

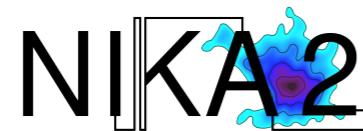


Cosmologie à partir des observations Sunyaev-Zeldovich d'amas de galaxies avec NIKA2

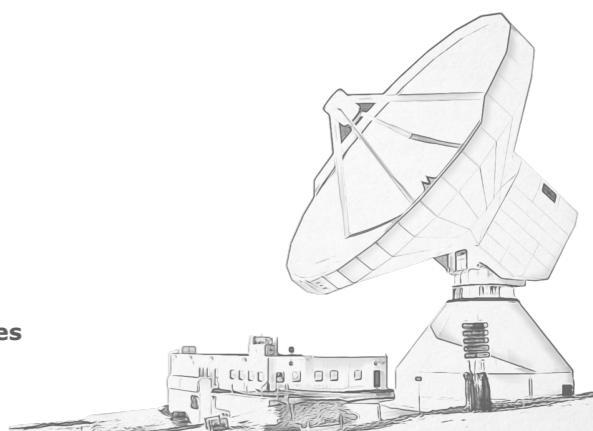
Florian Kéruzoré

Soutenance de thèse, 27 Septembre 2021

Thèse dirigée par Frédéric Mayet



financé par
IDEX Université Grenoble Alpes



Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

Travail de thèse

3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
4. Mesures des propriétés d'un amas distant peu massif
5. La relation d'échelle masse-observable dans le grand programme SZ

Conclusions

Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

Travail de thèse

3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
4. Mesures des propriétés d'un amas distant peu massif
5. La relation d'échelle masse-observable dans le grand programme SZ

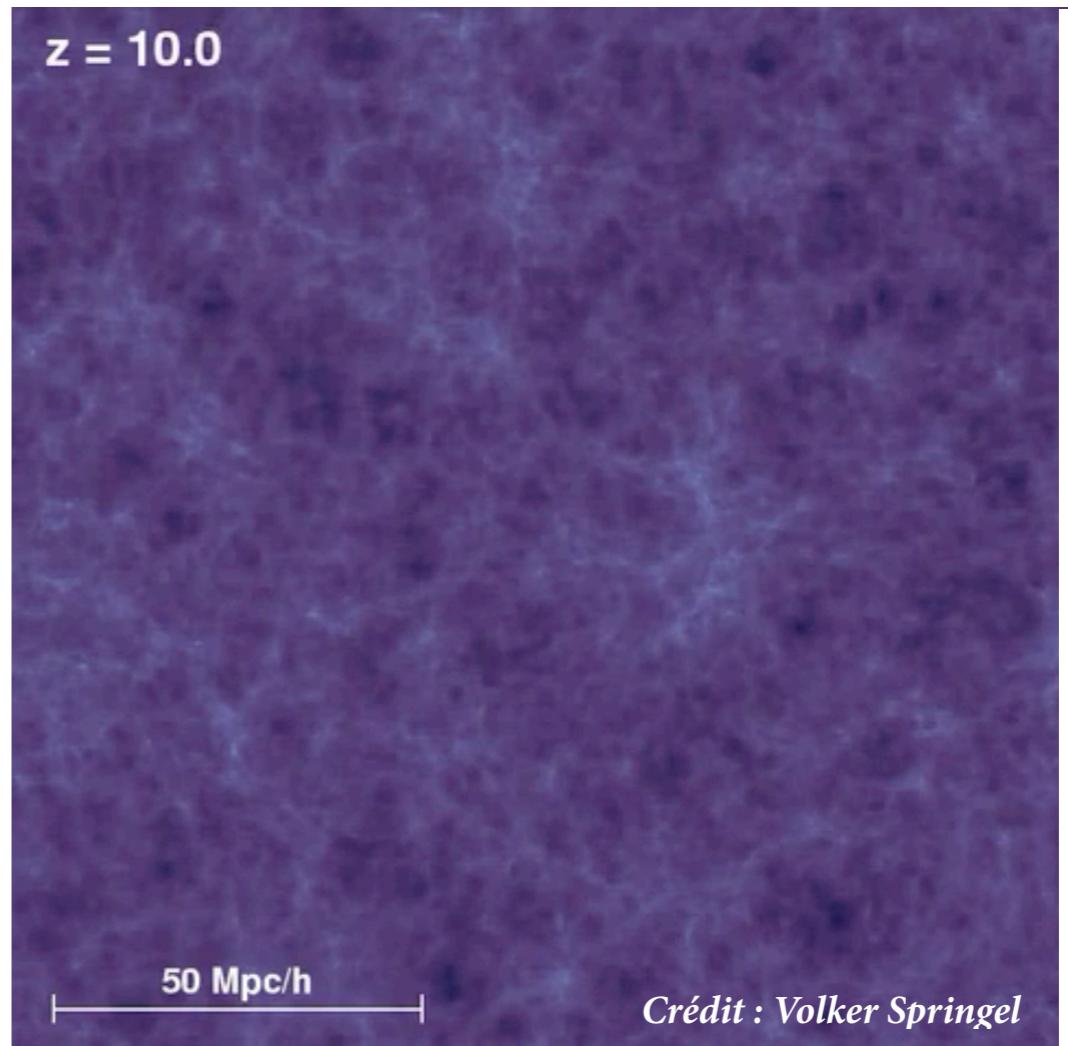
Conclusions

- Formation des grandes structures de l’Univers :
 - Effondrement gravitationnel autour des surdensités
 - Accrétion de matière environnante
 → Structure en filaments : toile cosmique

- Intersection des filaments = amas de galaxies
 - Tracent la distribution de matière dans l’Univers
 - Composition :
 - Galaxies (~3%)
 - Matière sombre (~85%)
 - Gaz chaud ionisé = milieu intra amas (~12%)

- Taille et masse des amas :

- Rayon caractéristique R_{500}
 - Rayon contenant une densité moyenne de $500 \rho_{\text{crit}}$
 - $R_{500} \sim \text{Mpc}$
- Masse caractéristique M_{500}
 - Masse contenue dans R_{500}
 - $M_{500} \sim 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$

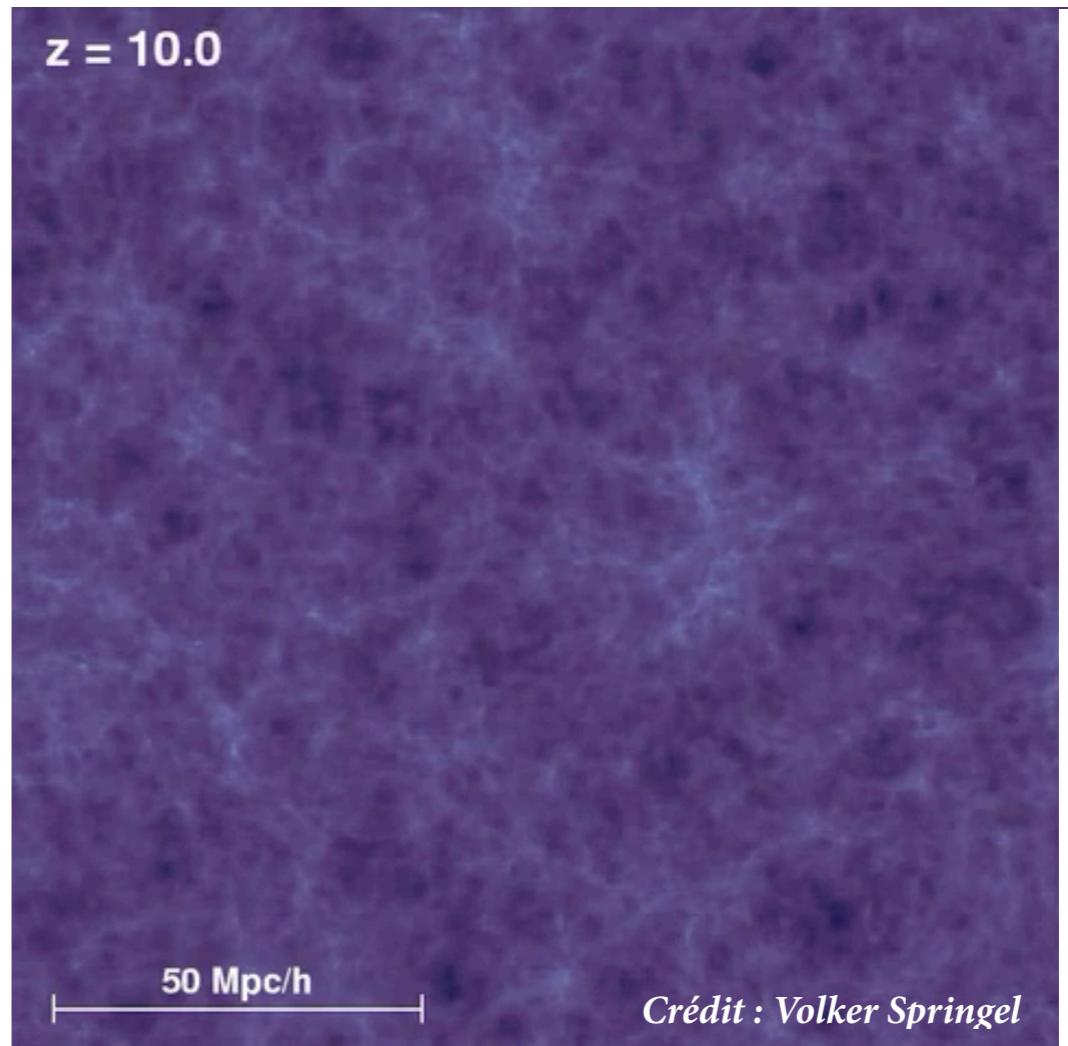


- Formation des grandes structures de l’Univers :
 - Effondrement gravitationnel autour des surdensités
 - Accrétion de matière environnante
 → Structure en filaments : toile cosmique

- Intersection des filaments = amas de galaxies
 - Tracent la distribution de matière dans l’Univers
 - Composition :
 - Galaxies (~3%)
 - Matière sombre (~85%)
 - Gaz chaud ionisé = milieu intra amas (~12%)

- Taille et masse des amas :

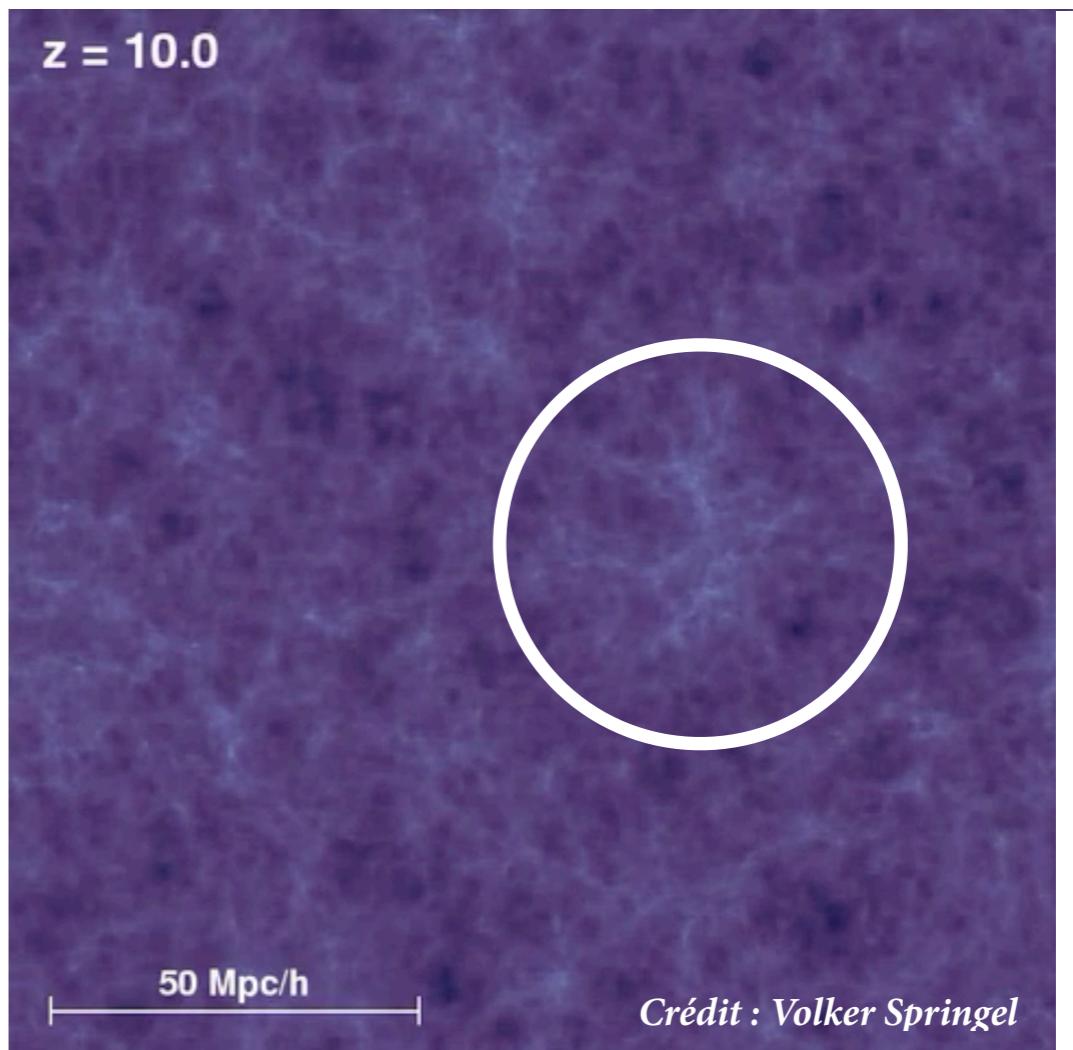
- Rayon caractéristique R_{500}
 - Rayon contenant une densité moyenne de $500 \rho_{\text{crit}}$
 - $R_{500} \sim \text{Mpc}$
- Masse caractéristique M_{500}
 - Masse contenue dans R_{500}
 - $M_{500} \sim 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$



- Formation des grandes structures de l’Univers :
 - Effondrement gravitationnel autour des surdensités
 - Accrétion de matière environnante
 → Structure en filaments : toile cosmique

- Intersection des filaments = amas de galaxies
 - Tracent la distribution de matière dans l’Univers
 - Composition :
 - Galaxies (~3%)
 - Matière sombre (~85%)
 - Gaz chaud ionisé = milieu intra amas (~12%)

- Taille et masse des amas :
 - Rayon caractéristique R_{500}
 - Rayon contenant une densité moyenne de $500 \rho_{\text{crit}}$
 - $R_{500} \sim \text{Mpc}$
 - Masse caractéristique M_{500}
 - Masse contenue dans R_{500}
 - $M_{500} \sim 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$

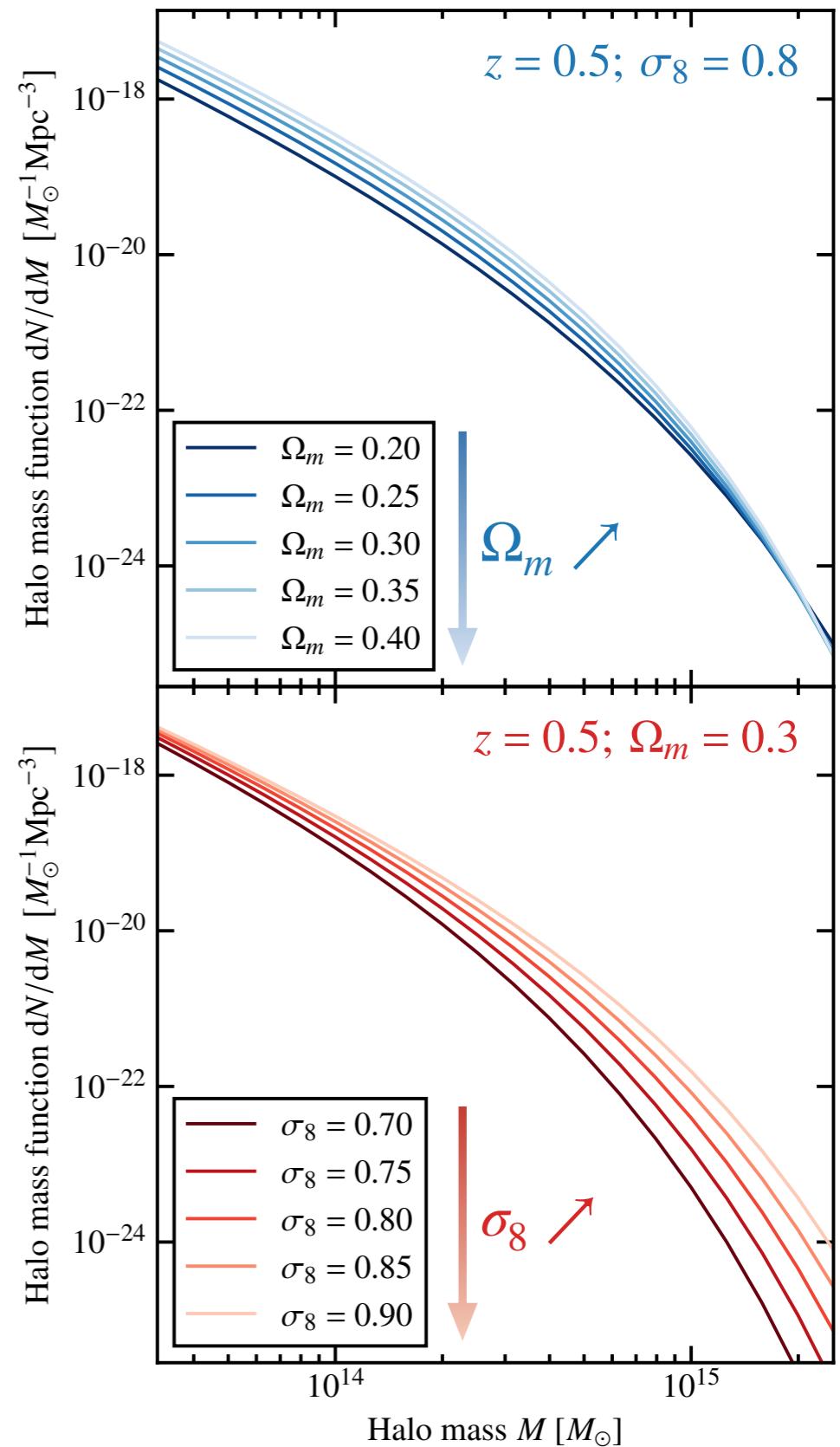


Cosmologie et distribution d'amas de galaxies

- Distribution en masse et redshift d'amas dans l'Univers
 - Dépend des propriétés de l'Univers : **paramètres cosmologiques**
 - Ω_m = Abondance de matière
 - σ_8 = Fluctuation de densité moyenne dans 8 Mpc/h
 - ...
- $\Omega_m \nearrow$: **Plus de matière dans l'Univers**
 - Plus d'amas de faible masse
- $\sigma_8 \nearrow$: **Plus de fluctuation de densité dans l'Univers**
 - Plus d'amas de haute masse
- Comparaison des comptages d'amas **observé vs théorique**
 - **Ajustement des paramètres cosmologiques**

Il faut de grands relevés d'amas de masse connue

Planck, ACT, SPT: $\mathcal{O}(10^3)$ amas détectés

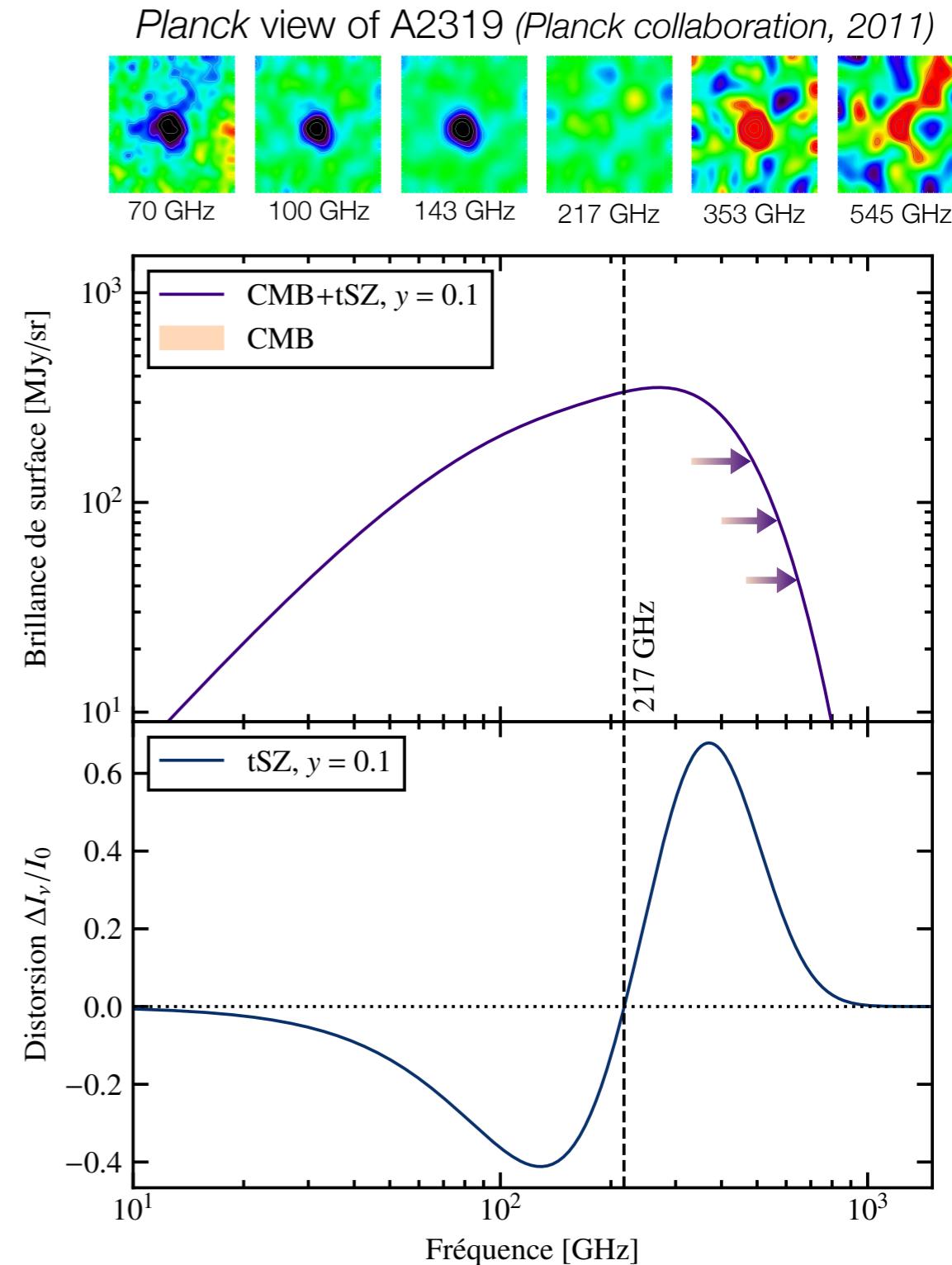


5 L'effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)

- Distorsion spectrale du fond diffus cosmologique (**CMB**)
 - Diffusion de **Compton inverse** sur les électrons du milieu intra-amas (**ICM, intracluster medium**)
 - **Gain d'énergie des photons**
 - Décrément du signal du CMB à basse fréquence
 - **Incrément** à haute fréquence
- **Amplitude de l'effet SZ = paramètre de Compton**

$$y = \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int_{\text{LdV}} P_e dl$$

- **Pression** de l'ICM intégrée le long de la ligne de visée
- Ne dépend pas du redshift
 - Observation d'amas distants

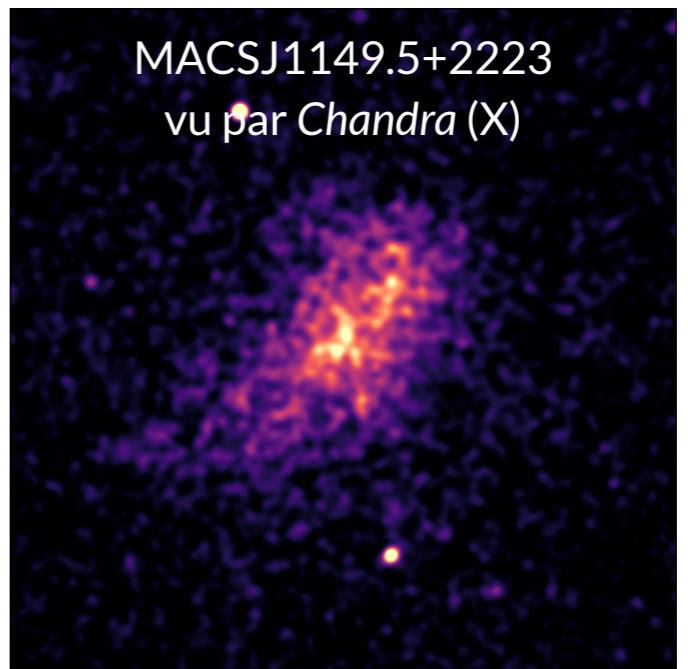


⑥ Observations en X

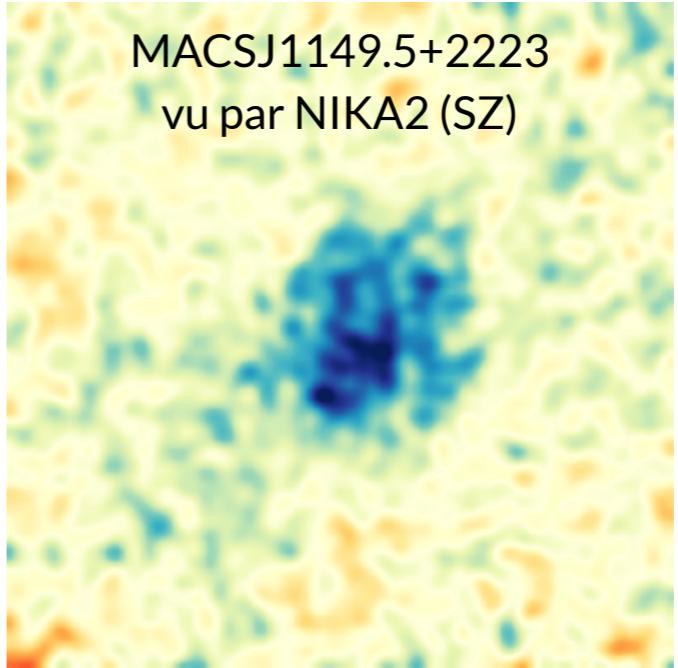
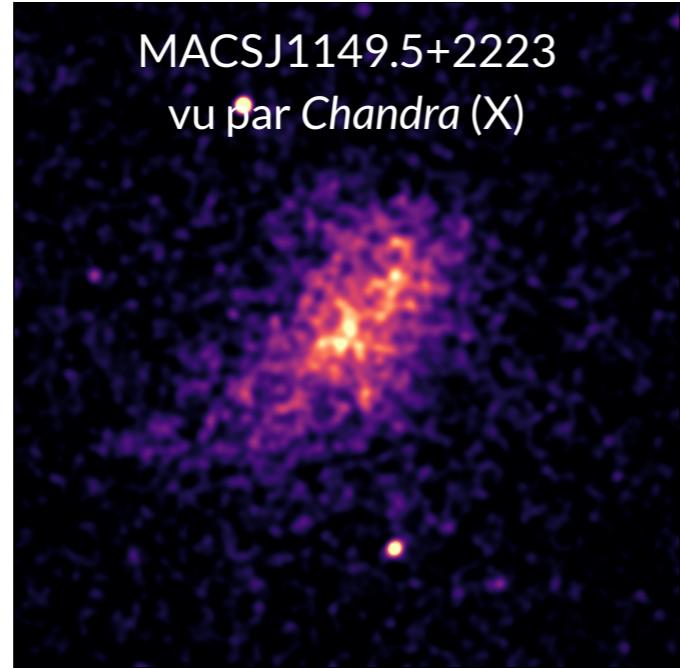
Émission X du milieu intra-amas par *bremsstrahlung* :

$$S_X \propto (1 + z)^{-4} \int_{\text{LdV}} \Lambda n_e^2 d\ell$$

- Permet de mesurer la **densité** des électrons de l'ICM : n_e
- Observations profondes : mesures de **spectroscopie X**
 - **Température** de l'ICM : T_e
- Principal inconvénient : forte dépendance en redshift
 - Observations X difficiles pour les amas lointains
 - Surtout spectroscopie



Cosmologie : besoin des masses des amas



Masse hydrostatique des amas de galaxies :

- Hypothèse d'équilibre hydrostatique :
- Densité n_e mesurée en X
- Pression P_e mesurée :
 - en X : $P_e = n_e k_B T_e$ Requiert spectro → amas proches
 - en SZ

$$M() \propto \frac{r^2}{n_e} \frac{dP_e}{dr}$$

X + SZ = mesures de masse d'amas lointains

Relation d'échelle masse-observable SZ

- Masse hydrostatique non-mesurable dans un relevé SZ

Amas distants non-résolus + suivis X complets impossibles

→ Besoin d'estimer les masses à partir d'**observables**

- **Observable des relevés SZ : paramètre de Compton intégré**

- $Y_{500} \propto \int^{R_{500}} P_e(r) r^2 dr$

- Corrélé à la masse des amas

→ **Relation d'échelle masse-observable** $Y_{500} = f(M_{500})$

- Étalonnage de la relation d'échelle :

- Sur de petits échantillons d'amas suivis

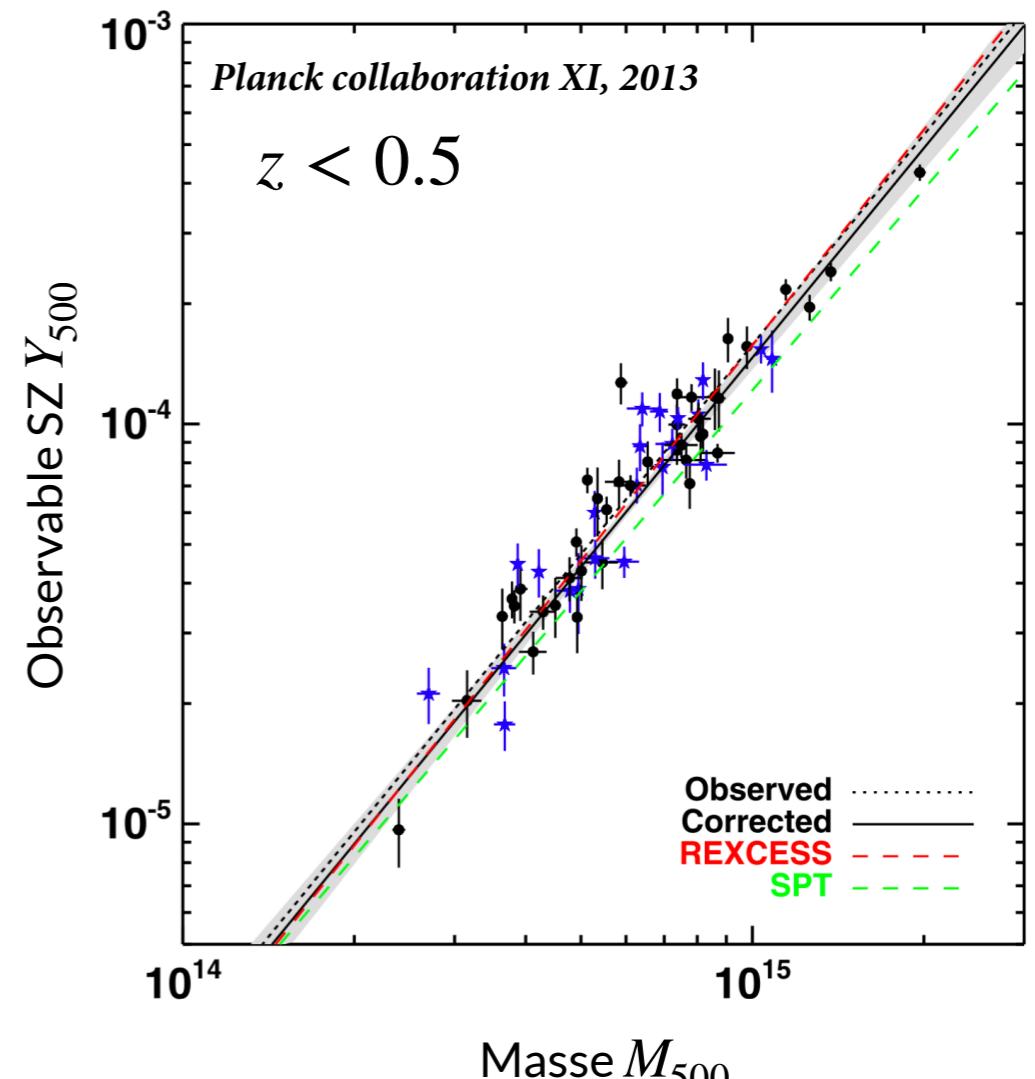
- Mesures actuelles : Suivis X seuls

Spectroscopie requise : limité aux amas proches

- SZ haute résolution : plus besoin de spectroscopie X

- Amas plus distants

- Mieux caractérisés



Relation d'échelle SZ haute résolution + X

Les analyses cosmologiques basées sur des comptages d'amas requièrent:

- De grands relevés SZ d'amas
 - Objectifs : détecter et compter des amas
 - Caractéristiques : Observations basse résolution, grandes statistiques
 - Instruments : *Planck*, ACT, SPT, ... CMB-S4
 - Produits finaux : paramètres cosmologiques

Les analyses cosmologiques basées sur des comptages d'amas requièrent:

- De grands relevés SZ d'amas
 - Objectifs : détecter et compter des amas
 - Caractéristiques : Observations basse résolution, grandes statistiques
 - Instruments : *Planck*, ACT, SPT, ... CMB-S4
 - Produits finaux : paramètres cosmologiques

- De petits échantillons d'amas
 - Objectifs : cartographier et étudier les propriétés & systématiques
 - Caractéristiques : haute résolution, suivis dédiés
 - Instruments : NIKA2, MUSTANG2, ...
 - Produits finaux : Outils pour la cosmologie avec les relevés
e.g. Relation d'échelle masse-observable

Les analyses cosmologiques basées sur des comptages d'amas requièrent:

- De grands relevés SZ d'amas
 - Objectifs : détecter et compter des amas
 - Caractéristiques : Observations basse résolution, grandes statistiques
 - Instruments : *Planck*, ACT, SPT, ... CMB-S4
 - Produits finaux : paramètres cosmologiques

- De petits échantillons d'amas
 - Objectifs : cartographier et étudier les propriétés & systématiques
 - Caractéristiques : haute résolution, suivis dédiés
 - Instruments : NIKA2, MUSTANG2, ...
 - Produits finaux : Outils pour la cosmologie avec les relevés
e.g. Relation d'échelle masse-observable



Les analyses cosmologiques basées sur des comptages d'amas requièrent:

- De grands relevés SZ d'amas
 - Objectifs : détecter et compter des amas
 - Caractéristiques : Observations basse résolution, grandes statistiques
 - Instruments : *Planck*, ACT, SPT, ... CMB-S4
 - Produits finaux : paramètres cosmologiques

- De petits échantillons d'amas
 - Objectifs : cartographier et étudier les propriétés & systématiques
 - Caractéristiques : haute résolution, suivis dédiés
 - Instruments : NIKA2, MUSTANG2, ...
 - Produits finaux : Outils pour la cosmologie avec les relevés
e.g. Relation d'échelle masse-observable



Grand programme SZ de NIKA2

Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

Travail de thèse

3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
4. Mesures des propriétés d'un amas distant peu massif
5. La relation d'échelle masse-observable dans le grand programme SZ

Conclusions

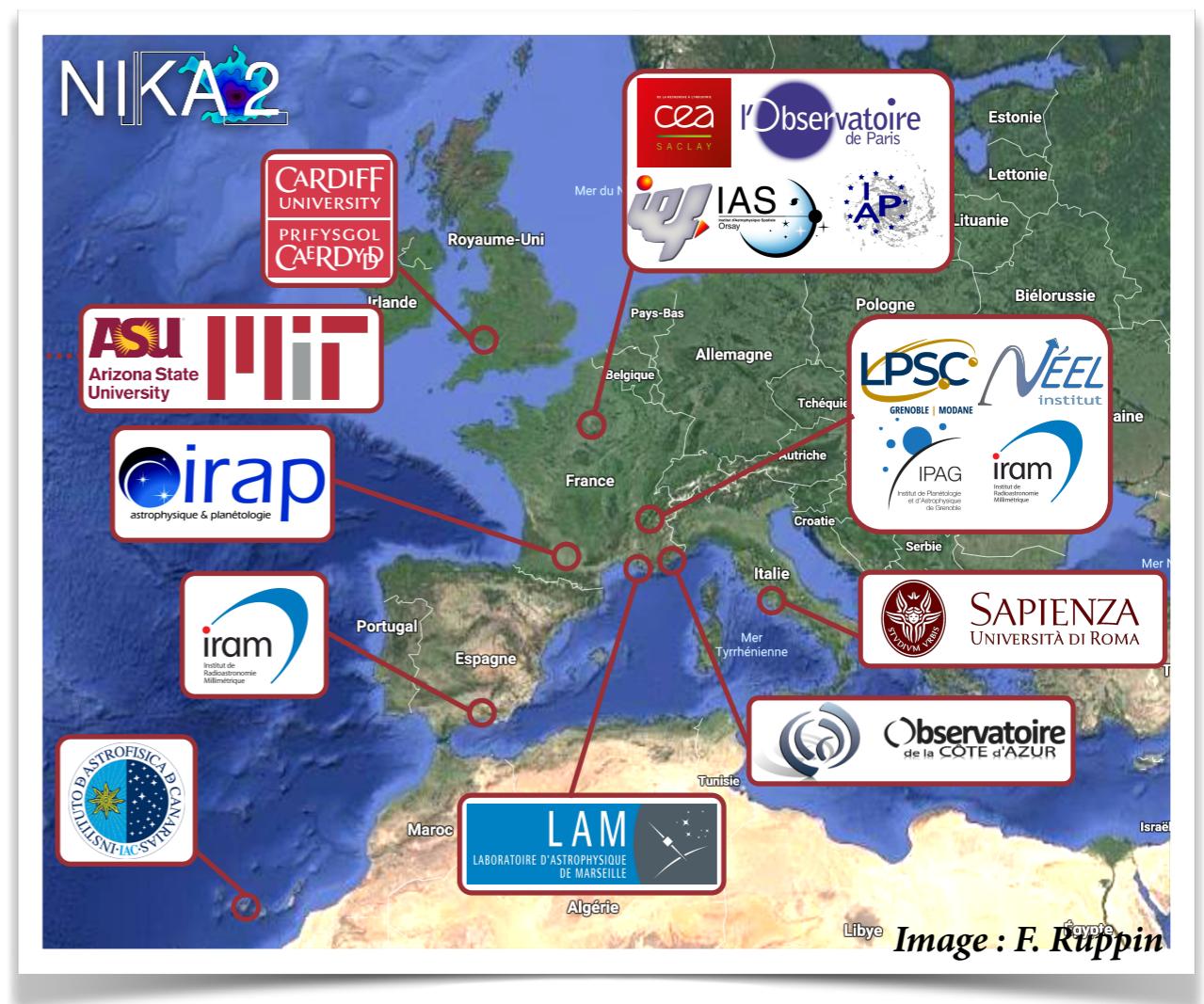
⑪ La collaboration NIKA2 et le grand programme SZ

La collaboration NIKA2

- Collaboration internationale
- Environ 150 membres
- Dirigée à Grenoble par l'Institut Néel, le LPSC, l'IPAG, l'IRAM
- A construit la caméra NIKA2 @ IRAM 30 m
→ 1300 h de temps d'observation garanti

Le grand programme SZ de NIKA2 (LPSZ)

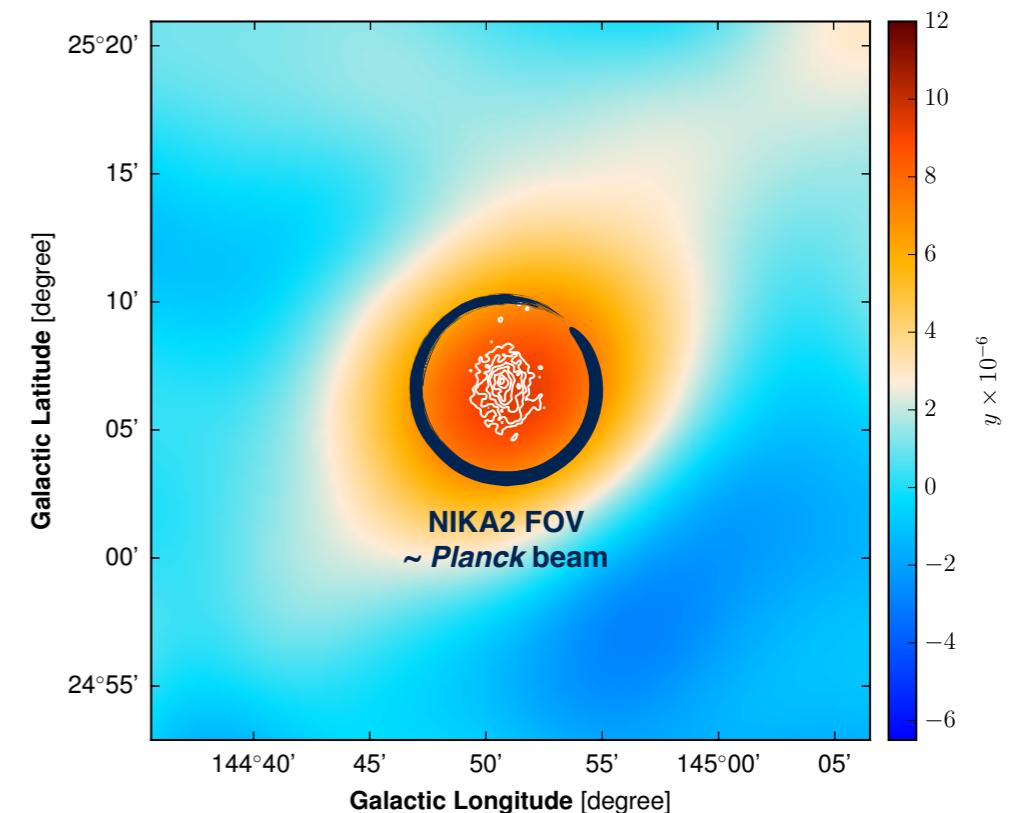
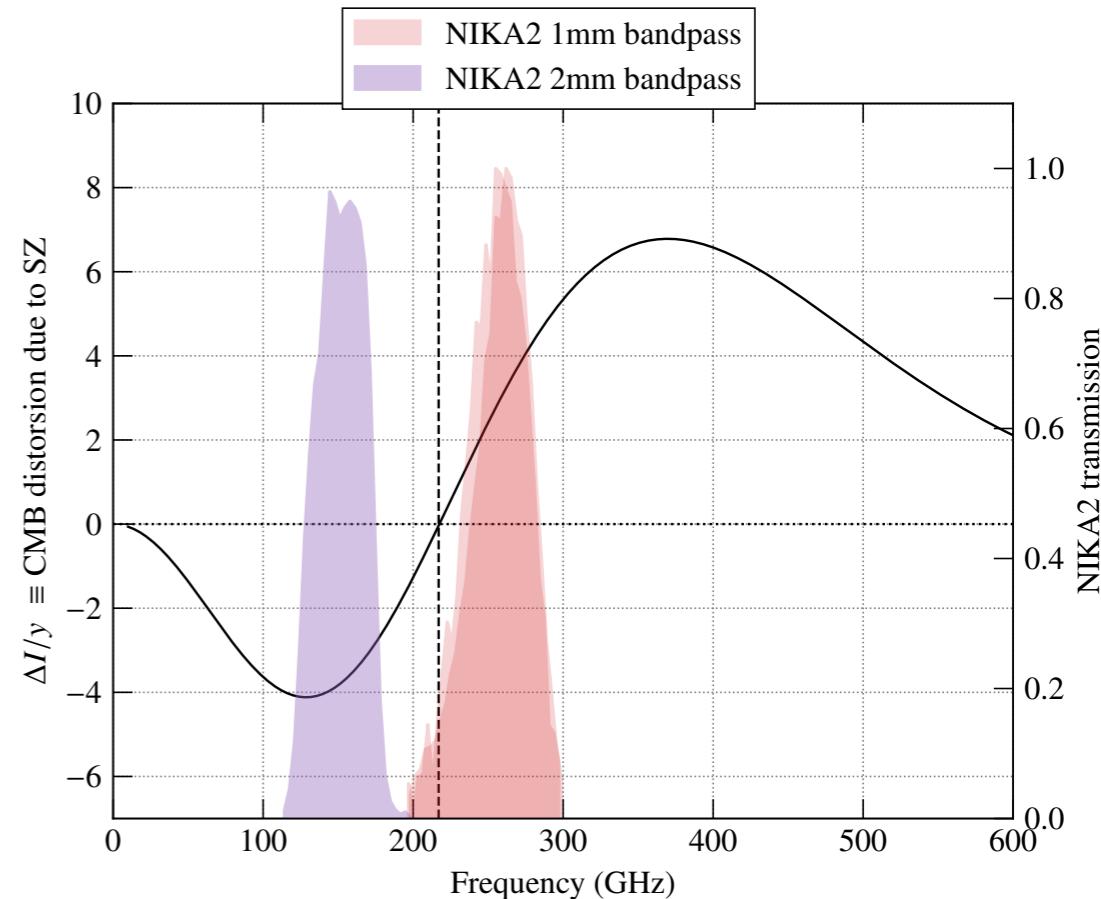
- Dirigé par le LPSC (F. Mayet, L. Perotto)
- 29 membres dans 13 laboratoires
→ 300 h de temps d'observation garanti



NIKA2 : un instrument idéal pour mesurer l'effet SZ

- Caméra millimétrique @ télescope de 30 m de l'IRAM
Sierra Nevada, Espagne
- Utilisant des détecteurs à inductance cinétique (KID)
- Adaptées aux observations SZ :
 - Deux bandes de fréquence
→ *Permet d'exploiter la signature spectrale de l'effet SZ*
 - Grande résolution angulaire
→ *Information détaillée sur la structure des amas*
 - Grand champ de vue
→ *Cartographie de régions étendues*
 - Très sensible
→ *Cartographie de signaux faibles*

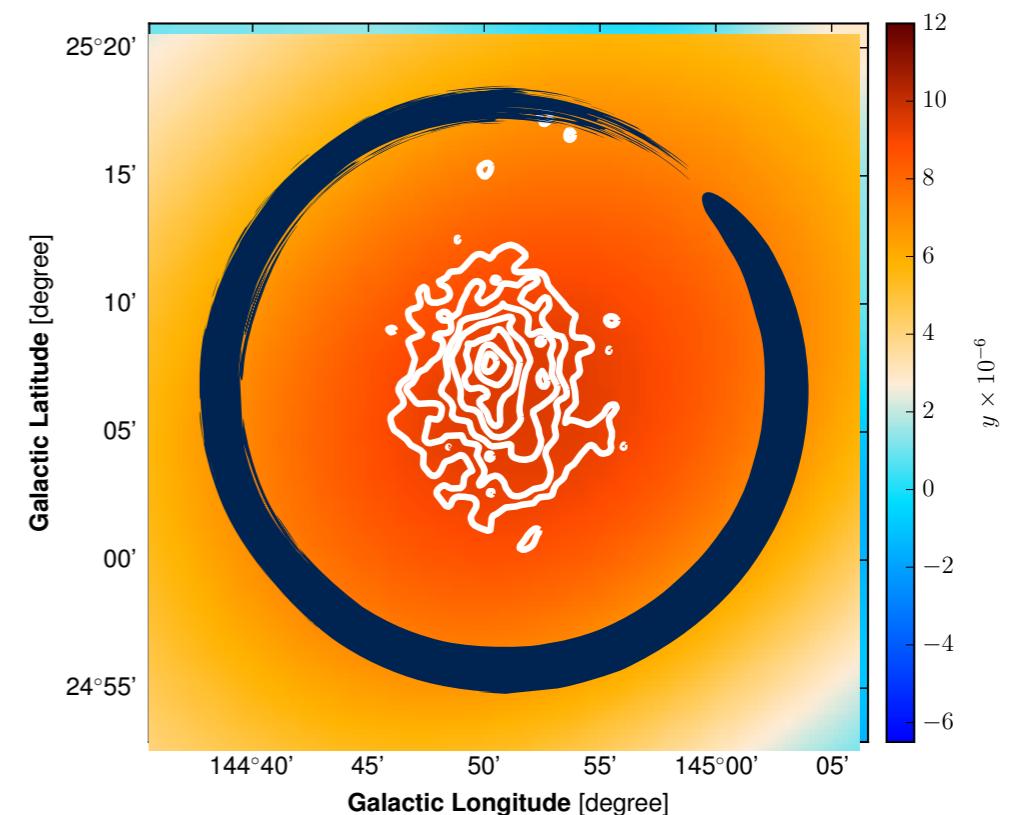
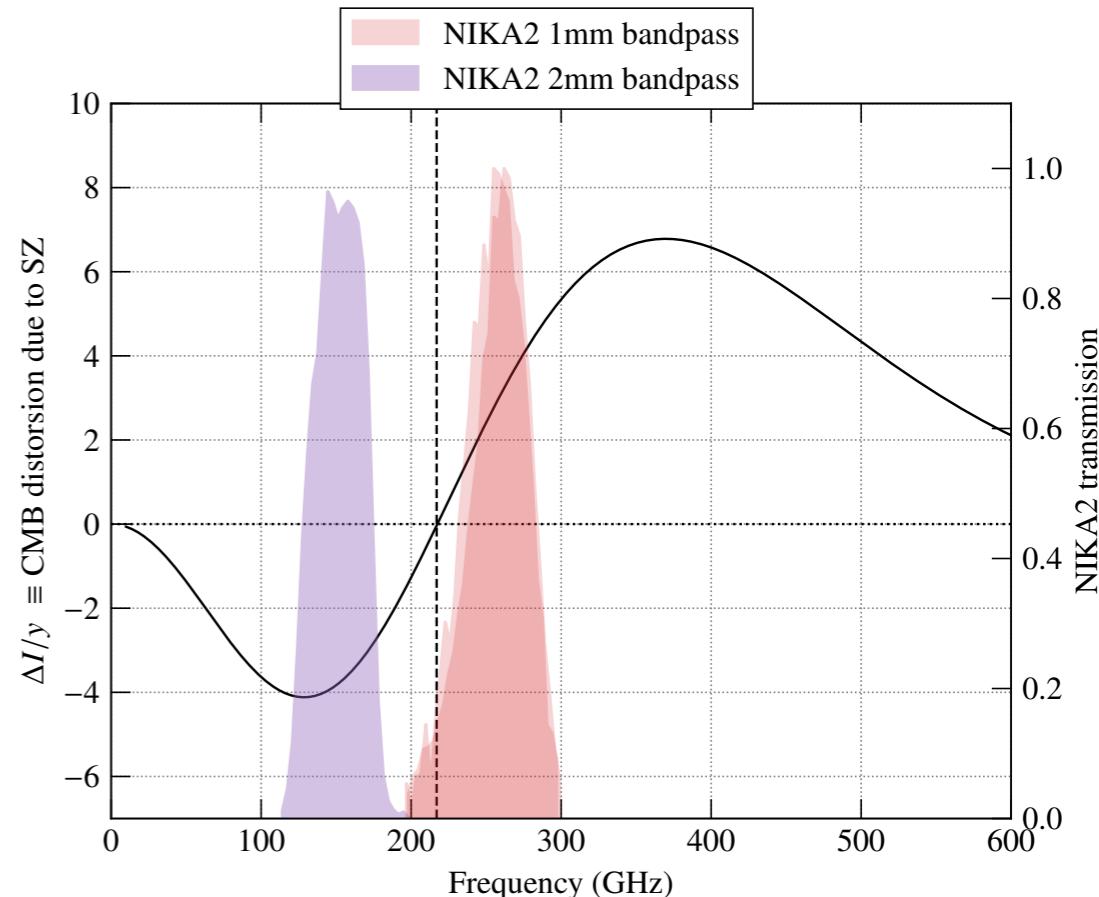
	1.2 mm	2 mm
✓ FWHM [arcsec]	11.1 ± 0.2	17.6 ± 0.1
✓ Field of view [arcmin]		6.5
✓ Sensitivity [$\text{mJy} \cdot \text{s}^{1/2}$]	30 ± 3	9 ± 1
✓ Mapping speed [$\text{arcmin}^2 \cdot \text{mJy}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$]	111 ± 11	1388 ± 174



NIKA2 : un instrument idéal pour mesurer l'effet SZ

- Caméra millimétrique @ télescope de 30 m de l'IRAM
Sierra Nevada, Espagne
- Utilisant des détecteurs à inductance cinétique (KID)
- Adaptées aux observations SZ :
 - Deux bandes de fréquence
→ *Permet d'exploiter la signature spectrale de l'effet SZ*
 - Grande résolution angulaire
→ *Information détaillée sur la structure des amas*
 - Grand champ de vue
→ *Cartographie de régions étendues*
 - Très sensible
→ *Cartographie de signaux faibles*

