

Rapport de stage de licence et Magistère de Physique d'Orsay
Juin-Juillet 2004

Etude de galaxies ultralumineuses dans l'infra-rouge et recherche de structures d'interaction



Rapport de Aude Alapini
Sous la direction de Florence Durret

Institut d'Astrophysique de Paris, 98 bis Bd Arago, 75014 Paris

Remerciements

Je remercie du fond du coeur Florence Durret, ma responsable de stage. Je la remercie tout d'abord pour son accueil chaleureux, sa gentillesse et sa disponibilité. Je la remercie également pour toutes les agréables discussions que nous avons eu l'occasion de partager. Je tiens à lui redire que ces deux mois passés à l'IAP resteront gravés dans mon coeur et je la remercie encore une fois de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce stage.

Je remercie tout particulièrement J-C Mauduit pour son aide lors de mon stage, tant sur le plan professionnel que sur le plan social. Je le remercie pour tous les agréables moments que l'on a partagés et j'espère que l'on gardera le contact malgré la distance.

Je remercie J-C Malapert, Annia Domenech, Nick Seymour, Hervé Manche, Frédéric Magnard, Niruj Mohan et Abishek Rawat pour leur accueil chaleureux, ainsi que pour leur aide tout au long de mon stage. Je tiens à leur dire que ils ont tous contribué à rendre mon stage à l'IAP inoubliable et j'espère que l'on gardera contact.

Je remercie Jacqueline Bergeron pour sa gentillesse et les conversations partagées.

Je remercie, enfin, Mathieu Vincendon car son rapport m'a été d'une grande aide et m'a fait gagner beaucoup de temps lors de mon stage.

Encore un grand merci à vous tous qui, en plus de ma motivation personnelle, m'avez donné davantage envie de rejoindre cette grande famille que forment les astrophysiciens.

Sujet : Etude de galaxies ultralumineuses dans l'infra-rouge et recherche de structures d'interaction.

Résumé

Ce rapport de stage présente l'étude de la morphologie et du stade de fusion de 12 ULIRGs (Ultra Luminous Infrared Galaxies), prélevées dans l'échantillon de 41 de luminosité infrarouge $L_{IR} \geq 10^{12.5} L_{\odot}$ (L_{\odot} étant la luminosité bolométrique solaire). Celles-ci, étudiées par l'équipe I. Márquez et al, sont tirées des 118 ULIRGs les plus brillantes du catalogue IRAS, déjà étudiées par l'équipe Veilleux et al. mais avec un temps de pose plus court (de 400 à 1200 s. selon les galaxies). Les observations ont été faites dans deux filtres ($504 \pm 73 \text{ nm}$ et $663 \pm 105 \text{ nm}$) au CAHA (Centro Astronomico Hispano Aleman) à Calar Alto en Espagne. Notre temps de pose est de 1 heure pour les fichiers combinés (3 poses de 1200s). Ceci a permis d'observer des structures externes de plus faible intensité. Après traitement des données (biais, flat field, calibrage en flux, combinaison des images) à l'aide du logiciel IRAF, les profils des galaxies ont été comparés avec d'autres de la forme $\log(I) = \alpha * r + \beta$ (ajustement à une galaxie spirale), et de la forme de de Vaucouleurs $\log(I) = \alpha * r^{\frac{1}{4}} + \beta$ (ajustement à une galaxie elliptique). Sur les 12 ULIRGs, 4 sont en stade primaire de fusion (pré-contact et premier contact), 4 sont en stade de pré-fusion (noyau multiple et queues de marée) et 4 sont en stade avancé de fusion (dont 1 en stade final). Parmi ces 12 ULIRGs, 3 sont le fruit de l'interaction entre deux galaxies suffisamment séparées pour être étudiées séparément. Donc, sur nos 15 galaxies, 2 sont des galaxies spirales, 5 des galaxies de type précoce (4 elliptiques, 1 lenticulaire) et 8 n'ont pas pu être classées. Dans la suite, il serait intéressant d'étudier le spectre de ces galaxies afin de pouvoir mettre en évidence d'éventuels effets de projection, et afin de déterminer l'activité nucléaire des ces ULIRGs.

Abstract

This report presents the study of the morphology and the stage of merging of a sample of 12 ULIRGs (Ultra Luminous Infrared Galaxies). This sample was taken from a larger one of 41 galaxies, which have an infrared luminosity $L_{IR} \geq 10^{12.5} L_{\odot}$ (L_{\odot} is the bolometric luminosity of the sun). These are studied by our team (I. Márquez et al.) and are part of the sample of 118 ULIRGs studied by Veilleux et al. (smaller exposure time than us), which are the most luminous galaxies of the IRAS catalogue. The observations were done with two filters ($504 \pm 73 \text{ nm}$ and $663 \pm 105 \text{ nm}$) at the CAHA (Centro Astronomico Hispano Aleman) in Calar Alto in Spain. We have an exposure time of 1 hour for the combined files (3 exposures of 1200 s.). This allowed us to see weaker details in the outer regions of the ULIRGs. After a data reduction (biais, flat field, calibration, combination of the 3 exposures for each galaxy) with the IRAF software, the profiles of the galaxies were compared with two theoretical profiles: $\log(I) = \alpha * r + \beta$ which fits a spiral galaxy, and $\log(I) = \alpha * r^{\frac{1}{4}} + \beta$ (de Vaucouleurs' profile) which fits an elliptical galaxy. Among the 12 ULIRGs, 4 are in a primary stage of merging (pre-contact and first contact), 4 are in a pre-merging stage (multiple-nucleus, tidal tails) and 4 are in an advanced stage of merging (one of which is in the final stage of merging). 3 of the 12 ULIRGs are the result of the interaction of two galaxies which are separated enough to be studied separately. Therefore, among our 15 galaxies, 2 are spiral ones, 5 are early type ones (4 elliptical and 1 lenticular), and I didn't succeed in classifying the 8 last ones. In the future, it will be interesting to study the spectrum of these 12 ULIRGs to know if there are some projection effects and to determine the nuclear activity of these objects.

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Présentation des ULIRGs, réf. [5] et [6]	9
1.1.1	Description des ULIRGs	9
1.1.2	Objectif de l'étude	10
1.1.3	Les ULIRGs étudiées	10
2	Présentation et traitement des données	12
2.1	Le LOG	12
2.2	Les flat fields	12
2.3	Les focus	13
2.4	Les étoiles standards	13
2.5	Les biais	13
2.6	Identification des étoiles standards	14
2.7	Identification des ULIRGs	15
2.8	Relevé des magnitudes expérimentales	15
2.9	Calibrage des images en flux	15
2.9.1	Calcul de A1, A1' et B1, B1'	15
2.9.2	Calcul de Vmes et Rmes	17
2.9.3	Calcul de X1, X1' et X2, X2'	17
2.9.4	Calcul des facteurs de calibration des galaxies	17
2.10	Combinaison des différents fichiers d'une même galaxie	18
2.11	Mesure du seeing	18
2.12	Mesure de la magnitude limite et du fond du ciel	19
3	Analyse des données : étude de la morphologie des galaxies	19
3.1	Tracé sous SIPL	19
3.1.1	Le logiciel	19
3.1.2	Tracé des niveaux de gris	20
3.1.3	Tracé des isophotes elliptiques	20
3.2	Tracé des profils	20
3.3	Tracé des pourcentages d'écart à un disque ou un bulbe	21
3.4	Tracé des modèles IRAF	21
3.5	Analyse cas par cas	22
3.5.1	IRAS00188-0856	22
3.5.2	IRAS00397-1312	22
3.5.3	IRAS01355-1814	23
3.5.4	IRAS01572+0009	23
3.5.5	IRAS03521+0028	24
3.5.6	IRAS16468+5200	24
3.5.7	IRAS16487+5447	24
3.5.8	IRAS17028+5817	25
3.5.9	IRAS20087-0308	25
3.5.10	IRAS23060+0505	25
3.5.11	IRAS23129+2548	26
3.5.12	IRAS23498+2423	26
4	Conclusions	27
4.1	Conclusions sur les résultats	27
4.2	Conclusions sur mon stage	28
	Annexe	31
1	Coordonnées équatoriales	31

2	Etoiles standards	31
3	Magnitudes expérimentales	33
4	Facteurs de calibration	34
5	Seeing des champs de galaxies	35
6	Magnitude limite des galaxies	35
7	Commandes SIPL	35
7.1	Liste de commandes SIPL, par M. Vincendon	35
7.2	Programmes de base	38
8	Galaxies: isophotes et moins modèle IRAF	40
8.1	iras00188 et iras00397	40
8.2	iras01355	41
8.3	iras01572 et iras03521	42
8.4	iras16468 et iras16487	43
8.5	iras17028	44
8.6	iras20087 et iras23060	45
8.7	iras23129	46
8.8	iras23498	47
9	Profils et pourcentage d'écart par rapport à un bulbe ou un disque	48
9.1	iras00188	48
9.2	iras00397	49
9.3	iras01355 Nord-Ouest	50
9.4	iras01355 Sud-Est	51
9.5	iras01572	52
9.6	iras17028 Est	53
9.7	iras17028 Ouest	54
9.8	iras03521, iras16468 et iras16487	55
9.9	iras20087 et iras23498	56
9.10	iras23060	57

1 Introduction

Mon stage ayant duré deux grands mois passionnants, mon rapport dépasse “légèrement” la taille demandée dans les instructions. Je m’en excuse, par avance, auprès du correcteur.

1.1 Présentation des ULIRGs, réf. [5] et [6]

1.1.1 Description des ULIRGs

Les LIGs (Luminous Infrared Galaxies) sont des galaxies émettant plus d’énergie dans l’infrarouge que dans toutes les autres longueurs d’onde. Entre 12 et 25 % des LIGs sont des systèmes irréguliers ou en interaction. Cette proportion augmente avec la luminosité de ces galaxies. Les LIGs de $L_{IR} > 10^{11} L_{\odot}$ (L_{\odot} est définie ci-dessous) sont la population dominante parmi les objets extragalactiques proches ($z \leq 0.3$).

Les ULIRGs (Ultra Luminous Infrared Galaxies) sont des LIGs qui ont une luminosité dans l’infrarouge supérieure à $10^{12} L_{\odot}$. Plus de 95 % d’entre elles sont des systèmes en fusion. Le fort rayonnement infrarouge serait émis par de la poussière, chauffée soit par des flambés d’étoiles naissantes (starburst), soit par des AGNs (Active Galactic Nucleus). Cette poussière a pour inconvénient de rendre l’exploration du noyau des ULIRGs délicate. On compte néanmoins que près de 30 % des ULIRGs ont pour source d’énergie un AGN, proportion qui peut aller jusqu’à 50 % pour des ULIRGs de luminosité $L_{IR} \geq 10^{12.3} L_{\odot}$. Les ULIRGs, étudiées dans ce rapport, sont tirées du catalogue IRAS (Infrared Astronomical Satellite). Elles font partie d’un échantillon de 118 ULIRGs, qui ont une densité de flux supérieur à 1 Jy pour une longueur d’onde de $60\mu m$.

Remarques :

$L_{\odot} = 3,8.10^{33} \text{ erg.s}^{-1}$ est la luminosité bolométrique solaire, c’est à dire la quantité d’énergie totale rayonnée par le soleil par unité de temps.

1 erg = 1.10^{-7} Joule. 1 joule = 1 watt.s.

Le Jansky est une unité de densité de flux. $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$.

IRAS est un projet international entre les Pays Bas, les Etats Unis et le Royaume Uni, qui avait pour but de mesurer les radiations infrarouge de certains objets en utilisant un satellite refroidi à l’hélium liquide. IRAS a été lancé le 26 Janvier 1983. La mission dura de fin Février (après les tests) jusqu’au 23 Novembre 1983, quand l’hélium liquide fut terminé. IRAS était composé, entre autre, de 62 détecteurs, sensibles dans l’infrarouge, centrés sur 4 longueurs d’onde : $12\mu m$, $25\mu m$, $60\mu m$ et $100\mu m$.

Il existe deux sortes d’ULIRGs : les “cold” ou “cool” ULIRGs ($\frac{f_{25\mu m}}{f_{60\mu m}} \leq 0.2$) et les “warm” ULIRGs ($\frac{f_{25\mu m}}{f_{60\mu m}} \geq 0.2$). $f_{x\mu m}$ est la densité de flux pour une longueur d’onde de $x\mu m$. On compte que près de 60% des “cool” ULIRGs ont un noyau double pour 44 % chez les “warm” ULIRGs. Ces dernières semblent donc être des systèmes à un stade de fusion plus avancé que les autres.

D’autre part, il a été trouvé que certaines ULIRGs sont aussi des QSOs (Quasi Stellar Objects ou quasars) optiques. Ces derniers sont des galaxies elliptiques possédant un AGN. Certains quasars, émettant dans l’infrarouge, possèdent même des traces de fusion récente. Il serait possible que certains QSOs, voire tous, commencent leur vie par une intense phase infrarouge.

Grâce à ces observations, D. B. Sanders a émis en 1988 l’hypothèse d’un scénario qui a pour avantage de voir un lien entre l’augmentation de la luminosité et l’avancée de l’état de fusion :

Deux galaxies spirales, riches en gaz moléculaire, se rencontrent et donnent un objet possédant deux noyaux (pre-merger), dont la luminosité viendrait principalement de starburst. Ces objets correspondraient aux “cool” ULIRGs. Ils évolueraient, suite à la fusion des noyaux, en ULIRGs possédant un AGN recouvert de poussière. Ces nouveaux objets, correspondant aux “warm” ULIRGs, évolueraient à leur tour en quasars optiques qui ne montrent que de très faibles signes de fusion passée.

Des mesures en interférométrie montrent que pour des longueurs d’onde millimétriques, les objets les plus lumineux dans l’infrarouge contiennent souvent près de $10^{10} M_{\odot}$ de gaz dans un rayon de 0.5 kpc. A

titre de comparaison, notre Galaxie tout entière comprend près de 10^{11} étoiles, pour un rayon de 30 kpc! Une telle concentration de gaz peut être à l'origine de puissants phénomènes, tels que :

1. des flambées de formation d'étoiles, accompagnées de super vents, participant ainsi à l'enrichissement métallique du milieu interstellaire,
2. la formation d'amas massifs d'étoiles,
3. et très probablement, la création ou l'alimentation d'AGNs.

Les LIGs représenteraient peut être aussi des objets de transition entre la fusion de galaxies spirales et la naissance de galaxies elliptiques.

1.1.2 Objectif de l'étude

Une étude récente [6] (2002), montre que sur l'échantillon de 118 ULIRGs (cf section 1.1.1) :

1. toutes sauf une présentent des signes d'interaction ou de fusion,
2. 4 % résultent de la fusion de plus de deux galaxies,
3. 56 % ont un noyau simple déformé (dernier stade de fusion),
4. les warm ULIRGs, galaxies les plus lumineuses ($L_{IR} \geq 10^{12.5} L_{\odot}$) et possédant un noyau actif, tendent toutes à être des systèmes en fusion avancée avec noyau simple.

Ces résultats concordent en général avec le scénario de Sanders (section 1.1.1). Cependant, il existe certaines exceptions. Par exemple 46 % des 41 systèmes en fusion avancée ne présentent pas de signes évidents de présence de noyau actif. Ceci montre l'importance d'utiliser un grand échantillon homogène, par exemple l'échantillon de 118 ULIRGs à 1 Jy. Ce grand nombre a cependant imposé à l'équipe Veilleux et a. un temps de pose assez court pour chaque galaxie. Le seeing étant bon, ils ont pu bien étudier les noyaux des galaxies. Mais un temps de pose plus long est nécessaire pour pouvoir bien identifier la morphologie de ces galaxies, en particulier dans les zones périphériques.

Le travail de Veilleux et a. propose une classification des galaxies hôtes en cinq stades de fusion :

1. stade I : pré-contact
2. stade II : premier contact sans queue de marée
3. stade III : pré-fusion avec un noyau multiple et des queues de marée
4. stade IV : galaxies en fusion avec de longues queues de marée et noyau simple
5. stade V : stade final de fusion, pas de queues de marée, noyau déformé.

L'objectif de notre équipe (Projet I. Márquez et J. Masegosa) est d'étudier les éventuelles relations entre la morphologie (témoignage de l'état de fusion) et l'activité nucléaire, sur l'échantillon des 41 ULIRGs très lumineuses ($L_{IR} \geq 10^{12.5} L_{\odot}$) visibles dans l'hémisphère nord. Le temps de pose pour ces galaxies est plus long, les champs seront donc plus profonds et les structures faibles (internes et externes) plus visibles que dans le cas de l'étude de l'équipe de Veilleux et al.

L'échantillon que j'étudie compte 12 ULIRGs prélevées parmi les 41 étudiées par notre équipe.

Le but de mon stage est d'identifier le stade de fusion de mes 12 ULIRGs. Pour cela il faudra faire une analyse de la structure de ces galaxies à l'aide des images et des profils.

L'étape suivante consisterait à étudier l'activité nucléaire grâce à des spectres. Mais cette partie n'a pas été abordée lors du stage, faute de spectre et de temps.

1.1.3 Les ULIRGs étudiées

Les observations des galaxies ont été réalisées pendant les nuits du 25 et 26 Août 2003 au CAHA (Centro Astronomico Hispano Aleman) à Calar Alto en Espagne.

12 ULIRGs (Ultra Luminous Infra Red Galaxies) ont été observées avec un télescope de 2,2m de diamètre et un système de caméras CCD appelé BUSCA (Bonn University Simultaneous CAmera). BUSCA permet l'acquisition simultanée d'images d'une même région du ciel dans quatre couleurs (filtres

a, b, c, d). Nous ne nous intéressons qu'aux filtres b (504 ± 73 nm, bleu-vert) et c (663 ± 105 nm, rouge).

Pour les CCDs utilisées par BUSCA, un pixel = 0.176 arcsec et la saturation d'un pixel commence à environ 65000 coups.

Les 12 galaxies (cf TAB.1) que j'ai eu à étudier lors de mon stage sont issues du catalogue IRAS (Infrared Astronomical Satellite).

TAB. 1 – *Galaxies et distances*

Galaxies	Nuit d'observation (08/2003)	Distance	
		Redshift[1]	Mpc(5)
IRAS00188-0856	25	0.128	511.6
IRAS00397-1312	25	0.261	1043.3
IRAS01355-1814	26	0.192	767.5
IRAS01572+0009	26	0.163	651.5
IRAS03521+0028	25	0.152	607.6
IRAS16468+5200	25	0.150	599.6
IRAS16487+5447	26	0.104	415.7
IRAS17028+5817	26	0.106	423.7
IRAS20087-0308	26	0.106	423.7
IRAS23060+0505	25	0.173	691.5
IRAS23129+2548	25	0.179	715.5
IRAS23498+2423	26	0.212	847.4

Il y a trois poses de 1200 secondes (20 minutes) pour chaque galaxie. Soit un temps de pose total de 3600 secondes (1 heure) pour les fichiers combinés (cf section 2.10).

