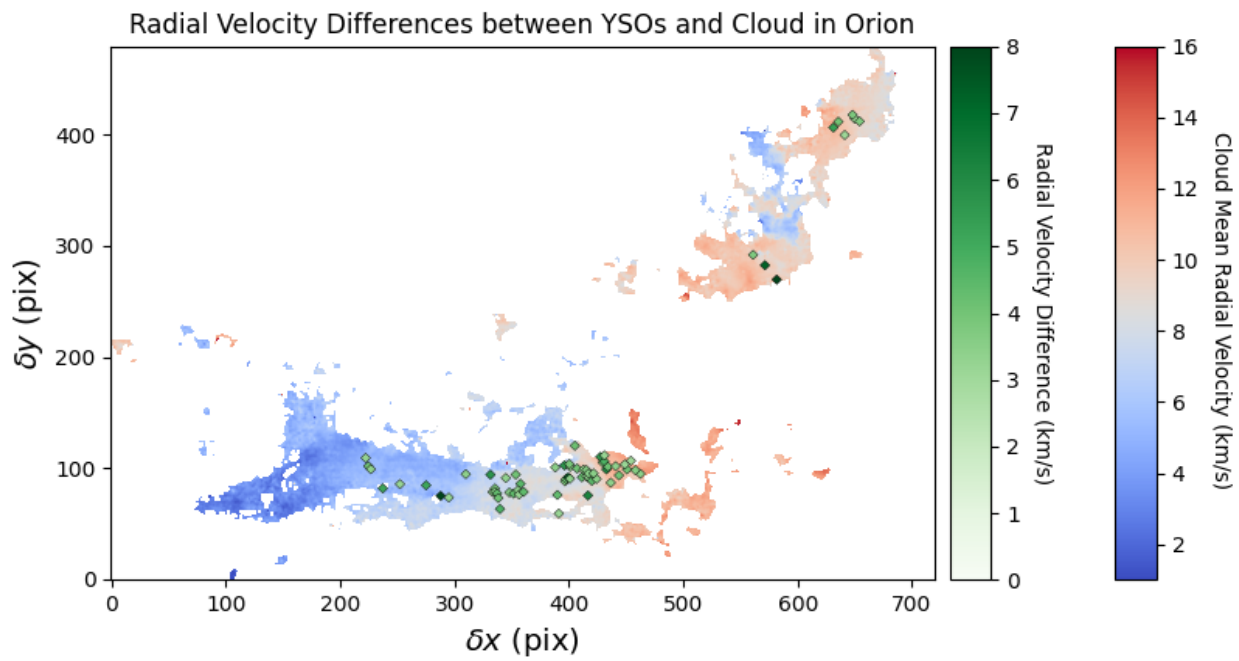
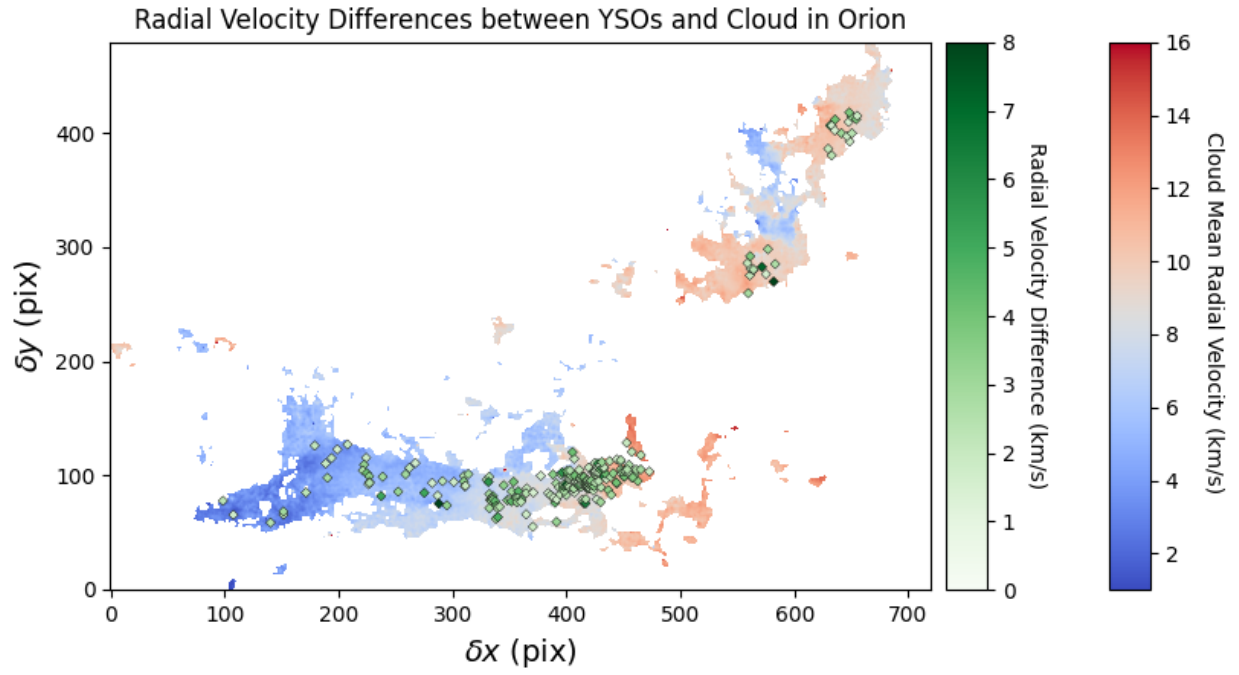


Figure 19 : Carte des vitesses radiales de Nishimura sur laquelle sont disposés les YSOs avec un code couleur représentant la différence en valeur absolue entre la vitesse radiale de l'objet et celle du gaz au même point.

Les zones de points verts sont bien visibles, représentant de fortes différences. Nous filtrons les YSOs pour afficher seulement les objets présentant des différences respectivement supérieures à 1.5 km/s et 3.0 km/s. Nous voyons à nouveau que les fortes différences sont très localisées, en particulier dans le nuage d'Orion A. Ces observations laissent alors penser que les régions de gaz à hautes vitesses radiales abritent des YSOs présentant des vitesses relativement différentes, contrairement aux zones de gaz de plus faible vitesse radiale. Pour s'en assurer nous affichons le nuage de points des différences des objets en fonction des vitesses du gaz au même point.



Figures 20 et 21 : Figure 19 pour laquelle uniquement les YSO présentant une différence en valeur absolue respectivement de plus de 1.5 km/s et de plus de 3 km/s ont été sélectionnés.

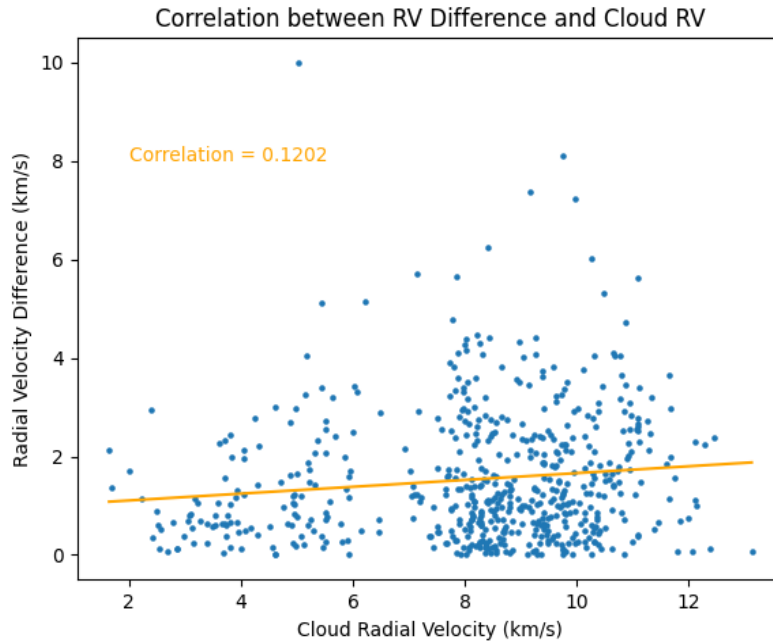


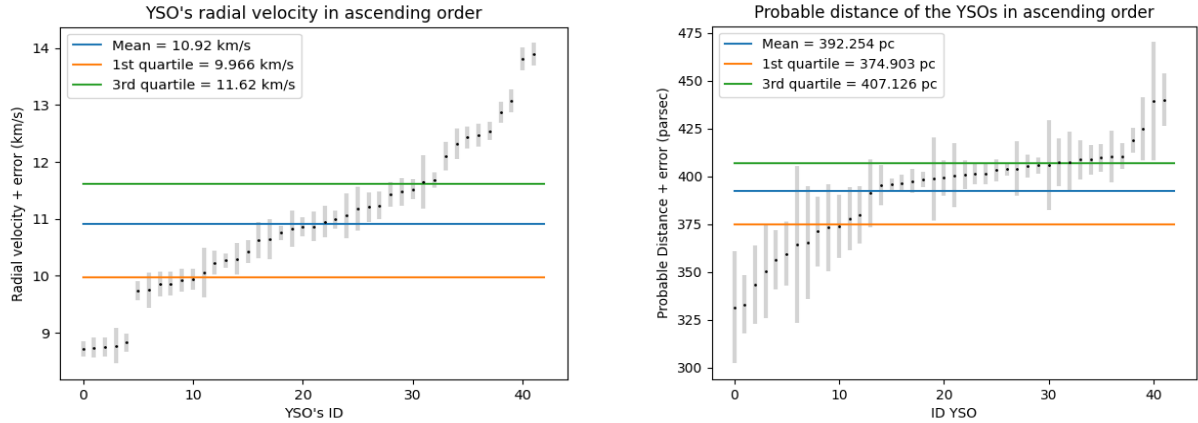
Figure 22 : Graphique de corrélation entre la vitesse radiale moyenne du nuage et la différence de vitesse observée au même point.

