



CENTRE DE RECHERCHE ASTROPHYSIQUE DE LYON

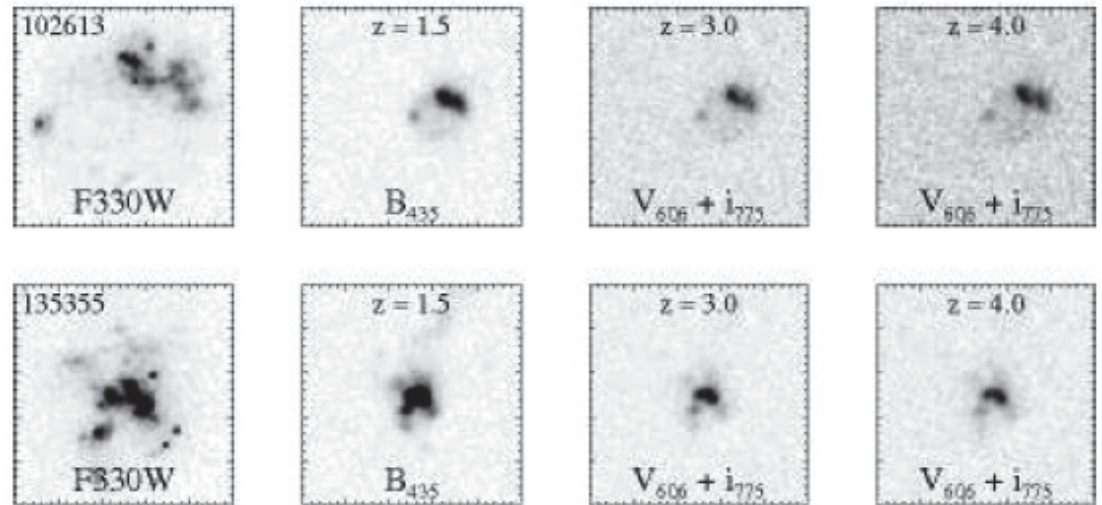
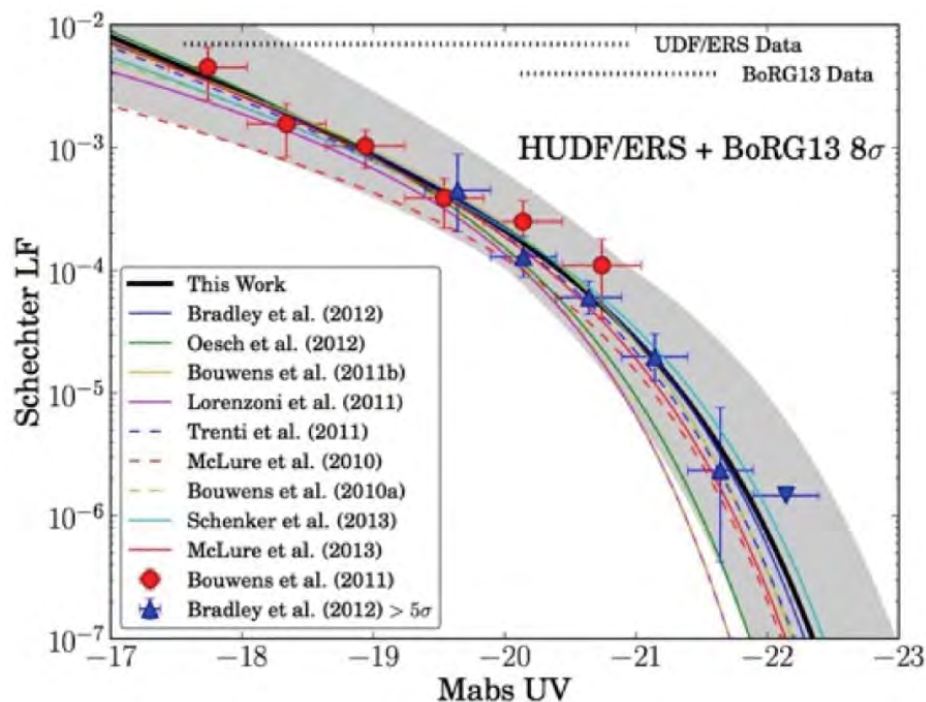
# Les champs Frontières du HST

**JOHAN RICHARD (CRAL)**  
Collège de France - 13 janvier 2020



# Limites Observationnelles des sources de la Réionisation

- Bonne connaissance de la fonction de luminosité pour la partie brillante, mais peu de contraintes sur la partie la plus faible. Impact des **galaxies de faible luminosité** sur la réionisation ?
- Résolution très limitée pour étudier la **structure interne et l'évolution de ces galaxies** : quand se sont formés les premiers disques ?



# Fonction de Luminosité des Galaxies Distantes

$$\dot{n}_{\text{ion}} = f_{\text{esc}} \xi_{\text{ion}} \rho_{\text{UV}}$$

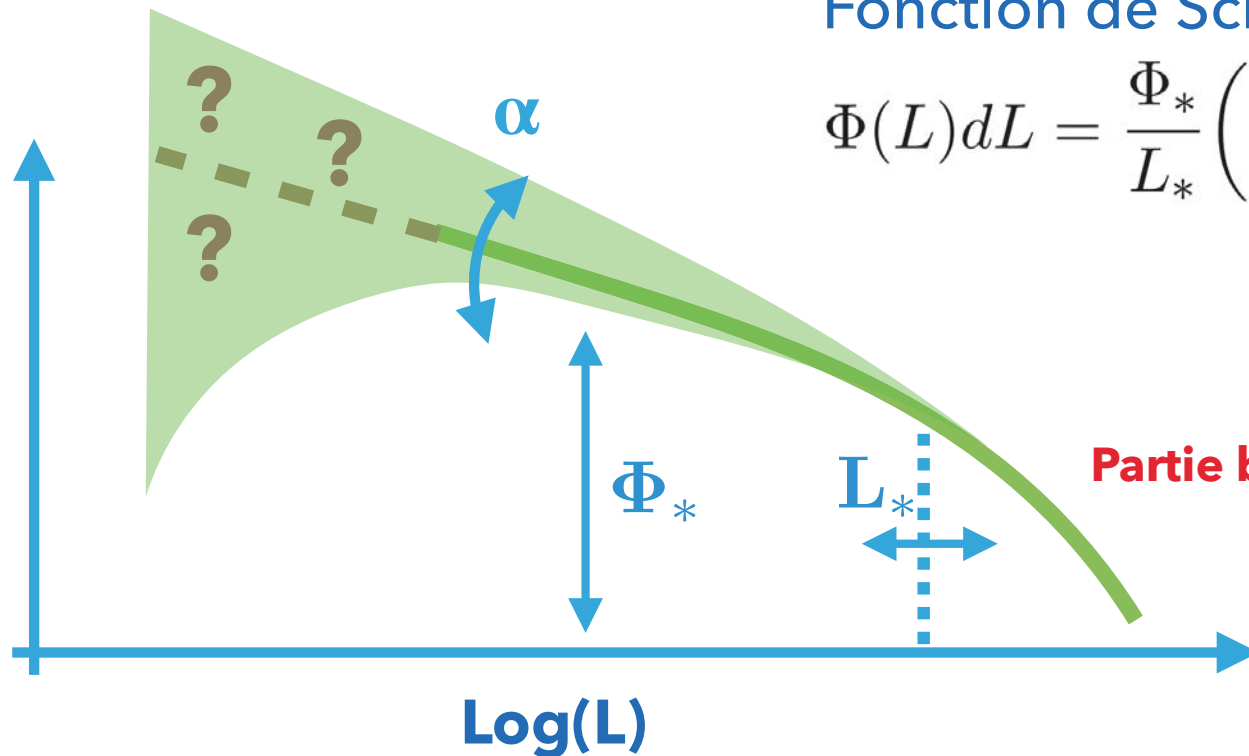
$\rho_{\text{UV}}$  Abondance des galaxies

$\xi_{\text{ion}}$  Taux de photons ionisants

$f_{\text{esc}}$  Fraction d'échappement

Densité Numérique  
Log (Gal / Mpc<sup>3</sup> / Lum)

Faibles Luminosités



Fonction de Schechter

$$\Phi(L)dL = \frac{\Phi_*}{L_*} \left( \frac{L}{L_*} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_*}\right)$$

# Fonction de Luminosité des Galaxies Distantes

$$\dot{n}_{\text{ion}} = f_{\text{esc}} \xi_{\text{ion}} \rho_{\text{UV}}$$

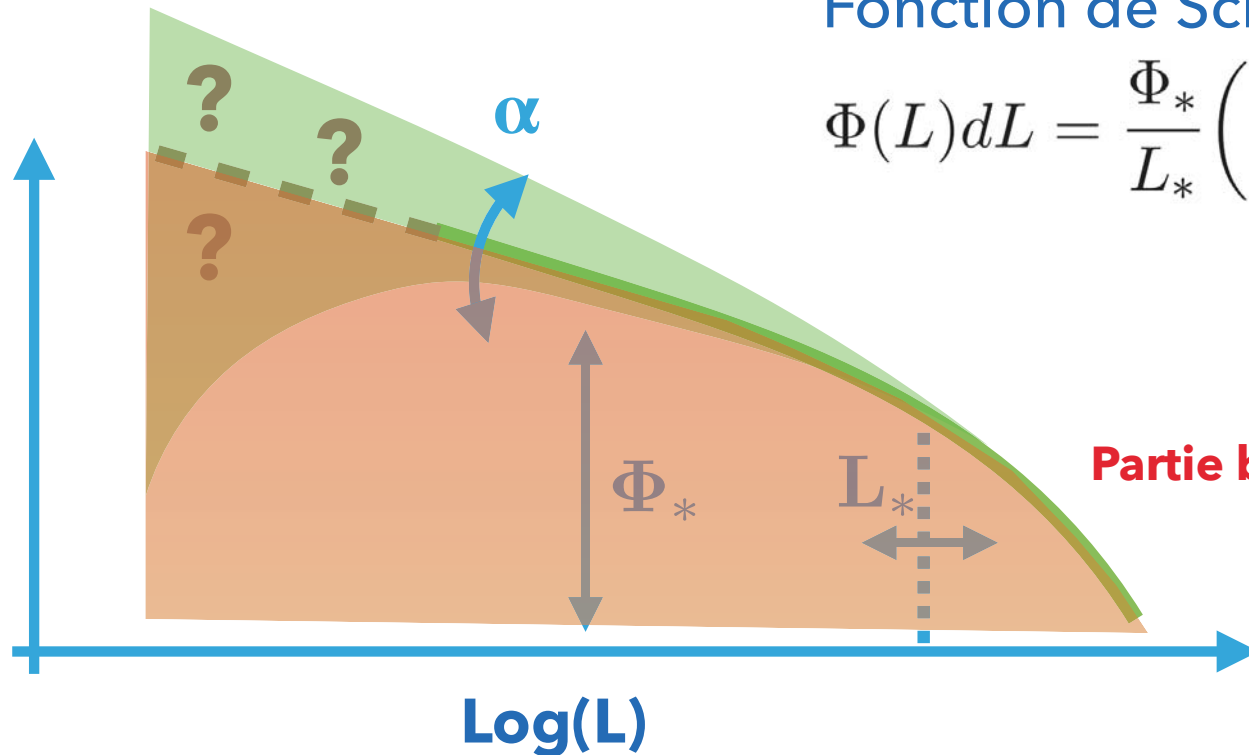
$\rho_{\text{UV}}$  Abondance des galaxies

$\xi_{\text{ion}}$  Taux de photons ionisants

$f_{\text{esc}}$  Fraction d'échappement

Densité Numérique  
Log (Gal / Mpc<sup>3</sup> / Lum)

Faibles Luminosités



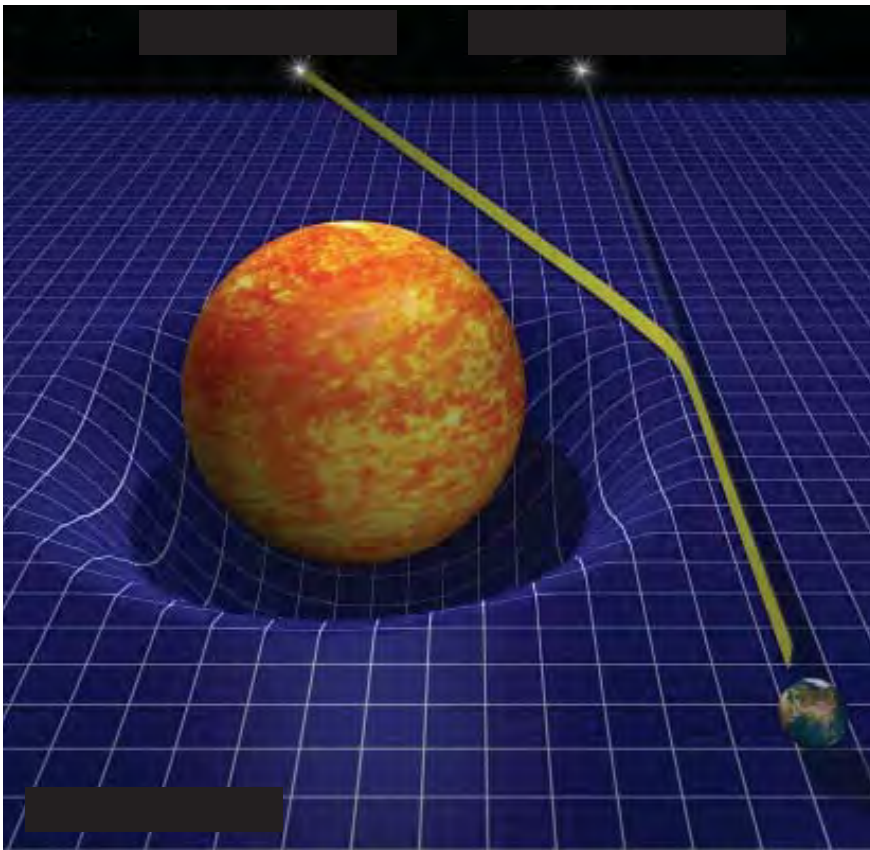
Fonction de Schechter

$$\Phi(L)dL = \frac{\Phi_*}{L_*} \left( \frac{L}{L_*} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_*}\right)$$

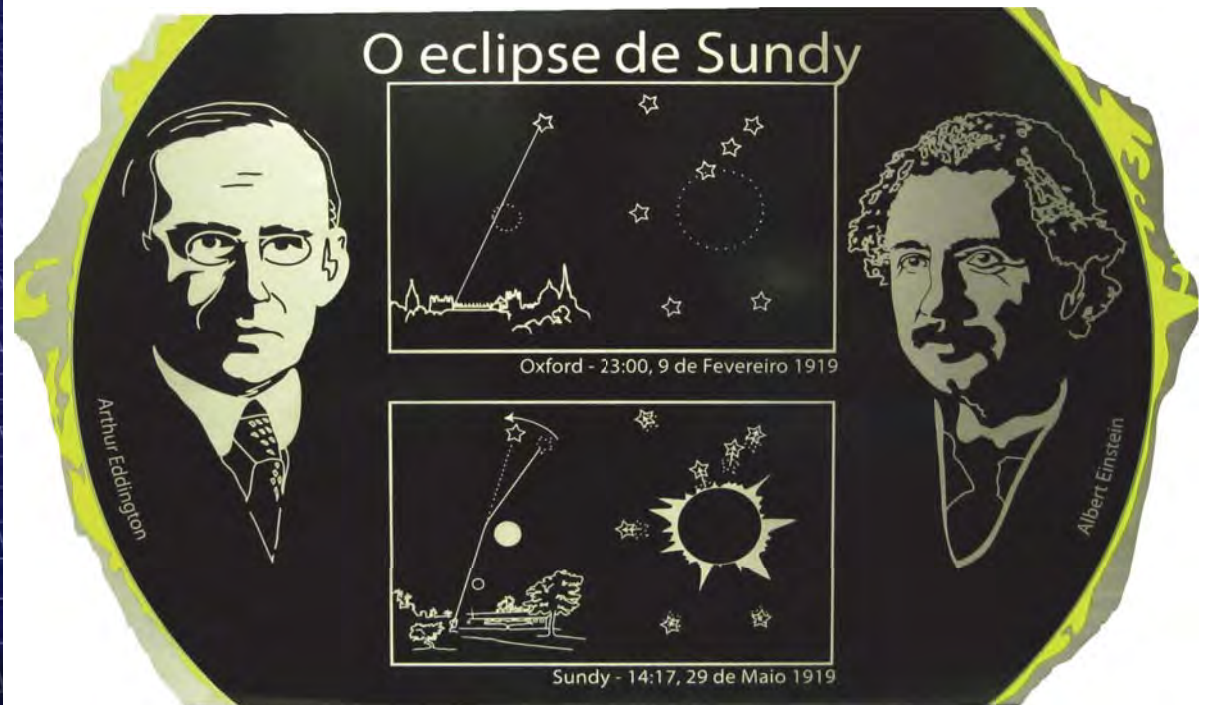
Partie brillante

# Lentilles Gravitationnelles

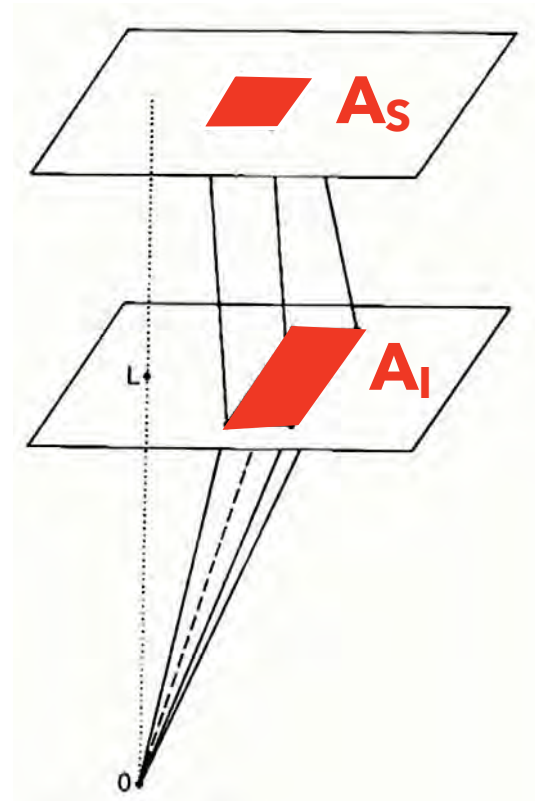
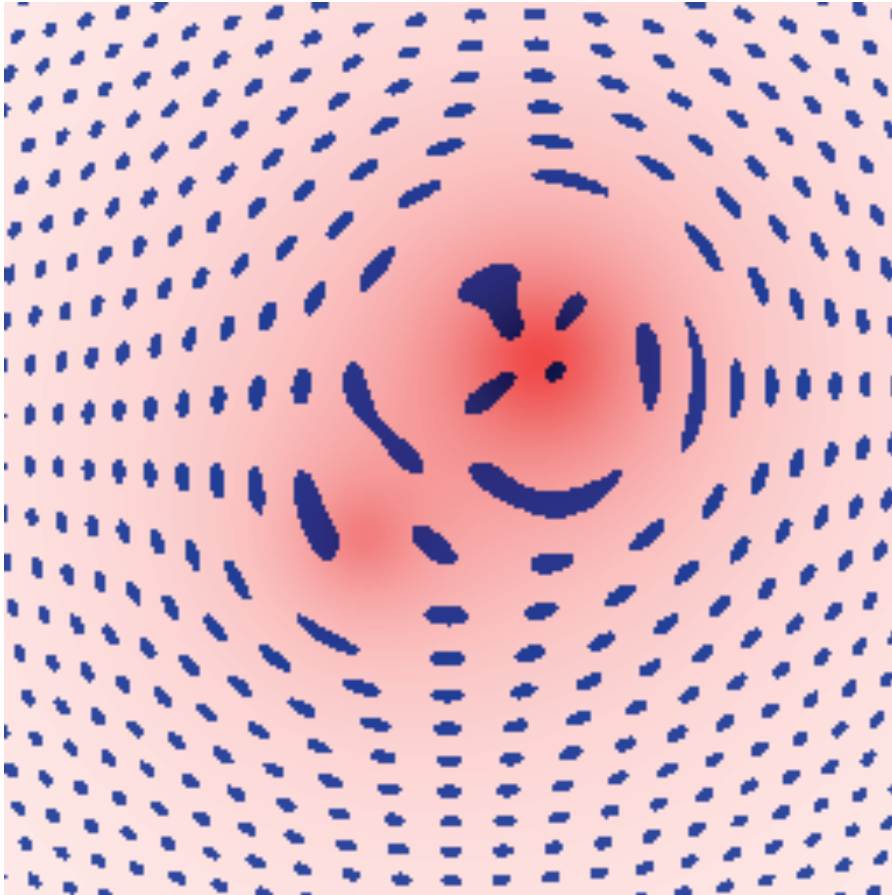
Déflexion des rayons lumineux par la courbure de l'Espace (RG)



Eclipse solaire du 29 Mai 1919, île de Príncipe



# Les différents effets....

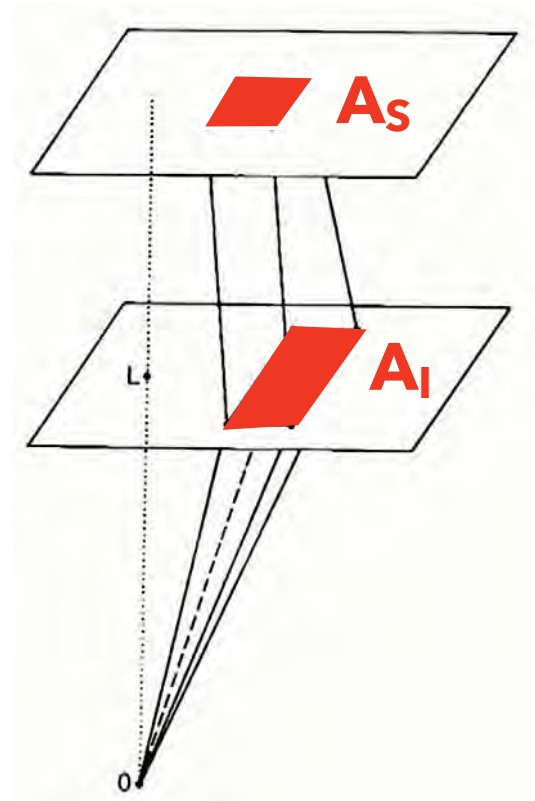
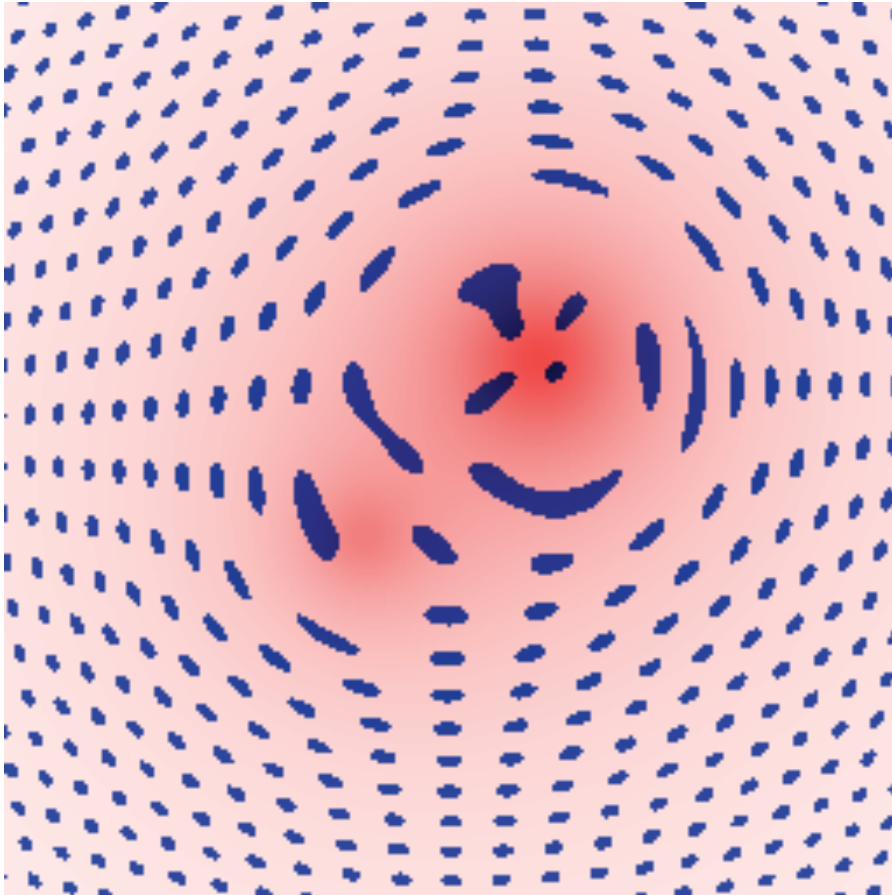


$$\mu = \frac{A_I}{A_S}$$

- Déplacement de l'image de la source ( $\alpha$ ) - mesure d'Eddington
- Augmentation de surface à brillance surfacique constante  
=> **amplification**
- Multiplication des images (cas de très forte amplification)  
=> effet de **lentille forte**



# Les différents effets....

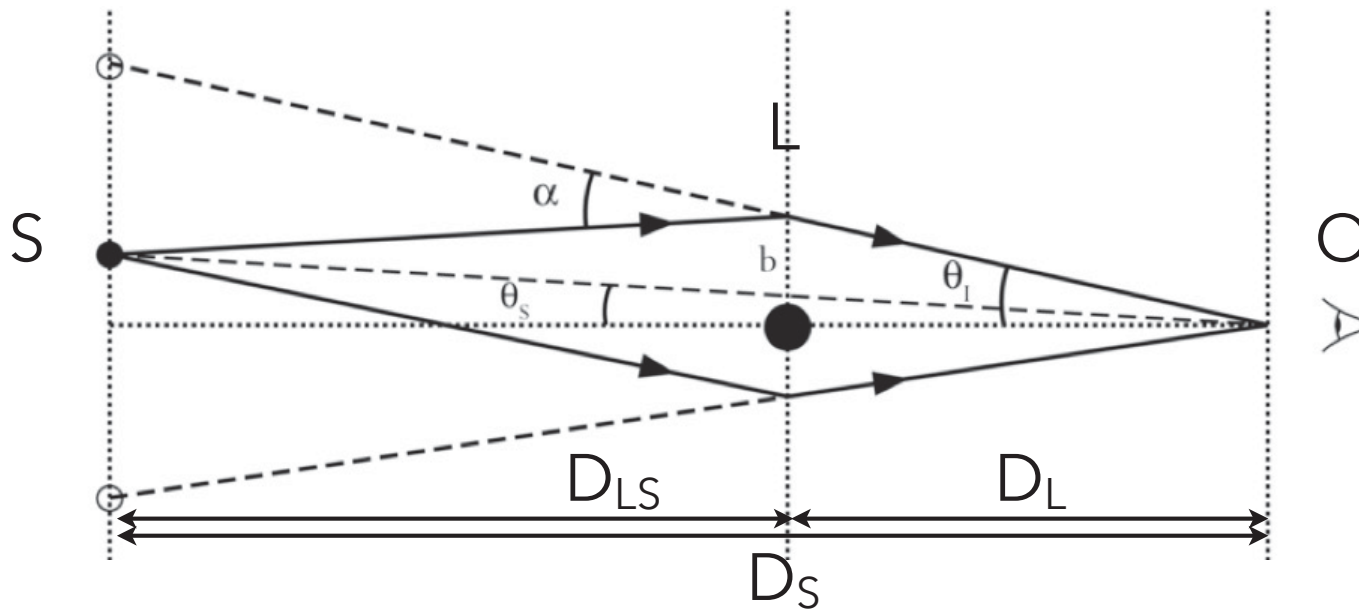


$$\mu = \frac{A_I}{A_S}$$

- Déplacement de l'image de la source ( $\alpha$ ) - mesure d'Eddington
- Augmentation de surface à brillance surfacique constante  
=> **amplification**
- Multiplication des images (cas de très forte amplification)  
=> effet de **lentille forte**

# Rayon d'Einstein

Échelle de l'effet de lentille gravitationnelle fort



$$\alpha = 4 \frac{GM}{c^2 b}$$

$$\theta_E = \left( \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right)^{1/2}$$



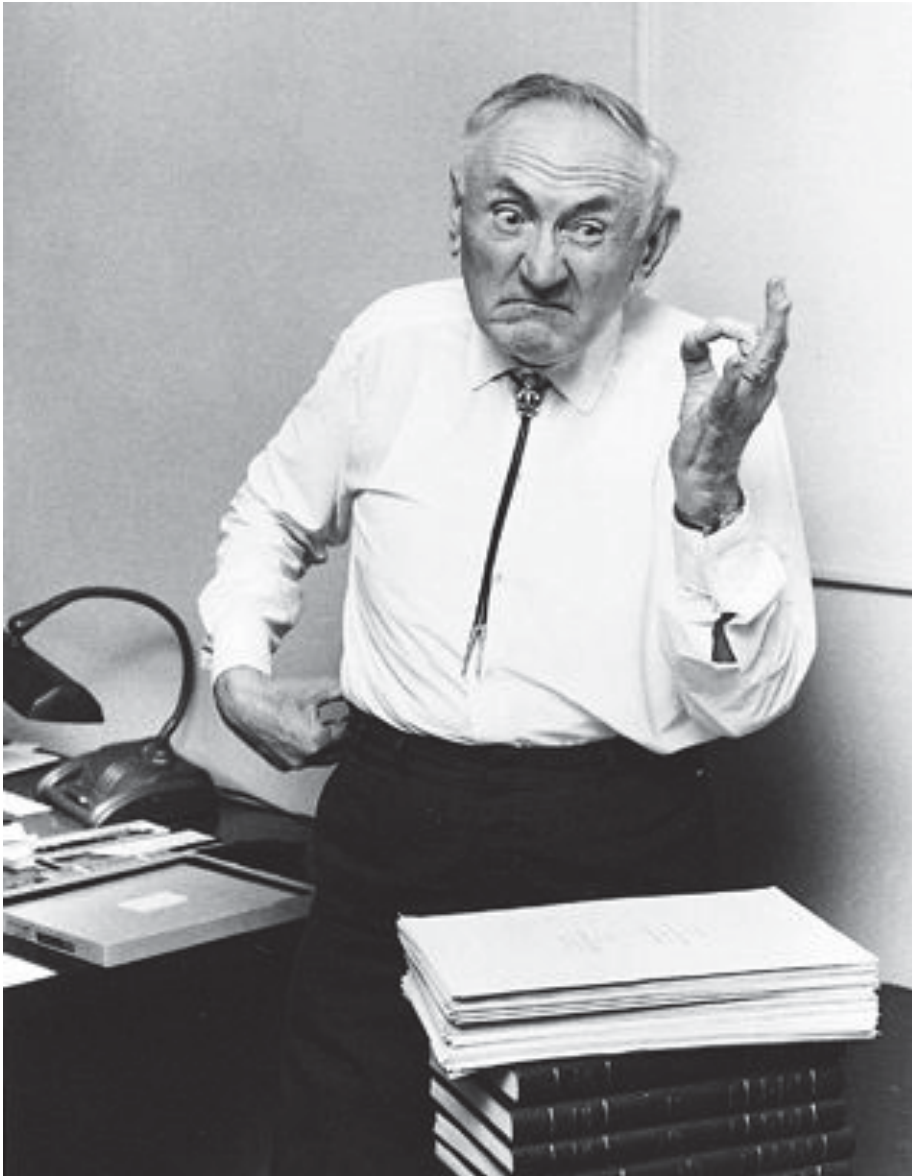
$$\alpha \sim 1.8'', \theta_E \sim 0.003''$$

$$\theta_E \sim 0.001''$$

$$\theta_E \sim 1''$$



# Fritz Zwicky, le précurseur



Les amas de galaxies contiennent une majorité de matière noire, n'émettant pas de rayonnement.



Zwicky (1937)

The discovery of images of nebulae which are formed through the gravitational fields of nearby nebulae would be of considerable interest for a number of reasons.

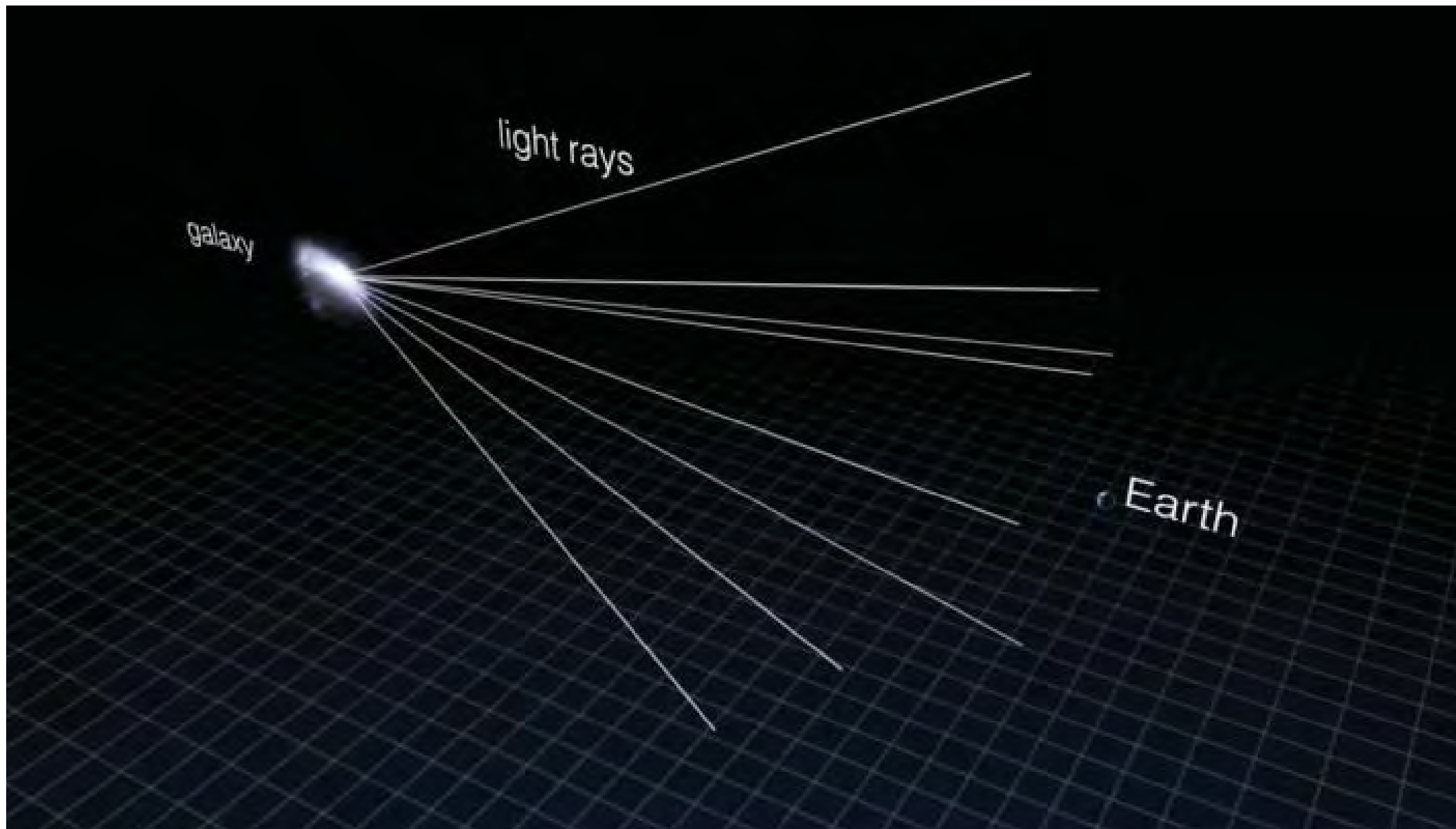
(1) It would furnish an additional test for the general theory of relativity.

(2) It would enable us to see nebulae at distances greater than those ordinarily reached by even the greatest telescopes. Any such *extension* of the known parts of the universe promises to throw very welcome new light on a number of cosmological problems.