7 de ces galaxies ont déjà été étudiées par Mathieu Vincendon : IRAS00188, IRAS00397, IRAS01572, IRAS03521, IRAS23060, IRAS23129 et IRAS23498.

Il avait également trois fichiers par galaxie, chacun ayant un temps de pose de 900 secondes. Le temps de pose des fichiers combinés de nos galaxies étant plus long que celui de Mathieu, on pourra mieux voir les structures de faible luminosité. Ainsi, pour les galaxies commune à Mathieu et moi, il sera intéressant de comparer les résultats.

On définit le décalage spectrale, ou redshift, par

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{th}}{\lambda_{th}} \quad (1)$$

avec λ longueur d'onde d'une raie d'émission de l'objet observé.

Nos redshifts étant au maximum de 0.261, on peut utiliser la formule non relativiste de la vitesse de fuite d'une galaxie :

$$v = c * z \quad (2)$$

avec $c = 299\,792.458$ km s^{-1} la célérité de la lumière, z le redshift.

Mais pour être vraiment rigoureux, il aurait fallu utiliser la formule relativiste du redshift

$$v = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} * c \quad (3)$$

Relation entre vitesse de fuite des galaxies et distance à la Terre :

$$v = H_0 * d \quad (4)$$

avec $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, d la distance séparant la galaxie de la Terre en Mpc.

Petit plus :

1 pc = $3.08568025 \cdot 10^{16}$ m = $205.7 \cdot 10^3$ UA.

L'UA est la distance Terre-Soleil égale à $150 \cdot 10^6$ km.

Le diamètre de notre galaxie fait environ 30 kpc.

En combinant les équations (2) et (4) on obtient :

$$d(\text{Mpc}) = \frac{v}{H_0} \quad (5)$$

C'est avec cette équation que on a calculé la distance en Mpc du TAB.1.

2 Présentation et traitement des données

Les données se présentent sous la forme de fichiers bu000xx*.fits (xx étant un nombre allant de 1 à 68 pour la nuit du 25 Août et de 1 à 64 pour la nuit du 26 Août).

On adoptera dans la suite du rapport la convention * pour "soit b, soit c" et x remplaçant 1 chiffre (donc xx deux chiffres ...).

Ces fichiers sont des champs du ciel visualisables sous IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) à l'aide de la commande "DISPLAY bu000xx*.fits".

2.1 Le LOG

Le LOG (cf Annexe) récapitule les informations principales sur chaque fichier .fits :

1. heure en temps universel,
2. nom du fichier,
3. masse d'air (quantité d'atmosphère que doit traverser la lumière jusqu'au télescope, dépend de la position de l'objet sur le ciel au moment de l'observation)
4. temps de pose,
5. filtres utilisés,
6. commentaires.

On a également accès à ces informations en tapant "HEAD bu000xx*.fits" sous IRAF.

2.2 Les flat fields

La première partie des fichiers du LOG (de 1 à 10 pour le 25 Août et de 1 à 11 pour le 26 Août) sont des flat fields. Les flat fields sont, comme leur nom l'indique, des champs uniformément éclairés (cf FIG.1(a)). On les obtient en observant le ciel au lever ou au coucher du soleil (au coucher dans notre cas). Ils servent à corriger les différences de réponse d'un pixel à un autre de la CCD.

Par nuit et par filtre, on vérifie que les fichiers de flat field (cf FIG.1(a)) ont des moyennes (MEAN) proches les unes des autres et que la déviation standard (écart à la moyenne) pour chacun d'eux est faible. Pour cela on utilise la commande IMSTAT de IRAF.

Remarque : dans tout mon rapport je mets les commandes IRAF en majuscule pour les distinguer du reste du texte mais elles sont à écrire en minuscule dans la pratique.

Sur la FIG.1(a), on voit un disque plus lumineux. Il est dû au fait que le filtre cache une partie du détecteur. Pour ne pas tenir compte de la région cachée, on doit couper les fichiers. On commence donc par appliquer une restriction (cadre noir des figures FIG.1(a) et FIG.2(a)) aux fichiers sources en appelant

les fichiers non plus par bu000xx*.fits mais par bu000xx*.fits[280:900,120:740]. Dans le cas des étoiles standards et de IRAS01355 la restriction a plutôt été bu000xx*.fits[150:1100,200:920] car la précédente était trop petite. J'aurai pu appliquer la deuxième restriction à tous les fichiers mais elle a l'inconvénient de frôler de trop près le bord du disque lumineux dont j'ai parlé auparavant. D'où des déviations standards moins bonnes lors du IMSTAT.

Dans chaque filtre et à chaque fichier de flat field on soustrait le biais moy*.fits (cf section 2.5) correspondant, à l'aide de la commande IMARITH de IRAF. Lors de ces opérations, on a dû ne pas tenir compte des fichiers bu00003c.fits[150:1100,200:920] et bu00004c.fits[150:1100,200:920] du 26 Août car leur nombre de coups par pixel (N) était trop proche de la saturation de la CCD et leur déviation standard était beaucoup trop faible ($\ll \sqrt{N}$). On obtient ainsi des fichiers ff*-bimxx*.fits.

Avec la commande IMCOMBINE, on moyenne alors ces fichiers et on obtient un fichier ff*-bimm*.fits. On obtient la valeur moyenne de chacun d'eux à l'aide de IMSTAT, puis on les divise par leur moyenne respective avec IMARITH pour obtenir les fichiers ffnorm*.fits de chaque nuit (cf FIG.1(b)). On vérifie que la moyenne de ces derniers est bien égale à 1.

Les différents flats de chaque nuit sont pris en décalant légèrement le champ à chaque pose de sorte qu'en faisant les calculs précédents, les étoiles de faible intensité, qui seraient dans les flats individuels, disparaissent lors de la moyenne.

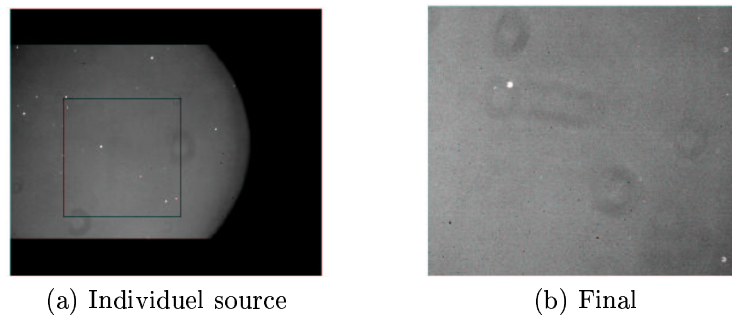


FIG. 1 – Flat field, 26 Août, filtre c

2.3 Les focus

Ensuite viennent, dans le LOG, deux fichiers sur le focus, qui servent à la mise au point de l'instrument. Mais on ne s'y intréressera pas.

2.4 Les étoiles standards

Puis de bu00013*.fits à bu00048*.fits pour le 25 Août, et de bu00013*.fits à bu00044*.fits pour le 26 Août, ce sont des clichés de galaxies et des champs d'étoiles standards. Les étoiles standards sont des étoiles dont on connaît bien les magnitudes, ici dans le système Johnson ou le système Gunn suivant les étoiles. Elles nous permettront de caculer le facteur correctif à appliquer aux fichiers des galaxies pour calibrer les images en flux.

2.5 Les biais

En dernier (de bu00049*.fits à bu00068*.fits pour le 25 Août et de bu00045*.fits à bu00064*.fits pour le 26 Août) viennent les biais. Les biais sont des clichés pris avec l'obturateur de la CCD fermé. Ils servent à corriger le défaut de la CCD dû au courant résiduel.

Par nuit et par filtre on vérifie que les fichiers de biais ont des moyennes (MEAN) proches les unes des autres et que la déviation standard (écart à la moyenne) pour chacun d'eux est faible. Pour cela on utilise la commande IMSTAT de IRAF.

Ensuite pour chaque nuit et chaque filtre, on moyenne les biais à l'aide de la commande IMCOMBINE de IRAF en utilisant l'option MEDIAN et l'option CRREJECT. L'option MEDIAN consiste à donner davantage de poids aux fichiers biais qui ont une valeur moyenne proche de la valeur médiane des moyennes des fichiers biais. L'option CRREJECT sert à enlever les effets causés par les rayons cosmiques. Ces derniers sont dus à des particules de haute énergie (muons, neutrinos...) qui ont une probabilité non nulle de toucher un pixel de la CCD, saturant ainsi celui-ci. La fonction CRREJECT détecte les pixels isolés qui sont saturés et n'en tient pas compte lors de la moyenne. Il n'y a pas de confusion avec les étoiles saturées car celles-ci s'étendent sur plusieurs pixels contrairement aux rayons cosmiques. On obtient deux fichiers *biaismoy*.fits* pour chaque nuit. On n'a pas encore trouvé l'origine des points brillants du flat FIG.1(b). Les taches plus foncées de cette figure sont les défauts de la caméra qu'on corrigera dans les fichiers de galaxies en divisant ceux-ci par le flat field normalisé de la nuit et du filtre correspondant.

Les clichés des galaxies et des étoiles standards, corrigés des défauts de caméra (biais et flat) et des rayons cosmiques, sont obtenus en faisant :

$$bu000xx * f.fits = \frac{bu000xx * .fits - biaismoy * .fits}{ffnorm * .fits} \quad (6)$$

pour chaque nuit et chaque filtre. C'est sur ces fichiers que on travaillera par la suite (cf FIG.2(b)).

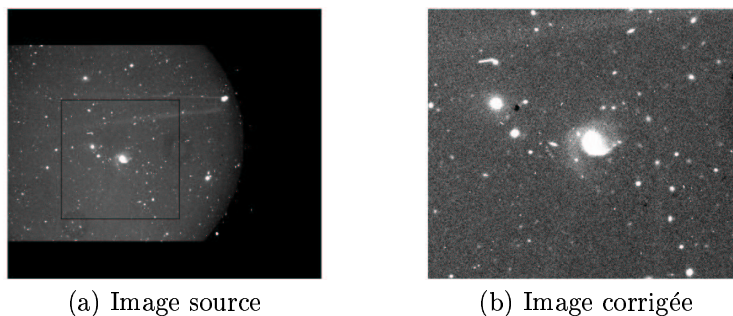


FIG. 2 – Différence entre image source et image corrigée de IRAS01572, 26 Août, filtre c

Sur la FIG.2(b), on voit, à l'emplacement des points brillants de la FIG.2(a), des taches sombres. Elles sont apparues lorsqu'on a divisé les fichiers par le flat field normalisé. Ces taches ne nous gêneront pas dans notre étude de l' ULIRG IRAS01572 car elles ne sont pas situées sur celle-ci. Cette situation se reproduit pour tous les fichiers finaux de galaxie. Mais pour les mêmes raisons cela ne nous gênera pas dans la suite des travaux.

2.6 Identification des étoiles standards

Nous avons 6 champs d'étoiles standards :

1. 4 en système Johnson : PG1633, MarKA, SA110, SA92 (cf Annexe).
2. 2 en système Gunn : F1038-6, F762-9 (champs de référence pour repérage des étoiles, fournis par Isabel Márquez).

Il y a plusieurs étoiles dans chaque champ. Les coordonnées de chaque étoile (cf TAB.9 en Annexe) datent de 1992 pour les Johnson. Leur position a donc varié et les coordonnées ne sont plus exactement les mêmes. Néanmoins les étoiles ont gardé la même configuration dans le ciel. J'ai donc utilisé cette propriété pour les identifier sur mes champs. Sur chacun d'eux j'ai marqué l'emplacement de 1992 et par translation de la configuration j'ai trouvé leur emplacement au 25 et 26 Août 2003 (cf Annexe).

Remarquons que nos champs sont inversés par rapport aux champs obtenus avec Simbad (<http://simbad.u-strasbg.fr/sim-fid.pl>) : nord en bas et est à droite pour nos fichiers. La convention en astronomie est de

mettre l'Est à gauche.

Simbad est une base de données astronomiques implantée à Strasbourg.

On repère un objet dans le ciel de façon analogue au repérage d'un objet sur terre. La longitude terrestre est analogue à l'ascension droite (α) sur la sphère céleste (donnée en heures minutes secondes : 16:35:24). Et la latitude terrestre est analogue à la déclinaison (δ) sur la sphère céleste (donnée en degrés minutes secondes d'arc : +09 47 50). (cf FIG.5 en Annexe).

Les données des TAB.9 et TAB.8, en Annexe, sont tirées respectivement des références [2] et [3].

2.7 Identification des ULIRGs

Pour repérer sur les champs les ULIRGs que on doit étudier, on a utilisé le site Simbad. Sur ce site, il nous faut rentrer le nom complet d'un objet puis avec Aladin previewer on peut visualiser le champ du ciel centré sur l'objet en question. J'ai donc utilisé cette méthode avec mes galaxies.

Parfois le centre du champ de Simbad ne correspondait à aucun objet sur le mes champs. L'article [1] présente un atlas de l'échantillon des galaxies ultralumineuses de 1 Jy du catalogue IRAS. En cas de doute avec simbad j'ai pu vérifier la forme des galaxies ou système d'interaction que je devais trouver dans mes champs. Toutes les ULIRGs que j'ai eu à étudier se trouvent dans ce catalogue sauf IRAS20087-0308. Mais pour cette dernière, il n'y avait pas d'ambiguïté. (cf Annexe)

2.8 Relevé des magnitudes expérimentales

Pour relever les magnitudes expérimentales, on utilise la commande PHOT sous IRAF. Cette commande se situe dans le package noao/digiphot/apphot.

Avant de lancer PHOT, il faut préciser :

1. dans EPAR DATAPARS, le temps d'exposition relatif au fichier utilisé.
2. dans EPAR FITSKYPARS, le rayon minimum, à l'intérieur duquel on calcule la contribution de l'étoile, et un rayon maximum. IRAF retranche à la magnitude de l'étoile la magnitude du ciel, calculée entre les deux cercles.
3. dans EPAR PHOTPARS, la liste des rayons des cercles concentriques, intérieurs au cercle minimum, pour lesquels IRAF calculera la valeur du signal. Les dernières valeurs calculées doivent être sensiblement les mêmes car on ajoute du ciel qui est retranché lors du calcul. Ceci permet de vérifier que le cercle minimum ne se trouve pas dans l'étoile. Il faut aussi préciser une estimation du point zéro (ici 25).

Les résultats sont regroupés dans le TAB.10 en Annexe.

2.9 Calibrage des images en flux

Les magnitudes théoriques des étoiles standards n'ont pas toutes été trouvées dans le même système. Certaines sont dans le système Gunn et d'autres dans le système Johnson (cf Annexe TAB.8 et TAB.9).

2.9.1 Calcul de A1, A1' et B1, B1'

Nos clichés ont été pris dans les filtres b et c, les magnitudes mesurées sont donc pour ces filtres. Il faudra en premier lieu transformer les magnitudes b et c en V et R du système Johnson, ou g et r du système Gunn en faisant un premier ajustement avec ccdphotoR pour les étoiles standards en Johnson et celles en Gunn dans chaque filtre (b et c) .

$$\begin{aligned} V_{cat} &= A1 + bmes \text{ et } R_{cat} = A1' + cmes \text{ pour les Johnson} \\ g_{cat} &= B1 + bmes \text{ et } r_{cat} = B1' + cmes \text{ pour les Gunn} \end{aligned}$$

Les fluctuations obtenues pour A1(0.161, 0.169), A1'(0.167, 0.191), B1(0.155, 0.156) et B1'(0.156, 0.385) des deux nuits sont trop grandes. On trace les $bmes$ en fonction de $Vcat$, $cmes$ en fonction de $Rcat$, $bmes$ en fonction de $gcat$ et $cmes$ en fonction de $rcat$, pour chaque filtre (b et c) et chaque nuit (cf FIG.3).

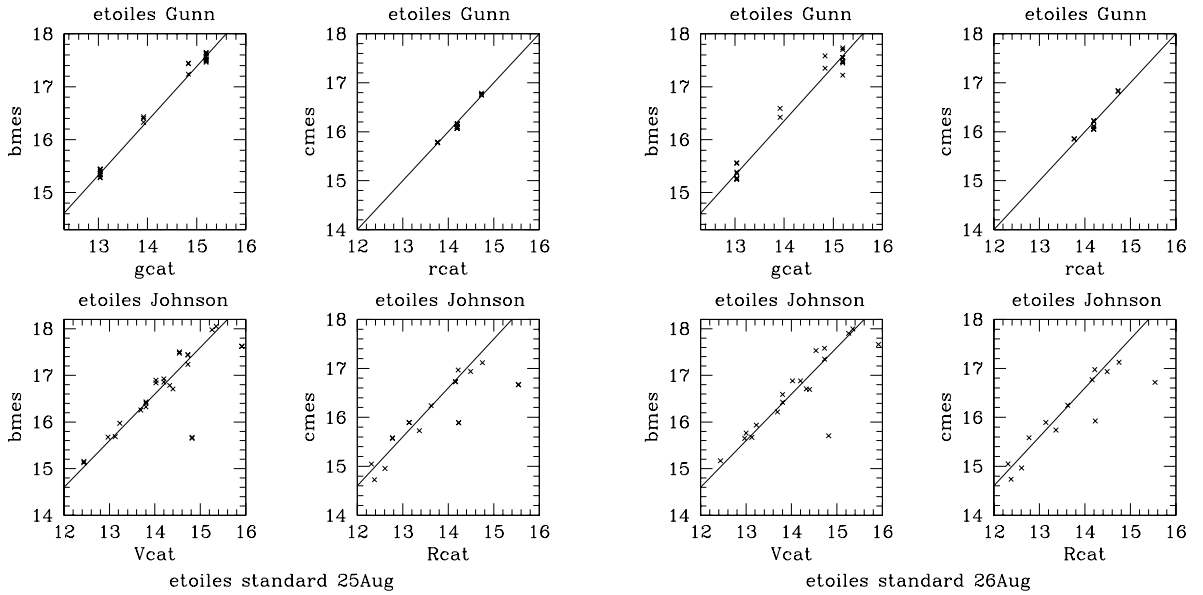


FIG. 3 – *Magnitudes catalogues en fonction des magnitudes dans les filtres b et c*

On refait les ajustements à 1 paramètre avec ccdphotoR pour les étoiles standard en Johnson en éliminant celles qui sont trop loin (σ trop grand) de la droite directrice $bmes = \alpha * Vcat + \beta$ (cf TAB.2 et FIG.4).

