

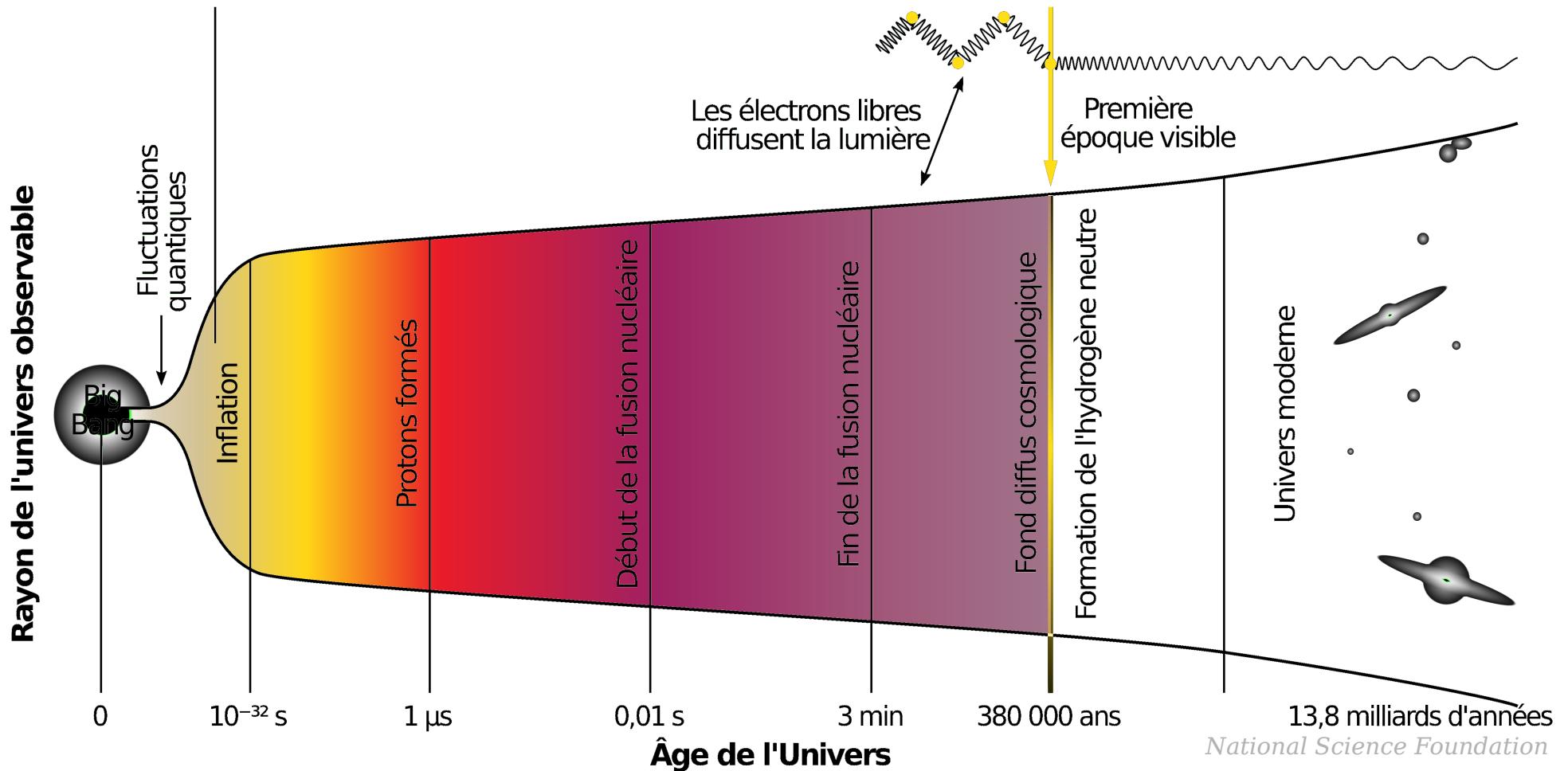
Variabilités intrinsèques des supernovæ de type Ia et leurs conséquences sur les paramètres cosmologiques

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

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

Cosmologie observationnelle : histoire

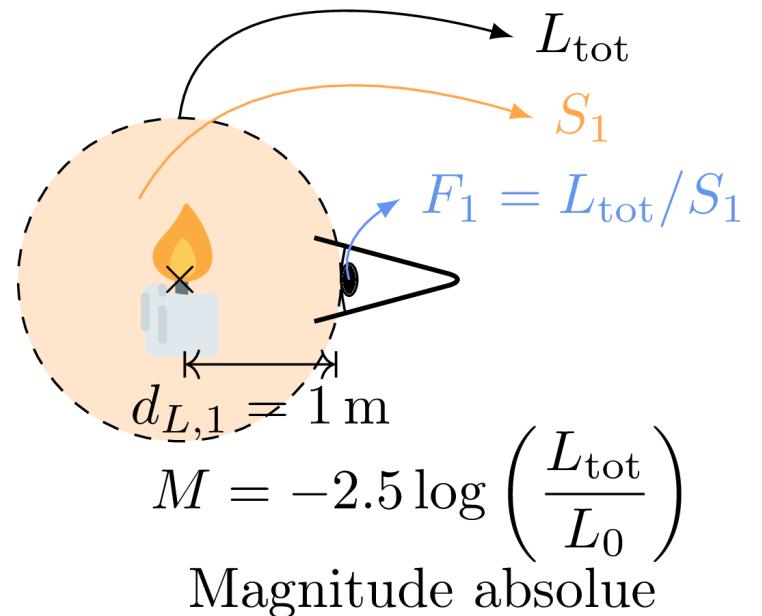
Histoire de l'Univers



Cosmologie observationnelle

Mesure avec les SNe Ia

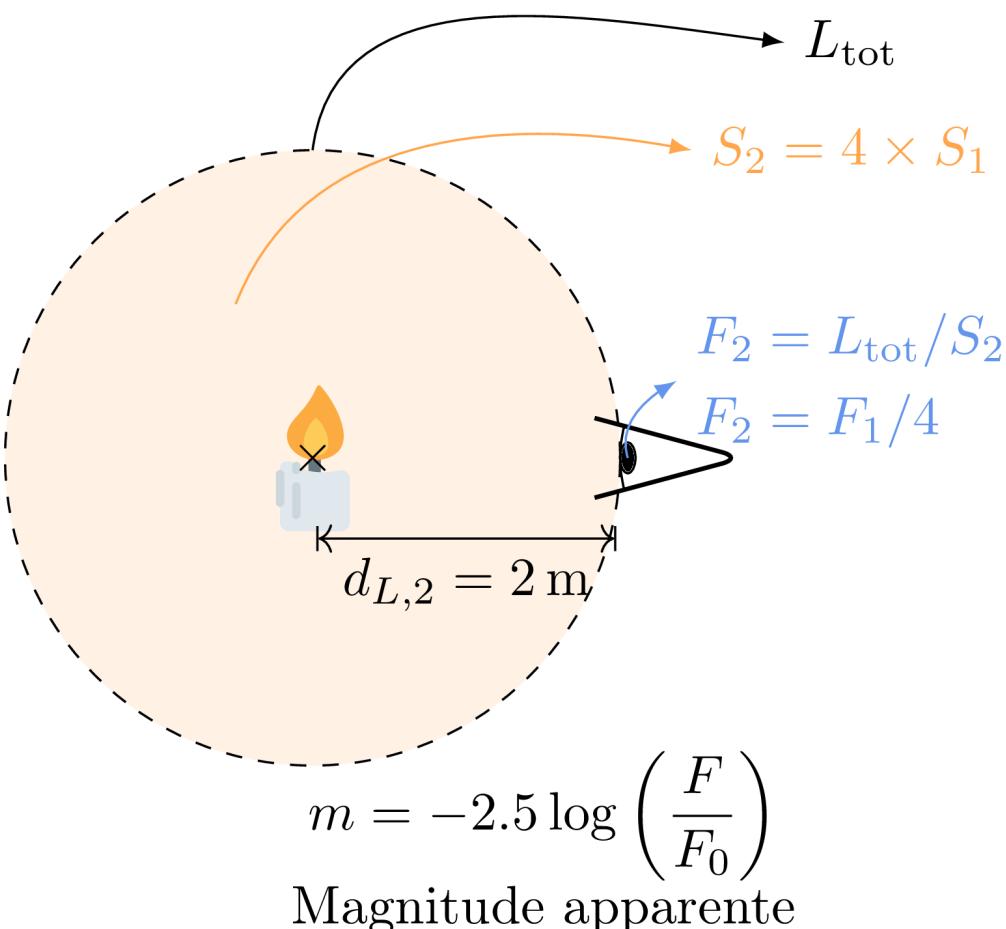
« Chandelles standard »



Cosmologie observationnelle

Mesure avec les SNe Ia

« Chandelles standard »



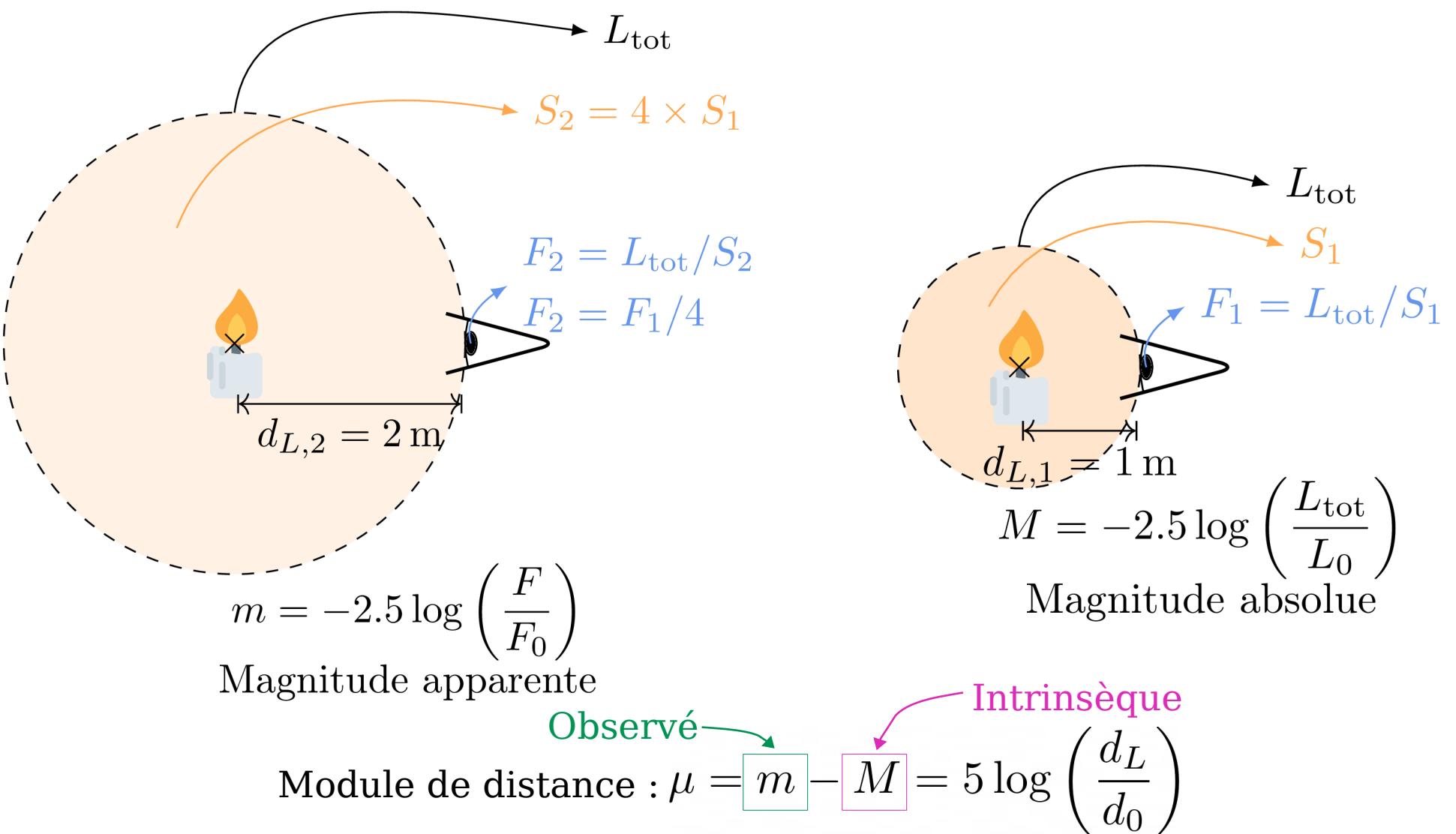
$$M = -2.5 \log \left(\frac{L_{\text{tot}}}{L_0} \right)$$

Magnitude absolue

Cosmologie observationnelle

Mesure avec les SNe Ia

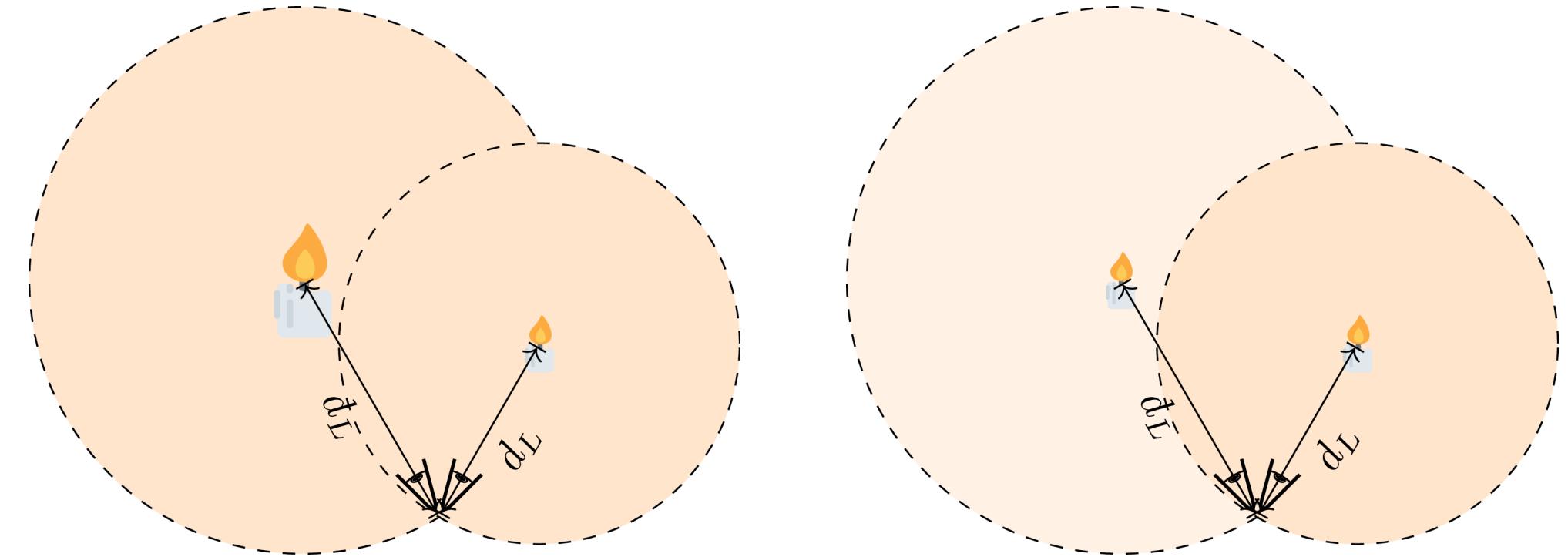
« Chandelles standard »



Cosmologie observationnelle

Mesure avec les SNe Ia

« Chandelles standard »

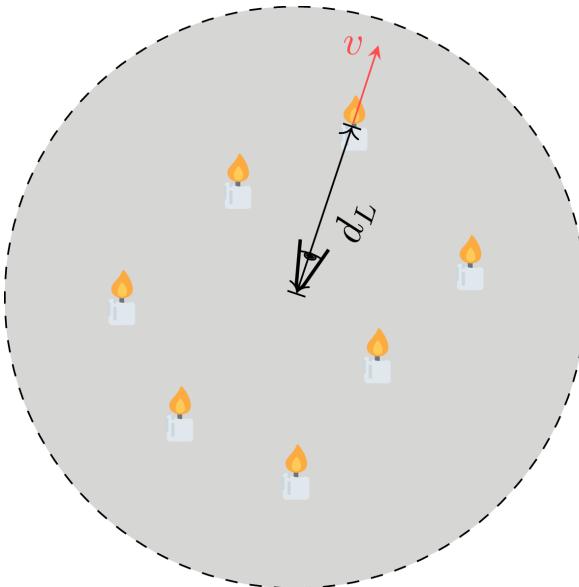


Module de distance : $\mu = m - M = 5 \log \left(\frac{d_L}{d_0} \right)$

Observé Intrinsèque

Diagram showing the observed modulus of distance ($m - M$) as the difference between the intrinsic modulus of distance (M) and the observed modulus of distance (m). The angle between the lines of sight is indicated as 10°.

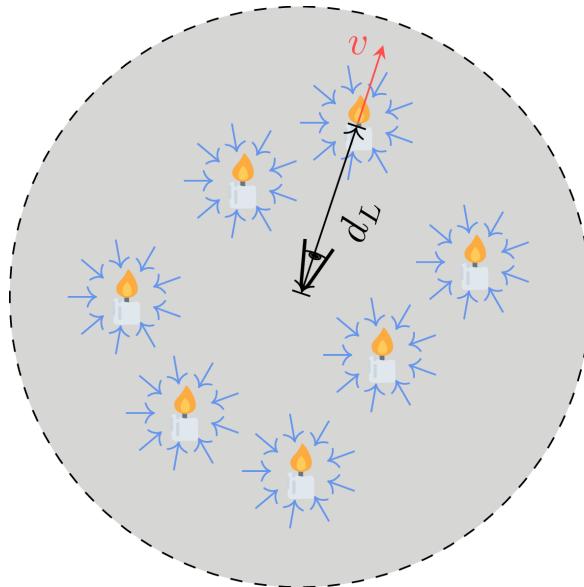
Cosmologie observationnelle : théorie



Paramètres cosmologiques :

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

Cosmologie observationnelle : théorie

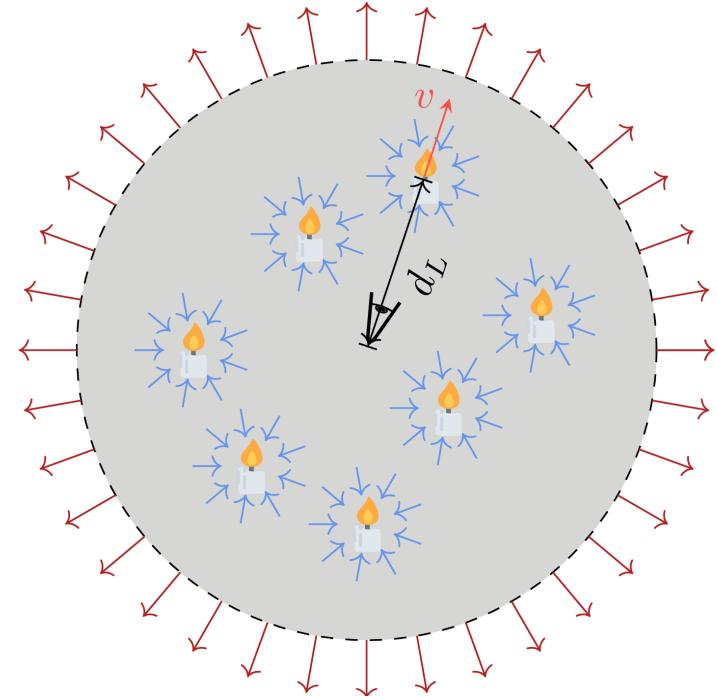


Paramètres cosmologiques :

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

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

Cosmologie observationnelle : théorie



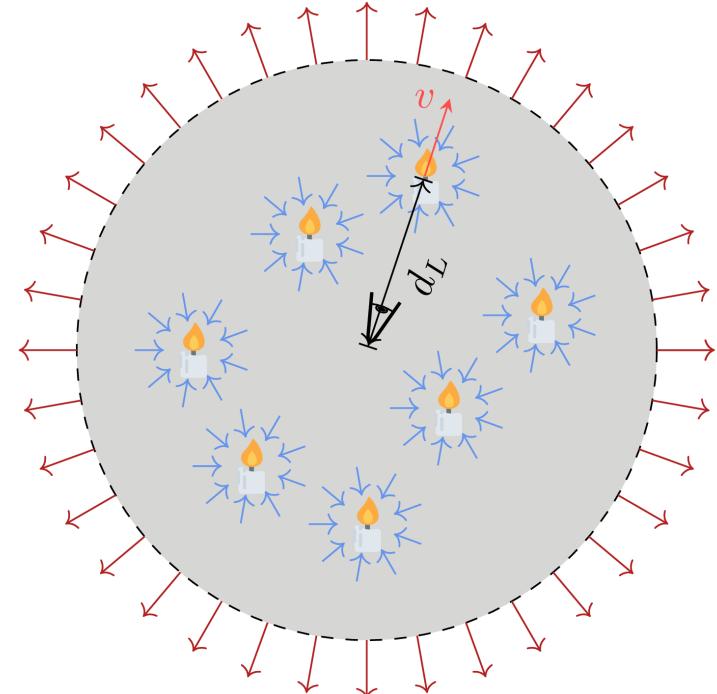
Paramètres cosmologiques :

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

Ω_m : densité de la matière \longrightarrow Contracte l'espace

Ω_Λ : densité de l'énergie sombre \longrightarrow Dilate l'espace

Cosmologie observationnelle : théorie



Paramètres cosmologiques :

- | | |
|--|---|
| H_0 : taux d'expansion | $\rightarrow d_L \nearrow \Rightarrow v \nearrow$ |
| Ω_m : densité de la matière | \rightarrow Contracte l'espace |
| Ω_Λ : densité de l'énergie sombre | \rightarrow Dilate l'espace |
| w : paramètre d'état de Ω_Λ | \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

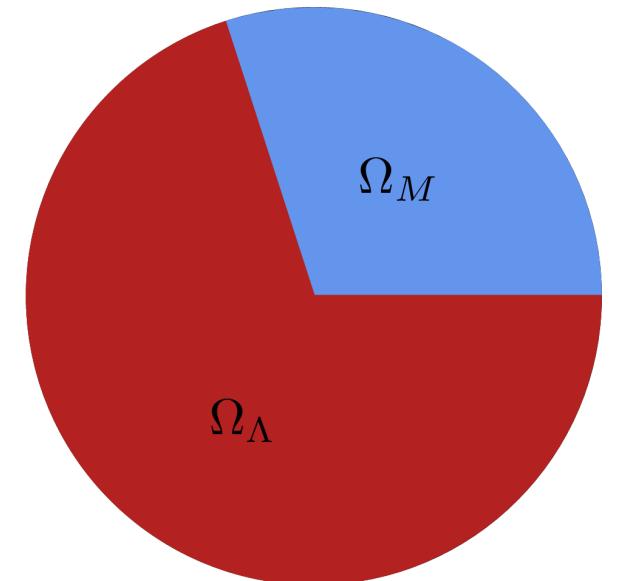
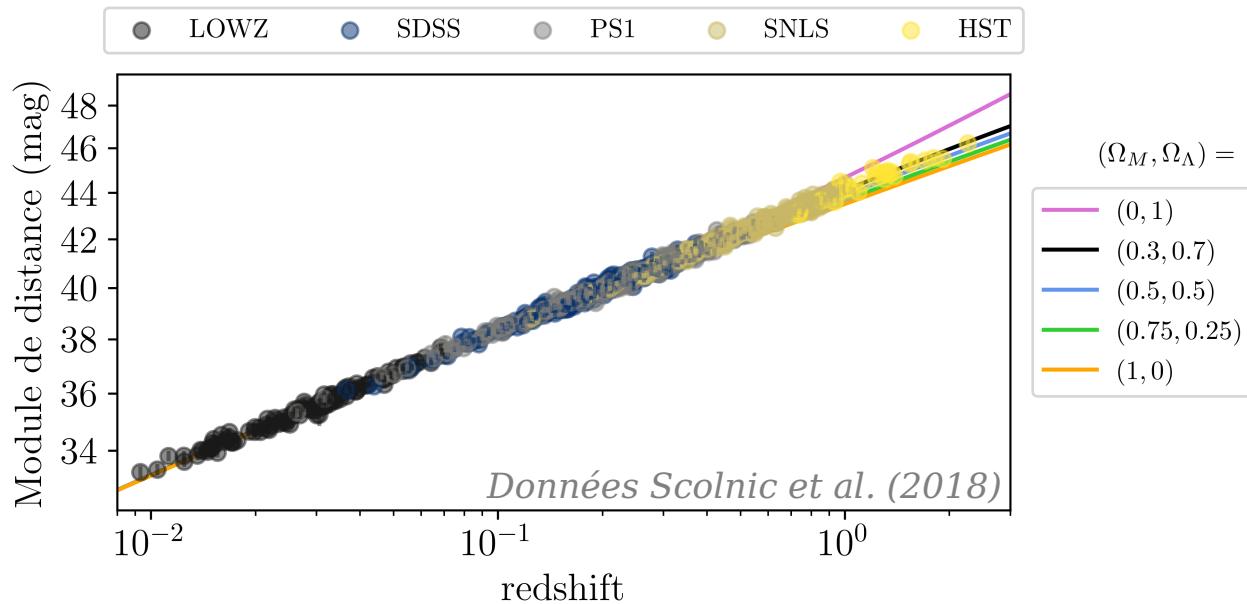
Module de distance : $\mu = m - M = 5 \log \left(\frac{d_L}{d_0} \right)$

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

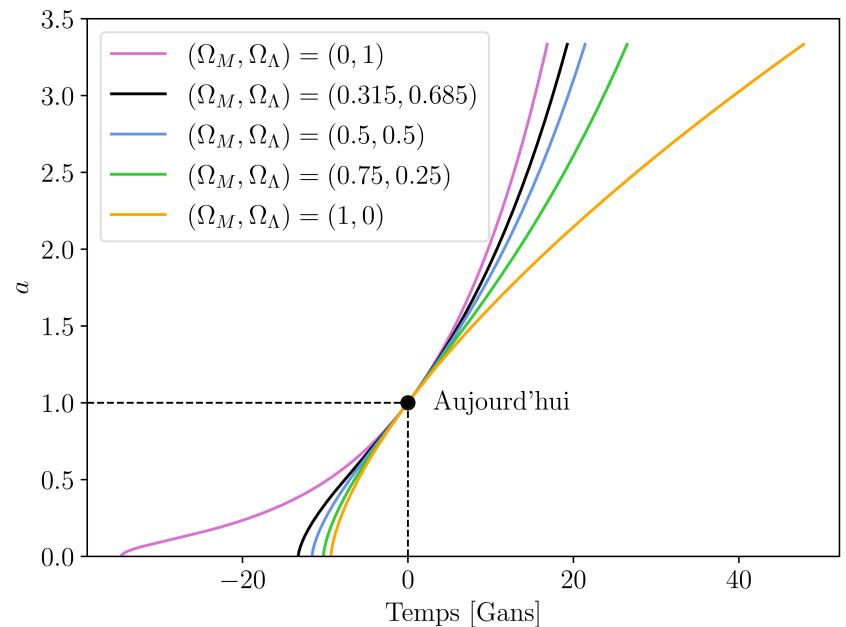
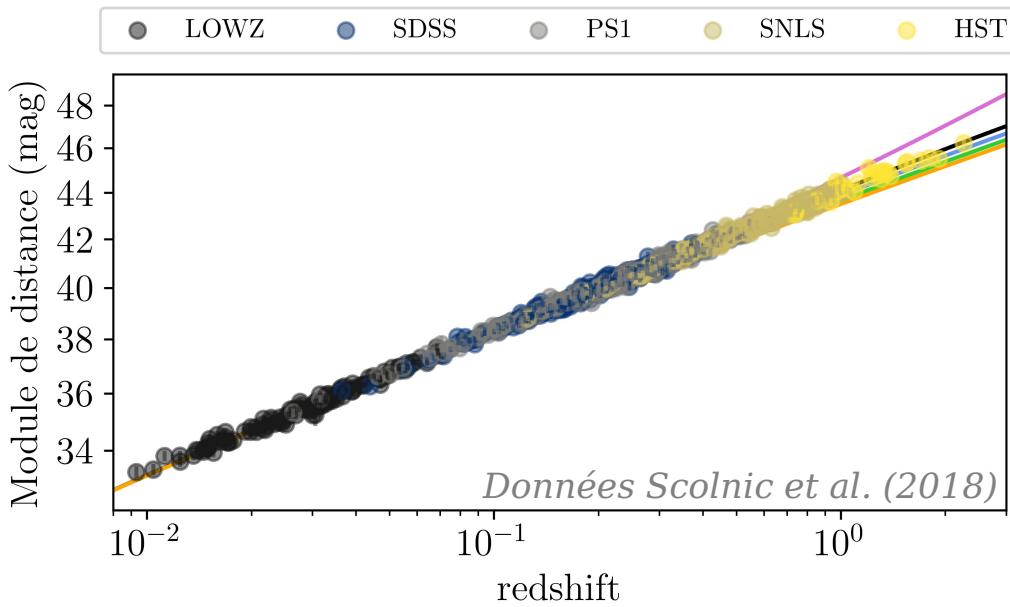
Intrinsèque