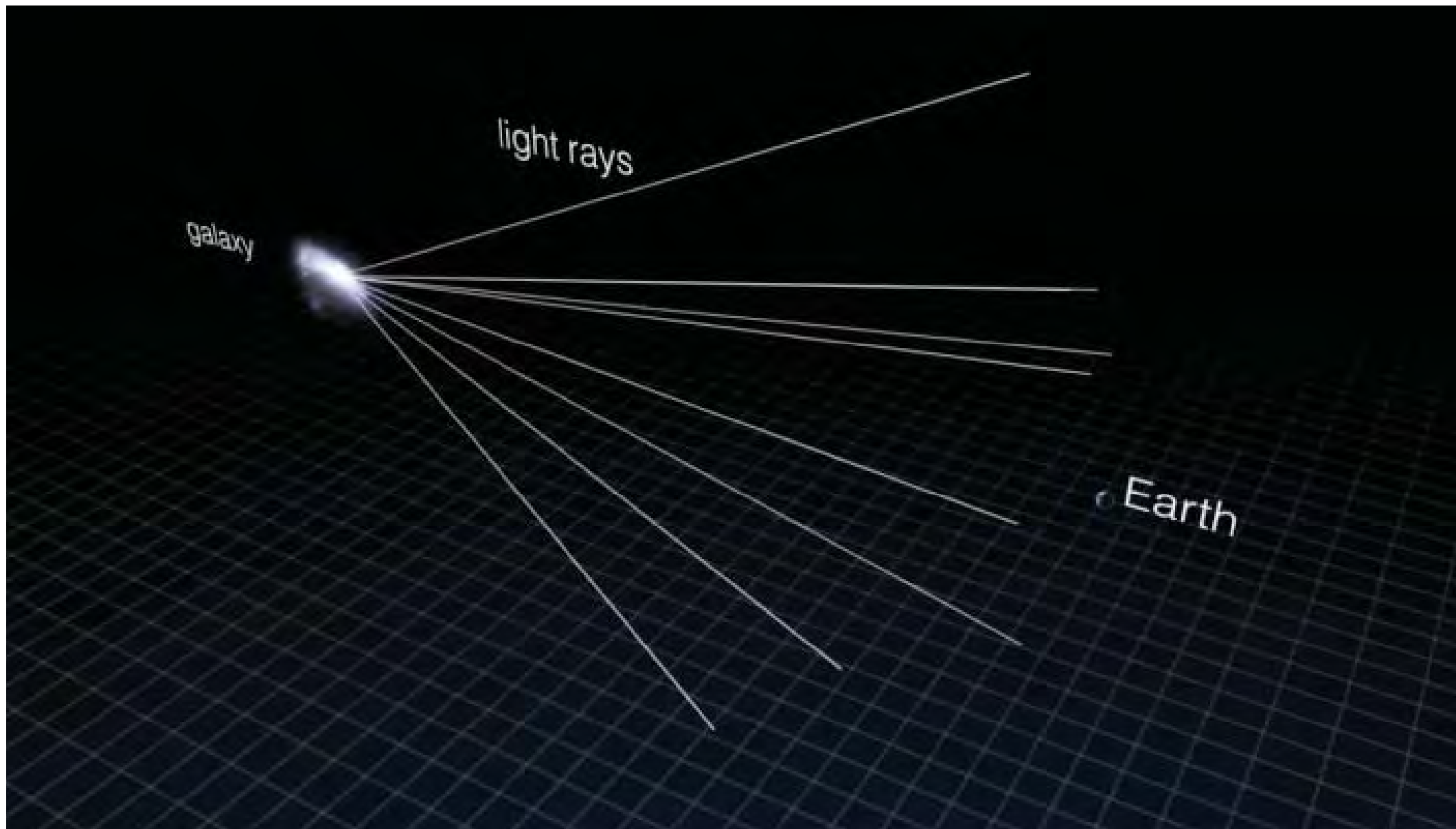
“Telescope gravitationnel”

(Nottale et al. 1987)

# Images multiples

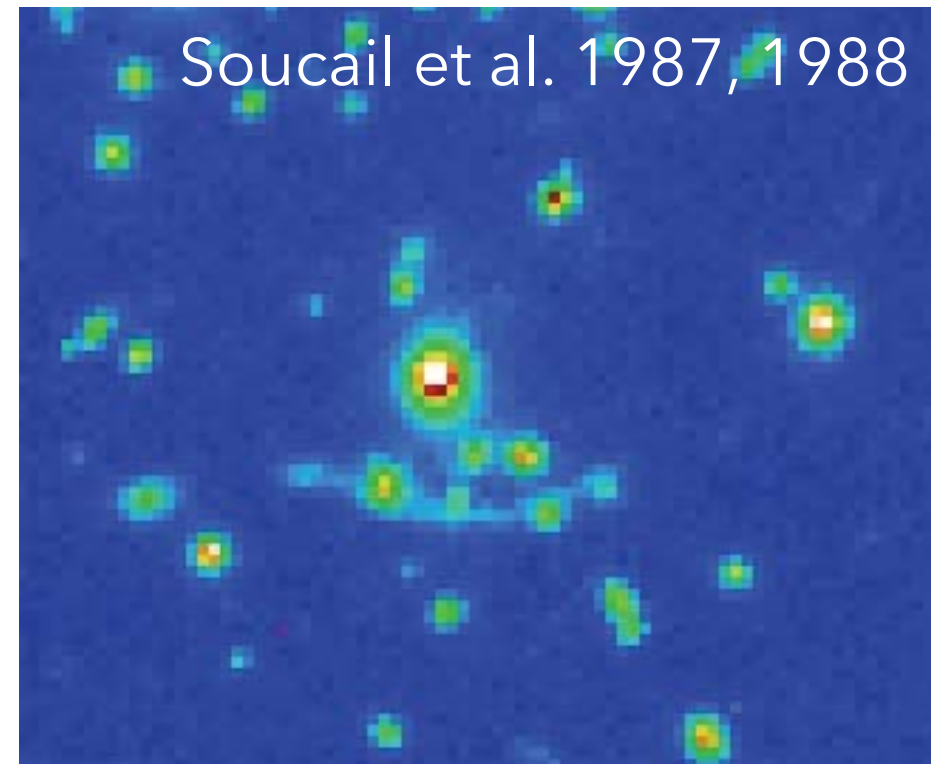
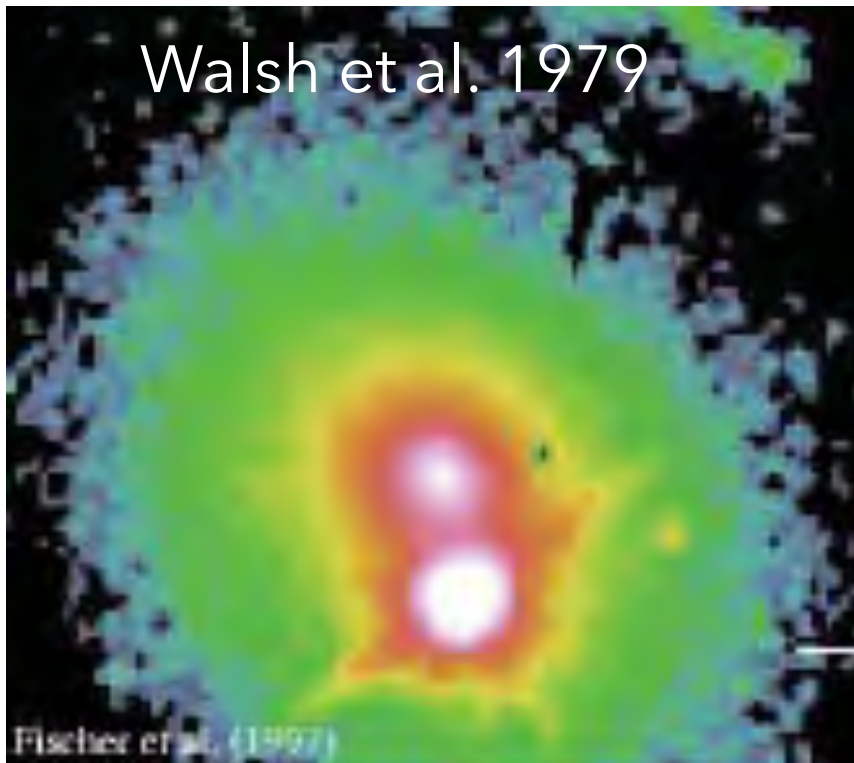
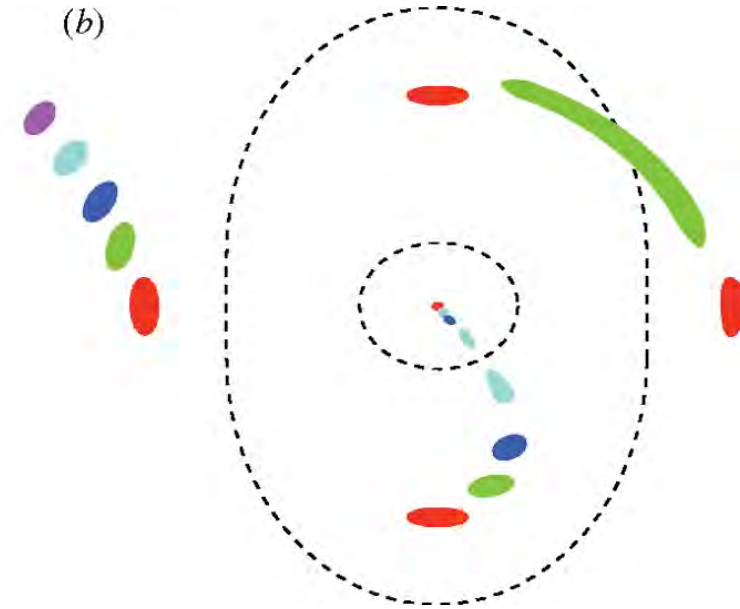
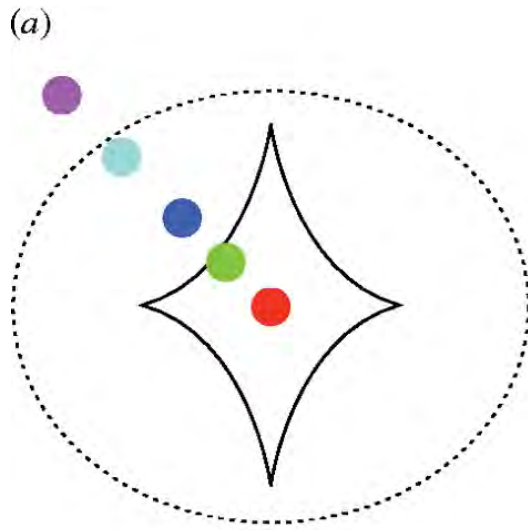


# Images multiples





# Premières observations



# La puissance du télescope spatial

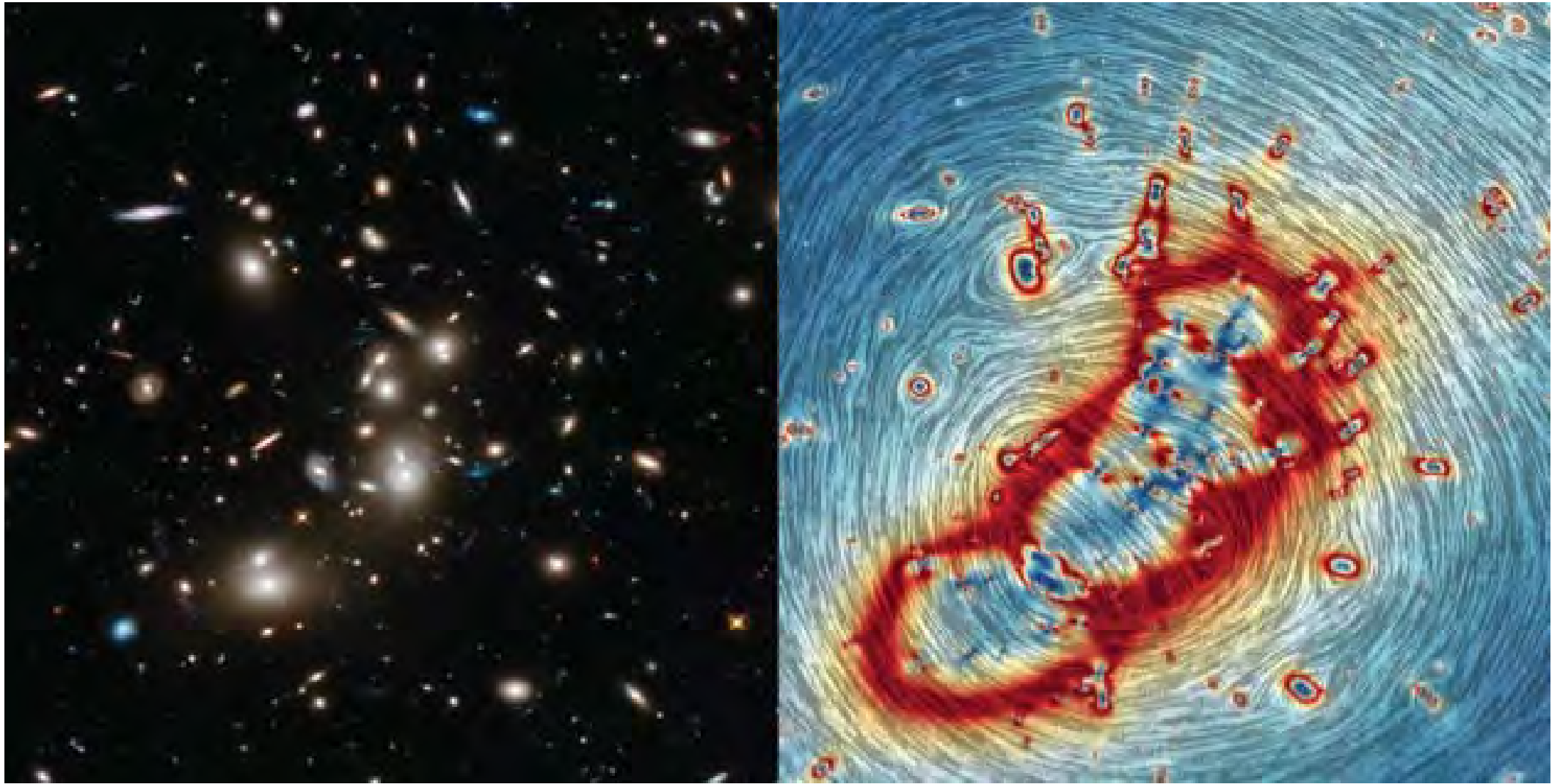




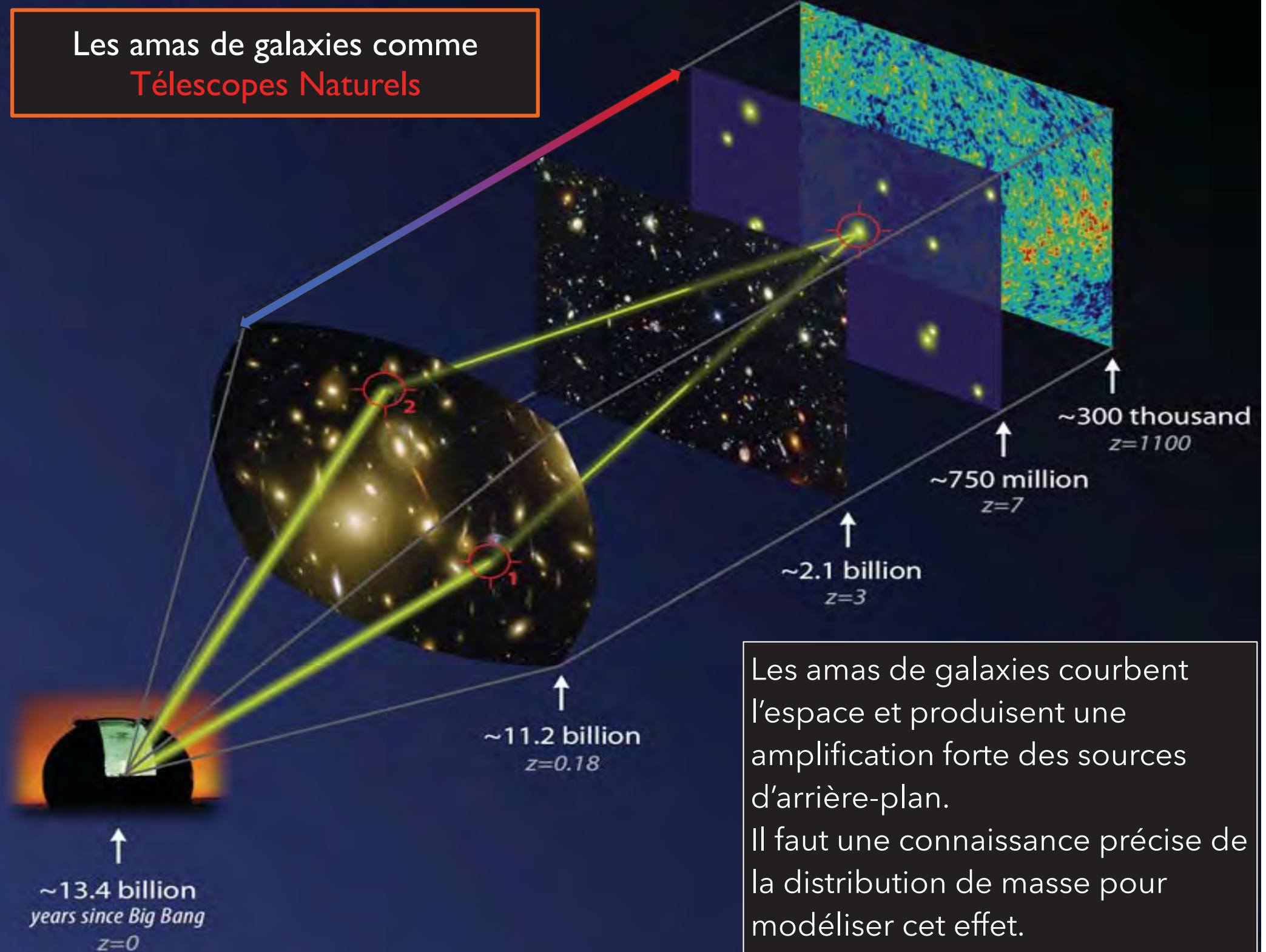




# L'amplification par un amas de galaxies



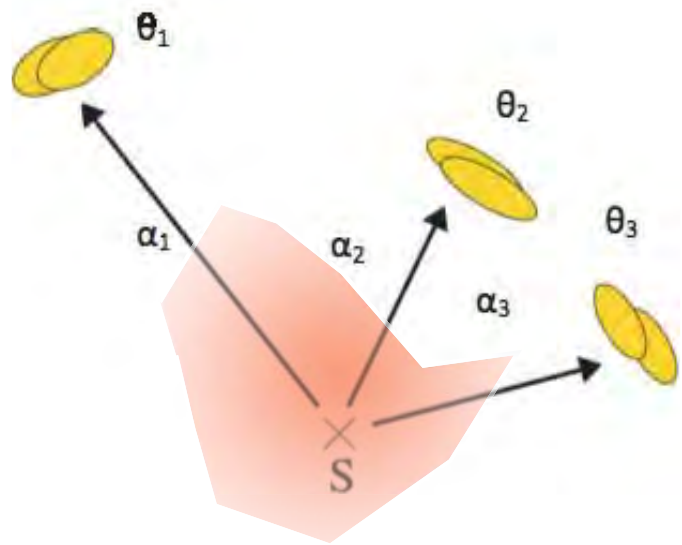
Les amas de galaxies comme  
Télescopes Naturels



Les amas de galaxies courbent l'espace et produisent une amplification forte des sources d'arrière-plan. Il faut une connaissance précise de la distribution de masse pour modéliser cet effet.

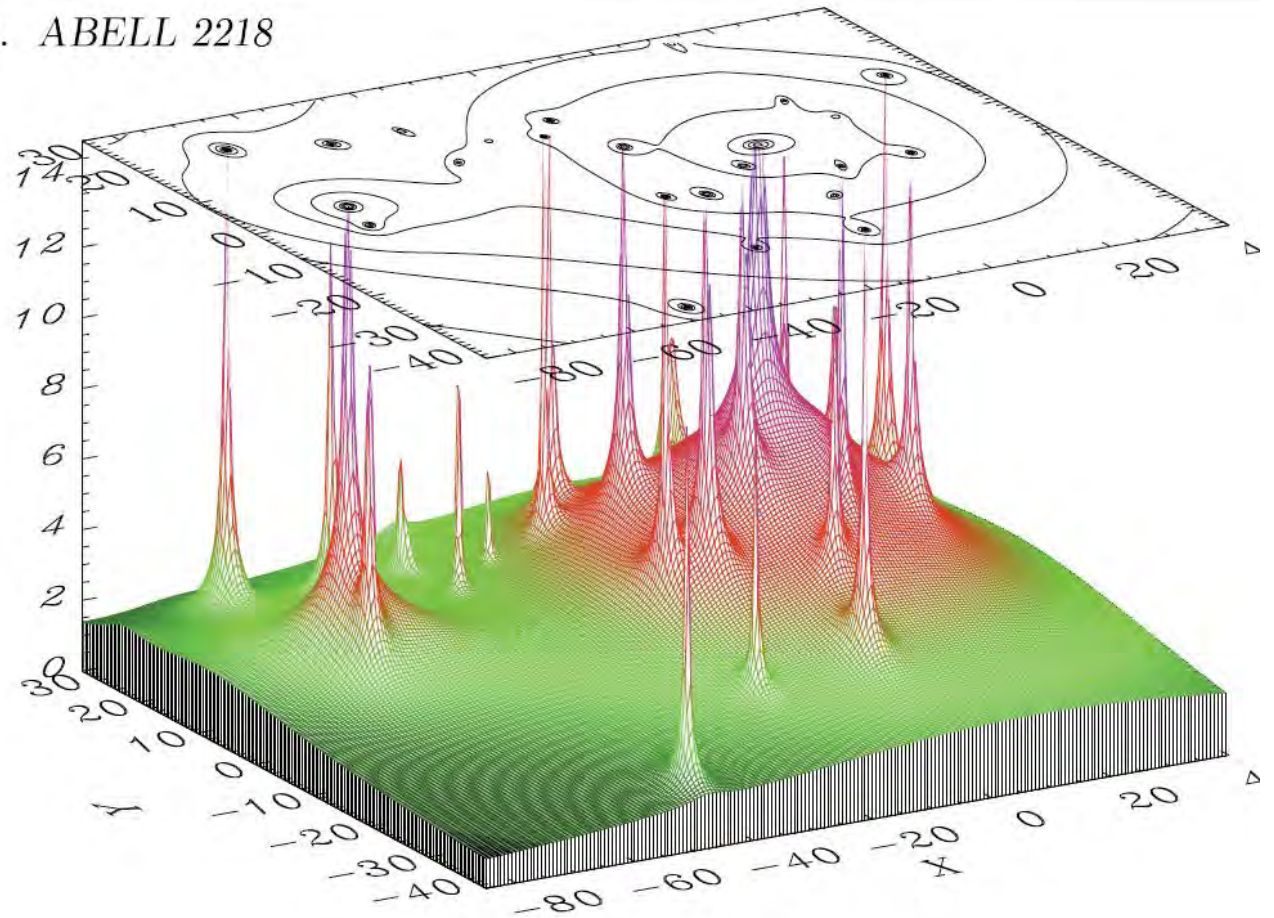


# Comment récupérer l'information?



$$\chi_{img}^2 = \sum_i \left( \frac{\hat{\theta}_i(\beta) - \theta_i}{\sigma_i} \right)^2$$

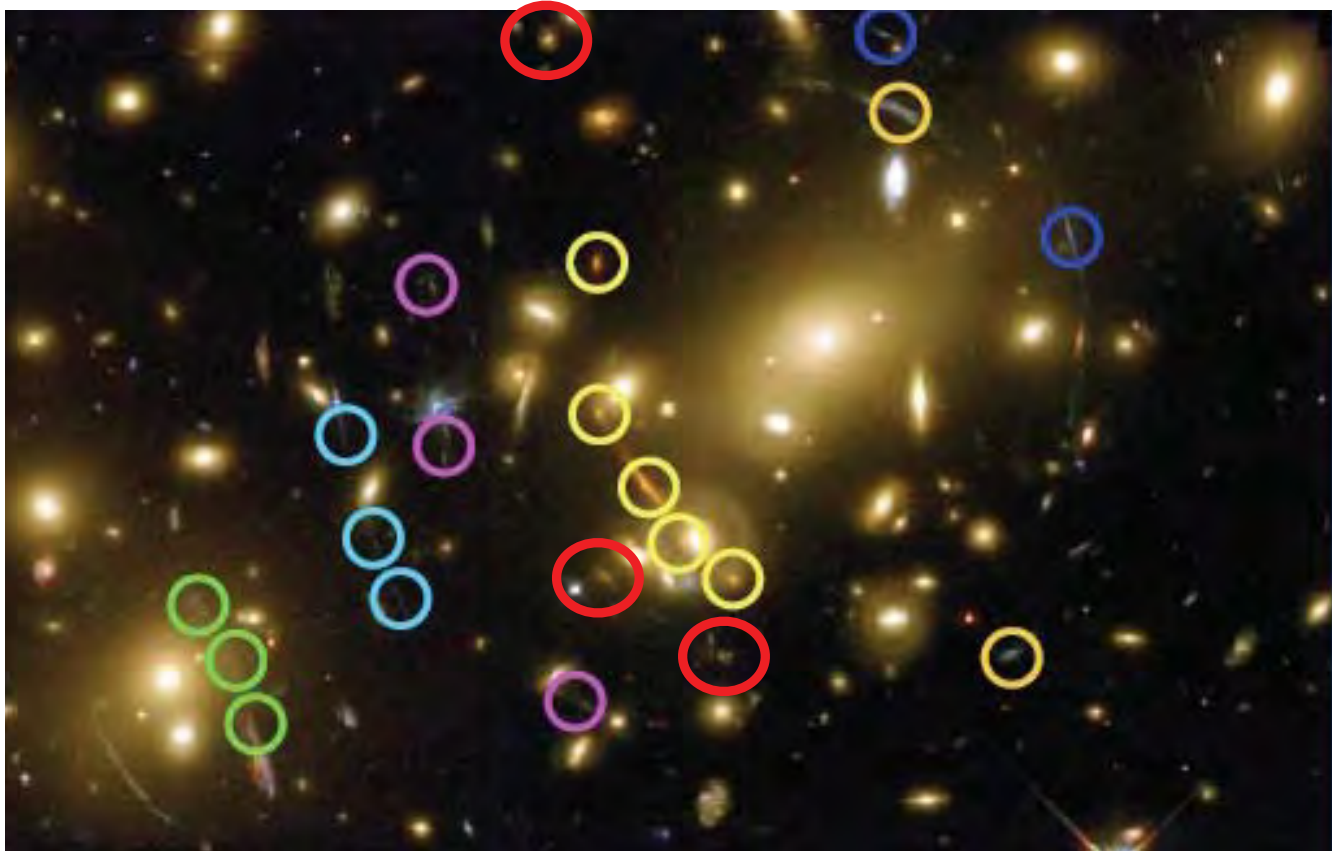
3.1. ABELL 2218



A partir de l'identification des centroïdes d'images multiples  $\theta_i$  on minimise l'erreur sur la prédiction  $\hat{\theta}_i$  pour une distribution de masse surfacique.

Plus généralement : distribution du flux de chaque image

# Prédictions Masse/Distance



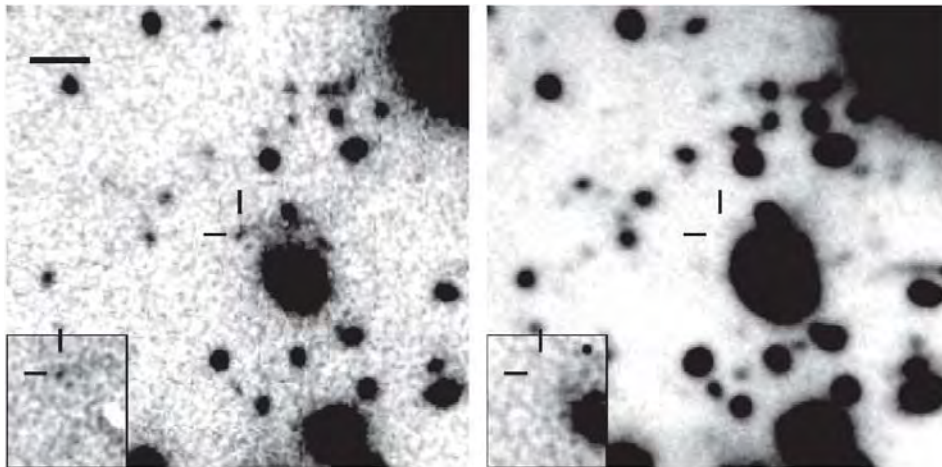
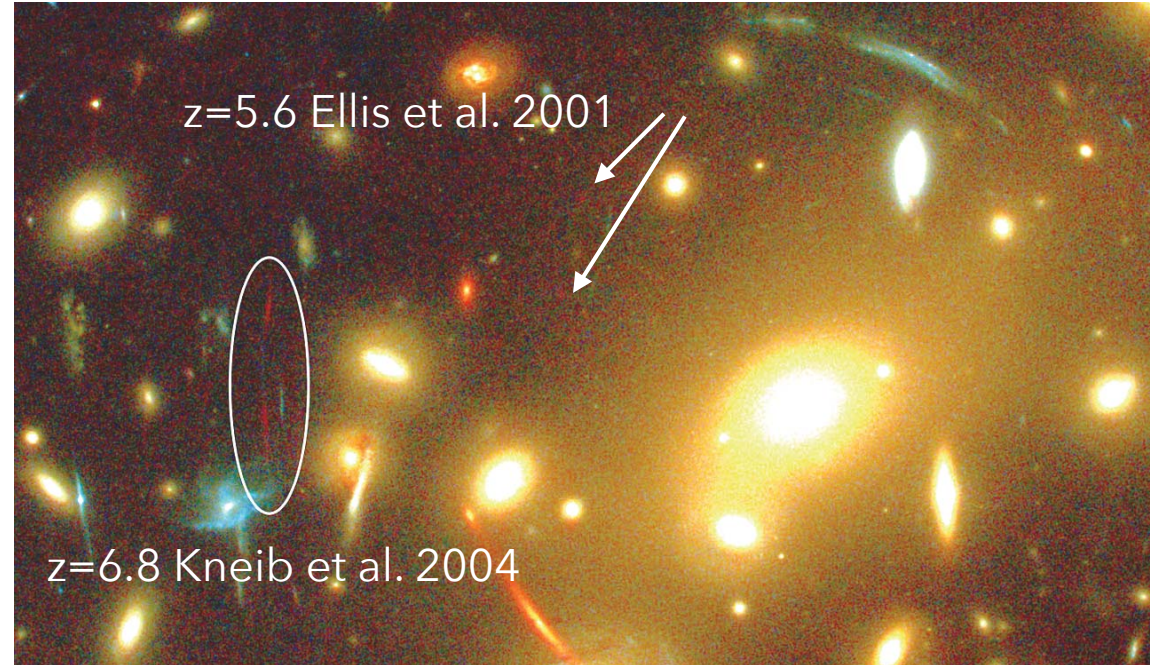
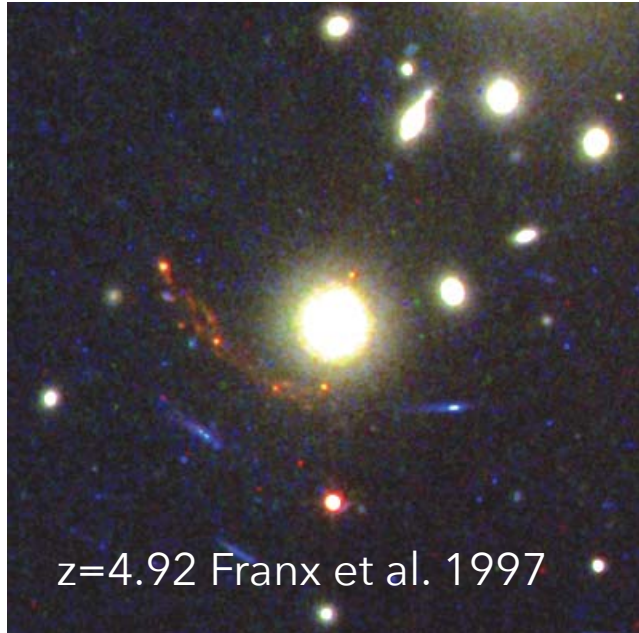
$$\alpha = \underbrace{\frac{D_{LS}}{D_{OS}}}_{\text{Distances}} \underbrace{\nabla \varphi(\theta_I)}_{\text{Masse}}$$

La connaissance des positions des images ( $\alpha$ ) nous renseigne directement sur le potentiel / la masse si on connaît les distances: importance de la spectroscopie pour calibrer.

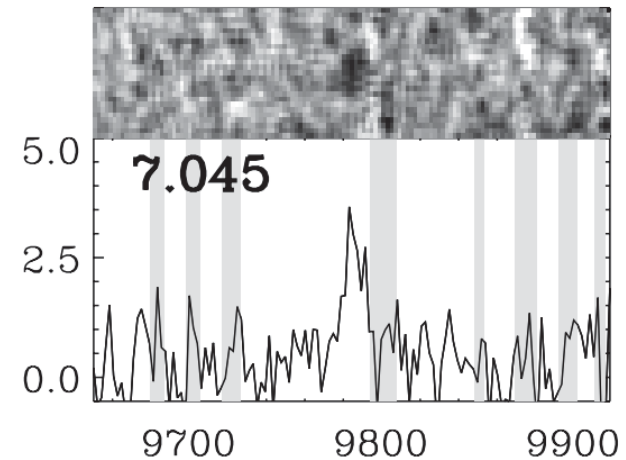
Réciproquement, un modèle calibré donne la distance d'un système multiple.



# Les premiers records de galaxies distantes lentillées



$z=6.56$  Hu et al. 2002



$z=7.1$  Schenker et al. 2011



# Précision des modèles

En 2013 :

~ 30 amas-lentilles modélisés et utilisés comme télescopes gravitationnels

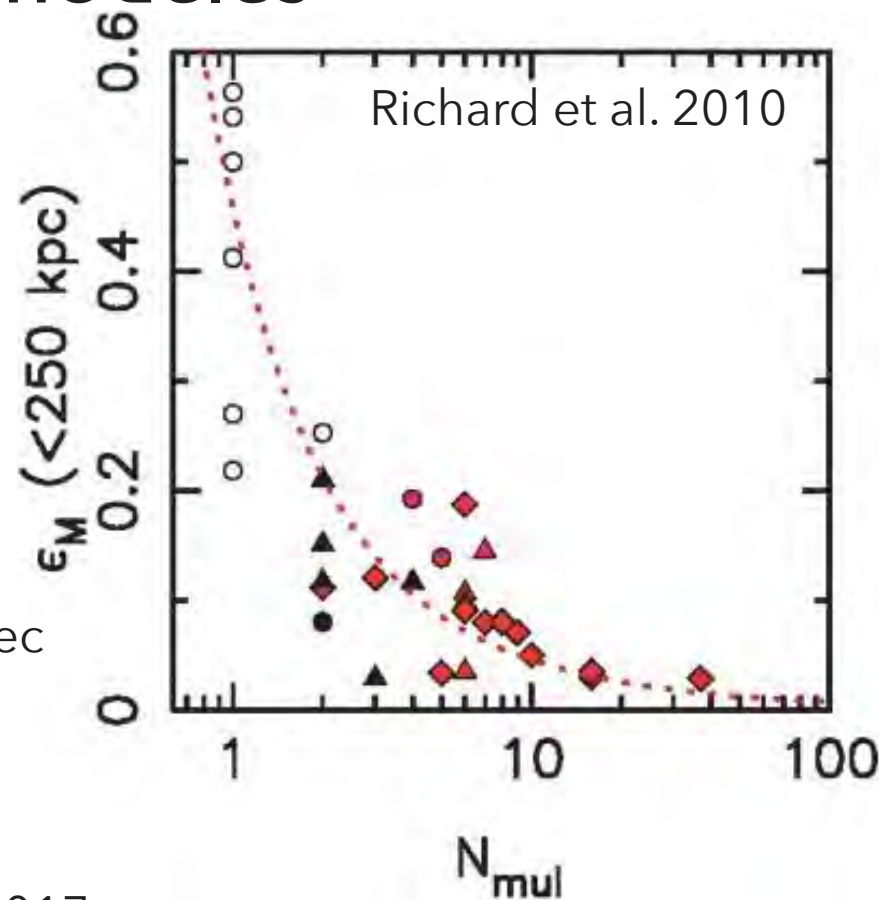
Notamment le sondage CLASH - 25 amas

Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble

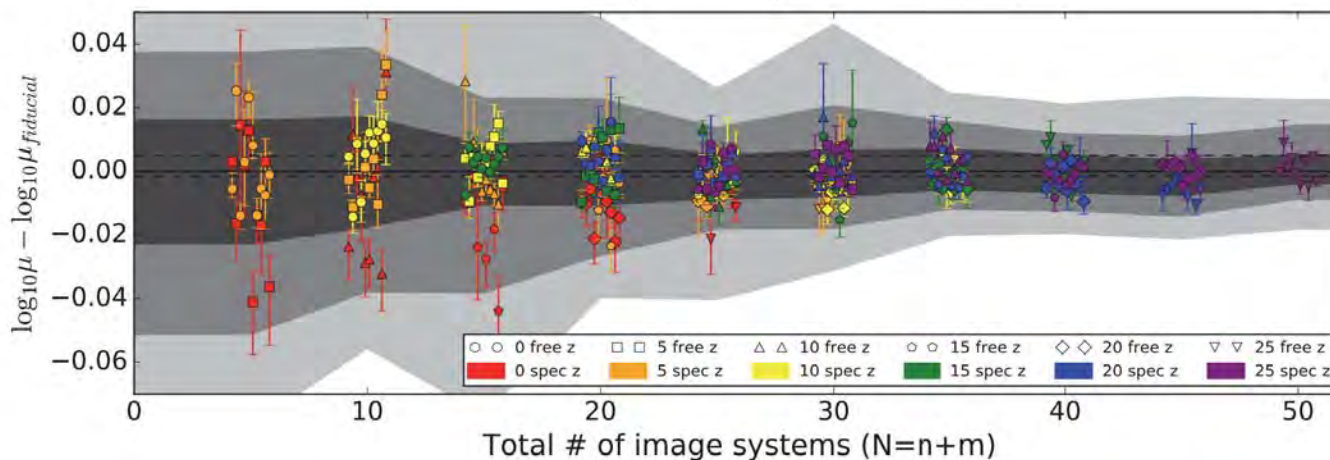
(Postman et al. 2012)

Abell 1689 : l'amas de galaxies le mieux contraint avec 35 systèmes multiples

(Broadhurst et al 2005, Limousin et al. 2007)



Johnston et al. 2017



# Les Champs Frontières



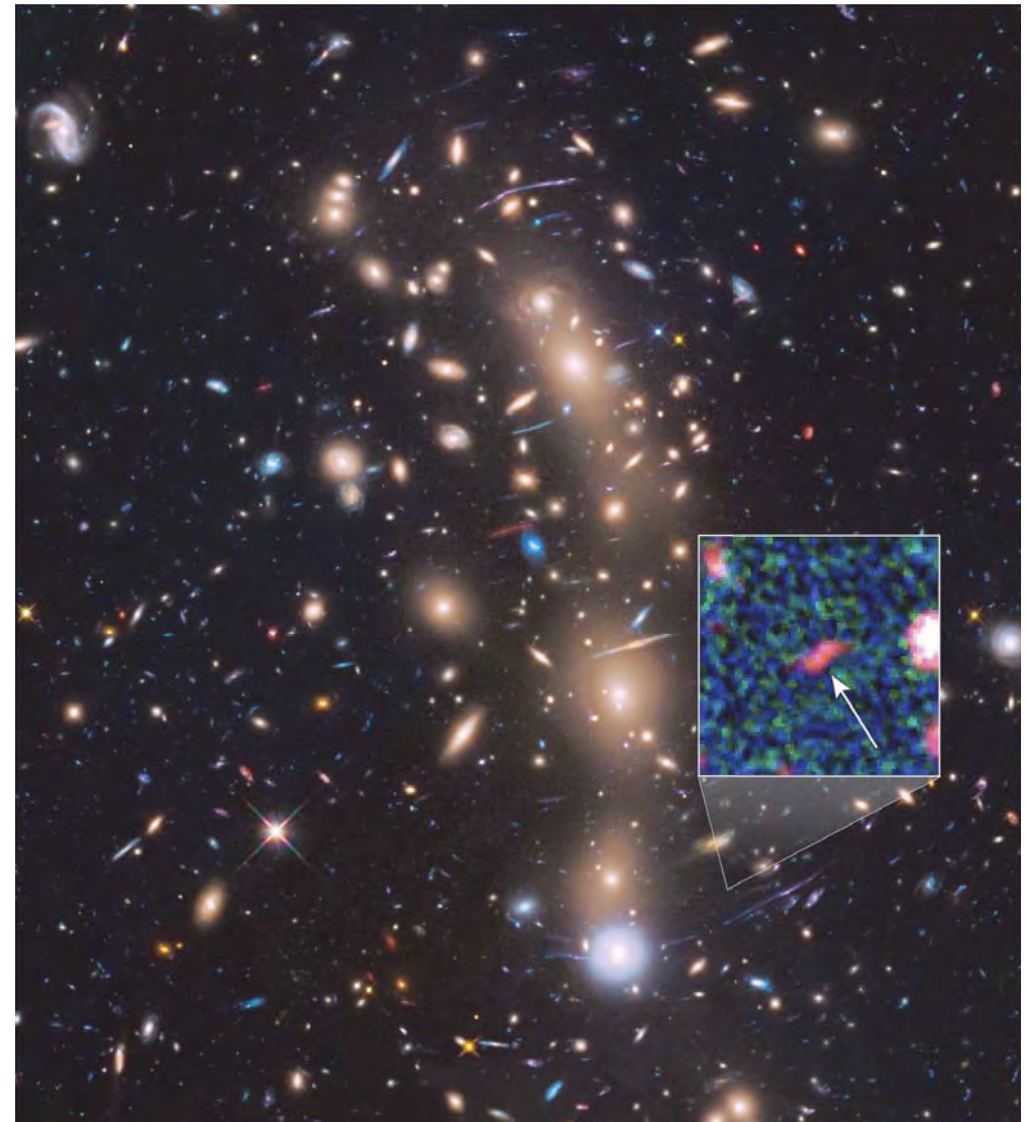
- Observations très profondes (29 AB) avec le télescope spatial Hubble de 6 amas-lentilles massifs (total de 840 orbites)
- Des modèles d'amas-lentilles ultra-précis / contraints pour prédire les effets de lentille gravitationnelle

1. L'UNIVERS DISTANT

2. LA PHYSIQUE DES AMAS DE GALAXIES

3. L'EVOLUTION DES GALAXIES

...



