

Université de Montréal

Recherche d'un âge cinématique
de l'association β Pictoris

par

Dominic Couture

Département de physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en physique

septembre 2019

Université de Montréal

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé

Recherche d'un âge cinématique de l'association β Pictoris

présenté par

Dominic Couture

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

David Lafrenière

(président-rapporteur)

René Doyon

(directeur de recherche)

Pierre Bergeron

(membre du jury)

Mémoire accepté le :

décembre 2019

Résumé

Les associations locales jeunes (YMG ; *young moving group*) sont des groupes d'étoiles jeunes, principalement des étoiles naines M, partageant une cinématique commune, situées dans le voisinage solaire et formées à la même époque lors de l'effondrement d'un nuage moléculaire unique à chaque association. Ce sont des laboratoires idéals pour l'étude des dernières étapes de la formation stellaire et l'imagerie directe d'exoplanètes. L'association β Pictoris (β PMG ; *β Pictoris moving group*) est l'une des plus jeunes et des plus rapprochées, mais son âge demeure incertain : les méthodes des isochrones et de la limite d'épuisement du lithium (LDB ; *lithium depletion boundary* ; 21 – 24 Ma) sont incohérentes avec la méthode du retracement à l'origine (11 – 13 Ma), consistant à retracer le parcours des étoiles membres jusqu'à l'époque où l'étendue de l'association était minimale, soit l'époque de la formation stellaire.

Cette étude présente une nouvelle méthode numérique, appelée **Traceback**, permettant de trouver un âge cinématique pour une association par retracement à l'origine avec les données du catalogue *Gaia Data Release 2* (DR2). Sa précision théorique maximale est calculée et deux biais sont caractérisés : un biais dû aux erreurs de mesure ($\sim -4,5$ Ma) et un biais $\Delta v_{r, grav} = 0,5$ km/s sur les mesures de vitesse radiale (v_r) dû au décalage vers le rouge gravitationnel ($\sim -1,8$ Ma). En appliquant cette méthode à un échantillon de 46 membres validés de l'association β Pictoris, un âge cinématique corrigé de 17 – 19 Ma, compatible avec les âges obtenus avec les méthodes des isochrones et de la LDB, est trouvé en minimisant la déviation médiane absolue (MAD ; *median absolute deviation*), une mesure de l'étendue de l'association résiliente aux données déviantes, et la covariance $X-U$ entre les positions X et les vitesses U des étoiles membres. De plus, on montre que l'usage d'un arbre couvrant de poids minimal (MST ; *minimum spanning tree*) n'apporte aucun avantage.

Mot clés : associations locales jeunes, âge stellaire, cinématique, retracement à l'origine, association β Pictoris.

Abstract

Young moving groups (YMGs) are associations of young stars, mainly M dwarfs, that share a common kinematics, located in the solar neighbourhood and formed at the same epoch by the collapse of a molecular cloud that is unique to every association. They are ideal laboratories for the study of the last steps of stellar formation and the direct imaging of exoplanets. The β Pictoris moving group (β PMG) is one of the youngest and closest YMGs, although its age remains uncertain: ages found using isochrones or the lithium depletion boundary (LDB; 21 – 24 Myr) are inconsistent with traceback ages (11 – 13 Myr), found by tracing back the trajectories of member stars up to the epoch when the size of the YMG was minimal, which coincides with the epoch of stellar formation.

This study presents a new numerical method, called **Traceback**, capable of finding a kinematic age for a YMG by traceback with data from the *Gaia* Data Release 2 (DR2) catalog. Its maximal theoretical precision is calculated and two important biases are characterized: a bias due to measurement errors (~ -4.5 Myr) and a $\Delta v_{r, grav} = 0.5$ km/s bias on radial velocity (v_r ; *vitesse radiale*) measurements due to gravitational redshift (~ -1.8 Myr). When this method is applied to a sample of 46 validated members of β PMG, a corrected kinematic age of 17 – 19 Myr, in agreement with isochrones and LDB ages, is found by minimizing the median absolute deviation (MAD), a measure of the size of the association that is robust against outliers in the data, and the X - U covariance between the X positions and the U velocities of member stars. Furthermore, the use of a minimum spanning tree (MST) is shown not to be advantageous.

Keywords: young moving groups, stellar age, kinematics, traceback, β Pictoris moving group.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des abréviations	xi
Chapitre 1. Introduction	1
1.1. Associations locales jeunes	1
1.1.1. Identification des étoiles membres	2
1.1.2. Associations locales jeunes connues	4
1.1.3. Intérêts des associations locales jeunes	7
1.2. Âge stellaire	8
1.2.1. Détermination de l'âge stellaire	8
1.2.1.1. Diagramme Hertzsprung–Russell	8
1.2.1.2. Isochrones	9
1.2.1.3. Gyrochronologie	10
1.2.1.4. Activité rayons X	10
1.2.1.5. Émission $H\alpha$	11
1.2.1.6. Limite d'épuisement du lithium	11
1.2.1.7. Retracement à l'origine	12
1.2.2. Contraintes sur l'âge de l'association β Pictoris	13

1.2.3.	Intérêts de l'âge stellaire	15
1.3.	Catalogue <i>Gaia</i>	15
1.4.	Objectif de cette étude	17
Chapitre 2.	Âge cinématique de l'association β Pictoris	18
2.1.	Méthodologie	18
2.1.1.	Transformation des coordonnées	18
2.1.1.1.	Vers les coordonnées galactiques	18
2.1.1.2.	Vers les observables	20
2.1.2.	Trajectoires galactiques	20
2.1.3.	Gestion des erreurs de mesure	21
2.1.4.	Décalage vers le rouge gravitationnel	21
2.1.4.1.	Principe	21
2.1.4.2.	Correction de la vitesse radiale	22
2.1.5.	Calcul de l'âge	22
2.1.5.1.	Dispersion	23
2.1.5.2.	Élimination des données déviantes	24
2.1.5.3.	Déviations médiane absolue	24
2.1.5.4.	Arbre couvrant de poids minimal	25
2.1.5.5.	Longueur moyenne des branches	26
2.1.5.6.	Déviations médiane absolue de la longueur des branches	26
2.1.5.7.	Covariances entre la position et la vitesse	27
2.2.	Simulations	27
2.2.1.	Création d'un modèle de l'association β Pictoris	27
2.2.2.	Précision théorique	30
2.2.3.	Impact des erreurs de mesure	32
2.2.4.	Impact du décalage vers le rouge gravitationnel	34
2.3.	Résultats	38

2.3.1.	Données déviantes dans l'association β Pictoris.....	38
2.3.2.	Âge de l'association β Pictoris	39
2.4.	Discussion	44
2.4.1.	Comparaison entre les simulations et les résultats	44
2.4.2.	Comparaison de l'âge obtenu avec d'autres méthodes.....	47
2.4.3.	Développements futurs.....	48
Chapitre 3.	Conclusion.....	49
Bibliographie.....		51
Annexe A.	Module Traceback	A-i
A.1.	Description.....	A-i
A.2.	Usage	A-i
Annexe B.	Propriétés des membres de l'association β Pictoris.....	B-i

Liste des tableaux

1.1	Propriétés des associations locales jeunes sélectionnées à intérieur d'un rayon de 60 pc autour du Soleil.....	4
2.1	Propriétés observationnelles de l'association β Pictoris.....	28
2.2	Propriétés cinématiques de l'association β Pictoris.....	28
2.3	Propriétés des indicateurs d'âge.....	37
2.4	Âge de l'association β Pictoris selon l'indicateur d'âge et l'échantillon utilisés....	45
B.1	Propriétés observationnelles des membres de l'association β Pictoris.....	B-i
B.2	Propriétés cinématiques des membres de l'association β Pictoris.....	B-iii

Liste des figures

1.1	Méthode du point convergent appliquée à des étoiles candidates de l'association des Hyades. Figure tirée de Montes et al. (2001).....	3
1.2	Distribution des modèles d'associations locales jeunes (YMG; <i>young moving group</i>) connues de <i>Bayesian Analysis for Nearby Young AssociationNs</i> (BANYAN) Σ situées dans un rayon de moins de 150 pc autour du Soleil. Figure tirée de Gagné et al. (2018).....	5
1.3	Diagramme couleur-magnitude (CMD; <i>color-magnitude diagram</i>) montrant des courbes isochrones empiriques de 10 et 100 Ma, des modèles de courbes isochrones <i>NextGen</i> aux mêmes âges ainsi que des populations stellaires d'âges variés. Figure tirée de Rodriguez et al. (2013).....	9
1.4	Position de la limite d'épuisement du lithium (LDB; <i>lithium depletion boundary</i>) sur un diagramme de la luminosité bolométrique ($\log L_{\text{bol}}$; L_{\odot}) selon la température effective (K) de membres de l'association β Pictoris (β PMG; <i>β Pictoris moving group</i>). Figure tirée de Malo et al. (2014).....	12
2.1	Incertitude minimale théorique sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, sans erreurs de mesure, selon le nombre de membres, la dispersion initiale (pc) et l'indicateur d'âge utilisé.	31
2.2	Impact des erreurs de mesure sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, composée de 46 membres, mesuré en minimisant les indicateurs d'âge.....	33
2.3	Impact d'un biais $\Delta v_{r, \text{grav}}$ sur les mesures de vitesse radiale (v_r) dû au décalage vers le rouge gravitationnel sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, composée de 46 membres, mesuré en minimisant la dispersion (σ) des membres de l'association selon l'erreur de mesure sur la vitesse radiale (km/s).	35

2.4	Impact du décalage vers le rouge gravitationnel sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, composée de 46 membres, mesuré en minimisant les indicateurs d'âge.....	36
2.5	Retracement de l'association β Pictoris (β PMG; β <i>Pictoris moving group</i>) sur une projection de Mollweide jusqu'à une époque de 30 Ma dans le passé.	39
2.6	Retracement de l'association β Pictoris (β PMG; β <i>Pictoris moving group</i>) sur des projections cartésiennes. L'association est présentée à l'époque actuelle, et à 5 Ma, 10 Ma, 15 Ma, 20 Ma et 25 Ma dans le passé.	39
2.7	Indicateurs d'âge de l'association β Pictoris (β PMG; β <i>Pictoris moving group</i>) en fonction du temps (Ma) par rapport à l'époque actuelle avec une correction $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur la vitesse radiale (v_r).	42
2.8	Indicateurs d'âge de l'association β Pictoris (β PMG; β <i>Pictoris moving group</i>) en fonction du temps (Ma) par rapport à l'époque actuelle avec une correction $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur la vitesse radiale (v_r) à partir des données de Crundall et al. (2019).....	43

Liste des abréviations

2MASS : *Two Micron All-Sky Survey*

ABDMG : *AB Doradus moving group*

BANYAN : *Bayesian Analysis for Nearby Young AssociatioNs*

BASS : *BANYAN All-Sky Survey*

CMD : *color-magnitude diagram*

DR : *Data Release*

ESA : *European Space Agency*

Gaia : *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*

Hipparcos : *HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite*

h : heure

H-R : Hertzsprung–Russell

IMF : *initial mass function*

IRAS : *InfraRed Astronomical Satellite*

K : kelvin

kG : kilogauss

km/s : kilomètre par seconde

LACEwING : *LocAting Constituent mEmbers In Nearby Groups*

LDB : *lithium depletion boundary*

L_{bol} : luminosité bolométrique

L_{X} : luminosité rayons X

L_{\odot} : luminosité solaire

Ma : million d'années

MAD : *median absolute deviation*

mas : milliseconde d'arc

mas/an : milliseconde d'arc par année
M_{Jup} : masse de Jupiter
M_☉ : masse solaire
MCMC : *Markov chain Monte Carlo*
MST : *minimum spanning tree*
Myr : *megayear*
nm : nanomètre
pc : parsec
pc/Ma : parsec par million d'années
rad : radian
rad/Ma : radian par million d'années
ROSAT : *Röntgen SATellite*
SACY : *Search for Associations Containing Young stars*
THA : *Tucana-Horologium association*
TWA : *TW Hydrae association*
v_r : vitesse radiale
WISE : *Wide-field Infrared Survey Explorer*
YMG : *young moving group*
α : ascension droite
βPMG : *β Pictoris moving group*
δ : déclinaison
π : parallaxe
μ_α : mouvement propre en ascension droite
μ_δ : mouvement propre en déclinaison
μm : micron
σ : dispersion
° : degré
°/Ma : degré par million d'années

Chapitre 1

Introduction

1.1. Associations locales jeunes

Les associations locales jeunes (YMG ; *young moving group*) sont des groupes d'étoiles jeunes composés de quelques dizaines membres situés dans le voisinage solaire, soit à moins de 150 parsecs (pc) du Soleil, et formés lors de l'effondrement d'un nuage moléculaire unique à chaque association il y a moins de 150 millions d'années (Ma). Puisque les étoiles de chaque association ont une origine commune et que leur formation est récente, leur âge, composition chimique et cinématique 6D, c'est-à-dire leurs coordonnées galactiques en position XYZ et en vitesse UVW , sont similaires. De par la proximité et la faible densité de ces associations, qui peuvent s'étendre jusqu'à 20 pc, les étoiles sont généralement réparties sur une grande fraction de la sphère céleste (Zuckerman & Song, 2004 ; Torres et al., 2008).

Les membres de ces associations ne sont pas liés gravitationnellement et deviendront indiscernables du reste des étoiles de la Voie lactée à mesure qu'ils se déplacent sur des orbites galactiques indépendantes et que leurs trajectoires sont perturbées par leur environnement. La dispersion en vitesse UVW (σ_{UVW}) typique des associations connues à ce jour est de moins de 3 kilomètres par seconde (km/s ; Gagné et al., 2018). De plus, étant donné que la fonction de masse initiale (IMF ; *initial mass function*) de ces associations est la même que celle du reste de la Voie lactée, dont le maximum se situe autour de 0,3 masse solaire (M_{\odot}), la plupart de leurs membres sont des étoiles naines M de faible masse. Des relevés récents ont permis de mettre en lumière les populations de naines brunes et d'objets de masse planétaire membres d'associations locales jeunes, d'étendre les listes de membres d'associations connues et d'en découvrir de nouvelles (Gagné et al., 2014 ; Faherty et al., 2016b).

1.1.1. Identification des étoiles membres

Il n'est pas, a priori, facile d'identifier les membres d'une association donnée, car ces étoiles sont assez rares et, en général, très éparpillées sur la sphère céleste. Il est donc difficile de les distinguer des étoiles du champ. Néanmoins, il est possible de tirer avantage de leurs caractéristiques communes, notamment leur cinématique 6D, afin de déterminer si une étoile donnée fait partie d'une association connue, en comparant sa position XYZ et sa vitesse UVW avec un modèle cinématique des membres connus de l'association. Le plus grand défi est d'obtenir des mesures précises de la parallaxe (π) et, surtout, de la vitesse radiale (v_r), car ces données requièrent beaucoup de temps d'observation. Les étoiles candidates sélectionnées doivent ensuite être validées par la présence d'indicateurs de jeunesse afin d'éliminer les fausses identifications d'étoiles du champ présentant, par hasard, une cinématique similaire aux membres d'une association. Cette sélection nécessite des données photométriques et spectrales (Malo et al., 2014).

Lorsque leur mouvement propre est projeté sur la sphère céleste, les étoiles membres d'association locales jeunes semblent décrire des trajectoires en direction d'un point convergent, l'apex, à partir d'un point anticonvergent, l'anti-apex. La figure 1.1 montre un exemple de cette méthode appliquée à l'association des Hyades. Ainsi, si le mouvement propre d'une étoile diverge trop de cette direction, on peut en déduire que l'étoile ne fait pas partie de l'association (Eggen, 1995). Cette méthode du point convergent tient également compte d'autres critères tels que le module de l'amplitude du mouvement, la distance, la vitesse radiale et la magnitude de l'étoile. Elle a été améliorée par les travaux de Montes et al. (2001), qui tiennent compte de la dispersion en vitesse UVW , par Zuckerman et al. (2001), qui estiment l'âge à partir d'un diagramme couleur-magnitude (CMD ; *color-magnitude diagram*), ainsi que par le relevé *Search for Associations Containing Young stars* (SACY ; Torres et al., 2006), qui utilise une fonction de mérite pour identifier de nouveaux membres. D'autres méthodes analysent les propriétés d'étoiles dans un rayon déterminé à la recherche d'étoiles avec des vitesses UVW similaires (Zuckerman & Song, 2004). Plus récemment, Riedel et al. (2017) ont développé un outil numérique, *LocAtIng Constituent mEmbers In Nearby Groups* (LACEwING), un algorithme de convergence qui utilise des simulations numériques du voisinage solaire afin de déterminer la probabilité d'appartenance d'une étoile à 13 associations locales jeunes à partir de la cinématique 6D des étoiles.

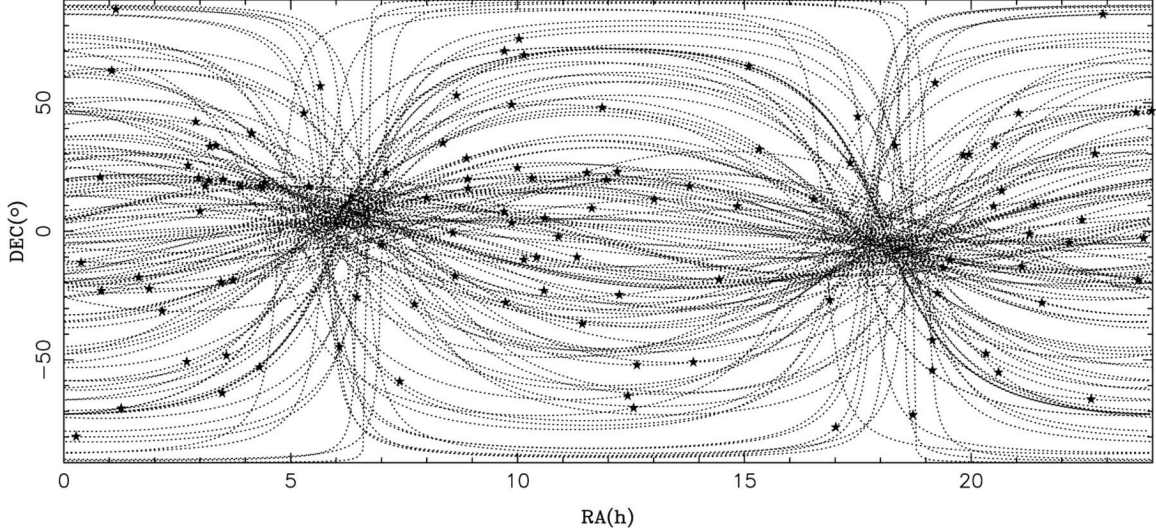


Figure 1.1. Méthode du point convergent appliquée à des étoiles candidates de l’association des Hyades. L’ascension droite (RA, α ; *right ascension*; h) et la déclinaison (DEC, δ ; *declination*; °) à l’époque actuelle des étoiles, et le grand cercle défini par leur mouvement propre respectif (traits pointillés) sont présentés. L’apex, représenté par un cercle noir, est situé aux coordonnées $\alpha = 6,4$ h (96°) et $\delta = 6,5^\circ$. Figure tirée de Montes et al. (2001).

Bayesian Analysis for Nearby Young AssociatioNs (BANYAN; Malo et al., 2013) est un outil d’analyse bayésienne permettant d’identifier de nouveaux membres d’associations locales jeunes connues à partir d’un échantillon d’étoiles sélectionnées montrant une cinématique commune et des indicateurs de jeunesse tels que l’émission $H\alpha$ et rayons X. BANYAN intègre des mesures astrométriques et colorimétriques de plusieurs relevés, tels que *High Precision PARallax Collecting Satellite (Hipparcos)* (Perryman et al., 1997) et *Two Micron All-Sky Survey* (2MASS; Skrutskie et al., 2006). La distance, la position, le mouvement propre, la magnitude et la vitesse radiale sont utilisés pour déterminer la probabilité d’appartenance d’une étoile à une association donnée. Des versions subséquentes de BANYAN ont permis d’améliorer sa précision et sa rapidité. BANYAN II (Gagné et al., 2014) modélise les associations à l’aide d’un ellipsoïde gaussien tridimensionnel, dont les axes principaux peuvent tourner librement dans l’espace, et incorpore les informations du relevé *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE; Wright et al., 2010). BANYAN Σ (Gagné et al., 2018) utilise des intégrales de marginalisation bayésiennes analytiques, incorpore les données du catalogue *Gaia Data Release 1* (DR1; Gaia Collaboration et al., 2016b) et se sert d’un modèle plus précis du disque galactique. Au total, 27 modèles d’associations sont inclus.

Tableau 1.1. Propriétés des associations locales jeunes sélectionnées
à l’intérieur d’un rayon de 60 pc autour du Soleil.

Association	Nombre ^a d’objets	Distance [pc]	$\langle X \rangle$ ^a [pc]	$\langle Y \rangle$ ^a [pc]	$\langle Z \rangle$ ^a [pc]	$\langle U \rangle$ ^a [km/s]	$\langle V \rangle$ ^a [km/s]	$\langle W \rangle$ ^a [km/s]	Âge ^b [Ma]
ABDMG	48	12,9	-6,0	-7,2	-8,8	-7,2	-27,6	-14,2	149 ⁺⁵¹ ₋₁₉
β PMG	42	32,8	4,1	-6,7	-15,7	-10,9	-16,0	-9,0	24 \pm 3
THA	39	30,8	5,4	-20,1	-36,1	-9,79	-20,94	19,4	45 \pm 4
TWA	23	54,6	14,4	-47,7	22,7	-11,6	-17,9	-5,6	10 \pm 3

Note. AB Doradus (ABDMG ; *AB Doradus moving group*), β Pictoris (β PMG ; *β Pictoris moving group*), Tucana-Horologium (THA ; *Tucana-Horologium association*) et TW Hydrae (TWA ; *TW Hydrae association*). Le nombre d’objets correspond au nombre de membres *bona fide* inclus dans les modèles gaussiens multivariés de *Bayesian Analysis for Nearby Young Associations* (BANYAN) Σ , dans lesquels les systèmes multiples sont comptés comme un seul objet. La distance correspond à la distance moyenne des membres de chaque association. La position XYZ et la vitesse UVW moyennes, composantes des modèles gaussiens multivariés, sont données dans un système de coordonnées héliocentrique d’axes galactiques. L’âge de chaque association a été obtenu avec la méthode des isochrones.

^a Gagné et al. (2018) ^b Bell et al. (2015)

1.1.2. Associations locales jeunes connues

Les associations AB Doradus (ABDMG ; *AB Doradus moving group*), β Pictoris (β PMG ; *β Pictoris moving group*), Tucana-Horologium (THA ; *Tucana-Horologium association*) et TW Hydrae (TWA ; *TW Hydrae association*), situées dans un rayon de 60 pc autour du Soleil, font partie du nombre croissant d’associations locales jeunes recensées à ce jour. Ces associations ont été découvertes en étudiant la cinématique 6D des étoiles dans le voisinage solaire à l’aide principalement des données du catalogue *Hipparcos* (Perryman et al., 1997). Leurs propriétés sont présentées dans le tableau 1.1 et leur distribution spatiale dans le plan du disque galactique est présentée à la figure 1.2. On présente une brève description de ces quatre associations.

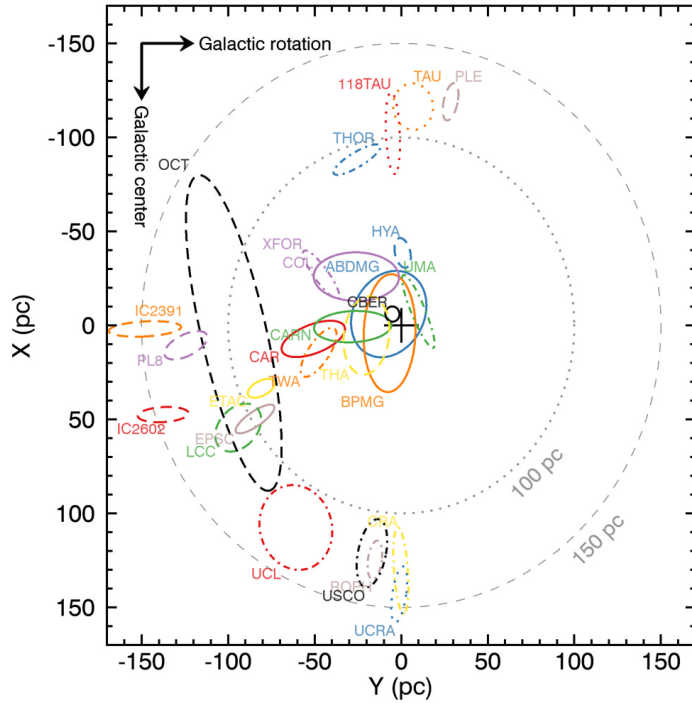


Figure 1.2. Distribution des modèles d’associations locales jeunes (YMG ; *young moving group*) connues de *Bayesian Analysis for Nearby Young AssociatioNs* (BANYAN) Σ situées dans un rayon de moins de 150 pc autour du Soleil, incluant AB Doradus (ABDMG ; *AB Doradus moving group*), β Pictoris (β PMG ; *β Pictoris moving group*), Tucana-Horologium (THA ; *Tucana-Horologium association*) et TW Hydrae (TWA ; *TW Hydrae association*), dans un système de coordonnées X et Y héliocentrique d’axes galactiques. Figure tirée de Gagné et al. (2018).

