

Chapitre 3

Morphologie automatique

Dans un deuxième temps, nous nous sommes attachés à caractériser quantitativement les objets, par l'application d'un outil automatique d'ajustement de profil convolué. La morphologie visuelle permet de contrôler les résultats automatiques, et d'améliorer leur qualité. Les résultats décrits ici s'appuient sur la mesure fiable des flux des objets. Je présente les premiers résultats concernant les fonctions de luminosité par type morphologique. Je montre par ailleurs des résultats préliminaires concernant les composantes séparées de bulbe et de disque.

3.1 Erreurs de photométrie dans le relevé SDSS

La photométrie SDSS des galaxies d'EFIGI montre des erreurs importantes pour de nombreux objets, se manifestant par une queue excédentaire de galaxies faibles, qui n'est pas présente si l'on utilise la photométrie photographique du RC3 (Baillard et al. 2011). Les logiciels de photométrie du relevé SDSS ont été optimisés pour traiter les galaxies de diamètre isophotal inférieur à 2 minutes d'arc, alors que 811 galaxies, soit 18% du catalogue EFIGI, mesurent entre 2 et 20 minutes d'arc (et 2693 entre 1 et 2 minutes d'arc).

Pour refaire ce travail de mesure, j'ai utilisé les nouvelles fonctionnalités de SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) qui permettent l'ajustement non-linéaire de chaque objet par un profil bidimensionnel convolué par la réponse impulsionnelle (Bertin 2010). Les profils ajustés ici sont la somme d'une loi en $r^{1/4}$ pour le bulbe, et d'un profil exponentiel pour le disque, définis comme suit :

- loi “de Vaucouleurs” $I(r) = I_0 e^{-7.67(r/re)^{1/4}}$,
- loi exponentielle $I(r) = I_0 e^{-1.68r/re}$.

Les magnitudes ainsi calculées par SExtractor sont nommées “MAG_MODEL”. Des analyses avec un indice variable pour la première loi sont aussi possibles (loi de Sérsic) et ont été menées; elles sont discutées dans les articles en préparation. (vois Sects. 3.4 et 3.5).

Pour le relevé SDSS, j'utilise le “Data Release 7” du SDSS (Abazajian et al. 2009; DR7 par la suite), et les magnitudes “model” et “Petrosian” (Petrosian 1976). Ces dernières sont des magnitudes d'ouverture, calculées dans un rayon adaptatif ayant une brillance de surface annulaire correspondant à une fraction fixe de la brillance de surface moyenne. L'ouverture étant définie dans la bande g pour les autres 4 filtres $ugiz$, cette magnitude vise à un calcul fiable des couleurs. Les magnitudes “model” du SDSS sont le résultat, dans un premier temps, de l'ajustement de deux profils bidimensionnels distincts : d'une part une loi “de Vaucouleurs”, d'autre par une loi exponentielle (définies ci-dessus), avec rapport d'axe et angle de position variable. Dans une deuxième étape, une combinaison linéaire des 2 meilleurs profils de chaque type ci-dessus est ajustée à nouveau au profil de l'objet, et la magnitude résultant fournit la magnitude “model” des catalogues du SDSS.

La Fig. 3.1 montre, pour les galaxies d'EFIGI, la différence dans la bande g entre les magnitudes “model” du SDSS, et les magnitudes “MAG_MODEL” obtenues par SExtractor. Si l'on examine le lieu

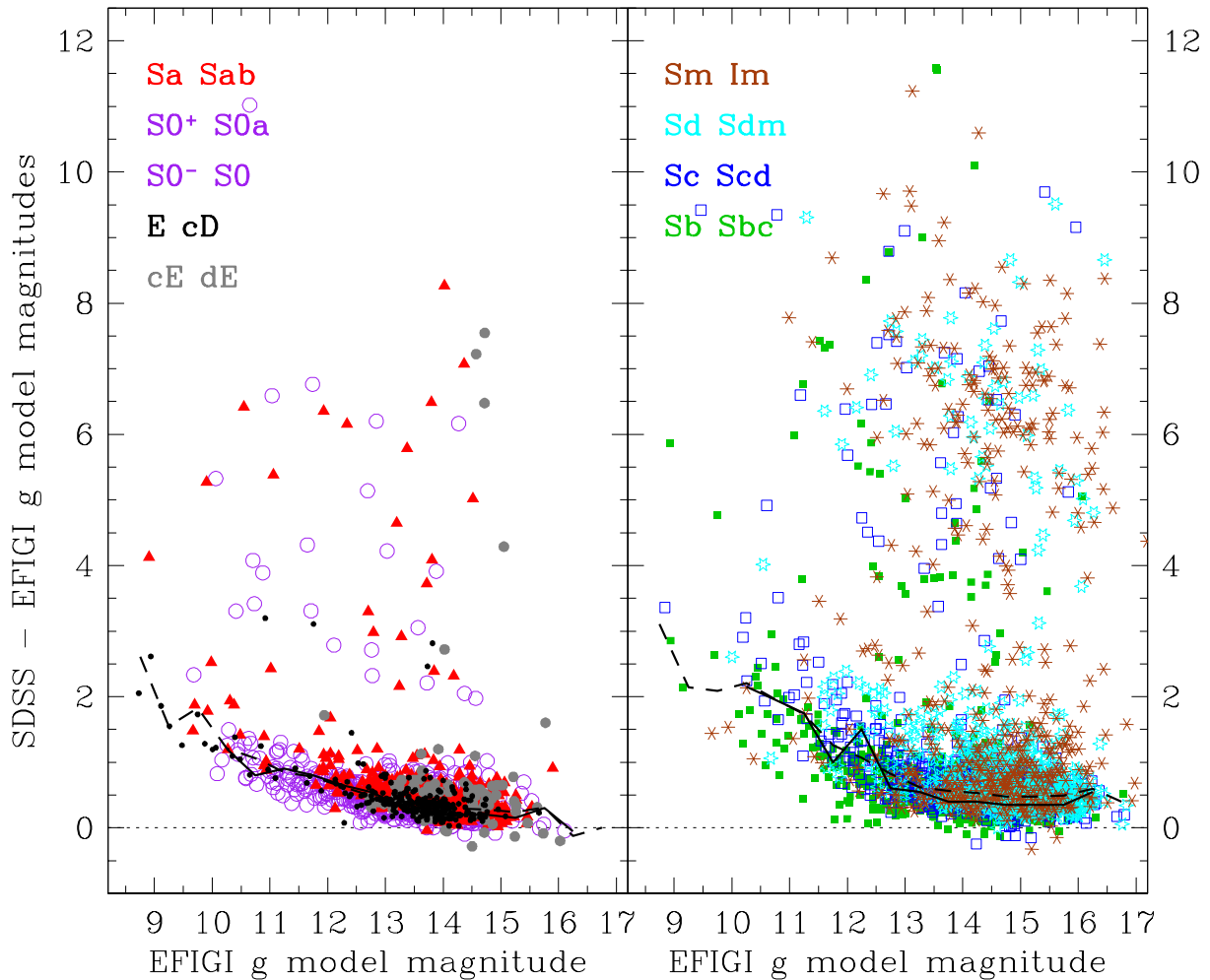


FIG. 3.1 – Différence entre les magnitudes “model” du relevé SDSS et les magnitudes “MAG.MODEL” obtenues avec SExtractor, dans la bande g et pour les 4458 galaxies d’EFIGI (de Lapparent & Bertin, 2011a, en préparation). Les différents types morphologiques sont indiqués, les galaxies avec bulbe dominant sont regroupées dans le panneau de gauche, les spirales tardives et les irrégulières dans le panneau de droite. La courbe continue indique le mode, et la courbe pointillée la médiane par intervalle de 0.5 magnitude (les moyennes sont très proches des médianes). Des courbes analogues sont obtenues en utilisant les magnitudes d’ouverture du SDSS (“Petrosian”), avec un décalage légèrement supérieur pour les galaxies précoces entre g 13-15. Ces figures montrent une surestimation systématique des flux pour les galaxies brillantes dans le SDSS, ainsi qu’une surestimation catastrophique de 2 à 10 magnitudes pour certaines galaxies, dont principalement les spirales tardives.

de la majorité des galaxies (guidé par les courbes indiquant le mode et la médiane), on observe un affaiblissement systématique des magnitudes SDSS aux magnitudes brillantes : le fond de ciel n’est pas estimé assez loin des objets, il est par conséquent contaminé par le profil des objets. Cet effet est présent jusqu’aux magnitudes les plus faibles d’EFIGI, soit $g = 15 - 16$, où il est 0.25 magnitude pour les galaxies de type jusqu’à Sab, et de 0.50 magnitude pour les galaxies spirales plus tardives. Le biais augmente à 1 magnitude à $g \simeq 11 - 12$ et à 2 magnitudes pour les objets plus brillants. A noter que la transition entre les galaxies à 2 minutes d’arc se produit à $g = 12.5 - 13.5$ pour les galaxies précoces (panneau de gauche), et à $g = 13.5 - 14.5$ pour les spirales tardives. La soustraction du ciel a été récemment améliorée dans le “Data Release 8” par masquage des sources préalablement à l’ajustement du fond de ciel Blanton et al. (2011); il sera intéressant de comparer les nouvelles magnitudes avec celles calculées par SExtractor.

L’autre effet remarqué dans la Fig. 3.1 (panneau de droite) est l’écart de magnitude très important pour une petite fraction des galaxies (8% de l’ensemble des types), pour lesquelles l’écart de magnitude entre les catalogue SDSS et les mesures SExtractor s’étale entre 2 et ~ 10 magnitudes. L’effet est plus marqué pour les galaxies spirales plus tardives que Sb. L’examen de la photométrie par SExtractor de ces objets m’a permis d’analyser le problème. Les attributs EFIGI montrent qu’à partir du type Sb, la flocculence du disque augmente fortement (de Lapparent et al. 2011). Combiné à un bulbe moins dominant, cela a pour effet de causer un morcellement des objets par les algorithmes de segmentation des sources. L’effet est particulièrement aigu pour les galaxies à faible brillance de surface comme les Sd, Sm et les Im. A noter que les naines cE et dE n’ayant pas ce problème de flocculence, elles sont très rares à présenter ces écarts de magnitude (voir panneau de gauche de la Fig. 3.1). On observe les mêmes effets de biais systématique et de morcellement dans les autres filtres (*uriz*).