Infante, Zheng, Laporte et al. 2015

# Selection des amas

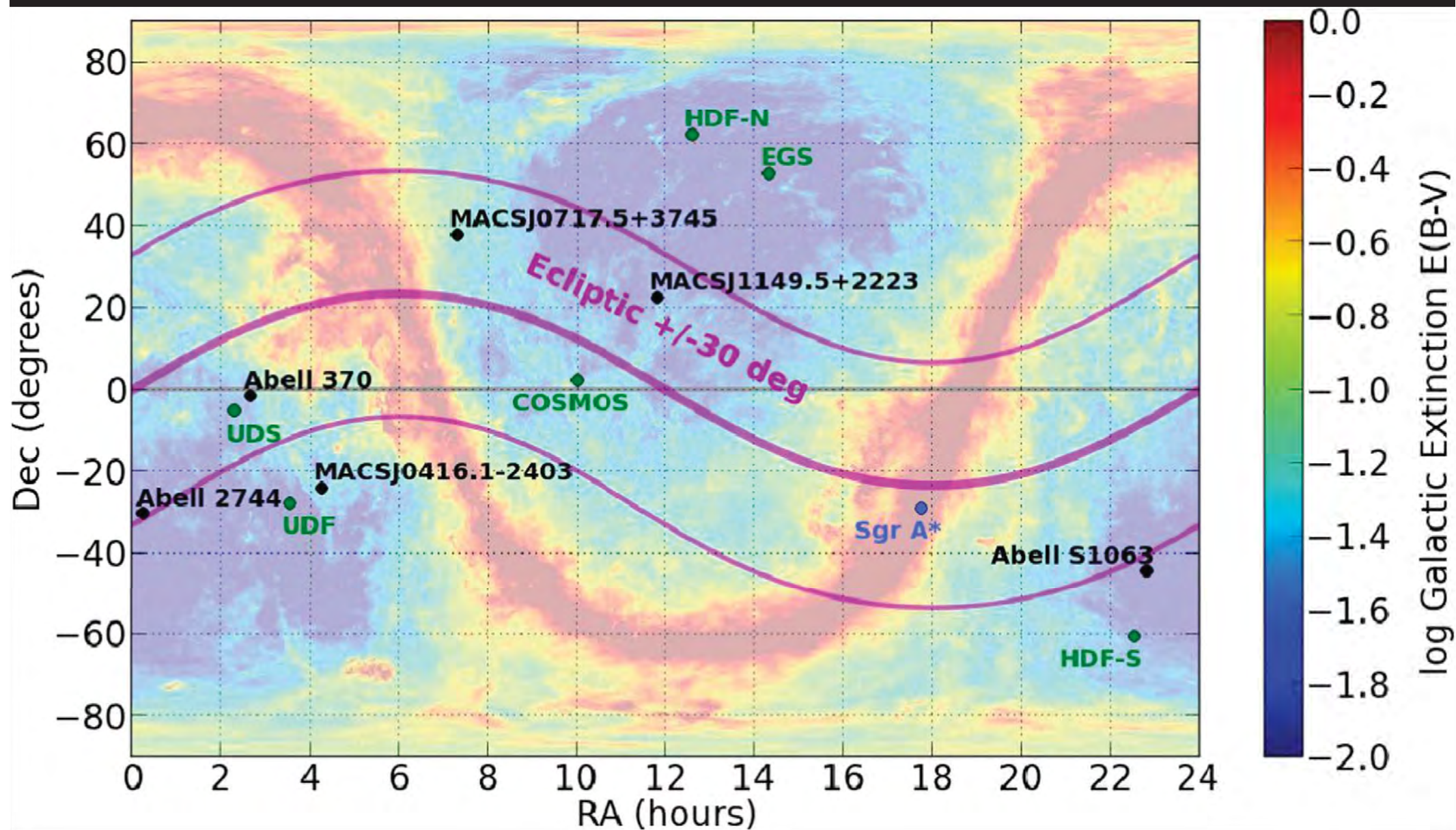


Lotz et al. 2017

Cluster	$z^a$	$M_{\text{vir}}^a$ ( $M_{\odot}$ )	$L_X^a$ ( $\text{erg s}^{-1}$ )	$P(z = 9.6)^b$ $H \leq 27$
Abell 2744	0.308	$1.8 \times 10^{15}$	$3.1 \times 10^{45}$	$0.69 \pm 0.07$
MACSJ0416.1–2403	0.396	$1.2 \times 10^{15}$	$1.0 \times 10^{45}$	$0.63 \pm 0.12$
MACSJ0717.5+3745	0.545	$2-3 \times 10^{15}$	$3.3 \times 10^{45}$	$0.84 \pm 0.05$
MACSJ1149.5+2223	0.543	$2.5 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{45}$	$0.60 \pm 0.10$
Abell S1063	0.348	$1.4 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{45}$	$0.69 \pm 0.08$
Abell 370	0.375	$\sim 1 \times 10^{15}$	$1.1 \times 10^{45}$	$0.90 \pm 0.08$

- Amas de galaxies à  $0.3 < z < 0.6$ , massifs, majoritairement issus du sondage MAssive Clusters Survey (MACS, Ebeling et al.)
- Des lentilles fortes connues, avec une forte région d'amplification
- Des observations existantes (HST, Spitzer, ...) et des opportunités de suivi (sol / espace)

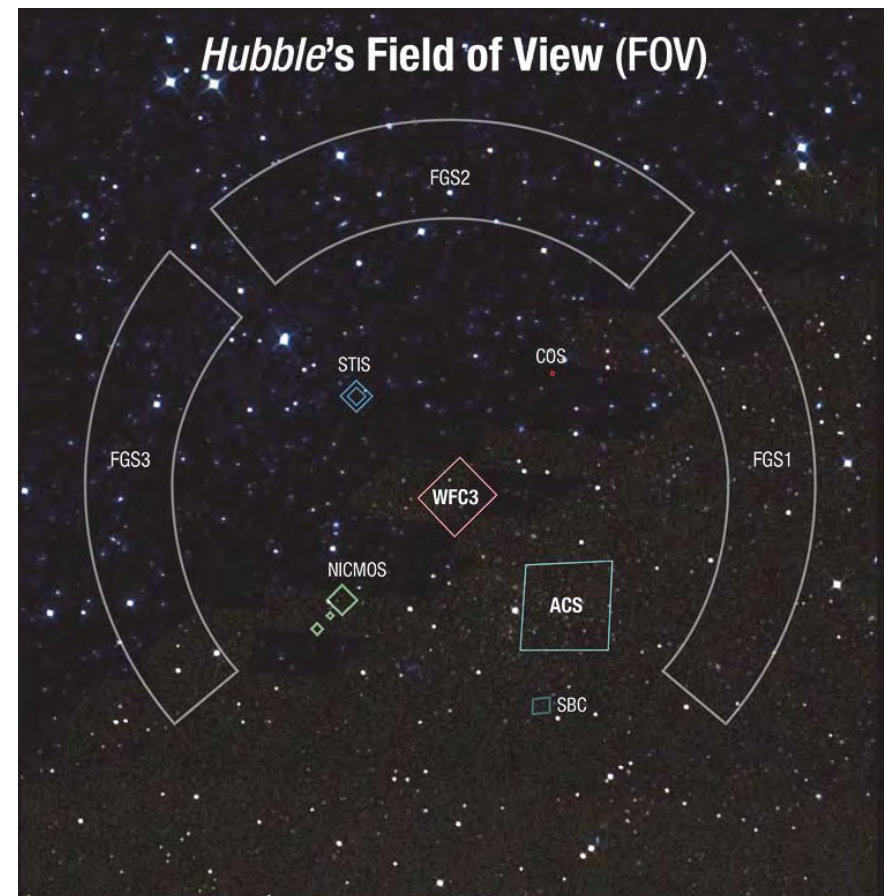
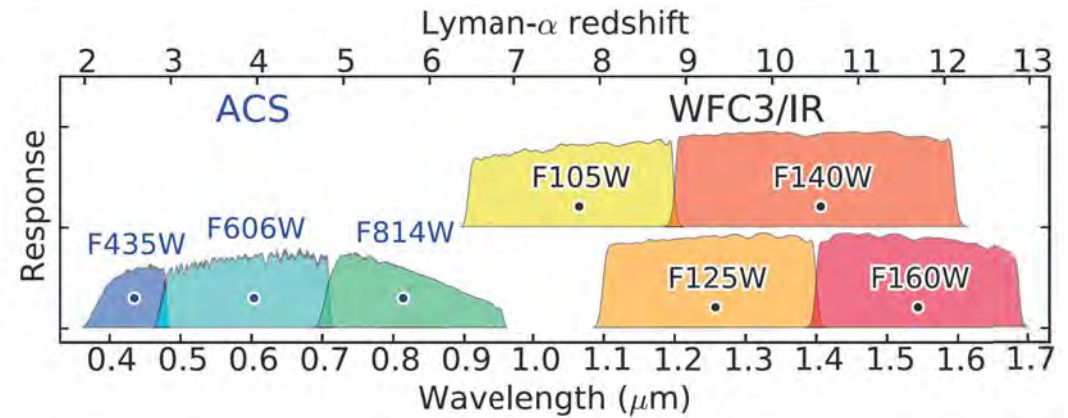
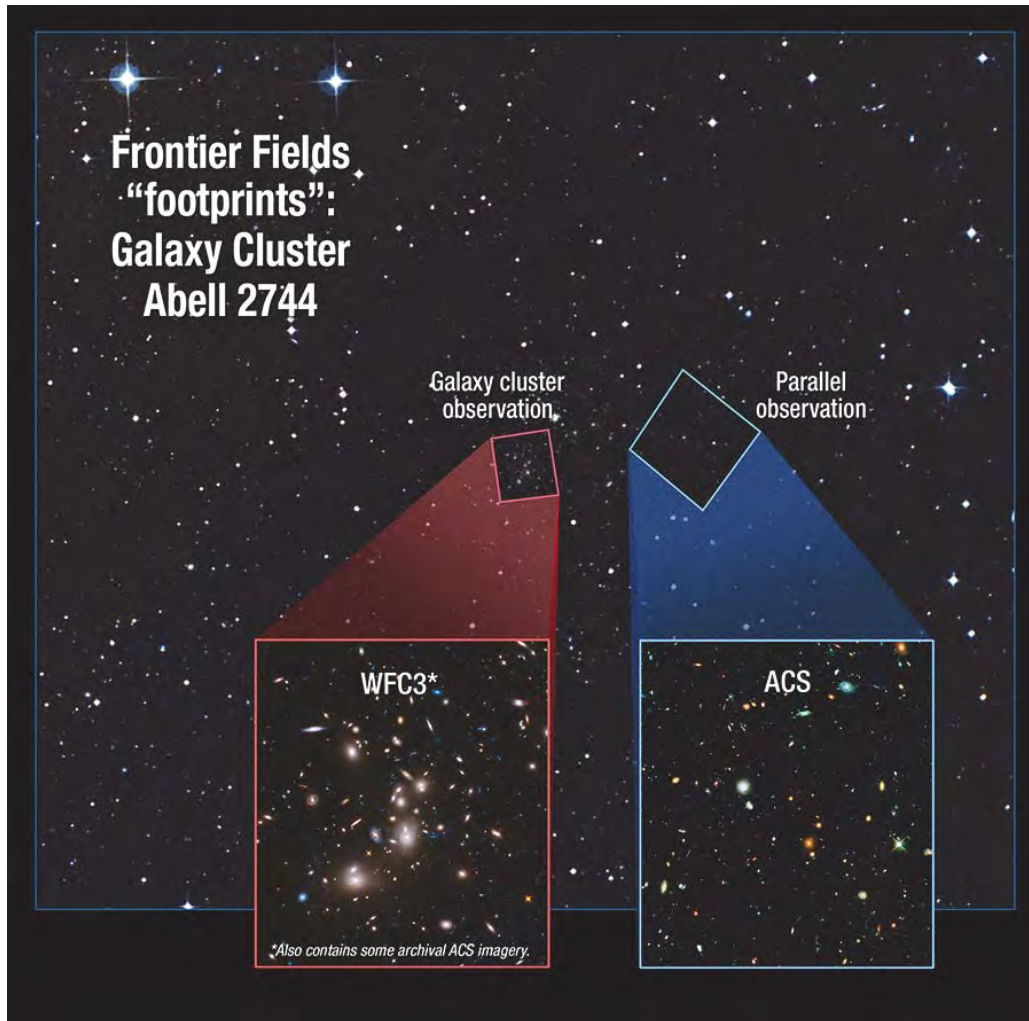






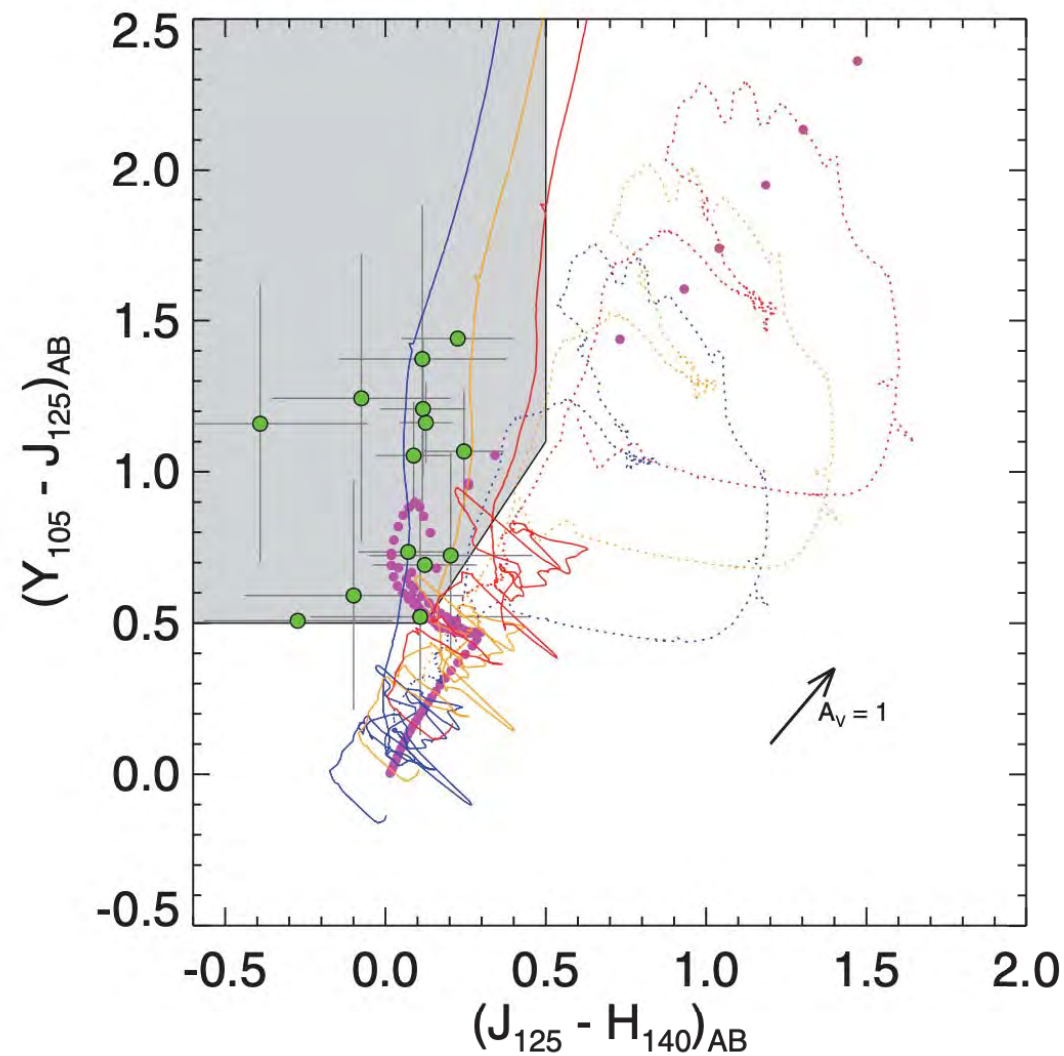
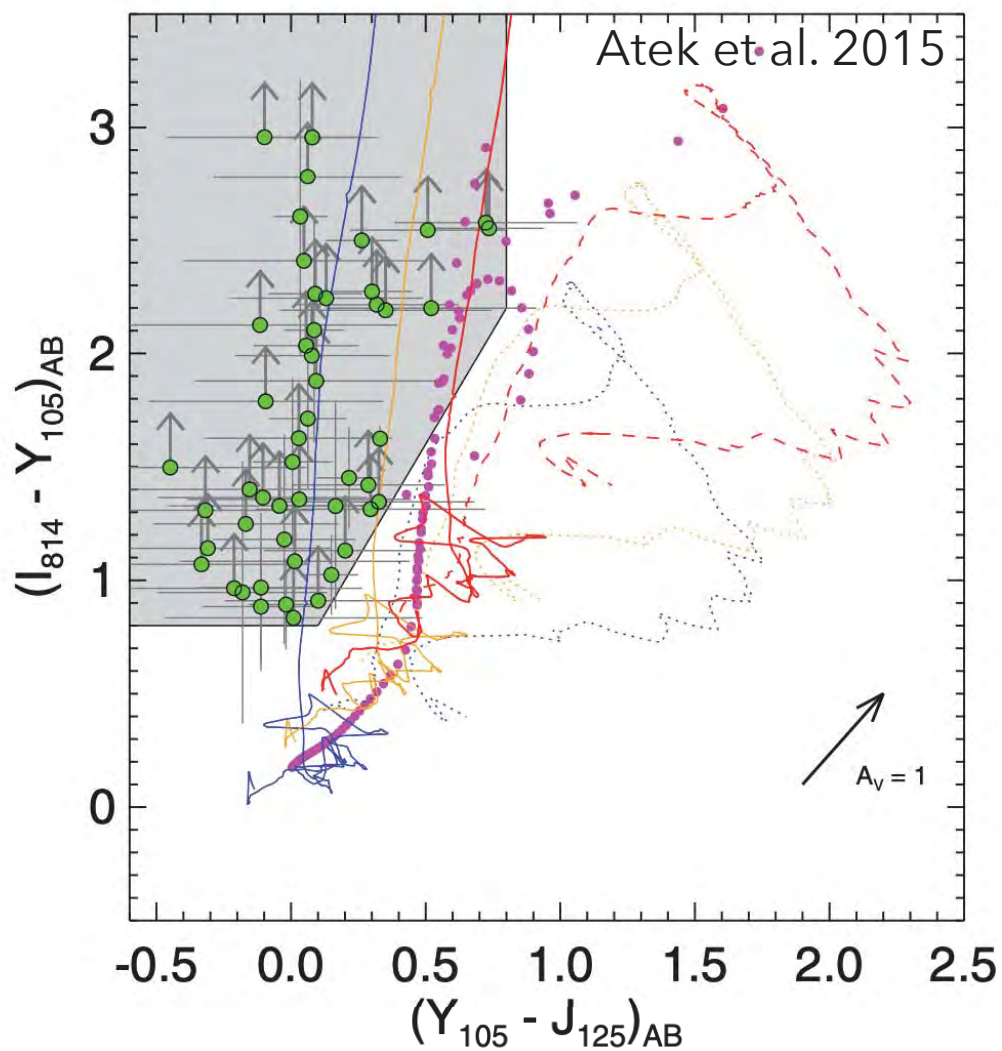
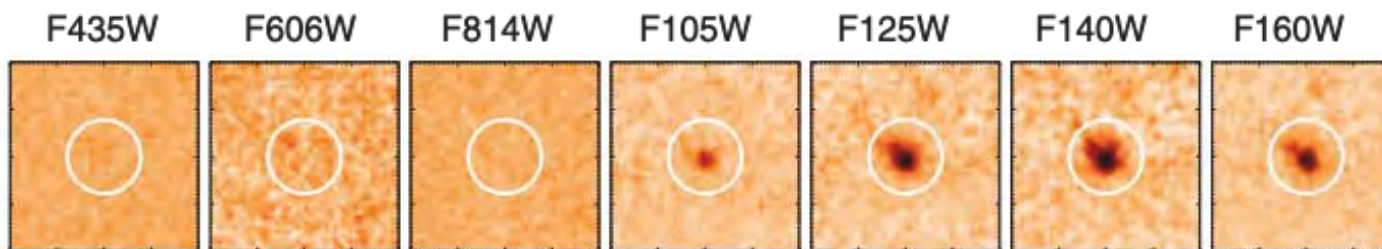
# Le coeur des amas et les champs 'parallèles'

Coe et al. 2016



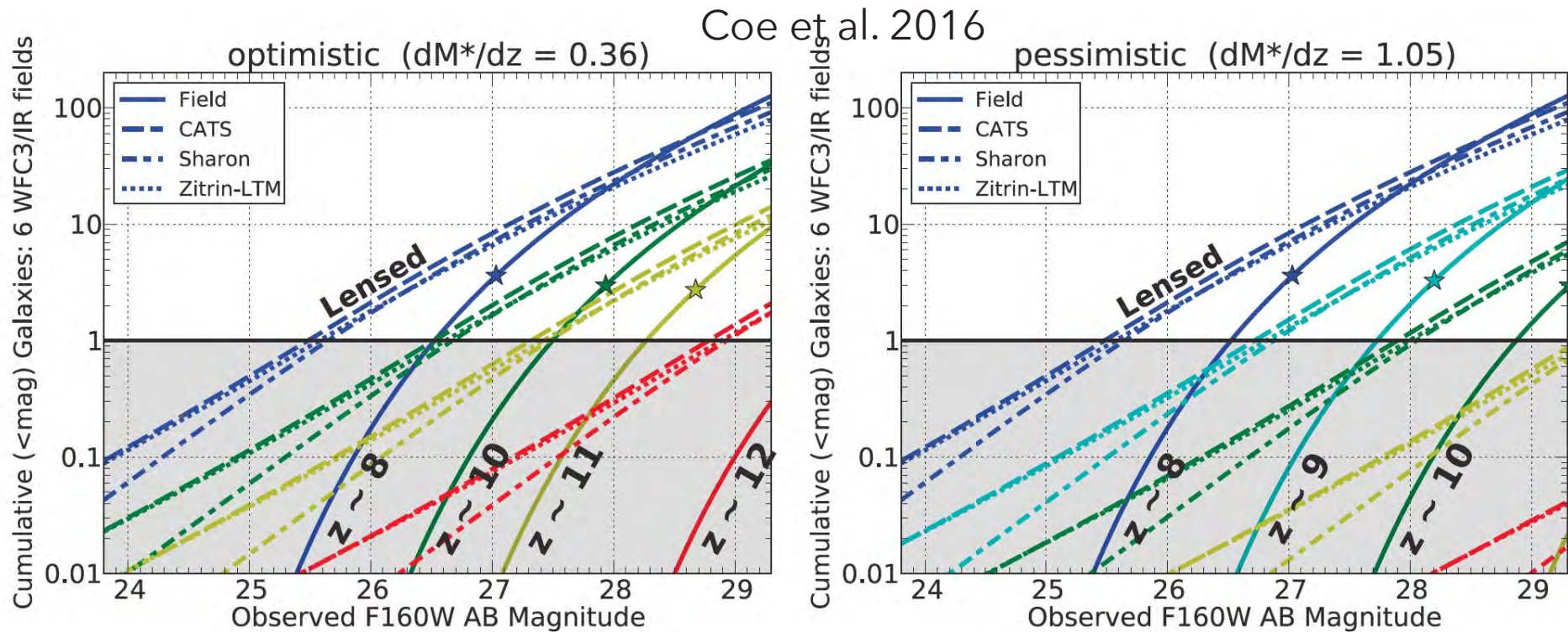
Le Télescope Hubble peut observer  
simultanément dans les deux instruments  
ACS et WFC3 de son plan focal

# “Dropouts” - diagrammes couleur/magnitude



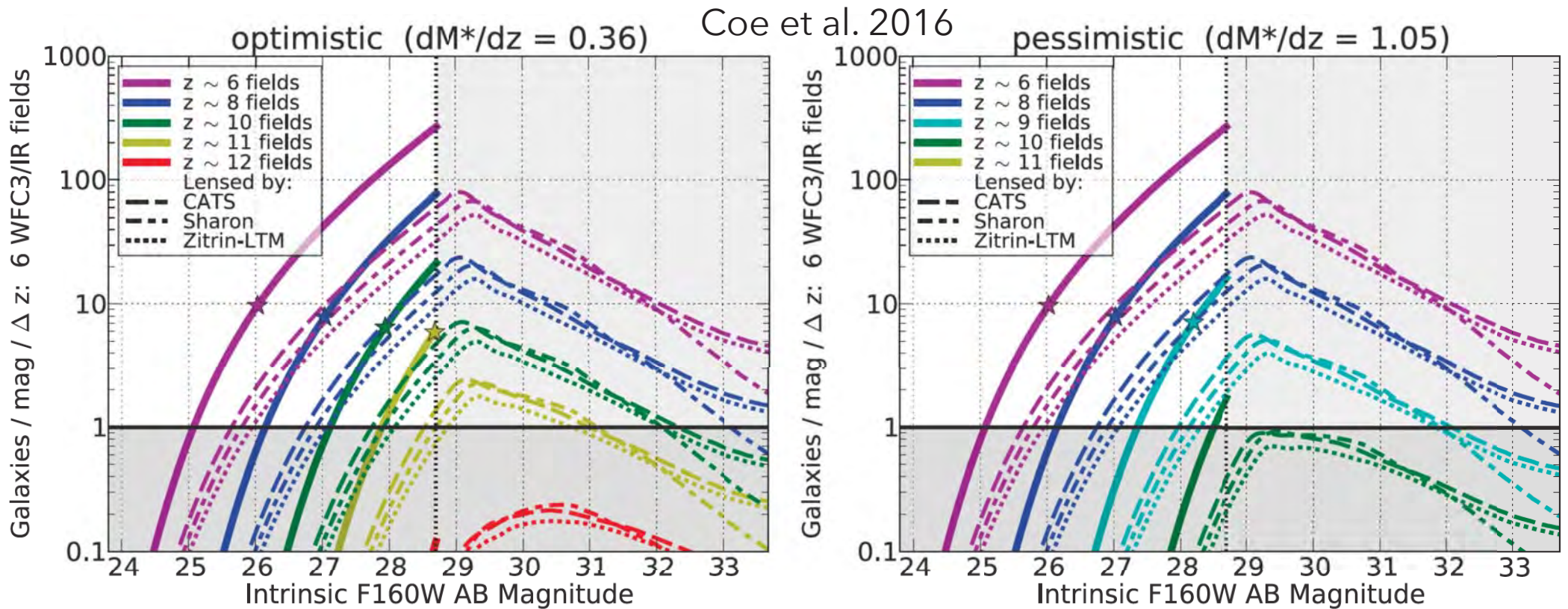


# Les champs frontières - Objectifs



- Le gain d'amplification est le seul moyen d'aller observer des sources plus faibles que 30 AB intrinsèquement
- Possibilité d'identifier des sources à  $z=10$  relativement brillantes (après amplification)

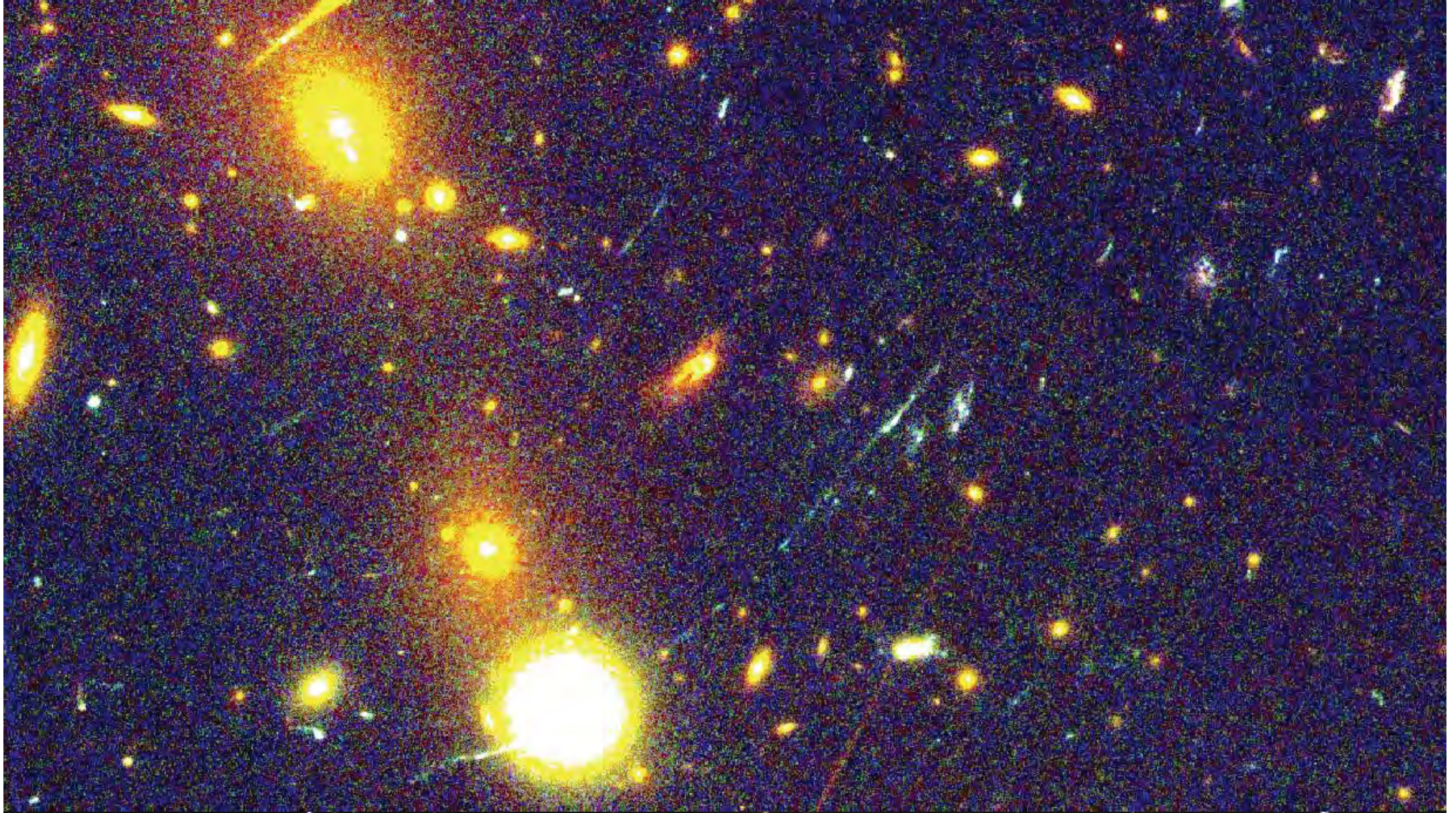
# Les champs frontières - Objectifs



- Le gain d'amplification est le seul moyen d'aller observer des sources plus faibles que 30 AB intrinsèquement
- Possibilité d'identifier des sources à  $z=10$  relativement brillantes (après amplification)



# Le gain de la profondeur des images





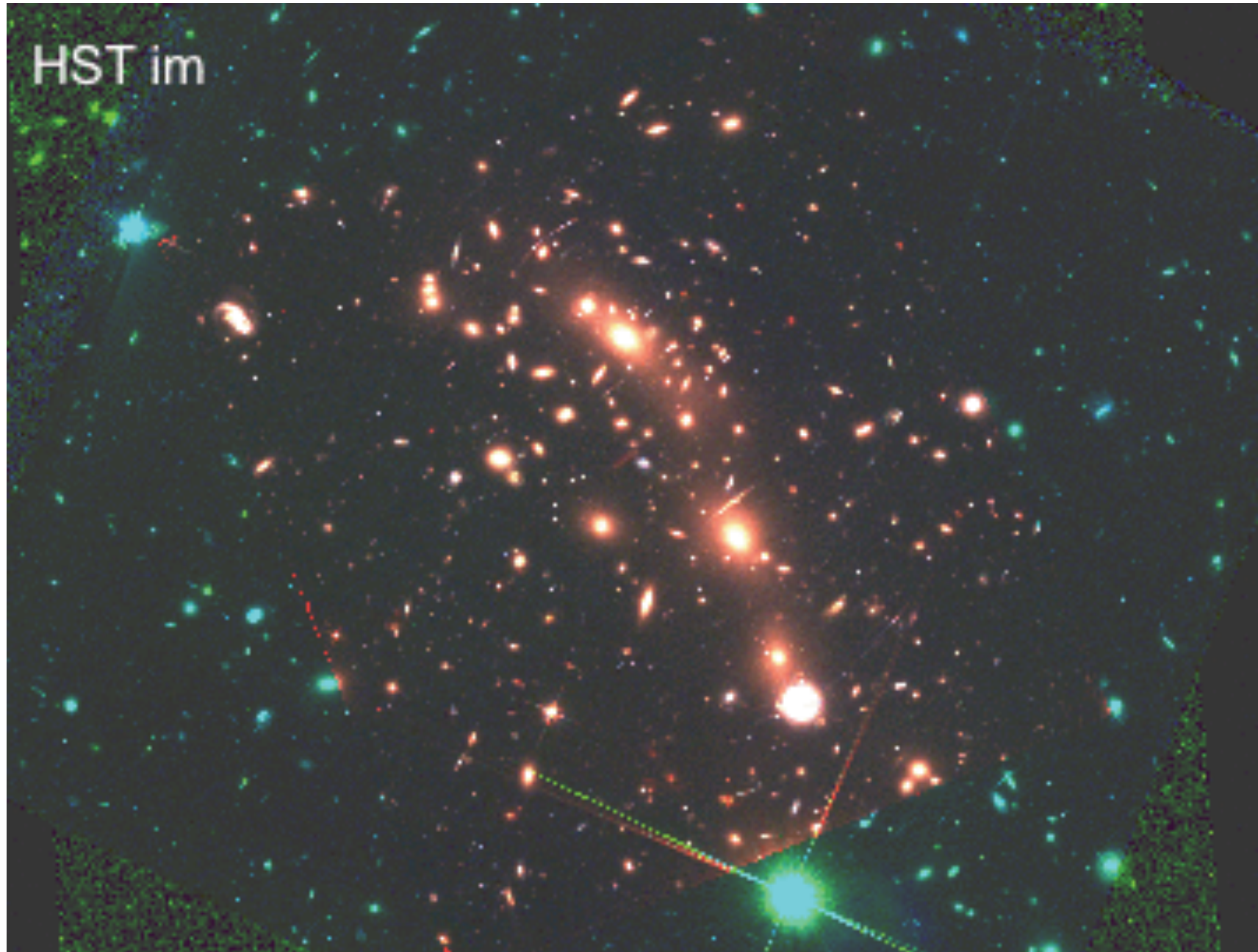
# Le gain de la profondeur des images





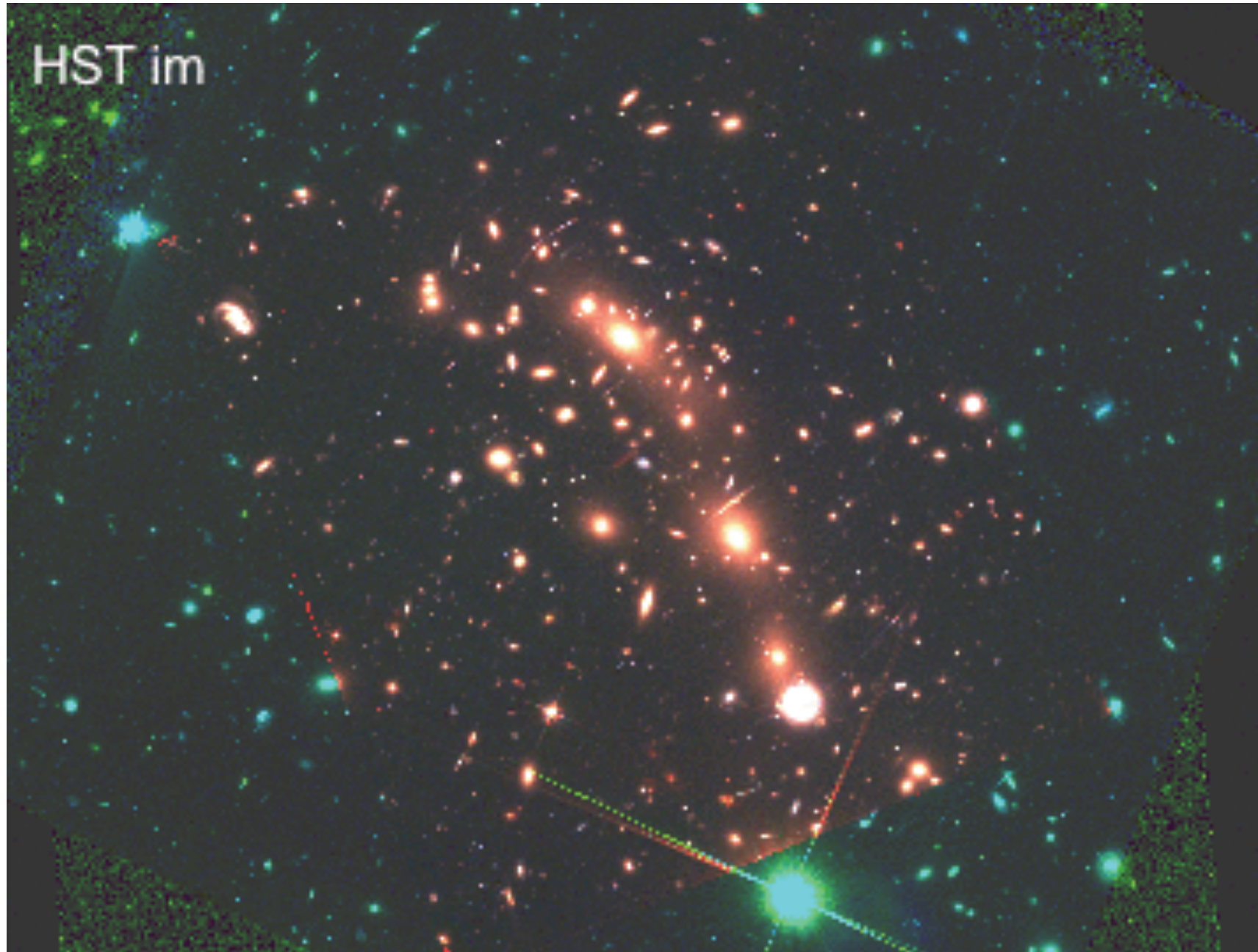
# Challenge I - Amas de Galaxies et Contamination

(J. Martinez)



# Challenge I - Amas de Galaxies et Contamination

(J. Martinez)

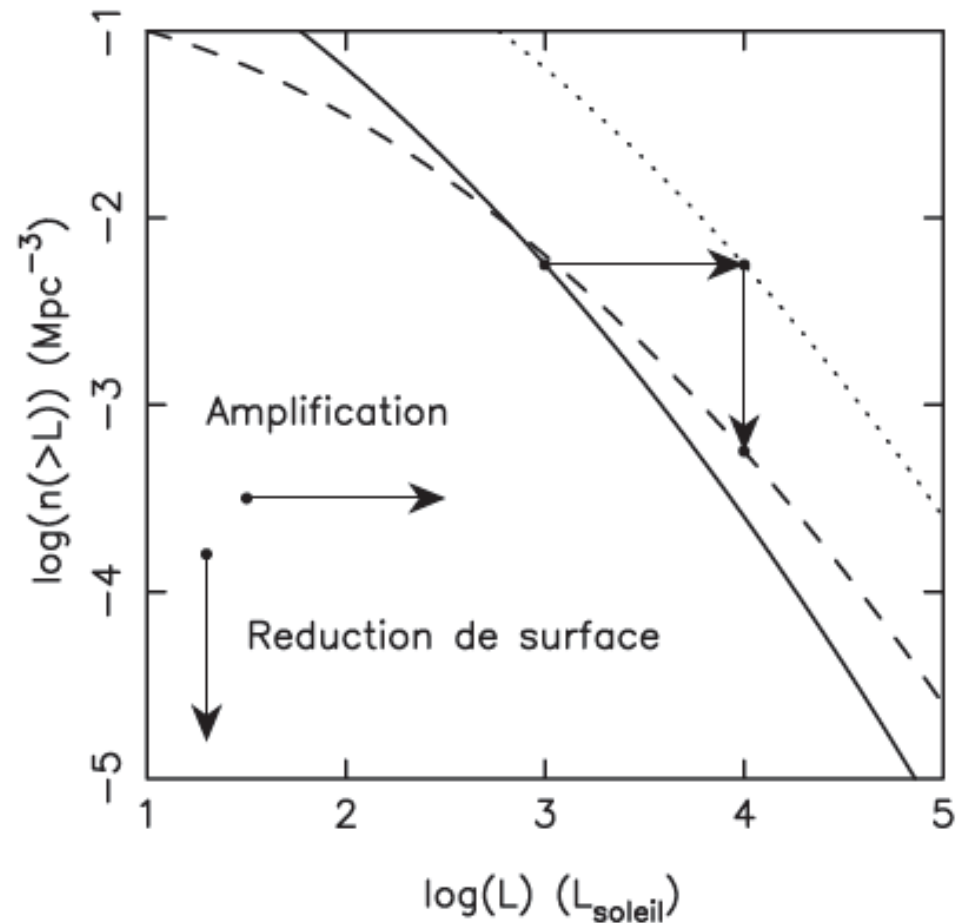
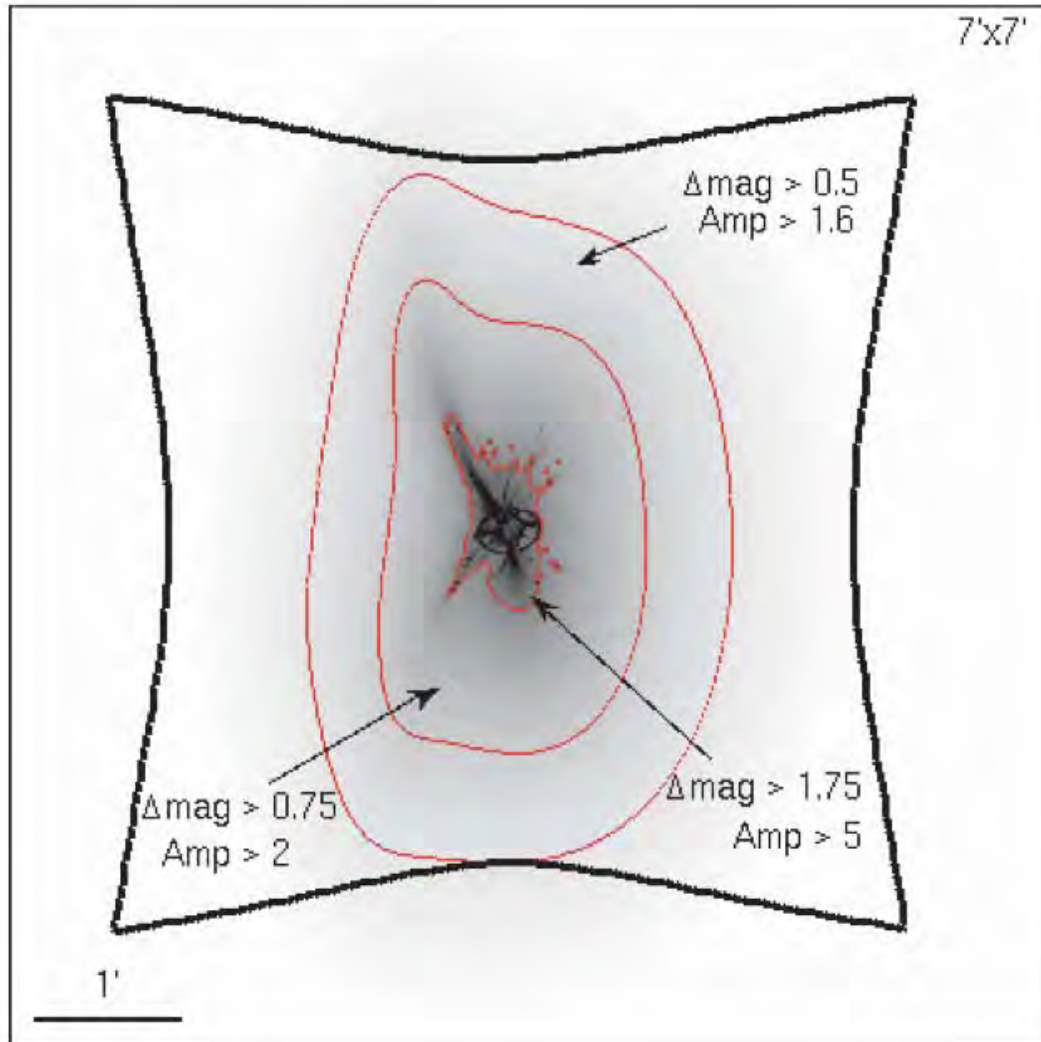




