

## Chapitre 3

# Structuration à grande échelle

### 3.1 Introduction

Les cartes du “Center for Astrophysics Redshift Survey”, complètes jusqu’à  $m_{B(0)} = 15.5$  et couvrant une fraction importante de l’hémisphère nord, avaient suggéré une nouvelle image de la distribution des galaxies à grande échelle : de grandes régions vides de galaxies de diamètre compris entre 15 et 70 Mpc, et délimitées par de minces feuillets de quelques megaparsecs d’épaisseur (de Lapparent et al. 1986a), comme montré dans le diagramme central de la Fig. 3.1. Des mesures de la dimensionnalité des structures basées sur la variation des comptages dans des cellules de taille variable (de Lapparent et al. 1991) avaient indiqué un accord avec un réseau de structures à deux dimensions. Dans cette distribution cellulaire, des structures cohérentes sur des échelles comparables à la taille des cartes peuvent apparaître sous la forme de grands murs (Geller & Huchra 1989; voir aussi Stoughton et al. 2002).

Les résultats du “Center for Astrophysics Redshift Survey” causèrent un regain d’intérêt pour la cartographie des grandes structures de l’Univers, qui conduisit à l’acquisition de nouveaux catalogues sondant la distribution des galaxies à plus grand décalage vers le rouge ( $z \sim 0.1$ , soit  $\sim 400$  Mpc). Malgré leur échantillonnage partiel (ou incomplétude), les premiers de ces catalogues confirmèrent la structuration en vides et feuillets de la distribution, avec une taille de vides dans l’intervalle 30-150 Mpc (Shectman et al. 1996; Vettolani et al. 1997; Schuecker & Ott 1991). Ce n’est qu’avec la mise en place des grands relevés 2dF et SDSS, visant à obtenir la spectroscopie à fibre pour des centaines de milliers de galaxies jusqu’à une magnitude apparente  $r \sim 17.8$ , que l’on pu disposer de grands échantillons statistiques (Stoughton et al. 2002; Colless et al. 2003). Les cartes tri-dimensionnelles de la distribution des galaxies obtenues par ces deux relevés (voir Fig. 3.1) montrèrent que l’alternance de vides et minces feuillets de galaxies est omniprésente dans les nouvelles régions explorées à  $z \lesssim 0.2$ , et permirent de caractériser mathématiquement les grandes structures.

La nature cellulaire de la distribution peut être décrite par une topologie en éponge (Vogeley et al. 1994), celle-ci découlant naturellement d’un spectre de fluctuations primordiales de matière dont les amplitudes suivent une loi de répartition gaussienne (Hamilton et al. 1986; Weinberg et al. 1987). L’intérêt des mesures de topologie réside dans la contrainte qu’elles posent sur les moments d’ordre élevé de la distribution; elles fournissent ainsi un test des simulations numériques qui sont ajustées pour avoir le même spectre de puissance que les observations. La topologie de la distribution des galaxies a été mesurée par le “genus”, en construisant la surface d’iso-densité à une densité de seuil donnée, puis en mesurant la différence entre le nombre de trous (de type “beignet”) et le nombre de régions isolées observées dans cette surface. Le genus est aussi l’intégrale de la courbure Gaussienne le long de la surface d’iso-densité (Gott et al. 1986, 1987).

Dans la topologie en éponge qui résulte de fluctuations gaussiennes, les variations du genus en fonction de la densité sont symétriques aux hautes et basses densités, ce qui signifie que les surfaces d’iso-densité séparant les régions de haute et faible densité ont les mêmes propriétés topologiques. En particulier, à la densité intermédiaire séparant le relevé en deux volumes égaux, les régions de haute et basse densité

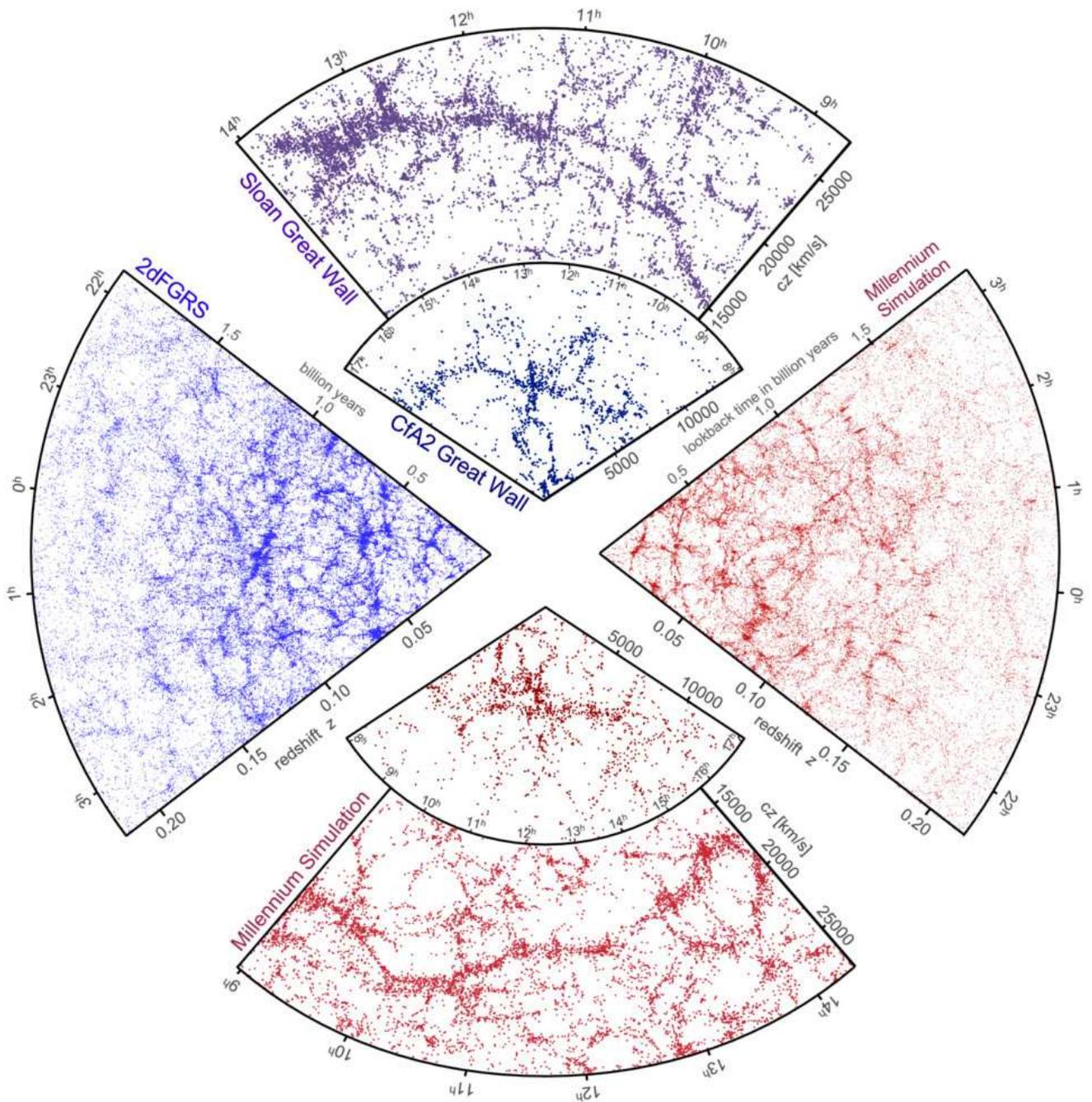


FIG. 3.1 – Une synthèse des observations et simulations numériques concernant la répartition des galaxies à grande échelle (image provenant du “Millennium Simulation Project”, Max-Planck-Institut für Astrophysik).

forment deux structures continues imbriquées l’une dans l’autre et contenant de nombreux trous mais aucune région isolée; on peut donc aller de tout endroit d’un des deux volumes à un autre sans traverser la surface d’iso-densité. Lorsque l’on isole les régions de haute et faible densité, les volumes se morcellent en faveur de régions isolées, et le genus devient négatif, avec un comportement similaire vers les hautes et les basses densités.

Les mesures du genus appliquées au relevé SDSS permettent de comparer avec une excellente statistique l’Univers observé aux résultats des simulations numériques avec matière noire et constante cosmologique (Springel et al. 2005). Les variations du genus pour le relevé SDSS sont proches de celles attendues pour des fluctuations Gaussiennes (Gott et al. 2009), qui sont elles-mêmes en bon accord avec celles mesurées pour les simulations numériques de matière noire (Springel et al. 2005; Park et al. 2005b). Des déviations par rapport à une topologie en éponge sont cependant mesurées dans le relevé SDSS sous la forme d’une légère prééminence des structures connexes de type amas (Gott et al. 2008). Cette déviation pourrait être entièrement due aux galaxies brillantes, alors que la topologie de la distribution des galaxies peu lumineuses montrent plutôt une prééminence des vides, soit une topologie de type “bulles” (Park et al. 2005a). Des différences dans la topologie en fonction de la luminosité, la couleur et la morphologie des galaxies posent en outre des contraintes sur les scénarios semi-analytiques de formation des galaxies (Choi et al. 2010). Enfin, les mesures de “squelette” offrent une approche intéressante pour caractériser le réseau de feuillettes et faire le lien avec la théorie (Pogosyan et al. 2009; Sousbie et al. 2009), mais l’application aux données observationnelles n’a pas encore été suffisamment explorée (Sousbie et al. 2008).

## 3.2 Un pinceau à travers la toile cosmique

*Article*: “Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”, Bellanger, C., **de Lapparent**, V., 1995, *ApJ Letters* 445, pp. L103-L107

Les résultats du catalogue ESO-Sculpteur ont permis, par l’observation, de lever l’ambiguïté posée par un sondage voisin dans le ciel (Broadhurst et al. 1990), qui suggèrait une répartition périodique des galaxies le long de la ligne-de-visée, avec une période de  $128 h^{-1}$  Mpc (dans le cas d’une constante de Hubble  $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Ces résultats furent mis en défaut par diverses analyses statistiques montrant que le regroupement des galaxies aux échelles inférieures à  $5 h^{-1}$  Mpc, qui se matérialise par la présence de groupes de galaxies dans les feuillettes, et d’amas aux intersections de ceux-ci, peut générer des périodicités telles que celles observées par Broadhurst et al. (1990), avec une probabilité de quelques pourcents à une dizaine de pourcents dans un Univers n’ayant pas de fluctuations primordiales à très grande échelle (Kaiser & Peacock 1991; Weiss & Buchert 1993). En outre, Park & Gott (1991) montrèrent qu’il n’y avait pas de différence statistique dans la mesure de périodicité entre les observations de Broadhurst et al. (1990) et des pinceaux étroits de même géométrie extraits de simulation numériques avec matière noire froide.

Les pinceaux de (Broadhurst et al. 1990) sont par ailleurs trop étroits pour détecter tous les feuillettes interceptés (ils échantillonnent transversalement moins de  $5 h^{-1}$  Mpc des feuillettes interceptés, soit la longueur de corrélation des galaxies), et des simulations de pinceaux étroits montrèrent que la taille typiques des vides observés dans le relevé du CfA ( $\lesssim 60 h^{-1}$  Mpc) est compatible avec la détection de pics marqués tous les  $120 h^{-1}$  Mpc (de Lapparent et al. 1991).

