

2m11. 2977. 6

Université de Montréal

**Étude de la cinématique et de la distribution de masse
des galaxies spirales NGC 247, NGC 300, NGC 7793**

par

Nancy Martineau

Département de Physique

Faculté des arts et des sciences

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

Avril, 2002

© Nancy Martineau, 2002



QC
3
U54
2002
v.014



Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

**Étude de la cinématique et de la distribution de masse
des galaxies spirales NGC 247, NGC 300, NGC 7793**

présenté par:

Nancy Martineau

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

François Wesemael,
Claude Carignan,
Serge Demers,

président-rapporteur
directeur de recherche
membre du jury

REMERCIEMENTS

Il y a deux ans, attirée par de fascinantes images astronomiques de l'univers, j'ai décidé de poursuivre des études graduées en astrophysique. Ironiquement, ma recherche s'est orientée vers la matière sombre, c'est-à-dire celle qui n'émet aucun rayonnement que nous sachions imager!

Mes remerciements vont d'abord à Claude Carignan, mon directeur de recherche, pour m'avoir proposé ce passionnant sujet, m'avoir aiguillée dans ma recherche et m'avoir permis - sur tous les plans - de mener à bien cette étude. J'apprécie tout particulièrement la confiance qu'il m'a accordée et la liberté offerte pour explorer les sujets parfois hétéroclites qui m'intéressaient. Merci donc à lui, ainsi qu'à Sébastien Blais-Ouellette et Olivier Hernandez, pour avoir guidé mes débuts dans le monde de l'astronomie.

De précieux collaborateurs méritent également d'être mentionnés. Parmi toutes les personnes qu'il m'a été donné de rencontrer durant cette recherche, je remercie tout particulièrement Jacques Boulesteix¹ et Philippe Amram², tous deux attachés à l'Observatoire de Marseille, avec qui nous avons travaillé en partenariat. Leurs conseils et leur aide ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

C'est à l'Observatoire de La Silla et à l'Observatoire du Mont Mégantic que j'ai fait mes premiers pas d'observatrice. Je remercie tous les membres du personnel pour avoir rendu mes missions des plus agréables.

Si j'ai réussi à y voir un peu plus clair, c'est aussi grâce à Luc Turbide, l'administrateur de réseau, qui m'a apporté un support technique incomparable avec un enthousiasme inconditionnel! Je le remercie de vouer son âme à l'informatique du département.

Ma gratitude va ensuite à François Wesemael et à Serge Demers qui, bien plus que des rapporteurs, ont été des interlocuteurs précieux tout le long de mes études. Je les remercie tout particulièrement de m'avoir fait bénéficier de leur expérience et de leur perspicacité.

¹ Boulesteix, J., Observatoire de Marseille, Jacques.Boulesteix@observatoire.cnrs-mrs.fr.

² Amram, P., Observatoire de Marseille, Philippe.Amram@observatoire.cnrs-mrs.fr.

Bien que non impliqués dans le projet, je tiens à remercier Louis Lemay, Louise Lafortune et Louise Grégoire qui ont si bien orchestré toutes les acrobaties administratives et académiques de dernière minute. J'aimerais aussi remercier l'Université de Montréal ainsi que le Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) pour leur aide financière.

Merci à tous les étudiants, chercheurs et professeurs du Centre de recherche de l'Observatoire du Mont Mégantic, pour leur sympathie, pour leur jovialité et pour les excellents moments partagés. La diversité des cultures et des personnalités rencontrées tout le long de mes recherches en firent une expérience formidablement enrichissante. Merci à tous.

Enfin, je souhaite adresser des remerciements très chaleureux à ma famille et à mes amis, sans qui je ne me serais sans doute pas lancée dans cette galère, pour leur patience et leur soutien sans faille et inconditionnel. Je ne saurai jamais leur témoigner suffisamment toute ma gratitude pour m'avoir toujours soutenue.

SOMMAIRE

Cette étude a pour but de préciser le potentiel gravitationnel de trois galaxies spirales appartenant au groupe Sculpteur, soit NGC 247, NGC 300 et NGC 7793. Elle fait suite à une série de travaux (Blais-Ouellette *et al.* 1999, Blais-Ouellette, Amram & Carignan 2001) qui ont montré que des données cinématiques bi-dimensionnelles H_{II} à haute résolution spatiale étaient indispensables pour bien évaluer les paramètres de la distribution de masse totale des galaxies spirales. En particulier, nos observations Fabry-Pérot de l'hydrogène ionisé permettent une meilleure description de la partie ascendante des courbes de rotation. Elles complètent parfaitement les observations radio en synthèse d'ouverture de l'hydrogène atomique introduites par Puche (1989) et offrent la possibilité d'évaluer différents modèles de halo en uniformisant la qualité, la sensibilité et la résolution des données cinématiques du groupe Sculpteur.

Mots clés : Matière sombre, rotation galactique, masse galactique, halos, régions H II, rapports masses-luminosité, interféromètre de Fabry-Pérot.

SOMMARY

The general aim of this study was to calculate the gravitational potential of three spiral galaxies belonging to the Sculptor group : NGC 247, NGC 300 and NGC 7793. It builds on work by (Blais-Ouellette et al. 1999, Blais-Ouellette, Amram & Carignan 2001) that has shown that two-dimensional H_{II} kinematics data are necessary to determine accurately the parameters of mass distribution in spirals galaxies. In particular, our Fabry-Perot observations of ionised hydrogen leads to a better description in the inner part of the rotation curves. They perfectly complete the radio aperture synthesis observations of atomic hydrogen introduced by Puche (1989) and allow us to evaluate with confidence various dark halo functional forms by standardising the quality, sensibility and resolution of the kinematics data of the Sculptor group.

Key words : Dark matter, galactic rotation, galactic mass, halos, H II regions, mass to light ratios, Fabry-Perot interferometer.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
SOMMARY	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	x
LISTE DES SYMBOLES	xi
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	1
1.1 Cinématique des galaxies	2
1.2 Programmes scientifiques.....	5
1.3 Objectifs de l'étude	6
1.4 Références	8
CHAPITRE 2: OBSERVATIONS ET RÉDUCTION DES DONNÉES	11
2.1 Hydrogène interstellaire ionisé.....	11
2.2 Interféromètre de Fabry-Pérot.....	12
2.3 Acquisition des données.....	16
2.4 Champ de vitesses, images monochromatique et continuum	17
2.5 Courbes de rotation	18
2.6 Modélisation de la distribution de masse	20
2.7 Références	24
CHAPITRE 3: SPECTROSCOPIE FABRY-PÉROT DES GALAXIES DU GROUPE SCULPTEUR. I. NGC 247.....	26
3.1 Étude cinématique	32
3.2 Modèles de masse.....	40
3.3 Références	49
CHAPITRE 4: SPECTROSCOPIE FABRY-PÉROT DES GALAXIES DU GROUPE SCULPTEUR. II. NGC 300	50
4.1 Étude cinématique	57
4.2 Modèles de masse.....	64

4.3	Références	71
CHAPITRE 5: SPECTROSCOPIE FABRY-PÉROT DES GALAXIES DU GROUPE SCULPTEUR. III. 7793.....		73
5.1	Étude cinématique	79
5.2	Modèles de masse.....	86
5.3	Références	97
CHAPITRE 6: CONCLUSION.....		98
6.1	Rappel des objectifs.....	98
6.2	Échantillon	99
6.3	Démarche	99
6.4	Bilan des résultats.....	101
6.5	Perspectives	101
6.6	Références	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	Paramètres des profils de densité	21
Tableau 3-1	Principaux résultats des études portant sur NGC 247	29
Tableau 3-2	Paramètres des observations Fabry-Pérot de NGC 247	30
Tableau 3-3	Paramètres intrinsèques de NGC 247.....	31
Tableau 3-4	Courbe de rotation optique de NGC 247	36
Tableau 3-5	Courbe de rotation radio de NGC 247.....	38
Tableau 3-6	Paramètres des modèles de masse pour NGC 247 (profil de lumière en B)...	43
Tableau 4-1	Principaux résultats des études portant sur NGC 300	54
Tableau 4-2	Paramètres des observations Fabry-Pérot de NGC 300.....	55
Tableau 4-3	Paramètres intrinsèques de NGC 300.....	56
Tableau 4-4	Courbe de rotation optique de NGC 300	62
Tableau 4-5	Courbe de rotation radio de NGC 300.....	63
Tableau 4-6	Paramètres des modèles de masse pour NGC 300 (profil de lumière en B)...	67
Tableau 5-1	Principaux résultats des études portant sur NGC 7793	76
Tableau 5-2	Paramètres des observations Fabry-Pérot de NGC 7793.....	77
Tableau 5-3	Paramètres intrinsèques de NGC 7793	78
Tableau 5-4	Courbe de rotation optique de NGC 7793	84
Tableau 5-5	Courbe de rotation radio de NGC 7793	85
Tableau 5-6	Paramètres des modèles de masse pour NGC 7793 (profil de lumière en B)	89
Tableau 5-7	Paramètres des modèles de masse pour NGC 7793 (profil de lumière en I)..	94

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Principe schématisé de l'interféromètre de Fabry-Pérot.....	12
Figure 2-2 Fonction d'Airy. Les courbes correspondent à différentes valeurs de coefficients de réflexion énergétique (Amram 1991).....	13
Figure 2-3 Illustration d'un profil créé en un pixel par la juxtaposition des canaux balayant un intervalle spectral libre (Amram 1991).....	14
Figure 2-4 Schéma de la bande passante du filtre interférentiel et de l'étalon de Fabry-Pérot (Amram 1991).....	15
Figure 2-5 Profils de densité des quatres modèles. Courbe continue : sphère pseudo-isotherme, courbe pointillée: KKBP, long tiretés: Burkert, courts tiretés : NFW	22
Figure 3-2 Champ de vitesses (à gauche) et image monochromatique de l'émission H α de NGC 247 (à droite).	33
Figure 3-3 Variation avec le rayon des angles de position et d'inclinaison des observations H α de NGC 247.....	34
Figure 3-4 Courbe de rotation H α (cercles ouverts) de NGC247, combinée à la courbe de rotation H β (cercles pleins) de Carignan & Puche (1990). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée.....	39
Figure 3-5 Courbe de rotation H α et H β et modèles de masse de NGC 247, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.....	41
Figure 3-6 Courbe de rotation H β et modèles de masse de NGC 247, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.....	42
Figure 3-7 Ajustement de Pearson pour le profil de densité NFW.....	44
Figure 3-8 Ajustement de Pearson pour le profil de densité ISO	45
Figure 3-9 Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO.....	46
Figure 3-10 Ajustement de Pearson pour le profil de densité FLAT.....	47
Figure 3-11 Ajustement de Pearson pour le profil de densité KKBP.....	47
Figure 4-1 Image dans la bande B de NGC 300 (IIIJ UKSchmidt, Digitized Sky Survey). 50	
Figure 4-2 Champ de vitesses (à gauche) et image monochromatique de l'émission H α de NGC 300 (à droite).	58

Figure 4-3	Courbe de rotation $H\alpha$ (cercles ouverts) de NGC 300, combinée à la courbe de rotation H_I (cercles pleins) de Puche, Carignan & Bosma (1990). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée.	61
Figure 4-4	Courbe de rotation $H\alpha$ et H_I et modèles de masse de NGC 300, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.	65
Figure 4-5	Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 300, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.	66
Figure 4-6	Ajustement de Pearson des paramètres du profil NFW	68
Figure 4-7	Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO	68
Figure 5-1	Image dans la bande B de NGC 7793 (IIIJ UKSchmidt, Digitized Sky Survey).	73
Figure 5-2	Champ de vitesses (à gauche) et image monochromatique de l'émission $H\alpha$ de NGC 7793 (à droite).	80
Figure 5-3	Variation avec le rayon des angles de position et d'inclinaison des observations $H\alpha$ de NGC 7793.	81
Figure 5-4	Courbe de rotation $H\alpha$ (cercles ouverts) de NGC 7793, combinées à la courbe de rotation H_I (cercles pleins) de Carignan & Puche (1990) et aux mesures optiques (croix) de Davoust & de Vaucouleurs (1980). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée.	83
Figure 5-5	Courbe de rotation $H\alpha$ et H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.	87
Figure 5-6	Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.	88
Figure 5-7	Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO	91
Figure 5-8	Courbe de rotation $H\alpha$ et H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en I modélise la composante stellaire.	92
Figure 5-9	Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en I modélise la composante stellaire.	93
Figure 5-10	Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO	95

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

AAp	Astronomy and Astrophysics
AApS	Astronomy and Astrophysics Supplement series
ADHOC	Analyse et Dépouillement Homogène des Observations Cigale
AIPS	Astronomical Image Processing System
AJ	Astronomical Journal
ApJ	Astrophysical Journal
ApJS	Astrophysical Journal Supplement series
CCD	Charge Coupled Device
CDM	Cold Dark Matter
CFHT	Canada-France-Hawaii Telescope
Cigale	CInématique des GALaxiEs
ESO	European Southern Observatory
FWHM	Full Width at Half Height
GdR Galaxies	Groupement de Recherche Galaxies
GHASP	Gassendi survey of H α in Spirals
HIA	Herzberg Institute Of Astrophysics
IAU	International Astronomical Union
IPCS	Image Photons Counting System
MACHO	MAssive Compact Halo Object
MNRAS	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society
ROTCUR	ROtation CURve
VELFI	VELOCITY Field
VLA	Very Large Array
WHISP	Westerbork survey of HI in SPiral galaxies

LISTE DES SYMBOLES

α	Échelle de longueur
Δ	Distance
ΔV	Différence de vitesses
ρ_0	Densité volumique centrale
σ	Dispersion des vitesses
χ^2	Khi-carré
A_B	Absorption galactique
c	Vitesse de la lumière
b	Latitude galactique
$B(o)_c$	Luminosité de surface centrale corrigée par l'inclinaison
D_{25}	Diamètre de l'isophote à $\mu_B = 25 \text{ mag arcsec}^2$
G	Constante gravitationnelle
i	Inclinaison du disque galactique
l	Longitude galactique
L_\odot	Luminosité solaire
L_B	Luminosité totale en bande B
M_\odot	Masse solaire
M_B	Magnitude absolue en bande B
$M_{H\text{I}}$	Masse $H\text{I}$ totale
M/L	Rapport masse/luminosité
N	Niveau de l'orbitale
PA	Axe majeur
pc	parsec
$q = b/a$	Rapport moyen des axes
r_c	Rayon de coeur ou rayon caractéristique
RA	Ascension droite
R_{HO}	Rayon d'Holmberg, rayon à une luminosité de surface $\mu_B = 26.5 \text{ mag arcsec}^2$
S	Seconde
T	Temps
V_{rot}	Vitesse de rotation
V_{sys}	Vitesse systémique

Beaucoup d'amour et beaucoup d'étoiles à tous ceux dont les destins côtoient le mien, en particulier à mon grand frère Sylvain qui, pendant que je regardais les galaxies tourner, se battait corps et âme pour jouir encore un peu de ce qu'on a de plus précieux : la vie.

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

La matière sombre est un des mystères les plus tenaces de l'astronomie contemporaine. Cette matière est dite sombre, ou noire, parce qu'elle n'émet aucun rayonnement que nous sachions mesurer et demeure donc invisible à nos instruments. Sa présence est uniquement inférée à partir des perturbations gravitationnelles qu'elle apporte à la matière lumineuse et qui prennent une ampleur considérable à l'échelle des galaxies. Bien qu'évoquée dès 1933 par l'astronome Fritz Zwicky (lors de son étude sur la distribution de vitesse de 7 galaxies dans l'amas de Coma, Zwicky 1937), ce n'est que dans les années soixante-dix que la connaissance de la structure et de la dynamique des galaxies spirales a offert des preuves incontestables de son existence (Freeman 1970, Ostriker, Peebles & Yahil 1974).

Nous savons depuis longtemps qu'en dehors du bulbe d'une galaxie spirale typique, la luminosité diminue rapidement en s'éloignant de son centre. Par conséquent, si la luminosité était un traceur de la masse, l'essentiel de celle-ci se trouverait dans le bulbe de la galaxie. Ainsi, la vitesse de rotation de la galaxie devrait d'abord augmenter pour ensuite rapidement décroître, selon les lois de Kepler, jusqu'à la limite des mesures. Les observations sont très différentes : la vitesse de rotation augmente bel et bien près du centre, mais demeure ensuite plus ou moins constante même au-delà des dernières étoiles (Rubin & Ford 1970, Roberts & Whitehurst 1975, Bosma 1978, Rubin, Thonnard & Ford 1978).

Ce résultat indique que la diminution de la masse lumineuse avec l'éloignement est contrebalancée par l'augmentation d'une grande quantité de matière sombre dans les régions extérieures de la galaxie et que, par conséquent, la distribution de la luminosité n'est pas un indicateur valable de la distribution de masse. Les observations ne s'expliquent donc que par l'adjonction d'un halo sombre et massif (Bahcall & Casertano 1985 et Carignan & Freeman 1985).

Bien que son existence soit aujourd'hui irréfutable, nous ignorons toujours la nature exacte de cette matière invisible constituant les halos massifs. Cependant, avant même d'essayer d'en déterminer la nature et d'examiner les candidats potentiels, nous devons éclaircir un certain nombre d'interrogations: combien y en a-t-il? Comment est-elle distribuée? Quelles

lois de densité suit-elle? Quelles relations existent entre les matières sombre et lumineuse? Ce sont précisément ces avenues que tente de paver la présente étude, ses jumelles et les études qui l'ont précédée. Pour un excellent résumé sur la matière sombre, les lecteurs peuvent d'ailleurs se reporter aux travaux de Ashman (1992) et à ceux de van den Bergh (1999).

1.1 Cinématique des galaxies

Bien qu'il s'agisse de paramètres fondamentaux, on ignore encore de nos jours la masse et l'étendue totale des galaxies. La méthode la plus directe pour mesurer la distribution de masse d'une galaxie est l'étude de sa courbe de rotation, puisque c'est le potentiel gravitationnel en chaque point qui détermine sa vitesse. Pour la plupart des galaxies possédant un axe de symétrie, nous pouvons établir une relation entre la vitesse radiale d'un point et sa distance au centre. Nous modélisons ensuite le potentiel gravitationnel correspondant avec les composantes de masse connues et selon des distributions probables. La cinématique de ce type de galaxie est donc un moyen simple pour mettre en évidence la différence entre les masses dynamiques et les masses lumineuses.

Depuis plus d'une vingtaine d'années, les propriétés générales de galaxies dites "*pure disk galaxies*", ou galaxies spirales tardives (Scd-Sd-Sdm), caractérisées par un noyau réduit ou qui ne contribue que faiblement (moins de 3%) à la luminosité totale, sont l'objet d'un grand nombre d'études (Carignan & Freeman 1988; Carignan, Sancisi & van Albada 1988; Jobin & Carignan 1990; Puche, Carignan & Bosma 1990; Côté, Carignan & Sancisi 1991; Martimbeau, Carignan & Roy 1994). Ces galaxies spirales comprennent un grand pourcentage d'étoiles jeunes et de régions H_I et H_{II} . L'observation de telles galaxies est facilitée par leur géométrie, qui permet de supposer une distribution de masse simple. La mise en évidence de la matière sombre dans ces galaxies est effectuée en étudiant leurs courbes de rotation, obtenues à partir des mesures des décalages Doppler des raies spectrales des étoiles et du gaz à différentes distances du centre galactique.

La méthode générale adoptée pour ce travail consiste à utiliser l'effet Doppler de deux constituants de la galaxie : le gaz ionisé, avec les raies d'émission optique, et l'hydrogène neutre (H_I), par les raies d'émission radio. Il s'agit donc de combiner des données photométriques et cinématiques de manière à construire les modèles de masse de ces

systèmes. La théorie fondamentale pour déterminer la distribution de masse à partir des courbes de rotation a été discutée, entre autres, par Freeman (1975), Bahcall, Schmidt & Soneira (1982), Rubin, Thonnard, & Ford (1982), Carignan & Freeman (1985) et van Albada & Sancisi (1986).

L'hydrogène est à privilégier en matière de cinématique, car il se retrouve généralement à très grand rayon galactique, bien au-delà du disque optique. Dès lors, il peut nous servir à sonder le potentiel gravitationnel d'une galaxie et donc nous permettre d'estimer sa masse totale (lumineuse et sombre). L'hydrogène neutre, c'est-à-dire l'hydrogène atomique, n'émet pas de lumière, mais possède une raie d'émission à 21 cm de longueur d'onde détectée en radioastronomie. Les observations H_I obtenues pendant le dernier quart du siècle ont fortement étayé les conclusions de Ostriker, Peebles et Yahil (1974) selon lesquelles, premièrement, les rapports masses-luminosité des galaxies augmentent avec le rayon et, deuxièmement, cette masse manquante est suffisamment importante pour être cosmologiquement significative. Les études H_I ont également contribué à la compréhension de la structure et des modèles de masse des galaxies (Burstein & Rubin 1985, Kent 1996, Broeils & Courteau 1997). De plus, elles ont contribué à mettre en évidence les effets de l'environnement sur les galaxies (Rubin, Ford, & Whitmore 1988, Whitmore 1989, Whitmore & Gilmore 1991, Amram *et al.* 1992, 1994, 1995, 1996, Vogt 1995).

Toutefois, alors que les modèles disponibles permettent d'étudier la distribution de la matière sombre en fonction de la masse et du type morphologique, dans chaque galaxie étudiée jusqu'à maintenant, seules des limites inférieures à la masse et à l'étendue totale de leur halo sombre ont pu être déterminées. Bien que les courbes H_I s'étendent plus loin que le disque stellaire, elles restent insuffisantes pour bien caractériser les paramètres du halo. D'une part, l'absence d'émission H_I en provenance du cœur de plusieurs galaxies constitue un obstacle majeur à la détermination de leur profil de rotation. D'autre part, l'échantillonnage spatial atteint par les études H_I est limité par les moyens disponibles : il faut avoir recours à de très grands interféromètres radio et effectuer des temps de pose exorbitants pour obtenir des données à haute résolution spatiale. Or, la résolution spatiale des observations radio s'avère insuffisante pour établir avec confiance la cinématique des parties internes des galaxies. En effet, l'étalement du faisceau radio ne permet pas de

distinguer les vitesses du gaz à différents rayons galactiques et entraîne bien souvent, de façon artificielle, une diminution de la pente interne des courbes de rotation (Amram *et al.* 1992, 1994, 1995, 1996, Blais-Ouellette *et al.* 1999, 2001).

Dès 1937, Zwicky, lors de son étude sur la distribution des galaxies de l'amas de la Chevelure de Bérénice, déduit que les observations des régions intérieures des galaxies sous-estiment leur masse totale. Il écrit: "*Present estimates of the masses of nebulae are based on observation of the luminosities and internal rotations of nebulae. It is shown that both these methods are unreliable; that from the observed luminosities of extragalactic systems only lower limits for the values of their masses can be obtained*"¹

Plus récemment, Blais-Ouellette et Carignan (Université de Montréal), Amram (Obs. Marseille) et Côté (HIA/Gemini) ont montré, sur la base de l'exemple de la galaxie Sd NGC 5585 (Blais-Ouellette *et al.* 1999), que des données cinématiques bi-dimensionnelles H_{II} à haute résolution sont nécessaires pour déterminer précisément les paramètres de la distribution de masse (lumineuse & sombre) des galaxies spirales. Swaters (1999) a également mis en évidence l'importance des deux premiers points de mesure des courbes de rotation sur la répartition et la quantité de matière sombre dans les halos. Il découle de ces études la nécessité d'obtenir des données cinématiques à plus haute résolution avec des observations Fabry-Pérot² de la raie Balmer α (λ 6562.8) de l'hydrogène ionisé pour la partie ascendante des courbes de rotation associées aux observations H_I à grande extension radiale.

L'explication de l'ensemble du problème réside dans le fait que la mesure du rapport entre la masse du disque stellaire et sa luminosité $(M/L_B)_*$ est très sensible aux variations du profil de rotation près du centre, là où la densité est plus élevée. Par comparaison des vitesses déduites du profil photométrique à la courbe de rotation optique, l'extrapolation d'un profil de vitesses centrales fautif conduit inévitablement à un rapport $(M/L_B)_*$ erroné et, en conséquence, à de mauvais paramètres du halo massif. Il est donc crucial de disposer de données cinématiques à haute résolution spatiale fiables pour les régions centrales. Par ailleurs, l'échantillonnage dans la partie ascendante permet d'évaluer différents modèles de

¹ Zwicky, F. (1937). On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *ApJ*, vol. 86, p. 217.

² Cet interféromètre fut inventé par le physicien Alfred Pérot et le grand opticien Charles Fabry en 1896.

halo. Ainsi, la cinématique des régions internes est indissociable de la cinématique des régions à grande extension radiale.

1.2 Programmes scientifiques

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme d'observation GHASP³ dont le but est d'établir la cinématique interne d'environ 200 galaxies spirales. Les cartes à haute résolution spectrale sont obtenues en observant le décalage de la raie d'émission H α de l'hydrogène ionisé grâce à l'utilisation combinée d'un interféromètre Fabry-Pérot à balayage et d'une caméra à comptage de photons. Ce type de caméra est utilisé plutôt qu'un CCD⁴ parce qu'étant donné son bruit nul, elle permet de rapidement couvrir tout le domaine spectral, et par le fait même de préserver la qualité photométrique des profils de vitesse. Ceci constitue un avantage plus important que l'augmentation d'un facteur trois en efficacité quantique d'un CCD. Le détecteur idéal (en cours de développement à Marseille et à Montréal) sera un CCD à bruit nul.

Des cubes de données permettent de construire des champs de vitesses à partir desquels, entre autres, des courbes de rotation sont établies. La motivation de ce programme conjoint entre la France, l'Arménie, le Chili et le Canada réside dans la nécessité d'un vaste échantillon de galaxies, statistiquement complet et de bonne qualité, en vue d'une compréhension plus profonde de la cinématique interne des galaxies.

Ce programme, appuyé par le GdR Galaxies⁵, est en fait complémentaire de son équivalent en H I WHISP⁶, mené par des astronomes de Groningen et Dwingeloo aux Pays-Bas. Leur objectif est de cartographier dans la prochaine décennie la distribution et les champs de vitesses de l'hydrogène neutre de quelques milliers de galaxies. Ce travail, réalisé à l'aide de l'interféromètre radio de Westerbork, se justifie notamment par: 1) la nécessité de couvrir la variété des types morphologiques, des luminosités et des environnements pour toute étude portant sur la distribution de matière lumineuse et sombre; 2) l'utilité en cosmologie des

³ GHASP: acronyme de "Gassendi survey of H α in Spirals" (voir <http://www-obs.cnrs-mrs.fr/interferometrie/GHASP/ghasp.html>).

⁴ CCD : acronyme de "Charge Coupled Device". Quand nous parlons de CCD, nous désignons en fait la technologie CCD.

⁵ GdR Galaxies : acronyme de "Groupement de Recherche Galaxies".

⁶ WHISP: acronyme de "Westerbork survey of HI in SPiral galaxies" (voir www.astro.rug.nl/~whisp)

champs de vitesses pour déterminer les distances. WHISP dispose actuellement de la distribution et des champs de vitesses H_I de plus d'une centaine de galaxies, mais les efforts se multiplient pour en augmenter le nombre de façon considérable.

En remédiant à l'absence de résolution dans les régions centrales galactiques, l'étude optique GHASP est le complément par excellence du programme WHISP réalisé en radio. Les champs de vitesses de l'hydrogène neutre permettent l'étude de la distribution de matière à un rayon galactique dépassant largement les limites du disque optique. En revanche, la faiblesse de l'émission H_I dans le cœur de plusieurs galaxies est un obstacle majeur à l'obtention de leur courbe de rotation. Enfin, l'analyse des données combinées de ces programmes (et des futures observations CO, UV et FIR) permettront de poursuivre plusieurs études ajournées, du fait de la faiblesse des échantillons de données disponibles. Débuté en 1998 sur le télescope de 1.93 m de l'Observatoire de Haute-Provence, le consortium GHASP est déjà bien établi. De nombreuses missions d'observation à l'aide d'interféromètres de Fabry-Pérot à balayage sont effectuées sur plusieurs télescopes: 3.60 m ESO⁷ (Chili), 3.60m CFHT⁸ (Hawaii), 6m Zelentchuk (Russie), 1.6m de l'Observatoire du mont Mégantic et 2.60m Byurakan (Arménie). Près de 70 galaxies ont déjà été observées dans le cadre du projet GHASP.

1.3 Objectifs de l'étude

La présente étude a pour but de mesurer, par des observations Fabry-Pérot, la cinématique interne à haute résolution spatiale d'un échantillon de trois galaxies spirales appartenant au groupe Sculpteur et dont l'hydrogène neutre a déjà fait l'objet d'une étude cinématique. Elle fait suite à une série de travaux (Blais-Ouellette *et al.* 1999) qui ont montré que des données cinématiques bi-dimensionnelles H_{II} à haute résolution spatiale étaient indispensables pour bien évaluer les paramètres de la distribution de masse totale des galaxies spirales.

Situé à 10 millions d'années-lumière, le groupe Sculpteur constitue le groupe de galaxies brillantes le plus proche de nous, après le Groupe Local (dominé par la Voie lactée et Andromède M 31). De plus, le groupe Sculpteur se situe à proximité du pôle galactique sud qui bénéficie d'une absorption galactique faible. Il couvre une surface de 20 degrés de

⁷ ESO : acronyme de "European Southern Observatory", La Silla, Chili.

diamètre centrée dans la constellation australe peu apparente désignée par le même nom et introduite par Nicolas-Louis La Caille (1713-1762).

Les galaxies les plus brillantes présentes dans ce groupe sont NGC 55, NGC 247, NGC 253, NGC 300 et NGC 7793. Ces galaxies appartiennent au type morphologique Sc, ou plus tardif. Elles sont caractérisées par un noyau réduit ou qui ne contribue que faiblement à la luminosité totale. La modélisation du gaz et de la lumière y est donc facilitée, de même que leur étude systématique. Une étude détaillée de la cinématique $H\alpha$ des membres du groupe a été réalisée par Puche 1989 (Carignan & Puche 1988, Carignan & Puche 1990a, Carignan & Puche 1990b, Puche, Carignan & Bosma 1990, Puche, Carignan & Wainscoat 1991, Puche, Carignan & van Gorkom 1991, Puche & Carignan 1991). Nos mesures permettent de compléter ces données à 21 cm obtenues au VLA⁹ relativement à trois galaxies du groupe Sculpteur, soit NGC 247, NGC 300 et NGC 7793.

Les observations Fabry-Pérot obtenues ici, combinées aux précédentes données disponibles, permettent de préciser la distribution de masse des galaxies sélectionnées. En particulier, elles permettent une meilleure description de la partie ascendante des courbes de rotation, correspondant aux régions centrales des galaxies. Les courbes de rotation obtenues sont sensibles, pour mesurer le signal loin du disque stellaire, et d'une résolution suffisante, pour établir des mesures bien définies près du centre. Par une étude cinématique multi-longueurs d'onde et une modélisation précise des contributions des masses stellaire et gazeuse, nous établissons la distribution de masse au sein de ces galaxies.

* * * * *

Ce mémoire se divise en 4 parties. Le deuxième chapitre décrit l'instrumentation utilisée ainsi que les procédures d'acquisition et d'analyse des observations. Dans les troisième, quatrième et cinquième chapitres, nous présentons l'étude approfondie de la cinématique et de la distribution de masse des galaxies NGC 247, NGC 300 et NGC 7793 respectivement. Suivent la conclusion et les annexes contenant le détail des courbes de rotation des trois galaxies de l'échantillon.

⁸ CFHT : acronyme de "Canada-France-Hawaii Telescope", Mauna Kea, Hawaii

⁹ VLA : acronyme de "Very Large Array". Radiotélescope formé de 27 antennes paraboliques, construit par le National Radio Astronomy Observatory et situé au Nouveau-Mexique (États-Unis)

1.4 Références

- Amram, P. Le Coarer, E. Marcelin, M. Balkowski, C. Sullivan, W. T. & Cayatte, V. (1992). H-alpha velocity fields and rotation curves of galaxies in clusters. Astronomy and Astrophysics Supplement, vol. 94, no.1, p. 175-209.
- Amram, P. Marcelin, M. Balkowski, C. Cayatte, V. Sullivan, W. T. & Le Coarer, E. (1994). H α velocity fields and rotation curves of galaxies in clusters. Astronomy and Astrophysics Supplement, vol. 103, p. 5-32.
- Amram, P. Boulesteix, J. Marcelin, M. Balkowski, C. Cayatte, V. & Sullivan, W. T. (1995). H α velocity fields and rotation curves of galaxies in clusters. III. Nine galaxies in DC 1842-63. Astronomy and Astrophysics Supplement, vol. 113, p. 35-49.
- Amram, P. Balkowski, C. Boulesteix, J. Cayatte, V. Marcelin, M. & Sullivan, W. T. (1996). The rotation curve of the cluster galaxy DC 1842-62 no. 24 does not decrease. Astronomy and Astrophysics, vol. 310, p. 737-750.
- Ashman, K. M. (1992). Dark matter in galaxies. Astronomical Society of the Pacific, vol. 104, no. 682, p. 1109-1138.
- Bahcall, J. N. Schmidt, M. & Soneira, R. M. (1982). On the interpretation of rotation curves measured at large galactocentric distances. Astrophysical Journal, vol. 258, p. L23-L27.
- Bahcall, J. N. & Casertano, S. (1985). Some possible regularities in the missing mass problem. Astrophysical Journal, vol. 293, p. L7-L10.
- Blais-Ouellette, S. Carignan, C. Amram, P. & Côté, S. (1999). Accurate Parameters of the Mass Distribution in Spiral Galaxies. I. Fabry-Perot Observations of NGC 5585. Astronomical Journal, vol. 118, issue 5, p. 2123-2131.
- Blais-Ouellette, S. Amram, P. & Carignan, C. (2001). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halo. Astronomical Journal, vol. 121, issue 4, p. 1952-1964.
- Bosma, A. (1978). The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types. Ph.D. thesis. Rijksuniversiteit Groningen, The Netherlands.
- Broeils, A. H. & Courteau, s. (1997). Modelling the Mass Distribution in Spiral Galaxies. IN : Persic M. & Salucci P. ed. ASP Conference Series 117 : Dark and visible matter in galaxies and Cosmological Implications, 2-5 July 1996, Italy, p. 74.
- Burstein, D. & Rubin, V. C. (1985). The distribution of mass in spiral galaxies. Astronomical Journal, vol. 297, p. 423-435.
- Carignan, C. & Freeman, K. C. (1985). Basic parameters of dark halos in late-type spirals. Astrophysical Journal, vol. 294, p. 494-501.
- Carignan C. & Freeman, K. C. (1988). DDO 154- A “dark” galaxy? Astrophysical Journal, vol. 332, p. L33-L36.
- Carignan, C. & Puche, D. (1988). HI studies of the Sculptor group galaxies. I - Membership and M/L of the group. Astronomical Journal, vol. 95, p. 1025-1030.
- Carignan, C. Sancisi, R. & van Albada, T. S. (1988). H I and mass distribution in the dwarf “regular” galaxy UGC 2259. Astronomical Journal, vol. 95, p. 37-44.