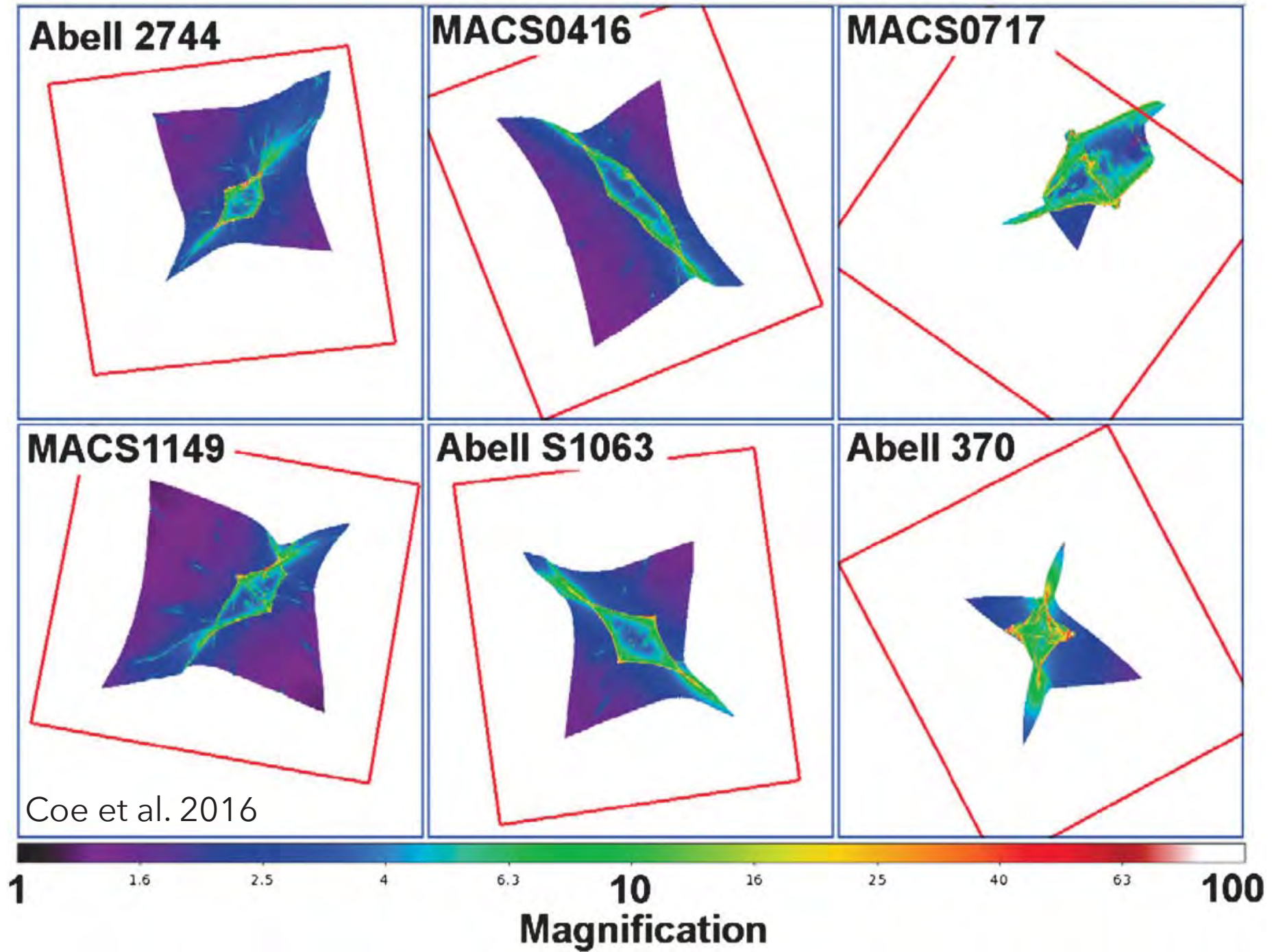
# Challenge II - Plan source et amplification

$$V_{\text{eff}} = \int_0^\infty \int_{\mu > \mu_{\text{min}}} \frac{dV_{\text{com}}}{dz} f(z, m, \mu) d\Omega(\mu, z) dz$$

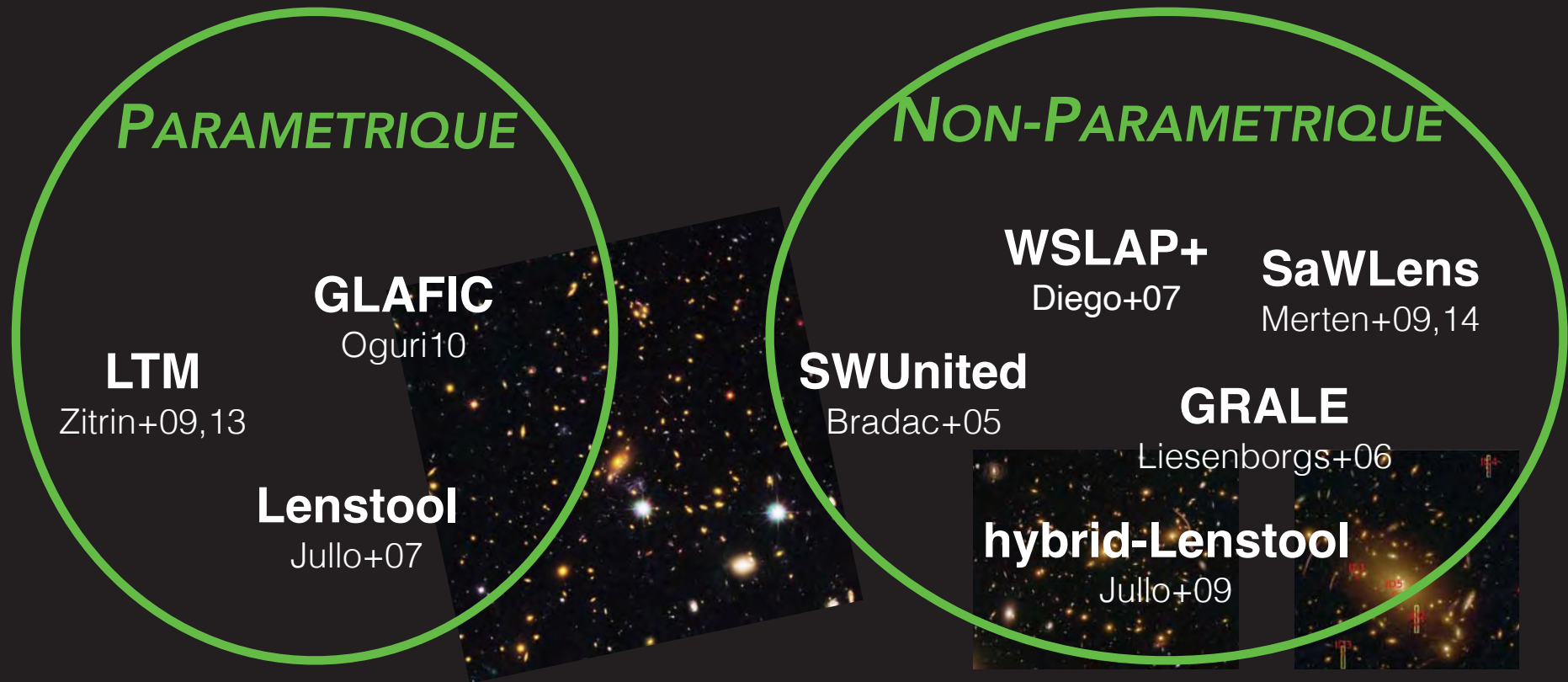
probabilité de détection	Angle solide
-----------------------------	-----------------



# Les champs frontières dans le plan source



# "L'INITIATIVE" DES CHAMPS FRONTIÈRES

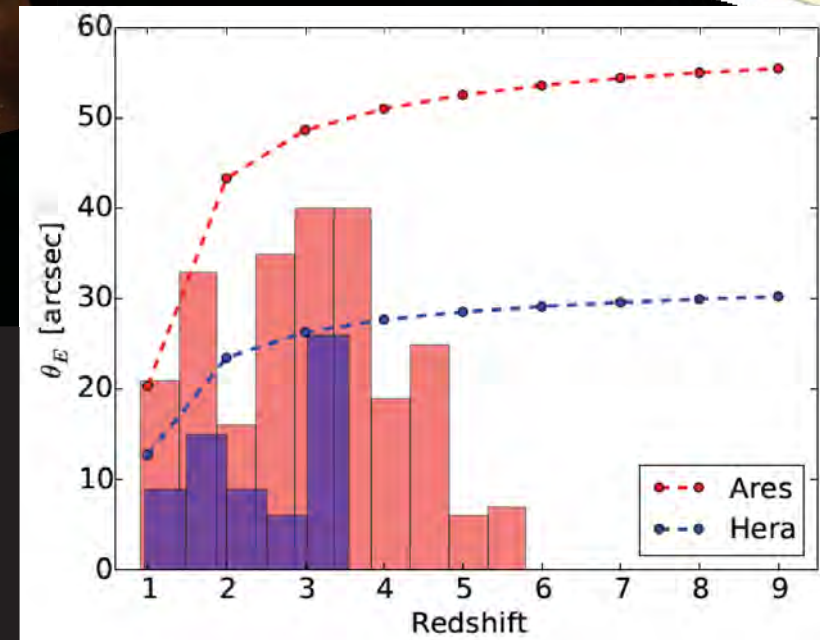
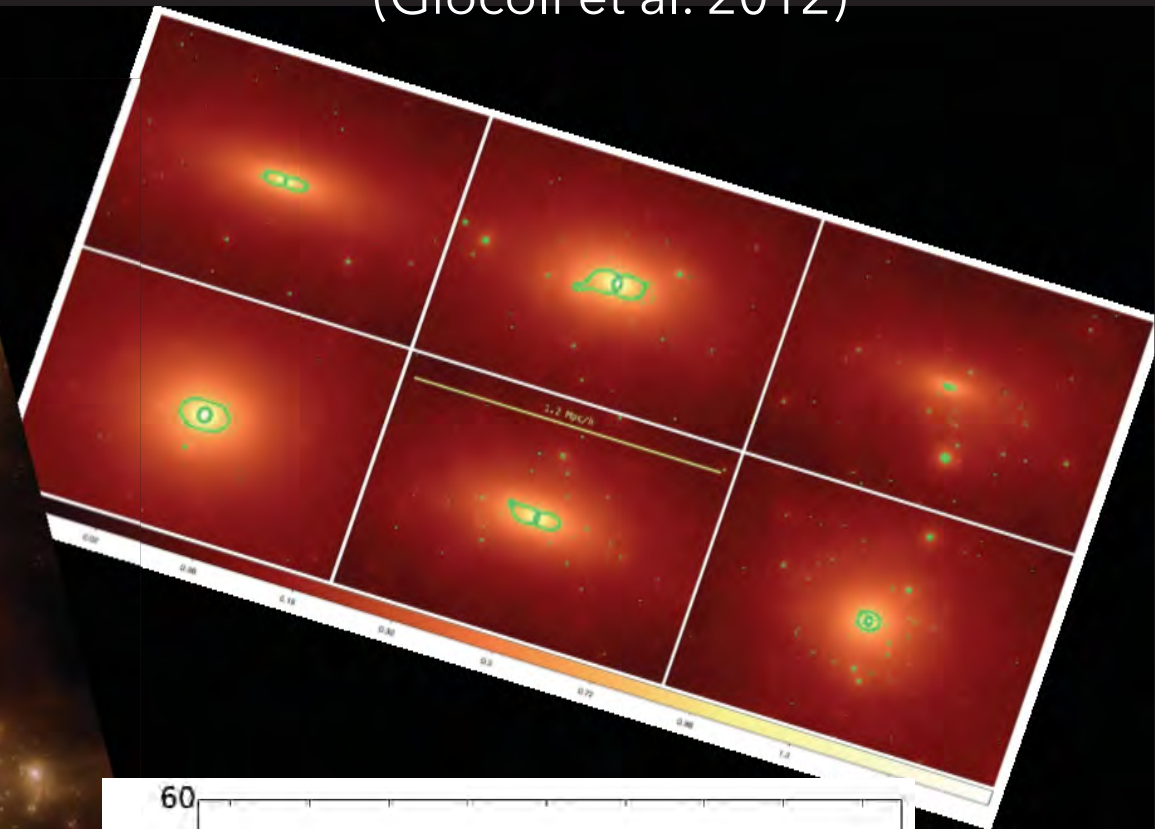
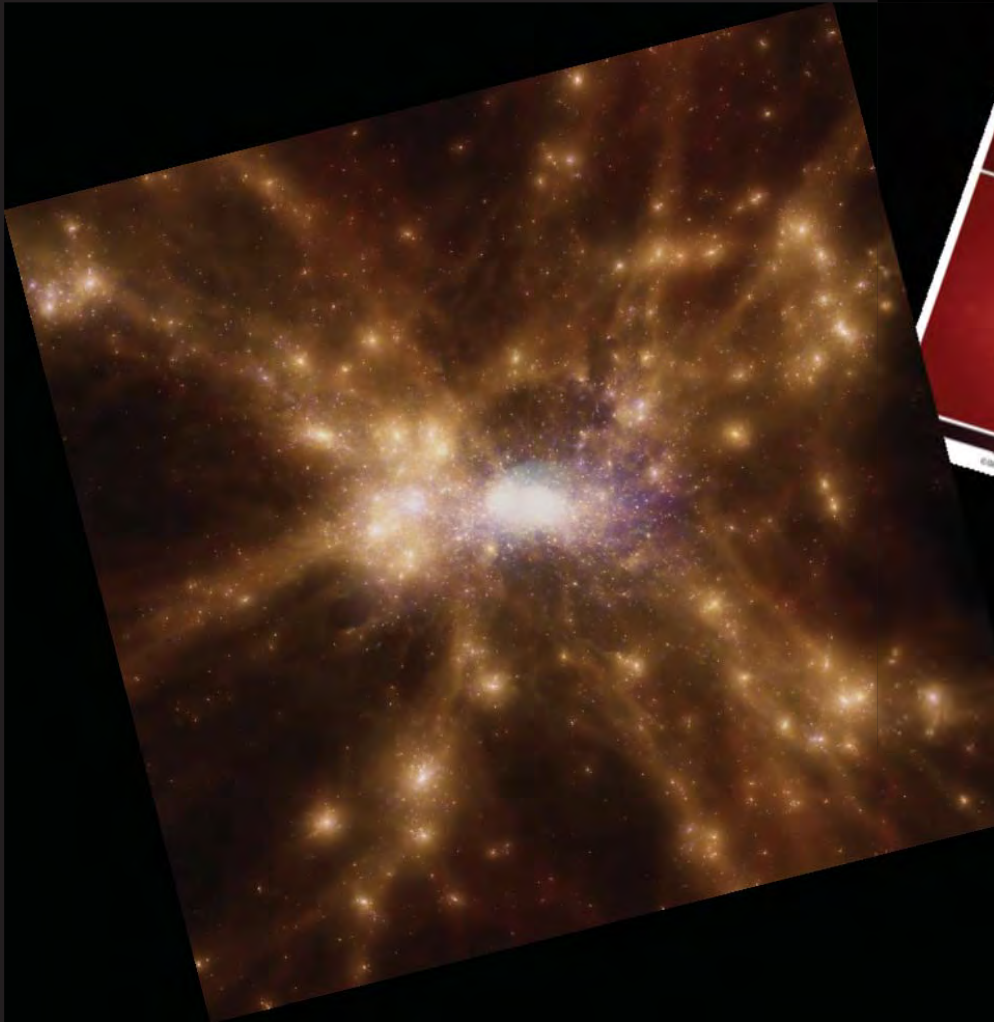


- 8 équipes différentes d'experts en lentilles gravitationnelles ont fourni publiquement des modèles de masse pour les amas des champs frontières, **en constante amélioration selon les discussions et les nouvelles données.**



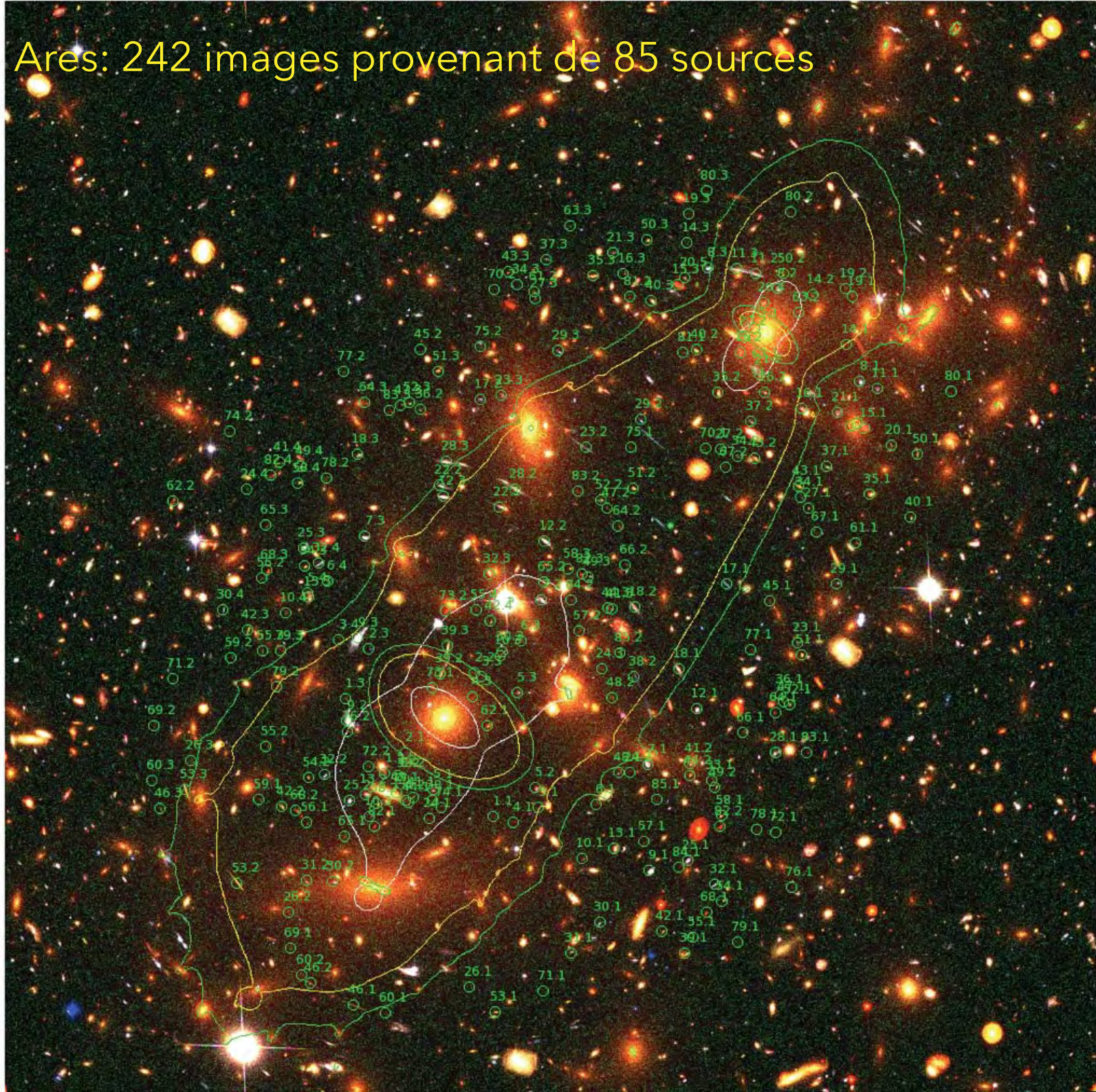
**Hera**: Simulation à N corps  
(Meneghetti et al. 2016)

**Ares**: librairie d'amas analytiques  
(Giocoli et al. 2012)

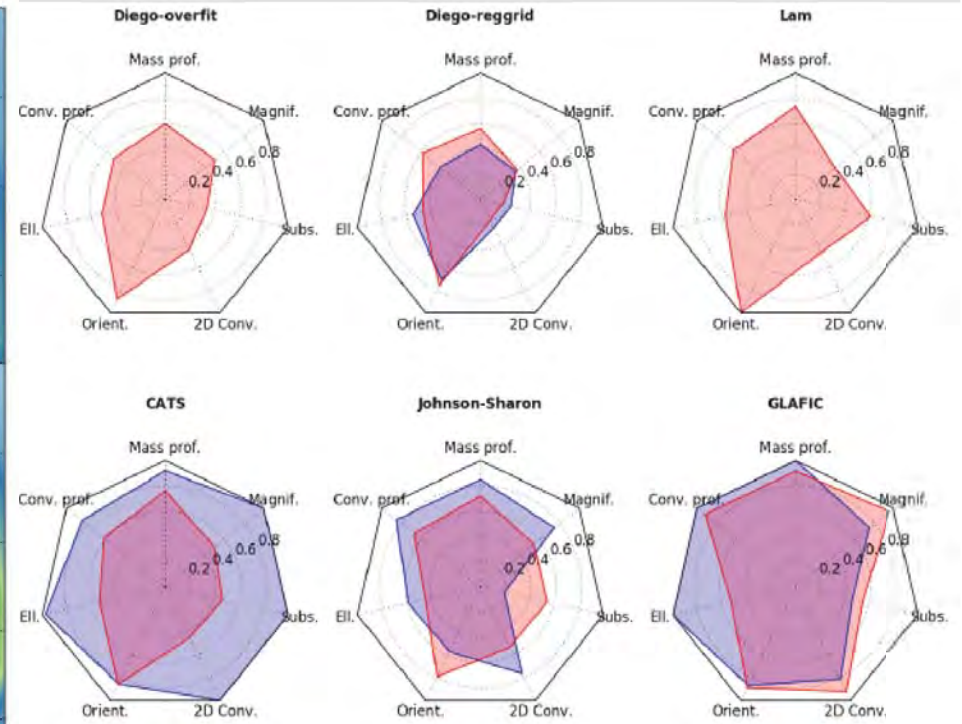
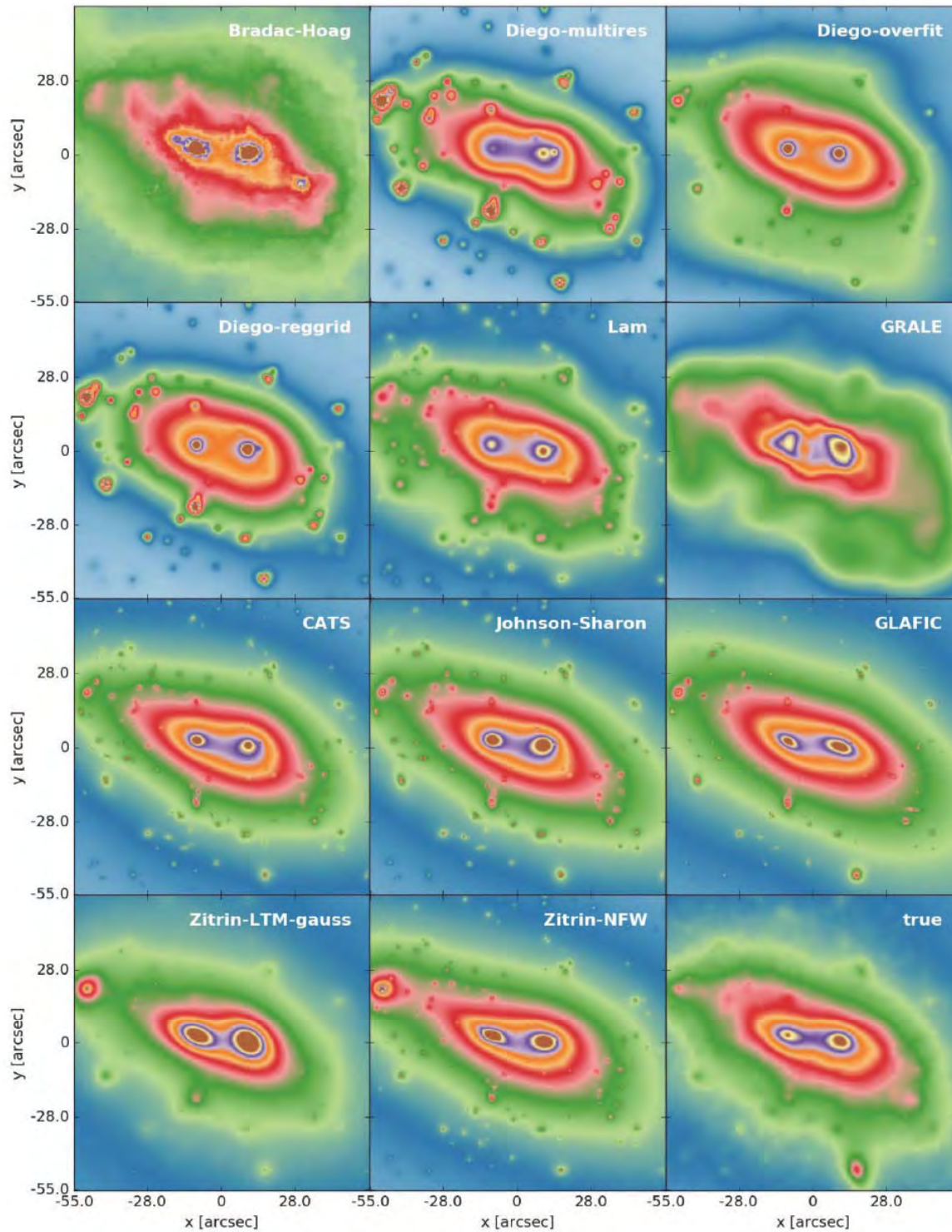




Ares: 242 images provenant de 85 sources







**Meneghetti et al. 2017**

Les modèles paramétriques ou hybrides sont généralement plus aptes à retrouver les propriétés des amas simulés.



# Abell 2744



PRE-HFF

**55**

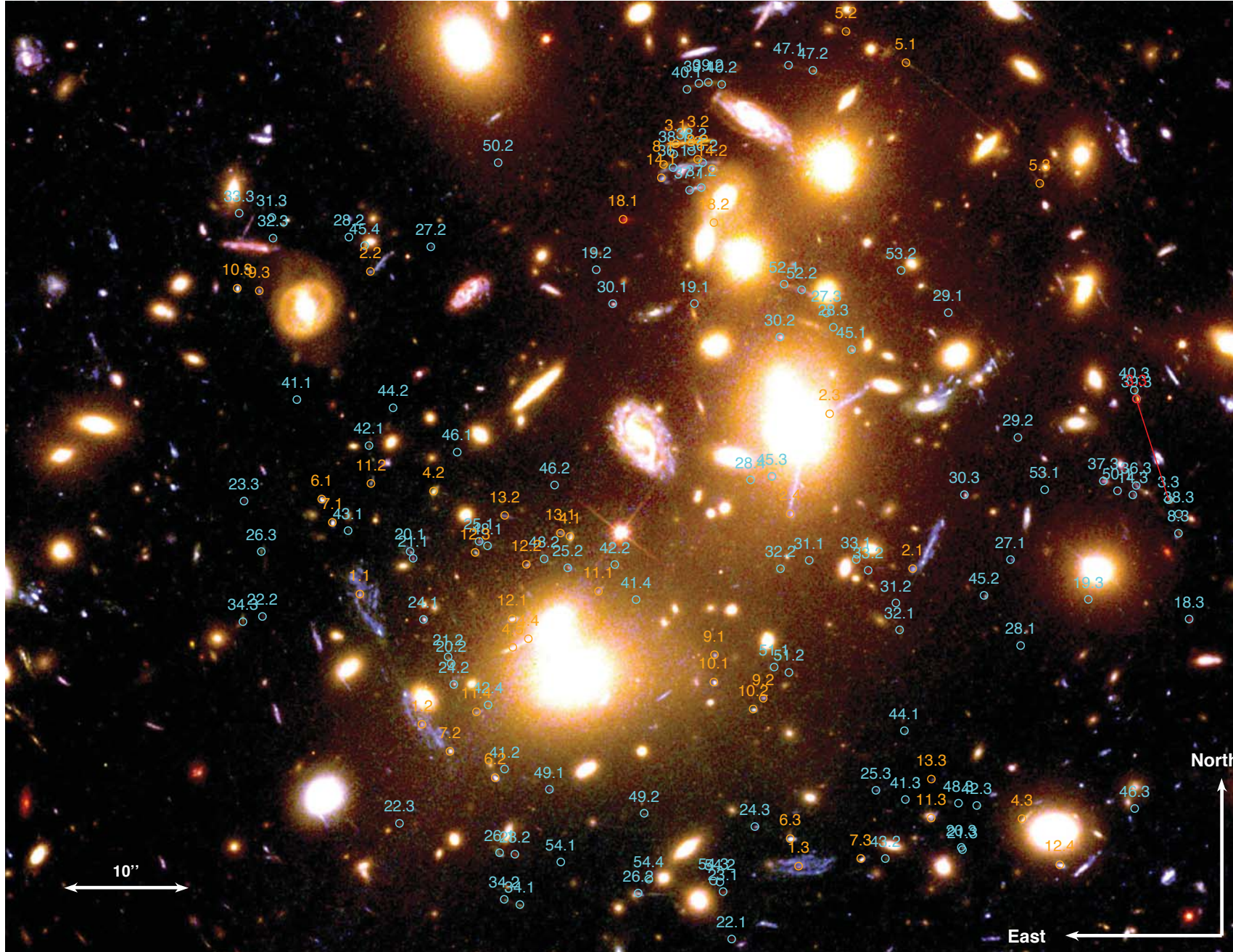
images  
multiples

**~50**

gal.arcmin<sup>-2</sup>



# Abell 2744



POST-HFF

**181**

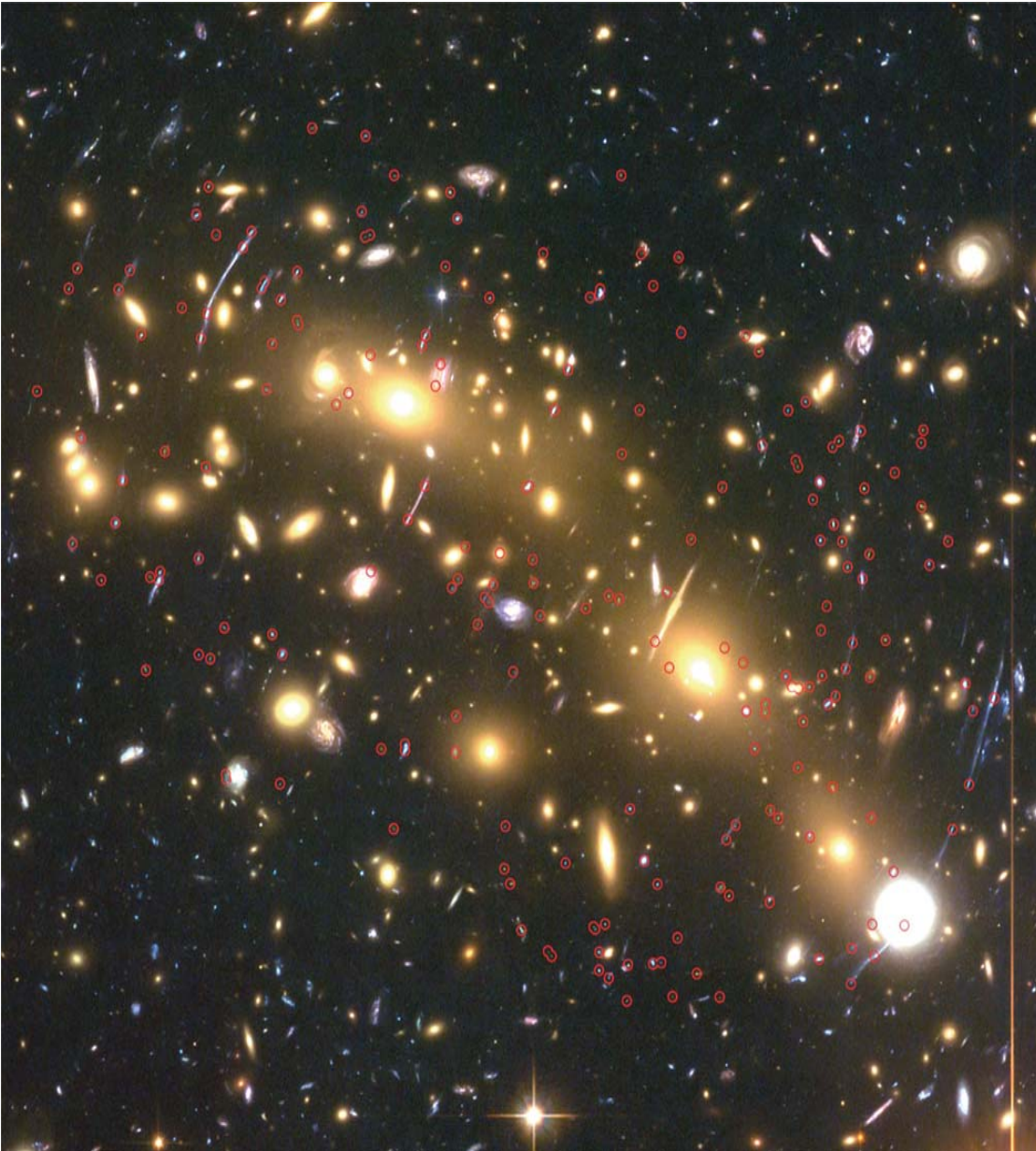
images  
multiples

**~100**

gal.arcmin<sup>-2</sup>



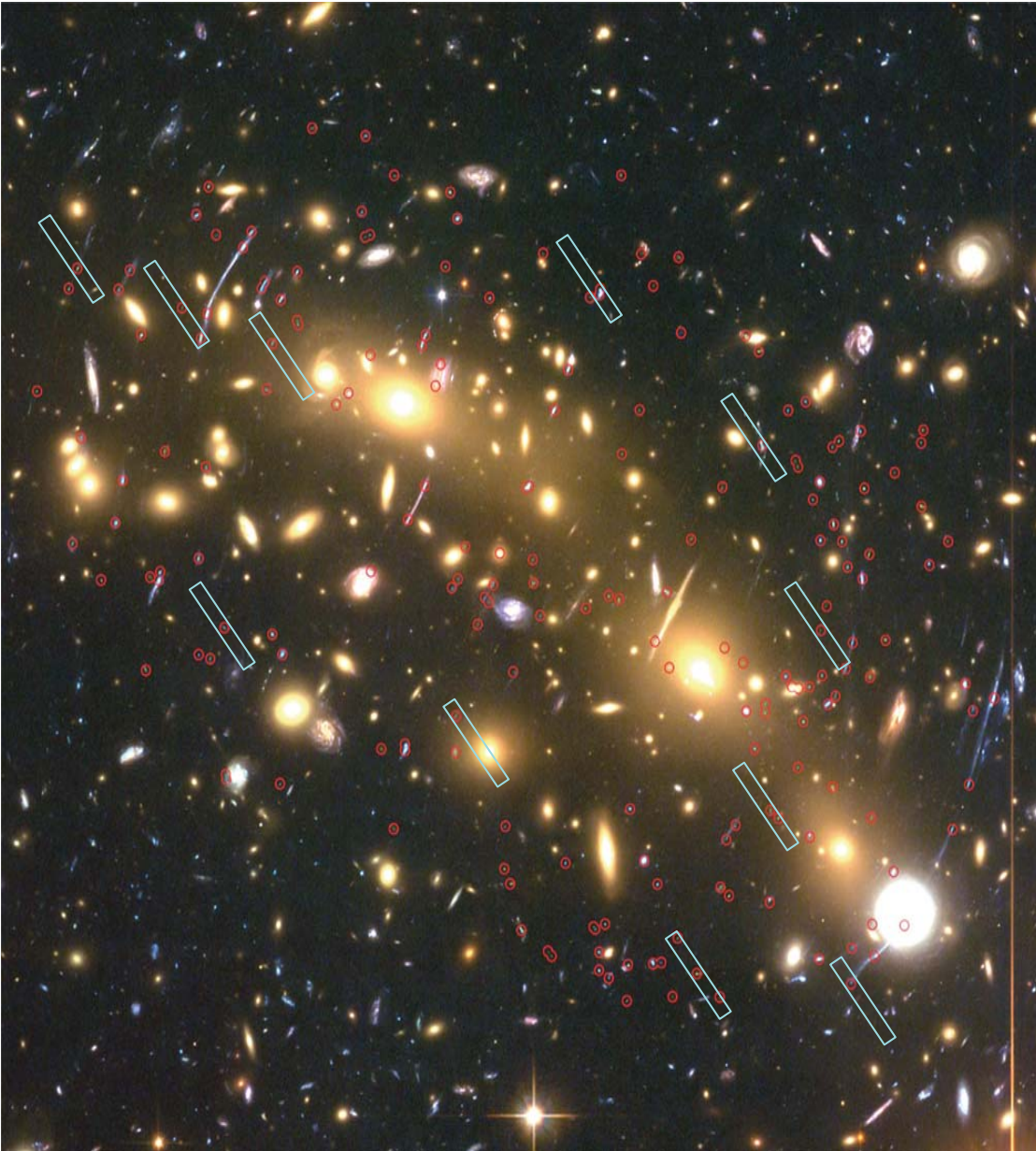
# Clé : Confirmation Spectroscopique



- Confirmer l'identification des images multiples
- Mesurer précisément le redshift des sources pour calibrer le modèle de lentille
- Bonus : contraintes cosmologiques par 'tomographie lensing'



