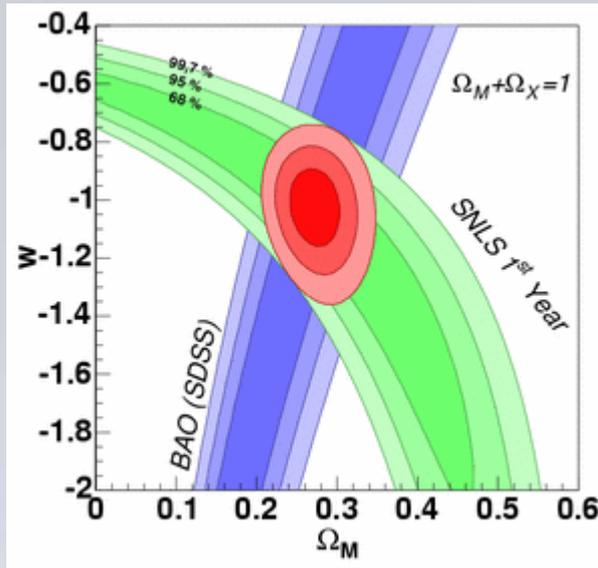


Cosmologie avec les supernovae de type Ia (SNe Ia)



1) Introduction

- Énergie noire
- Distance de luminosité et chandelles standard
- Supernovae Ia, historique

2) Extraction de l'information des SNe Ia

- détection, photométrie, calibration
- mesures de distance

3) Mesure de cosmologie

- construction d'un diagramme de Hubble
- contraintes sur les paramètres cosmologiques, aspects statistiques et incertitudes systématiques

La plupart des exemples sont tirés du 1er papier de cosmologie SNLS (Astier et al., 2006) (A06)

Énergie Noire?

Nécessité d'un fluide à pression négative pour expliquer l'accélération de l'expansion (Friedmann):

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3 p)$$

- Constante cosmologique ($p=-\rho$) peu satisfaisante car nécessite un ajustement fin (ou bien principe anthropique)
- modèles théoriques à partir de champs scalaires (très nombreux)
- Prise en compte du spectre de puissance des fluctuations de densité dans la métrique (controverse)

On décrit l'énergie par son équation d'état

$$w = \frac{p}{\rho}$$

$$\rho(z) = \rho_0 \exp\left(\int 3 \frac{w(z) + 1}{1 + z} dz\right)$$

On cherche à mesurer $w(z=0)$, dw/dz ou $dw/da(a=a_{\text{ref}})$

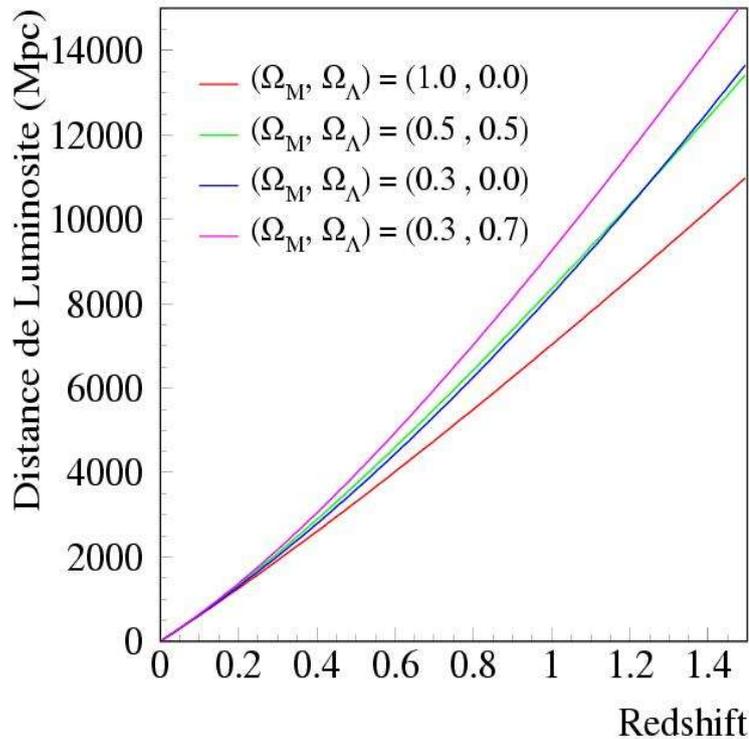
$w=-1$: constante cosmologique

$w>-1$: champs scalaires

$w<-1$: physique plus exotique

Chandelles standard

=> Distance de luminosité en fonction du redshift $d_L(z)$



$$\phi(\lambda_{obs}) = \frac{L(\lambda_{obs}/(1+z))}{4\pi(1+z)d_L^2}$$

Mesure directe de l'histoire de l'expansion

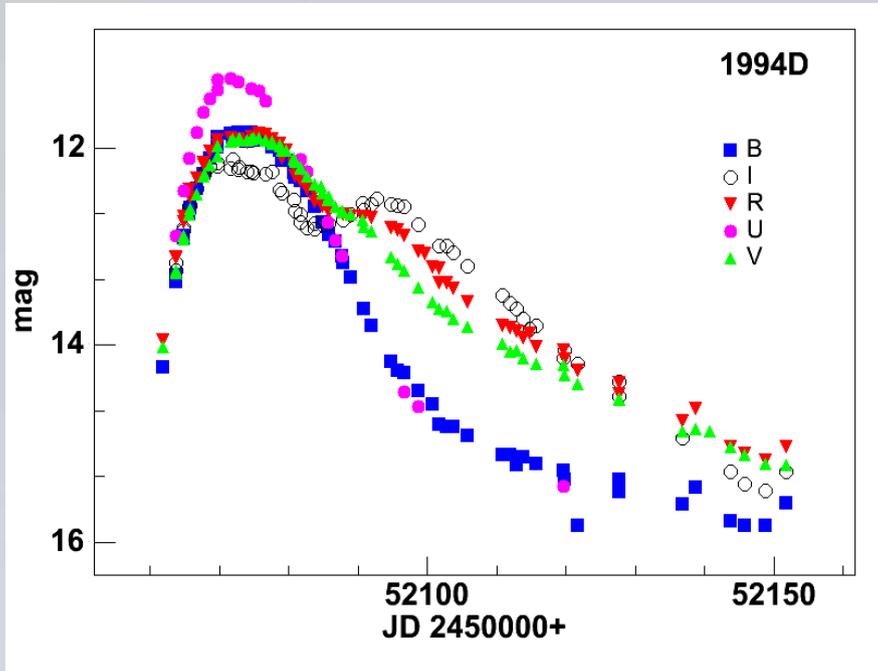
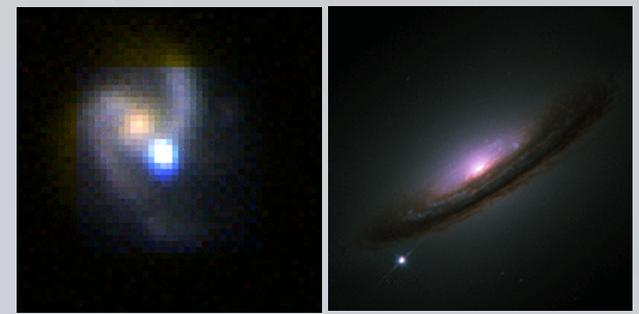
Pour un univers plat,

$$d_L(z) = c(1+z) \int_{(1+z)^{-1}}^1 \frac{da}{\dot{a}}$$

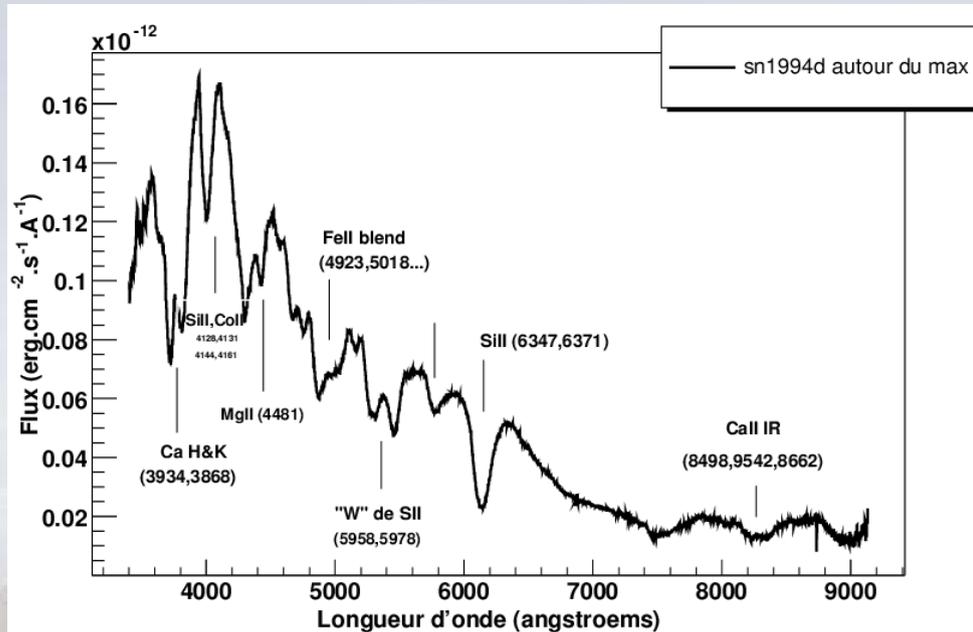
Si dominé par la matière et une "énergie noire",

$$d_L(z) = (1+z) \frac{c}{H_0} \int dz' \left(\Omega_M(1+z')^{-3} + (1-\Omega_M) \frac{\rho_X(z')}{\rho_X(0)} \right)^{-1/2}$$

Supernova de type Ia (SN Ia)



- Durée ~ 30 jours (mi-hauteur)
- $M_B \sim -19.4$ (10^{10} soleils)
- => parfois plus brillante que la galaxie hôte
- Dispersion faible de magnitude absolue au pic ~ 0.35 mag
- => réduite si l'on tient compte de corrélations forme/couleur/luminosité

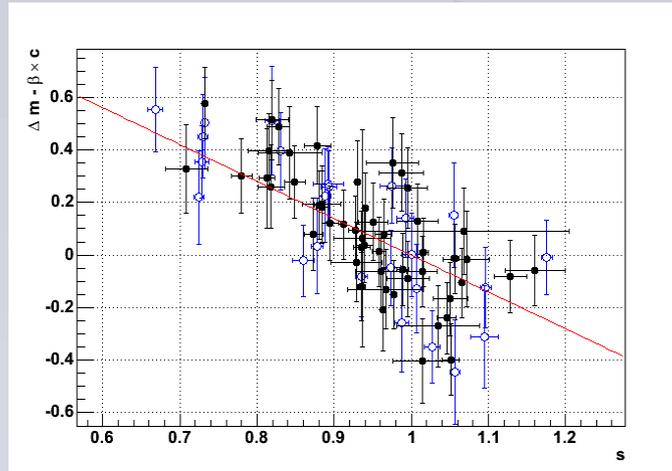
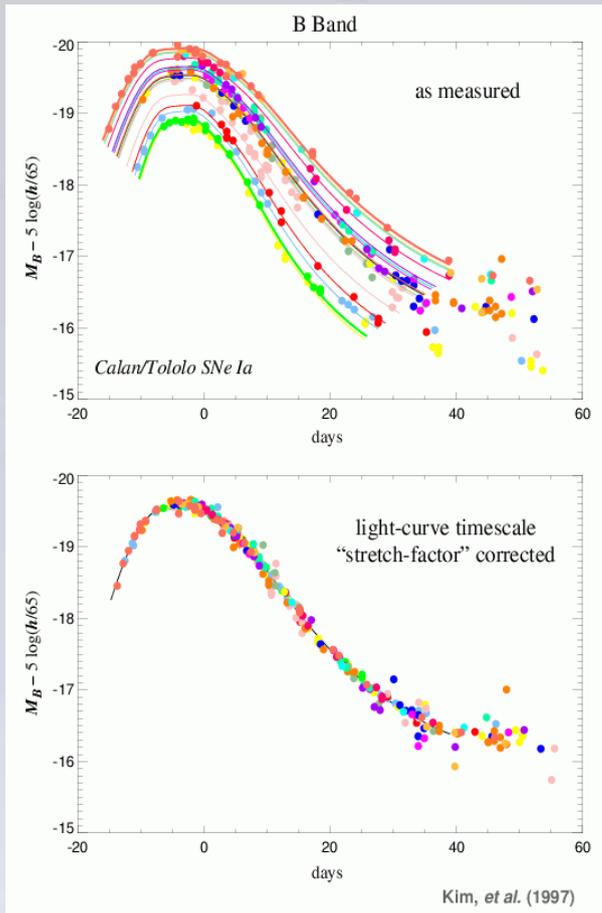


- Pic de luminosité dans le bleu
- Spectre caractéristique avec raie d'absorption Si à $\sim 6300\text{\AA}$.
- Raies larges (vitesse expans.)

Modèle théorique: explosion d'une naine blanche à la masse de Chandrasekar (masse fournie par un compagnon)

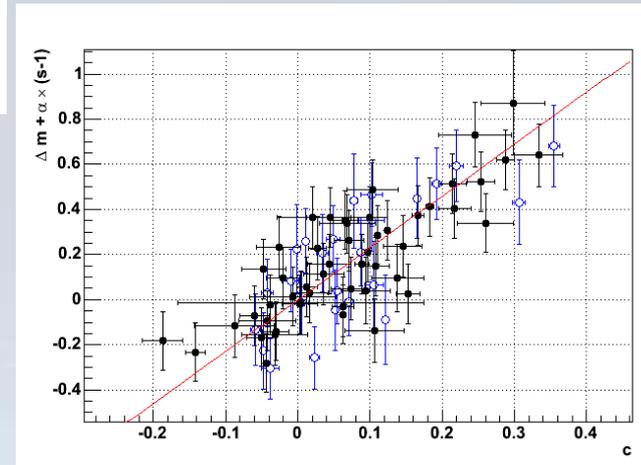
Relations connues entre observables de photométrie

Luminosité - largeur



stretch: paramètre d'étirement de la courbe de lumière en B

Luminosité - couleur



couleur B-V (référentiel de la SN) au maximum de luminosité

+ Corrélation entre couleur U-B et stretch (pour B-V donne)
=> permet de réduire la dispersion au pic à ~ 0.13 magnitude

Cosmologie avec les SNe Ia : Historique

Supernovae de type Ia (SNe Ia):

- **Riess 1998** (10(+6) SNe Ia)

- **Perlmutter 1999** (42 SNe Ia)

=> Accélération de l'expansion de l'Univers

- Allen 2002, Amas de galaxies en X -> Ω_m

- Spergel 2003, CMB (WMAP) -> Ω_T

=> Modèle de concordance :

Univers plat avec une "énergie noire"

compatible avec une constante cosmologique, $\Omega_\Lambda \sim 0.7$

SNe:

- **Sullivan 2002** en fonction du type de galaxie (test fort d'évolution)

- **Tonry 2003** (+8)

- **Barris 2003** (+23 SNe Ia, $z < 1$)

