

Résultats récents de SNLS

V.Ruhlmann-Kleider
Irfu/SPP



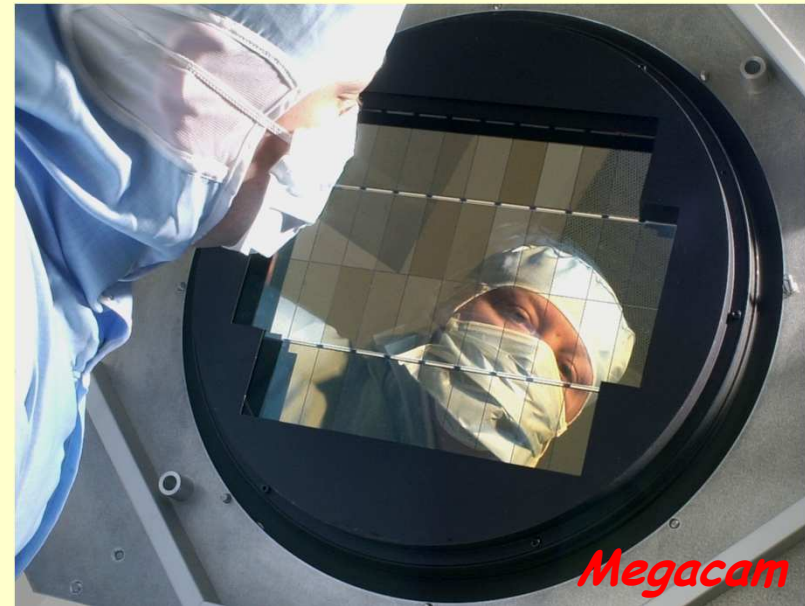
1. SNLS au CFHT
2. Cosmologie avec les SNe Ia
3. Les SNe Ia, chandelles standard ?



CFHT

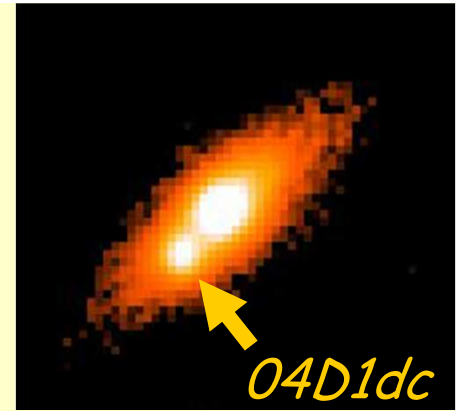
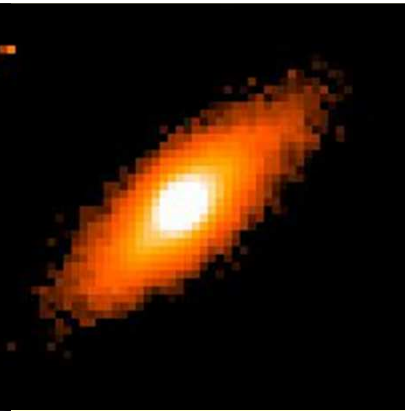
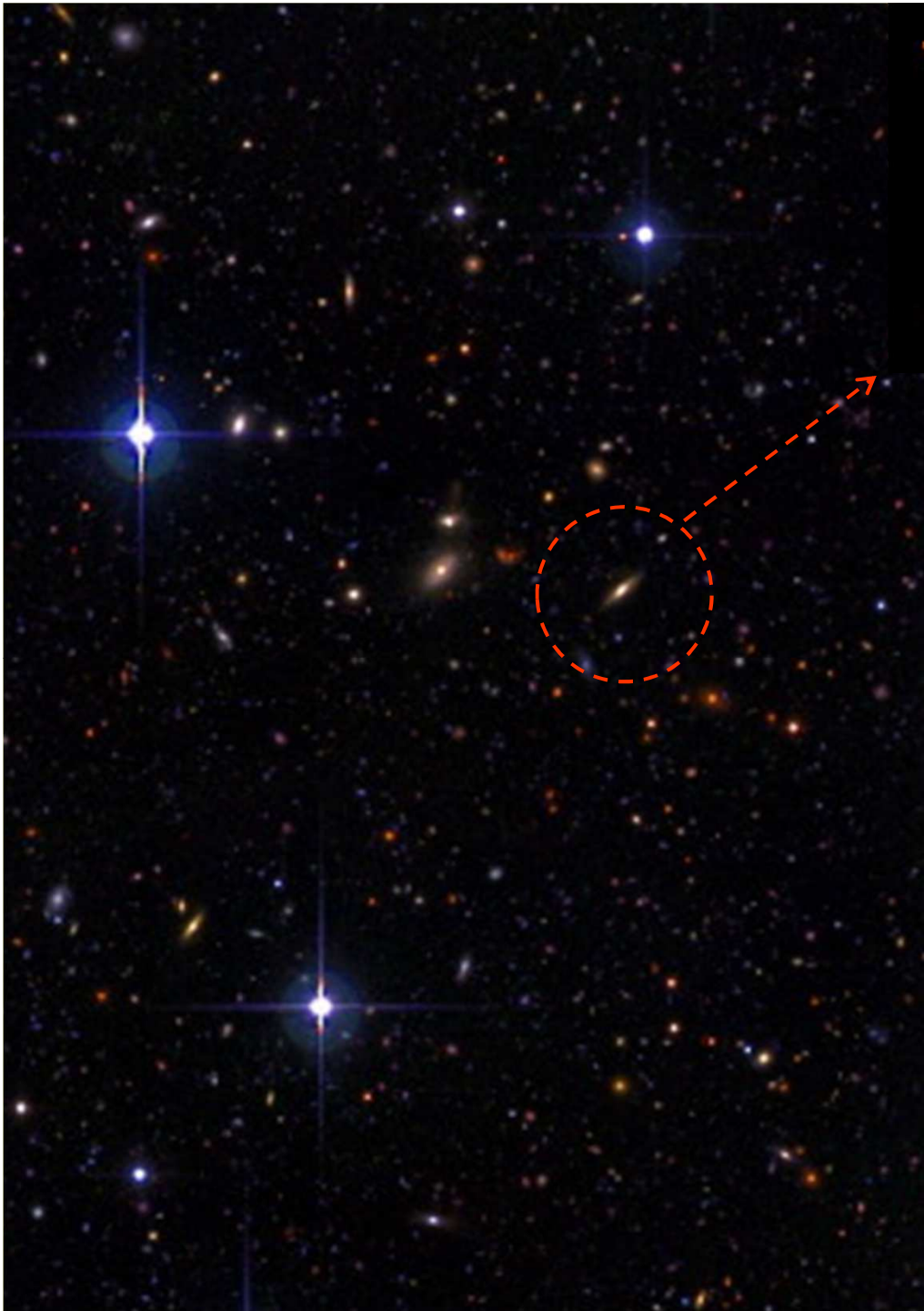


SNLS au CFHT (2003-2008)

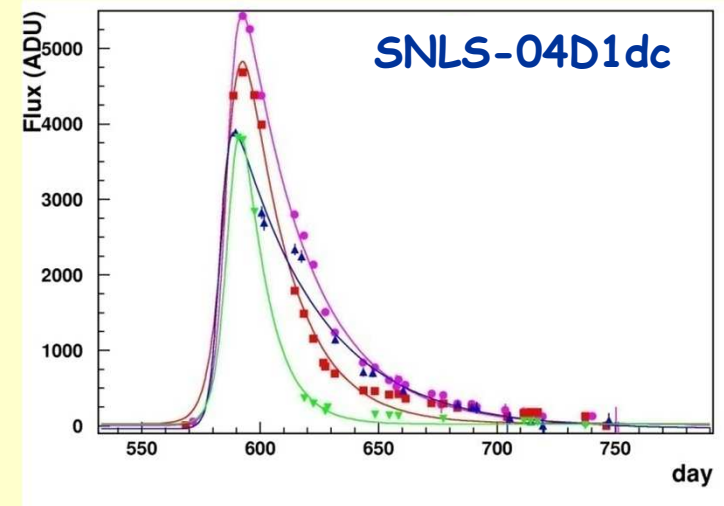


- Le relevé CFHTLS profond :
 - 4 champs de $1^\circ \times 1^\circ$
 - observations ttes les 3-4 nuits (6 mois/champ)

- MegaCam :
 - imageur CCD $1^\circ \times 1^\circ$
 - 340 millions de pixels
 - résolution: $0.18''$
 - 4 filtres (400-1000nm)

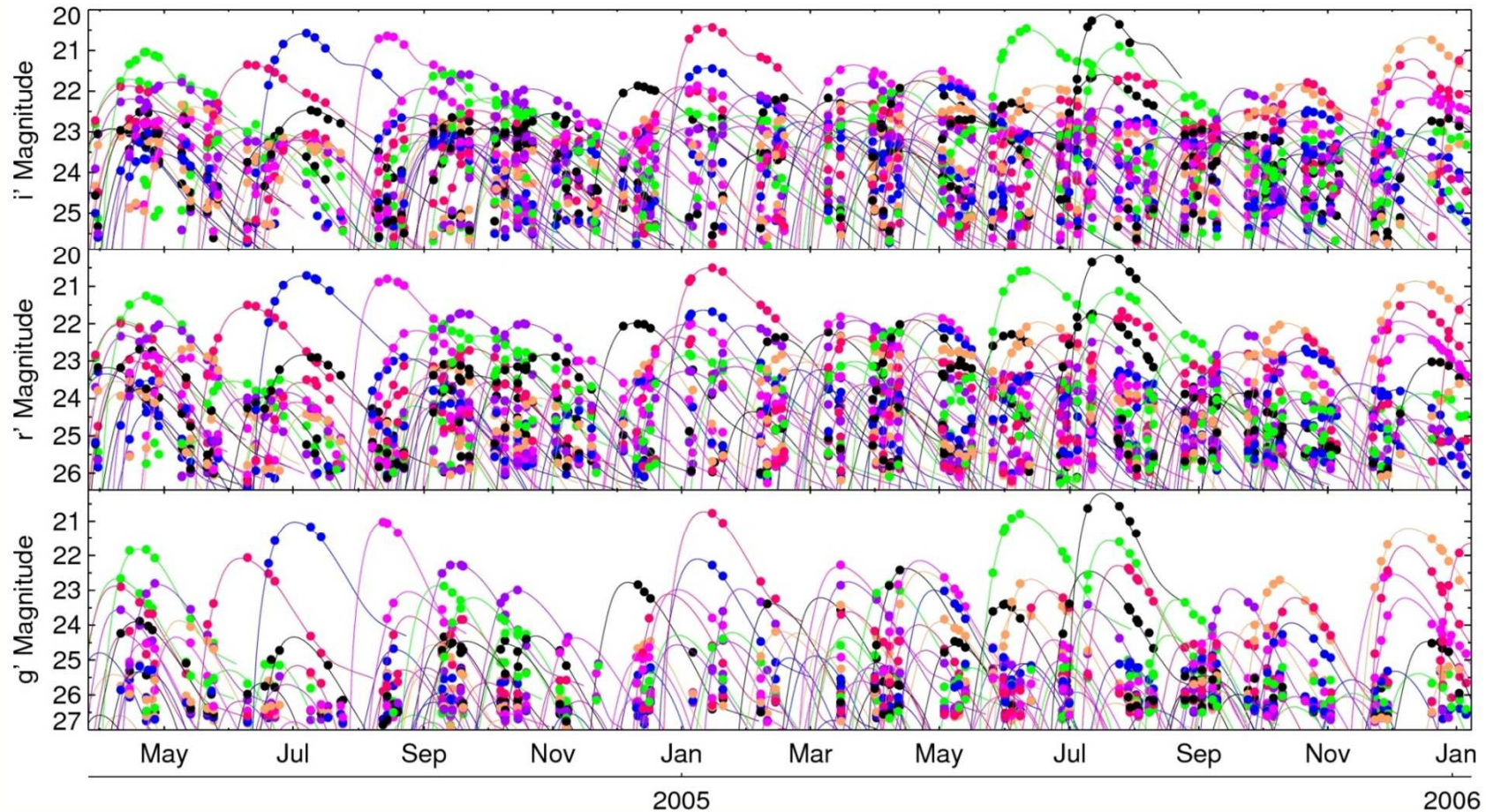


Courbe de lumière



- Spectroscopie: temps alloué sur télescopes de 8-10 m (VLT, Gemini, Keck)

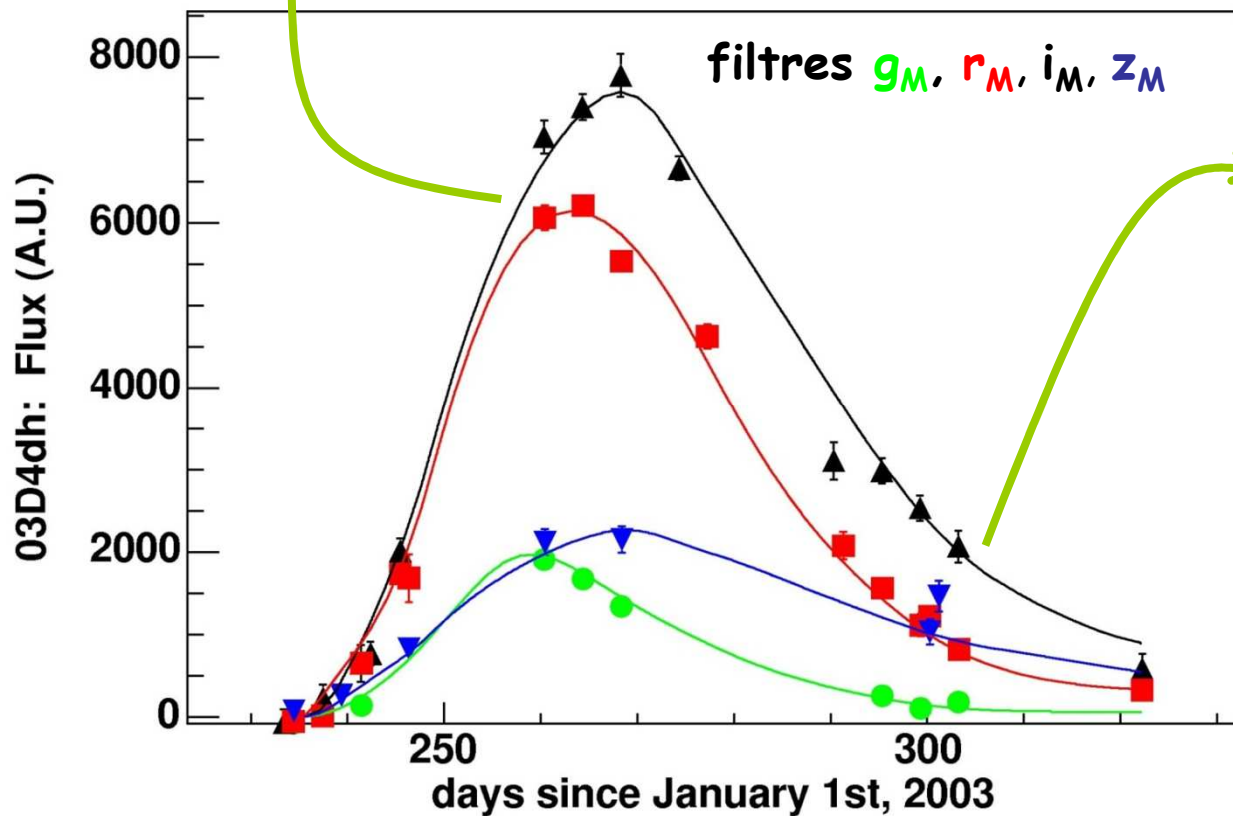
Stratégie "rolling search"