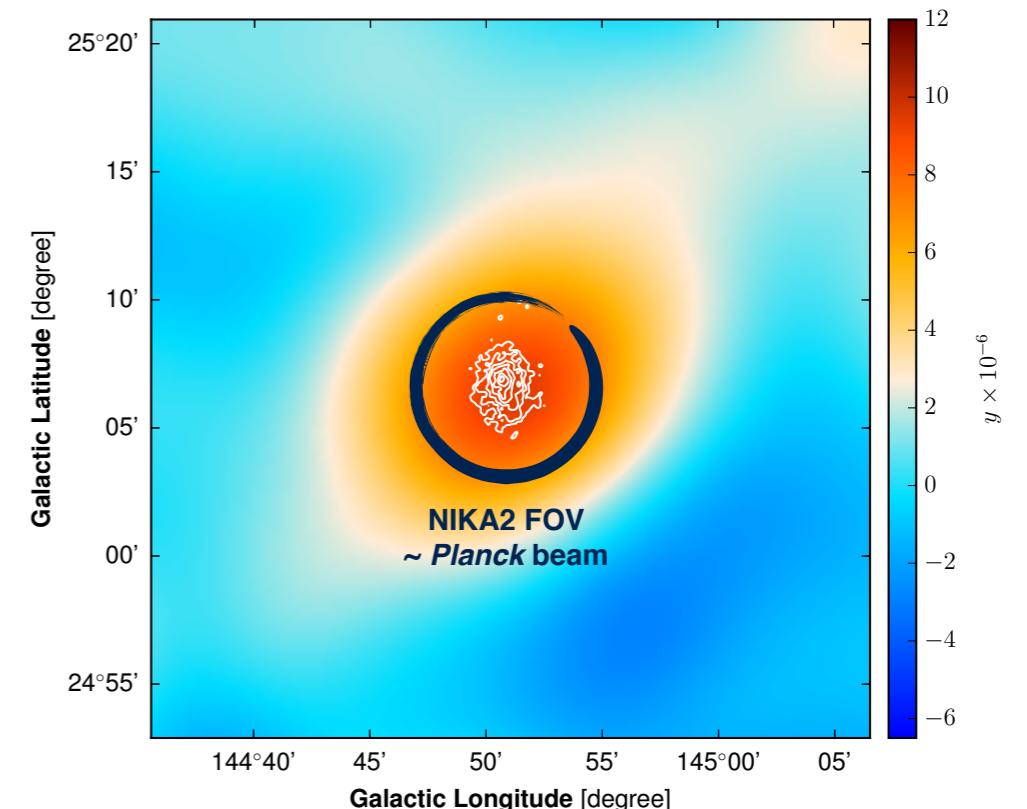
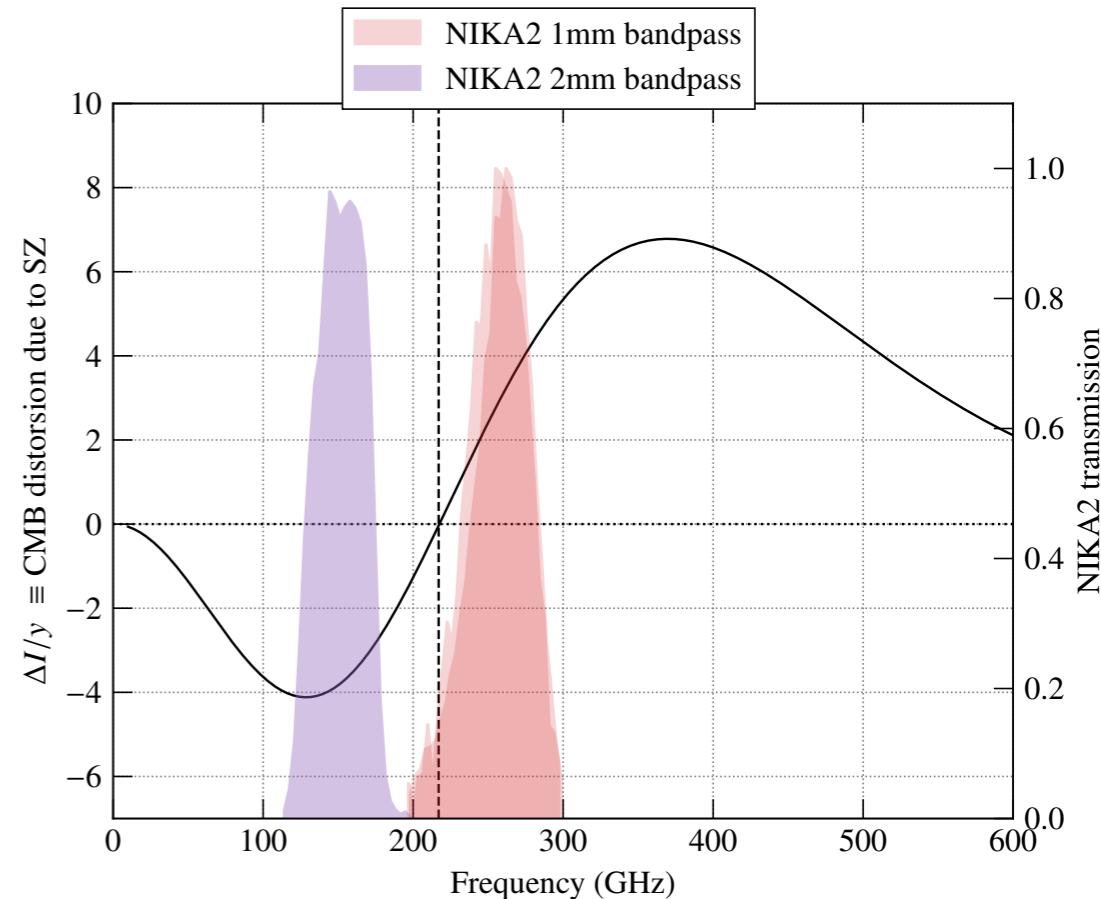
	1.2 mm	2 mm
✓ FWHM [arcsec]	11.1 ± 0.2	17.6 ± 0.1
✓ Field of view [arcmin]		6.5
✓ Sensitivity [$\text{mJy} \cdot \text{s}^{1/2}$]	30 ± 3	9 ± 1
✓ Mapping speed [$\text{arcmin}^2 \cdot \text{mJy}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$]	111 ± 11	1388 ± 174



NIKA2 : un instrument idéal pour mesurer l'effet SZ

- Caméra millimétrique @ télescope de 30 m de l'IRAM
Sierra Nevada, Espagne
- Utilisant des détecteurs à inductance cinétique (KID)
- Adaptées aux observations SZ :
 - Deux bandes de fréquence
→ *Permet d'exploiter la signature spectrale de l'effet SZ*
 - Grande résolution angulaire
→ *Information détaillée sur la structure des amas*
 - Grand champ de vue
→ *Cartographie de régions étendues*
 - Très sensible
→ *Cartographie de signaux faibles*

	1.2 mm	2 mm
✓ FWHM [arcsec]	11.1 ± 0.2	17.6 ± 0.1
✓ Field of view [arcmin]		6.5
✓ Sensitivity [$\text{mJy} \cdot \text{s}^{1/2}$]	30 ± 3	9 ± 1
✓ Mapping speed [$\text{arcmin}^2 \cdot \text{mJy}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$]	111 ± 11	1388 ± 174



Observations = balayage du ciel

- Évolution de la luminosité incidente avec le temps *Pour chaque détecteur*
- Résultat : données ordonnées en temps (TOI, *time-ordered information*)

Signal astrophysique Bruit électronique Glitches

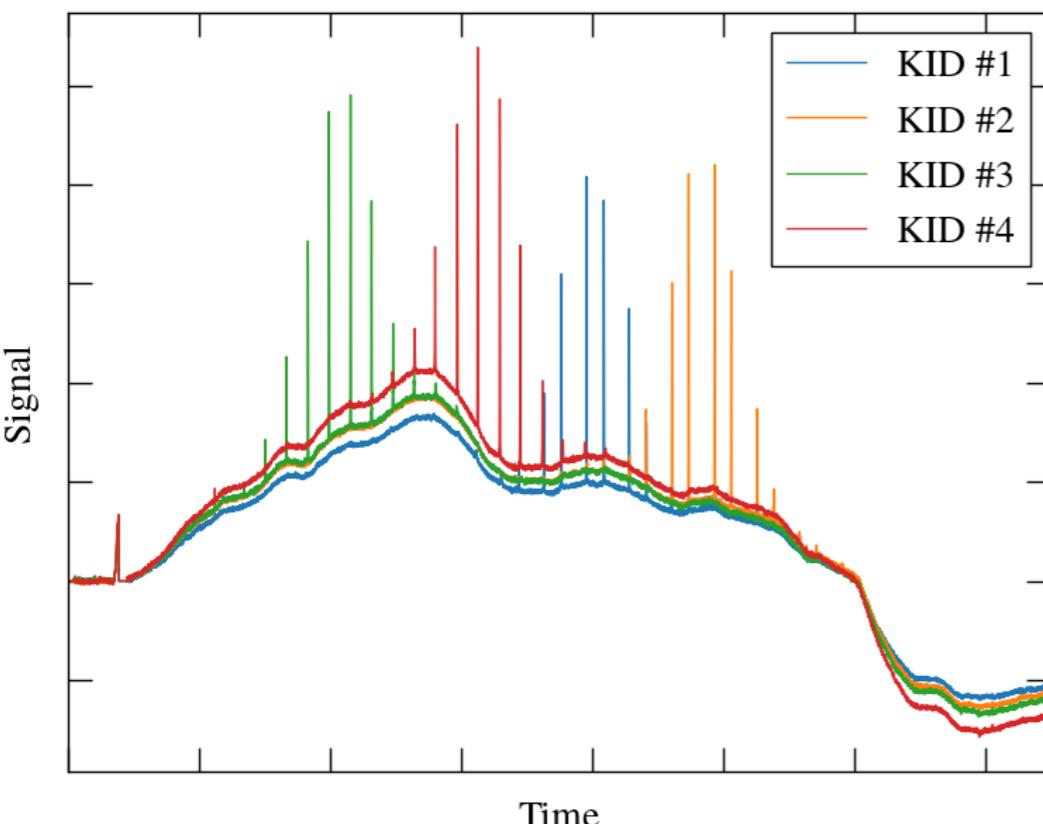
$$\text{TOI}(t) = S(t) + A(\nu, t) + E(t) + N(t) + G(t) + C(t)$$

Émission atmosphérique

Bruit des détecteurs

Vibrations du cryostat

- Bruit atmosphérique dominant → doit être retiré



- À chaque instant, les détecteurs voient :
 - **Bruit atmosphérique identique**
 - **Signal astrophysique différent**
- Bruit = mode commun des TOI
- Soustrait des données → TOI dominées par le signal
- Les données nettoyées sont projetées sur une carte



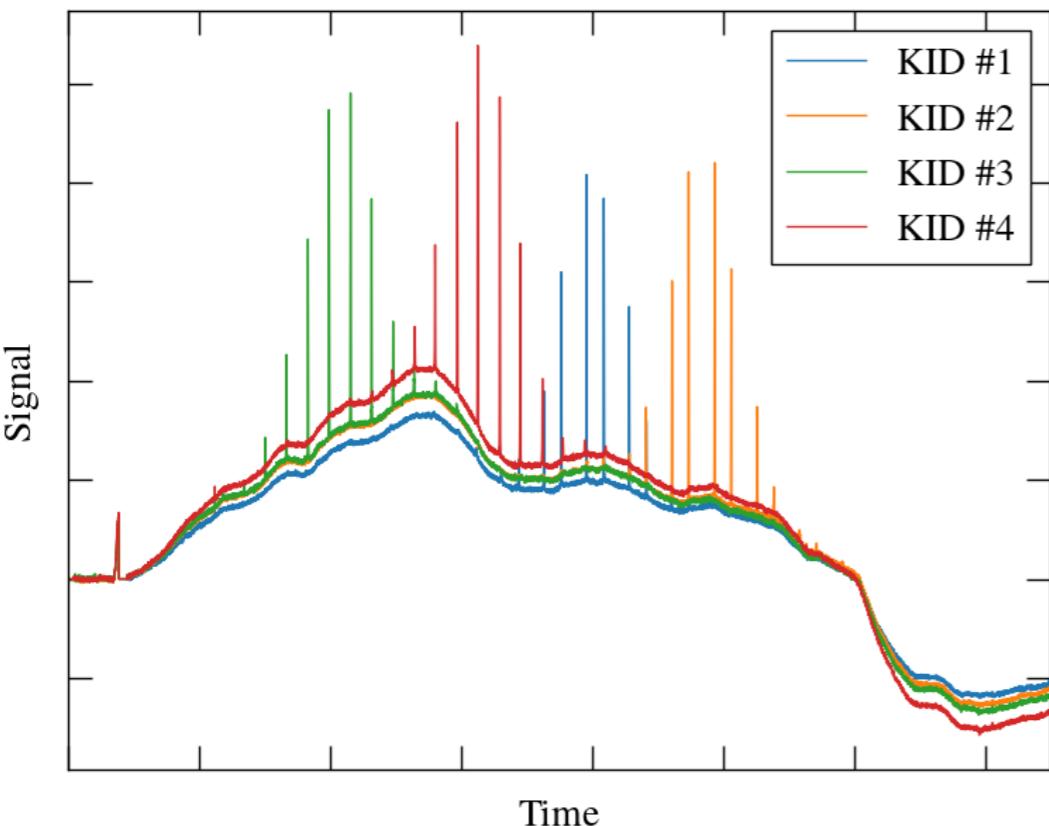
Observations = balayage du ciel

- Évolution de la luminosité incidente avec le temps *Pour chaque détecteur*
- Résultat : données ordonnées en temps (TOI, *time-ordered information*)

$$\text{TOI}(t) = S(t) + A(\nu, t) + E(t) + N(t) + G(t) + C(t)$$

Signal astrophysique Bruit électronique Glitches
 Émission atmosphérique Bruit des détecteurs Vibrations du cryostat

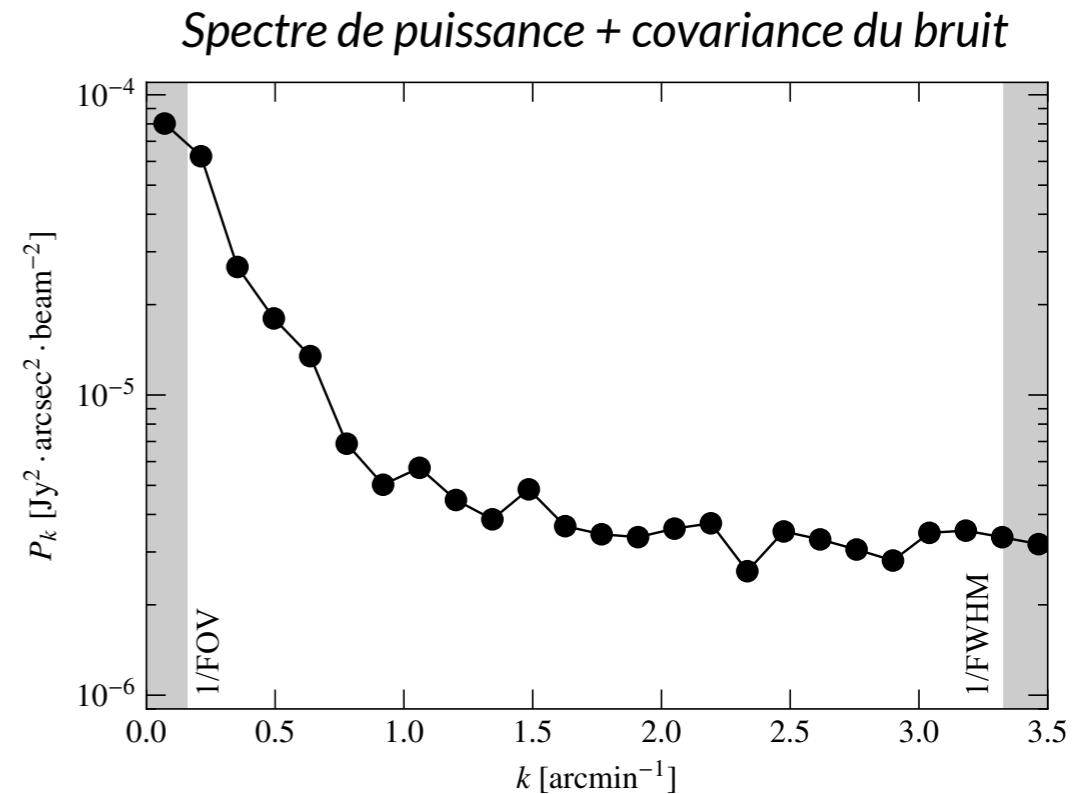
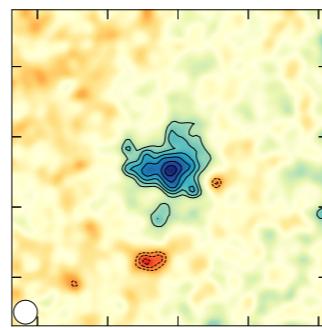
- Bruit atmosphérique dominant → doit être retiré



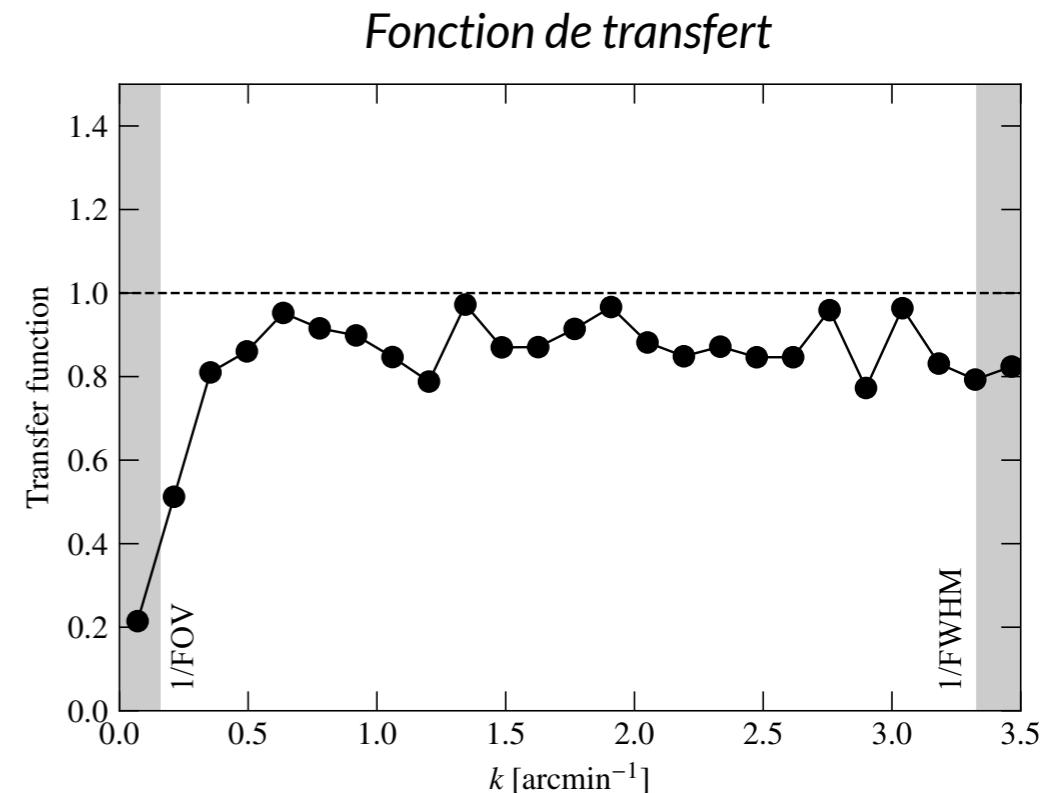
- À chaque instant, les détecteurs voient :
 - **Bruit atmosphérique identique**
 - **Signal astrophysique différent**
- Bruit = mode commun des TOI
- Soustrait des données → TOI dominées par le signal
- Les données nettoyées sont projetées sur une carte

Réduction des données : logiciel SZ_IMCM

- **Cartes NIKA2**
- **Spectre de puissance du bruit résiduel**
 - Évalué sur des cartes sans signal astrophysique
Cartes de demi-différence des scans
 - Quantifie le bruit restant dans les cartes
 - Utilisé pour calculer la **matrice de covariance du bruit**
- **Fonction de transfert**
 - Évaluée en analysant des simulations
 - Quantifie le filtrage subi par le signal lors de la soustraction du bruit
 - Doit être prise en compte pour comparer des modèles aux données

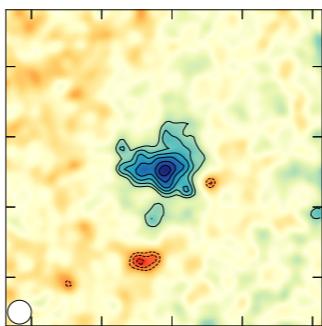


Matrice de covariance et fonction de transfert :
outils nécessaires à l'analyse correcte des données

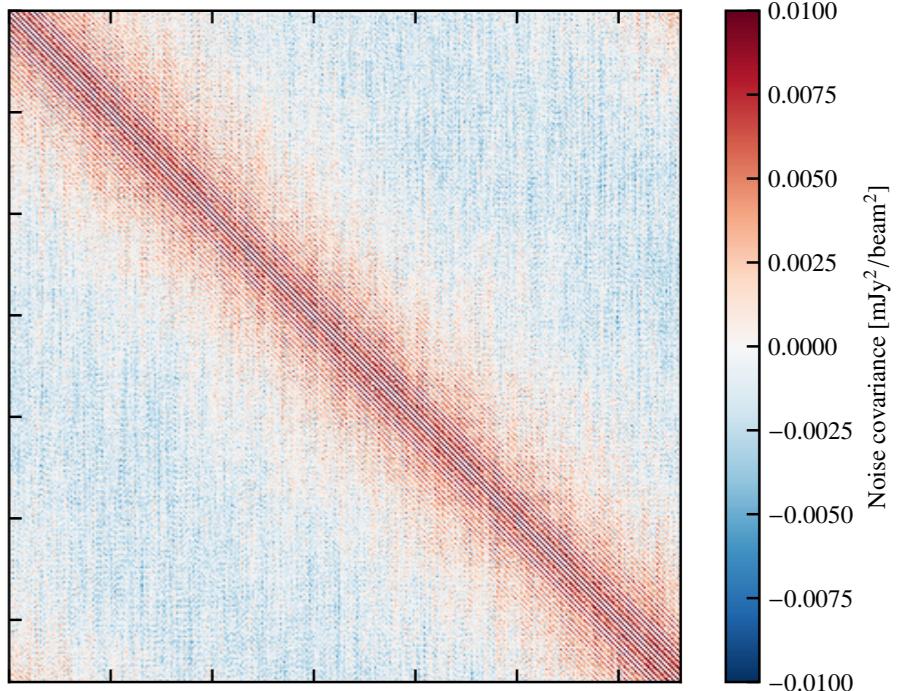


Réduction des données : logiciel SZ_IMCM

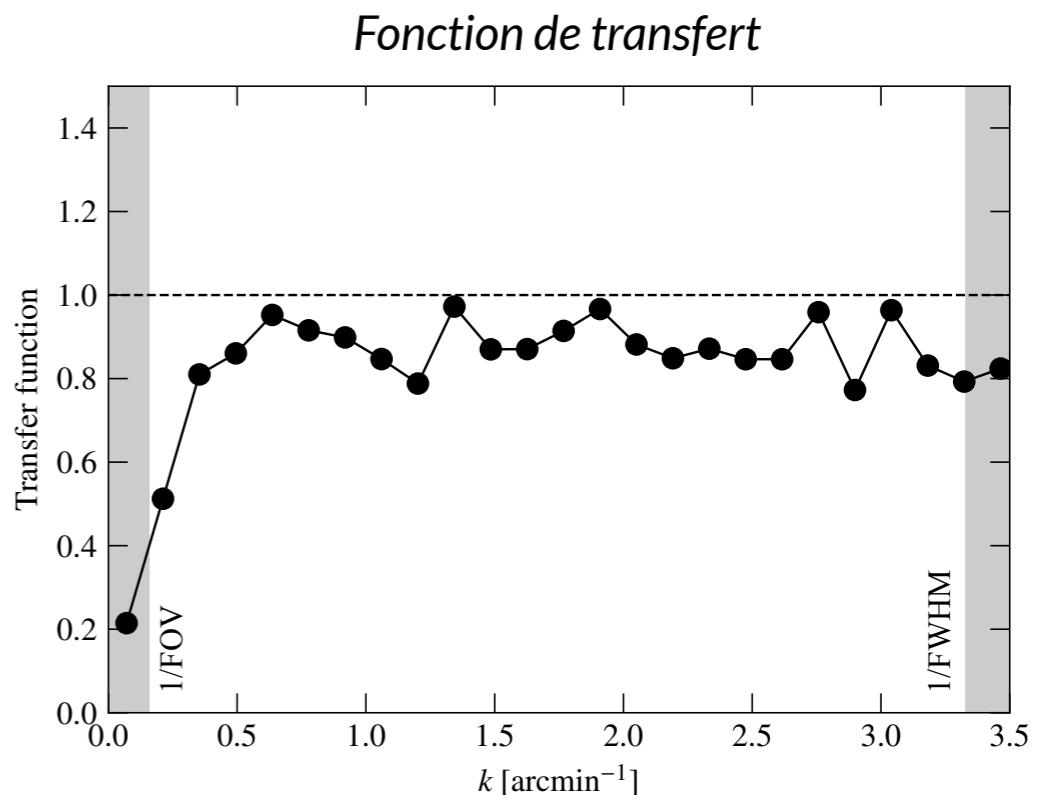
- **Cartes NIKA2**
- **Spectre de puissance du bruit résiduel**
 - Évalué sur des cartes sans signal astrophysique
Cartes de demi-différence des scans
 - Quantifie le bruit restant dans les cartes
 - Utilisé pour calculer la **matrice de covariance du bruit**
- **Fonction de transfert**
 - Évaluée en analysant des simulations
 - Quantifie le filtrage subi par le signal lors de la soustraction du bruit
 - Doit être prise en compte pour comparer des modèles aux données



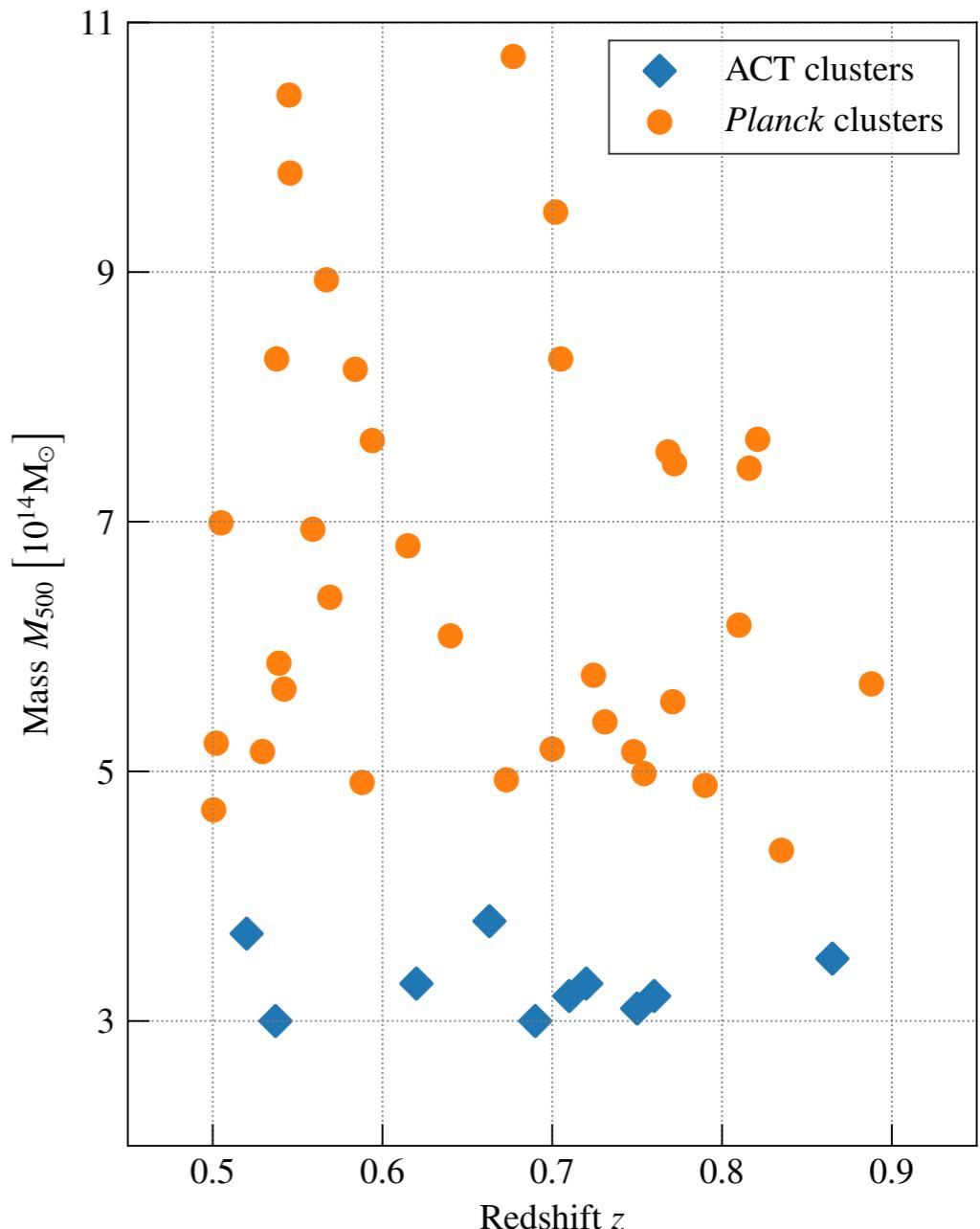
Spectre de puissance + covariance du bruit



Matrice de covariance et fonction de transfert : outils nécessaires à l'analyse correcte des données



- 300 h d'observation NIKA2 → Suivi SZ haute résolution
Combinaison avec X → information détaillée sur des amas distants
- Suivi de ~50 amas détectés dans des relevés SZ (Planck, ACT)
 - Amas à haut redshift : $z \in [0.5, 0.9]$
 - Grande couverture en masse : $M_{500} \in [3, 11] \times 10^{14} M_\odot$
- **Objectif :** outils nécessaires à la cosmologie SZ
 - Profil de pression moyen des amas
Nécessaire pour la détection dans les relevés SZ
 - Relation d'échelle masse-observable
Nécessaire pour l'exploitation cosmologique des relevés



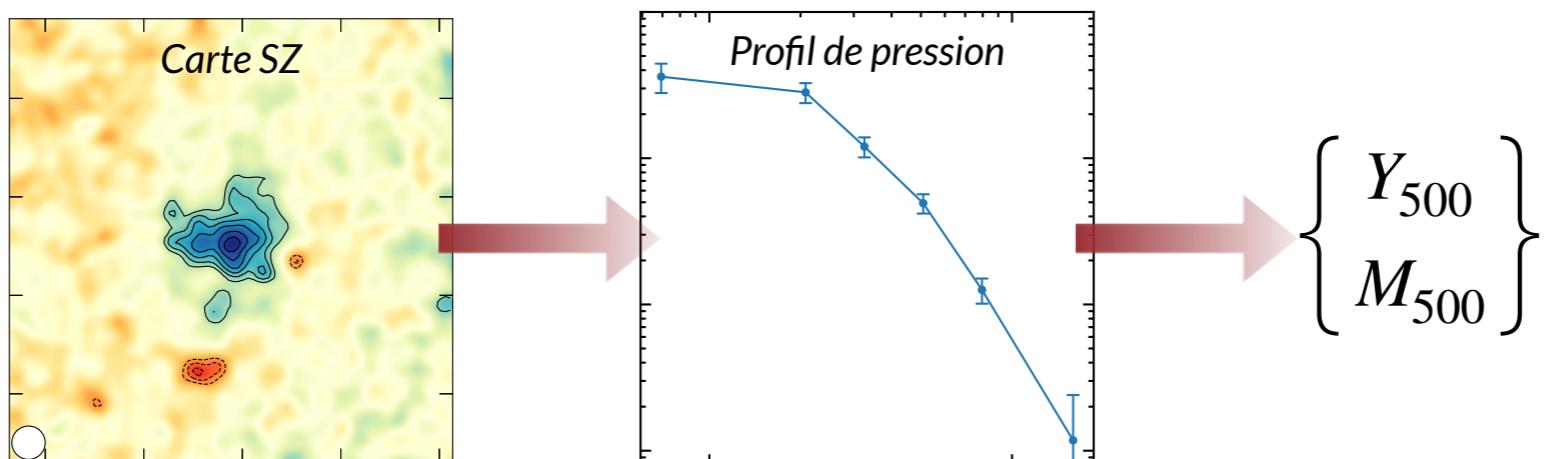
Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

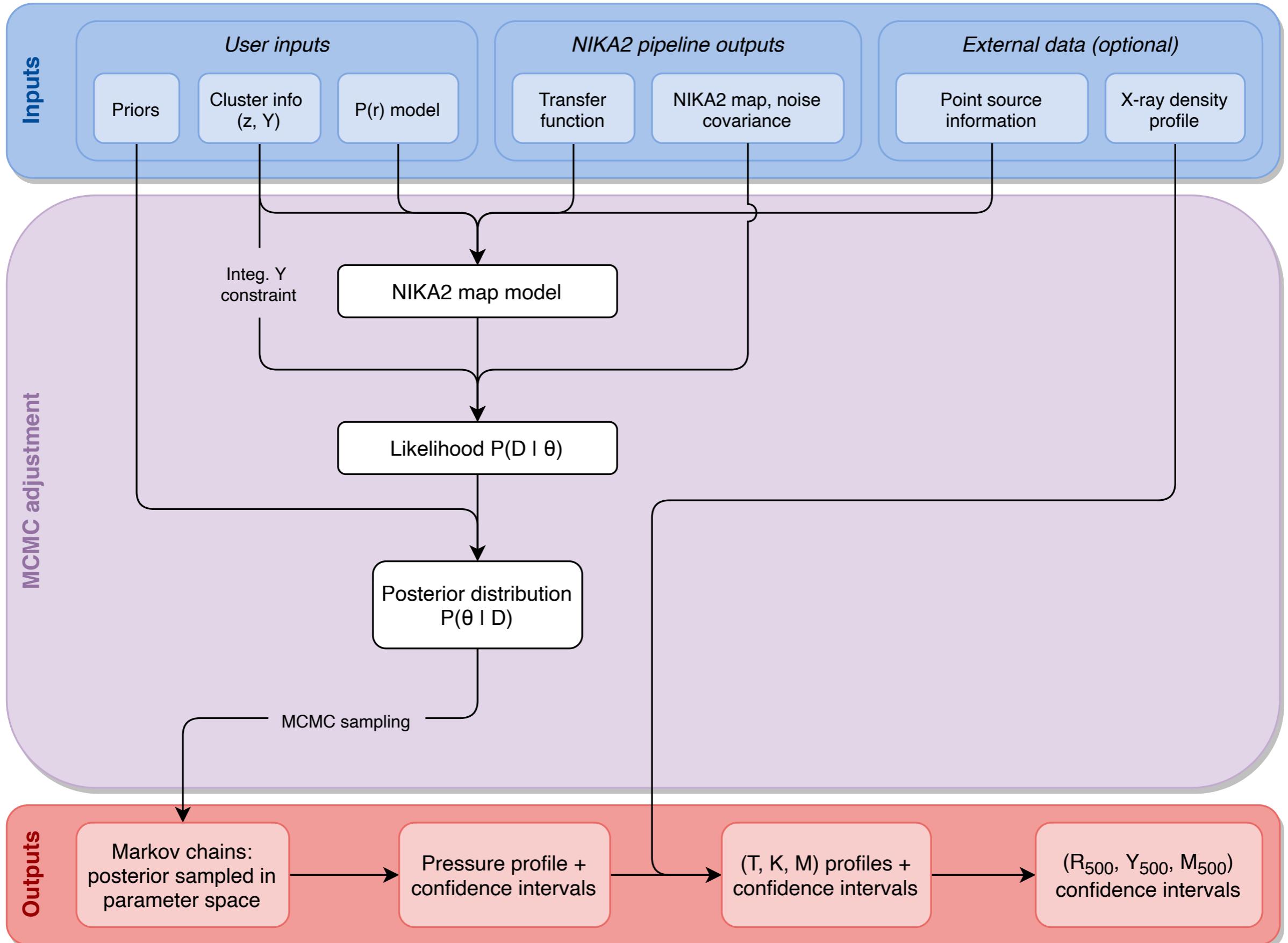
Travail de thèse

3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
 - A. Méthode et algorithme
 - B. Résultats produits & Validation sur simulations simples
 - C. Validation sur simulations hydrodynamiques

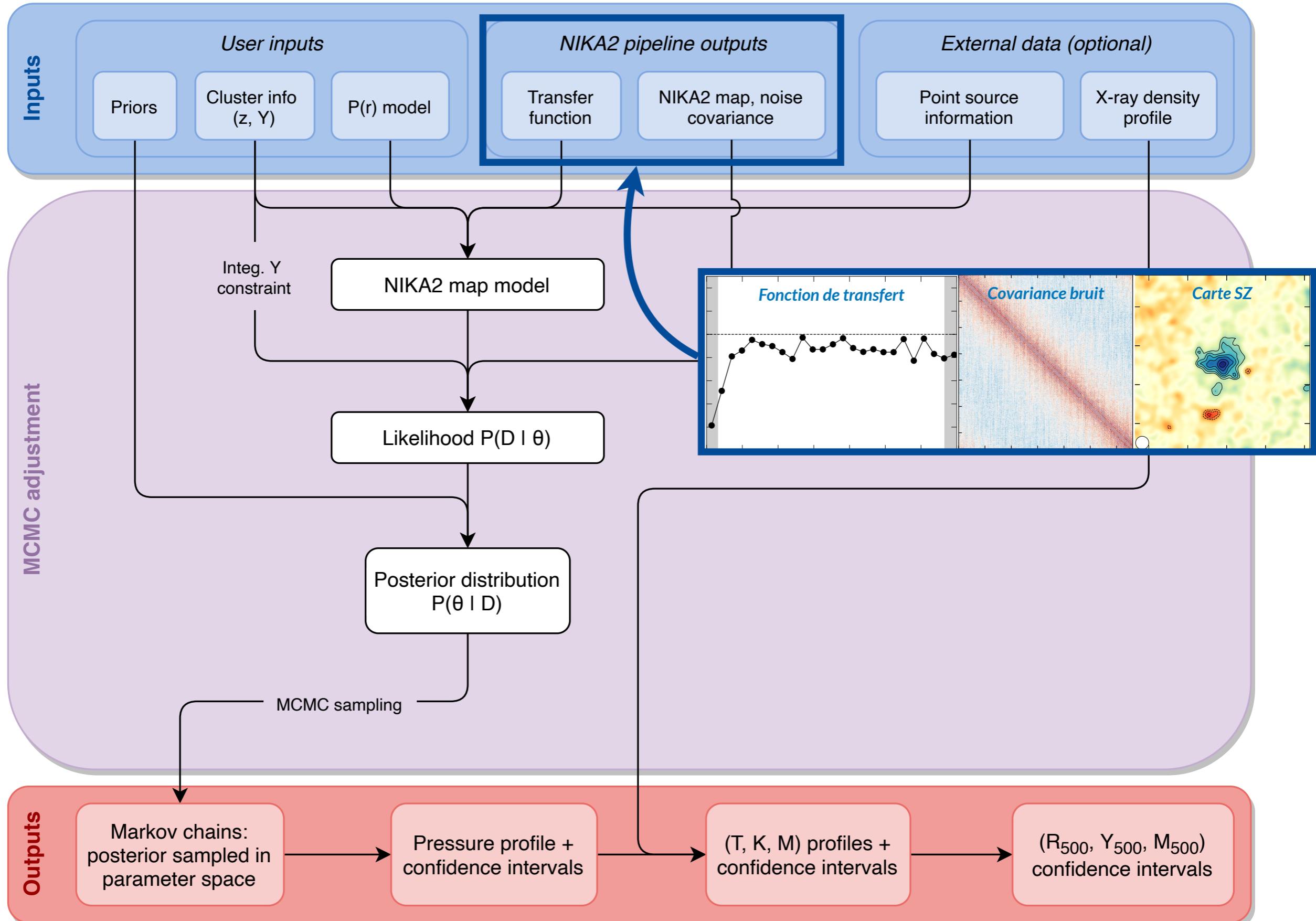
- Profils de pression des amas nécessaires pour le LPSZ
→ Mesure de 50 profils de pression
- Logiciels existants **trop lents** pour une analyse d'échantillon
(ques jours / amas)
- **Travail de thèse :** développement d'un nouveau code d'analyse → **PANCO2**
 - Analyse MCMC ajustant un profil de pression sur une carte SZ
 - Approche *forward modeling* tenant compte des systématiques
 - Entrées / options flexibles pour des analyses fines
 - Optimisé : gain d'un facteur 10~100 sur le temps d'analyse d'un amas
- Disponible pour la collaboration NIKA2, et bientôt public
Analyse de données non-NIKA2