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



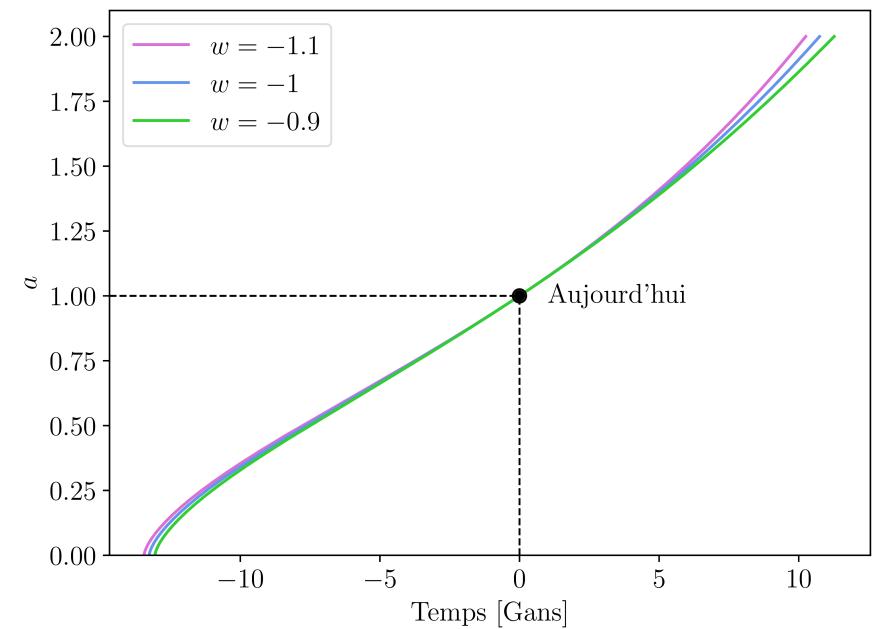
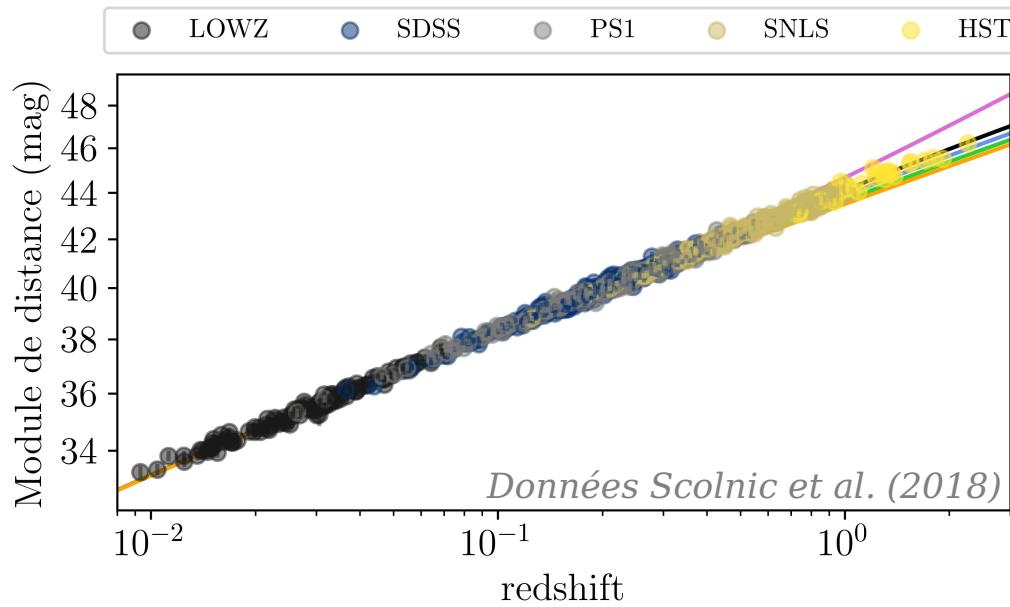
Cosmologie observationnelle : pratique

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

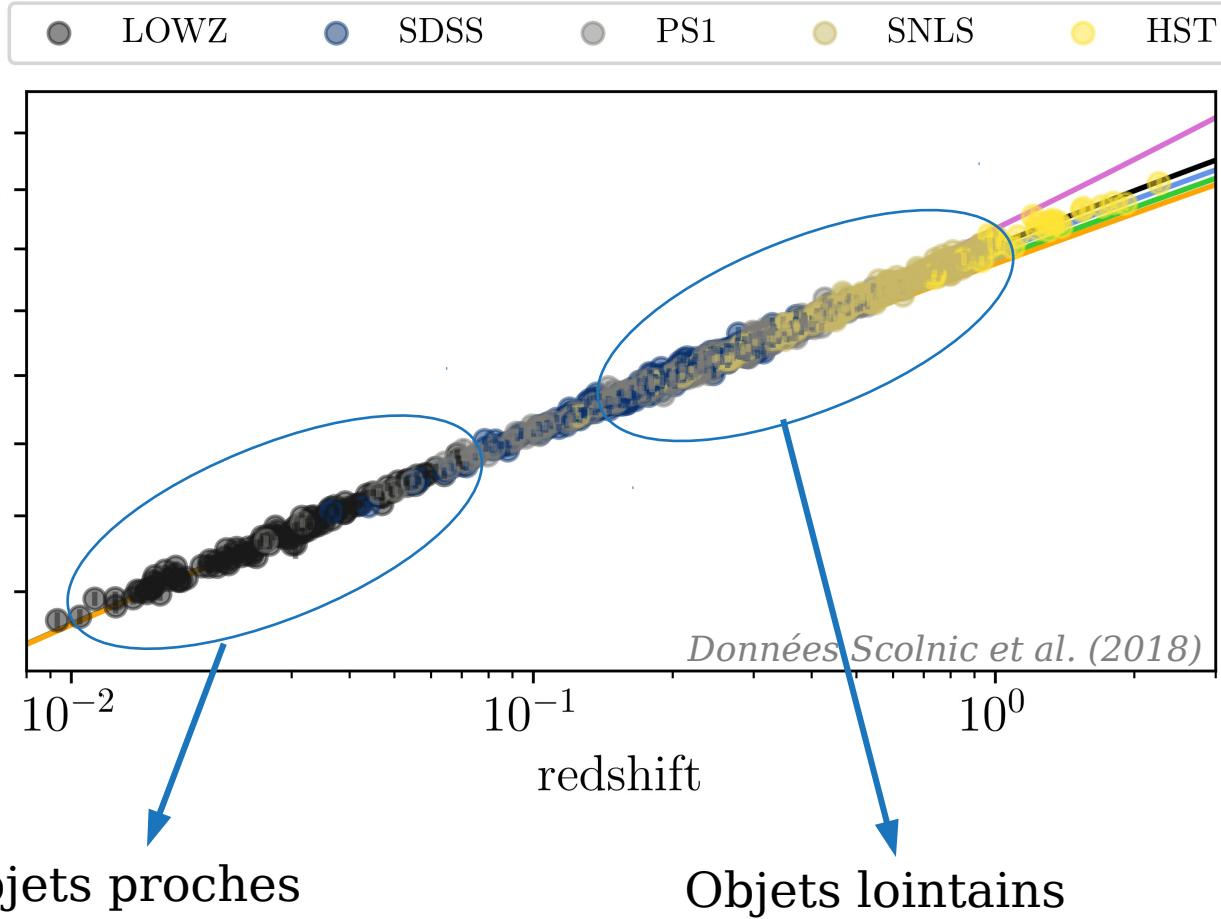
Distance : $d_L = (1 + z) \times \frac{c}{H_0} \left(\int_0^z dz' \left[\Omega_M (1 + z')^3 + \Omega_\Lambda (1 + z')^{3(1+w)} \right]^{-1/2} \right)$

Const. de Hubble Matière Énergie sombre

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

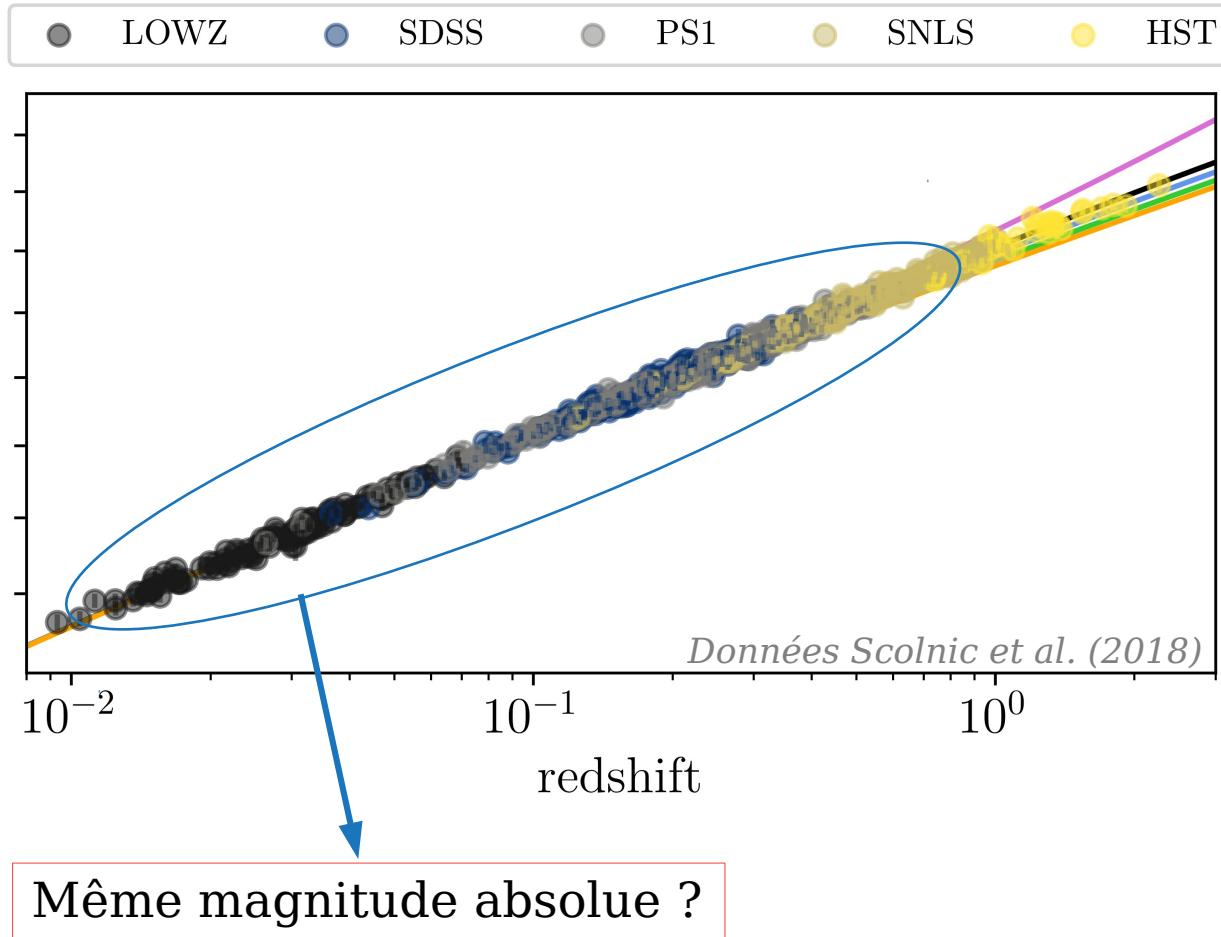


Cosmologie observationnelle : SNe Ia



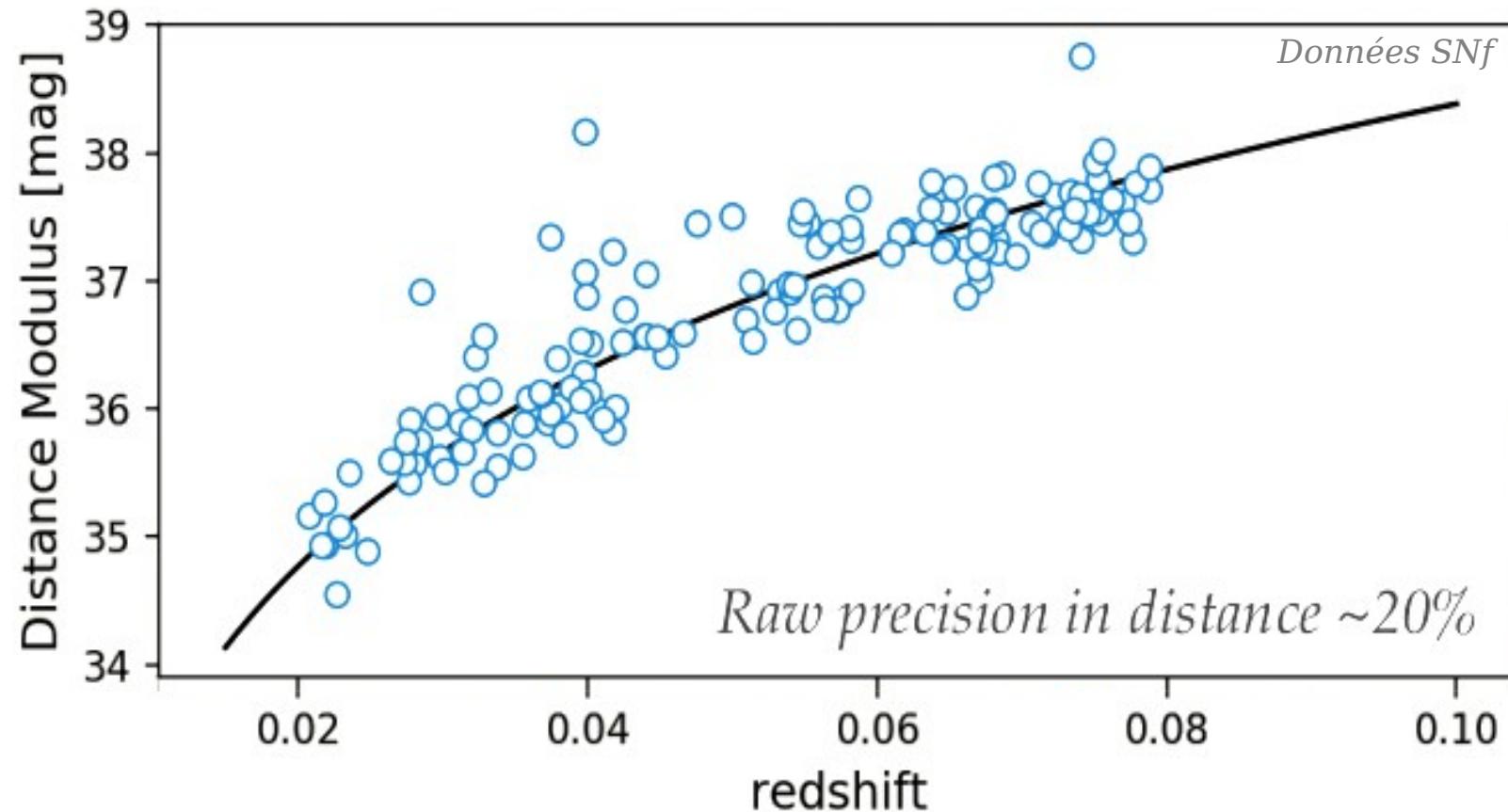
✓ $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$

Cosmologie observationnelle : SNe Ia



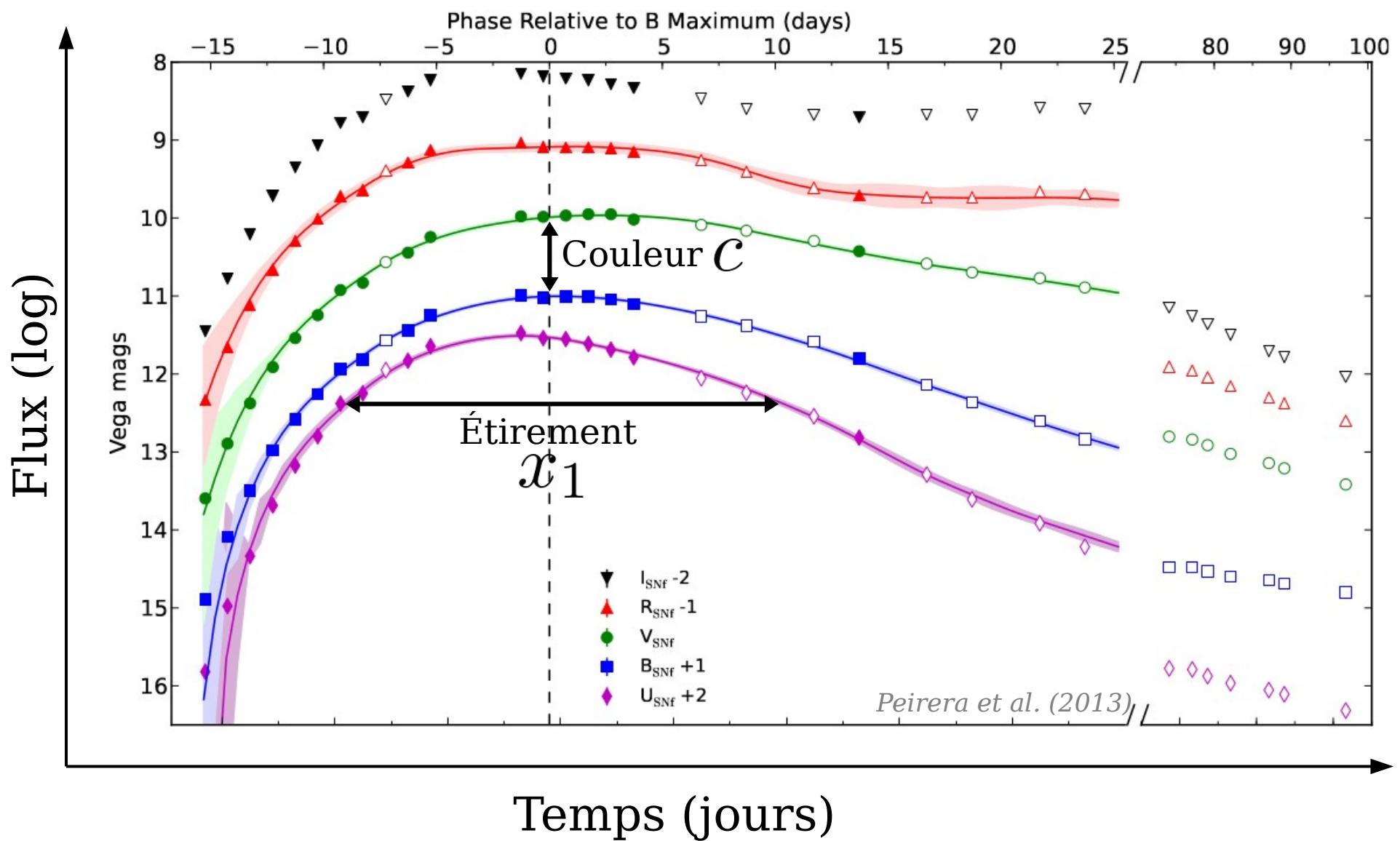
- ✓ $L_{\text{SN}} \approx L_{\text{galaxie}}$
- ✓ $L_{\text{SNe Ia}} \approx \text{const}$

Cosmologie observationnelle : SNe Ia

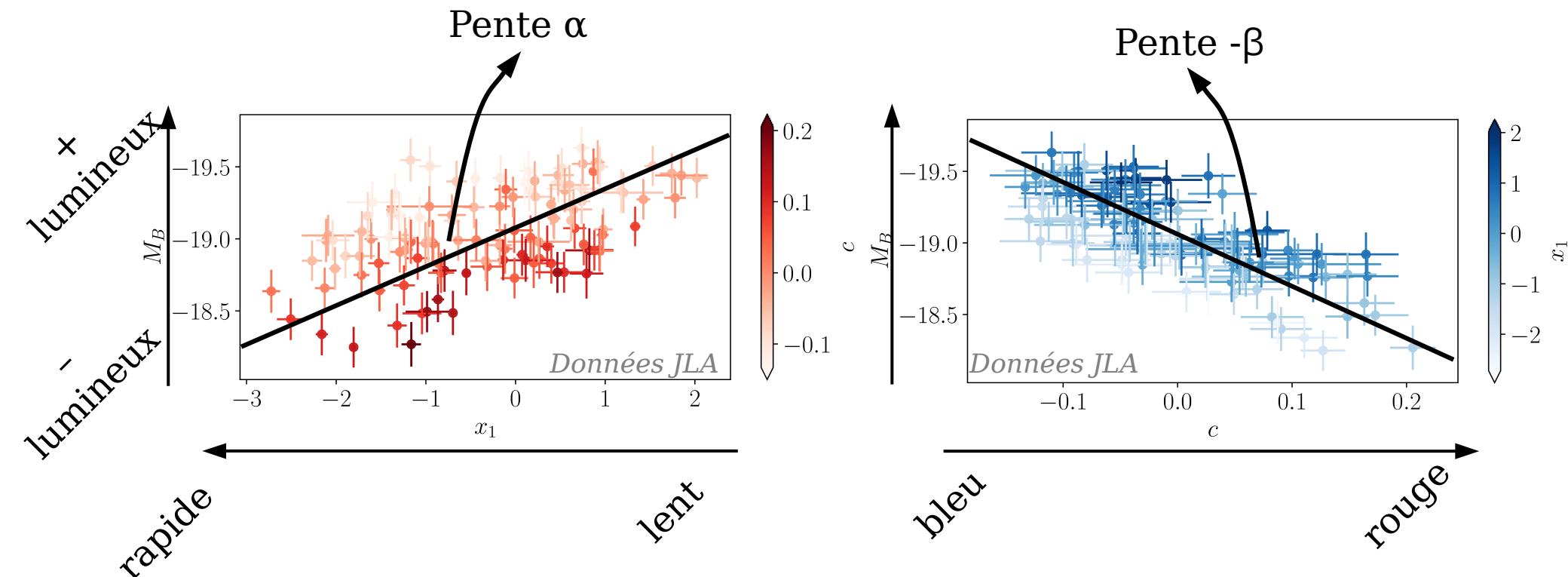


« Chandelles standardisables »

Paramètres de courbe de lumière



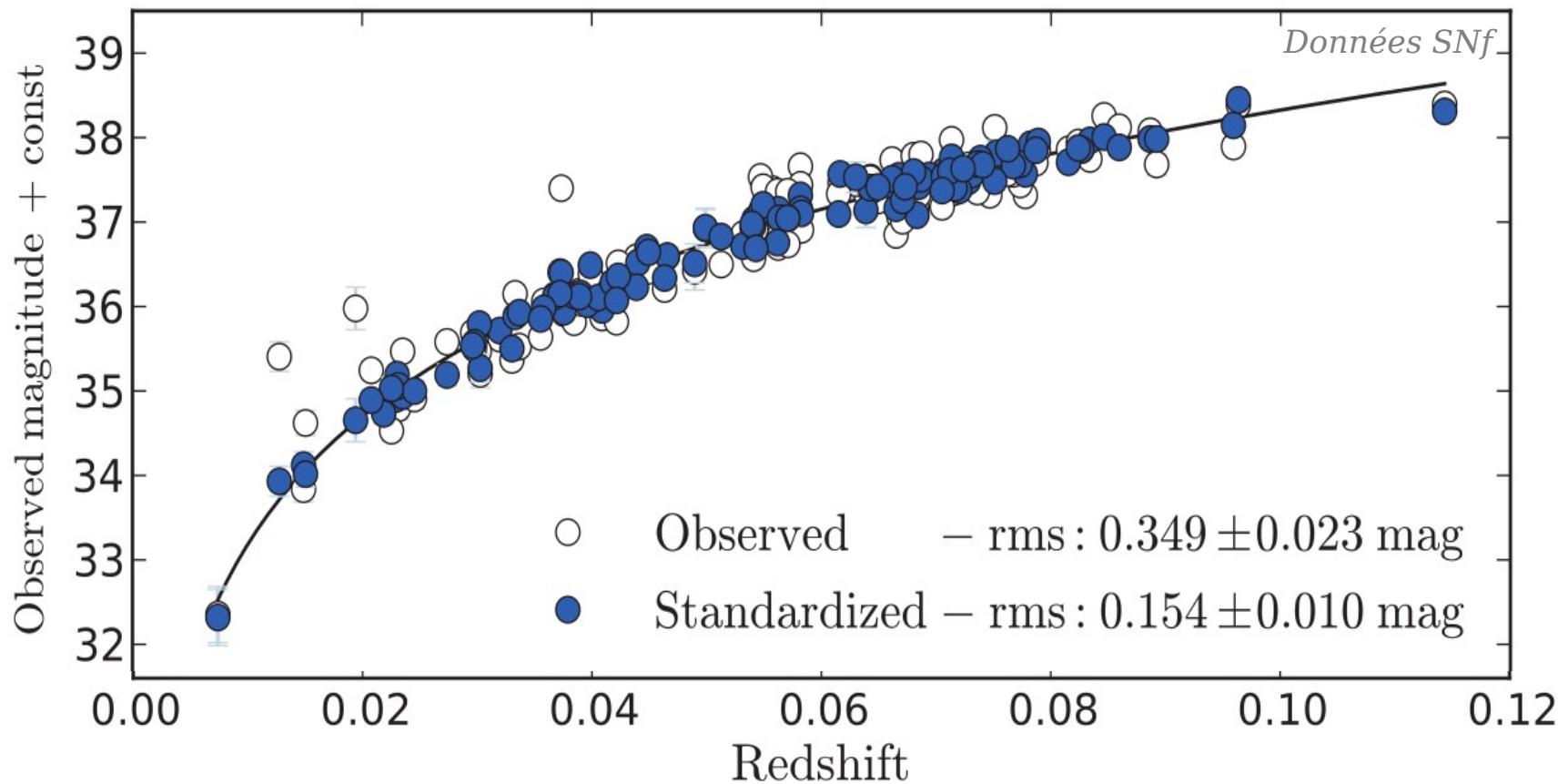
Relation luminosité - largeur et couleur



