

The Nearby Supernova Factory

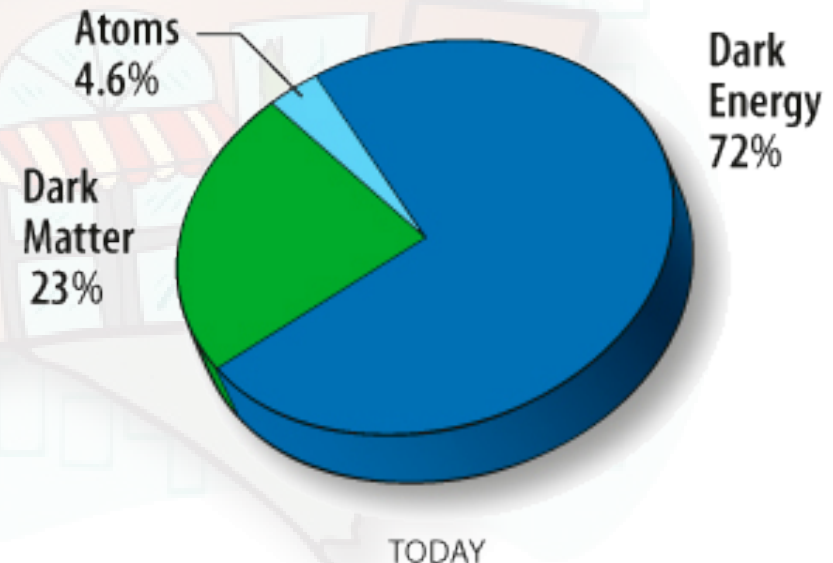


Yannick Copin
Institut de physique nucléaire de Lyon
Université Lyon 1

Très bref rappel de cosmologie

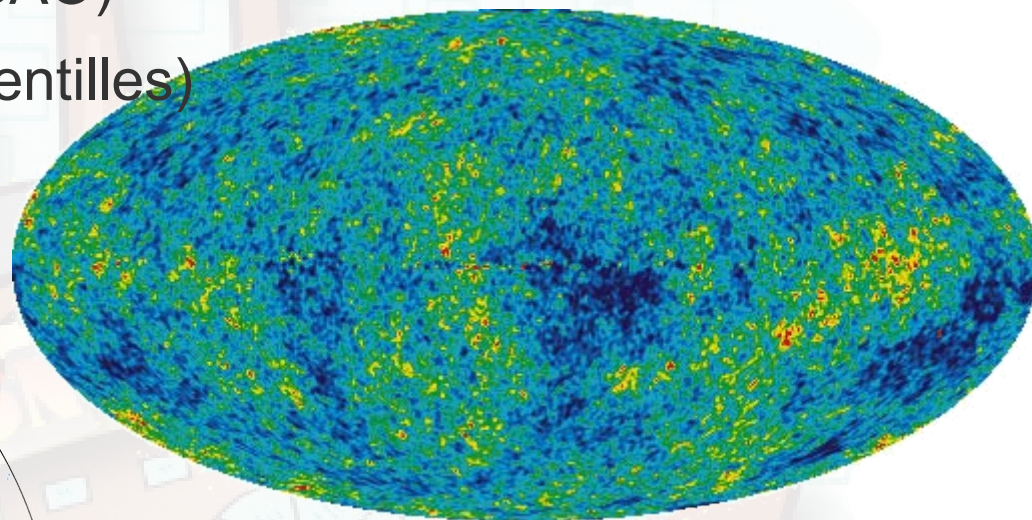
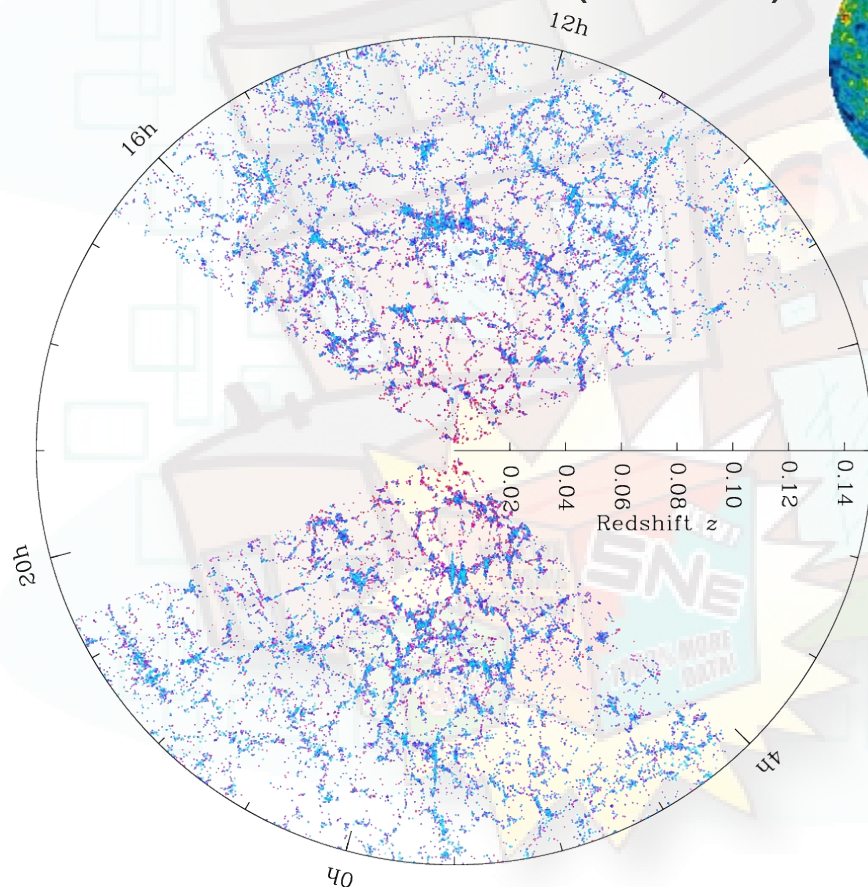
$$\Omega_{\text{total}} \hat{=} \sum_{\substack{\text{composantes } i \\ (M, \Lambda, \gamma, \nu, \dots)}} \Omega_i = 1 + \frac{k c^2}{H_0^2} \hat{=} 1 - \Omega_k$$

- Les équations de Friedmann relient l'expansion de l'Univers à son contenu énergétique
- Paramètres cosmologiques
 - Densité en énergie Ω_i et équation d'état $w_i = P/\rho$ des différents composants
 - Matière chaude/froide, constante cosmologique/énergie du vide, radiations, etc.
 - Courbure de l'univers k
 - $K = 0$: $\rho = \rho_c$, univers euclidien
 - $K = \pm 1$: $\rho \gtrless \rho_c$, univers fermé/ouvert



La cosmologie observationnelle

- Trois grands axes, basés sur trois « observables »
 - ▶ Corrélations angulaires (CMB, BAO)
 - ▶ Les grandes structures (amas, lentilles)
 - ▶ Chandelles standards (**SNe Ia**)



Les supernovæ de type Ia

- Deux types de supernovæ

- SNe gravitationnelles (II, Ib/c)

- Effondrement d'une étoile massive
- Grande diversité en luminosité

- ## ► SNe thermonucléaires (Ia)

- Explosion thermonucléaire d'(au moins) une naine blanche C+O approchant la masse critique de Chandrasekhar

- Relative homogénéité

- $M_B \sim -19.3 \pm 0.4$ au max de luminosité

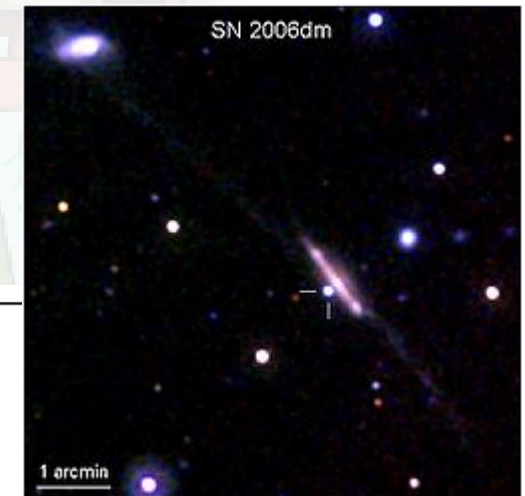
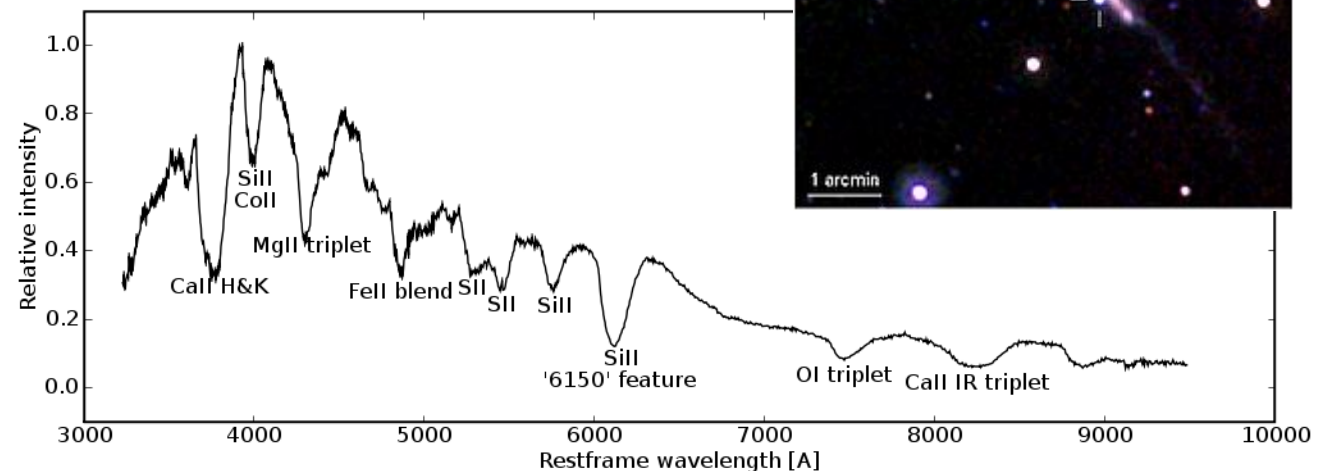
- Visibles à des distances cosmologiques

- Identification spectroscopique

- ▶ SN II : raies d'H

- SN Ia : pas d'H, raie de SiII

- Mais il existe quelques objets « exotiques »



SNe Ia, chandelles standard

- **Quasi chandelles standard**

- ▶ Variabilité brute ~40%
- ▶ Variabilité intrinsèque
 - Composition du progéniteur
 - Conditions d'allumage de la réaction
- ▶ Variabilité extrinsèque
 - Absorption de la galaxie hôte
 - Enveloppe circum-stellaire ?

- **Étalonnage empirique**

- ▶ Couleur (absorption)
 - « **Brighter – bluer** »
- ▶ *Stretch* (masse de Ni)
 - « **Brighter – slower** »
- ▶ Variabilité réduite à ~15%

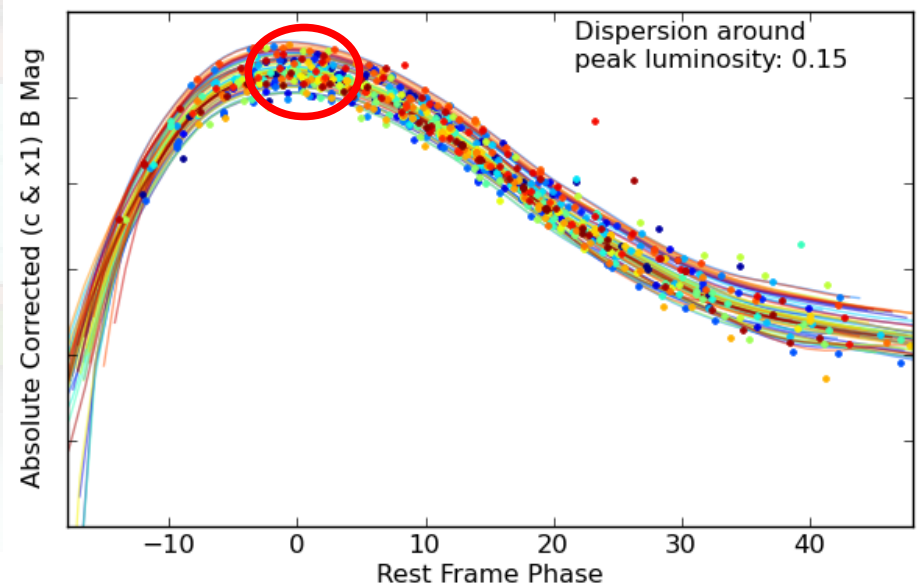
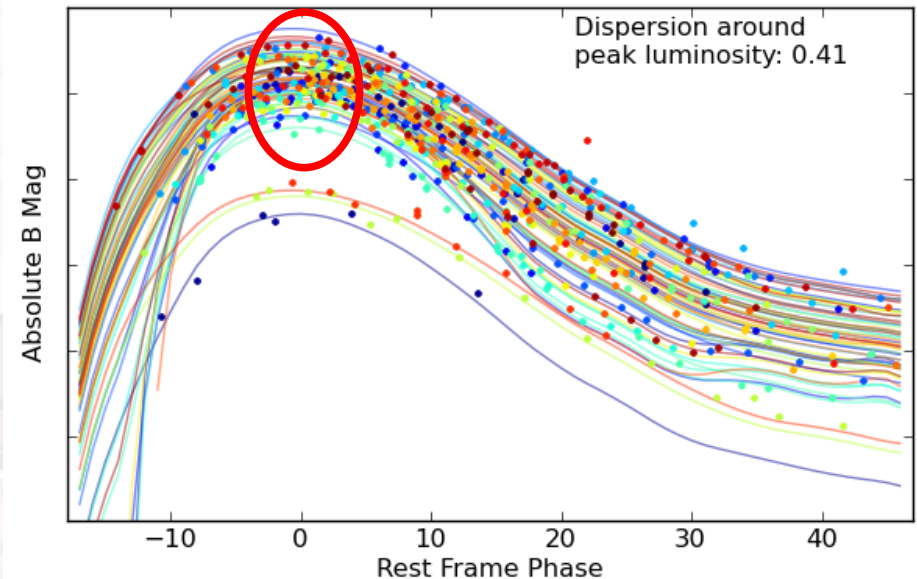


Diagramme de Hubble des SNe Ia

• Diagramme de Hubble

► Distance de luminosité

- $\text{flux} = L_{\text{SN}} / 4\pi d_L^2$
- Mesure photométrique

► *Redshift*

- $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$
- Mesure spectroscopique

► Contraintes sur les paramètres cosmologiques

- $\Omega_\Lambda, \Omega_M, w$, etc.

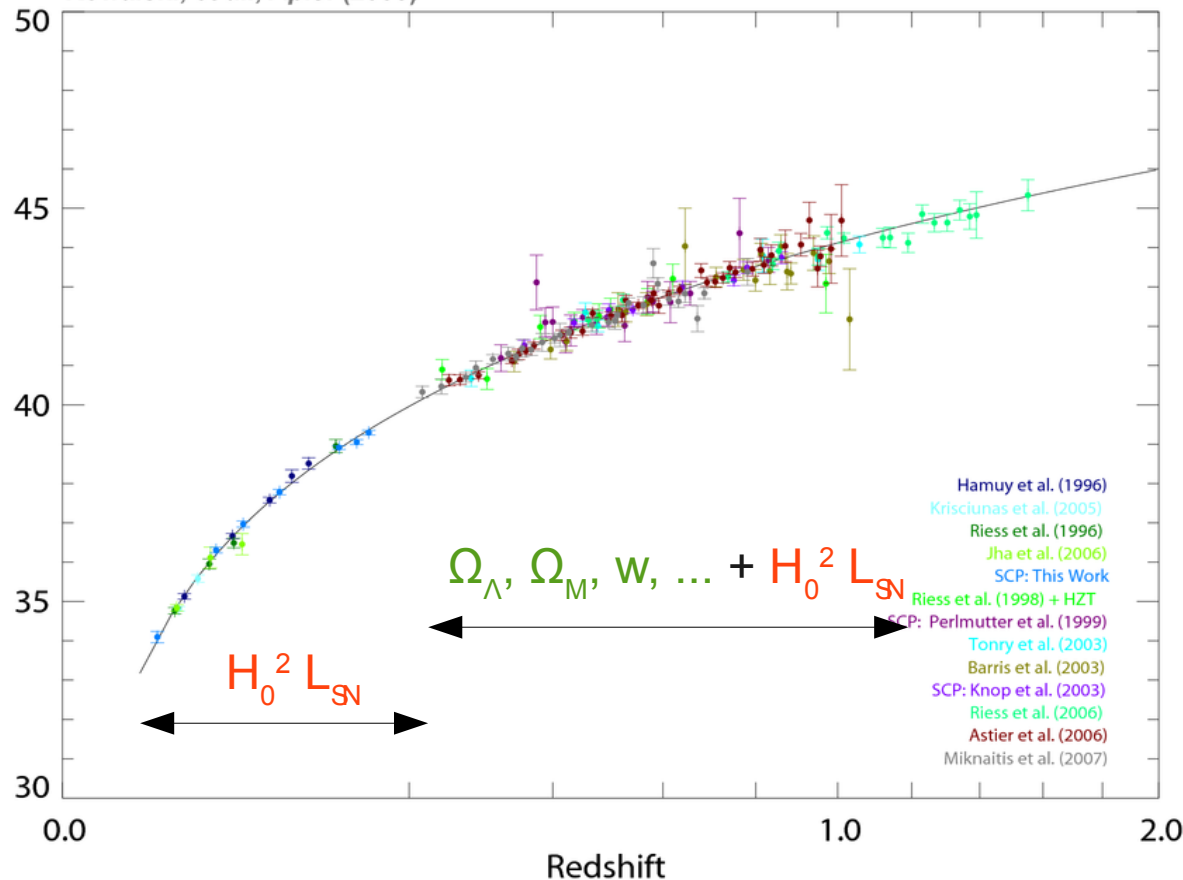
► Paramètre de « nuisance »

- $H_0^2 \times L_{\text{SN}}$

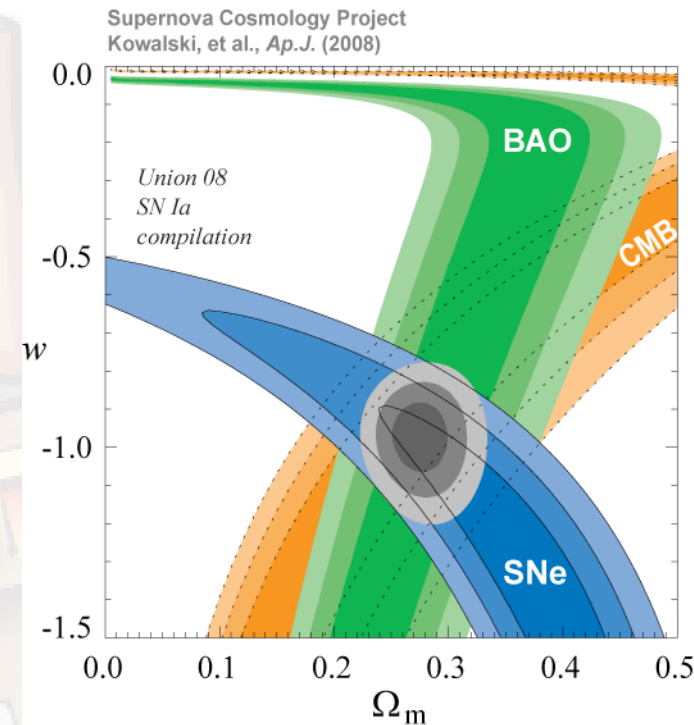
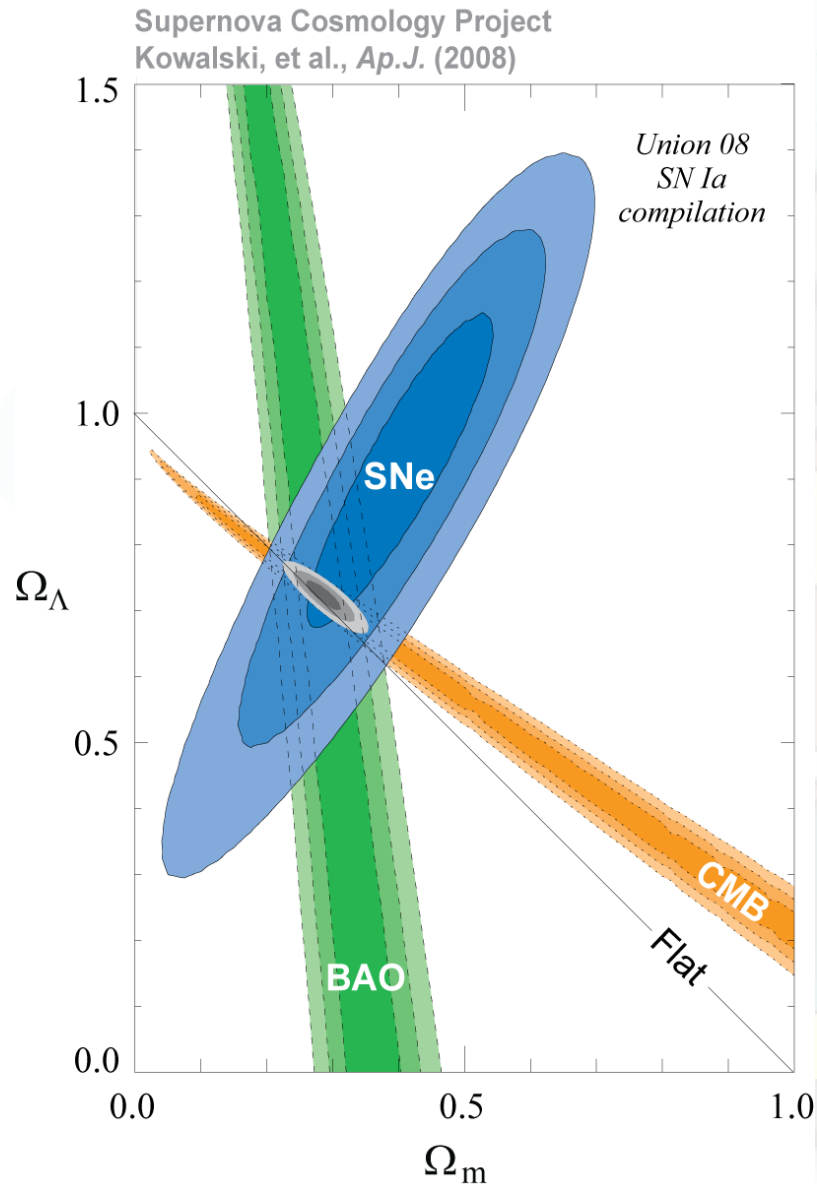
► Les techniques $z \gtrsim \sim 0.2$ sont différentes

