



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

Nora NICOLAS

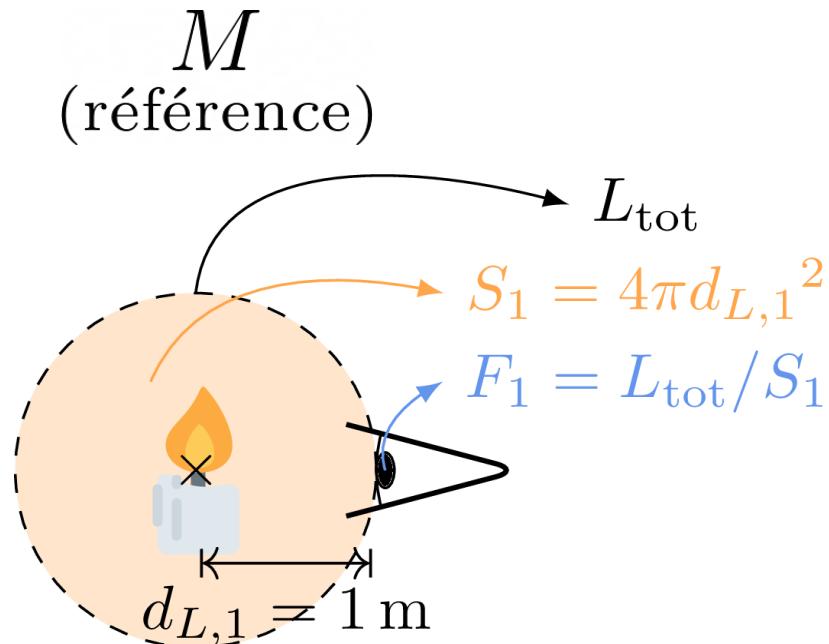
Groupe Cosmos IP2I

Vendredi 30 septembre 2022

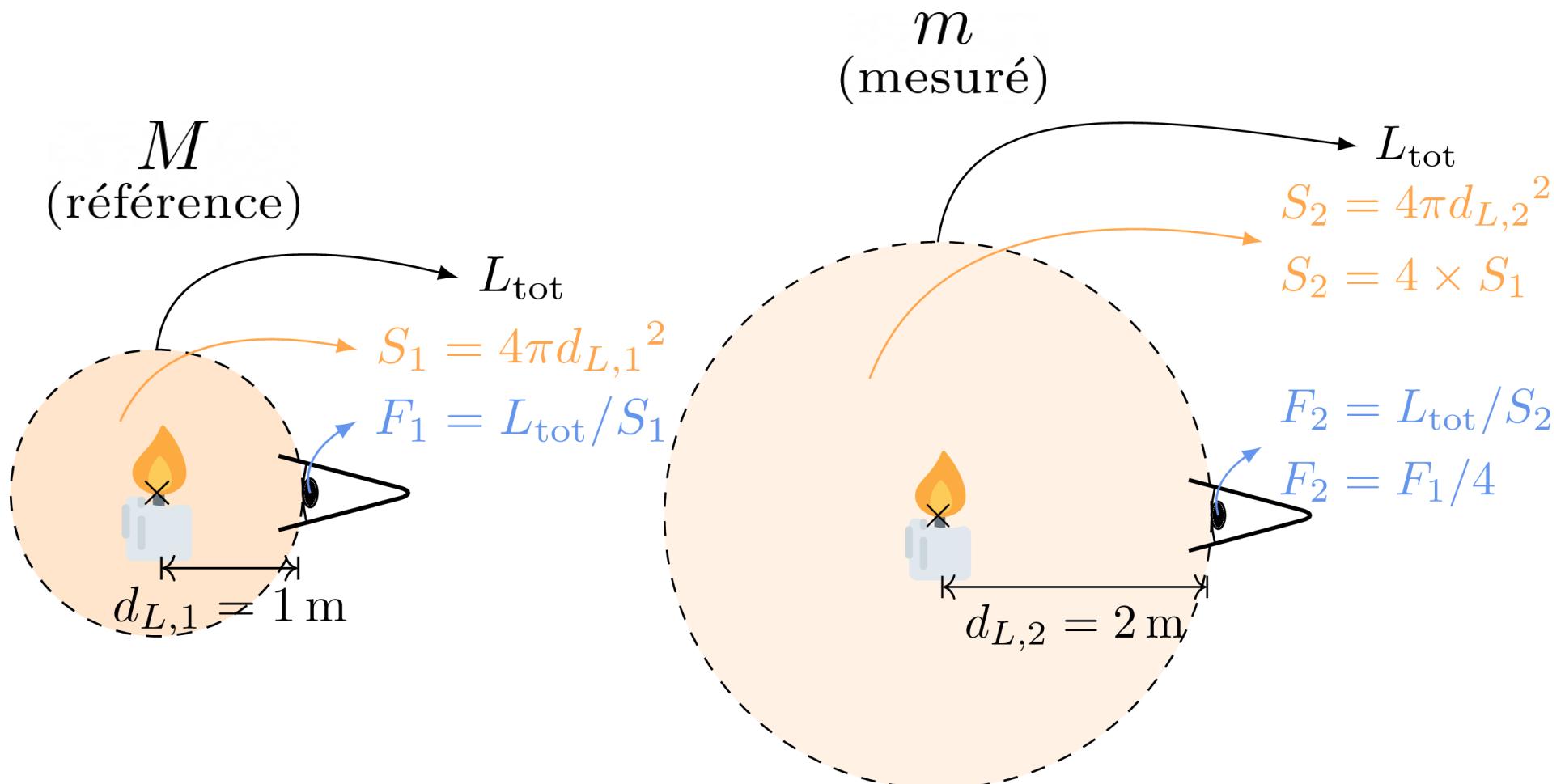
Soutenance de thèse de Doctorat  
Sous la direction de M. RIGAULT



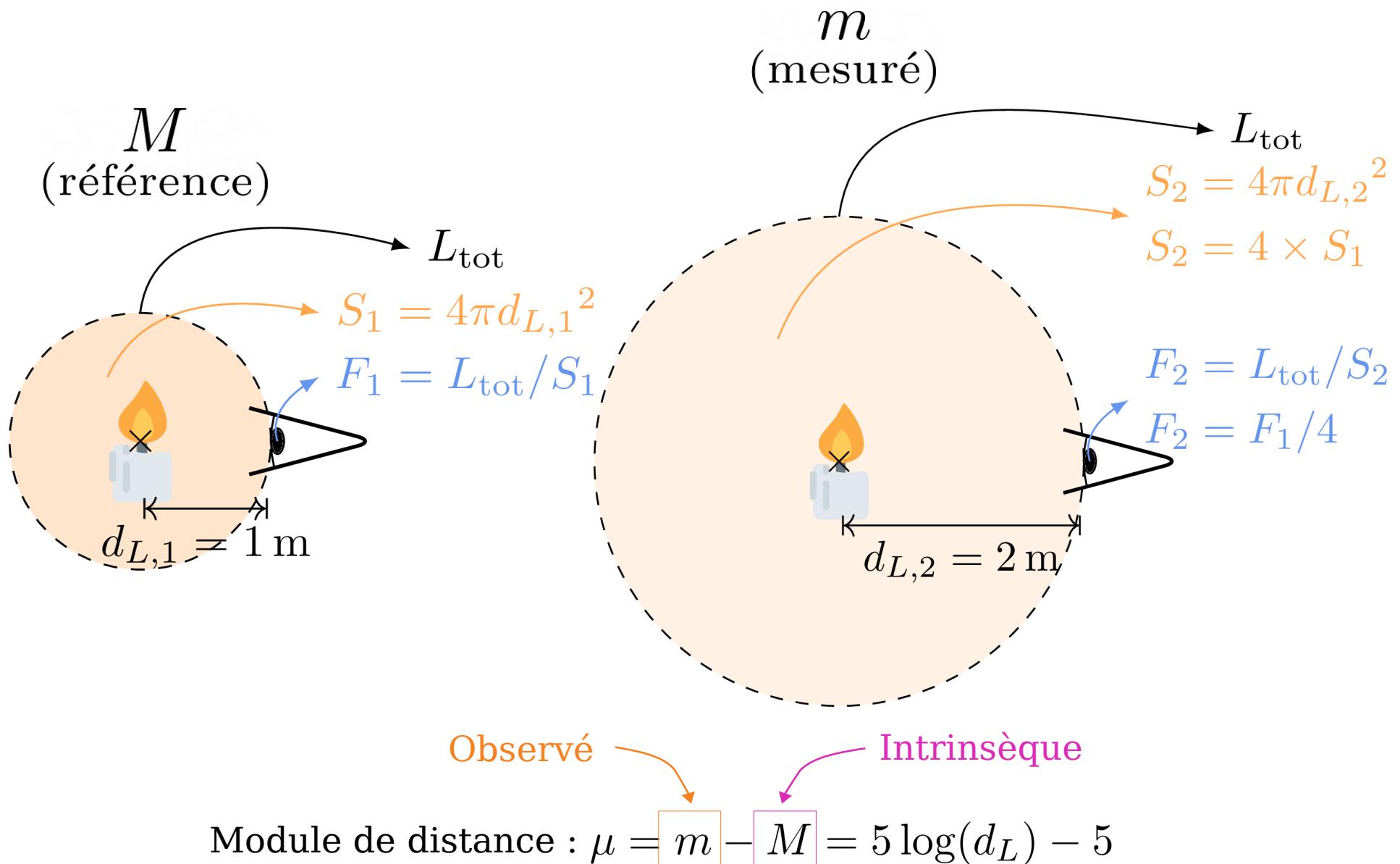
# Cosmologie observationnelle : mesure



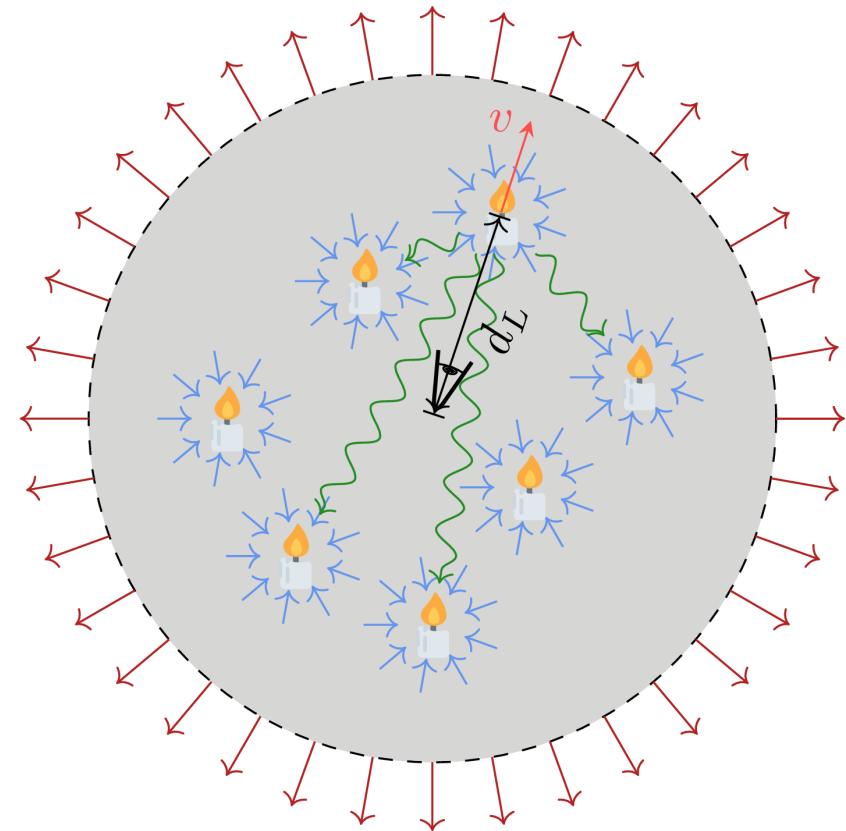
# Cosmologie observationnelle : mesure



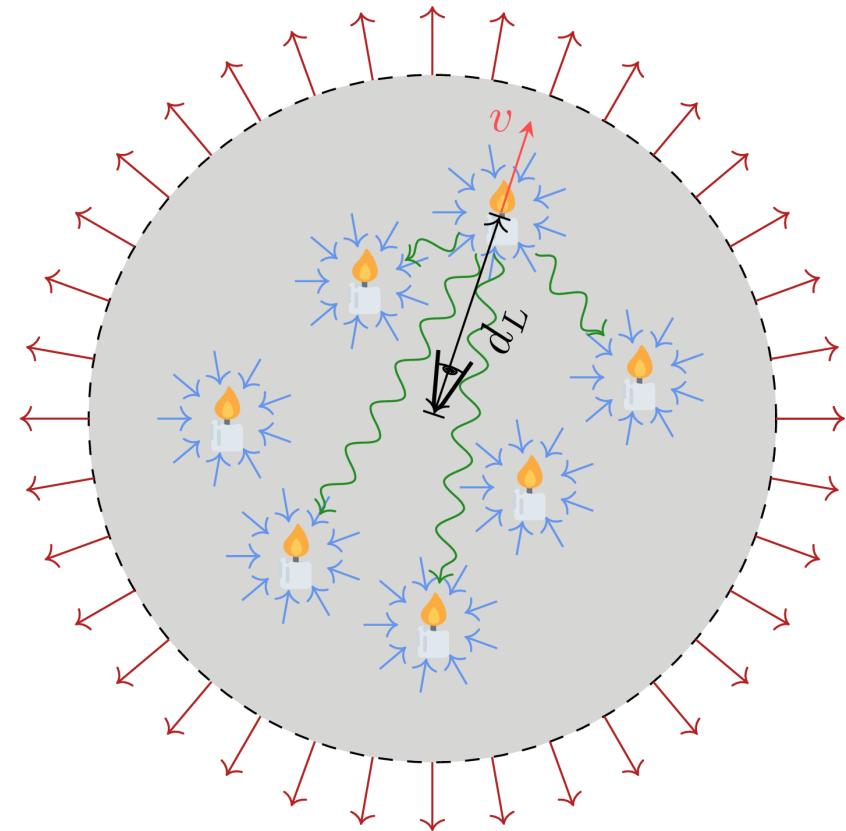
# Cosmologie observationnelle : mesure



# Cosmologie observationnelle : théorie



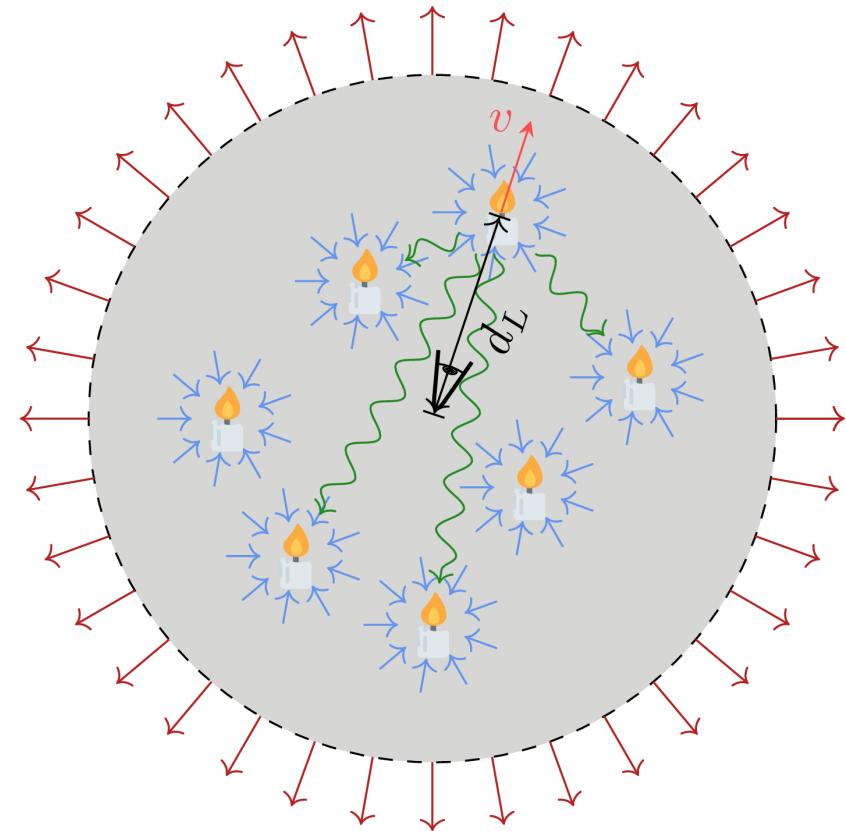
# Cosmologie observationnelle : théorie



Paramètres cosmologiques :

$$\sum_i \Omega_i = 1 \quad \begin{cases} H_0 : \text{taux d'expansion} & \longrightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow \\ \Omega_r : \text{densité du rayonnement} & \longrightarrow \text{Faible contribution} \\ \Omega_m : \text{densité de la matière} & \longrightarrow \text{Contracte l'espace} \\ \Omega_\Lambda : \text{densité de l'énergie sombre} & \longrightarrow \text{Dilate l'espace} \end{cases}$$

# Cosmologie observationnelle : théorie



Vitesse  
(redshift)

Distance :  $d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left( \int_0^z dz' [\Omega_R(1 + z')^4 + \Omega_M(1 + z')^3 + \Omega_\Lambda]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble      Radiation      Matière      Énergie sombre

Paramètres cosmologiques :

$$\sum_i \Omega_i = 1 \quad \begin{cases} H_0 : \text{taux d'expansion} & \rightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow \\ \Omega_r : \text{densité du rayonnement} & \rightarrow \text{Faible contribution} \\ \Omega_m : \text{densité de la matière} & \rightarrow \text{Contracte l'espace} \\ \Omega_\Lambda : \text{densité de l'énergie sombre} & \rightarrow \text{Dilate l'espace} \end{cases}$$

# Cosmologie observationnelle : pratique

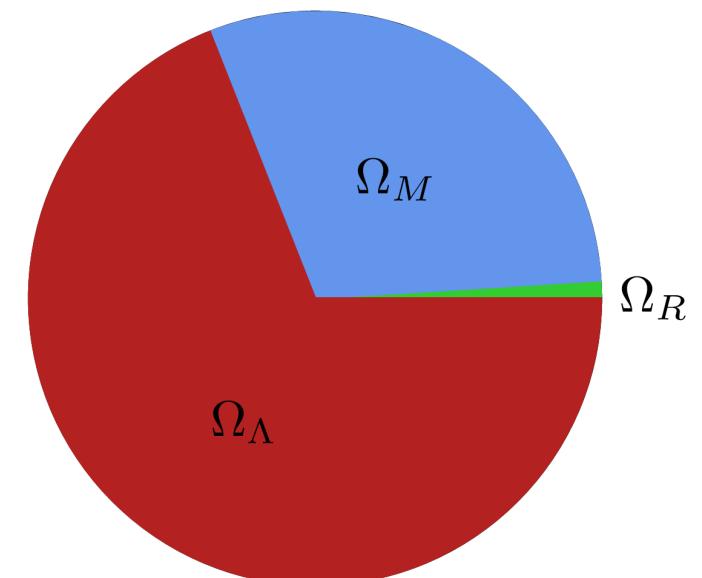
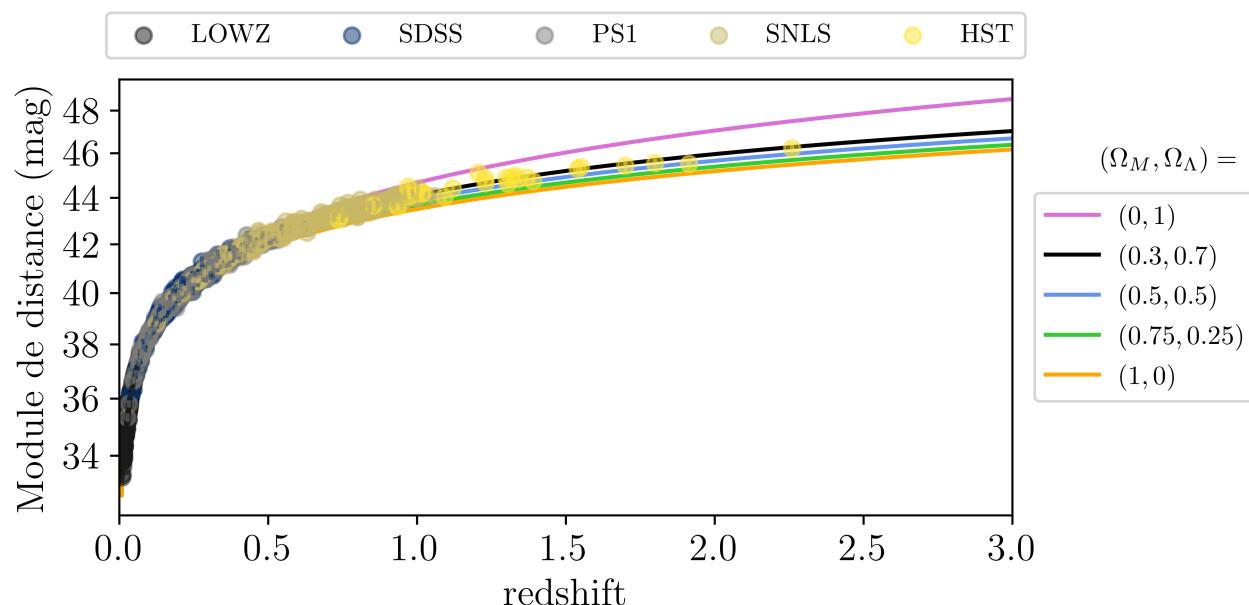
Observé      Intrinsèque

Module de distance :  $\mu = m - M = 5 \log(d_L) - 5$

Vitesse (redshift)

Distance :  $d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left( \int_0^z dz' [\Omega_R(1 + z')^4 + \Omega_M(1 + z')^3 + \Omega_\Lambda]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble      Radiation      Matière      Énergie sombre



