

Cosmologie observationnelle avec des supernovae de type Ia



The Nearby Supernovae Factory

CHOTARD Nicolas

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

JRJC 2009



1



Plan de l'exposé

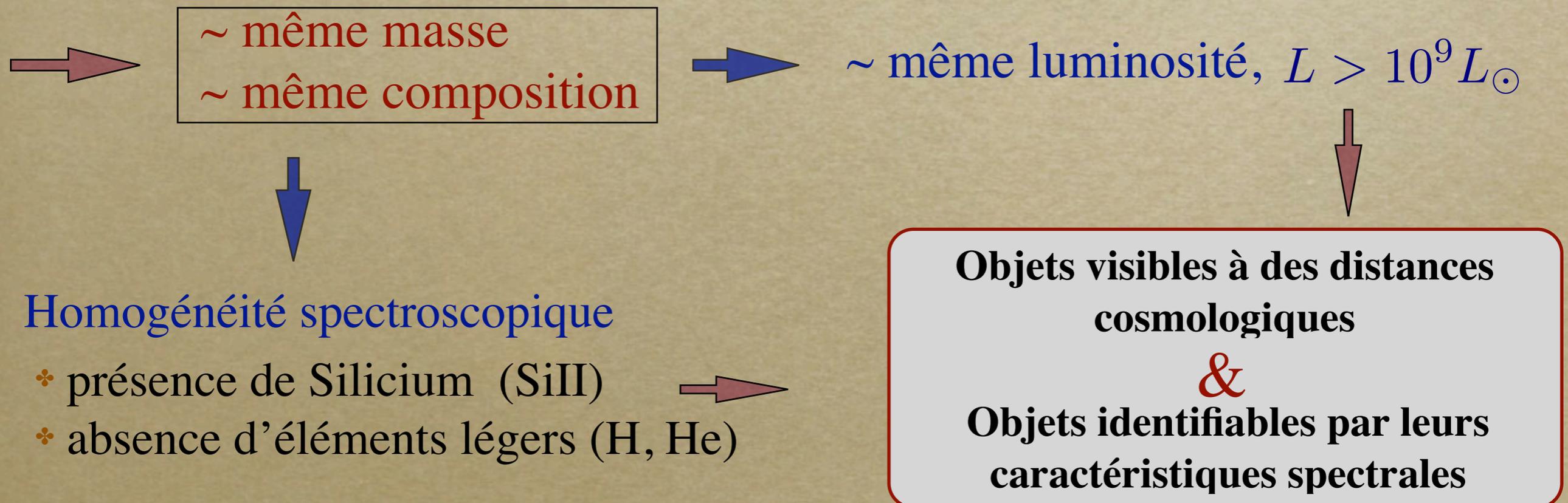
- ❖ Supernovae de type Ia et cosmologie
 - ❖ Modèle d'explosion des SNeIa
 - ❖ Chandelles standardisables
 - ❖ Cosmologie observationnelle
- ❖ The Nearby Supernovae Factory
- ❖ Analyse spectrale et standardisation
 - ❖ Indicateurs spectraux
 - ❖ Corrélations et standardisation

Modèle d'explosion des SNIa

- ★ **Naine blanche** (C+O) en **système binaire serré** accréant la masse de son compagnon
- ★ approche la masse limite de Chandrasekhar ($\sim 1,4 M_{\odot}$)
- ★ augmentation de la température
- ★ déclenchement et emballement de la **fusion thermonucléaire** du C et O donnant **Ni, Si, S, Ca**



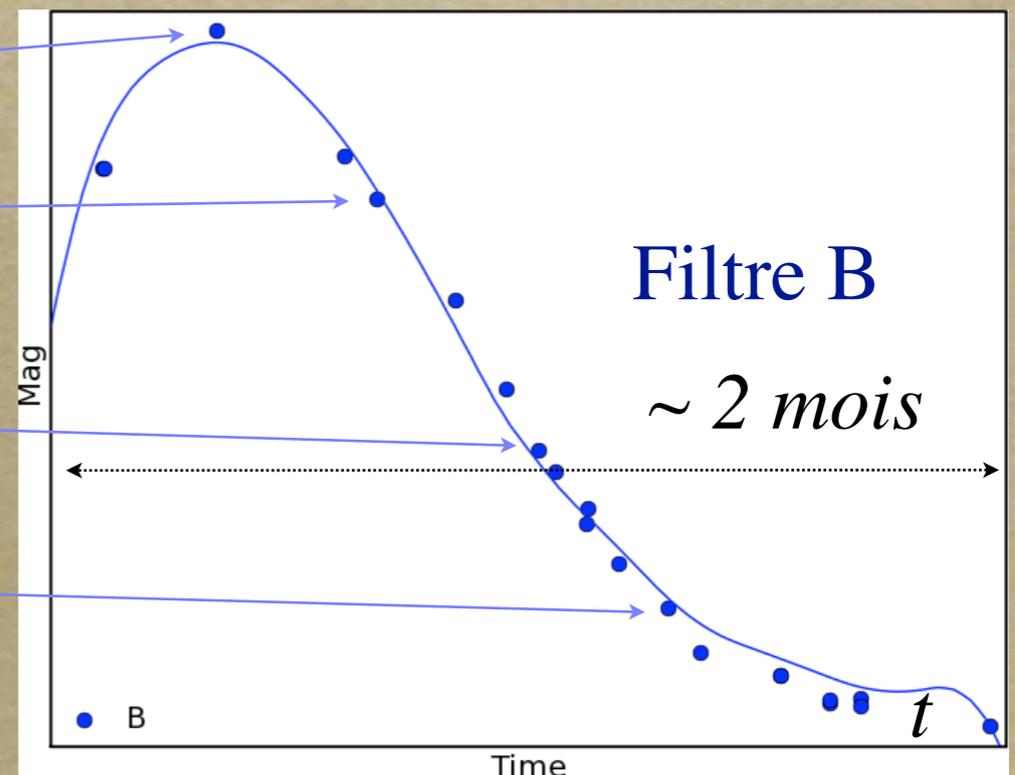
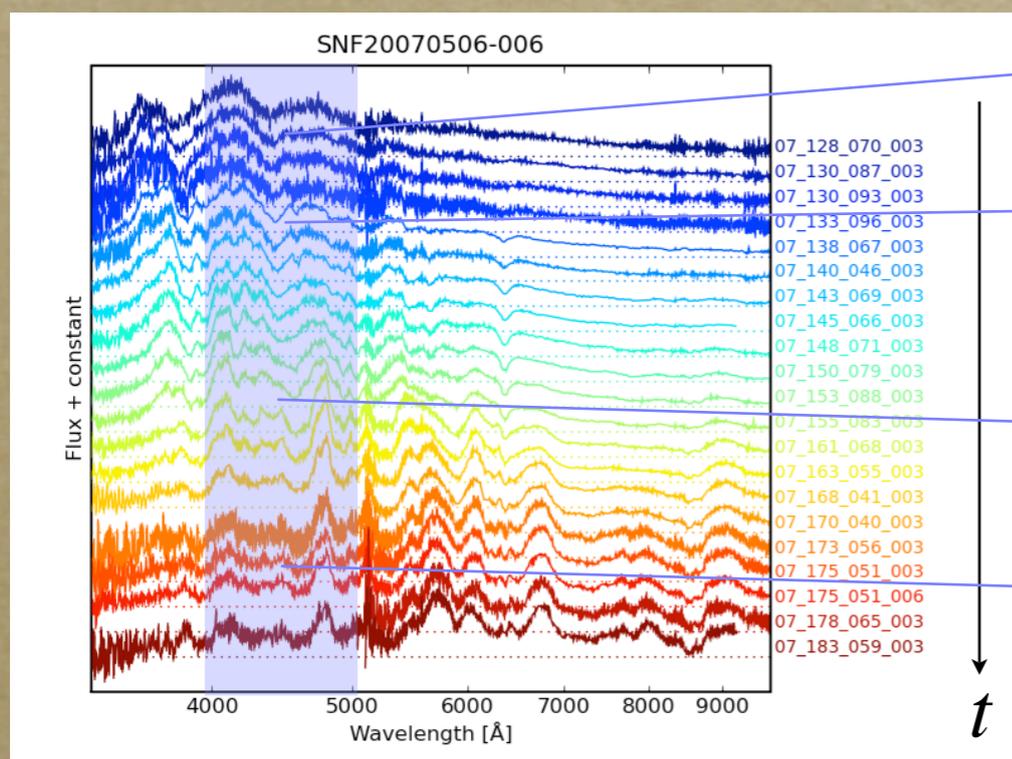
Vue d'artiste



Après l'explosion des SNIa

Compétition entre :

- ♦ évolution de l'opacité (enveloppe de la SNIa en expansion)
- ♦ taux de désintégration nucléaire dans le coeur de la SN
- ❖ Évolution de la contribution des différents éléments dans le spectre: *série temporelle*
- ❖ Évolution de la luminosité: *courbe de lumière*, décroissance liée aux périodes radioactives des éléments présents dans le coeur de la SN Ia



