



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du Master 2 Recherche

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Présenté et soutenu par
Isabelle SANTOS

Le 13 juin 2019

L'énigme des structures filamentaires dans les observations LOFAR

Master : **SUTS - Sciences de l'Univers et Technologies Spatiales**

Spécialité : **ASEP - Astrophysique, Sciences de l'Espace, Planétologie**

Unité de recherche :
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

Stage dirigé par
Marta ALVES et Katia FERRIÈRE

Jury
Natalie WEBB (IRAP)
Charlotte VASTEL (IRAP)
David Mimoun (ISAE)
Gabriel FRUIT (IRAP)
Michel RIEUTORD (IRAP)

Résumé

Contexte Avec les nouveaux télescopes à basse fréquence tels que LOFAR et bientôt SKA, de nouvelles méthodes telles que la tomographie Faraday permettent d'explorer la structure et la composition du milieu interstellaire, ainsi que le champ magnétique qui le traverse.

Objectifs Nous cherchons à déterminer les propriétés telles que la distance, le champ magnétique ou la densité électronique des structures du milieu interstellaire visibles en tomographie Faraday dans une région proche de la nébuleuse de Draco.

Méthodes Nous étudions ici l'émission polarisée en fonction de la profondeur de Faraday que nous comparons à d'autres traceurs du milieu interstellaire. Nous comparons en particulier les canaux de dépolarisation qui apparaissent en tomographie Faraday aux filaments HI.

Résultats Contrairement à des études précédentes d'autres zones du ciel, nous ne trouvons aucune corrélation entre les images en tomographie Faraday et celles issues d'autres techniques d'observation.

Conclusions Nous avons montré que la corrélation entre les canaux de dépolarisation et les filaments HI n'est pas universelle. En outre, nous proposons un modèle d'écrans Faraday permettant d'expliquer les observation LOFAR autour de la nébuleuse de Draco.

Mots-clés : Polarisation, Rotation de Faraday, Milieu interstellaire, Canaux de dépolarisation

Abstract

Context With low frequency observatories such as LOFAR and SKA currently being deployed, new observational methods such as Faraday tomography can be used to probe the structure and the composition of the interstellar medium, along with the interstellar magnetic field.

Aims We seek to determine the properties (distance, magnetic field, electronic density,...) of the structures visible in Faraday tomography.

Methods We study the polarized emission as a function of Faraday depth and compare the emergent structures to those seen with other interstellar medium tracers. Namely, we compare the depolarization canals in Faraday tomography to the HI filaments.

Results Contrary to prior studies of other regions of the sky, we find no correlation between the structures visible in Faraday tomography and those visible with other imaging techniques.

Conclusions We have shown that the correlation between depolarization canals and HI filaments is not universal. Furthermore, we propose a Faraday screen model to explain the LOFAR observations around the Draco nebula.

Keywords : Polarization, Faraday Rotation, Interstellar Medium, Depolarization canals

Remerciements

Je tiens à remercier Katia et Marta pour leurs conseils avisés et leur bienveillance.

Merci aussi à JB, Marta et Jean-Seb de pour la bonne ambiance dans le bureau, ainsi qu'à toute l'équipe MICMAC pour leur accueil chaleureux.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers le NASA Astrophysics Data System (ADS) qui m'a été d'une grande utilité dans mes recherches bibliographiques.

Merci au lecteur intéressé par mes travaux.

Contents

Résumé	iii
Remerciements	v
Contents	vii
List of Figures	ix
1 Introduction et contexte	1
1.1 Introduction générale	1
1.2 Le milieu interstellaire	1
1.2.1 Phases du milieu interstellaire	1
1.2.2 Cycle de la matière dans le milieu interstellaire	2
1.2.3 Vitesse des nuages	3
1.2.4 Observation de la matière du milieu interstellaire	3
1.2.5 Champs magnétiques du milieu interstellaire	4
1.2.6 Émission synchrotron	5
1.3 Tomographie Faraday	5
1.3.1 Mesure de rotation	5
1.3.2 Profondeur de Faraday	6
1.3.3 Canaux de dépolarisation	7
1.4 Nébuleuse de Draco	7
1.5 LOFAR Two-meter Sky Survey	9
2 Méthodes et moyens	11
2.1 Algorithmes	11
2.1.1 Calcul de l'intensité de la polarisation en fonction de la profondeur de Faraday	11
2.1.2 Détection de structures linéaires dans une image	11
2.2 Jeux de données	12
2.2.1 Rotation Faraday avec LOFAR	12
2.2.2 Comparaison à d'autres jeux de données	16
3 Résultats et conclusion	21
3.1 Inversion de la mesure de rotation	21
3.2 Canaux de dépolarisation	21
3.3 Conclusion générale	21
3.4 Travaux futurs	22
3.4.1 Autour de la nébuleuse de Draco	22
3.4.2 Ailleurs dans la Galaxie	23
Bibliography	25

List of Figures

1.1	Phases du milieu interstellaire	2
1.2	Densité de colonne et vitesse radiale du gaz H _I	3
1.3	Tomographie Faraday	6
1.4	Nébuleuse de Draco en rayons X	8
1.5	Distance à la nébuleuse de Draco	9
2.1	Principe de l'algorithme RHT	12
2.2	Couverture par LOFAR de la région autour de la nébuleuse de Draco	13
2.3	Canaux utilisables des images LOFAR	14
2.4	Profondeur de Faraday du maximum d'émission	15
2.5	Distribution angulaire des fibres	15
2.6	Distribution angulaire des fibres en tomographie Faraday	16
2.7	Filaments H _I	18
2.8	Orientation du champ magnétique global.	19
2.9	Carte de la mesure de rotation Galactique	20
3.1	Proposition d'un modèle du milieu interstellaire	22
3.2	Boucle du cygne en UV lointains. Image GALEX.	23

1 Introduction et contexte

1.1 Introduction générale

Avec ses 7000 antennes réparties sur 1 500 km en Europe, l'observatoire Low-Frequency Array (LOFAR) est le plus grand réseau d'antennes radio au monde [41]. Depuis quelques années, il sonde l'intégralité de l'hémisphère nord à des fréquences comprises entre 10 MHz et 250 MHz.

Les images obtenues avec LOFAR permettent de mettre en œuvre une technique d'observation du milieu interstellaire appelée tomographie Faraday [18]. Cette méthode récente permet de mettre en évidence des structures qui ne sont pas détectées avec les traceurs traditionnels du milieu interstellaire. En particulier, on observe en imagerie Faraday des structures rectilignes très fines alignées avec le champ magnétique global [37].

Dans ce mémoire, nous décrivons l'étude d'une région proche de la nébuleuse de Draco par le prisme des images LOFAR et de la tomographie Faraday. Les sections suivantes de ce chapitre d'introduction présentent ces différentes notions plus en détail. Dans le chapitre 2, les données utilisées et les méthodes employées seront présentées. Puis les résultats obtenus ainsi que les conclusions tirées de ces travaux seront détaillés dans le chapitre 3 qui figurera également les perspectives de travaux futurs.

1.2 Le milieu interstellaire

Entre les étoiles d'une galaxie se trouve le milieu interstellaire (ISM, Inter-Stellar Medium), un milieu diffus et inhomogène, mais loin d'être vide. Celui-ci est composé de gaz – 89% d'hydrogène, 9% d'hélium – sous plusieurs phases, de particules chargées relativistes (les rayons cosmiques) et de poussière. Il est de plus traversé par un champ magnétique couplé à la matière [19]. En outre, il contribue de façon significative à la dynamique et à la chimie de la galaxie et ses différentes composantes interagissent entre-elles [39].

L'étude de l'ISM de notre Galaxie est intéressante à plusieurs égards. L'ISM représente une part importante de la masse d'une galaxie, devant la masse stellaire [58] et de ce fait, sa contribution à la dynamique et à l'évolution des galaxies est non-négligeable. De plus, c'est dans les nuages interstellaires que se forment les étoiles et les disques protoplanétaires [4]. Une meilleure compréhension de l'ISM et de sa chimie permet alors de mieux connaître les premières phases de la vie d'une étoile. En outre, pour étudier le milieu intergalactique ou pour faire de la cosmologie, il est nécessaire de soustraire la contribution Galactique au signal total [34]. En effet, la non-prise en compte de l'avant-plan Galactique, même à hautes latitudes Galactiques, peut mener à des erreurs de mesures dans la caractérisation du fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background) [17]. L'étude de l'ISM permet alors de quantifier et modéliser cette contribution Galactique pour l'intégrer aux modèles d'observation du CMB. Enfin, la connaissance de l'ISM de notre propre Galaxie permet de contraindre les modèles pour la compréhension des autres galaxies.

1.2.1 Phases du milieu interstellaire

L'ISM est composé de plusieurs phases qui peuvent être décrites en fonction de leur température et de leur densité [19, 30, 54]. La matière de l'ISM peut passer d'une phase à l'autre au cours du temps. Une synthèse de ces phases est donnée en figure 1.1, où chaque bulle de couleur représente une forme de matière baryonique.

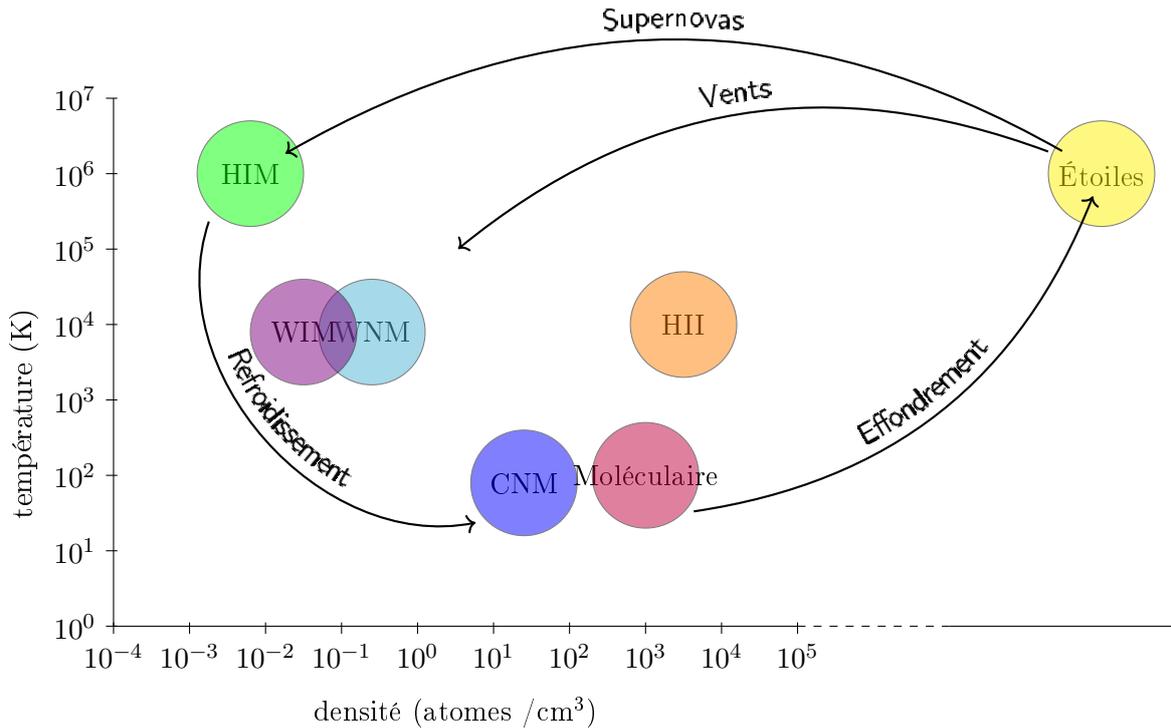


Figure 1.1: Phases du gaz interstellaire et cycle de la matière, adapté de la thèse de F. Levrier (2004)

Le gaz neutre peut être atomique froid (CNM, ou Cold Neutral Medium), atomique tiède (WNM, ou Warm Neutral Medium) ou moléculaire. Dans ce milieu neutre, l'hydrogène n'est pas ionisé, mais d'autres éléments peuvent l'être par les rayons UV des étoiles environnantes.

Les nuages moléculaires sont froids, avec une température inférieure à 1 000 K, et relativement denses, avec une densité atomique de 100 à $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$. Ces nuages sont le lieu où naissent la plupart des étoiles de type solaire [54].

Le gaz interstellaire ionisé apparaît sous une forme chaude et peu dense (HIM, ou Hot Interstellar Medium), sous une forme tiède et plus dense (WIM, ou Warm Interstellar Medium) ainsi que sous la forme de nuages HII.

Les grains de poussière sont mélangés avec le gaz dans toutes ses phases, quoiqu'ils sont typiquement à des températures plus faibles (10 à 20 K). Leur émission se situe dans le domaine sub-millimétrique.

Les observations réalisées par la mission Herschel de l'émission de la poussière ont pu montrer l'omniprésence de structures filamentaires dans toutes les phases de l'ISM, des régions de formation d'étoiles [2] aux régions les plus diffuses [47].