- Carignan, C. & Puche, D. (1990a). HI studies of the Sculptor group galaxies. II - NGC 7793. Astronomical Journal, vol. 100, p. 394-402.
- Carignan, C. & Puche, D. (1990b). HI studies of the Sculptor group galaxies. IV - NGC 247. Astronomical Journal, vol. 100, p. 641-647.
- Côté, S. Carignan, C. & Sancisi, R. (1991). A dark-halo-dominated galaxy - NGC 5585. Astronomical Journal, vol. 102, p. 904-913.
- Freeman, K. C. (1970). On the disks of spiral and so galaxies. Astrophysical Journal, vol. 160, p. 811-830.
- Freeman, K. C. (1975). Comparison with observations of disk galaxies. IN: Hayli, A. ed. Proceeding of the 69th IAU Symposium: Dynamics of stellar systems, September 9-13, 1974, France, p. 367.
- Jobin, M. & Carignan, C. (1990). The dark side of NGC 3109. Astronomical Journal, vol.100, p. 648-662.
- Kent, S. M. (1996). A survey of surveys. IN: Blitz, L. & Teuben, p. ed. Proceedings of the 169th IAU Symposium, August 23-29, 1994, The Netherlands, p. 47.
- Martimbeau, N. Carignan, C. & Roy, J.R. (1994). Dark matter distribution and the HI - Halpha connection in IC 2574. Astronomical Journal, vol. 107, no.2, p. 543-554.
- Ostriker, J. P. Peebles, p. J. E. & Yahil, A. (1974). The size and mass of galaxies, and the mass of the universe. Astrophysical Journal, vol. 193, p. L1-L4.
- Puche, D. (1989). Étude de la dynamique et de la cinématique des galaxies du groupe Sculpteur. Ph.D. thesis, Université de Montréal, Canada.
- Puche, D. Carignan, C. & Bosma, A. (1990). H I studies of the Sculptor group galaxies. VI - NGC 300. Astronomical Journal, vol. 100, p. 1468-1476, 1719, 1720.
- Puche, D. & Carignan, C. (1991). HI studies of the Sculptor group galaxies. VII - Implications on the distribution and nature of dark matter in groups. Astrophysical Journal, Part 1, vol. 378, p. 487-495.
- Puche, D. Carignan, C. & van Gorkom, J. H. (1991). HI studies of the Sculptor group galaxies. V - NGC 253. Astronomical Journal, vol. 101, p. 456-464, 748-750.
- Puche, D. Carignan, C. & Wainscoat, R. J. (1991). HI studies of the Sculptor group galaxies. III - NGC 55. Astronomical Journal, vol. 101, p. 447-455, 746, 747.
- Roberts, M. S. & Whitehurst, R. N. (1975). The rotation curve and geometry of M 31 at large galactocentric distances. Astrophysical Journal, vol. 201, p. 327-346.
- Rubin, V. C. & Ford, W. K., Jr. (1970). A Comparison of Dynamical Models of the Andromeda Nebula and the Galaxy. IN : Becker W. & Kontopoulos G. I. ed. Proceedings from 38th IAU Symposium : The Spiral Structure of our Galaxy, p. 61.
- Rubin, V. C. Thonnard, N. & Ford, W. K., Jr. (1978). Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV - Systematic dynamical properties, SA through SC. Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 225, p. L107-L111.
- Rubin, V. C. Thonnard, N. T. & Ford, W. K., Jr. (1982). NGC 3067 - Additional evidence for nonluminous matter. Astronomical Journal, vol 87, p. 477-485.

- Rubin, V. C. Ford, W. K., Jr. & Whitmore, B. C. (1988). Rotation curves for spiral galaxies in clusters. I - Data, global properties, and a comparison with field galaxies. Astrophysical Journal, vol. 333, p. 522-541.
- Swaters, R. (1999). Dark Matter in Late-Type Dwarf Galaxies. Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit Groningen.
- van Albada, T. S. & Sancisi, R. (1986). Dark matter in spiral galaxies. Royal Society of London Philosophical Transactions Series, vol. 320, p. 447-464.
- van den Bergh, S. (1999). The Early History of Dark Matter. The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 111, issue 760, p. 657-660.
- Vogt, N. P. (1995). The effects of environment on mass and light in galaxies. A study of nine nearby clusters, Ann Arbor: University Microfilms.
- Whitmore, B. C. (1989). The Effect of the Cluster Environment on Galaxies. Clusters of galaxies meeting, Baltimore, p. 139.
- Whitmore, B. C. & Gilmore, D. M. (1991). On the interpretation of the morphology-density relation for galaxies in clusters. Astrophysical Journal, vol. 367, p. 64-68.
- Zwicky, F. (1937). On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. Astrophysical Journal, vol. 86, p. 217-246.

CHAPITRE 2: OBSERVATIONS ET RÉDUCTION DES DONNÉES

Ces dernières années, des progrès considérables ont été faits en ce qui a trait à la cinématique des galaxies grâce à l'interférométrie de Fabry-Pérot. Les champs de vitesses ainsi obtenus à hautes résolutions spatiale et spectrale sont indispensables pour obtenir des courbes de rotation corrigées de tout biais (barres, spirales, gauchissement, etc.) sur de grands échantillons, et pour ainsi mieux caractériser la matière sombre des galaxies (Burstein & Rubin 1985, Kent 1996, Broeils & Courteau 1997).

2.1 Hydrogène interstellaire ionisé

Pour sonder le potentiel gravitationnel dans le disque stellaire, nous utilisons les raies d'émission de basse ionisation observées dans les régions H_{II} et parfois entre les bras des spirales. Ces régions H_{II} sont composées d'hydrogène ionisé. Ce sont des nuages dits chauds, où l'on retrouve une ou plusieurs étoiles dont la température de surface est suffisamment élevée (10^4 K) pour arracher l'électron des atomes d'hydrogène par l'effet de fluorescence. L'hydrogène interstellaire ionisé est principalement détecté autour des étoiles de type O et B. Le spectre de photons émis par l'atome d'hydrogène excité correspond aux séries de raies de Lyman (ultraviolet), Balmer (visible), Paschen (infrarouge), etc., selon l'orbite sur laquelle l'électron retombe.

La raie favorisée ici est la raie $H\alpha$ (λ 6562.8) produite lors de la transition spontanée de l'électron tombant de l'orbitale externe $n=3$ vers le premier niveau excité $n=2$. Pour la plupart des galaxies, cette raie est intrinsèquement fine dans les régions H_{II} et permet, en principe, des mesures de vitesse à $1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ près. Développée à l'observatoire de Haute Provence¹⁰, cette méthode repose sur l'usage d'un interféromètre qui permet d'obtenir un champ de vitesses à deux dimensions sans devoir recouper plusieurs mesures (Wozniak & Pfenniger 1997). Les principes généraux de l'instrument sont exposés à la section suivante; pour approfondir, le lecteur est invité à consulter les ouvrages de Vaughan (1989), Hernandez (1986), Reynolds, Develis & Thompson (1989), Amram (1991) et Blais-Ouellette (2000).

¹⁰ Courtes, G. (1960). Méthode d'observation et étude de l'hydrogène interstellaire en émission.

2.2 Interféromètre de Fabry-Pérot

L'interféromètre de Fabry-Pérot permet l'analyse des distributions spectrales des sources lumineuses et, par conséquent, l'étude de champs de vitesses d'un corps céleste (effet Doppler). Le système, fonctionnant en transmission, est constitué de deux lames de verre parallèles dont les surfaces internes sont recouvertes d'une couche de métal évaporé qui réfléchit une partie importante de la lumière. Les franges d'interférence obtenues ont la forme d'anneaux concentriques brillants et très fins. Ainsi, la mesure précise de longueur d'onde et l'étude de la structure fine des spectres sont possibles.

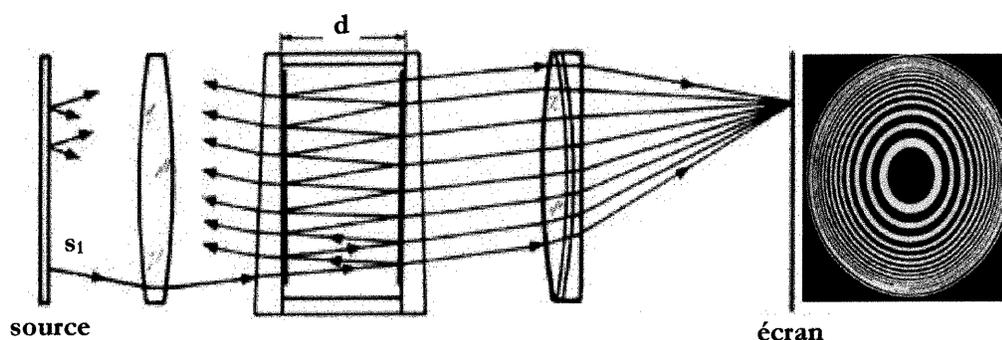


Figure 2-1 Principe schématisé de l'interféromètre de Fabry-Pérot

Le Fabry-Pérot est installé dans le réducteur focal sur l'image de la pupille du télescope, entre l'objectif collimateur et l'objectif de focalisation (le principe de cet interféromètre est schématisé ci-dessus.) Un rayon incident pénètre par une des faces et est réfléchi plusieurs fois entre les lames. À chaque réflexion, une fraction de lumière se trouve transmise. Une interférence à ondes multiples se produit entre tous ces rayons transmis. L'interférence est constructive lorsque le chemin optique parcouru entre les lames est un multiple entier de sa longueur d'onde.

L'intensité transmise par le système est proportionnelle à la fonction d'Airy¹¹, où la phase en abscisse est déterminée par le chemin effectué par la lumière (voir Figure 2-2, p. 13). La finesse de la fonction est inversement proportionnelle au coefficient de réflexion énergétique des lames. Nous appellerons "intervalle spectral libre", ou "interfrange",

Publication de l'Observatoire de Haute-Provence, no 5.

¹¹ Les fonctions d'Airy interviennent dans de nombreux domaines de la physique comme solutions d'équations différentielles ou comme outil de calcul asymptotique.

l'intervalle en longueurs d'onde compris entre deux pics de la fonction d'Airy. Il s'agit de l'intervalle à l'intérieur duquel il n'y a pas de recouvrement en longueurs d'onde.

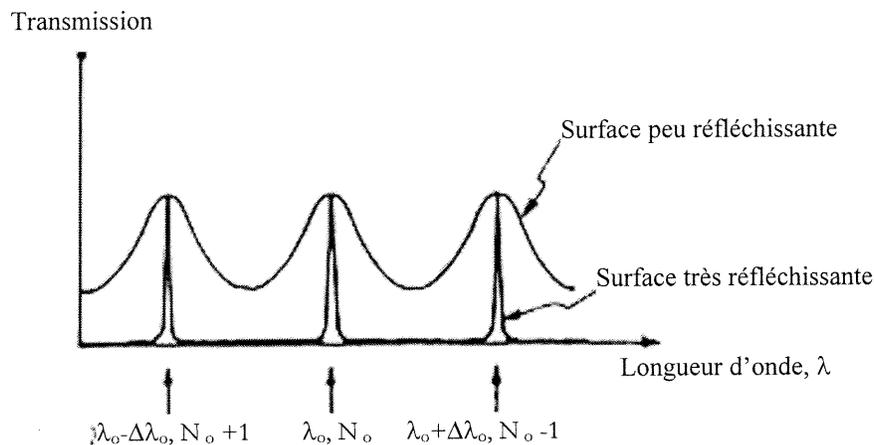


Figure 2-2 Fonction d'Airy. Les courbes correspondent à différentes valeurs de coefficients de réflexion énergétique (Amram 1991).

Un espacement donné entre les lames ne laisse passer qu'une longueur d'onde, en fonction uniquement de l'angle de la source ponctuelle monochromatique. Ainsi, une source non uniforme n'éclairera qu'une partie du champ. Or, l'objectif étant d'étudier l'information contenue dans le rayonnement émis par le gaz ionisé des galaxies, nous devons obtenir un spectre de ce rayonnement en chaque point du champ. Il s'agit donc d'ajouter aux deux dimensions spatiales d'un objet sur le plan du ciel une dimension spectrale, c'est-à-dire fabriquer des cubes de données (voir Figure 2-3, p. 14). En faisant varier l'épaisseur de la couche d'air entre les lames, il est possible de reconstituer la totalité de l'information spectrale de l'objet observé. Cette innovation considérable introduite dans les années 80, soit le Fabry-Pérot dit "à balayage", permet dorénavant la mesure des flux alors qu'autrefois, avec le Fabry-Pérot traditionnel, seules des positions de frange étaient mesurables.

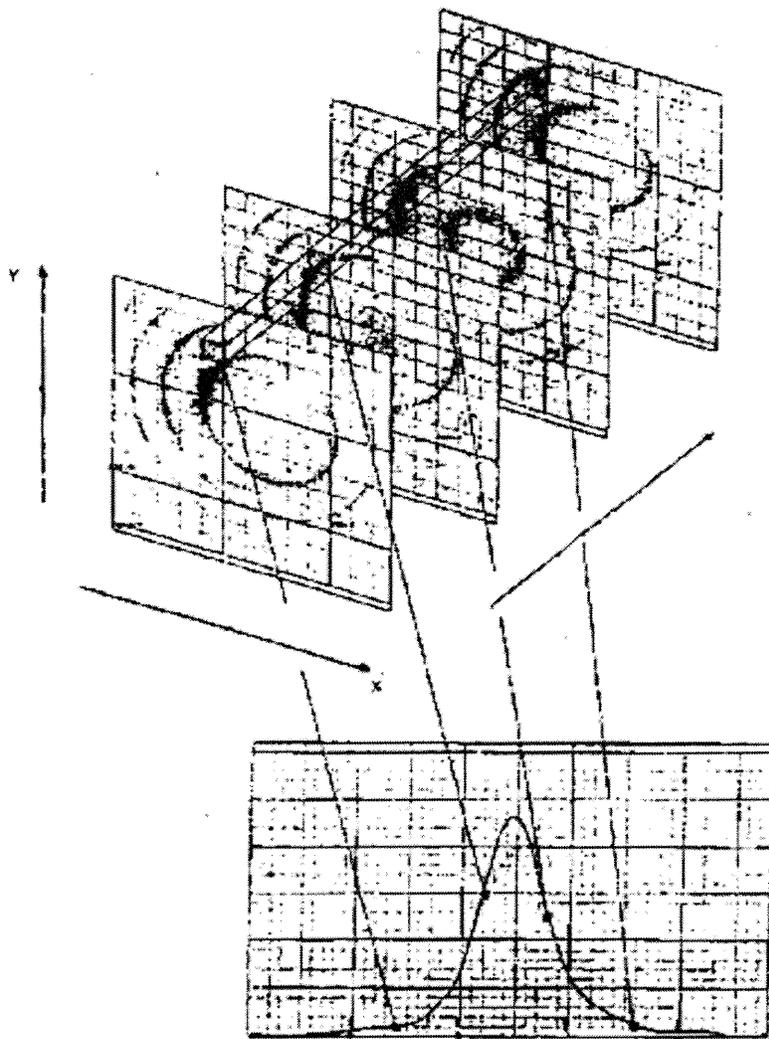


Figure 2-3 Illustration d'un profil créé en un pixel par la juxtaposition des canaux balayant un intervalle spectral libre (Amram 1991).

Ainsi, l'interféromètre de Fabry-Pérot à balayage nous permet d'obtenir, en chacun des pixels, un spectre de la lumière émise en un point de la source. Cependant, comme la source ponctuelle n'est pas monochromatique, c'est plutôt la superposition des spectres de tous les ordres d'interférence qui apparaît sur le récepteur. Nous plaçons donc un filtre interférentiel étroit dans le réducteur focal, avant le Fabry-Pérot, pour isoler un intervalle spectral libre et lever l'ambiguïté sur l'ordre d'interférence. Dès lors, au lieu d'observer une série d'anneaux, nous observons uniquement la tache centrale qui couvre la totalité du champ. L'utilisation d'un tel filtre permet de séparer la raie d'émission de l'émission continue des raies parasites du ciel nocturne et des autres raies d'émission du gaz. De cette façon, le Fabry-Pérot est soumis au rayonnement le plus monochromatique possible (voir Figure 2-4, p. 15).

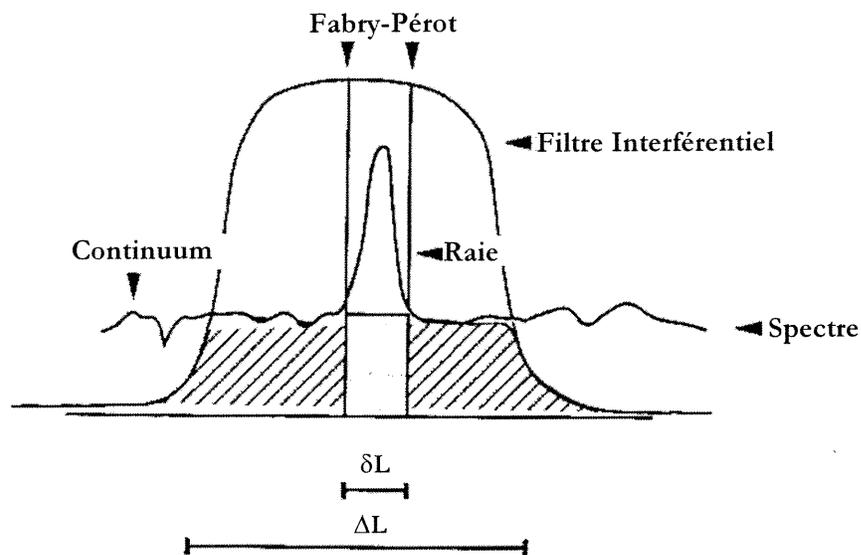


Figure 2-4 Schéma de la bande passante du filtre interférentiel et de l'étalon de Fabry-Pérot (Amram 1991).

De par sa grande sensibilité aux faibles intensités, cet interféromètre est parfaitement adapté à l'étude des objets faibles et étendus ainsi qu'aux raies d'émission isolées. Rappelons que ces études requièrent une instrumentation bidimensionnelle à grand champ, à fort pouvoir de détection monochromatique et à résolutions spatiale et spectrale adéquates. Pour mieux apprécier les travaux de Charles Fabry et d'Alfred Pérot, le lecteur est invité à consulter

l'ouvrage de Georgelin & Amram (1995) qui fait revivre les développements historiques de l'interféromètre qui porte désormais leurs noms.

2.3 Acquisition des données

La spectroscopie Fabry-Pérot de l'émission H α des trois galaxies sélectionnées dans le cadre de cette étude a été réalisée avec l'instrument Cigale¹², sur le télescope de 3.60m de l'ESO à La Silla, au Chili, lors de deux missions. Les articles de Boulesteix *et al.* (1984) et Amram *et al.* (1991) donnent une description complète du système utilisé. Nous en résumons ici rapidement les caractéristiques essentielles.

Pour les observations du 2 septembre 1999 (**21 septembre 2000**)¹³, l'instrument comprend l'étalon Fabry-Pérot à balayage ET50-832 (**ET50-826**) d'ordre d'interférence de 765 @ H α (**791 @ Néon**) fixé sur le réducteur focal Cigale. Celui-ci est placé au foyer Cassegrain du télescope et ramène le rapport focal nominal du foyer Cassegrain de f/8 à f/3. La finesse moyenne, à H α , est de 23.0 (**9.8**).

Le récepteur utilisé est une caméra à comptage de photons IPCS¹⁴ de 256 x 256 pixels (**1024 x 1024 biné 512 x 512 pixels**). La taille du pixel projetée sur le ciel est de 0.91 arcsec/pixel (**0.405 arcsec/pixel**), d'où un champ de vision résultant de 3.9 x 3.9 arcmin (**3.5 x 3.5 arcmin**). Contrairement à une caméra CCD, un tel détecteur rend possible un balayage rapide de l'interféromètre grâce à une résolution temporelle de 1/50 de seconde et à l'absence de bruit numérique. Cette particularité de la caméra à comptage de photons permet d'éliminer les problèmes dus aux variations de transparence du ciel et aux masses d'air lors d'expositions de longue durée. Ainsi, les corrections photométriques ne sont plus nécessaires. L'intervalle spectral libre résultant est de 8.58 Å - 392 km·s⁻¹ (**8.26 Å - 377 km·s⁻¹**) pour une résolution spectrale de 0.13 Å - 6.1 km·s⁻¹ (**0.26 Å - 11.8 km·s⁻¹**) par canal.

¹² Cigale : acronyme de "CInématique des GALaxiEs". Instrumentation adaptée pour l'étude des champs de vitesses.

¹³ Les valeurs entre parenthèses correspondent aux paramètres d'observations associés à la nuit du 21 septembre 2000.

¹⁴ IPCS : acronyme de "Image Photons Counting System", que l'on nomme en français "caméra à comptage de photons".

De façon à isoler la raie d'émission Balmer α de l'hydrogène ionisé des raies parasites du ciel nocturne et des autres raies d'émission du gaz, un filtre interférentiel, centré à 6570.3 Å (6567.7 Å) et possédant une bande passante FWHM de 13.7 Å (12 Å), est placé en amont de l'étalon.

Chacune des galaxies a été balayée 4 fois (7 fois) par 64 canaux¹⁵ (32 canaux) avec des temps de pose de 10 s (15 s) pour un temps total d'intégration de 43 min (56 min) par champ. De 1 à 4 champs sont nécessaires pour couvrir les galaxies observées. Des cubes identiques d'étalonnage ont été obtenus avant et après les observations de chacune des galaxies en balayant une étroite raie de néon ($\lambda=6598\text{Å}$, $t=10\text{s}$ par canal). Ces cubes permettent de déterminer pour chaque point du champ l'origine en longueur d'onde.

2.4 Champ de vitesses, images monochromatique et continuum

La base de l'analyse des données s'effectue à l'aide de l'ensemble de programmes ADHOC¹⁶, disponible en ligne¹⁷. Développé depuis plus de 15 ans à l'Observatoire de Marseille, le logiciel de pilotage, d'acquisition et de réduction ADHOC (Boulesteix 1993) constitue un système de traitement d'interférogrammes complet en soit. Il permet la réduction rapide d'un nombre important de données et assure, par le fait même, le bon déroulement des programmes scientifiques (voir Amram *et al.* 1995, 1996 et Russeil *et al.* 1995 pour les références incluses dans ces papiers). La méthode de réduction des données pour construire le champ de vitesses et les images monochromatique et continuum est décrite de façon très détaillée dans Amram (1991). Nous effectuons ici un bref rappel des diverses étapes à parcourir.

Dans un premier temps, des cubes de données sont constitués par combinaison d'images de canaux individuels. Puis, les cubes d'observation sont réduits à un cube de longueur d'onde calibré (x, y, z). La relation de passage entre les interférogrammes et les cartes en longueur d'onde est établie par la carte de phase. Cette correction décale un à un les spectres pour tenir compte de l'épaisseur réelle des couches multidiélectriques recouvrant les surfaces internes du Fabry-Pérot. Dans un second temps, le profil détaillé de la raie observée à

¹⁵ Chaque pas de balayage correspond à un espacement donné des lames de l'interféromètre.

¹⁶ ADHOC : acronyme de "Analyse et Dépouillement Homogène des Observations Cigale".

l'intérieur de l'intervalle spectral de l'interféromètre est analysé pixel par pixel. Finalement, les composantes dues au ciel nocturne et au continuum sont calculées, et les images de vitesse sont extraites.

Techniquement, les principales étapes du processus de réduction se résument en quelques points :

- combinaison et tri des images originales enregistrées individuellement par le détecteur de photons à raison de 10-15 secondes/canal;
- calcul des cartes de phases à partir des anneaux d'étalonnage;
- conversion des patrons d'interférence observés en cartes de longueurs d'onde à l'aide de cartes de phase;
- élimination du ciel nocturne parasite, en particulier des raies d'émission OH;
- détermination des flux continuum et monochromatique;
- calcul des champs de vitesse.

Lorsque le diamètre de la galaxie n'est pas couvert par le champ total du récepteur, les champs sont combinés en une mosaïque. La carte de vitesses est obtenue à partir des cartes en longueurs d'onde lissées, corrigées du recouvrement des intervalles spectraux libres et dont le continuum a été soustrait. Elle correspond à de vraies coupes en vitesse (au sens où les radioastronomes l'entendent).

2.5 Courbes de rotation

Les courbes de rotation donnent une représentation fiable de la cinétique des disques galactiques et constituent un outil indispensable dans l'étude de leur potentiel gravitationnel. Elle se dérivent à partir des champs de vitesses radiales à l'aide d'un programme de modélisation par anneaux inclinés inspiré des programmes ROTCUR et VELFI écrits par Begeman (1987). Le nouveau programme ROCUR décrit un processus itératif et incrémental. Il offre l'avantage de représenter le gauchissement des disques galactiques par une série de couronnes concentriques orientables de façon indépendante. Ce logiciel a été

¹⁷ <http://www-obs.cnrs-mrs.fr/adhoc/adhoc.html>.

installé dans le système d'analyse d'image radio AIPS¹⁸ originalement développé en 1978 pour traiter les cartes de l'interféromètre radio VLA (Côté, Carignan & Sancisi 1991).

Rappelons que la courbe de rotation d'une galaxie représente sa vitesse de rotation tangentielle en fonction de la distance au centre cinématique. La vitesse de rotation en un point est reliée à la vitesse radiale caractérisée par l'intermédiaire de cinq paramètres : la vitesse systémique V_{sys} , c'est-à-dire la vitesse de mouvement d'ensemble de la galaxie, la position du grand axe cinématique PA dans le ciel, l'inclinaison i du disque galactique et les deux coordonnées x_c et y_c du centre de rotation. En faisant varier les paramètres cinématiques du profil de rotation, le programme ROCUR minimise la dispersion des vitesses du gaz à l'intérieur d'anneaux de centre et d'inclinaison arbitraires par rapport au plan de la galaxie. La technique utilisée est décrite dans van Albada *et al.* (1985) et Carignan, Sancisi & van Albada (1988).

La méthode itérative pour trouver le meilleur ajustement des paramètres, qui est explicitée ici, est tirée en partie de la thèse de Begeman (1987) et de celle de Puche (1989). Tout d'abord, nous devons ajuster le nombre et la largeur des anneaux afin de maximiser la résolution et minimiser les incertitudes. Pour ce faire, une première recherche avec ROCUR est effectuée en laissant l'ensemble des paramètres libres. Nous estimons ensuite une valeur initiale des paramètres à partir des données photométriques. Puis nous trouvons une solution pour le centre dynamique (x_c et y_c) et la vitesse systémique V_{sys} , en gardant fixes les angles de position PA et d'inclinaison i du plan galactique. De façon générale, les erreurs dues à la déprojection sont minimisées en excluant les données autour de l'axe mineur. Un poids statistique variant de $\cos(\theta)$ ou $\cos^2(\theta)$ est introduit pour le reste des données avec un poids maximum sur l'axe principal de la galaxie.

Par la suite, nous fixons le couple (x_c, y_c) et V_{sys} pour déterminer plus précisément les angles de position et d'inclinaison, et en particulier les vitesses de rotation circulaire. Finalement, nous répétons la dernière étape sur chaque intervalle de rayon observé et sur chacun des côtés pris séparément. La différence pondérée entre les vitesses de rotation obtenues sur chacun des côtés constitue une mesure de l'erreur sur les points. Pour vérifier la fiabilité de la courbe de rotation dérivée, nous inspectons le champ de vitesses résiduelles. Ces vitesses

¹⁸ AIPS : acronyme de "Astronomical Image Processing System" (voir <http://www.cv.nrao.edu/aips/>)

représentent la différence entre les vitesses observées et les vitesses calculées à partir des résultats des paramètres obtenus par le programme. Les schémas de Warner, Wright & Baldwin (1973) et ceux de Sancisi & Allen (1979) facilitent grandement l'interprétation des résultats.

2.6 Modélisation de la distribution de masse

La quantité de matière sombre présente dans la région observée se donne habituellement à travers son rapport masse/luminosité (noté M/L en masses et luminosités solaires). Ce rapport dépend entre autres de la valeur de la distance employée et de la bande utilisée pour mesurer la luminosité. Pour caractériser les paramètres du halo et déterminer le rapport $(M/L)_{\text{global}}$ de la galaxie, nous devons modéliser sa distribution de masse (lumineuse et sombre). La méthode employée est une généralisation de celle prescrite par Carignan & Freeman (1985) et van Albada *et al.* (1985).

D'une part, le profil de luminosité est transformé en une distribution de masse pour le disque stellaire, en supposant un rapport $(M/L)_*$ radialement constant (Casertano 1983, Carignan 1985). En général, les luminosités sont mesurées optiquement dans la bande bleue. En revanche, plusieurs auteurs préconisent une bande plus rouge pour tenir compte de la vieille population d'étoiles qui est, généralement, plus représentative de la masse.

D'autre part, pour modéliser la composante gazeuse du disque, nous utilisons la distribution radiale H_I de la densité de surface ajoutée au disque lumineux en la multipliant par un facteur $4/3$ pour tenir compte de la fraction d'hélium présente. Rappelons qu'une modélisation du bulbe n'est pas incluse, puisque les trois galaxies observées sont de type tardif dans la classification de Hubble. Ces galaxies se caractérisent par un bulbe réduit, voire négligeable. Cette modélisation aurait de toute façon augmenté le nombre total de paramètres libres, au détriment de la précision sur les paramètres du halo (Lake & Feinswog 1989).

Pour compléter la modélisation de la distribution de masse au sein de la galaxie, nous devons supposer une distribution de masse non-lumineuse. Plusieurs observations portent à croire que la matière sombre est distribuée de façon plus ou moins sphérique (Ostriker & Peebles 1973). Le profil de densité le plus simple pour le halo massif correspond donc à

celui d'un équilibre hydrostatique isotherme où la vitesse quadratique moyenne en tout point du halo suit la distribution maxwellienne d'un gaz parfait. Or, ce modèle diverge à proximité du centre. Par conséquent, des formes approchées, avec un rayon caractéristique de quelques kpc et une densité centrale ρ_o constante, sont adoptées.

Les profils de densité étudiés dans le cadre de cette étude sont déterminés en suivant les indications de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001). Ils sont régis par:

$$\rho(r) = \frac{\rho_o}{\left(c + (r/r_o)^\gamma\right) \left(1 + (r/r_o)^\alpha\right)^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

où les c , α , β et γ sont les paramètres de formes. Pour ces profils, γ et β déterminent respectivement les pentes interne et externe de la courbe, alors que α contrôle l'angle du point de retournement de la courbe. Le tableau ci-dessous introduit les paramètres des quatre modèles évalués dans le cadre de cette étude.

Tableau 2-1 Paramètres des profils de densité

		c	α	β	γ
<i>Pseudo isothermal sphere</i> (Begeman 1987)	ISO	1	$\alpha \neq 0$	2	2
<i>Flat density core</i> (Burkert 1995)	Burkert	1	2	3	1
<i>Flat density core</i> (Kravtsov <i>et al.</i> 1998)	KKBD	0	2	3	0.2
<i>NFW type halo</i> (Navarro, Frank & White 1996)	NFW	0	1	3	1

Les trois premiers profils de halo présentés dans ce tableau reproduisent des formes fonctionnelles de la sphère isotherme, donnant des propriétés asymptotiques semblables, c'est-à-dire une vitesse de rotation constante à grand rayon (Kent 1987, Lake & Feinswog 1989, Blais-Ouellette *et al.* 1999). Le dernier profil de densité, présentant des pentes plus fortes au centre, découle de simulations à très haute résolution de l'évolution cosmologique de la masse sombre froide. Un candidat est dit "froid" (CDM pour *Cold dark matter*) s'il avait une vitesse non-relativiste à l'époque où les galaxies commençaient tout

juste à se former. Leur faible vitesse aurait ainsi permis la condensation des protogalaxies. Ce modèle, dans lequel les fluctuations primordiales sont adiabatiques et gaussiennes, fut d'abord introduit au début des années quatre-vingt par Peebles (1982), puis modifié par, notamment, Navarro, Frank & White (1996). L'allure des quatre profils de densité est présentée à la figure ci-dessous.

