

Chapitre 2

Morphologie visuelle

2.1 Introduction

Avec l'objectif de tester et calibrer les algorithmes automatiques de morphométrie qui sont discutés dans Sect. 3, nous nous sommes attachés à la construction d'un catalogue de référence fournissant l'intensité de divers attributs morphologiques pour tous les types de Hubble.

Ce projet fait partie du programme "Extraction de Formes Idéalisées de Galaxies en Imagerie" (EFIGI) initié en 2004 par Emmanuel Bertin, qui mit sur pied une collaboration entre les laboratoires d'astrophysique indiqués ci-dessous et deux laboratoires spécialisés dans le traitement du signal (le Laboratoire "Traitement de Communication de l'Information", LTCI; et le Laboratoire "Recherche et Développement de l'EPITA", LRDE). La collaboration obtint un financement par le biais d'une "Action Concertée Incitative" de type "Masses de Données", et permis à Anthony Baillard, élève de l'Ecole pour l'Informatique et les Techniques Avancées (EPITA), d'effectuer une thèse à l'IAP. L'autre volet du programme était le développement d'outils de morphométrie de haut niveau permettant d'analyser dans des temps suffisamment courts les grands relevés multi-couleurs tels que le "Canada-France-Hawaï Legacy Survey" (CFHTLS) et le "WIRCam Deep Survey" (WIRDS).

Je fus immédiatement séduite par le projet, ayant constaté par l'analyse du relevé ESO-Sculpteur les limites de la caractérisation des populations de galaxies par leur propriétés spectrales ou photométriques. J'entrevois alors, pour mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies, l'importance d'une exploration d'un espace des paramètres plus large que les simples mesures de flux, auquel on ajouterait la taille et la forme des objets.

2.2 Collaborateurs

- Anthony Baillard (ex-doctorant IAP ; actuellement dans le privé)
- Emmanuel Bertin (IAP)
- Pascal Fouqué (Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes)
- Stéphane Arnouts (actuellement au Télescope Canada-France-Hawaï, en détachement du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille)
- Yannick Mellier (IAP)
- Roser Pelló (Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Jean-François Leborgne (Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes)
- Philippe Prugniel (Centre de Recherches Astronomique de Lyon)
- Dmitry Makarov (Special Astrophysical Observatory, Russie)
- Lidia Marakova (Special Astrophysical Observatory, Russie)
- Henry McCracken (IAP)

- Albert Bijaoui (Observatoire Nice Côte d’Azur)
- Lidia Tasca (Laboratoire d’Astrophysique de Marseille)

