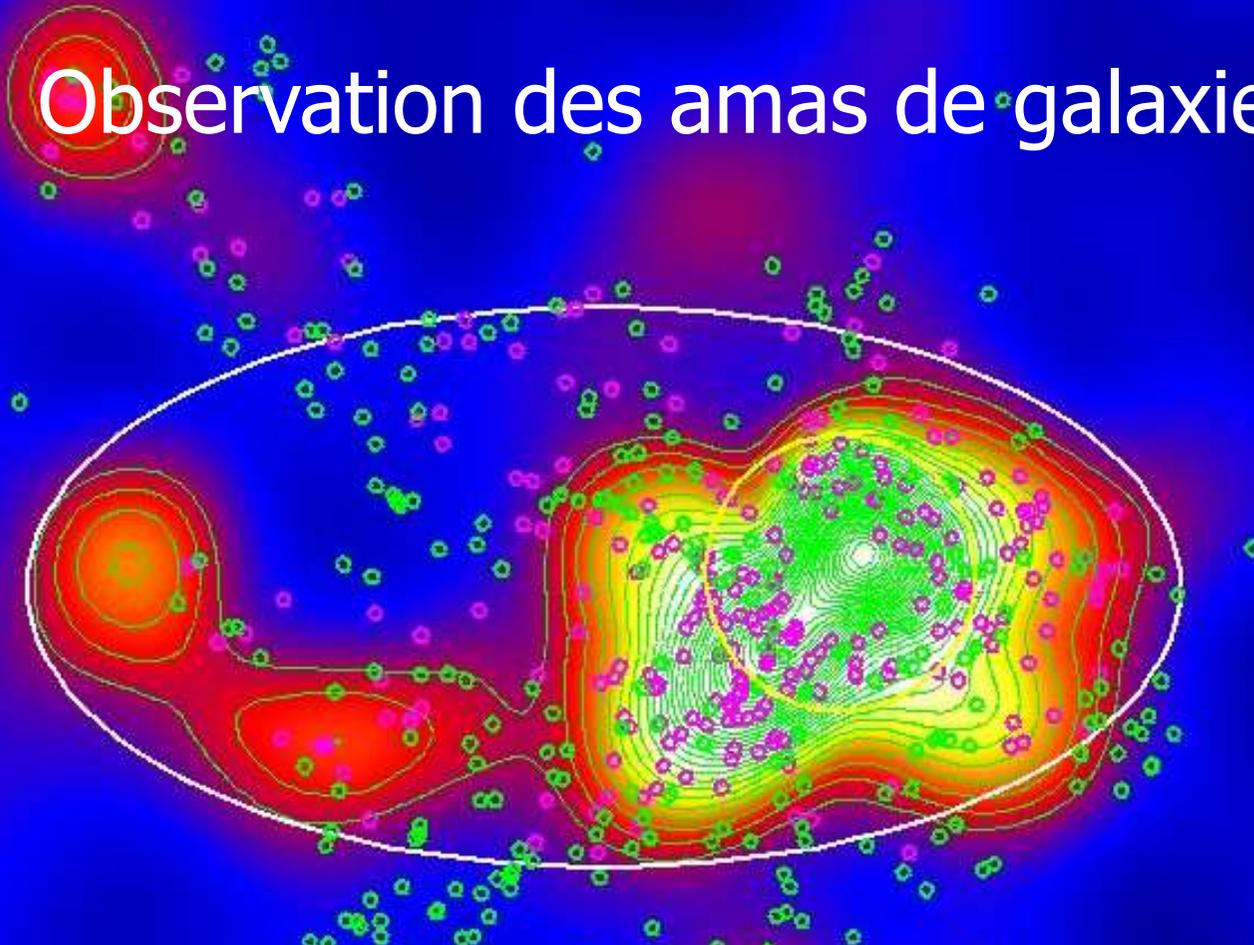


Observation des amas de galaxies



Florence DURRET

Institut d'Astrophysique de Paris et
Sorbonne Université



Institut d'astrophysique de Paris



COLLABORATEURS



Ana Acebrón
Master 2 (2014)



Halim Ashkar,
Master 1 (2017)



Loïc Guennou
PhD Marseille 2009-2012



Nicolas Martinet
PhD 2012-2015



Amaël Ellien
PhD 2017-2020



Yoann Tarricq
Master 2 (2017)



Isabel Márquez
(IAA, Granada, Spain)

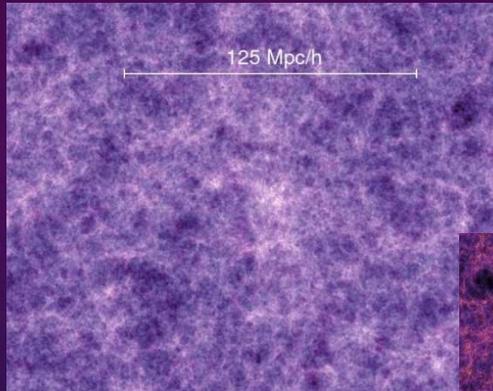


Christophe Adami
(LAM, Marseille, France)

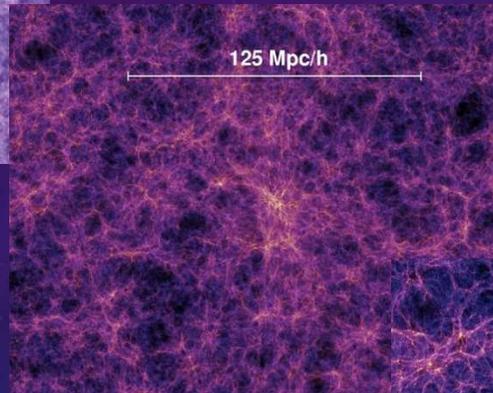


Florian Sarron
PhD 2015-2018

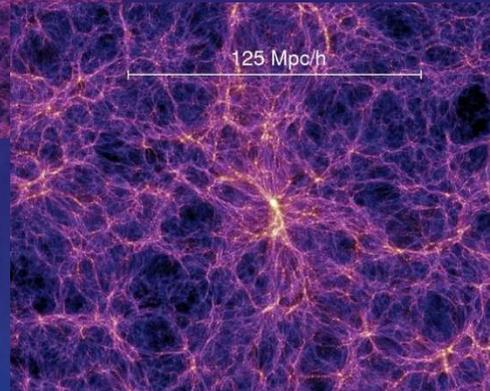
COMMENT LES AMAS SE FORMENT-ILS ?



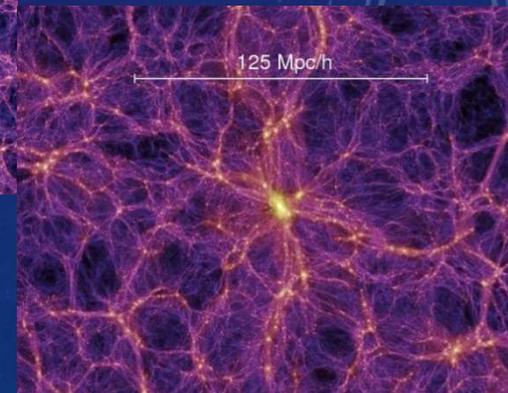
$z=18.3$ (t = 0.21 Gyr)



$z=5.7$ (t = 1.0 Gyr)



$z=1.4$ (t = 4.7 Gyr)



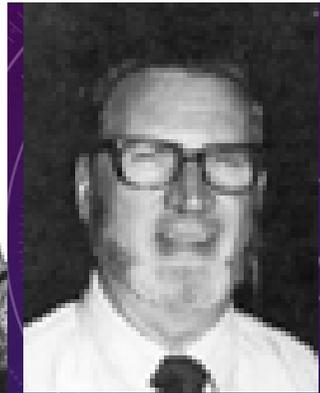
$z=0$ (t = 13.6 Gyr)

Simulation Millennium
Springel+05

LES AMAS DE GALAXIES



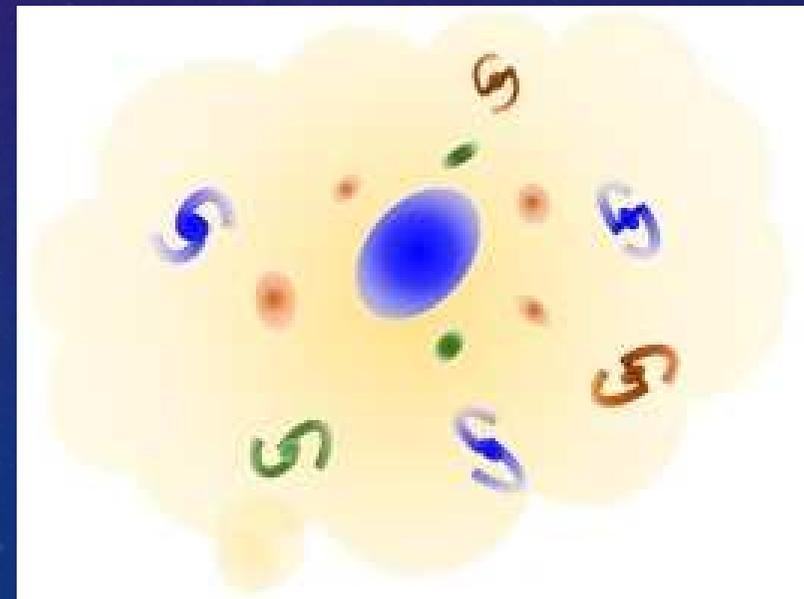
Fritz Zwicky
(1898-1974)



George Abell
(1927-1983)

Les amas de galaxies comprennent :

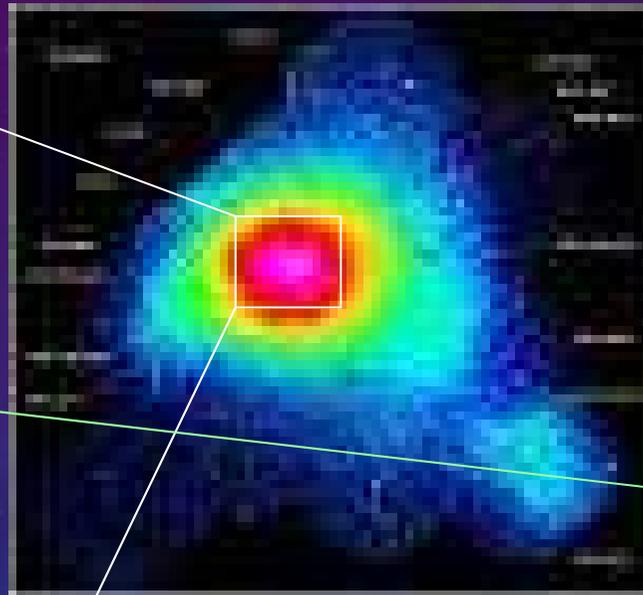
- des galaxies (quelques centaines à plusieurs milliers) visibles surtout en lumière visible
- du gaz très chaud émettant en rayons X
- de la matière noire



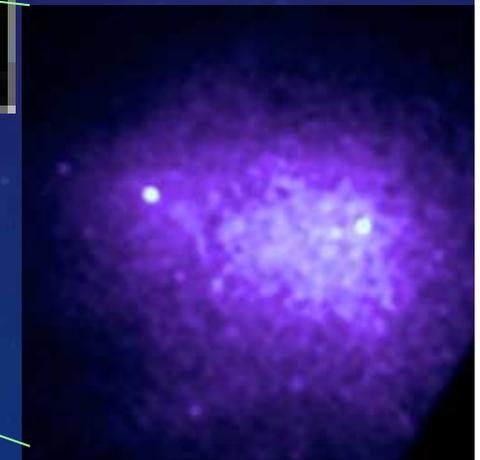
UN AMAS CÉLÈBRE : COMA (LA CHEVELURE DE BÉRÉNICE)



Coma en lumière visible



Satellite
XMM-Newton



Satellite
Chandra

Coma en rayons X

OBSERVER LES AMAS

- Observations en lumière visible ou infrarouge proche : au sol ou dans l'espace
- Observations en radio : au sol
- Observations en rayons X, UV : dans l'espace

LA NECESSITE DE GRANDS RELEVES D'AMAS : POUVOIR FAIRE DES ETUDES STATISTIQUES

- Le relevé CFHTLS (Canada France Hawaii Telescope Legacy Survey)
- La région « Stripe 82 » du Sloan Digital Sky Survey (SDSS)
- Le relevé DAFT/FADA (Dark energy American-French Team)
- Le relevé CLASH (Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble)

PLAN

I. Les galaxies dans les amas

- Ségrégation morphologique
- Galaxies les plus brillantes d'amas
- Fonctions de luminosité

II. Les fusions d'amas

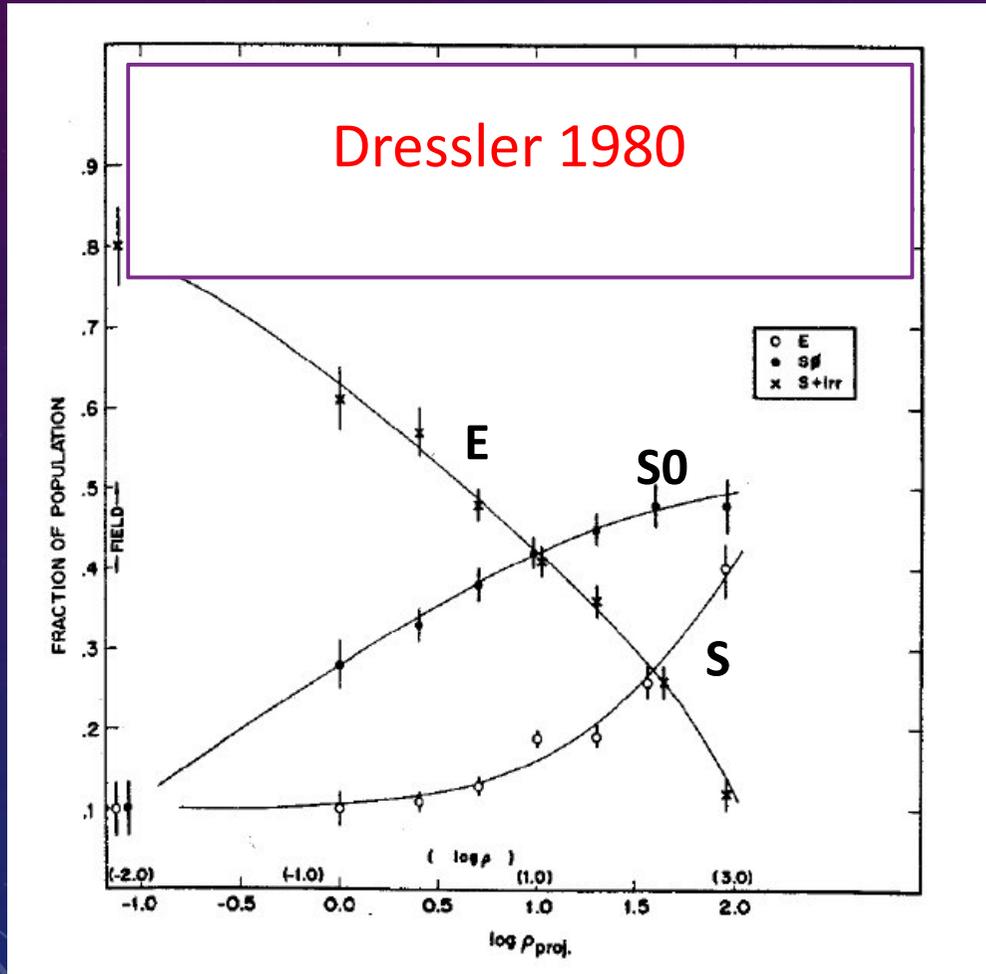
- Influence sur les galaxies
- Influence sur le gaz émetteur X

III. Les amas dans la toile cosmique

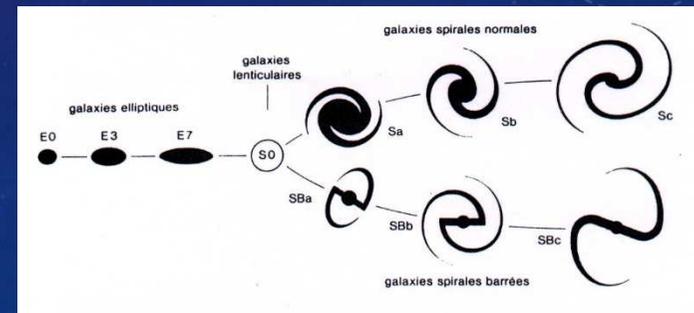
- Détection des filaments autour des amas
- Distribution/orientation des galaxies le long des filaments

I. LES GALAXIES DANS LES AMAS

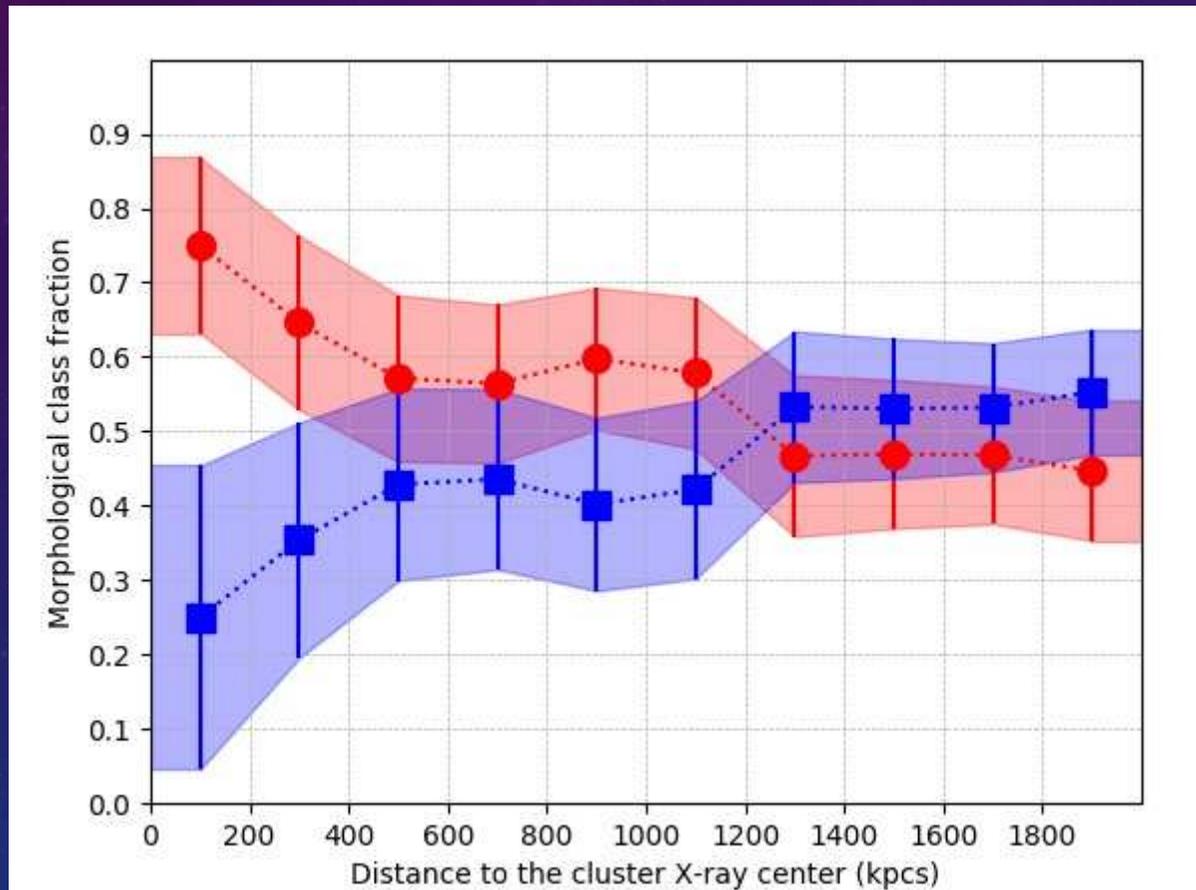
I. 1. SÉGRÉGATION MORPHOLOGIQUE



Dans les amas, on observe plus de galaxies elliptiques (E) dans les régions centrales, et plus de lenticulaires (S0) et de spirales (S) dans les zones extérieures