TAB. 2 – *Etoiles standards éliminées en Johnson*

Nuit	Filtres b et c
25 Août	4 étoiles (2*MARKA 1, 2*MARKA 3)
26 Août	2 étoiles (MARKA 1, MARKA 3)

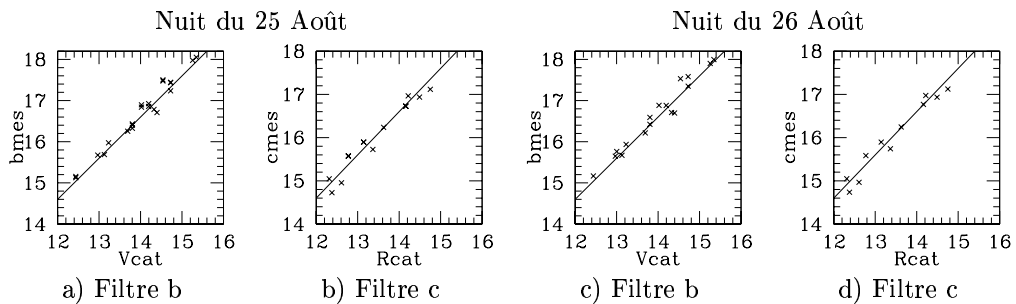


FIG. 4 – *Restriction des étoiles standards en Johnson*

On voit bien dans le TAB.3 que les fluctuations sont bien plus faibles que lors du premier ajustement.

On a choisi de ne garder que les étoiles du système Johnson car elles sont plus nombreuses et la dispersion autour des droites directrices $bmes = f(Vcat)$ et $cmes = f(Rcat)$, après avoir enlevé les étoiles

TAB. 3 – Coefficients $A1$ et $A1'$

Nuit	Filtre b		Filtre c	
	A1: zero point Z	Fluctuation rms	A1': zero point Z	Fluctuation rms
25 Août	-2.656	0.849E-01	-2.701	0.807E-01
26 Août	-2.635	0.902E-01	-2.678	0.116

du TAB.2, est moins grande que pour celles du système Gunn.

2.9.2 Calcul de $Vmes$ et $Rmes$

On transforme :

1. $bmes$ en $Vmes = A1 + bmes$.
2. $cmes$ en $Rmes = A1' + cmes$.

avec les coefficients de la TAB.3.

2.9.3 Calcul de $X1$, $X1'$ et $X2$, $X2'$

On veut trouver $X1$, $X2$ et $X1'$, $X2'$ tel que:

$$Vcat = Vmes + X1 + X2 * AM \text{ et}$$

$$Rcat = Rmes + X1' + X2' * AM.$$

Pour cela, on fait un ajustement à 2 paramètres avec ccdphotoR pour les étoiles standards en Johnson. On obtient les TAB.4 et TAB.5.

TAB. 4 – Coefficients $X1$, $X2$

Nuit	Filtre b		
	X1: zero point Z	X2: Air mass X	Fluctuation rms
25 Août	0.114	-0.763E-01	0.862E-01
26 Août	0.136	-0.114	0.913E-01

TAB. 5 – Coefficients $X1'$, $X2'$

Nuit	Filtre c		
	X1': zero point Z	X2': Air mass X	Fluctuation rms
25 Août	-0.334	0.253	0.629E-01
26 Août	-0.627E-01	0.590E-01	0.112

2.9.4 Calcul des facteurs de calibration des galaxies

La formule des facteurs de calibration est :

$$f = \frac{10^{-0,4*(25+X1+X2*airmasse+A1)}}{dt} \quad (7)$$

pour le passage du filtre b au filtre V, et

$$F = \frac{10^{-0,4*(25+X1'+X2'*airmasse+A1')}}{dt} \quad (8)$$

pour le passage du filtre c au filtre R, avec dt le temps d'exposition.

On applique ces facteurs aux étoiles standards pour voir si à partir de bmes et cmes on retrouve bien Vcat et Rcat respectivement. Les résultats sont égaux à ± 0.15 en moyenne. On a donc de bons coefficients pour calculer les facteurs de calibration (cf TAB.11) à appliquer à nos galaxies. Pour chaque galaxie, on a 3 fichiers. On calcule le facteur de calibration relatif à chacun d'eux. On obtient le facteur finale en moyennant ceux relatif à chaque galaxie pour chaque filtre.

On multiplie, enfin, les fichiers galaxies bu000xx*f.fits par le facteur de calibration calculé pour chacun. On obtient les fichiers calibrés, qu'on appellera bu000xx*c.fits (c pour calibré).

2.10 Combinaison des différents fichiers d'une même galaxie

Les différents fichiers d'une même galaxie sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres. Ceci permet d'éviter qu'un défaut de la caméra soit systématiquement placé sur un même point du ciel. Lorsqu'on moyennera les différents fichiers d'une même galaxie ces défauts seront soit éliminés, soit atténués.

Mais on ne peut pas superposer les images telles quelles. Il faut d'abord les aligner.

Pour cela :

1. On inscrit dans un fichier centre.dat les coordonnées des centres de 5 à 10 objets pour l'image d'une galaxie (bu000xx*c.fits), à l'aide la commande IMEXAM (+ r). Il faut préalablement avoir mis dans EPAR IMEXAM, yes à keeplog et un fichier centre.dat pour logfile. On ne conserve que les deux premières colonnes (coordonnées) du .dat.
2. Avec IMEXAM (+ r), on relève la position (Xi,Yi) du centre d'un même objet sur les différentes images d'une même galaxie. On inscrit cela dans un fichier offset.dat de la façon suivante, en prenant la première image de la galaxie comme référence :
0. 0.
X1-X2 Y1-Y2
X1-X3 Y1-Y3.
3. Après avoir mis dans EPAR IMALIGN la liste des trois images à aligner (bu000xx*c.fits), la liste des noms des images lorsqu'elles seront alignées (bu000xx*a.fits), le nom de l'image de référence et les coordonnées de plusieurs objets dans cette image (centre.dat), et l'offset du décalage des images (offset.dat).
4. Après avoir aligné les images d'une même galaxie on utilise IMCOMBINE pour les combiner et créer un fichier unique irasxxxx*.fits

2.11 Mesure du seeing

Le seeing est la largeur à mi-hauteur (FWHM) de la courbe représentant la luminosité de l'étoile en fonction de la distance au centre. Le seeing représente la turbulence atmosphérique et donc la qualité du ciel. Plus une étoile est ponctuelle sur l'image, plus le seeing est faible. Si la turbulence est grande alors la courbe de luminosité sera très évasée et donc le seeing élevé. Un "bon" seeing est ≤ 1 arcsec et un "mauvais" seeing est ≥ 1.5 arcsec.

Pour mesurer le seeing d'un fichier de galaxie, on utilise la commande IMEXAM (+ r). IRAF nous trace la courbe de luminosité et nous donne la FWHM en pixel. On relève le seeing pour différentes étoiles pour chaque fichier galaxieirasxxxx*.fits. On moyenne le seeing pour chaque cliché et on le multiplie par 0.176 pour obtenir un seeing en arcsec (cf TAB.12 en Annexe).

Les seeings de nos galaxies sont très bons, bien meilleur que ceux de Mathieu . On pourra donc voir les structures fines au centre des galaxies et ainsi compléter ou confirmer les conclusions de Mathieu Vincendon sur les galaxies que l'on a en commun.

2.12 Mesure de la magnitude limite et du fond du ciel

La magnitude limite des structures que l'on pourra observer, par *arcsec*² à 3σ , s'obtient par la formule :

$$m_{lim} = -2.5 \log\left(\frac{3\sigma * cte.calib}{0.176^2}\right) \quad (9)$$

Le σ est la déviation standard du fond du ciel, obtenue avec la commande IMEXAM (+ m). On mesure la magnitude limite (choix de portion d'image uniformément éclairée) une dizaine de fois pour chaque image, puis on fait la moyenne pour chaque fichier (cf TAB.13).

On remarque que le fait de moyenner les fichiers améliore le magnitude limite.

Le troisième fichier de IRAS03521 a une magnitude limite trop élevée. Ceci peut être dû au fait que ce cliché a été pris à 4h20 du matin. Le jour devait commencer à pointer et donc le ciel n'était plus aussi sombre. Pour pouvoir voir des structures plus profondes, il faut donc mieux ne pas tenir compte de ce dernier fichier. De plus, même en ne combinant que les deux premiers fichiers, les rayons cosmiques sont bien éliminés.

Les fichiers de IRAS20087 ont tous une traînée horizontale dans le filtre c (cf Annexe) mais celle-ci est particulièrement prononcée dans le premier. On n'a pas réussi à savoir à quoi était dû ce phénomène. On a pensé à un satellite passant dans le champ mais si c'était le cas, il est fort peu probable que plusieurs satellites soient passés devant le champ de la caméra, au même endroit sur les trois poses de 20 min! Puisqu'on ne peut pas faire autrement, on ne retire que le premier fichier afin d'atténuer quand même un peu l'effet. Mais malgré cela la galaxie ne semble pas très exploitable.

La commande IMEXAM (+ m) donne aussi la valeur moyenne du fond du ciel (MEAN). On note cette valeur que l'on retranche, avec IMARITH, aux fichiers irasxxxx*.fits, pour obtenir les fichiers irasxxxx*f.fits.

Puis, on crée les fichiers irasxxxx*ff.fits qui sont les fichiers irasxxxx*f.fits multipliés par 10^{13} pour pouvoir faire les isophotes elliptiques des galaxies.

3 Analyse des données : étude de la morphologie des galaxies

L'objectif de cette analyse est de détecter des structures caractéristiques d'interaction ou de fusion entre galaxies : queues de marée, galaxies de forme irrégulières, noyaux multiples ou déformés...

J'ai travaillé sur des données prises avec un très bon seeing. L'étude que je ferai, complètera donc également les travaux de M. Vincendon sur les galaxies que l'on a en commun.

3.1 Tracé sous SIPL

3.1.1 Le logiciel

Le logiciel SIPL est un logiciel graphique conçu par J. Perea de l'Institut d'Astrophysique d'Andalousie en Espagne.

On l'utilisera pour :

1. Tracer nos ULIRGs avec des niveaux de gris différents en fonction de la luminosité,
2. Tracer des isophotes elliptiques d'intensité, faisant ainsi ressortir la structure des galaxies,
3. Tracer les profils des ULIRGs à partir des données d'IRAF.

En Annexe se trouve un récapitulatif de certaines commandes SIPL, réalisé par M. Vincendon [4], suivi d'une liste de programmes de bases que j'ai utilisé pour tracer mes différentes figures sous SIPL.

3.1.2 Tracé des niveaux de gris

Sous SIPL, les zones les plus lumineuses sont représentées en blanc par défaut, les dégradés de gris étant réservés aux pixels de luminosité inférieure. Pour une meilleure visualisation, nous avons choisi de prendre la convention inverse : plus le pixel est lumineux, plus il apparaîtra sombre sur la figure. Pour cela on utilise la commande `lut/n 0`.

3.1.3 Tracé des isophotes elliptiques

Les isophotes elliptiques sont des courbes de niveau d'intensité. Pour les tracer, il suffit de rajouter `cont valeur.cont`, autant de fois que de contour à tracer, en allant à la ligne à chaque fois.

Pour connaître la valeur.cont, il suffit de lancer l'affichage de l'image, avec `@nom.plm` sous SIPL, puis de taper la commande `cur/iso/cont`. On clique gauche sur l'endroit dont on veut connaître la valeur et elle s'affiche dans la fenêtre de commande. On clique droit pour sortir de ce mode.

Les tracés des isophotes, superposés aux niveaux de gris, sont regroupés en Annexe.

3.2 Tracé des profils

Nous voulons savoir si nos galaxies sont des galaxies spirales (disque) ou elliptiques (présence d'un bulbe).

Pour cela il faut d'abord tracer les profils $-\mu_r = f(r)$ et $-\mu_r = f(r^{\frac{1}{4}})$ pour chacune de nos galaxies. μ_r est la magnitude apparente de l'objet par $arcsec^2$. Elle se calcule à partir de l'intensité (I) par $pixel^2$, à l'aide de la formule suivante :

$$\mu_r = -2.5 * \log\left(\frac{I}{0.176^2}\right) \quad (10)$$

L'erreur sur la magnitude apparente est obtenue en différenciant la formule de μ_r :

$$\Delta\mu_R = \frac{2.5 * \Delta I}{\ln 10 * I} \quad (11)$$

Les fichiers .dat, dont on a enlevé la première colonne, sont obtenus à l'aide de la commande `TPRINT fichier.tab > fichier.dat` sous IRAF.

Les fichiers .tab sont obtenus à l'aide de la commande `ELLIPSE` dans le package `stsdas/analysis/isophote` d'IRAF.

Avant de lancer `ELLIPSE`, il faut donner:

1. Dans `EPAR GEOMPAR`, la position de l'objet en pixel, le maxsma pour savoir jusqu'à quelle rayon IRAF doit faire les calculs, le pas de calcul, yes à l'option `LINEAR STEP`.
2. Dans `EPAR ELLIPSE`, le nom du fichier sur lequel on va tracer les ellipses (bu000xx*ff.fits), le nom du fichier .tab dans lequel IRAF mettra les résultats, yes pour l'option `INTERAC` et `REGION` afin que IRAF nous donne la main, avant de commencer les calculs, pour masquer les objets trop proches de celui dont on veut faire le profil.

On approche, ensuite, le profil $-\mu_r = f(r)$ par le profil d'un disque $\log(I) = \alpha * r + \beta$, et le profil $-\mu_r = f(r^{\frac{1}{4}})$ par le profil de de Vaucouleurs $\log(I) = \alpha * r^{\frac{1}{4}} + \beta$.

Les résultats des fits pour les différentes galaxies, dans chaque filtre sont regroupés dans le TAB.6. Les profils des différentes galaxies dans les différents filtres sont regroupés en Annexe.

TAB. 6 – Pente, ordonnée à l'origine et coefficient de corrélation, calculés lors du fit.

Galaxie		Filtre b			Filtre c		
		Pente	Ord. orig.	Coeff. cor.	Pente	Ord. orig.	Coeff. cor.
iras00188N	r	1.107±1.717	19.8±5.951	0.989	0.974±1.852	19.52±6.419	0.983
	$r^{\frac{1}{4}}$	10.531±0.133	9.416±0.179	0.993	9.340±0.110	10.256±0.148	0.993
iras00397	r	3.409±0.125	17.820±0.215	0.980	5.736±0.191	15.398±0.227	0.997
	$r^{\frac{1}{4}}$	19.097±0.646	1.811±0.735	0.984	26.073±0.972	5.006±1.015	0.996
iras01355NW	r	4.776±0.172	12.559±0.434	0.972	1.658±2.247	18.656±4.540	0.990
	$r^{\frac{1}{4}}$	34.859±0.826	19.381±1.038	0.989	10.511±0.127	9.566±0.149	0.992
iras01355SE	r	2.121±8.202	18.677±0.180	0.984	1.606±2.727	19.132±4.155	0.992
	$r^{\frac{1}{4}}$	16.683±0.370	3.092±0.450	0.988	8.742±0.104	11.913±0.120	0.994
iras01572	r	0.531±5.667	19.351±2.672	0.992	0.392±4.859	19.389±3.698	0.986
	$r^{\frac{1}{4}}$	6.216±3.736	12.778±5.385	0.998	6.276±3.421	12.109±5.506	0.997
iras17028E	r	1.865±2.035	18.243±5.182	0.990	0.601±8.146	20.897±3.234	0.986
	$r^{\frac{1}{4}}$	13.582±0.134	6.048±0.166	0.992	6.551±7.821	14.074±0.109	0.989
iras17028W	r	0.580±9.130	19.973±2.449	0.993	0.752±9.039	18.830±3.553	0.995
	$r^{\frac{1}{4}}$	5.488±7.701	14.543±9.547	0.992	7.957±0.133	10.627±0.186	0.990
iras23060	r	0.512±9.677	20.823±4.463	0.985	0.415±8.204	20.469±3.815	0.979
	$r^{\frac{1}{4}}$	5.822±0.105	14.707±0.150	0.987	5.120±6.809	14.925±9.828	0.990
iras23129N	r	1.250±1.993	19.907±5.261	0.987	0.450±9.328	21.377±2.821	0.988
	$r^{\frac{1}{4}}$	9.840±0.141	10.705±0.177	0.990	11.422±0.145	8.025±0.170	0.992
iras23129S	r	1.249±1.615	18.78±5.136	0.987	1.194±1.272	17.809±3.366	0.991
	$r^{\frac{1}{4}}$	11.360±0.118	7.695±0.153	0.992	11.422±0.145	8.025±0.170	0.992

3.3 Tracé des pourcentages d'écart à un disque ou un bulbe

On calcule l'écart relatif en pourcentage entre le profil de la galaxie et un fit en faisant:

$$\text{écart} = \frac{|\text{profil} - \text{fit}|}{\text{profil}} * 100 \quad (12)$$

Ces tracés servent à vérifier que au delà de 2-3 fois le seeing, le profil de la galaxie et celui du fit sont quasiment égaux.

Les écarts des profils des différentes galaxies dans les différents filtres, par rapport aux différents fits, sont regroupés en Annexe.

3.4 Tracé des modèles IRAF

Dans le même package qu'ELLIPSE, on peut créer un modèle de galaxie à partir du .tab de celle-ci, à l'aide de la commande BMODEL. Il faut rentrer, dans EPAR BMODEL, le nom .tab, le nom du modèle .fits (irasxxxxx*mod.fits) qui sera créé et le nom du fichier source du .tab (bu000xx*ff.fits).

On fait ensuite $bu000xx * ff.fits - irasxxxxx * mod.fits$, que on multiplie par 10^{-13} pour avoir un fichier irasxxxxx*-mod.fits. C'est ce fichier que l'on va afficher sous SIPL avec le même programme qui a servi à afficher bu000xx*f.fits au paragraphe 3.1.2.

Ces opérations nous permettent de voir certaines structures qui ne font pas partie du modèle et ainsi de révéler de nouvelles informations.

Les fichiers irasxxxxx*-mod.fits sont regroupés en Annexe.

3.5 Analyse cas par cas

Ces analyses sont faites sur les figures (filtre b et c) regroupées en Annexe.

On remarque que pour toutes les galaxies, les détails sont plus fins dans le filtre c. Cela paraît logique puisque nous traitons des galaxies ultralumineuses dans l'infra-rouge, et donc plus lumineuses dans le rouge que dans le bleu-vert. Les descriptions suivantes des galaxies sont faites pour les deux filtres, sauf précision.

Les stades de fusion sont décrits dans la section 1.1.2.

3.5.1 IRAS00188-0856

Les images

Sur les figures niveaux.gris+isophote de IRAS00188, on voit deux objets l'un au-dessus de l'autre. Notre galaxie est l'objet du haut (au centre de l'image), l'autre étant une étoile d'après le catalogue [1]. Les isophotes sont très concentriques au centre de la galaxie. Elles sont déformées vers l'est en une queue de marée qui se confirme davantage dans le filtre c.

Contrairement à ce que Mathieu avait observé, il n'y a pas plusieurs structures au niveau du centre de la galaxie.

La présence d'une queue de marée et d'un noyau simple nous permettent de classer cette galaxie au stade IV de fusion.