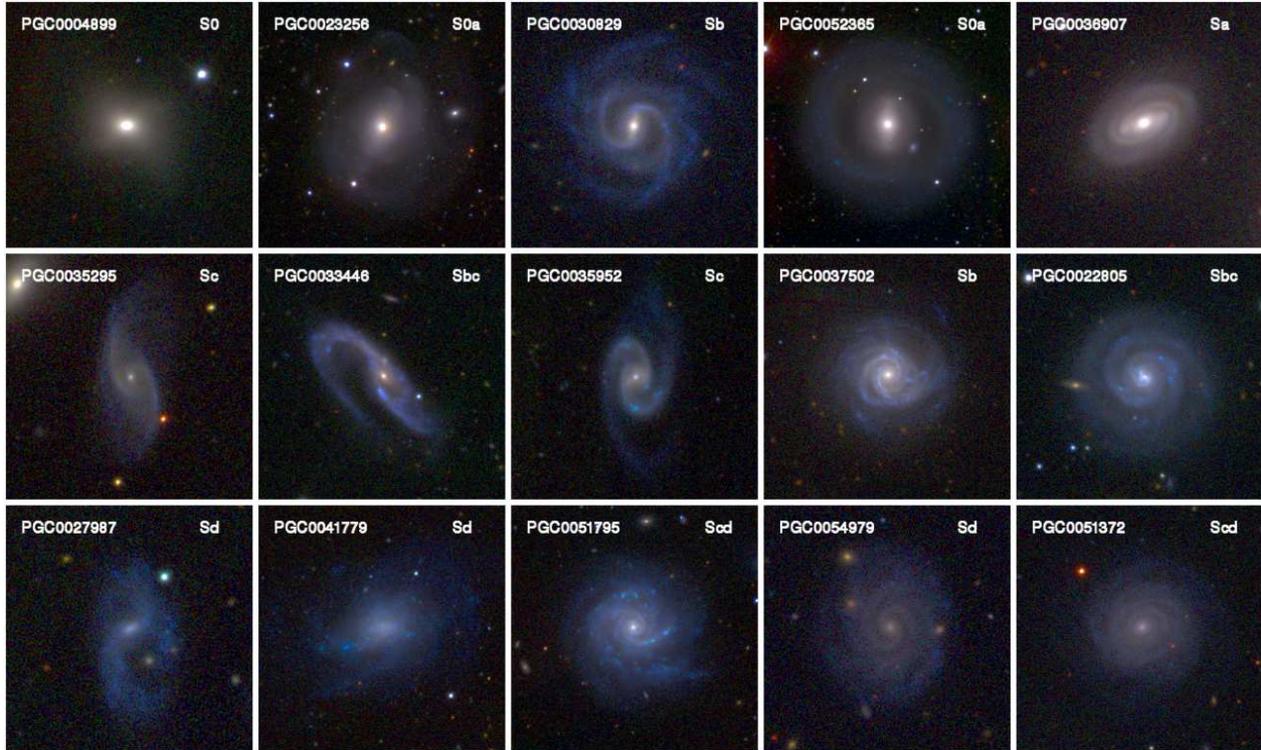


FIG. 2.1 – Images de galaxies illustrant l’attribut caractérisant la courbure des bras spiraux. Les cinq niveaux d’attributs sont montrés horizontalement (croissant vers la droite), et pour chaque niveau, trois galaxies de type de plus en plus tardif sont affichées du haut vers le bas.

2.3 Echantillon étiqueté EFIGI

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”, Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A., 2011, *A&A*, sous presse, astro-ph/1103.5734.

Thèse: “Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies”, Baillard, B., 2008 (<http://efigix.iap.fr/theseAB/>)

Article: “An Automatic Method to Determine the Degree of Flocculence of a Galaxy”, Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., Baillard, A., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Mellier, Y., Fouqué, P., Borgne, J.-F. L. and Pelló, R., Makarov, D., Makarova, L., Prugniel, P., Arnouts, S., 2008, *ASP Conference Series 394*, pp. 497.

L’échantillon comprend 4458 galaxies proches extraites catalogue PGC (“Principal Galaxy Catalogue”, Paturel et al. 1995), ayant plusieurs mesures du type RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991) pour une meilleure fiabilité de la classification, et avec imagerie *ugriz* extraite du “Data Release 4” du SDSS (DR4 par la suite). Les objets sont distribués sur toute la région du ciel couverte par le “Data Release 4” du SDSS, soit 6851 deg².