Il semble y avoir une légère corrélation, le coefficient étant de 0.12 environ, mais elle n'est pas significative. Toutefois nous pouvons conclure qu'il y a peu de grosses différences de vitesses radiales dans les régions de gaz à faible vitesse. Il faut aussi prendre en compte que certaines de ces observations sont potentiellement dues à des biais statistiques. En effet, la distribution des différences est aussi liée à la densité de présence des YSOs sur la carte.

3.2. L1630S

3.2.1. CATALOGUE ET FILTRAGES

Nous avons ensuite réalisé un travail similaire sur les cartes de Mathilde Gaudel, dans une région restreinte d'Orion-B. A nouveau ici, aucun seuil de probabilité n'a été fixé mais une restriction à la région de la carte. Nous gardons le même filtrage sur la distance : candidats situés entre 300 et 500 pc avec une précision d'au plus 50 pc et avons fixé une vitesse minimale de 7 km/s et une vitesse maximale de 16 km/s pour écarter les données aberrantes. Les trois objets présentant des vitesses radiales entre 0 et 5 km/s appartiennent très probablement à une autre couche de vitesse que la "Main". Voici ci-dessous les distributions en distance et vitesse radiale des objets restants après filtrage.



Figures 23 et 24 : Distributions croissantes des vitesses radiales et des distances probables avec les erreurs associées de l'ensemble des objets de notre catalogue filtré dans la région L1630S.

3.2.2. ETUDE QUALITATIVE

Nous avons pu ajouter à la carte des vitesses moyennes de la région “Main” de Mathilde Gaudel nos YSOs candidats restants.

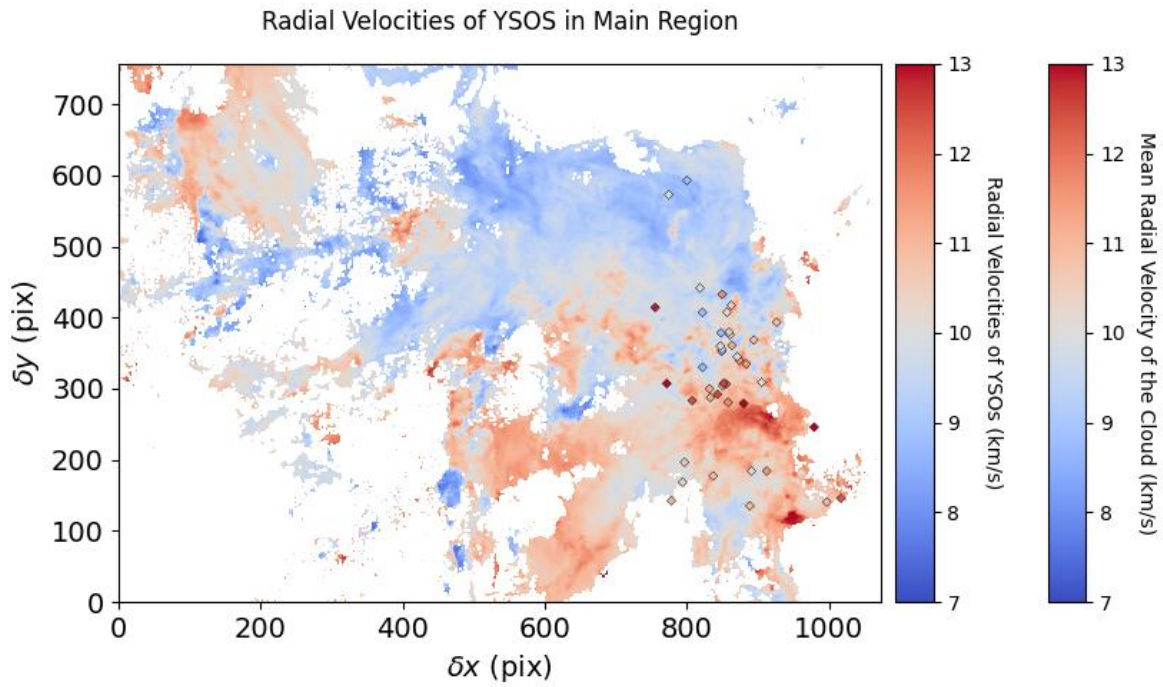


Figure 25 : Carte des vitesses radiales de la Main Region de Gaudel sur laquelle sont disposés les YSO filtrés issus de notre catalogue, selon le même code couleur.

Puisque nos données ne couvrent qu'une petite partie de la carte, nous travaillerons désormais sur des cartes zoomées.

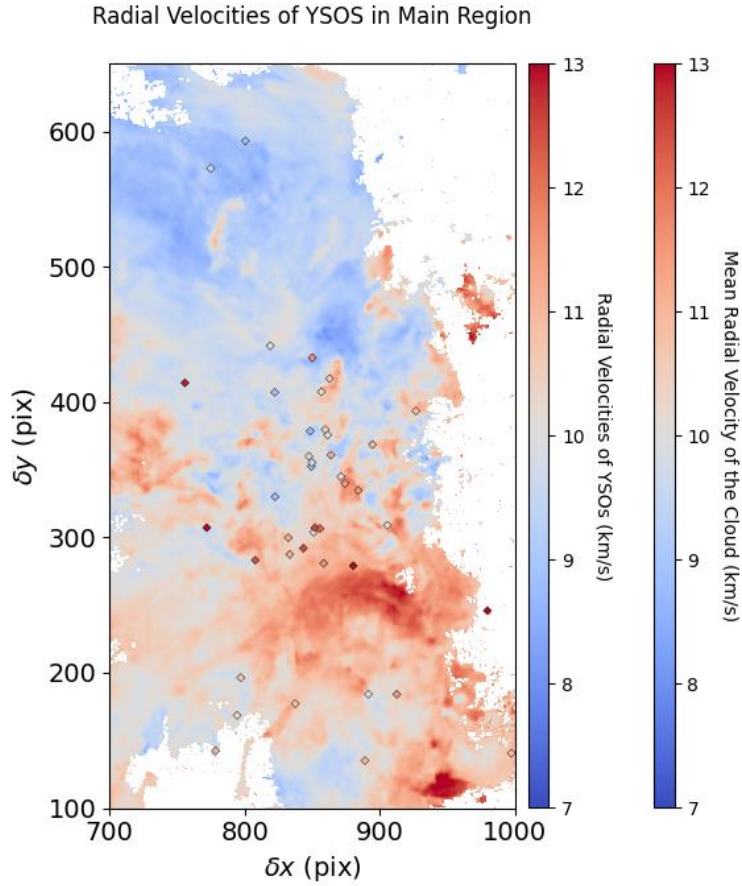
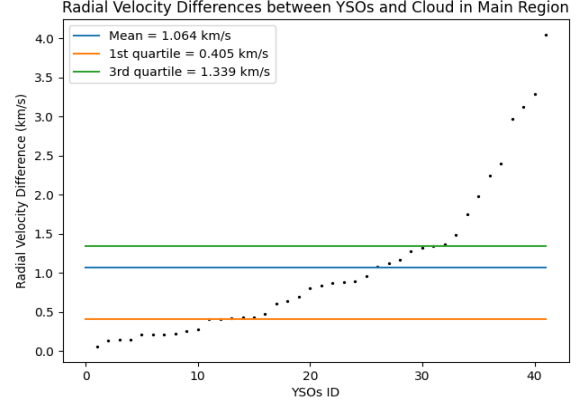
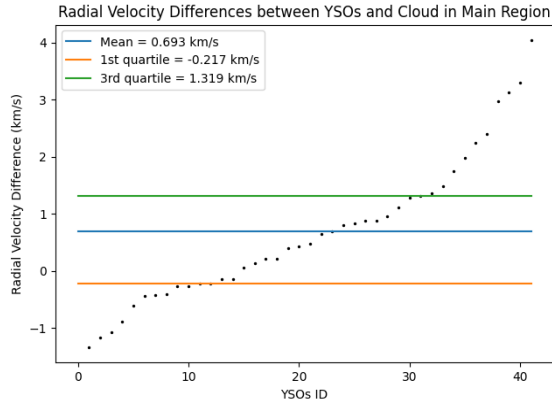


Figure 26 : Carte zoomée des vitesses radiales de la Main Region de Gaudel sur laquelle sont disposés les YSO filtrés issus de notre catalogue, selon le même code couleur.