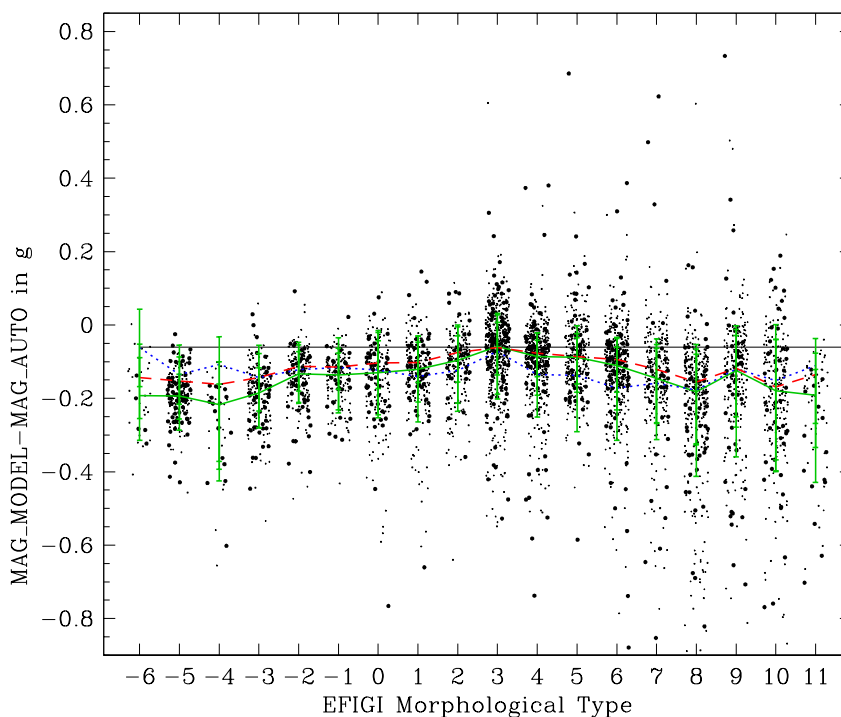


FIG. 3.2 – Différence entre les magnitudes modélisées “MAG_MODEL” et les magnitudes d’ouverture “MAG_AUTO” de SExtractor dans la bande g pour les 4458 galaxies EFIGI, en fonction du type morphologique. Les valeurs médianes et les quantiles à 70% sont en vert. Les médianes dans les filtres u et z sont indiquées en bleu et rouge resp. La ligne horizontale indique le décalage attendu entre la magnitude “MAG_AUTO” et la “vraie” magnitude pour une galaxie spirale de type intermédiaire.

Je montre par ailleurs que les magnitudes analytiques “MAG_MODEL” calculées par SExtractor sont fiables et robustes. Ces magnitudes sont intégrées jusqu’à l’infini, et par conséquent permettent

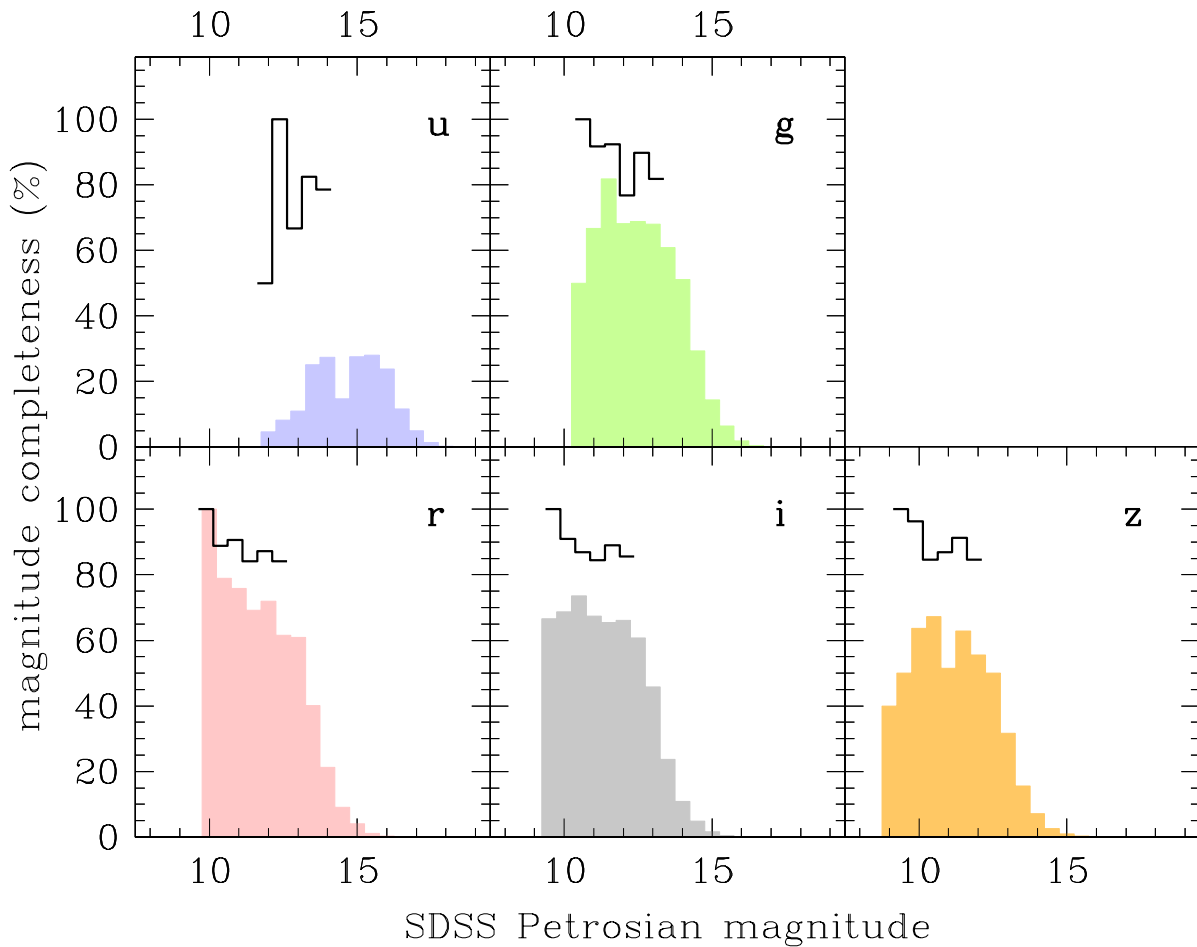


FIG. 3.3 – Histogrammes bruts de complétude photométrique du catalogue EFIGI par rapport au relevé SDSS DR4 dans les cinq filtres SDSS (histogrammes colorés), et premiers intervalles des histogrammes corrigés obtenus après élimination des fausses sources (traits noirs).

de s’affranchir du problème de troncature des magnitudes d’ouverture adaptative “MAG_AUTO” (voir définition dans la Sect. 2.3). La différence entre ces deux types de magnitude est montrée dans la Fig. 3.2. On observe que la fraction du flux manquant dépend du type morphologique, avec 0.2 mag. pour les elliptiques (type -5), 0.12 mag pour les S0 (type -2), 0.15 mag. pour les Sdm (type 8). On obtient en moyenne la valeur nominale de 0.06, prédite par les simulations (ligne horizontale dans la Fig. 3.2) pour les type Sb ($T = 3$).

La dispersion dans la différence de magnitude est cependant importante, d’environ 0.10 mag. pour tous les types. Elle est due en partie :

- à la contamination par des objets voisins ou superposés qui participent faiblement au calcul de la magnitude “modèle”, mais peuvent être pris en compte dans la magnitude d’ouverture ;
- aux effets d’extinction liés à l’inclinaison des galaxies (voir Sect. 4.5) : par exemple les allées de poussières sont partiellement corrigées dans les ajustements des modèles mais pas dans les magnitudes d’ouverture ;
- au morcellement des galaxies de faible brillance de surface discuté ci-dessus (principalement pour les Sdm, Sm et Im).

J’ai pu limiter ce dernier effet en ajustant le paramètre SExtractor de segmentation des sources “DE-BLEND_MINCONT”, après examen visuel des ~ 200 galaxies présentant des écarts importants dans la

Fig. 3.2. L’avantage des ajustements de modèles est d’exclure les étoiles ou galaxies contaminantes lorsqu’elles sont situées dans les ailes des profils, alors que ces objets ne sont pas systématiquement exclus par la segmentation, et peuvent fortement biaiser la mesure de magnitude d’ouverture. A ce sujet, on remarque que les écarts entre les magnitudes SDSS et SExtractor de plus de 2 magnitudes ne sont pas dus à une contamination des magnitudes SDSS par des étoiles ou des galaxies : cela conduirait à une sur-estimation du flux dans le SDSS, et donc à des différences négatives dans la Fig. 3.1).

Enfin, le calcul de la complétude photométrique du catalogue EFIGI m’a conduit à constater qu’un grand nombre de sources brillantes répertoriées dans le catalogue photométrique du SDSS DR4 sont des artefacts. J’ai visualisé les 890 galaxies les plus brillantes du relevé SDSS qui ne font pas partie de l’échantillon EFIGI, au moyen de l’outil de visualisation “Explore” du SDSS. Seulement 95 galaxies proches furent identifiées avec une magnitude “Petrosian” correspondant à celle annoncée. Un tiers des 795 sources restantes sont des objets compacts (étoiles ou galaxies lointaines), avec des magnitudes “psf” de 20 à 22 dans le filtre r , et leur magnitude “Petrosian” est contaminées par le halo d’une étoile brillante. Les deux tiers restants sont des sources “fantômes” causées par des halos d’étoiles brillantes, ou par des tracés de satellites. Le nombre de fausses sources est particulièrement élevé dans le filtre u . J’obtiens une complétude photométrique corrigée du catalogue EFIGI de $\sim 80\%$ aux magnitudes 12-14 (selon le filtre), alors que les complétude brutes étaient de $\sim 30\%$ en u , et $\sim 60 - 70\%$ en g , r , i , et z (voir Fig. 3.3).