SNLS: 1000 SNe Ia ($0.1 < z < 1.2$), **500 confirmées** par spectres, échantillon **large** et **homogène**, haute précision photométrique

Cosmologie avec les SNe Ia

Spectroscopie déclenchée \Rightarrow type Ia confirmé, $z=0.627$



4 courbes
de lumière

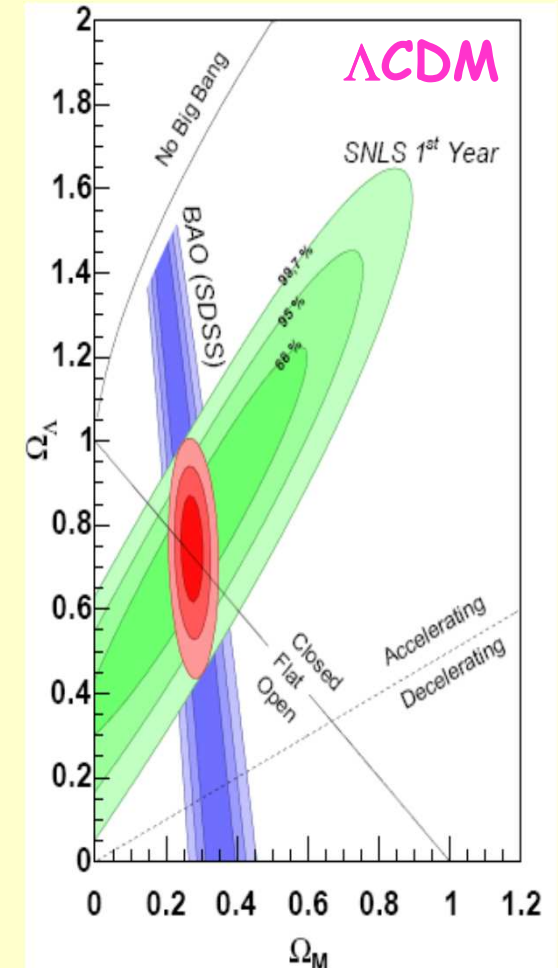
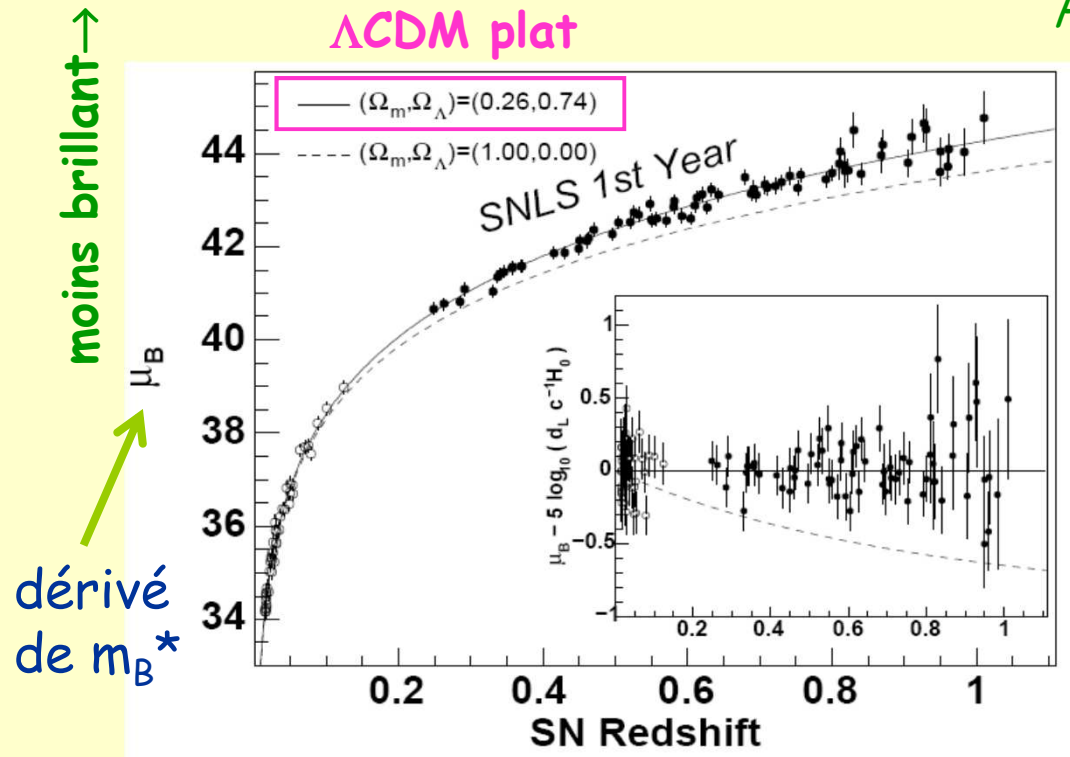
test de compatibilité
avec modèle de SNIa
(entraîné sur courbes
et spectres de Ia)

magnitude B apparente m_B^* , couleur (B-V) C et stretch s ou $X1$
 $\sim -2.5 \log_{10}(\mathcal{L} / 4\pi d_L^2)$

J. Guy et al., 2007, A&A, 466, 11

Résultats SNLS 1 an

P. Astier et al., 2006, A&A, 447, 31



- 71 SNe SNLS + 44 SNe proches : expansion accélérée confirmée
- Résidus en μ_B : RMS = 0.19
- Λ CDM plat: $\Omega_M = 0.263 \pm 0.042 \pm 0.032$
système dominante: calibration photométrique

SNLS : de 1 à 3 ans

- **Calibration photométrique** revue:

- Contrôle de la réponse instrumentale
- Intercalibration Landolt/MegaCam
- Nouvelle étoile de référence

N.Regnault et al., 2009, A&A, 506, 999

- **Modélisation des SNe Ia** améliorée (méthode, données d'entraînement, loi de couleur, propagation des erreurs):

J.Guy et al., 2007, A&A, 466, 11 et A.Conley, 2008, ApJ, 681, 482

- Analyse fine et poussée des **sysématiques** de SNLS (effets réévalués ou supplémentaires)

J.Guy et al., 2010, A&A, 523, A7 et K.Perrett, 2010, AJ, 140, 518

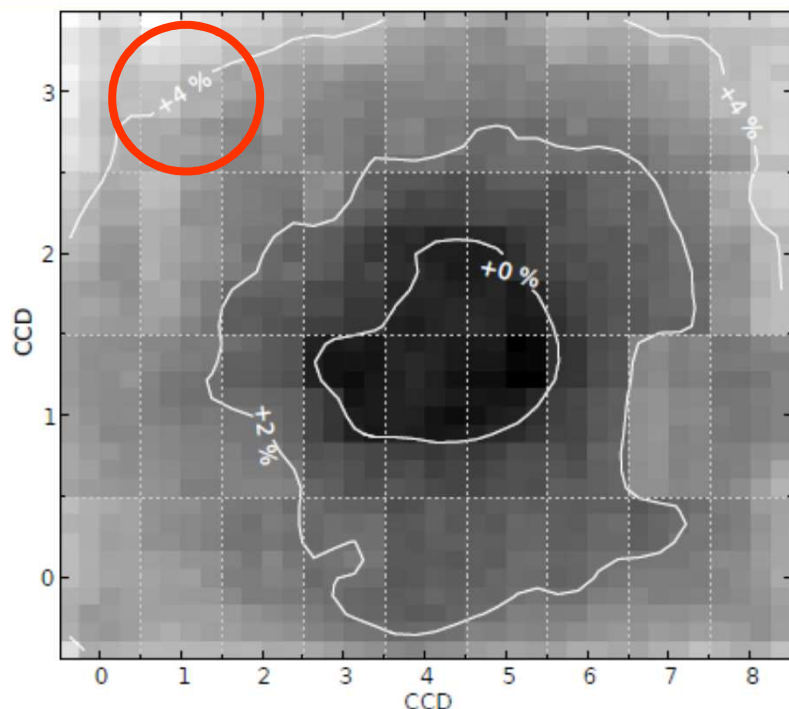
- **Autres lots de SNe Ia** revus et complétés (coupures de qualité, calibration relative, systématiques) et **combinés avec SNLS** puis avec **BAO et CMB**

A.Conley et al., 2011, ApJS, 192 et M.Sullivan et al., arXiv:1104.1444, soumis à ApJ

SNLS 3 ans: calibration

N.Regnault et al., 2009, A&A, 506, 999

- Corrections d'uniformisation de la réponse photométrique fournies par le CFHT : **non-uniformités résiduelles (4%)**
 - corrections réévaluées par SNLS



- Points zéro dérivés des étoiles de Landolt (cf. SNe proches):
 - intercalibration des systèmes Landolt / MegaCam ajustée **exclusivement** sur les données
- Etalon: Vega → **BD +17 4708**
 - $\text{mag}_{\text{Landolt}}$ et SED connus,
 $(B-V) \sim (B-V)_{\text{Landolt}} * (\sim 0.77)$

Magnitudes des étoiles tertiaires:

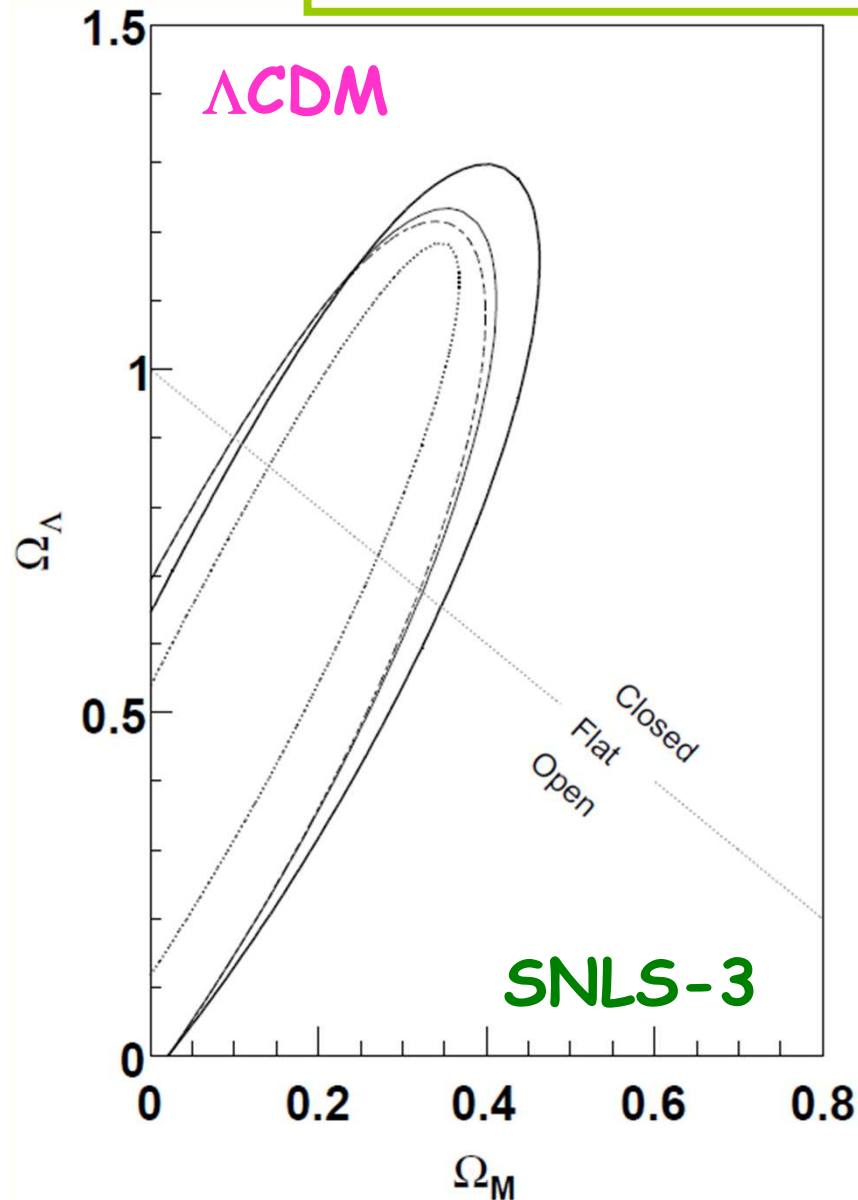
$$\delta_{\text{stat}} < 0.006 \text{ mag et } \delta_{\text{syst}} < 0.007 \text{ mag en } g_M, r_M, i_M \text{ et } \sim 0.019 z_M$$

Table 12. Summary of the systematic uncertainties affecting the calibrated magnitudes and fluxes.

	g_M	r_M	i_M	z_M
Aperture corrections	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Background subtraction	< 0.001	< 0.001	± 0.005	< 0.001
Shutter precision	± 0.0015	± 0.0015	± 0.0015	± 0.0015
Linearity	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Second order airmass corrections	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Grid Reference Colors	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Grid Color Corrections	< 0.001	< 0.001	± 0.002	< 0.001
Landolt catalog	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.002
Magnitudes of BD +17 4708	± 0.002	± 0.004	± 0.003	± 0.018
Total	± 0.003	± 0.004	± 0.006	± 0.018
SED of BD +17 4708	± 0.001	± 0.002	± 0.004	± 0.007
Total	± 0.003	± 0.005	± 0.007	± 0.019

- **Futur:** programme de calibration **absolue** de MegaCam (MAPC): observations des champs SNLS, d'étoiles étalon et des champs stellaires de SDSS
 \Rightarrow calibration **MegaCam/SDSS**, indépendante du système Landolt

SNLS 3 ans : données SNLS seules



- SNLS 3 ans: 285 SNe Ia, 242 après coupures de qualité

- Λ CDM plat:

$$\Omega_m = 0.211 \pm 0.034 \pm 0.069$$

- Systématiques:

	$\delta\Omega_m$
- calibration photométrique	0.048
- δ_{stat} lot d'entraînement	0.034
- modélisation LC	0.026
- évolution potentielle en β	0.022
- dispersion résiduelle	0.010
- corr. biais de Malmquist	0.004
- corrélation SN-hôte	0.003