En revanche, par sa couverture angulaire continue, et par son taux de complétude élevé, le relevé ESO-Sculpteur permit une cartographie détaillée de la distribution des galaxies à grande distance :  $0.1 \leq z \leq 0.5$  (Bellanger & de Lapparent 1995). La Fig. 3.2 montre qu’il apparaît dans le relevé ESO-Sculpteur la même remarquable alternance de vides et feuillettes que celle détectée dans les catalogues de l’Univers proche, ce qui fut la première indication que cette structuration à grande échelle persiste à  $z \sim 0.5$  (Bellanger & de Lapparent 1995). De surcroît, le diamètre typique des vides à grande distance est de 20–40 Mpc (avec  $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ ), en bon accord avec les structures proches. Ces résultats furent ensuite confirmés par des sondages analogues à des profondeurs similaires (Small et al. 1999; Yee et al. 2000).

Les diagrammes montrés dans la Fig. 3.2 indiquent que l’échelle de  $128 h^{-1}$  Mpc (ou 183 Mpc avec  $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ ), correspondant à un intervalle en décalage spectral de 0.045, est largement échantillonnée

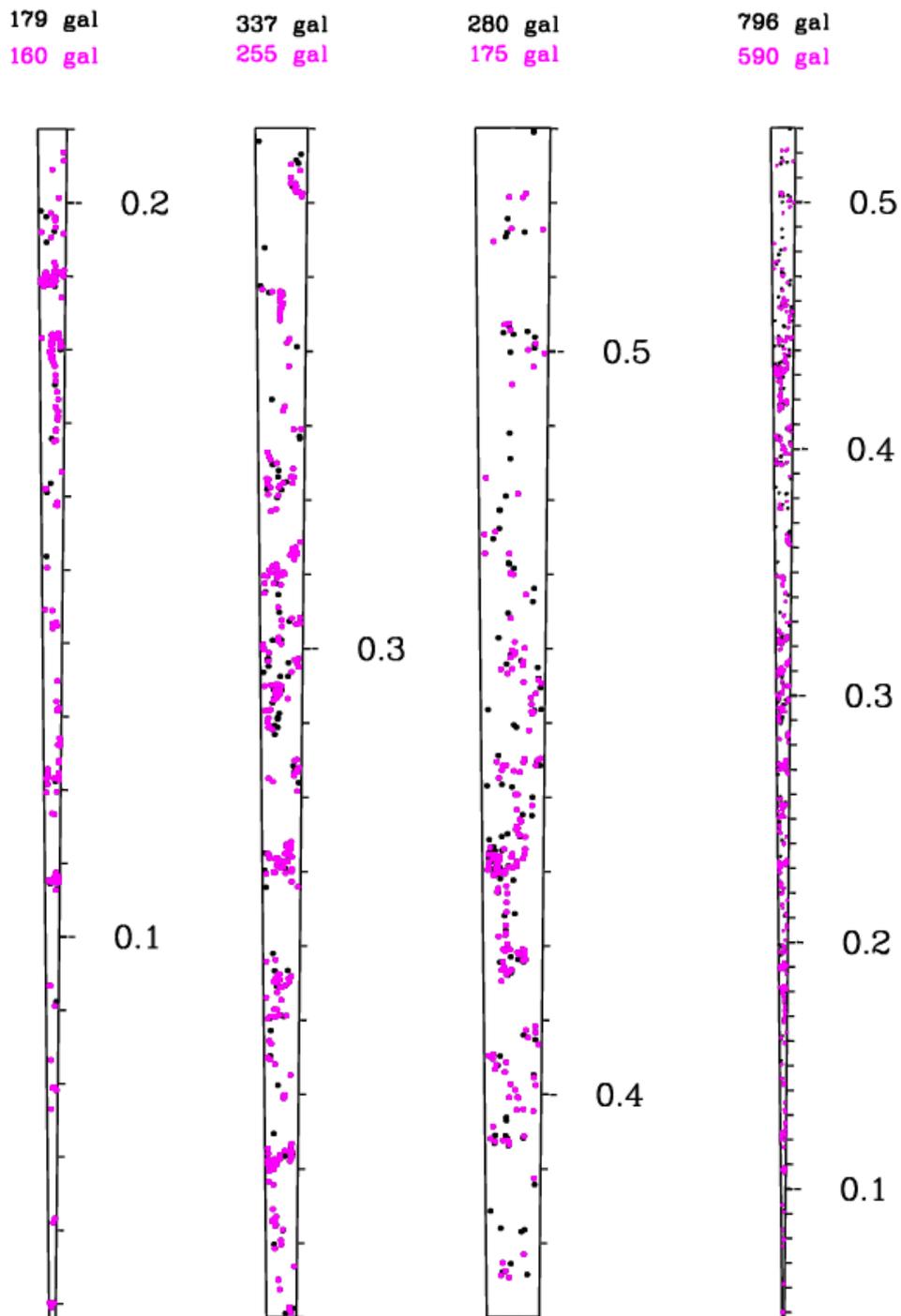


FIG. 3.2 – La distribution spatiale du catalogue spectroscopique du relevé ESO-Sculpteur, dans une région de  $0.25 \text{ deg}^2$  du ciel austral. Le cône de droite montre la ligne de visée complète du sondage. Les trois cônes de gauche permettent une vision rapprochée des structures dans trois intervalles de décalage spectral adjacents ( $0.08-0.21$ ,  $0.21-0.34$ ,  $0.34-0.47$ ). Les galaxies en magenta ont  $R_c \leq 20.5$ , celles en noir ont  $20.5 < R_c \leq 21.5$  (les nombres de galaxies indiqués en noir correspondent cependant à tous les objets avec  $R_c \leq 21.5$ ). La nature cellulaire de la distribution des galaxies à grande échelle se prolonge à grande distance, sous forme d'une alternance de vides et feuilletés espacés de  $\sim 25 - 40 \text{ Mpc}$ .

par le catalogue ESO-Sculpteur (sondant une région de  $\sim 2800 h^{-1}$  Mpc ou  $\sim 2000$  Mpc avec  $H_0 = 70$  km/s/Mpc), et qu'il n'apparaît pas de structuration marquée à cette échelle particulière. Le relevé ESO-Sculpteur confirme ainsi que les structures détectées par Broadhurst et al. (1990) sont causées par l'association perverse d'une faible couverture angulaire et des fluctuations inhérentes au regroupement des galaxies aux petites échelles. La Fig. 3.2 montre aussi qu'en accord avec le mode de sélection du champ (Sect. 1.4.1), le relevé ESO-Sculpteur ne contient pas d'amas riche de galaxies, mais de nombreux groupes de galaxies.



### 3.3 Article choisi n° 2

“Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”  
Bellanger, C., **de Lapparent**, V.  
*Astrophysical Journal Letters*, Vol. 445, pp. L103-L107  
1995



### 3.4 Fonctions de corrélation par type

*Article*: “Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1-0.5”, 2007, de Lapparent, V., Slezak, E., *A&A* 472, pp. 29-49.

Nous avons obtenu la première détection et mesure du regroupement plus serré d’un facteur 2 des galaxies rouges par rapport au galaxies bleues à partir d’un catalogue profond de 20 000 galaxies à  $V < 23.5$  (Cabanac et al. 2000), observées avec la caméra UH8K au TCFH (précurseur de MEGACAM). Le relevé ESO-Sculpteur permet d’aller plus loin dans la distinction du regroupement des divers types de galaxies. Pour cette analyse, on utilisa les 870 galaxies du relevé avec  $R_c \leq 21.5$ , complet à 52% jusqu’à cette limite, résultant d’une complétude de 92% à  $R_c \leq 20.5$  et de 25% pour  $20.5 \leq R_c \leq 21.5$ .

Afin de déceler des effets de ségrégation liés à la nature des galaxies, nous mesurâmes les fonctions de corrélation à 2-points pour les différents regroupements de types de galaxies mis en évidence par les fonctions de luminosité (voir Sect. 2.4.1). Le résultat principal est montré dans la Fig. 3.3. A petite échelle ( $\leq 0.3 h^{-1}$  Mpc), le signal est dominé par les galaxies géantes de type spectral précoce (E, S0, Sa), puis par les galaxies naines (dE, dI), alors que les galaxies spirales tardives (Sb, Sc, Sd/Sm) montrent une bien plus faible corrélation spatiale. Aux échelles de  $\sim 0.5$  à  $10 h^{-1}$  Mpc, les galaxies géantes précoces et les spirales tardives ont la même fonction de corrélation, alors qu’il n’y a pas de corrélation significative des galaxies naines à ces échelles (de Lapparent & Slezak 2007).

En outre, les galaxies naines sont peu mélangées avec les galaxies spirales tardives, et sont préférentiellement localisées comme satellites des galaxies géantes de type précoce (de Lapparent & Slezak 2007). Ces résultats sont obtenus par l’analyse des les fonctions de corrélation croisées entre les divers types de galaxies. Certains de ces effets sont visibles à l’œil dans les diagrammes en cône de la Fig. 5 de l’article choisi n° 3, p. 71 ci-apès (de Lapparent & Slezak 2007) : on voit par exemple que les galaxies précoces sont plutôt dans les régions centrales des groupes.

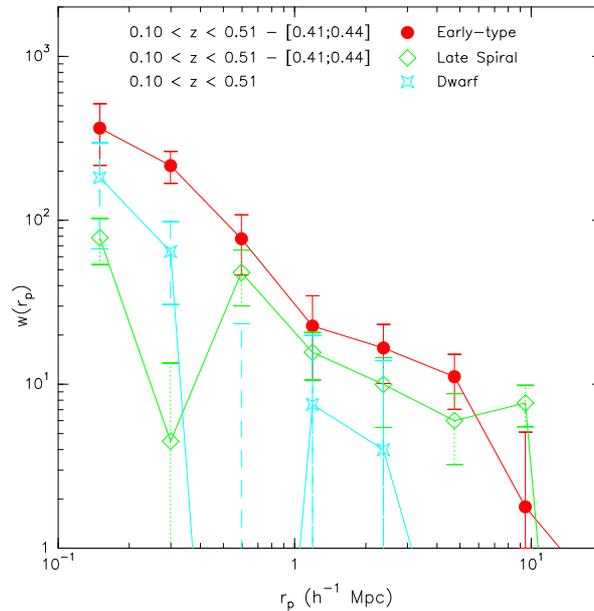


FIG. 3.3 – Les fonctions de corrélation du relevé ESO-Sculpteur pour les galaxies géantes, de type précoce (E, S0, Sa), et de type spirales tardives (Sb, Sc, Sd/Sm), et les galaxies naines (dE, dI).

Un autre résultat intéressant fut obtenu. Les diverses fonctions de corrélation mesurées révélèrent un comportement bimodal analogue à celui attendu dans les modèles contemporains de formation hiérarchique des galaxies au sein des halos de matière noire (Jenkins et al. 2001; Berlind & Weinberg 2002; Berlind et al. 2003) : à petite échelle, la fonction de corrélation est dominée par la composante intra-halo, provenant des paires de galaxies résidant dans un même halo de matière noire ; à grande échelle, c’est la

composante inter-halo, correspondant aux paires de galaxies appartenant à des halos différents, qui domine; cette dernière reproduit ainsi la fonction de corrélation de la matière. La transition entre les 2 régimes est observée sous la forme d'un "coude" à  $\sim 1 h^{-1}$  Mpc dans le relevé ESO-Sculpteur (voir la courbe des types précoces "early-type" dans la Fig. 3.3). Dans les modèles, cette transition s'opère à une échelle comparable au diamètre du viriel des grands halos, et les caractéristiques de la transition (force et échelle) dépendent de la fraction relative de galaxies dans les halos de faible et grande masse. Dans ce contexte, le relevé ESO-Sculpteur indiqua que les galaxies géantes de type précoce ont tendance à se placer au centre des halos les plus massifs, alors que les galaxies spirales tardives occupent plutôt la périphérie de ces halos, ou le centre des halos moins massifs.