SEGREGATION MORPHOLOGIQUE DES GALAXIES DANS LES AMAS DE LA ZONE « STRIPE 82 » DU SDSS



INTERPRETATION

- Les simulations numériques montrent que les galaxies elliptiques sont formées par la fusion de galaxies (elliptiques ou spirales), et les fusions de galaxies sont plus fréquentes dans les régions centrales des amas
- Dans les zones extérieures on voit davantage de spirales où la formation d'étoiles est intense : ces galaxies sont des galaxies de champ, majoritairement des spirales, qui « tombent » sur l'amas

LA FORMATION D'ÉTOILES DANS LES GALAXIES D'AMAS

- Des simulations numériques (Bekki) montrent que le gaz des galaxies accrétées par les amas peut être comprimé et former des étoiles
- Mais le gaz des galaxies peut aussi être arraché par leur mouvement dans le gaz inter-amas, ce qui va au contraire diminuer le taux de formation d'étoiles (« ram pressure stripping »)

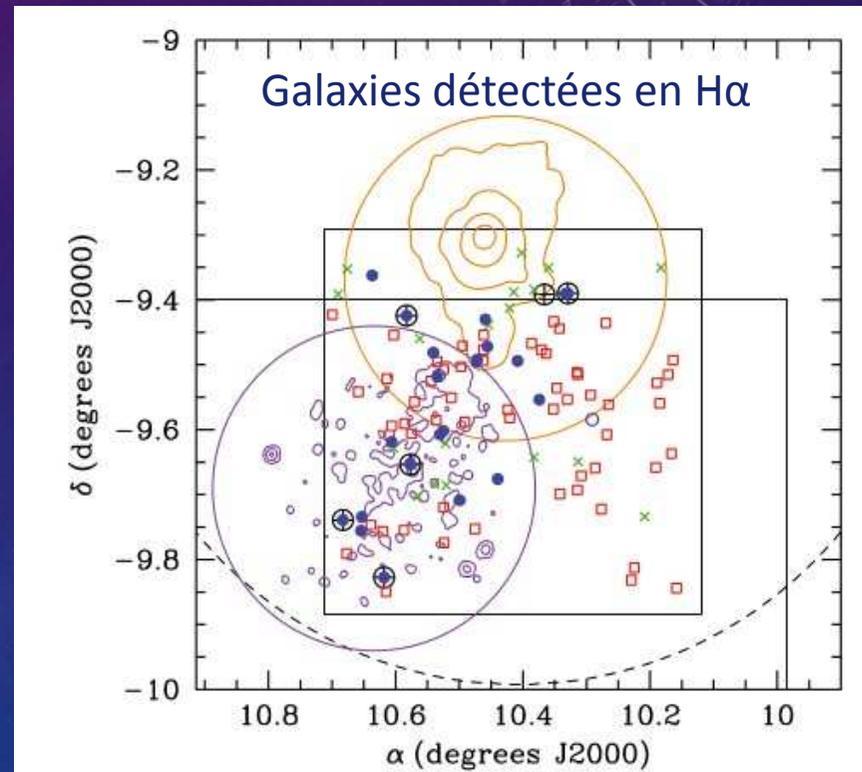
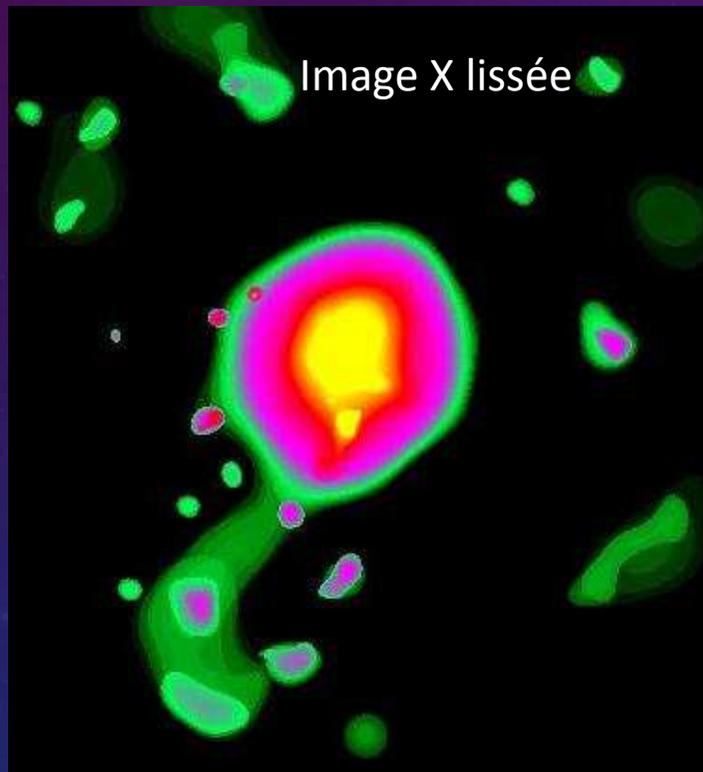
Autre cause de diminution de la formation d'étoiles dans les galaxies d'amas :

« Harcèlement (harrassment) » : les fusions et interactions de marée successives des galaxies entre elles arrachent du gaz aux galaxies



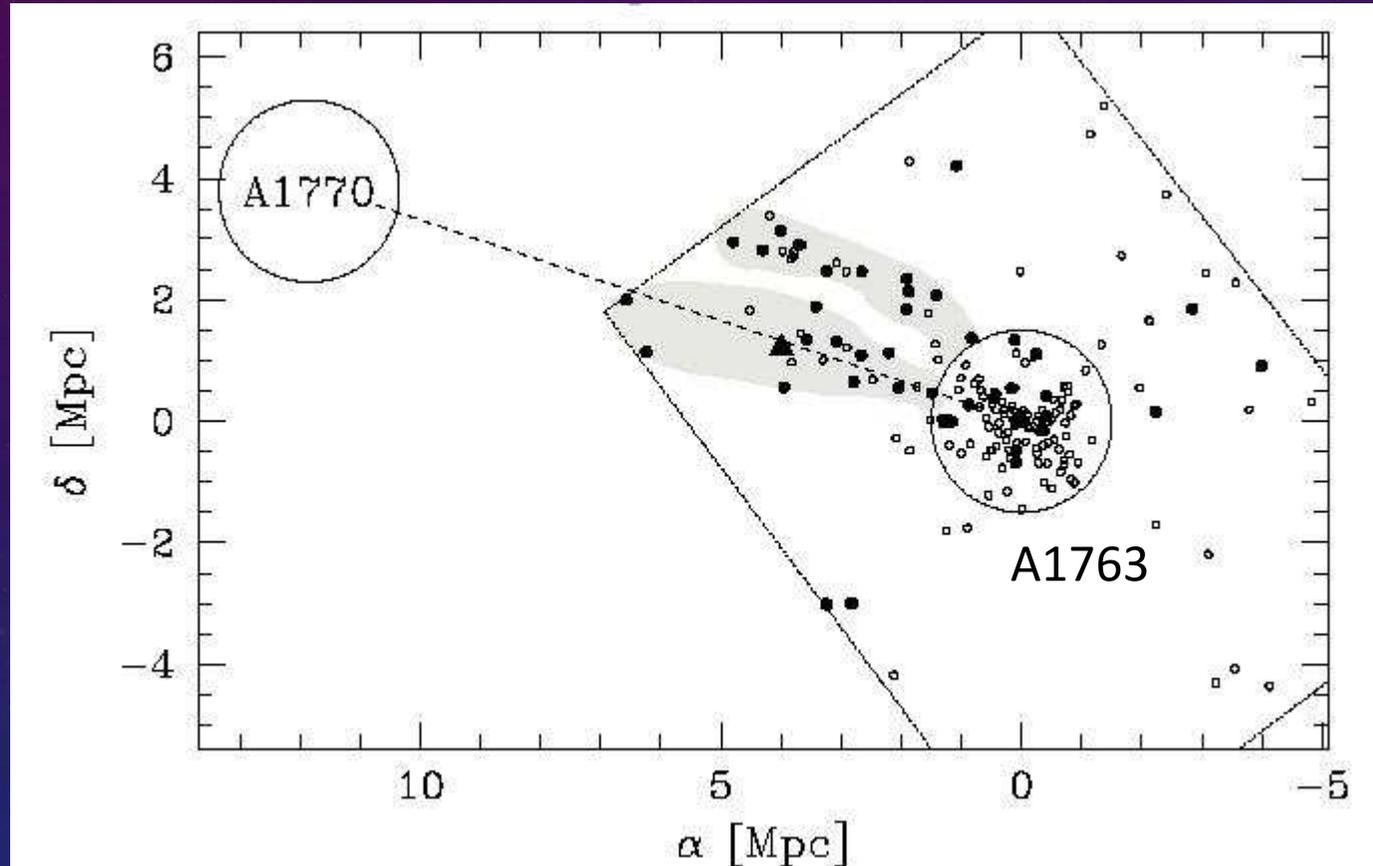
« Starvation/strangulation » : du fait de la diminution du gaz disponible dans les galaxies, leur taux de formation d'étoiles diminue

AUGMENTATION DU TAUX DE FORMATION D'ÉTOILES DANS LE FILAMENT D'ABELL 85



Boué, Durret, Adami, Mamon, Ilbert, Cayatte 2008, A&A 489, 11

AUGMENTATION DU TAUX DE FORMATION D'ÉTOILES DANS LES FILAMENTS JOIGNANT A1763 ET A1770



Galaxies à fort taux de formation d'étoiles en excès dans les filaments joignant ces deux amas

I. LES GALAXIES DANS LES AMAS

I. 2. GALAXIES LES PLUS BRILLANTES D'AMAS (BRIGHTEST CLUSTER GALAXIES, OU BCGS)

Buts de notre étude :

- Caractériser les propriétés physiques de ces galaxies
- Chercher s'il y a des variations des propriétés avec le décalage spectral
- Comparer la position du grand axe de la BCG avec l'élongation à grande échelle (LSS = Large Scale Structure)

Données :

- 38 BCGs des relevés DAFT/FADA et/ou CLASH dans le domaine $0.2 < z < 0.9$
- Images Hubble Space Telescope ACS dans le filtre F814W (sauf un amas)

SIMULATION DE LA FORMATION D'UN AMAS

R = 6.0 Mpc

z = 10.155



a = 0.090

diemand 2003

- Ajustement par un modèle à 2D de chaque BCG avec GALFIT : une ou deux (si nécessaire) lois de Sérsic

$$I(r) = I_e \exp\left\{-b_n \left[\left(\frac{r}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right]\right\}$$

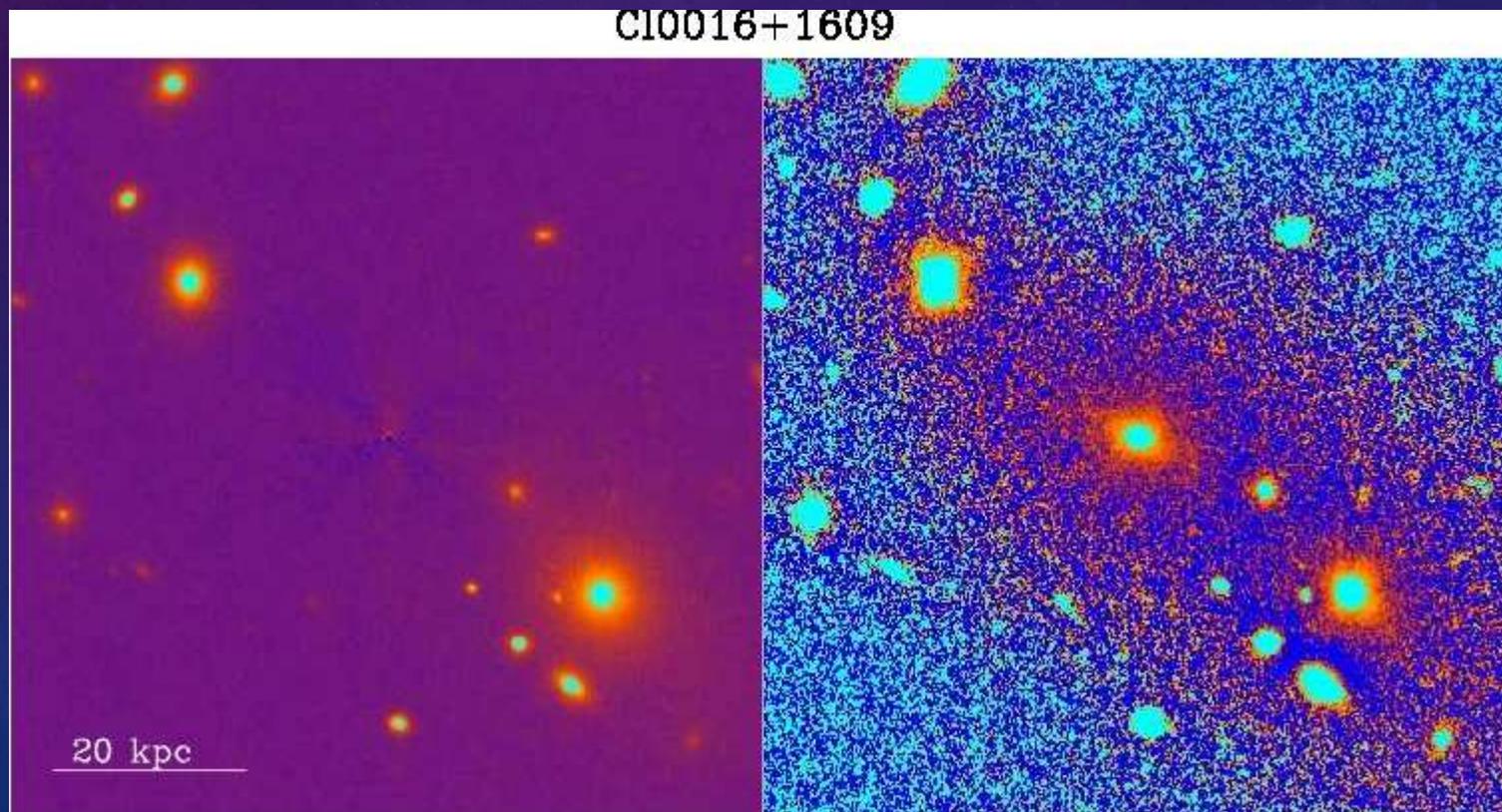
→ R_e et n

- Image résiduelle = image - modèle
- Image « sharp divided » = image / image_filtree
- Angle de position du grand axe de la BCG

UN EXEMPLE: CL0016+1609 ($Z=0.5455$)

Image résiduelle après
ajustement (deux lois de
Sérsic)

Image « sharp-divided »



RESULTATS

- Pour 27 BCGs sur 38, l'ajustement exige deux lois de Sérsic : l'une pour la composante interne, l'autre pour l'enveloppe étendue

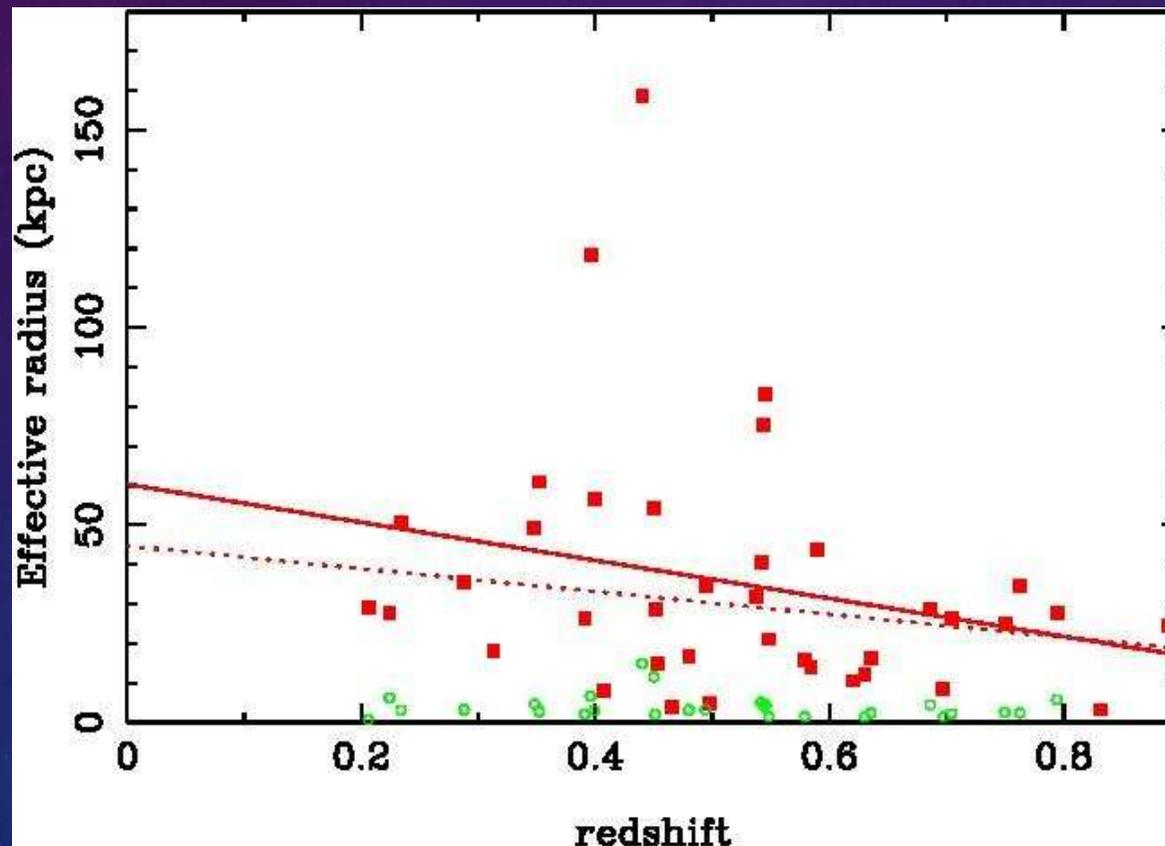
- Les paramètres de la composante externe sont très divers :

$$4 < R_{e,ext} < 160 \text{ kpc} \quad \text{et} \quad 1.0 < n < 4.4$$

Durret , Tarricq, Márquez, Ashkar, Adami 2018, A&A soumis

DEPENDANCE AVEC LE DECALAGE SPECTRAL

Le rayon effectif de la composante externe $R_{e,ext}$ semble augmenter de $z=0.9$ à $z=0$



Carrés rouges :
composante externe

Cercles verts :
composante interne

RELATION DE KORMENDY

La brillance de surface effective de la composante de Sérsic externe diminue quand le rayon effectif augmente : nos *BCGs* (*étoiles bleues*) suivent la relation de Kormendy (1977)