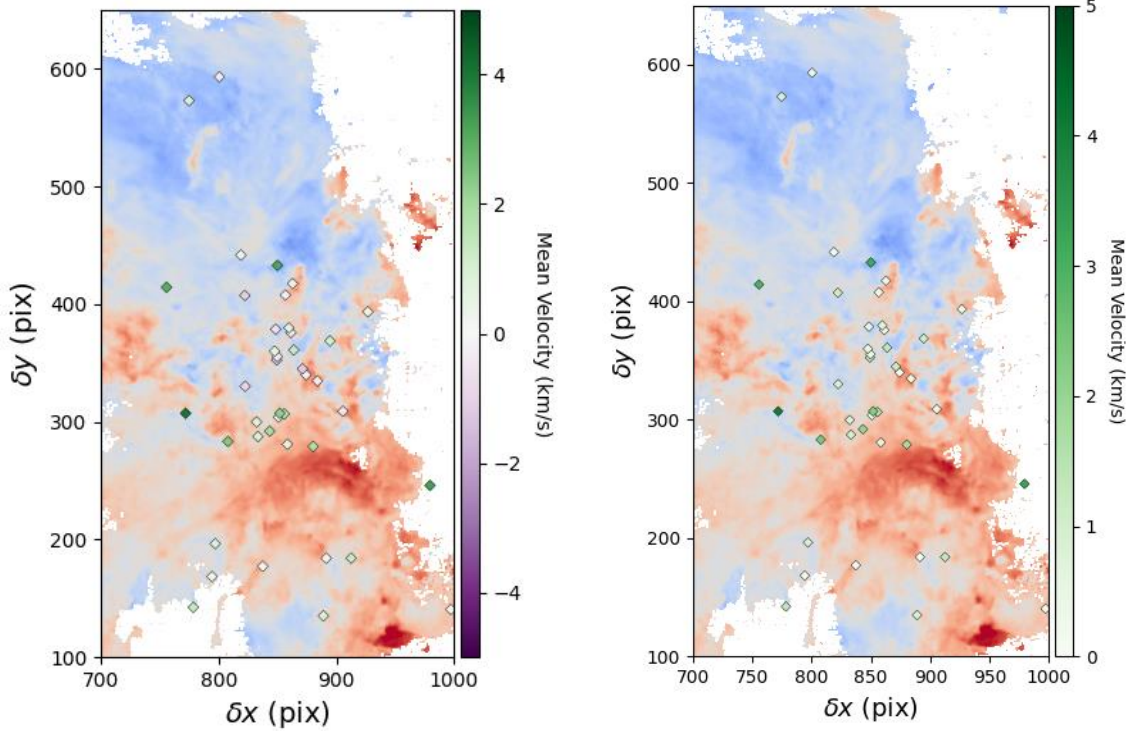
3.2.3. ETUDE QUANTITATIVE

A partir de cette carte et des données associées, nous pouvons comparer les vitesses radiales des YSOs à celles du gaz au même point. Pour cela, nous avons à nouveau écarté les objets situés sur un pixel “blanc” puis tracé dans l’ordre croissant la distribution des différences obtenues. Des 42 objets du catalogue de travail, 41 ont permis d’obtenir une donnée de comparaison.



Figures 27 et 28 : Distributions croissantes des différences de vitesses (en valeur absolue à droite) dans le complexe d'Orion complet.

Nous pouvons voir que ce sont des résultats cohérents avec ce que nous avons vu précédemment, les différences semblent être globalement positives dans le nuage d'Orion-B, avec notamment une différence moyenne de 0.693 km/s.



Figures 29 et 30 : Carte des vitesses radiales de Nishimura sur laquelle sont disposés les YSOs avec un code couleur représentant la différence entre la vitesse radiale de l'objet et celle du gaz au même point.

Ici le coefficient de corrélation est de 0.195. Le comportement observé dans Orion-B seulement est très proche de celui des objets dans l'ensemble d'Orion, étudié précédemment.

4. ETUDE DES STRUCTURES

4.1. ETUDE DES MOUVEMENTS PROPRES

La première étape pour mieux appréhender le comportement des YSOs dans le complexe d'Orion a été d'étudier leurs mouvements propres. En reprenant la carte de Nishimura, puis en y ajoutant comme précédemment les objets de notre catalogue, cette fois sous la forme d'un nuage de vecteurs dans le but de faire apparaître leurs mouvements propres, nous pouvons facilement observer les comportements cinématiques locaux de ces objets. Nous avons gardé les mêmes filtrages sur les distances et vitesses radiales et avons ajouté un filtrage sur l'erreur des données de mouvements propres, acceptant une erreur relative maximale de 0.5, ce qui permet de limiter les erreurs d'orientation des flèches tout en gardant un nombre conséquent d'objets. Dans la région L1630N, les YSOs présentent des mouvements propres très semblables globalement dirigés vers le sud de la carte. En particulier, une partie semble se mouvoir vers le Sud-Est tandis qu'une autre vers le Sud-Ouest. Au contraire, dans la région L1630S, les orientations des flèches sont beaucoup plus distribuées et il est difficile de dégager un mouvement général. Il semble toutefois y avoir un mouvement courbé vers l'Est au sud de la zone. Dans Orion A, le mouvement global est très clair malgré la grande quantité d'objets : ils se dirigent le long de la région vers l'Ouest.

