

# The Nearby Supernova Factory



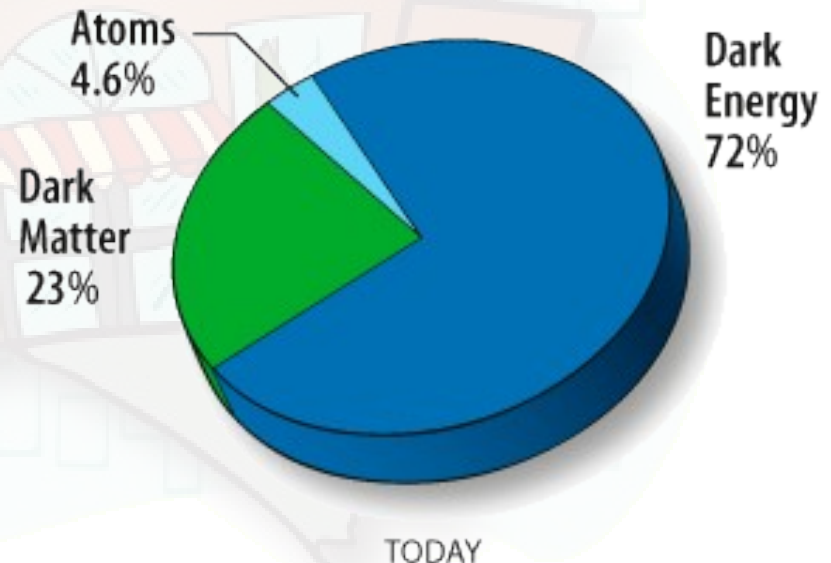
**Yannick Copin**

Institut de physique nucléaire de Lyon  
Université Lyon 1

# Très bref rappel de cosmologie

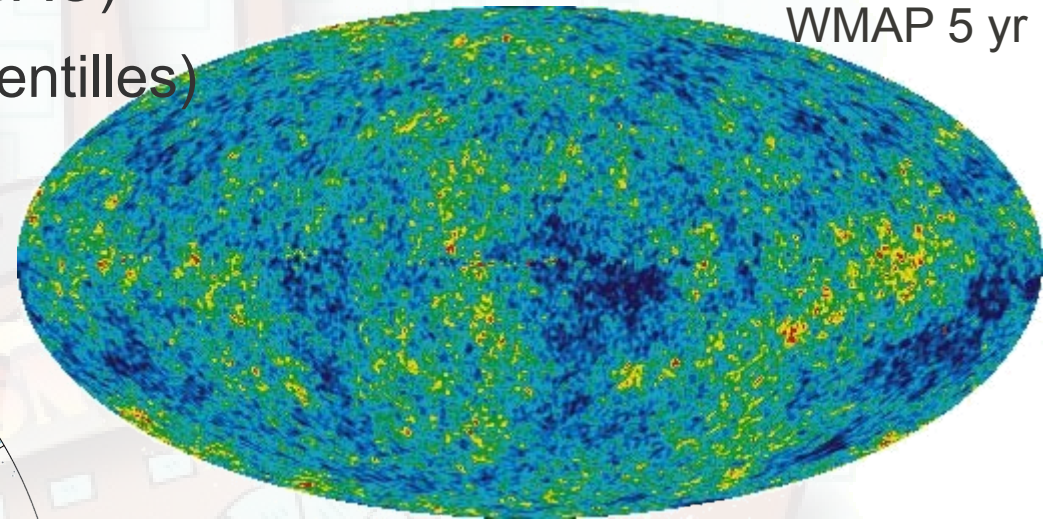
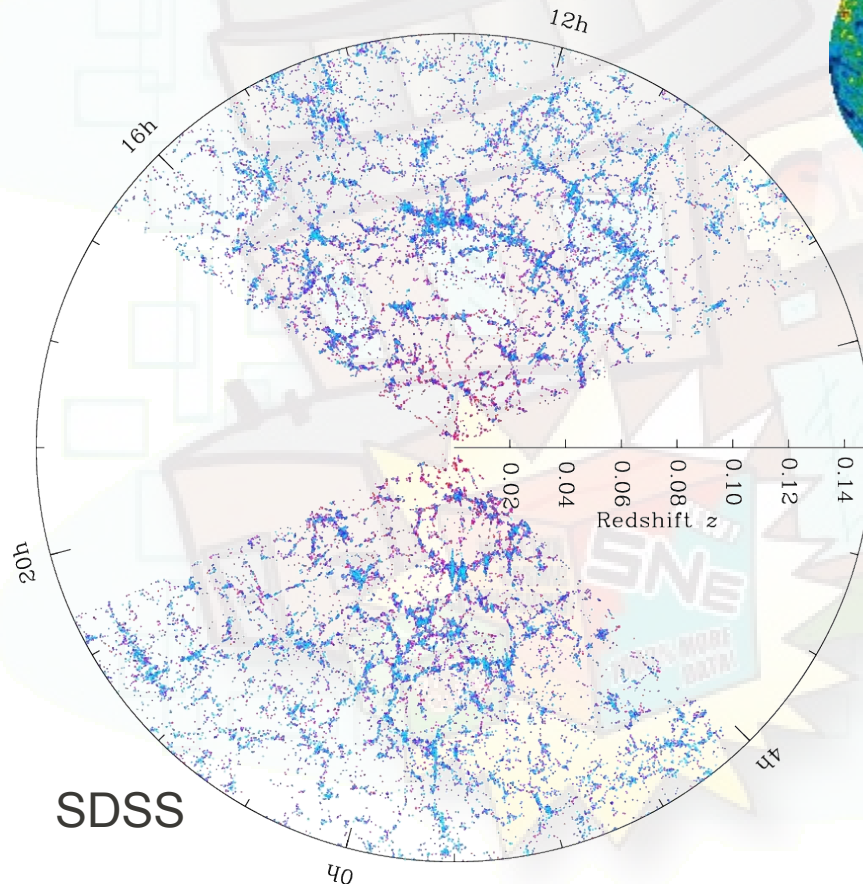
$$\Omega_{\text{total}} \hat{=} \sum_{\substack{\text{composantes } i \\ (M, \Lambda, \gamma, \nu, \dots)}} \Omega_i = 1 + \frac{k c^2}{H_0^2} \hat{=} 1 - \Omega_k$$

- Les équations de Friedmann relient l'expansion de l'Univers à son contenu énergétique
- Paramètres cosmologiques
  - ▶ Densité en énergie  $\Omega_i$  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  $k$ 
    - $k = 0$  :  $\rho = \rho_c = 3H^2/8\pi G$ , 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)**

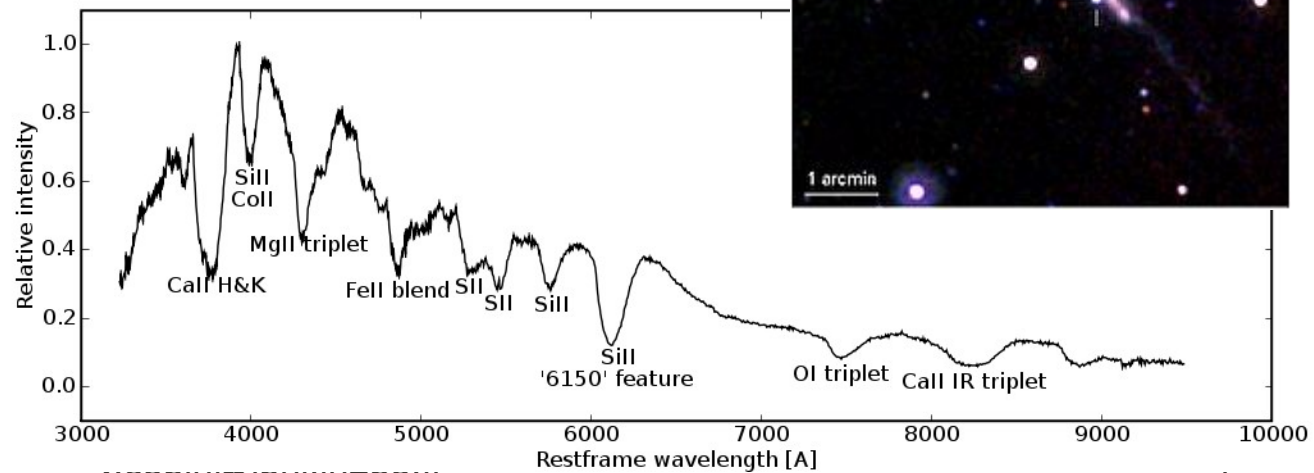
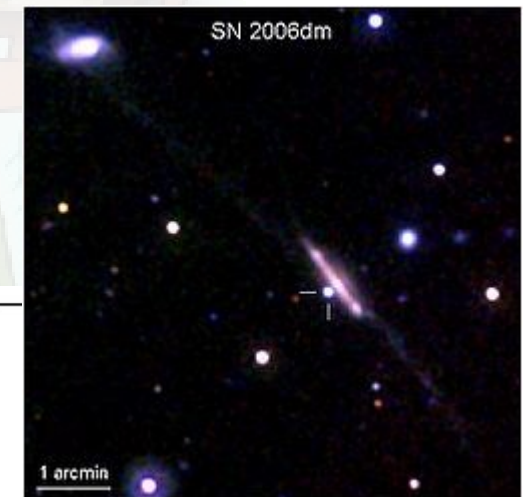
- Explosion thermonucléaire d'(au moins) une naine blanche C+O approchant la masse critique de Chandrasekhar
- Relative **homogénéité**
  - $M_B \sim -19.3 \pm 0.4$  au max de luminosité
- Visibles à des distances cosmologiques

- Identification spectroscopique

- ▶ SN II : raies d'H

- ▶ SN Ia : pas d'H, raie de SiII

- Mais il existe quelques objets « exotiques »



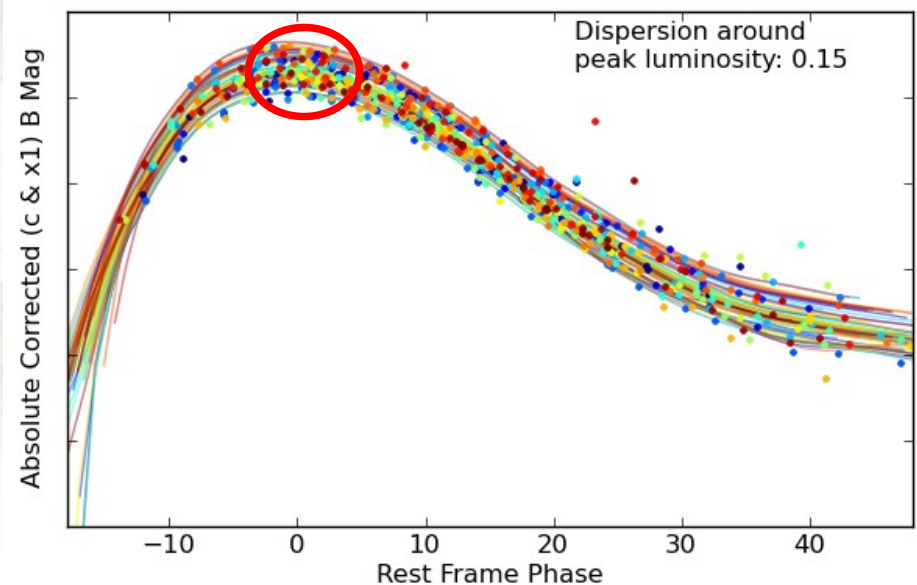
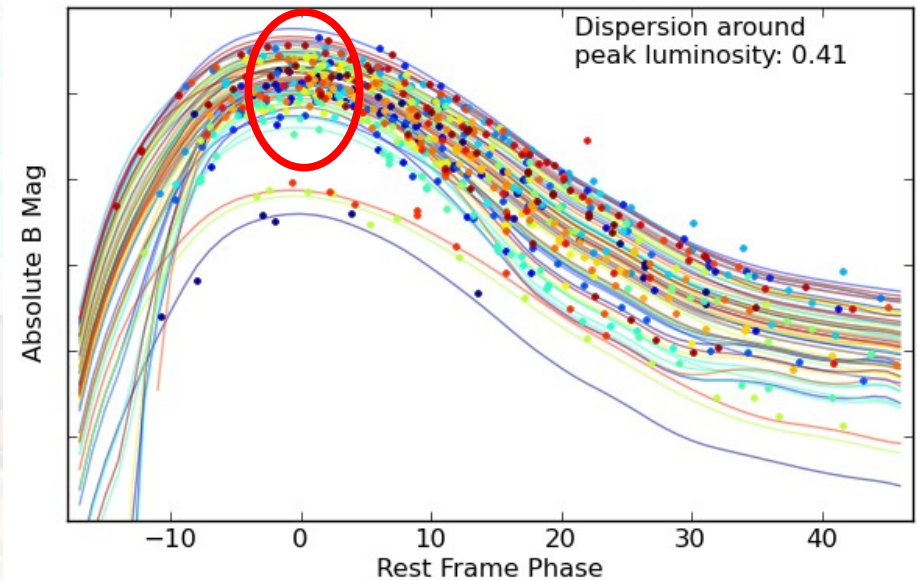
# SNe Ia, chandelles standard

- **Quasi chandelles standard**

- ▶ Variabilité brute ~40%
- ▶ Variabilité intrinsèque
  - Composition du progéniteur
  - Conditions d'allumage de la réaction
- ▶ Variabilité extrinsèque
  - Extinction 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

- 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.

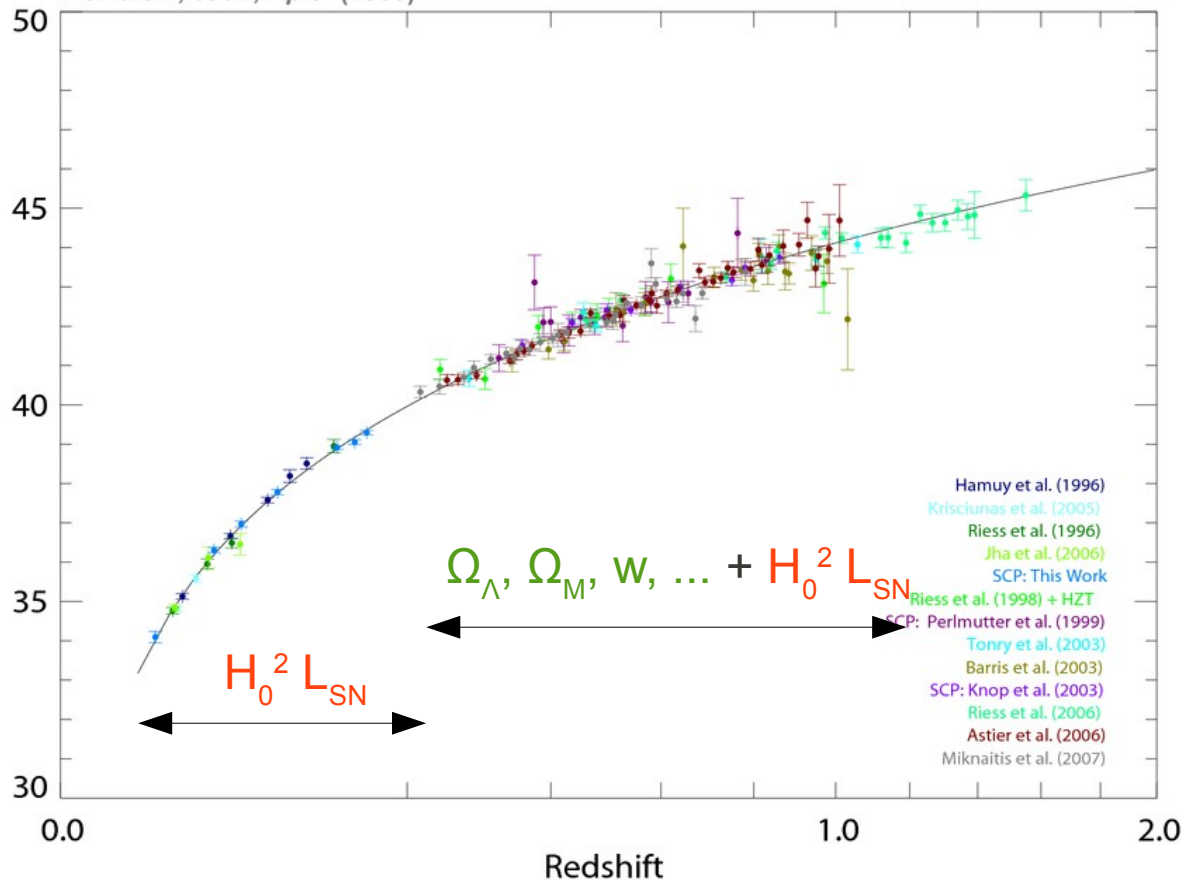
### ▶ Paramètre de « nuisance »

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

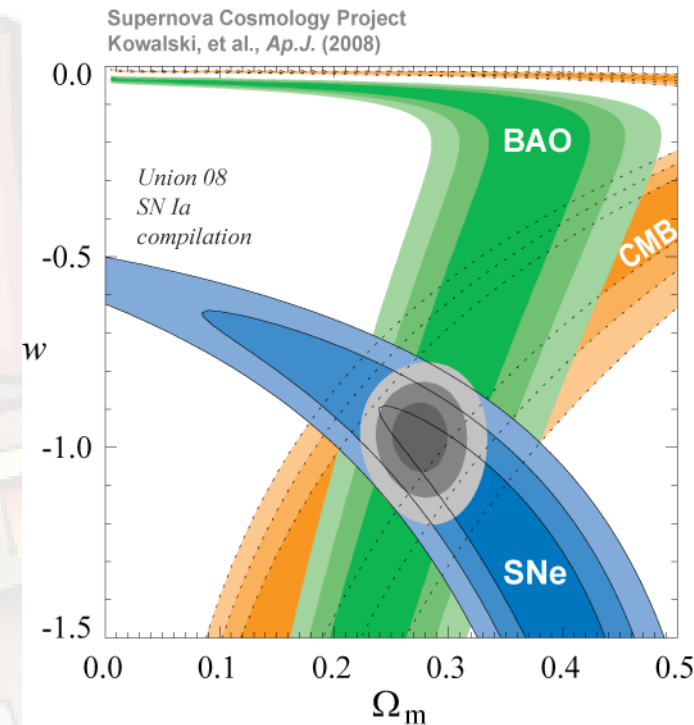
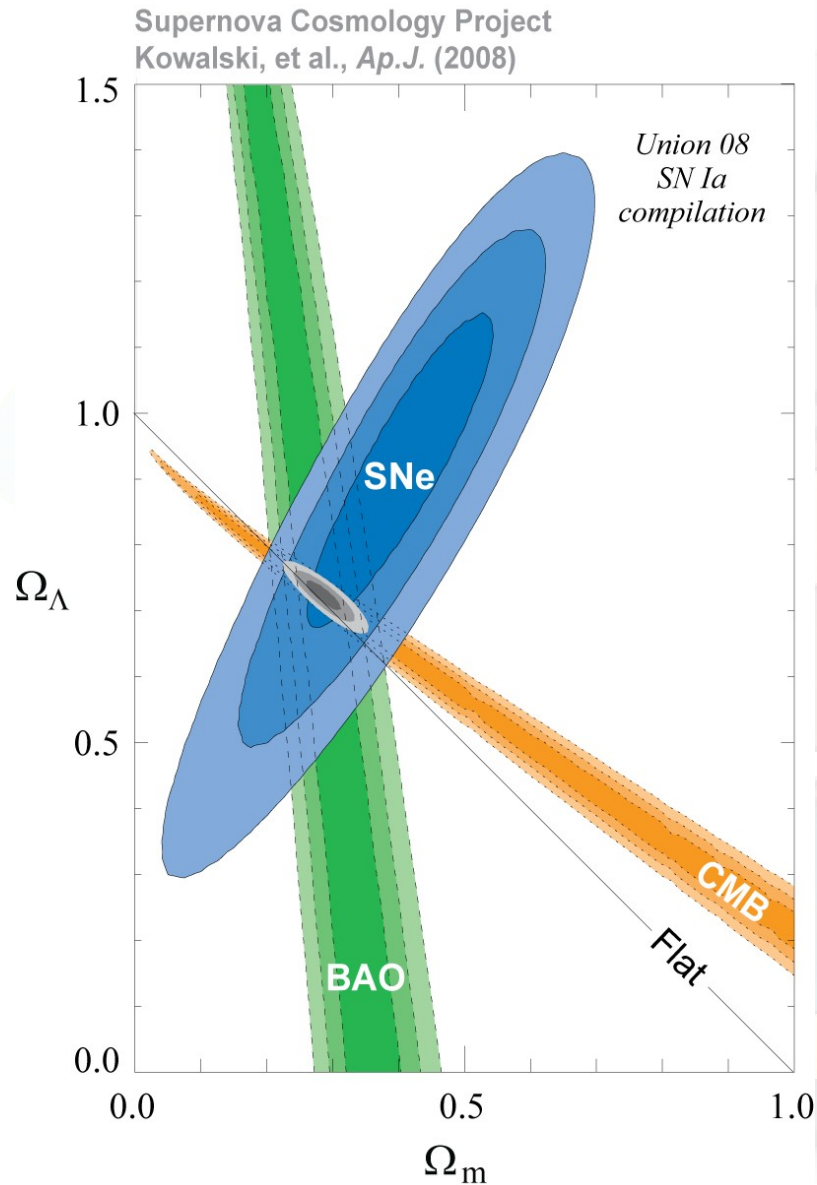
### ▶ Les techniques $z \gtrsim \sim 0.2$ sont différentes

- Échantillons « distincts »