3.2 Séquence couleur-magnitude

Le relevé SDSS avait montré une bi-modalité dans la distribution couleur-magnitude des galaxies, caractérisée par un pic correspondant aux galaxies rouges et de type “précoce” dans la séquence de Hubble, et un excès plus étalé de galaxies bleues et de type “tardif”, avec de surcroît la suggestion d’un minimum dénommé “vallée verte” pour les galaxies de couleurs intermédiaires. La première mise en évidence provenait des couleurs apparentes $u - r$ en fonction de la magnitude apparente g (Strateva et al. 2001). Cet effet fut ensuite confirmé au moyen des magnitudes et couleurs absolues (Hogg et al. 2002; Blanton et al. 2003; Baldry et al. 2004) et produisit des contraintes sur les modèles semi-analytiques de formation des galaxies (Baldry et al. 2004, 2006). Un résultat similaire fut constaté pour les galaxies du RC3 (Conselice 2006), qui montrait en outre que les galaxies de type Sa-Sab-Sb peuplent la “vallée verte”.

Récemment, van den Bergh (2007) a montré en utilisant les 1246 galaxies du “Revised Shapley-Ames Catalogue of Bright Galaxies” (Sandage & Tammann 1981), pour lesquelles le type de Hubble est connu avec précision, qu’il n’y a pas de dichotomie entre les galaxies rouges et bleues, mais plutôt une transition progressive en couleur le long de la séquence morphologique dans le diagramme couleur-magnitude (les magnitudes utilisées sont ici photographiques). Cet effet est confirmé par la séquence couleur-magnitude obtenue des galaxies d’EFIGI, montrée dans la Fig. 3.4 : on constate un glissement remarquablement continu depuis les galaxies elliptiques qui sont brillantes et rouges, jusqu’aux galaxies irrégulières qui sont les plus bleues et les moins lumineuses ; mais on n’observe pas de séparation entre les populations de galaxies rouges et bleues qui correspondrait à la “vallée verte”. La couleur $u - r$ présente l’avantage de couvrir un grand intervalle spectral, et le domaine de longueur d’onde au repos couvert par le filtre u est sensible à l’histoire de la formation d’étoile dans les galaxies. J’obtiens cependant des résultats similaires avec les couleurs $u - g$, $g - r$, et $g - i$.

On peut se demander si le fait que l’échantillon EFIGI soit limité en diamètre apparent plutôt qu’en magnitude apparente, comme le sont les relevés existants puisse jouer un rôle dans l’absence de la bi-modalité couleur-magnitude détectée pour les galaxies plus faibles du relevé SDSS. Dans Baillard et al. (2011), nous avons montré que le catalogue EFIGI sous-échantillonne les types de Sa à Sc, et suréchantillonne les elliptiques, les spirales tardives (Sd-Sm), et les irrégulières. Ces effets vont dans le sens d’accentuer le contraste des éventuels “pics” rouge et bleu et la “vallée verte” du diagramme couleur-magnitude. L’éclatement du diagramme couleur-magnitude pour chaque type morphologique, dans le panneau de droite de la Fig. 3.4, montre que la présence de pic ou vallée dépend de la densité relative de chaque type morphologique, et dépend donc des effets de sélections affectant les différents types des échantillons du SDSS considérés.

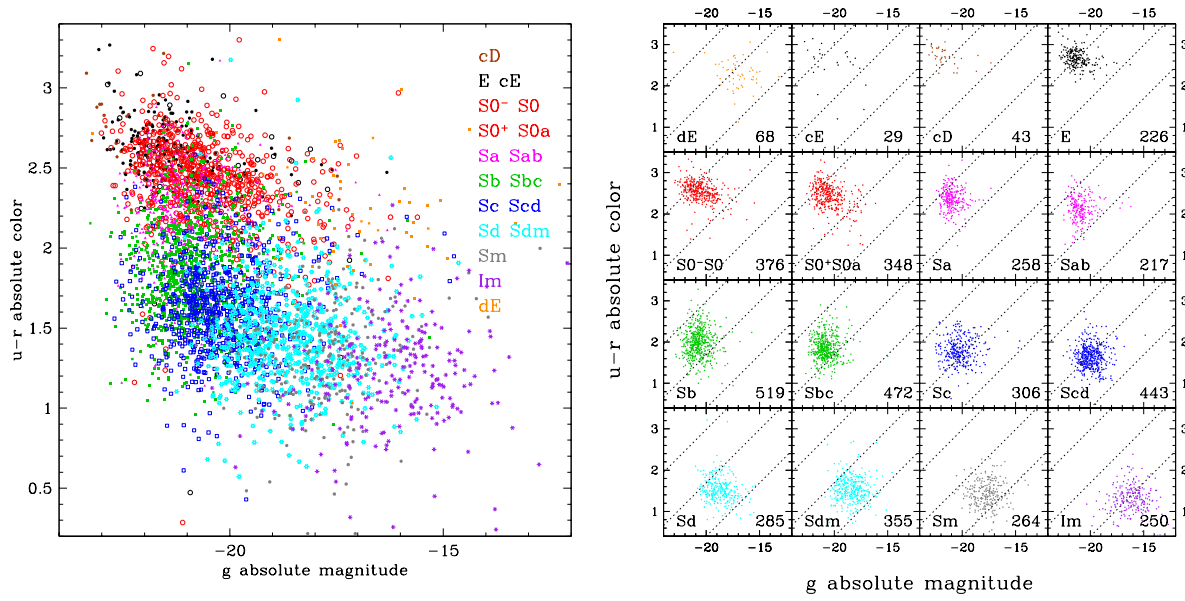


FIG. 3.4 – A gauche, la séquence de couleur absolue $u - r$ en fonction de la magnitude absolue g pour les différents types morphologiques des 4458 galaxies du catalogue EFIGI, en utilisant les magnitudes obtenues par ajustement de profils avec SExtractor. Il n’y a pas de dichotomie entre les galaxies bleues et rouges, mais plutôt un glissement progressif dans l’espace couleur-magnitude des différents types de la séquence de Hubble. Ce glissement est visible dans le graphique de droite, montrant dans chaque cadrant les différents types de Hubble, depuis les galaxies s’apparentant aux elliptiques, jusqu’aux types plus tardifs (en allant de haut en bas et de gauche à droite).

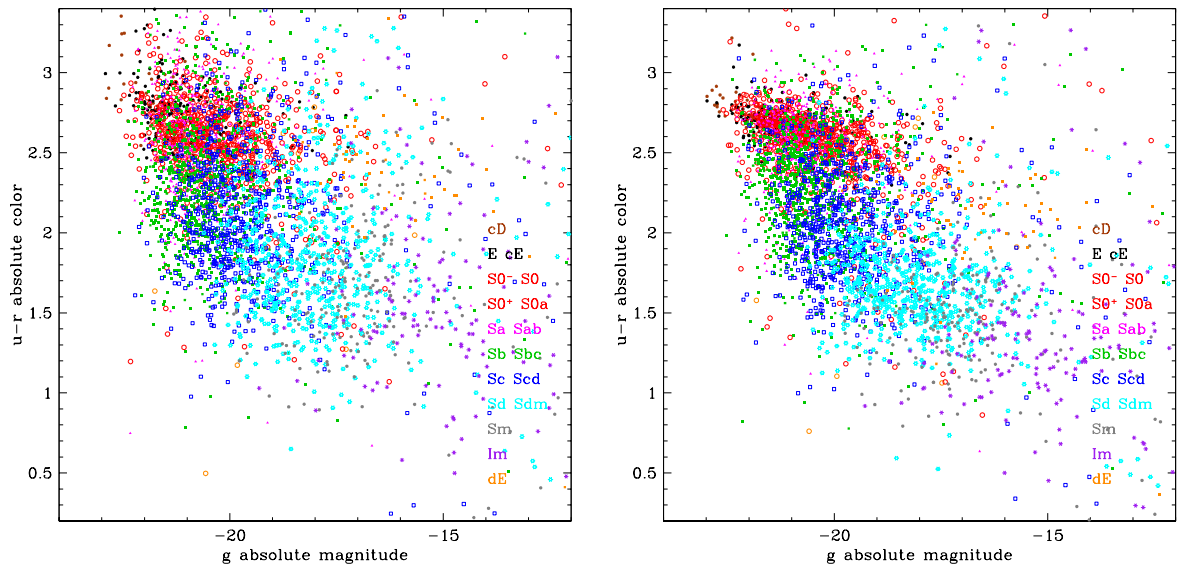


FIG. 3.5 – Même chose que dans la Fig. 3.4 pour les magnitudes extraites du relevé SDSS DR7. A gauche, il s’agit des magnitudes “Petrosian”, à droite, des magnitudes “model”, obtenues par ajustement d’un profil. On observe un comportement différent de celui de la Fig. 3.4, avec une moindre discrimination des types morphologiques.

