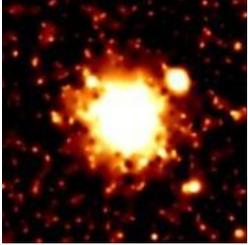


**Exploration, par simulation,  
des observations de grands champs  
d'amas de galaxies Sunyaev-Zel'dovich  
- Intérêt en cosmologie -**

**Jean-Baptiste Juin**  
Dapnia/SPP

**Sous la direction de U. Goerlach et D. Yvon**



## I Contexte physique

**Cosmologie et amas de galaxies**

**Observations grand-champ d'amas SZ**

Exemple Olimpo

## II Effets de sélection des sondages SZ

**Outils d'étude des effets de sélection**

Simulation du ciel observé

Détection des amas de galaxies SZ

**Modéliser les effets de sélection**

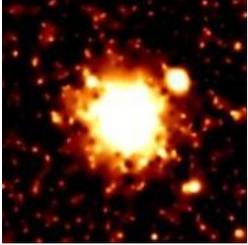
Complétude, photométrie, contamination

## III Contraintes et systématiques

**Prospective cosmologique**

de physique interne des amas

**Effets de sélection et systématiques**



Cosmologie

Formation de structure

Observations grand champ d'amas Sunyeav Zel'Dovich

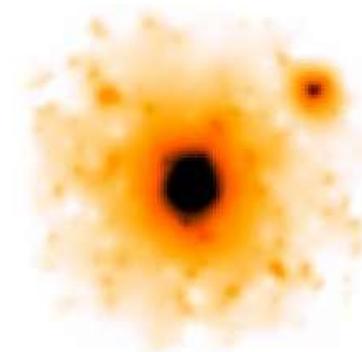
# Histoire thermique de l'univers

**Expansion**  
**Refroidissement**

Découplage  
 $T_{dec} \sim 3000 K$

Aujourd'hui  
 $2.725 K$

CMB



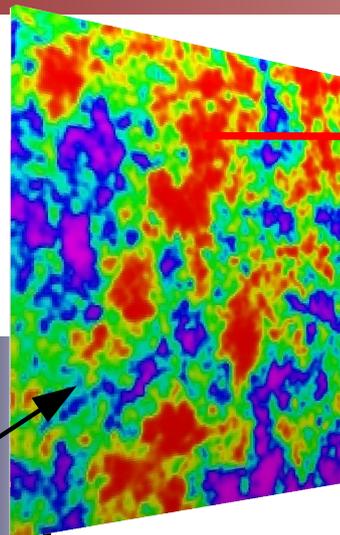
Amas de galaxies

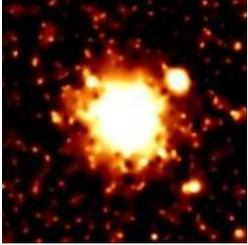
Grandes  
structures

Plasma

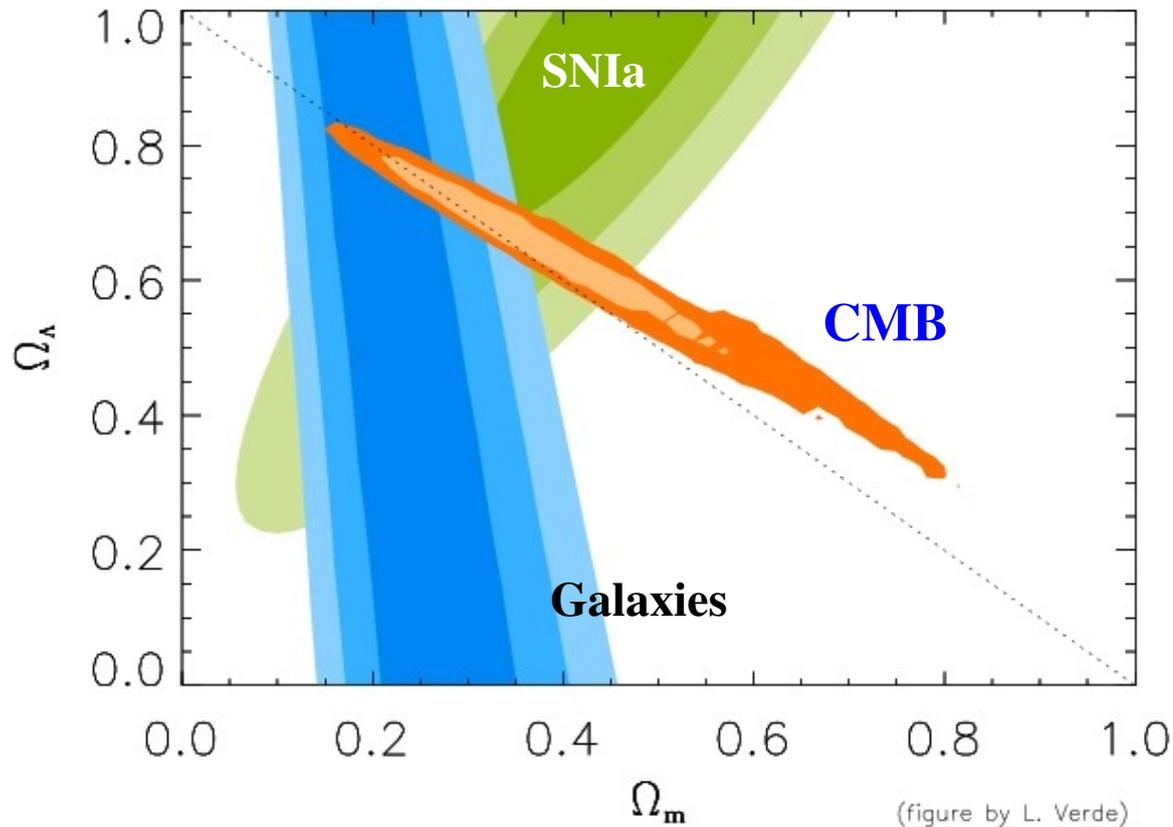
Energie  
Matière

?





## Modèle cosmologique de concordance



Energie noire **73%**

Matière noire **23%**

?

Matière Baryonique **4%**

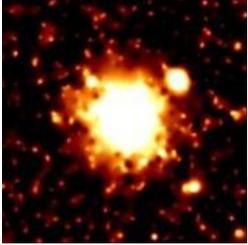
**CMB:** WMAP + ACBAR + CBI

**SNIa:** Riess et al. (2004)

**Structures:** 2dF

Autre information sur l'univers à grande échelle:

## Les amas de galaxies



## Evolution d'une sphère de matière après le découplage

Au découplage

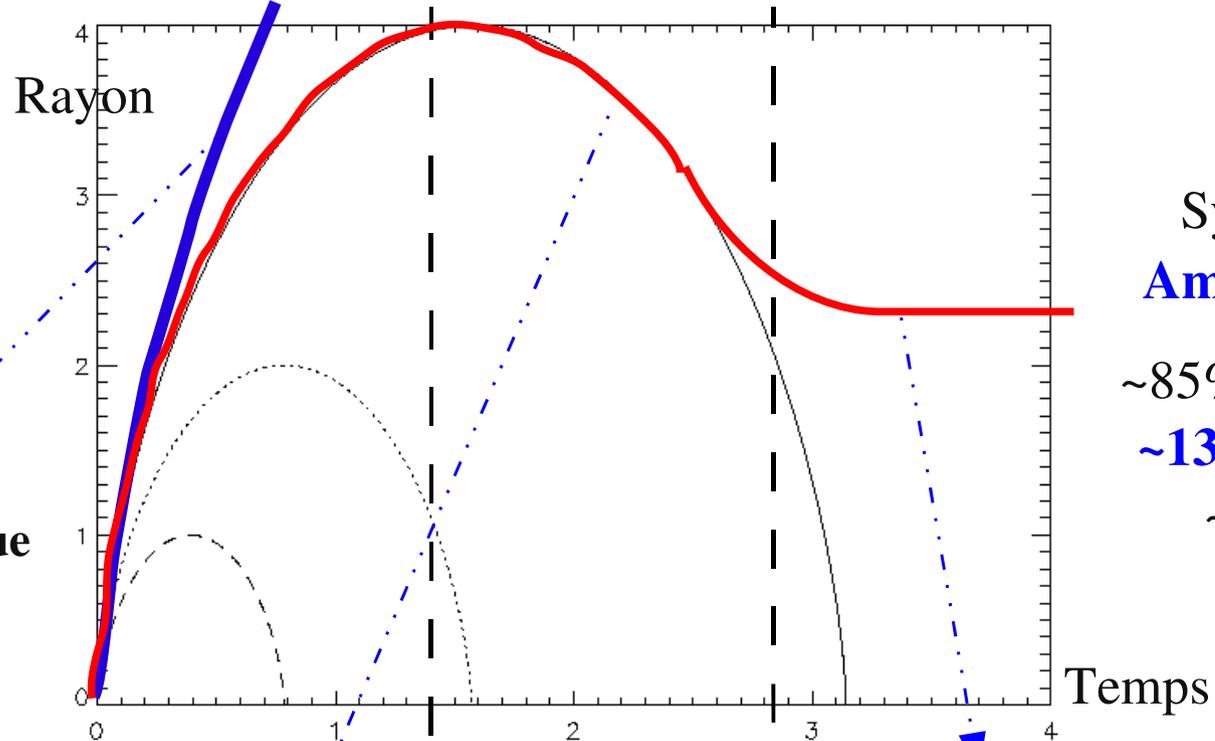
Fluctuations de densité

Effondrement des surdensités

Expansion cosmologique

$$\Omega_m = 0.3$$

$$\sigma_8 = 0.85$$



Systèmes liés:

**Amas de galaxies**

~85% Matière noire

~13% **Gaz chaud**

~2% Etoiles

Equilibre thermodynamique

Effondrement gravitationnel

**Fonction de masse**

Press&Schechter  
Sheth&Tormen  
Jenkins&al.

$$\frac{dN}{dz dM d\Omega}$$

**Mécanisme de chauffage du gaz**

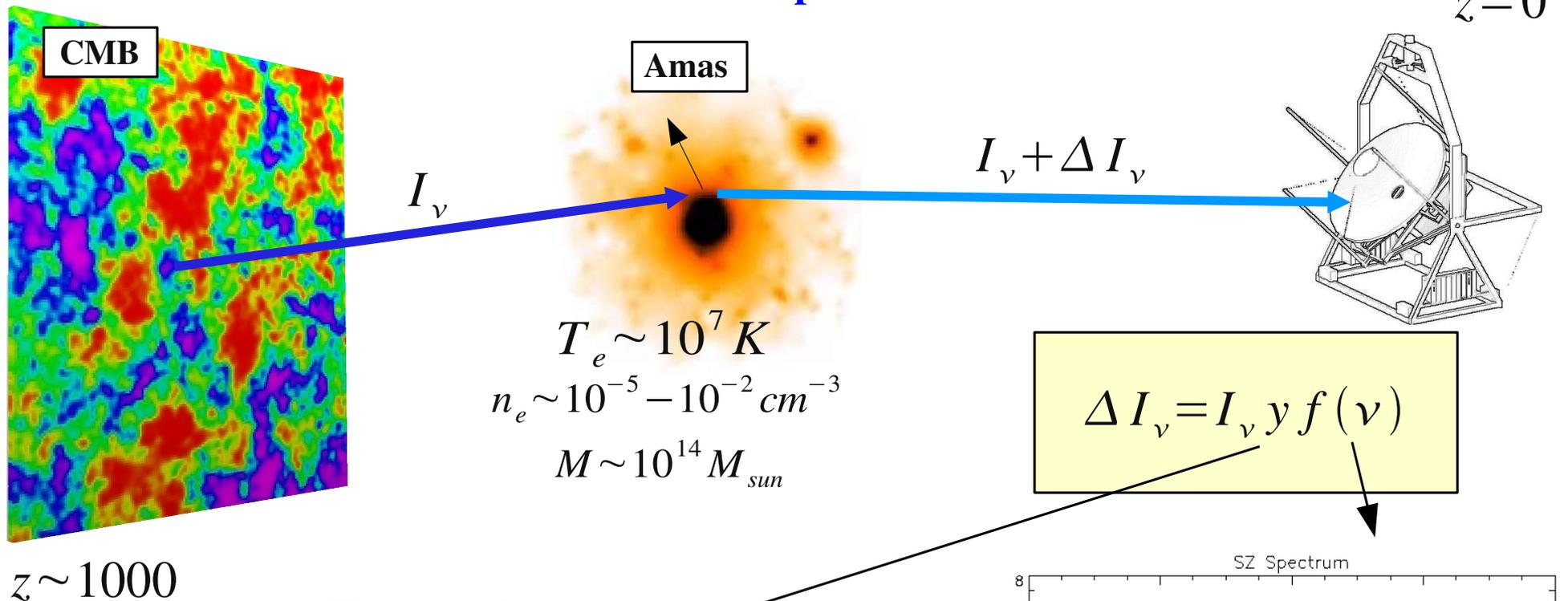
$$\frac{T}{T_*} = \left( \frac{M}{10^{15} h^{-1} M_{sun}} \right)^{2/3} (\Delta_c E^2)^{1/3} \left( 1 - \frac{2\Omega_\Lambda}{\Delta_c} \right)$$