AB Doradus. Composée de près d’une cinquantaine de membres, l’association AB Doradus a été proposée par Zuckerman et al. (2004). Ces derniers ont remarqué, à l’aide du catalogue *Hipparcos*, qu’une trentaine d’étoiles dans le voisinage solaire montraient des vitesses UVW similaires à celle de l’étoile AB Doradus, une étoile binaire très active, dont la rotation est très rapide. Parmi les associations sélectionnées, il s’agit de l’une des plus peuplées et de la plus vieille, avec un âge de 149^{+51}_{-19} Ma (Bell et al., 2015), obtenu avec la méthode des isochrones. Les membres de l’association AB Doradus montrent également des indicateurs d’activité stellaire tels que l’émission $H\alpha$ et des raies caractéristiques du lithium, et la plupart sont des étoiles naines G, K ou M. De plus, étant l’association la plus rapprochée du Soleil, à une distance moyenne de seulement 12,9 pc, elle s’étend sur une très grande fraction de la sphère céleste.

β Pictoris. Composée d'un peu plus d'une quarantaine de membres, l'association β Pictoris est l'une des associations les plus jeunes et les plus rapprochées connues à ce jour (Mamajek & Bell, 2014), ce qui fait d'elle un laboratoire idéal pour étudier les étoiles jeunes et la formation stellaire. Proposée par Zuckerman et al. (2001), elle fut découverte en sélectionnant dans le catalogue *Hipparcos* des étoiles dans un rayon de 50 pc autour de la Terre dont les vitesses UVW étaient similaires à celle de l'étoile β Pictoris, puis en confirmant les étoiles candidates par la présence d'indicateurs de jeunesse. La plupart des membres sont des étoiles naines M de faible masse, dispersées sur une très grande fraction de la sphère céleste, principalement dans l'hémisphère sud. Son étoile éponyme est la plus brillante du groupe, possède un disque de poussière ainsi que deux exoplanètes connues à ce jour (Lagrange et al., 2008, 2019) et pourrait également être un site actif de formation planétaire. Le nombre d'étoiles membres *bona fide* de l'association β Pictoris a augmenté par rapport aux 17 membres confirmés par Zuckerman et al. (2001) grâce à des relevés qui ont permis d'identifier un grand nombre d'étoiles naines M peu lumineuses (Malo et al., 2014). De plus, l'association β Pictoris contient PSO J318.5338-22.8603, un objet de masse planétaire de $6,5_{-1,0}^{+1,3}$ masses de Jupiter (M_{Jup}) en orbite autour d'aucune étoile (Liu et al., 2013). Les contraintes sur l'âge de cette association sont présentées en détail à la section 1.2.2.

Tucana-Horologium. Cette association est le résultat de la combinaison de deux associations découvertes à peu près au même moment : Tucana, proposée par Zuckerman & Webb (2000) et découverte par une méthode semblable à celle ayant permis la découverte de l'association β Pictoris, à l'aide du catalogue *InfraRed Astronomical Satellite* (IRAS), et Horologium, proposée par Torres et al. (2000) et découverte en cherchant des sources rayons X autour de l'étoile active ER Eri dans le catalogue *Röntgen Satellite* (ROSAT). C'est Zuckerman (2001) qui s'est rendu compte de la similarité entre ces deux associations et proposa qu'elles ne forment en fait qu'une seule association, qui compte près d'une quarantaine de membres, principalement des étoiles naines K et M. Leur âge est estimé à (45 ± 4) Ma avec la méthode des isochrones et 40 Ma avec la méthode de la limite d'épuisement du lithium (LDB; *lithium depletion boundary*; Kraus et al., 2014). Les étoiles membres de l'association Tucana-Horologium montrent aussi une émission $H\alpha$ et des vitesses de rotation élevées. Le relevé *BANYAN All-Sky*

Survey (BASS; Gagné et al., 2015) a montré que l’association possédait plus d’objets de masse planétaire que prévu, remettant en question son IMF.

TW Hydrae. Composée d’un peu plus d’une vingtaine de membres, l’association TW Hydrae a été découverte par Zuckerman & Webb (2000) en étudiant la cinématique d’étoiles situées dans un rayon de 6 degrés ($^{\circ}$) dans le catalogue *Hipparcos* autour de sources à 60 microns (μm), un signe de jeunesse, identifiées dans le catalogue IRAS. Une émission $\text{H}\alpha$, des raies caractéristiques du lithium, et des vitesses de rotation élevées ont été détectées parmi les étoiles membres de cette association (Webb, 2000), qui, avec un âge de seulement (10 ± 3) Ma (Bell et al., 2015), obtenu avec la méthode des isochrones, est la plus jeune ainsi que la plus éloignée (54,6 pc; Gagné et al., 2018) parmi celles sélectionnées. Cela fait de l’association TW Hydrae un excellent laboratoire pour l’étude des étoiles jeunes et la formation planétaire. Par exemple, l’étoile éponyme de l’association possède un disque protoplanétaire et au moins une exoplanète connue à ce jour (Nomura et al., 2016). Le relevé BASS (Gagné et al., 2015) a également montré que la plupart des étoiles dans cette association sont des étoiles naines M et que l’IMF présente une surpopulation d’objets de masse planétaire.

1.1.3. Intérêts des associations locales jeunes

Les associations locales jeunes offrent l’opportunité d’étudier des étoiles dans le voisinage solaire de très jeune âge, à peine sorties de leur nuage moléculaire d’origine, ainsi que les dernières étapes de la formation stellaire et planétaire (Donaldson et al., 2016). Elles permettent de faire le pont entre les régions de formation stellaire et les étoiles plus vieilles du champ. De plus, les étoiles membres de ces associations sont des cibles de choix pour la découverte d’exoplanètes. En effet, puisqu’elles sont jeunes, une exoplanète en orbite autour de l’une de ces étoiles l’est également et, par conséquent, celle-ci est plus chaude et plus brillante, surtout dans le spectre infrarouge, qu’à tout autre stade de son évolution, ce qui améliore le contraste par rapport à son étoile hôte et facilite sa détection par imagerie directe. Le contraste est aussi amélioré par le fait que la plupart des étoiles membres d’association locales jeunes sont des naines M, dont la luminosité est plus faible que celle d’autres étoiles. Finalement, la proximité de ces étoiles par rapport au Soleil augmente la séparation angulaire entre l’exoplanète et son étoile hôte (Artigau et al., 2015).

1.2. Âge stellaire

En plus de la masse et de la métallicité, l'âge stellaire est l'un des paramètres physiques les plus fondamentaux d'une étoile, mais puisqu'il ne s'agit pas d'une quantité directement mesurable, il est, en général, difficile d'obtenir une valeur précise. On détermine l'âge stellaire à partir d'observables qui varient au cours de l'évolution de l'étoile (des indicateurs d'âge stellaire) ou encore en calculant l'âge de l'amas stellaire dont l'étoile fait partie (Kraus et al., 2014). De plus, il existe une dégénérescence entre l'âge d'une étoile et plusieurs paramètres stellaires tels que la masse, la luminosité, la température, la métallicité, le rayon, la vitesse de rotation, l'intensité de raies spectrales, etc. Ainsi, la plupart des méthodes de détermination de l'âge stellaire reposent sur des modèles d'évolution stellaire et celles-ci ont, par conséquent, le désavantage que leur exactitude et leur précision dépendent de celles du modèle utilisé.

1.2.1. Détermination de l'âge stellaire

On présente une brève description des méthodes les plus utilisées pour contraindre l'âge stellaire, incluant les principaux indicateurs de jeunesse.

1.2.1.1. *Diagramme Hertzsprung–Russell*

Le diagramme de Hertzsprung–Russell (H-R) représente la luminosité absolue (magnitude absolue) en fonction de la température effective (type spectral ou couleur) des étoiles au sein d'une population stellaire. C'est un outil très utile pour étudier l'évolution stellaire, car la position d'une étoile sur ce diagramme dépend principalement de sa masse et de son âge (stade évolutif). Les étoiles passent la majeure partie de leur vie à l'intérieur d'une zone appelée la séquence principale correspondant à la période durant laquelle ces dernières produisent leur énergie via la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium. La durée de vie d'une étoile dépend fortement de sa masse : les étoiles les plus massives, dont la température effective et la luminosité absolue sont élevées (quadrant supérieur gauche) ne restent que quelques millions d'années sur la séquence principale, alors que les étoiles moins massives peuvent y rester plusieurs milliards d'années (quadrant inférieur droit).

Ainsi, si l'on trace le diagramme H-R d'un amas stellaire, dont les étoiles se sont formées à peu près au même moment, il est possible d'estimer l'âge de l'amas en trouvant le point de sortie de la séquence principale (*turnoff point*). Puisque les étoiles massives quittent la

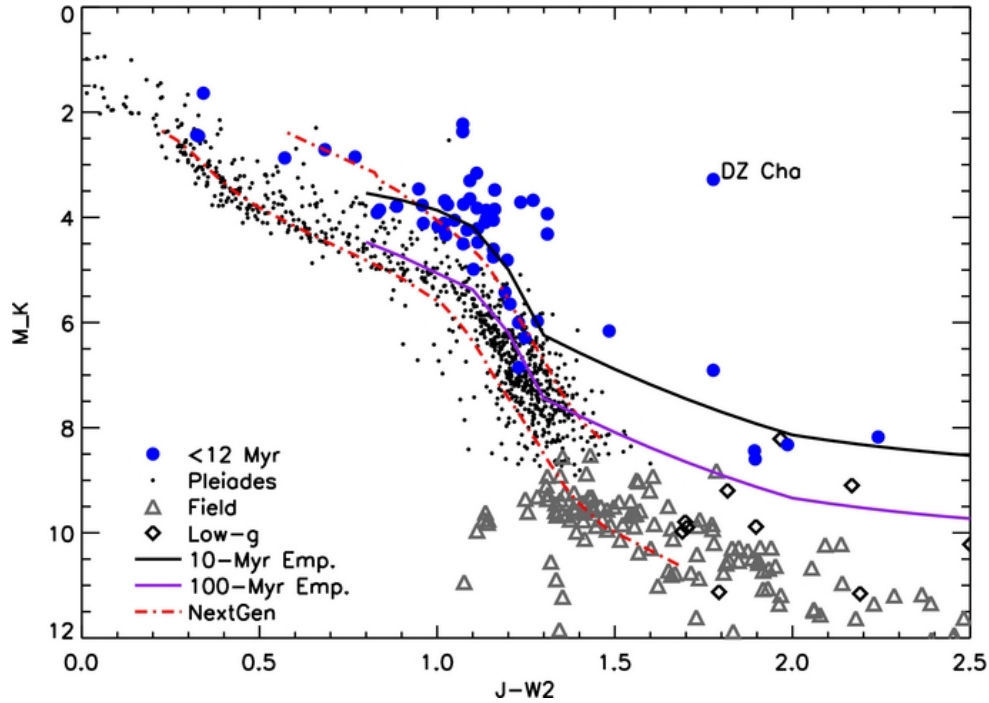


Figure 1.3. Diagramme couleur-magnitude (CMD ; *color-magnitude diagram*) montrant des courbes isochrones empiriques de 10 et 100 Ma, des modèles de courbes isochrones *NextGen* aux mêmes âges ainsi que des populations stellaires d'âges variés. Figure tirée de Rodriguez et al. (2013).

séquence principale rapidement, à mesure qu'une population vieillit, la séquence principale s'arrête à une température effective et une luminosité absolue de plus en plus faibles (Bell et al., 2015). Cette coupure de la séquence principale (*main sequence cut-off*) permet donc de contraindre l'âge des étoiles de l'amas.

1.2.1.2. Isochrones

Une courbe isochrone représente une population d'étoiles d'âge égal sur un diagramme H-R (figure 1.3). À partir de plusieurs paramètres tels que l'IMF, c'est-à-dire la courbe du nombre d'étoiles au sein d'une population à l'époque de la formation stellaire en fonction de la masse stellaire (Salpeter, 1955), et la métallicité, c'est-à-dire la fraction de la masse stellaire constituée d'éléments plus lourds que l'hélium, il est possible de simuler l'évolution des étoiles d'une population jusqu'à un âge donné. En comparant cette courbe théorique au CMD empirique d'une population stellaire, on peut estimer l'âge des étoiles d'un amas ou d'une association locale jeune (VandenBerg et al., 2006).

Toutefois, il est plus difficile d'appliquer cette méthode à des étoiles jeunes à cause de la complexité de la modélisation du CMD pour des étoiles qui n'ont pas encore atteint la séquence principale (Bell et al., 2015). La précision de la parallaxe est aussi une limite importante de cette méthode, car il est nécessaire d'estimer la luminosité absolue des étoiles d'un amas (Barnes, 2007). Cette technique est donc très utilisée pour estimer l'âge d'étoiles dans le voisinage solaire, pour lesquelles une parallaxe précise est connue.

1.2.1.3. *Gyrochronologie*

La vitesse de rotation d'une étoile varie au cours de son évolution. Initialement, lors de la phase de contraction gravitationnelle, la vitesse de rotation augmente à mesure que le rayon de l'étoile diminue par conservation du moment angulaire, puis les interactions entre le vent et le champ magnétique stellaires réduisent peu à peu le moment angulaire d'une étoile et, conséquemment, sa vitesse de rotation diminue (Ferreira et al., 2000). C'est ce qu'on appelle le freinage par vent stellaire (*wind braking*).

Ce phénomène permet d'estimer l'âge d'une étoile individuelle en mesurant sa période ou sa vitesse de rotation (v) et, bien entendu, en se servant d'un modèle d'évolution stellaire bien calibré. En pratique, on obtient le facteur $v \sin(i)$, qui dépend de l'inclinaison (i) de l'étoile, en mesurant l'élargissement Doppler des raies spectrales d'une étoile (Barnes, 2007). Cette méthode est utile pour les étoiles naines M dans le voisinage solaire, pour lesquelles la vitesse de rotation typique se situe entre 2 et 4 km/s (Reiners et al., 2012). Une vitesse de rotation rapide sert également d'indicateur de jeunesse.

1.2.1.4. *Activité rayons X*

Les étoiles actives peuvent réchauffer leur couronne jusqu'à des températures atteignant 10^7 kelvins (K), ce qui engendre un rayonnement thermique dans le spectre rayons X. La présence d'une activité rayons X en provenance d'une étoile peut donc servir de marqueur d'activité chromosphérique et, surtout, coronale. À l'aide de la relation décroissante entre la luminosité rayons X (L_X) et l'âge stellaire, l'activité rayons X permet d'estimer l'âge stellaire, en calculant le rapport L_X/L_{bol} , où L_{bol} est la luminosité bolométrique, et peut servir d'indicateur de jeunesse (Preibisch & Feigelson, 2005 ; Rodriguez et al., 2013).

1.2.1.5. *Émission H α*

La raie H α est une raie d'émission de l'hydrogène centrée à 656,28 nanomètres (nm) correspondant à la transition électronique $3 \rightarrow 2$. Sa présence dans le spectre d'une étoile est un signe d'activité chromosphérique et coronale, engendrée par un fort champ magnétique. Le spectre des jeunes étoiles naines M actives, dont l'enveloppe convective combinée à la rotation différentielle crée de forts champs magnétiques, montre une telle raie d'émission (Sissa et al., 2016 ; Robertson et al., 2013). L'utilité de l'émission H α comme indicateur d'âge stellaire vient du fait qu'à mesure que l'étoile vieillit et que sa rotation ralentit, son activité chromosphérique diminue également, ce qui diminue l'intensité et la variabilité de la raie H α (Reiners et al., 2012). Toutefois, il n'est pas simple de modéliser l'activité chromosphérique d'une jeune étoile naine M, car de nombreux facteurs peuvent influencer son intensité. La présence d'une atmosphère convective (type spectral $< M4$; Browning et al., 2010) ou d'un disque d'accrétion augmente l'intensité de la raie H α . La raie H α montre également une périodicité liée aux cycles d'activité stellaire.

1.2.1.6. *Limite d'épuisement du lithium*

Une petite quantité de lithium, créée principalement lors de la nucléosynthèse primordiale suivant le Big Bang, est présente dans l'atmosphère des étoiles au moment de leur formation, mais celle-ci disparaît rapidement (en moins de 100 Ma pour les étoiles naines M), par l'entremise d'un processus de nucléosynthèse où le lithium est fusionné avec un proton, lorsque la température du noyau dépasse $2,5 \cdot 10^6$ K (Jeffries & Oliveira, 2005). Cette combustion est d'autant plus rapide en présence d'une convection profonde permettant au lithium d'être transporté efficacement au centre de l'étoile.

La méthode de la limite d'épuisement du lithium (LDB ; *lithium depletion boundary*) tire avantage de ce phénomène : à l'aide du spectre d'étoiles au sein d'un amas ouvert ou d'une association locale jeune, dont toutes les étoiles ont à peu près le même âge, on identifie à partir de quel type spectral ou de quelle température effective le spectre des étoiles ne montre plus de raies caractéristiques du lithium (e.g. 670,8 nm). Il est alors possible de comparer cette valeur à une courbe théorique de modèles d'atmosphère stellaire pour déterminer l'âge de la population stellaire (Mamajek & Bell, 2014 ; Soderblom et al., 1990). La figure 1.4 montre un exemple de cette méthode appliquée à l'association β Pictoris.

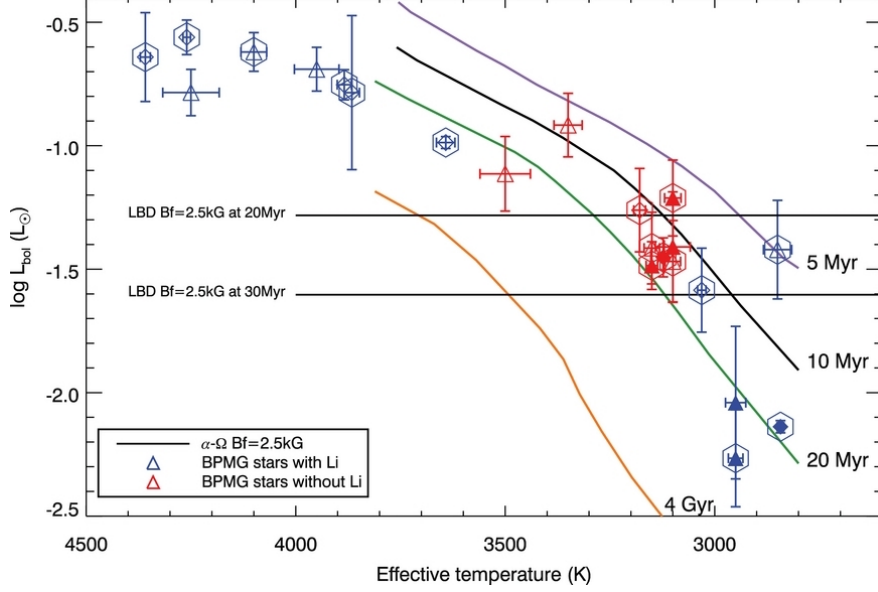


Figure 1.4. Position de la limite d'épuisement du lithium (LDB ; *lithium depletion boundary*) sur un diagramme de la luminosité bolométrique ($\log L_{\text{bol}} ; L_{\odot}$) selon la température effective (K) de membres de l'association β Pictoris (β PMG ; β Pictoris moving group). Les symboles pleins représentent des étoiles binaires et les hexagones, les membres *bona fide*. Les étoiles avec et sans la présence de lithium sont représentées par des symboles bleus et rouges respectivement. L'intensité du champ magnétique est fixée à 2,5 kG et des courbes isochrones magnétiques de Dartmouth à différents âges sont également présentées. Figure tirée de Malo et al. (2014).

Toutefois, ces modèles doivent être précis et tenir compte de facteurs tels que la vitesse de rotation de l'étoile, le champ magnétique stellaire et la présence d'une convection profonde (Messina et al., 2016). Ainsi, cette technique est utile pour les étoiles jeunes de faible masse, car, étant donné que la zone convective de la plupart des étoiles naines M s'étend jusqu'au noyau, le lithium disparaît rapidement de l'atmosphère de ces étoiles.

1.2.1.7. Retracement à l'origine

La méthode du retracement à l'origine (*traceback*) consiste à retracer le parcours des étoiles membres d'une association locale jeune dans le temps, en calculant des orbites galactiques indépendantes pour chaque membre, afin de retrouver l'époque où l'étendue de l'association était minimale. Les étoiles s'étant formées à partir de l'effondrement d'un seul nuage moléculaire, leur dispersion en position XYZ (σ_{XYZ}) initiale est minimale au moment

de leur formation, mais elle augmente au fil du temps, car chaque étoile possède une vitesse UVW quelque peu différente de la vitesse UVW moyenne de l'association. Des mesures astrométriques de parallaxe, de mouvement propre et de vitesse radiale très précises sont nécessaires, puisqu'il faut se servir de la cinématique 6D complète des étoiles pour calculer leurs positions sur des dizaines de millions d'années lors du retraceur à l'origine. Cette méthode est d'un grand intérêt, car elle ne dépend pas de modèles d'évolution stellaire, pourrait permettre de calibrer ces derniers, et être plus précise et fiable que les autres méthodes de détermination de l'âge stellaire (Miret-Roig et al., 2018 ; Donaldson et al., 2016).

La précision des mesures de mouvement propre et de vitesse radiale est particulièrement importante, car une erreur sur la vitesse UVW engendre une erreur sur la position XYZ de plus en plus grande à mesure qu'on extrapole la position d'une étoile dans le passé. C'est pourquoi il a fallu attendre les mesures d'*Hipparcos* pour obtenir des âges par retraceur à l'origine adéquats (Asiain et al., 1999). En pratique, cette méthode est limitée par la précision des mesures de parallaxe et, surtout, de vitesse radiale.

1.2.2. Contraintes sur l'âge de l'association β Pictoris

Au moment de la découverte de l'association β Pictoris, Zuckerman et al. (2001) ont démontré la présence de nombreux indicateurs de jeunesse parmi les membres de l'association, notamment un rapport L_X/L_{bol} élevé, un facteur $v \sin(i)$ élevé, une forte émission $H\alpha$ et la présence de raies caractéristiques du lithium. Bien qu'il soit évident que les étoiles membres de l'association β Pictoris sont très jeunes, les âges obtenus varient significativement selon la méthode utilisée :

Isochrones. Zuckerman et al. (2001) trouvent un âge de 12_{-4}^{+8} Ma avec la méthode des isochrones et en comparant l'abondance du lithium parmi les membres des associations β Pictoris, Tucana-Horologium et TW Hydrae. Malo et al. (2014) obtiennent un âge de $(21,5 \pm 6,5)$ Ma cohérent avec ceux obtenus avec la méthode de la LDB en tenant compte de l'impact du champ magnétique des étoiles naines K5V à M5V. Puis, Mamajek & Bell (2014) trouvent un âge de (22 ± 3) Ma en étudiant les étoiles naines F et G. Finalement, Bell et al. (2015) obtiennent un âge de (24 ± 3) Ma à l'aide de courbes isochrones semi-empiriques basées sur les étoiles jeunes des Pléiades et d'une correction de l'impact de la gravité de surface des étoiles.

Limite d'épuisement du lithium. À l'aide de modèles d'évolution stellaire pré-séquence principale, Mentuch et al. (2008) arrivent à un âge de (21 ± 9) Ma, alors que Binks & Jeffries (2014) trouvent un âge de (21 ± 4) Ma, sans égard au choix du modèle. Malo et al. (2014) obtiennent un âge de (26 ± 3) Ma avec la méthode de la LDB. Cette méthode étant considérée comme plus fiable et précise, ces résultats ont remis en question les âges obtenus avec les méthodes des isochrones et du retracement à l'origine. Yee & Jensen (2010) attribuent cette différence à un désaccord entre les rayons mesurés et théoriques des étoiles naines M.

Retracement à l'origine. Cette méthode mène, en général, à des âges plus jeunes que celles des isochrones et de la LDB. Ortega et al. (2002) trouvent un âge de 11,5 Ma, Song et al. (2003), un âge de 12 Ma, Ortega et al. (2004), un âge de $(10,8 \pm 0,3)$ Ma, et Miret-Roig et al. (2018), un âge de 13_{-0}^{+7} Ma. Cela pourrait s'expliquer par la propagation des erreurs de mesure ou le manque de précision des mesures de parallaxe et de vitesse radiale. De plus, la présence de données déviantes peut facilement brouiller les résultats et biaiser le résultat du retracement vers des âges plus jeunes. Malgré tout, certaines études arrivent à des âges compatibles avec les autres méthodes : Torres et al. (2006) trouvent une expansion de $0,0053$ km/s/pc, ce qui équivaut, d'après Mamajek & Bell (2014), à un âge de ~ 18 Ma, alors que Makarov (2007) obtient un âge de (22 ± 12) Ma. Ce dernier utilise une méthode qui calcule les délais de rencontre entre les étoiles (*encounter times*) en fonction du temps avec un échantillon de 14 membres sélectionnés de l'association β Pictoris, qui exclut l'étoile β Pictoris.

Chronostar. Cette nouvelle méthode, développée par Crundall et al. (2019), construit un modèle cinématique des étoiles d'un échantillon en projetant celles-ci vers l'époque actuelle plutôt que de retracer leur parcours dans le passé. Des ensembles d'étoiles, appelés des composantes, dont la position et la vitesse moyennes sont initialisées avec les valeurs moyennes correspondantes des données à modéliser, des dispersions en position $\sigma_{XYZ} = 20$ pc et en vitesse $\sigma_{UVW} = 7$ km/s, et un âge $t = 3$ Ma, sont créés. Les paramètres de chaque composante sont optimisés afin de maximiser la probabilité gaussienne d'appartenance avec une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC ; *Markov chain Monte Carlo*). De nouvelles composantes sont créées jusqu'à ce que l'ajout d'une composante n'améliore plus le modèle. Cette méthode ne fait pas

de supposition sur l'appartenance des étoiles à une association donnée et permet à la fois de trouver un âge cinématique et la probabilité d'appartenance d'une étoile à une association à l'aide des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ entre les positions XYZ et les vitesses UVW des étoiles, qui sont minimales au moment de la formation stellaire. Avec **Chronostar**, l'association β Pictoris est datée à $18,3_{-1,2}^{+1,3}$ Ma.