# Cosmologie observationnelle : pratique

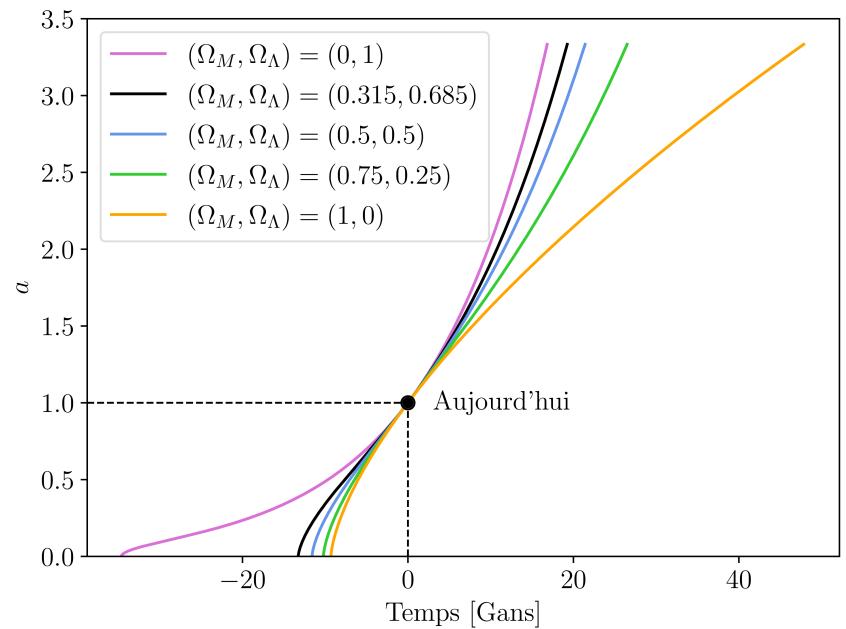
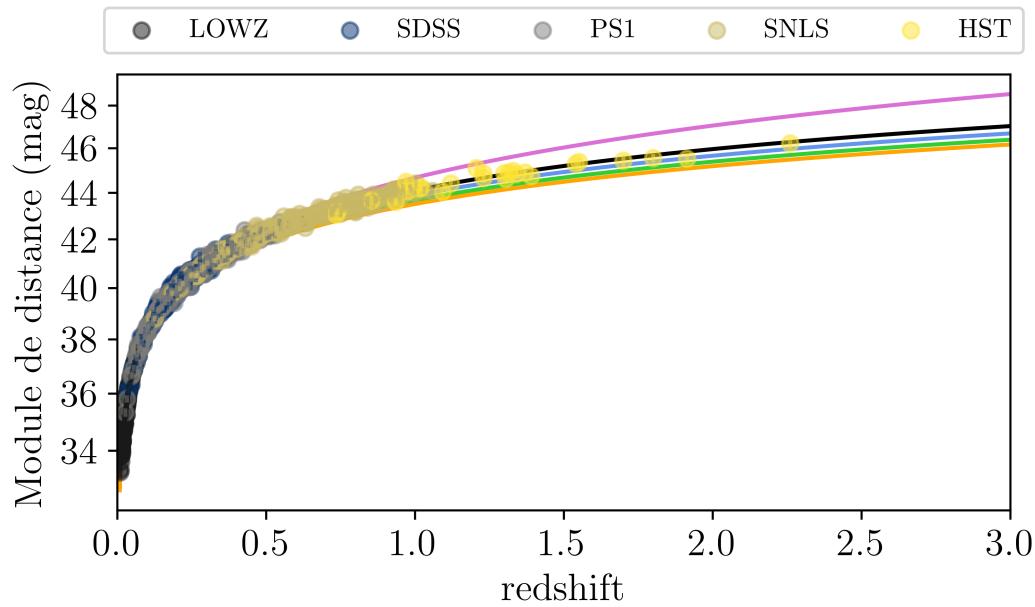
Observé      Intrinsèque

Module de distance :  $\mu = \boxed{m} - \boxed{M} = 5 \log(d_L) - 5$

Vitesse (redshift)

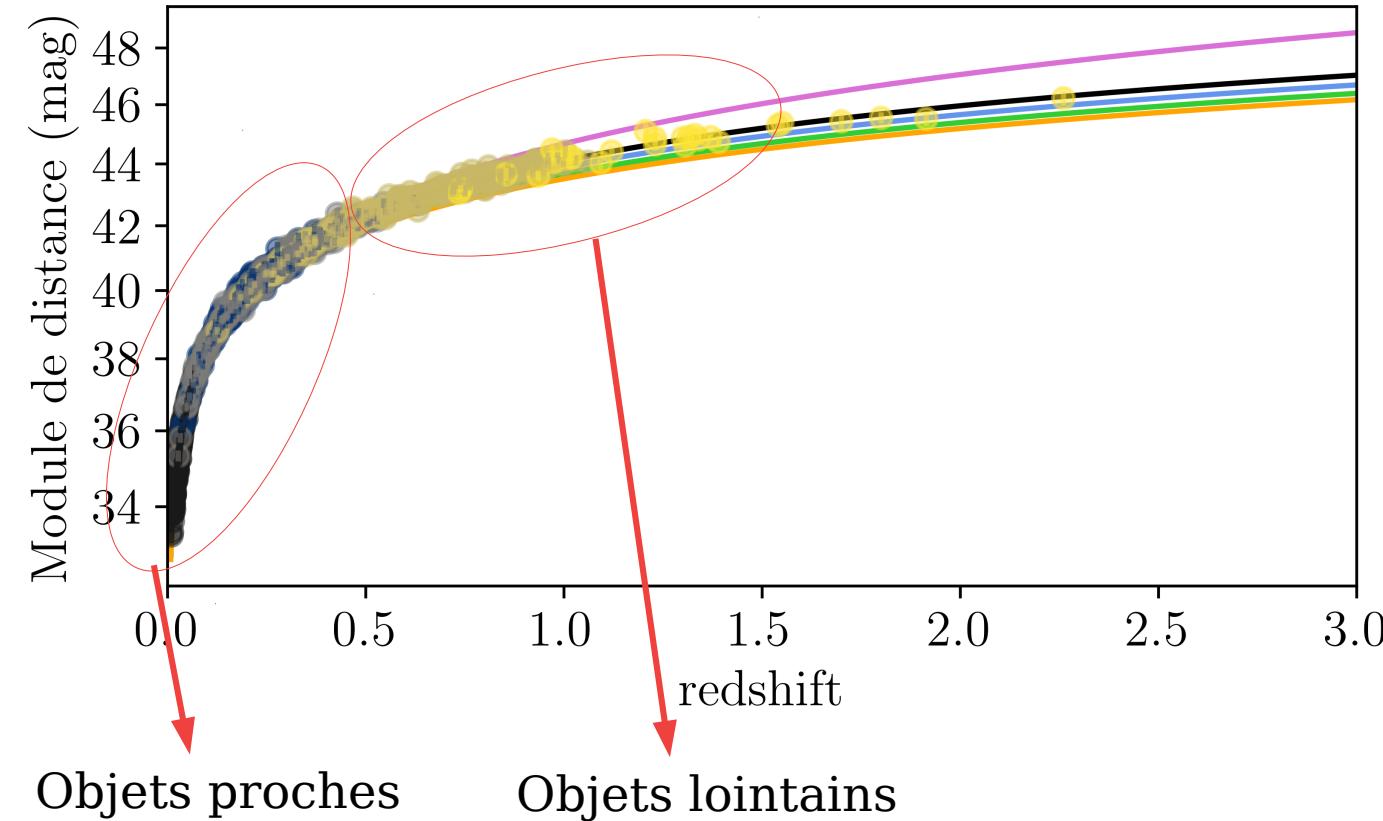
Distance :  $d_L = (1 + \boxed{z}) \times \frac{c}{\boxed{H_0}} \left( \int_0^z dz' \left[ \Omega_R (1 + z')^4 + \boxed{\Omega_M} (1 + z')^3 + \boxed{\Omega_\Lambda} \right]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble      Radiation      Matière      Énergie sombre



# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

● LOWZ   ● SDSS   ● PS1   ● SNLS   ● HST

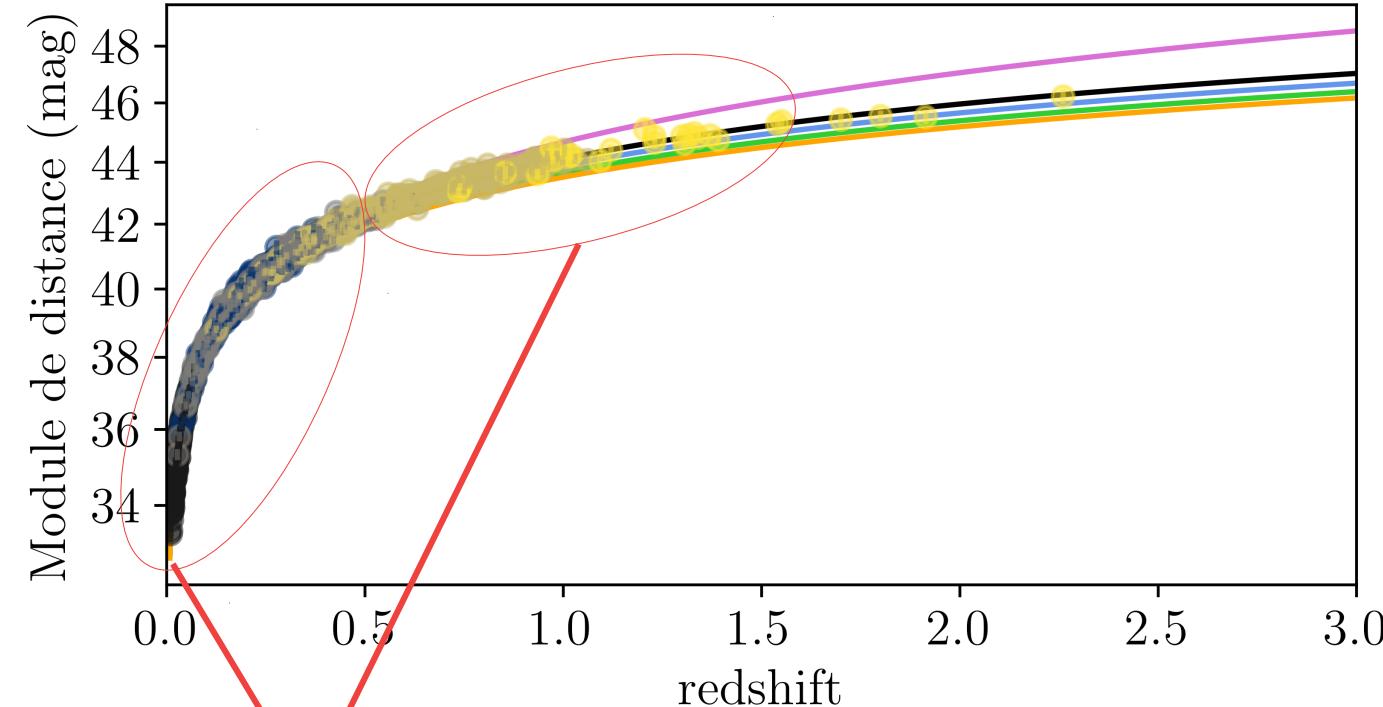


✓  $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$

$\underbrace{L_{\text{SN}}}_{15 \text{ jours}}$        $\underbrace{L_{\text{galaxie}}}_{5 \text{ Mans}}$

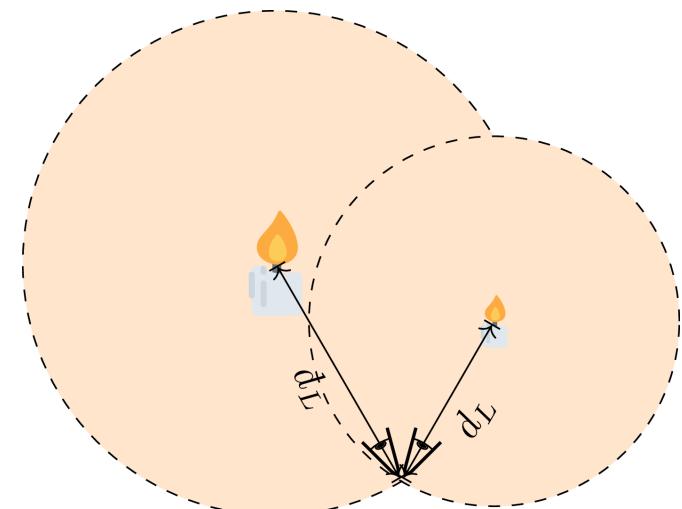
# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

● LOWZ ● SDSS ● PS1 ● SNLS ● HST



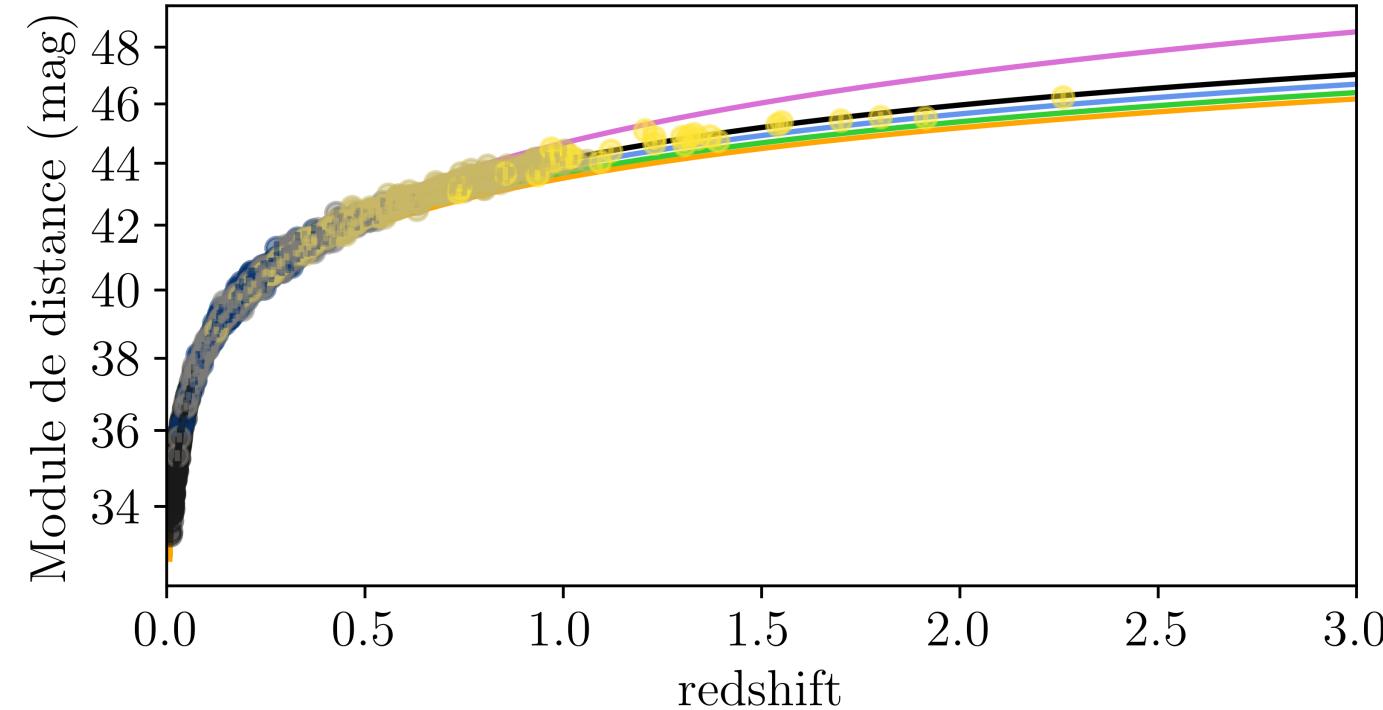
Même luminosité ?

- ✓  $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$   
15 jours                    5 Mans
- ✗  $L_{\text{astre}_1} \neq L_{\text{astre}_2}$



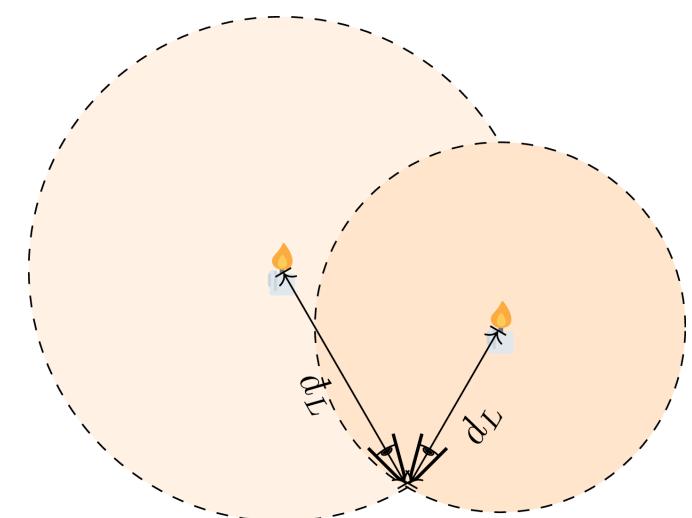
# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

● LOWZ   ● SDSS   ● PS1   ● SNLS   ● HST

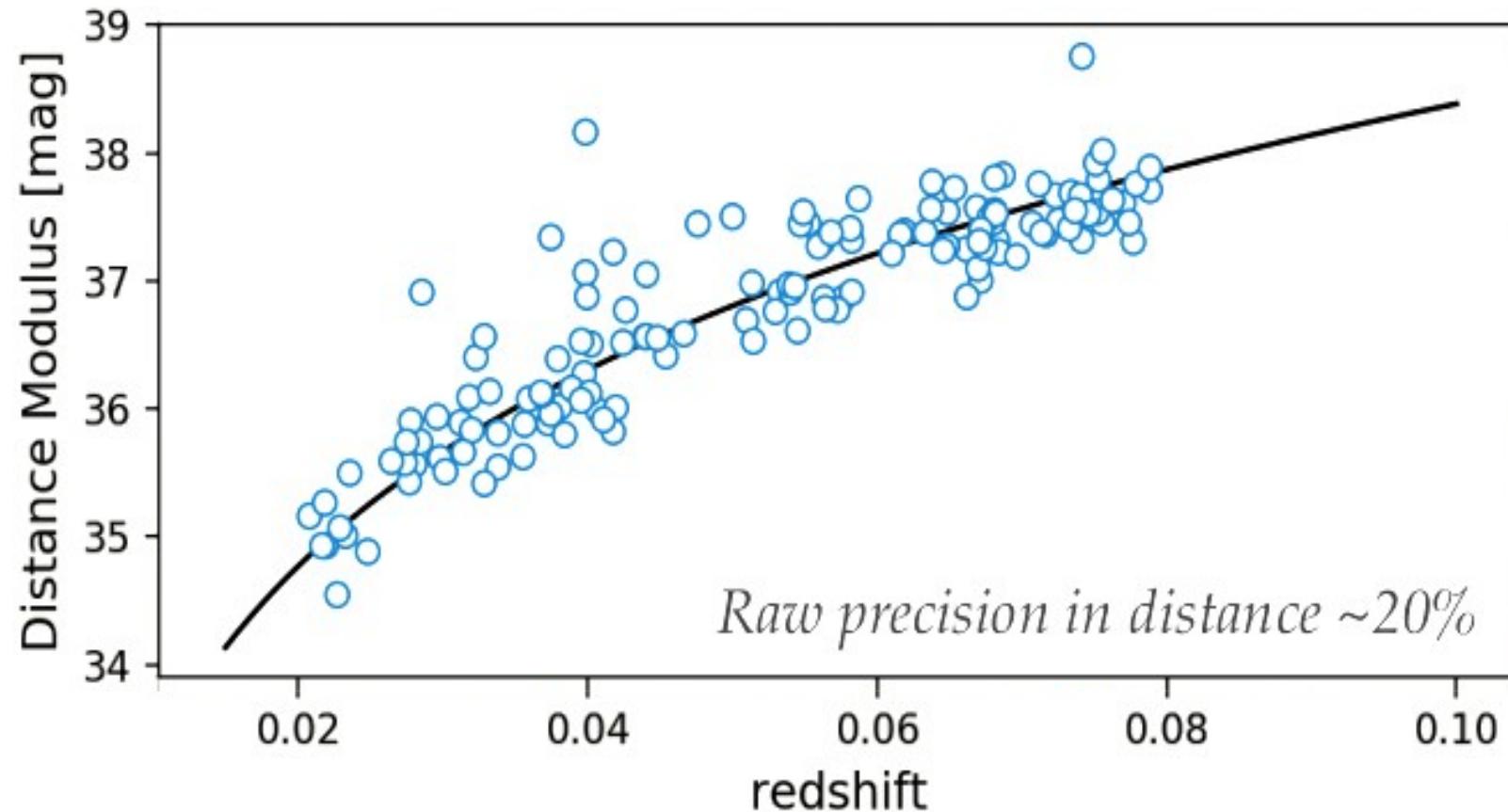


« Chandelles standard »

- ✓  $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$   
15 jours      5 Mans
- ✓  $L_{\text{SNe Ia}} \approx \text{const}$

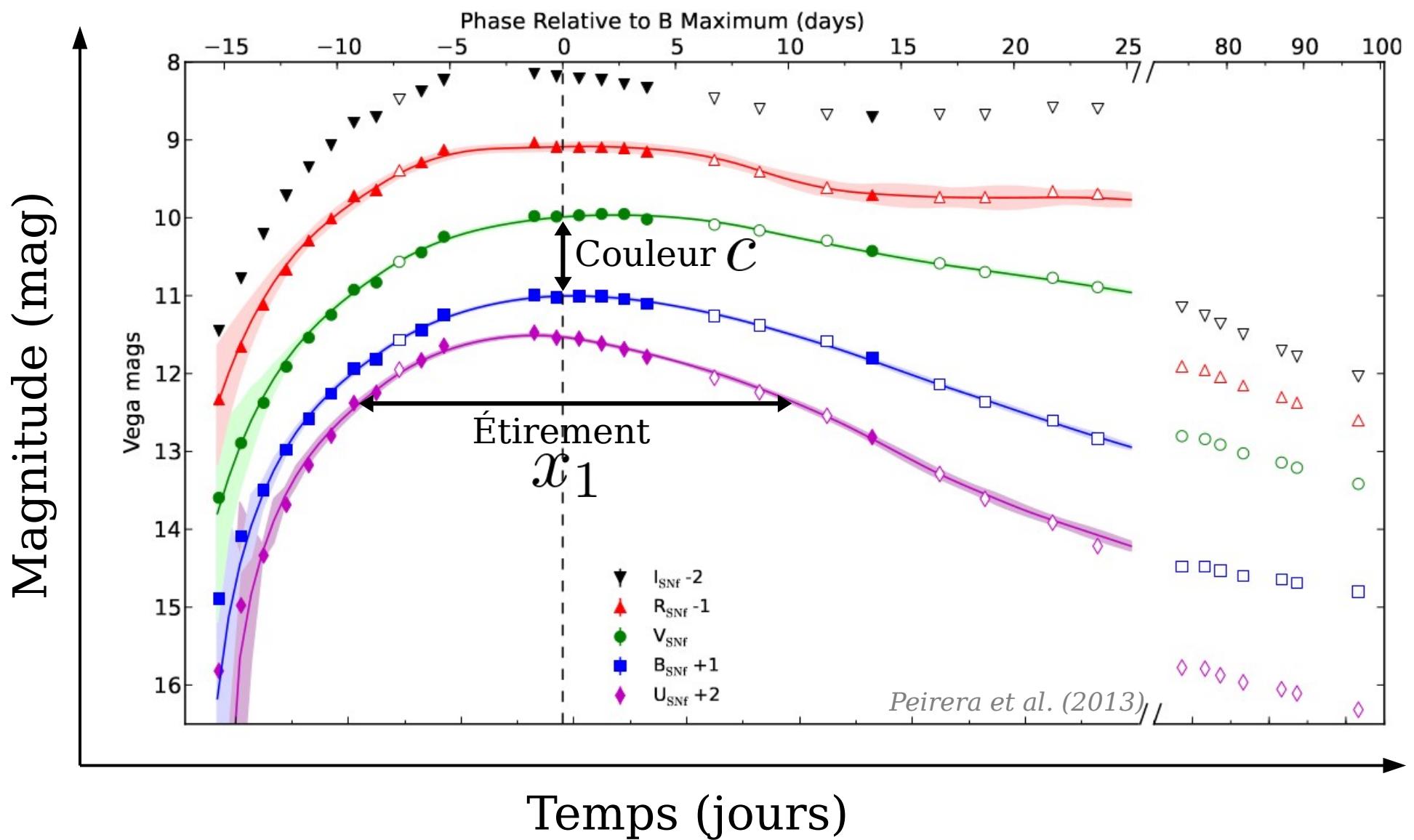


# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

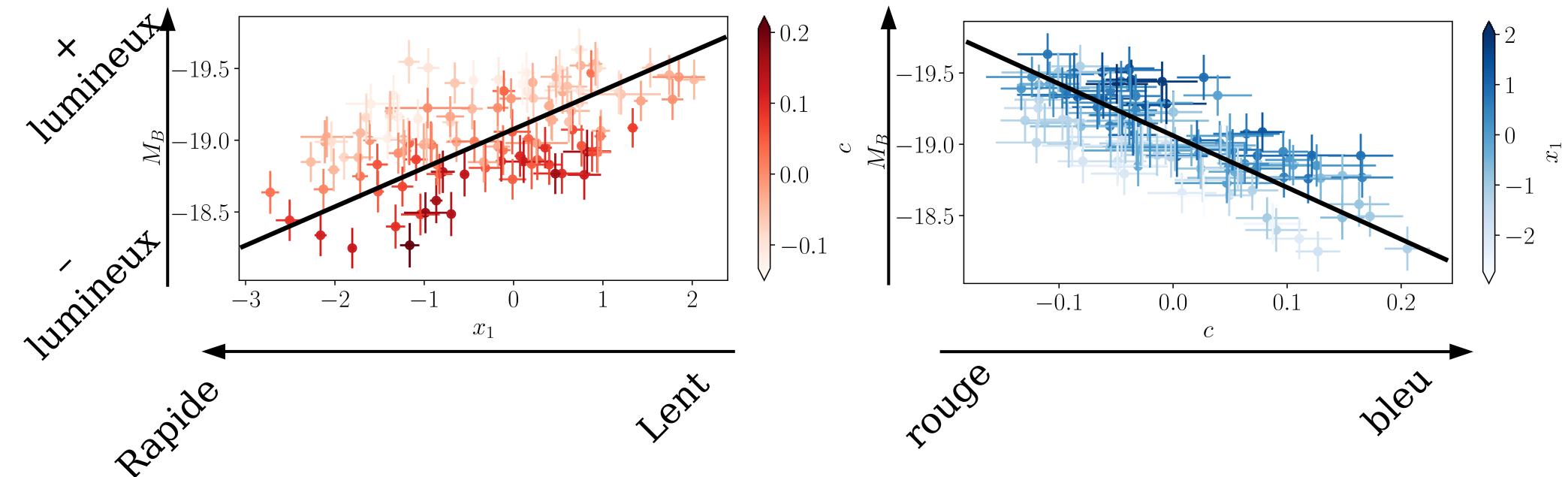


« Chandelles standardisables »

