

# **Variabilités intrinsèques des supernovæ de type Ia et leurs conséquences sur les paramètres cosmologiques**

Nora NICOLAS

Groupe Cosmos IP2I

Vendredi 30 septembre 2022

Soutenance de thèse de Doctorat

Sous la direction de

M. RIGAULT

M. SMITH

Y. COPIN

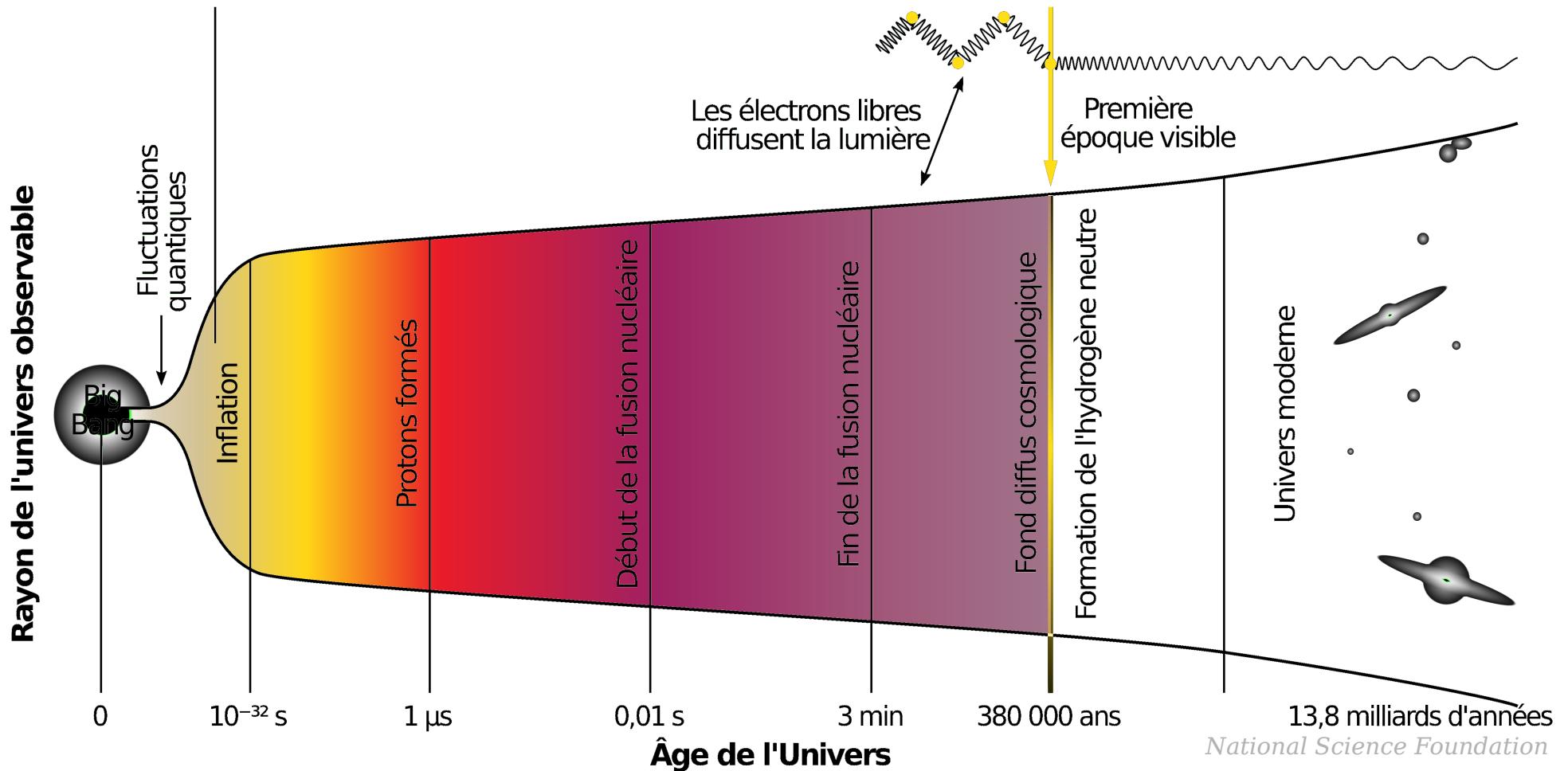


Lyon 1



# Cosmologie observationnelle : histoire

## Histoire de l'Univers

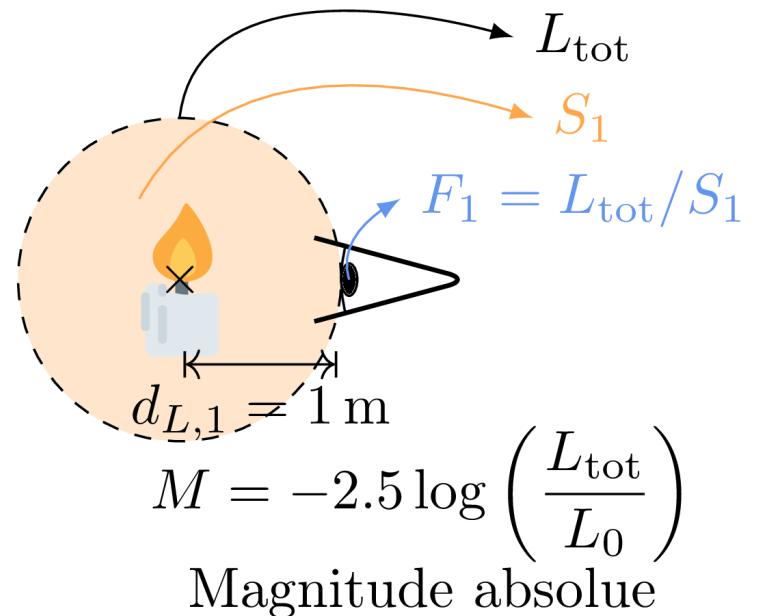




# Cosmologie observationnelle

Mesure avec les SNe Ia

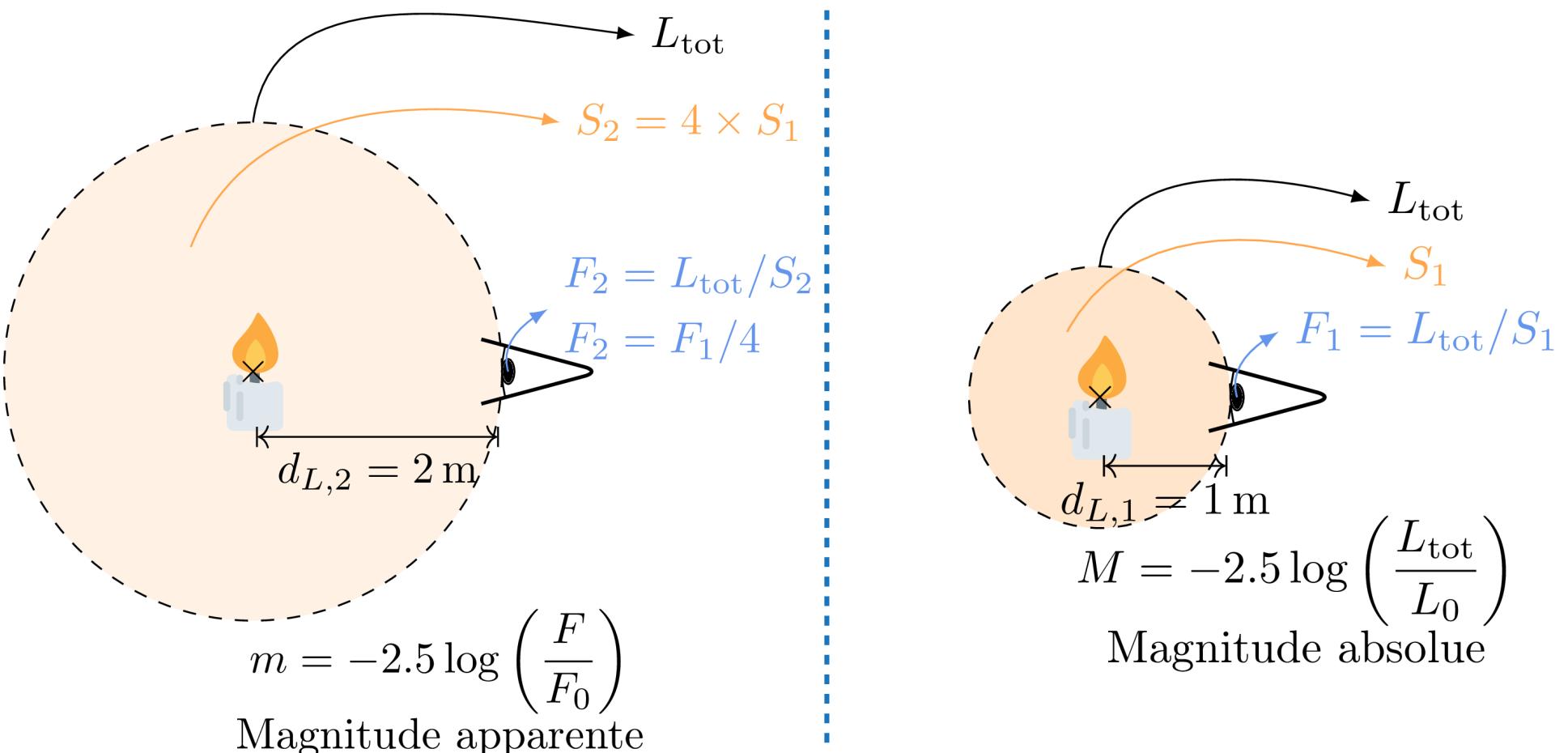
## « Chandelles standard »



# Cosmologie observationnelle

## Mesure avec les SNe Ia

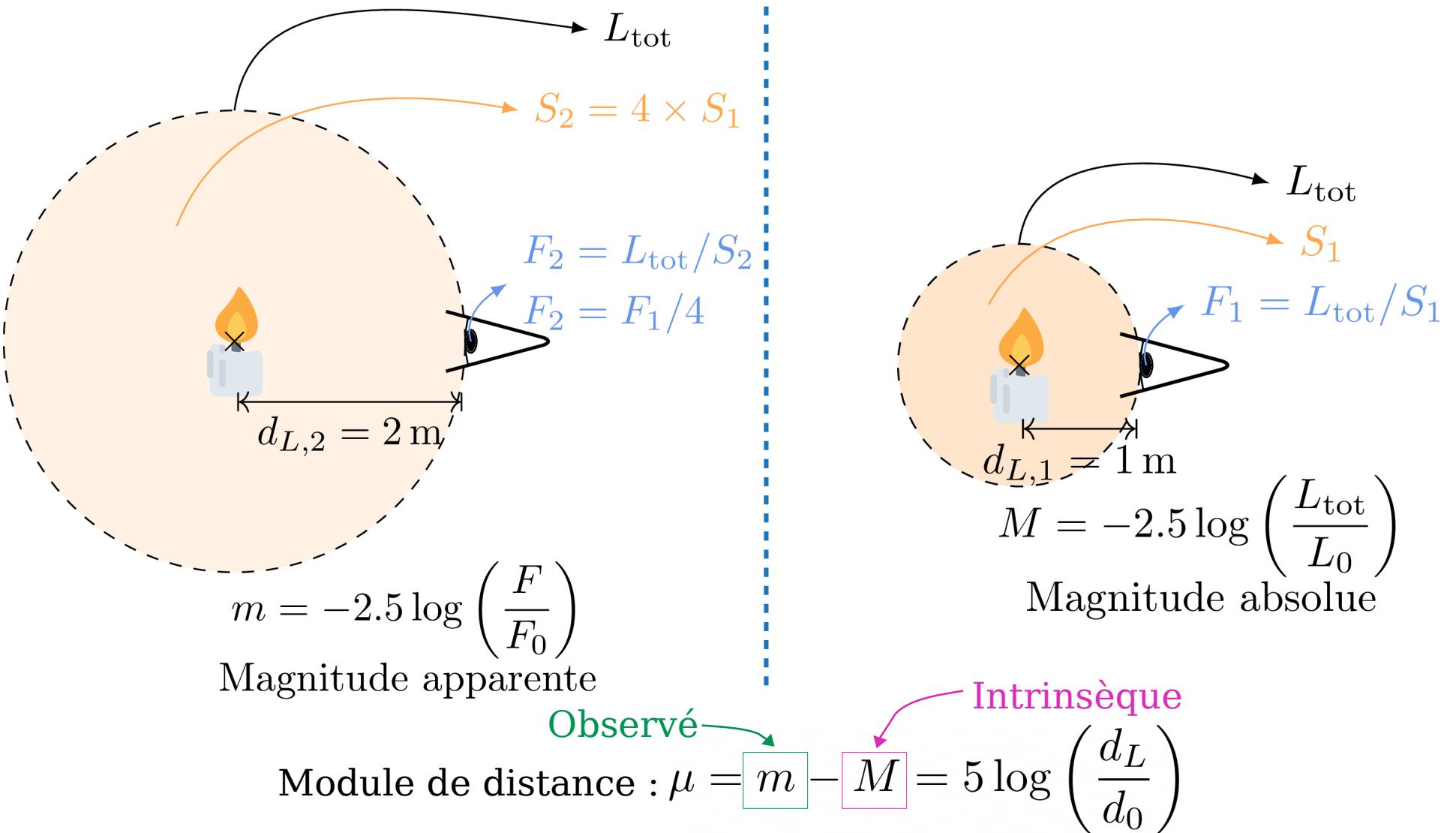
### « Chandelles standard »



# Cosmologie observationnelle

## Mesure avec les SNe Ia

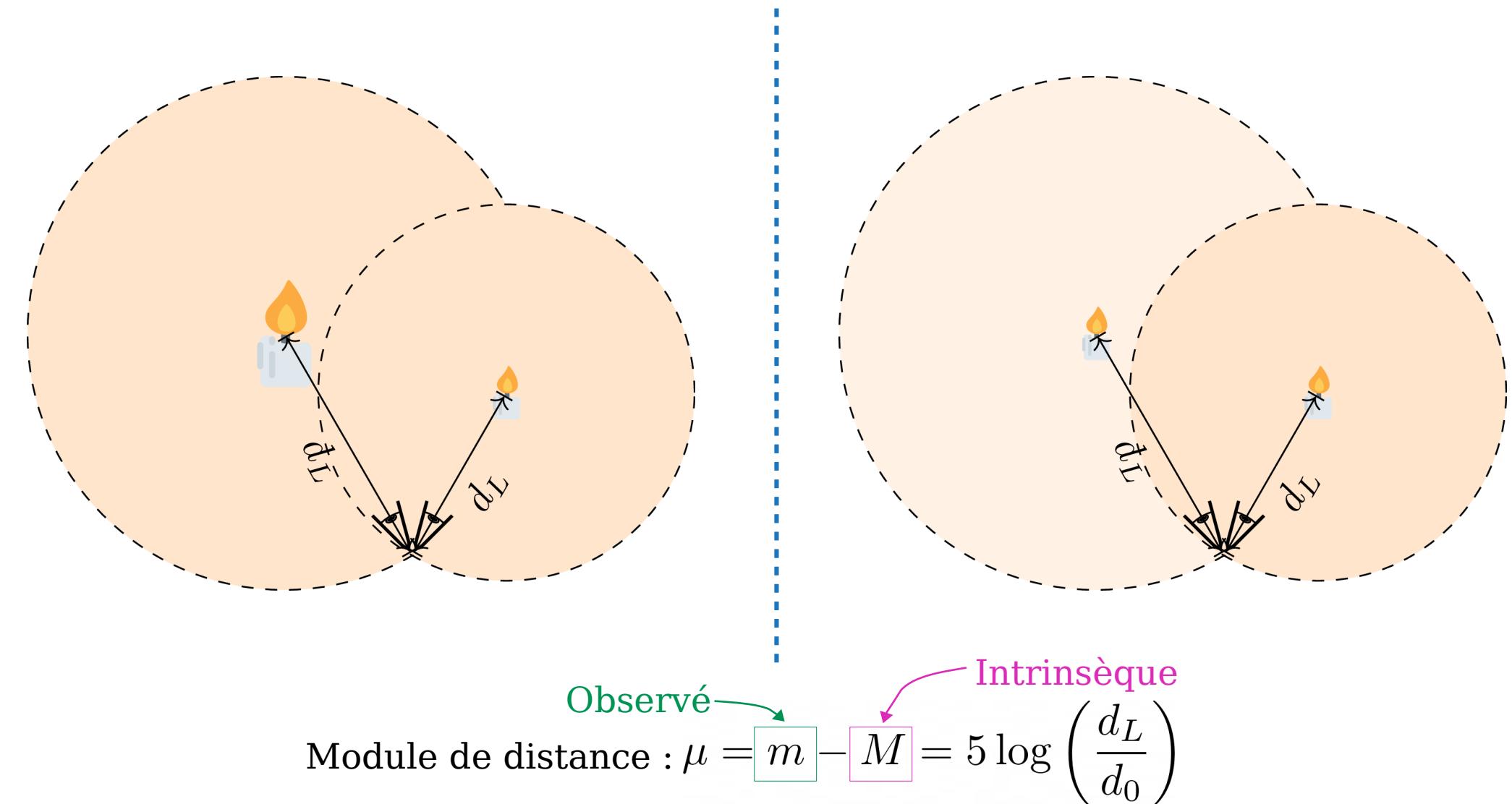
### « Chandelles standard »



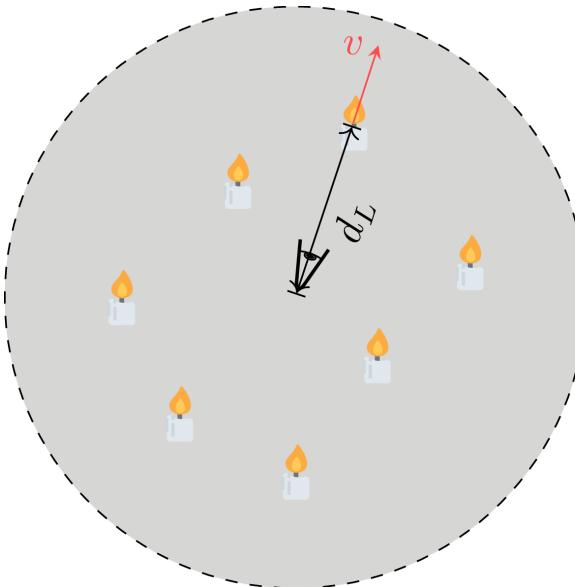
# Cosmologie observationnelle

## Mesure avec les SNe Ia

« Chandelles standard »



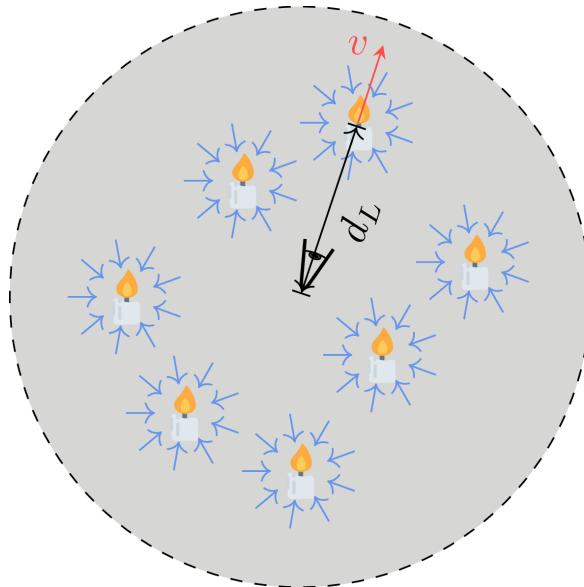
# Cosmologie observationnelle : théorie



Paramètres cosmologiques :

$$H_0 : \text{taux d'expansion} \longrightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow$$

# Cosmologie observationnelle : théorie

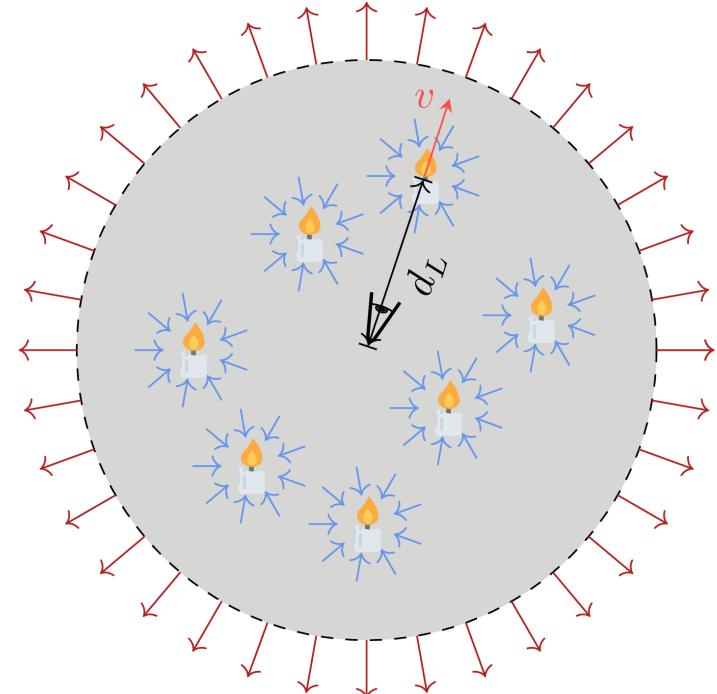


Paramètres cosmologiques :

$$H_0 : \text{taux d'expansion} \longrightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow$$

$$\Omega_m : \text{densité de la matière} \longrightarrow \text{Contracte l'espace}$$

# Cosmologie observationnelle : théorie



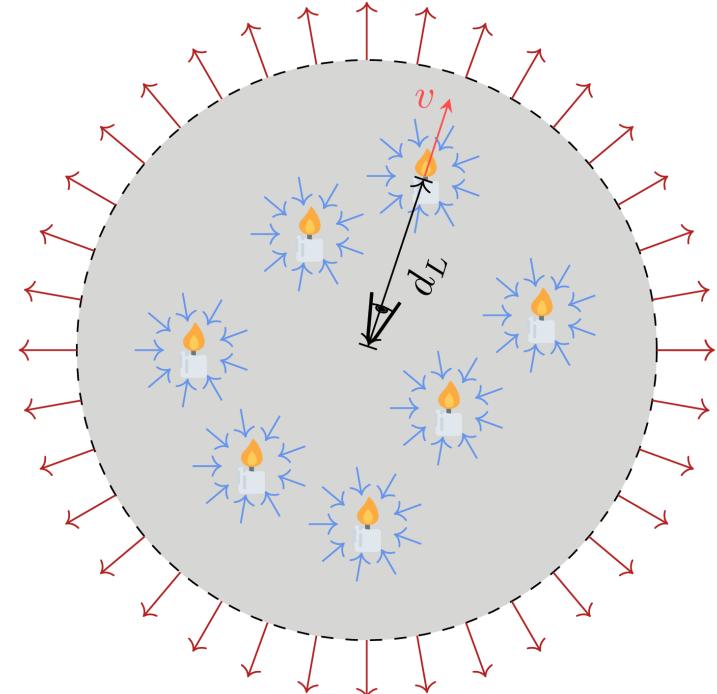
Paramètres cosmologiques :

$H_0$  : taux d'expansion  $\longrightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow$

$\Omega_m$  : densité de la matière  $\longrightarrow$  Contracte l'espace

$\Omega_\Lambda$  : densité de l'énergie sombre  $\longrightarrow$  Dilate l'espace

# Cosmologie observationnelle : théorie



Paramètres cosmologiques :

- |  |   |
|--|---|
| $H_0$ : taux d'expansion                       | $\rightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow$ |
| $\Omega_m$ : densité de la matière             | $\rightarrow$ Contracte l'espace                  |
| $\Omega_\Lambda$ : densité de l'énergie sombre | $\rightarrow$ Dilate l'espace                     |
| $w$ : paramètre d'état de $\Omega_\Lambda$     | $\rightarrow$ Décrit son comportement             |

Vitesse (redshift)

Distance :  $d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left( \int_0^z dz' \left[ \Omega_M (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda (1 + z')^{3(1+w)} \right]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble      Matière      Énergie sombre

# Cosmologie observationnelle : pratique

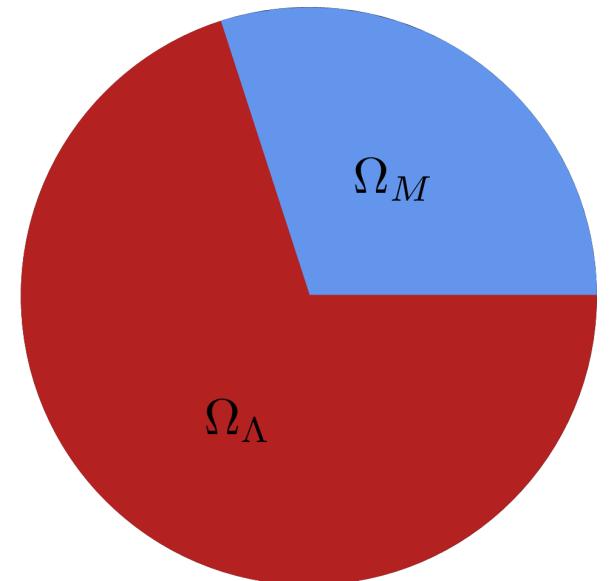
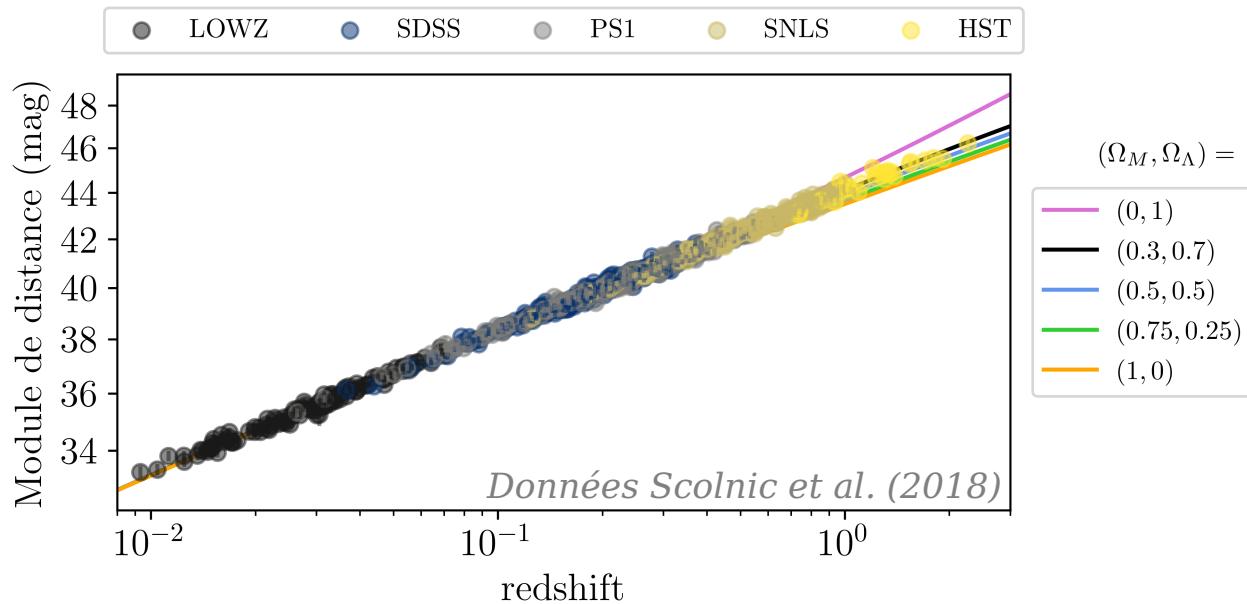
Module de distance :  $\mu = m - M = 5 \log \left( \frac{d_L}{d_0} \right)$

Observé → Intrinsèque

Vitesse (redshift) → Comportement de l'énergie sombre

Distance :  $d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left( \int_0^z dz' \left[ \Omega_M (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda (1 + z')^{3(1+w)} \right]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble Matière Énergie sombre