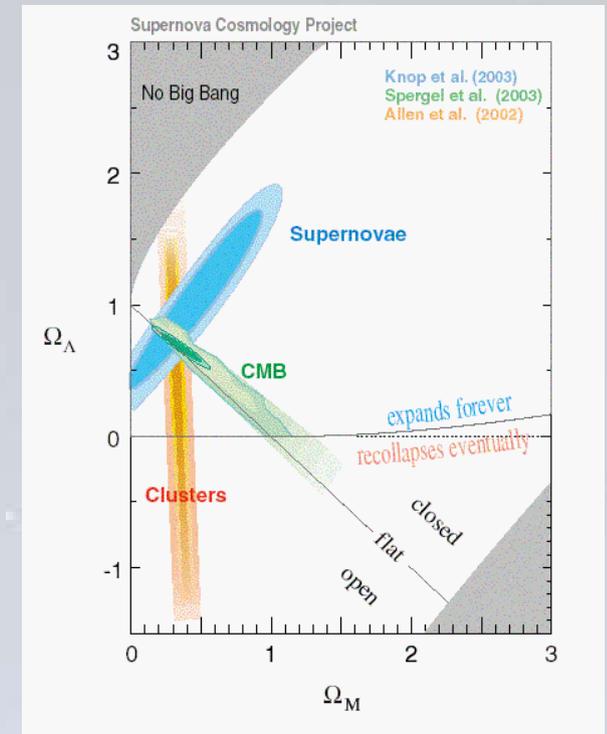
- **Knop 2003** (+11 SNe Ia suivies au HST)

- **Riess 2004**: (+16 SNe Ia découvertes au HST) jusqu'à $z \sim 1.6$

- **Astier 2005** (71 SNe), ~ 700 prévues d'ici la fin du SNLS

Pic acoustique des baryons:

- Eisenstein 2005



Extraction de l'information de supernovae de type Ia : Mesure de distance

détection (3)

photométrie (2)

calibration (3)

courbes de lumière -> distance (14)

corrections-k

les approches utilisées

1 méthode : SALT, développements récents

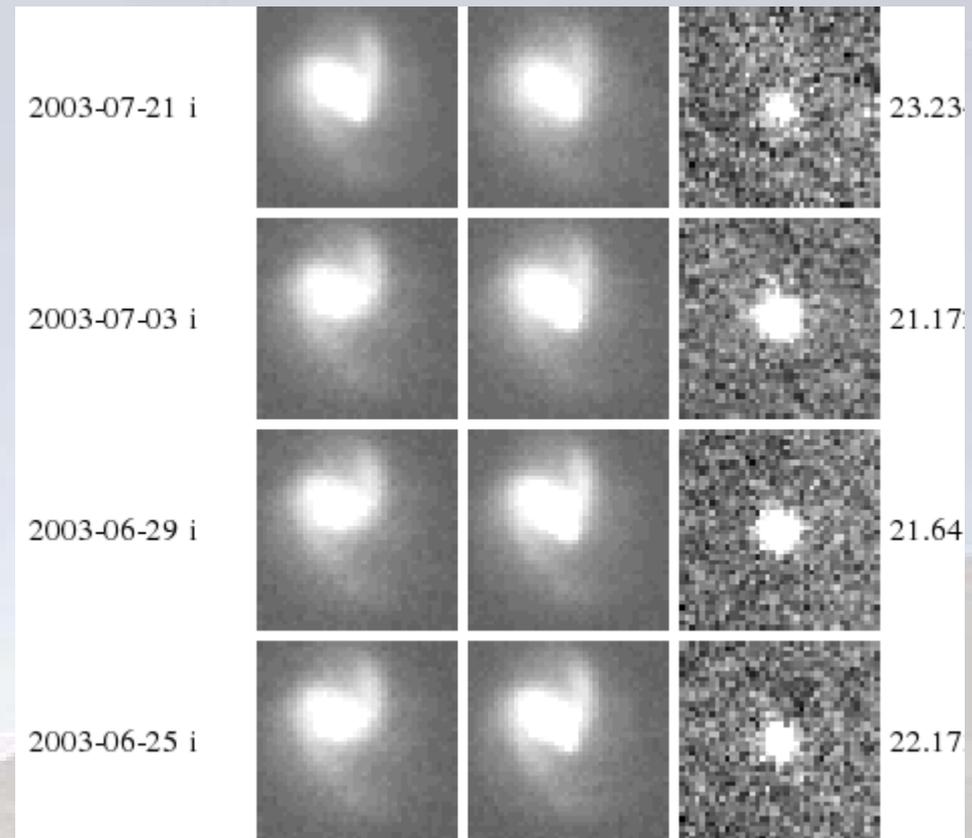
Détection des supernovae 1/3

A un lot de nouvelles images est soustraite une image de référence du champ (obtenue à partir d'un stack d'images)

Préalablement :

- les images sont alignées géométriquement
- les PSFs ajustées

- > Détection des excès positifs
($> \sim 3 \sigma$)
- > Association des détections par nuit/filtres (élimine la plupart des détections fortuites)
- > Suppression des mauvaises det.
- > Réjection photométrique lâche (couleur des objets)
- > Spectroscopie



Détection des supernovae 2/3

Alignement géométrique d'images:

- association de catalogues d'objets
- ajustement d'une loi de transformation (x,y degré ≤ 3)
- ré-échantillonnage des images (noyau 3x3)

Alignement de PSF:

- résolution d'un système linéaire à partir d'une base de noyaux de convolution
- > Noyau fonction des coordonnées dans l'image
- convolution de l'image

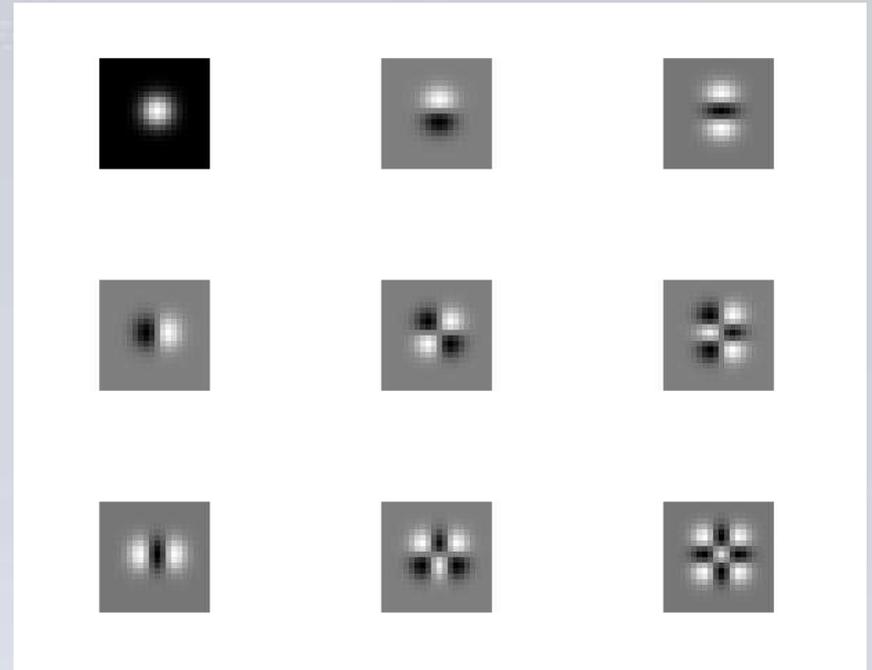
Détection:

- soustraction
- convolution par PSF
- détection au-dessus d'un seuil

Détection des supernovae 3/3

Identification des fausses détections

Décomposition en shapelets
de la vignette :



Réseau de neurones (perceptron
multi-couches) :

NON



OUI



Faux événements

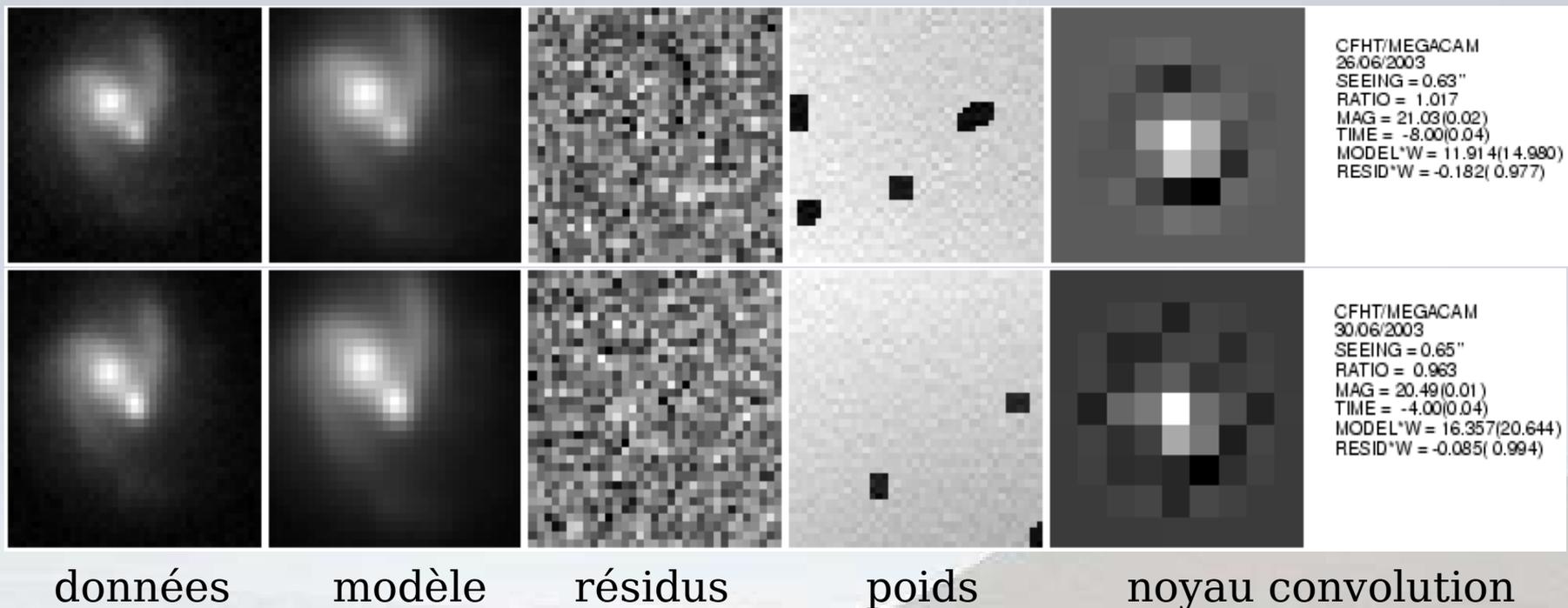


Vrais événements

Photométrie différentielle 1/2

$$I(x, y) = \text{Flux} \times [\text{Kernel} \otimes \text{PSF}_{\text{best}}](x - x_{sn}, y - y_{sn}) \\ + [\text{Kernel} \otimes \text{Galaxy}_{\text{best}}](x, y) + \text{Sky}$$

- Fit galaxie(i,j) sur une vignette (de meilleure résolution)
- Fit un fond plat par vignette
- Fit de la position de la SN (avec info. de toutes les images)
- Robustification pour identifier les pixels morts



Utilise ~ 300 images alignées géométriquement
Une mesure de flux par pose

Photométrie différentielle 2/2

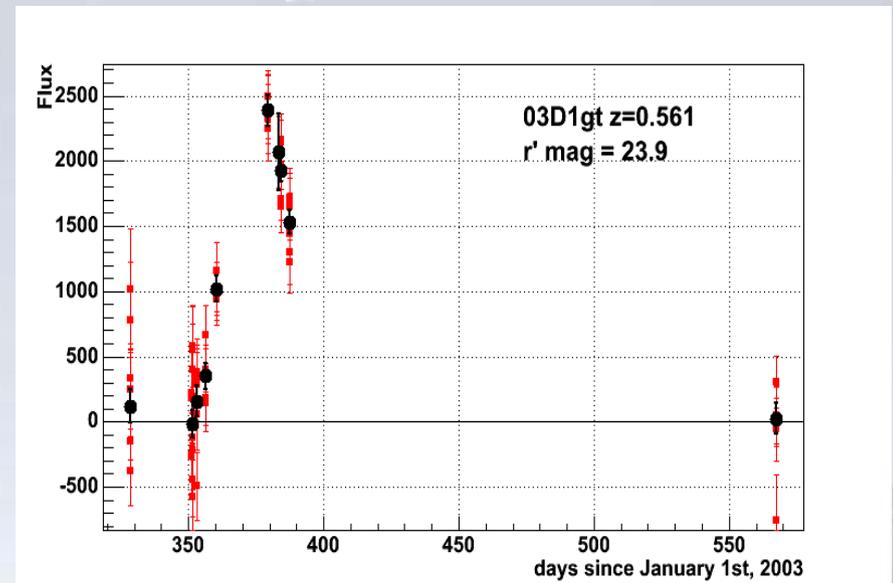
La matrice de covariance extraite de l'ajustement sous-estime les erreurs sur le flux car:
ré-échantillonnage -> 20% corrélation des pixels

- + erreurs de modèle de PSF (dont noyaux) non propagées.
- + parasites non détectés (cosmiques)

Contrôle via une estimation indépendante : flux moyen par nuit

Utilise la covariance des estimations de flux par pose (corrélations dues aux fits de position et galaxie).

- Réjection d'outliers, dus par exemple à des cosmiques sur la position de la SN.



Erreurs déduites = $1.11 \times$ erreur statistique du fit précédent
(en tenant compte des corrélations entre pixels)

Mesure de (rapports de) distances avec les SNe Ia

On cherche à obtenir:
$$\frac{f(z_1, T_{rest})}{f(z_2, T_{rest})} = \left(\frac{d_L(z_2)}{d_L(z_1)} \right)^2$$

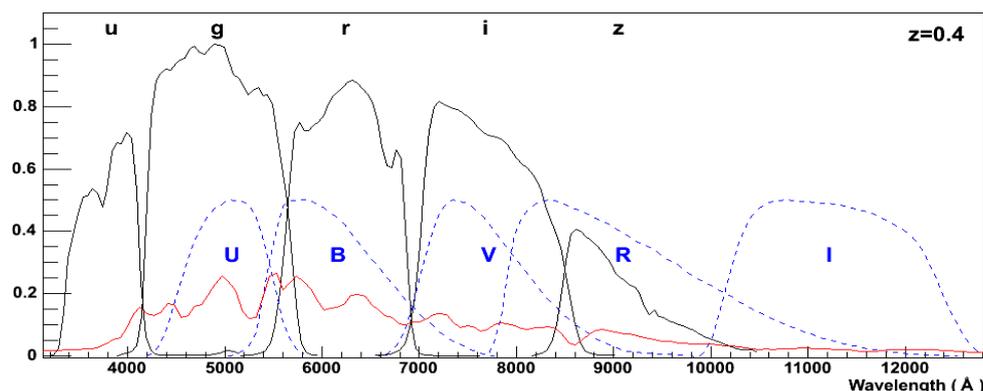
$$f(z, T_{rest}) = 10^{-0.4(m(T_{obs}) - m_{ref}(T_{obs}))} \times \frac{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{rest}(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{obs}(\lambda(1+z)) d\lambda} \int \phi_{ref}(\lambda) T_{obs}(\lambda) d\lambda$$

magnitude observée de la SN
(photométrie+calibration)

k-correction
(modélisation de la luminosité de la SN
en fonction de la date et de la longueur d'onde)

spectre de référence associé
au système de magnitudes
(AB / Vega)

modélisation de l'instrument
(réponse en fonction de la
longueur d'onde)



Calibration 1/3

Comptages dans le détecteur (ADUs)
-> flux physique (photons $s^{-1} \text{ cm}^{-2}$)

Deux étapes :

1) ADUs -> magnitude (rapport aux flux d'étoiles calibrées sur une étoile de calibration primaire)

2) spectre connu de l'étoile primaire intégré via la modélisation de la fonction de réponse de l'instrument

$$f(z, T_{rest}) = 10^{-0.4 \overset{1}{(m(T_{obs}) - m_{ref}(T_{obs}))}} \times \frac{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{rest}(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{obs}(\lambda(1+z)) d\lambda} \overset{2}{\int \phi_{ref}(\lambda) T_{obs}(\lambda) d\lambda}$$

Objectif: erreurs systématiques < 1%

Calibration 2/3

1) calibration d'étoiles dans le champ de la SN

- nuits "photométriques".