Ce comportement bimodal fut détecté dans les diverses fonctions de corrélation du relevé SDSS sondant la distribution des galaxies à  $z \leq 0.1$  (Zehavi et al. 2004, 2005a,b). Notre analyse du catalogue ESO-Sculpteur montra que ce comportement est aussi détecté à plus grand décalage spectral ( $z \leq 0.5$ ), avec des différences spécifiques aux différents types de galaxies. La modélisation de ces résultats pourrait fournir des contraintes sur la répartition des multiples types d'objets au sein des halos de matière noire. Sachant que chaque type de galaxie correspond à une histoire spécifique d'accumulation de la masse et de la transformation en étoiles, ces mesures de fonction de corrélation représentent des outils prometteurs pour clarifier notre compréhension des mécanismes de formation des galaxies.

### 3.5 Article choisi n° 3

“Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1-0.5”

**de Lapparent**, V., Slezak, E.

*Astronomy & Astrophysics*, Vol. 472, pp. 29-49

2007



### 3.6 Fluctuations à très grande échelle

Des fluctuations de densité à l'échelle de  $\sim 150-200$  Mpc sont présentes dans le relevé ESO-Sculpteur. La Fig. 3.4 montre que les régions situées dans l'intervalle  $0.33 < z < 0.39$  (soit  $\sim 213$  Mpc en intervalle de distance comobile) et dans l'intervalle  $0.41 < z < 0.46$  ( $\sim 170$  Mpc) sont sous-denses et sur-denses resp. par rapport au nombre de galaxies attendues dans un échantillon qui serait spatialement homogène, pour toutes les combinaisons de types géantes considérées. Les galaxies naines (dE+Im) sont intrinsèquement trop peu lumineuses pour être détectées dans le relevé à  $z \gtrsim 0.4$ ; on remarque cependant bien la chute brutale de densité à  $z \simeq 0.3$ . Ces fluctuations sont bien visibles dans le diagramme en cône complet de la Fig. 3.2, et apparaissent comme une alternance d'un creux puis d'un excès. Ces deux fluctuations de densité étaient déjà visibles dans les diagrammes en cône basés sur l'échantillon spectroscopique incomplet à 50% (Bellanger & de Lapparent 1995, voir Fig. 1). Ces structures produisent un signal alternatif positif et négatif dans les fonctions de corrélation entre 50 et 200 Mpc, et un excès de corrélation aux échelles entre 5 et 20 Mpc (voir Figs. 4, 7 et 9 de l'article choisi n° 3, p. 71, de Lapparent & Slezak 2007).

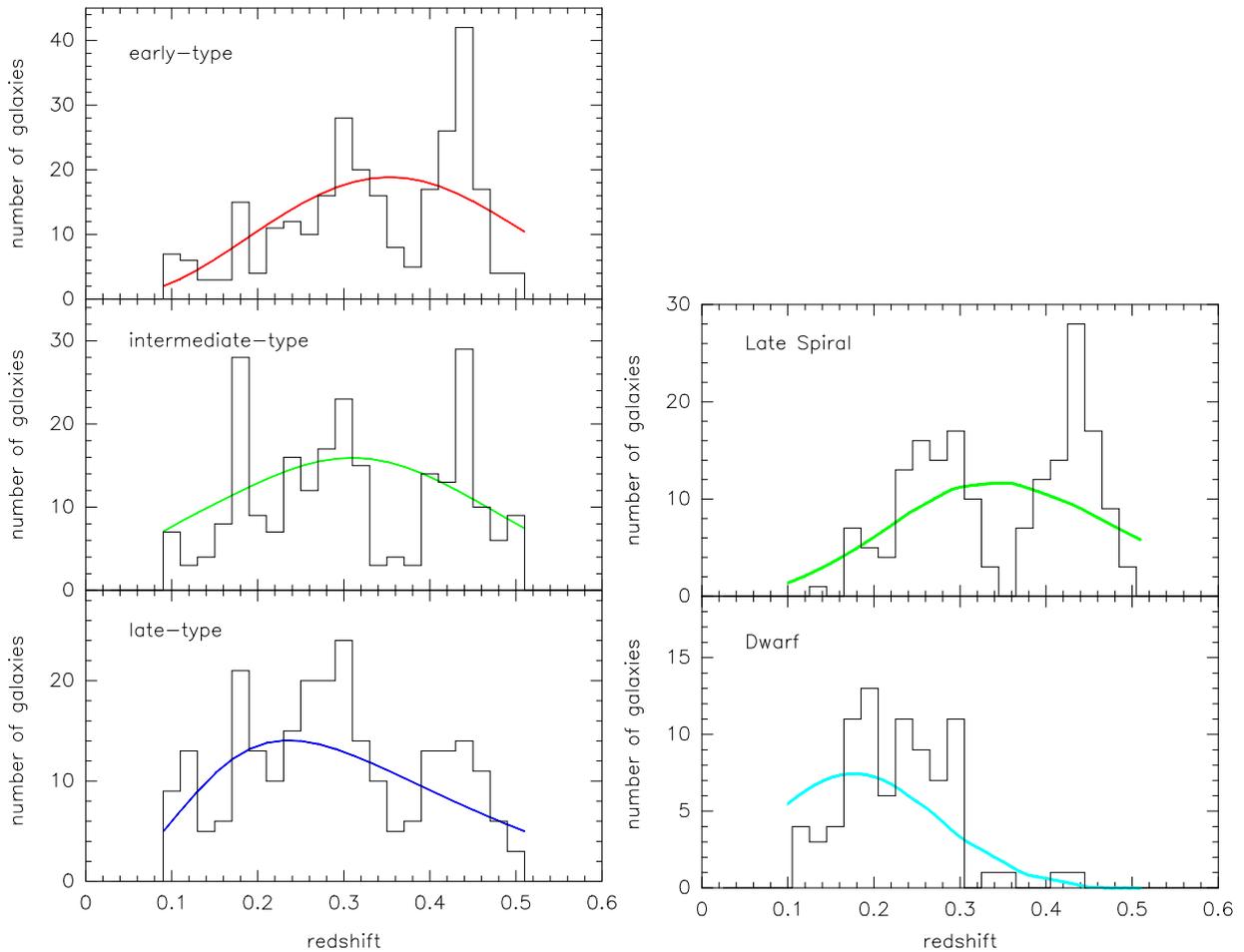


FIG. 3.4 – *A gauche, les histogrammes en décalage spectral des galaxies de type spectral précoce E+S0+Sa, (haut), intermédiaire Sb+Sc (centre), et tardif Sc+Sd/Sm (bas) du relevé ESO-Sculpteur. Les courbes continues indiquent les distributions attendues pour des échantillons de même combinaison de types et avec les fonctions de luminosité, mais répartis spatialement de façon homogène. A droite, on montre la distribution des galaxies de type spectral Sb+Sc+Sd/Sm, et la distribution des galaxies naines Im+dE.*

J'évalue ici le niveau de vraisemblance de ces fluctuations, en prenant en compte l'excès de variance prédit par les fonctions de corrélation mesurées par de Lapparent & Slezak (2007, voir Sect. précédente).

Pour estimer le nombre de galaxies prédites dans un échantillon homogène, je prends en compte les types spectraux des différentes galaxies, et les corrections- $k$  et fonctions de luminosité correspondantes. Les nombres de galaxies observés  $N_{obs}$  et prédits  $N_{pr}$ , ainsi que l’excès ou le défaut de densité  $N_{obs}/N_{pr}$  sont indiqués pour les 2 régions considérées dans la Table 3.6. On indique aussi les valeurs correspondantes pour l’ensemble des galaxies de tous types dans chaque région.

La colonne  $N_{obs}/N_{pr}$  de la Table 3.6 montre que pour les types spectraux précoces (E+S0+Sa) et tardifs (Sc+Sd/Sm+Im), ainsi que pour tous les types réunis, les deux régions  $0.33 < z < 0.39$  et  $0.41 < z < 0.46$  sont sous-dense et sur-dense resp. d’un facteur  $\sim 2$ . Pour les galaxies de type spectral intermédiaire (Sb+Sc+dE),  $N_{obs}/N_{pr}$  diminue même à  $\sim 1/4$  dans la région de la sous-densité (voir panneau central gauche de la Fig. 3.4).

La Table 3.6 indique aussi le contraste de densité  $\Delta N/N_{pr} = (N_{obs} - N_{pr})/N_{pr}$  de chaque structure pour les différents regroupements de types de galaxies, avec un contraste nul attendu pour une distribution homogène. Nous estimons le niveau de significativité des contrastes mesurés. La variance du contraste est la somme des variances relatives sur  $N_{pr}$  et  $N_{obs}$ . La première variance est le terme de Poisson  $1/N_{pr}$ . Dans le formalisme de la fonction spatiale de corrélation, la seconde variance est la somme du terme de Poisson  $1/N_{pr}$  et de la double intégrale en volume (normalisée) de la fonction de corrélation, soit :

$$\sigma^2 \left( \frac{\Delta N}{N_{pr}} \right) = \frac{2}{N_{pr}} + \frac{1}{V^2(z_{min}, z_{max})} \int_{V(z_{min})}^{V(z_{max})} \xi(r_p, \pi) dV_1 dV_2, \quad (3.1)$$

où  $V(z_{min}, z_{max})$  est le volume comobile intercepté par le relevé entre  $z_{min}$  et  $z_{max}$ , et  $r_p$  et  $\pi$  les séparations projetées et le long de la ligne de visée des paires de galaxies. L’utilisation de  $\xi(r_p, \pi)$  conduit à une estimation non biaisée par les distorsions en décalage vers le rouge dues aux vitesses propres des objets. L’intégrale est calculée en utilisant la fonction de corrélation effectivement mesurée par de Lapparent & Slezak (2007) pour l’ensemble du relevé. Les valeurs des 2 termes de variance intervenant dans l’Eq. 3.1 pour les différents types sont indiquées dans la Table 3.6 (colonnes  $2/N_{pr}$  et  $\int \xi/V^2$ ), ainsi que la valeur correspondante de l’écart-type  $\sigma$  et le niveau de significativité Sig. défini par  $\Delta N/N_{pr}/\sigma$ .

On constate que la variance due au regroupement des galaxies est supérieure au terme de Poisson d’un facteur au moins  $\sim 2$  pour les types séparés, et  $\sim 6$  pour tous les types réunis. Si les niveaux de significativité ne sont que de 1.5 à 2.0  $\sigma$  pour la sous-densité, ils sont  $\geq 2.5 \sigma$  pour la surdensité à  $0.41 < z < 0.46$ , que l’on considère l’ensemble des galaxies ou uniquement les galaxies de type précoce.

On peut aussi effectuer le calcul du terme de variance causé par le regroupement des galaxies en utilisant la fonction de corrélation obtenue *sans* la surdensité. En effet, cette structure introduit un excès de corrélation marqué dans  $\xi(s)$  aux échelles  $> 2$  Mpc, et entre 3 et 10 Mpc dans  $\omega(r_p)$ , la fonction de corrélation projetée; cette dernière se retrouve déformée par rapport à la loi de puissance qu’elle décrit habituellement à ces échelles (voir la Fig. 9 de l’article choisi n° 3, p. 71, de Lapparent & Slezak 2007). On peut en déduire que le relevé ESO-Sculpteur n’est pas un échantillon représentatif de la distribution des galaxies, et que cette structure accroît artificiellement le regroupement des galaxies à ces échelles. En faisant l’hypothèse que la fonction de corrélation spatiale mesurée dans le relevé ESO-Sculpteur sans la structure sur-dense à  $0.41 < z < 0.46$  est plus proche de la fonction de corrélation “universelle” des galaxies, alors on peut réévaluer les niveaux de significativité dans la Table 3.6. Les valeurs correspondantes apparaissent dans les trois dernières colonnes, avec l’indication “SSD” (pour “sans surdensité”).