# Cosmologie observationnelle : pratique

Observé →

Module de distance :  $\mu = m - M = 5 \log \left( \frac{d_L}{d_0} \right)$

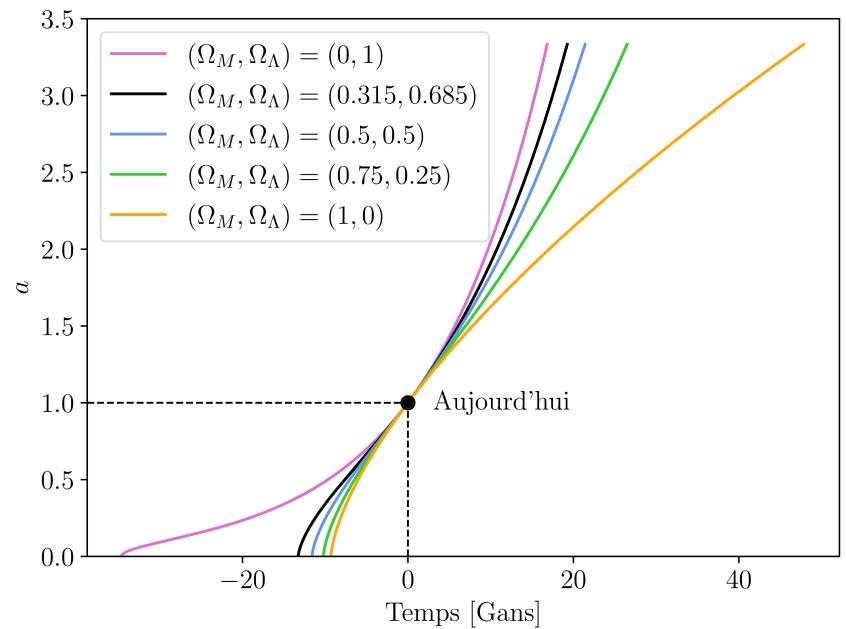
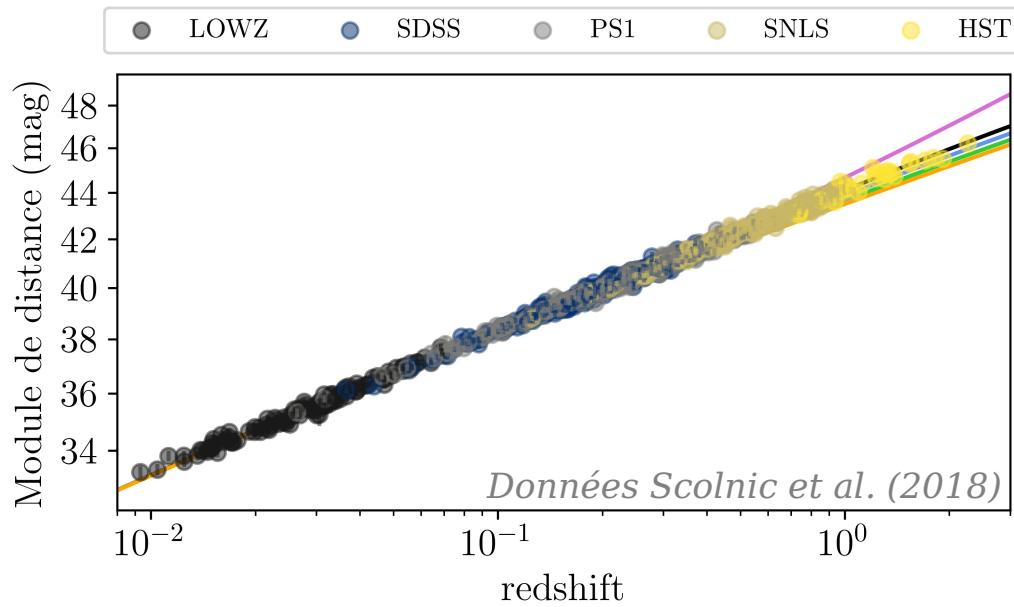
Intrinsèque

Vitesse  
(redshift)

Distance :  $d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left( \int_0^z dz' \left[ \Omega_M (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda (1 + z')^{3(1+w)} \right]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble      Matière      Énergie sombre

Comportement de l'énergie sombre



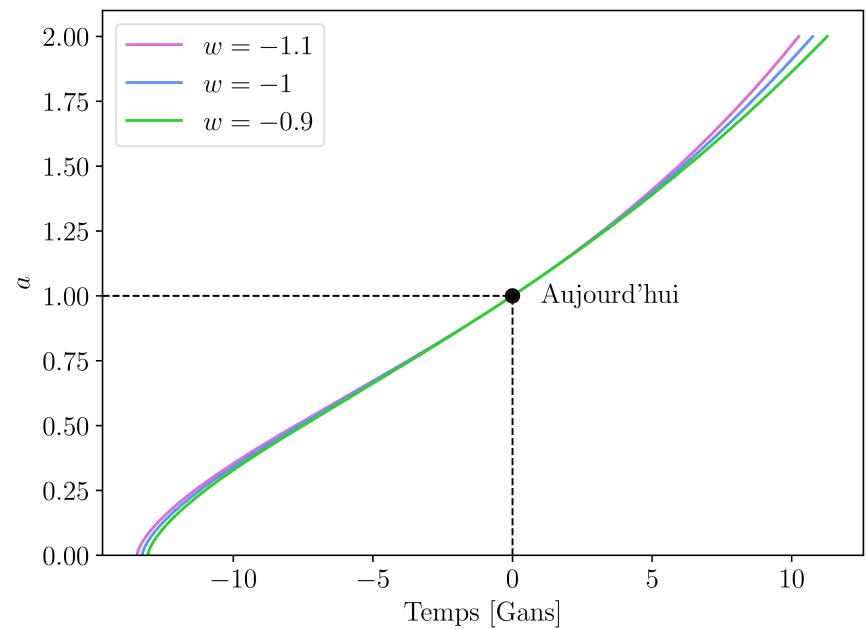
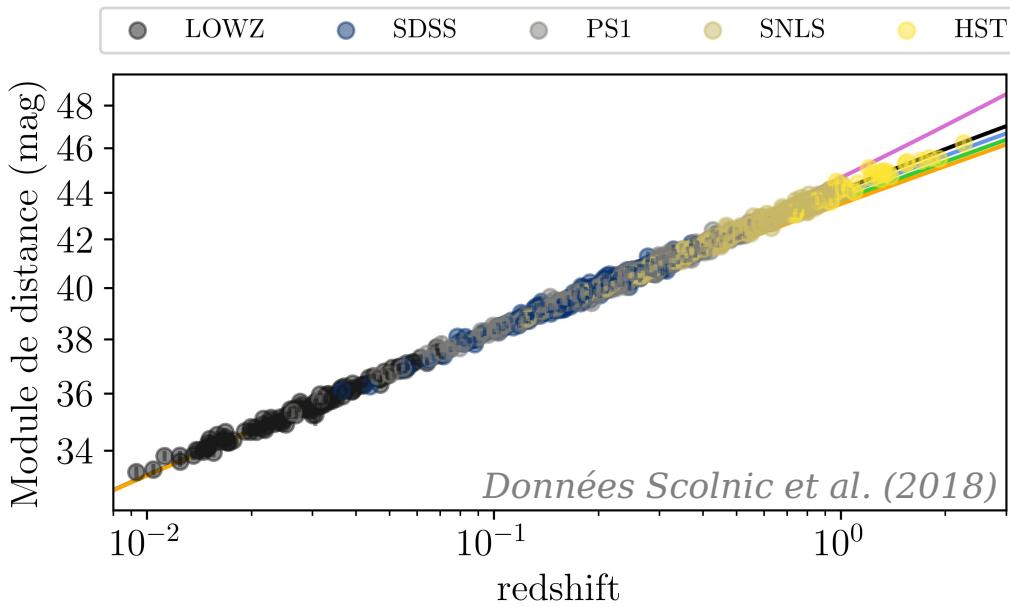
# Cosmologie observationnelle : pratique

$$\text{Module de distance : } \mu = m - M = 5 \log \left( \frac{d_L}{d_0} \right)$$

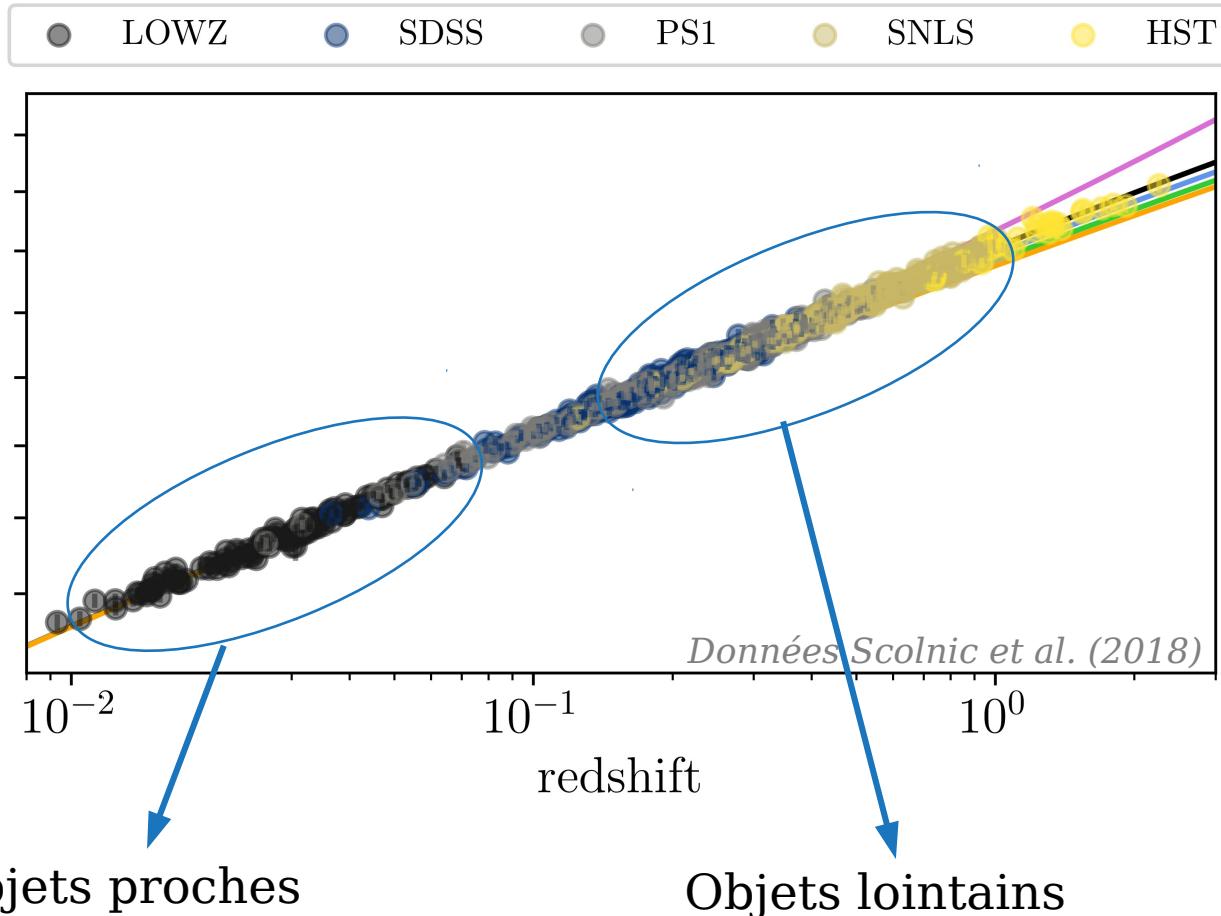
Observé → Intrinsèque  
Vitesse  
(redshift) → Comportement de  
l'énergie sombre

$$\text{Distance : } d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left( \int_0^z dz' \left[ \Omega_M (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda (1 + z')^{3(1+w)} \right]^{-1/2} \right)$$

Const. de Hubble   Matière   Énergie sombre

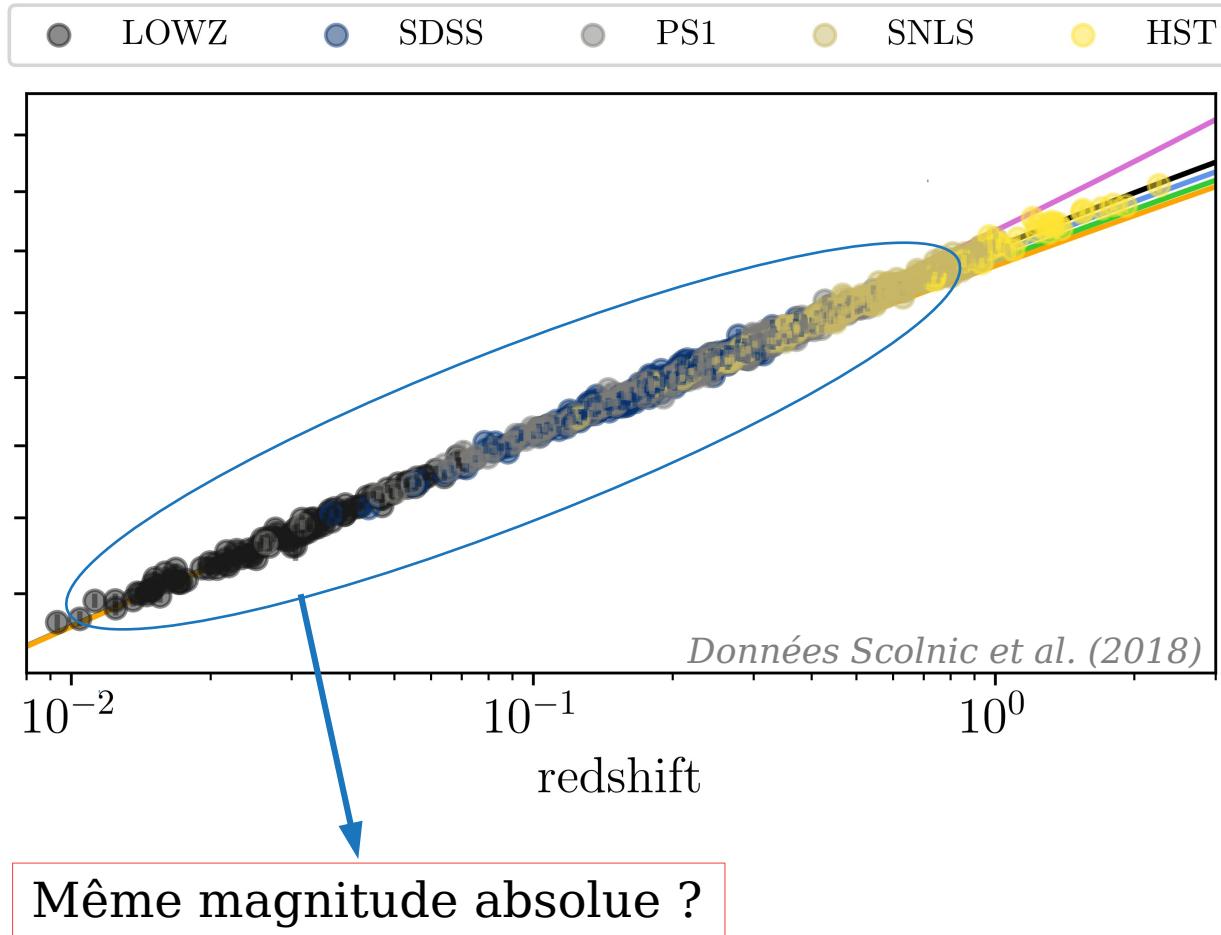


# Cosmologie observationnelle : SNe Ia



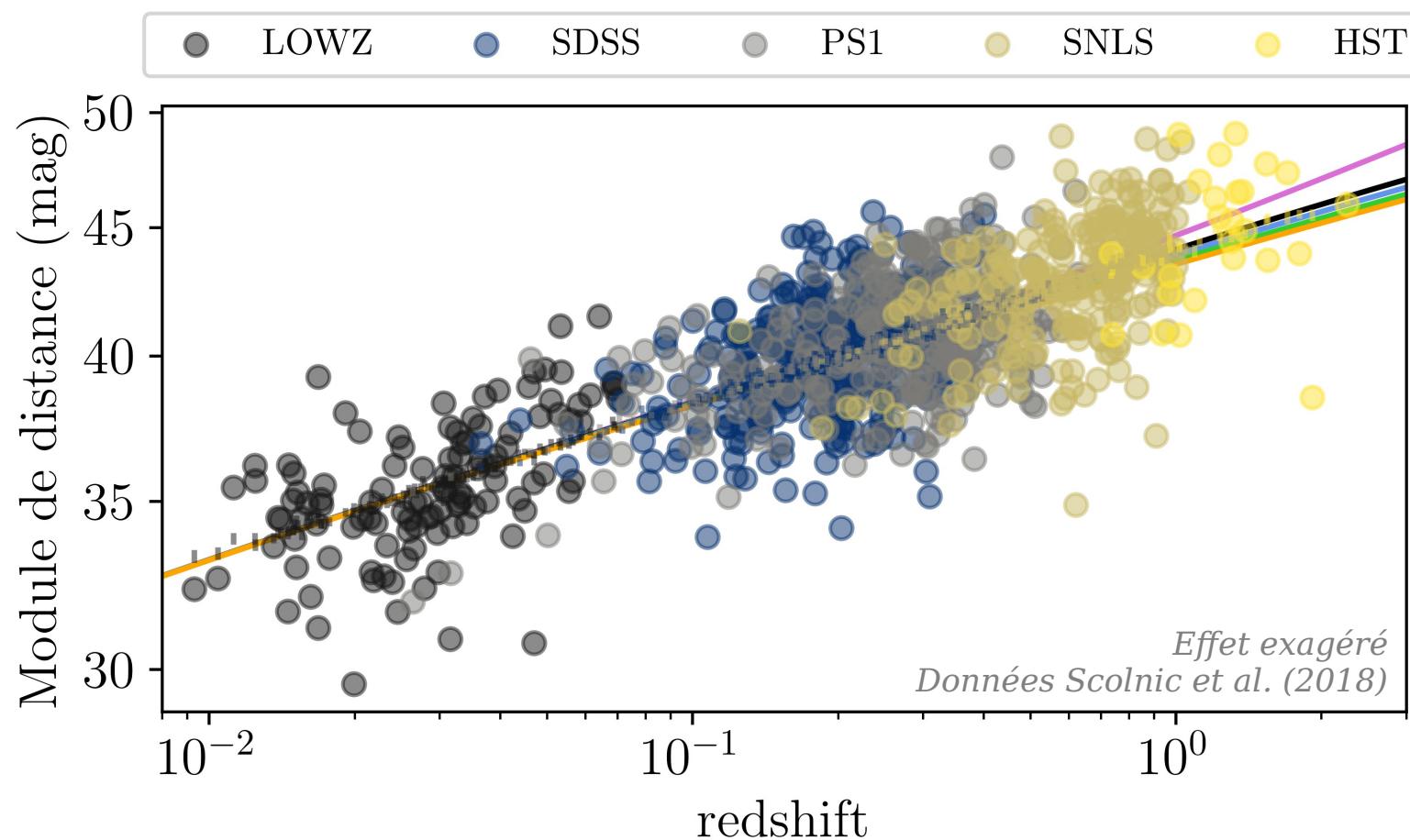
✓  $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$

# Cosmologie observationnelle : SNe Ia



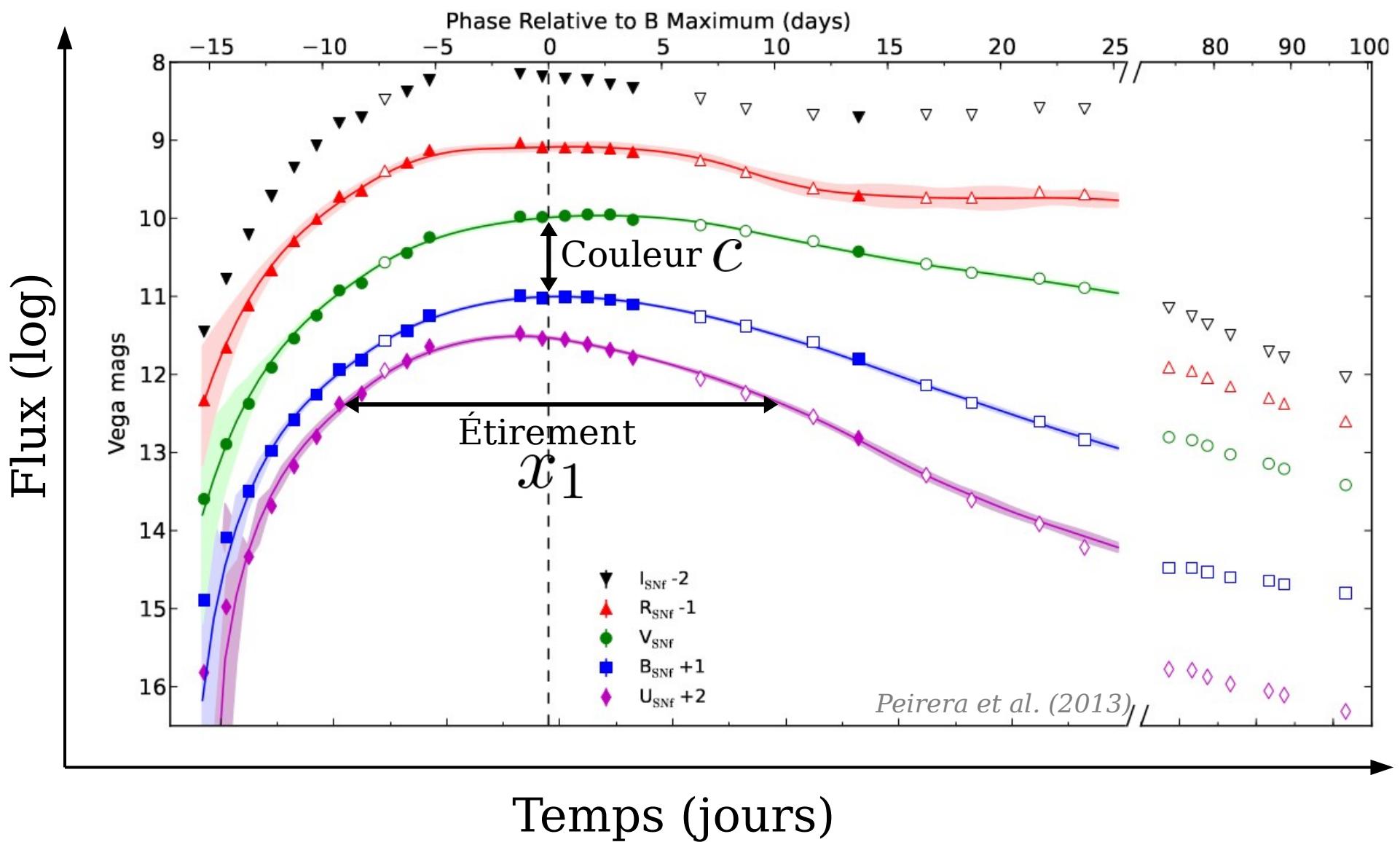
- ✓  $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$
- ✓  $L_{\text{SNe Ia}} \approx \text{const}$

# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

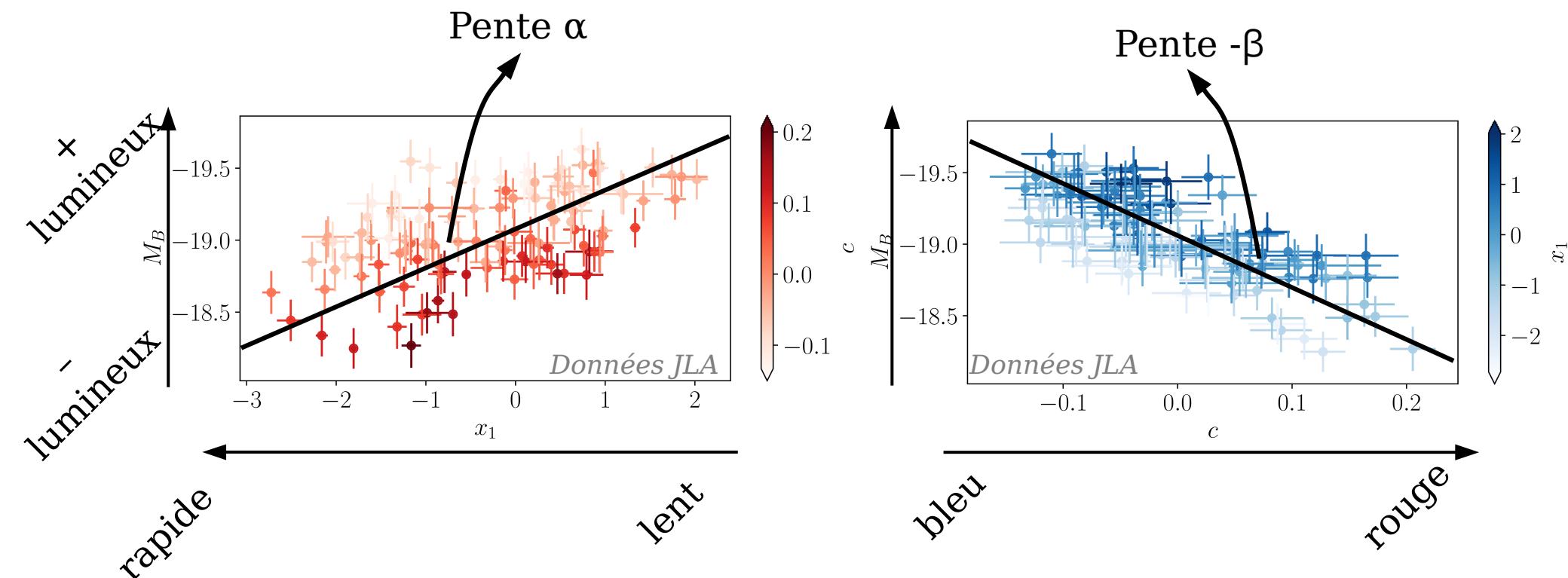


« Chandelles standardisables »

# Paramètres de courbe de lumière



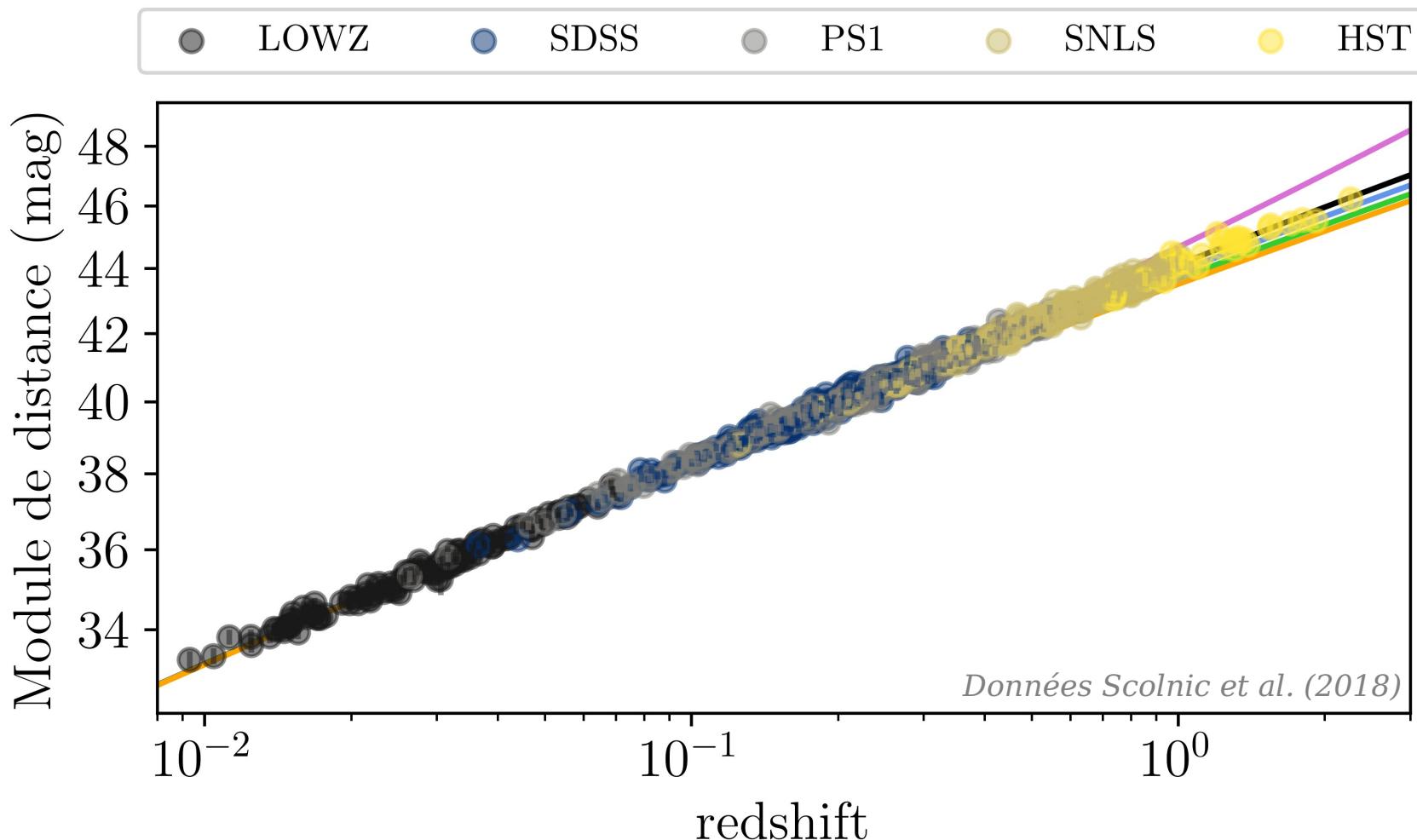
# Relation luminosité - largeur et couleur



$$\text{Module de distance standardisé : } \mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c)$$