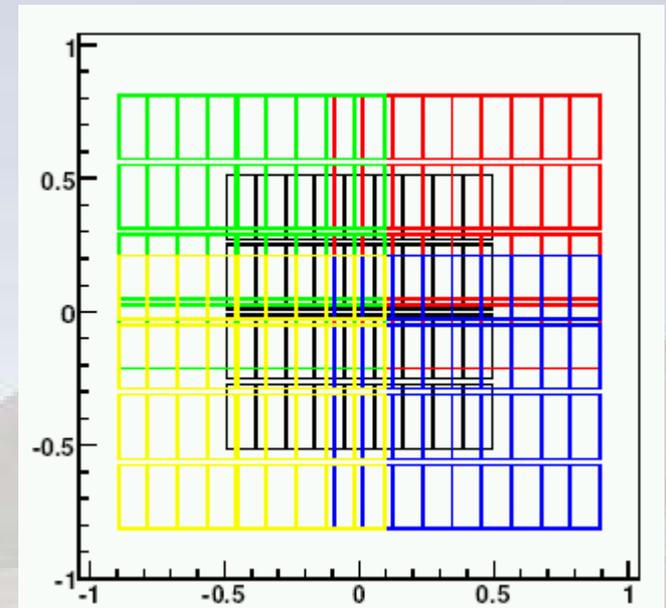
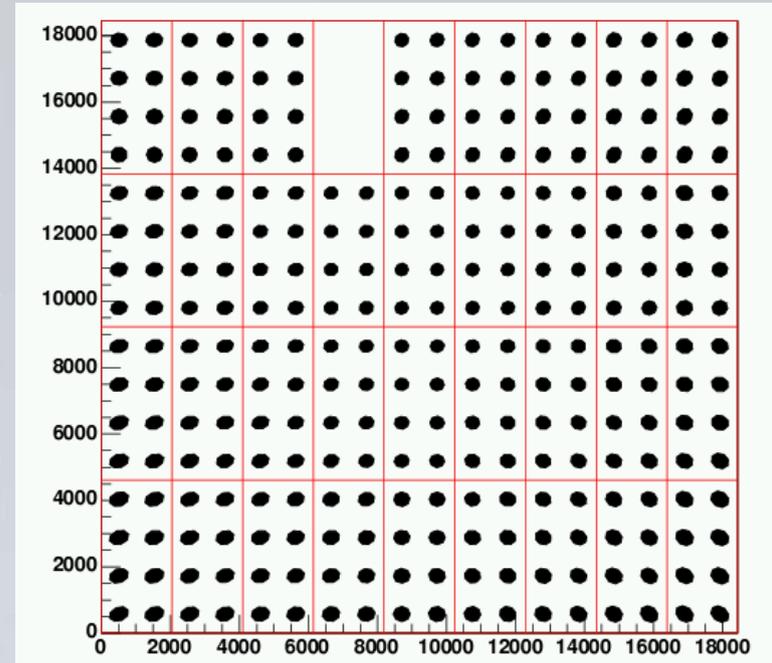
- photométrie d'ouverture (robuste, mais faible résolution statistique) des étoiles du champ, et d'étoiles connues calibrées

- demande un bonne uniformité de réponse sur le champ.

=> observation avec de grands dithering pour évaluer simultanément les flux des étoiles et les coefficients d'uniformisation de la camera.

- répétition sur un grand nombre de nuit pour moyenner les effets instrumentaux + atmosphère

=> contrôle de la répétabilité



Calibration 3/3

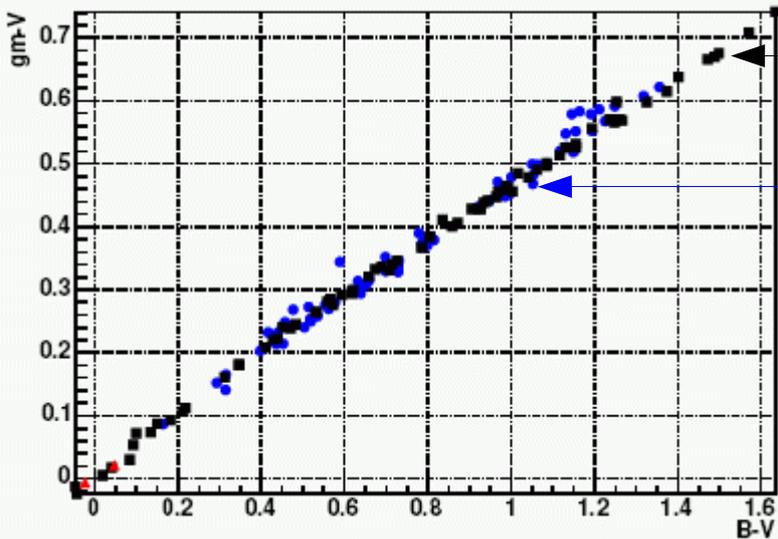
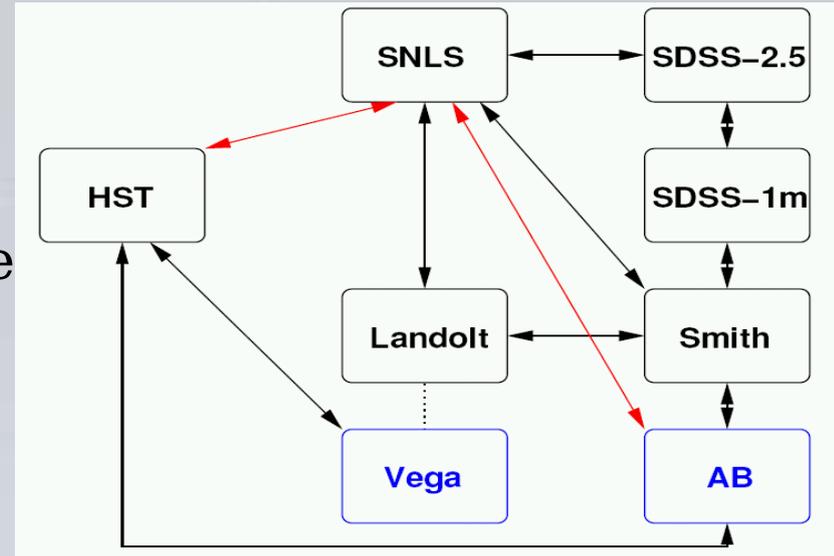
2) Système de magnitude

- Nombreux

Mesurer des rapports de distance avec SNe proches

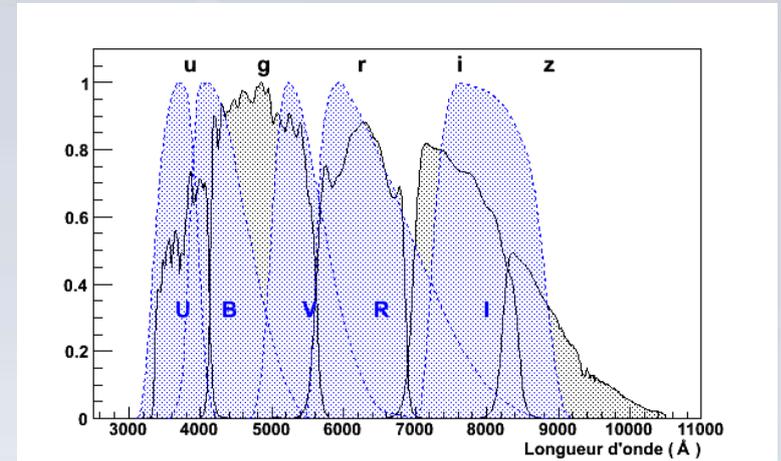
- > même calibration que ces SNe
- > Système de Landolt

3) Modélisation de l'instrument



magnitudes synthétiques

magnitudes observées



modélisation de la réponse inst. -> pente de la distribution g-V vs B-V
calibration -> ordonnée a l'origine

les deux doivent être évalués simultanément

Mesure de distance 1/14

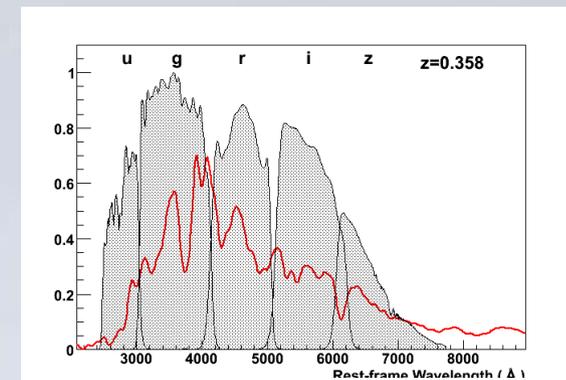
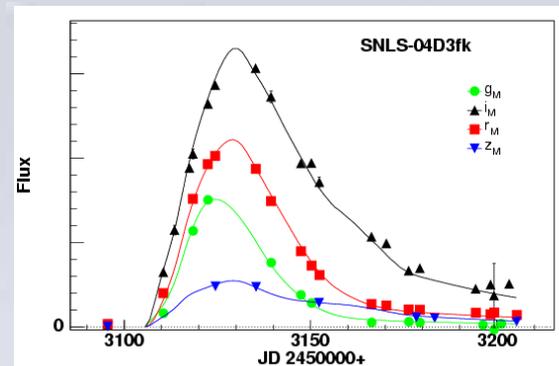
Nécessite un modèle de l'émission de la SN

- en fonction du temps (car échantillonnage avec pas de qq jours)
- et de la longueur d'onde à cause du redshift

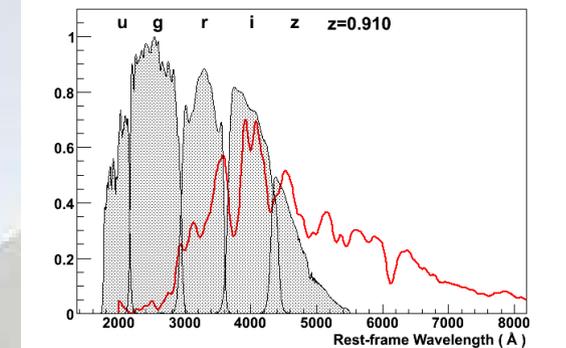
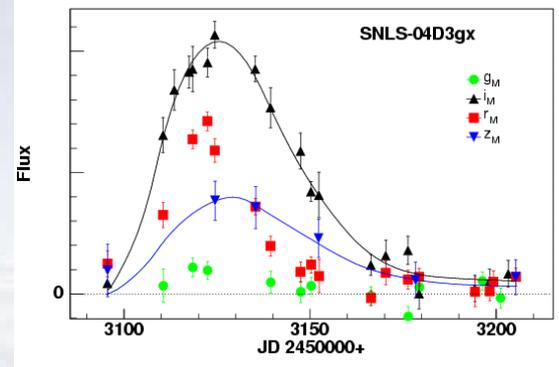
$$f(z, T_{rest}) = 10^{-0.4(m(T_{obs}) - m_{ref}(T_{obs}))} \times \frac{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{rest}(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{obs}(\lambda(1+z)) d\lambda} \int \phi_{ref}(\lambda) T_{obs}(\lambda) d\lambda$$

=> séquence spectrale

$z=0.358$



$z=0.91$



Mesure de distance 2/14

Méthode “historique” <2005

1) Corrections k **des données** à partir d'une séquence spectrale + loi de “rougissement”.

ex: observations R,I z=0.5 -> B,V z=0

$$K(z, T_{obs}, T_{rest}) = 2.5 \log_{10} \frac{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{rest}(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{SN}(\lambda) T_{obs}(\lambda(1+z)) d\lambda} \frac{\int \phi_{ref}(\lambda) T_{obs}(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{ref}(\lambda) T_{rest}(\lambda) d\lambda}$$

2) Ajustement avec un template de courbes de lumière dilaté (paramètre stretch) dans les filtres UBVRI (Johnson-Cousins)

=> Comme les couleurs des SNe dépendent du stretch, procédure itérative où la séquence spectrale est modifiée à partir d'une loi dépendant du stretch, et d'une loi de couleur

Inconvénients:

- la procédure itérative ne permet pas de propager correctement les erreurs
- la validité des formules de correction stretch et couleur pas clairement démontrée

=> Erreurs systématiques et impact sur la cosmologie.

Mesure de distance 3/14

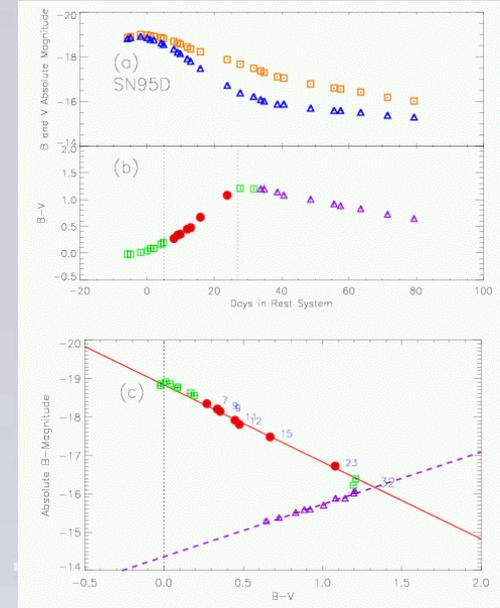
Autres estimateurs de distance

- Δm_{15} (Phillips 1993)
 \Leftrightarrow stretch (chang^t variable)
- CMAGIC (L. Wang 2003, Conley 2006) utilise le diagramme couleur-magnitude comme indicateur de distance

$$B = B_{BV0.6} + \beta_{BV} (B - V - 0.6)$$

- ΔC_{12} Couleur à +12 jours (X. Wang 2005, 2006)
- MLCS (Riess 1996, Jha 2002)

=> Ne traitent pas les corrections k
(Qualité des résultats sensibles aux coupures utilisées)



Mesure de distance 4/14

- Corrélations “forme de courbe de lumière” / spectres
=> l'ajustement des courbes de lumière ne peut être traité indépendamment des corrections-k

=> Il est nécessaire de modéliser l'ensemble de la séquence spectrale
=> L'ajustement peut alors être réalisé en intégrant le modèle dans la fonction de réponse de l'instrument, **sans altérer les données**



Mesure de distance 5/14

Spectral Adaptive Lightcurve Template [astro-ph/0506583](#), A&A

Modèle **empirique** de séquence spectrale fonction de :

- **phase** (date par rapport au maximum en B)
- **lambda** (longueur d'onde dans le référentiel de la SN)

mais aussi, suivant les travaux précédents

- **stretch** (dilatation de l'axe des temps en B)
- **couleur** = $B-V + cst$ au maximum en B

Modélisation “rustique”:

Séquence spectrale moyenne (Nugent 2002) + corrections polynomiales (en magnitude).