$$T_* \sim 1.9 \text{ keV}$$

# L'effet Sunyaev Zel'Dovich thermique

7

## Diffusion Compton

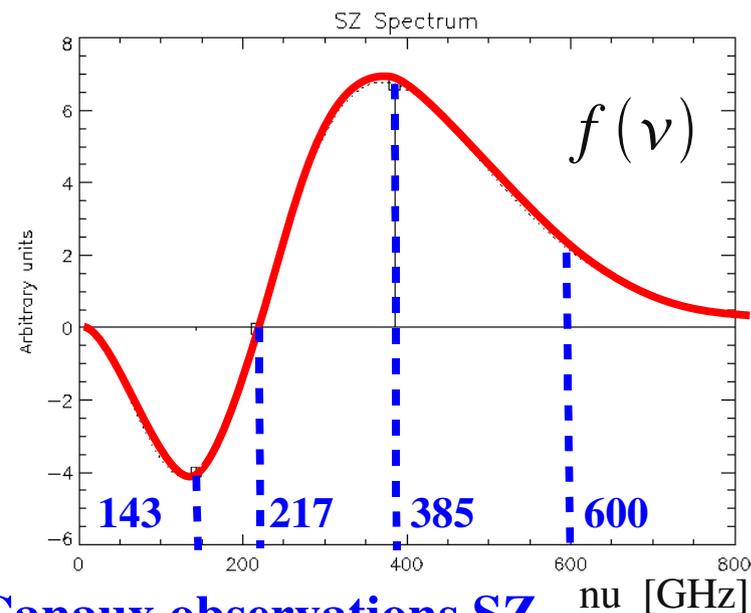


## Energie thermique

$$y \propto \int_{los} T_e n_e dl \sim 10^{-4}$$

$$Y \propto \langle T_e M \rangle$$

$$Y \propto T_* M^{5/3}$$



Canaux observations SZ

## Observer Fond Diffus Cosmologique à haute résolution

### Objectifs Scientifiques

Anisotropies du CMB: Spectres Cl – Cosmologie primordiale

**Amas de galaxie SZ**

**Grandes structures - Cosmologie**

Structure interne d'amas résolus

Galaxies IR



### Suite de BOOMerang/Archeops

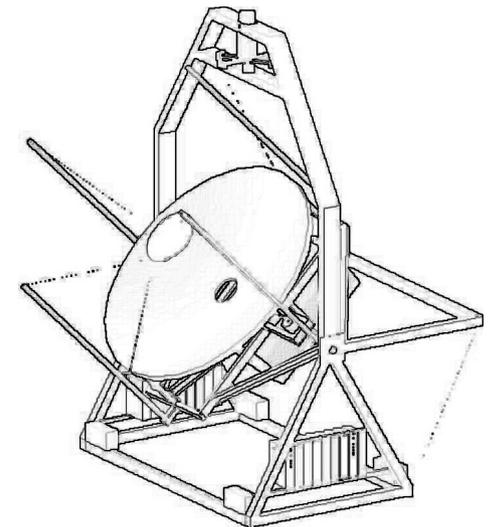
Ballon stratosphérique

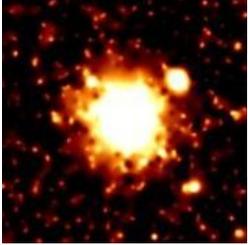
### Collaboration

Université « la sapienza », Rome, Italie

Cardiff, Angleterre

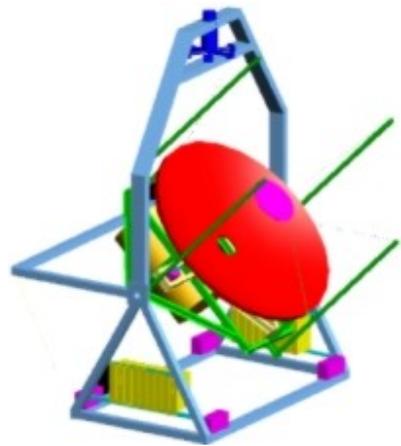
Dapnia/SPP + CSNSM, France





# Observations grands-champs d'amas SZ 9

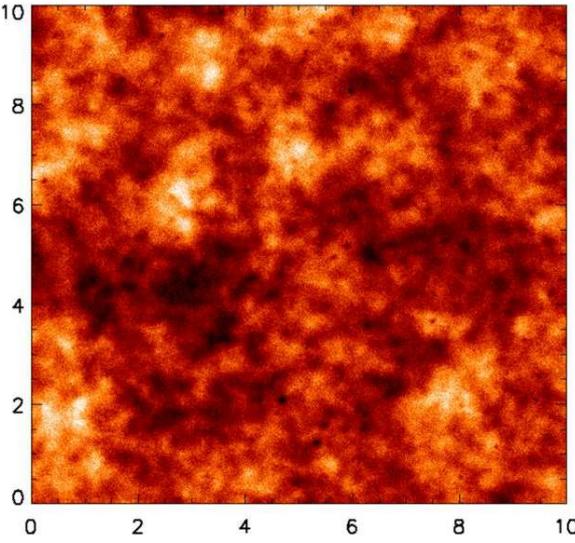
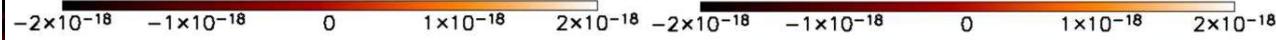
	2006		2007
Expérience	Olimpo	APEX	Planck
Fréq [Ghz]	143; 217; 385; 600	143; 217	100; 143; 217; 353; 545; 857
FWHM [arcmin]	3; 2; 2; 2	0.7; 0.7	?; 7.1; 5; 5; 5; ?
Bruit [ $\mu\text{K s}^{1/2}$ ]	150; 200; 500; 5000	280; 280	?; 70; 100; 300; 2200; ?
Nbolo	19; 35; 35; 35	162; 162	?; 12; 12; 12; 12; ?
Surface [ $\text{deg}^2$ ]	300	170	43000
Durée	10 jours	2 ans	1an



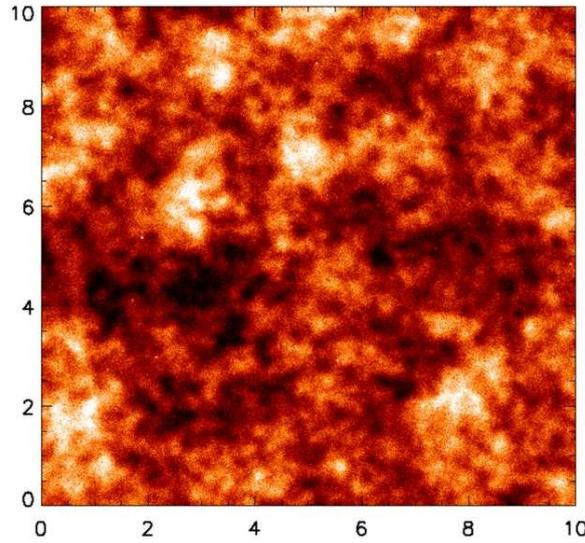
**Les données arrivent bientôt !**

# Exemple de ciel millimétrique observé 10

- simulation Olimpo -



143 GHz



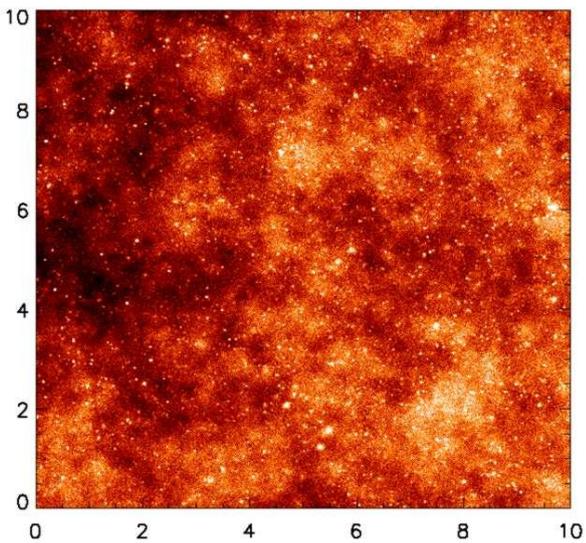
217 GHz

← Anisotropies CMB dominant

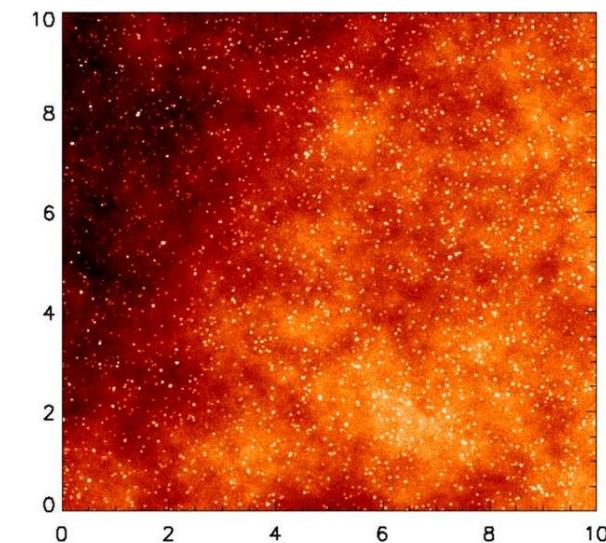
Avant-plan



**SZ effet faible  
à toutes les fréquences**



385 GHz



600 GHz

Cosmologie

Catalogue d'amas de galaxies « vrai »

+

Contaminants  
Astrophysiques



Instrument

+

Algorithmes  
de détection

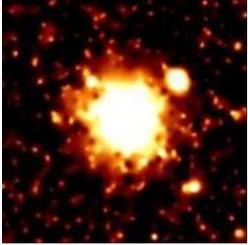


Catalogue de sources détectées

« Déformation » du catalogue vrai

Effets de sélection **complexes**

Melin et al. (2005)



# Deux nécessités pour analyser les données 12

1

**Algorithmes spécifiques d'extraction d'amas SZ**

Pires, Juin et al. (2005)

2

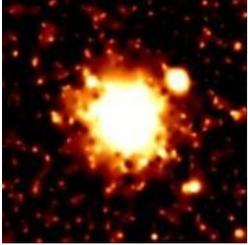
**Comprendre les effets de sélection**

Juin, Yvon, Réfrégier  
(bientôt)

→ Impact sur l'estimation des paramètres  
cosmologiques ?

**Chaîne cohérente d'étude**

**Observations** → **Estimation des paramètres**

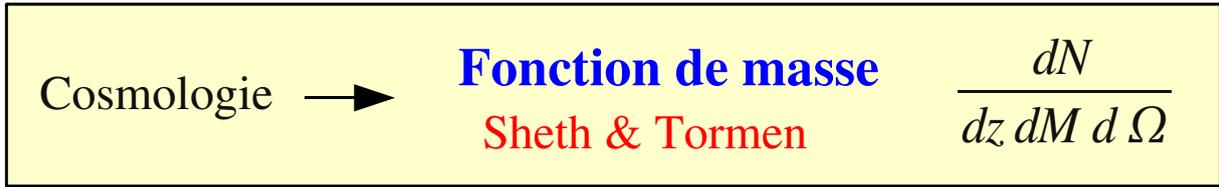
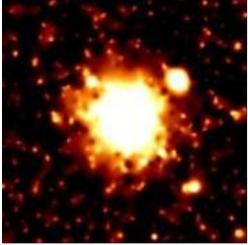


Outils

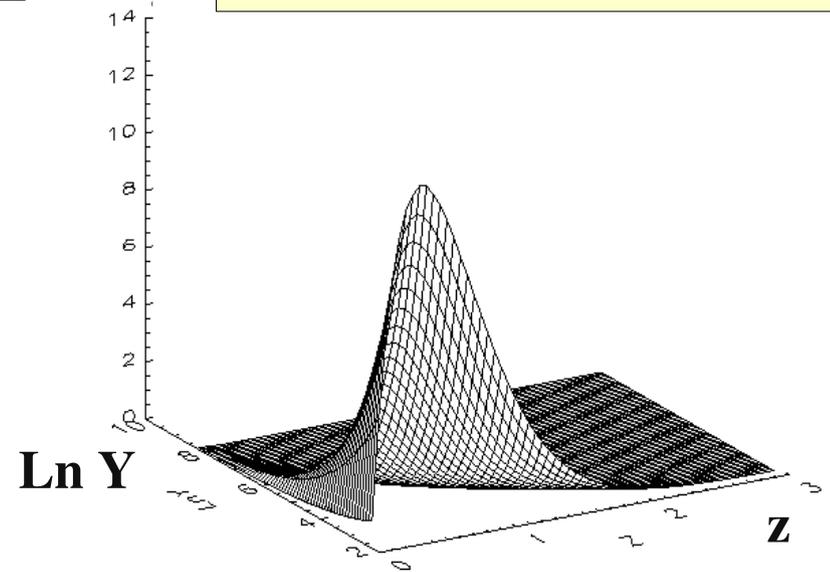
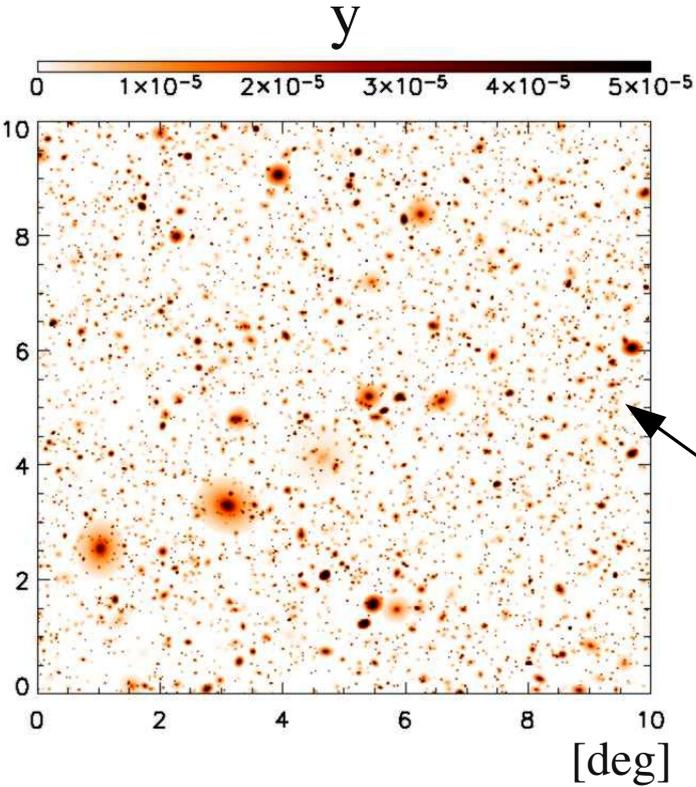
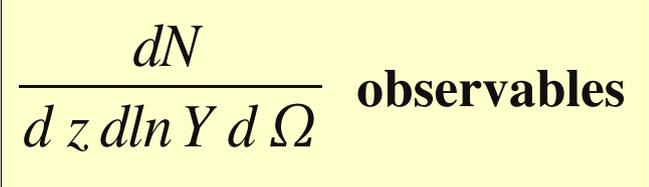
Simulation de ciel millimétrique observé

Détection des amas SZ

Modèle des effets de sélection



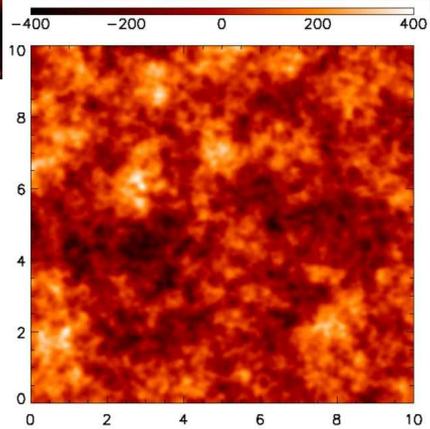
ICOSMO A. Réfrégier, Dapnia/SAp



Tirage aléatoire: N puis Y et z



# Simulation des contaminants astrophysiques 15



## Anisotropies du CMB

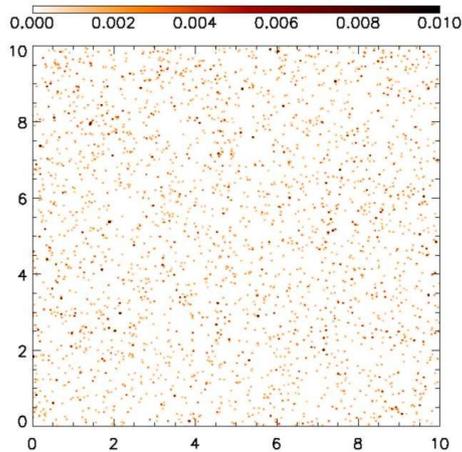
CMBeasy

Doran (2003)

Spectre de  
puissance spatial

Dipôle soustrait,  
Petites cartes White et al. (1997)

Monopôle:  
Corps noir  
 $Planck(\nu, T_{CMB})$



## Galaxies IR

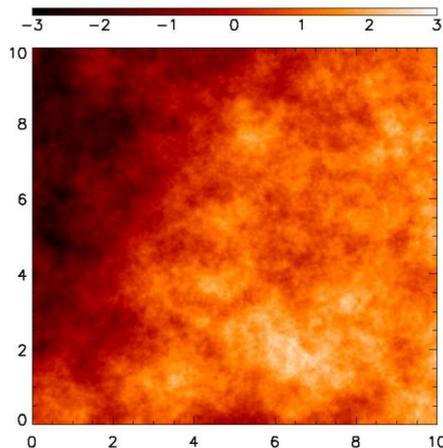
SCUBA :  $dN(>S) / dS$  Borys et al. (1999)

**Corrélation possible avec les amas**

Mais: placement aléatoire

Corps gris  
 $\nu^\alpha Planck(\nu, 30 K)$

**alpha = 1.5 - 2**



## Poussière galactique

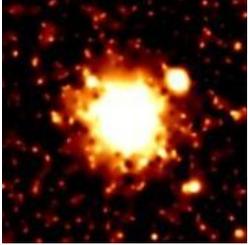
Emission

thermique Bouchet et al. (1995)

Génération aléatoire

Corps gris  
 $\nu^\alpha Planck(\nu, 20 K)$

alpha = 2



## Mélange des sources astrophysiques à la fréquence $\nu$

$$Ciel_{phys}(\nu) = a_{SZ}(\nu) S_{SZ} + a_{CMB}(\nu) S_{CMB} + a_{pouss.}(\nu) S_{pouss.} + \sum^{galax. IR} b(i, \nu) S(i)$$