Expansion de l'enveloppe



Diminution de l'opacité



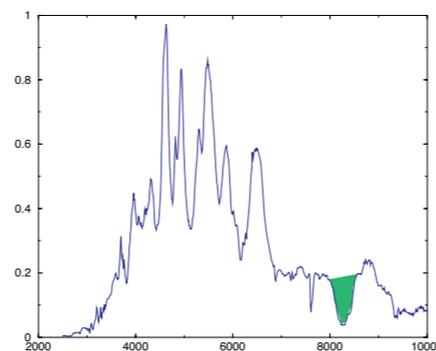
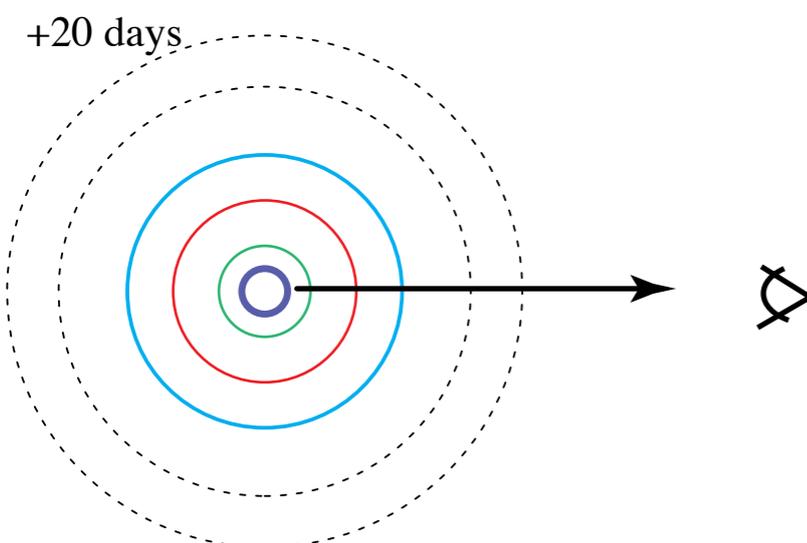
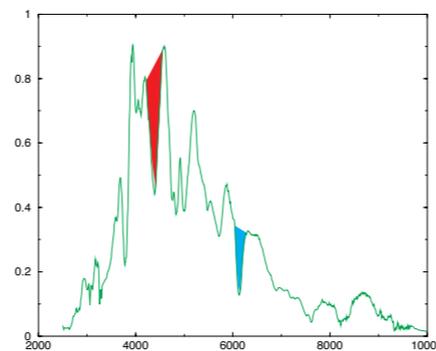
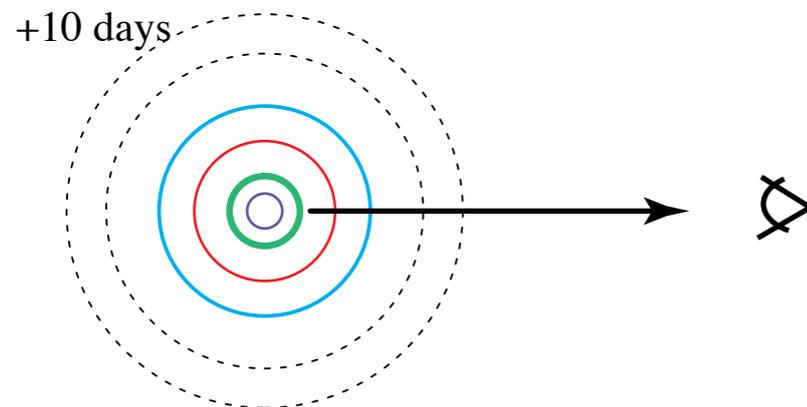
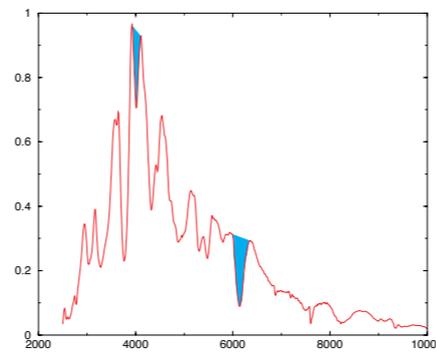
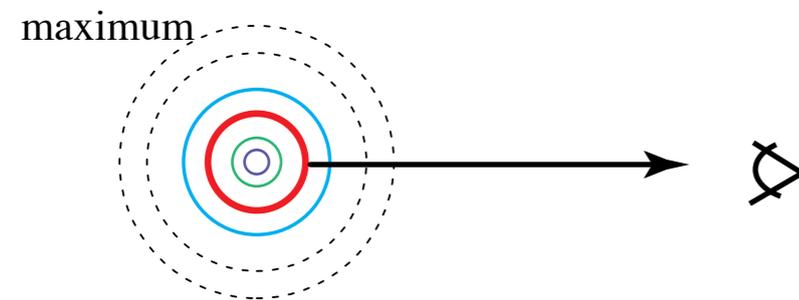
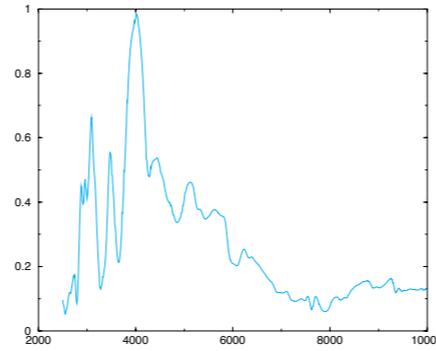
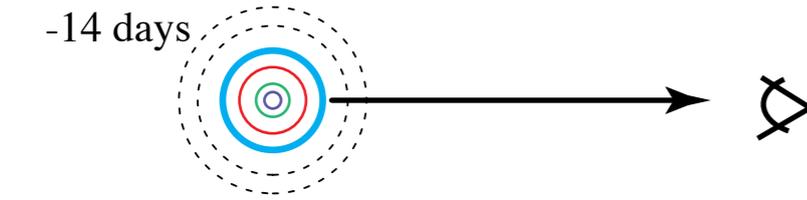
Accès aux couches profondes de la SNIa



Accès aux éléments les plus profonds



Évolution du spectre observé



Typical SN Ia Spectral Feature at max



SNeIa : chandelles quasi-standards

- ❖ L'**homogénéité** des SNe Ia au moment de l'explosion leur confère le caractère de **chandelles quasi-standards**
- ❖ Sources de **variabilités intrinsèques** à chaque SN Ia (stretch):
 - ❖ lieu d'allumage des réactions nucléaires et propagation turbulente de la flamme de combustion
 - ❖ composition du progéniteur?
- ❖ Source de **variabilité extrinsèque**:
 - ❖ absorption du milieu interstellaire de la galaxie hôte (couleur)

Dispersion d'environ 40% sans aucune correction

Possibilités de réduire la dispersion par des **corrections empiriques**

supernova 1994D



Standardisation par la photométrie

❖ SALT2 : Paramétrisation empirique d'ajustement de courbe de lumière de SNIa déterminant 3 paramètres par SN :

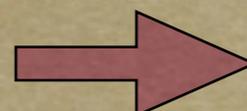
- ❖ **mb**, magnitude B au maximum
- ❖ **x1**, correction de **stretch** (Étirement)
plus large = plus brillante (intrinsèque)
- ❖ **c**, correction de **couleur** (B-V)
plus bleue = plus brillante (extinction)

Diminution de la dispersion moyenne après **correction de stretch et de couleur** :