Les figures IRAS00188 - modèle IRAF montre que le modèle n'est pas parfait. Il reste une structure au centre. Celle-ci peut être un deuxième noyau qui n'a pas été pris en compte lors du modèle. Cette ULIRG que l'on pensait ne posséder qu'un noyau simple, semble en avoir plusieurs en réalité, mais beaucoup trop proches pour les avoir détectés par les isophotes.

Les profils

D'après la qualité des coefficients de corrélation du TAB.6, obtenus dans les deux filtres pour le fit $r^{\frac{1}{4}}$, on peut dire que l'ULIRG IRAS00188 est une galaxie elliptique.

Les graphes pourcentage écart-disque et écart-bulbe nous montrent également que les profils en $r^{\frac{1}{4}}$ sont meilleurs à partir de 2-3 seeing ($\text{écart} - \text{bulbe} < 2\%$ au delà de 2 seeing).

3.5.2 IRAS00397-1312

IRAS00397-1312 se situe au centre de la figure niveaux.gris+isophote. Elle ne présente pas de queue de marée dans nos filtres. Les isophotes au centre sont légèrement déformées mais on n'observe pas de noyaux multiples contrairement à ce que Mathieu avait observé.

Ces informations nous permettent de classer cette ULIRG dans un stade V de fusion.

Mêmes commentaires que pour la figure galaxie - modèle IRAF du cas précédent : le modèle ne représente pas exactement la galaxie. Il semble qu'il y ait un ou plusieurs autres noyaux. Mais notre seeing, de 0.7 arcsec pour cette galaxie, ne nous permet pas de faire des remarques pertinentes.

Les profils

L'analyse du profil de cette galaxie est difficile car elle semble être une galaxie elliptique dans le bleu-vert et plutôt une spirale dans le filtre c. Cependant, dans les deux filtres, les écarts à un disque étant plus faible que les écarts à un bulbe, on peut supposer que cette ULIRG est plutôt une galaxie spirale.

3.5.3 IRAS01355-1814

Les images

IRAS01355-1814 est un système de deux galaxies en interaction, comme nous le montrent les isophotes reliant les deux objets. Les deux noyaux sont bien séparés. Ils sont distants d'environ 3 arcsec, correspondant à 0.13 Mpc en tenant compte de la distance de la galaxie par rapport à nous. Il n'y a pas de queue de marée visible dans nos filtres.

Je classerai donc cette ULIRG dans un stade II de fusion.

Les modèles créés par IRAF pour les deux galaxies de ce système sont très bien car il ne reste que du ciel après la soustraction galaxie - modèle. On ne voit pas apparaître de queue de marée, ce qui confirme que le système se trouve bien dans un stade II de fusion.

Les profils

D'après la valeur des coefficients de corrélation du TAB.6, qui sont meilleurs dans les deux filtres pour le fit $r^{\frac{1}{4}}$, on peut donc dire que les galaxies IRAS01355NW et IRAS01355E sont des galaxies elliptiques.

Les graphes pourcentage écart-disque et écart-bulbe de chacune d'elle, et dans chaque filtre, nous montrent également que les profils en $r^{\frac{1}{4}}$ sont meilleurs à partir de 2-3 seeings (*écart - bulbe* < 1 % au delà de 2 seeings).

3.5.4 IRAS01572+0009

Les images

IRAS01572+0009 se situe au centre de la figure niveaux.gris+isophote. Les isophotes intérieures sont concentriques, il n'y a donc pas de noyaux multiples. Les isophotes extérieures sont déformées. On distingue nettement deux grandes structures qui sont soit des queues de marées, soit des bras spiraux. L'une part du nord de la galaxie et s'incurve vers le sud-est et l'autre part du sud de la galaxie et s'incurve vers le nord. Dans le filtre c, on observe à l'intérieur des grandes structures, des structures moins lumineuses qui pourraient être des galaxies naines impliquées dans la fusion des noyaux de notre ULIRG.

Ces observations nous permettent de classer cette ULIRG dans un stade IV de fusion.

Les modèles de IRAF pour cette galaxie sont aussi très bien puisqu'il ne reste presque plus de structure après soustraction. On voit cependant qu'il existerait un ou plusieurs autres noyaux au centre. Mais notre seeing étant ici de 0.7 arcsec, on ne peut rien conclure. On voit également sur les figures IRAS01572 - modèle, une queue de marée s'étendant vers l'est. Les grandes structures ayant disparu lors de la soustraction du modèle, on peut dire que ce sont des bras spiraux de la galaxie. L'existence de ces bras spiraux nous confirme dans le choix du stade IV de fusion pour cette ULIRG.

La figure IRAS01572 - modèle du filtre c, fait aussi ressortir des structures dans les bras spiraux, notamment le long de la queue de marée, qui semble être des galaxies naines impliquées dans la fusion de notre ULIRG. Mais il faudrait faire une étude de spectrométrie pour calculer leur redshift, et ainsi vérifier si la présence de ces objets dans notre ULIRG n'est pas simplement dû à un effet de projection.

Les profils

D'après la valeur des coefficients de corrélation du TAB.6, qui sont meilleurs dans les deux filtres pour le fit $r^{\frac{1}{4}}$, on peut dire que l'ULIRG IRAS01572 est une galaxie elliptique.

Les graphes pourcentage écart-disque et écart-bulbe nous montrent également que les profils en $r^{\frac{1}{4}}$ sont meilleurs à partir de 2-3 seeings (*écart - bulbe* < 1 % au delà de 2 seeings).

3.5.5 IRAS03521+0028

Les images

IRAS03521+0028 est une ULIRG en forme de banane. Dans le filtre c, on observe au “centre” de ce système, 3 structures séparées d’à peine 1 arcsec (35 kpc). Mathieu les avait déjà repérés mais il n’était pas sûr de leur existence car le seeing était de 1.6 arcsec. Le nôtre est de 0.45 arcsec. On peut donc confirmer l’existence de ces noyaux multiples. Notre ULIRG est composée de 3 noyaux en fusion. On peut donc classer cette ULIRG dans un stade II de fusion.

La figure IRAS03521 - modèle de cette galaxie n’est pas très pertinente à cause de la présence de noyaux multiples. Il semblerait qu’il y ait une queue de marée vers l’ouest, visible dans le filtre c. Mais on ne sait pas vraiment si la structure sombre ne serait pas plutôt la manifestation d’autres noyaux.

Les profils

La présence de noyaux multiples, trop proches les uns des autres, ne nous permet pas d’ajuster chaque noyau séparément. L’irregularité du profil de la galaxie nous montre qu’une structure complexe se trouve au centre de celle-ci.

3.5.6 IRAS16468+5200

Les images

Les isophotes elliptiques de IRAS16468+5200 montrent que c’est un système composé de deux noyaux distants d’un peu plus de 1 arcsec. Elle présente une grande queue de marée ou bras spiral, s’étendant vers le nord, au niveau de laquelle on observe des structures dans le filtre c. On peut donc classer cette ULIRG dans un stade III de fusion.

La figure IRAS16468 - modèle fait ressortir la queue de marée ou bras spiral, et la présence des deux noyaux.

Les profils

Sur le profil de cette galaxie, on voit deux pics de magnitude dans le filtre b, traduisant la présence des deux noyaux. Je n’ai pas pu réaliser un fit propre à chaque noyau. La séparation de ceux-ci n’était pas suffisante pour essayer un ajustement à chaque composante.

3.5.7 IRAS16487+5447

Les images

Les isophotes elliptiques de IRAS16487+5447 montrent que c’est un système composé de deux noyaux distants d’environ 1 arcsec (35 kpc). On observe aussi une grande queue de marée s’étendant vers le nord-est. On peut donc classer cette ULIRG dans un stage III de fusion.

La figure IRAS16487 - modèle fait ressortir la queue de marée et la présence des deux noyaux.

Les profils

Même remarque que pour la galaxie précédente : la présence de deux noyaux très proches l’un de l’autre ne nous permet pas de faire des fits individuels et de déterminer ainsi la nature de chaque objet en fusion.

3.5.8 IRAS17028+5817

Les images

IRAS17028+5817 est un système de deux galaxies distantes de plus de 5 arcsec (0.12 Mpc). Les isophotes de celle de l'est sont déformées vers celle de l'ouest, montrant ainsi l'existence d'une interaction entre les deux. On peut classer ces galaxies dans un stade I de fusion.

Les figures IRAS17028 - modèle pour chacune des galaxies du système montrent qu'il existe des structures non prises en compte dans le modèle: noyaux multiples, queues de marée ou bras spiraux vers le sud et le nord-est pour la galaxie ouest. Etant donné que le seeing de ces galaxies est de 0.45 arcsec, on peut espérer que ces structures soient bien réelles.

Les profils

D'après les coefficients de corrélation et les pourcentages d'écart (écart-bulbe $< 1\%$ au delà de 3 seeings), la galaxie à l'ouest est une spirale.

Pour la galaxie est, les coefficients de corrélation et les pourcentages d'écart donnent des résultats ambigus. Par exemple, les pourcentages d'écart montrent que dans le filtre b la galaxie est plutôt spirale alors que dans le filtre c, elle est plutôt elliptique. On ne peut donc pas conclure sur la nature de la galaxie est.

3.5.9 IRAS20087-0308

Les images

Le tracé des isophotes dans le filtre b montre qu'IRAS20087-0308 possède un système de noyaux doubles séparés par environ 0.5 arcsec (25 kpc), i.e 1 fois le seeing. Le noyau de gauche n'apparaît pas dans le filtre c, pour lequel le seeing est meilleur, mais on remarque quand même une déformation importante des isophotes dans le sens d'un noyau de gauche fictif. Cependant, ces structures sont trop fines pour notre seeing. L'existence de cette structure est donc remise en question. De plus une grande traînée horizontale coupe le nord de la galaxie, affectant ainsi le tracé des isophotes de l'ULIRG. On observe aussi une queue de marée ou bras spiral, s'étendant vers le sud-est.

Dans le doute, on peut classer cette ULIRG en stade III de fusion.

La figure IRAS20087 - modèle fait ressortir 3 grandes queues de marée ou bras spiraux. On y voit aussi l'effet de la traînée, ce qui nous permet de mieux juger la galaxie. Il semble également qu'il existe plusieurs noyaux au centre car malgré la soustraction du modèle, de nombreuses structures subsistent au centre, surtout dans le filtre c. Notre seeing est de 0.5 arcsec pour cette galaxie, ce qui est largement inférieur à la taille des différentes structures. On a donc de bonnes raisons de penser que ces structures sont bien réelles.

Les profils

La structure interne complexe de cette galaxie ne nous permet pas de réaliser des fits. On voit d'ailleurs bien sur les profils de cette galaxie, la présence de plusieurs bosses (représentant des noyaux) au centre de l'ULIRG.

3.5.10 IRAS23060+0505

Les images

Les isophotes centrales de IRAS23060+0505 sont déformées mais ne font pas ressortir une éventuelle présence de noyaux multiples. Une grande queue de marée s'étend vers le sud-ouest.

D'après ces observations on peut donc classer cette ULIRG dans un stade IV de fusion.

La figure IRAS23060 - modèle fait ressortir la présence de plusieurs noyaux et de 3 petites queues de marée ou bras spiraux, à l'intérieur de la galaxie. On voit également la trace de la grande queue de marée détectée auparavant. Le seeing de cette galaxie est de 0.6 arcsec, on a donc de bonnes chances pour que ces structures soient réelles.

Les profils

Les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés pour cette galaxie, autant pour le fit d'un bulbe que pour celui d'un disque. Mais lorsqu'on regarde le pourcentage d'écart entre profil et fit, le fit d'un bulbe semble être plus approprié au centre et celui d'un disque semble être meilleur sur les bords. On serait donc en présence d'une galaxie avec un bulbe et un disque. Ce serait une galaxie de type précoce, peut-être une lenticulaire. On remarque quand même la présence d'une structure à 0.9 arcsec du centre, distance supérieure au seeing. Mathieu a interprété cela par la présence hypothétique d'une queue de marée superposée au disque de la galaxie.

3.5.11 IRAS23129+2548

Les images

IRAS23129+2548 est un système de deux galaxies distantes d'environ 8 arcsec (0.33 Mpc). Les isophotes intérieures, de chaque galaxie, sont régulières. Il n'y a donc pas de noyaux multiples intérieurs à chacune d'elle. Les deux galaxies présentent une excroissance dans la direction de l'autre (plus une excroissance vers l'ouest pour la galaxie nord), signe possible d'une interaction future ou passée. Je pencherai plus pour le cas d'une interaction future car dans le cas d'une interaction passée, les isophotes intérieures devraient être déformées, ce qui n'est pas le cas.

On peut donc classer cette ULIRGS dans un stade I de fusion.

Les figures IRAS23129 - modèle font ressortir les excroissances que présente chaque galaxie. En les observant bien, elles ressemblent à des étoiles. Ces structures pourraient donc également être dû à la superposition de trois étoiles sur la ligne de visée. Pour être fixé, il faudrait faire une étude spectrométrique afin de déterminer la distance de ces objets. Et ainsi, on pourrait savoir si ils sont sur le même plan que nos galaxies ou non.

Les profils

Les coefficients de corrélation tendent à nous montrer que ces galaxies ont une forme elliptique. Ce qui ne semble pas être vraiment ce que nous montrent les écarts en pourcentage. D'après les écarts, la galaxie sud serait une spiral et on ne peut pas conclure pour la galaxie nord.

D'après nos résultats, on ne peut pas conclure sur la nature de ces deux galaxies. Mathieu, lui avait trouvé que la galaxie nord était une galaxie précoce à bulbe et disque.

3.5.12 IRAS23498+2423

Les images

IRAS23498+2423 est également un système en forme de banane. Les isophotes montrent 2 à 4 noyaux séparés de 2 arcsec (99 kpc). On observe aussi une queue de marée s'étendant vers le sud-est, dans laquelle ressort une structure à deux zones plus intenses. Mais ceci est peut être dû à des effets de projection. A l'aide d'une étude de spectrométrie, il faudrait donc vérifier si ces "étoiles" sont sur le même plan que l'ULIRG. Si ce n'est pas le cas, les structures s'étendant vers le sud-est et le nord-ouest (voir figure iras - model IRAF) pourraient bien être des bras spiraux.

On peut donc classer cette ULIRG dans un stade III de fusion.

La figure IRAS23498 - modèle fait ressortir la queue de marée vers le sud-est et en dévoile une plus faible vers le nord-ouest.

Les profils

Ce système en interaction ayant une structure interne trop complexe (nombreuses bosses sur les profils), il est inutile d'essayer d'ajuster cet objet.

4 Conclusions

4.1 Conclusions sur les résultats

Le long temps de pose (1 heure pour les fichiers combinés) a dévoilé des structures externes de faible intensité (bras spiraux, queues de marée) ce qui a permis de mieux déterminer le stade de fusion. C'est un plus par rapport aux résultats de Veilleux et al. en 2002 et par rapport au travail de Mathieu Vincendon en 2003 (temps de pose combiné de 45 min).

Rappel des stades de fusion :

1. stade I : pré-contact
2. stade II : premier contact sans queue de marée
3. stade III : pré-fusion avec un noyau multiple et des queues de marée
4. stade IV : galaxies en fusion avec de longues queues de marée et noyau simple
5. stade V : stade final de fusion, pas de queues de marée, noyau déformé.

TAB. 7 – *Récapitulation des résultats*

Galaxie	Noyau	Stade de fusion	Type de galaxie
iras00188N	simple	IV	elliptique
iras00397	déformé	V	spirale
iras01355NW		II	elliptique
iras01355SE		II	elliptique
iras01572	simple	IV	elliptique
iras03521	triple	II	?
iras16468	double	III	?
iras16487	double	III	?
iras17028E		I	?
iras17028W		I	spirale
iras20087	double	III	?
iras23060	déformé	IV	précoce, lenticulaire
iras23129N		I	?
iras23129S		I	?
iras23498	multiple (2 à 4)	III	?

Sur les 15 galaxies étudiées (15 galaxies car les ULIRGs iras01355, iras17028 et iras23129 ont chacune 2 galaxies bien distinctes) :

1. toutes présentent les caractéristiques de systèmes en fusion ou en interaction
2. 2 ont un noyau simple non déformé
3. 2 (17 %) ont un noyau simple déformé
4. 3 ont un noyau double
5. 1 a un noyau triple

6. 1 a un noyau multiple comprenant 2 à 4 composantes
7. les 6 autres sont à un stade primaire de fusion (pré-contact ou premier contact)

8. 4 sont au stade de pré-contact (I)
9. 3 sont au stade de premier contact sans queue de marée (II)
10. 4 sont au stade de pré-fusion avec un noyau multiple et des queues de marée (III)
11. 3 sont au stade de fusion avec de longues queues de marée et noyau simple (IV)
12. 1 est au stade final de fusion, sans queue de marée, noyau déformé (V)

13. 2 sont des galaxies spirales,
14. 4 des galaxies elliptiques,
15. 1 galaxie de type précoce, peut être lenticulaire,
16. 8 galaxies n'ont pas pu être typées, soit à cause de leur noyau multiple non séparable, soit à cause d'une ambiguïté sur l'interprétation des coefficients de corrélation et des pourcentages d'écart à un bulbe ou à un disque.

Mes résultats ne sont pas tout à fait en accord avec ceux de Veilleux et al. de 2002. Seulement 17 % des 12 ULIRGs ont un noyau simple déformé, au lieu de 56 % pour Veilleux et al. 17 % de mes ULIRGs possèdent plus de deux noyaux, au lieu de 4 % chez Veilleux et al. Cependant, eux travaillaient sur un échantillon de 118 galaxies. Mon échantillon ne fait que 12 galaxies, ce qui ne permet pas de faire des statistiques significatives.

33 % de nos 12 ULIRGs sont de type précoce (elliptique ou lenticulaire). Ceci est en accord avec les 43 % obtenu par Márquez et al. en 2002 [7]. Mais, étant donné qu'on n'a pas réussi à identifier le type de la majorité de nos galaxies (53 %), les pourcentages peuvent encore varier. Dans l'étude de Veilleux et al. de 2002, 35 % des 118 ULIRGs sont des elliptiques, 64 % n'ont pas de forme clairement identifiée (38 % peuvent aussi bien être ajustées par des elliptiques que par des spirales, et 26 % sont ambiguës). Même si notre échantillon est trop petit pour avoir des statistiques significatives, nos résultats semblent concorder avec ceux de Veilleux et al.

Nos valeurs de seeing étant bonnes (≤ 1 arcsec), notre étude a permis de confirmer, ou d'infirmer selon les cas, les observations que Mathieu Vincendon avait faites sur la structure du noyau des ULIRGs, lors de son stage en 2003. Ces nouvelles données ont permis de mieux déterminer le stade de fusion des ULIRGs.