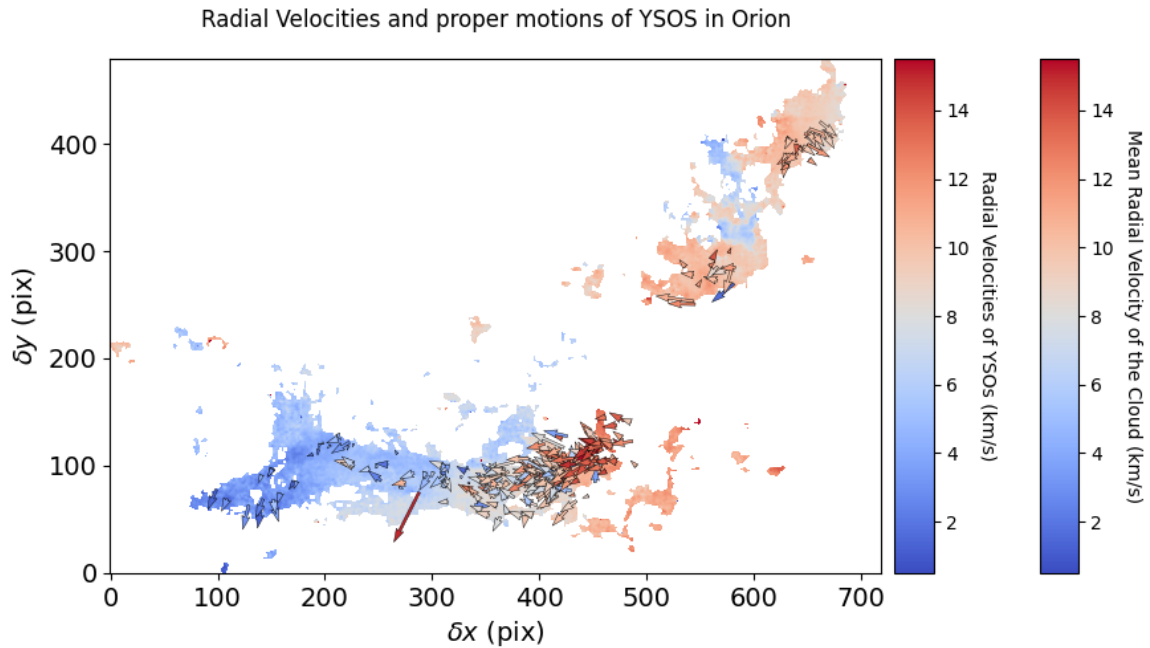
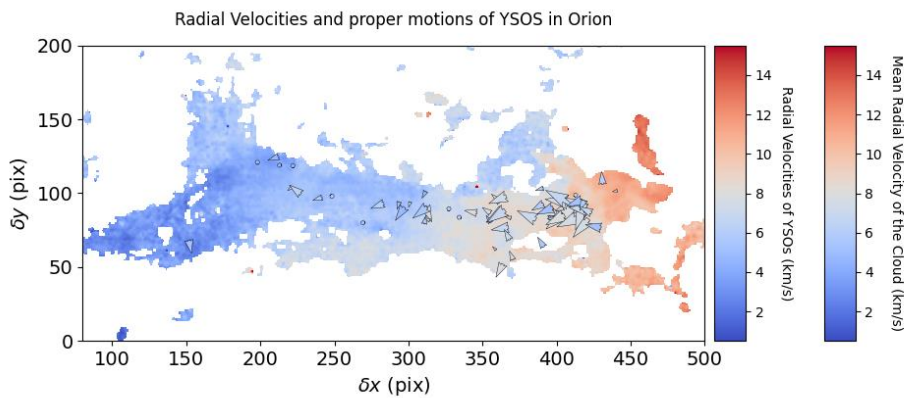
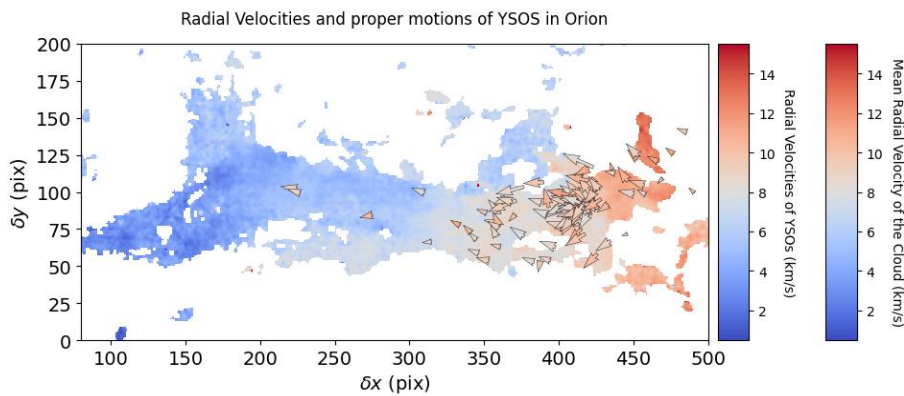
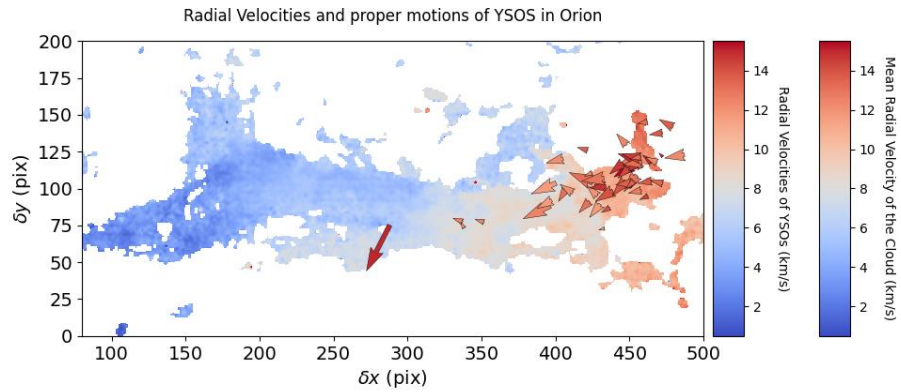
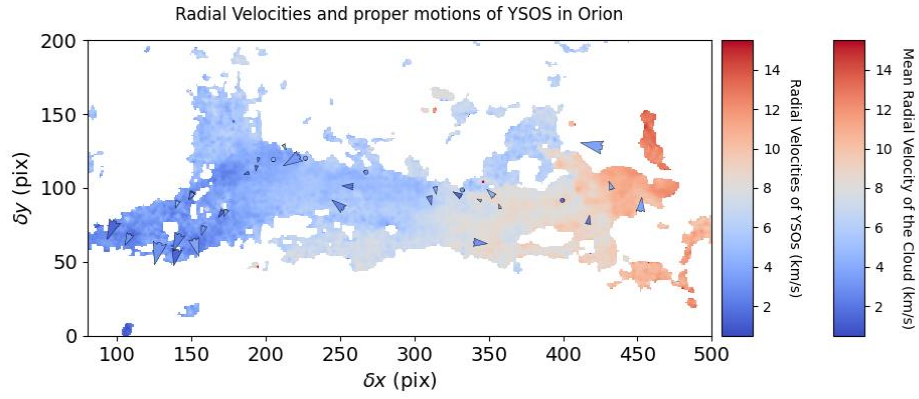


Figure 31 : Carte des vitesses radiales de Nishimura sur laquelle sont disposés les YSO filtrés issus de notre catalogue, selon le même code couleur. Les flèches représentent les mouvements propres des objets : l'orientation des flèches représente leur orientation par rapport au nuage et la longueur de la flèche est caractéristique de l'intensité.

Pour observer plus en détail les comportements des objets dans la région d'Orion A, nous avons zoomé et séparé l'affichage des YSOs en plusieurs intervalles de vitesses radiales (respectivement entre 1 km/s et 5 km/s, entre 5 km/s et 8.5 km/s, entre 8.5 km/s et 12 km/s, entre 12 km/s et 16 km/s). Ces cartes permettent de suivre les mouvements des objets dans Orion A.





Figures 32 à 35 : Figure 30 séparée en plusieurs intervalles de vitesses radiales. Respectivement entre 1 km/s et 5 km/s, entre 5 km/s et 8.5 km/s, entre 8.5km/s et 12 km/s, entre 12 km/s et 16 km/s

Nous avons ensuite réalisé le même travail sur les cartes de la région Main d'Orion-B. Ici, nous avons décidé d'alléger le filtrage avec une tolérance de 100 pc sur l'erreur en distance et de 1 km/s sur les vitesses radiales, pour pouvoir observer un nombre suffisant d'objets. Pour les mêmes raisons, nous n'avons pas filtré les données de mouvements propres dans un premier temps et à nouveau conservé les bornes usuelles en distance et vitesse pour la région main : 300-500 pc et 7-16 km/s.

Radial Velocities and proper motions of YSOS in Main Region

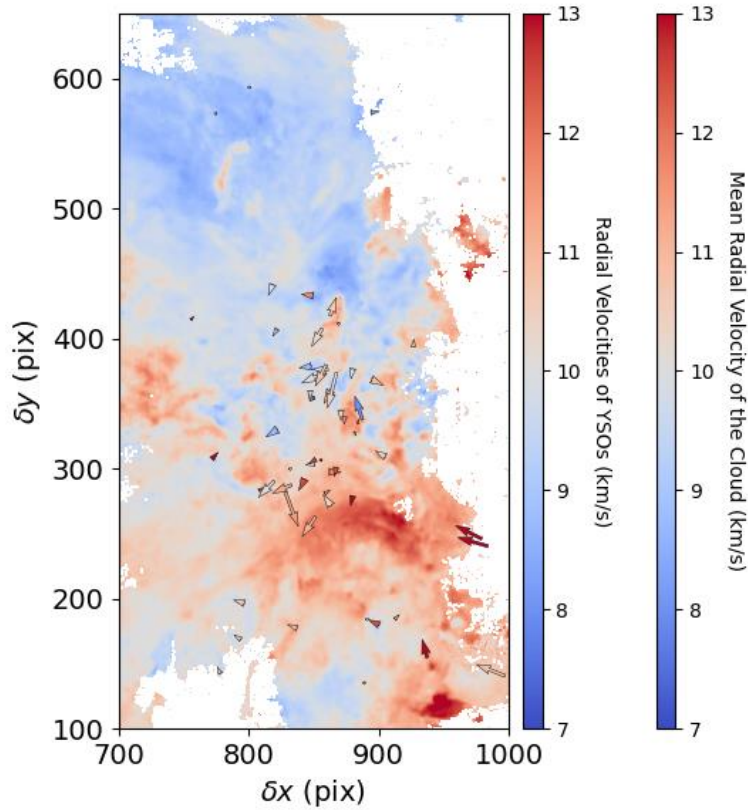


Figure 36 : Carte zoomée des vitesses radiales et mouvements propres de la Main Region de Gaudel sur laquelle sont disposés les YSO filtrés issus de notre catalogue, selon le même code couleur.

Comme observé précédemment, le mouvement général de la région est relativement tumultueux au sein du complexe d'Orion. On peut constater un mouvement global de contraction pour les objets rapides (rouges) qui semblent se diriger vers la zone "centrale" de gaz à hautes vitesses. On peut remarquer des groupes d'objets proches ayant des comportements semblables, comme aux coordonnées (800, 200). On observe aussi des comportements très différents pour des objets proches aux coordonnées (870, 350). A titre indicatif, le graphique suivant présente les objets sous la même forme avec un filtrage plus restrictif : une erreur en distance de 50 pc, en vitesse radiale de 0.5 km/s et en mouvements propres, relative de 0.5. Il écarte plusieurs objets très utiles à la conjecture qualitative précédente, qui semble toutefois rester correcte.