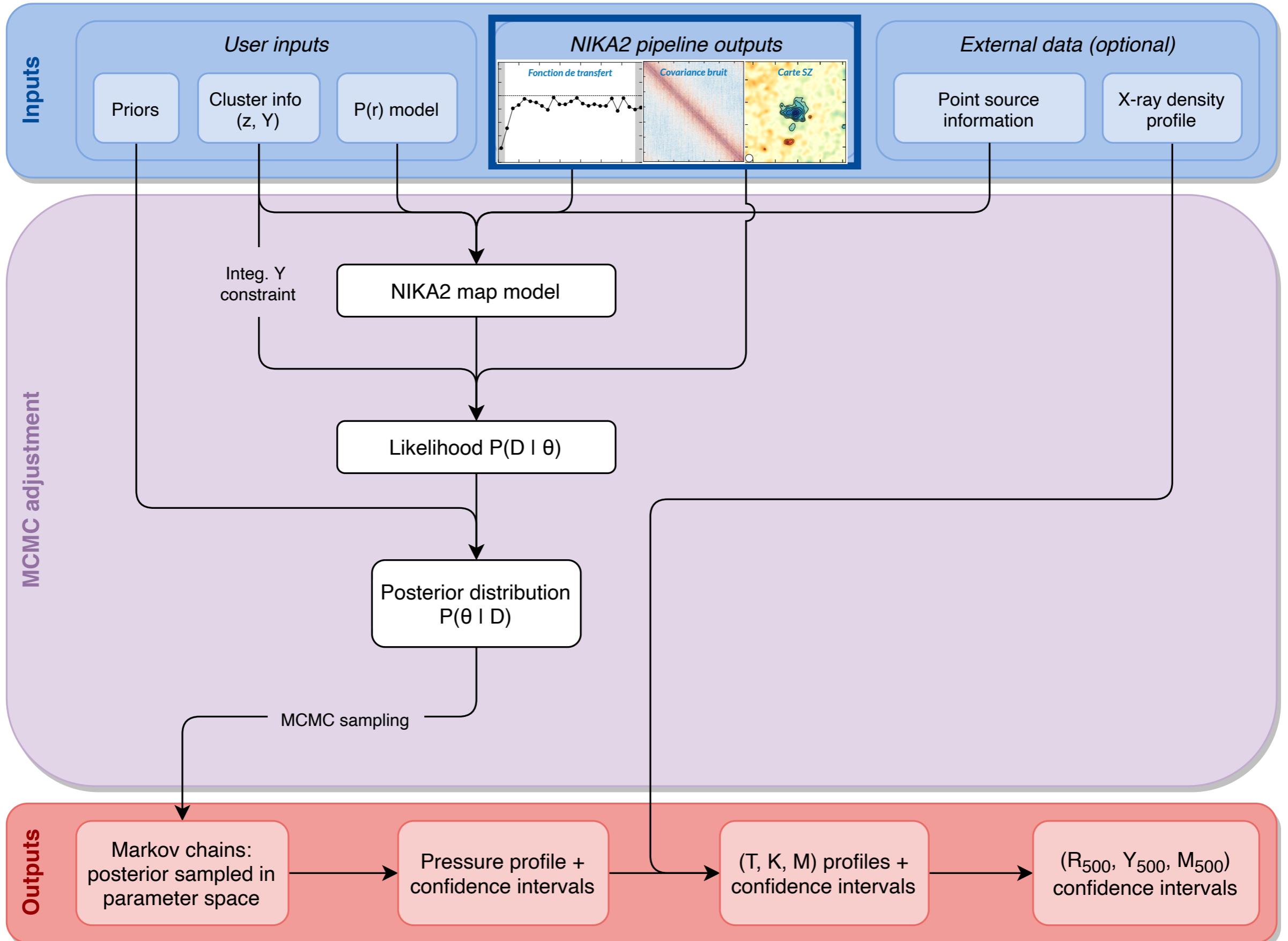
18 Schéma de l'algorithme



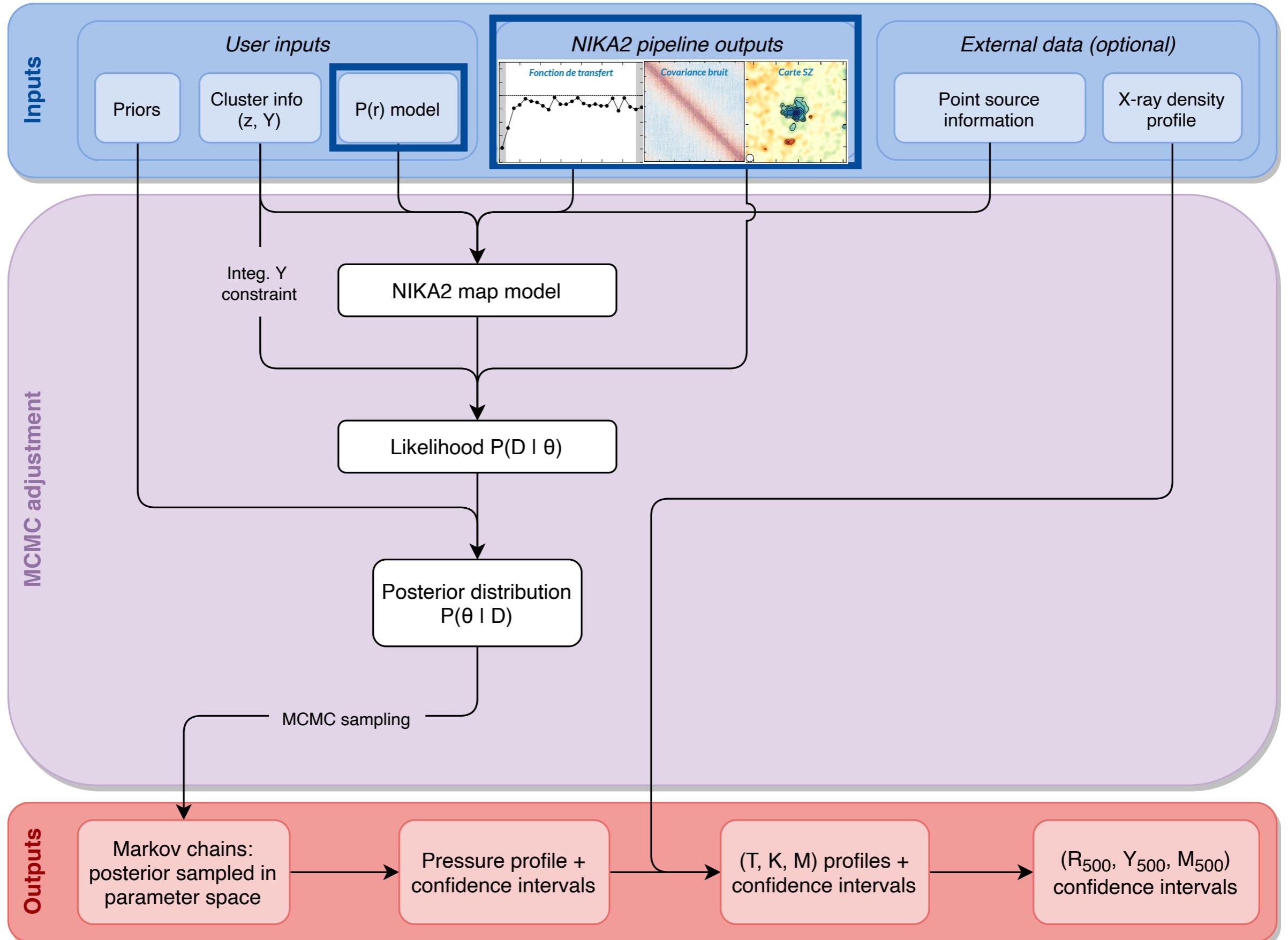
18 Schéma de l'algorithme



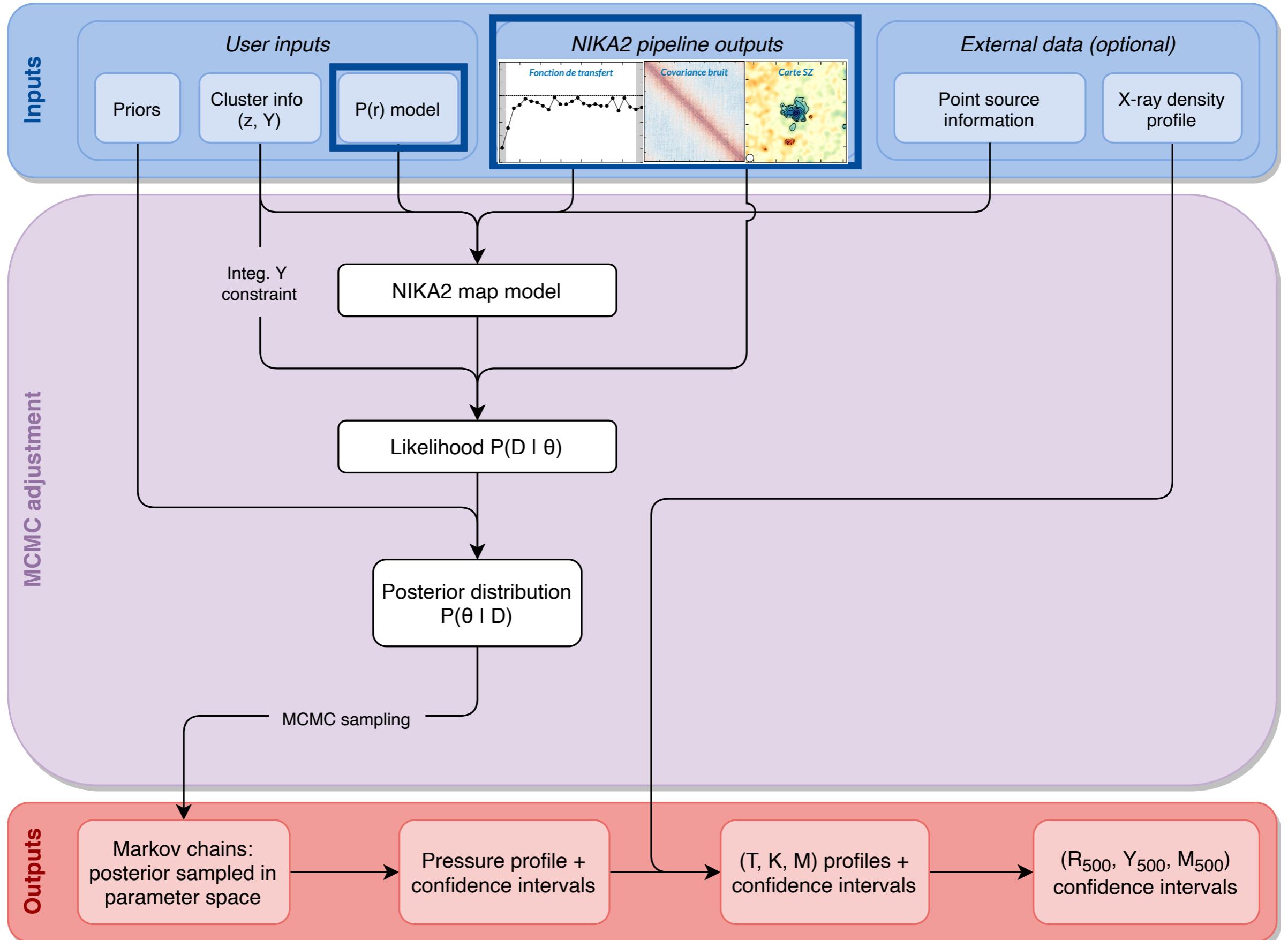
18 Schéma de l'algorithme



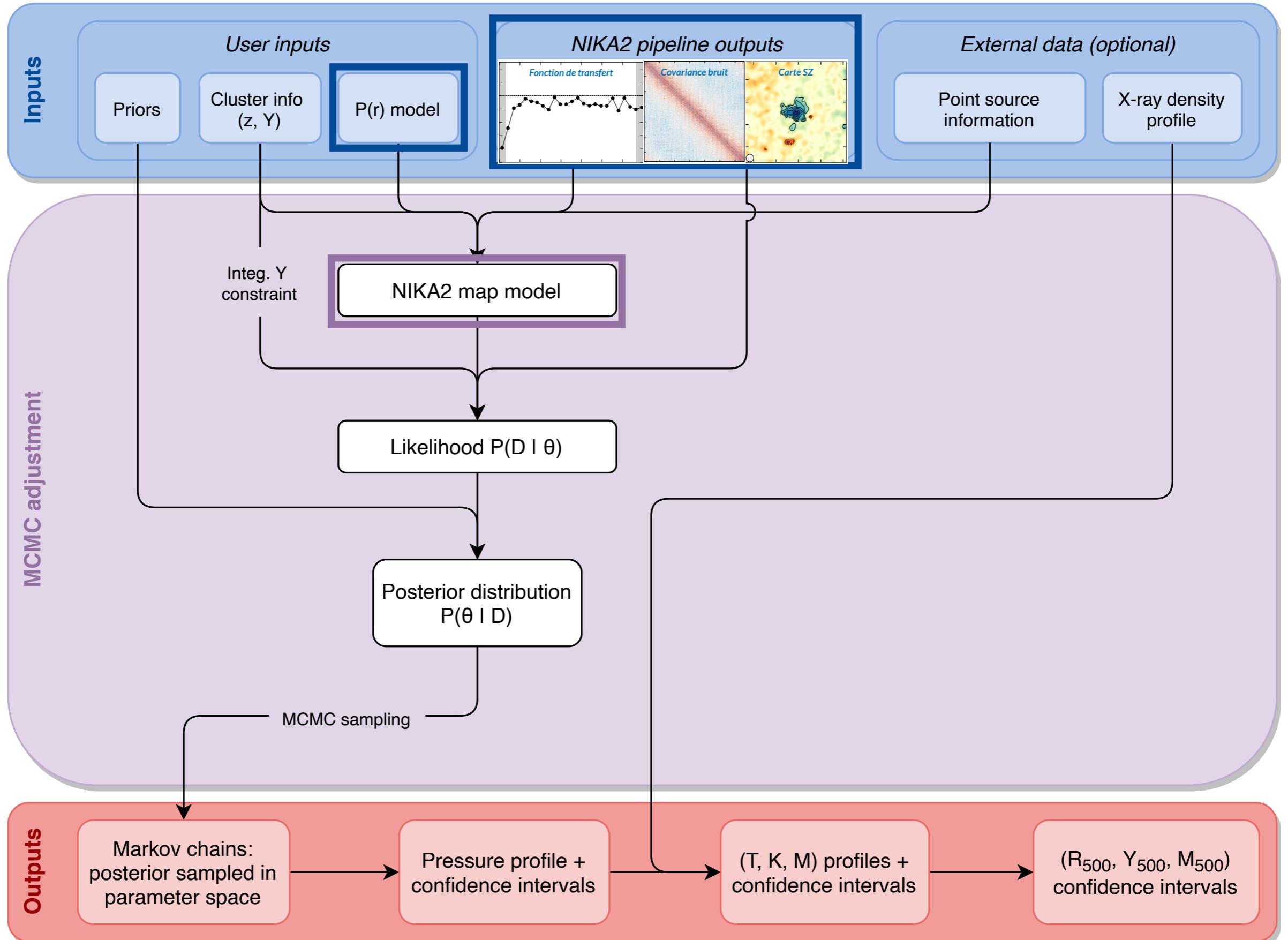
18 Schéma de l'algorithme



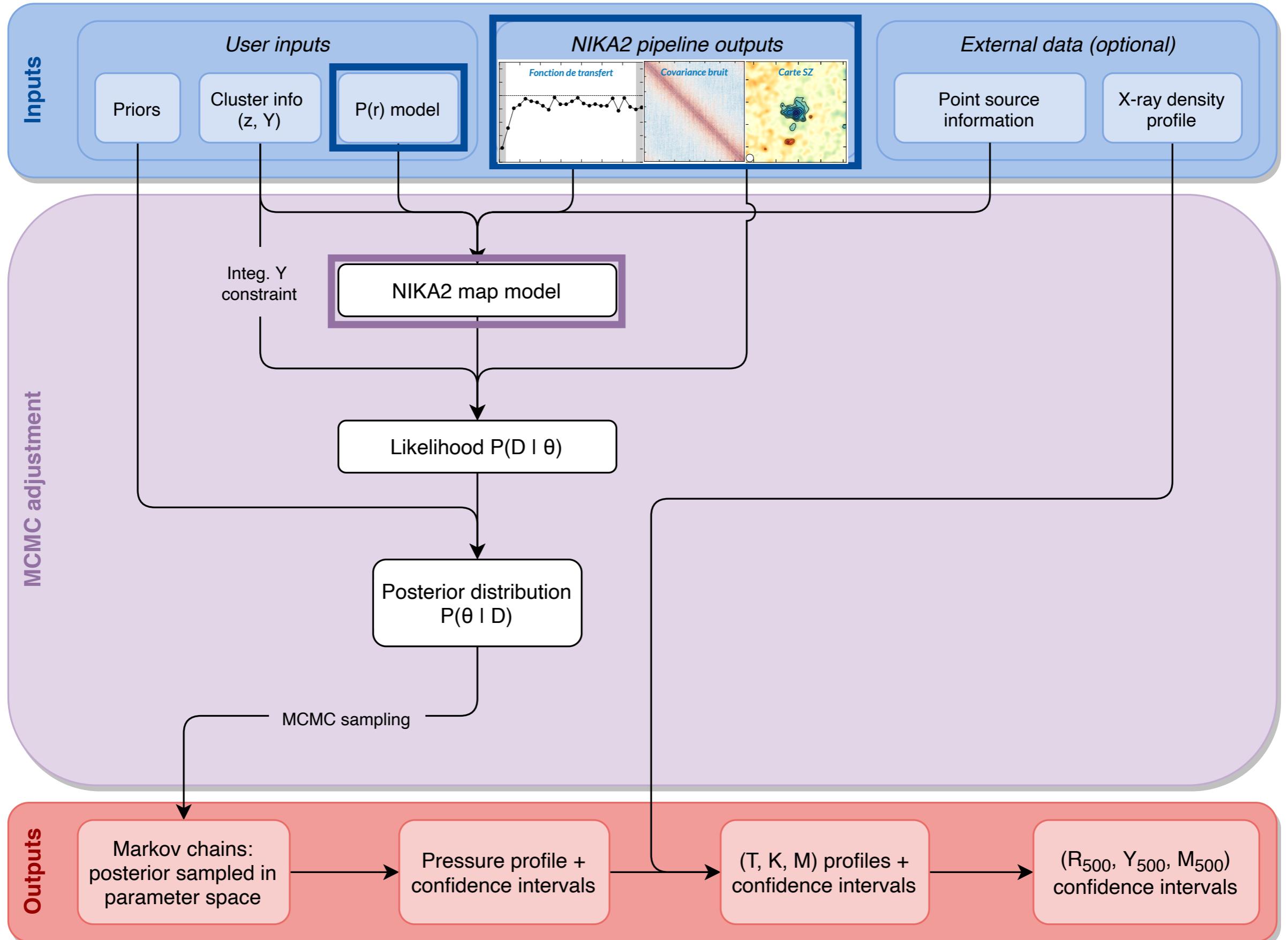
18 Schéma de l'algorithme



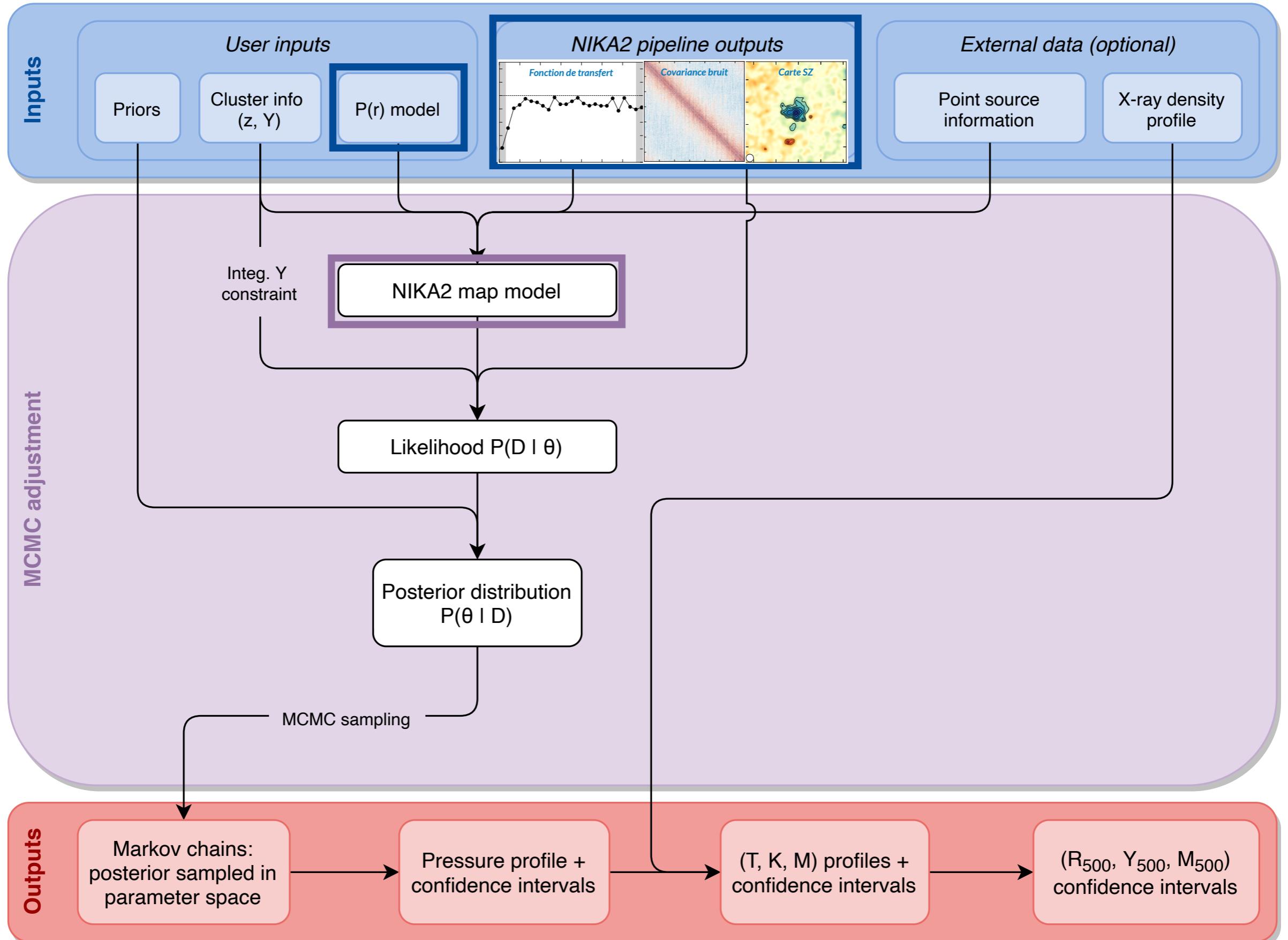
18 Schéma de l'algorithme



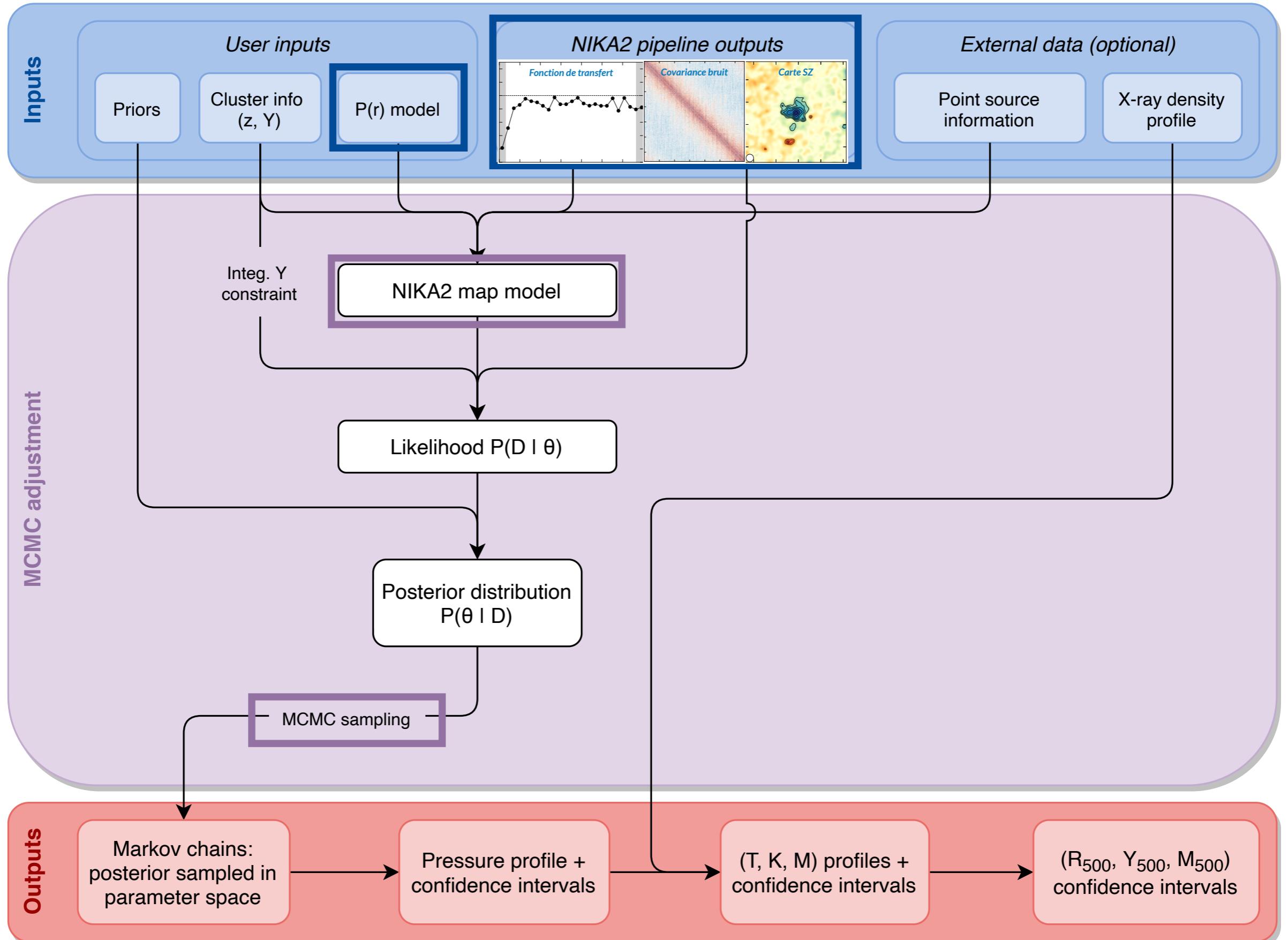
18 Schéma de l'algorithme



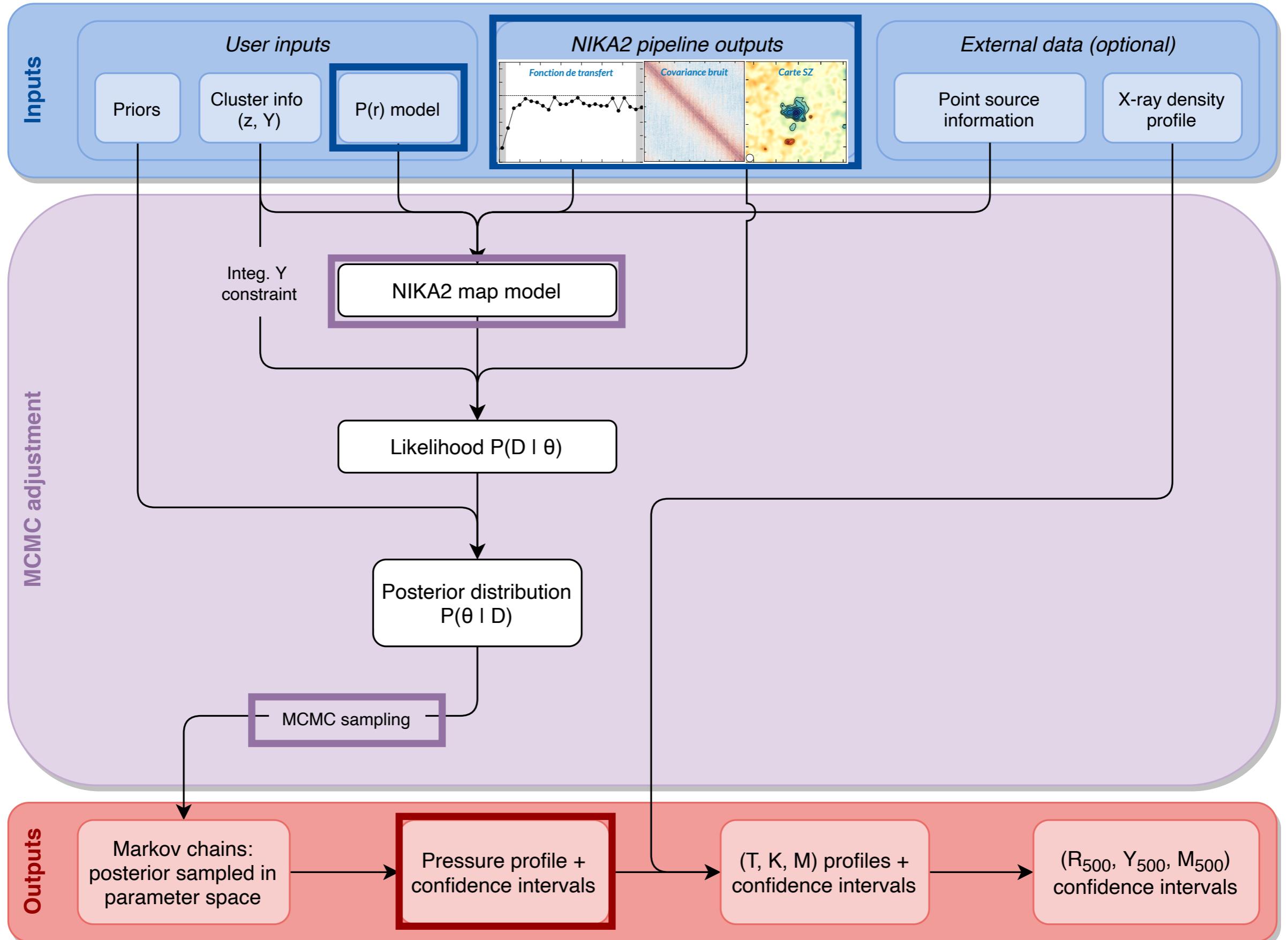
18 Schéma de l'algorithme



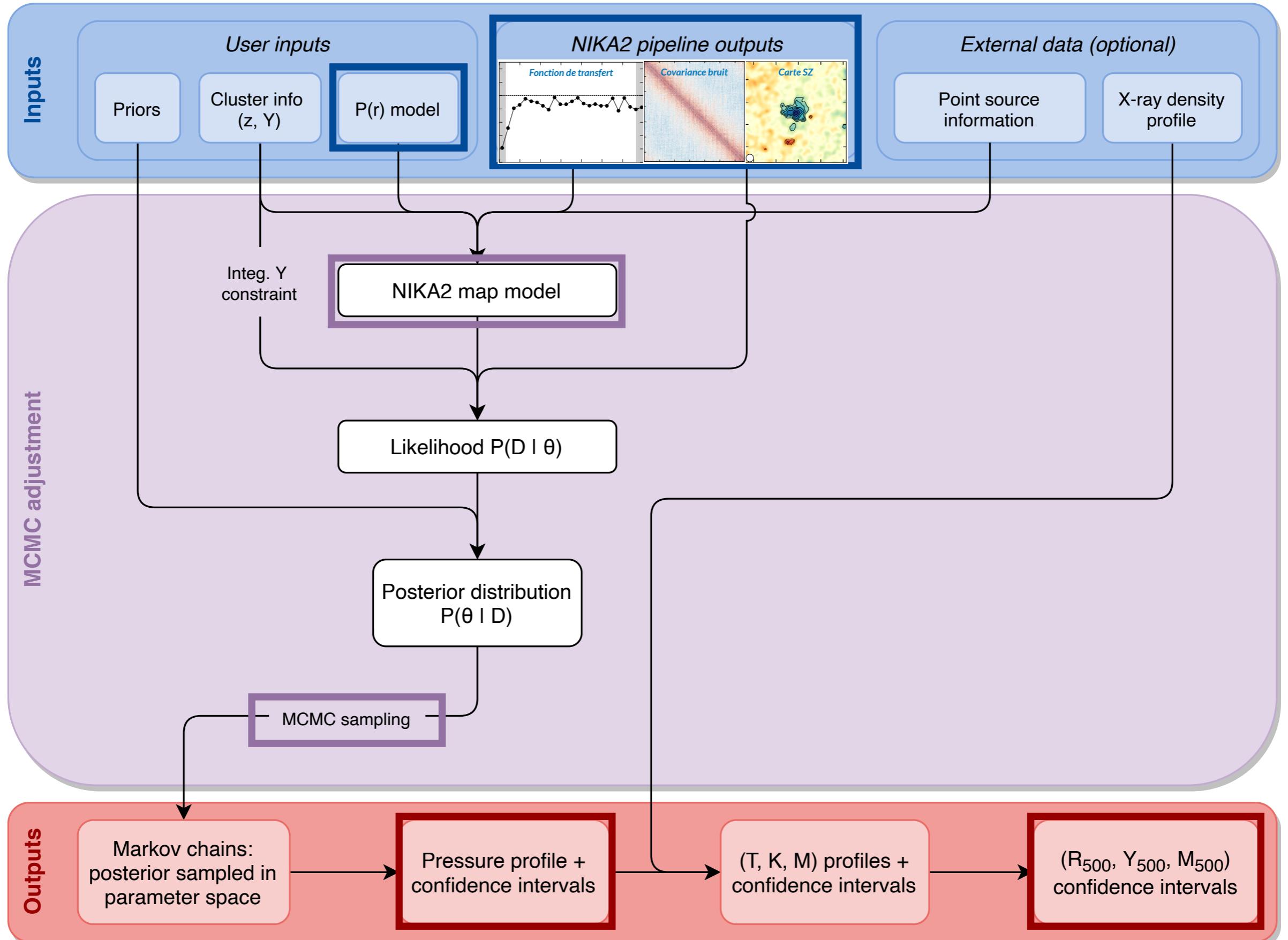
18 Schéma de l'algorithme



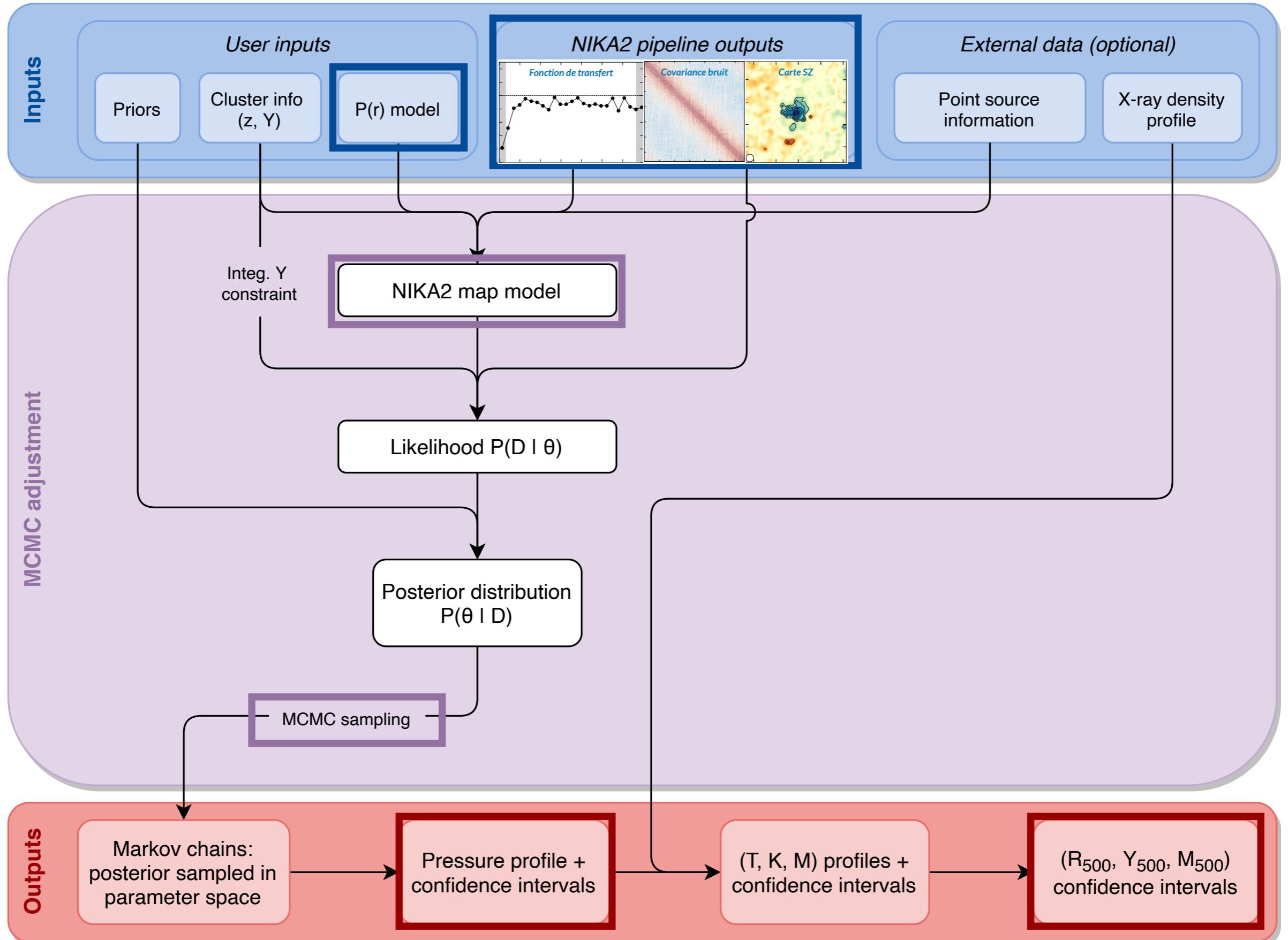
18 Schéma de l'algorithme



18 Schéma de l'algorithme



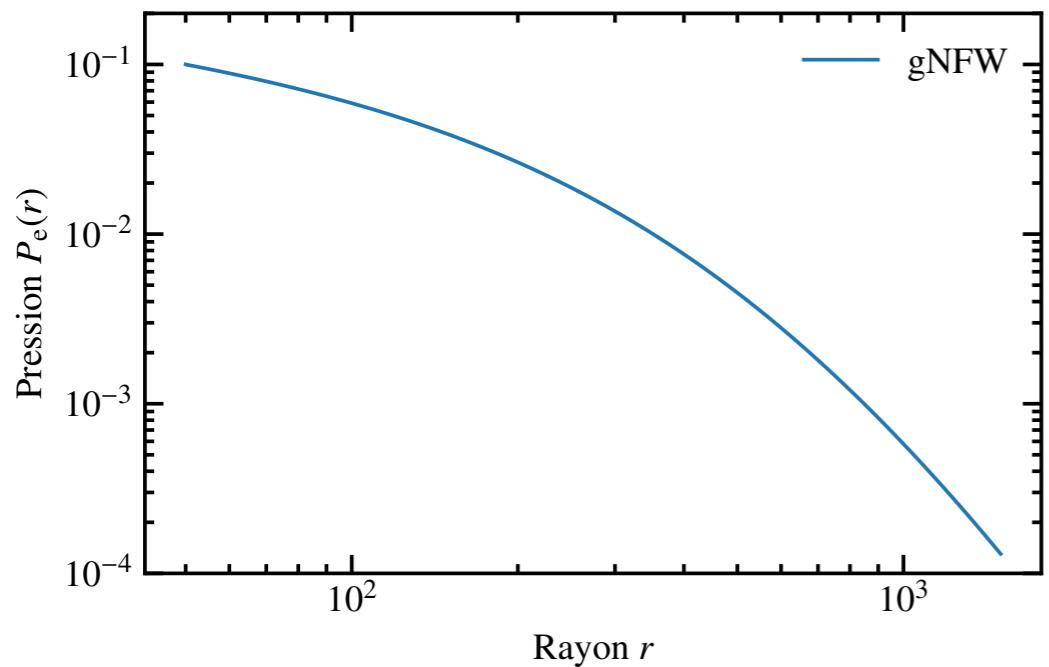
18 Schéma de l'algorithme



$$\text{Modèle gNFW : } P(r) = P_0 \left[\frac{r}{r_p} \right]^{-c} \left[1 + \left[\frac{r}{r_p} \right]^a \right]^{\frac{c-b}{a}}$$

- **Paramètres :**

- Normalisation P_0
- Pentes interne & externe (b, c)
- ...



- **Avantages :**

- Très utilisé → comparable à la littérature
- Dérivée continue

- **Inconvénients :**

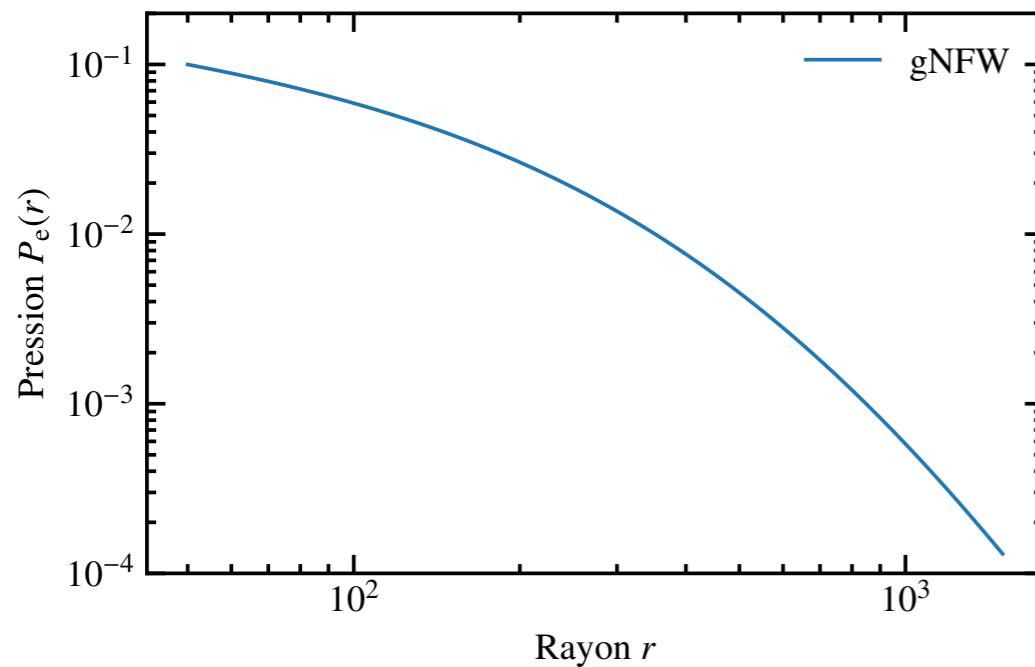
- Forme restreinte → Ne peut pas tout décrire
- Paramètres dégénérés → MCMC lent

Profil de pression : deux modèles possibles

$$\text{Modèle gNFW : } P(r) = P_0 \left[\frac{r}{r_p} \right]^{-c} \left[1 + \left[\frac{r}{r_p} \right]^a \right]^{\frac{c-b}{a}}$$

- Paramètres :

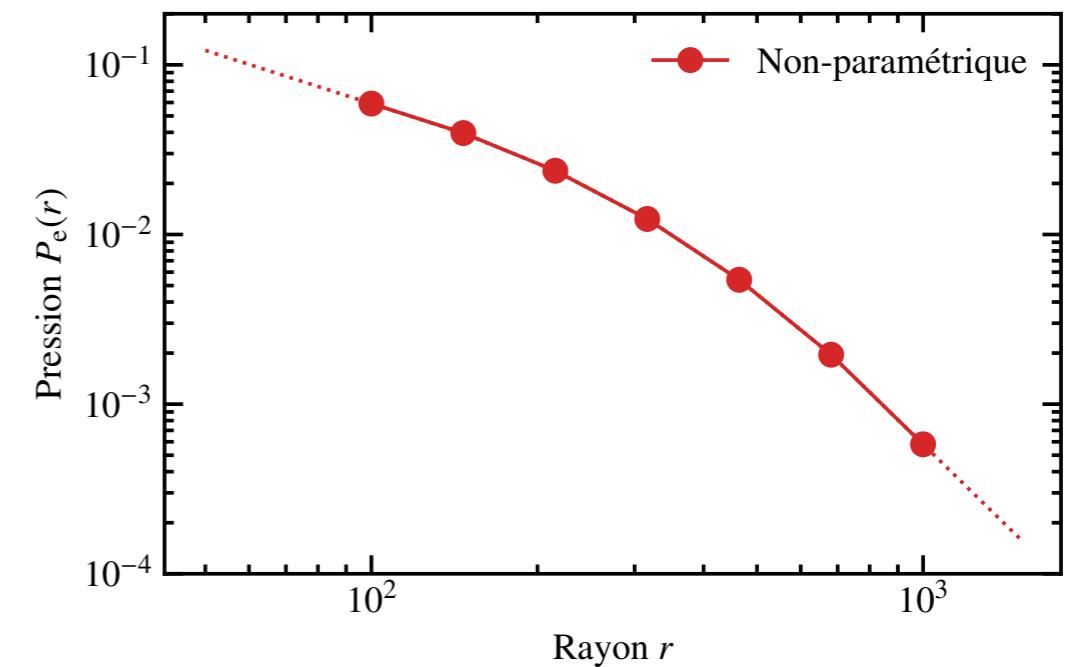
- Normalisation P_0
- Pentes interne & externe (b, c)
- ...



$$\text{Modèle "non-paramétrique" : } P(R_i < r < R_{i+1}) = P_i \left(\frac{r}{R_i} \right)^{-\alpha_i}$$

- Paramètres :

- Valeurs de pression P_i aux rayons R_i "bins"
- Entre les bins : interpolation en loi de puissance



- Avantages :

- Très utilisé → comparable à la littérature
- Dérivée continue

- Inconvénients :

- Forme restreinte → Ne peut pas tout décrire
- Paramètres dégénérés → MCMC lent

- Avantages :

- Forme plus libre → meilleure description
- Paramètres moins corrélés → MCMC rapide

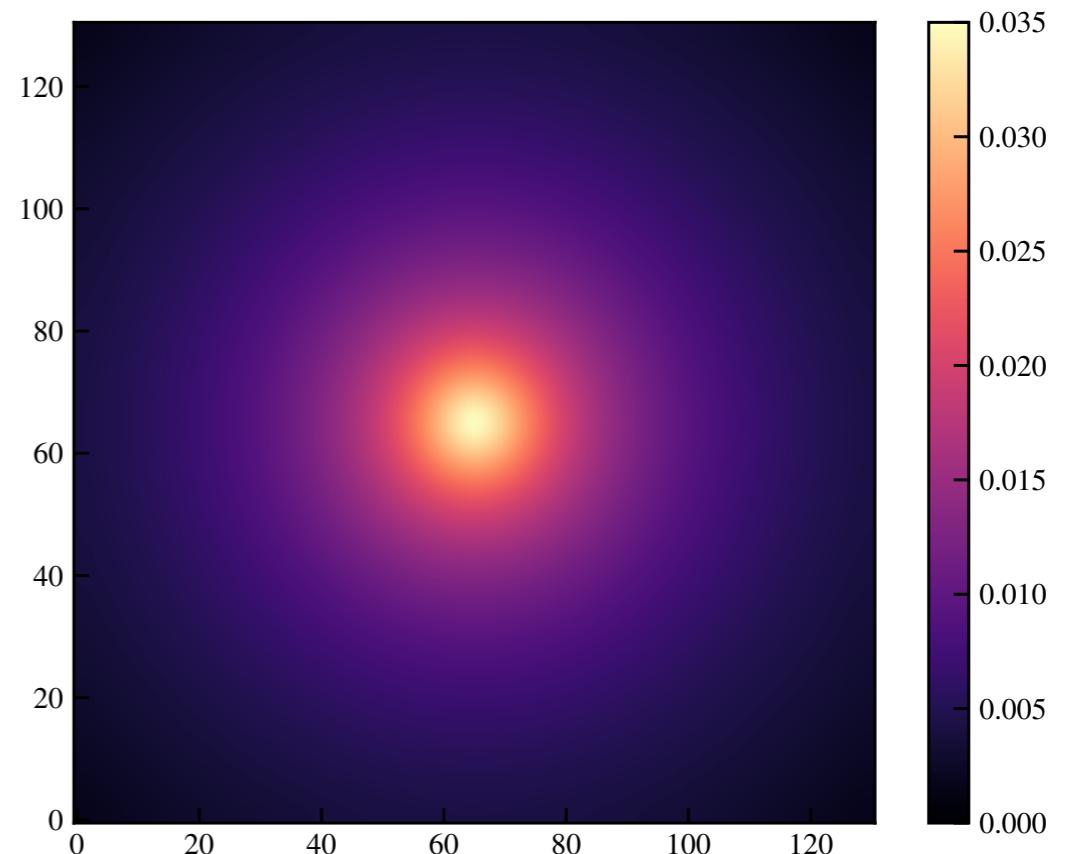
- Inconvénients :

- Dérivée discontinue → estimation de masse complexe

20 Modélisation du signal SZ

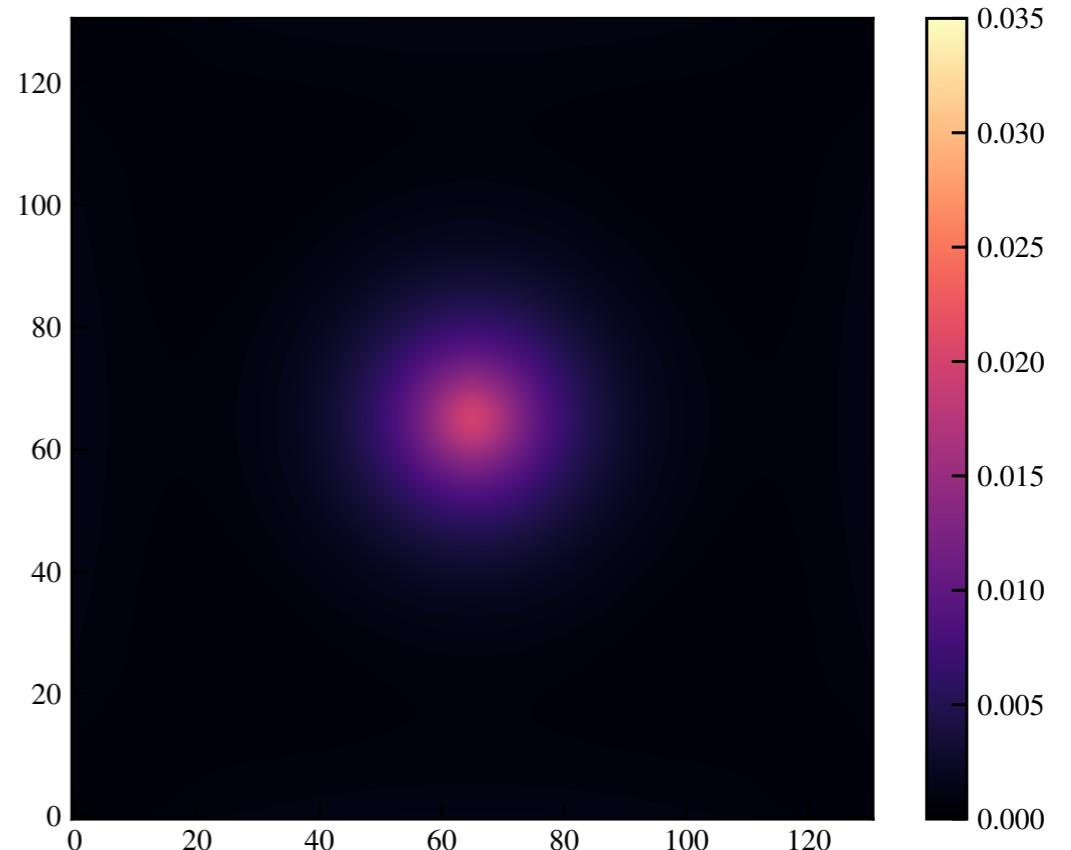
- Profil de pression intégré le long de la ligne de visée

→ Carte de paramètre de Compton y



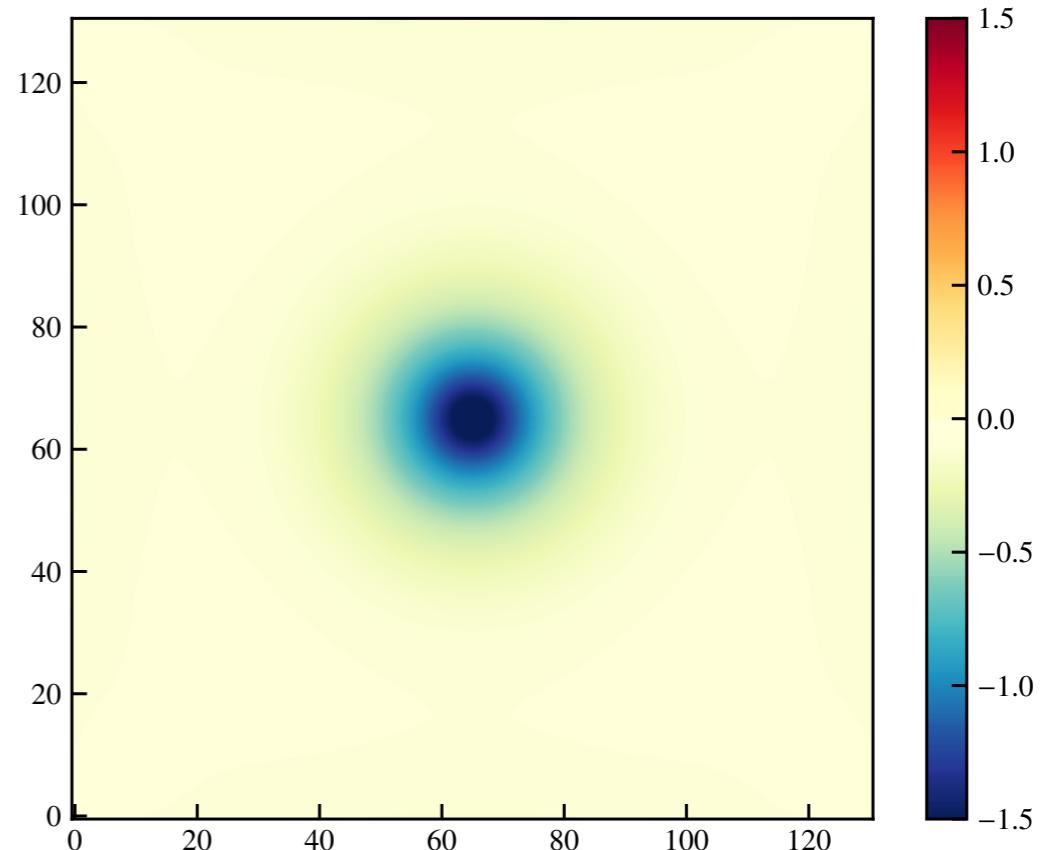
20 Modélisation du signal SZ

- Profil de pression intégré le long de la ligne de visée
 - **Carte de paramètre de Compton y**
- Convolution par le **lobe de NIKA2** *Filtrage instrumental*
- Convolution par **fonction de transfert** *Filtrage de l'analyse*
 - **Carte de paramètre de Compton y filtrée**



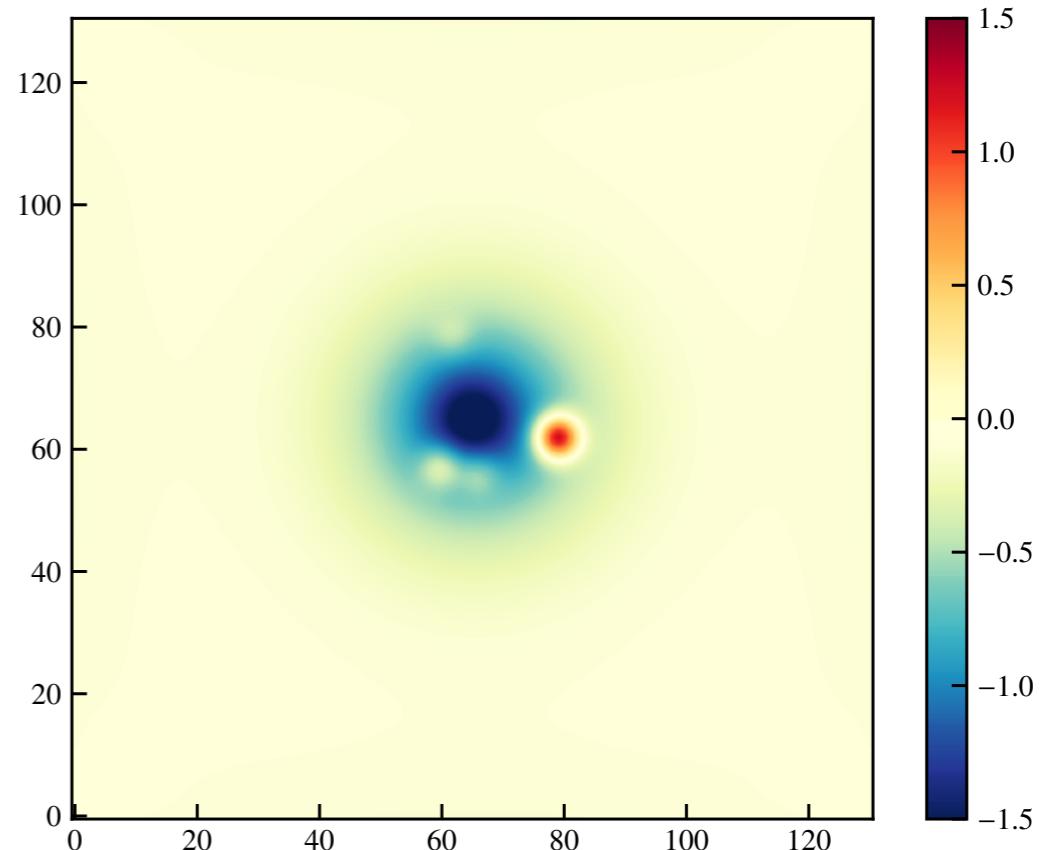
20 Modélisation du signal SZ

- Profil de pression intégré le long de la ligne de visée
 - **Carte de paramètre de Compton y**
- Convolution par le **lobe de NIKA2** *Filtrage instrumental*
- Convolution par **fonction de transfert** *Filtrage de l'analyse*
 - **Carte de paramètre de Compton y filtrée**
- **Conversion** en unités de brillance de surface
 - Coefficient traité comme paramètre de nuisance
 - **Carte SZ filtrée et convertie, comparable aux données**



20 Modélisation du signal SZ

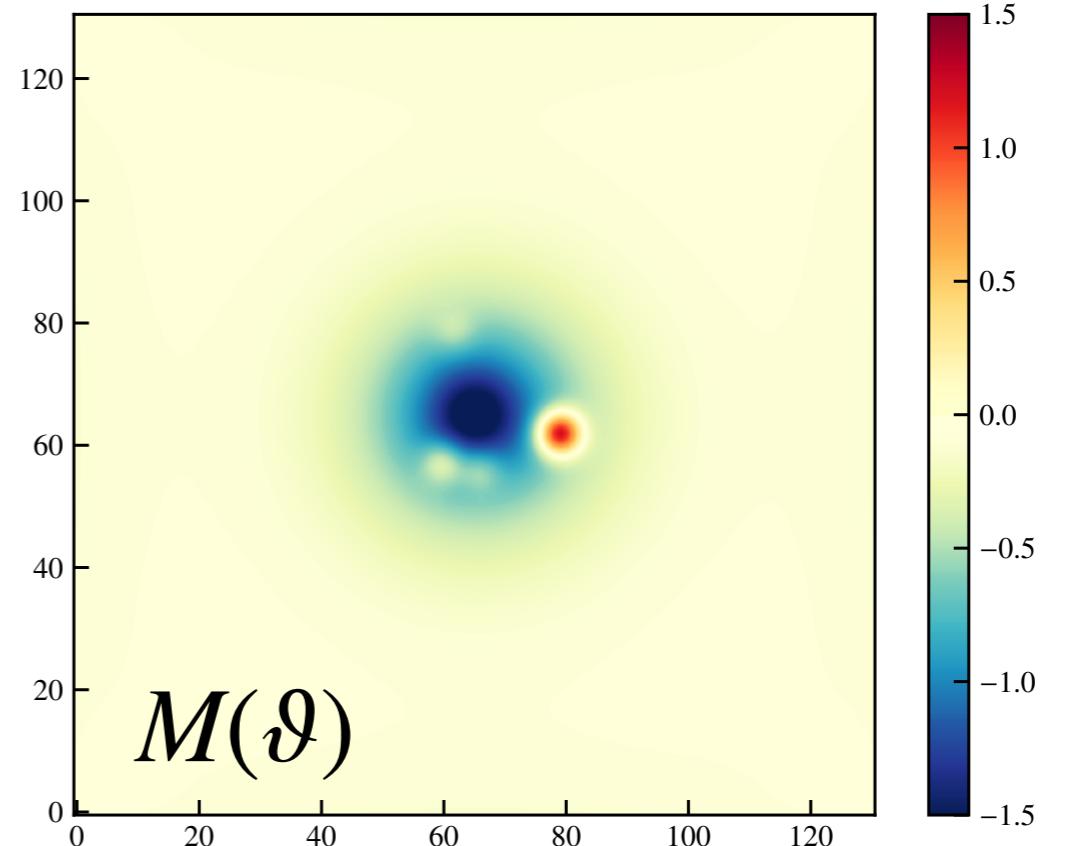
- Profil de pression intégré le long de la ligne de visée
 - **Carte de paramètre de Compton y**
- Convolution par le **lobe de NIKA2** *Filtrage instrumental*
- Convolution par **fonction de transfert** *Filtrage de l'analyse*
 - **Carte de paramètre de Compton y filtrée**
- **Conversion** en unités de brillance de surface
 - Coefficient traité comme paramètre de nuisance*
 - **Carte SZ filtrée et convertie, comparable aux données**
- **Contamination par des sources ponctuelles :**
 - des sources de flux variable peuvent être ajoutées
 - Traitées comme des paramètres de nuisance*



20 Modélisation du signal SZ

- Profil de pression intégré le long de la ligne de visée
 - **Carte de paramètre de Compton y**
- Convolution par le **lobe de NIKA2** *Filtrage instrumental*
- Convolution par **fonction de transfert** *Filtrage de l'analyse*
 - **Carte de paramètre de Compton y filtrée**
- **Conversion** en unités de brillance de surface
 - Coefficient traité comme paramètre de nuisance*
 - **Carte SZ filtrée et convertie, comparable aux données**
- **Contamination par des sources ponctuelles :**
 - des sources de flux variable peuvent être ajoutées
 - Traitées comme des paramètres de nuisance*
- **Résumé – Paramètres du modèle :**
 - Paramètres du profil de pression
 - Coefficient de conversion
 - Niveau zéro de la carte
 - Flux de sources ponctuelles

ϑ



- Modèle de carte $M(\vartheta)$ comparée aux données avec la fonction de vraisemblance :

$$-2 \log \mathcal{L}(\vartheta) = (D - M(\vartheta))^T \Sigma^{-1} (D - M(\vartheta)) + \left(\frac{Y_{500}^{\text{input}} - Y_{500}(\vartheta)}{\delta Y_{500}^{\text{input}}} \right)^2$$

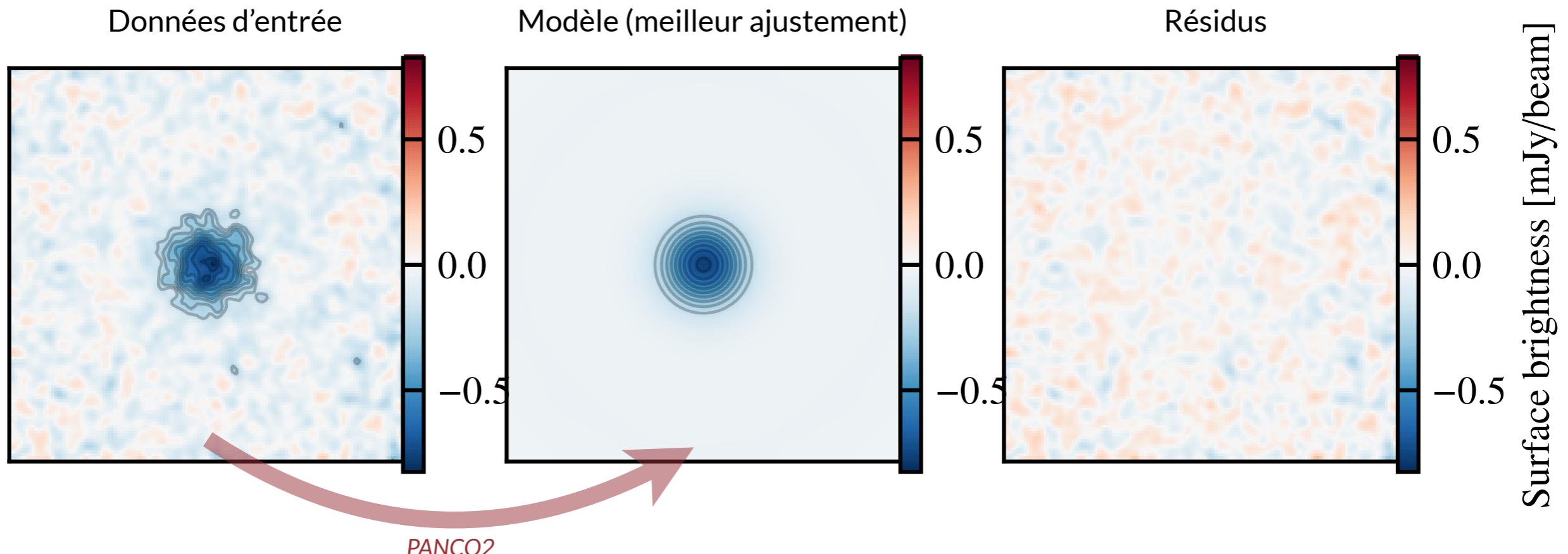
Comparaison entre la carte NIKA2 D et le modèle de carte $M(\vartheta)$, avec covariance du bruit Σ

Contrainte sur le signal SZ intégré provenant du relevé SZ (ACT, Planck)

$$Y_{500}(\vartheta) \propto \int_0^{R_{500}} P_e(r; \vartheta) r^2 dr$$

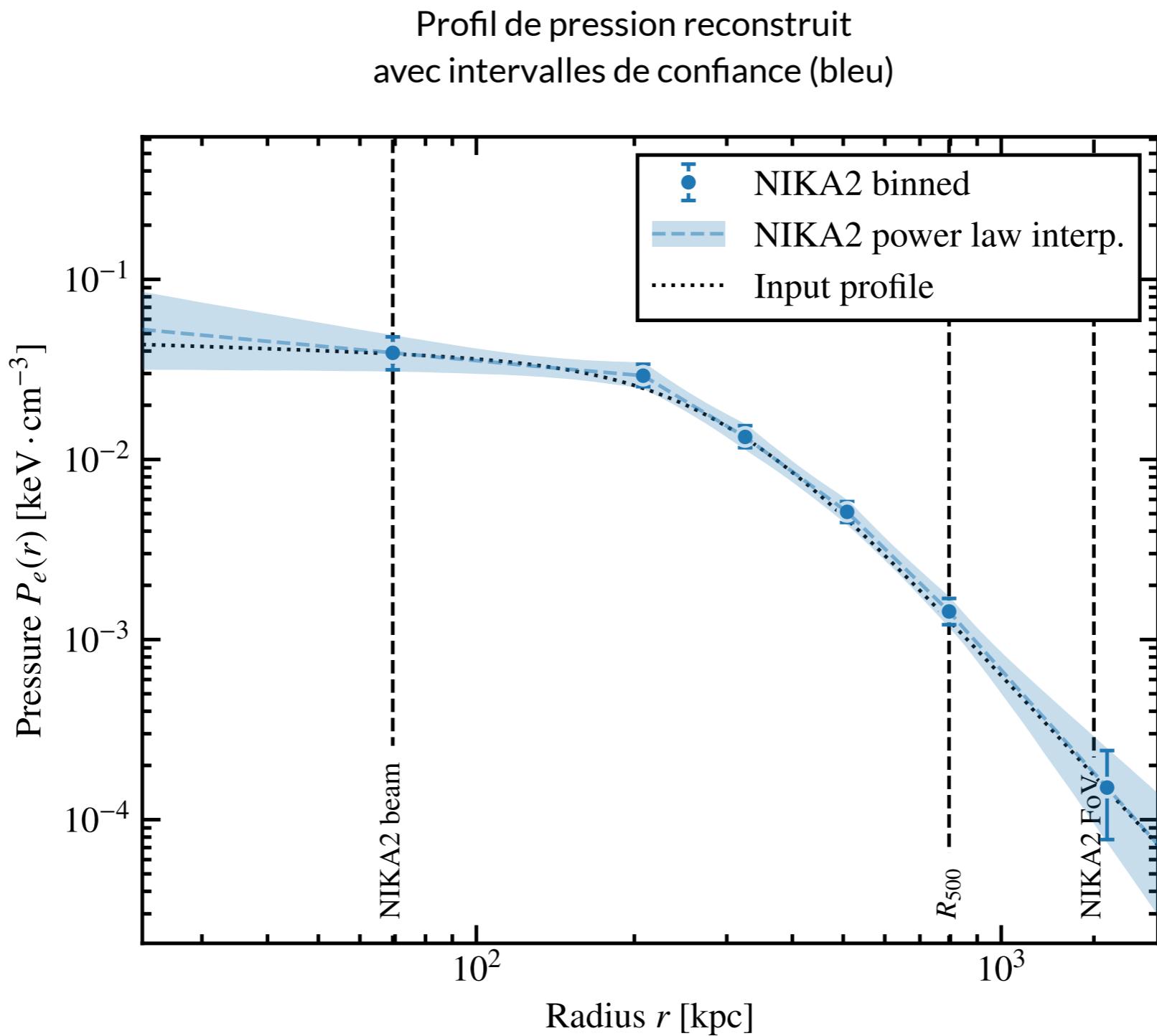
- Combinée à une distribution a priori des paramètres
 - **Distribution de probabilité postérieure $P(\vartheta | D)$**
- **Échantillonnage MCMC de la distribution postérieure**
 - Chaînes de Markov finales dans l'espace des paramètres
- **Inférence :** expression de la probabilité dans l'espace des propriétés physiques
 - Calcul de chaque propriété d'intérêt pour chaque échantillon MCMC
 - Distribution de probabilité de la quantité *Exemple : $P(r)$*

- Test – carte SZ simulée, incluant filtrage réaliste (lobe, fonction de transfert), bruit blanc
 - Ajustement d'un modèle non-paramétrique, avec contrainte sur le signal SZ intégré Y_{500}
- Convergence atteinte en ~10 minutes