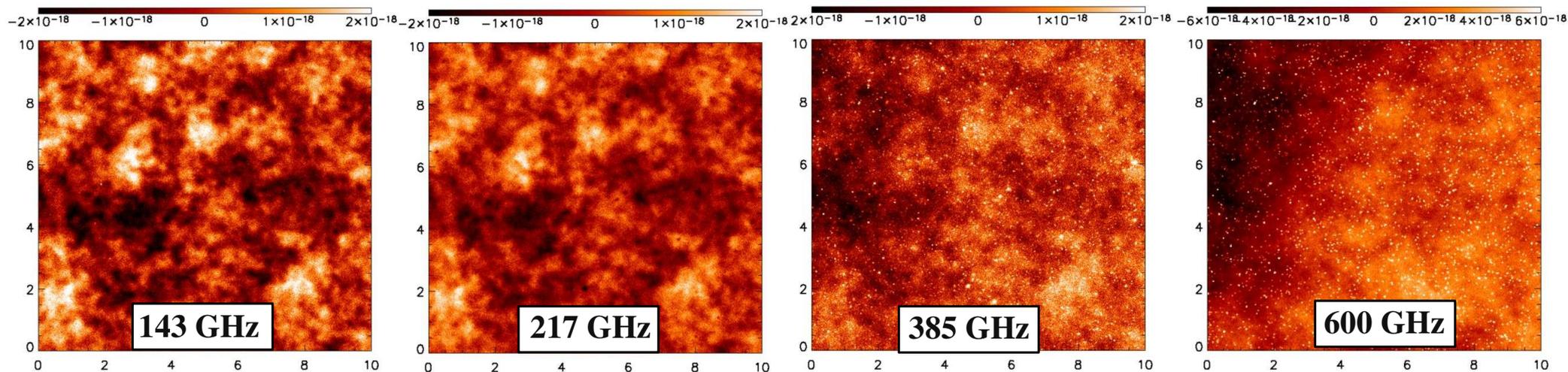
---

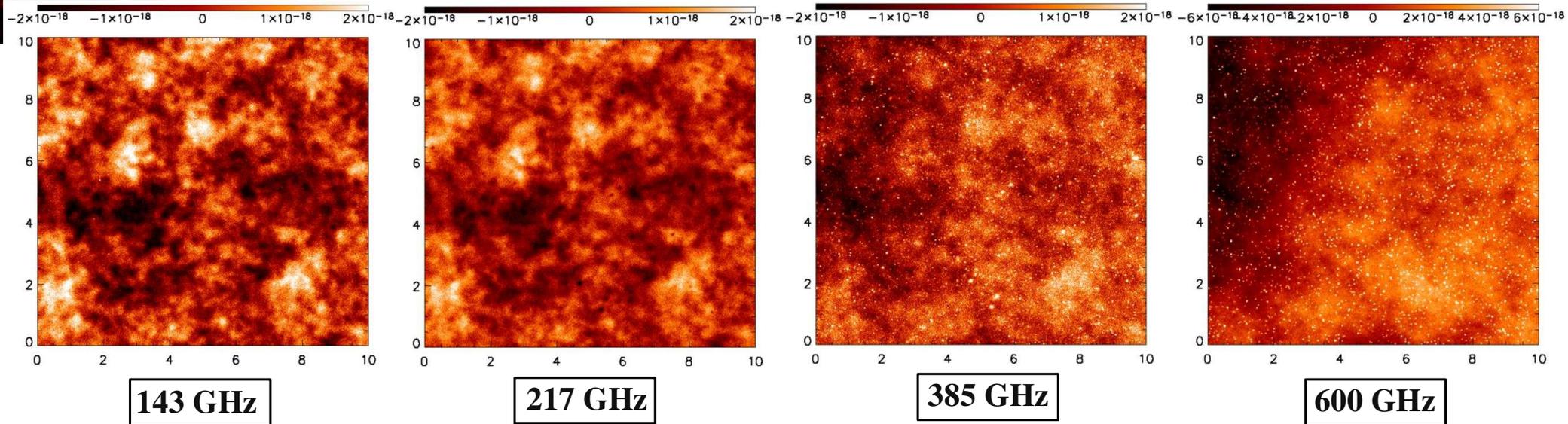
$$Ciel_{obs.}(\nu) = Ciel_{phys.}(\nu) + \text{Instrument / fréquence d'observation}$$

Lobe d'antenne symétrique

Bruit non-corrélé

Nombre de détecteurs





Catalogue d'amas détectés

Critères de  
qualité

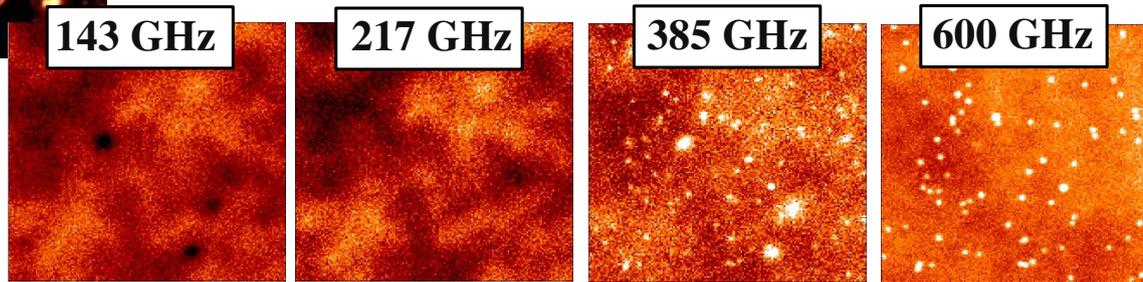
Maximum d'amas: efficacité de détection  
Attention fausses détections (**Galaxies IR !**)  
Photométrie: Reconstruire Y

- 1 Séparation de la composante SZ
- 2 Débruiter la carte
- 3 Construction du catalogue

*Minimum d'a priori*

# 1 - Séparation de la composante SZ

18



Séparation en composantes indépendantes (FastICA, JADE, etc)

$\tilde{S}_{SZ}$

Hypothèse:

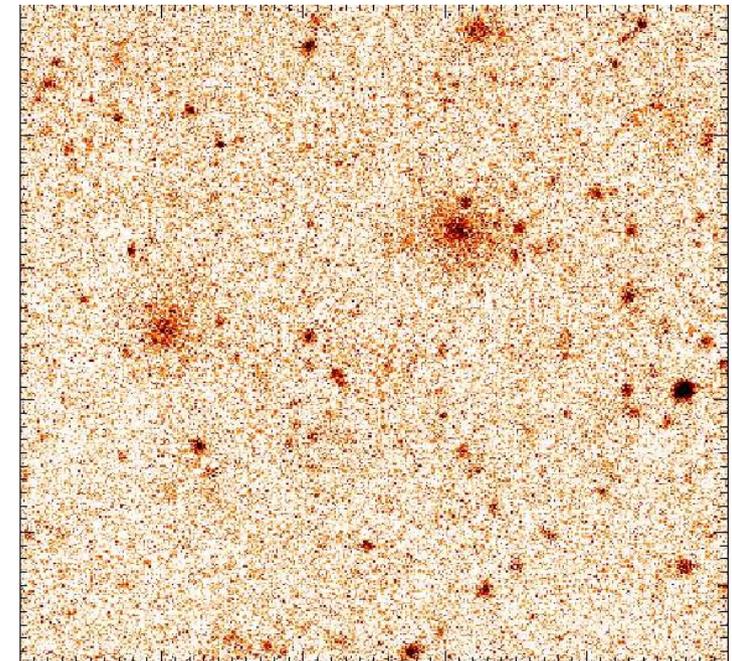
**Il existe 4 sources physiques indépendantes**

$$Ciel_{observé}(\nu) = a_1(\nu)S_1 + a_2(\nu)S_2 + a_3(\nu)S_3 + a_4(\nu)S_4$$

**Cohérence spatiale des sources entre canaux**

Estimation des spectres d'émission

$$\tilde{a}_i(\nu) \longrightarrow \tilde{S}_i$$



**On isole le signal SZ**

**Il reste du bruit**

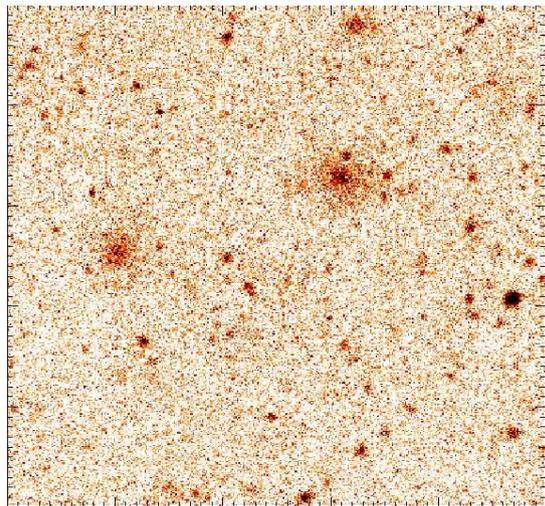
**JADE** Cardoso (1999)

+ décomposition en ondelettes  
multi-échelles du signal

**Filtrage non-linéaire moderne: « ME-FDR »** Starck (2005)

1. Décomposition en ondelettes multi-échelles du signal
2. Isoler les pixels contenant le signal brillant
3. Filtrer en dehors de ce signal

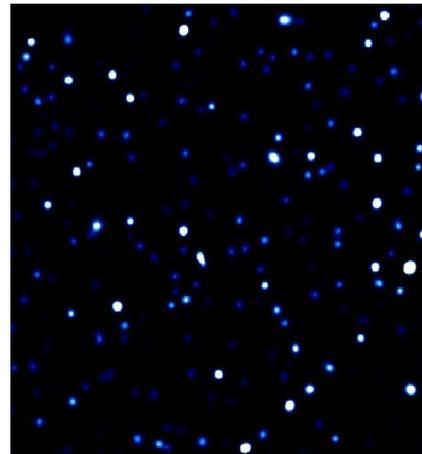
Carte bruitée



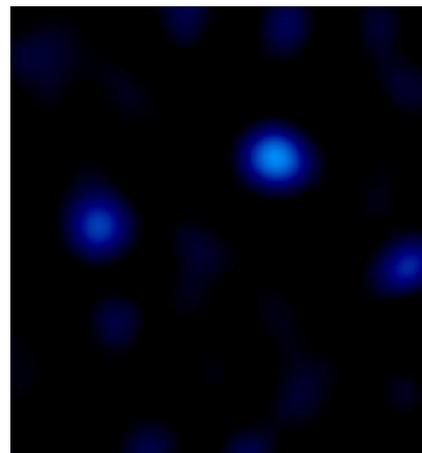
5 deg

Décomposition par échelle

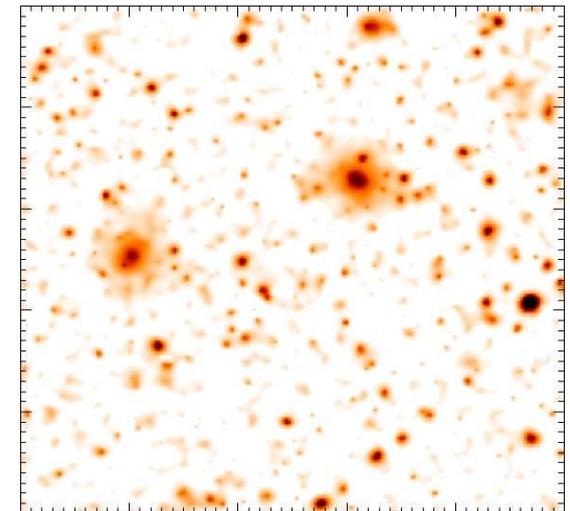
~0.1 deg



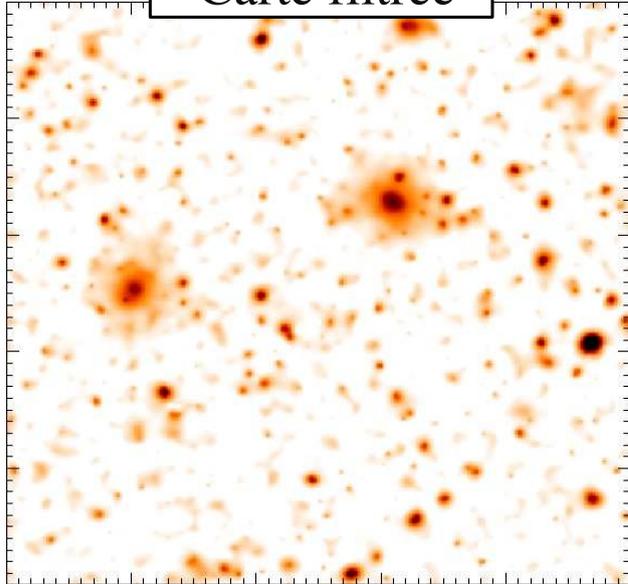
~1 deg



Carte filtrée



Carte filtrée



## Catalogue de sources détectées

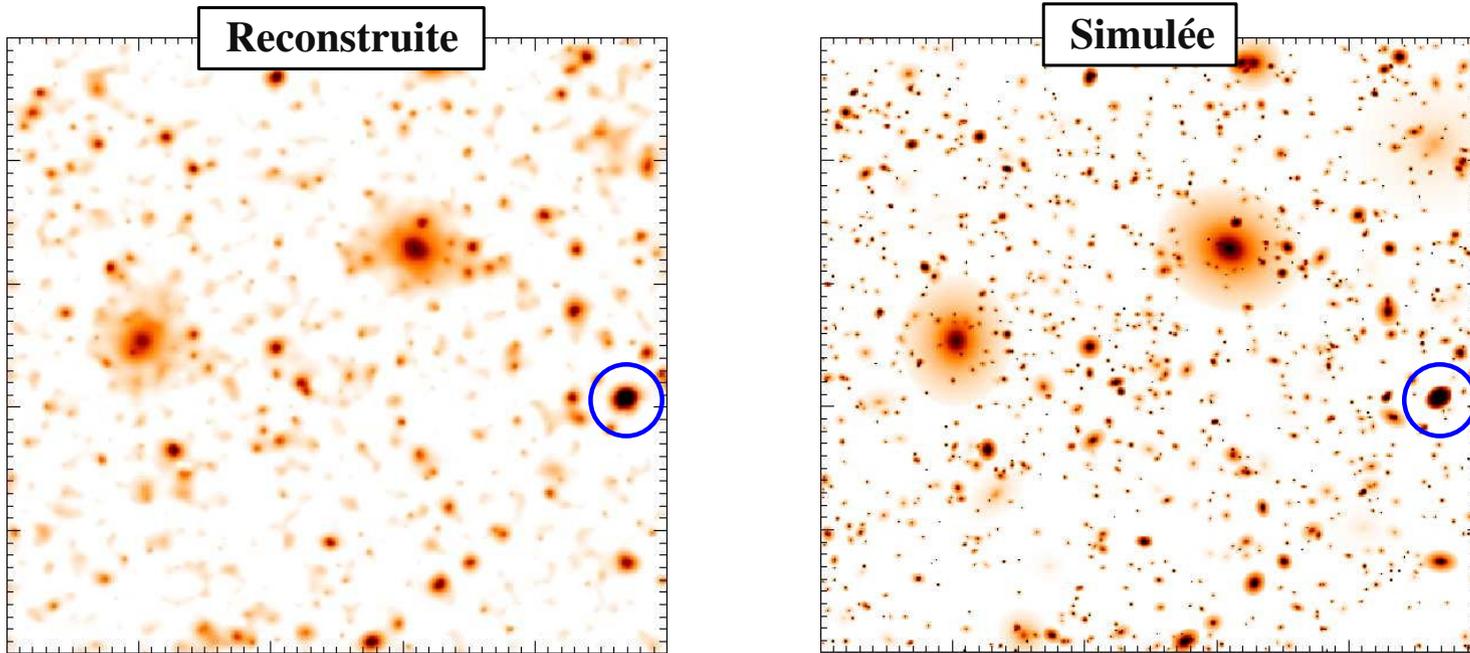
- Position  $x,y$
- Flux:  $Y$

## **SExtractor** + Choix d'un seuil de détection

Bertin & Arnouts (1996)

- **Superposition des sources**
- **Photométrie intégrale:  $Y$**

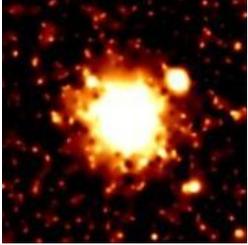
## Amas ou contamination



## Association des sources détectées / simulées

Critères de distance et de photométrie

Si association: **la source est un amas**  
Sinon: **la source est une contamination**



Complétude (> seuil de détection)