# Paramètres de courbe de lumière



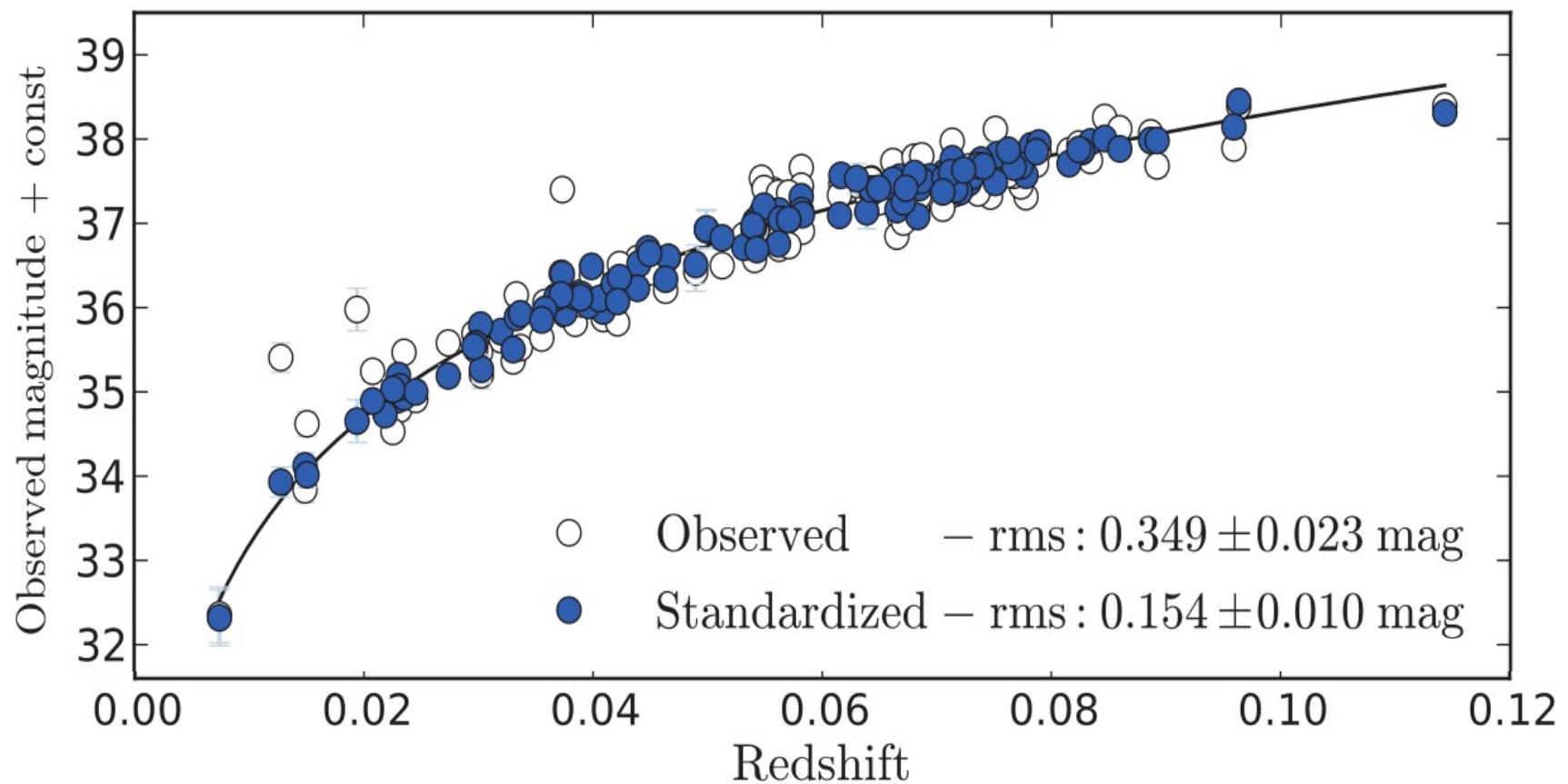
# Relation luminosité - largeur et couleur



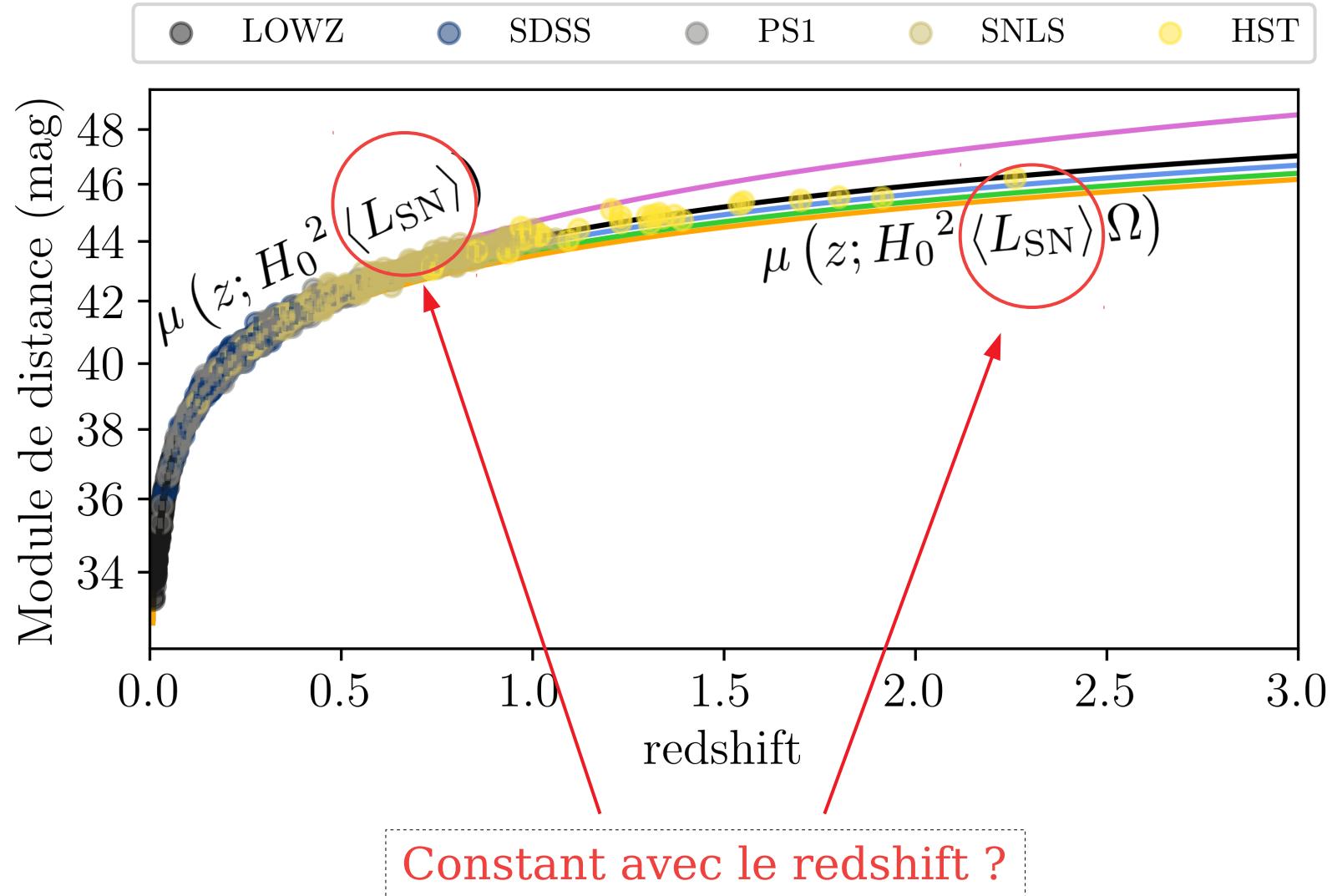
$$\text{Module de distance standardisé : } \mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c)$$

# Cosmologie observationnelle : SNe Ia

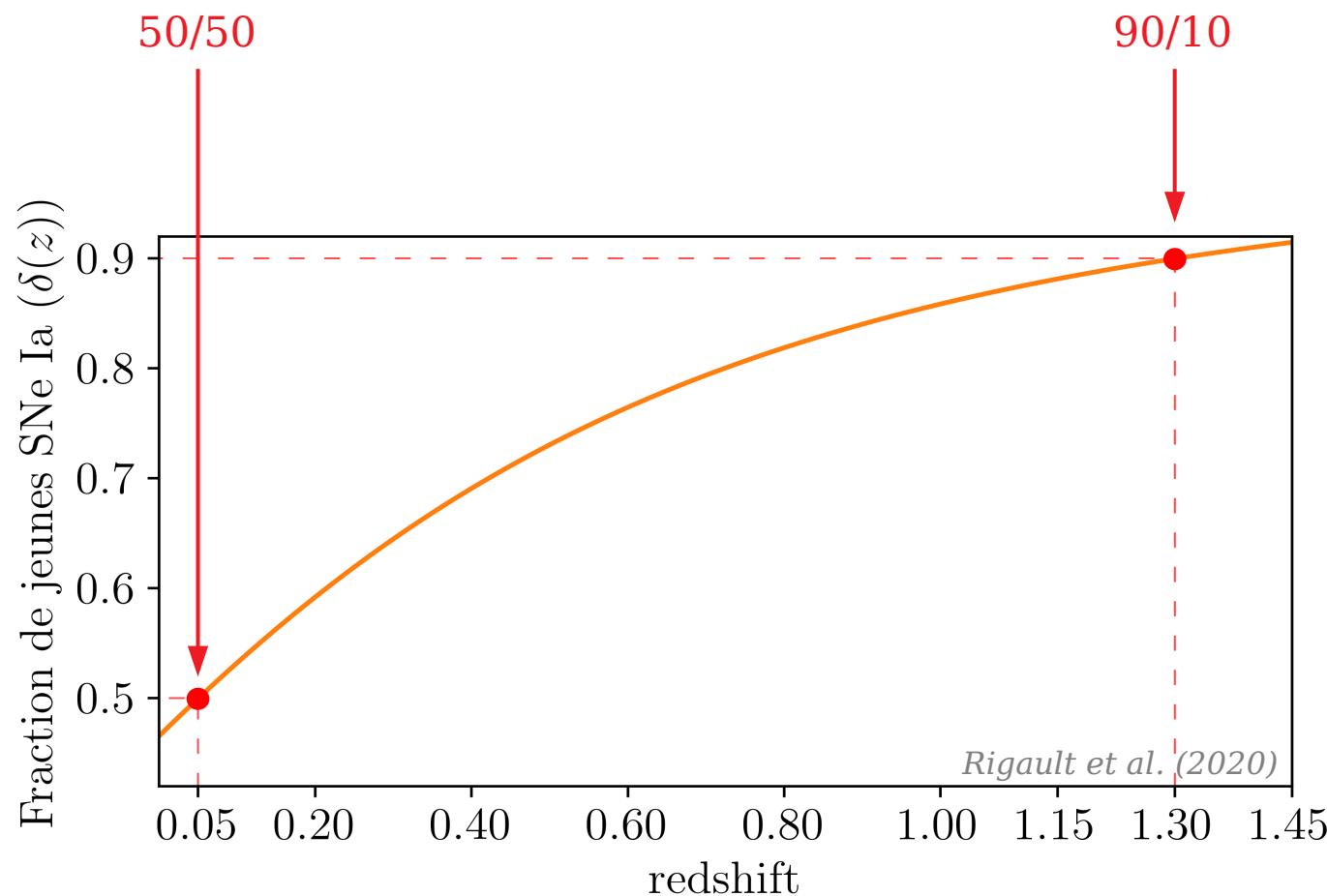
Module de distance *standardisé* :  $\mu = m_B - M + (\alpha x_1 - \beta c)$



# Erreurs systématiques - ancrage de l'étude

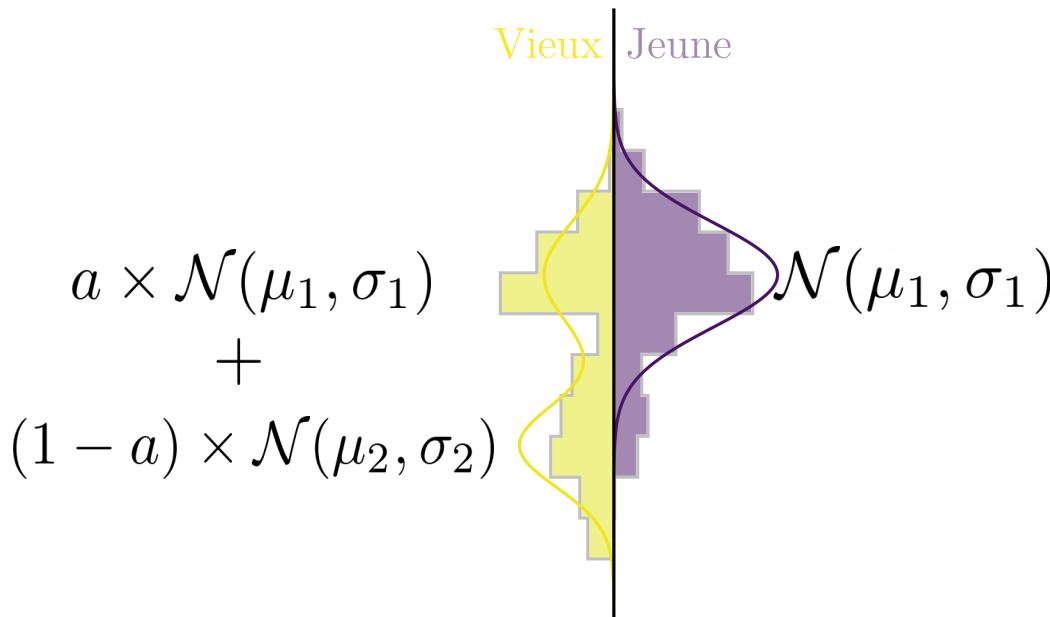
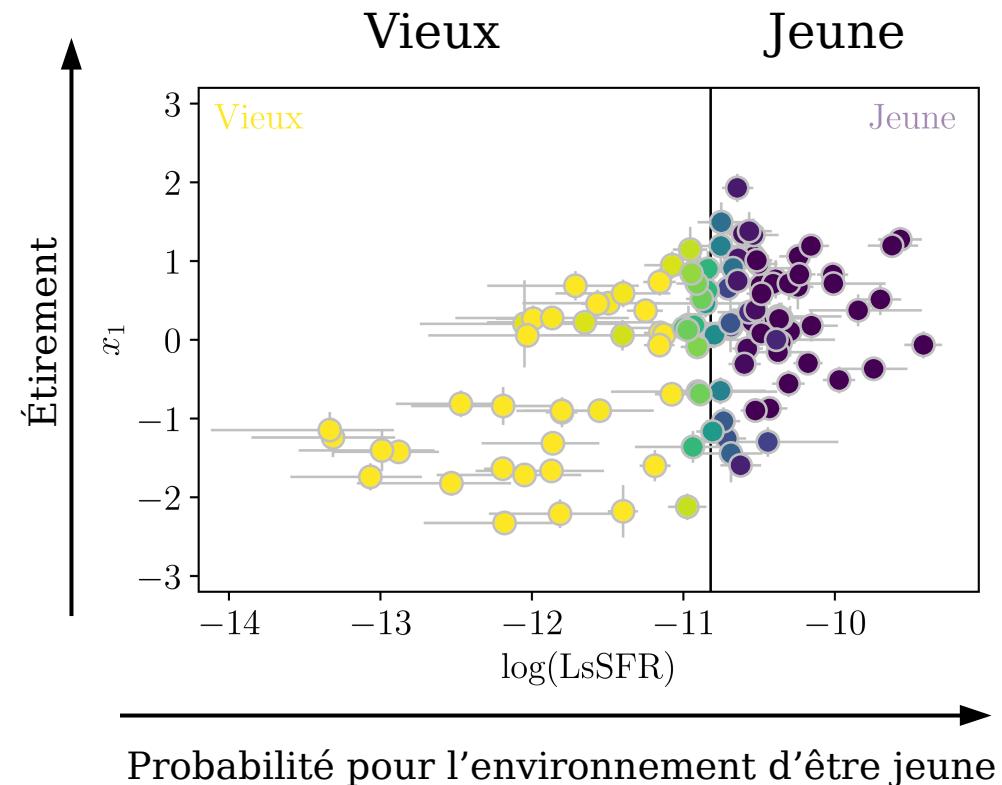


# Base de réflexion : Modèle d'évolution des jeunes étoiles



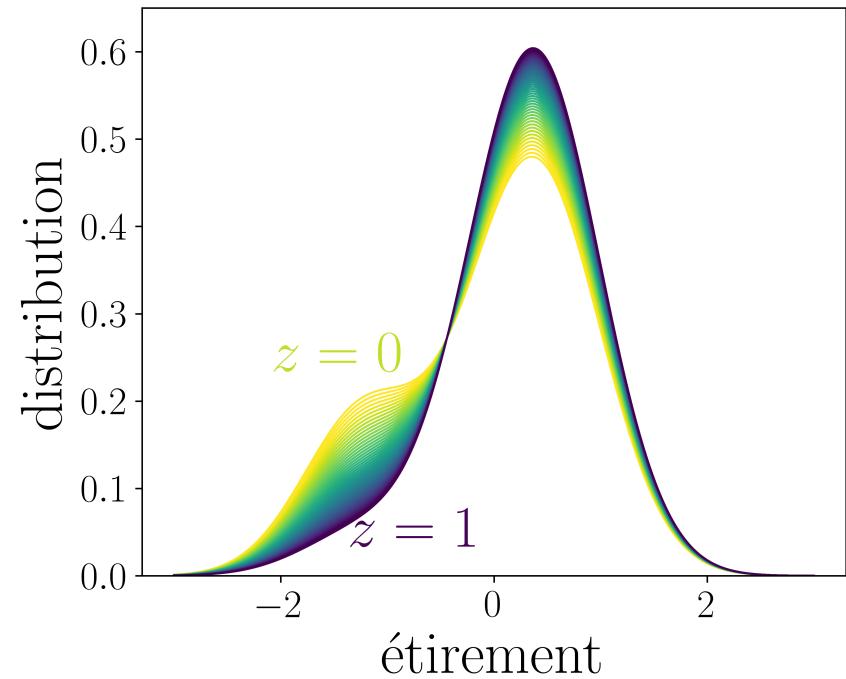
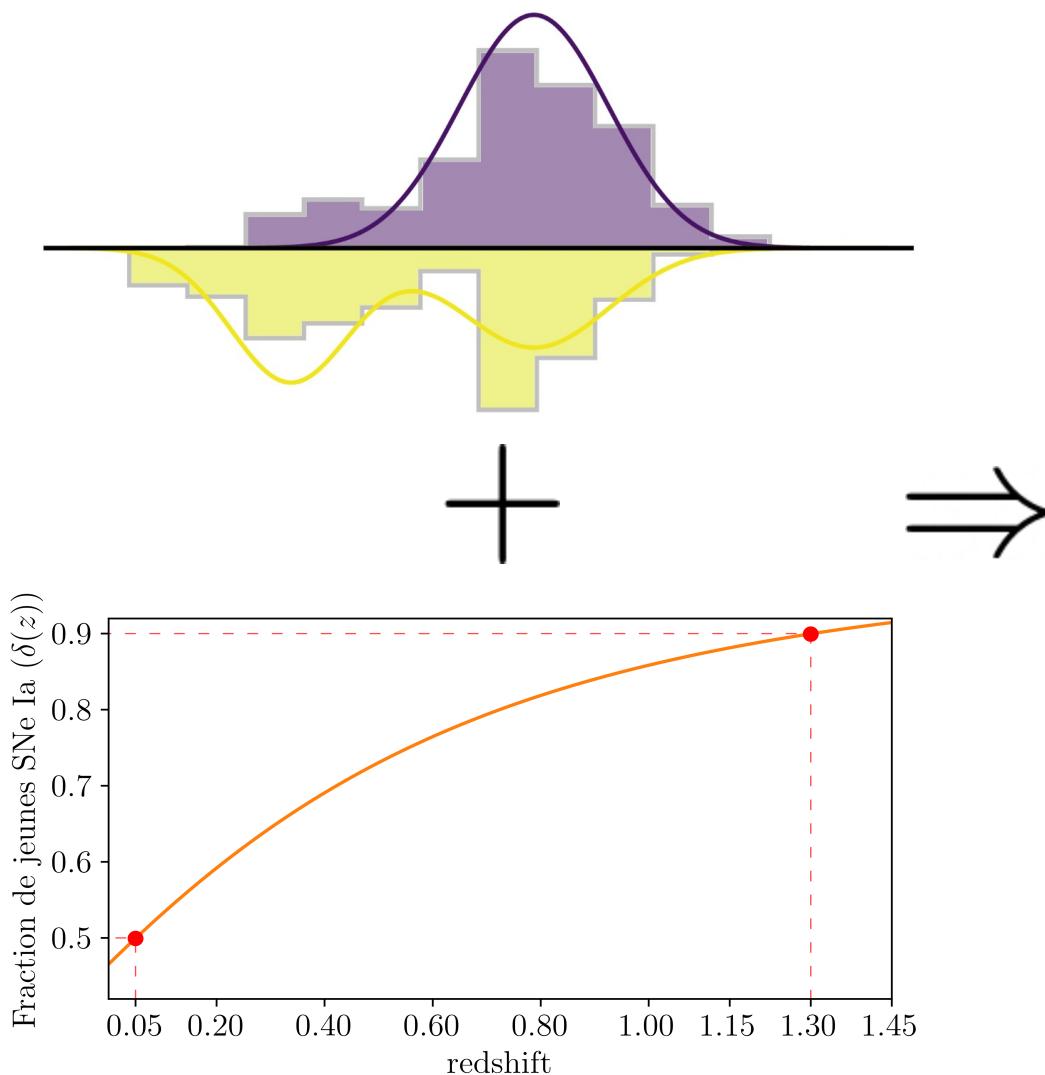
Environnement évolue avec le redshift