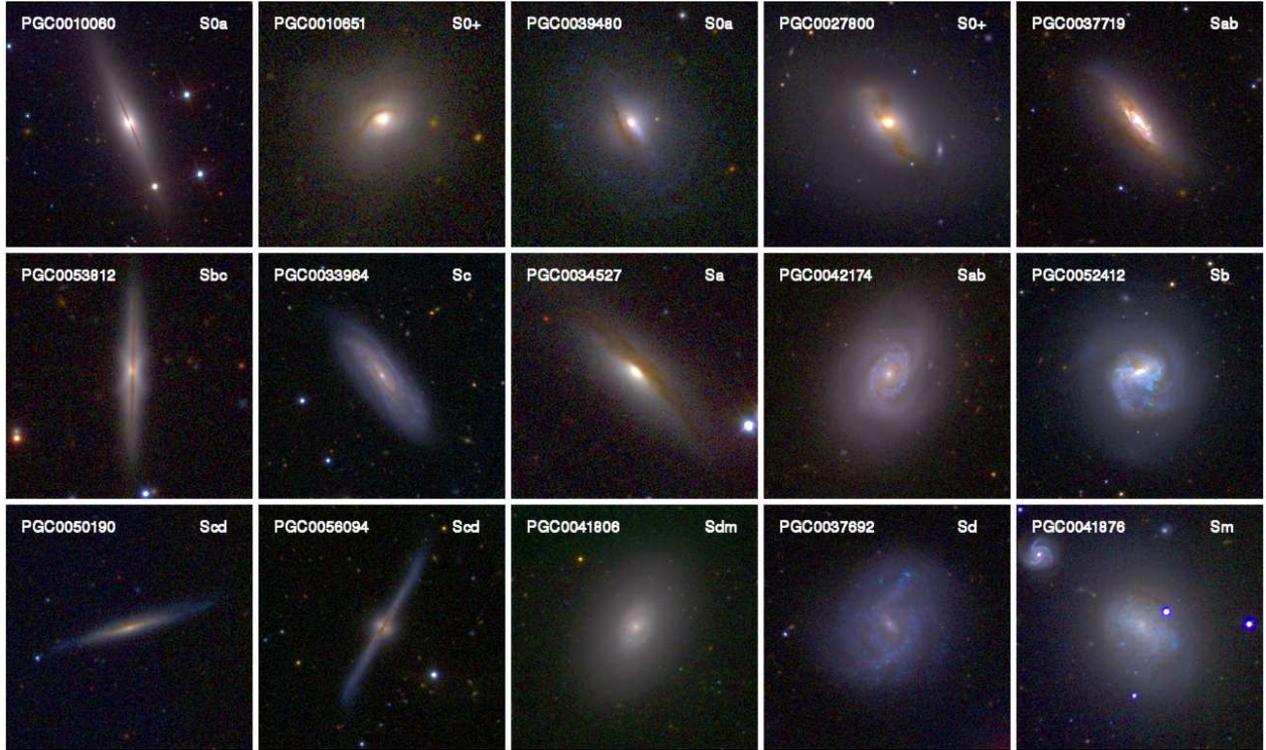


FIG. 2.2 – Même chose que la Fig. précédente pour l'attribut caractérisant la dispersion de la poussière.

Après construction des images couleurs *irg* rééchantillonnées afin d'avoir la même taille angulaire apparente des objets tout en préservant la brillance de surface, nous avons défini des attributs morphologiques décrivant les différentes composantes des galaxies, dont leur structure dynamique et leur texture, ainsi que l'apparence des objets sur le ciel et leur environnement. Les 16 attributs choisis mesurent pour chaque galaxie les quantités suivantes:

- le rapport de luminosité du bulbe sur la luminosité totale de l'objet
- la longueur des barres et l'intensité des anneaux internes et externes
- l'intensité des bras spiraux, leur courbure et leur sens de rotation
- la présence et la dispersion de la poussière
- la flocculence et les régions de formation intense d'étoiles
- la perturbation du profil
- la contamination du profil, le nombre de galaxies voisines.

La définition détaillée des différents attributs est donnée dans l'article choisi n° 7, p. 245 (Baillard et al. 2011), et dans la Table 1 de l'article choisi n° 8, p. 279, (de Lapparent et al. 2011).

L'objectif de ces attributs est de relier la forme d'une galaxie aux phénomènes physiques sous-jacents, en caractérisant les composantes stellaires, gazeuses, et poussiéreuses ainsi que les structures dynamiques, et de prendre en compte l'impact de l'environnement immédiat et les biais d'observation sur la forme apparente d'une galaxie. Des images de galaxies illustrant deux des attributs sont montrées dans les Figs. 2.1 et 2.2.

Les astronomes de la collaboration (voir Sect. 2.2) furent mobilisés pour procéder à l'étiquetage visuel des images couleurs *irg* selon cinq niveaux d'intensité pour chacun des 16 attributs, ainsi qu'un intervalle de confiance, soit trois mesures par attribut. La grande disparité des mesures effectuées par les différents astronomes nous a cependant contraint, E. Bertin et moi-même, à homogénéiser l'ensemble des attributs (Baillard et al. 2011). Le catalogue résultant fournit une base de donnée unique par sa grande statistique, sa complétude de $\sim 80\%$ à $10 \leq g \leq 14$, sa diversité et son homogénéité. Les images et catalogues sont

accessibles en ligne sur le site du projet (<http://www.efigi.org>). La constitution du catalogue d'attributs fit partie de la thèse de doctorat d'Anthony Baillard.