1.2.2 Cycle de la matière dans le milieu interstellaire

La matière de l'ISM suit une évolution cyclique représentée par des flèches dans la figure 1.1. Les étoiles se forment dans les régions froides et denses de l'ISM, les nuages moléculaires (voir section 1.2.1) lorsque la matière de ces régions se contracte du fait de la gravité et s'effondre localement.

Une partie de la matière dans les étoiles est ensuite restituée à l'ISM par l'intermédiaire des vents stellaires et des supernovas. L'explosion de supernova injecte aussi une grande quantité d'énergie cinétique dans l'ISM, contribuant ainsi à la turbulence à grande échelle dans les nuages moléculaires.

Plusieurs processus, tels que les supernovas ou la rotation galactique différentielle, peuvent provoquer localement des compressions du gaz [44]. En refroidissant, ces surdensités peuvent devenir gravitationnellement liées, formant des filaments de matière dans lesquels naissent les cœurs proto-stellaires, complétant ainsi le cycle dont la durée est estimée à $1,5 \times 10^9$ ans [54].

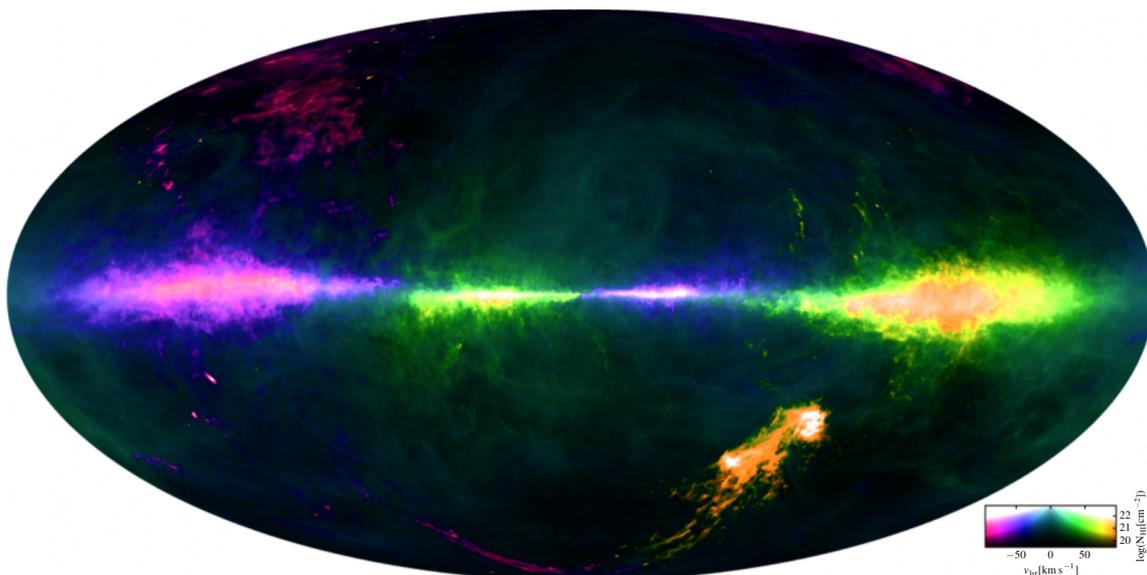


Figure 1.2: Image composite montrant la densité de colonne du HI et sa vitesse radiale. La vitesse est représentée par la couleur et la densité de colonne par la saturation. Les vitesses relevées vont jusqu'à $\pm 600 \text{ km s}^{-1}$, mais celles au delà de $\pm 100 \text{ km s}^{-1}$ ont été coupées dans cette carte. Les éléments en rouge et orange peuvent donc avoir une vitesse plus élevée que ce qui est indiqué par les couleurs. La carte est en coordonnées galactiques avec une projection Mollweide. Image HI4PI [32].

1.2.3 Vitesse des nuages

La Galaxie est un ensemble dynamique au sein duquel la matière se déplace et duquel la matière entre et sort. Les nuages interstellaires sont répartis, avec un certain arbitraire, en trois régimes de vitesse : haute, basse et intermédiaire [43]. Les vitesses des nuages HI sont représentées en figure 1.2.

Les nuages interstellaires à haute vitesse (HVC, High Velocity Cloud) sont vus comme la preuve d'une arrivée de matière du milieu intergalactique [15]. L'origine de ces nuages peut être déterminée en mesurant leur métallicité.

Les nuages interstellaires à vitesse intermédiaire (IVC, Intermediate Velocity Cloud) sont plus proches du plan Galactique que les nuages HVC. Ils peuvent être des nuages d'origine extragalactique [46], comme les HVC ou bien faire partie de la fontaine Galactique : du gaz chaud expulsé par les vents stellaires et les supernovas s'élève dans le halo puis retombe dans le plan Galactique par l'action de la gravitation [59, 53].

Les IVC et les HVC sont le plus souvent des nuages neutres, mais peuvent également contenir du gaz moléculaire comme c'est le cas pour la nébuleuse de Draco.

Enfin, les nuages interstellaires à basse vitesse (LVC, Low Velocity Cloud) sont les nuages du disque Galactique. Ils sont situés proches du plan de la Galaxie.

Autour de la nébuleuse de Draco, les bornes utilisées par GHIGLS [43] pour les nuages de type LVC, IVC et HVC sont respectivement $[-20,5; 47,5]$, $[-83,3; -20,5]$ et $[-199; -83,3] \text{ km/s}$.

1.2.4 Observation de la matière du milieu interstellaire

L'ISM est moins facilement visible que les étoiles de notre Galaxie. Néanmoins, plusieurs mécanismes sont à notre disposition pour l'observer et déterminer ses caractéristiques physiques.

Le gaz et la poussière de l'ISM se manifeste principalement par l'absorption de la lumière des sources d'arrière-plan. L'absorption d'un nuage de poussière est par ailleurs plus efficace aux longueurs d'onde proches de la taille des grains. La lumière bleue sera donc plus absorbée que la lumière rouge, aussi

les étoiles d'arrière-plan auront une magnitude apparente plus ou moins élevée en fonction du domaine spectral d'observation. Pour cette raison, les étoiles de notre Galaxie plus éloignées apparaissent en moyenne plus rouge. Les nuages moléculaires notamment apparaissent comme des taches sombres dans l'imagerie visible. Ce phénomène de rougissement n'est pas à confondre avec celui de redshift qui a une autre origine physique.

En plus d'absorber la lumière des sources d'arrière-plan, les grains de poussière émettent dans le sub-millimétrique. Or comme ces grains sont mélangés au gaz, leur émission constitue un bon traceur de l'ISM.

Il est possible de mesurer très précisément la position des étoiles avec la méthode de la parallaxe pour les étoiles les plus proches, ou en calculant la magnitude absolue à partir du type spectral et de la photométrie pour les étoiles plus distantes. Ces méthodes permettent de déterminer indirectement la position des nuages en cherchant la distance des étoiles le long de la ligne de visée dont la lumière n'est pas absorbée [38].

Par ailleurs, puisque l'ISM est à la fois peu dense et très étendu, des phénomènes tels que la transition de retournement de spin de l'atome d'hydrogène peuvent être observée dans le domaine radio. Cette désexcitation produit un photon à 21 cm de longueur d'onde qui n'est observable que dans l'ISM [39]. Ces mesures permettent de connaître la distribution et la cinématique du gaz atomique, représentée en figure 1.2.

Le gaz ionisé peut être étudié par l'intermédiaire des raies de recombinaison telles que $H\alpha$, mais aussi dans le domaine Ultra violet (UV) ou X [38].

Par ailleurs, plusieurs molécules trouvables dans l'ISM ont des raies d'émission dans le domaine UV (telles que H_2), dans le domaine radio (telles que OH, NH_3 ou H_2O) ou dans le domaine millimétrique (telles que CO ou SiO) [38]. La présence de gaz moléculaire peut donc être déduit de la présence de ces raies.

Outre leur composition, la distance de ces nuages peut également être déterminée par les raies spectrales. En connaissant la courbe de rotation de la Galaxie, la position des raies indique la vitesse radiale et donc la distance du nuage.

1.2.5 Champs magnétiques du milieu interstellaire

Le champ magnétique de l'ISM joue un rôle prépondérant dans bon nombre de processus physiques [30]. Il contribue à l'accélération, la propagation ou le confinement de rayons cosmiques, ainsi qu'à la formation stellaire. Sa mesure est cependant difficile à réaliser. En effet, les méthodes qui permettent d'inférer son orientation ou son amplitude ne donnent pas une information complète sur le champ et ne donnent souvent que des quantités intégrées le long de la ligne de visée. De plus, ces méthodes sont dépendantes de la phase de l'ISM [38].

Dans les régions de gaz neutre, le champ magnétique peut être mesuré de façon directe par l'effet Zeeman [16]. La mesure de la séparation des raies permet de déterminer la composante du champ le long de la ligne de visée.

Dans les régions ionisées, la rotation de Faraday permet de déduire la composante du champ magnétique le long de la ligne de visée, sous réserve d'un modèle décrivant la distribution électronique [18]. La rotation de Faraday sera présentée plus en détail dans les sections suivantes.

Dans les nuages de poussière, le champ magnétique se mesure de façon indirecte par la polarisation de la lumière [38]. En effet, en présence de champ magnétique, les grains de poussière interstellaires oblongs s'alignent. Dans ce cas, la lumière se trouve polarisée en sortie du nuage de poussière et l'orientation de la polarisation donne l'orientation du champ dans le plan du ciel. En outre, la fraction de polarisation donne de façon indirecte l'inclinaison du champ par rapport au plan du ciel.

La mesure de l'émission synchrotron produite par la rotation d'électrons relativistes autour des lignes de champ donne la composante dans le plan du ciel du champ magnétique, mais pas celle selon la ligne de visée.

Du fait de la prévalence de rayons cosmiques et de photons provenant d'étoiles dans l'ISM, le milieu neutre se trouve partiellement ionisé. Le gaz de l'ISM se déplace donc avec les lignes de champ du

fait du théorème du gel. La forme de l'ISM est ainsi en partie déterminée par la force et la forme du champ magnétique interstellaire [30].

Lors de l'effondrement des filaments de gaz moléculaire dans l'ISM, la matière aura tendance à se déplacer le long des lignes du champ magnétique. Pour cette raison, les filaments de matière les plus denses sont souvent orthogonaux aux lignes du champ magnétique [1]. En revanche, les filaments neutres observés par l'intermédiaire de l'émission H_I moins denses se trouvent alignés avec le champ magnétique à cause des mouvements turbulents dans l'ISM [29].

1.2.6 Émission synchrotron

L'émission synchrotron est produite par la rotation d'électrons relativistes autour des lignes de champ magnétiques. Ce rayonnement dépend à la fois de la norme du champ magnétique dans le plan du ciel et du spectre des électrons des rayons cosmiques. Dans notre Galaxie, la répartition de l'émission de rayonnement synchrotron a été modélisée par [5].

En outre, ce rayonnement synchrotron est fortement polarisé linéairement [38], ce qui rend son étude intéressante dans le contexte de la tomographie Faraday présentée dans la section suivante. L'orientation de sa polarisation donne de plus l'orientation du champ magnétique dans le plan du ciel.

1.3 Tomographie Faraday

La tomographie Faraday est une méthode exploitant la mesure de la rotation de la polarisation d'une onde électromagnétique à travers un milieu biréfringent afin d'en déduire des propriétés sur le milieu traversé. Nous détaillons le principe de cette méthode dans les paragraphes suivants.

1.3.1 Mesure de rotation

Un milieu ionisé soumis à un champ magnétique est un diélectrique dont l'indice de réfraction est différent pour les deux polarisation circulaires opposées. Or la polarisation linéaire peut se décomposer en une composante circulaire main droite et une composante circulaire main gauche. Les composantes circulaires main droite et main gauche d'une onde incidente ne ralentissent pas autant l'une que l'autre en traversant le milieu. Ainsi, lorsqu'une onde électromagnétique linéairement polarisée traverse un tel milieu, appelé écran Faraday, sa polarisation tourne d'un certain angle.

Cet angle, noté θ , est fonction de la longueur d'onde λ de l'onde traversante, de la distance L parcourue par l'onde, du champ magnétique selon la direction de propagation B_{\parallel} et de la densité électronique n_e du milieu [9]. Cet effet porte le nom de rotation Faraday et l'angle duquel tourne la polarisation s'écrit de la façon suivante :

$$\Delta\theta = \mathcal{C}\lambda^2 \int_0^L n_e B_{\parallel} ds , \quad (1.1)$$

où \mathcal{C} est une constante numérique. Par convention, la composante B_{\parallel} sera positive lorsque le champ se dirige vers l'observateur et négative dans le cas contraire.

On définit alors une grandeur qui ne dépend que du milieu traversé, la mesure de rotation, notée RM telle que

$$\Delta\theta = RM \cdot \lambda^2 . \quad (1.2)$$

Puisque la quantité de rotation de la polarisation augmente avec le carré de la longueur d'onde, il est plus aisé en pratique d'observer la rotation Faraday aux grandes longueurs d'onde. Il est donc avantageux d'observer la polarisation dans le domaine radio afin d'en déduire la mesure de rotation.