1.2.3. Intérêts de l'âge stellaire

Déterminer l'âge stellaire est d'un grand intérêt pour plusieurs champs de recherche tels que la modélisation des étoiles, l'étude de l'évolution stellaire et l'étude de l'activité magnétique des étoiles. L'âge stellaire est aussi d'un intérêt tout particulier pour l'étude des exoplanètes. En effet, puisque la précision des paramètres planétaires dépend en grande partie de celle des paramètres de l'étoile hôte, l'utilité d'un âge stellaire précis, et donc d'un modèle et de paramètres stellaires précis, est évidente. Un âge stellaire précis, et par extension, un âge planétaire bien contraint, est utile pour toutes les techniques de détection d'exoplanètes, incluant l'imagerie directe, la vélocimétrie radiale et les transits planétaires, ainsi que pour la spectroscopie de transit de l'atmosphère des exoplanètes. Comme mentionné à la section 1.1.3, les étoiles membres d'associations locales jeunes sont des cibles de choix pour la recherche d'exoplanètes et se servir de la méthode du retracement à l'origine pour trouver leur âge est d'autant plus avantageux, car elle ne repose que sur des mesures astrométriques et non un modèle stellaire. De plus, l'étude d'étoiles s'étant formées au même moment permet d'obtenir un âge plus précis que la détermination de l'âge d'une étoile seule, car il est possible de combiner les données de plusieurs étoiles (Bell et al., 2015).

1.3. Catalogue *Gaia*

Les techniques d'identification des membres d'association locales jeunes dépendent d'abord et avant tout de mesures astrométriques précises afin de calculer la cinématique complète des étoiles candidates. Ce n'est d'ailleurs qu'après la publication du catalogue de la mission *Hipparcos* (Perryman et al., 1997) de l'Agence spatiale européenne (ESA ; *European Space Agency*), que le nombre d'associations découvertes augmenta significativement. En effet, le catalogue *Hipparcos*, publié en 1997, offrait des mesures astrométriques d'une précision inégalée pour l'époque.

Toutefois, les données d'*Hipparcos* sont limitées aux étoiles brillantes, jusqu'à une magnitude $V \sim 12$, soit les types spectraux F, G et K, ce qui contraint le nombre d'étoiles pour lesquelles la cinématique complète est connue. Au total, le catalogue contient 117 955 sources avec une solution astrométrique. Les incertitudes typiques sur la position, la parallaxe et le mouvement propre sont de $0,6 - 0,8$ milliseconde d'arc (mas), 1,0 mas et $0,7 - 0,9$ milliseconde d'arc par année (mas/an) respectivement, selon la magnitude apparente.

La mission *Gaia*, qui est également pilotée par l'ESA et dont le nom signifiait à l'origine *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*, a pour but d'obtenir les mesures astrométriques les plus précises à ce jour (Gaia Collaboration et al., 2016b) sur un très grand nombre d'étoiles. Depuis sa mise en service en 2014, l'observatoire spatial *Gaia*, situé sur une orbite de Lissajous au point de Lagrange L_2 du système Terre–Soleil, collecte des données sur plus d'un milliard de sources jusqu'à une magnitude apparente de 20 (Lindgren et al., 2018). L'ESA s'attend à ce que le satellite *Gaia*, dont la durée de vie prévue est de cinq ans, demeure actif au moins jusqu'en 2022.

La première version du catalogue *Gaia*, *Gaia Data Release 1* (DR1), a été publiée en 2016 (Gaia Collaboration et al., 2016a). Ce catalogue, représentant près de 1000 jours d'observations, contient la parallaxe et le mouvement propre d'environ 2 millions de sources avec des incertitudes typiques de 0,3 mas et 1,0 mas/an respectivement, en combinant ces données avec celles des catalogues *Hipparcos* et Tycho-2 (Høg et al., 2000). Ces mesures ont une profondeur allant jusqu'à une magnitude $V \sim 12$. La position de plus de 1,1 milliard de sources avec une incertitude de ~ 10 mas, jusqu'à une profondeur de 20,7 magnitudes, ainsi que leur magnitude dans la bande G sont également disponibles.

La deuxième version du catalogue *Gaia*, *Gaia Data Release 2* (DR2), a été publiée en 2018 (Brown et al., 2018). Représentant environ 22 mois d'observations, ce catalogue est beaucoup plus complet et contient la parallaxe et le mouvement propre de 1,3 milliard de sources avec une incertitude de $0,04 - 0,7$ mas et de $0,05 - 1,2$ mas/an respectivement pour les sources dont la magnitude dans la bande G est de $14 - 20$ (les mesures sont plus précises pour les sources les plus brillantes). Le nombre de sources pour lesquelles la position est connue est porté à 1,6 milliard avec une précision d'au moins 2 mas selon la magnitude. De plus, la vitesse radiale d'un peu plus de 7 millions de sources, avec une précision d'au mieux 1 km/s, est également disponible (Soubiran et al., 2018).

En résumé, par rapport aux données disponibles précédemment, les données du catalogue *Gaia* DR2 offrent plusieurs avantages.

Position et mouvement propre : meilleure précision des mesures.

Parallaxe : augmentation du nombre de sources et meilleure précision des mesures.

Vitesse radiale : augmentation du nombre de sources, mais la précision des mesures reste limitée. La vitesse radiale demeure, de loin, la plus grande source d'incertitude pour le calcul de la vitesse UVW .

Les prochaines versions du catalogue *Gaia*, *Gaia Data Release 3* (DR3) et *Gaia Data Release 4* (DR4), représentant environ 34 et 60 mois d'observations, devraient être publiées en 2021 et 2024 respectivement. Une version partielle du catalogue *Gaia* DR3, *Gaia Early Data Release 3* (EDR3) devrait être publiée dès 2020. D'autres catalogues pourraient être publiés si la mission est prolongée par l'ESA.

Par rapport au catalogue *Gaia* DR2, la précision de la plupart des mesures des catalogues *Gaia* DR3 et DR4 sera améliorée d'un facteur 1,2 et 1,7 respectivement. Quant à la précision des mesures du mouvement propre, elle sera améliorée d'un facteur plus grand, soit 1,9 et 4,5 respectivement. Les futurs catalogues *Gaia* augmenteront aussi le nombre sources pour lesquelles la vitesse radiale est disponible ainsi que la précision des mesures, selon la magnitude et la température effective de la source. Pour les membres de l'association β Pictoris, qui sont pour la plupart des étoiles naines M dont la magnitude se situe entre 6 et 9, la précision des mesures de vitesse radiale variera entre 0,2 et 0,5 km/s.

1.4. Objectif de cette étude

L'objectif de cette étude est d'utiliser les plus récentes mesures astrométriques des étoiles membres de l'association β Pictoris identifiées par BANYAN Σ (Gagné et al., 2018) afin de calculer un âge cinématique par retraceur à l'origine. Pour ce faire, on se sert principalement des mesures de position, de mouvement propre et de parallaxe du catalogue *Gaia* DR2, ainsi que des mesures de vitesse radiale disponibles dans divers relevés de la littérature. Une toute nouvelle méthode numérique, permettant d'importer les données, de retracer le parcours des étoiles et de calculer plusieurs indicateurs d'âge, a été développée et appliquée à l'association β Pictoris.

Chapitre 2

Âge cinématique de l'association β Pictoris

Dans ce chapitre, dont le contenu constitue le matériel de base d'un article en voie de publication, on décrit d'abord la méthode utilisée pour retracer l'origine et trouver l'âge cinématique d'une association locale jeune (YMG ; *young moving group* ; section 2.1), puis on caractérise la précision et l'exactitude de cette méthode, ainsi que sa susceptibilité à différents biais tels que les erreurs de mesure et le décalage vers le rouge gravitationnel (section 2.2). Finalement, les résultats de l'application de cette méthode à l'association β Pictoris (β PMG ; *β Pictoris moving group*) sont présentés (section 2.3) et analysés (section 2.4).

2.1. Méthodologie

2.1.1. Transformation des coordonnées

2.1.1.1. Vers les coordonnées galactiques

Il est nécessaire de transformer les observables de chaque étoile membre d'une association locale jeune en coordonnées galactiques afin d'en retracer l'origine. Ces observables sont : la parallaxe (π), la déclinaison (δ), l'ascension droite (α), la vitesse radiale ($v_r = dr/dt$), le mouvement propre en déclinaison ($\mu_\delta = d\delta/dt$) et le mouvement propre en ascension droite ($\mu_\alpha = d\alpha/dt$) multiplié par un facteur $\cos(\delta)$. On convertit d'abord π en distance (r) et on isole μ_α pour passer des observables à un système de coordonnées géocentrique d'axes équatoriaux, de position $r\delta\alpha$ et de vitesse $v_r\mu_\delta\mu_\alpha$, tel que r est la distance par rapport à l'origine, δ est l'angle par rapport au plan équatorial et α est l'angle sur le plan équatorial par rapport au point vernal (équinoxe du printemps), fixé à l'époque J2000.0 :

$$r = \frac{k}{\pi} \quad (2.1.1a)$$

$$\mu_\alpha = \frac{\mu_\alpha \cos(\delta)}{\cos(\delta)} \quad (2.1.1b)$$

où k est une constante qui dépend des unités de r et π . On utilise des parsecs (pc), des radians (rad), des millions d'années (Ma), des parsecs par million d'années (pc/Ma) et des radians par million d'années (rad/Ma) afin de simplifier les expressions mathématiques. Les valeurs numériques sont converties à partir de leurs unités usuelles au préalable lors de l'importation des données avant d'effectuer toute autre opération : π (milliseconde d'arc ; mas), δ et α (degré ; °), v_r (kilomètre par seconde, km/s), μ_δ et $\mu_\alpha \cos(\delta)$ (milliseconde d'arc par année ; mas/an). Ainsi, $k = \pi/648000 \approx 4,85 \cdot 10^{-6}$. On passe ensuite à un système de coordonnées héliocentrique d'axes galactiques, de position XYZ et de vitesse UVW où $U = dX/dt$, $V = dY/dt$ et $W = dZ/dt$. Les axes galactiques sont orientés de façon à ce que l'axe X soit dans la direction du centre de la Voie lactée, l'axe Y dans la direction de rotation du disque galactique (sens horaire, vu du pôle nord galactique) et Z dans la direction du pôle nord galactique :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} r \cos(\delta) \cos(\alpha) \\ r \cos(\delta) \sin(\alpha) \\ r \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (2.1.2a)$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \cos(\delta) \cos(\alpha) & -r \sin(\delta) \cos(\alpha) & -r \cos(\delta) \sin(\alpha) \\ \cos(\delta) \sin(\alpha) & -r \sin(\delta) \sin(\alpha) & r \cos(\delta) \cos(\alpha) \\ \sin(\delta) & r \cos(\delta) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \mu_\delta \\ \mu_\alpha \end{bmatrix} \quad (2.1.2b)$$

où R est une matrice de rotation permettant de passer des axes équatoriaux à galactiques et formée à partir de trois matrices de rotation :

$$R = \begin{bmatrix} \sin(l_G) & \cos(l_G) & 0 \\ -\cos(l_G) & \sin(l_G) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\delta_N) & \cos(\delta_N) \\ 0 & -\cos(\delta_N) & \sin(\delta_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_N) & \cos(\alpha_N) & 0 \\ -\cos(\alpha_N) & -\sin(\alpha_N) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.3a)$$

$$R = \begin{bmatrix} -0,054875657707 & -0,873437051953 & -0,483835073621 \\ 0,494109437203 & -0,444829721222 & 0,746982183981 \\ -0,867666137554 & -0,198076337284 & 0,455983813693 \end{bmatrix} \quad (2.1.3b)$$

où $l_G = 122,931925267^\circ$ est l'inclinaison du centre de la Voie lactée par rapport au plan équatorial, $\delta_N = 27,1282524167^\circ$ est la déclinaison du pôle nord galactique et $\alpha_N = 192,859477875^\circ$ est l'ascension droite du pôle nord galactique (Liu et al., 2010).

2.1.1.2. Vers les observables

Il est nécessaire de convertir les coordonnées galactiques en observables lors des simulations. Pour ce faire, on utilise les transformations inverses vers les coordonnées équatoriales :

$$\begin{bmatrix} r \\ \delta \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2} \\ \arcsin\left(\frac{Z}{\sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}}\right) \\ \arctan\left(\frac{Y'}{X'}\right) \end{bmatrix} \quad \text{où} \quad \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R^T \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.1.4a)$$

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \mu_\delta \\ \mu_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U'X' + V'Y' + Z'W'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}} \\ \frac{W'(X'^2 + Y'^2) - U'X'Z' + V'Y'Z'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}(X'^2 + Y'^2 + Z'^2)} \\ \frac{V'X' - U'Y'}{X'^2 + Y'^2} \end{bmatrix} \quad \text{où} \quad \begin{bmatrix} U' \\ V' \\ W' \end{bmatrix} = R^T \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (2.1.4b)$$

où, puisque la matrice inverse d'une matrice de rotation est sa transposée, $R^T = R^{-1}$. Puis, on passe aux observables en isolant π et $\mu_\alpha \cos(\delta)$ dans l'équation 2.1.1.

2.1.2. Trajectoires galactiques

Pour calculer la position des étoiles d'une association en fonction du temps, on néglige le potentiel gravitationnel galactique et on fait l'approximation que les étoiles se déplacent le long de trajectoires rectilignes avec des vitesses UVW constantes. Bien entendu, cette approximation n'est valide que pour des âges stellaires de quelques dizaines de millions d'années. En fait, puisque les étoiles dans le voisinage solaire ont à peu près la même période de révolution galactique que le Soleil, ~ 230 Ma, une trajectoire de 30 Ma décrit un arc de cercle de $\sim 45^\circ$ autour du centre galactique et non une ligne droite.

Toutefois, ce n'est pas la position des étoiles dans la Voie lactée, mais plutôt leurs positions XYZ les unes par rapport aux autres qui sont utiles pour calculer l'âge, alors il est possible de trouver un minimum réaliste dans la courbe des indicateurs d'âge, malgré l'approximation significative effectuée. À l'avenir, on se servira du module Python `Galpy` (Bovy, 2015) pour calculer des orbites galactiques précises.

2.1.3. Gestion des erreurs de mesure

Il est primordial de transformer les erreurs de mesure sur les observables dans un système de coordonnées héliocentrique d'axes galactiques afin de calculer l'erreur sur la position en fonction du temps. Pour ce faire, on applique l'équation 2.1.5 aux transformations de coordonnées :

$$dy = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} dx_i \right)^2} \quad (2.1.5)$$

où x_i est la variable indépendante i et y est une variable dépendante des variables x_i . Bien entendu, l'équation 2.1.5 fait l'hypothèse que toutes les variables x_i sont bel et bien indépendantes et ignore toute covariance entre celles-ci. Pour calculer l'erreur sur les indicateurs d'âge et, par conséquent, sur l'âge de l'association, on se sert d'une méthode Monte Carlo où $n = 1000$ associations sont simulées en appliquant une erreur gaussienne centrée autour de la mesure, dont l'écart-type correspond à l'erreur de mesure sur l'observable. Lors de simulations, on attribue à chaque étoile artificielle des erreurs correspondant aux erreurs de mesure sur une véritable étoile membre de l'association β Pictoris.

2.1.4. Décalage vers le rouge gravitationnel

2.1.4.1. Principe

Le décalage vers le rouge gravitationnel (z_{grav}) est un phénomène découlant de la relativité générale. Un photon émis dans un champ gravitationnel subit un décalage spectral vers le rouge lorsqu'il est observé par un observateur situé dans un champ gravitationnel plus faible. On utilise la métrique de Schwarzschild (Schwarzschild, 1916) :

$$1 + z_{grav} = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda} = \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} \right)^{-1/2} \quad (2.1.6)$$

où λ_{obs} est la longueur d'onde du photon mesurée par un observateur situé sur Terre, λ est la longueur d'onde du photon lors de son émission à la surface d'une étoile de rayon r et de masse m , G est la constante gravitationnelle et c est la vitesse la lumière. Ce décalage peut avoir un impact sur les mesures de vitesse radiale, obtenues en mesurant le décalage spectral dû à l'effet Doppler ($z_{Doppler}$). Puisque $v_r \lll c$, l'effet Doppler non relativiste est utilisé :

$$1 + z_{Doppler} = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda} = 1 + \frac{v_r}{c} \quad (2.1.7)$$

où $v_r > 0$ si l'étoile s'éloigne de l'observateur. En d'autres mots, le décalage vers le rouge gravitationnel induit un biais $\Delta v_{r, grav}$ sur les mesures de vitesse radiale vers des valeurs plus élevées correspondant à des longueurs d'onde plus grandes. Pour estimer ce biais, on égalise les équations 2.1.6 et 2.1.7, et isole v_r (redéfini comme $\Delta v_{r, grav}$) :

$$\Delta v_{r, grav} = c \left(\left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} \right)^{-1/2} - 1 \right) \quad (2.1.8)$$

2.1.4.2. Correction de la vitesse radiale

On peut utiliser l'équation 2.1.8 pour calculer le biais $\Delta v_{r, grav}$ sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel des étoiles de notre échantillon et appliquer une correction inverse. La plupart des membres de l'association β Pictoris sont des étoiles naines M, pour lesquelles le biais oscille entre 0,4 et 0,6 km/s, alors on adopte une correction uniforme $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur les mesures de vitesse radiale. Dans le futur, on appliquera une correction plus détaillée tenant compte du type spectral ou, plus justement, de la masse et du rayon de chaque étoile.

Il est à noter que ce genre de correction uniforme n'a d'utilité que pour une association étendue sur une grande fraction de la sphère céleste, car malgré que la norme Δv_r du vecteur de correction soit la même pour toutes les étoiles, sa direction varie d'une étoile à l'autre, selon leur position sur la sphère céleste. Autrement dit, si une correction uniforme est appliquée à une association peu étendue, cela est équivalent à modifier la vitesse UVW moyenne de l'association, sans modifier les vitesses UVW des étoiles les unes par rapport aux autres, ce qui n'a aucun impact sur l'âge calculé.

2.1.5. Calcul de l'âge

Pour déterminer l'âge d'une association locale jeune, on cherche l'âge auquel une mesure de son étendue (un indicateur d'âge) est minimale. Cette méthode est limitée théoriquement par l'étendue initiale de l'association ainsi que par le nombre d'étoiles dans l'association : plus l'étendue initiale est petite et plus le nombre de membres est grand, plus le calcul de l'âge sera précis. On compare cinq indicateurs d'âge distincts : la dispersion (σ), la déviation médiane absolue (MAD ; *median absolute deviation*), la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST ; *minimum spanning tree*) reliant les membres de l'association, la MAD de la longueur des branches de ce même MST et les covariances $X-U$,

$Y-V$ et $Z-W$ entre les positions XYZ et les vitesses UVW des étoiles. Ces indicateurs d'âge sont calculés à chaque pas de temps lors du retracement à l'origine.

2.1.5.1. *Dispersion*

Pour calculer la dispersion des membres d'une association, on calcule d'abord leur position moyenne \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \frac{1}{n} \sum_i^n \mathbf{r}_i \quad (2.1.9)$$

où \mathbf{r}_i est la position de l'étoile i et n le nombre de membres dans l'association. On calcule également la distance r_i de chaque étoile i par rapport à \mathbf{R} :

$$r_i = \sqrt{\sum_j (r_{i,j} - R_j)^2} \quad (2.1.10)$$

où $r_{i,j}$ est la composante j de la position \mathbf{r}_i de l'étoile i et R_j est la composante j de \mathbf{R} . Puis, on calcule la composante σ_j de l'écart-type de la position \mathbf{r}_i des étoiles i :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (r_{i,j} - R_j)^2} \quad (2.1.11)$$

C'est à ce point qu'on applique une correction pour tenir compte de l'impact des erreurs de mesure. En effet, les erreurs sur les mesures de la position et de la vitesse ajoutent une dispersion artificielle aux données. Cette dispersion s'accroît à mesure que l'association est retracée à une époque lointaine, principalement à cause des incertitudes sur les vitesses UVW des membres de l'association. Il y a donc deux composantes à la courbe de la dispersion en fonction de l'âge : une dispersion intrinsèque (σ_{int}), due à l'expansion de l'association et centrée (minimale) autour de l'âge de l'association, et une dispersion extrinsèque (σ_{ext}) associée aux erreurs de mesure et centrée (minimale) à l'époque actuelle. Ainsi, les erreurs de mesure causent un élargissement du minimum de la courbe de l'écart-type σ_j en fonction de l'âge, une augmentation de la valeur du minimum et, surtout, un déplacement du minimum vers un âge plus jeune. σ_{int} est bien entendu la valeur recherchée. On modélise σ_{ext} par :

$$\sigma_{\text{ext},j}(t) = \sqrt{\Delta r_{i,j}^2 + \Delta v_{i,j}^2 t^2} \quad (2.1.12)$$

où Δr_j et Δv_j sont respectivement l'erreur moyenne sur la composante j de la position XYZ et de la vitesse UVW au temps t . En d'autres mots, on modélise une fausse association contenant le même nombre n d'étoiles, mais dont la dispersion des membres dans le temps est uniquement due aux erreurs de mesure. Cette correction est imparfaite et néglige un terme

croisé dans l'équation 2.1.12, mais il est nécessaire de faire une correction pour obtenir des âges réalistes. La dispersion est l'unique indicateur d'âge pour lequel une telle correction est appliquée, car c'est seulement pour celui-ci qu'il est relativement simple de modéliser le biais dû aux erreurs de mesure sur l'âge de l'association. On cherchera à vérifier si cette correction est efficace et permet à la dispersion de se distinguer par rapport aux autres indicateurs d'âge. Puisque les écarts-types σ_a et σ_b de deux variables aléatoires a et b peuvent s'additionner en quadrature pour obtenir l'écart-type σ_{a+b} de $a + b$, on écrit que :

$$\sigma_{\text{int},j} = \sqrt{\sigma_j^2 - \sigma_{\text{ext},j}^2} \quad (2.1.13)$$

où $\sigma_{\text{int},j}$ et $\sigma_{\text{ext},j}$ sont les composantes j de σ_{int} et σ_{ext} respectivement. Pour obtenir la dispersion intrinsèque totale σ_{int} des membres de l'association, on additionne les composantes $\sigma_{\text{int},j}$ en quadrature pour obtenir la dispersion σ :

$$\sigma = \sigma_{\text{int}} = \sqrt{\sum_j \sigma_{\text{int},j}^2} \quad (2.1.14)$$

2.1.5.2. *Élimination des données déviantes*

Le principal désavantage d'utiliser la dispersion comme indicateur d'âge est sa susceptibilité aux données déviantes dans l'échantillon utilisé. Si les vitesses UVW de quelques membres sont inexactes ou imprécises, l'âge obtenu serait trop jeune. Il est donc important de s'assurer que tous les membres sélectionnés appartiennent bel et bien à l'association et d'utiliser les mesures astrométriques les plus précises possible, surtout celles de parallaxe et de vitesse radiale. De plus, si une étoile s'éloigne à plus de 3σ de la position XYZ moyenne de l'association lors du retracement à l'origine, celle-ci est éliminée, et la position XYZ moyenne et la dispersion en position XYZ des étoiles membres restantes sont recalculées. Cette étape est répétée jusqu'à ce que $r_i < 3\sigma$ (2.1.10) pour toutes les étoiles i de l'échantillon. Les étoiles rejetées sont également exclues du calcul des autres indicateurs d'âge.

2.1.5.3. *Déviation médiane absolue*

La déviation médiane absolue (MAD ; *median absolute deviation*) consiste à calculer, dans chaque axe, la médiane de la valeur absolue de l'écart par rapport à la position médiane de chaque étoile membre de l'association. La composante MAD_j de la MAD est :

$$\text{MAD}_j = \text{médiane}\left(\left|r_{i,j} - \tilde{r}_j\right|\right) \quad (2.1.15)$$

où $r_{i,j}$ est la composante j de la position \mathbf{r}_i de l'étoile i et $\tilde{r}_j = \text{médiane}(r_{i,j})$ est la composante j de la valeur médiane des positions \mathbf{r}_i des étoiles i . Alors, la MAD est :

$$\text{MAD} = \sqrt{\sum_j \text{MAD}_j^2} \quad (2.1.16)$$

Puisque la MAD repose sur le calcul de la médiane, c'est un indicateur d'âge moins susceptible aux données déviantes que la dispersion.

2.1.5.4. *Arbre couvrant de poids minimal*

Un arbre couvrant de poids minimal (MST ; *minimum spanning tree*) est un type de graphe non orienté, convexe et pondéré connectant tous les points d'un ensemble, et dont la longueur totale des branches, c'est-à-dire les lignes droites reliant les points entre eux, est minimale. Ce type de graphe fut inventé au début de 20^e siècle pour résoudre un type de problème consistant à relier des habitations à un réseau électrique ou téléphonique en minimisant la longueur totale des câbles à installer et, par extension, les coûts d'installation. La taille du MST reliant toutes les étoiles d'une association peut donc être utilisée pour mesurer son étendue.

L'intérêt de se servir de cette mesure de l'âge est que celle-ci est indépendante de la géométrie d'une association. En effet, les associations ont, en général, une forme complexe évoluant dans le temps difficile à modéliser et dont les axes principaux n'ont pas nécessairement la même orientation que le système de coordonnées utilisé. L'usage d'un MST, au lieu d'une mesure plus simple de l'étendue d'une association comme la dispersion ou la MAD, pourrait donc permettre d'obtenir un âge cinématique plus juste, au coût d'un temps de calcul significativement plus long qu'avec d'autres mesures plus rapides à calculer. De nombreux algorithmes ont été développés pour trouver les branches du MST reliant un ensemble de points, notamment :

Algorithme de Prim. En partant d'un point quelconque, on calcule la distance vers tous les points à l'extérieur de l'arbre à partir des points à l'intérieur de l'arbre, puis on ajoute la branche la plus courte et le nouveau point à l'arbre, et on recommence jusqu'à ce que le graphe soit un arbre couvrant, c'est-à-dire un graphe reliant tous les points d'un ensemble. La performance de cet algorithme est meilleure si les points sont rapprochés les uns par rapport aux autres (Prim, 1957).