- Échantillons « distincts »

Supernova Cosmology Project
Kowalski, et al., *Ap.J.* (2008)



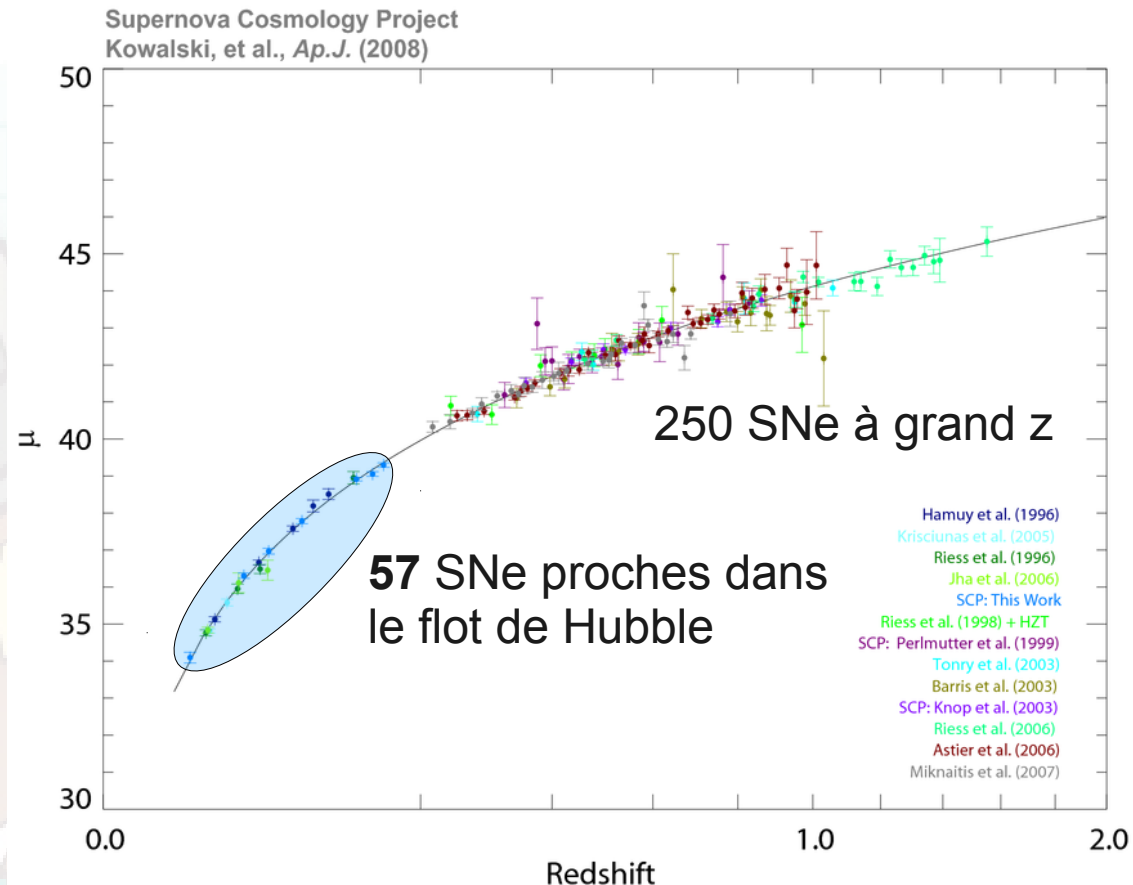
Modèle de concordance



- $\Omega_T \sim 1.0 \pm 0.02$ (Komatsu et al.09)
 - Univers euclidien
- $\Omega_\Lambda \sim 0.73 \pm 0.01$, $\Omega_M \sim 0.27 \pm 0.01$
 - Dominé par l'énergie sombre
- $w \sim -1.0 \pm 0.1$
 - Constante cosmologique

Importance des SNe la proches

- Les SNe proches sont **nécessaires** à la cosmologie
 - Bras de levier bas z /grand z
 - Les erreurs systématiques sont sensibles à l'échantillon proche
- Importance de la spectrophotométrie
 - Production de spectres type
 - Sous-classification
 - Couleurs intrinsèques
 - Indicateurs spectraux
 - Physique des SNe



« We don't need more SNe,
we need better SNe »

Importance des SNe à $z < 0.1$

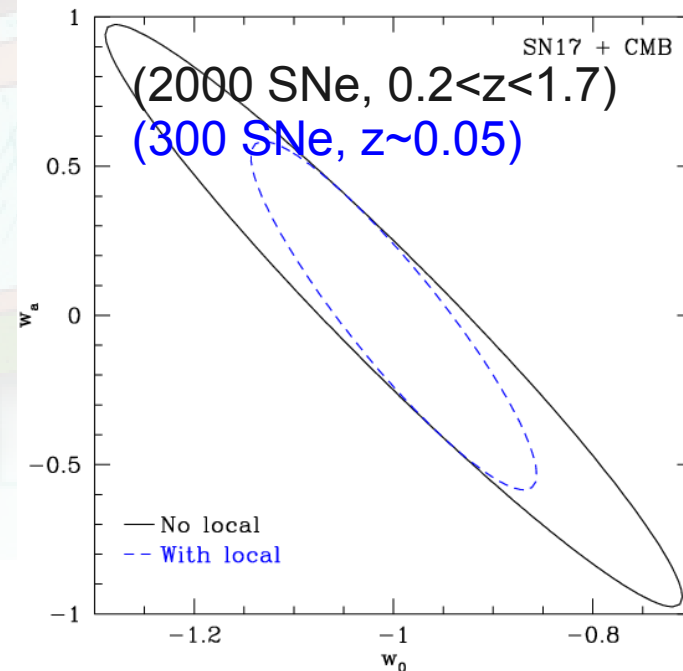
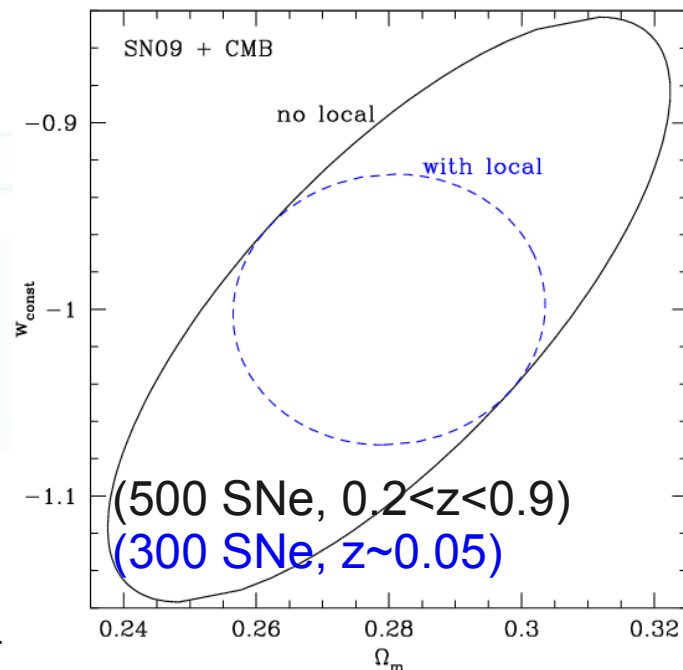
- Linder (2006)

- ▶ *Redshift* optimal ~ 0.05 (flot de Hubble)

- En deçà : impact des vitesses propres
 - Au delà : impact de la cosmologie, mesures

- ▶ Échantillon optimal

- 150-500 SNe pour expérience type SNLS ($z < 0.9$)
 - 300-900 SNe pour expérience type SNAP ($z < 1.7$)



Exigences observationnelles

• Détection des SNe

- ▶ Dans le flot de Hubble
 - $0.03 < z < 0.08$
 - Sondage grand champ
- ▶ Recherche non biaisée
 - Contrôle des effets de sélection
 - Automatisation maximale
- ▶ SNe thermonucléaires
 - Identification spectroscopique requise

• Observations des SNe

- ▶ **Suivi spectro-photométrique**
- ▶ Idéalement de -15 à +45 jours tous les ~3 jours
 - Instrument à demeure
 - Observations automatisées
- ▶ Spectroscopie
 - Domaine optique étendu
 - 320–1000 nm
 - Résolution $\lambda/\Delta\lambda \sim 2000$
- ▶ Précision photométrique
 - Spectrographie 3D
 - Suivi de l'extinction atmosphérique effective



The Nearby SuperNova Factory

The Nearby Supernova Factory



- Dates clés de SNfactory

- ▶ 2000: début du projet
- ▶ 2001: MoU France-Berkeley
- ▶ 2004: SNIFS sur le ciel
- ▶ 2005-2008: programme de recherche
- ▶ 12/2009: fin du suivi



LPNHE
Laboratoire de
physique nucléaire
et des hautes énergies



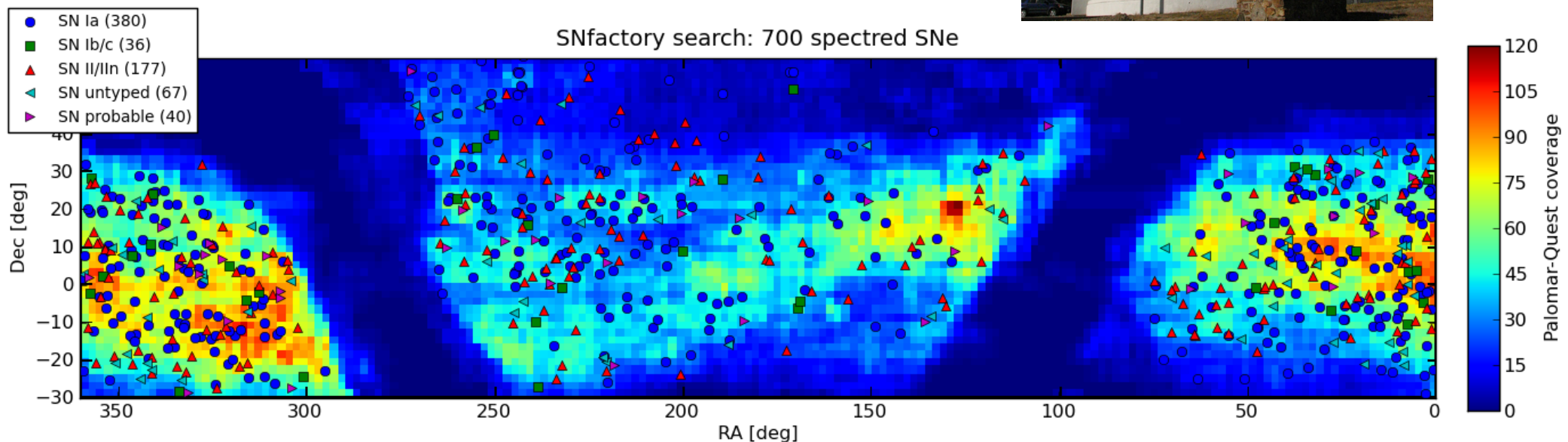
+ Charling Tao

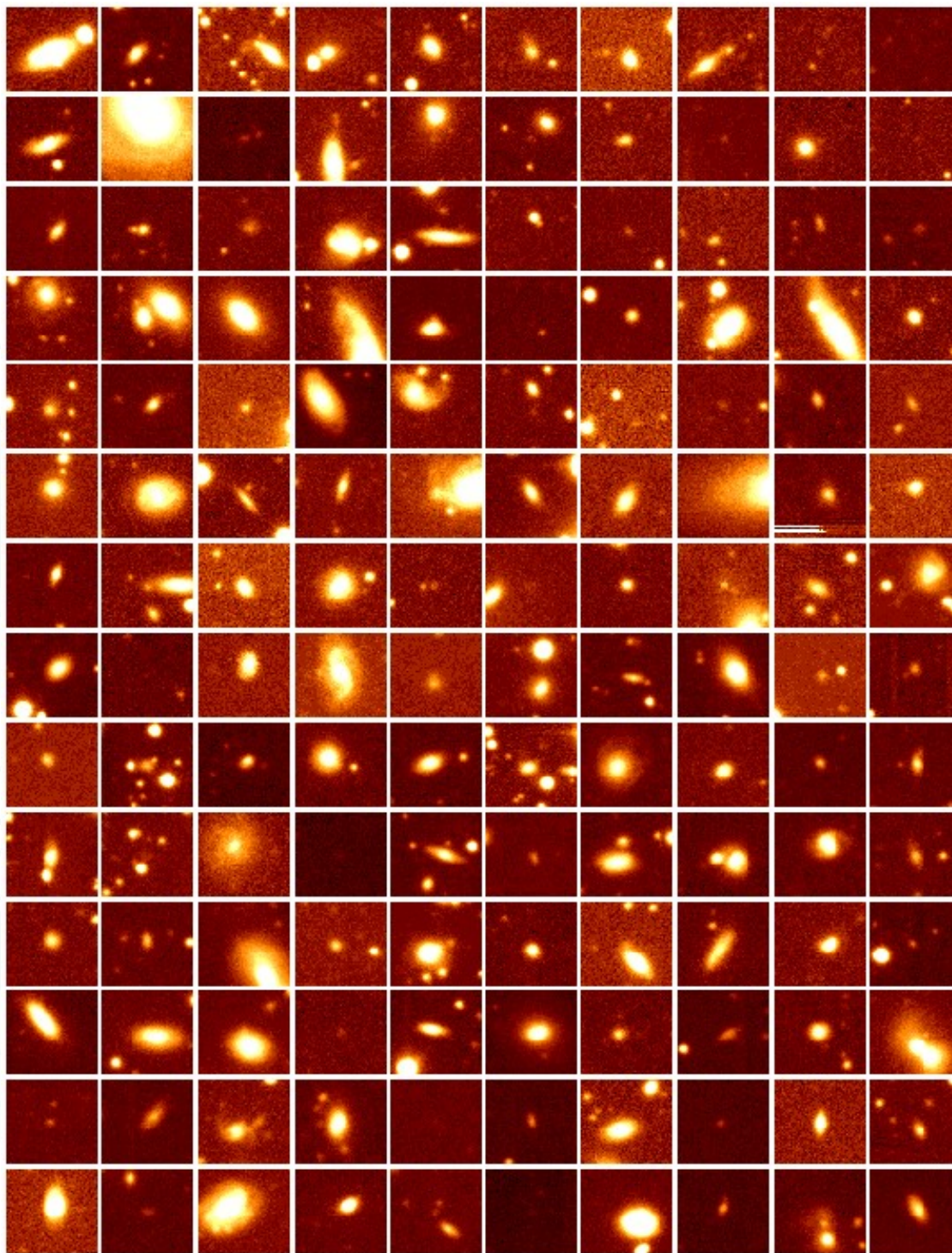
The Nearby Supernova Factory

- Accroître l'échantillon local de SNe dans le flot de Hubble
 - $0.03 < z < 0.08$
 - Recherche grand champ
 - Acquérir des séries temporelles spectrophotométriques
 - Spectrographie 3D
 - Observations semi-automatiques
 - De -15 à +45 j
 - Tous les 2-3 jours
1. Recherche des SNe
 - Palomar 1,2 m + Quest II
 - Non biaisée
 2. Suivi spectro-photométrique
 - UH 2,2 m + SNIFS (3D)
 - Typage et sélection
 - Suivi temporel
 3. Analyse
 - Séries temporelles
 - Photométrie synthétique

Programme de recherche QUEST

- Sondage Palomar-QUEST (2004-08)
 - Télescope Palomar Oschin 1.2 m
 - 112 CCD (161 Mpx), 9.4 deg²
 - 350-850 deg²/nuit, profondeur 20.5 mag.
 - 30 000 images, ~50 Gb par nuit
 - Couverture 2π
- Plus de 1000 candidats en 28 mois



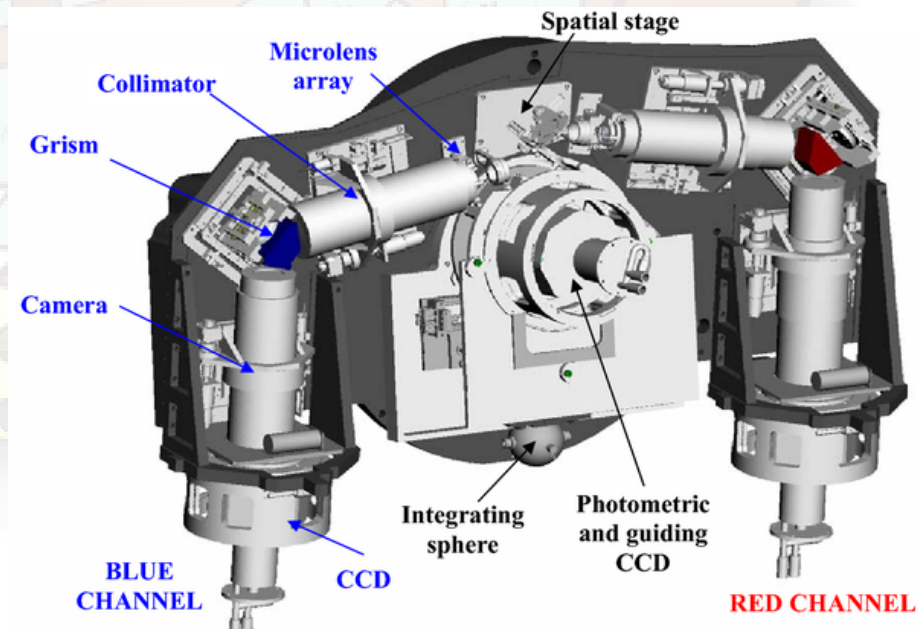
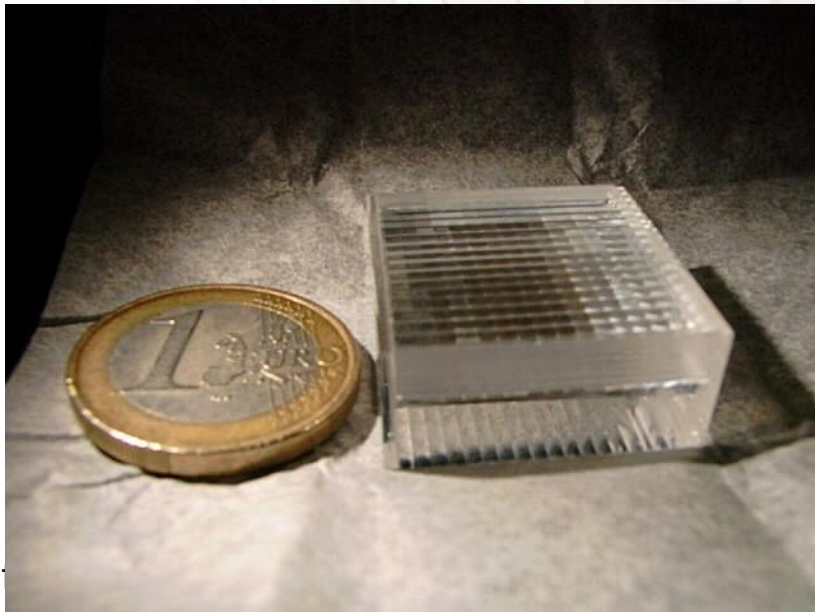


Mosaic of thumbnails centered on the locations of each of SNe Ia discovered by the SNfactory (~30 images coadded).