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

Cosmologie observationnelle : SNe Ia

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



Standardisation via l'environnement

Différence brute de luminosité entre deux populations → marche de magnitude

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

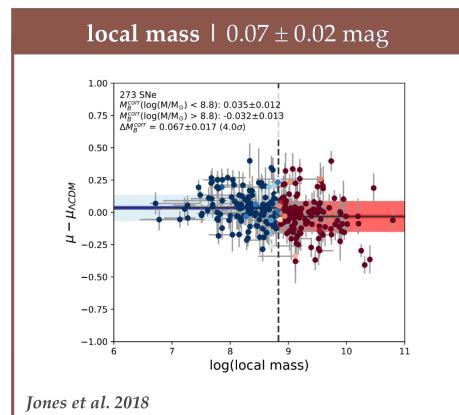
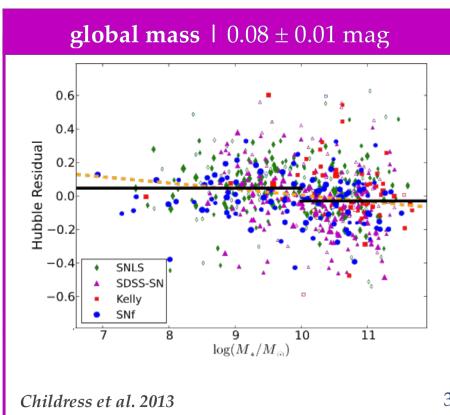
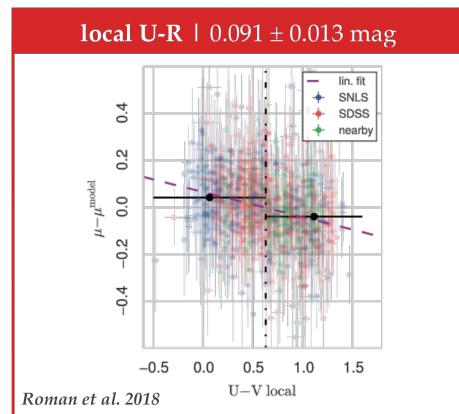
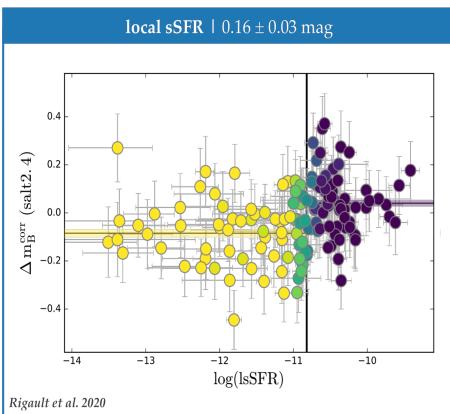
Marche de
magnitude

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

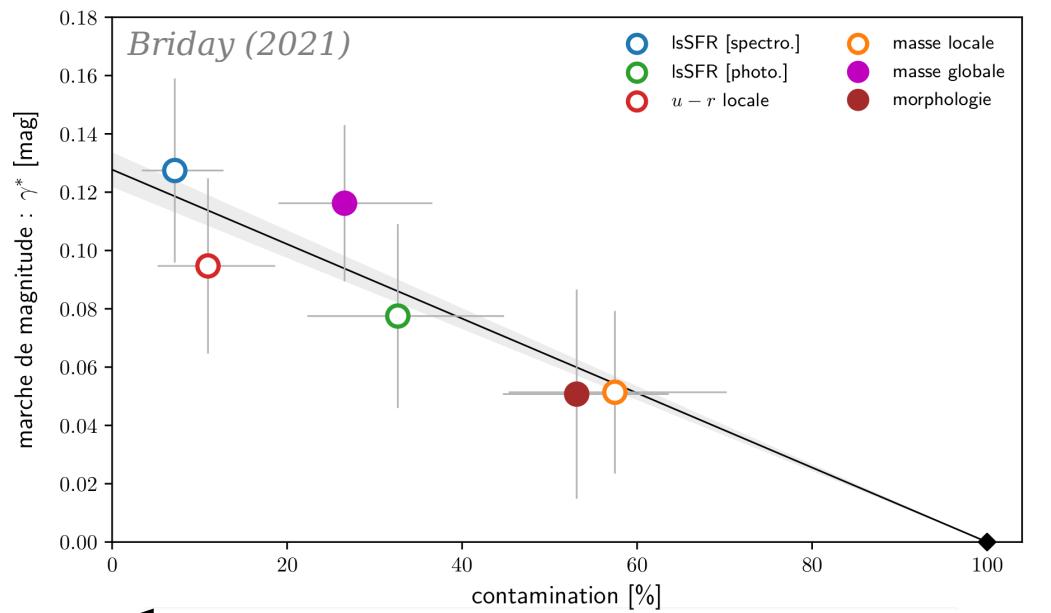
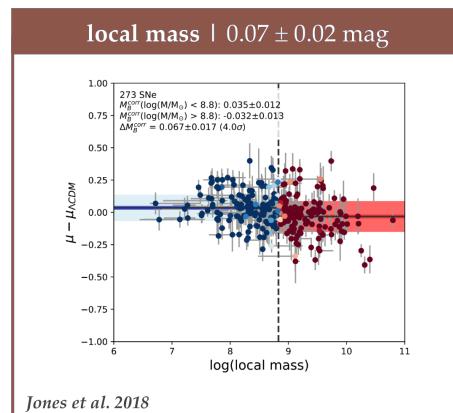
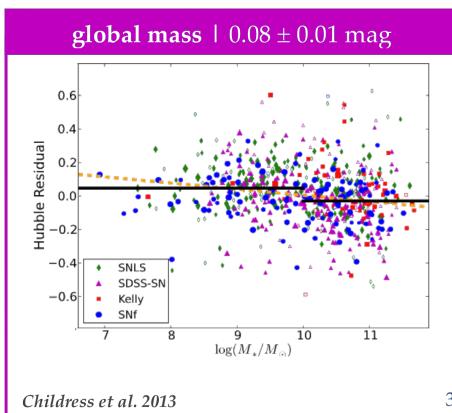
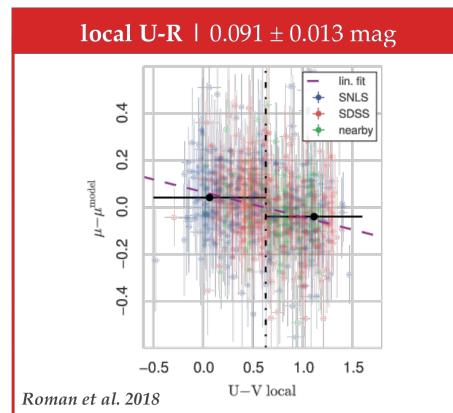
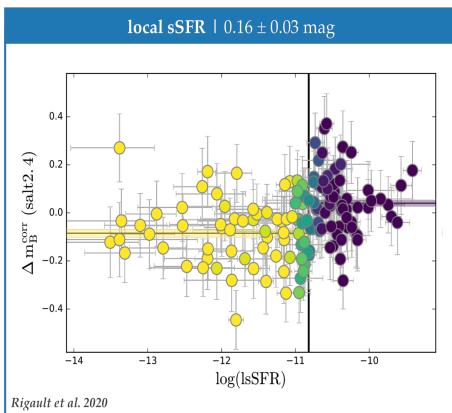


Standardisation via l'environnement

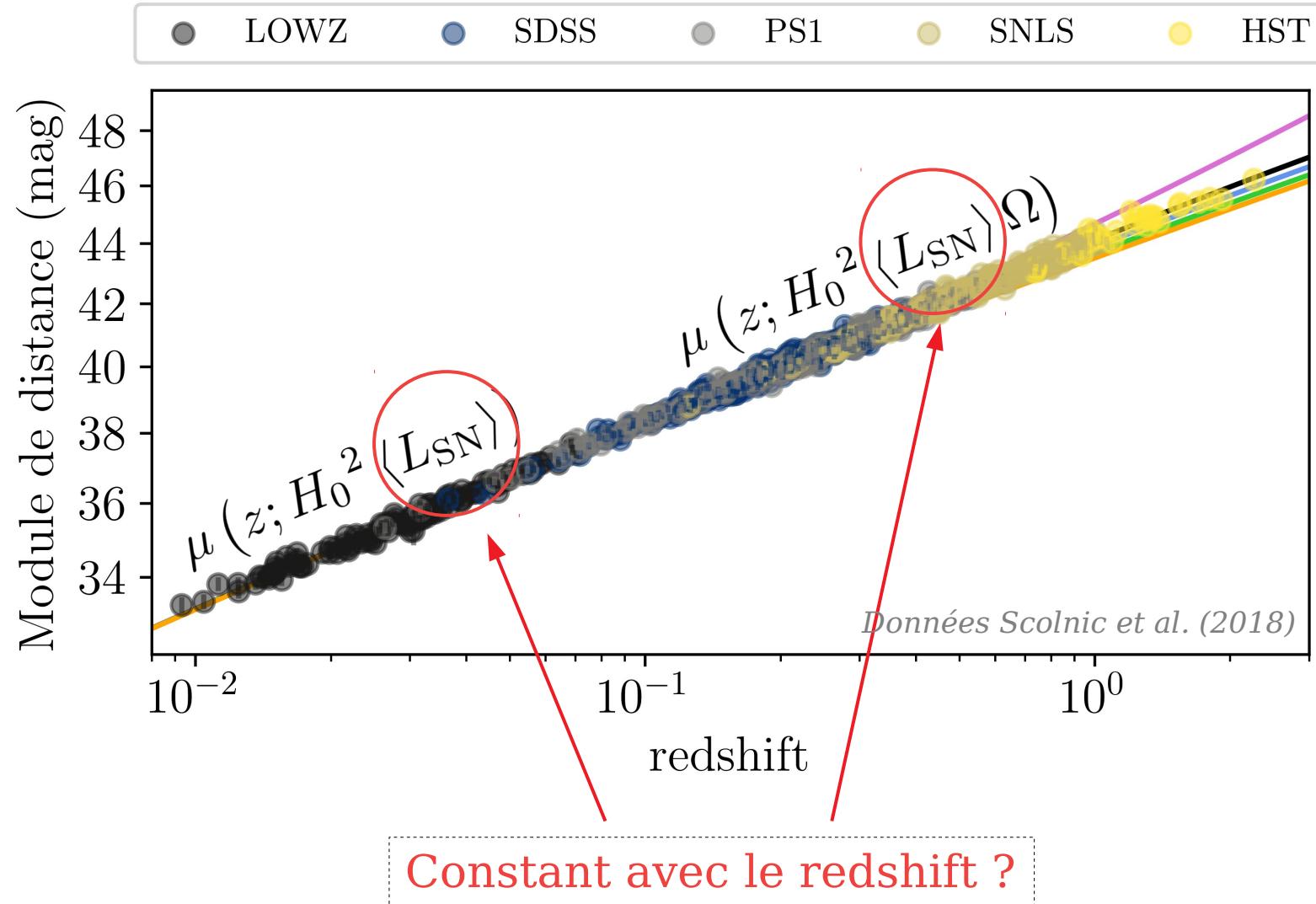
Différence brute de luminosité entre deux populations → marche de magnitude

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

Marche de magnitude



Erreurs systématiques - ancrage de l'étude



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

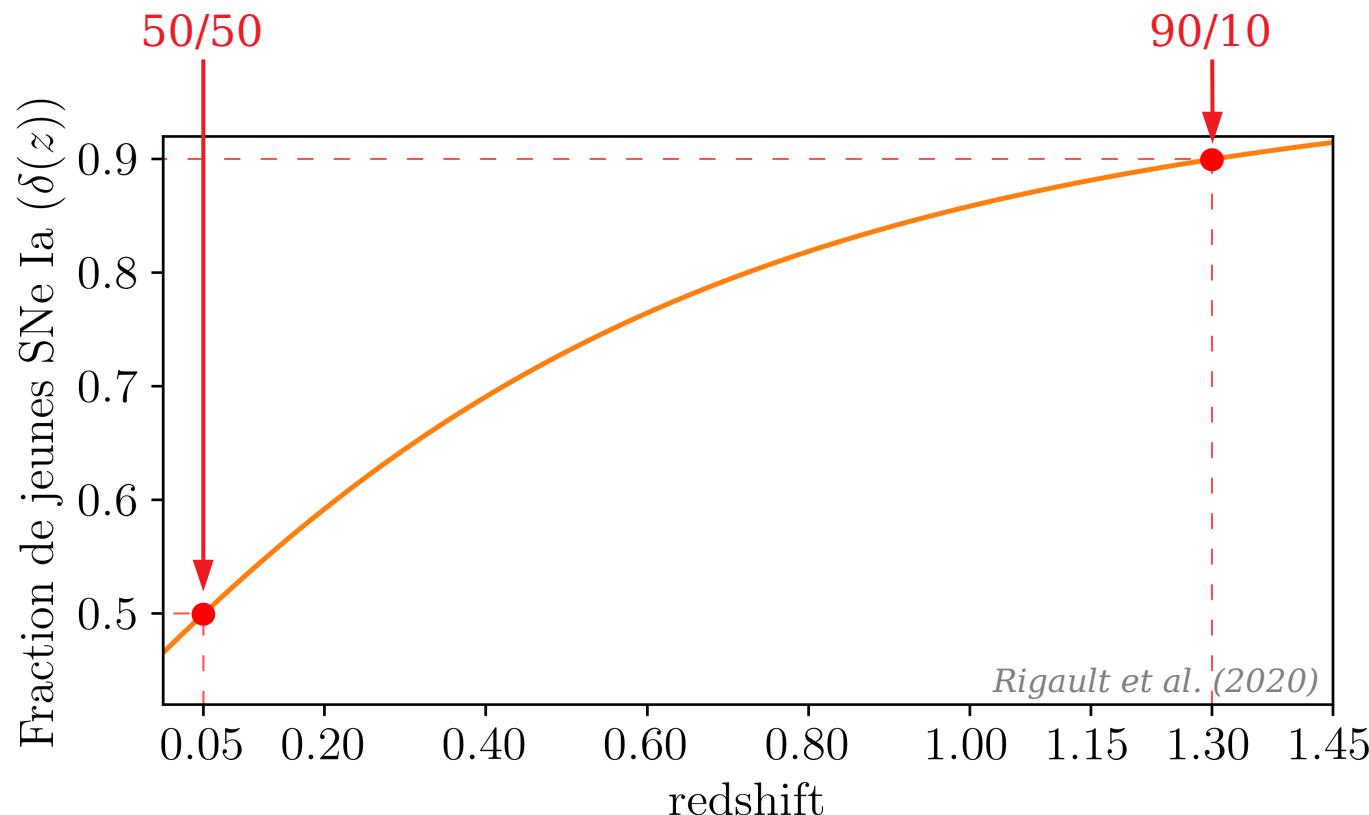
$$N_{\text{jeunes}} \propto SFR$$

Taux de formation stellaire

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

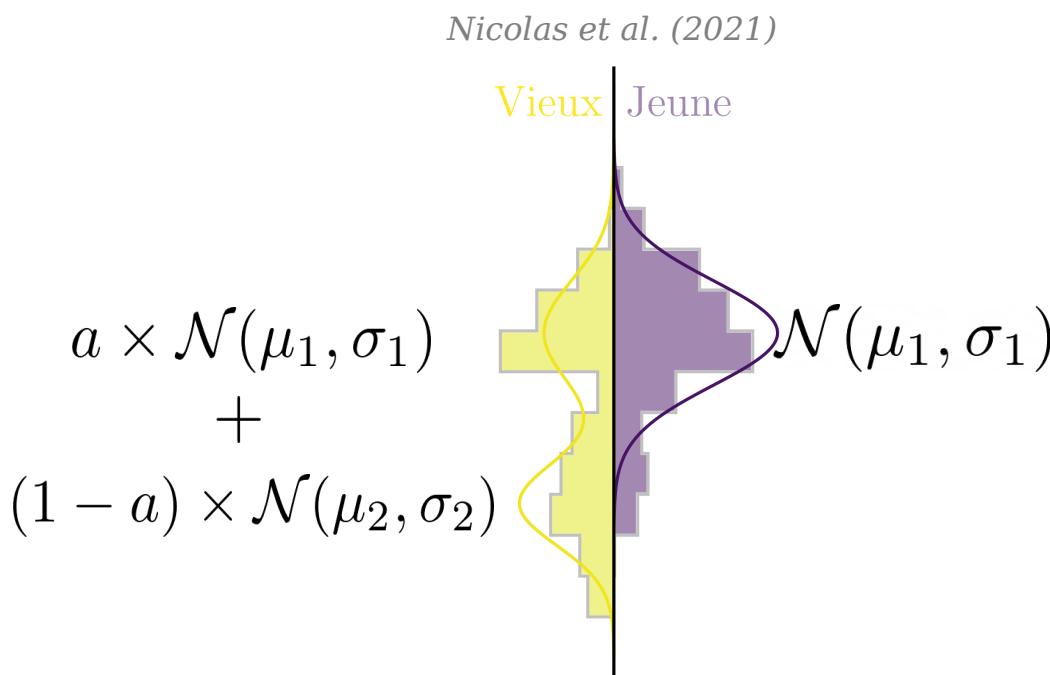
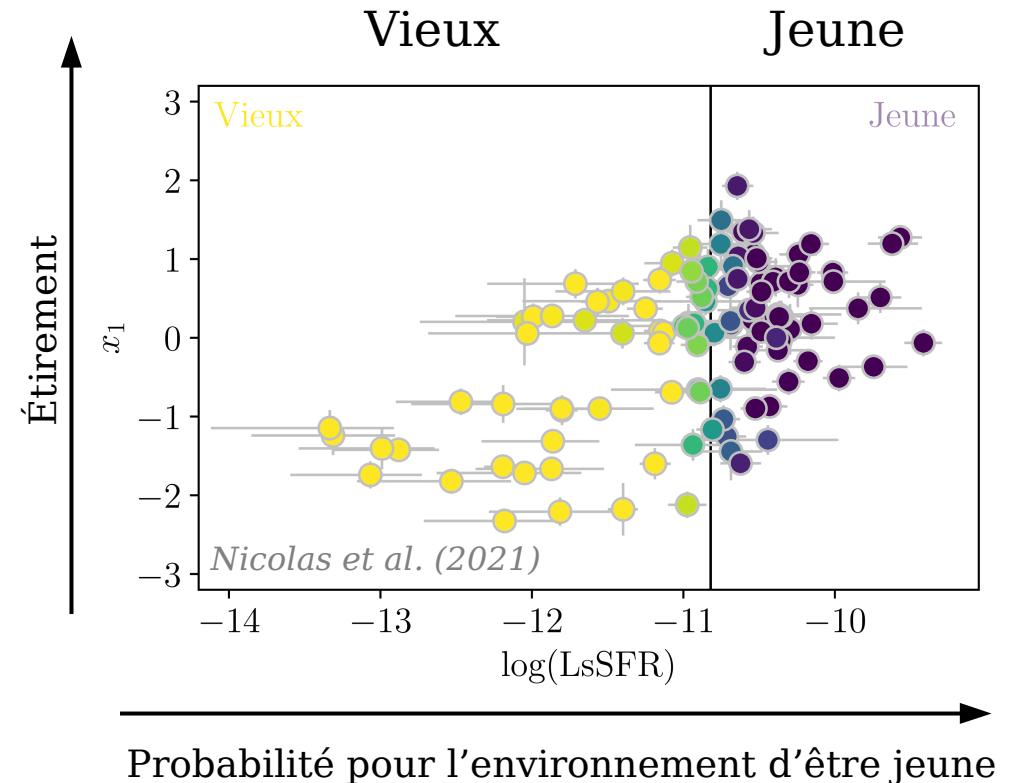
Masse de la galaxie hôte

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



Environnement évolue avec le redshift

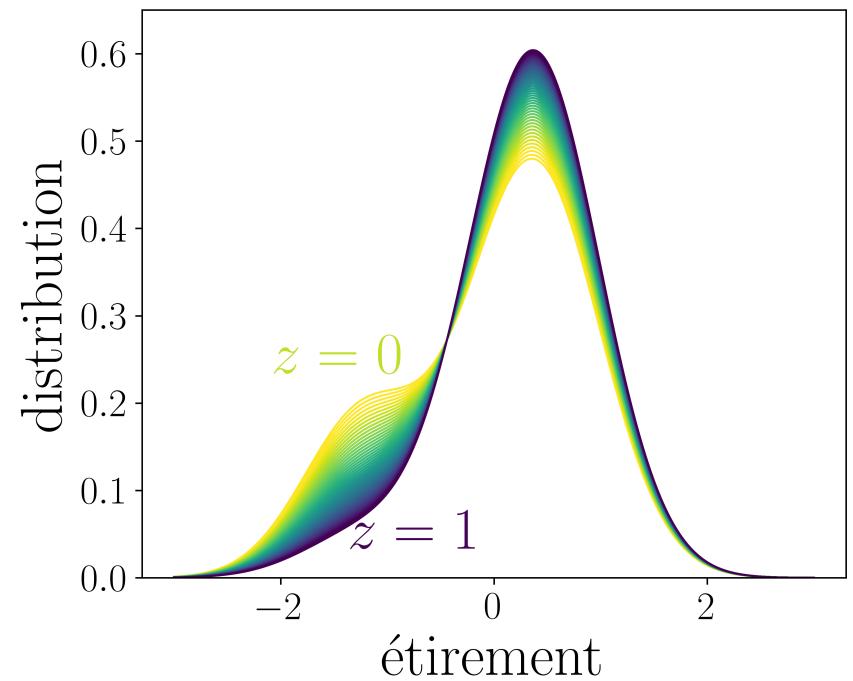
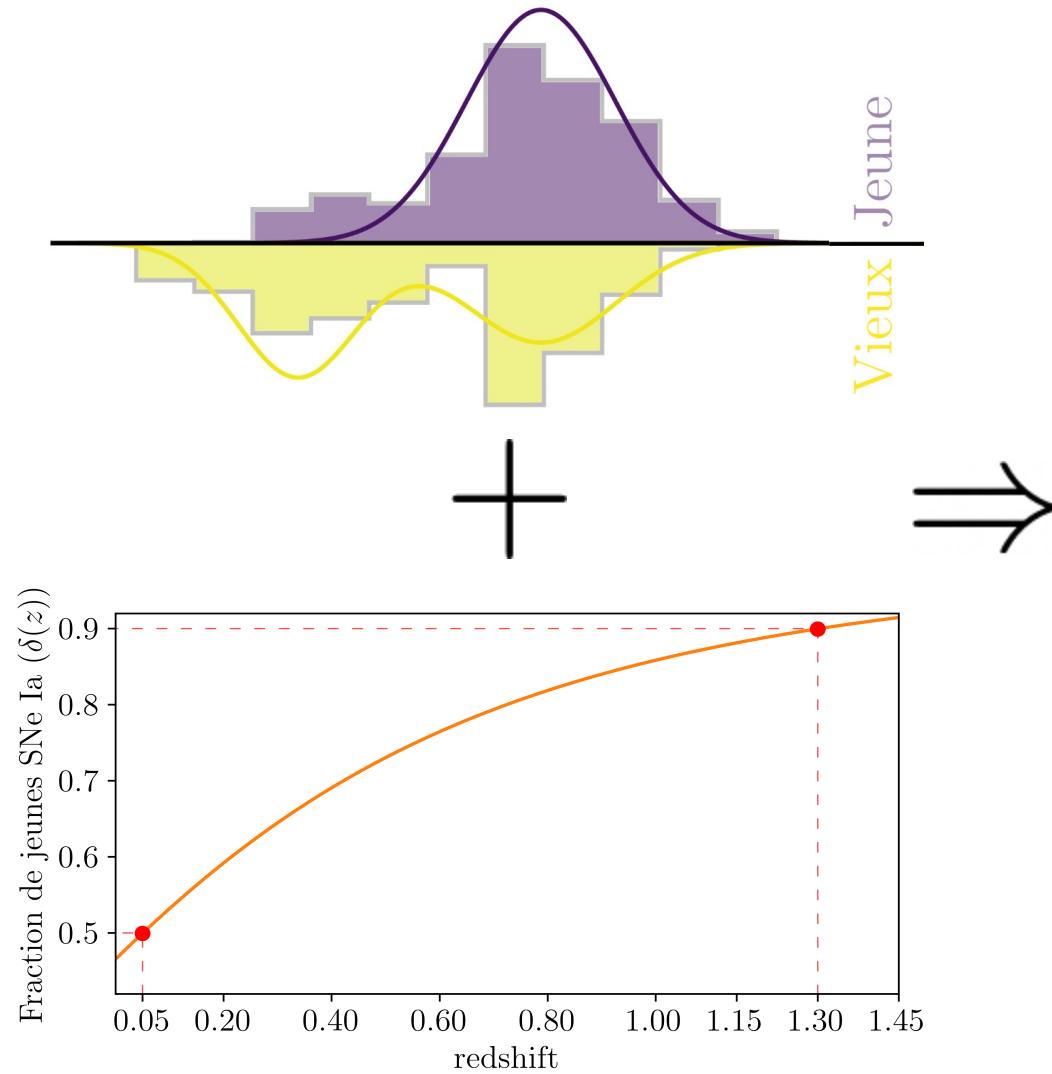
Base de réflexion : Modèle d'évolution des SNe jeunes et vieilles



SNe Ia dépendent de l'environnement

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

Nicolas et al. (2021)

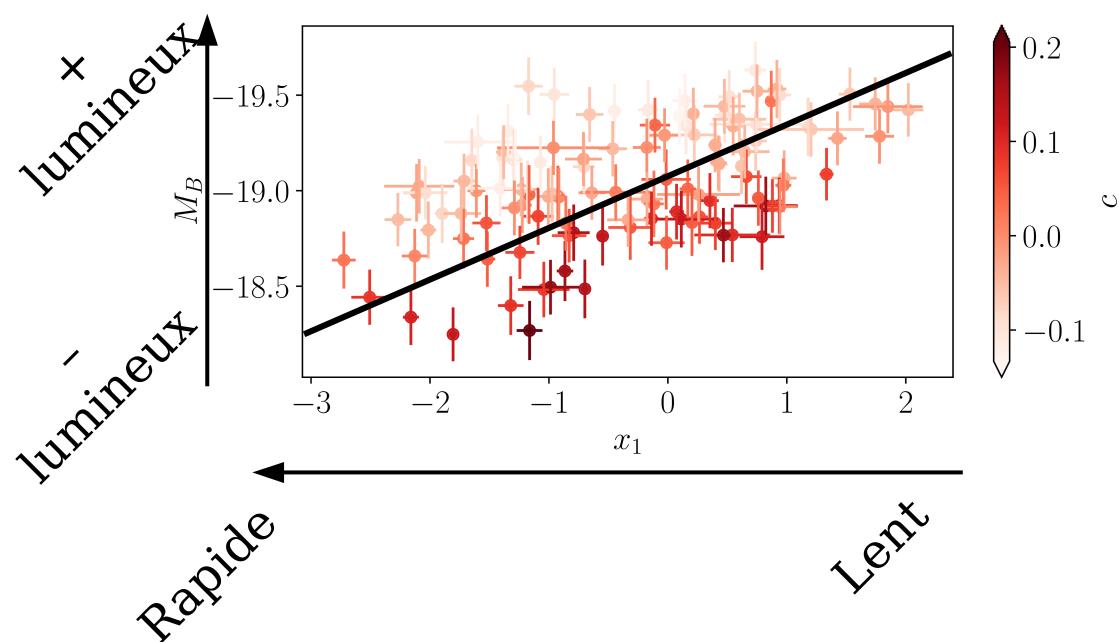
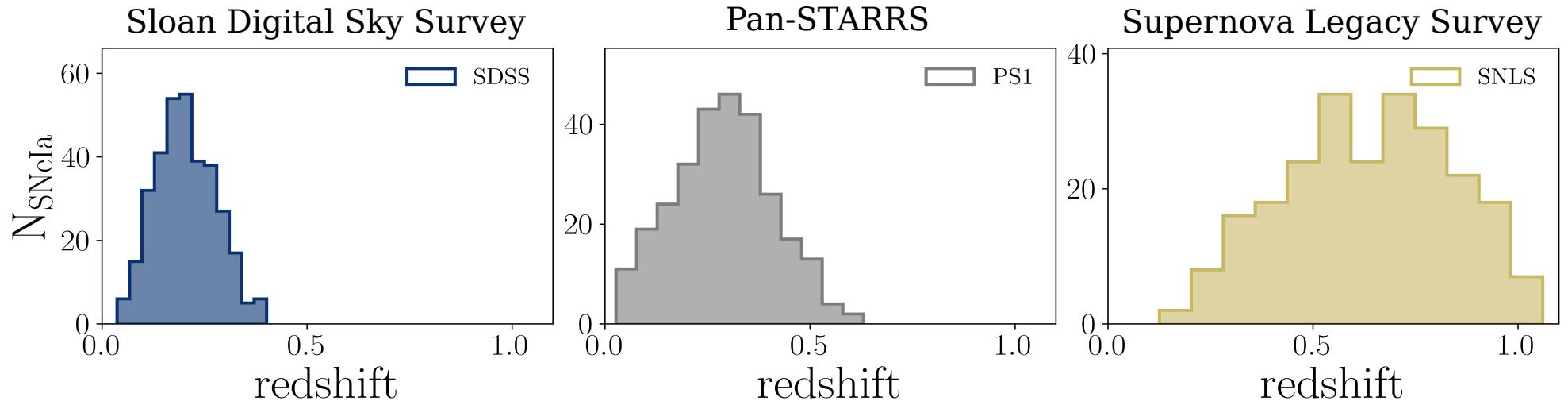