La mesure de rotation peut être estimée pour une source ponctuelle d'arrière-plan, comme par exemple un pulsar ou une galaxie, ou encore pour une source diffuse émettant du rayonnement synchrotron. Elle donne alors accès à des informations sur le milieu traversé par l'onde électromagnétique. Lorsque plusieurs sources et plusieurs régions de gaz ionisé se situent sur la même ligne de visée, chaque source

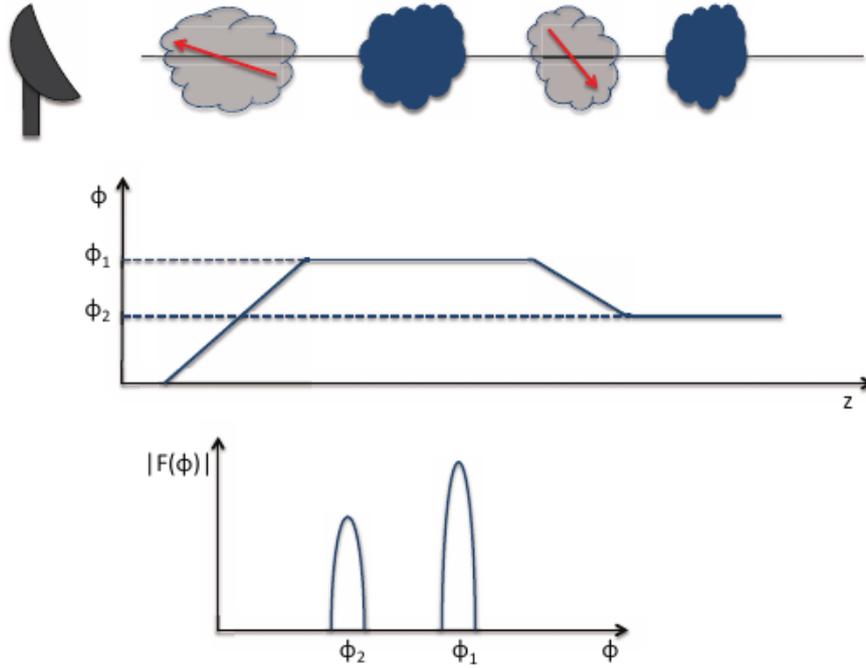


Figure 1.3: Principe de la tomographie Faraday. En gris, les écrans Faraday, en bleu les sources. Les flèches rouges indiquent la direction du champ magnétique dans le milieu. La première courbe montre la profondeur de Faraday ϕ en fonction de la distance z à l'observateur le long de la ligne de visée. La deuxième trace le spectre de la dispersion de Faraday $|F(\phi)|$. Image : Marta Alves.

et chaque écran contribue à la mesure de rotation totale. La mesure de rotation seule ne permet alors plus de rendre compte du détail de ce qui se situe le long de la ligne de visée. L'émission synchrotron est produite dans toute la Galaxie et subit la rotation Faraday en se propageant dans l'ISM. Dans ce cas, la source émettrice et le milieu produisant la rotation Faraday ne sont pas séparés dans l'espace. Il est alors nécessaire d'avoir recours à la notion de profondeur de Faraday.

1.3.2 Profondeur de Faraday

La profondeur de Faraday peut être définie en tout point de l'ISM situé à une distance z de l'observateur de la façon suivante :

$$\phi = C \int_0^z n_e B_{\parallel} ds , \quad (1.3)$$

avec les notations précédents [9, 8]. La profondeur de Faraday peut se comprendre par analogie avec la profondeur optique. De façon analogue, on peut également définir l'épaisseur de Faraday d'un écran Faraday.

On peut ensuite définir [9] la fonction de dispersion de Faraday à la profondeur ϕ comme étant la fonction $F(\phi)$ telle que

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) \exp^{2i\phi\lambda^2} d\phi , \quad (1.4)$$

où $P = Q + iU$ désigne l'intensité polarisée, avec Q et U les notations usuelles pour les paramètres de Stokes.

La valeur de $F(\phi)$ s'obtient en inversant l'équation 1.4 après avoir mesuré l'intensité polarisée à plusieurs longueurs d'onde λ . La tomographie Faraday, illustrée en figure 1.3, est la technique permettant d'obtenir la distribution F de l'intensité polarisée en fonction de la profondeur de Faraday ϕ .

Un exemple de ligne de visée est présenté en figure 1.3. Dans le premier schéma de cette figure, l'observateur se situe à gauche. Le premier nuage le long de la ligne de visée, un écran Faraday, est traversé par un champ magnétique dirigé vers l'observateur. Sa composante le long de la ligne de visée est positive donc le nuage suivant, une source synchrotron, est situé à une profondeur de Faraday positive, notée ϕ_1 dans les deuxième et troisième schémas de la figure 1.3. Le champ magnétique traversant le troisième nuage, un autre écran, est dirigé dans le sens opposé et sa composante le long de la ligne de visée est plus petite que celle du premier nuage. Sa profondeur de Faraday est donc négative. En outre, si sa densité et son épaisseur physique sont comparables à celles du premier, alors son épaisseur de Faraday est plus faible en valeur absolue. La profondeur de Faraday ϕ_2 du quatrième nuage, une autre source synchrotron, est la somme des épaisseurs de Faraday des nuages précédents, d'où $\phi_2 < \phi_1$. Pour ces raisons, dans le second schéma de la figure 1.3, la profondeur de Faraday augmente en traversant le premier nuage et décroît mais reste positive en traversant le troisième nuage. Enfin, l'émission des deux nuages bleus se voit aux profondeurs de Faraday ϕ_1 et ϕ_2 dans le troisième schéma de la figure 1.3.

Nous cherchons dans nos travaux à contraindre le champ magnétique en utilisant la tomographie Faraday. Des travaux précédents ont utilisé la mesure de rotation de sources extragalactiques pour contraindre de le champ magnétique dans un nuage de type HVC, le nuage de Smith [33], mais à notre connaissance, aucune étude n'a utilisé la tomographie Faraday à cette fin.

1.3.3 Canaux de dépolarisation

À plusieurs endroits, des "trous" en émission rectilignes de faible largeur apparaissent dans l'émission polarisée [28]. Leur largeur est celle de la fonction d'étalement du point (PSF, Point Spread Function) de l'instrument et l'angle de la polarisation tourne de 90° de part et d'autre. Ces structures, appelées « canaux », peuvent être liés à des effets de dépolarisation causés par la rotation de Faraday par trois biais différents :

- à la limite entre deux régions avec une intensité de polarisation semblable mais une orientation de la polarisation différente, la résultante sera négligeable ;
- un gradient linéaire de mesure de rotation produit un canal de dépolarisation pour une certaine mesure de rotation telle que $RM\lambda^2 = \frac{n\pi}{2}$ avec n un entier positif ;
- un milieu magnéto-ionique turbulent devant un arrière-plan polarisé provoque une dépolarisation à petite échelle.

Il existe également des canaux qui sont plus larges que la PSF qui correspondent soit à une zone sans émission tout le long de la ligne de visée, soit à une zone extrêmement turbulente [37].

1.4 Nébuleuse de Draco

Nous avons souhaité nous intéresser à un nuage de type IVC et à ses abords. Pour cela, nous nous sommes penchés sur la nébuleuse de Draco.

La nébuleuse de Draco est un nuage moléculaire [45, 23] du type IVC [46] avec une vitesse de -21 km s^{-1} situé à haute latitude Galactique [23]. Son origine est vraisemblablement la collision d'un nuage extragalactique avec la Galaxie [46]. Ce nuage a été observé pour la première fois par [23] à 21 cm aux coordonnées Galactiques ($l = 91^\circ, b = 38^\circ$).

Dans la portion du ciel autour de la nébuleuse de Draco, plusieurs types de nuages apparaissent. Un filament aux coordonnées ($l = 91^\circ, b = 37^\circ$) est en collision avec la nébuleuse de Draco [55]. Il se trouve également un nuage de type LVC au voisinage du Soleil [46] et plusieurs petits nuages de type HVC [22, 56, 62].

La présence de gaz moléculaire dans la nébuleuse de Draco a été déterminée par [45]. En outre, des observations du CO ont montré sa présence sur le bord de la nébuleuse [55]. Du gaz chaud a été identifié autour de la nébuleuse, mais pas dans la nébuleuse de Draco elle-même [46].

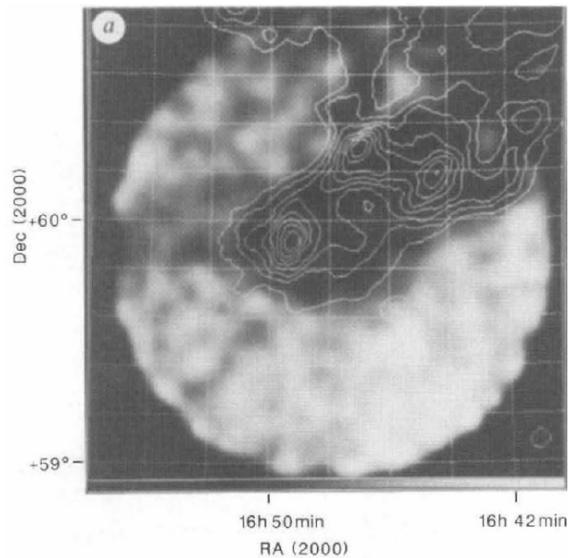


Figure 1.4: Nébuleuse de Draco vue en rayons X proches (de 100 ev à 300 ev) par ROSAT. Est visible dans cette image l'ombre de la nébuleuse. La position de la nébuleuse déterminée avec les données infrarouges du satellite IRAS est indiquée par les lignes de contour blanches. Image D. Burrows [10].

Cette nébuleuse, issue d'une collision d'un nuage extragalactique avec la Galaxie, serait en interaction avec le milieu environnant. L'émission en UV lointains pourrait être due au refroidissement radiatif du gaz chaud ayant subi un choc [46].

Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre pour déterminer la distance du nuage, avec des résultats parfois contradictoires. De façon générale, la position des nuages au dessus du plan Galactique est mal connue. Contrairement aux objets du plan, on ne peut pas utiliser leur vitesse différentielle pour obtenir leur position. Or, si on n'a pas la position du nuage, on ne peut pas savoir où se produit la rotation de Faraday.

Le type de méthode le plus communément employé pour la nébuleuse de Draco consiste à estimer la distance des étoiles le long de la ligne de visée qui ne sont pas masquées par la nébuleuse [45, 63, 22, 40]. Les auteurs dans [49] utilisent une méthode un peu différente en arguant que l'émission X de la nébuleuse serait due à l'interaction avec le halo HI de la Galaxie dont la hauteur caractéristique est d'environ 120 pc. La nébuleuse ne peut donc pas être beaucoup plus haute au-dessus du plan Galactique.

Bien que la distance le long de la ligne de visée soit incertaine, il est clair que le nuage est situé hors de la bulle locale et bloque les rayons X provenant du halo Galactique [10]. Une synthèse de des différentes méthodes de mesure de distance utilisées pour la nébuleuse de Draco ainsi que leur résultat est donnée en figure 1.5.

La nébuleuse de Draco est un nuage composé principalement de gaz neutre, de gaz moléculaire et de poussière et le gaz ionisé détecté dans sa direction provient vraisemblablement des bords de la nébuleuse. Or la tomographie de Faraday est une méthode qui permet principalement de sonder le gaz ionisé. En utilisant la tomographie de Faraday au voisinage de la nébuleuse de Draco, nous pourrions mieux contraindre la répartition du gaz ionisé. En effet, si la nébuleuse de Draco contient suffisamment de gaz ionisé, alors elle pourra produire de la rotation de Faraday du rayonnement synchrotron d'arrière-plan. Sinon, si la nébuleuse de Draco émet du rayonnement synchrotron, celui-ci pourrait subir la rotation de Faraday d'un éventuel nuage de gaz ionisé d'avant-plan.

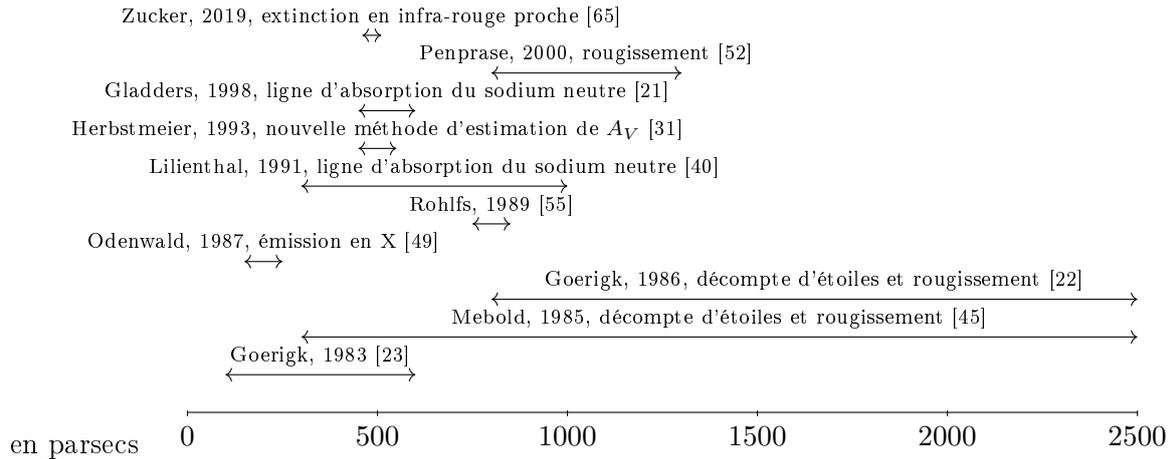


Figure 1.5: Distance à la nébuleuse de Draco en parsecs. Les flèches indiquent la distance estimée de la nébuleuse de Draco le long de la ligne de visée. Au dessus de chaque flèche, l'étude ayant mené à cette estimation ainsi que la méthode utilisée.