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



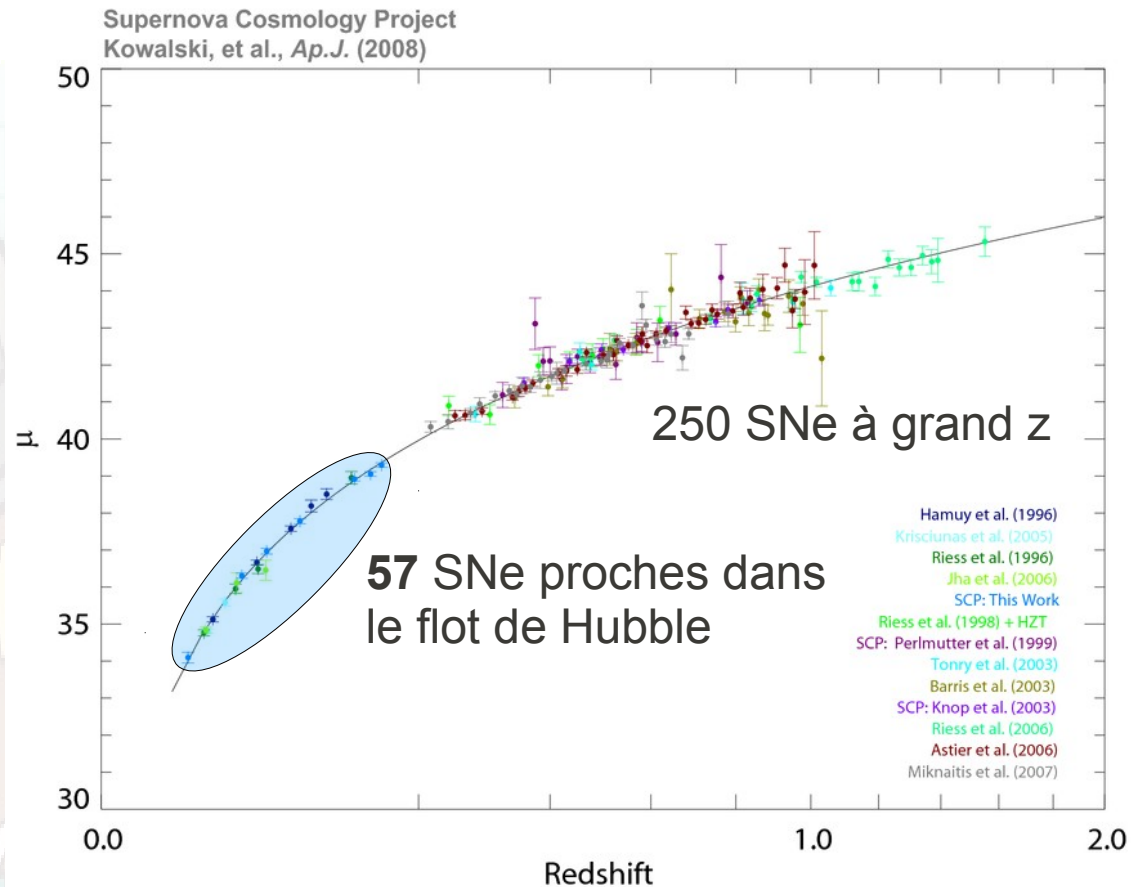
# Modèle de concordance



- $\Omega_T \sim 1.0 \pm 0.02$  (Komatsu et al. 10)
- ▶ Univers euclidien
- $\Omega_\Lambda \sim 0.73 \pm 0.01$ ,  $\Omega_M \sim 0.27 \pm 0.01$
- ▶ Dominé par l'énergie sombre
- $w \sim -1.0 \pm 0.1$

# Importance des SNe Ia 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 $z < 0.1$

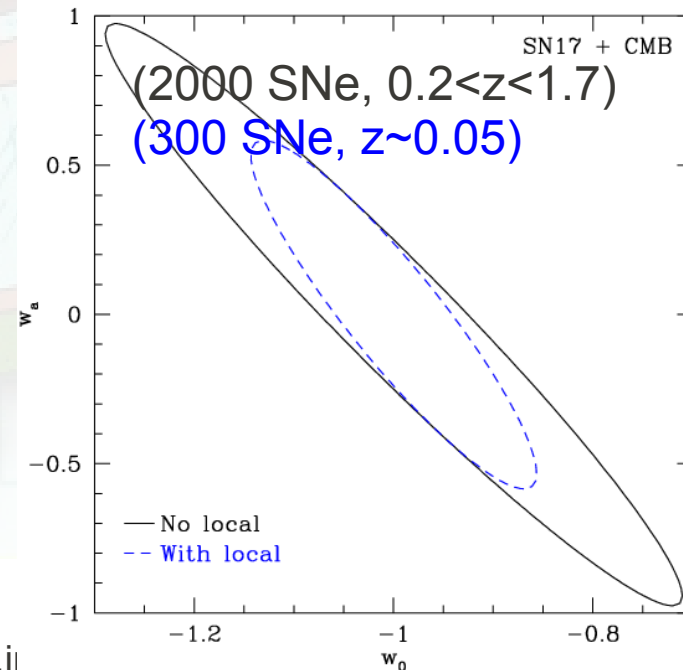
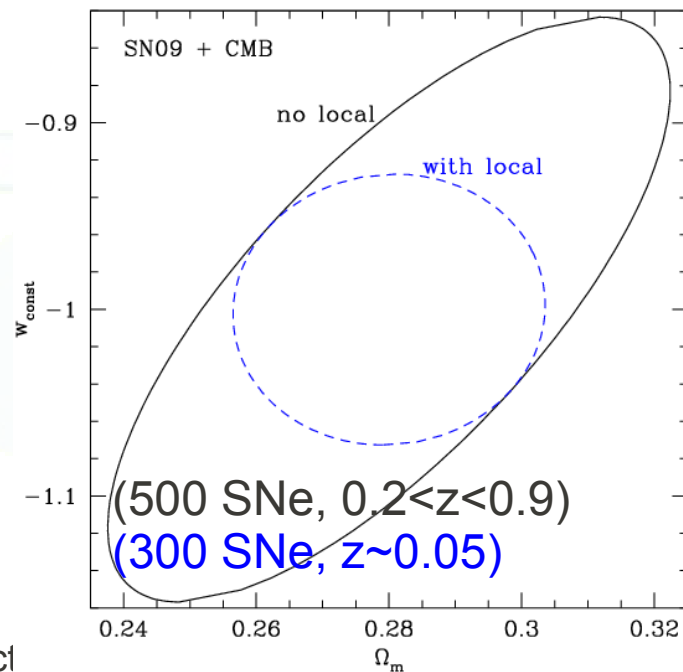
- Linder (2006)

- ▶ *Redshift* optimal  $\sim 0.05$  (flot de Hubble)

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

- ▶ 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  $\sim 3$  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 SNf-I
- ▶ 2010 : transition SNf-II



**LPNHE**  
Laboratoire de  
physique nucléaire  
et des hautes énergies

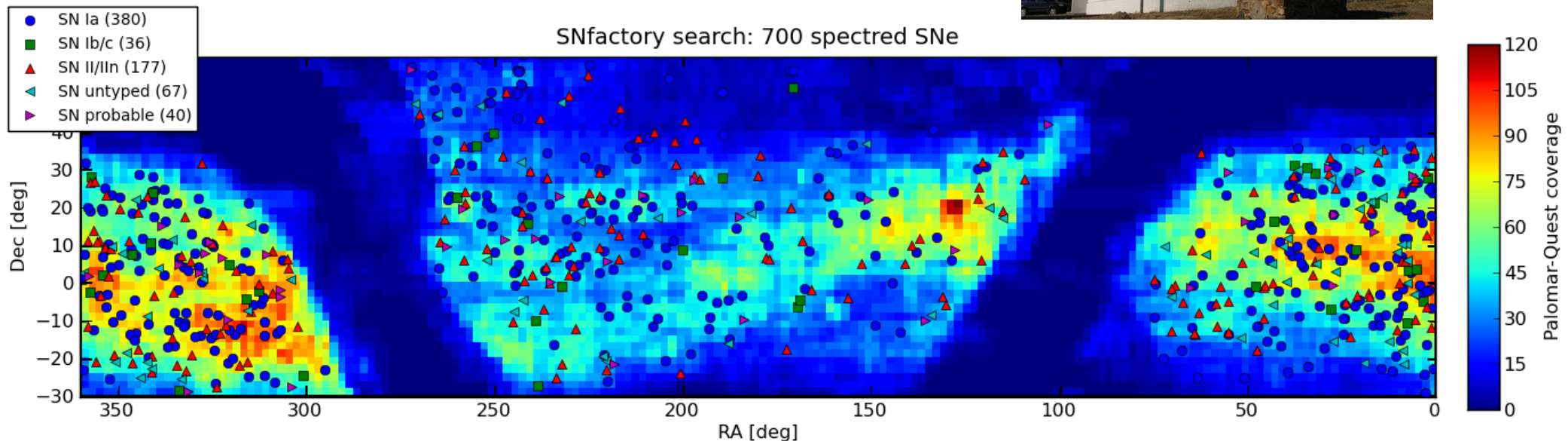


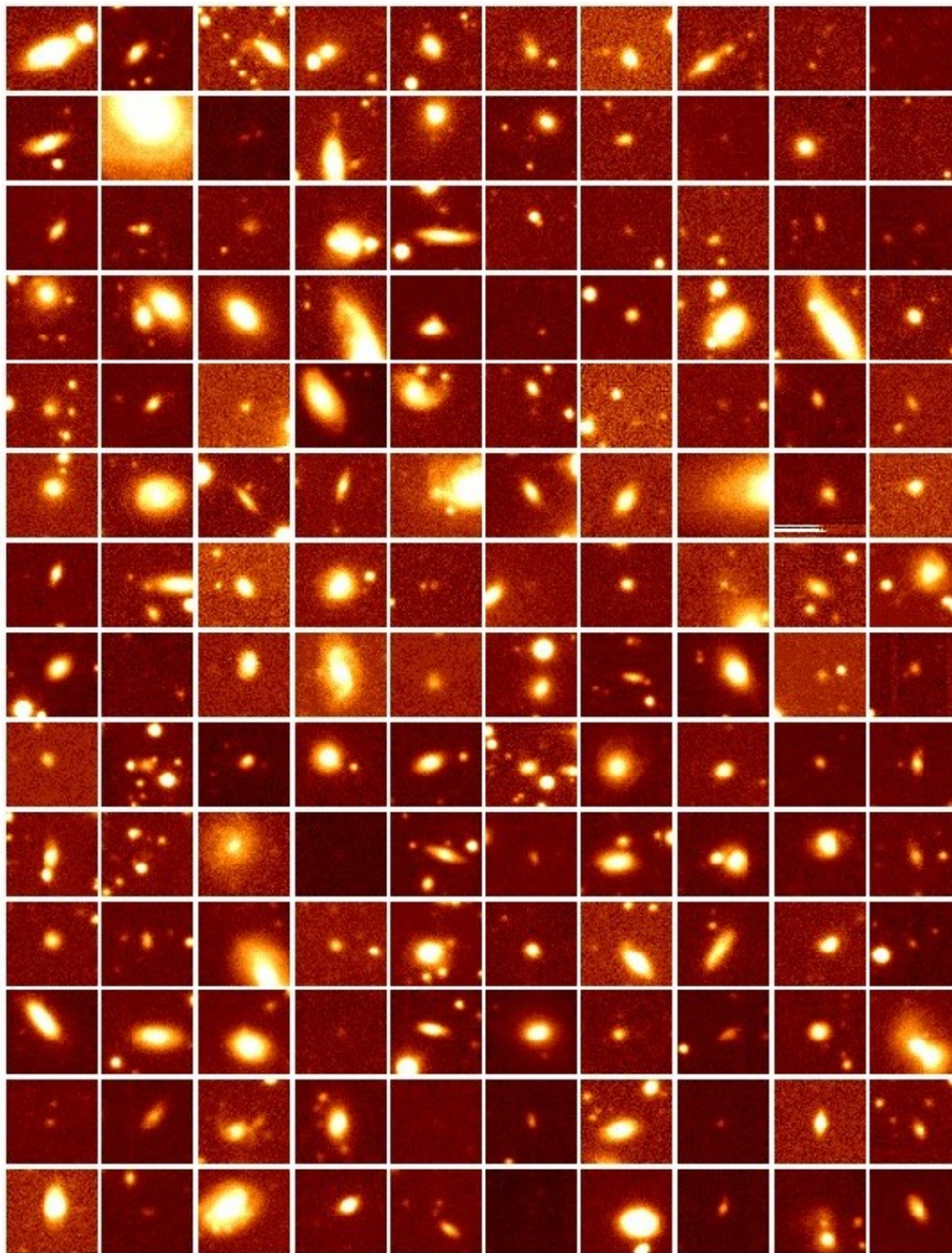
# The Nearby Supernova Factory

- 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 (US)
    - ▶ Palomar 1,2 m + Quest II
    - ▶ Non biaisée
  2. Suivi spectro-photométrique (Fr)
    - ▶ 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 deg<sup>2</sup>
  - ▶ 350-850 deg<sup>2</sup>/nuit, profondeur 20.5 mag.
  - ▶ 30 000 images, ~50 Gb par nuit
  - ▶ Couverture  $2\pi$
- Plus de 1000 candidats en 28 mois



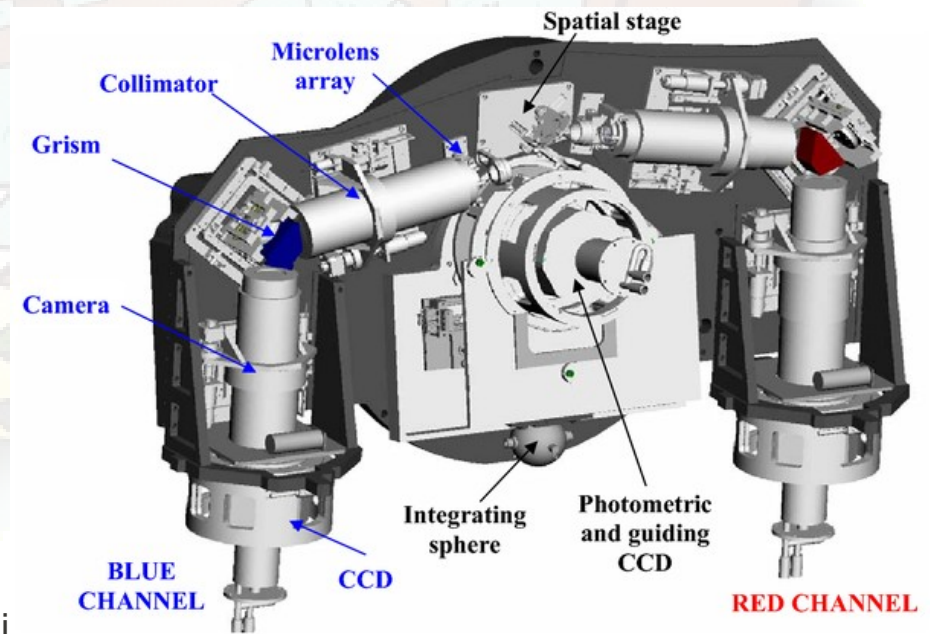
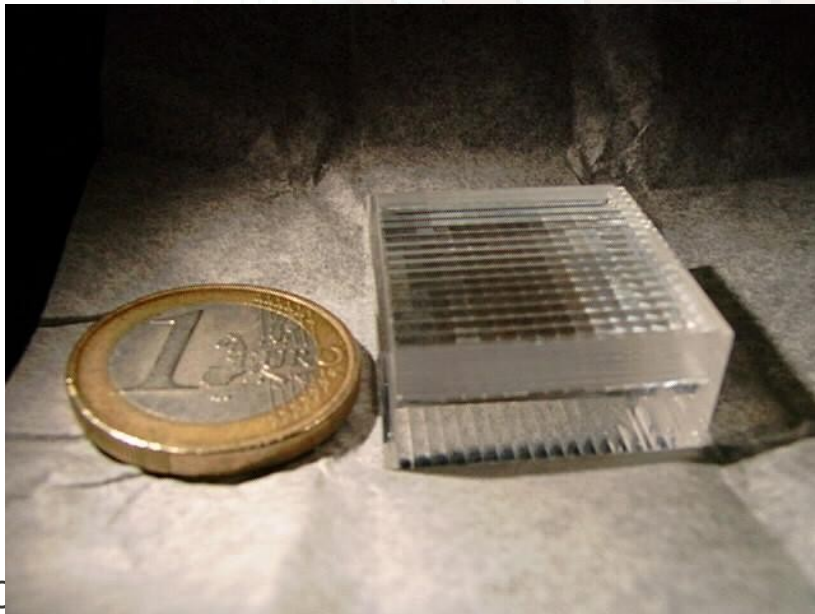


Mosaic of thumbnails centered on the locations of each of SNe Ia discovered by the SNfactory (~30 images coadded).

210 SNe published (ATELs), search results available from [snfactory.lbl.gov](http://snfactory.lbl.gov) (open access honor system)

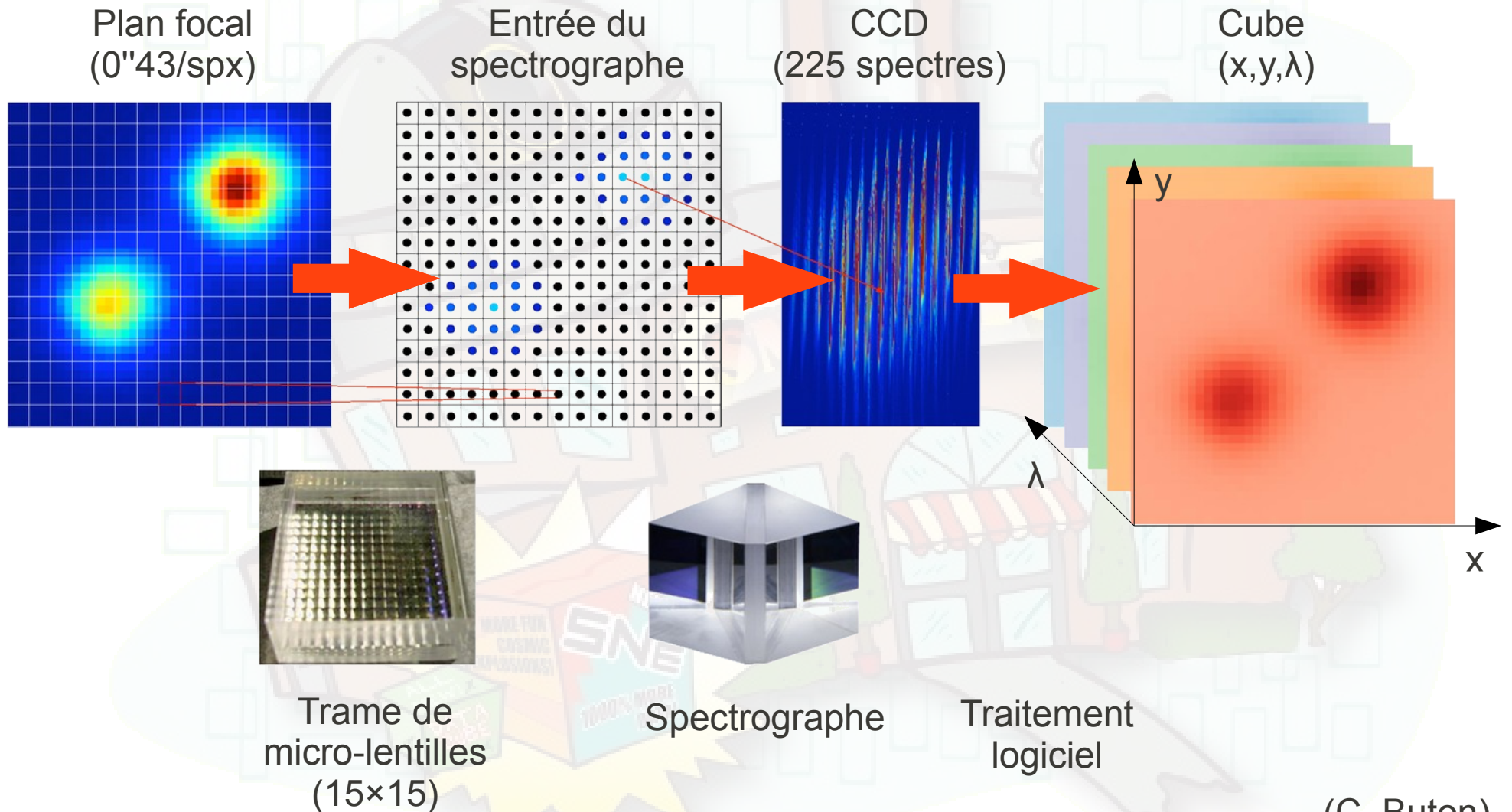
# SuperNova Integral Field Spectrograph

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





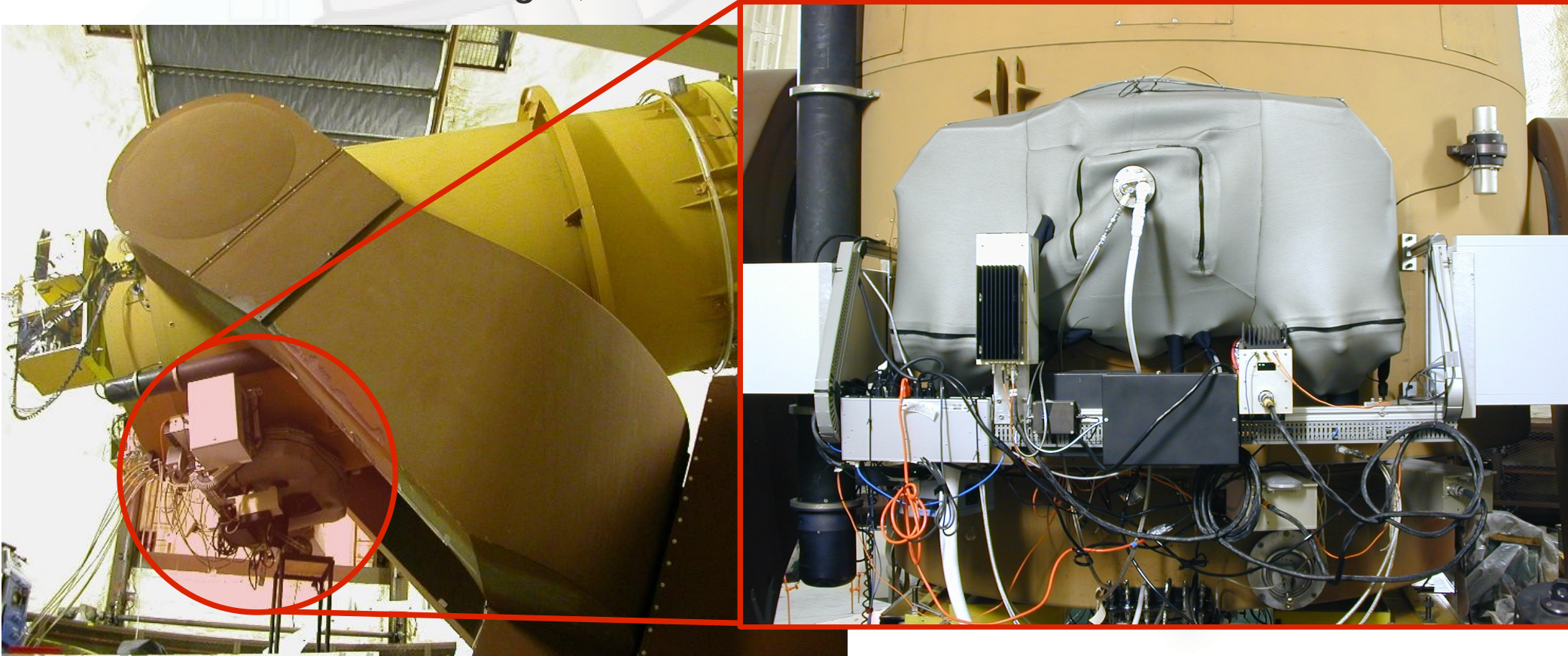
# Principe optique d'un IFS « à la Tigre »