Résidus compatibles avec du bruit

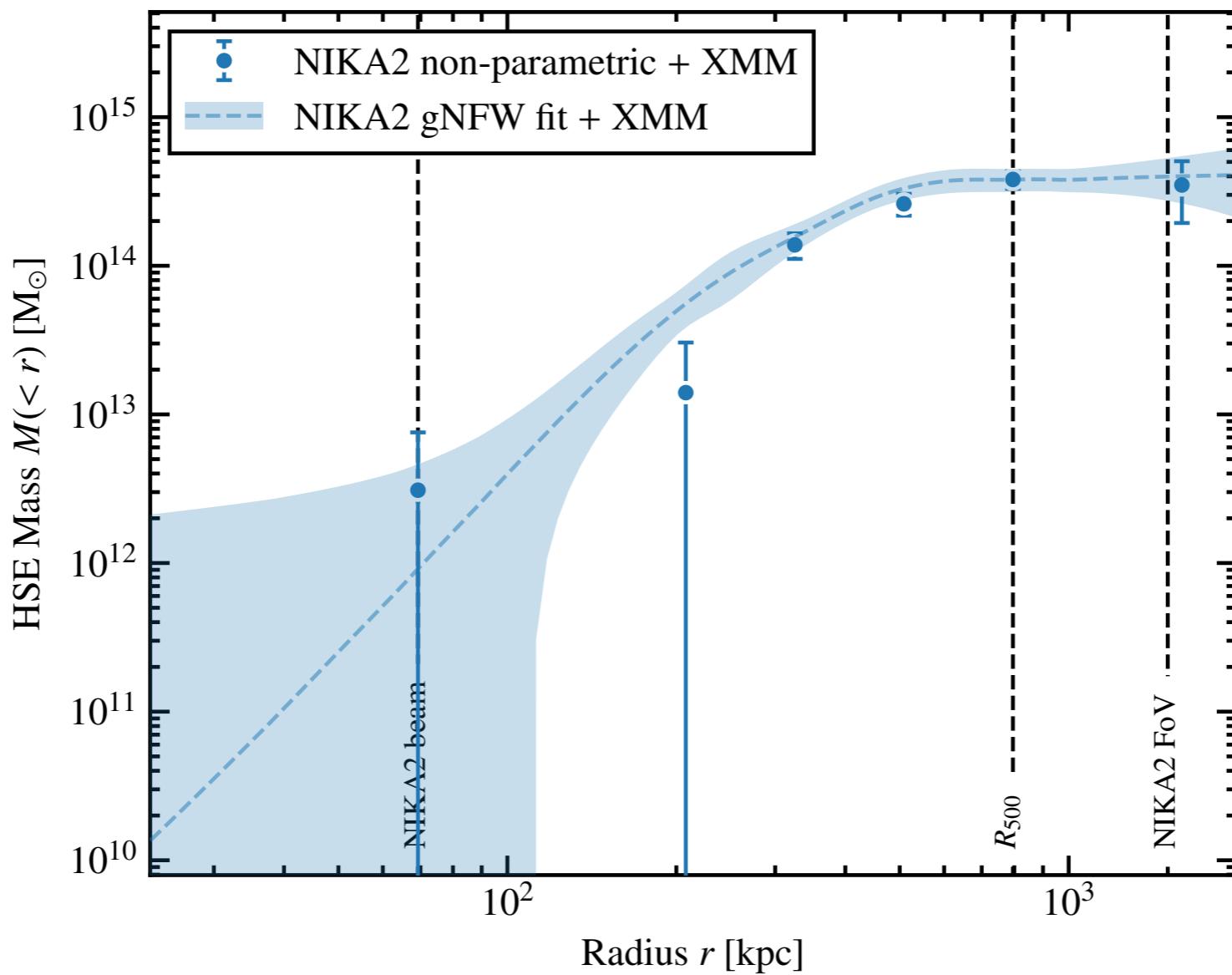
→ Bon ajustement



Excellent accord entre
le profil reconstruit et les données d'entrée

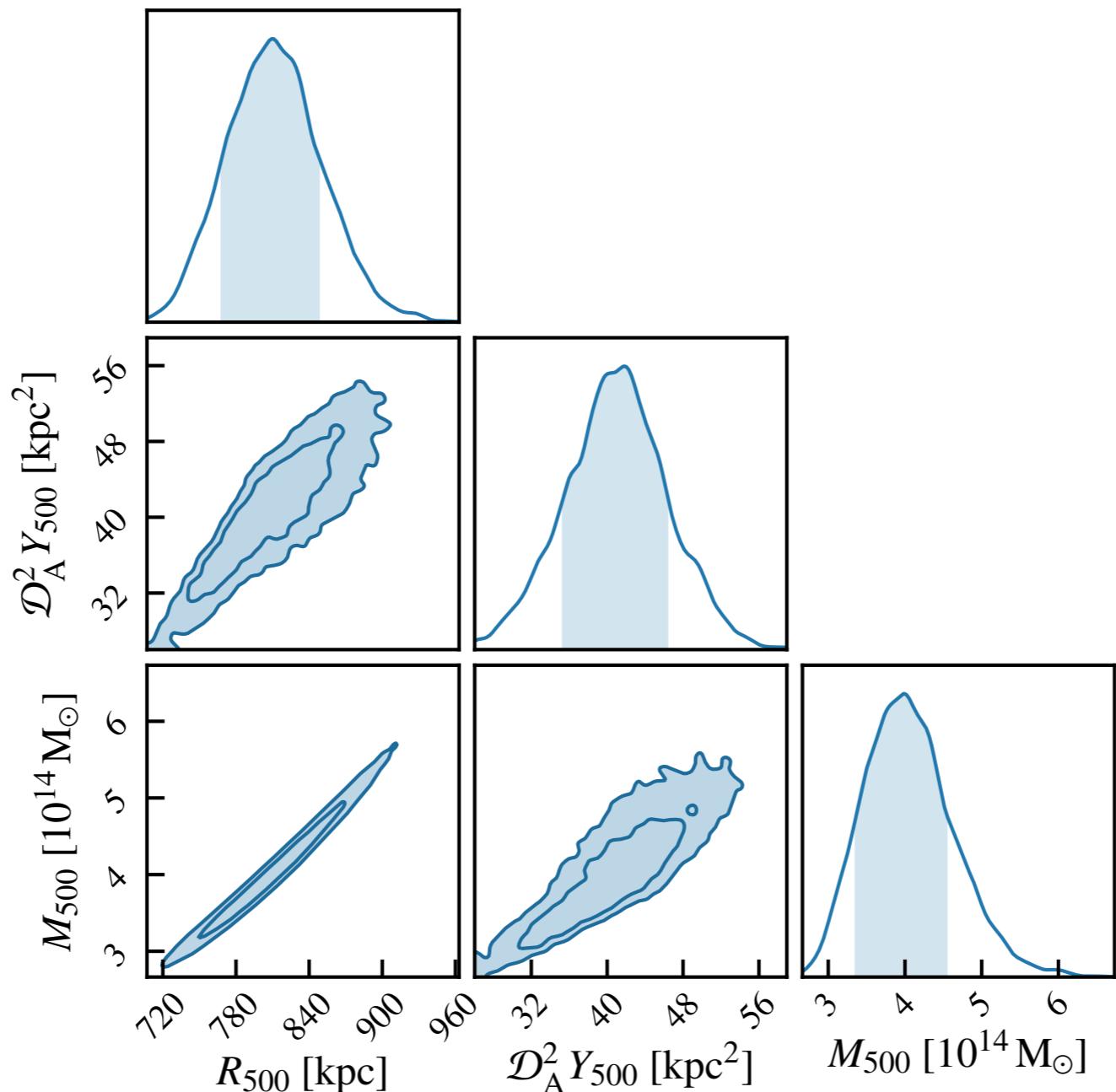
Résultats validation 1 : Grandeurs intégrées

- Si données X disponibles : combinaison pression SZ & densité X
 - Profils thermodynamiques : température, entropie, **masse hydrostatique**
 - **Grandeurs intégrées** R_{500} , Y_{500} , M_{500}



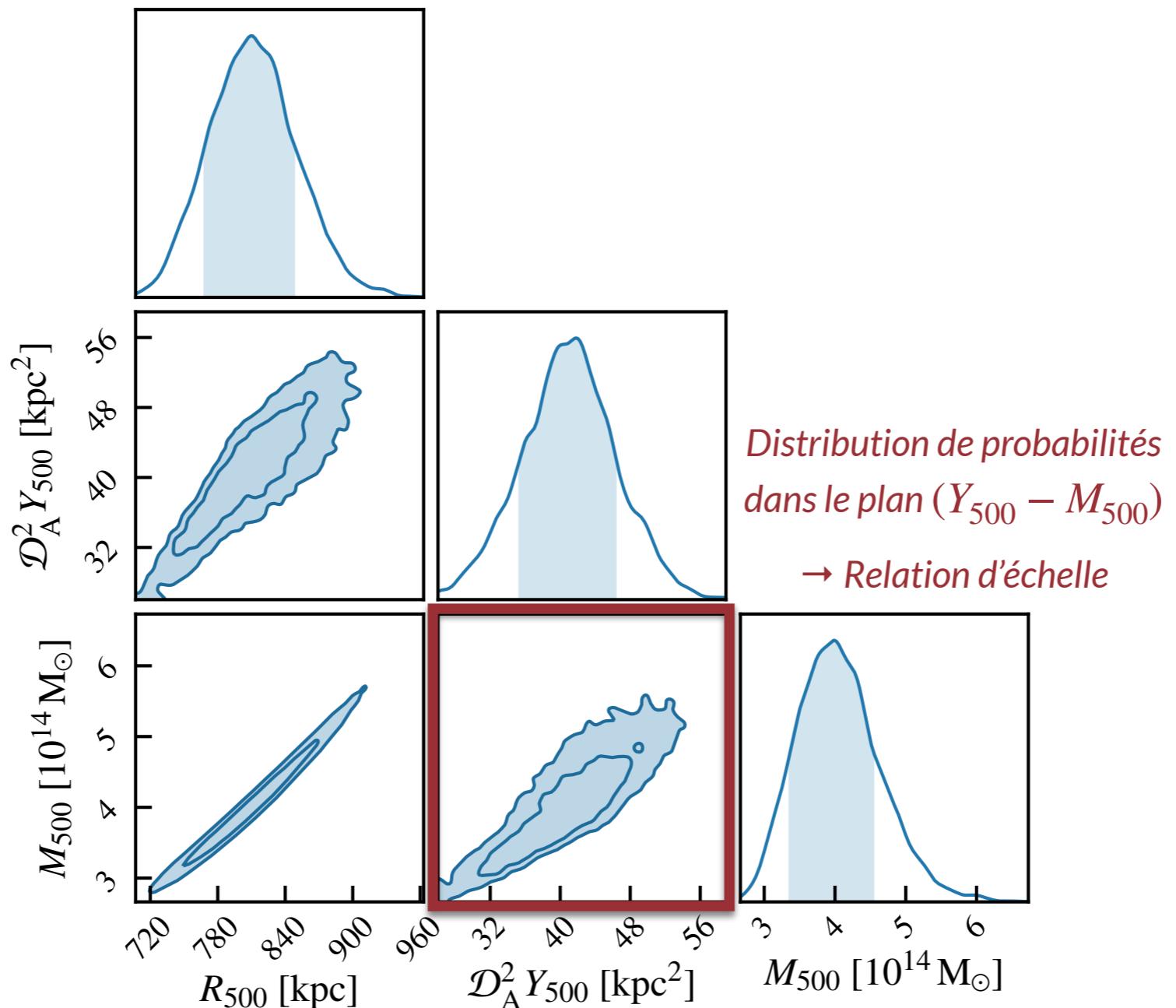
Résultats validation 1 : Grandeurs intégrées

- Si données X disponibles : combinaison pression SZ & densité X
 - Profils thermodynamiques : température, entropie, **masse hydrostatique**
 - **Grandeurs intégrées** R_{500} , Y_{500} , M_{500}



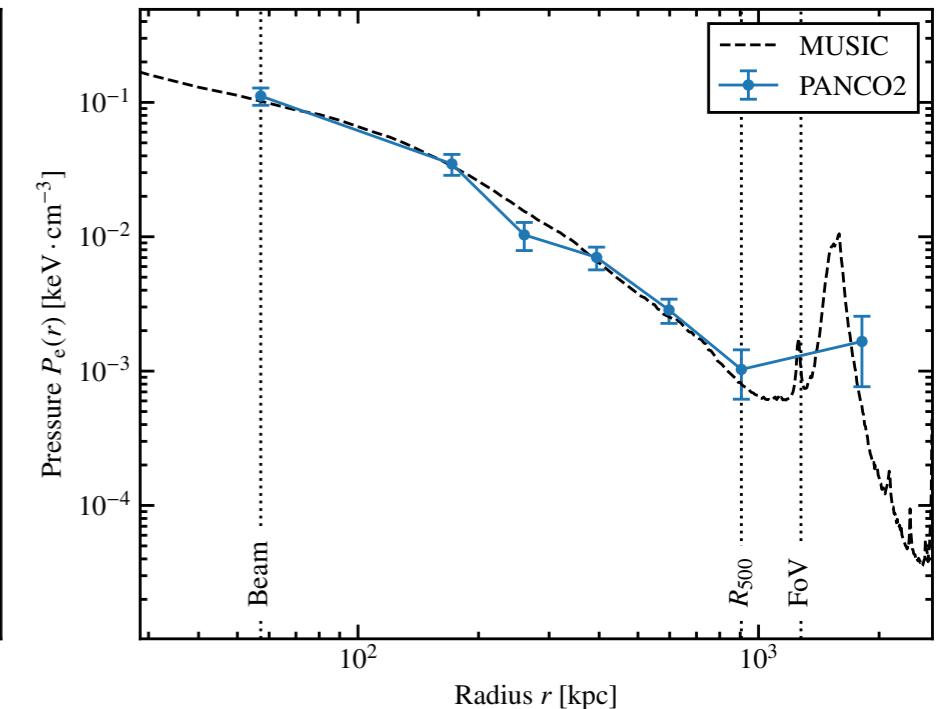
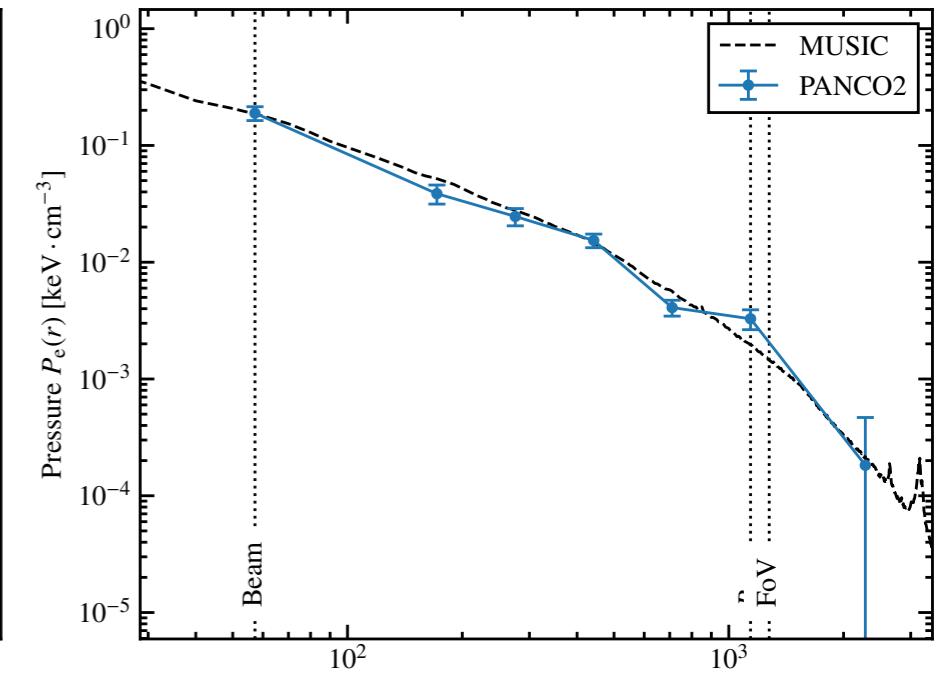
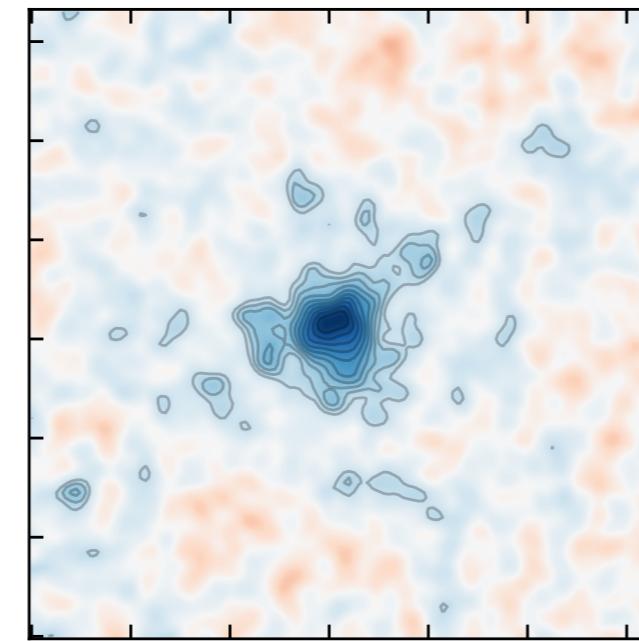
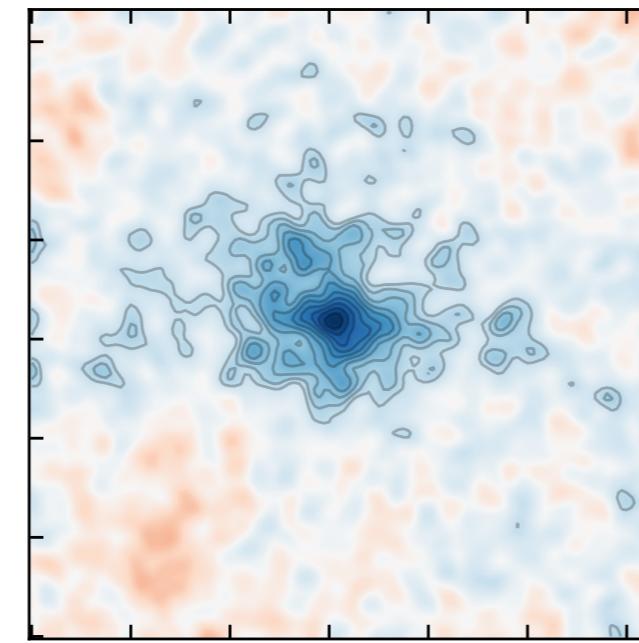
Résultats validation 1 : Grandeurs intégrées

- Si données X disponibles : combinaison pression SZ & densité X
 - Profils thermodynamiques : température, entropie, **masse hydrostatique**
 - **Grandeurs intégrées** R_{500} , Y_{500} , M_{500}



But : tester PANCO2 sur des amas réalistes

- Observations NIKA2 simulées d'amas issus de simulations hydrodynamiques
Simulation MUSIC
- Cartes réalistes :
 - Signal SZ non-sphérique
 - Bruit corrélé
 - Filtrage réaliste
Lobe + fonction de transfert
- Ajustement profil de pression :
PANCO2 non-paramétrique



Accord entre profils ajustés & réels :
Validation de PANCO2 sur des observations réalistes

Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

Travail de thèse

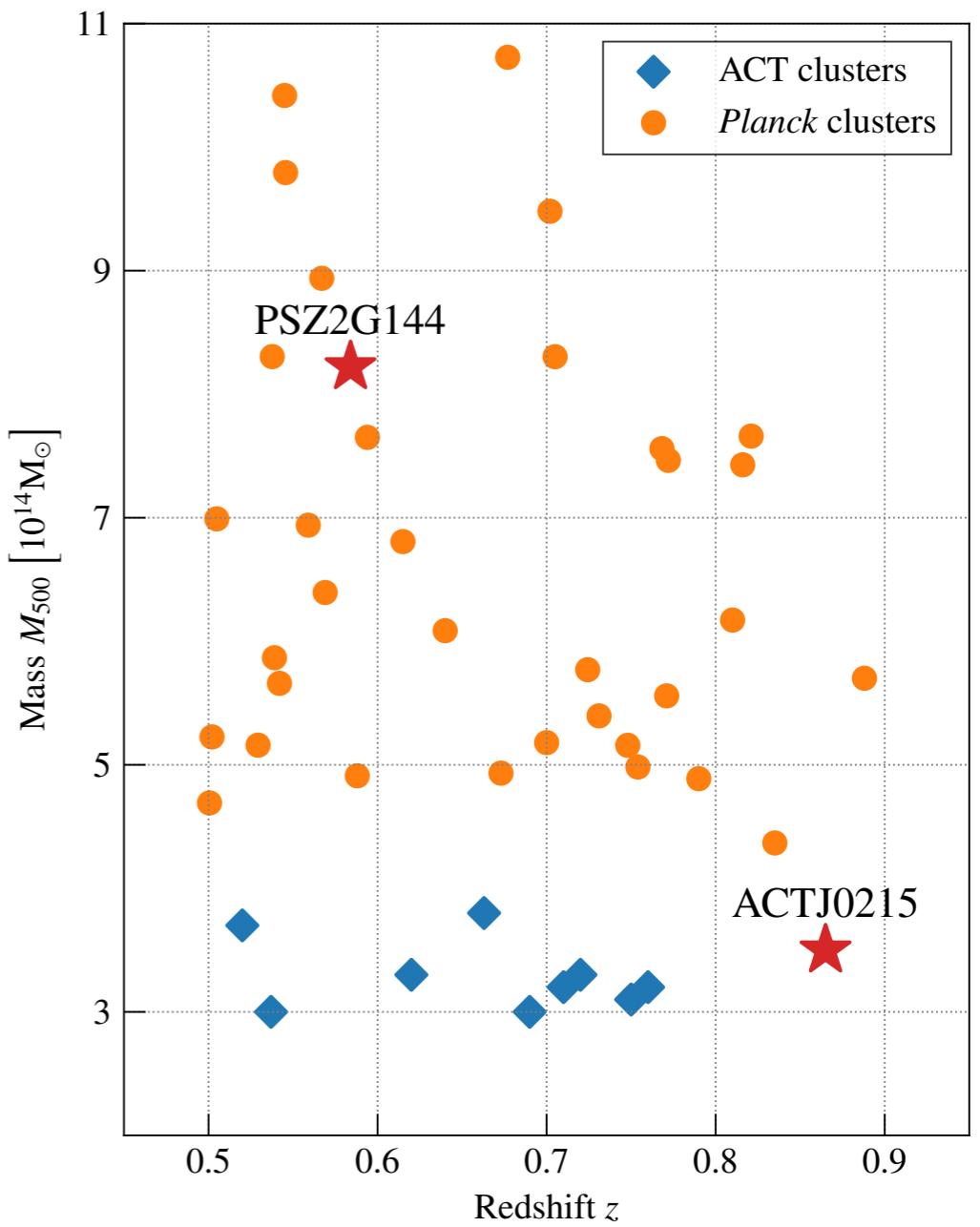
3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
4. Mesures des propriétés d'un amas distant peu massif
 - A. *Difficultés de l'analyse*
 - B. *Ajustement joint signal SZ + sources ponctuelles*
 - C. *Résultats*

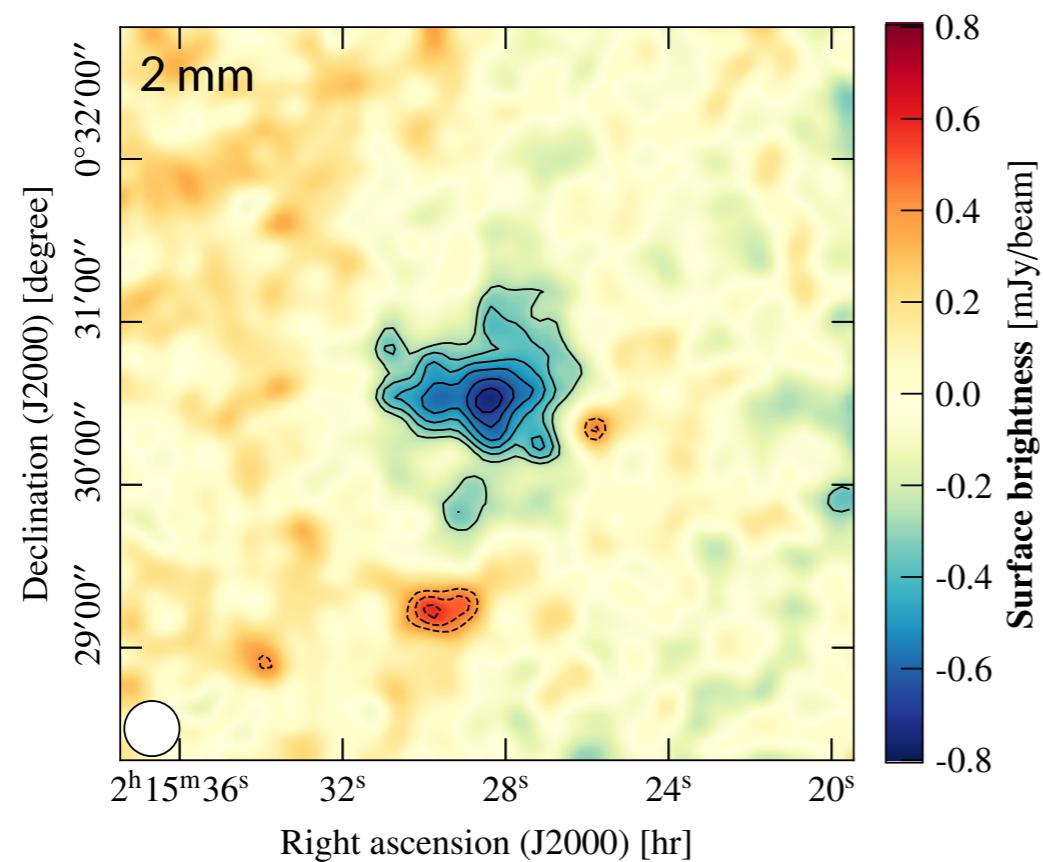
27 Objectifs de l'analyse

- Seconde analyse des propriétés d'un amas du LPSZ
- **Premier amas :** Vérification scientifique de NIKA2 Ruppin+18
 - Amas proche et massif du LPSZ
 - Temps d'observation élevé
 - Grande qualité de données
- **Étude suivante :** confrontation aux difficultés d'analyse
 - Amas peu massif et distant Non-détecté dans Planck
 - Qualité de données standard du LPSZ
 - Contamination par des sources ponctuelles
 - Cible choisie : ACTJ0215

Analyse combinant les difficultés attendues pour le LPSZ

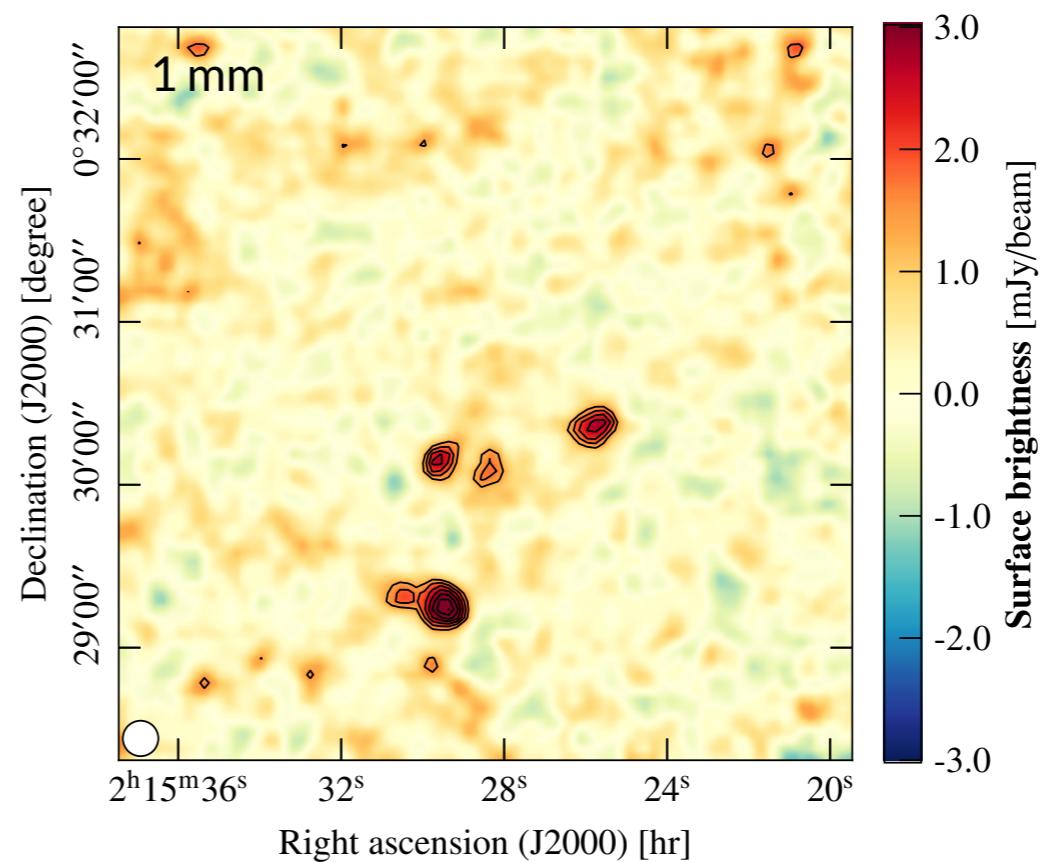
Kéruzoré et al. (2020)





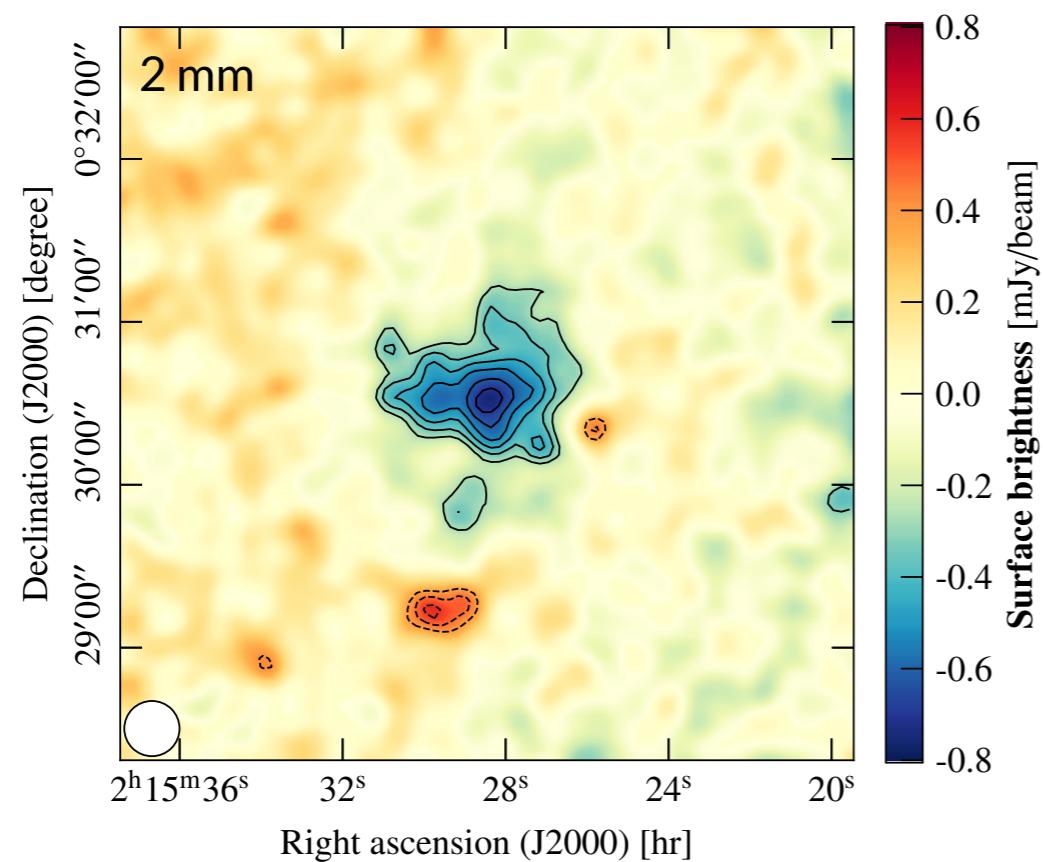
@ 150 GHz (2 mm):

- Décrément SZ détecté à $\sim 9\sigma$
- Signal faible, peu étendu
- Bruit résiduel corrélé & élevé
- Contamination par sources ponctuelles
Sources de flux positif compensant le décrément



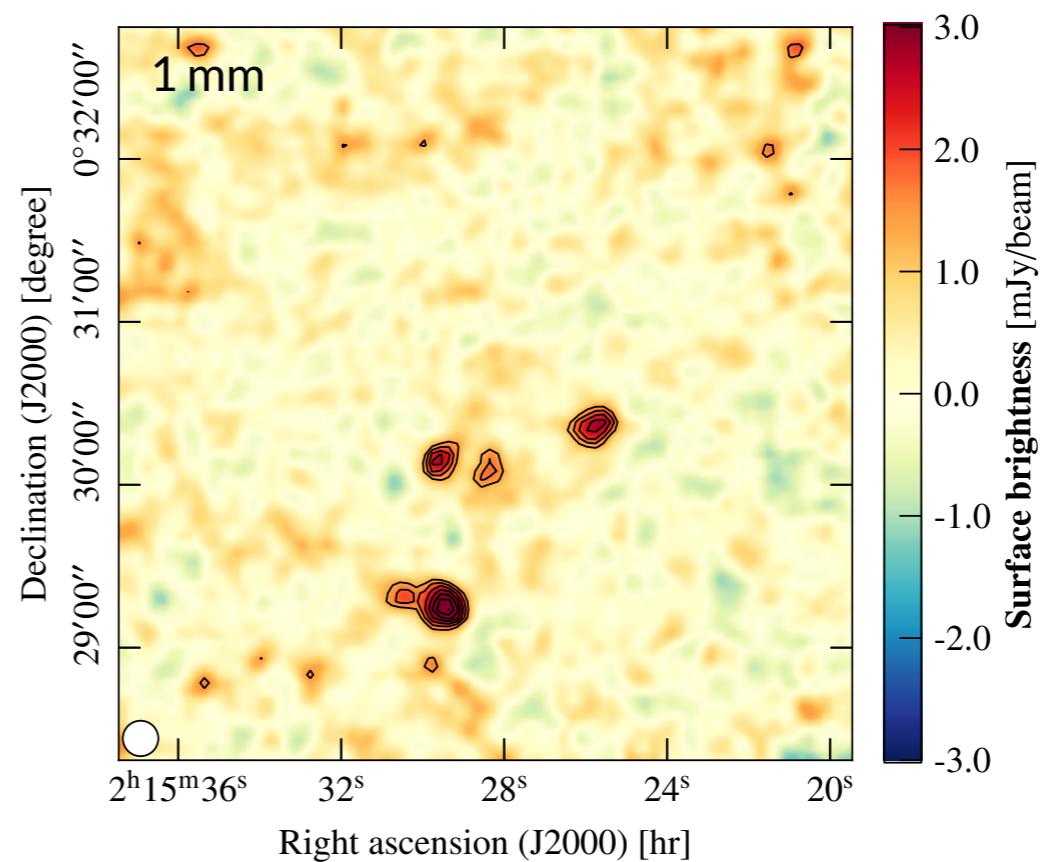
@ 260 GHz (1.2 mm):

- Pas de signal SZ détecté
Attendu vu le niveau de bruit
- Sources ponctuelles confirmées



@ 150 GHz (2 mm):

- Décrément SZ détecté à $\sim 9\sigma$
- Signal faible, peu étendu
- Bruit résiduel corrélé & élevé
- Contamination par sources ponctuelles
Sources de flux positif compensant le décrément

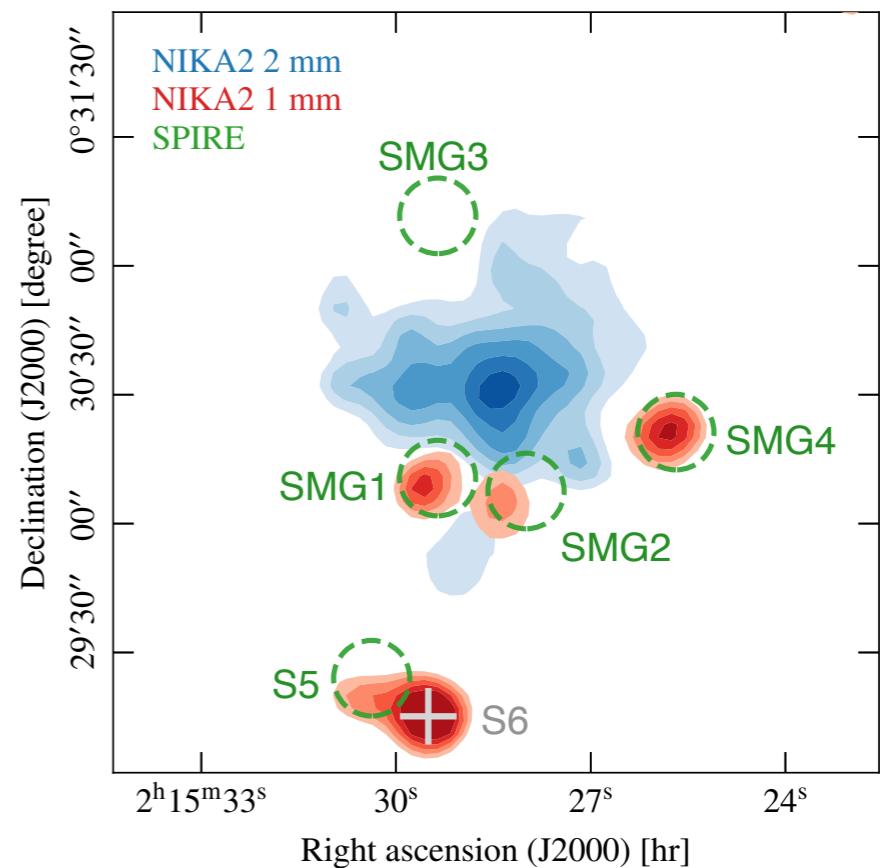


@ 260 GHz (1.2 mm):

- Pas de signal SZ détecté
Attendu vu le niveau de bruit
- Sources ponctuelles confirmées

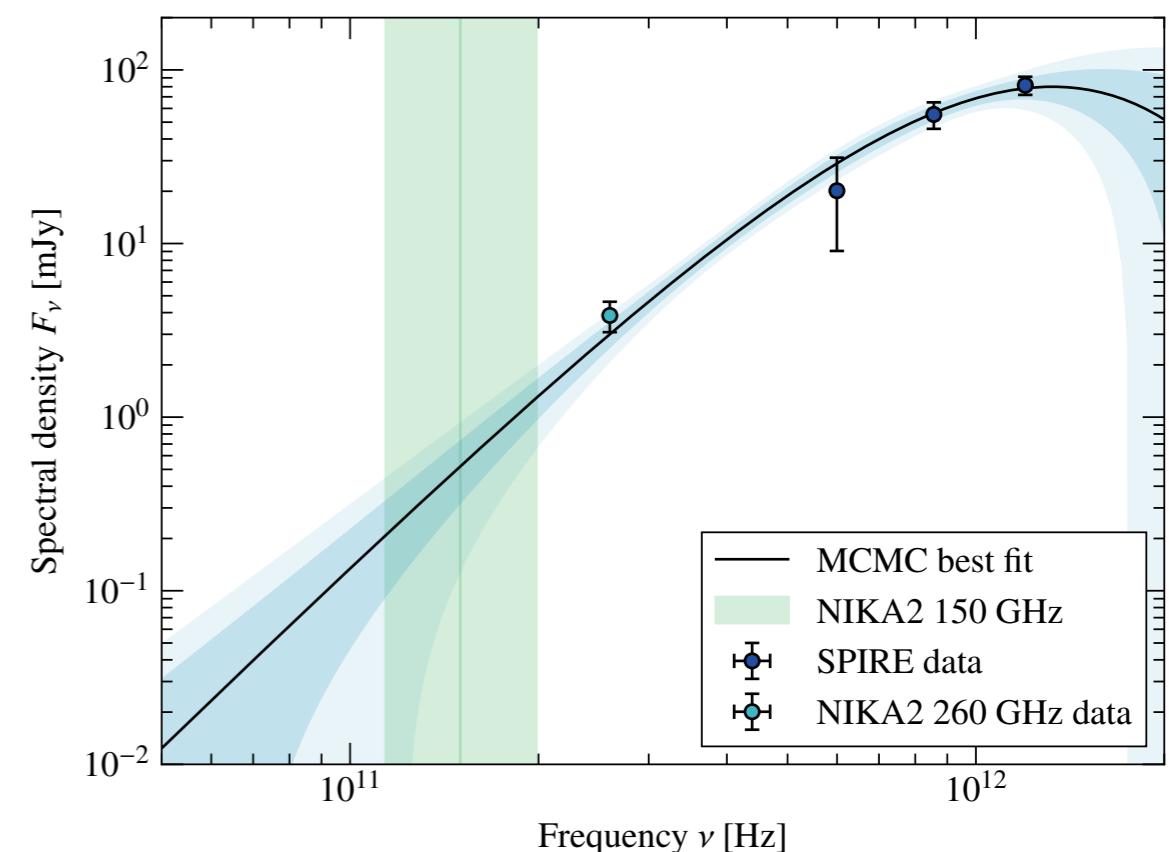
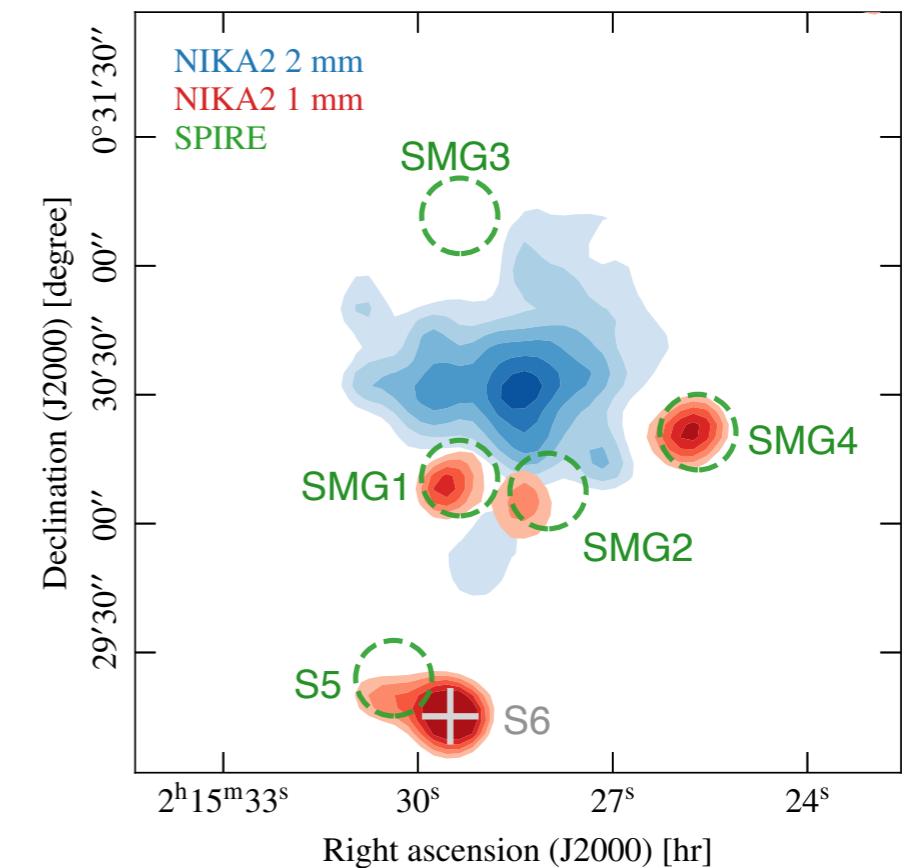
Contamination par les sources ponctuelles

- Sources ponctuelles connues ?
 - 5 galaxies sub-millimétriques (SMG) dans le champ de l'amas d'après *Herschel*
 - SMG1, SMG2, SMG4 facilement identifiées aux détections NIKA2 1 mm
 - SMG3 : SNR<3 à 1 mm
 - Sources S5 et S6 soustraites de la carte
Éloignées de l'amas
- Estimation du flux @ 2 mm : PSTools
 - Ajustement des sources NIKA2 @ 1 mm
→ Flux 1 mm
 - Ajustement du spectre
Flux Herschel + NIKA2 @ 1 mm
 - Extrapolation dans la bande NIKA2 @ 2 mm
→ **Distribution de probabilité du flux @ 2 mm**



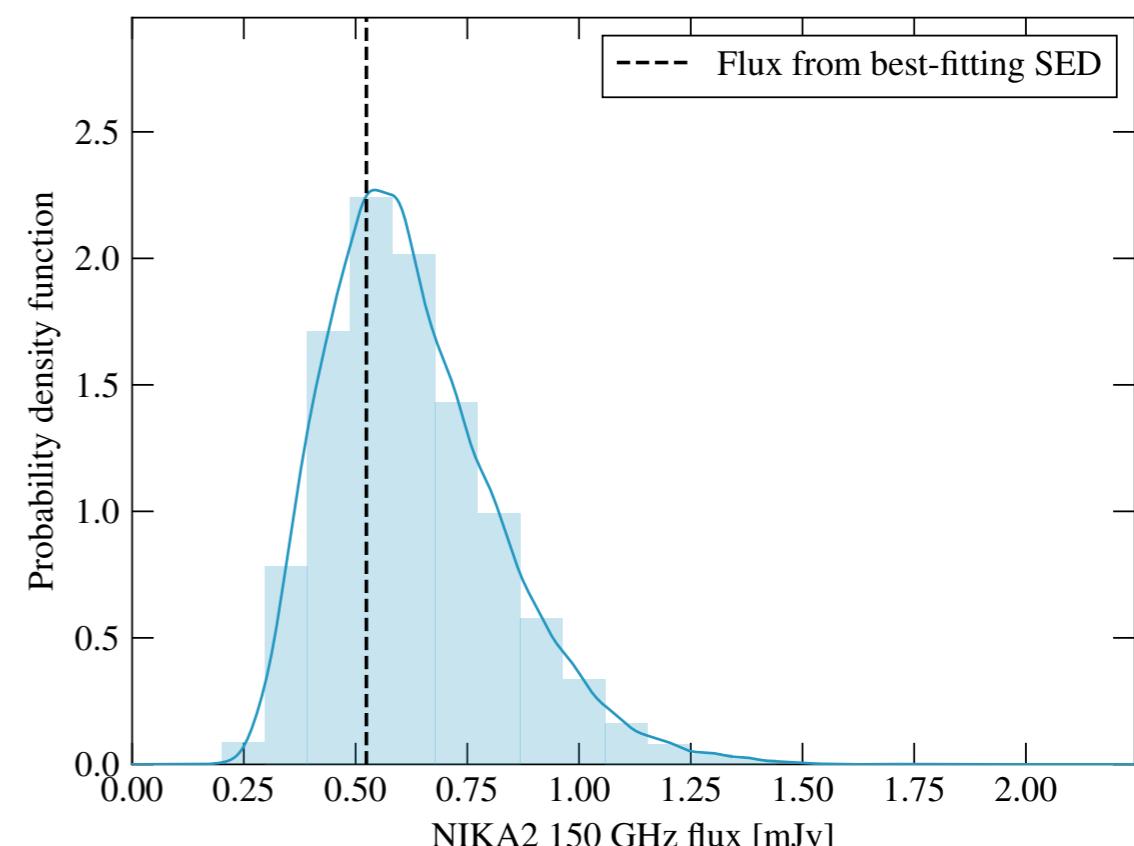
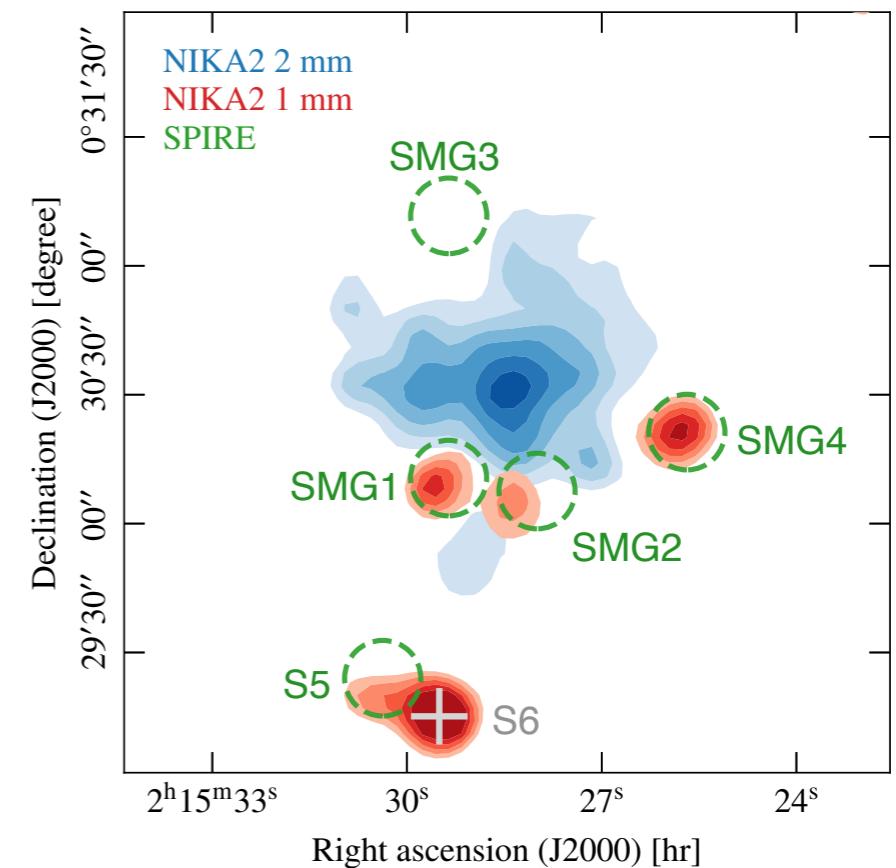
Contamination par les sources ponctuelles

- Sources ponctuelles connues ?
 - 5 galaxies sub-millimétriques (SMG) dans le champ de l'amas d'après *Herschel*
 - SMG1, SMG2, SMG4 facilement identifiées aux détections NIKA2 1 mm
 - SMG3 : SNR<3 à 1 mm
 - Sources S5 et S6 soustraites de la carte
Éloignées de l'amas
- Estimation du flux @ 2 mm : PSTools
 - Ajustement des sources NIKA2 @ 1 mm
→ Flux 1 mm
 - Ajustement du spectre
Flux Herschel + NIKA2 @ 1 mm
 - Extrapolation dans la bande NIKA2 @ 2 mm
→ **Distribution de probabilité du flux @ 2 mm**

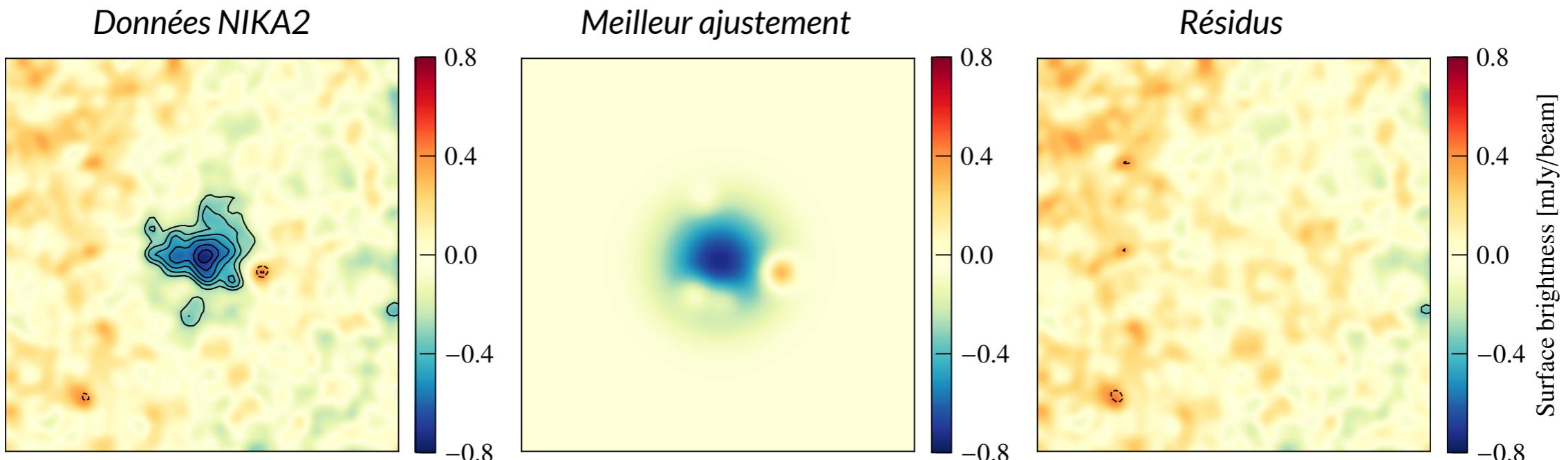


Contamination par les sources ponctuelles

- Sources ponctuelles connues ?
 - 5 galaxies sub-millimétriques (SMG) dans le champ de l'amas d'après *Herschel*
 - SMG1, SMG2, SMG4 facilement identifiées aux détections NIKA2 1 mm
 - SMG3 : SNR<3 à 1 mm
 - Sources S5 et S6 soustraites de la carte
Éloignées de l'amas
- Estimation du flux @ 2 mm : PSTools
 - Ajustement des sources NIKA2 @ 1 mm
→ Flux 1 mm
 - Ajustement du spectre
Flux Herschel + NIKA2 @ 1 mm
 - Extrapolation dans la bande NIKA2 @ 2 mm
→ **Distribution de probabilité du flux @ 2 mm**



- Analyse similaire à PANCO2 : approche *forward modeling* + MCMC
- Ajustement d'un modèle gNFW + sources ponctuelles
- Flux sources = paramètres de nuisance Priors = PDF du flux

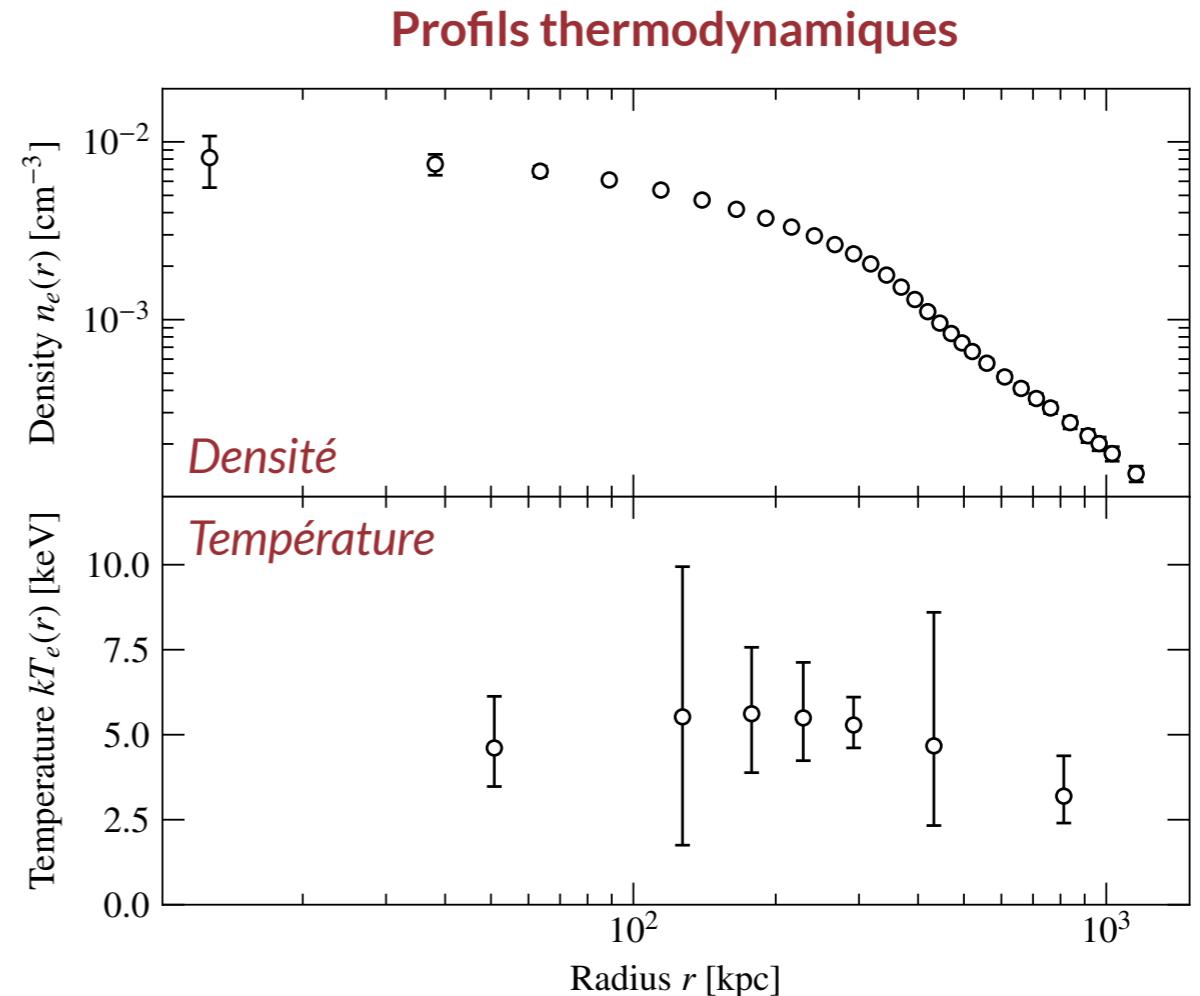
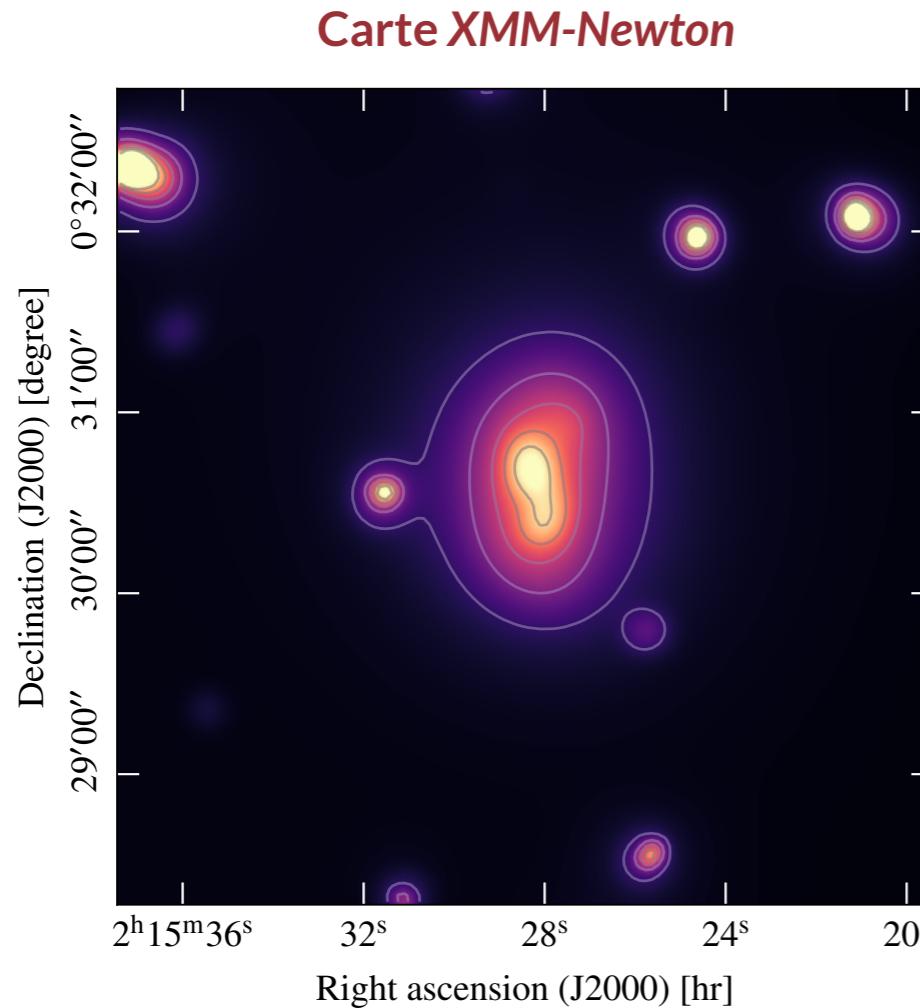