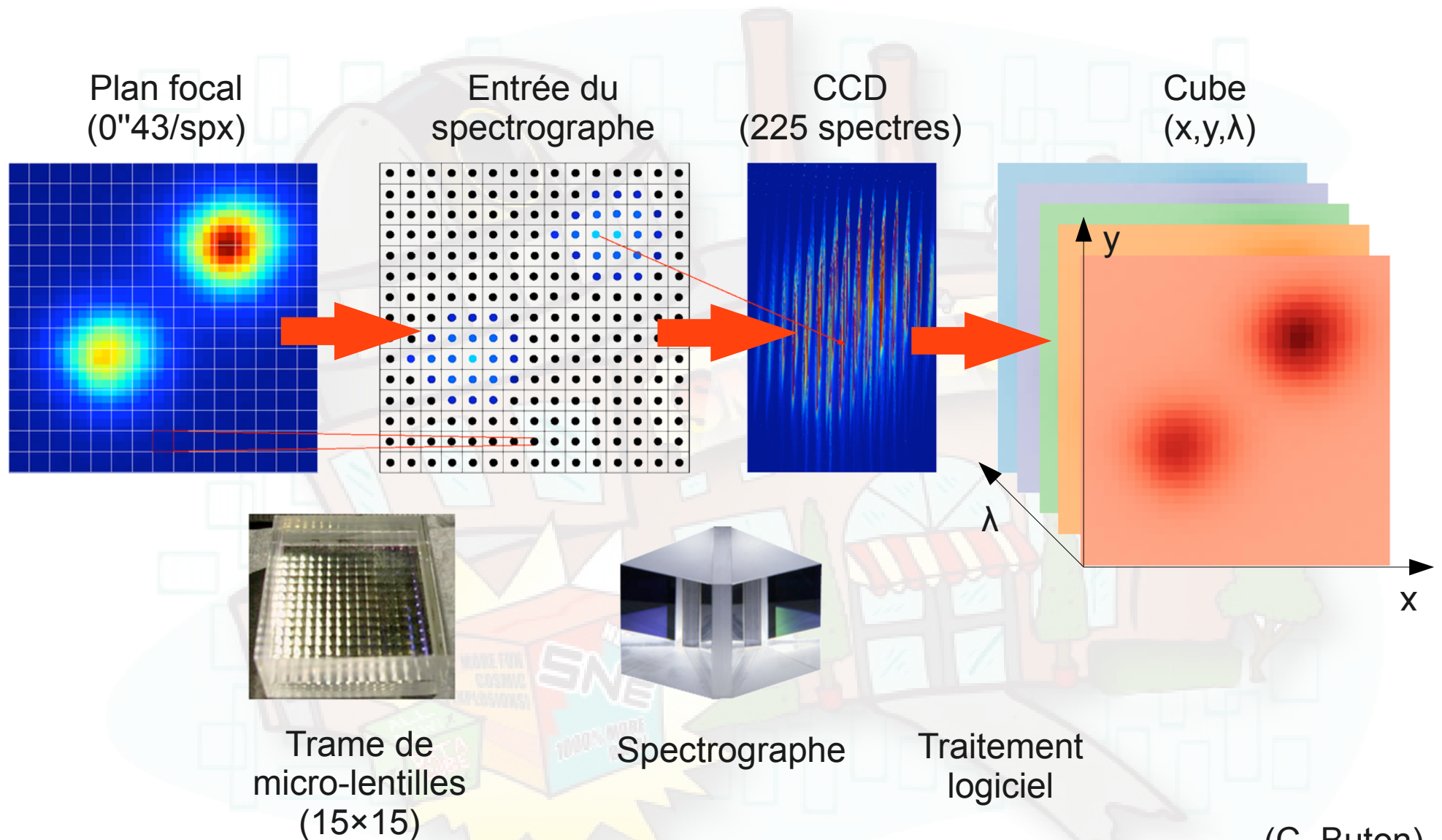
210 SNe published (ATELs), search results available from snfactory.lbl.gov (open access honor system)

SuperNova Integral Field Spectrograph

- Spectrographe 3D à trame de micro-lentilles
 - ▶ Conçu et réalisé à Lyon
 - CRAL, IPNL
 - ▶ 15×15 spx de $0''.43$
 - Champ de $6''.5 \times 6''.5$
 - ▶ 2 canaux spectroscopiques
 - 320–520 (B) et 510–1000 nm (R)
- Voie photométrique
 - ▶ Suivi de l'extinction atmosphérique effective
 - ▶ Acquisition et guidage
- Monté sur UH 2,2 m
 - ▶ Contrôlé à distance
 - ▶ Toutes les 2-3 nuits (2004-09)

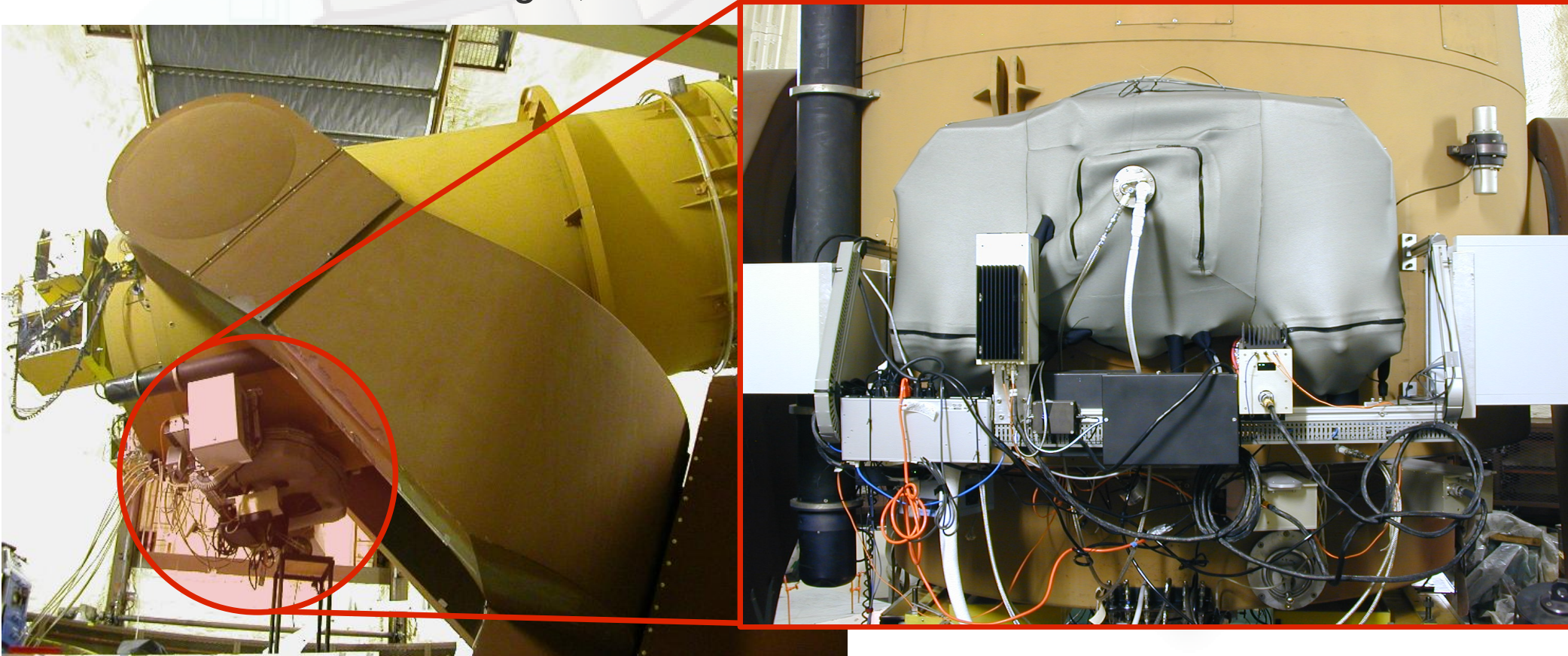


Principe optique d'un IFS « à la Tigre »



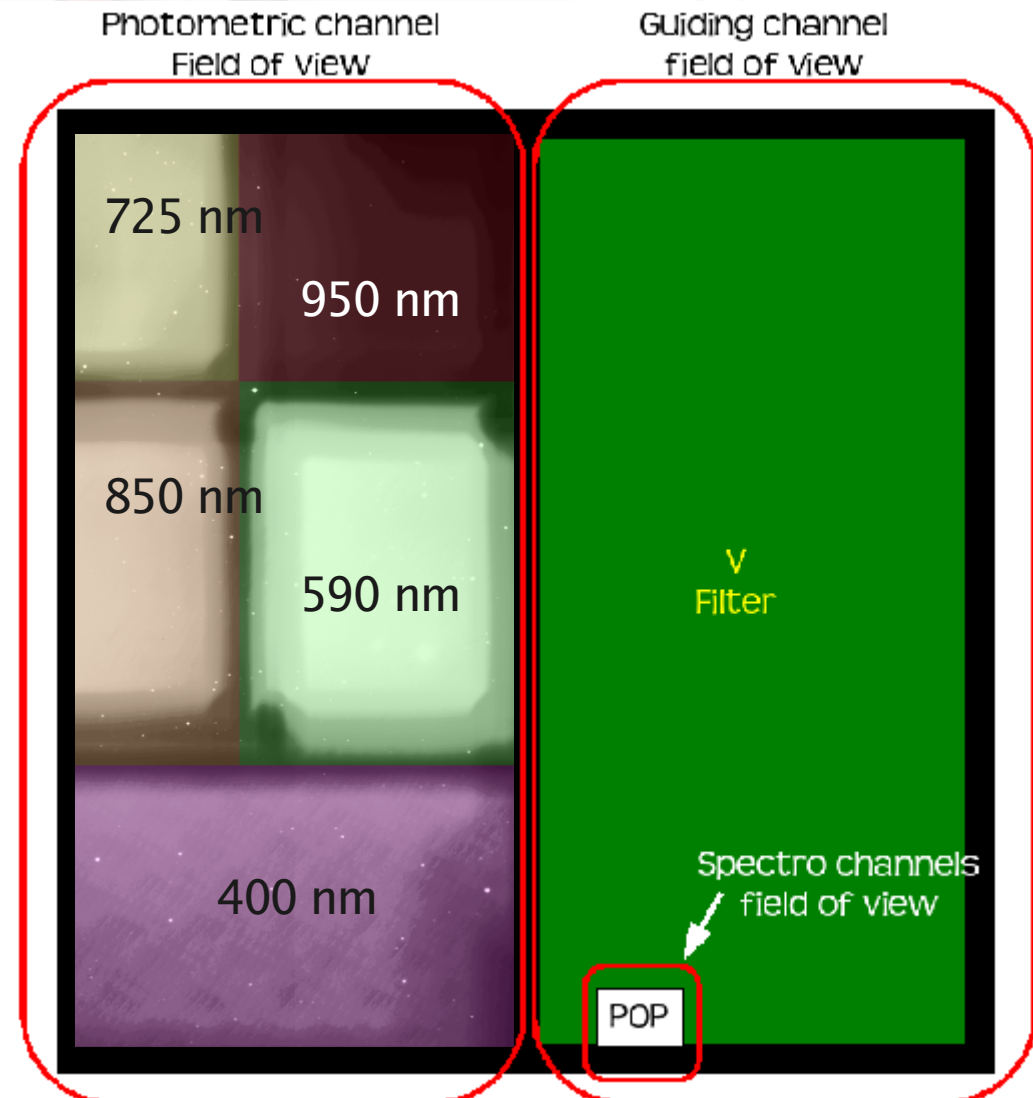
SNIFS sur le télescope UH 2.2 m

- Monté à demeure sur le port Cassegrain replié
 - D'abord $\sim 3 \times \frac{1}{2}$ -nuits/semaine, nuits complètes depuis mai 2006
- Contrôle à distance semi-automatique
 - « *Queue scheduling* », salle de contrôle virtuelle

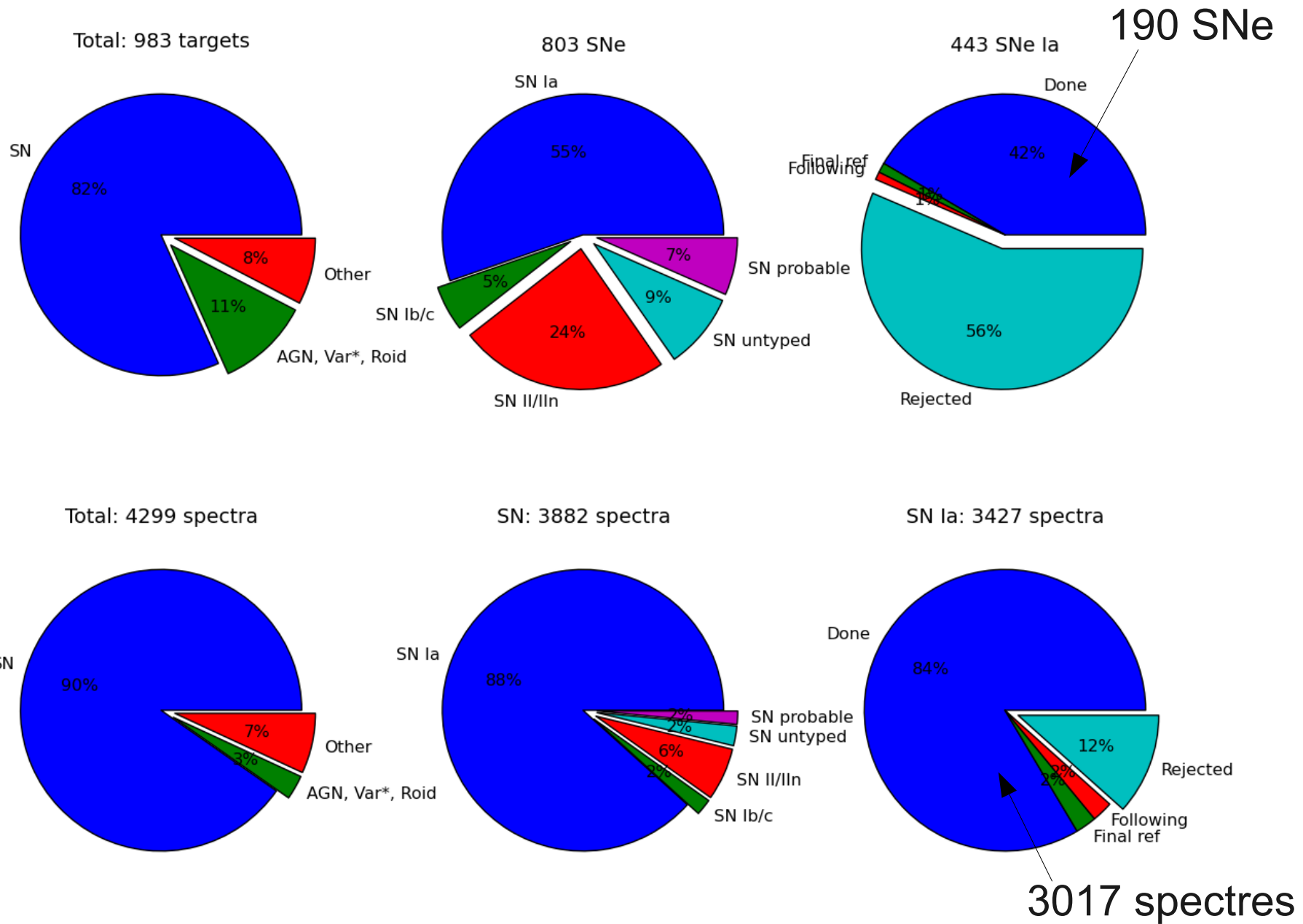


Voies de guidage et photométrie

- $2 \times 4'8 \times 9'6$
- Acquisition de la cible
- [Photométrie UBVRIZ]
- Durant la pose spectro:
 - ▶ À dr. : voie de guidage
 - ▶ À g. : multi-filtre pour suivi de l'extinction atmosphérique effective



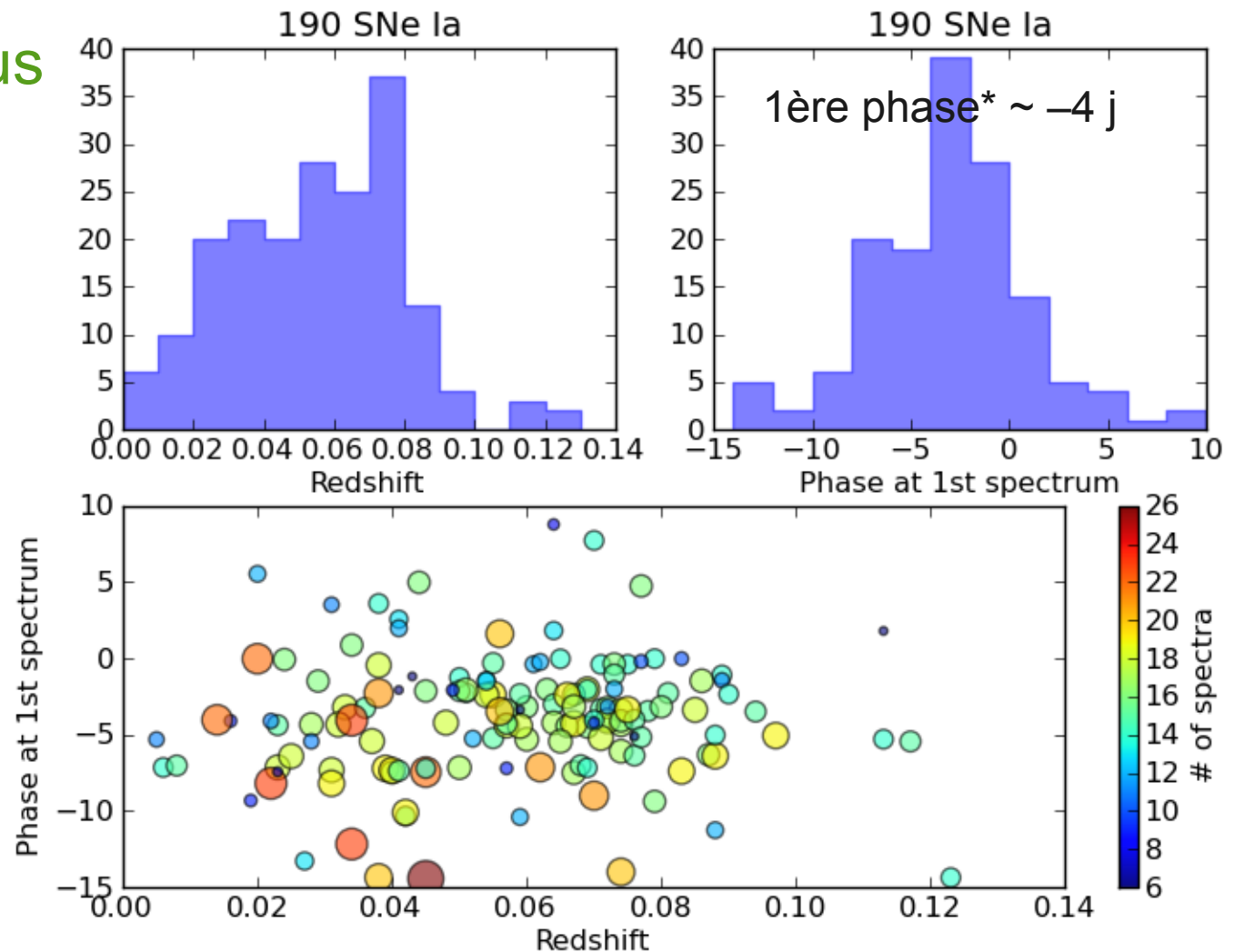
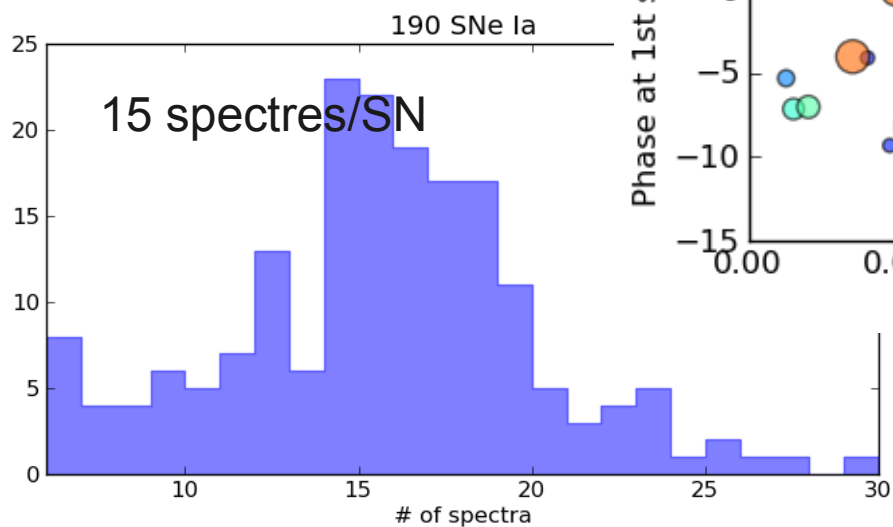
Les observations SNIFS