(C. Buton)

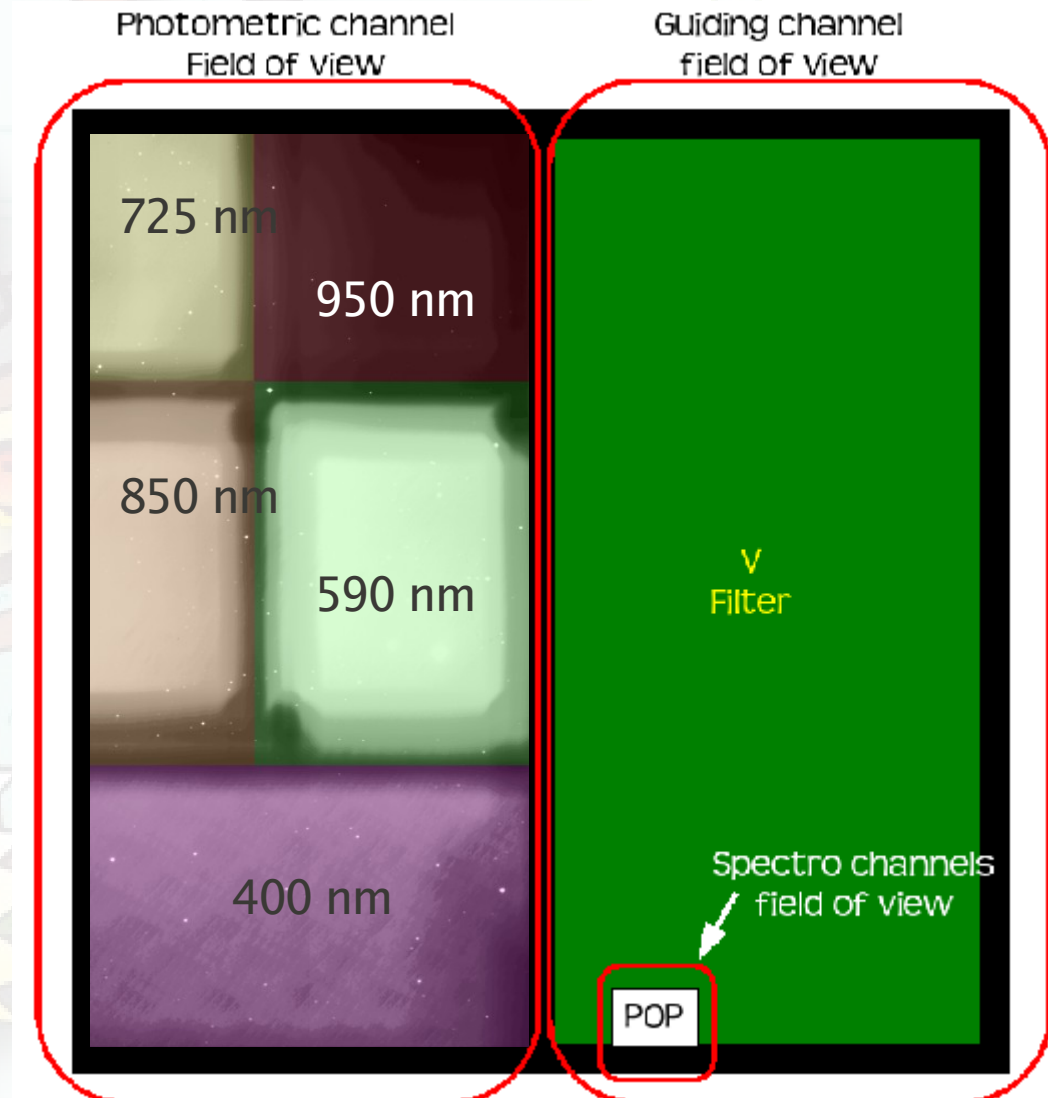
# SNIFS sur le télescope UH 2.2 m

- 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

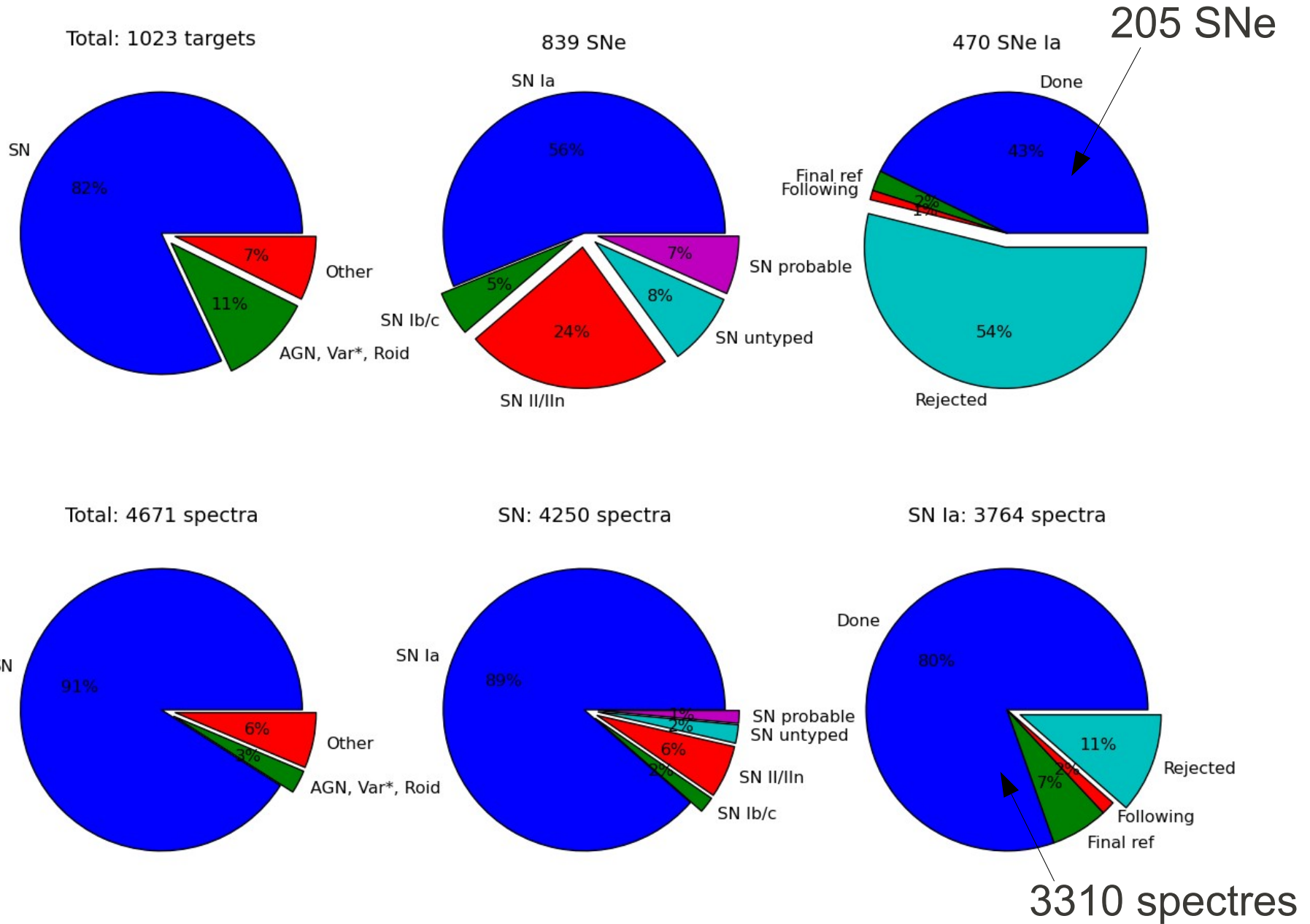


# Voies de guidage et photométrie

- $2 \times 4'8 \times 9'6$
- 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



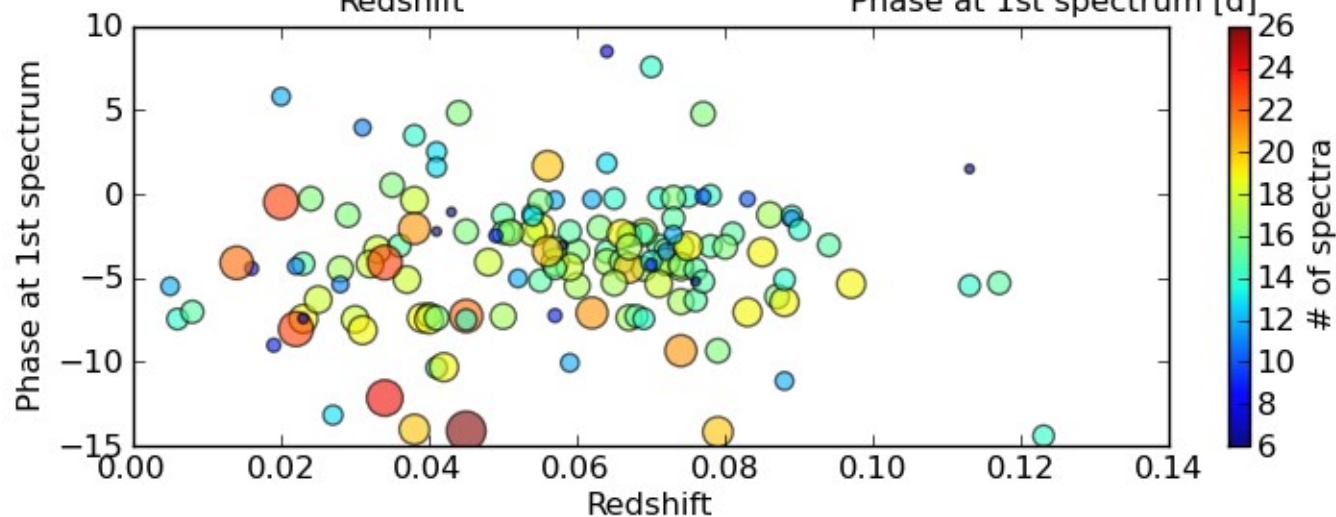
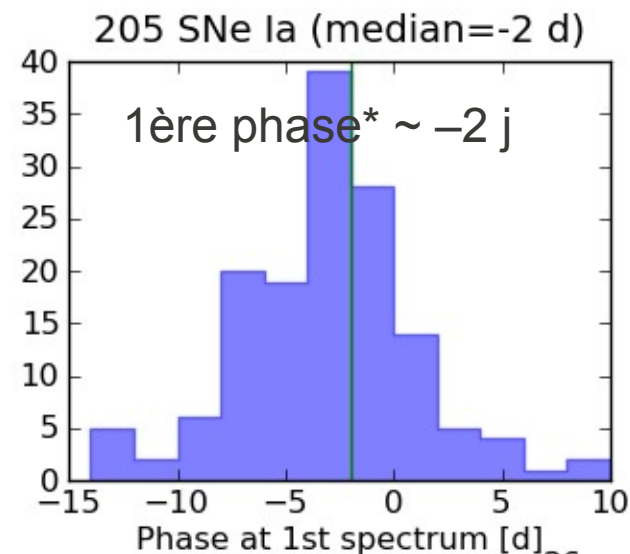
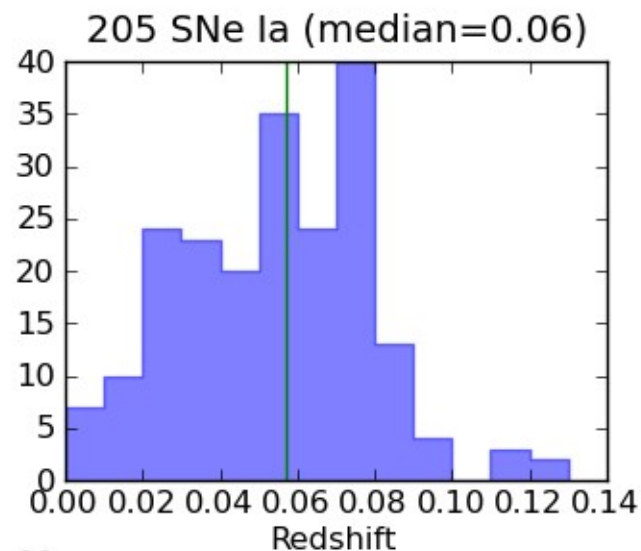
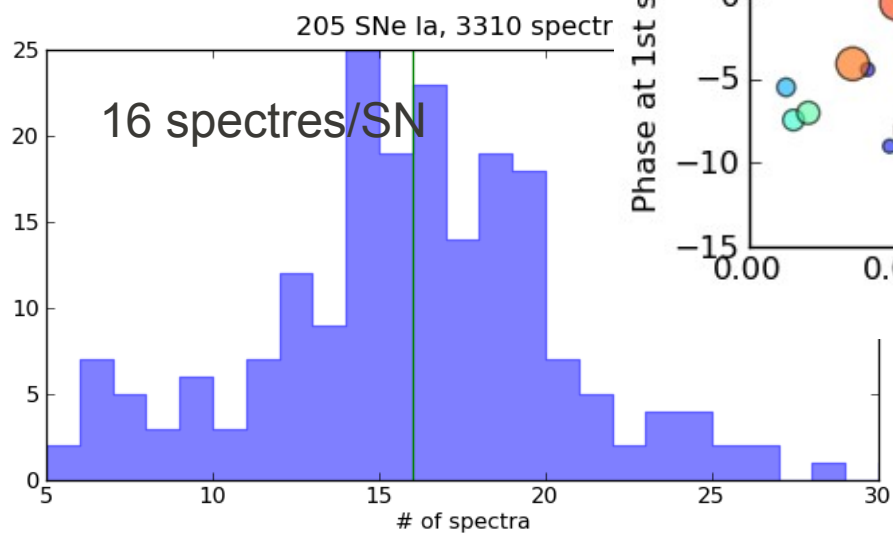
# Les observations SNIFS (oct. 2010)



# Échantillon SNfactory (oct. 2010)

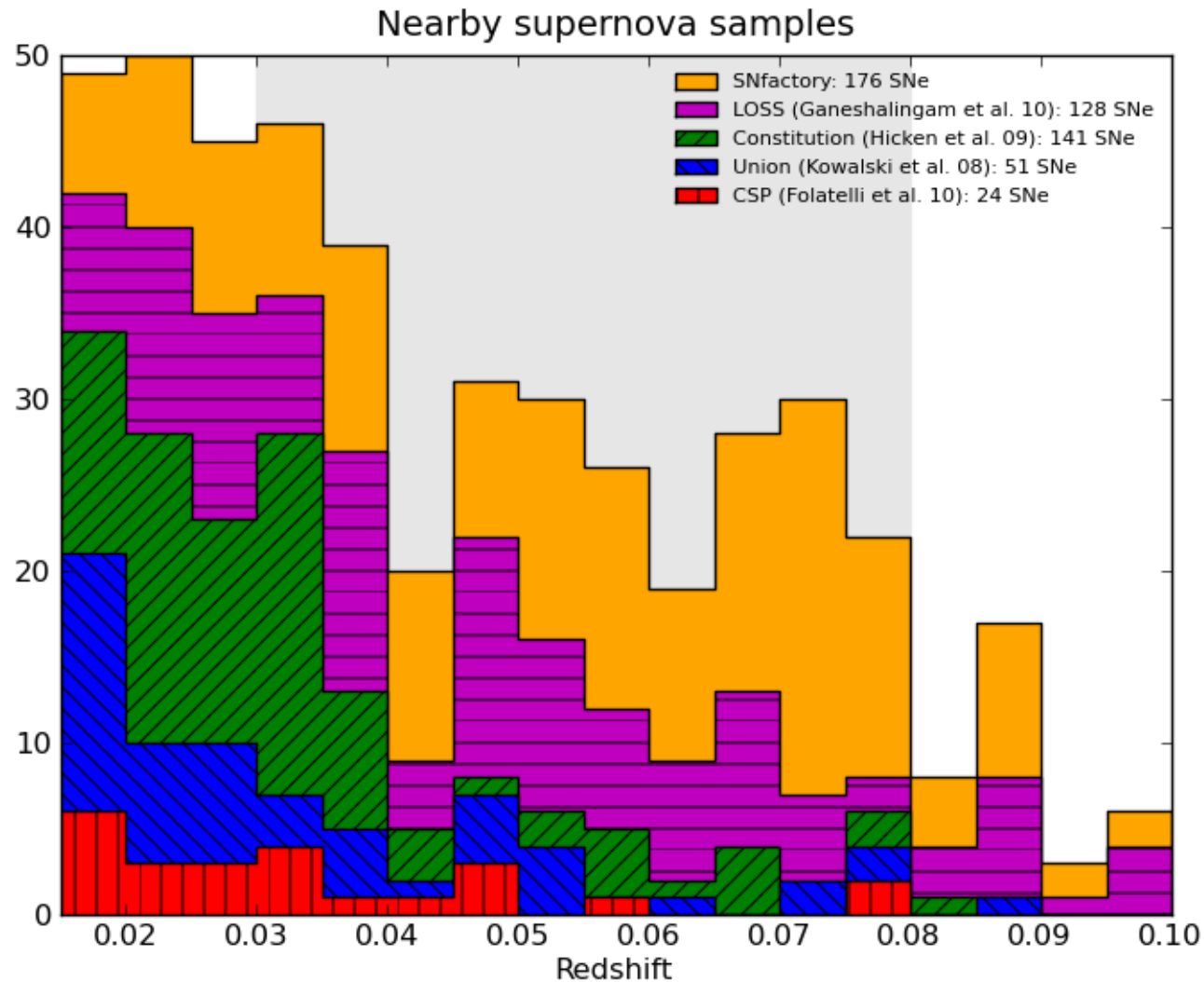
- **205 SNe avec plus de 5 spectres**

- ▶ 3310 spectres
- ▶ 16 spectres/SN (médiane)
- ▶ 181 SNe avec >10 spectres



\* Phase SNID du 1er spectre

# Les échantillons de SN proches





# Éléments de spectro-photométrie

# Étalonnage spectro-photométrique

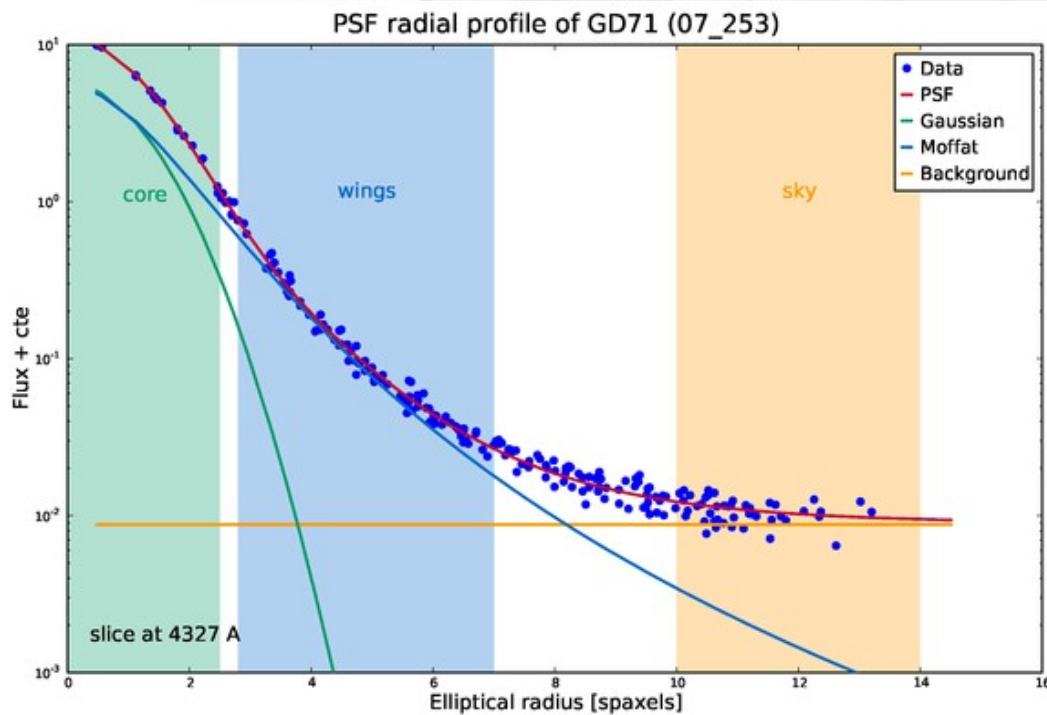
- L'objectif est d'atteindre une précision à l'échelle du **pour-cent** sur l'ensemble de la courbe de lumière de la SN
  - ▶ ...malgré un instrument et un traitement des données complexe
  - ▶ ...malgré la lune, les nuages, l'atmosphère, etc.
- Un domaine ( $\sim$ ) maîtrisé en photométrie, mais peu 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