Algorithme de Kruskal. D'abord, la longueur des $n(n-1)/2$ branches possibles, où n est le nombre de points, est calculée et les branches sont ordonnées en ordre croissant. Puis, les branches sont ajoutées une à une à l'arbre, pourvu que celles-ci ne connectent pas deux points déjà connectés par d'autres branches, c'est-à-dire deux points qui ne font pas déjà partie du même arbre, jusqu'à ce que le graphe soit couvrant (Kruskal, 1956). C'est ce type d'algorithme qui est implémenté dans cette étude, où chaque étoile d'une association est représentée par un point du graphe. Pour déterminer si deux étoiles sont déjà connectées, on associe à chaque étoile un noeud et à chaque noeud, un noeud parent (un noeud isolé n'a pas de parent). Si l'ancêtre le plus vieux du noeud d'une étoile est différent de celui d'une autre étoile, alors les deux étoiles font partie d'arbres différents et la branche reliant les deux étoiles est validée.

Une fois qu'on a trouvé les branches du MST des membres d'une association à chaque pas de temps, on obtient son âge en minimisant deux mesures distinctes de la taille du MST : la longueur moyenne et la MAD de la longueur des branches du MST.

2.1.5.5. *Longueur moyenne des branches*

La longueur L_i d'une branche i du MST reliant deux étoiles a et b est :

$$L_i = \sqrt{\sum_j (r_{b,j} - r_{a,j})^2} \quad (2.1.17)$$

où $r_{a,j}$ et $r_{b,j}$ sont, respectivement, les composantes j des positions \mathbf{r}_a et \mathbf{r}_b des étoiles a et b . La longueur moyenne des branches du MST (\bar{L}) est simplement :

$$\bar{L} = \frac{1}{n-1} \sum_i^{n-1} L_i \quad (2.1.18)$$

où n est le nombre de membres dans l'association. Puisqu'il utilise une simple moyenne arithmétique, cet indicateur d'âge est susceptible aux données déviantes et est équivalent à utiliser la longueur totale des branches du MST.

2.1.5.6. *Déviante médiane absolue de la longueur des branches*

Pour trouver la MAD de la longueur des branches du MST (L_{MAD}), on calcule d'abord la médiane $\tilde{L} = \text{médiane}(L_i)$ de la longueur des branches i du MST, puis on calcule la MAD de façon analogue à l'équation 2.1.15 :

$$L_{\text{MAD}} = \text{médiane}\left(\left|L_i - \tilde{L}\right|\right) \quad (2.1.19)$$

Puisqu'il repose sur le calcul de la médiane au lieu de la moyenne de la longueur des branches i du MST, cet indicateur d'âge est moins susceptible aux données déviantes.

2.1.5.7. Covariances entre la position et la vitesse

La dernière méthode utilisée est celle de la minimisation des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ entre les positions XYZ et les vitesses UVW des étoiles. En effet, à l'époque de la formation stellaire, les corrélations entre la position XYZ et la vitesse UVW d'une étoile sont minimales. Toutefois, à mesure que les membres de l'association se déplacent le long de trajectoires que l'on considère rectilignes, on s'attend à ce que la valeur absolue des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ augmente. C'est d'ailleurs de ce principe dont se servent Crundall et al. (2019) pour trouver un âge cinématique pour l'association β Pictoris. La covariance $\text{Cov}(X, U)$ entre les variables X et U , par exemple, est définie par :

$$\text{Cov}(X, U) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mathbb{E}(X))(U_i - \mathbb{E}(U)) \quad (2.1.20)$$

où $\mathbb{E}(X)$ et $\mathbb{E}(U)$ sont respectivement l'espérance mathématique (moyenne arithmétique) de X et U , X_i et U_i sont la position X et la vitesse U de l'étoile i , et n est le nombre de membres dans l'association. Les covariances $\text{Cov}(Y, V)$ et $\text{Cov}(Z, W)$ sont définies de façon analogue à $\text{Cov}(X, U)$.

2.2. Simulations

2.2.1. Création d'un modèle de l'association β Pictoris

Afin de caractériser la méthode du retracement à l'origine, il est nécessaire de construire un modèle d'association d'âge connu, représentatif de l'association β Pictoris, en créant un échantillon artificiel d'étoiles à l'époque de leur formation et projetant ces dernières à l'époque actuelle. Les propriétés observationnelles de 46 membres sélectionnés de l'association β Pictoris ainsi que leurs propriétés cinématiques, c'est-à-dire leurs positions XYZ et leurs vitesses UVW , calculées à partir des équations de la section 2.1.1.1, sont présentées dans les tableaux B.1 et B.2 respectivement à l'annexe B. À partir de ces données, on calcule la valeur moyenne, l'erreur moyenne et l'écart-type des propriétés observationnelles et cinématiques

Tableau 2.1. Propriétés observationnelles de l’association β Pictoris.

Propriété	π	δ	α	v_r	μ_δ	$\mu_\alpha \cos(\delta)$
	[mas]	[°]	[°]	[km/s]	[mas/an]	[mas/an]
Valeur moyenne	31,2	−32,9	202,1	4,9	−72,8	43,9
Erreur moyenne	0,21	0,0	0,0	0,98	0,32	0,27
Écart-type	16,0	27,8	117,8	9,4	68,8	79,1

Note. Parallaxe (π), déclinaison (δ), ascension droite (α), vitesse radiale (v_r), mouvement propre propre en déclinaison (μ_δ), mouvement propre propre en ascension droite (μ_α). Les erreurs sur δ et α sont négligeables.

Tableau 2.2. Propriétés cinématiques de l’association β Pictoris.

Propriété	X	Y	Z	U	V	W
	[pc]	[pc]	[pc]	[km/s]	[km/s]	[km/s]
Valeur moyenne	16,4	−5,9	−16,4	−10,9	−15,8	−8,9
Erreur moyenne	0,05	0,04	0,04	0,13	0,13	0,12
Écart-type	30,9	14,2	8,1	2,23	0,91	0,86

Note. La position XYZ et la vitesse UVW de l’association sont données dans un système de coordonnées héliocentrique d’axes galactiques.

(tableaux 2.1 et 2.2 respectivement) des membres de l’association β Pictoris. On remarque que l’écart-type de toutes les valeurs est significatif, sauf celui de la vitesse UVW moyenne des membres de l’association, qui est beaucoup plus petit. En effet, comme mentionné à la section 1.1.2, l’association β Pictoris est très étendue sur la sphère céleste et étant donné que les étoiles membres sont identifiées sur la base de leurs vitesses UVW , il est normal que l’écart-type de la vitesse UVW moyenne des membres de l’association soit petit. L’objectif n’est pas de créer une copie exacte de l’association β Pictoris, mais de créer un modèle simple et représentatif. Alors, on adopte un âge de 24 Ma en se basant principalement sur les âges obtenus par les méthodes des isochrones et de la limite d’épuisement du lithium (LDB ; *lithium depletion boundary* ; section 1.2.2). Au total, 1000 modèles d’associations distincts sont créés, chacun contenant le même nombre d’étoiles que le nombre de membres identifiés dans l’association β Pictoris, soit 46.

On crée un modèle d’association sphérique, dont la position XYZ et la vitesse UVW moyennes des membres sont égales à celles des membres de l’association β Pictoris à l’époque actuelle. La position XYZ moyenne initiale réelle de ces derniers est inconnue, mais on peut recentrer l’association simulée autour de la position XYZ moyenne actuelle des membres de l’association β Pictoris après avoir projeté les positions XYZ des membres de l’association simulée à l’époque actuelle, soit 24 Ma dans le futur. Ainsi, à l’époque de la formation stellaire, les composantes de la position XYZ moyenne de membres de l’association simulée sont $\langle X \rangle = \langle Y \rangle = \langle Z \rangle = 0,0$ pc, puis l’association est recentrée autour de $\langle X \rangle = 16,4$ pc, $\langle Y \rangle = -5,9$ pc et $\langle Z \rangle = -16,4$ pc à l’époque actuelle. Puisqu’on considère les vitesses UVW des étoiles membres comme étant constantes, on adopte les composantes de la vitesse UVW moyenne actuelle des membres de l’association β Pictoris, soit $\langle U \rangle = -10,9$ km/s, $\langle V \rangle = -15,8$ km/s et $\langle W \rangle = -8,9$ km/s.

On assigne à chaque étoile une position XYZ et une vitesse UVW uniques à partir de distributions de probabilité gaussiennes sphériques, dont les trois composantes sont égales. Les composantes de la dispersion en position XYZ (σ_{XYZ}) des membres de l’association β Pictoris à l’époque de la formation stellaire ne sont pas connues, uniquement leurs valeurs à l’époque actuelle. Toutefois, on sait que l’association s’est formée lors de l’effondrement d’un nuage moléculaire unique, dont l’étendue était beaucoup plus petite que celle de l’association à l’époque actuelle. Puisque la dispersion en Z actuelle des membres de l’association β Pictoris est de 8,1 pc, on adopte $\sigma_{XYZ} = \sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = 5,0$ pc, une valeur légèrement inférieure. En effet, les étoiles se déplacent le long d’orbites galactiques circonscrites par le disque de la Voie lactée en oscillant selon l’axe des Z (Miret-Roig et al., 2018), alors leur dispersion en Z demeure plus petite par rapport à leurs dispersions en X et en Y . Les composantes de la dispersion en vitesse UVW (σ_{UVW}) des membres de l’association simulée sont choisies pour que le volume de la sphère définie par un rayon égal à ces composantes soit égal au volume de l’ellipsoïde défini par des axes principaux égaux aux composantes de la dispersion en vitesse UVW des membres de l’association β Pictoris. Alors, en utilisant les valeurs du tableau 2.2, on adopte $\sigma_{UVW} = \sigma_U = \sigma_V = \sigma_W = 1,2$ km/s.

Pour simuler les erreurs de mesure, les coordonnées galactiques des étoiles simulées à l’époque actuelle sont transformées en observables (section 2.1.1.2), puis un bruit gaussien, dont l’écart-type correspond à la précision des mesures sur les observables des membres de

l'association β Pictoris, est ajouté afin de reproduire la qualité des données. Ainsi, on applique des erreurs uniques à chaque étoile simulée avec des valeurs moyennes de $\langle \Delta\pi \rangle = 0,21$ mas, $\langle \Delta v_r \rangle = 0,98$ km/s, $\langle \Delta\mu_\delta \rangle = 0,32$ mas/an et $\langle \Delta\mu_\alpha \cos(\delta) \rangle = 0,27$ mas/an. Les erreurs $\Delta\delta$ et $\Delta\alpha$ sont nulles pour tous les membres de l'association simulée. Finalement, les observables sont retransformées en coordonnées galactiques (section 2.1.1.1) et le parcours des étoiles est retracé de l'époque actuelle jusqu'à 30 Ma dans le passé sur 200 pas de temps.

2.2.2. Précision théorique

Même avec des mesures d'une précision infinie, la précision de la méthode du retracement à l'origine est limitée théoriquement par le nombre de membres et la dispersion initiale, à l'époque de la formation stellaire. En effet, plus une association est étendue initialement, plus la probabilité que l'âge où l'on trouve une dispersion minimale soit différent de l'âge réel sera grande, mais cet écart entre les deux sera statistiquement plus petit, plus la population est grande. Toutefois, inclure davantage de membres dans l'échantillon étudié afin d'améliorer la précision théorique peut réduire la précision réelle de la méthode, car l'incertitude sur l'âge est aussi sensible aux erreurs de mesure et à la présence de données déviantes.

La figure 2.1 montre l'incertitude minimale théorique de notre méthode de retracement à l'origine, sans erreurs de mesure, selon le nombre de membres, la dispersion initiale et l'indicateur d'âge utilisé. L'association étant sphérique, les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ sont équivalentes. Leur incertitude minimale moyenne est présentée à la figure 2.2e. Comme prévu, l'incertitude minimale est nulle si la dispersion initiale est nulle, et plus élevée, plus la dispersion initiale est élevée et plus le nombre de membres est petit. Pour une association de 46 membres avec une dispersion en position XYZ initiale de 5,0 pc, l'incertitude théorique est de 0,35 Ma pour la dispersion, 0,62 Ma pour la moyenne des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$, 0,65 Ma pour la longueur moyenne des branches du MST, 0,96 Ma pour la MAD et 1,7 Ma pour la MAD de la longueur des branches du MST. L'âge trouvé n'est pas biaisé par rapport à l'âge théorique de 24 Ma pour tous les indicateurs d'âge. Ainsi, l'incertitude minimale théorique de notre méthode est plus petite que l'incertitude sur l'âge de l'association β Pictoris obtenue par la plupart des études précédentes utilisant les méthodes des isochrones, de la LDB ou du retracement à l'origine. Deux indicateurs d'âge se distinguent particulièrement à cet égard, soit la dispersion et les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$.

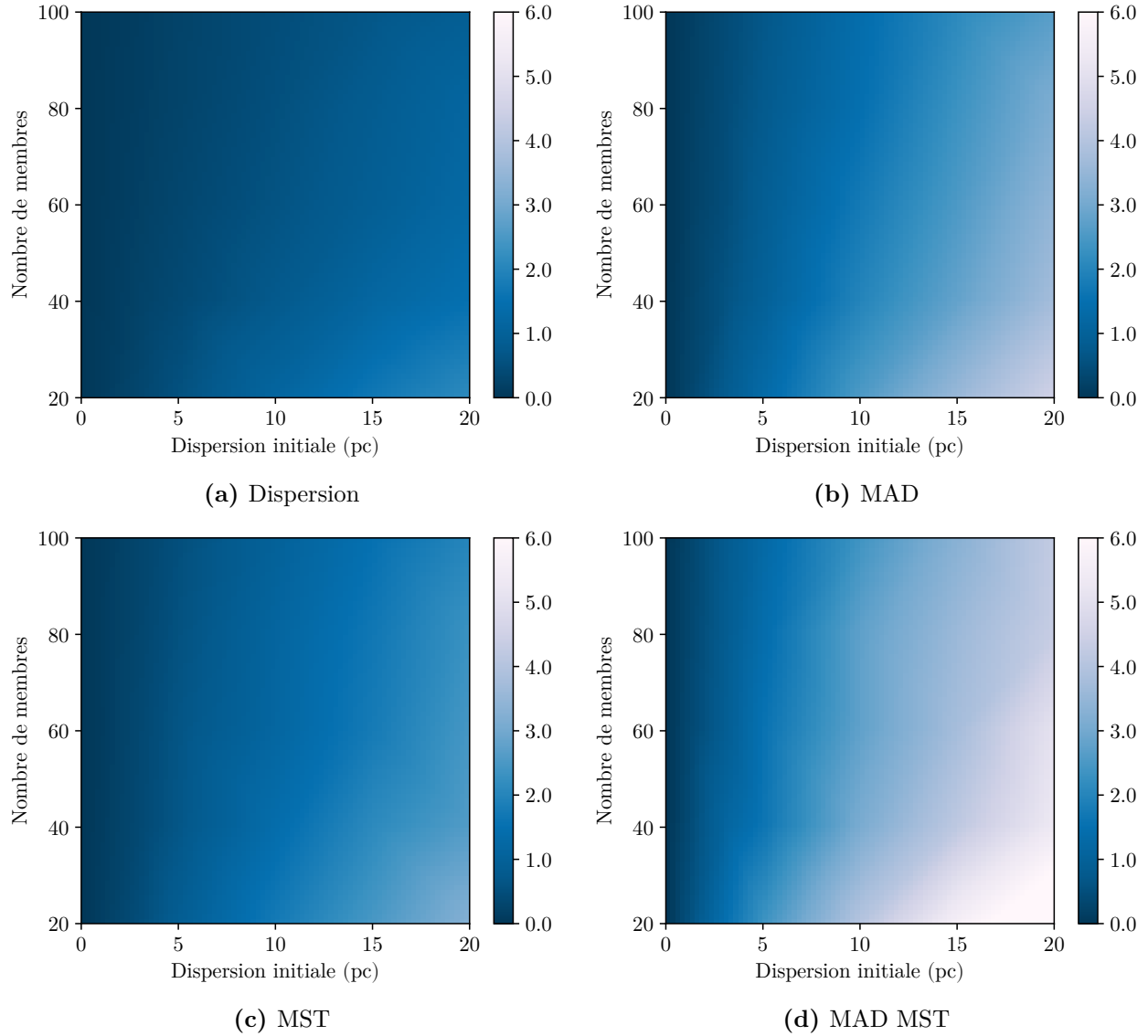
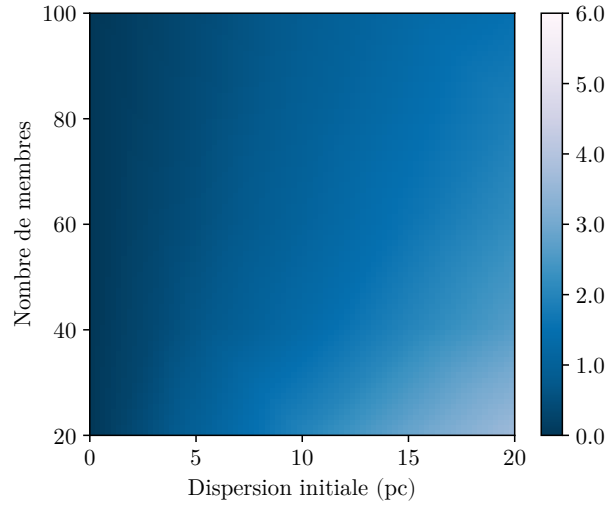


Figure 2.1. Incertitude minimale théorique sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, sans erreurs de mesure, selon le nombre de membres, la dispersion initiale (pc) et l'indicateur d'âge utilisé : la dispersion (σ ; a), la déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*; b), la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*; c), la MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST; d) et la moyenne des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ (e). On suppose des distributions gaussiennes sphériques des positions XYZ ($\sigma_{XYZ} = 5,0$ pc) et des vitesses UVW ($\sigma_{UVW} = 1,2$ km/s) des étoiles membres de l'association simulée. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'une méthode Monte Carlo ($n = 1000$).



(e) Moyenne des covariances

Figure 2.1. (Suite)

2.2.3. Impact des erreurs de mesure

En réalité, les mesures astrométriques possèdent toutes des erreurs, notamment les mesures de vitesse radiale et de parallaxe. L'effet de ces erreurs de mesure est démontré par la figure 2.2 où l'on présente un retraceur à l'origine effectué sans et avec des erreurs de mesure. Sur cette figure, ainsi que toutes les autres figures similaires (figures 2.4, 2.6 et 2.8), les courbes des indicateurs d'âge en fonction du temps sont normalisées par rapport à leur valeur à l'époque actuelle. On remarque que l'ajout d'erreurs de mesure augmente l'incertitude pour tous les indicateurs d'âge : 1,2 Ma pour la dispersion, 1,73 Ma pour la moyenne des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$, 1,76 Ma pour la longueur moyenne des branches du MST, 2,64 Ma pour la MAD et 4,94 Ma pour la MAD de la longueur des branches du MST. Dans tous les cas, c'est une augmentation significative de l'incertitude. De plus, l'incertitude sur l'âge obtenu à l'aide de la dispersion est équivalente à celle obtenue par **Chronostar** (Cruddall et al., 2019), alors que les incertitudes obtenues à l'aide des autres indicateurs d'âge sont similaires à celles obtenues par les méthodes des isochrones et de la LDB (3 – 4 Ma) utilisées par des études précédentes.

En plus d'augmenter l'incertitude sur l'âge, les erreurs de mesure ont aussi pour effet de biaiser l'âge obtenu vers des valeurs plus jeunes avec un décalage par rapport à l'âge réel de $\sim -4,6$ Ma. On en conclut que la correction appliquée sur la dispersion afin de

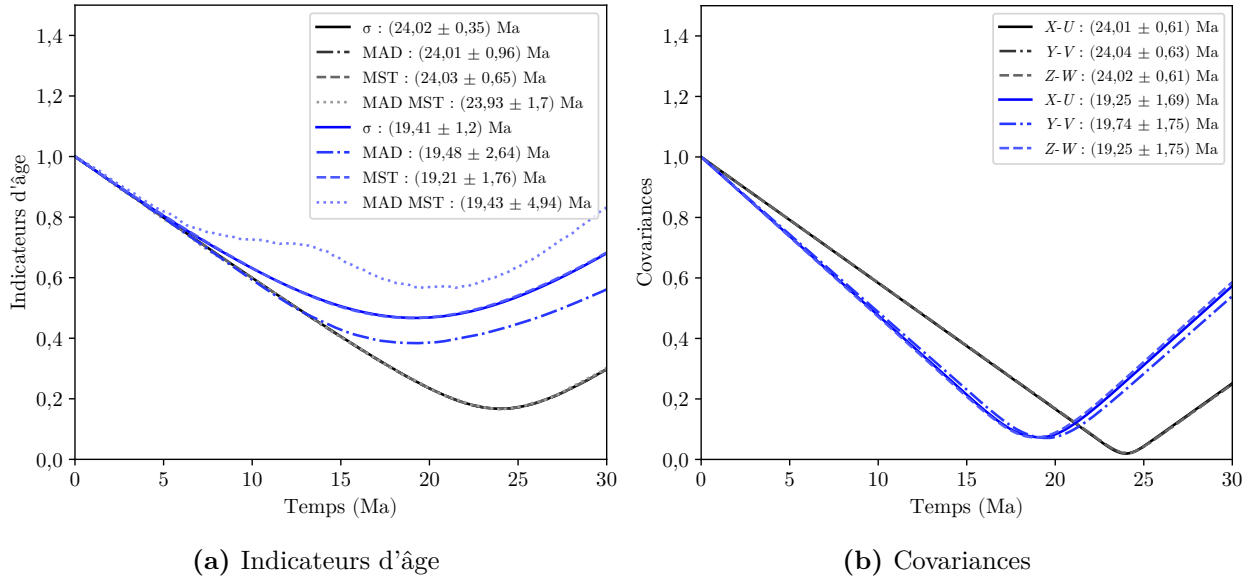


Figure 2.2. Impact des erreurs de mesure sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, composée de 46 membres, mesuré en minimisant la dispersion (σ), la déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*), la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*), la MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST; a), et les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ (b). Les courbes noires représentent des retracements à l'origine sans erreurs de mesure et les courbes bleues, des retracements à l'origine avec des erreurs de mesure correspondant aux véritables erreurs sur les mesures astrométriques des membres l'association β Pictoris (β PMG; β Pictoris moving group). La légende montre l'âge correspondant au minimum de la courbe selon l'indicateur d'âge utilisé. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'une méthode Monte Carlo ($n = 1000$). Les courbes sont normalisées par rapport à leur valeur à l'époque actuelle.

minimiser ce biais, dû à l'addition des dispersions σ_{ext} et σ_{int} (section 2.1.5.1), est inefficace. En fait, la correction appliquée pour tenir compte de σ_{ext} , ne fait une différence que de 0,7 % entre les courbes de la dispersion corrigée et non corrigée. On compare aussi le contraste des différents indicateurs d'âge, c'est-à-dire l'amplitude du minimum de la courbe de l'indicateur d'âge en fonction du temps, normalisée par rapport à la valeur initiale à l'époque actuelle. Plus cette valeur, qui varie entre 0,0 et 1,0, est proche de 0,0, meilleur est le contraste. Sans erreurs de mesure, le contraste est de 0,02 pour la moyenne des covariances et de 0,17, en moyenne, pour les autres indicateurs d'âge. Le constat est tout autre lorsque les erreurs de

mesure sont ajoutées : les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ ont toujours le meilleur contraste, 0,07, alors que le contraste est de 0,38 pour la MAD, 0,47 pour la dispersion et la longueur moyenne des branches du MST, et 0,57 pour la MAD de la longueur des branches du MST. Comme prévu, avec ou sans erreurs de mesure, il n’y a pas de différence significative parmi les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$, car l’association simulée est sphérique. En résumé, les erreurs de mesure affectent négativement l’incertitude, le biais et le contraste des indicateurs d’âge. Les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ ont le meilleur contraste et la dispersion, l’incertitude la plus faible. La MAD montre aussi un bon contraste et une incertitude moyenne.

2.2.4. Impact du décalage vers le rouge gravitationnel

Le biais $\Delta v_{r, grav}$ sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel (section 2.1.4) a également un impact sur les âges obtenus par retracement à l’origine. La figure 2.3 montre cet impact ainsi que l’impact des erreurs de mesure sur la vitesse radiale. On remarque qu’un biais ajouté artificiellement $\Delta v_{r, grav} \sim 0,5$ km/s, typique des membres l’association β Pictoris, engendre un biais significatif sur l’âge obtenu. Les erreurs de mesure sur la vitesse radiale causent aussi un décalage important, mais ce dernier pourrait être abaissé à l’aide de mesures plus précises. Par exemple, une erreur de mesure moyenne sur la vitesse radiale de 0,5 km/s, ce qui est à la portée des instruments actuels, réduirait le biais sur l’âge obtenu de près de 2 Ma par rapport à une erreur de mesure moyenne de 1,0 km/s, typique des membres de l’association β Pictoris.