Incertitude sur mod. de dist. μ dans les données SNLS 3ans

$\sigma(\mu)=0.04$ 0.02 0.06

calibration
photométrique

δ_{stat} entraînement
du modèle de
courbe de lumière

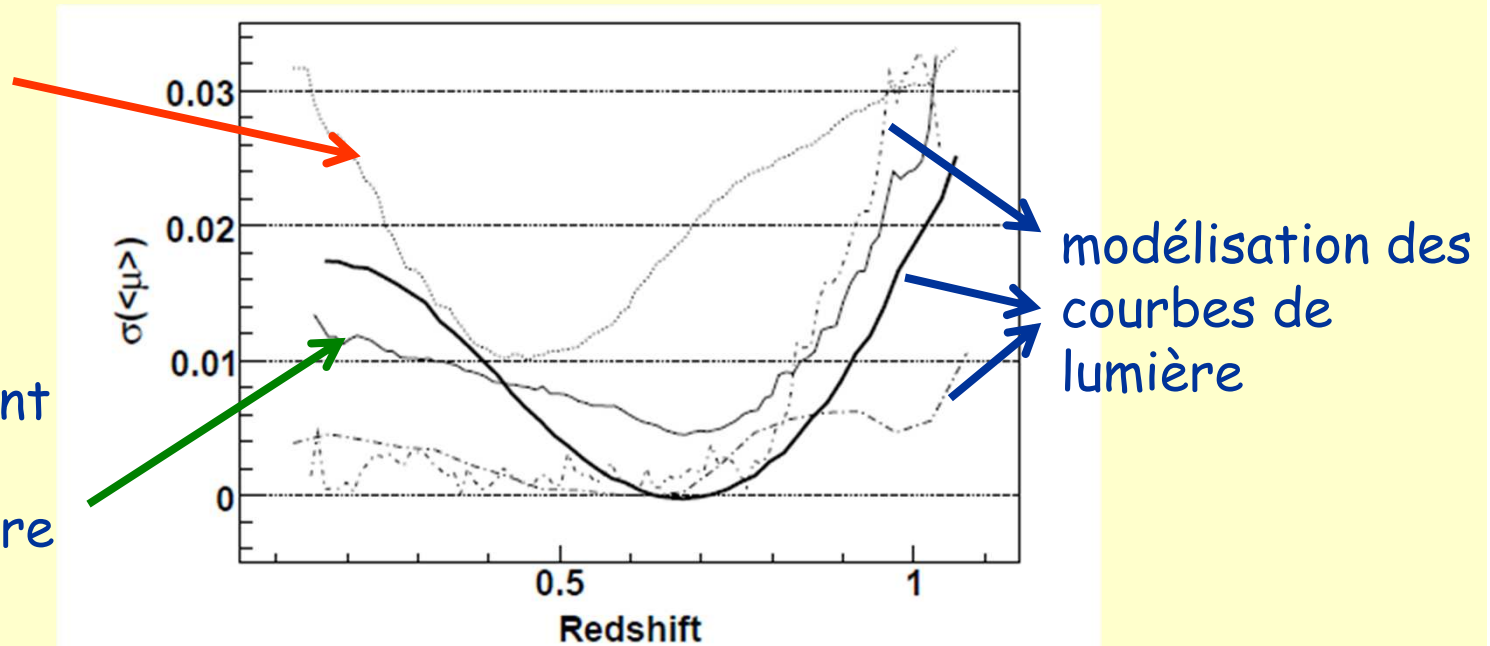
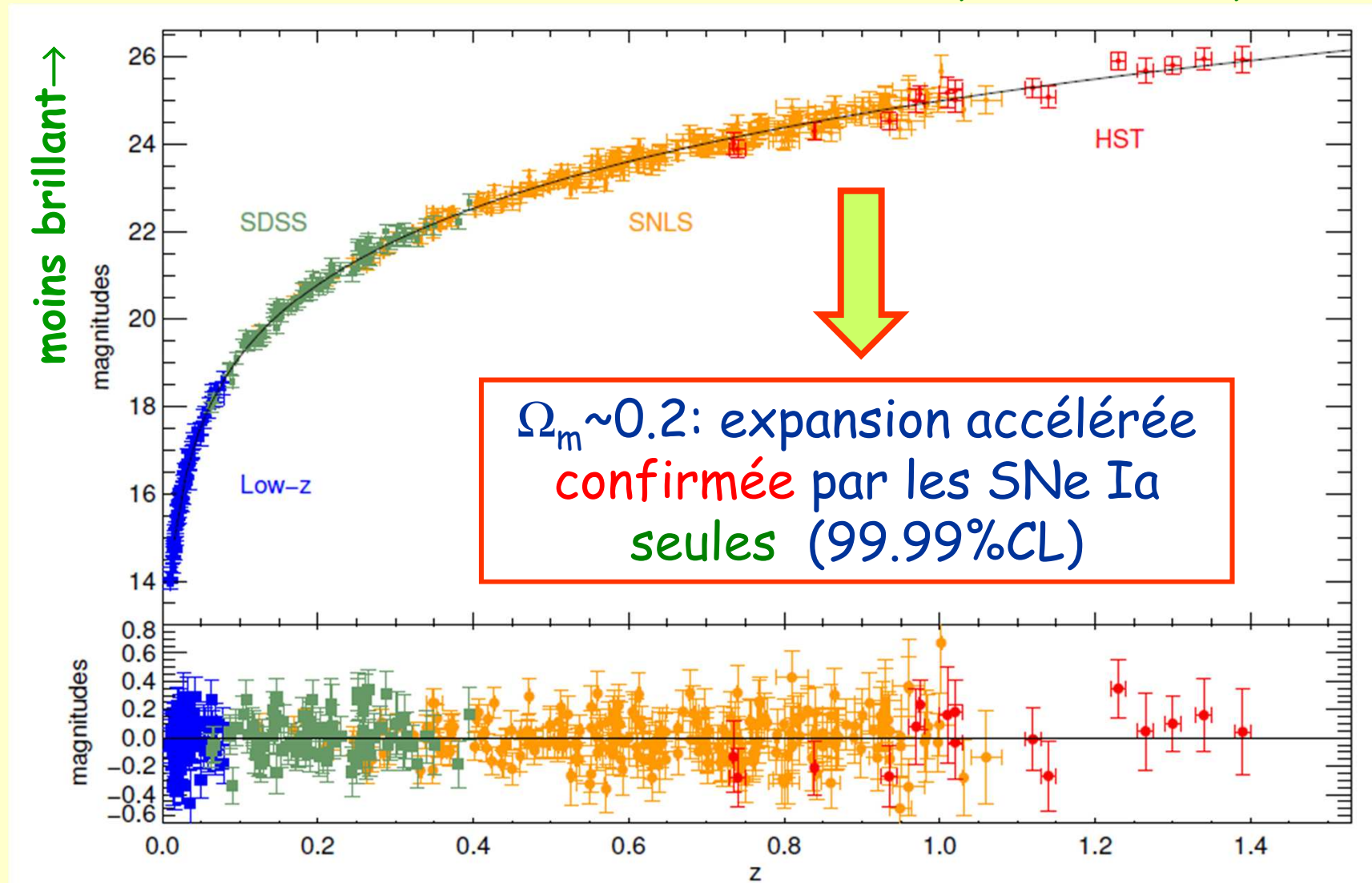


Fig. 16 Uncertainties on the average distance modulus μ in redshift bins of 0.2: impact of the statistical uncertainty of the training (for SALT2, thin solid curve), calibration uncertainties (dotted curve), residual scatter model (dotted short dashed curve), systematic uncertainty due to SALT2 regularisation (dotted long dashed curve) and differences between results obtained with the two light curve fitters (thick solid curve). Values of α and β that minimise residuals from the Hubble diagram were used.

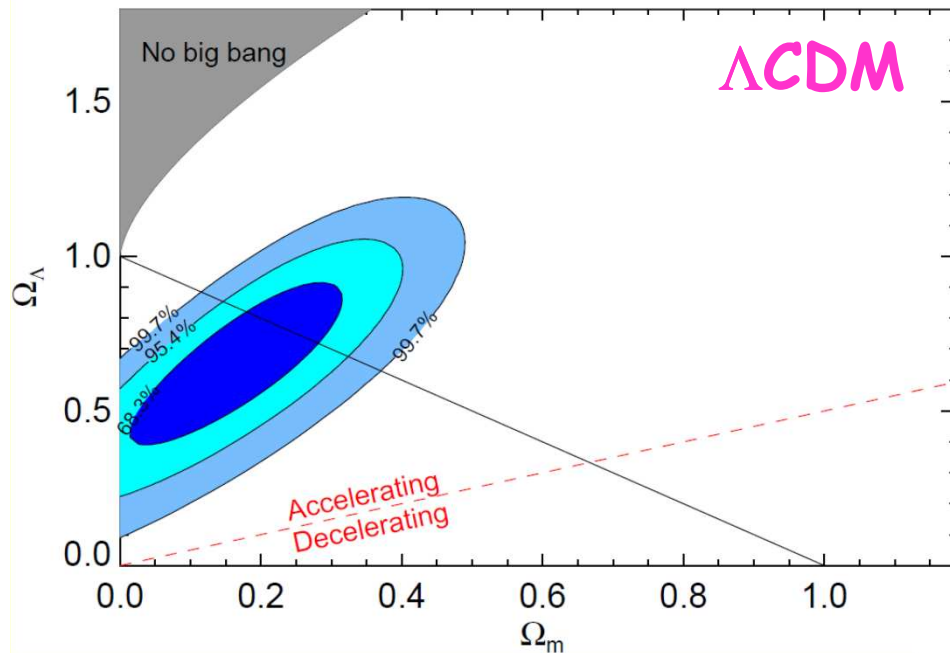
SNLS 3 ans : toutes données SNe Ia

A. Conley et al., 2011, ApJS, 192



472 SNe Ia de haute qualité, résidus SNLS: $RMS=0.16$

Ajustements cosmologiques : données SNeIa

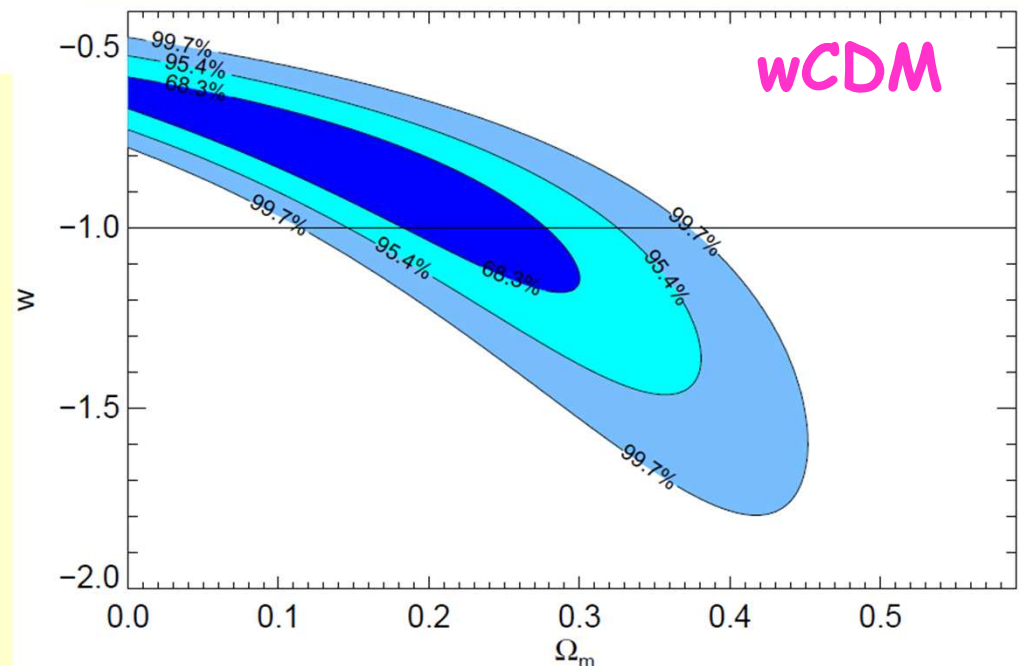


- δ_{stat} et δ_{syst} combinés (avec corrélations)
- meilleur contrôle des systématiques (calibration photométrique, modélisation des courbes des SNIa)

$$\Omega_m = 0.183^{+0.096}_{-0.102}$$

$$w = -0.91^{+0.17}_{-0.24}$$

NB: SNLS 1 an, SNe Ia seules : $w < -0.5$ (95% CL)



Systematiques : données SNe Ia

Description	Ω_m	w	Rel. Area ^a	w for $\Omega_m=0.27$	Section
Stat only	$0.19^{+0.08}_{-0.10}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1	-1.031 ± 0.058	
All systematics	0.18 ± 0.10	$-0.91^{+0.17}_{-0.24}$	1.85	$-1.08^{+0.10}_{-0.11}$	§4.4
Calibration	$0.191^{+0.095}_{-0.104}$	$-0.92^{+0.17}_{-0.23}$	1.79	-1.06 ± 0.10	§5.1
SN model	$0.195^{+0.086}_{-0.101}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1.02	-1.027 ± 0.059	§5.2
Peculiar velocities	$0.197^{+0.084}_{-0.100}$	$-0.91^{+0.16}_{-0.20}$	1.03	-1.034 ± 0.059	§5.3
Malmquist bias	$0.198^{+0.084}_{-0.100}$	$-0.91^{+0.16}_{-0.20}$	1.07	-1.037 ± 0.060	§5.4
non-Ia contamination	$0.19^{+0.08}_{-0.10}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1	-1.031 ± 0.058	§5.5
MW extinction correction	$0.196^{+0.084}_{-0.100}$	$-0.90^{+0.16}_{-0.20}$	1.05	-1.032 ± 0.060	§5.6
SN evolution	$0.185^{+0.088}_{-0.099}$	$-0.88^{+0.15}_{-0.20}$	1.02	-1.028 ± 0.059	§5.7
Host relation	$0.198^{+0.085}_{-0.102}$	$-0.91^{+0.16}_{-0.21}$	1.08	-1.034 ± 0.061	§5.8

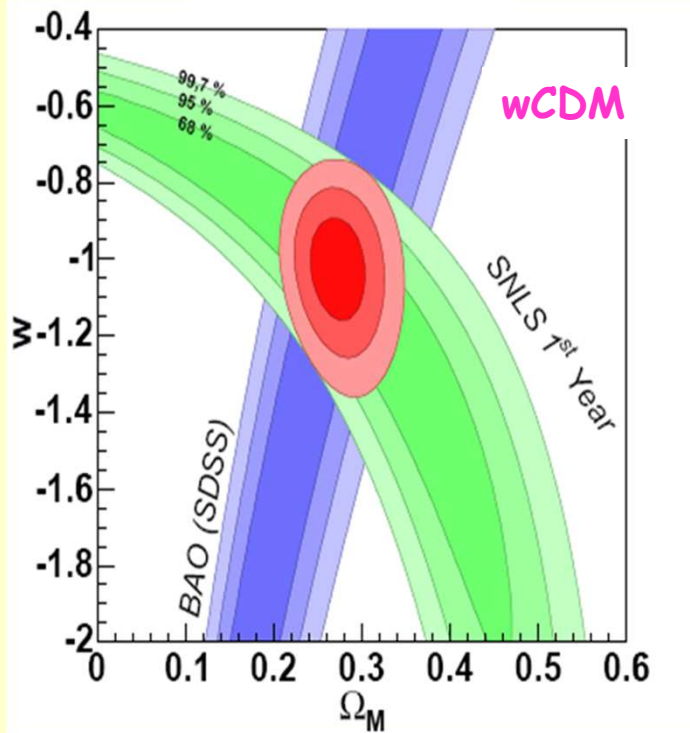
^aArea relative to statistical only fit of the contour enclosing 68.3% of the total probability.