1.5 LOFAR Two-meter Sky Survey

LOFAR est un interféromètre qui comporte environ 7 000 antennes dont la plupart sont aux Pays-Bas, mais certaines sont aussi ailleurs en Europe.

LOFAR observe tout le ciel simultanément. Le pointage est réalisé électroniquement sans aucune pièce mobile. Sa grande surface collectrice permet d'obtenir une grande sensibilité [26].

Le relevé LOFAR Two-meter Sky Survey (LoTSS) couvrira à terme tout le ciel de l'hémisphère nord terrestre [60] sur la plage de fréquences entre 120 MHz et 168 MHz avec une résolution en fréquence de 12,2 kHz, et une sensibilité de 100 μ Jy par faisceau. Ces images sont produites à deux résolutions différentes [60]. Ce ne sont que les images basse résolution, avec une résolution angulaire de 4,2', que nous utilisons dans ces travaux.

Ce relevé est constitué de 3170 observations de 8 heures dont le lobe principal ou primary beam peut être approché par une Gaussienne, dont la largeur à mi-hauteur (FWHM, Full Width at Half Maximum) est d'environ 4°. En fait, chaque image fait 10°×10°, mais la partie utilisable des images a le diamètre du lobe principal, soit 4°. Les centres de deux images voisines sont espacés de 2,58° [60]. À l'heure actuelle, 2% du ciel a été couvert par ce relevé.

Il est attendu des données produites par LoTSS qu'elles permettent de caractériser l'émission polarisée de la Galaxie, ainsi que les canaux de dépolarisation [37] sur une large portion du ciel. Par ailleurs, les observations à basse fréquence sont en plein essor, puisque l'interféromètre Square Kilometer Array (SKA) est en cours de déploiement [12].

À l'heure actuelle, la nébuleuse de Draco n'a pas été observée par LOFAR. En revanche, quelques champs voisins l'ont été. L'étude de ces champs voisins pourra permettre de mieux comprendre l'origine et l'évolution de la nébuleuse.

2 Méthodes et moyens

Dans ce chapitre, nous présentons les jeux de données utilisés pour étudier l'environnement de la nébuleuse de Draco par la méthode de la tomographie Faraday, ainsi que les algorithmes utilisés pour analyser ces données.

2.1 Algorithmes

Nous avons utilisé au cours de stage des algorithmes disponibles en ligne. Nous expliquons leur principe dans les paragraphes suivants.

2.1.1 Calcul de l'intensité de la polarisation en fonction de la profondeur de Faraday

À partir de la polarisation linéaire à différentes longueurs d'onde, l'algorithme RM-synthesis, développé dans [8], permet d'obtenir la valeur de $F(\phi)$ tel que décrit dans l'équation (1.4).

En pratique, l'intensité de la polarisation n'est pas connue pour toutes les valeurs de λ^2 . La polarisation est mesurée pour des valeurs de λ^2 comprises entre λ_{min} et $\lambda_{min} + \Delta\lambda$ avec un pas $\delta\lambda$ entre deux mesures. Ces valeurs de λ_{min} , $\Delta\lambda$ et $\delta\lambda$ contraignent ce qui est observable dans le domaine de Faraday [8]. En particulier, elles imposent une profondeur de Faraday maximale observable ϕ_{max} , la résolution $\delta\phi$ dans l'espace de Faraday et la étendue maximale $\Delta\phi$ des objets dans l'espace de Faraday observable

$$\|\phi_{max}\| = \frac{\sqrt{3}}{\delta\lambda^2} \quad (2.1)$$

$$\delta\phi = \frac{2\sqrt{3}}{\Delta\lambda^2} \quad (2.2)$$

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda_{min}^2}. \quad (2.3)$$

L'algorithme RM-synthesis prend en entrée deux cubes d'images 2D où chaque image représente le paramètre de Stokes Q ou U à une fréquence donnée et renvoie un cube d'images 2D où chaque image correspond à une profondeur de Faraday avec les caractéristiques données par les équations (2.1) à (2.3).

Les structures qui s'étendent sur une profondeur supérieure à $\Delta\phi$ ne seront pas correctement représentées, avec notamment l'apparition de plusieurs pics dans la fonction $F(\phi)$ calculée par RM-synthesis là où il ne devrait y en avoir qu'un seul [61].

2.1.2 Détection de structures linéaires dans une image

La transformation de Hough à fenêtre glissante (RHT, Rolling Hough Transform) décrite dans [13] est une méthode permettant de trouver des structures linéaires dans une image plane. Elle a notamment été utilisée pour caractériser des formes filamenteuses dans les nuages interstellaires et comparer leur alignement à celui du champ magnétique global [13, 35, 37, 42, 51].

Le principe de cet algorithme, illustré en figure 2.1 est le suivant. L'image lissée avec une fonction créneau de diamètre D_K est soustraite à l'image initiale afin d'y enlever les structures à grande échelle. Puis en chaque point de l'image, l'intensité est intégrée dans une fenêtre de diamètre D_W le long du segment d'angle θ pour tout θ pour tracer l'histogramme qui constitue la transformée de Hough de l'image en un point.

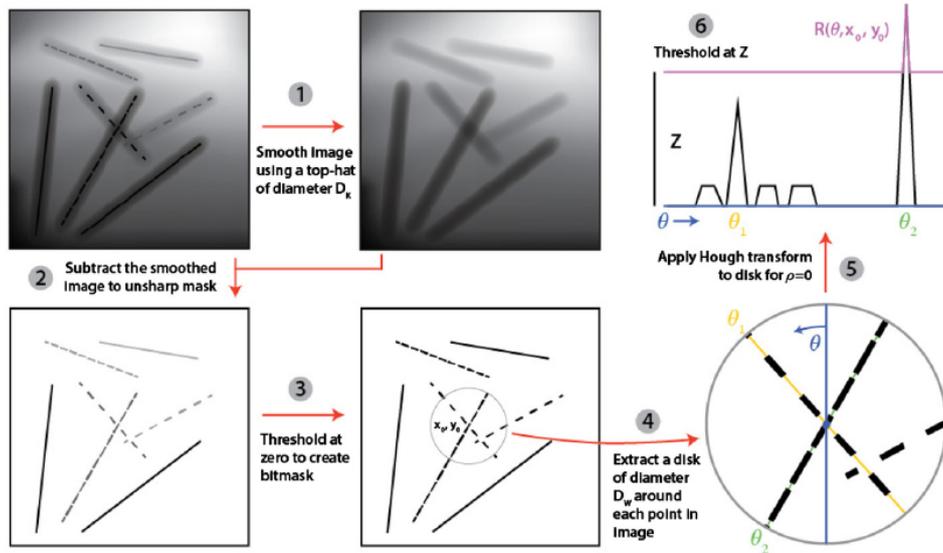


Figure 2.1: Principe de l’algorithme RHT. L’image est pré-traitée dans les étapes 1, 2 et 3. Dans l’étape 4, un disque de diamètre D_w est isolé autour d’un pixel de l’image. La transformée de Hough est l’étape 5. À l’étape 6, seuls les pics qui dépassent un seuil Z sont conservés. Image de [13].

Cet algorithme permet à la fois d’identifier les filaments dans une image et de déterminer la probabilité avec laquelle un pixel de l’image appartient à une structure linéaire cohérente.

Il est important de noter que cet algorithme détecte les structures filamenteuses en émission. Pour détecter une structure telle que les canaux de dépolarisation, il est nécessaire d’utiliser cet algorithme sur l’image en couleurs inversées.

2.2 Jeux de données

Dans l’étude de la zone autour de la nébuleuse de Draco, nous avons utilisé plusieurs jeux de données afin de chercher des corrélations entre elles et de tenter de mieux comprendre ce qui peut être vu dans les images en mesure de rotation. Étant donné que nous ne connaissons pas la distance à laquelle se produit l’émission dans les cubes de Faraday, nous souhaitons établir des corrélations avec l’émission produite par d’autres traceurs du milieu interstellaire. En connaissant la position de le long de la ligne de visée de l’émission des autres traceurs, nous pourrions alors contraindre la position de l’émission vue en tomographie Faraday.

Nous présentons ces différents jeux de données ainsi que les opérations de traitement que nous y avons appliqué dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Rotation Faraday avec LOFAR

Champs LOFAR utilisés

Nous avons utilisé les images du relevé LoTSS présenté en section 1.5. Ces données sont sous la forme d’un fichier FITS contenant les paramètres de Stokes Q et U . Dans la suite, sauf mention contraire, ce sont les images basse résolution qui sont utilisées, puisque les images à la plus haute résolution ne sont pas nécessaires pour étudier notre propre Galaxie. En outre, la résolution la plus basse des images LOFAR est plus grande que celle disponible pour les autres traceurs que nous utilisons dans la suite. Enfin, les images à haute résolution font chacune de l’ordre de 100 GB et leur traitement demande des ressources en calcul importantes.

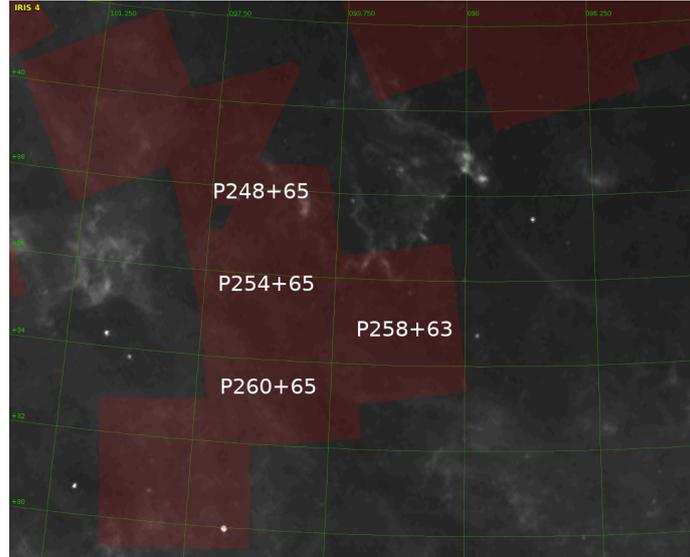


Figure 2.2: Région du ciel autour de la nébuleuse de Draco couverte par les relevés LOFAR. Chaque carré rouge est un champ observé par LOFAR. Sur chaque champ utilisé dans ces travaux, les coordonnées ICRS du centre du champ sont indiquées. En nuances de gris, la poussière observée par IRAS à $100\ \mu\text{m}$ [48]. La nébuleuse de Draco est la structure claire en haut au centre de la figure. La grille verte représente les coordonnées galactiques. Image réalisée avec Aladin [7].

Ce sont quatre champs autour de la nébuleuse de Draco qui ont servi à cette étude et dont les centres ont pour ascension droite et pour déclinaison $258+63$, $260+65$, $254+65$ et $248+65$ respectivement. Leur position par rapport à la nébuleuse de Draco est montrée en figure 2.2. Une partie de l'émission dans cette figure liée à la nébuleuse de Draco est contenue dans ces champs, notamment le champ P258+63.

Avant de pouvoir appliquer l'algorithme RM-synthesis sur ces données, il est nécessaire de déterminer la quantité de bruit dans chaque image afin d'enlever les images pour lesquelles le bruit est trop élevé. En effet, des interférences radio peuvent dégrader les images à certaines fréquences. Ces images auront alors une quantité de bruit plus élevée. Si nous utilisons le paramètre de Stokes U ou le paramètre de Stokes Q pour une des fréquences dégradées dans l'algorithme RM-synthesis, alors le bruit se propagera dans les images à toutes les profondeurs de Faraday. Nous commençons donc par enlever les fréquences dégradées.

Le bruit – défini ici comme étant l'écart-type sur l'image complète – pour du champ LoTSS dont le centre a pour coordonnées $260+65$ est tracé en figure 2.3. On y constate que le bruit augmente aux hautes fréquences de sorte que tous les canaux ne sont pas utilisables. Pour ce champ, les images Q et U avec une fréquence supérieure à 149 MHz ne seront pas utilisées. Chaque champ étant observé à un moment différent, différentes sources d'interférence peuvent dégrader la qualité des images. Les fréquences inutilisables peuvent alors être différentes d'une image à l'autre donc nous répétons cette opération pour chaque image utilisée. Enlever dans chaque champ les fréquences pour lesquelles le bruit est supérieur à 2,5 fois le bruit médian nous permet de garder un grand nombre d'images, tout en retirant les images qui ont clairement subi un phénomène d'interférence. Pour chaque champ, nous ne conservons que les fréquences pour lesquelles le bruit est faible dans toutes les champs, afin d'utiliser le même ensemble de fréquences dans chaque champ.