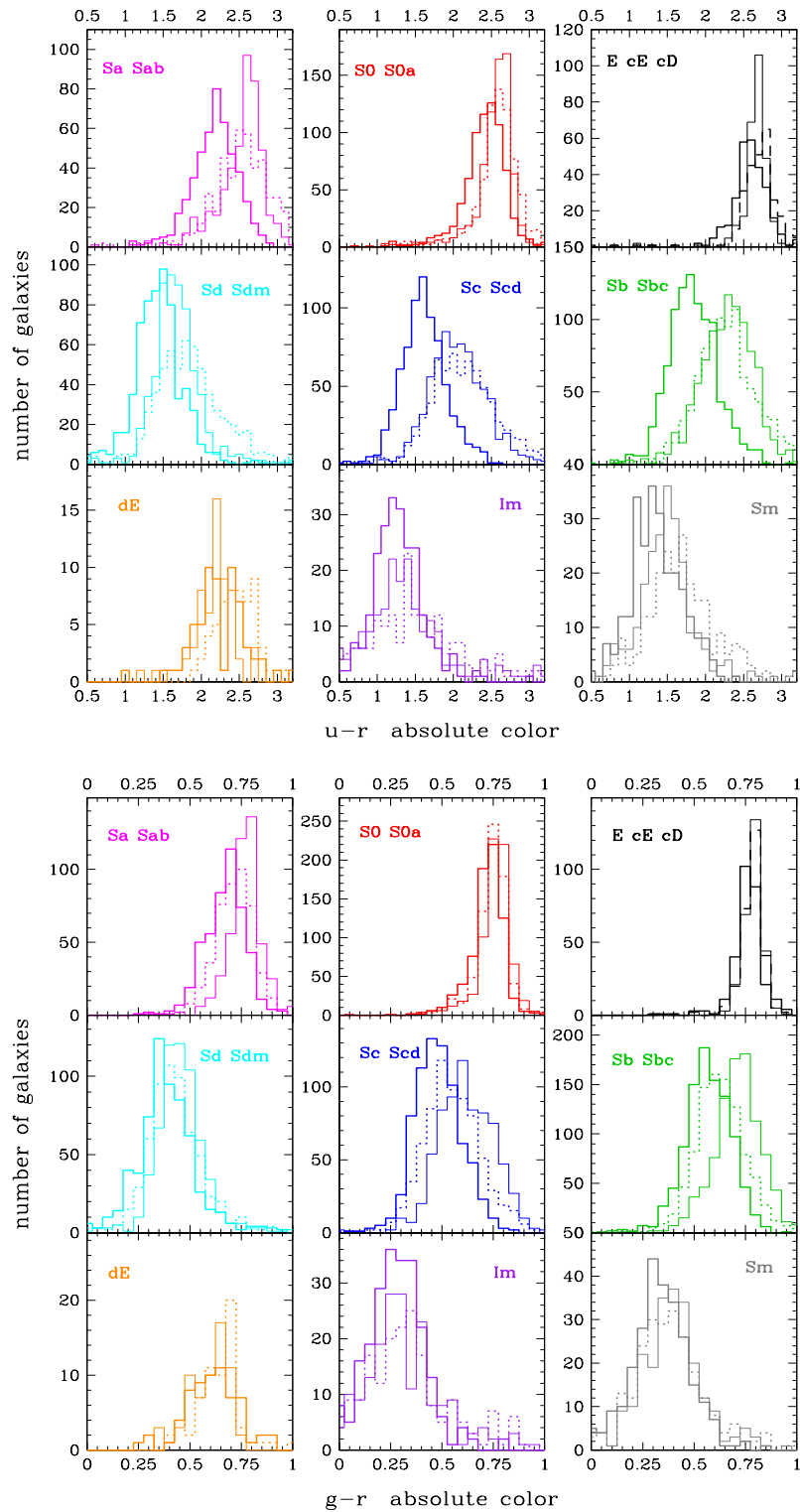


FIG. 3.6 – En haut, les histogrammes de couleur absolues $u-r$ pour les différents types morphologiques du catalogue EFIGI et les différentes magnitudes examinées : en trait plein et épais, les magnitudes obtenues par ajustement de modèles avec SExtractor; en trait plein fin, les magnitudes “model” du SDSS DR7; en trait pointillé, les magnitudes “Petrosian” du SDSS DR7. En bas, même chose pour les couleurs $g-r$.

Pour comparaison, je présente aussi dans la Fig. 3.5 les diagrammes couleur-magnitude obtenus pour les galaxies d’EFIGI lorsqu’on extrait la photométrie du catalogue DR7 du relevé SDSS avec dans le panneau de gauche les magnitudes “Petrosian”, et dans le panneau de droite les magnitudes “model”. On voit en comparant les Figs. 3.4 et 3.5 que les trois séquences présentent des différences notables. Dans la Fig. 3.5, les couleurs SDSS des galaxies de type Sa-Sab, Sb-Sbc, et Sc-Scd sont plus rouges de près de 0.5 magnitude que celles obtenues avec SExtractor dans la Fig. 3.4. La séquence de couleurs des lenticulaires semble cependant plus étroite lorsqu’on utilise les magnitudes “model” du SDSS, plutôt que les magnitudes “Petrosian” ou les magnitudes SExtractor. On remarque en outre, un nombre plus faible de galaxies Im dans les deux panneaux de la Fig. 3.5 en comparaison avec la Fig. 3.4. Ces galaxies manquantes sont les galaxies morcelées par la chaîne de traitement du relevé SDSS, comme décrit dans la Sect. 3.1. Il en résulte des séquences couleur-magnitude plus “compactes” ou “tronquées” lorsqu’on utilise les magnitudes SDSS, et tout particulièrement pour les magnitudes “model”.

Afin de quantifier les différences entre les séquences couleur-magnitudes montrées dans les Figs. 3.4 et 3.5, on montre dans la Fig. 3.6 les histogrammes de couleurs $u - r$ pour les différents regroupements de types morphologiques considérés, et pour les trois différents types de magnitudes (“MAG_MODEL” SExtractor, “model” SDSS, et “Petrosian” SDSS). On constate un rougissement de ~ 0.5 mag. des distributions de couleurs pour tous les types de Sa-Sab à Sc-Scd, entre les couleurs provenant de SExtractor et celles du SDSS. Cet effet peut expliquer la population de galaxies rouges du SDSS qui sont de type morphologique tardif détectée par Deng et al. (2009) : en effet, la Fig. 3.6 montre qu’une fraction importante des galaxies de type Sa à Scd ont des couleurs SDSS plus rouges que la limite de $u - r = 2.2$ utilisée par ces auteurs. On observe par ailleurs des nombres totaux de galaxies par type qui sont moindres dans les histogrammes utilisant les couleurs SDSS par rapport aux couleurs SExtractor, à nouveau à cause des objets morcelés dans le catalogue du SDSS ; l’effet est présent non seulement pour les types Im, mais aussi pour les types Sb-Sbc et Sc-Scd, et pour les types Sd-Sdm et Sm avec les magnitudes “Petrosian” (mais pas pour les magnitudes “model”). Ces divers résultats seront publiés dans de Lapparent & Bertin (2011a, en préparation).

3.3 Comparaison avec les types spectro-photométriques

Bien que la spectroscopie du relevé SDSS soit disponible pour 3136 des galaxies du catalogue EFIGI, celle-ci n’est pas utilisable pour contraindre le contenu stellaire des objets, car les galaxies d’EFIGI sont des objets proches et par conséquent étendus bien au delà des 2 secondes d’arc des fibres utilisées pour la spectroscopie (voir Sect. 3.1). Il est par conséquent nécessaire d’utiliser la photométrie des galaxies pour déterminer les types spectro-photométriques.

Ainsi, j’utilise à nouveau le code ZPEG et je l’applique aux magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor. J’utilise les mêmes scénarios (E, S0, Sa, Sb, Sbc, Sc, Sd, Im, et Starburst) et la même contrainte d’âge à $z = 0$ que dans la Sect. 4.2; la limite supérieure et le pas en décalage spectral sont cependant modifiés à 0.1 et 0.0005 resp. J’exclus de ce calcul les ~ 200 galaxies d’EFIGI ayant une contamination importante (attribut `Contamination` ≤ 0.5), et j’utilise les décalages vers le rouge spectroscopiques afin d’obtenir le meilleur ajustement des scénarios.

Je montre dans la Fig. 3.7 la comparaison entre les types morphologiques et les types spectro-photométriques fournis par ZPEG. Dans le graphe, on attribue à chacun de ces scénarios le type morphologique numérique T correspondant, sauf pour le scénario Starburst qui est placé à $T = 10$, alors que dans la séquence de Hubble, cela correspond au type morphologique Im. On remarque une grande dispersion des types, avec des effets systématiques, plaçant les valeurs moyenne et médianes des types ZPEG au dessous des types morphologiques. Le même effet a été récemment observé par Sanchez Almeida et al. (2011), en utilisant la classification morphologique de Nair & Abraham (2010) et la classification spectrale de Sánchez Almeida et al. (2010) pour un sous-échantillon du SDSS.

Le décalage systématique des types ZPEG par rapport aux types morphologiques semble causé principalement par l’inclinaison des galaxies. Celle-ci est indiquée par des symboles de différentes couleurs selon le niveau de l’attribut, 0 correspondant à une galaxie de face, et 4 à une galaxie vue par la tranche. Par exemple les galaxies de type morphologique Sa ($T = 1$) sont classées plutôt en S0 et E quand l’in-