Radial Velocities and proper motions of YSOs in Main Region

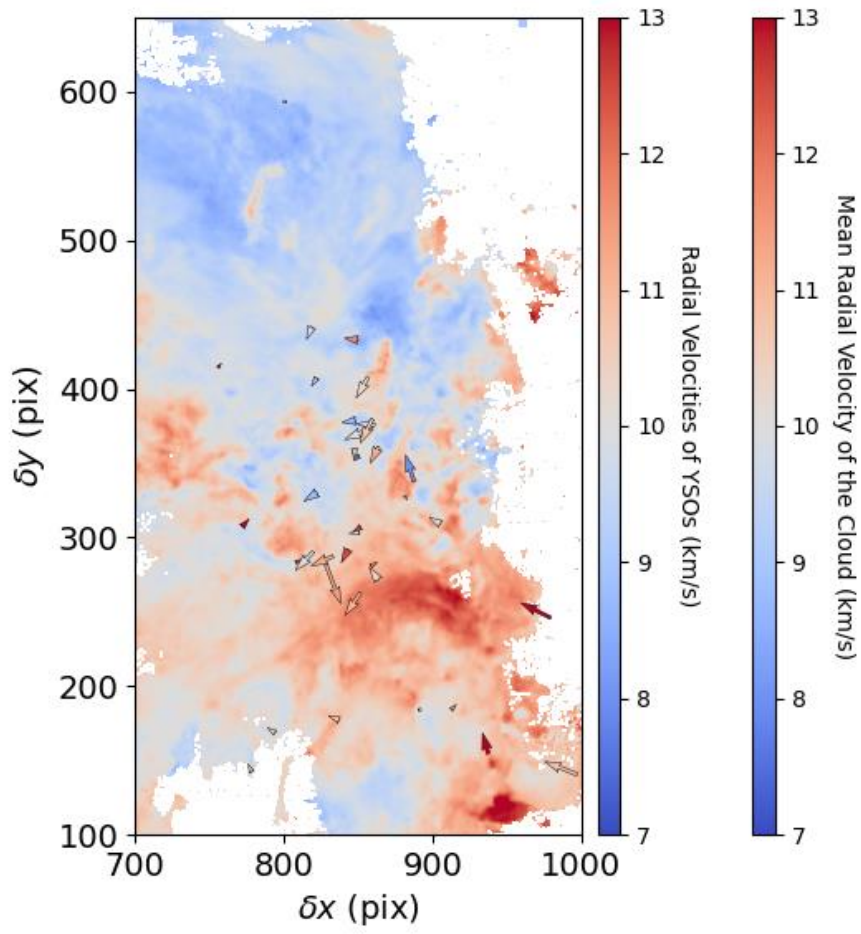
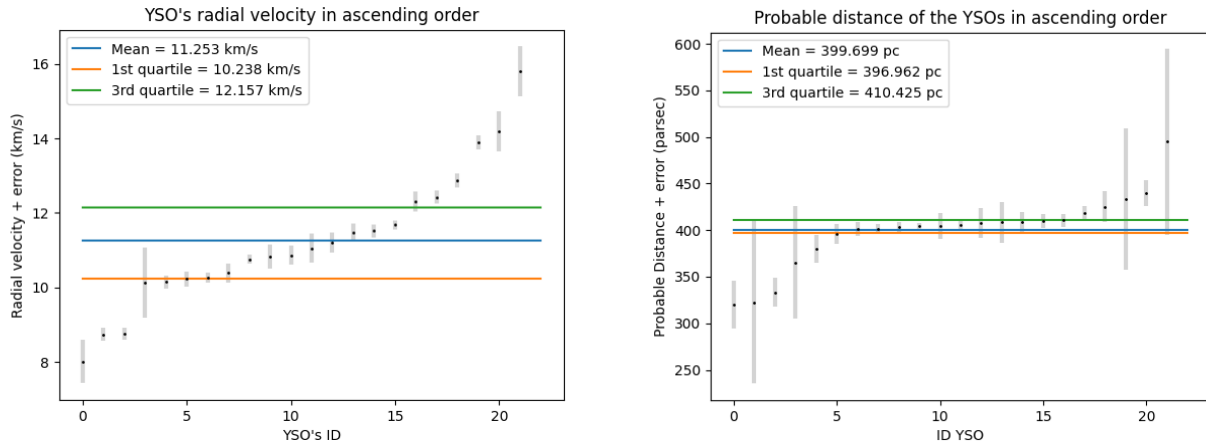


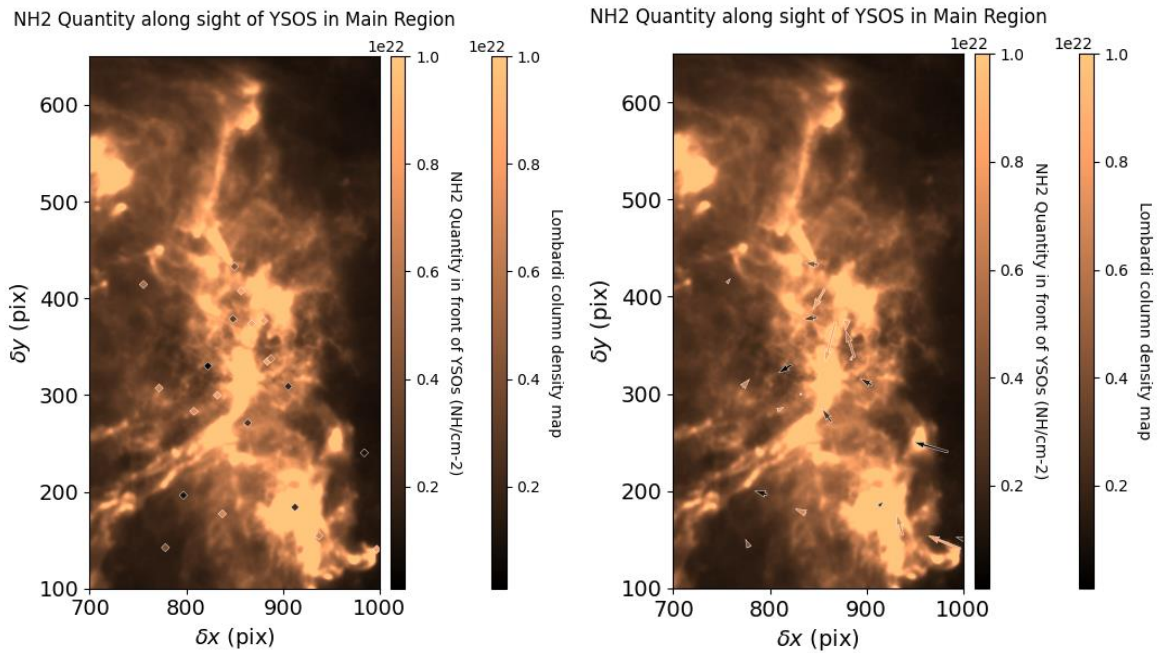
Figure 37 : Figure 36 avec les objets filtrés plus restrictivement, notamment sur les mouvements propres.

4.2. ETUDE DES EXTINCTIONS

Pour mieux comprendre la structure du nuage, nous avons tracé sur la carte de Lombardi certains des objets de notre catalogue. Comme le nombre d'objets pour lesquels nous possédons une donnée sur l'extinction est faible, nous avons effectué un filtrage moins restrictif que précédemment, en doublant l'erreur acceptée sur les distances. Ainsi, les objets affichés ci-dessous sont situés entre 300 et 500 pc avec une précision de 100 pc. Nous ne faisons aucun filtrage sur l'erreur de la vitesse radiale car ce n'est pas un paramètre d'intérêt ici. Nous ne filtrons pas non plus dans un premier temps les mouvements propres pour avoir un nombre de données suffisamment important pour pouvoir dégager un comportement général.



Figures 38 et 39 : Distributions croissantes des vitesses radiales et des distances probables avec les erreurs associées de l'ensemble des objets de notre catalogue filtré dans la région L1630S.



Figures 40 et 41 : Cartes de Lombardi zoomées sur lesquelles sont disposés les YSOs avec un code couleur représentant leur extinction.

La première carte présente uniquement les positions des objets ainsi que leur extinction tandis que les flèches dans la deuxième ajoutent une donnée sur leurs mouvements propres. Il est difficile de dégager des conclusions de ces deux graphiques puisque le nombre de données est limité. Toutefois, les YSOs sont, comme attendu, regroupés dans et autour des zones de fortes densités. Certains objets sont toutefois intéressants. Au centre de l'image, trois objets relativement éteints (couleur beige) semblent présenter un comportement similaire en se dirigeant dans la direction du filament de densité. Nous émettons une réserve sur cette dernière conclusion car les données de mouvements propres de deux de ces objets présentent des erreurs importantes. Les cartes suivantes présentent la carte de Lombardi avec d'autres caractéristiques des YSOs, respectivement les différences de vitesses radiales, les vitesses radiales et les distances probables.