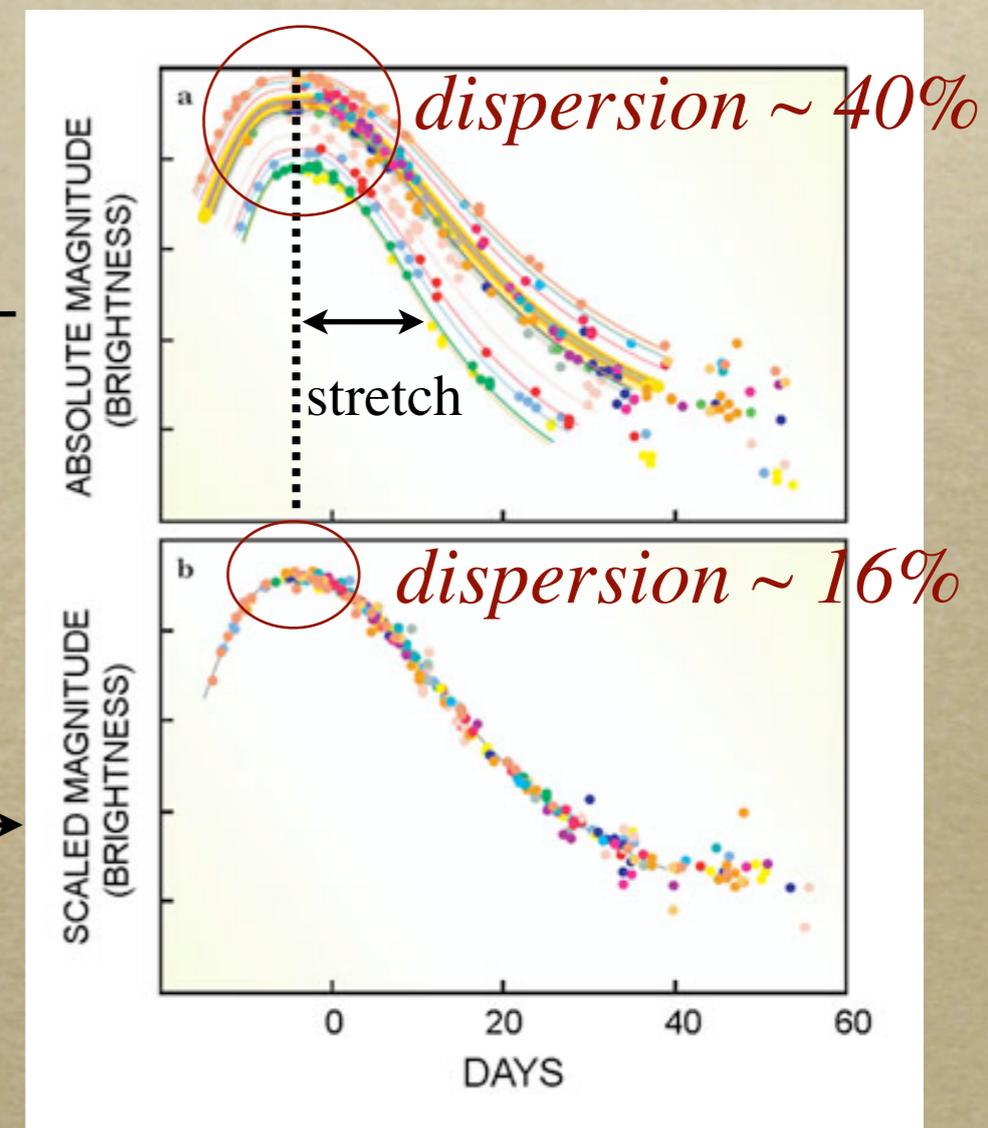
Chandelles standardisables

&

Objets visibles à des distances cosmologiques



Utilisation en Cosmologie



Cosmologie et SNIa

- ❖ Cosmologie observationnelle avec des **chandelles standard**:
 - ♦ mesure du décalage vers le rouge (*redshift*) des SNeIa
 - ♦ mesure de la *magnitude apparente* des SNIa

$$\mu_B = m_B - M_B = 5 \log(d_L) - 5$$

module de distance

magnitude absolue des SNIa

- ♦ *distance de luminosité*

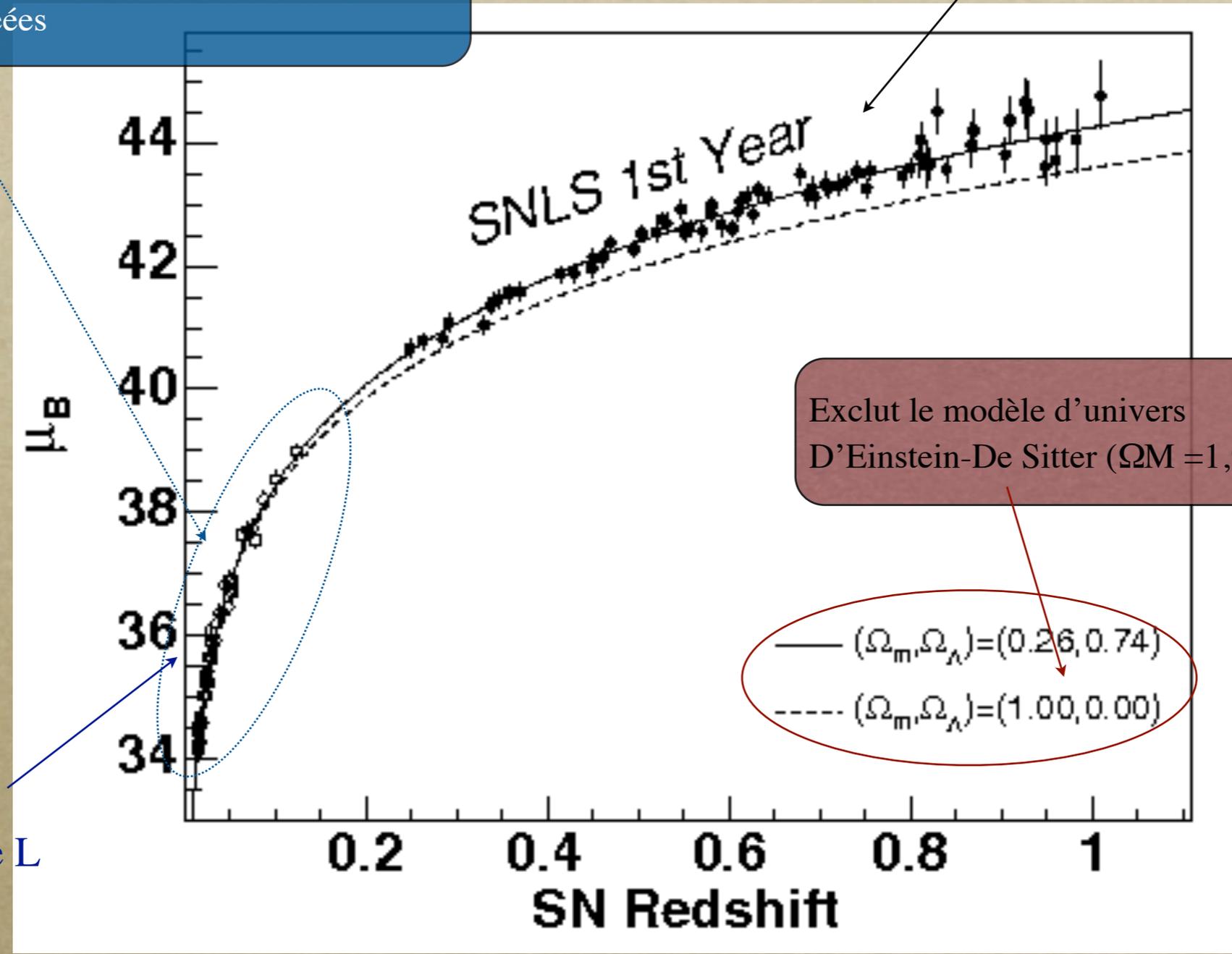
$$d_L = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\sum_i \Omega_i^{(0)} (1+z')^{3(1+\omega_i)}}}$$

redshift

➔ Paramètres cosmologiques

SNe lointaines mesurent l'expansion et les paramètres cosmologiques

Seulement 44 SNe à bas décalage vers le rouge dans ces données



Exclut le modèle d'univers D'Einstein-De Sitter ($\Omega_M = 1, \Omega_\Lambda = 0$)

SNe proches contraignent la luminosité absolue L

Étude des SNe Ia à faible décalage vers le rouge utile pour diminuer les erreurs systématiques : besoin d'une bonne statistique

➔ Nearby Supernova Factory

Cosmologie observationnelle

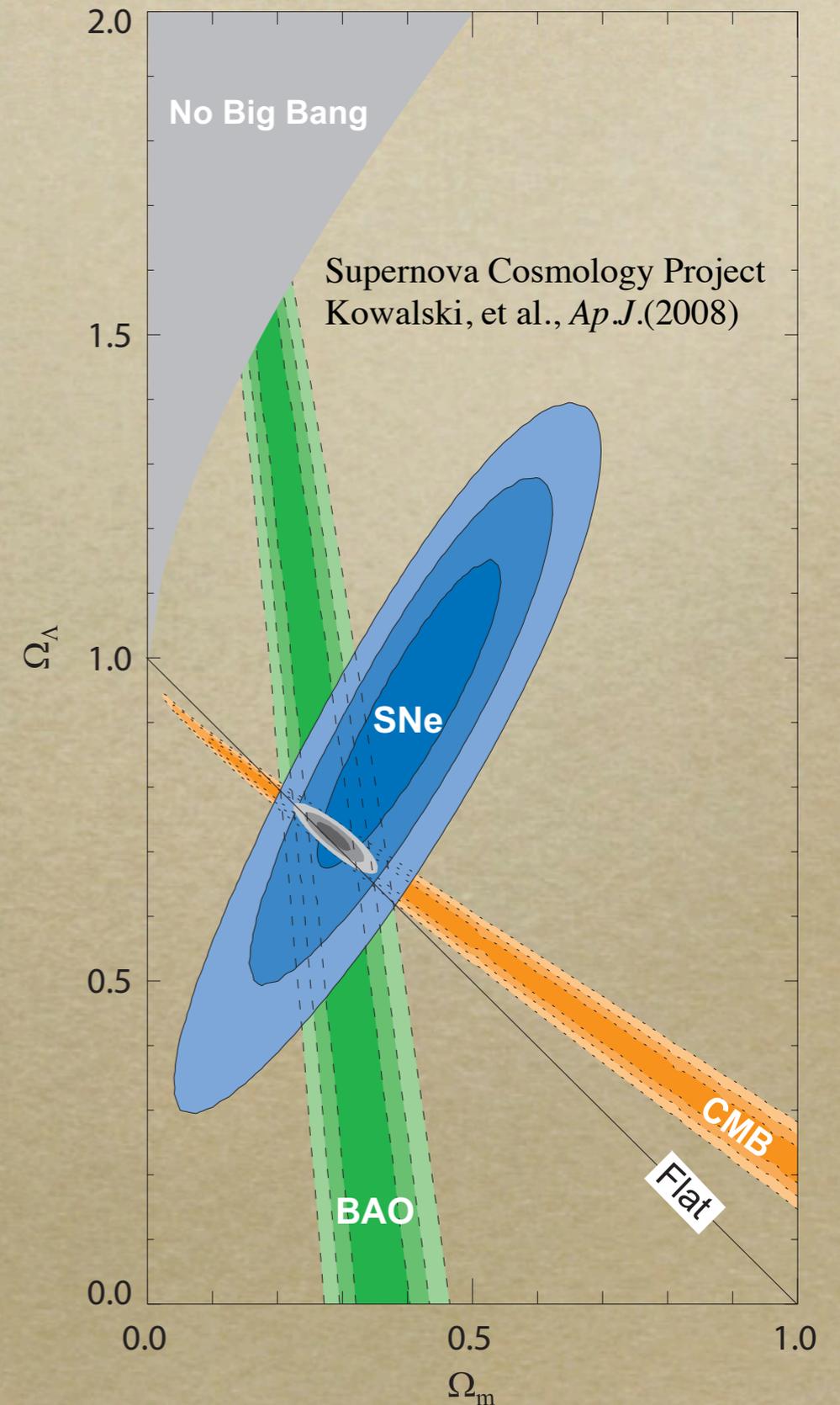
Trois méthodes principales
(SNe,CMB,BAO) donnent:

$$\Omega_M \approx 0.285 \pm 0.030$$

$$\Omega_\Lambda \approx 0.73 \pm 0.04$$

kowalski 08

- ✦ Ω_M densité de matière
- ✦ Ω_Λ densité d'énergie noire



SNFactory : la collaboration



~30 personnes dans 6 laboratoires

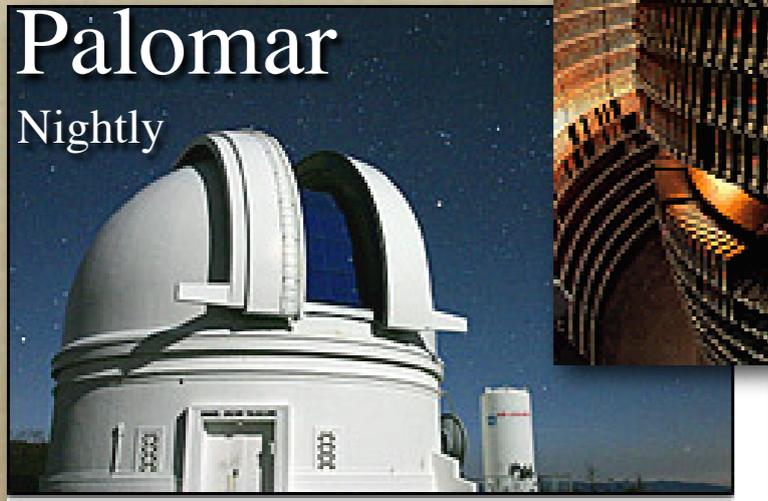
IPNL: 3 chercheurs, 1 postdoc, 2 doctorants

SNFactory : objectifs

- ❖ Augmentation de l'échantillon de SNIa proches ($0,03 < z < 0,08$)
- ❖ Engendrer un large échantillon de séries temporelles étalonnées en flux:
 - ❖ amélioration du contrôle des **systematiques**
 - ❖ standardisation des SNIa
- ❖ Amélioration de la compréhension de la **physique** des SNIa:
 - ❖ contraintes sur les **modèles d'explosion**,
 - ❖ types de **progéniteurs**,
 - ❖ **environnement**, caractéristiques de l'hôte (extinction)

SNFactory : Observations

1. Découverte



Terminée fin 2008



= $\sim 10^{-7}$ de la surface observée par nuit

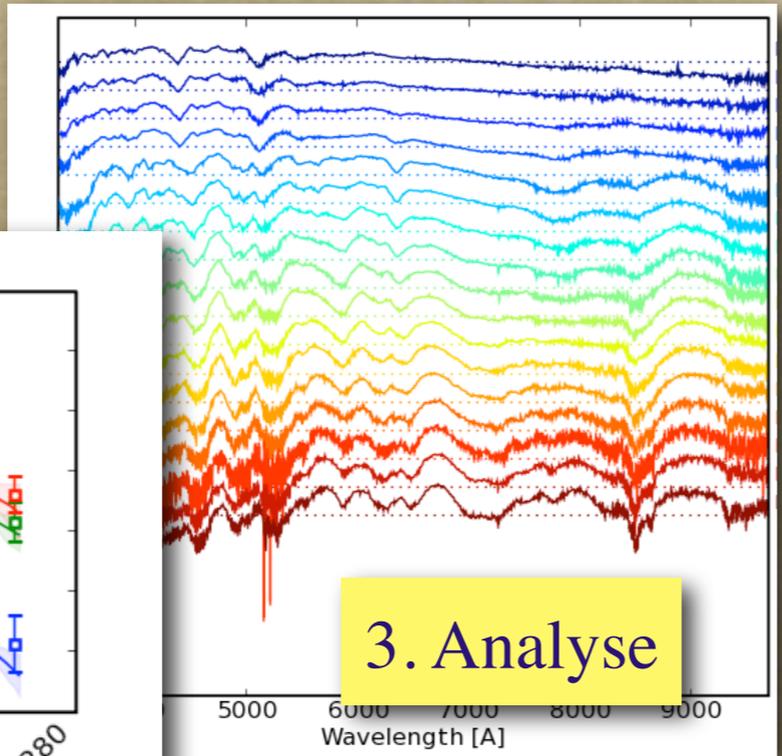
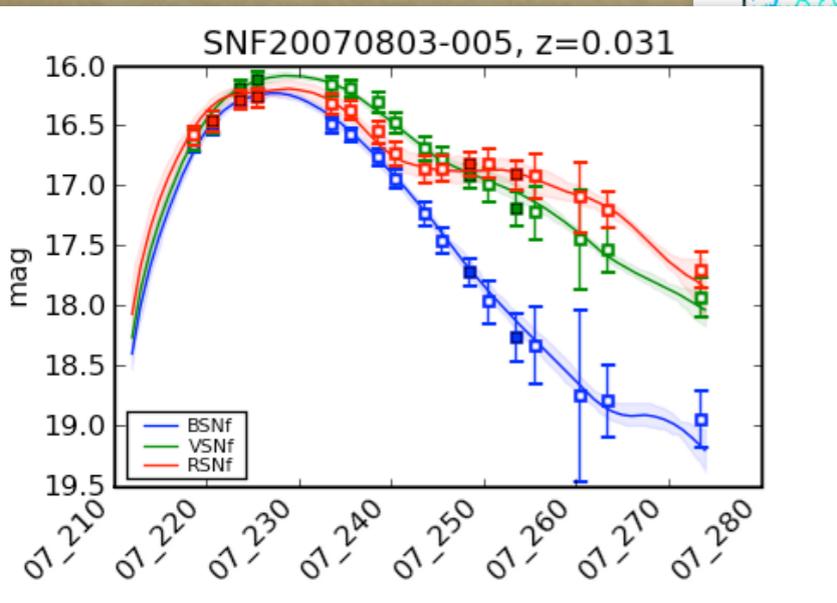
2. Observation