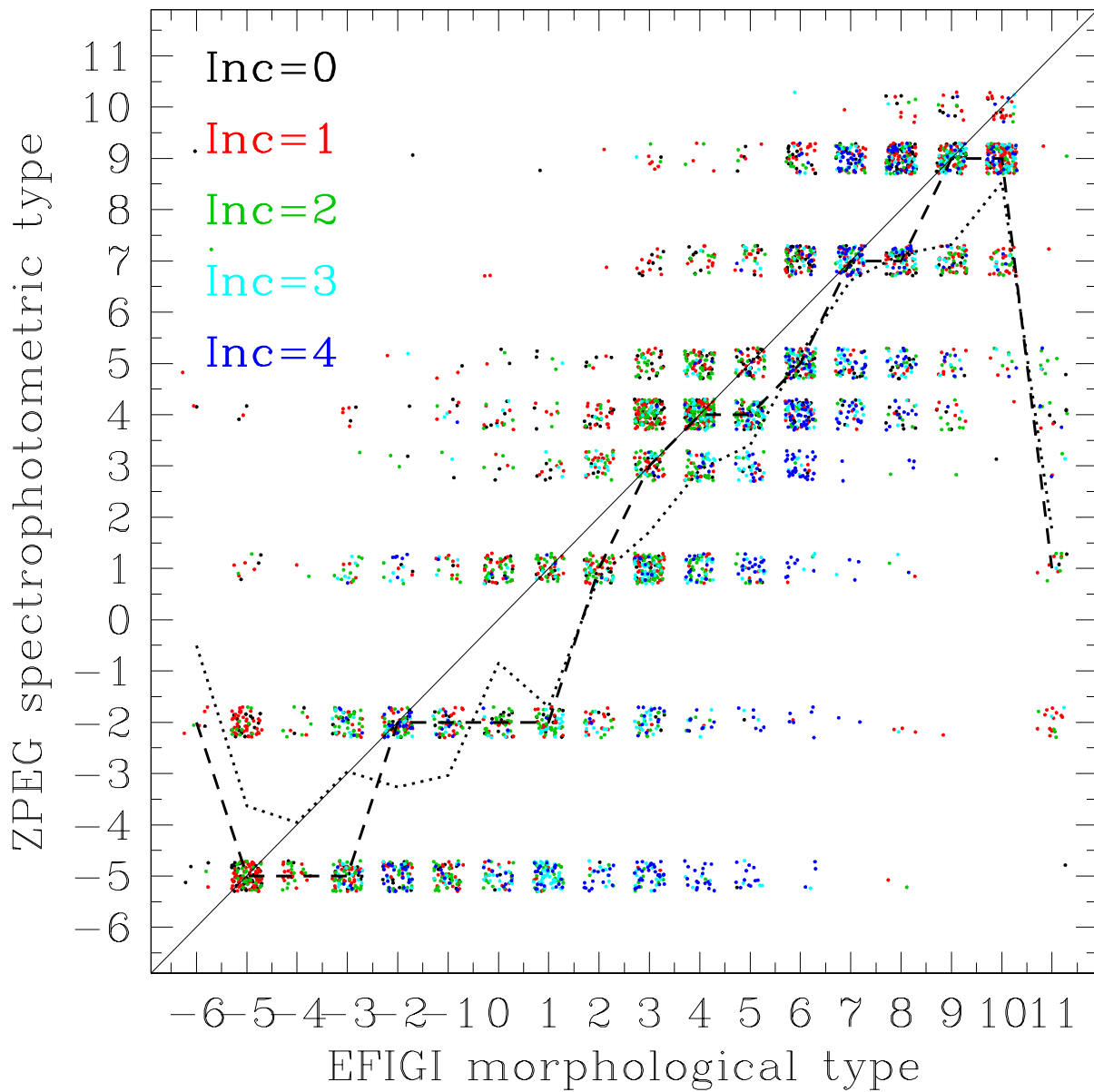


FIG. 3.7 – Comparaison des types spectraux morphologiques du catalogue EFIGI avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie SExtractor dans les bandes *ugriz*, et en utilisant les décalages vers le rouge spectroscopiques. La ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types morphologique, et la ligne pointillée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points, et la couleur des points dépend de l'inclinaison sur le ciel pour les lenticulaires et spirales, ou de l'élongation pour les type E, cE, cD, Im et cE. Les types morphologiques numériques correspondent à cE (-6), E (-5), cD (-4), S0⁻ (-3), S0 (-2), S0⁺ (-1), S0a (0), Sa (1), Sab (2), Sb (3), Sbc (4), Sc (5), Scd (6), Sd (7), Sdm (8), Sm (9), Im (10), dE (11).

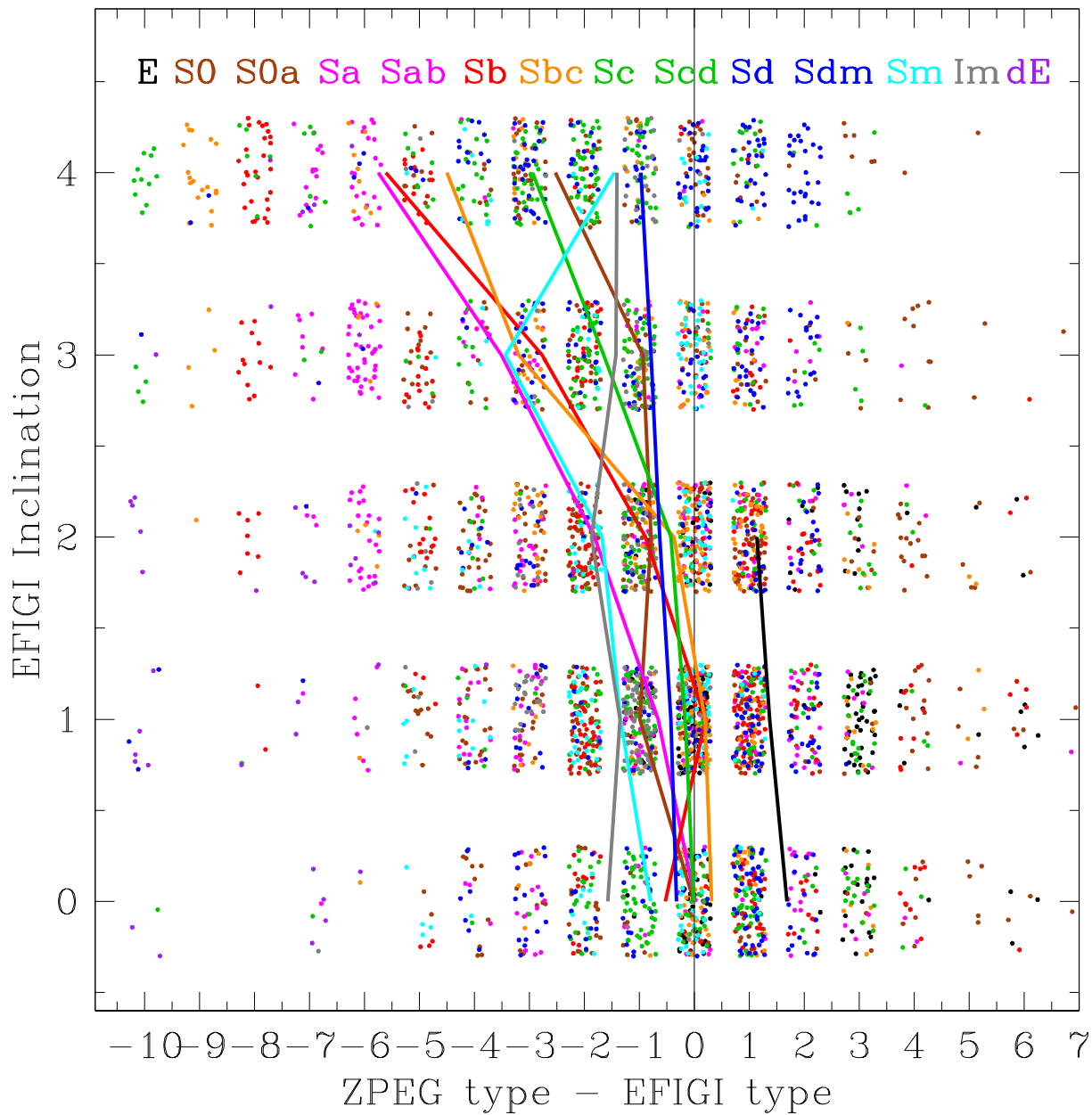


FIG. 3.8 – Même chose que dans la Fig. 3.7, mais montrant cette fois la différence de type en la mesure spectro-photométrique avec ZPEG et le type morphologique EFIGI, en fonction de l'attribut d'inclinaison dans EFIGI.

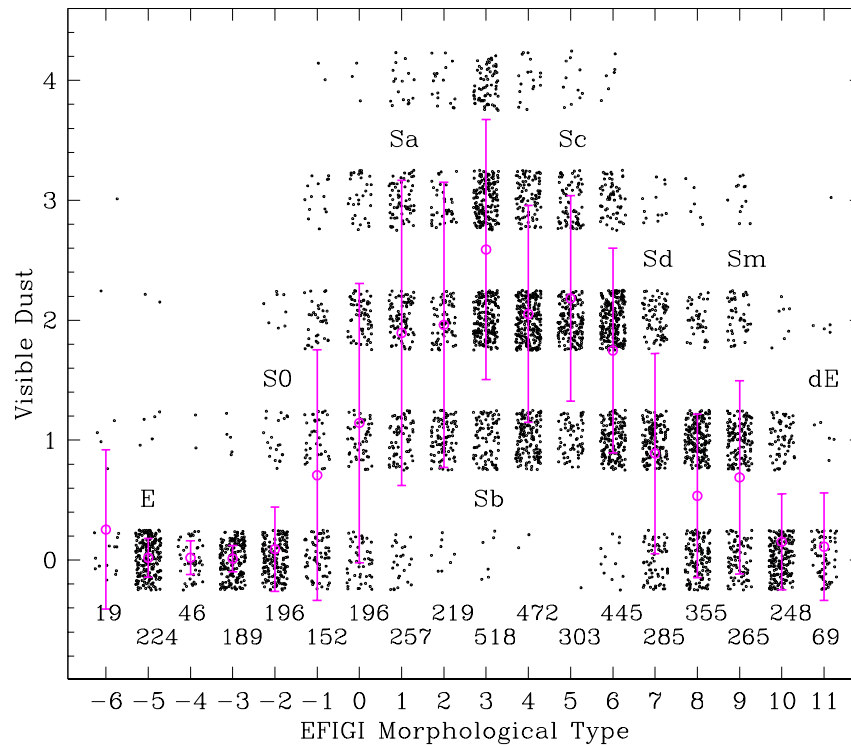


FIG. 3.9 – Distribution de l'attribut caractérisant la quantité de “poussière visible” dans les galaxies du catalogue EFIGI. La valeur 0 correspond à aucune poussière visible, et la valeur 4 à la quantité maximale détectée dans l'échantillon.

clinaison augmente. J'attribue cet effet au rougissement interne des galaxies par les poussières qu'elles contiennent, et qui varie avec l'inclinaison. Driver et al. (2007) ont montré à partir des 10 095 galaxies du catalogue observé “Millennium” (à ne pas confondre avec les simulations numériques “Millennium”) que les poussières contenues dans les disques des galaxies atténuent les magnitudes B des disques et des bulbes associés jusqu'à 1 et 2.5 mag. resp. en fonction de leur inclinaison ; 1/3 de la lumière émise par les disques dans la bande B , et 2/3 de celle émise par les bulbes serait absorbée par les poussières. On observe de même un affaiblissement des magnitudes absolues des galaxies du catalogue EFIGI, atteignant 0.5 magnitude pour les galaxies spirales précoces (Sa-Scd) dans les bandes u et g , et pouvant atteindre 1 à 2 mag. pour les disques de ces galaxies.

On voit dans la Fig. 3.7 que cet effet de rougissement est important aux types morphologiques S0 à Sbc, avec un étalement jusqu'au type ZPEG E ; l'effet s'amointrit pour les galaxies de type Sc et plus tardif. On remarque aussi que le type dE ne figurant pas parmi les scénarios utilisés, ces galaxies sont classées par ZPEG en types S0, Sa, Sb ou Sbc, suivant l'élongation des objets.

La Fig. 3.8 montre quantitativement le décalage entre le type ZPEG et le type morphologique en fonction de l'attribut d'inclinaison : pour tous les types de lenticulaires et pour toutes les spirales jusqu'à Scd, on voit un accroissement de la différence de type vers les valeurs négatives pour les plus grandes inclinaisons. L'effet est le plus marqué pour les types Sa, Sab et Sb, qui sont les plus riches en poussières, comme le montre la Fig. 3.9, donnant la répartition des types EFIGI selon les cinq valeurs de l'attribut “poussière visible”. En revanche, pour les types E, Sd, Sdm, Sm et Im, l'attribut d'inclinaison mesure l'élongation des objets (rapport d'axes), et la différence entre les types morphologiques et spectrophotométriques ne montre pas de variation avec l'élongation.