=

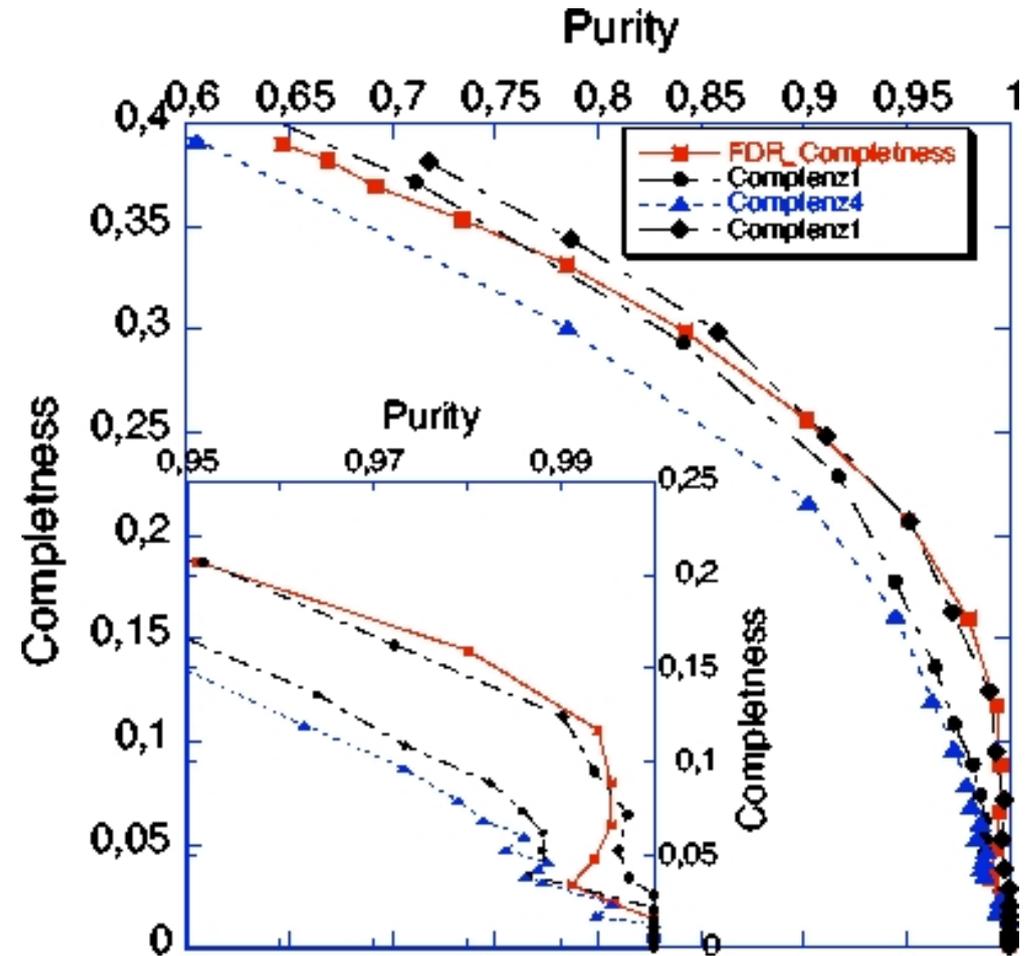
$\frac{\text{Nombre amas détectés (>seuil)}}{\text{Nombre amas simulés total}}$

$Y > 3.5 \times 10^{-5} \text{ arcmin}^2$

Pureté (> seuil de détection)

=

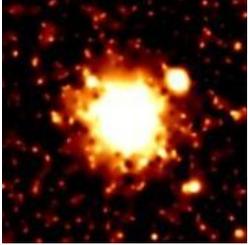
$\frac{\text{Nombre amas détectés (>seuil)}}{\text{Nombre sources détectés (>seuil)}}$



Pires, Juin et al. (2005)

Pierpaoli (2005)

- **Performante + sans *a priori* !**
- **Bonne pureté: rejette efficacement les galaxies IR**

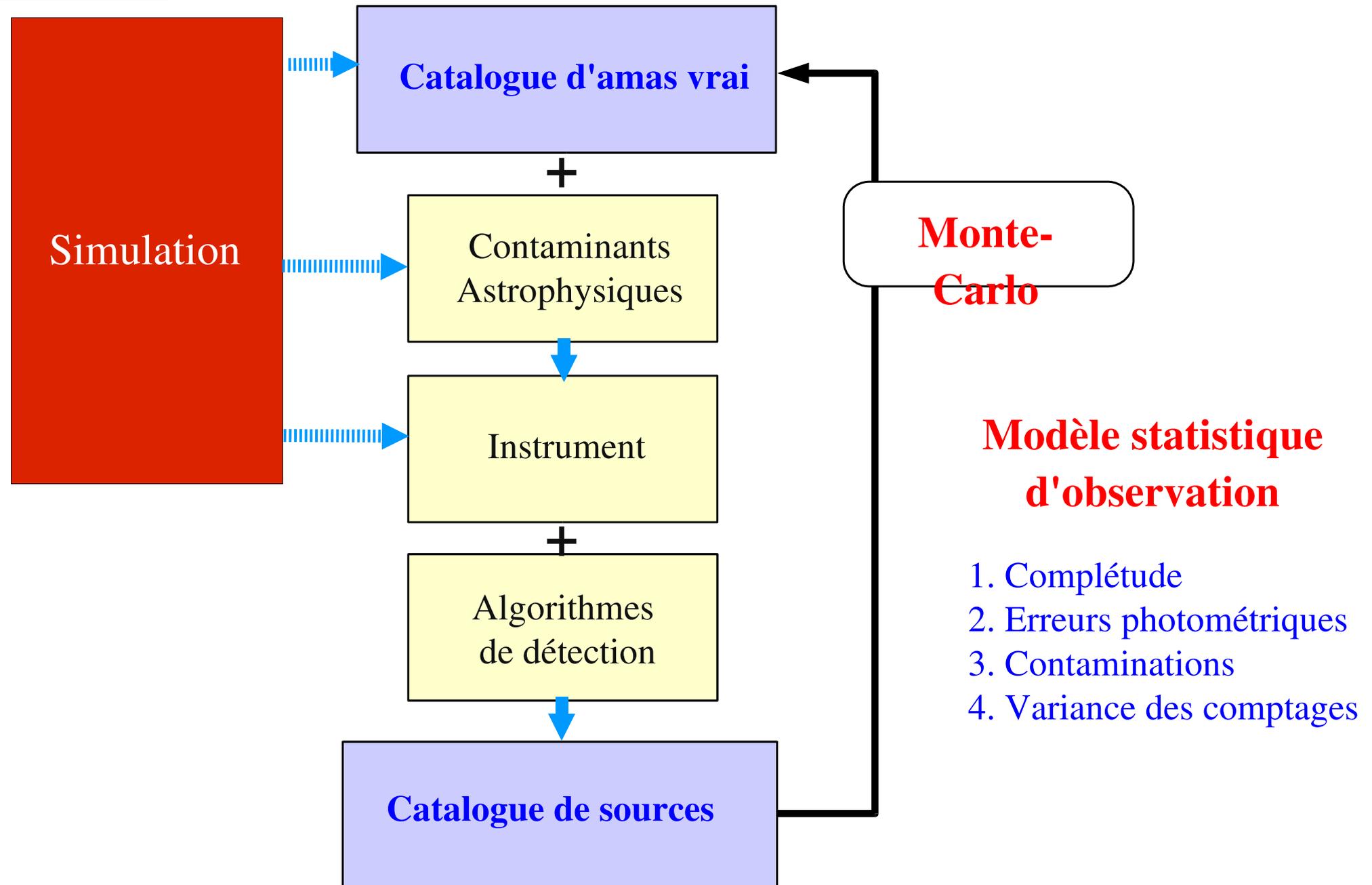
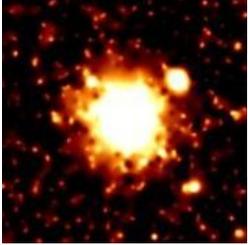


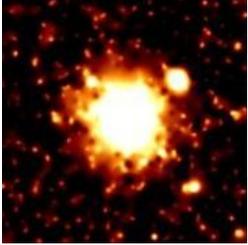
## **Simulation de ciel millimétrique observé**

Phénomènes astrophysiques dominants  
Premier ordre des effets instrumentaux

## **Algorithmes de détection d'amas SZ**

Performants  
Rejette les galaxies IR





1

Comprendre les effets de sélection

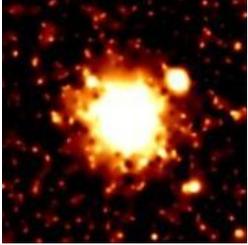
2

Calculer pour **une cosmologie**  
et **une chaîne de détection d'amas**  
la **distribution des sources détectées attendue**  
**Essentiel pour estimer les paramètres cosmologiques**

Distribution « vraie »

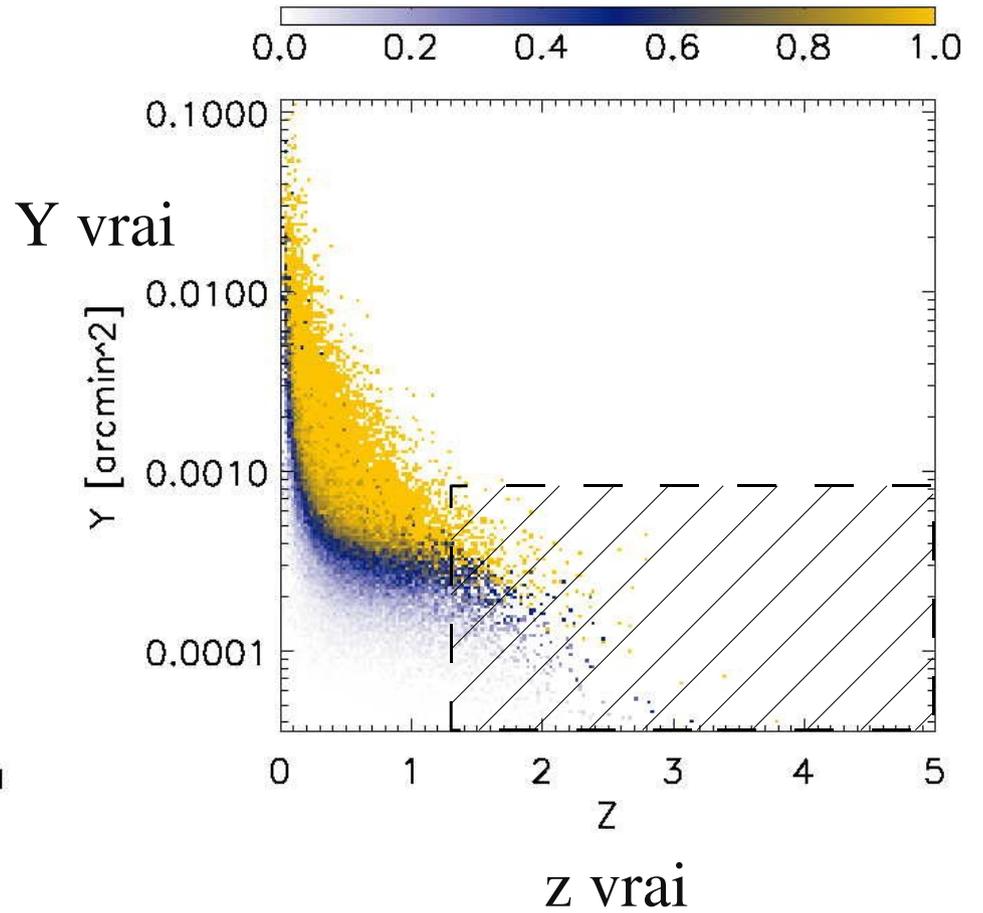
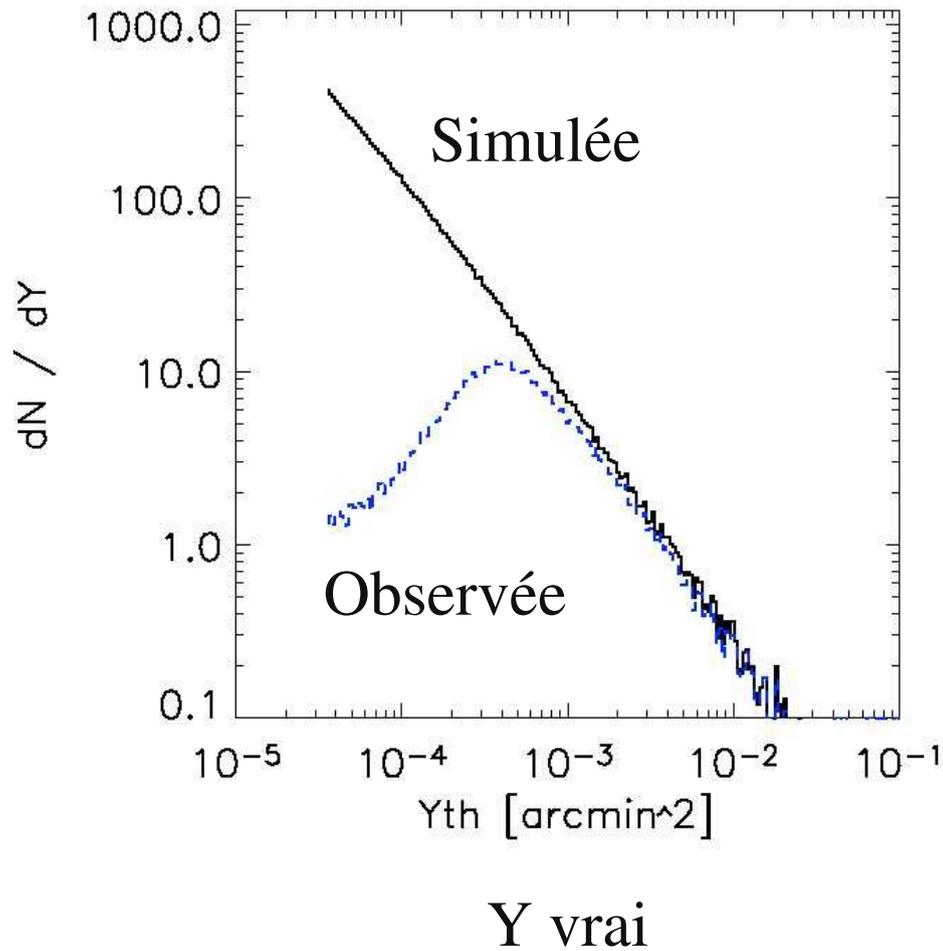
Distribution observable

$$\frac{dN_{vraie}^{amas\ moyen}}{dz_{vraie} dY_{vraie}} \quad \dashrightarrow \quad \frac{dN_{observé}^{detection\ effectif}}{dz_{observé} dY_{observé}}$$



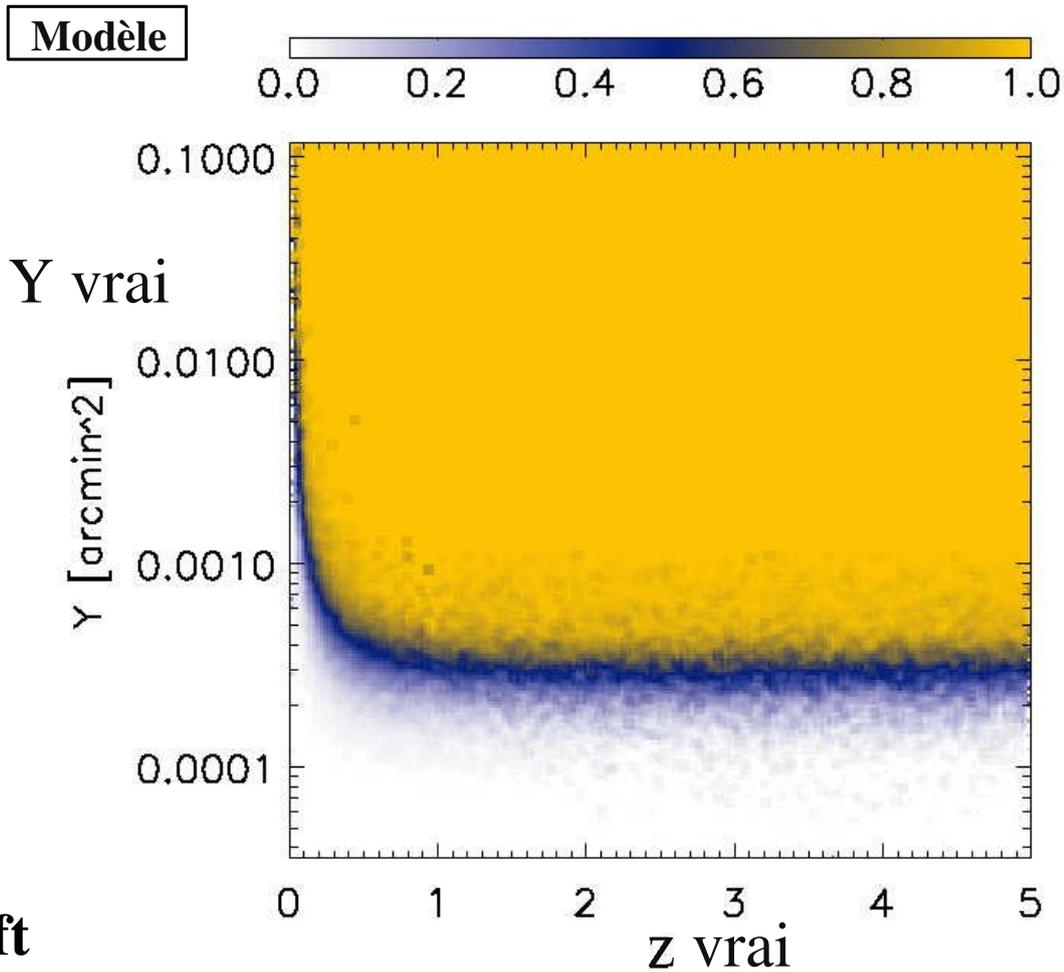
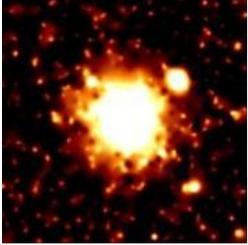
# 1. Calcul de la complétude