Par ailleurs, chaque image couvre un champ de 10° , mais le rapport signal sur bruit est plus élevé sur les bords de l'image, en dehors du faisceau principal. Nous avons donc détourné chaque image pour utiliser un carré de 5° de côté au centre des images initiales.

Nous avons ensuite utilisé l'outil *Montage* [3] pour réaliser une mosaïque des champs LOFAR autour de la nébuleuse de Draco. L'image ainsi obtenue couvre une région d'environ 15° par 6° représentée en figure 2.2.

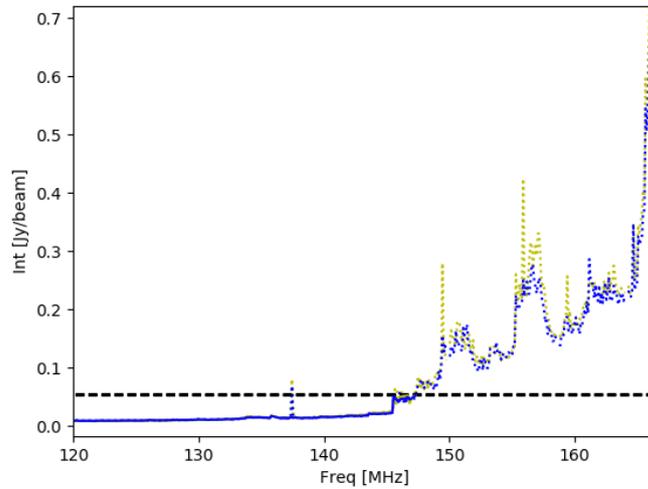


Figure 2.3: Bruit en fonction de la fréquence d'observation. Paramètre de Stokes Q en jaune et U en bleu. En noir, le bruit seuil au delà duquel les données sont rejetées est égale à 2,5 fois le bruit médian.

Mesure de rotation

La fonction $F(\phi)$ décrite dans l'équation 1.4 a été calculée sur cette mosaïque avec l'algorithme `rm-synthesis` présenté dans la section 2.1. Le cube de données résultant contient pour différentes profondeurs de Faraday l'émission située à la profondeur donnée. Nous constatons la présence de structures dans ce cube pour des profondeurs de Faraday inférieures à 20 rad m^{-2} en valeur absolue.

Conformément à l'équation 2.2, nous déterminons que pour les données LOFAR, la résolution en profondeur de Faraday est $\delta\phi = 1,2 \text{ rad m}^{-2}$. Préférant sur-échantillonner la résolution, un pas de $0,25 \text{ rad m}^{-2}$ est utilisé entre deux points pour lesquels $F(\phi)$ est calculé avec l'algorithme `rm-synthesis`.

En figure 2.4, la profondeur de Faraday du maximum d'émission, après avoir filtré la portion ayant une profondeur de Faraday entre $-1,25$ et $1,25 \text{ rad m}^{-2}$, a été tracée. Les faibles fréquences de Faraday sont enlevées au préalable car les galaxies d'arrière-plan produisent des artefacts dus à l'instrumentation qui dominant l'émission à ces profondeurs de Faraday. On voit dans cette image une dichotomie entre une partie d'ascension droite inférieure à 252° où le maximum d'émission se situe plutôt à une profondeur négative, et une partie d'ascension droite supérieure à 252° où le maximum d'émission se situe plutôt à une profondeur positive.

Canaux de dépolarisation

Afin de déterminer l'existence de canaux de dépolarisation, nous calculons l'émission maximale dans le cube $F(\phi)$. L'intensité de l'émission maximale sur toutes les profondeurs de Faraday, montrée en figure 2.4, fait apparaître des stries d'émission négligeable dont la largeur est du même ordre que la PSF : des canaux de dépolarisation tels que décrits dans [36, 9, 28] et en section 1.3.3.

L'algorithme de RHT [13] décrit précédemment (section 2.1.2) peut être utilisé pour déterminer la position et la distribution angulaire de ces stries. La position des stries détectées par cet algorithme est donnée en figure 2.5a. Cette figure permet de constater que les stries ont deux orientations préférentielles : 5° et 50° par rapport au cadre de l'image. Plus précisément, les stries sont parallèles entre-elles à une longitude Galactique inférieure à 36° , et parallèles entre-elles mais dans une autre direction à une longitude Galactique supérieure à 36° . La distribution angulaire de ces stries donnée en figure 2.5b montre en effet deux pics pour ces deux orientations. Nous pouvons noter que les stries trouvées par l'algorithme RHT concordent bien avec celles que nous avons repérées dans la carte de l'émission maximale et que l'algorithme RHT relève ces stries pour plusieurs jeux de paramètres D_K , D_W et Z .

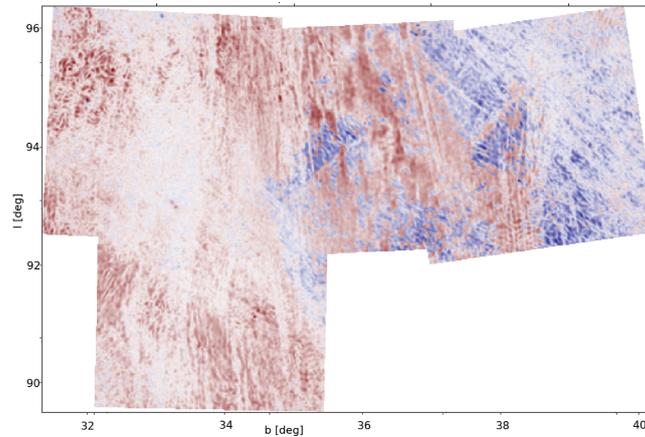
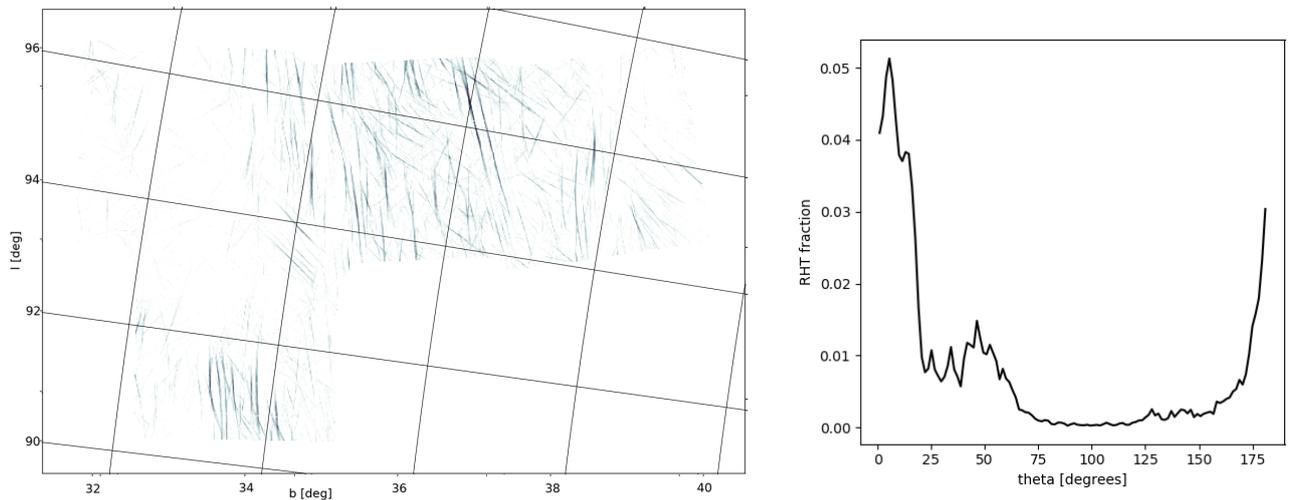
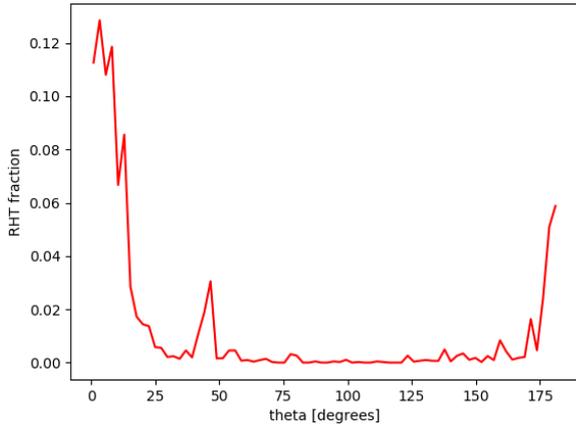


Figure 2.4: Profondeur de Faraday du maximum d'émission. Le rouge indique que le maximum d'émission est situé à une profondeur de Faraday positive, le bleu une profondeur de Faraday négative. L'intensité de la couleur indique la valeur du maximum d'émission. Les zones plus claires sont celles avec le moins d'émission.

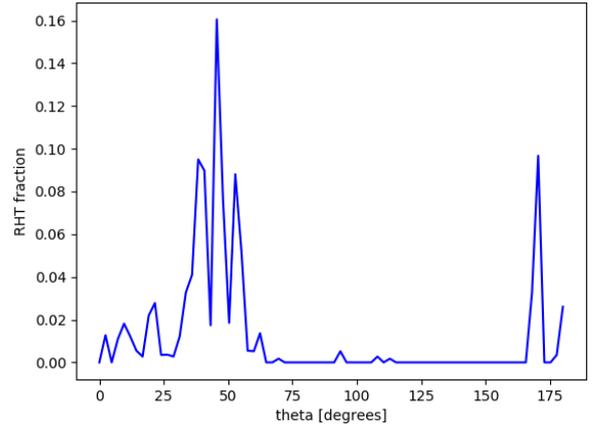


(a) Stries obtenues par l'algorithme RHT avec $D_W = 55$, $D_K = 2$ et $Z = 0.7$. Sont repérés dans l'image les points qui font partie d'une fibre. La grille indique les coordonnées Galactiques. (b) Distribution angulaire des stries avec $D_W = 55$, $D_K = 2$ et $Z = 0.7$ sur l'image complète.

Figure 2.5: Distribution angulaire des fibres sur l'image complète.



(a) Distribution angulaire des fibres dans la portion de l'image dans laquelle le maximum d'émission se situe à une profondeur positive (portion rouge dans la figure 2.4).



(b) Distribution angulaire des fibres dans la portion de l'image dans laquelle le maximum d'émission se situe à une profondeur négative (portion bleue dans la figure 2.4).

Figure 2.6: Distribution angulaire des fibres pour chacune des deux portions de l'image. En ordonnée, la fraction de fibres dans la portion d'image.

En outre, la dichotomie observée en figure 2.5a est semblable à celle observée en figure 2.4. En effet, en appliquant l'algorithme RHT sur la portion du champ où le maximum d'émission est positive (resp. négative), nous obtenons les distributions angulaires en figure 2.6a (resp. 2.6b).

Dans la figure 2.6a, on a bien un seul pic et ce pic n'apparaît pas dans la figure 2.6b. Ainsi, l'orientation des fibres est la même sur toute la partie rouge (quand le maximum d'émission se situe à une profondeur positive) et n'est pas la même que sur la partie bleue (quand le maximum d'émission se situe à une profondeur négative).

2.2.2 Comparaison à d'autres jeux de données

Nous avons cherché à comparer les images en polarisation de Faraday à des images montrant d'autres traceurs de la matière et du champ magnétique. Les paragraphes suivants décrivent les données utilisées à des fins de comparaison ainsi que leur exploitation.

Nous ne parlons pas d'imagerie en UV dans les sections qui suivent. En effet, les données GALEX [6] ne couvrent pas la zone du ciel étudiée ici. Par ailleurs, en consultant les cartes montrant la raie de recombinaison $H\alpha$, nous n'y avons pas vu de structure notable dans la région étudiée. Cependant, les cartes indiquant la présence de ce gaz [27, 20] ont une résolution (environ 1°) comparable à la taille des images LOFAR, ce qui rend difficile la comparaison entre ces deux jeux de données.

Filaments en H I

Les données H I utilisées sont celles du relevé HI4PI qui combine des données issues des relevés EBHIS et GASS. Ce relevé indique la présence de H I pour chaque vitesse radiale entre -600 km s^{-1} et 600 km s^{-1} avec une résolution angulaire de $16'$ [32]. Ces images sont fournies avec plusieurs systèmes de projection différents et nous veillons à ce que la projection utilisée dans la suite soit la même que celle des images LOFAR.

Une corrélation entre les canaux de dépolarisation et les filaments H I a été relevée par [36] dans un autre champ – le champ 3C 196 – situé à une latitude galactique intermédiaire. Afin d'étudier une possible corrélation analogue dans le champ qui nous intéresse, nous appliquons l'algorithme RHT [13] décrit en section 2.1 sur les images H I pour chaque canal de vitesse entre -200 km s^{-1} et 50 km s^{-1} . Nous utilisons l'algorithme RHT avec les paramètres $D_W = 100'$, $D_K = 10'$ et $Z = 0.8$, comme il a été fait dans [36]. Les filaments ainsi trouvés sont présentés en figure 2.7.