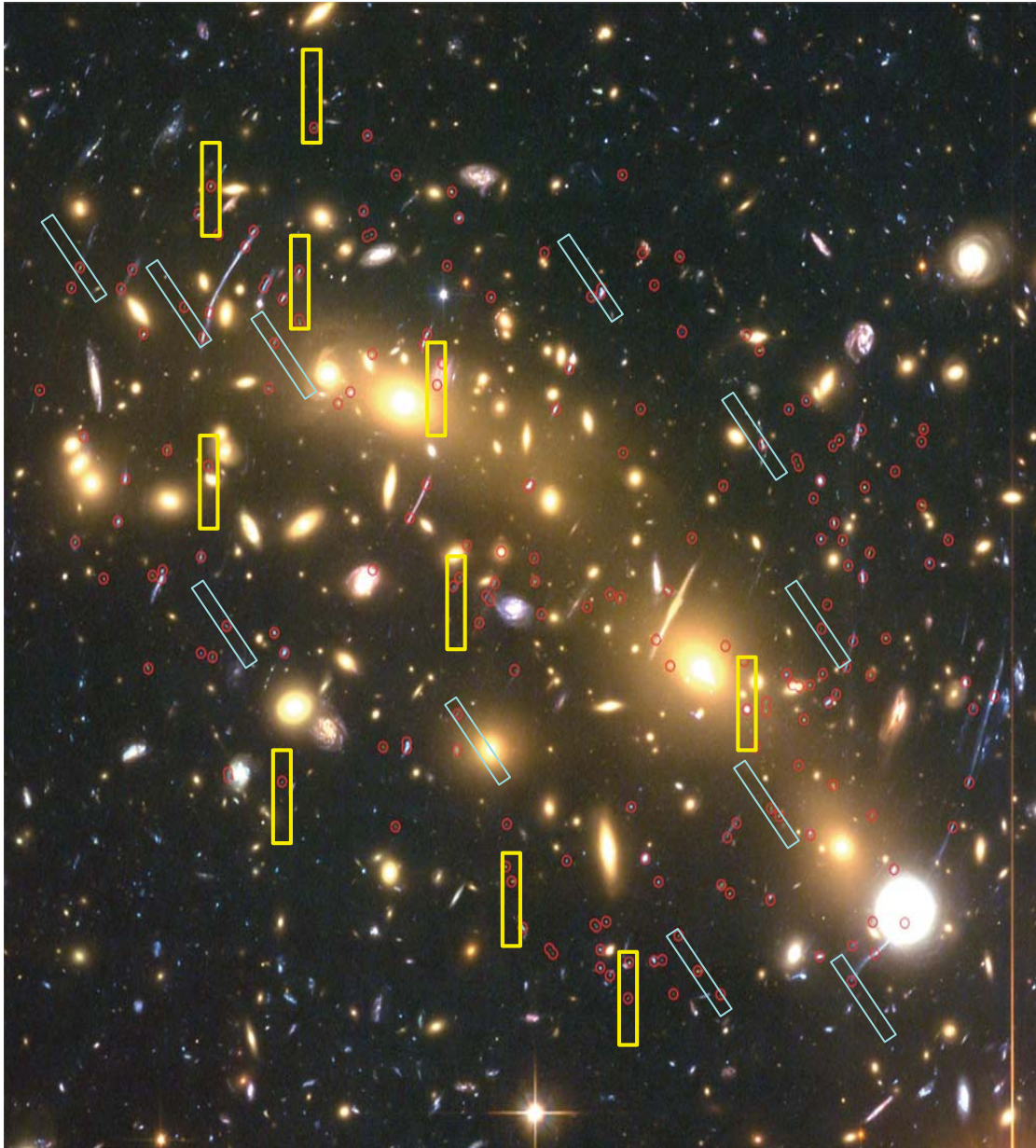
# Clé : Confirmation Spectroscopique



- Confirmer l'identification des images multiples
- Mesurer précisément le redshift des sources pour calibrer le modèle de lentille
- Bonus : contraintes cosmologiques par 'tomographie lensing'

Spectroscopie 'classique' :  
masques multi-fentes

# Clé : Confirmation Spectroscopique

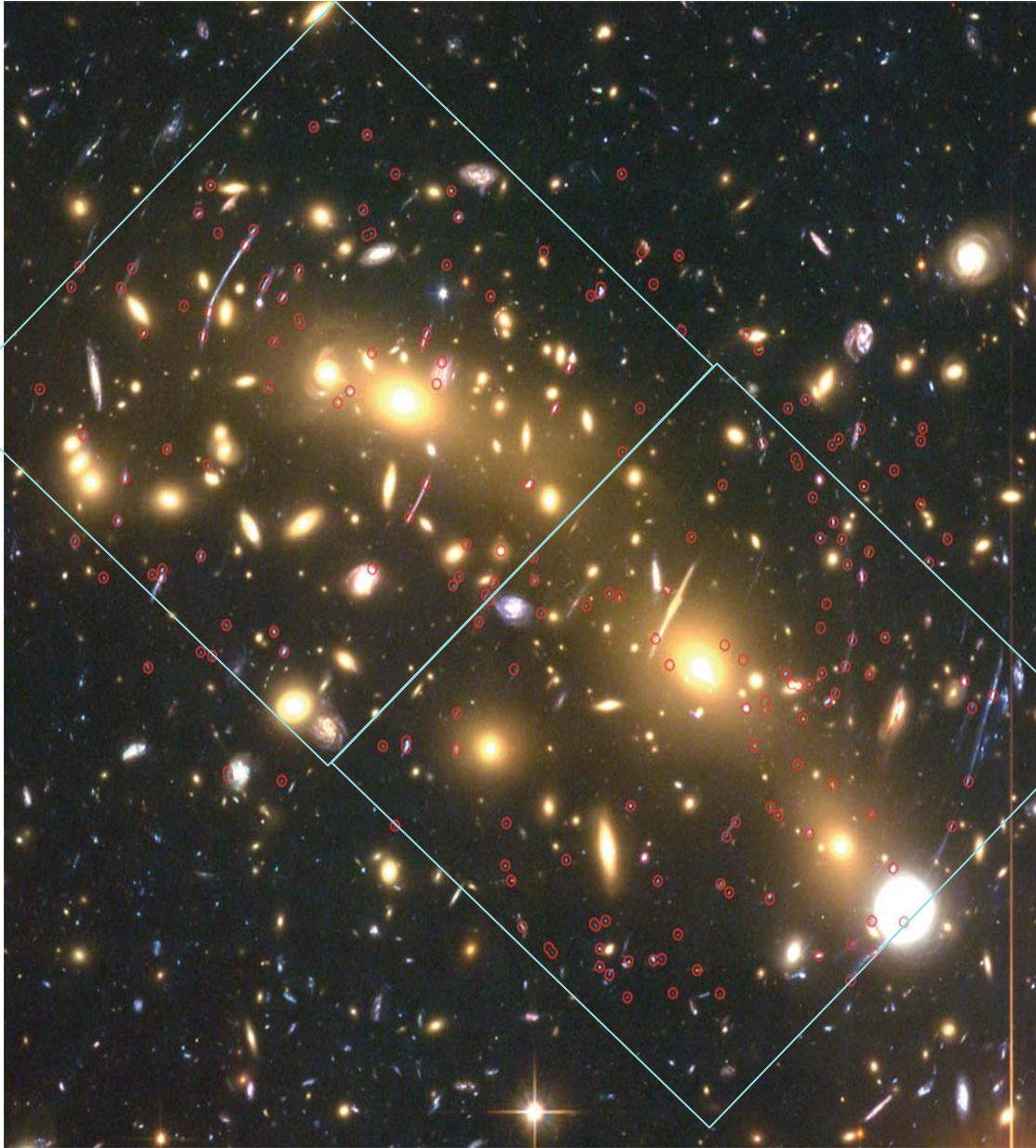


- Confirmer l'identification des images multiples
- Mesurer précisément le redshift des sources pour calibrer le modèle de lentille
- Bonus : contraintes cosmologiques par 'tomographie lensing'

Spectroscopie 'classique' :  
masques multi-fentes



# Clé : Confirmation Spectroscopique



- Confirmer l'identification des images multiples
- Mesurer précisément le redshift des sources pour calibrer le modèle de lentille
- Bonus : contraintes cosmologiques par 'tomographie lensing'

Spectroscopie 'classique' :  
masques multi-fentes

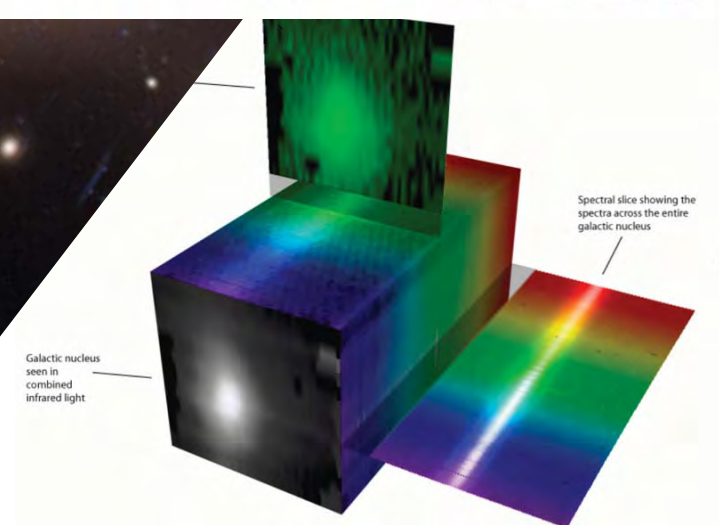
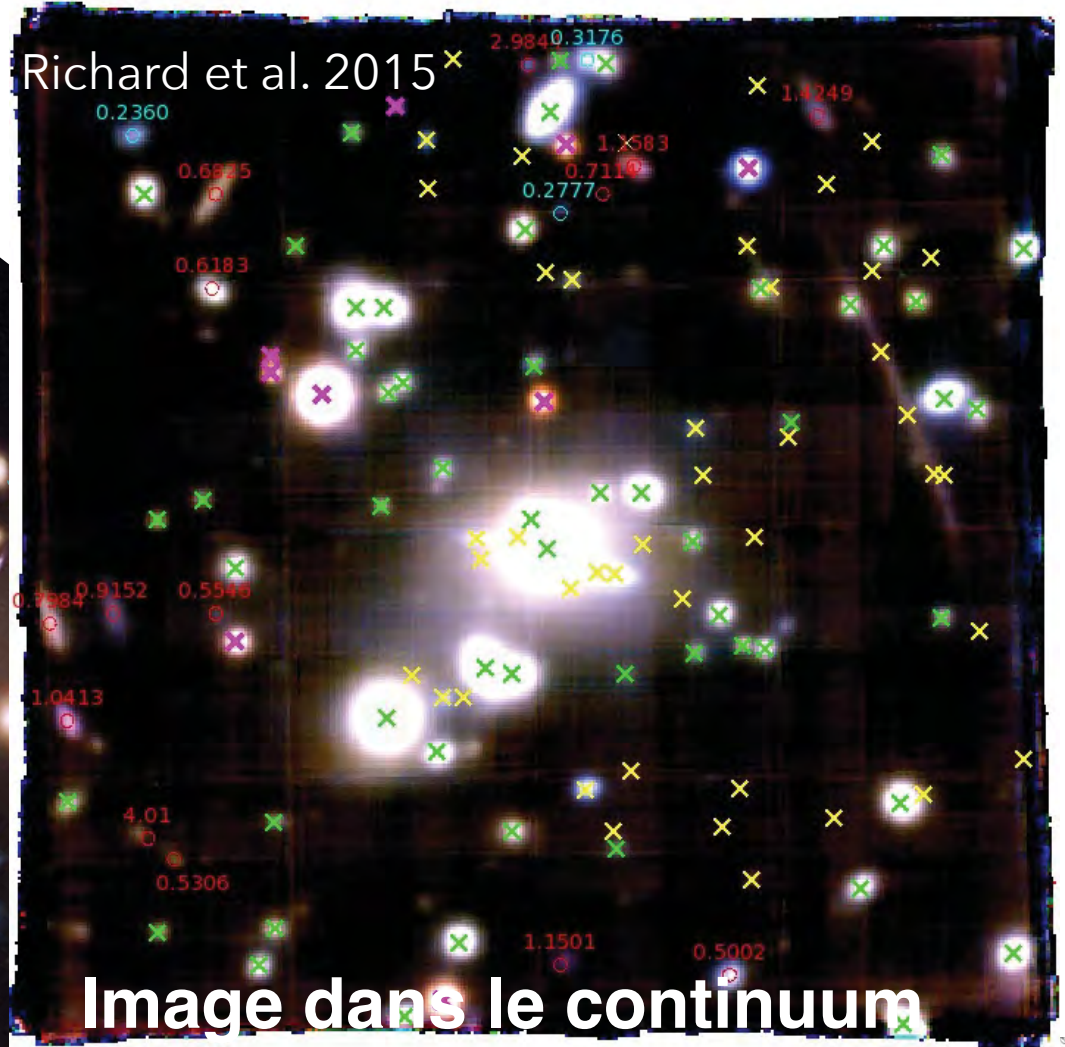
Spectroscopie intégrale de  
champ - meilleure efficacité !





# MUSE

multi unit spectroscopic explorer







**MUSE**  
multi unit spectroscopic explorer



Richard et al. 2015

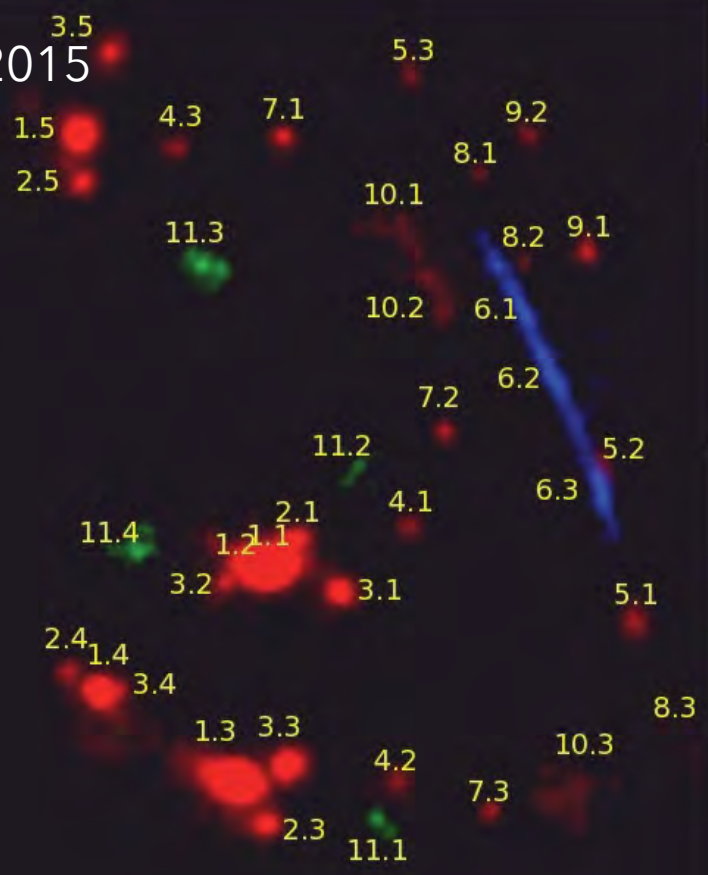
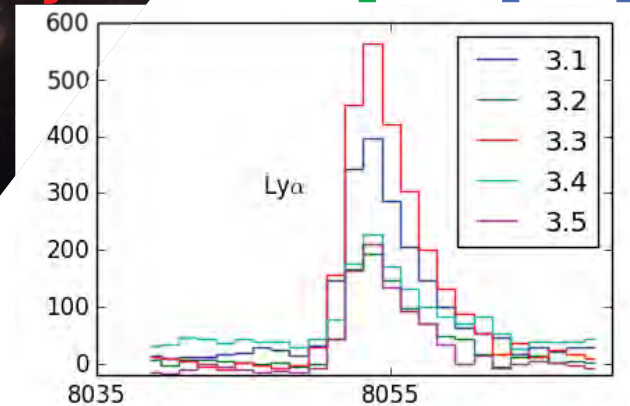


Image des raies en emission

**Ly $\alpha$**       **CIII]**      **[OII]**

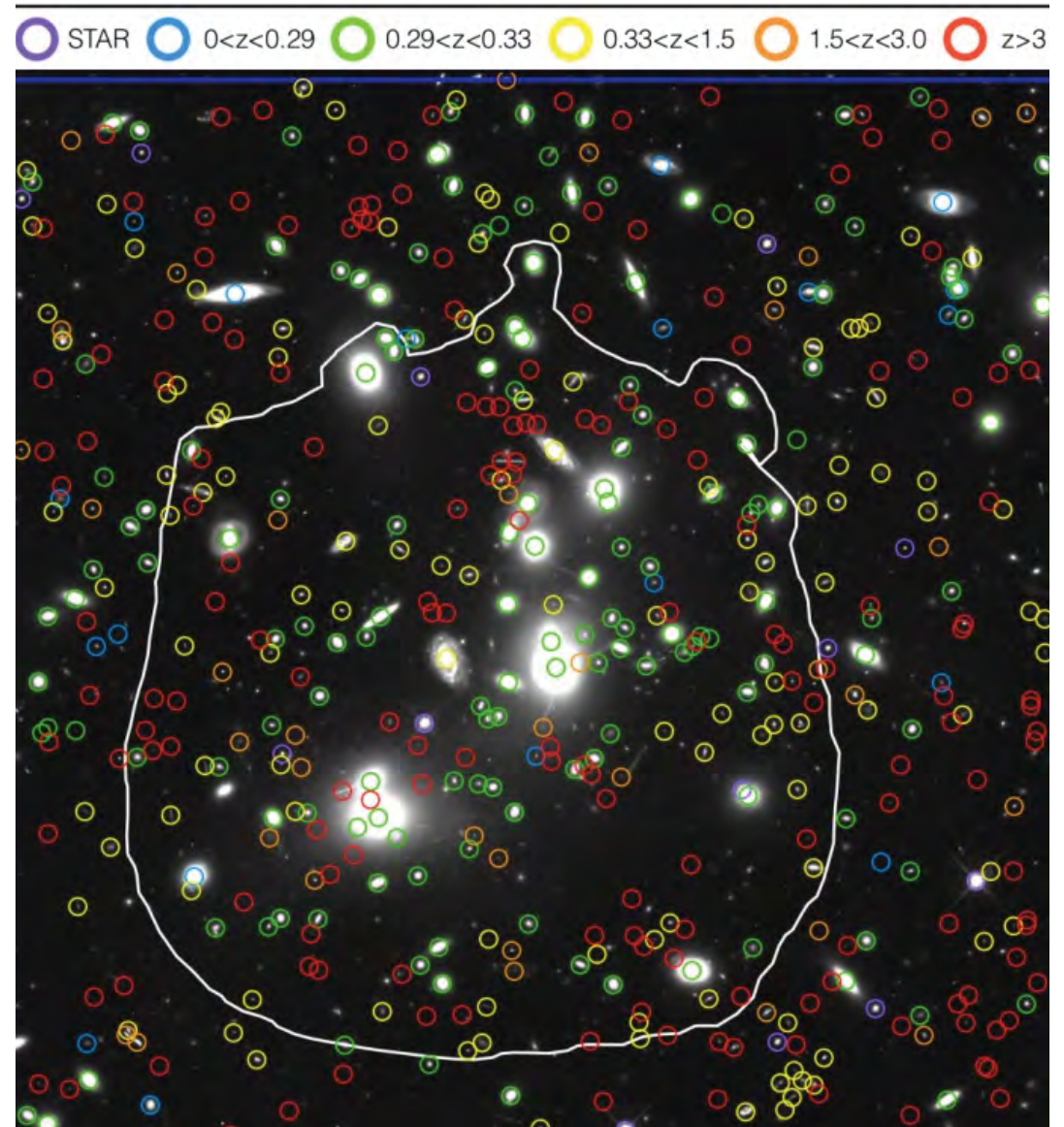




# MUSE dans les Champs Frontières

**Mahler et al. 2018**

Study	$N_{\text{sys},z}$	$N_{\text{im},z}$	$N_{\text{sys}}$	$N_{\text{im}}$
pre-HFF				
Merten et al. 2011	0	0	11	34
Richard et al. 2014	2	2	18	55
Johnson et al. 2014	3	3	15	47
post-HFF				
Lam et al. 2014	4	4	21	65
Zitrin et al. 2014	4	4	21	65
Ishigaki et al. 2015	3	3	24	67
Jauzac et al. 2015	3	8	61	181
Wang et al. 2015	3	8	57	179
Kawamata et al. 2016	5	5	37	111
<b>This work</b>	<b>29</b>	<b>83</b>	<b>60</b>	<b>188</b>

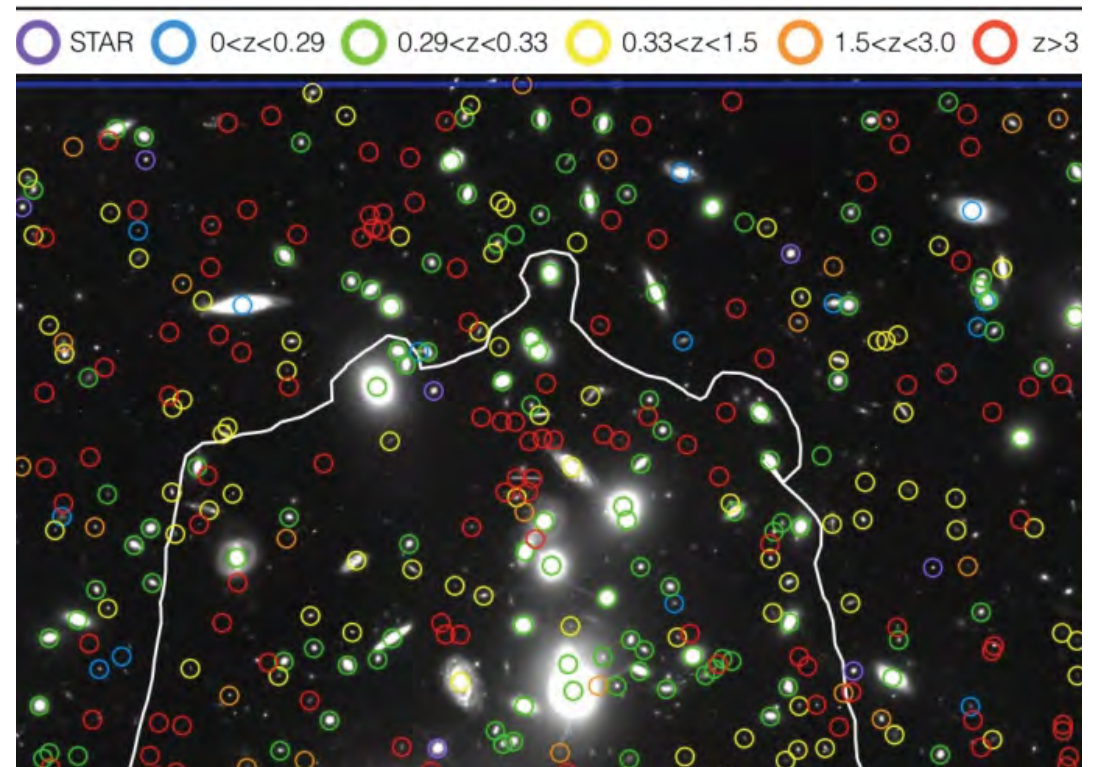




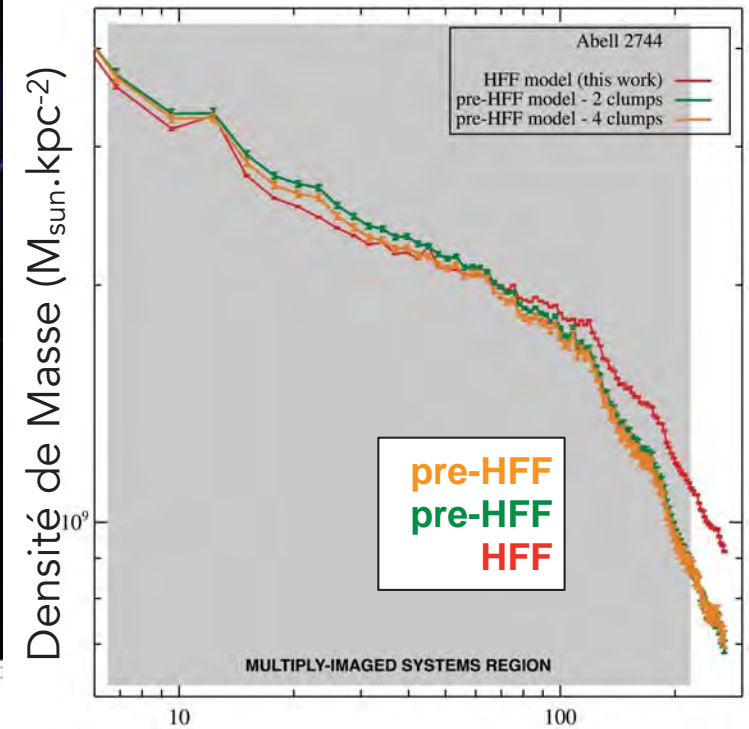
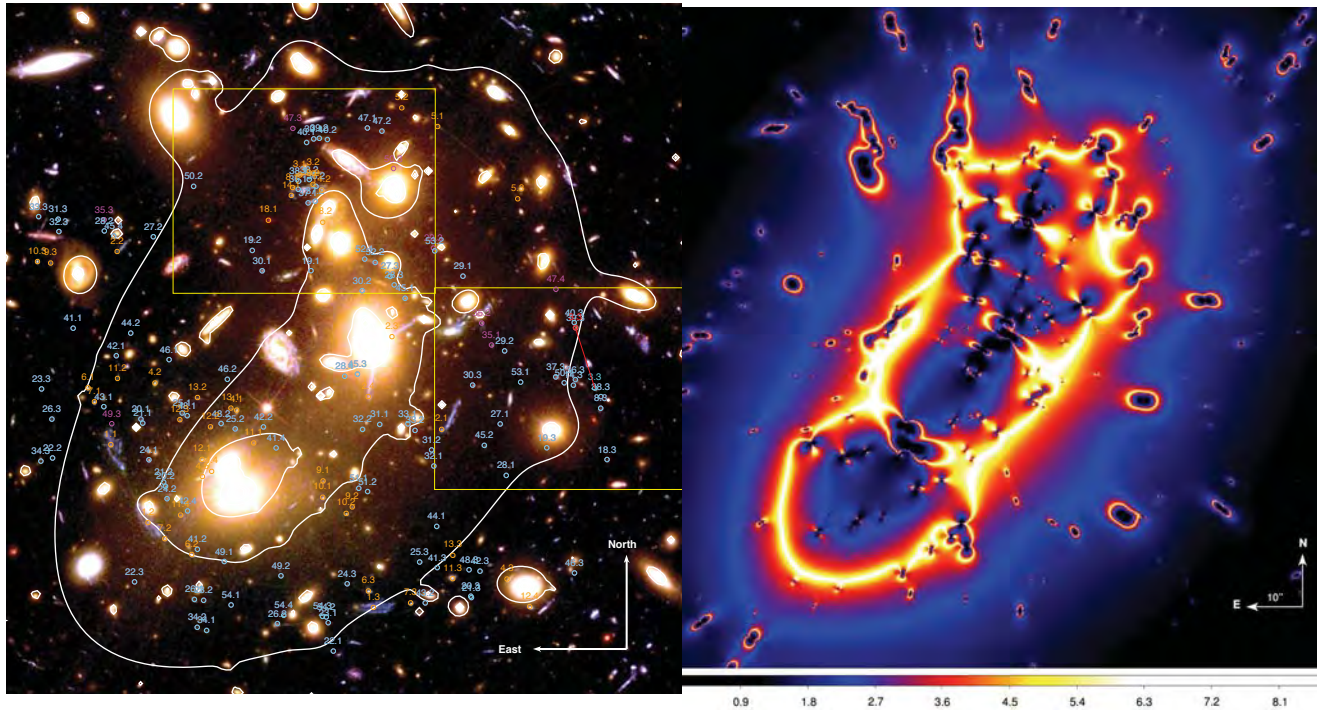
# MUSE dans les Champs Frontières

## Mahler et al. 2018

Study	$N_{\text{sys},z}$	$N_{\text{im},z}$	$N_{\text{sys}}$	$N_{\text{im}}$
pre-HFF				
Merten et al. 2011	0	0	11	34
Richard et al. 2014	2	2	18	55
Johnson et al. 2014	3	3	15	47
post-HFF				
Lam et al. 2014	4	4	21	65
Zitrin et al. 2014	4	4	21	65
Ishigaki et al. 2015	3	3	24	67
Jauzac et al. 2015	3	8	61	181
Wang et al. 2015	3	8	57	179
Kawamata et al. 2016	5	5	37	111
<b>This work</b>	<b>29</b>	<b>83</b>	<b>60</b>	<b>188</b>



# Profils de masse des Champs Frontières



Jauzac et al. 2015

Augmentation du nombre de contraintes dans le coeur de l'amas-lentille :

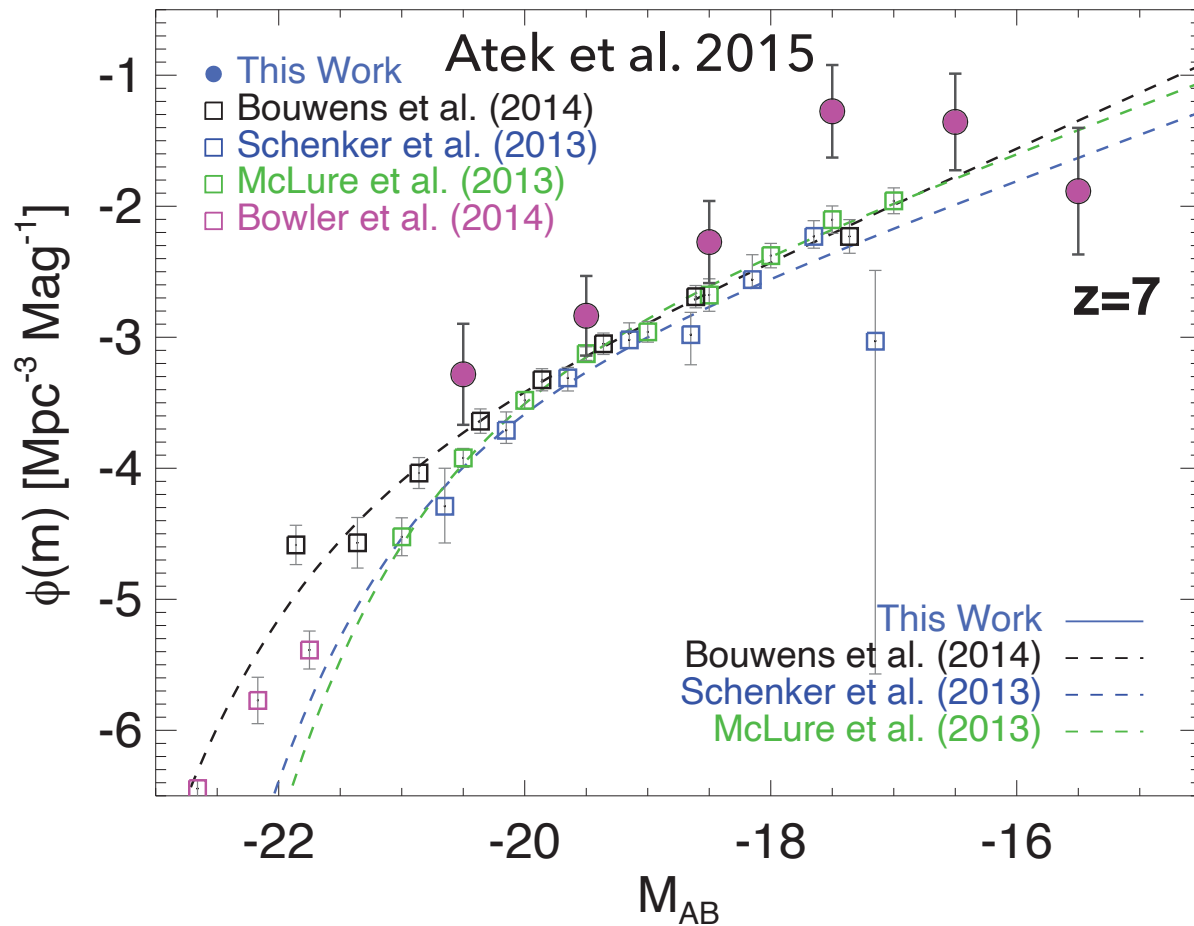
- correction des modèles préliminaires
- meilleure estimation des amplifications

Estimation de la masse à **<1%** :  
 $M(R < 250 \text{ kpc}) = 2.765 \pm 0.008 \text{ (stat)} 10^{14} M_{\text{sun}}$

Amplification estimée à **2%** :  
 $\mu = 5.61 \pm 0.10 \text{ (stat)} \pm 0.57 \text{ (sys)}$

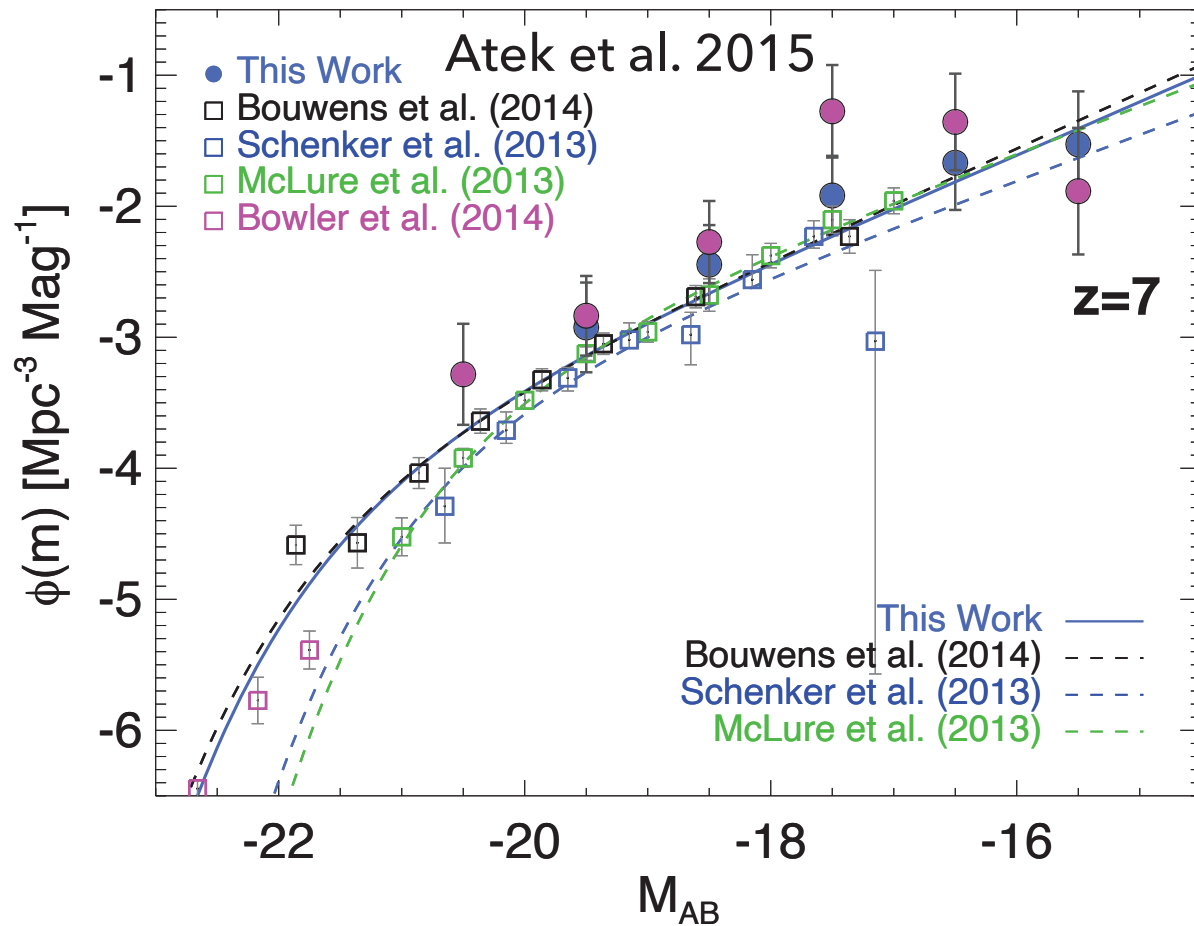


# Fonction de luminosité UV des sources de la réionisation



- L'augmentation du nombre de dropouts et la précision des amas-lentilles des Champs Frontières ont permis de repousser les contraintes jusque -15 / -16
- Certains groupes ont tenté d'aller au-delà (-13) au coeur des sources de la réionisation.