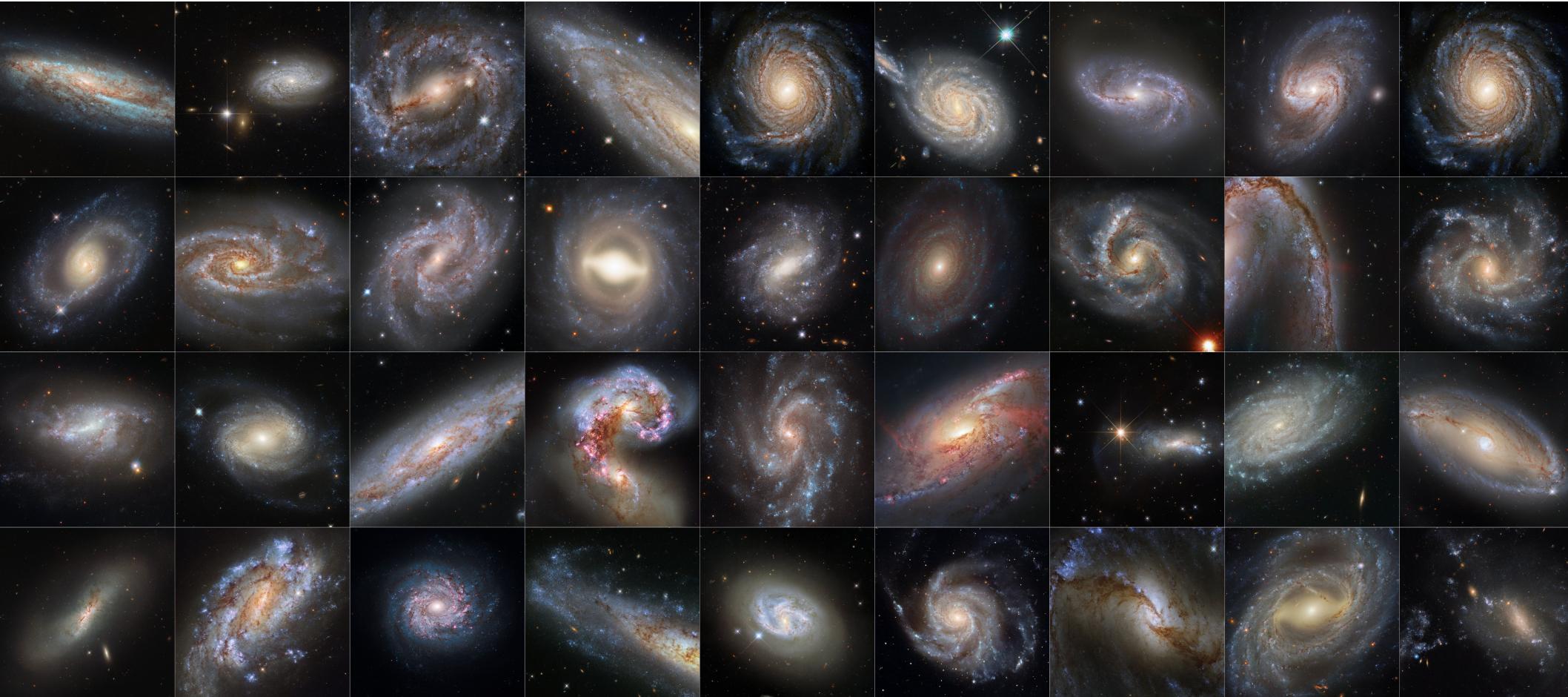
# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

Module de distance standardisé :  $\mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c)$



# Cosmologie observationnelle

## Environnement des SNe Ia



# Standardisation via l'environnement

Différence brute de luminosité entre deux populations → marche de magnitude

Module de distance *standardisé* :  $\mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c) \pm \boxed{\gamma}/2$

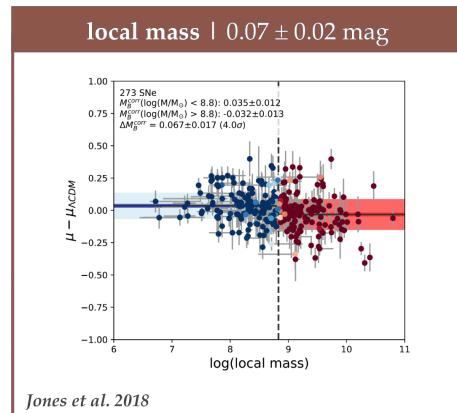
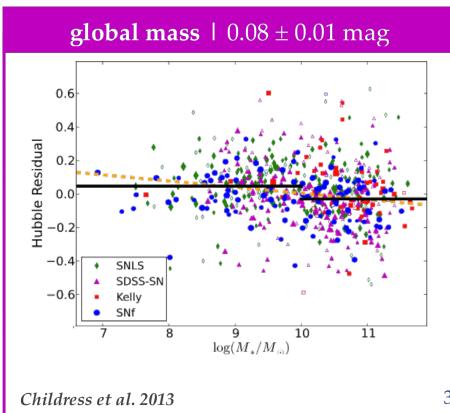
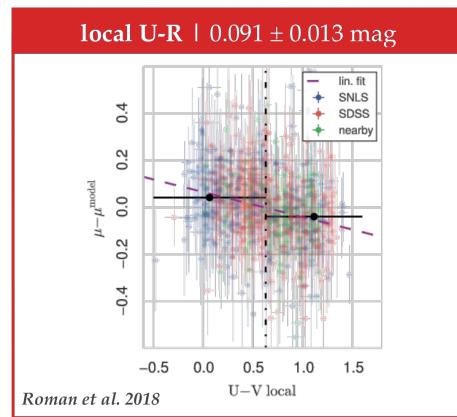
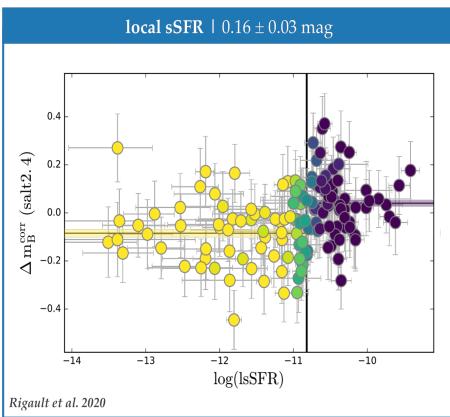
Marche de  
magnitude

# Standardisation via l'environnement

Différence brute de luminosité entre deux populations → marche de magnitude

Module de distance *standardisé* :  $\mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c) \pm \boxed{\gamma}/2$

Marche de magnitude

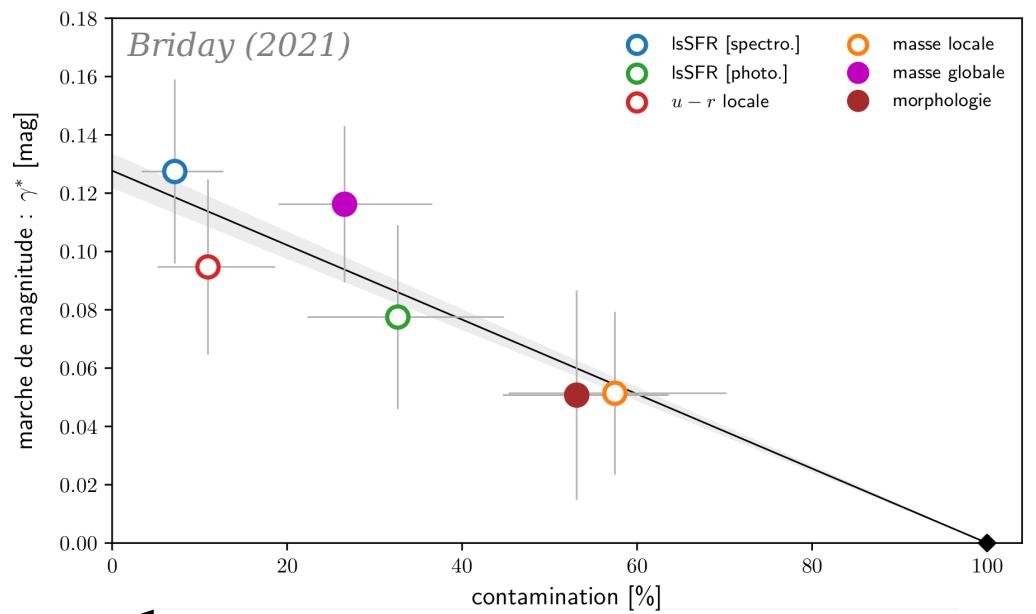
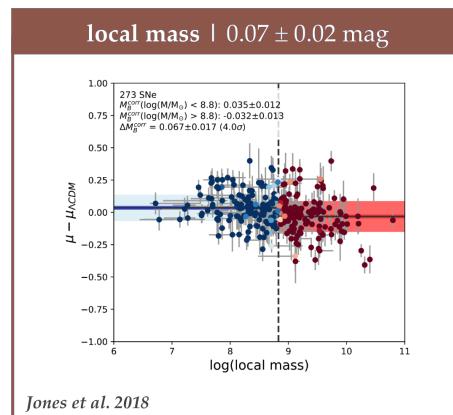
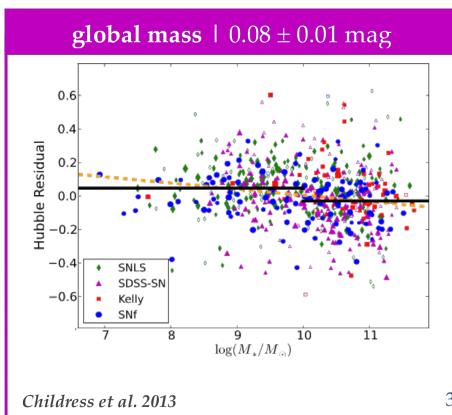
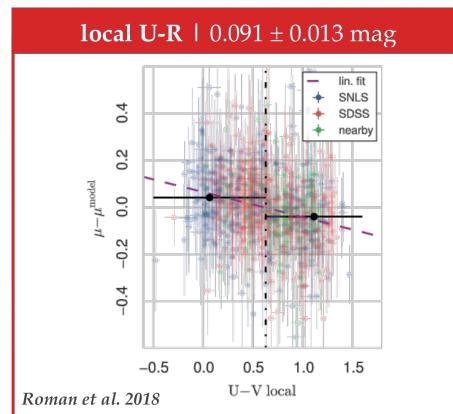
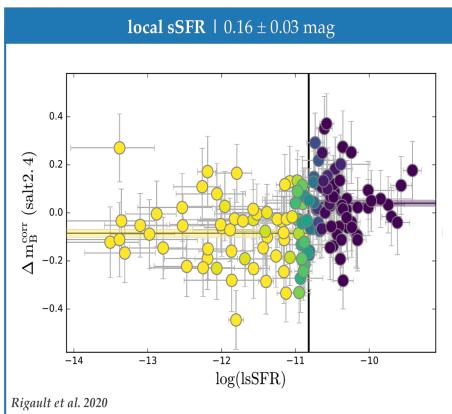


# Standardisation via l'environnement

Différence brute de luminosité entre deux populations → marche de magnitude

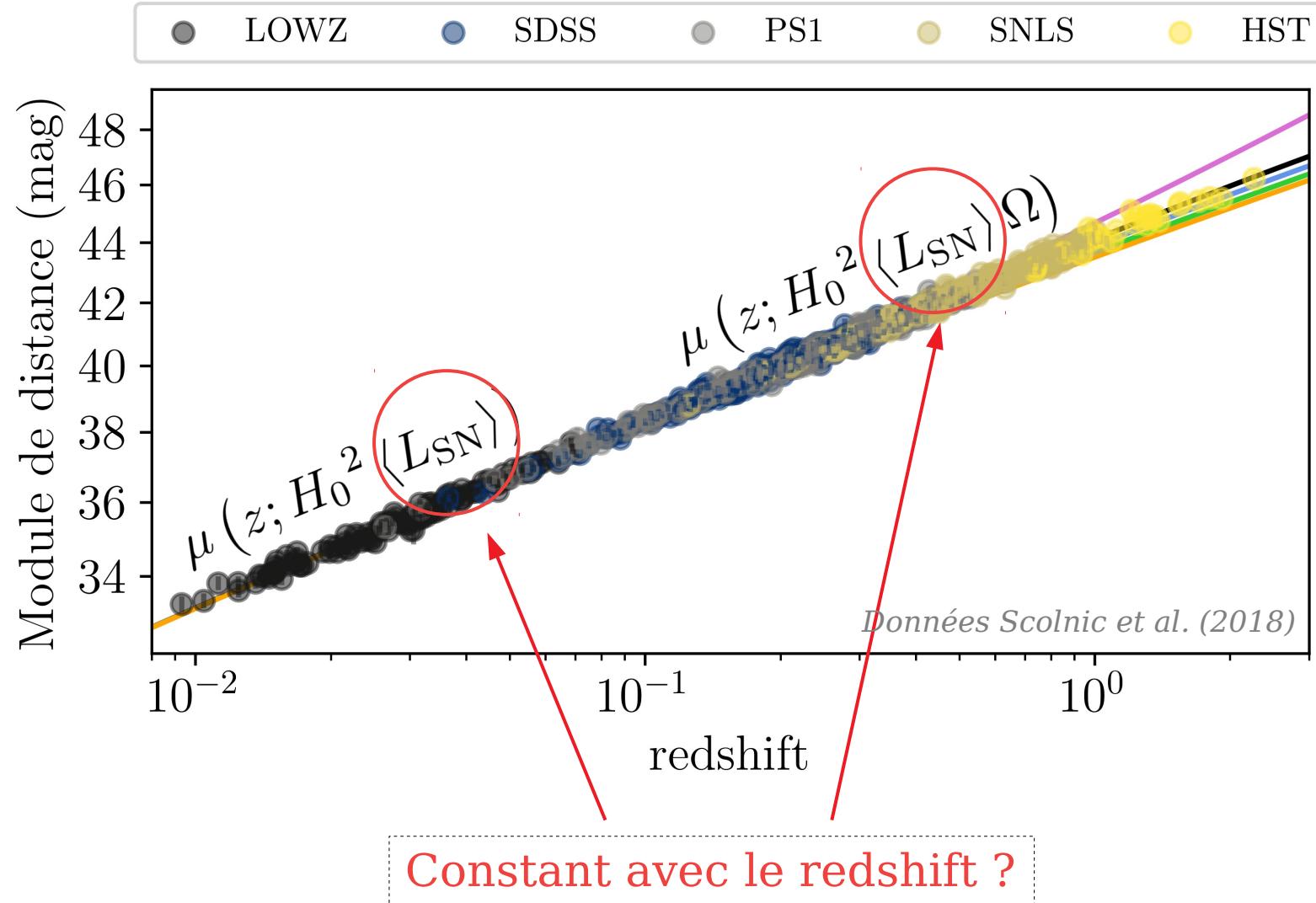
$$\text{Module de distance standardisé : } \mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c) \pm \boxed{\gamma/2}$$

Marche de magnitude



Capacité des traceurs à distinguer deux populations par rapport au LsSFR

# Erreurs systématiques - ancrage de l'étude



# Base de réflexion : Modèle d'évolution des SNe jeunes et vieilles

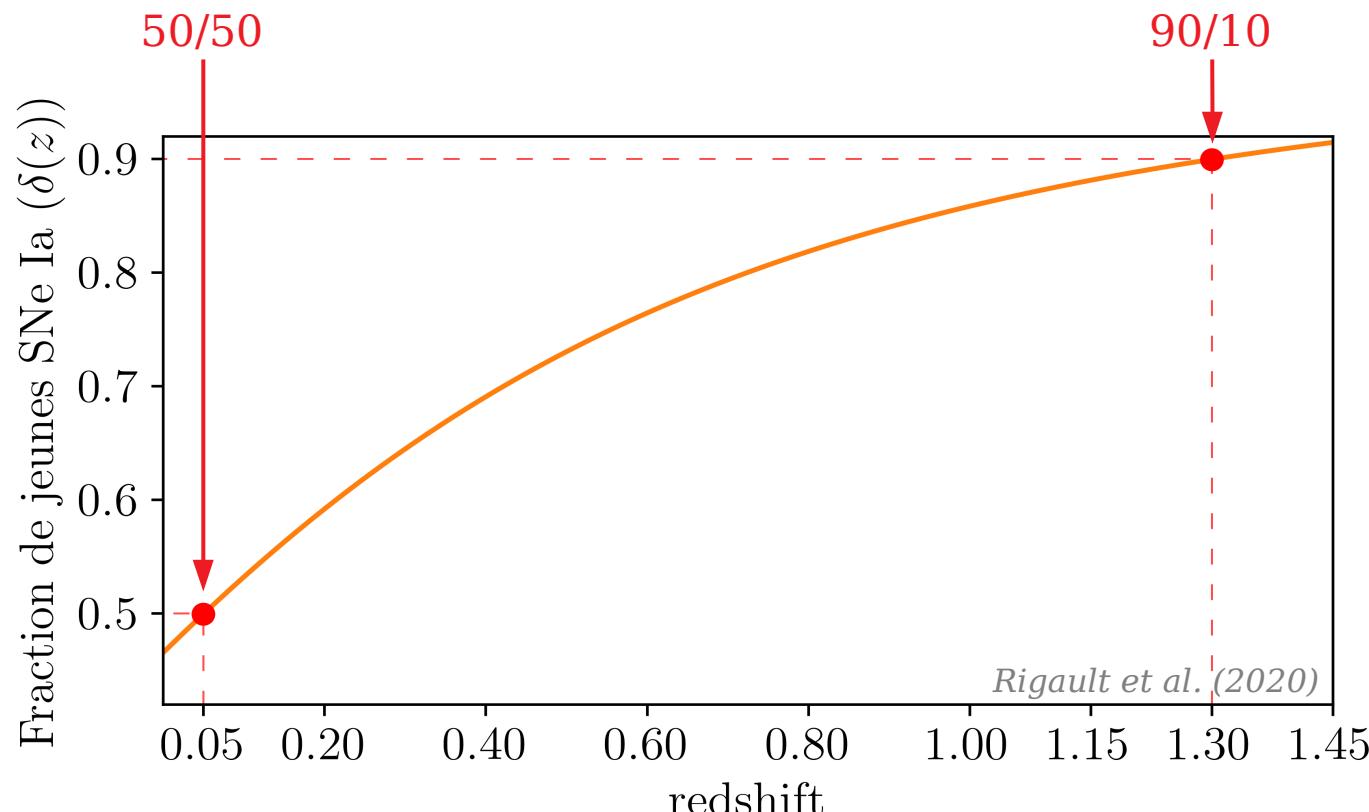
$$N_{\text{jeunes}} \propto SFR$$

Taux de formation stellaire

$$N_{\text{vieilles}} \propto M_*$$

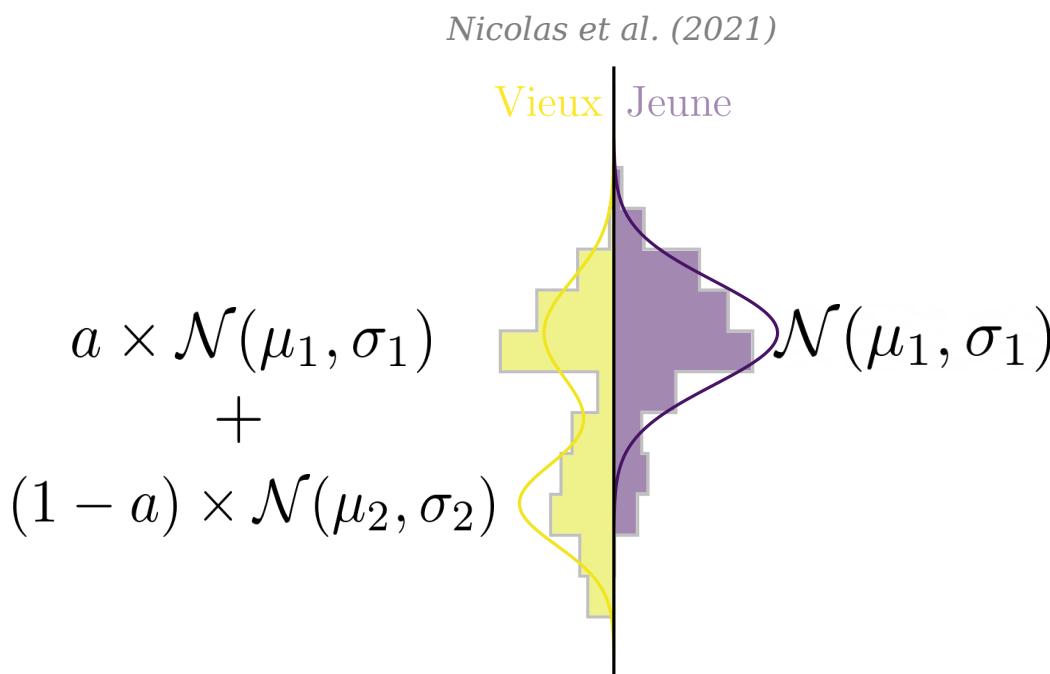
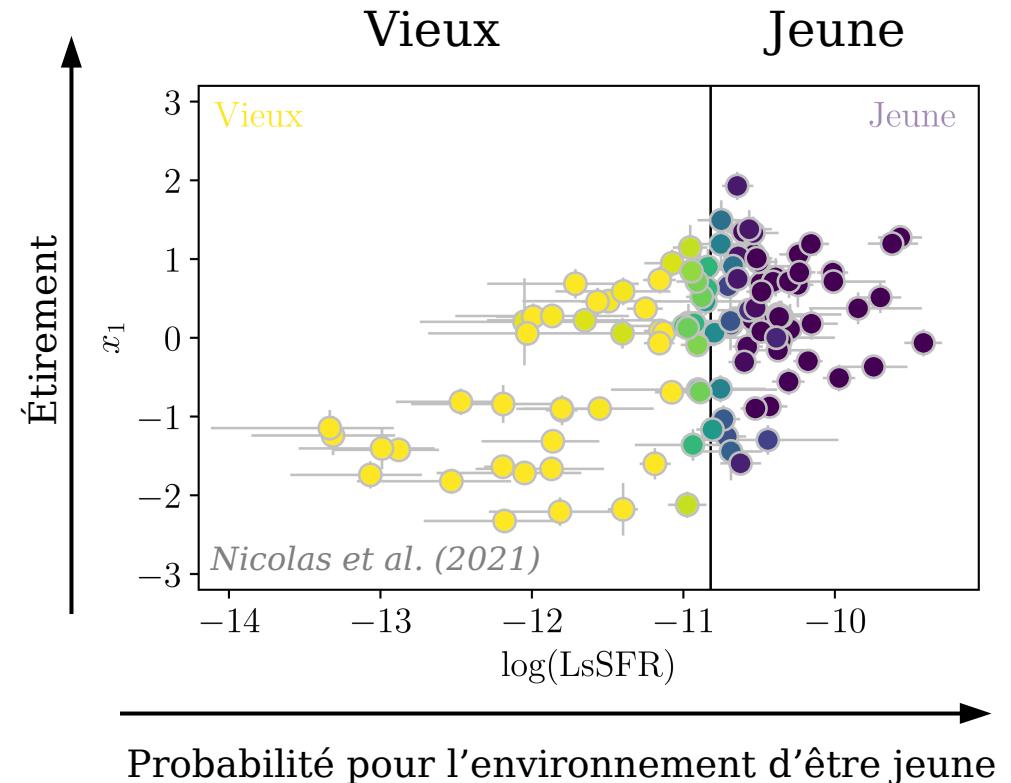
Masse de la galaxie hôte

$$sSFR = \frac{SFR}{M_*}$$



Environnement évolue avec le redshift

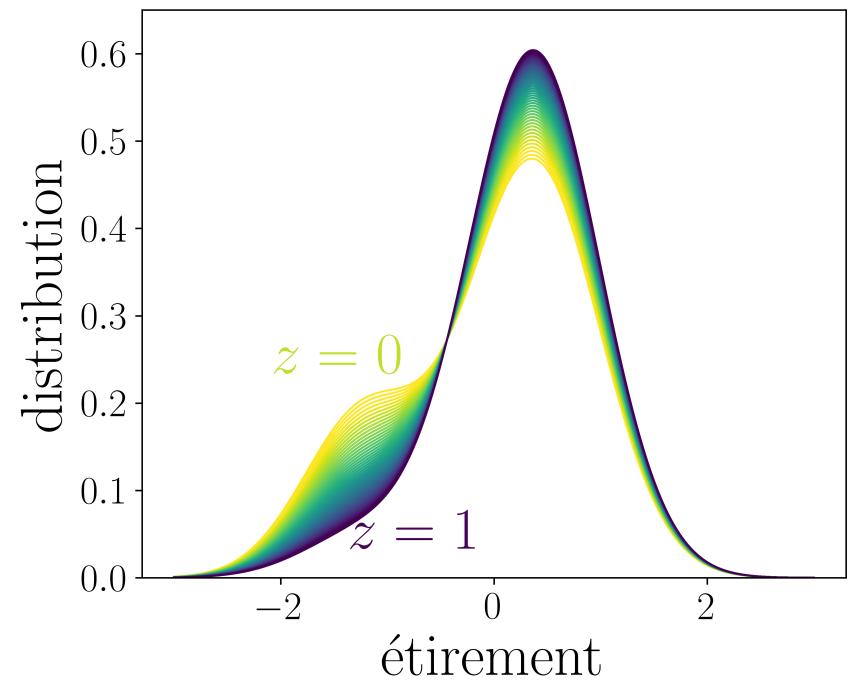
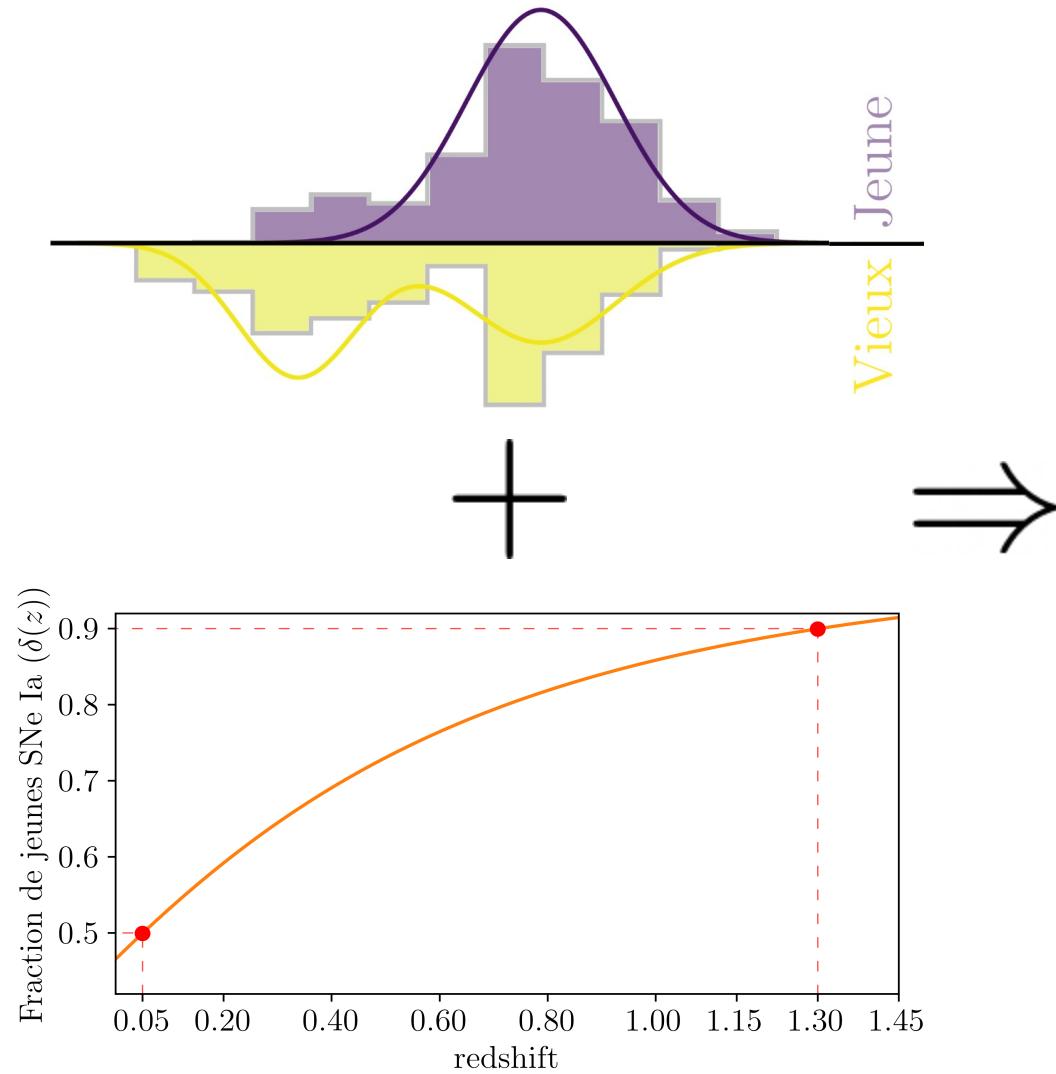
# Base de réflexion : Modèle d'évolution des SNe jeunes et vieilles



SNe Ia dépendent de l'environnement

# Base de réflexion : Modèle d'évolution des SNe jeunes et vieilles

Nicolas et al. (2021)