Distribution des
étirements des SNe Ia
évolue avec le redshift

Échantillon total

Avec effets de sélection

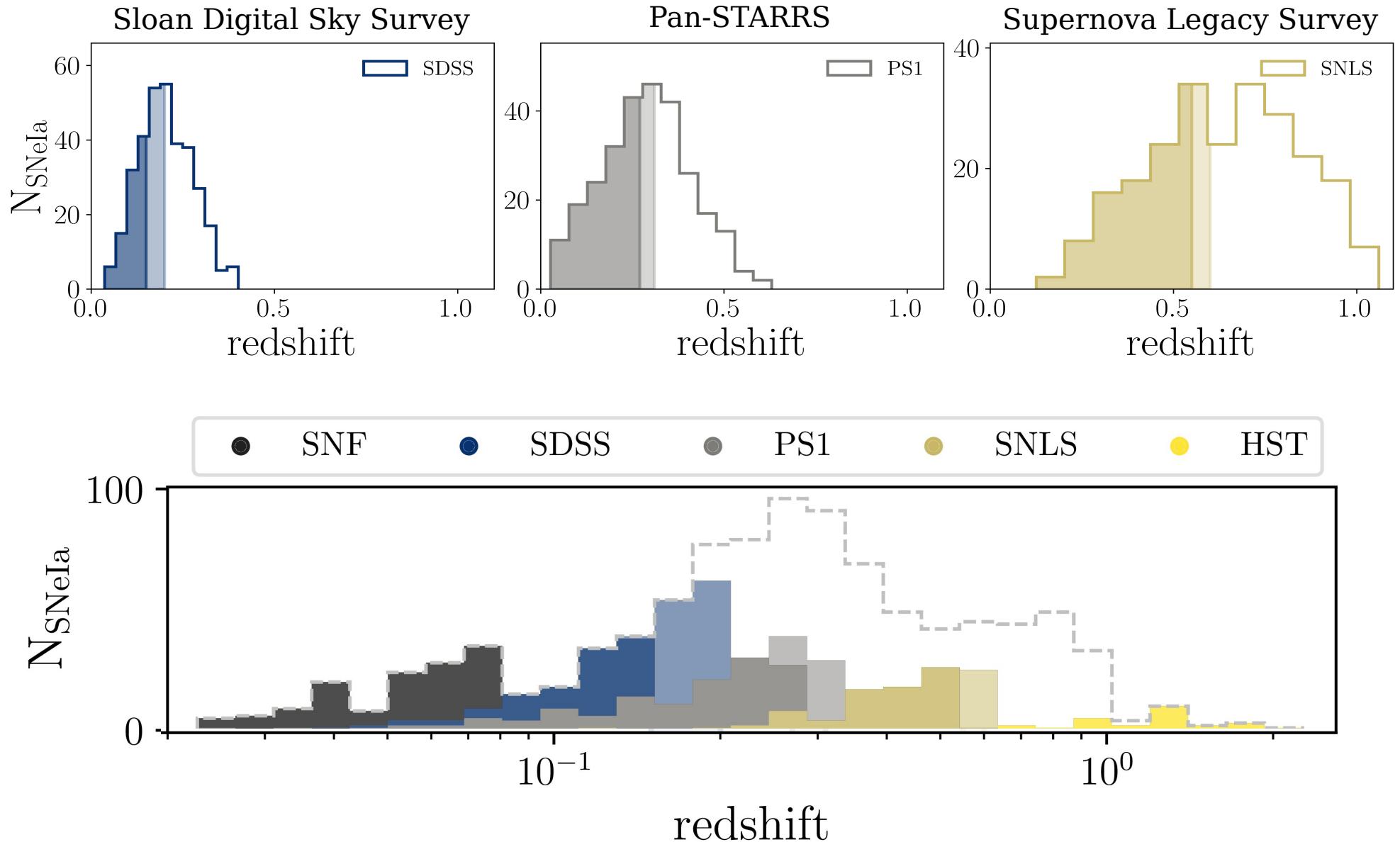
Nicolas et al. (2021)



Échantillon complet

Exempt d'effets de sélection

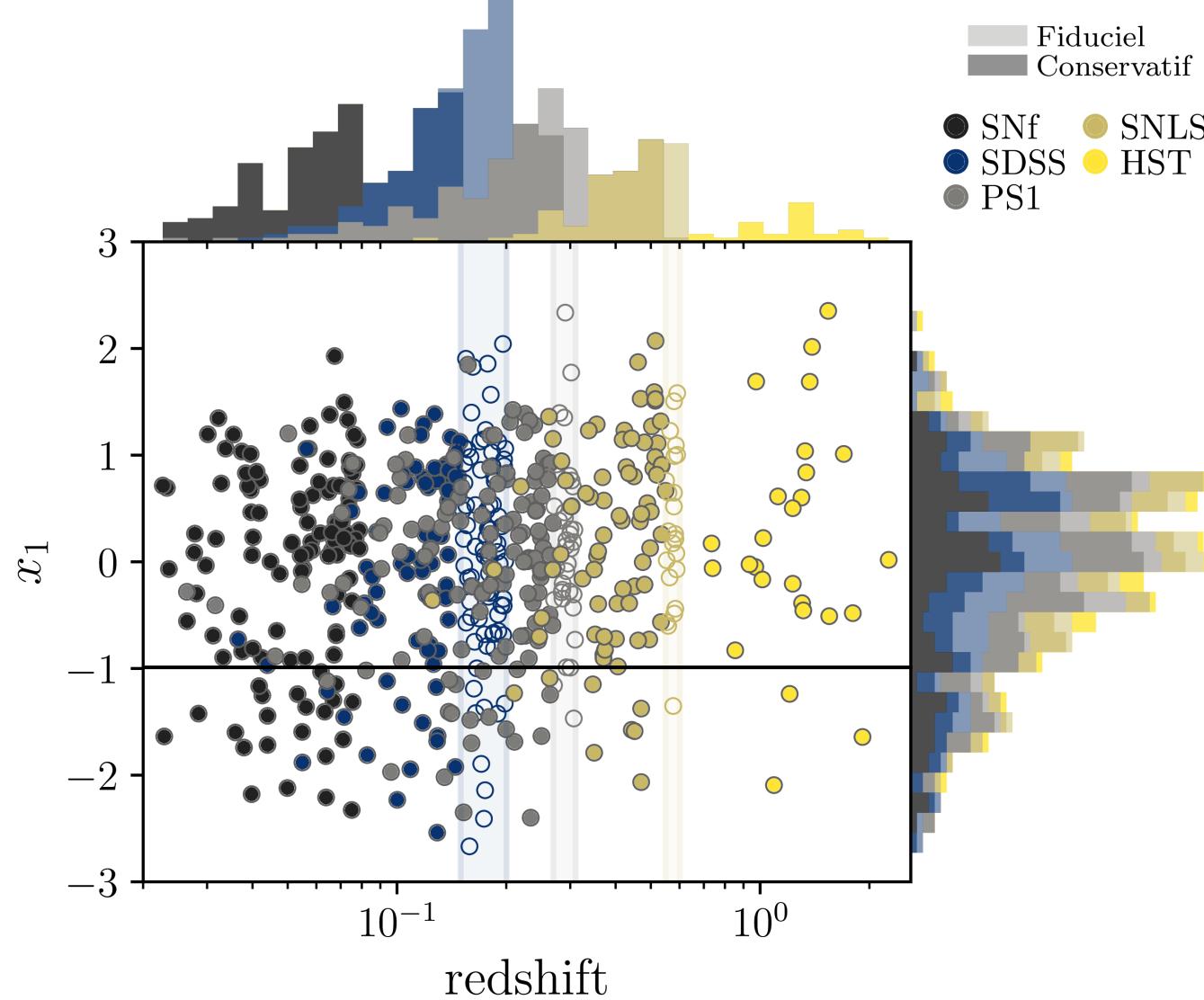
Nicolas et al. (2021)



Échantillon complet

Distribution des étirements

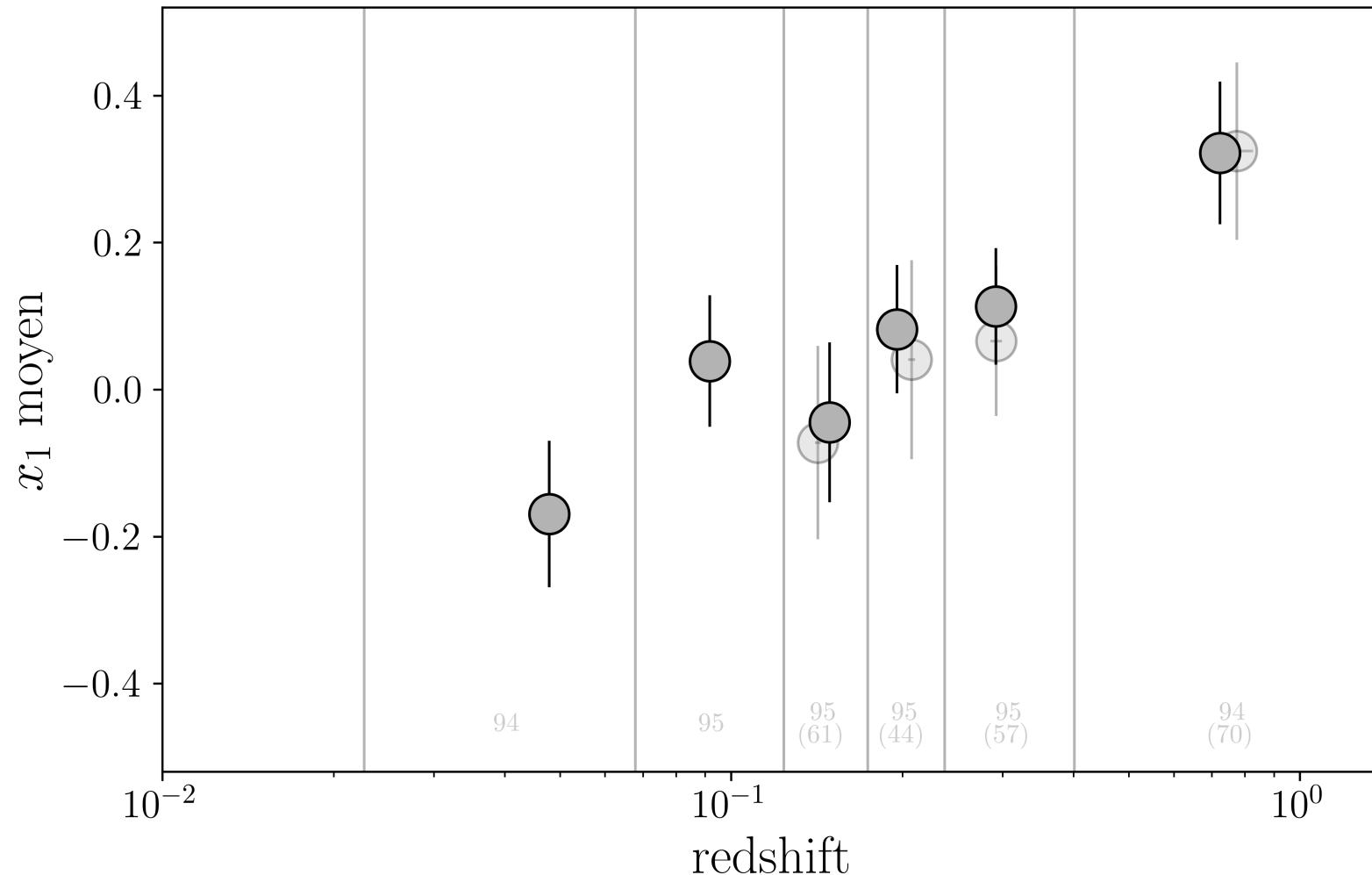
Nicolas et al. (2021)



Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

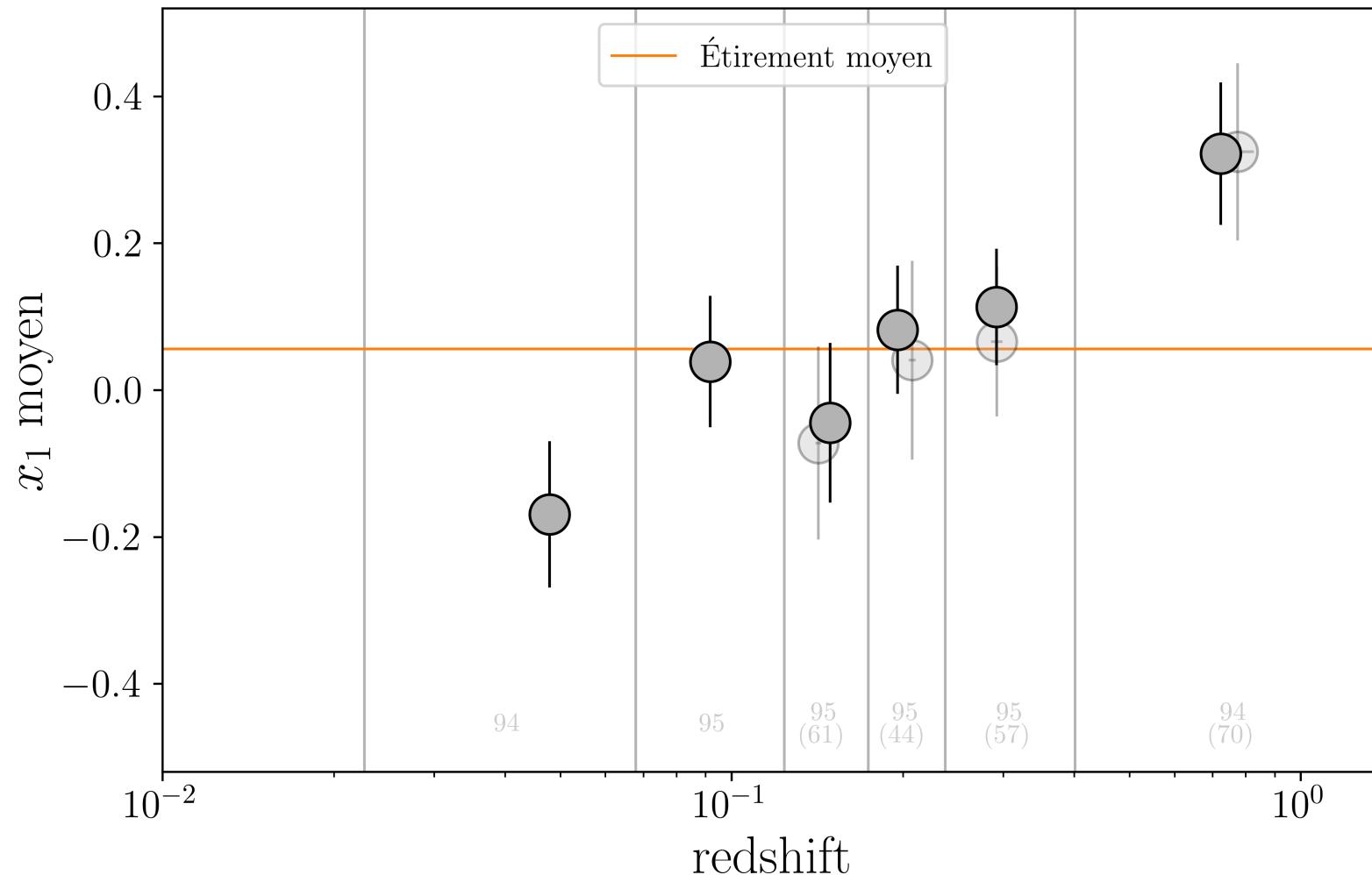
Nicolas et al. (2021)



Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

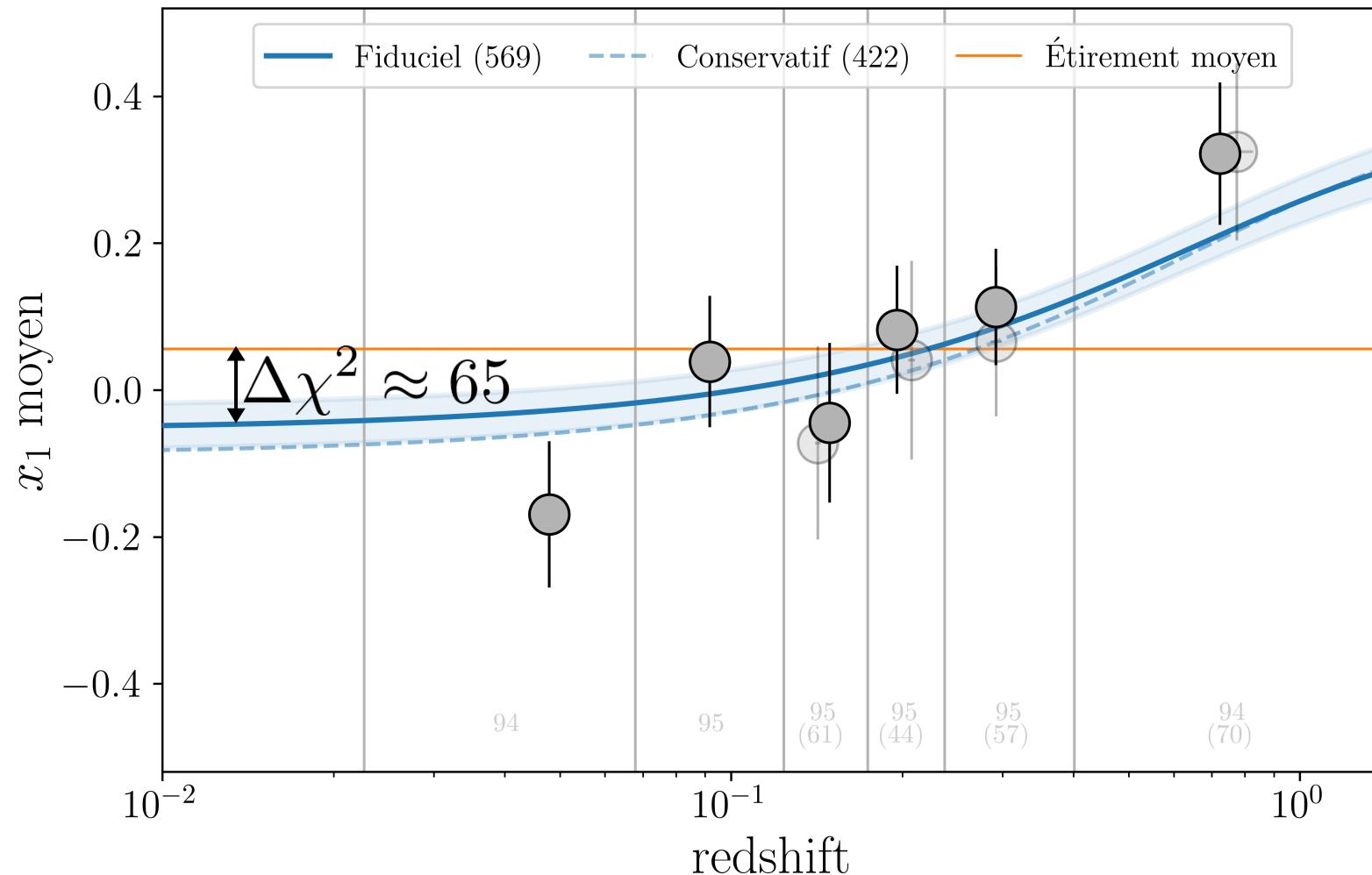
Nicolas et al. (2021)



Évolution de l'étirement

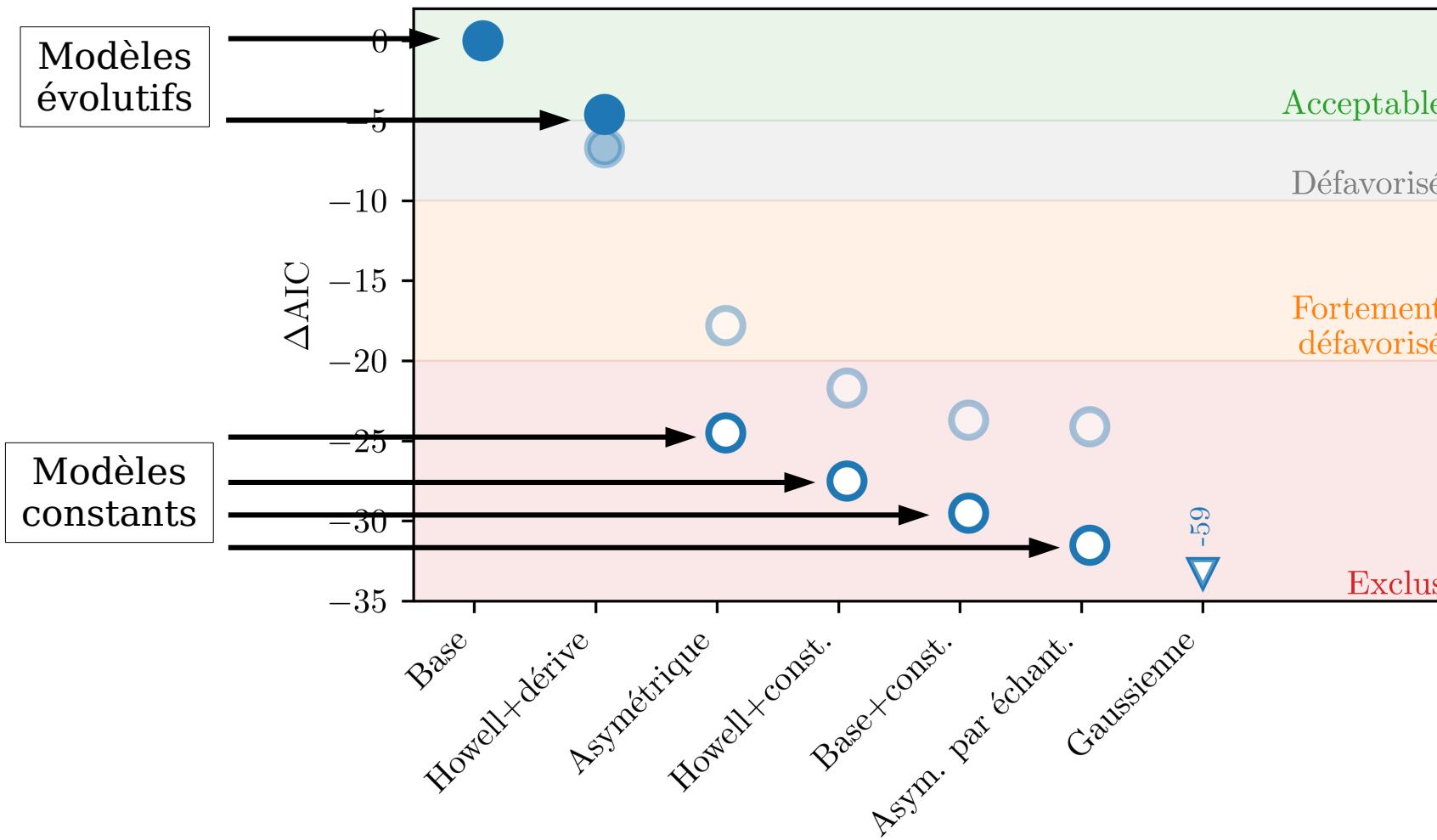
Dérive de l'étirement comparée aux données

Nicolas et al. (2021)



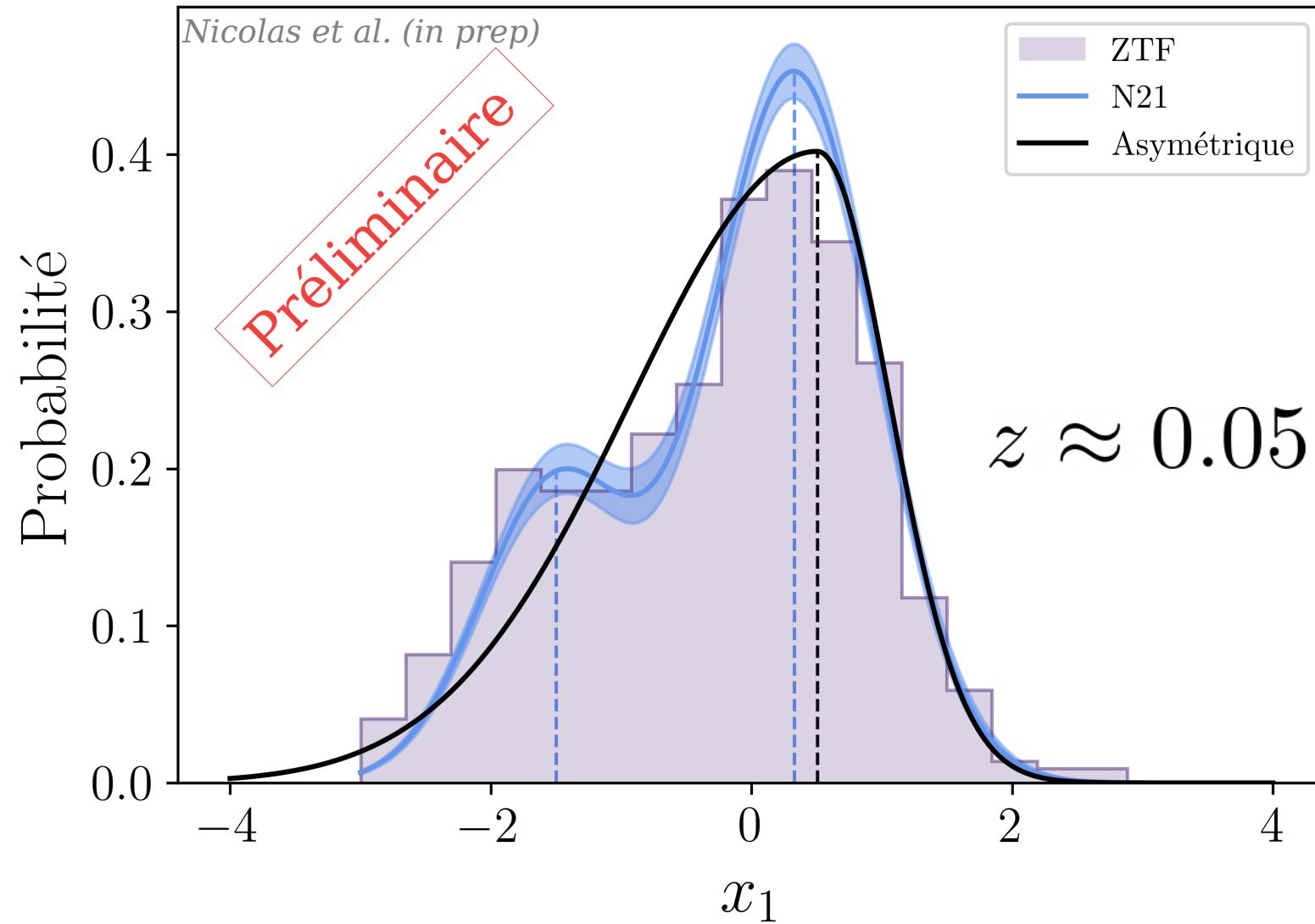
Résultats de la comparaison

Nicolas et al. (2021)