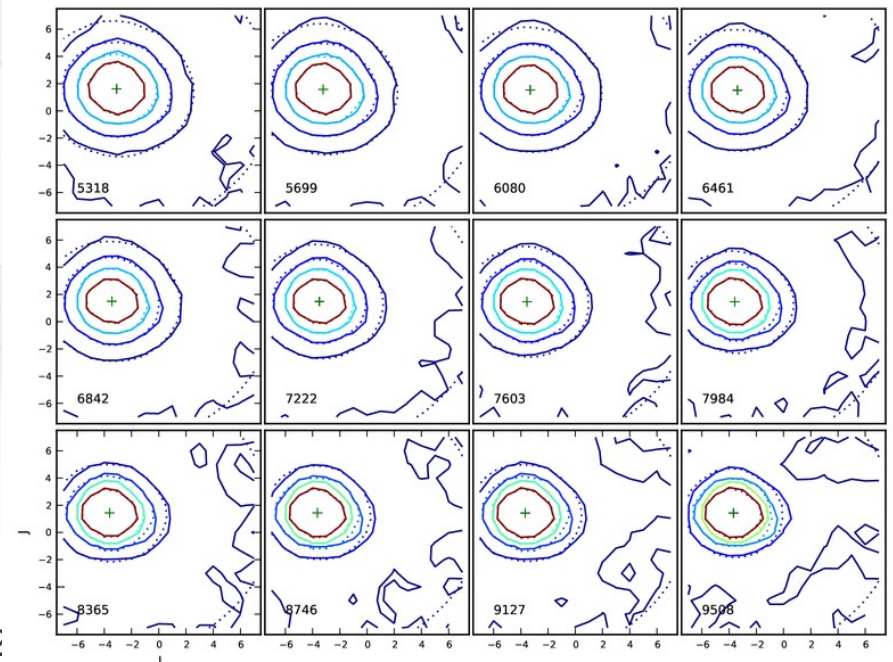
- ▶ Le champ de vue ( $6''5 \times 6''5$ ) est trop petit pour une photométrie d'ouverture précise



- Modèle semi-empirique

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

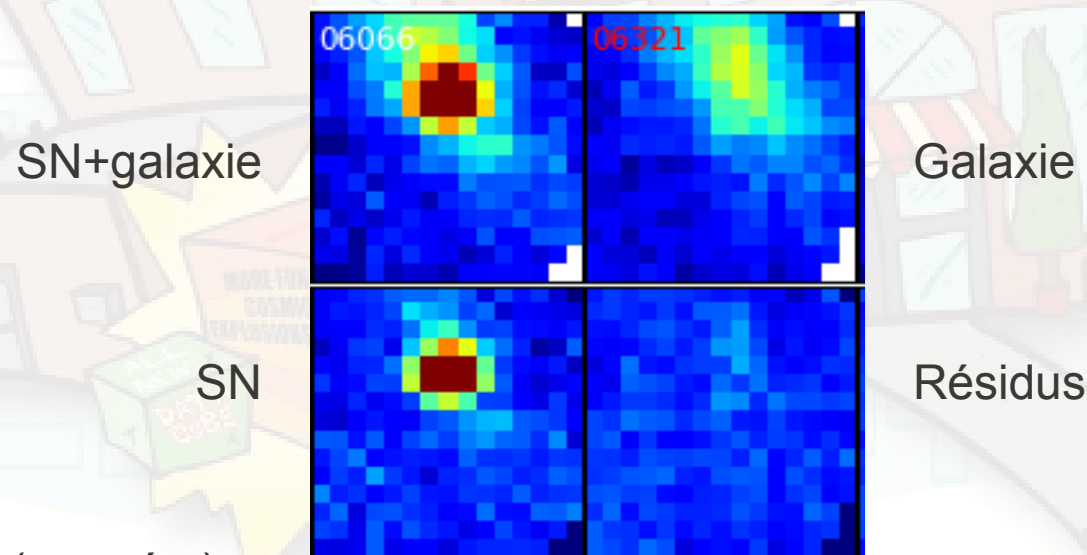
- Précision en flux : 0,7/1,5%



C. Buton (thèse 2009)

# 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 ( $\geq 1$  an après)
    - Alignement et adaptation de PSF (*seeing*)
    - Soustraction de la contribution galactique
  - ▶ Extraction de la SN débarrassée de son fond structuré



S. Bongard et al. (en prép.)

$t_0$   $t_0 + 255j$   
y.copin@ipnl.in2p3.fr

# 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 ( $\chi^2$ )

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

Extinctions atmosphériques  
[mag/airmass]

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

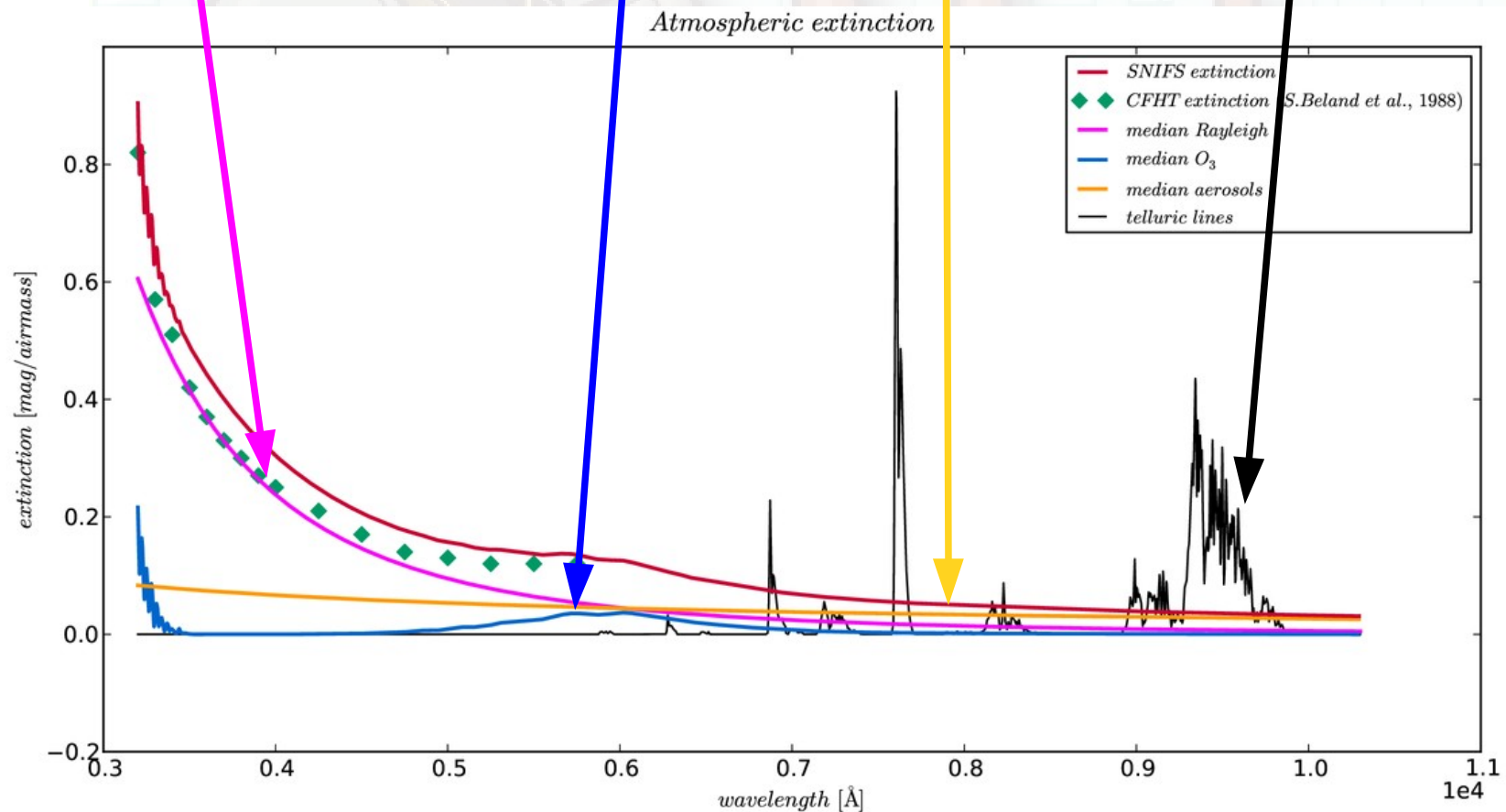
Spectre étalonné  
[erg/s/cm<sup>2</sup>/Å]

Solution en flux  
[erg/s/cm<sup>2</sup>/Å / pseudo-ADU]

# Modélisation de l'extinction atmosphérique

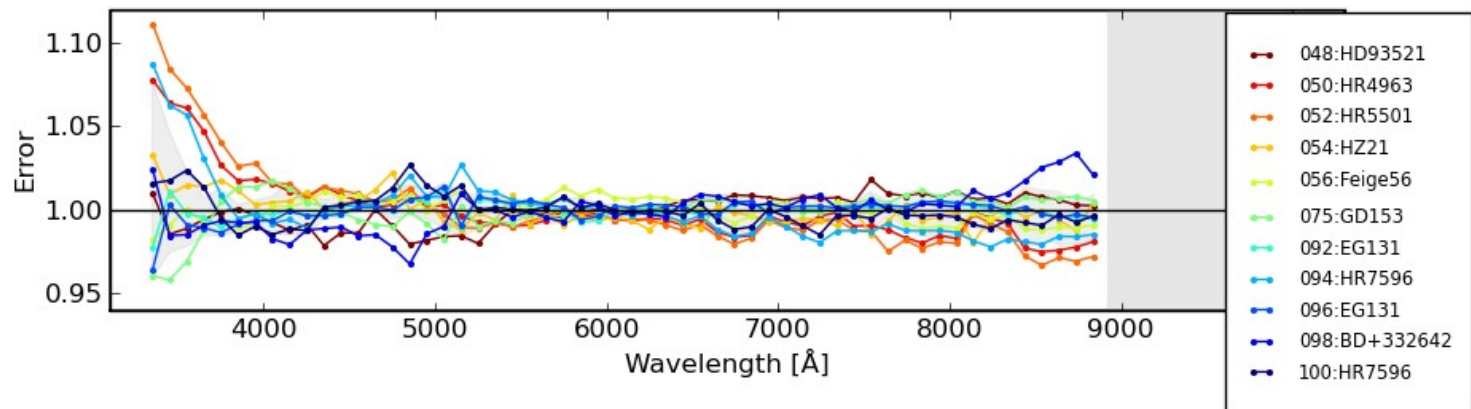
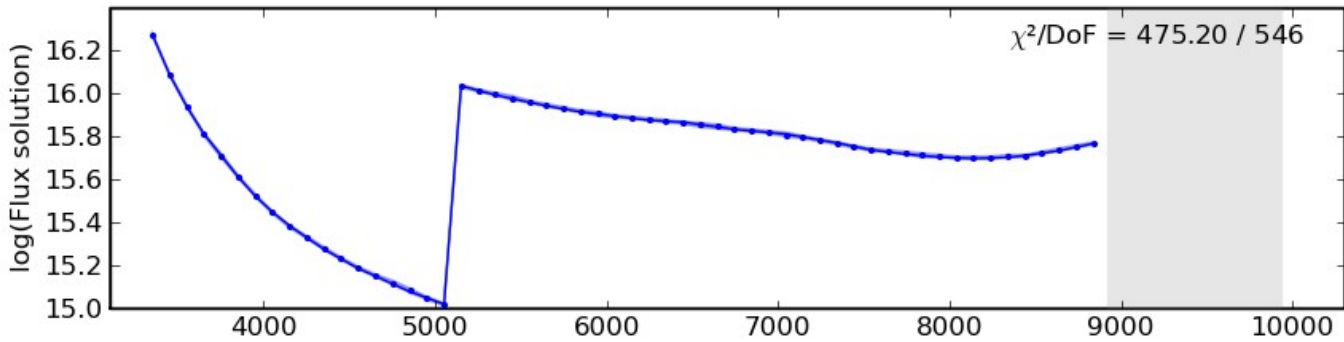
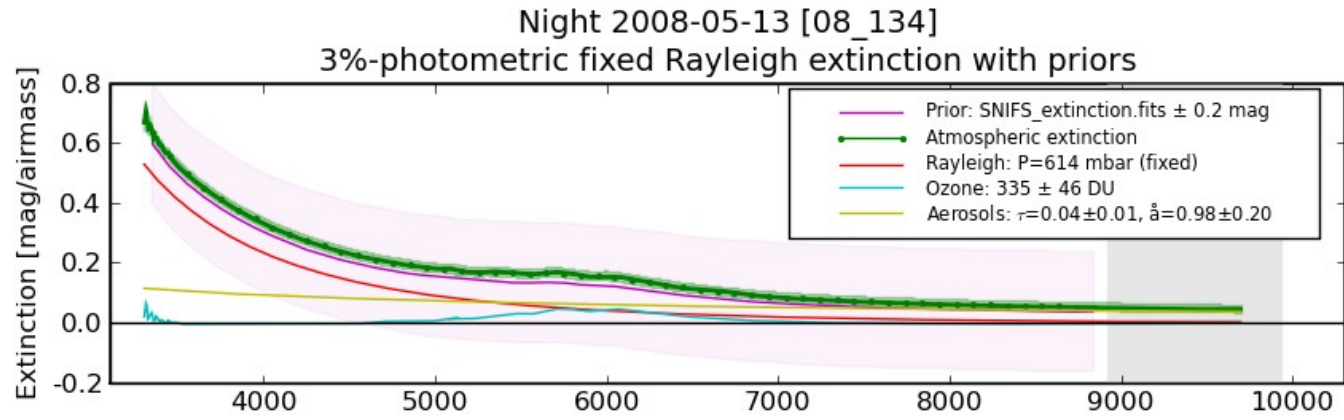
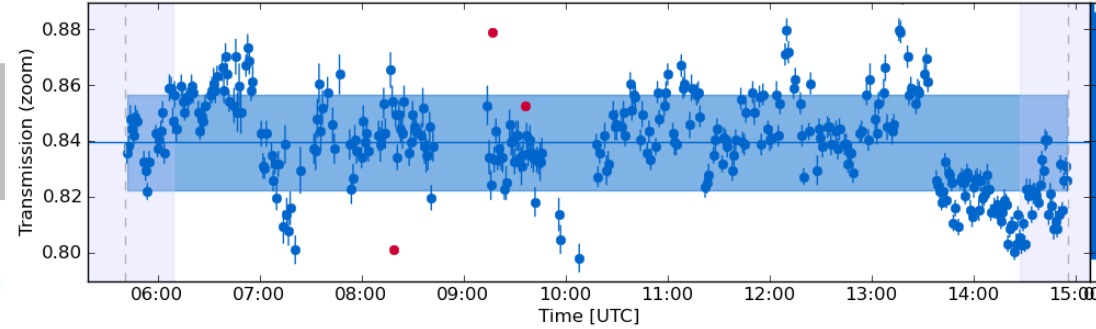
- Décomposition de l'extinction en **composantes physiques**

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



C. Buton (thèse 2009), Burke et al. (2010)

# Cas photométrique



Atténuation  
atmosphérique  
en temps réel  
SkyProbe  
(CFHTLS)

# 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

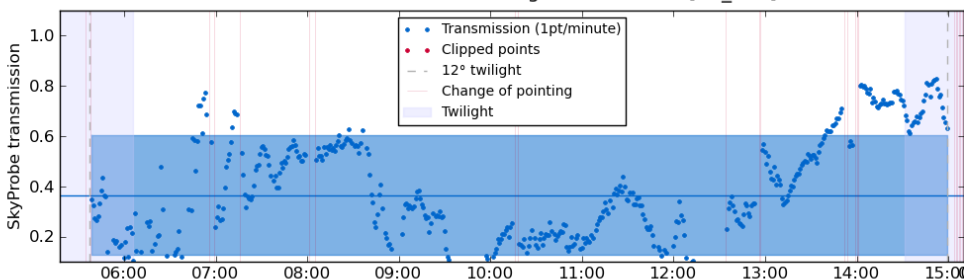
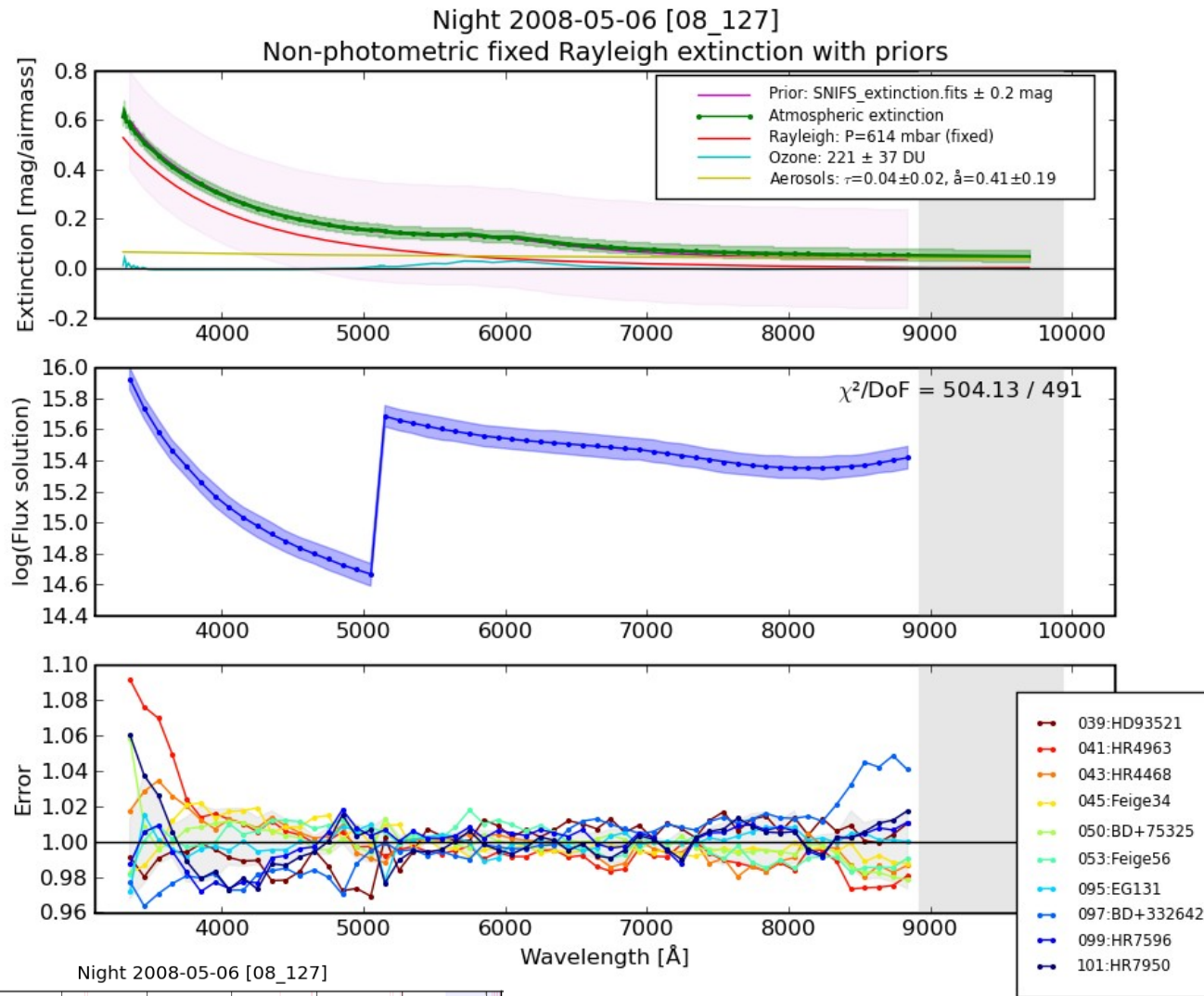
Diagram illustrating the flux calibration equation for a non-photometric night:

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

Labels and arrows in the diagram:

- Top left: Spectre observé à masse d'air  $z$  [pseudo-ADU] (points to  $S(\lambda)$ )
- Top right: Extinction atmosphérique [mag/airmass] (points to  $K(\lambda, t)$ )
- Bottom left: Spectre étalonné [erg/s/cm<sup>2</sup>/Å] (points to  $S^*(\lambda)$ )
- Bottom right: Solution en flux [erg/s/cm<sup>2</sup>/Å / pseudo-ADU] (points to  $C(\lambda)$ )