La figure 2.4 montre le retracement à l’origine d’une association simulée avec et sans l’ajout d’un biais $\Delta v_{r, grav} = 0,5$ km/s sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel. L’incertitude sur l’âge est améliorée pour tous les indicateurs d’âge : 1,0 Ma pour la dispersion, 1,37 Ma pour la moyenne des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$, 1,43 pour la longueur moyenne des branches du MST, 2,17 pour la MAD et 3,38 pour la MAD de la longueur des branches du MST. Par contre, l’ajout du biais $\Delta v_{r, grav}$ augmente significativement la valeur absolue du biais sur l’âge de l’association : $-6,37$ Ma pour la MAD de la longueur des branches du MST, $-6,83$ Ma pour la moyenne des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ et la dispersion, $-6,99$ Ma pour la MAD et $-7,02$ Ma pour la longueur moyenne des branches du MST. Quant au contraste, il est amélioré pour tous les indicateurs d’âge : 0,06 pour la moyenne des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$, 0,33 pour la MAD, 0,4

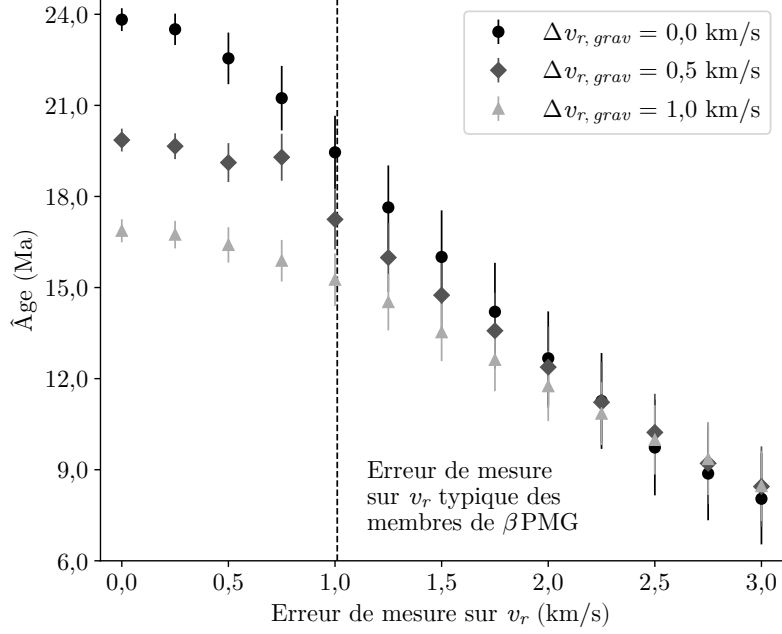


Figure 2.3. Impact d’un biais $\Delta v_{r,grav}$ sur les mesures de vitesse radiale (v_r) dû au décalage vers le rouge gravitationnel sur l’âge (Ma) d’une association simulée de 24 Ma, composée de 46 membres, mesuré en minimisant la dispersion (σ) des membres de l’association selon l’erreur de mesure sur la vitesse radiale (km/s). Une erreur de mesure de $\sim 1,0$ km/s (ligne pointillée) et un biais $\Delta v_{r,grav} = 0,5$ km/s (losanges) sur les mesures de vitesse radiale sont typiques des membres de l’association β Pictoris (β PMG; β Pictoris moving group). On présente également, à titre de comparaison, l’impact d’un biais nul $\Delta v_{r,grav} = 0,0$ km/s (cercles) et d’un biais $\Delta v_{r,grav} = 1,0$ km/s (triangles), typique des étoiles les moins massives de l’association. Les erreurs de mesure sur les autres mesures astrométriques, notamment la parallaxe (π), sont également prises en compte.

pour la dispersion et la longueur moyenne des branches du MST, et 0,49 pour la MAD de la longueur des branches du MST. Ainsi, l’ajout d’un biais systématique $\Delta v_{r,grav}$ sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel fait en sorte que le minimum des courbes des indicateurs d’âge est atteint à un âge plus jeune et qu’il est mieux défini. Cela est imputable au fait qu’un biais $\Delta v_{r,grav} > 0$ sur les mesures de vitesse radiale des membres d’une association qui s’étend sur toute la sphère céleste modifie les vitesses radiales mesurées dans des directions divergentes. Lors du retracement à l’origine, les vitesses UVW des étoiles membres sont inversées et, par conséquent, leur convergence est plus rapide ($v_r > 0$ signifie que l’étoile s’éloigne de l’origine du système de coordonnées).

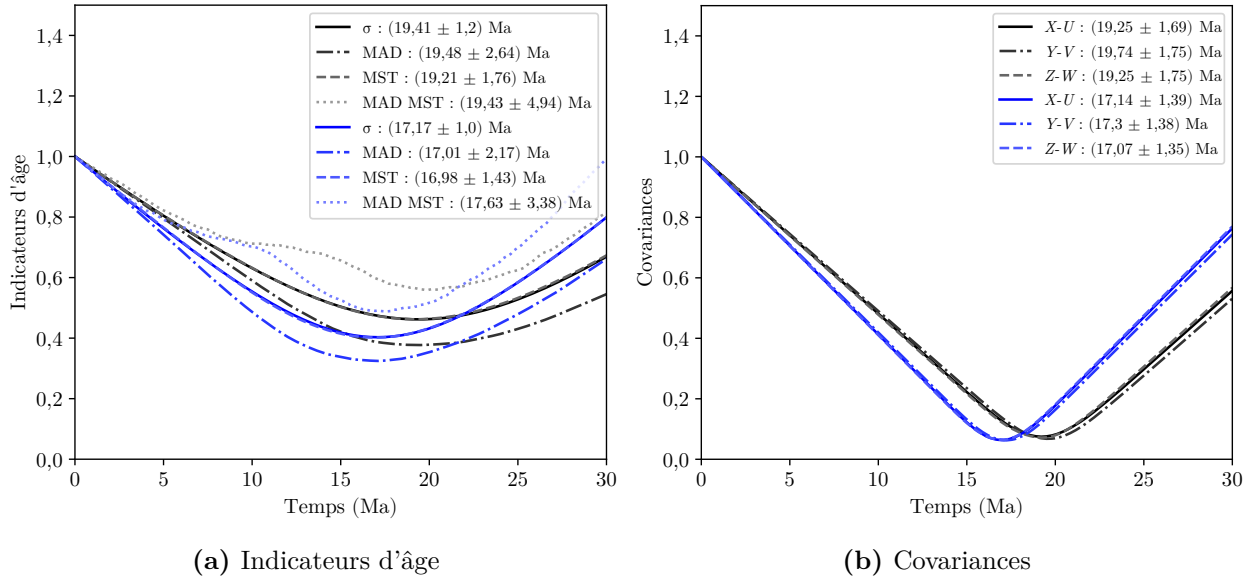


Figure 2.4. Impact du décalage vers le rouge gravitationnel sur l'âge (Ma) d'une association simulée de 24 Ma, composée de 46 membres, mesuré en minimisant la dispersion (σ), la déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*), la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*), la MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST; a), et les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ (b). Les courbes noires représentent des retracements à l'origine sans biais $\Delta v_{r,grav}$ sur les mesures de vitesse radiale (v_r) dû au décalage vers le rouge gravitationnel et les courbes bleues, des retracements à l'origine avec un biais $\Delta v_{r,grav} = 0,5$ km/s correspondant au biais typique des membres de l'association β Pictoris (β PMG; β Pictoris moving group). Les erreurs sur les mesures astrométriques typiques des membres de l'association β Pictoris sont également ajoutées. La légende montre l'âge correspondant au minimum de la courbe selon l'indicateur d'âge utilisé. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'une méthode Monte Carlo ($n = 1000$). Les courbes sont normalisées par rapport à leur valeur à l'époque actuelle.

Puisque le biais $\Delta v_{r,grav}$ sur les mesures de vitesse radiale est le même pour toutes les étoiles membres de l'association, une composante systématique est ajoutée à leurs vitesses UVW , ce qui explique la dispersion plus faible de l'âge des 1000 associations simulées avec l'ajout d'un biais $\Delta v_{r,grav} = 0,5$ km/s. Si les étoiles étaient regroupées sur la sphère céleste, ce biais ne ferait que modifier la vitesse UVW moyenne des membres l'association, qui convergeraient au même âge lors du retracement à l'origine, mais à un endroit différent.

Tableau 2.3. Propriétés des indicateurs d'âge.

Indicateur d'âge	Théorique			+ Erreurs de mesure			+ $\Delta v_{r,grav} = 0,5$ km/s		
	Incertitude [Ma]	Biais [Ma]	Contraste	Incertitude [Ma]	Biais [Ma]	Contraste	Incertitude [Ma]	Biais [Ma]	Contraste
Dispersion	0,35	0,02	0,17	1,2	-4,59	0,47	1,0	-6,83	0,4
MAD	0,96	0,01	0,17	2,64	-4,52	0,38	2,17	-6,99	0,33
MST	0,65	0,03	0,17	1,76	-4,79	0,47	1,43	-7,02	0,4
MAD MST	1,7	-0,07	0,17	4,94	-4,57	0,57	3,38	-6,37	0,49
$X-U$	0,61	0,01	0,02	1,69	-4,75	0,07	1,39	-6,86	0,06
$Y-V$	0,63	0,04	0,02	1,75	-4,26	0,07	1,38	-6,7	0,06
$Z-W$	0,61	0,02	0,02	1,75	-4,75	0,07	1,35	-6,93	0,06

Note. Dispersion (σ), déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*), longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*), MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST), et covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'une méthode Monte Carlo ($n = 1000$). Le biais correspond à l'écart par rapport à l'âge réel de 24 Ma et le contraste, à l'amplitude du minimum de la courbe de l'indicateur d'âge en fonction du temps par rapport à sa valeur initiale à l'époque actuelle. Les erreurs de mesure appliquées correspondent aux véritables erreurs sur les mesures astrométriques des membres de l'association β Pictoris (β PMG; β *Pictoris moving group*) et un biais $\Delta v_{r,grav} = 0,5$ km/s sur les mesures de vitesse radiale (v_r) dû au décalage vers le rouge gravitationnel est typique des membres de l'association β Pictoris.

Le tableau 2.3 résume les propriétés des indicateurs d'âge étudiés en fonction des biais dus aux erreurs de mesure et au décalage vers le rouge gravitationnel. Deux indicateurs d'âge se distinguent particulièrement : les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ ont un excellent contraste et une très bonne précision, alors que la MAD possède le deuxième meilleur contraste et une précision moyenne. La MAD a également l'avantage d'être résiliente aux données déviantes, ce qui fait d'elle un meilleur indicateur d'âge que la dispersion ou la longueur moyenne des branches du MST. Tous les indicateurs d'âge ont un biais similaire vers des âges plus jeunes, ~ 7 Ma, ce qui met en évidence la nécessité de corriger l'âge trouvé par retracement à l'origine pour obtenir une estimation réaliste de l'âge d'une association. Pour corriger le biais $\Delta v_{r,grav}$ sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel, on peut simplement appliquer une correction $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur ces mesures, alors que pour corriger le biais dû aux erreurs de mesure, on applique une correction sur l'âge obtenu, égale à l'inverse du biais du tableau 2.3, soit $\sim 4,5$ Ma, selon l'indicateur d'âge utilisé.

2.3. Résultats

2.3.1. Données déviantes dans l'association β Pictoris

Puisque certains indicateurs d'âge sont susceptibles aux données déviantes, c'est-à-dire des étoiles dont les propriétés cinématiques diffèrent de la moyenne des propriétés des membres de l'association β Pictoris (tableau 2.2) et qui, par conséquent, s'éloignent trop du centre de l'association à mesure que leur parcours est retracé vers leur origine, il est nécessaire de valider les étoiles de l'échantillon. Autrement, l'âge trouvé par retracement à l'origine serait trop jeune, car les étoiles dont la cinématique n'est pas cohérente avec celle des membres de l'association β Pictoris ne convergeront pas vers son origine.

À partir des données obtenues à l'aide de *Bayesian Analysis for Nearby Young Associations* (BANYAN Σ) (Gagné et al., 2018), on identifie 50 membres de l'association β Pictoris et on utilise les mesures astrométriques les plus précises disponibles à ce jour, incluant celles du catalogue *Gaia Data Release 2* (DR2; Brown et al., 2018), afin de retracer leur parcours et identifier visuellement les étoiles qui s'éloignent trop du centre de l'association à tout point lors du retracement sur une période de 30 Ma. Cette vérification identifie quatre étoiles :

AF Psc : rejetée du modèle cinématique de BANYAN Σ avec une probabilité d'appartenance inférieure à 10 % (Gagné et al., 2018).

G 271-110 : identifiée visuellement et située à plus de $2,47\sigma$ du centre de l'association lors du retracement. Elle fut donc rejetée.

HD 15115 : rejetée du modèle cinématique de BANYAN Σ avec une probabilité d'appartenance inférieure à 10 % (Gagné et al., 2018).

HD 165189 : identifiée visuellement et située à plus de $2,53\sigma$ du centre de l'association lors du retracement. Elle fut donc rejetée.

À l'annexe B, le tableau B.1 présente les propriétés observationnelles des 46 membres sélectionnés de l'association β Pictoris et le tableau B.2 présente leurs propriétés cinématiques, utilisées pour retracer leur parcours. La figure 2.5 présente ces données sur la sphère céleste. On note la grande étendue de l'association, surtout dans l'hémisphère sud à l'époque actuelle par rapport à son étendue passée. Le regroupement des étoiles observé est le résultat de l'éloignement des étoiles par rapport à l'observateur et ne correspond pas au moment où les étoiles sont physiquement plus rapprochées les unes par rapport aux autres.

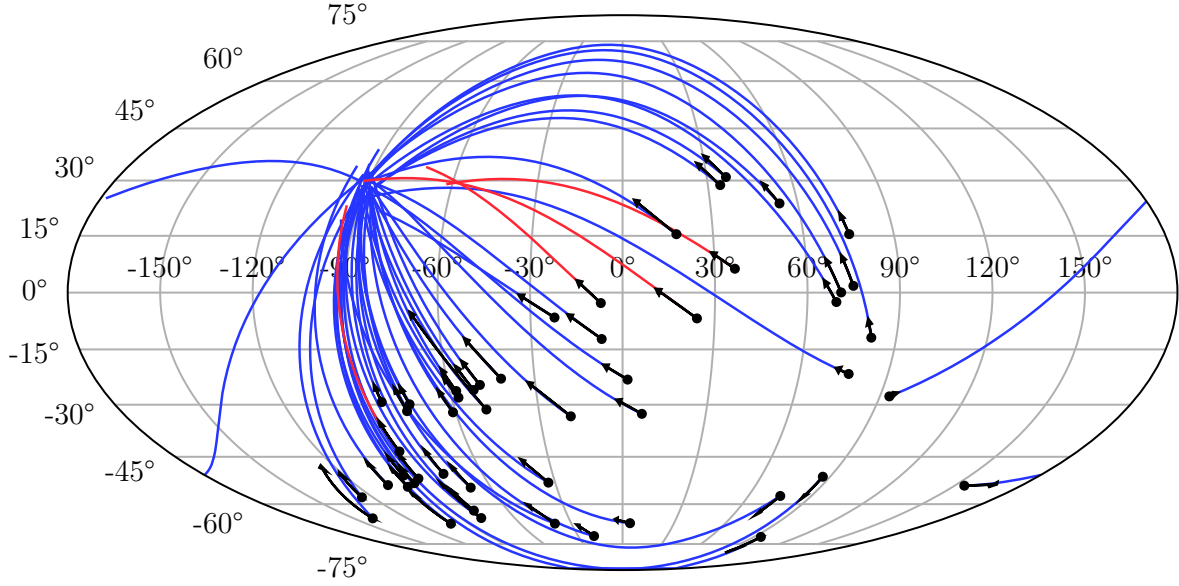


Figure 2.5. Retracement de l’association β Pictoris (β PMG ; β Pictoris moving group) sur une projection de Mollweide jusqu’à une époque de 30 Ma dans le passé. Les points noirs représentent l’ascension droite (α ; °) et la déclinaison (δ ; °) des étoiles à l’époque actuelle et les flèches noires représentent leur mouvement propre en ascension droite ($\mu_\alpha \cos(\delta)$; °/Ma) et en déclinaison (μ_δ ; °/Ma), inversé et divisé par 4 pour plus de clarté. Les traits bleus représentent les trajectoires des étoiles validées et les traits rouges, celles des étoiles rejetées.

Figure 2.6. (Voir les pages 40 et 41.) Retracement de l’association β Pictoris (β PMG ; β Pictoris moving group) sur des projections cartésiennes. L’association est présentée à l’époque actuelle (a), et à 5 Ma (b), 10 Ma (c), 15 Ma (d), 20 Ma (e) et 25 Ma (f) dans le passé. De haut en bas, les plans d’axes galactiques XY , XZ et YZ (pc), comprenant l’incertitude sur la position des étoiles ainsi qu’une représentation tridimensionnelle isométrique comprenant l’arbre couvrant de poids minimal (MST ; *minimum spanning tree*) reliant les étoiles (en bleu) sont présentés. Les points noirs représentent les étoiles validées et les points rouges, les étoiles rejetées.

2.3.2. Âge de l’association β Pictoris

On se sert de l’échantillon de 46 membres sélectionnés de l’association β Pictoris pour retracer son parcours sur une période de 30 Ma en appliquant une correction $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur les mesures de vitesse radiale pour tenir compte du biais $\Delta v_{r, grav}$ dû au décalage vers le

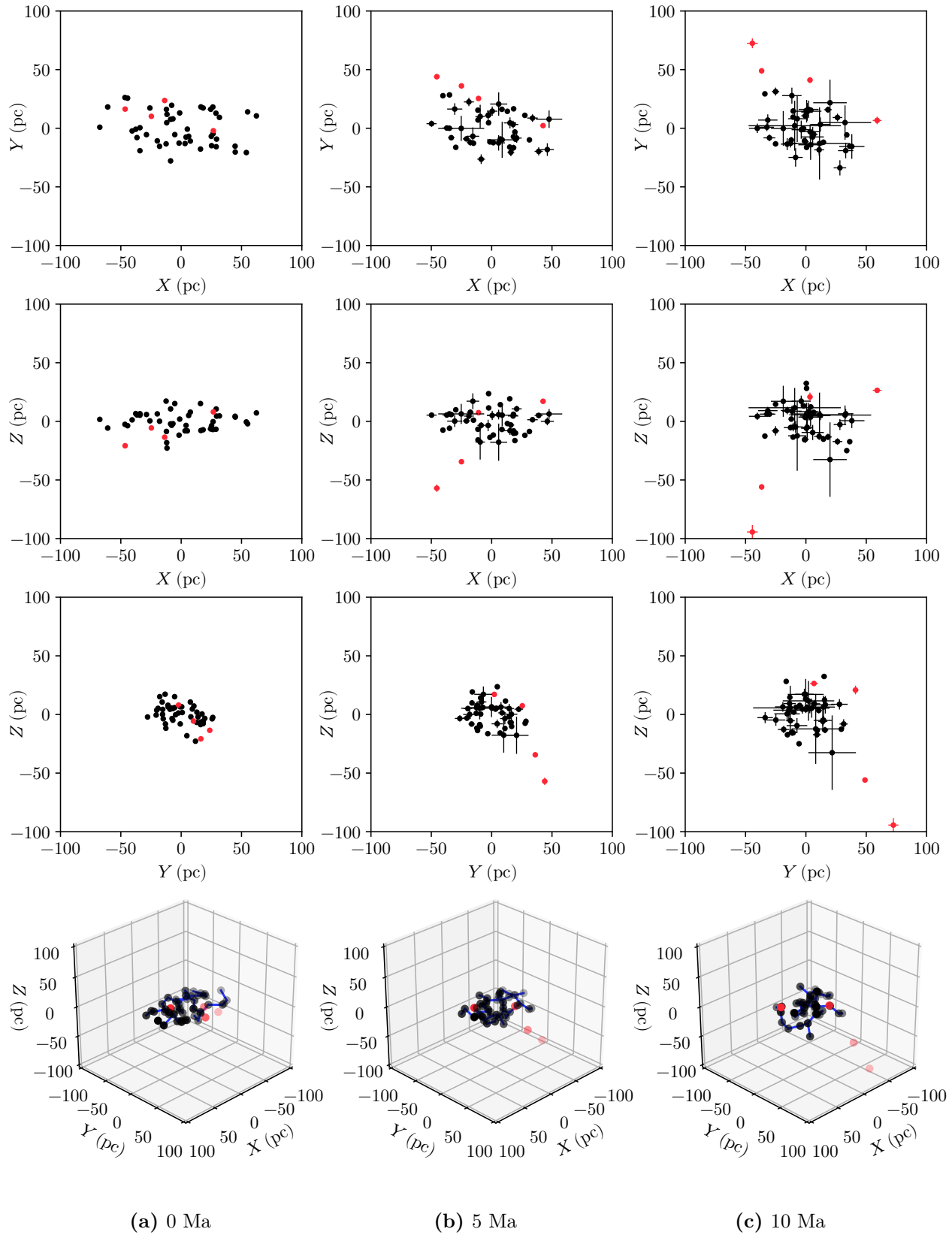


Figure 2.6. (Suite)

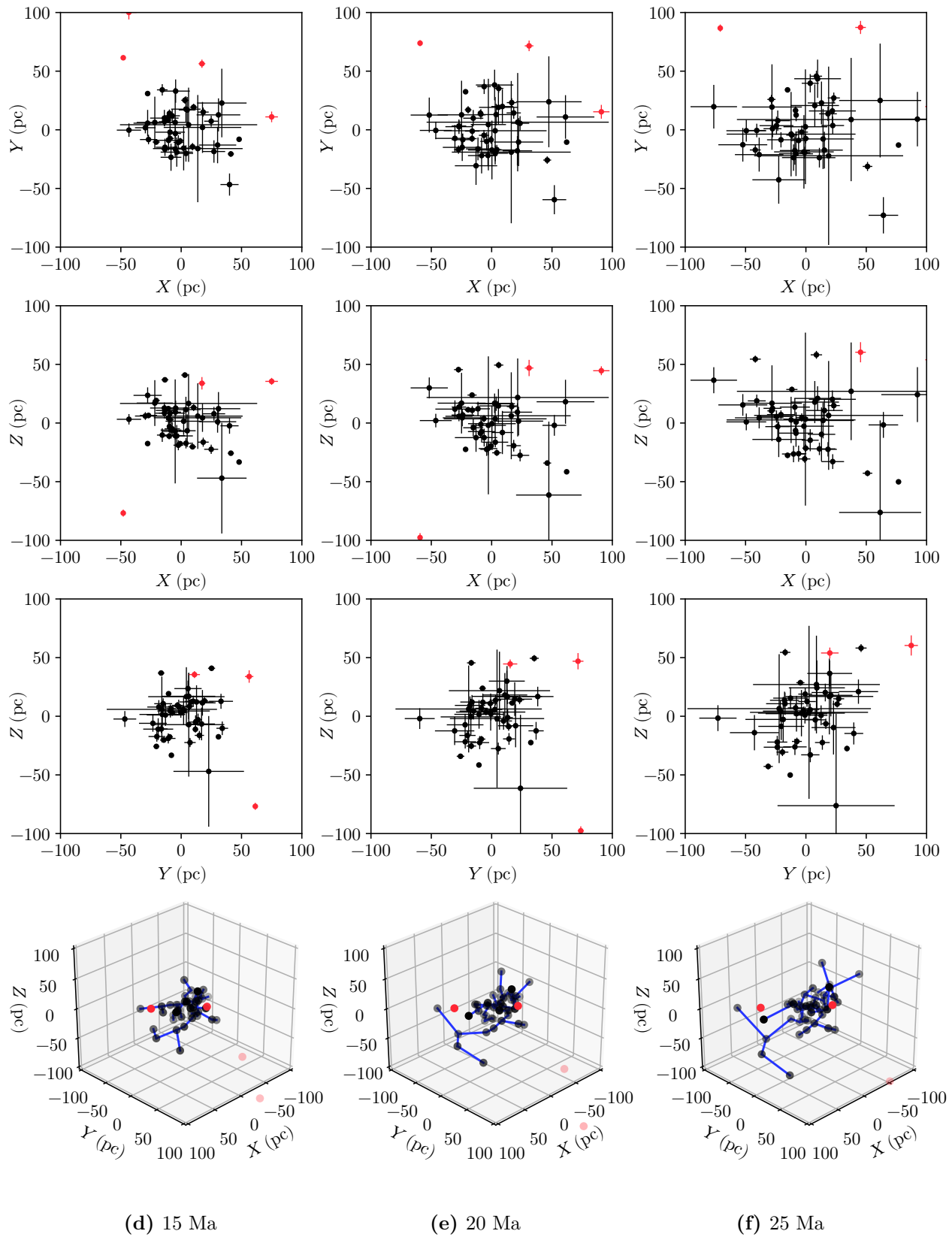


Figure 2.6. (Suite)

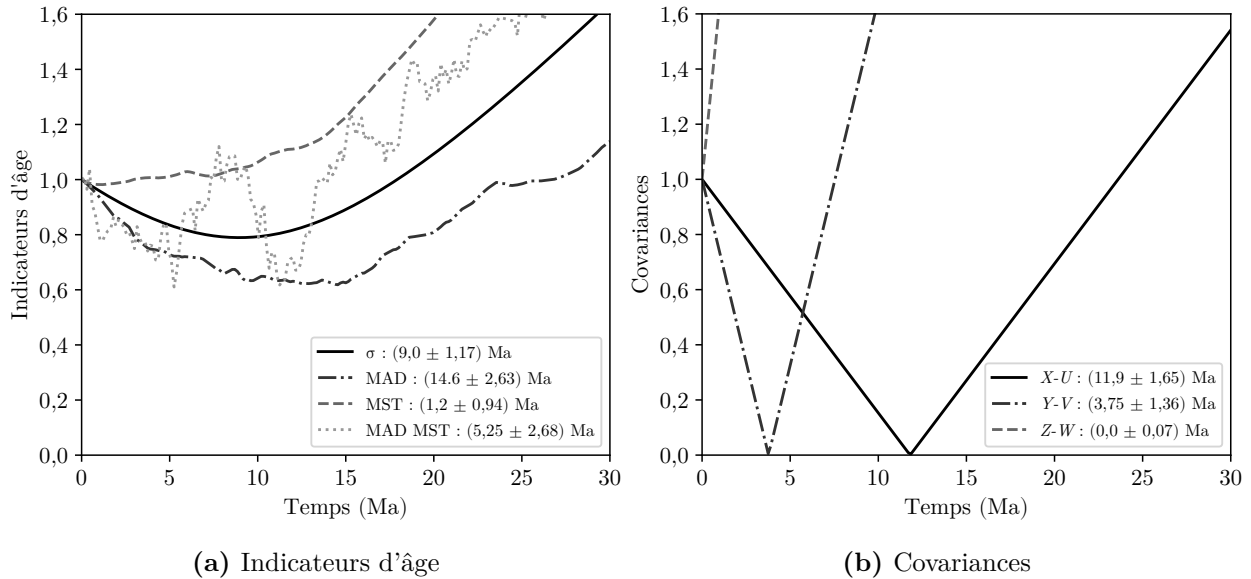


Figure 2.7. Indicateurs d'âge, incluant la dispersion (σ), la déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*), la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*), la MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST; a), et les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ (b) de l'association β Pictoris (β PMG; *β Pictoris moving group*) en fonction du temps (Ma) par rapport à l'époque actuelle avec une correction $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur la vitesse radiale (v_r), à partir des données de cette étude (tableau B.2). La légende montre l'âge correspondant au minimum de la courbe selon l'indicateur d'âge utilisé. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'une méthode Monte Carlo ($n = 1000$). Les courbes sont normalisées par rapport à leur valeur à l'époque actuelle.

rouge gravitationnel. La figure 2.6 présente la distribution spatiale de l'association β Pictoris à six époques différentes dans les plans XY , XZ et YZ avec les incertitudes sur les positions XYZ , qui augmentent significativement avec le temps à cause de l'accumulation des incertitudes sur les vitesses UVW . On remarque le changement de la forme de l'association dans le temps ainsi que la réduction puis l'augmentation de son étendue. Sur la représentation isométrique, on observe l'évolution significative des branches du MST dans le temps.