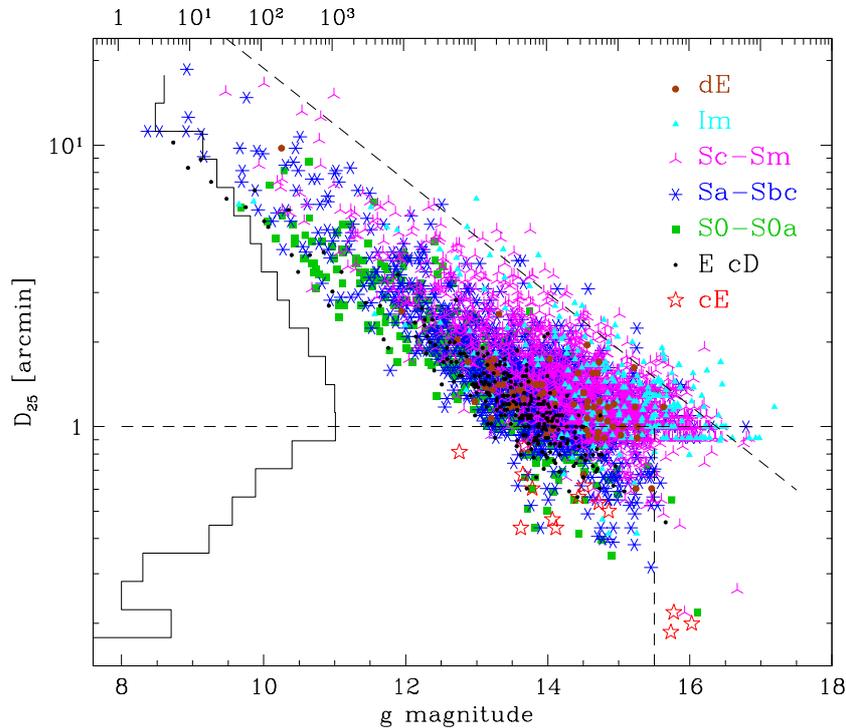


FIG. 2.3 – Diamètre isophotal D_{25} en minute d'arc en fonction de la magnitude g des galaxies du catalogue EFIGI. Ce graphe montre que le catalogue est limité en diamètre apparent à 1 minute d'arc (l'histogramme vertical montre la décroissance rapide du nombre de galaxies en dessous de cette valeur) et à $g \sim 15.5$, ces deux limites correspondant au catalogue RC3, ainsi qu'à 25 mag. par seconde d'arc-carré en brillance de surface (ligne inclinée), correspondant à la limite visuelle sur une copie papier des plaques du "Palomar Observatory Sky Survey" (Abell 1959).

Le catalogue EFIGI est principalement limité en diamètre apparent à 1 minute d'arc. Le diamètre est mesuré par D_{25} , correspondant à l'isophote auquel la brillance de surface est de 25 magnitude par seconde d'arc-carré (de Vaucouleurs et al. 1976) ; c'est la limite au delà de laquelle il est difficile d'effectuer une identification visuelle d'un objet ou d'une partie d'un objet à partir de copies sur papier des plaques photographiques du Palomar (Abell 1959). Cette sélection en diamètre contraste avec la limitation en magnitude apparente des autres catalogues morphologiques existants, et conduit à un excellent échantillonnage des spirales tardives et des irrégulières, qui est une des spécificités du catalogue EFIGI. Ce dernier contient entre ~ 150 et 500 galaxies dans chaque type de Hubble (sauf pour les types rares comme les cD et les cE), avec une grande diversité de caractéristiques morphologiques par type.

J'ai complété l'échantillon EFIGI des différentes mesures de décalages vers le rouge provenant des bases de données HyperLeda, NED, SDSS et VAGC pour un ensemble de plus de 99.5% des galaxies. Le catalogue EFIGI est mis à la disposition de la communauté (sur le site <http://www.efigi.org>), et au CDS.

2.4 Article choisi n° 7

“The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”

Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A.