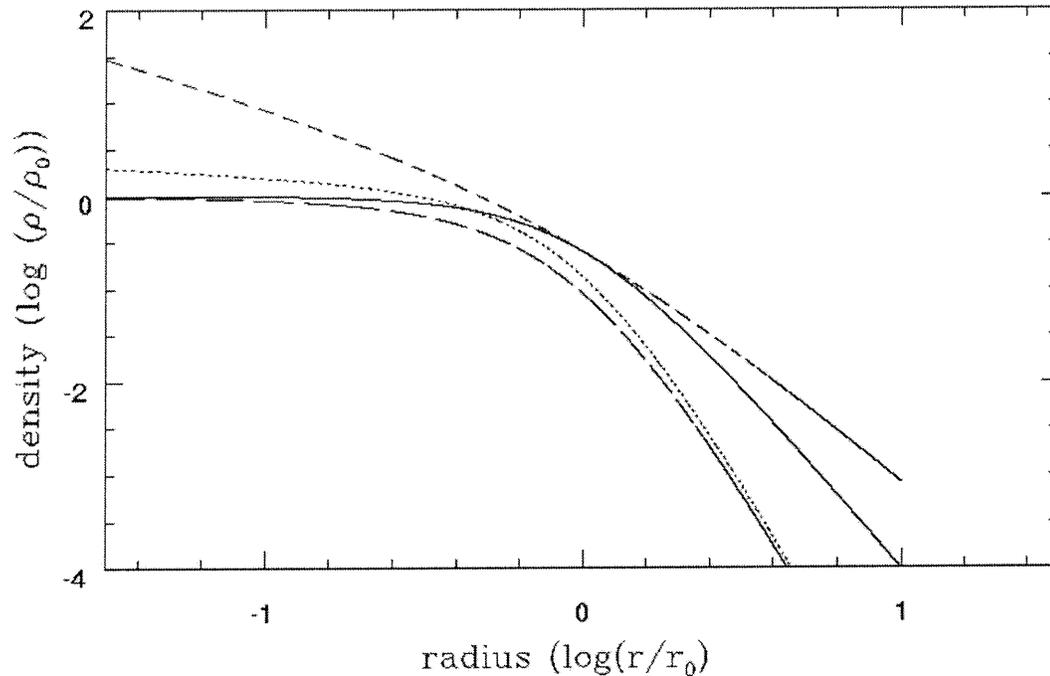


Figure 2-5 Profils de densité des quatre modèles. Courbe continue : sphère pseudo-isotherme, courbe pointillée: KKBP, long tiretés: Burkert, courts tiretés : NFW

Tous les modèles étudiés utilisent la loi de gravitation de Newton standard. Une alternative à l'existence de matière sombre est une modification de la loi de la gravitation sur des distances à l'échelle des galaxies. Or, non seulement ces modèles ont du mal à expliquer le big bang, mais les constantes universelles qui en découlent varient largement d'une galaxie à l'autre (Blais-Ouellette, Amram & Carignan 2001).

Enfin, la somme des contributions des vitesses de rotation dues au disque stellaire, au gaz (H_2 et He) et au halo est ajustée à la courbe de rotation observée, par un processus itératif qui minimise la somme des carrés des résidus en explorant l'espace des paramètres du profil. La différence en quadrature entre les vitesses observées et les vitesses calculées pour

le disque nous donne la contribution en vitesses du halo de matière non-lumineuse. Les paramètres d'un modèle (e.g. *Best-Fit Model*, Carignan 1985) sont le rapport de la masse du disque optique sur sa luminosité $(M/L_B)_*$ et, pour le halo sombre, le rayon caractéristique r_c et la densité volumique centrale ρ_0 . Notons que le rayon de cœur associé à la sphère isotherme ne correspond pas aux rayons caractéristiques paramétrisant les autres modèles et que, par conséquent, une comparaison directe ne peut être établie. Le programme utilisé est développé par Carignan depuis 1982 et a été légèrement modifié par Puche en 1989. Blais-Ouellette a étendu la méthode en 1999 pour inclure de nouveaux modèles de halo.

Les chapitres qui suivent présentent les résultats de l'étude approfondie de la cinématique et de la paramétrisation des modèles de distribution de masse des galaxies NGC 247, NGC 300 et NGC 7793. Plus particulièrement, nous y discutons l'impact des corrections de la partie montante des courbes de rotation sur les mesures des distributions de masse et les changements dans l'importance relative des composantes sombre et lumineuse de chacune des galaxies de l'échantillon. Nous y présentons également les similitudes et les divergences entre le modèle de halo utilisant une sphère isotherme complète et ceux basés sur des formes fonctionnelles.

2.7 Références

- Amram P. Boulesteix J. Georgelin Y.P. Georgelin Y.M. Laval, A. le Coarer E. Marcelin M. & Rosado, M. (1991). Depe H-alpha survey of gaseous emission regions in the Milky Way and the Magellanic Clouds. ESO Messenger, no. 64, p. 45-50.
- Amram, P. (1991). Étude cinématique du gaz ionisé dans les galaxies spirales. Ph.D. thesis, Université de Provence, France.
- Amram, P. Boulesteix, J. Marcelin, M. Balkowski, C. Cayatte, V. & Sullivan, W. T. (1995). H α velocity fields and rotation curves of galaxies in clusters. III. Nine galaxies in DC 1842-63. Astronomy and Astrophysics Supplement, vol. 113, p. 35-49.
- Amram, P. Balkowski, C. Boulesteix, J. Cayatte, V. Marcelin, M. & Sullivan, W. T. (1996). The rotation curve of the cluster galaxy DC 1842-62 no. 24 does not decrease. Astronomy and Astrophysics, vol. 310, p. 737-750.
- Begeman, K. (1987). HI rotation curves of spiral galaxies. Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit te Groningen, The Netherlands.
- Blais-Ouellette, S. (2000). Distribution de la matière sombre dans les galaxies spirales. Ph.D. thesis, Université de Montréal, Canada.
- Blais-Ouellette, S. Carignan, C. Amram, P. & Côté, S. (1999). Accurate Parameters of the Mass Distribution in Spiral Galaxies. I. Fabry-Perot Observations of NGC 5585. Astronomical Journal, vol. 118, issue 5, p. 2123-2131.
- Blais-Ouellette, S. Amram, P. & Carignan, C. (2001). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halo. Astronomical Journal, vol. 121, Issue 4, p. 1952-1964.
- Boulesteix, J. Georgelin, Y. Marcelin, M. & Monnet, G. (1984). First results from Cigale scanning Perot-Fabry interferometer. IN : Proceedings of the Fifth Meeting, September 7-9, 1983, England, vol. 445, p. 37-41.
- Boulesteix J. (1993). ADHOC reference manual. Publications de l'Observatoire de Marseille.
- Broeils, A. H. & Courteau, s. (1997). Modelling the Mass Distribution in Spiral Galaxies. IN : Persic M. & Salucci P. ed. ASP Conference Series 117 : Dark and visible matter in galaxies and Cosmological Implications, July 2-5, 1996, Italy, p. 74.
- Burkert, A. (1995). The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies. Astrophysical Journal Letters, vol.447, p. L25-L28.
- Burstein, D. & Rubin, V. C. (1985). The distribution of mass in spiral galaxies. Astronomical Journal, vol. 297, p. 423-435.
- Carignan, C. & Freeman, K. C. (1985). Basic parameters of dark halos in late-type spirals. Astrophysical Journal, vol. 294, p. 494-501.
- Carignan, C. (1985). Surface photometry of the sculptor group galaxies - NGC 7793, NGC 247, and NGC 300. Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 58, p. 107-124.
- Carignan, C. Sancisi, R. van Albada, T. S. (1988). H I and mass distribution in the dwarf "regular" galaxy UGC 2259. Astronomical Journal, vol. 95, p. 37-44.
- Casertano, S. (1983). Rotation curve of the edge-on spiral galaxy NGC 5907: disc and halo masses. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 203, p. 735-747.

- Côté, S. Carignan, C. & Sancisi, R. (1991). A dark-halo-dominated galaxy – NGC 5585. Astronomical Journal, vol. 102, p. 904-913.
- Courtes, G. (1960). Méthode d'observation et étude de l'hydrogène interstellaire en émission. Publication de l'Observatoire de Haute-Provence, no 5.
- Georgelin, Y. P. & Amram, P. (1995). A Review of Fabry and Perot Discoveries. IN: Comte, G. & Marcelin, M.ed. Tridimensional Optical Spectroscopic Methods in Astrophysics. ASP Conference Series, vol. 71. Proceedings of I.A.U. Colloquium 149, Marseille, France, March 22-25, 1994, p. 382
- Hernandez, G. (1986). Fabry-Perot interferometers. Cambridge Studies in Modern Optics, Cambridge, University Press.
- Kent, S. M. (1987). Dark matter in spiral galaxies. II – Galaxies with HI rotation curves. Astronomical Journal, vol. 93, p. 816-832.
- Kent, S. M. (1996). A survey of surveys. IN: Blitz, L. & Teuben, p. ed. Proceedings of the 169th IAU Symposium, August 23-29 1994, The Netherlands, p. 47.
- Kravtsov, A. V. Klypin, A. A. Bullock, J. S. & Primack, J. R. (1998). The Cores of Dark Matter-dominated Galaxies: Theory versus Observations. Astrophysical Journal, vol.502, p. 48
- Lake, G. & Feinswog, L. (1989). The distribution of dark matter in galaxies. I - Models of spiral galaxies. Astronomical Journal, vol. 98, p. 166-179.
- Navarro, J.F. Frenk, C.S. & White, S. D.M. (1996). The Structure of Cold Dark Matter Halos. Astrophysical Journal, vol.462, p. 563-575.
- Ostriker, J. P. & Peebles, P. J. E. (1973). A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, can Cold Galaxies Survive? Astrophysical Journal, vol. 186, p. 467-480.
- Peebles, P. J. E.(1982). Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 263, Dec. 1, 1982, p. L1-L5.
- Puche, D. (1989). Étude de la dynamique et de la cinématique des galaxies du groupe Sculpteur. Ph.D. thesis, Université de Montréal, Canada.
- Reynolds, G. O. Develis, J.B. & Thompson, B. J. (1989). Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). Reynolds, G. O. Develis, J.B. & Thompson, B. J. ed.
- Russeil, D. Georgelin, Y. M. Georgelin, Y. P. Le Coarer, E. & Marcelin, M. (1995). Galactic HII regions at $l=234\text{deg}$. Astronomy & Astrophysics, vol. 114, p. 557-564.
- Sancisi, R. & Allen, R. J. (1979). Neutral hydrogen observations of the edge-on disk galaxy NGC 891. Astronomy and Astrophysics, vol. 74, no. 1, p. 73-84.
- van Albada, T. S. Bahcall, J. N. Begeman, K. & Sancisi, R. (1985). Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198. Astrophysical Journal, vol. 295, p. 305-313.
- Vaughan, J. M. (1989). The Fabry-Perot interferometer - History, theory, practice and applications. The Adam Hilger Series on Optics and Optoelectronics, Bristol.
- Warner, P. J. Wright, M. C. H. & Baldwin, J. E. (1973). High resolution observations of neutral hydrogen in M 33. II. Monthly Notices of the Astronomical Society, vol. 163, p. 163-182.
- Wozniak, H. & Pfenniger, D (1997). "Rotation curves" in self-consistent models of barred galaxies. Astronomy & Astrophysics, vol. 317, p. 14-24.

CHAPITRE 3: SPECTROSCOPIE FABRY-PÉROT DES GALAXIES DU GROUPE SCULPTEUR. I. NGC 247

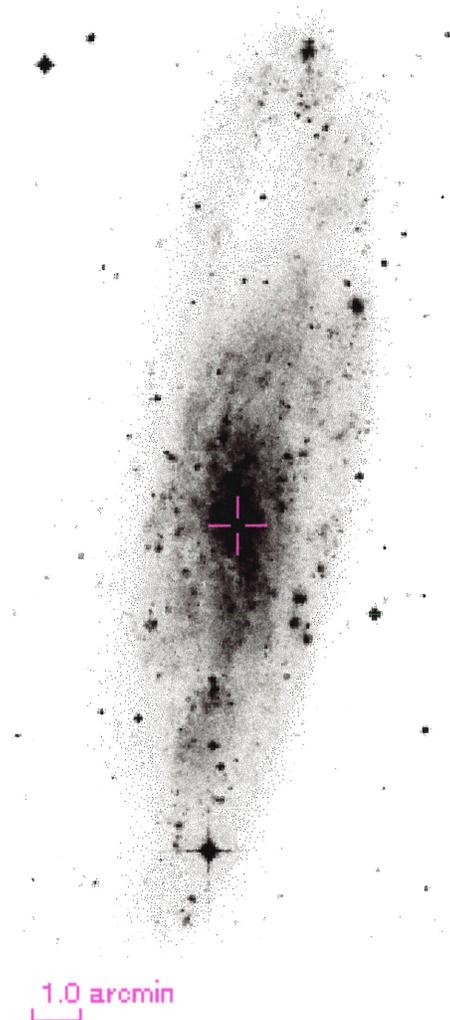


Figure 3-1 Image dans la bande B de NGC 247 (IIIJ UKSchmidt, Digitized Sky Survey).

NGC 247 est une galaxie spirale de type morphologique SAB(s)d, située dans la constellation Cetus. Mesurant 21.4×6.9 arcmin, elle apparaît fortement étirée dans la direction nord-sud et légèrement irrégulière sur un côté. Elle comprend un noyau extrêmement petit et très brillant, une courte barre et des bras inégaux. Elle est de taille comparable à celle de sa voisine NGC 253, mais d'une luminosité plus faible de deux amplitudes de grandeur.

Dans le cadre d'études portant sur la distribution de masse du groupe Sculpteur, de Vaucouleurs & Davoust (1980) et Carignan (1985) ont réalisé la photométrie de surface de NGC 247 afin d'utiliser ultérieurement les profils de lumière en conjonction avec des données cinématiques. De Vaucouleurs & Davoust (1980) et Bottinelli *et al.* (1983) ont également discuté des relations entre les paramètres photométriques et cinématiques.

L'étude photométrique de Carignan (1985) visant à dériver les propriétés générales des galaxies dites "pure disk" favorise pour cette galaxie de faible luminosité de surface ($(B(0))_c = 23.44 \text{ mag arcsec}^{-2}$) une distance moyenne de $\Delta \sim 2.52 \text{ Mpc}$ et une inclinaison du plan galactique d'environ $i_{\text{phot}} \sim 75.4^\circ$. Elle attribue, en partie, la faible luminosité de surface du disque à une absorption interne. Une forte asymétrie dans la distribution de l'hydrogène

atomique neutre est identifiée, avec pratiquement deux fois plus de gaz dans la partie nord du disque galactique. L'auteur conclut que le gaz H_I ne peut que partiellement contribuer à la masse dans les régions extérieures de la galaxie (et qu'il en est probablement de même pour l'hydrogène moléculaire).

Plusieurs auteurs ont étudié successivement son champ de vitesse en radio (Shostak 1977, Carignan & Freeman 1985 et Carignan & Puche 1990). Selon l'étude cinématique de Carignan & Puche (1990), le disque H_I de NGC 247 n'est pas très étalé par comparaison avec d'autres galaxies spirales tardives: il atteint à peine le diamètre optique, D_{HO} ¹⁹. Sa courbe de rotation n'est pas plate, mais continuellement ascendante jusqu'au dernier point de mesure. Ce résultat indique clairement que la limite de la galaxie n'est pas atteinte. Leur analyse cinématique donne une vitesse systémique $V_{sys} \sim 161 \text{ km s}^{-1}$, une inclinaison $i_{HI} \sim 74^\circ$ et un angle de position $PA_{HI} \sim 170^\circ$. Des différences de $\Delta V \sim 20 \text{ km s}^{-1}$ sont observées entre le côté approchant et le côté fuyant de la galaxie.

En combinant les données de photométrie et les mesures cinématiques, l'analyse de la distribution de masse de Carignan & Puche (1990) fournit les résultats suivants: 1) Un modèle basé sur une seule composante lumineuse (étoiles et gaz) à l'exclusion de la matière sombre donne un maximum $(M/L_B)_* = 4.5 M_\odot/L_\odot$ pour le disque stellaire. La composante lumineuse est la contribution principale aux vitesses de rotation pour $r \leq 5 \text{ kpc}$. Par contre, un tel modèle sous-évalue les vitesses d'environ $\Delta V \sim 30 \text{ km s}^{-1}$ dans les régions extérieures. 2) Pour représenter la courbe de rotation dans son entier, l'ajout d'un halo de matière sombre isotherme est nécessaire. Ce halo a un rayon de cœur de $r_c = 24.2 \text{ kpc}$ et une densité centrale $\rho_0 = 0.0046 M_\odot \text{ pc}^{-3}$. Dans ce modèle, $(M/L_B)_* = 4.0 M_\odot/L_\odot$. À la distance $\Delta = 2.53 \text{ Mpc}$, la masse H_I totale est $M_{HI} \sim 8.0 \times 10^8 M_\odot$.

Plus récemment, l'ouverture du domaine des rayons X par les satellites a permis l'étude du rayonnement d'un gaz très chaud (10^6 K) diffus. L'intensité qui lui est associée dépend des profils de température et de densité du gaz, ce dernier étant lui-même gouverné par le potentiel gravitationnel environnant. Les données obtenues à l'aide du satellite germano-américain ROSAT (Roentgensatellit) révèle dans NGC 247 la présence de bulles, de boucles

¹⁹ D_{HO} : Diamètre optique de l'axe majeur à $\mu_B = 26.5 \text{ mag. arcsec}^{-2}$.

et d'autres particularités filamenteuses s'étendant jusqu'à des centaines de parsecs. Les différents mécanismes physiques qui creusent le gaz ionisé témoignent de l'action des étoiles massives sur l'environnement (Tenorio-Tagle, Bodenheimer & Franco 1988). Un exemple flagrant de ce phénomène est la présence d'une bosse sur son profil de luminosité dans la bande 3/4 keV et la bande 3/2 keV à une quinzaine de minutes d'arc du centre (Strässle *et al.* 1999). Ces auteurs expliquent cette particularité par l'émission d'amas sombres de MACHOs²⁰ dans la bande des rayons X, en utilisant des arguments semblables à ceux présentés par de Paolis *et al.* (1998). Ces amas de naines brunes représenteraient près de la moitié de la matière sombre au sein de NGC 247, ce qui en fait un laboratoire unique pour observer comment se forme un halo de matière sombre baryonique.

Le Tableau 3-1 (p. 29) présente les principaux résultats des études photométriques et cinématiques portant sur NGC 247. Pour uniformiser la qualité, la sensibilité et la résolution de la bande de données disponibles du groupe Sculpteur, nous apportons des mesures spectroscopiques Fabry-Pérot de l'émission H α de NGC 247. Nous avons observé cette galaxie le 21 septembre 2000 avec l'instrument Cigale (voir section 2.3, p. 16), sur le télescope de 3.60m de l'ESO à La Silla, au Chili. Le Tableau 3-2 (p. 30) présente les principaux paramètres d'observation et le Tableau 3-3 (p. 31) regroupe les paramètres physiques de NGC 247 retenus pour cette étude cinématique à haute résolution.

²⁰ MACHO : acronyme anglo-saxon de "MAssive Compact Halo Objects"

Tableau 3-1 Principaux résultats des études portant sur NGC 247

Auteur(s)	Carignan 1985	Carignan & Freeman 1985	Carignan & Puche 1990
Nature des observations	Photométrie de surface Plaqué Schmidt Siding Spring 61cm télescope	H _I	Observations à 21 cm Radiotélescope VLA
Principaux résultats	$\Delta = 2.52 \pm 0.50$ Mpc $(1' \approx 0.733$ kpc) $B(o)_c = 23.44$ mag arcsec ⁻² $M_B^{0.i} = -18.01$ $q = b/a = 0.28 \pm 0.02$ $D_{25} = 19.9'$ $R_{HO} = 12.2'$ $i_{phot} = 75.4 \pm 1.2^\circ$ $PA_{phot} = 171.1 \pm 0.1^\circ$	$r_c = 22.5$ kpc $\sigma = 100$ km·s ⁻¹	Pour $\Delta = 2.53$ Mpc $V_{sys} = 161 \pm 7$ km·s ⁻¹ $i_{HI} = 74^\circ \pm 3^\circ$ $PA_{HI} = 170^\circ \pm 1^\circ$ * * * $r_c = 24.2$ kpc $\rho_0 = 0.0046 M_\odot pc^{-3}$ $M_{HI} = 8.0 \pm 0.3 \times 10^8 M_\odot$ $(M/L_B)_* = 4 M_\odot/L_\odot$ $\dot{A} R_{HO}$ $M_{dark}/M_{lum} \sim 1.3$ $(M/L_B)_{global} \sim 8.8 M_\odot/L_\odot$ Au dernier point ($r = 7.35$ kpc) $M_{dark}/M_{lum} \sim 1.7$ $(M/L_B)_{global} \sim 10.9 M_\odot/L_\odot$

Tableau 3-2 Paramètres des observations Fabry-Pérot de NGC 247

Dates des observations	21 septembre, 2000
Télescope	3.6m ESO
Location	La Silla, Chili
Instrumentation:	
Instrument focal	Cigale au foyer Cassegrain
Détecteur IPCS	1024x1024 biné 512x512 (Thompson)
Étalon de Fabry-Pérot à balayage	ET50-826 (OM)
Ordre d'interférence	791 @ $\lambda_{\text{néon}}$
Finesse moyenne dans le champ	9.8
Lampe d'échantillonnage	Néon ($\lambda = 6598.95\text{\AA}$)
Durée	
Par canal	15 sec/canal
Nombre de cycles	7
Total	56 min
Filtre	$\lambda = 6567.7\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 12\text{\AA}$
Paramètres spatiaux	
Grandeur du champ	3.5'x9.3'
Taille des pixels	0.405" pix ⁻¹
Nombre de champs	3
Paramètres spectraux	
Nombre de canaux	32
Intervalle spectral libre	8.26 \AA (377 km s ⁻¹)
Échantillonnage	0.26 \AA (11.8 km s ⁻¹) / canal

Tableau 3-3 Paramètres intrinsèques de NGC 247

Type morphologique ^a	SAB(s)d
RA (J2000.0)	00h 47m 08s. 28
Dec (J2000.0)	-20° 45' 37".6
l	113°.94
b	-83°.56
Distance adoptée (Mpc) ^b	2.53 (1' \approx 0.73 kpc)
Rapport moyen des axes, $q = b/a$ ^a	0.28 ± 0.02
Inclinaison, i ^a	$75.4 \pm 0.9^\circ$
Diamètre de l'isophote à $\mu_B = 25$ mag arcsec ² , D_{25} ^a	19.9'
Axe majeur, PA ^a	$171.1 \pm 0.1^\circ$
Excentricité du disque stellaire ^a	0.12
Longueur d'échelle exponentielle (kpc) ^a	2.9
Rayon d'Holmberg, R_{HO} ^a	12.2'
Magnitude absolue, M_B ^a	-18.01
Luminosité totale, L_B	$2.38 \times 10^9 L_\odot$
Absorption galactique, A_B ^c	0.07
Vitesse radiale héliocentrique (km s ⁻¹) ^b	155 ± 4

^a Carignan (1985)

^b Carignan & Puche (1990)

^c Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC3)

3.1 Étude cinématique

Pour cartographier la région interne de NGC 247, nous utilisons une mosaïque de 3 champs. La surface résultante couvre un champ de vision de 9.3×3.5 arcmin, excluant malheureusement la particularité constatée par Strässle *et al.* (1999) sur son profil de luminosité dans le domaine des rayons X.

La Figure 3-2 (p. 33) présente le champ des vitesses radiales héliocentriques (à gauche) calculées en chacun des pixels et l'image monochromatique de l'émission H_α (à droite) reconstruite à partir de la séquence de balayage. Ces images représentent la même région et sont à la même échelle. La méthode de réduction des données utilisée est détaillée à la section 2.3 (p. 16). Il est à remarquer que les vitesses enregistrées s'étendent de 50 à 230 km s^{-1} et que des régions H_T de petite taille, de faible intensité et largement séparées les unes des autres caractérisent la carte d'intensité.

La méthode de modélisation par des anneaux inclinés, présentée à la section 2.5 (p. 18), permet de déterminer les paramètres dynamiques (PA, i , V_{sys} , X_c , Y_c) caractérisant les parties internes de la galaxie. À partir des 9262 mesures comprises à l'intérieur d'un secteur de 80° de part et d'autre du grand axe cinématique, nous trouvons un angle de position de la ligne des noeuds PA $\sim 167^\circ$ et un angle d'inclinaison du plan galactique $i \sim 74^\circ$. Ces mesures sont parfaitement en accord avec les valeurs photométriques de Carignan (1985) (voir Tableau 3-3, p. 31), à l'exception des valeurs du PA pour l'intervalle de rayons compris entre 50 et 130 arcsec. Cette différence est à l'origine d'une diminution de 4° de la valeur moyenne du PA trouvé dans le cadre de cette étude par rapport à celle déduite de l'étude photométrique ($PA_{\text{phot.}} \sim 171$). La Figure 3-3 (p. 34) illustre la variation avec le rayon de i et du PA dans le cœur de la galaxie, c'est-à-dire pour des rayons allant jusqu'à 180 arcsec.

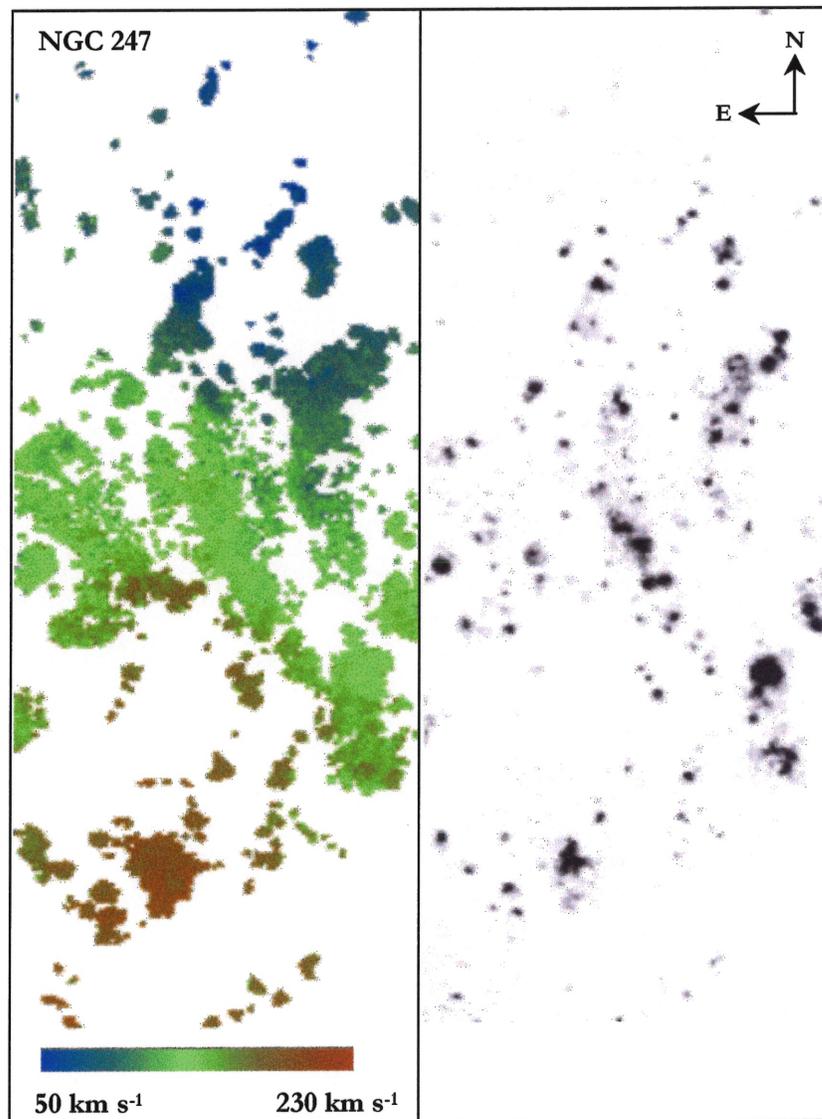


Figure 3-2 Champ de vitesses (à gauche) et image monochromatique de l'émission H α de NGC 247 (à droite).

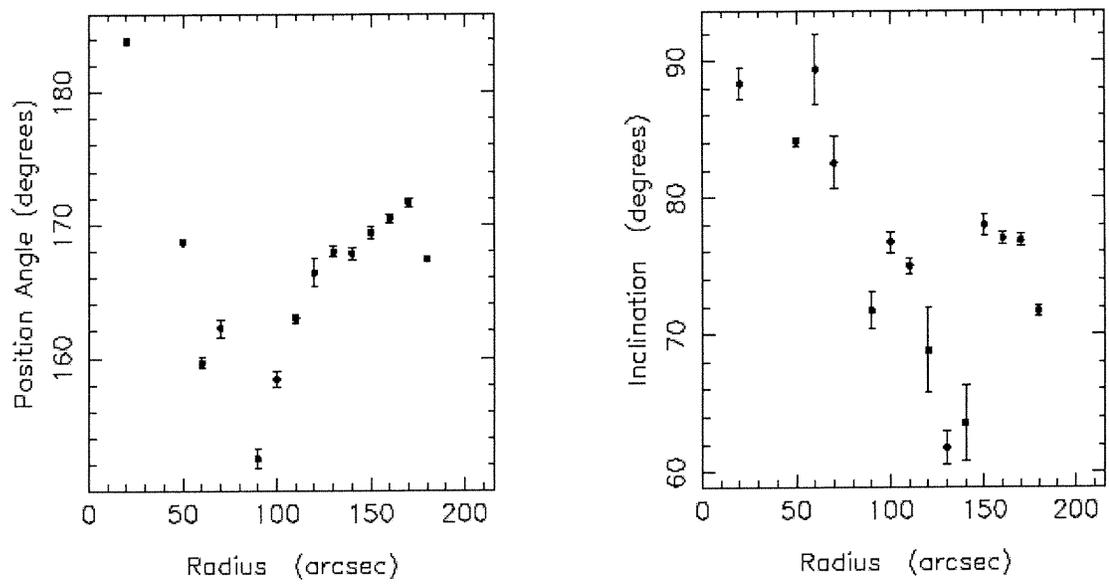


Figure 3-3 Variation avec le rayon des angles de position et d'inclinaison des observations $H\alpha$ de NGC 247.

Le Tableau 3-4 (p. 36) introduit les vitesses de rotation pour les côtés approchant (*approaching*) et fuyant (*receding*) de la galaxie. Ces mesures se groupent dans des couronnes concentriques de 10 arcsec de large et balaient l'intervalle allant de 15 à 255 arcsec. Elles sont déduites à partir du champ de vitesse en gardant fixes les angles de position et d'inclinaison du plan galactique ($PA = 167^\circ$ et $i = 74^\circ$). Mentionnons que pour obtenir un rapport signal-sur-bruit suffisamment élevé sur l'ensemble du champ de vitesse, nous l'avons lissé par une gaussienne. Le nombre de pixels servant à tracer chaque point des courbes de rotation ainsi que les dispersions de vitesses associées à cette couronne sont également indiquées. Nous remarquons que les dispersions de vitesses associées à chacune des couronnes sont élevées. Il convient toutefois de rappeler que, pour prendre en compte les effets de l'inverse de la projection, les points n'ont pas tous le même poids statistique. Nous utilisons ici un poids variable en $\cos(\theta)$.

La dernière colonne du Tableau 3-4 (p. 36) présente la modélisation obtenue par l'utilisation simultanément des deux côtés de l'axe mineur dans le programme ROCUR, ainsi que les poids statistiques adoptés pour réaliser l'étude de la distribution de masse. Deux méthodes permettent de représenter la barre d'erreur en chaque couronne : la dispersion de vitesse divisée par la racine du nombre de points mesurés, σ/\sqrt{n} , et la différence de vitesse entre le côté fuyant et le côté approchant, pondérée par le nombre de points utilisés sur chaque côté. Étant donné que cette courbe est utilisée pour évaluer des modèles de distribution de masse appliqués à un disque axisymétrique, la deuxième méthode pour estimer les incertitudes est préférée.

Mentionnons qu'aucune des courbes de rotation à haute résolution n'est corrigée pour tenir compte de l'effet de dérive asymétrique (*asymmetric drift*). Ce choix se justifie par le fait que ces corrections sont très faibles dans la partie ascendante des courbes. Swaters (1999) évalue ces corrections à moins de $1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. De plus, dans les régions extérieures, ces corrections ne sont importantes que lorsque les vitesses de rotation sont du même ordre de grandeur que la dispersion des vitesses ($\sim 10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), ce qui n'est pas le cas ici.

Tableau 3-4 Courbe de rotation optique de NGC 247

R arcsec (1)	N_{app} (2)	V_{app} km s ⁻¹ (3)	σ_{ring} km s ⁻¹ (4)	N_{rec} (5)	V_{rec} km s ⁻¹ (6)	σ_{ring} km s ⁻¹ (7)	V km s ⁻¹ (8) ± (9)
20	-	-	-	128	17.02	7	4.4 ± 9.1
30	-	-	-	119	17.52	18	10.0 ± 11.3
40	97	12.31	17	92	22.91	13	16.5 ± 5.6
50	109	10.42	13	184	52.20	21	37.3 ± 26.3
60	127	34.50	17	158	54.84	20	34.4 ± 28.8
70	161	23.22	20	74	68.91	16	36.4 ± 31.5
80	173	37.72	18	71	54.84	33	41.2 ± 12.1
90	288	51.04	15	97	70.56	12	53.5 ± 14.9
100	332	60.11	12	83	49.77	30	59.3 ± 8.0
110	257	60.92	12	45	67.87	15	61.3 ± 5.9
120	166	62.63	9	35	72.67	7	63.4 ± 8.3
130	211	65.49	8	53	63.17	9	65.0 ± 1.6
140	195	73.37	7	75	66.74	17	70.7 ± 4.3
150	163	77.75	8	90	81.85	19	79.5 ± 2.6
160	277	77.56	9	56	91.39	11	78.9 ± 10.8
170	491	74.77	9	103	80.76	15	75.4 ± 5.0
180	674	75.57	8	52	76.12	13	75.6 ± 1.0
190	542	79.14	8	57	95.89	7	79.8 ± 15.4
200	519	80.95	9	109	76.95	17	80.4 ± 3.3
210	299	89.20	10	269	79.29	10	83.2 ± 5.3
220	189	89.25	12	452	72.30	12	75.4 ± 12.0
230	84	107.42	7	337	80.77	9	82.6 ± 20.8
240	86	106.43	5	414	78.73	13	80.3 ± 22.3
250	46	102.25	6	456	76.95	14	77.6 ± 22.7

Note: Ces courbes furent dérivées avec $i = 74^\circ$ et $PA = 167^\circ$. Les couronnes ombragées sont utilisées pour élaborer les modèles de distributions de masse (voir Section 3.2).