- Coefficients ajustés sur un ensemble de courbes de lumière (CLs) de supernovae proches

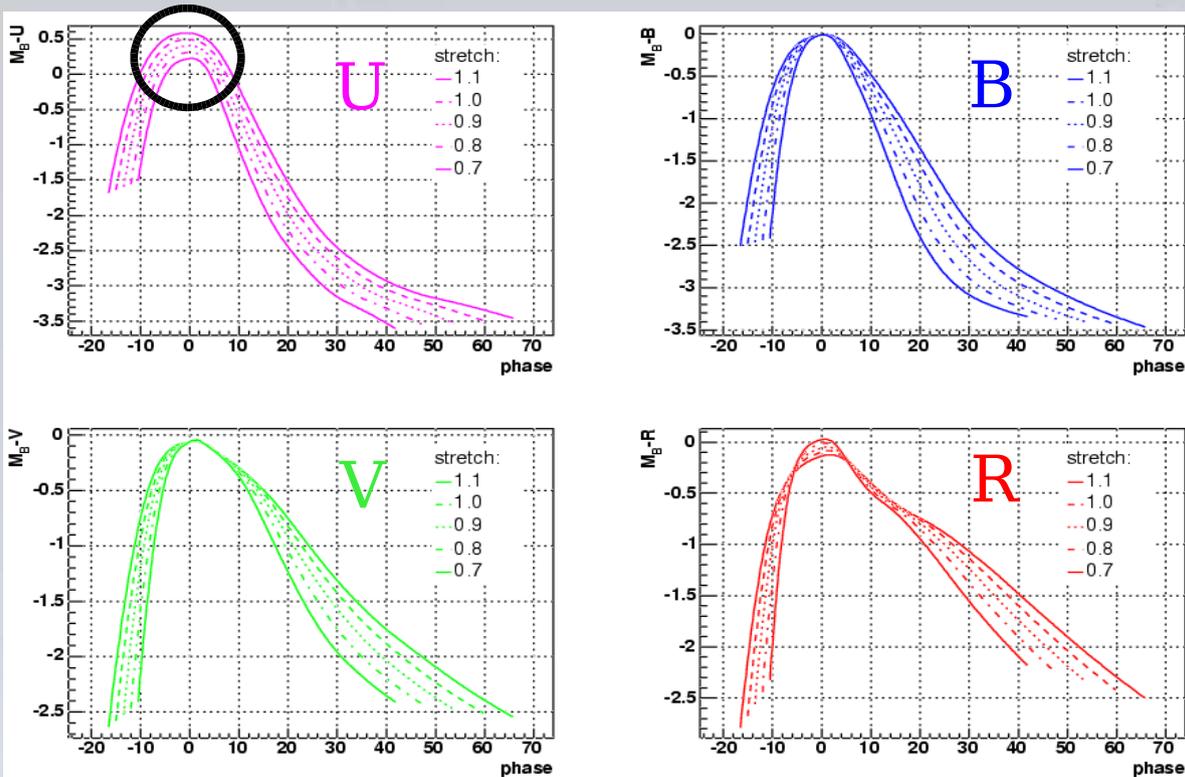
=> CLs dans n'importe quel filtre, en particulier, stretch dans la bande B.

=> fournit des corrections k naturellement compatibles avec la description des CLs

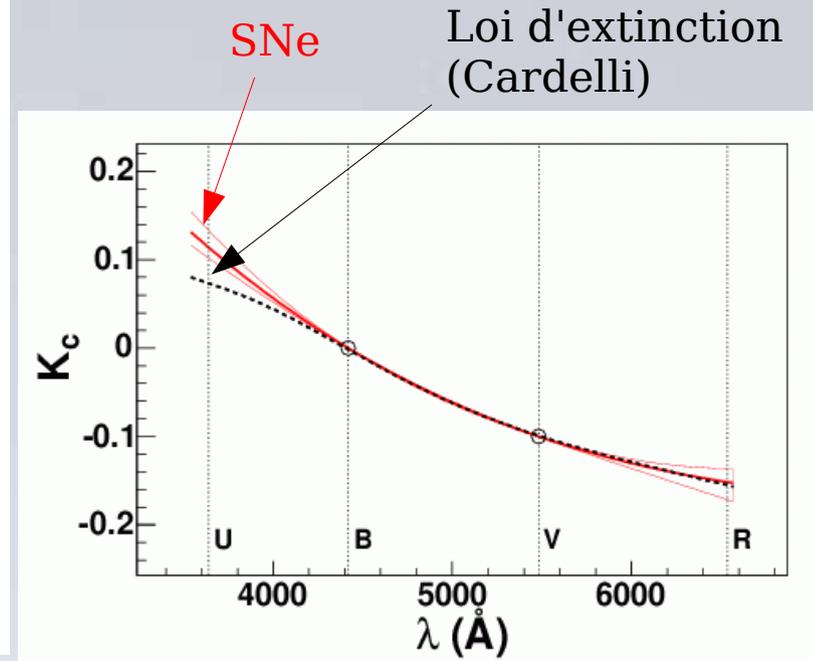
En pratique, le modèle est comparé aux données en intégrant le modèle directement dans les filtres instrumentaux

Mesure de distance 6/14

SALT : Résultats



Courbes de lumière pour plusieurs valeurs de stretch entre 0.7 et 1.1



Correction de couleur pour $E(B-V)=0.1$

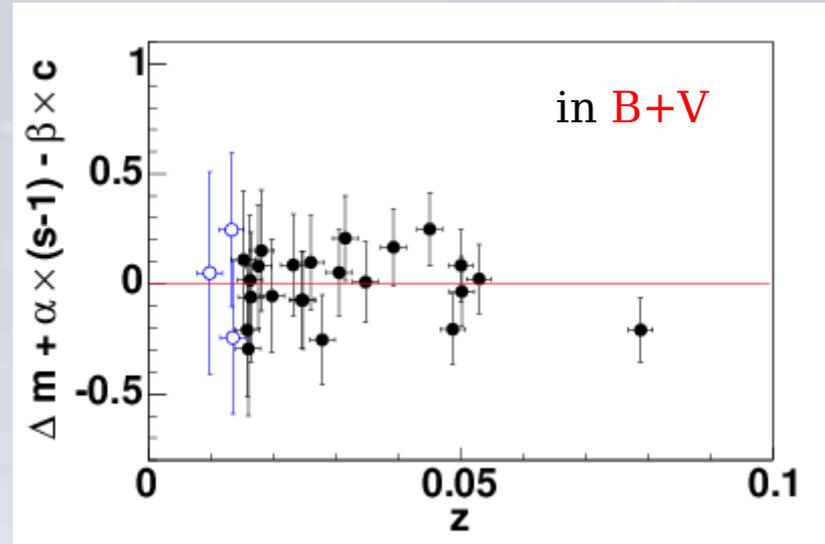
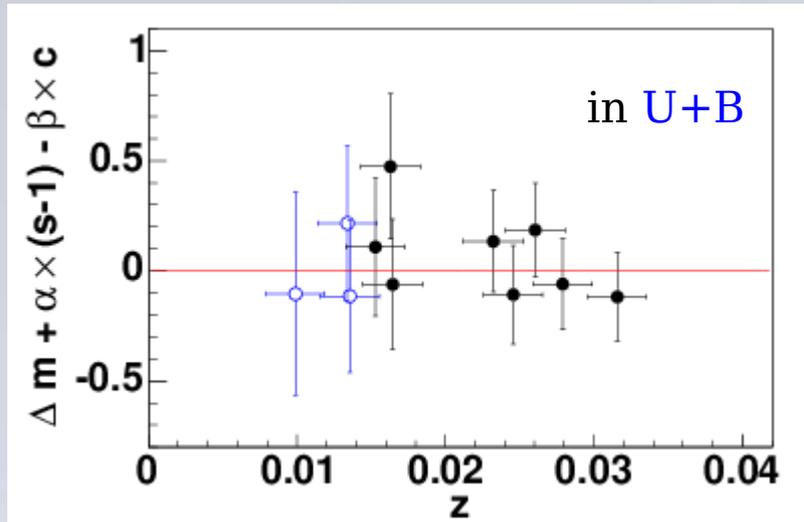
Le modèle intègre la relation stretch couleur U-B au maximum.

Mesure de distance 7/14

SALT : Résidus au diagramme de Hubble des SNe proches

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

Dispersion de ~ 0.16 mag en utilisant les courbes de lumière dans les bandes U et B, ou B et V



=> Possibilité d'utiliser des données dans la bande U (référentiel de la SN) pour la cosmologie

=> plus grande gamme de redshifts

Mesure de distance 8/14

SALT : Validation avec les données SNLS

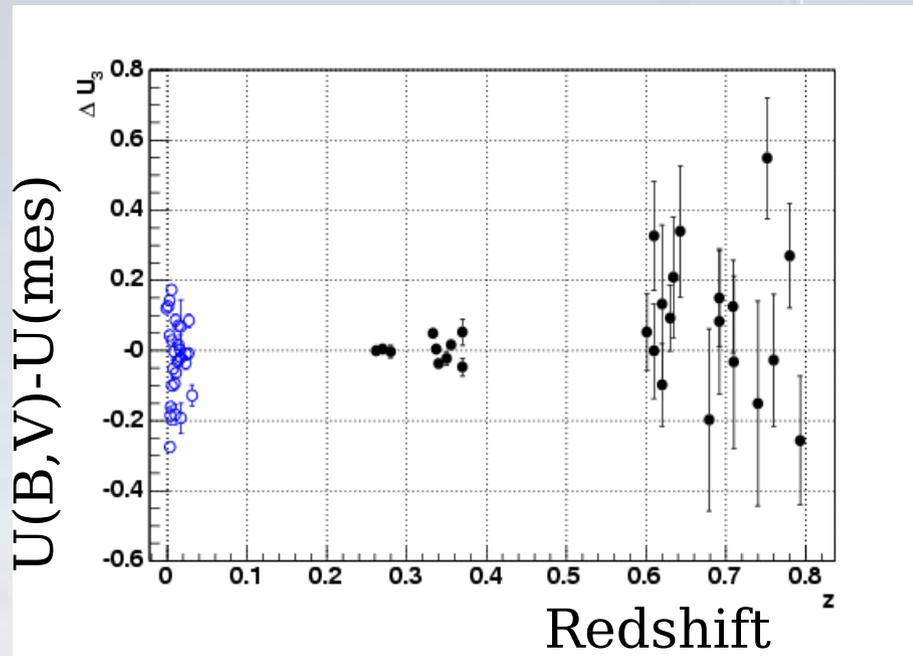
-> Mesure de $m^*_{B,s,c}$ en utilisant les courbes de lumière U,B ou B,V (dans le référentiel de la SN)

-> SNLS CLs:

z	0	0.3	0.7
U	g'	r'	
B	r'	i'	
V	i'	z'	

U(B,V)-U(mes)

	moyenne	RMS
UBV	0+-0.02	0.12
g'r'i'	0+-0.008	0.03
i'r'z'	0.09+-0.04	



- > bon accord UBV g'r'i'
- > 2 sigma i'r'z' (significatif?)
- > **faible dispersion en g'r'i'**

Mesure de distance 9/14

Amélioration de la méthode (travail en cours) : SALT2

1) On souhaite améliorer la séquence spectrale :

- dans l'un
- prise en compte des variations spectrales fines
- > amélioration des “corrections k” + prise en compte des erreurs résiduelles

2) Le paradigme du stretch, étirement de la courbe de lumière, est complètement empirique, non motivé théoriquement, et non valable au-delà de 35 jours après le maximum, ni dans les bandes R,I.

3) Au-delà d'un paramètre de forme (stretch, $\Delta C12$, $\Delta m15$, CMAGIC ...), existe-t-il d'autres paramètres (hormis la couleur)?

Mesure de distance 10/14

SALT2 : Méthode

~ Analyse en composantes principales avec données manquantes

Paramètres pour chaque SN (+date du max)

$$F(SN, p, \lambda) = x_0(SN) [M_0(p, \lambda) + x_1(SN)M_1(p, \lambda) + \dots] \times \exp [c(SN)CL(\lambda)]$$

Modèle global

Nous voulons ajuster simultanément,
sans a priori:

- un modèle moyen (séq. spectrale): M_0
- une ou plusieurs comp. qui décrivent la variabilité des SNe: M_i
- une loi de couleur (incluant l'extinction): CL
- les paramètres de toutes les SNe dans ce modèle: x_0, x_1, \dots, c

Mesure de distance 11/14

SALT2 : Implémentation

- Description du modèle ($M_0 + M_i$) sur une base de fonctions:

$$f_i(p, \lambda) = g_j(p) \times h_k(\lambda)$$

Le modèle à ajuster est un vecteur, et une observable m est comparée au modèle avec un vecteur \mathbf{h} :

Pour un spectre :

$$h_m \equiv h(p_m, \lambda_m) = \begin{pmatrix} f_1(p_m, \lambda_m) \\ f_2(p_m, \lambda_m) \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}$$

et pour une CL :

$$h_m \equiv h(p_m, T_m) = \begin{pmatrix} \int f_1(p_m, \lambda) T_m(\lambda) d\lambda \\ \int f_2(p_m, \lambda) T_m(\lambda) d\lambda \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}$$

Mesure de distance 12/14

SALT2 : Implémentation 2

LC: lightcurves S: spectra

On cherche à minimiser :

$$\chi^2 = \sum_{SN} \left(\sum_{LC} R_{LC}^T W_{LC} R_{LC} + \sum_S R_S^T W_S R_S \right)$$

$R_{LC/S}$: vecteur de résidus au modèle
(espace des données)

et $W_{LC/S}$ sont des matrices de poids
(inv. de covariance)

Le vecteur du modèle $M_{LC/S}$ vaut:

$$M_S(D_S) = H_S(D_S) M_{SN} \exp \left[c(SN) CL(\hat{\lambda}) \right]$$

$$R_S = D_S - M_S = \begin{pmatrix} d_1 - m(d_1) \\ d_2 - m(d_2) \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$$

$$H_S(D_S) = \begin{pmatrix} h_1^T(d_1) \\ h_2^T(d_1) \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$$

$$M_{SN} = x_0(SN) (M_0 + x_1(SN) M_1 + \dots + x_k(SN) M_k)$$

Mesure de distance 13/14

SALT2 : conclusion

(Méthode en développement ... donc pas de résultats ici)

- Outil qui permet d'obtenir simultanément :
 - une séquence spectrale
 - plusieurs composantes qui permettent de reproduire l'étirement des CLs et les variations spectrales
 - une loi de couleur (\sim extinction?) moyenne
- Entraîné sur un lot de courbes de lumière + spectres
- Applications possibles:
 - fits de CLs pour la cosmologie
 - identification spectroscopique
 - identification photométrique
(entraînement avec des SNe Ib/c / II)
 - étude de l'évolution des SNe ?