Note. — Results including statistical and identified systematic uncertainties broken down into categories. In each case the constraints are given including the statistical uncertainties and only the stated systematic contribution. The importance of each class of systematic uncertainties can be judged by the relative area compared with the statistical-only fit.

SNLS 3 ans: combinaison SNe+CMB+BAO

M.Sullivan et al., arXiv:1104.1444

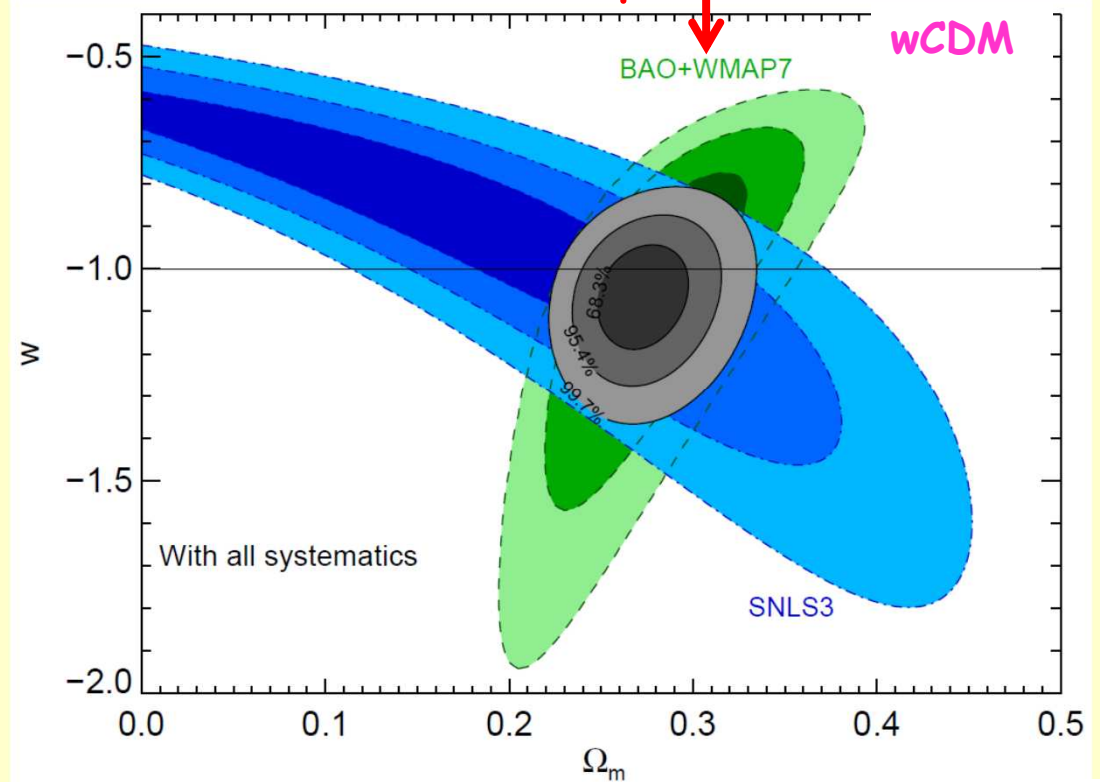
SNLS-1



$$\Omega_m = 0.271 \pm 0.042 \pm 0.032$$

$$w = -1.023 \pm 0.090 \pm 0.054$$

priors



$$\Omega_m = 0.274^{+0.019}_{-0.015}$$

$$w = -1.068^{+0.080}_{-0.082}$$

SNLS-3

$(\delta_{\text{stat}} \oplus \delta_{\text{syst}})$

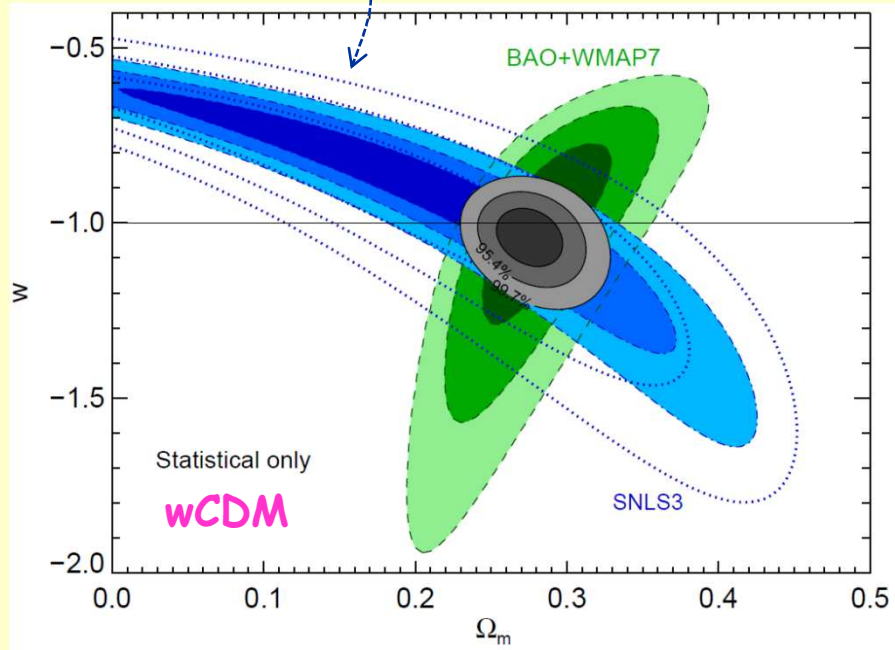
Systematiques

Table 3. Detailed summary of systematic uncertainties

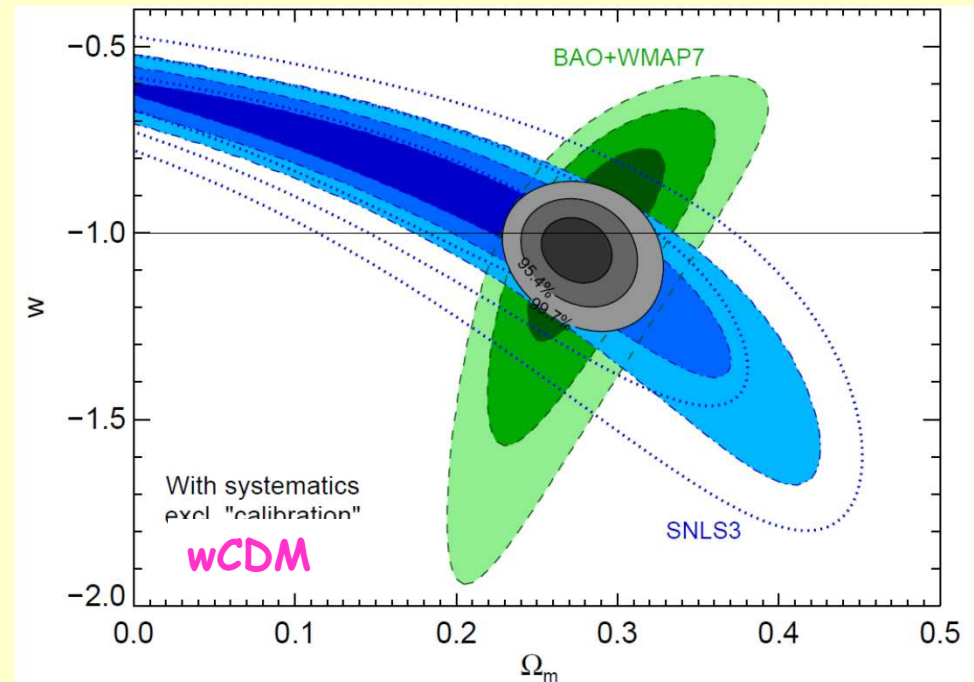
Source	Ω_m	w	Relative area ^a
Statistical only	$0.2763^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0430^{+0.0543}_{-0.0546}$	1.0
All systematics	$0.2736^{+0.0186}_{-0.0145}$	$-1.0676^{+0.0799}_{-0.0821}$	1.693
All systematics, except calibration	$0.2756^{+0.0164}_{-0.0133}$	$-1.0481^{+0.0573}_{-0.0580}$	1.068
All systematics, except host term	$0.2738^{+0.0186}_{-0.0145}$	$-1.0644^{+0.0790}_{-0.0809}$	1.677
All systematics, fixing α, β^b	$0.2656^{+0.0179}_{-0.0144}$	$-1.1168^{+0.0807}_{-0.0824}$	1.641
Contribution of different systematics:			
Calibration	$0.2750^{+0.0185}_{-0.0150}$	$-1.0581^{+0.0774}_{-0.0791}$	1.614
SN Ia model	$0.2767^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0403^{+0.0543}_{-0.0547}$	1.013
Peculiar velocities	$0.2761^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0452^{+0.0544}_{-0.0548}$	1.002
Malmquist bias	$0.2758^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0474^{+0.0548}_{-0.0553}$	1.014
Non SN Ia contamination	$0.2763^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0430^{+0.0543}_{-0.0546}$	1.000
Milky Way extinction	$0.2762^{+0.0164}_{-0.0133}$	$-1.0441^{+0.0553}_{-0.0557}$	1.023
SN redshift evolution	$0.2763^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0408^{+0.0544}_{-0.0547}$	1.017
Host galaxy term	$0.2762^{+0.0163}_{-0.0132}$	$-1.0453^{+0.0556}_{-0.0562}$	1.029

Systemématiques

stat \oplus syst



stat seulement: $\delta w \sim 0.055$



stat+syst hors calib: $\delta w \sim 0.058$

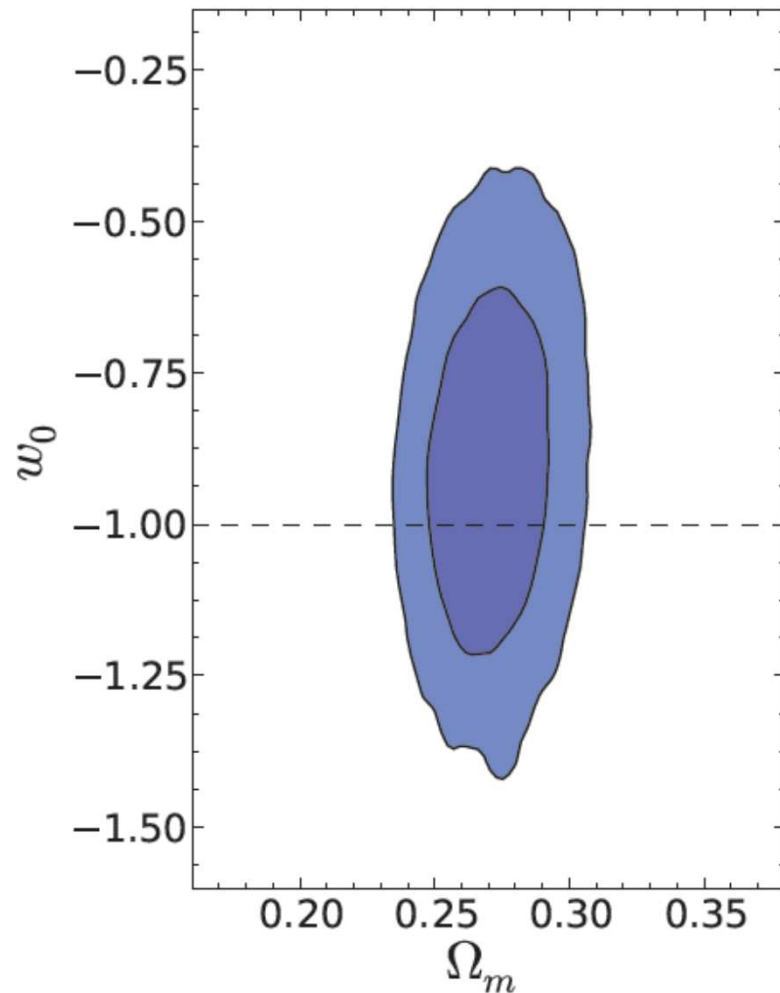
(relative area: 1.07)

Au-delà de w CDM: $w(a)$ CDM $w(a)=w_0+w_a(1-a)$

spectres de puissance



SNLS3+SDSS DR7 LRGs+WMAP7+ H_0 (Flat)



$w(a)$ CDM

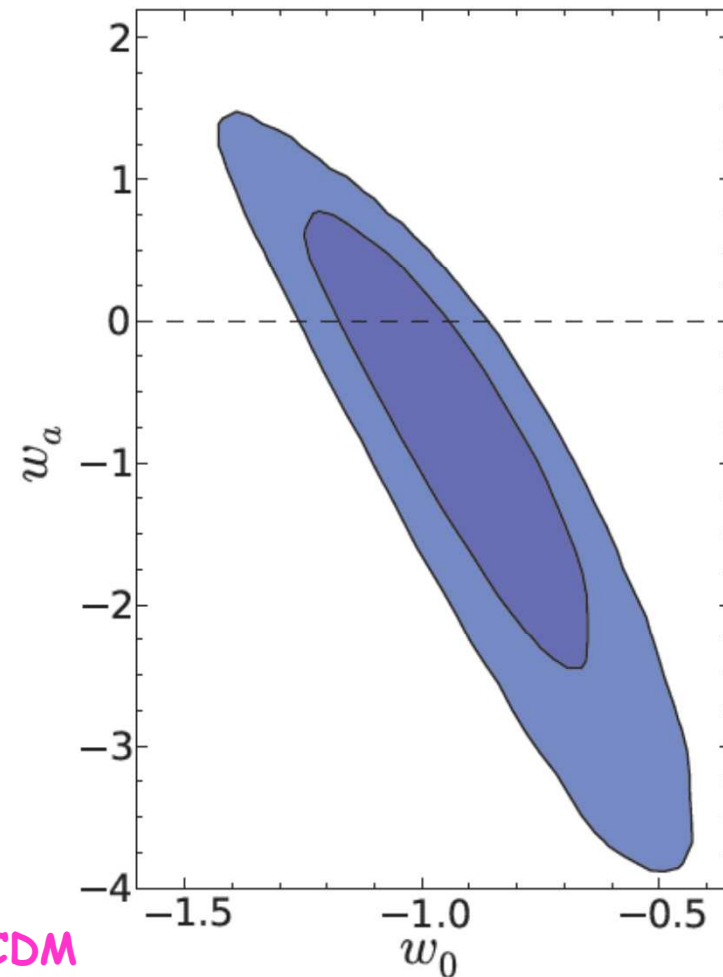


Table 6. Cosmological results obtained with CosmoMC assuming a variable dark energy equation of state and a flat universe

Parameter	WMAP7+DR7 +SNLS3	WMAP7+DR7 +SNLS3+ H_0 (stat. only)	WMAP7+DR7 +SNLS3+ H_0 (stat+sys)
Ω_m	$0.282^{+0.019}_{-0.019}$	$0.274^{+0.014}_{-0.014}$	$0.271^{+0.015}_{-0.015}$
w_0	$-0.949^{+0.198}_{-0.201}$	$-0.870^{+0.139}_{-0.139}$	$-0.905^{+0.196}_{-0.196}$
w_a	$-0.535^{+1.109}_{-1.111}$	$-0.938^{+0.821}_{-0.827}$	$-0.984^{+1.094}_{-1.097}$
H_0	$70.26^{+2.40}_{-2.43}$	$71.38^{+1.40}_{-1.38}$	$71.99^{+1.68}_{-1.69}$
FoM ^a	10.6	21.5	11.1

- données SNeIa indispensables pour contraindre $w(a)$
- résultats en accord avec publication WMAP7 (Komatsu et al, 2011):

$$w_0 = -0.93 \pm 0.12 (\text{stat})$$

$$w_a = -0.38^{+0.66}_{-0.65} (\text{stat})$$

mais plus complets (systématiques, données SNe à jour)

Les SNe Ia, chandelles standard ?