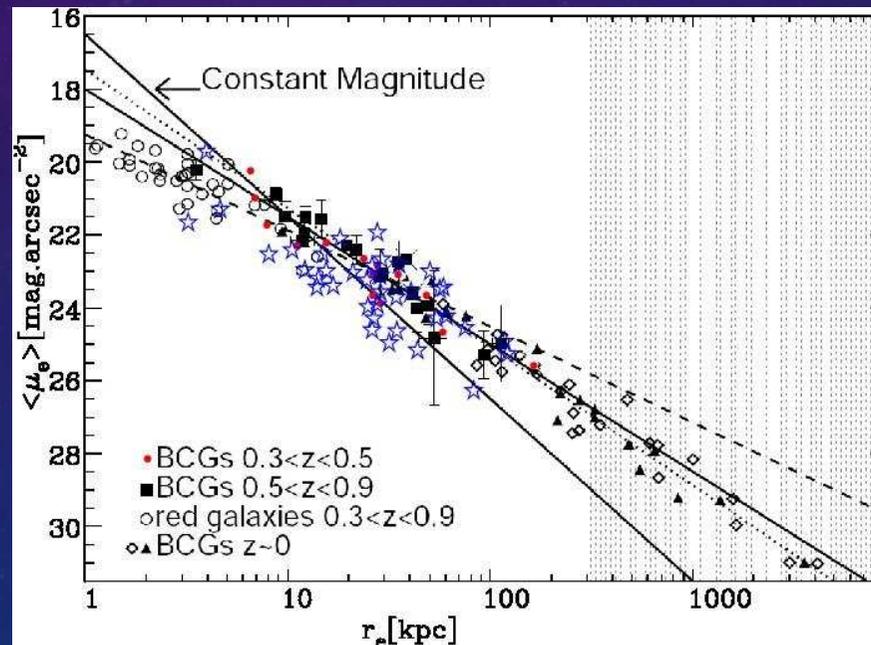


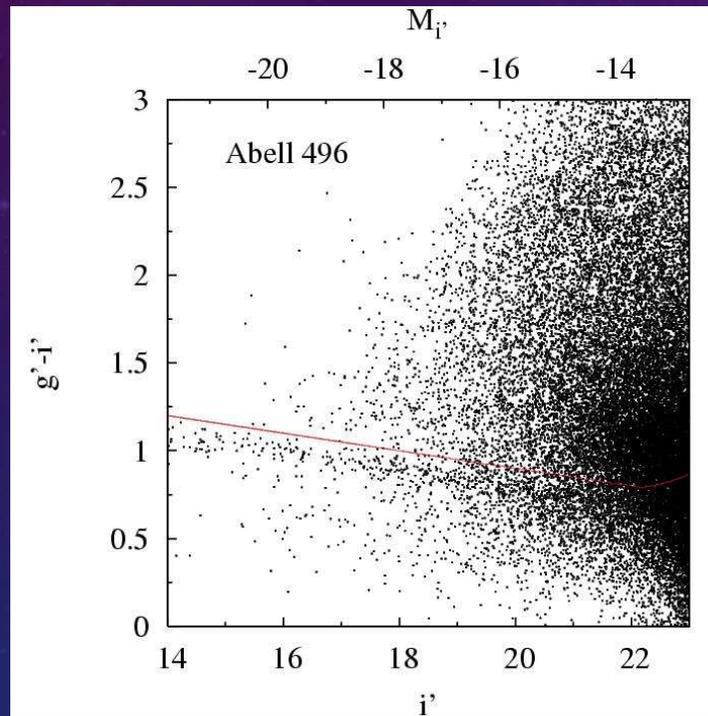
Figure d'après Bai et al. 2014, ApJ 789, 134

LES BCGS ET LEUR AMAS HOTE ONT-ILS LA MEME ORIENTATION ?

- Ajustement des isophotes externes de la BCG donne l'orientation sur le plan du ciel (le « PA » ou position angle)
- Comparaison avec l'orientation de l'amas hôte à grande échelle
 - comment la déterminer ?
 - En sélectionnant les galaxies de l'amas qui forment une séquence dans un diagramme couleur-magnitude (séquence due au fait que dans un amas, la majorité des galaxies s'est formée à peu près en même temps)
 - En calculant une carte de densité des galaxies sélectionnées

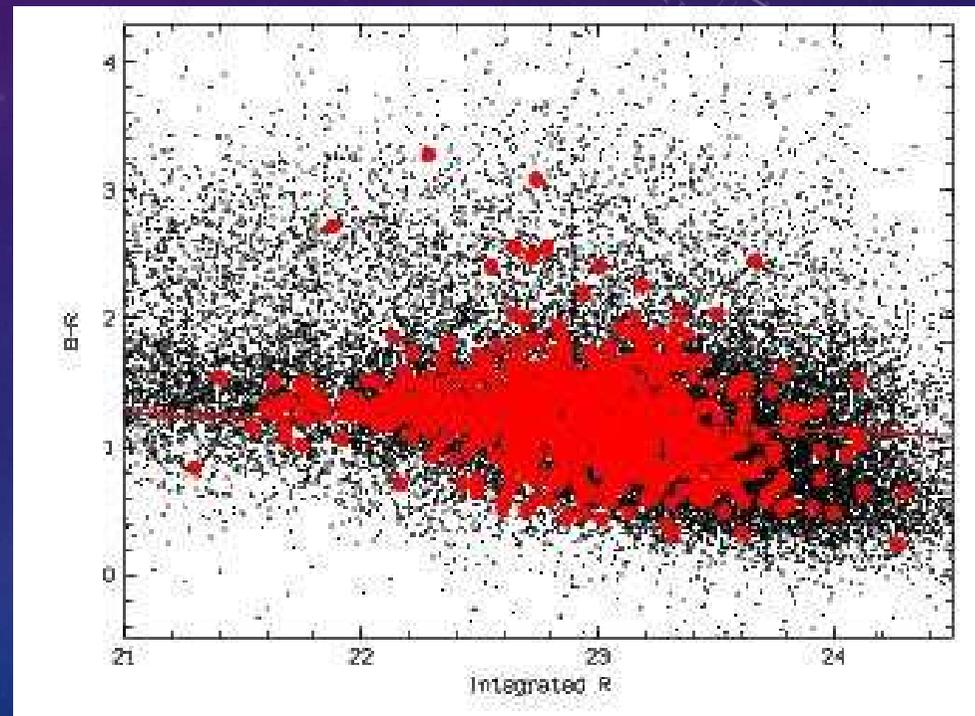
LA RELATION COULEUR-MAGNITUDE DES GALAXIES D'AMAS

Abell 496 ($z=0.033$)



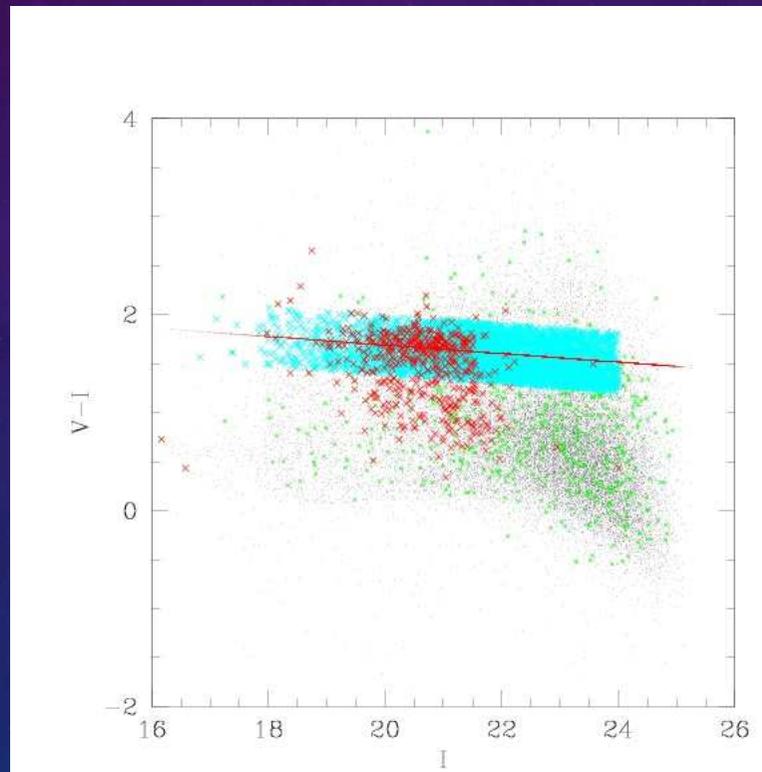
Boué et al. 2008,
A&A 479, 335

Coma ($z=0.0231$)



Adami et al. 2006, A&A 459, 659
(en rouge, redshifts spectroscopiques
dans l'amas)

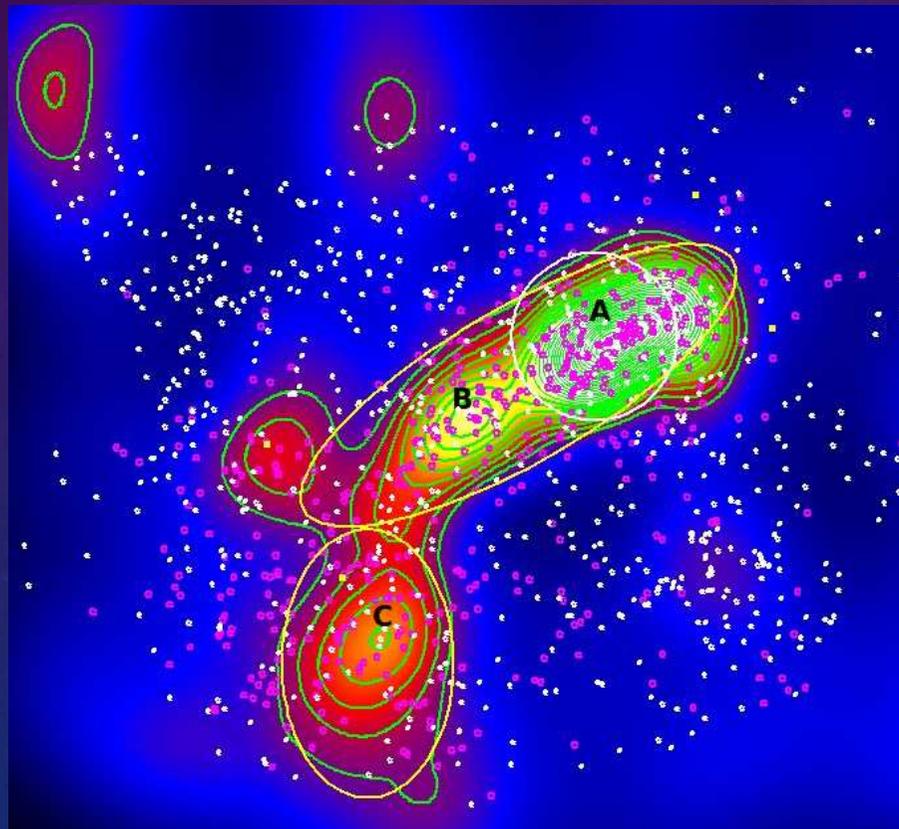
SÉLECTION DES GALAXIES DE L'AMAS



MACS J0717.5+ 3745 ($z=0.5458$)

CALCUL DE CARTES DE DENSITÉ DES GALAXIES DE L'AMAS

MACS J0717.5+ 3745 ($z=0.5458$)

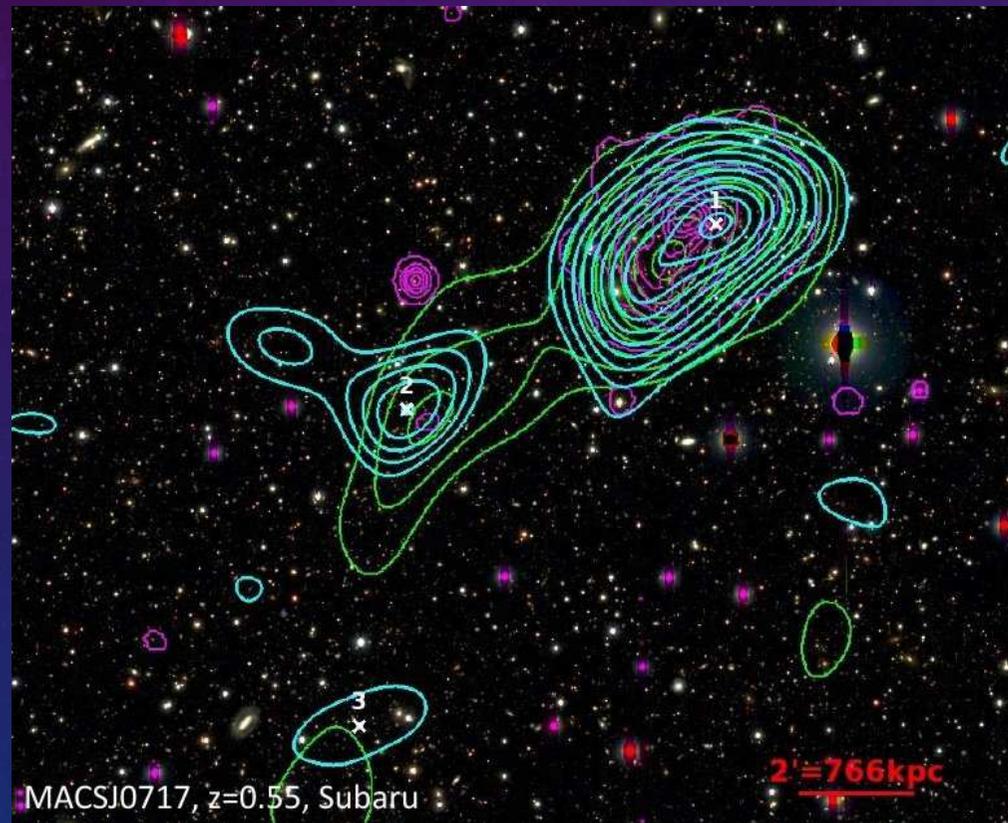


Cercle blanc :
rayon 1 Mpc

Ellipses jaunes :
6.0 x 1.8 Mpc
3.2 x 2.1 Mpc

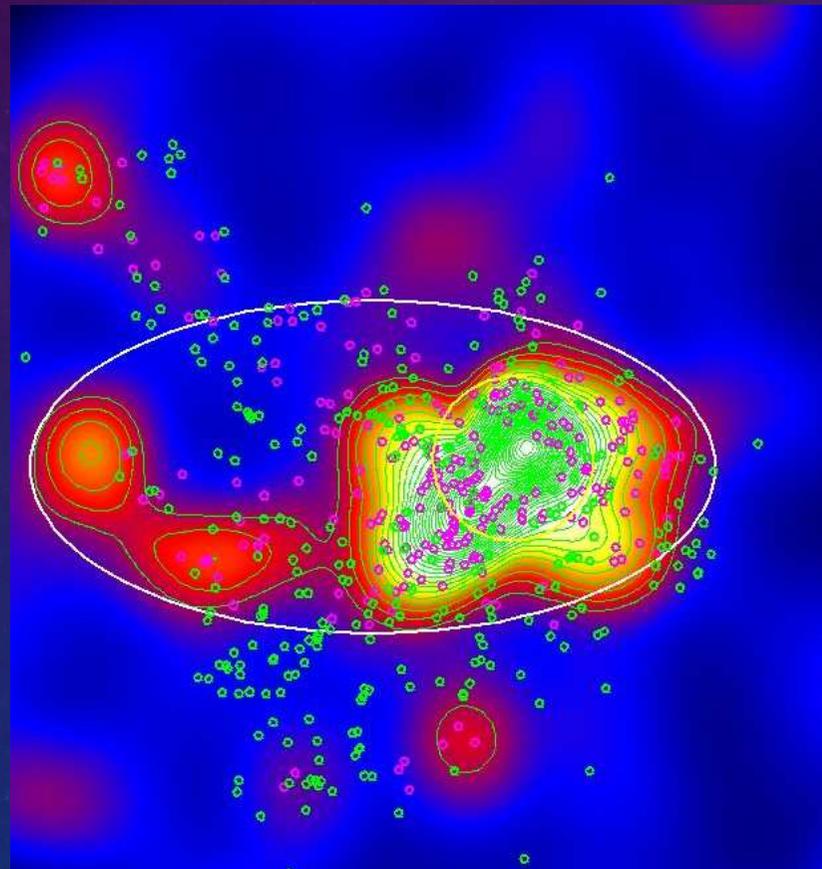
COMPARAISON AVEC LA DISTRIBUTION DE MATIERE OBTENUE PAR EFFET DE LENTILLE FAIBLE

MACS J0717.5+ 3745 ($z=0.5458$)



DETECTION DE GRANDES STRUCTURES AVEC DES EXTENSIONS > 5 MPC AUTOUR D'UN CERTAIN NOMBRE D'AMAS

MACS J1149.6+2223 ($z=0.544$)

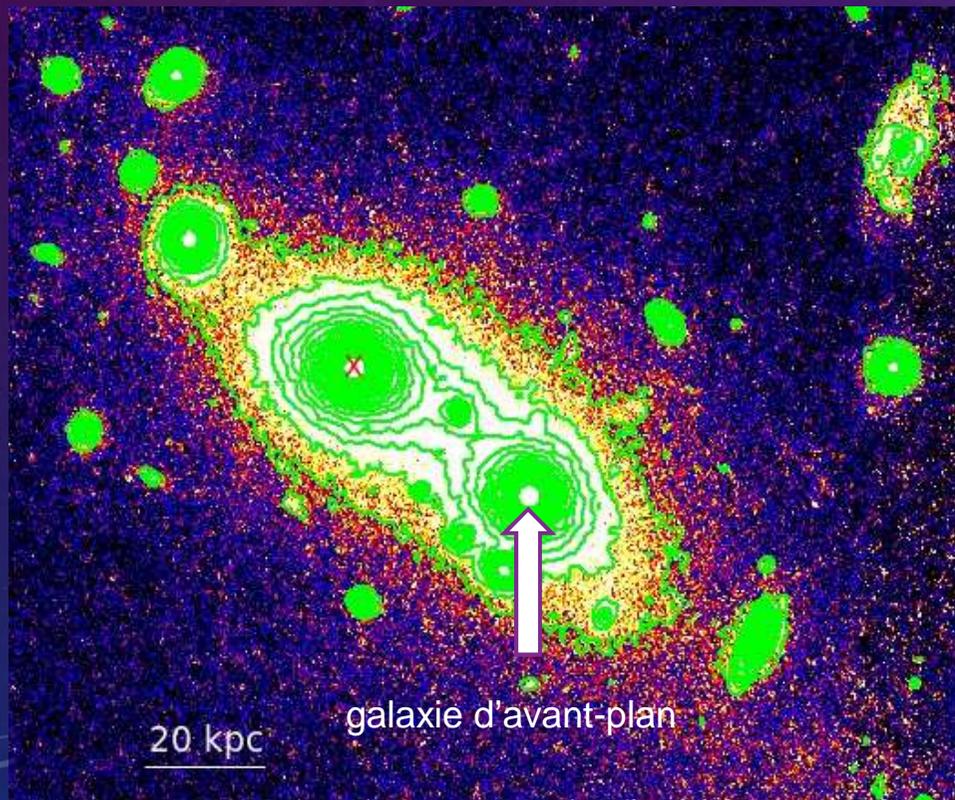


Ellipse :
8.6 x 4 Mpc

COMPARAISON DES ORIENTATIONS DE LA BCG ET DE L'AMAS : EXEMPLE DE CL0016+1609 (Z=0.5455)