Mon modèle de base est devenu la référence pour la communauté

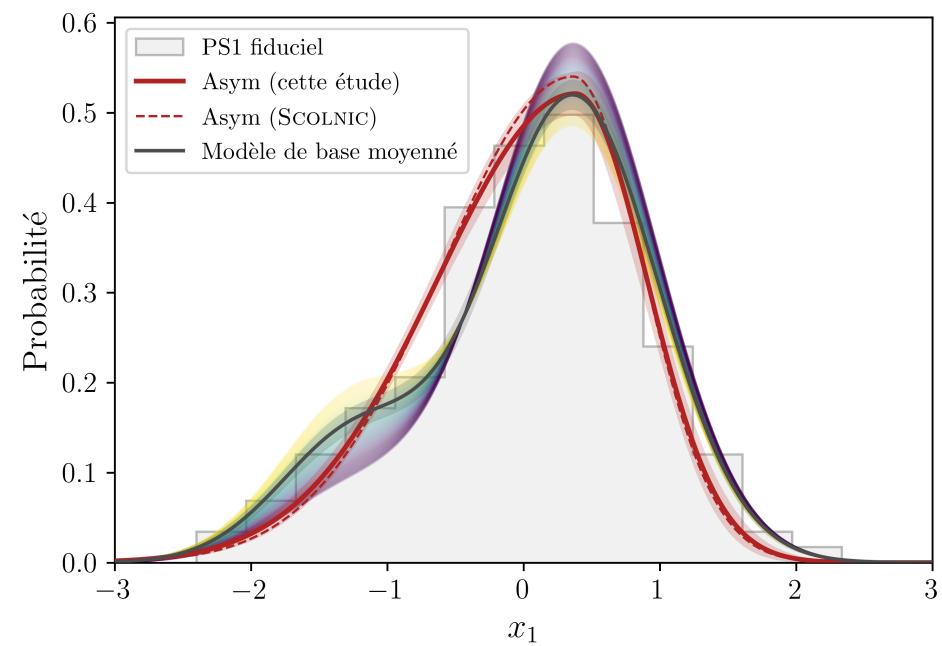
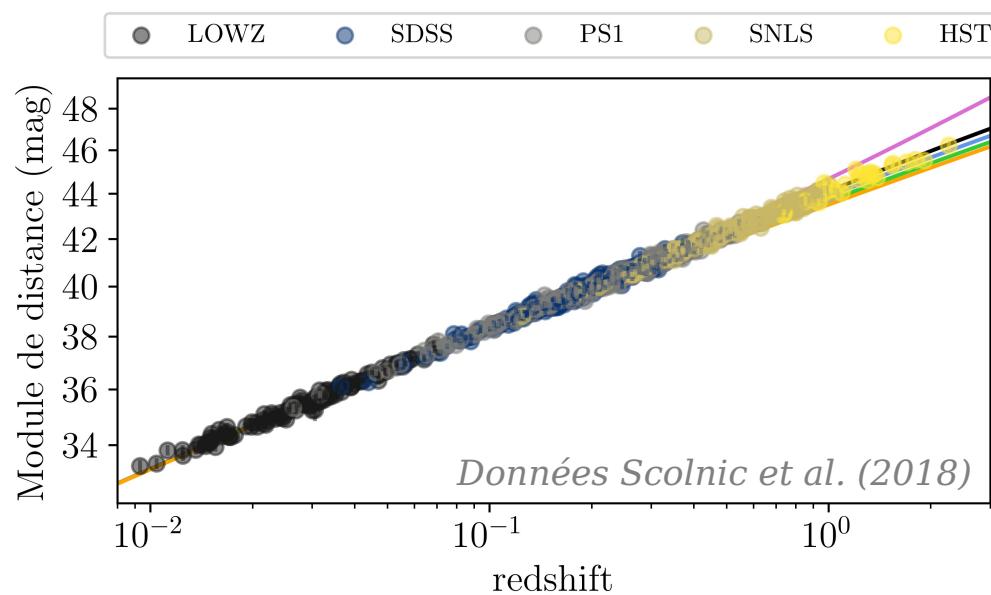
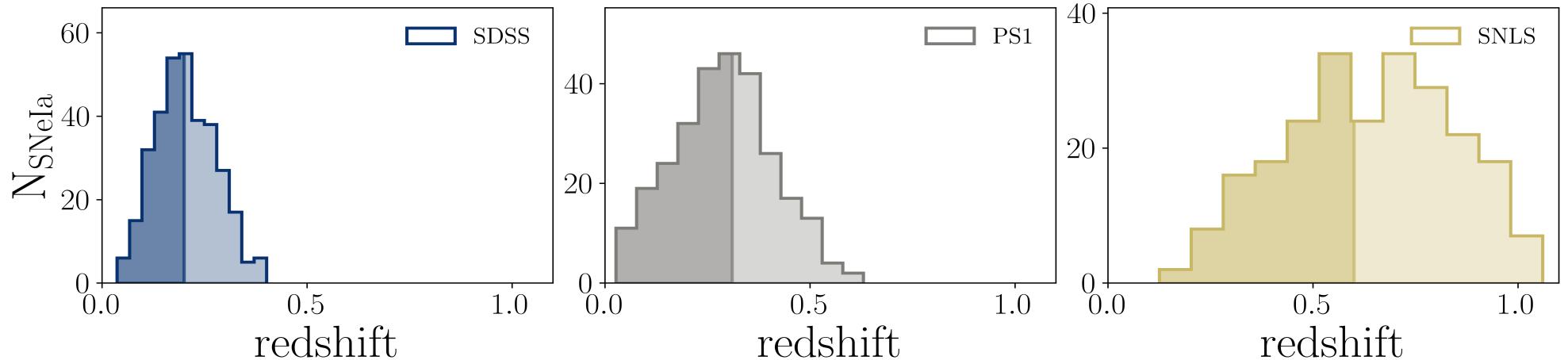
Force du modèle



Échantillon total

Avec effets de sélection

Nicolas et al. (2021)



Simulations avec SNANA

Présentation

Nicolas et al. (in prep)

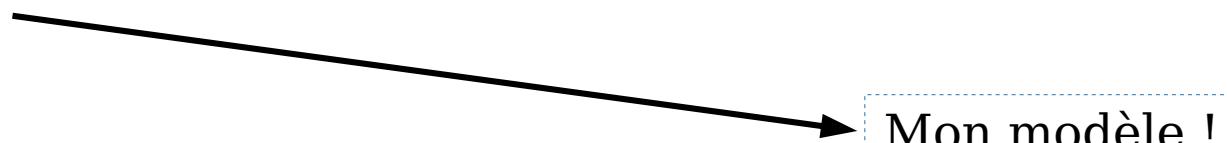
1) Choisir une galaxie

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

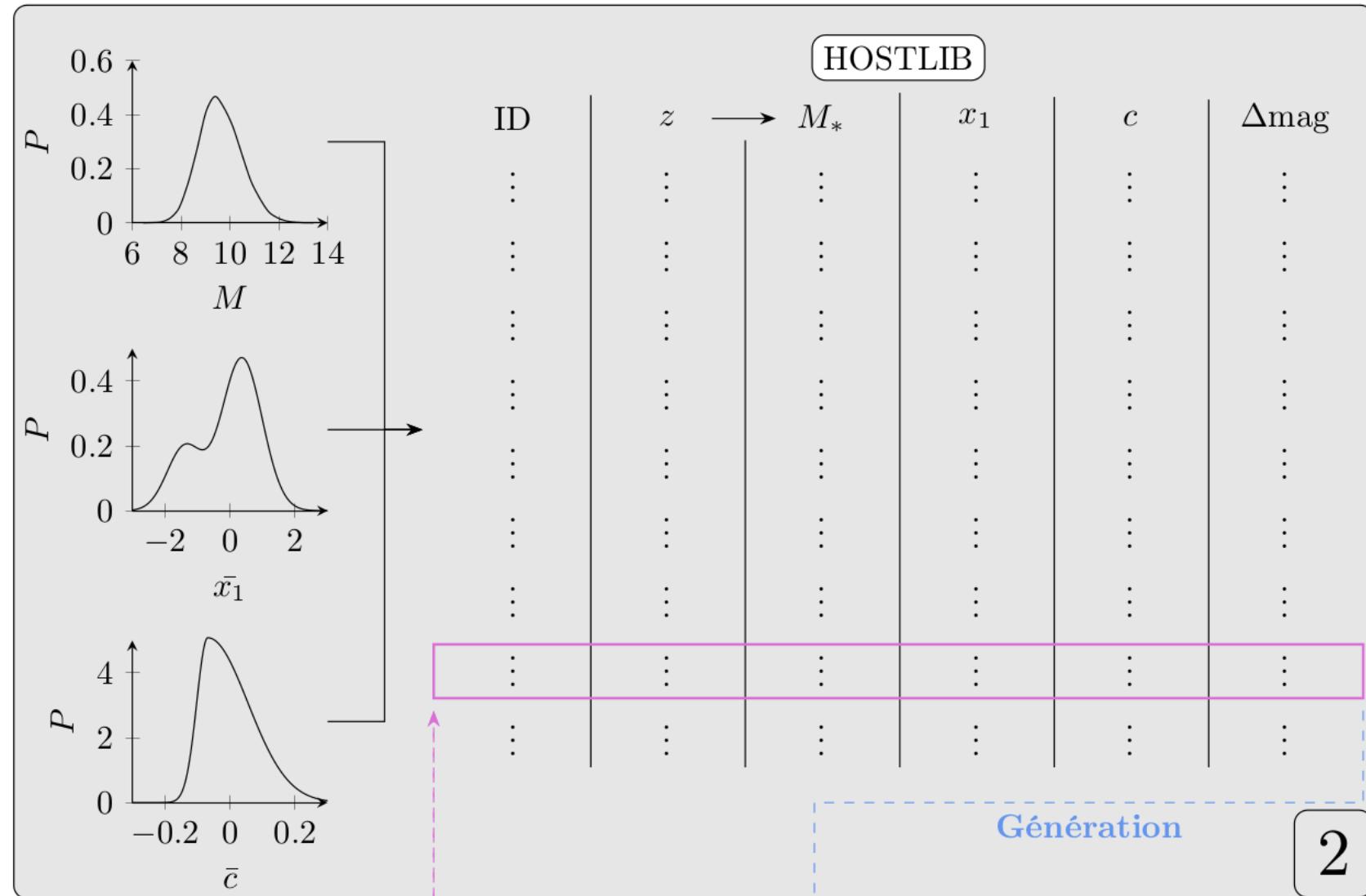
Mon modèle !

Simulations avec SNANA

Présentation

Nicolas et al. (in prep)

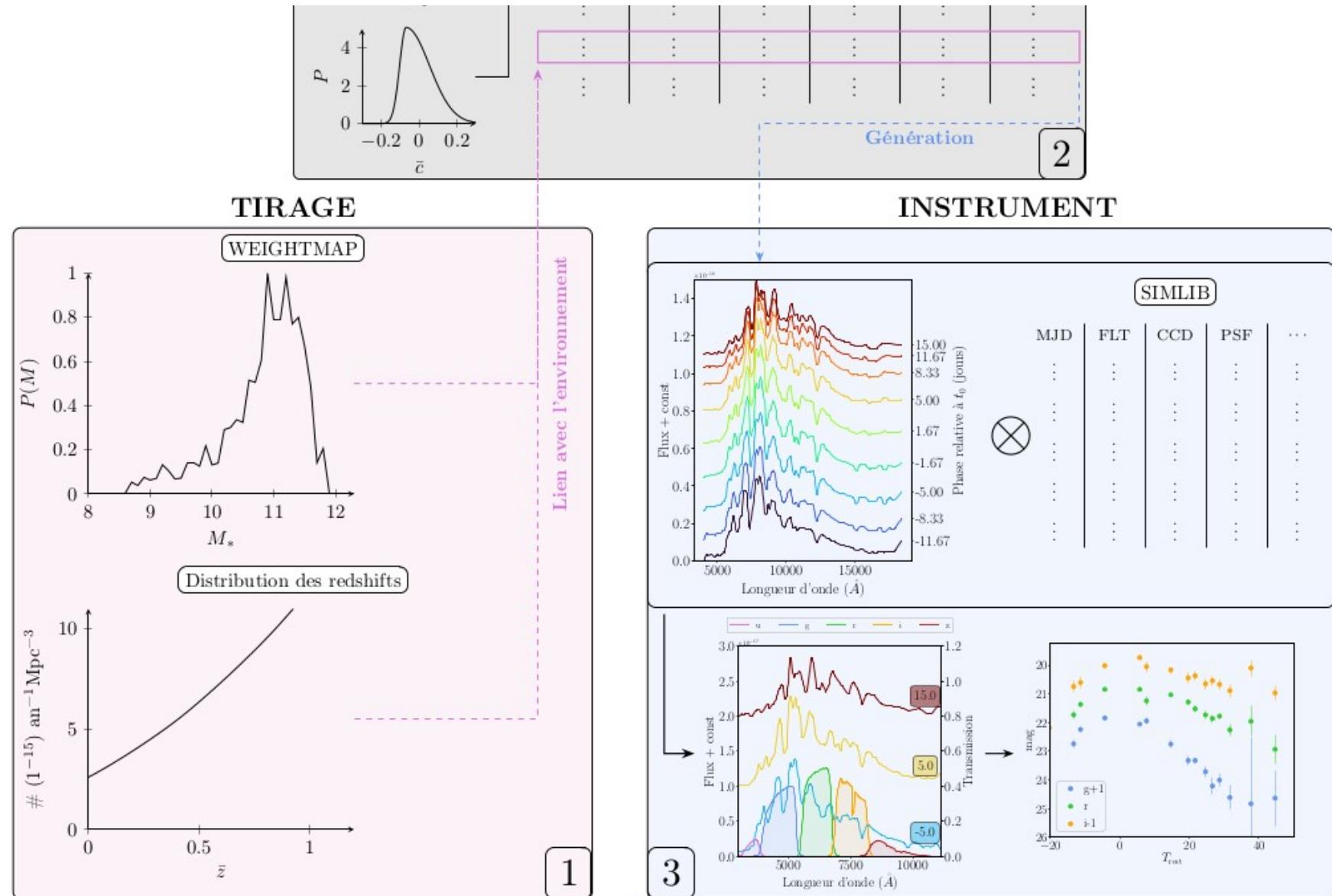
CRÉATION HOSTLIB



Simulations avec SNANA

Présentation

Nicolas et al. (in prep)

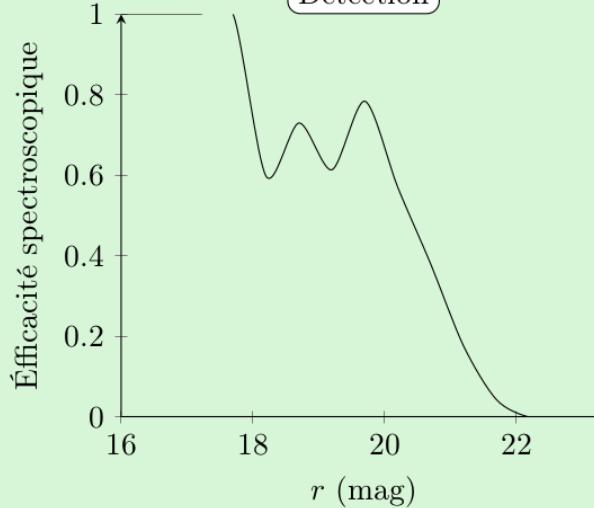


Simulations avec SNANA

Présentation

Nicolas et al. (in prep)

SÉLECTION



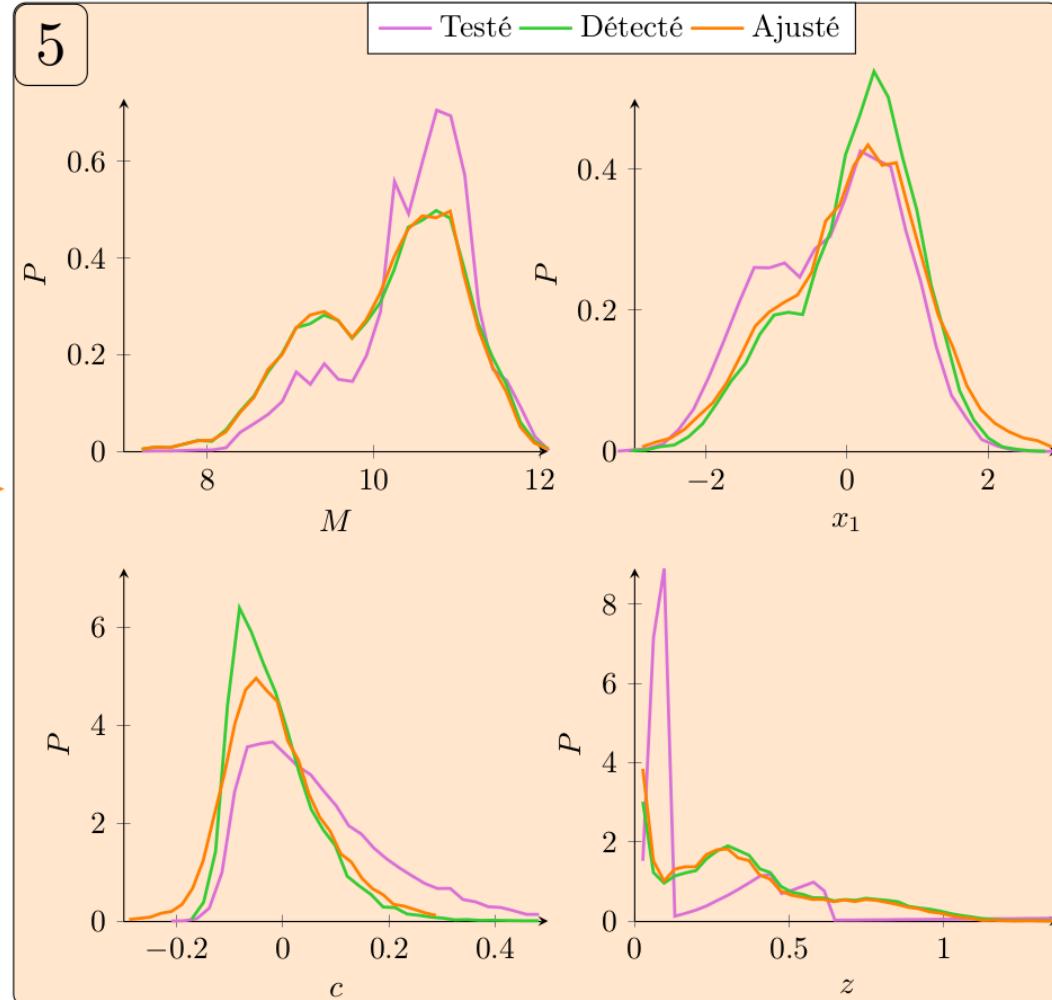
4

Coupes de qualité

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

Détection rejetée

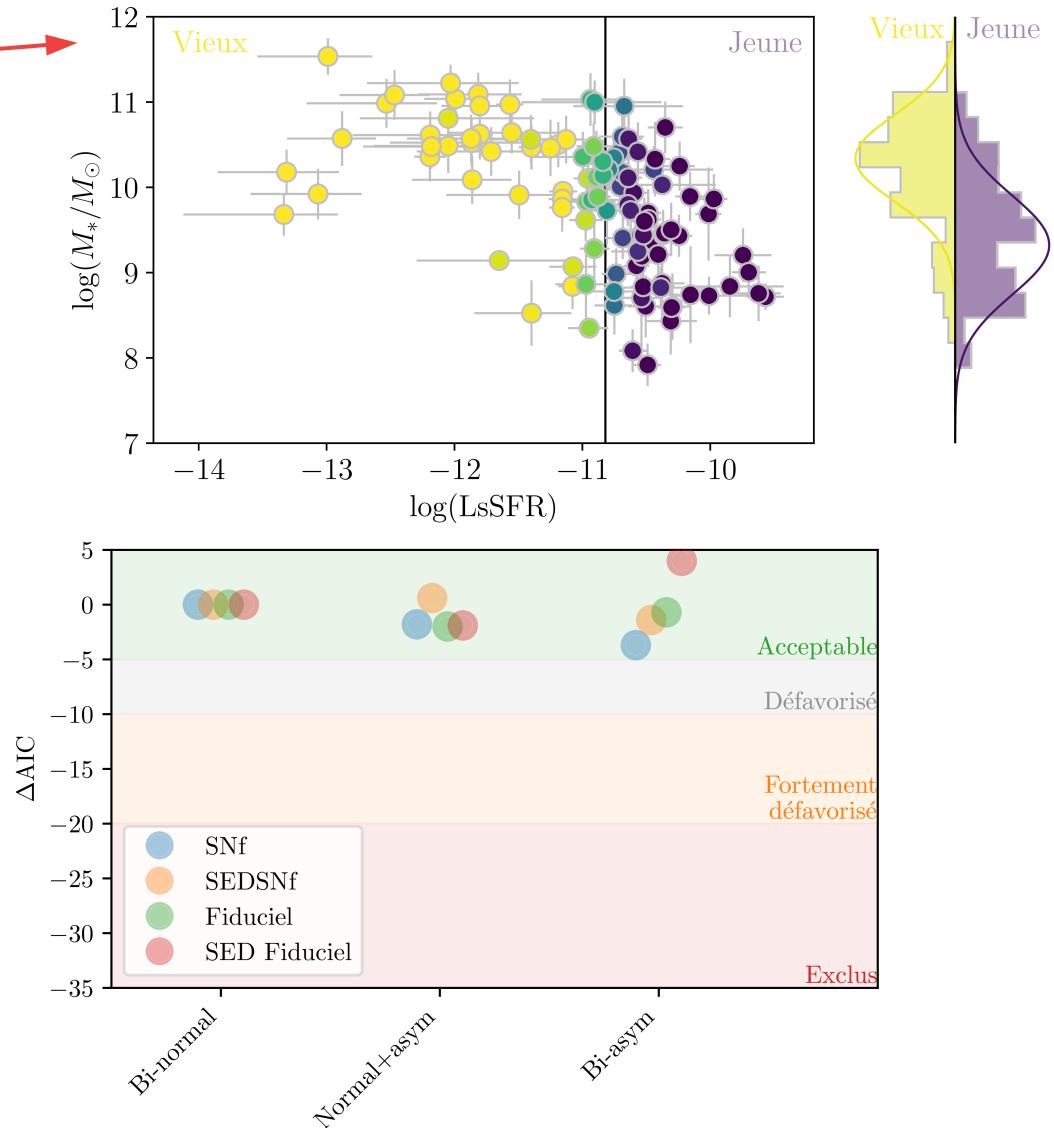
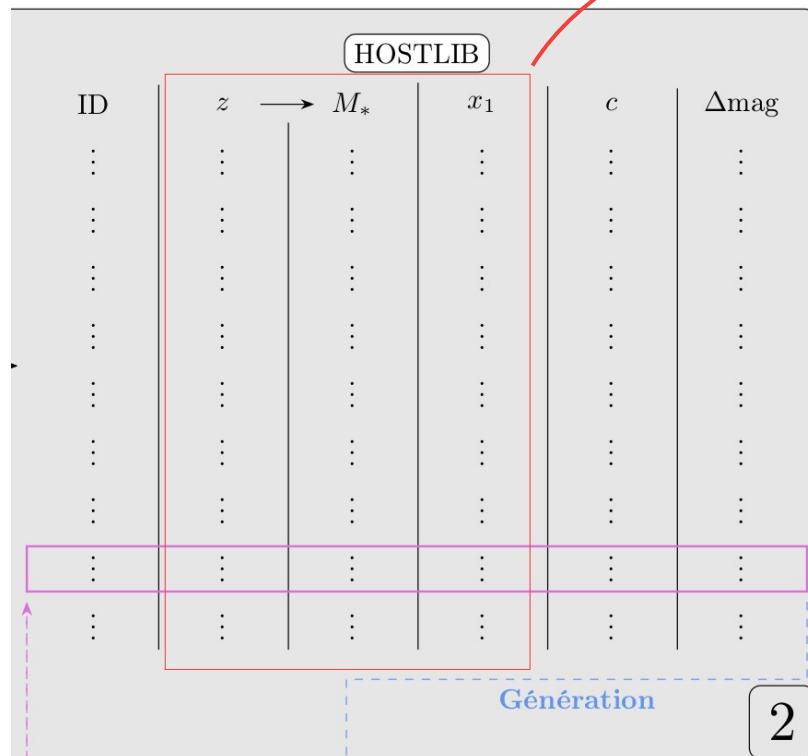
CONSERVÉ



Simulations avec SNANA

Implémentation du modèle dans les logiciels

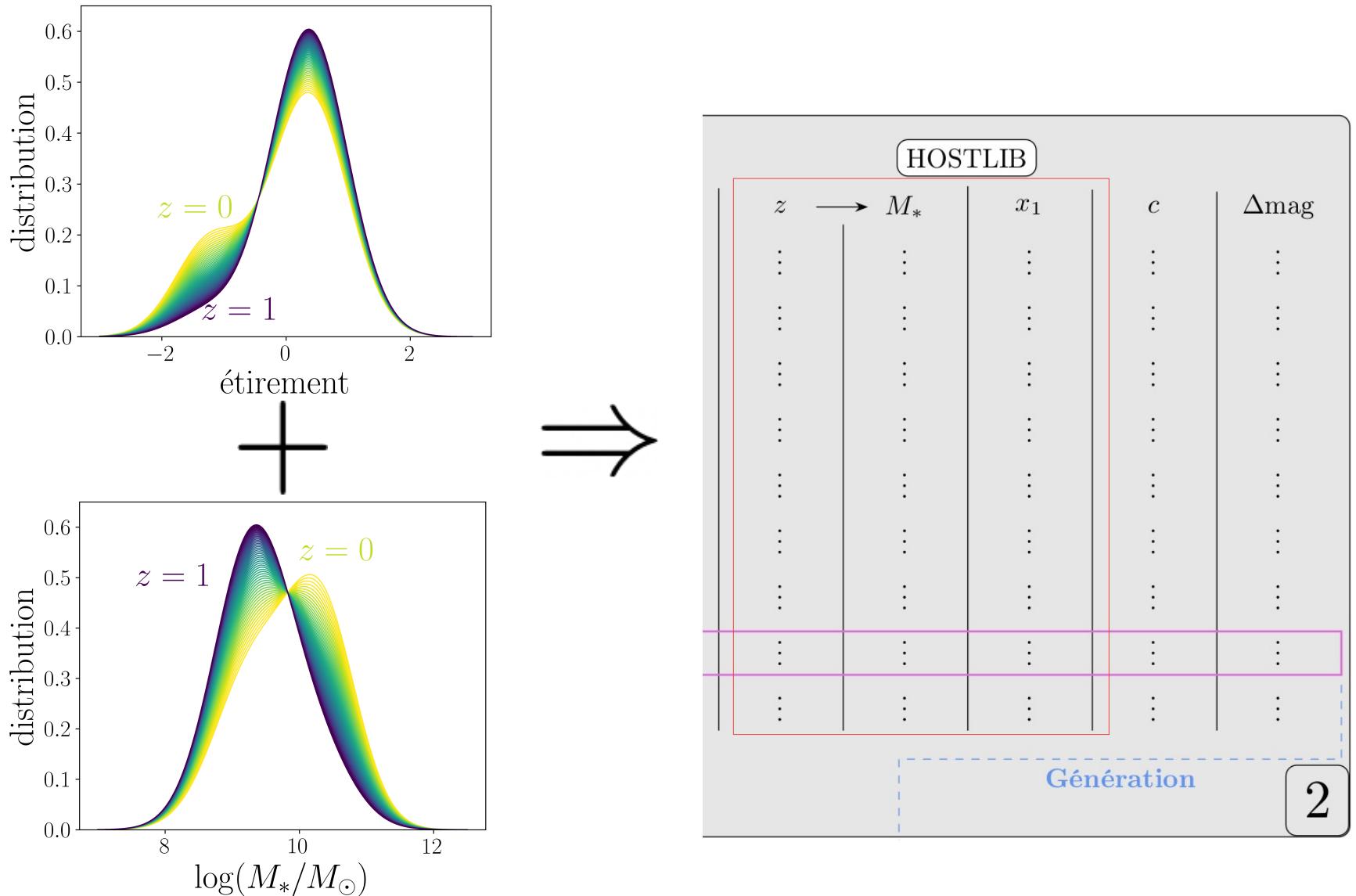
Nicolas et al. (in prep)