3.4 Fonctions de luminosité par type morphologique

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology IV. Luminosity functions along the Hubble sequence”, de **Lapparent, V.**, Bertin, E., 2011, en préparation.

Le catalogue EFIGI offre l’opportunité sans précédent de mesurer les fonctions de luminosité “intrinsèques” à chaque type de Hubble à partir d’un grand échantillon statistique. Nous avons vu dans Sects. 5.3 et 5.5 que ces fonctions ne sont connues que dans l’Univers local (dans les amas de la Vierge et du Centaure), pour un petit nombre de galaxies, et à partir de magnitudes photographiques.

Le panneau de gauche de la Fig. 3.10 montre la fonction de luminosité obtenue pour l’ensemble de l’échantillon EFIGI, tous types confondus, au moyen des magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor. J’utilise ici la méthode de Efstathiou et al. (1988) dite “Step-Wise Maximum-Likelihood”, qui corrige des inhomogénéités spatiales, en prenant en compte uniquement des rapports de nombre de galaxies dans un même volume. C’est une méthode itérative qui converge pour l’échantillon EFIGI en 10 à 50 itérations, selon la taille du sous-échantillon considéré. Je corrige en outre de l’incomplétude en magnitude apparente, qui décroît rapidement à $g > 14$, en interpolant le comportement en loi de puissance des comptages de galaxies dans l’intervalle $10 \leq g \leq 14$: $dN(g) = 10^{0.401g-3.061} dg/0.2$.

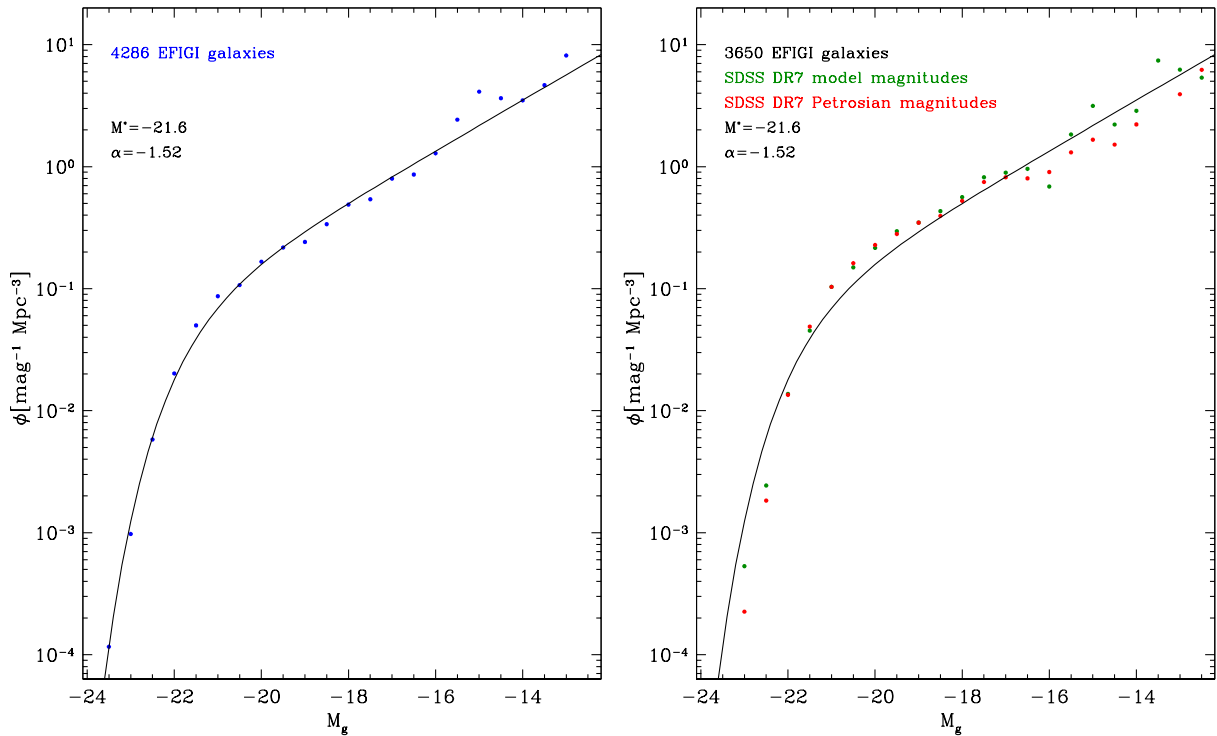


FIG. 3.10 – *A gauche*, la fonction de luminosité pour l’ensemble du catalogue EFIGI dans la bande g avec les magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor (points bleus), ainsi que la fonction de Schechter ajustée (ligne continue); les paramètres de cette fonction, et le nombre de galaxies utilisées sont indiqués dans le graphe. *A droite*, les fonctions de luminosité globales obtenues avec les magnitude SDSS DR7 “model” (points verts) et “Petrosian” (points rouges), comparées avec la loi de Schechter ajustée dans le panneau de gauche.

La fonction de luminosité totale de l’échantillon EFIGI est proche d’une fonction de Schechter (1976), dont le formalisme est

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha e^{-\frac{L}{L^*}} d \left(\frac{L}{L^*} \right), \quad (3.1)$$

où L^* est la fonction de luminosité caractéristique. Si l'on réécrit cette formule en termes de magnitude on obtient :

$$\begin{aligned} \phi(M)dM &= 0.4 \ln 10 \phi^* e^{-X} X^{\alpha+1} dM, \\ \text{avec} & \\ X &\equiv \frac{L}{L^*} = 10^{0.4(M^*-M)}, \end{aligned} \tag{3.2}$$

où M^* est la magnitude caractéristique.

Les paramètres de la fonction de Schechter ajustée à la fonction de luminosité totale du catalogue FIGI (panneau de gauche, Fig. 3.10), sont $M^* = -21.6$ et $\alpha = -1.52$; des mesures de “bootstrap” (Ling et al. 1986), devront être effectuées afin d’obtenir les marges d’erreur sur les points de mesure de la méthode SWML et sur les ajustements de Schechter. Par comparaison, on montre dans le panneau de droite de la Fig. 3.10 les fonctions de luminosité totales obtenues lorsqu’on utilise pour les galaxies FIGI les magnitudes “model” et “Petrosian” du catalogue SDSS DR7. On observe par rapport à la fonction de Schechter ajustée dans le panneau de gauche un manque de galaxies aux magnitudes brillantes et aux magnitudes faibles, que ce soit pour les magnitudes “model” ou “Petrosian” du SDSS. Ces différences sont causées par les erreurs de photométrie décrites dans Sect. 3.1 : le flux des galaxies brillantes est sous-estimé, et le morcellement des galaxies faibles (et donc tardives) tend à les exclure de l’échantillon. L’ajustement d’une fonction de Schechter à la fonction de luminosité globale calculée avec les magnitudes “model” du SDSS (panneau de droite) donne $M^* = -21.0$ et $\alpha = -1.39$, soit un décalage en magnitude caractéristique de 0.6 mag. et une pente plus plate de 0.13. Ainsi les erreurs de photométrie du relevé SDSS ont des implications sur les mesures statistiques qui en sont déduites.

En outre, on remarque que Blanton et al. (2001) avaient obtenu dans la bande g à partir de $\sim 10\,000$ galaxies du relevé SDSS à $z \sim 0.01 - 0.2$, un M^* plus faible d’une magnitude et demi (-20.04 ± 0.04) et une pente encore plus plate ($\alpha = 1.26 \pm 0.05$). Les mesures plus récentes publiées par Blanton et al. (2003) pour $\sim 150\,000$ galaxies du catalogue SDSS indiquent une pente encore plus plate de $\alpha = -0.89 \pm 0.03$, et une magnitude de référence $M^* = -19.39 \pm 0.02$; mais ces paramètres ne peuvent pas être comparés directement avec les fonctions de luminosité calculées ici pour le catalogue FIGI, car ces mesures furent obtenues dans les filtres décalés à $z = 0.1$. Blanton et al. (2003) attribut les différences avec les mesures précédentes de Blanton et al. (2001) aux effets d’évolution entre $z = 0$ et $z = 0.1$. Il est étonnant qu’il y ait de telles différences entre les résultats de Blanton et al. (2001) avec la fonction de luminosité totale du catalogue FIGI. L’essentiel des galaxies utilisées dans les mesures de Blanton et al. (2001) ont des magnitudes $r \gtrsim 17$, au delà des magnitudes de l’échantillon FIGI pour lesquelles nous avons mis en évidence les problèmes de photométrie (Sect. 3.1). Cependant, les écarts vont dans le même sens, et les biais de la photométrie pourraient expliquer une partie de ce qui était interprété par ces auteurs comme des effets d’évolution.

Lorsqu’on calcule les fonctions de luminosité séparément pour les différents types morphologiques, des corrélations marquées apparaissent entre les formes des fonctions et le type de Hubble. Celles-ci sont montrées dans le panneau de gauche de la Fig. 3.11. A noter qu’à ce stade de l’analyse, la normalisation absolue des fonctions de luminosité de l’échantillon FIGI n’a pas été effectuée, et seules les formes des différentes courbes peuvent être comparées. Les fonctions de luminosité par type affichent une diminution des magnitudes caractéristiques le long de la séquence de Hubble. En outre, on observe pour les types E, S0 et les spirales Sa à Scd des fonctions de luminosité en cloche, c’est-à-dire qui décroissent à forte et faible magnitude. En revanche, pour les spirales Sd et plus tardives, ainsi que les types Im et dE, les fonctions de luminosité sont croissantes aux faibles magnitudes. La forme des fonctions obtenues est en accord avec les fonctions prédites à partir des mesures locales (de Lapparent 2003), et démontre l’intérêt de faire des mesures par type morphologique. C’est la première fois que ces fonctions sont mises en évidence à partir d’un relevé systématique avec photométrie CCD.