Elongation de la BCG

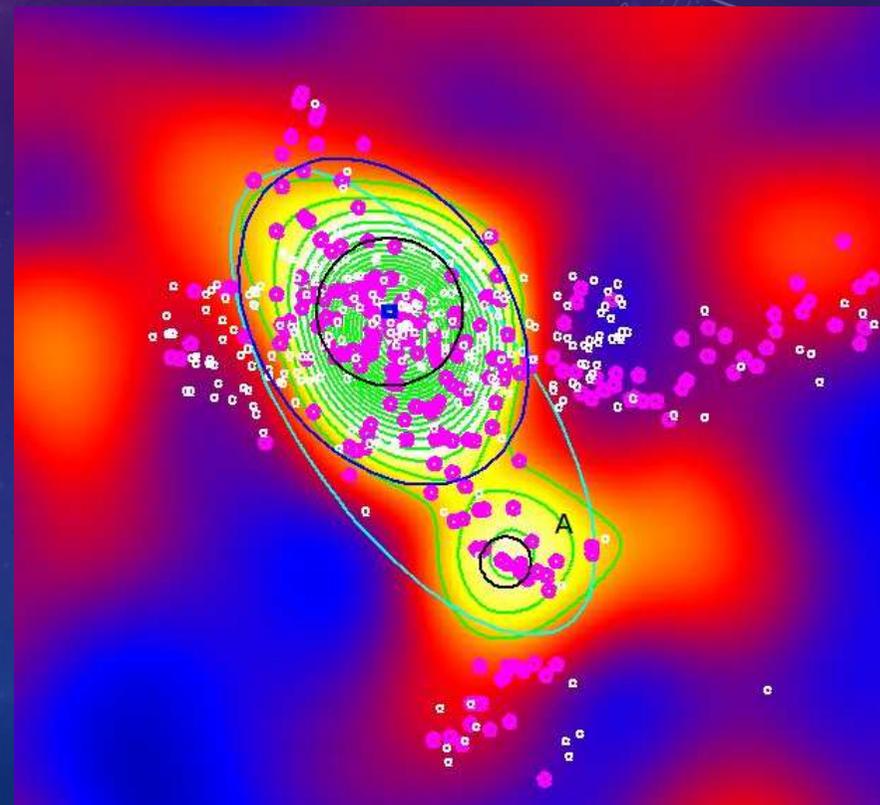
PA=56°



Durret et al. 2018, A&A soumis

Elongation à grande échelle

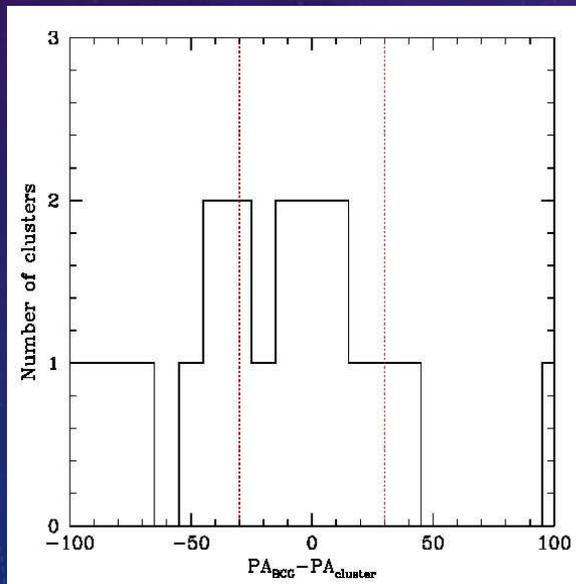
PA=35°



Durret et al. 2016, A&A 588, 69

ORIENTATIONS PREFERENTIELLES

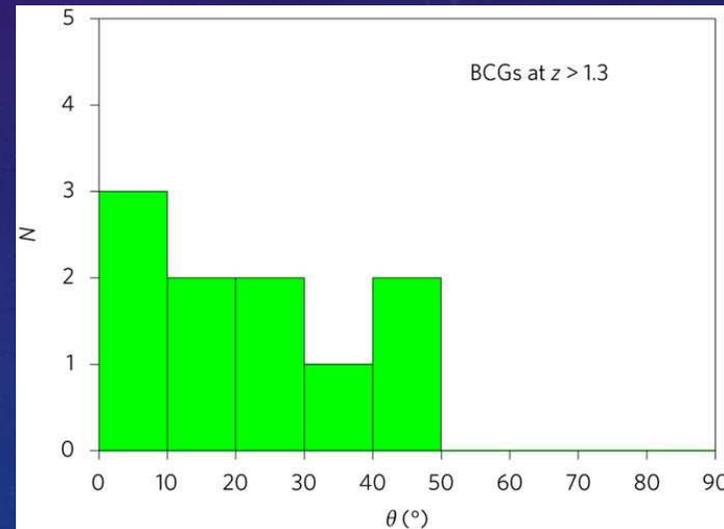
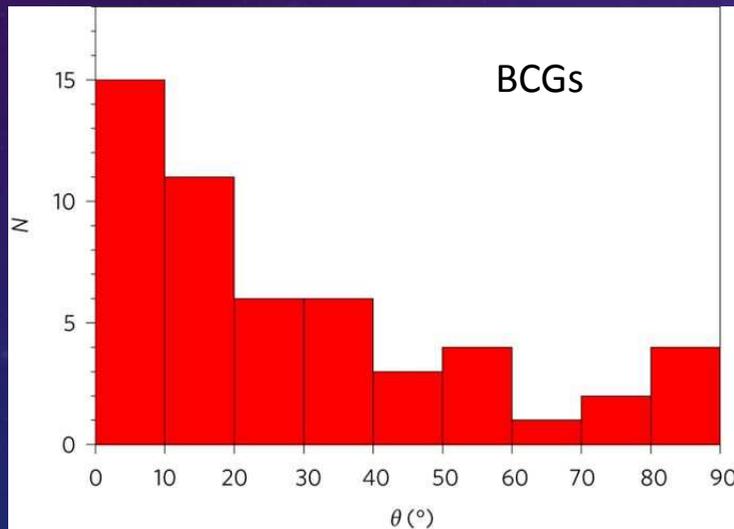
Accord à $\pm 30^\circ$ entre l'orientation du grand axe de la BCG et l'élongation à très grande échelle pour 10 amas sur 19



Cluster	PA _{BCG}	PA _{LSS}	PA _{cluster}
Cl0016+16*	56	35	
Cl0152*	134	160	
A209	146	131	
MACS0329	158	144	
MACS0416	40	52	
MACS0429	167	125:	
MACS0454*	113	150	
MACS0647*	46	90	
MACS0717*	63	122	
MACS0744*	22	96	
A611	38	63	
A851*	76	–	
LCDCS0172	1	100	
MACS1115	148	147	
MACS1149	131	90:	140
MACS1206*	104	180	
BMW-HRI1226*	95	–	
MACS1311	132:	174	
Zw1332*	59	–	
LCDCS0829*	30	51	
MACS1621*	78	125	
OC02*	126	90	
MACS1720	177	49	150
A2261	174	91	60
MACS2129*	81	80	
RX2129	64	78	
MS2137	71:	136	
RX2328*	113	–	

COMPARAISON AVEC WEST ET AL. (2017)

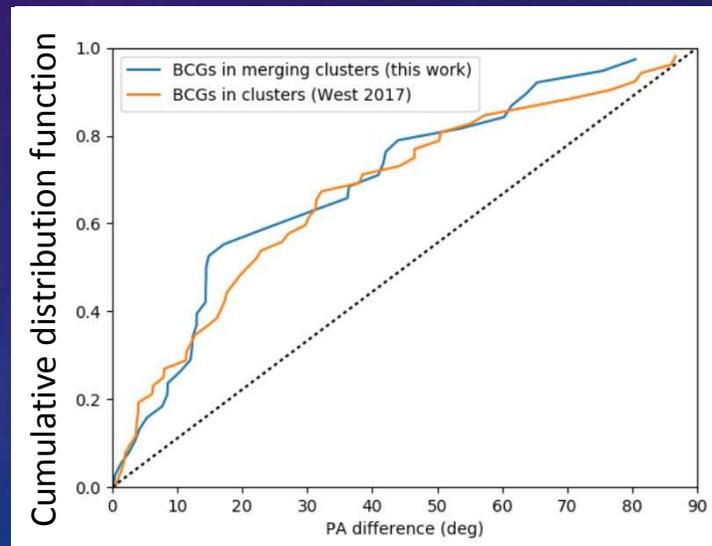
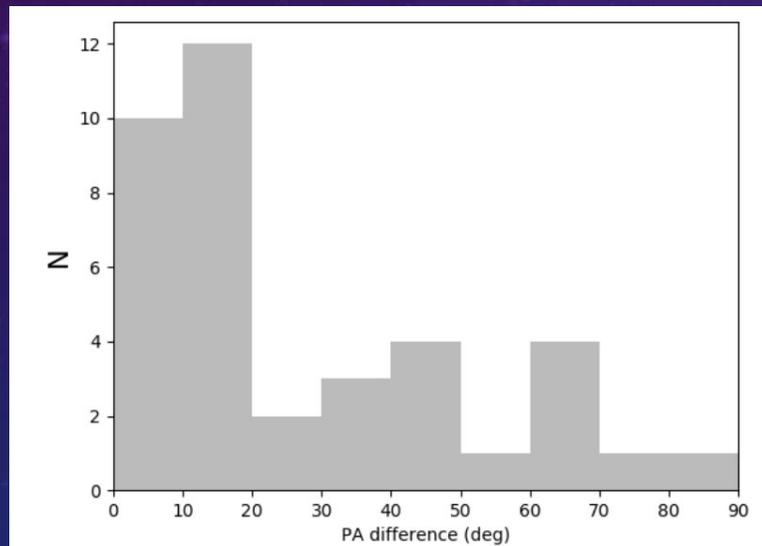
65 amas $0.19 < z < 1.8$, données HST : excès d'alignements entre BCGs et amas



West et al. 2017, Nature Astronomy 1, 157

COMPARAISON AVEC WITTMAN ET AL. (2018)

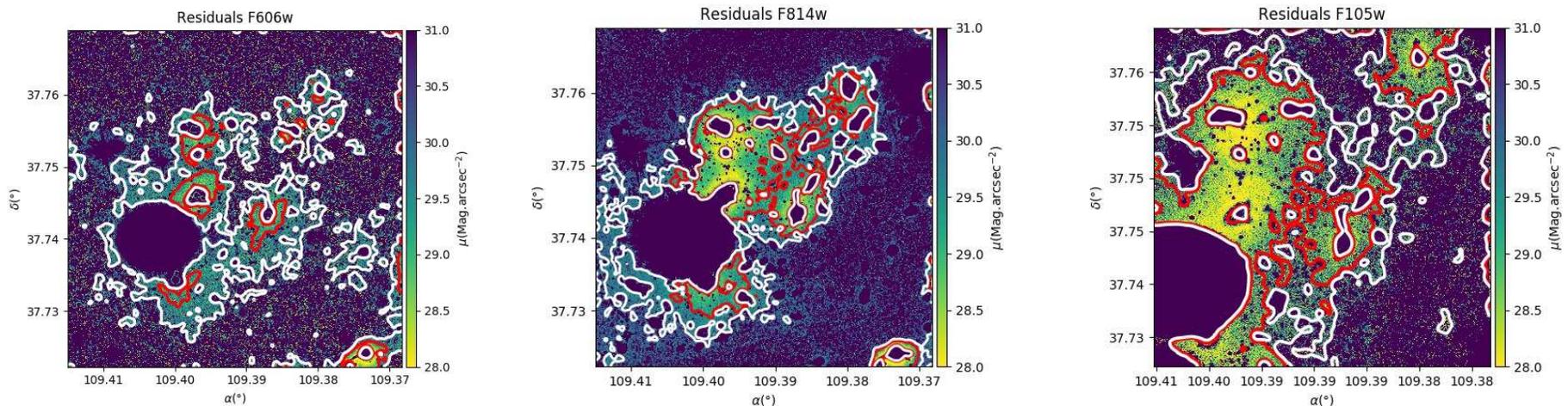
- Fort excès de systèmes BCG-amas ayant la même orientation à 20° près
- Accord avec West et al. (2017)



PETITE DIGRESSION VERS LA LUMIERE DIFFUSE DANS LES AMAS (ICL = INTRA-CLUSTER LIGHT)

C'est de la lumière émise par des étoiles qui ne sont pas rattachées à une galaxie

Exemple de MACS J0717 (images Hubble Space Telescope) :



F606W

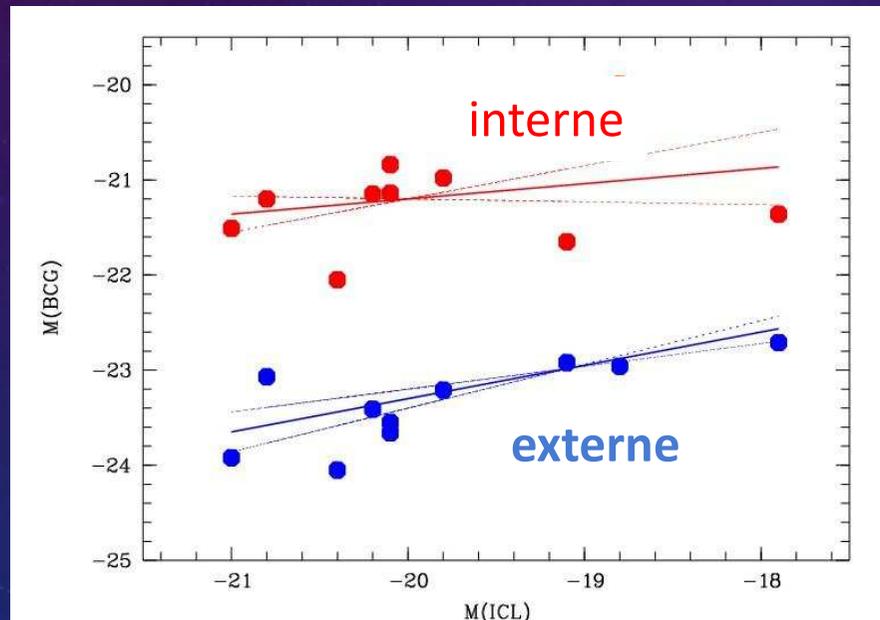
F814W

F105W

Ellien et al. en préparation

RELATION DE LA COMPOSANTE EXTERNE DE LA BCG AVEC LA LUMIERE DIFFUSE (ICL)

Notre échantillon a 10 amas en commun avec Guennou+12, qui ont détecté ICL dans ces 10 amas



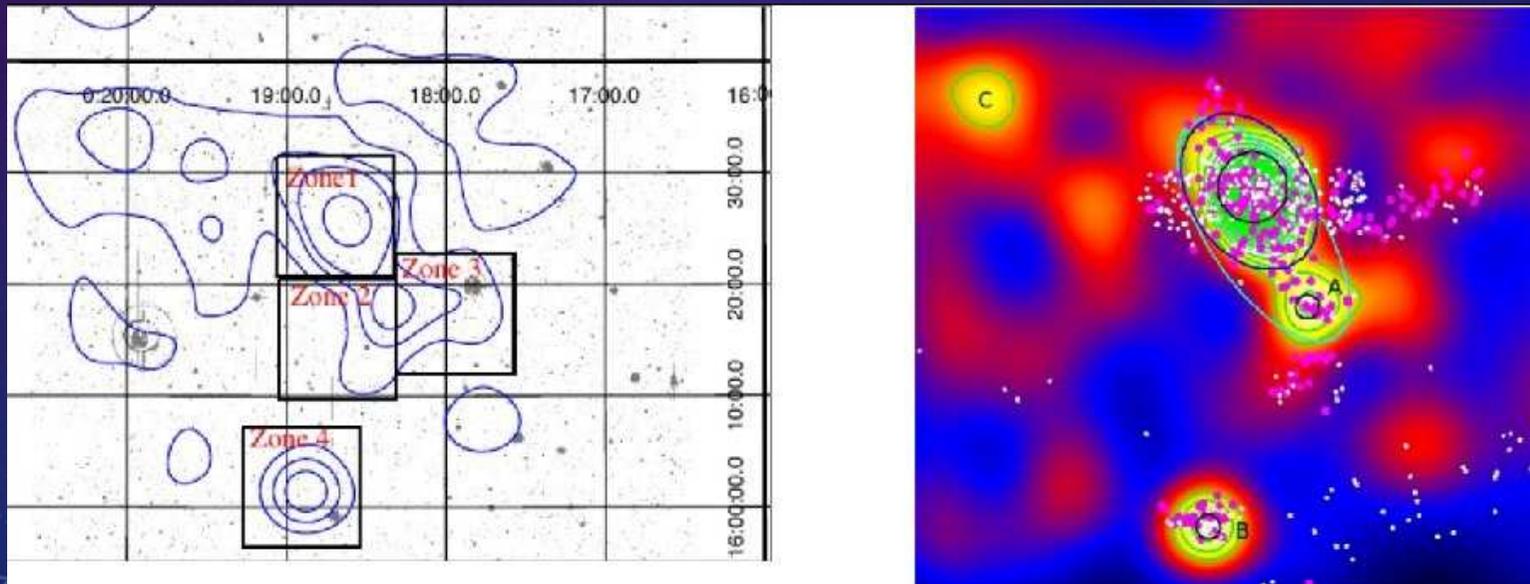
La magnitude absolue de la composante de Sérsic externe semble corrélée avec celle de l'ICL



Les phénomènes physiques à l'origine de l'ICL sont liés à la formation des halos autour des BCG ?