- Hypothèse: SNe Ia = chandelles standard

luminosité reproductible

$$m_{B^*} \equiv -2.5 \log_{10} \Phi_B^* \quad \text{et} \quad \Phi_B^* \equiv \mathcal{L}(c, s) / 4\pi d_L^2(z, H_0, \Omega_M, \Omega_\Lambda, w, \dots)$$

- Estimateur de distance μ_B : modèle empirique pour $\mathcal{L}(c, s)$

$$\mu_B = 5 \log_{10} d_L \equiv m_B^* - M_B + \alpha(s-1) - \beta c$$

magnitude au pic
apparente au repos dans
le B

magnitude
absolue dans le B

variabilité de la forme de
la courbe de lumière

variabilité en couleur
(B-V) (variation intrinsèque
et extinction)

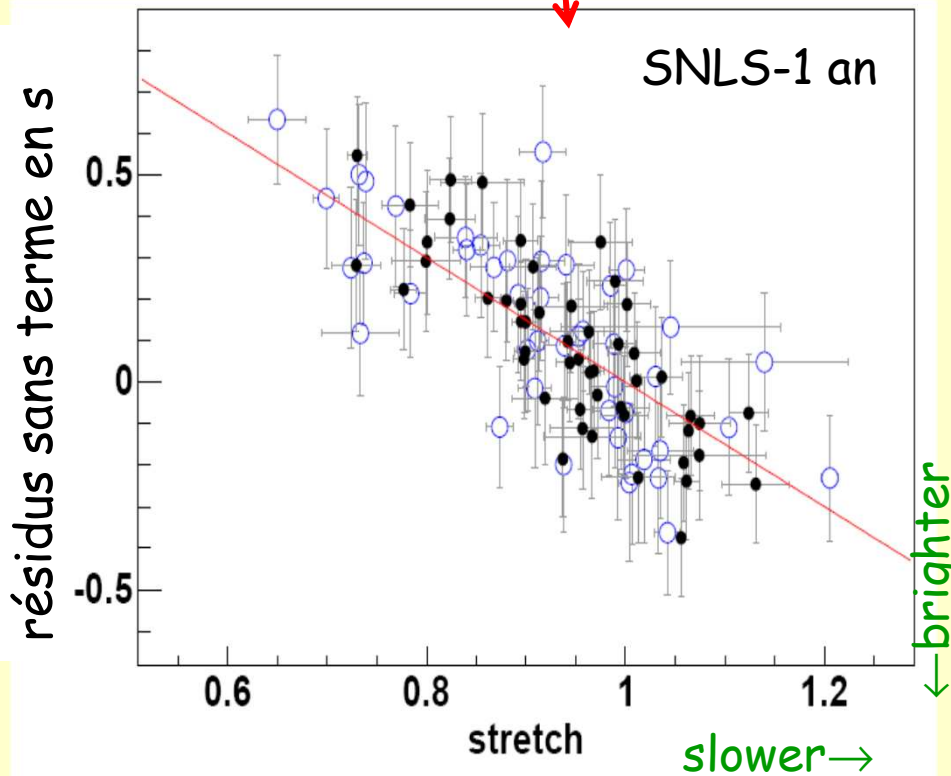
M_B, α, β à ajuster en même temps que par. cosmologiques

Relations luminosité - stretch - couleur

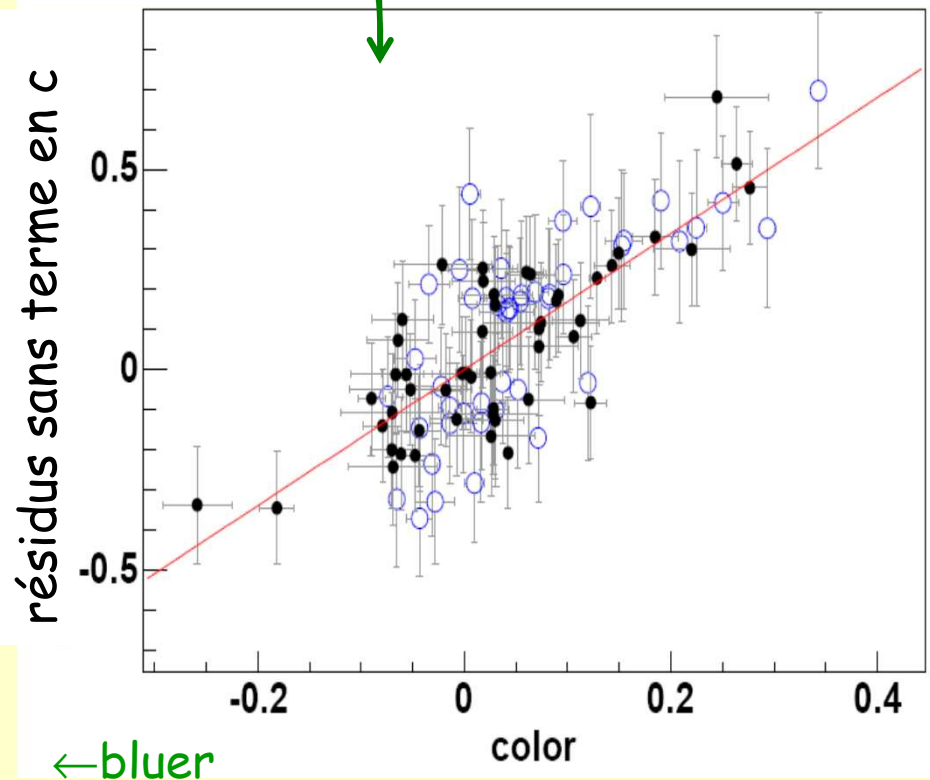
$$m_B^* - M_B + \alpha(s-1) - \beta c - 5 \log_{10}(d_L^{\text{fit}})$$

○ : $z < 0.15$

● : $z > 0.15$



relation "brighter-slower"



relation "brighter-bluer"

- Hypothèses sur la dérivation du module de distance:

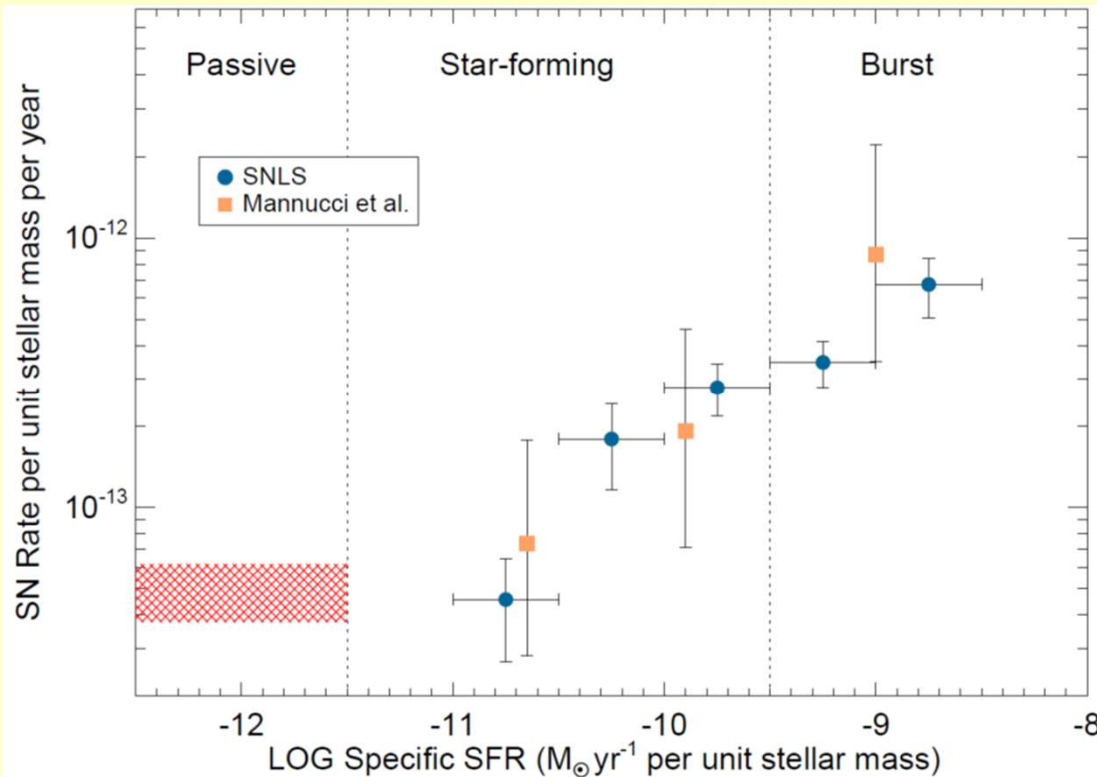
$$\mu_B = m_B^* - \underbrace{M_B + \alpha(s-1) - \beta c}$$

M_B, α, β supposés indépendants de z et suffisants

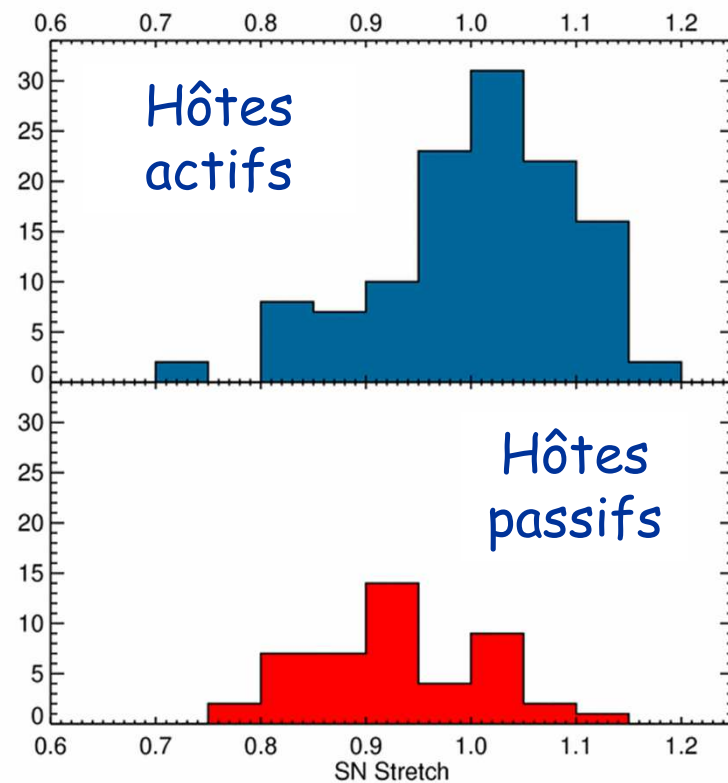


- Tests de cohérence: comparaison des propriétés des SNe Ia (taux, résidus en μ_B) en fonction du décalage spectral, du stretch, de la couleur et des propriétés de la galaxie-hôte

SNe Ia et galaxies-hôtes



Relation stretch des SNe vs activité de l'hôte

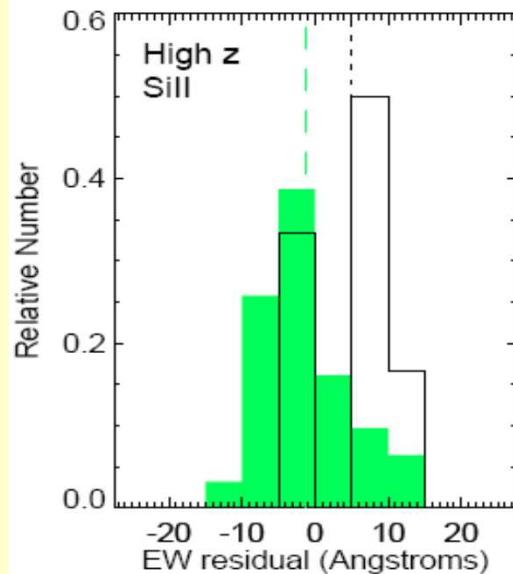
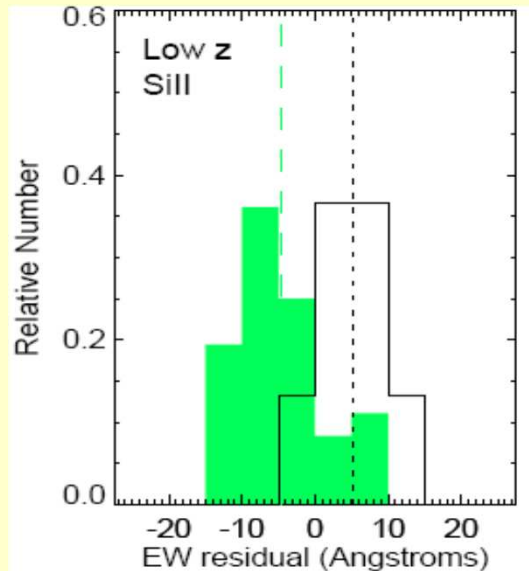


M. Sullivan et al., ApJ 648 (2006) 868
(SNLS-2ans)

Les SNe Ia les **plus longues** (donc les **plus brillantes**), apparaissent surtout dans les galaxies à **fort taux de formation stellaire** (ie jeunes).
NB: **pas** d'effet significatif observé pour la couleur des SNe