Pour tester la méthode, on a effectué les mêmes calculs pour la région sur-dense à  $0.27 < z < 0.33$ , qui précède (en  $z$ ) la sous-densité à  $0.33 < z < 0.39$ , ainsi que pour deux régions plus petites à  $0.17 < z < 0.20$  et  $0.25 < z < 0.26$ , localisées sur des groupes de galaxies, et causant pour la première un pic très marqué dans les histogrammes de la Fig. 3.4 (y compris dans celui des galaxies naines). Les résultats figurent également dans la Table 3.6. Les densités relatives de ces régions sont typiquement de  $\simeq 1.5$ , et les niveaux de significativité sont  $\simeq 0.6 - 1.1 \sigma$  (selon la fonction de corrélation utilisée), sauf pour la région à  $0.17 < z < 0.20$  avec  $1.2 - 1.7 \sigma$  pour tous les types réunis, et  $2.1 - 2.7 \sigma$  pour les galaxies de type intermédiaire. Ces tests montrent que l’excès de variance dû à la fonction de corrélation suffit à décrire ces surdensités de tailles diverses.

Avec un niveau de significativité de 2.59  $\sigma$  ou 3.33  $\sigma$  (selon la fonction de corrélation utilisée), la région sur-dense à  $0.41 < z < 0.46$  est une fluctuation de densité assez rare, avec une probabilité de  $10^{-2}$

TAB. 3.1 – Contraste et niveau de significativité des fluctuations de densité dans le relevé ESO-Sculpteur

Intervalle Volume (Mpc <sup>3</sup> )	Type	$\frac{N_{obs}}{N_{pr}}$		$\frac{\Delta N}{N_{pr}}$	$\frac{2}{N_{pr}}$	$\frac{\int \xi}{V^2}$	$\sigma$	Sig.	$\frac{\int \xi}{V^2}$ SSD	$\sigma$ SSD	Sig. SSD
0.41-0.46	E+S0+Sa	81	= 2.33	1.33	0.0575	0.1552	0.46	2.88	0.0836	0.38	3.54
		$\overline{34.8}$									
170 Mpc	Sb+Sc+dE	49	= 1.98	0.98	0.0802	0.1552	0.49	2.04	0.0836	0.40	2.44
		$\overline{24.9}$									
35705	Sc+Sm+Im	38	= 1.83	0.83	0.0949	0.1552	0.50	1.69	0.0836	0.42	2.00
		$\overline{21.1}$									
	Tout	168	= 2.09	1.09	0.0247	0.1552	0.42	2.59			
		$\overline{80.8}$									
0.33-0.39	E+S0+Sa	29	= 0.58	-0.42	0.0398	0.1168	0.40	-1.09	0.0534	0.31	-1.41
		$\overline{50.2}$									
213 Mpc	Sb+Sc+dE	10	= 0.26	-0.74	0.0511	0.1168	0.41	-1.81	0.0534	0.32	-2.29
		$\overline{39.1}$									
31896	Sc+Sm+Im	21	= 0.57	-0.43	0.0543	0.1168	0.41	-1.06	0.0534	0.33	-1.34
		$\overline{36.8}$									
	Tout	60	= 0.47	-0.53	0.0159	0.1168	0.36	-1.46			
		$\overline{126.2}$									
0.27-0.33	E+S0+Sa	64	= 1.33	0.33	0.0415	0.1077	0.39	0.85	0.0455	0.29	1.11
		$\overline{48.2}$									
220 Mpc	Sb+Sc+dE	55	= 1.33	0.33	0.0484	0.1077	0.40	0.81	0.0455	0.31	1.04
		$\overline{41.3}$									
23657	Sc+Sm+Im	58	= 1.25	0.25	0.0433	0.1077	0.39	0.64	0.0455	0.30	0.83
		$\overline{46.2}$									
	Tout	177	= 1.30	0.30	0.0147	0.1077	0.35	0.85			
		$\overline{135.7}$									
0.25-0.26	E+S0+Sa	10	= 1.43	0.43	0.2855	0.3018	0.77	0.56	0.1677	0.67	0.63
		$\overline{7.0}$									
38 Mpc	Sb+Sc+dE	11	= 1.67	0.67	0.3041	0.3018	0.79	0.86	0.1677	0.69	0.98
		$\overline{6.6}$									
2985	Sc+Sm+Im	14	= 1.62	0.62	0.2316	0.3018	0.73	0.85	0.1677	0.63	0.98
		$\overline{8.6}$									
	Tout	35	= 1.58	0.58	0.0900	0.3018	0.63	0.92			
		$\overline{22.2}$									
0.17-0.20	E+S0+Sa	19	= 1.43	0.43	0.1499	0.1868	0.58	0.72	0.0709	0.47	0.90
		$\overline{13.3}$									
117 Mpc	Sb+Sc+dE	35	= 2.20	1.20	0.1254	0.1868	0.56	2.12	0.0709	0.44	2.68
		$\overline{16.0}$									
5076	Sc+Sm+Im	32	= 1.25	0.25	0.0780	0.1868	0.52	0.48	0.0709	0.39	0.64
		$\overline{25.7}$									
	Tout	86	= 1.57	0.57	0.0364	0.1868	0.47	1.19			
		$\overline{55.0}$									

Note:

- La 1<sup>ère</sup> colonne indique successivement l'intervalle en décalage spectral, l'intervalle en distance comobile, et le volume comobile de la région considérée.

à  $10^{-3}$ . Dans la région angulaire couverte par le relevé, la surdensité à  $0.41 < z < 0.46$  soutend  $\sim 5 \times 25$  Mpc<sup>2</sup> perpendiculairement à la ligne-de-visée, et 170 Mpc le long de la ligne de visée. Pour augmenter de façon marquée le niveau de significativité de cette structure, il faudrait qu'elle persiste au delà de l'angle solide du relevé ESO-Sculpteur avec le même contraste de densité. Par exemple, pour un angle solide de  $2 \times 2$  degré-carrés, c'est à dire le double de l'étendue en ascension droite du relevé et 15 fois l'étendue angulaire en déclinaison, on calcule un niveau de significativité de  $4.1 \sigma$ , et  $5.0 \sigma$  dans le cas "SSD", soit des probabilités de  $4 \cdot 10^{-5}$  et  $6 \cdot 10^{-7}$  resp. Une région de  $2 \times 2$  degré-carrés du ciel soutend une région de  $\sim 55 \times 55$  Mpc<sup>2</sup> à  $z \sim 0.43$ . Quant à la sous-densité à  $0.33 < z < 0.39$ , son niveau de significativité pour un relevé de  $2 \times 2$  degré-carrés deviendrait  $1.9 \sigma$ , et  $2.3 \sigma$  dans le cas "SSD", ce qui resterait marginal. Il sera possible d'examiner si la fluctuation de densité à  $0.41 < z < 0.46$  s'étend angulairement avec la photométrie optique et infrarouge qui sera obtenue avec le VST et VISTA dans cette région du ciel (relevés KIDS et VIKING). Il faudra alors utiliser les décalages vers le rouge photométriques, avec des contraintes sur la précision des observations que j'examine dans la Sect. 4.2.

Les fluctuations de densité dans la distribution des galaxies indiquent des fluctuations similaires dans la distribution de masse, à moins qu'il y ait des variations systématiques à grande échelle du biais. Par conséquent, la question de la taille et de la fréquence de telles structures se pose, car ces deux paramètres sont simultanément contraints dans un Univers provenant d'un champ Gaussien de perturbations initiales (Miller et al. 2004). Je montre dans la Sect. 3.7 ci-dessous que les grandes fluctuations de densité détectées dans le relevé ESO-Sculpteur se produisent très rarement dans les simulations à N-corps du "Millennium", en bon accord avec les niveaux de significativité dérivés ici au moyen de la fonction de corrélation.

Il faut souligner que les fluctuations discutées sont distinctes des oscillations baryoniques acoustiques, qui sont détectées à des échelles similaires, mais dont le contraste est beaucoup plus faible, environ 10% dans la fonction de corrélation à 2-points (Eisenstein et al. 2005). En examinant les diagrammes en cône de la Fig. 3.2, on remarque que la région sur-dense à  $0.41 < z < 0.46$  correspond à une collection de groupes de galaxies, et non pas à un superamas au sens standard du terme, c'est-à-dire constitué de plusieurs amas de galaxies, comme Corona Borealis par exemple (Postman et al. 1988).

Les grands volumes sondés par les grands relevés 2dF et SDSS à  $z \lesssim 0.2$  donnaient l'espoir que des volumes représentatifs de la distribution des galaxies et de la distribution de matière noire sous-jacente avaient été atteints. Pourtant, des fluctuations de densité à des échelles de plus de 100 Mpc furent détectées dans ces relevés, sous la forme d'une anisotropie entre les hémisphères galactiques nord et sud. Par un lissage de la distribution des galaxies du relevé SDSS sur des échelles de  $10 h^{-1}$  Mpc d'une part, et de  $0.8 h^{-1}$  Mpc d'autre part, Einasto et al. (2003) ont extrait les superamas, ainsi que les groupes et amas individuels contenus dans ces cartes, et mesurèrent leur luminosité intégrée; ils en déduisirent une anisotropie caractérisée par le fait que les superamas et amas sont 2 fois plus lumineux dans l'hémisphère nord galactique que dans l'hémisphère sud. Ces effets furent confirmés par le catalogue d'amas de galaxies du relevé 2dF (De Propris et al. 2002). Et dans le catalogue de "vides" du relevé 2dF, Hoyle & Vogeley (2004) constatèrent que les vides de l'hémisphère sud galactique présentent des densités plus faibles que dans l'hémisphère nord.

Des effets similaires furent détectés dans les comptages infrarouge dans la bande  $K$  (obtenus par cross-identification entre le relevé 2dF et le relevé 2MASS; Cole et al. 2001), sous la forme d'une déficience de 30% à  $z \leq 0.1$  dans l'hémisphère sud galactique par rapport à l'hémisphère nord (Frith et al. 2003). Cet effet fut confirmé par une réanalyse des comptages optiques dans le relevé 2dF, basée sur une photométrie améliorée permettant de vérifier l'échelle de magnitude. Ces nouvelles observations confirmèrent la déficience de 30% à  $z \leq 0.1$  dans l'hémisphère sud galactique du relevé 2dF, aux magnitudes plus brillantes que  $\sim 17$  (Buswell et al. 2004). Cette anisotropie avait été détectée auparavant dans le relevé en décalage vers le rouge "Durham-UK-Schmidt" (Ratcliffe et al. 1998). Cette sous-densité est visible dans la distribution en décalage vers le rouge de l'hémisphère sud galactique du relevé 2dF à  $z \leq 0.1$ , alors qu'à  $z \geq 0.1$ , la distribution en décalage vers le rouge atteint une densité proche de celle de l'hémisphère nord (Colless et al. 2003).