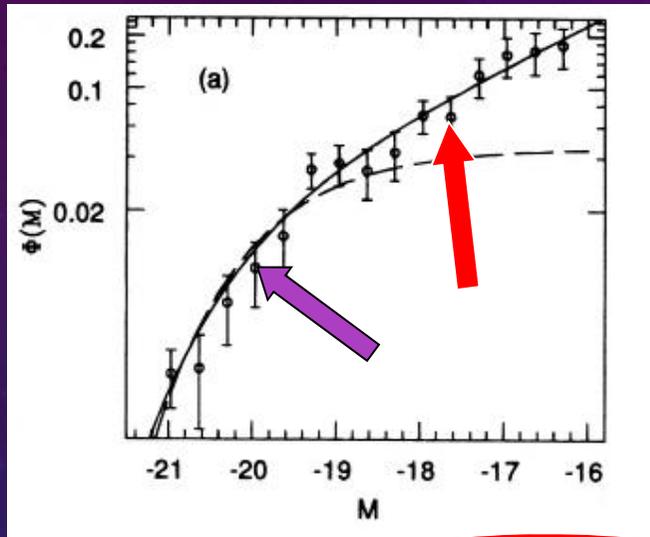
PERSPECTIVES

- Observation d'un plus grand échantillon de BCGs (plus de 1000 BCGs dans le relevé CFHTLS jusqu'à $z=0.7$)
- Analyse de BCGs à $z>0.9$
- Recherche de galaxies à raies d'émission dans les filaments et extensions autour des amas, par exemple avec CFHT/SITELLE dans Cl0016+1609 ($z=0.5455$)



Collaboration avec L. Edwards et I. Márquez

I. 3. UN MOYEN D'ANALYSE POUR LES GALAXIES : LES FONCTIONS DE LUMINOSITÉ



Press & Schechter 1974,
ApJ 187, 425

$$S(M_V) = K_S \left[10^{0.4(\alpha+1)(M_V^* - M_V)} \exp[-10^{0.4(M_V^* - M_V)}] \right] \quad (1)$$

Ajustement : minimiser le χ^2

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \left[\frac{\phi_i - \phi(L_i; C, \alpha, L^*)}{\sigma_i} \right]^2$$

M_V = magnitude absolue (ici en bande V)

- Les fonctions de luminosité (FDL) des galaxies dans les amas nous renseignent sur la proportion de galaxies à différentes magnitudes
- Ajustement par une loi de Schechter $S(M)$, plus parfois une gaussienne $G(M)$ pour représenter les galaxies brillantes :

Schechter

$$S(M_V) = K_S 10^{0.4(\alpha+1)(M_V^* - M_V)} \exp[-10^{0.4(M_V^* - M_V)}] \quad (1)$$

Gaussienne

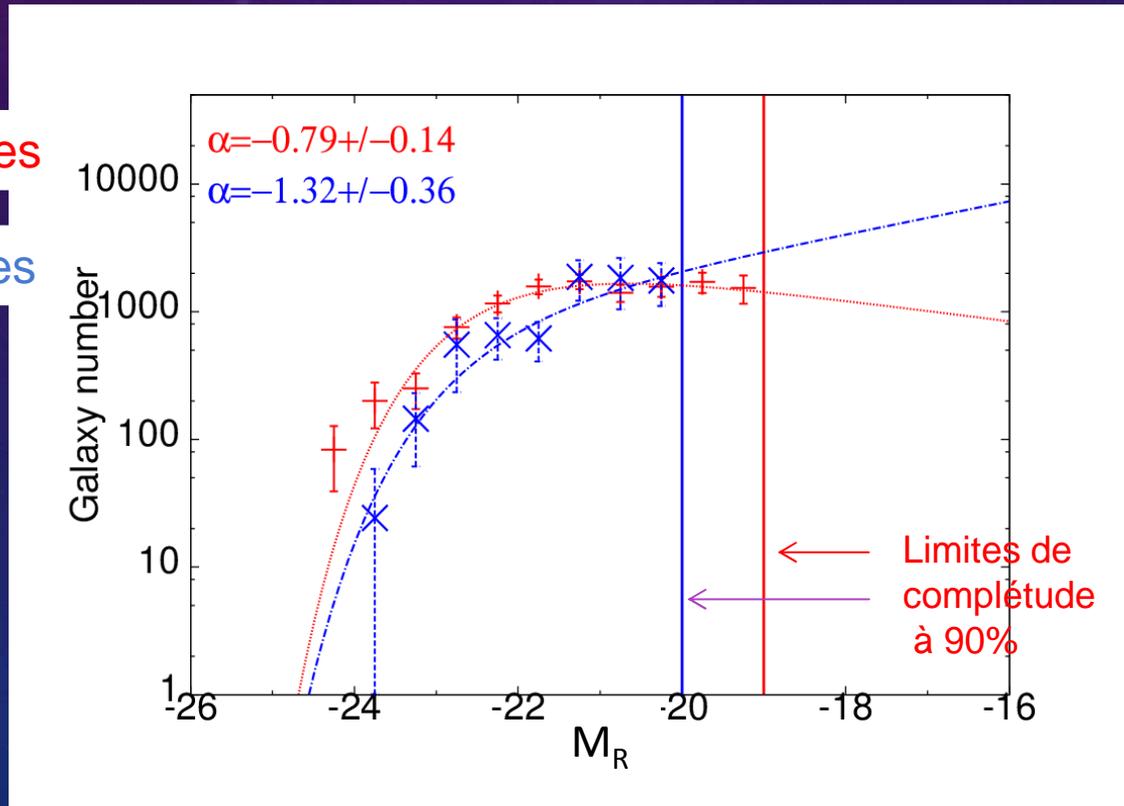
$$G(M_V) = K_G \exp[-(M_V - \mu)^2 / (2\sigma^2)] \quad (2)$$

- La pente α de la FDL aux faibles magnitudes semble dépendre de l'environnement : elle est plus plate au centre des amas (les galaxies faibles sont accrétées par les grosses galaxies) et plus « pentue » dans les zones externes

SOMME (« STACKING ») D'AMAS ET AJUSTEMENT PAR UNE FONCTION DE SCHECHTER

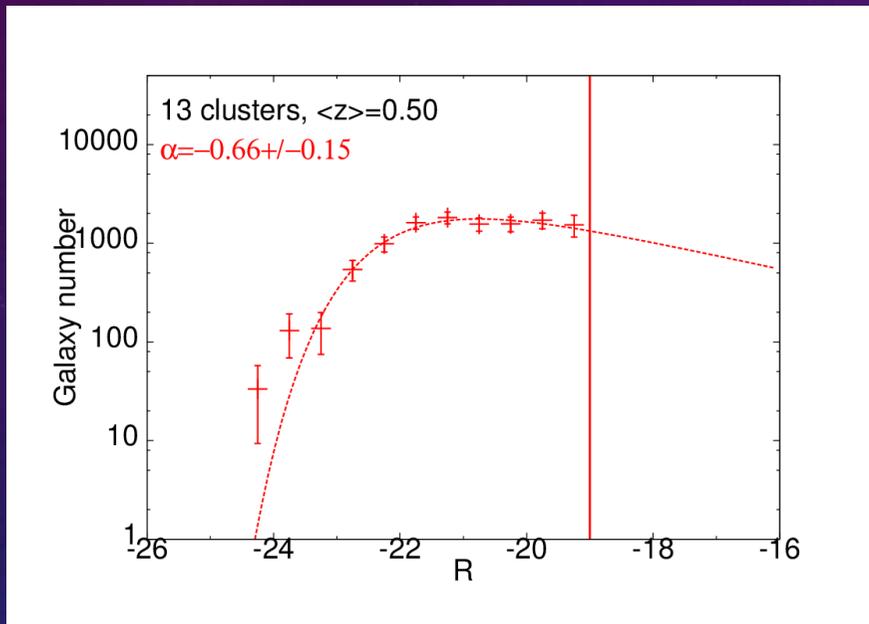
Galaxies rouges

Galaxies bleues

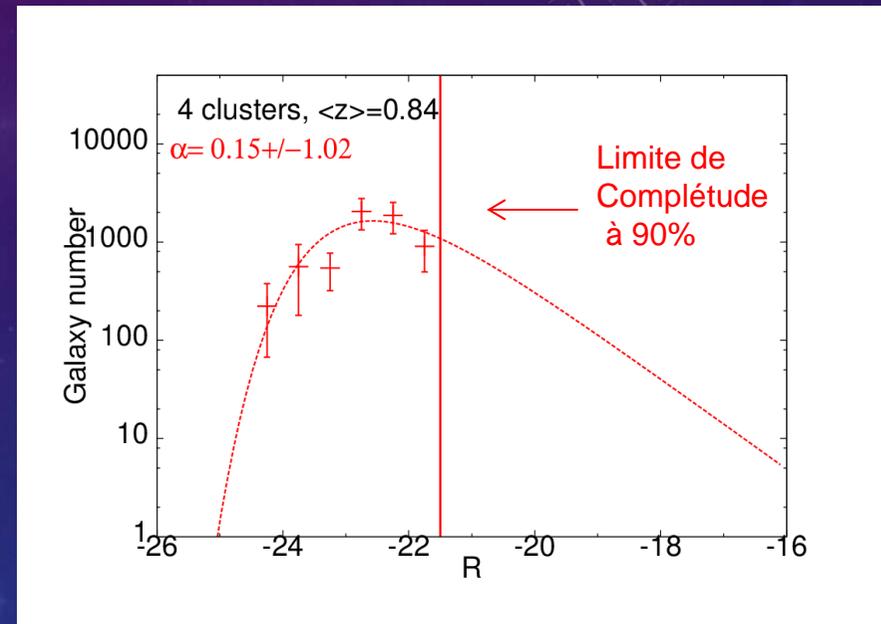


La valeur de α n'est pas la même pour les galaxies bleues et rouges

VARIATION AVEC LE DÉCALAGE SPECTRAL



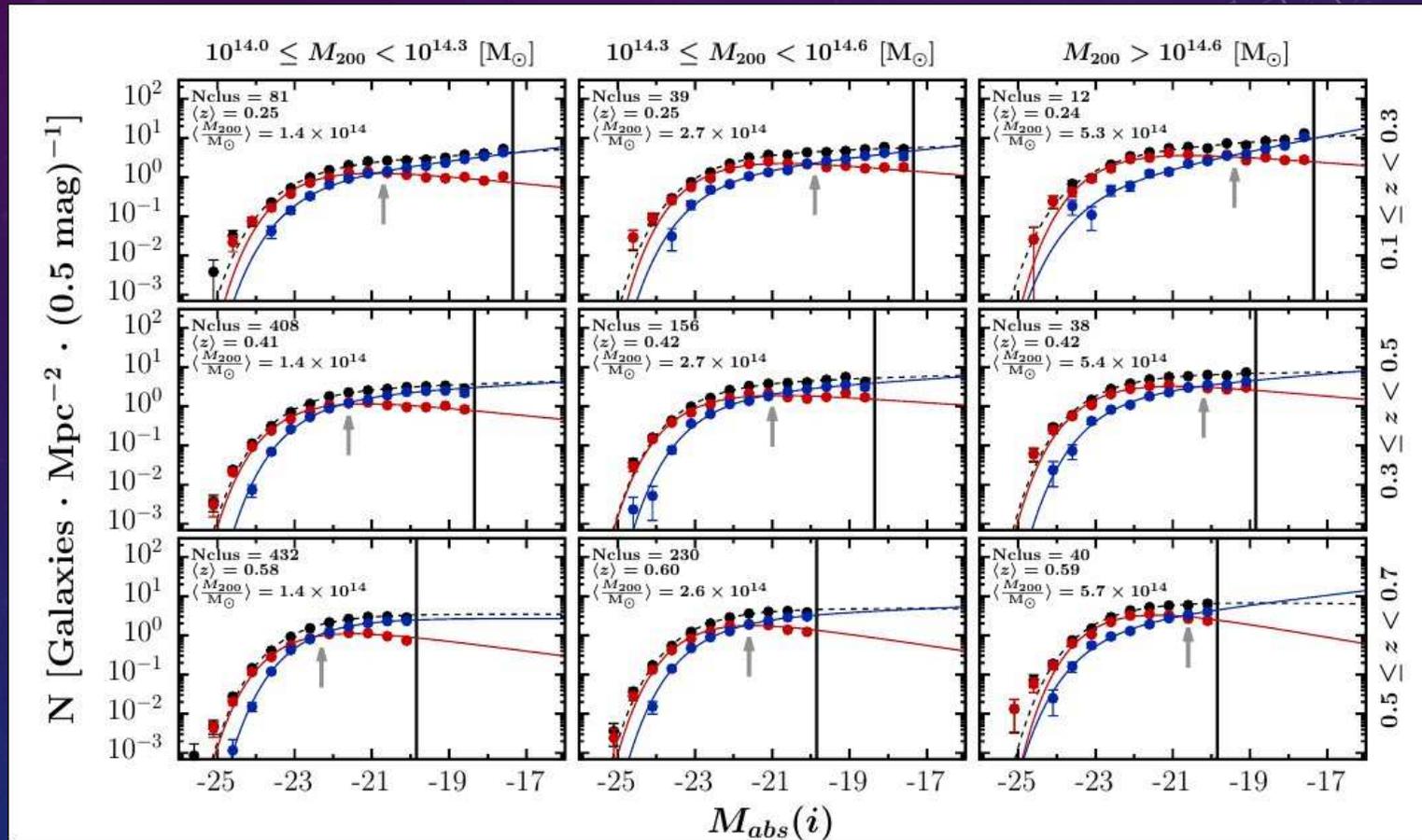
$0.40 < z < 0.65$



$0.65 < z < 0.90$

La valeur de α n'est pas la même pour les amas proches et plus lointains

ETUDE STATISTIQUE DE LA VARIATION DES FONCTIONS DE LUMINOSITE AVEC LE REDSHIFT ET LA MASSE DE L'AMAS : 1371 AMAS DU CFHTLS



PRINCIPAUX RESULTATS (THÈSE DE FLORIAN SARRON 2018)

- 1371 amas détectés dans le relevé CFHTLS avec masse $M > 10^{14} M_{\text{sol}}^{\text{aire}}$ et redshift $z \leq 0.7$
- Augmentation des populations de galaxies bleues et rouges de $z=0.7$ à $z=0.1$
- Diminution du nombre de galaxies bleues *brillantes* de $z=0.7$ à $z=0.1$
- Evolution en redshift plus prononcée dans amas massifs
- La pente α ne varie pas avec la masse de l'amas

Donc

- La séquence rouge se forme à $z > 0.7$ et continue à être enrichie par transformation de galaxies bleues en galaxies rouges à $z \leq 0.7$ (« quenching »)

II. LES FUSIONS D'AMAS : INFLUENCE SUR LES GALAXIES ET SUR LE GAZ CHAUD INTERAMAS

Galaxies :

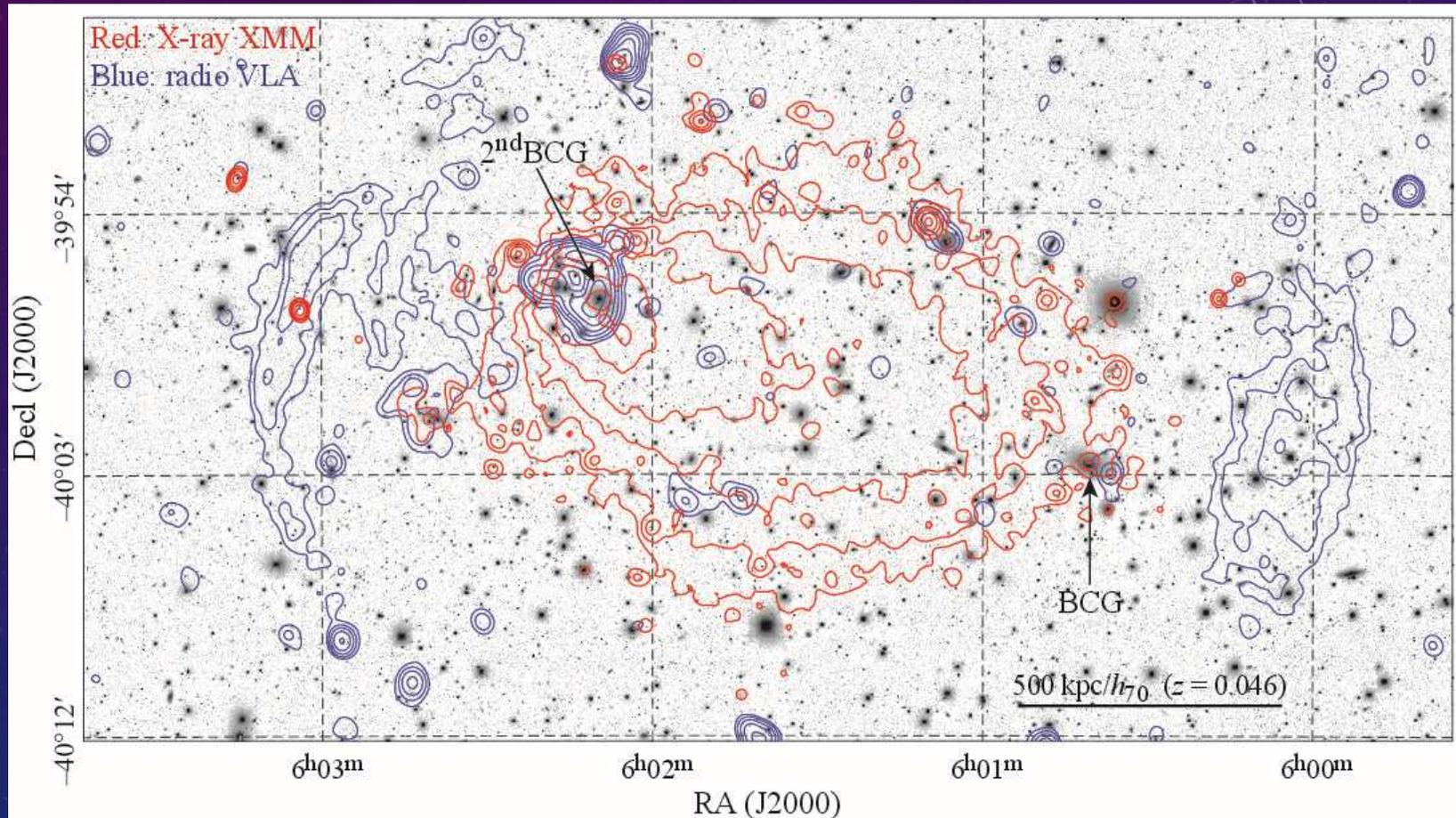
- Effets sur la formation d'étoiles
- Effets sur les fonctions de luminosité : excès de galaxies brillantes

Emission radio dans zones externes

Gaz chaud interamas :

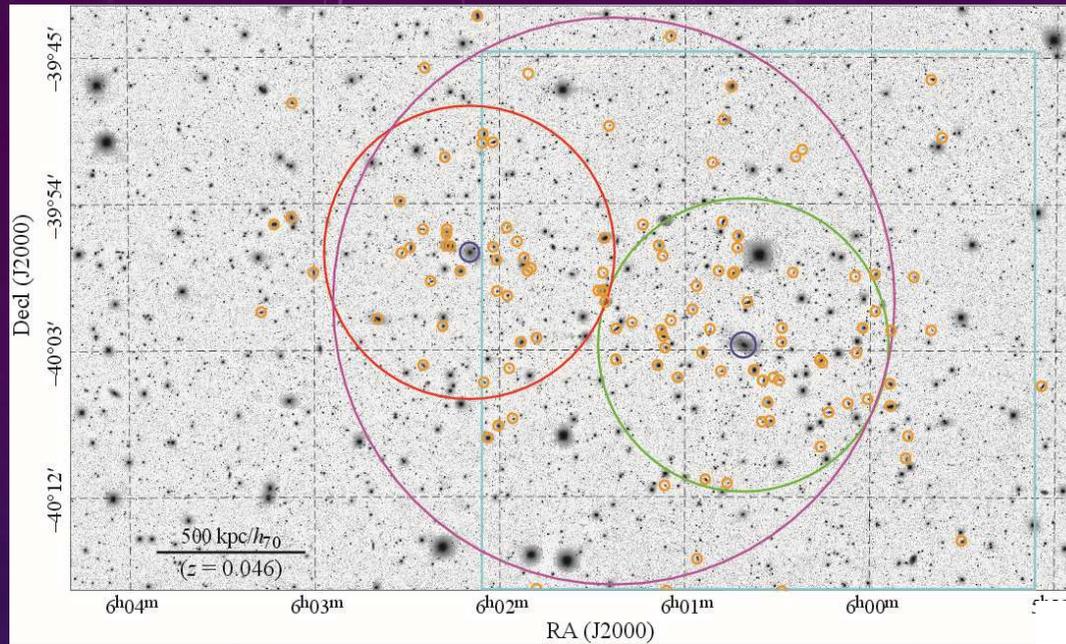
- Suppression de la région froide au centre
- Perturbation des distributions de température et de métallicité

ABELL 3376 ($z=0.046$) : UN AMAS EN FUSION



FONCTIONS DE LUMINOSITE D'ABELL 3376

Schechter + Gaussienne



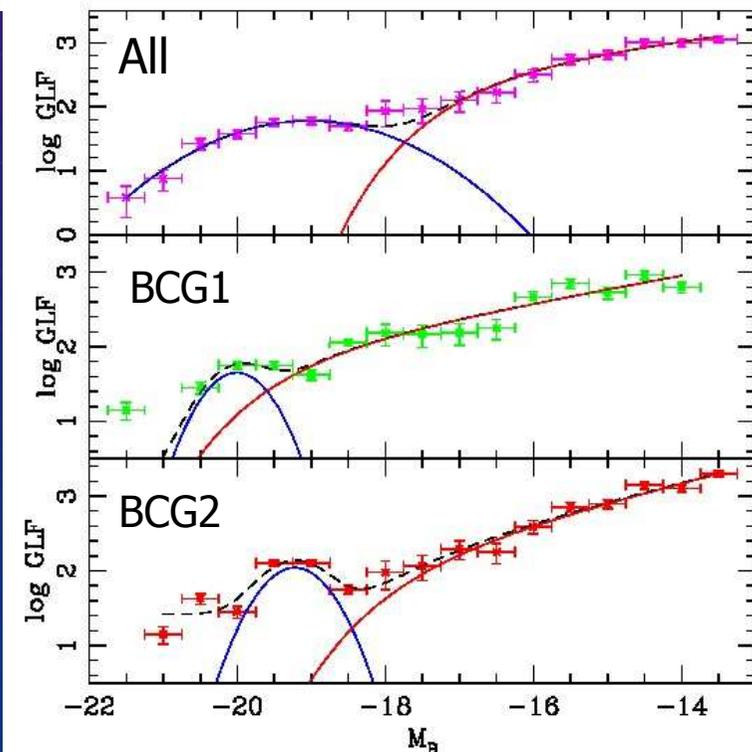
Tout l'amas (grand cercle)
 $\alpha = -1.36 \pm 0.06$

All

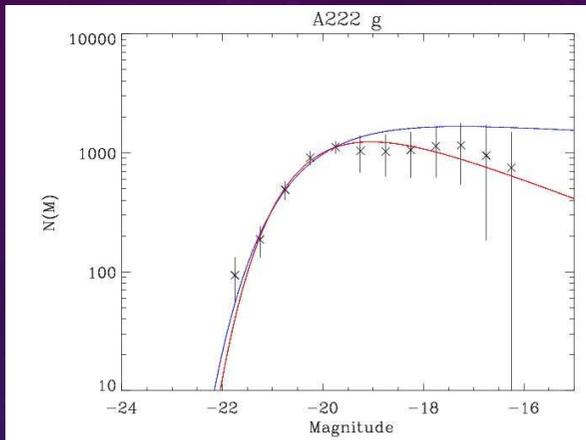
BCG1 (cercle vert)
 $\alpha = -1.45 \pm 0.02$

BCG2 (cercle rouge)
 $\alpha = -1.63 \pm 0.03$

Excès de galaxies brillantes dans la région BCG2 (et dans la région BCG1?)