Typage et suivi des objets



Spectromètre unique conçu pour les observations de SNe proches

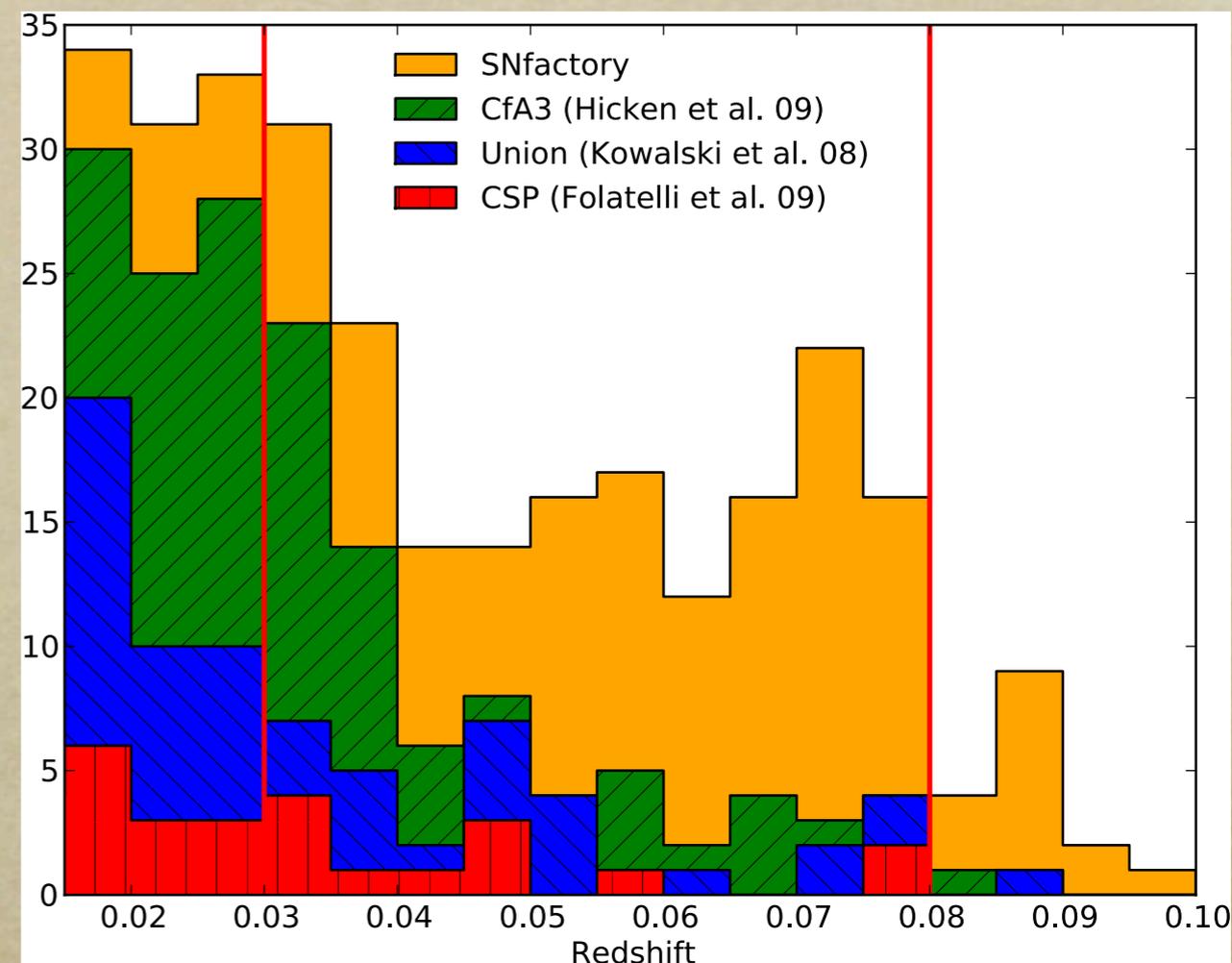
couverture spectrale:
3000-10000 Å SN2009ig



3. Analyse

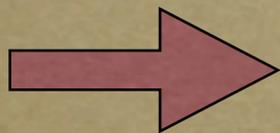
SNFactory : Les données

- ❖ ~190 SNeIa, ~15 spectres par SN
- ❖ ~ 3000 spectres de -15 a +40 jours / max
- ❖ ~150 spectres proches du max (+/- 2.5 j)



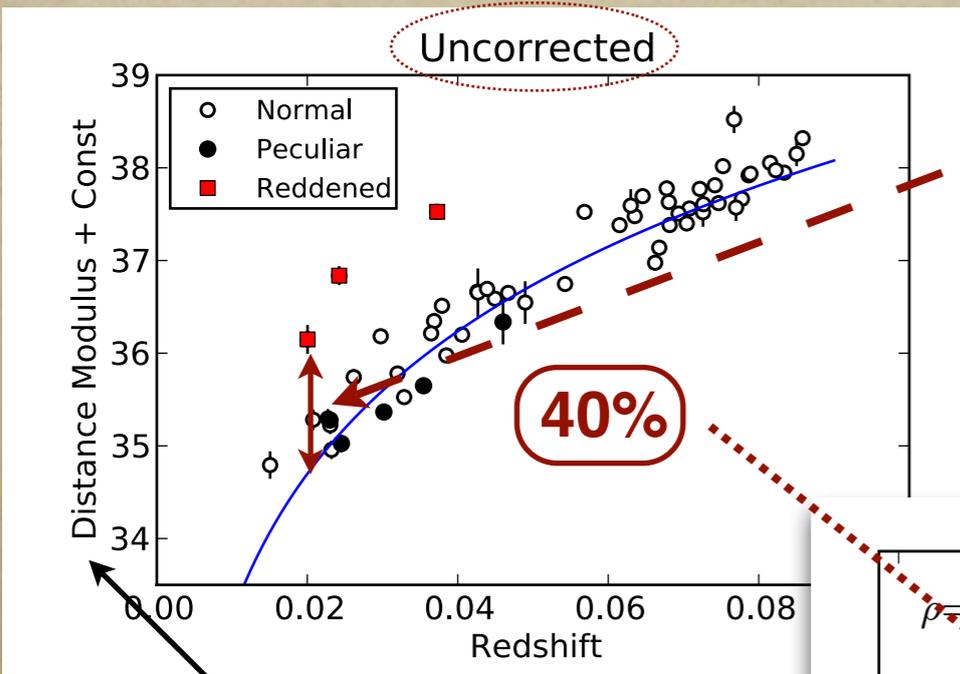
❖ Actuellement:

- ❖ 58 objets pour lesquels seront déterminés avec le modèle SALT2:
 - ❖ magnitude au maximum dans le filtre B
 - ❖ paramètre de stretch (x1) (diversité des objets)
 - ❖ paramètre de couleur (c) (absorption galaxie hôte)



Analyse primaire des 58 spectres proches du maximum
Comparaison des données spectrales aux paramètres SALT2

Diagramme de Hubble proche



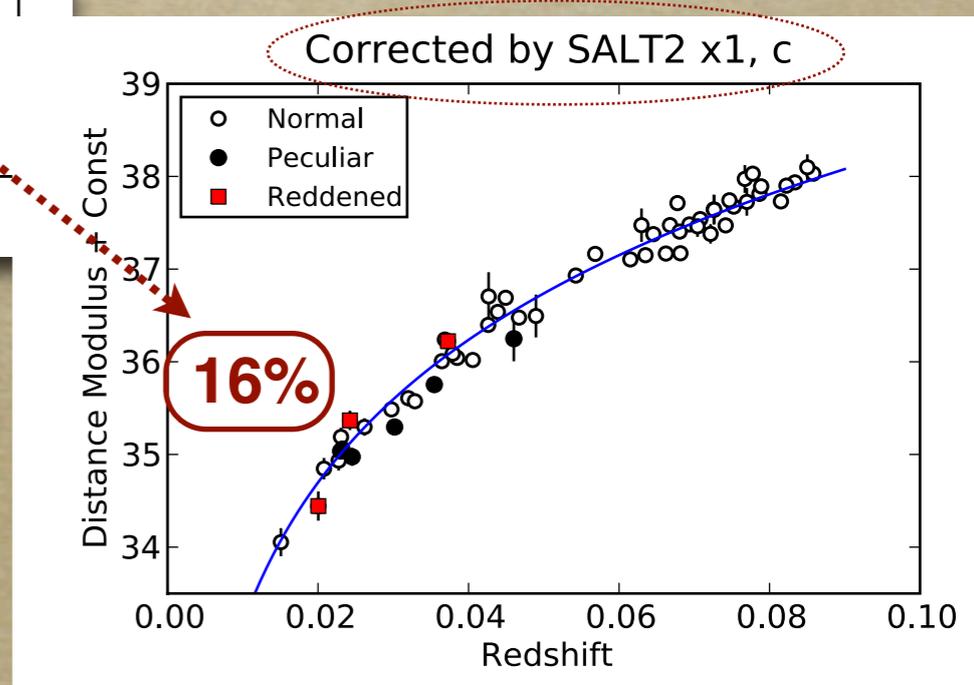
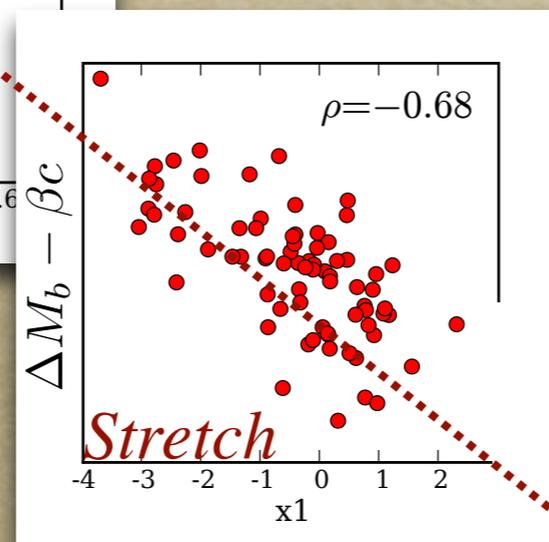
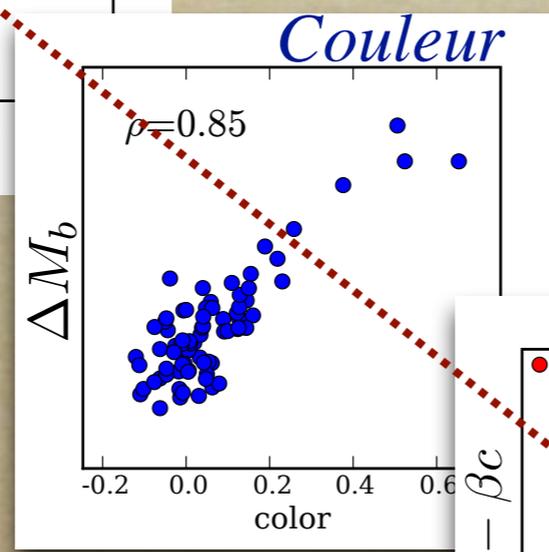
$\Delta M_b \longrightarrow$ Écart à la courbe de Hubble