Astronomy & Astrophysics, sous presse, astro-ph/1103.5734

2011

2.5 Description statistique de la séquence de Hubble

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology II. Statistical properties along the Hubble sequence”, de **Lapparent, V.**, Baillard, B., Bertin, E., 2011, *A&A*, sous presse, astro-ph/1103.5735.

La richesse du catalogue EFIGI permet de mener à $z \sim 0.05$ des analyses statistiques concernant une grande diversité de propriétés morphologiques pour l'éventail complet des types de Hubble. En particulier, ce catalogue permet pour la première fois d'effectuer une description détaillée et quantitative de la séquence visuelle de Hubble (de Lapparent et al. 2011). On constate la diminution du rapport de luminosité bulbe/total le long de la séquence de Hubble, avec cependant une grande dispersion de 5 types, ainsi que la décroissance progressive de l'enroulement des bras, qui sont les critères principaux dans l'établissement de la séquence de Hubble visuelle (van den Bergh 1998).

On remarque par ailleurs que la contribution des disques à la lumière intégrée des galaxies augmente le long de la séquence de Hubble, les spirales les plus tardives étant dominées par les disques, alors que les spirales précoces sont dominées par les bulbes. Ce n'est que dans les spirales intermédiaires (Sb et Sbc) que la lumière du disque semble concentrée dans les bras spiraux. On montre en outre que cet effet, combiné avec une décroissance rapide de la quantité de poussière visible des types Sb aux types Sbc-Sc, conduit au “grand dessin” des spirales Sc.

Il est intéressant de noter que seules les galaxies Sm et Im sont perturbées fréquemment et significativement dans leur profil, peut-être à cause d'interactions plus fréquentes, ou parce que celles-ci auraient laissé des traces à cause de leurs plus faibles masses. En outre, l'échantillon EFIGI montre qu'on détecte de la poussière dans tous les types de galaxies lenticulaires et spirales, avec un maximum pour les types Sb. La dispersion de la poussière augmente cependant régulièrement le long de la séquence de Hubble. Quant à la flocculence et aux régions de formation intense d'étoiles, ces deux attributs augmentent entre les types Sa et Sb, puis restent stables jusqu'aux types les plus tardifs (Sm, Im).

TAB. 2.1 – Pourcentage des galaxies EFIGI selon les cinq niveaux de longueur de barre

Type EFIGI	Longueur de Barre						
	0	incertaine	1	2	3	4	1-2-3-4
cE cD E	100± 8	-	-	-	-	-	-
S0 ⁻	87±11	11± 3	2± 1	-	-	-	2± 1
S0	59± 9	14± 4	12± 3	11± 3	2± 1	2± 1	28± 5
S0 ⁺	51± 8	5± 2	5± 2	15± 4	20± 5	3± 2	43± 7
S0a	50± 7	8± 2	5± 2	14± 3	14± 3	8± 2	42± 6
Sa	39± 6	10± 3	4± 2	25± 4	14± 3	8± 2	51± 7
Sab	23± 4	6± 2	5± 2	23± 4	27± 5	16± 3	71± 9
Sb	37± 4	11± 2	4± 1	18± 2	21± 3	9± 2	52± 5
Sbc	44± 4	11± 2	9± 2	19± 3	12± 2	6± 1	46± 4
Sc	45± 6	10± 2	11± 3	24± 4	9± 2	1± 1	45± 6
Scd	55± 6	14± 2	13± 2	15± 3	3± 1	1± 1	31± 4
Sd	32± 6	11± 3	13± 3	29± 5	11± 3	3± 2	56± 8
Sdm	39± 5	26± 4	7± 2	17± 3	10± 2	1± 1	34± 5
Sm	55± 7	22± 4	2± 1	16± 3	5± 2	-	22± 4
Im	77± 9	16± 3	-	5± 2	2± 1	-	7± 2
dE	88±17	4± 3	2± 2	5± 3	-	2± 2	9± 4
Tous les disques	46± 2	13± 1	7± 1	17± 1	12± 1	5± 1	41± 1
Toutes les spirales	42± 2	13± 1	7± 1	20± 1	13± 1	5± 1	45± 2
Tous les types	54± 2	12± 1	6± 1	15± 1	10± 1	4± 1	35± 1