Buswell et al. (2004) avaient également détecté un "vide local" dans l'ensemble du catalogue de l'APM (Maddox et al. 1990c), avec une déficience de 25% aux magnitudes  $B \leq 17$ , suggérant une sous-densité s'étendant sur  $\sim 300 h^{-1}$  Mpc  $\times$   $300 h^{-1}$  Mpc sur le ciel, ainsi que sur  $\sim 300 h^{-1}$  Mpc le long de la ligne de visée. Cette sous-densité correspond par ailleurs à la sous-densité détectée dans le catalogue

d’amas de galaxies de l’hémiphère sud galactique du relevé 2dF (De Propris et al. 2002).

De très grandes structures sur des échelle de  $\sim 100 h^{-1}$  Mpc furent aussi détectées dans la distribution des radio-galaxies à  $z \simeq 0.27$  (Brand et al. 2003), et dans la distribution des quasars à  $z \sim 1.2$  (Clowes & Campusano 1991). Dans cette dernière analyse, la structure est associée à un excès d’absorbants MgII (Williger et al. 2002), ainsi qu’à un excès de galaxies évoluant de façon “passive” (Haines et al. 2004); une surdensité de taille similaire fut en outre détectée à  $z \sim 0.8$  par Haines et al. (2004).

### 3.7 Comparaison avec les simulations du Millennium

J’utilise les simulations à N-corps du “Millennium” (Springel et al. 2005) pour extraire des pinceaux étroits ayant la même géométrie que le relevé ESO-Sculpteur. La simulation adaptée pour cette analyse est celle qui décrit l’évolution de  $\sim 10^{10}$  particules de matière noire dans un cube de 500 Mpc de côté, dans laquelle les galaxies sont introduites au moyen de la prescription semi-analytique de De Lucia et al. (2006). J’utilise les “instantanés” (“snapshots” en anglais) n° 63 et 48, téléchargés à l’IAP par Gilles Missonnier, et correspondant aux décalages spectraux de 0 et 0.509 resp., qui encadrent les valeurs des décalages spectraux pour la majorité des galaxies du relevé ESO-Sculpteur. Pour chacun des deux instantanés, je tire profit des conditions aux limites périodiques de la simulation pour générer des pinceaux étroits atteignant une distance comobile de 2 000 Mpc ( $z = 0.55$  avec les paramètres cosmologiques de la simulation, proches de ceux utilisés dans ce mémoire, voir p. 16).

Je souligne que l’on pourrait rendre ces simulations plus réalistes en extrayant à chaque distance les galaxies de l’instantané au décalage vers le rouge correspondant à la distance. Cela nécessite un espace disque très important (pour télécharger les différents instantanés des simulations du “Millennium”) et un travail de programmation significatif qui n’est pas nécessaire pour les tests effectués ici (les conclusions seraient inchangées).

Pour générer les pinceaux, je choisis une face de référence, définissant un plan (X,Y), et je réplique quatre fois le cube de la simulation dans la direction perpendiculaire Z, puis l’ensemble des quatre cubes dans la direction Y. Je tire des pinceaux ayant une étendue angulaire correspondant à l’intervalle d’ascension droite et de déclinaison du relevé ESO-Sculpteur. Les pinceaux sont tirés à partir de points de référence distribués dans le plan (X,Y) avec un pas régulier de 40 Mpc en X et en Y; la ligne de visée de tous les pinceaux se trouve dans le plan (Y,Z) et fait un angle de  $14.6^\circ$  avec l’axe Z, ce qui décale de  $\sim 130$  Mpc en Y le croisement de la face  $N + 1$  par rapport au croisement de la face  $N$ . Cet angle est suffisamment grand pour s’assurer qu’un même pinceau échantillonne des grandes structures distinctes à chaque fois qu’il traverse une nouvelle réplification du cube de la simulation, tout en évitant de répliquer une portion d’un autre pinceau.

Je génère ainsi  $11 \times 11 = 121$  pinceaux à partir d’une face. En procédant de la même façon à partir des faces (X,Z) et (Y,Z) du cube de la simulation, j’obtiens un total de  $3 \times 121 = 363$  pinceaux. J’applique la procédure aux 2 instantanés à  $z = 0$  et à  $z = 0.509$ , et j’estime les magnitudes apparentes à partir des magnitudes absolues fournies par les simulations, en ajoutant des corrections- $k$  dans la bande  $R$  définies linéairement par  $k_{cor} = [0.33(B - R) + 0.4] * z/0.5$ : cela permet de reproduire approximativement les corrections- $k$  calculées par Coleman et al. (1980) pour les différents types de galaxies, et qui sont en bon accord avec les correction- $k$  du relevé ESO-Sculpteur à  $z \lesssim 0.4$  (voir la Fig. 9 de l’article choisi n° 6, p. 193, de Lapparent et al. 2004). Ensuite, je sélectionne uniquement les galaxies des pinceaux ayant une magnitude  $R \leq 20.5$ . Les données ESO-Sculpteur de comparaison utilisées vont au delà de  $R = 20.5$ , avec une limite à  $R_c \leq 21.5$ , et une complétude décroissante entre ces deux valeurs. On pourrait simuler la même fonction d’incomplétude en magnitude apparente dans les pinceaux extraits du “Millennium”, mais la différence dans le contraste des grandes structures interceptées par les pinceaux serait négligeable.

Pour comparer les données avec les simulations, je convertis les décalages vers le rouge en distance comobile, et j’échantillonne la ligne de visée du relevé ESO-Sculpteur avec des pas de 100 Mpc à partir de l’origine, puis avec le même pas, mais avec un décalage d’un demi-pas de l’origine (50 Mpc). Ce décalage des histogrammes permet de s’assurer qu’un pic ou creux de densité est bien réel, et non pas une fluctuation statistique résultant de la position de la grille d’échantillonnage. Puis je divise chaque

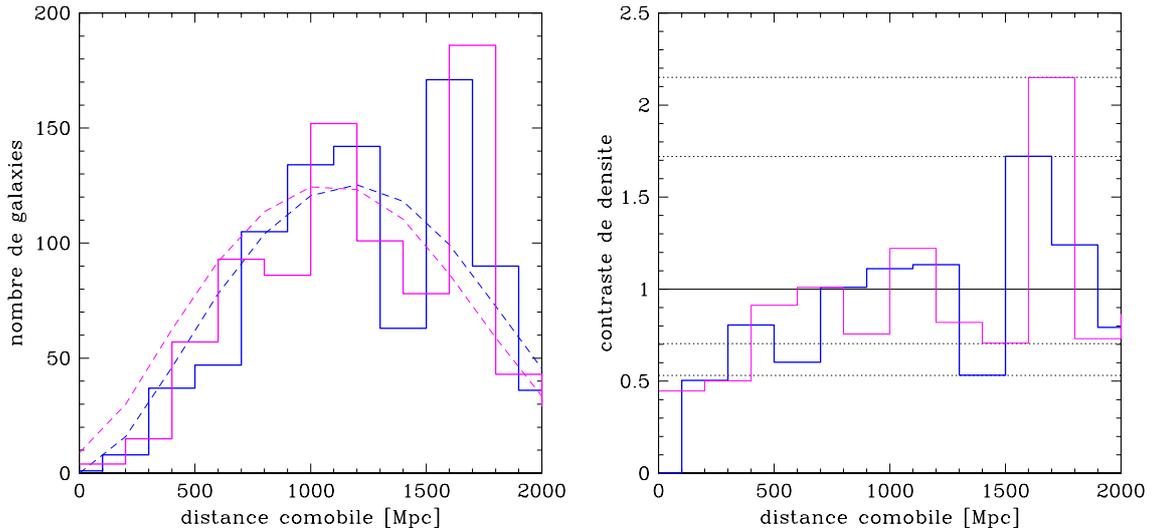


FIG. 3.5 – A gauche, histogrammes du relevé ESO-Sculpteur à  $R_c \leq 21.5$  avec un pas de 100 Mpc et décalés de 50 Mpc, et en ligne pointillée, les fonctions de sélection globales correspondantes. A droite, les distributions de contraste de densité obtenues par le rapport entre les histogrammes et les fonctions de sélection correspondantes. Les niveaux de contraste extrêmes correspondant à la surdensité à  $0.41 < z < 0.46$ , et à la sous-densité à  $0.33 < z < 0.39$  sont indiqués par des lignes horizontales pointillées.

histogramme des données par la fonction de sélection résultant des fonctions de luminosité des trois populations de galaxies répertoriées dans la Fig. 5.1.

Comme on ne peut séparer dans les décalages vers le rouge des galaxies observées les composantes spatiales et des composantes radiales des vitesses propres, j’ajoute aux distances des galaxies dans les pincesaux simulés les composantes radiales des vitesses propres, afin d’inclure, comme dans les données, les effets de dispersion des vitesses le long de la ligne de visée.

Le panneau de gauche de la Fig. 3.5 montre les histogrammes et fonctions de sélection correspondantes pour le relevé ESO-Sculpteur, et le panneau de droite, les distributions de contraste de densité obtenues en calculant les rapports de densité. On constate que la particularité de la surdensité à  $0.41 < z < 0.46$  est de produire deux pics se recouvrant dans les deux histogrammes considérés, l’un avec un contraste de 1.72 et l’autre avec un contraste de 2.15 ; en outre, ces pics sont précédés par un creux de contraste  $1/1.88$  et  $1/1.42$  selon l’histogramme considéré, et correspondant à la sous-densité à  $0.33 < z < 0.39$ , examinée également dans la Sect. 3.6. On remarque une apparente sous-estimation de la distribution observée par les fonctions de sélection du relevé ESO-Sculpteur aux distances  $< 500$  Mpc, résultat du faible nombre de galaxies observées et des incertitudes sur le comportement des fonctions de luminosité à faible magnitude (voir Sect. 5.3).

Pour les simulations, la fonction de sélection est obtenue en effectuant la moyenne des distributions de galaxies dans les 363 pincesaux. L’absence de fluctuations marquées dans les histogrammes résultants, montrés dans le panneau de gauche de la Fig. 3.6, confirme que le cube de la simulation est bien un volume “cosmologique”, compte-tenu du spectre de puissance utilisé. On remarque que la densité de galaxies décroît entre les instantanés à  $z = 0.509$  et  $z = 0$ , à cause des fusions de galaxies. Cependant, le regroupement des galaxies augmente entre  $z = 0.509$  et  $z = 0$  (voir ci-dessous). En outre, le pic de la fonction de sélection se trouve à une distance comobile de  $\sim 650$  Mpc dans les simulations, alors qu’il est à  $\sim 1200$  Mpc dans le relevé ESO-Sculpteur. Cela résulte de la fonction de luminosité utilisée dans la prescription semi-analytique de De Lucia et al. (2006), qui est différente de celle mesurée dans le relevé ESO-Sculpteur. D’où l’importance d’utiliser les fonctions de sélection pour calculer le contraste de densité des différentes distributions de galaxies. Dans le panneau de droite de la Fig. 3.6, je montre la distribution de contraste pour un pincesau ressemblant au relevé ESO-Sculpteur par la présence d’une surdensité et d’une sous-densité adjacentes entre 1 000 et 2 000 Mpc, mais inversées en distance (voir plus bas).