Pour trouver l'âge de l'association β Pictoris, on trace les courbes des indicateurs d'âge en fonction du temps (figure 2.7). La courbe de la dispersion atteint un minimum à un âge de $(9,0 \pm 1,17)$ Ma, avec un contraste de 0,79, alors que celle de la MAD atteint un minimum à un âge de $(14,6 \pm 2,63)$ Ma, avec un contraste de 0,62, ce qui fait de la MAD l'indicateur d'âge

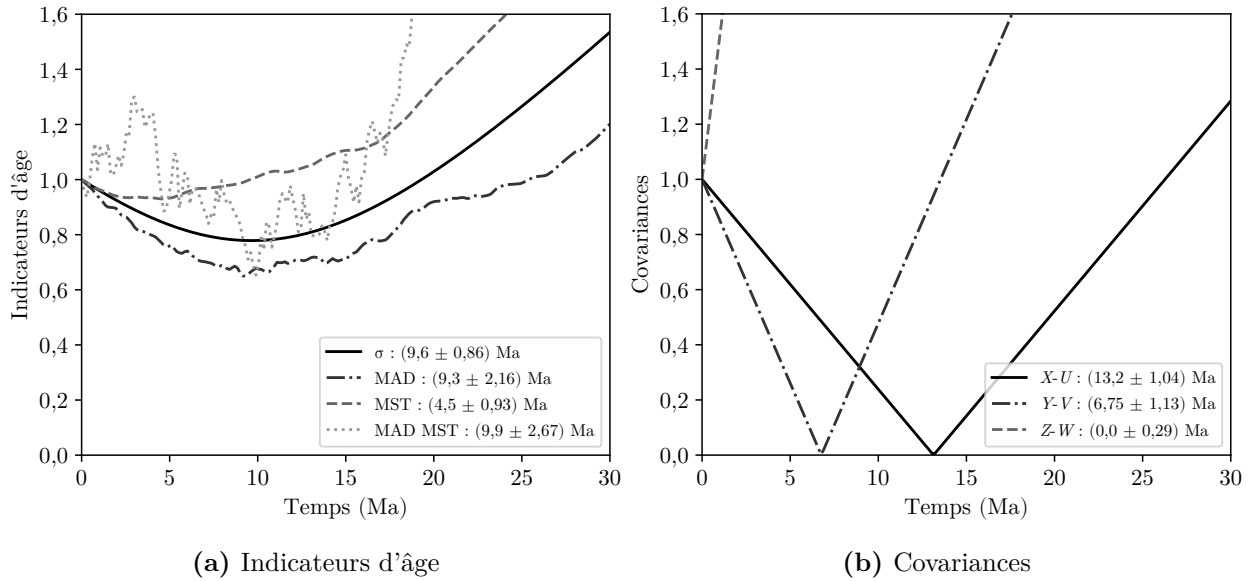


Figure 2.8. Indicateurs d'âge, incluant la dispersion (σ), la déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*), la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*), la MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST; a), et les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ (b) de l'association β Pictoris (β PMG; β Pictoris moving group) en fonction du temps (Ma) par rapport à l'époque actuelle avec une correction $\Delta v_r = -0,5$ km/s sur la vitesse radiale (v_r), à partir des données de Crundall et al. (2019). La légende montre l'âge correspondant au minimum de la courbe selon l'indicateur d'âge utilisé. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'une méthode Monte Carlo ($n = 1000$). Les courbes sont normalisées par rapport à leur valeur à l'époque actuelle.

menant à l'âge le plus vieux. Les indicateurs d'âge utilisant le MST ne fonctionnent pas : la courbe de la longueur moyenne des branches du MST atteint un minimum à $(1,2 \pm 0,94)$ Ma seulement, avec un contraste de 0,98, alors que celle de la MAD des branches du MST atteint un minimum à $(5,25 \pm 2,68)$ Ma, avec un contraste de 0,61. Cette dernière est irrégulière et un atteint un second minimum à ~ 11 Ma. Quant aux covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$, la courbe de la covariance $X-U$ atteint un minimum à un âge de $(11,9 \pm 1,647)$ Ma, avec un contraste de 0,004, mais celle de la covariance $Y-V$ atteint un minimum à un âge plus jeune de $(3,75 \pm 1,36)$ Ma, avec un contraste équivalent. La courbe de la covariance $Z-W$ est strictement croissante et n'atteint aucun minimum. Ce résultat est très différent de l'association simulée sphérique pour laquelle les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ sont équivalentes.

À la figure 2.8, on trace les mêmes courbes des indicateurs d'âge, mais en utilisant l'échantillon de Crundall et al. (2019) afin de voir l'impact d'un échantillon différent d'étoiles membres de l'association β Pictoris. À noter que les étoiles 2MASS J21100461-1920302, V390 Pav et CD-27 11535 sont exclues automatiquement, car elles s'éloignent à plus de 3σ du centre de l'association lors du retraceur à l'origine. Par rapport aux résultats obtenus avec notre échantillon, la courbe de la dispersion atteint un minimum à un âge plus vieux, $(9,6 \pm 0,86)$ Ma, avec un contraste de 0,78, alors que celle de la MAD atteint un minimum à un âge un peu plus jeune, $(9,3 \pm 2,16)$ Ma, avec un contraste de 0,65. De plus, les indicateurs d'âge utilisant le MST voient une amélioration : la courbe de la longueur moyenne des branches du MST atteint un minimum à un âge plus vieux de $(4,5 \pm 0,93)$ Ma, mais son contraste, 0,93, demeure mauvais, alors que celle de la MAD de la longueur des branches du MST atteint un minimum à un âge de $(9,9 \pm 2,67)$ Ma, avec un contraste de 0,65. Les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ se sont quelque peu améliorées. Les courbes des covariances $X-U$ et $Y-V$ atteignent un minimum à un âge plus vieux de $(13,2 \pm 1,04)$ Ma, avec un contraste de 0,005, et de $(6,75 \pm 1,13)$ Ma, avec un contraste de 0,002, respectivement. La courbe de la covariance $Z-W$ est similaire à celle de la figure (figure 2.7) et n'atteint aucun minimum.

2.4. Discussion

Le tableau 2.4 résume les âges obtenus pour l'association β Pictoris selon l'indicateur d'âge et l'échantillon utilisés. Une correction égale à l'inverse du biais dû aux erreurs de mesure (tableau 2.3) est appliquée sur l'âge obtenu, en fonction de l'indicateur d'âge, afin d'obtenir un âge corrigé plus réaliste.

2.4.1. Comparaison entre les simulations et les résultats

Les résultats obtenus à partir des mesures astrométriques de l'association β Pictoris (section 2.3) sont très différents de ceux obtenus à partir de l'association simulée (section 2.2). D'abord, on remarque que les courbes des figures 2.7 et 2.8 sont beaucoup plus irrégulières que celles des figures 2.2 et 2.4. Les courbes des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ sont également plus pointues. Ces différences s'expliquent par le fait que les courbes des simulations représentent la moyenne de 1000 associations simulées indépendantes. Le contraste des courbes des figures 2.7 et 2.8 est inférieur à celui des simulations, mais les courbes de la MAD, et des

Tableau 2.4. Âge de l’association β Pictoris selon l’indicateur d’âge et l’échantillon utilisés.

Indicateur d’âge	Échantillon de cette étude			Échantillon de Crundall et al. (2019)		
	Âge [Ma]	Âge corrigé [Ma]	Contraste	Âge [Ma]	Âge corrigé [Ma]	Contraste
σ	$9,0 \pm 1,17$	$13,6 \pm 1,67$	0,79	$9,6 \pm 0,86$	$14,2 \pm 1,48$	0,78
MAD	$14,6 \pm 2,63$	$19,1 \pm 3,73$	0,62	$9,3 \pm 2,16$	$13,8 \pm 3,41$	0,65
MST	$1,2 \pm 0,94$	$6,0 \pm 1,99$	0,98	$4,5 \pm 0,93$	$9,29 \pm 1,99$	0,93
MAD MST	$5,25 \pm 2,68$	$9,82 \pm 5,62$	0,68	$9,9 \pm 2,67$	$14,5 \pm 5,62$	0,65
$X-U$	$11,9 \pm 1,65$	$16,7 \pm 2,36$	0,004	$13,2 \pm 1,04$	$17,8 \pm 2,22$	0,005
$Y-V$	$3,75 \pm 1,36$	$8,01 \pm 2,22$	0,006	$6,75 \pm 1,13$	$11,0 \pm 2,08$	0,002
$Z-W$	$0,0 \pm 0,07$	$4,75 \pm 1,75$	1,0	$0,0 \pm 0,29$	$4,75 \pm 1,77$	1,0

Note. Dispersion (σ), déviation médiane absolue (MAD ; *median absolute deviation*), longueur moyenne des branches de l’arbre couvrant de poids minimal (MST ; *minimum spanning tree*), MAD de la longueur des branches du MST (MAD MST), et covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$. L’incertitude sur l’âge est calculée avec une méthode Monte Carlo ($n = 1000$) et le contraste est l’amplitude du minimum de la courbe de l’indicateur d’âge en fonction du temps par rapport à sa valeur à l’époque actuelle. L’âge corrigé correspond à l’âge non corrigé additionné à l’inverse du biais dû aux erreurs de mesure sur l’âge de l’association simulée (tableau 2.3). L’incertitude sur l’âge corrigé correspond à la somme en quadrature de l’incertitude sur l’âge non corrigé et de l’incertitude sur l’âge de l’association simulée avec des erreurs de mesure. Une correction du biais $\Delta v_{r, grav}$ sur les mesures de vitesse radiale (v_r) dû au décalage vers le rouge gravitationnel égale à $\Delta v_r = -0,5$ km/s est appliquée.

covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ ont toujours le meilleur contraste. Les courbes de certains indicateurs d’âge, telles que celles de la longueur moyenne des branches du MST et de la covariance $Y-V$, atteignent un minimum à des âges beaucoup plus jeunes que d’autres, alors que toutes les courbes atteignent un minimum à des âges similaires aux figures 2.2 et 2.4. De plus, la courbe de la MAD de la longueur des branches du MST montre deux minima locaux, ce qu’on pourrait expliquer par un changement radical de la forme du MST au cours du retracement à l’origine.

On en conclut que la forme réelle de l'association β Pictoris et son évolution dans le temps sont beaucoup plus complexes que celles de l'association simulée. C'est pourquoi la longueur moyenne des branches du MST mène à un âge si jeune. L'association simulée sphérique n'est tout simplement pas un bon analogue à la véritable association β Pictoris, car les covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ ne convergent pas toutes vers le même âge aux figures 2.7 et 2.8. L'âge obtenu avec la covariance $X-U$ est beaucoup plus vieux que celui obtenu avec la covariance $Y-V$. Dans le tableau 2.2, on remarque que l'écart-type des vitesses U des membres l'association β Pictoris est plus grand que celui de leurs vitesses V et, par conséquent, il en va de même pour l'écart-type de leurs positions X et Y respectivement. Il y a donc plus de corrélation entre les positions X et les vitesses U des membres de l'association β Pictoris qu'entre leurs positions Y et leurs vitesses V , ce qui fait de la covariance $X-U$ un meilleur indicateur de l'âge cette association. De plus, les positions Z des membres de l'association ne sont pas du tout corrélées avec leurs vitesses W , alors que c'est le cas pour les simulations de la figure 2.4b. Le potentiel gravitationnel galactique pourrait être à l'origine de cette différence, car étant donné que la masse de la Voie lactée est concentrée dans le plan de son disque, les étoiles oscillent selon l'axe des Z avec une période de ~ 35 Ma (Miret-Roig et al., 2018). Ainsi, la covariance $Z-W$ n'est d'aucune utilité pour établir un âge cinématique.

L'approximation des trajectoires linéaires est inadéquate et ne permet pas de reproduire l'évolution de la forme de l'association β Pictoris. Tenir compte du potentiel gravitationnel galactique et utiliser une association simulée non sphérique, basée sur les ellipsoïdes de BANYAN Σ (Gagné et al., 2018), dont l'orientation et l'amplitude des axes XYZ et UVW sont plus représentatives de la véritable association, pourrait donc améliorer les résultats, étant donné que les positions XYZ et les vitesses UVW initiales ainsi que trajectoires des étoiles seraient plus réalistes. Cela permettrait aussi d'obtenir une correction du biais dû aux erreurs de mesure plus juste. En effet, puisque l'association simulée est peu représentative, la correction qui en dépend est imparfaite. Finalement, des données déviantes pourraient encore être présentes au sein de l'échantillon utilisé et certaines mesures astrométriques, surtout celles de la vitesse radiale, pourraient être trop imprécises pour faire un retracement adéquat de la trajectoire des étoiles. Cela expliquerait pourquoi la courbe de la MAD, une mesure résiliente aux données déviantes, atteint un minimum à un âge plus vieux et réaliste que celles des autres indicateurs d'âge, notamment la dispersion.

Malgré ses limites, la méthode développée dans cette étude permet de trouver des âges mutuellement compatibles de $(19,1 \pm 3,73)$ Ma à l'aide de la MAD et $(16,7 \pm 2,36)$ Ma à l'aide de la covariance $X-U$. Ces deux indicateurs d'âge se distinguent par rapport aux autres grâce à leur bon contraste et leur résilience aux données déviantes. L'incertitude relative sur l'âge est toutefois significative dans les deux cas, soit 19,5 % et 14,1 % respectivement.

2.4.2. Comparaison de l'âge obtenu avec d'autres méthodes

En comparant les résultats de la section 2.3.2 avec ceux d'études précédentes, on établit les constats suivants :

Isochrones. Les âges obtenus avec la méthode des isochrones par d'autres études, soit $(21,5 \pm 6,5)$ Ma (Malo et al., 2014), (22 ± 3) Ma (Mamajek & Bell, 2014) et (24 ± 3) Ma (Bell et al., 2015), sont légèrement plus vieux que les âges obtenus par retracement à l'origine dans cette étude, avec un écart de ~ 4 Ma par rapport au plus vieil âge corrigé trouvé de $(19,1 \pm 3,73)$ Ma, mais on peut affirmer que les résultats de notre méthode sont compatibles avec ceux obtenus avec la méthode des isochrones par des études précédentes, car les incertitudes, qui sont similaires, se chevauchent.

Limite d'épuisement du lithium. Le constat est semblable lorsqu'on compare les âges obtenus dans cette étude aux âges obtenus avec la méthode de la LDB par d'autres études, soit (21 ± 9) Ma (Mentuch et al., 2008), (21 ± 4) Ma (Binks & Jeffries, 2014) et (26 ± 3) Ma (Malo et al., 2014). Encore une fois, les âges sont compatibles.

Retracement à l'origine. Les âges non corrigés obtenus dans cette étude sont compatibles avec la plupart des âges obtenus par d'autres études avec la méthode de retracement à l'origine, soit 11,5 Ma (Ortega et al., 2002), 12 Ma (Song et al., 2003), $(10,8 \pm 0,3)$ Ma (Ortega et al., 2004) et 13_{-0}^{+7} Ma (Miret-Roig et al., 2018), et sont donc tout aussi problématiques, malgré l'usage des mesures astrométriques de *Gaia* DR2 les plus récentes, d'un échantillon validé et d'une correction du biais $\Delta v_{r, grav}$ sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel. Au mieux, on peut affirmer que les âges obtenus dans cette étude en minimisant la MAD et la covariance $X-U$ sont un peu plus vieux. Toutefois, l'application d'une correction du biais dû aux erreurs de mesure fait en sorte que les âges corrigés trouvés en minimisant la MAD et la covariance $X-U$ sont significativement plus vieux que les âges cinématiques

obtenus par des études précédentes. C’est cette correction qui distingue le plus notre méthode par rapport aux autres méthodes cinématiques.

Chronostar. L’âge obtenu par Crundall et al. (2019), $18,3_{-1,2}^{+1,3}$ Ma, est à mi-chemin entre les âges obtenus par les méthodes des isochrones et de la LDB, et les âges non corrigés obtenus par retracement à l’origine, incluant ceux de cette étude. En corrigeant le biais dû aux erreurs de mesure, les âges obtenus en minimisant la MAD et la covariance $X-U$ sont compatibles avec les âges obtenus avec **Chronostar**. Bien que notre méthode soit moins précise, elle requiert beaucoup moins de temps de calcul que **Chronostar**.

2.4.3. Développements futurs

Afin de reproduire adéquatement la trajectoire des étoiles membres d’associations locales jeunes sur plusieurs dizaines de millions d’années, il sera impératif, à l’avenir, de tenir compte du potentiel gravitationnel galactique en calculant des orbites galactiques. Pour ce faire, on modifiera le calcul des trajectoires des étoiles en y greffant le module Python **Galpy** (Bovy, 2015), une librairie conçue à cet effet. Cela devrait également permettre de reproduire le comportement de la covariance $Z-W$, car les trajectoires des étoiles simulées seront plus réalistes. Les membres de l’association simulée devront également avoir des dispersions en position XYZ et en vitesse UVW non sphériques pour être plus fidèles aux membres de l’association β Pictoris. Un système de coordonnées orienté selon les axes principaux de l’association (Gagné et al., 2018) sera également utilisé pour les indicateurs d’âge.

La correction du biais $\Delta v_{r, grav}$ sur les mesures de vitesse radiale dû au décalage vers le rouge gravitationnel devra également être perfectionnée en utilisant une correction individuelle selon le type spectral de l’étoile ou, plus justement, du rayon et de la masse stellaires, si ces valeurs sont connues. Il faudra également développer une méthode fonctionnelle pour compenser le biais dû aux erreurs de mesure s’appliquant à tous les indicateurs d’âge. On pourra réduire grandement ce biais en contournant les mesures les plus problématiques, soit celles de la vitesse radiale. En effet, on calculera, pour l’échantillon d’étoiles sélectionnées, l’ensemble des vitesses radiales qui minimisent la dispersion en position XYZ afin d’éliminer ces données imprécises du calcul des positions XYZ en fonction du temps. Finalement, on appliquera cette méthode améliorée aux autres associations locales jeunes connues.

Chapitre 3

Conclusion

Les objectifs de l'étude (section 1.4) ont été atteints : la méthode numérique développée permet de trouver rapidement un âge cinématique par retracement à l'origine pour l'association β Pictoris (β PMG ; β Pictoris moving group), à l'aide d'un échantillon de 46 étoiles membres validées, identifiées par l'outil *Bayesian Analysis for Nearby Young AssociatioNs* (BANYAN) Σ (Gagné et al., 2018), à partir des mesures astrométriques disponibles dans le catalogue *Gaia Data Release 2* (DR2; Brown et al., 2018) et d'autres relevés de la littérature. On démontre l'importance d'éliminer les données déviantes de l'échantillon, qui doit également inclure le plus grand nombre de membres possible, et d'utiliser des données précises, afin d'améliorer la précision de la méthode et de minimiser le biais dû aux erreurs de mesure sur l'âge de l'association, $\sim -4,5$ millions d'années (Ma), selon l'indicateur d'âge utilisé. On montre également qu'un biais uniforme $\Delta v_{r, grav} = 0,5$ kilomètre par seconde (km/s) dû au décalage vers le rouge gravitationnel sur les mesures de vitesse radiale (v_r) engendre un biais sur l'âge de $\sim -1,8$ Ma.

Les résultats varient significativement selon l'indicateur d'âge utilisé. La déviation médiane absolue (MAD ; *median absolute deviation*) mène à un âge plus réaliste que tout autre indicateur d'âge puisqu'elle est moins susceptible aux données déviantes que les autres indicateurs d'âge, notamment la dispersion (σ) et la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST ; *minimum spanning tree*). En fait, on montre que l'usage d'un MST, un indicateur d'âge menant à des âges irréalistes pour l'association β Pictoris, n'apporte aucun avantage par rapport à d'autres indicateurs d'âge plus simples et rapides à calculer. L'utilité des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ entre les positions XYZ et les vitesses UVW des membres de l'association β Pictoris a également été étudiée. La covariance $X-U$

est un bon indicateur d'âge, la covariance $Y-V$ n'est pas utile, et il n'existe aucune covariance entre les positions Z et les vitesses W des membres de l'association β Pictoris. Au final, en corrigeant les biais dus aux erreurs de mesure et au décalage vers le rouge gravitationnel, on obtient un âge de 17 – 19 Ma pour l'association β Pictoris en minimisant la MAD et la covariance $X-U$. Toutefois, on note que l'association simulée sphérique n'est pas représentative de l'association réelle.

L'âge corrigé de l'association β Pictoris obtenu dans cette étude est similaire à celui obtenu avec la méthode cinématique **Chronostar** ($18,3_{-1,2}^{+1,3}$ Ma; Crundall et al., 2019). Cet âge est aussi compatible avec ceux trouvés par des études précédentes avec les méthodes des isochrones, 21,5 – 24 Ma (Malo et al., 2014 ; Mamajek & Bell, 2014 ; Bell et al., 2015), et de la limite d'épuisement du lithium (LDB; *lithium depletion boundary*), 21 – 26 Ma (Mentuch et al., 2008 ; Binks & Jeffries, 2014 ; Malo et al., 2014). La précision de notre méthode est, pour le moment, équivalente à celle des méthodes des isochrones et de la LDB. Les nombreuses améliorations suggérées, notamment le calcul d'orbites galactiques individuelles et une association simulée plus représentative de l'association réelle, devront être apportées à notre méthode afin qu'on puisse s'en servir pour trouver un âge cinématique par retracement à l'origine de l'association β Pictoris et des autres associations locales jeunes (YMG; *young moving group*) connues plus précis que les âges obtenus avec les méthodes actuelles.