Simulations avec SNANA

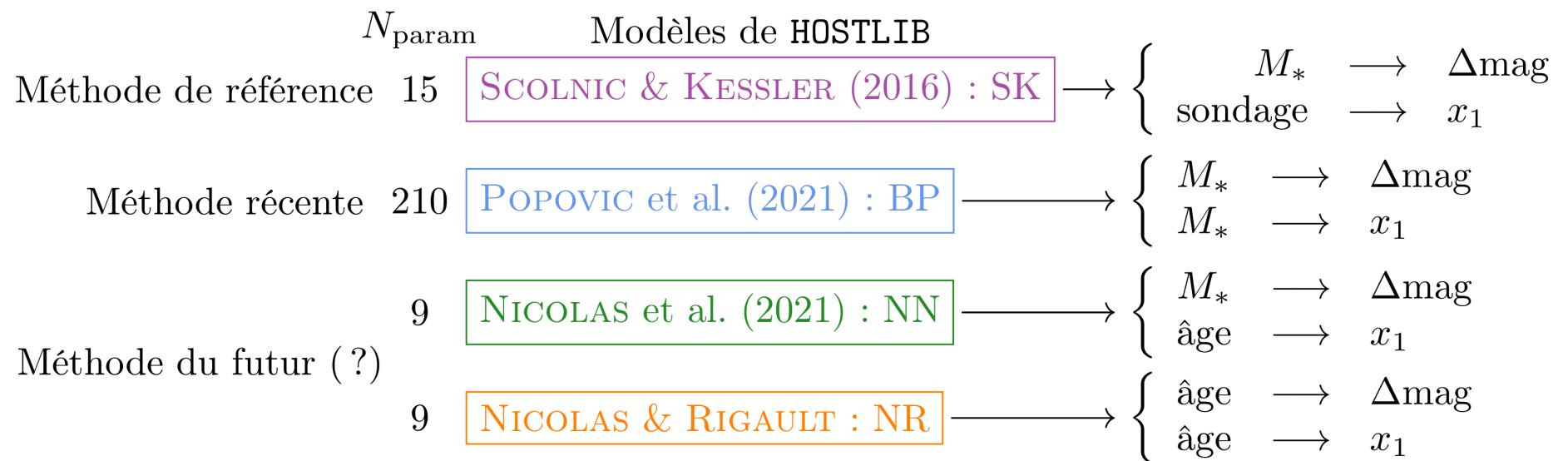
Implémentation du modèle dans les logiciels

Nicolas et al. (in prep)



Simulations avec SNANA

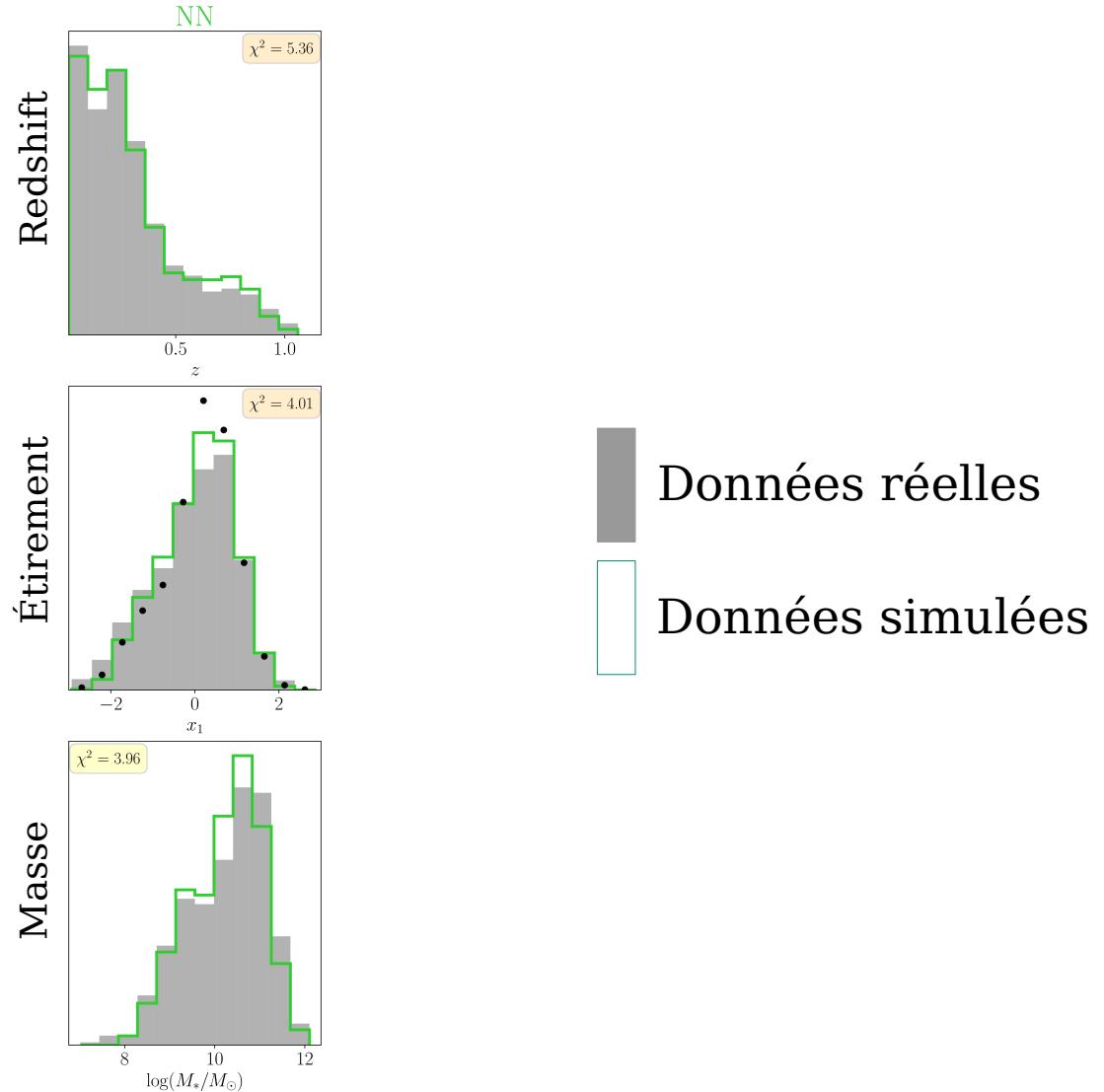
Présentation des modèles



Simulations avec SNANA

Comparaison des modèles aux données

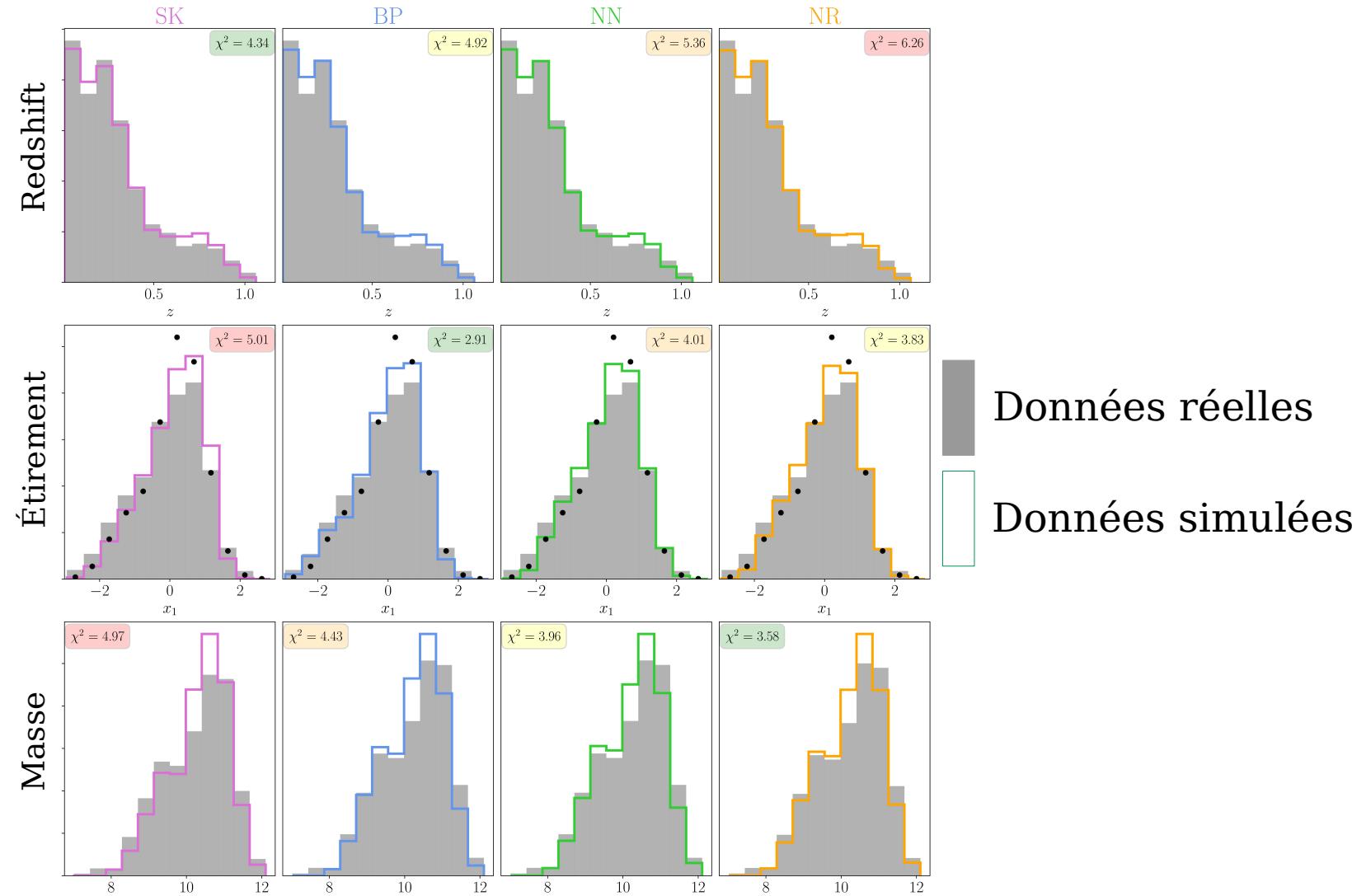
Nicolas (*in prep*)



Simulations avec SNANA

Comparaison des modèles aux données

Nicolas (in prep)

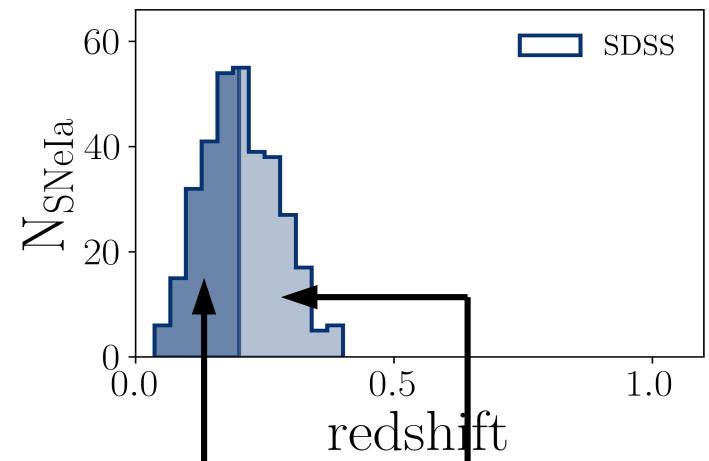


Tous de bonnes représentations des données

Simulations avec SNANA

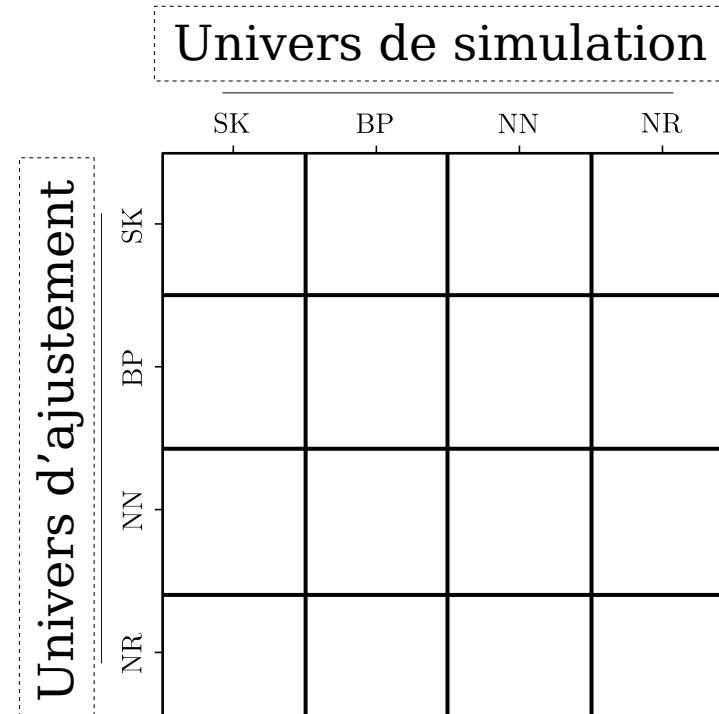
Comparaison des modèles aux données

Nicolas (*in prep*)



Simulation
avec un modèle

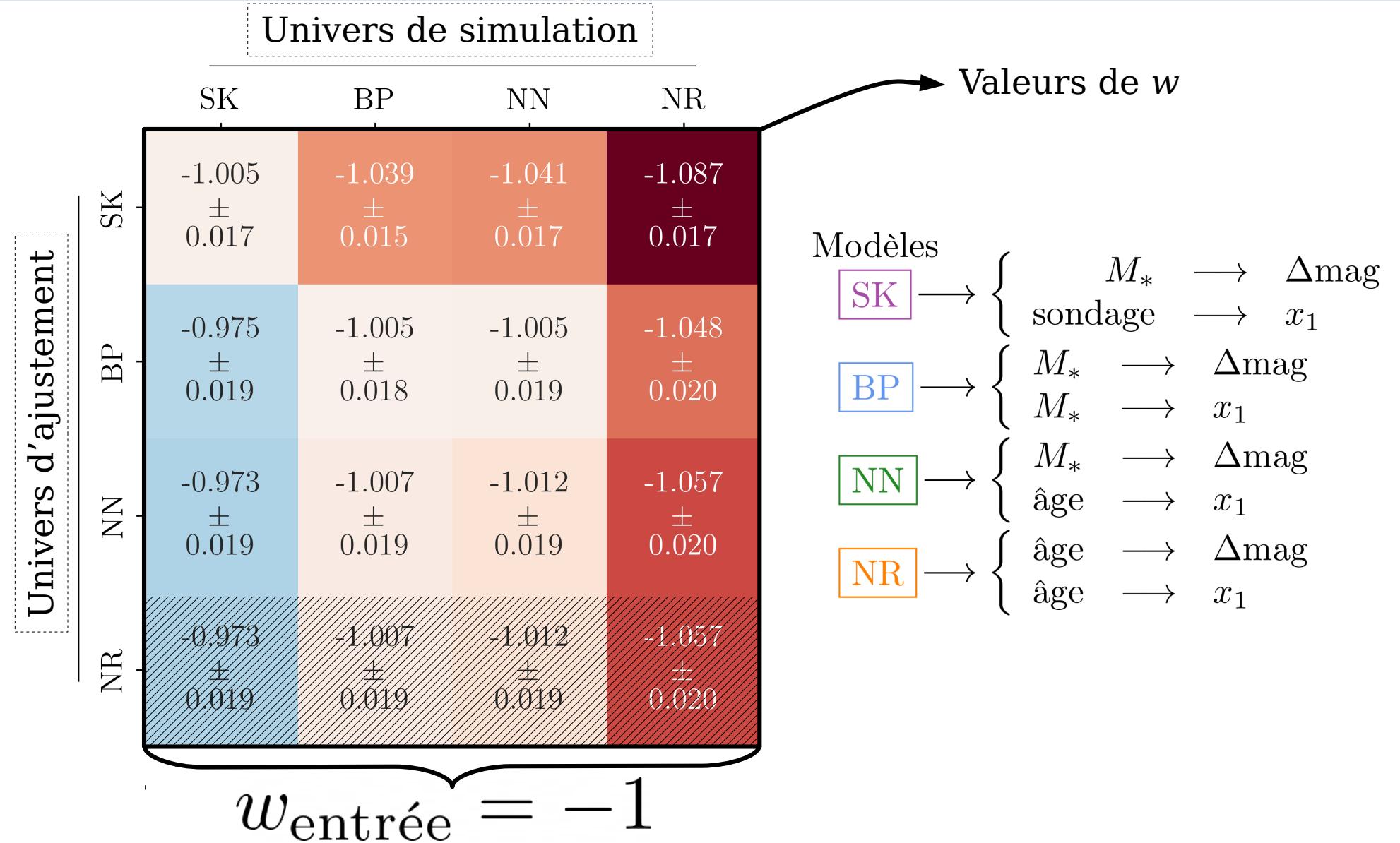
Effets de sélection
avec un autre



Impact des modèles sur la cosmologie

Paramètre d'état de l'énergie sombre

Nicolas et al. (in prep)

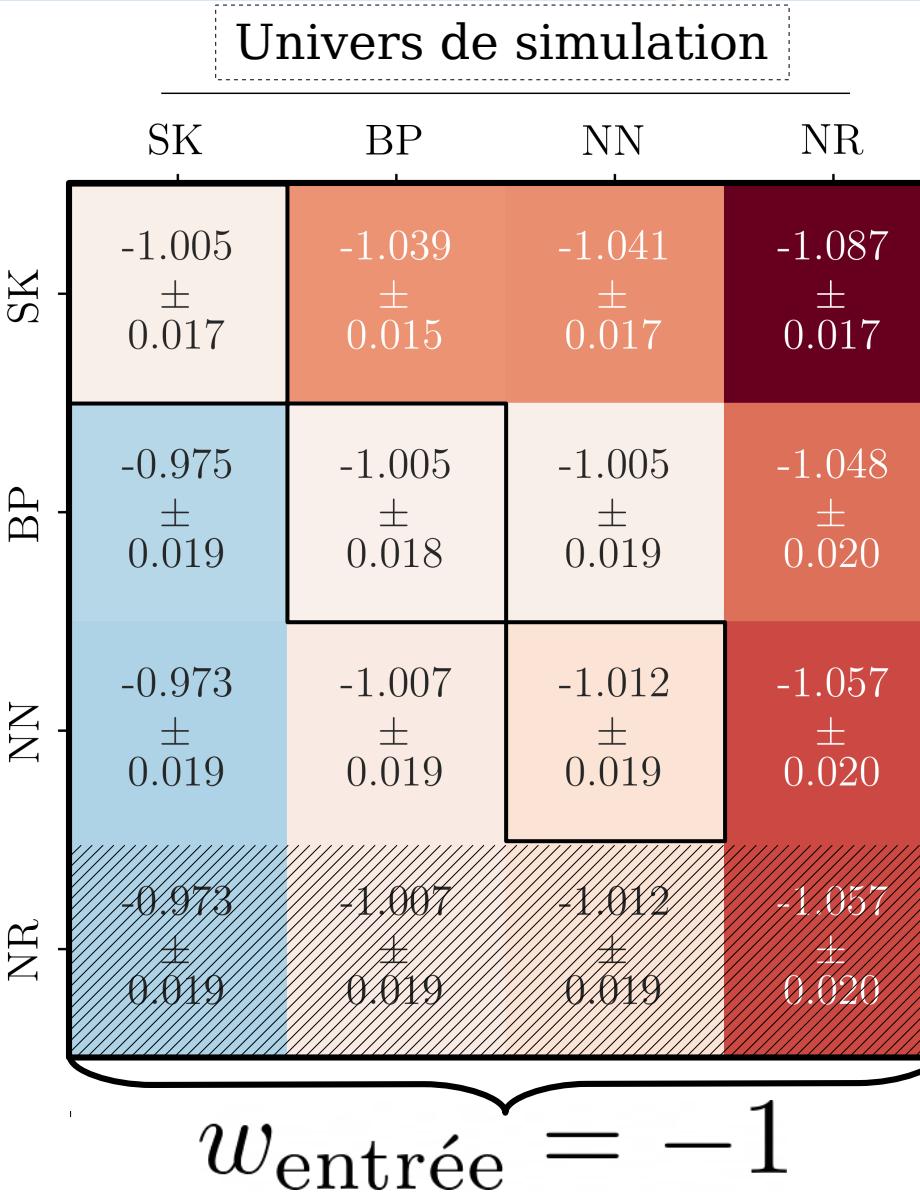


Impact des modèles sur la cosmologie

Paramètre d'état de l'énergie sombre

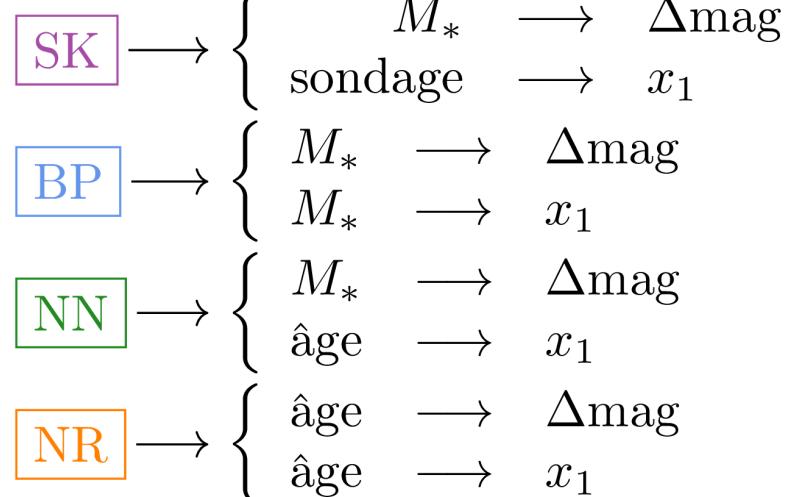
Nicolas et al. (in prep)

Univers d'ajustement



Valeurs de w

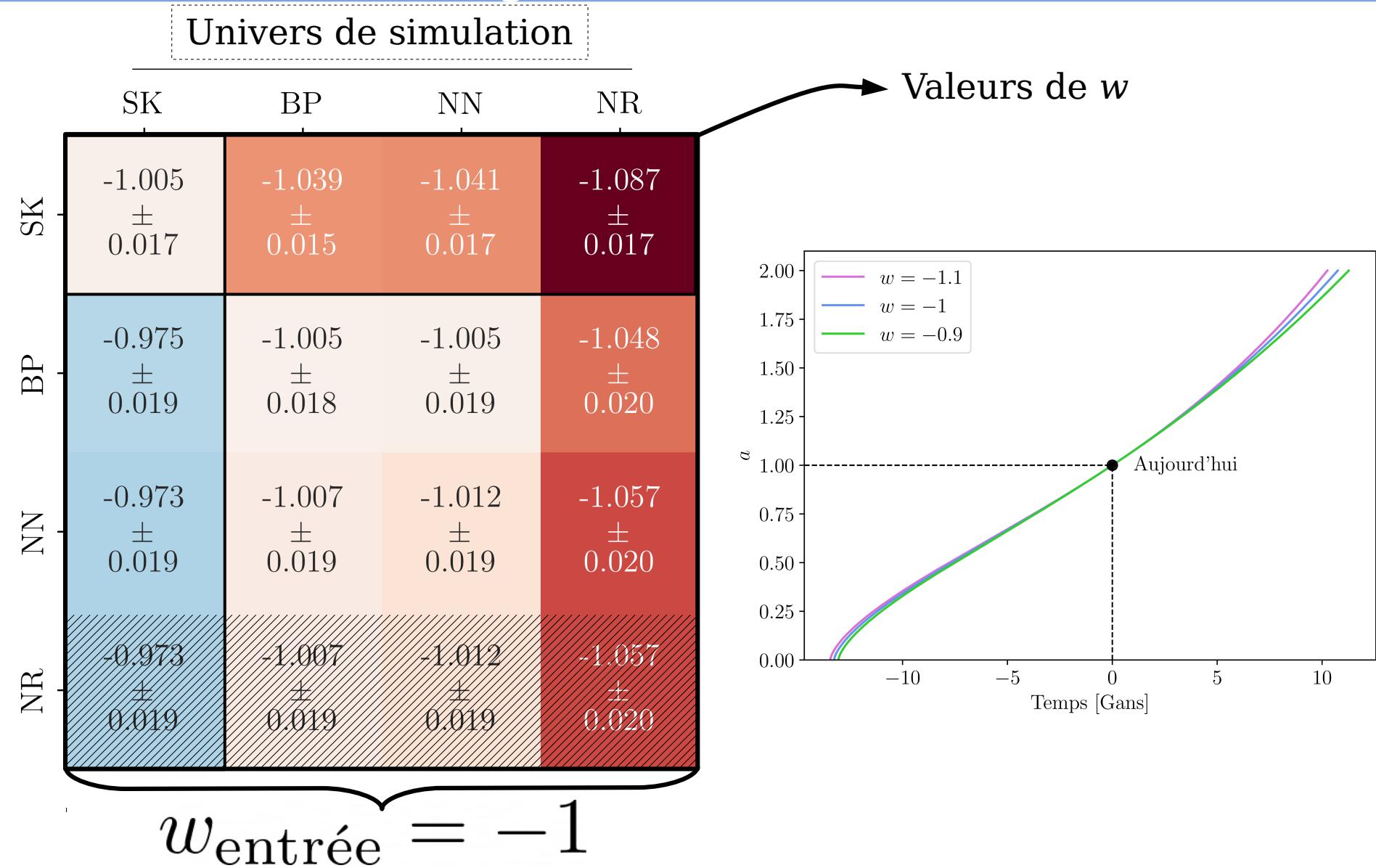
Modèles



Impact des modèles sur la cosmologie

Paramètre d'état de l'énergie sombre

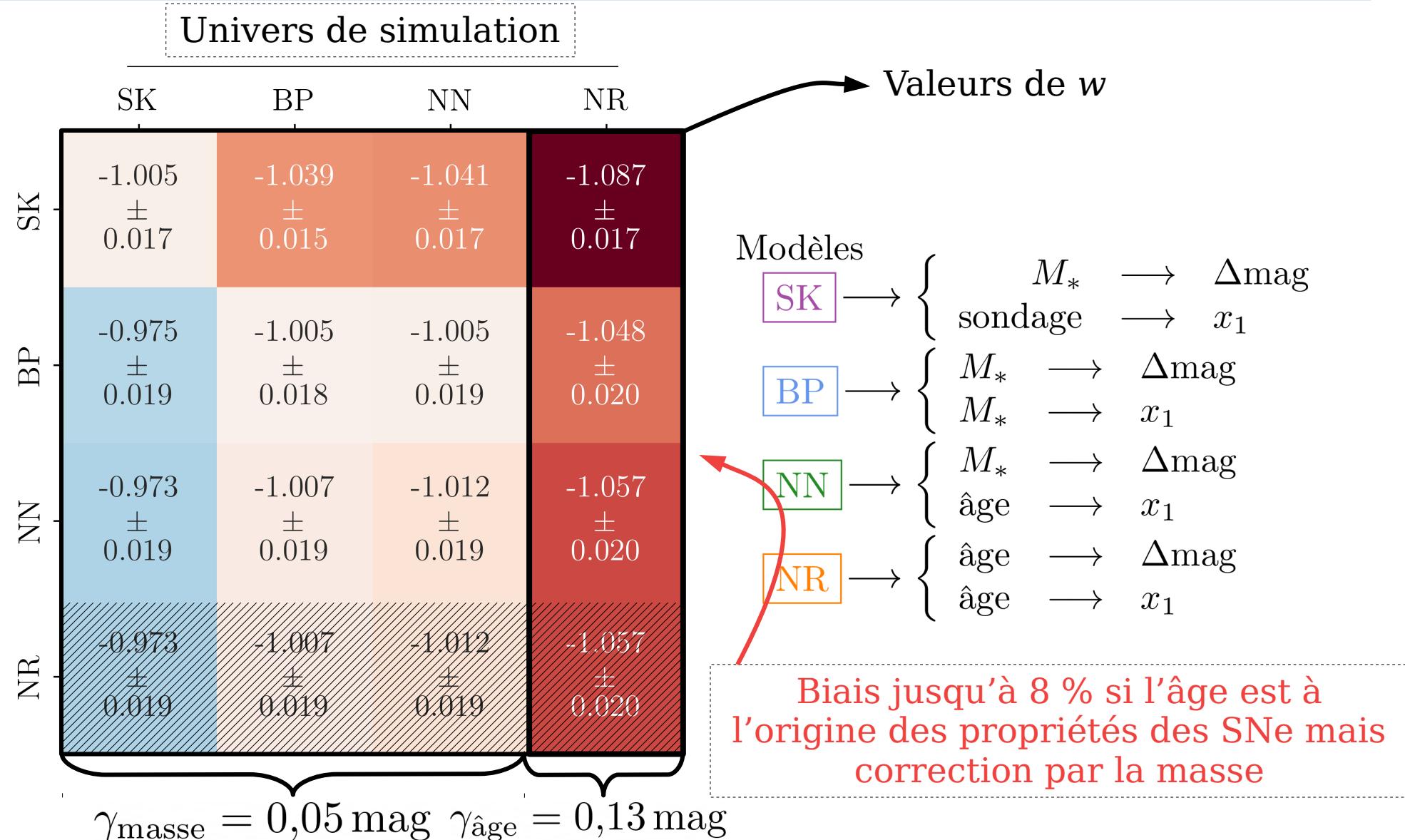
Nicolas et al. (in prep)