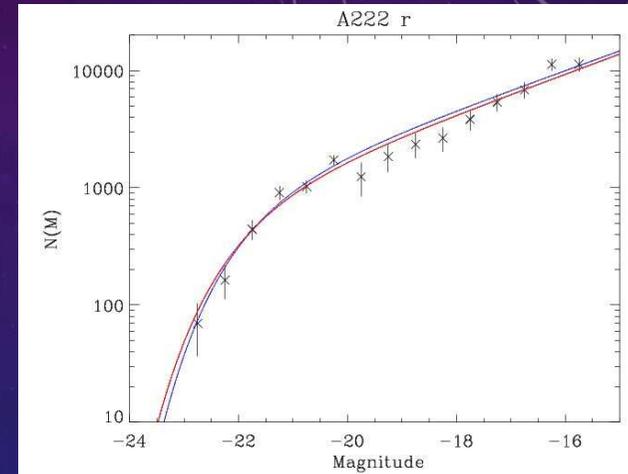
LA PAIRE D'AMAS ABELL 222/223 (Z=0.21)



A222

$$g' \quad \alpha = -0.60 \pm 0.05$$
$$\alpha = -0.94 \pm 0.03$$

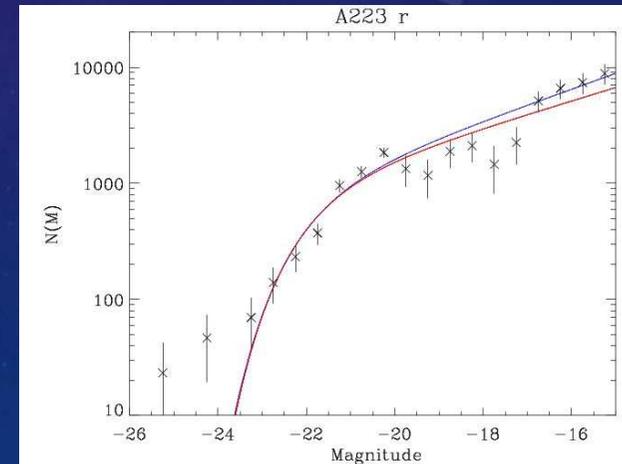
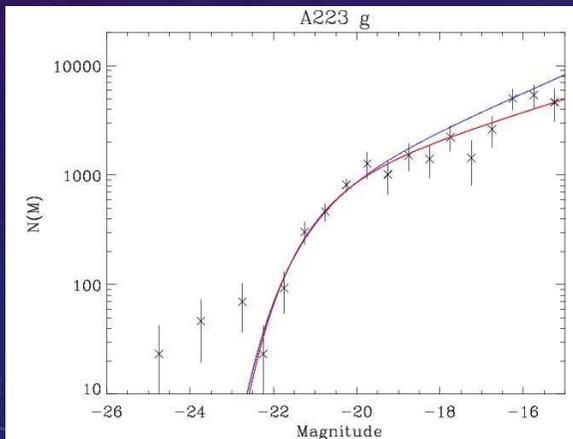
$$r' \quad \alpha = -1.43 \pm 0.01$$
$$\alpha = -1.42 \pm 0.01$$



A223

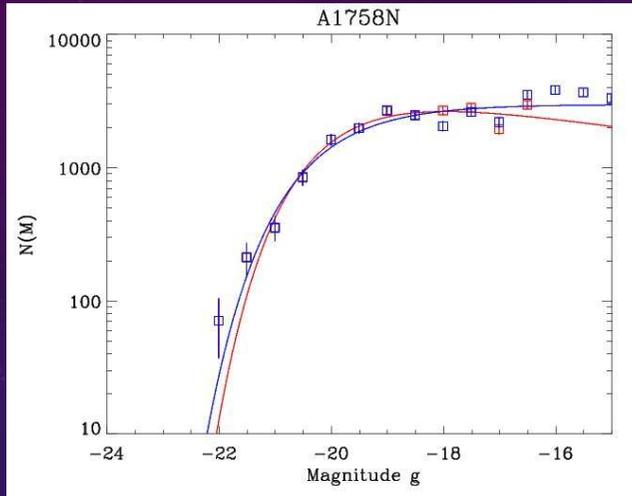
$$g' \quad \alpha = -1.30 \pm 0.02$$
$$\alpha = -1.42 \pm 0.01$$

$$r' \quad \alpha = -1.29 \pm 0.01$$
$$\alpha = -1.34 \pm 0.01$$



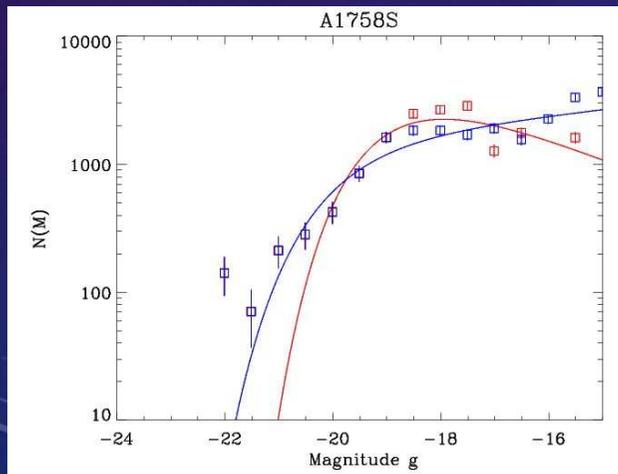
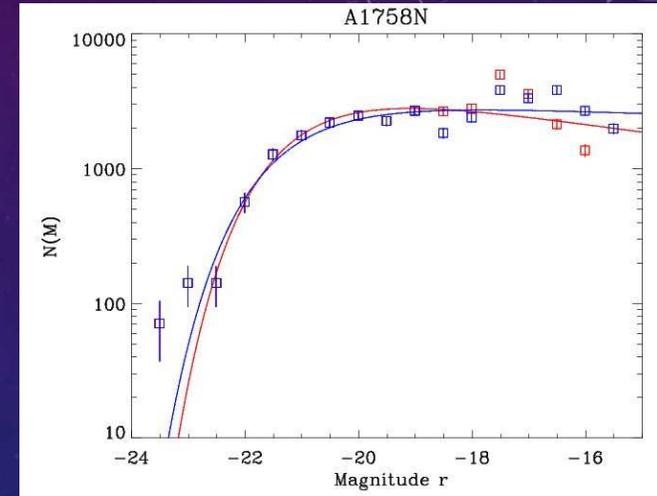
Pentes α peuvent dependre
de la soustraction du fond
A223: excès de galaxies très
brillantes

LA PAIRE D'AMAS ABELL 1758 (Z=0.279)



A1758 Nord

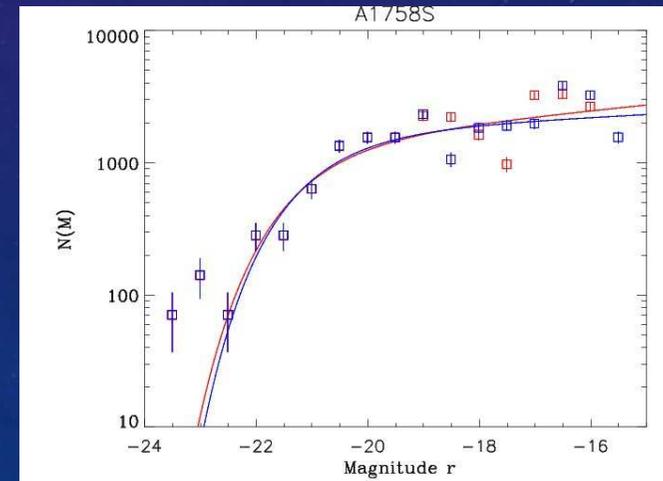
$$g'$$
$$\alpha = -0.86 \pm 0.05$$
$$\alpha = -1.00 \pm 0.02$$
$$r'$$
$$\alpha = -0.85 \pm 0.02$$
$$\alpha = -0.96 \pm 0.02$$



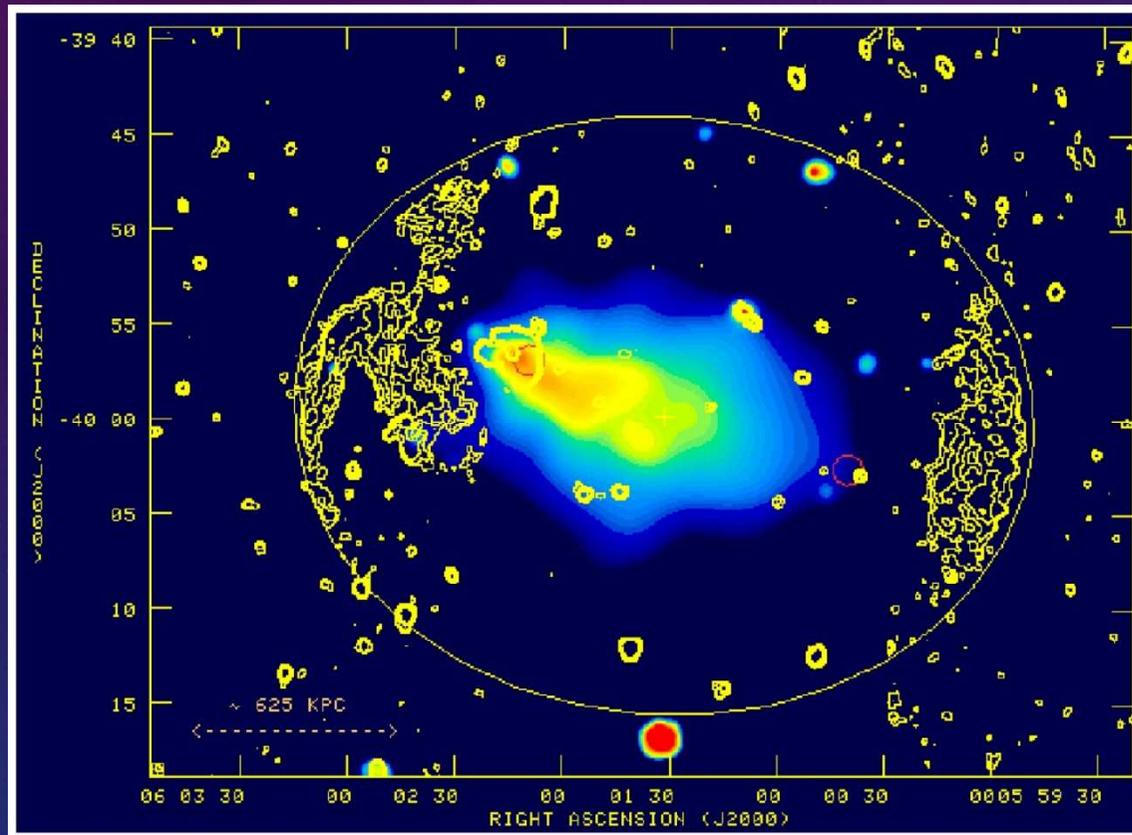
A1758 Sud

$$g'$$
$$\alpha = -0.59 \pm 0.08$$
$$\alpha = -1.12 \pm 0.03$$
$$r'$$
$$\alpha = -1.11 \pm 0.04$$
$$\alpha = -1.06 \pm 0.03$$

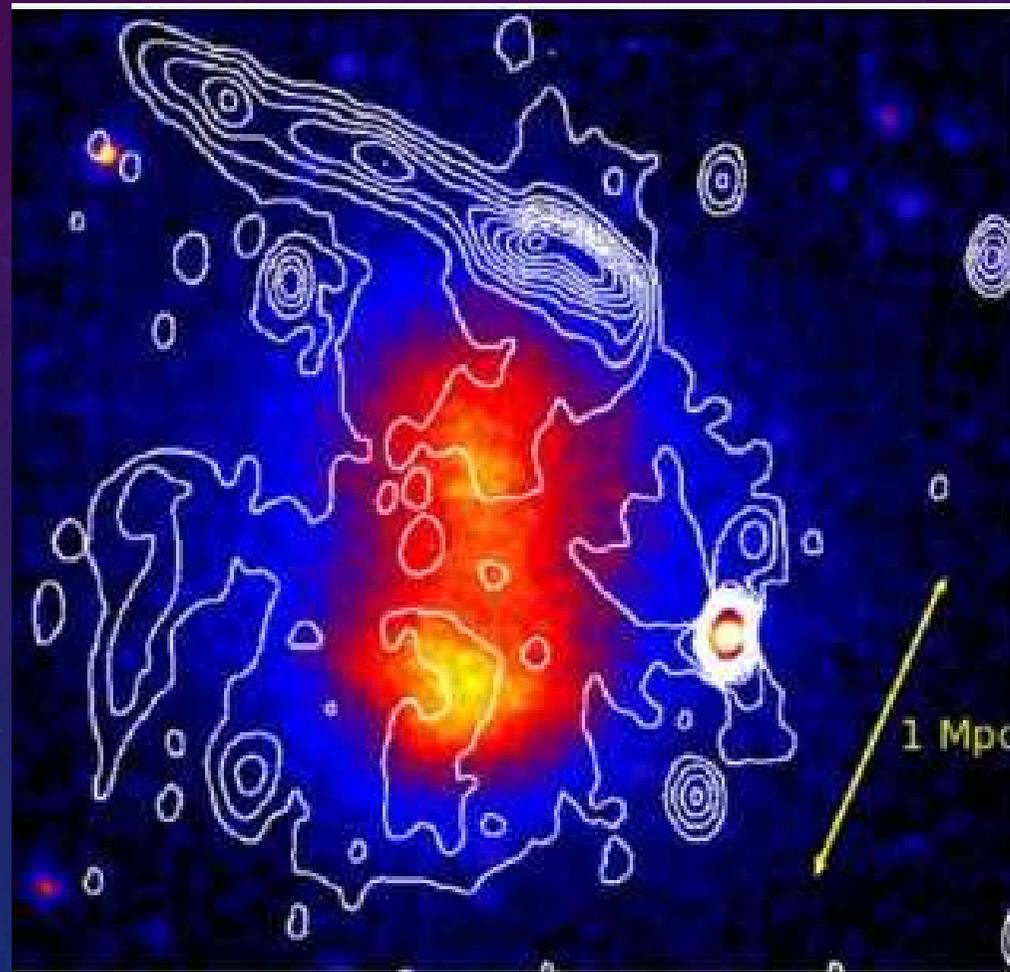
Excès de galaxies
très brillantes



A3376 : EMISSION RADIO (CONTOURS JAUNES) CRÉÉE PAR LA FUSION DE DEUX AMAS



L'AMAS DIT « DE LA BROSSE À DENTS »



Contours radio
sur image X

Röttgering et al. 2013, Astron. Nachr. 334, 333

L'AMAS DIT « DE LA SAUCISSE »

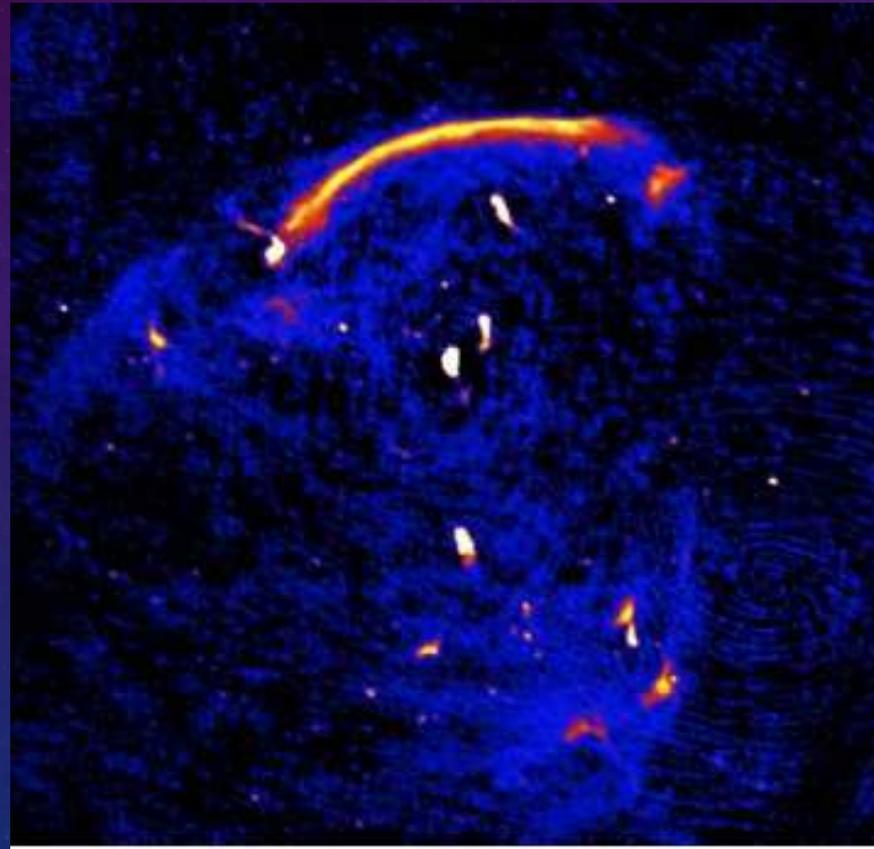


Image radio

Röttgering et al. Astron. 2013 Nachr. 334, 333

INTERPRÉTATION

- La fusion de deux amas crée des ondes de choc qui vont accélérer les électrons
- Les électrons spiralent autour des lignes de champ magnétique, créant du rayonnement synchrotron en radio
- On détecte alors des « reliques radio » (émission radio non liée à des galaxies)

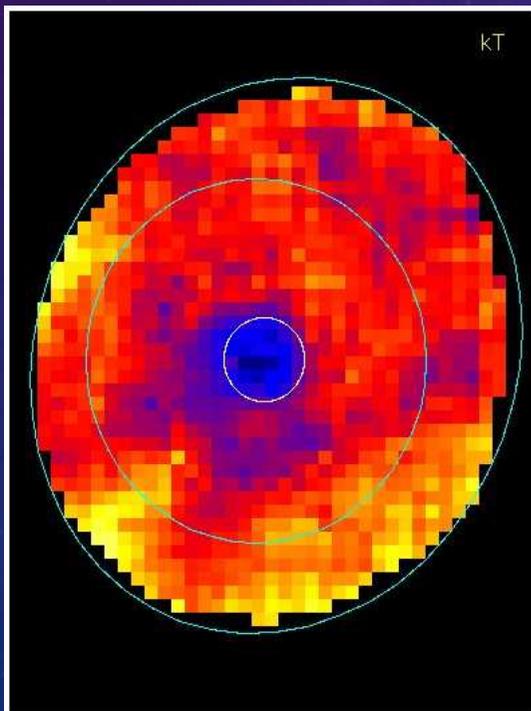
OBSERVATION DU GAZ EMETTEUR X

- On observe le ciel en rayons X grâce à des satellites, car les rayons X sont absorbés par l'atmosphère terrestre et ne parviennent pas au sol
- Depuis bientôt 20 ans, trois grands satellites X sont en orbite : XMM-Newton (européen), Chandra (américain) et Suzaku (japonais)
- Leurs propriétés (respectivement : sensibilité, résolution spatiale et résolution en énergie) sont complémentaires

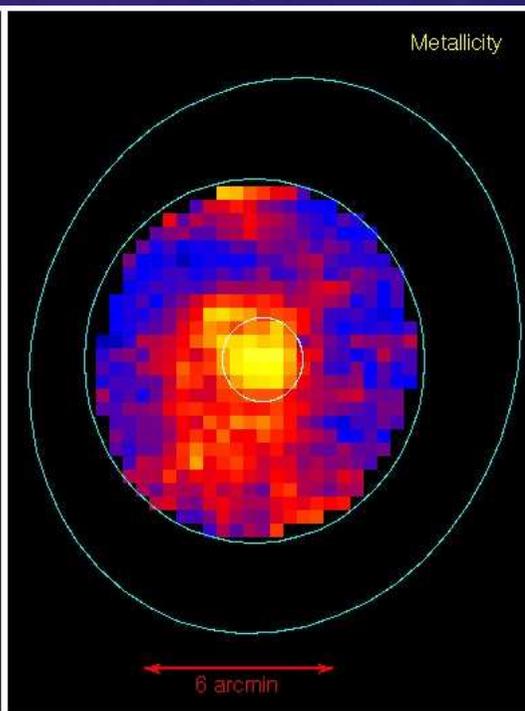
EFFETS DES FUSIONS D'AMAS SUR LE GAZ EMETTEUR X ABELL 496 EST-IL VRAIMENT « RELAXÉ » ?