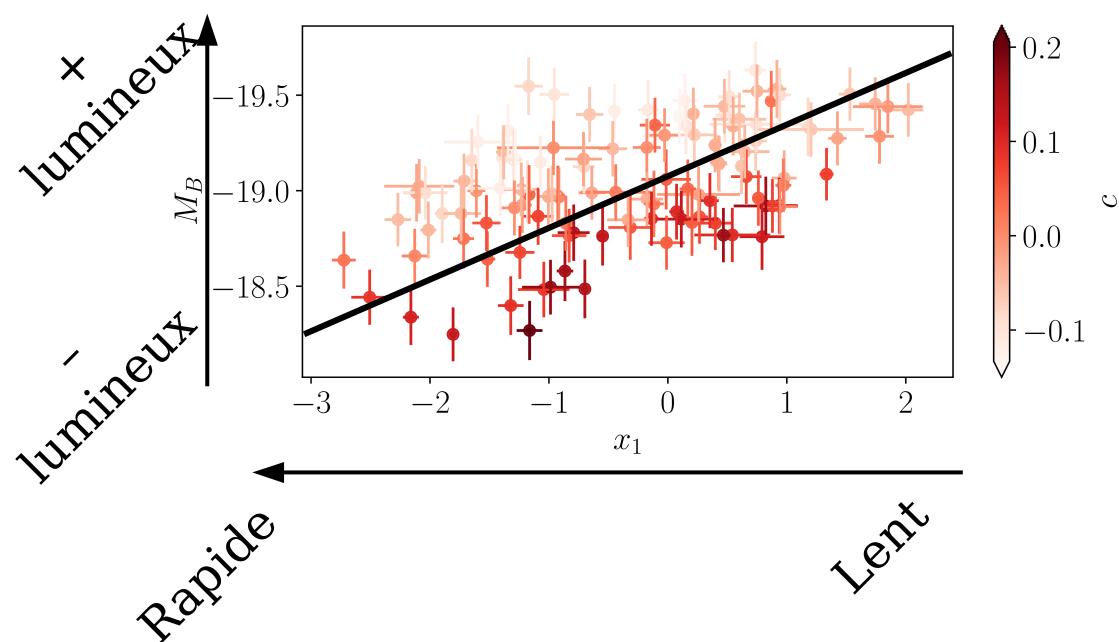
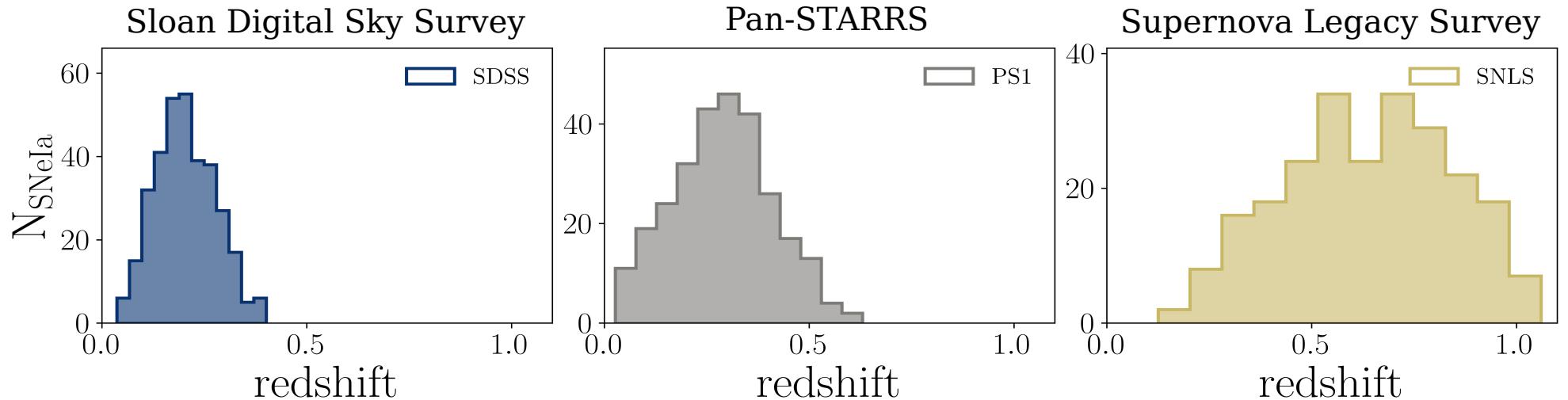


Distribution des  
étirements des SNe Ia  
évolue avec le redshift

# Échantillon total

## Avec effets de sélection

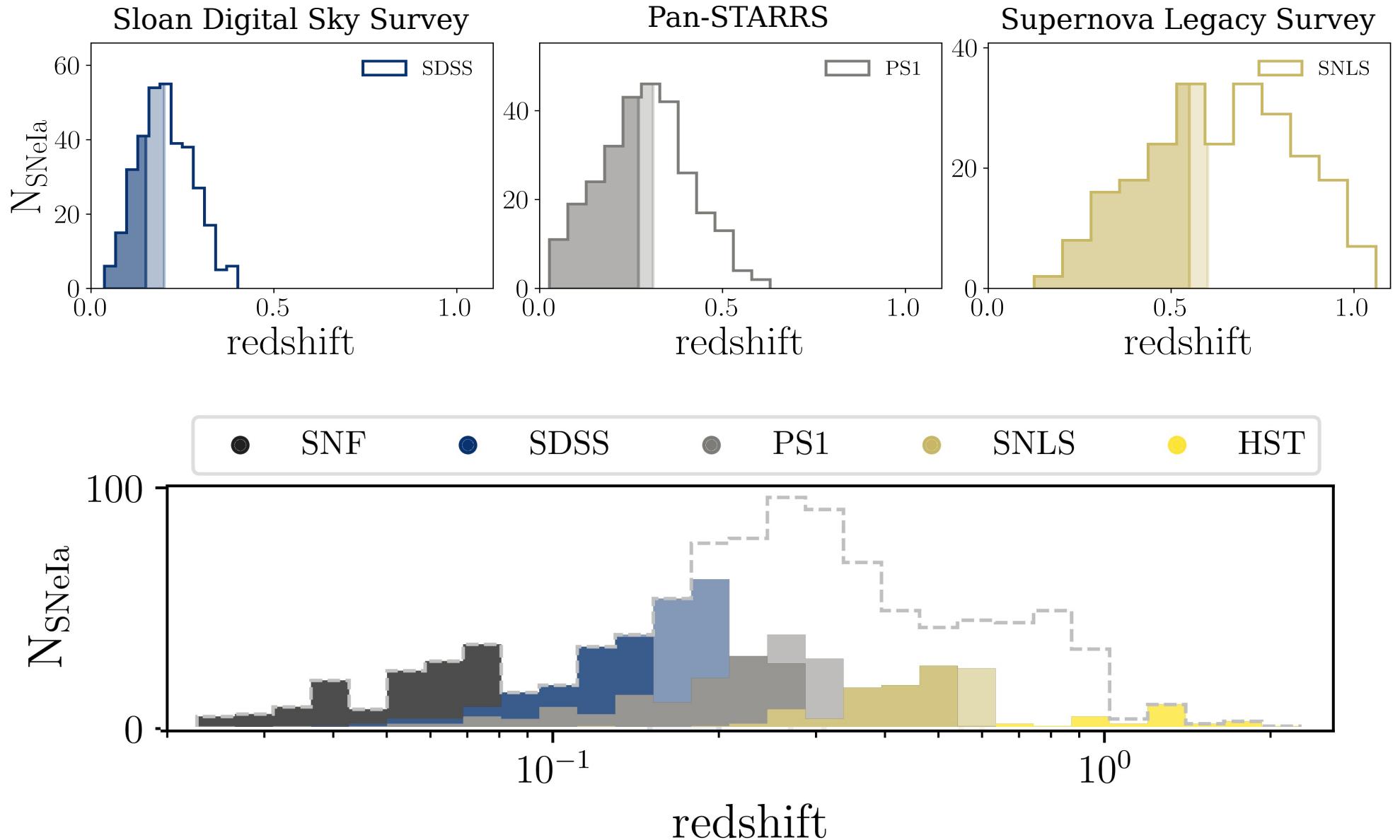
Nicolas et al. (2021)



# Échantillon complet

Exempt d'effets de sélection

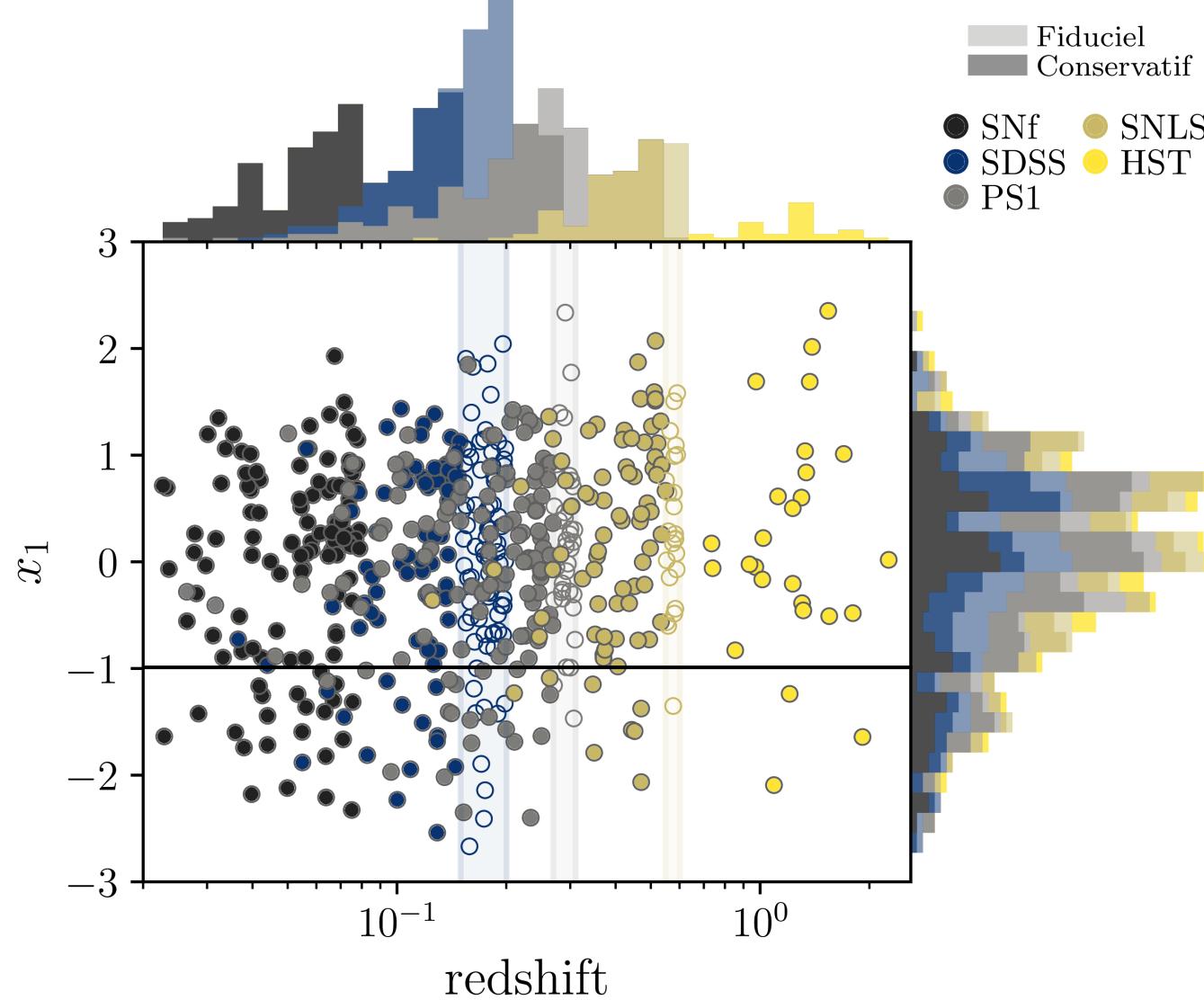
Nicolas et al. (2021)



# Échantillon complet

## Distribution des étirements

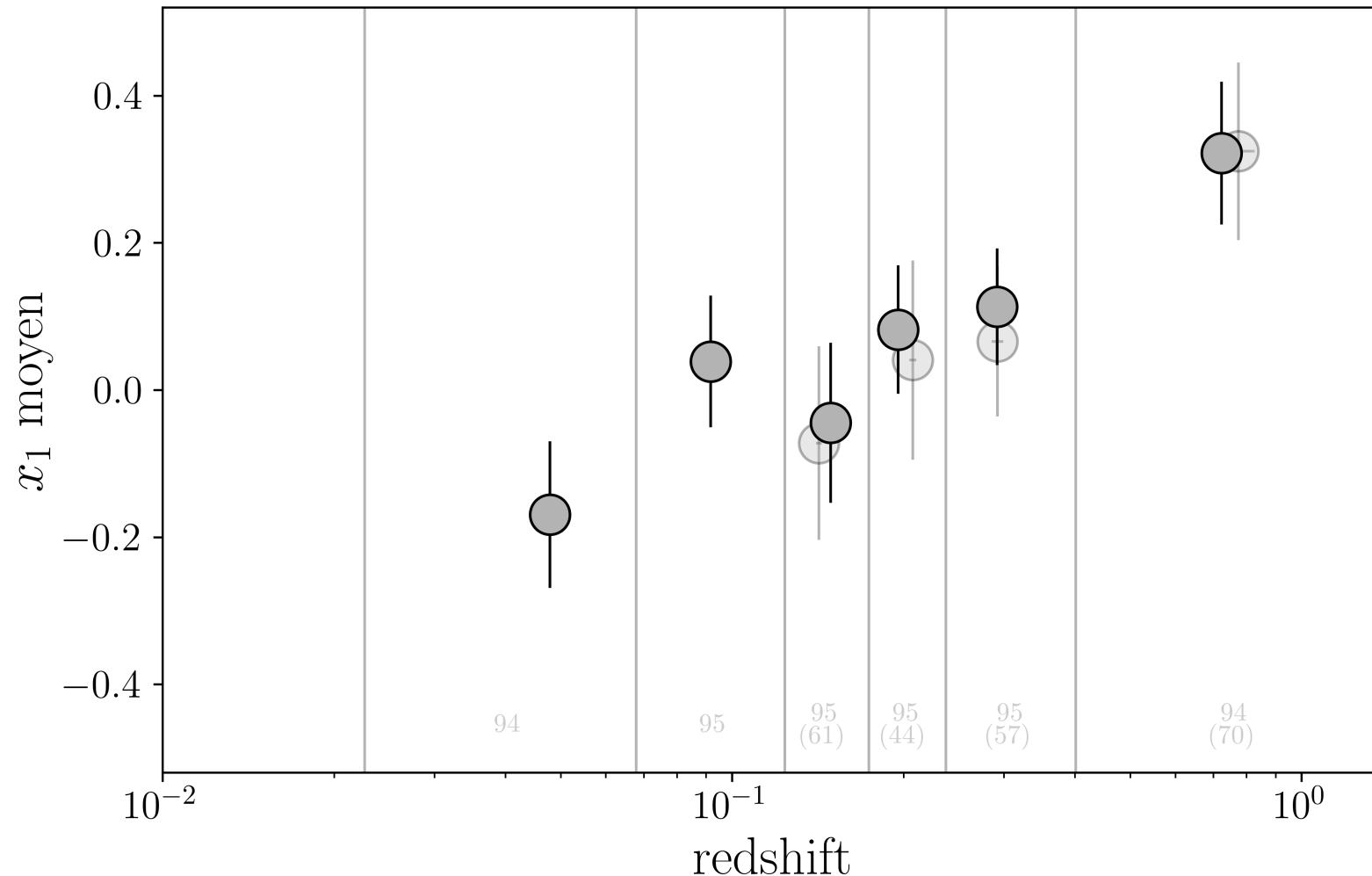
Nicolas et al. (2021)



# Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

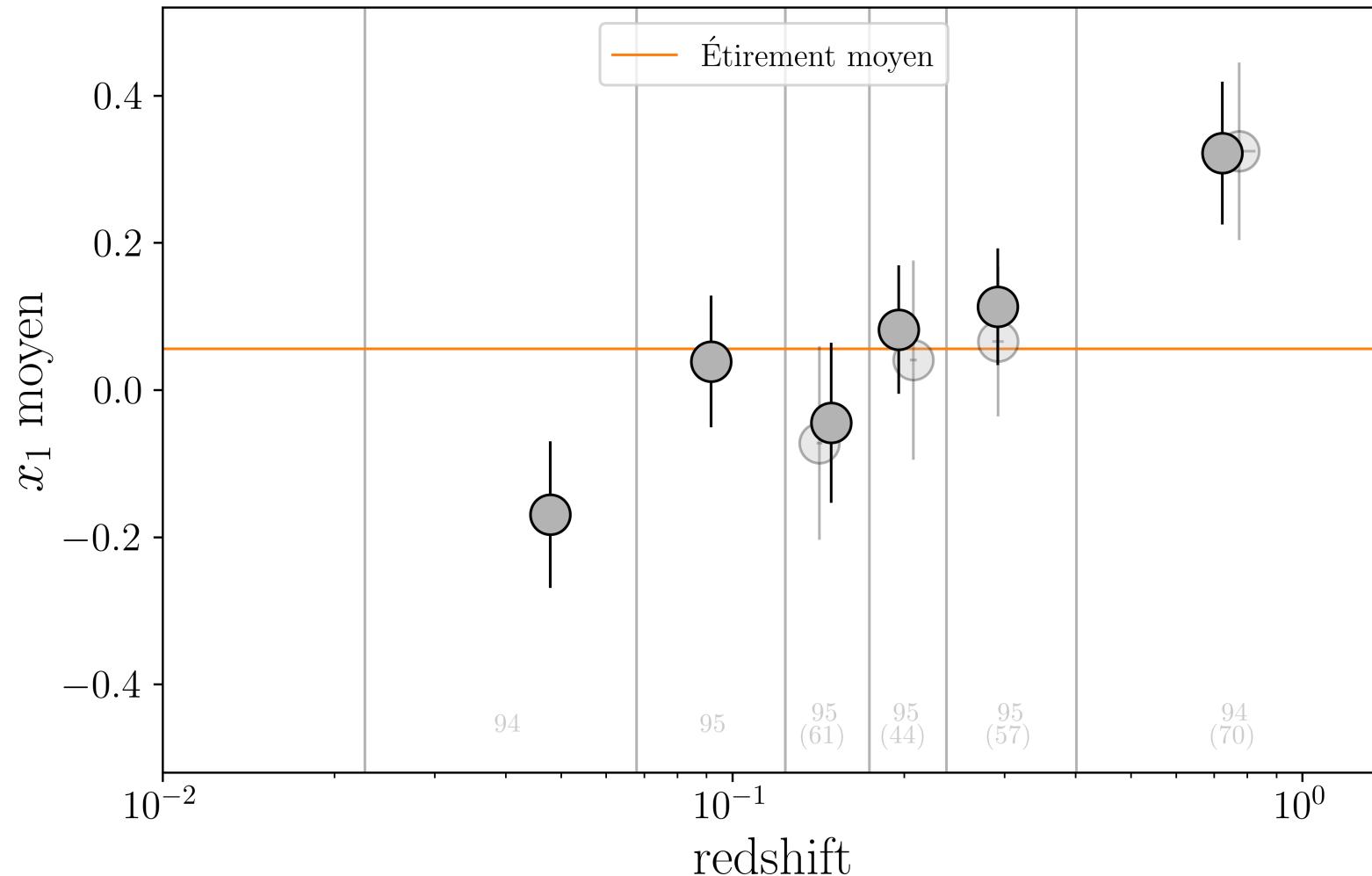
Nicolas et al. (2021)



# Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

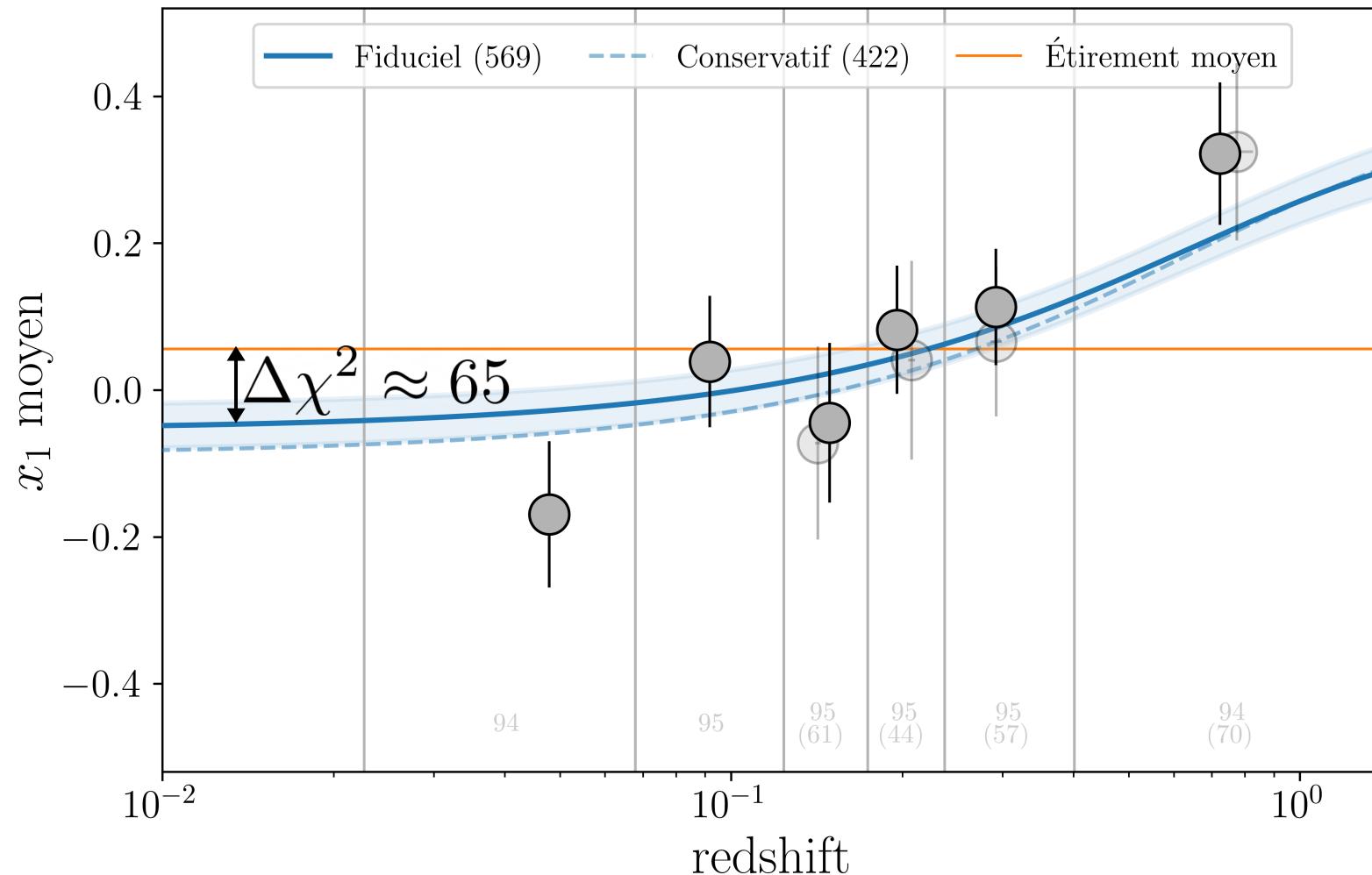
Nicolas et al. (2021)



# Évolution de l'étirement

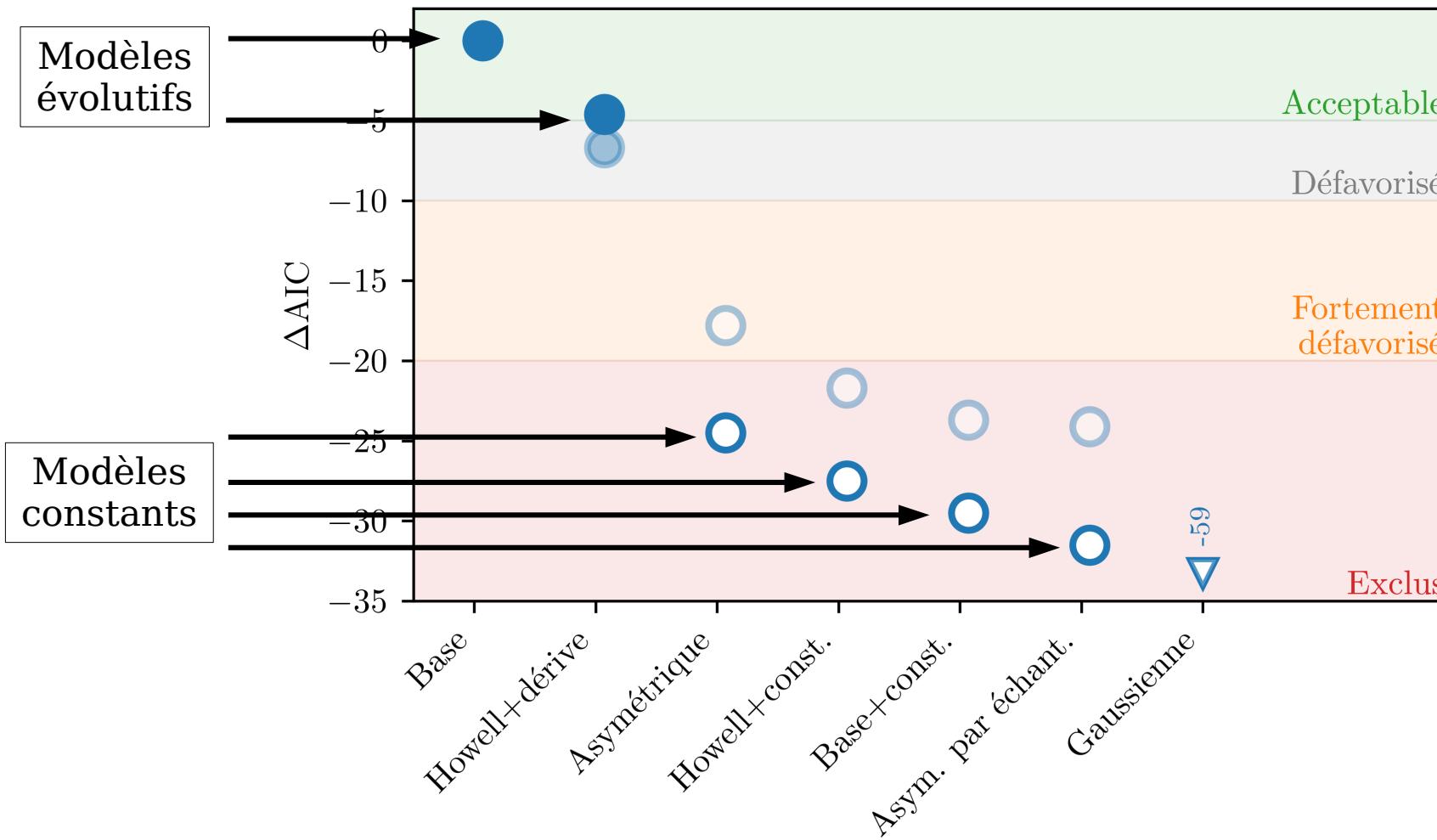
Dérive de l'étirement comparée aux données

Nicolas et al. (2021)



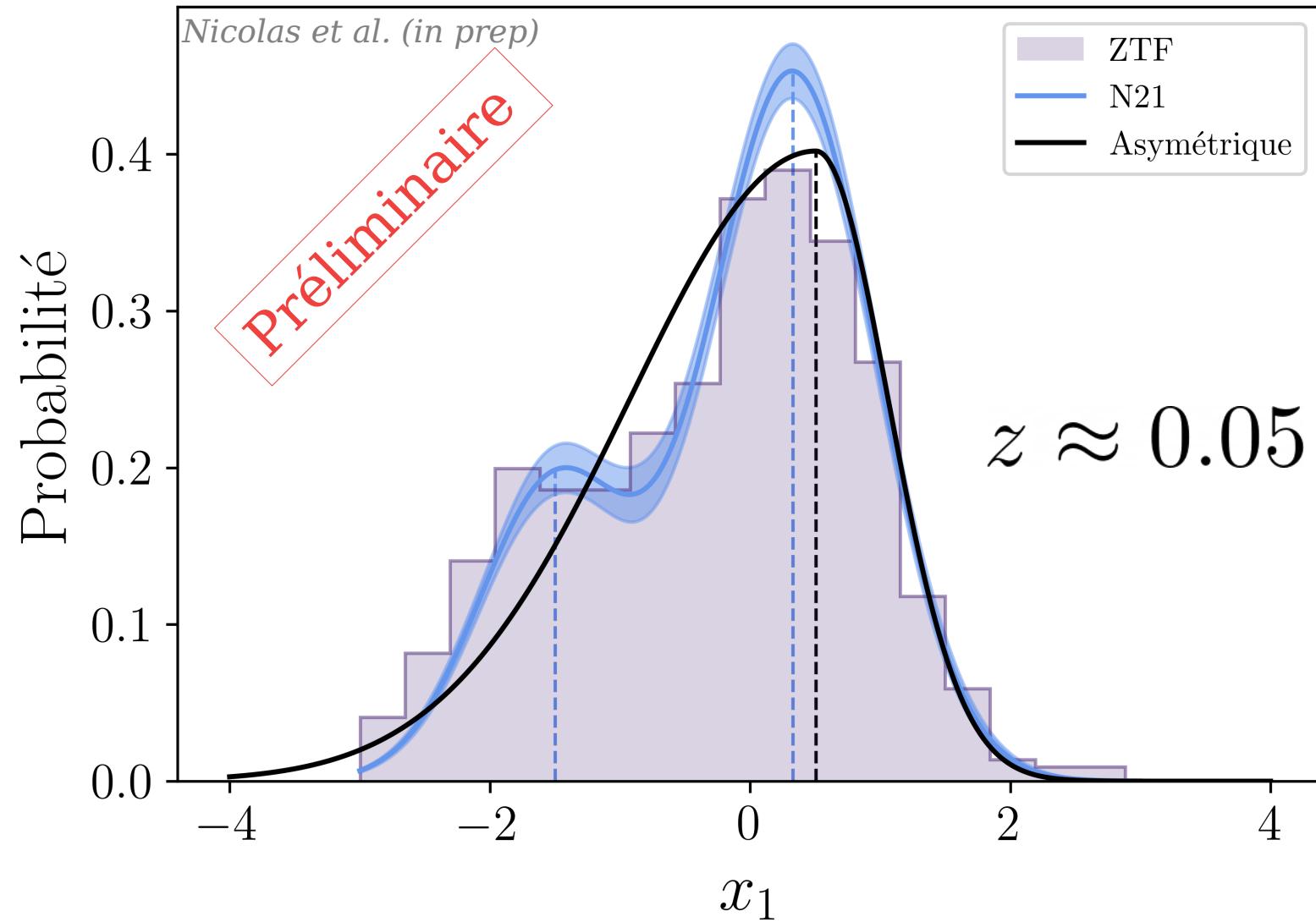
# Résultats de la comparaison

Nicolas et al. (2021)