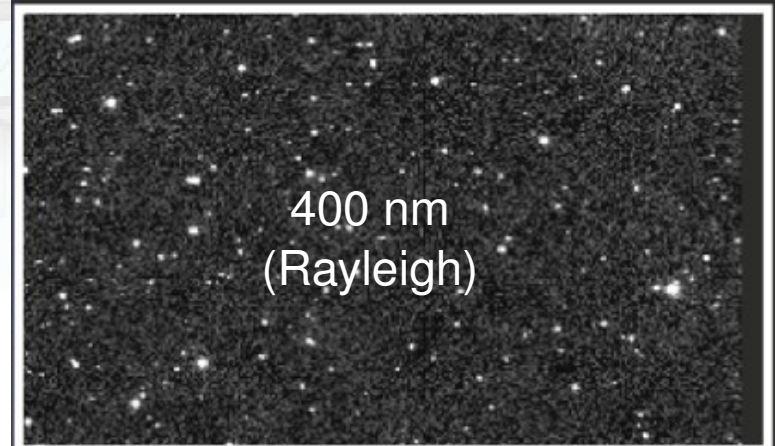
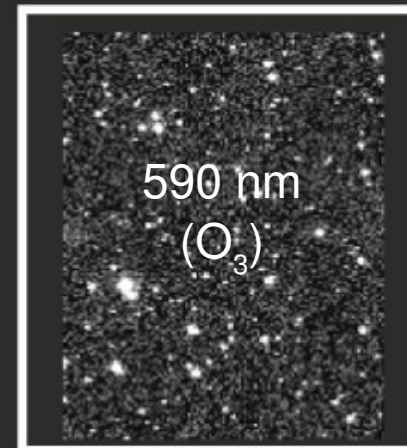
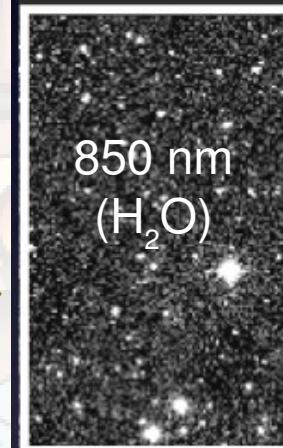
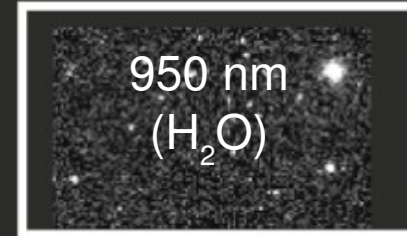
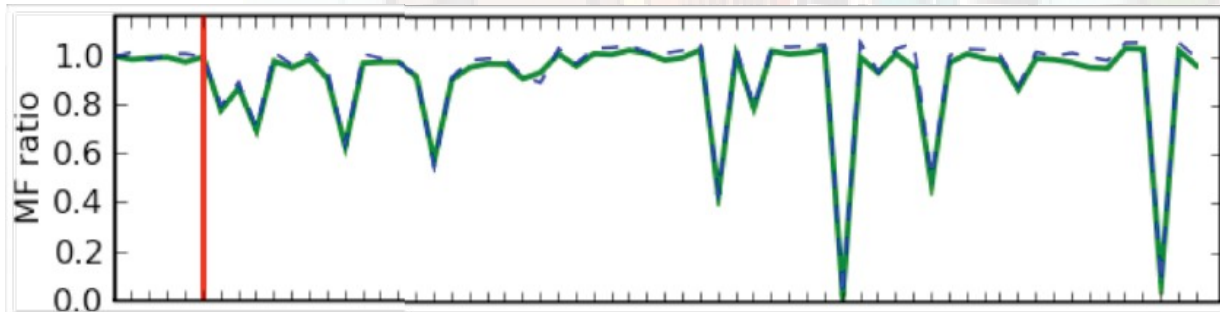
# Cas non-photométrique



C. Buton (thèse 2009)

# Cas non-photométrique

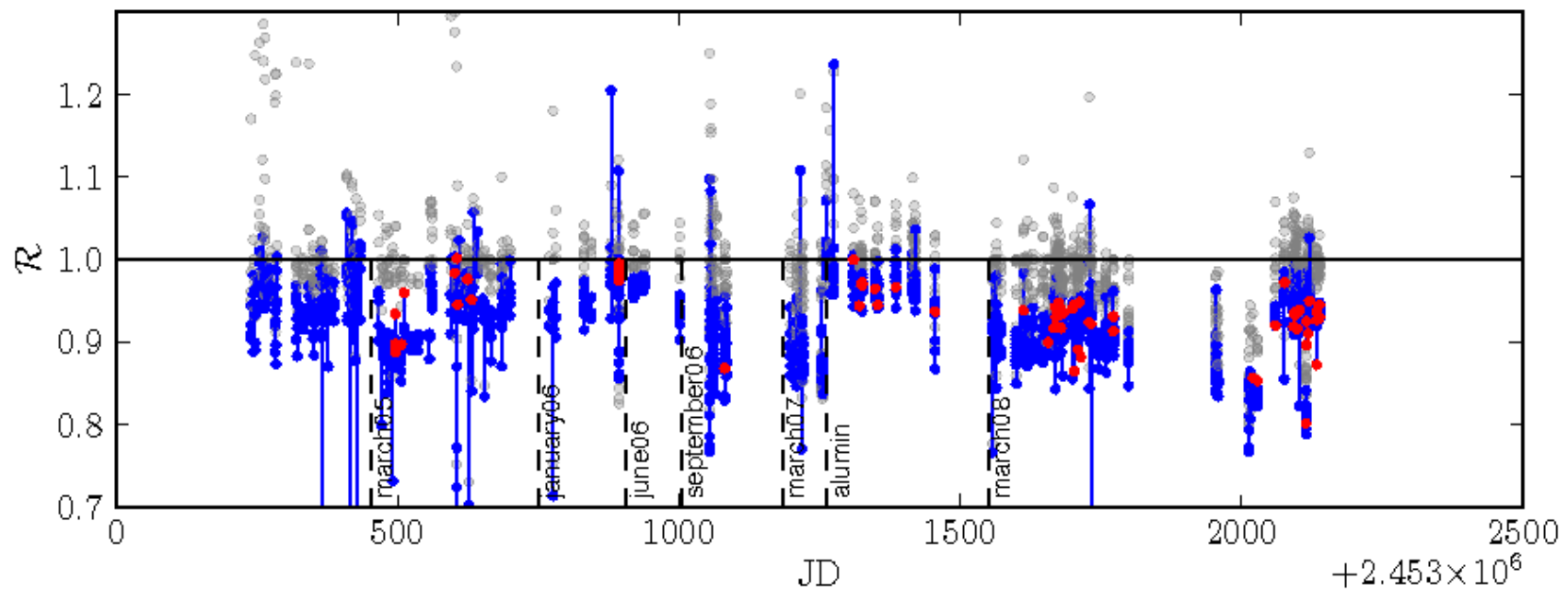
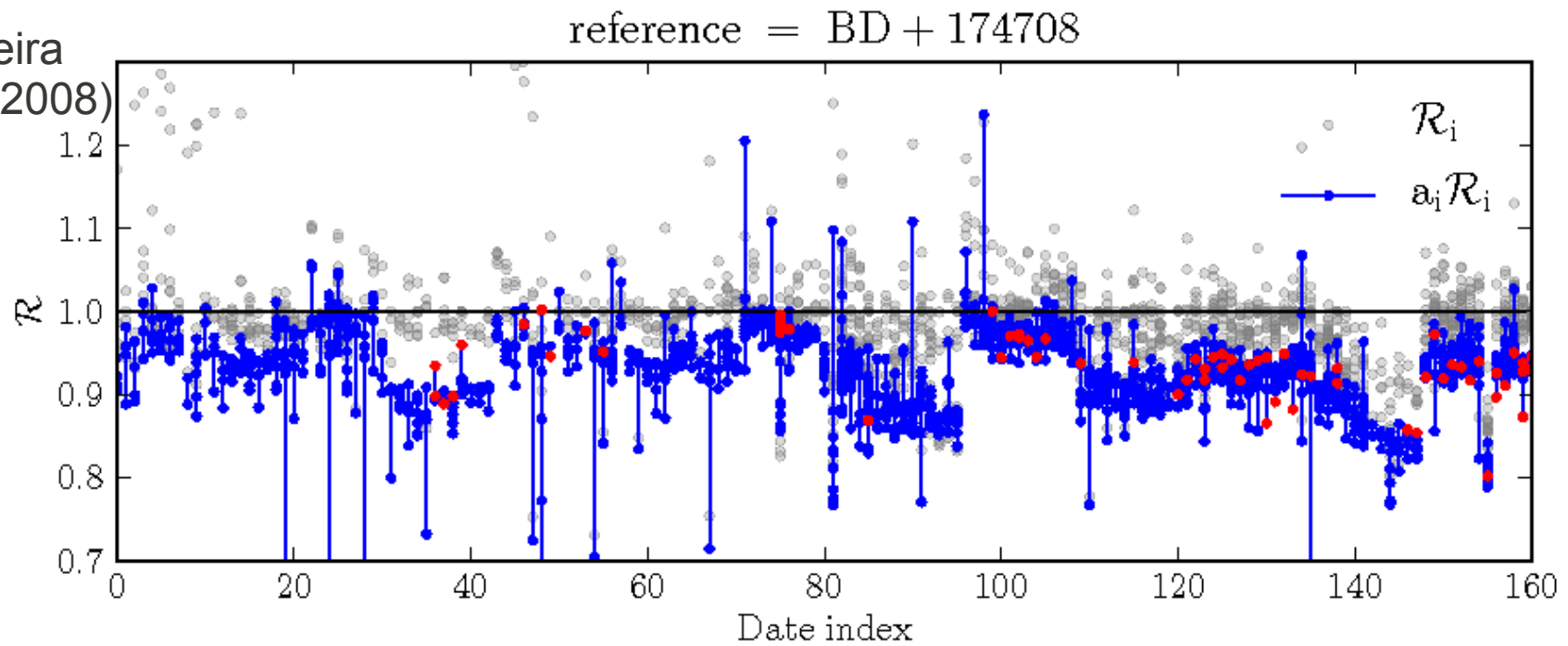
- **Suivi de l'extinction effective** durant la pose spectroscopique
  - ▶ Sources secondaires dans le MF
  - ▶ Extinction différentielle / nuits photométriques de référence
    - Auto-étalonnage
- **Hypothèse** : les nuages sont « gris »
  - ▶ Variabilité *achromatique* de l'extinction
    - $K(\lambda,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

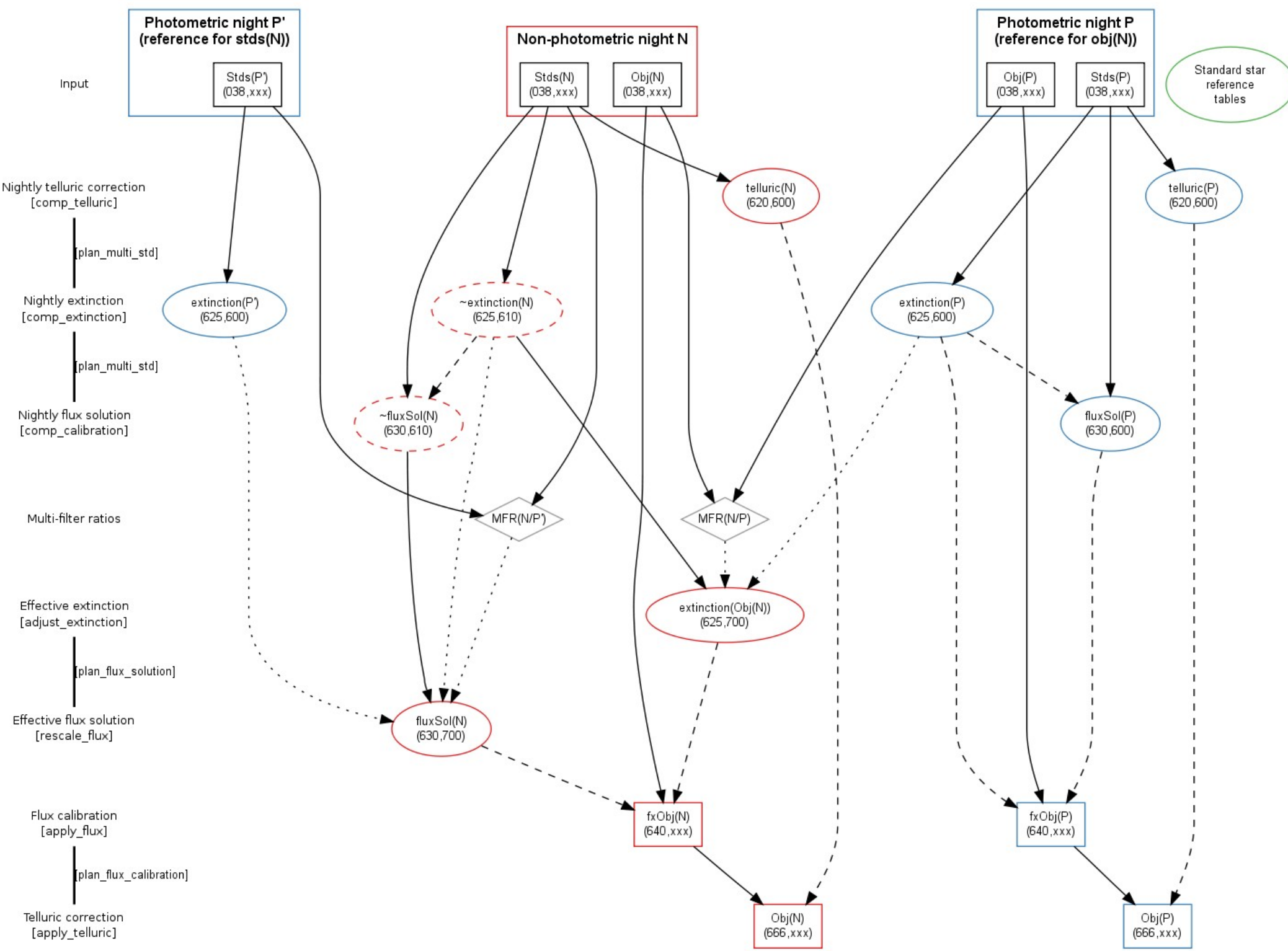




# Auto-étalonnage voie photométrique

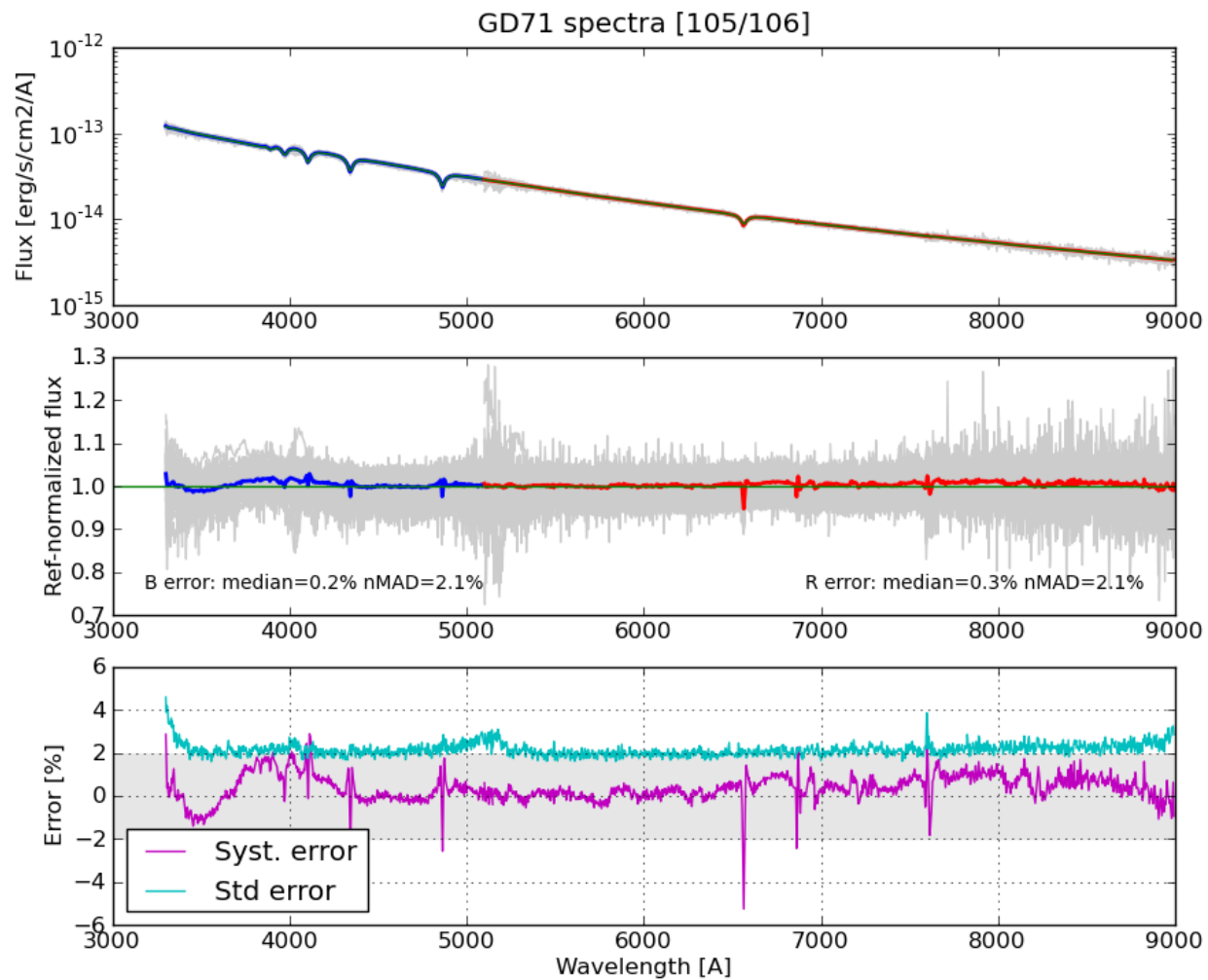
R. Pereira  
(thèse 2008)





SNIFS multi-standard flux calibration flow

# Précision spectro-photométrique



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

# Inter-étalonnage des étoiles standard

- 39 étoiles standard

- ▶ Les tables de référence proviennent de diverses sources

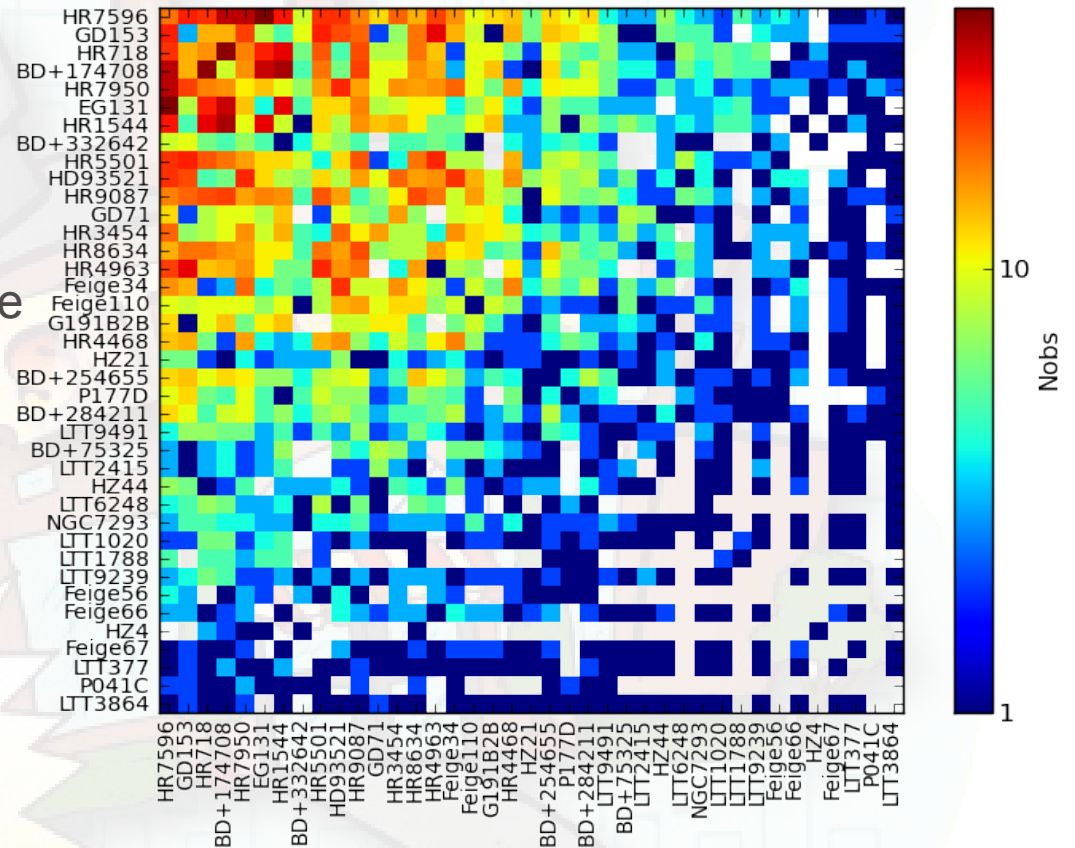
- Problèmes de décalage en  $\lambda$ , de résolution spectrale, etc.
- Elles ne sont pas compatibles entre elles ( $\pm 2\%$ )