Bibliographie

- Allers, K. N., Gallimore, J. F., Liu, M. C., & Dupuy, T. J. 2016, *The Astrophysical Journal*, 819, 133
- Anderson, E. & Francis, C. 2012, *Astronomy Letters*, 38, 331
- Artigau, É., Gagné, J., Faherty, J., Malo, L., Naud, M.-È., Doyon, R., Lafrenière, D., & Beletsky, Y. 2015, *The Astrophysical Journal*, 806, 254
- Asiain, R., Figueras, F., & Torra, J. 1999, *A&A*, 350, 434
- Barnes, S. A. 2007, *The Astrophysical Journal*, 669, 1167
- Bell, C. P. M., Mamajek, E. E., & Naylor, T. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454, 593
- Binks, A. S. & Jeffries, R. D. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society : Letters*, 438, L11
- Bobylev, V. V. & Bajkova, A. T. 2007, *Astronomy Letters*, 33, 571
- Bovy, J. 2015, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 216, 29
- Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Biermann, M., Evans, D. W., Eyer, L., & et al. 2018, *Astronomy & Astrophysics*, 616, A1
- Browning, M. K., Basri, G., Marcy, G. W., West, A. A., & Zhang, J. 2010, *The Astronomical Journal*, 139, 504
- Crundall, T. D., Ireland, M. J., Krumholz, M. R., Federrath, C., Žerjal, M., & Hansen, J. T. 2019, arXiv e-prints, arXiv :1902.07732
- Desidera, S., Covino, E., Messina, S., Carson, J., Hagelberg, J., Schlieder, J. E., Biazzo, K., Alcalá, J. M., Chauvin, G., Vigan, A., Beuzit, J. L., Bonavita, M., Bonnefoy, M., Delorme, P., D’Orazi, V., Esposito, M., Feldt, M., Girardi, L., Gratton, R., Henning, T., Lagrange, A.-M., Lanzafame, A. C., Launhardt, R., Marmier, M., Melo, C., Meyer, M., Mouillet, D.,

- Moutou, C., Ségransan, D., Udry, S., & Zaidi, C. M. 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 573, A126
- Donaldson, J. K., Weinberger, A. J., Gagné, J., Faherty, J. K., Boss, A. P., & Keiser, S. A. 2016, *The Astrophysical Journal*, 833, 95
- Durkan, S., Janson, M., Ciceri, S., Brandner, W., Schlieder, J., Henning, T., Bonnefoy, M., Kankare, J., & Watson, C. A. 2018, *A&A*, 618, A5
- Eggen, O. J. 1995, *The Astronomical Journal*, 110, 2862
- Faherty, J. K., Riedel, A. R., Cruz, K. L., Gagné, J., Filippazzo, J. C., Lambrides, E., Fica, H., Weinberger, A., Thorstensen, J. R., Tinney, C. G., Baldassare, V., Lemonier, E., & Rice, E. L. 2016a, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 225, 10
- Faherty, J. K., Riedel, A. R., Cruz, K. L., Gagne, J., Filippazzo, J. C., Lambrides, E., Fica, H., Weinberger, A., Thorstensen, J. R., Tinney, C. G., & et al. 2016b, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 225, 10
- Ferreira, J., Pelletier, G., & Appl, S. 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 312, 387
- Gagné, J. & Faherty, J. K. 2018, *The Astrophysical Journal*, 862, 138
- Gagné, J., Faherty, J. K., Cruz, K. L., Lafrenière, D., Doyon, R., Malo, L., Burgasser, A. J., Naud, M.-E., Artigau, É., Bouchard, S., & et al. 2015, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219, 33
- Gagné, J., Lafrenière, D., Doyon, R., Malo, L., & Artigau, É. 2014, *The Astrophysical Journal*, 783, 121
- Gagné, J., Mamajek, E. E., Malo, L., Riedel, A., Rodriguez, D., Lafrenière, D., Faherty, J. K., Roy-Loubier, O., Pueyo, L., Robin, A. C., & et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 856, 23
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Mignard, F., Drimmel, R., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D. W., Eyer, L., Jansen, F., Jordi, C., Katz, D., Klioner, S. A., Lammers, U., Lindegren, L., Luri, X., O'Mullane, W., Panem, C., Pourbaix, D., Randich, S., Sartoretti, P., Siddiqui, H. I., Soubiran, C., Valette, V., van Leeuwen, F., Walton, N. A., Aerts, C., Arenou, F., Cropper, M., Høg, E., Lattanzi, M. G., Grebel, E. K., Holland, A. D., Huc, C., Passot, X.,

Perryman, M., Bramante, L., Cacciari, C., Castañeda, J., Chaoul, L., Cheek, N., De Angeli, F., Fabricius, C., Guerra, R., Hernández, J., Jean-Antoine-Piccolo, A., Masana, E., Messineo, R., Mowlavi, N., Nienartowicz, K., Ordóñez-Blanco, D., Panuzzo, P., Portell, J., Richards, P. J., Riello, M., Seabroke, G. M., Tanga, P., Thévenin, F., Torra, J., Els, S. G., Gracia-Abril, G., Comoretto, G., Garcia-Reinaldos, M., Lock, T., Mercier, E., Altmann, M., Andrae, R., Astraatmadja, T. L., Bellas-Velidis, I., Benson, K., Berthier, J., Blomme, R., Busso, G., Carry, B., Cellino, A., Clementini, G., Cowell, S., Creevey, O., Cuypers, J., Davidson, M., De Ridder, J., de Torres, A., Delchambre, L., Dell’Oro, A., Ducourant, C., Frémat, Y., García-Torres, M., Gosset, E., Halbwachs, J. L., Hambly, N. C., Harrison, D. L., Hauser, M., Hestroffer, D., Hodgkin, S. T., Huckle, H. E., Hutton, A., Jasniewicz, G., Jordan, S., Kontizas, M., Korn, A. J., Lanzafame, A. C., Manteiga, M., Moitinho, A., Muinonen, K., Osinde, J., Pancino, E., Pauwels, T., Petit, J. M., Recio-Blanco, A., Robin, A. C., Sarro, L. M., Siopis, C., Smith, M., Smith, K. W., Sozzetti, A., Thuillot, W., van Reeve, W., Viala, Y., Abbas, U., Abreu Aramburu, A., Accart, S., Aguado, J. J., Allan, P. M., Allasia, W., Altavilla, G., Álvarez, M. A., Alves, J., Anderson, R. I., Andrei, A. H., Anglada Varela, E., Antiche, E., Antoja, T., Anton, S., Arcay, B., Bach, N., Baker, S. G., Balaguer-Núñez, L., Barache, C., Barata, C., Barbier, A., Barblan, F., Barrado y Navascués, D., Barros, M., Barstow, M. A., Becciani, U., Bellazzini, M., Bello García, A., Belokurov, V., Bendjoya, P., Berihuete, A., Bianchi, L., Bienaymé, O., Billebaud, F., Blagorodnova, N., Blanco-Cuaresma, S., Boch, T., Bombrun, A., Borrachero, R., Bouquillon, S., Bourda, G., Bouy, H., Bragaglia, A., Breddels, M. A., Brouillet, N., Brüsemeister, T., Bucciarelli, B., Burgess, P., Burgon, R., Burlacu, A., Busonero, D., Buzzzi, R., Caffau, E., Cambras, J., Campbell, H., Cancelliere, R., Cantat-Gaudin, T., Carlucci, T., Carrasco, J. M., Castellani, M., Charlot, P., Charnas, J., Chiavassa, A., Clotet, M., Cocozza, G., Collins, R. S., Costigan, G., Crifo, F., Cross, N. J. G., Crosta, M., Crowley, C., Dafonte, C., Damerджи, Y., Dapergolas, A., David, P., David, M., De Cat, P., de Felice, F., de Laverny, P., De Luise, F., De March, R., de Martino, D., de Souza, R., Debosscher, J., del Pozo, E., Delbo, M., Delgado, A., Delgado, H. E., Di Matteo, P., Diakite, S., Distefano, E., Dolding, C., Dos Anjos, S., Drazinos, P., Durán, J., Dzigan, Y., Edvardsson, B., Enke, H., Evans, N. W., Eynard Bontemps, G., Fabre, C., Fabrizio, M., Faigler, S., Falcão, A. J., Farràs Casas, M., Federici, L., Fedorets, G., Fernández-Hernández, J., Fernique, P., Fienga,

A., Figueras, F., Filippi, F., Findeisen, K., Fonti, A., Fouesneau, M., Fraile, E., Fraser, M., Fuchs, J., Gai, M., Galletti, S., Galluccio, L., Garabato, D., García-Sedano, F., Garofalo, A., Garralda, N., Gavras, P., Gerssen, J., Geyer, R., Gilmore, G., Girona, S., Giuffrida, G., Gomes, M., González-Marcos, A., González-Núñez, J., González-Vidal, J. J., Granvik, M., Guerrier, A., Guillout, P., Guiraud, J., Gúrpide, A., Gutiérrez-Sánchez, R., Guy, L. P., Haigron, R., Hatzidimitriou, D., Haywood, M., Heiter, U., Helmi, A., Hobbs, D., Hofmann, W., Holl, B., Holland, G., Hunt, J. A. S., Hypki, A., Icardi, V., Irwin, M., Jevardat de Fombelle, G., Jofré, P., Jonker, P. G., Jorissen, A., Julbe, F., Karampelas, A., Kochoska, A., Kohley, R., Kolenberg, K., Kontizas, E., Kuposov, S. E., Kordopatis, G., Koubsky, P., Krone-Martins, A., Kudryashova, M., Kull, I., Bachchan, R. K., Lacoste-Seris, F., Lanza, A. F., Lavigne, J. B., Le Poncin-Lafitte, C., Lebreton, Y., Lebzelter, T., Leccia, S., Leclerc, N., Lecoœur-Taibi, I., Lemaitre, V., Lenhardt, H., Leroux, F., Liao, S., Licata, E., Lindstrøm, H. E. P., Lister, T. A., Livanou, E., Lobel, A., Löffler, W., López, M., Lorenz, D., MacDonald, I., Magalhães Fernandes, T., Managau, S., Mann, R. G., Mantelet, G., Marchal, O., Marchant, J. M., Marconi, M., Marinoni, S., Marrese, P. M., Marschalkó, G., Marshall, D. J., Martín-Fleitas, J. M., Martino, M., Mary, N., Matijević, G., Mazeh, T., McMillan, P. J., Messina, S., Michalik, D., Millar, N. R., Miranda, B. M. H., Molina, D., Molinaro, R., Molinaro, M., Molnár, L., Moniez, M., Montegriffo, P., Mor, R., Mora, A., Morbidelli, R., Morel, T., Morgenthaler, S., Morris, D., Mulone, A. F., Muraveva, T., Mussella, I., Narbonne, J., Nelemans, G., Nicastro, L., Noval, L., Ordénovic, C., Ordieres-Méré, J., Osborne, P., Pagani, C., Pagano, I., Pailler, F., Palacin, H., Palaversa, L., Parsons, P., Pecoraro, M., Pedrosa, R., Pentikäinen, H., Pichon, B., Piersimoni, A. M., Pineau, F. X., Plachy, E., Plum, G., Poujoulet, E., Prša, A., Pulone, L., Ragaini, S., Rago, S., Rambaux, N., Ramos-Lerate, M., Ranalli, P., Rauw, G., Read, A., Regibo, S., Reylé, C., Ribeiro, R. A., Rimoldini, L., Ripepi, V., Riva, A., Rixon, G., Roelens, M., Romero-Gómez, M., Rowell, N., Royer, F., Ruiz-Dern, L., Sadowski, G., Sagristà Sellés, T., Sahlmann, J., Salgado, J., Salguero, E., Sarasso, M., Savietto, H., Schultheis, M., Sciacca, E., Segol, M., Segovia, J. C., Ségransan, D., Shih, I. C., Smareglia, R., Smart, R. L., Solano, E., Solitro, F., Sordo, R., Soria Nieto, S., Souchay, J., Spagna, A., Spoto, F., Stampa, U., Steele, I. A., Steidelmüller, H., Stephenson, C. A., Stoev, H., Suess, F. F., Süveges, M., Surdej, J., Szabados, L., Szegedi-Elek, E., Tapiador, D., Taris, F., Tauran, G., Taylor, M. B., Teixeira,

R., Terrett, D., Tingley, B., Trager, S. C., Turon, C., Ulla, A., Utrilla, E., Valentini, G., van Elteren, A., Van Hemelryck, E., van Leeuwen, M., Varadi, M., Vecchiato, A., Veljanoski, J., Via, T., Vicente, D., Vogt, S., Voss, H., Votruba, V., Voutsinas, S., Walmsley, G., Weiler, M., Weingrill, K., Wevers, T., Wyrzykowski, Ł., Yoldas, A., Žerjal, M., Zucker, S., Zurbach, C., Zwitter, T., Alecu, A., Allen, M., Allende Prieto, C., Amorim, A., Anglada-Escude, G., Arsenijevic, V., Azaz, S., Balm, P., Beck, M., Bernstein, H. H., Bigot, L., Bijaoui, A., Blasco, C., Bonfigli, M., Bono, G., Boudreault, S., Bressan, A., Brown, S., Brunet, P. M., Bunclark, P., Buonanno, R., Butkevich, A. G., Carret, C., Carrion, C., Chemin, L., Chéreau, F., Corcione, L., Darmigny, E., de Boer, K. S., de Teodoro, P., de Zeeuw, P. T., Delle Luche, C., Domingues, C. D., Dubath, P., Fodor, F., Frézouls, B., Fries, A., Fustes, D., Fyfe, D., Gallardo, E., Gallegos, J., Gardiol, D., Gebran, M., Gomboc, A., Gomez, A., Grux, E., Gueguen, A., Heyrovsky, A., Hoar, J., Iannicola, G., Isasi Parache, Y., Janotto, A. M., Joliet, E., Jonckheere, A., Keil, R., Kim, D. W., Klagyivik, P., Klar, J., Knude, J., Kochukhov, O., Kolka, I., Kos, J., Kutka, A., Lainey, V., LeBouquin, D., Liu, C., Loreggia, D., Makarov, V. V., Marseille, M. G., Martayan, C., Martinez-Rubi, O., Massart, B., Meynadier, F., Mignot, S., Munari, U., Nguyen, A. T., Nordlander, T., Oc-virk, P., O’Flaherty, K. S., Olias Sanz, A., Ortiz, P., Osorio, J., Oszkiewicz, D., Ouzounis, A., Palmer, M., Park, P., Pasquato, E., Peltzer, C., Peralta, J., Péturaud, F., Pieniluoma, T., Pigozzi, E., Poels, J., Prat, G., Prod’homme, T., Raison, F., Rebordao, J. M., Risquez, D., Rocca-Volmerange, B., Rosen, S., Ruiz-Fuertes, M. I., Russo, F., Sembay, S., Serraller Vizcaino, I., Short, A., Siebert, A., Silva, H., Sinachopoulos, D., Slezak, E., Soffel, M., Sosnowska, D., Straižys, V., ter Linden, M., Terrell, D., Theil, S., Tiede, C., Troisi, L., Tsalmantza, P., Tur, D., Vaccari, M., Vachier, F., Valles, P., Van Hamme, W., Veltz, L., Virtanen, J., Wallut, J. M., Wichmann, R., Wilkinson, M. I., Ziaeeppour, H., & Zschocke, S. 2016a, *Astronomy & Astrophysics*, 595, A2

Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., Vallenari, A., Babu-siaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D. W., & et al. 2016b, *A&A*, 595, A1

Gontcharov, G. A. 2006, *Astronomy Letters*, 32, 759

Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V. V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwekendiek, P., & Wicenec, A. 2000, *A&A*, 355, L27

- Jeffries, R. D. & Oliveira, J. M. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358, 13
- Kharchenko, N. V., Scholz, R. D., Piskunov, A. E., Röser, S., & Schilbach, E. 2007, *Astronomische Nachrichten*, 328, 889
- Kiss, L. L., Moór, A., Szalai, T., Kovács, J., Bayliss, D., Gilmore, G. F., Bienaymé, O., Binney, J., Bland-Hawthorn, J., Campbell, R., Freeman, K. C., Fulbright, J. P., Gibson, B. K., Grebel, E. K., Helmi, A., Munari, U., Navarro, J. F., Parker, Q. A., Reid, W., Seabroke, G. M., Siebert, A., Siviero, A., Steinmetz, M., Watson, F. G., Williams, M., Wyse, R. F. G., & Zwitter, T. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411, 117
- Kraus, A. L., Shkolnik, E. L., Allers, K. N., & Liu, M. C. 2014, *ApJ*, 147, 146
- Kruskal, J. B. 1956, *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7, 48
- Lagrange, A.-M., Gratadour, D., Chauvin, G., Fusco, T., Ehrenreich, D., Mouillet, D., Rousset, G., Rouan, D., Allard, F., Gendron, É., & et al. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, 493, L21
- Lagrange, A. M., Meunier, N., Rubini, P., Keppler, M., Galland, F., Chapellier, E., Michel, E., Balona, L., Beust, H., Guillot, T., Grandjean, A., Borgniet, S., Mékarnia, D., Wilson, P. A., Kiefer, F., Bonnefoy, M., Lillo-Box, J., Pantoja, B., Jones, M., Iglesias, D. P., Rodet, L., Diaz, M., Zapata, A., Abe, L., & Schmider, F.-X. 2019, *Nature Astronomy*
- Lindgren, L., Hernández, J., Bombrun, A., Klioner, S., Bastian, U., Ramos-Lerate, M., de Torres, A., Steidelmüller, H., Stephenson, C., & Hobbs, D. 2018, *A&A*, 616, A2
- Liu, J.-C., Zhu, Z., & Zhang, H. 2010, *Astronomy & Astrophysics*, 526, A16
- Liu, M. C., Dupuy, T. J., & Allers, K. N. 2016, *The Astrophysical Journal*, 833, 96
- Liu, M. C., Magnier, E. A., Deacon, N. R., Allers, K. N., Dupuy, T. J., Kotson, M. C., Aller, K. M., Burgett, W. S., Chambers, K. C., Draper, P. W., & et al. 2013, *The Astrophysical Journal*, 777, L20
- Makarov, V. V. 2007, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 169, 105
- Malo, L., Artigau, É., Doyon, R., Lafrenière, D., Albert, L., & Gagné, J. 2014, *The Astrophysical Journal*, 788, 81
- Malo, L., Doyon, R., Feiden, G. A., Albert, L., Lafrenière, D., Artigau, É., Gagné, J., & Riedel, A. 2014, *ApJ*, 792, 37

- Malo, L., Doyon, R., Lafrenière, D., Artigau, É., Gagné, J., Baron, F., & Riedel, A. R. 2013, *The Astrophysical Journal*, 762, 88
- Mamajek, E. E. & Bell, C. P. M. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445, 2169
- Mentuch, E., Brandeker, A., van Kerkwijk, M. H., Jayawardhana, R., & Hauschildt, P. H. 2008, *The Astrophysical Journal*, 689, 1127
- Messina, S., Lanzafame, A., A. Feiden, G., Millward, M., Desidera, S., Buccino, A., Curtis, I., Jofré, E., Kehusmaa, P., Medhi, B., Monard, B., & Petrucci, R. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 596
- Miret-Roig, N., Antoja, T., Romero-Gómez, M., & Figueras, F. 2018, *Astronomy & Astrophysics*, 618, C7
- Montes, D., López-Santiago, J., Gálvez, M., Fernández-Figueroa, M., De Castro, E., & Cornide, M. 2001, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328, 45
- Nomura, H., Tsukagoshi, T., Kawabe, R., Ishimoto, D., Okuzumi, S., Muto, T., Kanagawa, K. D., Ida, S., Walsh, C., Millar, T. J., & et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 819, L7
- Ortega, V. G., de La Reza, R., Jilinski, E., & Bazzanella, B. 2002, *The Astrophysical Journal*, 575, L75
- Ortega, V. G., de la Reza, R., Jilinski, E., & Bazzanella, B. 2004, *The Astrophysical Journal*, 609, 243
- Perryman, M. A. C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., Hoeg, E., Bastian, U., Bernacca, P. L., Crézé, M., Donati, F., Grenon, M., Grewing, M., van Leeuwen, F., van der Marel, H., Mignard, F., Murray, C. A., Le Poole, R. S., Schrijver, H., Turon, C., Arenou, F., Froeschlé, M., & Petersen, C. S. 1997, *Astronomy & Astrophysics*, 323, L49
- Preibisch, T. & Feigelson, E. D. 2005, *ApJS*, 160, 390
- Prim, R. C. 1957, *Bell System Technical Journal*, 36, 1389
- Reiners, A., Joshi, N., & Goldman, B. 2012, *The Astronomical Journal*, 143, 93
- Riedel, A. R., Blunt, S. C., Lambrides, E. L., Rice, E. L., Cruz, K. L., & Faherty, J. K. 2017, *The Astronomical Journal*, 153, 95
- Riedel, A. R., Rodriguez, D., Finch, C. T., Henry, T. J., Subasavage, J. P., Jao, W.-C., Malo, L., Cruz, K. K., White, R. J., Gies, D. R., Dieterich, S. B., Winters, J. G., Davison, C. L., Nelan, E. P., Blunt, S. C., Rice, E. L., & Ianna, P. A. 2014, *The Astronomical Journal*,

- Robertson, P., Endl, M., Cochran, W. D., & Dodson-Robinson, S. E. 2013, *The Astrophysical Journal*, 764, 3
- Rodriguez, D. R., Zuckerman, B., Kastner, J. H., Bessell, M. S., Faherty, J. K., & Murphy, S. J. 2013, *The Astrophysical Journal*, 774, 101
- Salpeter, E. E. 1955, *The Astrophysical Journal*, 121, 161
- Schneider, A. C., Shkolnik, E. L., Allers, K. N., Kraus, A. L., Liu, M. C., Weinberger, A. J., & Flagg, L. 2019, *The Astronomical Journal*, 157, 234
- Schwarzschild, K. 1916, *Abh. Konigl. Preuss. Akad. Wissenschaften Jahre 1906,92*, Berlin, 1907, 1916
- Shkolnik, E. L., Allers, K. N., Kraus, A. L., Liu, M. C., & Flagg, L. 2017, *The Astronomical Journal*, 154, 69
- Shkolnik, E. L., Anglada-Escude, G., Liu, M. C., Bowler, B. P., Weinberger, A. J., Boss, A. P., Reid, N. I., & Tamura, M. 2012, *The Astrophysical Journal*, 758, 56
- Sissa, E., Gratton, R., Desidera, S., Martinez Fiorenzano, A. F., Bonfanti, A., Carolo, E., Vassallo, D., Claudi, R. U., Endl, M., & Cosentino, R. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 596, A76
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D. G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Gizis, J. E., Howard, E., Evans, T., Fowler, J., Fullmer, L., Hurt, R., Light, R., Kopan, E. L., Marsh, K. A., McCallon, H. L., Tam, R., Van Dyk, S., & Wheelock, S. 2006, *The Astrophysical Journal*, 131, 1163
- Soderblom, D. R., Oey, M. S., Johnson, D. R. H., & Stone, R. P. S. 1990, *The Astronomical Journal*, 99, 595
- Song, I., Zuckerman, B., & Bessell, M. S. 2003, *The Astrophysical Journal*, 599, 342
- Soubiran, C., Jasniewicz, G., Chemin, L., Crifo, F., Udry, S., Hestroffer, D., & Katz, D. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 552, 64
- Soubiran, C., Jasniewicz, G., Chemin, L., Zurbach, C., Brouillet, N., Panuzzo, P., Sartoretti, P., Katz, D., Le Campion, J.-F., Marchal, O., & et al. 2018, *Astronomy & Astrophysics*, 616, A7

- Torres, C. A. O., da Silva, L., Quast, G. R., de la Reza, R., & Jilinski, E. 2000, *The Astronomical Journal*, 120, 1410
- Torres, C. A. O., Quast, G. R., da Silva, L., de La Reza, R., Melo, C. H. F., & Sterzik, M. 2006, *A&A*, 460, 695
- Torres, C. A. O., Quast, G. R., Melo, C. H. F., & Sterzik, M. F. 2008, *Handbook of Star Forming Regions, I*, 757
- Torres, R. M., Loinard, L., Mioduszewski, A. J., & Rodríguez, L. F. 2009, *The Astrophysical Journal*, 698, 242
- Valenti, J. A. & Fischer, D. A. 2005, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 159, 141
- van Leeuwen, F. 2007, *Astronomy & Astrophysics*, 474, 653
- VandenBerg, D. A., Bergbusch, P. A., & Dowler, P. D. 2006, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 162, 375
- Webb, R. A. 2000, ProQuest Dissertations And Theses ; Thesis (Ph.D.)—University of California
- White, R. J., Gabor, J. M., & Hillenbrand, L. A. 2007, *The Astronomical Journal*, 133, 2524
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., Ressler, M. E., Cutri, R. M., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Padgett, D., McMillan, R. S., Skrutskie, M., Stanford, S. A., Cohen, M., Walker, R. G., Mather, J. C., Leisawitz, D., Gautier, III, T. N., McLean, I., Benford, D., Lonsdale, C. J., Blain, A., Mendez, B., Irace, W. R., Duval, V., Liu, F., Royer, D., Heinrichsen, I., Howard, J., Shannon, M., Kendall, M., Walsh, A. L., Larsen, M., Cardon, J. G., Schick, S., Schwalm, M., Abid, M., Fabinsky, B., Naes, L., & Tsai, C.-W. 2010, *The Astrophysical Journal*, 140, 1868
- Yee, J. C. & Jensen, E. L. N. 2010, *ApJ*, 711, 303
- Zacharias, N., Finch, C., Girard, T., Hambly, N., Wycoff, G., Zacharias, M. I., Castillo, D., Corbin, T., Divittorio, M., Dutta, S., Gaume, R., Gauss, S., Germain, M., Hall, D., Hartkopf, W., Hsu, D., Holdenried, E., Makarov, V. V., Martinez, M., Mason, B., Monet, D., Rafferty, T., Rhodes, A., Siemers, T., Smith, D., Tilleman, T., Urban, S., Wieder, G., Winter, L., & Young, A. 2010, *The Astronomical Journal*, 139, 2184
- Zuckerman, B. 2001, *Young Stars Near Earth : Progress and Prospects*, 244, 122
- Zuckerman, B. & Song, I. 2004, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42, 685
- Zuckerman, B., Song, I., & Bessell, M. S. 2004, *The Astrophysical Journal*, 613, L65

Zuckerman, B., Song, I., Bessell, M. S., & Webb, R. A. 2001, *The Astrophysical Journal*, 562, L87

Zuckerman, B. & Webb, R. A. 2000, *The Astrophysical Journal*, 535, 959

Annexe A

Module Traceback

A.1. Description

Le module `Traceback` (à ne pas confondre avec le module standard `traceback`) est un outil écrit en Python (version 3.7.4) conçu pour retracer l'origine et calculer l'âge cinématique d'une association locale jeune (YMG; *young moving group*). Le module requiert les modules non standards suivants : `numpy`, `scipy`, `matplotlib` et `astropy`. Le projet peut être consulté à la page GitHub privée de Jonathan Gagné : <https://github.com/jgagneastro/tracebacks>. Cette page contient le dossier `/Traceback`, où se situent les composantes du module, ainsi qu'un fichier de configuration, `config.py`, et un script, `__main__.py`, en exemple.

A.2. Usage

Une fois le module `Traceback` importé dans l'environnement Python, il est possible de définir des paramètres de configuration à même le script ou d'importer les paramètres contenus dans un fichier de configuration. L'outil vérifie si tous les paramètres sont valides et convertit les unités au besoin.

Deux modes d'utilisation sont possibles : `from_model` et `from_data`. Le mode `from_model` permet de simuler une association avant de retracer son origine et calculer un âge cinématique. L'association est d'abord créée à son origine à partir des paramètres de simulation : `number_of_stars`, `age`, `avg_position`, `avg_position_error`, `avg_position_scatter`, `avg_velocity`, `avg_velocity_error` et `avg_velocity_scatter`. L'outil utilise une distribution pseudo-aléatoire gaussienne pour attribuer à chaque étoile

une position XYZ et une vitesse UVW uniques, projette les étoiles jusqu'à l'âge spécifié, déplace l'origine du système de coordonnées à la position moyenne spécifiée, convertit les coordonnées galactiques en observables et applique une erreur de mesure sur ces dernières. Le résultat du mode `from_data` est équivalent, sauf que les observables de chaque étoile sont importées à partir d'un fichier `.csv`, ou d'un dictionnaire, d'une liste ou d'un tuple Python, dont le chemin ou la valeur correspond au paramètre `data`.