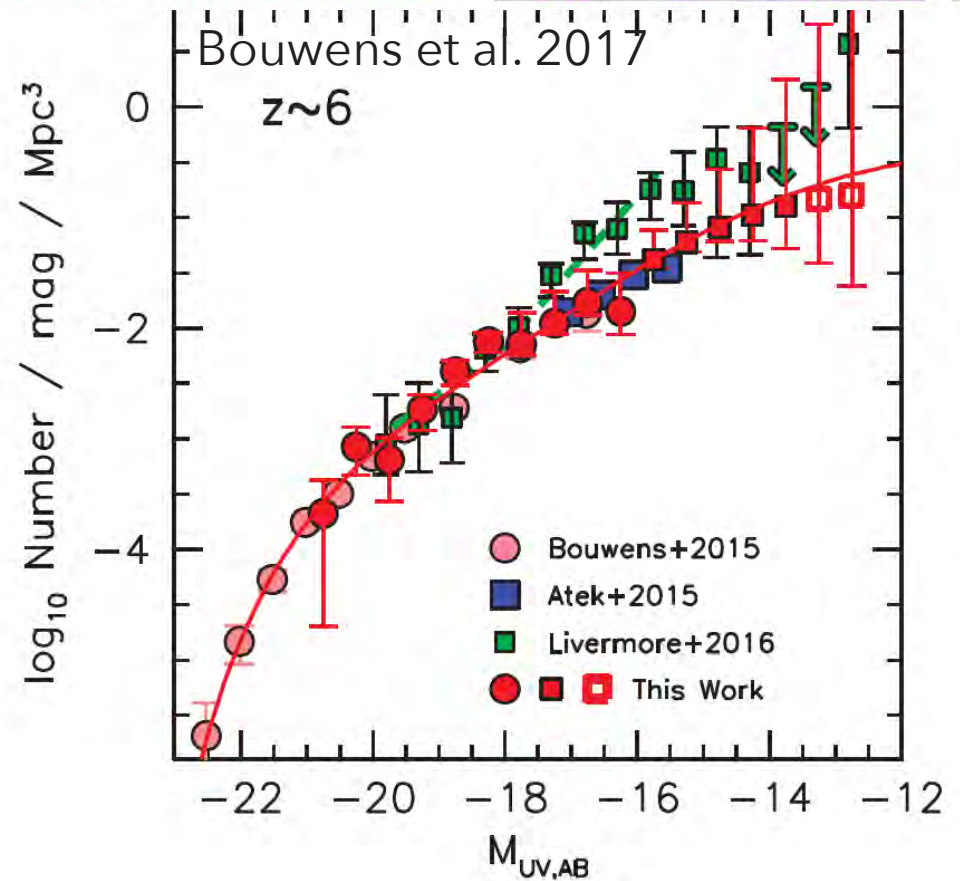
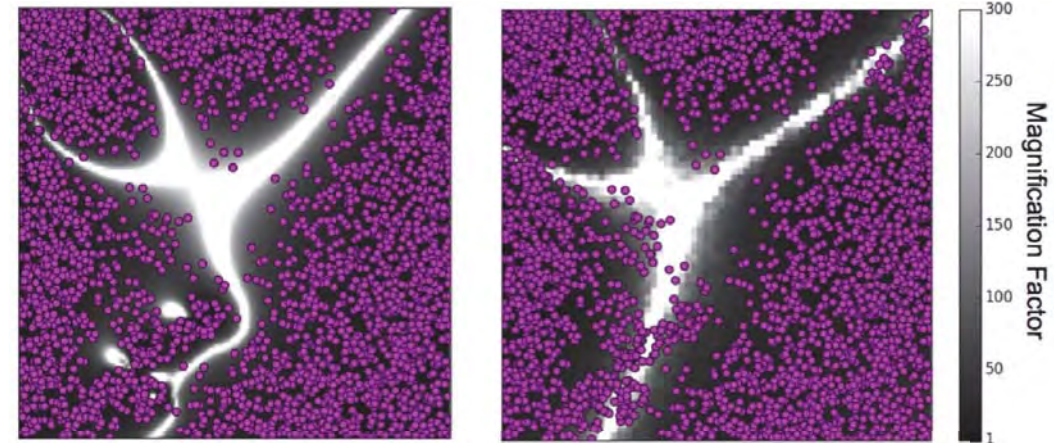
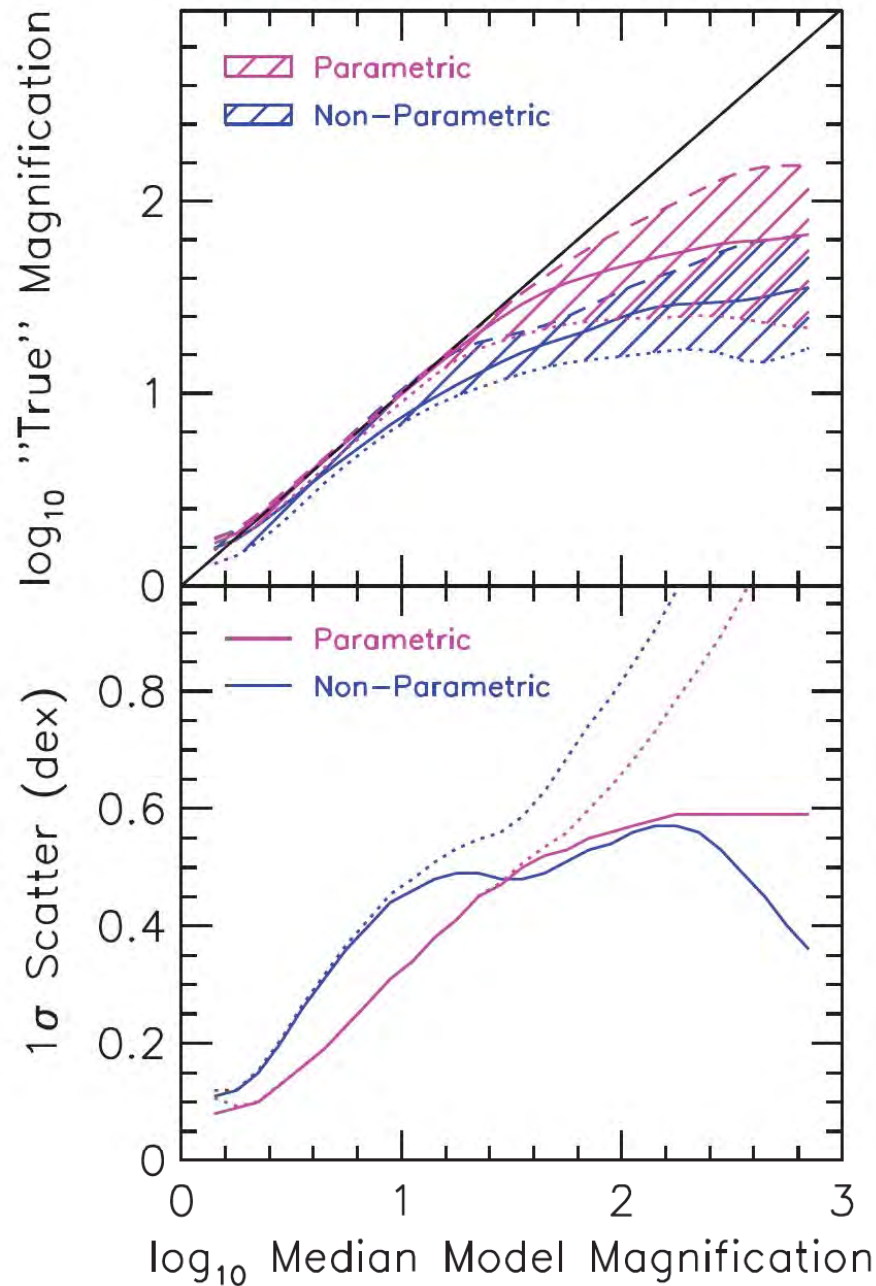
# Fonction de luminosité UV des sources de la réionisation

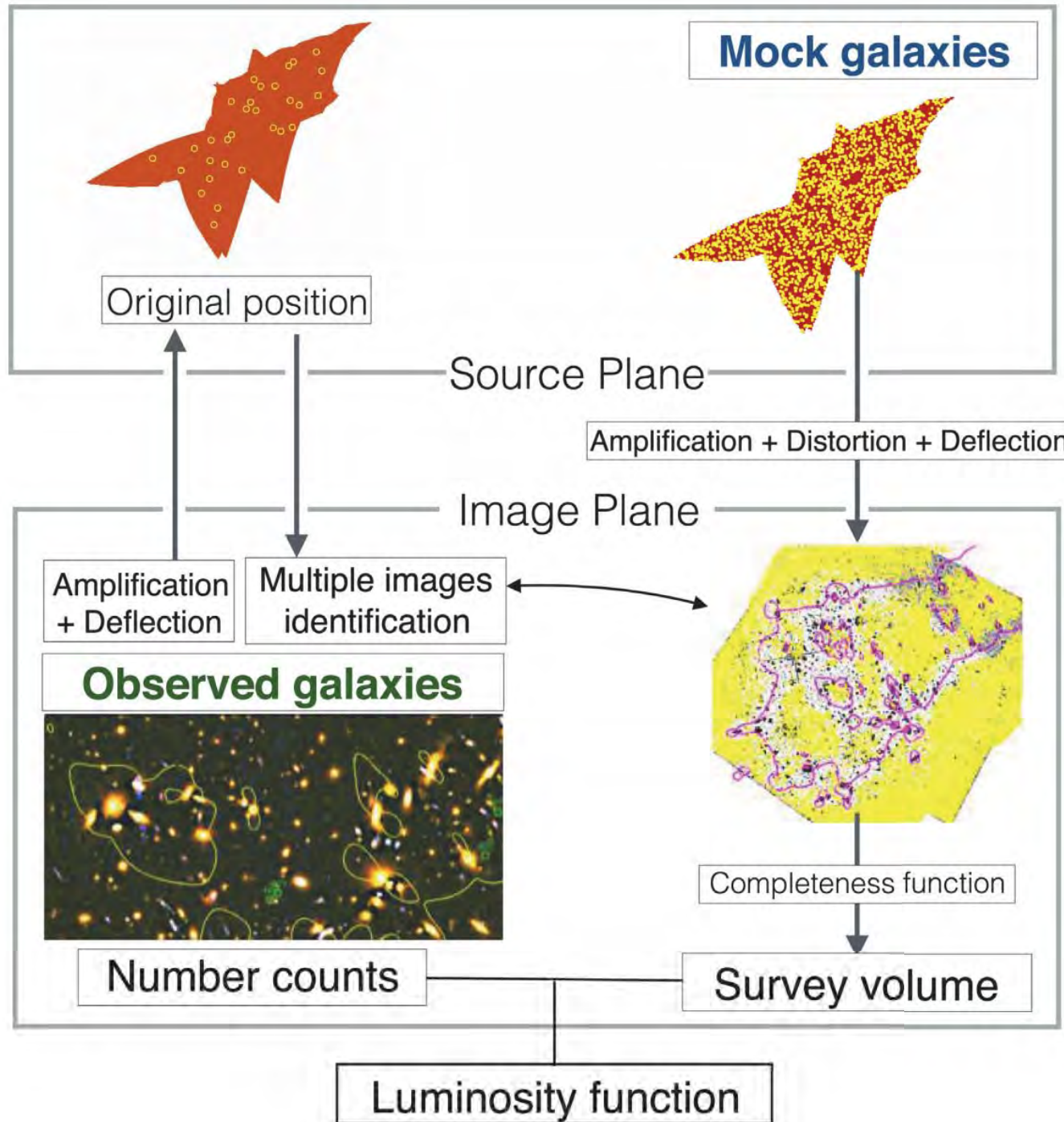


- L'augmentation du nombre de dropouts et la précision des amas-lentilles des Champs Frontières ont permis de repousser les contraintes jusque -15 / -16
- Certains groupes ont tenté d'aller au-delà (-13) au coeur des sources de la réionisation.



# Impact de l'incertitude sur l'amplification



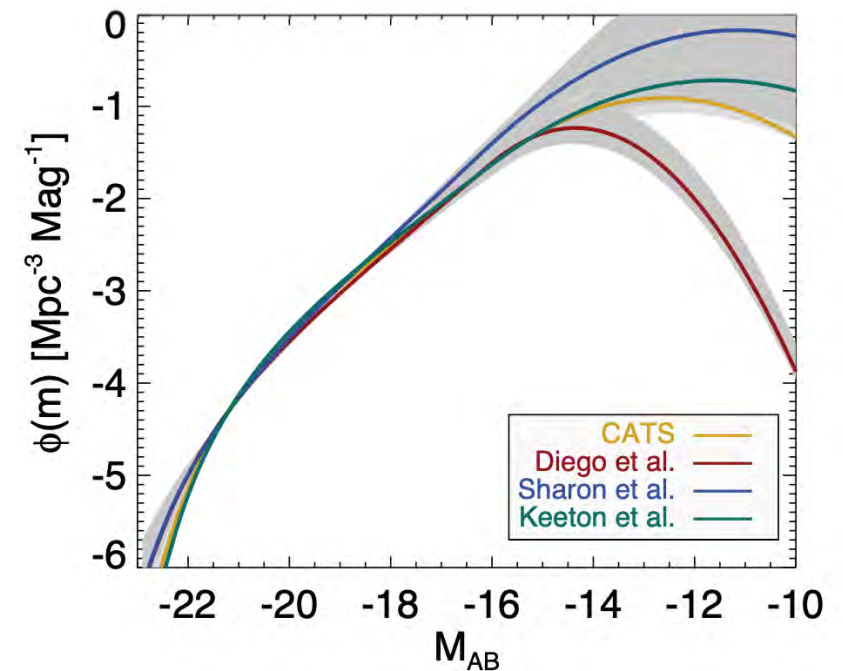
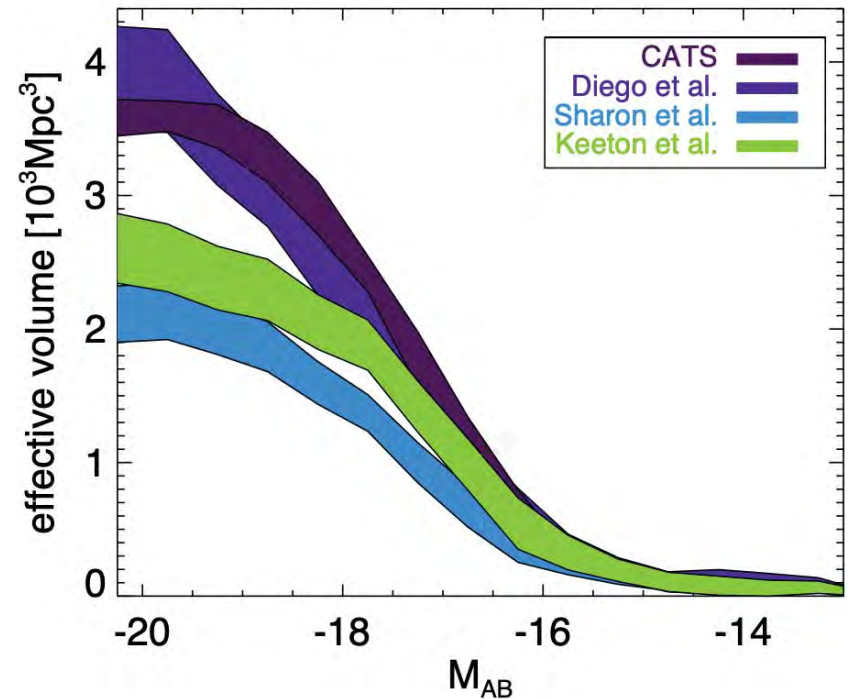
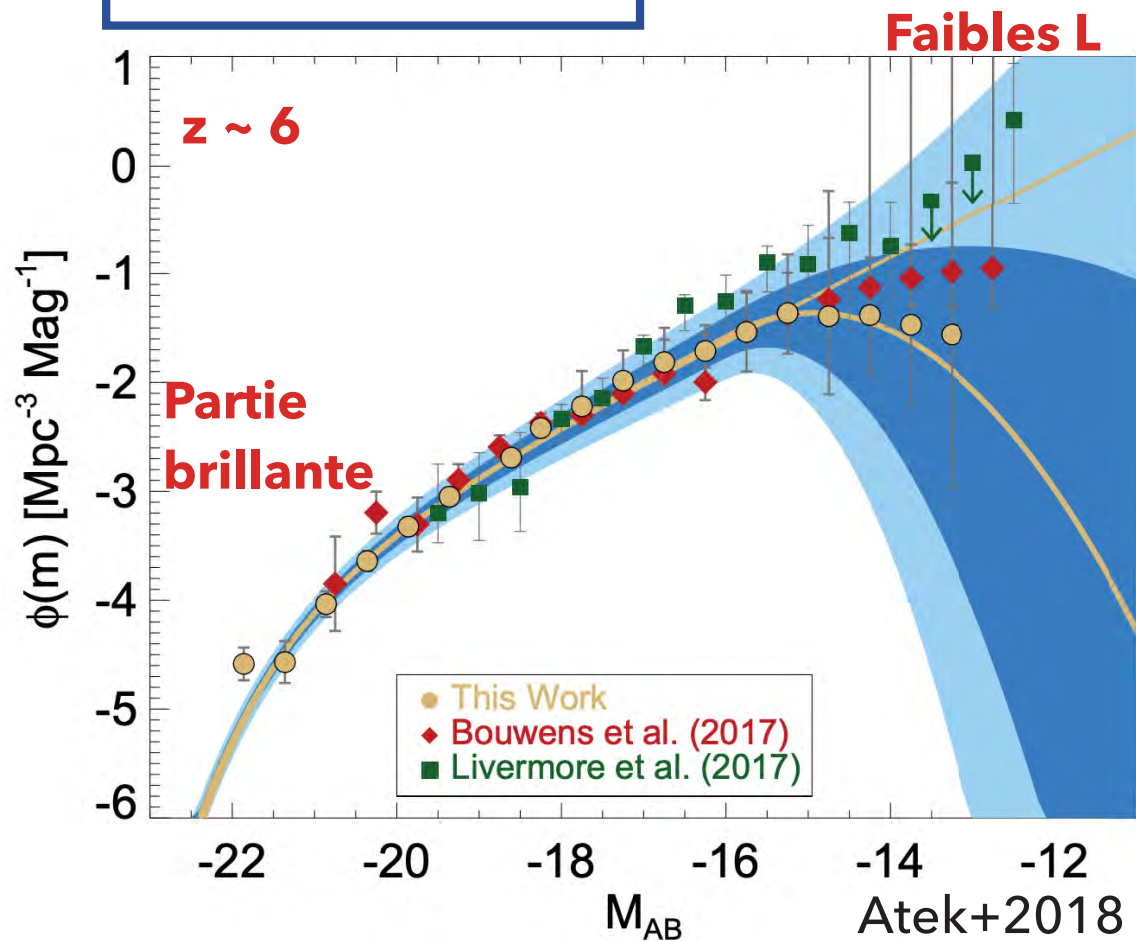




# Présence d'un 'rebroussement' ?

$$\phi(M) = \frac{\ln(10)}{2.5} \phi^* 10^{0.4(\alpha+1)(M^*-M)} \exp(-10^{0.4(M^*-M)})$$

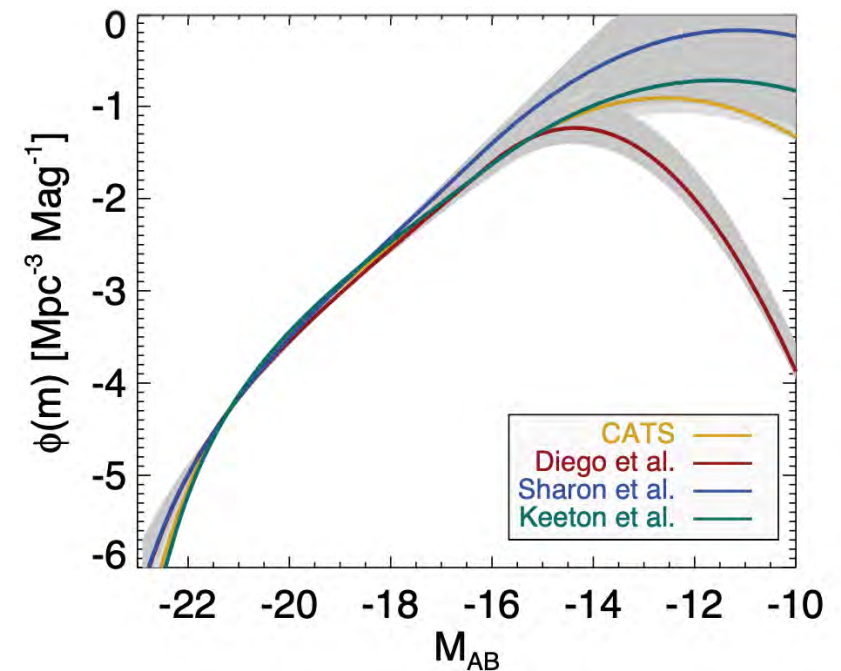
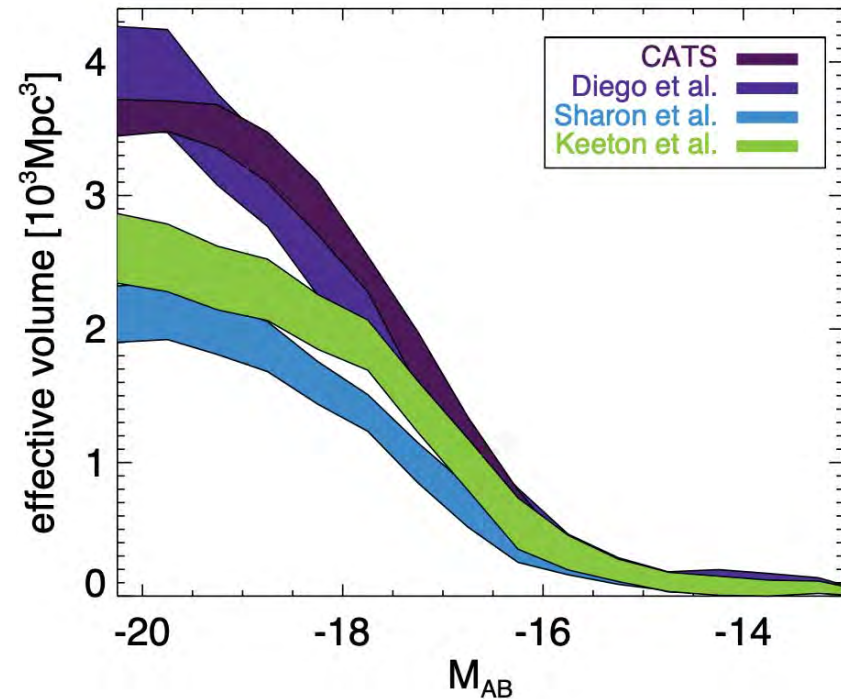
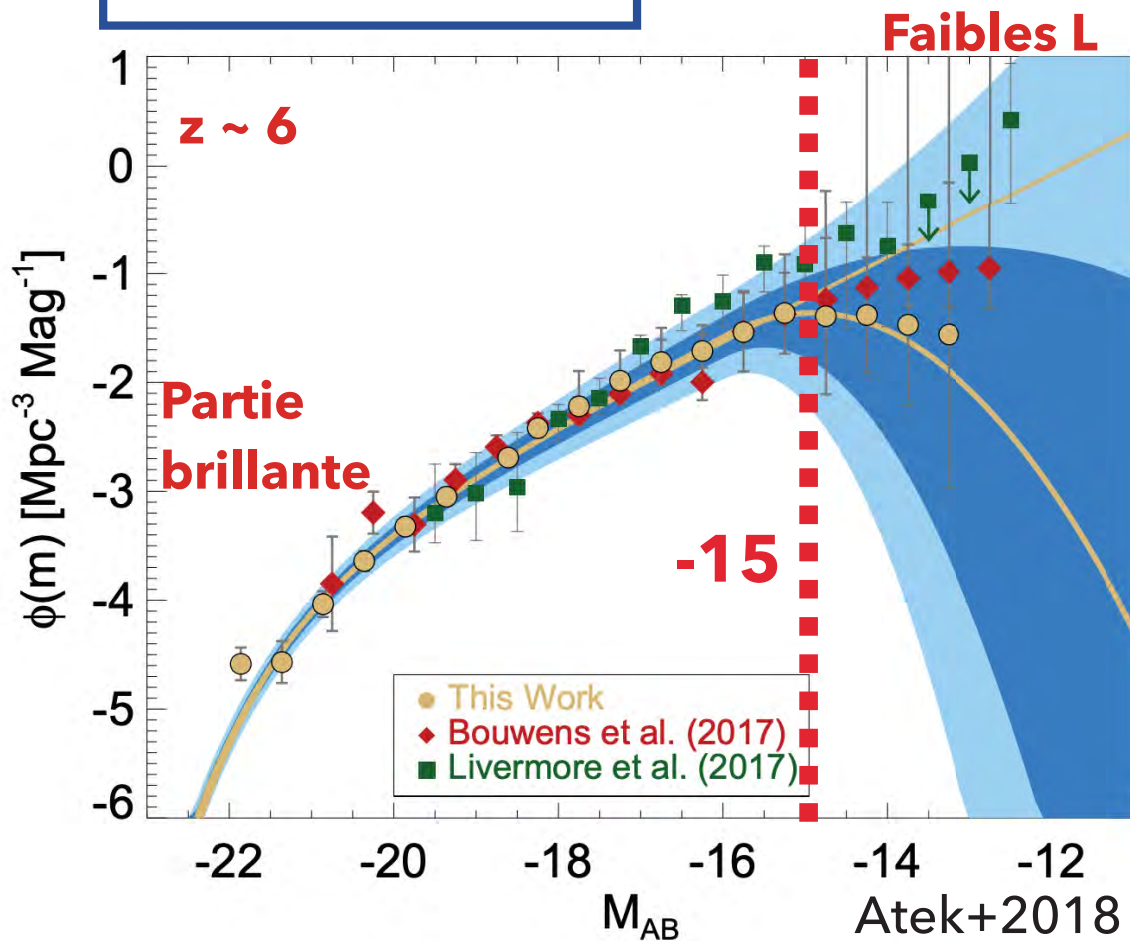
$$\times 10^{-0.4\beta(M+16)^2} \quad \text{à } M < -16 \text{ (turnover)}$$



# Présence d'un 'rebroussement' ?

$$\phi(M) = \frac{\ln(10)}{2.5} \phi^* 10^{0.4(\alpha+1)(M^*-M)} \exp(-10^{0.4(M^*-M)})$$

$$\times 10^{-0.4\beta(M+16)^2} \text{ à } M < -16 \text{ (turnover)}$$

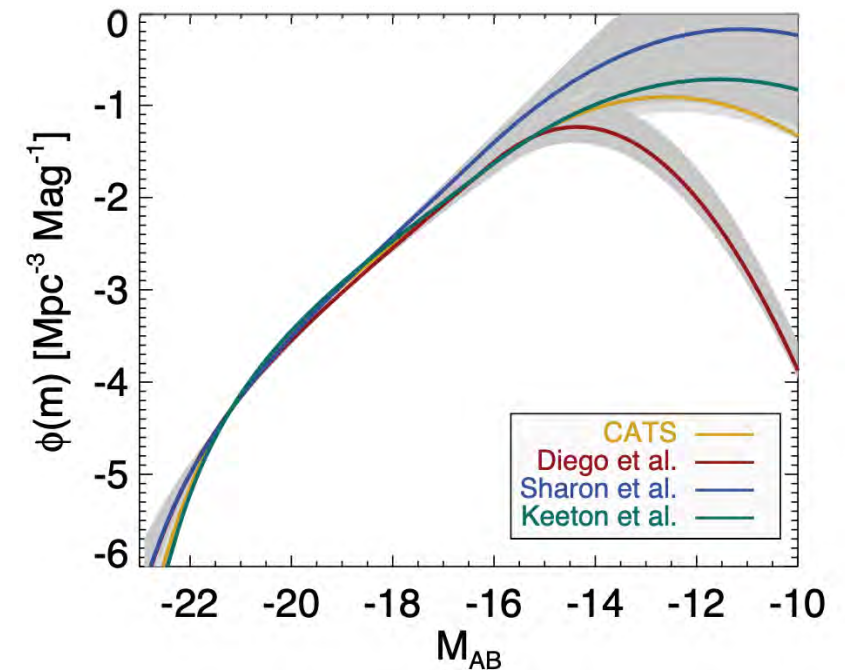
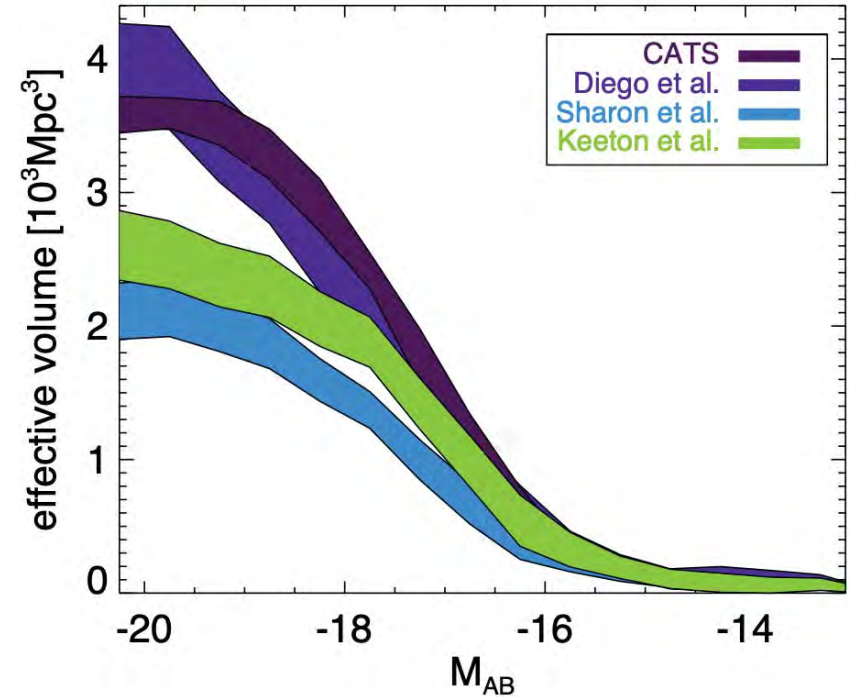
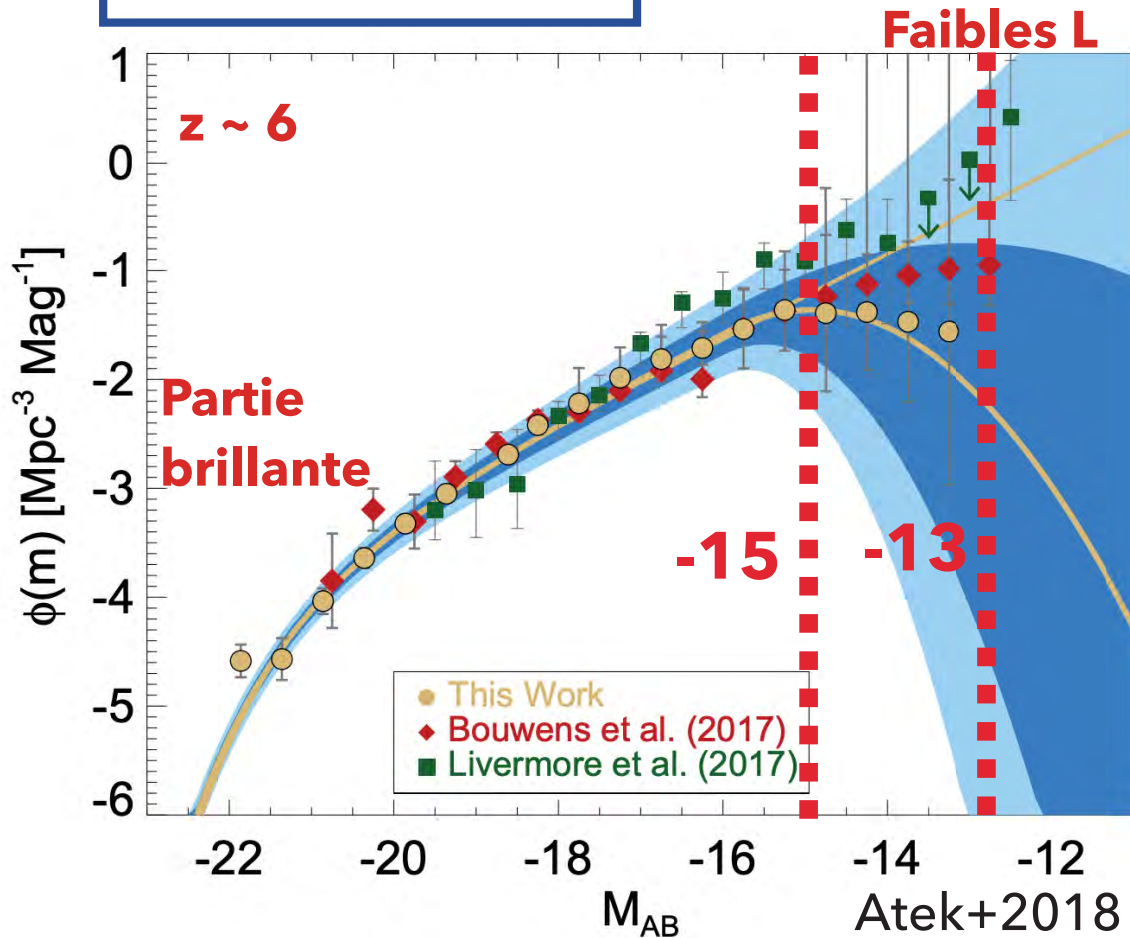




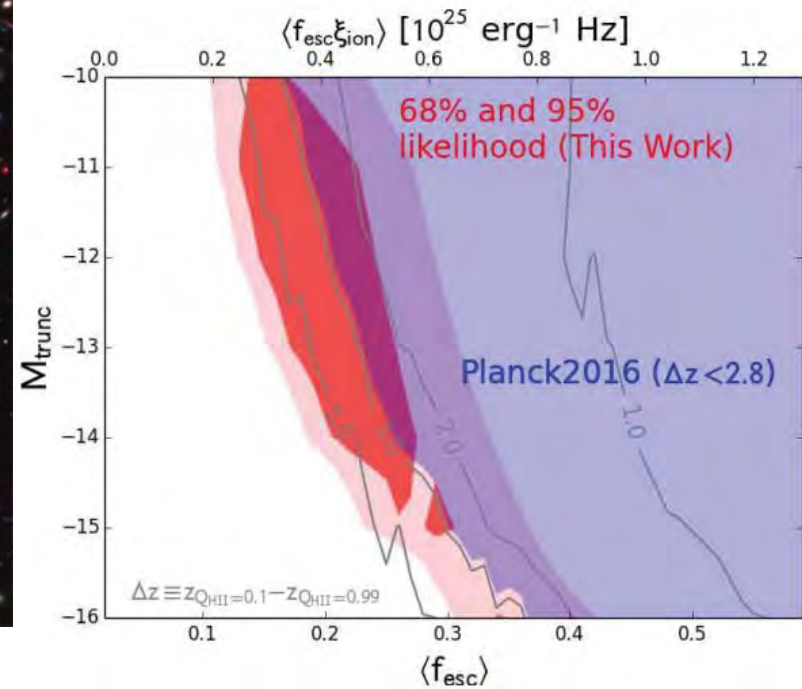
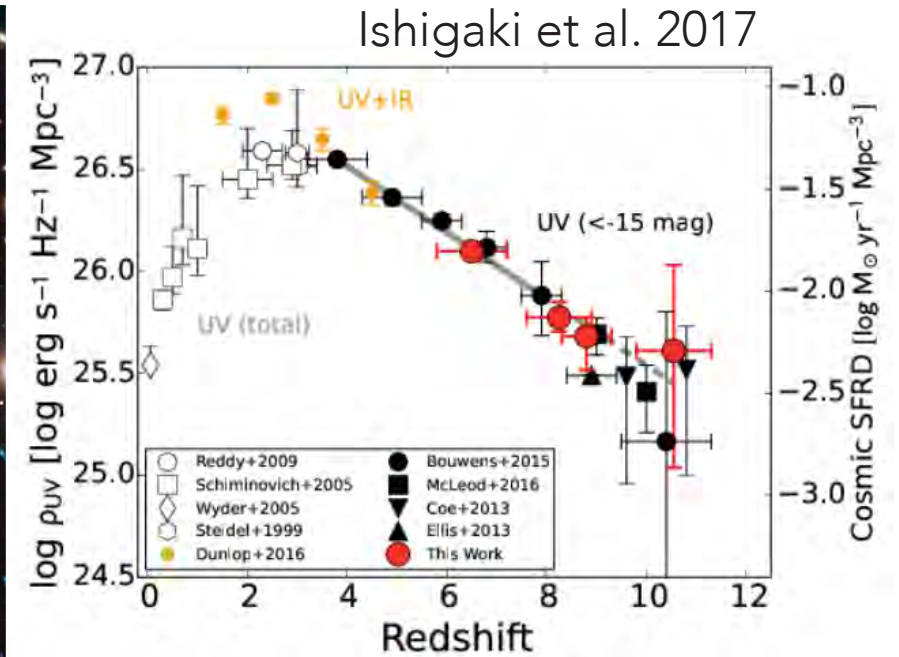
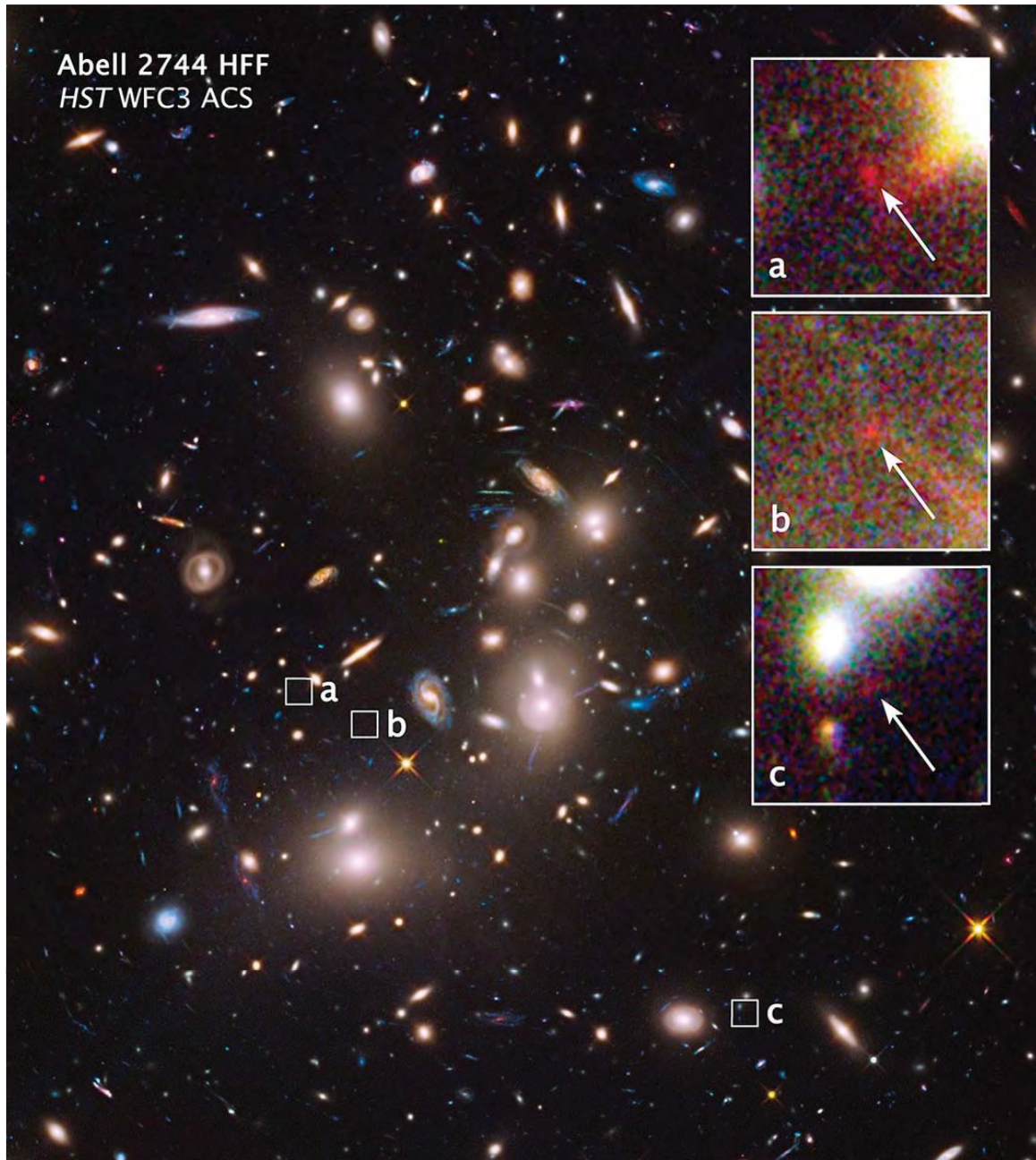
# Présence d'un 'rebroussement' ?

$$\phi(M) = \frac{\ln(10)}{2.5} \phi^* 10^{0.4(\alpha+1)(M^*-M)} \exp(-10^{0.4(M^*-M)})$$

$$\times 10^{-0.4\beta(M+16)^2} \text{ à } M < -16 \text{ (turnover)}$$



# $z = 10$ : La Dernière Frontière



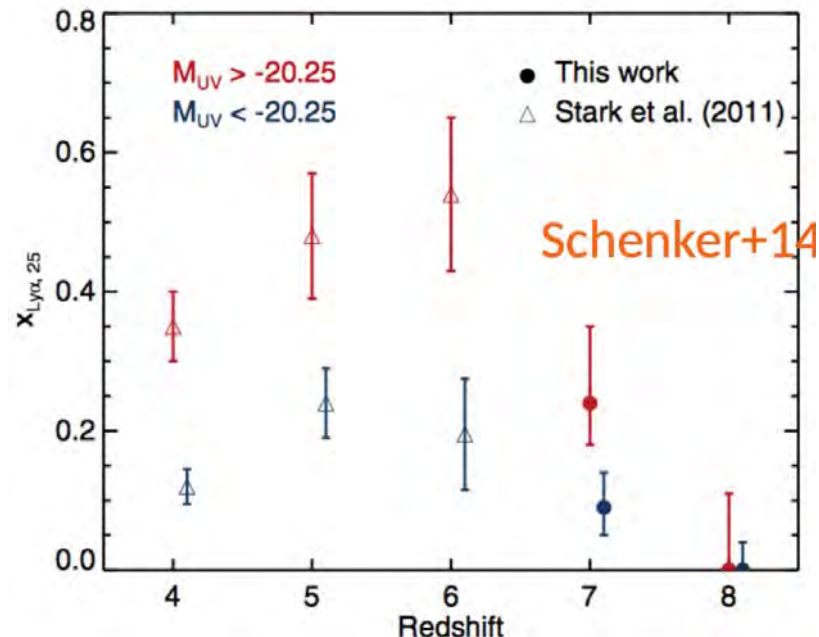


# Limites des résultats photométriques

- Les détections Hubble de galaxies très distantes restent majoritairement des **candidats photométriques**.
- Un suivi spectroscopique au sol permet de confirmer une fraction de ces candidats (au travers de la raie Lyman-alpha de l'hydrogène)

Domaine visible (jusque  $z = 7$ ) ou proche-infrarouge ( $z = 7$  à  $11$ )

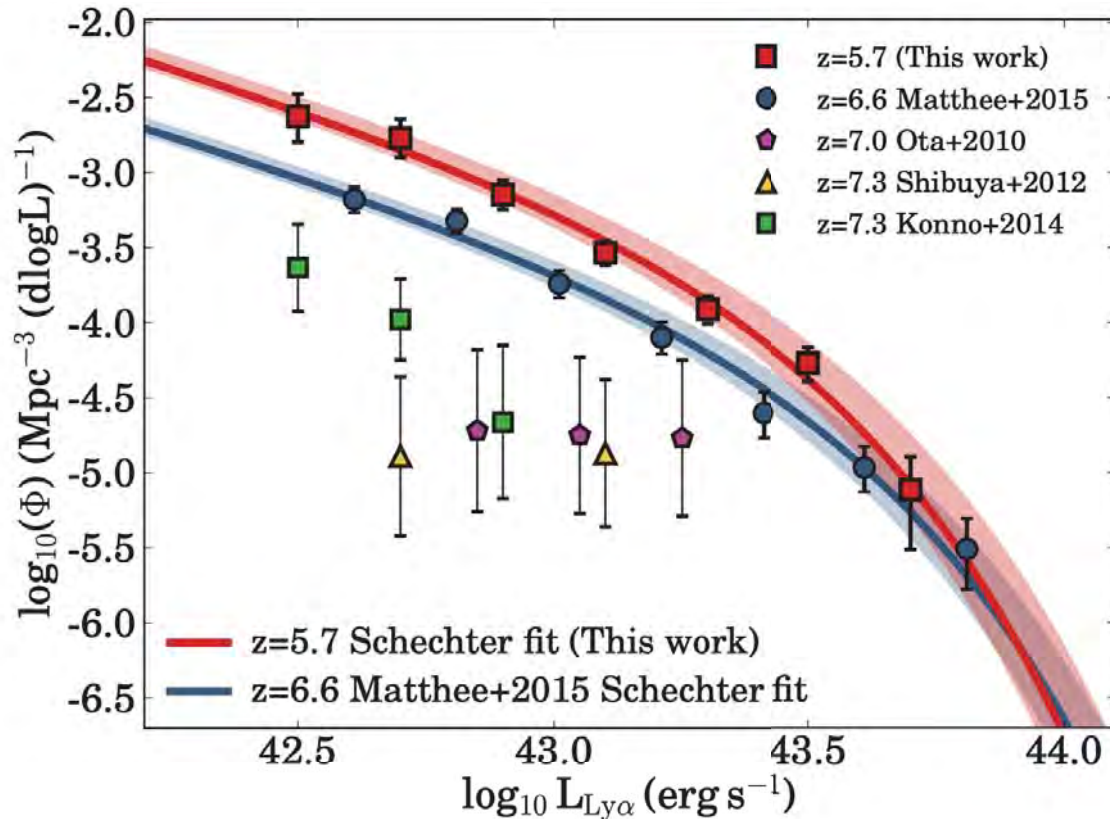
- Mesure de la largeur équivalente Lyman-alpha (test de réionisation)
- Autres raies nébulaires : mesure des propriétés physiques