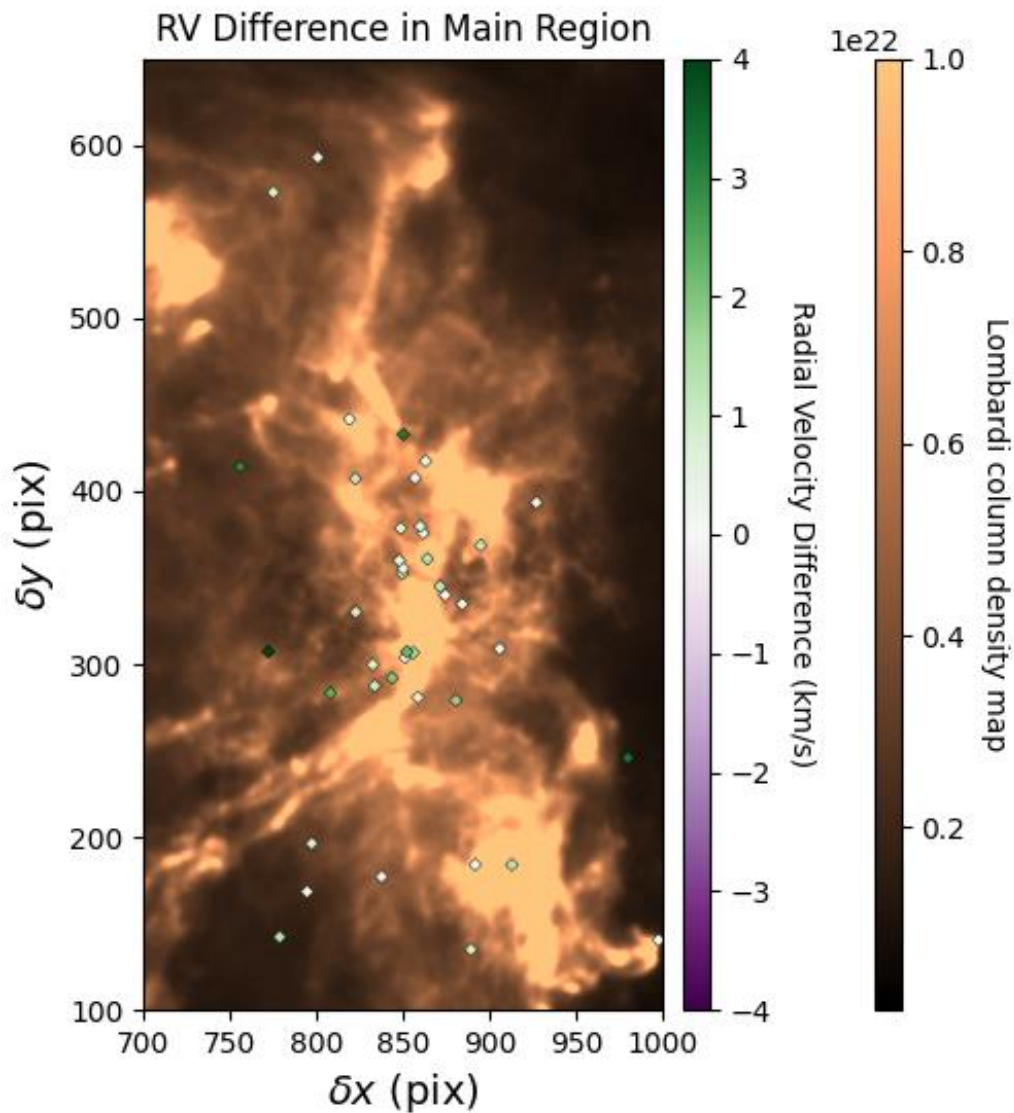
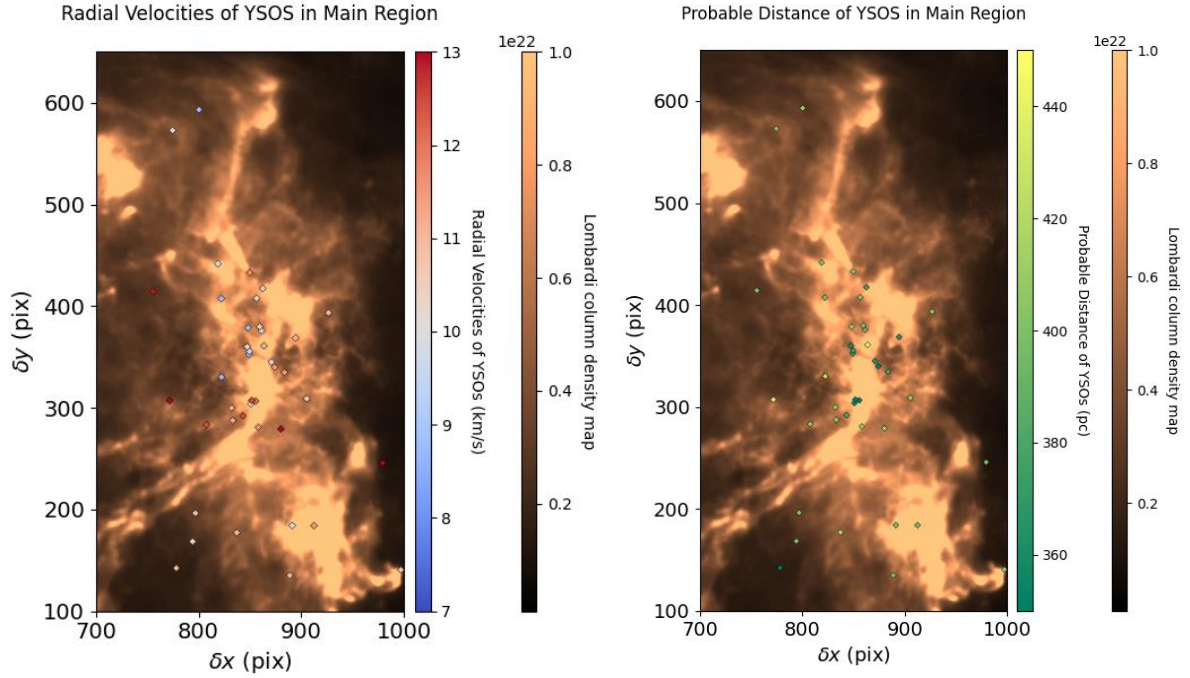


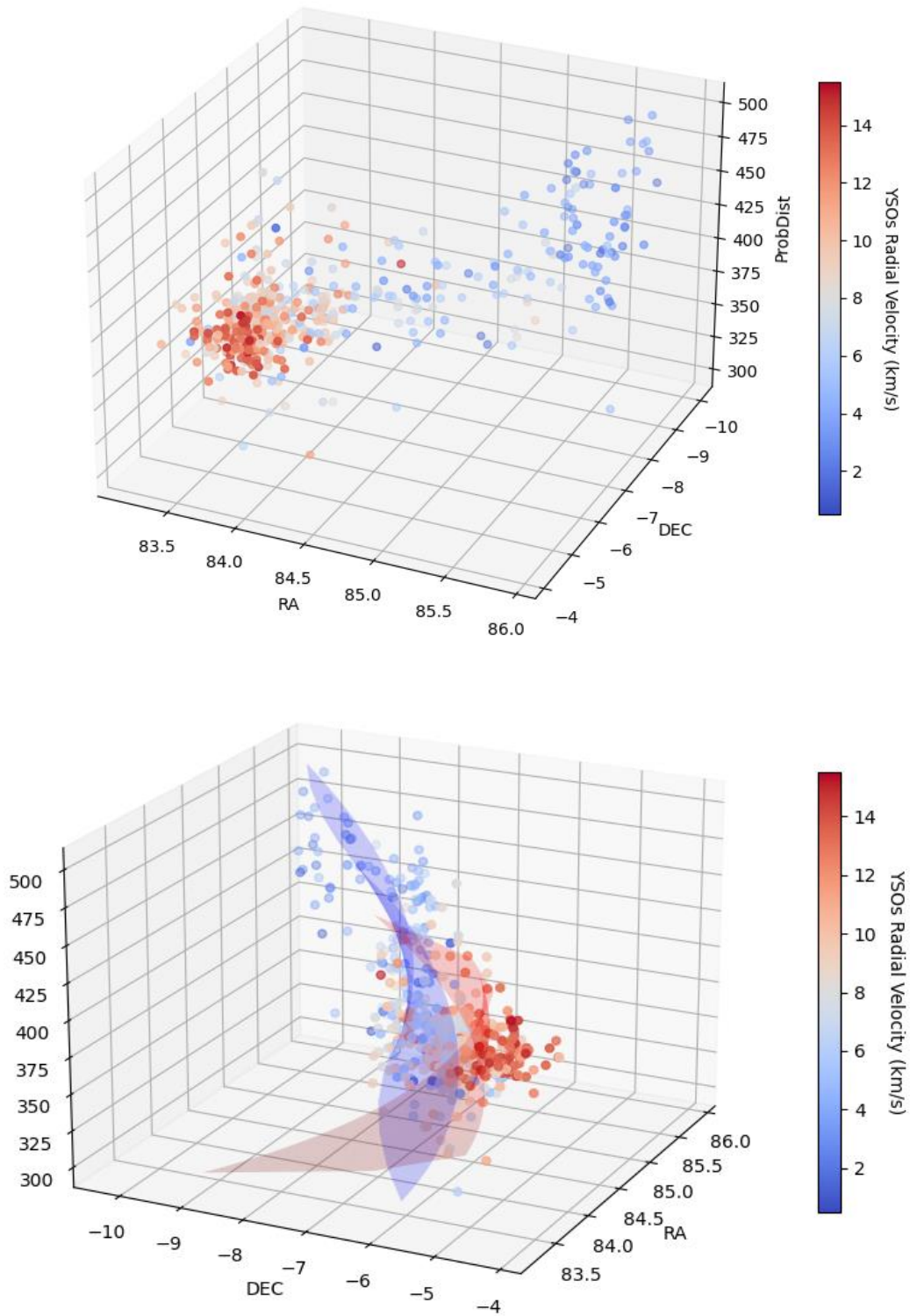
Figure 42 : Cartes de Lombardi zoomées sur lesquelles sont disposés les YSOs avec un code couleur représentant la différence de vitesses radiales entre le nuage et les objets au même point.