Ces résultats sont corroborés et précisés par les analyses effectuées par A. Baillard lors sa thèse de doctorat. Il a montré que l'on peut utiliser les attributs EFIGI pour restituer avec précision le type morphologique de Hubble par un apprentissage supervisé au moyen d'une "machine à vecteur de support", permettant de séparer des nuages de points dans un espace de grande dimensionnalité (16 pour EFIGI). La précision qui en résulte est semblable à celle des astronomes en comparaison à la classification du RC3. En outre, il a appliqué une méthode de perte de précision qui consiste à ôter un attribut, puis à mesurer la perte en précision qui en résulte sur le type de Hubble. Il a constaté que les attributs les plus significatifs pour la détermination de la séquence de Hubble sont par ordre décroissant d'importance : (1) le rapport de luminosité bulbe/total; (2) l'intensité des bras spiraux; (3) la courbure des bras spiraux. Viennent ensuite la quantité de poussière visible et la flocculence, avec des pertes de précision deux et trois fois moindres resp. que pour la courbure des bras (Baillard 2008).

Nous présentons dans l'article choisi n° 8, p. 279 (de Lapparent et al. 2011), les statistiques des 16 attributs du catalogue EFIGI en fonction du type morphologique. Concernant les structures dynamiques, on observe que les barres sont fréquentes parmi tous les types de Hubble excepté les E et dE, et sont détectées dans 30 à 40% des lenticulaires, 20 à 70% des spirales, et 7% des Im; les barres les plus longues se situent dans les spirales Sab, pour lesquelles la fréquence de barres de toute longueur est aussi la plus grande (voir Table 2.1; la colonne "incertaine" qualifie la présence d'une barre, et non pas sa longueur). Les anneaux internes se produisent dans 25% des galaxies et sont deux fois plus fréquents que les anneaux externes; les anneaux internes sont les plus fréquents dans les galaxies S0a, Sa, Sab, et uniquement dans les S0a pour les anneaux externes (voir Table 6 de l'article choisi n° 8, p. 279).