# Fonction de luminosité Lyman-alpha en champ vide

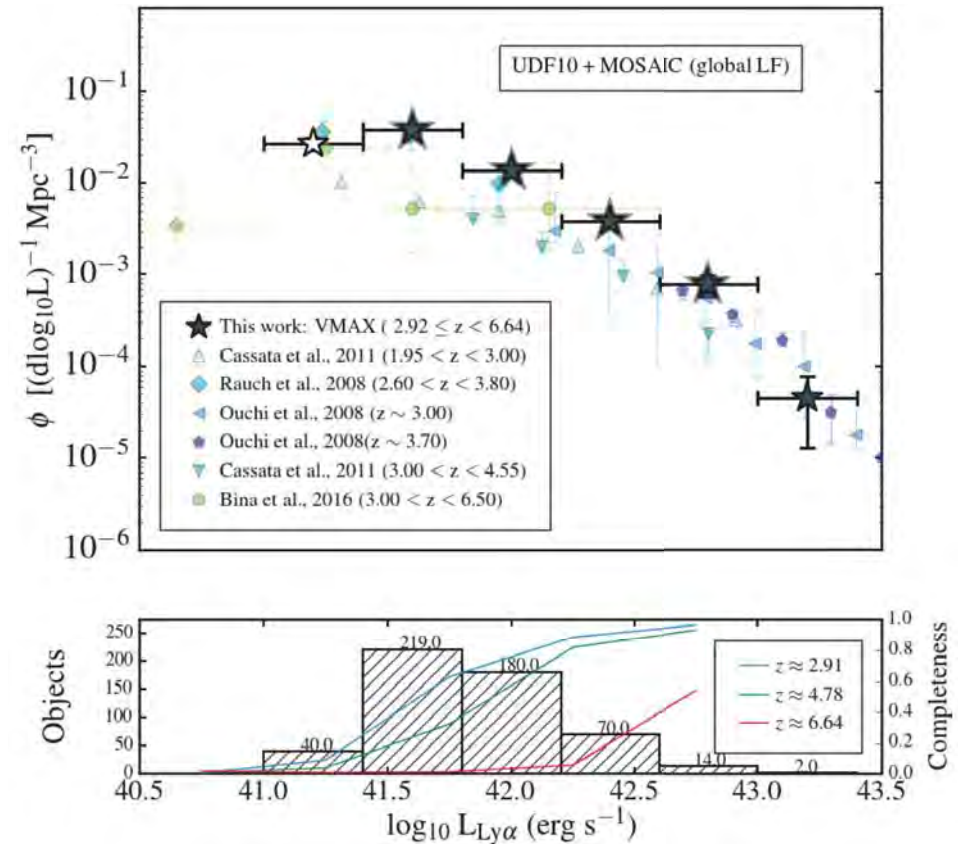
Grands relevés en bande étroite

Santos et al. 2017



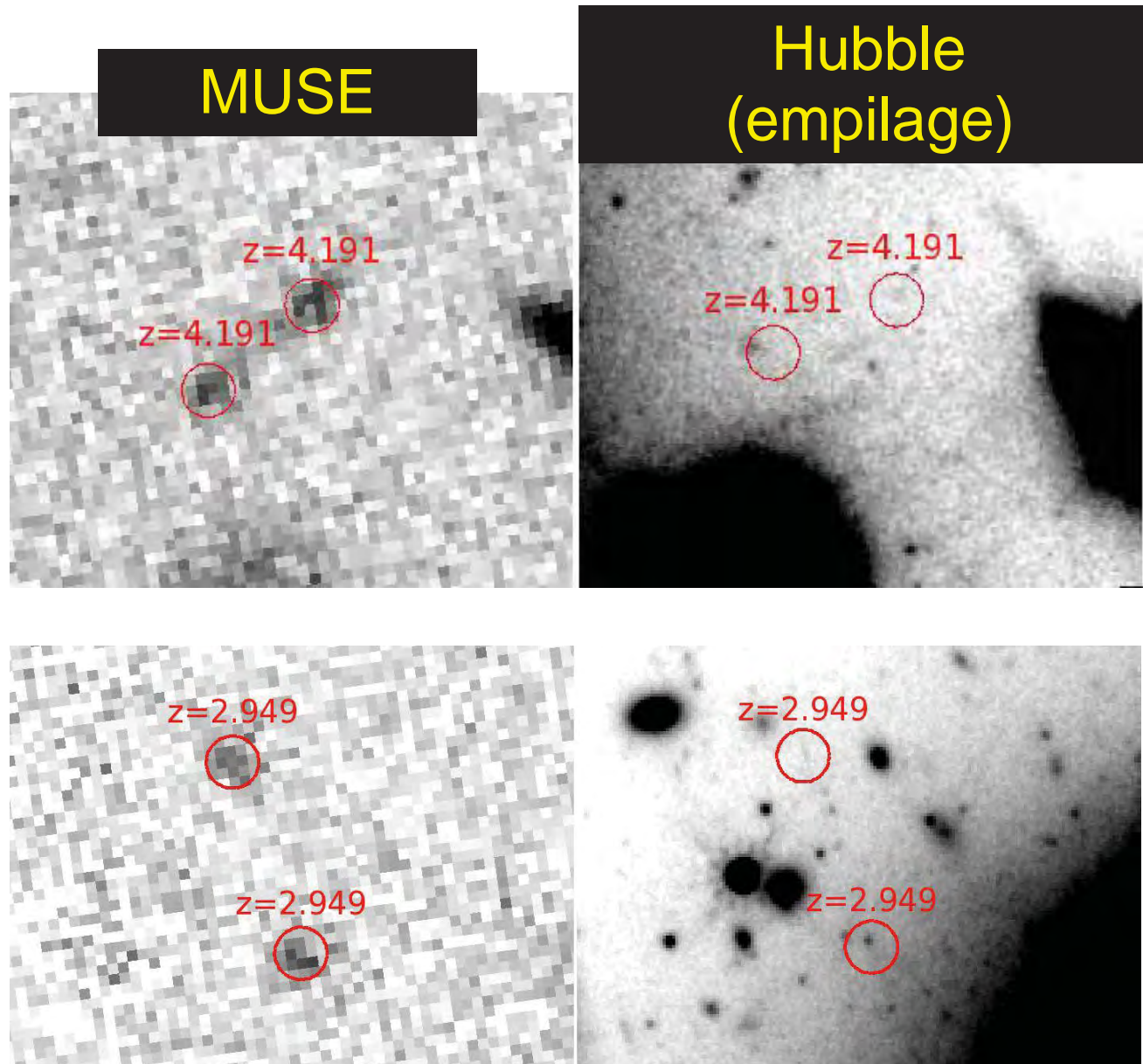
Champs profonds MUSE  
(10 - 30 heures)

Drake et al. 2017,2018



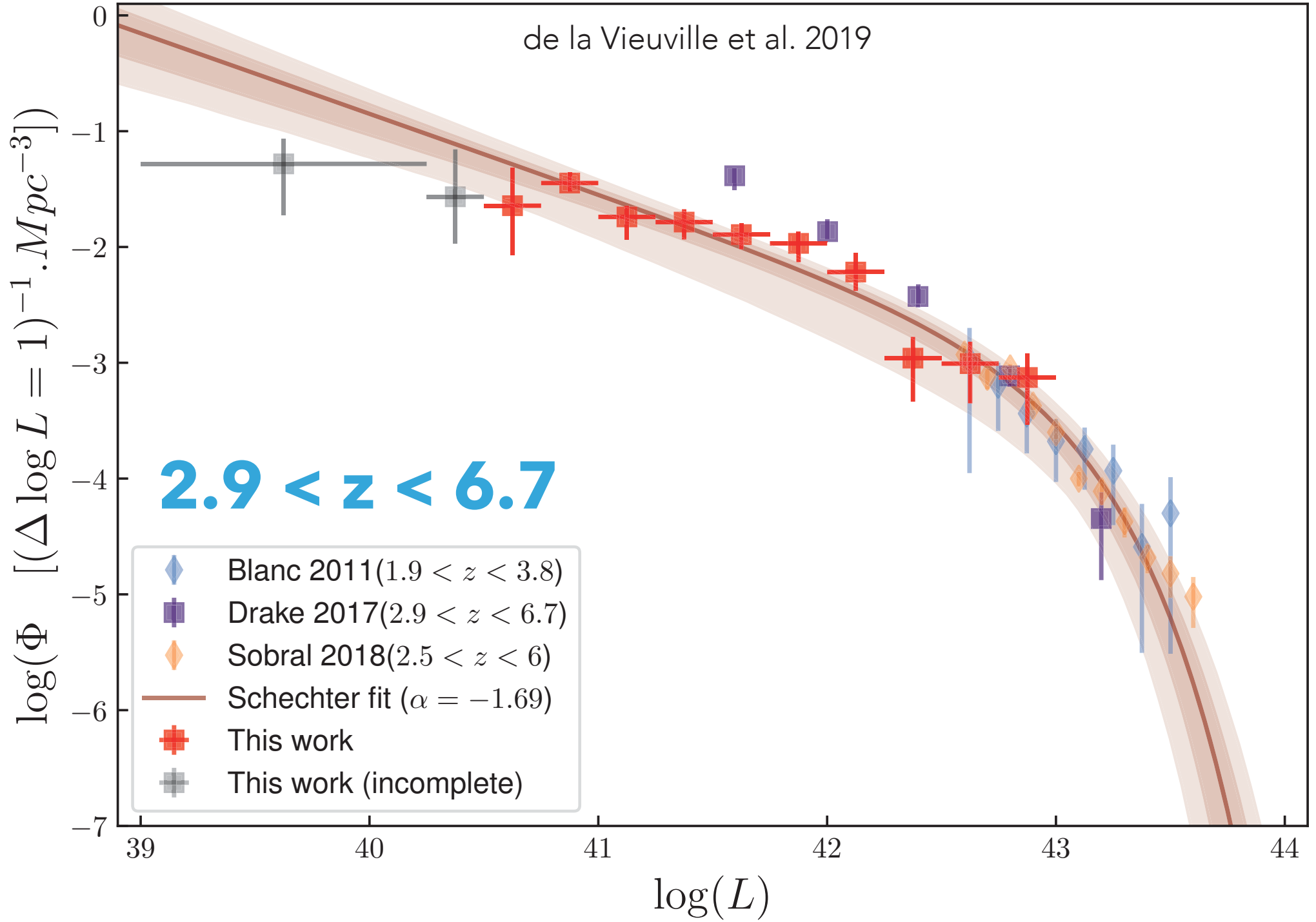


# Rien n'échappe à MUSE .... en Lyman-alpha



# Fonction de luminosité Lyman-alpha

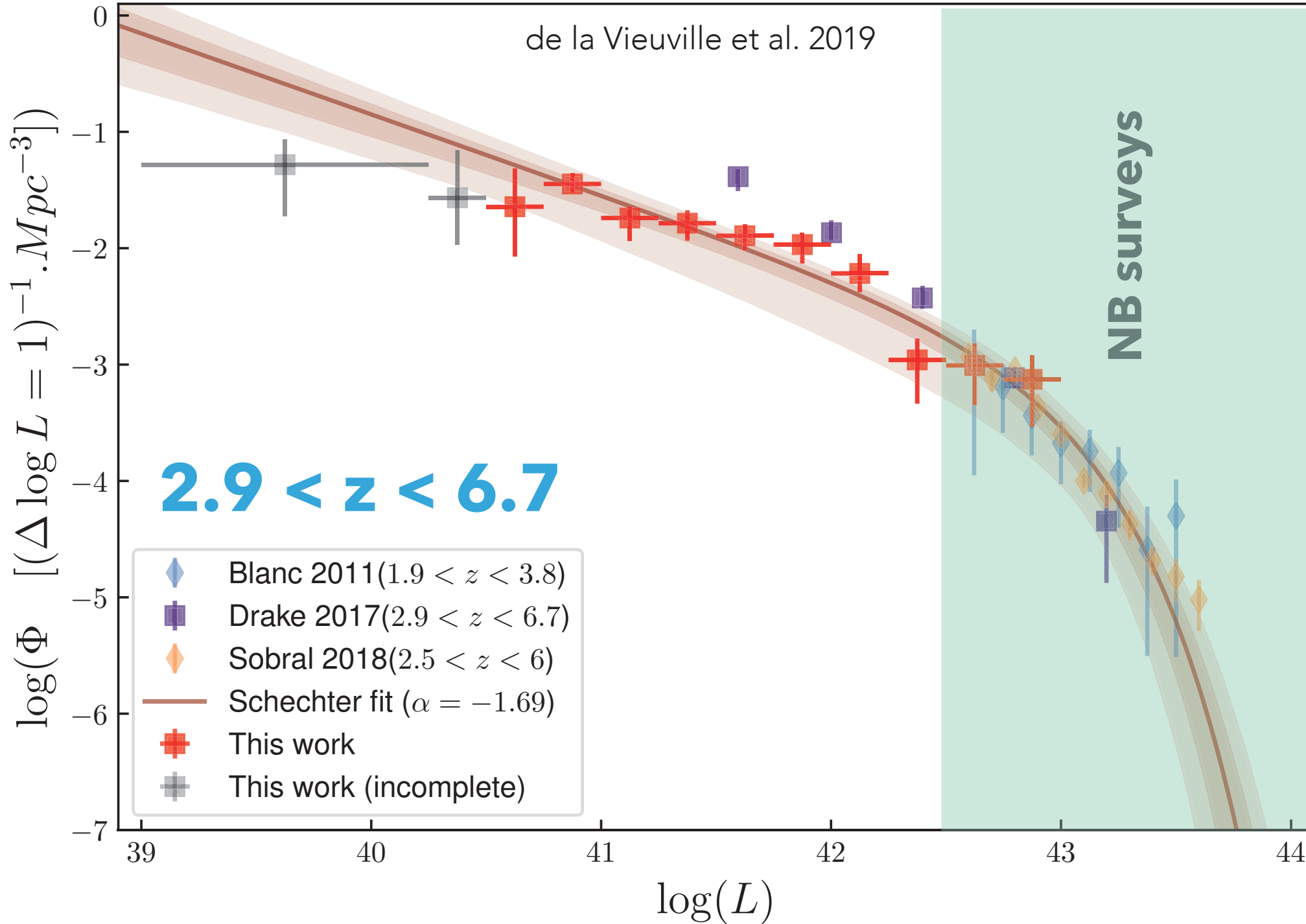
de la Vieuville et al. 2019



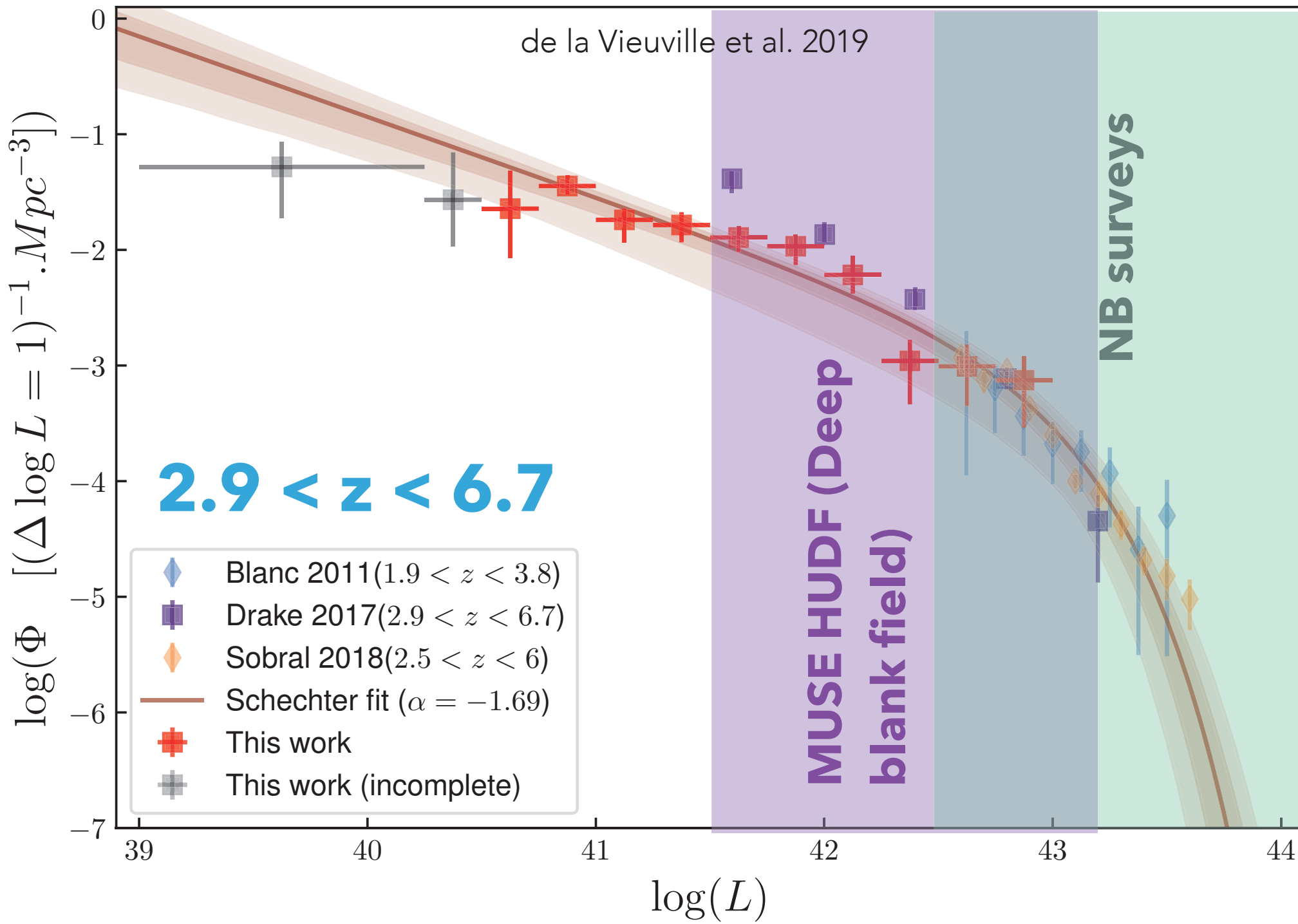


# Fonction de luminosité Lyman-alpha

de la Vieuville et al. 2019

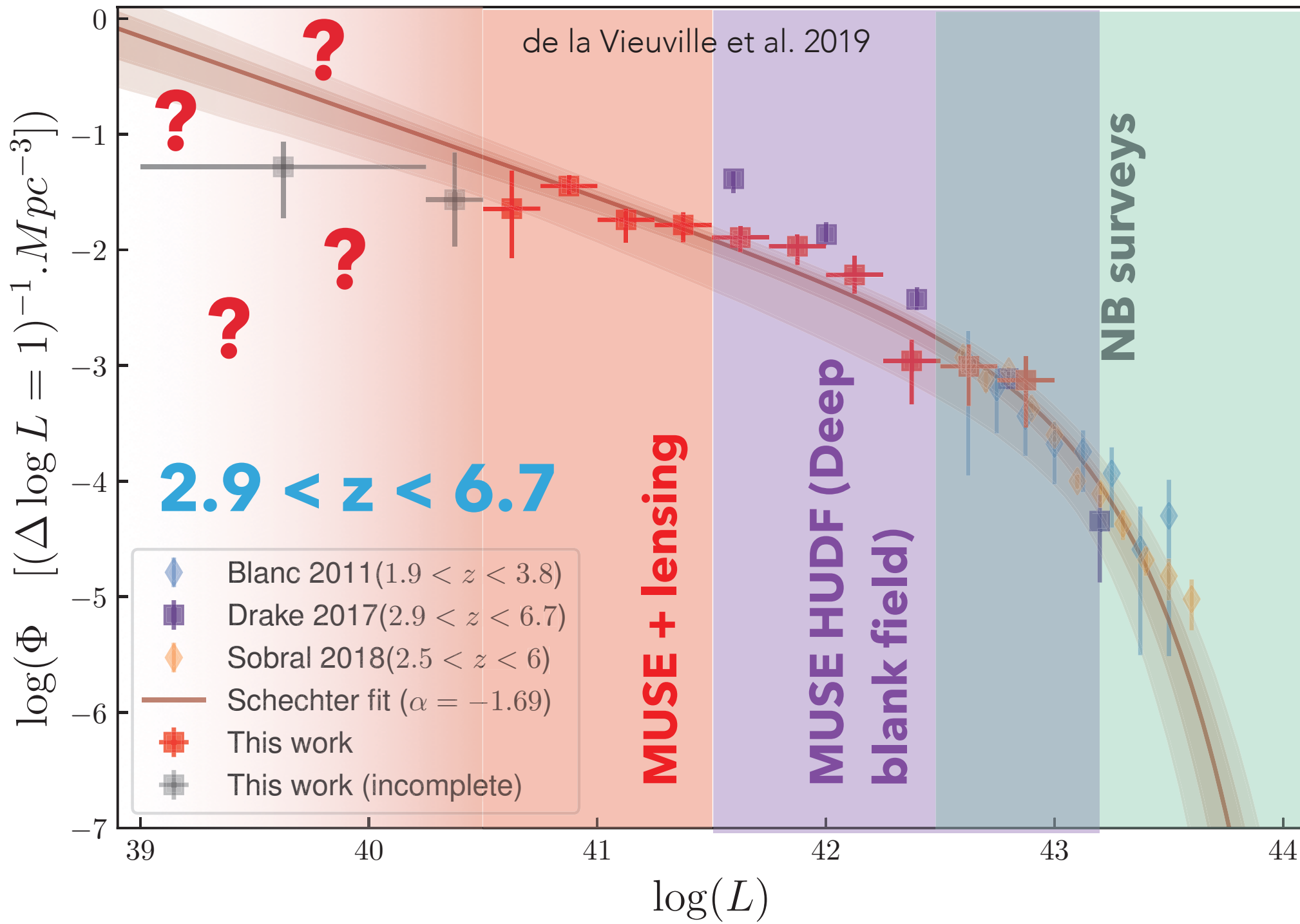


# Fonction de luminosité Lyman-alpha



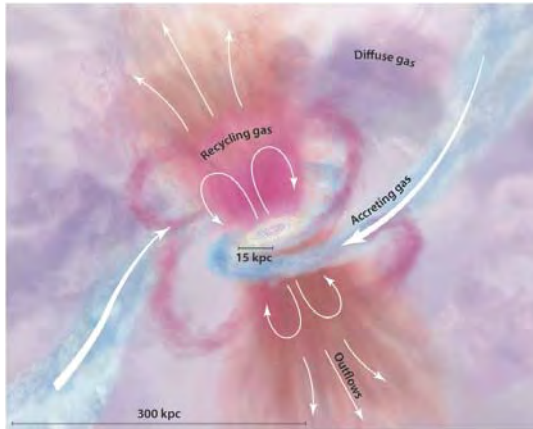


# Fonction de luminosité Lyman-alpha



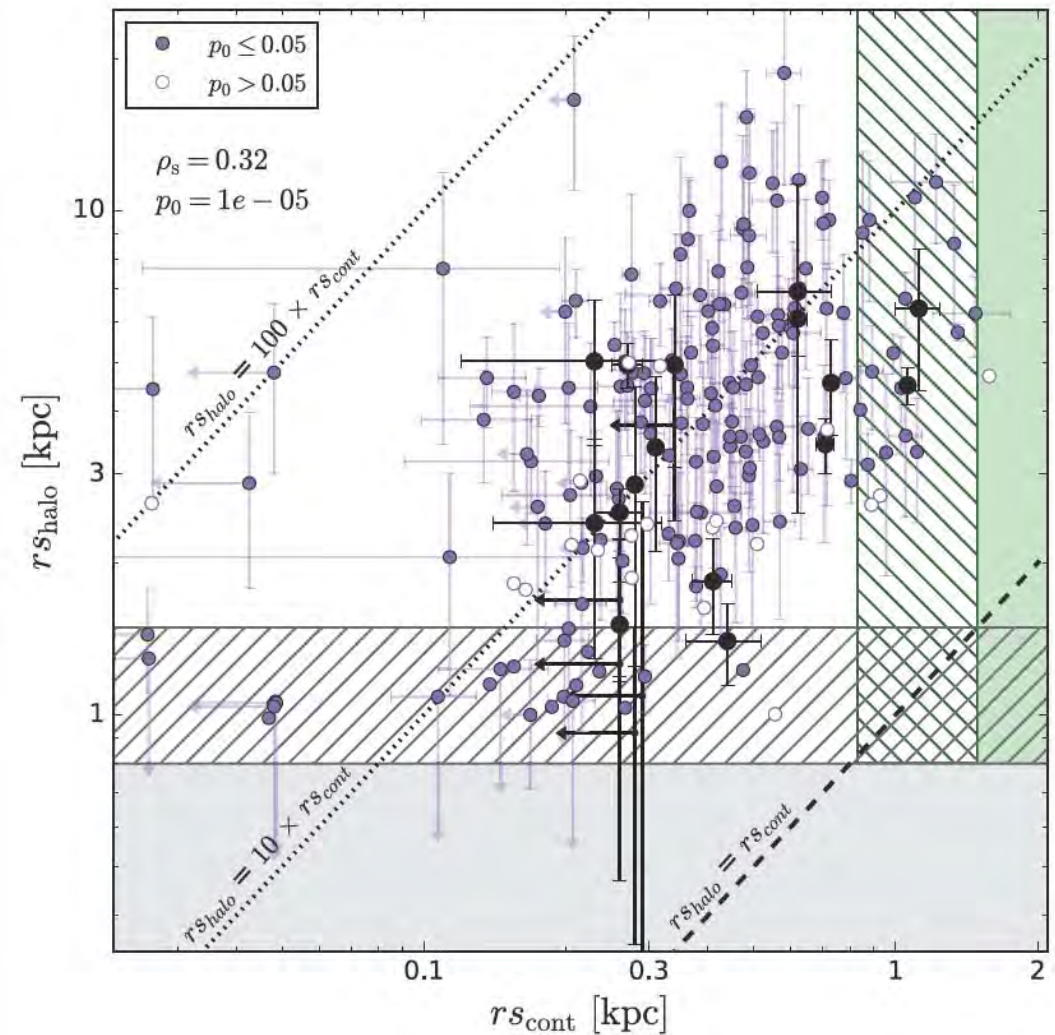
# "Halos de gaz" vus en Lyman-alpha

Le milieu circum-galactique, lieu des échanges de gaz autour des galaxies, s'illumine



Wisotzki et al. 2018

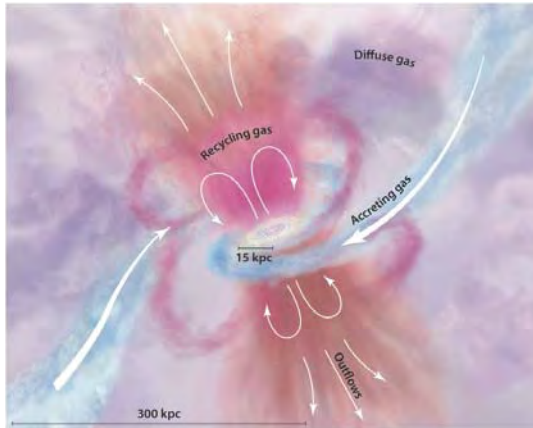
Leclercq et al. 2017





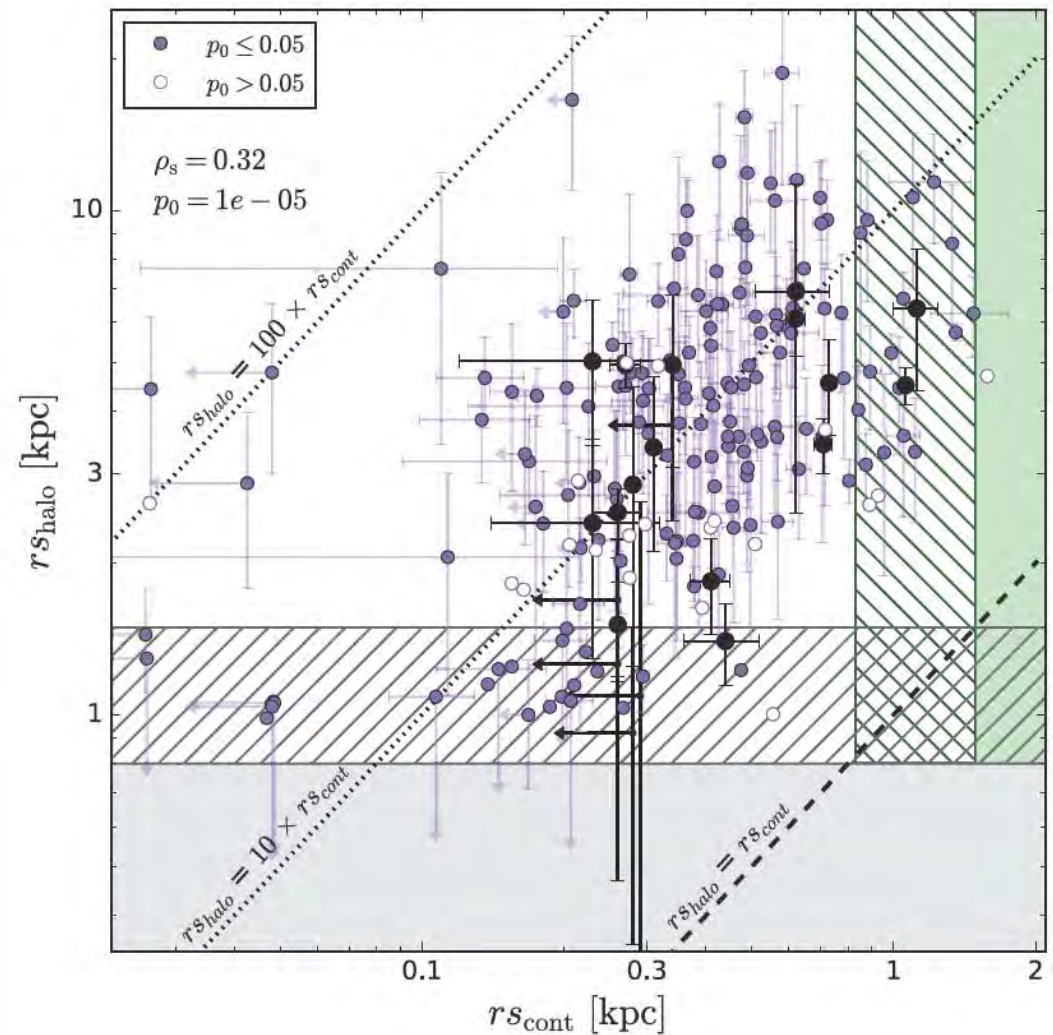
# "Halos de gaz" vus en Lyman-alpha

Le milieu circum-galactique, lieu des échanges de gaz autour des galaxies, s'illumine



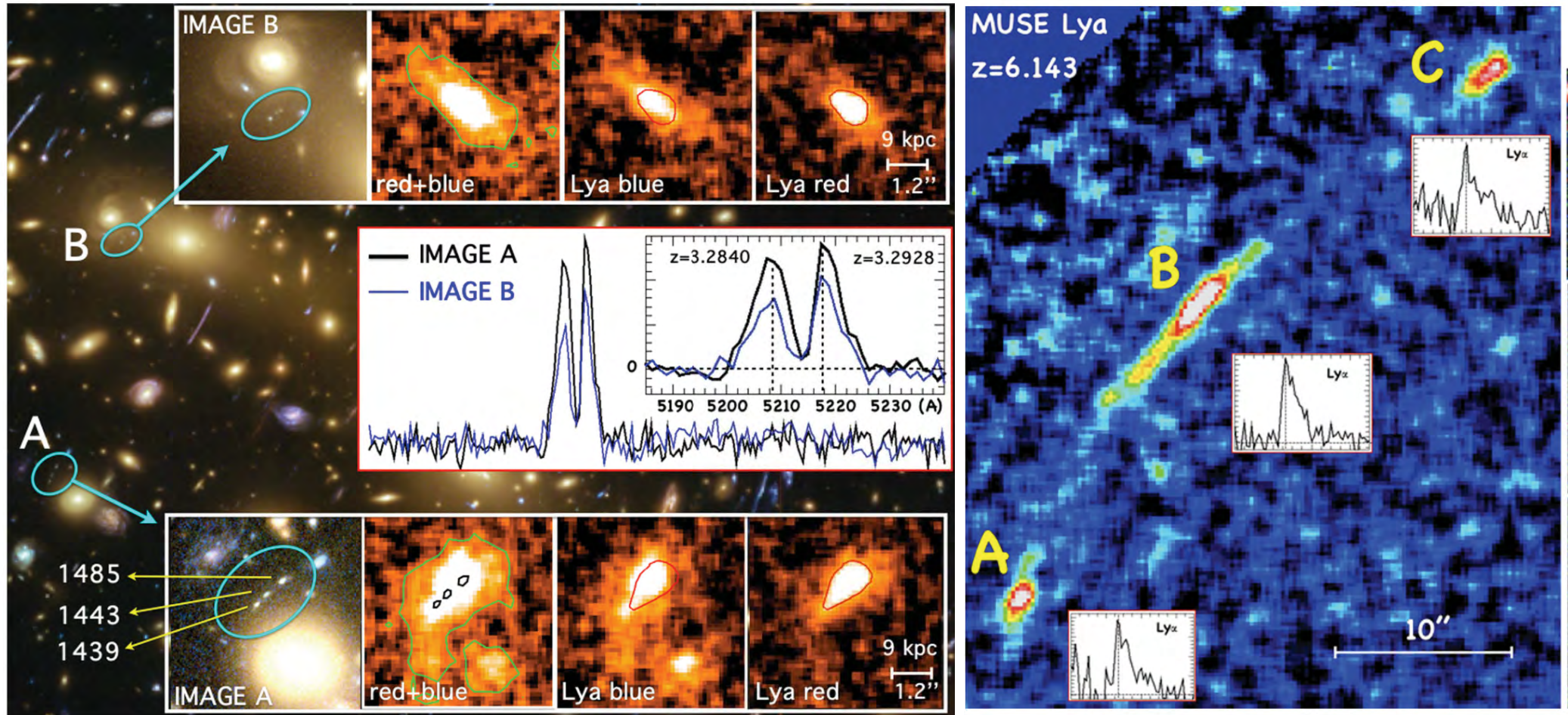
Wisotzki et al. 2018

Leclercq et al. 2017





# Halos Lyman- $\alpha$ amplifiés



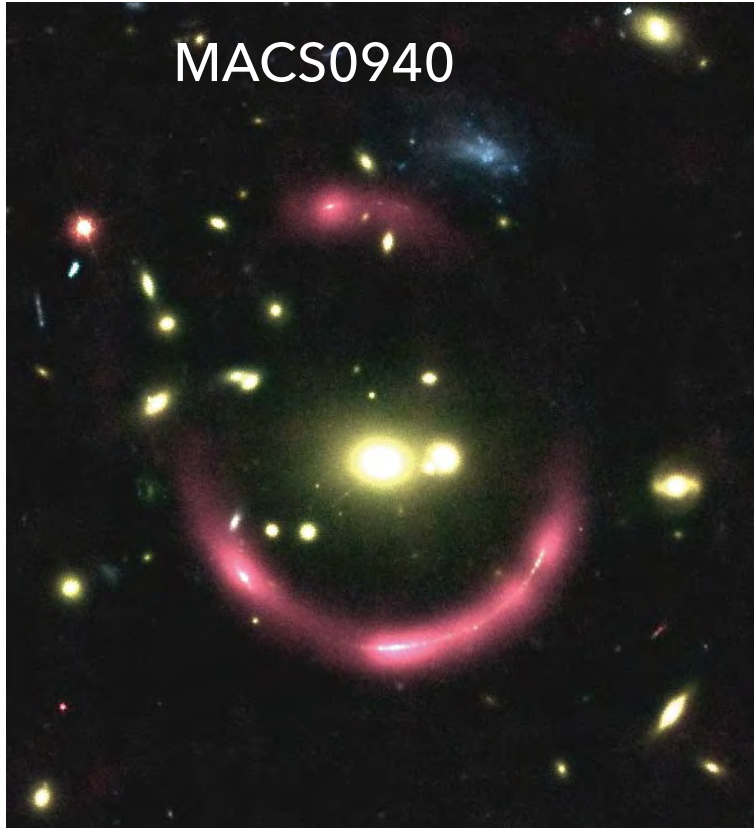
Vanzella et al. 2017, 2019

MUSE dans les champs frontières identifie ces halos de gaz lentillés et révèle des variations spectrales

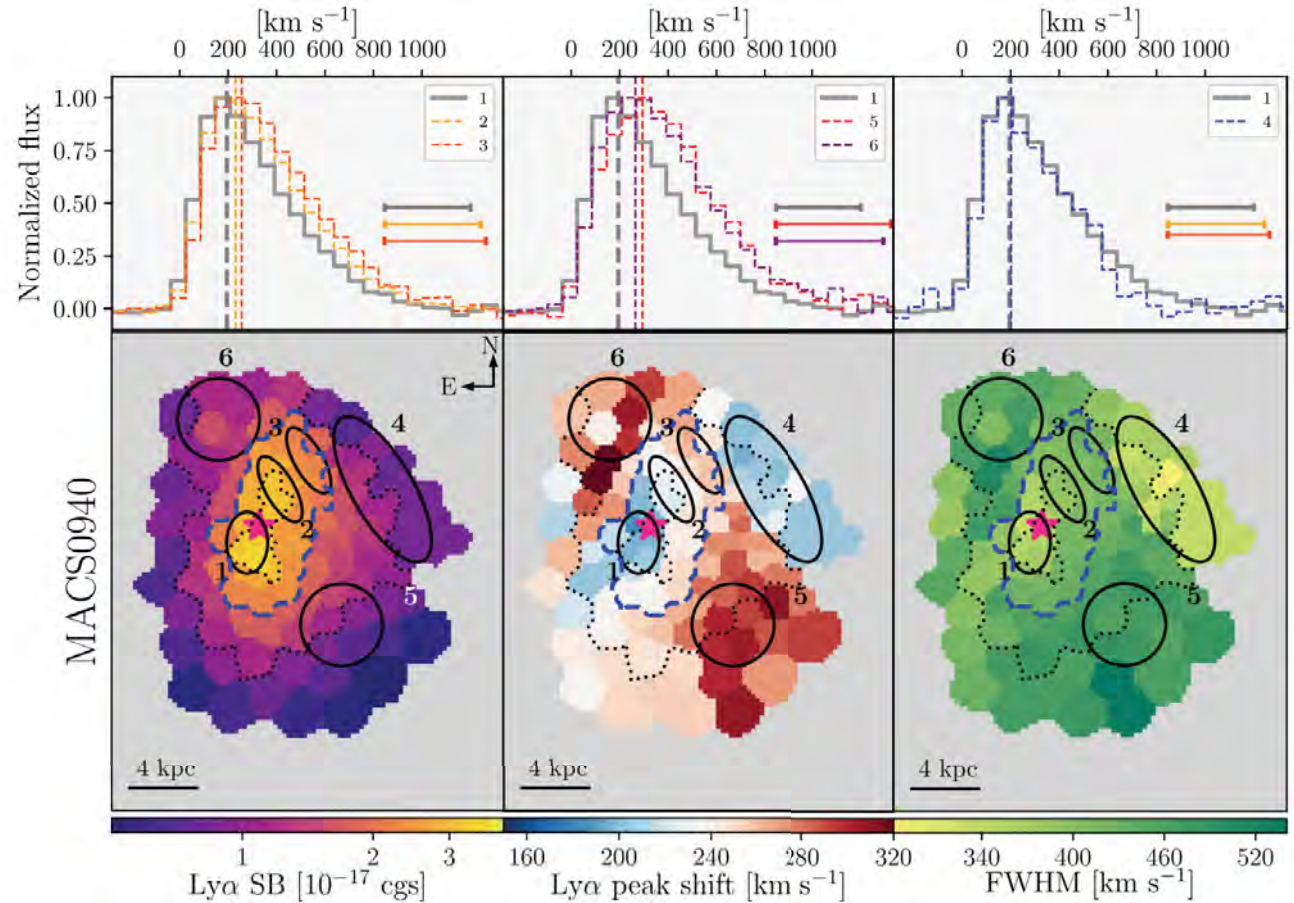
$\xi_{ion}$   
 $f_{esc}$



# Halos Lyman- $\alpha$ très amplifiés



Claeysens et al. 2019

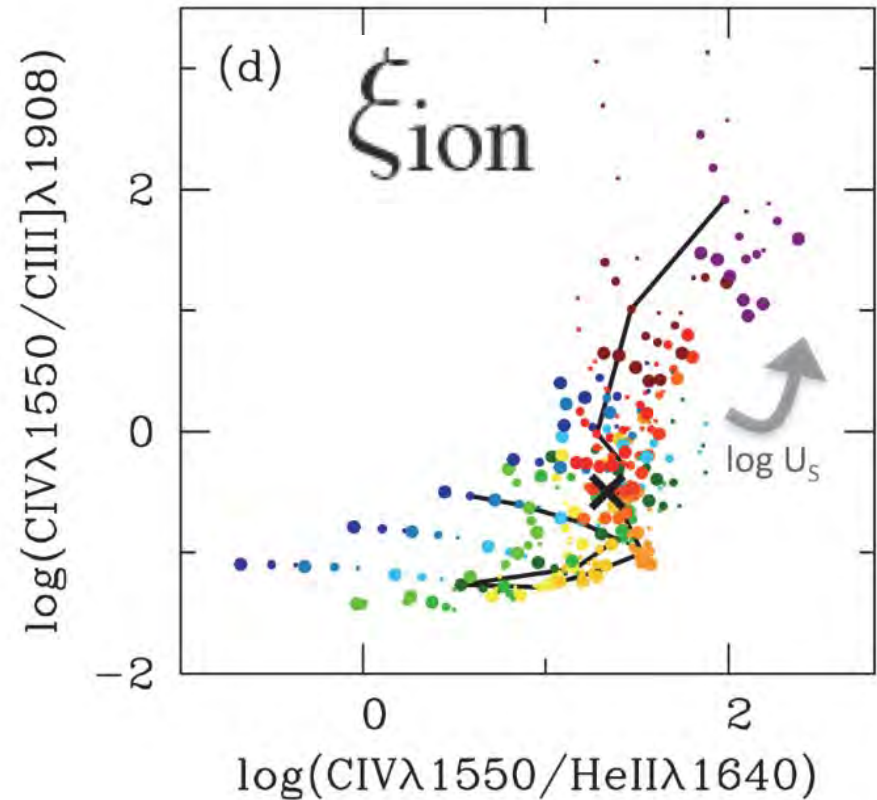
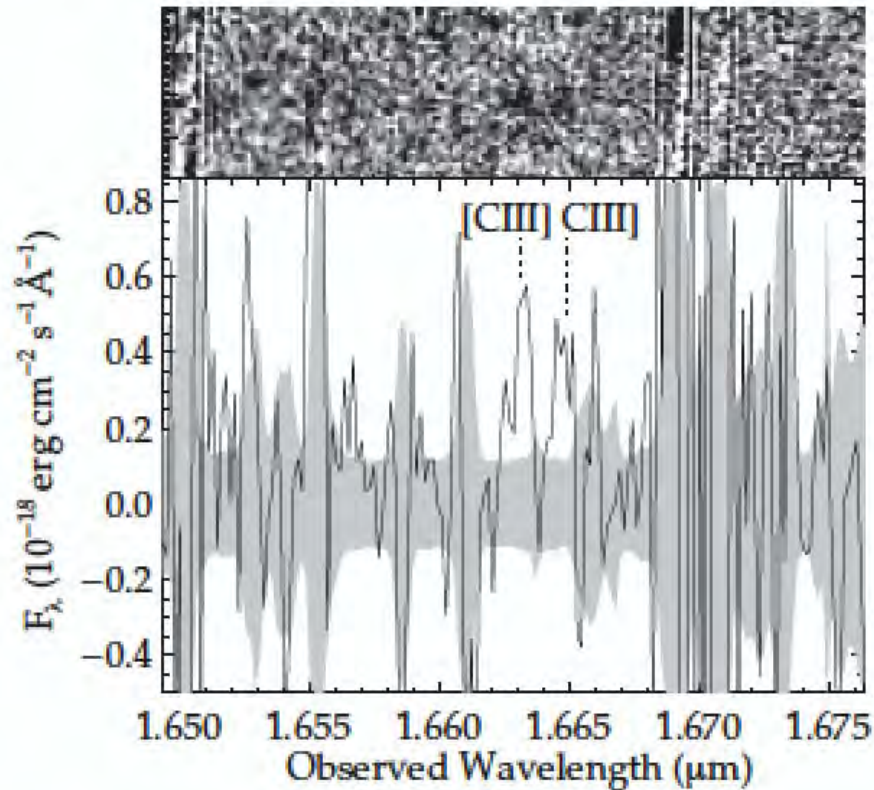


Pour les halos les plus amplifiés (rares) à  $z > 4$ , possibilité de résoudre et comparer les profils Lyman-alpha.  
Tests des processus physiques sous-jacents !