Échantillon SNfactory

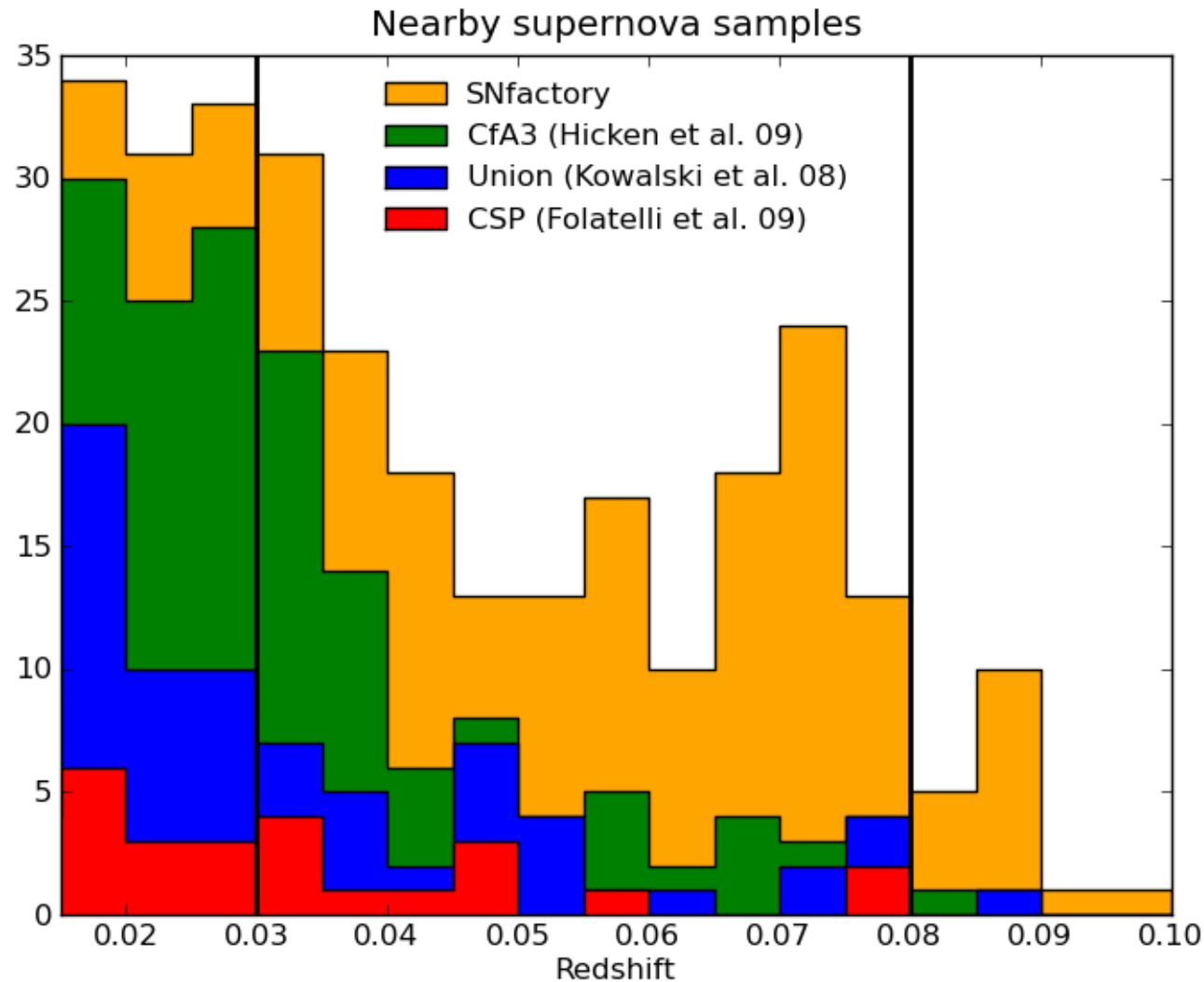
- 190 SNe avec plus de 5 spectres

- ▶ 3017 spectres
- ▶ 15 spectres/SN (médiane)
- ▶ 166 SNe avec >10 spectres



* Phase SNID du 1er spectre

Les échantillons de SN proches





Éléments de spectro-photométrie

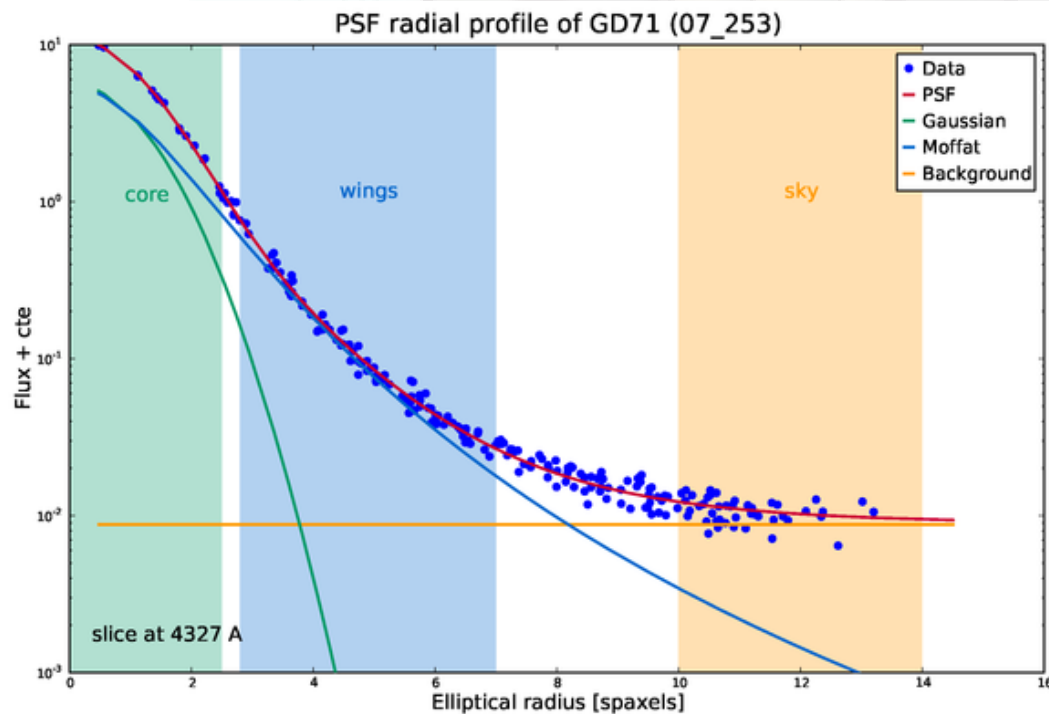
Étalonnage spectro-photométrique

- L'objectif est d'atteindre une précision à l'échelle du **pour-cent** sur l'ensemble de la courbe de lumière de la SN
 - ▶ ...malgré un instrument et un traitement des données complexe
 - ▶ ...malgré la lune, les nuages, l'atmosphère, etc.
- Un domaine (~) maîtrisé en photométrie, mais peu abordé en spectrographie des supernovæ
 - ▶ **Extraction de source ponctuelle**
 - Seule la spectro 3D permet une précision spectro-photométrique
 - ▶ **Caractérisation de la transmission atmosphérique effective**
 - Au delà de simples corrections de couleurs
 - Y compris en nuit non-photométrique

Extraction des sources ponctuelles

- Photométrie de PSF

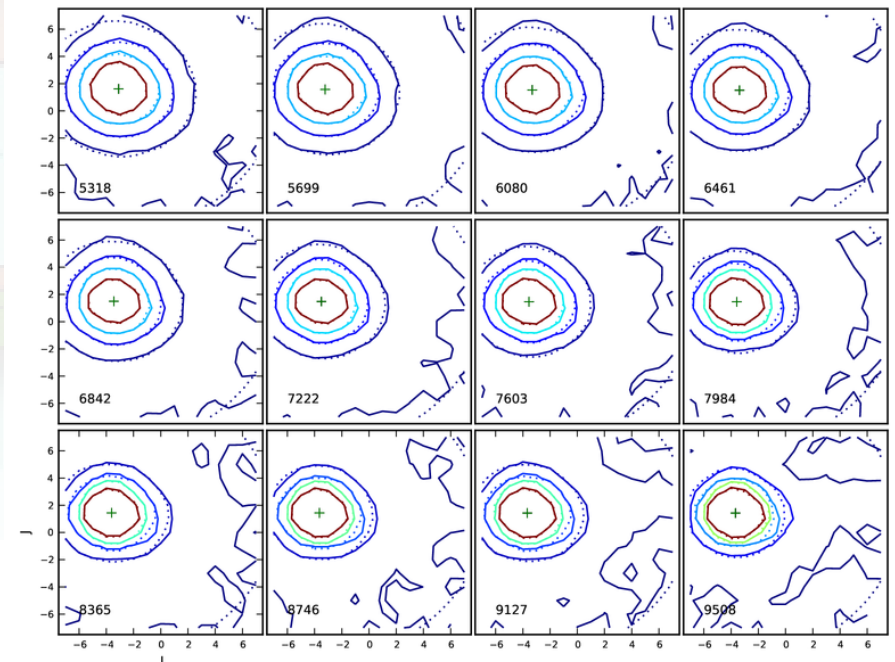
- ▶ Le champ de vue ($6''5 \times 6''5$) est trop petit pour une photométrie d'ouverture précise



- Modèle semi-empirique

- ▶ Kolmogorov ne suffit pas
- ▶ 2 paramètres de forme
 - *Seeing* & focalisation/guidage
- ▶ Modélisation chromatique
 - ADR, $seeing(\lambda)$

- Précision en flux : 0,7/1,5%

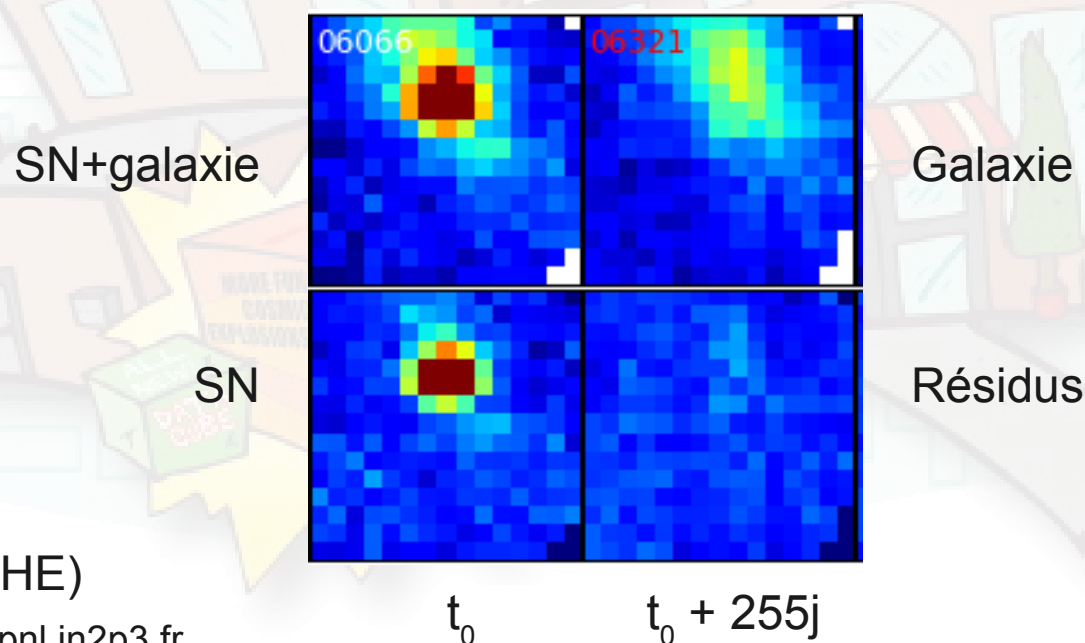


C. Buton (thèse 2009)

SNfactory – y.copin@ipnl.in2p3.fr

Soustraction du fond galactique

- La photométrie de PSF ne s'applique qu'à des sources **sans fond structuré** : étoiles, SNe sans galaxie-hôte visible
- Pour les SNe avec galaxie : **soustraction du fond nécessaire**
 - ▶ Utilisation d'une pose de référence (~ 1 an après)
 - Alignement et adaptation de *seeing*
 - Soustraction de la contribution galactique
 - ▶ Extraction de la SN débarrassée de son fond structuré



Étalonnage en flux – cas photométrique

- **Nuit *photométrique*** : l'atmosphère est stable avec le temps
 - ▶ Schéma d'étalonnage en flux « classique »
 - ▶ Utilisation de **toutes** les étoiles standard de la nuit (χ^2)

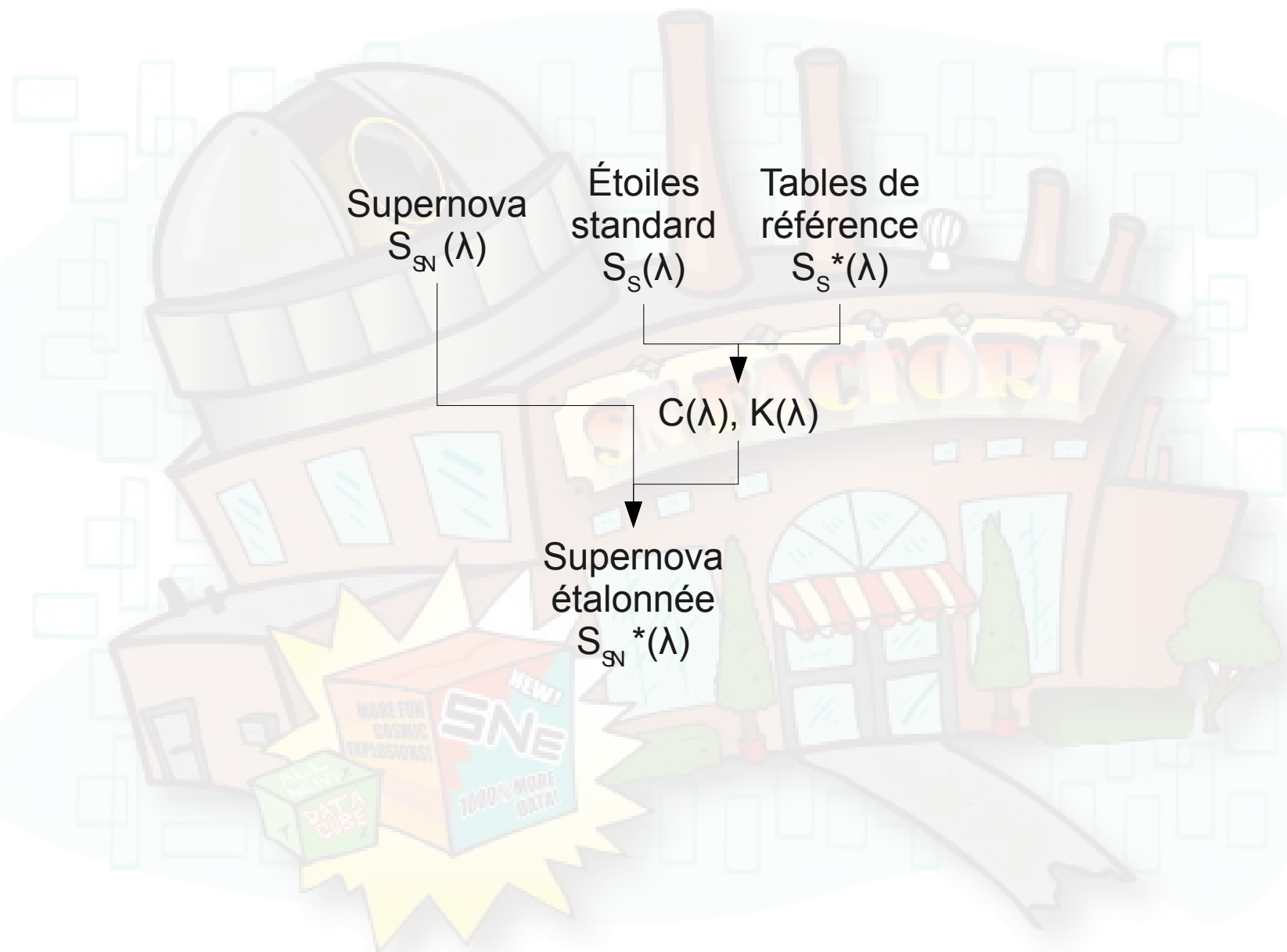
Spectre observé à masse d'air z
[pseudo-ADU]

Extinctions atmosphériques
[mag/airmass]

$$\log \left(\frac{S(\lambda)}{S^*(\lambda)} \right) = \log C(\lambda) - 0.4 \times z \times \bar{K}(\lambda) - 0.4 \times \bar{K}_T(\lambda, z)$$

Spectre étalonné
[erg/s/cm²/Å]

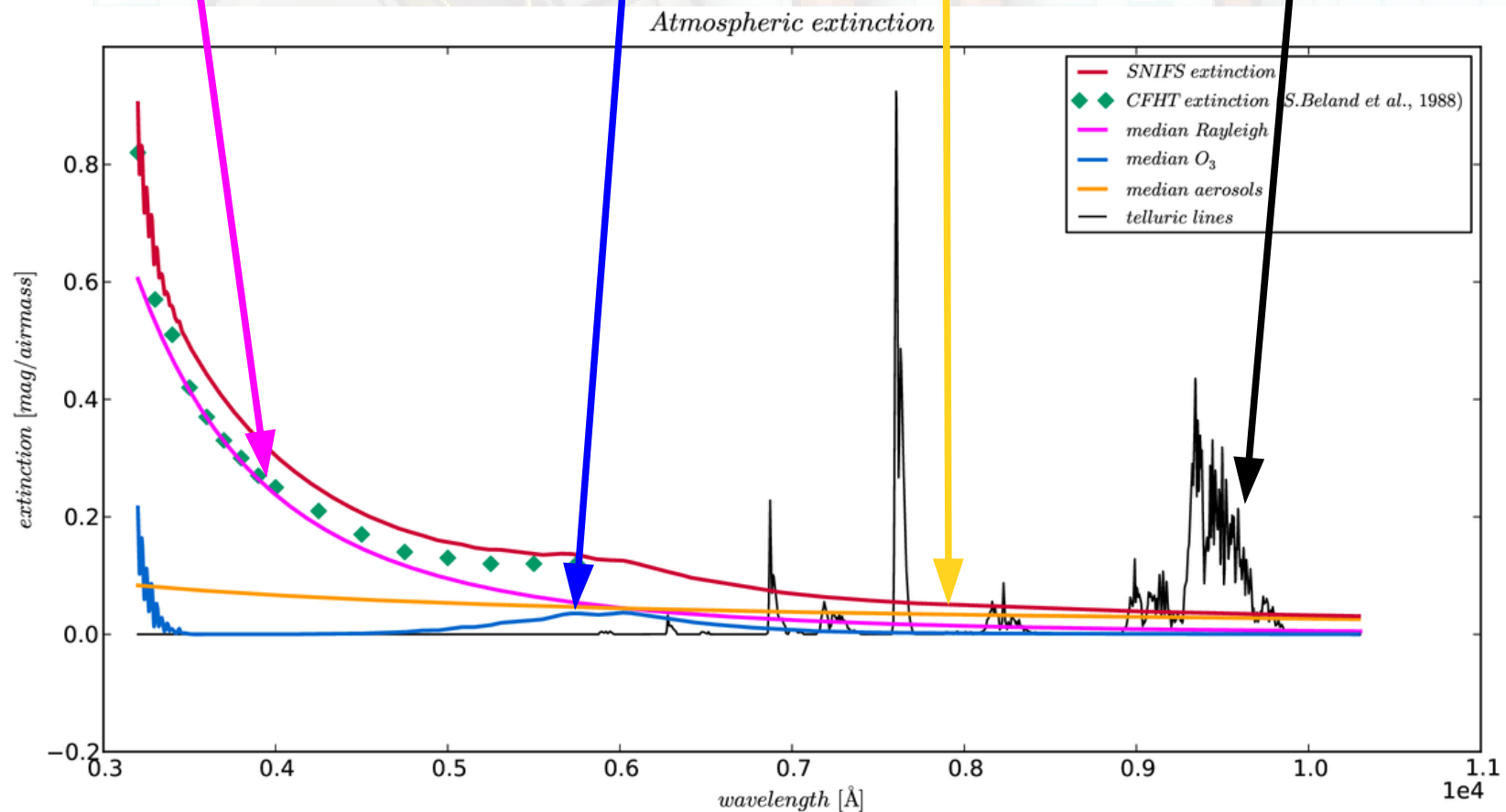
Solution en flux
[erg/s/cm²/Å / pseudo-ADU]



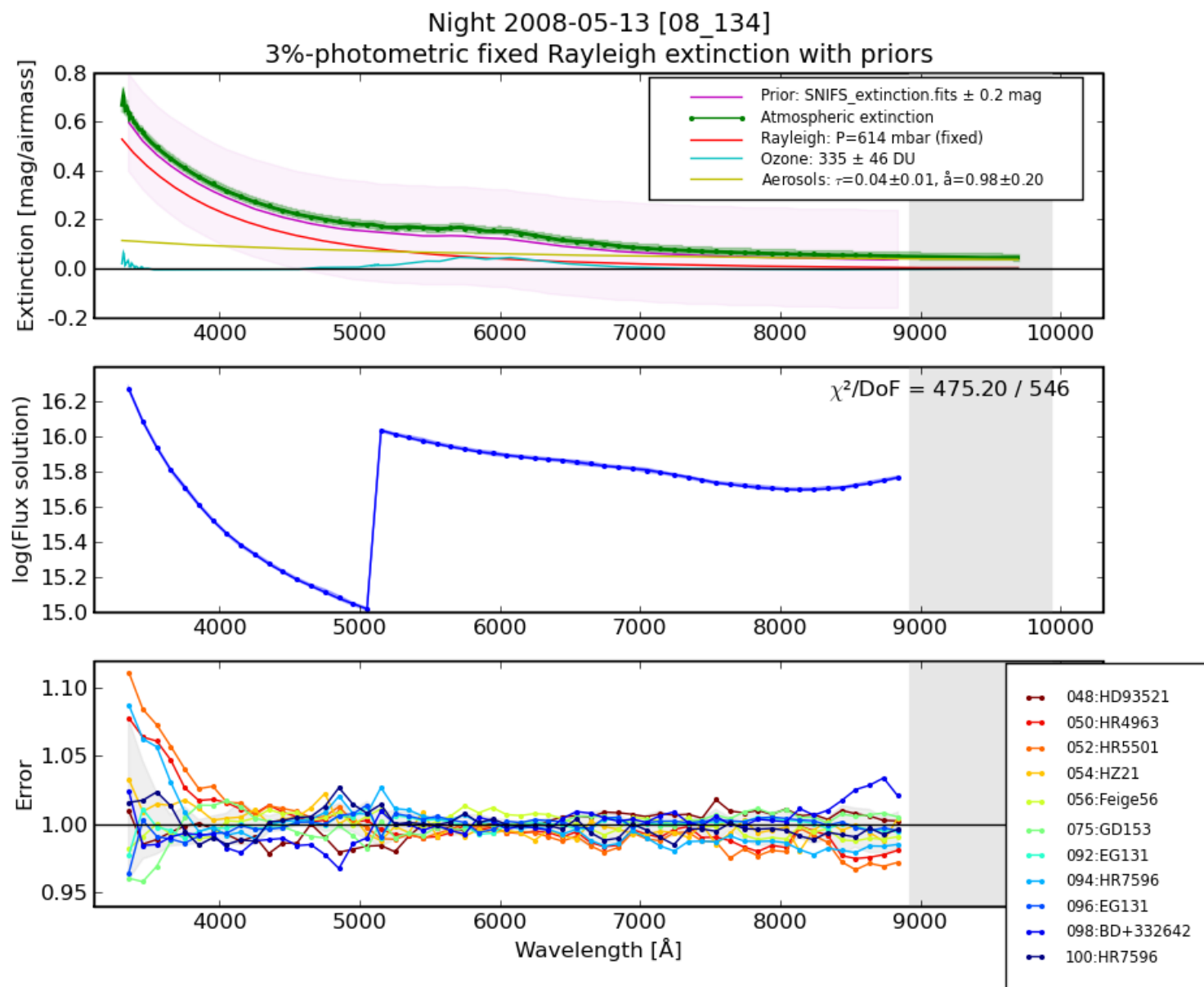
Modélisation de l'extinction atmosphérique

- Décomposition de l'extinction en **composantes physiques**

$$\bar{K}(\lambda) = K_{\text{Rayleigh}}(\mathbf{P}, \lambda) + \alpha_{\text{O}_3} k_{\text{O}_3}(\lambda) + \mathbf{A} K_{\text{Aérosols}}(\lambda, \mathbf{y}) + K_{\text{Tellurique}}(\lambda, \mathbf{z})$$



Cas photométrique



Étalonnage en flux – cas non-photométrique

- **Nuit *non-photométrique*** : l'extinction atmosphérique est n'est pas stable au cours de la nuit
 - Le schéma d'étalonnage en flux « classique » ne s'applique plus

Diagram illustrating the flux calibration equation for non-photometric nights, with a background illustration of a factory labeled 'SNfactory'.