NB: SMG5&6 soustraites

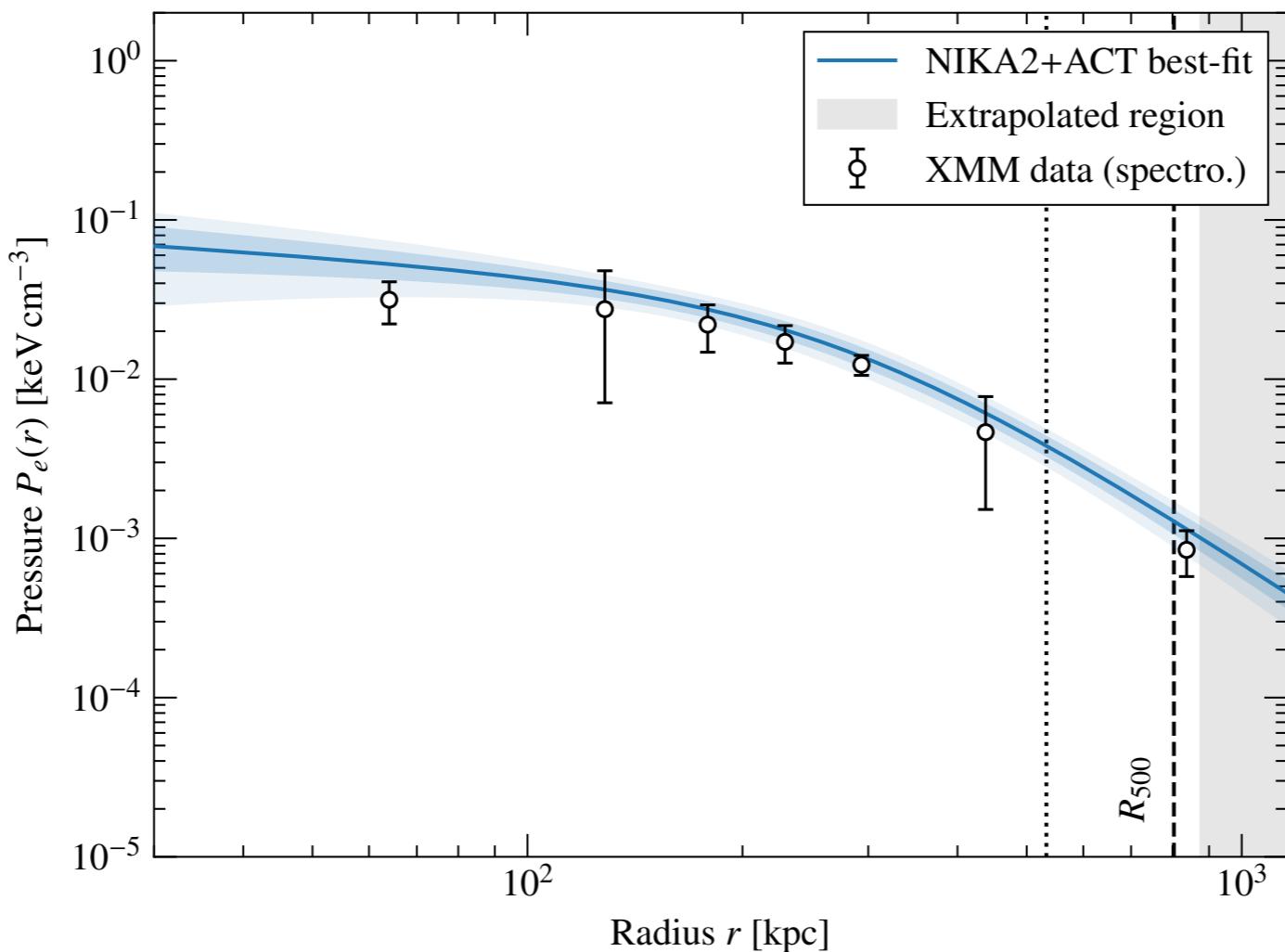
Résidus compatibles avec du bruit

→ Données bien décrites par un modèle gNFW + sources

- Amas observé avec XMM-Newton
 - Temps d'observation = 37 ks : Suffisant pour mesure spectroscopique
 - Température accessible par spectroscopie : rare à ce redshift & à cette masse
 - **Comparaison profils : X+SZ vs X seuls**

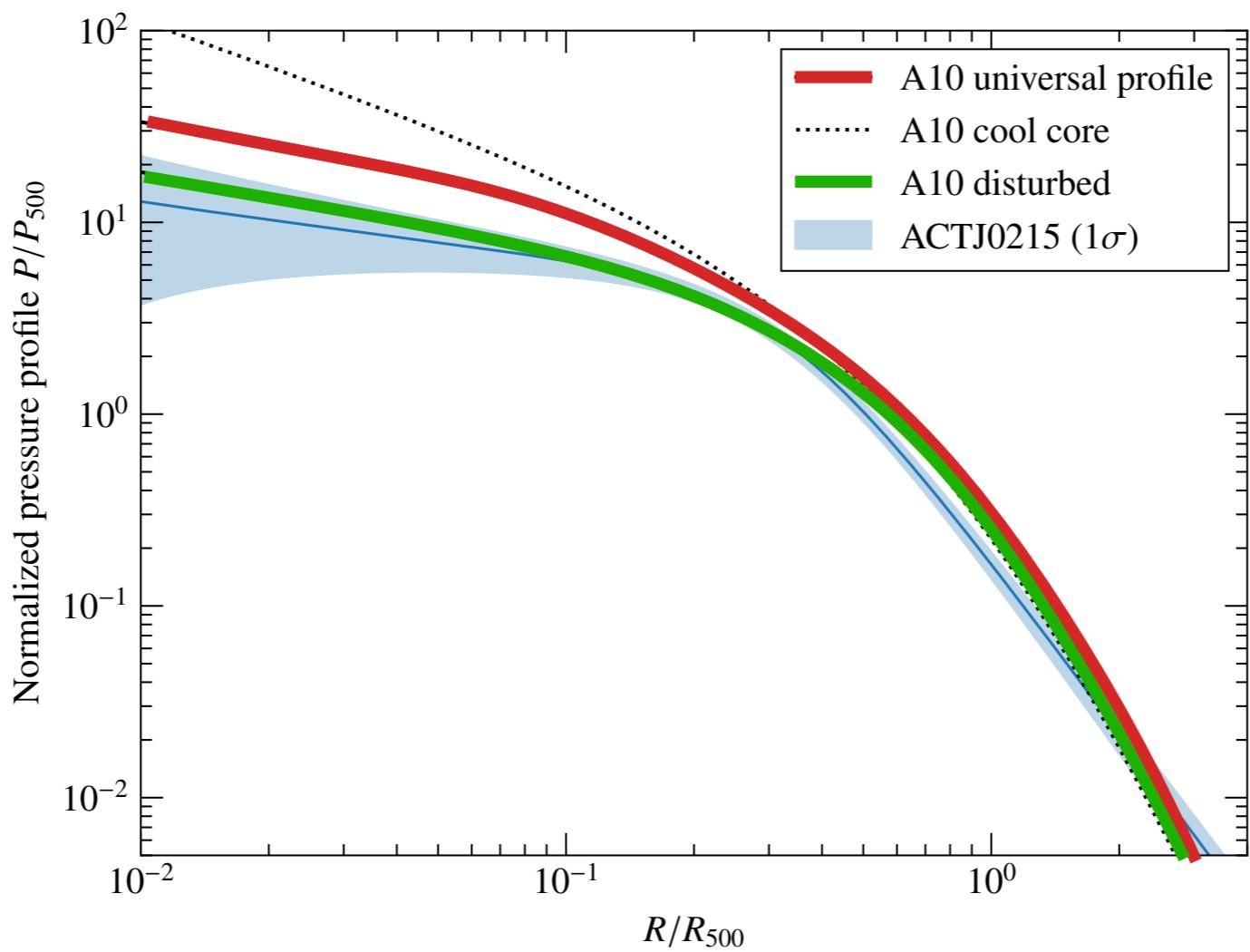


Résultat : profil de pression de ACTJ0215



Profil de pression de ACTJ0215

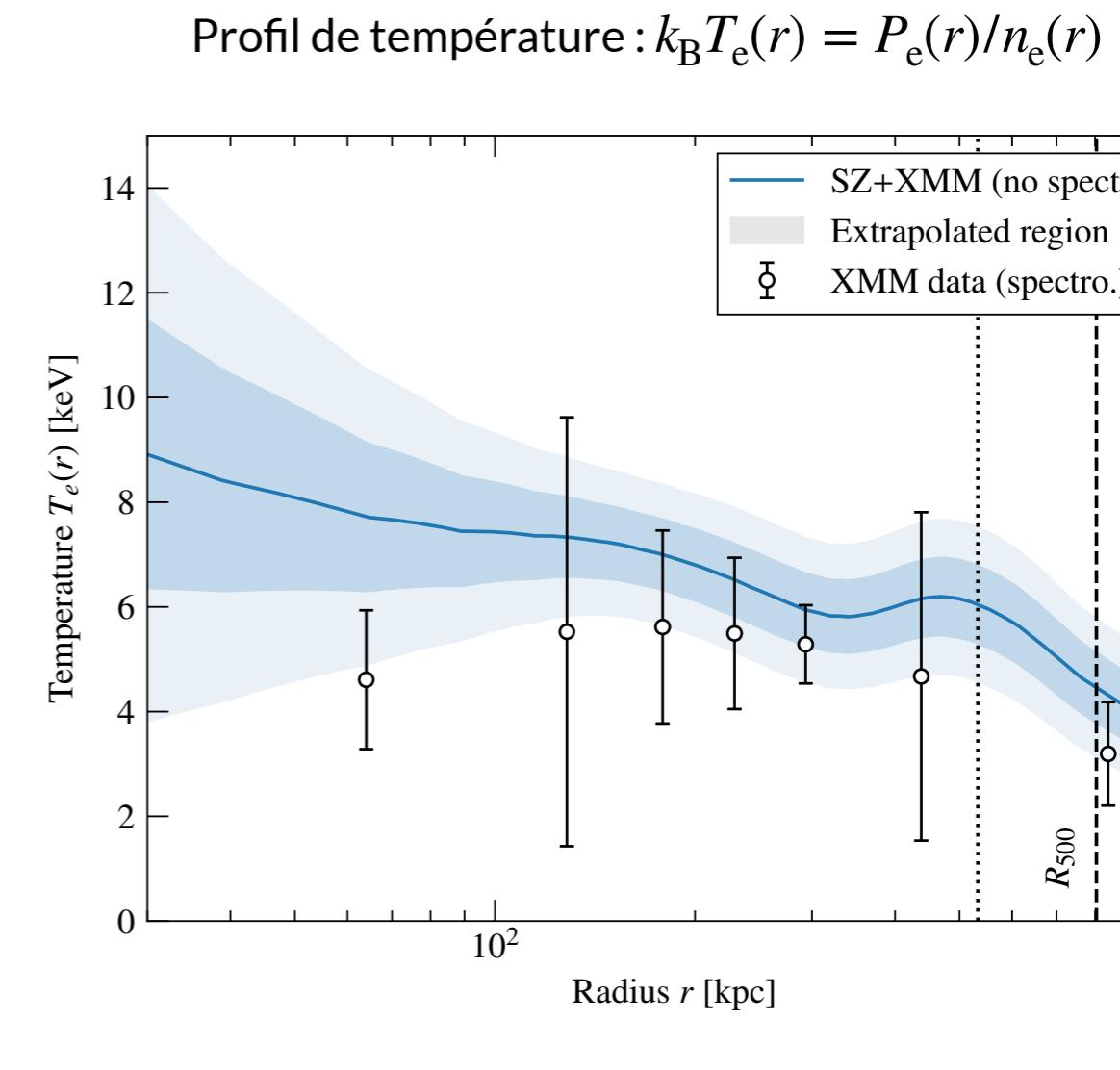
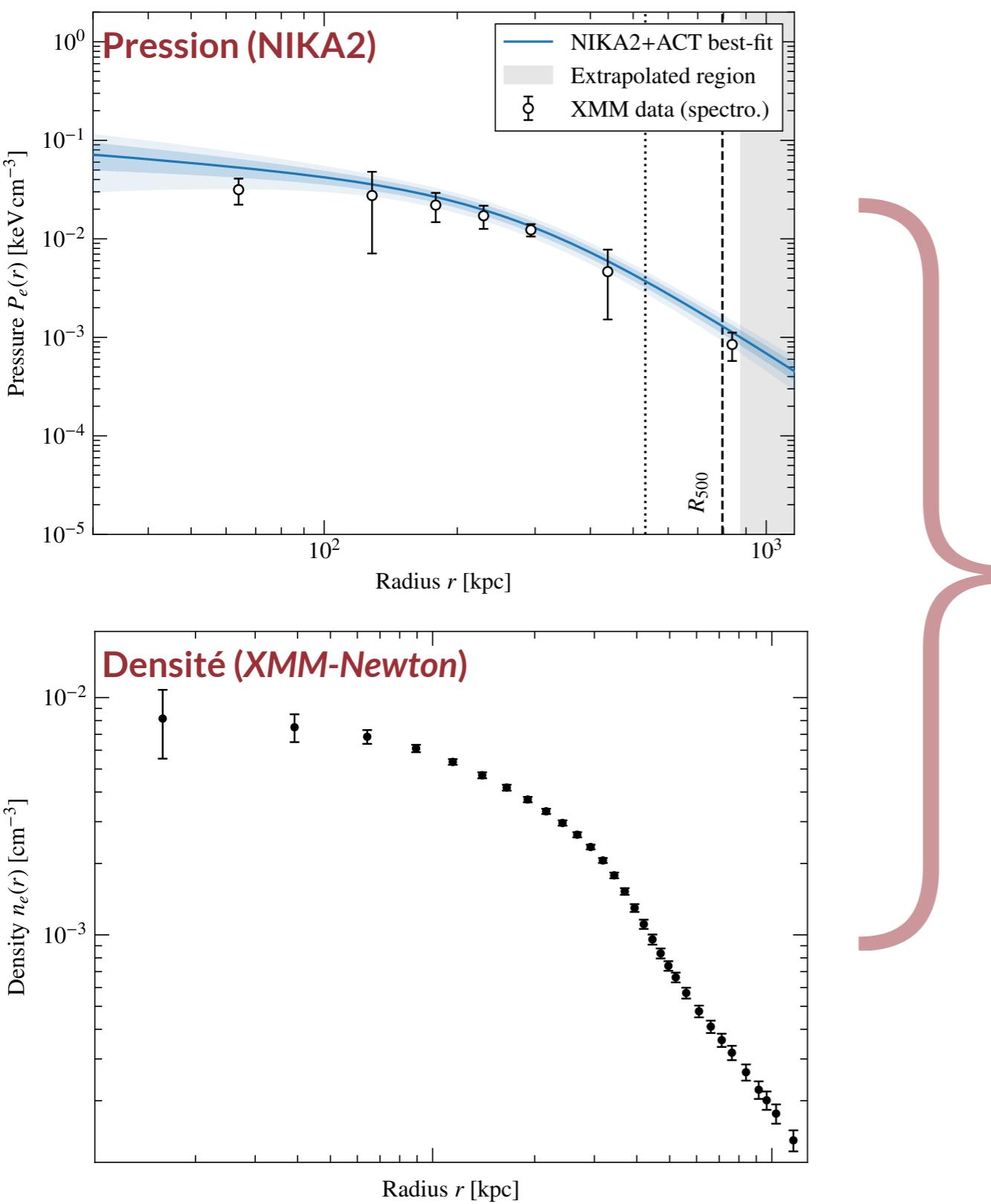
- Profil de pression reconstruit (bleu) compatible avec mesures X seules (blanc)
- Profil plat dans le coeur de l'amas → cœur perturbé
- Profil **incompatible** avec le **profil universel** de Arnaud+10
Compatible avec le **profil moyen d'amas perturbés** de Arnaud+10



Profil de pression normalisé

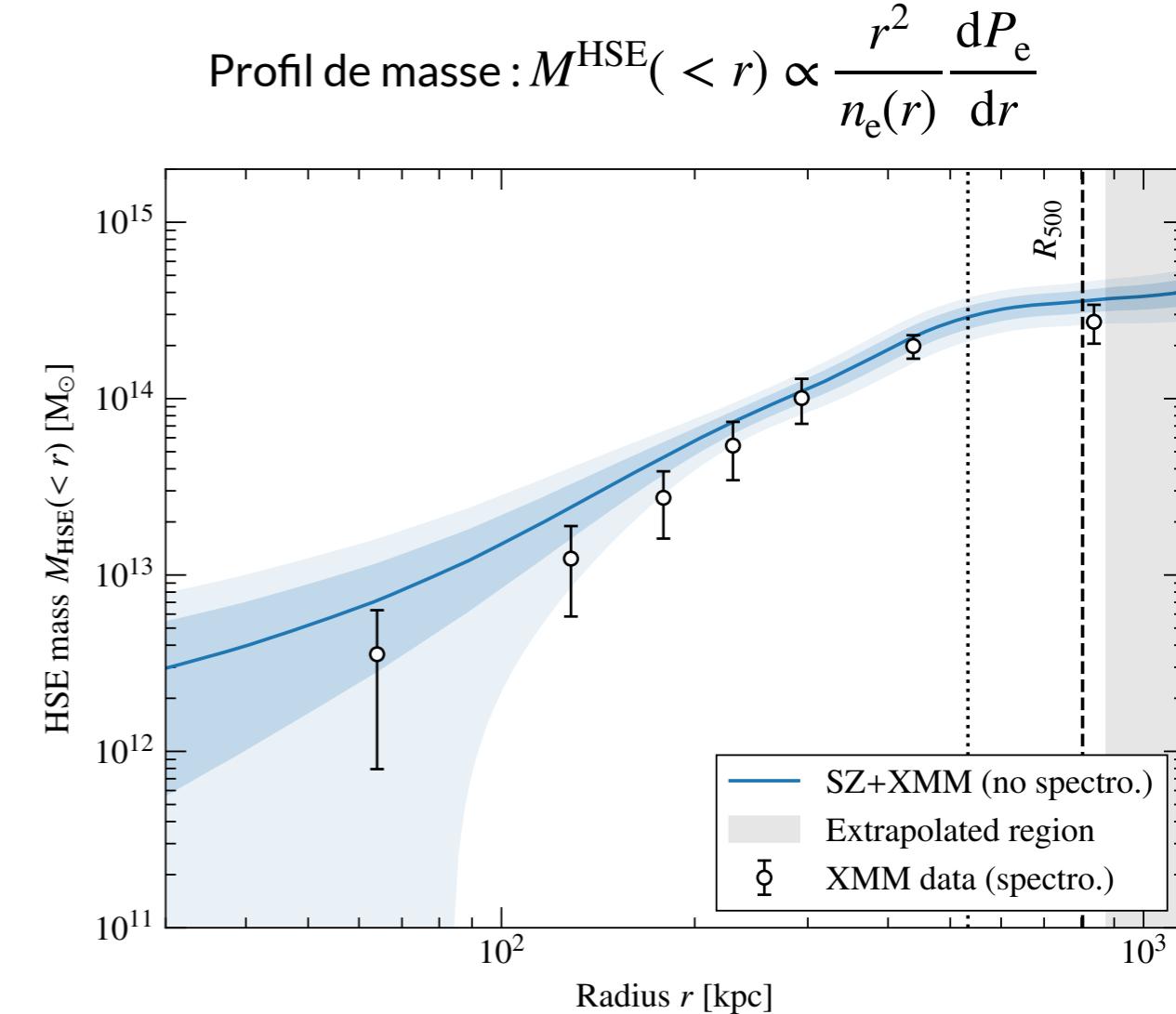
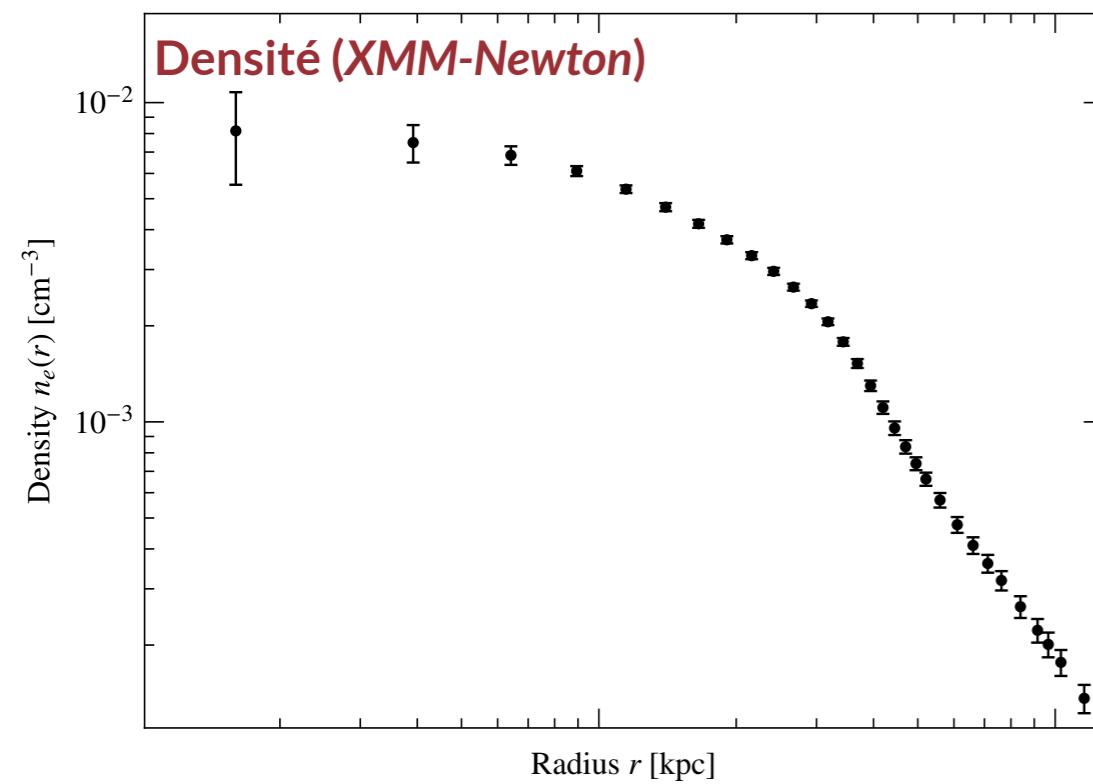
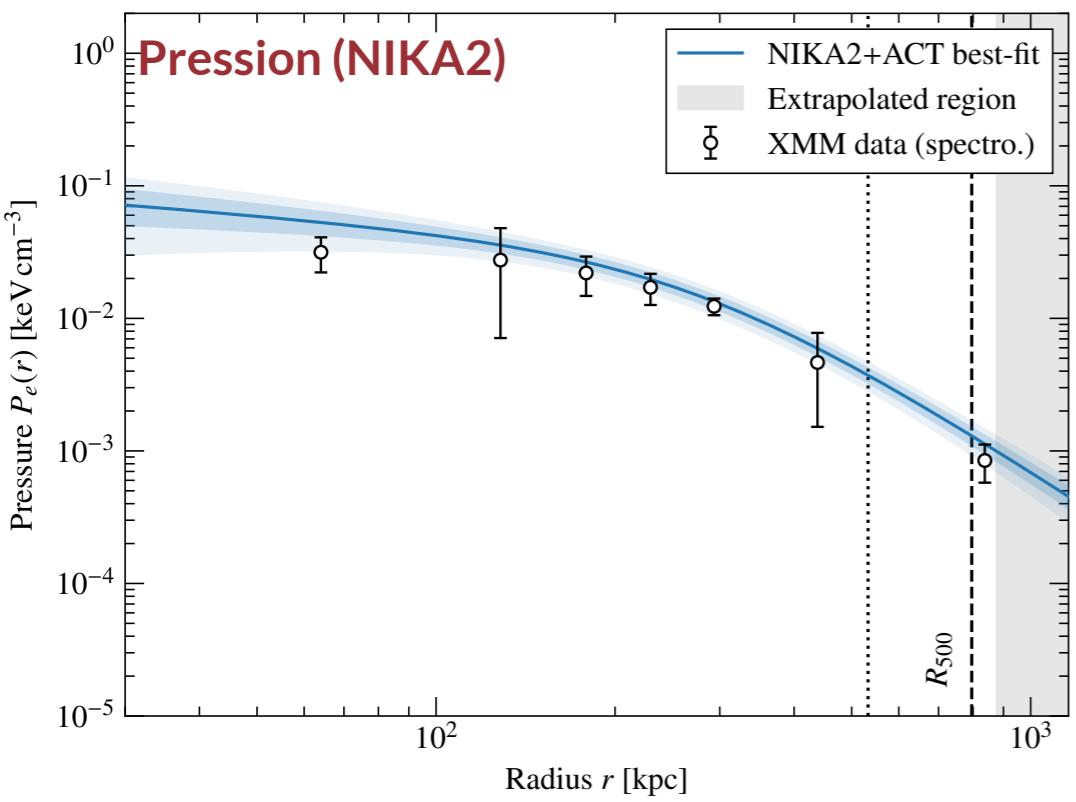
- Profil de pression reconstruit (bleu) compatible avec mesures X seules (blanc)
- Profil plat dans le coeur de l'amas → cœur perturbé
- Profil **incompatible** avec le **profil universel** de Arnaud+10
Compatible avec le **profil moyen d'amas perturbés** de Arnaud+10

Combinaison X-SZ → caractérisation thermodynamique du milieu intra-amas



Température centrale élevée
 → Cœur perturbé
 → Systématique état de relaxation

Combinaison X-SZ → caractérisation thermodynamique du milieu intra-amas



$$\rightarrow \{M_{500}, R_{500}\}$$

Résultats : grandeurs caractéristiques intégrées

	ACT	XMM-Newton	NIKA2+XMM
R_{500} [kpc]	877.8 ± 46.2	780.9 ± 19.8	810.1 ± 41.9
$\mathcal{D}_A^2 Y_{500}$ [10^{-5} Mpc^2]	4.07 ± 1.13	-	3.76 ± 0.39
M_{500} [10^{14} M_\odot]	3.5 ± 0.8	2.48 ± 0.70	3.79 ± 0.58
	<i>From ACT &</i> —	Hydrostatic mass	Hydrostatic mass
	$Y_{500} - M_{500}$ <i>scal. rel.</i>		

- Résultats en accord avec les études précédentes :
 - XMM-Newton seul *Observations profondes & spectroscopie*
 - ACT *SZ basse résolution : masse d'après relation d'échelle*
- Précision améliorée → Apport de la combinaison SZ haute résolution + X

→ Résultats prometteurs pour le LPSZ : Fortes contraintes

- Sur les propriétés d'un amas complexe
- Sur les propriétés des amas du LPSZ
- Sur le profil de pression moyen / la relation d'échelle

Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

Travail de thèse

3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
4. Mesures des propriétés d'un amas distant peu massif
5. La relation d'échelle masse-observable dans le grand programme SZ
 - A. *Modélisation probabiliste de la relation d'échelle*
 - B. *Validation par analyse Monte-Carlo d'échantillons fictifs*
 - C. *Extensions du LPSZ*

- Relation d'échelle (**SR**) masse-observable : objectif du LPSZ
- Apport du LPSZ : quantités **mieux contraintes** sur un échantillon à **haut redshift**
- Ajustement d'une relation d'échelle : **complexe**
Multitude d'effets à prendre en compte : incertitudes corrélées, effets de sélection, ...
- **Travail de thèse** : préparation de l'ajustement de la relation avec les données du LPSZ

- Croissance des structures auto similaire : relation en **loi de puissance** entre :

- **Paramètre de Compton intégré** $Y_{500} \propto \int^{R_{500}} P_e(r) d^3r$

- **Masse** M_{500}

$$E^{-2/3}(z) \frac{D_A^2 Y_{500}}{10^{-4} \text{ Mpc}^2} = 10^\alpha \left[\frac{M_{500}}{6 \times 10^{14} \text{ M}_\odot} \right]^\beta$$

- Relation linéaire entre les logarithmes de l'observable Y et de la masse Z :

$$\left. \begin{aligned} Y &\equiv \log \left[E^{-2/3}(z) \frac{D_A^2 Y_{500}}{10^{-4} \text{ Mpc}^2} \right] \\ Z &\equiv \log \left[\frac{M_{500}}{6 \times 10^{14} \text{ M}_\odot} \right] \end{aligned} \right\} \Rightarrow Y = \alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z} Z$$

- **Relation d'échelle = tendance** : dispersion intrinsèque autour de la relation

Due à la physique des amas : pour une masse donnée, un amas peut être plus ou moins brillant

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z} Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

→ **Paramètres d'intérêt** : Ordonnée à l'origine $\alpha_{Y|Z}$, Pente $\beta_{Y|Z}$, dispersion intrinsèque $\sigma_{Y|Z}$

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- **Biais d'Eddington** : Masse réelle Z inconnue, accès à un estimateur X

$$P(X|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{X|Z} + \beta_{X|Z}Z, \sigma_{X|Z}^2)$$

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- **Biais d'Eddington** : Masse réelle Z inconnue, accès à un estimateur X

$$P(X|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{X|Z} + \beta_{X|Z}Z, \sigma_{X|Z}^2)$$

- **Grandeurs mesurées** (y, x) et **incertitudes** corrélées avec covariance V :

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) = \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i)$

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- **Biais d'Eddington** : Masse réelle Z inconnue, accès à un estimateur X

$$P(X|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{X|Z} + \beta_{X|Z}Z, \sigma_{X|Z}^2)$$

- **Grandeurs mesurées** (y, x) et **incertitudes** corrélées avec covariance V :

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) = \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i)$

- **Biais de Malmquist (MB)** : seuls les objets d'observable $y > y_{\text{th}}$ sont détectables

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) \propto \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i) \times H(y_i - y_{\text{th}})$ $H(x)$ = Fonction de Heaviside

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- **Biais d'Eddington** : Masse réelle Z inconnue, accès à un estimateur X

$$P(X|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{X|Z} + \beta_{X|Z}Z, \sigma_{X|Z}^2)$$

- **Grandeurs mesurées** (y, x) et **incertitudes** corrélées avec covariance V :

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) = \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i)$

- **Biais de Malmquist (MB)** : seuls les objets d'observable $y > y_{\text{th}}$ sont détectables

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) \propto \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i) \times H(y_i - y_{\text{th}})$ $H(x)$ = Fonction de Heaviside

- **Distribution latente** modélisée comme un mélange de Gaussiennes

$$P(Z) = (1/n_{\text{mix}}) \sum_{k=1}^{n_{\text{mix}}} \pi_k \mathcal{N}(\mu_k, \sigma_k^2)$$

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- **Biais d'Eddington** : Masse réelle Z inconnue, accès à un estimateur X

$$P(X|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{X|Z} + \beta_{X|Z}Z, \sigma_{X|Z}^2)$$

- **Grandeurs mesurées** (y, x) et **incertitudes** corrélées avec covariance V :

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) = \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i)$

- **Biais de Malmquist (MB)** : seuls les objets d'observable $y > y_{\text{th}}$ sont détectables

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) \propto \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i) \times H(y_i - y_{\text{th}})$ $H(x)$ = Fonction de Heaviside

- **Distribution latente** modélisée comme un mélange de Gaussiennes

$$P(Z) = (1/n_{\text{mix}}) \sum_{k=1}^{n_{\text{mix}}} \pi_k \mathcal{N}(\mu_k, \sigma_k^2)$$

Entrées



Paramètres d'intérêt



Paramètres de nuisance



ϑ

- Approche choisie : **modélisation bayésienne hiérarchique** de la SR

Couramment utilisée : Kelly07, Andreon+13, Mantz15, Sereno16, ...

- **Dispersion intrinsèque** Gaussienne autour de la relation :

$$P(Y|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{Y|Z} + \beta_{Y|Z}Z, \sigma_{Y|Z}^2)$$

- **Biais d'Eddington** : Masse réelle Z inconnue, accès à un estimateur X

$$P(X|Z) = \mathcal{N}(\alpha_{X|Z} + \beta_{X|Z}Z, \sigma_{X|Z}^2)$$

- **Grandeurs mesurées** (y, x) et **incertitudes** corrélées avec covariance V :

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) = \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i)$

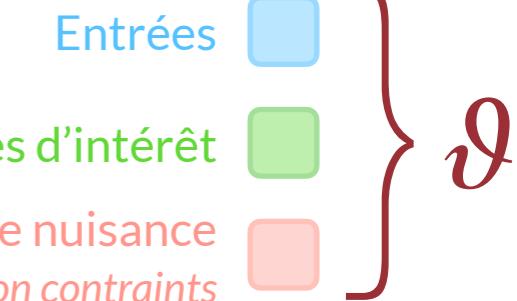
- **Biais de Malmquist (MB)** : seuls les objets d'observable $y > y_{\text{th}}$ sont détectables

Pour chaque amas i , $P(\{y_i, x_i\} | \{Y_i, X_i\}) \propto \mathcal{N}_2(\{Y_i, X_i\}, V_i) \times H(y_i - y_{\text{th}})$ $H(x)$ = Fonction de Heaviside

- **Distribution latente** modélisée comme un mélange de Gaussiennes

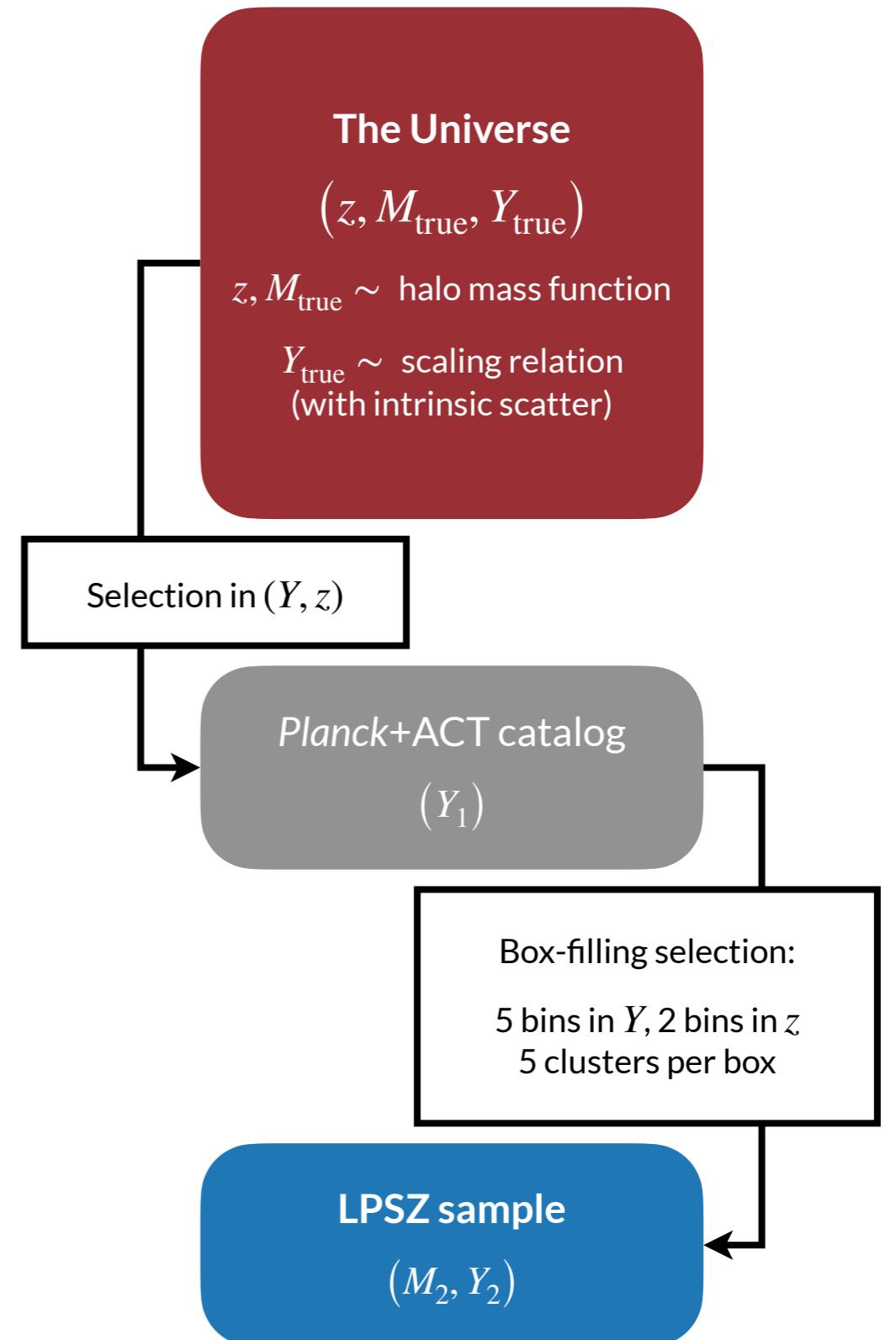
$$P(Z) = (1/n_{\text{mix}}) \sum_{k=1}^{n_{\text{mix}}} \pi_k \mathcal{N}(\mu_k, \sigma_k^2)$$

- Ajout d'a priori sur les paramètres → **distribution postérieure** $P(\vartheta | \{x_i, y_i\})$
- Échantillonnée par MCMC à l'aide de LIRA (Sereno16)

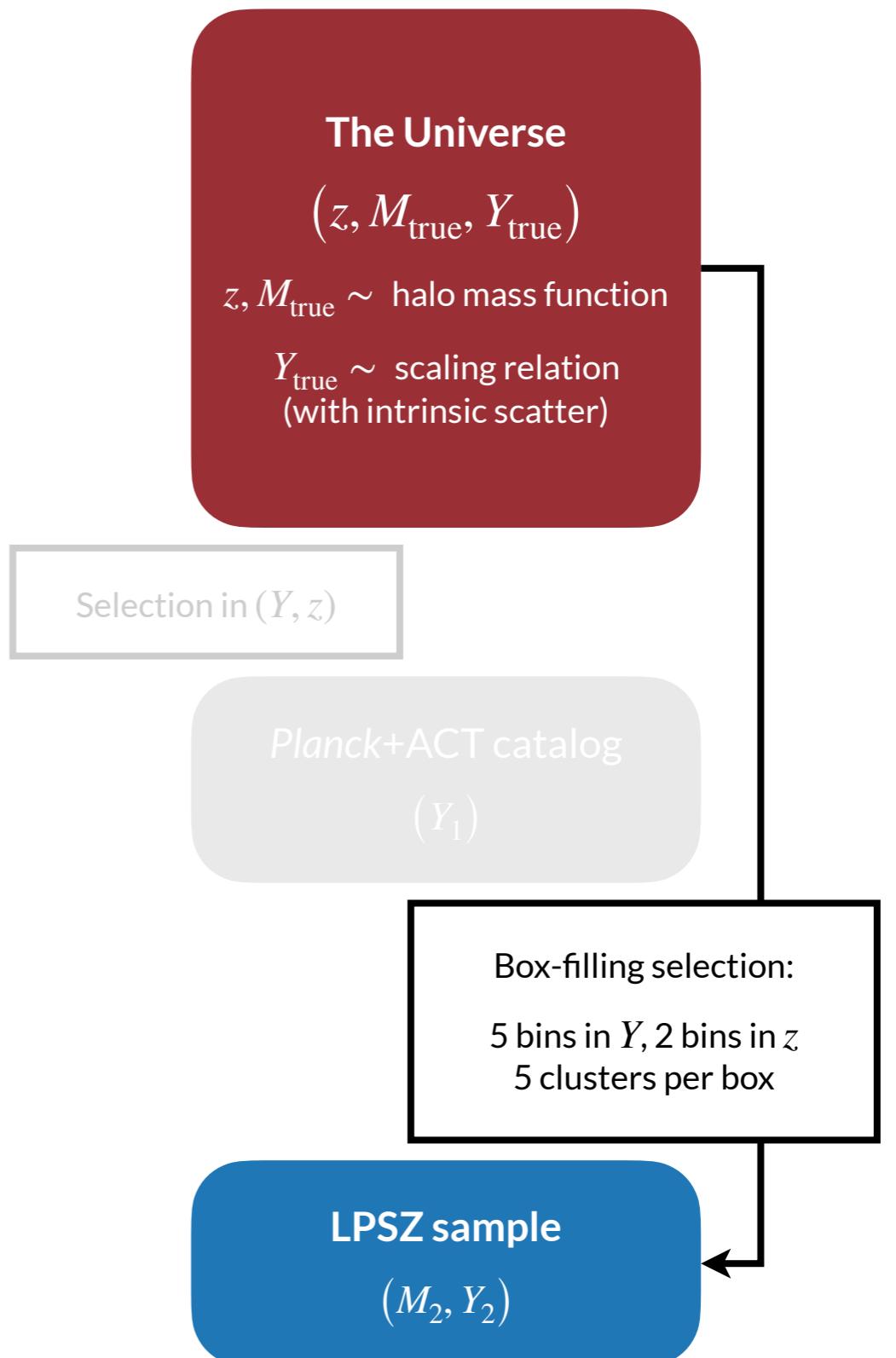


- **Objectif :** prédiction des contraintes du LPSZ sur la relation d'échelle
 - Simulation d'échantillons fictifs mimant le LPSZ
 - Relation d'échelle réelle connue
 - Ajustement de la relation sur l'échantillon
- Test de l'analyse :
 - **Justesse :** Analyse non biaisée
 - **Précision :** Contraintes fortes

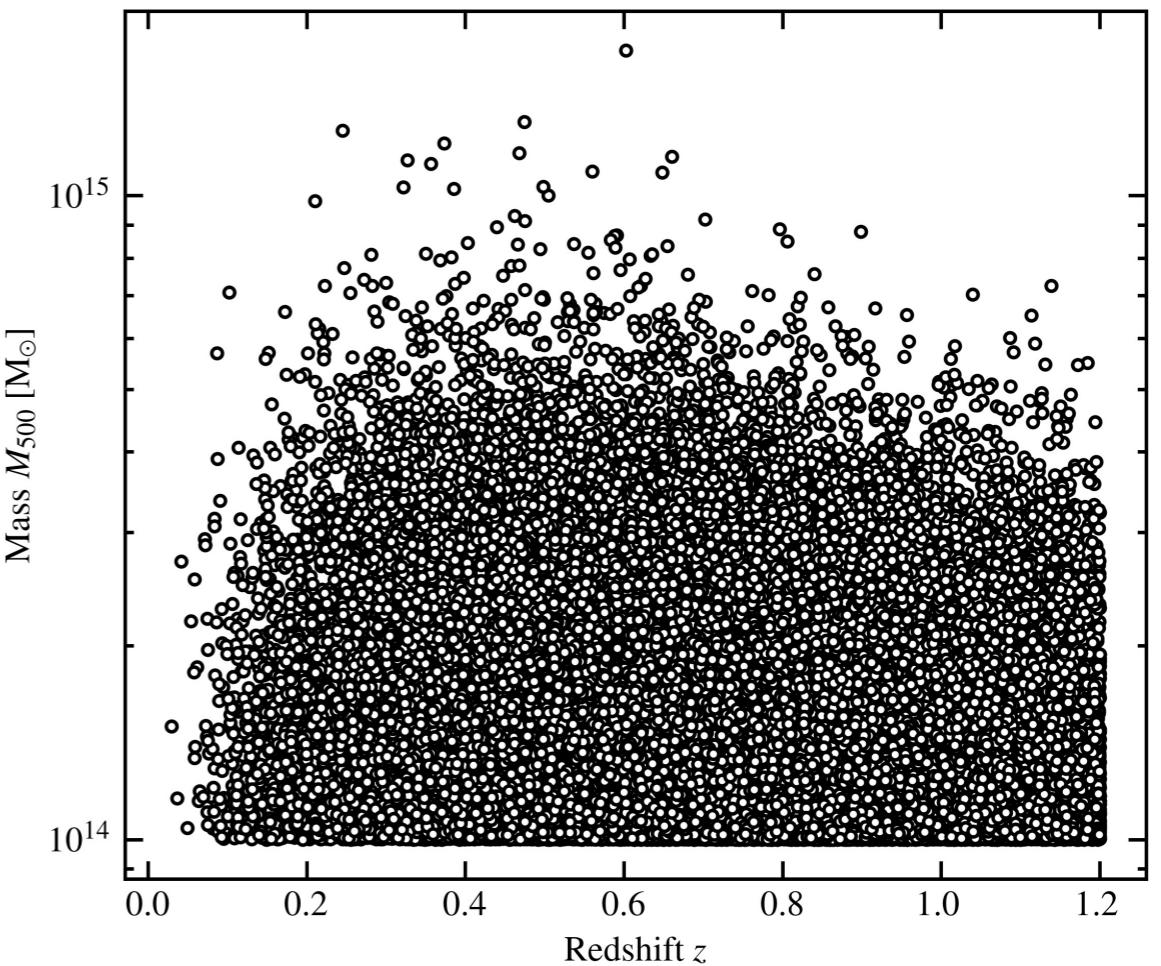
- **Objectif :** prédiction des contraintes du LPSZ sur la relation d'échelle
 - Simulation d'échantillons fictifs mimant le LPSZ
 - Relation d'échelle réelle connue
 - Ajustement de la relation sur l'échantillon
- Test de l'analyse :
 - **Justesse :** Analyse non biaisée
 - **Précision :** Contraintes fortes
- Fonction de sélection du LPSZ :
 - 10 “boîtes” : 2 bins en z , 5 bins en Y
 - Remplies avec des amas des catalogues Planck/ACT



- **Objectif :** prédiction des contraintes du LPSZ sur la relation d'échelle
 - Simulation d'échantillons fictifs mimant le LPSZ
 - Relation d'échelle réelle connue
 - Ajustement de la relation sur l'échantillon
- Test de l'analyse :
 - **Justesse :** Analyse non biaisée
 - **Précision :** Contraintes fortes
- Fonction de sélection du LPSZ :
 - 10 “boîtes” : 2 bins en z , 5 bins en Y
 - Remplies avec des amas des catalogues Planck/ACT
- **Cette analyse :** sélection de Planck/ACT ignorée



- **Étape 1 :** tirage aléatoire de points dans le plan (z, M_{500})
Suivant une fonction de masse réaliste (Tinker+08)



- **Étape 1 :** tirage aléatoire de points dans le plan (z, M_{500})

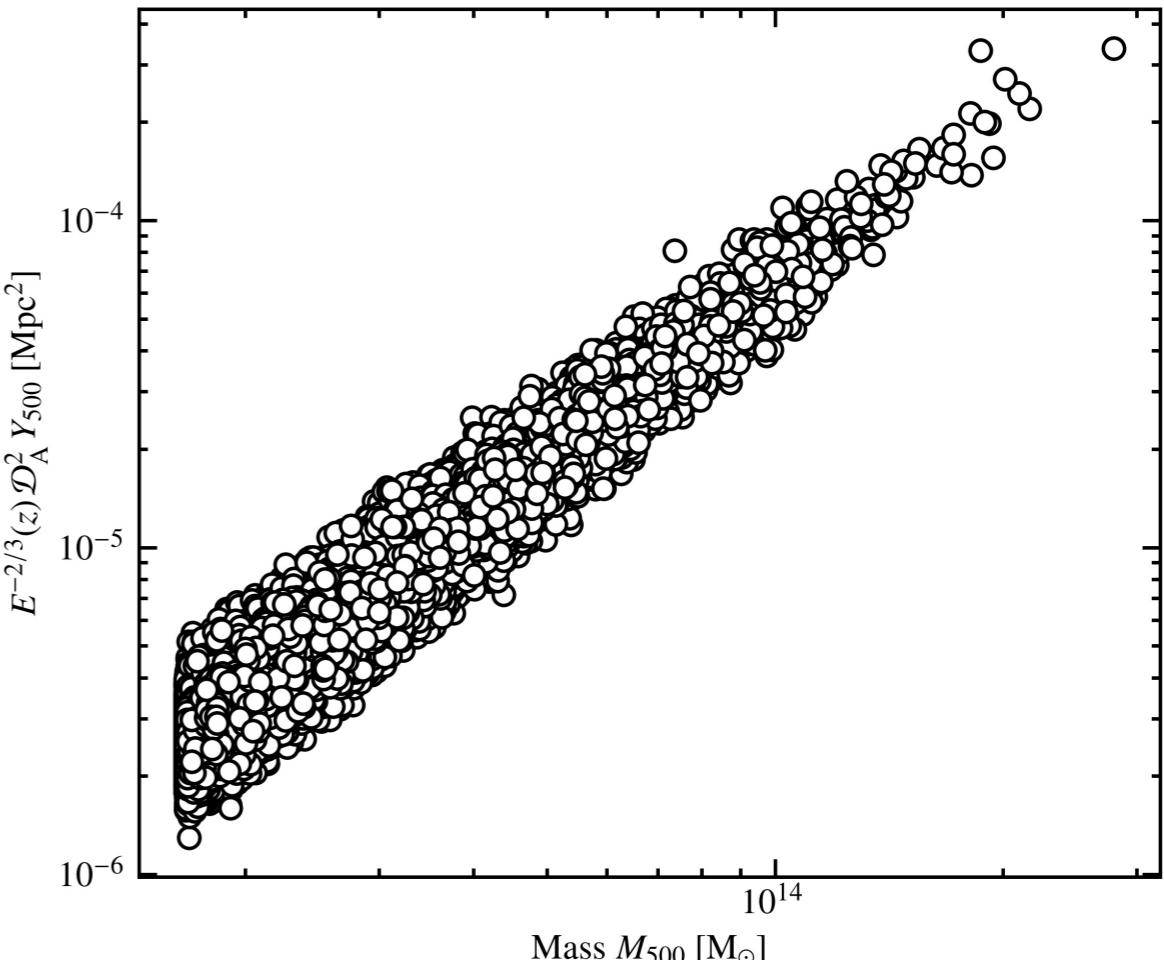
Suivant une fonction de masse réaliste (Tinker+08)

- **Étape 2 :** application d'une relation d'échelle fiduciellement

Résultats de *Planck* :

$$\alpha_{Y|Z} = -0.19, \beta_{Y|Z} = 1.79, \sigma_{Y|Z} = 0.075$$

→ Valeur d'observable Y pour tous les amas



- **Étape 1 :** tirage aléatoire de points dans le plan (z, M_{500})

Suivant une fonction de masse réaliste (Tinker+08)

- **Étape 2 :** application d'une relation d'échelle fiduciel

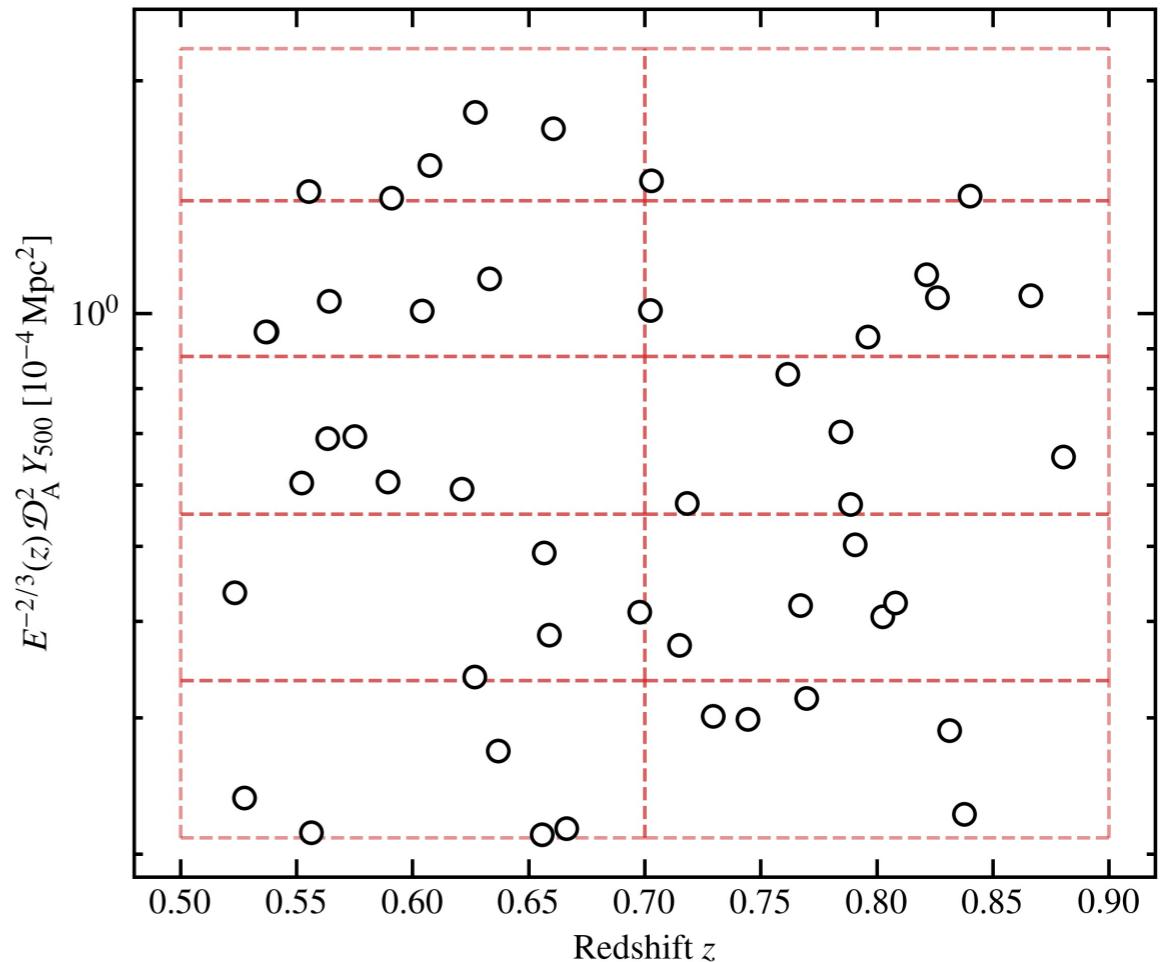
Résultats de *Planck* :

$$\alpha_{Y|Z} = -0.19, \beta_{Y|Z} = 1.79, \sigma_{Y|Z} = 0.075$$

→ Valeur d'observable Y pour tous les amas

- **Étape 3 :** sélection d'amas en boîtes

- Mêmes bins en (Y, z) que le LPSZ
- 5 amas/boîte → 50 au total



Simulation d'échantillons LPSZ fictifs

- **Étape 1 :** tirage aléatoire de points dans le plan (z, M_{500})