Il apparaît en figure 2.7a des structures filamentaires à basse vitesse dans la portion gauche de l'image qui correspondent effectivement à des structures visibles dans les images H_I. En outre, dans la figure 2.7b, des structures cohérentes en vitesse apparaissent. En effet, il y a trois plages de vitesses dans lesquelles des filaments apparaissent avec trois orientations différentes.

En outre, la distribution angulaire des canaux de dépolarisation est donnée dans la figure 2.7b. Deux pics vers 10° et 50° dans les données LOFAR semblent angulairement proches de deux pics vers 25° et 30°. Néanmoins, ces filaments ne sont pas physiquement proches des canaux concernés.

Champ magnétique à grande échelle avec Planck

Le satellite Planck a mesuré le ciel à plusieurs fréquences entre 30 GHz et 857 GHz. À partir des données en polarisation à 353 GHz, fréquence à laquelle l'émission totale est dominée par celle de la poussière, l'équipe du satellite Planck a produit une carte de la projection dans le plan du ciel de l'orientation du champ magnétique [14]. Les données Planck [14] indiquent la polarisation de la poussière intégrée le long de la ligne de visée. Puisque cette polarisation est corrélée au champ magnétique, la carte Line Integral Convolution (LIC) [11] donne indirectement le champ magnétique global de la région étudiée.

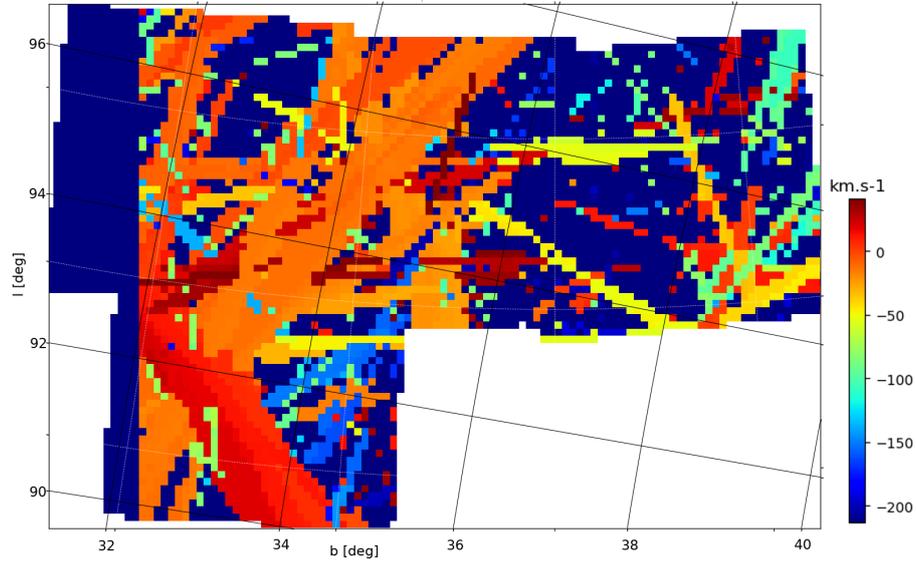
Une corrélation claire entre le champ magnétique global mesuré par Planck et les filaments vue en imagerie Faraday par LOFAR a été établie dans [64] qui propose d'explorer des corrélations similaires dans d'autres champs. En superposant la carte LIC et la carte du maximum d'émission issue des images LOFAR en figure 2.8, nous constatons que ni les canaux de dépolarisation ni les structures visibles en émission polarisée ne sont alignés avec le champ magnétique global en aucun point de l'image.

En revanche, le champ magnétique global est aligné avec les filaments H_I que nous avons relevés dans la section précédente. Ce résultat était attendu, puisque le champ magnétique structure les nuages de gaz observés en H_I, comme nous l'avons décrit en section 1.2.5.

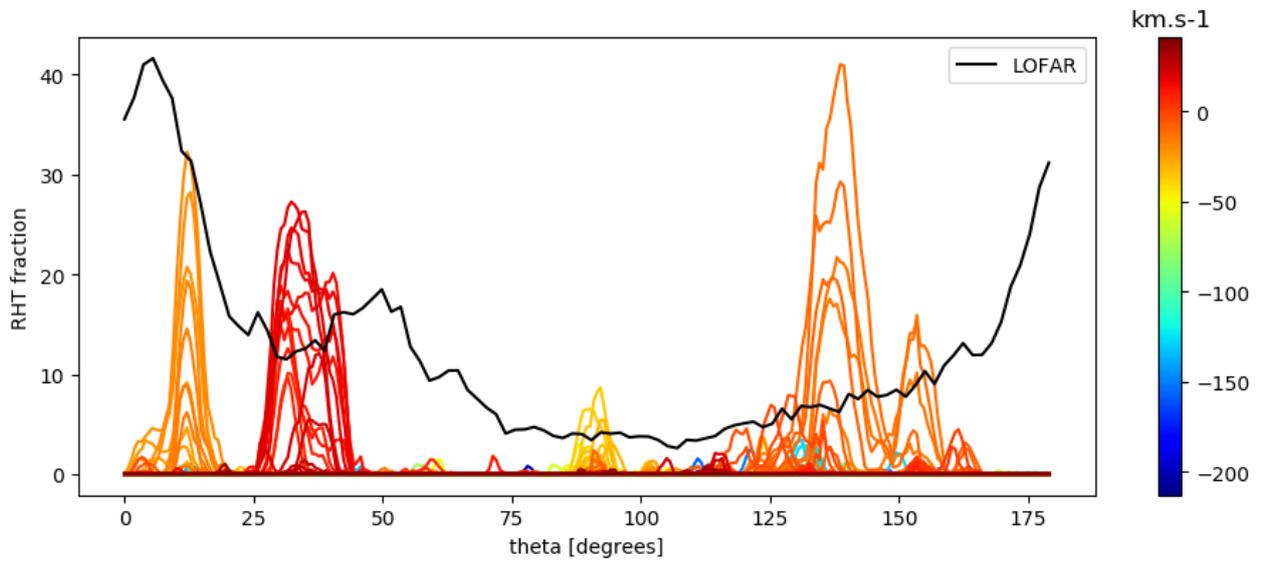
Épaisseur de Faraday de la Galaxie

Nous comparons enfin la profondeur de Faraday des structures observées avec LOFAR à l'épaisseur de Faraday de toute la Galaxie le long de la ligne de visée avec la carte d'Oppermann [50]. Nous constatons que le gradient de la mesure de rotation est comparable dans les deux images, avec un changement de signe entre mesure de rotation positive et négative. En revanche, les valeurs observées sont plus élevées dans la carte d'Oppermann (−5 à 36 rad m^{−2}) que dans la profondeur du maximum d'émission avec LOFAR (−17 à 15 rad m^{−2}).

En outre, nous pouvons voir dans la carte d'Oppermann en figure 2.9a l'épaisseur de Faraday de la Galaxie autour du champ auquel nous avons accès avec LOFAR. Cette carte montre une antisymétrie par rapport au plan de la Galaxie dans le halo Galactique, et une symétrie par rapport à ce plan hors du halo. Nous constatons que l'inversion du signe de l'épaisseur de Faraday n'est pas une inversion locale, mais plutôt à la frontière du halo, entre deux zones où la mesure de rotation est de signe constant.



(a) Projection des filaments dans le plan du ciel.



(b) Distribution angulaire des filaments. Chaque courbe correspond à une image du cube de données $H\text{I}$, soit une vitesse radiale. En noir, la distribution angulaire des canaux obtenus par l'algorithme RHT sur les données LOFAR.

Figure 2.7: Filaments dans les données $H\text{I}$ obtenues avec l'algorithme RHT. La couleur de chaque filament correspond à la vitesse du gaz associé. L'échelle de couleurs est la même dans les deux images.

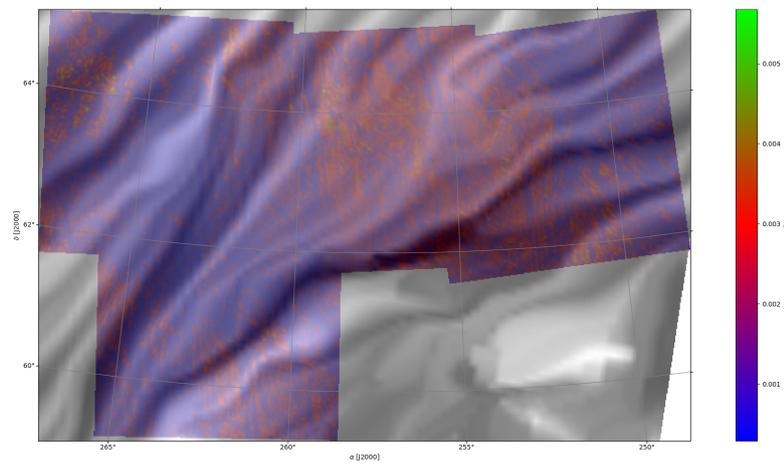
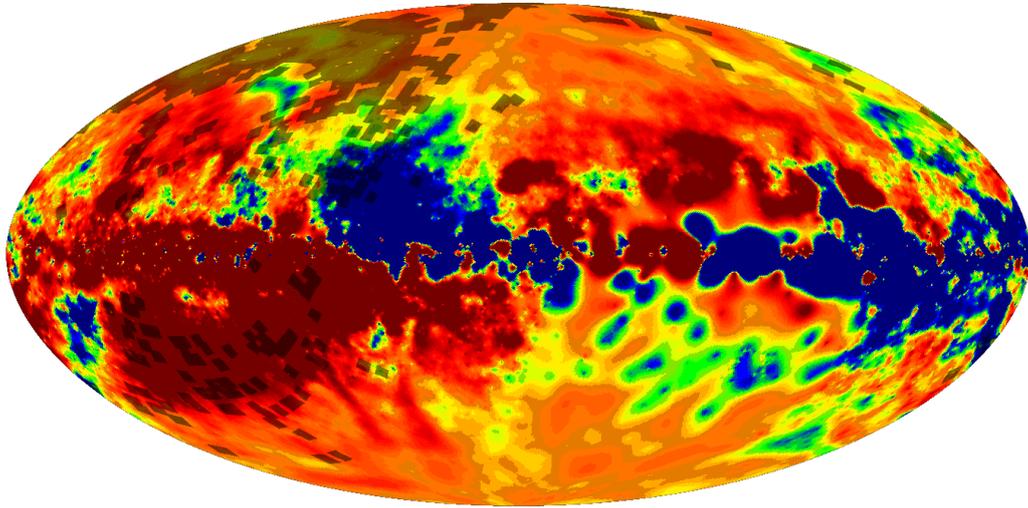
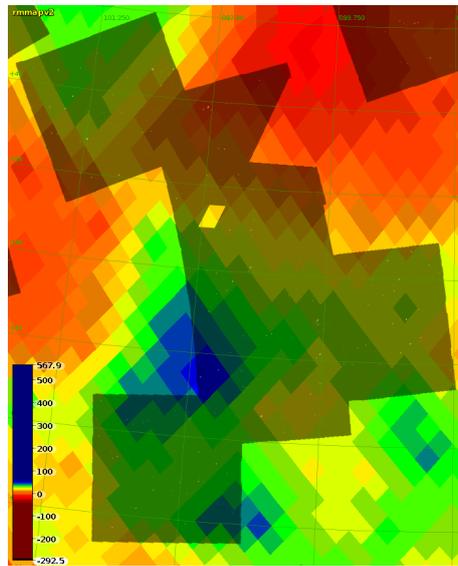


Figure 2.8: En niveaux de gris, l'orientation du champ magnétique global d'après les données de Planck. L'émission polarisée maximale issue des données LOFAR en couleurs. L'orientation du champ magnétique global n'est pas la même que celle des canaux de dépolarisation.



(a) Mesure de rotation dans tout le ciel. Le pointeur rose dans le quartier en haut à gauche indique la position du champ étudié.



(b) Mesure de rotation dans le champ étudié.

Figure 2.9: Mesure de rotation (issue de la carte d'Oppermann [50]) en projection galactique. RM positif en bleu, RM négatif en rouge. En vert, la mesure de rotation est faible. Les carrés grisés sont les champs LOFAR. L'échelle des couleurs est la même dans les deux figures.

3 Résultats et conclusion

Les différents éléments présentés au chapitre précédent permettent de construire une vision globale de l'ISM le long de la ligne de visée pour le champ étudié.

3.1 Inversion de la mesure de rotation

Une inversion du signe de la mesure de rotation peut être due à l'inversion de la direction du champ magnétique le long de la ligne de visée. Par exemple, avec des lignes de champ initialement alignés, une supernova déformera les lignes de champ (qui seront entraînées par la matière), et on verra le champ qui va vers nous d'un côté de la coquille et qui s'éloigne de nous de l'autre côté de la coquille.

Cette inversion pourrait aussi être causée par le sillage d'un nuage de gaz se déplaçant. De la même façon, le nuage de gaz poussera la matière et entraînera les lignes de champ. Or le fait que cette inversion de signe de la profondeur de Faraday ne soit pas une inversion locale mais plutôt à la frontière entre deux grandes zones entre plutôt en contradiction avec cette hypothèse.