À ce point, les modes `from_model` et `from_data` convergent. Les coordonnées sont transformées dans un système de coordonnées héliocentrique d'axes galactiques, une correction, égale au paramètre `rv_offset`, est appliquée sur les mesures de la vitesse radiale (v_r), pour tenir compte du biais $\Delta v_{r, grav}$ dû au décalage vers le rouge gravitationnel, et le parcours des étoiles est retracé du temps `inital_time` à `final_time` en effectuant un nombre de pas égal à `number_of_step + 1`. Puis, un âge cinématique est obtenu en trouvant le pas de temps où les mesures de la dispersion (σ), de la déviation médiane absolue (MAD; *median absolute deviation*), de la longueur moyenne des branches de l'arbre couvrant de poids minimal (MST; *minimum spanning tree*), de la MAD de la longueur des branches du MST, et des covariances $X-U$, $Y-V$ et $Z-W$ entre les positions XYZ et les vitesses UVW des étoiles membres de l'association sont minimales.

Ces opérations sont répétées un nombre de fois égal au paramètre `number_of_groups` et chaque groupe est ajouté à une série de données dont le nom correspond au paramètre `name`. Puis, il est possible de créer plusieurs types de figures à partir de ces données ou d'enregistrer chaque série de données dans un fichier `.series`, qui pourra ensuite être réutilisé. Un fichier de journal `.log` est également créé. Tous les fichiers de sortie sont sauvegardés au chemin défini par le paramètre `file_path`. Si aucun chemin n'est défini, par défaut, les fichiers de sortie sont créés dans un dossier appelé `/Output`, situé dans le même répertoire que le module `Traceback`, et le fichier de journal, dans un dossier appelé `/Output/Logs`.

Annexe B

Propriétés des membres de l'association β Pictoris

On compile les propriétés observationnelles (tableau B.1) et les propriétés cinématiques (tableau B.2), calculées à l'aide des équations de la section 2.1.1.1, des membres sélectionnés de l'association β Pictoris (β PMG ; β Pictoris moving group).

Tableau B.1. Propriétés observationnelles des membres de l'association β Pictoris.

Nom	Type spectral	π [mas]	δ [°]	α [°]	v_r [km/s]	μ_δ [mas/an]	$\mu_\alpha \cos \delta$ [mas/an]
HD 203	F2 IV	$25,020 \pm 0,06$ ^b	-23,107744	1,7091469	$6,50 \pm 3,50$ ^g	$-47,279 \pm 0,018$ ^a	$97,107 \pm 0,029$ ^b
RBS 38	M2.5 V	$27,170 \pm 0,03$ ^b	-66,753498	4,3492107	$10,7 \pm 0,20$ ^h	$-16,874 \pm 0,048$ ^b	$103,039 \pm 0,054$ ^b
GJ 2006 A	M3.5 Ve	$28,660 \pm 0,07$ ^b	-32,551955	6,9598677	$8,80 \pm 0,20$ ^h	$-47,389 \pm 0,067$ ^b	$109,817 \pm 0,115$ ^b
GJ 3076	M5	$45,790 \pm 1,78$ ^c	15,439305	17,855935	$3,50 \pm 0,50$ ^{ijk}	$-120,400 \pm 1,000$ ^c	$187,600 \pm 0,800$ ^c
HD 14082 A	F5 V	$25,130 \pm 0,04$ ^b	28,744721	34,355789	$5,40 \pm 0,52$ ^l	$-74,069 \pm 0,070$ ^b	$86,924 \pm 0,071$ ^b
BD+30 397	K8	$24,360 \pm 0,05$ ^b	30,973188	36,872292	$4,85 \pm 0,11$ ^b	$-72,002 \pm 0,066$ ^b	$79,679 \pm 0,080$ ^b
EPIC 211046195	M8.5	$19,530 \pm 0,15$ ^b	23,709567	53,758953	$15,5 \pm 1,70$ ^m	$-62,940 \pm 0,209$ ^b	$50,337 \pm 0,317$ ^b
51 Eri	F0 V	$33,580 \pm 0,14$ ^b	-2,4738245	69,400742	$21,0 \pm 4,50$ ⁿ	$-63,833 \pm 0,178$ ^b	$44,352 \pm 0,227$ ^b
2MASS J0443+0002	M9	$47,410 \pm 0,19$ ^b	0,03428978	70,906941	$16,97 \pm 0,76$ ^o	$-107,485 \pm 0,280$ ^b	$55,112 \pm 0,402$ ^b
V1005 Ori	M0 Ve	$40,980 \pm 0,03$ ^b	1,7831108	74,895311	$18,08 \pm 0,63$ ^b	$-95,051 \pm 0,040$ ^b	$39,234 \pm 0,060$ ^b
CD-57 1054	M0.5 Ve	$37,170 \pm 0,03$ ^b	-57,256751	75,196655	$19,4 \pm 0,30$ ^p	$74,138 \pm 0,054$ ^b	$35,198 \pm 0,045$ ^b
V1841 Ori	K2 IV	$18,720 \pm 0,04$ ^b	15,449941	75,205432	$18,1 \pm 0,90$ ^q	$-58,835 \pm 0,051$ ^b	$18,131 \pm 0,082$ ^b
BD-21 1074 A	M1 V	$50,310 \pm 0,04$ ^b	-21,585935	76,708203	$20,71 \pm 0,62$ ^b	$-15,574 \pm 0,055$ ^b	$47,144 \pm 0,042$ ^b
AF Lep	F7	$37,210 \pm 0,03$ ^b	-11,901175	81,769922	$20,61 \pm 0,51$ ^b	$-49,163 \pm 0,025$ ^a	$17,135 \pm 0,031$ ^a
β Pic	A6 V	$51,440 \pm 0,12$ ^d	-51,066148	86,821234	$20,0 \pm 0,70$ ^r	$83,100 \pm 0,150$ ^d	$4,650 \pm 0,110$ ^d
GSC 06513-00291	M3.5 V	$30,560 \pm 0,21$ ^b	-27,701554	93,305426	$22,5 \pm 0,20$ ^h	$-5,623 \pm 0,363$ ^b	$-13,157 \pm 0,342$ ^b
AO Men	K4 Ve	$25,470 \pm 0,03$ ^b	-72,044526	94,617425	$16,2 \pm 1,00$ ^r	$74,295 \pm 0,055$ ^b	$-7,908 \pm 0,042$ ^b
TWA 22 A	M5	$51,000 \pm 0,30$ ^b	-53,907371	154,36081	$13,0 \pm 0,20$ ^{ks}	$-4,939 \pm 0,540$ ^b	$-173,099 \pm 0,559$ ^b
α Cir	A7 V	$62,940 \pm 0,43$ ^b	-64,976145	220,62479	$6,20 \pm 0,20$ ^t	$-232,614 \pm 0,630$ ^b	$-190,466 \pm 0,494$ ^b
V343 Nor A	K0 V	$24,930 \pm 0,06$ ^b	-57,707996	234,73938	$3,90 \pm 0,19$ ^b	$-97,866 \pm 0,069$ ^a	$-49,864 \pm 0,059$ ^a
TYC 8726-1327-1	M3 V	$19,760 \pm 0,12$ ^b	-53,725807	254,33435	$1,40 \pm 0,20$ ^h	$-84,087 \pm 0,143$ ^b	$-10,849 \pm 0,187$ ^b

Tableau B.1. (Suite)

Nom	Type	π	δ	α	v_r	μ_δ	$\mu_\alpha \cos \delta$
	spectral	[mas]	[°]	[°]	[km/s]	[mas/an]	[mas/an]
HD 155555 A	G5 IV	$32,780 \pm 0,03$ ^b	-66,951627	259,35604	$3,30 \pm 1,70$ ^u	$-137,247 \pm 0,026$ ^a	$-21,487 \pm 0,023$ ^a
CD-54 7336	K1V	$14,760 \pm 0,04$ ^b	-54,263787	262,47945	$-0,2 \pm 0,90$ ^t	$-63,546 \pm 0,064$ ^b	$-5,413 \pm 0,069$ ^b
HD 160305	F9 V	$15,210 \pm 0,05$ ^b	-50,724740	265,45431	$2,40 \pm 1,10$ ^u	$-65,858 \pm 0,062$ ^b	$-2,023 \pm 0,073$ ^b
UCAC3 74-428746	(M2)	$12,970 \pm 0,05$ ^b	-53,103534	267,14060	$-0,20 \pm 1,50$ ^{vw}	$-56,132 \pm 0,068$ ^b	$-1,928 \pm 0,085$ ^b
HD 164249 A	F5 V	$20,160 \pm 0,05$ ^b	-51,649380	270,76422	$-0,09 \pm 0,41$ ^b	$-86,131 \pm 0,033$ ^a	$2,274 \pm 0,038$ ^a
HD 168210	G5 V	$12,600 \pm 0,05$ ^b	-29,275986	274,96757	$-7,00 \pm 2,60$ ^r	$-46,408 \pm 0,060$ ^a	$4,626 \pm 0,089$ ^a
HD 172555	A7	$35,030 \pm 0,19$ ^d	-64,871904	281,36241	$2,00 \pm 4,20$ ^g	$-149,480 \pm 0,170$ ^d	$32,400 \pm 0,170$ ^d
HD 173167	F5 V	$19,760 \pm 0,04$ ^b	-62,230069	282,02662	$2,36 \pm 0,61$ ^b	$-80,028 \pm 0,047$ ^b	$13,056 \pm 0,051$ ^b
CD-31 16041	K7 V	$20,160 \pm 0,03$ ^b	-31,796806	282,68543	$-6,00 \pm 1,00$ ^w	$-72,275 \pm 0,059$ ^b	$17,375 \pm 0,070$ ^b
PZ Tel	G9 IV	$21,220 \pm 0,06$ ^b	-50,180895	283,27458	$-4,20 \pm 0,20$ ^g	$-85,254 \pm 0,084$ ^a	$16,348 \pm 0,084$ ^a
TYC 6872-1011-1	M0 Ve	$13,470 \pm 0,07$ ^b	-29,884838	284,51737	$-4,90 \pm 1,00$ ^w	$-48,625 \pm 0,110$ ^b	$13,411 \pm 0,121$ ^b
HD 181327	F5.5	$20,740 \pm 0,06$ ^b	-54,538403	290,74578	$-0,25 \pm 0,26$ ^b	$-82,205 \pm 0,033$ ^a	$24,518 \pm 0,036$ ^a
TYC 7443-1102-1	M0 V	$19,520 \pm 0,05$ ^b	-32,127426	299,01839	$-7,20 \pm 0,50$ ^g	$-68,395 \pm 0,053$ ^b	$33,449 \pm 0,092$ ^b
HD 191089	F5 V	$19,950 \pm 0,04$ ^b	-26,224324	302,27193	$-5,39 \pm 0,39$ ^b	$-67,475 \pm 0,026$ ^b	$40,355 \pm 0,039$ ^b
SCR J2010-2801	M2.5	$20,850 \pm 1,33$ ^c	-28,028390	302,50045	$-5,80 \pm 0,60$ ^h	$-62,700 \pm 0,900$ ^e	$40,400 \pm 0,900$ ^e
SCR J2033-2556	M4.5 V	$23,050 \pm 0,11$ ^b	-25,948130	308,40691	$-7,60 \pm 0,40$ ^h	$-74,355 \pm 0,138$ ^b	$53,465 \pm 0,190$ ^b
StHA 182	M3.7	$23,510 \pm 0,12$ ^b	-24,565262	310,92153	$-5,80 \pm 0,60$ ^h	$-74,882 \pm 0,135$ ^b	$55,934 \pm 0,210$ ^b
AU Mic	M1 Ve	$102,83 \pm 0,05$ ^b	-31,342450	311,29114	$-4,25 \pm 0,24$ ⁱ	$-360,112 \pm 0,043$ ^a	$281,376 \pm 0,069$ ^a
PSO J318.5338-22.8603	L7	$45,100 \pm 1,70$ ^f	-22,859955	318,53344	$-6,00 \pm 0,95$ ^x	$-144,300 \pm 1,300$ ^f	$136,300 \pm 1,000$ ^f
TYC 9114-1267-1	K7 V	$31,710 \pm 0,40$ ^b	-66,918836	320,37081	$13,0 \pm 0,38$ ⁱ	$-85,324 \pm 0,782$ ^b	$105,130 \pm 0,671$ ^b
HD 207043	G5 V	$30,050 \pm 0,04$ ^b	-52,931021	326,98110	$0,129 \pm 0,006$ ^y	$-88,750 \pm 0,040$ ^a	$103,310 \pm 0,050$ ^a
HD 213429	F8 V	$39,190 \pm 0,62$ ^b	-6,5556227	337,82700	$-7,896 \pm 3,787$ ^b	$-75,661 \pm 1,579$ ^b	$145,605 \pm 1,767$ ^b
CPD-72 2713	K7 V	$27,280 \pm 0,02$ ^b	-71,706114	340,70519	$8,60 \pm 0,50$ ^w	$-52,464 \pm 0,045$ ^b	$94,798 \pm 0,035$ ^b
WW PsA	M4 IVe	$47,940 \pm 0,05$ ^b	-33,251015	341,24244	$1,10 \pm 1,20$ ^z	$-123,103 \pm 0,099$ ^b	$179,904 \pm 0,102$ ^b
BD-13 6424	M0 V	$36,530 \pm 0,06$ ^b	-12,264649	353,12920	$1,38 \pm 0,37$ ^A	$-81,889 \pm 0,065$ ^b	$139,260 \pm 0,087$ ^b

Note. Parallaxe (π), déclinaison (δ), ascension droite (α), vitesse radiale (v_r), mouvement propre en déclinaison (μ_δ), mouvement propre en ascension droite (μ_α) à l'époque actuelle.

^a Gaia Collaboration et al. (2016a) ^b Brown et al. (2018) ^c Riedel et al. (2014) ^d van Leeuwen (2007) ^e Zacharias et al. (2010) ^f Liu et al. (2016) ^g Gontcharov (2006) ^h Malo et al. (2014) ⁱ Schneider et al. (2019) ^j Montes et al. (2001) ^k Durkan et al. (2018) ^l Valenti & Fischer (2005) ^m Shkolnik et al. (2012) ⁿ Kharchenko et al. (2007) ^o Faherty et al. (2016a) ^p Bobylev & Bajkova (2007) ^q White et al. (2007) ^r Anderson & Francis (2012) ^s Torres et al. (2009) ^t Desidera et al. (2015) ^u Kiss et al. (2011) ^v Gagné & Faherty (2018) ^w Torres et al. (2006) ^x Allers et al. (2016) ^y Soubiran et al. (2013) ^z Song et al. (2003) ^A Shkolnik et al. (2017)

Tableau B.2. Propriétés cinématiques des membres de l'association β Pictoris.

Nom	X [pc]	Y [pc]	Z [pc]	U [km/s]	V [km/s]	W [km/s]
HD 203	$4,614 \pm 0,02$	$5,95 \pm 0,054$	$-39,244 \pm 0,081$	$-10,969 \pm 0,694$	$-15,27 \pm 1,893$	$-10,223 \pm 2,861$
RBS 38	$14,605 \pm 0,021$	$-18,594 \pm 0,034$	$-28,206 \pm 0,026$	$-10,447 \pm 0,092$	$-16,163 \pm 0,143$	$-8,717 \pm 0,109$
GJ 2006 A	$4,369 \pm 0,025$	$-1,184 \pm 0,051$	$-34,598 \pm 0,068$	$-10,653 \pm 0,071$	$-16,184 \pm 0,119$	$-9,666 \pm 0,155$
GJ 3076	$-9,55 \pm 0,249$	$11,372 \pm 0,435$	$-16,013 \pm 0,685$	$-12,193 \pm 0,739$	$-16,471 \pm 0,619$	$-9,881 \pm 0,386$
HD 14082 A	$-28,032 \pm 0,03$	$19,765 \pm 0,034$	$-20,162 \pm 0,042$	$-12,808 \pm 0,258$	$-16,005 \pm 0,288$	$-8,538 \pm 0,35$
BD+30 397	$-30,213 \pm 0,043$	$20,299 \pm 0,047$	$-18,981 \pm 0,055$	$-12,176 \pm 0,066$	$-15,765 \pm 0,067$	$-7,967 \pm 0,074$
EPIC 211046195	$-44,513 \pm 0,272$	$12,256 \pm 0,21$	$-22,151 \pm 0,212$	$-17,001 \pm 1,152$	$-15,233 \pm 0,889$	$-10,096 \pm 0,897$
51 Eri	$-24,28 \pm 0,098$	$-8,177 \pm 0,054$	$-15,186 \pm 0,043$	$-14,041 \pm 3,678$	$-16,273 \pm 2,034$	$-9,973 \pm 1,609$
2MASS J0443+0002	$-17,794 \pm 0,068$	$-5,448 \pm 0,037$	$-9,928 \pm 0,028$	$-10,411 \pm 0,628$	$-15,787 \pm 0,345$	$-8,731 \pm 0,262$
V1005 Ori	$-21,283 \pm 0,017$	$-6,767 \pm 0,009$	$-9,832 \pm 0,006$	$-11,538 \pm 0,531$	$-16,017 \pm 0,283$	$-8,872 \pm 0,187$
CD-57 1054	$-1,543 \pm 0,012$	$-21,322 \pm 0,014$	$-16,329 \pm 0,008$	$-11,177 \pm 0,184$	$-16,627 \pm 0,202$	$-9,192 \pm 0,125$
V1841 Ori	$-51,08 \pm 0,099$	$-5,017 \pm 0,057$	$-14,777 \pm 0,037$	$-14,55 \pm 0,742$	$-16,346 \pm 0,429$	$-9,575 \pm 0,278$
BD-21 1074 A	$-12,407 \pm 0,012$	$-11,365 \pm 0,007$	$-10,585 \pm 0,004$	$-12,455 \pm 0,502$	$-15,278 \pm 0,309$	$-7,89 \pm 0,191$
AF Lep	$-20,259 \pm 0,016$	$-13,859 \pm 0,009$	$-10,95 \pm 0,005$	$-11,584 \pm 0,434$	$-15,942 \pm 0,236$	$-8,98 \pm 0,125$
β Pic	$-3,429 \pm 0,087$	$-16,652 \pm 0,084$	$-10,059 \pm 0,049$	$-11,085 \pm 0,469$	$-15,857 \pm 0,455$	$-9,248 \pm 0,271$
GSC 06513-00291	$-17,813 \pm 0,178$	$-25,057 \pm 0,116$	$-11,217 \pm 0,062$	$-11,736 \pm 0,164$	$-16,658 \pm 0,115$	$-9,796 \pm 0,077$
AO Men	$7,587 \pm 0,021$	$-33,748 \pm 0,028$	$-18,575 \pm 0,017$	$-10,51 \pm 0,533$	$-16,424 \pm 0,724$	$-8,695 \pm 0,439$
TWA 22 A	$3,872 \pm 0,052$	$-19,203 \pm 0,077$	$0,821 \pm 0,068$	$-9,875 \pm 0,951$	$-17,473 \pm 1,404$	$-8,675 \pm 1,245$
α Cir	$11,067 \pm 0,054$	$-11,327 \pm 0,076$	$-1,272 \pm 0,054$	$-10,781 \pm 0,167$	$-18,058 \pm 0,163$	$-10,429 \pm 0,114$
V343 Nor A	$32,363 \pm 0,058$	$-23,654 \pm 0,07$	$-1,262 \pm 0,049$	$-8,44 \pm 0,116$	$-17,705 \pm 0,132$	$-8,539 \pm 0,093$
TYC 8726-1327-1	$45,374 \pm 0,194$	$-21,651 \pm 0,202$	$-5,879 \pm 0,126$	$-7,367 \pm 0,16$	$-15,864 \pm 0,152$	$-10,484 \pm 0,099$
HD 155555 A	$23,955 \pm 0,014$	$-16,837 \pm 0,018$	$-8,561 \pm 0,011$	$-9,83 \pm 0,948$	$-15,674 \pm 1,206$	$-8,439 \pm 0,733$
CD-54 7336	$61,161 \pm 0,106$	$-26,19 \pm 0,109$	$-12,813 \pm 0,065$	$-8,982 \pm 0,578$	$-16,015 \pm 0,595$	$-9,082 \pm 0,355$
HD 160305	$61,032 \pm 0,153$	$-21,188 \pm 0,147$	$-12,125 \pm 0,086$	$-5,396 \pm 0,735$	$-17,233 \pm 0,709$	$-10,06 \pm 0,416$
UCAC3 74-428746	$70,356 \pm 0,205$	$-26,64 \pm 0,206$	$-16,959 \pm 0,121$	$-8,575 \pm 0,979$	$-16,384 \pm 0,983$	$-8,927 \pm 0,578$
HD 164249 A	$45,69 \pm 0,081$	$-15,169 \pm 0,08$	$-12,001 \pm 0,047$	$-7,898 \pm 0,274$	$-16,257 \pm 0,267$	$-9,149 \pm 0,157$
HD 168210	$78,707 \pm 0,266$	$4,651 \pm 0,178$	$-9,24 \pm 0,097$	$-7,175 \pm 2,068$	$-15,12 \pm 1,387$	$-8,592 \pm 0,753$
HD 172555	$22,588 \pm 0,105$	$-12,745 \pm 0,129$	$-11,419 \pm 0,079$	$-10,677 \pm 2,394$	$-15,333 \pm 2,951$	$-8,97 \pm 1,795$
HD 173167	$41,539 \pm 0,055$	$-20,763 \pm 0,066$	$-20,113 \pm 0,04$	$-8,791 \pm 0,358$	$-15,567 \pm 0,423$	$-8,024 \pm 0,258$
CD-31 16041	$48,074 \pm 0,064$	$3,348 \pm 0,046$	$-11,807 \pm 0,028$	$-7,35 \pm 0,768$	$-14,485 \pm 0,548$	$-8,821 \pm 0,334$
PZ Tel	$42,788 \pm 0,088$	$-10,549 \pm 0,085$	$-16,7 \pm 0,052$	$-11,091 \pm 0,139$	$-14,78 \pm 0,133$	$-7,229 \pm 0,082$
TYC 6872-1011-1	$71,427 \pm 0,293$	$8,059 \pm 0,205$	$-18,522 \pm 0,129$	$-5,913 \pm 0,774$	$-14,609 \pm 0,543$	$-9,52 \pm 0,343$
HD 181327	$41,304 \pm 0,083$	$-12,803 \pm 0,089$	$-21,322 \pm 0,057$	$-9,143 \pm 0,166$	$-15,35 \pm 0,175$	$-7,929 \pm 0,113$
TYC 7443-1102-1	$45,175 \pm 0,084$	$6,926 \pm 0,067$	$-23,175 \pm 0,055$	$-9,886 \pm 0,35$	$-15,28 \pm 0,279$	$-7,917 \pm 0,229$
HD 191089	$42,616 \pm 0,075$	$12,232 \pm 0,057$	$-23,406 \pm 0,052$	$-7,545 \pm 0,273$	$-14,854 \pm 0,208$	$-9,954 \pm 0,191$
SCR J2010-2801	$40,843 \pm 2,109$	$10,288 \pm 1,641$	$-22,942 \pm 1,489$	$-8,324 \pm 0,832$	$-13,303 \pm 0,775$	$-8,659 \pm 0,567$
SCR J2033-2556	$34,549 \pm 0,139$	$11,391 \pm 0,113$	$-23,625 \pm 0,115$	$-10,191 \pm 0,269$	$-15,432 \pm 0,222$	$-8,39 \pm 0,222$
StHA 182	$32,695 \pm 0,135$	$12,314 \pm 0,112$	$-24,259 \pm 0,121$	$-8,651 \pm 0,387$	$-15,153 \pm 0,322$	$-9,183 \pm 0,344$
AU Mic	$7,597 \pm 0,003$	$1,706 \pm 0,003$	$-5,826 \pm 0,003$	$-11,437 \pm 0,179$	$-16,381 \pm 0,162$	$-9,178 \pm 0,162$

Tableau B.2. (Suite)

Nom	X [pc]	Y [pc]	Z [pc]	U [km/s]	V [km/s]	W [km/s]
PSO J318.5338-22.8603	$15,144 \pm 0,473$	$7,149 \pm 0,438$	$-14,532 \pm 0,532$	$-10,577 \pm 0,766$	$-15,843 \pm 0,684$	$-9,661 \pm 0,683$
TYC 9114-1267-1	$20,4 \pm 0,196$	$-13,458 \pm 0,281$	$-19,927 \pm 0,196$	$-12,609 \pm 0,461$	$-13,369 \pm 0,587$	$-9,101 \pm 0,413$
HD 207043	$21,468 \pm 0,019$	$-6,661 \pm 0,026$	$-24,533 \pm 0,022$	$-13,057 \pm 0,022$	$-15,328 \pm 0,015$	$-7,44 \pm 0,01$
HD 213429	$8,478 \pm 0,137$	$13,68 \pm 0,2$	$-19,803 \pm 0,327$	$-13,127 \pm 1,31$	$-15,65 \pm 1,877$	$-6,256 \pm 3,047$
CPD-72 2713	$19,567 \pm 0,015$	$-18,943 \pm 0,023$	$-24,543 \pm 0,016$	$-9,956 \pm 0,235$	$-16,118 \pm 0,363$	$-8,343 \pm 0,252$
WW PsA	$9,526 \pm 0,008$	$2,113 \pm 0,013$	$-18,435 \pm 0,017$	$-11,126 \pm 0,429$	$-16,236 \pm 0,695$	$-8,855 \pm 0,88$
BD-13 6424	$4,151 \pm 0,007$	$10,202 \pm 0,022$	$-25,06 \pm 0,037$	$-10,669 \pm 0,064$	$-15,382 \pm 0,189$	$-9,537 \pm 0,314$

Note. Les positions XYZ et les vitesses UVW des membres de l'association sont données dans un système de coordonnées héliocentrique d'axes galactiques à l'époque actuelle.