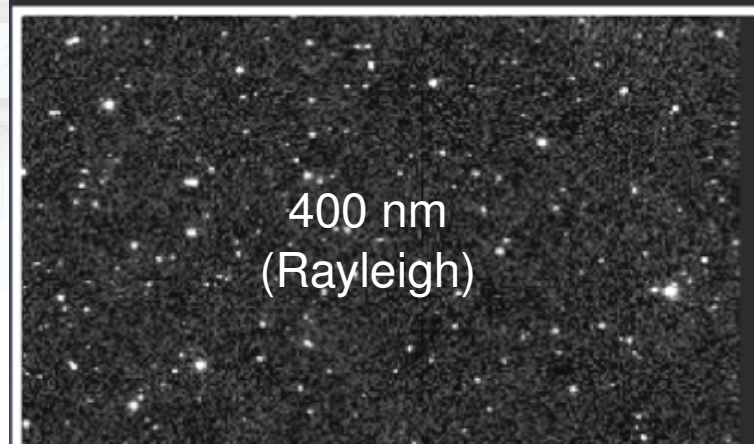
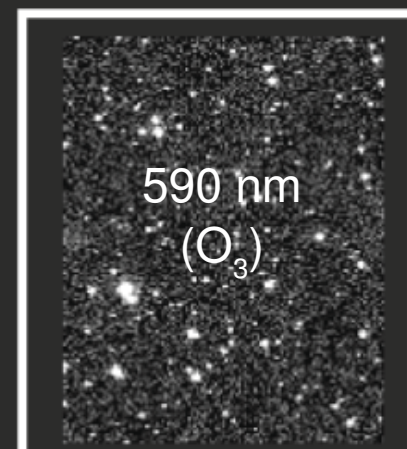
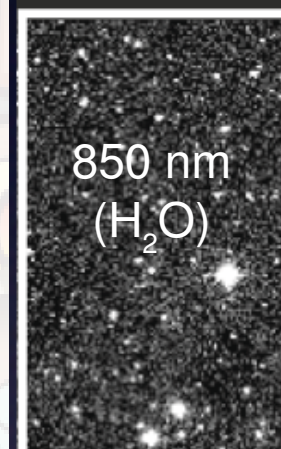
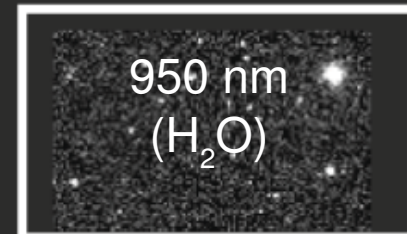
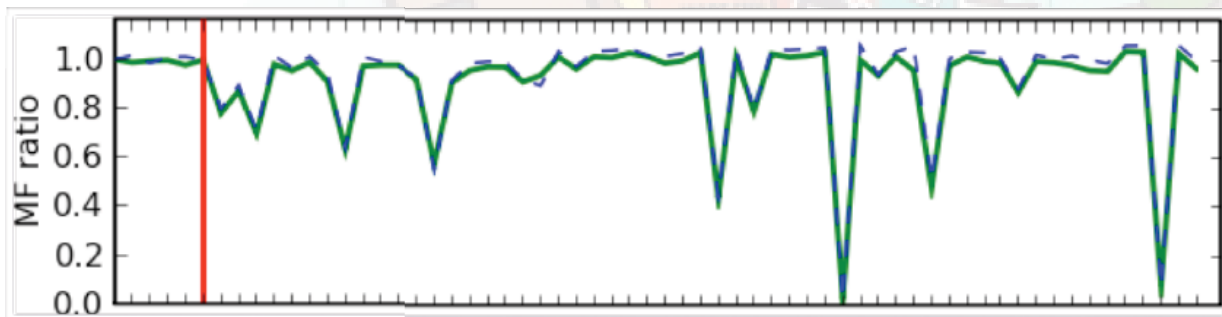
Labels and arrows pointing to the equation:

- Spectre observé à masse d'air z [pseudo-ADU] points to $S(\lambda)$
- Extinction atmosphérique [mag/airmass] points to $K(\lambda, t)$
- Spectre étalonné [erg/s/cm²/Å] points to $S^*(\lambda)$
- Solution en flux [erg/s/cm²/Å / pseudo-ADU] points to $C(\lambda)$

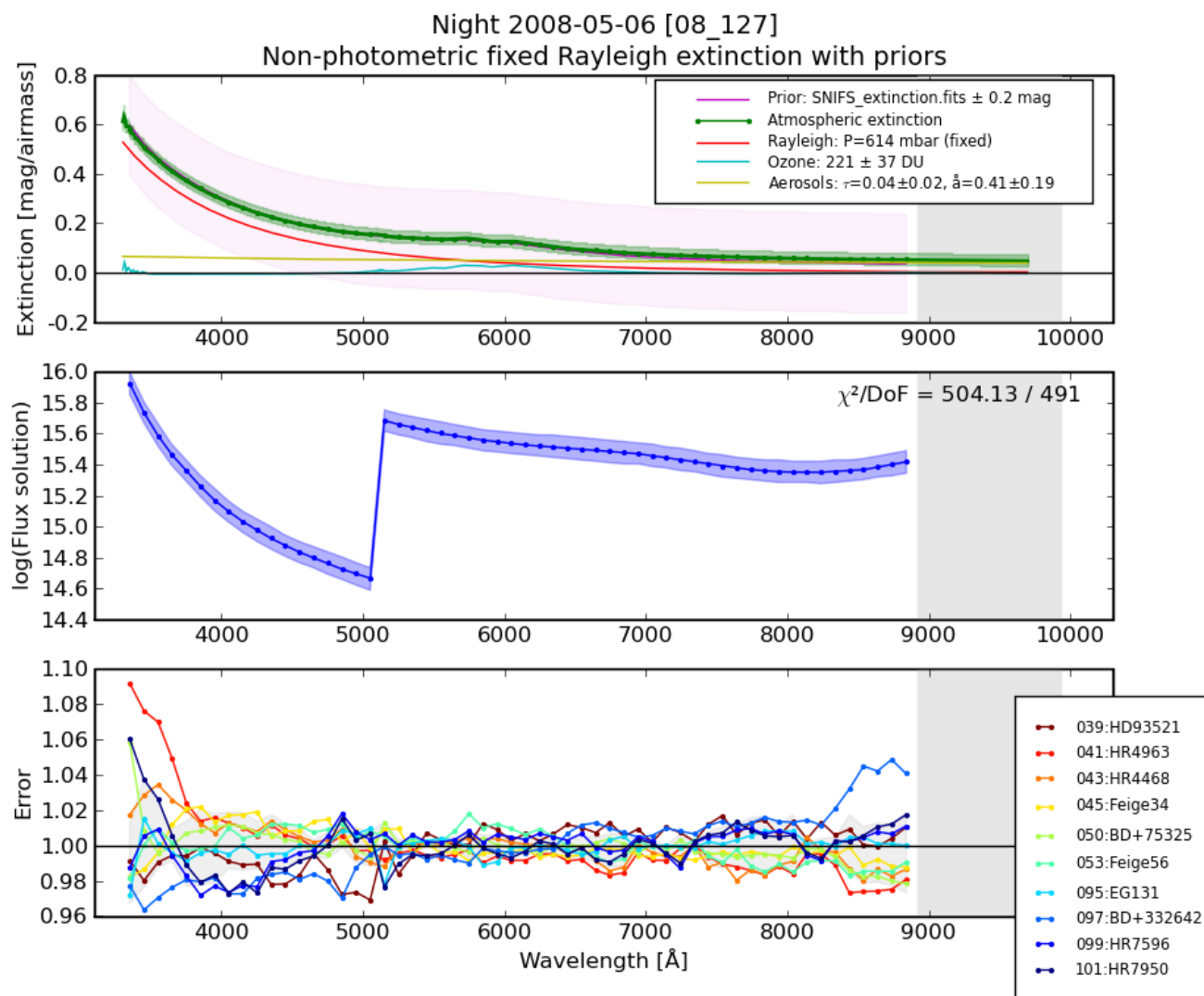
$$\log \left(\frac{S(\lambda)}{S^*(\lambda)} \right) = \log C(\lambda) - 0.4 \times z \times K(\lambda, t)$$

Cas non-photométrique

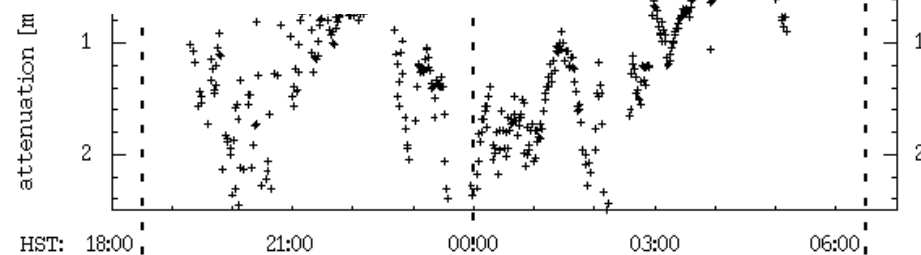
- **Suivi de l'extinction effective** durant la pose spectroscopique
 - Sources secondaires dans le MF
 - Extinction différentielle / nuits photométriques de référence
 - Auto-étalonnage
- **Hypothèse : les nuages sont gris**
 - Variabilité *achromatique* de l'extinction
 - $K(\lambda, t) = K(\lambda) + \Delta K(t)$
 - Vérifiée au pour-cent près



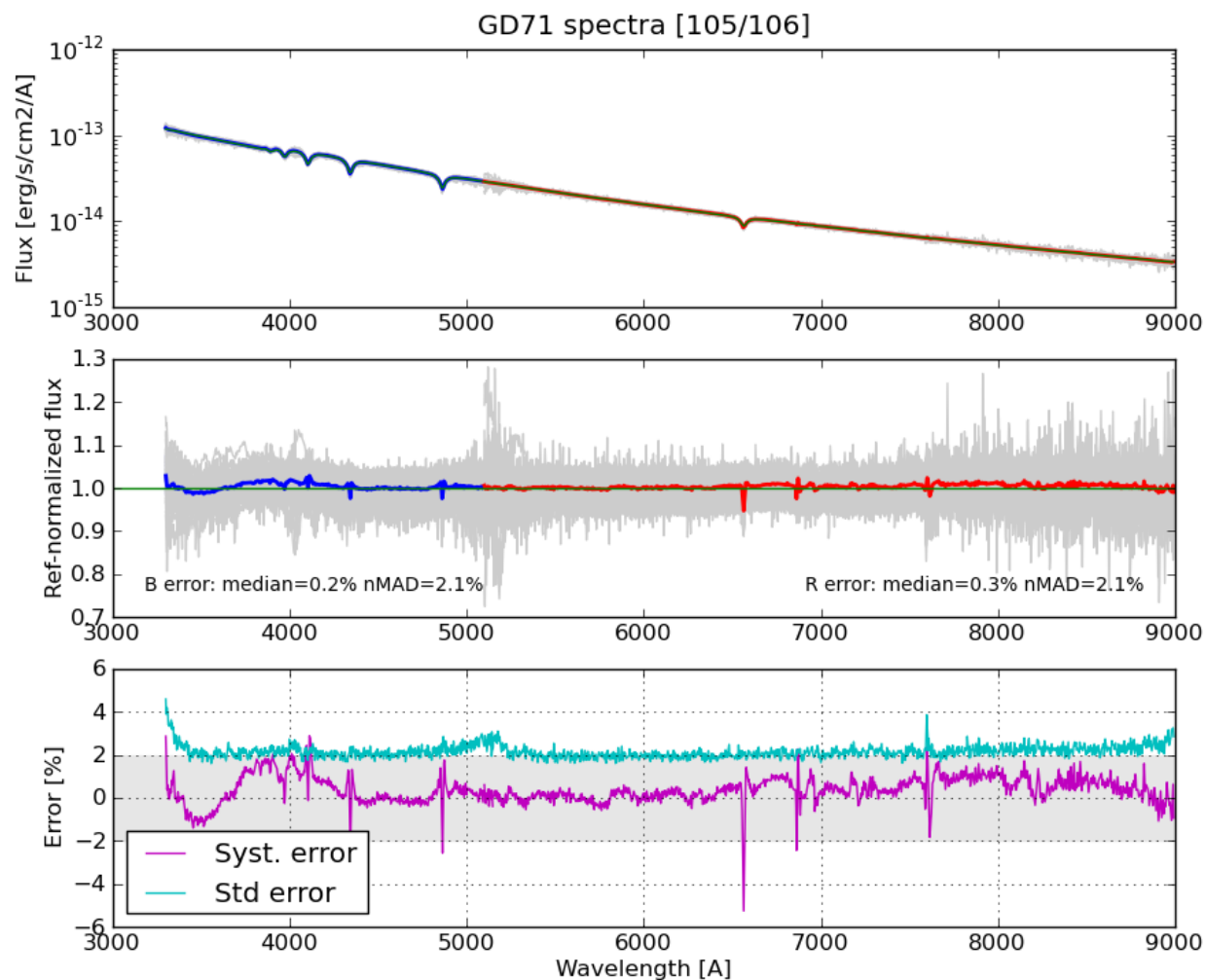
Cas non-photométrique



Atténuation
atmosphérique
en temps réel
SkyProbe
(CFHTLS)



Précision spectro-photométrique



<dispersion en flux>	Nuits P	Nuits non-P	Total
Étoiles faibles	1,7%	3,2%	2,5%

Inter-étalonnage des étoiles standard

- 39 étoiles standard

- Les tables de référence proviennent de diverses sources

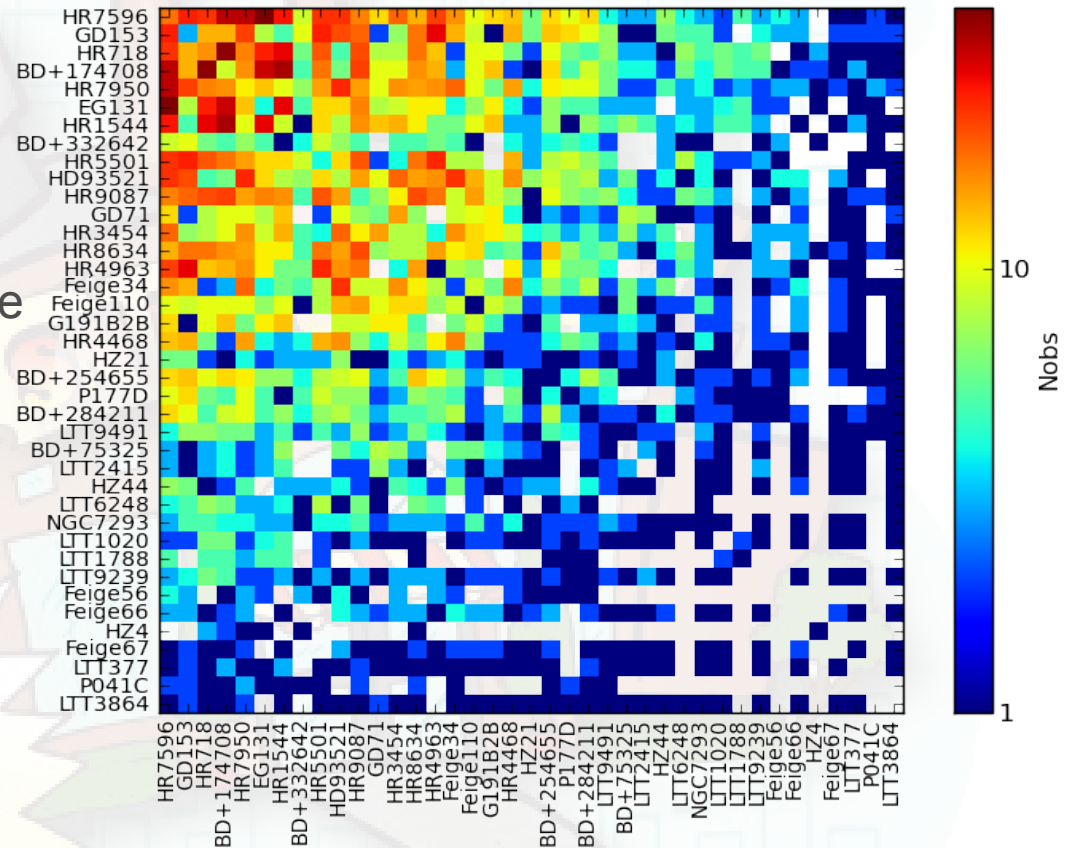
- Problèmes de décalage en λ , de résolution spectrale, etc.
- Elles ne sont pas compatibles entre elles ($\pm 2\%$)

- Nécessité d'un **inter-étalonnage**

- Réseau des étoiles observées durant les nuits photométriques

- Calibrateurs primaires :
GD71, GD153, G191B2B

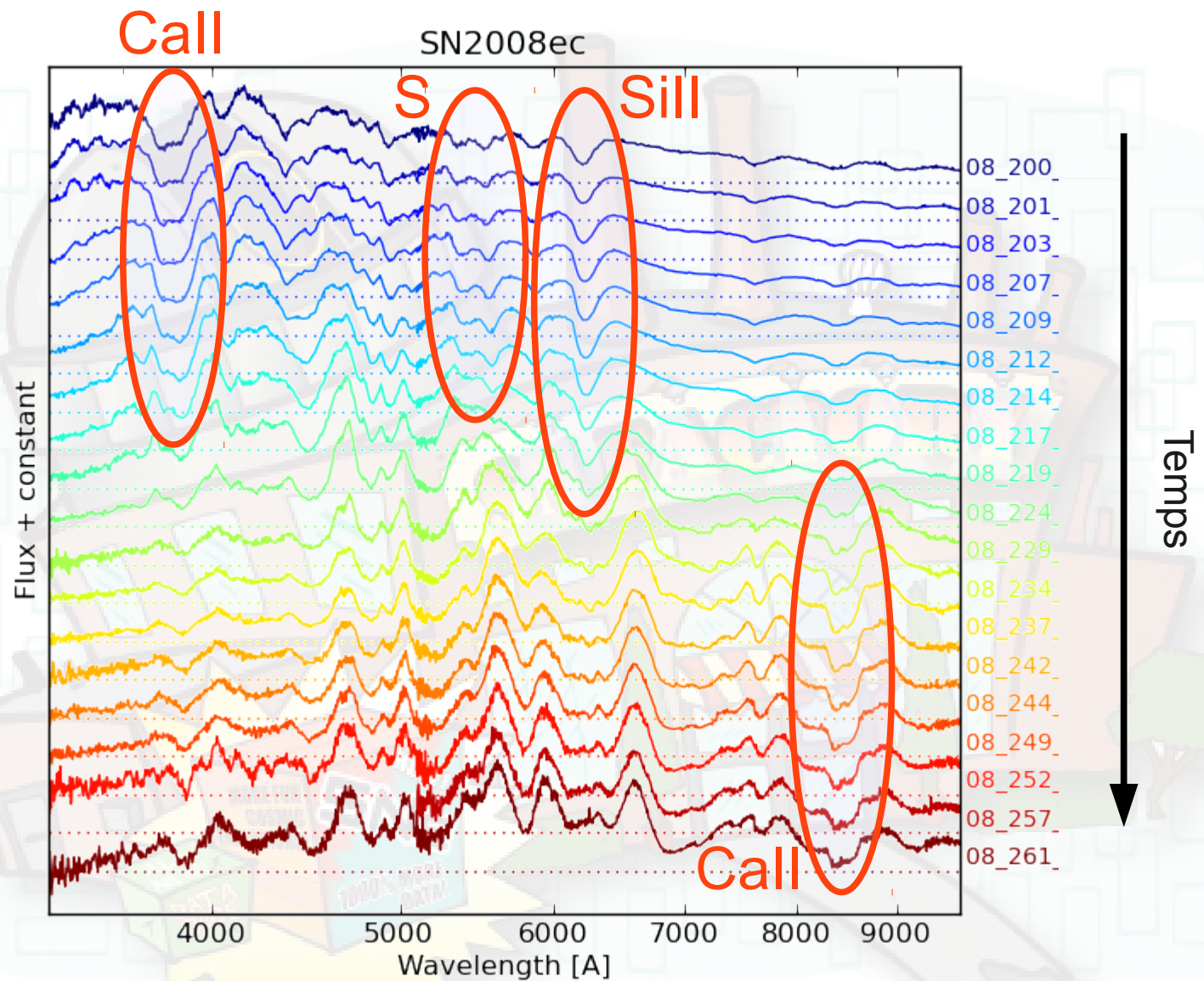
Std star network 05/06/07/08/09 [B]: 1108 spectra of 39 stars in 127 nights