- (1) Rayon de la couronne en seconde d'arc
- (2) Nombre de points de la couronne considérée du côté approchant
- (3) Vitesse de rotation du côté approchant
- (4) Dispersion de vitesse du côté approchant
- (5) Nombre de points de la couronne considérée du côté fuyant
- (6) Vitesse de rotation du côté fuyant
- (7) Dispersion de vitesse du côté fuyant
- (8) Vitesse de rotation moyenne de la couronne
- (9) Différence pondérée entre les deux côtés

Les résultats de la présente étude cinématique sont combinés aux données radio réalisées par Carignan & Puche (1990) (voir Tableau 3-5, p. 38). Les cercles ouverts de la Figure 3-4 (p. 39) illustrent les vitesses $H\alpha$ de NGC247, où la ligne brisée indique le côté approchant et la ligne pointillée, le côté fuyant. Les cercles pleins représentent la courbe de rotation $H\beta$ de Carignan & Puche (1990). Pour faciliter la visualisation de la région commune des deux courbes, un agrandissement de la figure est également présenté pour des rayons allant jusqu'à 250 arcsec.

La courbe optique dans les régions centrales de NGC 247 se démarque des données radio par la présence d'un plateau centré à $80 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ pour les rayons galactiques supérieurs à 150 arcsec. Par contre, dans la région de rayons galactiques inférieurs à 130 arcsec, les deux ensembles de données se superposent. Au-delà, les profils divergent. Ces résultats indépendants confirment ceux de Carignan & Freeman (1985), ce qui nous porte à croire qu'il s'agit bel et bien d'une caractéristique intrinsèque de NGC 247. Par ailleurs, nous constatons que pour cette galaxie, les observations radio ne sont pas affectées par l'étalement de faisceau dû à la basse résolution ($\sim 30''$). Néanmoins, nos données cinématiques à haute résolution ($0.405''$) apportent de nouvelles mesures dans les régions centrales exemptes d'émission $H\beta$.

La courbe de rotation finale qui est utilisée pour établir les distributions de masse combine les résultats des deux études cinématiques. Nous ne conservons que les mesures optiques pour l'intervalle de rayon s'étendant jusqu'à 130 arcsec et, par le fait même, nous excluons le plateau optique. Les parties ombragées du Tableau 3-4 (p. 36) et du Tableau 3-5 (p. 38) indiquent les mesures qui ont été conservées. La courbe résultante s'étend jusqu'à 13.5 arcmin. De ces résultats cinématiques multi-longueurs d'onde, nous élaborons dans la section suivante une modélisation précise des contributions des masses stellaire et gazeuse, et nous établissons la distribution de masse au sein de NGC 247.

Tableau 3-5 Courbe de rotation radio de NGC 247

R arcsec (1)	V km s ⁻¹ (2)	Incertitude km s ⁻¹ (3)
60	34.4	± 0.9
90	47.0	± 0.8
120	59.1	± 3.1
150	64.4	± 1.4
180	67.4	± 2.3
210	69.8	± 0.7
240	71.3	± 1.1
270	73.2	± 1.7
300	75.1	± 3.0
330	78.5	± 3.8
360	81.4	± 5.0
390	83.5	± 7.0
420	87.1	± 7.2
450	90.7	± 4.8
480	93.1	± 1.4
510	95.9	± 2.1
540	98.4	± 5.2
570	101.5	± 8.2
600	103.6	± 9.4
630	104.0	± 9.4
660	105.0	± 8.9
690	105.0	± 8.4
720	105.2	± 9.0
750	106.0	± 8.4
780	108.4	± 7.7
810	107.8	± 9.2

Note: Cette courbe de rotation fut dérivée par Carignan & Puche (1990).
Les couronnes ombragées sont utilisées pour élaborer les modèles de
distributions de masse (voir Section 3.2).

- (1) Rayon de la couronne en seconde d'arc
- (2) Vitesse de rotation moyenne de la couronne
- (3) Différence pondérée entre les deux côtés

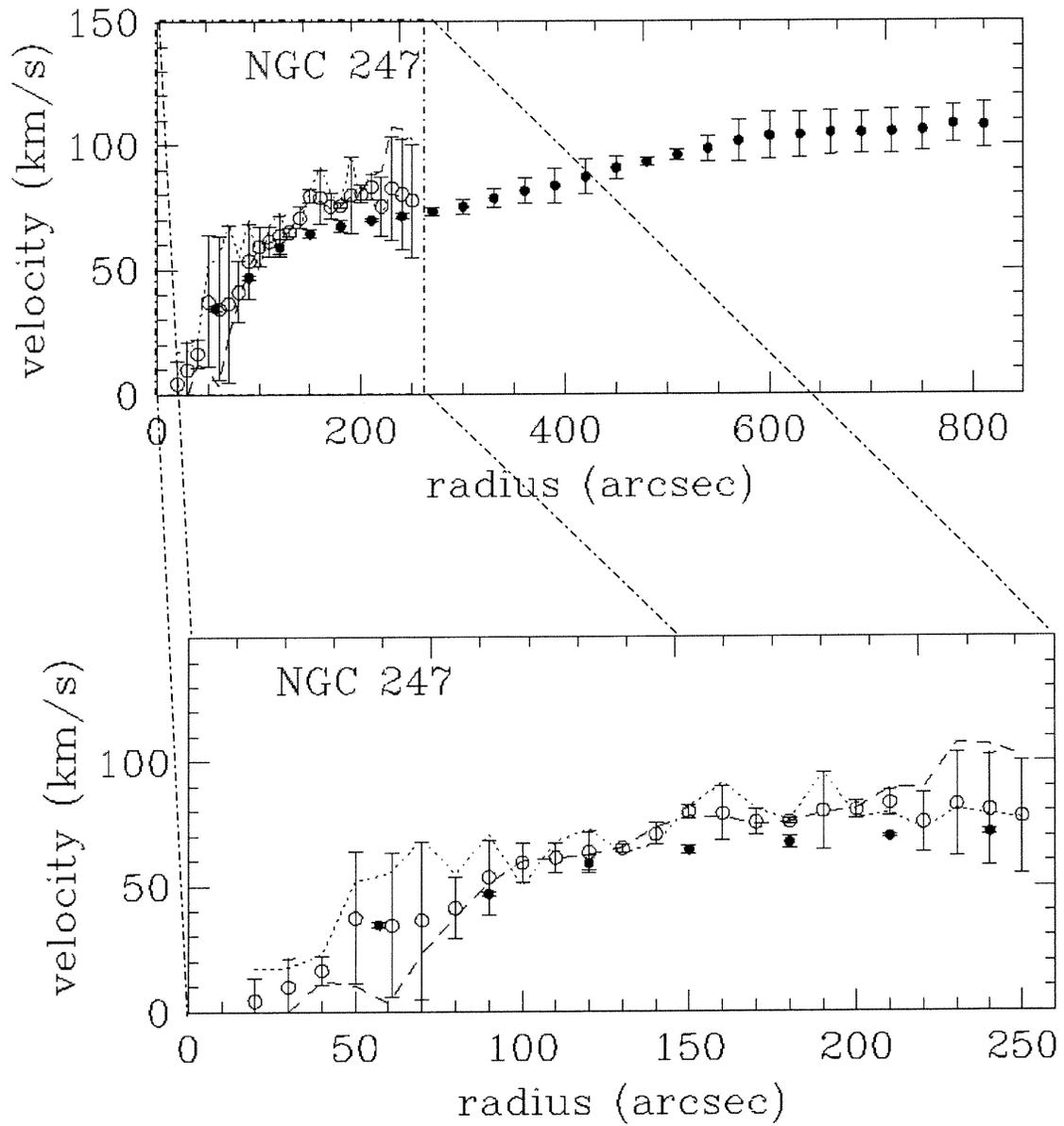


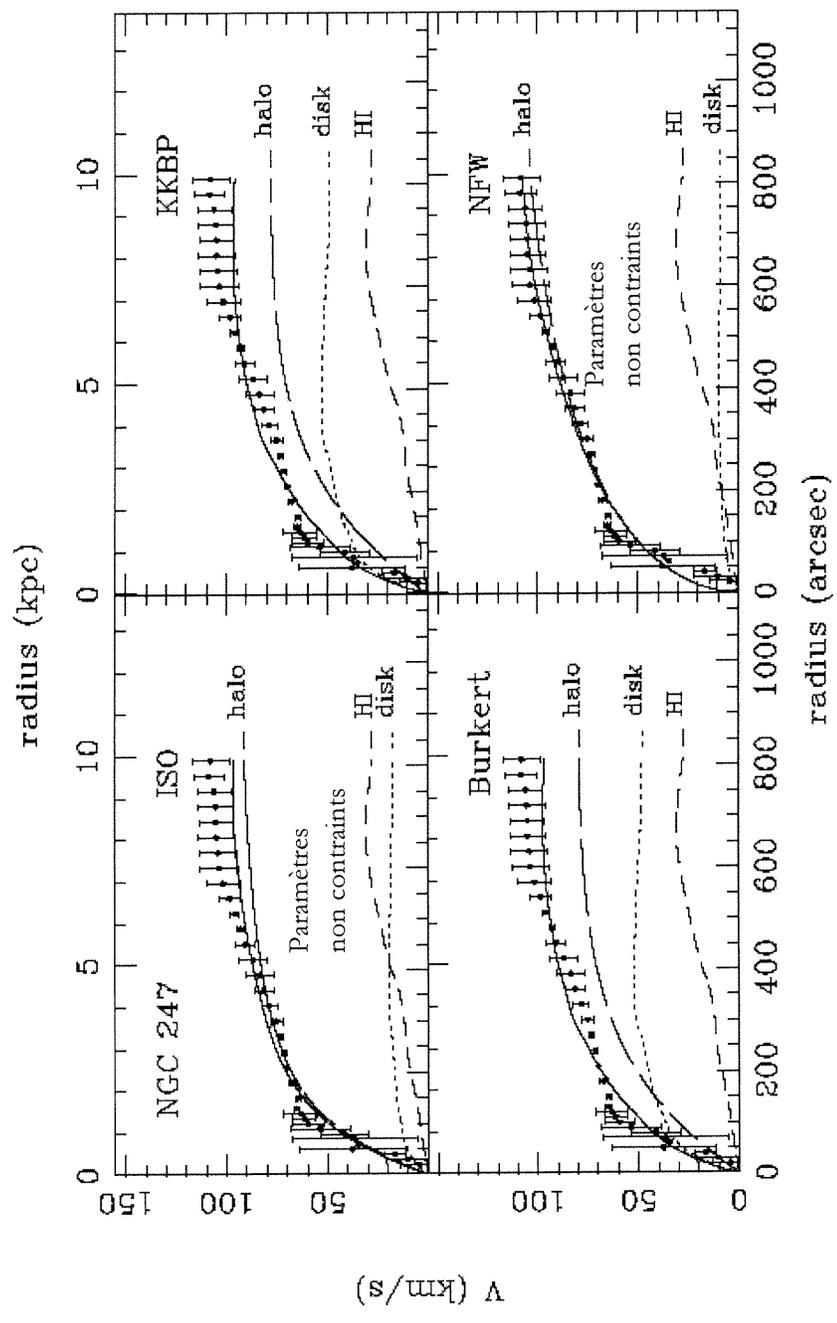
Figure 3-4 Courbe de rotation H α (cercles ouverts) de NGC247, combinée à la courbe de rotation H I (cercles pleins) de Carignan & Puche (1990). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée.

3.2 Modèles de masse

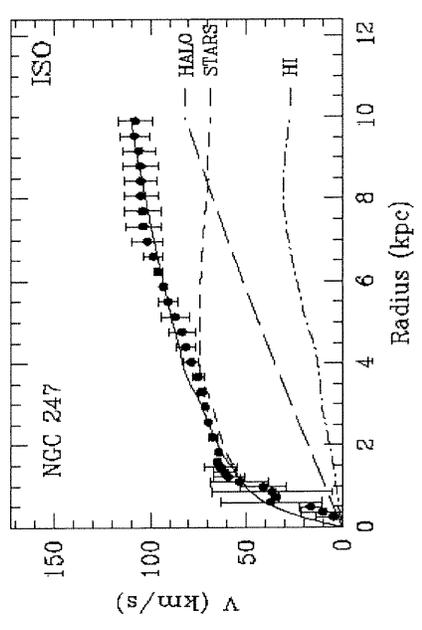
De l'étude cinématique, nous précisons le potentiel gravitationnel de NGC 247 et nous élaborons des modèles de masse en utilisant la méthode décrite à la section 2.6 (p. 20). La dépendance radiale de la brillance de surface s'estime par un disque exponentiel mince, avec un rapport $(M/L_B)_*$ radialement constant. Pour ce faire, nous utilisons le profil de luminosité en bande B de Carignan (1985) et nous supposons une excentricité du disque stellaire de $q_0 \equiv c/a = 0.12$ (Bottinelli *et al.* 1983).

Étant donné qu'un modèle ne possédant qu'une composante (étoiles et gaz) ne peut reproduire les vitesses de rotation sur l'ensemble de la galaxie (Carignan 1983), nous incluons la modélisation d'une composante non-lumineuse pour tenter d'expliquer la courbe de rotation observée. En suivant les travaux de Blais-Ouellette *et al.* (1999), nous investiguons quatre formes de halo sombre (voir section 2.6, p. 20). Les profils considérés incluent trois variantes de la sphère pseudo-isotherme ainsi qu'un modèle de matière sombre froide. Enfin, pour mesurer la similarité entre les distributions théoriques et les distributions expérimentales, nous effectuons un test de conformité, en l'occurrence un test du χ^2 .

La Figure 3-5 (p. 41) présente la courbe de rotation multi-longueurs d'onde (H_α et H_I) s'étendant jusqu'à 13.5 arcmin et les modèles de distributions de masse qui en découlent. Les courbes pointillées montrent la contribution de la masse sous forme d'étoiles à la courbe rotation, les courts tiretés représentent la contribution du disque gazeux (H_I et He) et les longs tiretés le halo nécessaire pour reproduire les données. La courbe solide est la somme des trois composantes. De façon similaire, la Figure 3-6 (p. 42) reproduit ces résultats en n'utilisant que les données cinématiques à ouverture de synthèse de l'émission de l'hydrogène atomique. Le Tableau 3-6 (p. 43) introduit les paramètres qui permettent un meilleur ajustement des courbes de rotation théoriques aux courbes de rotation déduites des observations, où les lignes ombragées indiquent les cas où l'ajustement en question ne permet pas de contraindre les paramètres de halo.

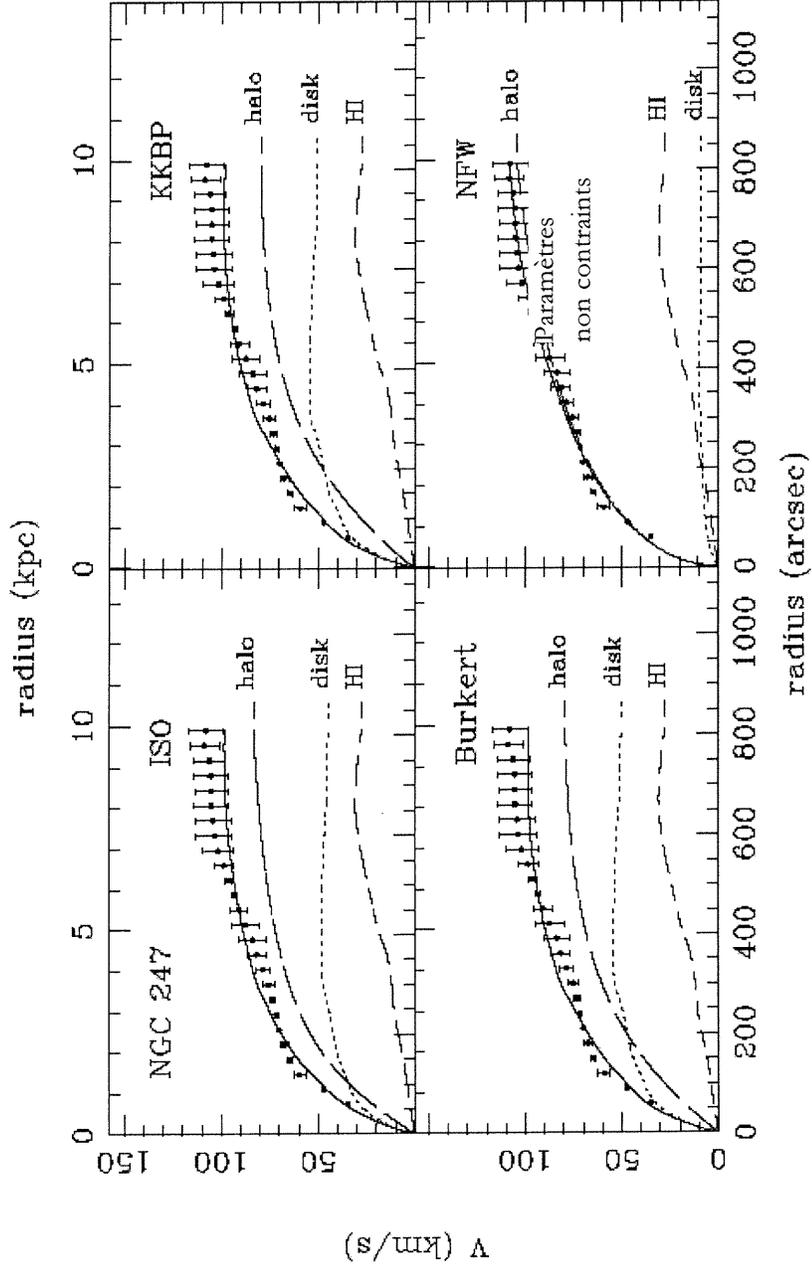


a) Distributions obtenues en suivant le formalisme de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001)

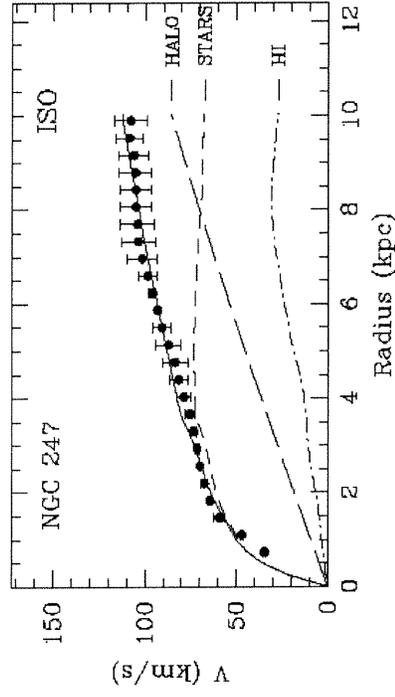


b) Distribution obtenue en suivant le formalisme de Carignan & Freeman (1985)

Figure 3-5 Courbe de rotation H_{α} et H_I et modèles de masse de NGC 247, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.



a) Distributions obtenues en suivant le formalisme de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001)



b) Distribution obtenue en suivant le formalisme de Carignan & Freeman (1985)

Figure 3-6 Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 247, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.

Tableau 3-6 Paramètres des modèles de masse pour NGC 247
(profil de lumière en B)

Modèle	$(M/L_B)_*$ (M_\odot/L_\odot) (1)	r_0 (kpc) (2)	ρ_0 (M_\odot/pc^{-3}) (3)	χ^2
ISO				
H _I	2.6	1.8	0.053	2.20
H _{α} & H _I	0.4	1.2	0.13	2.61
KKBD				
H _I	3.3	4.1	0.023	2.67
H _{α} & H _I	3.1	3.7	0.027	3.48
Burkert				
H _I	3.3	3.8	0.038	2.57
H _{α} & H _I	3.0	3.4	0.047	3.36
NFW				
H _I	0.1	15.4	0.0052	2.36
H _{α} & H _I	0.1	13.9	0.006	3.33

- (1) Rapport entre la masse du disque stellaire et sa luminosité
(2) Rayon de caractéristique
(3) Densité centrale de matière non-lumineuse

Note: Les lignes ombragées indiquent que l'ajustement ne permettait pas de contraindre les paramètres de halo.

À titre de comparaison, mentionnons que le programme de Carignan & Freeman (1985) utilisant un modèle de la sphère pseudo-isotherme fournit les résultats suivants:

$$\text{H}_\alpha \text{ \& \& H}_\text{I} : (M/L_B)_* = 6.2; r_c = 21.70; \sigma = 112; \chi^2 = 1.15$$

$$\text{H}_\text{I} : (M/L_B)_* = 6.0; r_c = 23.90; \sigma = 127; \chi^2 = 1.40$$

Alors que Carignan & Puche (1990) favorisent les paramètres suivants:

$$\text{H}_\text{I} : (M/L_B)_* = 4.0, r_c = 24.2, \rho_0 = 0.0046$$

Modèles de masse découlant des observations radio (voir Figure 3-6, p. 42)

Nous observons que la courbe de rotation déduite uniquement des mesures cinématiques radio ne peut être ajustée par le modèle de Navarro, Frank & White (1996), découlant de simulations à très haute résolution de l'évolution cosmologique de la masse sombre froide. Cet ajustement, que nous désignerons au-delà par NFW, ne permet pas de contraindre les paramètres de halo (voir Tableau 3-6, p. 43) et, comme en témoigne la Figure suivante, le rapport $(M/L_B)_*$ résultant tend vers zéro.

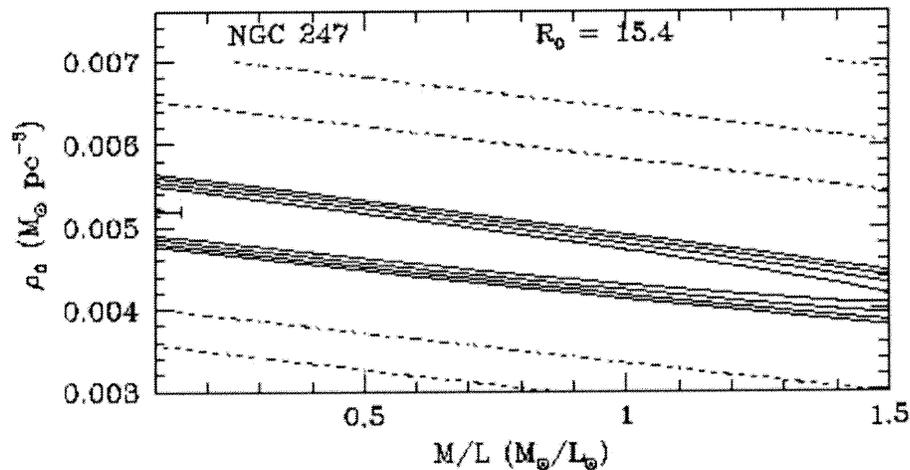


Figure 3-7 Ajustement de Pearson pour le profil de densité NFW

En revanche, les trois modèles de profil qui reproduisent des formes fonctionnelles de la sphère isotherme ajustent globalement les courbes de rotation théoriques aux vitesses de rotation observées. Ces ajustements sont parfaitement équivalents avec des différences de khi-carré inférieures à $\Delta\chi^2 < 0.5$. Aucune indication ne nous permet de favoriser un modèle plutôt qu'un autre. Pour faciliter la comparaison de nos résultats avec ceux des études parallèles, nous poursuivrons la discussion en n'utilisant que le modèle de Begeman (1987), que nous appellerons au-delà ISO.

Il est à remarquer que les étoiles fournissent la majorité de la masse dans les régions intérieures alors que le halo de matière sombre ne gagne en importance qu'à partir de 3 arcmin. À la distance adoptée de 2.53 Mpc, nous trouvons un rapport $(M/L_B)_* = 2.6 M_\odot/L_\odot$, un rayon caractéristique $r_c = 1.8$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.053 M_\odot/\text{pc}^{-3}$. Soulignons que l'estimation de la distance est indépendante de la mesure de son décalage vers le rouge.

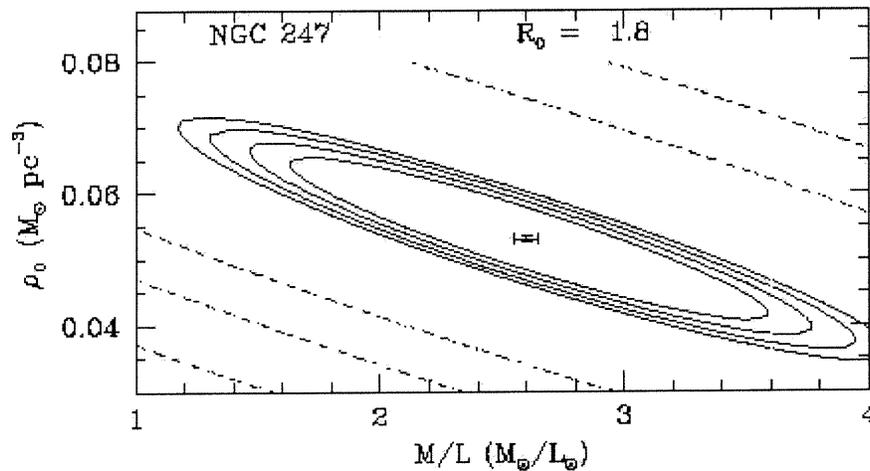


Figure 3-8 Ajustement de Pearson pour le profil de densité ISO

Cette paramétrisation diffère largement des résultats obtenus par Carignan & Puche lors de leur étude cinématique réalisée en 1990. Leur ajustement accorde plus d'importance à la contribution du disque stellaire et ce, à tous rayons. Le halo sombre ne devient le principal contributeur qu'à partir de 10 arcmin. De plus, ces auteurs favorisent, pour le modèle de la sphère pseudo-isotherme complète, un rapport $(M/L_B)_* = 4.0 (M_\odot/L_\odot)$ et un rayon de cœur $r_c = 24.2$ kpc. Rappelons que la définition du rayon de cœur diffère de celle du rayon caractéristique des modèles faisant l'objet principal de cette étude et que, par conséquent, ces valeurs ne peuvent être comparées.

Par contre, ce qui plus inquiétant c'est qu'en reprenant le formalisme de Carignan & Freeman (1985) (voir Figure 3-6b, p. 42) nous déduisons à partir des mêmes mesures cinématiques et d'un profil de densité très similaire, un rapport $(M/L_B)_* = 6.0 M_\odot/L_\odot$ et un rayon de cœur $r_c = 23.9$ kpc. Notons que le rayon de cœur des deux ajustements est égal, mais que les ratios masse/luminosité diffèrent considérablement.

Modèles de masse découlant à la fois des observations radio et des nouvelles mesures optiques (Figure 3-5, p. 41)

Comme pour le cas découlant uniquement des points de mesures radio, la courbe de rotation multi-longueurs d'onde n'est pas ajustée par le modèle NFW. Il en résulte un

rapport $(M/L_B)_*$ nul. De plus, l'ajustement utilisant le modèle ISO parvient difficilement à cerner la densité centrale ρ_0 du halo. Le patron résultant est illustré à la figure suivante.

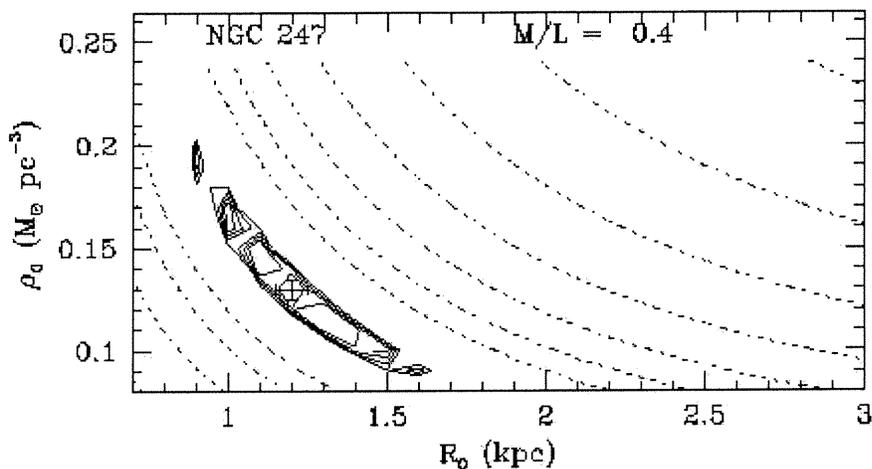


Figure 3-9 Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO

En revanche, le modèle Burkert (1995) et celui de Kravtsov *et al.* (1998) qui reproduisent des formes fonctionnelles de la sphère isotherme avec une densité de noyau plate (*Flat density core*) parviennent à bien cerner les paramètres du halo et par le fait même, peuvent expliquer la dynamique de la galaxie. Les deux ajustements sont, à toute fin pratique, équivalents. Le modèle de Burkert, appelé FLAT, favorise un rapport $(M/L_B)_* = 3.1 M_\odot/L_\odot$, un rayon caractéristique $r_c = 3.7$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.027 M_\odot/\text{pc}^{-3}$, alors que le modèle de Kravtsov *et al.* (1998), désigné par KKBD, minimise le khi-carré avec un rapport $(M/L_B)_* = 3.0 M_\odot/L_\odot$, un rayon caractéristique $r_c = 3.4$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.047 M_\odot/\text{pc}^{-3}$. Pour les deux profils de halo, nous constatons que la composante sombre domine à partir de 5 arcsec, alors que les vitesses maximales de rotation sont associées au disque stellaire dans le centre de la galaxie.

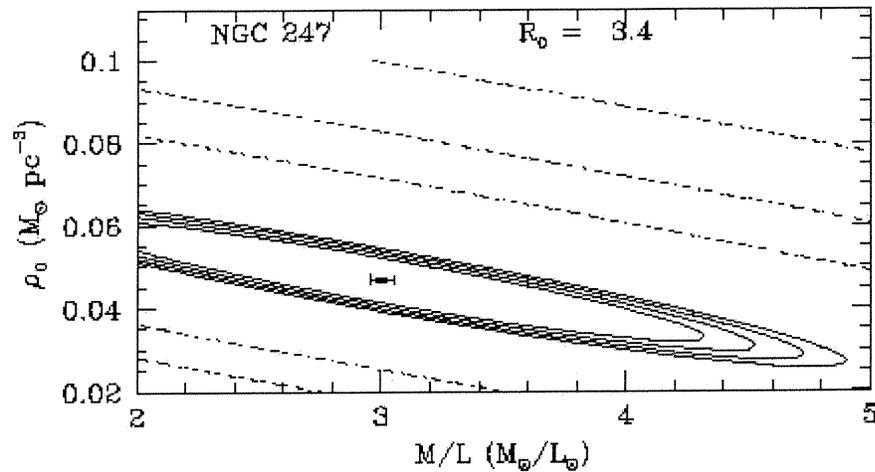


Figure 3-10 Ajustement de Pearson pour le profil de densité FLAT

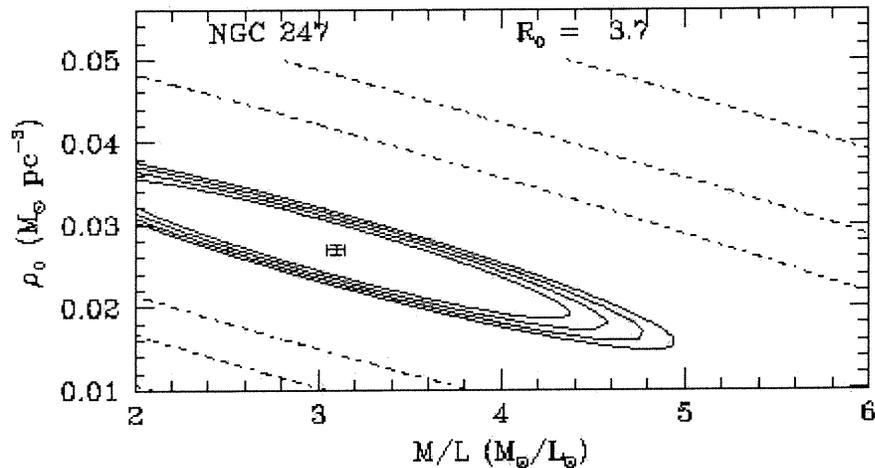


Figure 3-11 Ajustement de Pearson pour le profil de densité KKBP

Par ailleurs, l'ajout des données cinématiques à haute résolution n'a aucun effet sur l'allure général des courbes de rotation, du moins pour les cas où les paramètres sont bien cernés. Prenons par exemple le cas où nous utilisons le profil de la sphère pseudo-isotherme complète de Carignan & Freeman (1985) (voir Figure 3-5b, p. 41). L'analyse favorise maintenant un rapport $(M/L_B)_* = 6.2 M_\odot/L_\odot$ et un rayon de cœur $r_c = 21.7$ kpc, comparativement au rapport $(M/L_B)_* = 6.0 M_\odot/L_\odot$ et $r_c = 23.9$ kpc pour l'étude radio. Ce résultat n'est pas surprenant puisque pour cette galaxie, les observations à ouverture de synthèse n'étaient pas affectées par l'étalement de faisceau dans la région d'intérêt.