Impact des modèles sur la cosmologie

Paramètre d'état de l'énergie sombre

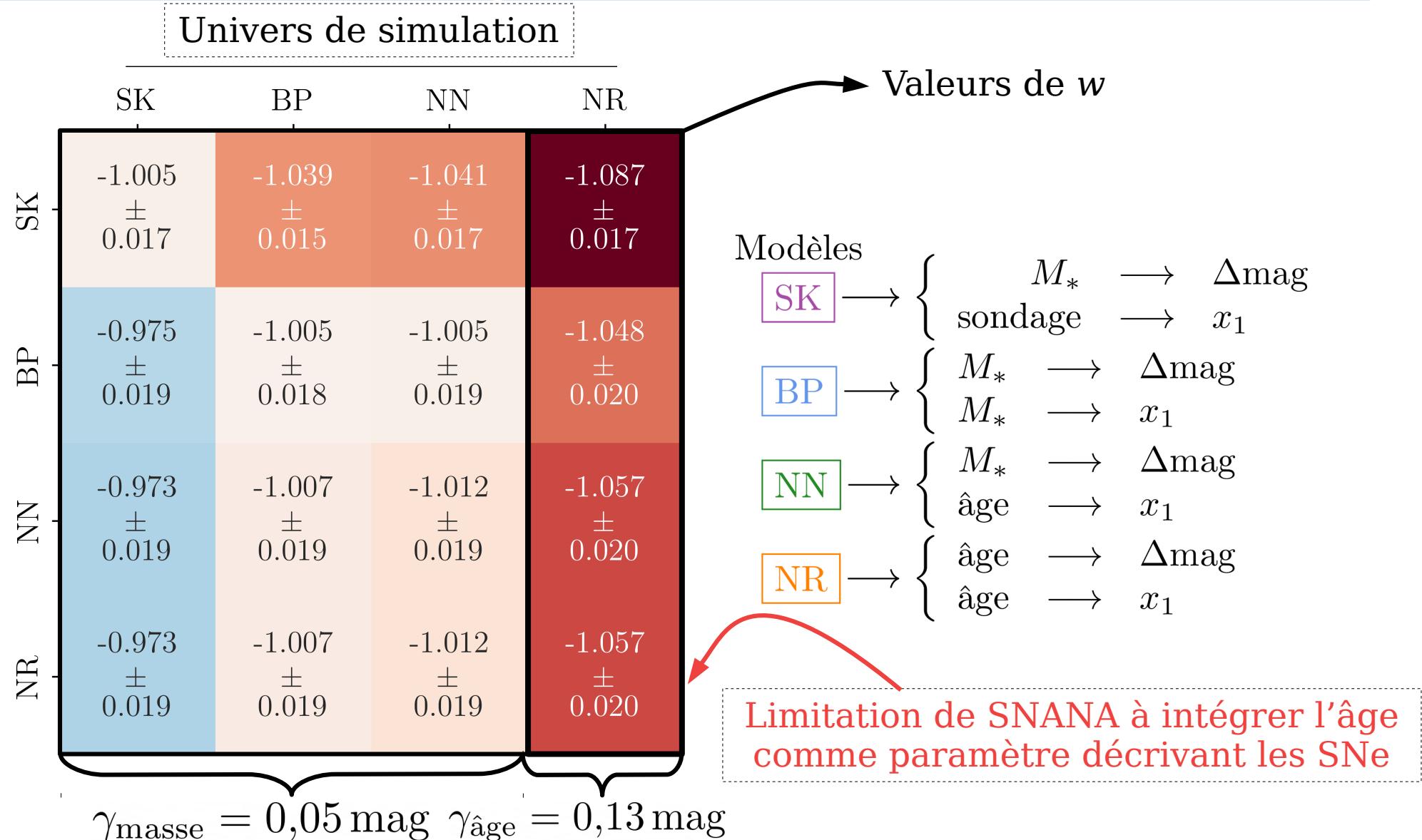
Nicolas et al. (in prep)



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)

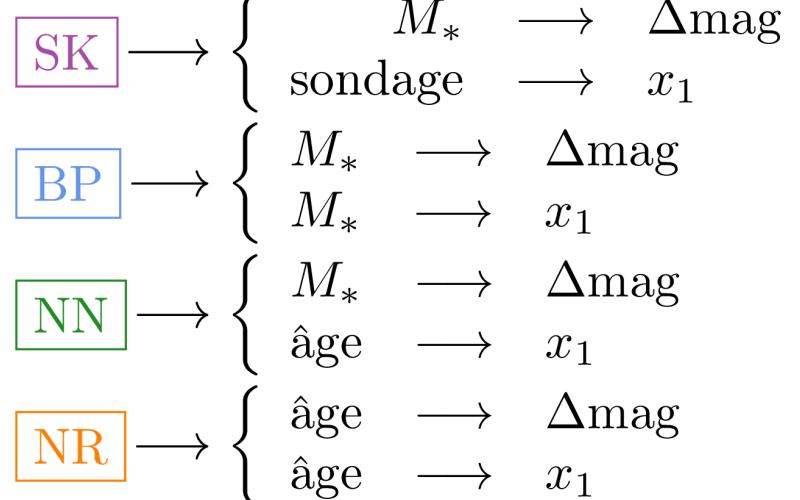
Univers de simulation

		SK	BP	NN	NR
		SK	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.094 ± 0.003
		BP	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.103 ± 0.003
		NN	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003
		NR	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 γ_{masse}

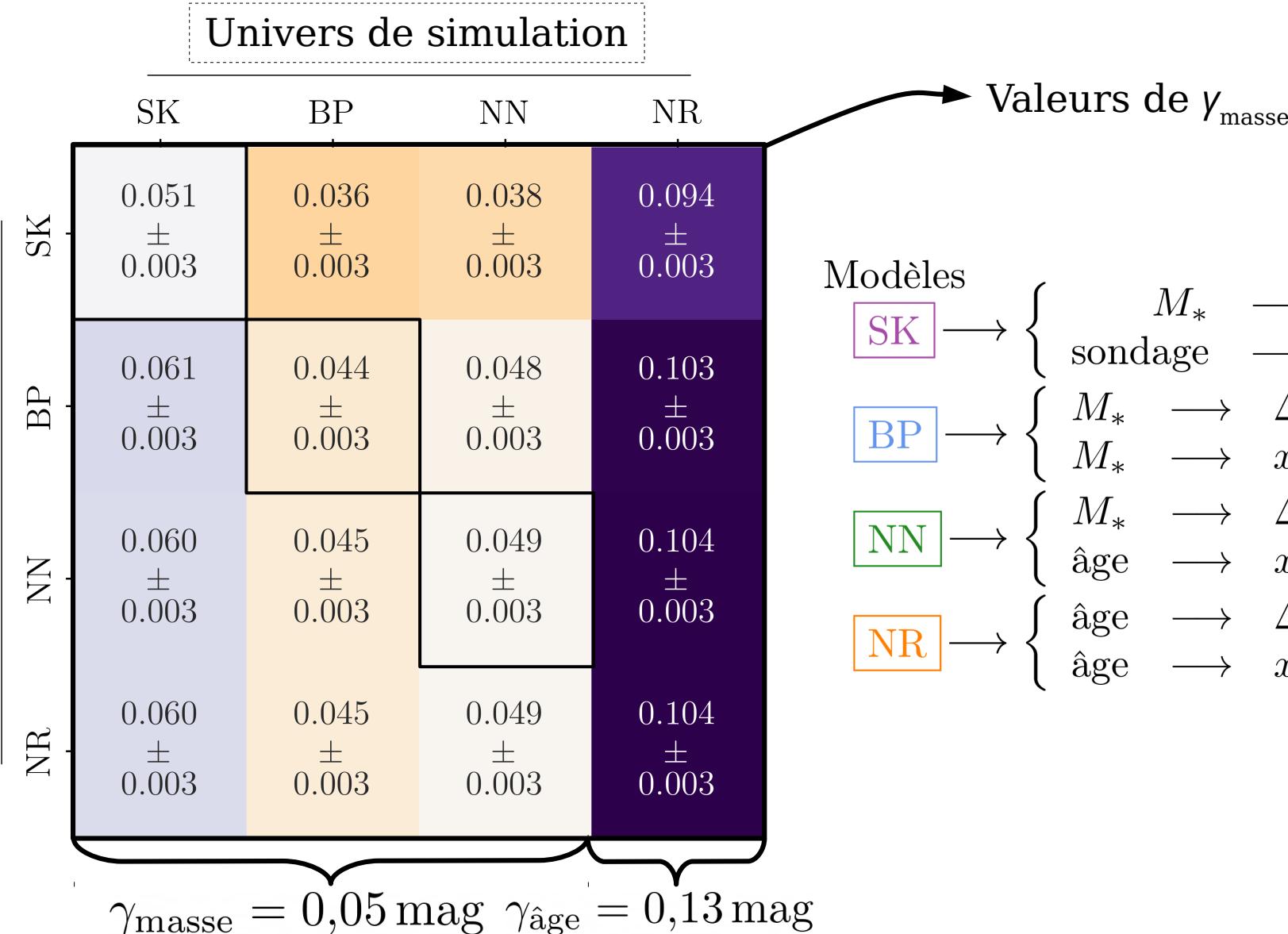
Modèles



Impact des modèles sur la cosmologie

Marche de magnitude basée sur la masse

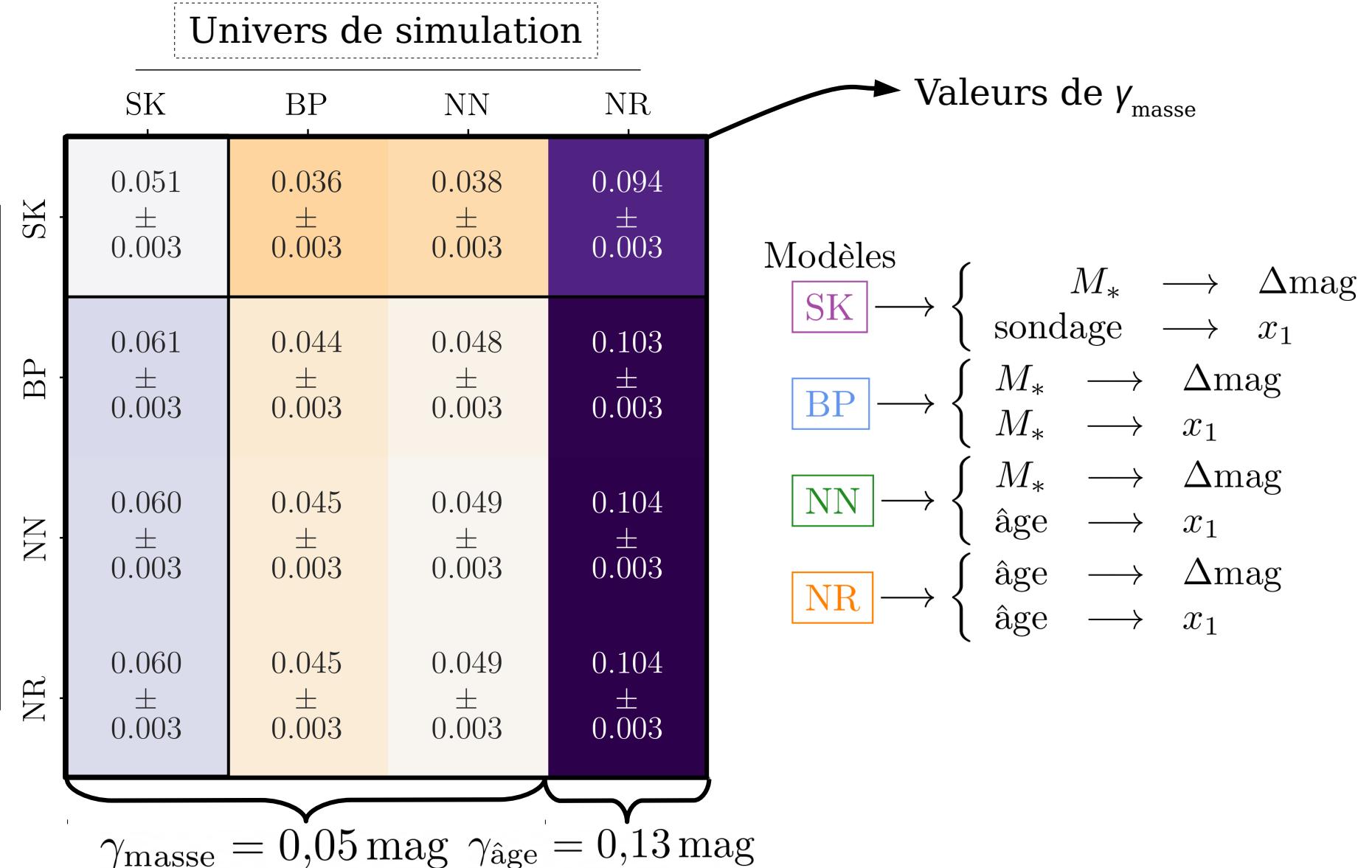
Nicolas et al. (in prep)



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

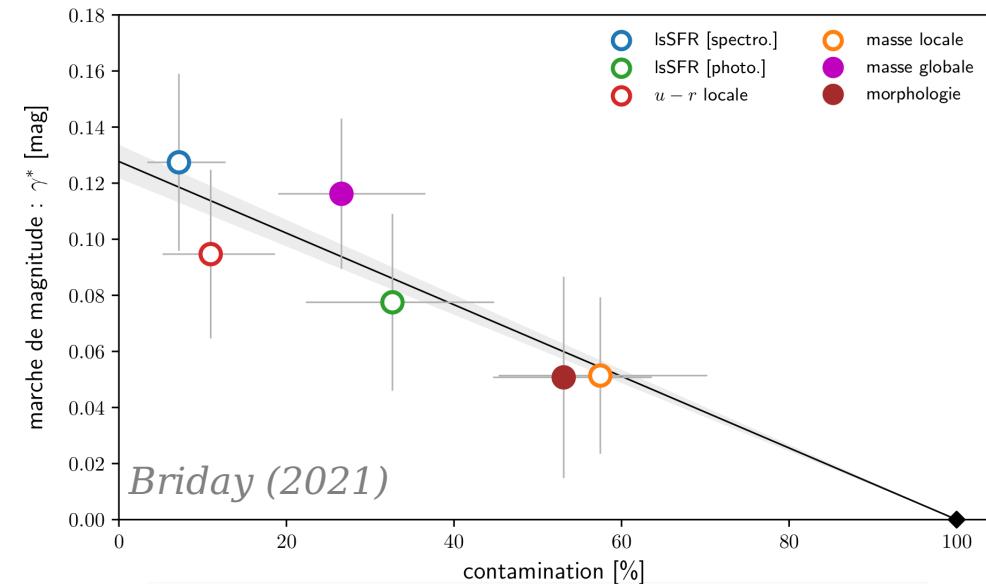
Nicolas et al. (in prep)

Univers de simulation

		SK	BP	NN	NR
		SK	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.094 ± 0.003
		BP	0.044 ± 0.003	0.048 ± 0.003	0.103 ± 0.003
		NN	0.045 ± 0.003	0.049 ± 0.003	0.104 ± 0.003
		NR	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 γ_{masse}

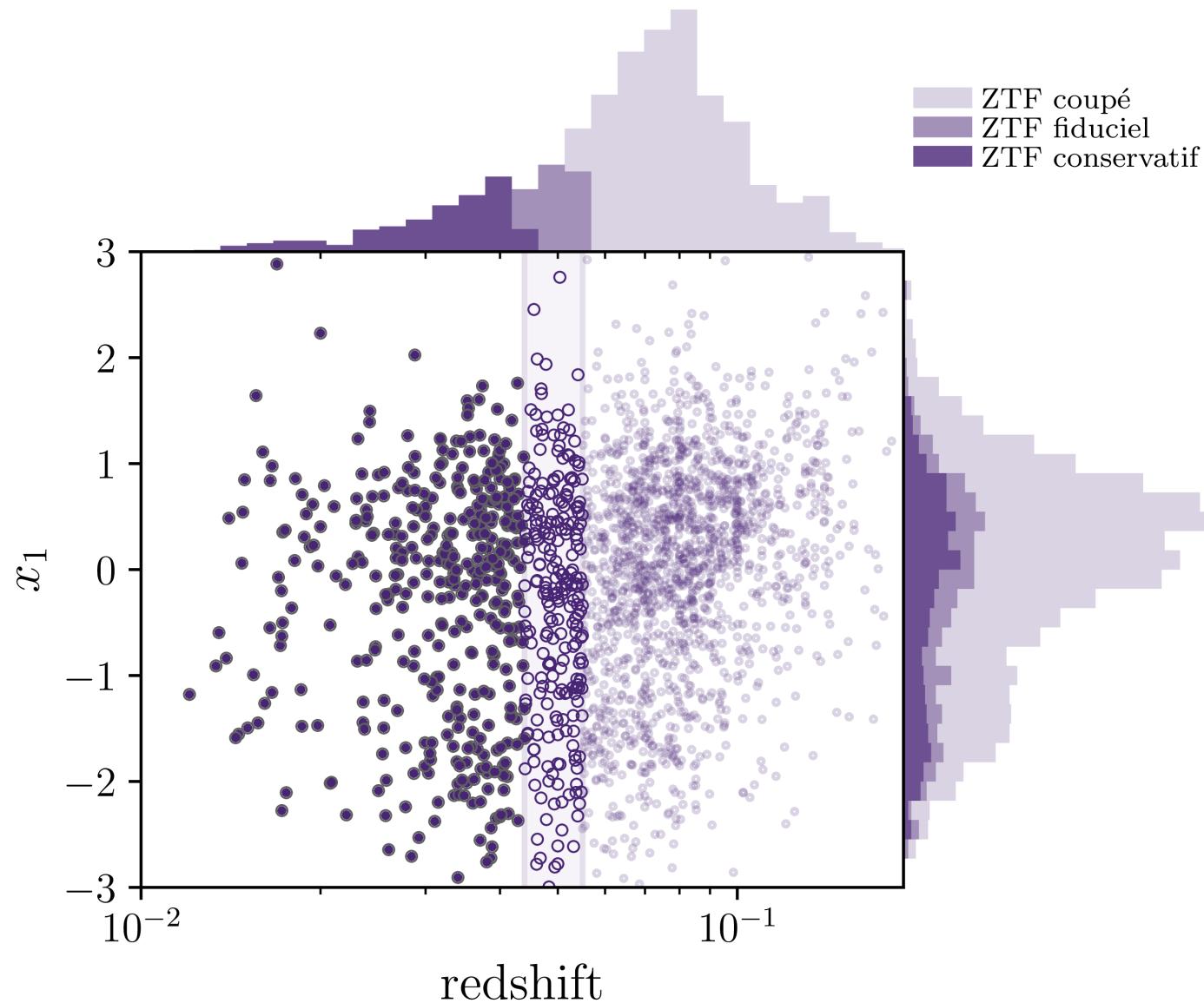


Renforcement de l'hypothèse que l'âge est à l'origine des propriétés des SNe

Perspectives

Inclusion des données de ZTF

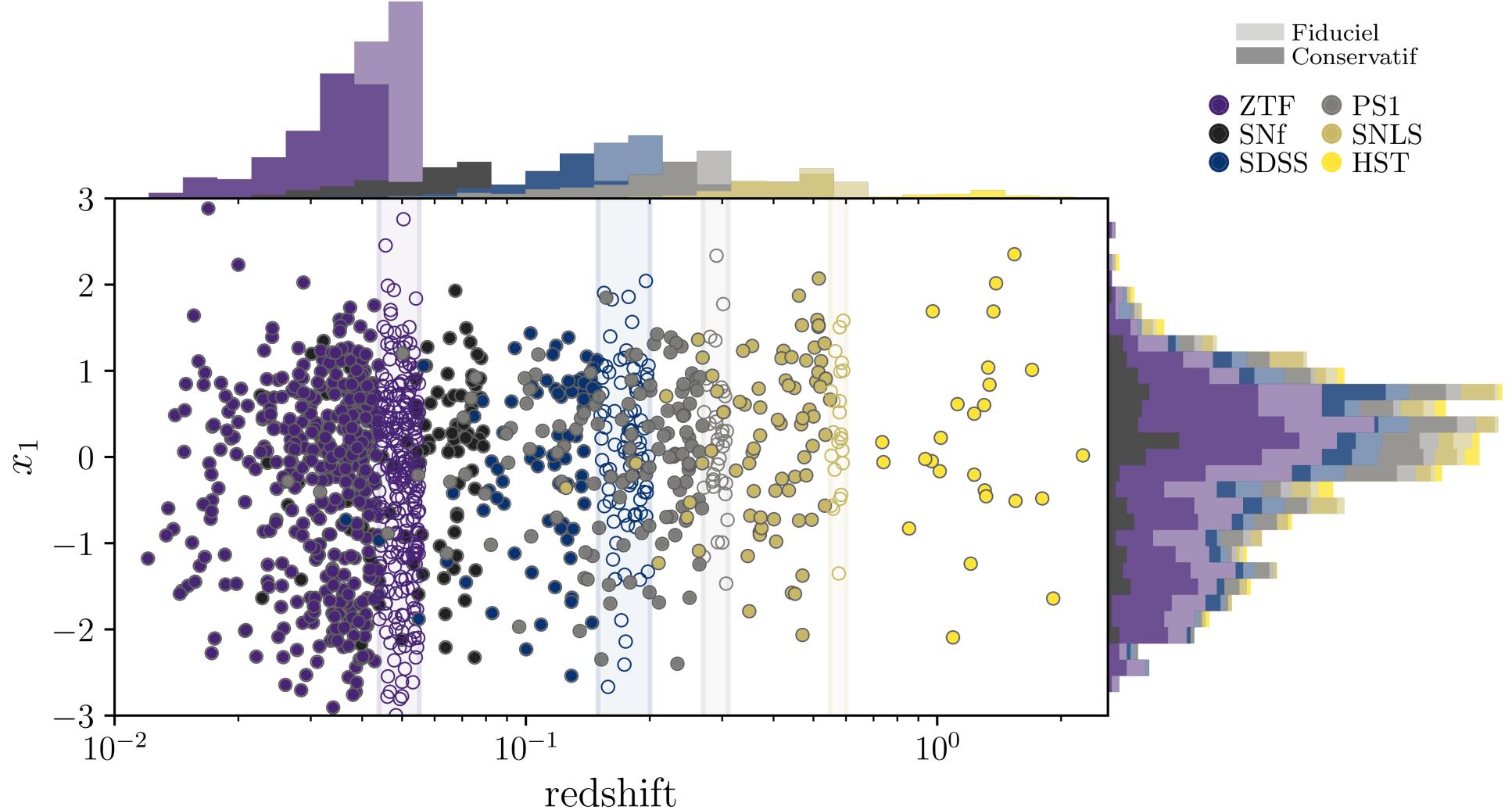
Nicolas (in prep)



Perspectives

Inclusion des données de ZTF

Nicolas (in prep)

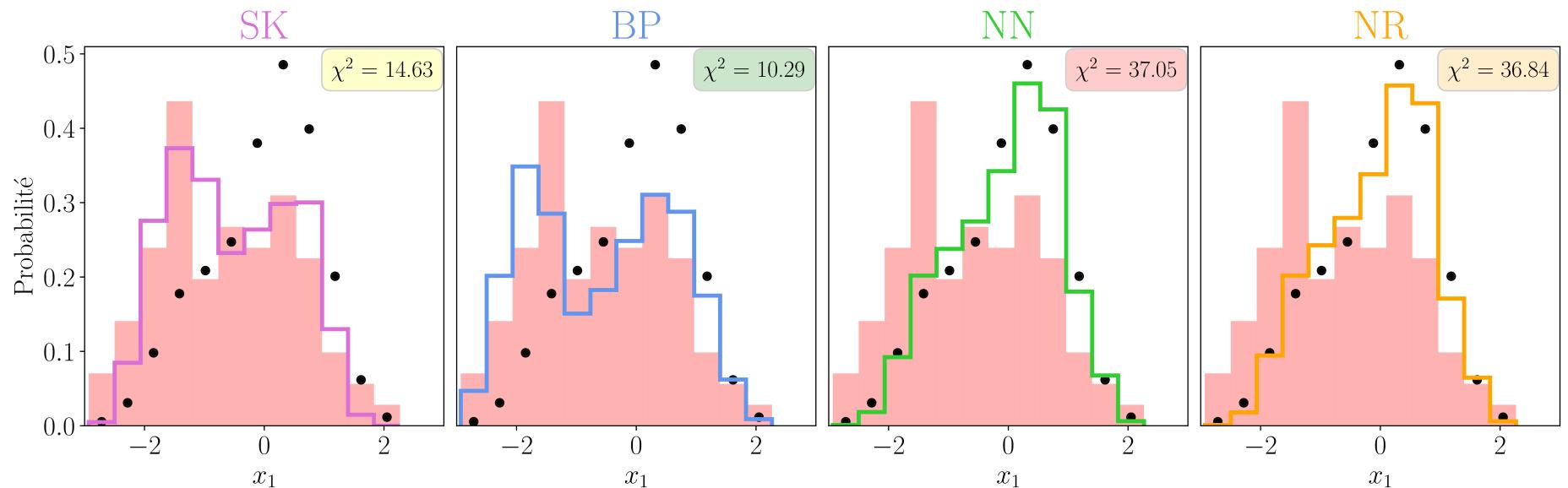


Perspectives

Amélioration des simulations

Nicolas et al. (in prep)

LOWZ : sondage ciblé, sélection inhérente

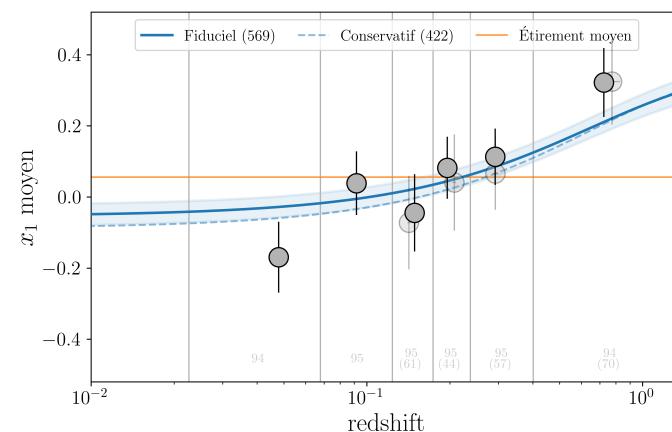
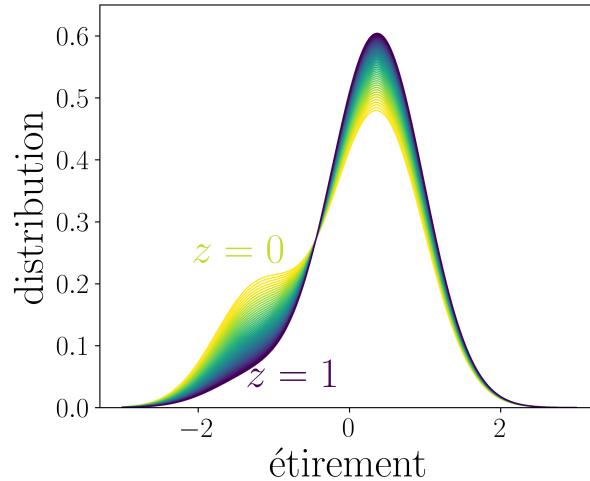


Conclusions :

Modèle jeunes SNe explique

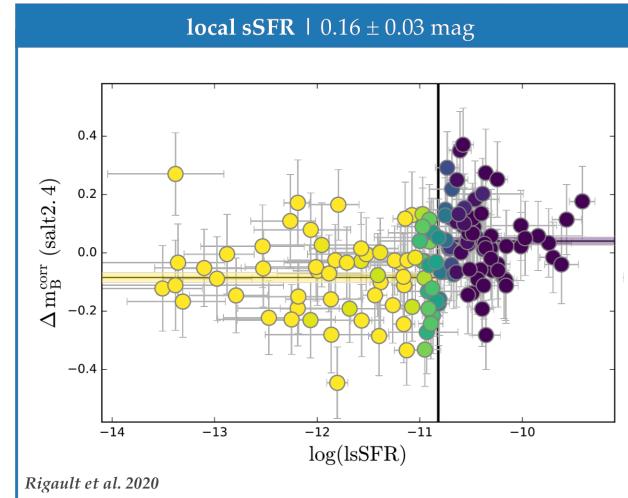
Dérive avec le redshift

Nicolas et al. (2021)



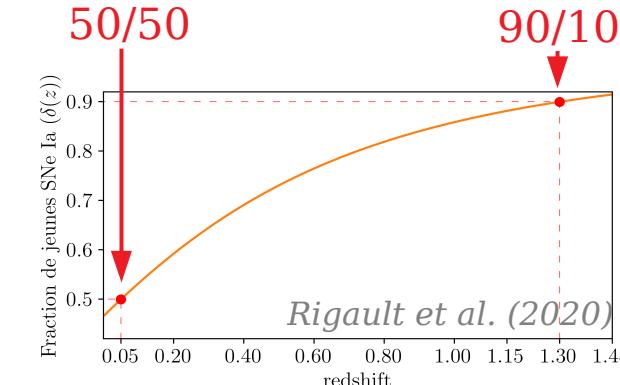
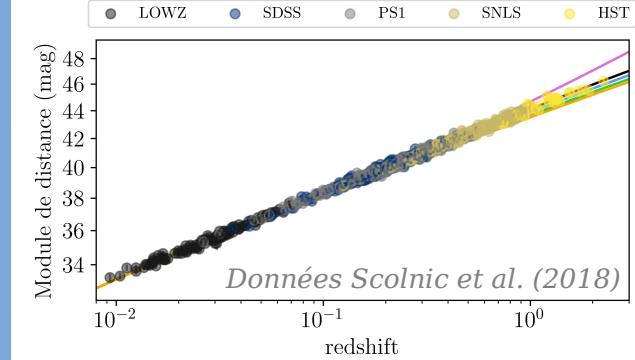
Différentes marches de magnitudes

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 !