Corrections classiques:

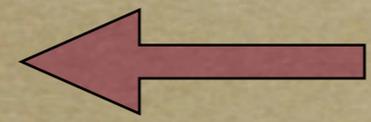
$$\Delta M_b^{corr} = \Delta M_b + \alpha x_1 - \beta c$$

α et β optimisés pour réduire la dispersion

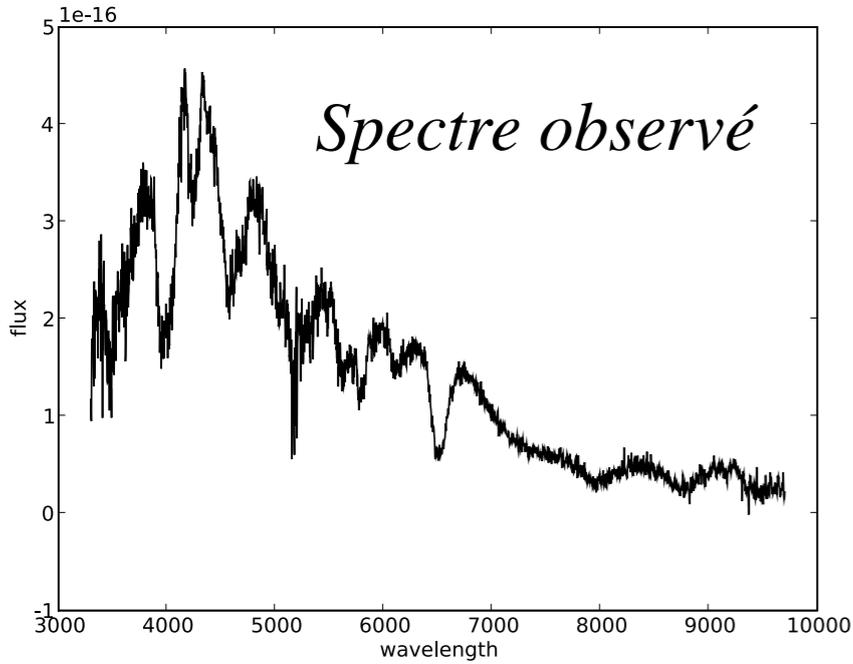
$\mu_B = m - M$
Module de distance



- ❖ Réduction de la dispersion
- ❖ Peut on mieux faire avec les indicateurs spectraux?
- ❖ Quelles sont les corrélations entre tous ces paramètres?

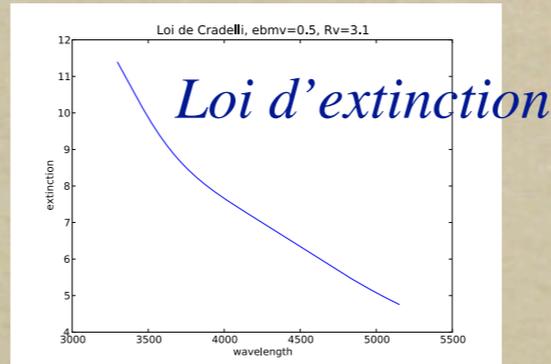


Analyse spectrale



1

×



1

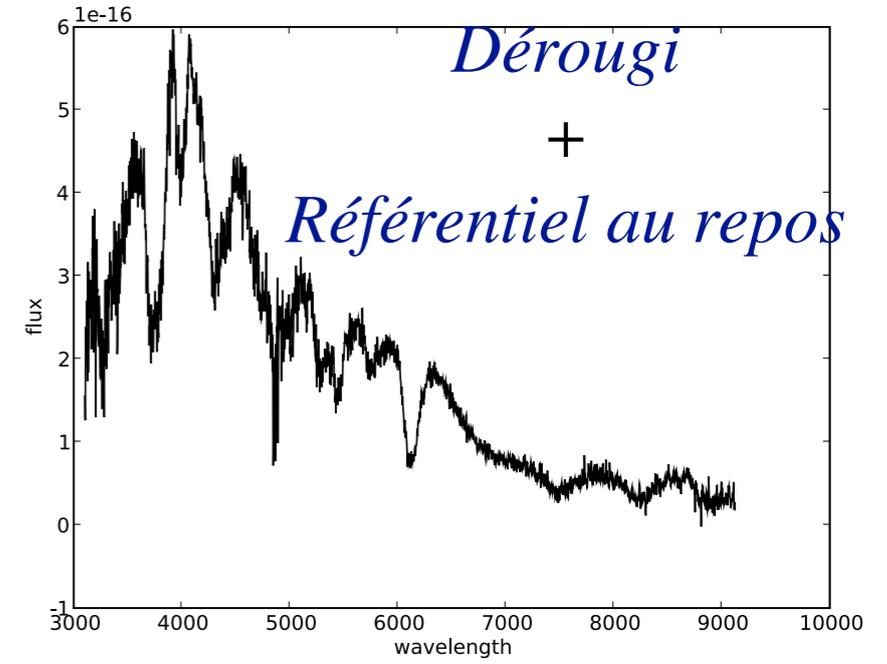


2

Référentiel au repos

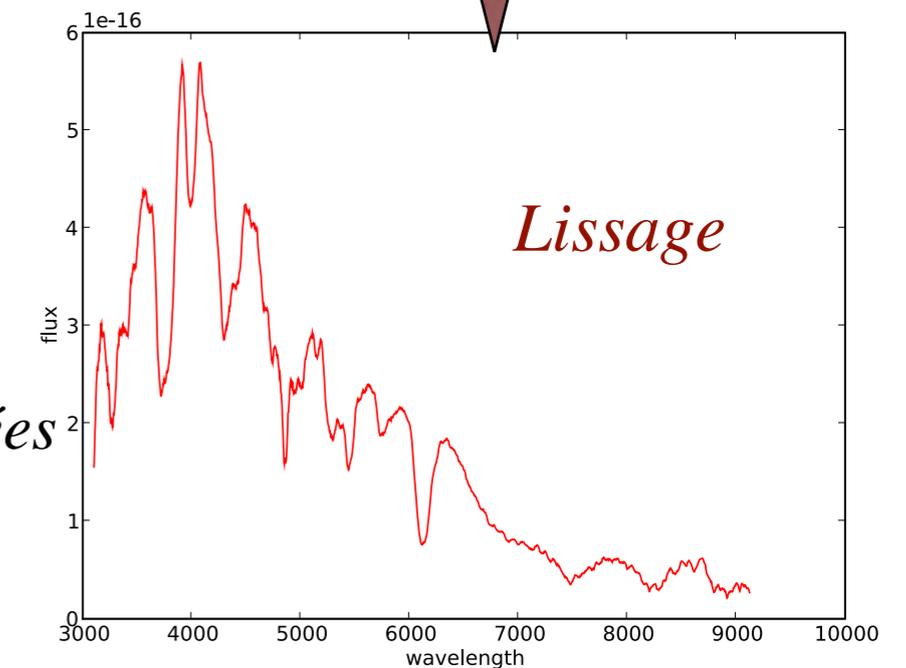
$$F \longrightarrow F \times (1 + z)^2$$