T.J.Bronder et al., A&A 477 (2008) 717
(SNLS-3ans, spectres Gemini)

Corollaires spectroscopiques



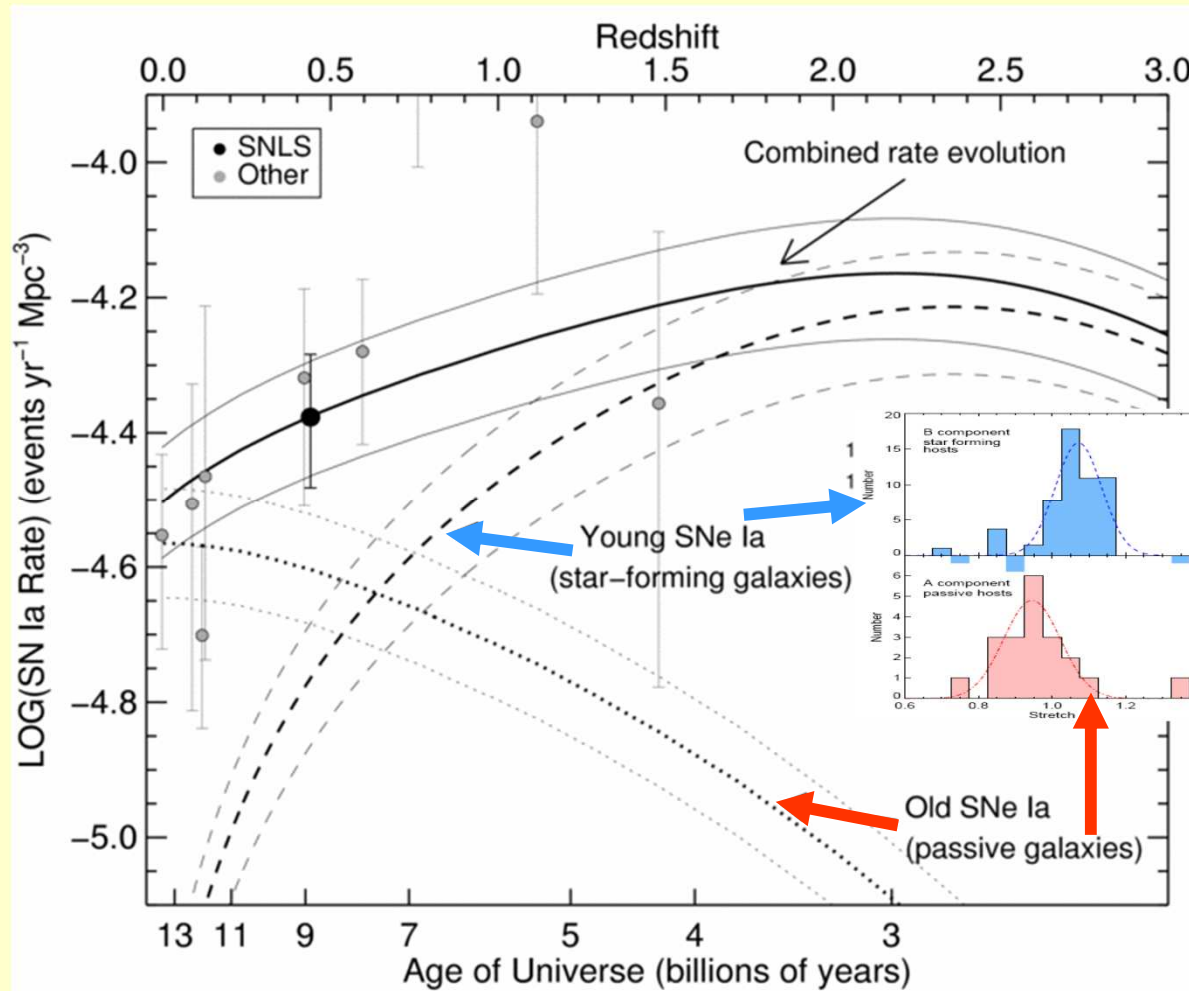
Distribution de la largeur équivalente en
SiII (résidus / bas z)

□ E/S0 ■ Spirales

Largeurs équivalentes **moins élevées** dans
les galaxies de type **tardif** (∇z) i.e. à **fort**
taux de formation stellaire.

Dans ces galaxies, les SNe Ia sont **plus**
brillantes \Rightarrow milieu plus chaud donc **plus**
ionisé \Rightarrow **moins** d'éléments de masse
intermédiaire (Ca, Si).

Taux de SNe Ia : deux composantes



Proportions relatives
des deux populations
de SNe Ia évoluent
avec z



stretch moyen
des SNe Ia
évolue avec z
(évolution
démographique du
stretch)

M. Sullivan et al., ApJ 648 (2006) 868

Evolution du stretch avec z : prédictions = data

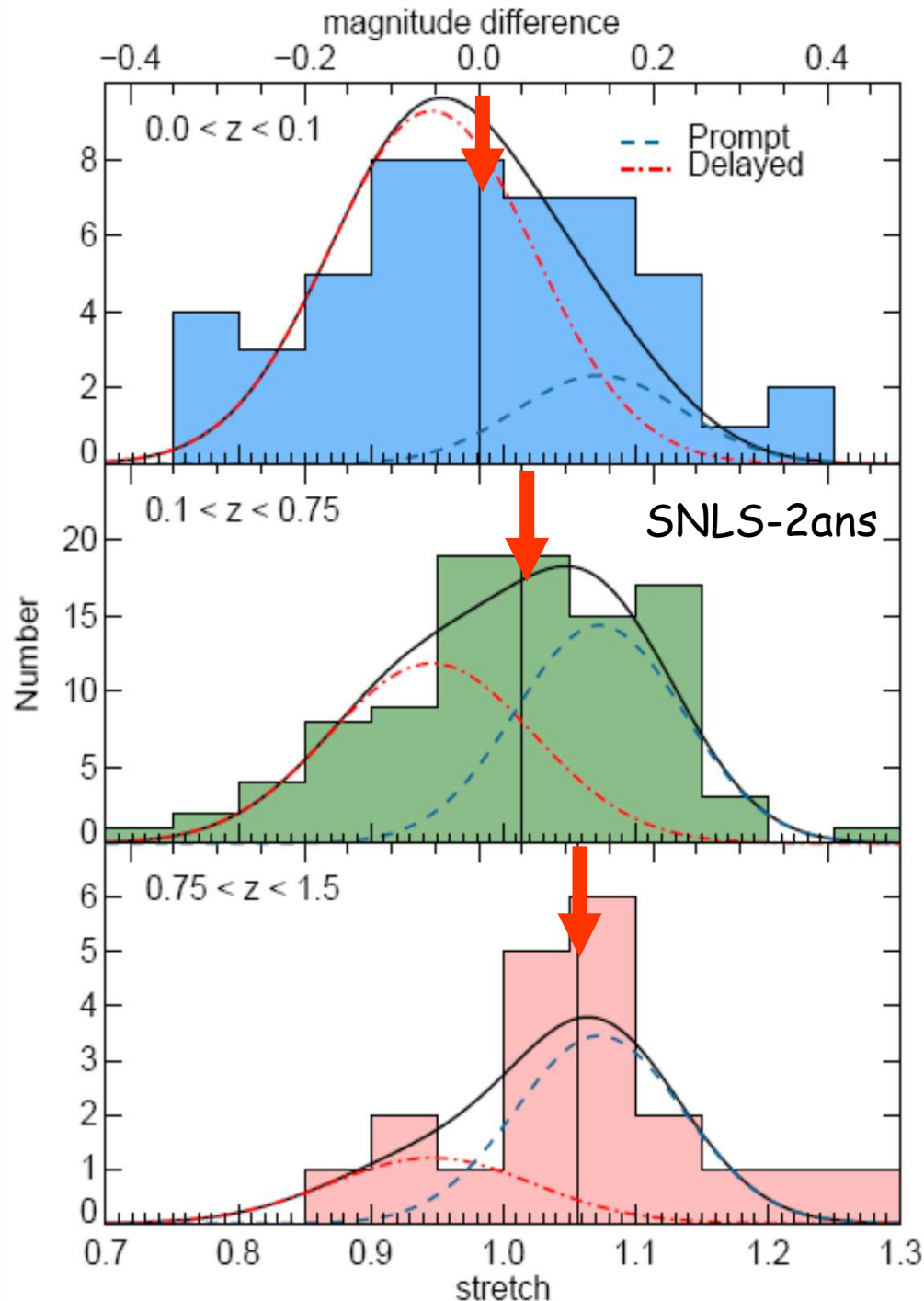
$\langle \text{stretch} \rangle + 8\%$ pour $z=0.03-1.12$
 $\langle \text{brillance intrinsèque} \rangle +12\%$

Si α est le même pour les deux populations de SNe Ia, pas d'effet sur la cosmologie

Rappel:

α = corrélation luminosité-stretch

$$\mu_B = m_B^* - M_B + \alpha(s-1) - \beta c$$



Résultats SNLS 3 ans

J. Guy et al., 2010, A&A, 523, A7
(ajustements Λ CDM, SNLS seul[†])

■ Pas d'évolution de α

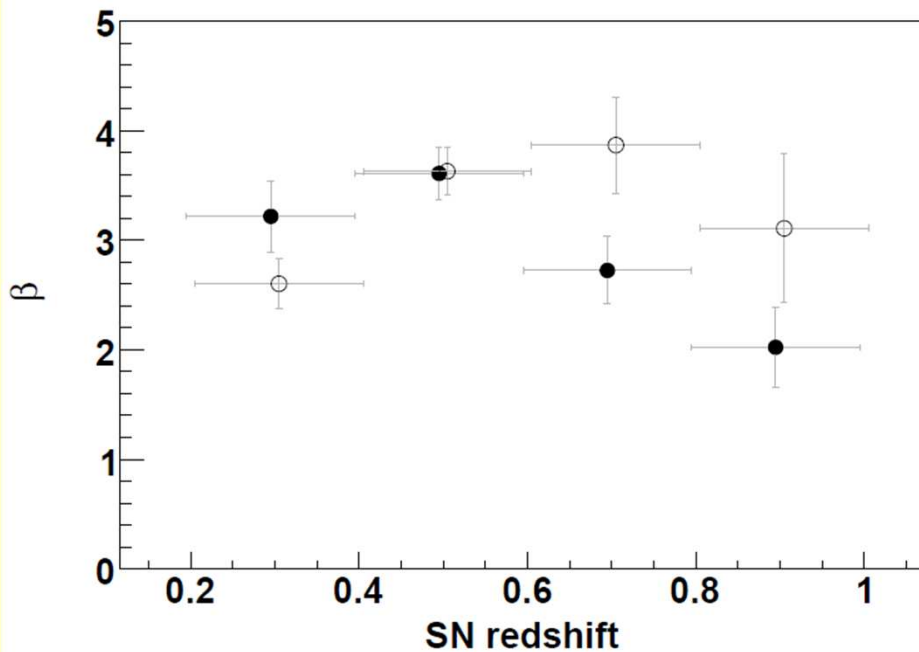
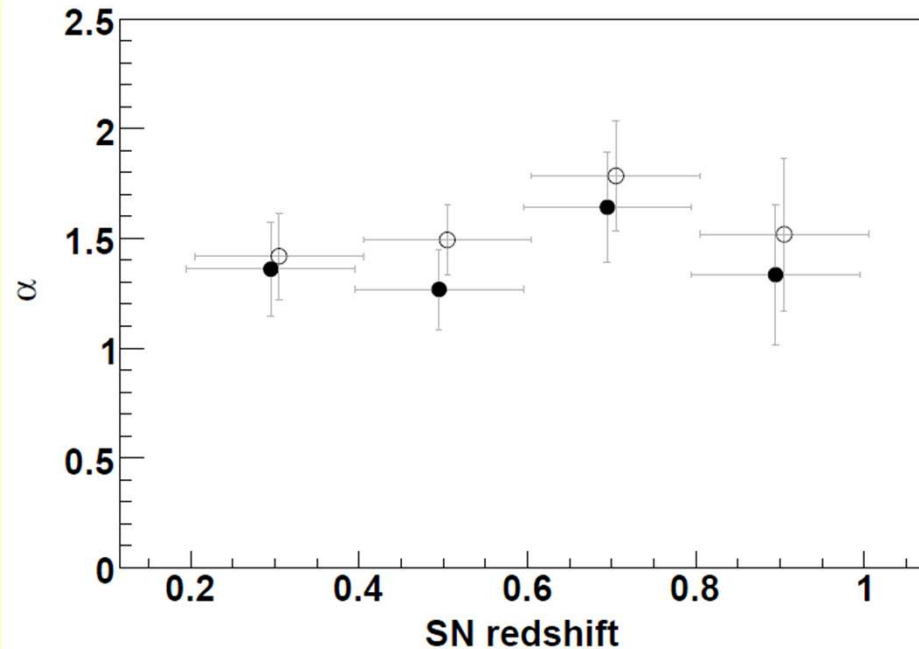
■ Possible évolution de β