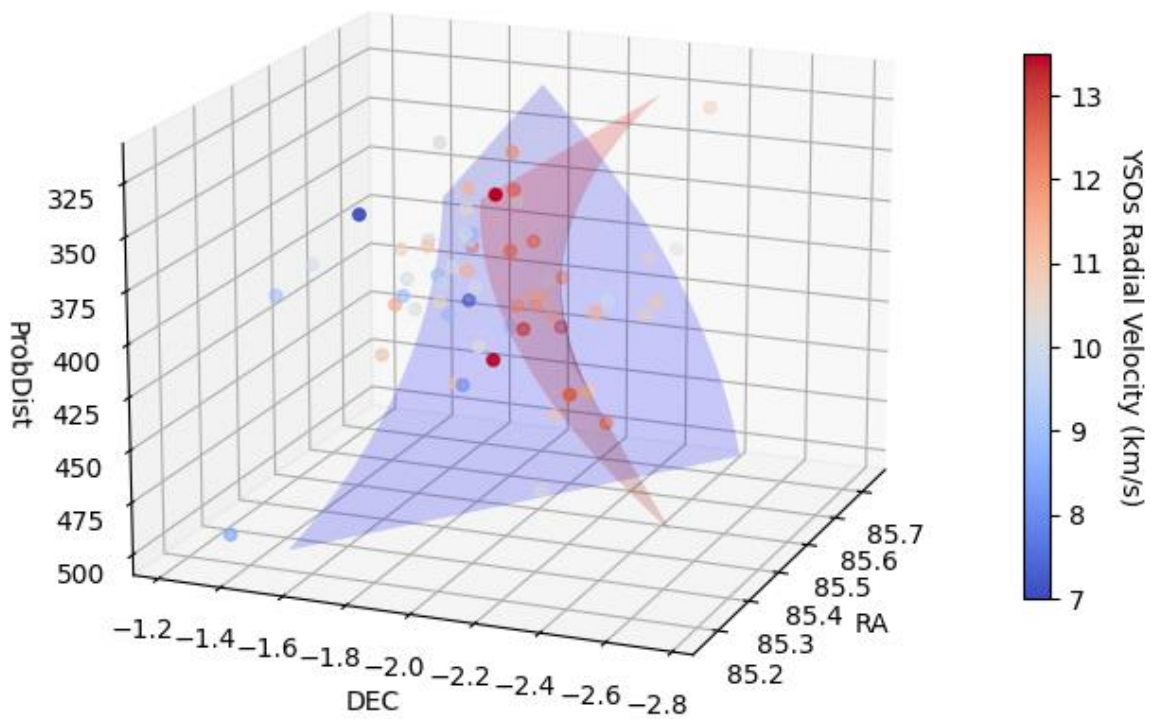
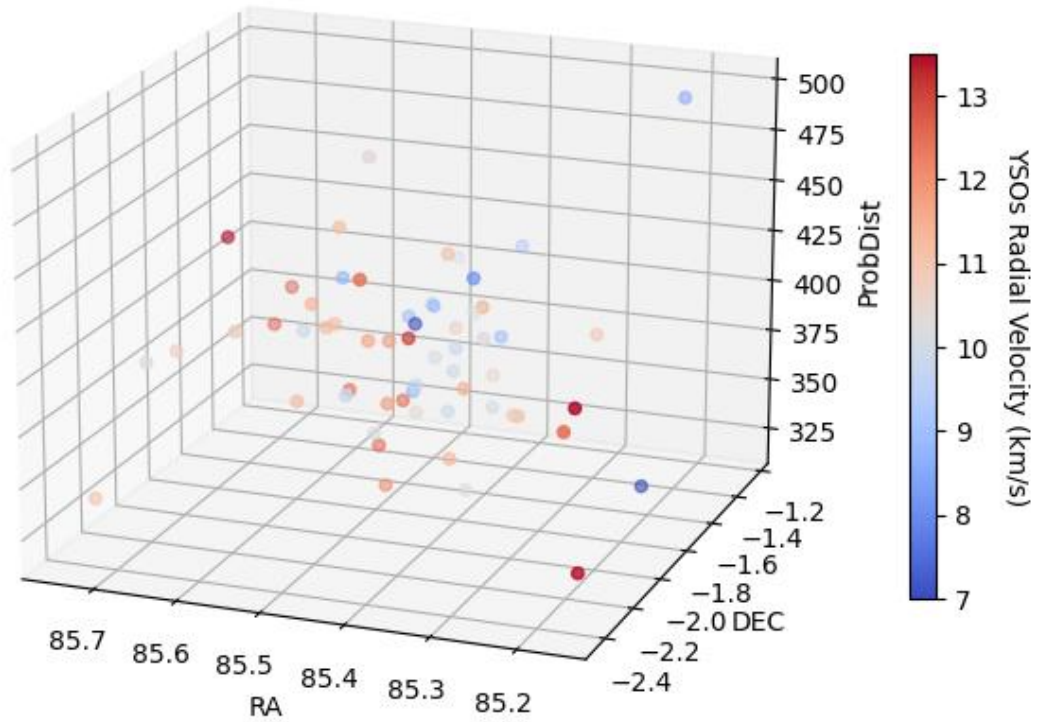
Figures 43 et 44 : Cartes de Lombardi zoomées sur lesquelles sont disposés les YSOs avec un code couleur représentant respectivement leurs vitesses radiales et leur distances probables.

4.3. ÉTUDE EN TROIS DIMENSIONS

Pour aller plus loin dans l'analyse structurale du nuage, nous avons aussi développé des graphiques en trois dimensions. L'affichage ne prend pas en compte la courbure de l'espace mais permet d'avoir une meilleure notion de la distance des objets. En effet, le troisième axe du graphique fait intervenir les distances probables des YSO pour mieux les situer dans l'espace. Nous affichons ci-dessous une capture d'écran de deux graphiques en trois dimensions de la région d'Orion A. Nous appliquons les filtres usuels précédemment utilisés. La première figure montre sous forme d'un nuage de points la répartition spatiale des YSOs avec un code couleur représentant la vitesse radiale de ces objets comme précédemment. La deuxième figure, sous un autre angle, ajoute deux plans moyens qui permettent de distinguer la répartition globale des objets plus "lents" de ceux plus rapides". Nous avons ensuite réalisé le même travail dans la région L1630S seulement.



Figures 45 et 46 : Représentation spatiale des YSOs dans Orion A avec le code couleur usuel pour les vitesses radiales. La deuxième figure fait intervenir deux plans moyens, un pour les objets « lents » (< 9 km/s) et un pour les objets rapides (> 11 km/s).



Figures 47 et 48 : Représentation spatiale des YSOs dans L1630S avec le code couleur usuel pour les vitesses radiales. La deuxième figure faut intervenir deux plans moyens, un pour les objets « lents » (< 11 km/s) et un pour les objets rapides (> 11 km/s).