- ▶ Nécessité d'un **inter-étalonnage**

- Réseau des étoiles observées durant les nuits photométriques

- Calibrateurs primaires : GD71, GD153, G191B2B

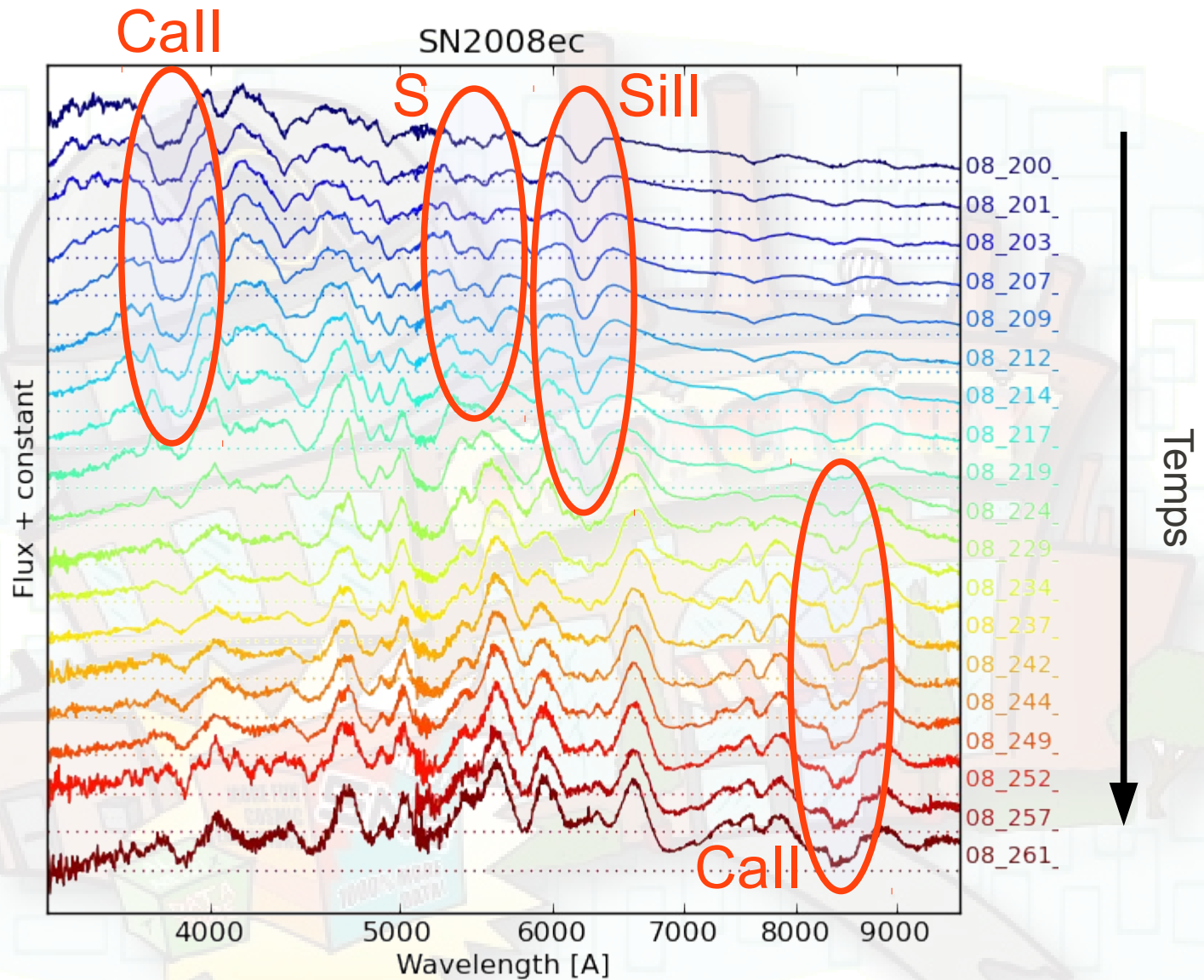
Std star network 05/06/07/08/09 [B]: 1108 spectra of 39 stars in 127 nights



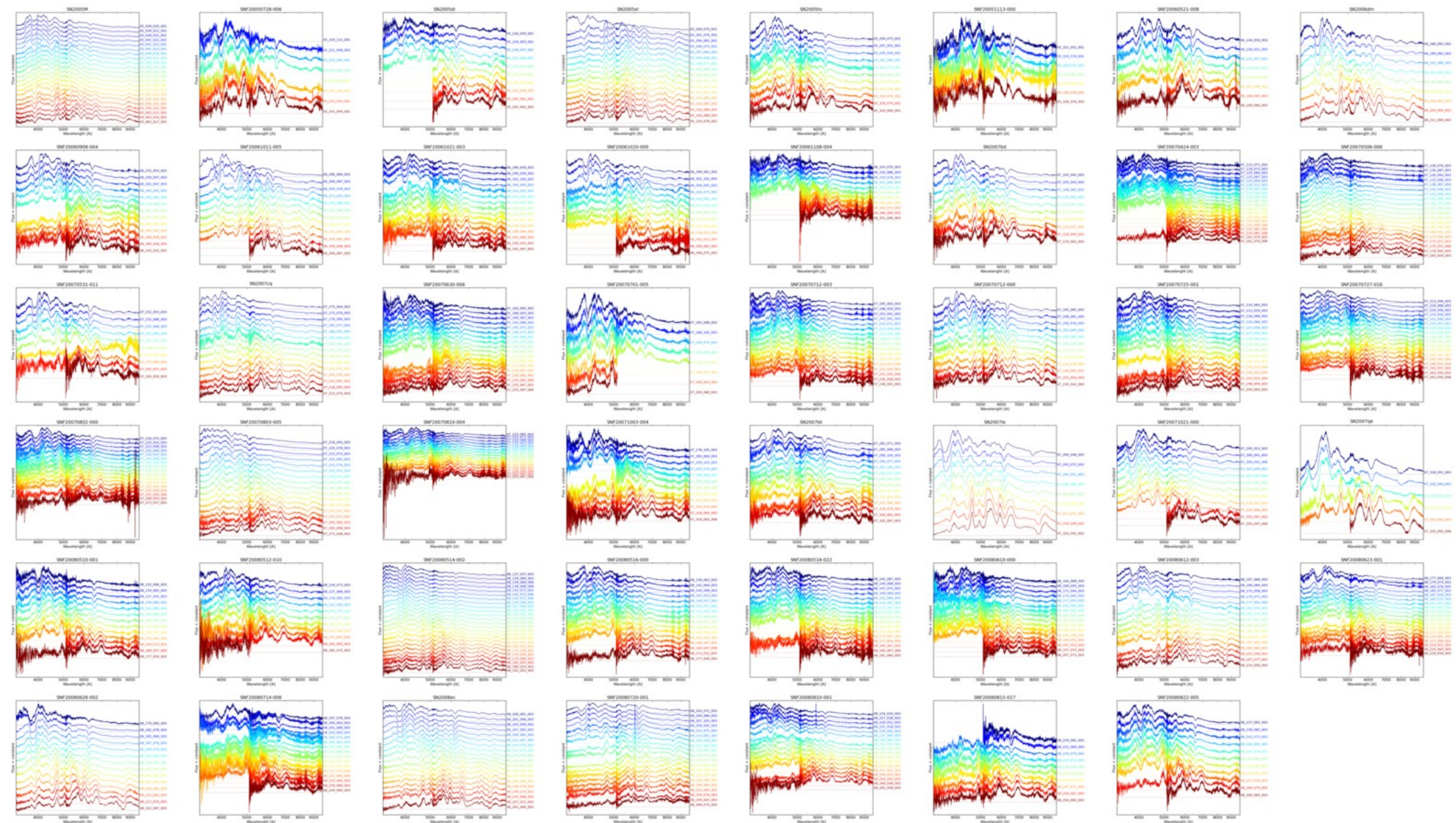


# Résultats scientifiques (préliminaires)

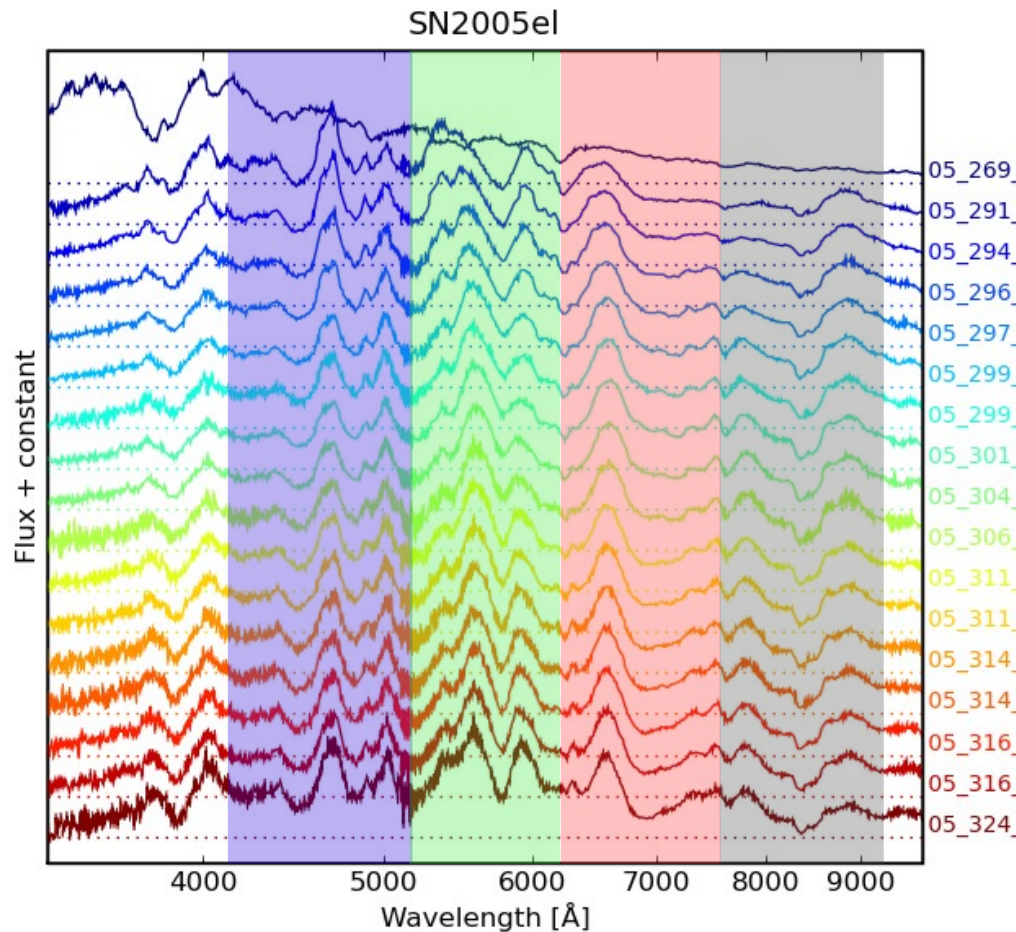
# Série temporelle de SN2008ec



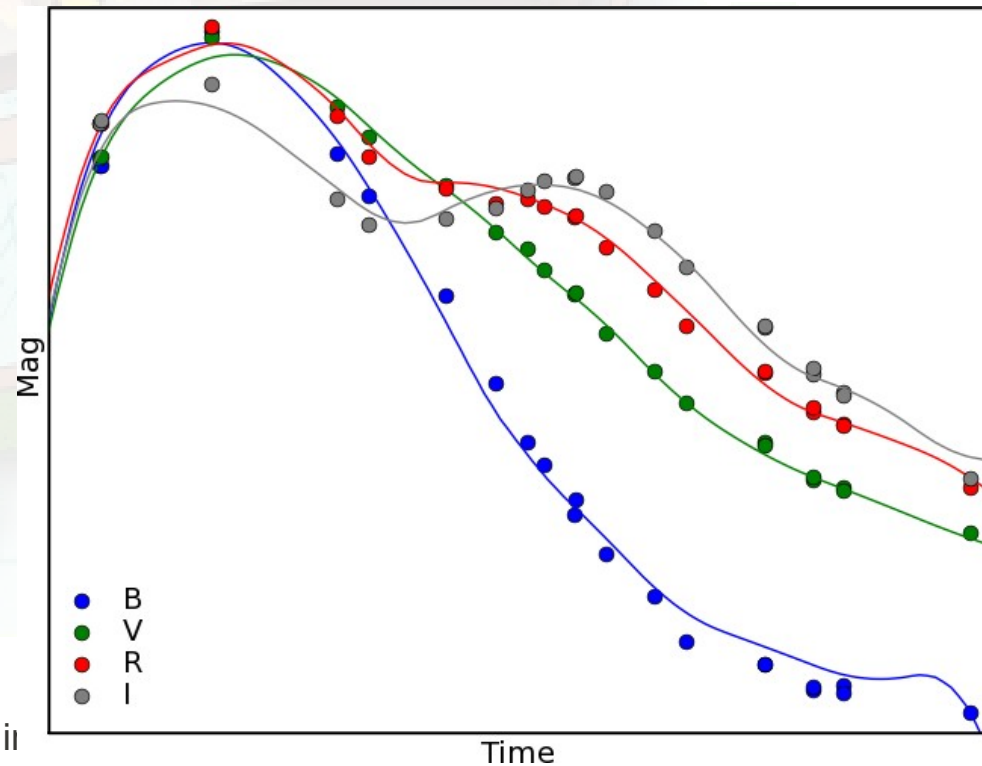
# Quelques séries temporelles (~1/4)



# Photométrie bandes larges

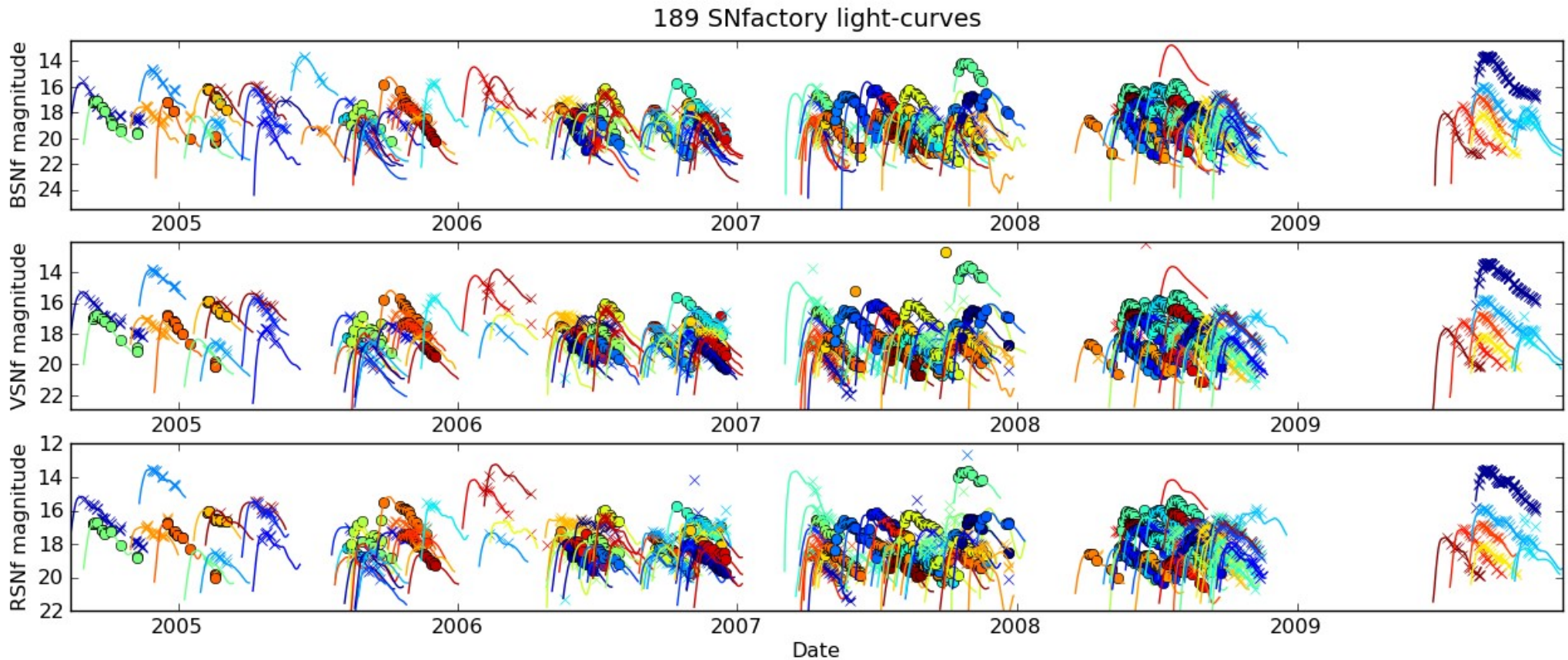


- Photométrie **synthétique**
  - ▶ Dans n'importe quelle bande !
    - Inter-calibration avec les autres expériences
  - ▶ Y compris bandes « *rest frame* »
    - Corrections K non-nécessaires





# Courbes de lumière



Débuts  
laborieux...

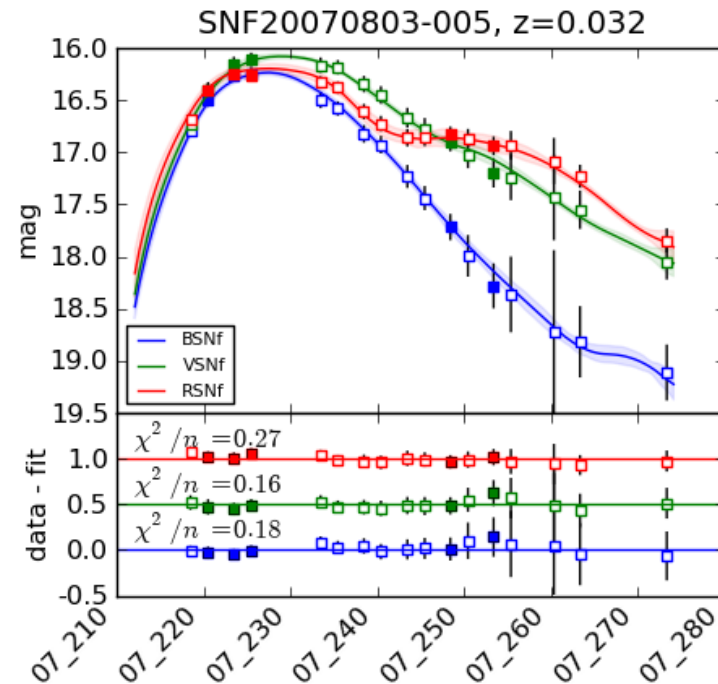
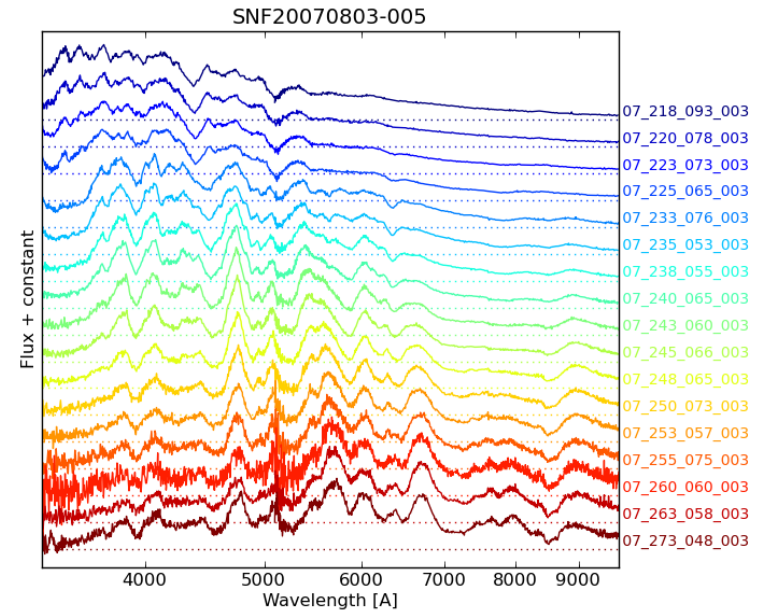
SNfactory  
à pleine puissance

Fin du  
*search*

Prise de  
références

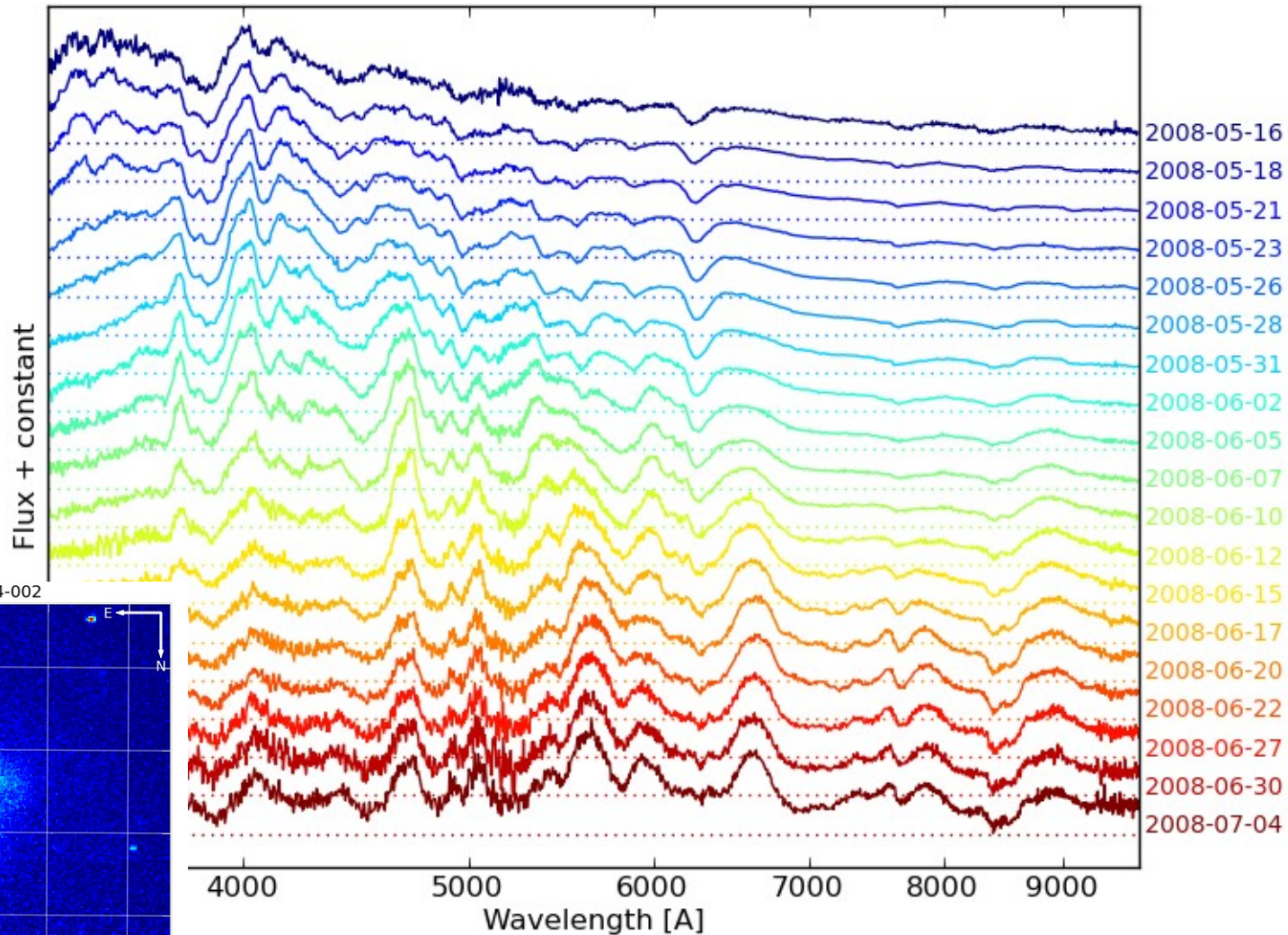
# Ajustement de la courbe de lumière

- Ajustement SALT2 (B,V,R)
  - ▶ Approche **minimale** pour simuler la photométrie traditionnelle
- Paramètres :  $M_B^{\max}$ , « stretch » ( $x1$ ), couleur ( $c$ )
  - ▶ Ajustement :  $\sim 10\%$  RMS
    - 7% cœur + « outliers »
    - Précision  $\sim 5\%$  sur les paramètres
- **Développements** à venir
  - ▶ Magnitudes « rest-frame »
    - Pas de correction K
  - ▶ Séries temporelles
    - Nouveaux « templates » (SALT3)