Cartes en rayons X (XMM-Newton)

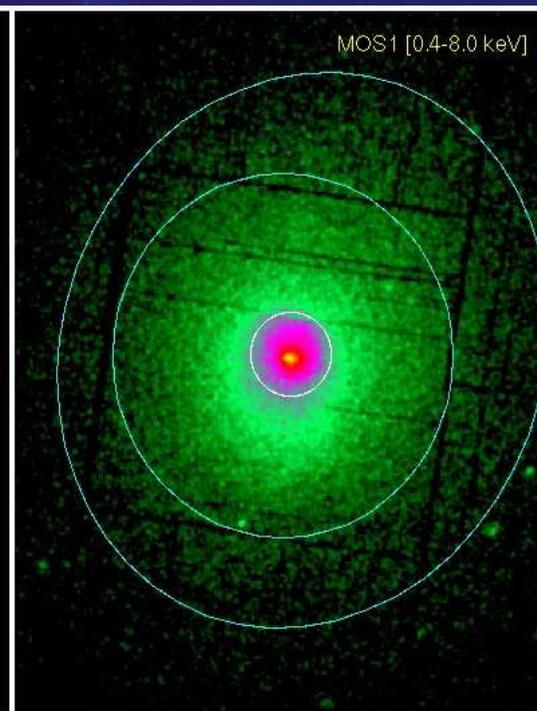
Température



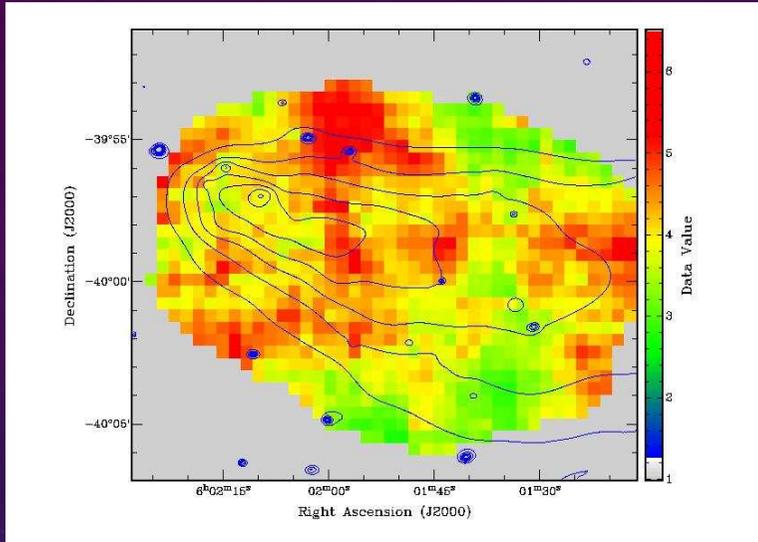
Métallicité (Fe)



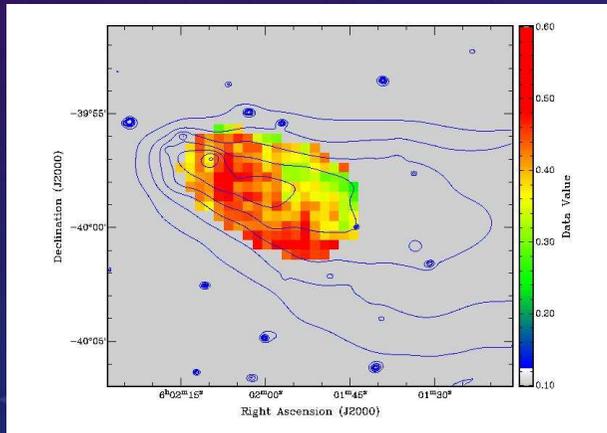
Emissivité



Carte de température (XMM-Newton)



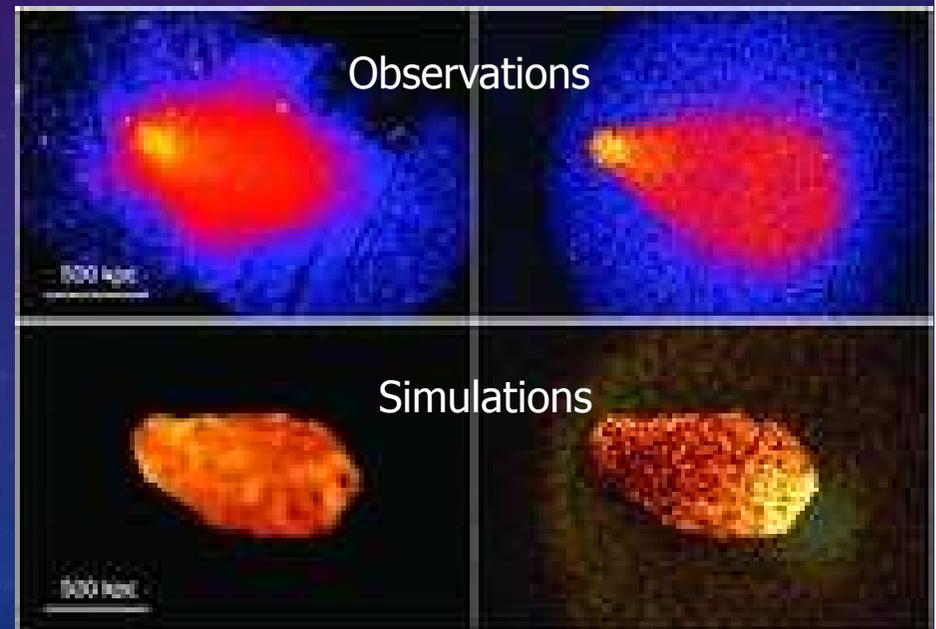
Carte de métallicité (XMM-Newton)



A3376 EN RAYONS X

Emissivité

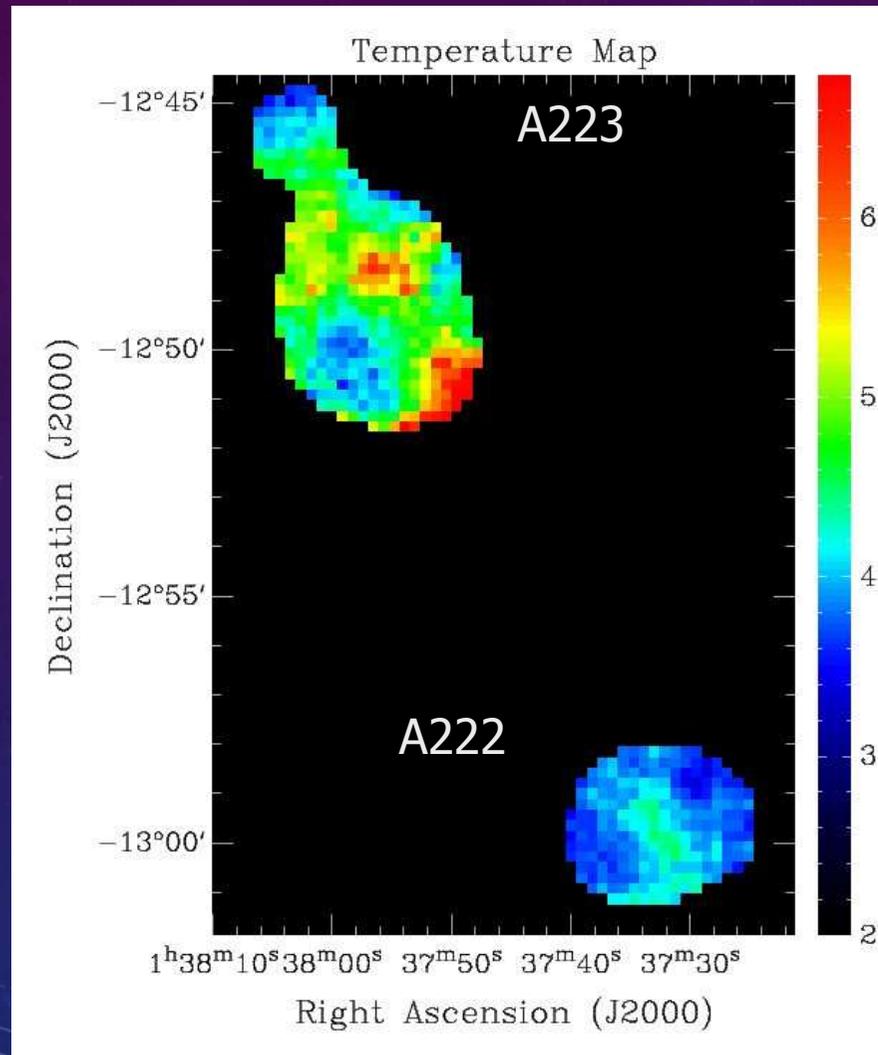
Température



Bagchi, Durret, Lima Neto, Paul,
2006, Science 314, 791

Machado & Lima Neto 2013,
MNRAS 430, 3249

LA PAIRE A222/223 EN RAYONS X



A222:

Pas de perturbation forte en X
mais le centre est plus chaud

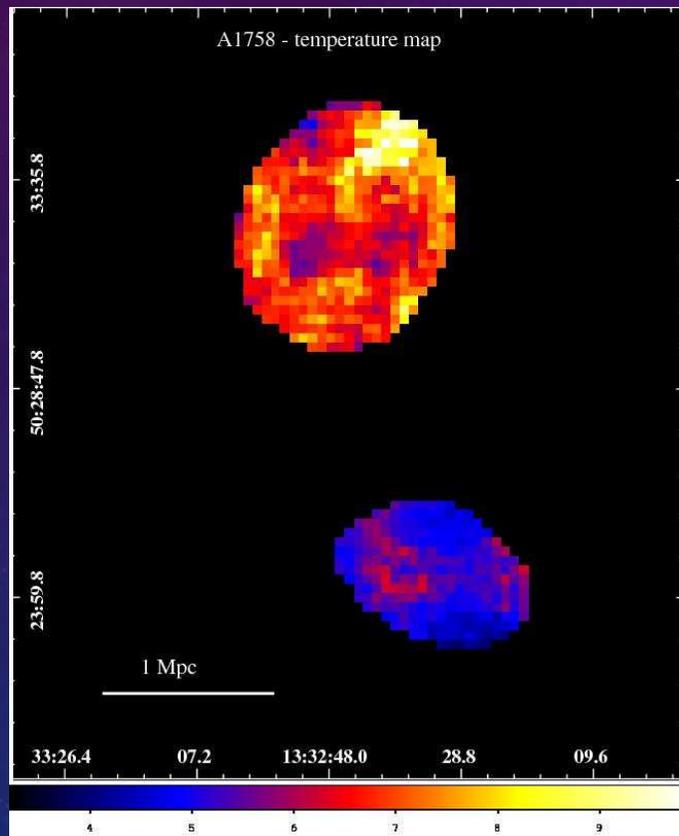
A223:

A été traversé récemment par un
petit amas se dirigeant vers le
nord-est

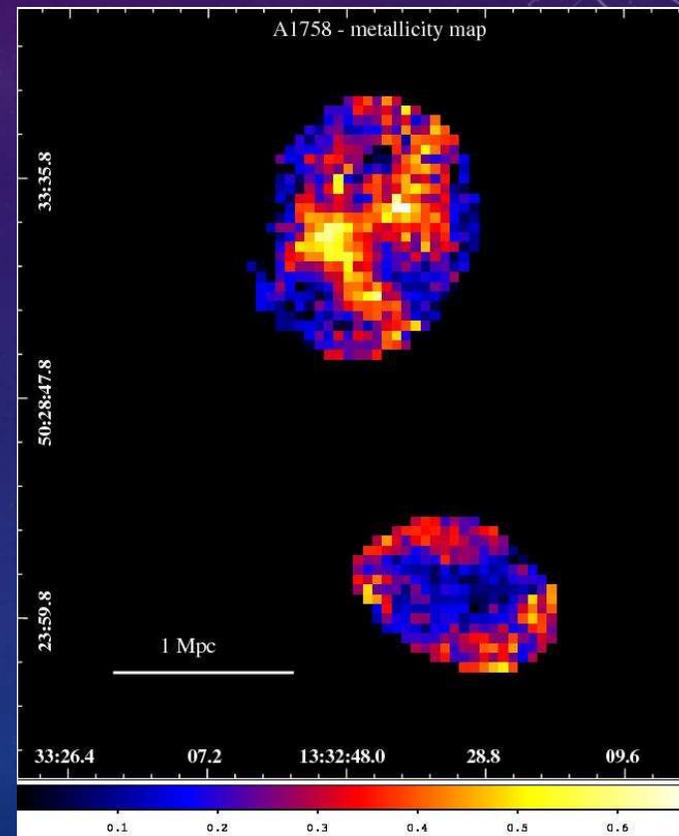
Interaction entre A222 and A223:
filament de matière noire détecté
par effet de lentille faible,
coïncidant avec une surdensité de
galaxies et une émission X faible
et diffuse (Dietrich et al. 2012,
Nature 487, 202)

LA PAIRE A1758 N/S EN RAYONS X

Carte de température

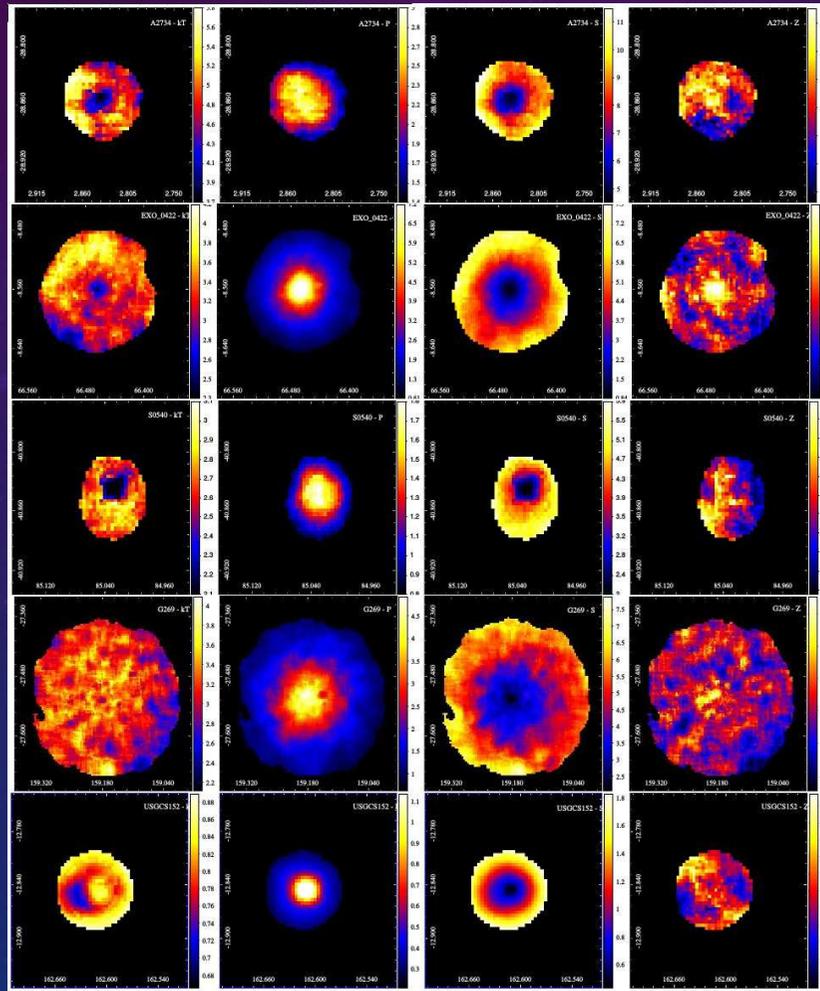


Carte de métallicité



OBTENTION DE CARTES POUR LE GAZ CHAUD DE 53 AMAS

Température Pression Entropie Métallicité



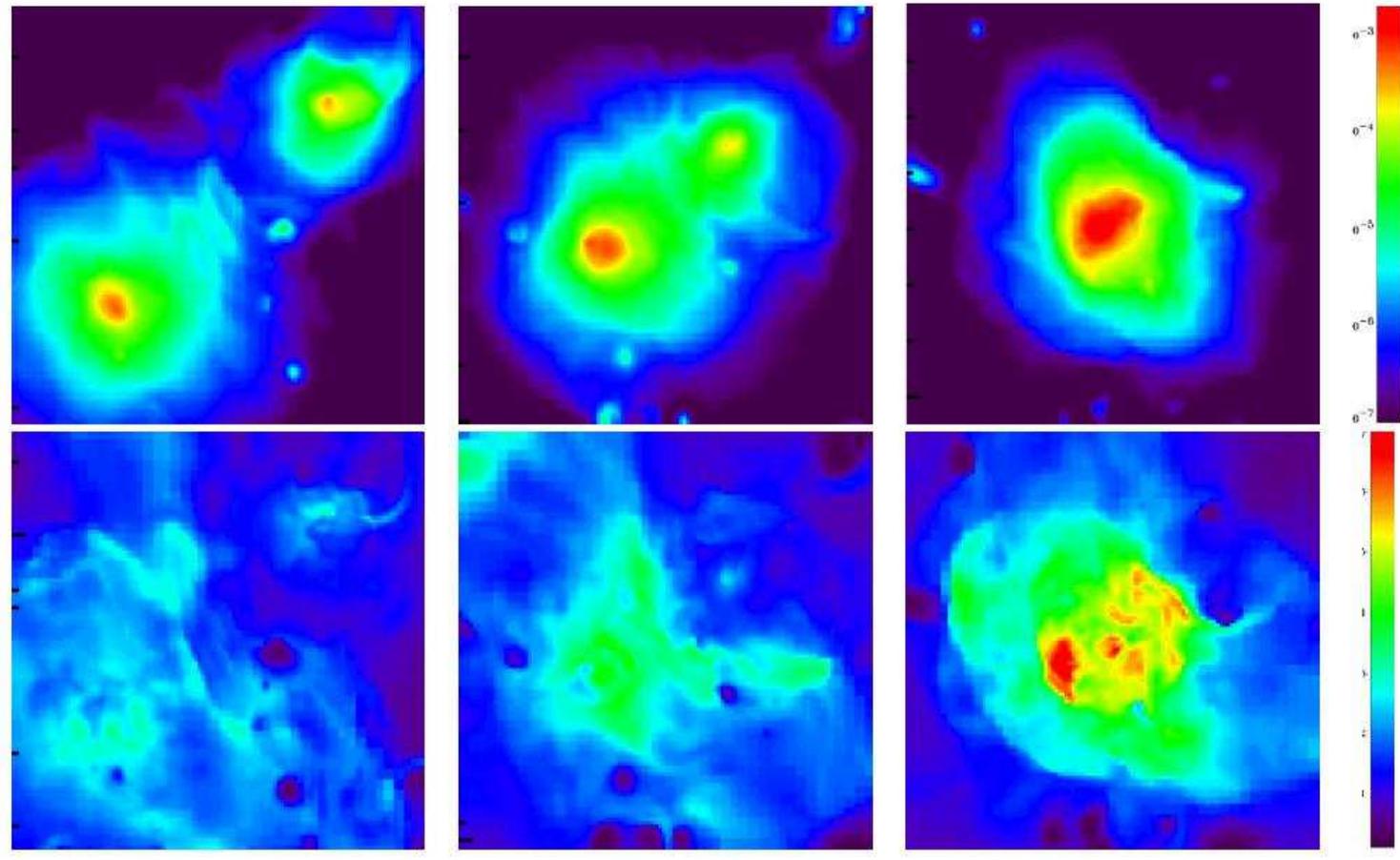
Des simulations hydrodynamiques et une analyse dynamique des vitesses des galaxies suivront...