Par comparaison, on montre dans le panneau de droite de la Fig. 3.11 les fonction de luminosité par type FIGI obtenues en utilisant les magnitudes “model” du SDSS DR7. On observe pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu’à Scd ;

- le déficit de galaxies brillantes qui se traduit par une chute de la fonction de luminosité aux magnitudes brillantes à des valeurs ~ 0.5 mag. moins brillantes que avec les magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor;

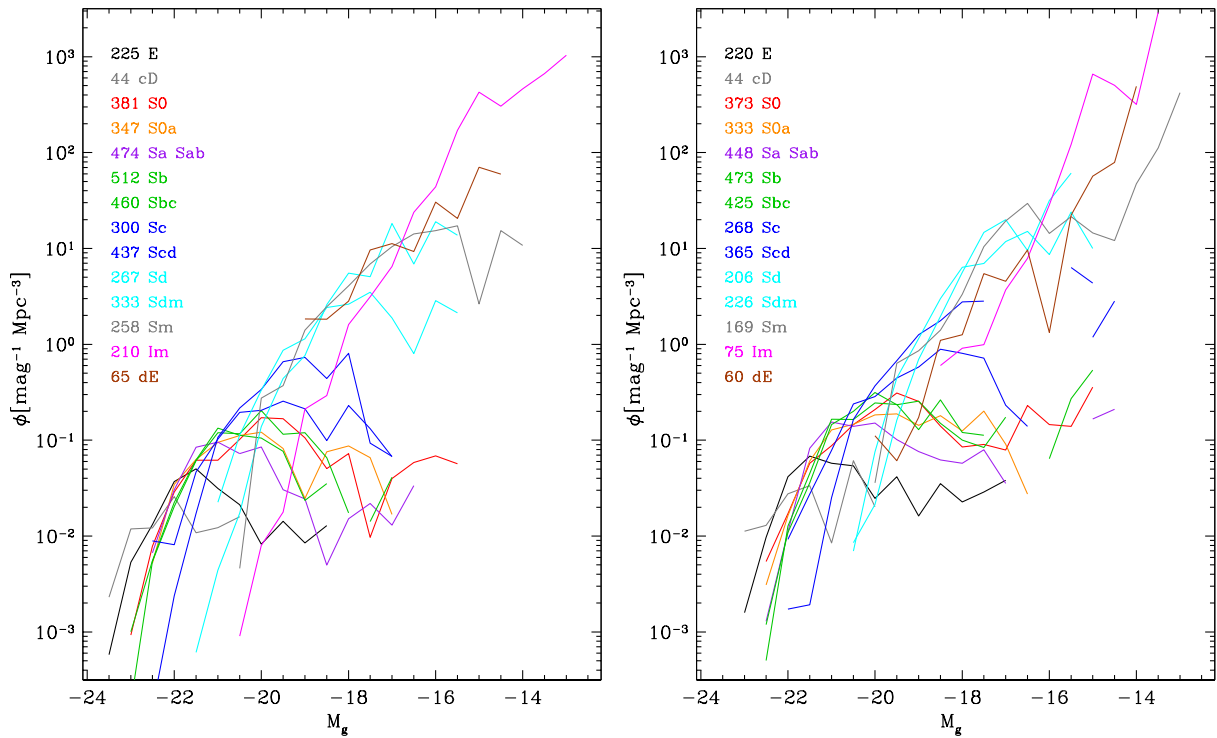


FIG. 3.11 – *A gauche, les fonctions de luminosité “intrinsèques” pour les différents types morphologiques du catalogue EFIGI dans la bande g du relevé SDSS (magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor) ; on observe la décroissance de la luminosité caractéristique vers les types plus tardifs, le comportement en cloche pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu’à Scd, et la croissance aux faibles luminosités pour les types les plus tardifs. A droite, le même graphe en utilisant les magnitudes “model” du SDSS DR7.*

- le rehaussement du côté des magnitudes faibles à cause de la contamination par les objets morcelés et les objets dont le fond de ciel est surestimé (voir Sect. 3.1).

Ces derniers effets causent l’extension aux faibles magnitudes des fonctions de luminosité pour les galaxies de types Sd-Sdm, Sm, Im et dE, lorsqu’on utilise les magnitudes SDSS (panneau de droite). L’absence de signal aux magnitudes plus brillantes que -18.5 pour les galaxies Im est particulièrement frappante dans le panneau de droite Fig. 3.11, alors que des objets jusqu’à -20.5 , soit 2 magnitudes plus brillantes sont détectées lorsqu’on utilise les magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor (dans le panneau de gauche de la Fig. 3.11).

J’examine maintenant les biais dans les mesures des fonctions de luminosité causés par le mélange des types morphologiques lorsqu’on effectue une séparation par couleur ou par type spectral, et que j’ai mentionnés dans les Sects. 5.3 et 5.5. Pour cela, je montre dans le panneau de gauche de la Fig. 3.12 les fonctions obtenues pour les cinq intervalles de couleur absolue $M_g - M_r$ utilisés par Blanton et al. (2001). La décroissance à faible magnitude des fonctions de luminosité pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu’à Sc disparaît : même lorsqu’on considère les deux intervalles de magnitude les plus rouges. En outre, seule la fonction de luminosité des galaxies les plus bleues exhibe un affaiblissement des magnitudes les plus brillantes détectées. Mais celles-ci sont 1 magnitude plus brillantes (~ -21.5) que dans la fonction de luminosité des galaxies irrégulières montrée dans la Fig. 3.11 (~ -20.5).

On peut aisément expliquer ce comportement en examinant le panneau de droite de la Fig. 3.12, montrant comment les types morphologiques des galaxies d’EFIGI se répartissent dans les 5 intervalles de couleur considérés dans le panneau de gauche. L’intervalle de couleur le plus bleu, contient non seulement des galaxies irrégulières, mais aussi des galaxies de type Sm et Sdm. Quant à l’intervalle suivant en

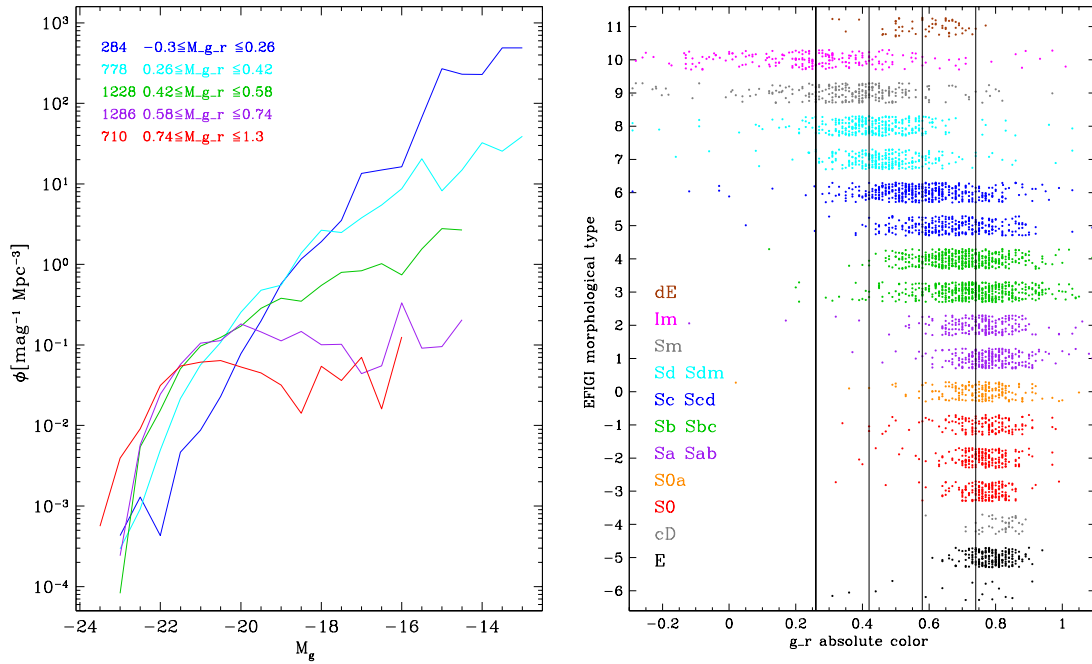


FIG. 3.12 – A gauche, les fonctions de luminosité pour les différents intervalles de couleurs absolue $g - r$ indiqués (utilisant les magnitudes “MAG_MODEL” de SExtractor). A droite, la distribution des types morphologiques pour les cinq intervalles de couleurs, avec le même code de couleur par type que dans la Fig. 3.11. On observe le mélange des types morphologiques et la perte d’information qui en résulte sur les fonctions de luminosité intrinsèques.

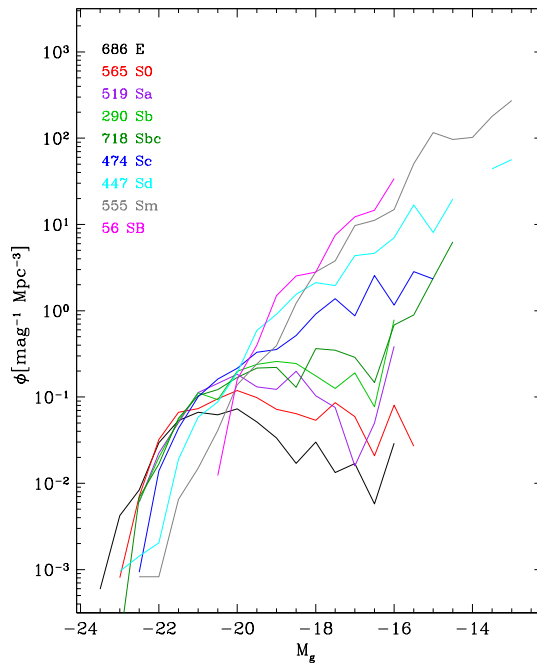


FIG. 3.13 – Les fonctions de luminosité pour les différents types spectro-photométriques calculés par ZPEG pour les galaxies du catalogue EFIGI.

couleur, $0.25 \leq M(g-r) \leq 0.42$, il contient des nombres équivalents de galaxies de types Im, Sm et Sdm, et un peu moins de types Sd et Scd. L'intervalle central de couleur $0.42 \leq M_g - M_r \leq 0.58$ contient tous les types depuis les Sb jusqu'aux dE, alors que le panneau de gauche de la Fig. 3.11 indique des fonctions de luminosité distinctes pour ces différents types. L'intervalle $0.58 \leq M_g - M_r \leq 0.74$ est le plus contaminé, car il contient des galaxies de *tous* les types morphologiques. Le contenu en types morphologiques de l'intervalle de couleur le plus rouge, $0.74 \leq M_g - M_r \leq 1.30$, diffère par la très faible contribution des types Sd à dE, et contient les galaxies les plus rouges parmi les types E à Scd. Ainsi, les différents intervalles de couleurs scindent les différents types morphologiques par couleur, sans parvenir à séparer les types individuels. On remarque que même l'intervalle de couleur le plus rouge ne parvient pas mesurer la fonction de luminosité des galaxies elliptiques, qui s'interrompt à $M_g \simeq -18.5$ dans la Fig. 3.11, alors qu'on observe une extension jusqu'à $M_g \simeq -16$ pour la composante la plus rouge dans la Fig. 3.12.