La dichotomie à la fois en terme de profondeur de Faraday du maximum d'émission et d'orientation des canaux de dépolarisation du champ considéré au cours de ce stage tend à indiquer la présence de deux écrans de Faraday le long de la ligne de visée, avec au moins l'un d'entre eux ne couvrant qu'une partie du champ, comme synthétisé en figure 3.1.

N'ayant pas pu corrélérer ces structures en tomographie Faraday avec des structures visibles avec d'autres traceurs de l'ISM, nous ne pouvons pas estimer leur distance ni leurs dimensions caractéristiques. En revanche, la comparaison avec la mesure de rotation de la Galaxie nous indique que les structures vues en tomographie Faraday avec les images LOFAR sont très loin de nous, proches du bord de la Galaxie ou bien s'étendent sur une grande distance.

Il est intéressant de noter que du fait des basses fréquences avec lesquelles sont réalisées les observations LOFAR, le phénomène de dépolarisation est plus important dans ces données. La distance maximale sondée par la tomographie Faraday avec LOFAR est donc vraisemblablement plus petite que celle dans la carte d'Oppermann. Cet écart pourrait être la cause de l'écart obtenu entre les valeurs de la profondeur de Faraday pour ces deux cartes.

3.2 Canaux de dépolarisation

Par ailleurs, les canaux de dépolarisation peuvent indiquer le bord d'une structure. Cependant, nous avons montré que les canaux de dépolarisation et le gaz HI ne sont, de façon générale, pas clairement connectés. En effet, aucune corrélation n'a pu être établie entre leurs orientations ou entre leurs positions.

Nous pourrions nous attendre à ce que différents types d'images permettent d'observer différentes strates d'une même structure de l'ISM. Si nous étions dans ce cas, nous pourrions voir des stries parallèles mais non superposées dans les différentes images. Ici, les structures filamentaires d'orientation proche sont très éloignées, ce qui semble exclure une telle hypothèse. Nous ne pouvons donc pas dans ce cas utiliser les données HI pour contraindre la position des structures vues en tomographie Faraday.

3.3 Conclusion générale

Au cours de ce stage, nous nous sommes intéressés de façon exploratoire à une zone autour de la nébuleuse de Draco observée par le radiotélescope LOFAR. Dans ce champ, des structures apparaissent

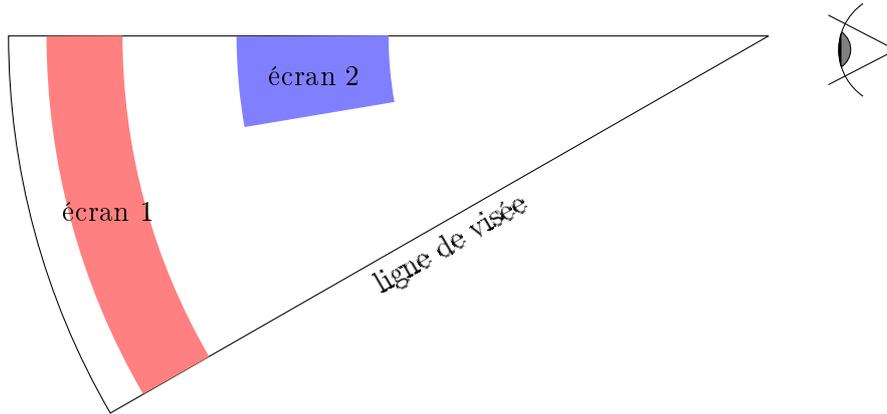


Figure 3.1: Modèle proposé pour l’ISM le long de la ligne de visée pour le champ étudié. Deux écrans Faraday se situent le long de la ligne de visée. Dans une portion du champ, seul un des deux écrans est visible, tandis que dans l’autre, les contributions des deux écrans se superposent.

à plusieurs profondeurs de Faraday. En particulier, des stries dépolarisées sont visibles dans les cartes du maximum de polarisation. Nous avons cherché à déterminer l’origine de ces stries ainsi que des autres structures observées en polarisation de Faraday en comparant les images issues des observations LOFAR à celles visibles grâce à d’autres traceurs de la matière.

Nous avons établi que ces stries visibles en tomographie Faraday ne sont corrélées ni avec le champ magnétique global ni avec les filaments HI. Nous avons ainsi montré que la corrélation entre ces marqueurs observée dans le champ 3C 196 [37, 36] n’est pas universelle.

En outre, nous avons déduit la présence de deux écrans Faraday le long de la ligne de visée à partir du maximum d’émission. La question de leur distance le long de la ligne de visée reste néanmoins ouverte, puisque nous n’avons pas trouvé de structure visible à d’autres longueurs d’ondes qui soit cohérente avec la position de ces écrans.

3.4 Travaux futurs

Les travaux réalisés au cours de stage ont ouvert de nouvelles questions qu’il sera intéressant d’explorer. Quelques pistes sont présentées dans les sections suivantes. Elles sont regroupées en deux catégories : les pistes pour aller plus loin dans l’exploration du champ étudié au cours de ce stage, et les pistes pour examiner d’autres parties de la Galaxie.

3.4.1 Autour de la nébuleuse de Draco

Images haute résolution

Les canaux de dépolarisation sont des artefacts qui ont la même largeur que la PSF de l’instrument d’observation. Ainsi, la largeur de ces canaux varie avec la résolution des images. En particulier, l’utilisation d’images plus haute résolution permettra de confirmer que ces structures rectilignes sont en effet des canaux de dépolarisation. Si les canaux autour de la nébuleuse de Draco ont la même largeur dans les images à plus haute résolution, alors ce ne sont pas des canaux de dépolarisation tels que décrits dans [28]. L’exploitation d’images à plus haute résolution permettra alors de mieux caractériser ces structures.

Nébuleuse de Draco

Le relevé LoTSS ne couvre à ce jour qu’une partie restreinte du ciel de l’hémisphère nord. En particulier, la nébuleuse de Draco n’a pas été observée par ce relevé, mais le sera à terme. Il sera alors intéressant

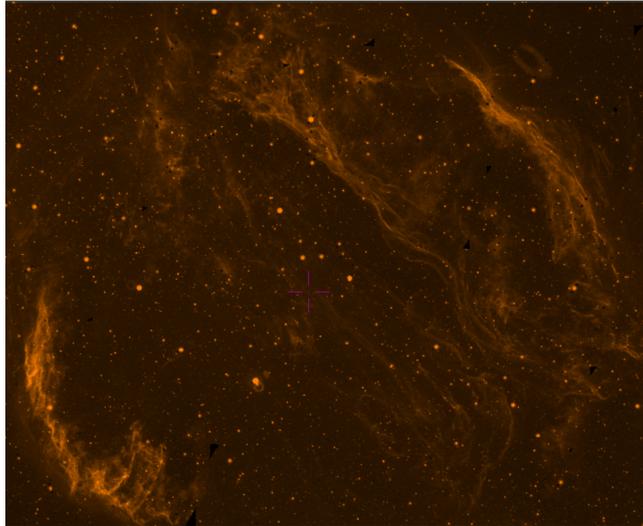


Figure 3.2: Boucle du cygne en UV lointains. Image GALEX.

d'étudier la polarisation de la nébuleuse elle-même, ainsi que les autres champs voisins de la nébuleuse.

La nébuleuse de Draco a été observée par de nombreux relevés qui ne couvrent pas la partie du ciel étudiée au cours de ce stage. Par exemple, la nébuleuse de Draco a été observée à 21 cm par le relevé GHIGLS [43]. Cette partie du ciel a donc été observée à plus haute résolution dans cette gamme de fréquences que les champs voisins et en particulier que la partie du ciel étudiée pendant ce stage. De même, le relevé GALEX [6] en UV ne couvre par le champ considéré dans cette étude mais couvre la nébuleuse de Draco. Ainsi, il sera possible de croiser les données issues de plus de relevés pour l'étude de la nébuleuse Draco que pour l'étude réalisée au cours de ce stage, et donc d'obtenir une meilleure compréhension des observations en tomographie Faraday.

Voisinage de la nébuleuse de Draco

Seule une partie du voisinage de la nébuleuse de Draco a été observée par le relevé LoTSS. Dans les champs voisins du champ étudié au cours de ce stage, il sera possible de voir si l'inversion en profondeur de Faraday illustrée en figure 2.4 est local où si elle s'étend sur une plus grande portion du ciel.

3.4.2 Ailleurs dans la Galaxie

Cygnus Loop

Cygnus loop, ou boucle du Cygne, montrée en figure 3.2, est un reste de supernova situé aux coordonnées galactiques $(74, -9)$. Différents éléments de ce reste de supernova sont visibles en rayons X [24], lumière visible [25], infrarouge, ou ondes radio [57]. Il est alors raisonnable de supposer que l'étude de cette zone en tomographie Faraday permettra de dégager des informations supplémentaires sur le champ magnétique la traversant.

Filaments H_I

L'alignement entre les filaments H_I, le champ magnétique global et les canaux de dépolarisation a été constaté dans le champ 3C 196 [37]. Nous avons trouvé lors de ce stage qu'au contraire les canaux de dépolarisation ne sont alignés avec aucune autre structure. Il sera alors intéressant de comparer l'orientation des canaux de dépolarisation et des filaments H_I de façon plus systématique sur tout le ciel afin de déterminer si l'alignement décrit dans [36] est le produit du hasard et sinon de déterminer les mécanismes en jeu.

Bibliography

- [1] P. a. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves, M. Arnaud, D. Arzoumanian, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, R. B. Barreiro, N. Bartolo, and et al. Planck intermediate results - XXXIII. signature of the magnetic field geometry of interstellar filaments in dust polarization maps. *Astronomy & Astrophysics*, 586:A136, Feb 2016.
- [2] Ph André, A. Men'shchikov, S. Bontemps, V. Könyves, F. Motte, N. Schneider, P. Didelon, V. Minier, P. Saraceno, D. Ward-Thompson, and et al. From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar imf: Initial highlights from the herschel Gould belt survey. *Astronomy & Astrophysics*, 518:L102, Jul 2010.
- [3] NASA/IPAC Infrared Science Archive. A Python wrapper for the IPAC Montage mosaicking software. <http://www.astropy.org/montage-wrapper/>. This research made use of Montage. It is funded by the National Science Foundation under Grant Number ACI-1440620, and was previously funded by the National Aeronautics and Space Administration's Earth Science Technology Office, Computation Technologies Project, under Cooperative Agreement Number NCC5-626 between NASA and the California Institute of Technology.
- [4] Edwin A. Bergin and Mario Tafalla. Cold dark clouds: The initial conditions for star formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45(1):339–396, Sep 2007. arXiv: 0705.3765.
- [5] K. Beuermann, G. Kanbach, and E. M. Berkhuijsen. Radio structure of the Galaxy - thick disk and thin disk at 408 MHz. *Astronomy and Astrophysics*, 153:17–34, Dec 1985.
- [6] Luciana Bianchi and GALEX Team. The Galaxy evolution explorer (GALEX): an all sky ultra-violet survey. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 70, 1999.
- [7] F. Bonnarel, P. Fernique, O. Bienaymé, D. Egret, F. Genova, M. Louys, F. Ochsenbein, M. Wenger, and J. G. Bartlett. The ALADIN interactive sky atlas. a reference tool for identification of astronomical sources. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 143:33–40, Apr 2000.
- [8] Michiel A Brentjens and AG De Bruyn. Faraday rotation measure synthesis. *Astronomy & Astrophysics*, 441(3):1217–1228, 2005.
- [9] B. J. Burn. On the depolarization of discrete radio sources by Faraday dispersion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 133(1):67–83, Jul 1966.
- [10] D. N. Burrows and J. A. Mendenhall. Soft X-ray shadowing by the Draco cloud. *Nature*, 351(6328):629–631, Jun 1991.
- [11] B. Cabral and L. C. Leedom. *Imaging vector fields using Line Integral Convolution*. Number UCRL-JC-112935; CONF-9208240-1. Mar 1993.
- [12] C. Carilli and S. Rawlings. Science with the square kilometer array: Motivation, key science projects, standards and assumptions. Sep 2004.
- [13] S. E. Clark, J. E. G. Peek, and M. E. Putman. Magnetically aligned H I fibers and the Rolling Hough transform. *The Astrophysical Journal*, 789:82, Jul 2014.