* * * * *

Nos observations Fabry-Pérot de l'hydrogène ionisé ont permis une meilleure description de la partie ascendante des courbes de rotation en augmentant la résolution de près d'un facteur vingt. La courbe enregistrée fut comparée avec les distributions théoriques par le biais d'un test de conformité, en l'occurrence un test du khi-carré. Nous avons constaté que la mesure de la similarité entre les courbes n'est pas simple, et en tout état de cause devrait faire intervenir des tests perceptifs. Cependant, nous notons les points suivants:

- Les corrections apportées de la partie montante de la courbe de rotation n'entraînent pratiquement pas de changements dans l'importance relative des composantes sombre et lumineuse.
- Malgré la sensibilité et la résolution spatiale de la courbe de rotation résultante, l'analyse de la distribution de masse ne permet pas de favoriser un modèle par rapport à un autre.
- Le manque de cohérence entre les ajustements favorisés par l'étude indépendante de Carignan & Puche (1990) et ceux que nous avons déduit en utilisant le formalisme de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001) et celui de Carignan & Freeman (1985), montre que les modèles de distribution de masse sont sensibles non seulement à la résolution des données, mais aussi à la forme fonctionnelle théorique et au formalisme utilisé.

3.3 Références

- Blais-Ouellette, S. Amram, P. & Carignan, C. (2001). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halo. Astronomical Journal, vol. 121, issue 4, p. 1952-1964.
- Bottinelli, L. Gouguenheim, L. Paturel, G. & de Vaucouleurs, G. (1983). H I line studies of galaxies. II - The 21-cm-width as an extragalactic distance indicator. Astronomy and Astrophysique, vol. 118, p. 4-20
- Burkert, A. (1995). The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies. Astrophysical Journal Letters, vol.447, p. L25-L28.
- Carignan, C. (1983). Photometry and kinematics of pure disk galaxies. Ph.D. thesis, Australian National University, Australia.
- Carignan, C. (1985). Surface photometry of the sculptor group galaxies - NGC 7793, NGC 247, and NGC 300. Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 58, p. 107-124.
- Carignan, C. & Freeman, K. C. (1985). Basic parameters of dark halos in late-type spirals. Astrophysical Journal, vol. 294, p. 494-501.
- Carignan, C. & Puche, D. (1990). H I studies of the Sculptor group galaxies. IV - NGC 247. Astronomical Journal, vol. 100, p. 641-647.
- de Paolis, F. Ingrosso, G. Jetzer, P. & Roncadelli, M. (1998). X-ray emission from dark clusters of MACHOs. Astronomy and Astrophysics, vol. 329, p. 74-80.
- de Vaucouleurs, G. & Davoust, E. (1980). Southern galaxies. VIII – Surface photometry of the SD spiral NGC 7793. Astrophysical Journal, vol.239, p. 783-802.
- Kravtsov, A.V. Klypin, A.A. Bullock, J.S. & Primack, J.R. (1998). The Cores of Dark Matter-dominated Galaxies: Theory versus Observations. Astrophysical Journal, vol.502, p. 48
- Navarro, J.F. Frenk, C.S. & White, S. D.M. (1996). The Structure of Cold Dark Matter Halos. Astrophysical Journal, vol.462, p. 563-575.
- Shostak, G. S. (1977). H I observations of interacting groups of galaxies IN: Proceedings of an International Conference: The Evolution of the Galaxies and its Cosmological Implications, September 8-9 1976, France, p. 489-496.
- Strässle, M. Huser, M. Jetzer, P. & de Paolis, F. (1999). Dark matter in the dwarf galaxy NGC 247. Astronomy and Astrophysics, vol. 349, p. 1-6.
- Swaters, R. (1999). Dark Matter in Late-Type Dwarf Galaxies. Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit Groningen.
- Tenorio-Tagle, G. Bodenheimer, P. & Franco, J. (1988). Supernova explosions inside pre-existing wind-driven cavities - Spherically symmetric models. IN: High energy astrophysics: Supernovae, remnants, active galaxies, cosmology, Proceedings of the Second Workshop, July 12-17 1987, Federal Republic of Germany, p. 77-87.

CHAPITRE 4: SPECTROSCOPIE FABRY-PÉROT DES GALAXIES DU GROUPE SCULPTEUR. II. NGC 300

Située dans le côté le plus rapproché du groupe Sculpteur, NGC 300 est une galaxie spirale, faiblement brillante et de type morphologique SA(s)d. Elle mesure 21.9 x 15.5 arcmin et possède un petit noyau sphérique au centre de son disque, semblable à un amas globulaire. De celui-ci émergent deux bras fortement résolus de faible luminosité de surface qui se fragmentent en plusieurs filaments. Cette galaxie ressemble beaucoup à la galaxie du Triangle M33 (NGC 598), mais est de type légèrement plus tardif (Carignan 1985). Elle se caractérise particulièrement par de nombreuses et lumineuses régions H_{II} qui en font une candidat idéale pour les études portant sur l'abondance chimique (Pagel *et al.* 1979).

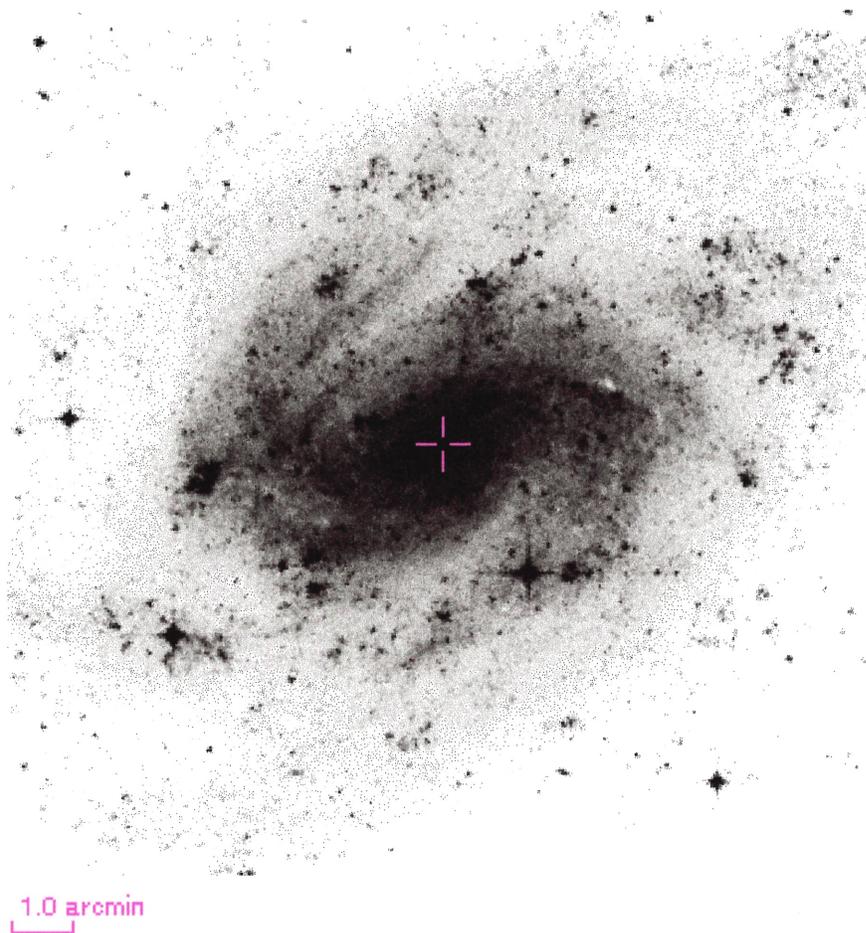


Figure 4-1 Image dans la bande B de NGC 300 (IIIJ UKSchmidt, Digitized Sky Survey).

Dès 1970, Freeman expliquait la différence entre le profil photométrique de NGC 300 et sa courbe de rotation mesurée au radiotélescope de Parkes en Australie (Shobbrook & Robinson 1967) par la présence d'une grande quantité de matière non détectée et présentant une distribution très différente de la loi exponentielle (Freeman 1971). Depuis, lors les observations se sont multipliées. L'étude photométrique de Carignan (1985) adopte, pour cette galaxie présentant une luminosité de surface $(B(o))_c = 22.23 \text{ mag arcsec}^{-2}$ moyenne, une inclinaison du plan équatorial d'environ $i_{\text{phot}} \sim 42.3^\circ$ et un angle de position de $PA_{\text{phot}} \sim 105.6^\circ$. Son contenu en hydrogène atomique surplante d'un facteur deux (Carignan 1985) celui déduit à partir de la corrélation entre l'index de luminosité et le contenu H_I , tel qu'établi par de Vaucouleurs (1977). Cependant, l'auteur conclut tout de même que son contenu en hydrogène ne peut que partiellement contribuer à la masse dans les régions extérieures de la galaxie.

De nombreux auteurs ont étudié son champ de vitesse en radio (Lewis 1972, Rogstad, Chu & Crutcher 1979, Carignan & Freeman 1985, Puche, Carignan & Bosma 1990). Ces derniers déduisent à partir de son profil général une vitesse systémique de $V_{\text{sys}} \sim 144.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ et une densité de flux intégral de $915 \text{ Jy km}\cdot\text{s}^{-1}$. À la distance de $\Delta \sim 1.8 \text{ Mpc}$, ce flux se traduit par une masse de $M_{\text{HI total}} \sim 0.7 \times 10^9 M_\odot$. La distribution H_I étant très étalée, les auteurs utilisent une mosaïque de cinq champs VLA pour cartographier le disque d'hydrogène neutre jusqu'à $2.6 D_{\text{H0}}$ à un niveau de $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Le plan H_I est fortement tordu dans les régions extérieures comprises dans l'intervalle $10 \leq r \leq 20 \text{ arcmin}$. Cette déformation est symétrique des deux côtés de la galaxie. Le champ de vitesses n'est pas régulier, il présente quelques mouvements non circulaires à des rayons intermédiaires sur le côté nord-ouest. La résolution cinématique fournit des paramètres d'orientation variables en fonction du rayon. Dans les régions intermédiaires, les paramètres moyens sont $i_{\text{HI}} \sim 50^\circ$ et $PA_{\text{HI}} \sim 110^\circ$. Enfin, la courbe de rotation est déterminée jusqu'à $1.6 R_{\text{H0}}$. Les vitesses de rotation atteignent une valeur constante à partir de $r = 3 \text{ kpc}$ jusqu'au dernier point de mesure.

En utilisant la courbe de rotation déduite des observations H_I , l'analyse de la distribution de masse donne les résultats suivants: 1) La courbe de rotation expérimentale est modélisée à

l'aide d'un modèle dans lequel un halo sombre est ajouté à la composante lumineuse (étoiles et gaz) puisque la matière lumineuse ne peut expliquer les vitesses élevées encore observées à des rayons supérieurs à 3 kpc. Deux modèles de masse sont étudiés: un modèle de *best-fit* et un modèle de disque maximal. Dans le modèle du disque maximal adopté, le halo a un rayon de caractéristique $r_c = 12.4$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.0064 M_\odot \text{pc}^{-3}$. 2) Au dernier point mesuré de la courbe de rotation, la masse totale est de $2.4 \times 10^{10} M_\odot$, donnant un rapport $(M/L_B)_{\text{global}} \sim 11 M_\odot/L_\odot$. Ce rapport n'est inférieur que d'un facteur de $\cong 10$ au rapport $(M/L_B)_{\text{dyn}}$ obtenu dans l'ensemble du groupe du Sculpteur. Ainsi, en supposant que NGC 300 est représentative des autres galaxies spirales du groupe du Sculpteur, les auteurs concluent qu'une grande partie de la matière sombre serait répartie autour des galaxies.

Marcelin, Boulesteix & Georgelin (1985) ont obtenu le premier champ de vitesses détaillé de son contenu en hydrogène ionisé. Le patron général de celui-ci s'avère relativement symétrique par rapport au noyau, avec un angle de position de $PA_{H\alpha} \sim 105^\circ$ en parfait accord avec le résultat de Carignan (1985). En revanche, les axes mineur et majeur ne sont pas perpendiculaires, contrairement à ce que devrait engendrer dans un disque un mouvement purement circulaire. Les auteurs proposent deux explications. La première évoque un mouvement radial de contraction et est supportée par la détection de larges nuages H_I autour de cette galaxie (Mathewson *et al.* 1975, Rogstad *et al.* 1979, Carignan & Freeman 1975). La seconde appuie l'hypothèse d'un gauchissement au sein du disque galactique tel qu'initialement proposé par Shobbrook & Robinson (1967), hypothèse qui fut par la suite soigneusement étudiée par Rogstad, Chu & Crutcher (1979). Marcelin, Boulesteix & Georgelin (1985) concluent leur étude cinématique en indiquant que le gauchissement du disque s'étend plus que prévu vers le centre, avec un angle de position allant de $PA_{H\alpha} \sim 90^\circ$ près du centre jusqu'à $PA_{H\alpha} \sim 150^\circ$ à 20 arcmin du noyau en passant par $PA_{H\alpha} \sim 105^\circ$ à 10 arcmin.

Le Tableau 4-1 (p. 54) présente les principaux résultats des études cinématiques portant sur NGC 300. Pour notre part, nous introduisons, par des observations Fabry-Pérot de l'émission H_α , la cinématique à haute résolution des parties centrales de NGC 300. Ces nouvelles observations se justifient par la nécessité de données cinématiques uniformes, et sensibles, pour mesurer le signal loin du disque stellaire, et d'une résolution suffisante pour

établir des mesures bien définies au cœur de la galaxie. Le Tableau 4-2 (p. 55) résume les paramètres des observations réalisées le 2 septembre 1999 avec l'instrument Cigale (voir section 2.3, p. 16) sur le télescope de 3.60m de l'ESO à La Silla, au Chili. Le Tableau 4-3 (p. 56) fournit les paramètres optiques retenus pour la présente étude.

Tableau 4-1 Principaux résultats des études portant sur NGC 300

Auteur(s)	Carignan 1985	Puche, Carignan & Bosma 1990
Nature des observations	Photométrie de surface Plaqué Schmidt Siding Spring 61cm télescope	Observations à 21 cm Radiotélescope VLA
Principaux résultats	$\Delta = 1.90 \pm 0.18$ Mpc $(1' \approx 0.553$ kpc) $B(o)_c = 22.23$ mag arcsec ⁻² $M_B^{0,i} = -17.89$ $q = b/a = 0.74 \pm 0.07$ $D_{25} = 19.6'$ $R_{HO} = 11.7'$ $i_{phot} = 42.3 \pm 3.0^\circ$ $PA_{phot} = 105.6 \pm 1.8^\circ$	Pour $\Delta = 1.8$ Mpc : $V_{sys} = 144.5 \pm 3.0$ km s ⁻¹ $i_{HI} \sim 50^\circ$ $PA_{HI} \sim 110^\circ$ * * * $r_c = 12.4$ kpc $\rho_0 = 0.0064 M_\odot pc^{-3}$ $M_{HI} = 0.7 \pm \times 10^9 M_\odot$ À R_{HO} ($R_{HO} = 6.08$ kpc): $M_{dark}/M_{lum} \sim 1.1$ $(M/L_B)_{global} \sim 4.7 M_\odot/L_\odot$ Au dernier point ($r = 10.6$ kpc): $M_{dark}/M_{lum} \sim 3.7$ $(M/L_B)_{global} \sim 11.0 M_\odot/L_\odot$

Tableau 4-2 Paramètres des observations Fabry-Pérot de NGC 300

Dates des observations	2 septembre, 1999
Télescope	3.6m ESO
Location	La Silla, Chili
Instrumentation:	
Instrument focal	Cigale au foyer Cassegrain
Détecteur IPCS	256x256 (Thompson)
Étalon de Fabry-Pérot à balayage	ET50-832 (Qbc)
Ordre d'interférence	765 @ $\lambda_{H\alpha}$
Finesse moyenne dans le champ	23
Lampe d'échantillonnage	Néon ($\lambda = 6598.95 \text{ \AA}$)
Durée	
Par canal	10 sec/canal
Nombre de cycles	5
Total	53 min 20 sec
Filtre	$\lambda = 6570.3 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 13.7 \text{ \AA}$
Paramètres spatiaux	
Grandeur du champ	7.8'x7.8'
Taille des pixels	0.91" pix ⁻¹
Nombre de champs	4
Paramètres spectraux	
Nombre de canaux	64
Intervalle spectral libre	8.58 \AA (392 km s ⁻¹)
Échantillonnage	0.13 \AA (6.1 km s ⁻¹) / canal

Tableau 4-3 Paramètres intrinsèques de NGC 300

Type morphologique ^a	SA(s)d
RA (J2000.0)	00h 54m 53s. 47
Dec (J2000.0)	-37° 41' 00" 0
L	299°.21
B	-79°.42
Distance adoptée (Mpc) ^a	1.90 ± 0.18 (1' ≈ 0.52 kpc)
Rapport moyen des axes, q = b/a ^a	0.74 ± 0.07
Inclinaison, i ^a	42 ± 3°
Diamètre de l'isophote à $\mu_B = 25$ mag arcsec ² , D ₂₅ ^a	19.6'
Axe majeur, PA ^a	105.6 ± 1.8°
Excentricité du disque stellaire ^a	0.12
Longueur d'échelle exponentielle (kpc) ^a	2.06
Rayon d'Holmberg, R _{HO} ^a	11.7'
Magnitude absolue, M _B ^a	-17.89
Luminosité totale, L _B	2.13 x 10 ⁹ L _⊙
Absorption galactique, A _B ^c	0.02
Vitesse radiale héliocentrique (km s ⁻¹) ^b	144.5 ± 3

^a Carignan (1985)

^b Puche, Carignan & Bosma (1990)

^c Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC3)

4.1 Étude cinématique

Pour mesurer les vitesses radiales héliocentriques de NGC 300, nous utilisons une mosaïque de 4 champs. Le champ de vue résultant est de 7.8×7.8 arcmin. La Figure 4-2 (p. 58) de gauche montre les vitesses radiales obtenues à partir du champ de profil H_{α} . Le champ des vitesses de NGC 300 balaie un intervalle allant de 100 à $220 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. La Figure 4-2 (p. 58) de droite présente l'image monochromatique de l'émission H_{α} de la même région. Nous observons que les parties centrales du disque sont dépourvues d'émission H_{α} .

La couverture incomplète de l'émission H_{α} de NGC 300 (due à la nature discrète des régions H_{II}) rend les techniques classiques, présentées à la section 2.5 (p. 18), tout à fait inutilisables pour établir sa courbe de rotation. Comme alternative pour évaluer les paramètres cinématiques (PA, i , V_{sys} , X_c , Y_c), nous utilisons un sous-programme d'ADHOC de visualisation interactive (ADW3d). Cette évaluation s'effectue par comparaison directe entre les côtés approchant et fuyant du disque galactique. Le centre dynamique ainsi que les angles de position et d'inclinaison sont déterminés pour un meilleur accord entre les deux côtés de la courbe de rotation.

À partir des 9555 points de mesure, inclus dans un secteur de 100° de part et d'autre du grand axe cinématique, nous déterminons un angle de position PA $\sim 105^\circ$, ainsi qu'une inclinaison $i \sim 50^\circ$ pour la partie centrale de la galaxie. Mentionnons toutefois que cette galaxie est fortement tordue et que, par conséquent, ces deux paramètres cinématiques ne sont pas bien définis. Il en est de même pour la valeur photométrique de l'inclinaison du plan (Carignan 1985). À cet effet, l'étude interférométrique de Marcelin, Boulesteix & Georgelin (1985) laisse sous-entendre qu'une meilleure précision ne peut être obtenue en raison de la turbulence interne du gaz ionisé. Par ailleurs, la faible inclinaison du plan équatorial de la galaxie par rapport au plan tangent au ciel accentue l'importance du facteur correctif nécessaire pour obtenir la vitesse réelle à partir de la vitesse mesurée.

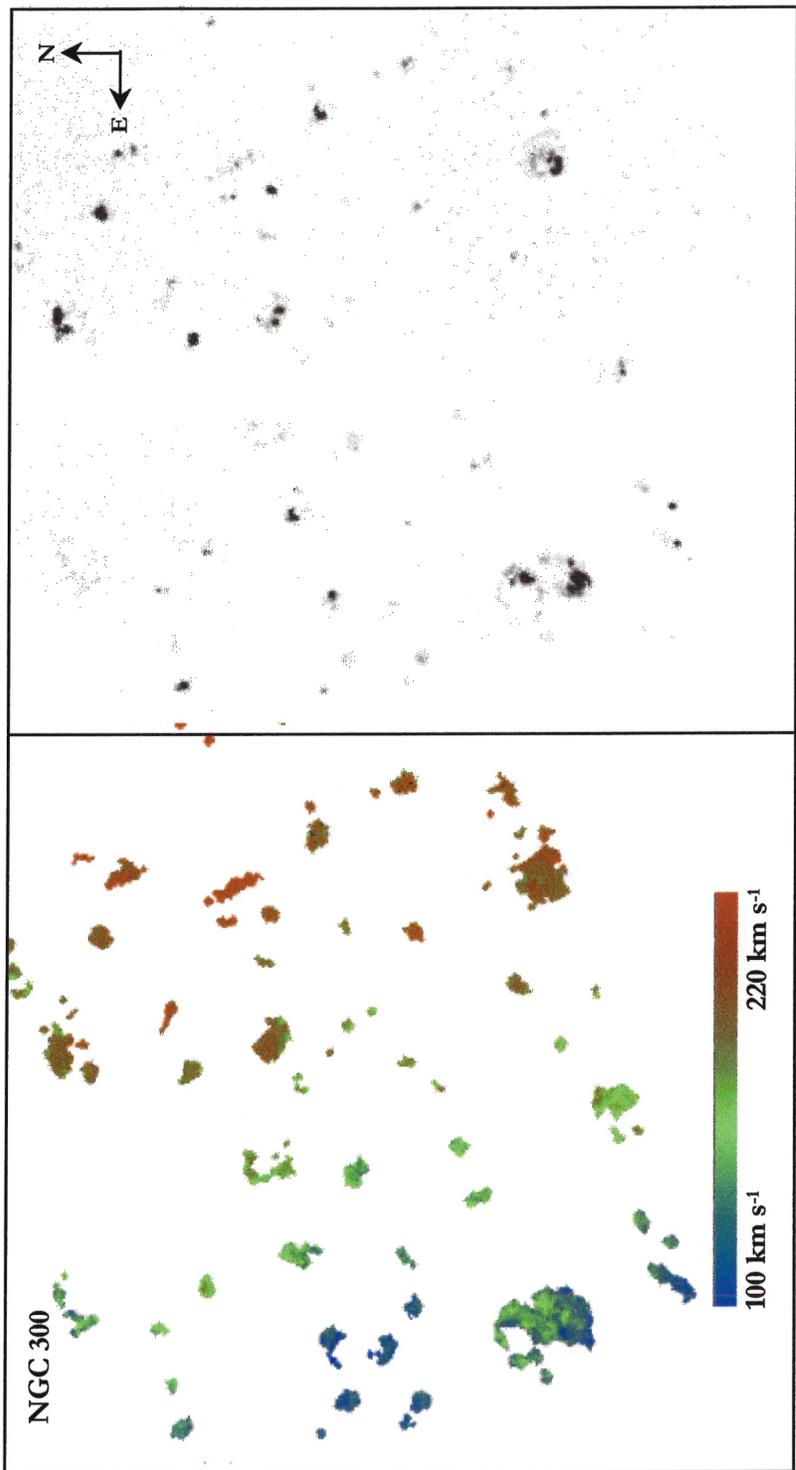


Figure 4-2 Champ de vitesses (à gauche) et image monochromatique de l'émission H α de NGC 300 (à droite).

Nous découpons la projection inverse de NGC 300 sur son plan galactique en couronnes concentriques de 15 arcsec, chacune donnant un point de la courbe de rotation. Nous déduisons ces mesures à partir du champ de vitesse lissé par une gaussienne pour un rayon allant de 15 à 300 arcsec. Les deuxième et quatrième colonnes du Tableau 4-4 (p. 62) présentent les vitesses de rotation de chaque couronne pour le côté approchant et le côté fuyant de la galaxie. Le nombre de pixels servant à tracer chaque point des deux courbes de rotation ainsi que les dispersions de vitesses associées à cette couronne sont également indiquées. Une moyenne pondérée ajuste les points de vitesse obtenus sur l'ensemble de la galaxie. Ceux-ci sont reportés à la dernière colonne du Tableau 4-4 (p. 62). Pour tenir compte des torsions, des asymétries axiales et des mouvements non-circulaires présents dans le disque gazeux, l'erreur sur les mesures de vitesses s'évalue par les différences pondérées entre les deux côtés (voir section 3.1, p. 32).

Les résultats de la présente étude cinématique sont combinés aux données radio dérivées par Puche, Carignan & Bosma (1990) (voir Tableau 4-5, p. 63). La Figure 4-3 (p. 61) présente la courbe de rotation déduite des observations Fabry-Pérot (cercles ouverts) obtenues dans le cadre de la présente étude et celle découlant des observations à 21 cm (cercles pleins) réalisées au radiotélescope VLA par Puche, Carignan & Bosma (1990). Les 16 nouvelles mesures optiques confirment la partie intérieure de la courbe de rotation précédemment tirée des observations $H\alpha$. Seuls les points, compris entre 230 à 250 arcsec, augmentent la pente interne de la courbe de rotation en élevant les valeurs des vitesses de 10 à 25 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Soulignons toutefois que l'erreur sur ces points est plus élevée en raison de l'asymétrie entre le côté fuyant (ligne pointillée) et le côté approchant (ligne brisée) du plan galactique.

Nous observons par ailleurs une forte déformation dans la région centrale du disque galactique de NGC 300. Marcelin, Boulesteix & Georgelin (1985) ont souligné ces distorsions cinématiques et expliquent ces perturbations par le passage des ondes de densité dans le gaz du disque galactique. Par un simple effet gravitationnel, le gaz serait accéléré dans la direction du bras spiral lorsqu'il s'en approche, puis ralenti après le croisement. Ce phénomène fut étudié théoriquement par Roberts (1969). Les variations de vitesse calculées varient de 10 à 30 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui est en accord avec les observations.

Comme pour le cas de NGC 247, nous constatons que les données radio en ouverture de synthèse de NGC 300 ne sont pas affectées par l'étalement de faisceau dû à la basse résolution ($\sim 20''$) des observations. Néanmoins, nos mesures permettent un meilleur échantillonnage dans la partie centrale. De plus, ces observations à haute résolution ($0.91''$ par pixel) offrent la possibilité d'évaluer différents modèles de halo en uniformisant la qualité, la sensibilité et la résolution des données cinématiques du groupe Sculpteur. Les mesures permettant de construire la courbe finale sont ombragées dans la Figure 4-4 (p. 65) et la Figure 4-5 (p. 66). Cette courbe de rotation est ensuite utilisée dans le cadre de l'analyse de la distribution de masse.

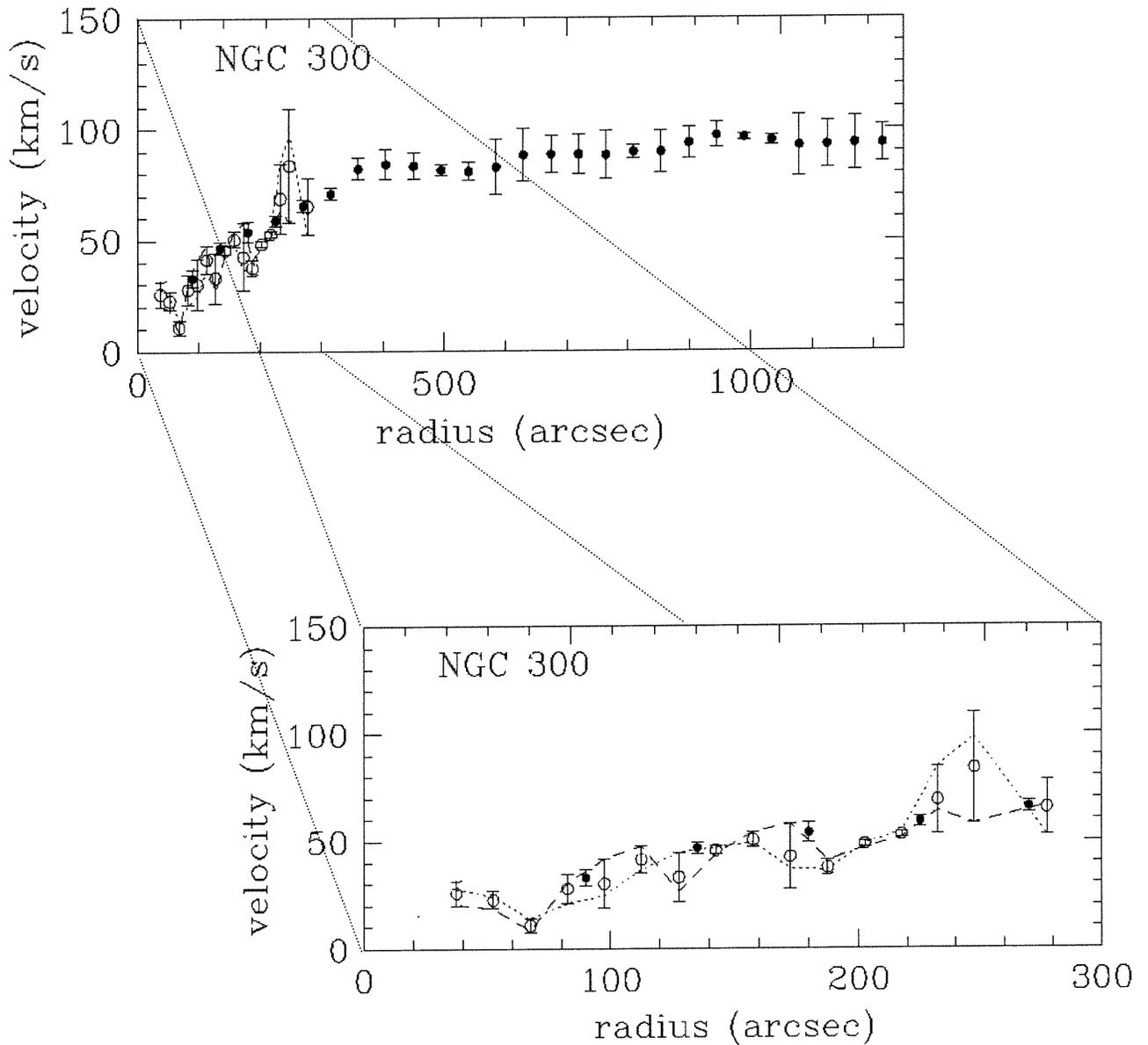


Figure 4-3 Courbe de rotation H α (cercles ouverts) de NGC 300, combinée à la courbe de rotation H γ (cercles pleins) de Puche, Carignan & Bosma (1990). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée.

Tableau 4-4 Courbe de rotation optique de NGC 300

R arcsec (1)	N_{app} (2)	V_{app} km s^{-1} (3)	σ_{ring} km s^{-1} (4)	N_{rec} (5)	V_{rec} km s^{-1} (6)	σ_{ring} km s^{-1} (7)	V km s^{-1} (8)
22.5	11	28.9	29.4	-	-	-	-
37.5	13	20.2	9.1	38	27.9	11.6	25.9 ± 5.7
52.5	62	18.6	16.3	161	24.3	13.5	22.7 ± 4.1
67.5	25	8.3	6.8	19	14.0	10.6	10.8 ± 3.2
82.5	120	30.5	17.5	45	21.1	8.1	27.9 ± 6.9
97.5	65	41.6	15.1	132	24.6	9.6	30.2 ± 11.4
112.5	109	47.5	16.6	147	36.8	16.6	41.4 ± 6.2
127.5	89	26.5	10.8	50	44.5	17.7	33.0 ± 11.5
142.5	58	43.9	6.6	75	47.0	11.6	45.6 ± 1.8
157.5	107	54.0	14.4	319	49.2	20.8	50.4 ± 3.6
172.5	266	57.9	15.3	713	36.9	21.4	42.6 ± 15.3
187.5	225	40.9	20.0	643	36.4	15.1	37.6 ± 3.3
202.5	146	46.8	13.6	726	48.7	16.0	48.4 ± 1.6
217.5	256	51.3	19.6	245	54.2	16.5	52.7 ± 1.5
232.5	291	63.9	16.0	91	84.5	12.7	68.8 ± 15.7
247.5	43	57.8	18.7	77	98.1	13.0	83.6 ± 25.8
262.5	68	77.4	15.5	0	-	-	-
277.5	24	66.2	13.6	2	52.3	126.1	65.1 ± 12.8
292.5	18	92.0	8.6	0	-	-	-

Note: Ces courbes furent dérivées avec $i = 50^\circ$ et $\text{PA} = 105^\circ$.

Les couronnes ombragées sont utilisées pour élaborer les modèles de distributions de masse (voir Section 4.2).