Enfin, nous pouvons aussi réaliser des graphiques sous la forme de nuages de vecteurs, prenant en compte cette fois les mouvements propres des objets. Voici après filtrage, les différentes vitesses des objets obtenus. Pour chaque vitesse, la valeur moyenne de l'échantillon a été soustraite pour pouvoir mieux visualiser le mouvement au sein du nuage, c'est-à-dire des objets les uns par rapport aux autres. Nous affichons ensuite le nuage de vecteurs correspondant permettant de mieux analyser spatialement le comportement cinématique des YSOs.

YSO's velocities

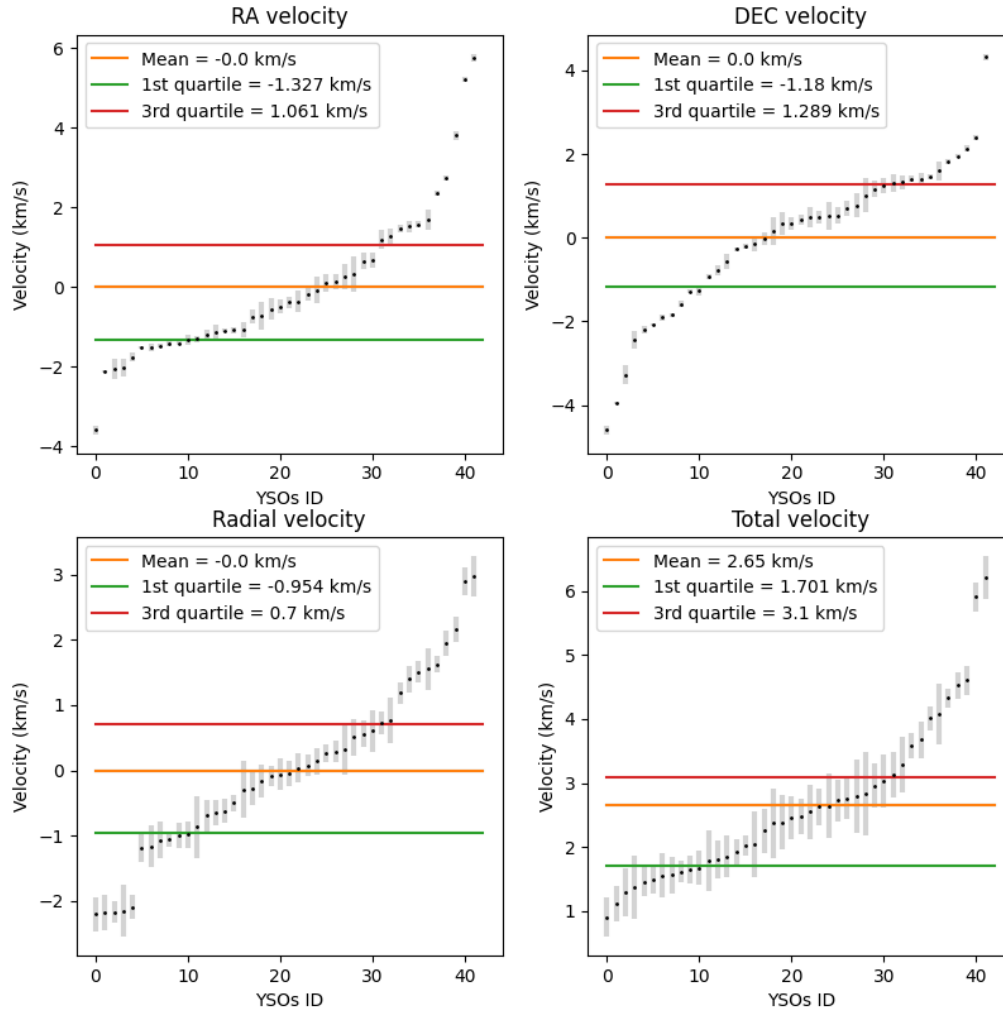


Figure 49 : Distributions croissantes des vitesses radiales, des vitesses propres selon l'ascension droite et la déclinaison et des vitesses totales, toutes relatives au mouvement moyen du nuage, avec les erreurs associées de l'ensemble des objets de notre catalogue filtré dans la région L1630S.

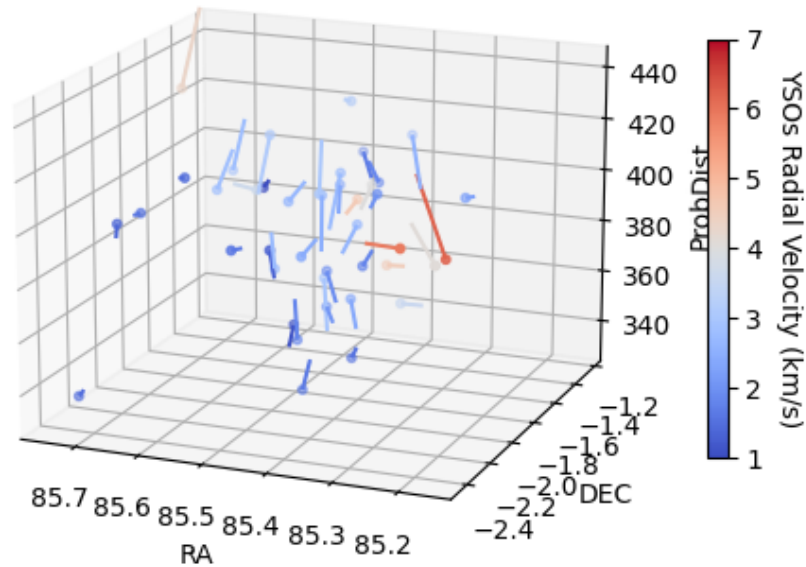


Figure 50 : Représentation spatiale des YSOs dans L1630S avec le code couleur usuel pour les vitesses radiales. Les flèches représentent les mouvements « totaux » des objets. L'orientation des flèches correspondent à leurs déplacements et la taille des flèches est représentative de leur vitesse totale.

5. CONCLUSION

5.1. RESULTATS ET OUTILS

Premièrement, ce stage aura permis de répondre à l'objectif principal qui lui était accordé : comparer qualitativement les vitesses radiales moyennes du nuage d'Orion à celles des YSO. Nous avons pu observer une forte corrélation entre ces-dernières, ce qui est un résultat attendu. Toutefois, les études comparatives réalisées dans ce travail peuvent être largement approfondies. C'est pourquoi l'accent a été mis sur la création d'outils facilement réutilisables permettant au groupe de potentiellement compléter ce travail. Ces outils permettent notamment de créer un catalogue d'objets jeunes selon les caractéristiques voulues, processus détaillé dans la documentation technique. Il y a aussi des outils de filtrage afin de restreindre le domaine d'étude et d'écarter les données aberrantes. Enfin, nous avons développé de nombreux outils d'affichages qui viennent compléter les travaux de cartographie de Nishimura, Gaudel et Lombardi.

5.2. AMELIORATIONS

Il y a de nombreuses potentielles améliorations à réaliser sur ce travail, notamment sur les fonctions de filtrage qui restent relativement basiques. Il serait par exemple possible d'affiner le filtrage en distance en connaissant en détail les dimensions de la région pour mieux sélectionner les objets sur leur distance probable. Il y a aussi certains soucis avec quelques bibliothèques d'affichage de Python, en particulier pour l'affichage vectoriel 3D, que nous n'avons pas eu le temps de peaufiner. Il est notamment possible de voir survenir de légères incohérences vis-à-vis de la taille des vecteurs, en 2D ou en 3D. Aussi, le code peut ne pas être aussi accessible pour quelqu'un d'autre que moi, même si des efforts ont été fait pour le rendre le plus automatique

et simple d'utilisation possible et c'est pourquoi je mets aussi à disposition un fichier Python avec les affichages principaux déjà préparés. A noter que ces travaux restent les prémices d'un projet et permet d'avoir une vue introductive sur la relation entre les vitesses radiales des YSOs et celles du nuage moléculaire d'Orion.

5.3. SOURCES

[1] A neural network-based methodology to select young stellar object candidates from IR surveys?
D. Cornu and J. Montillaud, 2020

[2] The APOGEE-2 Survey of the Orion Star-forming Complex. II. Six-dimensional Structure
M. Kounkel and Al., 2018

[3] The Spitzer Space Telescope Survey of the Orion A & B Molecular Clouds - Part I: A Census of Dusty Young Stellar Objects and a Study of their Mid-IR Variability
Megeath and Al., 2012

[4] Revealing the physical properties of molecular gas in Orion with a large scale survey in $J = 2-1$ lines of ^{12}CO , ^{13}CO and C^{18}O
Nishimura and Al., 2015

[5] APOGEE Data and Spectral Analysis from SDSS Data Release 16: Seven Years of Observations Including First Results from APOGEE-South
Jonsson et Al., 2020

[6] Gaia EDR3
Gaia Collaboration, 2020