État des lieux:

- séquence spectrale significativement diff. de P.Nugent v1.2 dans la bande U ($\lambda < 380$ nm)
- Même propriétés que SALT(-1)
- Précision sur les param. cosmologiques équivalente ...

Mesure de distance 14/14

Conclusion

- * Pas de modèle théorique prédictif
 - > Utilisation de méthodes empiriques
- * Deux aspects:
 - s'affranchir du redshift (corrections-k)
 - > Critique car influence le résultat cosmologique.
 - > Permet dans une moindre mesure de réduire disp.
 - estimation de distance
 - > pleins de techniques sur le marché +/- équivalentes
- * Seule la méthode SALT combine les deux de façon cohérente
 - > bénéfique pour la propagation des erreurs

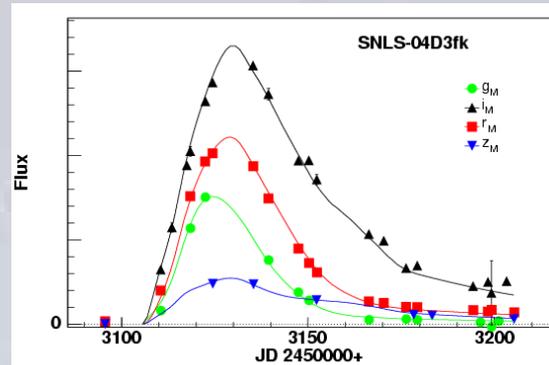
Cosmologie avec les SNe Ia

Diagramme de Hubble

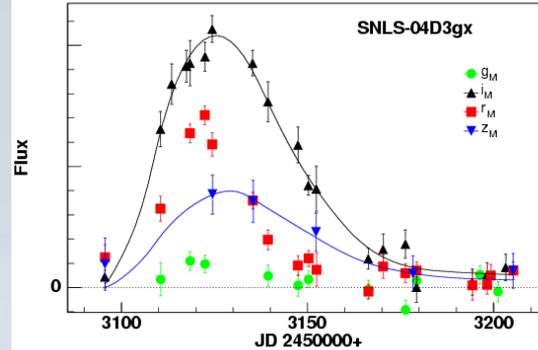
- Ajustement d'un diagramme de Hubble
- Erreurs systématiques

Pour chaque SN Ia

$z=0.358$



$z=0.91$



- date de max
- normalisation (-> magnitude dans filtre « rest-frame »)
- stretch (s)
- couleur $c = B-V + cst$
- (matrice de covariance de tout ça)

Diagramme de Hubble 1/3

Magnitude dans un filtre « redshifté » (\Leftrightarrow ref. de la SN):

$$m_B^* = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f(z, T_B^*, t = t_{max,B})}{(1+z) \int \phi_{ref}(\lambda) T_B(\lambda) d\lambda} \right)$$

where $T_B^*(\lambda) \equiv T_B(\lambda/(1+z))$

Ajustement cosmologique (A06):

$$\chi^2 = \sum_{objects} \frac{(\mu_B - 5 \log_{10}(d_L(\theta, z)/10pc))^2}{\sigma^2(\mu_B) + \sigma_{int}^2}$$

Incertitude de mesure

Paramètres cosmologiques

Dispersion intrinsèque (de sorte que $\chi^2 = ndof$). Dépend de la qualité de l'estimateur de distance (et de celle des données).

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

Corrélations de la luminosité avec le stretch et la couleur.

Les paramètres M , α et β ajustés simultanément avec la cosmologie.

(A06)

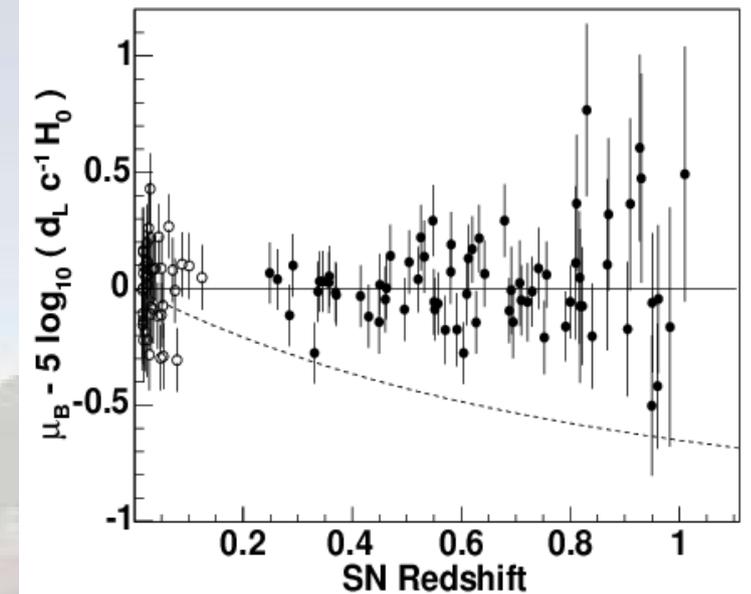
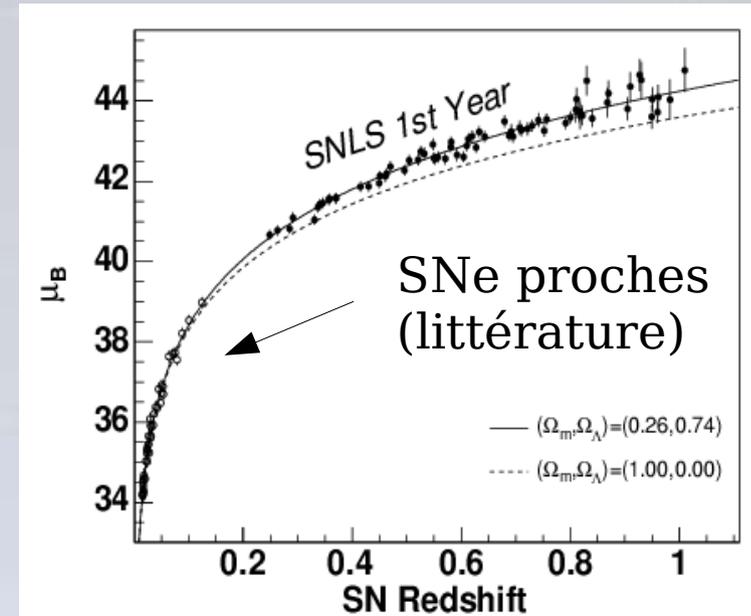


Diagramme de Hubble 2/3 : correction de couleur

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

s = stretch

c = (B-V)_{max} + cst

- Choix d'une simple dépendance linéaire

Ajouter des termes s^i , c^i ($i > 1$) n'est pas justifié statistiquement sur l'échantillon du papier A06.

- Ajustement du paramètre β :

De nombreux auteurs estiment qu'il s'agit uniquement d'une correction d'extinction, $\beta = R_B$.

Parmi eux, nombreux imposent à R_B la valeur observée pour la Voie Lactée, $R_B = 4.1$, et utilise la loi d'extinction de Cardelli 1989.

Mais:

- Rien n'impose que la valeur pour la Voie Lactée = valeur moyenne.
(il existe déjà une variabilité suivant la ligne de visée dans la Voie Lactée)

- On trouve lors de l'ajustement une valeur significativement différente ~ 2 (Guy 2005, Astier 2006), comme d'autres auteurs (Tripp 1998 ...)

- Rien ne prouve qu'il n'existe pas une variabilité de couleur intrinsèque (\sim température) corrélée à la luminosité (CMAGIC).

Diagramme de Hubble 3/3 :

$$\chi^2 = \sum \frac{(m_B^* + \alpha(s - 1) - \beta c - m(\Omega, z))^2}{V(m_B^*) + \tilde{\alpha}^2 V(s) + \tilde{\beta}^2 V(c) + 2\tilde{\alpha}C(m_B^*, s) - 2\tilde{\beta}C(m_B^*, c) - 2\tilde{\alpha}\tilde{\beta}C(s, c) + V_{int} + V_z}$$

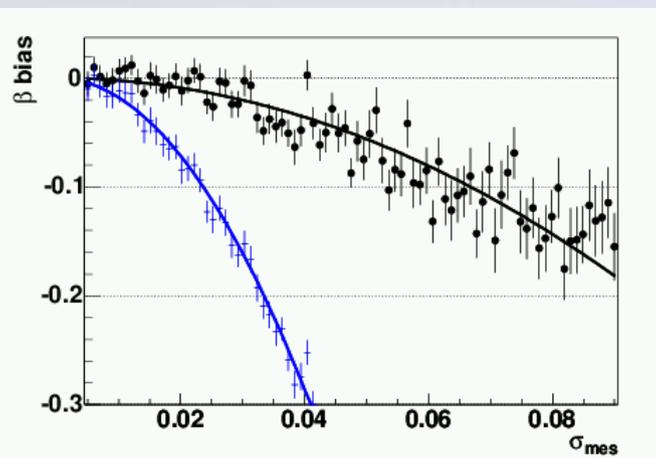
-> Estimateur biaisé des paramètres α et β (mais pas cosmo!) lorsque, incertitude \sim disp. réelle pour stretch et surtout couleur.

Estimateur nettement moins biaisé:
Nouveaux estimateur de stretch et couleur.

$$\chi^2 = \sum R^T C^{-1} R$$

$$C = \begin{pmatrix} V(m_B^*) + V_z + V_{int} & C(m_B^*, s) & C(m_B^*, c) \\ \cdot & V(s) & C(s, c) \\ \cdot & \cdot & V(c) \end{pmatrix}$$

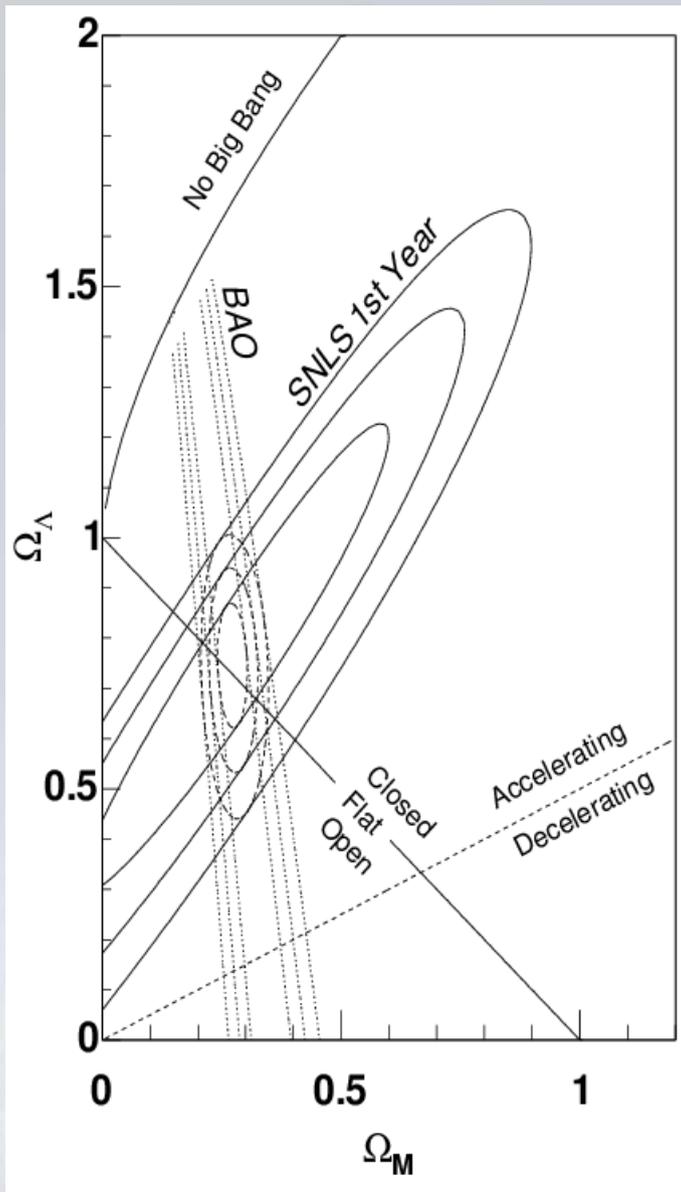
$$R = \begin{pmatrix} m_B^* - m(z, \Omega) + \alpha(\hat{s} - 1) - \beta\hat{c} \\ s - \hat{s} \\ c - \hat{c} \end{pmatrix}$$



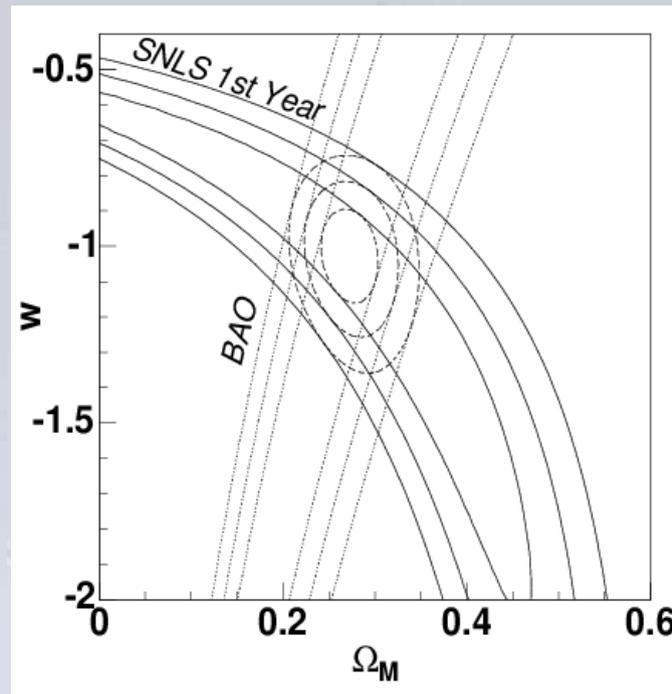
<- Biais en fonction de l'erreur de mesure pour une dispersion réelle de 0.1 pour les deux estimateurs.