→ cause probable: incertitude sur la modélisation des couleurs des SNe Ia

→ systématique supplémentaire

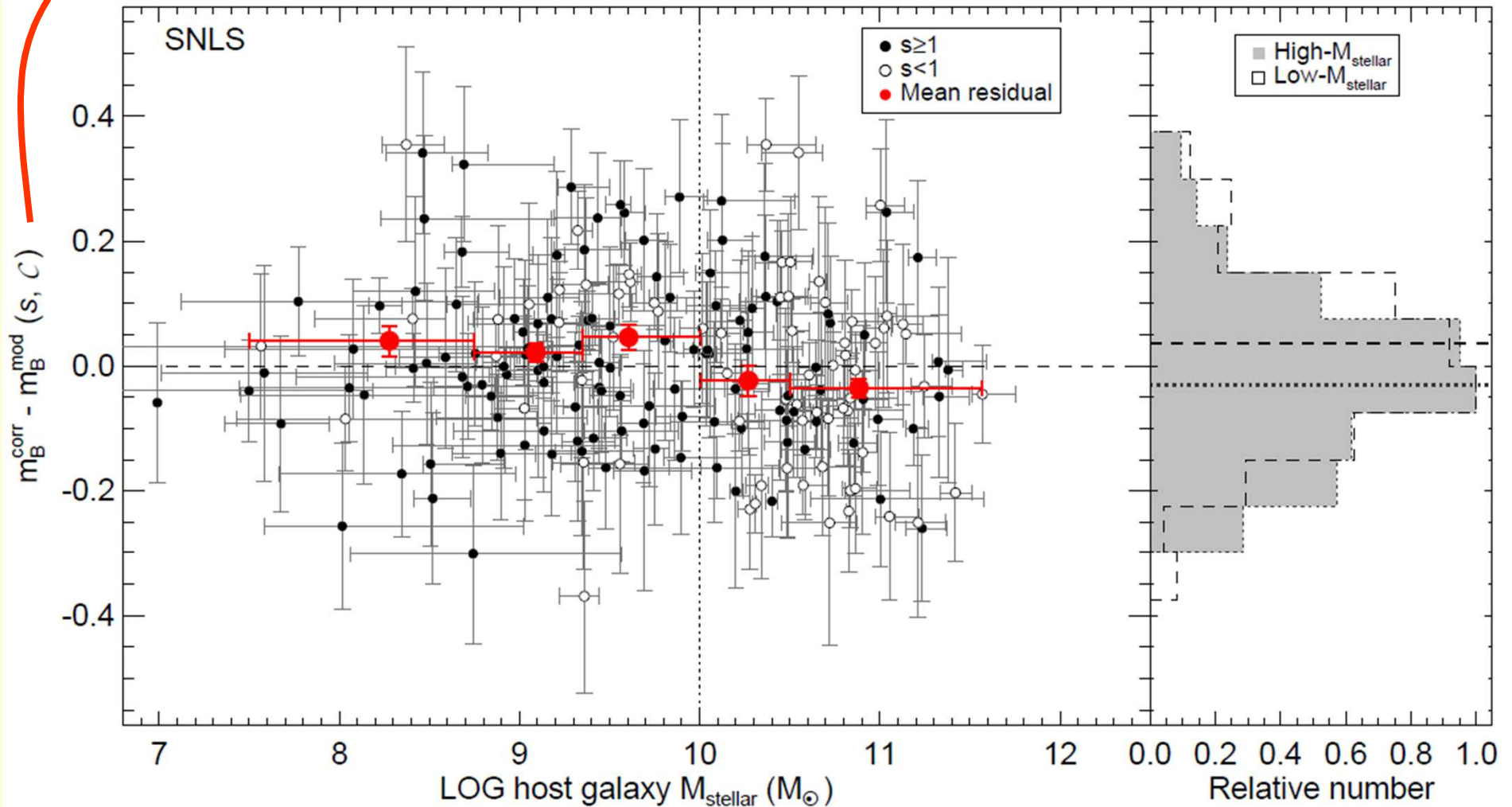
● SALT2 LC fitter

○ SiFTO LC fitter

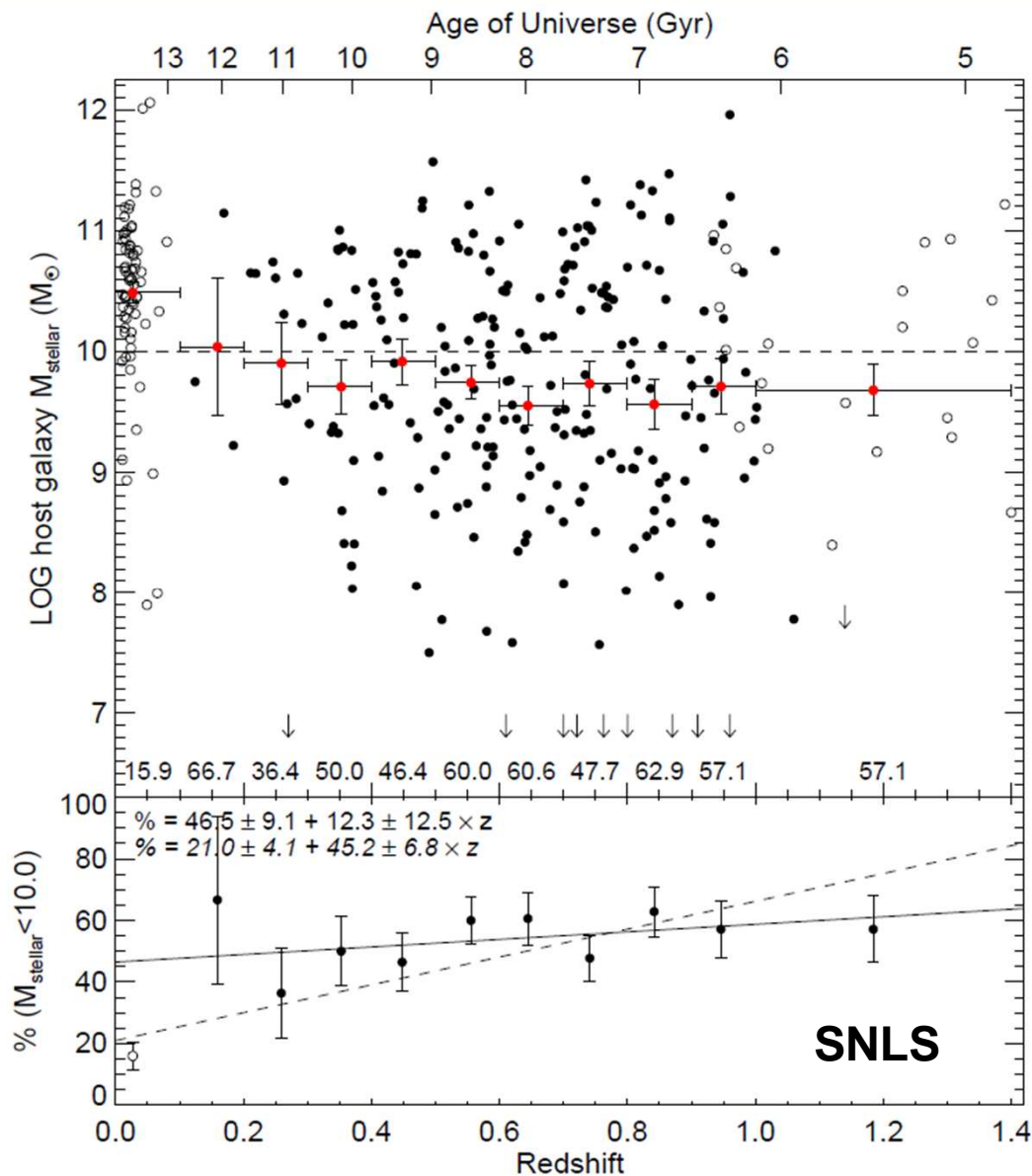


$$\mu_B - 5 \log_{10} d_L^{\text{fit}}$$

M. Sullivan et al., 2010, MNRAS 406, 782
 (ajustements Λ CDM, SNLS + bas z)



La luminosité des SNe Ia corrigée en s, c dépend de la masse de la galaxie-hôte: les SNe Ia dans les galaxies massives (ie à métallicité élevée) sont plus brillantes ($>3\sigma$)



Population de SNe Ia d'hôtes différents évolue avec z (effet démographique)



Pour éviter un biais dans les analyses cosmologiques :

modifier μ_B :

M_B différent

si $M_{\text{hôte}} < \text{ou} > 10^{10} M_{\odot}$

NB: sans correction :

$\Delta_w \sim 1 \sigma_{\text{stat}}$ (données combinées)

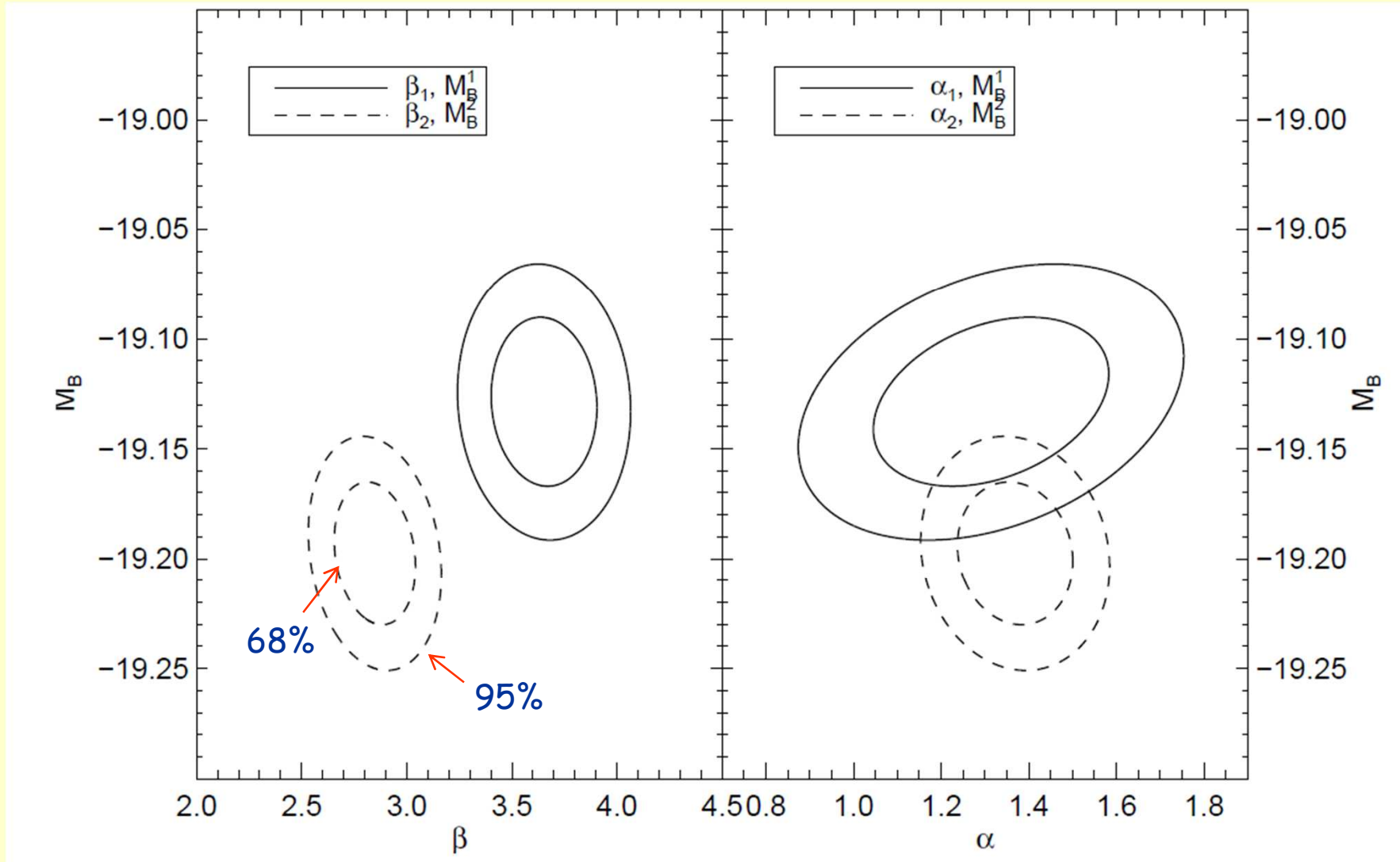
→ modification incluse dans les résultats SNLS-3 (μ_B et syst)

M. Sullivan et al., arXiv:1104.1444 (ajustements Λ CDM, SNLS+BAO+CMB)

données SNe divisées en 2 lots :

— $M_{\text{hôte}} < 10^{10} M_{\odot}$

- - - $M_{\text{hôte}} > 10^{10} M_{\odot}$



Conséquences

- Modification de $\mu_B = m_B^* - M_B^i + \alpha(s-1) - \beta c$?
 - pour décrire la dépendance selon $M_{\text{hôte}}$: les données préfèrent $2M_B$, 2β et **1 seul α** plutôt que $2M_B$, 1β , 1α
 - effet sur le χ^2 de l'ajustement global (données SNe regroupées): 423/466 \rightarrow 405/465
 - impact sur w : **inférieur** à la systématique liée à l'hôte
 - valeurs ajustées de β_1 et β_2 : différence de 4.5σ
 - galaxies de basse masse: $\beta_1 = 3.65 \pm 0.17$
 - galaxies de haute masse: $\beta_2 = 2.85 \pm 0.12$
 - Interprétation: $\beta \leftrightarrow$ **variation de couleur des SNe Ia**
 - extinction par poussières de l'hôte: $\beta = 4.1$ (cf Voie Lactée)
 - variations intrinsèques hors stretch (asymétrie de l'explosion, angle de vue ...)
 - Comment prendre ces deux effets en compte **correctement** ?
 - \rightarrow le débat est loin d'être clos (et reste vif) !

Conclusions

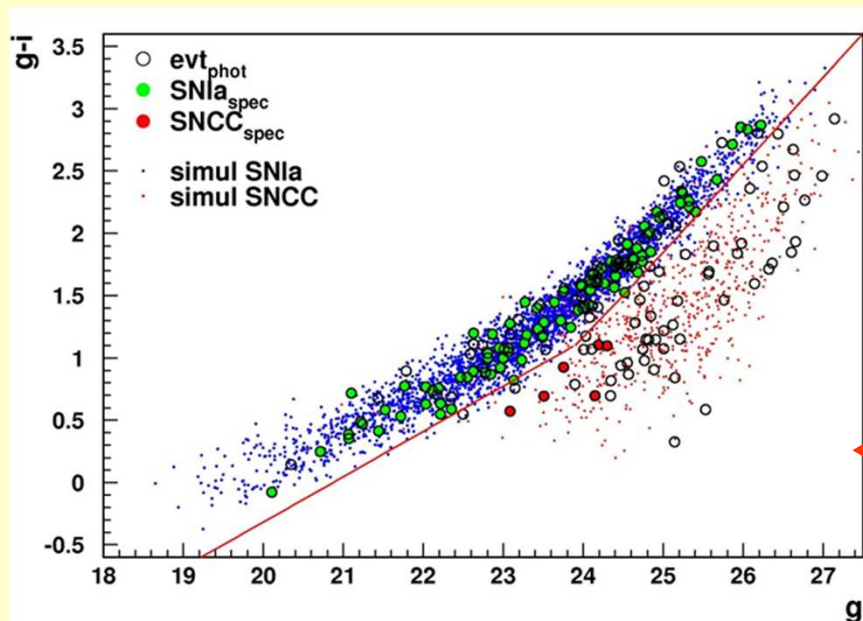
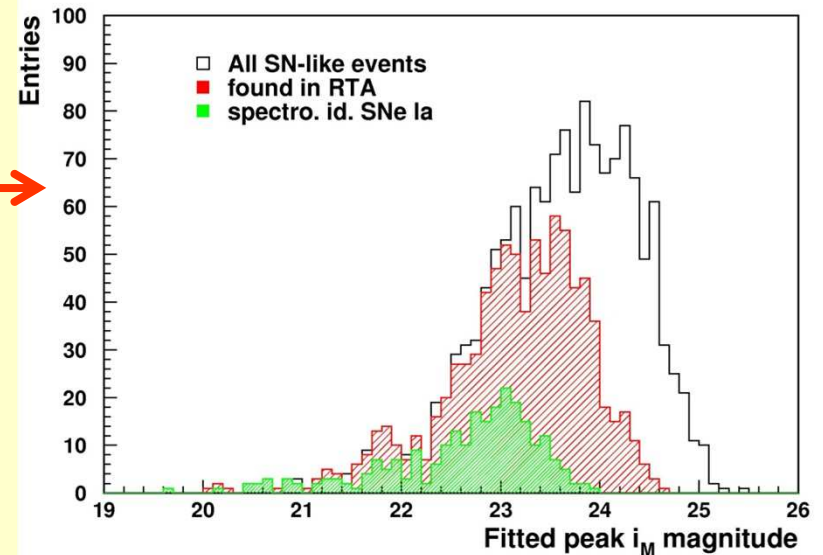
- **SNLS (2003-2008)**: imageur grand champ de haute résolution, stratégie d'observation optimisée, suivi spectroscopique conséquent, photométrie étalonnée au %
- **Résultats 3 ans**: **472** SNe Ia de **haute qualité** $\forall z$ (SNLS: 242), contrôle poussé des **systematiques**: accélération de l'Univers confirmée à plus de 99,99%CL par les **seules** SNe.
- **Futur**: réduction **significative** des systematiques de calibration photométrique encore possible.
- **Hypothèse de chandelle standard**: relations (**empiriques**) luminosité-stretch & couleur **variables** $\forall z$, dépendance luminosité-galaxie hôte **à inclure**.