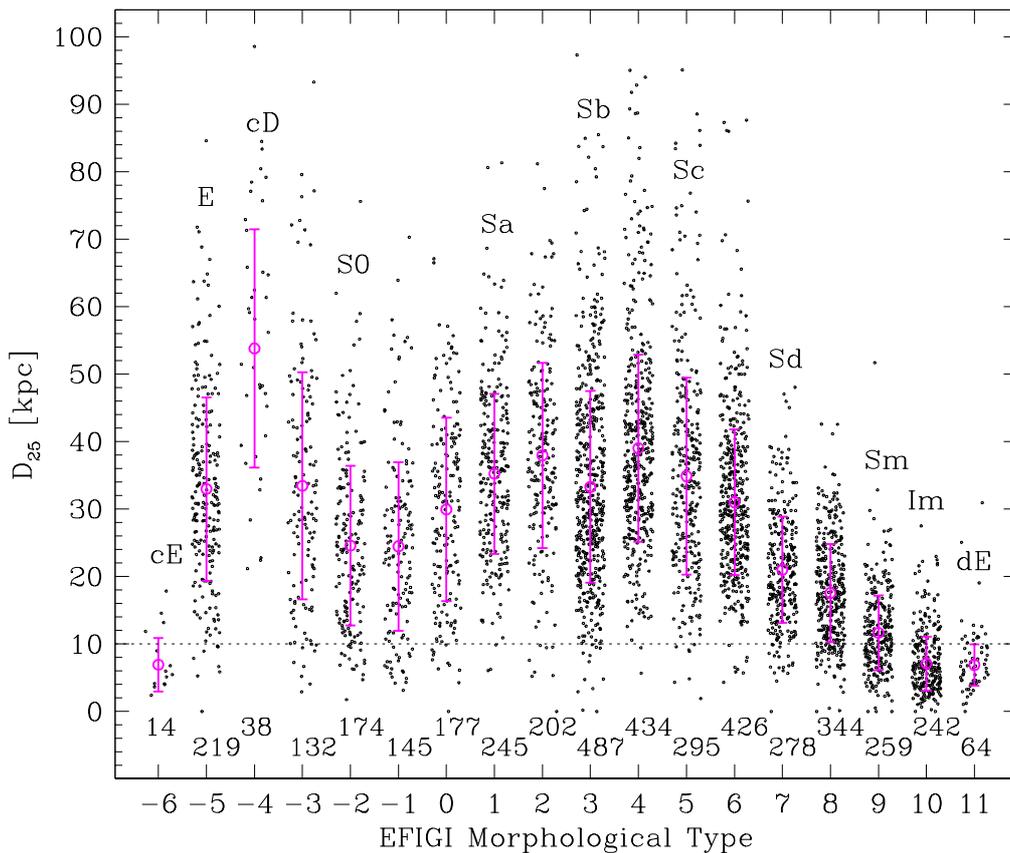


FIG. 2.4 – la distribution des diamètres intrinsèques des objets calculés à partir du D_{25} pour 4156 galaxies du catalogue EFIGI en fonction du type morphologique; pour chaque type, la moyenne pondérée et l'écart-type (avec rejet à 3σ) sont indiquées (un seuil indicatif à 10 kpc est indiquée en pointillés).

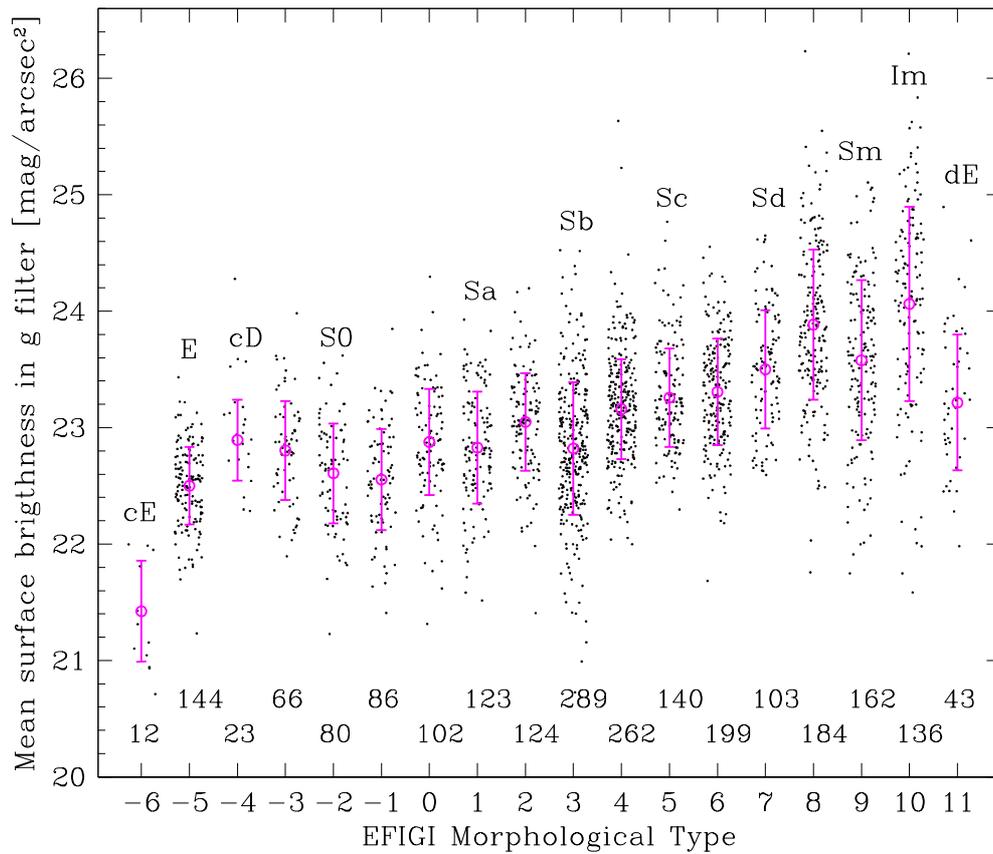


FIG. 2.5 – Même chose que dans la Fig. 2.4 pour la brillance de surface déduite du D_{25} pour 2273 galaxies EFIGI peu inclinées et faiblement contaminées.