Beaucoup de choses restent à faire sur l'étude de ces galaxies :

1. dans la section 2.2, on a pas encore réussi à trouver l'origine des points brillants sur les flat fields normalisés. Il serait bien de continuer à y réfléchir.
2. pour compléter l'étude de la morphologie des ULIRGs, il faudrait ajuster les profils en utilisant une autre méthode (par exemple le maximum de vraisemblance).
3. il serait intéressant de faire une étude de spectrométrie afin de déterminer le redshift des différents objets. Ceci permettrait de savoir si ces objets sont sur le même plan que l'ULIRGs ou si il faut tenir compte d'un effet de projection.
4. afin de vérifier le scénario de Sanders (cf section 1.1.1), il faudrait connaître l'activité nucléaire du noyau de chaque ULIRG. Pour cela, il faudrait étudier le spectre de chaque ULIRG et en fonction des raies (type, largeur, intensité ...) déterminer le type d'activité nucléaire. C'est donc la prochaine grande étape dans l'étude du lien entre la luminosité et l'avancée du stade de fusion des ULIRGs.

4.2 Conclusions sur mon stage

Mon stage a été pour moi une période de grand épanouissement, tant sur le plan professionnel que sur le plan social.

Tout au long de mon stage, j'ai eu l'occasion de rencontrer plusieurs astrophysiciens qui m'ont parlé de leur travail, ce qui m'a permis de découvrir davantage ce métier. J'ai appris beaucoup sur le sujet de mon stage et en informatique (utilisation des logiciels IRAF, Super-mongo, SIPL, \LaTeX). J'ai eu l'opportunité d'assister à plusieurs conférences sur différents sujets de l'astrophysique (IAP, SF2A). J'ai amélioré mon Anglais grâce à la littérature et aux personnes de toutes les origines (Angleterre, Espagne, Italie, Grèce, Inde, États Unis ...), que j'ai eu l'occasion de rencontrer à l'IAP. J'ai également appris à rechercher les informations par moi-même via support papier, internet, ou en posant la question directement aux personnes adéquates (programmation en C, utilisation de \LaTeX ...). En bref, j'ai appris tellement de choses qu'il est fort probable que j'en ai oublié pas mal dans la liste précédente!

Malheureusement toutes les choses ont une fin, même les meilleures. C'est ainsi que mon stage se termine. J'en garderai un souvenir merveilleux et je dis à tout le monde "ce n'est qu'un au revoir" car je voudrais de tout coeur faire un DEA en astrophysique dans un an, et qui sait, ce sera peut être celui de l'IAP!

Références

- [1] D.-C. KIM, S. VEILLEUX and D. B. SANDERS *Optical and near-infrared imaging of the IRAS 1 Jy sample of ultraluminous galaxies. I. The atlas.* The Astrophysical Journal Supplement Series, 143:277-314, 2002 Decembre.
- [2] Arlo U.UB LANDOLT *VRI Photometric Standard Stars in the magnitude range $11.5 < V < 16.0$ around the celestial equator.* the Astronomical Journal, vol 104, number1, 1992 July.
- [3] Inger JORGENSEN *Secondary Photometric Standard Stars for the Thuan-Gunn and Johnson-Kron-Cousins Systems.* the Astronomical Society of the Pacific, 106: 967-973, 1994 September.
- [4] Mathieu VINCENDON *Etude de galaxies ultralumineuses dans l'IR.* Rapport de stage de licence et Magistère de Physique sous la direction de Florence Durret, Institut d'Astrophysique de Paris, Juin/Juillet 2003.
- [5] D. B. SANDERS, I. F. MIRABEL *Luminous Infrared Galaxies.* Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1996. 34:749-92
- [6] S. VEILLEUX, D.-C. KIM and D. B. SANDERS *Optical and near-infrared imaging of the IRAS 1 Jy sample of ultraluminous galaxies. II. The analysis.* The Astrophysical Journal Supplement Series, 143:315-376, 2002 Decembre.
- [7] J. MASEGOSA, I. MÁRQUEZ *On the nature of high luminosity ULIRGs.* Astrophysics and Space Science 284: 483-486, 2003.

Annexes

1 Coordonnées équatoriales

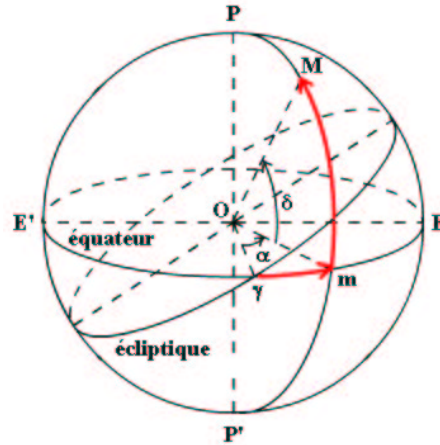


FIG. 5 – Coordonnées équatoriales : ascension droite (α), déclinaison (δ)

2 Etoiles standards

TAB. 8 – *Etoiles standards système Gunn : magnitudes théoriques*

Etoiles	Magnitudes théoriques	
	g	r
F762-9-5	17.467	17.244
F762-9-6	18.148	17.955
F762-9-7	18.389	18.153
F762-9-8	18.592	18.156
F762-9-9	...	18.467
F1038-6-1	13.615	12.724
F1038-6-2	16.494	14.196
F1038-6-3	18.965	16.773
F1038-6-4	19.275	17.435
F1038-6-5	19.553	17.376
F1038-6-6	...	18.332
F1038-6-7	...	18.559
F1038-6-8	...	19.116

TAB. 9 – *Etoiles standards système Johnson : position et magnitudes théoriques*

Etoiles	Position		Magnitudes théoriques	
	Ascension droite	Déclinaison	V	R
PG1633+099	16:35:24	+09 47 50	14.397	14.49
PG1633+099A	16:35:26	+09 47 53	15.256	14.751
PG1633+099B	16:35:34	+09 46 22	12.969	12.379
PG1633+099C	16:35:38	+09 46 16	13.229	12.611
PG1633+099D	16:35:40	+09 46 43	13.691	12.905
MARKA	20:43:59	-10 47 42	13.258	13.373
MARKA-1	20:43:58	-10 47 11	15.911	15.544
MARKA-2	20:43:54	-10 45 32	14.540	14.161
MARKA-3	20:44:02	-10 45 39	14.818	14.231
SA92-245	00:54:16	+00 39 51	13.818	12.889
SA92-248	00:54:31	+00 40 15	15.346	14.218
SA92-249	00:54:34	+00 41 05	14.325	13.626
SA92-250	00:54:37	+00 38 56	13.128	12.314
SA110-496	18:42:59	+00 31 08	13.004	11.964
SA110-497	18:43:02	+00 30 56	14.196	13.144
SA110-499	18:43:07	+00 28 00	11.737	10.75
SA110-503	18:43:11	+00 29 43	11.773	11.102
SA110-504	18:43:11	+00 30 05	14.022	12.774
SA110-506	18:43:19	+00 30 27	11.312	10.744
SA110-507	18:43:19	+00 29 26	12.440	11.299
F762-9-1	...	...	11.447	...
F762-9-2	...	...	11.358	...
F762-9-3	...	...	13.802	...
F762-9-4	...	...	14.725	...

3 Magnitudes expérimentales

TAB. 10 – *Magnitudes calculées avec IRAF*

Etoiles	25 Août		26 Août	
	bmes	cmes	bmes	cmes
PG1633+099	16.709	16.937	16.698	16.934
PG1633+099A	17.978	17.117	17.901	17.124
PG1633+099B	15.675	14.726	15.649	14.736
PG1633+099C	15.974	14.955	15.934	14.966
PG1633+099D	16.255	15.727	16.214	15.741
MARKA-2	17.504	16.727	17.531	16.769
MARKA-2	17.475	16.729	...	...
SA92-248	18.051	16.966	17.996	16.975
SA92-249	16.784	16.238	16.710	16.247
SA92-250	15.687	15.046	15.670	15.048
SA110-496	...	...	15.762	14.765
SA110-497	16.857	15.894	16.882	15.896
SA110-499	14.414	13.474	14.445	...
SA110-503	14.315	13.777	14.344	13.811
SA110-504	16.839	15.569	16.883	15.583
SA110-506	13.779	13.357	13.806	...
SA110-507	15.126	14.164	15.168	14.168
SA110-496	...	14.750	...	...
SA110-497	16.925	15.896	...	...
SA110-499	14.426	13.472	...	...
SA110-503	14.329	13.774	...	...
SA110-504	16.896	15.580	...	...
SA110-506	13.792	13.354	...	...
SA110-507	15.156	14.163	...	...
F762-9-1	13.899	...	14.013	...
F762-9-2	14.269	...	14.384	...
F762-9-3	16.402	...	16.591	...
F762-9-4	17.444	...	17.582	...
F762-9-1	13.905	...	13.950	...
F762-9-2	14.277	...	14.328	...
F762-9-3	16.435	...	16.423	...
F762-9-4	17.435	...	17.348	...
F762-9-3	16.327	...	...	...
F762-9-4	17.256	...	...	...

4 Facteurs de calibration

TAB. 11 – *Facteurs de calibration pour les ULIRGs étudiées*

Galaxie	Air mass	Facteur de calibration	
		Filtre b	Filtre c
IRAS00188-0856	1.438	9.579e-13	9.756e-13
	1.445	9.584e-13	9.741e-13
	1.468	9.599e-13	9.689e-13
IRAS00397-1312	1.717	9.768e-13	9.142e-13
	1.647	9.720e-13	9.293e-13
	1.600	9.689e-13	9.395e-13
IRAS01355-1814	1.803	1.006e-12	9.433e-13
	1.765	1.002e-12	9.453e-13
	1.755	1.001e-12	9.458e-13
IRAS01572+0009	1.586	9.834e-13	9.545e-13
	1.484	9.729e-13	9.598e-13
	1.403	9.647e-13	9.641e-13
IRAS03521+0028	1.445	9.584e-13	9.741e-13
	1.374	9.536e-13	9.903e-13
	1.325	9.504e-13	1.002e-12
IRAS16468+5200	1.124	9.371e-13	1.050e-12
	1.163	9.397e-13	1.040e-12
	1.206	9.425e-13	1.030e-12
IRAS16487+5447	1.095	9.340e-13	9.803e-13
	1.119	9.364e-13	9.791e-13
	1.152	9.396e-13	9.773e-13
IRAS17028+5817	1.198	9.442e-13	9.749e-13
	1.239	9.482e-13	9.727e-13
	1.285	9.528e-13	9.703e-13
IRAS20087-0308	1.340	9.583e-13	9.674e-13
	1.374	9.618e-13	9.656e-13
	1.427	9.671e-13	9.628e-13
IRAS23060+0505	1.231	9.442e-13	1.024e-12
	1.213	9.430e-13	1.028e-12
	1.186	9.412e-13	1.035e-12
IRAS23129+2548	1.269	9.467e-13	1.015e-12
	1.200	9.421e-13	1.031e-12
	1.268	9.466e-13	1.015e-12
IRAS23498+2423	1.104	9.349e-13	9.799e-13
	1.067	9.313e-13	9.818e-13
	1.045	9.291e-13	9.830e-13

5 Seeing des champs de galaxies

TAB. 12 – *Seeing des différents champs de galaxies (fichiers combinés)*

Galaxie	Seeing (arcsec)		Seeing Mathieu
	Filtre b	Filtre c	
IRAS00188-0856	0.54	0.53	3.6
IRAS00397-1312	0.72	0.67	3
IRAS01355-1814	0.99	0.91	
IRAS01572+0009	0.70	0.71	2.4
IRAS03521+0028	0.45	0.45	1.6
IRAS16468+5200	0.61	0.55	
IRAS16487+5447	0.42	0.39	
IRAS17028+5817	0.44	0.45	
IRAS20087-0308	0.51	0.49	
IRAS23060+0505	0.61	0.61	2.6
IRAS23129+2548	0.82	0.70	2.4
IRAS23498+2423	0.46	0.50	2.2

6 Magnitude limite des galaxies

TAB. 13 – *Magnitude limite à 3 sigmas des galaxies*

Galaxie	Magnitude limite							
	Fichier individuel						Fichier combiné	
	Filtre b		Filtre c		Filtre b	Filtre c	Filtre b	Filtre c
IRAS00188-0856	21.60	21.69	22.28	21.74	21.58	22.44	22.38	22.21
IRAS00397-1312	21.63	22.38	21.86	21.71	22.20	21.90	22.38	22.37
IRAS01355-1814	21.67	22.30	22.44	21.80	22.02	22.41	22.54	22.36
IRAS01572+0009	21.64	22.37	22.42	21.95	22.33	22.55	22.31	22.36
IRAS03521+0028	21.64	21.71	20.98	21.63	21.60	20.92	21.74	21.77
	21.64	21.71		21.63	21.60		22.04	22.13
IRAS16468+5200	21.75	22.45	22.39	21.88	22.25	22.28	22.52	22.20
IRAS16487+5447	21.78	22.27	22.39	21.83	22.25	22.49	22.51	22.49
IRAS17028+5817	21.92	22.38	22.39	22.07	22.70	22.31	22.59	22.36
IRAS20087-0308	21.64	22.51	22.00	21.86	22.70	22.34	22.58	22.48
IRAS20087-0308	21.64	22.51	22.00		22.70	22.34	22.73	22.45
IRAS23060+0505	21.80	22.38	22.38	21.99	22.76	22.85	22.55	22.94
IRAS23129+2548	21.68	22.08	22.10	21.82	22.05	22.29	22.33	22.48
IRAS23498+2423	21.68	22.19	22.47	22.06	22.68	22.50	22.60	22.77

7 Commandes SIPL

7.1 Liste de commandes SIPL, par M. Vincendon

Pour entrer dans SIPL, taper `insipl` puis `sipl` pour lancer `sipl`.
 Sous `sipl` on peut utiliser des commandes unix en rajoutant `$` devant la commande.
 Pour lancer l’affichage d’une image avec un programme `nom.plm`, taper `@nom.plm` sous SIPL.

Pour afficher une image :

dev "/xwindow" pour écrire dans une fenêtre graphique
dev nom.ps/vps pour écrire dans un fichier postscript (il faudra terminer par close)
grop : graphique open
box : pour tracer les échelles
j 1 : pour que les axes soient à l'échelle 1
j 0 : pour que le logiciel ajuste les échelles
rf nom.fits : pour afficher l'image nom.fits
go : pour afficher à l'écran

Il faut indiquer les valeurs limitent des niveaux de gris :

On utilise la commande gray valeurmin valeurmax
Pour cela, il faut avoir une idée de la valeur des pixels de l'image.
On peut pour cela utiliser la commande cur/map/cont
Après avoir tapé cette commande, on peut cliquer à l'aide du bouton gauche de la souris dans la fenêtre image et voir ainsi sur la fenêtre sipl la valeur de ce pixel (ainsi que les coordonnées) de ce dernier.
On quitte par un clic droit de la souris.

Modification de l'image :

Pour zoomer, il faut préciser les coordonnées de la boîte que l'on desire afficher :
On utilise la commande limits xmin xmax ymin ymax
(Il faut ensuite à nouveau taper go ainsi que les niveaux de gris)

On peut appliquer une transformation à l'image de type

$$x' = xo + (a1a2) * x \quad (13)$$

$$y' = yo + (b1b2) * y \quad (14)$$

qui s'écrit :

trset/limits xo a1 a2 yo b1 b2

Par exemple pour translater les échelles et mettre le zéro au centre (le centre étant à 1000 pixels soit 176 arcsec), tout en changeant les pixels en arcsec avec 1 pixel = 0.176 arcsec, on fait :
trset/limits -188 0.176 0 -188 0 0.176

pour afficher en même temps plusieurs graphiques, il faut utiliser la commande :
ngr nbselonx nbselony

Dessin et écriture :

Pour tracer des contours :

soit on tape cur/iso/cont : On peut alors cliquer dans la fenêtre graphique sur un pixel et tous les pixels de même valeur se colorent.

on peut également taper cont valeur : les pixels de cette valeur se colorent

Pour sélectionner une couleur :

col n (0 pour noir, 1 pour blanc, 2 pour rouge)

lut/n n inverse les couleurs

Pour tracer un trait :

move xmin ymin;plot xmax ymax

Pour tracer une ellipse :

elip xcentre ycentre rayonselony angle(facultatif;0 par défaut)

Pour écrire en écriture grec : (par exemple affiche mu)

Pour écrire en indice (resp exposant) (resp)

Pour écrire des noms sur l'image, on peut écrire ces noms dans un fichier noms.dat ou l'on écrit en colonne :

nom1 x1 y1

nom2 x2 y2

puis on tape

read/nam noms.dat 2 nbdelettres

x 1

x 2

name

(le 2 indique le nombre de colonne de chiffres)

Pour trouver le sigma d'une zone et sa valeur moyenne :

par/mat/cur puis on dessine une fenêtre sur l'image (clic droit pour quitter)

pour écrire un text : text "texte" x y

pour donner un nom aux axes et à l'image :

label "axe des x" "axe des y" "titre"

On peut écrire les commandes dans un fichier nom.plm et les exécuter avec la commande @nom.

On indique une ligne de commentaires par !

Pour tracer des profils, il faut lire dans les fichiers .dat fait avec ellipse les 3 premières colonnes (r,I,erreur sur I) en sautant les cinq premières lignes

On peut utiliser la commande :

read/skip=nombrede lignesasauter nom.dat nombredecolonnealire

soit pour nos fichiers : read/skip=5 nom.dat 3

Les trois premières colonnes sont dans les colonnes 1,2 et 3 du buffer.

Opération sur les colonnes :

Lorsque l'on effectue une opération sur une colonne, le résultat se place automatiquement dans la colonne 0, écrasant les données précédemment installées là.

La ligne à taper est du type :

op1 m 1 0.188 soit :

type d'opération :

op1 : opération entre une colonne et un scalaire)

op2 : opération entre deux colonnes)

Les différentes natures d'opération sont les suivantes :

m : multiplier

r : soustraire

d : diviser

su : ajouter

abs : valeur absolu : op1 abs 1 met la valeur abs de la colonne 1 dans la colonne 0

log : log décimal

aexp : op1 aexp col 10 met 10 exposant les valeurs de la colonne dans la col 0

pot : puissance : op1 pot 1 0.25 col 1 puissance 1/4

Autres opérations :

swap : échange deux colonnes

new : met le résultat de l'opération précédent cette ligne dans une nouvelle colonne (portant le numéro suivant)

sel : permet de sélectionner dans une colonne certaines valeurs :

sel col gt valeur : prend les valeurs de la colonne supérieur ou égale à valeur

en remplaçant gt par :

le : \leq

eq :=
 ne ≠
 lt <

lis colonne : affiche le contenu de la colonne.
 fit : fait un fit linéaire sur le graphe avec les points sélectionnés précédemment avec sel
 Mettre une colonne en x : x colonne
 Mettre une colonne en y : y colonne
 Pour tracer le graphe : go
 po/co 3 affiche les points avec des astérisques en changeant le chiffre, on change la nature des points)
 ery colonne : prend pour erreurs les valeurs de la colonne.