Mon modèle de base est devenu la référence pour la communauté

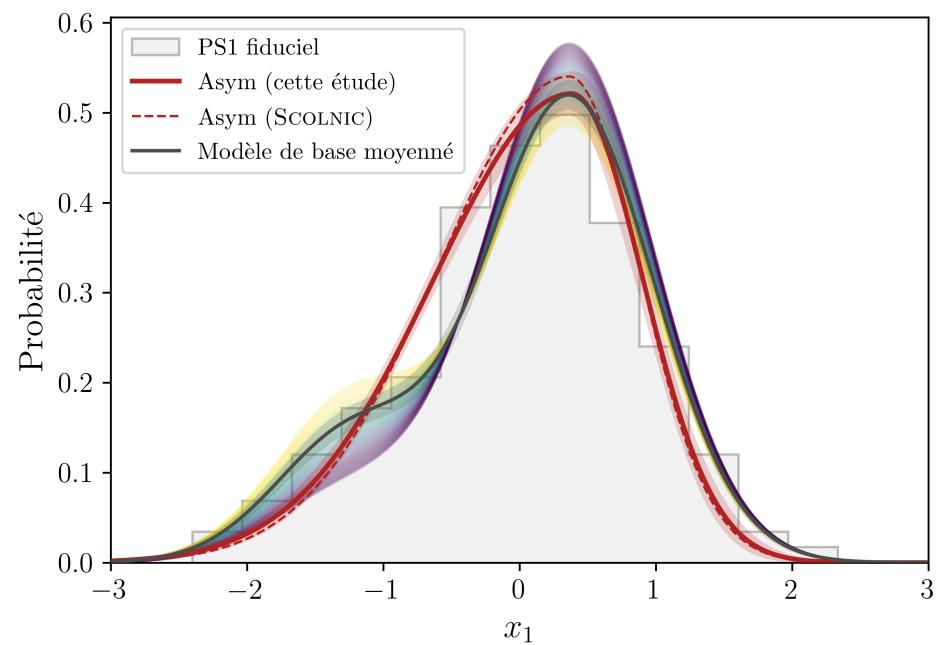
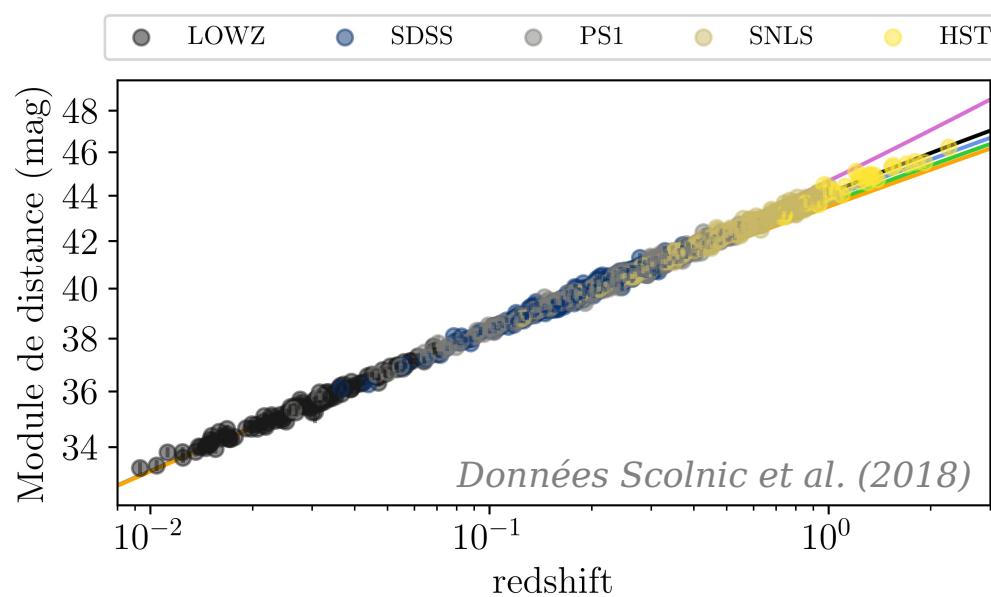
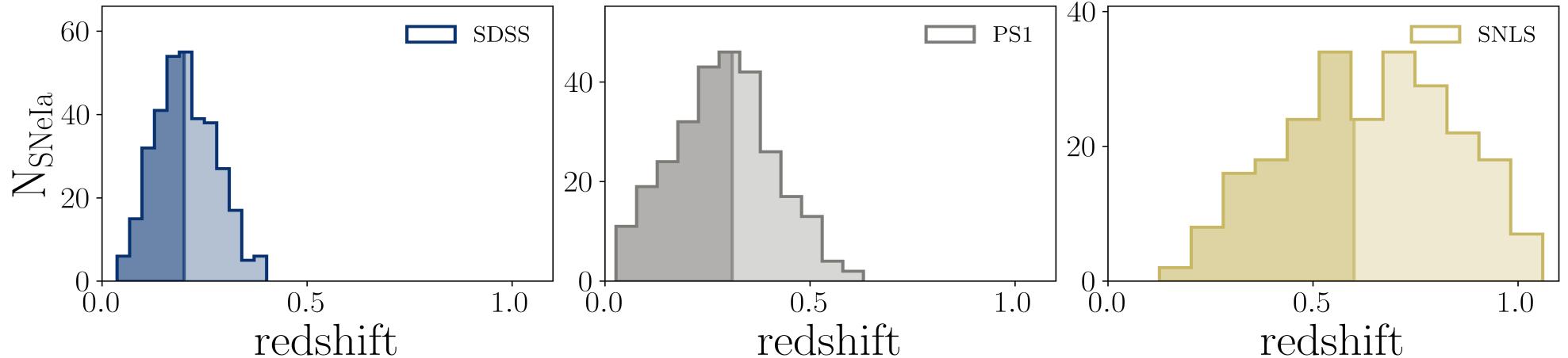
# Force du modèle



# Échantillon total

## Avec effets de sélection

Nicolas et al. (2021)



# Simulations avec SNANA

## Présentation

*Nicolas et al. (in prep)*

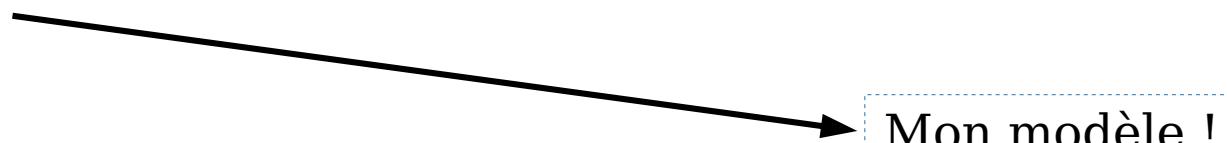
### 1) Choisir une galaxie

Position, masse, redshift...

### 2) Corréler la SN avec et prendre paramètres « vrais » $(x_1, c)$

### 3) Simuler le télescope qui acquiert

Cadence, nuage, qualité de la caméra...



### 4) Appliquer la sélection cosmologique

Coupe de qualité, classification réussie

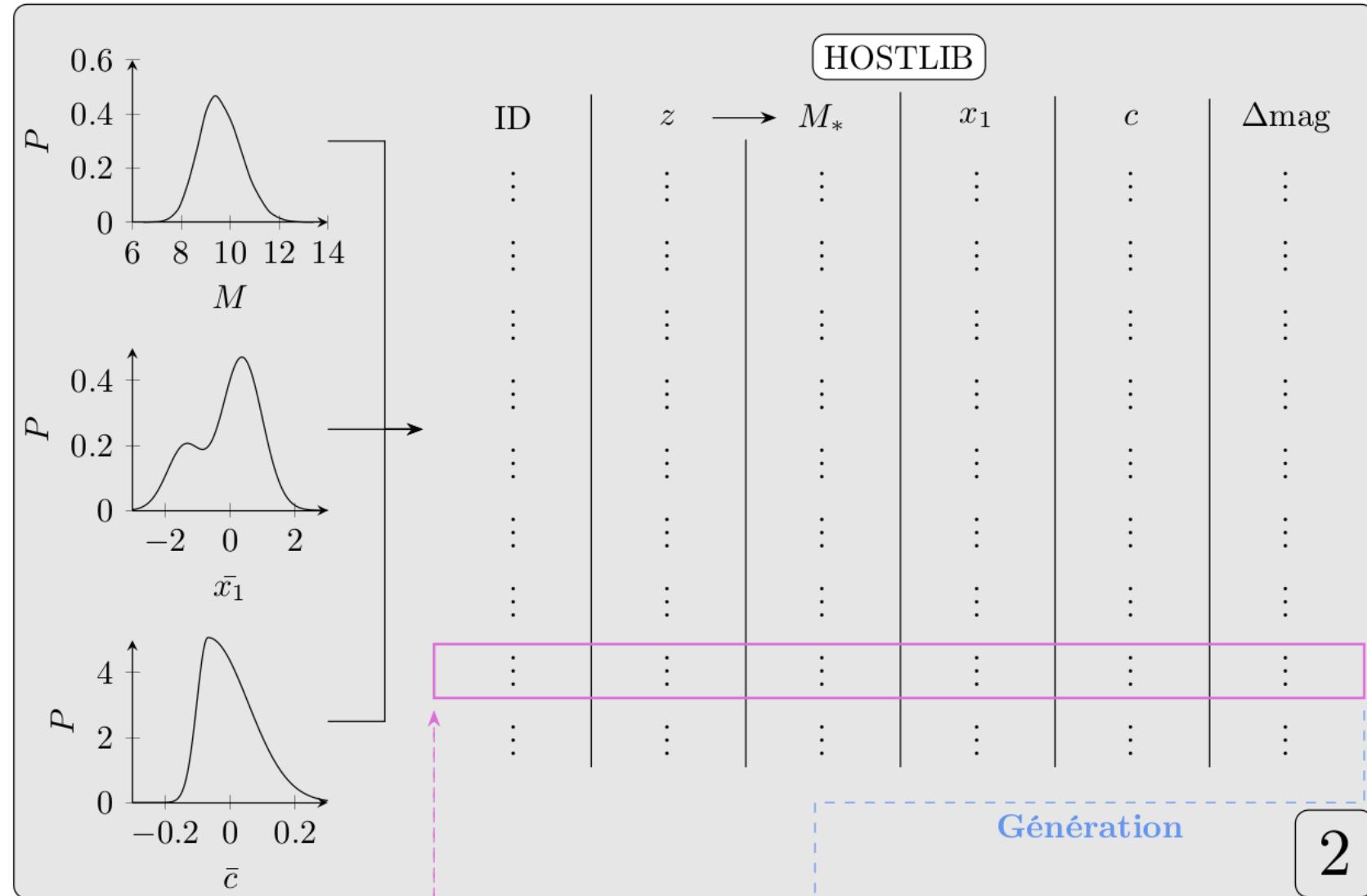
Mon modèle !

# Simulations avec SNANA

## Présentation

Nicolas et al. (in prep)

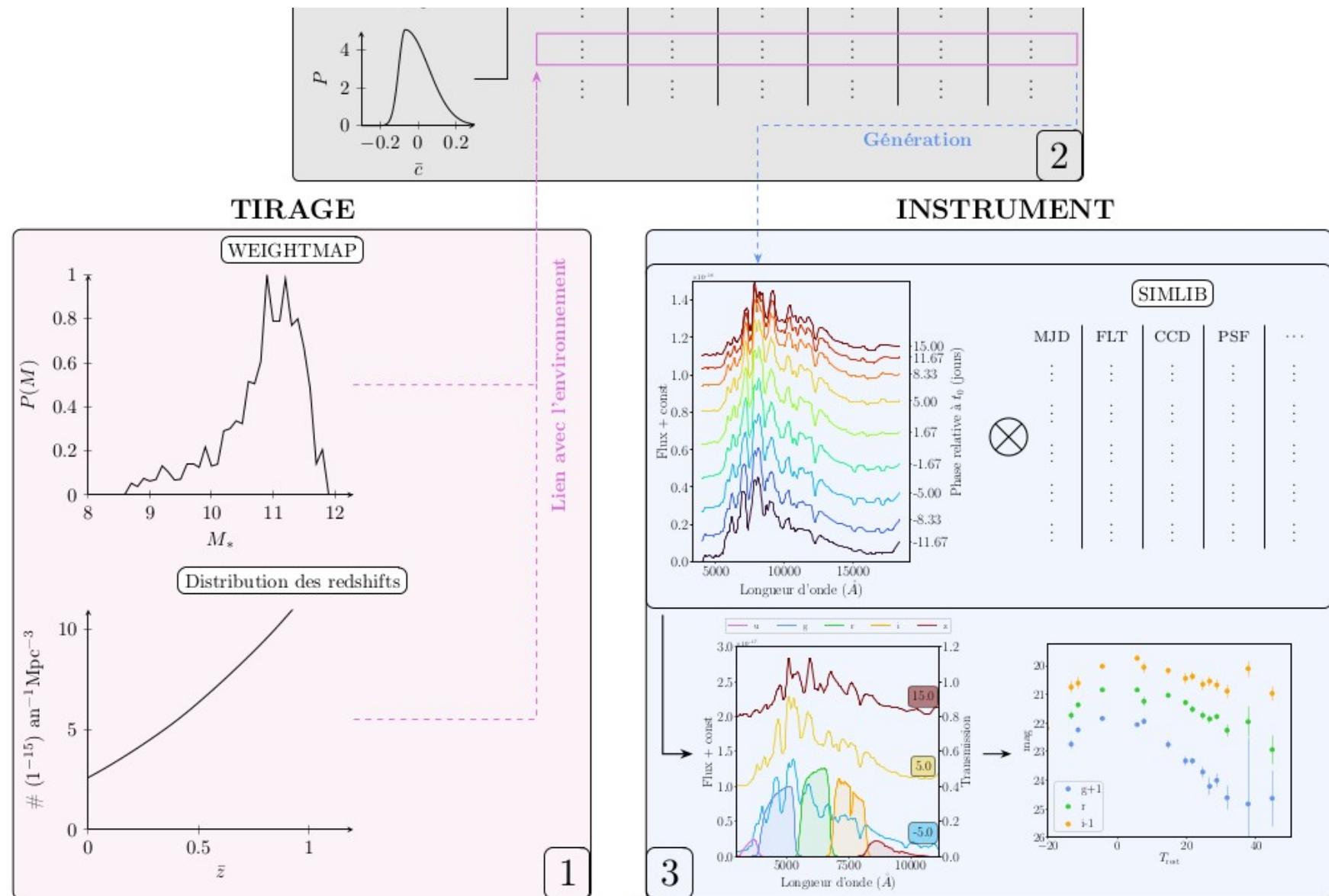
### CRÉATION HOSTLIB



# Simulations avec SNANA

## Présentation

Nicolas et al. (in prep)

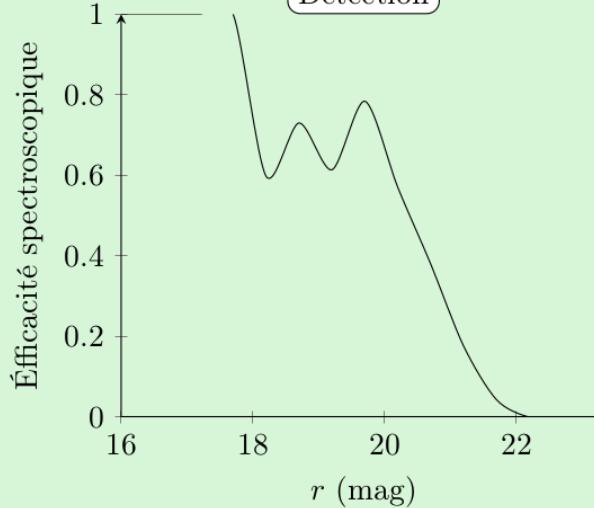


# Simulations avec SNANA

## Présentation

Nicolas et al. (in prep)

### SÉLECTION



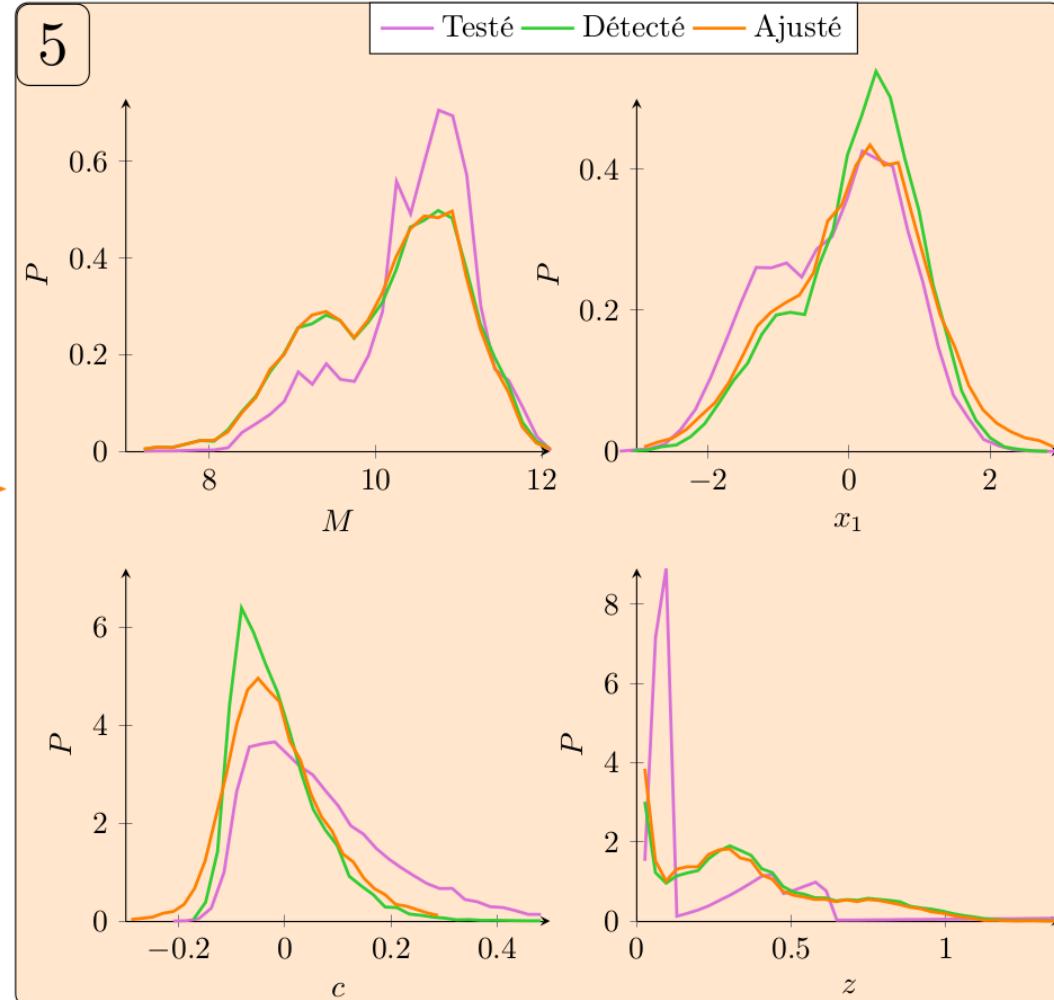
Coupes de qualité

$T_{\text{rest}} < 0$	$T_{\text{rest}} > 10$	$\text{SNR} > 5 \text{ gri}$	$-3 < x_1 < 3$	...
✓	✗	✗	✗	...
✓	✓	✓	✗	...
✗	✗	✓	✗	...
✓	✓	✓	✓	...
...	...	...	...	...

4

Détection rejetée

### CONSERVÉ



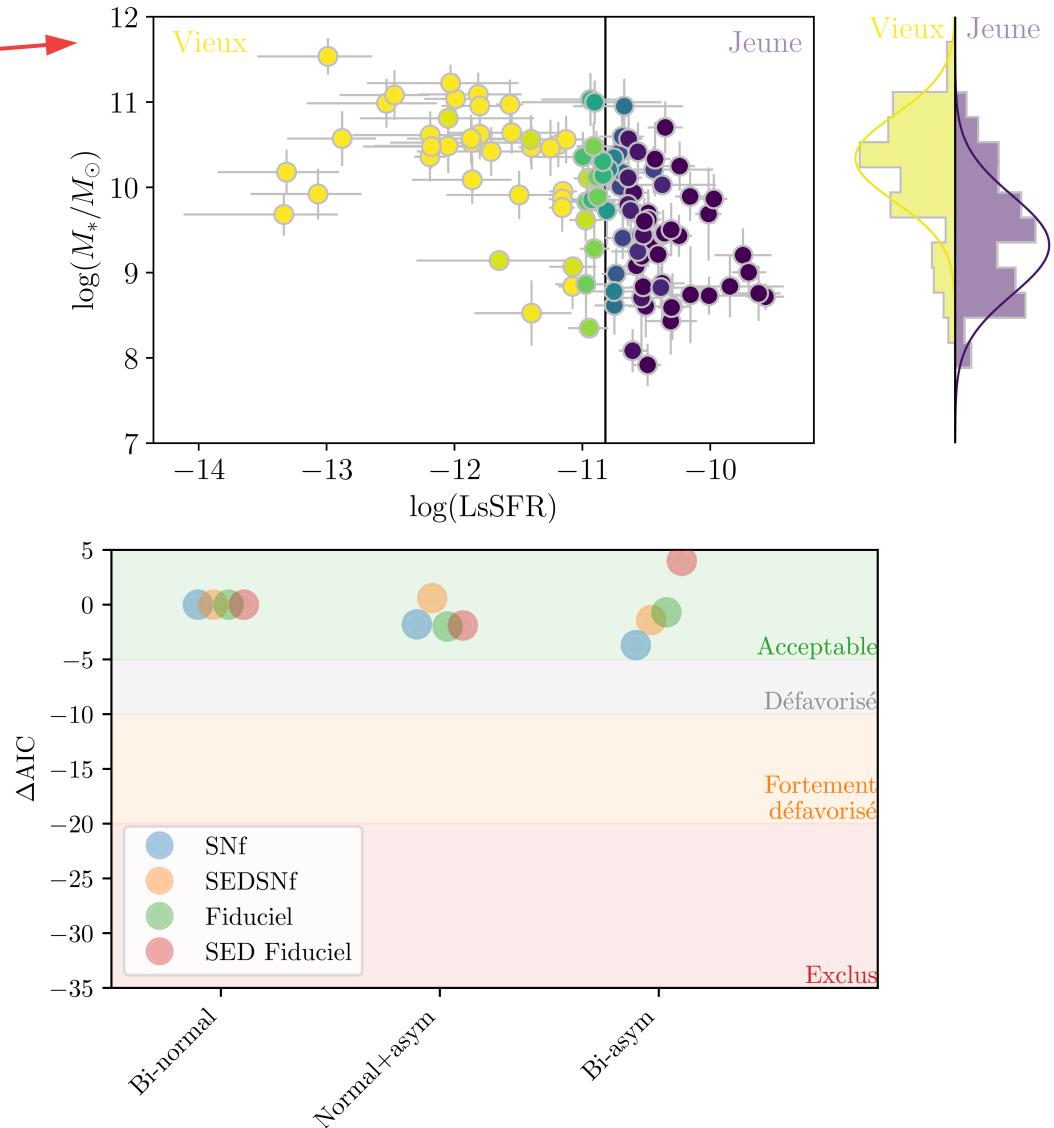
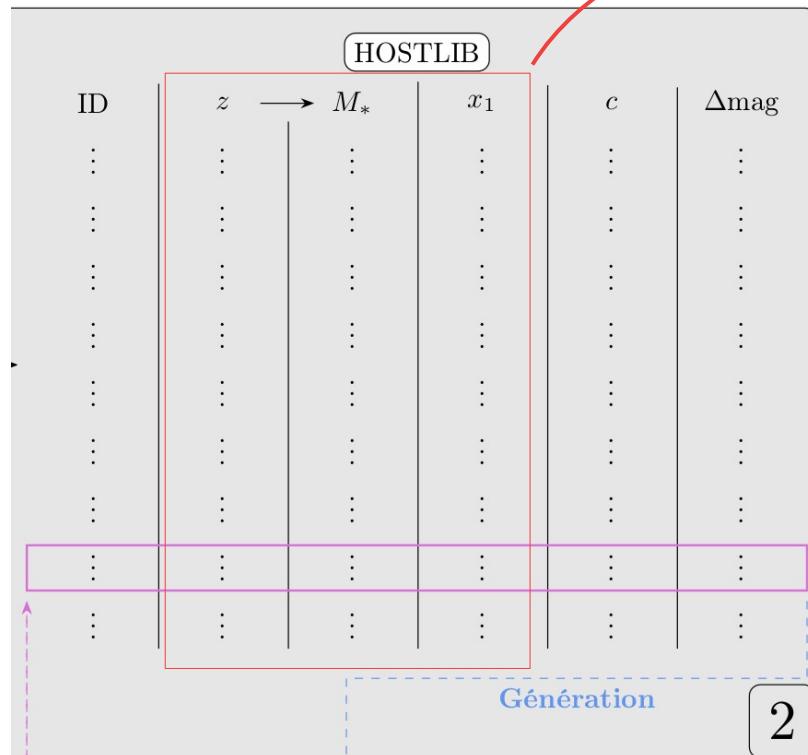
5

Ajustement conservé

# Simulations avec SNANA

## Implémentation du modèle dans les logiciels

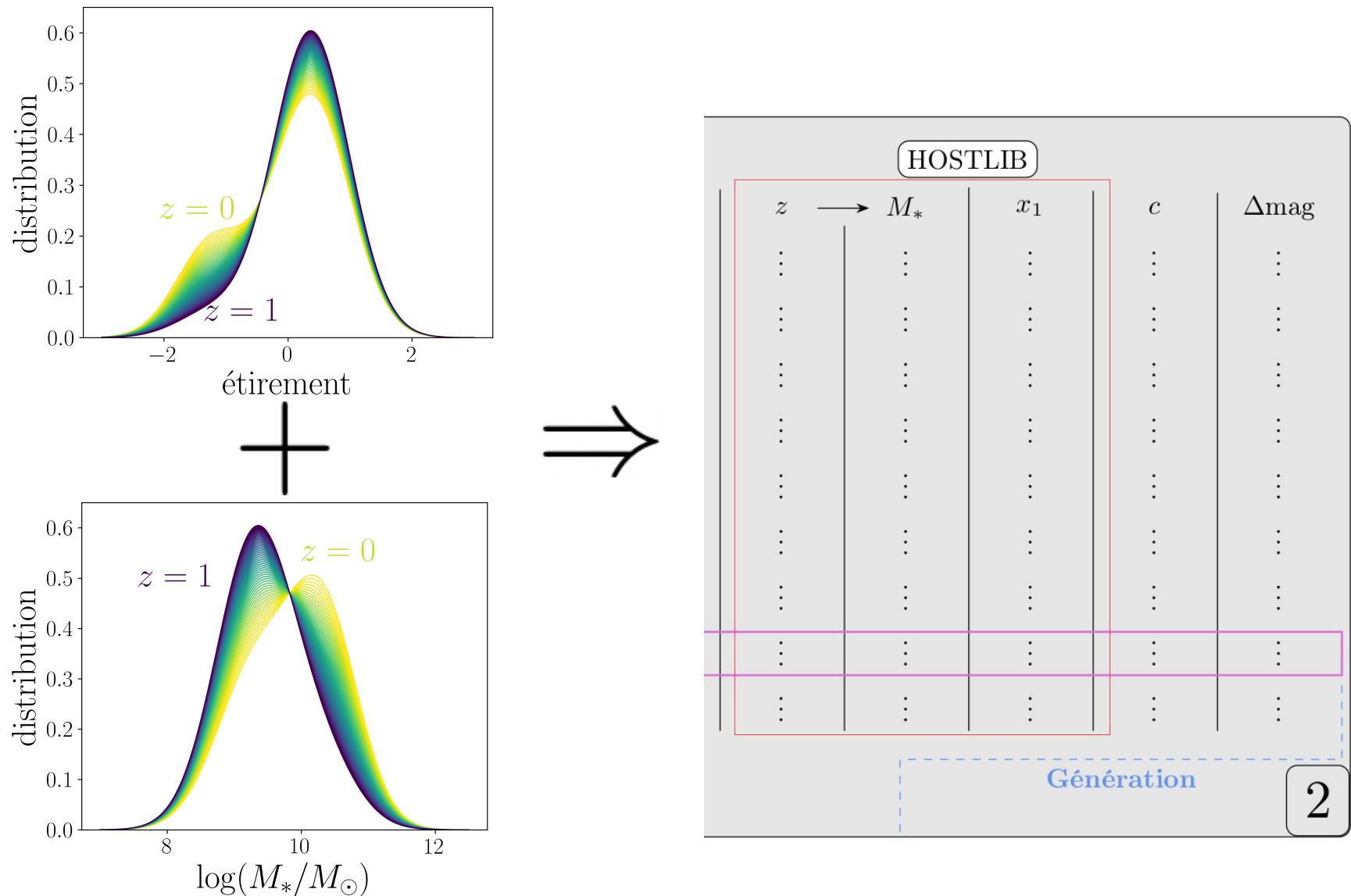
Nicolas et al. (in prep)