Cette analyse montre enfin une croissance progressive du diamètre des galaxies et de la brillance de surface associée le long de la séquence de Hubble, montrées dans les Figs. 2.4 et 2.5. Les plus grandes galaxies sont les cD, puis les elliptiques et les spirales intermédiaires Sab-Sbc ($D_{25} \simeq 20 - 50$ kpc), alors que les Sd-Sdm-Sm sont deux à trois fois plus petites ($D_{25} \simeq 10 - 30$ kpc). Les galaxies lenticulaires ont une taille intermédiaire ($D_{25} \simeq 15 - 35$ kpc), et les irrégulières, les elliptiques compactes (cE) et les naines elliptiques (dE et dS0) sont confirmées comme étant de petits objets ($D_{25} \simeq 5 - 15$ kpc).

2.6 Galaxies naines spirales

Grace à l'attribut décrivant l'intensité des bras, j'ai mis en évidence dans l'échantillon EFIGI deux galaxies naines spirales, montrées dans la Fig. 2.6. Celles-ci sont des objets rares dans les classes morphologiques des spirales Sa à Scd (Schombert et al. 1995; Sandage & Binggeli 1984). La galaxie de gauche présente des bras spiraux remarquablement réguliers et plutôt ouverts, alors qu'ils sont un peu plus fermés dans celle de droite, et avec une très légère asymétrie. Les deux galaxies ont une petite barre, et une très faible flocculence. L'article choisi n° 8, p. 279, fournit les divers paramètres de ces deux objets. La structure spirale de la galaxie de droite dans la Fig. 2.6 rappelle celle que l'on voit, à un niveau de contraste moindre, dans certaines galaxies naines de type dE du catalogue EFIGI, ces dernières étant fréquentes parmi les dE les plus brillantes de l'amas de la Vierge (Barazza et al. 2002; Lisker et al. 2006). Il serait intéressant d'examiner, au moyen de simulations numériques, quelles sont les contraintes posées sur les halos de matière noire sous-jacents pour obtenir des structures spirales de ce type, et évaluer leur

stabilité dynamique.

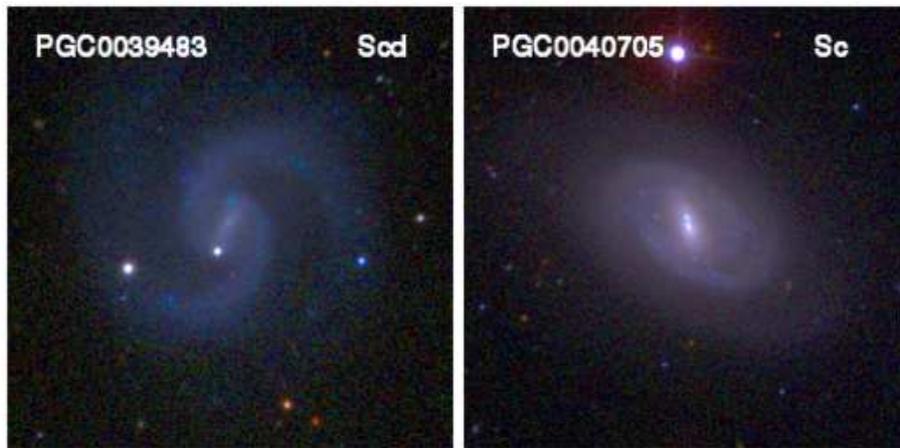


FIG. 2.6 – Images en “vraies couleurs” irg des deux galaxies naines spirales trouvées dans le catalogue EFIGI. Ces galaxies ont pour type morphologique Scd et Sa resp., pour décalage vers le rouge 0.0026385 et 0.0006414 resp., pour magnitude absolue dans la bande g -16.9 et -14.8 resp., et pour diamètre isophotal intrinsèque (D_{25}) 5.7 kpc et 1.9 kpc resp.

2.7 Article choisi n° 8

“The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology II. Statistical properties along the Hubble sequence”

de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E.

Astronomy & Astrophysics, sous presse, astro-ph/1103.5735

2011