Compléments

Sélection photométrique de SNe

- Analyse différée des données de SNLS-3ans:

Détections en i ($0.1 < z < 1.1$)	300 000
Rejet bruit, étoiles, AGNs	1483
Association avec galaxie hôte de z connu	1233

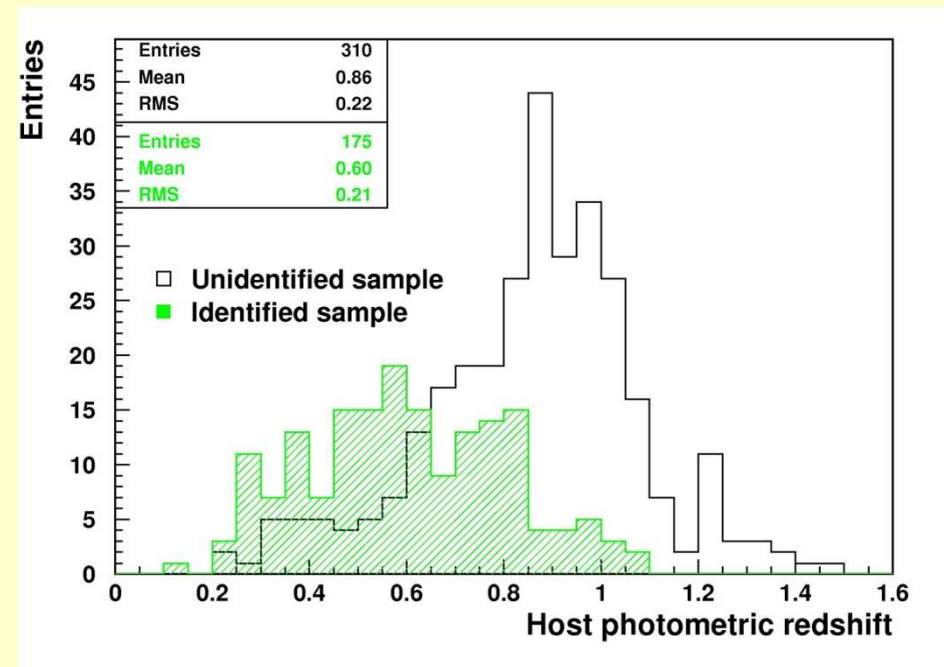


- Ajustement par modèle de SNIa au z_{gal} et coupures sur χ^2 , stretch, couleur, couleur-magnitude

Sélection SNIa photométrique à z connu (galaxie-hôte):

- efficacité : 80%
- contamination SNe CC : 4%
- **485** SNe Ia (SNLS-3ans)

Application:



biais de la sélection spectroscopique ($0.8 < z < 1.05$):

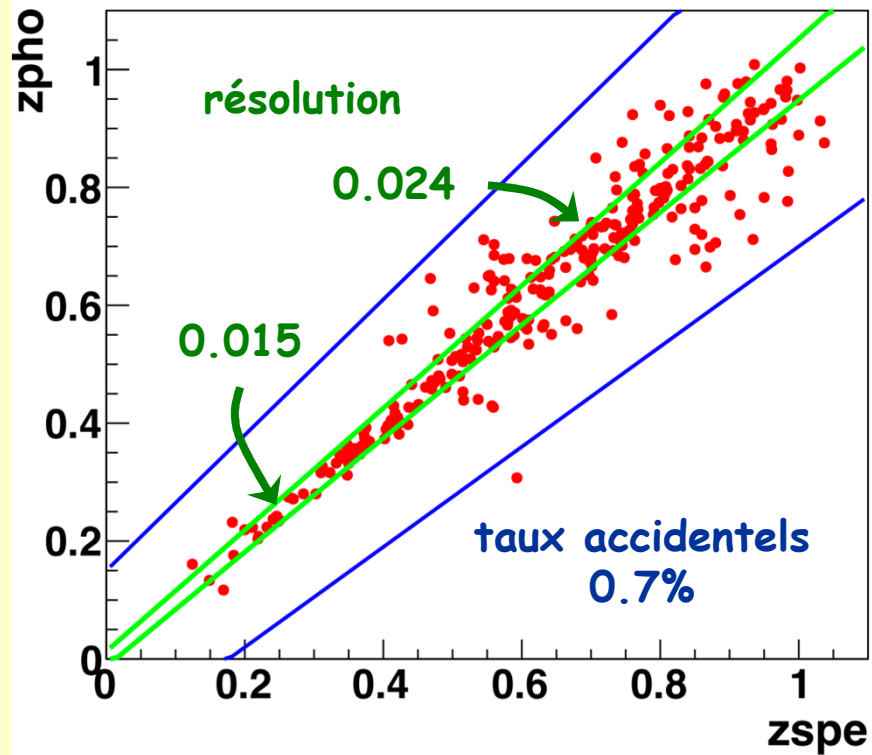
$$\Delta\mu_B = -0.044 \pm 0.036(\text{stat})$$

Confirme **avec les données** l'estimation (plus précise) de SNLS issue des simulations et utilisée pour les résultats cosmologiques 3 ans

G. Bazin et al., soumis à A&A

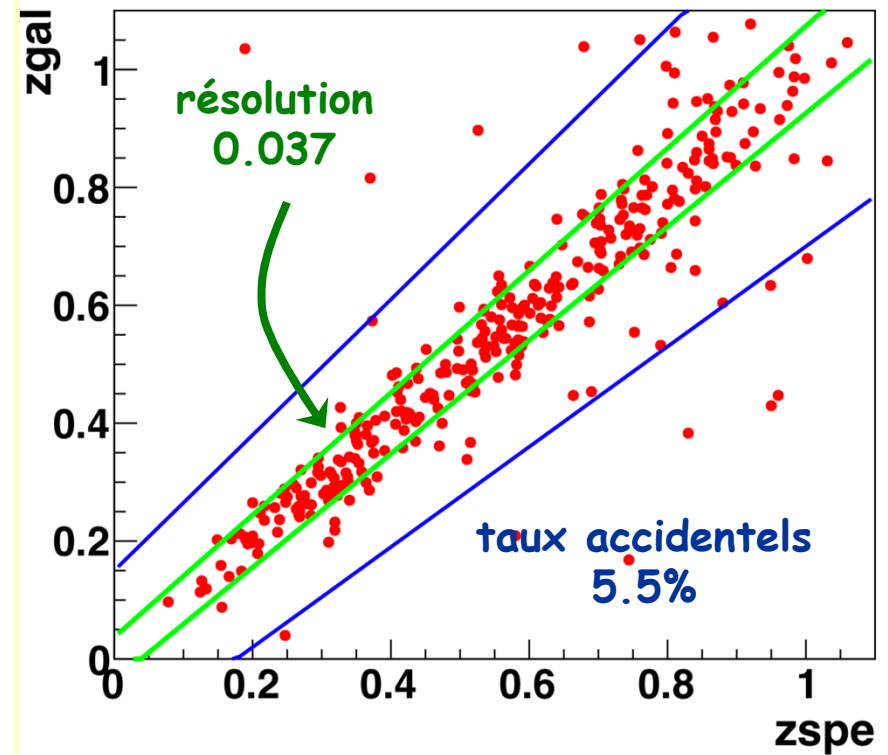
Redshift photométrique de SNIa

redshift photométrique de
SN



résolution: $rms(z_{pho} - z_{spe}) / (1 + z_{spe})$

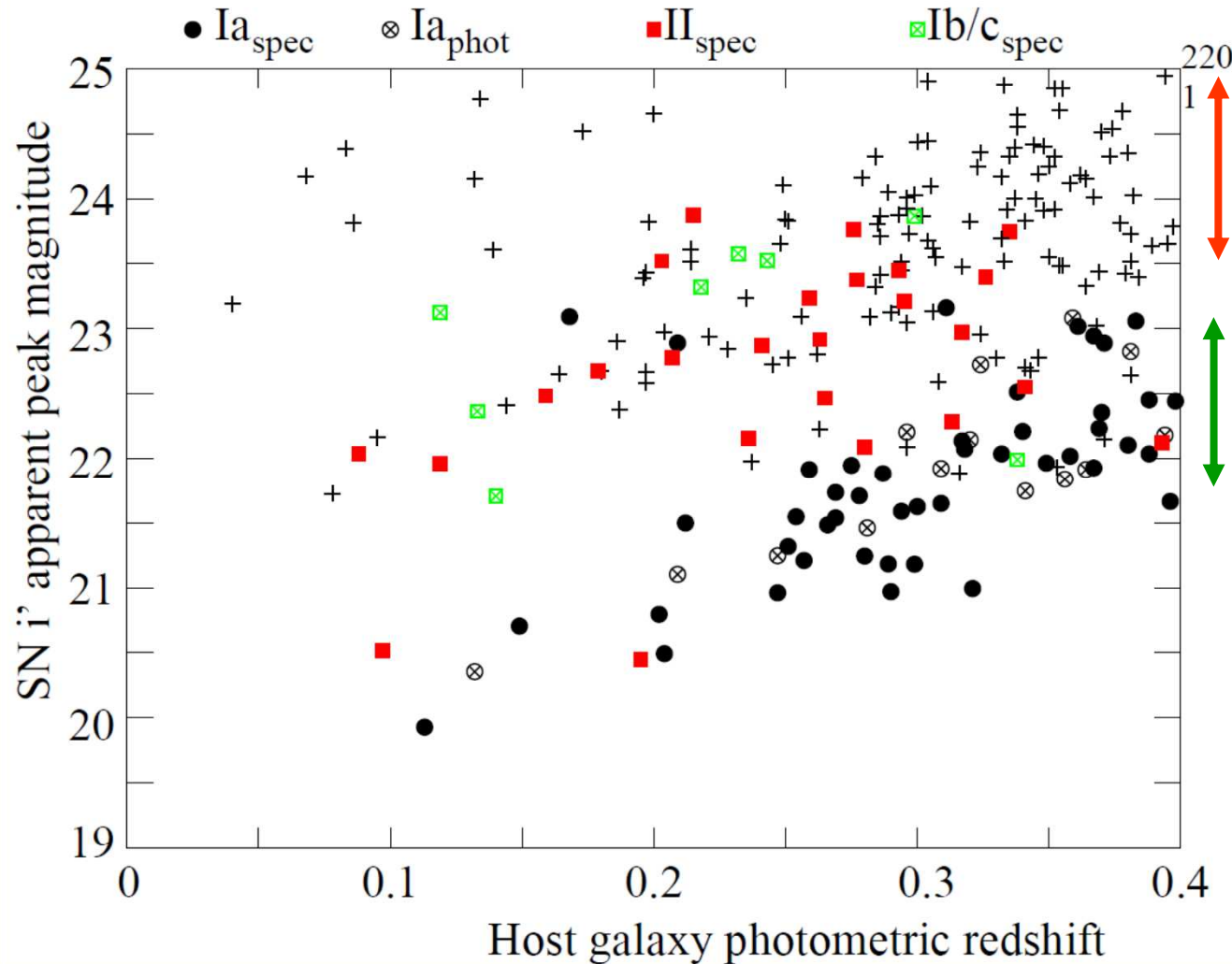
redshift photométrique de
galaxie hôte



accidentels: résolution > 0.15

Sélection de SNe CC

moins brillant ↑

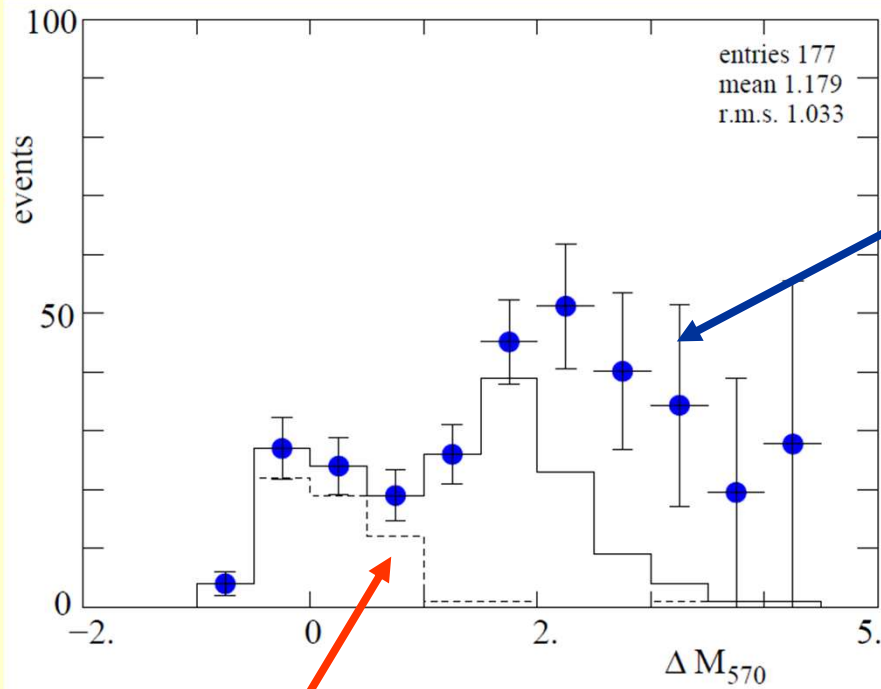


surtout des
SNe CC

surtout des
SNe Ia

$z < 0.4$: échantillon SNe CC = evt CC spectré et tout evt non Ia (spec ou phot) : 117 evts (SNLS-3ans)

G. Bazin et al., A&A, 499 (2009) 653



SN Ia

taux de SNCC
 \propto taux de formation stellaire
 $\propto (1+z)^{3.6}$

après correction
d'efficacité et d'acceptance

$$\frac{R_{cc}(\Delta M_{570} < 4.5)}{R_{Ia}} = 4.5 \pm 0.8(stat.)^{+0.9}_{-0.7}(syst.)$$