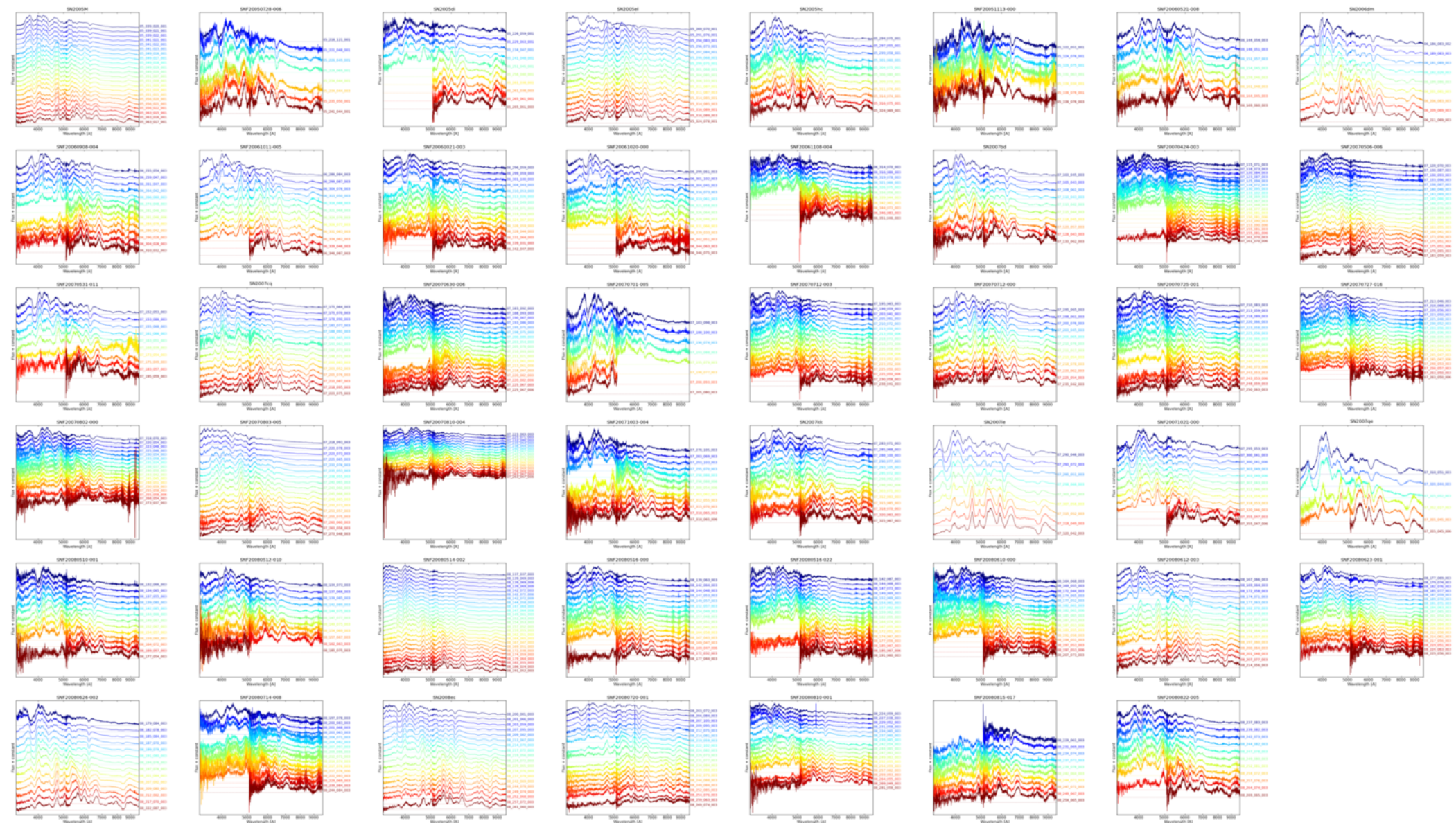


Résultats scientifiques (préliminaires)

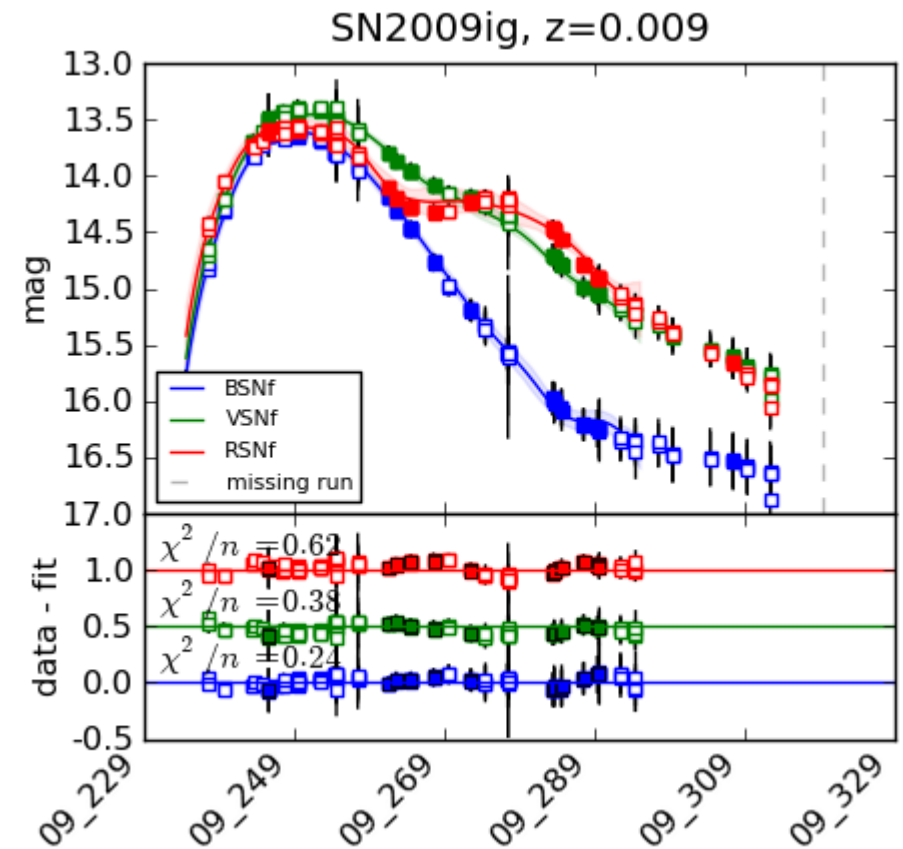
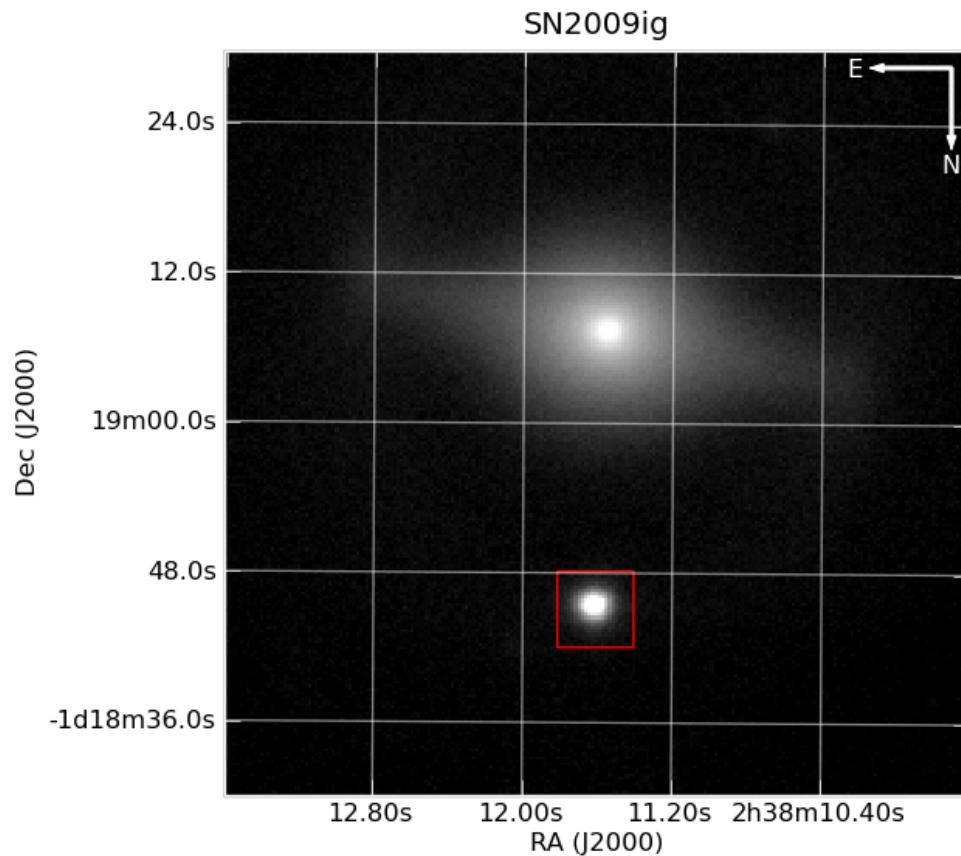
Série temporelle de SN2008ec



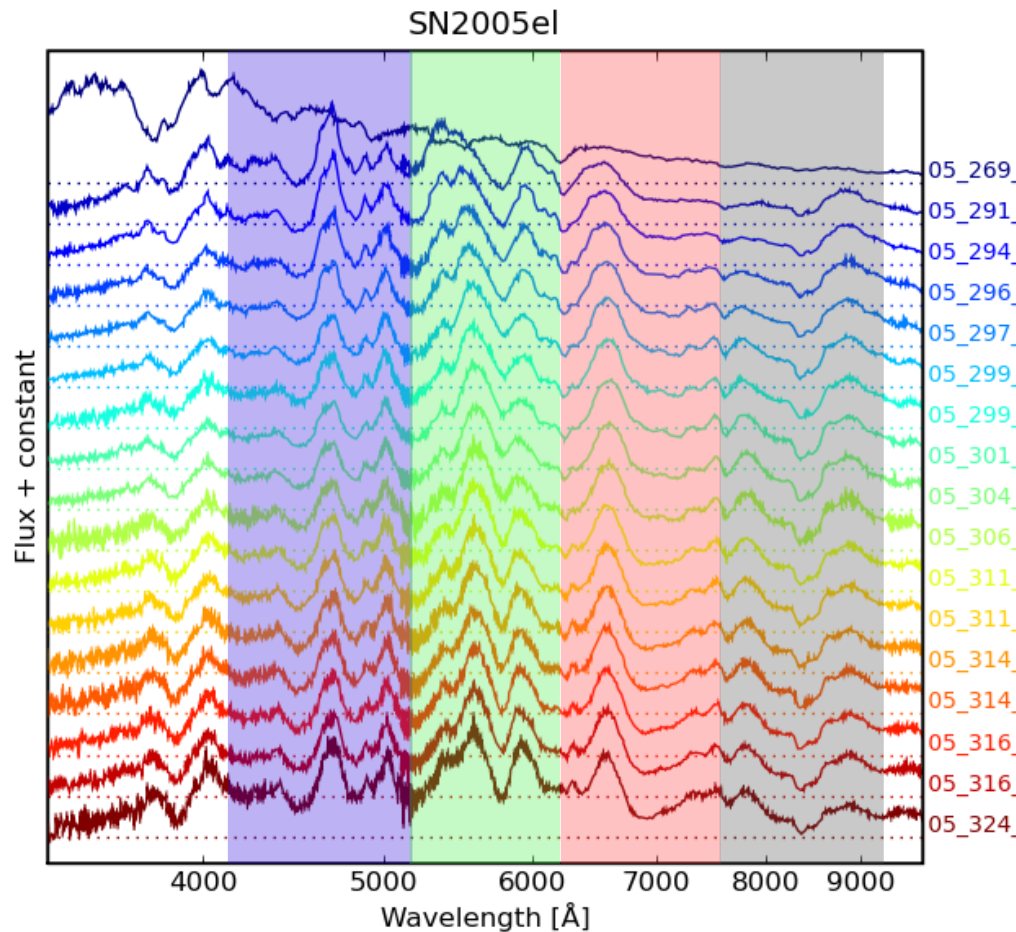
Quelques séries temporelles ($\sim 1/4$)



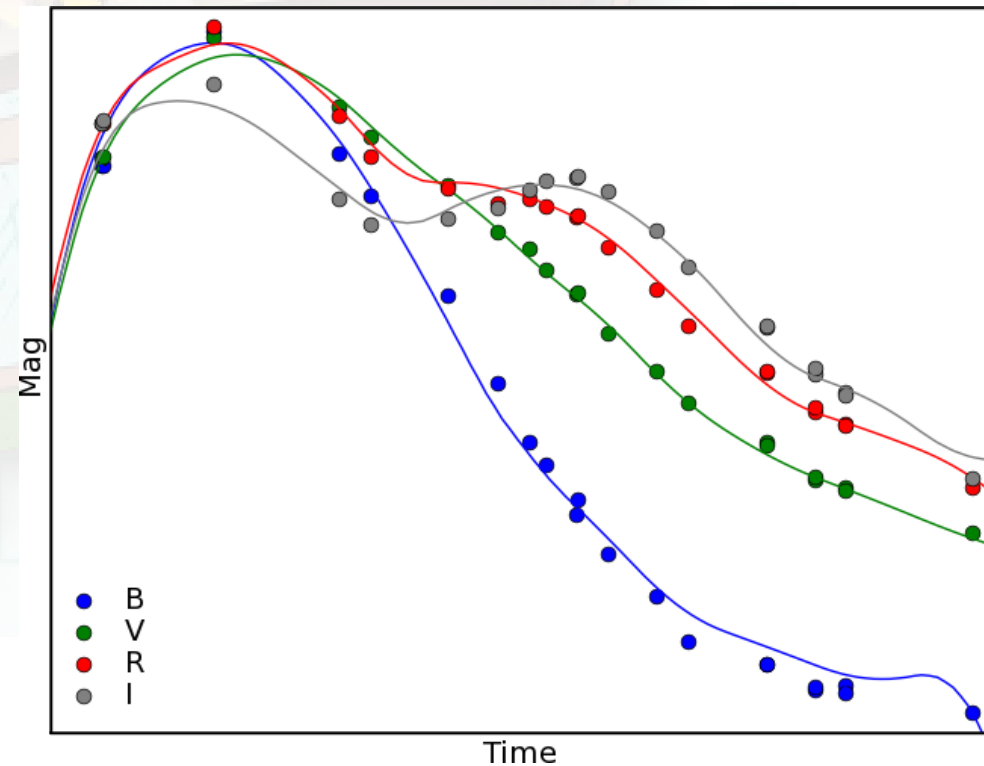
SN2009ig dans NGC1015 ($z=0.009$)



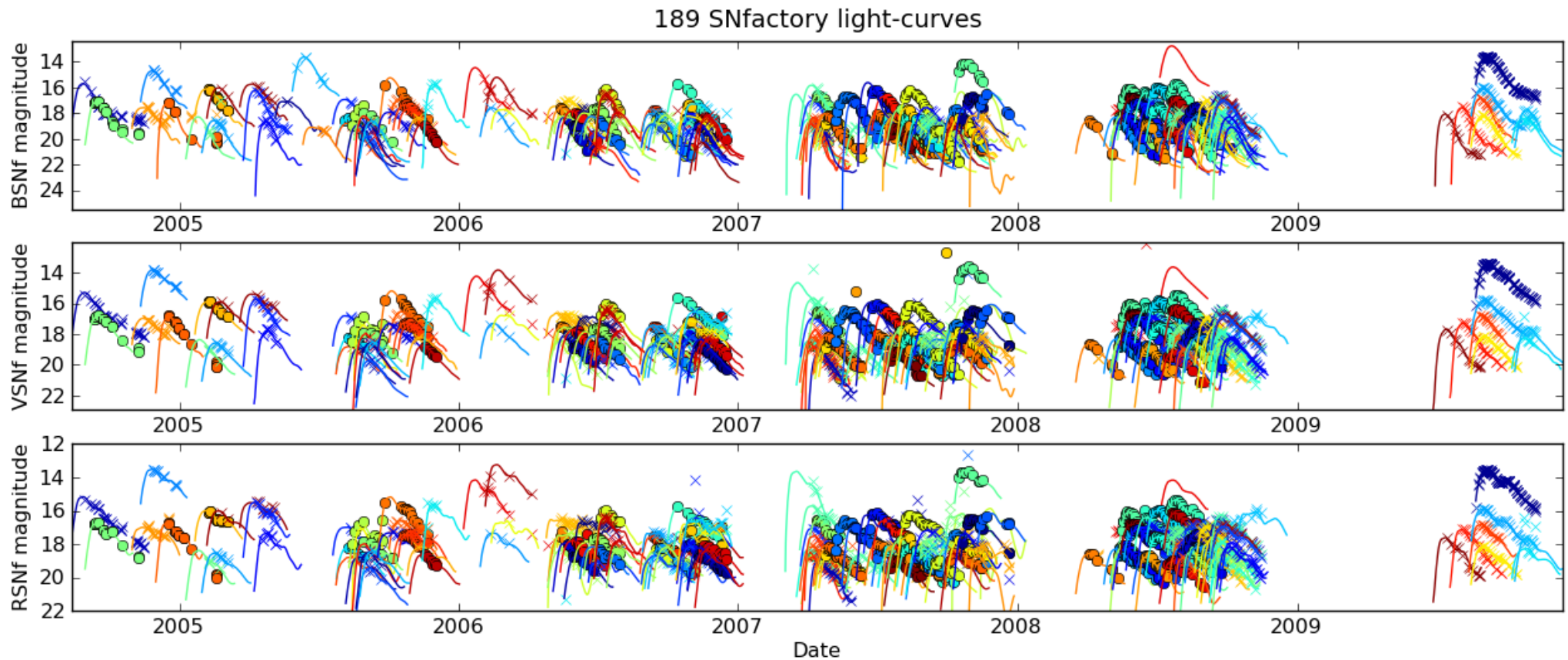
Photométrie synthétique



- Photométrie **synthétique**
 - Dans n'importe quelle bande !
 - Inter-calibration avec les autres expériences
 - Y compris bandes « *rest frame* »
 - Corrections K non-nécessaires



Courbes de lumière



Débuts
laborieux...

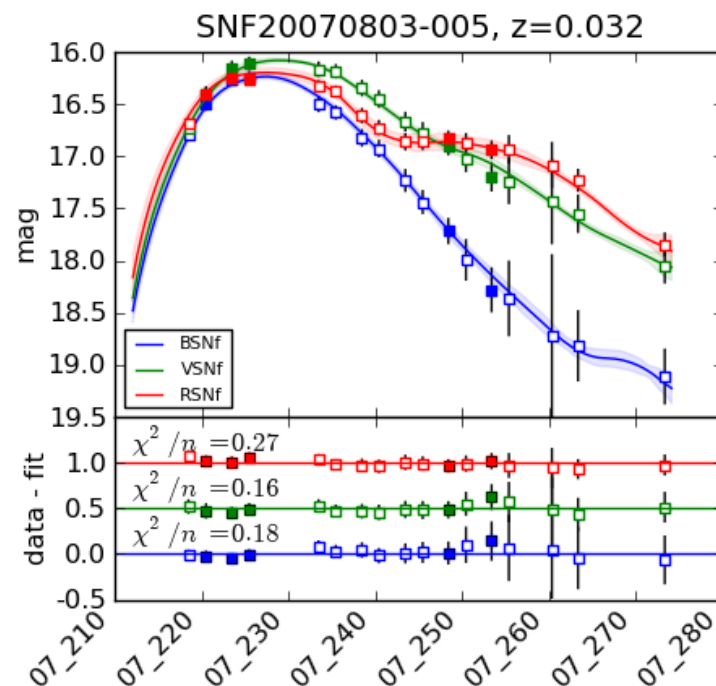
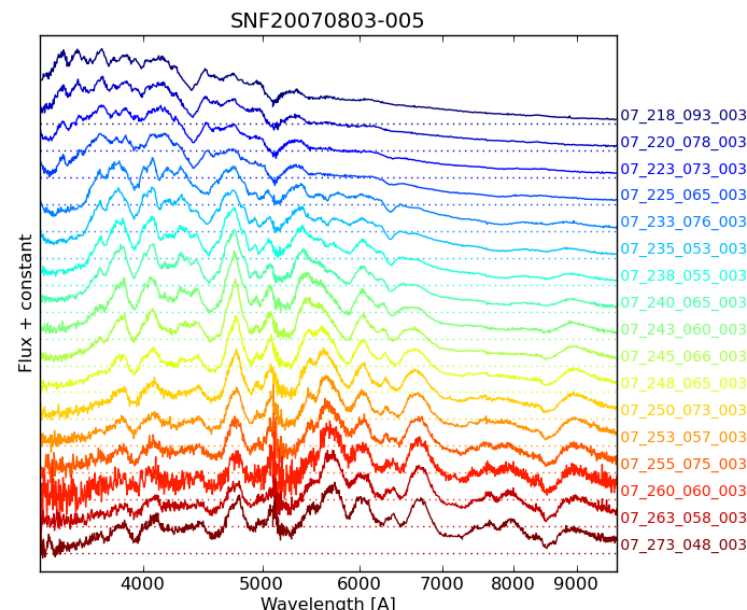
SNfactory
à pleine puissance

Fin du
search

Prise de
références

Ajustement de la courbe de lumière

- Ajustement SALT2 (B,V,R)
 - ▶ Approche **minimale** pour simuler la photométrie traditionnelle
- Paramètres : $M_B^{\max}$,
« *stretch* » (x1), couleur (c)
 - ▶ Ajustement : ~10% RMS
 - 7% cœur + « outliers »
 - Précision ~5% sur les paramètres
- **Développements** à venir
 - ▶ Magnitudes « *rest-frame* »
 - Pas de correction K
 - ▶ Série temporelle
 - Nouveaux « *templates* »



Quelques courbes de lumières ($\sim 1/4$)