## Monte-Carlo



# 1. Modèle de complétude

27



**Grand redshift**

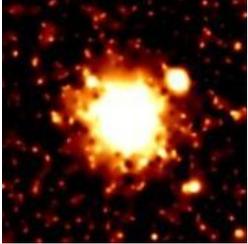
Amas dans le lobe  
~ Coupure en flux

**Bas redshift**

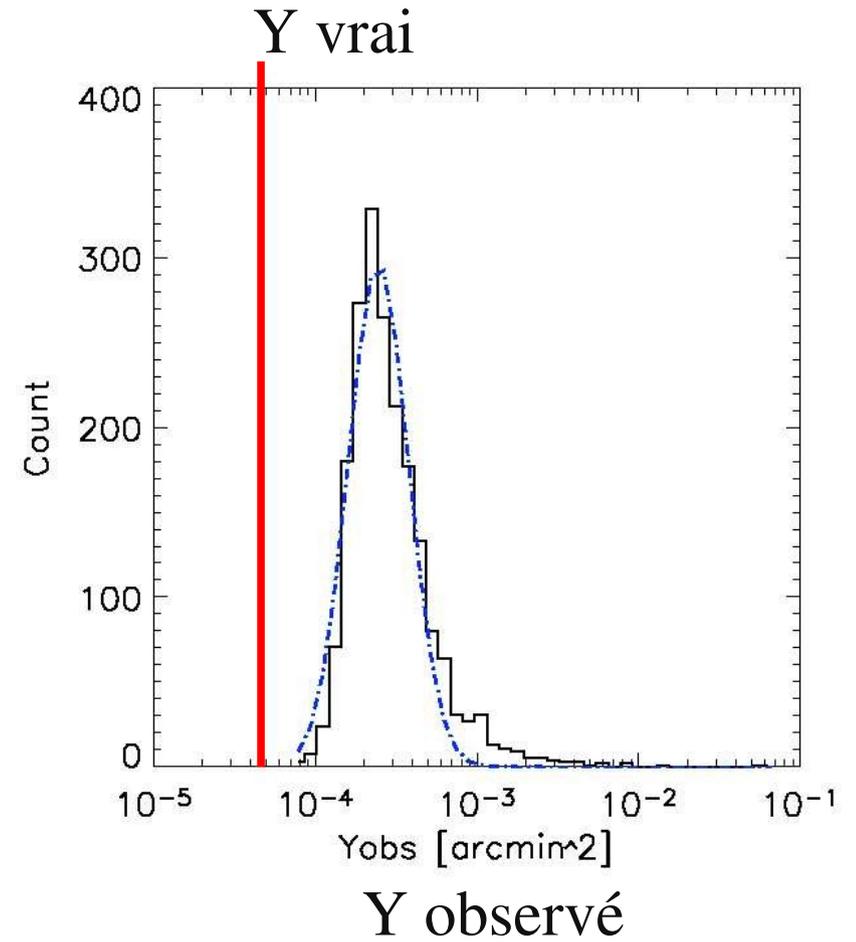
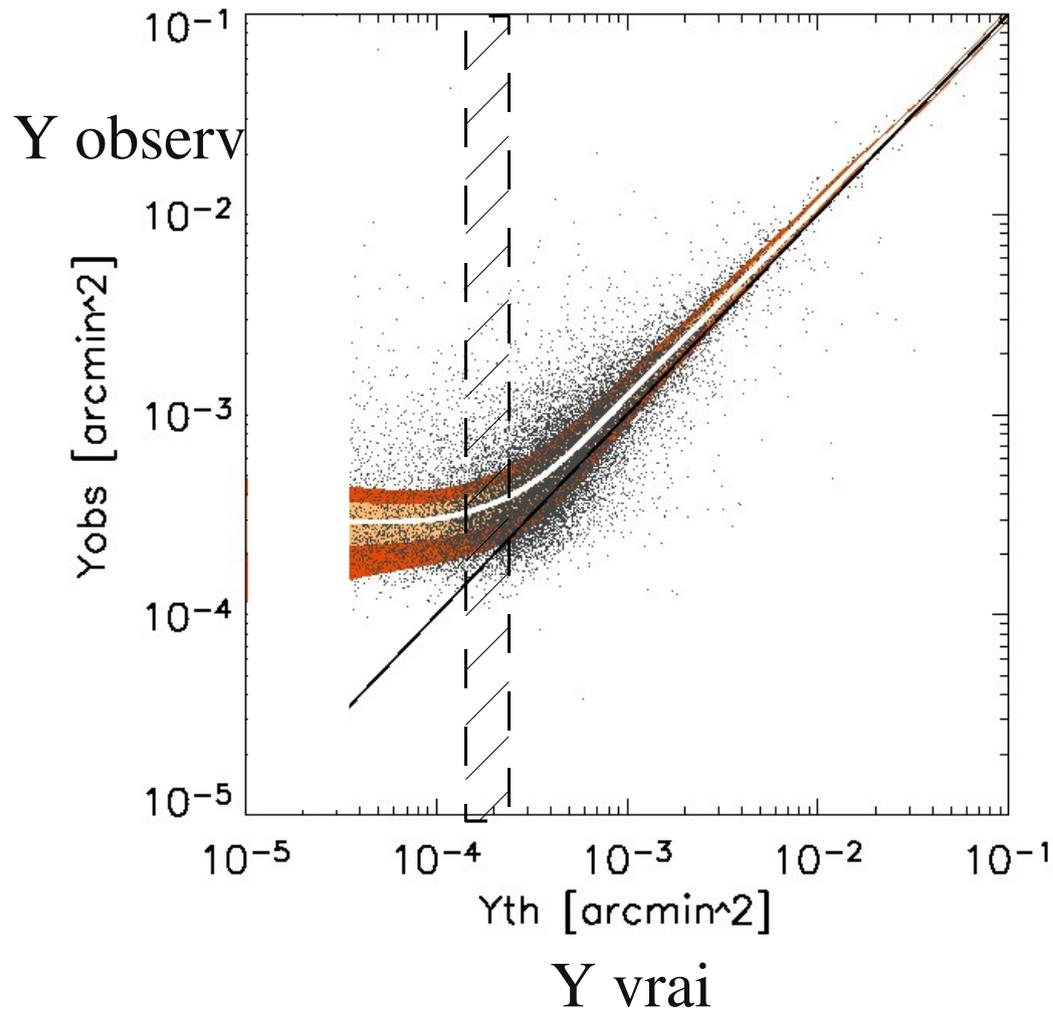
Pas une coupure en flux

Où il y a des amas !

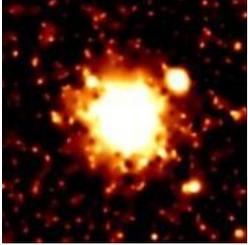
$$N_{vrai}^{amas} \longrightarrow N_{observé}^{amas} (z_{vrai}, Y_{vrai})$$



## 2. Erreurs photométriques Y



$$N_{\text{observé}}^{\text{amas}}(z_{\text{vrai}}, Y_{\text{vrai}}) \longrightarrow N_{\text{observé}}^{\text{amas}}(z_{\text{vrai}}, Y_{\text{observé}})$$



## 2. La mesure du *redshift* $z$

Catalogue de  $N$  sources  
 $(\theta, \phi)$



Observations complémentaires:  
*Followup* optique

### Sources pointées

Identification des sources: **Amas ou Contamination**

mesure de  $z_{\text{observé}}$       On en tient compte

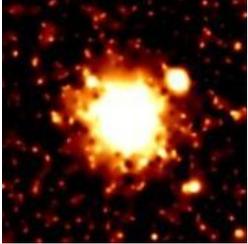
### Modèle

Suivi photométrique  $\sigma = 0.1$   
Pas de biais  $\bar{z}_{\text{observé}} = z_{\text{vrai}}$

### Sources non pointées

Source ?  **On en tient compte dans le modèle**

$$N_{\text{observé}}^{\text{amas}}(z_{\text{vrai}}, Y_{\text{observé}}) \quad \text{---} \quad N_{\text{observé}}^{\text{amas}}(z_{\text{observé}}, Y_{\text{observé}})$$

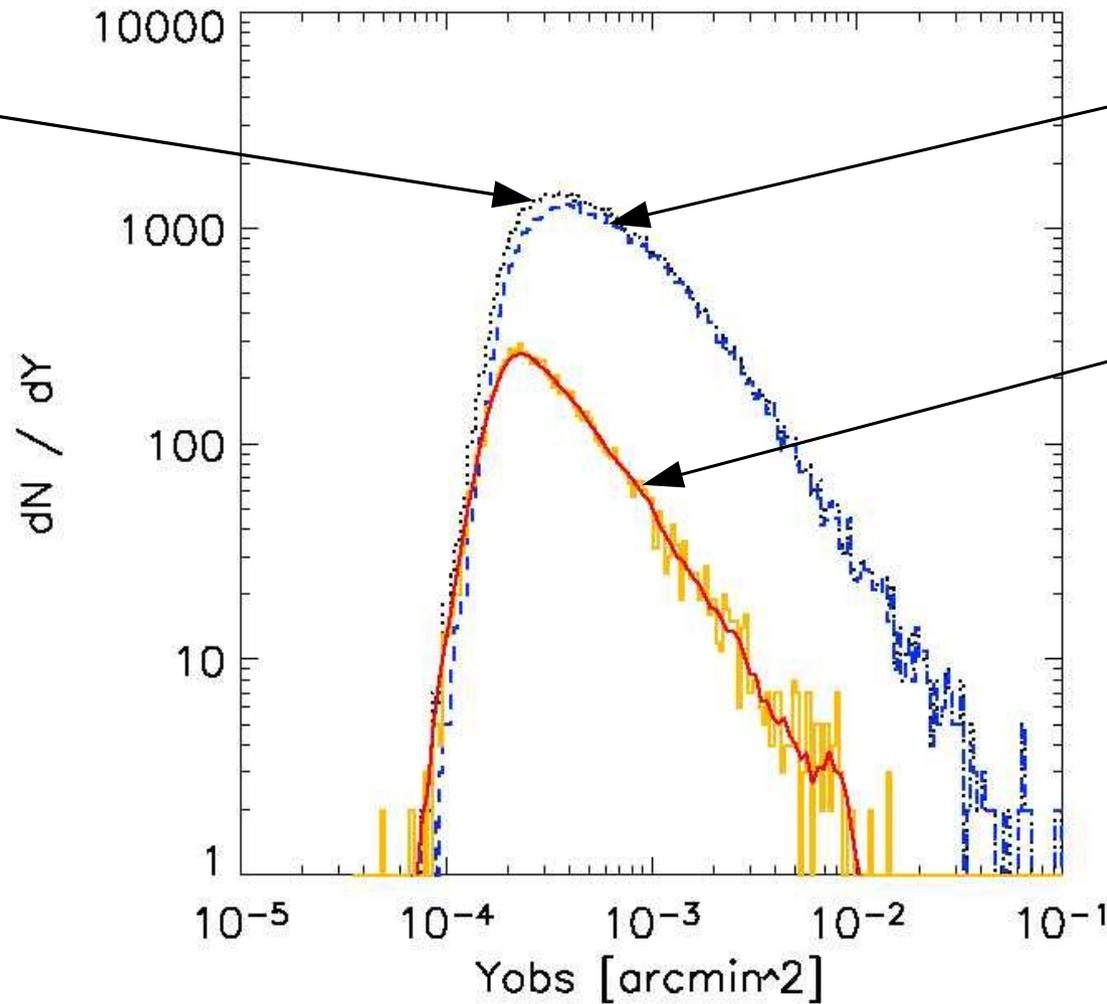


# 3. Les contaminations

Détections

Amas

Contaminations



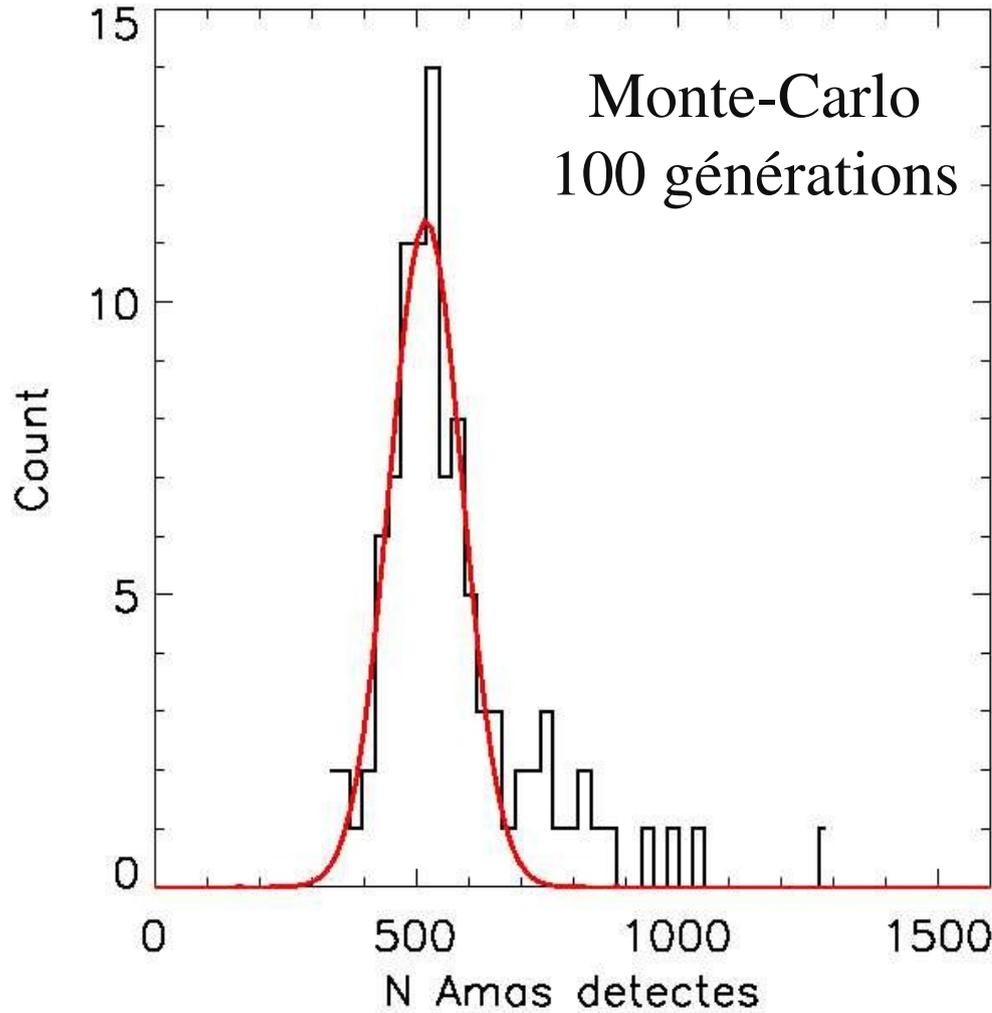
$$\frac{dN_{\text{observé}}^{\text{contamination moyen}}}{dY_{\text{observé}}}$$

Distribution en flux des contaminations

Y observé

$$N_{\text{observé}}^{\text{amas}} \longrightarrow N_{\text{observé}}^{\text{détection}}(z_{\text{observé}}, Y_{\text{observé}})$$

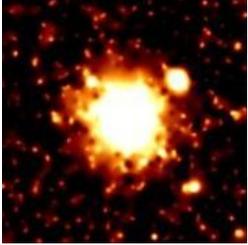
# 4. Variance des comptages



**Largeur >> largeur  
d'une distr. de poisson de  
même espérance**

**On DOIT en tenir compte  
pour estimer les  
paramètres cosmologiques**

$$\bar{N}^{\text{détecté observé}} \longrightarrow N^{\text{détecté effectif observé}}$$



## Observation

### Catalogue de sources

Nombre de détections **observés**  
Mesures de **Y<sub>obs</sub>** et **Z<sub>obs</sub>**