Suivant une fonction de masse réaliste (Tinker+08)

- **Étape 2 :** application d'une relation d'échelle fiduciel

Résultats de *Planck* :

$$\alpha_{Y|Z} = -0.19, \beta_{Y|Z} = 1.79, \sigma_{Y|Z} = 0.075$$

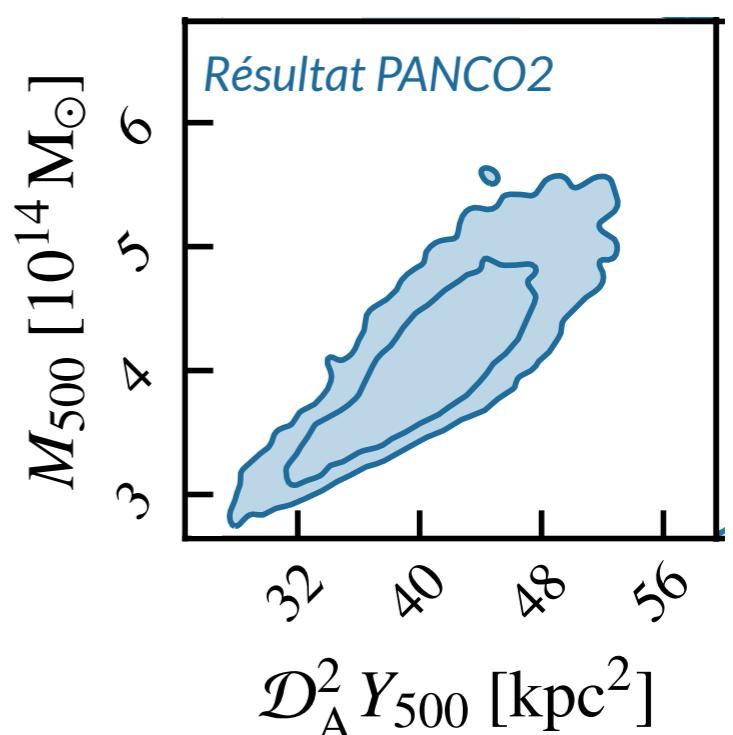
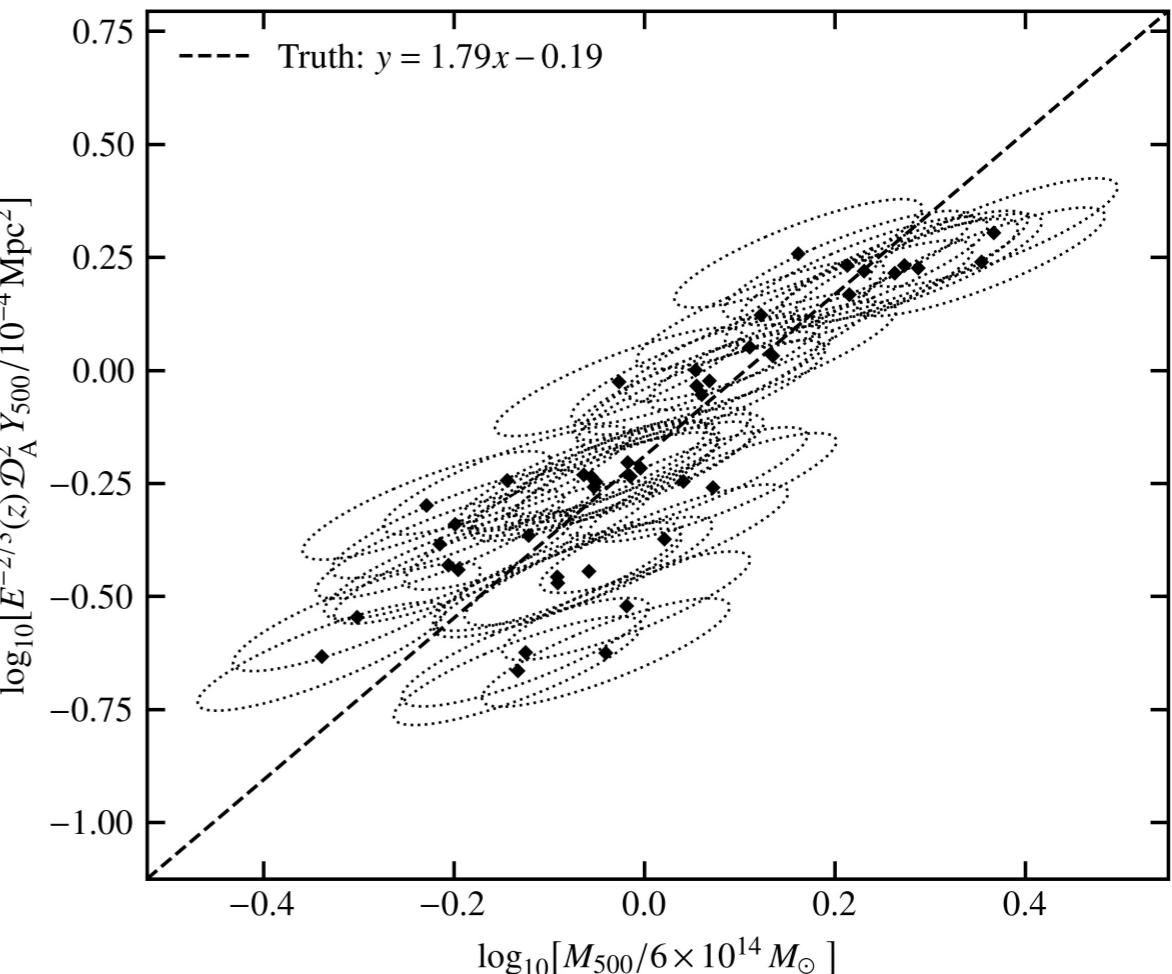
→ Valeur d'observable Y pour tous les amas

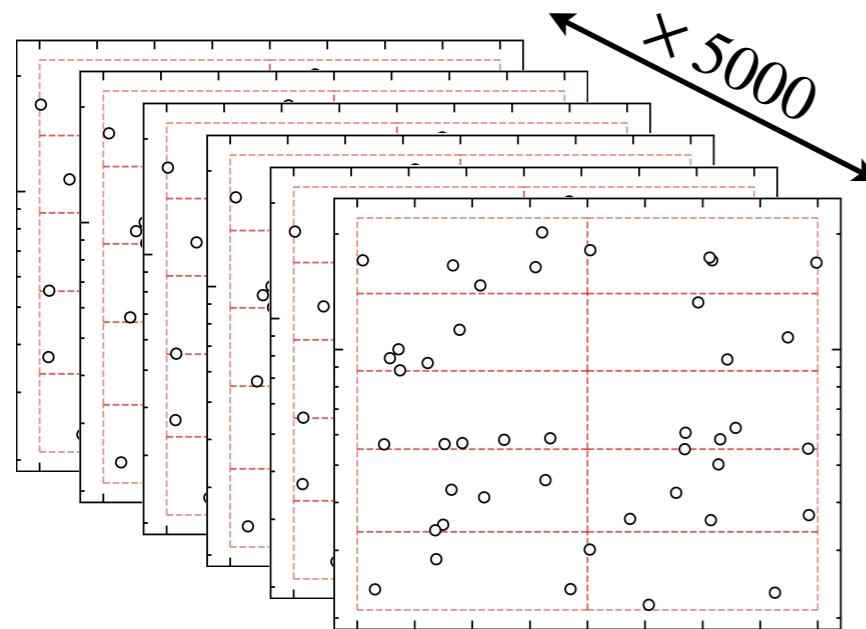
- **Étape 3 :** sélection d'amas en boîtes

- Mêmes bins en (Y, z) que le LPSZ
- 5 amas/boîte → 50 au total

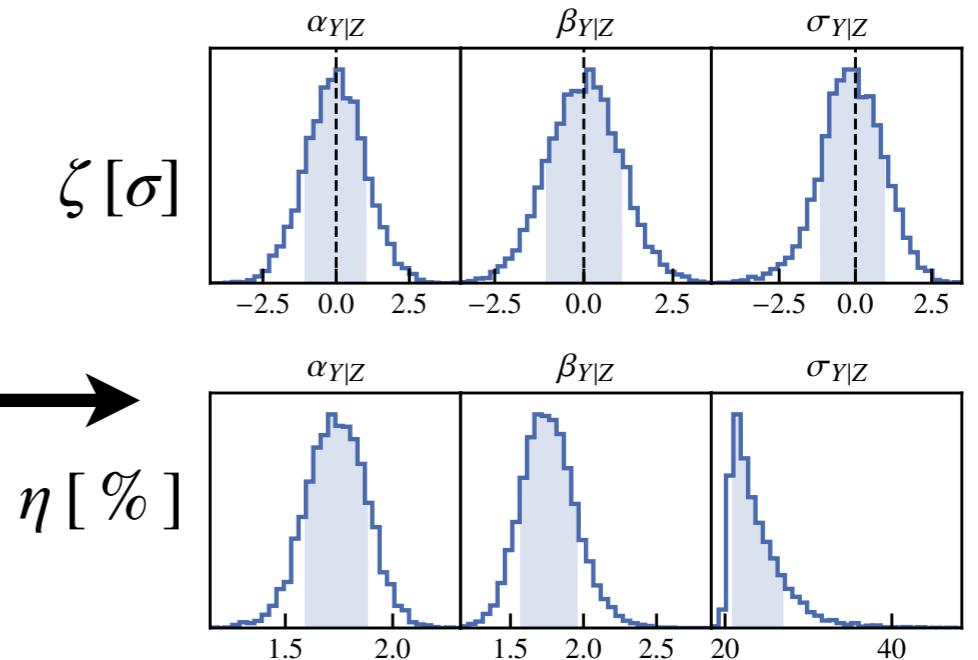
- **Étape 4 :** ajout d'incertitudes

- Incertitudes corrélées sur les deux axes = résultat de PANCO2 (pour chaque amas)
- Valeurs réalistes (études précédentes + simulations) : incertitudes ~10-15%, corrélation ~85%





MCMC sur chaque échantillon



5000 échantillons différents simulés et ajustés

5000 valeurs de ζ, η pour chaque paramètre d'intérêt

- Procédure répétée 5000 fois → 5000 échantillons → 5000 ajustements de relation d'échelle
- Pour chaque réalisation, biais et dispersion des estimateurs des paramètres d'intérêt:

Pour un paramètre ϑ de valeur vraie $\hat{\vartheta}$,

$$\text{Biais } \zeta_{\vartheta} [\sigma] \equiv \frac{\text{Med}[\vartheta_i] - \hat{\vartheta}}{\sqrt{\text{Var}[\vartheta_i]}}$$

(sur les échantillons i des chaînes de Markov)

$$\text{Dispersion } \eta_{\vartheta} [\%] \equiv \frac{\sqrt{\text{Var}[\vartheta_i]}}{|\hat{\vartheta}|}$$

- Pas de biais significatif sur les paramètres d'intérêt

→ Analyse juste : pas de biais liés à l'échantillon

Pour les valeurs de paramètres utilisées

- Précision des estimateurs :

- Incertitudes relatives sur les paramètres d'intérêt

- ~10% sur $\alpha_{Y|Z}$ et $\beta_{Y|Z}$, ~30% sur $\sigma_{Y|Z}$

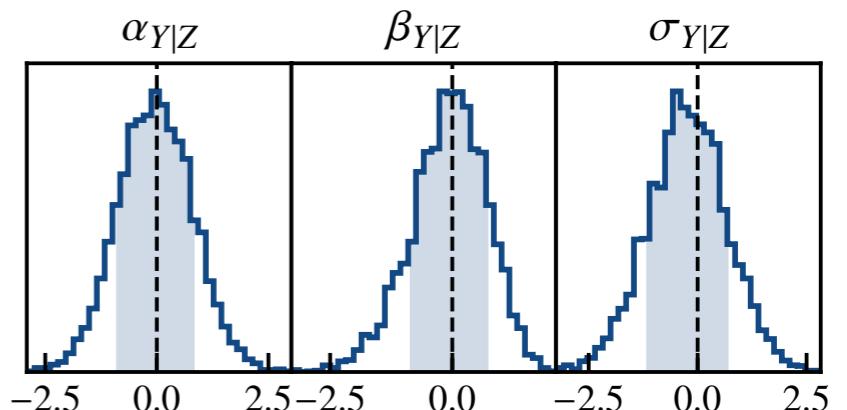
- Gain en précision par rapport à la littérature :

- Planck (2013) : incertitudes similaires,
mais uniquement statistiques

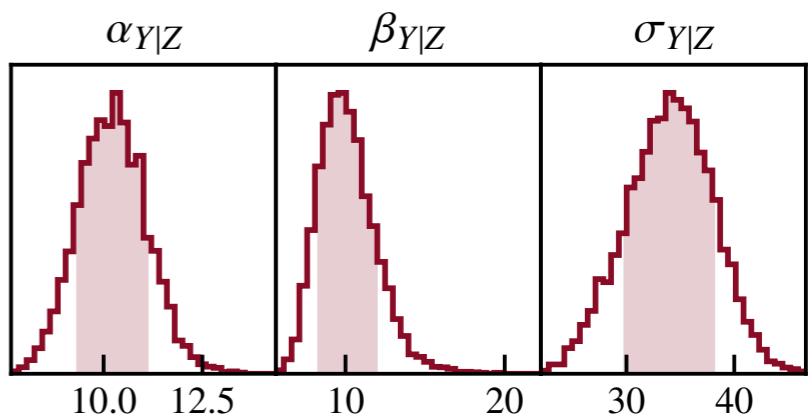
- CoMaLit (2015) : étude similaire,
incertitudes 2~3 fois supérieures

→ Relation d'échelle du LPSZ :
Peu biaisée + grand pouvoir de contrainte

$$\text{Biais } \zeta_{\vartheta} [\sigma] \equiv \frac{\text{Med}[\vartheta_i] - \hat{\vartheta}}{\sqrt{\text{Var}[\vartheta_i]}}$$

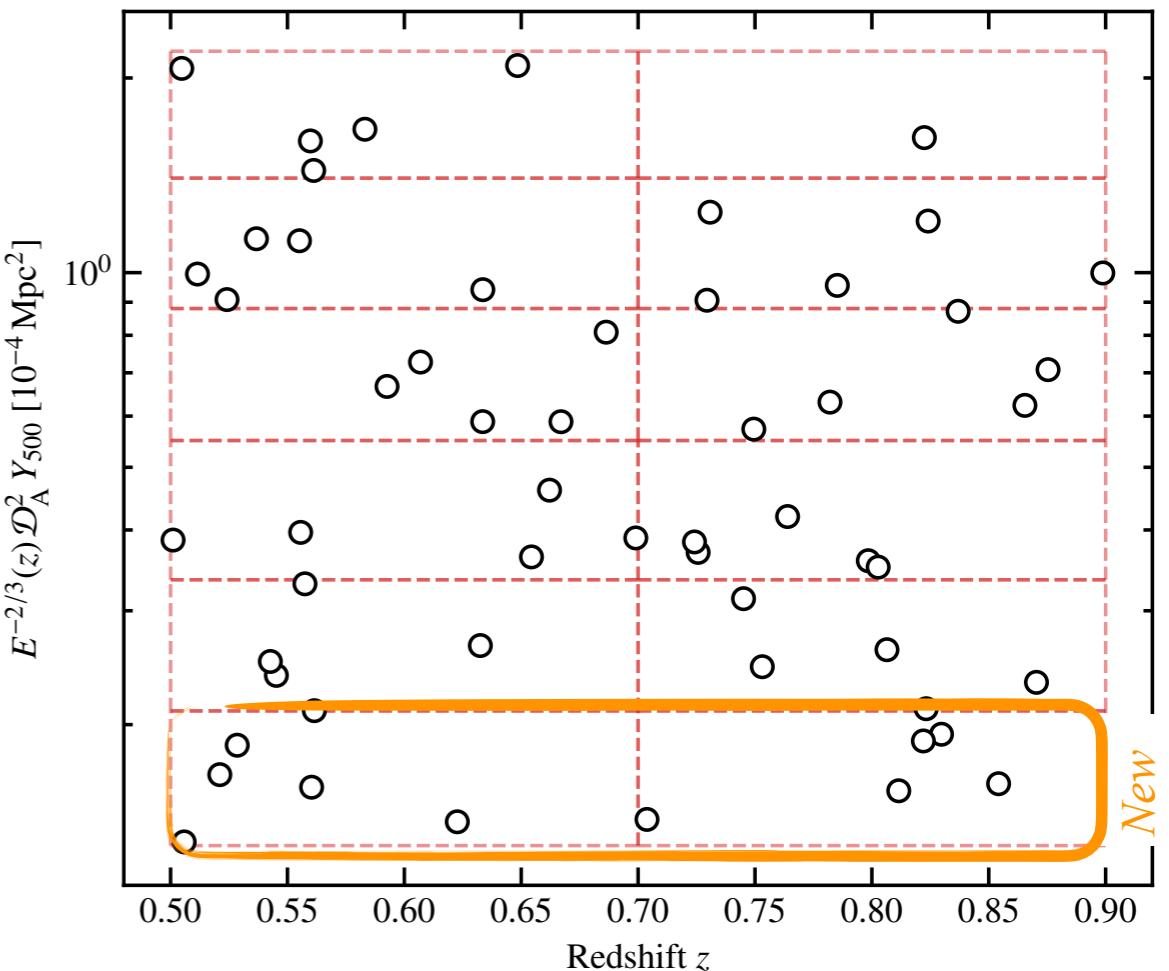


$$\text{Dispersion } \eta_{\vartheta} [\%] \equiv \frac{\sqrt{\text{Var}[\vartheta_i]}}{|\hat{\vartheta}|}$$



43 Extensions du LPSZ

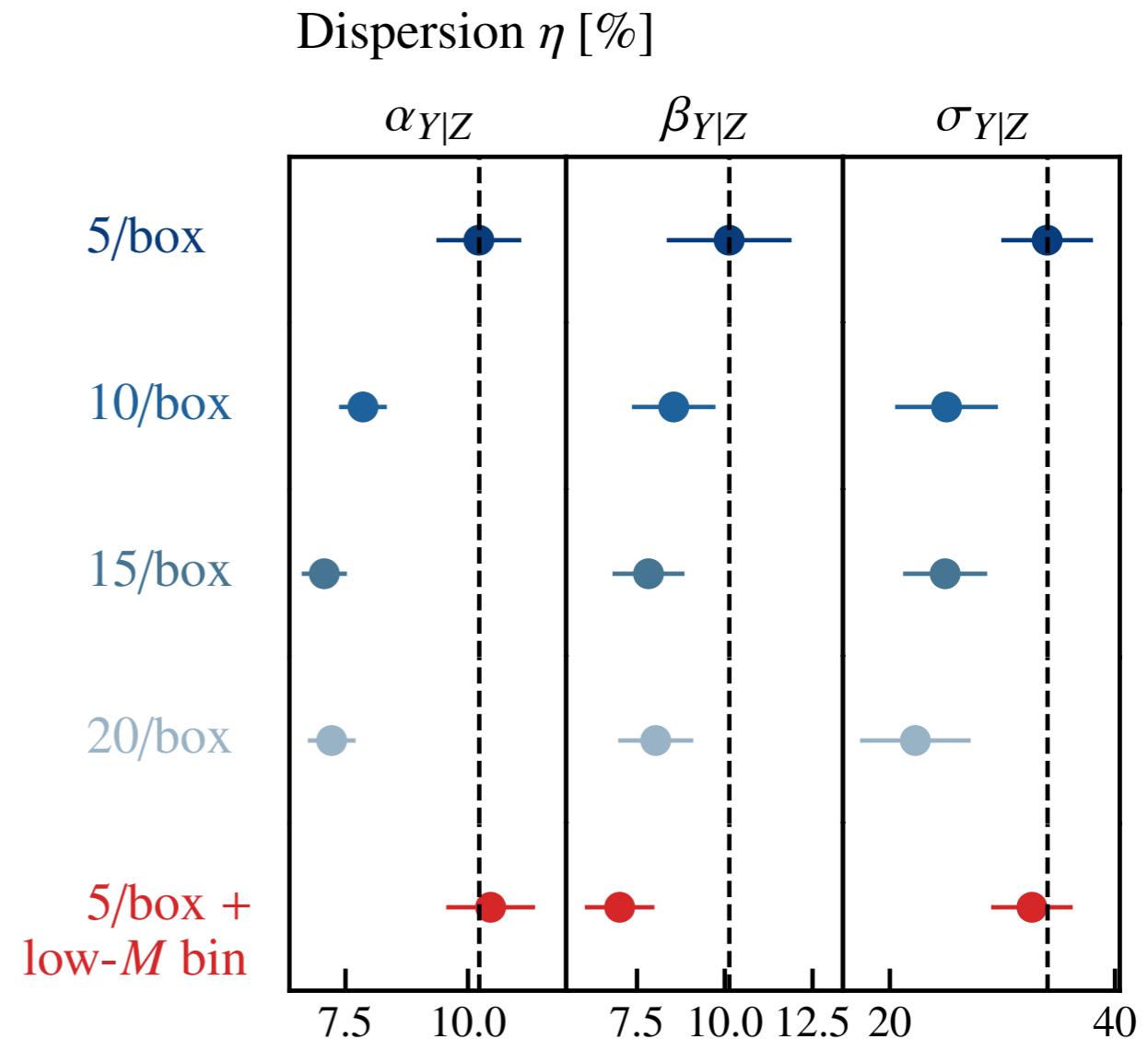
- LPSZ : 300 h de temps garanti NIKA2
- Possibilité de temps ouvert → profitable ?
- Extensions possibles :
 - Plus d'amas par boîte (nominal : 5)
→ Test avec 10, 15, 20 amas / boîte
 - Couverture améliorée du plan $M - z$
→ Test d'ajout d'une bin à basse masse
- Ajout d'amas → meilleure précision
 - **+ d'amas / boîte** : amélioration marginale
Temps d'observation élevé
 - **Extension basse masse** : amélioration significative sur β
Avec seulement 10 amas



→ Meilleure extension : bin basse masse

43 Extensions du LPSZ

- LPSZ : 300 h de temps garanti NIKA2
- Possibilité de temps ouvert → profitable ?
- Extensions possibles :
 - Plus d'amas par boîte (nominal : 5)
 - Test avec 10, 15, 20 amas / boîte
 - Couverture améliorée du plan $M - z$
 - Test d'ajout d'une bin à basse masse
- Ajout d'amas → meilleure précision
 - **+ d'amas / boîte** : amélioration marginale
Temps d'observation élevé
 - **Extension basse masse** : amélioration significative sur β
Avec seulement 10 amas



→ Meilleure extension : bin basse masse

Contexte

1. Les amas de galaxies comme sondes cosmologiques
2. La caméra NIKA2 et son Grand Programme SZ

Travail de thèse

3. PANCO2 : des cartes SZ aux propriétés thermodynamiques des amas
4. Mesures des propriétés d'un amas distant peu massif
5. La relation d'échelle masse-observable dans le grand programme SZ

Conclusions

- **Développement d'un nouveau logiciel de mesure de profils de pression depuis les cartes SZ**
 - Analyse rapide d'échantillons d'amas
 - Prise en compte des **systématiques** associées aux observations SZ
 - Livré à la collaboration NIKA2, bientôt public
- **Analyse des propriétés thermodynamiques d'un amas complexe**
 - L'un des amas les plus complexes du LPSZ
 - Prise en compte des **systématiques** lors de l'analyse
 - Analyse multi- λ (X+SZ) → contraintes fortes sur les propriétés de l'amas
- **Étude de la relation d'échelle masse-observable pour le grand programme SZ**
 - Mise en place d'une analyse avancée
 - Évaluation des **biais et systématiques** de l'analyse
 - Prédictions sur les potentielles extensions du LPSZ
- **Logiciels d'analyse livrés à la collaboration NIKA2 :**
 - **SZ_IMCM** – Utilisation du pipeline NIKA2 pour réduire les données brutes des observations SZ
 - **PSTools** – Estimation de la contamination des observations SZ par des sources ponctuelles
 - **PANCO 2** – Extraction des propriétés thermodynamiques à partir d'observations SZ

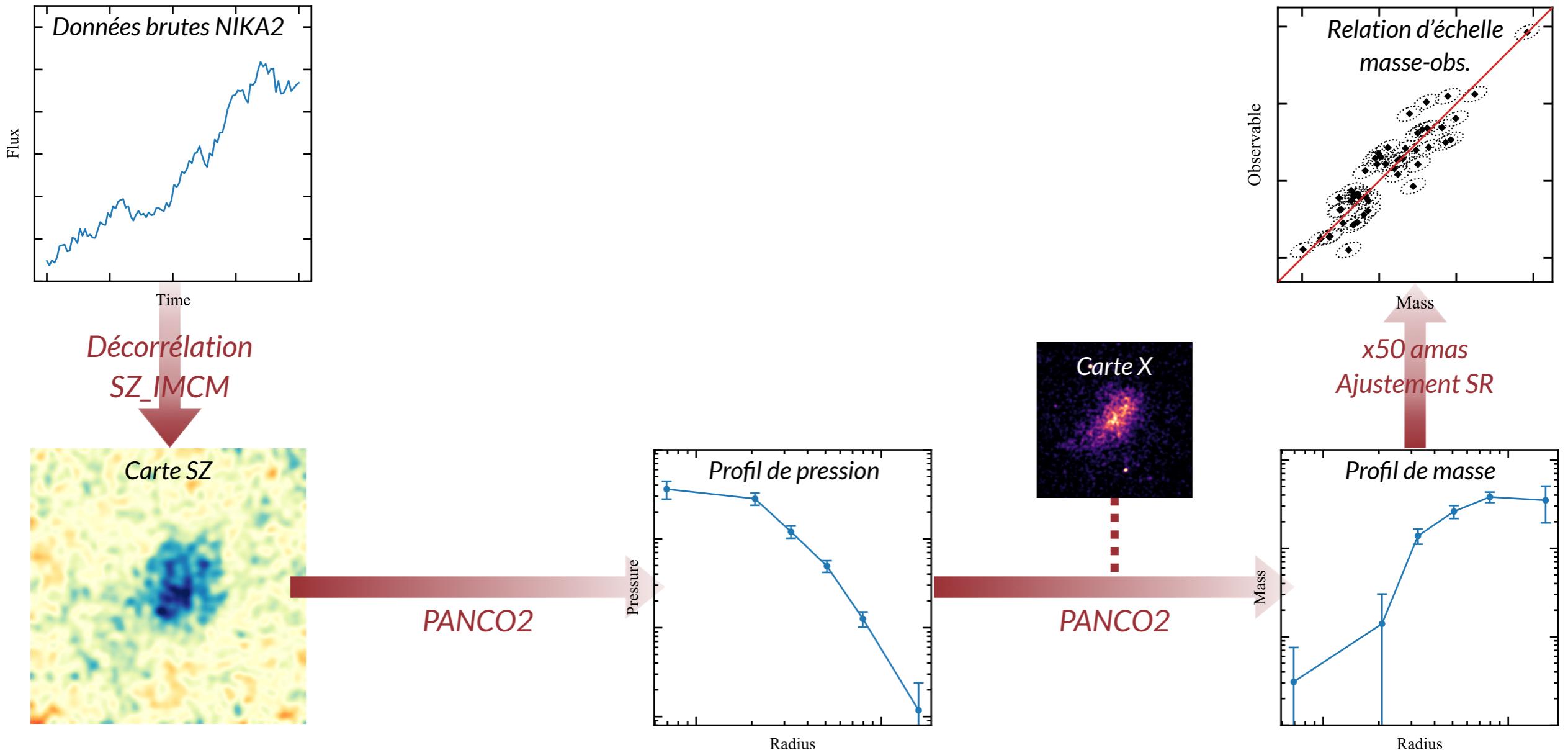
- **Développement d'un nouveau logiciel de mesure de profils de pression depuis les cartes SZ**
 - Analyse rapide d'échantillons d'amas
 - Prise en compte des **systématiques** associées aux observations SZ
 - Livré à la collaboration NIKA2, bientôt public
- **Analyse des propriétés thermodynamiques d'un amas complexe**
 - L'un des amas les plus complexes du LPSZ
 - Prise en compte des **systématiques** lors de l'analyse
 - Analyse multi- λ (X+SZ) → contraintes fortes sur les propriétés de l'amas
- **Étude de la relation d'échelle masse-observable pour le grand programme SZ**
 - Mise en place d'une analyse avancée
 - Évaluation des **biais et systématiques** de l'analyse
 - Prédictions sur les potentielles extensions du LPSZ
- **Logiciels d'analyse livrés à la collaboration NIKA2 :**
 - *SZ_IMCM* – Utilisation du pipeline NIKA2 pour réduire les données brutes des observations SZ
 - *PSTools* – Estimation de la contamination des observations SZ par des sources ponctuelles
 - *PANCO 2* – Extraction des propriétés thermodynamiques à partir d'observations SZ

- Développement d'un nouveau logiciel de **mesure de profils de pression** depuis les cartes SZ
 - Analyse rapide d'échantillons d'amas
 - Prise en compte des **systématiques** associées aux observations SZ
 - Livré à la collaboration NIKA2, bientôt public
- Analyse des propriétés thermodynamiques d'un **amas complexe**
 - L'un des amas les plus complexes du LPSZ
 - Prise en compte des **systématiques** lors de l'analyse
 - Analyse multi- λ (X+SZ) → contraintes fortes sur les propriétés de l'amas
- Étude de la relation d'échelle masse-observable pour le grand programme SZ
 - Mise en place d'une analyse avancée
 - Évaluation des **biais et systématiques** de l'analyse
 - Prédictions sur les potentielles extensions du LPSZ
- Logiciels d'analyse livrés à la collaboration NIKA2 :
 - *SZ_IMCM* – Utilisation du pipeline NIKA2 pour réduire les données brutes des observations SZ
 - *PSTools* – Estimation de la contamination des observations SZ par des sources ponctuelles
 - *PANCO 2* – Extraction des propriétés thermodynamiques à partir d'observations SZ

- Développement d'un nouveau logiciel de **mesure de profils de pression** depuis les cartes SZ
 - Analyse rapide d'échantillons d'amas
 - Prise en compte des **systématiques** associées aux observations SZ
 - Livré à la collaboration NIKA2, bientôt public
- Analyse des propriétés thermodynamiques d'un **amas complexe**
 - L'un des amas les plus complexes du LPSZ
 - Prise en compte des **systématiques** lors de l'analyse
 - Analyse multi- λ (X+SZ) → contraintes fortes sur les propriétés de l'amas
- Étude de la relation d'échelle masse-observable pour le grand programme SZ
 - Mise en place d'une analyse avancée
 - Évaluation des **biais et systématiques** de l'analyse
 - Prédictions sur les potentielles extensions du LPSZ
- Logiciels d'analyse livrés à la collaboration NIKA2 :
 - **SZ_IMCM** – Utilisation du pipeline NIKA2 pour réduire les données brutes des observations SZ
 - **PSTools** – Estimation de la contamination des observations SZ par des sources ponctuelles
 - **PANCO 2** – Extraction des propriétés thermodynamiques à partir d'observations SZ

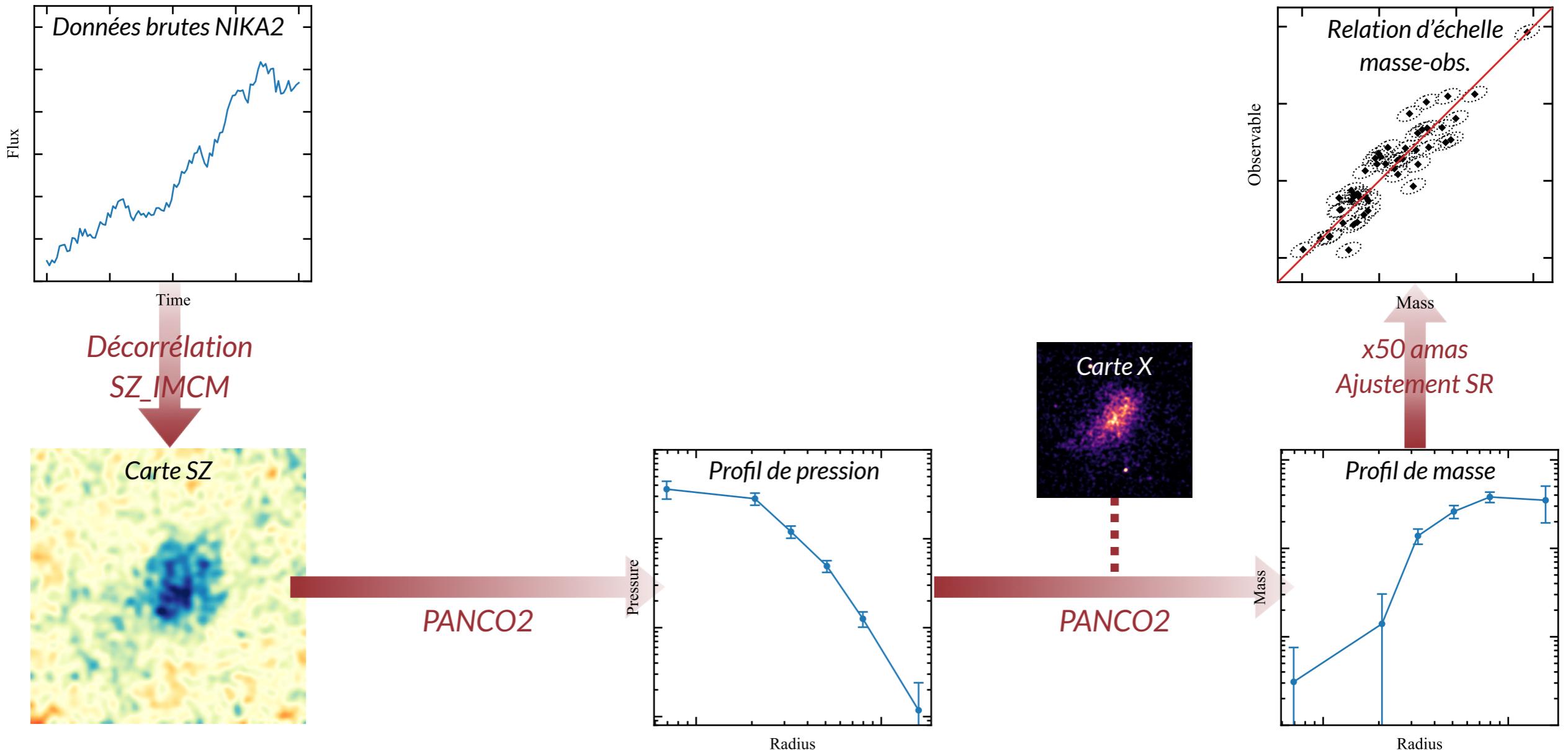
Travail de thèse : implication dans 4 axes du LPSZ de NIKA2

- Les observations avec NIKA2 – 8 semaines d'observation
- L'analyse des données brutes de NIKA2 – Des données en temps aux cartes SZ
- L'analyse des propriétés thermodynamiques des amas – Des cartes SZ aux profils thermodynamiques
- L'évaluation des outils cosmologiques – Des profils thermodynamiques à la relation masse-observable



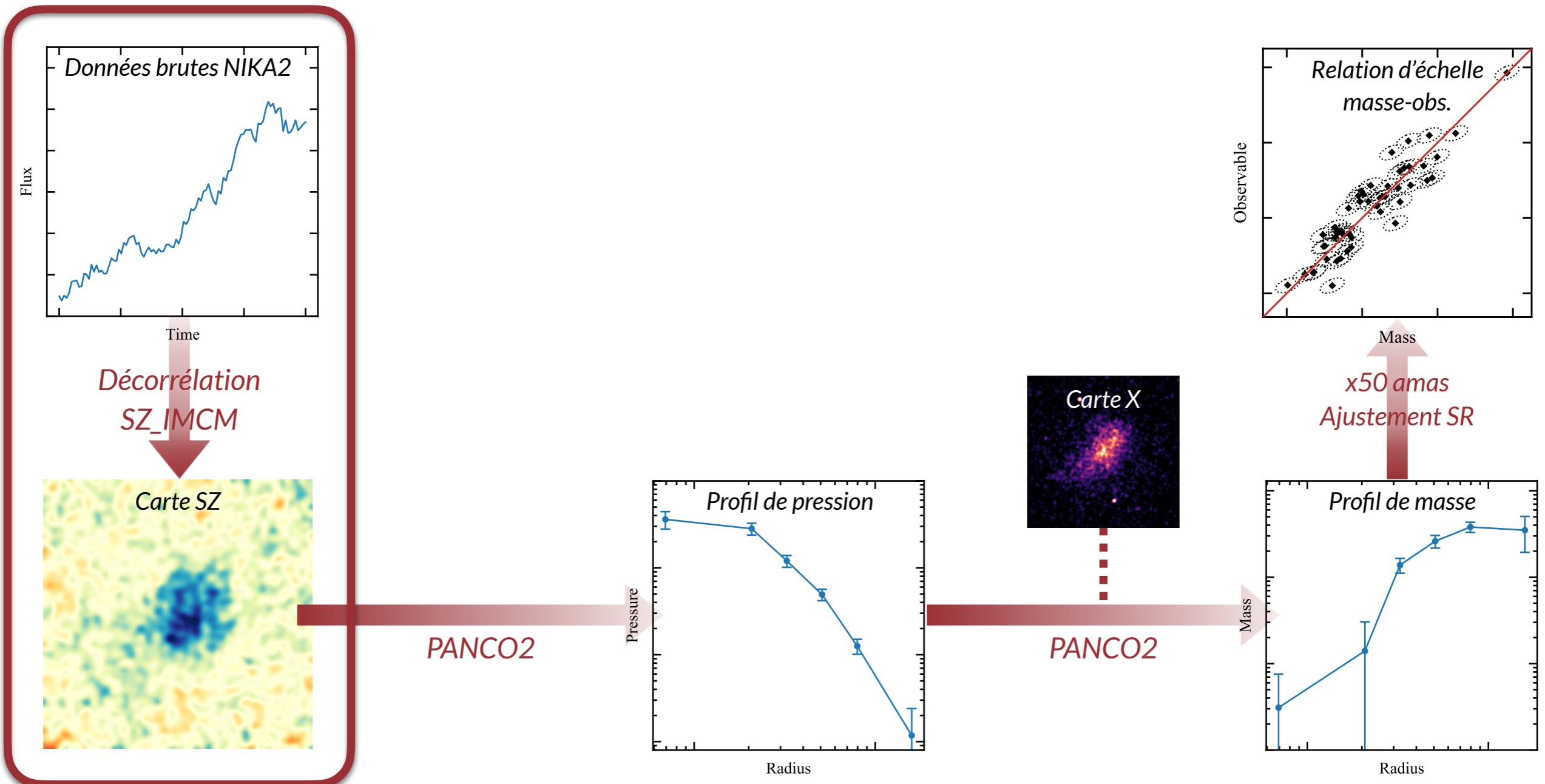
Travail de thèse : implication dans 4 axes du LPSZ de NIKA2

- Les observations avec NIKA2 – 8 semaines d'observation
- L'analyse des données brutes de NIKA2 – Des données en temps aux cartes SZ
- L'analyse des propriétés thermodynamiques des amas – Des cartes SZ aux profils thermodynamiques
- L'évaluation des outils cosmologiques – Des profils thermodynamiques à la relation masse-observable



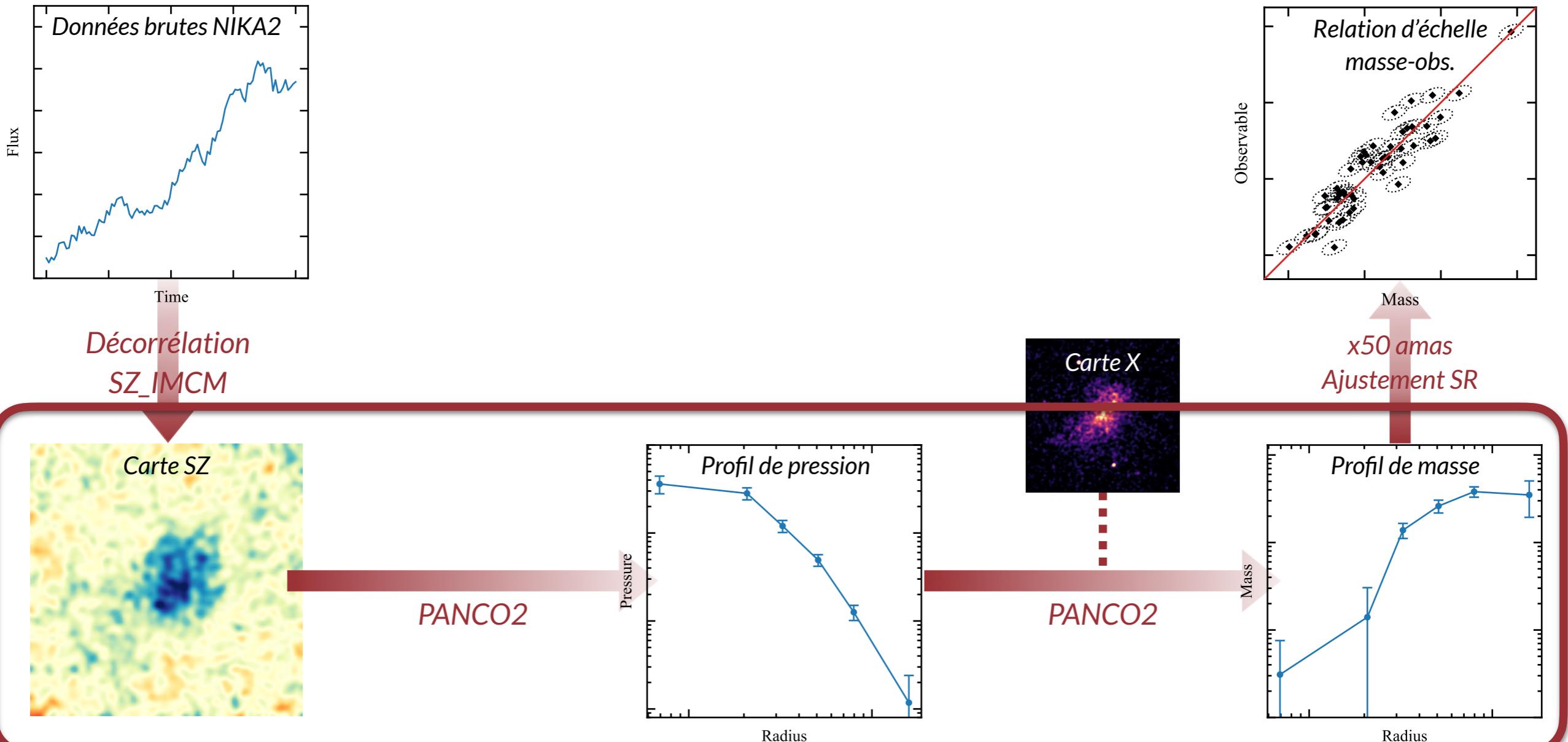
Travail de thèse : implication dans 4 axes du LPSZ de NIKA2

- Les observations avec NIKA2 – 8 semaines d'observation
- L'analyse des données brutes de NIKA2 – Des données en temps aux cartes SZ
- L'analyse des propriétés thermodynamiques des amas – Des cartes SZ aux profils thermodynamiques
- L'évaluation des outils cosmologiques – Des profils thermodynamiques à la relation masse-observable



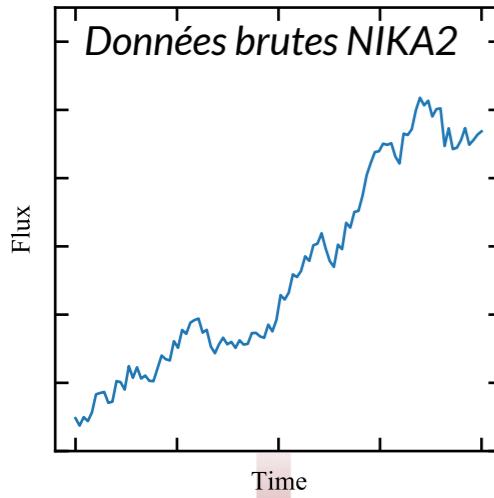
Travail de thèse : implication dans 4 axes du LPSZ de NIKA2

- Les observations avec NIKA2 – 8 semaines d'observation
- L'analyse des données brutes de NIKA2 – Des données en temps aux cartes SZ
- L'analyse des propriétés thermodynamiques des amas – Des cartes SZ aux profils thermodynamiques
- L'évaluation des outils cosmologiques – Des profils thermodynamiques à la relation masse-observable

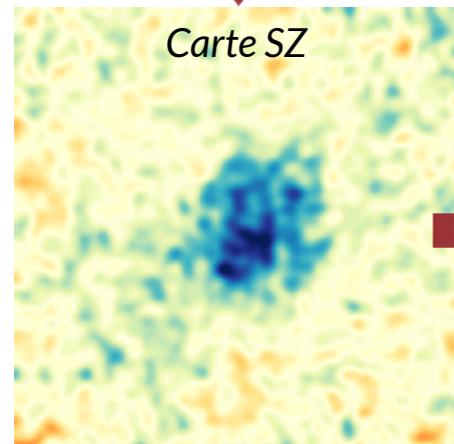


Travail de thèse : implication dans 4 axes du LPSZ de NIKA2

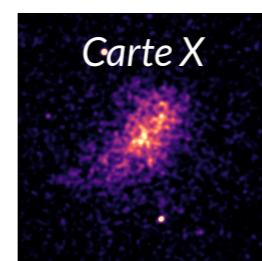
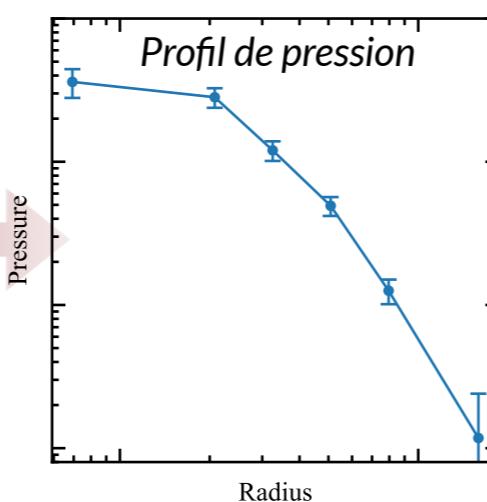
- Les observations avec NIKA2 – 8 semaines d'observation
- L'analyse des données brutes de NIKA2 – Des données en temps aux cartes SZ
- L'analyse des propriétés thermodynamiques des amas – Des cartes SZ aux profils thermodynamiques
- L'évaluation des outils cosmologiques – Des profils thermodynamiques à la relation masse-observable



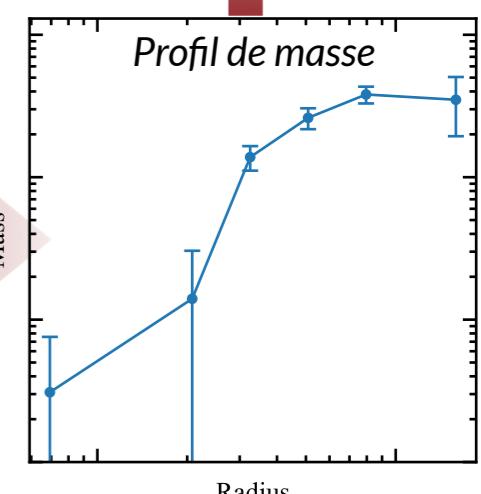
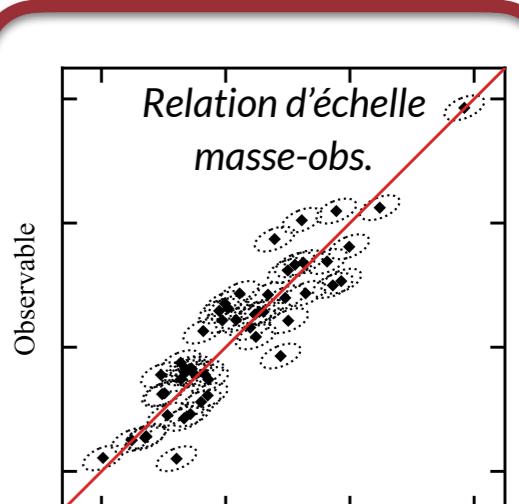
Décorrélation
SZ_IMCM



PANCO2

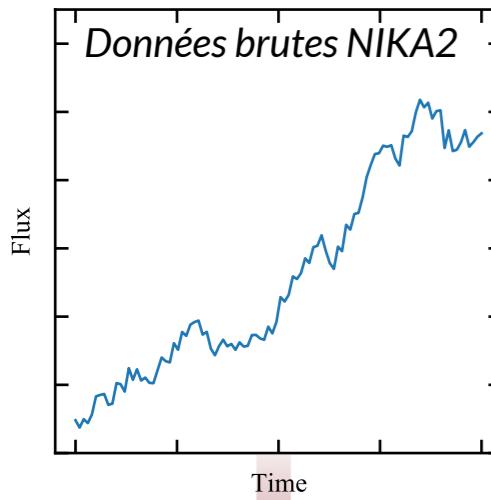


PANCO2

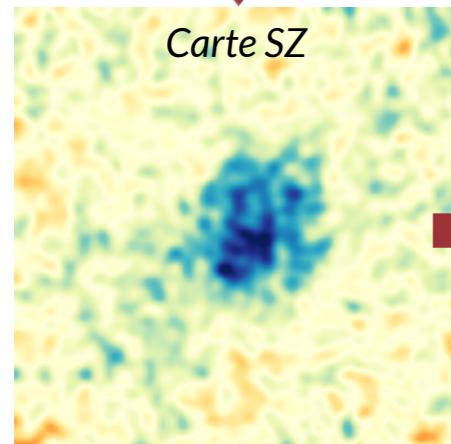


Travail de thèse : implication dans 4 axes du LPSZ de NIKA2

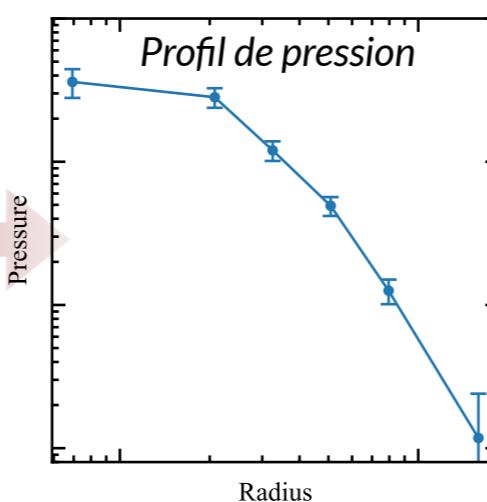
- Les observations avec NIKA2 – 8 semaines d'observation
- L'analyse des données brutes de NIKA2 – Des données en temps aux cartes SZ
- L'analyse des propriétés thermodynamiques des amas – Des cartes SZ aux profils thermodynamiques
- L'évaluation des outils cosmologiques – Des profils thermodynamiques à la relation masse-observable



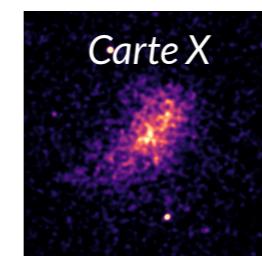
Décorrélation
SZ_IMCM



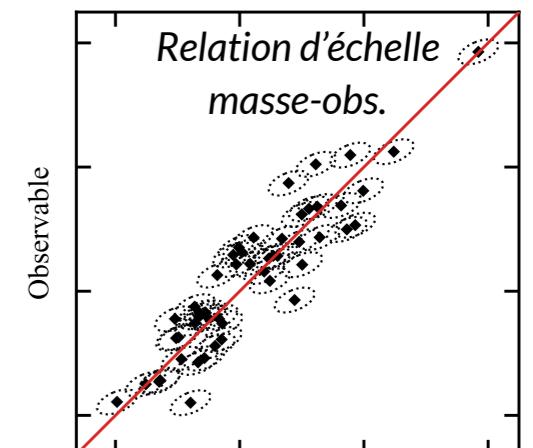
Étude des systématiques en cosmologie avec des amas de galaxies :
Des données brutes aux relations masse-observable



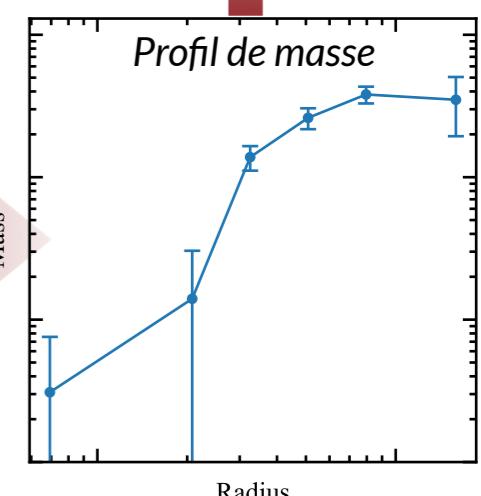
PANCO2



PANCO2



x50 amas
Ajustement SR



Radius

SZ @ 1 mm ?