# Base de réflexion : Modèle d'évolution des jeunes étoiles



SNe Ia dépendent de l'environnement

# Base de réflexion : Modèle d'évolution des jeunes étoiles

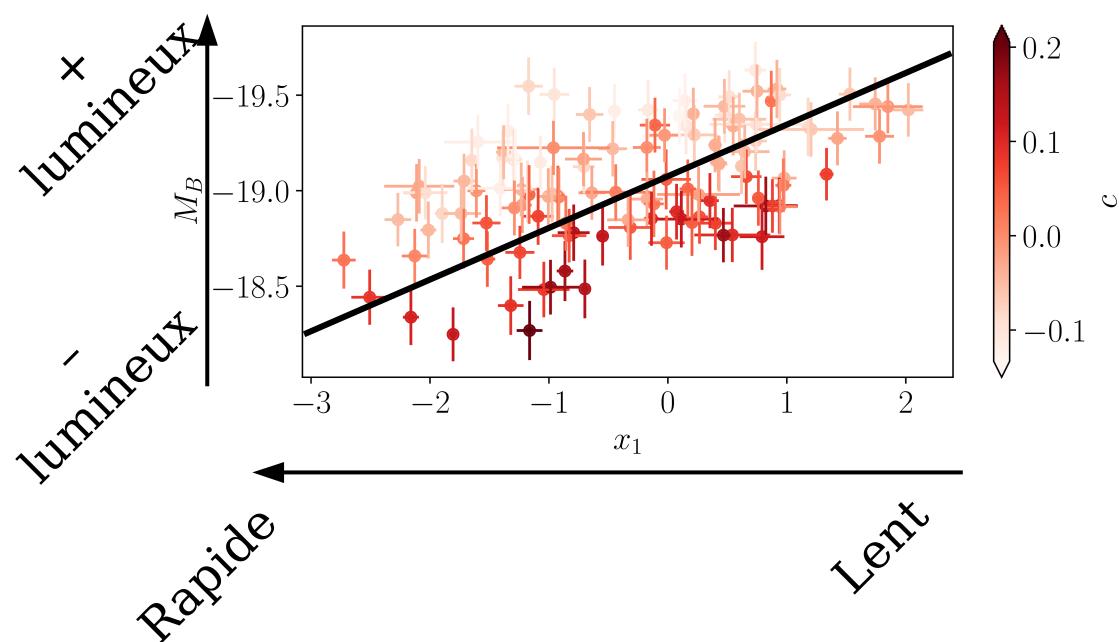
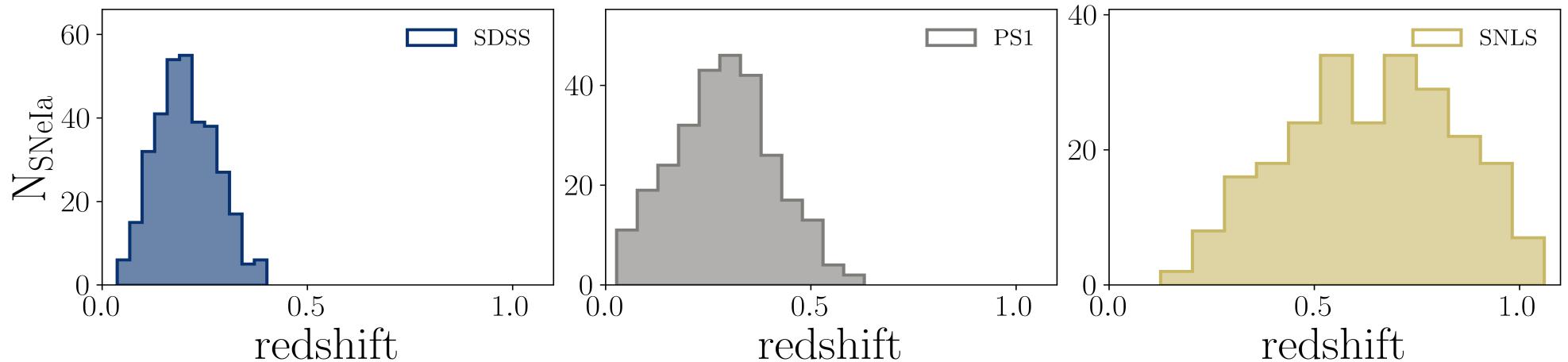


Étirement des SNe Ia  
évolue avec le redshift

# Échantillon complet

Exempt d'effets de sélection

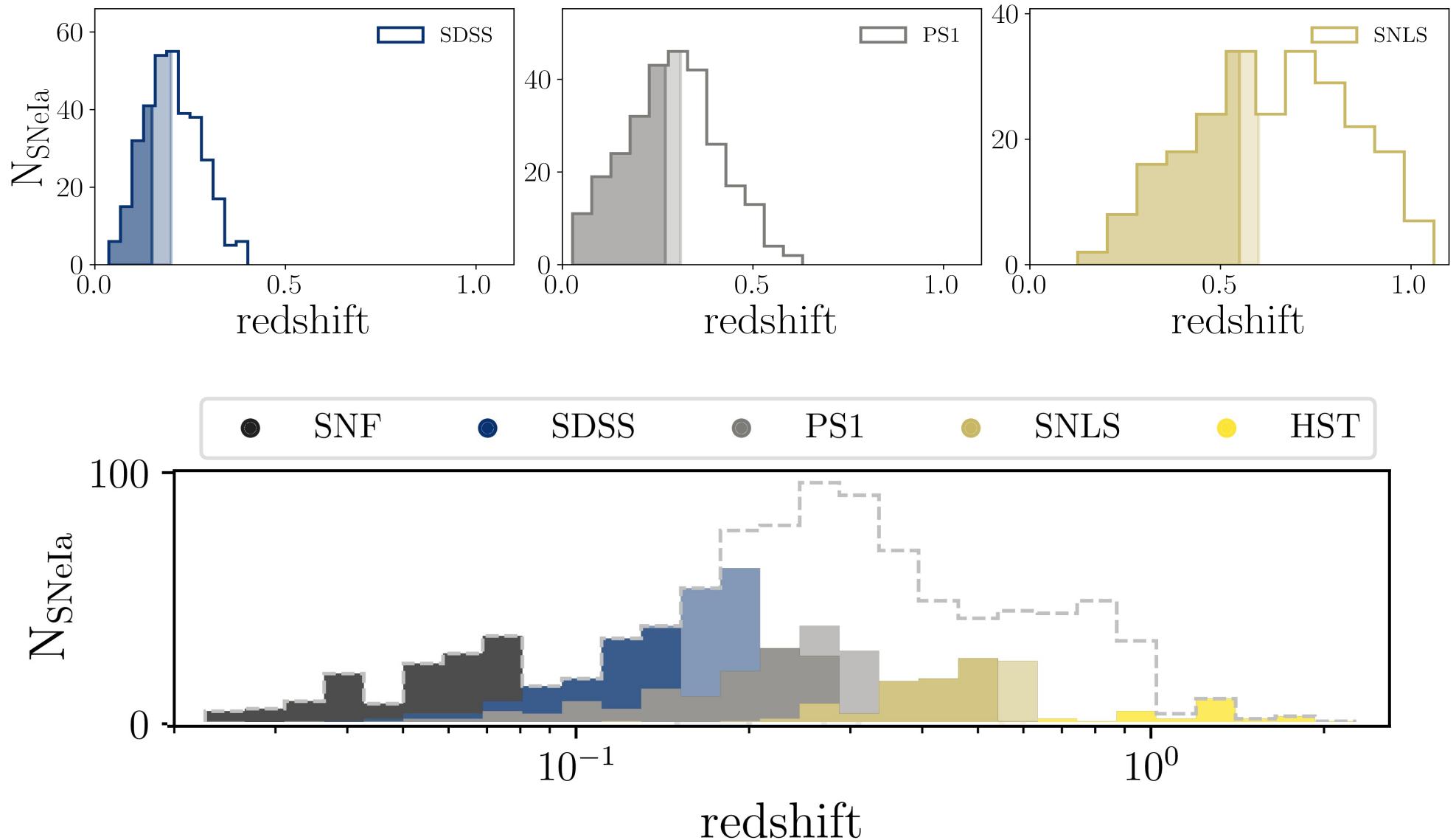
Nicolas et al. (2021)



# Échantillon complet

Exempt d'effets de sélection

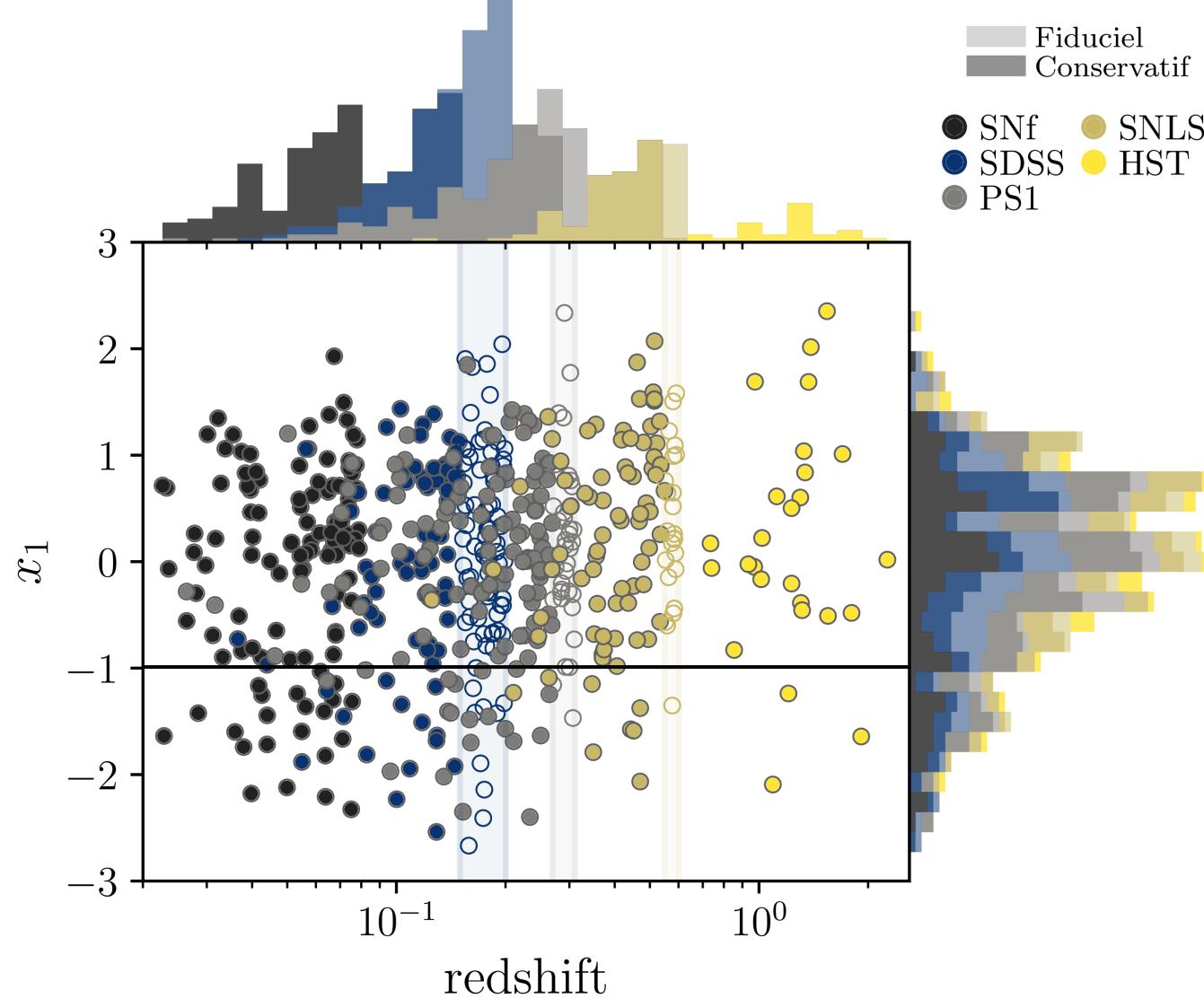
Nicolas et al. (2021)



# Échantillon complet

Exempt d'effets de sélection

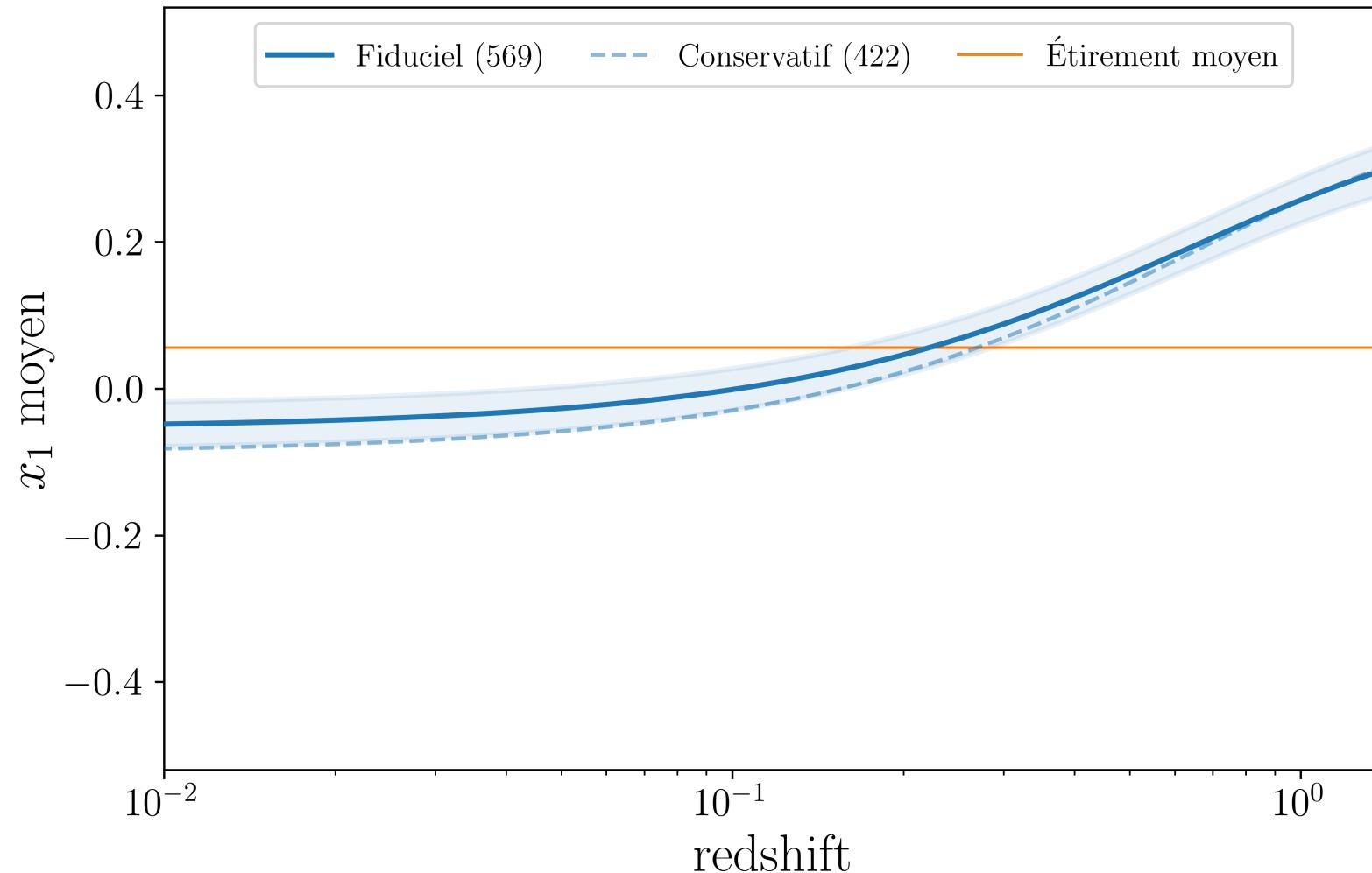
Nicolas et al. (2022)



# Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

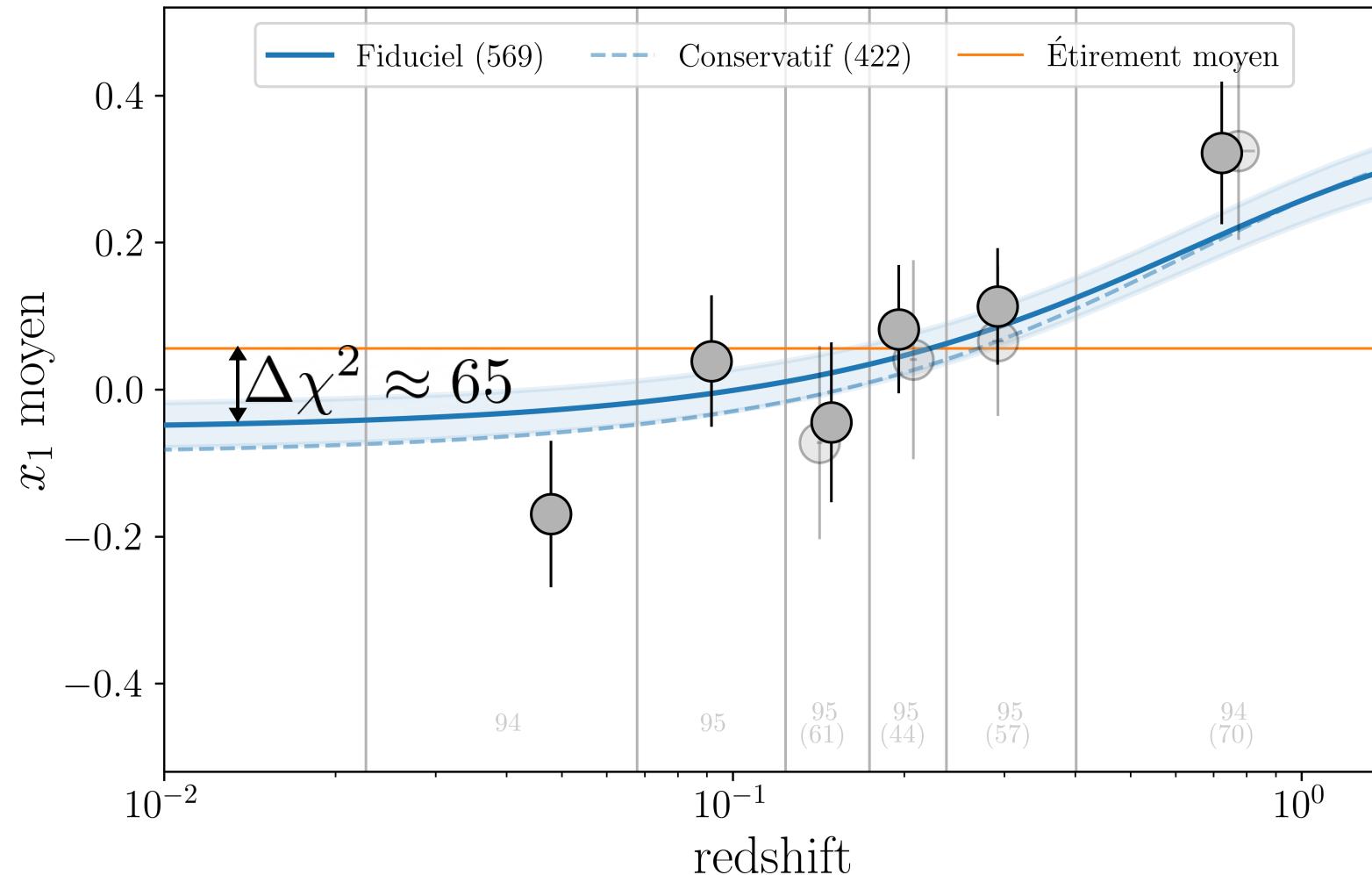
Nicolas et al. (2021)



# Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

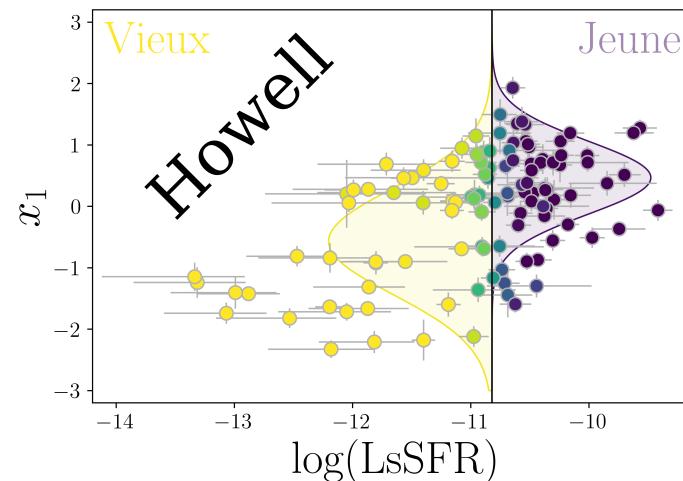
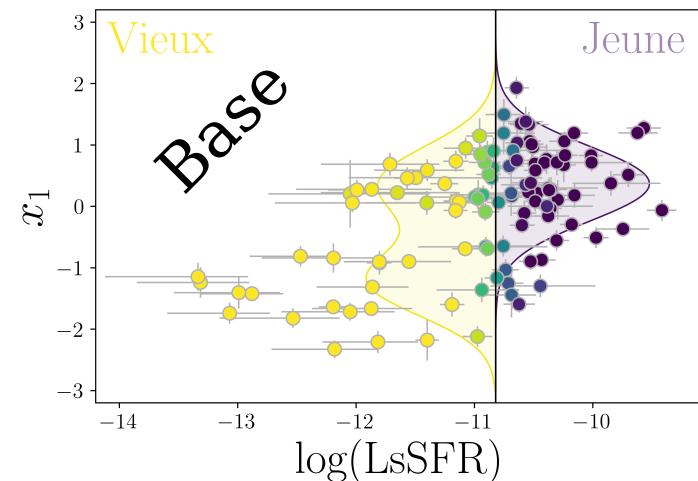
Nicolas et al. (2021)



# Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

Nicolas et al. (2021)

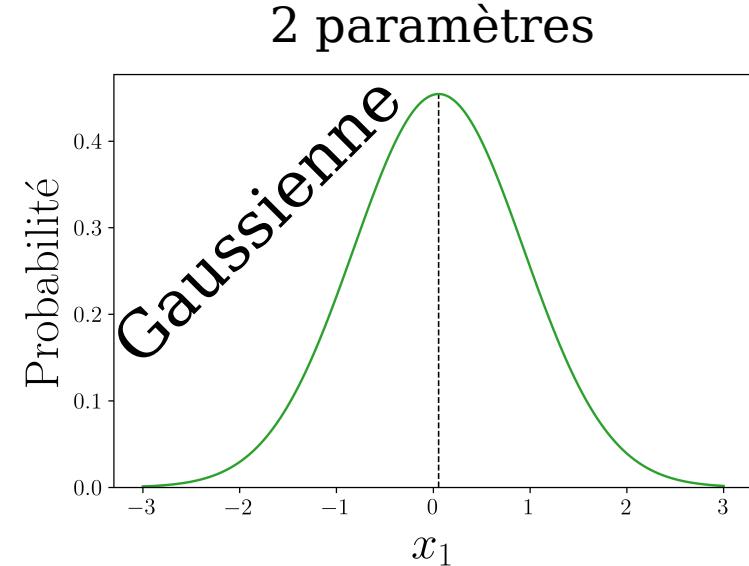
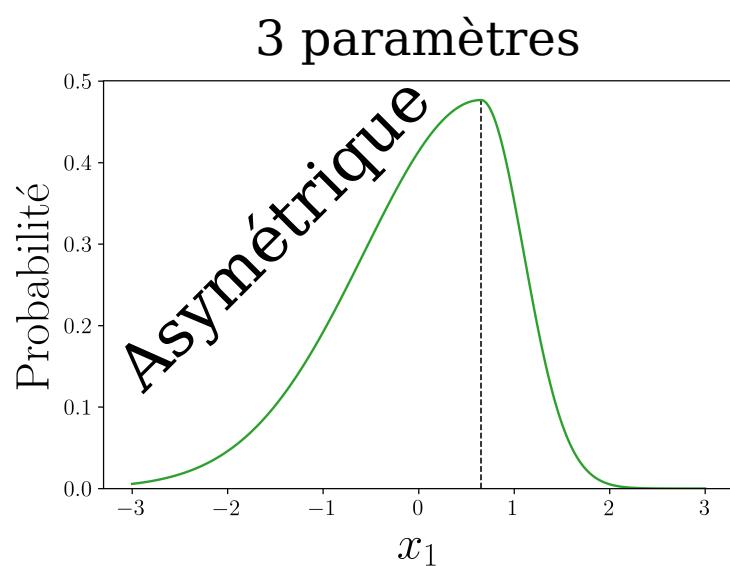


Dérive de l'âge

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

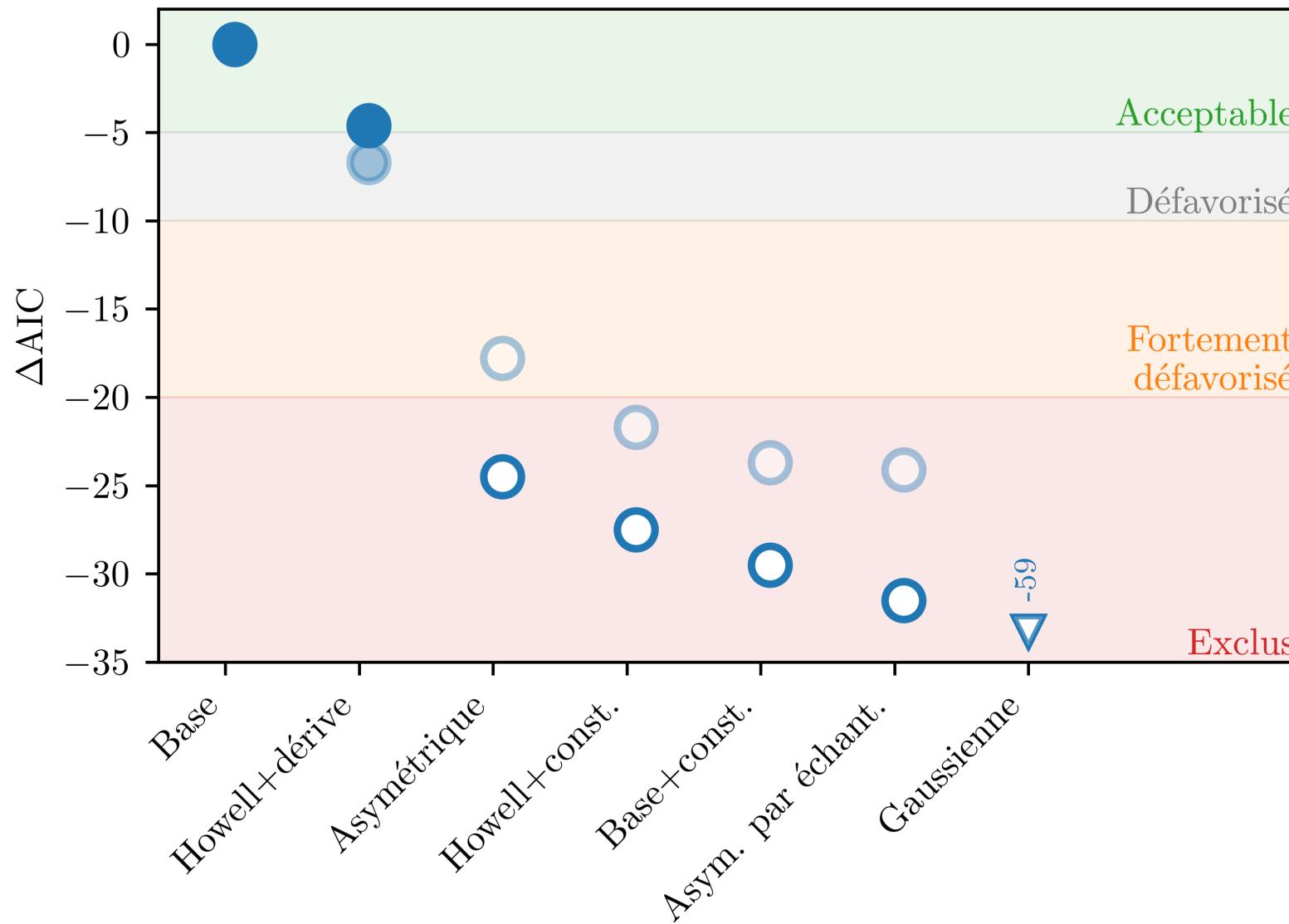
Ou sans dérive

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



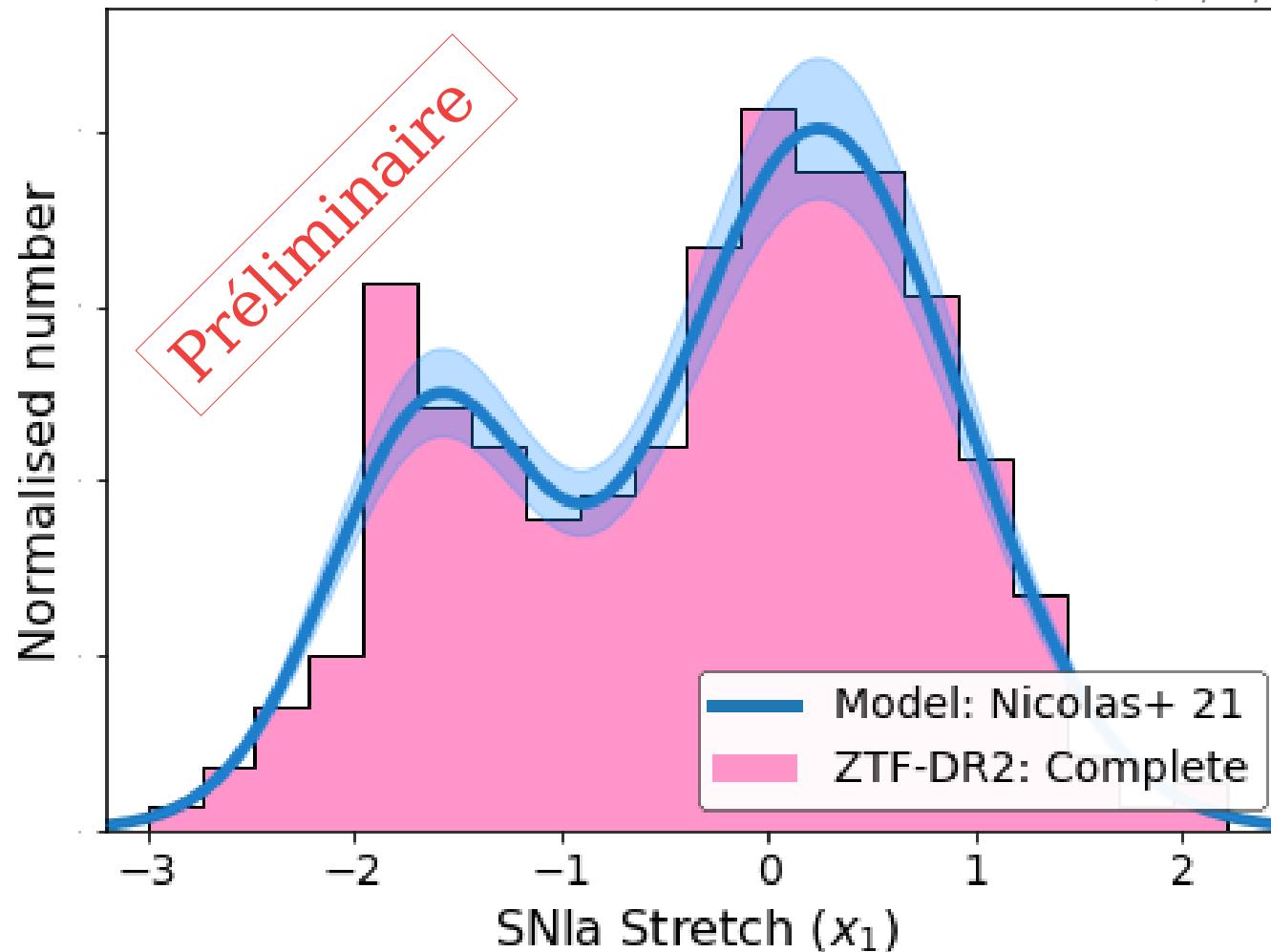
# Résultats de la comparaison

Nicolas et al. (2021)



# Force du modèle

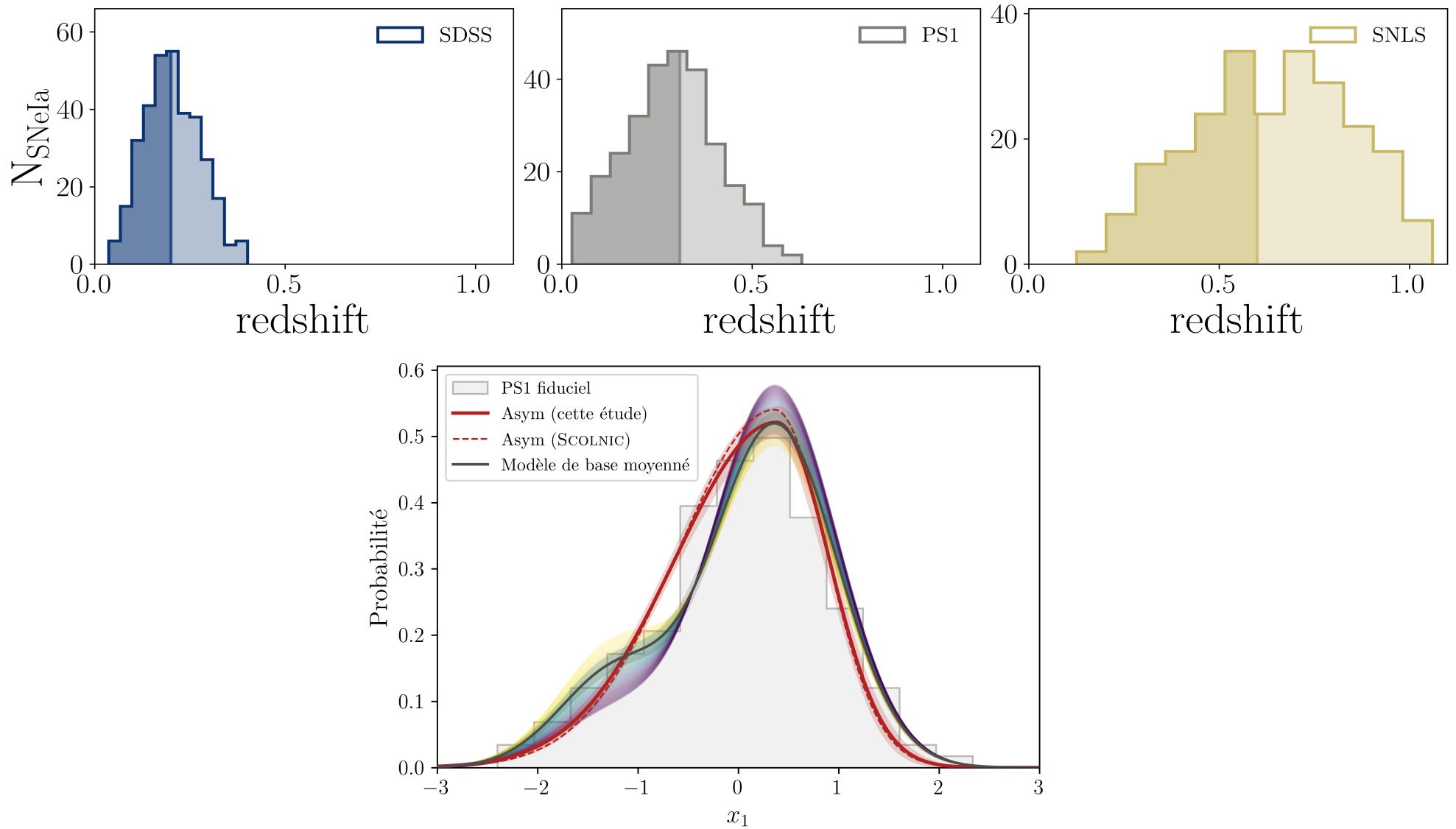
*Smith et al. (in prep)*



# Échantillon complet

Exempt d'effets de sélection

Nicolas et al. (2021)

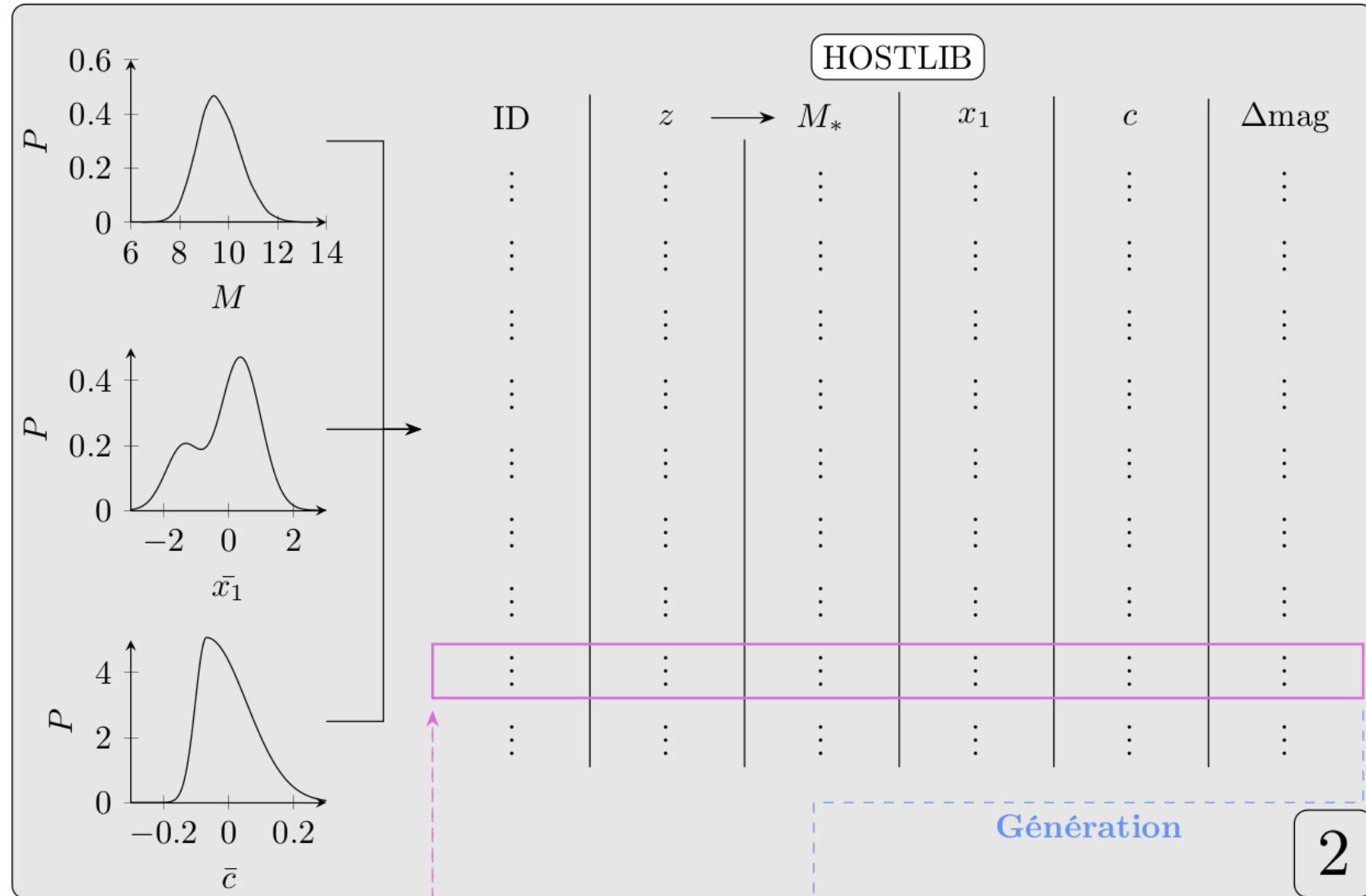


# Simulations avec SNANA

## Présentation

Nicolas et al. (in prep)

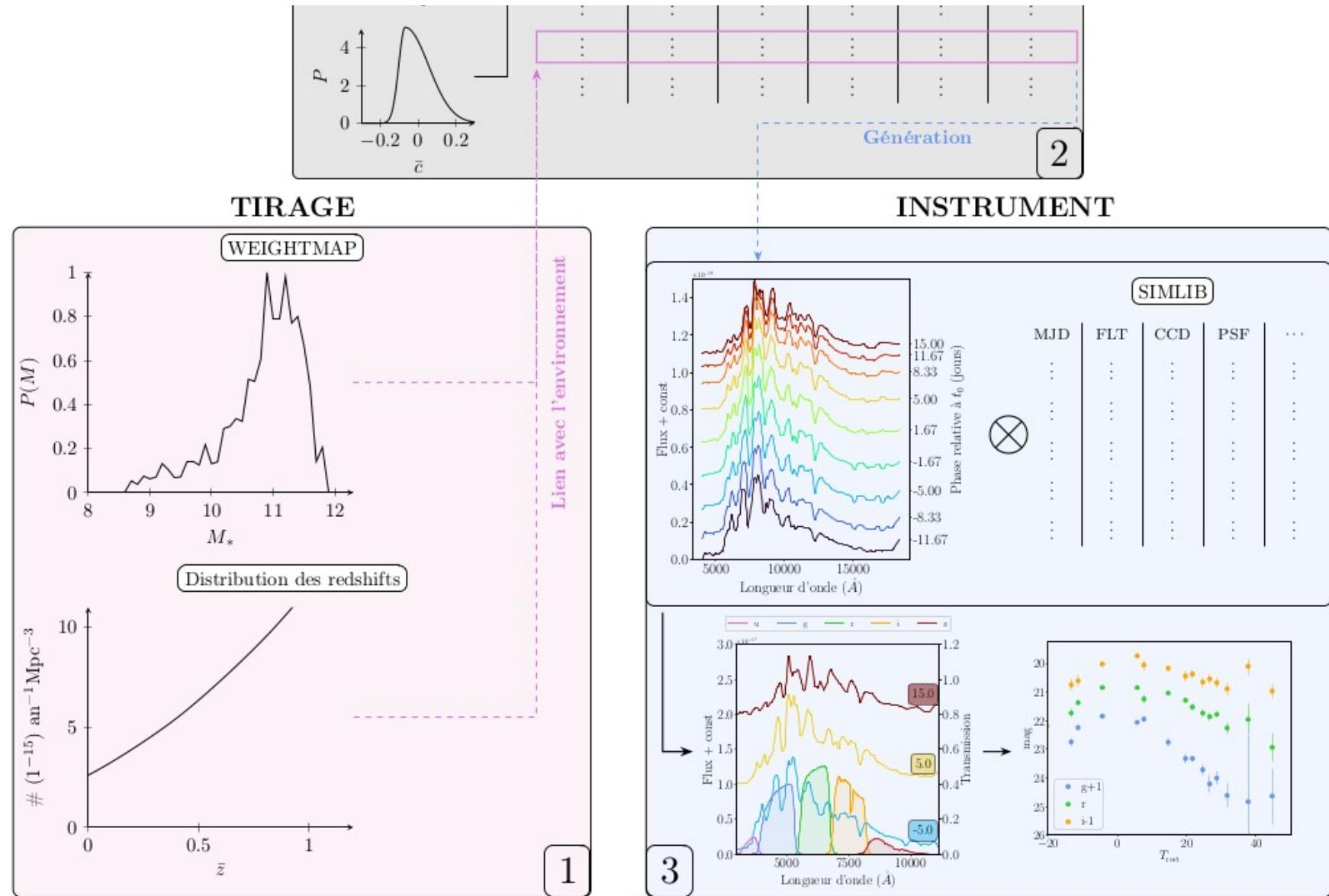
### CRÉATION HOSTLIB



# Simulations avec SNANA

## Présentation

Nicolas et al. (in prep)