Ajustement des paramètres cosmologiques (A06)

$w = -1$



$\Omega_T = 1$



Marginalisation sur α , β et M

BAO: Baryon Acoustic Oscillations
Eisenstein 2005

fit	parameters (stat only)
$(\Omega_M, \Omega_\Lambda)$	$(0.31 \pm 0.21, 0.80 \pm 0.31)$
$(\Omega_M - \Omega_\Lambda, \Omega_M + \Omega_\Lambda)$	$(-0.49 \pm 0.12, 1.11 \pm 0.52)$
$(\Omega_M, \Omega_\Lambda)$ flat	$\Omega_M = 0.263 \pm 0.037$
$(\Omega_M, \Omega_\Lambda) + \text{BAO}$	$(0.271 \pm 0.020, 0.751 \pm 0.082)$
$(\Omega_M, w) + \text{BAO}$	$(0.271 \pm 0.021, -1.023 \pm 0.087)$

68.3, 95.5 and 99.7% CL

Sources d'incertitudes systématiques

Analyse :

- photométrie, calibration, modèle d'instrument
- modélisation (empirique) des CLs.
- biais de sélection

Physique des SNe + ligne de visée :

- évolution
- contamination
- poussières grises
- lentilles gravitationnelles à grand z

Inc. Sys. : Photométrie

- * Contrôle du biais de photométrie différentielle (inévitabile lorsqu'on ajuste la position de la SN => non-linéaire) à partir de simulation :
 - on “colle” sur des galaxies des copies d'images d'étoiles voisines (x 1/1000)
 - la photométrie diff. de la fausse SN comparée à la photom. de PSF de l'étoile permet de contrôler le biais ($< \sim 0.01$ mag pour $S/N > 10$)
 - * Linéarité de la réponse de la camera ($< ? 0.01$ mag sur la gamme, entre mag 17 et 25).
- => Effets négligeables sur la cosmologie (par rapport aux autres sources d'erreur)

Inc. Sys. : Calibration 1/3

Multiples sources (mais corrélées)

* Incertitude d'alignement sur le catalogue de référence (Landolt) : Erreurs de points zéro, offset global des magnitudes dans un filtre et un champ donné

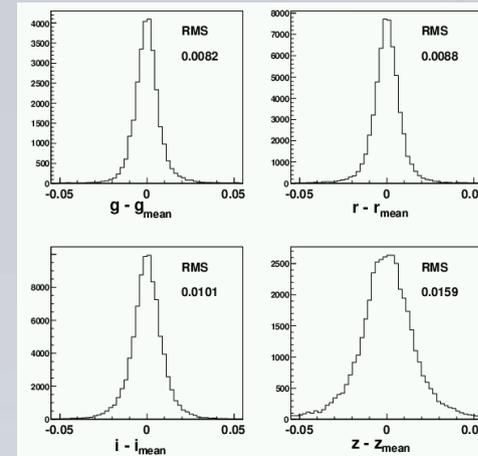
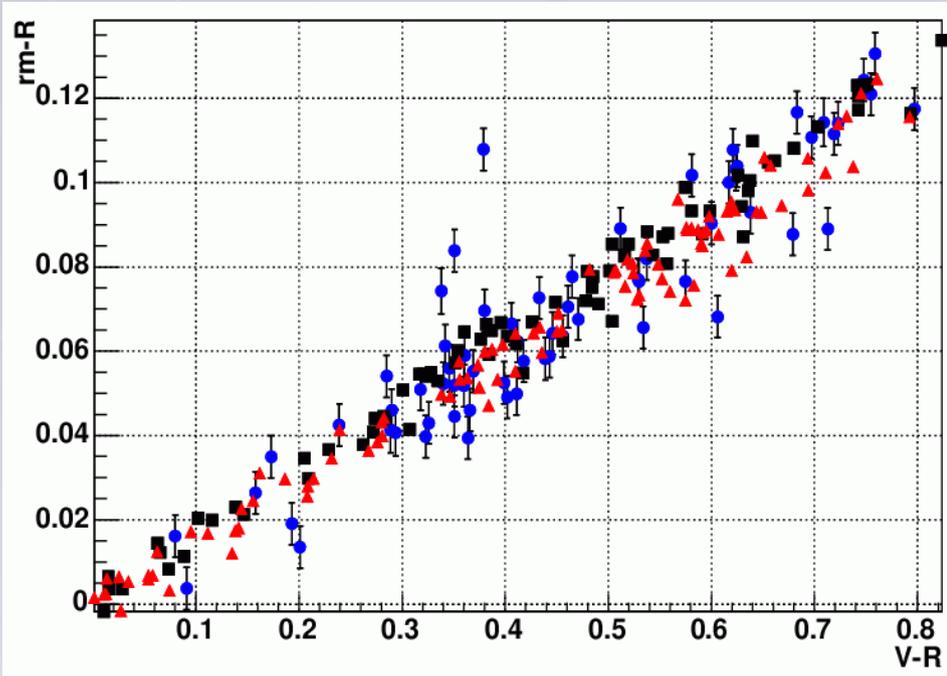
- > Tests par la répétabilité de la calibration d'étoiles du champs (limitations dues aux modif. transparence atmosphère ...)
- > Test de l'uniformité de la camera (les étoiles de calibration sont souvent observées au centre du champ)
- > Prise en compte des termes de couleur et incertitudes associées (associe au modèle d'instrument)

* Modèle d'instrument (fonction de réponse) : Principalement les longueurs d'onde centrales des filtres qui jouent sur les estimations des couleurs des SNe.

* Spectre physique ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) de l'étoile de référence et ses magnitudes dans le système défini par le catalogue de référence. (seules les couleurs jouent dans le bilan, pas la normalisation)

Inc. Sys. : Calibration 2/3

Ajustement de points zéros



<- histogrammes de répétabilité

Bleu : observations avec Megacam des étoiles de Landolt

Rouge/Noir : magnitudes synthétiques à partir de spectres photométriques

-> Sensible dans la bande z car extrapolation à partir des mesures R,I de Landolt

Band	zero-point shift	$\delta\Omega_M$ (flat)	$\delta\Omega_{tot}$	δw (fixed Ω_M)
g_M	0.01	0.000	-0.02	0.00
r_M	0.01	0.009	0.03	0.02
i_M	0.01	-0.014	0.17	-0.04
z_M	0.03	0.018	-0.48	-0.03
sum	-	0.024	0.51	0.05

<- Impact sur les paramètres cosmologiques

Inc. Sys. : Calibration 3/3

Spectre physique (de l'étoile) de référence

Les rapports de distances sont fonction de rapport de flux de SNe.
=> il faut connaître les rapports de flux d'un spectre de référence dans deux filtres distincts

ex :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d_L(z_2 = 0.5)}{d_L(z_1 = 0)} \right)^2 &= \frac{f_2(z_2 = 0.5, \hat{B})}{f_1(z_1 = 0, \hat{B})} \\ &= 10^{-0.4[m_2(R) - m_1(B)]} \\ &\quad \times \frac{\int \phi_{SN}(\lambda) B(\lambda(1 + z_1)) d\lambda}{\int \phi_{SN}(\lambda) R(\lambda(1 + z_2)) d\lambda} \\ &\quad \times 10^{0.4[m_{ref}(R) - m_{ref}(B)]} \\ &\quad \times \frac{\int \phi_{ref}(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{ref}(\lambda) B(\lambda) d\lambda} \end{aligned}$$

couleur de B-R de la référence (Vega)

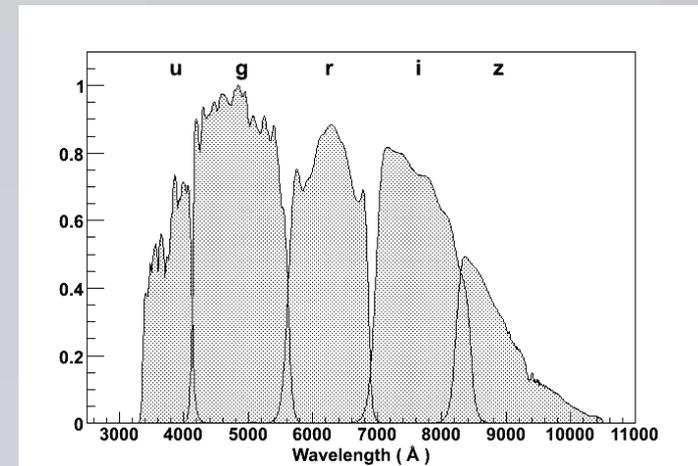
Aujourd'hui : dépendant de modèles stellaires !!

-> Voir calibration du HST (papiers de Bohlin)

-> compatible ~0.01 avec calibration par corps noir (Hayes 1985)

Futur : Campagnes de calibration des télescopes au sol (avec source calibrée par photodiode), projet de recalibration des standard primaires ...

Inc. Sys. : Modèle de réponse instrumentale



Trois sources :

- mesures au sol (transmissions filtres, eff. quantique, réflectivité ... etc)

- + transmission atmosphérique (en tirant profit de la variation en f^{ct} de la masse d'air)

(plus fiable)

- calibration relative sur d'autres instruments, via des diagrammes couleur-couleur d'étoiles

- (pente de $m(i)-m(j)$ vs $m(k)-m(l)$ proportionnelle à $\lambda(i)-\lambda(j) / \lambda(k)-\lambda(l)$)

- calibration via des observations d'étoiles standard de spectre connu.

=> en pratique impact faible sur la cosmologie (A06, incertitudes de 1 nm sur longueur d'onde centrale => erreur sur Ω_M de 0.007

Inc. Sys. : Modèle empirique de courbes de lumière

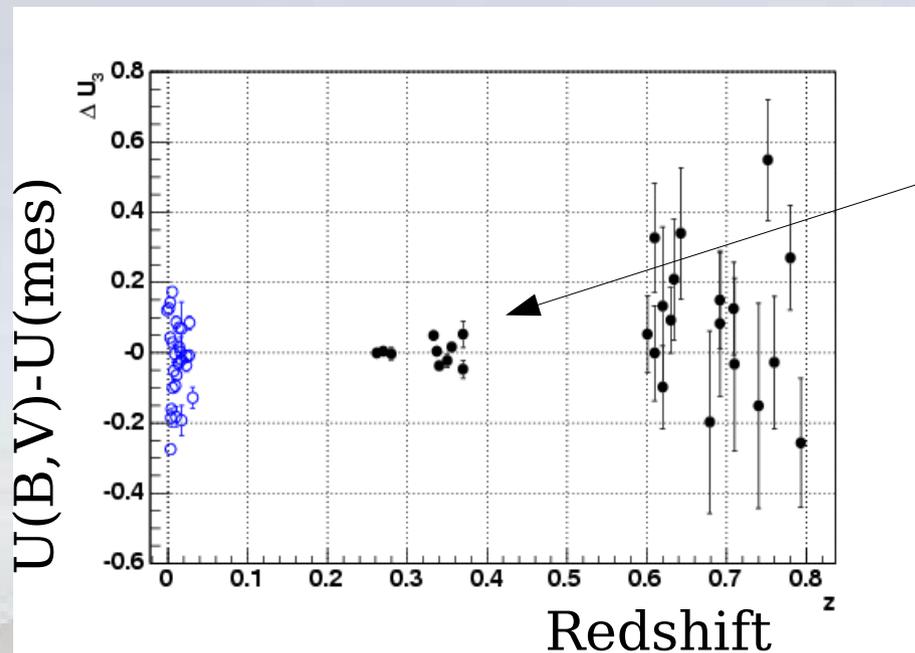
Une erreur systématique sur le spectre dans une gamme de longueur d'onde

- > erreur de correction-k
- > erreur dépendante du redshift -> cosmologie

Le meilleur outil est l'**observation d'une même SN dans plusieurs filtres** (>2) (2 minimum pour mesurer une couleur)

~ équivalent à l'observation de SNe identiques à des redshifts différents

-> les différences de distances obtenues avec deux paires de filtres différents donnent une estimation des erreurs de correction k.



moyenne à 0 +/- 0.01

La dispersion au-delà du bruit de photon rentre dans le terme de "dispersion intrinsèque"

Inc. Sys. : Biais de sélection 1/2

Étude à partir de SNe simulées

- Simulations à partir de SALT reproduisant les distributions de: redshifts, $i'(AB)$ au maximum, stretch, couleur
- En tenant compte des corrélations avec la luminosité
- Avec une modélisation de l'efficacité de détection et d'identification

noir: SNLS data

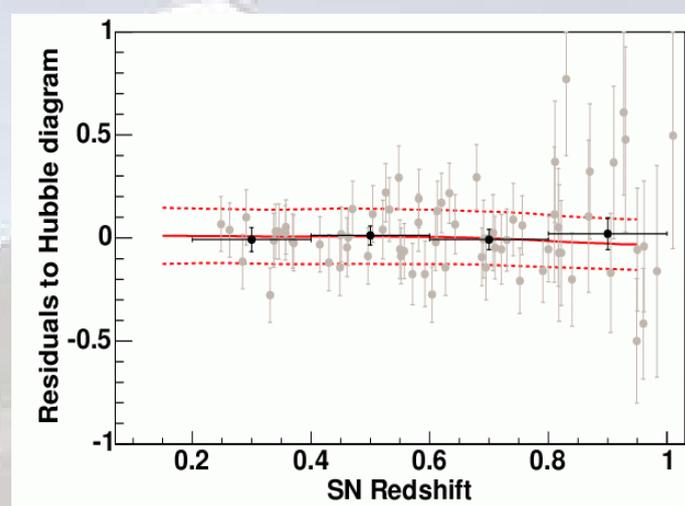
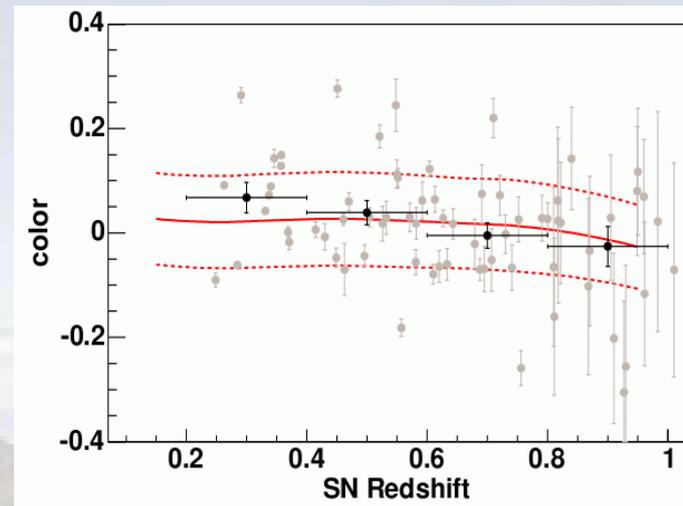
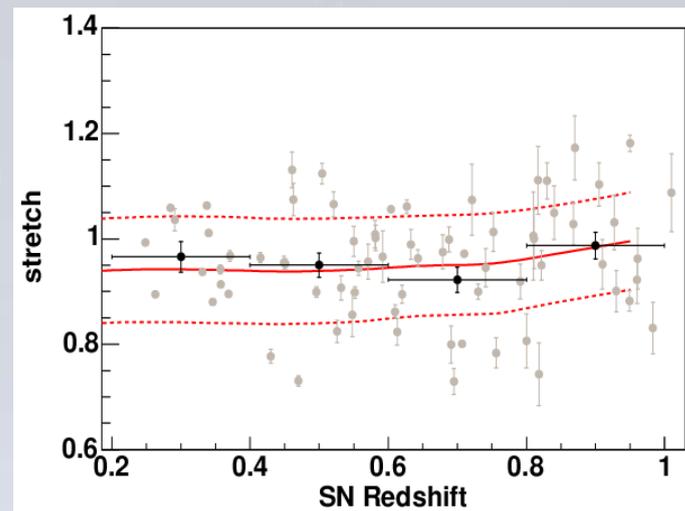
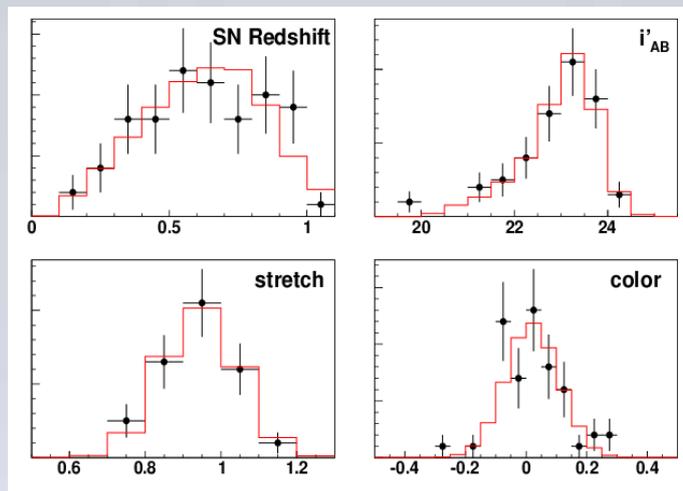
rouge:

Simulations

Biais sur le module de distance :

0.02 @ $z=0.8$

0.05 @ $z=1$.