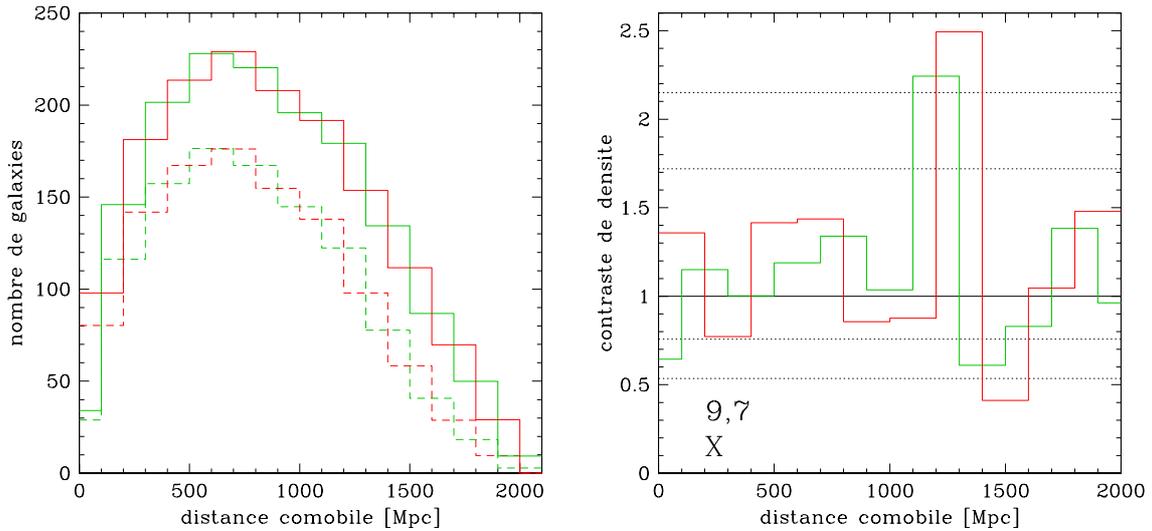


FIG. 3.6 – A gauche, histogrammes de la moyenne des 363 pinceaux de la simulation “Millennium” à  $R_c \leq 20.5$  avec un pas de 100 Mpc et décalés de 50 Mpc, pour les instantanés à  $z = 0.509$  (ligne continue) et à  $z = 0$  (ligne pointillée), produisant la fonction de sélection des pinceaux. A droite, les distributions de contraste de densité pour le pinceau [9,7,X] (voir Fig. 3.7) dans l’instantané à  $z = 0.509$ .

Je recherche ensuite dans les distributions de contraste de densité des 363 pinceaux, celles qui présentent un contraste d’au moins 2.15 et 1.72 dans chacun des deux histogrammes décalés avec des intervalles en distance non disjoints. On limite cette recherche à une distance comobile de l’origine entre 1 000 et 2 000 Mpc, afin de sonder la moitié la plus distante des pinceaux ; cela correspondant à l’intervalle de décalage spectral  $0.26 < z < 0.55$ , qui contient la surdensité ; à plus faible distance, on échantillonne une étendue transverse plus petite qu’à  $z > 0.26$ , et la probabilité de trouver des fluctuations de densité d’un contraste donné est par conséquent élevée.

En utilisant l’instantané à  $z = 0.509$ , je trouve 13 pinceaux avec des contrastes de densité supérieurs à 2.15 et 1.72, et 24 dans l’instantané à  $z = 0$ , soit des probabilités de 3.6% et 6.6% resp. La différence obtenue entre les deux instantanés résulte du fait qu’au cours du temps, et donc quand  $z$  décroît de 0.509 à 0, le regroupement des galaxies augmente. Le décalage vers le rouge  $z = 0.509$  correspondant à une distance comobile de 1873 Mpc, cet instantané est ainsi plus adapté pour rechercher les fluctuations de densité dans l’intervalle de distance comobile 1 000 - 2 000 Mpc. Si je prends en compte l’incertitude de Poisson de 13% sur les densités de seuil, et que je diminue d’autant les seuils, soit à 1.9 et 1.5, je trouve 22 pinceaux dans l’instantané à  $z = 0.509$ , soit une probabilité de 6.1% (et 53 pinceaux à  $z = 0$ , soit 14.6%). Ces diverses probabilités correspondent à un niveau de significativité à  $\sim 2 - 2.5$ , en bon accord avec les niveaux calculés au moyen de la fonction de corrélation dans la Sect. 3.6.

Je montre dans la Fig. 3.7 les distributions de contraste de densité dans les 13 et 24 pinceaux contenant au moins une surdensité entre 1 000 et 2 000 Mpc avec un contraste supérieur ou égal à la surdensité à  $0.41 < z < 0.46$  du relevé ESO-Sculpteur ; le panneau supérieur correspond à l’instantané  $z = 0$ , et le panneau inférieur, à l’instantané  $z = 0.509$ . On peut dans un premier temps observer directement l’augmentation du contraste entre  $z = 0.509$  et  $z = 0$  en comparant les distributions pour les pinceaux communs ([4,5,X], [10,7,Y], et [10,7,Z] par exemple).

On remarque ensuite, dans la Fig. 3.7, qu’un seul pinceau dans l’instantané à  $z = 0.509$  présente une sous-densité directement adjacente dans l’intervalle 1 000-2 000 Mpc (et pour les deux échantillonnages d’histogramme) et bornée de l’autre côté par une région de contraste de densité  $\sim 1$  (ce qui permet de délimiter la sous-densité de part et d’autre) : il s’agit du pinceau [9,7,X], qui est montré de plus près dans le panneau de droite de la Fig. 3.6. Dans ce pinceau, la surdensité se positionne cependant sur la ligne-de-visée *avant* la surdensité, contrairement aux données. Pour les autres pinceaux, la surdensité est soit très étendue spatialement (sur plus de 300 Mpc dans les pinceaux [4,5,X], [10,7,Y] et [7,3,Z], par exemple),

soit elle est adjacente à des régions de contraste proche de 1 (pincesaux [0,2,X], [1,3,Z], et [10,7,Z] par exemple), soit la sous-densité n'est pas bornée du côté opposé à la surdensité, sauf proche de  $z \simeq 0$  (pincesau [2,6,Y] par exemple). Dans l'instantané à  $z = 0$ , on ne trouve pas de pincesau supplémentaire qui reproduise la triple alternance sous-densité/surdensité avec les seuils requis.

Les Fig. 3.8 et 3.9 montrent pour les instantanés à  $z = 0.509$  et  $z = 0$  resp., les diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur et les différents pincesaux de la Fig. 3.7, qui contiennent une surdensité entre 1 000 et 2 000 Mpc; dans chaque pincesau, celle-ci est indiquée par un crochet définissant les limites correspondant aux histogrammes de la Fig. 3.7. Cette figure illustre la diversité des pincesaux obtenus, et atteste que la méthode utilisée permet de produire des échantillons dans lesquelles les grandes structures interceptées sont distinctes. On peut voir également que les surdensités détectées correspondent parfois à plusieurs groupes, feuilletts ou amas séparés par des vides, comme c'est le cas par exemple pour les pincesaux [8,1,X], [2,5,Z], [10,1,Z], et [9,7,X] (ce dernier est celui qui présente l'alternance surdensité/sous-densité similaire en contraste aux observations). Dans d'autres pincesaux, la surdensité est répartie sur tout l'intervalle, ressemblant plus aux données (pincesaux [2,6,Y], [10,7,Y], et [7,2,Z] par exemple).

En conclusion, la surdensité détectée dans l'intervalle  $0.41 < z < 0.46$  du relevé ESO-Sculpteur est rare (avec une probabilité de  $\sim 4\%$ ), et sa juxtaposition avec la sous-densité à  $0.33 < z < 0.39$  en fait un système encore plus rare, que l'on ne trouve dans 1 ou 0 pincesau (si l'on tolère ou pas l'inversion le long de la ligne de visée). Cela donne une probabilité  $< 1/363$ , c'est-à-dire  $< 0.3\%$ , soit  $2.75 \sigma$ , ce qui est en bon accord avec les calculs utilisant la fonction de corrélation dans la Sect. 3.6. Le volume de la simulation étant au départ un cube de 500 Mpc de côté, on peut en déduire que ce volume est trop faible pour y rencontrer les grandes fluctuations de densité détectées dans le relevé ESO-Sculpteur. Des simulations dans un cube plus étendu seraient ainsi nécessaires pour évaluer la probabilité d'occurrence de ces structures.

Pour information, je montre dans la Fig. 3.10 un diagramme en cône pour une tranche de déclinaison aussi fine que le relevé ESO-Sculpteur, mais s'étendant sur  $90^\circ$  en ascension droite. L'instantané utilisé est celui à  $z = 0.509$ , et la tranche contient 190 277 galaxies avec une magnitude apparente limitée par  $R < 20.5$ . Comme pour les pincesaux (mais l'effet n'est pas visible à l'oeil pour les petits angles), les diagrammes en cône présentés ici prennent en compte la décroissance supplémentaire en  $1/1+z$  par rapport au calcul Euclidien de l'étendue transverse interceptée par un angle fixe sur le ciel. La Fig. 3.11 permet de faire la comparaison avec l'instantané à  $z = 0$ , et de voir l'évolution des grandes structures dans cet intervalle de décalage vers le rouge, sous la forme d'un accroissement du regroupement des galaxies, et d'un évidement des régions sous-denses. Ce dernier diagramme ne contient que 129 056 galaxies, car le nombre total de galaxies décroît avec le temps à cause des fusions de galaxies. Enfin, la Fig. 3.12 montre, la distribution en distance comobile des objets dans l'instantané à  $z = 0$ , sans ajouter les composantes radiales des vitesses propres des galaxies. Par comparaison avec la Fig. 3.11, on peut voir que les diagrammes en décalage vers le rouge conduisent à un renforcement du contraste des structures à cause de la chute des galaxies vers les régions de haute densité que sont les amas et les feuilletts de galaxies. On peut cependant voir en "diaphragmant" les yeux que les fluctuations de densité aux échelles de  $\sim 100$  Mpc sont invariantes d'une carte à l'autre.