- (1) Rayon de la couronne en seconde d'arc
- (2) Nombre de points de la couronne considérée du côté approchant
- (3) Vitesse de rotation du côté approchant
- (4) Dispersion de vitesse du côté approchant
- (5) Nombre de points de la couronne considérée du côté fuyant
- (6) Vitesse de rotation du côté fuyant
- (7) Dispersion de vitesse du côté fuyant
- (8) Vitesse de rotation moyenne de la couronne

Tableau 4-5 Courbe de rotation radio de NGC 300

R arcsec (1)	V km s ⁻¹ (2)	Incertitude km s ⁻¹ (3)
90	33.1	± 3.9
135	46.7	± 2.7
180	53.9	± 4.7
225	58.8	± 2.5
270	65.6	± 2.6
315	70.8	± 2.7
360	82.1	± 4.9
405	84.1	± 6.6
450	83.4	± 6.2
495	81.5	± 2.7
540	80.8	± 4.0
585	82.8	± 12.4
630	88.2	± 11.7
675	88.5	± 8.5
720	88.4	± 8.9
765	88.2	± 10.8
810	89.5	± 3.1
855	89.7	± 9.5
900	93.7	± 7.3
945	97.0	± 5.7
990	96.2	± 1.5
1035	94.8	± 2.1
1080	92.5	± 13.9
1125	92.8	± 10.6
1170	93.5	± 12.1
1215	93.4	± 8.2

Note: Cette courbe fut dérivée par Puche, Carignan & Bosma (1990). Les couronnes ombragées sont utilisées pour élaborer les modèles de distributions de masse (voir Section 4.2).

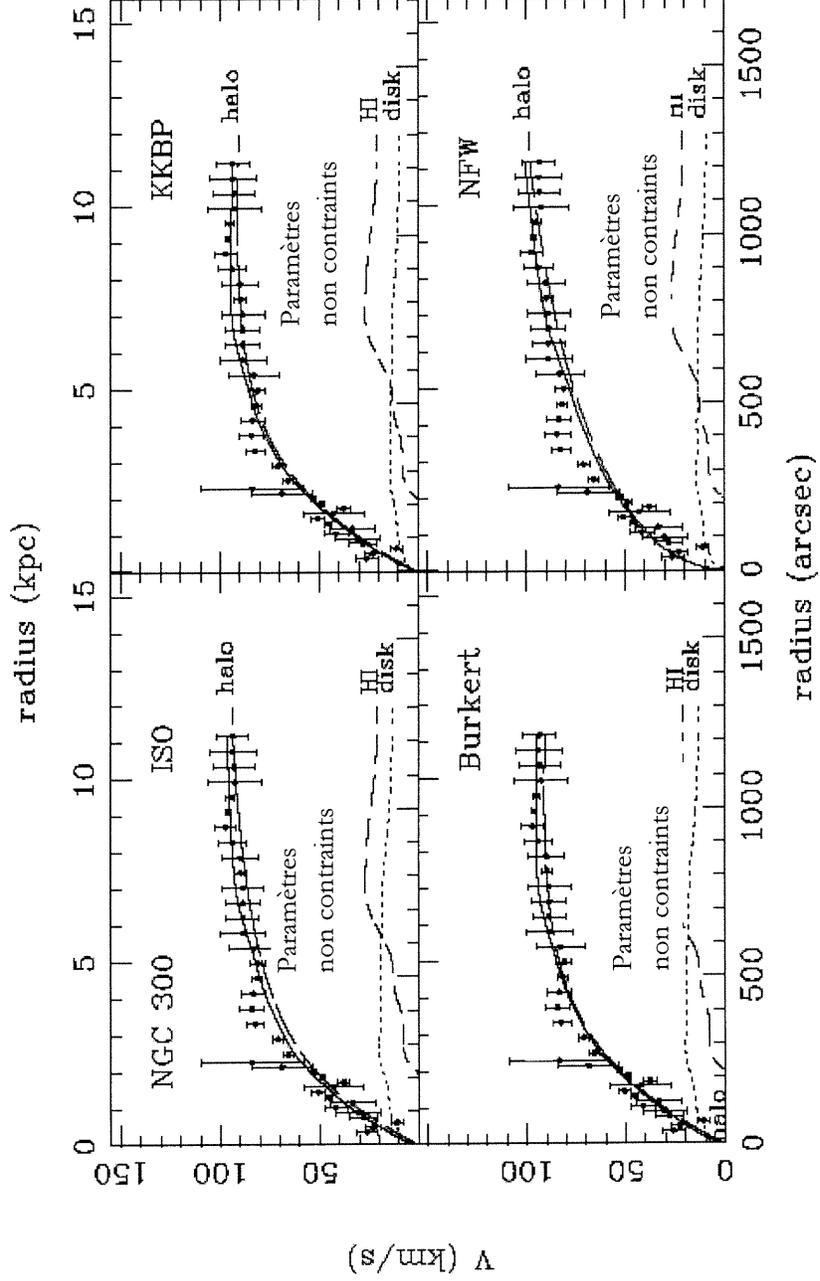
- (1) Rayon de la couronne en seconde d'arc
- (2) Vitesse de rotation moyenne de la couronne
- (3) Différence pondérée entre les deux côtés

4.2 Modèles de masse

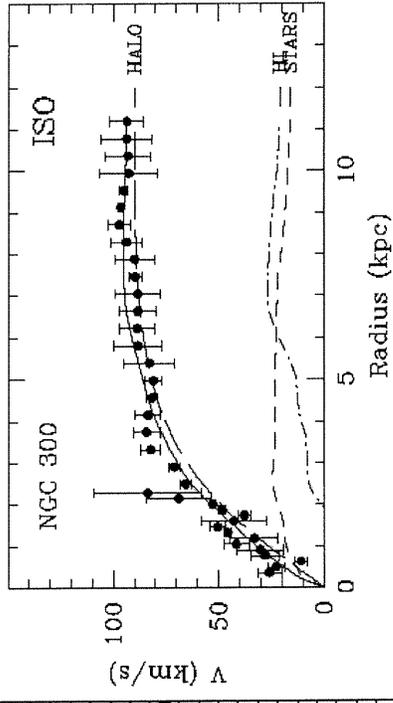
La courbe de rotation multi-longueurs d'onde, dérivée des observations radio et optiques, permet de reconstituer le potentiel gravitationnel de NGC 300, et donc la distribution des composantes lumineuse et sombre de la galaxie à cette échelle. Cette paramétrisation s'effectue grâce à la technique présentée à la section 2.6 (p. 20).

D'abord, nous dérivons la composante stellaire à partir d'un disque exponentiel mince où le rapport $(M/L_B)_*$ est radialement constant. Pour ce faire, nous avons recours au profil radial de lumière réalisé en bande B par Carignan (1985). Par son type morphologique, nous supposons une excentricité du disque stellaire de $q_0 \equiv c/a = 0.12$ (Bottinelli et al 1983). Nous évaluons ensuite la composante gazeuse à l'aide de la distribution radiale H_I de la densité de surface en la multipliant par un facteur de 4/3 pour tenir compte de la fraction d'hélium présente. Nous supposons un disque H_I infiniment mince. Enfin, conformément aux travaux de Blais-Ouellette *et al.* (1999), nous modélisons la composante non-lumineuse en utilisant quatre formes de halo sombre (voir section 2.6, p. 20) allant du profil singulier de la sphère pseudo-isotherme à un modèle de halo non-baryonique distribué selon les prédictions du modèle standard de la masse sombre froide.

Nous utilisons le test khi-carré (somme des carrés des résidus) d'ajustement de Pearson pour minimiser la déviation des vitesses observées par rapport aux valeurs attendues déduites des modèles considérés. La Figure 4-4 (p. 65) présente les modèles de masse qui découlent de la courbe de rotation combinant à la fois des mesures radio et optique. Les trois courbes discontinues de chaque graphique représentent les contributions aux vitesses venant de la masse sous forme gazeuse (H_I et He), d'étoiles et du halo. La courbe continue est la somme des trois composantes. La présente étude couvre l'intervalle de rayon s'étendant jusqu'à 20 arcmin. Similairement, la Figure 4-5 (p. 66) reproduit ces résultats en n'utilisant que les données cinématique à ouverture de synthèse de l'émission de l'hydrogène atomique. Enfin, le Tableau 4-6 (p. 67) introduit les paramètres qui ajustent le mieux les courbes de rotation produites par les modèles de distribution de masse aux courbes de rotation observées.



a) Distributions obtenues en suivant le formalisme de Blais-Ouellette et al. (1999)



b) Distribution obtenue en suivant le formalisme de Carignan & Freeman (1985)

Figure 4-4 Courbe de rotation $H\alpha$ et H_I et modèles de masse de NGC 300, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.

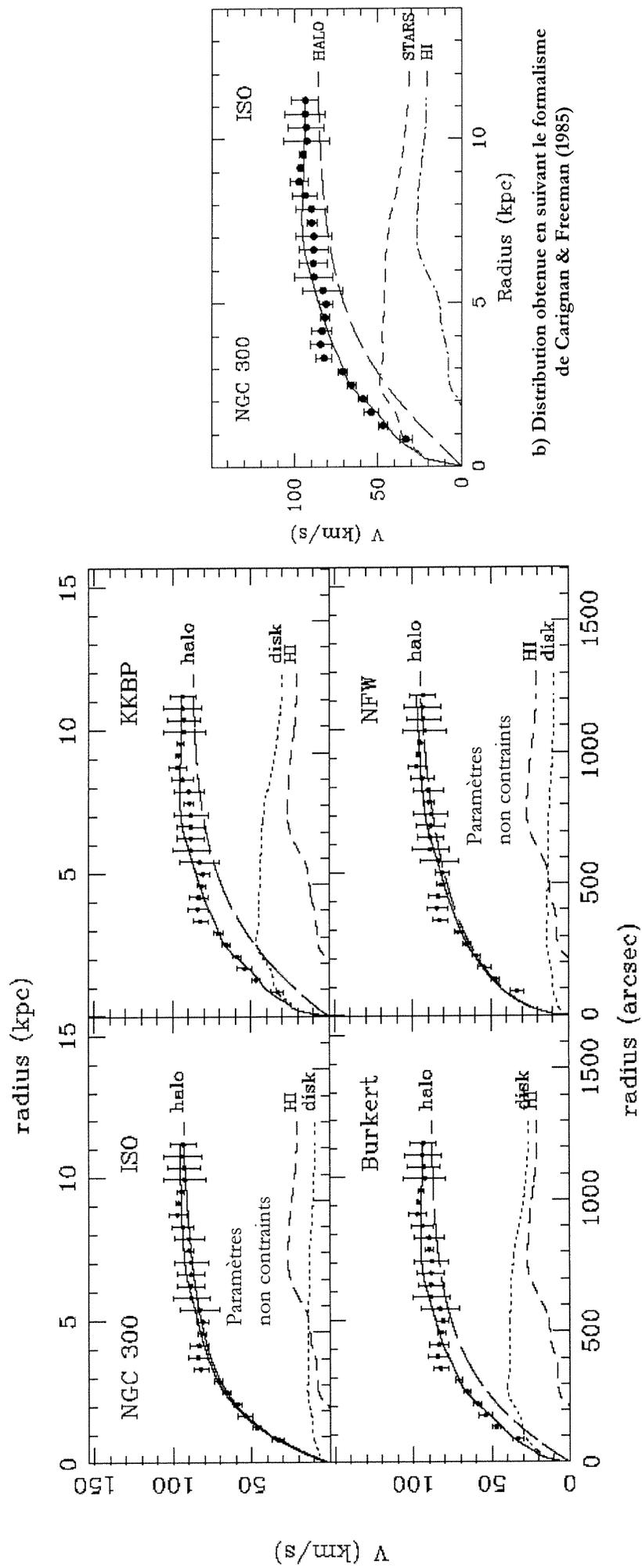


Figure 4-5 Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 300, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.

**Tableau 4-6 Paramètres des modèles de masse pour NGC 300
(profil de lumière en B)**

Modèle	$(M/L_B)_*$ (M_\odot/L_\odot) (1)	r_0 (kpc) (2)	ρ_0 (M_\odot/pc^{-3}) (3)	χ^2
ISO				
H _I	0.1	1.4	0.10	0.41
H _α & H _I	0.2	1.9	0.059	1.99
KKBD				
H _I	1.1	4.8	0.020	0.64
H _α & H _I	0.1	3.5	0.041	1.96
Burkert				
H _I	0.8	3.8	0.046	0.61
H _α & H _I	0.2	3.4	0.062	1.94
NFW				
H _I	0.1	10.8	0.0073	0.72
H _α & H _I	0.1	21.0	0.0027	3.24

- (1) Rapport entre la masse du disque stellaire et sa luminosité;
(2) Rayon de cœur;
(3) Densité centrale de matière non-lumineuse.

Note: Les lignes ombragées indiquent que l'ajustement ne permettait pas de contraindre les paramètres de halo.

À titre de comparaison, mentionnons que le programme de Carignan & Freeman (1985) utilisant un modèle de la sphère pseudo-isotherme fournit les résultats suivants:

$$H_\alpha \text{ \& \& H}_I : (M/L_B)_* = 1.2; r_c = 4.6; \sigma = 54; \chi^2 = 0.67$$

$$H_I : (M/L_B)_* = 0.3; r_c = 3.5; \sigma = 56.5; \chi^2 = 1.95$$

Alors que Puche, Carignan & Bosma (1990) déduisent les paramètres suivants:

$$H_I \quad (M/L_B)_* = 2.0, r_c = 12.4, \rho_0 = 0.006$$

Modèles de masse découlant des observations radio (voir Figure 4-5, p. 66)

La courbe de rotation inférée des observations radio n'est ajustée ni par le modèle de Begeman (1987) (ISO) reproduisant une forme fonctionnelle de la sphère pseudo-isotherme ni par celui de de Navarro, Frank & White (1996) (NFW) découlant de simulations à très haute résolution de l'évolution cosmologique de la masse sombre froide. Ces deux ajustements ne parviennent pas à contraindre les paramètres du halo. Comme illustré aux Figures suivantes, il en résulte des rapports $(M/L_B)_*$ nuls et des patrons chaotiques pour l'examen du khi-carré résiduel de la densité centrale.

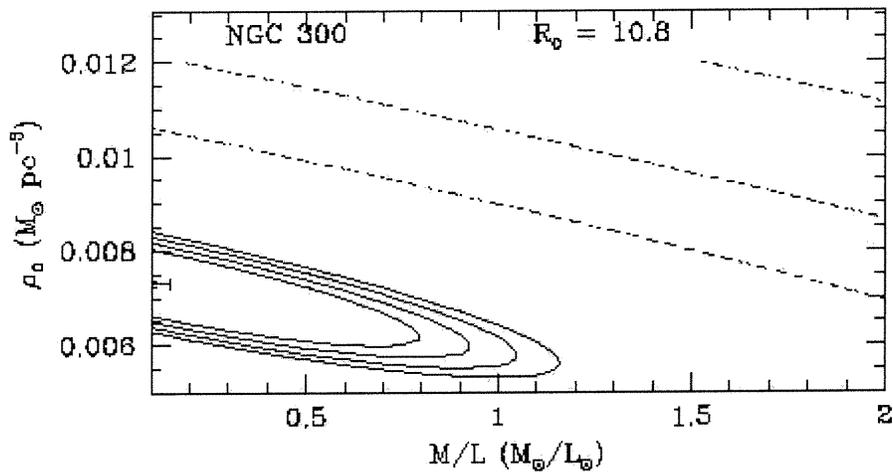


Figure 4-6 Ajustement de Pearson des paramètres du profil NFW

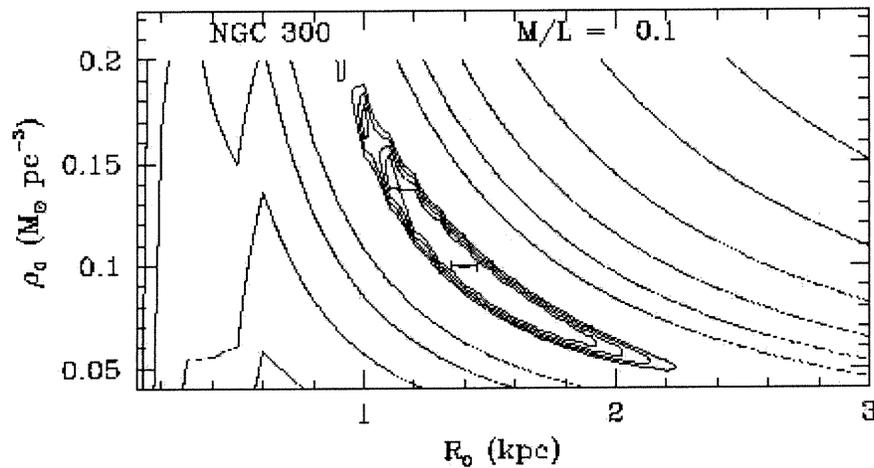


Figure 4-7 Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO

En revanche, le modèle Burkert (1995) (FLAT) et celui de Kravtsov *et al.* (1998) (KKBD) qui reproduisent deux autres variantes de la sphère isotherme, jumelées à une densité de noyau plate (*Flat density core*), produisent des ajustements équivalents des courbes de rotation. Le modèle FLAT favorise un rapport $(M/L_B)_* = 0.8 M_\odot/L_\odot$, un rayon caractéristique $r_c = 3.8$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.046 M_\odot/\text{pc}^{-3}$, alors que le modèle KKBD minimise le khi-carré avec un rapport $(M/L_B)_* = 1.1 M_\odot/L_\odot$, un rayon caractéristique $r_c = 4.8$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.020 M_\odot/\text{pc}^{-3}$. Pour les deux ajustements, nous constatons que la composante sombre domine dès 4 arcmin. Ces résultats furent dérivés pour la distance $\Delta = 1.90 \pm 0.18$ Mpc (Carignan 1985). Mentionnons toutefois que Freedman *et al.* (1992) ont déterminé, à partir de Céphéides, une distance plus précise de $\Delta = 2.1 \pm 0.1$ Mpc. Afin de comparer les différents formalismes, nous avons conservé la valeur de Carignan (1985).

Par ailleurs, en reprenant le formalisme de Carignan & Freeman (1985), avec le modèle de la sphère pseudo-isotherme complète, nous déduisons un rapport $(M/L_B)_* = 0.3 M_\odot/L_\odot$ et un rayon de cœur $r_c = 3.5$ kpc. Cet ajustement diffère significativement de celui trouvé par l'étude indépendante de Puche, Carignan & Bosma (1990) qui, pour les mêmes données cinématiques et un profil de densité très similaire, favorise un rapport $(M/L_B)_* = 2.0 M_\odot/L_\odot$ et un rayon de cœur $r_c = 12.4$ kpc. Rappelons que la définition du rayon de cœur diffère de celle du rayon caractéristique des modèles faisant l'objet principal de cette étude et que, par conséquent, ces valeurs ne peuvent être comparées à celles des modèles précédents

Modèles de masse découlant des observations radio et des nouvelles mesures optiques (voir Figure 4-4, p. 65)

Pour tous les types de profil de densité, déterminés en suivant les indications de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001) et appliqués à la courbe de rotation multi-longueurs d'onde, nous constatons que les paramètres du halo ne peuvent être contraints. Les quatre modèles, de complexité croissante, entraînent un ratio masse-luminosité du disque stellaire nul. En revanche, en reprenant le formalisme de Carignan & Freeman (1985) avec une pseudo-sphère complète, nous déduisons cette fois-ci un rapport $(M/L_B)_* = 1.2 M_\odot/L_\odot$ et

un rayon de cœur $r_c = 4.6$ kpc. Cela se traduit par une augmentation d'un facteur quatre du ratio masse-luminosité du disque stellaire due à l'ajout de données cinématiques à haute résolution dans la partie ascendante de la courbe de rotation.

* * * * *

L'ajout de mesures Fabry-Pérot a permis d'augmenter d'un facteur dix la résolution de la partie ascendante de la courbe rotation de cette galaxie fortement tordue. Malgré la qualité de l'étude cinématique, les résultats de l'étude de la distribution de masse au sein de NGC 300 sont peu concluants. Nous notons les points suivants:

- Les quatre modèles de densité décrits à la Section 2.6 (p. 20) ne parviennent pas à contraindre les paramètres du halo sombre.
- L'analyse de la distribution de masse en reprenant le formalisme de Carignan & Freeman (1985) permet d'identifier un changement substantiel dans l'importance relative des composantes sombre et lumineuse dû à l'ajout de données optiques. Or, nous avons constaté que les données radio en ouverture de synthèse de NGC 300 ne sont pas affectées par l'étalement de faisceau dû à la basse résolution des observations.
- En revanche, l'application du formalisme de Carignan & Freeman (1985) aux mesures cinématiques de Puche, Carignan & Bosma (1990), ne permet pas de reproduire l'ajustement favorisé par ces derniers. Ce résultat renforce l'idée que les modèles de distribution de masse seraient sensibles au formalisme utilisé.

4.3 Références

- Begeman, K. (1987). HI rotation curves of spiral galaxies. Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit te Groningen, The Netherlands. Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001)
- Blais-Ouellette, S. Amram, P. & Carignan, C. (2001). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halo. Astronomical Journal, vol. 121, issue 4, p. 1952-1964.
- Bottinelli, L. Gouguenheim, L. Paturel, G. & de Vaucouleurs, G. (1983). H I line studies of galaxies. II - The 21-cm-width as an extragalactic distance indicator. Astronomy and Astrophysique, vol. 118, p. 4-20
- Burkert, A. (1995). The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies. Astrophysical Journal Letters, vol.447, p. L25-L28.
- Carignan, C. (1985). Surface photometry of the sculptor group galaxies - NGC 7793, NGC 247, and NGC 300. Astrophysical Journal Supplement Seriesuppl, vol. 58, p. 107-124.
- Carignan, C. & Freeman, K. C. (1985). Basic parameters of dark halos in late-type spirals. Astrophysical Journal, vol. 294, p. 494-501.
- de Vaucouleurs (1977). Evolution of galaxies and stellar populations. IN: Tinsley, B. M. & Larson, R. B. ed., Proceedings of a Conference at Yale University. May 19-21, p. 43.
- Freedman, W.L., Madore, B.F., Hawley, S.L., Horowitz, I.K., Mould, J., Navarrete, M. and Sallmen, S. (1992) New Cepheid distances to nearby galaxies based on BVRI CCD photometry. III - NGC 300. Astrophysical Journal, vol. 396, pp. 80-96.
- Freeman, K. C. (1970). On the disks of spiral and so galaxies. Astrophysical Journal, vol. 160, p. 811-830.
- Kravtsov, A.V. Klypin, A.A. Bullock, J.S. & Primack, J.R. (1998). The Cores of Dark Matter-dominated Galaxies: Theory versus Observations. Astrophysical Journal, vol.502, p. 48
- Lewis, B. M. (1972). The Mass-Luminosity Ratio of Spiral Galaxies. Astronomy and Astrophysics, vol. 16, p. 165-171
- Marcelin, M. Boulesteix, J. & Georgelin, Y. P. (1985). The velocity field of the ionized gas in NGC 300. Astronomy and Astrophysics, vol. 151, p. 144-150.
- Mathewson, D. S. Cleary, M. N. Murray, J. D. (1975). Intergalactic H I in the sculptor group. Astrophysical Journal, vol. 195, p. L97-L100.
- Navarro, J.F. Frenk, C.S. & White, S. D.M. (1996). The Structure of Cold Dark Matter Halos. Astrophysical Journal, vol.462, p. 563-575.
- Pagel, B. E. J. Edmunds, M. G. Blackwell, D. E. Chun, M. S. & Smith, G. (1979). On the composition of H II regions in southern galaxies. I - NGC 300 and 1365. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 189, p. 95-113.
- Puche, D. Carignan, C. & Bosma, A. (1990). H I studies of the Sculptor group galaxies. VI - NGC 300. Astronomical Journal, vol. 100, p. 1468-1476.
- Roberts, W. W. (1969). Large-Scale Shock Formation in Spiral Galaxies and its Implications on Star Formation. Astrophysical Journal, vol. 158, p. 123.

Rogstad, D. H. Chu, K. & Crutcher, R. M. (1979). Aperture-synthesis observations of H I in the galaxy NGC 300. Astrophysical Journal, vol. 229, p. 509-513.

Shobbrook, R. R. & Robinson, B. J. (1967). 21 CM observations of NGC 300. Australian Journal of Physics, vol. 20, p. 131-145.

CHAPITRE 5: SPECTROSCOPIE FABRY-PÉROT DES GALAXIES DU GROUPE SCULPTEUR. III. 7793

NGC 7793 est une galaxie spirale, la cinquième plus brillante du groupe Sculpteur. Du type morphologique SA(s)d, elle comprend un noyau central extrêmement réduit qui ne contribue que faiblement à la luminosité totale. Cette galaxie ordinaire présente une structure spirale en filament et elliptique ($b/a = 0.60$) (Carignan 1985). Le spectre optique de son noyau est dominé par des étoiles de caractéristiques métalliques presque solaires. Ces dernières coexistent avec une population plus vieille d'étoiles de faible métallicité (Diaz *et al.* 1982).

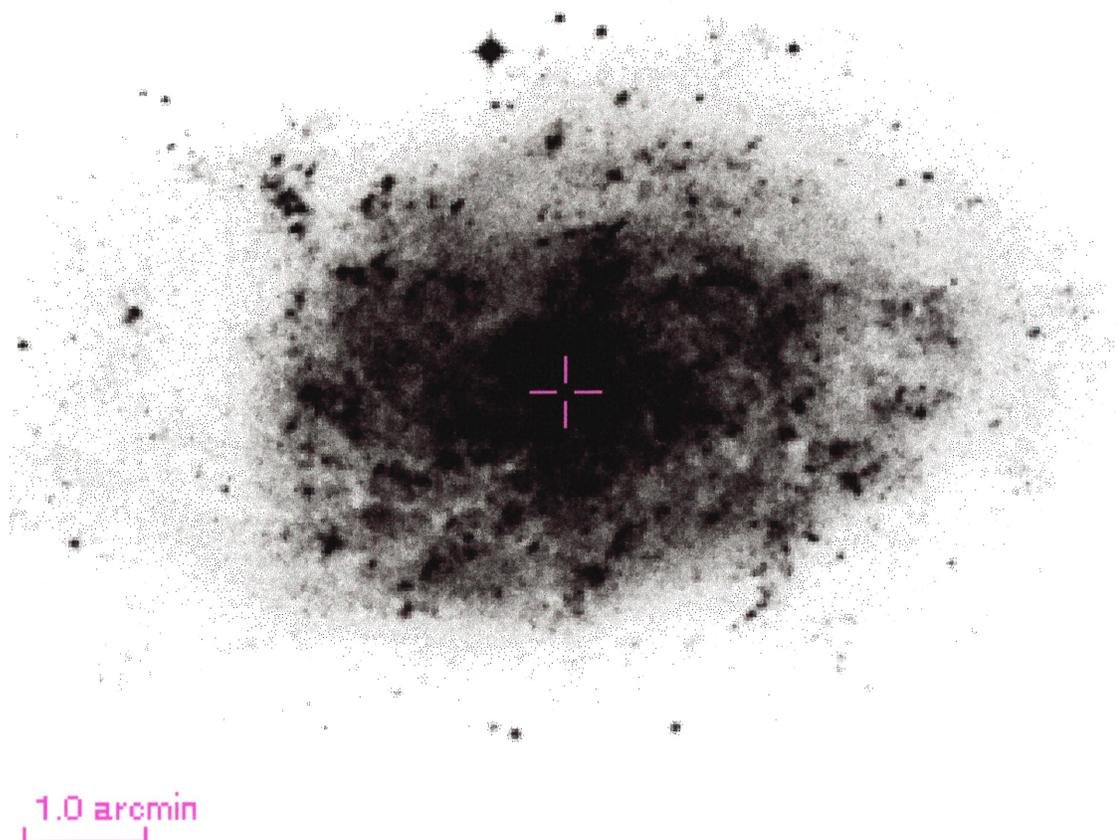


Figure 5-1 Image dans la bande B de NGC 7793 (IIIJ UKSchmidt, Digitized Sky Survey).

Les travaux photométriques de Carignan (1985) situent cette galaxie brillante ($B(o)_c = 20.33 \text{ arcsec}^{-2}$) dans le côté éloigné du groupe Sculpteur, à une distance moyenne de $\Delta \sim 3.38 \text{ Mpc}$. L'auteur favorise également une inclinaison du plan galactique d'environ $i_{\text{phot}} \sim 53.7^\circ$. Les cartes isophotales, exemptes de patrons spiraux, lui permettent d'identifier une région dans la partie Est caractérisée soit par une forte absorption ou encore, par des indications de mouvements non circulaires. Cette région fut également identifiée par de Vaucouleurs et Davoust (1980). Enfin, l'auteur démontre, par la décomposition des profils de luminosité, que le profil de type II caractérise véritablement la vieille population de son disque stellaire.

Son inclinaison, son grand diamètre apparent, ses nombreuses régions H_{II} et son émission $H\alpha$ répandue dans l'ensemble du disque optique font de NGC 7793 un objet idéal pour entreprendre des études cinématiques (Monnet 1971). De plus, NGC 7793 apparaît comme l'une des rares galaxies dont la courbe de rotation est réellement décroissante (Carignan & Freeman 1985). Cependant, bien que le gradient dans les régions extérieures corresponde à celui d'un disque exponentiel standard, un modèle de halo sombre s'avère plus approprié à reproduire la courbe de rotation observée sur l'ensemble de l'intervalle de rayons galactiques (Carignan & Puche 1990). En fait, l'unique particularité de NGC 7793 réside dans son halo, plus centralement concentré que celui des galaxies de même type. L'analyse de la distribution de masse au sein de NGC 7793, entreprise par Carignan & Puche (1990), révèle pour leur modèle du *best-fit* une densité centrale du halo d'environ $\rho_0 \sim 0.038 M_\odot \text{pc}^{-3}$. Ces derniers ont étudié le champ de vitesse de cette galaxie par des observations à ouverture de synthèse de la raie d'émission de l'hydrogène atomique. Du profil général H_{I} , Carignan & Puche (1990) déduisent que la distribution du disque gazeux est bien représentée par une gaussienne avec une longueur d'échelle $b \sim 3.0 \text{ kpc}$. Le disque H_{I} atteint $\sim 1.5 D_{\text{H}\alpha}$ à $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. À la distance estimée de 3.38 Mpc , la masse H_{I} totale est $M_{\text{HI}} \sim 6.8 \times 10^8 M_\odot$. Ceci correspond à un rapport $M_{\text{HI}}/L_B \sim 0.22$. Le champ de vitesses est passablement régulier, avec quelques indications de mouvements non circulaires sur la face Nord. Les auteurs en tirent une vitesse systémique $V_{\text{sys}} \sim 227 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ et une inclinaison moyenne $i_{\text{HI}} \sim 47^\circ$. L'angle de position varie de $PA_{\text{HI}} \sim 290^\circ$, à $r \sim 5 \text{ arcmin}$, à $PA_{\text{HI}} \sim 305^\circ$, à $r \sim 7.5 \text{ arcmin}$.

En utilisant la courbe de rotation déduite des observations H_I , l'analyse de la distribution de masse de Carignan & Puche (1990) donne les résultats suivants: 1) Un modèle basé sur la seule composante lumineuse (étoiles et gaz), à l'exclusion de la matière sombre, ne peut pas être complètement écarté. 2) L'introduction d'un halo sombre isotherme permet toutefois une meilleure représentation de la courbe de rotation dans tout l'intervalle de rayons. Ce halo est cependant de petite taille ($r_c = 2.7$ kpc) et très concentré. Sa densité centrale surpasse d'au moins un facteur 10 celle normalement détectée dans les spirales de même type. Ainsi, par rapport au groupe Sculpteur, NGC 7793 est une des plus brillantes, mais aussi une des plus petites avec un $(M/L_B)_{\text{global}} \sim 5$ comparé à $(M/L_B)_{\text{global}} > \sim 8$ pour les autres membres du groupe. Les auteurs concluent que les indications de mouvements non circulaires au sein de son champ de vitesses pourraient révéler des interactions passées avec d'autres galaxies du groupe. Ces interactions auraient modifié son halo et ses caractéristiques intrinsèques.

Par ailleurs, Brand *et al.* (1989) ont introduit des données CO à haute résolution spectrale. Ils constatent que le spectre de NGC 7793 est asymétrique, avec un côté plus bleui. Cette particularité serait une conséquence de la distribution asymétrique des régions H_{II} dans le cœur de cette galaxie. Plus récemment, Read & Pietsch (1999) ont apporté des observations dans le domaine des rayons X à l'aide du satellite ROSAT. La comparaison entre les propriétés en rayons X de NGC 7793 et celles des autres membres du Groupe du Sculpteur suggère que celle-ci puisse, en terme d'activité, être placée entre ses voisines en phase calme et celles présentant des sursauts de formation stellaire.

Nous présentons, ici, une étude cinématique à haute résolution de l'émission H_α de la région centrale de NGC 7793. Nous avons observé cette galaxie le jeudi 2 septembre 1999 avec l'instrumentation bidimensionnelle à grand champ Cigale (voir section 2.3, p. 16), sur le télescope de 3.60m de l'ESO à La Silla, au Chili. Le Tableau 5-2 (p. 77) introduit les principaux paramètres des observations Fabry-Pérot, alors que le Tableau 5-3 (p. 78) donne une vue d'ensemble des paramètres intrinsèques retenus de NGC 7793.