Inc. Sys. : Biais de sélection 2/2

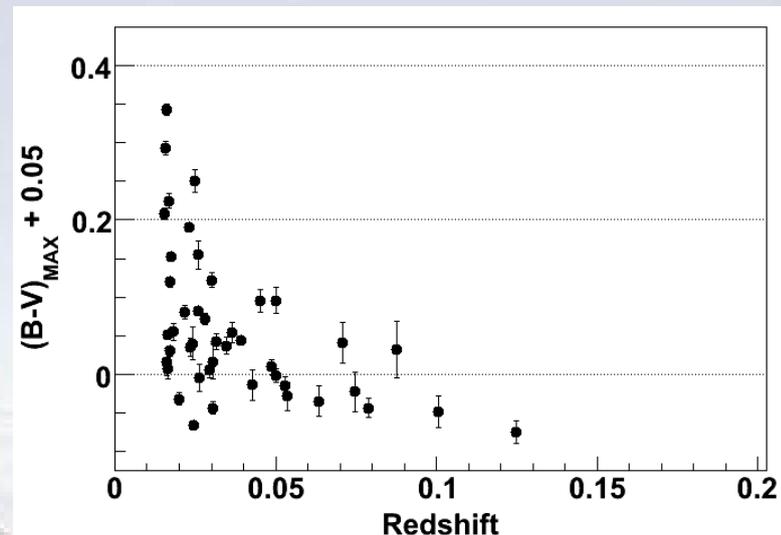
Le cas des SNe proches

“Facile” à évaluer pour une expérience comme SNLS (rolling search, un seul télescope, détection entièrement automatisée).

Pour les SNe proches, incertitude bcq plus importante : Plusieurs surveys différents + SNe découvertes par des amateurs !!

Critère de choix de suivi photométrique ?

=> La systématique la plus importante de la cosmologie avec les SNe Ia aujourd'hui (tous les groupes utilisent approximativement le même lot de SNe proches!)



Inc. Sys. : Évolution 1/6

Influence sur la luminosité (ou autres propriétés des SNe) de l'environnement:

- la **métallicité**
 - plusieurs types de **progéniteurs de durée de vie différente**
 - OU une seule séquence avec corrélation entre durée de vie et luminosité
 - nature et densité des poussières de la galaxie hôte
- > Idéalement : un modèle prédictif d'explosion de SNe devrait apporter des réponses ou du moins préciser quelles quantités doivent être observées
- > En pratique deux approches :
- Comparaison des caractéristiques photométriques et spectroscopiques des SNe à bas et grand redshift.
 - Plus pertinent: Comparaison des SNe en fonction des propriétés de leur galaxie hôte

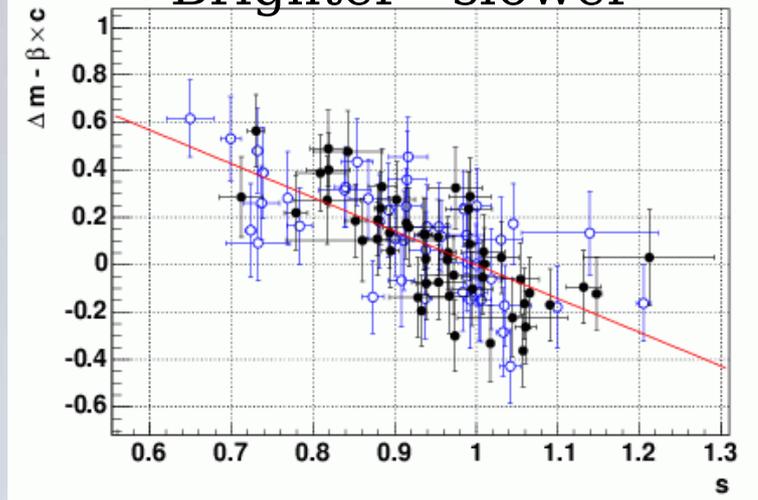
Inc. Sys. : Évolution 2/6

Comparaison photométriques des SNe proches et distantes

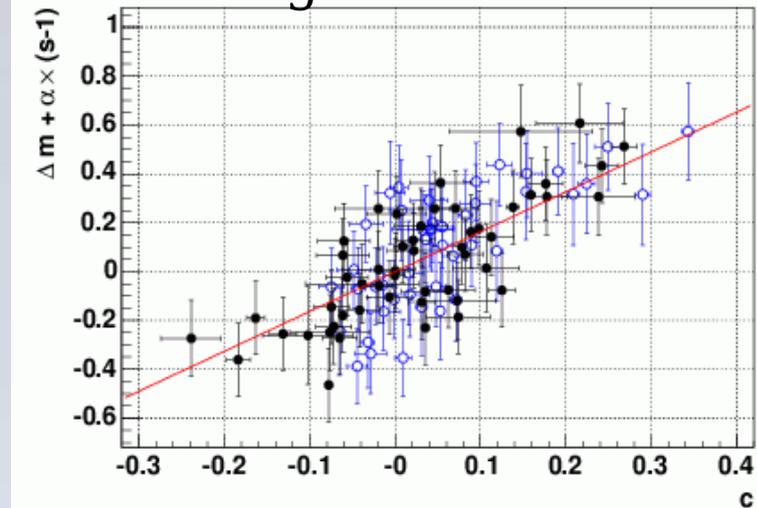
Distributions de stretch, couleur et relations avec la luminosité compatibles entre SNe proches et distantes

(A06)

Brighter - slower

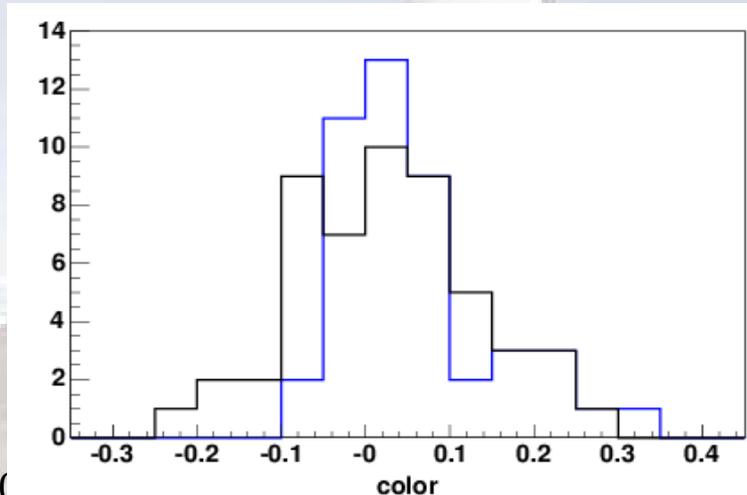
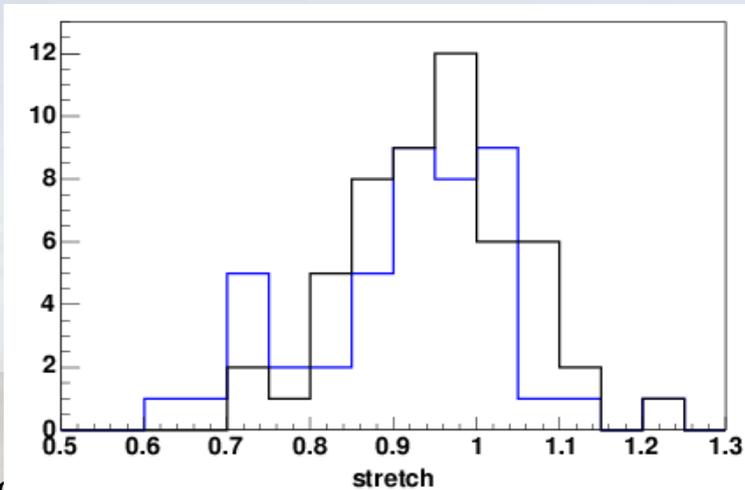


Brighter - bluer



Bleu: SNe proches
Noir: SNe SNLS

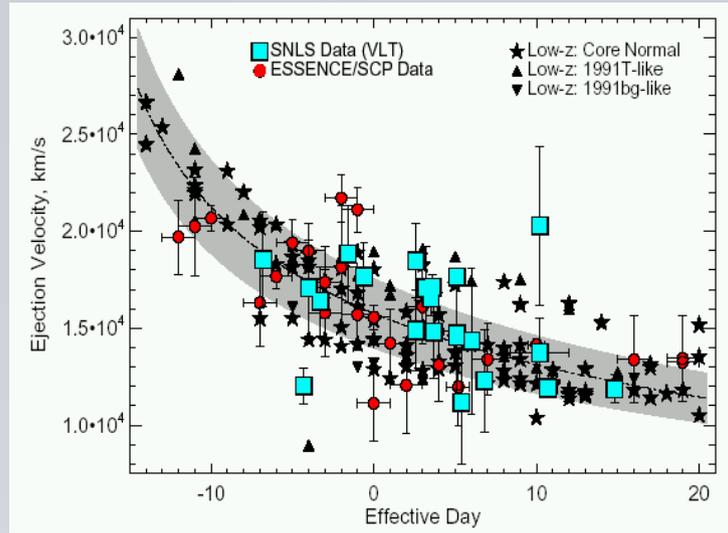
-> pas d'évolution significative de couleur
ni de relation couleur luminosité



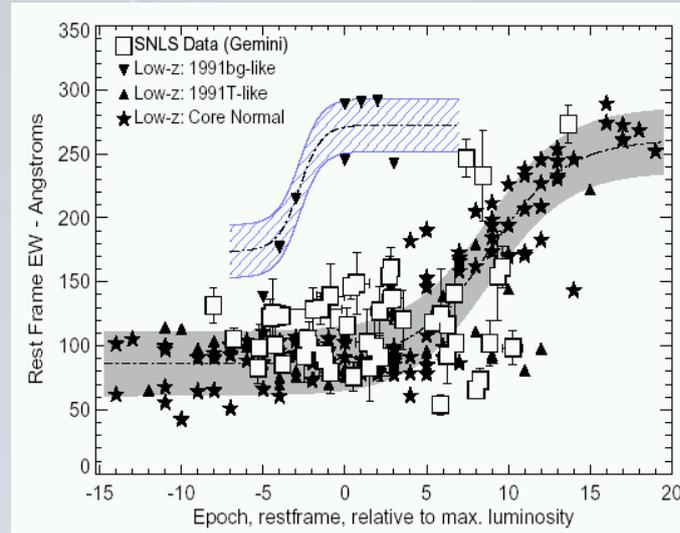
Inc. Sys. : Évolution 3/6

Comparaison spectroscopiques des SNe proches et distantes

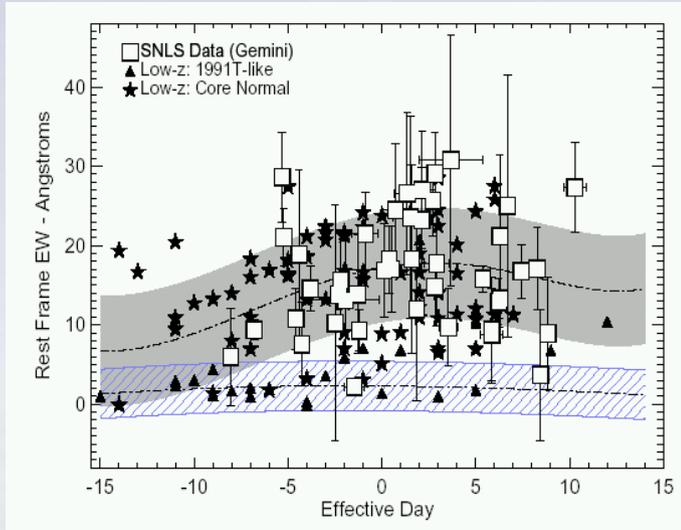
Thèse de J. Bronder, spectroscopie Gemini pour SNLS



Vitesse éjection CaII (H&K)



Quantité de MgII (EW)



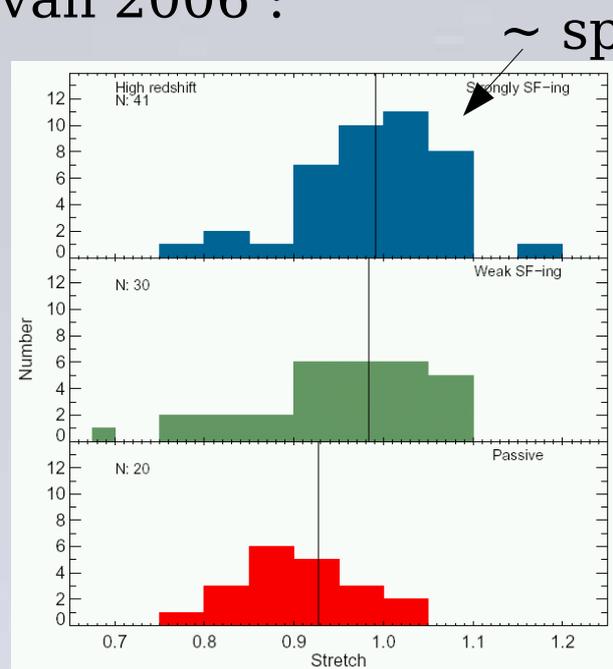
Quantité de SiII (EW)

Pas d'offsets systématique
Dispersion plus grande à grand z?

Inc. Sys. : Évolution 4/6

Propriétés des SNe en fonction du type de galaxie hôte

Sullivan 2006 :



Taux de formation d'étoiles (SFR)
(déduit des couleurs des galaxies hôtes, à partir du code Pegase, D. Le Borgne)

stretch

Les SNe explosant dans un environnement avec fort SFR ont de plus grand stretch (et sont donc plus brillantes)

=> Progéniteurs jeunes donnent des SNe plus brillantes ?