Cosmologie

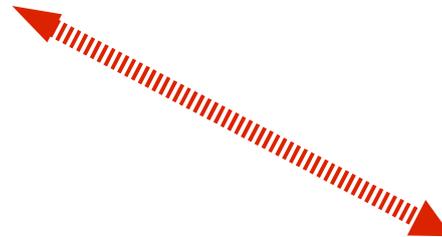
$$\frac{dN_{vraie}^{amas\ moyen}}{dz_{vraie} dY_{vraie}}$$

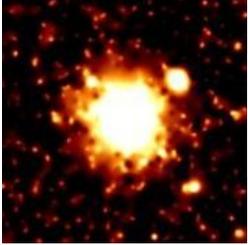


**Modèle stat. d'observation**



$$\frac{dN_{observé}^{detection\ effectif}}{dz_{observé} dY_{observé}}$$

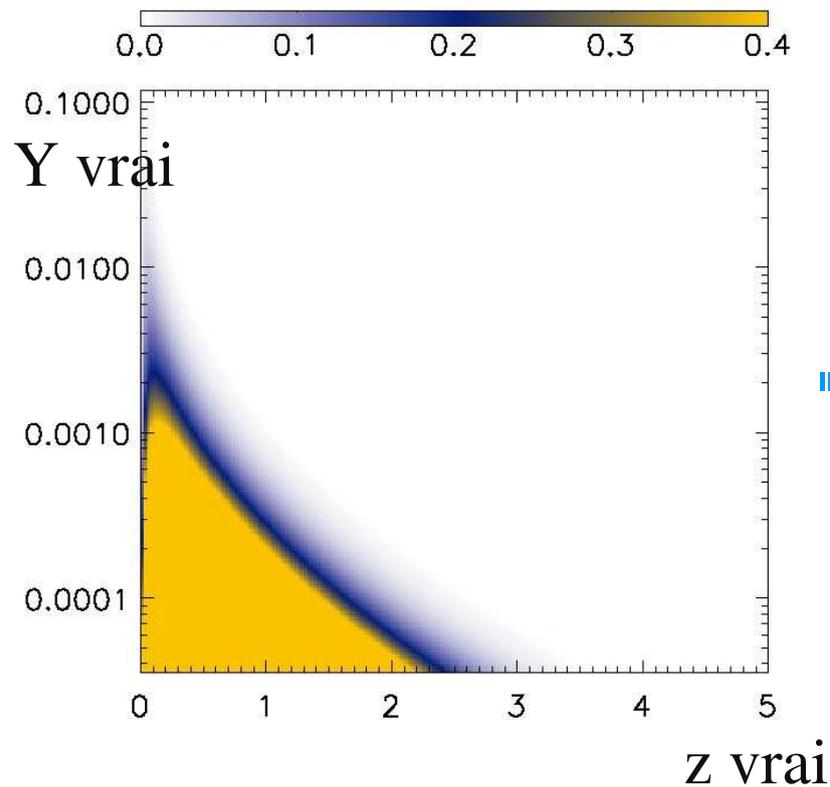




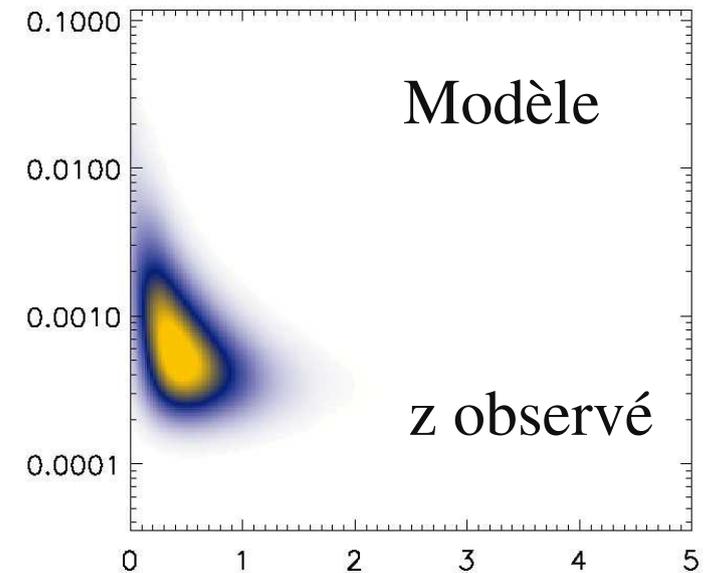
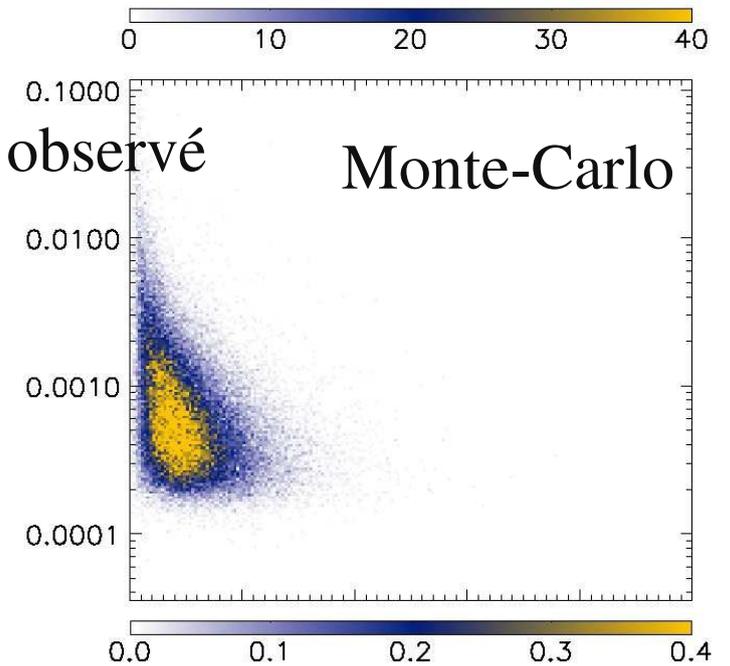
Complétude + Erreurs photométriques

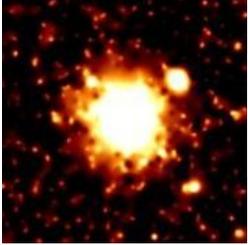
Distribution observée

Distribution « vraie »



Y observé Monte-Carlo





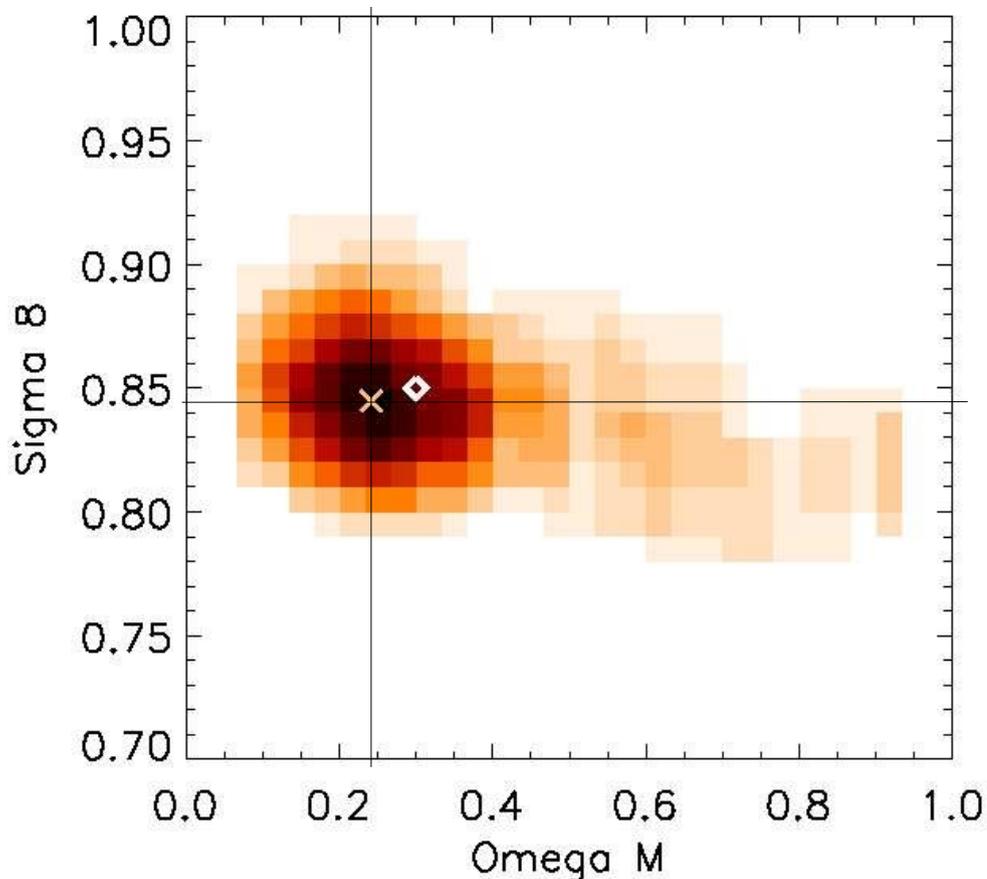
$$\sigma_8 = 0.85$$

$$\Omega_m = 0.3$$



N observations simulées

N estimation de paramètres **avec le modèle statistique complet**



On reconstruit:

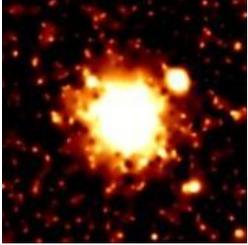
$$\sigma_8 = 0.844$$

$$\Omega_m = 0.24$$

**Biais << incertitudes statistiques**

**Le modèle d'obs. est un estimateur faiblement biaisé des paramètres cosmo.**

Hypothèse: non biaisé



## Effets de sélection:

Instrumentaux - Bruit de mesure...

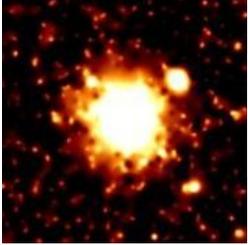
Algorithmiques - Photométrie des petits amas...

**Astrophysiques - Avant-plan,**

**Confusion entre amas: introduit un « bruit »**



**Elle dépend de la cosmologie via la densité d'amas**



## 3 modèles d'observation

Une cosmologie

$$\sigma_8 = 0.85$$

$$\Omega_M = 0.3$$



Une observation

Confusion « naturelle »

~ 9000 *amas*

$$\sigma_8 = 0.85$$

Basse confusion

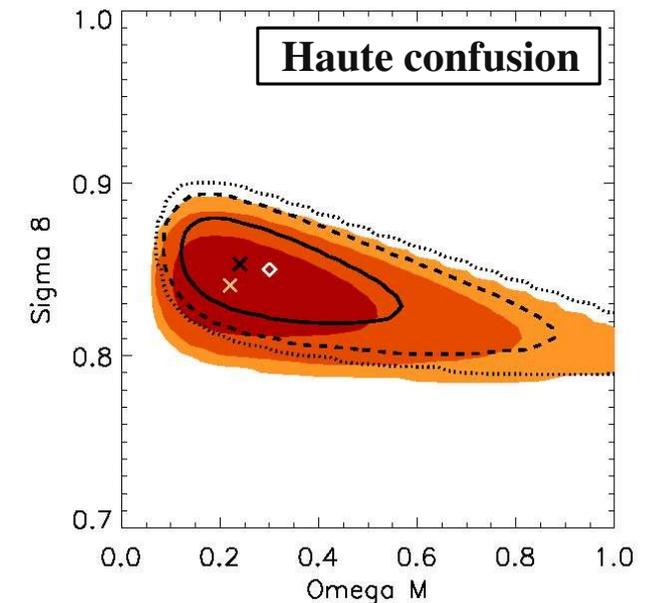
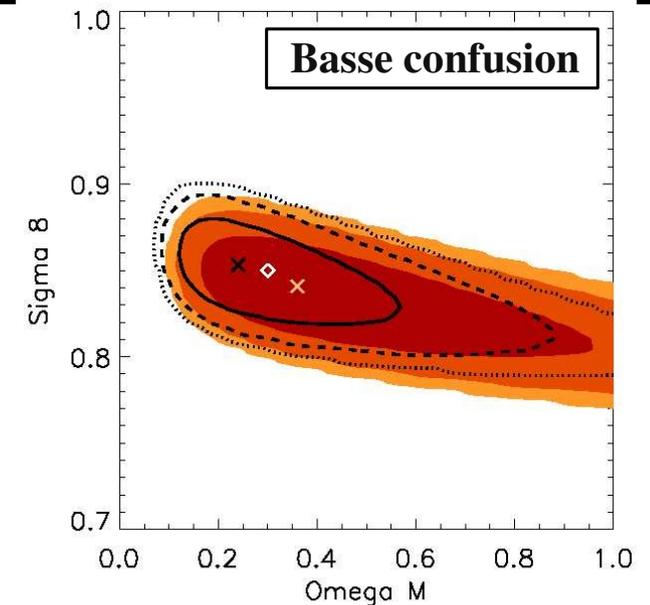
~ 6700 *amas*

$$(\sigma_8 \sim 0.78)$$

Haute confusion

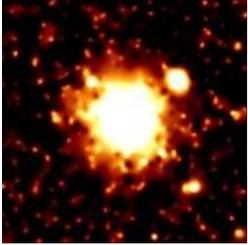
~ 13500 *amas*

$$(\sigma_8 \sim 0.94)$$



Systematique << Statistique à 1 sigma: une cosmologie reconstruite

Hypothèse: Le modèle d'observation est indépendant de la cosmologie



Outils d'analyse statistique adaptés

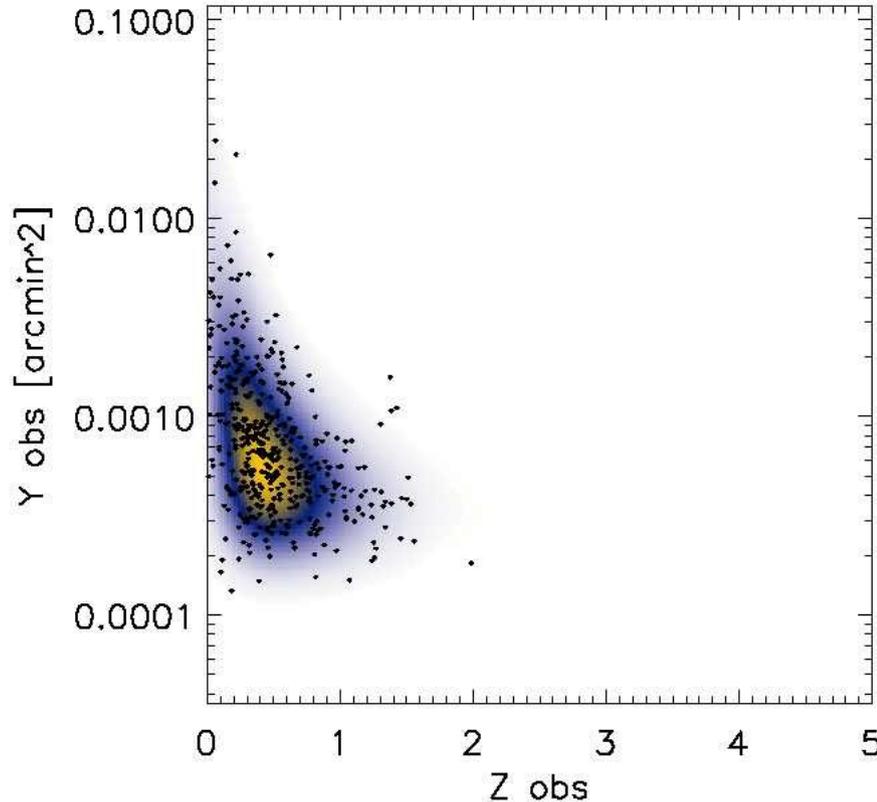
Prospective Olimpo

Systématiques liées au modèle d'observation

**Observation: Catalogue de sources**

**Cosmologie  $\theta$   
+ Modèle d'obs.**

$N_{obs}$   
sources  $Y_i$   
*follow-up*  $z_i$



**Vraisemblance**

$$L(obs; \theta) = \frac{dp}{dN} (N_{obs}; \theta) \prod_i^{amas} \frac{dp}{dz_{obs} dY_{obs}} (z_i, Y_i; \theta) \prod_i^{detection} \frac{dp}{dY_{obs}} (Y_i; \theta)$$

Nombre effectif de détections

Amas détectés  
Y et mesure du *redshift*

Pas de suivi optique  
Source: Y pas de *redshift*

## Tests d'hypothèse:

« L'observation est une génération aléatoire du modèle considéré »