Tableau 5-1 Principaux résultats des études portant sur NGC 7793

Auteur(s)	Carignan 1985	Carignan & Puche 1990
Nature des observations	Photométrie de surface Plaqué Schmidt Siding Spring 61cm télescope	Observations à 21 cm Radiotélescope VLA
Principaux résultats	$\Delta = 3.38 \pm 0.3$ Mpc $(1' \approx 0.98$ kpc) $B(o)_c = 20.33$ mag arcsec ⁻² $M_{T^0,i}(B) = -18.31$ $q = b/a = 0.60 \pm 0.02$ $D_{25} = 10.1'$ $R_{HO} = 6.1'$ $i_{phot} = 53.7 \pm 1.6^\circ$ $PA_{phot} = 99.3^\circ \pm 1.1^\circ$	Pour $\Delta = 3.38$ Mpc $V_{sys} = 227 \pm 3$ km·s ⁻¹ $i_{HI} = 47 \pm 4^\circ$ $PA_{HI} = 110^\circ$ à 120° * * * $r_c = 2.7$ kpc $\rho = 0.38 M_\odot \text{pc}^{-3}$ $M_{HI\text{ totale}} = 6.8 \pm 0.7 \times 10^8 M_\odot$ À R_{HO} $M_{dark}/M_{lum} \sim 0.8$ $(M/L_B)_{global} \sim 4.4 M_\odot/L_\odot$ Au dernier point ($r = 7.35$ kpc) $M_{dark}/M_{lum} \sim 0.97 M_\odot/L_\odot$ $(M/L_B)_{global} \sim 6.9 M_\odot/L_\odot$

Tableau 5-2 Paramètres des observations Fabry-Pérot de NGC 7793

Dates des observations	2 septembre, 1999
Télescope	3.6m ESO
Location	La Silla, Chili
Instrumentation:	
Instrument focal	Cigale au foyer Cassegrain
Décteur IPCS	256x256 (Thompson)
Étalon de Fabry-Pérot à balayage	ET50-832 (Qbc)
Ordre d'interférence	765 @ $\lambda_{H\alpha}$
Finesse moyenne dans le champ	23
Lampe d'échantillonnage	Néon ($\lambda = 6598.95\text{\AA}$)
Durée	
Par canal	10 sec/canal
Nombre de cycles	5
Total	53 min 20 sec
Filtre	$\lambda = 6570.3 \text{\AA}$, $\Delta\lambda = 13.7 \text{\AA}$
Paramètres spatiaux	
Grandeur du champ	3.9'x3.9'
Taille des pixels	0.91" pix ⁻¹
Nombre de champs	1
Paramètres spectraux	
Nombre de canaux	64
Intervalle spectral libre	8.58 \AA (392 km s ⁻¹)
Échantillonnage	0.13 \AA (6.1 km s ⁻¹) /canal

Tableau 5-3 Paramètres intrinsèques de NGC 7793

Type morphologique ^a	SA(s)d
RA (J2000.0)	23h 57m 49s. 75
Dec (J2000.0)	-32° 35'29" 5
l	4°.51
b	-77°.17
Distance adoptée (Mpc) ^a	3.38 ± 0.30 (1' ≈ 0.98 kpc)
Rapport moyen des axes, q = b/a ^a	0.60 ± 0.02
Inclinaison, i ^a	53.7 ± 1.6°
Diamètre de l'isophote à $\mu_B = 25$ mag arcsec ² , D ₂₅ ^a	10.1'
Axe majeur, PA ^a	279.3 ± 1.1°
Excentricité du disque stellaire ^a	0.12
Longueur d'échelle exponentielle (kpc) ^a	1.1
Rayon d'Holmberg, R _{HO} ^a	6.1'
Magnitude absolue, M _B ^a	-18.31
Luminosité totale, L _B	3.1 x 10 ⁹ L _⊙
Absorption galactique, A _B ^c	0.02
Vitesse radiale héliocentrique (km s ⁻¹) ^b	230 ± 2

^a Carignan (1985)

^b Carignan & Puche (1990)

^c Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC3)

5.1 Étude cinématique

Le champ de vue observé de NGC 7793 est couvert par un récepteur de 3.9×3.9 arcmin. La résolution élevée des observations Fabry-Pérot permet d'obtenir des cartes détaillées de la structure spatiale de l'émission monochromatique H_{α} (voir Figure 5-2 de droite, p. 80). De la carte d'intensité, nous constatons que cette galaxie se caractérise par un nombre élevé de régions et complexes H_{II} très lumineux. Ces régions remplissent une fraction beaucoup plus élevée du disque optique que celles au sein des autres galaxies de l'échantillon. De plus, la carte monochromatique montre que la densité de surface de ces régions décroît exponentiellement avec la distance radiale du centre. L'étude spectrale permet à son tour de déterminer le champ des vitesses radiales héliocentriques de l'hydrogène ionisé (voir Figure 5-2 de gauche, p. 80). Celui-ci représente la même région et couvre un intervalle de vitesses allant de 100 à $370 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. La modélisation du champ des vitesses, par une série de couronnes concentriques indépendamment orientables, permet de déterminer la courbe de rotation de NGC 7793.

Le grand nombre de points de vitesses mesurés (22386) dans un secteur de 80° de part et d'autre du grand axe cinématique permet un excellent ajustement des paramètres cinématiques. Avec une pondération de $\cos(\theta)$ par rapport au grand axe, nous trouvons, par la méthode classique présentée à la section 2.5 (p. 18), un angle moyen de position du grand axe $PA = 280 \pm 6^{\circ}$ et une inclinaison moyenne du plan $i = 44 \pm 7^{\circ}$. Ces valeurs sont comparables à celles déduites par Carignan (1985) lors d'une étude photométrique ($i = 53.7 \pm 1.6^{\circ}$ et $PA = 279.3 \pm 1.1^{\circ}$). La Figure 5-3 (p. 77) illustre la variation avec le rayon du PA et de i pour la partie centrale de la galaxie, c'est-à-dire pour un rayon s'étendant jusqu'à 165 arcsec.

En gardant fixes les paramètres cinématiques ($i \sim 44^{\circ}$ et $PA \sim 280^{\circ}$), nous tirons du champ de vitesses présenté à la Figure 5-2 de gauche (p. 80) les courbes de rotation pour le côté approchant et le côté fuyant de la galaxie. Le Tableau 5-4 (p. 84) présente ces courbes en regroupant les mesures dans des couronnes concentriques de 10 arcsec de large et ce, pour l'intervalle de rayon $5 < r < 165$ arcsec. Le nombre de pixels servant à tracer chaque point des deux courbes de rotation ainsi que les dispersions de vitesses associées à cette couronne sont également indiquées.

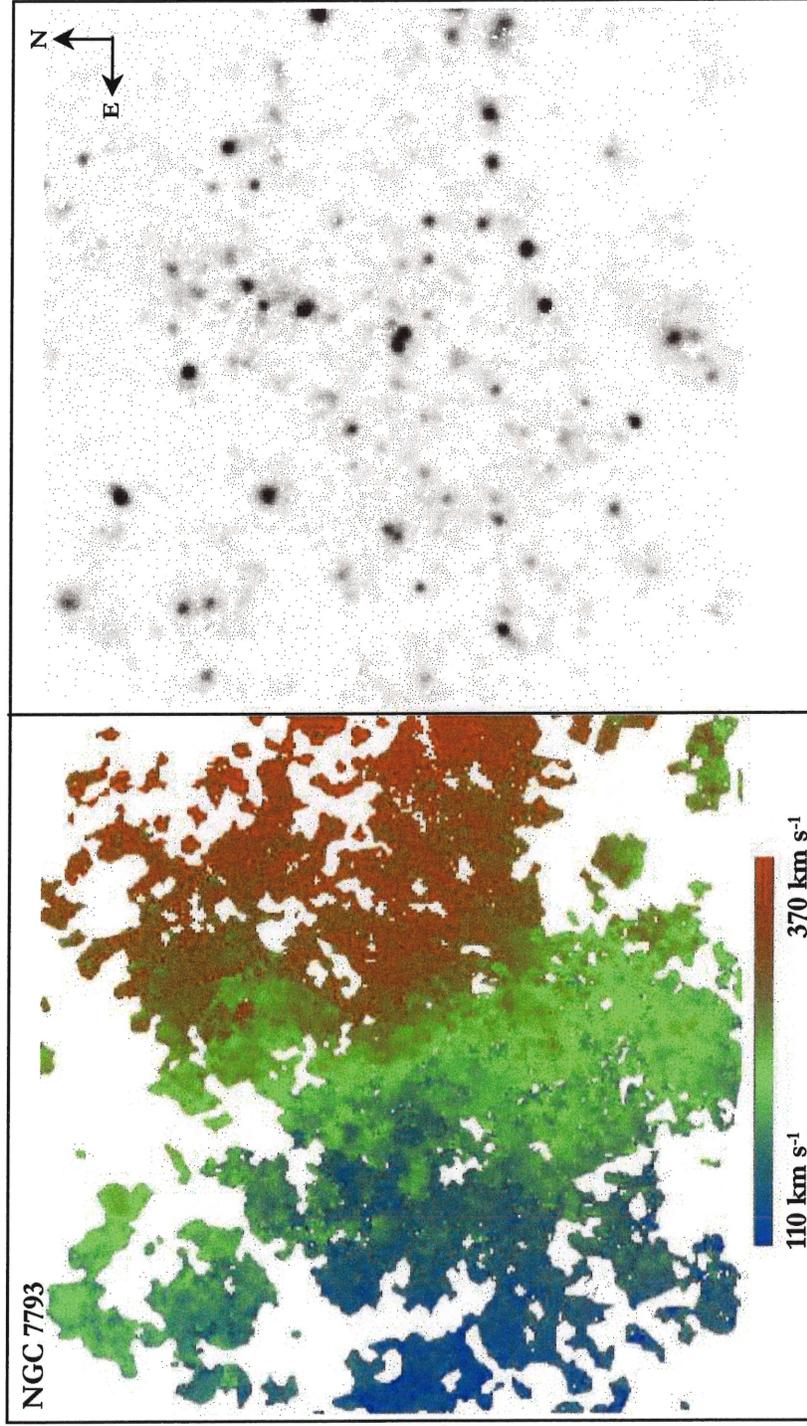


Figure 5-2 Champ de vitesses (à gauche) et image monochromatique de l'émission H α de NGC 7793 (à droite).

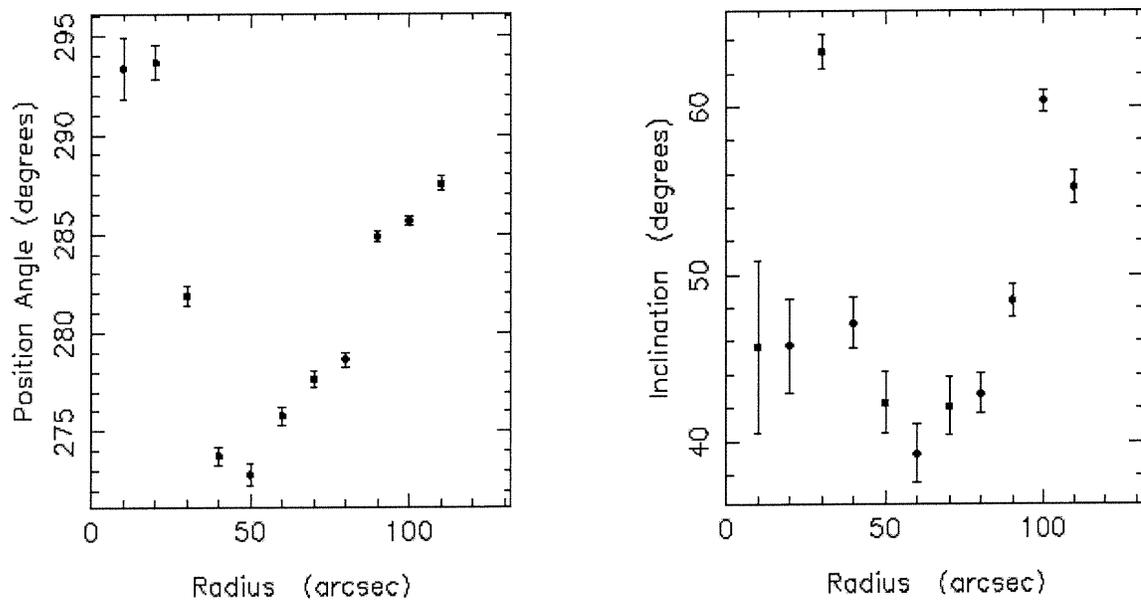


Figure 5-3 Variation avec le rayon des angles de position et d'inclinaison des observations H α de NGC 7793

La dernière colonne du Tableau 5-4 (p. 84) introduit la modélisation finale ($i \sim 44^\circ$ et $PA \sim 280^\circ$) dérivée à l'aide du programme ROCUR en considérant les deux côtés simultanément. La barre d'erreur en chaque couronne représente la différence de vitesse entre le côté fuyant et le côté approchant, pondérée par le nombre de points utilisés sur chaque côté. Dans l'intervalle de rayon allant de 45 à 145 arcsec, nous observons trois petits plateaux, dont celui compris entre 45 et 65 arcsec et préalablement identifié par Carignan (1983).

La Figure 5-4 (p. 83) illustre les résultats de l'étude $H\alpha$ réalisée par Carignan & Puche en 1990 avec un angle d'inclinaison $i_{H\alpha} \sim 47^\circ$ fixe (symbolisés par des cercles pleins) et ceux de cette étude interférométrique (symbolisés par des cercles ouverts). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée. Les trois mesures optiques (symbolisées par des croix) réalisées par Davoust & de Vaucouleurs (1980) et retenues pour compléter la courbe de rotation adoptée par l'étude de Carignan & Puche (1990) y figurent également.

Les observations présentées dans ce chapitre infirment la partie ascendante de la courbe de rotation $H\alpha$. Nous trouvons des vitesses de rotation systématiquement plus élevées (de 5 à 15 km s^{-1}) que celles obtenues par les études radio. Ainsi, pour NGC 7793, l'étalement du faisceau radio dû à la basse résolution des observations ($\sim 35''$) ne permet pas de parfaitement distinguer les vitesses du gaz à petits rayons galactiques et entraîne, de façon artificielle, une légère diminution de la pente interne de la courbe de rotation. Tel que l'a prédit par Bosma (1978), ces corrections sont légères puisque le rapport du diamètre de l'isophote sur la grandeur du faisceau est supérieur à 20 ($R/B \sim 23$). En d'autres termes, la grandeur de la galaxie supporte celle du faisceau. Les mesures détaillées de l'étude radio réalisée par Carignan & Puche en 1990 se retrouvent au Tableau 5-5 (p. 85).

Les données cinématiques de ces deux études sont combinées pour générer une courbe de rotation à la fois sensible et bien résolue. Nous ne conservons les mesures optiques à haute résolution (0.91" par pixel) que pour l'intervalle de rayon allant jusqu'à 120 arcsec. Nous la complétons avec les données radio. Les mesures utilisées pour construire la courbe finale sont ombragées dans les Tableaux 5-4 (p. 84) et 5-5 (p. 85). La courbe résultante atteint un maximum $V_{\text{rot}} \sim 116 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ à $r \sim 4.0 \text{ arcmin}$, puis décroît jusqu'à une vitesse $V_{\text{rot}} \sim 88 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ au dernier point de vitesse observé ($r \sim 7.5 \text{ arcmin}$).

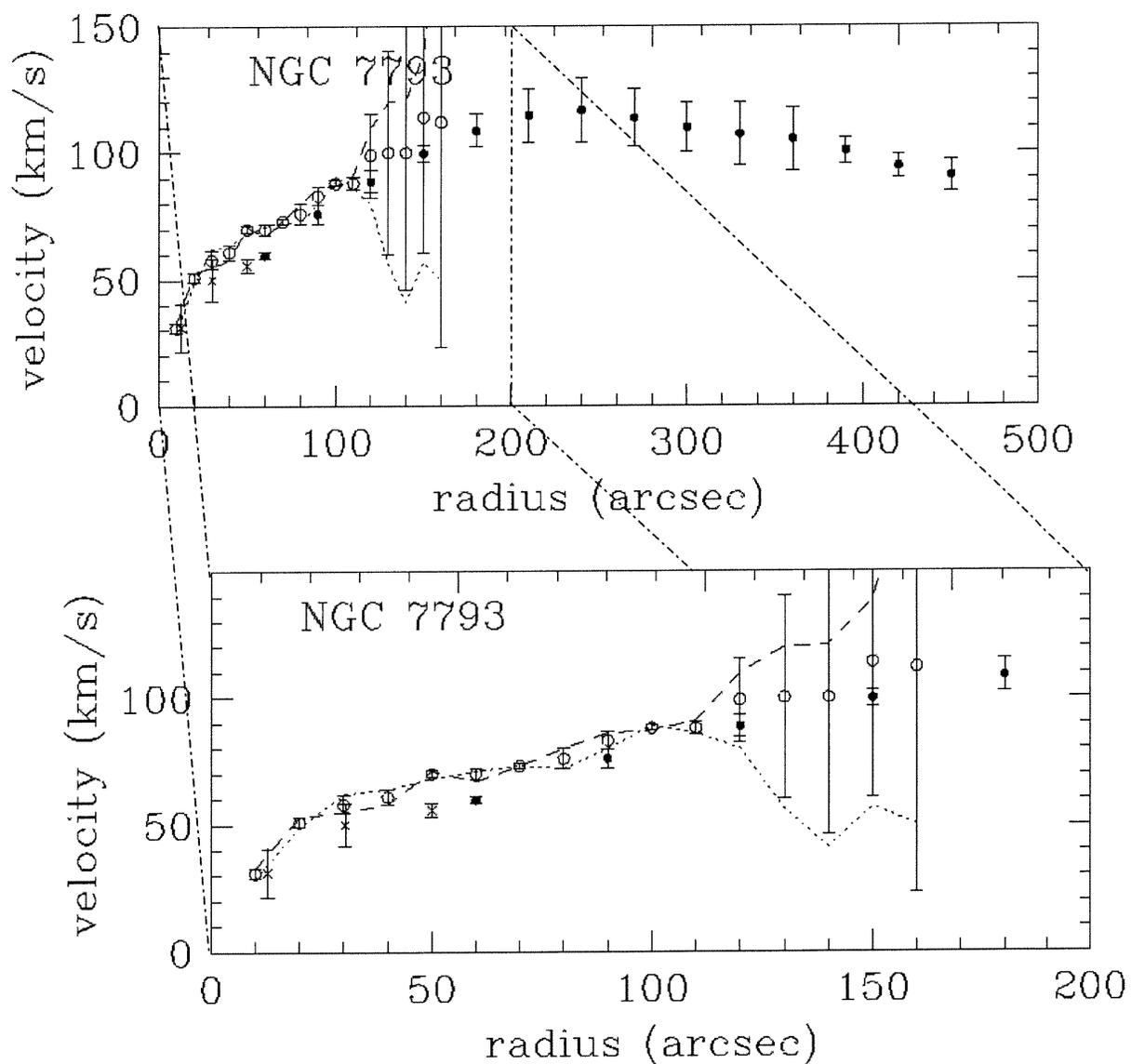


Figure 5-4 Courbe de rotation H α (cercles ouverts) de NGC 7793, combinées à la courbe de rotation H I (cercles pleins) de Carignan & Puche (1990) et aux mesures optiques (croix) de Davoust & de Vaucouleurs (1980). Le côté approchant est indiqué par la ligne brisée et le côté fuyant par la ligne pointillée.

Tableau 5-4 Courbe de rotation optique de NGC 7793

R arcsec (1)	N _{app} (2)	V _{app} km s ⁻¹ (3)	σ _{ring} km s ⁻¹ (4)	N _{rec} (5)	V _{rec} km s ⁻¹ (6)	σ _{ring} km s ⁻¹ (7)	V km s ⁻¹ (8) ± (9)
10	152	32.8	8	152	29.3	4	31.1 ± 1.8
20	304	53.2	4	304	49.0	6	51.1 ± 2.1
30	457	55.0	6	441	61.9	5	58.4 ± 3.6
40	584	57.5	8	575	64.2	6	60.9 ± 3.0
50	744	70.6	7	742	68.0	7	69.5 ± 1.5
60	915	66.8	5	834	71.4	7	68.9 ± 2.1
70	1041	73.2	6	978	73.1	6	73.1 ± 0.1
80	1113	80.3	5	1096	71.5	6	76.0 ± 4.0
90	931	85.8	5	1259	80.2	7	82.7 ± 3.4
100	1105	87.5	5	1308	88.8	8	88.1 ± 1.1
110	1292	90.9	6	1381	85.9	38	88.4 ± 2.6
120	1014	110.0	33	820	79.8	30	96.6 ± 16.6
130	724	120.2	38	428	56.3	50	96.2 ± 40.2
140	559	120.5	34	269	41.3	61	100.0 ± 54.0
150	333	138.8	36	179	56.5	63	114.0 ± 53.3
160	109	201.66	52	153	49.6	57	112.0 ± 88.8

Note: Ces courbes furent dérivées avec $i = 44^\circ$, $PA = 280^\circ$.

Les couronnes ombragées sont utilisées pour élaborer les modèles de distribution de masse (voir Section 5.2).

- (1) Rayon de la couronne en seconde d'arc
- (2) Nombre de points de la couronne considérée du côté approchant
- (3) Vitesse de rotation du côté approchant
- (4) Dispersion de vitesse du côté approchant
- (5) Nombre de points de la couronne considérée du côté fuyant
- (6) Vitesse de rotation du côté fuyant
- (7) Dispersion de vitesse du côté fuyant
- (8) Vitesse de rotation moyenne de la couronne
- (9) Différence pondérée entre les deux côtés

Tableau 5-5 Courbe de rotation radio de NGC 7793

R	V	Incertitude
arcsec	km s ⁻¹	km s ⁻¹
(1)	(2)	(3)
12.8 ^a	31.3	± 9.5
30.4 ^a	50.1	± 8.4
50 ^a	55.7	± 2.8
60	59.6	± 1.4
90	75.8	± 3.8
120	88.7	± 4.5
150	99.7	± 3.2
180	108.6	± 6.5
210	114.7	± 10.6
240	116.7	± 12.5
270	113.7	± 11.4
300	109.9	± 9.9
330	107.2	± 12.6
360	105.2	± 12.5
390	100.6	± 5.2
420	94.5	± 4.6
450	90.8	± 6.1

Note: Cette courbe fut dérivée par Carignan & Puche (1990). Les couronnes ombragées sont utilisées pour élaborer les modèles de distribution de masse (voir Section 5.2).

(a) Mesures optiques provenant de l'étude de Davoust et de Vaucouleurs (1980)

(1) Rayon de la couronne en seconde d'arc

(2) Vitesse de rotation moyenne de la couronne

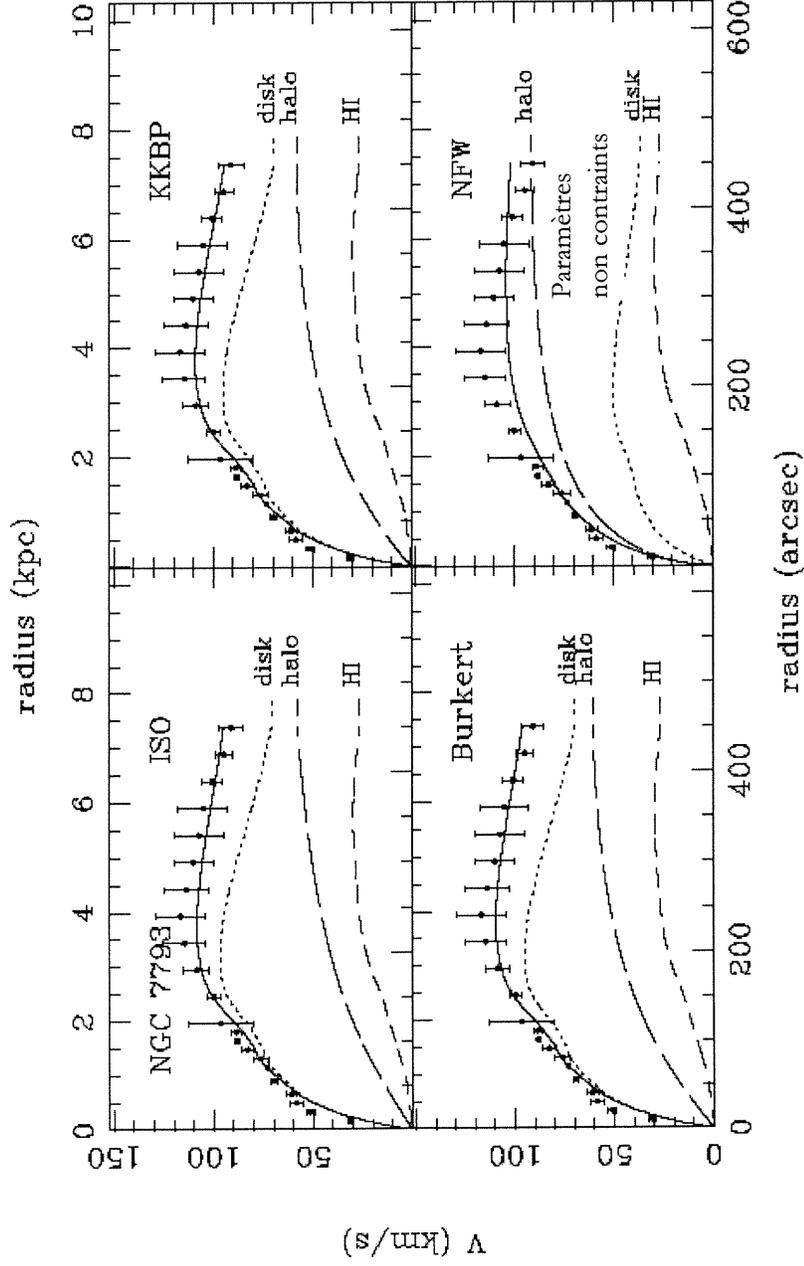
(3) Différence pondérée entre les deux côtés

5.2 Modèles de masse

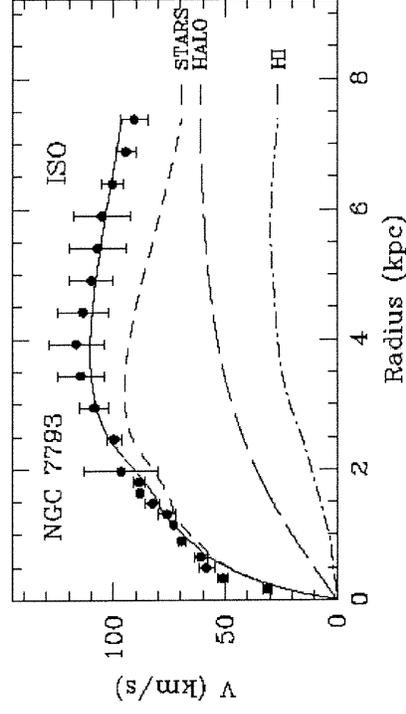
La combinaison des courbes de rotation provenant de l'analyse Fabry-Pérot et des observations à ouverture de synthèse donne une représentation précise du potentiel gravitationnel de NGC 7793 pour des rayons allant jusqu'à 7.5 arcmin. De l'étude cinématique, nous modélisons la distribution de masse en utilisant diverses formes de halo sombre. La technique utilisée est présentée à la section 2.6 (p. 20).

Pour modéliser la contribution de la population stellaire, les profils de luminosité en bande B et I de Carignan (1985) sont successivement utilisés. La dépendance radiale de la brillance de surface s'estime par un disque exponentiel mince. Nous supposons également un rapport $(M/L_B)_*$ radialement constant Carignan (1985) et une excentricité du disque stellaire de $q_0 \equiv c/a = 0.12$ (Bottinelli et al 1983).

Le jugement le plus simple sur l'ajustement des modèles passe par l'examen du khi-carré résiduel. La Figure 5-5 (p. 87) présente les modèles de masse qui découlent de la courbe de rotation combinant à la fois des mesures radio et optiques. La Figure 5-6 (p. 88) illustre les mêmes modèles pour les mesures à ouverture de synthèse de l'hydrogène atomique seulement. Les trois courbes discontinues de chaque graphique représentent les contributions aux vitesses venant de la masse sous forme gazeuse (H_I et He) d'étoiles et du halo. Les courbes continues correspondent à la somme des trois composantes. Le Tableau 5-6 (p. 89) introduit les paramètres qui ajustent le mieux les vitesses produites par les modèles de distribution de masse utilisant le profil de lumière en B, aux vitesses observées. De façon similaire, la Figure 5-8 (p. 92), la Figure 5-9 (p. 93) et le Tableau 5-7 (p. 94) reproduisent l'ensemble de ces résultats pour le profil radial de luminosité dans la bande photométrique I, c'est-à-dire à la limite du domaine visible.

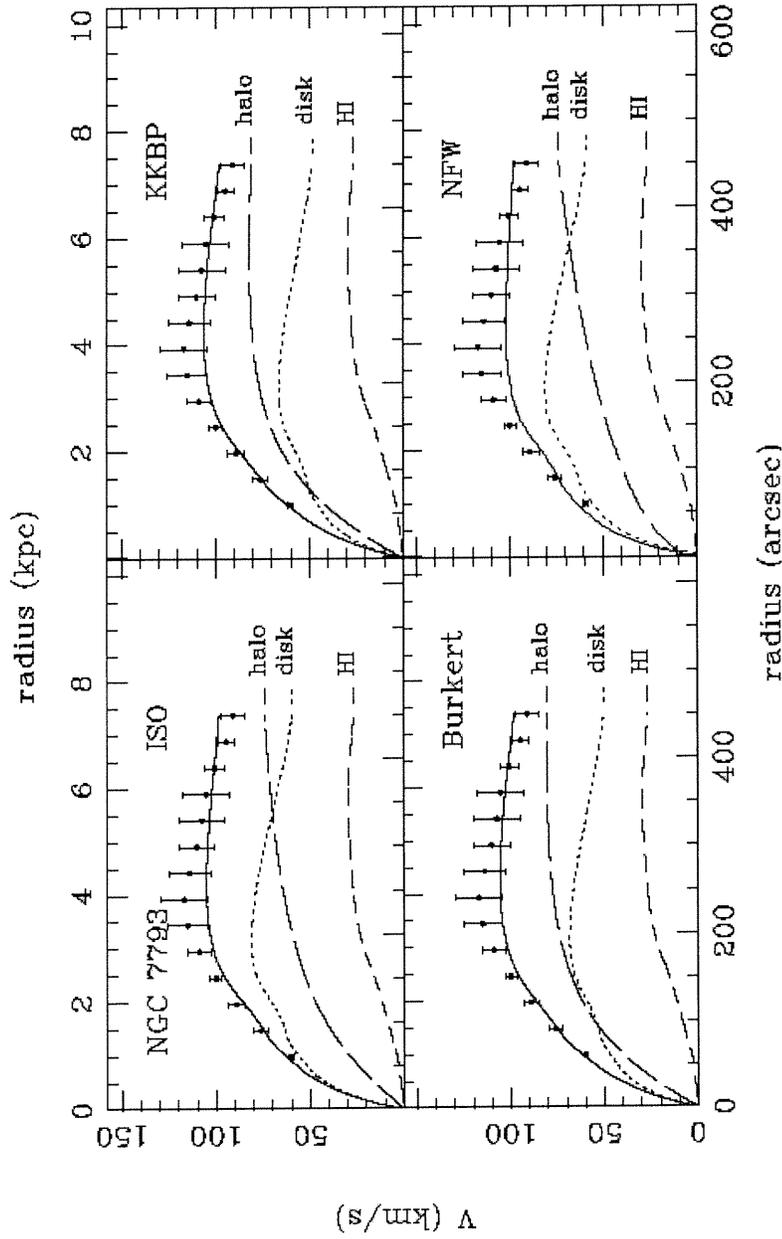


a) Distributions obtenues en suivant le formalisme de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001)

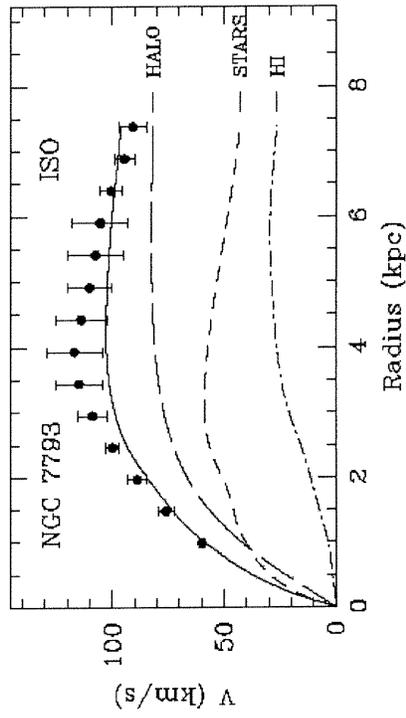


b) Distribution obtenue en suivant le formalisme de Carignan & Freeman (1985)

Figure 5-5 Courbe de rotation H_α et H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.



a) Distributions obtenues en suivant le formalisme de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001)



b) Distribution obtenue en suivant le formalisme de Carignan & Freeman (1985)

Figure 5-6 Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en B modélise la composante stellaire.

Tableau 5-6 Paramètres des modèles de masse pour NGC 7793
(profil de lumière en B)

Modèle	$(M/L_B)_*$ (M_\odot/L_\odot) (1)	r_0 (kpc) (2)	ρ_0 (M_\odot/pc^{-3}) (3)	χ^2
ISO				
H _I	2.1	1.6	0.056	1.29
H _{α} & H _I	3.0	2.5	0.017	5.53
KKBD				
H _I	1.4	2.1	0.092	0.84
H _{α} & H _I	2.9	3.4	0.018	5.48
Burkert				
H _I	1.5	2.0	0.14	0.95
H _{α} & H _I	2.9	3.4	0.029	5.52
NFW				
H _I	2.1	25.6	0.0015	2.38
H _{α} & H _I	0.8	3.9	0.047	3.93

- (1) Rapport entre la masse du disque stellaire et sa luminosité;
(2) Rayon de cœur;
(3) Densité centrale de matière non-lumineuse.

Note: Les lignes ombragées indiquent que l'ajustement ne permettait pas de contraindre les paramètres de halo.