7.2 Programmes de base

Le programme de base (exemple.plm) pour afficher une image avec des degrés de gris est :

```
dev "/xwindow"
grop
j 1
col 1
rf bu000xx*f.fits
go
lut/n 0
gray valeur.min valeur.max
box
label "abscisse" "ordonnée" "titre graph"
```

Voilà les programmes de base permettant de tracer ces profils avec leurs barres d'erreur :

profil $-\mu_r = f(r)$	profil $-\mu_r = f(r^{\frac{1}{4}})$	
dev "/xwindow"	dev "/xwindow"	
grop	grop	
col 1	col 1	
j 0	j 0	
read/skip=6 fichier.dat 3	read/skip=6 fichier.dat 3	
op1 m 1 0.176	op1 m 1 0.176	composante selon x
	op1 pot 1 0.25	
swap 1 0	swap 1 0	
x 1	x 1	
op1 m 2 1e-13	op1 m 2 1e-13	composante selon y
op1 d 0 0.176	op1 d 0 0.176	
op1 d 0 0.176	op1 d 0 0.176	
new	new	
sel 4 gt 0	sel 4 gt 0	
op1 log 4	op1 log 4	
op1 m 0 2.5	op1 m 0 2.5	
swap 4 0	swap 4 0	
y 4	y 4	
op2 d 3 2	op2 d 3 2	barres d'erreur
op1 m 0 2.5	op1 m 0 2.5	
op1 d 0 2.3	op1 d 0 2.3	
swap 3 0		
go	go	
po/co 3	po/co 3	
label "r (arcsec)" "-μ _r " "nom galaxie"	label "r(1/4)(arcsec)" "-μ _r " "nom galaxie"	
ery 3	ery 0	

Pour faire le fit de nos profils, on rajoute dans notre programme SIPL les lignes
 sel 1 gt 2.1
 sel 1 le 12
 fit

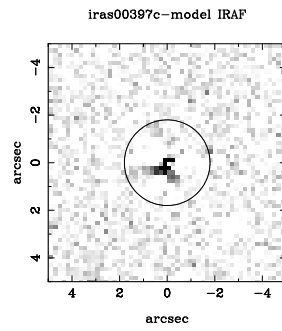
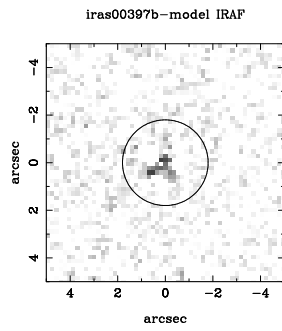
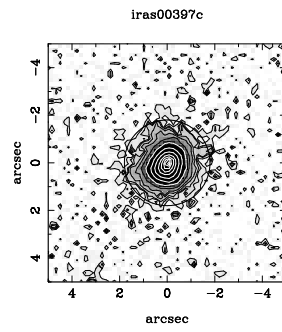
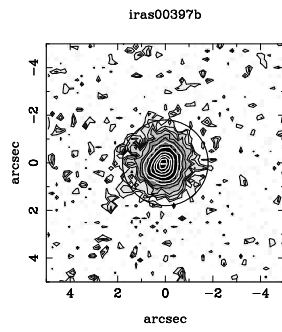
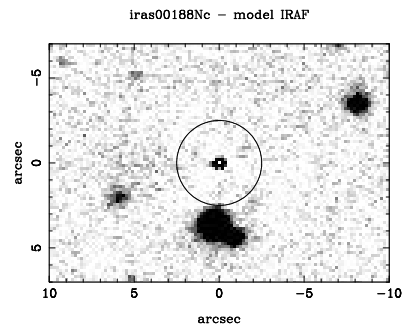
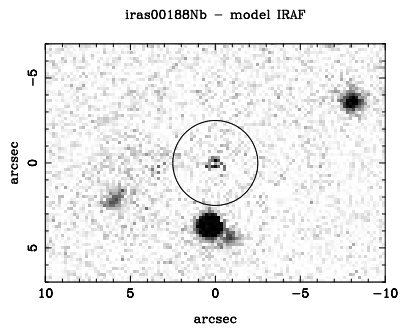
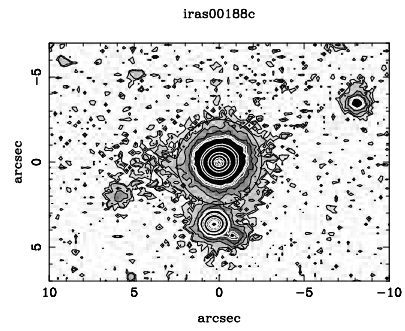
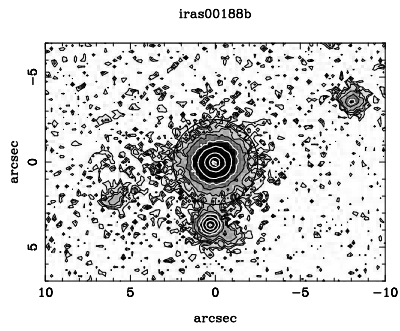
Les deux premières lignes servent à délimiter la zone que l'on veut ajuster. Lors du fit il ne faut pas tenir compte du centre de l'ULIRG, c'est à dire de la région intérieure à 1 à 2 fois le seeing.

Les programmes de base permettant de tracer ces écarts sont:

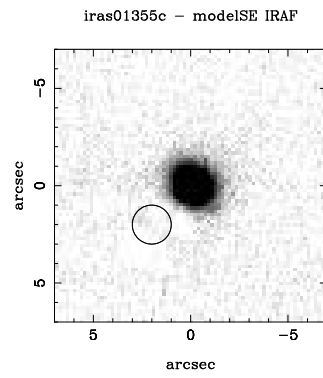
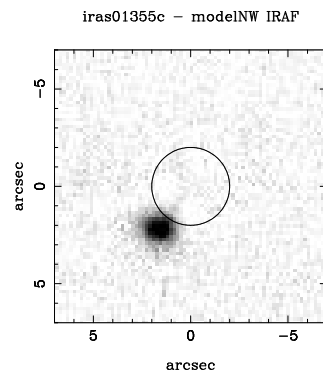
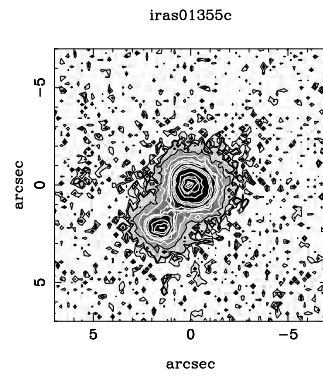
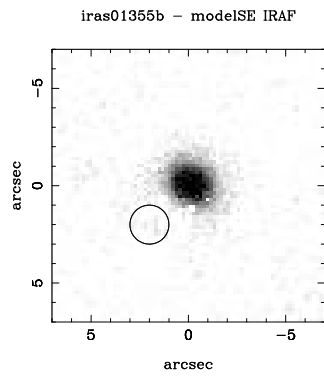
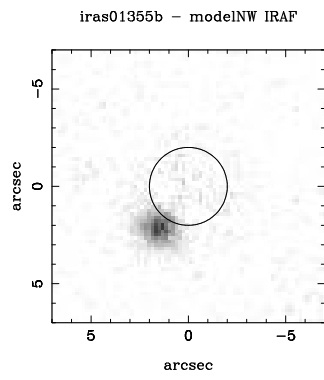
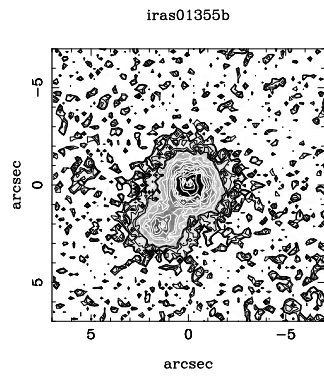
Ecart disque	Ecart bulbe	
dev "/xwindow"	dev "/xwindow"	
grop	grop	
col 1	col 1	
j 0	j 0	
read/skip=6 fichier.dat 3	read/skip=6 fichier.dat 3	
op1 m 1 0.176	op1 m 1 0.176	| composante | selon x
	op1 pot 1 0.25	
swap 1 0	swap 1 0	
op1 m 2 1e-13	op1 m 2 1e-13	
op1 d 0 0.176	op1 d 0 0.176	
op1 d 0 0.176	op1 d 0 0.176	
new	new	| profil | galaxie
sel 4 gt 0	sel 4 gt 0	
op1 log 4	op1 log 4	
op1 m 0 -2.5	op1 m 0 -2.5	
swap 4 0	swap 4 0	
x 1	x 1	
op1 m 1 pente (TAB.6)	op1 m 1 pente (TAB.6)	| fit
op1 su 0 ord. orig. (TAB.6)	op1 su 0 ord. orig. (TAB.6)	
new	new	
op2 r 4 5	op2 r 4 5	| profil - fit | <i>|profil - fit|</i> | division par profil | multiplication par 100
op1 abs 0	op1 abs 0	
op2 d 0 4	op2 d 0 4	
op1 m 0 100	op1 m 0 100	
new	new	
y 6	y 6	
go	go	
po/co 3	po/co 3	
label "arcsec" "pourcent" "titre"	label "arcsec" "pourcent" "titre"	

8 Galaxies: isophotes et moins modèle IRAF

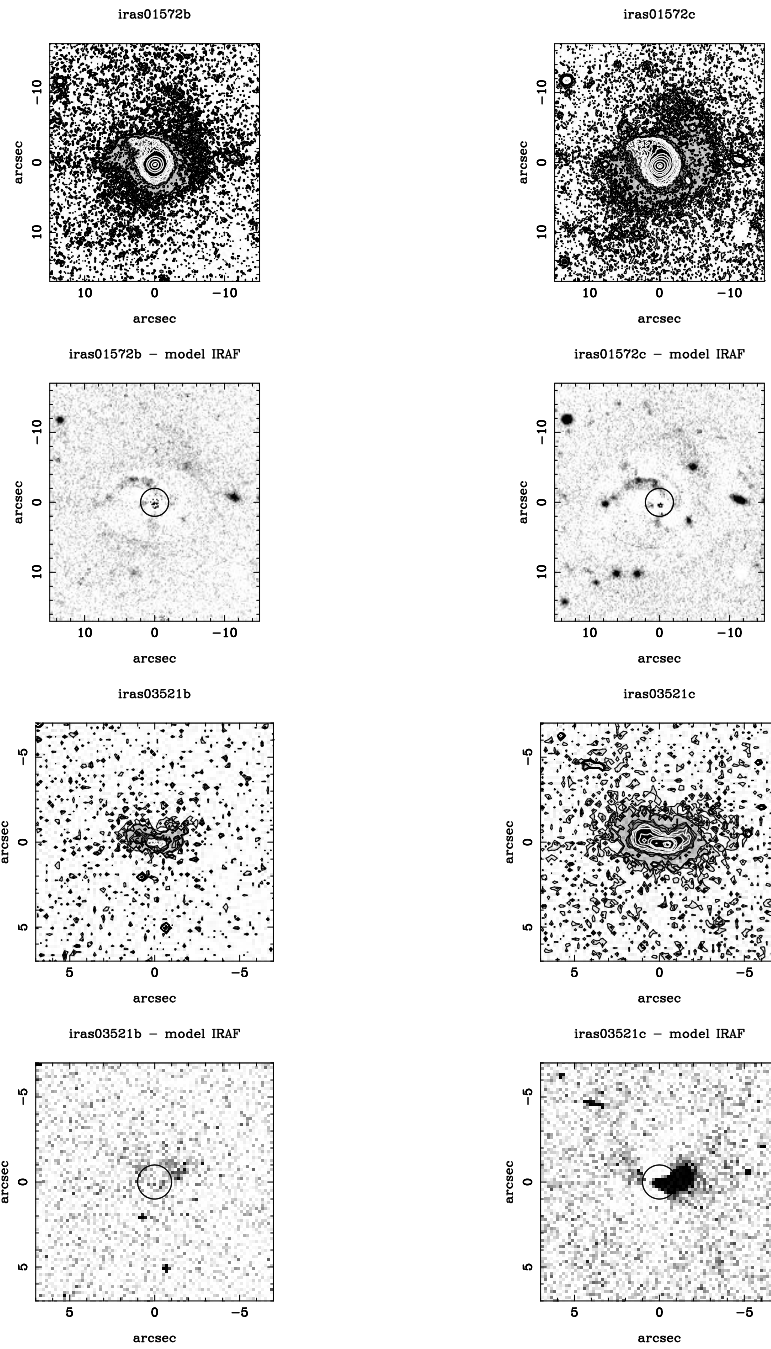
8.1 iras00188 et iras00397



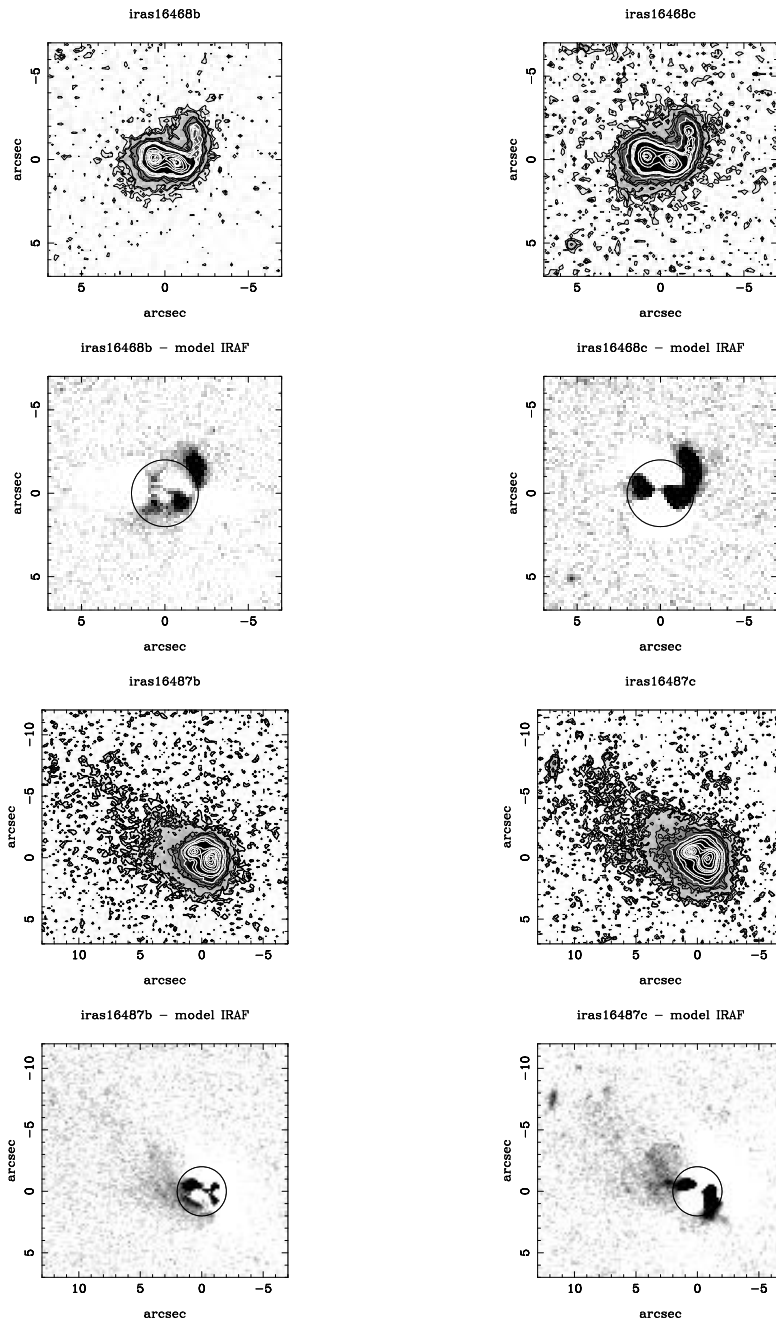
8.2 iras01355



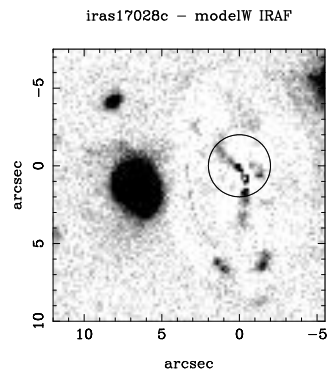
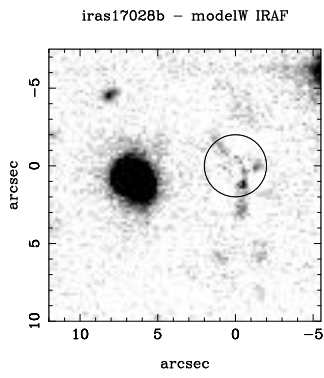
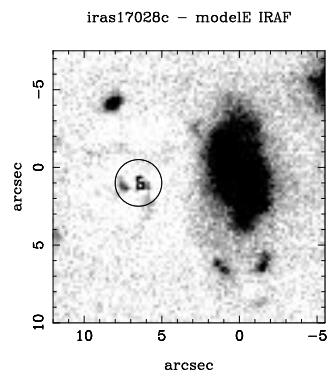
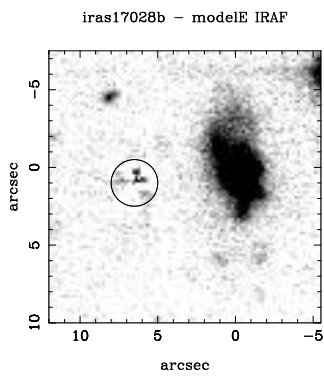
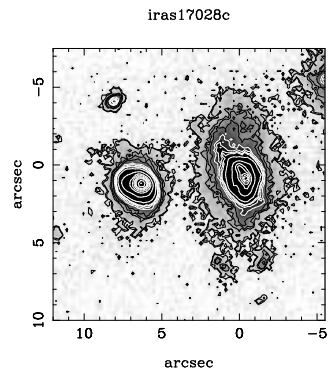
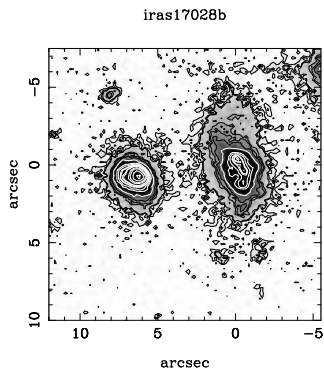
8.3 iras01572 et iras03521