### Exemple:

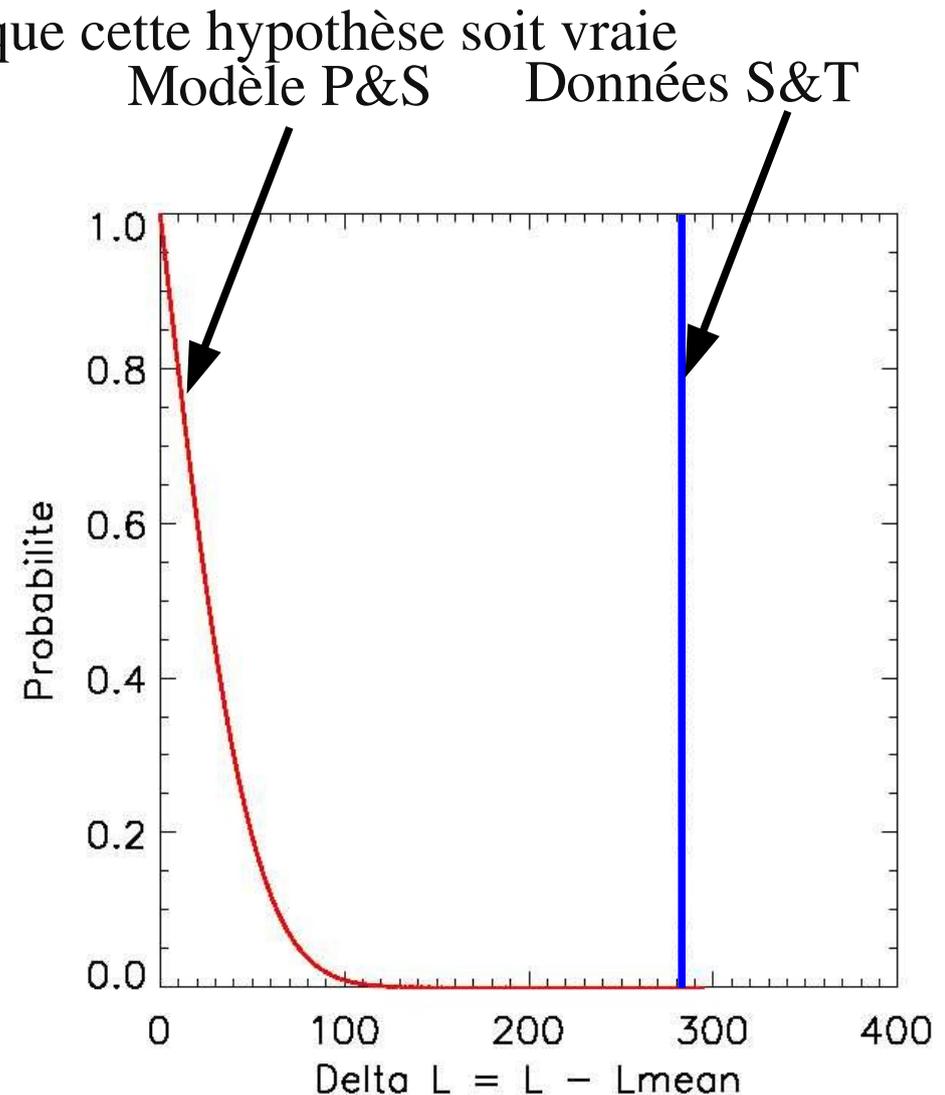
#### choisir la fonction de masse

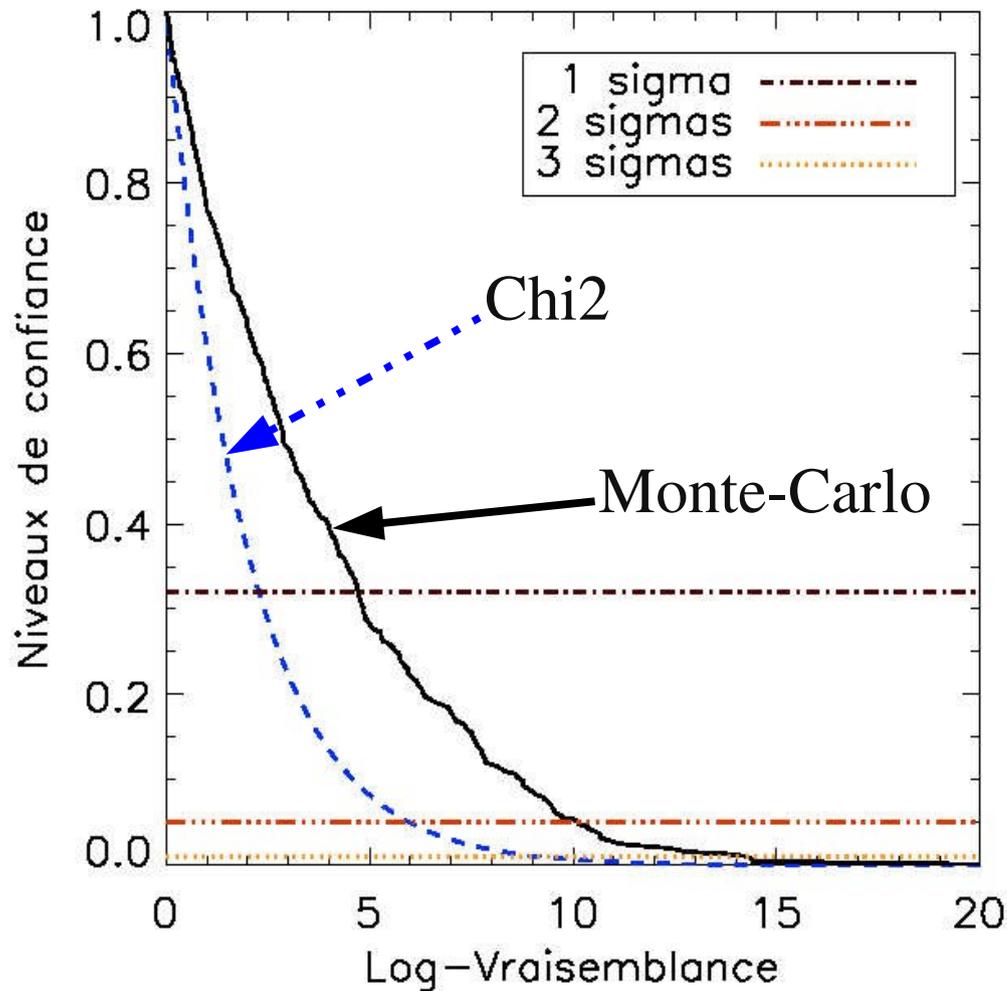
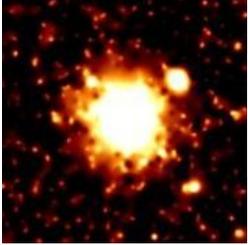
1. Données (simulées S&T)
2. Hyp.:  
« C'est une génération aléatoire d'un modèle utilisant la f. de masse de P&S »

P&S: incompatible ( >5 sigmas)

S&T: compatible (>80%)

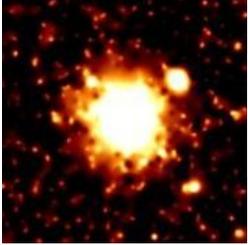
**Trouver une classe de modèle compatibles avec l'observation**





1. Classe de modèles compatibles
2. Estimer les meilleurs paramètres maximum de vraisemblance
3. Calcul des niveaux de confiance par Monte-Carlo

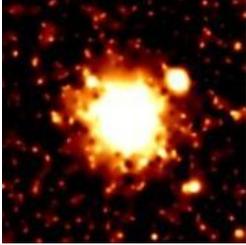
**On doit faire ce calcul**



- Trouver une classe de modèles compatibles avec les données
- Estimer les paramètres des modèles et calculer les erreurs sur cette estimation

Peu de statistique

Distributions non gaussiennes

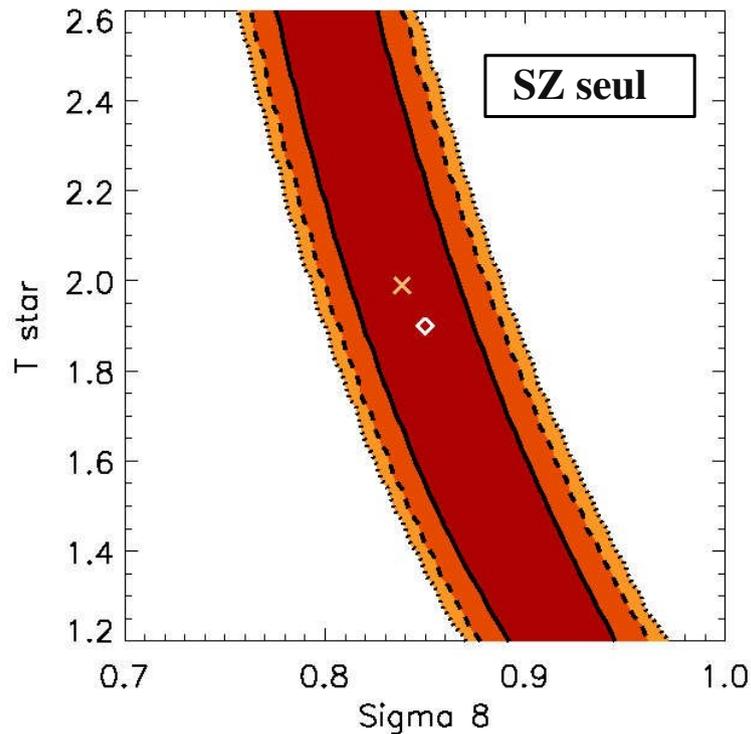


## Données SZ

Simulation Olimpo vol scientifique: 400 deg<sup>2</sup>, 10 jours  
520 sources dont 500 amas pointés et 20 contaminations

Marginalisé sur OmegaM

$\sigma_8$  et  $T_*$  sont dégénérés



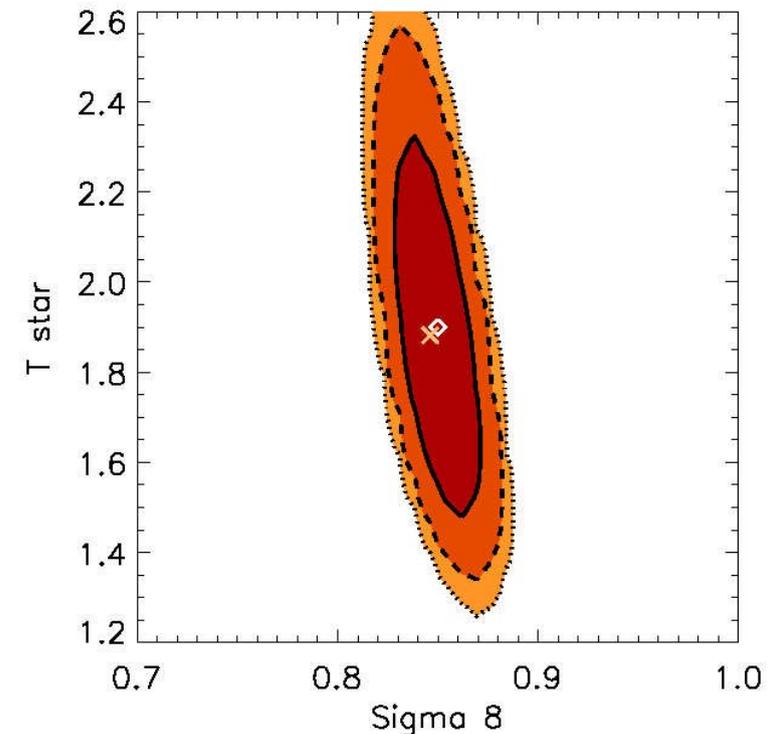
## Combine les données

WMAP: matrice de Fisher

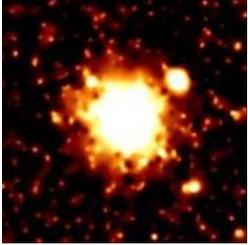
CFHTLS-wide, prospective *weak-shear*: matrice de Fisher

HST: matrice de Fisher

SZ + WMAP + CFHTLS-wide



- **Sigma 8 ~ indépendant de Tstar: Cosmo**
- **Il faudra contraindre Tstar: Champ commun X-SZ**



## Données SZ

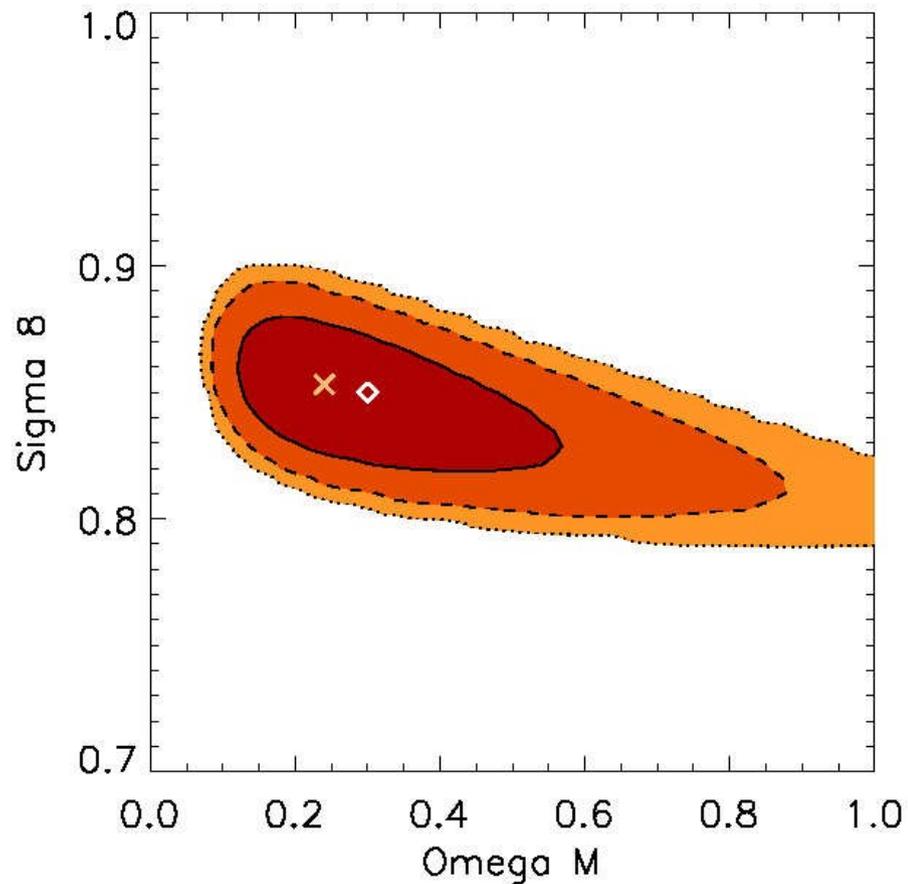
400 deg<sup>2</sup>, 10 jours

~500 amas (avec mesure de z)