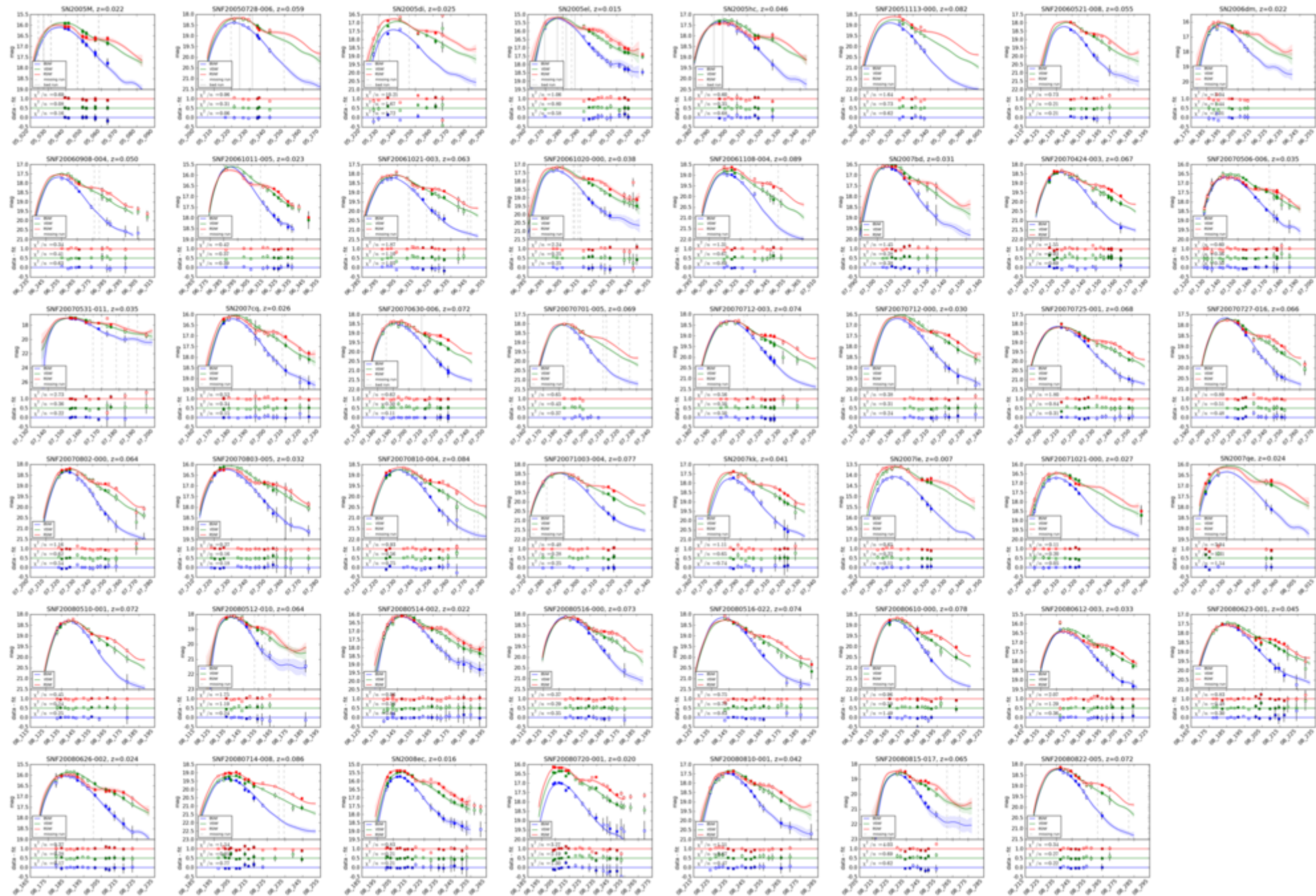
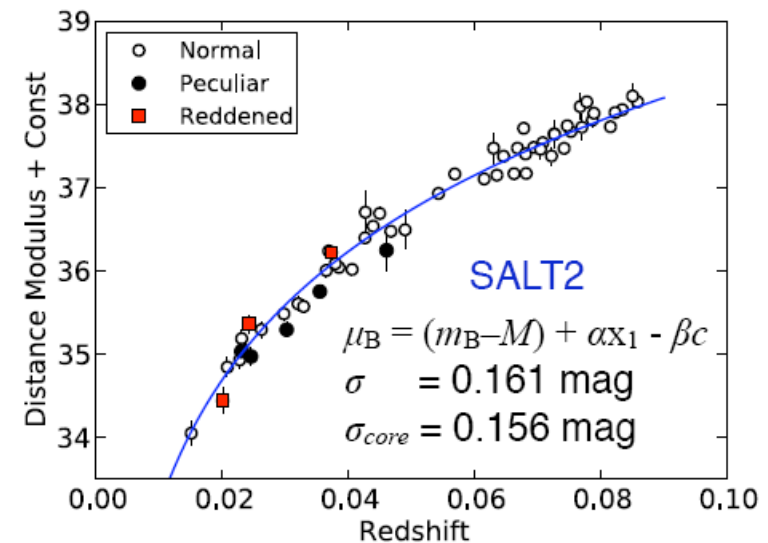
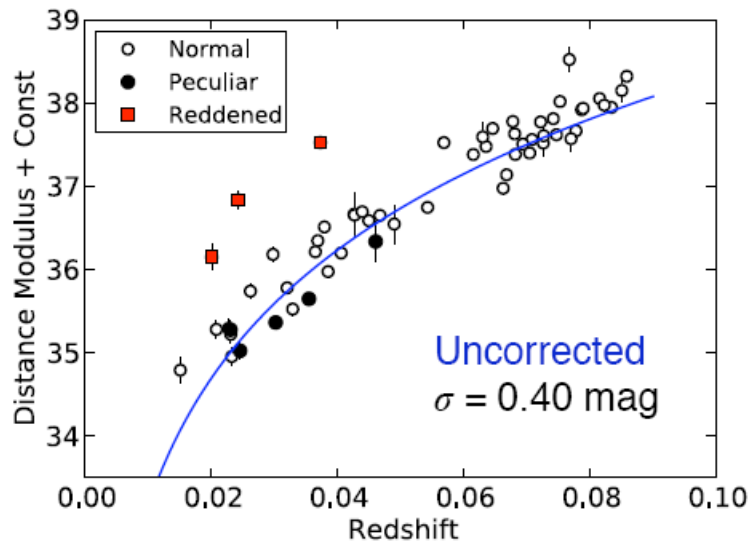
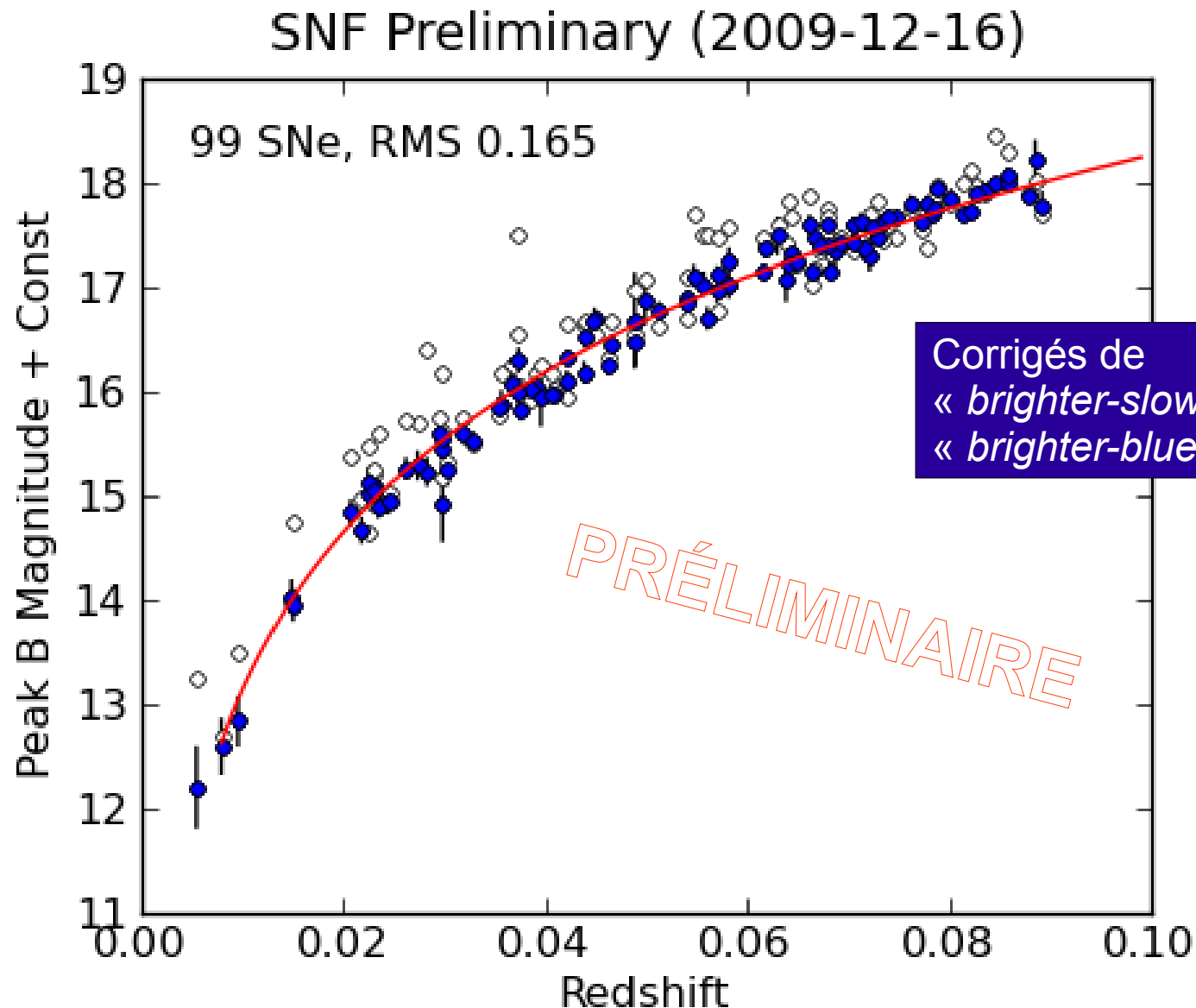


Diagramme de Hubble

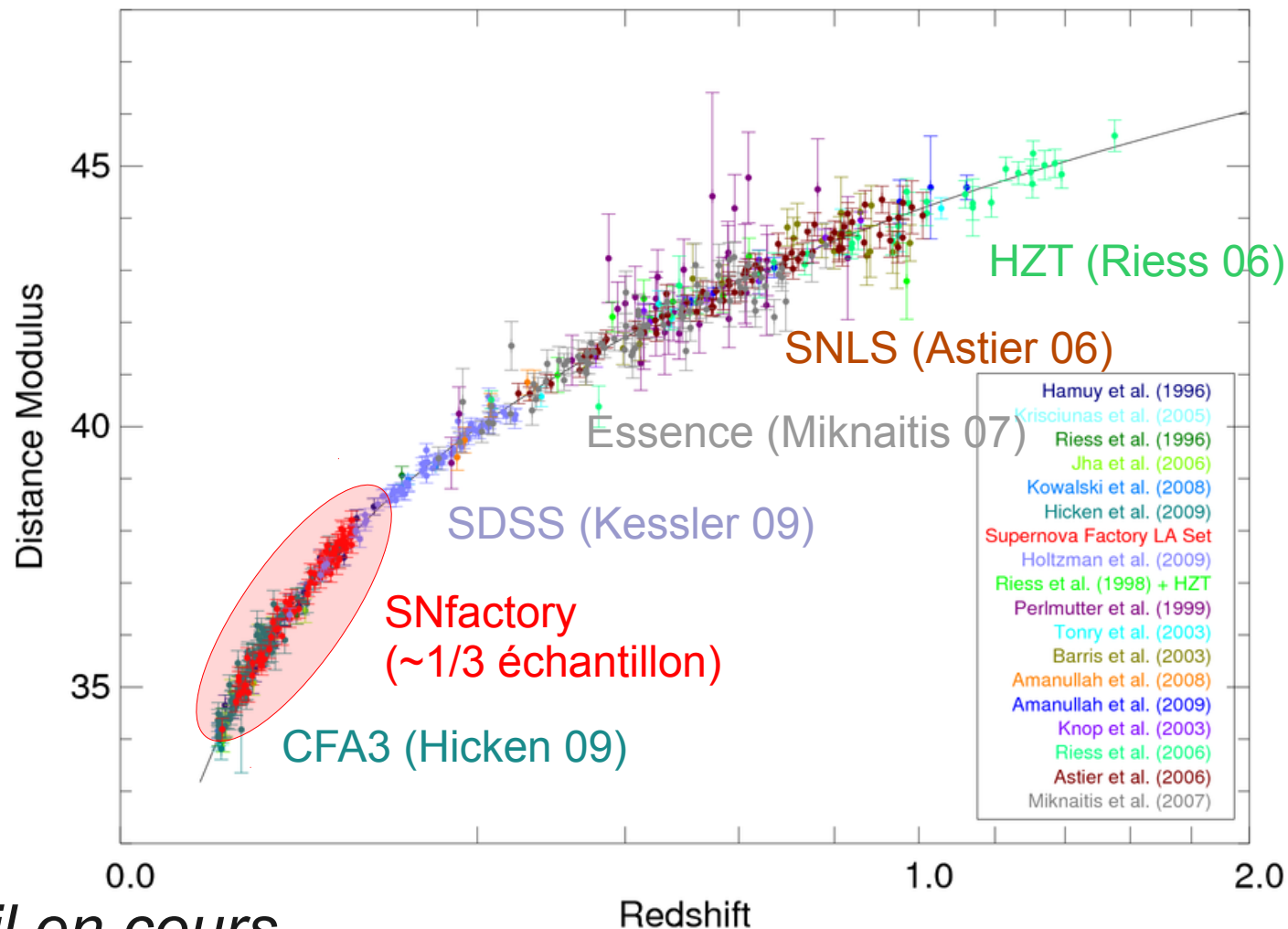
- Ajustement traditionnel des courbes de lumière
 - « *Brighter–bluer* » & « *Brighter–slower* » (SALT2)
- La photométrie synthétique atteint la même précision
 - Sous-échantillon de 58 SNe (« Louisiana »)
 - Spectres au max ($\pm 2,5$ j)
 - Peu de fond galactique (pas de soustraction galactique)



Dernière production en date : Mississippi



Échantillon SNfactory



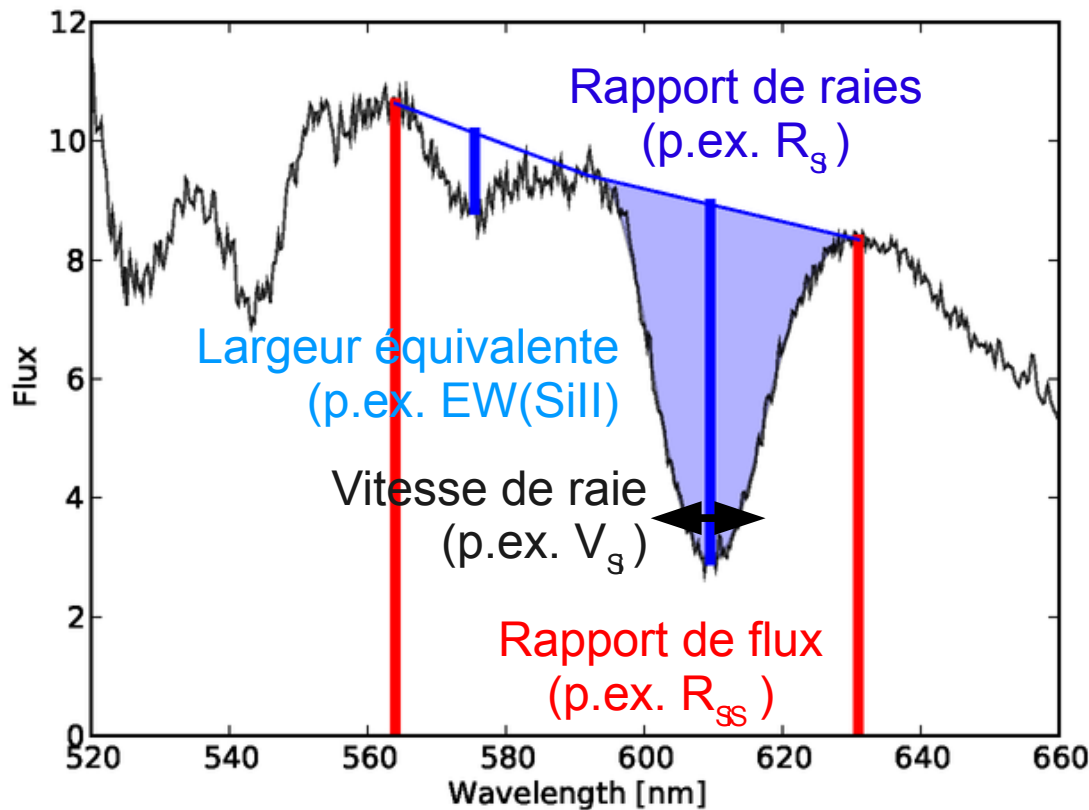
- *Travail en cours*
- Cosmologie cachée

(D. Rubin)

Contributions SNfactory

- L'échantillon SNfactory améliore directement le diagramme de Hubble **même** en n'utilisant que les techniques photométriques traditionnelles
 - ▶ **Qualité comparable** (voire meilleure) aux autres échantillons proches
 - ▶ Bras de levier
 - ▶ Échantillon non-biaisé dans le flot de Hubble
 - ▶ Inter-étalonnage avec les échantillons à grand z
- **Mais** les données SNf permettent d'aller **plus loin**
 - ▶ Courbes de lumière « *rest-frame* »
 - Pas de correction K
 - ▶ Analyse spectrale
 - Indicateurs spectraux
 - Spectres type, sous-classification
 - ▶ Physique des SNe
 - SN2005gj: type Ia/IIn
 - SN2006D: carbone
 - SN2007if: super-Chandrasekhar

Indicateurs spectraux classiques

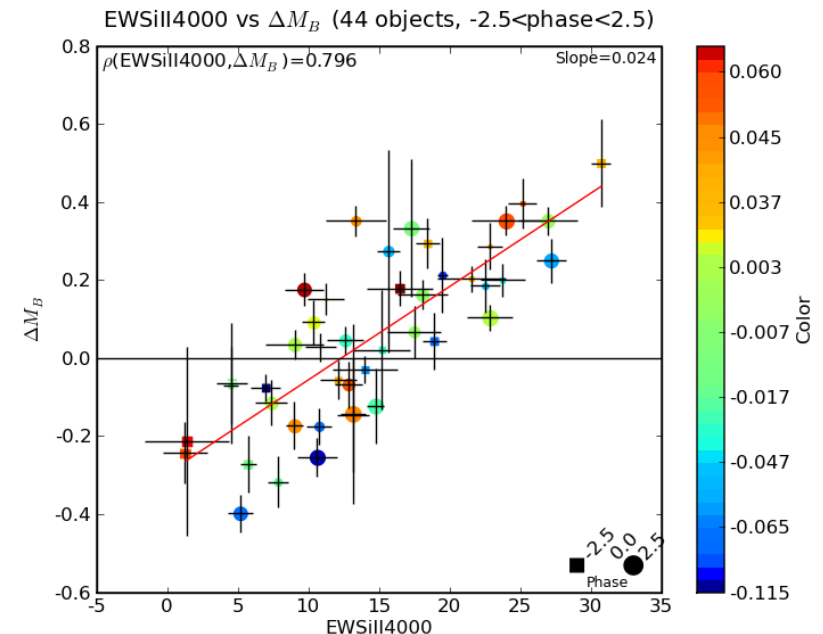
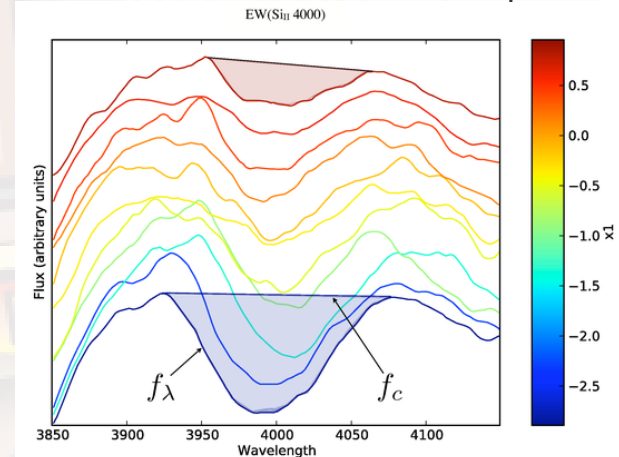


- En voie de séparer extinction intrinsèque vs. extrinsèque

(N. Chotard)

- Ex. : $EW(SiII\ 4000)$

► Compétitif avec x_1, c



Corrélations spectrales (Bailey et al. 09)

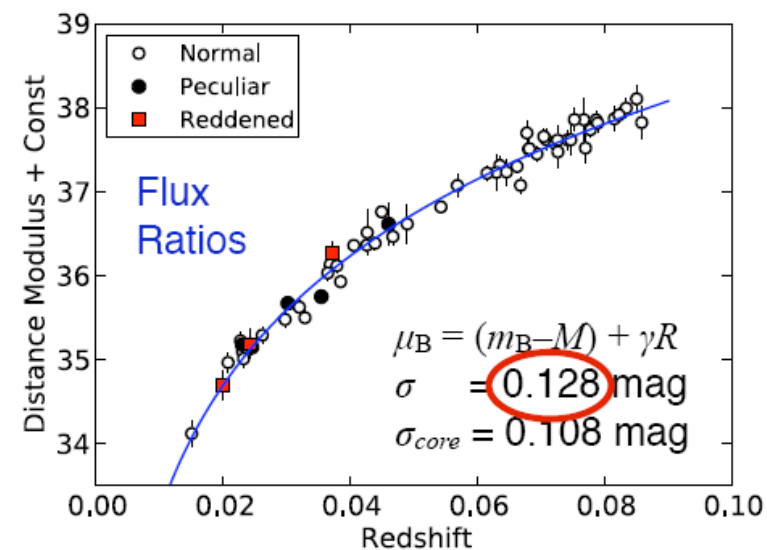
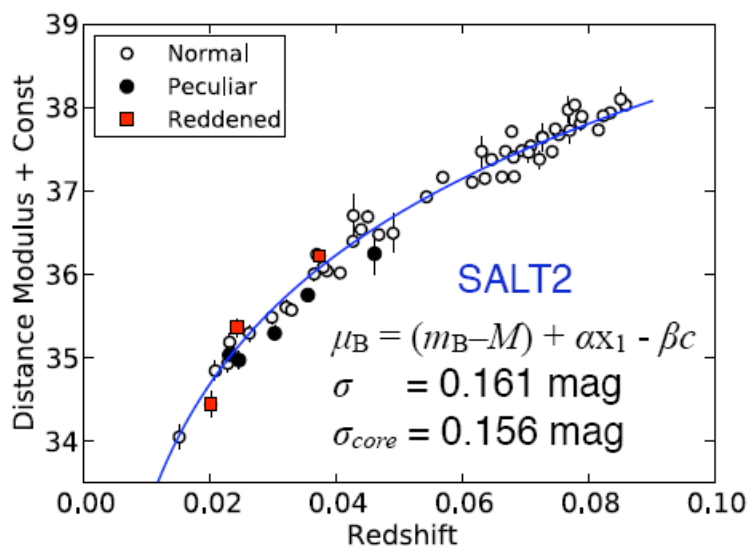
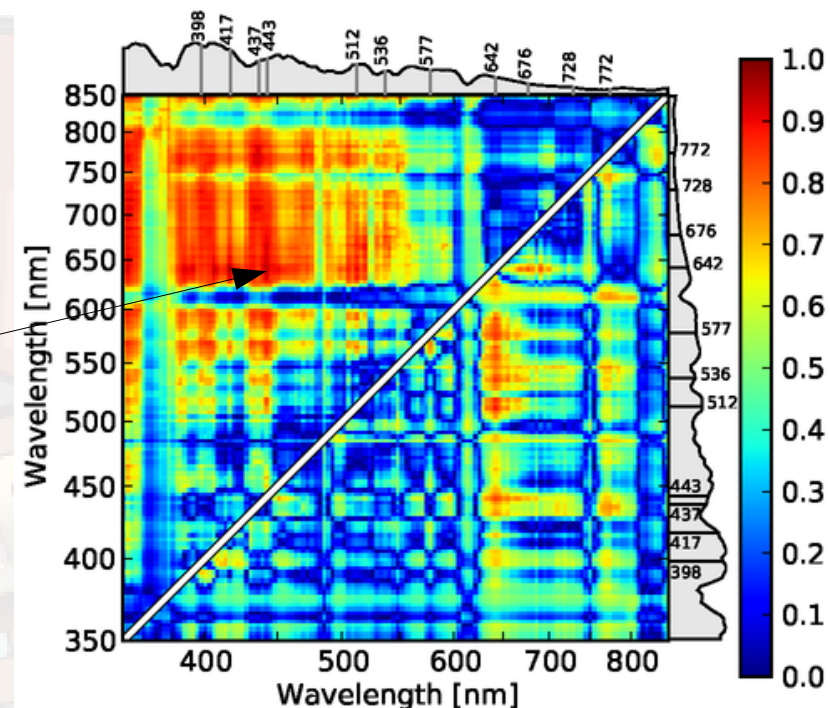
- Approche **empirique**