# Simulations avec SNANA

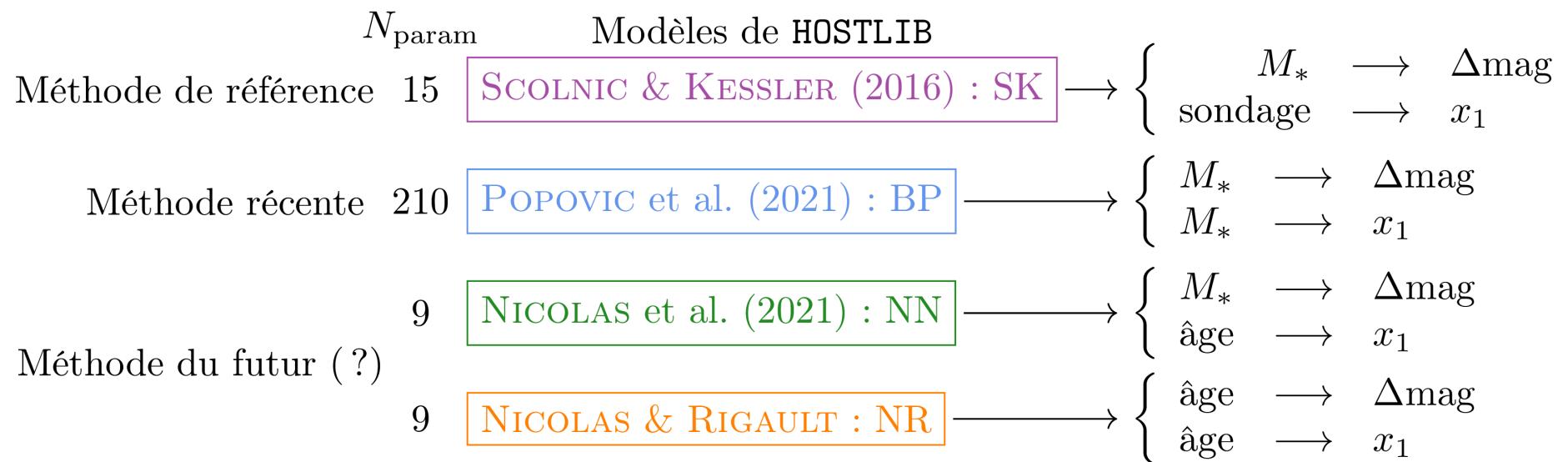
## Implémentation du modèle dans les logiciels

Nicolas et al. (in prep)



# Simulations avec SNANA

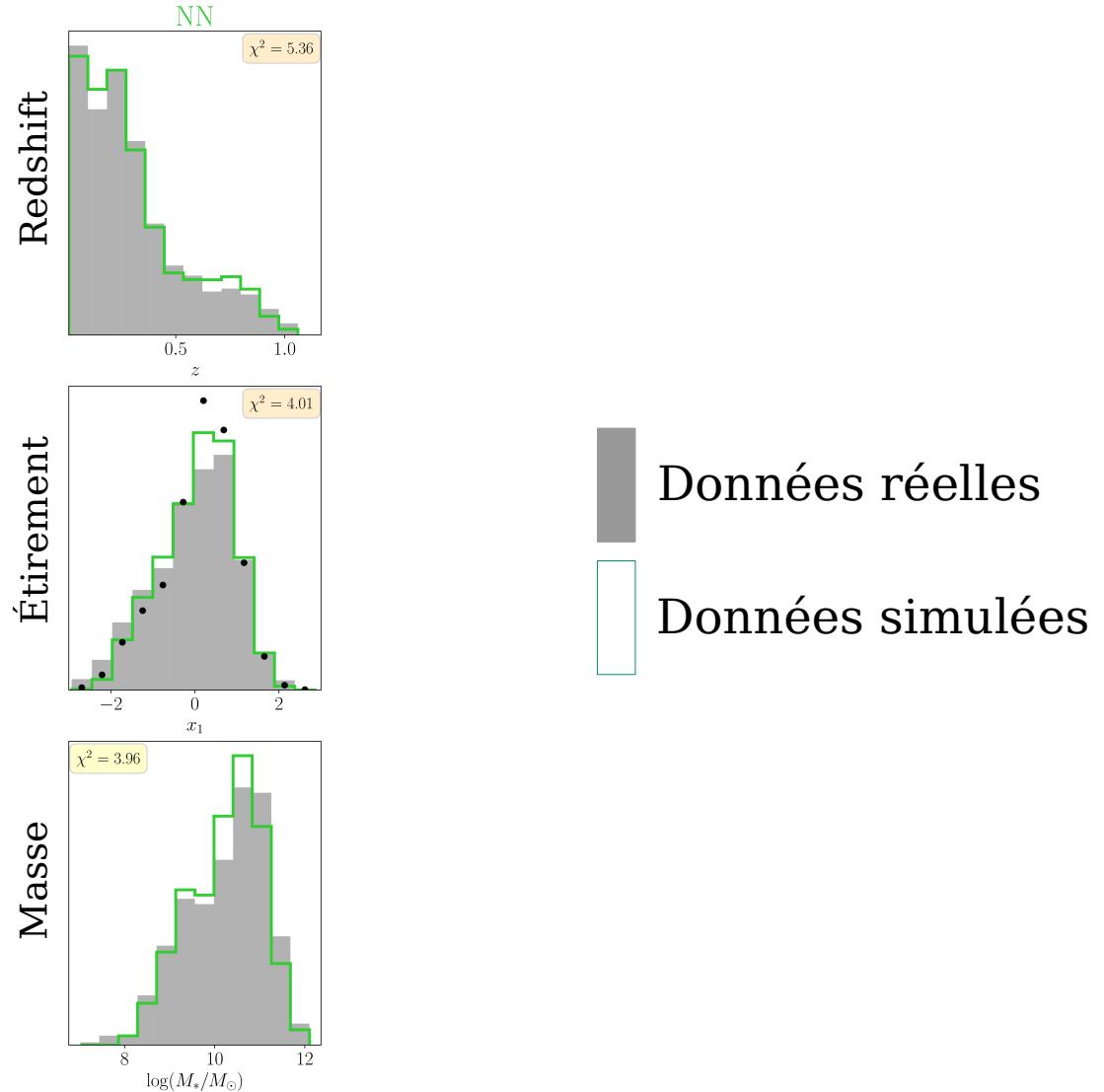
## Présentation des modèles



# Simulations avec SNANA

## Comparaison des modèles aux données

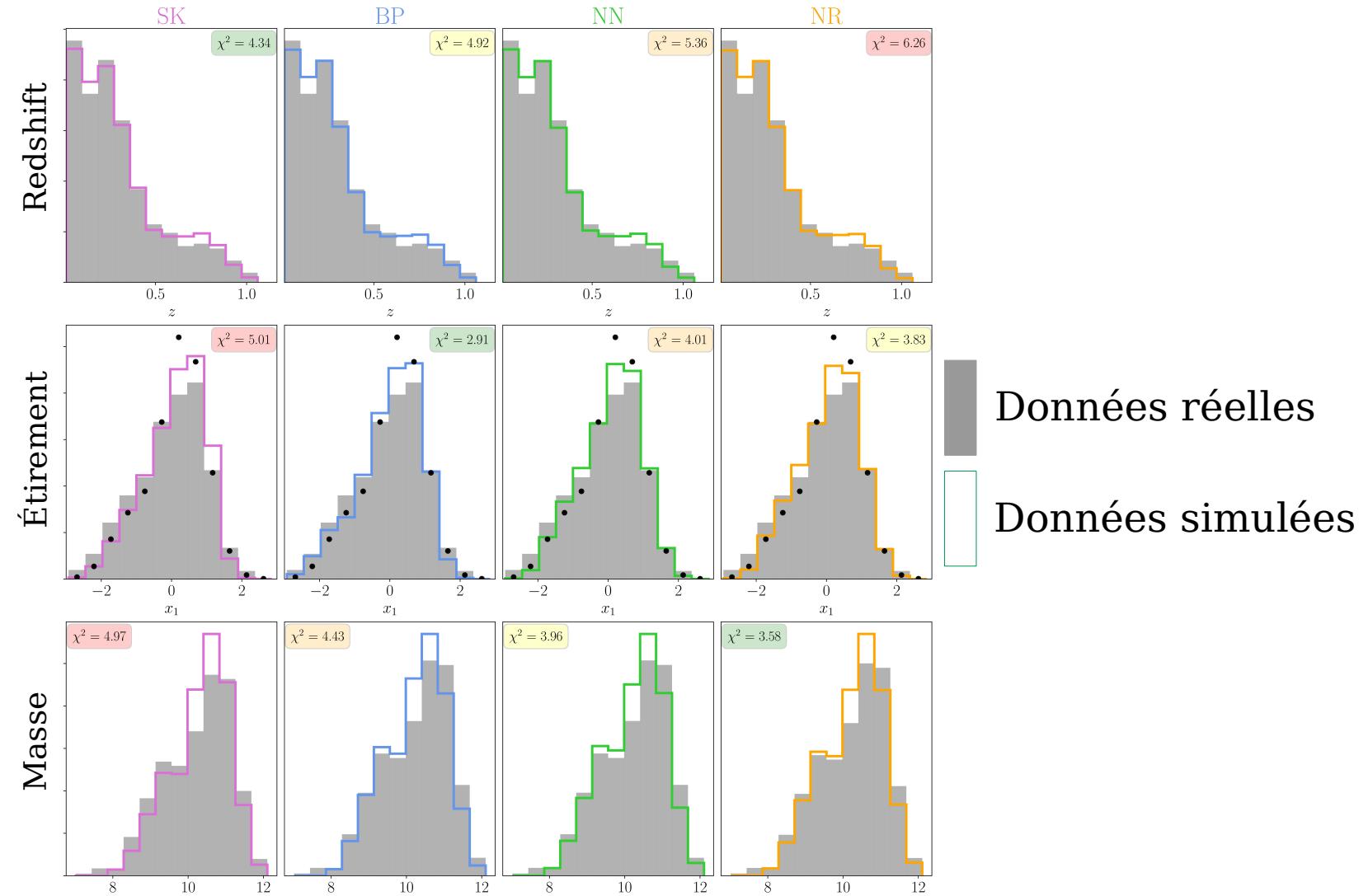
Nicolas (*in prep*)



# Simulations avec SNANA

## Comparaison des modèles aux données

Nicolas (*in prep*)

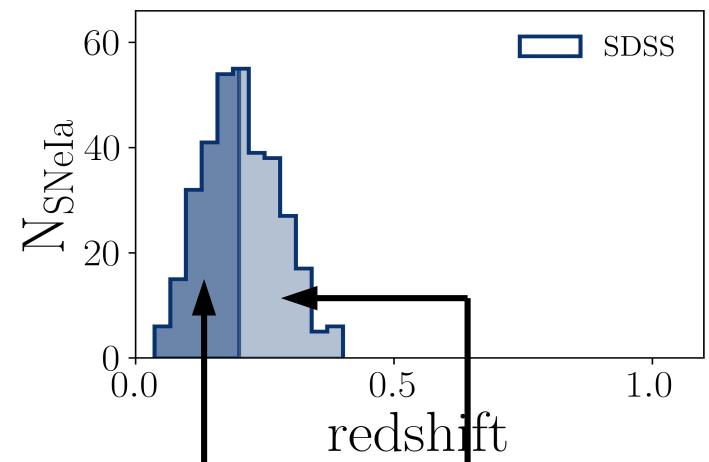


Tous de bonnes représentations des données

# Simulations avec SNANA

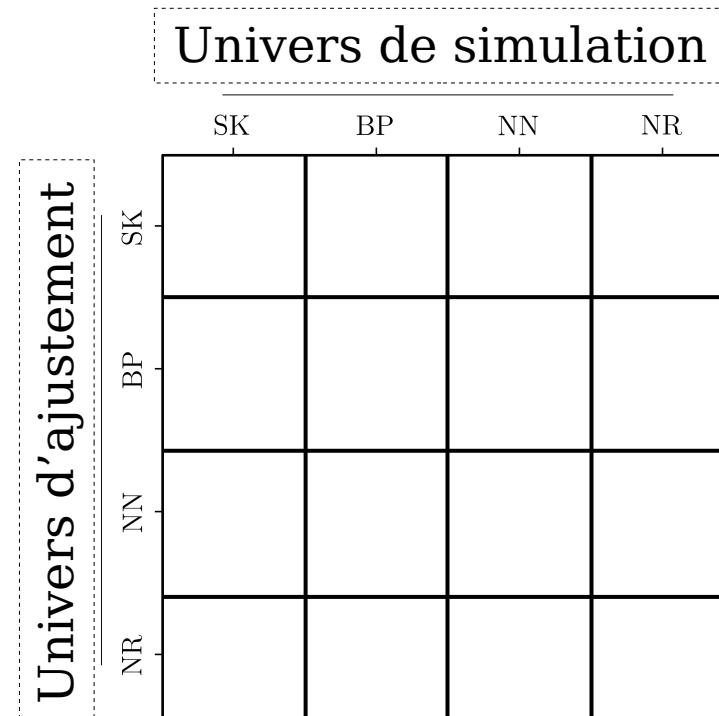
## Comparaison des modèles aux données

Nicolas (*in prep*)



Simulation  
avec un modèle

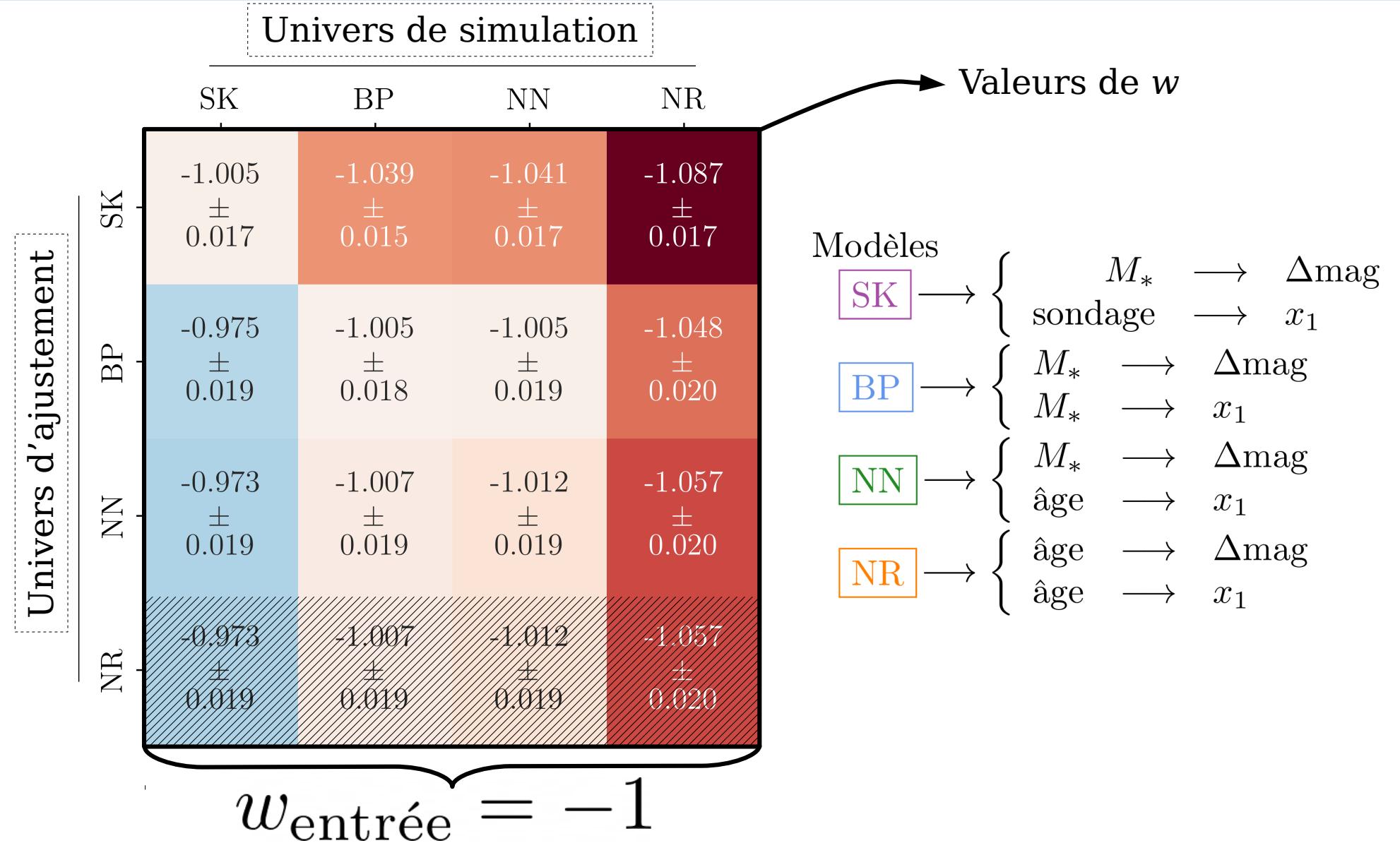
Effets de sélection  
avec un autre



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)

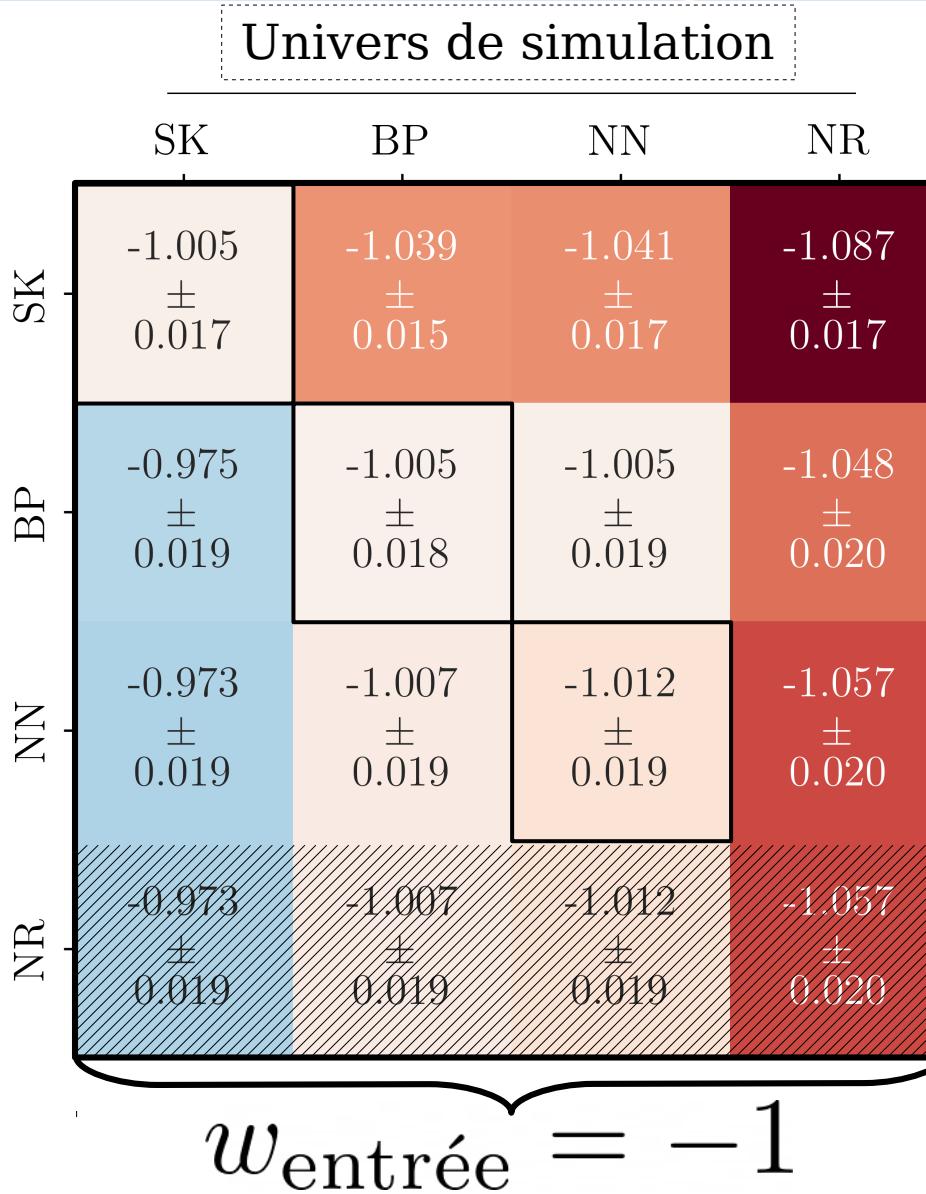


# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

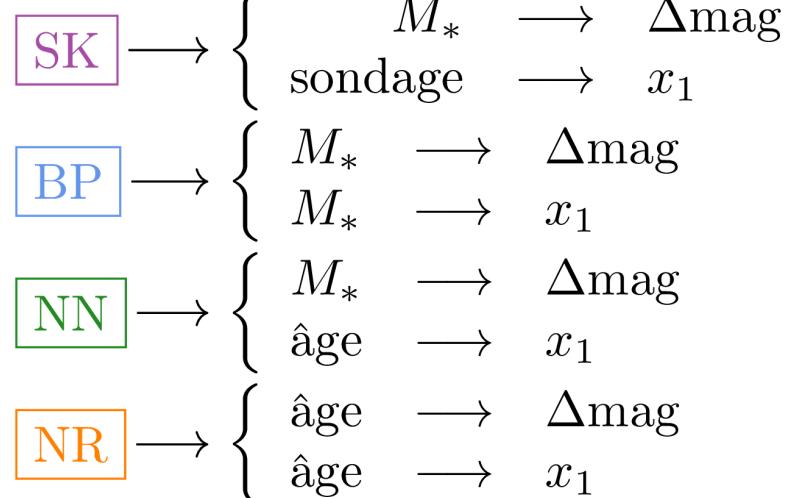
Nicolas et al. (in prep)

Univers d'ajustement



Valeurs de  $w$

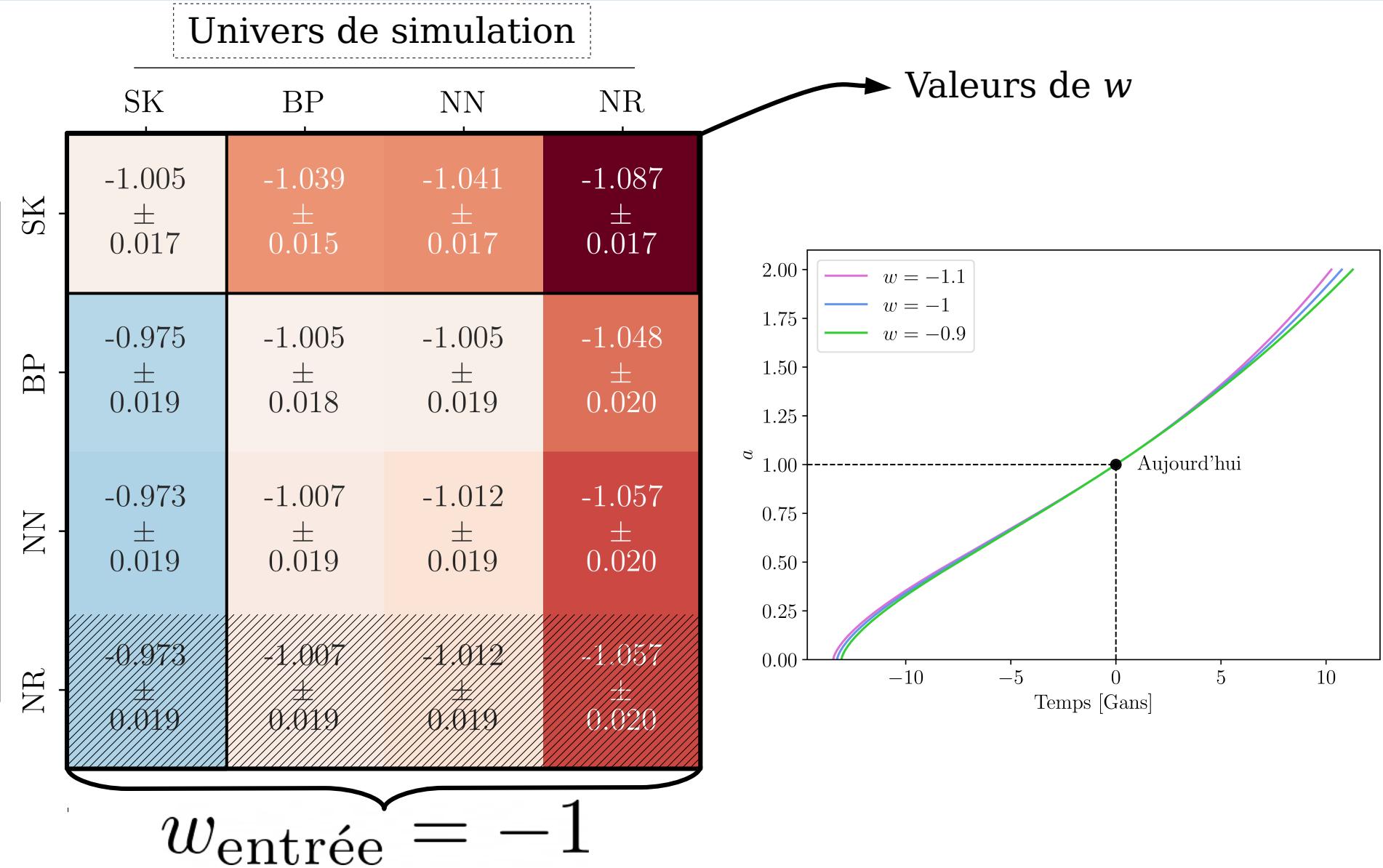
Modèles



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

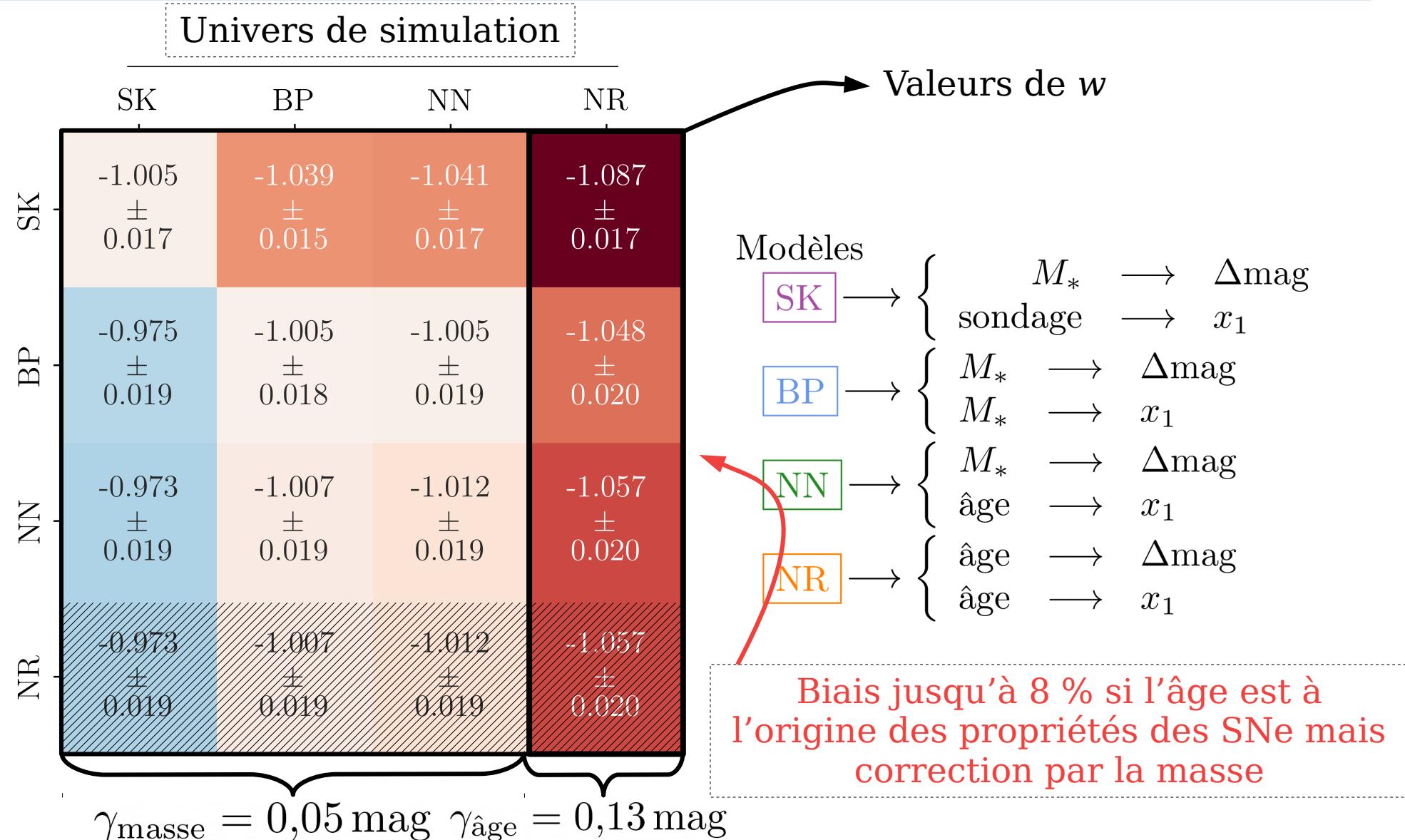
Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