BIBLIOGRAPHY

- [14] Planck Collaboration, R. Adam, P. a. R. Ade, N. Aghanim, Y. Akrami, M. I. R. Alves, M. Arnaud, F. Arroja, J. Aumont, C. Baccigalupi, and et al. Planck 2015 results. I. overview of products and scientific results. Feb 2015.
- [15] Joseph A. Collins, J. Michael Shull, and Mark L. Giroux. Metallicity and ionization in high-velocity cloud complex c. *The Astrophysical Journal*, 657(1):271–285, Mar 2007.
- [16] Richard M. Crutcher, Benjamin Wandelt, Carl Heiles, Edith Falgarone, and Thomas H. Troland. Magnetic fields in interstellar clouds from Zeeman observations: Inference of total field strengths by bayesian analysis. *The Astrophysical Journal*, 725(1):466–479, Nov 2010.
- [17] Josquin Errard and Radek Stompor. Characterizing bias on large scale CMB B-modes after Galactic foregrounds cleaning. *Physical Review D*, 99(4):043529, Feb 2019. arXiv: 1811.00479.
- [18] K. Ferrière. Faraday tomography: a new, three-dimensional probe of the interstellar magnetic field. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 767 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012006, November 2016.
- [19] K. M. Ferrière. The interstellar environment of our galaxy. *Reviews of Modern Physics*, 73:1031–1066, October 2001.
- [20] Douglas P Finkbeiner. A full-sky H α template for microwave foreground prediction. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 146(2):407, 2003.
- [21] Michael D. Gladders, T. E. Clarke, Christopher R. Burns, A. Attard, M. P. Casey, Devon Hamilton, Gabriela Mallén-Ornelas, J. L. Karr, Sara M. Poirier, Marcin Sawicki, and et al. The distance to the draco cloud. *arXiv:astro-ph/9809183*, Sep 1998. arXiv: astro-ph/9809183.
- [22] W Goerigk and U Mebold. The distance of the Draco nebula and its high velocity clouds. *Astronomy and Astrophysics*, 162:279–282, 1986.
- [23] W. Goerigk, U. Mebold, K. Reif, P. M. W. Kalberla, and L. Velden. A high-latitude HI-cloud with optical emission. *Astronomy and Astrophysics*, 120:63–73, April 1983.
- [24] James R. Graham, N. A. Levenson, J. J. Hester, J. C. Raymond, and R. Petre. An X-ray and optical study of the interaction of the Cygnus loop supernova remnant with an interstellar cloud. *The Astrophysical Journal*, 444:787–795, May 1995.
- [25] H. Greidanus and R. G. Strom. Optical kinematics in the Cygnus Loop. II - interpretation. *Astronomy and Astrophysics*, 257:265–277, Apr 1992.
- [26] M. P. van Haarlem, M. W. Wise, A. W. Gunst, G. Heald, J. P. McKean, J. W. T. Hessels, A. G. de Bruyn, R. Nijboer, J. Swinbank, R. Fallows, and et al. Lofar: The low-frequency array. *Astronomy & Astrophysics*, 556:A2, Aug 2013.
- [27] L. M. Haffner, R. J. Reynolds, S. L. Tufte, G. J. Madsen, K. P. Jaehnig, and J. W. Percival. The Wisconsin H-Alpha Mapper Northern Sky Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 149(2):405–422, Dec 2003. arXiv: astro-ph/0309117.
- [28] M. Haverkorn and F. Heitsch. Canals beyond Mars: Beam depolarization in radio continuum maps of the warm ISM. *Astronomy & Astrophysics*, 421(3):1011–1019, Jul 2004.
- [29] Patrick Hennebelle. On the origin of non-self-gravitating filaments in the ism. *Astronomy & Astrophysics*, 556:A153, Aug 2013.
- [30] Patrick Hennebelle and Shu-ichiro Inutsuka. The role of magnetic field in molecular cloud formation and evolution. *arXiv:1902.00798 [astro-ph]*, Feb 2019. arXiv: 1902.00798.

- [31] U. Herbstmeier, A. Heithausen, and U. Mebold. Tracing the molecular hydrogen content of the Draco nebula - very low H/H₂/W/12CO/ ratios or varying far infrared emissivities. *Astronomy and Astrophysics*, 272:514, May 1993.
- [32] HI4PI Collaboration:, Ben Bekhti, N., Flöer, L., Keller, R., Kerp, J., Lenz, D., Winkel, B., Bailin, J., Calabretta, M. R., Dedes, L., Ford, H. A., Gibson, B. K., Haud, U., Janowiecki, S., Kalberla, P. M. W., Lockman, F. J., McClure-Griffiths, N. M., Murphy, T., Nakanishi, H., Pisano, D. J., and Staveley-Smith, L. HI4PI: a full-sky survey based on EBHIS and GASS. *A&A*, 594:A116, 2016.
- [33] Alex S. Hill, S. A. Mao, Robert A. Benjamin, Felix J. Lockman, and Naomi M. McClure-Griffiths. Magnetized gas in the smith high velocity cloud. *The Astrophysical Journal*, 777(1):55, Oct 2013.
- [34] Sebastian Hutschenreuter and Torsten A. Enßlin. The Galactic Faraday depth sky revisited. *arXiv:1903.06735 [astro-ph]*, Mar 2019. arXiv: 1903.06735.
- [35] Tsuyoshi Inoue and Shu-ichiro Inutsuka. Formation of H I clouds in shock-compressed interstellar medium: Physical origin of angular correlation between filamentary structure and magnetic field. *The Astrophysical Journal*, 833:10, Dec 2016.
- [36] Vibor Jelic, David Prelogovic, Marijke Haverkorn, Jur Remeijn, and Dora Klindzic. Magnetically aligned straight depolarisation canals and the rolling hough transform. *arXiv preprint arXiv:1806.06634*, 2018.
- [37] V. Jelić, A. G. de Bruyn, V. N. Pandey, M. Mevius, M. Haverkorn, M. A. Brentjens, L. V. E. Koopmans, S. Zaroubi, F. B. Abdalla, K. M. B. Asad, and et al. Linear polarization structures in LOFAR observations of the interstellar medium in the 3C 196 field. *Astronomy & Astrophysics*, 583:A137, Nov 2015.
- [38] James Lequeux. *Le milieu interstellaire*. EDP Sciences, 2002.
- [39] François Levrier. *Désordre et cohérence dans les structures du milieu interstellaire: analyse statistique, filtrage interférométrique et transfert radiatif*. PhD thesis, Université Paris-Diderot - Paris VII, Dec 2004.
- [40] D. Lilienthal, A. Wennmacher, U. Herbstmeier, and U. Mebold. Interstellar NA I D line studies of stars towards the Draco nebula. *Astronomy and Astrophysics*, 250:150–158, October 1991.
- [41] Lofar. About LOFAR, 2019. Consulté le 2019-04-10.
- [42] J. Malinen, L. Montier, J. Montillaud, M. Juvela, I. Ristorcelli, S. E. Clark, O. Berné, J.-Ph. Bernard, V.-M. Pelkonen, and D. C. Collins. Matching dust emission structures and magnetic field in high-latitude cloud L1642: comparing Herschel and Planck maps. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460:1934–1945, Aug 2016.
- [43] P. G. Martin, K. P. M. Blagrove, F. J. Lockman, D. Pinheiro Gonçalves, A. I. Boothroyd, G. Joncas, M.-A. Miville-Deschênes, and G. Stephan. GHIGLS: HI Mapping at Intermediate Galactic Latitude Using the Green Bank Telescope. *The Astrophysical Journal*, 809:153, August 2015.
- [44] Christopher F. McKee. A theory of the interstellar medium: Three components regulated by supernova explosions in an inhomogeneous substrate. *The Astrophysical Journal*, May 1977.
- [45] U Mebold, J Cernicharo, L Velden, K Reif, C Crezelius, and W Goerigk. The Draco nebula - a molecular cloud in the galactic halo? *Astronomy and Astrophysics*, 151:427–434, 1985.
- [46] Miville-Deschênes, M.-A., Salomé, Q., Martin, P. G., Joncas, G., Blagrove, K., Dassas, K., Abergel, A., Beelen, A., Boulanger, F., Lagache, G., Lockman, F. J., and Marshall, D. J. Structure formation in a colliding flow: The Herschel view of the Draco nebula. *A&A*, 599:A109, 2017.

BIBLIOGRAPHY

- [47] M.-A. Miville-Deschênes, P. G. Martin, A. Abergel, J.-P. Bernard, F. Boulanger, G. Lagache, L. D. Anderson, P. André, H. Arab, J.-P. Baluteau, and et al. Herschel-spire observations of the polaris flare: Structure of the diffuse interstellar medium at the sub-parsec scale. *Astronomy & Astrophysics*, 518:L104, Jul 2010.
- [48] Marc-Antoine Miville-Deschênes and Guilaine Lagache. IRIS: A new generation of IRAS maps. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 157(2):302, Apr 2005.
- [49] Sten F. Odenwald and Lee J. Rickard. Hydrodynamical processes in the Draco molecular cloud. *The Astrophysical Journal*, 318:702–711, Jul 1987.
- [50] N. Oppermann, H. Junklewitz, M. Greiner, T. A. Enßlin, T. Akahori, E. Carretti, B. M. Gaensler, A. Goobar, L. Harvey-Smith, M. Johnston-Hollitt, and et al. Estimating extragalactic Faraday rotation. *Astronomy & Astrophysics*, 575:A118, Mar 2015.
- [51] G. V. Panopoulou, I. Psaradaki, and K. Tassis. The magnetic field and dust filaments in the polaris flare. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462:1517–1529, Oct 2016.
- [52] B. E. Penprase, J. D. Rhodes, and E. L. Harris. Optical observations of the Draco molecular cloud. I. catalog of B and V magnitudes for selected areas. *Astronomy and Astrophysics*, 364:712–722, Dec 2000.
- [53] M.E. Putman, J.E.G. Peek, and M.R. Joungh. Gaseous galaxy halos. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50(1):491–529, 2012.
- [54] Isabelle Ristorcelli. Contribution à l'étude des premières phases de la formation stellaire, Mar 2019.
- [55] R. Rohlfs, U. Herbstmeier, U. Mebold, and A. Winnberg. Collision of a high-velocity cloud with a dust cloud in the Galactic halo. *Astronomy and Astrophysics*, 211:402–408, Mar 1989.
- [56] R. Rohlfs, I. Souvatzis, U. Herbstmeier, A. Winnberg, and U. Mebold. Dust and CO in the vicinity of high velocity clouds. *Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Hamburg*, 70:411, 1987.
- [57] C. V. Sastry, K. S. Dwarakanath, and R. K. Shevgaonkar. The structure of the Cygnus Loop at 34.5 MHz. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2:339–347, Sep 1981.
- [58] N. Scoville, H. Aussel, K. Sheth, K. S. Scott, D. Sanders, R. Ivison, A. Pope, P. Capak, P. Vanden Bout, S. Manohar, and et al. The evolution of ISM mass probed by dust emission – ALMA observations at $z = 0.3$ to 2. *The Astrophysical Journal*, 783(2):84, Feb 2014. arXiv: 1401.2987.
- [59] Paul R. Shapiro and George B. Field. Consequences of a new hot component of the interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 205:762–765, May 1976.
- [60] T. W. Shimwell, H. J. A. Röttgering, P. N. Best, W. L. Williams, T. J. Dijkema, F. de Gasperin, M. J. Hardcastle, G. H. Heald, D. N. Hoang, A. Horneffer, and et al. The LOFAR two-metre sky survey. I. survey description and preliminary data release. *Astronomy and Astrophysics*, 598:A104, Feb 2017.
- [61] X. H. Sun, L. Rudnick, Takuya Akahori, C. S. Anderson, M. R. Bell, J. D. Bray, J. S. Farnes, S. Ideguchi, K. Kumazaki, T. O'Brien, and et al. Comparison of algorithms for determination of rotation measure and Faraday structure. I. 1100-1400 MHz. *The Astronomical Journal*, 149:60, Feb 2015.
- [62] Gerrit L. Verschuur. An association between H I concentrations within high-velocity clouds A and C and nearby molecular clouds. *The Astrophysical Journal*, 361:497–510, Oct 1990.

- [63] A Wennmacher. CO-and dust temperatures on G354+ 24. In *Astronomische Gesellschaft Abstract Series*, volume 1, page 25, 1988.
- [64] S. Zaroubi, V. Jelić, A. G. de Bruyn, F. Boulanger, A. Bracco, R. Kooistra, M. I. R. Alves, M. A. Brentjens, K. Ferrière, T. Ghosh, and et al. Galactic interstellar filaments as probed by LOFAR and Planck. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 454(1):L46–L50, Nov 2015.
- [65] Catherine Zucker, Joshua S. Speagle, Edward F. Schlafly, Gregory M. Green, Douglas P. Finkbeiner, Alyssa A. Goodman, and João Alves. A large catalog of accurate distances to local molecular clouds: The Gaia DR2 edition. Feb 2019.

Acronyms

ADS NASA Astrophysics Data System. v

CMB Cosmic Microwave Background (fond diffus cosmologique). 1

FWHM Full Width at Half Maximum (largeur à mi-hauteur). 10

HVC High Velocity Cloud (nuage interstellaire à haute vitesse). 3, 4

ISM Inter-Stellar Medium (milieu interstellaire). 1–6, 21, 22

IVC Intermediate Velocity Cloud (nuage interstellaire à vitesse intermédiaire). 3, 4, 8

LIC Line Integral Convolution. 17

LOFAR Low-Frequency Array. 1

LoTSS LOFAR Two-metre Sky Survey. 10, 23

LVC Low Velocity Cloud (nuage interstellaire à basse vitesse). 4

PSF Point Spread Function (fonction d'étalement du point). 8, 23

RHT Rolling Hough Transform (transformation de Hough à fenêtre glissante). 11, 15, 17

SKA Square Kilometer Array. 10

UV Ultra violet. 4