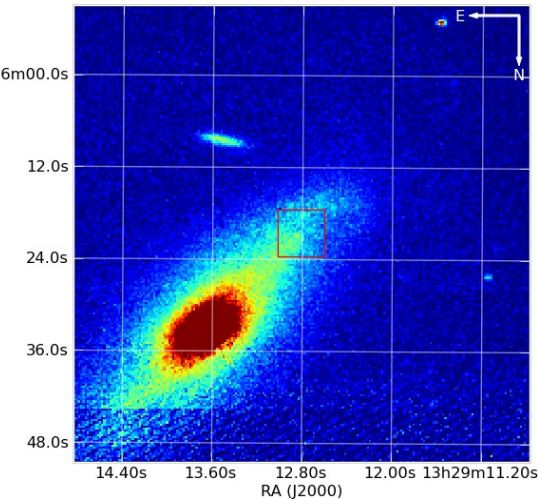


# Série temporelle de SNf20080514-002

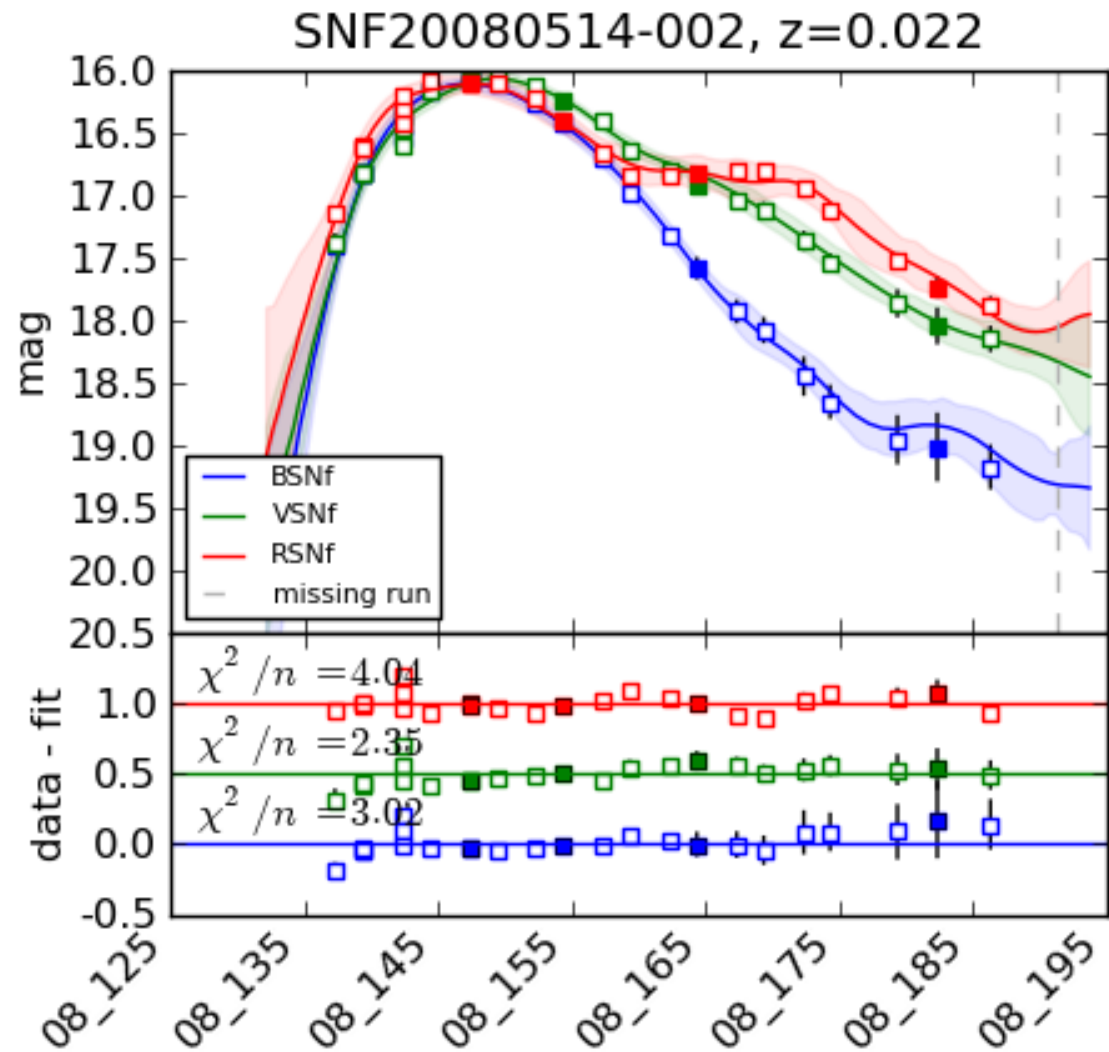
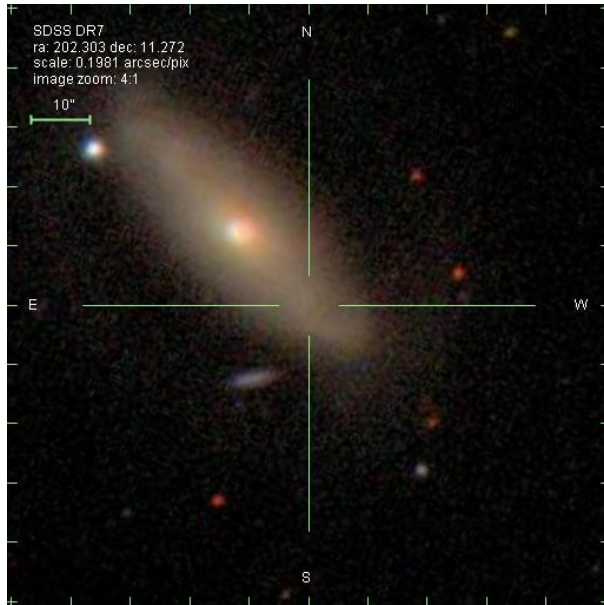
SNf20080514-002 in UGC08472 ( $z=0.022$ )



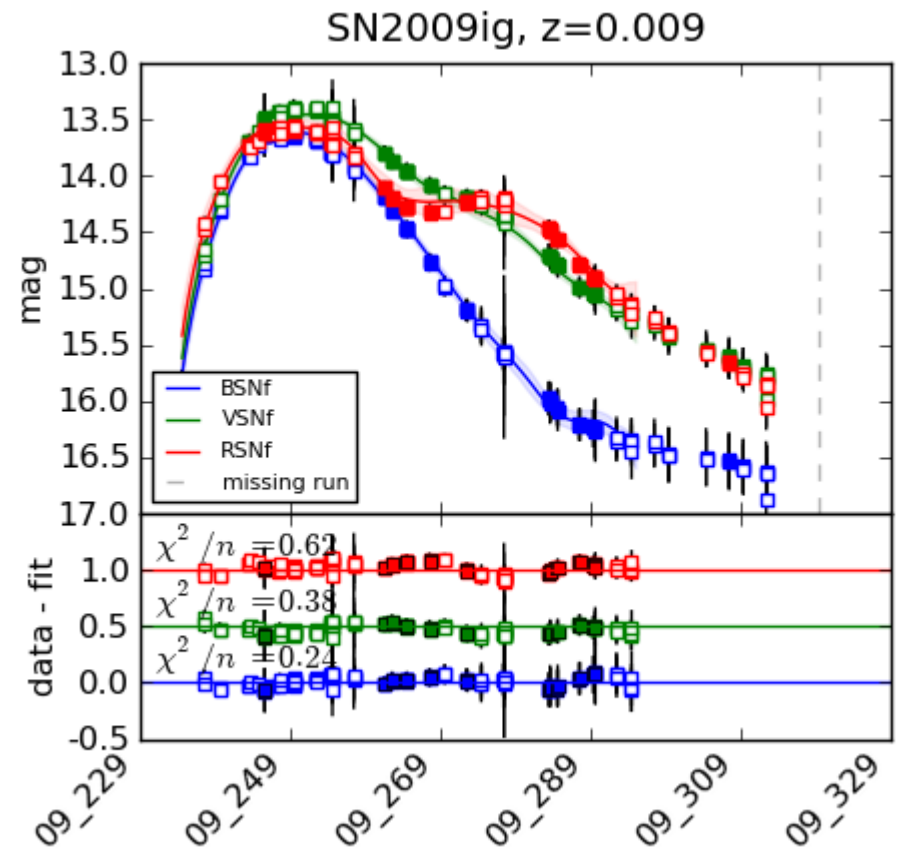
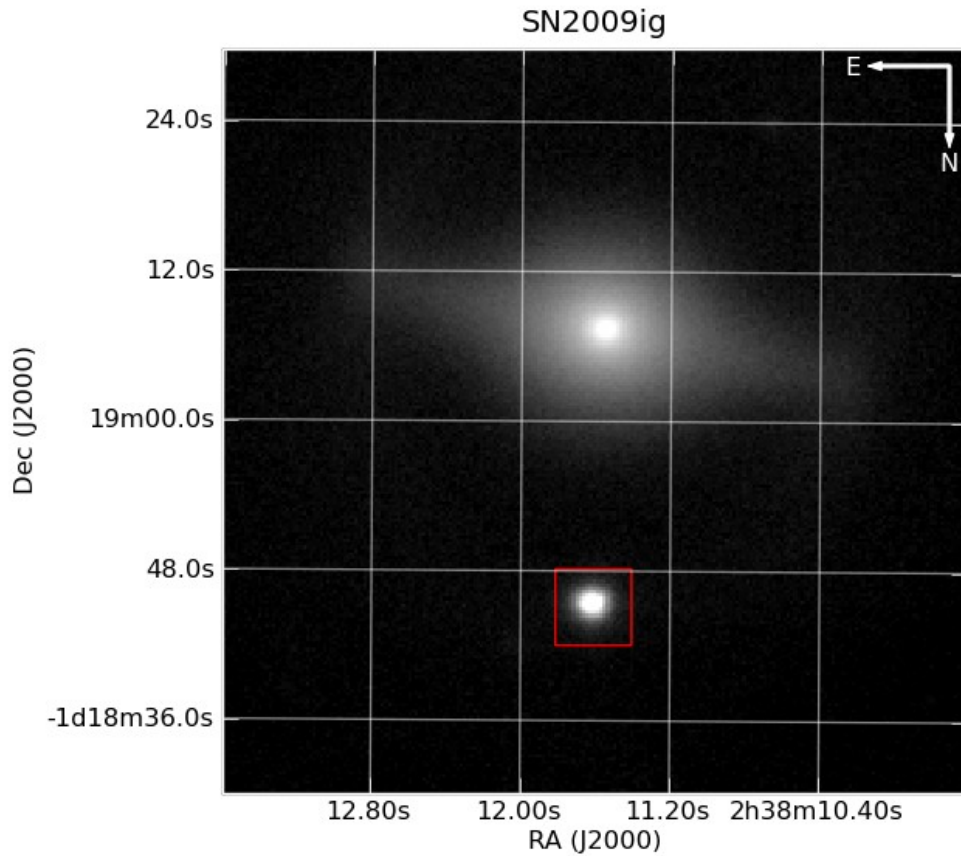
SNf20080514-002



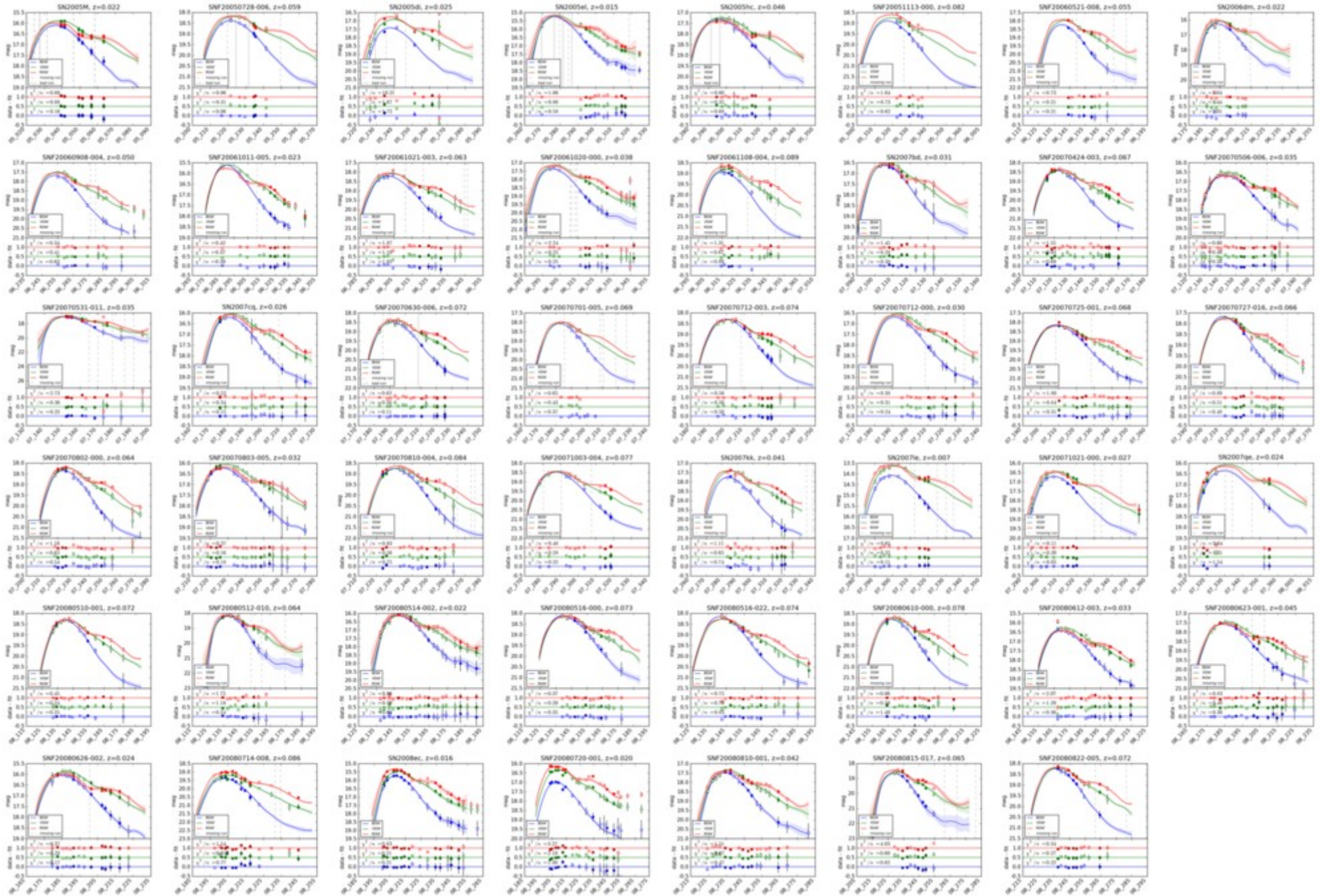
# SNF20080514-002 in UGC8472 ( $z=0.022$ )



# SN2009ig dans NGC1015 ( $z=0.009$ )

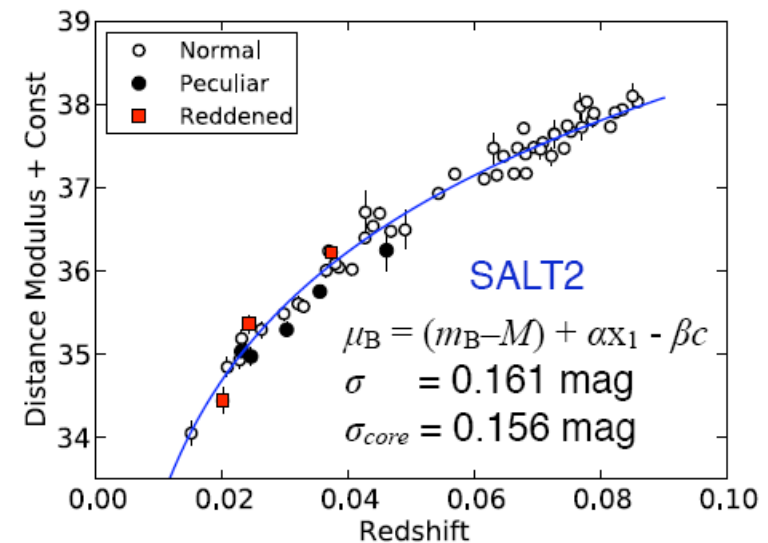
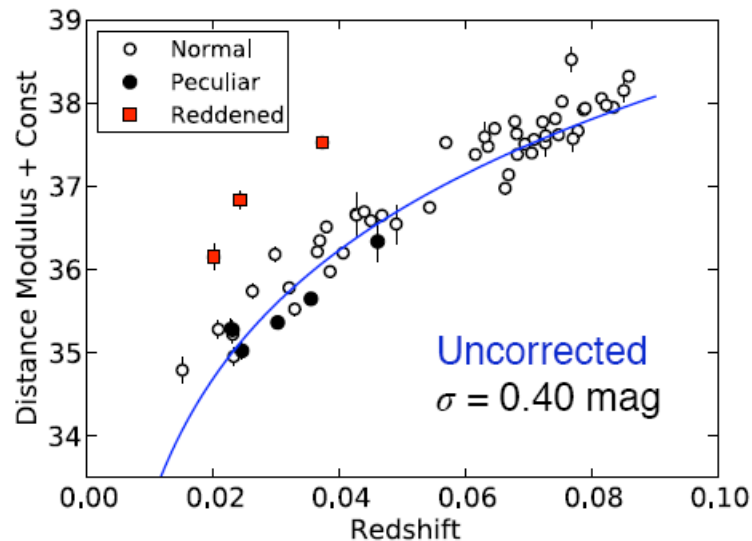


# Quelques courbes de lumières ( $\sim 1/4$ )

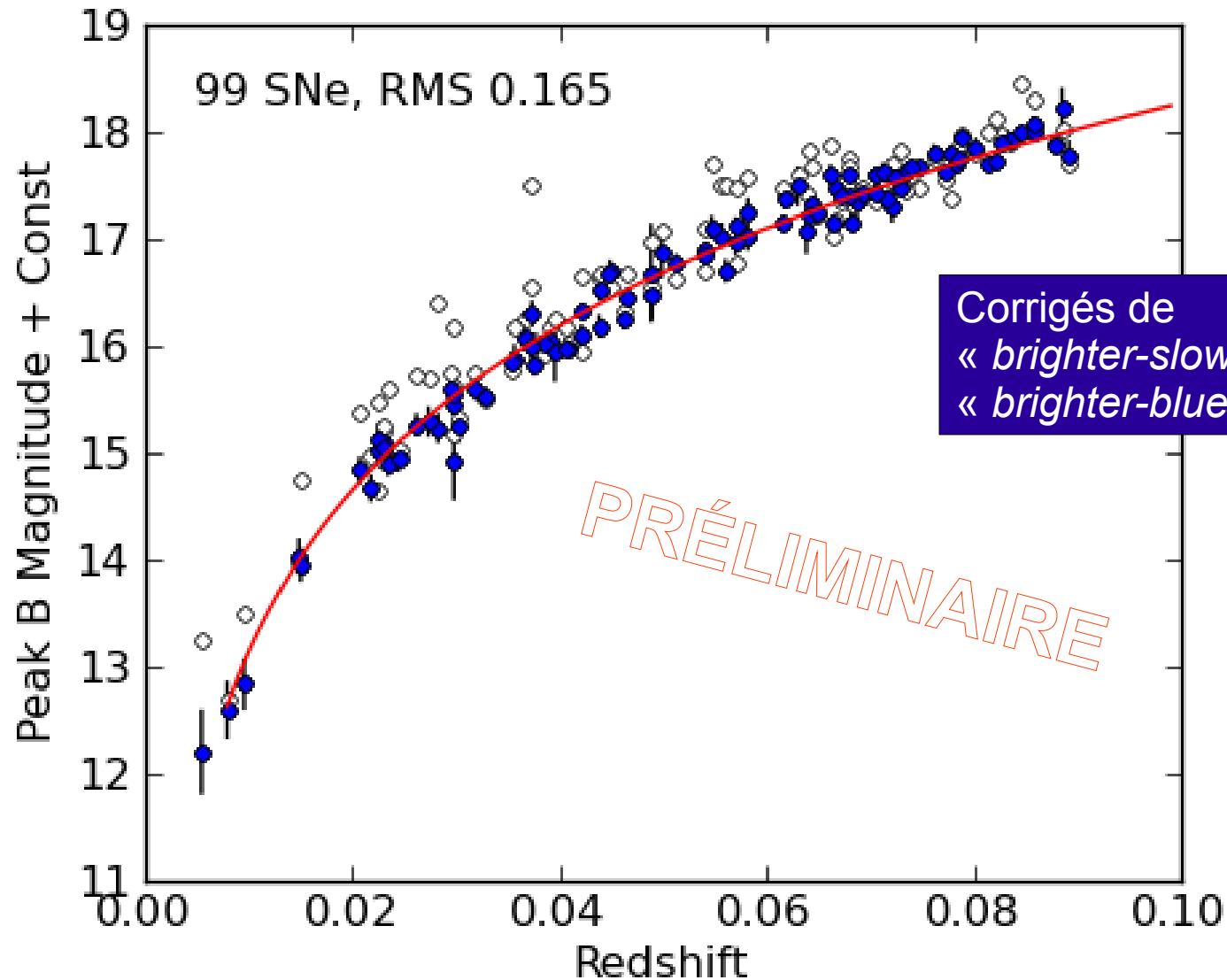


# Diagramme de Hubble

- 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)