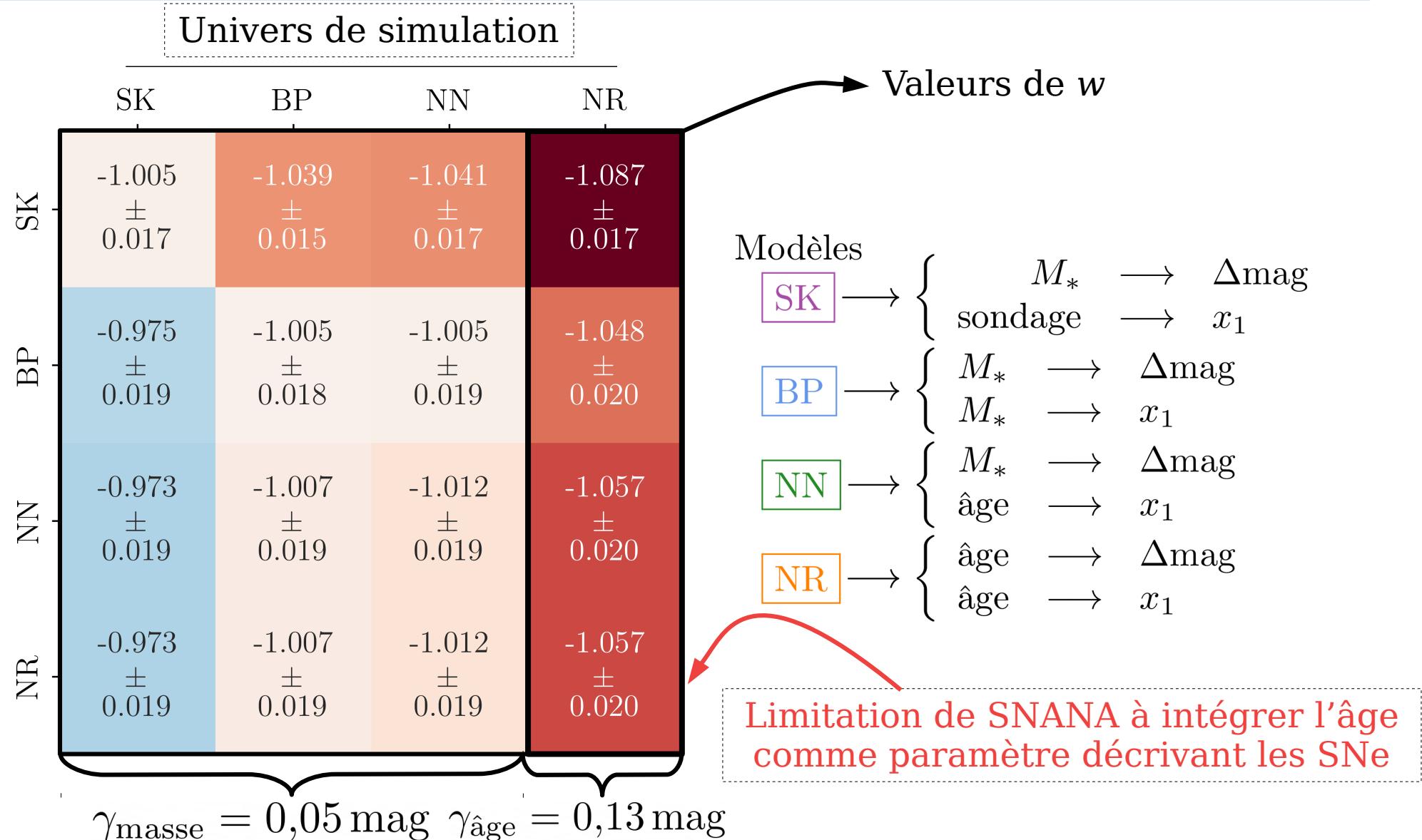
Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

Nicolas et al. (in prep)

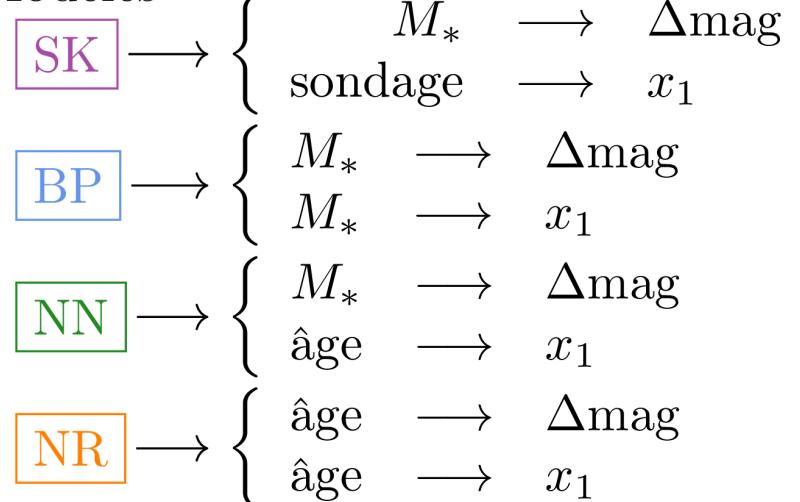
Univers de simulation

		SK	BP	NN	NR
		SK	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.094 ± 0.003
Univers d'ajustement	SK	0.051 ± 0.003	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.103 ± 0.003
	BP	0.061 ± 0.003	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003
NN	NN	0.060 ± 0.003	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003
	NR	0.060 ± 0.003	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003

$\gamma_{\text{masse}} = 0,05 \text{ mag}$   $\gamma_{\text{âge}} = 0,13 \text{ mag}$

Valeurs de  $\gamma_{\text{masse}}$

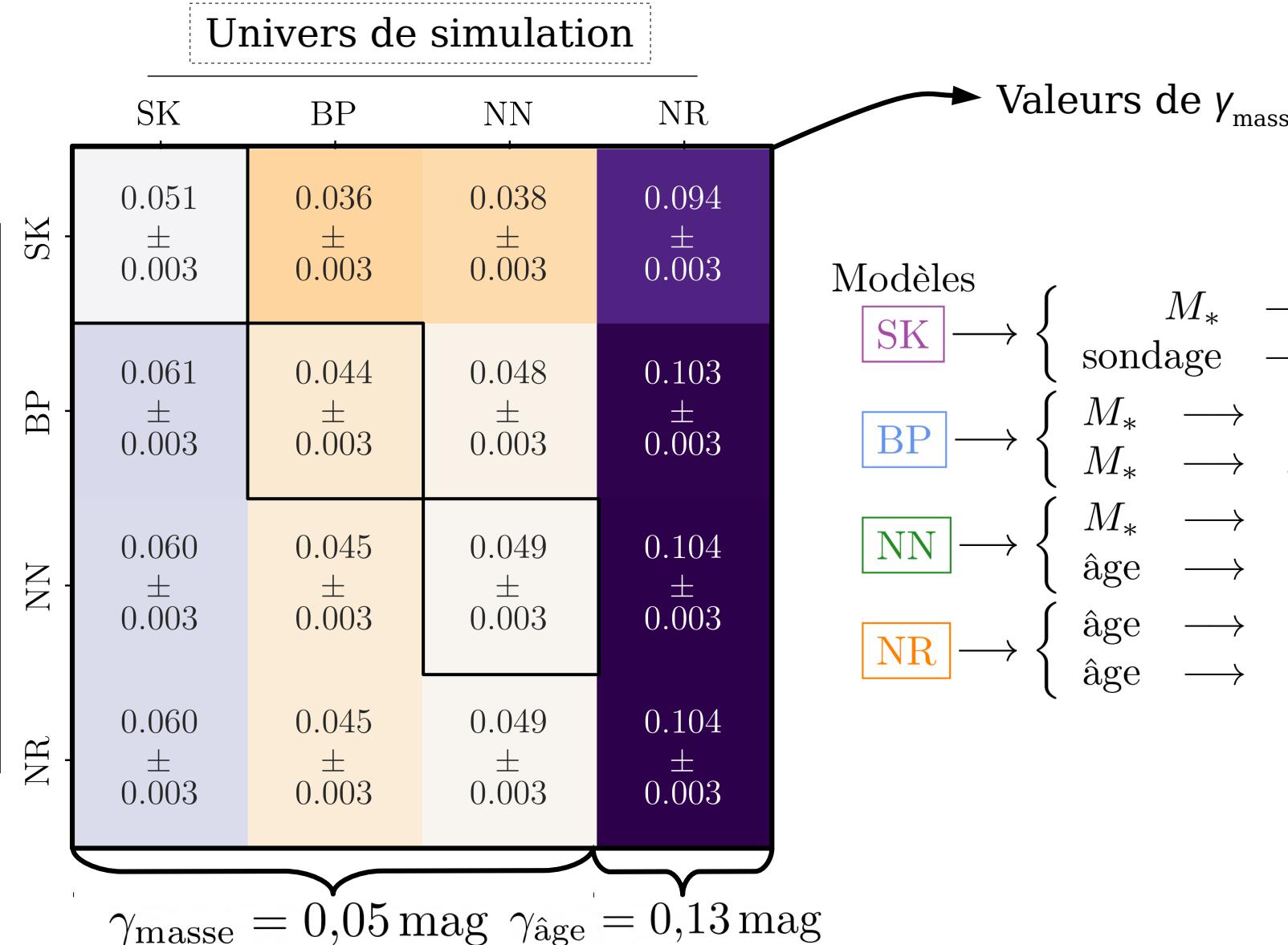
Modèles



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

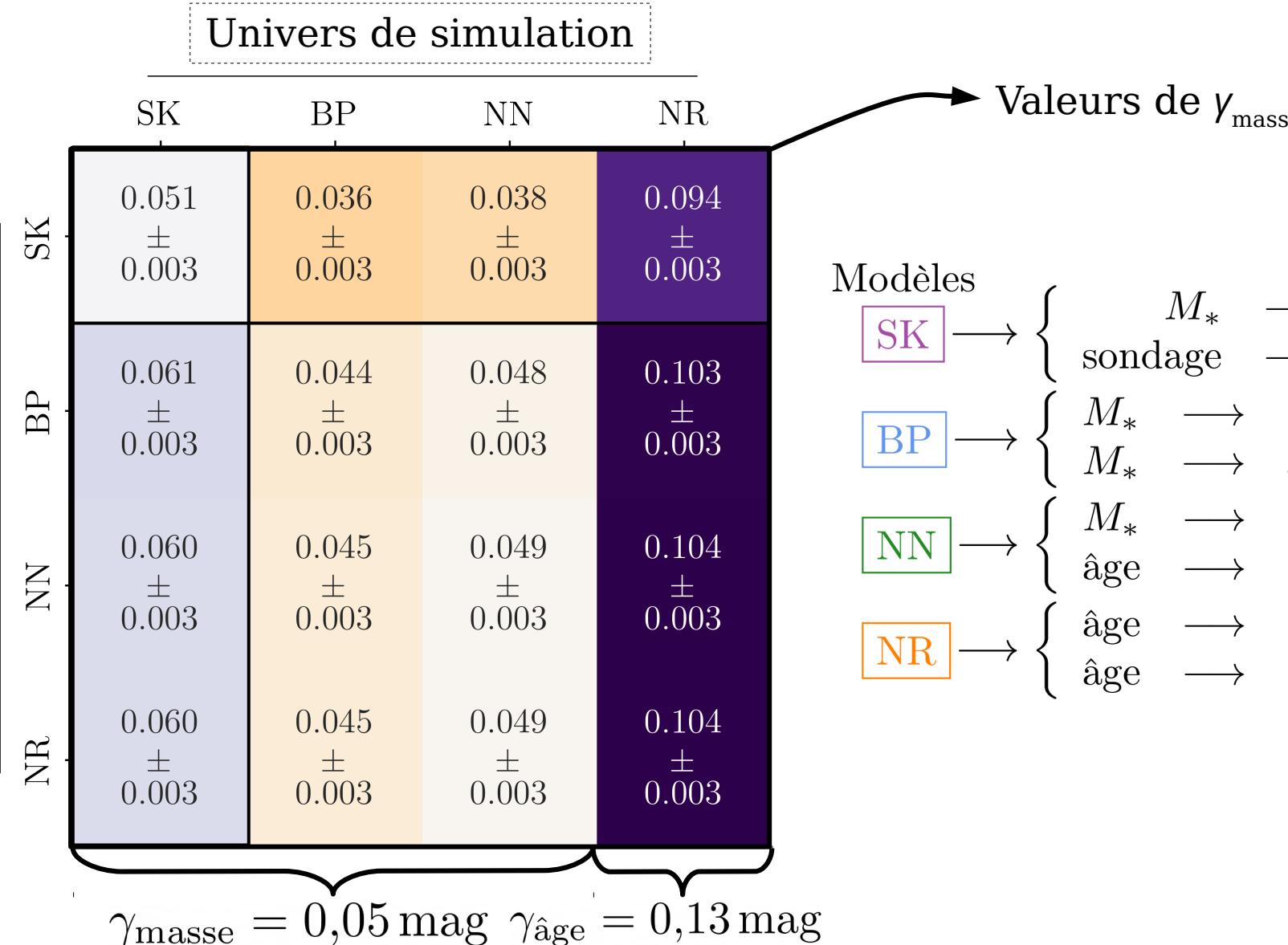
Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

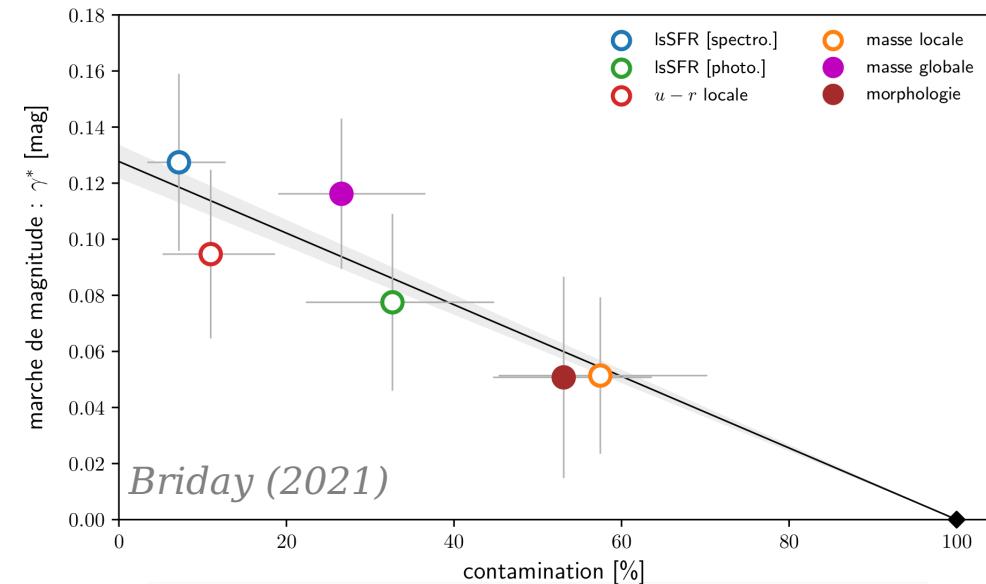
Nicolas et al. (in prep)

Univers de simulation

		SK	BP	NN	NR
		SK	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.094 ± 0.003
Univers d'ajustement	SK	0.051 ± 0.003	0.061 ± 0.003	0.060 ± 0.003	0.103 ± 0.003
	BP	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.045 ± 0.003	0.104 ± 0.003
NN	NN	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003
	NR	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003

$\gamma_{\text{masse}} = 0,05 \text{ mag}$   $\gamma_{\text{âge}} = 0,13 \text{ mag}$

Valeurs de  $\gamma_{\text{masse}}$

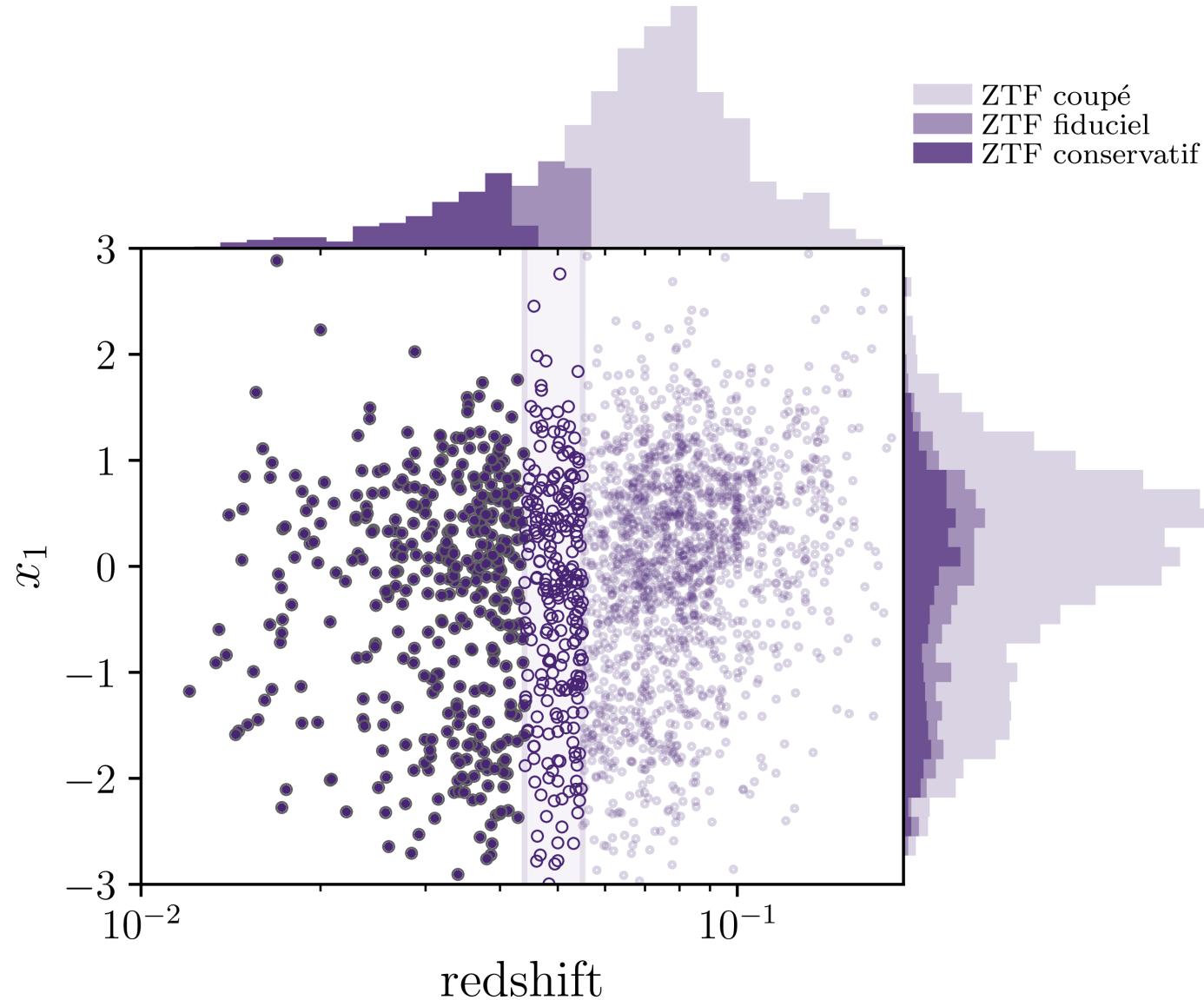


Renforcement de l'hypothèse que l'âge est à l'origine des propriétés des SNe

# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

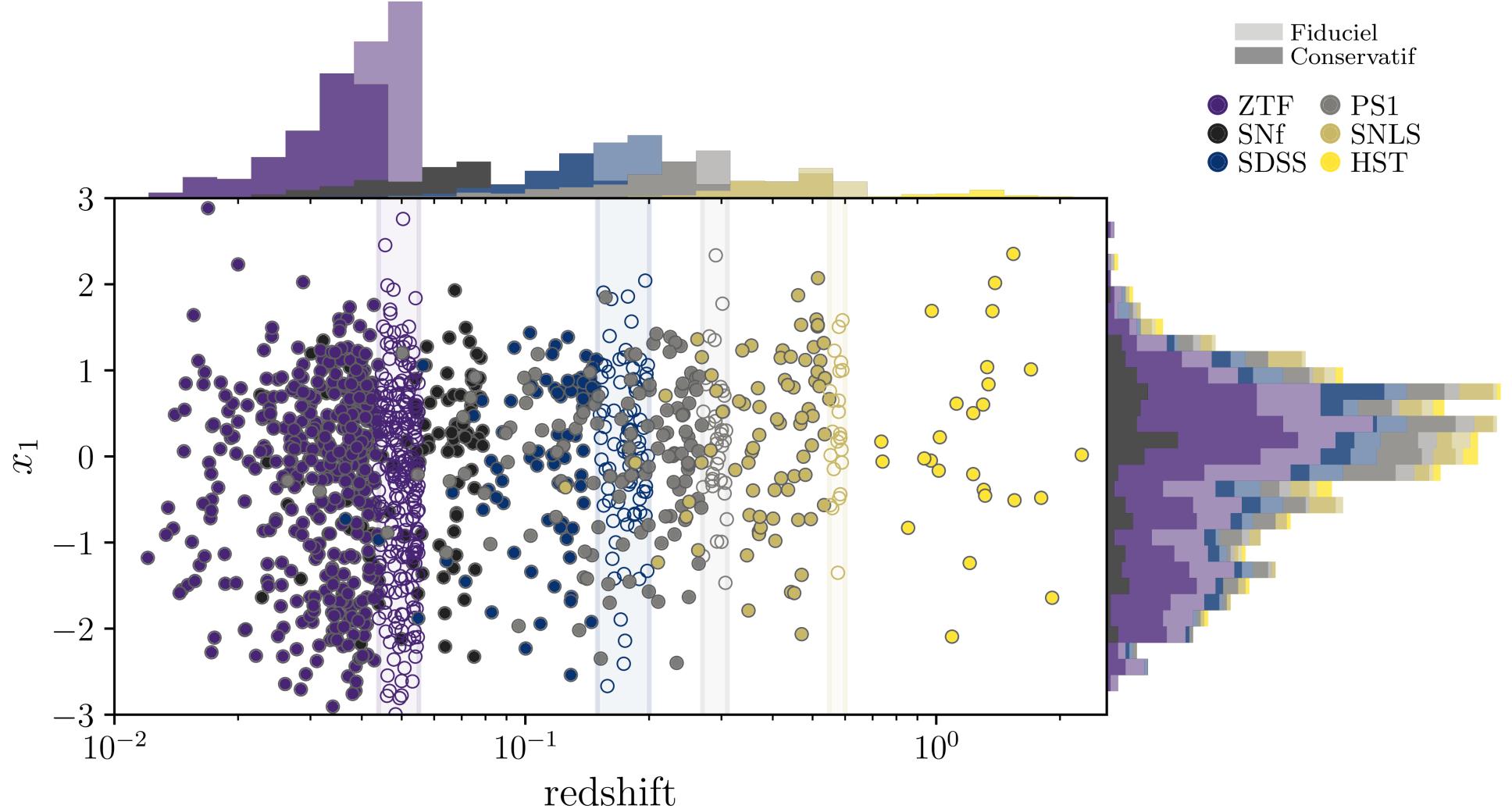
Nicolas (in prep)



# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

Nicolas (in prep)

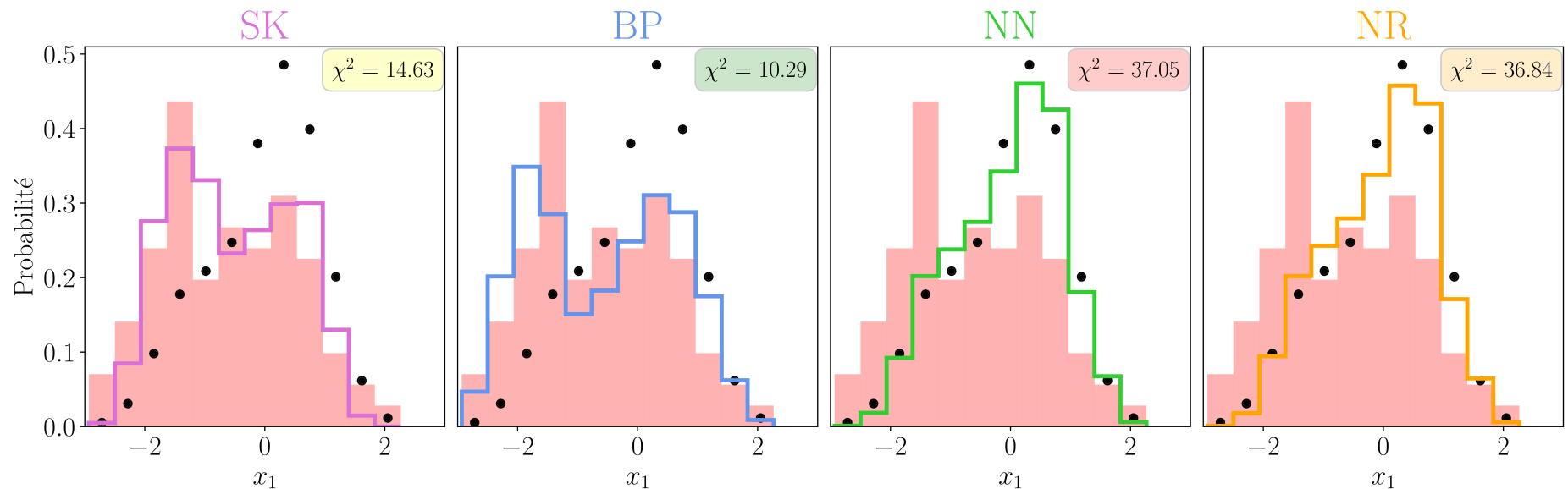


# Perspectives

## Amélioration des simulations

Nicolas et al. (in prep)

### LOWZ : sondage ciblé, sélection inhérente

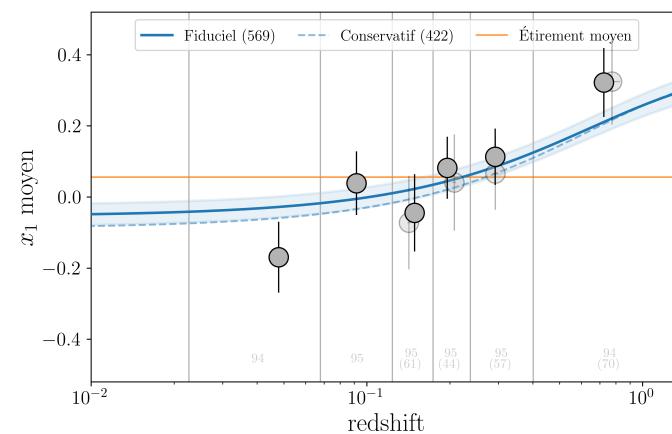
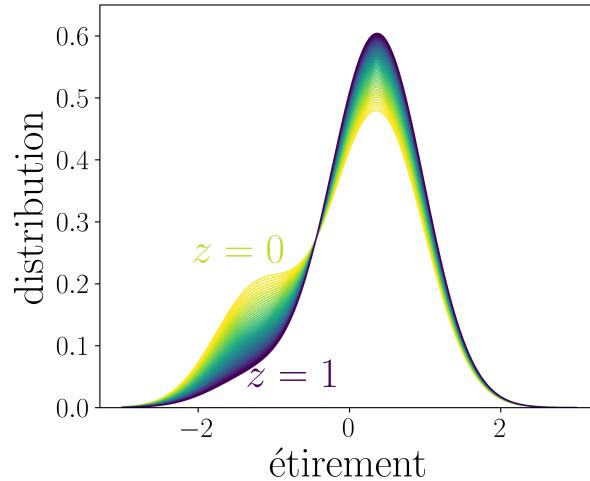


# Conclusions :

## Modèle jeunes SNe explique

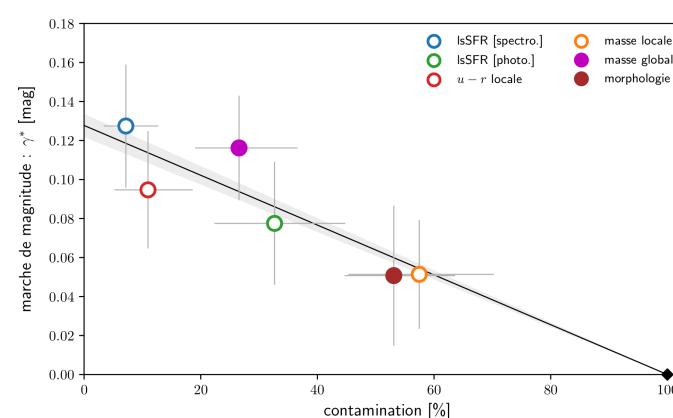
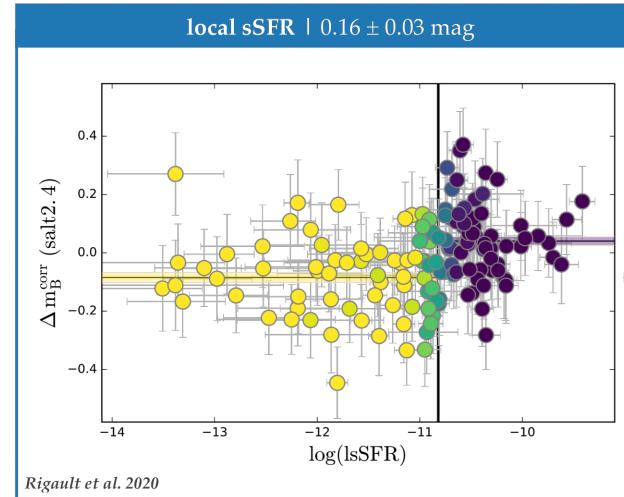
### Dérive avec le redshift