Pas de marginalisation

**Hypothèse: Tstar connu**

Potentiel cosmologique  
d'un vol nominal Olimpo

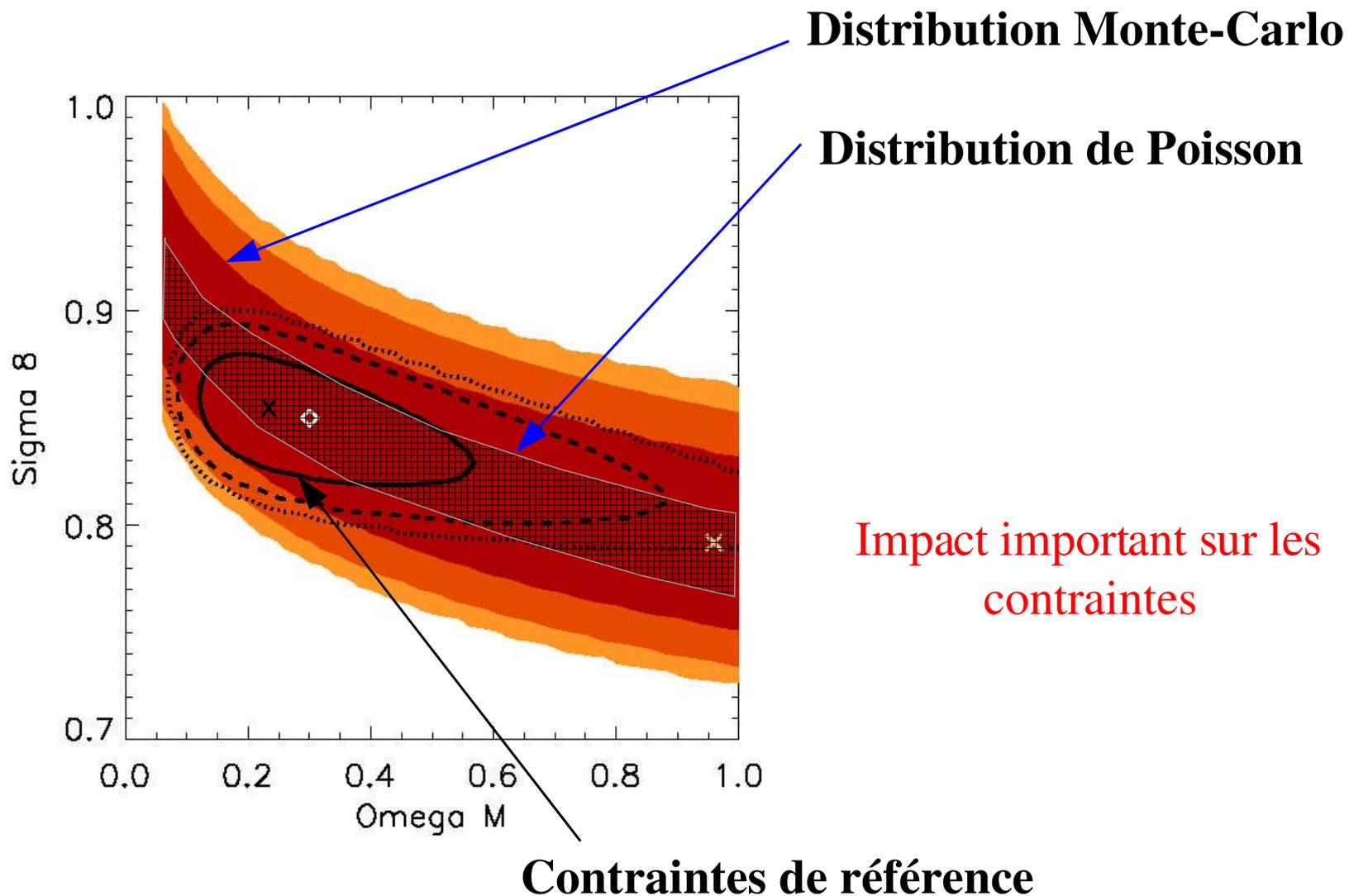


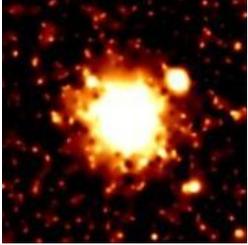
Contraintes de référence pour  
l'étude des systématiques

# Impact de la variance des comptages en cosmologie 44

Données SZ

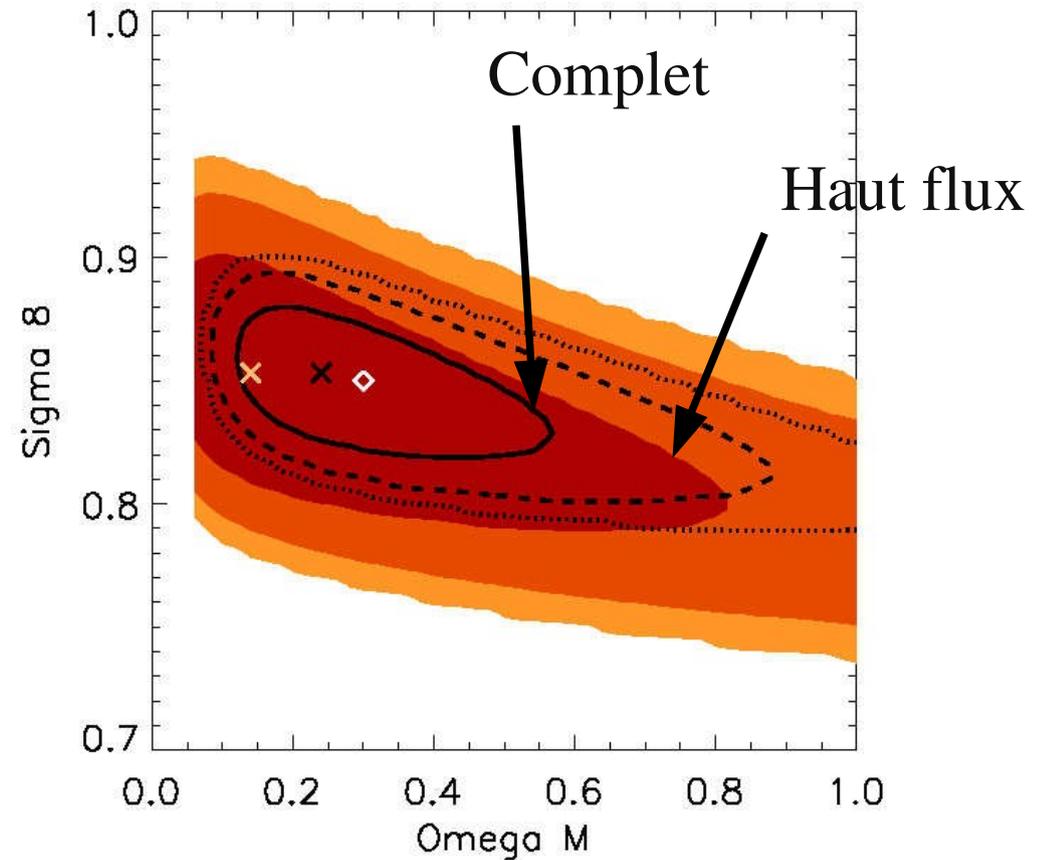
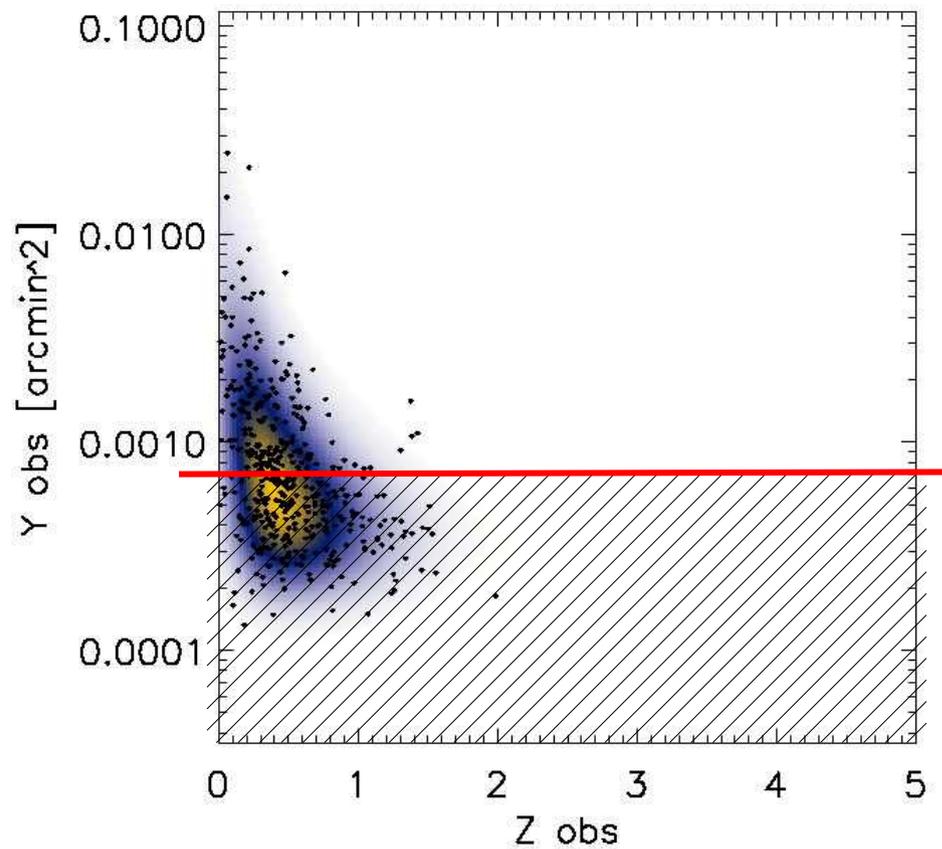
On considère l'information sur le nombre de détection



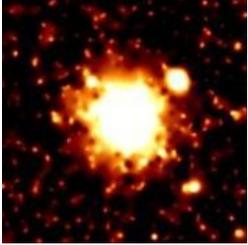


# Impact des observations d'amas de faible flux<sup>45</sup>

Physique des amas de basse masse est incertaine:  
**On ne considère que les sources brillantes pour une estimation robuste**



**Augmentation significative des erreurs**  
**Comprendre les amas de basse masse**

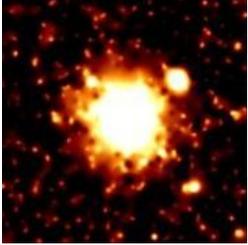


## Préparation à l'analyse des données SZ de 2006-2008

- 1 Détection performante d'amas SZ
- 2 Chaîne cohérente d'étude des effets de sélection
- 3 Phénoménologie de la détection des amas SZ

### A retenir

1. Il faut des outils d'analyse adaptés: détection et estimation des paramètres
2. Indépendance, au premier ordre, du modèle d'observation avec la cosmologie
3. **Attention** au nombre effectif de détections
4. Champ commun d'observation SZ-X (Physique interne et cosmo.)
5. Un modèle complet permet d'exploiter l'information des amas de bas flux



- 1 **Extraire l'information cosmologique de la corrélation amas-amas**  
Mei & Bartlett  
(2004)
- 2 **Co-analyse d'observations grand champ SZ-X-weak shear**

## Simulation d'instrument

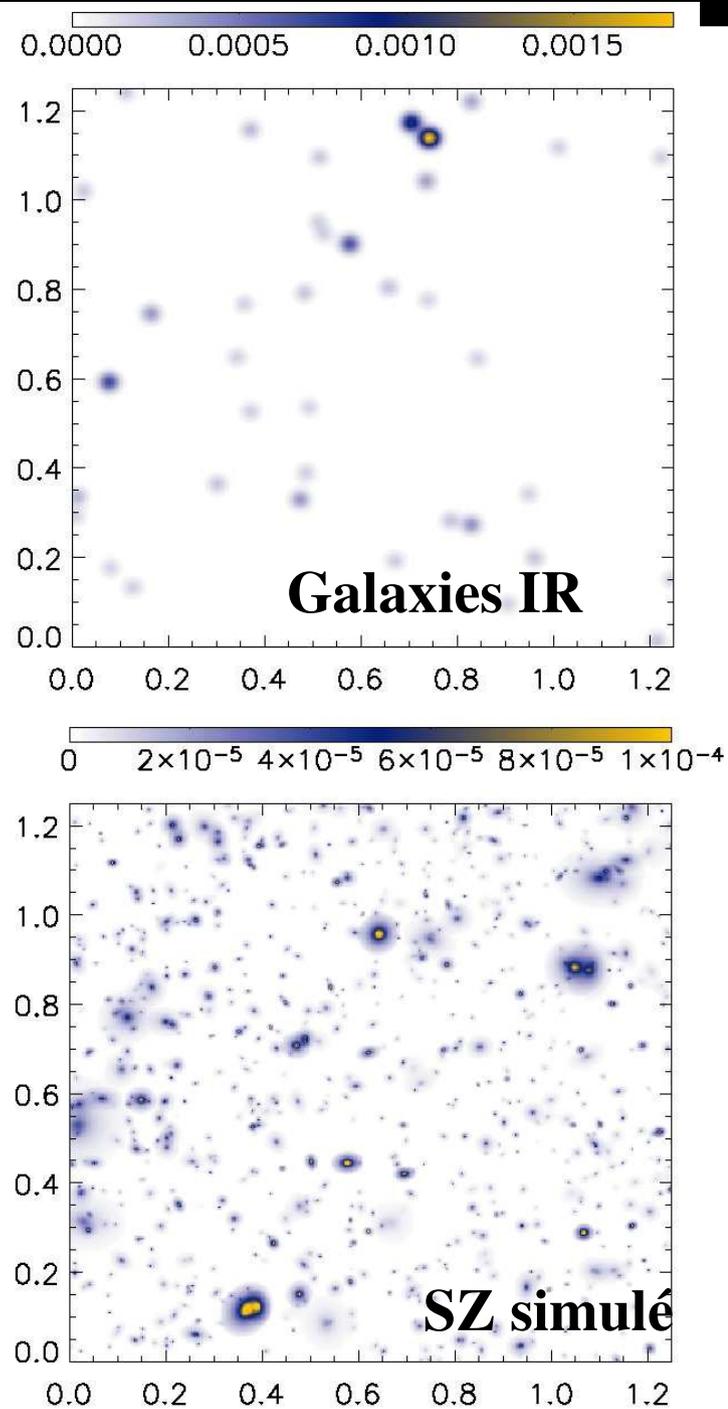
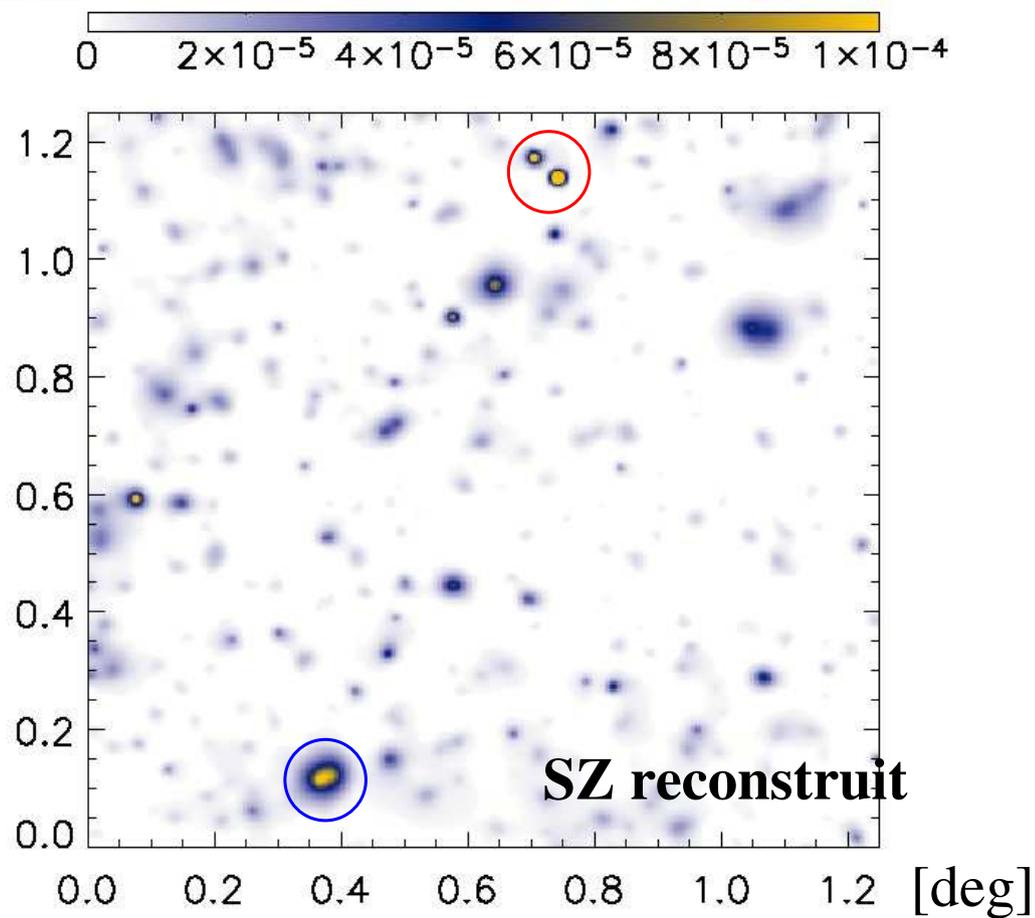
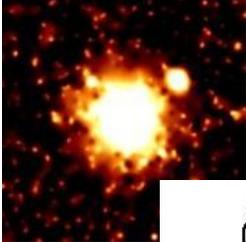
TOD (bruit  $1/f$ , bruit non-uniforme, lobe asymétrique)

## Détection d'amas

Améliorer les méthodes

Robustesse vis-a-vis de la corrélation amas-amas et amas-galaxies IR

Photométrie avec *a priori* sur la forme des amas



- Efficacité de la séparation avec hautes fréquences
- Traiter les galaxies IR par d'autres méthodes
  - Suivi complémentaire IR ?
  - Critères photométriques ?



Je remercie toutes les personnes  
qui, de près ou de loin, ont participé à cette étude !