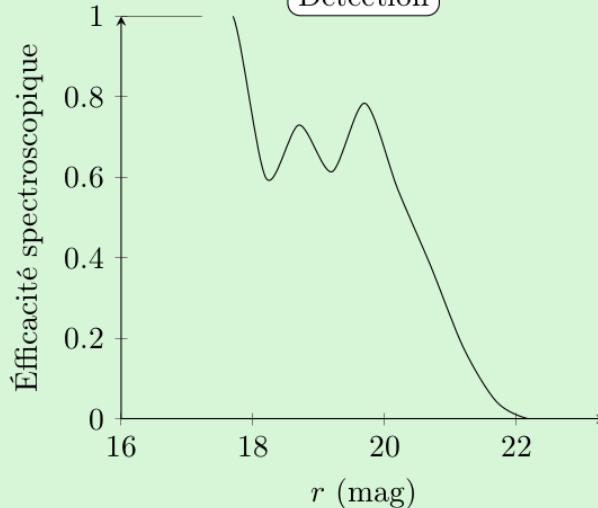


# Simulations avec SNANA

## Présentation

Nicolas et al. (in prep)

### SÉLECTION



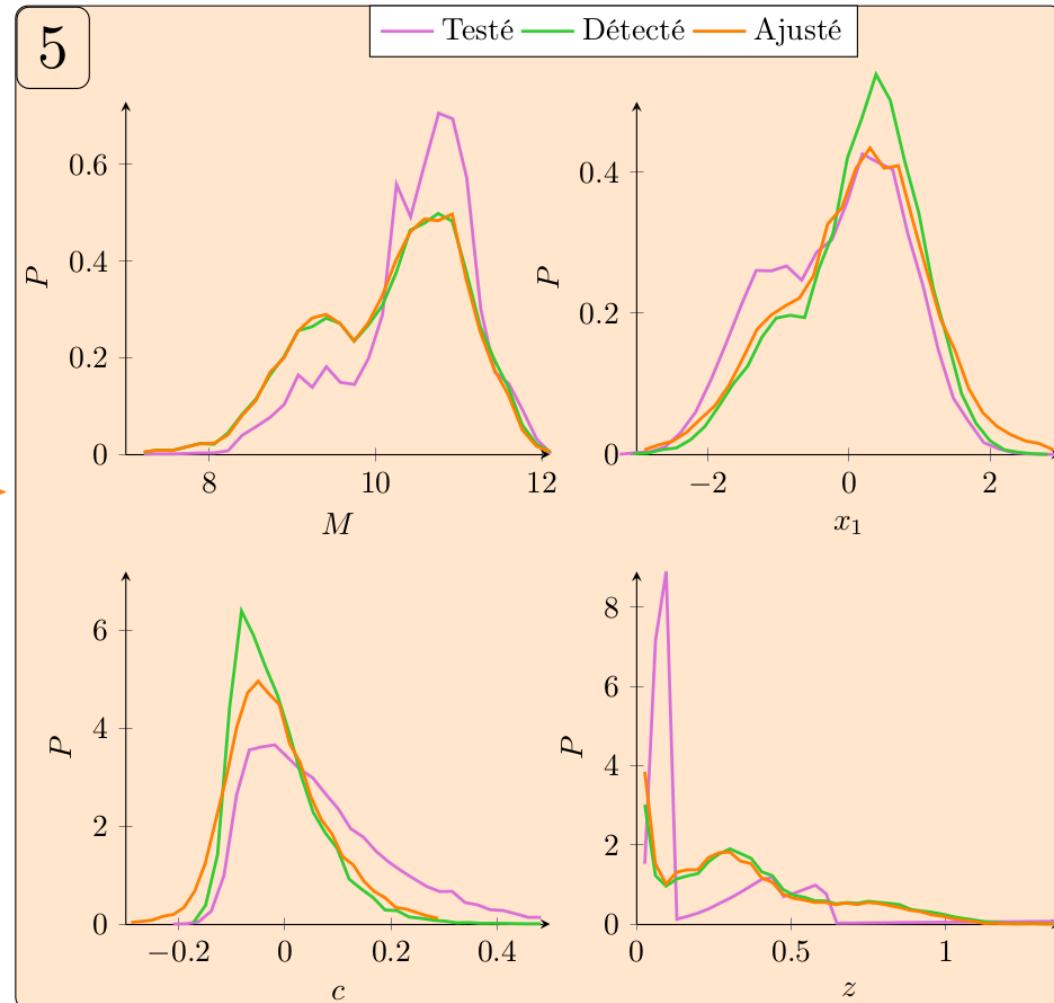
Coupes de qualité

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

4

Détection rejetée

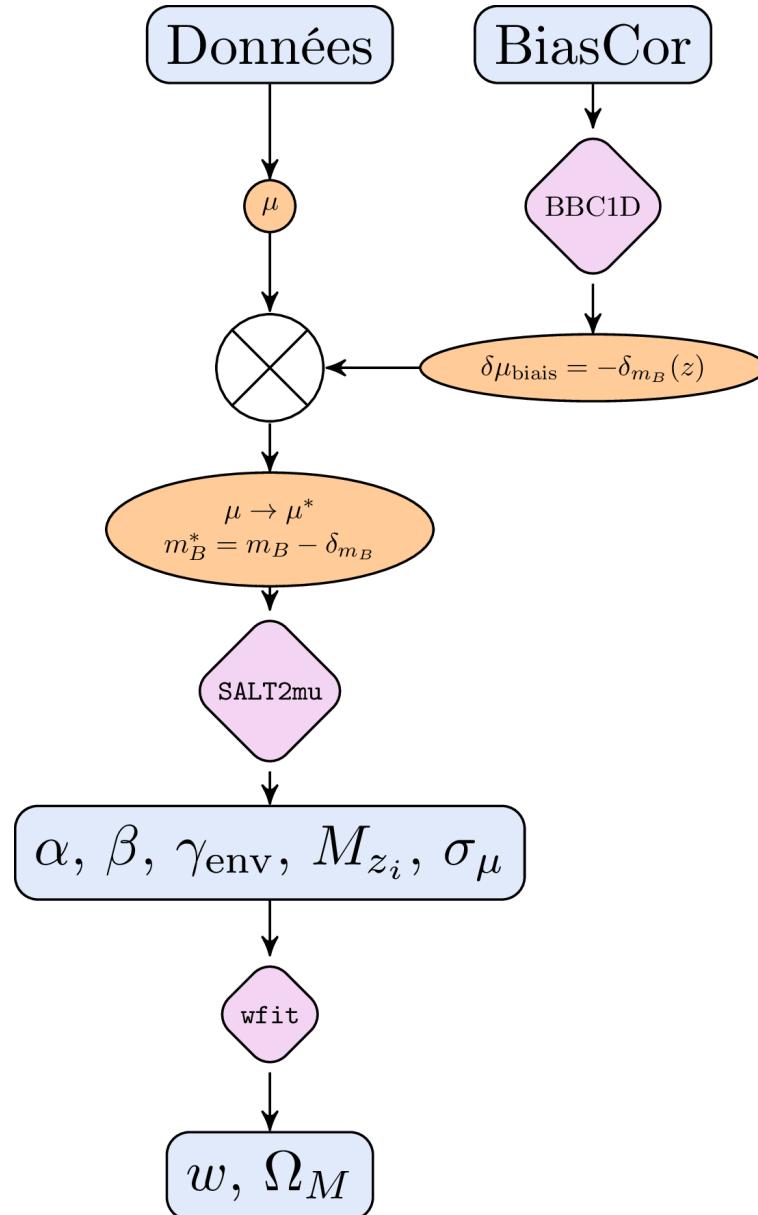
### CONSERVÉ



# Simulations avec SNANA

## Correction des biais

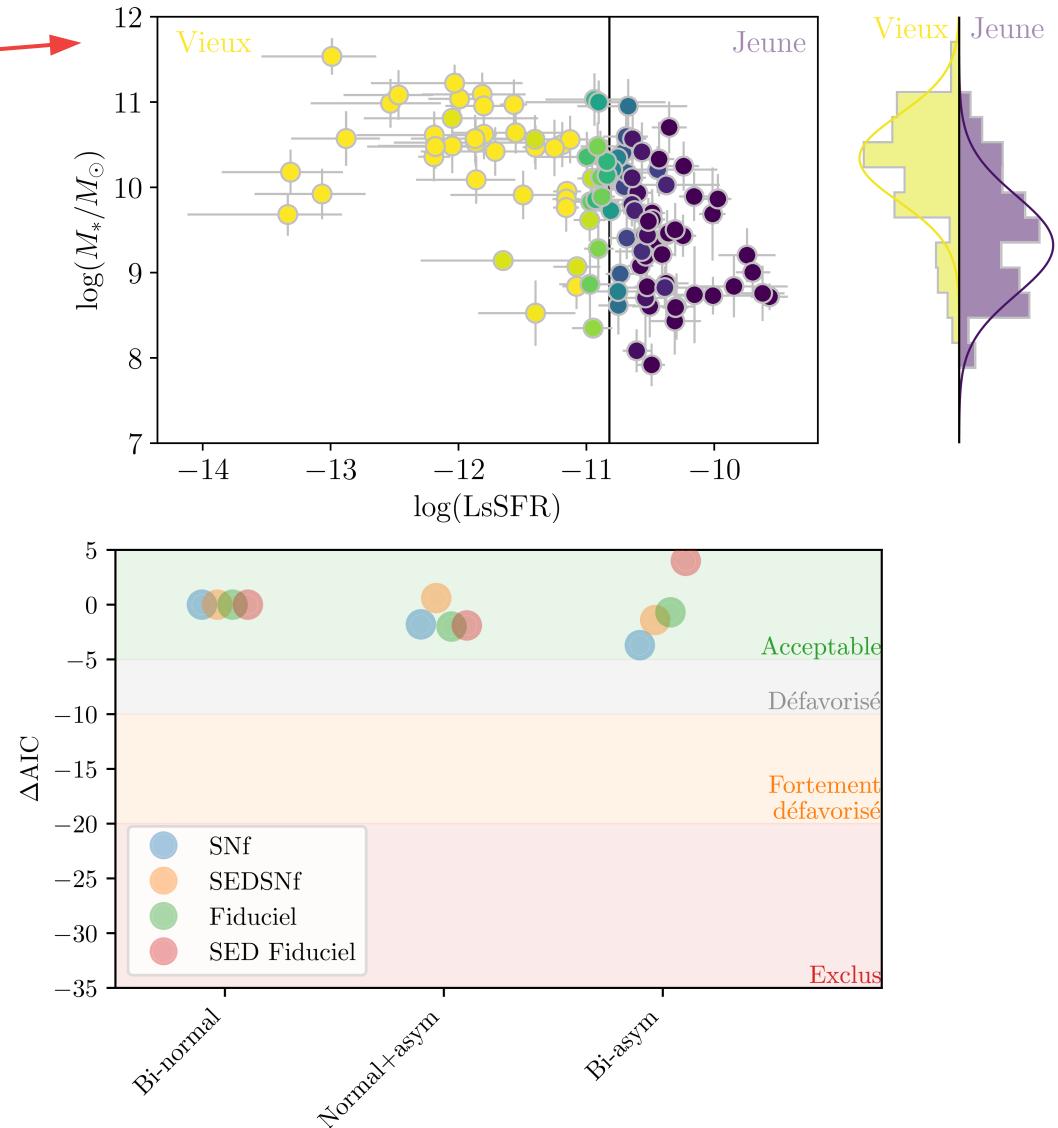
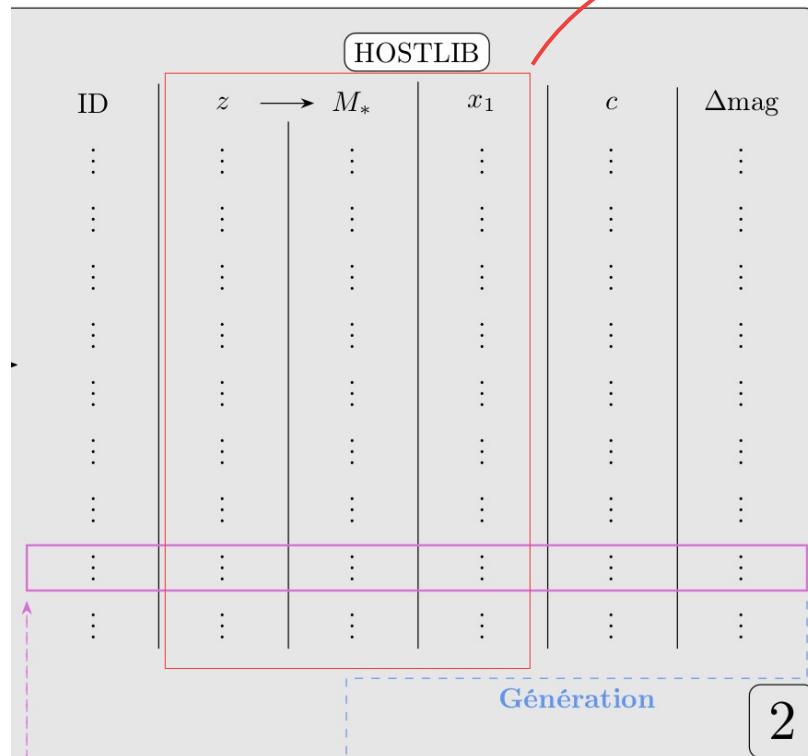
Nicolas et al. (in prep)



# Simulations avec SNANA

## Implémentation du modèle dans les logiciels

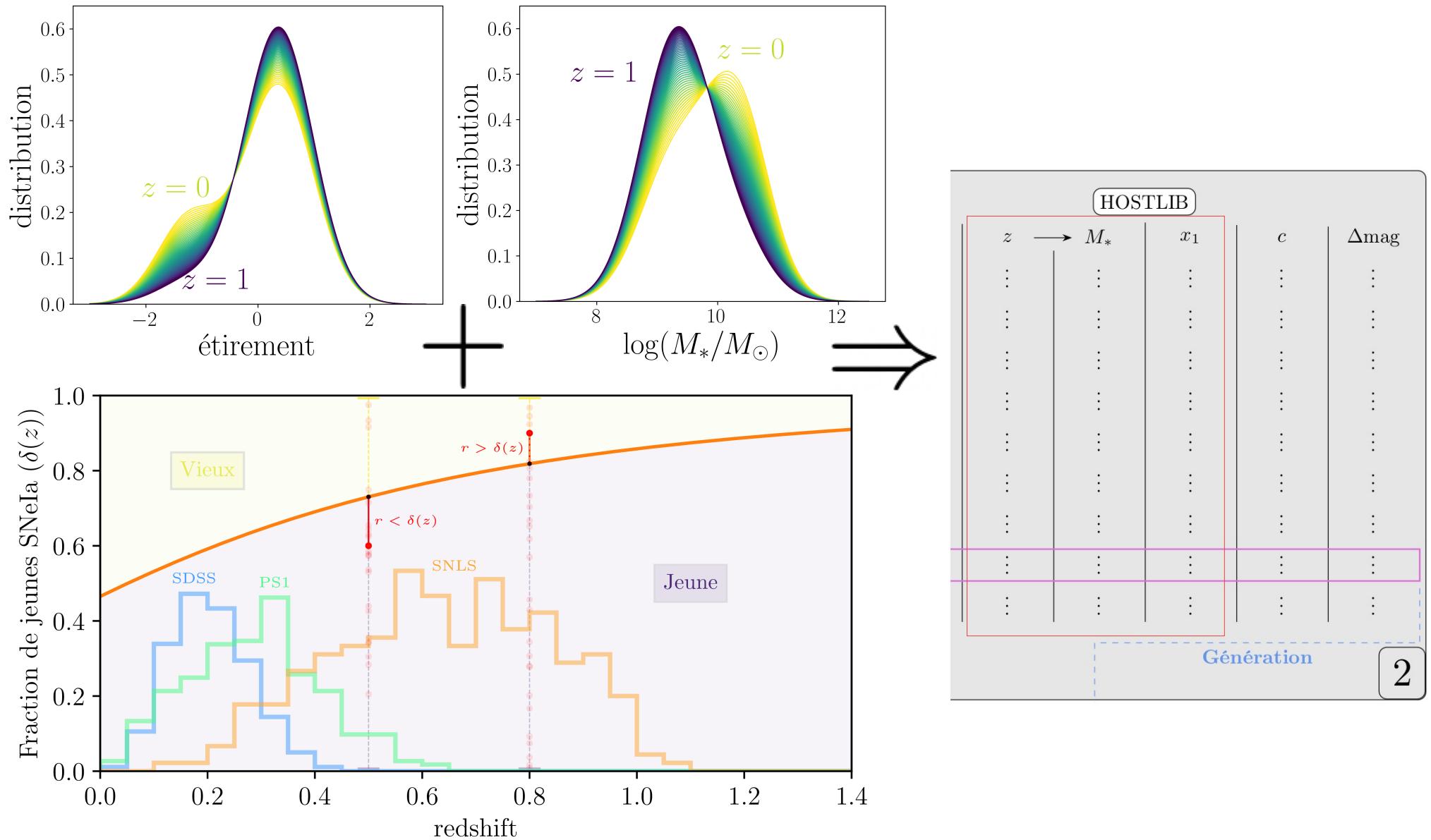
Nicolas et al. (in prep)



# Simulations avec SNANA

## Implémentation du modèle dans les logiciels

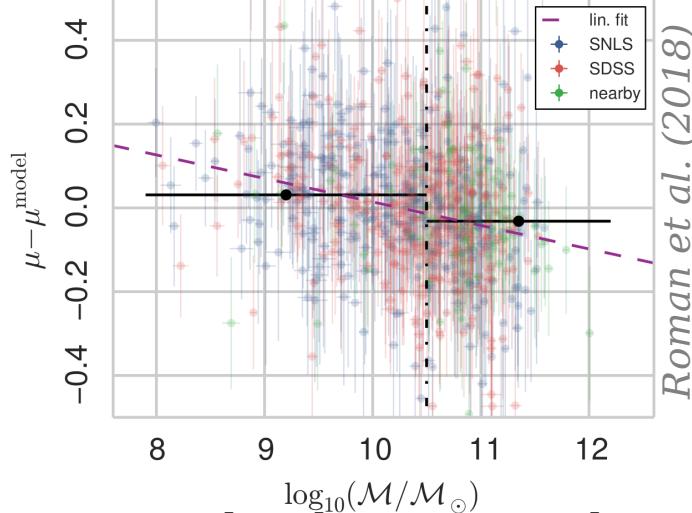
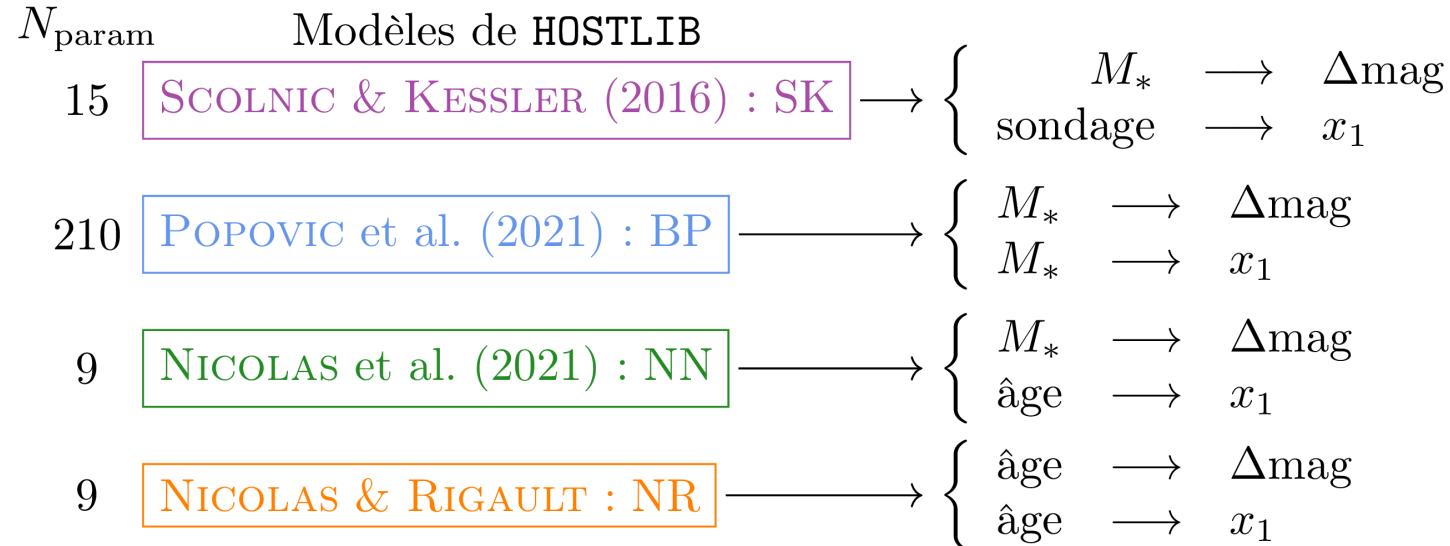
Nicolas et al. (in prep)



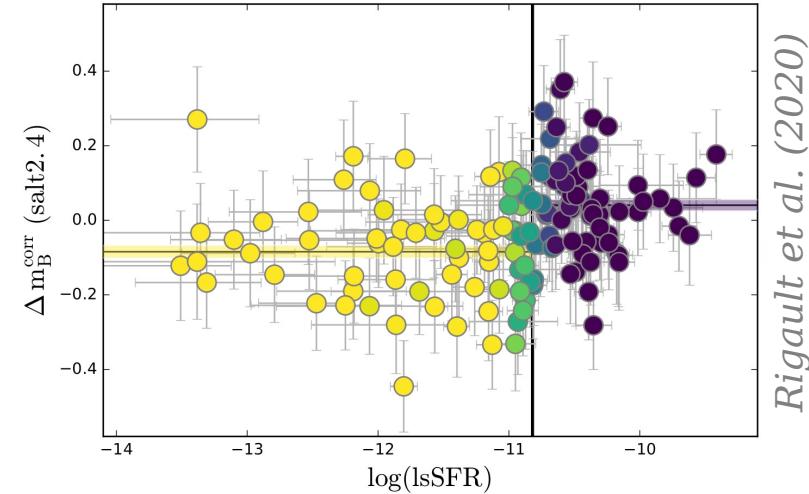
# Simulations avec SNANA

## Présentation des modèles

Nicolas et al. (in prep)