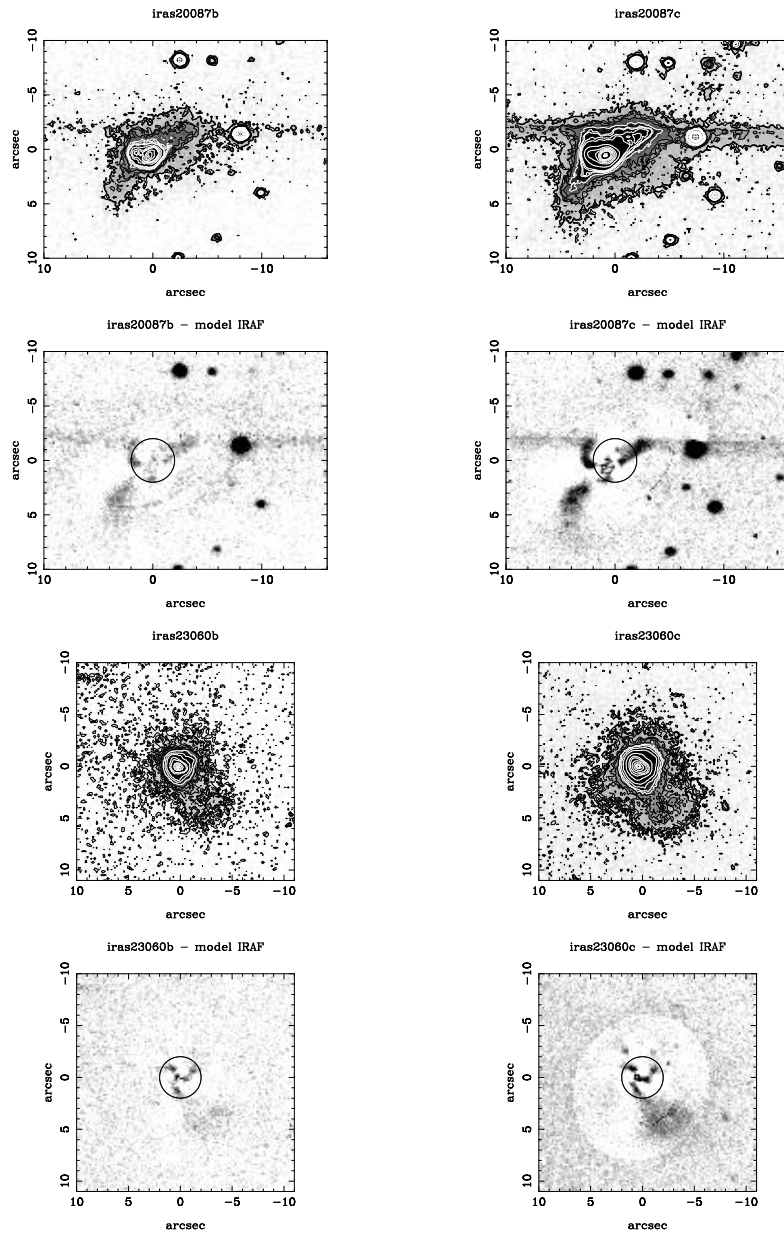
8.4 iras16468 et iras16487



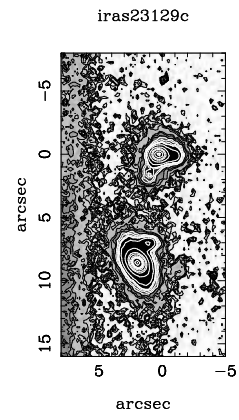
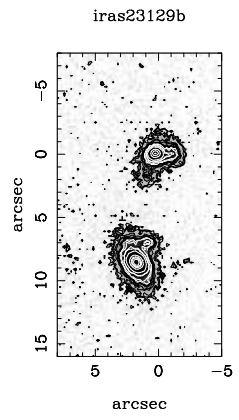
8.5 iras17028



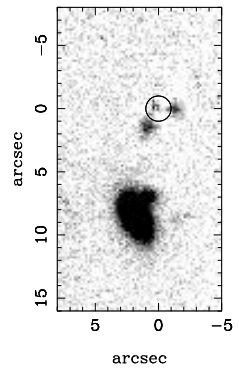
8.6 iras20087 et iras23060



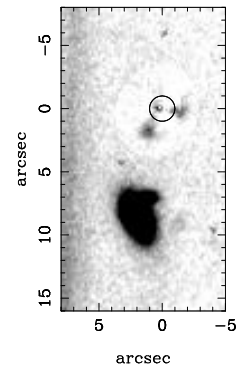
8.7 iras23129



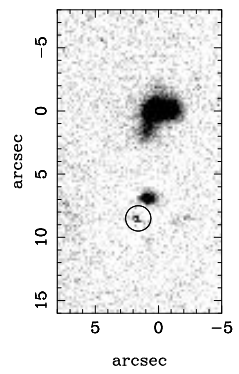
iras23129b - modelN IRAF



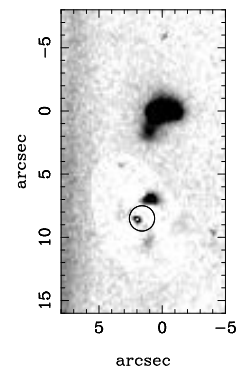
iras23129c - modelN IRAF



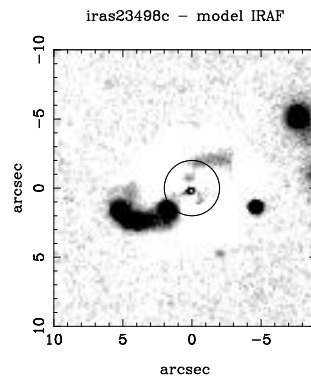
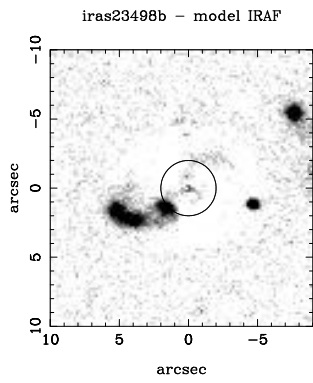
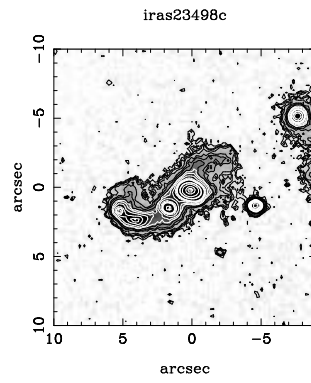
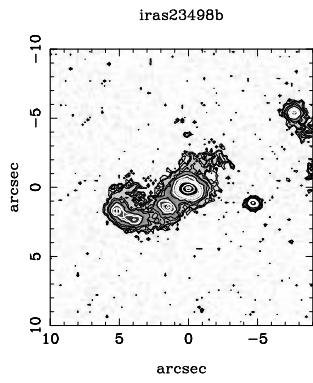
iras23129b - modelS IRAF



iras23129c - modelS IRAF

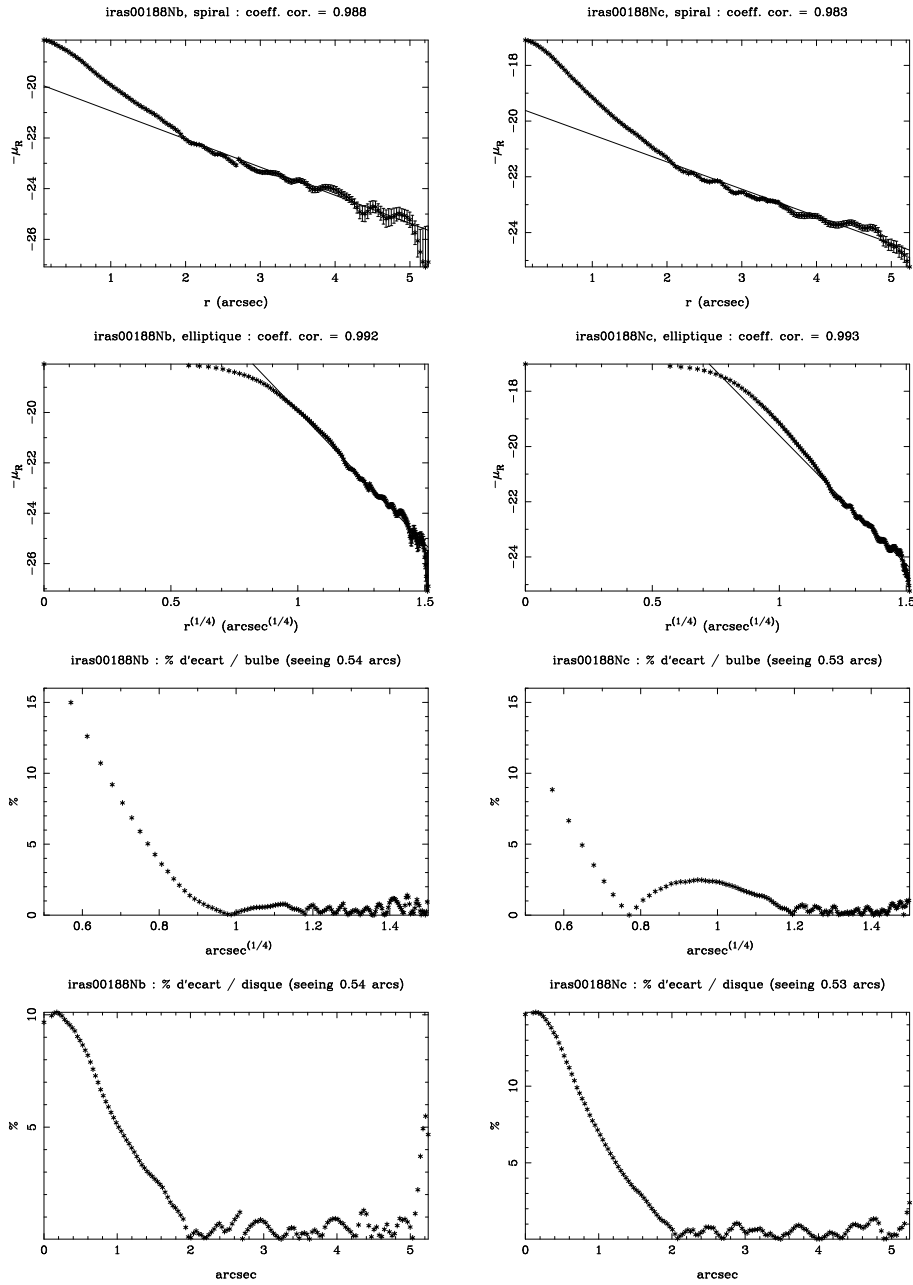


8.8 iras23498

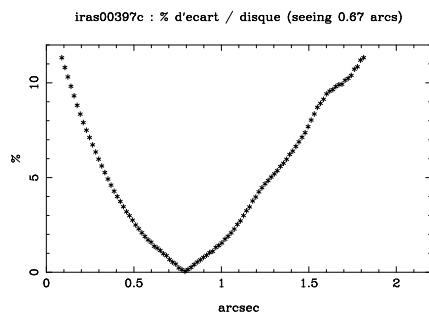
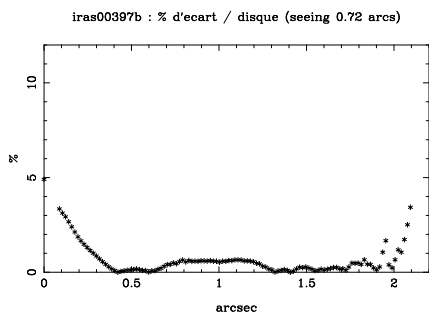
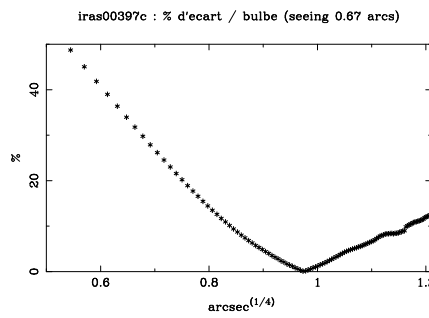
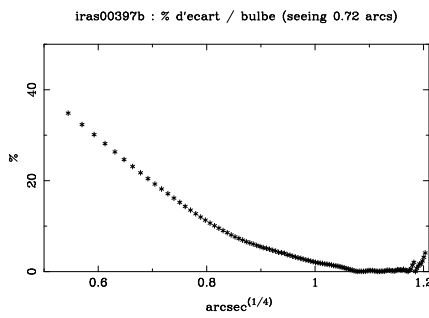
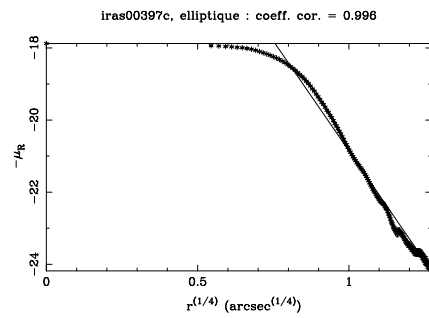
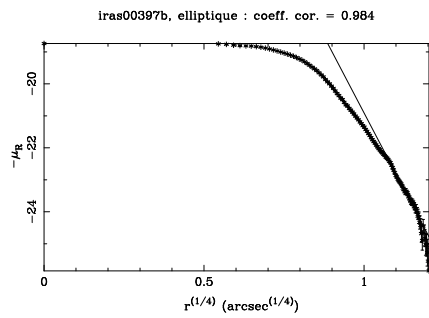
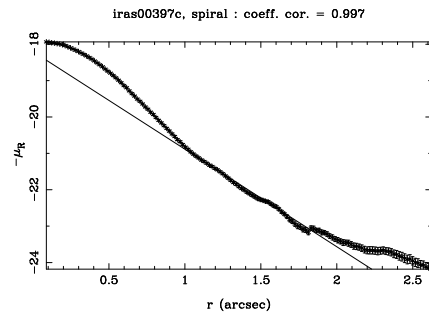
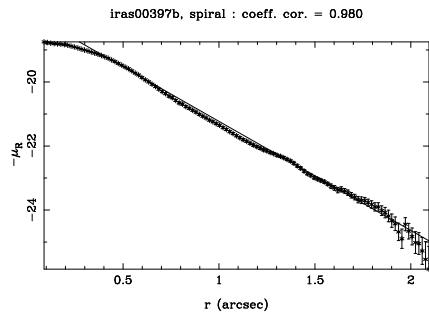