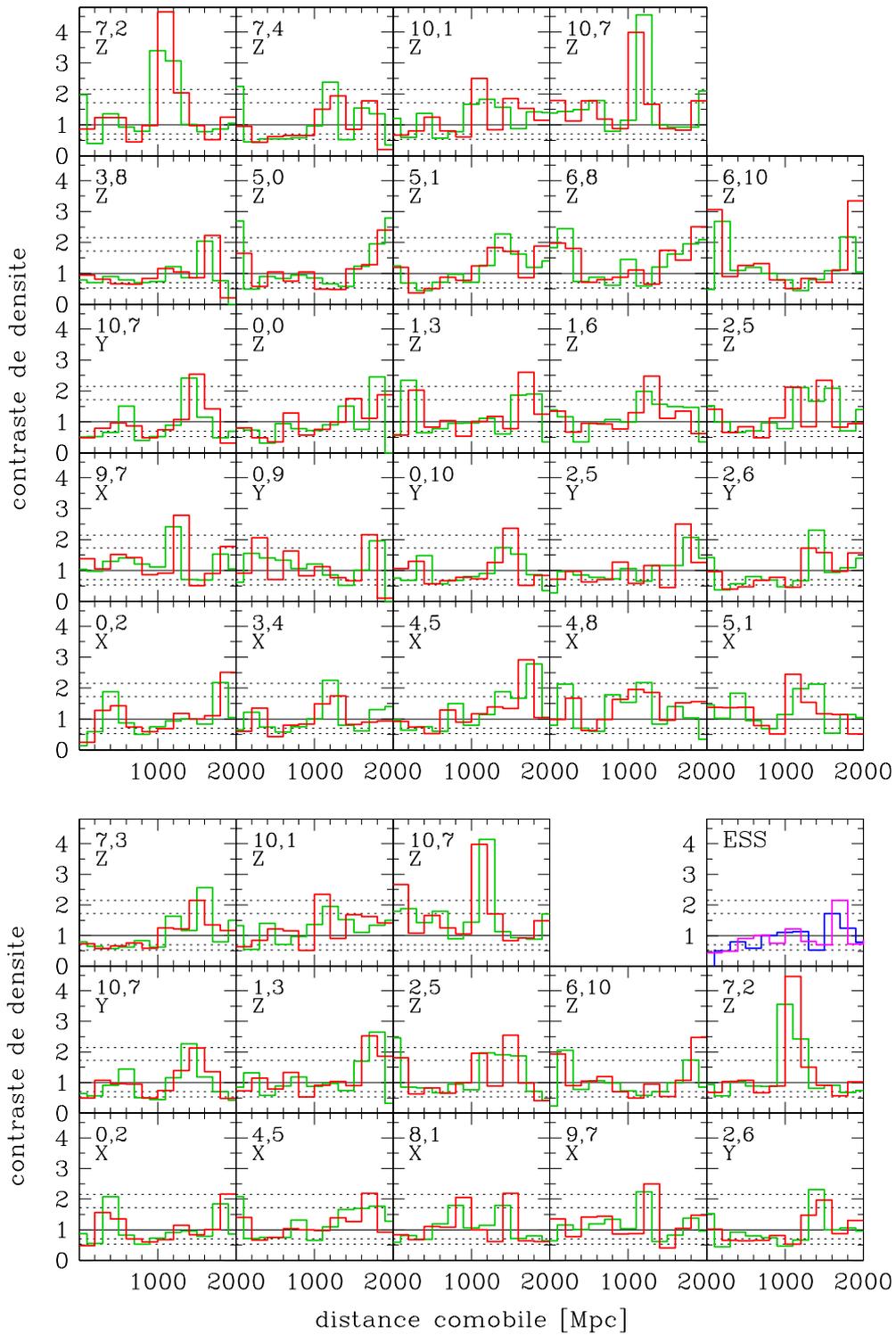


FIG. 3.7 – Distribution des contrastes de densité pour les pincesaux de la simulation “Millennium” à  $R_c \leq 20.5$  avec un pas de 100 Mpc, présentant une surdensité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à  $0.41 < z < 0.46$  dans le relevé ESO-Sculpteur (et dans les histogrammes décalés). Les pincesaux sélectionnés sont extraits des instantanés à  $z = 0$  (panneau du haut) et à  $z = 0.509$  (panneau du bas; voir Fig. 3.8 pour la nomenclature des pincesaux). Pour comparaison, le relevé ESO-Sculpteur est inséré dans le panneau du bas (“ESS”).

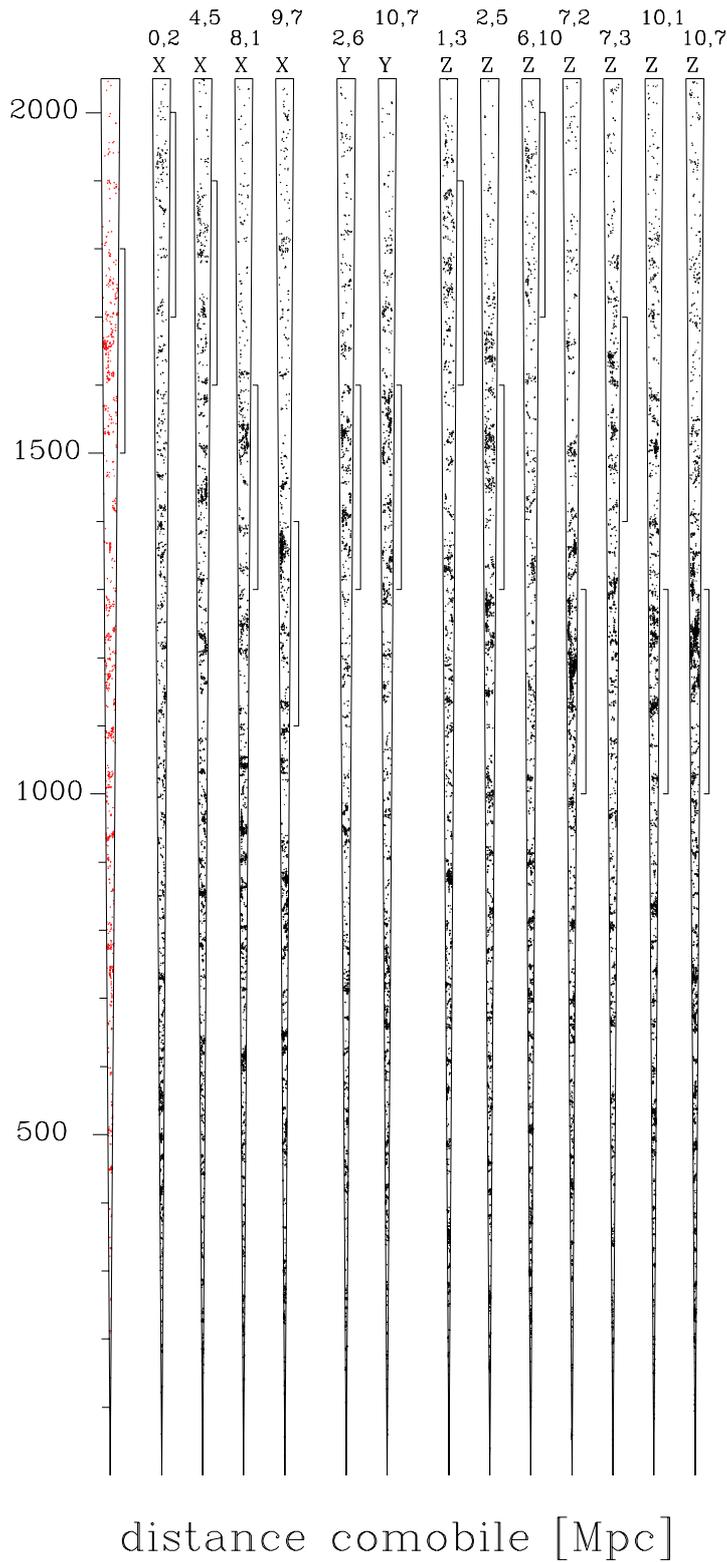


FIG. 3.8 – Diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur (à gauche et en rouge), et pour les pinceaux de la simulation “Millennium” à  $R_c \leq 20.5$  dans l’instantané à  $z = 0.509$  (en noir), qui présentent une surdensité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à  $0.41 < z < 0.46$  dans le relevé ESO-Sculpteur (voir la Fig. 3.7). Les chiffres et lettres indiquent les indices du pinceau sur la face d’origine, et la direction perpendiculaire à celle-ci resp.

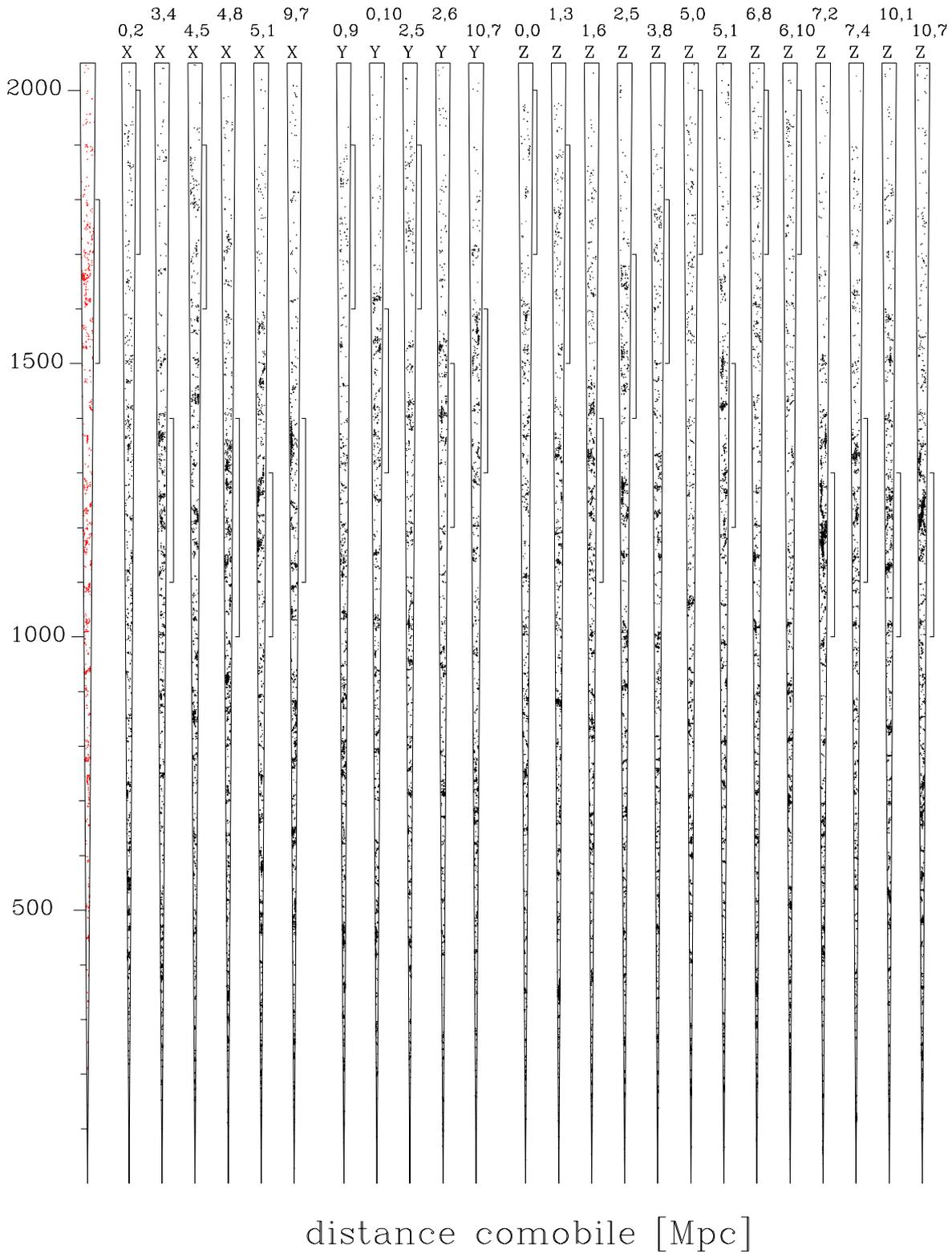


FIG. 3.9 – Diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur (à gauche et en rouge), et pour les pincesaux de la simulation “Millennium” à  $R_c \leq 20.5$  dans l’instantané à  $z = 0$  (en noir), qui présentent une surdensité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à  $0.41 < z < 0.46$  dans le relevé ESO-Sculpteur (voir la Fig. 3.7). Les chiffres et lettres indiquent les indices du pinceau sur la face d’origine, et la direction perpendiculaire à celle-ci resp.