$$\lambda \longrightarrow \lambda / (1 + z)$$



2

Savitzky-Golay



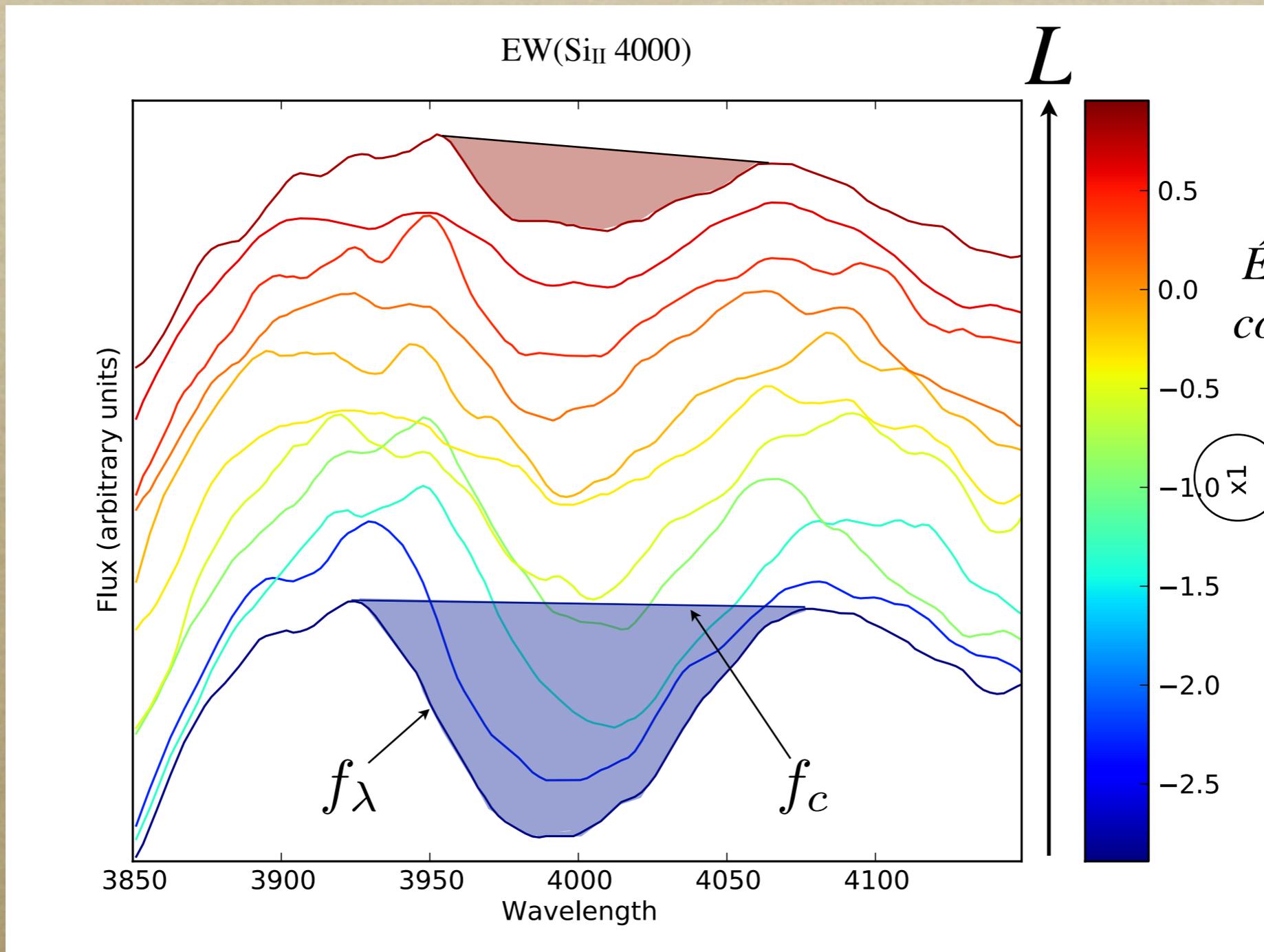
3



Mesures automatisées

- ❖ *Mesure d'indicateurs spectraux*
- ❖ *Comparaison aux paramètres de la SN:*
 - ❖ *Stretch (x1)*
 - ❖ *Couleur (c)*
 - ❖ *Module de distance*

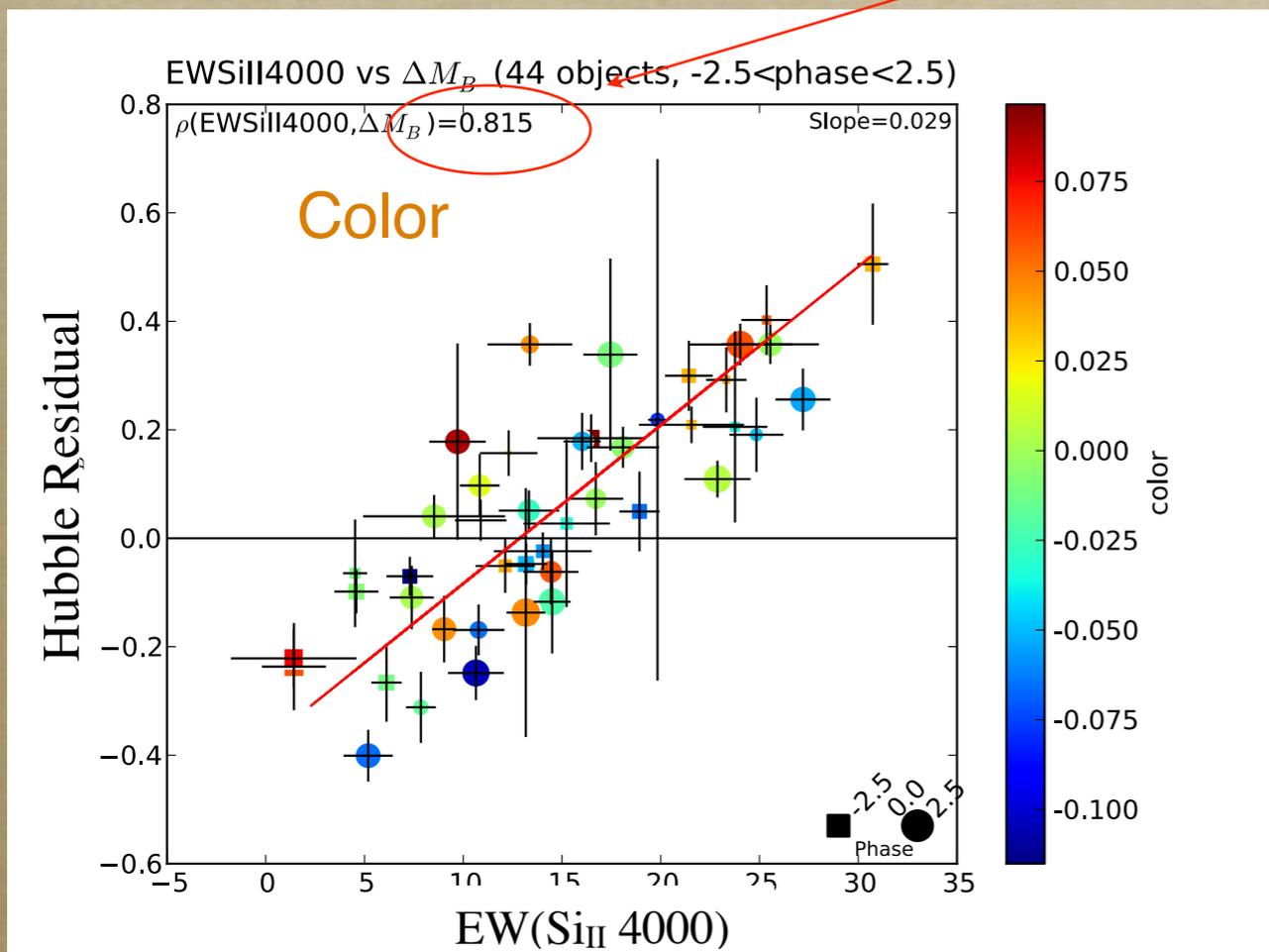
Évolution des spectres



$$EW = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{f_\lambda(\lambda_i)}{f_c(\lambda_i)} \right) \Delta\lambda_i$$

Corrélations entre paramètres

	ΔM_B	x1	color
$EW_{SiII}(4000)$	0.33	-0.74	-0.02
$EW_{SiII}(4000)^{cut}$	0.82	-0.83	0.02



Coupure en couleur appliquée sur l'échantillon (couleur < 0.1); 44/58 SNe ont passé la coupure

- ✦ Corrélations renseignent sur le **pouvoir de standardisation** des indicateurs
- ✦ $EW(Si_{II}4000)$ **indépendant de l'absorption** (c) de la galaxie hôte et corrélé au stretch (intrinsèque)
- ✦ Coupure en couleur pour s'affranchir des effets liés à l'absorption de la galaxie hôte

Corrections au diagramme de Hubble

Standardisation par l'analyse spectrale

Corrections spectrales appliquées de la même manière que pour le stretch et la couleur

Correction	Coupure en couleur					
	None	c & x1	c & EWSiII 4000	None	c & x1	c & EWSiII 4000
RMS	0.41	0.16	0.16	0.22	0.15	0.12