9 Profils et pourcentage d'écart par rapport à un bulbe ou un disque

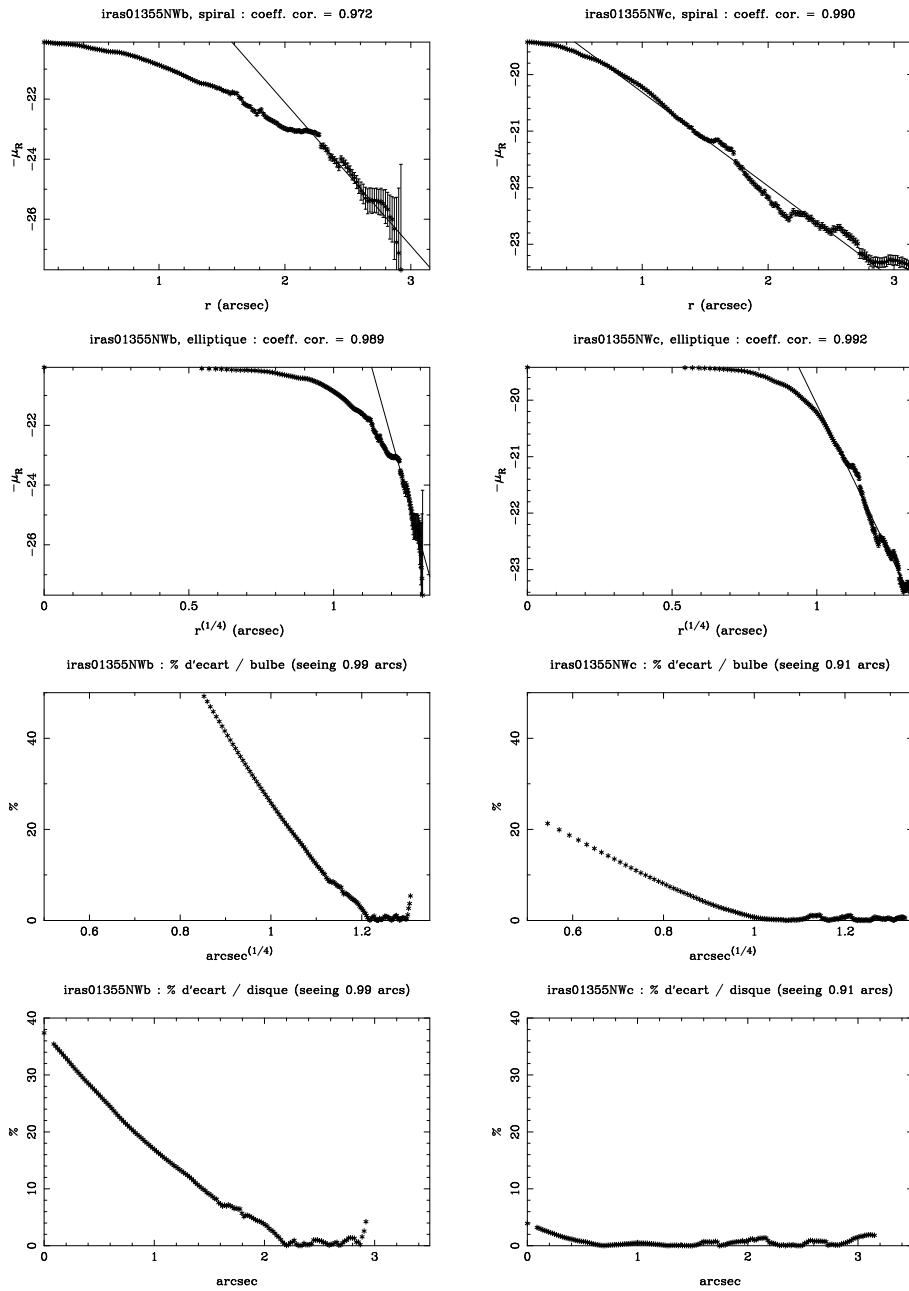
9.1 iras00188



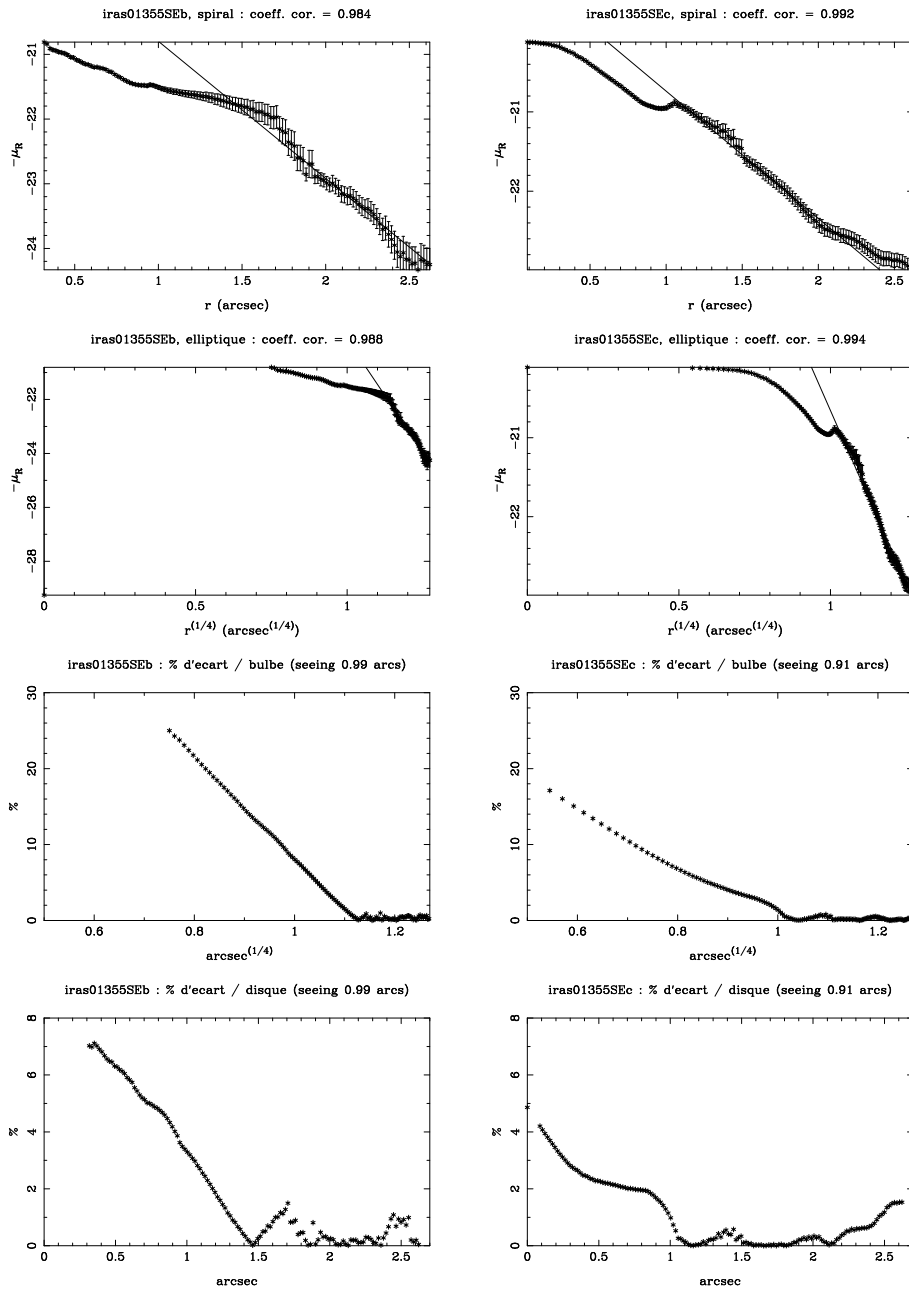
9.2 iras00397



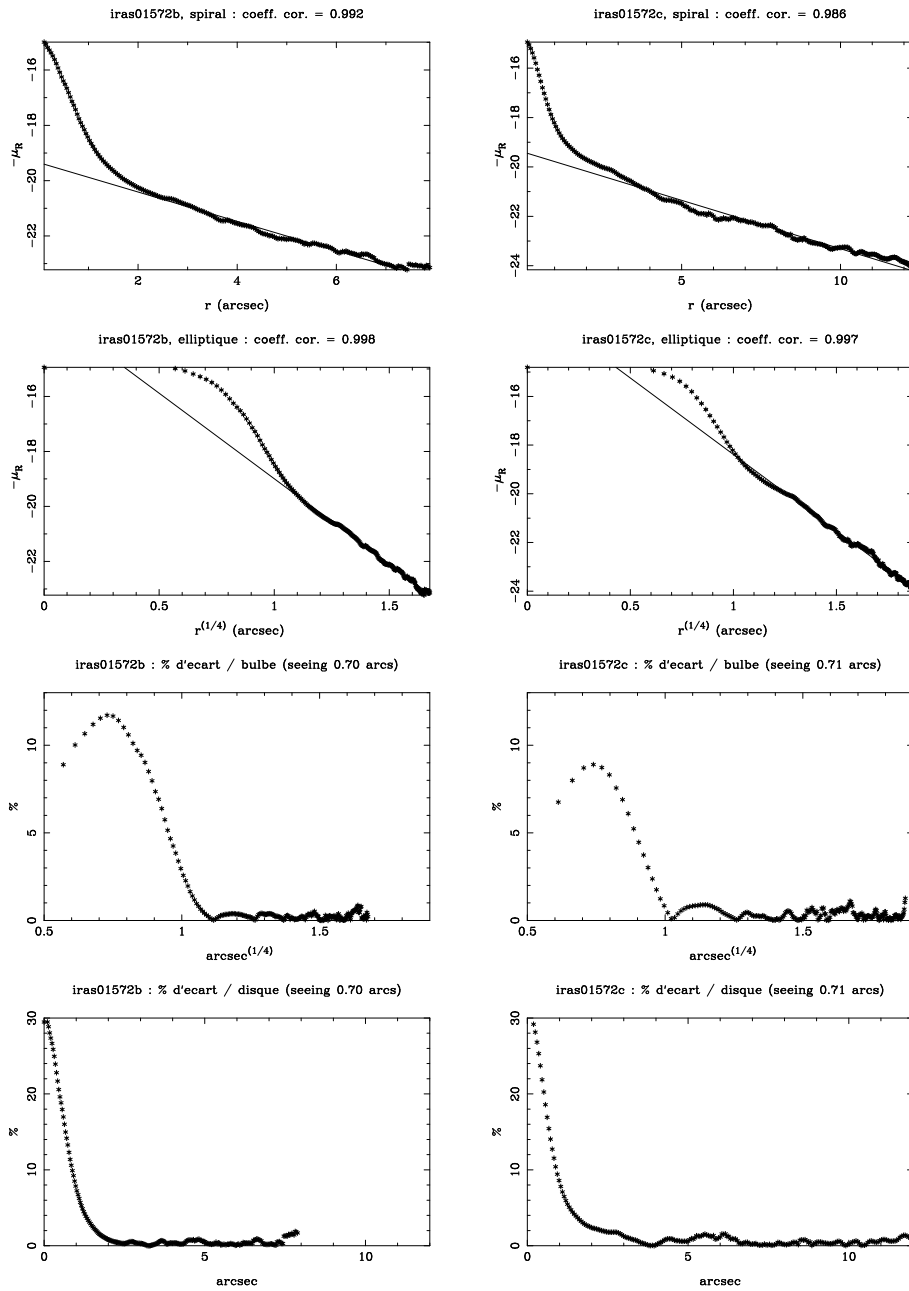
9.3 iras01355 Nord-Ouest



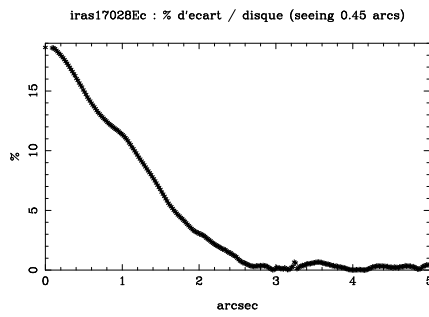
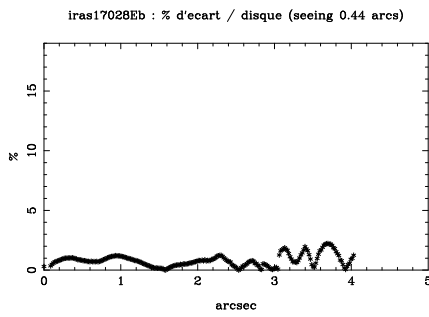
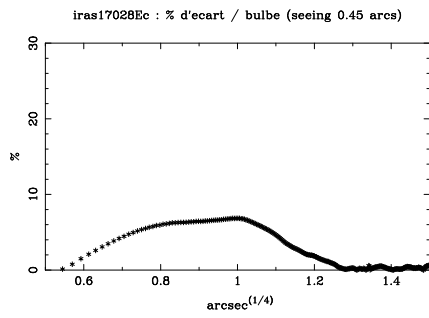
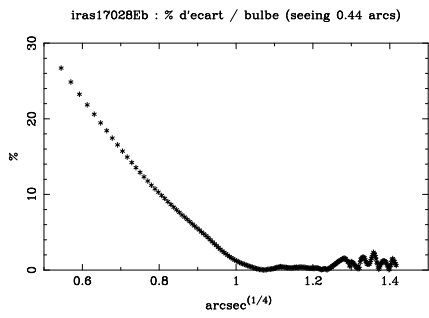
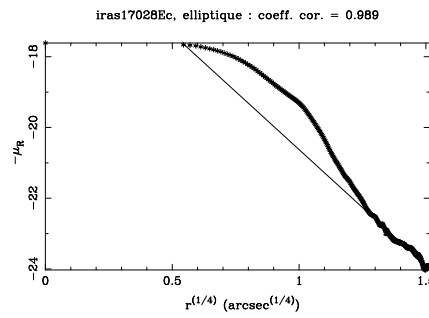
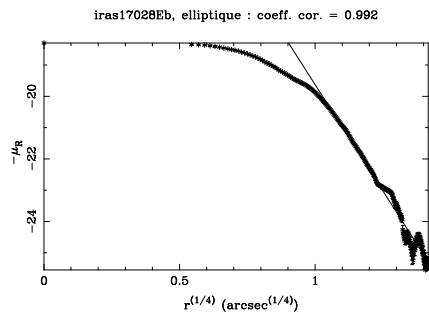
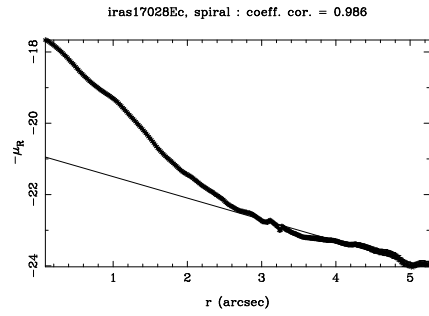
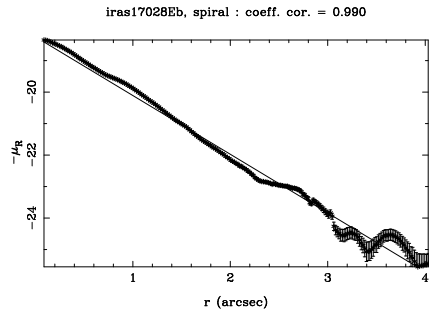
9.4 iras01355 Sud-Est



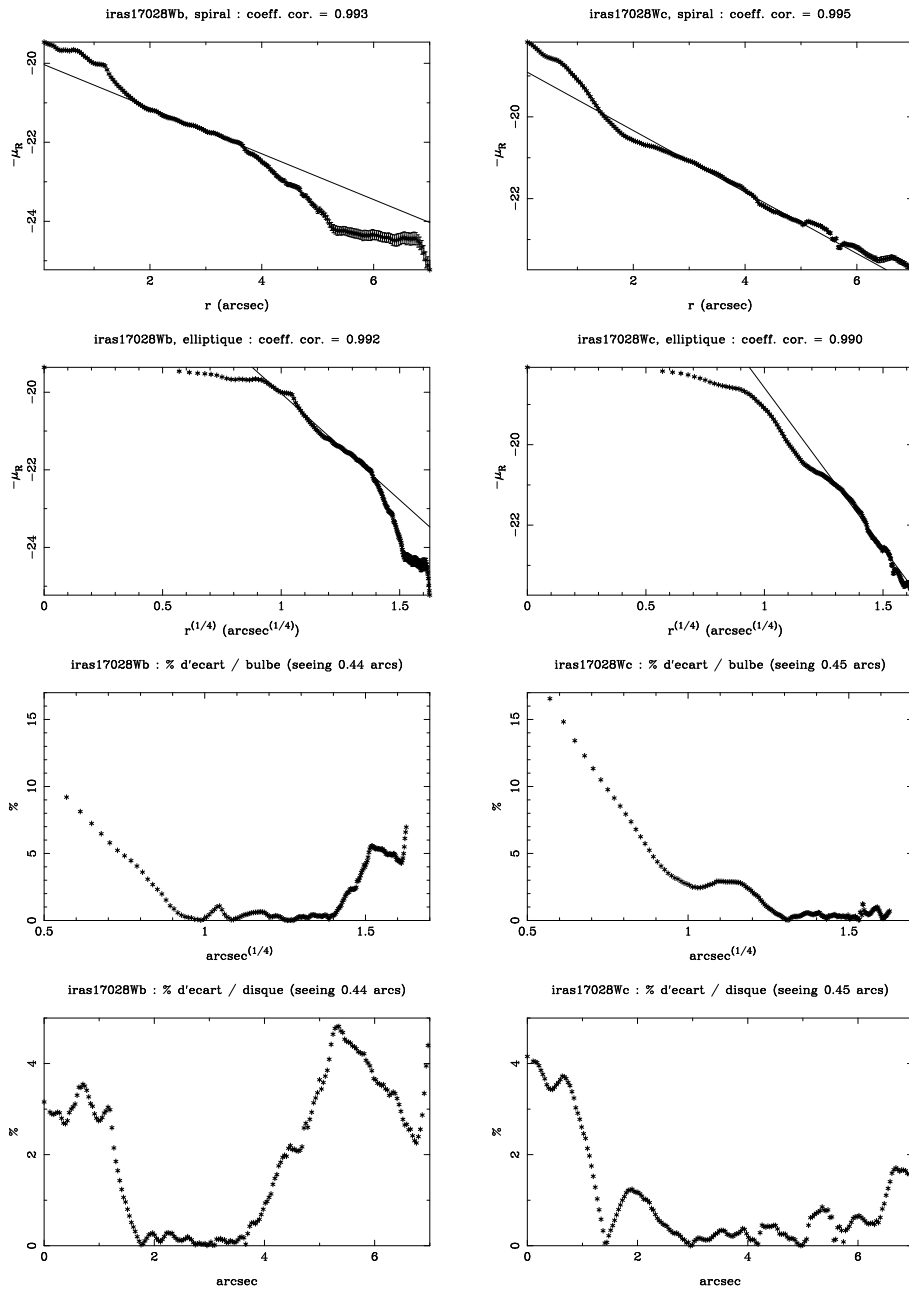
9.5 iras01572



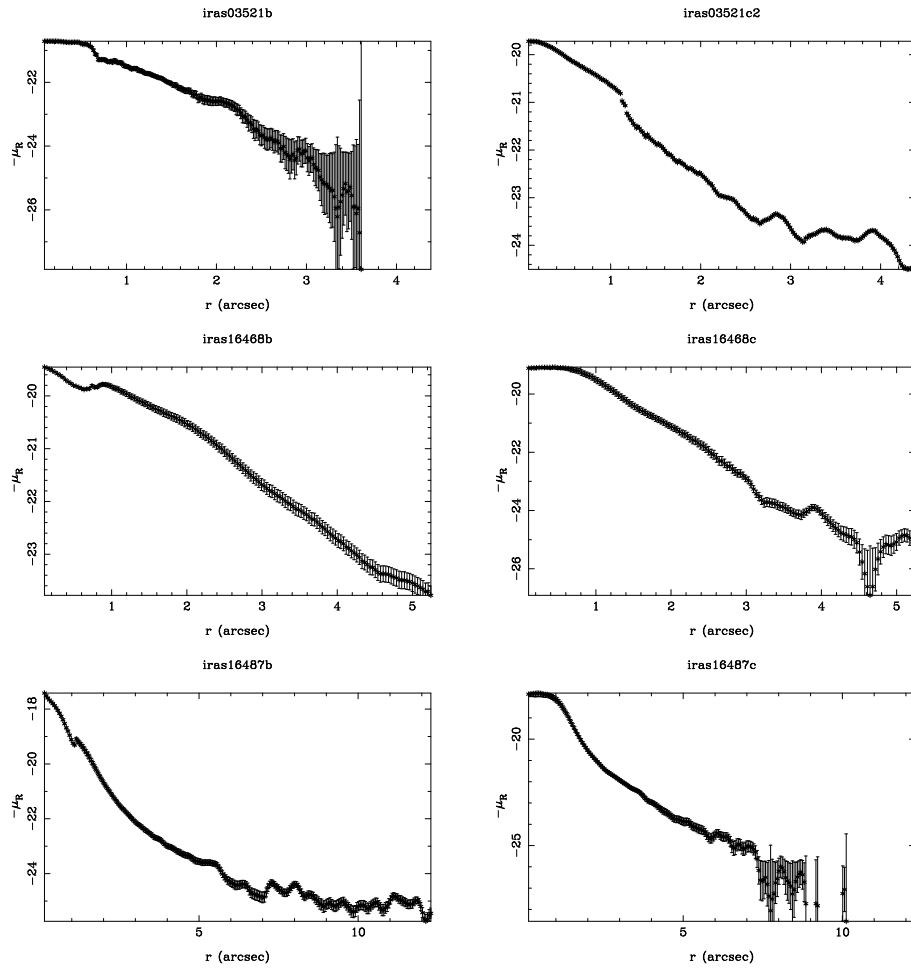
9.6 iras17028 Est



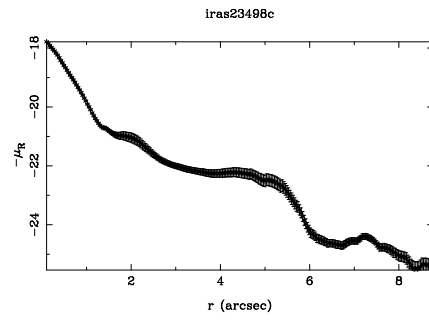
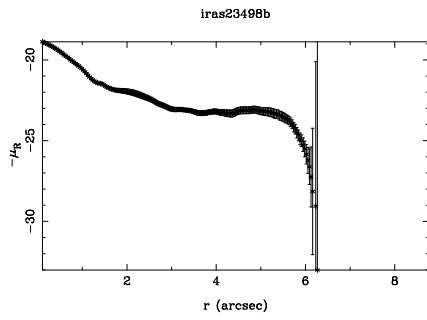
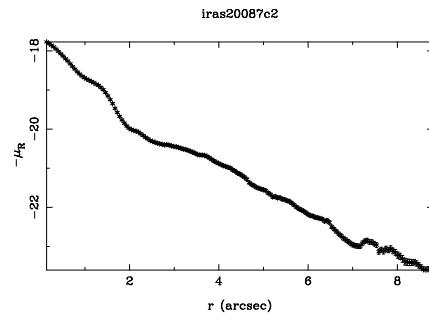
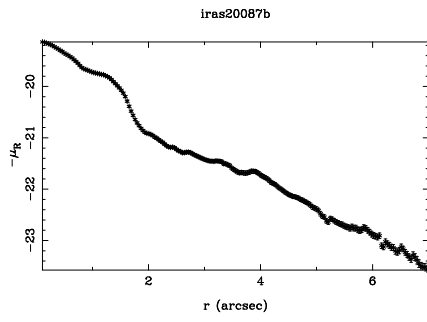
9.7 iras17028 Ouest



9.8 iras03521, iras16468 et iras16487



9.9 iras20087 et iras23498



9.10 iras23060