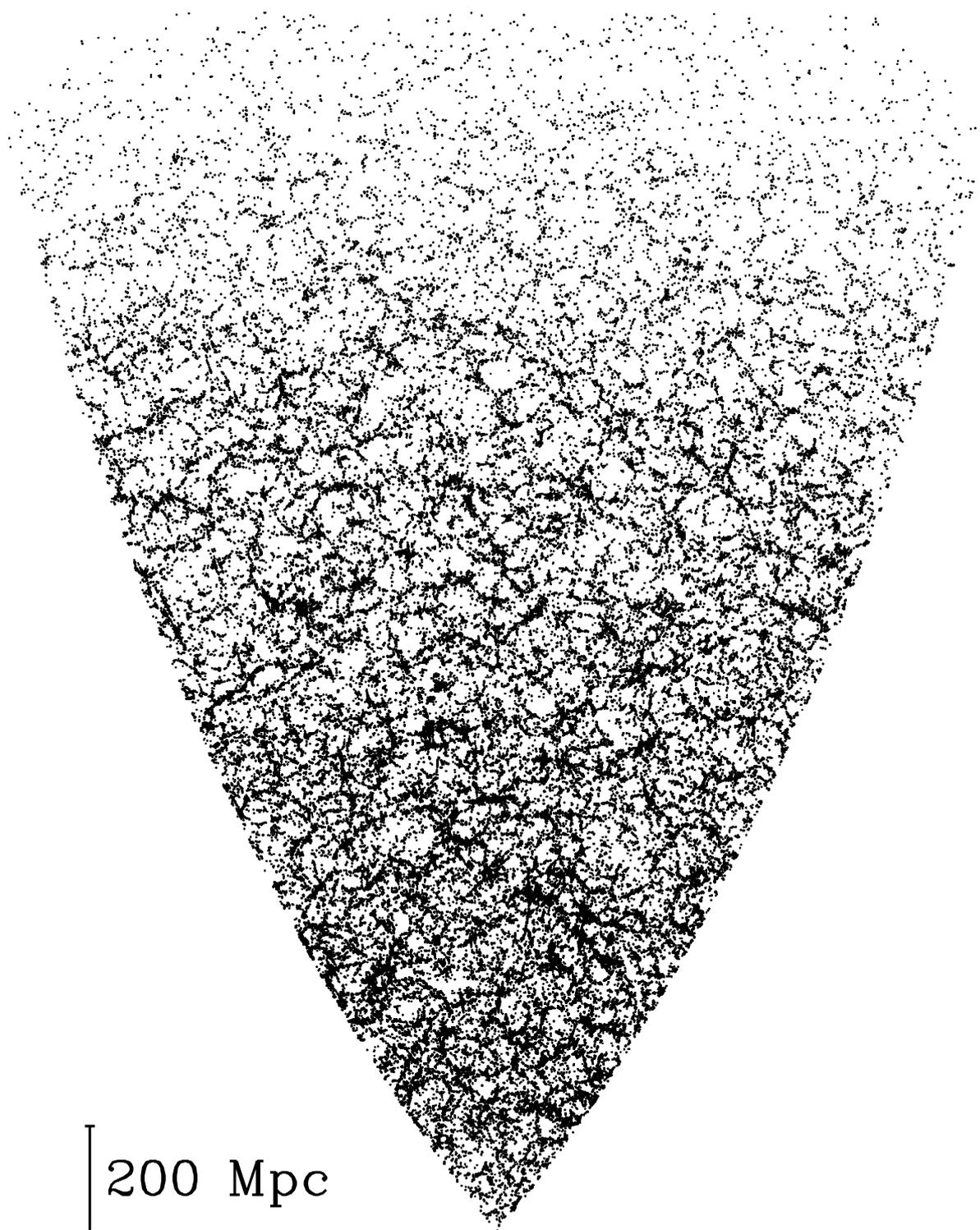


FIG. 3.10 – Diagramme en cône pour une tranche en déclinaison de même épaisseur que le relevé ESO-Sculpteur, centrée à une déclinaison de  $25^\circ$ , et s'étendant sur  $90^\circ$  en ascension droite. L'instantané à  $z = 0.509$  est utilisé à toutes les distances, la distance maximale est de 2 460 Mpc, et les galaxies sont sélectionnées par une limite de 20.5 en magnitude apparente dans le filtre  $R_c$ .



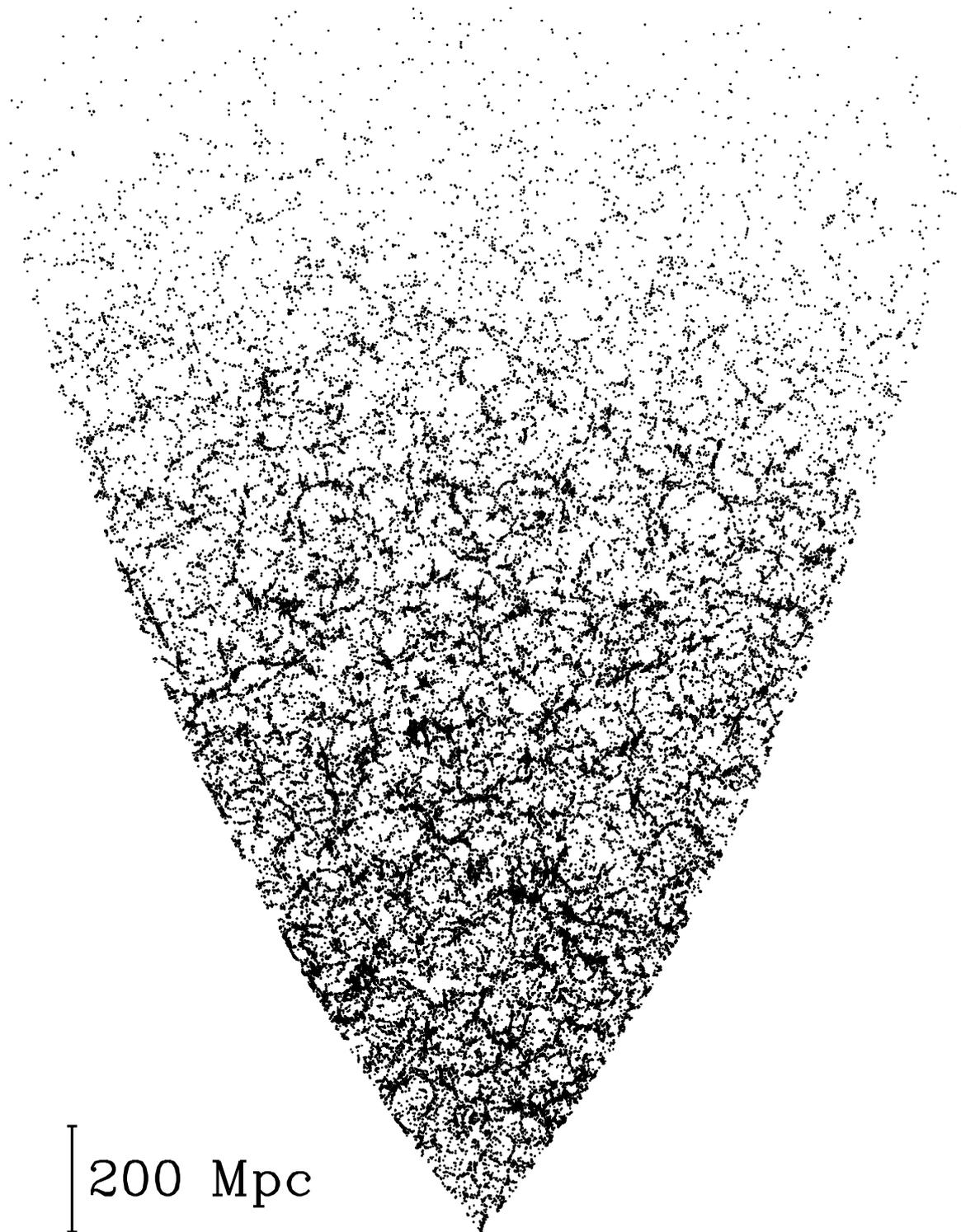


FIG. 3.11 – Même chose que dans la Fig. 3.10, mais pour l'instantané à  $z = 0$  (et incluant les composantes radiales des vitesses propres des galaxies).

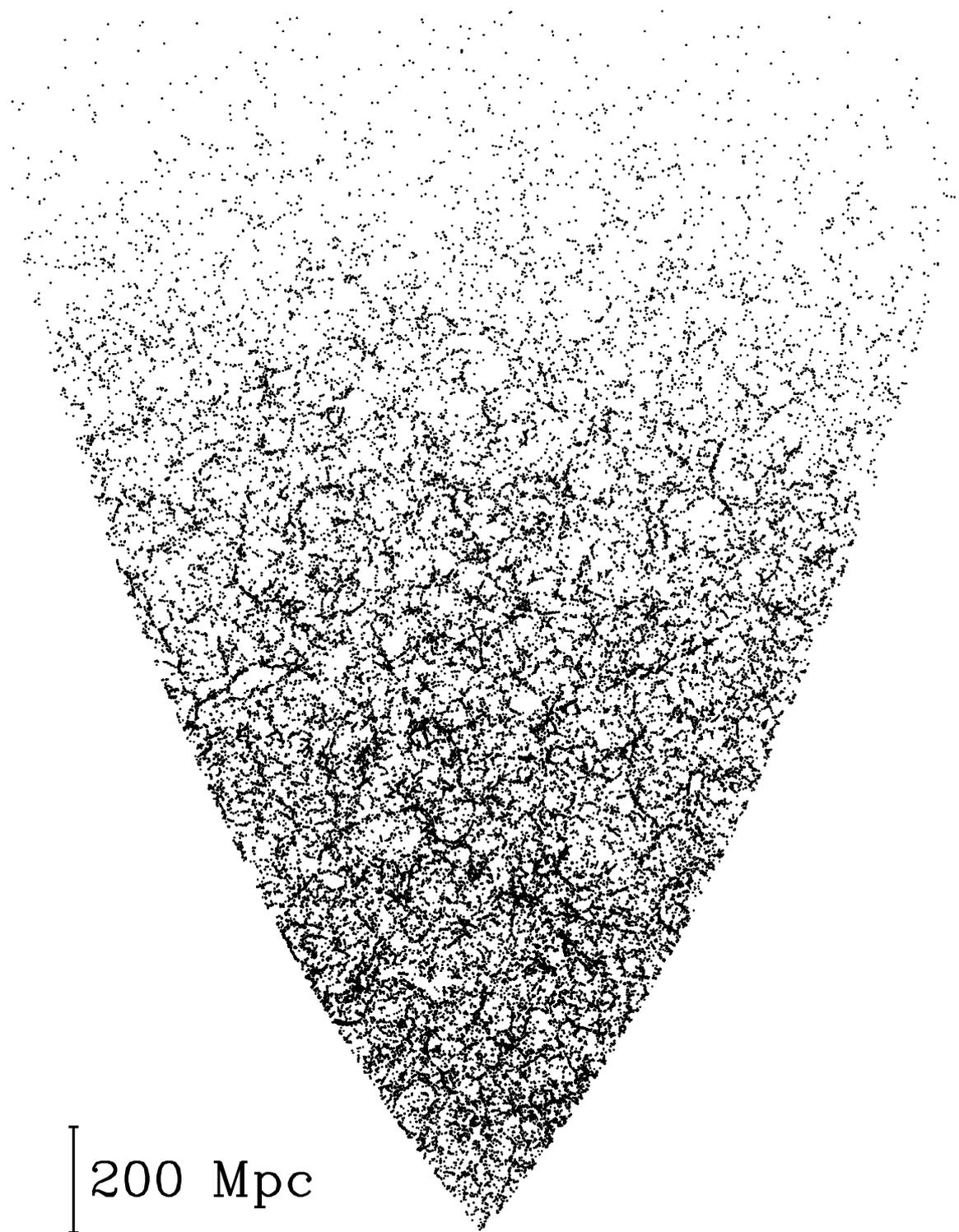


FIG. 3.12 – Même chose que dans la Fig. 3.11 pour l'instantané à  $z = 0$ , mais en ignorant les composantes radiales des vitesses propres des galaxies.