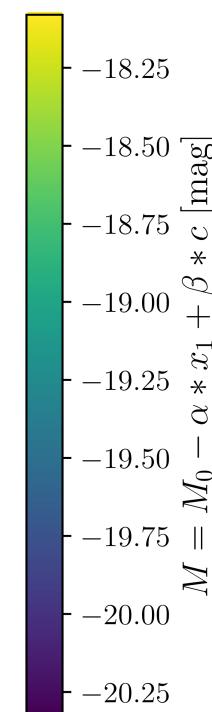
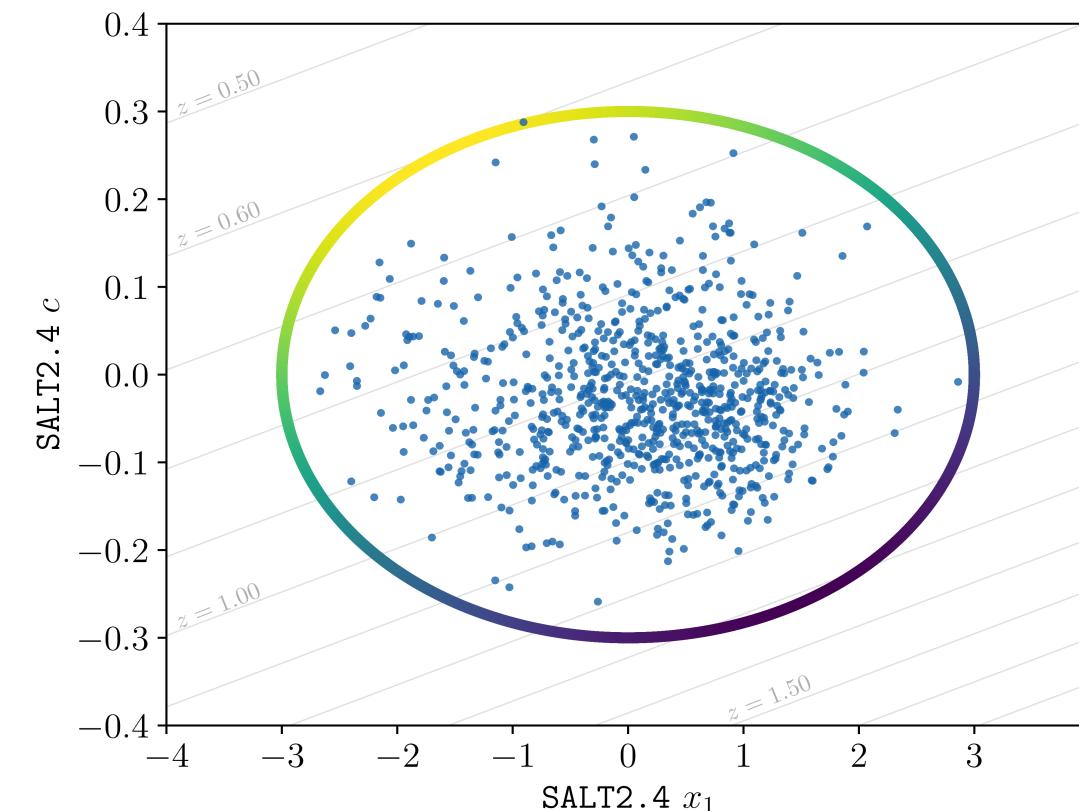
Nora NICOLAS
Groupe Cosmos IP2I
Vendredi 30 septembre 2022
Soutenance de thèse de Doctorat

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

Sondages limités en magnitude

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

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

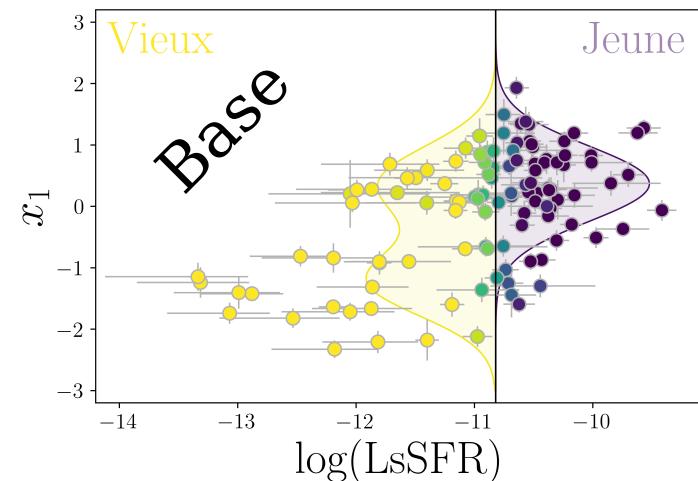


$$M_{\min,}^{t_0-5} = -18.00 \text{ mag}$$
$$x_1 = -1.66$$
$$c = 0.25$$

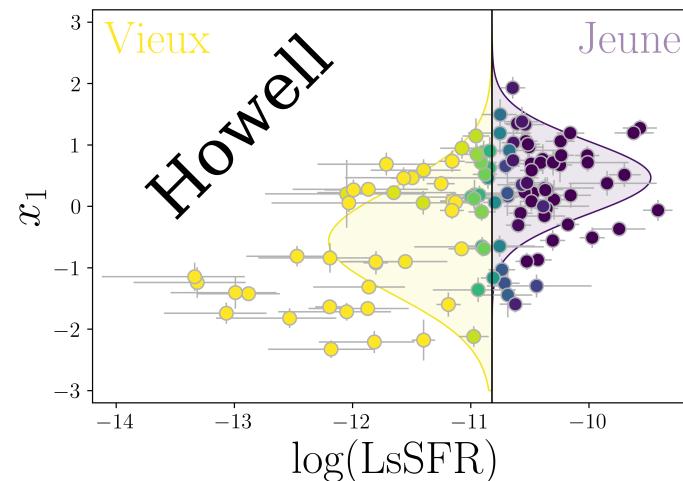
Évolution de l'étirement

Dérive de l'étirement comparée aux données

Nicolas et al. (2021)



5 paramètres



4 paramètres

Dérive de l'âge

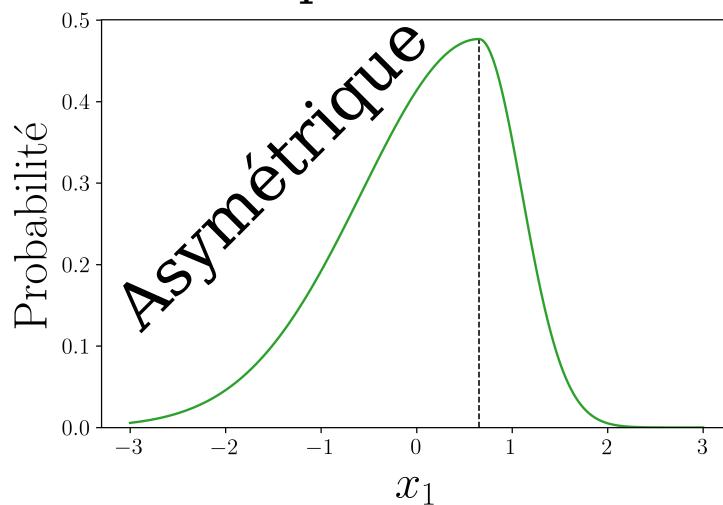
$$\delta(z) = (K^{-1} \times (1 + z)^{-\phi} + 1)^{-1}$$

+

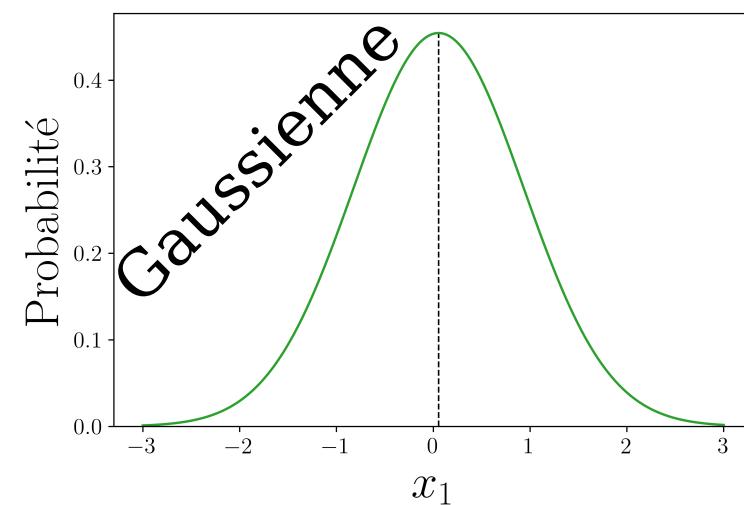
Ou sans dérive

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

3 paramètres



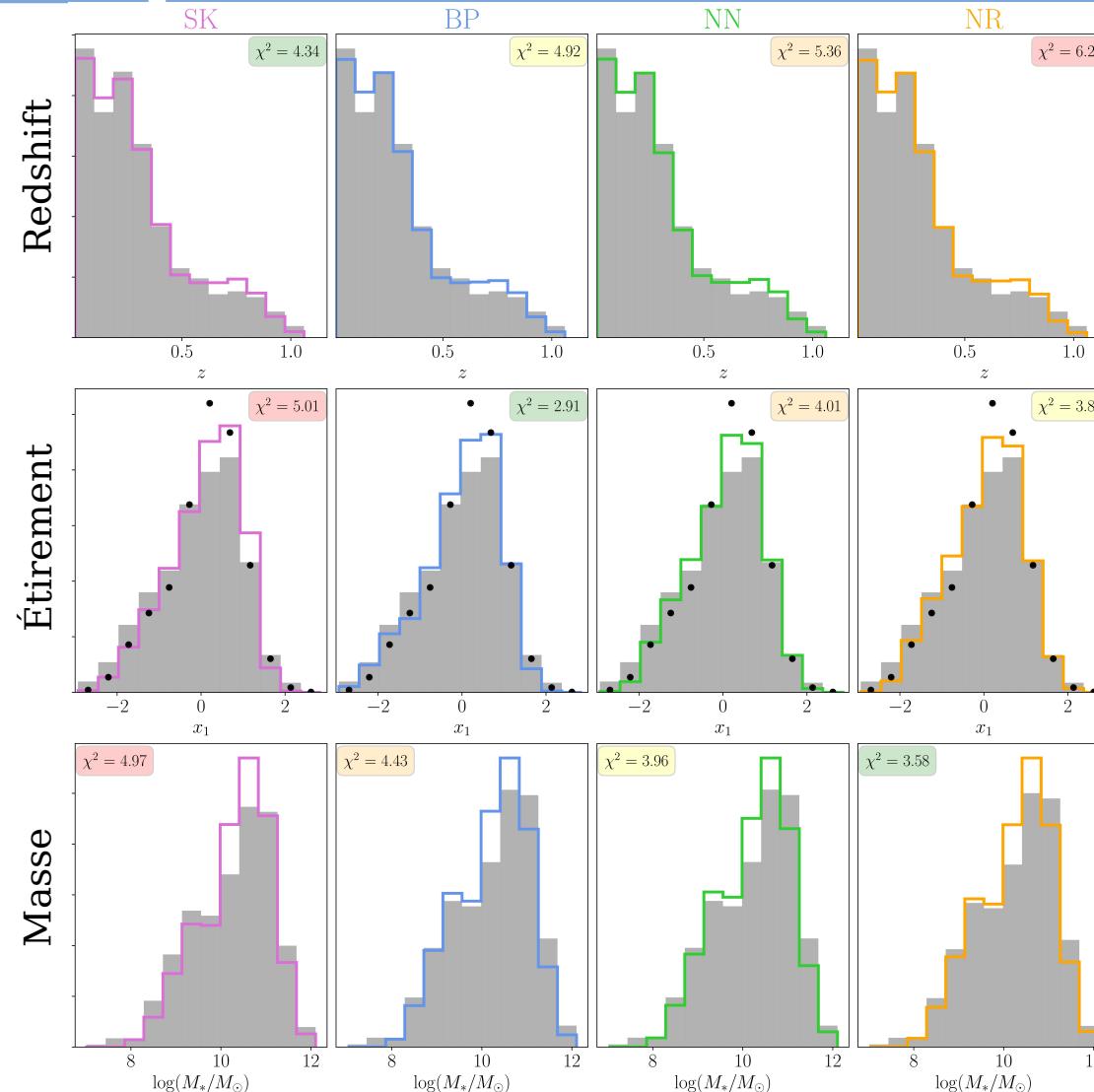
2 paramètres



Simulations avec SNANA

Comparaison des modèles aux données

Nicolas (in prep)



Comparaison pour tous les paramètres

Paramètre	χ^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

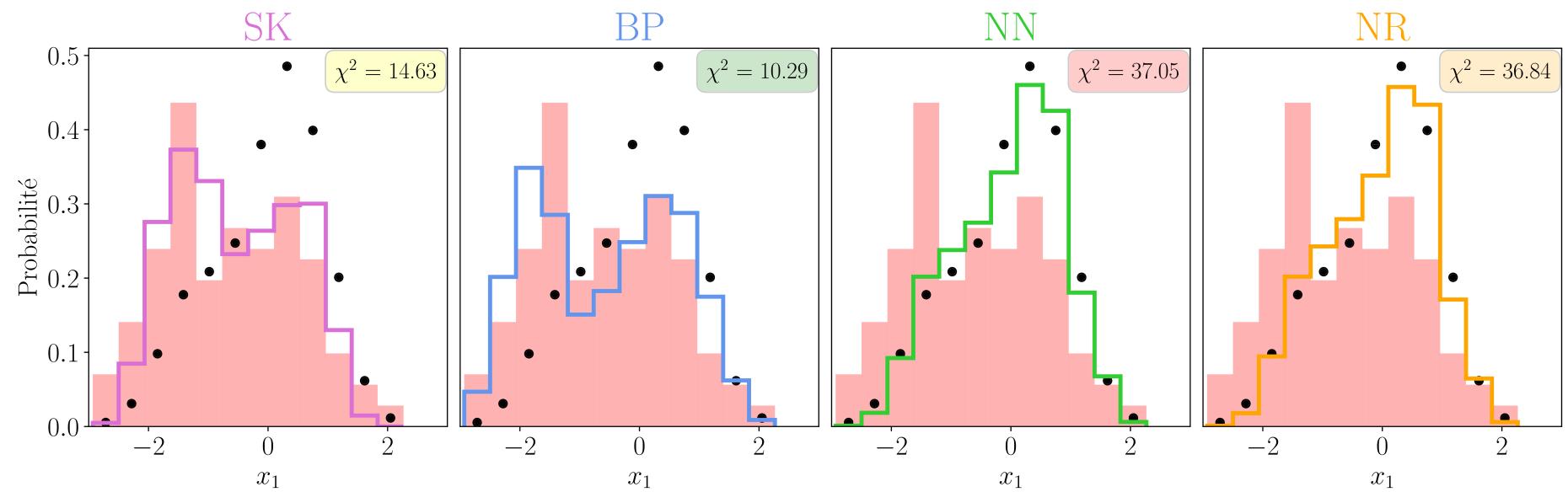
Perspectives

Amélioration des simulations

Nicolas et al. (in prep)

Comparaison pour l'étirement seul

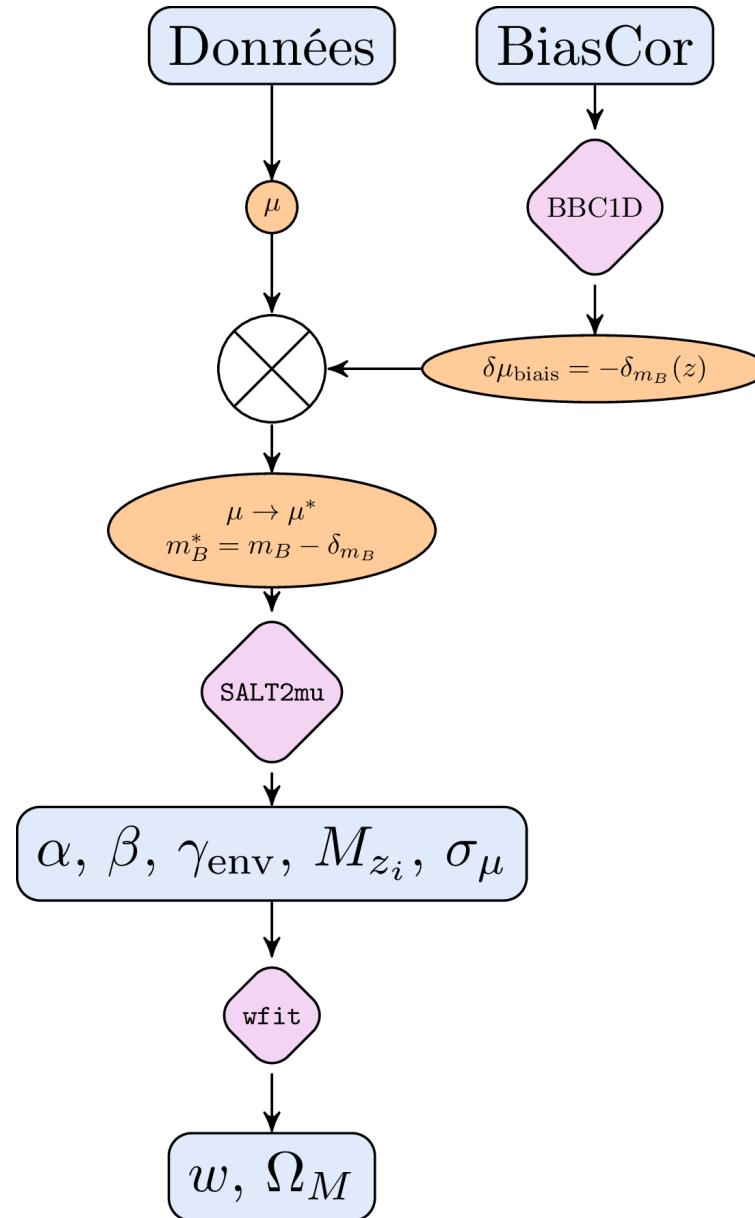
Sondage	χ^2			
	SK	BP	NN	NR
LOWZ	14.63	10.29	37.05	36.84
SDSS	7.03	8.52	7.66	7.05
PS1	10.35	3.58	4.06	4.29
SNLS	15.14	23.13	15.03	15.00
Somme	47.15	45.52	63.80	63.18
Sans LOWZ	35.52	35.23	26.75	26.34



Simulations avec SNANA

Correction des biais

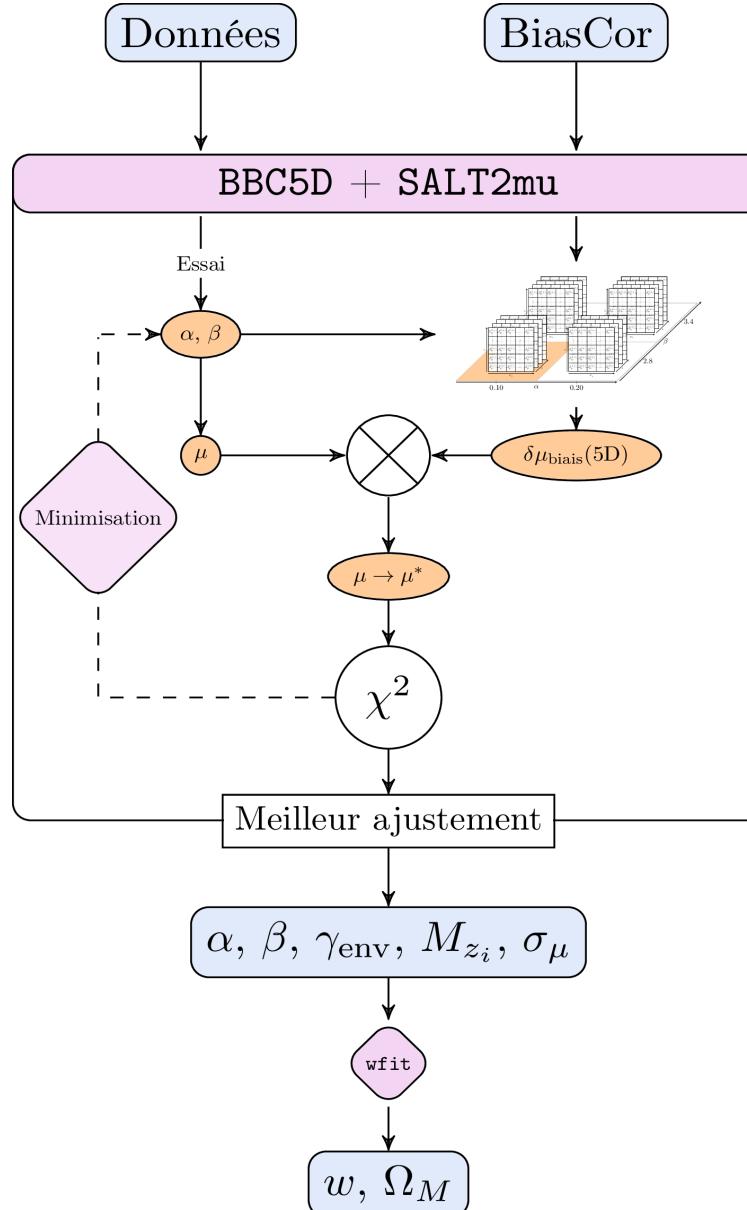
Nicolas et al. (in prep)



Simulations avec SNANA

Correction des biais

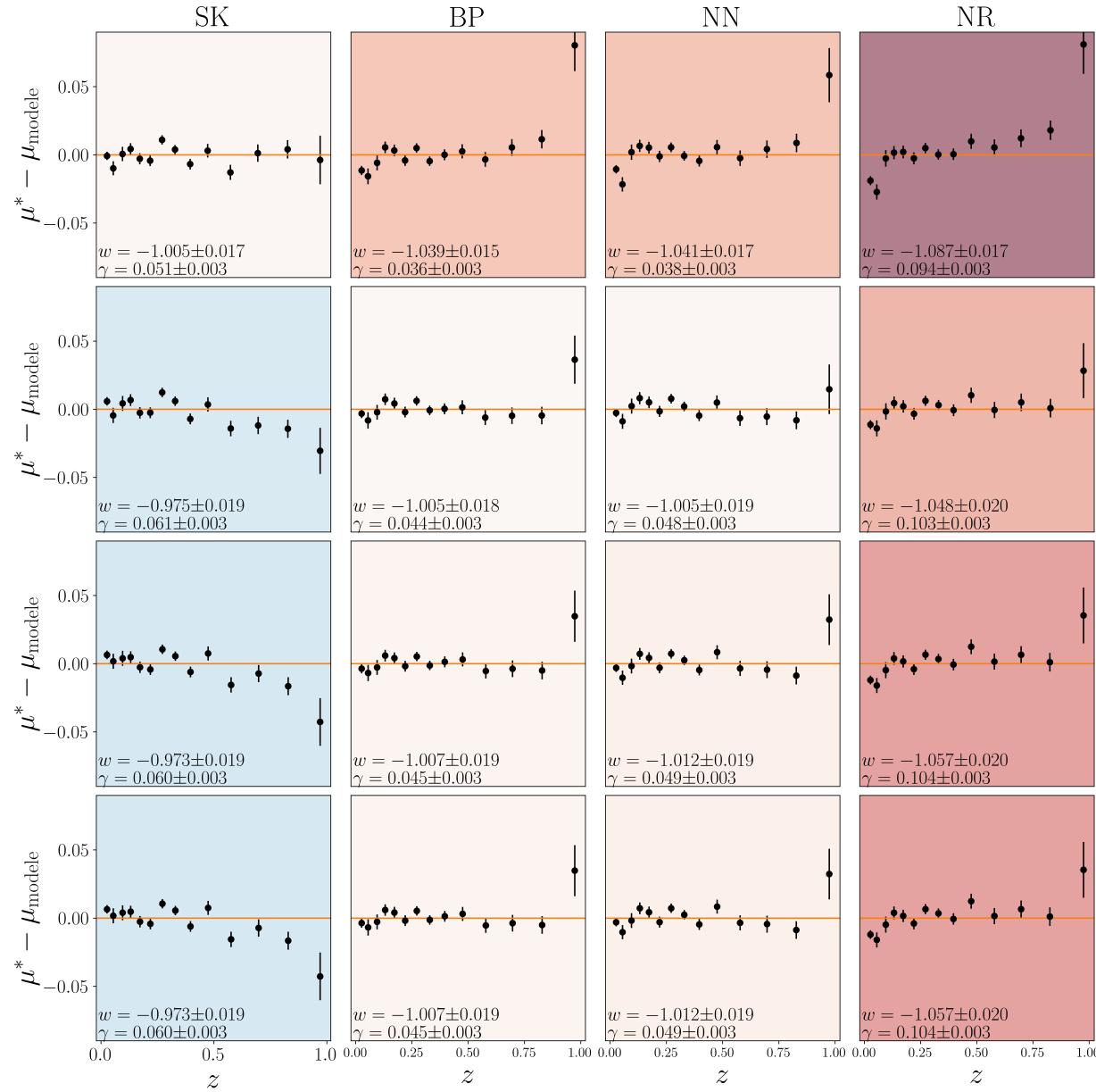
Nicolas et al. (in prep)



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 $\gamma_{\text{masse}} = 0.100 \text{ mag}$