Décorrélation

Bruit résiduel & filtrage

PSTools

Interpolation profil de pression

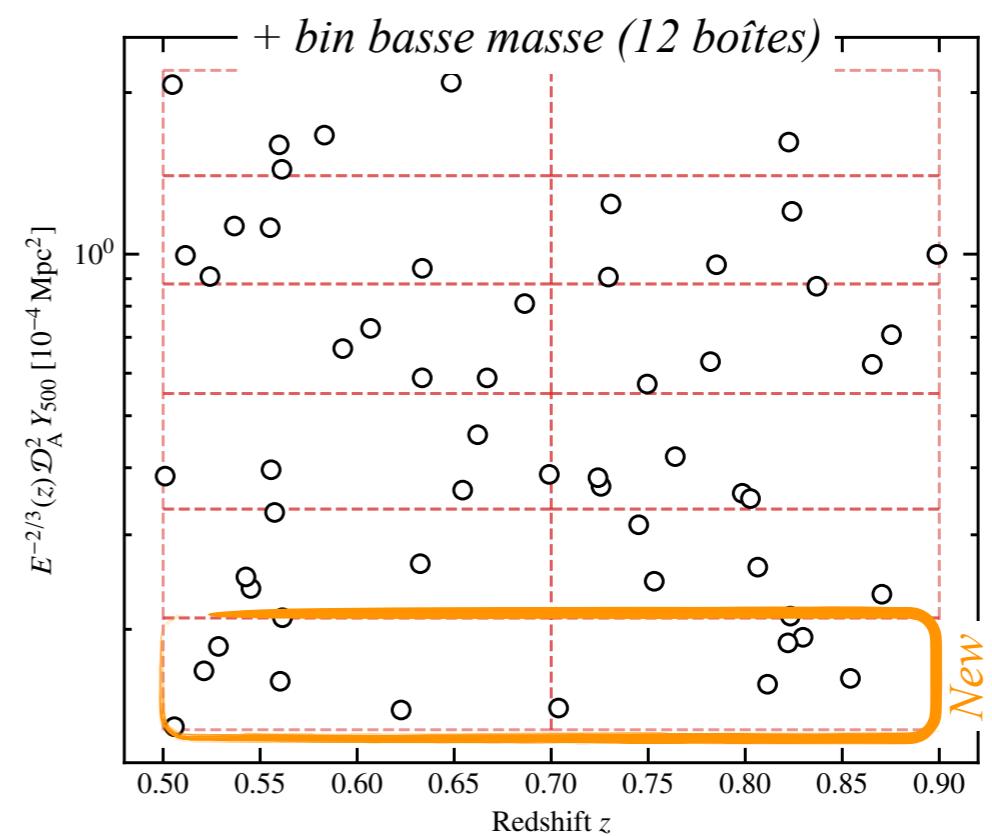
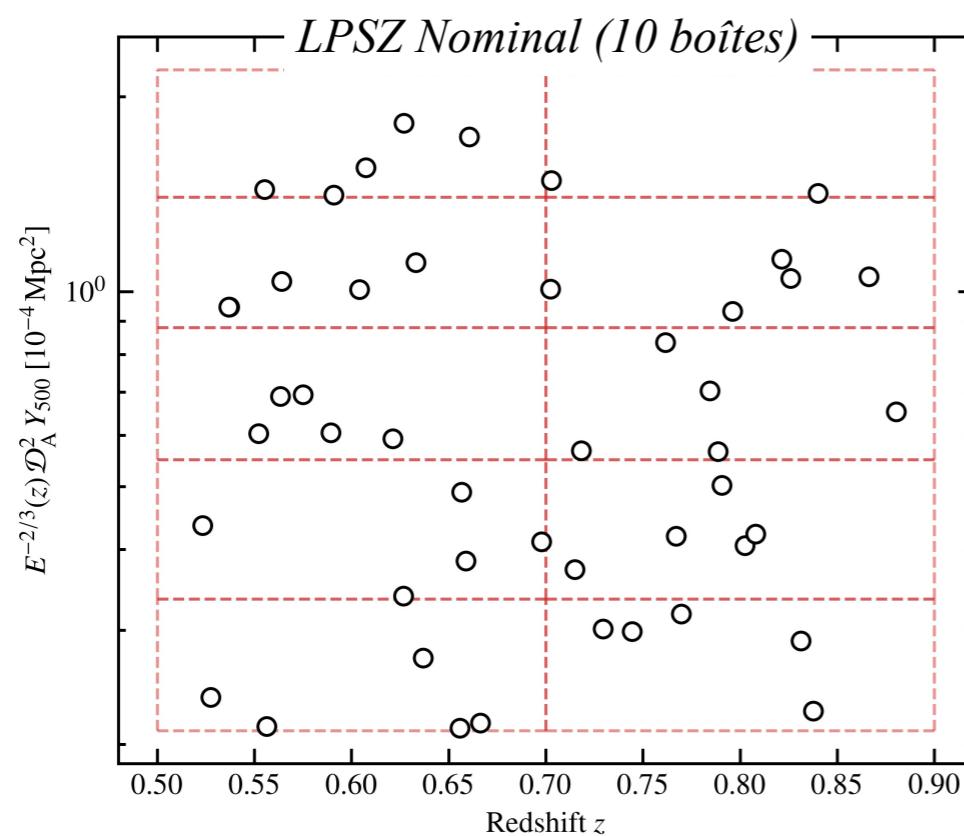
Biais sur α

S8 amas

Thermo amas perturbés

Extensions du LPSZ ?

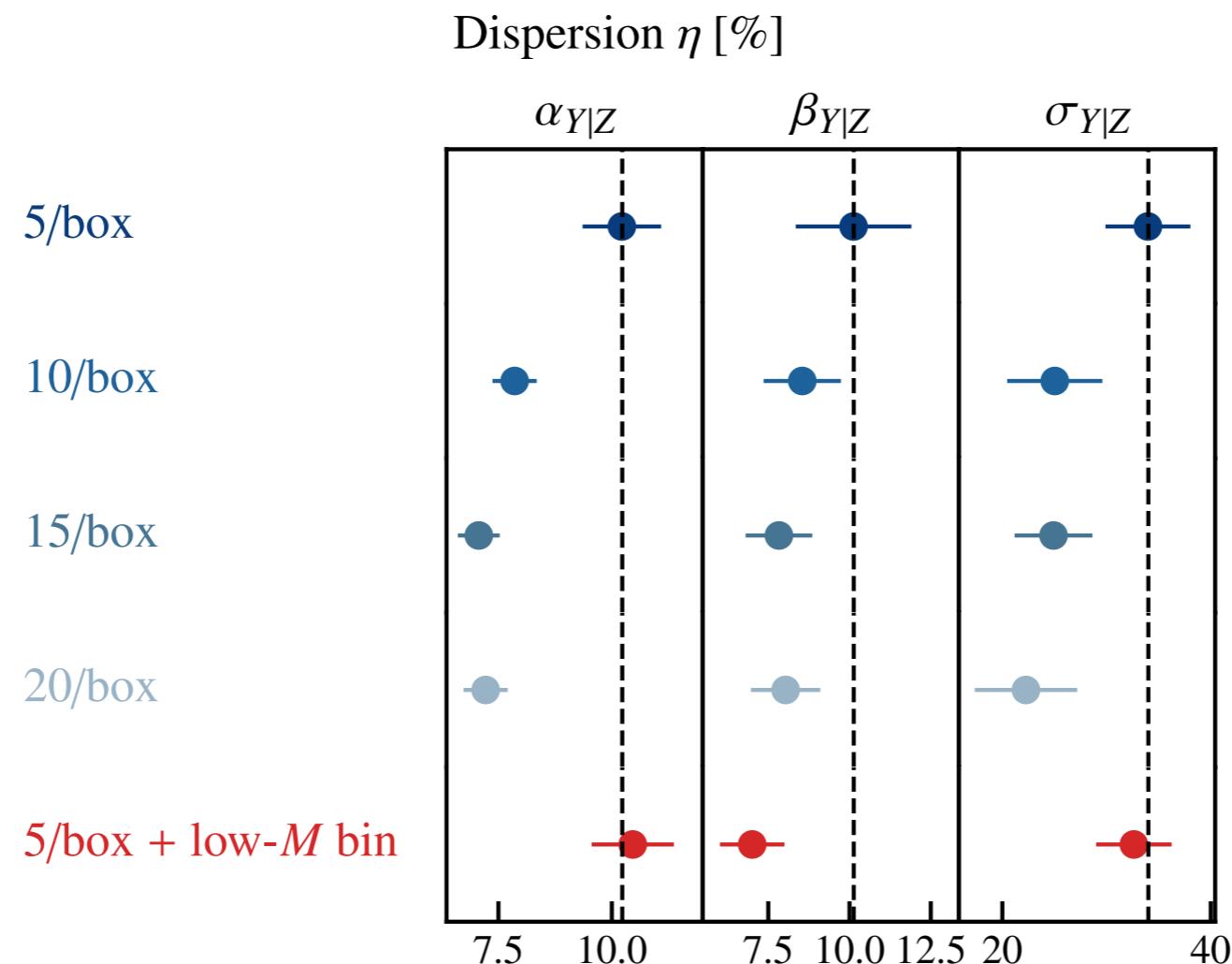
- LPSZ = 300 h de temps garanti avec NIKA2
- Possibilité de temps ouvert pour augmenter le retour scientifique → profitable ?
- Extensions possibles :
 - Plus d'amas par boîte (nominal : 5)
 - Test avec 10, 15, 20 amas / boîte
 - Nouvelles boîtes (couverture améliorée du plan $M - z$)
 - Test d'ajout d'une boîte à basse masse



- Bénéfice mesuré par l'amélioration de la précision sur les paramètres d'intérêt

Résultats extension LPSZ

- Ajout d'amas → meilleure précision (*diminution erreurs statistiques*)
 - **+ d'amas / boîte**: amélioration marginale pour le temps nécessaire
 - **Extension basse masse**: amélioration significative sur β avec seulement 10 amas

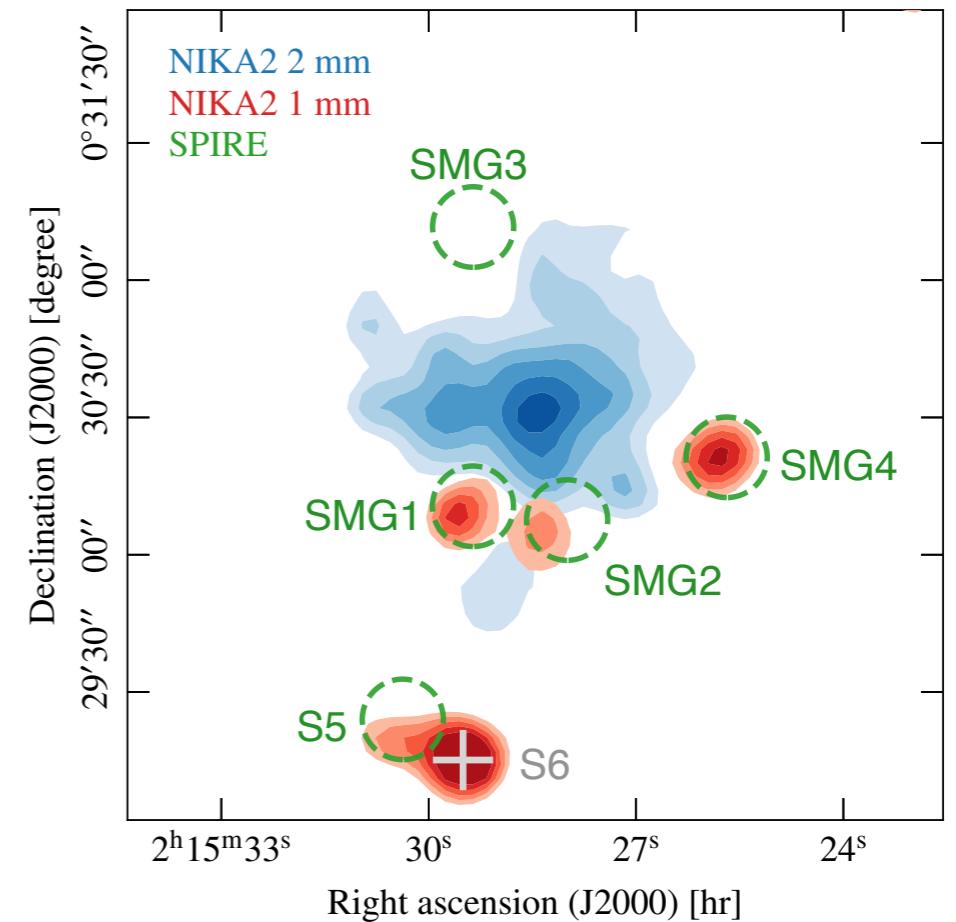


→ Meilleure extension : bin basse masse

Identification des sources ponctuelles

Sources ponctuelles connues ?

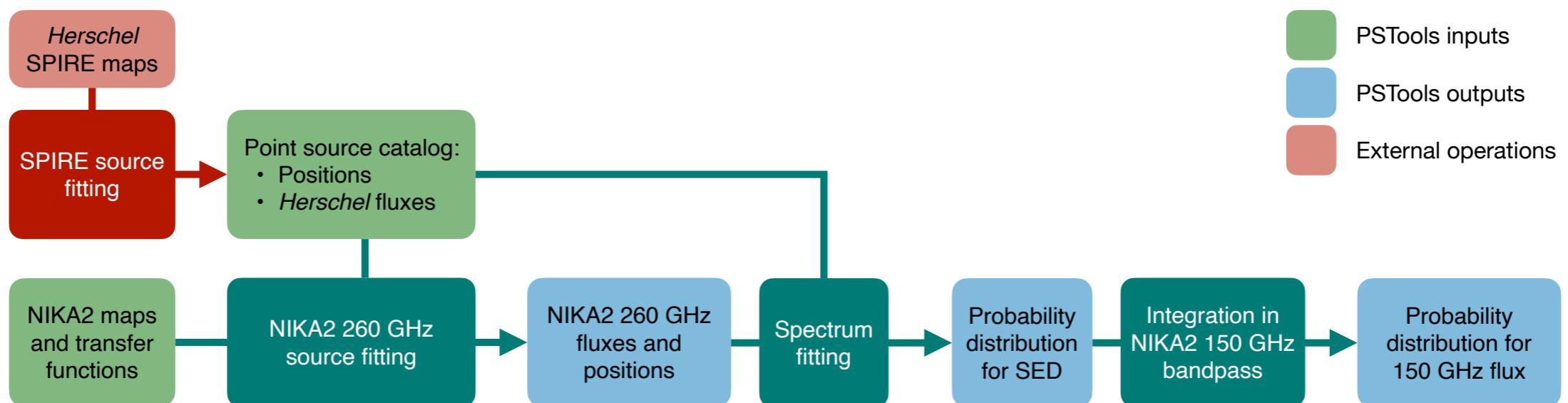
- 5 galaxies sub-millimétriques (SMG) dans le champ de l'amas d'après *Herschel*
 - SMG1, SMG2, SMG4 facilement identifiées aux détections NIKA2 1 mm
 - SMG3 : SNR<3 à 1 mm
 - Ambiguïté pour S5 & S6 :
 - Deux sources vues par NIKA2, une seule par *Herschel* (la plus faible)
 - Sources assez éloignées de l'amas : pas de signal SZ significatif
- Sources soustraites de la carte



→ Besoin d'estimer le flux à 2 mm de SMG1-4
(contamination de l'effet SZ)

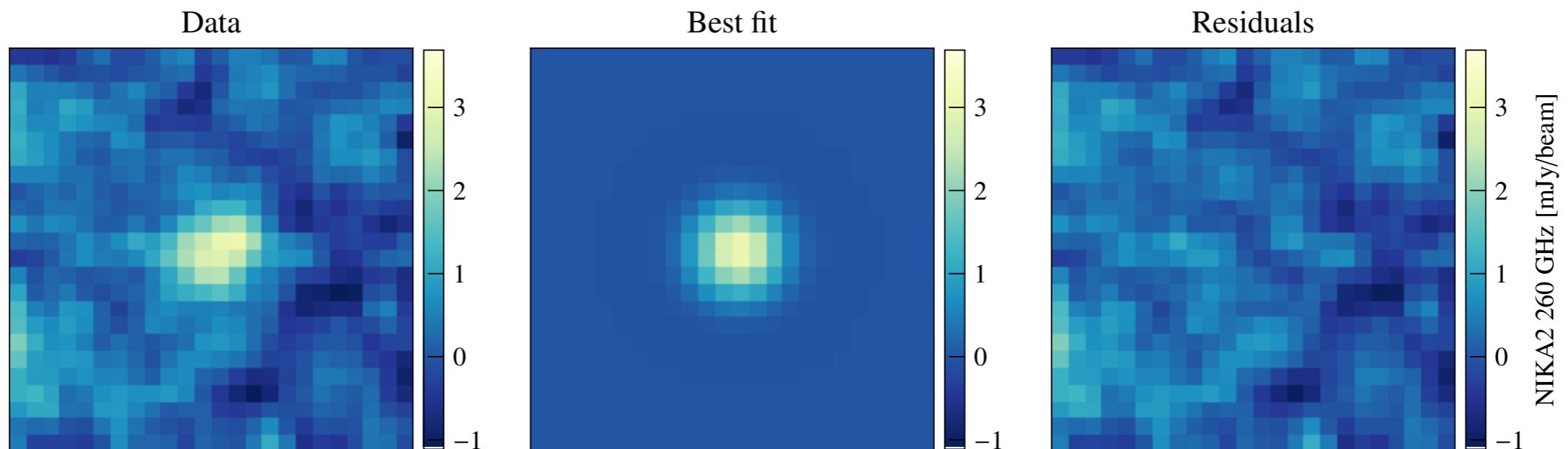
Le logiciel PSTools

- Estimation de la contamination par des sources sub-millimétriques dans des observations NIKA2
- Entrées :
 - Carte NIKA2 1 mm (pas de SZ)
 - Catalogues de sources (flux, positions) à $\nu = [250, 350, 500] \mu\text{m}$ (*Herschel SPIRE*)
- Sorties :
 - Positions et flux des sources dans la carte NIKA2 1 mm
 - Distribution de probabilité du flux dans la carte NIKA2 2 mm



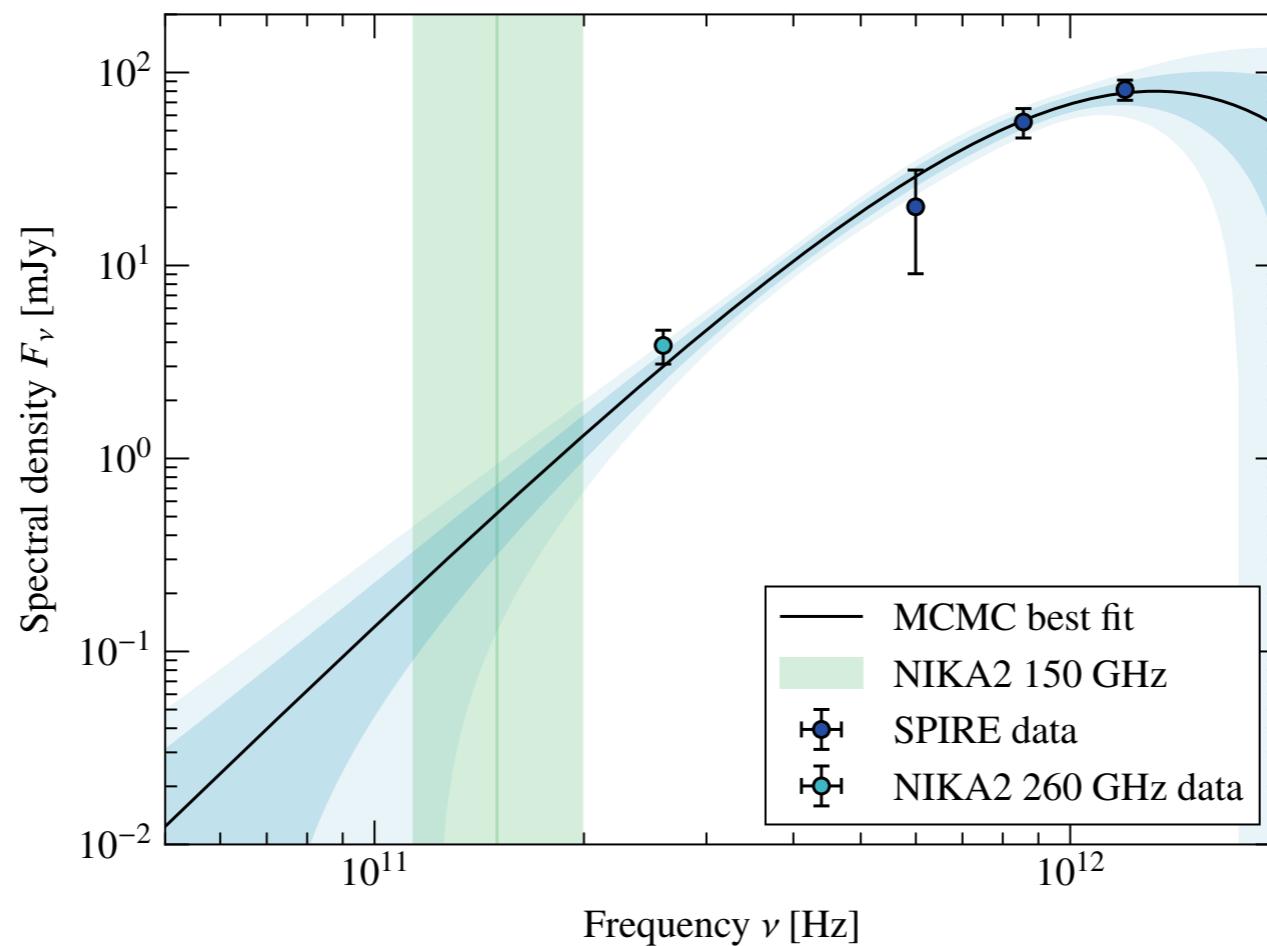
Estimation de la contamination par les sources

1. Herschel → flux des sources en sub-millimétrique $\nu = [250, 350, 500] \mu\text{m}$
2. Mesure des flux dans la carte NIKA2 à 1 mm (pas de SZ) → Flux à 1 mm
3. Ajustement du spectre de chaque source par un spectre de corps noir modifié : $F_\nu(A_0, \beta, T) = A_0 \nu^\beta B_\nu(T)$
4. Extrapolation des SED dans la bande NIKA2 à 2 mm → Distribution de probabilité du flux à 2 mm



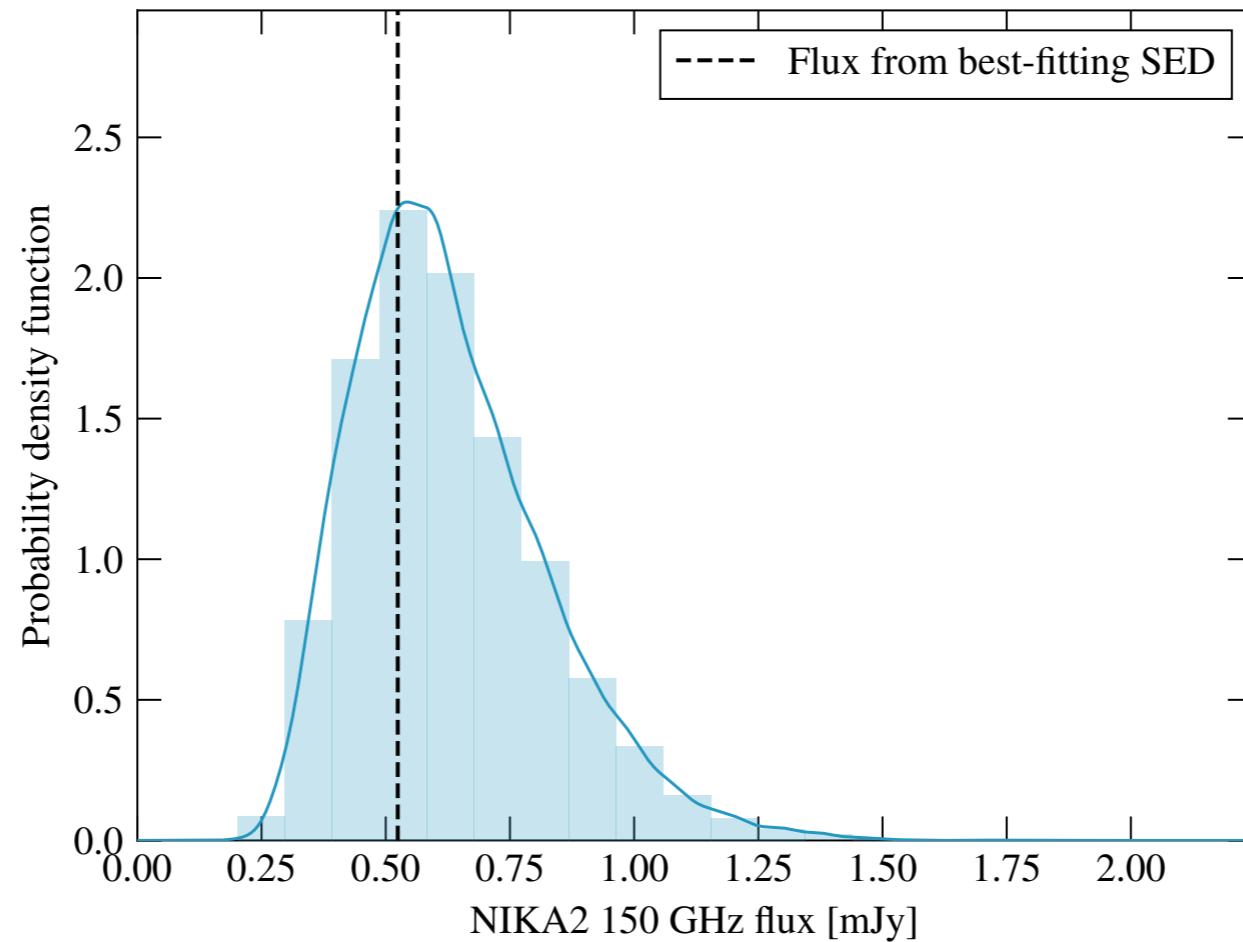
↪ Estimation de la contamination par les sources

1. Herschel → flux des sources en sub-millimétrique $\nu = [250, 350, 500] \mu\text{m}$
2. Mesure des flux dans la carte NIKA2 à 1 mm (pas de SZ) → Flux à 1 mm
3. Ajustement du spectre de chaque source par un spectre de corps noir modifié : $F_\nu(A_0, \beta, T) = A_0 \nu^\beta B_\nu(T)$
4. Extrapolation des SED dans la bande NIKA2 à 2 mm → Distribution de probabilité du flux à 2 mm



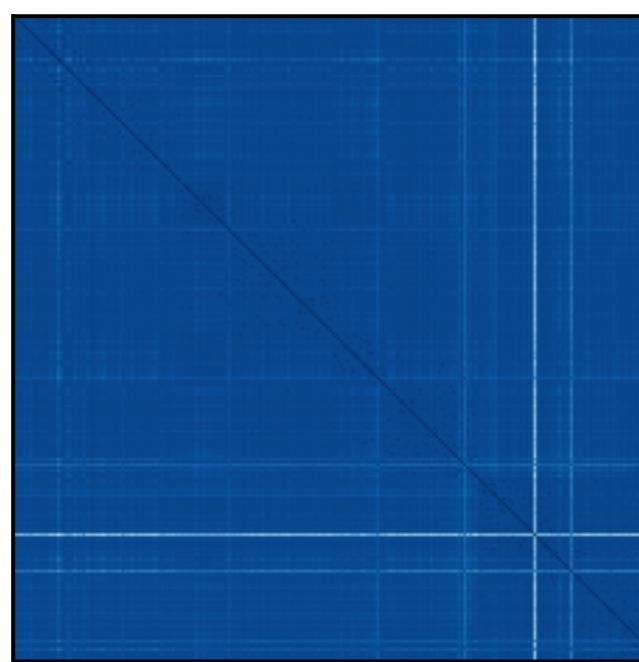
Estimation de la contamination par les sources

1. Herschel → flux des sources en sub-millimétrique $\nu = [250, 350, 500] \mu\text{m}$
2. Mesure des flux dans la carte NIKA2 à 1 mm (pas de SZ) → Flux à 1 mm
3. Ajustement du spectre de chaque source par un spectre de corps noir modifié : $F_\nu(A_0, \beta, T) = A_0 \nu^\beta B_\nu(T)$
4. Extrapolation des SED dans la bande NIKA2 à 2 mm → Distribution de probabilité du flux à 2 mm

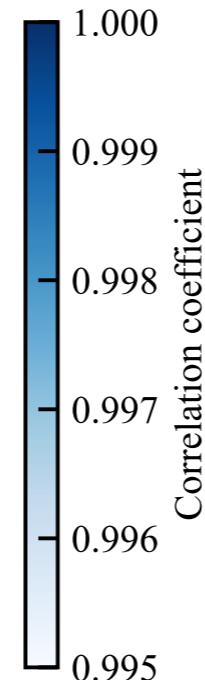


→ Peut être utilisée comme *a priori* dans
un ajustement joint SZ + sources

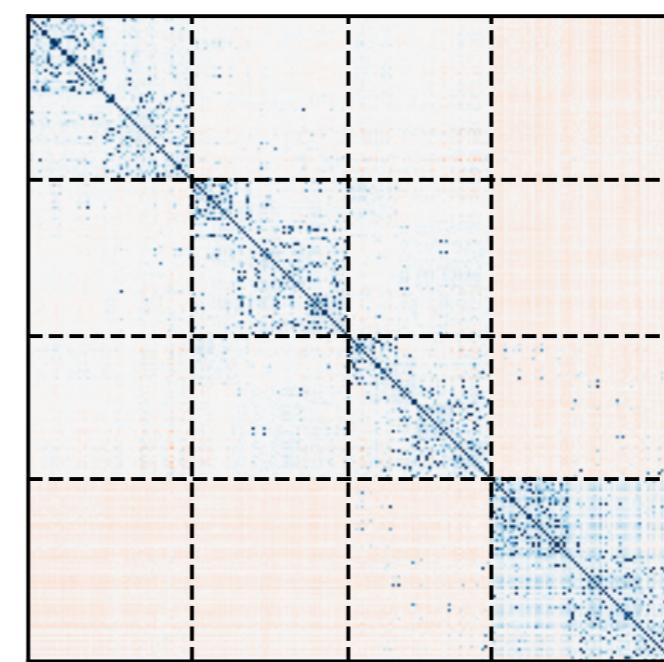
- Différentes sources de bruits : différentes corrélations entre les détecteurs
 - Atmosphère identique pour tous les KID → corrélation matrice
 - Bruit électronique dû à l'électronique de lecture → corrélation par ligne de lecture



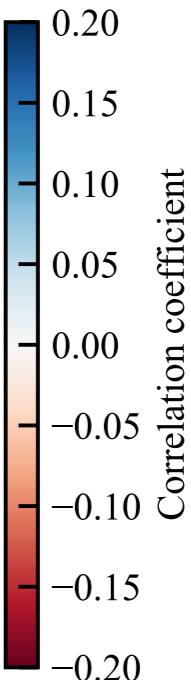
*Corrélation des KID,
données brutes*



Correlation coefficient



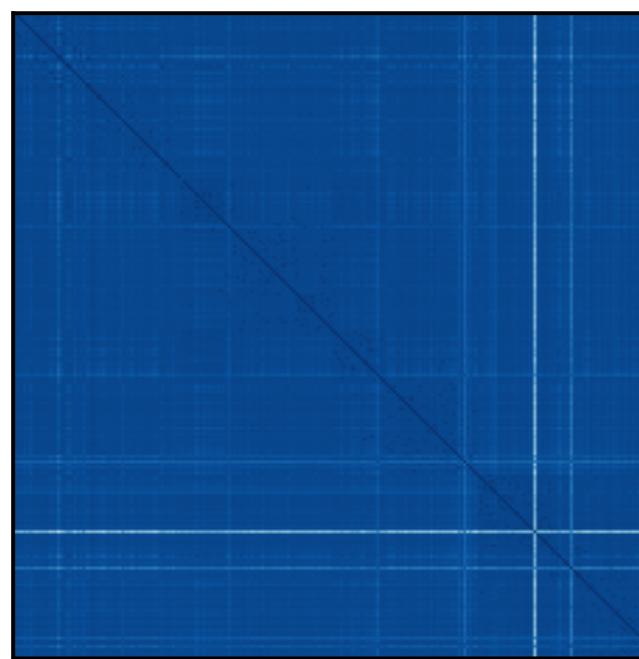
*Corrélation des KID,
mode commun atmosphérique soustrait*



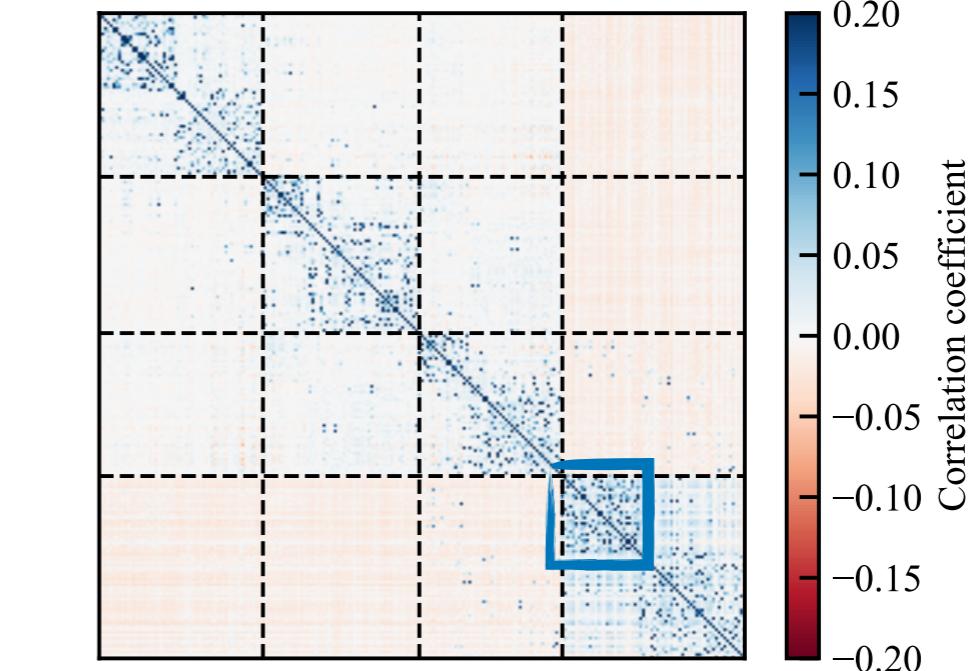
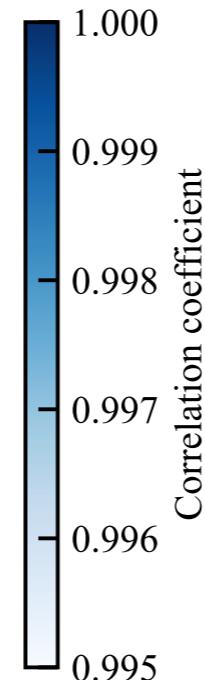
Correlation coefficient

- En pratique : mode commun par groupe de détecteurs corrélés
 - Coefficient de corrélation entre tous les KID d'une matrice
 - Détecteurs les + corrélés groupés pour estimer le mode commun

- Différentes sources de bruits : différentes corrélations entre les détecteurs
 - Atmosphère identique pour tous les KID → corrélation matrice
 - Bruit électronique dû à l'électronique de lecture → corrélation par ligne de lecture



*Corrélation des KID,
données brutes*

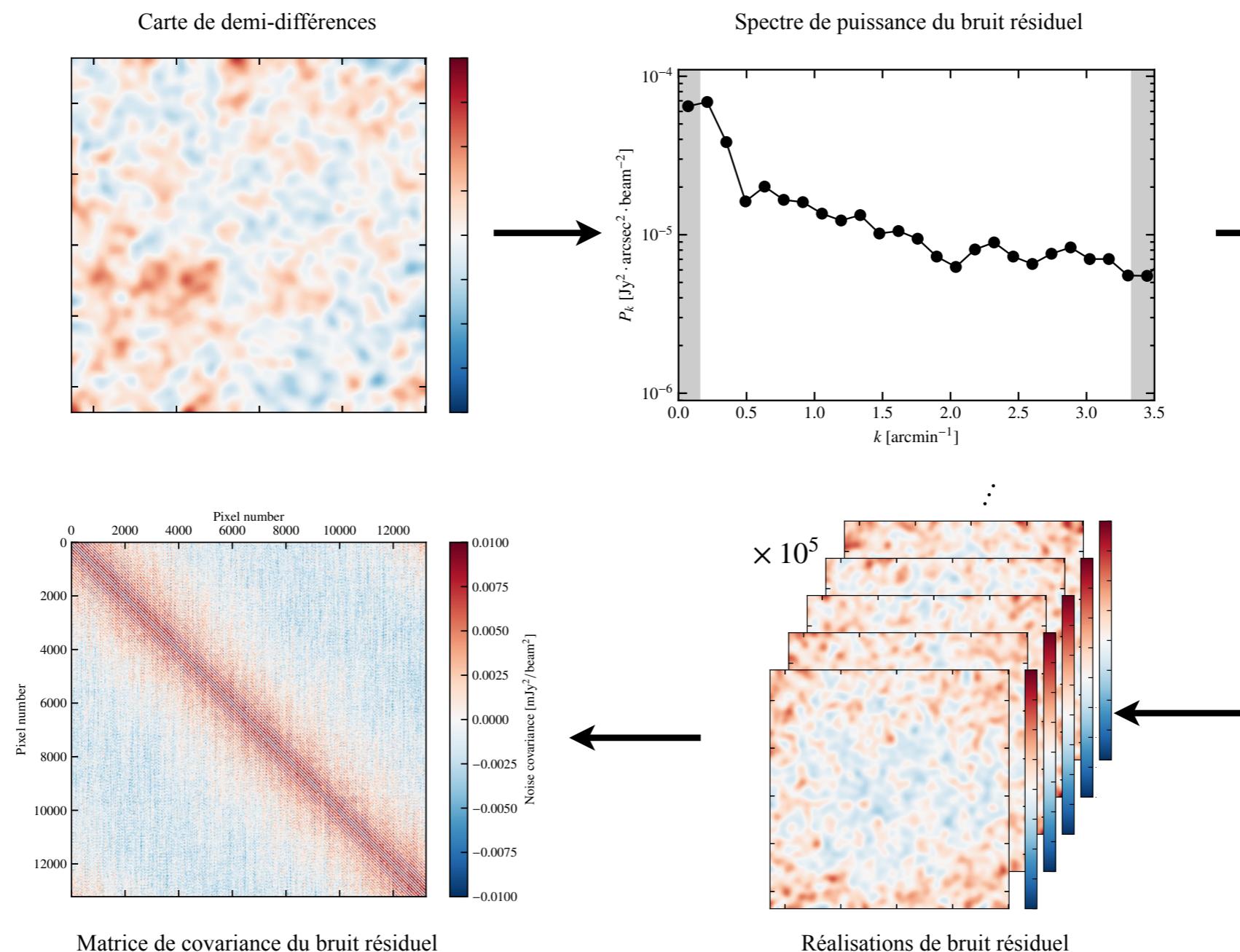


*Corrélation des KID,
mode commun atmosphérique soustrait*

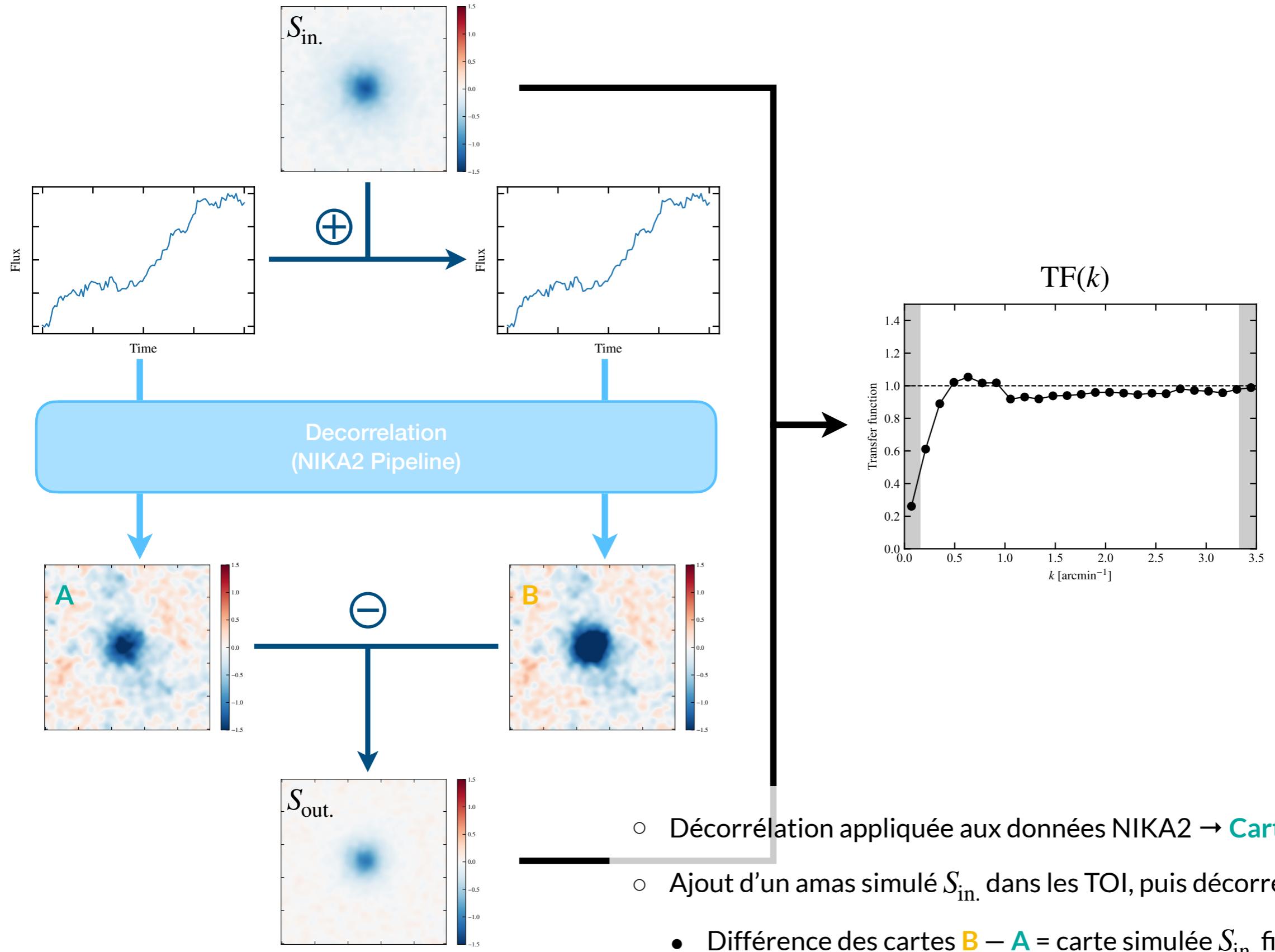
- En pratique : mode commun par groupe de détecteurs corrélés
 - Coefficient de corrélation entre tous les KID d'une matrice
 - Détecteurs les + corrélés groupés pour estimer le mode commun

↪ Spectre de puissance & covariance du bruit

- Carte de demi-différences : $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \times (-1)^i$
 - Signal astrophysique annulé, bruit toujours présent → Spectre de puissance du bruit résiduel
 - Simulation de cartes de bruit avec le même spectre de puissance
- Covariance des cartes = covariance pixel à pixel du bruit résiduel

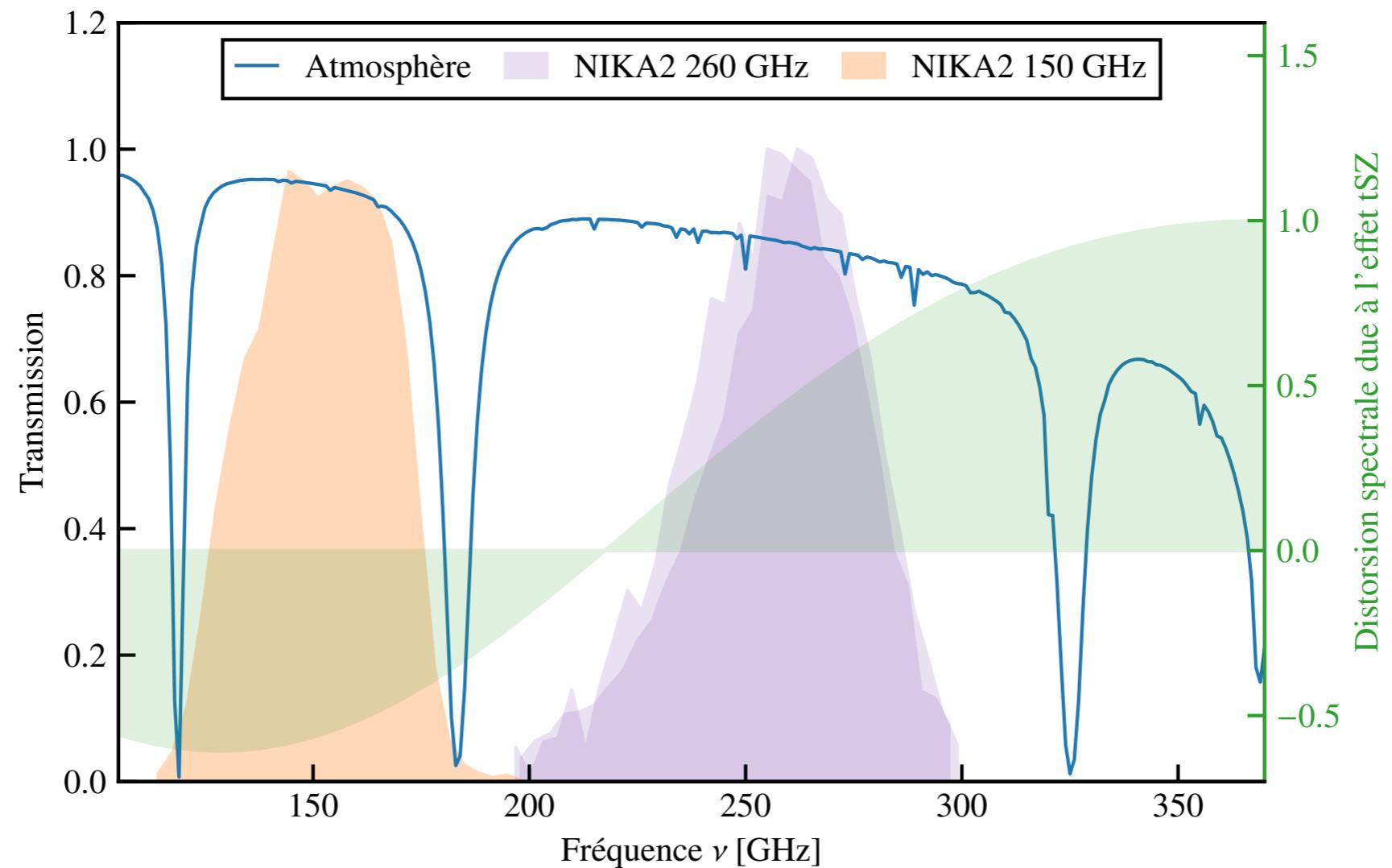


Fonction de transfert



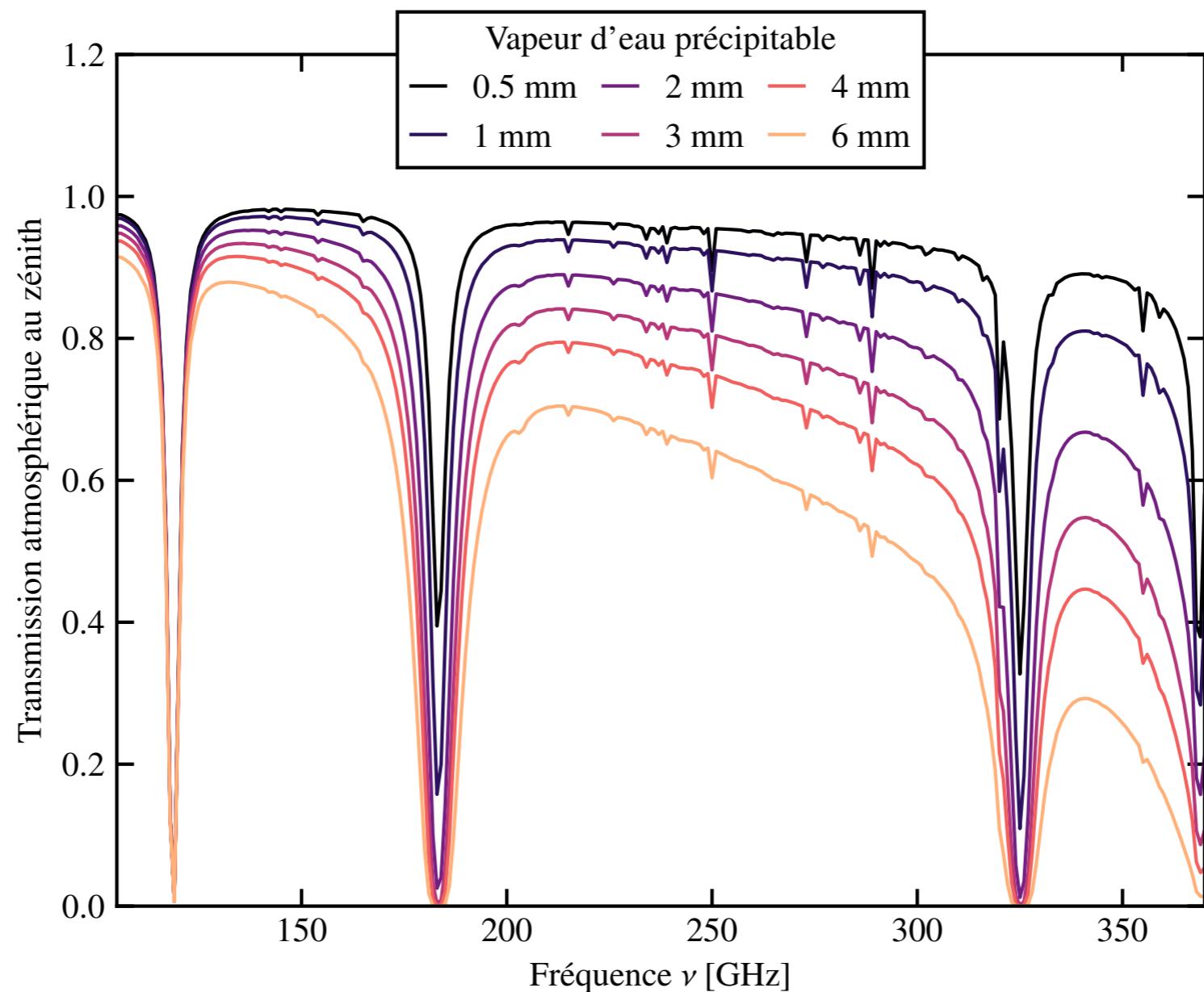
↪ Pas de SZ à 1 mm ?

- Distorsion spectrale SZ @ 260 GHz = 70% de celle @ 150 GHz
- Sensibilité NIKA2 ~3x plus faible @ 260 GHz
- Lobe plus petit @ 260 GHz → moins de Jy/beam
- Atténuation atmosphérique plus importante @ 260 GHz → plus sensible à la météo

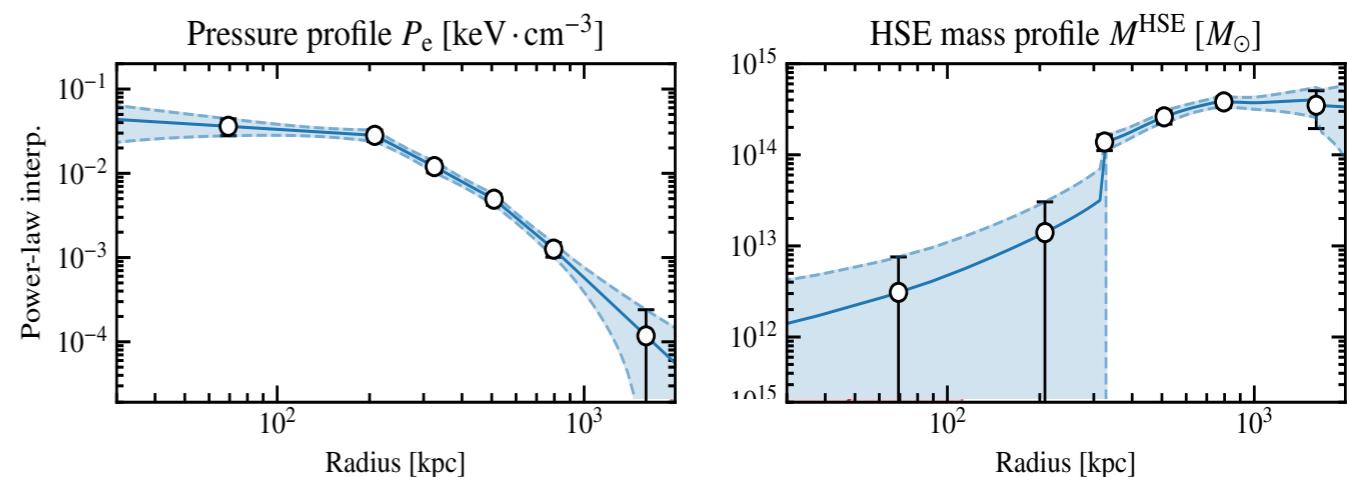


↪ Pas de SZ à 1 mm ?