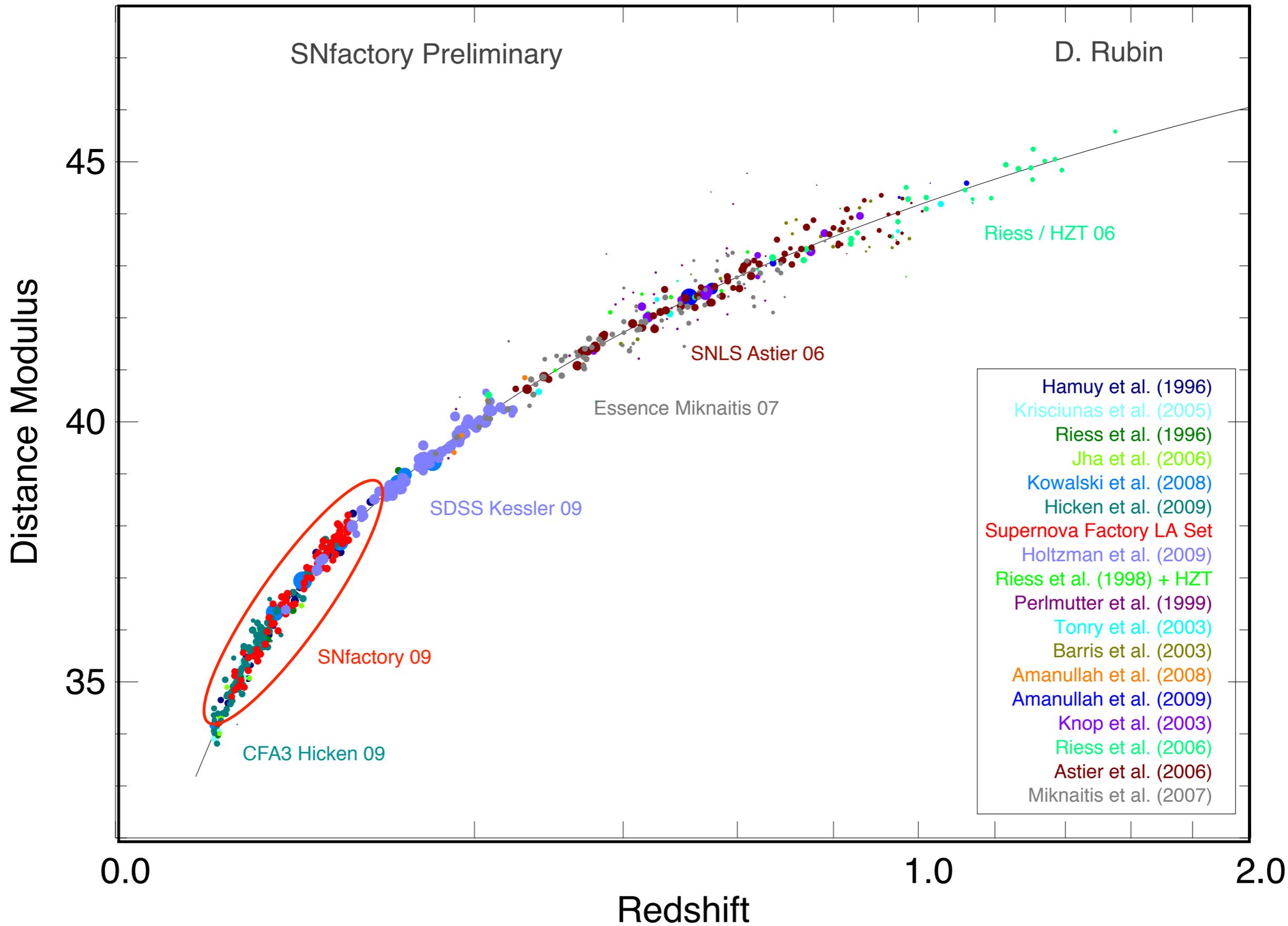
Pouvoir de standardisation égal à celui du stretch

Meilleure correction avec coupure en couleur : meilleure description de la partie intrinsèque de la variabilité

Conclusion

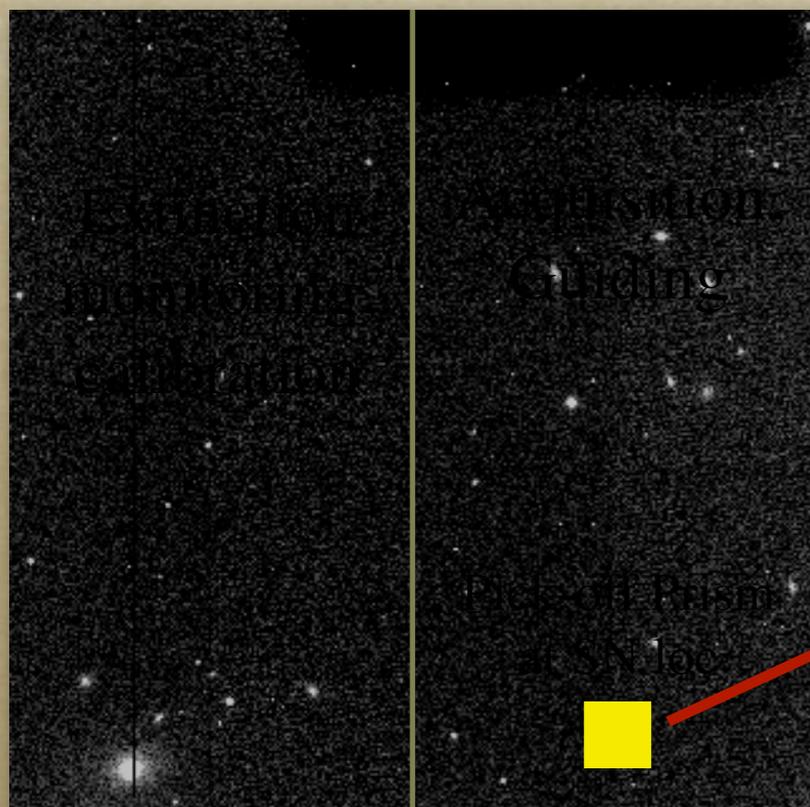
EWSiII4000, excellent candidat pour:

- ♦ estimer la partie intrinsèque de la variabilité de la SNIa
- ♦ remplacer le paramètre x1 pour la standardisation



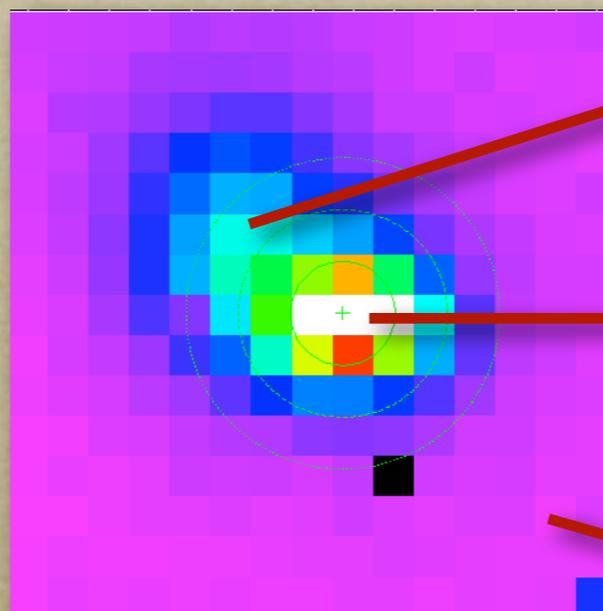
SuperNova Integral Field Spectrometer (SNIFS)

Photometric Channel



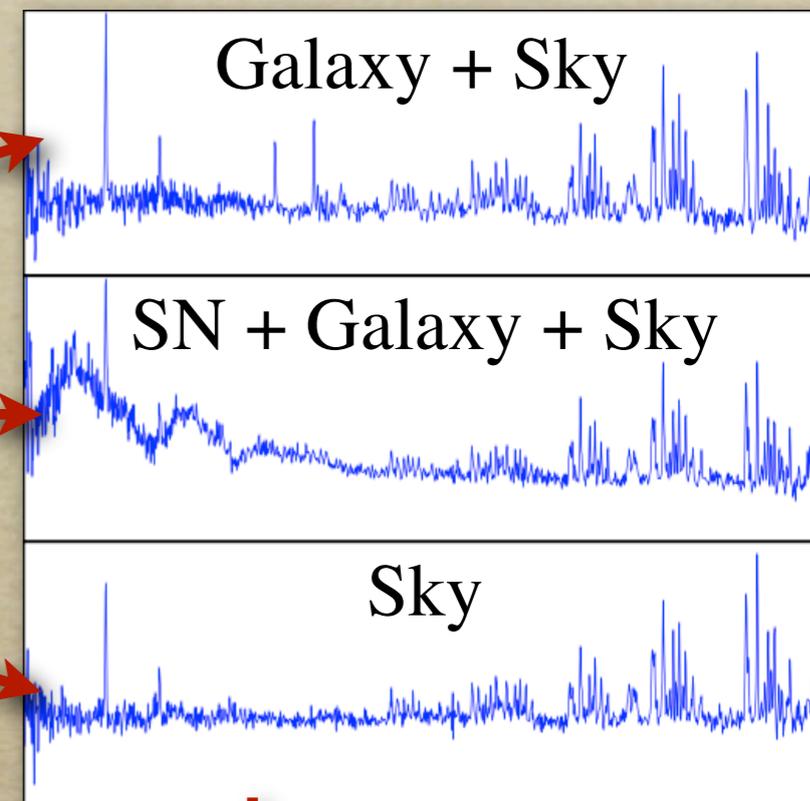
9.4' x 9.4' FOV; 0.14"/pix

Microlens array to
two channel spectrograph
15x15 = 225 spectra

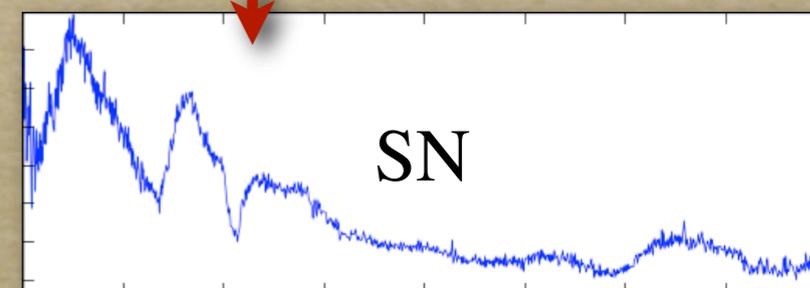


6" x 6" FOV; 0.4"/spaxel

R channel:



Hard work...



Every obs: flux calibrated spectra,
320 – 520, 510 – 1000 nm coverage

On UH 2.2m on Mauna Kea;
SNfactory every 2-3 nights for ~9 months/year