À titre de comparaison, mentionnons que le programme de Carignan & Freeman (1985) utilisant un modèle de la sphère pseudo-isotherme fournit les résultats suivants:

$$\text{H}_\alpha \text{ \& \; H}_\text{I} : (M/L_B)_* = 2.9; r_c = 3.2; \sigma = 39; \chi^2 = 5.43$$

$$\text{H}_\text{I} : (M/L_B)_* = 1.2; r_c = 4.6; \sigma = 54; \chi^2 = 0.67$$

Alors que Carignan & Puche (1990) favorisent les paramètres suivants:

$$\text{H}_\text{I} \quad (M/L_B)_* = 2.2, r_c = 2.5, \rho_0 = 0.39$$

Modèles de masse découlant des observations radio (voir Figure 5-6, p. 88)

Il est à constater d'une part que les quatre paramétrisations du halo de matière sombre faisant l'objet de cette étude (voir Tableau 2-1, p. 21) parviennent à reproduire les vitesses observées en ouverture de synthèse lorsque jumelées au profil de lumière en B. Les ensembles de paramètres qui minimisent le mieux la somme des carrés des résidus sont semblables, à l'exception des paramètres du profil prédit par les simulations de l'évolution cosmologique de la masse sombre froide (profil NFW de Navarro, Frank & White 1996). La densité centrale qui lui est associée est environ cinquante fois plus petite.

Pour tous les modèles qui reproduisent des formes fonctionnelles de la sphère isotherme étudiée, nous constatons que le halo sombre domine à tous les rayons galactiques. Cependant, le modèle de Begeman (1987), que nous appelons au-delà ISO, favorise un ratio masse/luminosité légèrement supérieure à ceux des modèles de Burkert (1995) et de Kravtsov *et al.* (1998) qui utilisent une densité de noyau plate (*Flat density core*). Aucune indication ne nous permet de favoriser un modèle plutôt qu'un autre. Pour être conforme à la section 3.2, nous poursuivons la discussion avec le modèle ISO. Ce dernier ajuste la courbe de rotation avec un rapport $(M/L_B)_* = 2.1 M_\odot/L_\odot$, un rayon caractéristique $r_c = 1.6$ kpc et une densité centrale $\rho_0 = 0.056 M_\odot/\text{pc}^{-3}$.

Modèles de masse découlant des observations radio et des nouvelles mesures optiques (voir Figure 5-5, p. 87)

L'ajout de données cinématiques à haute résolution dans la partie ascendante de la courbe précise la distribution de masse de NGC 7793 en apportant une correction de l'étalement du faisceau des observations à 21 cm. Cela a pour effet de considérablement diminuer la contribution du halo sombre. La courbe combinée révèle que la matière lumineuse domine le potentiel gravitationnel presque à tout rayon. En d'autres termes, les étoiles fournissent la majorité de la masse dans l'intervalle de rayon galactique observé. En revanche, bien que NGC 7793 exhibe une courbe de rotation réellement décroissante, la présence d'un halo de matière sombre gagne en importance dans les régions extérieures et s'avère essentielle pour expliquer la totalité des vitesses observées.

Outre le modèle NFW, tous les profils parviennent plus ou moins à cerner les paramètres du halo. Cependant, l'ajout des mesures optiques a diminué la qualité de cette mise sous contrainte. La Figure suivante illustre à titre d'exemple l'examen du khi-carré résiduel pour la densité centrale du modèle ISO. Malgré tout, les modèles qui représentent des variantes de la sphère isotherme sont équivalents, avec des écarts de khi-carré inférieurs à $\chi^2 < 0.05$ les uns par rapport aux autres.

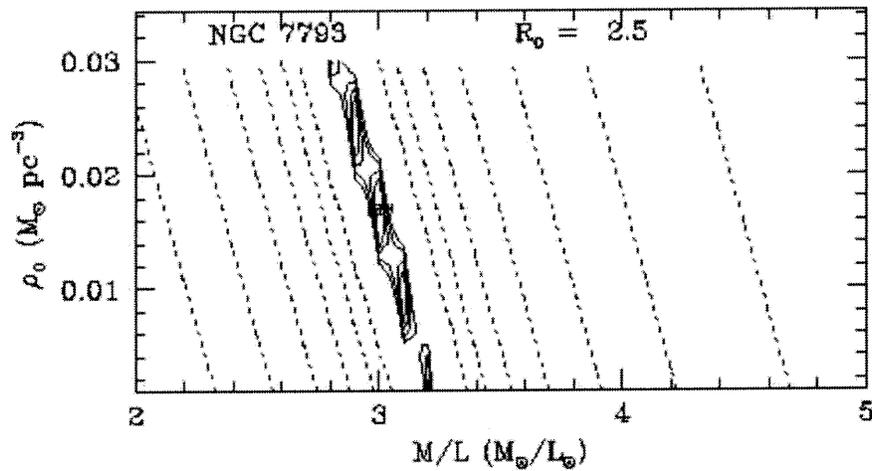


Figure 5-7 Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO

À la distance adoptée de 3.38 Mpc, nous obtenons maintenant pour le modèle ISO un rapport $(M/L_B)_* = 3.0 M_\odot/L_\odot$ pour le disque lumineux. Le rayon caractéristique est légèrement plus grand, avec $r_c = 2.5$ kpc, et moins concentré, avec $\rho_0 = 0.017 M_\odot/\text{pc}^{-3}$.

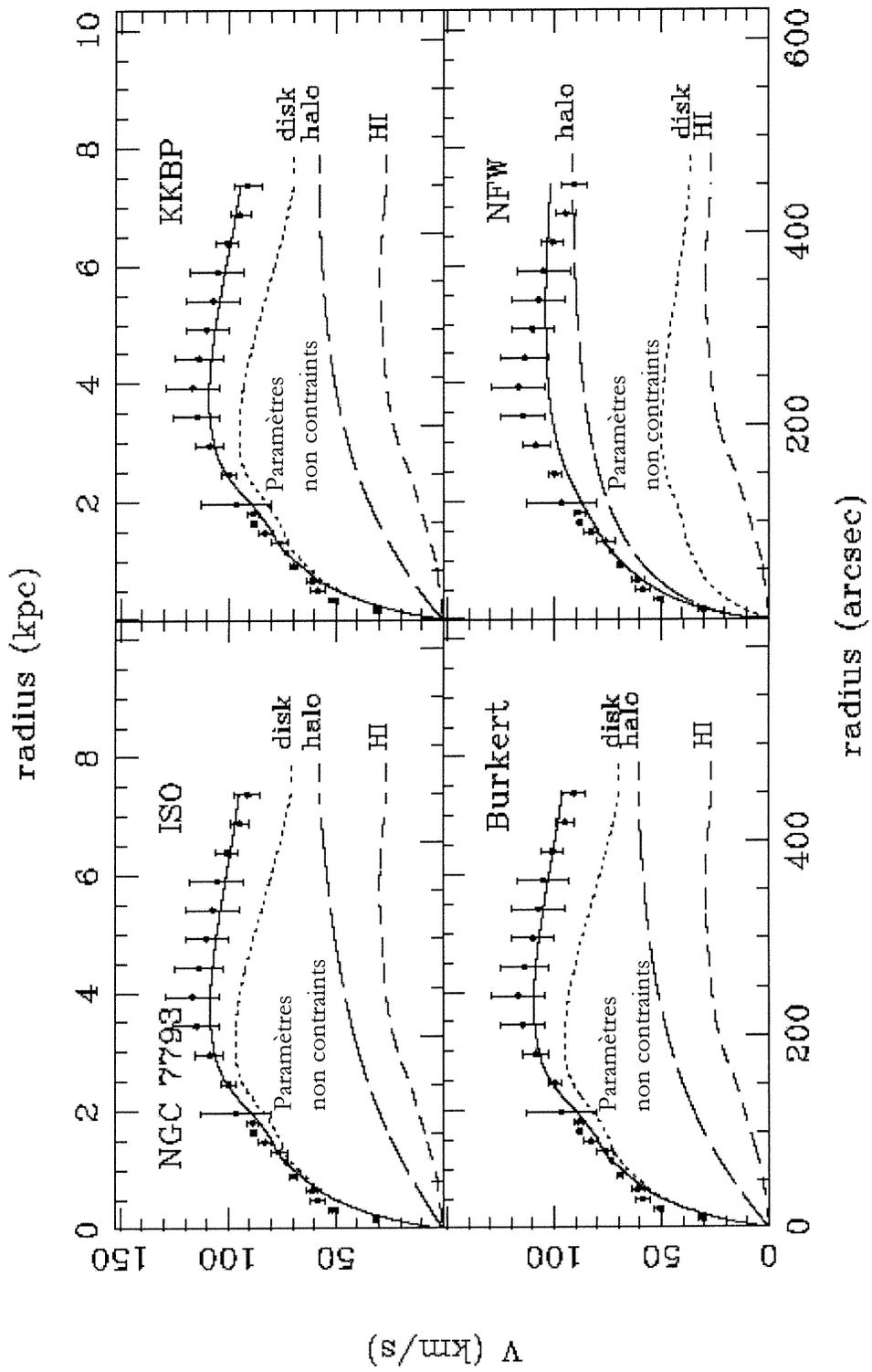


Figure 5-8 Courbe de rotation $H\alpha$ et H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en I modélise la composante stellaire.

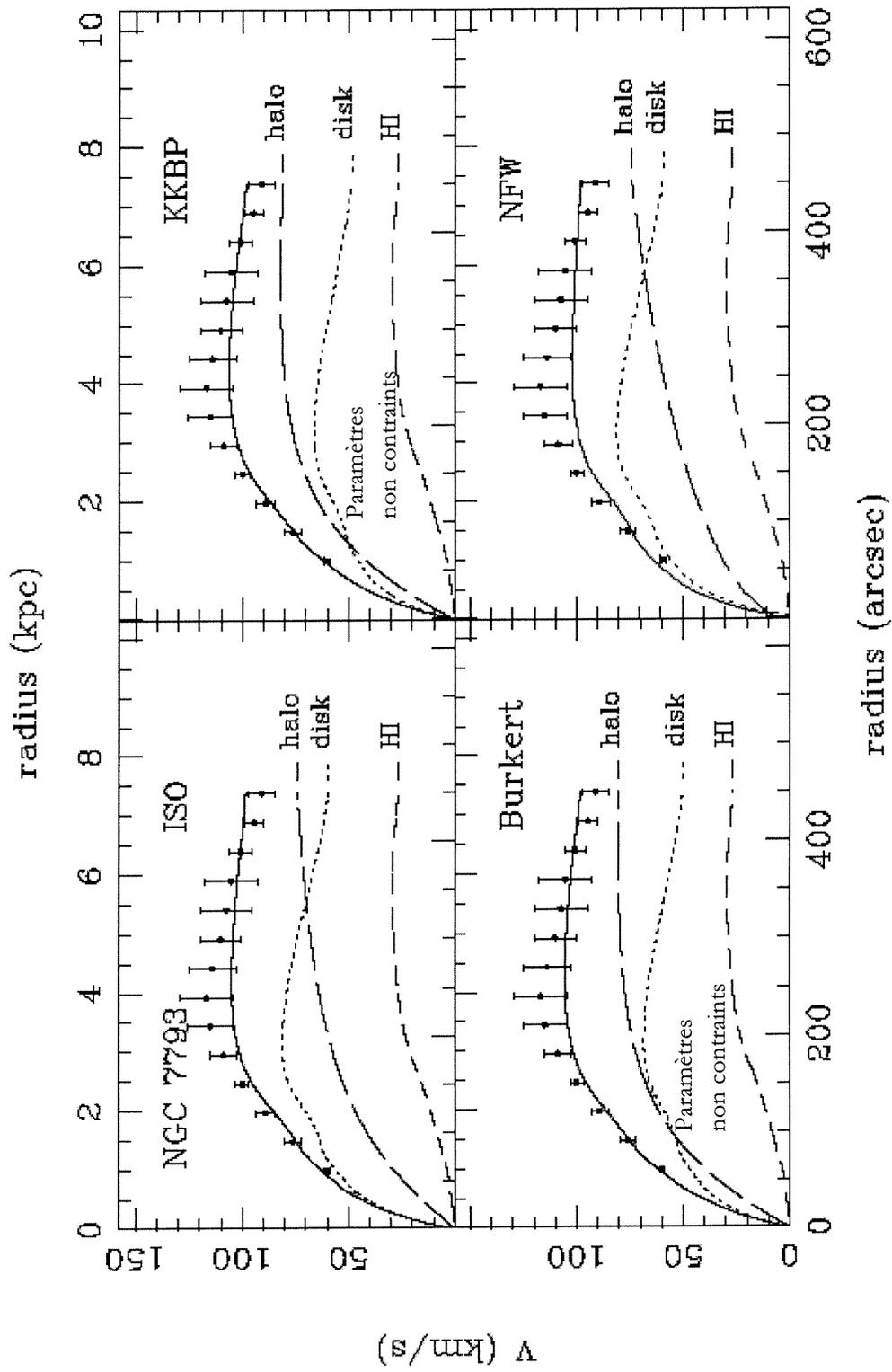


Figure 5-9 Courbe de rotation H_I et modèles de masse de NGC 7793, où le profil de lumière en I modélise la composante stellaire.

Tableau 5-7 Paramètres des modèles de masse pour NGC 7793
(profil de lumière en I)

Modèle	$(M/L_B)_*$ (M_\odot/L_\odot) (1)	r_0 (kpc) (2)	ρ_0 (M_\odot/pc^{-3}) (3)	χ^2
ISO				
H _I	0.8	1.1	0.16	2.91
H _{α} & H _I	1.0	1.0	0.20	4.51
KKBD				
H _I	0.1	1.7	0.21	1.27
H _{α} & H _I	0.9	1.7	0.15	3.5
Burkert				
H _I	0.1	1.5	0.37	1.53
H _{α} & H _I	0.8	1.6	0.27	3.70
NFW				
H _I	0.4	5.8	0.025	4.70
H _{α} & H _I	0.1	3.6	0.066	4.16

- (1) Rapport entre la masse du disque stellaire et sa luminosité;
(2) Rayon de cœur;
(3) Densité centrale de matière non-lumineuse.

Modèles de masse utilisant un profil de lumière en I

Nous constatons qu'aucun des modèles ne parvient à contraindre les paramètres du halo lorsque combinés à la photométrie de surface en bande I. Les ajustements du ratio masse/luminosité soit tendent vers zéro ou encore, comme illustré à la Figure suivante, présentent un patron discontinu. Ce sont donc les modèles utilisant la photométrie de surface en bande B qui permettent un meilleur ajustement des courbes de rotation théoriques sur l'ensemble des mesures cinématiques. Or, la lumière passant dans la bande B est émise par des étoiles jeunes, distribuées de façon irrégulière. Ces étoiles contribuent beaucoup à la luminosité, mais peu à la masse. En revanche, la bande I est associée à la vieille population d'étoiles et est, généralement, plus représentative de la masse sous-jacente du disque stellaire. En pratique toutefois, la photométrie de surface d'une galaxie s'effectue en dessous du seuil de la brillance du ciel. Comme ce dernier est plus brillant d'environ deux magnitudes dans la bande photométrique I, les perturbations superposées au signal utile sont plus significatives. Par conséquent, le profil radial de luminosité obtenu dans cette bande est de moins bonne qualité, ce qui en partie explique les résultats obtenus. Il convient toutefois de rappeler que le spectre optique de son noyau est dominé par des étoiles de premier type, ce qui peut en soit contribuer à cette divergence.

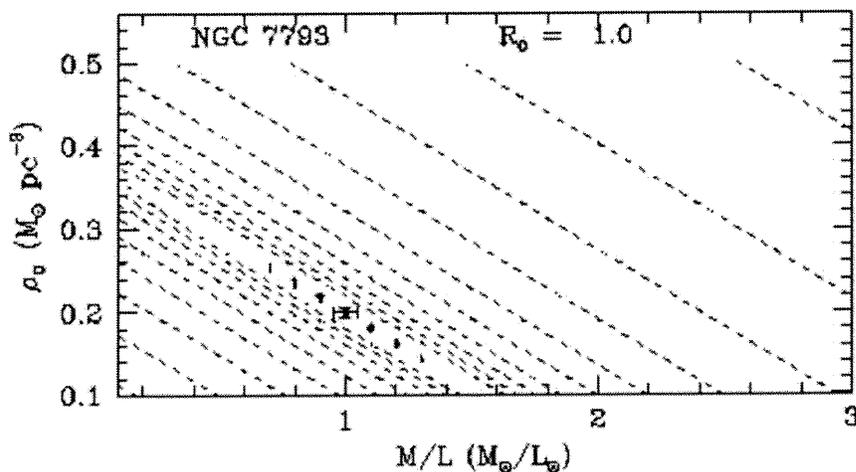


Figure 5-10 Ajustement de Pearson des paramètres du profil ISO

* * * * *

L'ajout de mesures Fabry-Pérot a permis d'augmenter d'un facteur dix la résolution dans le cœur de la galaxie spirale NGC 7793. Ces nouvelles mesures ont infirmé la partie ascendante de la courbe de rotation $H\alpha$. Nous avons trouvé des vitesses de rotation systématiquement plus élevées (de 5 à 15 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$). Ainsi, l'étalement du faisceau radio dû à la basse résolution des observations ne permet pas de parfaitement distinguer les vitesses du gaz à petits rayons galactiques et entraîne, de façon artificielle, une légère diminution de la pente interne de la courbe de rotation. À partir de la nouvelle courbe de rotation multi-longueurs d'onde, nous notons les points suivants:

- Les modèles utilisant la photométrie de surface en bande B permettent un meilleur ajustement des modèles sur l'ensemble des courbes de rotation par rapport à la bande I, associée à la vieille population d'étoiles.
- Les trois modèles qui reproduisent des formes fonctionnelles de la sphère isotherme parviennent à contraindre les paramètres du halo sombre.
- Les corrections apportées de la partie montante des courbes de rotation entraînent des changements dans l'importance relative des composantes sombre et lumineuse. L'impact de ces corrections sur la mesure des distributions de masse demeure inégal d'un modèle à l'autre.
- Le manque de cohérence entre les ajustements favorisés par l'étude indépendante de Carignan & Puche (1990) et ceux que nous avons déduit en utilisant le formalisme de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001) et celui de Carignan & Freeman (1985), montre que les modèles de distribution de masse sont sensibles non seulement à la résolution des données, mais aussi à la forme fonctionnelle théorique et au formalisme utilisé.

5.3 Références

- Begeman, K. (1987). HI rotation curves of spiral galaxies. Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit te Groningen, The Netherlands.
- Blais-Ouellette, S. Amram, P. & Carignan, C. (2001). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halo. Astronomical Journal, vol. 121, issue 4, p. 1952-1964.
- Bosma, A. (1978). The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types. Ph.D. thesis. Rijksuniversiteit Groningen, The Netherlands.
- Bottinelli, L. Gouguenheim, L. Paturel, G. & de Vaucouleurs, G. (1983). H I line studies of galaxies. II - The 21-cm-width as an extragalactic distance indicator. Astronomy and Astrophysique, vol. 118, p. 4-20
- Brand, J. Wouterloot, J. G. A. Becker, R. & Stirpe, G. M. (1989). High spectral-resolution CO observations of NGC 6814 and NGC 7793. Astronomy and Astrophysics, vol. 211, no.2, p. 315-317.
- Burkert, A. (1995). The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies. Astrophysical Journal Letters, vol.447, p. L25-L28.
- Carignan, C. (1983). Photometry and kinematics of pure disk galaxies. Ph.D. thesis, Australian National University, Australia.
- Carignan, C. (1985). Surface photometry of the sculptor group galaxies - NGC 7793, NGC 247, and NGC 300. Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 58, p. 107-124.
- Carignan, C. & Freeman, K. C. (1985). Basic parameters of dark halos in late-type spirals. Astrophysical Journal, vol. 294, p. 494-501.
- Carignan, C. & Puche, D. (1990). H I studies of the Sculptor group galaxies. II - NGC 7793. Astronomical Journal, vol. 100, p. 394-402.
- Davoust, E. & de Vaucouleurs, G. (1980). Velocity fields in late-type galaxies from H-alpha Fabry-Perot interferometry. II - Kinematics and dynamics of the SD spiral NGC 7793. Astrophysical Journal, vol.242, p. 30-52.
- de Vaucouleurs, G. & Davoust, E.(1980). Southern galaxies. VIII - Surface photometry of the SD spiral NGC 7793. Astrophysical Journal, vol.239, p. 783-802.
- Diaz, A. I. Pagel, B. E. J. Edmunds, M. G. Phillips, M. M. (1982). On the nature of the stellar population in the nucleus of the SD galaxy NGC 7793. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 201, p. 49P-55P.
- Kravtsov, A.V. Klypin, A.A. Bullock, J.S. & Primack, J.R. (1998). The Cores of Dark Matter-dominated Galaxies: Theory versus Observations. Astrophysical Journal, vol.502, p. 48
- Monnet, G.(1971). Evidence for a New Class of Very Extended HN Regions in the Disks of SC Galaxies. Astronomy and Astrophysics, vol. 12, p. 379-387.
- Navarro, J.F. Frenk, C.S. & White, S. D.M. (1996). The Structure of Cold Dark Matter Halos. Astrophysical Journal, vol.462, p. 563-575.
- Read, A. M. & Pietsch, W. (1999). ROSAT observations of the Sculptor galaxy NGC 7793. Astronomy and Astrophysics, vol. 341, p. 8-22.

CHAPITRE 6: CONCLUSION

6.1 Rappel des objectifs

Les études cinématiques permettent, en principe, d'établir la masse et l'étendu total des galaxies spirales. La théorie fondamentale pour déterminer la distribution de masse à partir des courbes de rotation a été discutée, entre autres, par Freeman (1975), Bahcall, Schmidt & Soneira (1982), Rubin, Thonnard, & Ford (1982), Carignan & Freeman (1985) et van Albada & Sancisi (1986). L'hydrogène atomique, avec sa raie d'émission à 21 cm de longueur d'onde détectée en radioastronomie, est à privilégier en matière de cinématique, car il se retrouve à très grand rayon galactique. Les observations H_I obtenues pendant le dernier quart du siècle ont fortement étayé cette conclusion et ont également contribué à la compréhension de la structure et des modèles de masse des galaxies (Burstein & Rubin 1985, Kent 1996, Broeils & Courteau 1997).

Les mesures radio souffrent néanmoins de limites liées aux contraintes apportées par les moyens d'observation disponibles. Ces contraintes portent principalement sur la grandeur des interféromètres radio et les temps de pose nécessaires pour obtenir des données à haute résolution spatiale et par le fait même, pour établir avec confiance la cinématique des parties internes des galaxies. En effet, l'étalement du faisceau radio ne permet pas de distinguer les vitesses du gaz à différents rayons galactiques et entraîne bien souvent, de façon artificielle, une diminution de la pente interne des courbes de rotation (Amram *et al.* 1992 à 1996).

L'objectif de ce travail de mémoire est de répondre à ces limites par l'ajout d'observations à haute résolution de l'hydrogène ionisé de trois galaxies spirales appartenant au groupe Sculpteur. Elle fait suite à une série de travaux (Blais-Ouellette *et al.* 1999, 2001) qui ont montré que des données cinématiques bi-dimensionnelles H_{II} à haute résolution étaient indispensables pour bien évaluer la répartition et la quantité de la matière sombre dans le halo des galaxies spirales. En termes plus spécifiques, cet objectif se traduit par la combinaison d'observations radio en synthèse d'ouverture de l'hydrogène atomique et de nouvelles mesures spectroscopiques Fabry-Pérot de la raie Balmer α (λ 6562.8) de l'hydrogène ionisé.

6.2 Échantillon

Le groupe Sculpteur, centrée dans la constellation australe peu apparente désignée par le même nom, constitue un candidat idéal pour les études cinématiques. Situé à 10 millions d'années-lumière, il couvre une surface de 20 degrés de diamètre. De plus, ce groupe de galaxies brillantes se situe à proximité du pôle galactique sud qui bénéficie d'une absorption galactique faible. Les membres du groupe étudiés dans le cadre de cette recherche sont : NGC 247, NGC 300 et NGC 7793. Ces grandes galaxies spirales de type tardif (Sd) se caractérisent par un noyau réduit qui ne contribue que faiblement à la luminosité totale. La modélisation du gaz et de la lumière y est donc facilitée, de même que leur étude systématique.

Dans le cadre de vastes études portant sur la distribution de masse du groupe Sculpteur, Carignan (1985) a réalisé la photométrie de surface des membres du groupe. Leur contenu en hydrogène neutre a également fait l'objet d'une étude cinématique détaillée par le biais d'observations $H\alpha$ à ouverture de synthèse (Carignan & Puche 1988, Carignan & Puche 1990a, Carignan & Puche 1990b, Puche, Carignan & Bosma 1990, Puche, Carignan & Wainscoat 1991, Puche, Carignan & van Gorkom 1991, Puche & Carignan 1991).

6.3 Démarche

Cette thèse a été effectuée selon une démarche comportant deux phases principales : d'abord une étude cinématique permettant l'obtention de courbes de rotation sensibles, pour mesurer le signal loin du disque stellaire, et d'une résolution suffisante, pour établir des mesures bien définies près du centre et enfin, une étude de la distribution de masse explorant quatre profils de halo de complexité croissante. Ces deux phases sont développées ci-dessous :

1. Étude cinématiques

Nous avons d'abord cartographié les parties internes des galaxies grâce à des observations spectroscopiques Fabry-Pérot. Pour ce faire, nous avons utilisé l'instrumentation bidimensionnelle à grand champ Cigale placé au foyer Cassegrain du télescope de 3.60m de l'ESO à La Silla, au Chili. Une description complète du système se retrouve dans l'article de Boulesteix *et al.* (1984). Le passage entre les interférogrammes et les cartes en longueur s'est effectué à l'aide de l'ensemble de programmes ADHOC, développés à l'Observatoire de Marseille (Boulesteix 1993). La technique utilisée est décrite dans Amram (1991).

Nous avons ensuite dérivé les courbes de rotation à l'aide de ROCUR, un programme de modélisation par anneaux inclinés inspiré des programmes de Begeman (1987). La technique utilisée pour déterminer les paramètres dynamiques ($PA, i, V_{\text{sys}}, X_c, Y_c$) à partir du champ des vitesses radiales héliocentriques calculées en chacun des pixels, se retrouve dans van Albada *et al.* (1985) et Carignan, Sancisi & van Albada (1988). Une méthode itérative, tirée en partie de la thèse de Begeman (1987) et de celle de Puche (1989), a permis de trouver les meilleurs ajustements des paramètres. Nous avons finalement combiné les courbes de rotation à haute résolution aux résultats cinématiques H_I de nos prédécesseurs. Des courbes multi-longueurs d'onde résultantes, nous avons établi la distribution de masse des galaxies de l'échantillon.

2. Étude de la distribution de masse

Nous avons d'abord modélisé le potentiel gravitationnel correspondant aux courbes de rotation avec les composantes de masse connues et selon des distributions probables. La méthode employée est une généralisation de celle prescrite par Carignan & Freeman (1985) et van Albada *et al.* (1985). Un modèle de *best-fit*, couplé à une technique de minimisation en χ^2 sur les trois paramètres indépendants, a ensuite permis de restituer les points de mesure avec la somme de deux courbes théoriques :

- la courbe du disque exponentiel évaluée en supposant un rapport $(M/L)_*$ radialement constant (Casertano 1983, Carignan 1985);
- la courbe d'une distribution sphérique de matière sombre avec une densité de la forme

$$\rho(r) = \frac{\rho_o}{\left(c + (r/r_o)^\gamma\right) \left(1 + (r/r_o)^\alpha\right)^{\beta-\gamma/\alpha}} \quad (\text{Blais-Ouellette, Amram \& Carignan 2001}).$$

Au total, quatre distributions théoriques furent évaluées : le modèle de Begeman (1987) qui consiste en une forme approchée de la sphère pseudo-isotherme avec $[c=1, \alpha \neq 0, \beta=2, \gamma=2]$; le modèle Burkert (1995) et celui de Kravtsov *et al.* (1998) qui reproduisent des formes fonctionnelles de la sphère isotherme avec une densité de noyau plate avec respectivement $[c=1, \alpha=2, \beta=3, \gamma=1]$ et $[c=0, \alpha=2, \beta=3, \gamma=0.2]$; et le modèle de Navarro, Frank & White (1996), découlant de simulations à très haute résolution de l'évolution gravitationnelle de l'Univers, présente des pentes plus faibles au centre et plus fortes aux bords des pentes plus fortes au centre $[c=0, \alpha=1, \beta=3, 1]$.

6.4 Bilan des résultats

Les acquis scientifiques que nous pouvons tirer de cette recherche sont nombreux. En tout premier lieu, nous avons pu constater que l'ensemble des courbes de rotation ne peut être ajusté par le profil de Navarro, Frank & White (1996). Ainsi, les distributions théoriques décrites par ce modèle ne peuvent expliquer la dynamique des galaxies spirales tardives. Ce modèle, d'abord introduit par Peebles (1982), proposait des fluctuations primordiales adiabatiques et gaussiennes. Nos données excluent donc les scénarios d'un univers dominé par la matière sombre froide. Dans un deuxième temps, notre étude cerne une forte dépendance de la modélisation des distributions de masse avec le formalisme utilisé. Ainsi, pour le modèle de la pseudo-sphère, les résultats que nous avons obtenus en suivant les travaux de Blais-Ouellette, Amram & Carignan (2001) diffèrent de ceux trouvés en reprenant le formalisme de Carignan & Freeman (1985).

Contrairement aux spirales massives, les galaxies de l'échantillon se démarquent par un faible gradient de vitesses dans la partie ascendante des courbes de rotation, correspondant aux régions centrales des galaxies. Les résultats de cette étude nous incitent à croire la thèse selon laquelle le faible gradient interne poserait une contrainte supplémentaire sur l'ajustement des régions externes et expliquerait la forte influence du formalisme. Historiquement, les études cinématiques ont suivi le formalisme de Carignan & Freeman (1985) pendant plus de quinze ans. À la fin des années quatre-vingt dix, le code fut modifié (Blais-Ouellette *et al.* 1999) pour étendre la technique à d'autres profils de halo. Or cette réforme fut réalisée à l'aide d'un échantillon de galaxies normales. La subtilité, associée aux galaxies peu massives qui présentent un faible gradient interne, aurait par conséquent passé inaperçue.

6.5 Perspectives

Le problème de la modélisation des distributions de masse au sein des galaxies est très vaste. Les méthodes sont diversifiées et leur pertinence est dépendante du domaine auquel elles sont appliquées. Ainsi, un modèle jugé plus ou moins adaptable peut se révéler adéquat pour des applications précises comme l'étude au sein des galaxies massives.

Deux développements faisant suite à ce travail peuvent être envisagés : l'un directement en rapport avec l'influence du formalisme consisterait à élaborer de nouveaux outils de

modélisation résistant aux variations de masse des galaxies, et l'autre ouvrant sur un tout autre domaine consisterait à inclure dans les nouveaux codes un mécanisme qui permettrait d'explorer l'ensemble de la plage des paramètres pour éviter de favoriser un minimum local de l'intervalle spécifié par l'utilisateur. En parallèle, une meilleure connaissance des mécanismes qui influencent l'ajustement des courbes externes, nous permettrait un meilleur contrôle des conditions d'utilisation concernant les outils actuels de modélisation.

* * * * *

Ce travail nous a permis de prendre conscience qu'il n'existe pas d'outils permettant l'étude systématique de la distribution de masse, mais plutôt différentes techniques adaptées à des situations particulières.

6.6 Références

- Begeman, K. (1987). HI rotation curves of spiral galaxies. Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit te Groningen, The Netherlands.
- Blais-Ouellette, S. Carignan, C. Amram, P. & Côté, S. (1999). Accurate Parameters of the Mass Distribution in Spiral Galaxies. I. Fabry-Perot Observations of NGC 5585. Astronomical Journal, vol. 118, issue 5, p. 2123-2131.
- Blais-Ouellette, S. Amram, P. & Carignan, C. (2001). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halo. Astronomical Journal, vol. 121, Issue 4, p. 1952-1964.
- Burkert, A. (1995). The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies. Astrophysical Journal Letters, vol.447, p. L25-L28.
- Casertano, S. (1983). Rotation curve of the edge-on spiral galaxy NGC 5907: disc and halo masses. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 203, p. 735-747.
- Carignan, C. (1985). Surface photometry of the sculptor group galaxies - NGC 7793, NGC 247, and NGC 300. Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 58, p. 107-124.
- Carignan, C. & Freeman, K. C. (1985). Basic parameters of dark halos in late-type spirals. Astrophysical Journal, vol. 294, p. 494-501.
- Carignan, C. & Puche, D. (1990a). HI studies of the Sculptor group galaxies. II - NGC 7793. Astronomical Journal, vol. 100, p. 394-402.
- Carignan, C. & Puche, D. (1990b). HI studies of the Sculptor group galaxies. IV - NGC 247. Astronomical Journal, vol. 100, p. 641-647.
- Kravtsov, A. V. Klypin, A. A. Bullock, J. S. & Primack, J. R. (1998). The Cores of Dark Matter-dominated Galaxies: Theory versus Observations. Astrophysical Journal, vol.502, p. 48
- Navarro, J.F. Frenk, C.S. & White, S. D.M. (1996). The Structure of Cold Dark Matter Halos. Astrophysical Journal, vol.462, p. 563-575.
- Puche, D. (1989). Étude de la dynamique et de la cinématique des galaxies du groupe Sculpteur. Ph.D. thesis, Université de Montréal, Canada.
- Puche, D. Carignan, C. & Bosma, A. (1990). HI studies of the Sculptor group galaxies. VI - NGC 300. Astronomical Journal, vol. 100, p. 1468-1476, 1719, 1720.
- Puche, D. & Carignan, C. (1991). HI studies of the Sculptor group galaxies. VII - Implications on the distribution and nature of dark matter in groups. Astrophysical Journal, Part 1, vol. 378, p. 487-495.
- van Albada, T. S. Bahcall, J. N. Begeman, K. & Sancisi, R. (1985). Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198. Astrophysical Journal, vol. 295, p. 305-313.