- Distorsion spectrale SZ @ 260 GHz = 70% de celle @ 150 GHz
- Sensibilité NIKA2 ~3x plus faible @ 260 GHz
- Lobe plus petit @ 260 GHz → moins de Jy/beam
- Atténuation atmosphérique plus importante @ 260 GHz → plus sensible à la météo

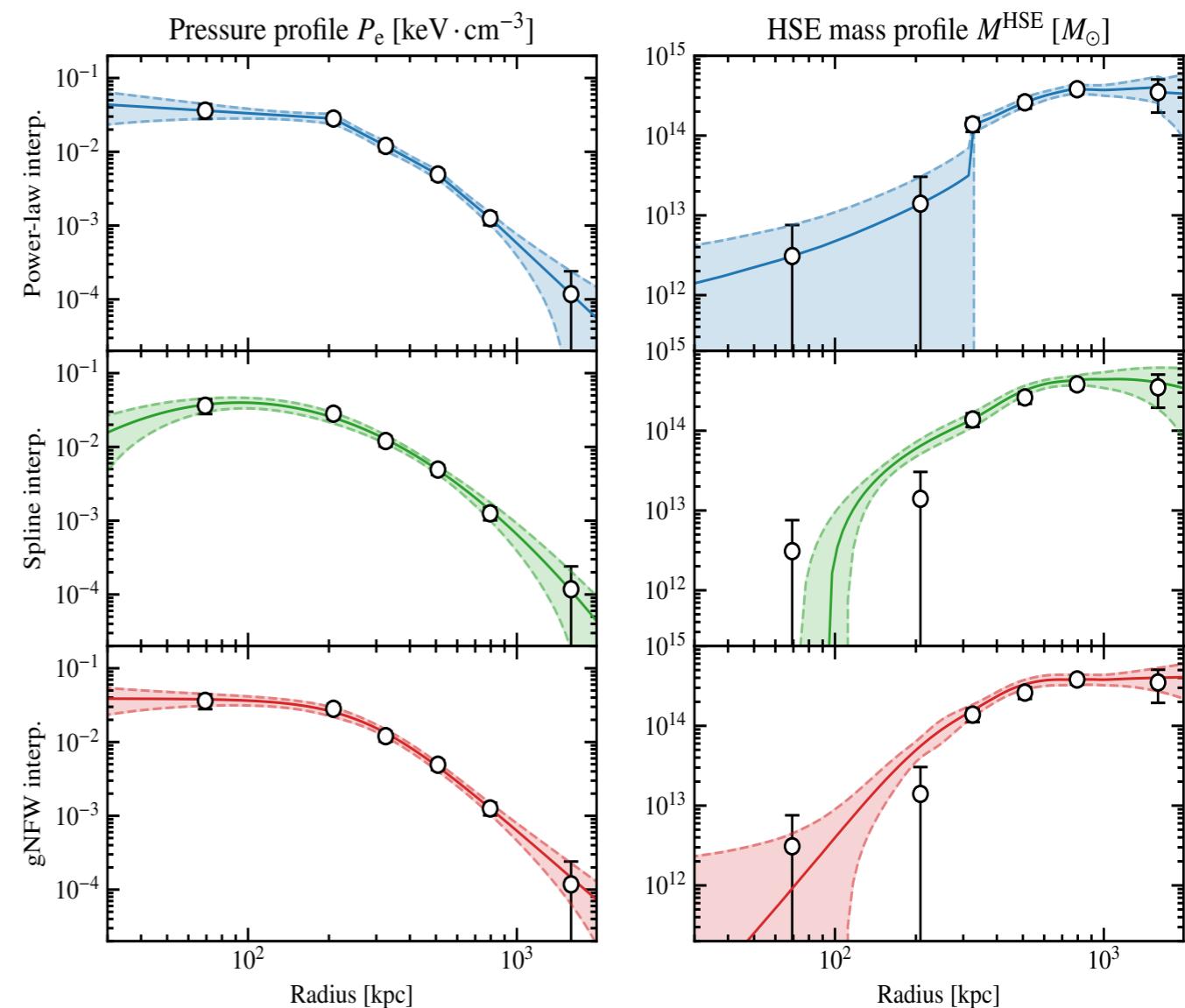


- Profil de pression non-paramétrique : interpolation nécessaire pour le profil de masse
- Technique :
 - Interpolation sur chaque échantillon des chaînes de Markov
 - Calcul d'un profil de masse pour chaque profil de pression
 - Distribution de probabilité du profil de masse
- Interpolations en loi de puissance :
Profil de masse discontinu



Meilleure méthode :
dépend des objectifs de l'analyse

- Profil de pression non-paramétrique : interpolation nécessaire pour le profil de masse
- Technique :
 - Interpolation sur chaque échantillon des chaînes de Markov
 - Calcul d'un profil de masse pour chaque profil de pression
 - Distribution de probabilité du profil de masse
- Interpolations en loi de puissance :
 - Profil de masse discontinu
- 3 interpolations implémentées :
 - Loi de puissance (linéaire en log-log)
 - Profil de masse discontinu
 - Splines
 - Lisse mais inextrapolable
 - Interpolation par modèle gNFW
 - Lisse, physique (extrapolable)

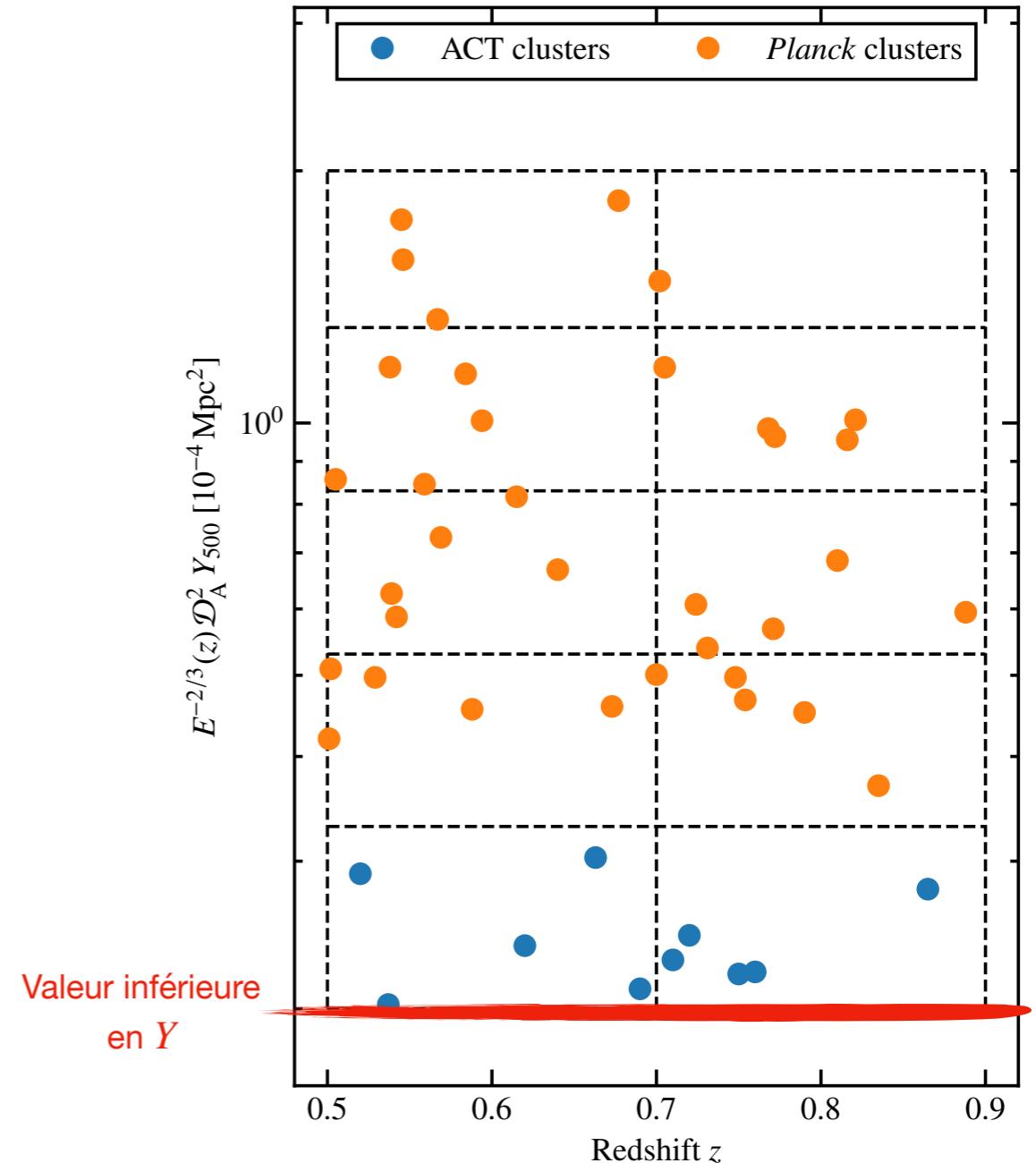


Meilleure méthode :
dépend des objectifs de l'analyse

Effets de sélection du LPSZ

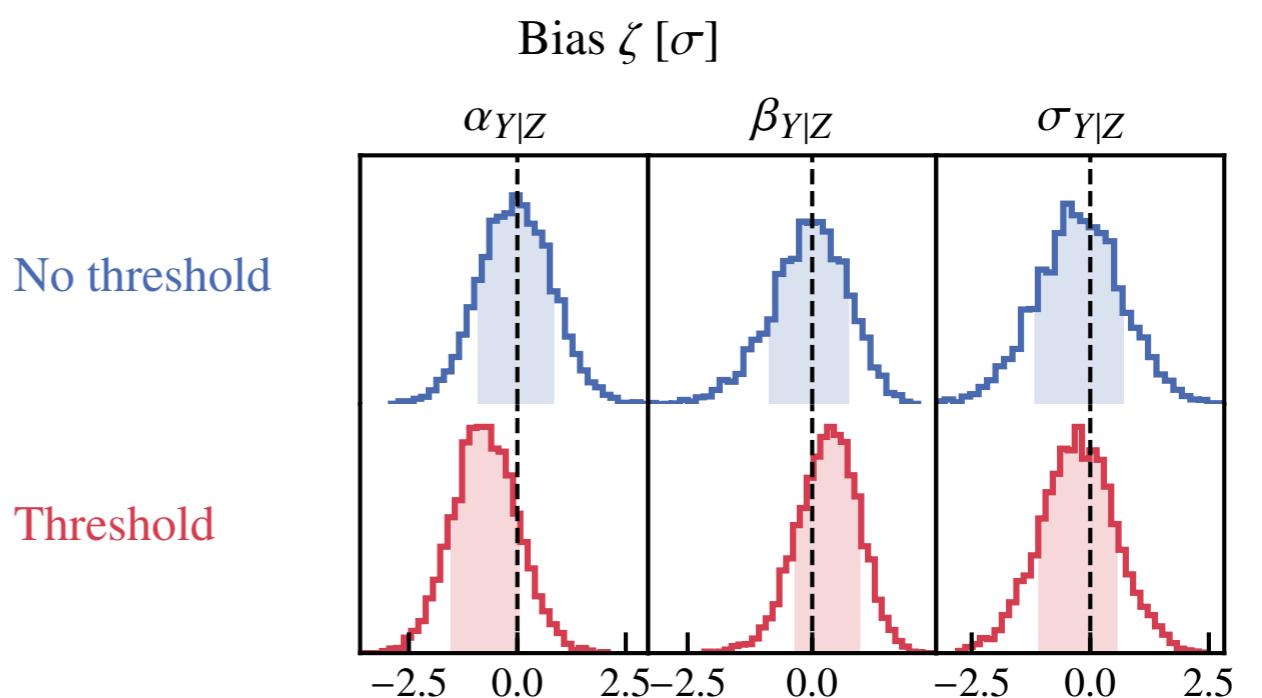
- Sélection en boîtes du LPSZ = complexe à modéliser
 - Pas une simple coupure en observable pour chaque boîte

Amas peuvent être détectés dans les boîtes inférieures
- Modélisation de cette sélection ?
 - Choix 1 : ignorer la sélection
 - Choix 2 : sélection = coupure à la valeur inférieure en Y
- Impact de la modélisation :
 - Simulation de 5000 échantillons
- Ajustement avec chaque modélisation



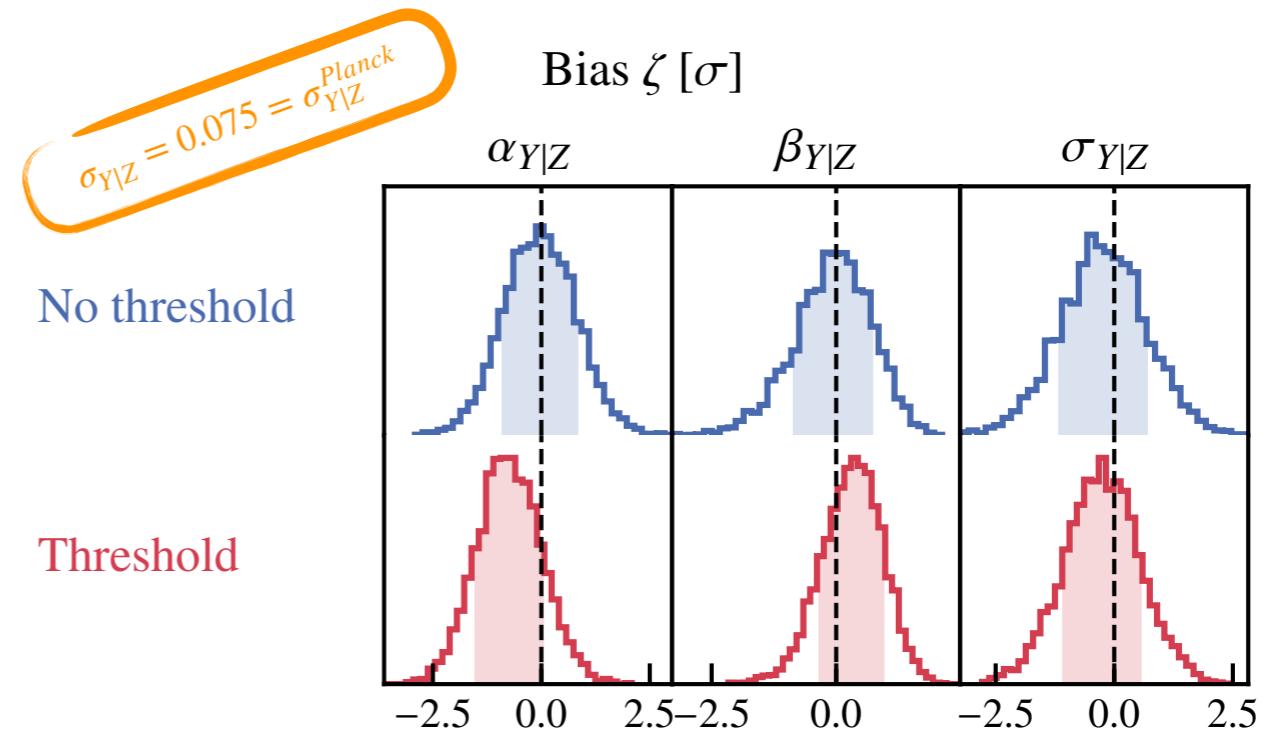
↪ Biais de sélection du LPSZ ?

- Pas de biais significatif sur les paramètres d'intérêt
 - Impact minime de la modélisation
 - Pas de biais de sélection pour le LPSZ ?
- Pour une grande dispersion intrinsèque ?
 - Valeur utilisée faible : $\sigma_{Y|Z} = 0.075$ (Planck)
 - Biais de Malmquist bias (MB) dû à la dispersion
 - Répétition de l'analyse avec $\sigma_{Y|Z} \rightarrow 2 \times \sigma_{Y|Z}$



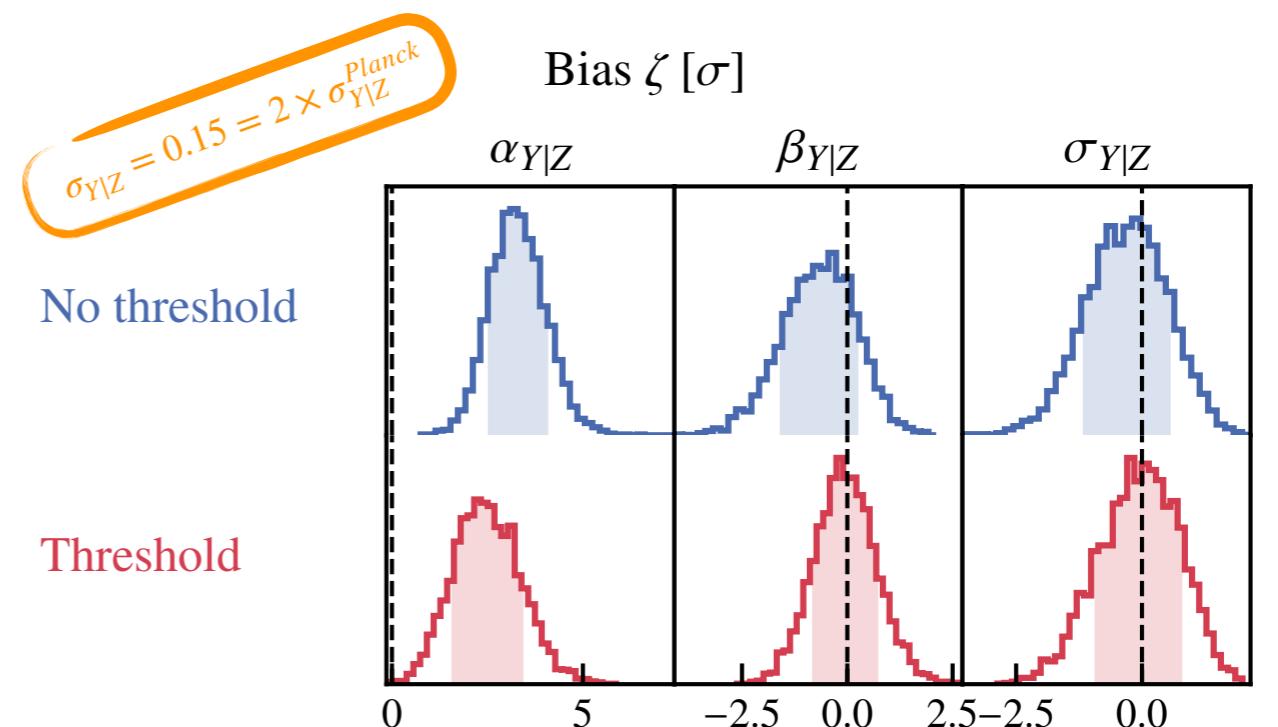
Biais de sélection du LPSZ ?

- Pas de biais significatif sur les paramètres d'intérêt
 - Impact minime de la modélisation
 - Pas de biais de sélection pour le LPSZ ?
- Pour une grande dispersion intrinsèque ?
 - Valeur utilisée faible : $\sigma_{Y|Z} = 0.075$ (Planck)
 - Biais de Malmquist bias (MB) dû à la dispersion
 - Répétition de l'analyse avec $\sigma_{Y|Z} \rightarrow 2 \times \sigma_{Y|Z}$

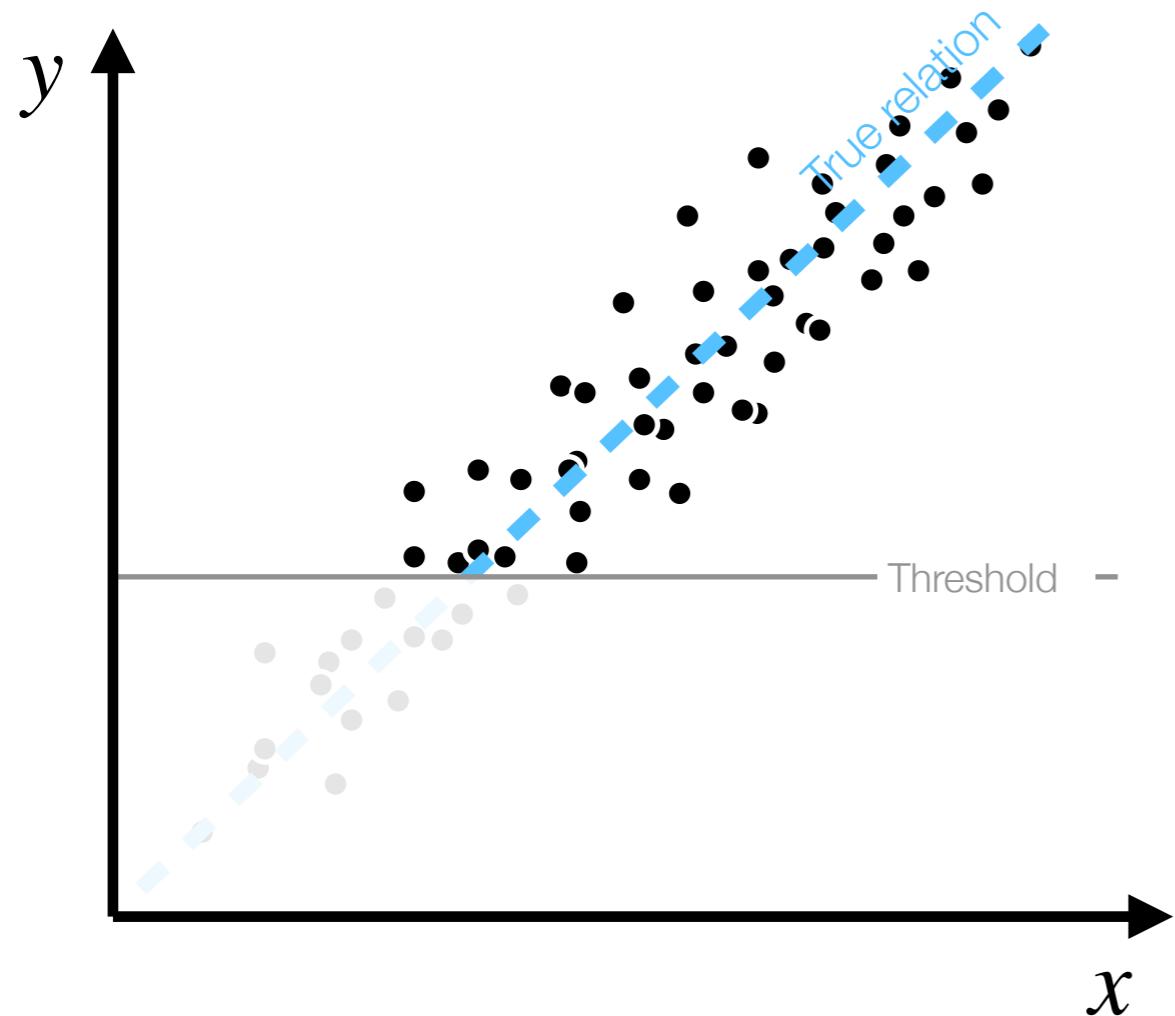


- Biais significatif sur $\alpha_{Y|Z}$, avec $\zeta > 2\sigma$
 - Pas sur les autres paramètres (\neq Malmquist)
 - Impact minime de la modélisation
- Conséquence : si $\sigma_{Y|Z}$ est sous-estimé par Planck, la sélection du LPSZ crée un biais sur $\alpha_{Y|Z}$

- Solutions envisageables :
 - Si σ est faible, négliger le biais
 - Étude $\zeta_\alpha = f(\sigma)$ sur simulations
→ Correction ad-hoc
 - Mesure de α indépendamment
→ Paramètre fixé dans l'analyse



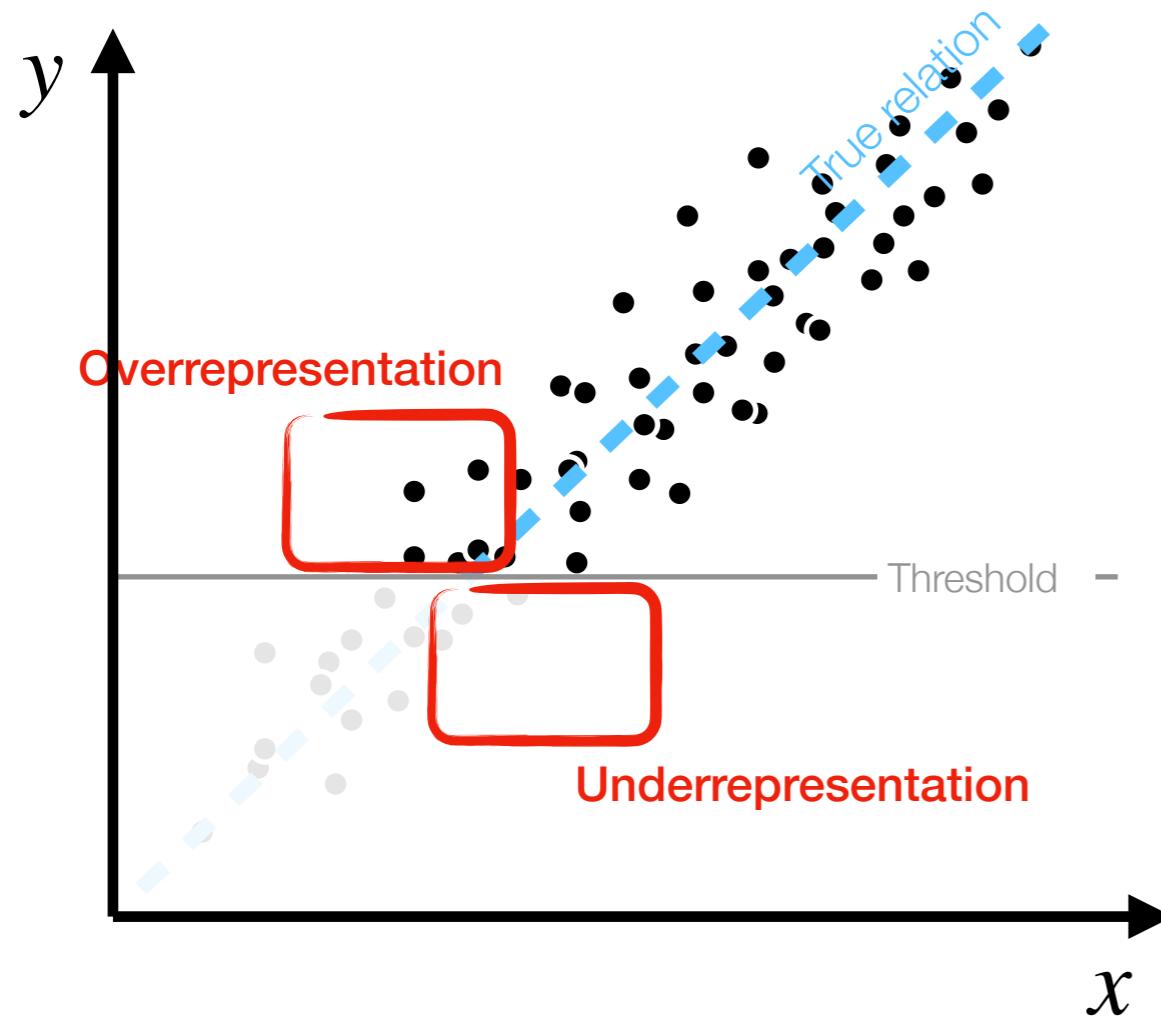
➡ Interprétation du biais de sélection sur α



Biais de Malmquist : Surreprésentation
au dessus d'un seuil de détection

→ Rotation : biais sur la pente β

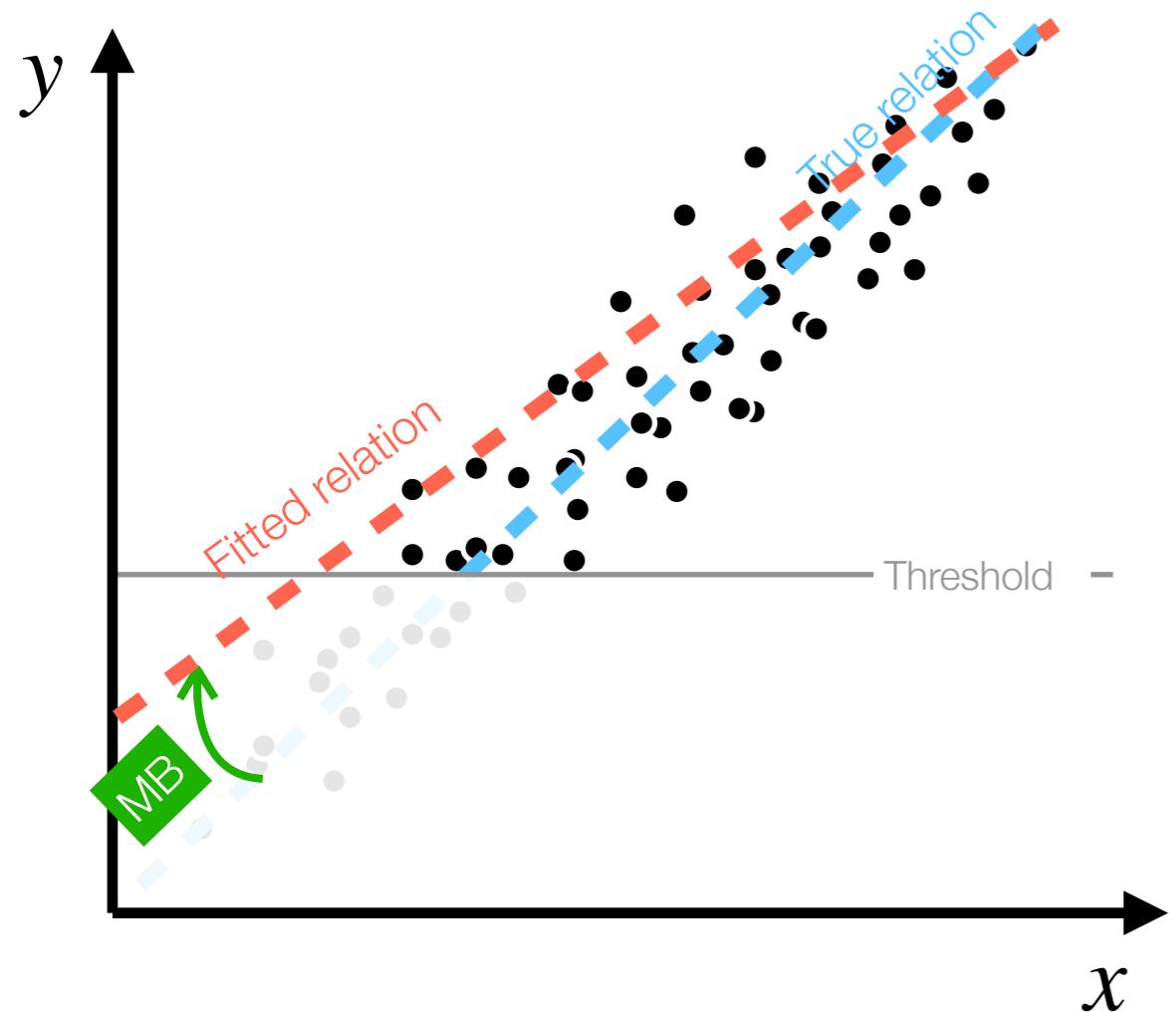
Interprétation du biais de sélection sur α



Biais de Malmquist : Surreprésentation
au dessus d'un seuil de détection

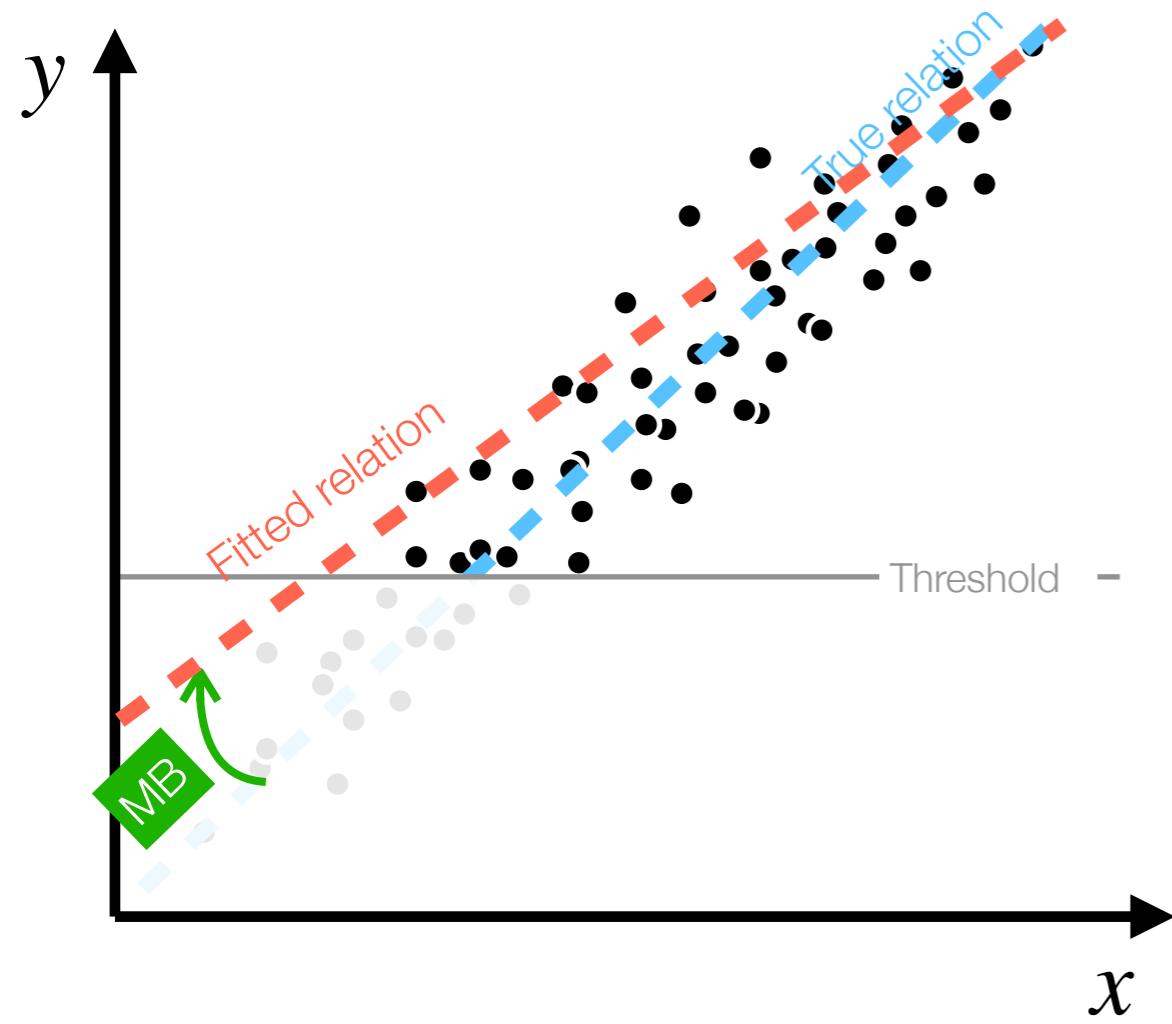
→ Rotation : biais sur la pente β

ⓘ Interprétation du biais de sélection sur α



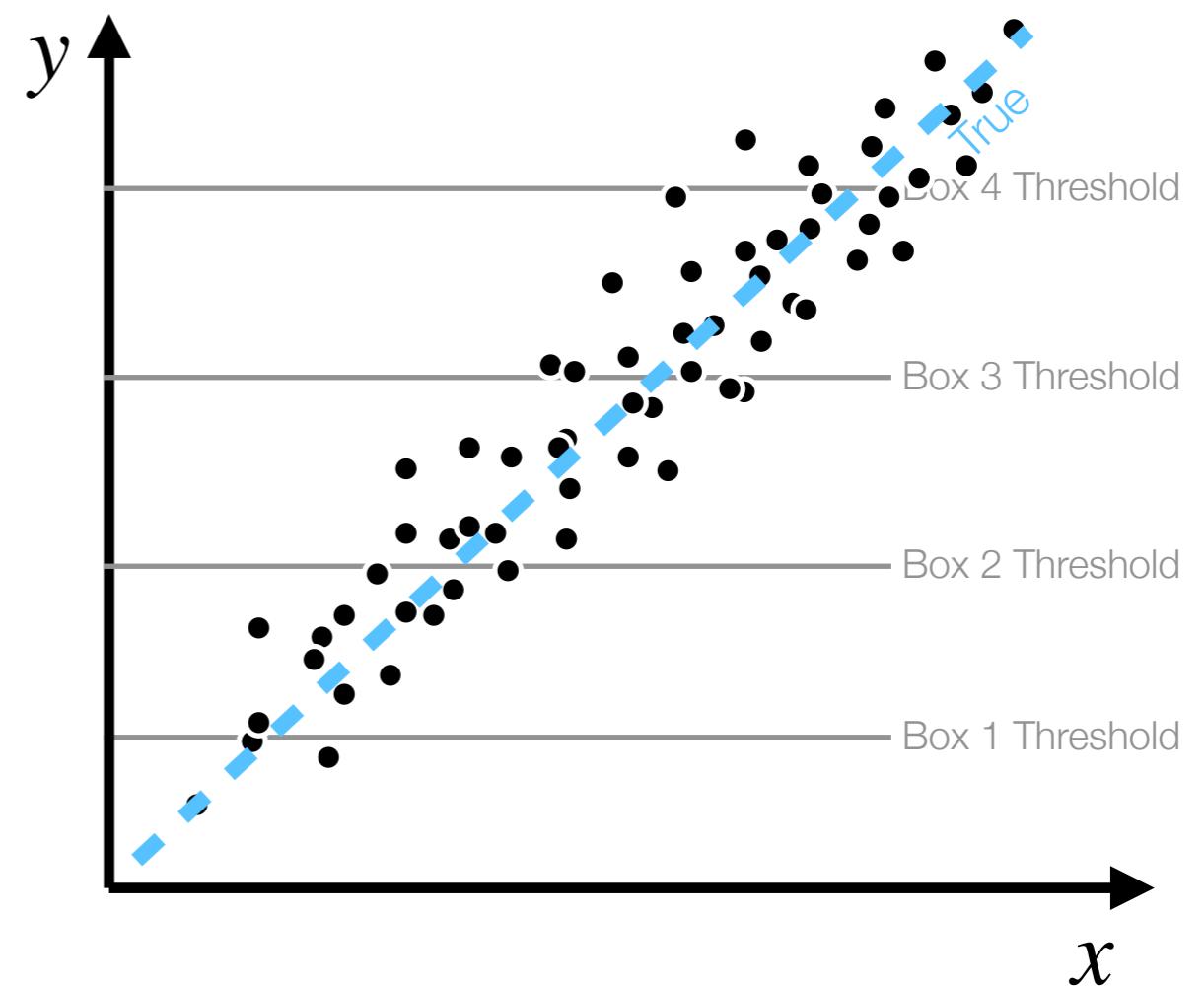
Biais de Malmquist : Surreprésentation
au dessus d'un seuil de détection

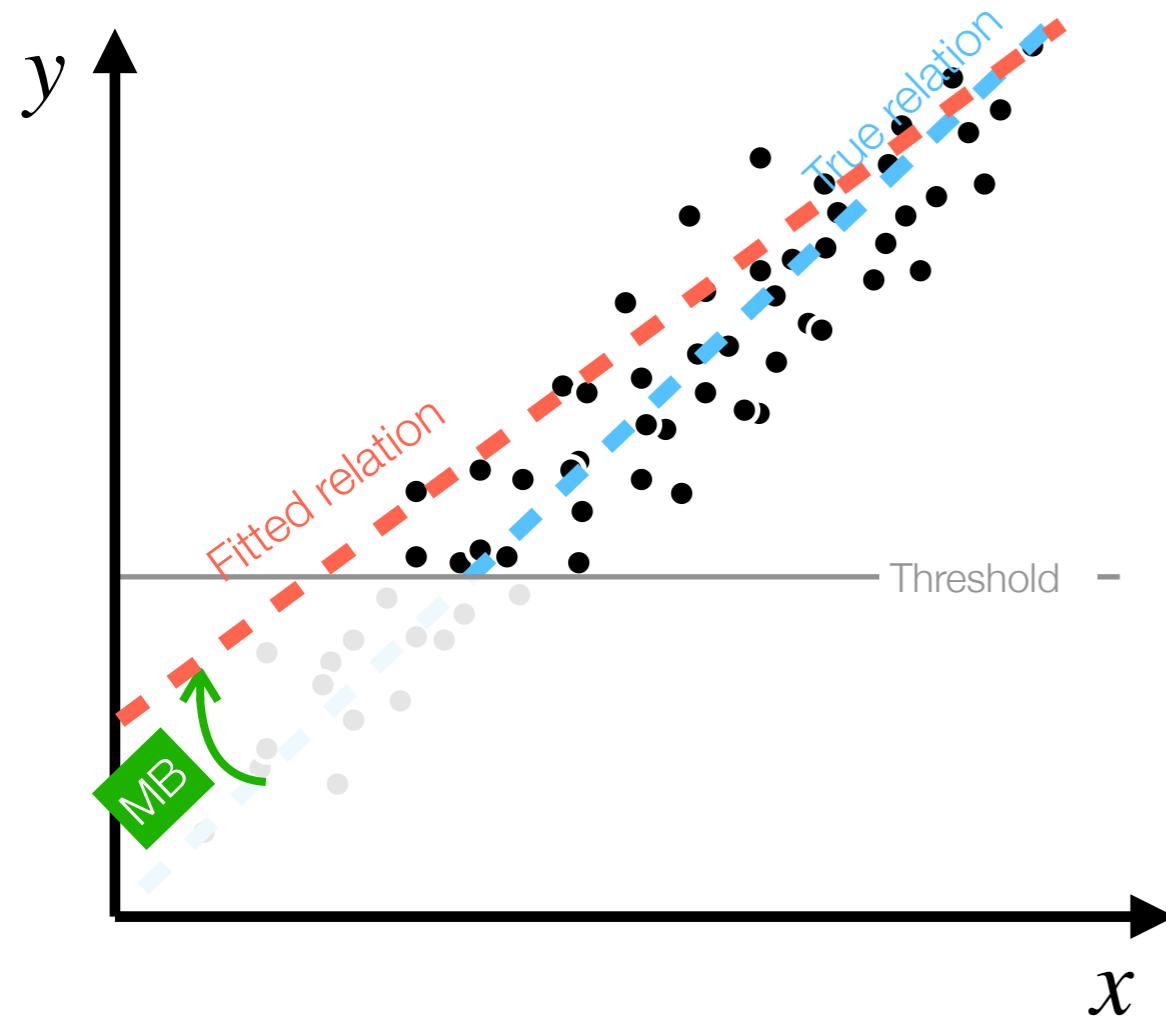
→ Rotation : biais sur la pente β



Biais de Malmquist : Surreprésentation
au dessus d'un seuil de détection

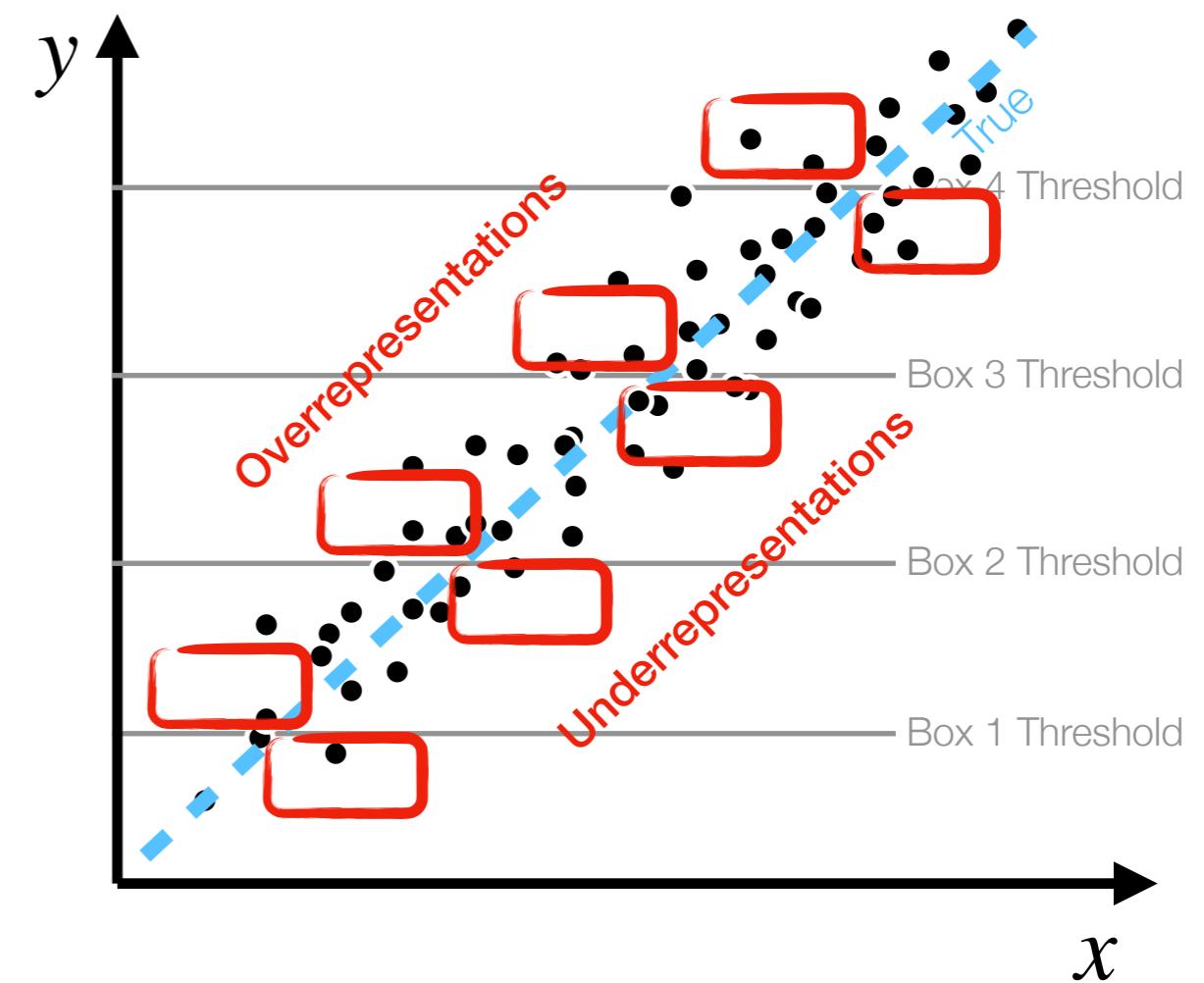
→ Rotation : biais sur la pente β





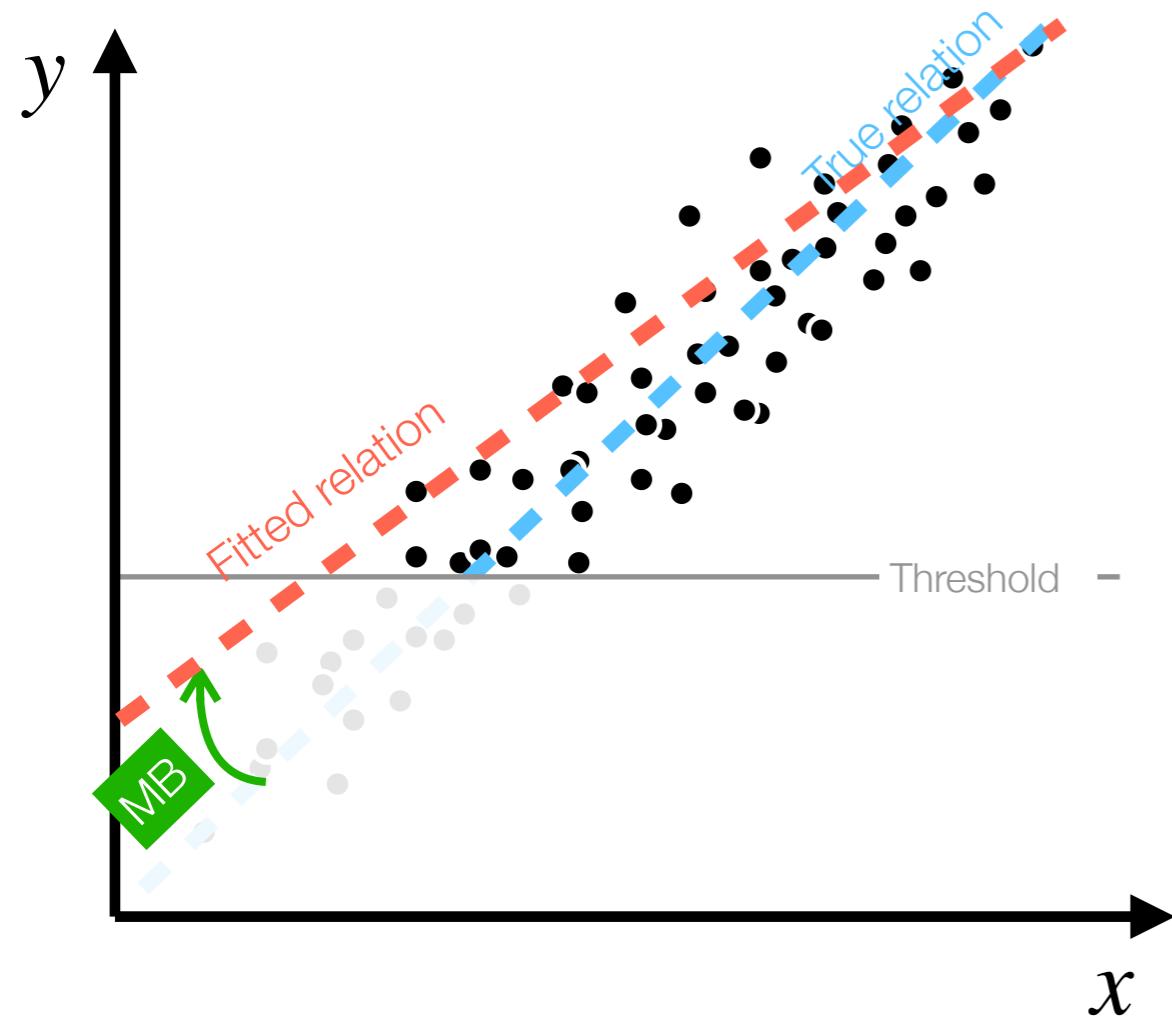
Biais de Malmquist : Surreprésentation
au dessus d'un seuil de détection

→ Rotation : biais sur la pente β



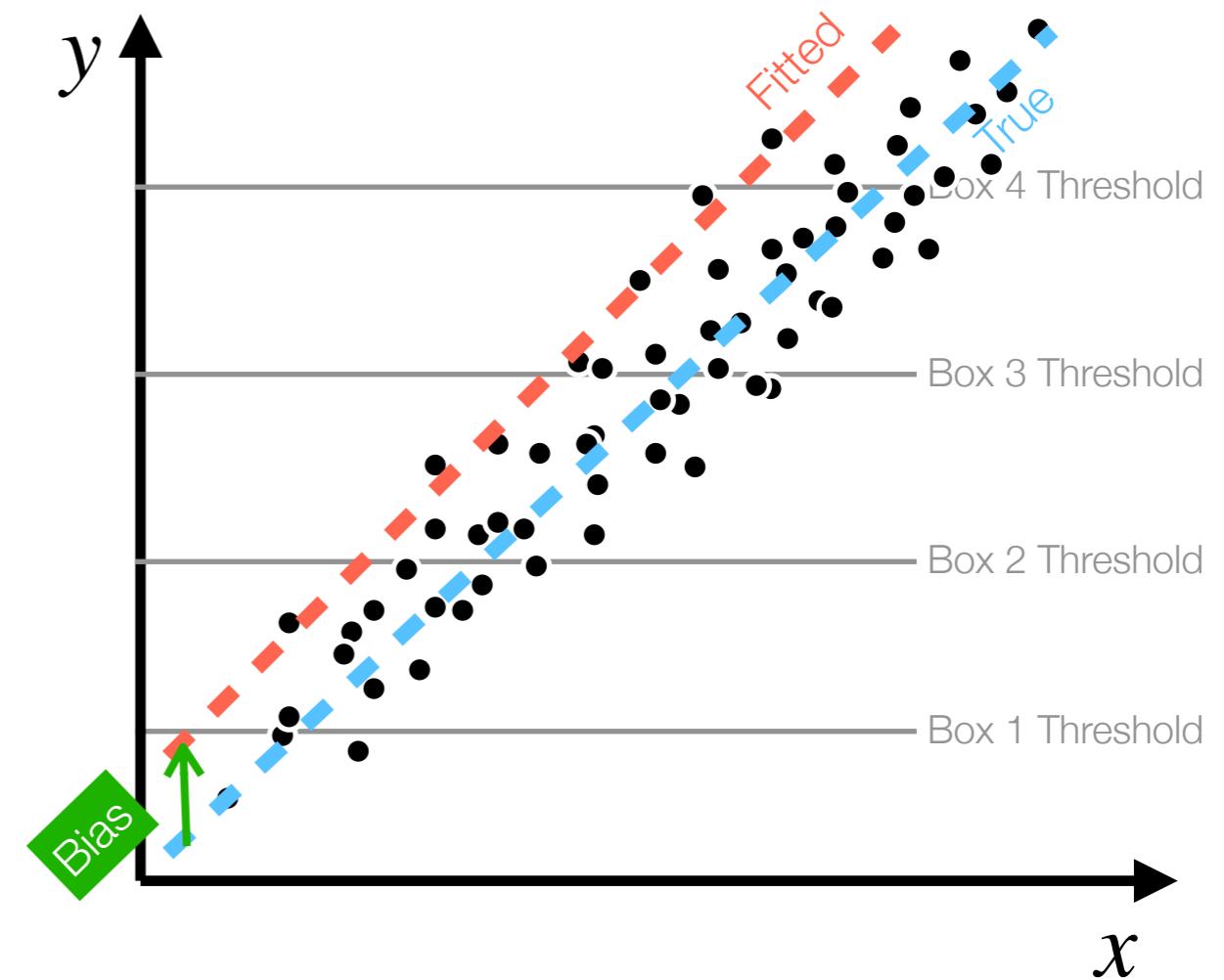
Ici : Surreprésentations aux limites des
boîtes

→ Décalage : biais sur α



Biais de Malmquist : Surreprésentation
au dessus d'un seuil de détection

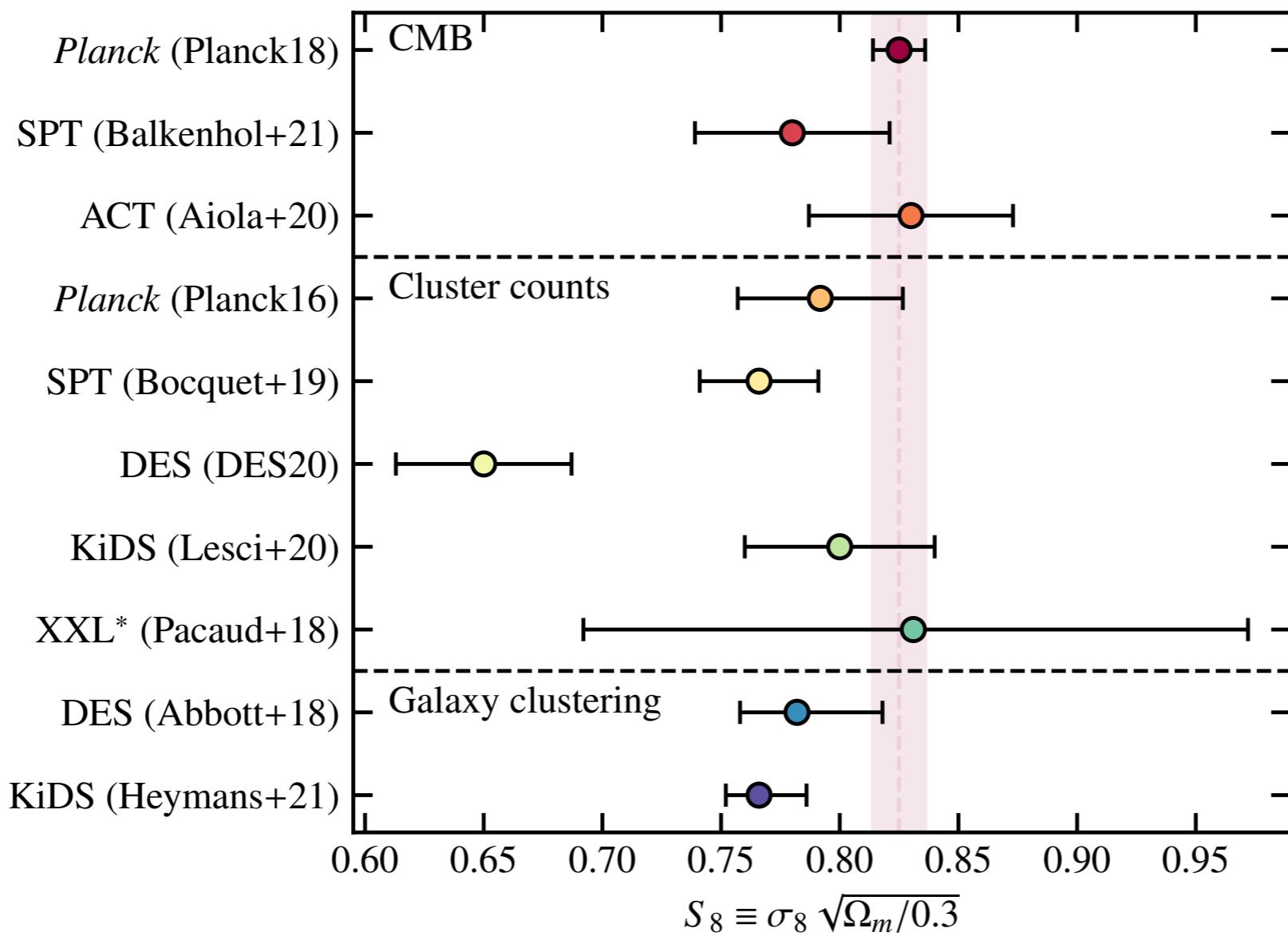
→ Rotation : biais sur la pente β



Ici : Surreprésentations aux limites des
boîtes

→ Décalage : biais sur α

Résultats cosmologiques amas



- “Tension” sur S_8 : moins d’amas que prédit par les observations du CMB
- Peu significatif aujourd’hui, pourra le devenir avec les grands relevés à venir :
 - SZ : AdvACT, SPT-3G → Simons Observatory, CMB-S4
 - Optique : DES, KiDS → LSST, Euclid
 - X: eROSITA

Propriétés amas perturbés vs relaxés

- Profils thermodynamiques des amas **perturbés** et **relaxés** différents :
 - Profil de pression
 - Profil d'entropie
- Classification d'amas : étude de l'impact sur la relation d'échelle :

$$P(Y|Z) \rightarrow P(Y|Z, K)$$