$\xi_{ion}$   
 $f_{esc}$

# Raies nébulaires dans l'UV

Stark et al. 2017



Il y a un intérêt accru pour l'observations d'autres raies que Lyman- $\alpha$ : CIII], CIV, ...

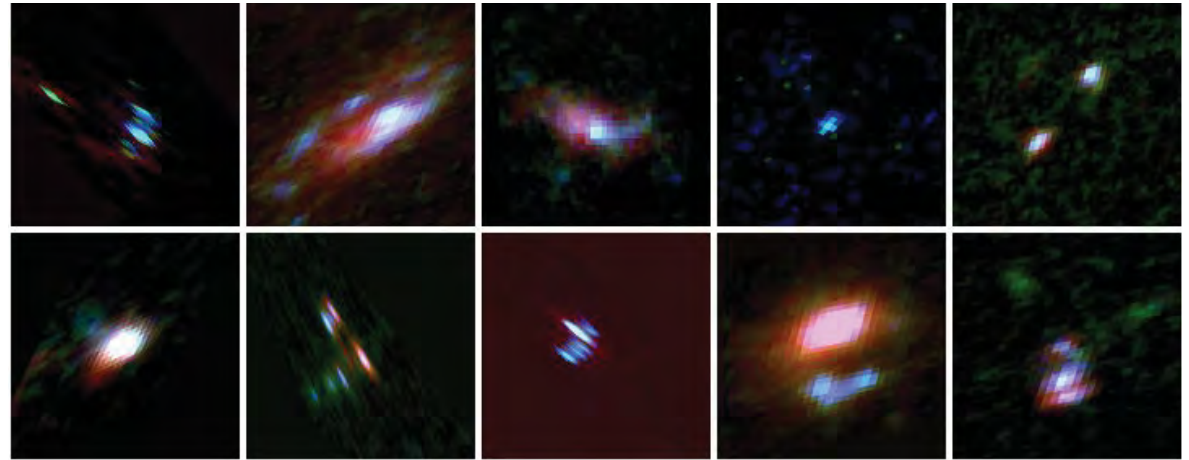
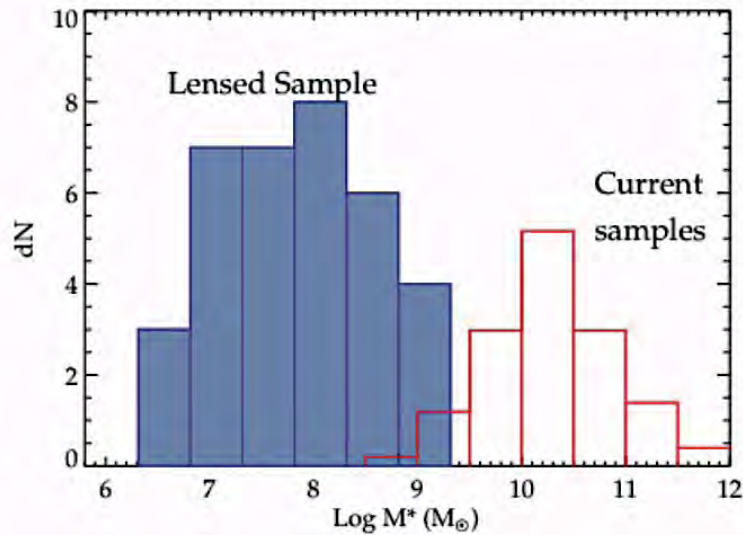
A  $z > 6$  CIII] pourrait être la raie la plus observable lorsque Lyman- $\alpha$  est supprimé pendant l'époque de réionisation. Mais faible largeur équivalente ! ( $\sim 12$  Angstr.)

Indicateurs de spectres 'durs' ionisants: CIV (48 eV), OIII] (35 eV), CIII] (24 eV), HeII (25 eV)

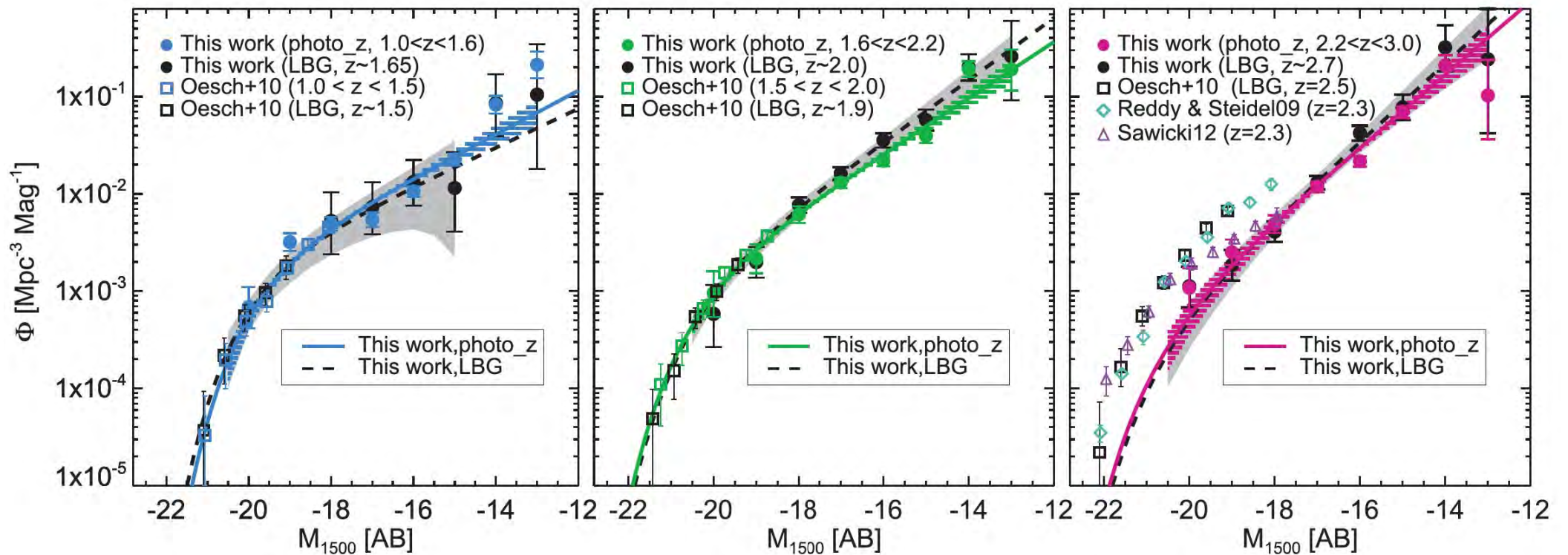


# Galaxies 'analogues' à $z=2$

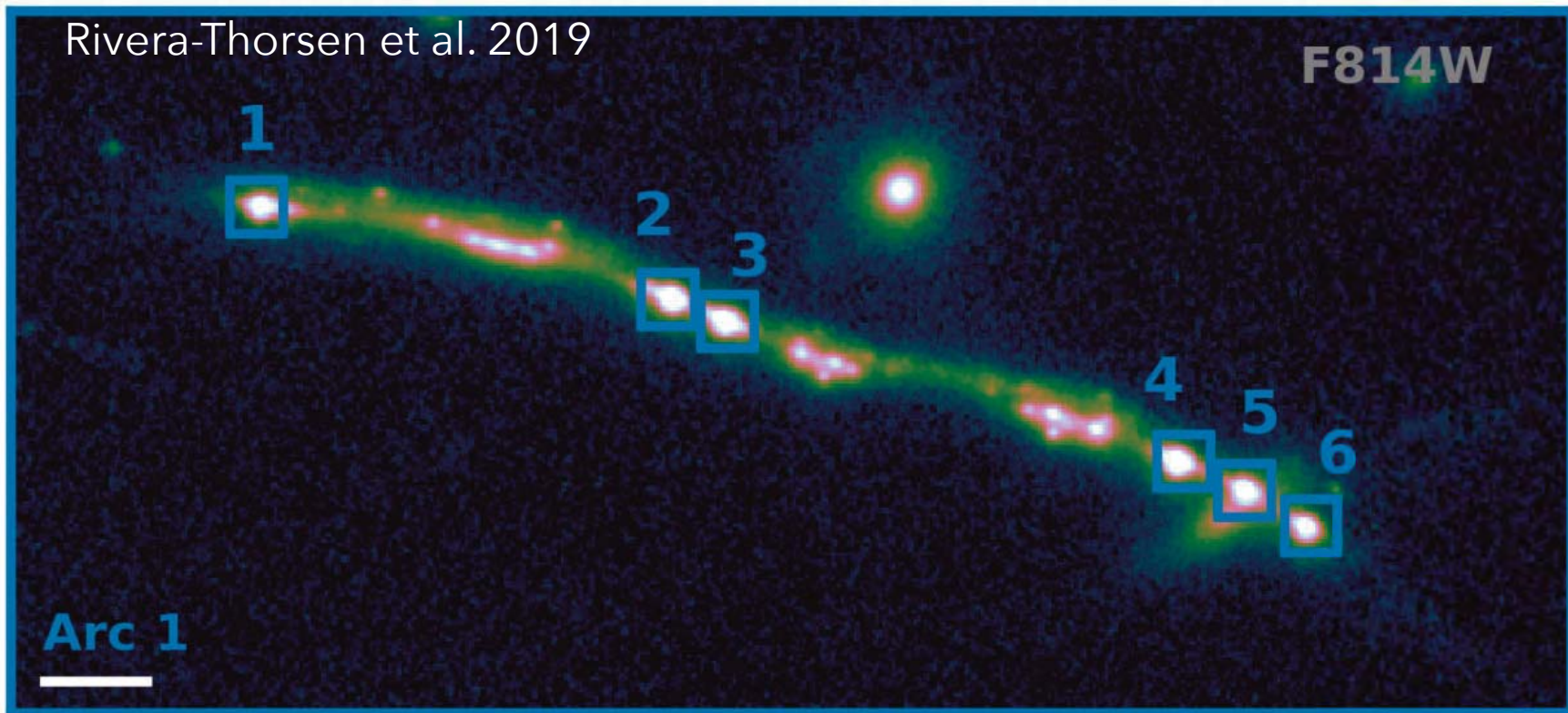
Richard et al. 2011



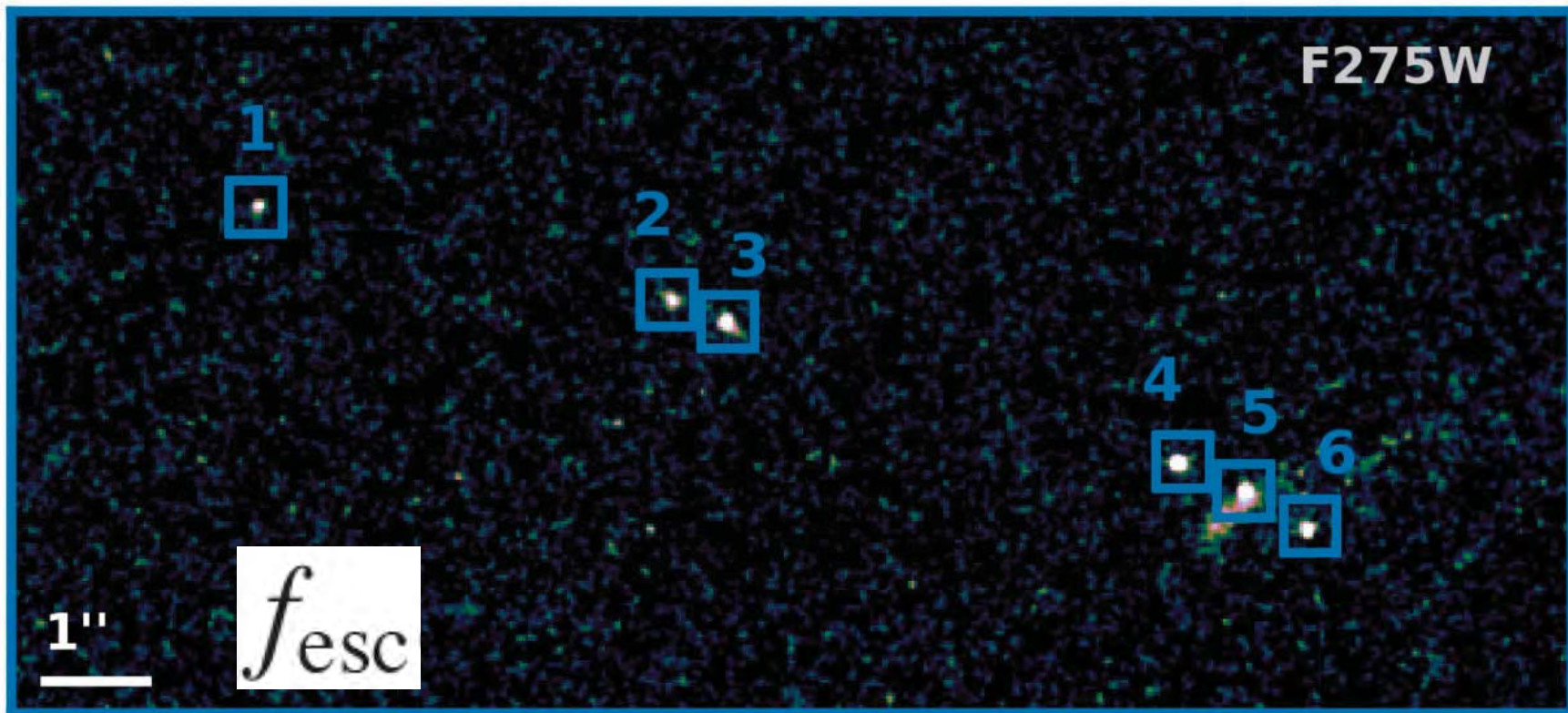
Alavi et al. 2018







Arc 1



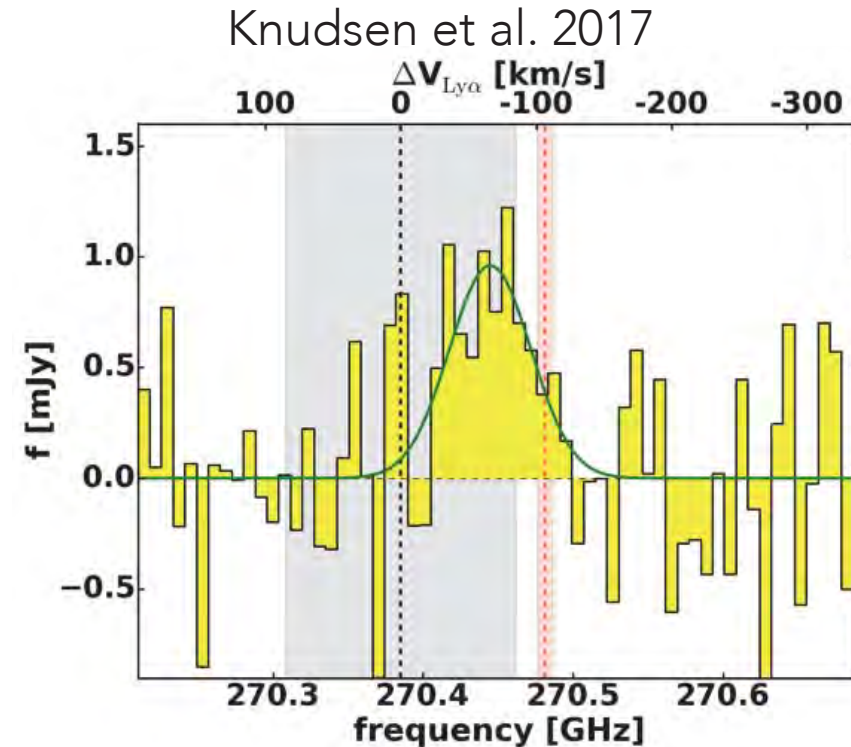
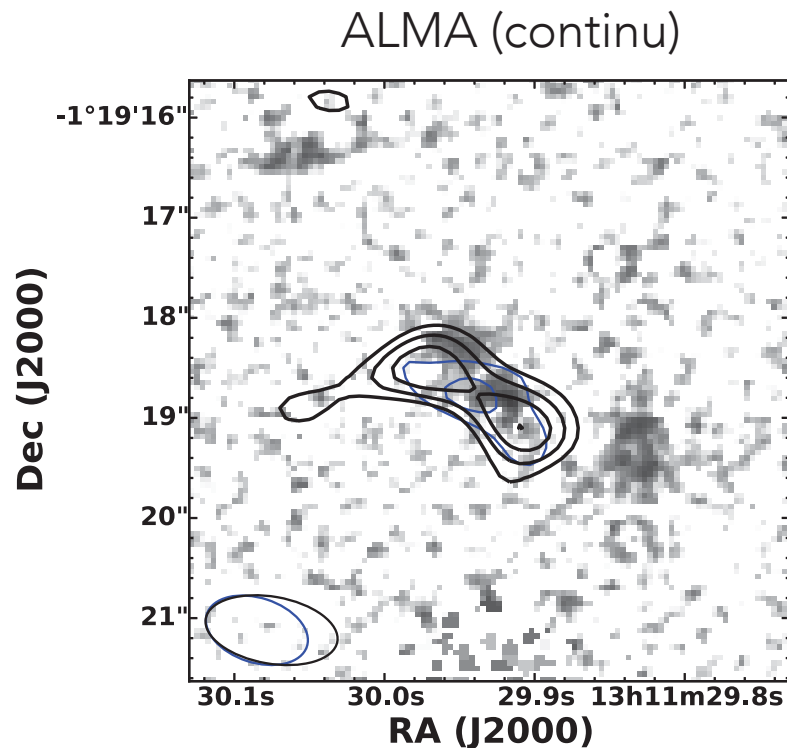
1''

fesc



# Détection par la poussière ou [CII]

- Pour un recensement complet des sources de la réionisation, inconnue sur la quantité d'extinction et la présence de sources extrêmement poussiéreuses
- On peut observer la poussière et le gaz froid dans les domaines sub-millimétriques et millimétriques : les télescopes gravitationnels sont achromatiques !
- Détections récentes de l'émission des poussières, du gaz moléculaire et de la raie [CII] à  $z > 6$



HST/WFC3

ALMA

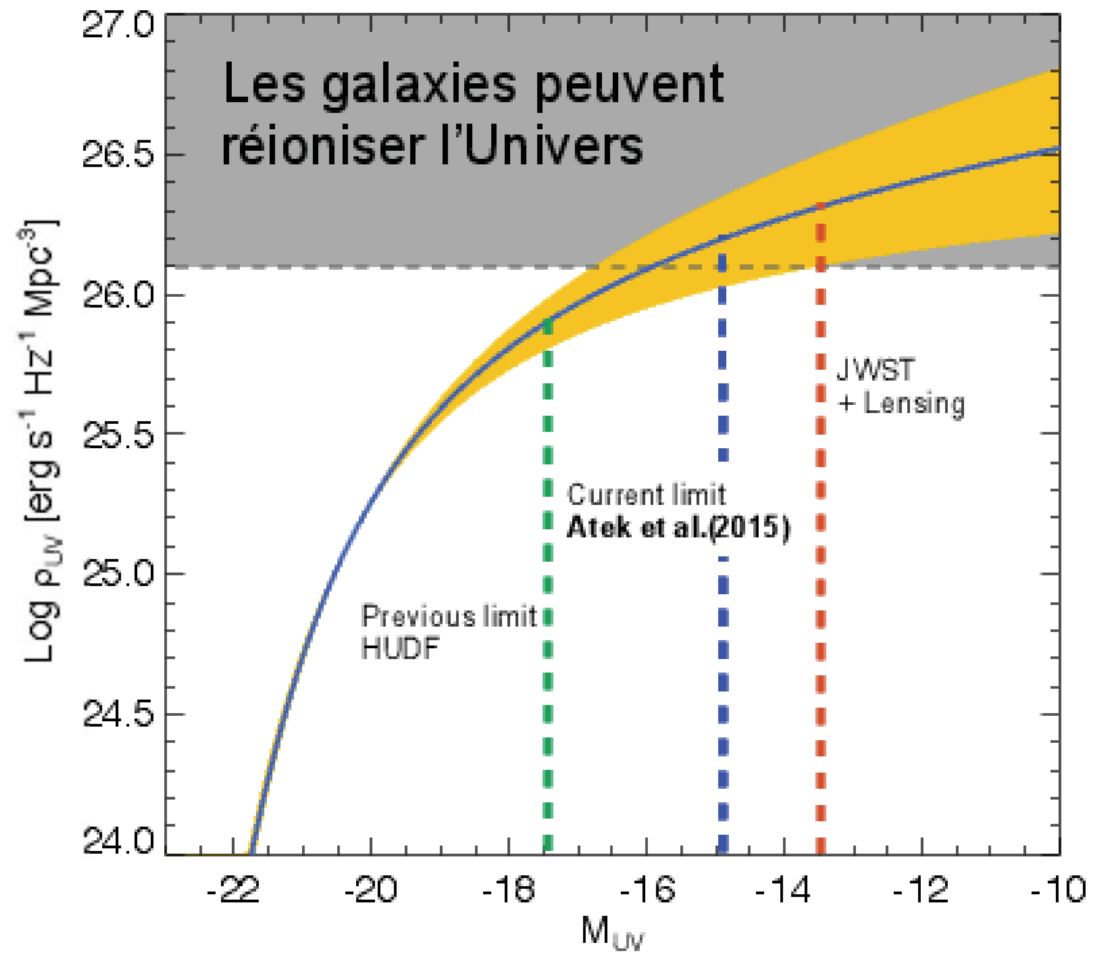
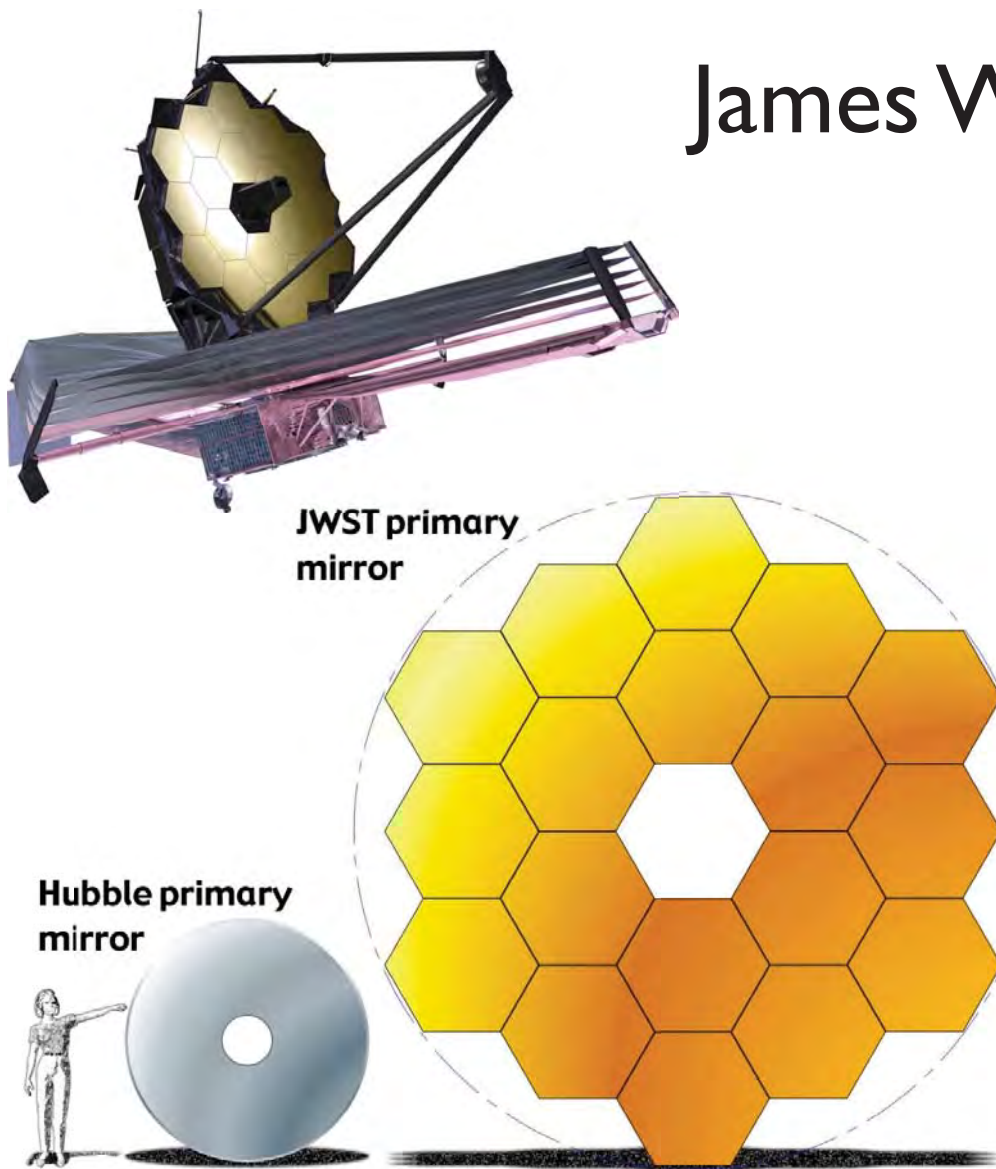
A1689 zD1,  $z=7.5$

Watson et al. 2015



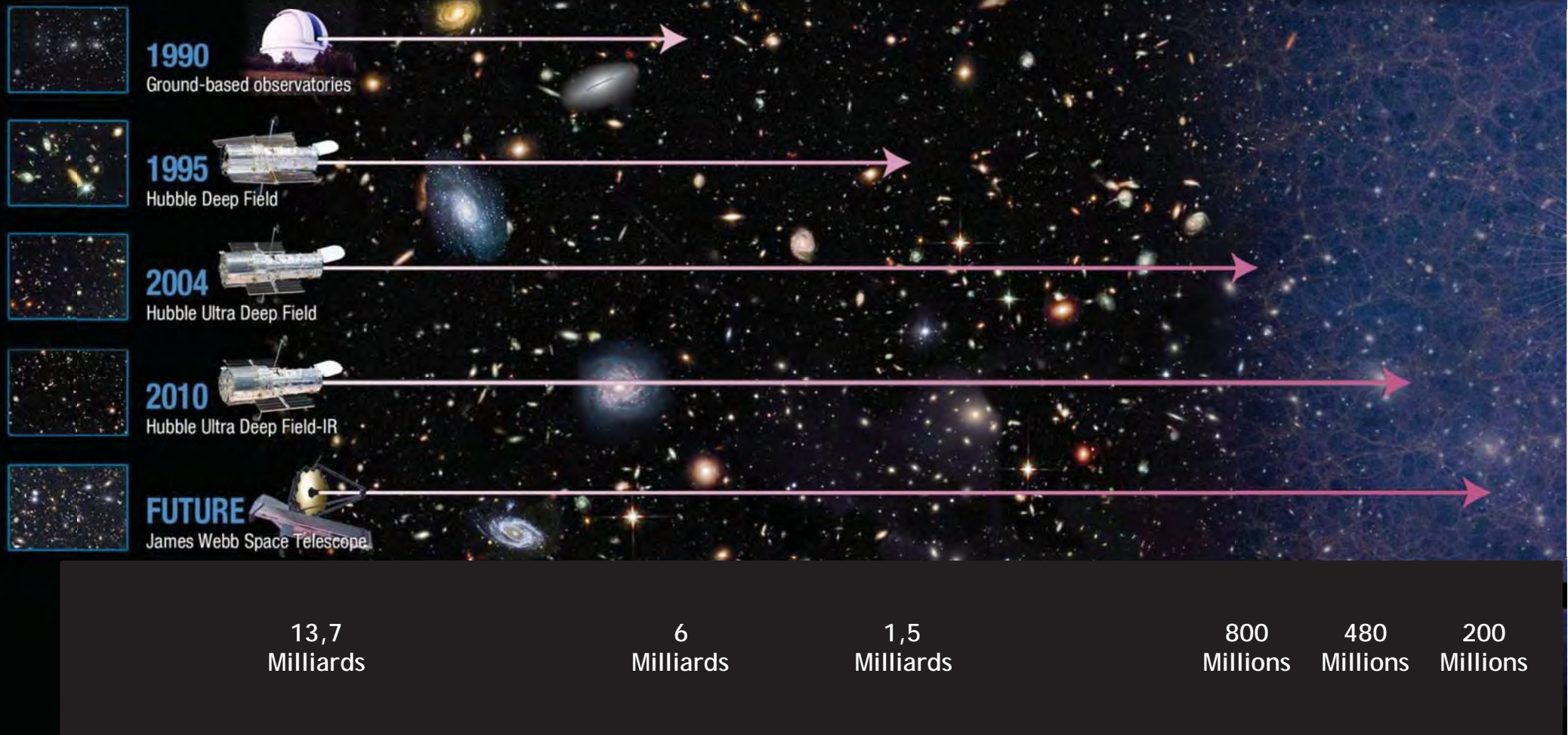


# James Webb Space Telescope



- Early Release Science (dès 2021) : observation de plusieurs Champs Frontières !
- Confirmation spectroscopique et raies nébulaires jusqu'à  $z=10$

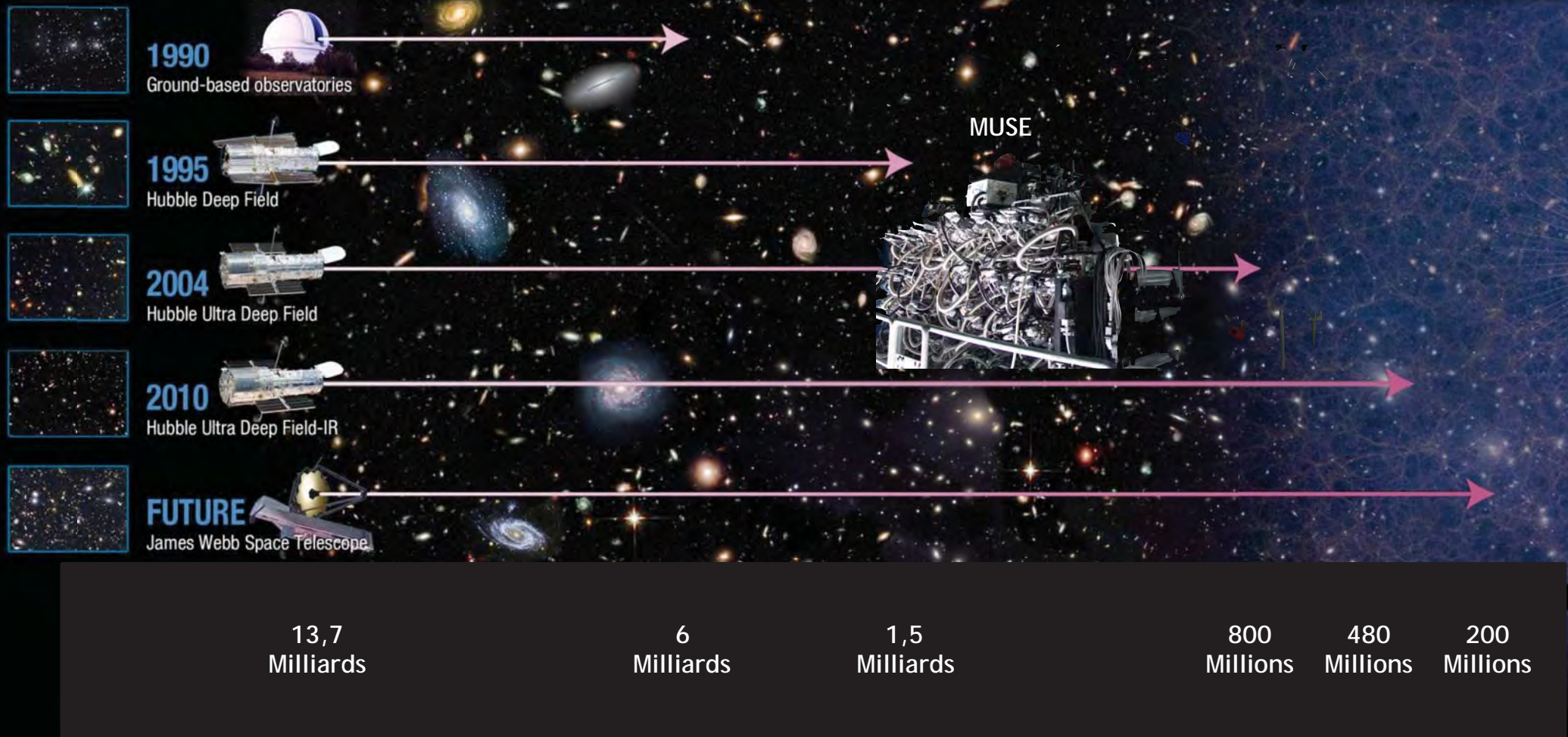
# Bilan



et toujours en appui : le télescope gravitationnel !

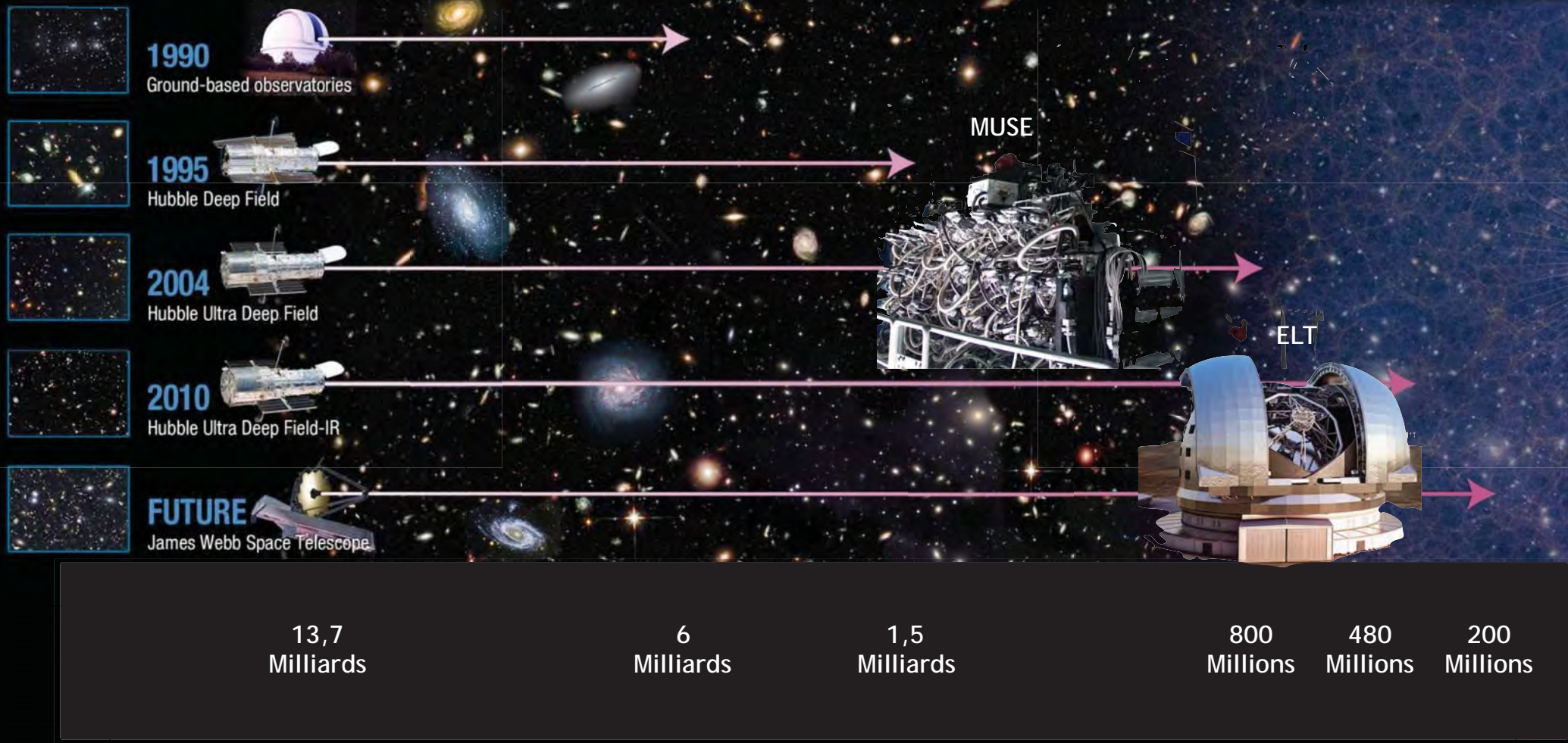


# Bilan



et toujours en appui : le télescope gravitationnel !

# Bilan



et toujours en appui : le télescope gravitationnel !