On obtient des résultats similaires lorsqu'on calcule les fonctions de luminosité par type spectro-photométrique calculées avec ZPEG. Ces fonctions sont montrées dans la Fig. 3.13, et l'on observe des effets similaires à ceux de la Fig. 3.12. La dispersion entre les types spectro-photométriques et les types morphologiques est visible dans la Fig. 3.7 (Sect. 3.3, p. 305). Tous les résultats énoncés dans cette Sect. sont aussi constatés dans les quatre autres filtres du SDSS. L'ensemble des résultats sera publié dans de Lapparent & Bertin (2011b, en préparation).

3.5 Couleurs des bulbes et disques

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology III. Disk and bulge bi-modality along the Hubble sequence”, de **Lapparent, V.**, Bertin, E., 2011, en préparation.

Les décompositions des profils d'environ 10 095 galaxies avec $B < 20$ dans le catalogue “Millennium” avaient suggéré que l'apparente bi-modalité est le résultat d'une nette séparation entre les couleurs des bulbes et des disques des galaxies (Allen et al. 2006). Mais cette analyse manque de robustesse dans l'ajustement des profils à cause de dégénérescences entre les composantes (en partie liées au choix peu contraignant d'un profil de Sérsic pour les bulbes), ainsi que de l'absence d'une classification morphologique précise (galaxies classées en E/S0, Sabc, et Sd/Irr/Pec).

Grâce à la qualité des ajustements de profil et à la précision du type de Hubble pour le catalogue EFIGI, nous avons pu établir les séquences couleur-magnitude pour les bulbes et les disques de la majorité des objets. Dans les Figs. 3.14 et 3.15 on voit clairement le comportement distinct des bulbes qui ont majoritairement des couleurs proches de celles des galaxies elliptiques, alors que les disques décrivent tout l'intervalle de couleur depuis la couleur rouge des elliptiques $g-r \simeq 0.75$, jusqu'à la couleur très bleue des irrégulières.

Ces résultats contrastent de façon marquée avec les résultats de Balcells & Peletier (1994), qui trouvèrent un bleuissement des bulbes de 18 spirales précoces (non affectées par l'extinction) par rapport aux couleurs des elliptiques. En ajustant des profils dans la partie excluant la bande de poussière pour 30 galaxies spirales précoces inclinées, Peletier & Balcells (1996) mesurèrent des couleurs similaires pour les bulbes et disque des ces galaxies. Par l'ajustement des profils des 10 095 galaxies du catalogue “Millennium” avec un bulbe de type Sérsic ajouté à un disque exponentiel, et au moyen de GIM2D (Simard 1998), Cameron et al. (2009) obtinrent une étonnante corrélation entre les couleurs $u-r$ des bulbes et disques sur un intervalle de 2 magnitudes, après une correction de l'atténuation par la poussière. Les différences avec les mesures effectuées sur le catalogue EFIGI illustrent la difficulté des ajustements de profils, et l'importance d'une bonne prise en compte de la réponse impulsionnelle.

Il est intéressant de remarquer que dans la Fig. 3.14 les bulbes des types Sb, Sbc, Sc, Scd montrent un rougisement par rapport à la couleur de référence ($g-r = 0.75$). Ces types présentent un forte quantité de poussière, comme indiqué dans la Fig. 3.9 au moyen de l'attribut EFIGI `Visible Dust` (voir Sect. 3.3, p. 307). L'effet est cependant présent lorsque l'on examine séparément les galaxies de ce type avec peu ou pas de poussière visible, car la poussière évaluée par l'attribut EFIGI est principalement celle du disque. Cependant, on observe dans la Fig. 3.16 que ce rougisement des bulbes augmente pour les

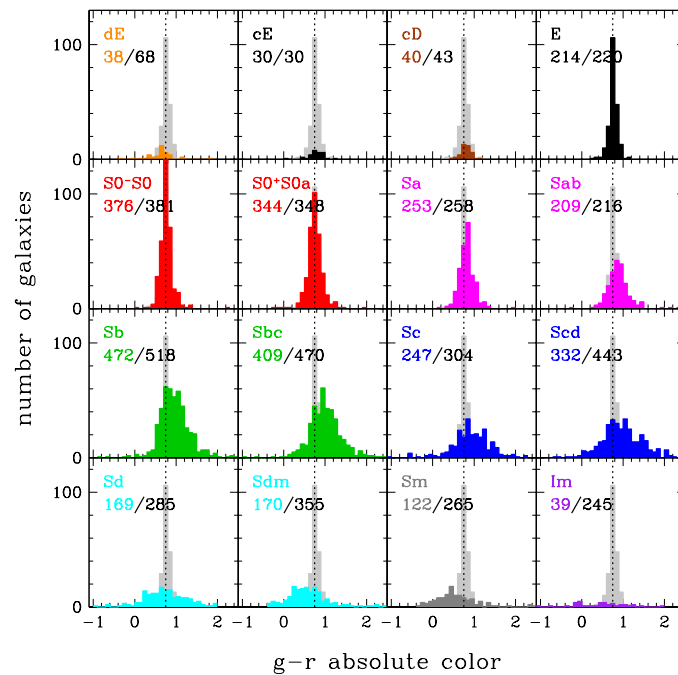


FIG. 3.14 – Distributions des couleurs $g-r$ pour les bulbes des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l’ajustement d’un profil en $r^{1/4}$ convolué par la réponse impulsionnelle, en fonction du type de Hubble. L’histogramme grisé réplique celui obtenu en haut à droite pour les galaxies elliptiques.

galaxies présentant un rapport Bulbe/Total décroissant. Cela est peut-être cohérent avec le fait que le rougissement par la poussière s’accompagne d’une extinction. Mais il est aussi possible que les détails de la modélisation bulbe+disque pour les galaxies ayant une faible contribution du bulbe aient un impact sur les couleurs calculées pour les bulbes dans ces objets. Enfin, on remarque que les bulbes des galaxies de type Sbc et plus tardives sont principalement des “pseudo-bulbes”, qui peuvent avoir des profils exponentiels et qui auraient été formés par accréation lente de matière provenant du disque, plutôt que par relaxation violente selon le modèle des galaxies elliptiques massives (Kormendy & Kennicutt 2004). L’ensemble de ces considérations appelle à poursuivre cette étude en utilisant des profils autres que la loi “de Vaucouleurs” pour les bulbes. Ces résultats seront approfondis et discutés dans de Lapparent & Bertin (2011a, en préparation).

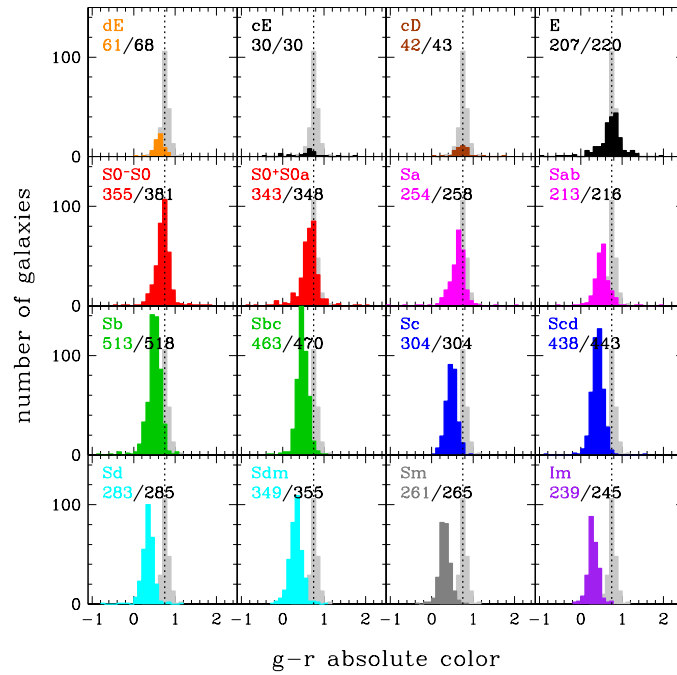


FIG. 3.15 – Distributions des couleurs $g - r$ pour les disques des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil exponentiel convolué par la réponse impulsionnelle, en fonction du type de Hubble. L'histogramme gris réplique celui obtenu dans la Fig. 3.14 pour les bulbes des galaxies elliptiques.

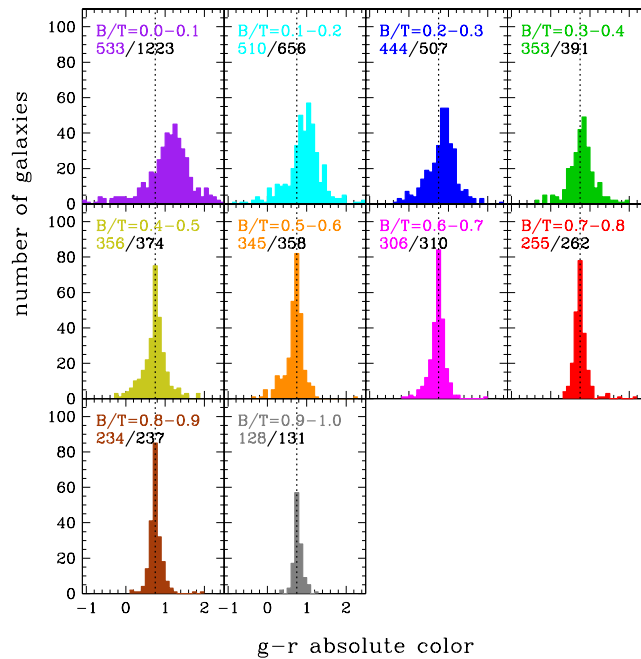


FIG. 3.16 – Distributions des couleurs $g - r$ pour les bulbes des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil en $r^{1/4}$ convolué par la réponse impulsionnelle, en fonction du rapport Bulbe/Total. La ligne verticale en pointillés indique dans chaque cadran la couleur médiane des galaxies elliptiques (la majorité ont un rapport Bulbe/Total > 0.9).