- Recherche aveugle de corrélations entre $R(\lambda_1/\lambda_2)$ et $\Delta\mu$

- Échantillon de 58 SNe

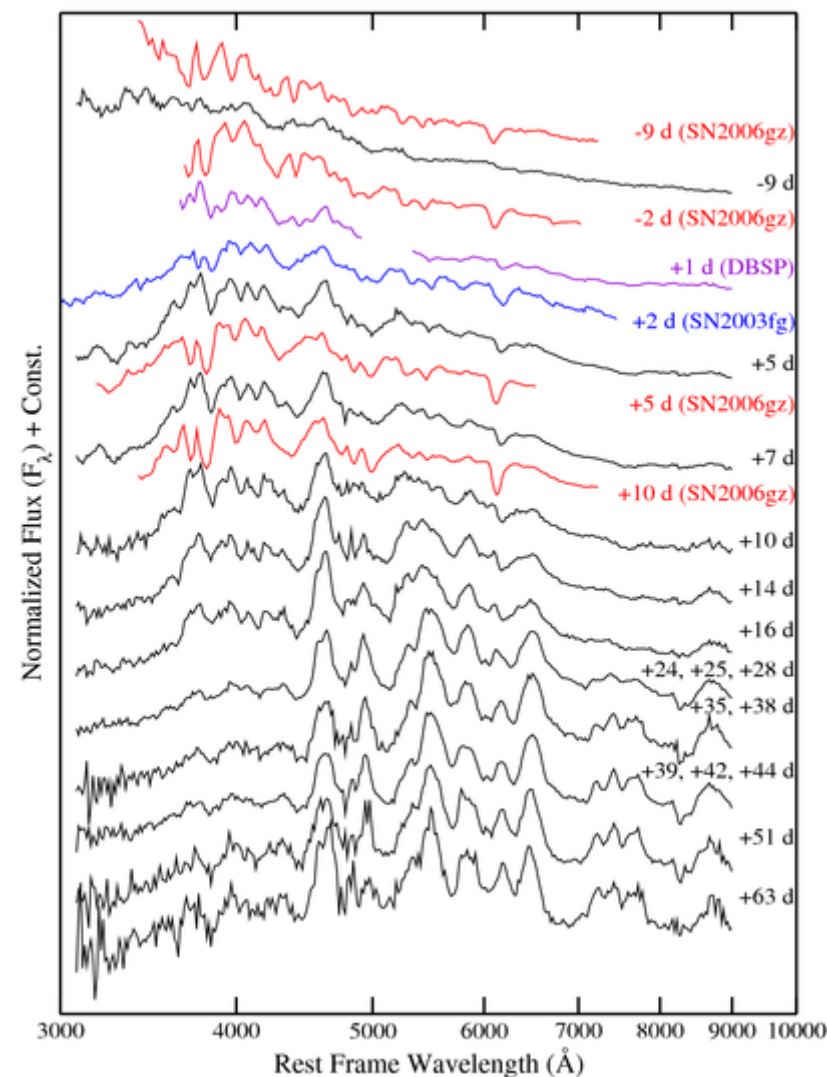
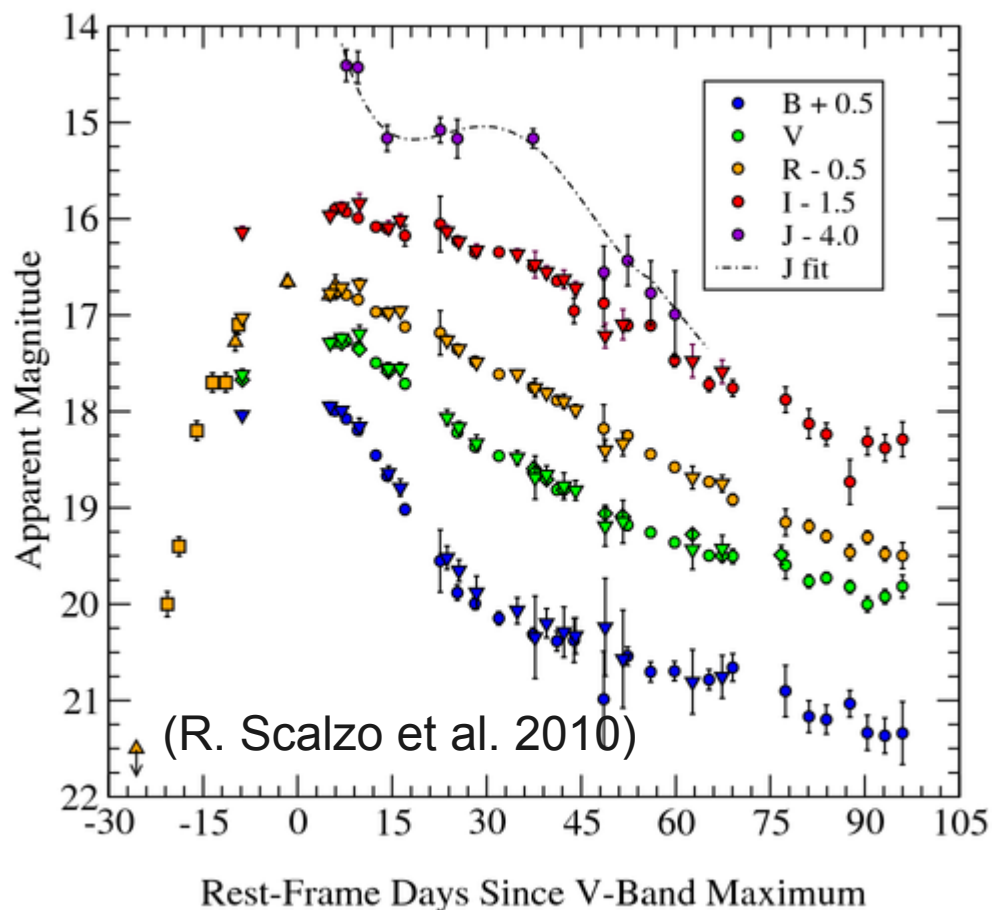
- ± 2.5 jours du max
 - Apprentissage / validation
 - $R(642/443)$: $\rho = 0.95$

$R(642/443)$



Objets individuels

- Exemple : **SN 2007if** (SNF20070825-001)
 - SN super-Chandrasekhar (avec SN03fg, SN06gz, SN09dc)
 - $M = 2,4 \pm 0,2 M_{\odot}$



Conclusions et perspectives

• SNfactory (2004-2009)

- ▶ 190 séries temporelles spectro-photométriques, 3000 spectres
 - Échantillon sans équivalent
 - Derniers ajustements dans l'étalonnage en flux
- ▶ Nouvelle ère dans la compréhension des SNe
 - Plus grande puissance statistique, meilleur contrôle des systématiques
- ▶ Développement de la spectro-photométrie
 - Spectrographie 3D indispensable
 - Extraction de source ponctuelle, soustraction de fond diffus
 - Caractérisation de l'atmosphère, auto-calibration

• Perspectives

- ▶ SNfactory+
 - Prolongation sur 3 ans
 - Nouvelle collaboration
 - Nouvelle recherche (p.ex. PTF), suivi identique (SNIFS)
 - Échantillon $\times 2$
 - Encore incertain (financement)
- ▶ Au-delà : nécessité d'un suivi spectro-photométrique des cibles LSST ?
 - *La photométrie ne peut pas tout*
 - Spectro 3D sur un 4 m
 - Automatisation complète

Publications

- Papiers de la collaboration

- ▶ SN2007if (super-Chandra)
 - Scalzo et al. 2009 (soumis)
- ▶ « *Flux ratios* » (standardisation)
 - Bailey et al. 2009, A&A 500, L17
- ▶ SN2006D (signatures C)
 - Thomas et al. 2007, ApJ 654, L53
- ▶ SN2005gj (enveloppe)
 - Aldering et al. 2006, ApJ 650, 510

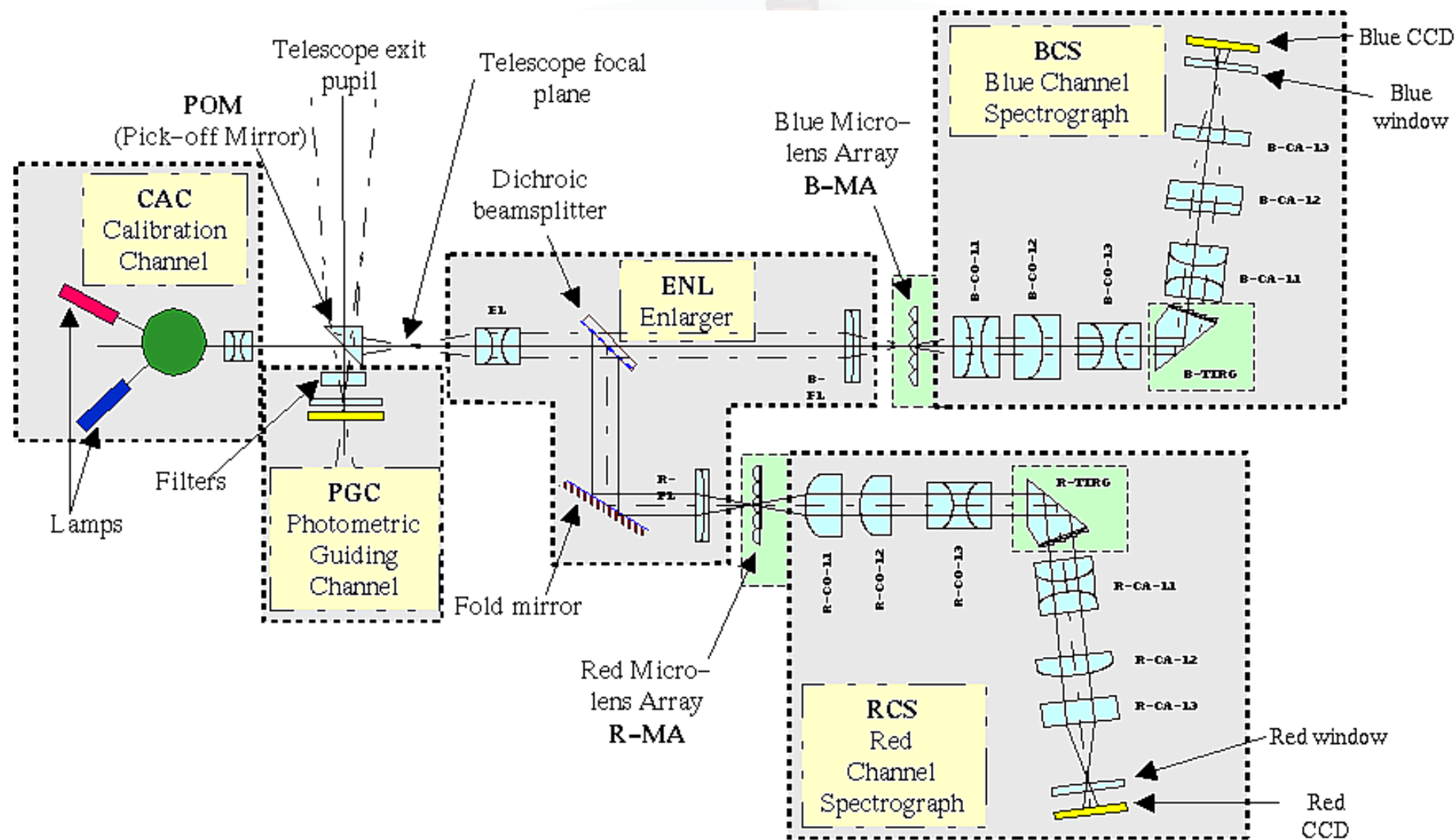
- Papiers utilisant des données SNIFS (hors SNfactory)

- ▶ V1647 Orionis (étoile variable)
 - Aspin et al. 2009, ApJ, 592, L67
- ▶ Astéroïde 1991 RY16
 - Moskovitz et al. 2008, ApJ, 682, 57
- ▶ Étalonnage en flux
 - Stubbs et al. 2007, PASP, 119, 1163
- ▶ Deep Impact (comète Tempel 1)
 - Hodapp et al. 2007, Icarus, 187, 185
- ▶ SN2005gl (SN IIn)
 - Gal-Yam et al. 2007, ApJ, 656, 327

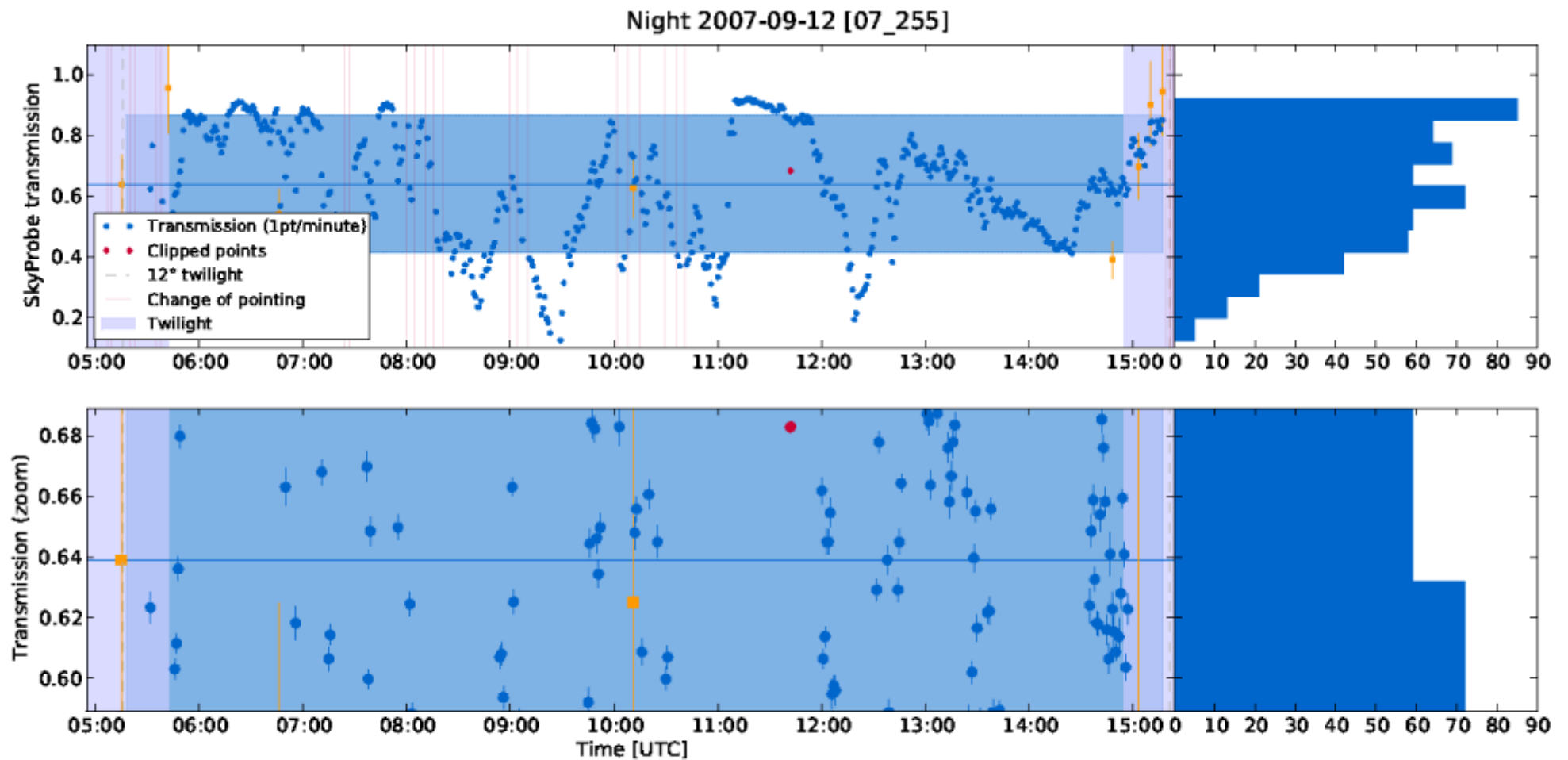


Suppléments

Schéma optique SNIFS



Photométrie SkyProbe

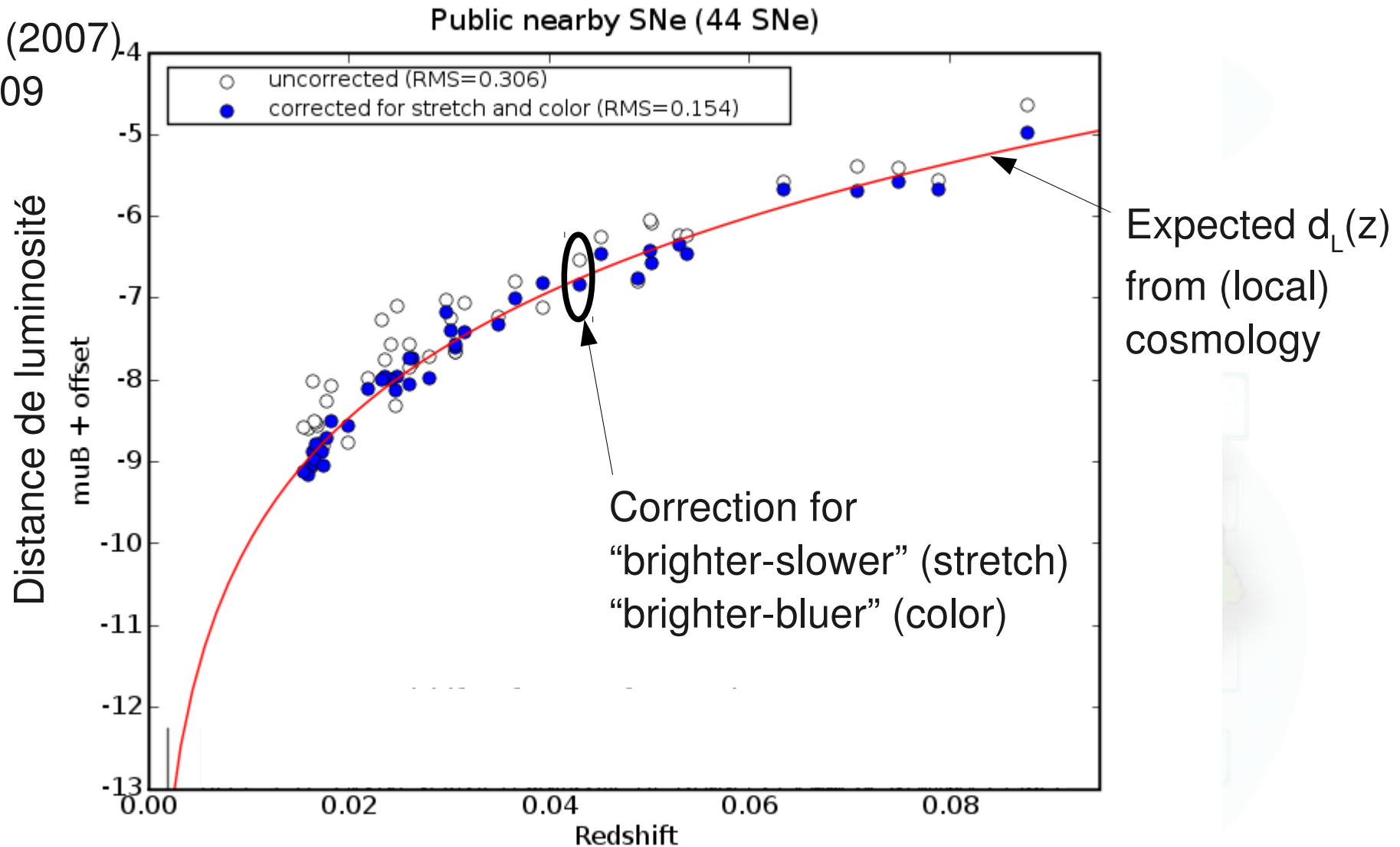


Median = 0.63915 nMAD = 22.57% RMS = 37.99%

Median = 1.48870 nMAD = 64.04%

Public nearby SN Hubble diagram

Sample from
Guy et al. (2007)
up to $z=0.09$



R(642/443)