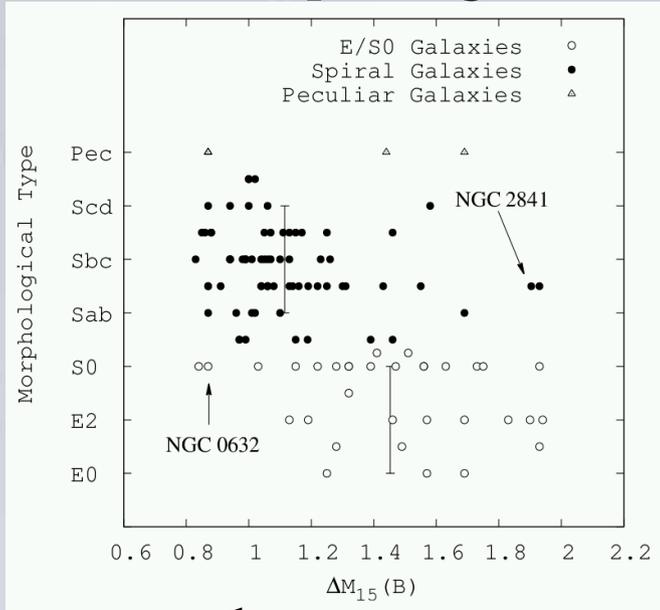
A grand z , SFR plus important qu'à bas z , impact sur la cosmo ?

Pas d'écart sur la mesure de distance (avec corr. du stretch) dans le lot A06 (à suivre)

Inc. Sys. : Évolution 5/6

Gallagher 2005

Morphologie

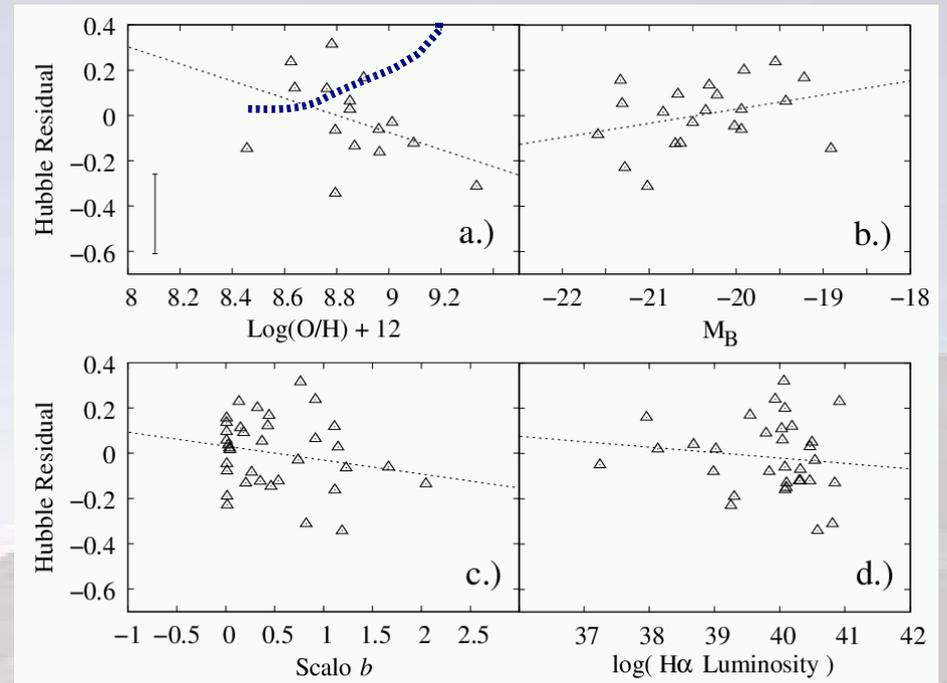
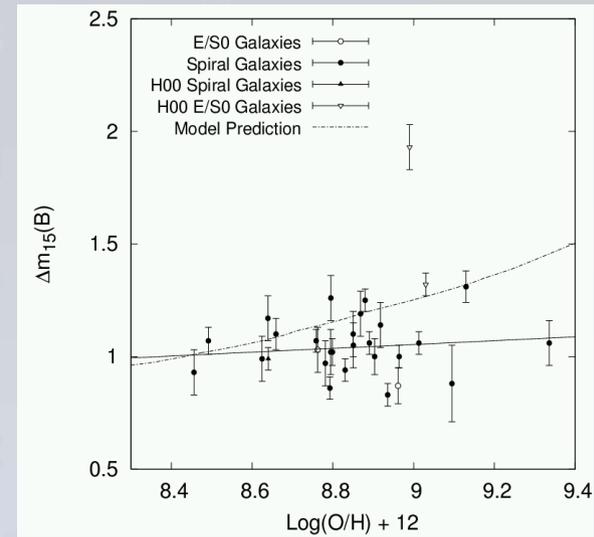


← stretch

Pas de corrélation significative avec les résidus au diagramme de Hubble

-> Par ex, en désaccord avec prédictions de Podsiadlowski 2006 pour la métallicité (courbe bleue pointillée)

Métallicité (pas d'effet significatif)



Inc. Sys. : Évolution 6/6

Temps de montée, Conley 2006

Motivation:

Temps de montée -4 jours

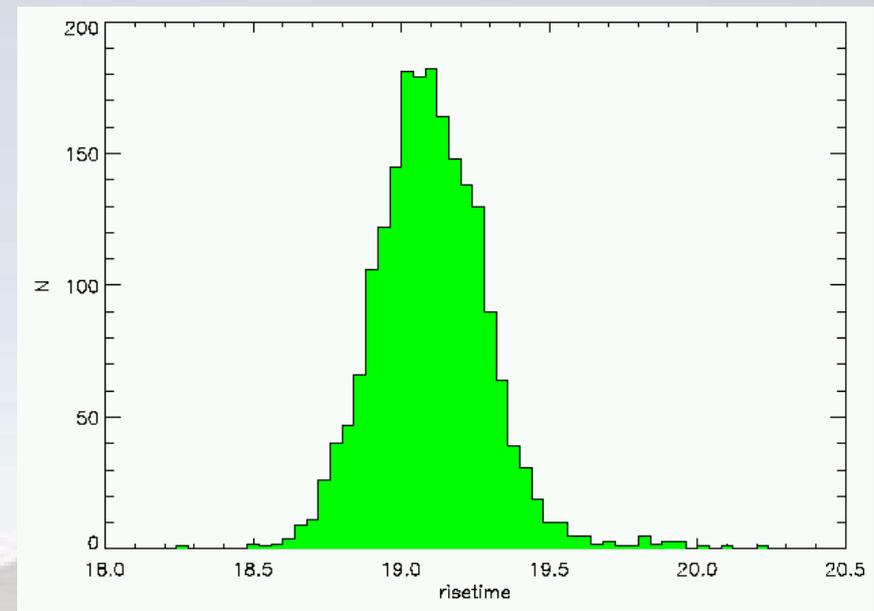
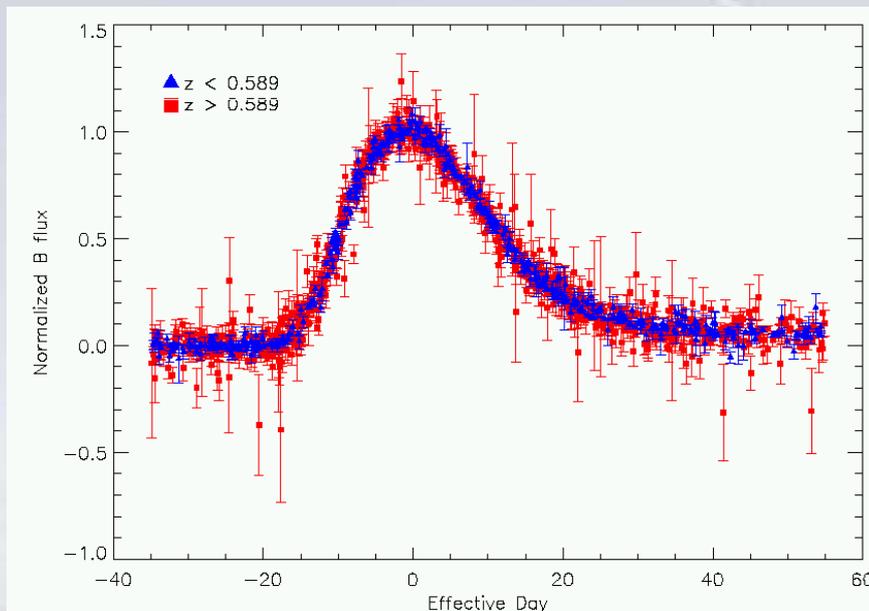
-> quantité de ^{56}Ni -10% (\sim luminosité au pic)

Riess 1999 trouve une diff. de 2.5 ± 0.4 jours entre SNe proches et distantes !

Proches : 19.58 ± 0.2

Distantes (SNLS) : 19.10 ± 0.2 (stat) ± 0.2 (syst)

=> Pas d'effet significatif



Inc. Sys. : Contamination

- Les supernovae « core-collapse » = SNe II, Ib, Ic ont des progéniteurs plus jeunes => plus nombreux à grand redshift.
- Pour les faibles S/N photométriques et spectroscopiques, contamination possible.
- SNe II nettement moins brillantes
- SNe Ib/c dispersion luminosité importante

=> diagramme de Hubble avec les événements pureté=1

=> ou hypothèse du taux de contamination

+ coupures en écarts au diagramme de Hubble

-> limite sur le poids de ces événements dans la cosmologie.

A06: argument statistique

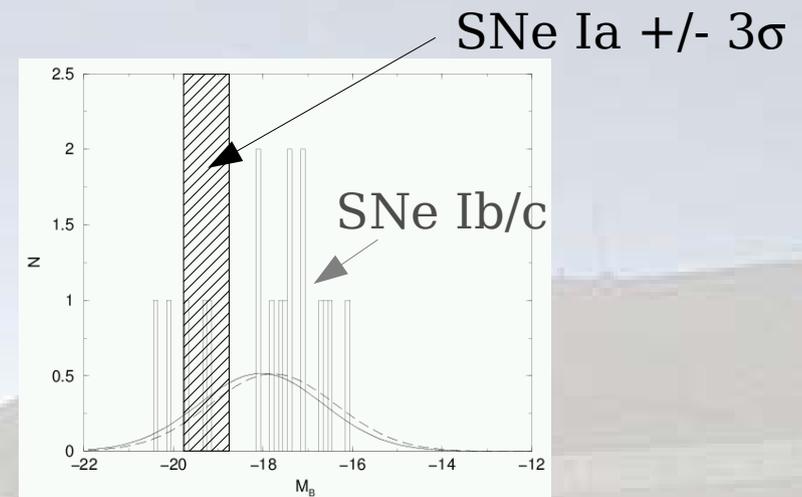
Dispersion au pic des SNe Ib/c

~ 1.29 mag (Richardson 2002)

2 objets à plus de 3σ (Ia) dans le lot

=> $2 \cdot 0.16 / (1 - 0.16) = 0.4$

~0.4 objets dans le diagramme de Hubble final.



Inc. Sys. :

Poussières grises

Couleurs de quasars du SDSS

=> limite sur la densité de colonne de poussière

pour une hypothèse de R_v

$$\sigma(\Omega_m) < 0.025, \sigma(w) < 0.048$$

(pour $R_v < 12$, Ostman 2005)

Lentilles gravitationnelles

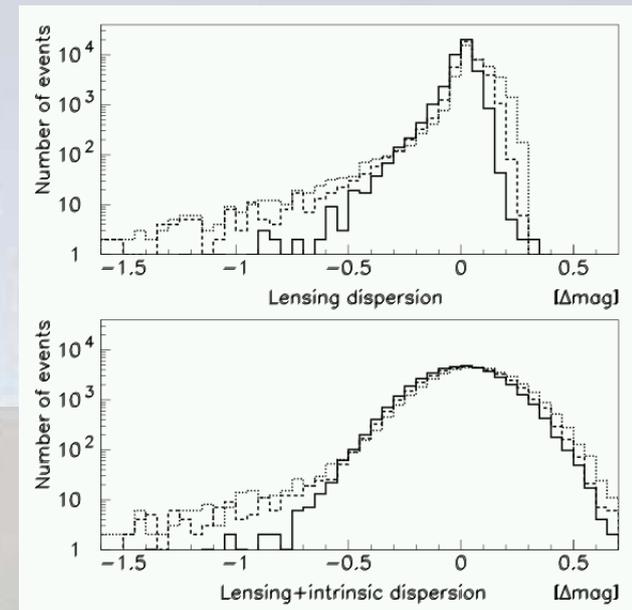
Conservation du flux lumineux mais :

- Distributions des résidus asymétrique
+ perte nette de lumière pour les images multiples

=> Évaluation avec SNOC (Bergstrom 2000)

=> Limites importantes apportées
par le survey CLASS (Myers 2003)

$$\sigma(\Omega_m) < 0.005, \sigma(w) < 0.01$$



Inc. Sys. : Bilan des incertitudes du papier A06

Source	$\sigma(\Omega_M)$ (flat)	$\sigma(\Omega_{tot})$	$\sigma(w)$	$\sigma(\Omega_M)$ (with BAO)	$\sigma(w)$
Zero-points	0.024	0.51	0.05	0.004	0.040
Vega spectrum	0.012	0.02	0.03	0.003	0.024
Filter bandpasses	0.007	0.01	0.02	0.002	0.013
Malmquist bias	0.016	0.22	0.03	0.004	0.025
Sum (sys)	0.032	0.55	0.07	0.007	0.054
Meas. errors	0.037	0.52	0.09	0.020	0.087
U-B color(stat)	0.020	0.10	0.05	0.003	0.021
Sum (stat)	0.042	0.53	0.10	0.021	0.090

L'incertitude la plus important provient de la calibration.
=> Amélioration dans le cadre d'un programme commun CFHTLS
+ observations des étoiles de champ des SNe proches

Incertain sur le biais de sélection : amenée à décroître pour SNLS
=> Bientôt limité par le lot de SNe proches

Résultats A06

SNLS seul, Univers plat : $\Omega_M = 0.263 \pm 0.042$ (*stat*) ± 0.032 (*syst*)

SNLS+BAO,
sans autres
contraintes :

$$\begin{aligned}\Omega_M &= 0.271 \pm 0.021 \text{ (stat)} \pm 0.007 \text{ (syst)} \\ w &= -1.023 \pm 0.090 \text{ (stat)} \pm 0.054 \text{ (syst)} \\ w &< -0.85 \text{ (95\% CL)}\end{aligned}$$

A comparer, par exemple, aux contraintes combinées par Seljak 2005 incluant WMAP, SDSS, et SNe Ia (Riess 2004)

$$\begin{aligned}\Omega_M &= 0.282 \pm 0.02 \\ w &= -0.98^{+0.086}_{-0.093}\end{aligned}$$

Conclusion

- Les SNe Ia ne sont pas une classe d'objets homogènes
 - > pas de traitement statistique rigoureux
 - > sous-classe homogène identifiable?
- Beaucoup de systématiques n'en sont pas :
 - > la résolution stat. permet de les réduire (sélection, évolution, modélisation empirique, lentilles grav.)
- D'autres sont solides : modèles d'extinction inter-galactiques (poussière 100% grises)

Aujourd'hui,

* les principales incertitudes sont:

- Biais dans l'échantillon de SNe proches => SNFactory
- Calibration à affiner
- Indices forts pour une dépendance des SNe Ia avec SFR (âge du progéniteur), à suivre

* Les SNe Ia sont aujourd'hui la meilleure sonde pour contraindre l'énergie noire

* Besoin d'un modèle théorique d'explosion prédictif

=> Besoin d'un survey de SNe Ia proches, non biaisé, $stat > \sim 500$, mesures redondantes par SN (nombreux filtres, plusieurs spectres)