Marche de magnitude basée sur la masse

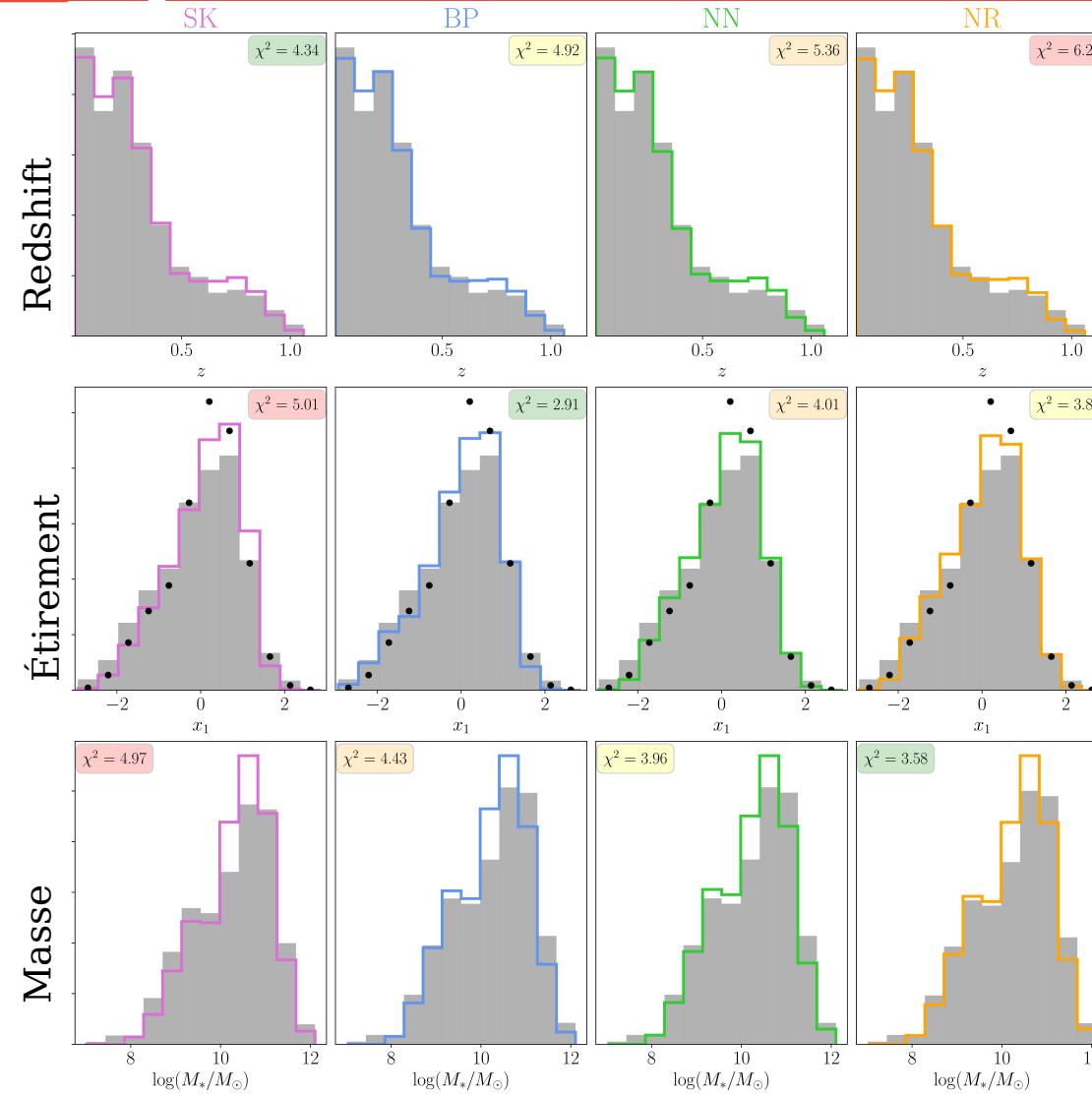


Marche de magnitude basée sur l'âge

# Simulations avec SNANA

## Comparaison des modèles aux données

Nicolas et al. (in prep)



Tous de bonnes représentations des données

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

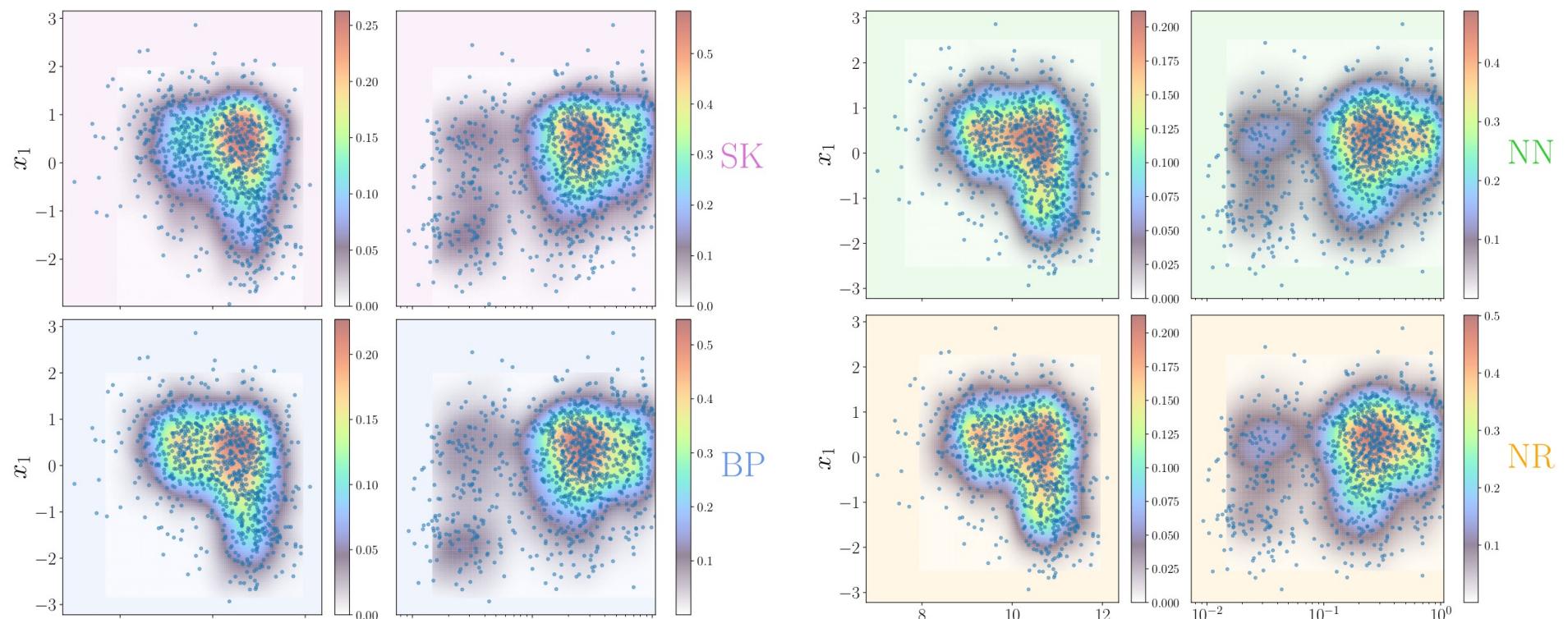
Sondage	$\chi^2$			
	SK	BP	NN	NR
LOWZ	14.63	10.29	37.05	36.84
SDSS	7.03	8.52	7.66	7.05
PS1	10.35	3.58	4.06	4.29
SNLS	15.14	23.13	15.03	15.00
Somme	47.15	45.52	63.80	63.18
Sans LOWZ	35.52	35.23	26.75	26.34

Comparaison pour l'étirement seul

# Simulations avec SNANA

## Comparaison des modèles aux données

Nicolas et al. (in prep)



Probabilité

Modèles	$x_1$ vs $M_*$	$x_1$ vs $z$	Somme
SK	103,03	252,57	355,60
BP	103,37	246,49	349,85
NN	102,35	236,25	338,60
NR	102,32	235,61	338,93

Tous de bonnes  
représentations des données

# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

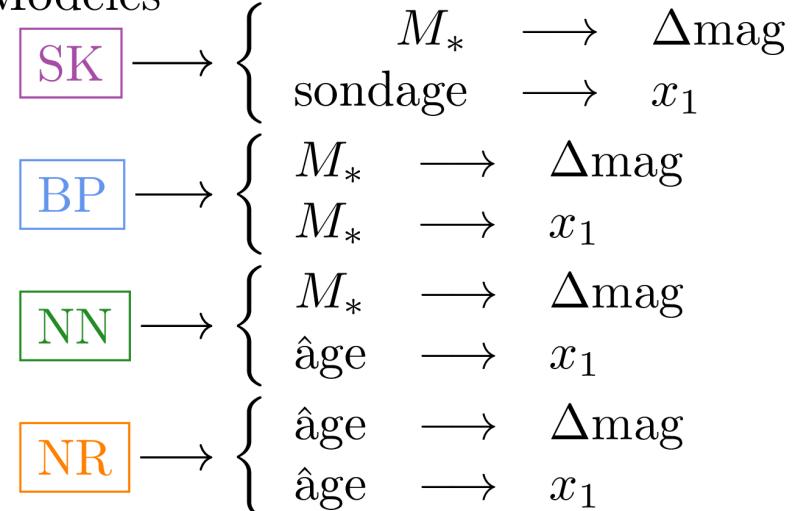
Nicolas et al. (in prep)

Univers de simulation

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

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

Modèles



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

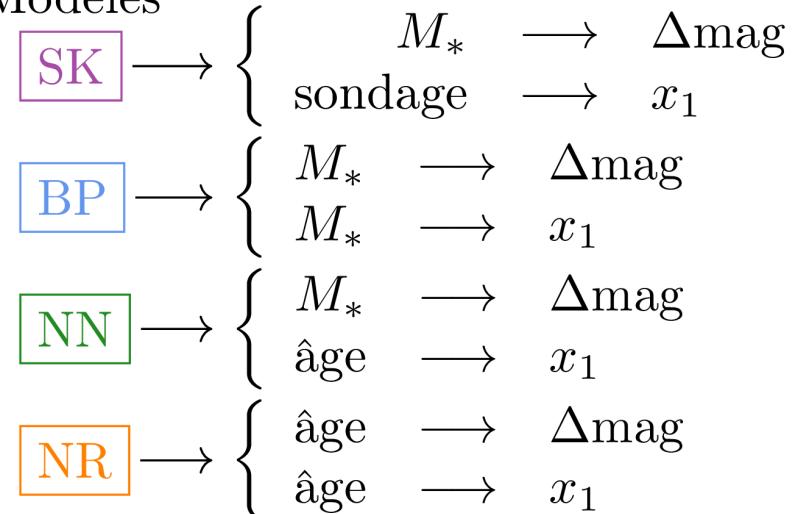
Nicolas et al. (in prep)

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			
	BP	0.061 ± 0.003	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.103 ± 0.003
	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

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

Modèles



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Marche de magnitude basée sur la masse

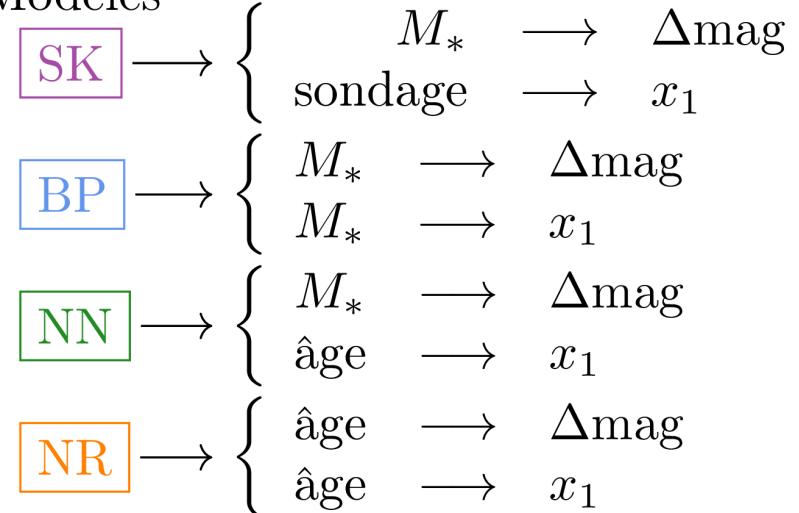
Nicolas et al. (in prep)

Univers de simulation

	SK	BP	NN	NR
SK	0.051 ± 0.003	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.094 ± 0.003
BP	0.061 ± 0.003	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.103 ± 0.003
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

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

Modèles



# Impact des modèles sur la cosmologie

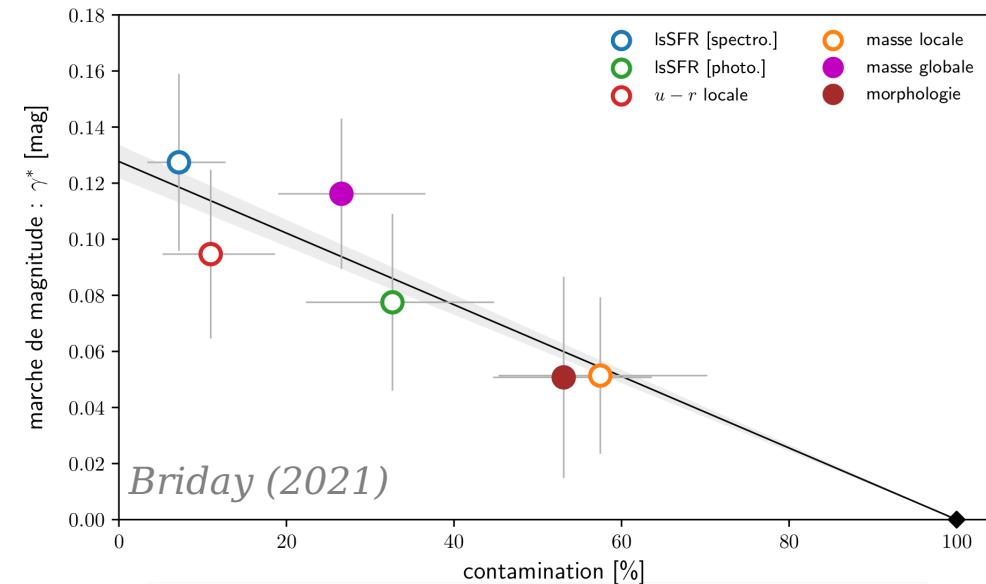
## Marche de magnitude basée sur la masse

Nicolas et al. (in prep)

### Univers de simulation

		Univers de simulation			
		SK	BP	NN	NR
Univers d'ajustement	SK	0.051 ± 0.003	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.094 ± 0.003
	BP	0.061 ± 0.003	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.103 ± 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

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



La masse ne saurait être un traceur efficace des propriétés tenant de l'âge

# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

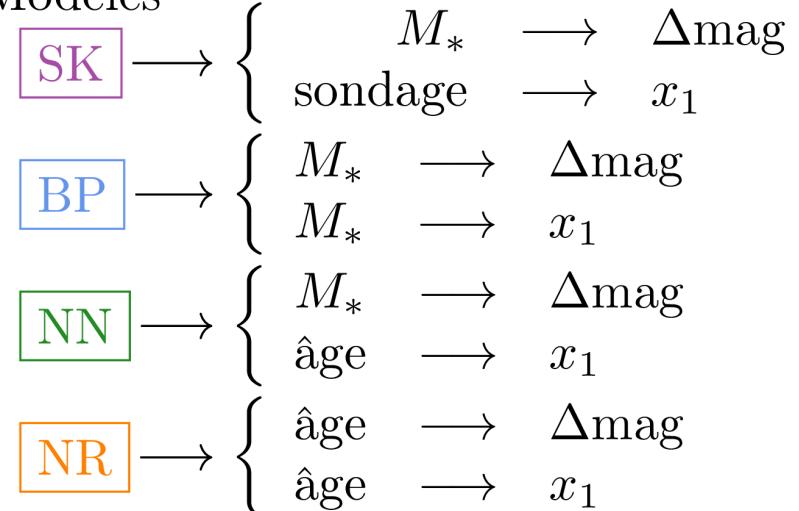
Nicolas et al. (in prep)

Univers de simulation

		SK	BP	NN	NR
Univers d'ajustement	SK	-1.005 ± 0.017	-1.039 ± 0.015	-1.041 ± 0.017	-1.087 ± 0.017
	BP	-0.975 ± 0.019	-1.005 ± 0.018	-1.005 ± 0.019	-1.048 ± 0.020
NN	NN	-0.973 ± 0.019	-1.007 ± 0.019	-1.012 ± 0.019	-1.057 ± 0.020
	NR	-0.973 ± 0.019	-1.007 ± 0.019	-1.012 ± 0.019	-1.057 ± 0.020

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

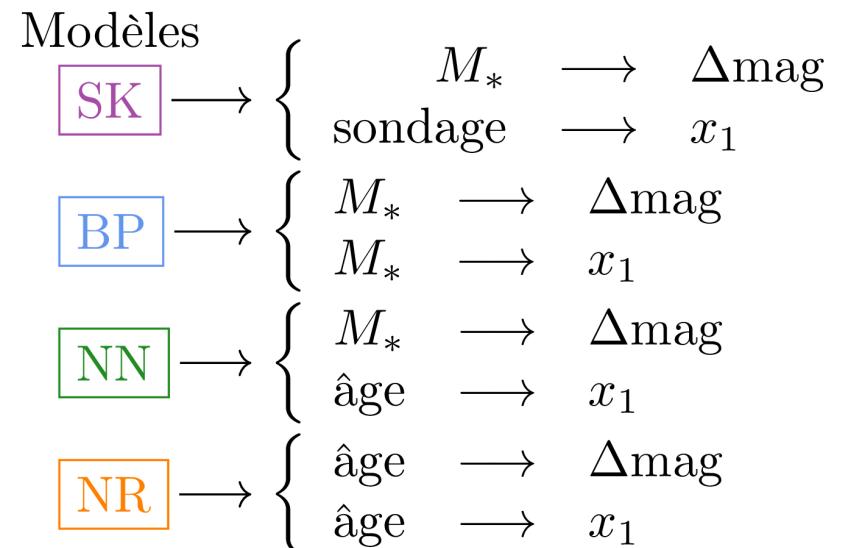
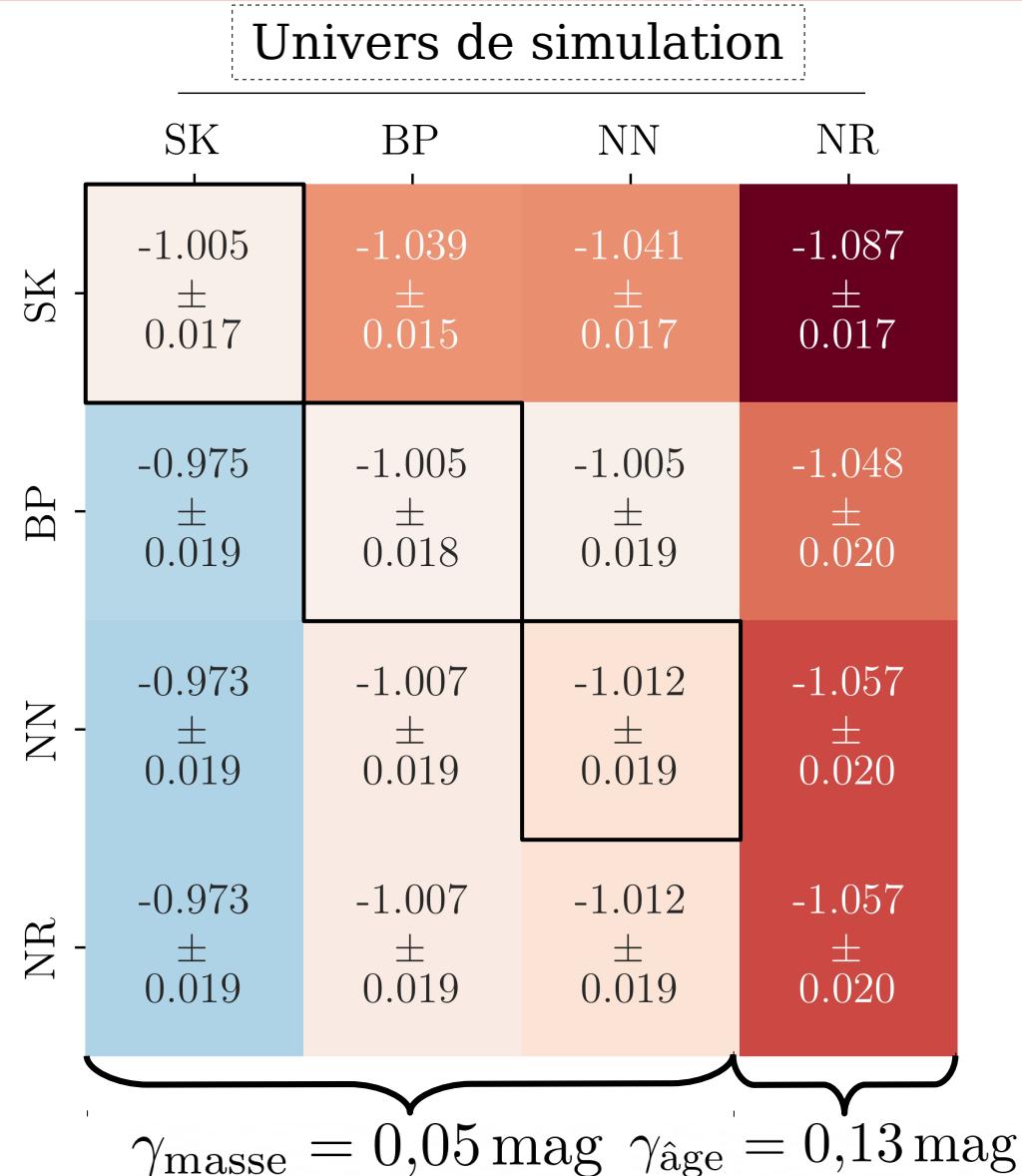
Modèles



# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)



# Impact des modèles sur la cosmologie

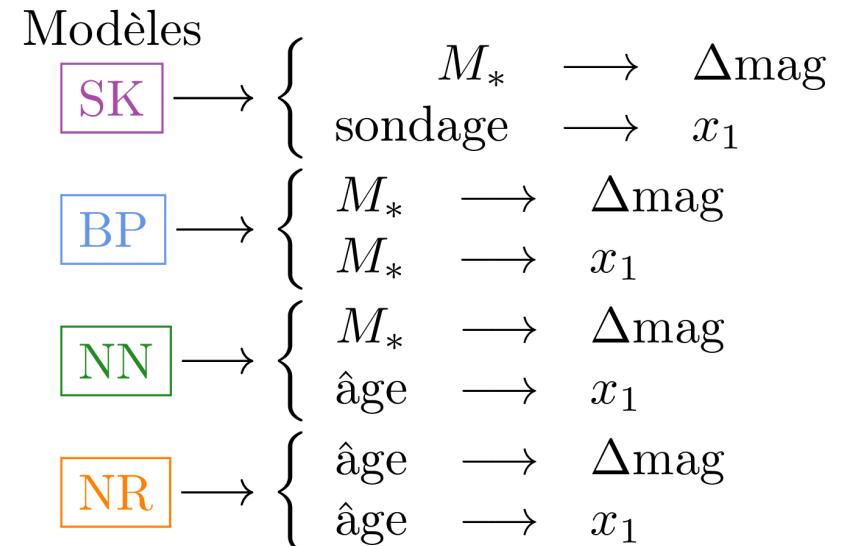
## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)

Univers de simulation

		SK	BP	NN	NR
Univers d'ajustement	SK	-1.005 ± 0.017	-1.039 ± 0.015	-1.041 ± 0.017	-1.087 ± 0.017
	BP	-0.975 ± 0.019	-1.005 ± 0.018	-1.005 ± 0.019	-1.048 ± 0.020
NN	NN	-0.973 ± 0.019	-1.007 ± 0.019	-1.012 ± 0.019	-1.057 ± 0.020
	NR	-0.973 ± 0.019	-1.007 ± 0.019	-1.012 ± 0.019	-1.057 ± 0.020