*Nicolas et al. (2021)*



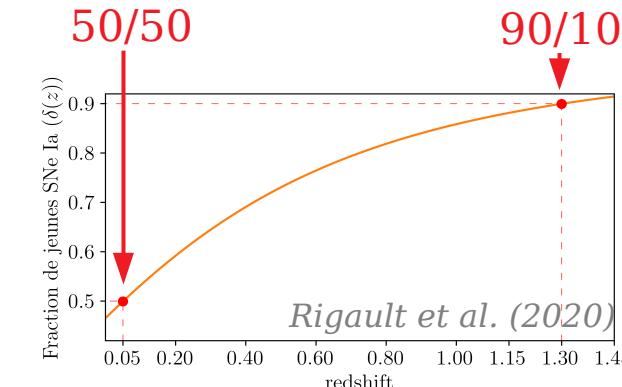
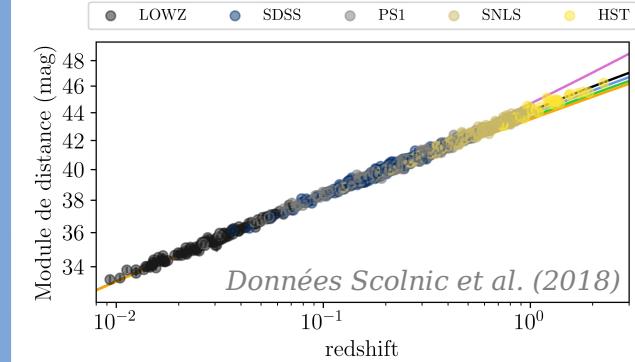
### Différentes marches de magnitudes

*Briday et al. (2021)*



### Biais jusqu'à 8 % sur w

*Nicolas (in prep)*  
*Nicolas et al. (in prep)*





# Merci !

Nora NICOLAS

Groupe Cosmos IP2I

Vendredi 30 septembre 2022

Soutenance de thèse de Doctorat

Sous la direction de M. RIGAULT



# Merci !

Nora NICOLAS  
Groupe Cosmos IP2I  
Vendredi 30 septembre 2022  
Soutenance de thèse de Doctorat

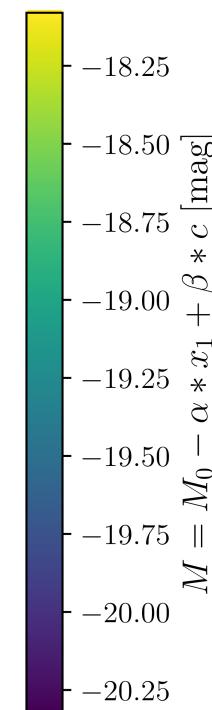
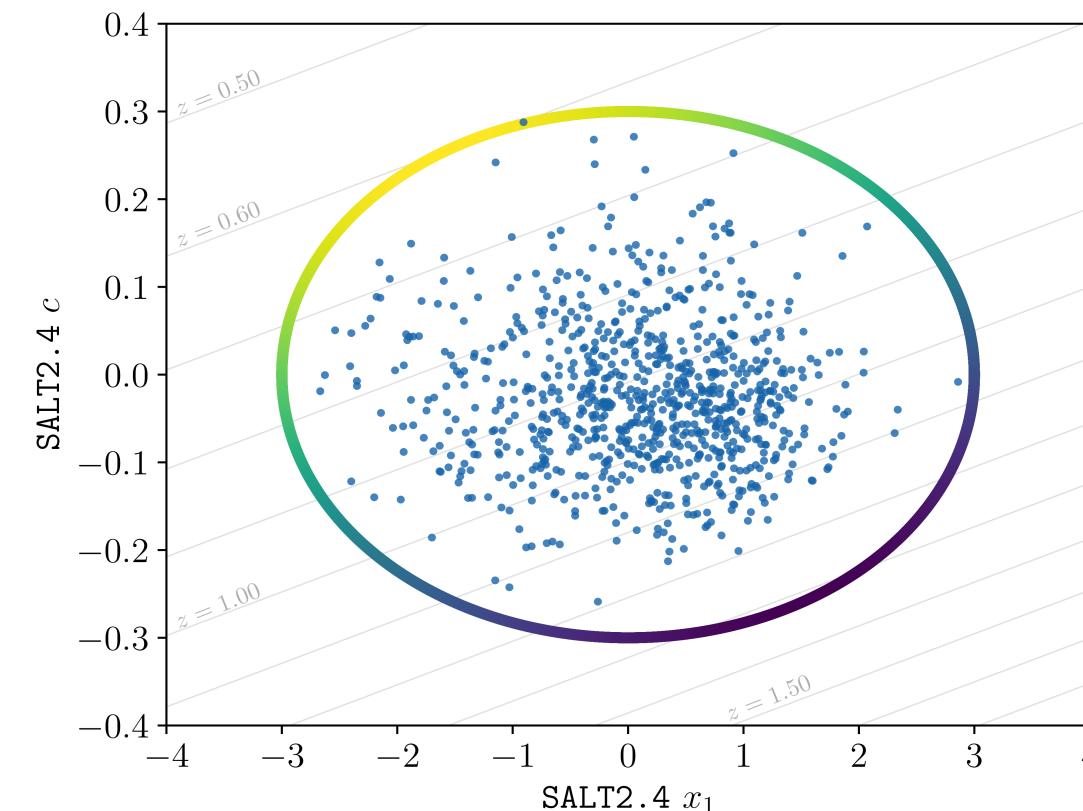
Sous la direction de  
M. RIGAULT  
M. SMITH  
Y. COPIN



# Sondages limités en magnitude

$m_{\text{lim}} = 24.8 \text{ mag}$  (SNLS)

$$\mu(z) = m - M(x_1, c) \Leftrightarrow m = \mu(z) + M(x_1, c)$$

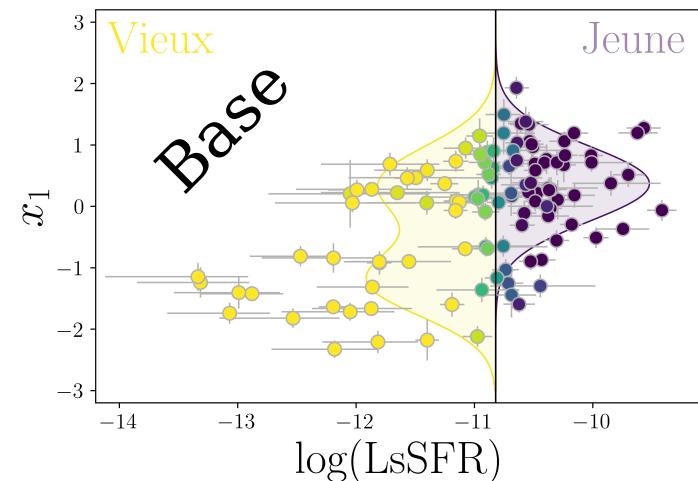


$$M_{\min,}^{t_0-5} = -18.00 \text{ mag}$$
$$x_1 = -1.66$$
$$c = 0.25$$

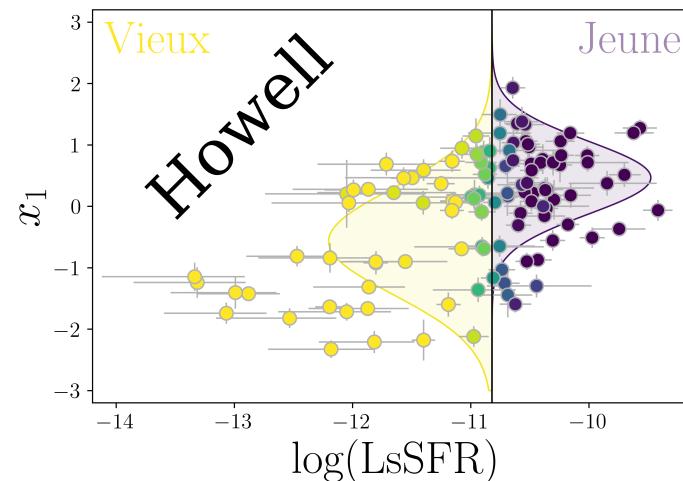
# Évolution de l'étirement

## Dérive de l'étirement comparée aux données

Nicolas et al. (2021)



5 paramètres



4 paramètres

Dérive de l'âge

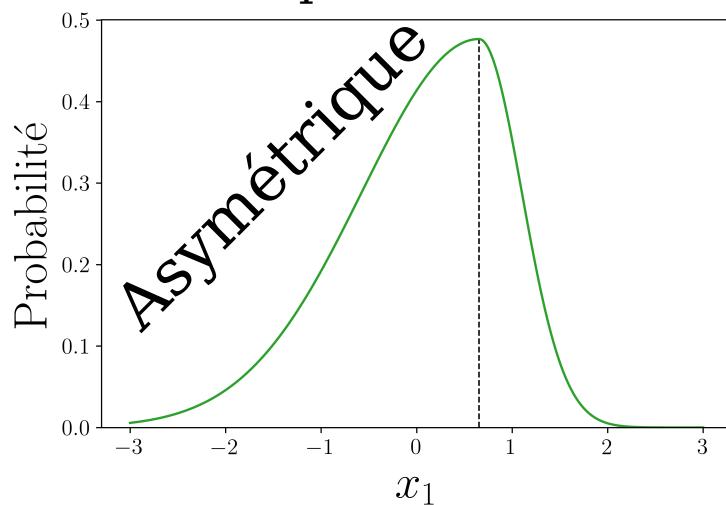
$$\delta(z) = (K^{-1} \times (1 + z)^{-\phi} + 1)^{-1}$$

+

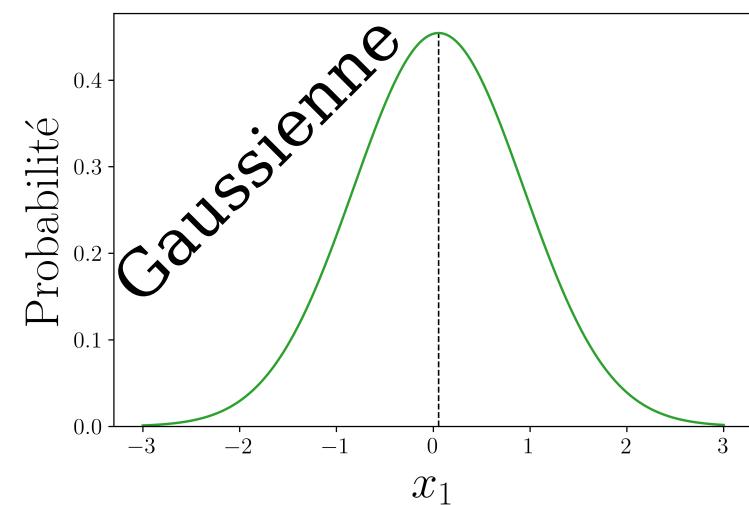
Ou sans dérive

$$\delta(z) = \text{cst}$$

3 paramètres



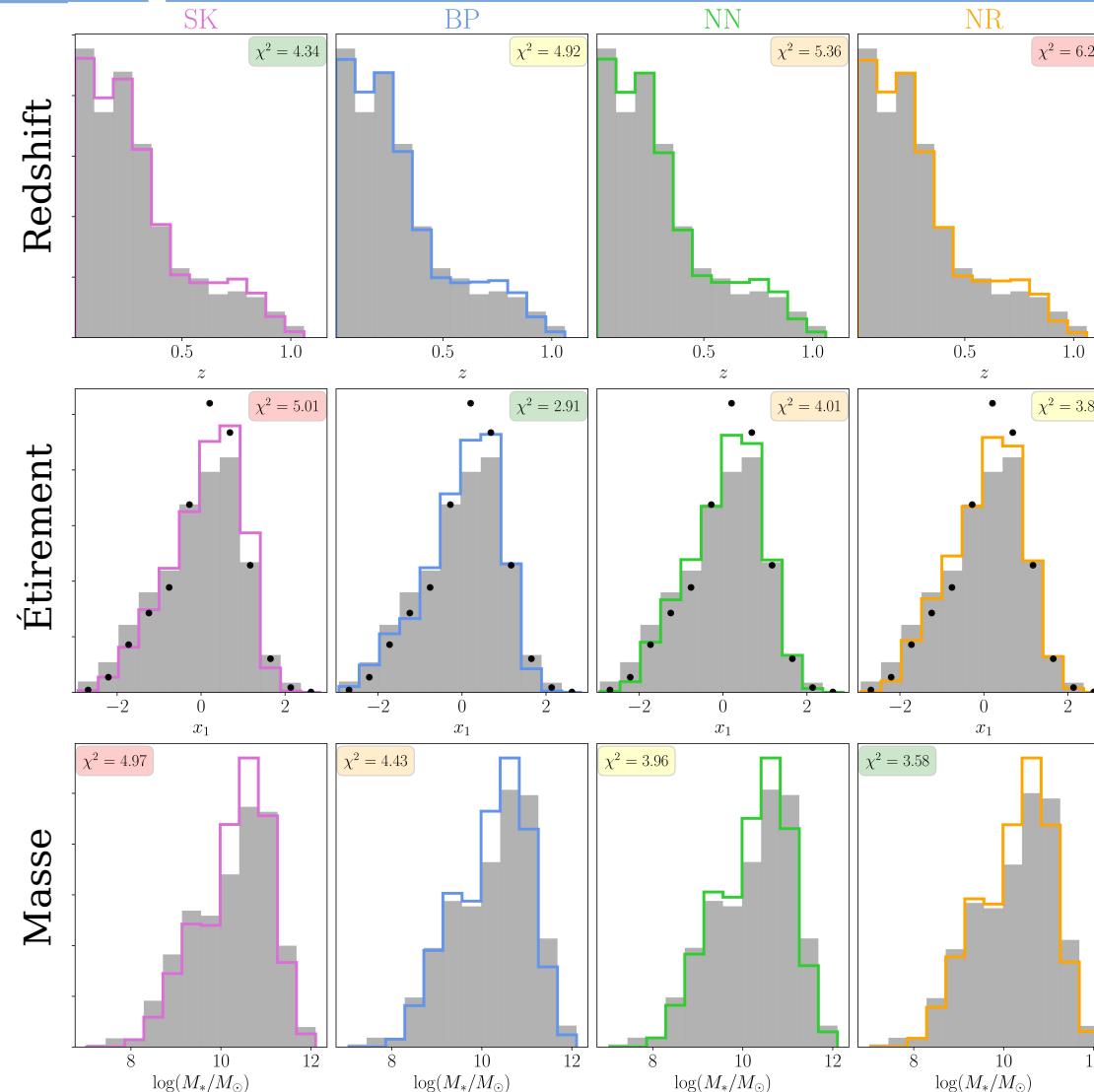
2 paramètres



# Simulations avec SNANA

## Comparaison des modèles aux données

Nicolas (in prep)



Comparaison pour tous les paramètres

Paramètre	$\chi^2$			
	SK	BP	NN	NR
Redshift	4.34	4.92	5.36	6.26
Étirement	5.01	2.91	4.01	3.83
Masse	4.97	4.43	3.96	3.58
Somme	14.32	12.26	13.33	13.67
Probabilité	0.36	1.00	0.59	0.49

Tous de bonnes représentations des données

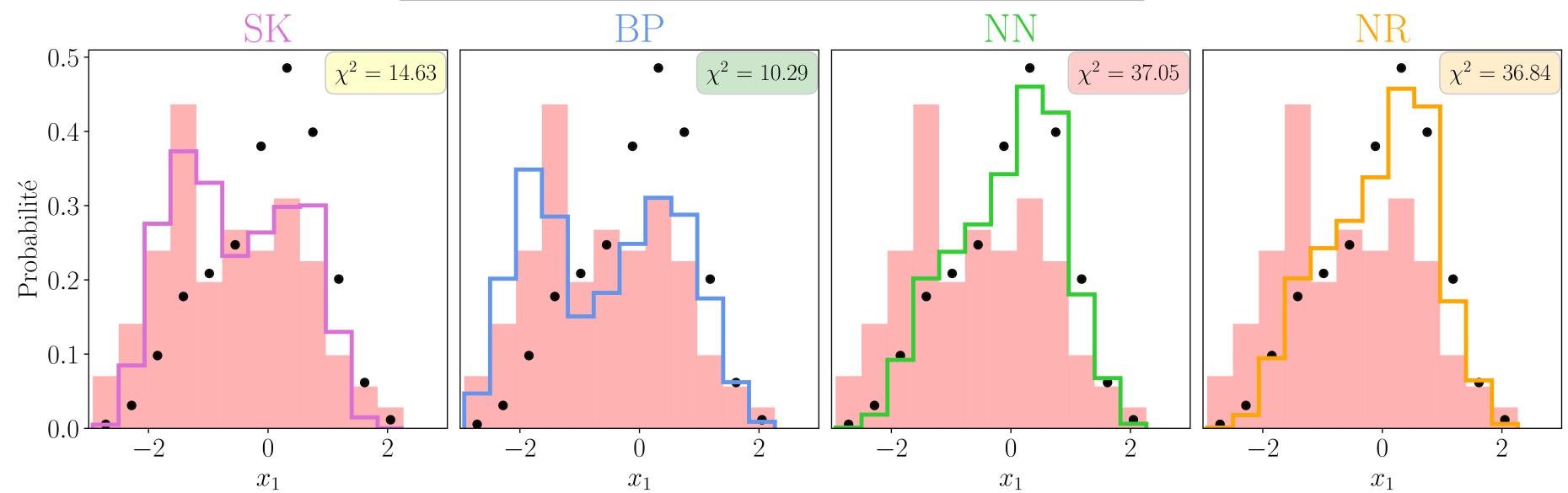
# Perspectives

## Amélioration des simulations

Nicolas et al. (in prep)

### Comparaison pour l'étirement seul

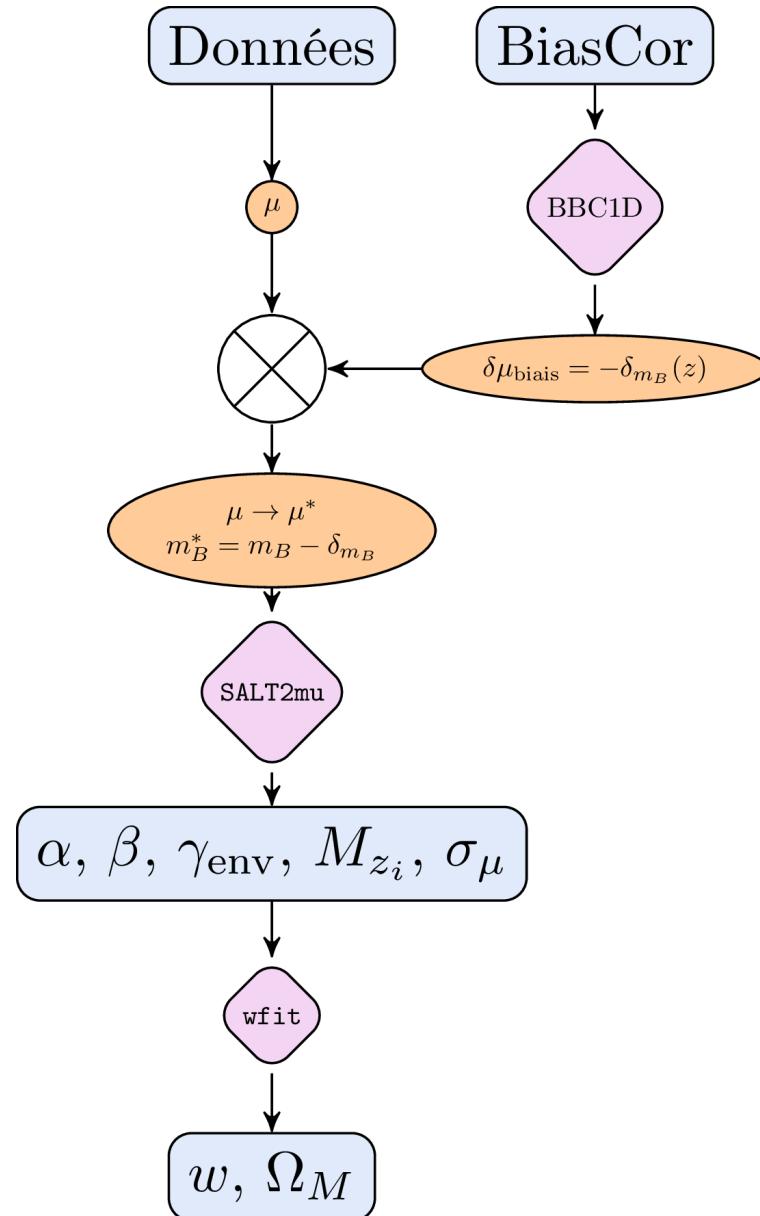
Sondage	$\chi^2$			
	SK	BP	NN	NR
LOWZ	14.63	10.29	37.05	36.84
SDSS	7.03	8.52	7.66	7.05
PS1	10.35	3.58	4.06	4.29
SNLS	15.14	23.13	15.03	15.00
Somme	47.15	45.52	63.80	63.18
Sans LOWZ	35.52	35.23	26.75	26.34



# Simulations avec SNANA

## Correction des biais

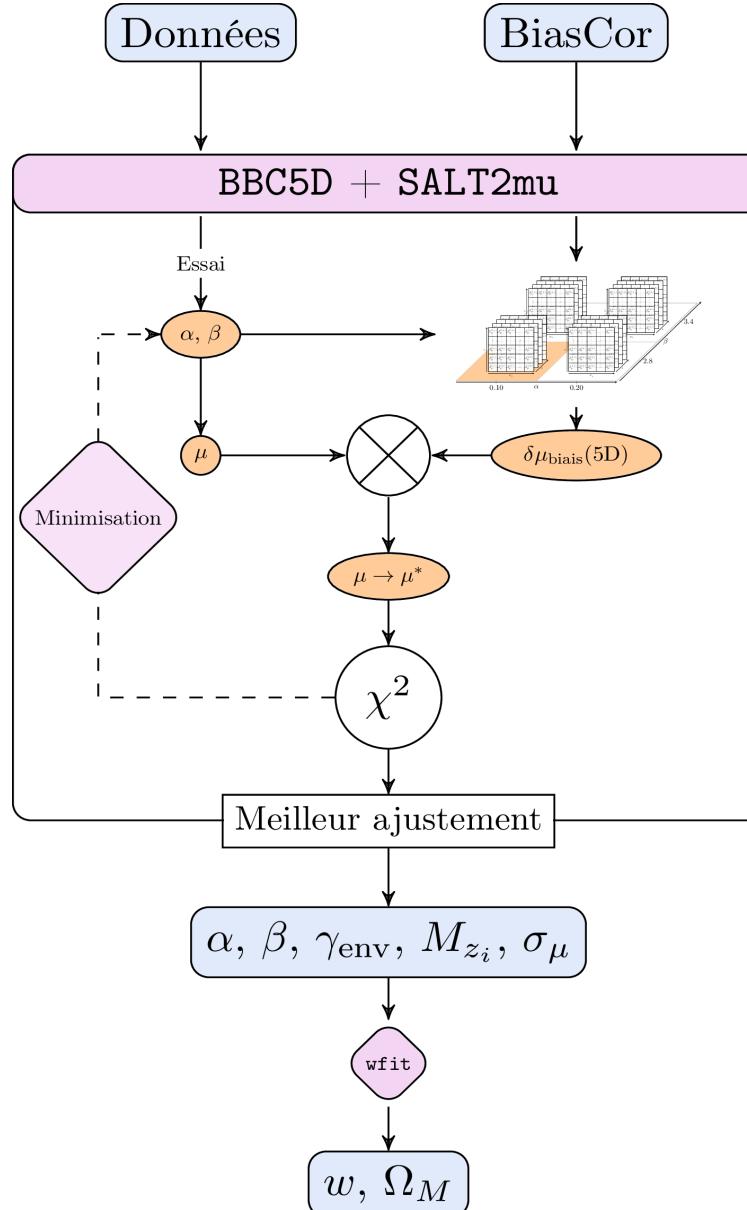
Nicolas et al. (in prep)



# Simulations avec SNANA

## Correction des biais

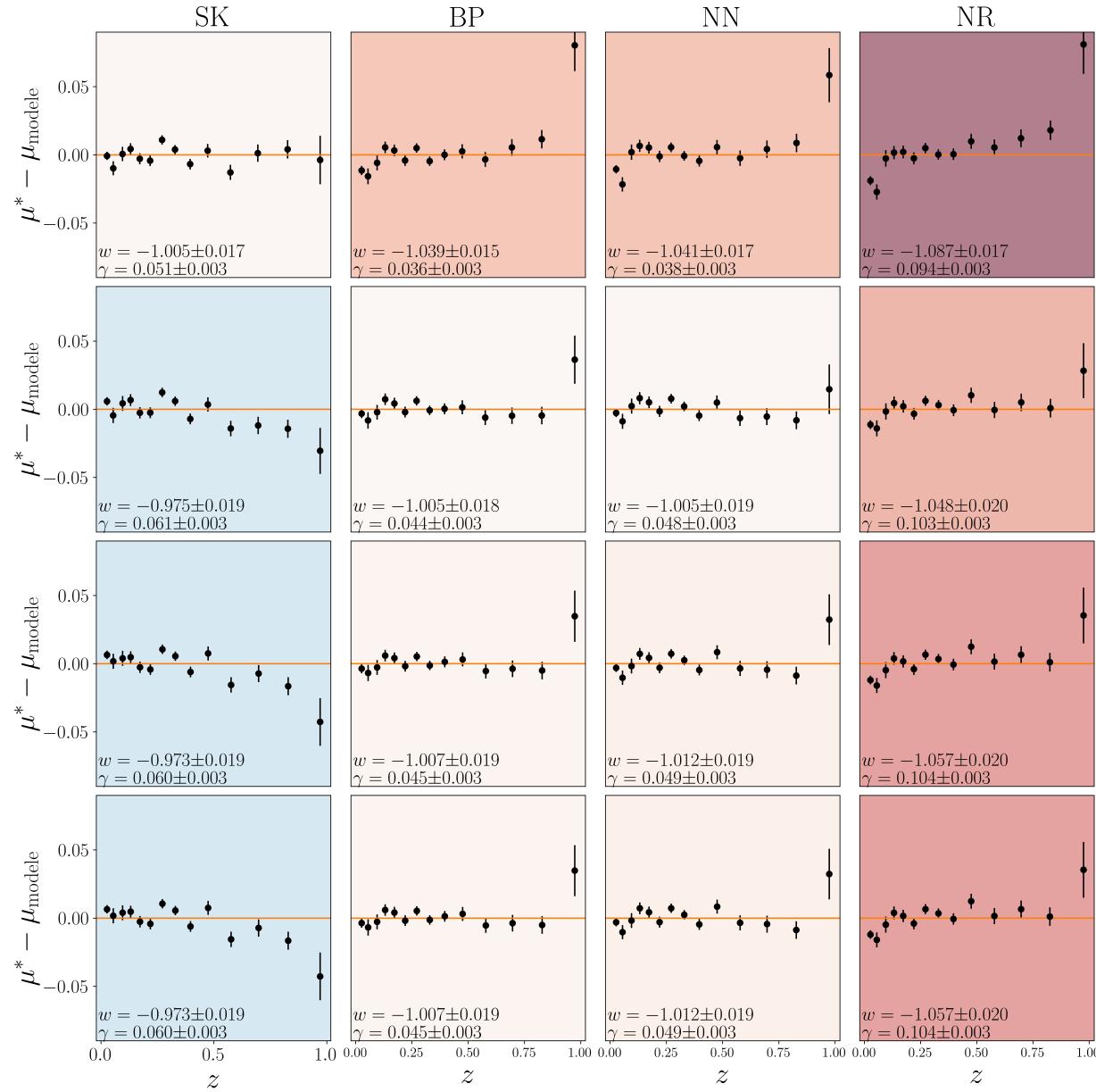
Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)



# Conclusions

- 1) Modèles non-dérivants exclus comme bonnes représentations des données
- 2) *Modèle de base utilisé dans les grands sondages (DES, Pantheon, SNANA...)*
- 3) Confirmation que l'âge est le meilleur traceur des propriétés des SNe
- 4) Augmentation des tables usuelles de SNANA par l'ajout de l'âge
- 5) Remplacement de modèles rétrospectifs par un modèle prospectif
- 6) Robustesse du modèle à décrire les données *via simulations*
- 7) Biais sur  $w$  de 4 à 8 %
- 8) Renforce la position de l'âge comme traceur avec  $\gamma_{\text{masse}} = 0.100 \text{ mag}$