INTERPRETATION GRACE AUX SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES

$z=0.13$

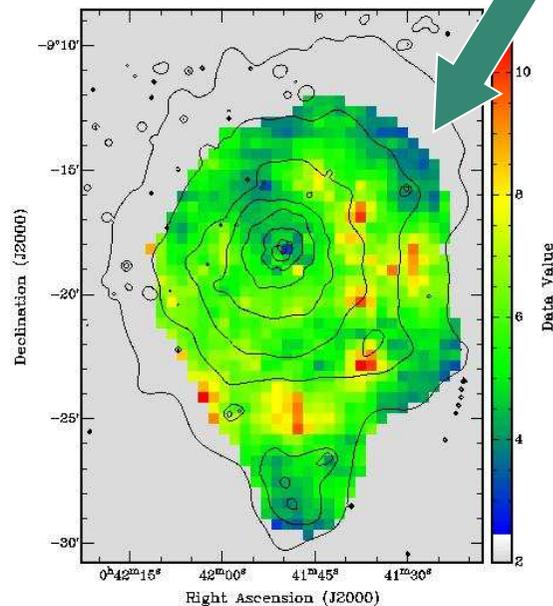
$z=0.09$

$z=0$

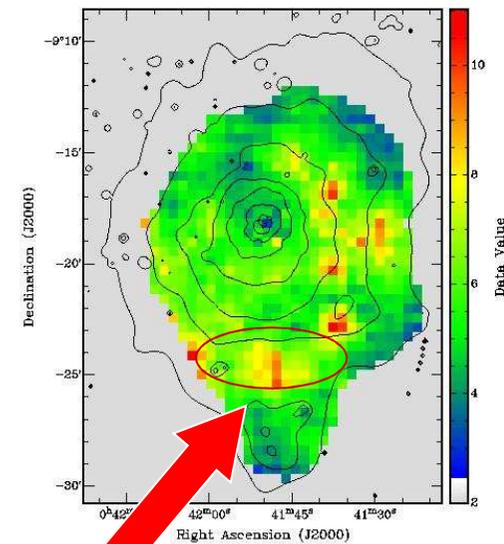


UN SCÉNARIO POUR ABELL 85 : CET AMAS A SUBI PLUSIEURS FUSIONS

Fusion plus ancienne (3-4 Gyr) avec un amas moins massif venant du NW



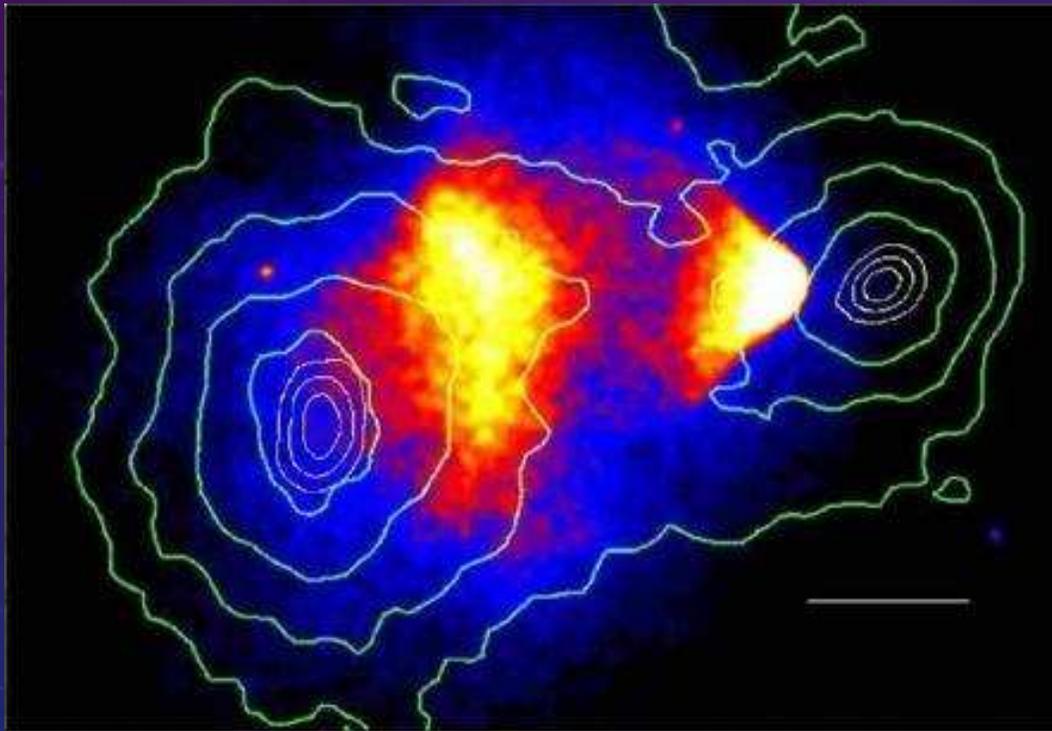
Chute (encore en cours) le long du filament de groupes venant du sud-est et arrivant sur la zone d'impact



Chute de groupes

QUE NOUS APPRENNENT LES FUSIONS D'AMAS ?

Les distributions du gaz X et de la matière noire (calculée à partir de l'effet de lentille gravitationnelle) peuvent être différentes



L'amas du boulet
(1E0657-56)

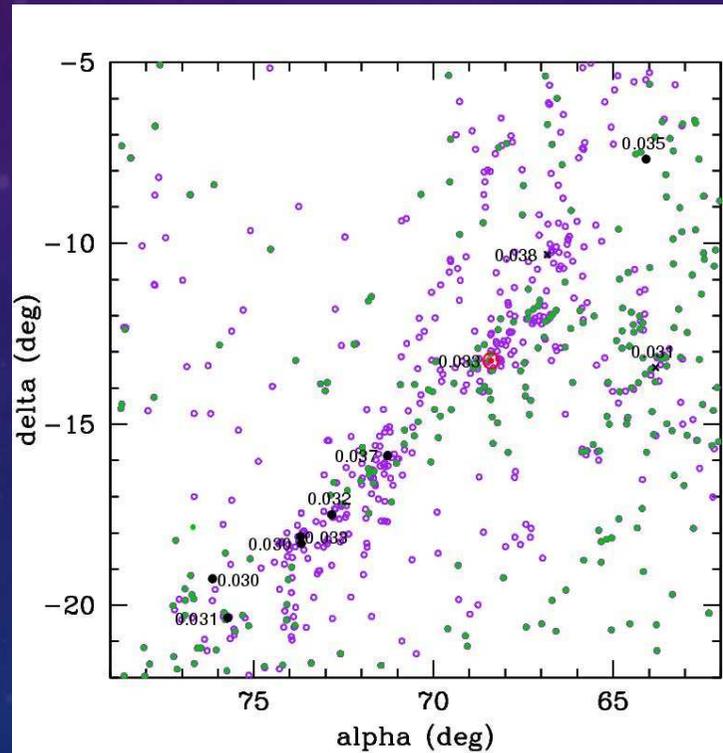
*Image en X et contours
de la distribution de
masse totale calculée
par effet de lentille
faible*

Clowe, Gonzalez & Markevitch 2004, ApJ 604, 596
Clowe et al. 2006, ApJ 648, 109

III. LES AMAS DANS LA TOILE COSMIQUE

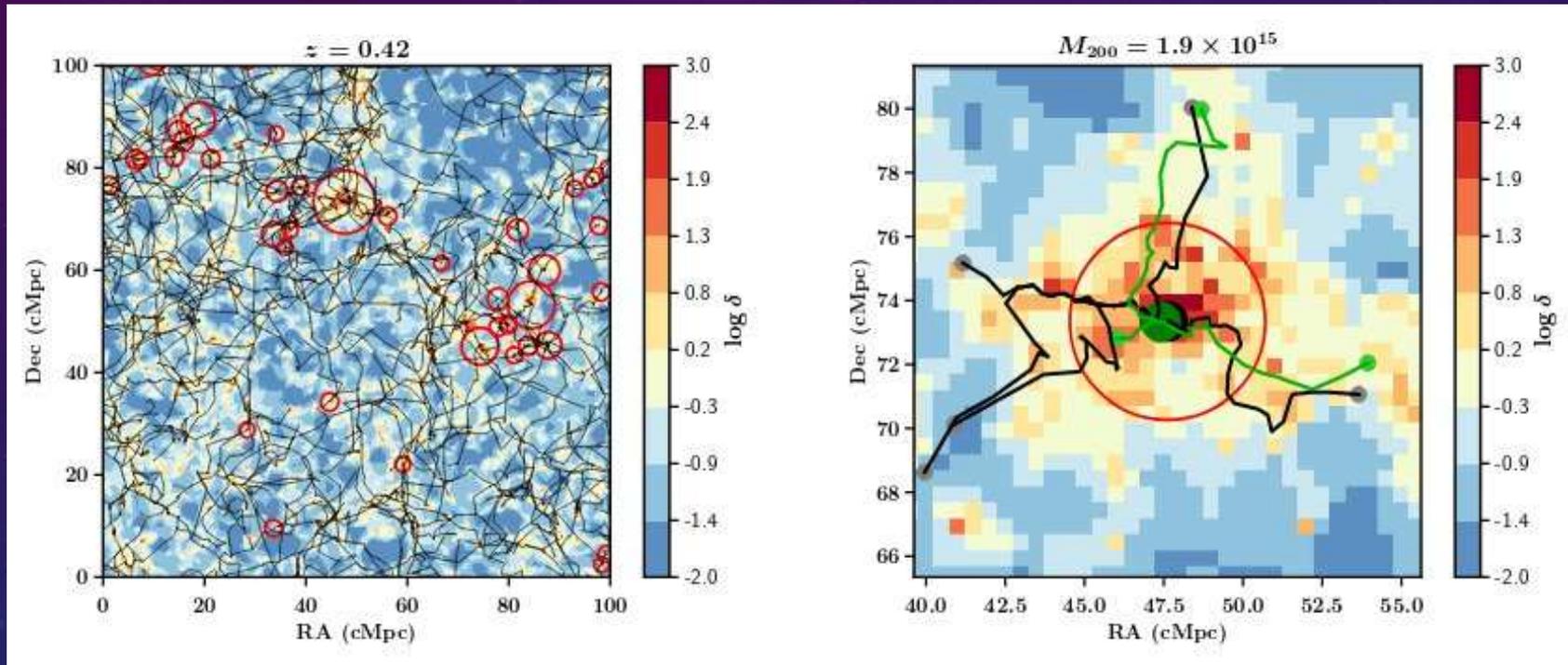
III. 1. DETECTION DES FILAMENTS AUTOUR DES AMAS

A496 et son environnement : un filament de galaxies, groupes, amas



Boué, Adami, Durret, Mamon & Cayatte 2007, A&A 479, 335

RECHERCHE DE FILAMENTS AUTOUR DES AMAS DU CFHTLS



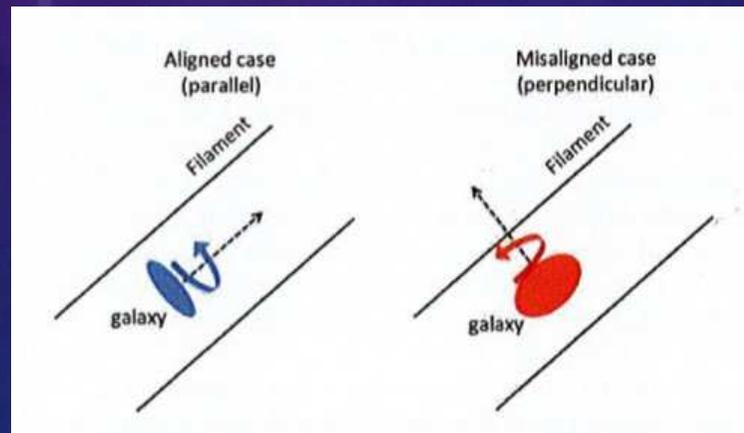
Tests sur des simulations et application au CFHTLS

Sarron, Durret, Adami & Laigle 2019, A&A en préparation

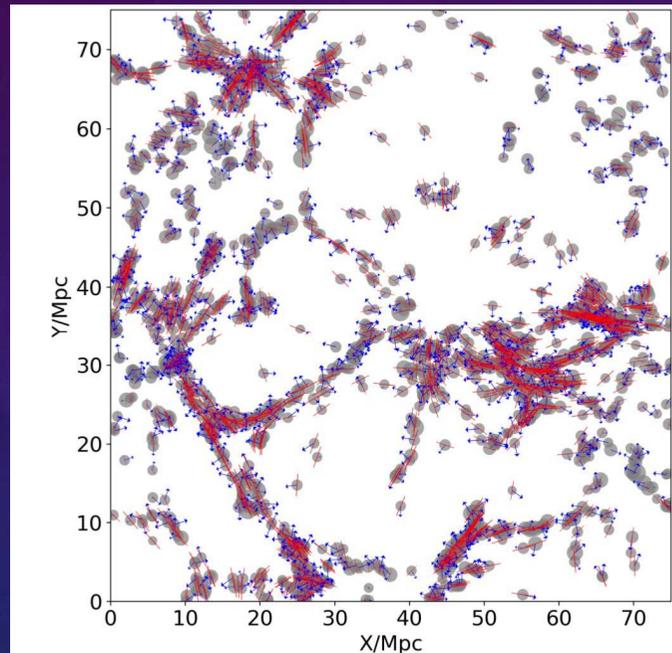
III. 2. DISTRIBUTION/ORIENTATION DES GALAXIES LE LONG DES FILAMENTS

Dans les simulations, l'orientation des galaxies de type précoce et tardif n'est pas la même relativement au filament qui les contient

(Codis et al. 2012, Dubois et al. 2014)



Ces propriétés commencent à être observées sur de
« vraies » images de manière convaincante

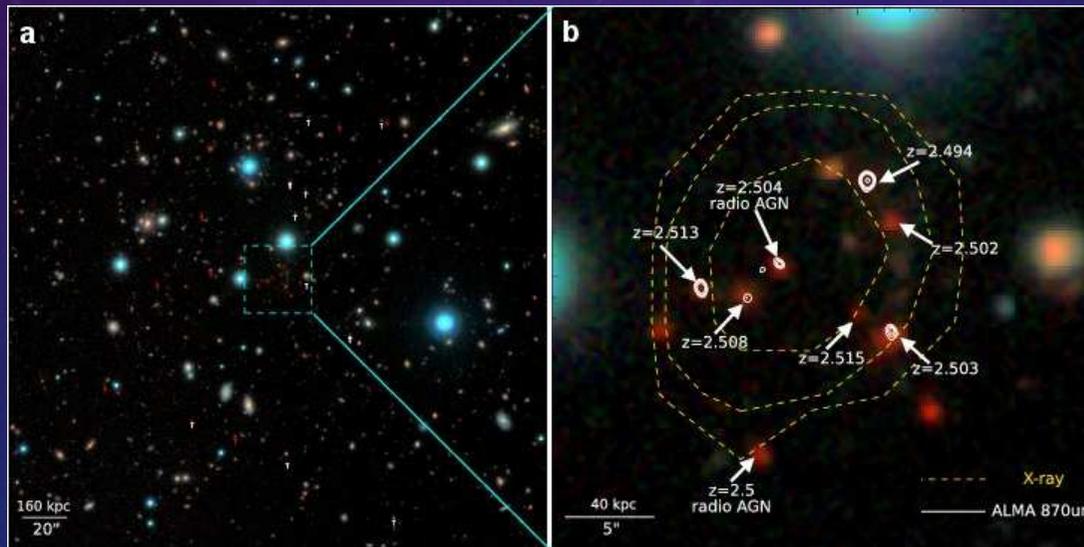


Wang et al. 2018, arXiv:1810.04581

Notre équipe fait le même travail à partir d'images HST de MACS J0717

CONCLUSIONS

- Les propriétés des galaxies dépendent fortement de leur environnement
- Les fusions d'amas ont des effets importants tant sur les galaxies que sur le gaz émetteur X
- Le nombre d'amas à $z > 2$ augmente de jour en jour



L'amas de plus lointain connu $z=2.506$

Wang et al. 2016, ApJ 828, 56

PERSPECTIVES

- Notre équipe :
 - Analyse détaillée des propriétés de MACS J0717.5+3747 (lumière diffuse, fonction de luminosité et orientation des galaxies le long des filaments)
 - BCGs à grand z
 - Lumière diffuse dans les amas du relevé UNIONS
- Découverte et analyse multi-longueur d'onde d'amas plus lointains pour mieux comprendre leur formation
- Découverte et étude de très grands échantillons d'amas

LE SATELLITE EUCLID (INFRAROUGE)



- Satellite de l'ESA, lancement prévu en 2020
- Tests sur l'énergie noire et la matière noire
- Tests sur l'effet de lentille gravitationnelle
- Mesure des formes des galaxies et des redshifts photométriques sur 15000 degrés carrés
- Environ 100 000 amas de galaxies devraient être détectés

L'AVENIR EN RAYONS X



Le satellite européen Athena :
lancement en 2028