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



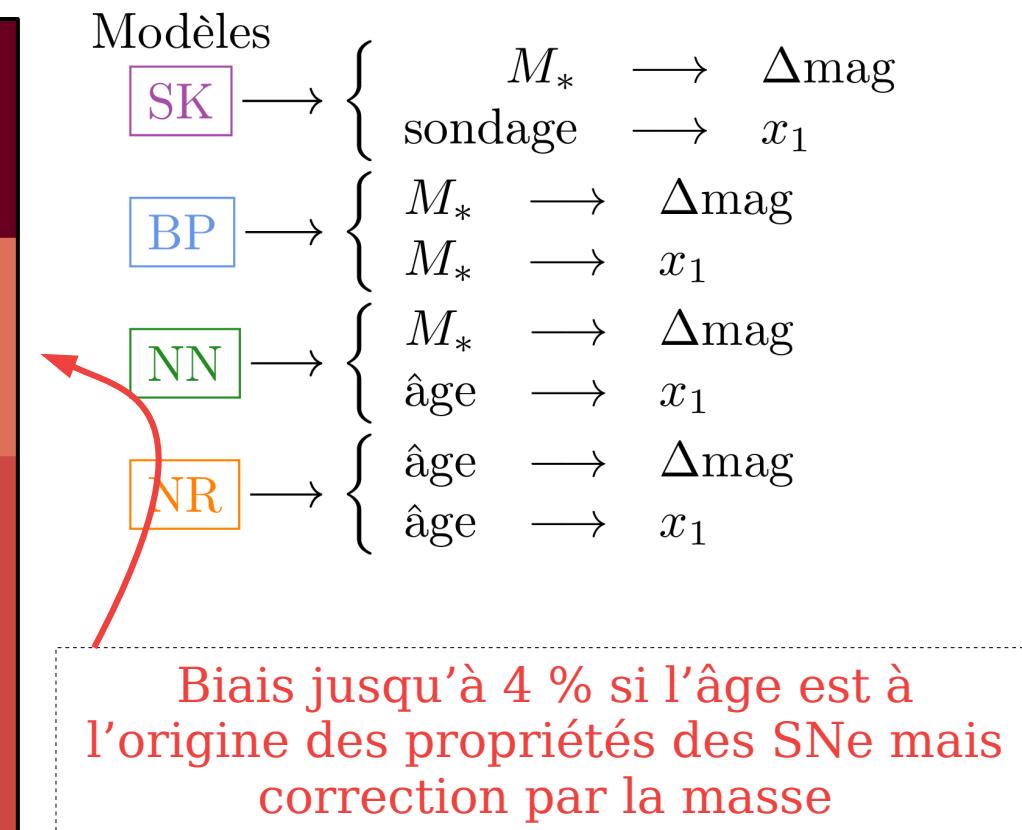
# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)

		Univers de simulation			
		SK	BP	NN	NR
Univers d'ajustement	SK	-1.005 ± 0.017	-1.039 ± 0.015	-1.041 ± 0.017	-1.087 ± 0.017
	BP	-0.975 ± 0.019	-1.005 ± 0.018	-1.005 ± 0.019	-1.048 ± 0.020
	NN	-0.973 ± 0.019	-1.007 ± 0.019	-1.012 ± 0.019	-1.057 ± 0.020
	NR	-0.973 ± 0.019	-1.007 ± 0.019	-1.012 ± 0.019	-1.057 ± 0.020

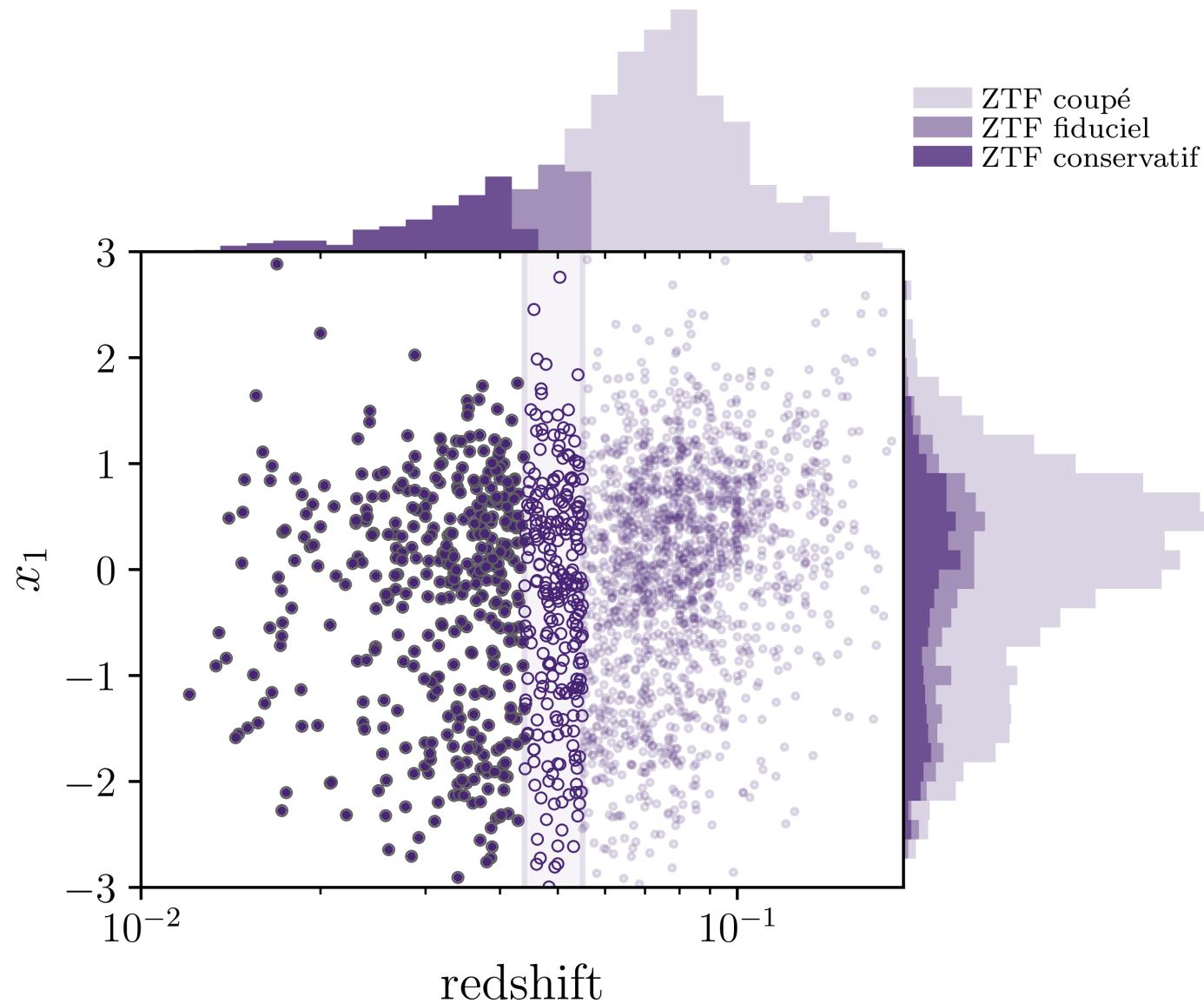
$\gamma_{\text{masse}} = 0,05 \text{ mag}$   $\gamma_{\text{âge}} = 0,13 \text{ mag}$



# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

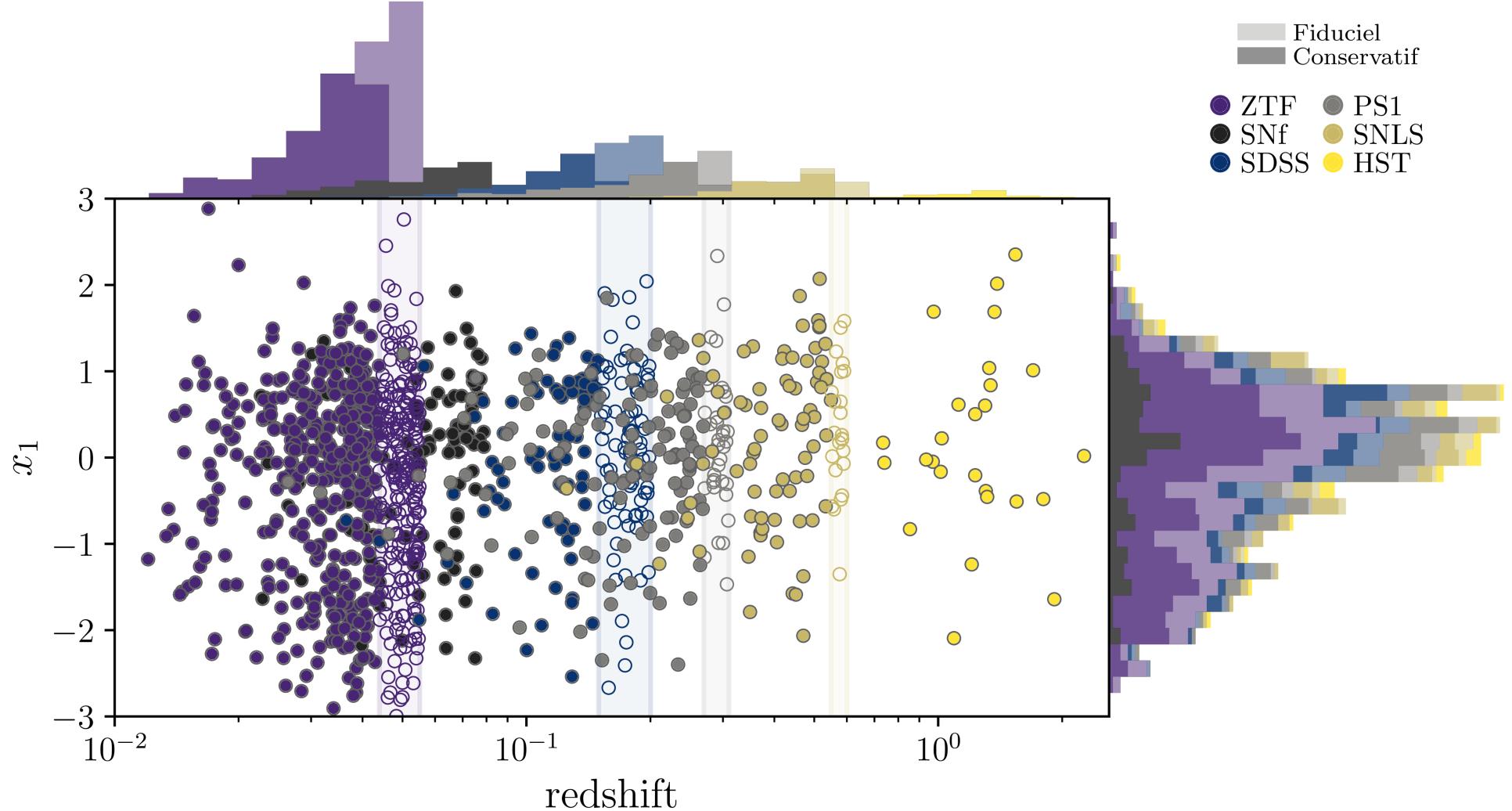
Nicolas (in prep)



# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

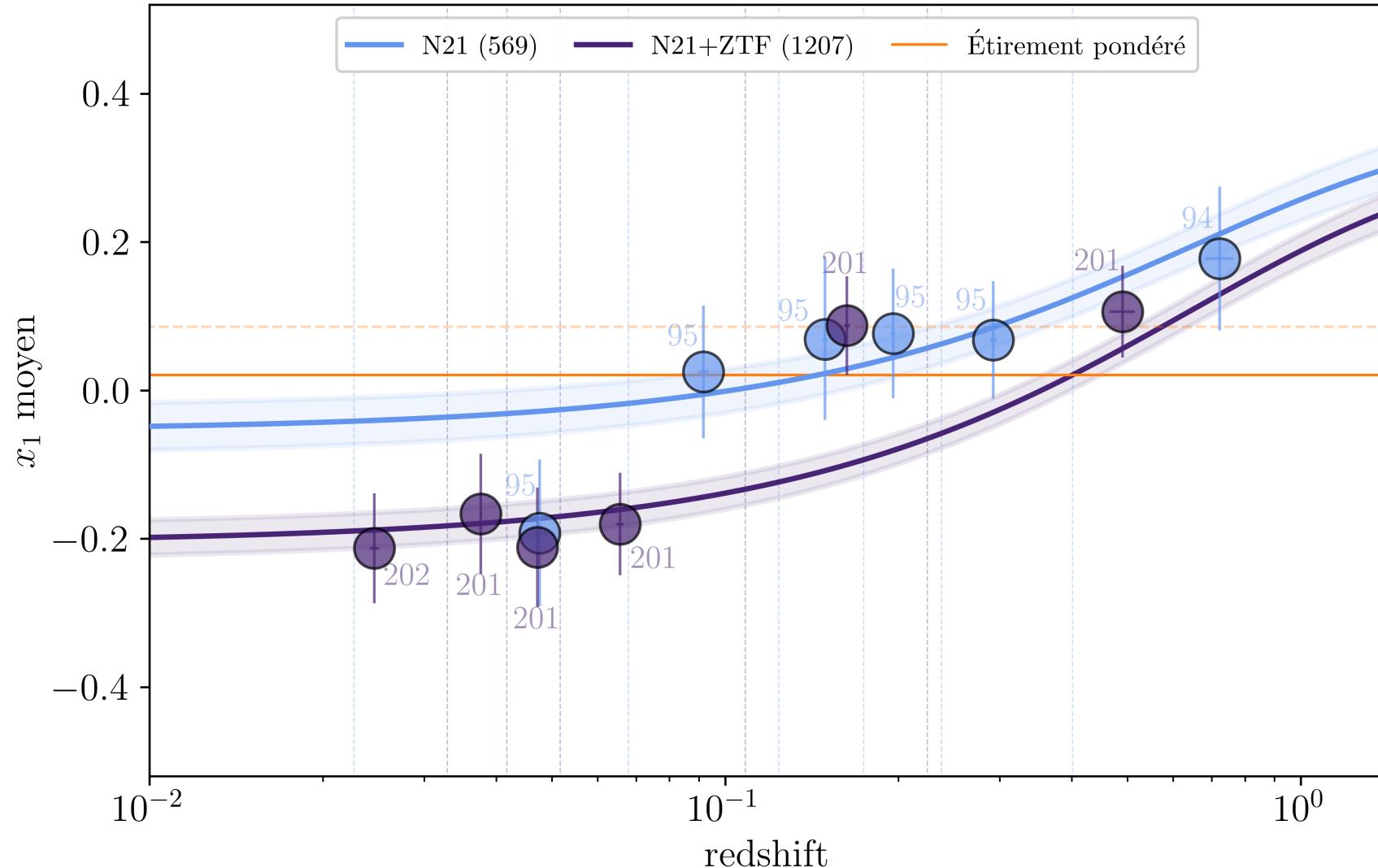
Nicolas (in prep)



# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

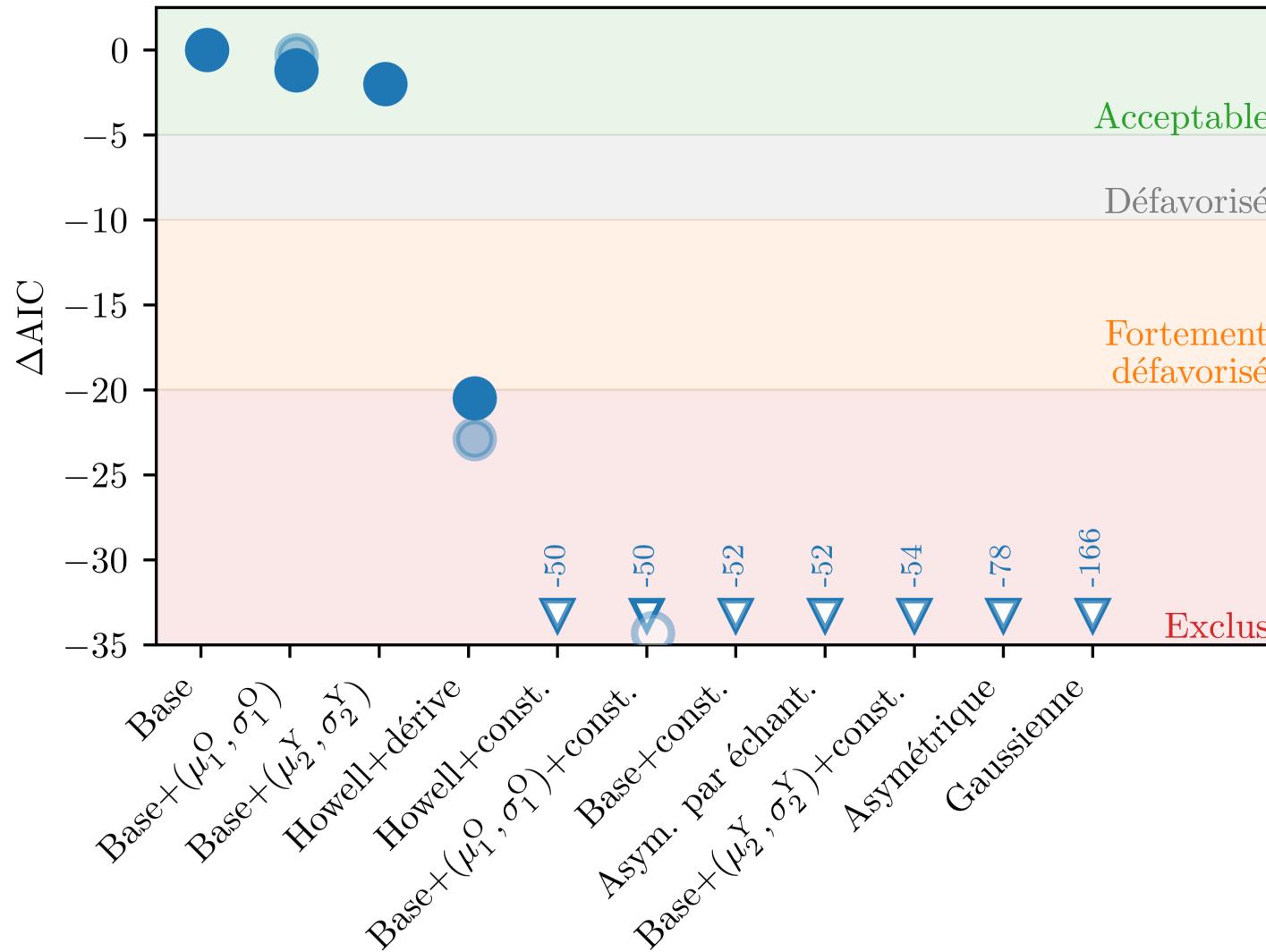
Nicolas (in prep)



# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

Nicolas (in prep)



Renforce la conclusion que les modèles non-dérivants sont exclus  
Renforce la pertinence du modèle de base à décrire les données d'étirement

# Perspectives

## Inclusion des données de ZTF

Nicolas (in prep)

Différences de  $\chi^2$  entre le modèle ajusté sur l'échantillon de base (N21) et le modèle ajusté sur l'échantillon avec ZTF (N21+ZTF)

Modèle	Sondage							
	SNF	ZTF	SDSS	PS1	SNLS	HST	Base	Base+ZTF
N21	272,9	1948,2	446,6	399,4	262,9	75,0	1456,7	3404,9
N21+ZTF	274,6	1874,5	450,0	407,2	268,1	74,4	1474,2	3348,7
Variation	1,66	-73,69	3,45	7,76	5,23	-0,57	17,53	-56,16

L'ajout des données de ZTF statistiquement supérieures peut biaiser la capacité du modèle à représenter les données à tous redshifts

# Perspectives

## Amélioration des simulations

*Nicolas et al. (in prep)*

# Conclusions

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



# Merci !

Nora NICOLAS

Groupe Cosmos IP2I

Vendredi 30 septembre 2022

Soutenance de thèse de Doctorat

Sous la direction de M. RIGAULT

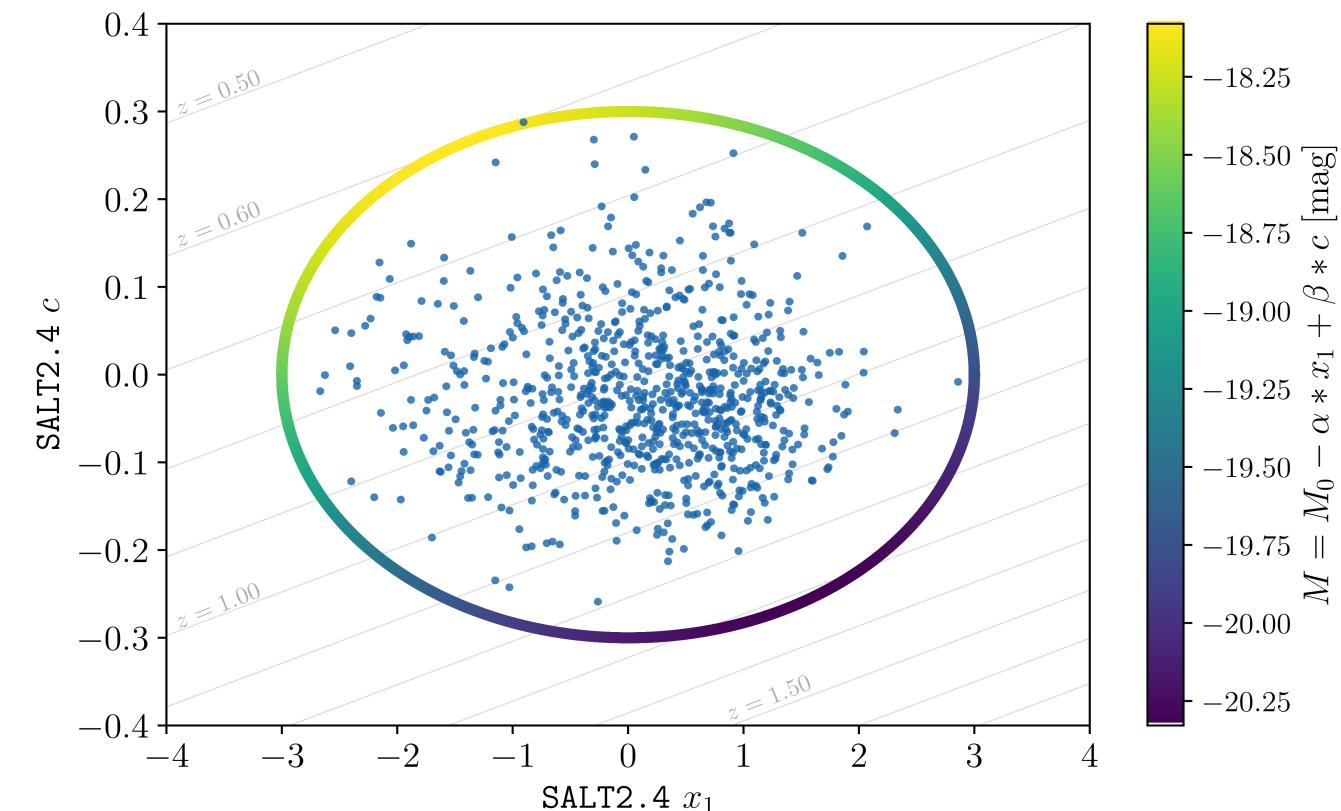




# Sondages limités en magnitude

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

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



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

# Impact des modèles sur la cosmologie

## Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)