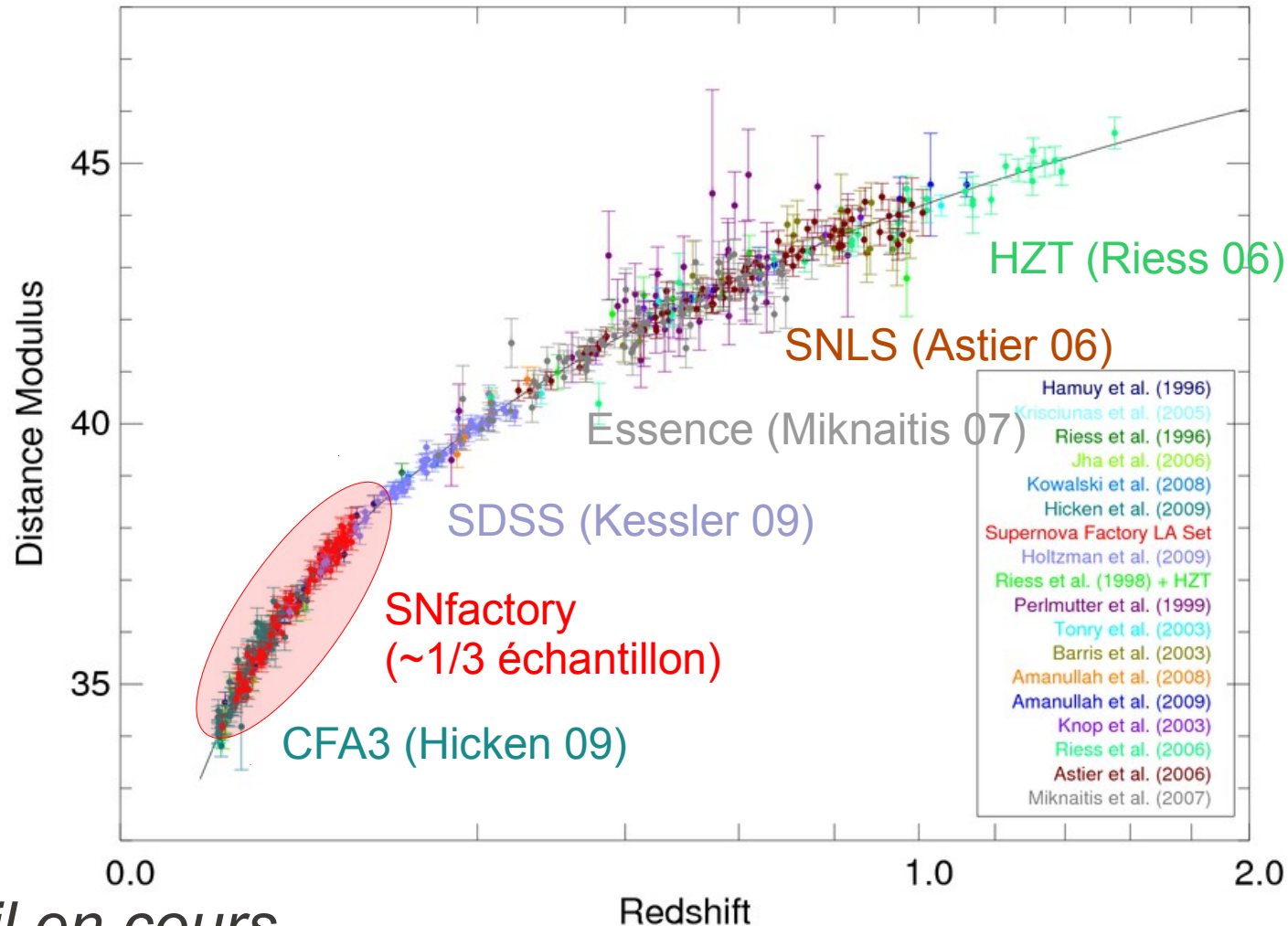


# Dernière production en date





# Échantillon SNfactory



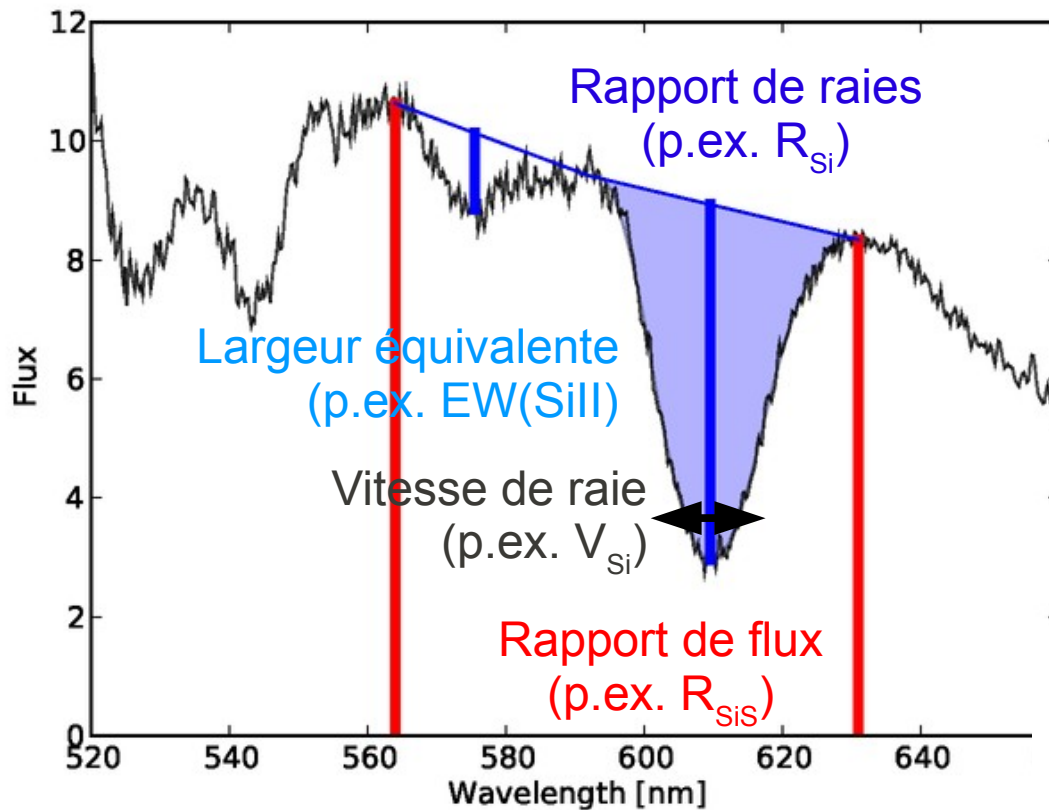
- *Travail en cours*
- *Cosmologie cachée*

(D. Rubin)

# Contributions SNfactory

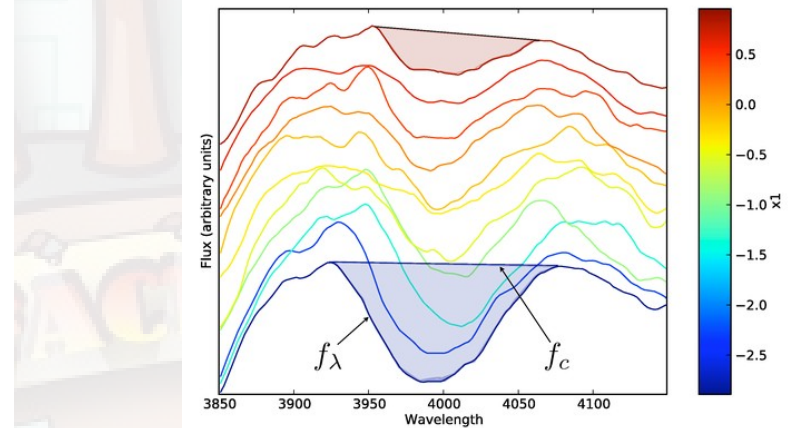
- L'échantillon SNfactory améliore directement le diagramme de Hubble **même** en n'utilisant que les techniques photométriques traditionnelles
  - ▶ **Qualité comparable** (voire meilleure) aux autres échantillons proches
  - ▶ Bras de levier
  - ▶ Échantillon non-biaisé dans le flot de Hubble
  - ▶ 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
    - Variabilité intrinsèque/extrinsèque
    - Spectres type, sous-classification
  - ▶ Physique des SNe
    - SN2005gj: type Ia/IIa
    - SN2006D: carbone
    - SN2007if: super-Chandrasekhar
  - ▶ Galaxies hôtes
    - « Bigger – brighter »

# Indicateurs spectraux classiques

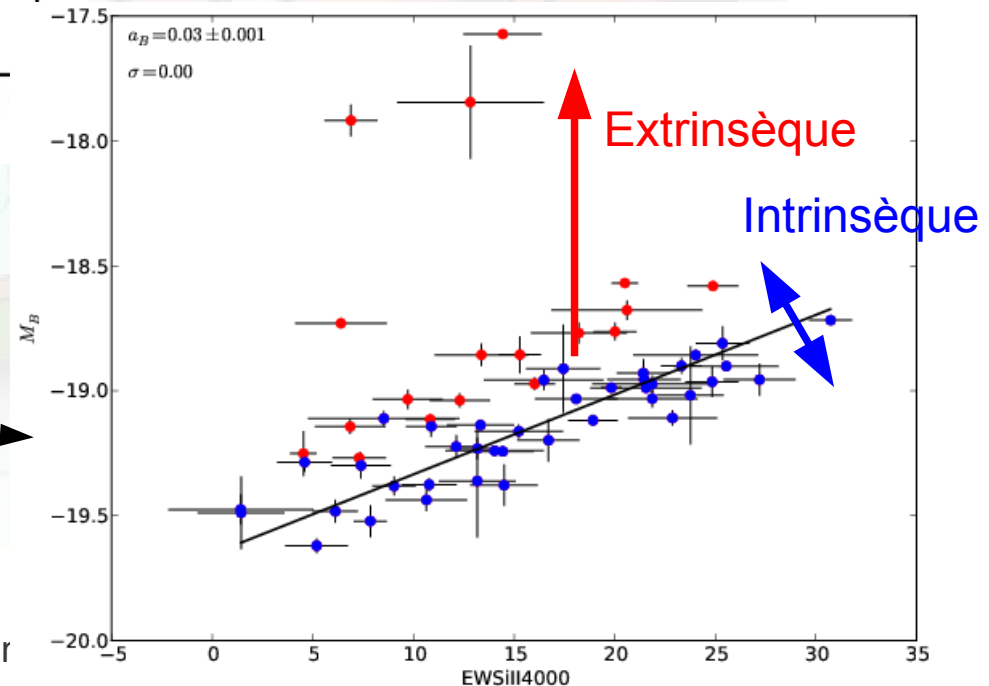


• Ex. : EW(SiII 4000)

► Compétitif avec  $x_1, c$



• En voie de séparer extinction intrinsèque vs. extrinsèque



N. Chotard et al. 2010 (en prép.)

# Corrélations spectrales (Bailey et al. 09)

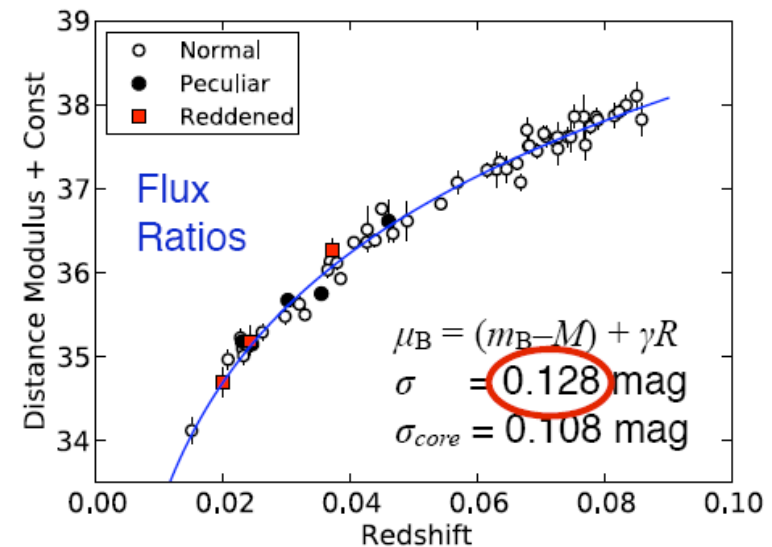
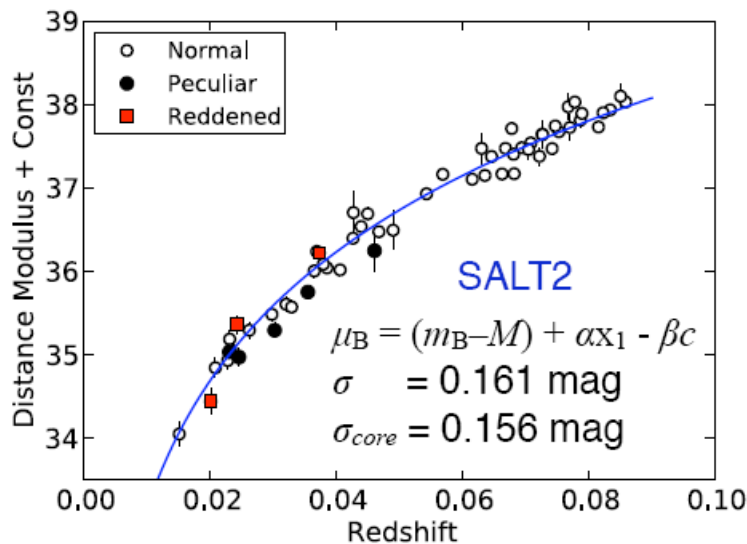
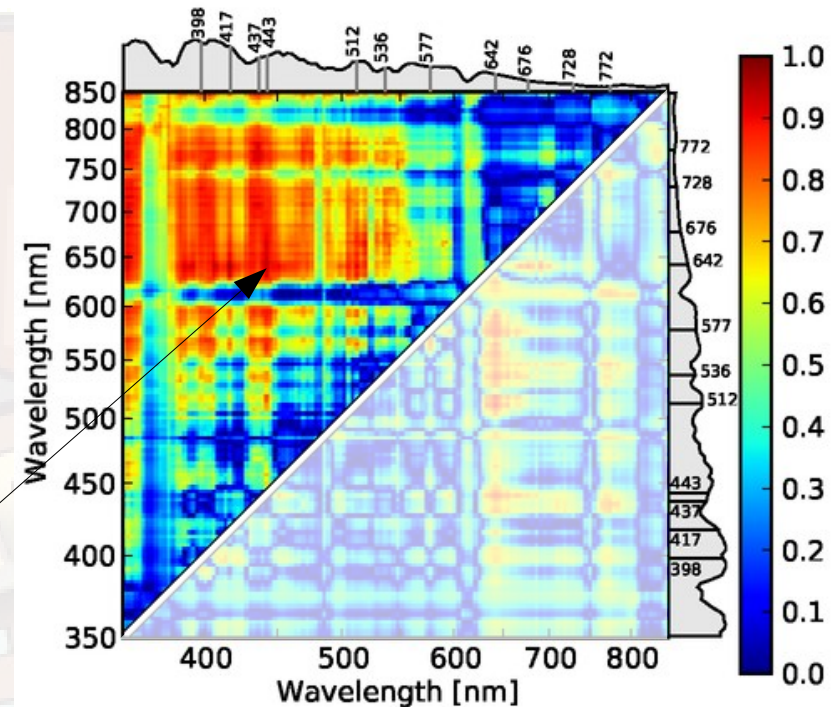
- Approche **empirique**

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

- ▶ Échantillon de 58 SNe

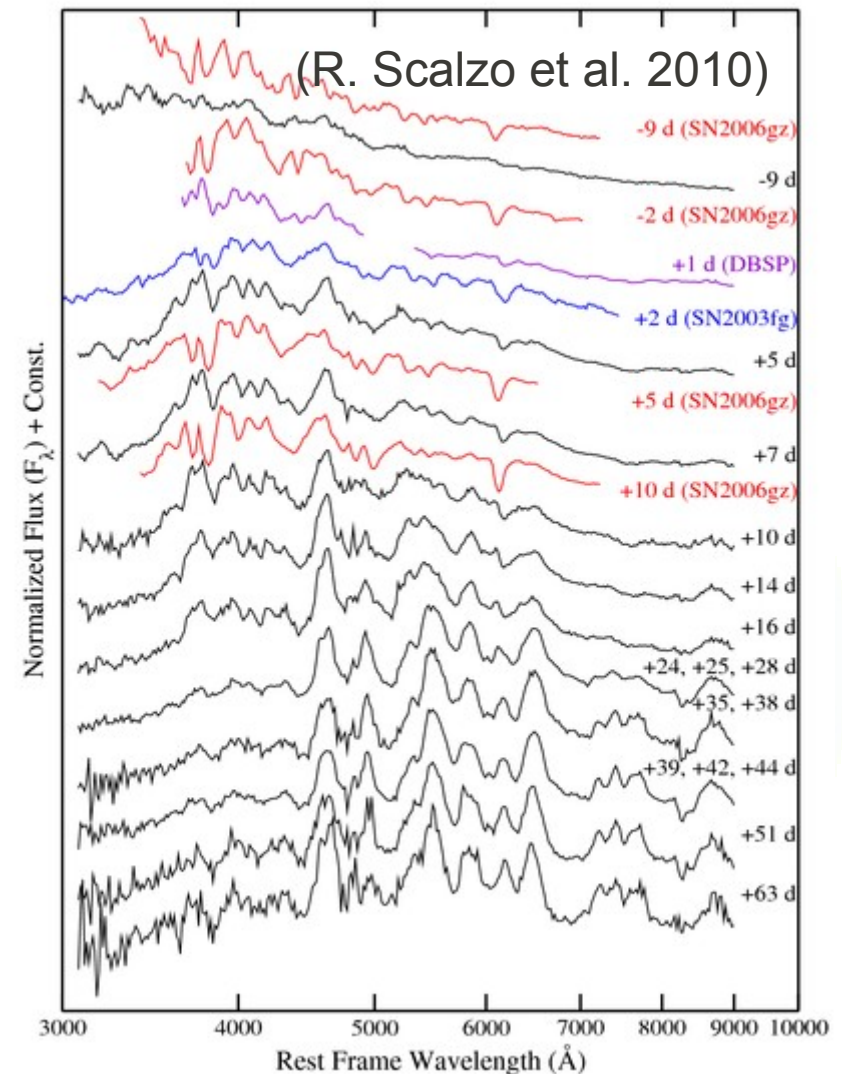
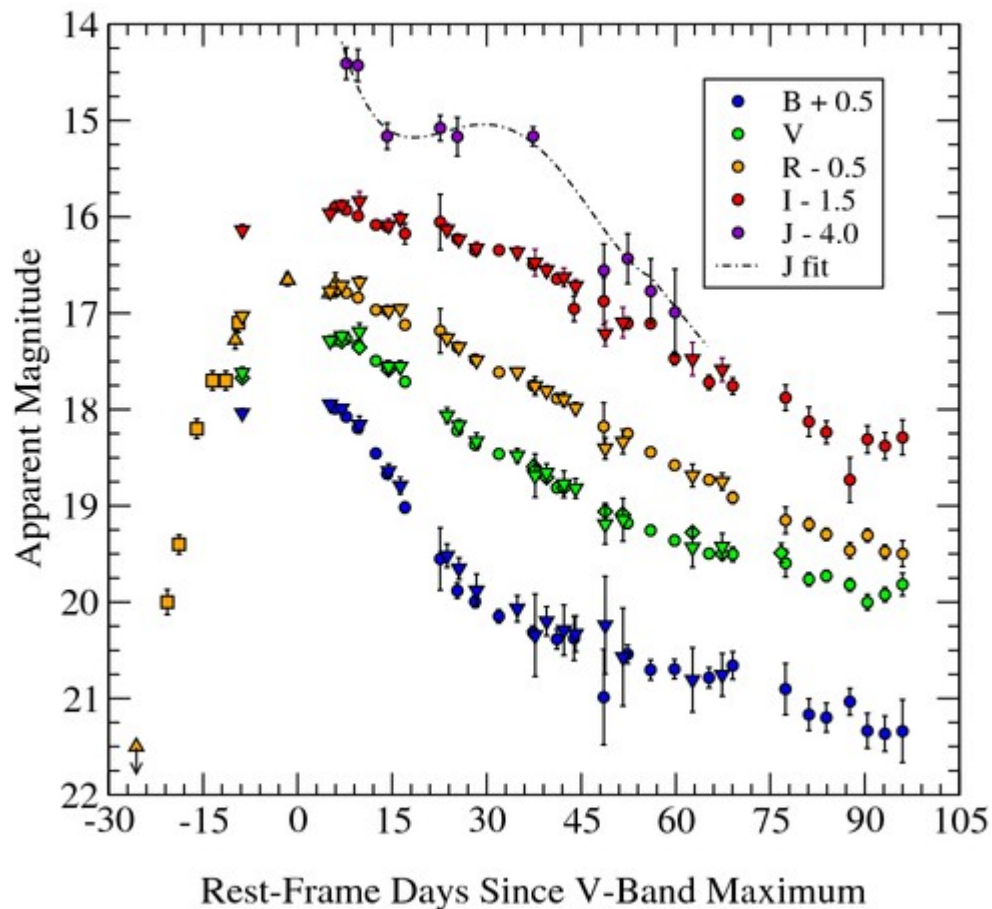
- $\pm 2.5$  jours du max
- Apprentissage / validation
- $R(642/443)$ :  $\rho = 0.95$

$R(642/443)$

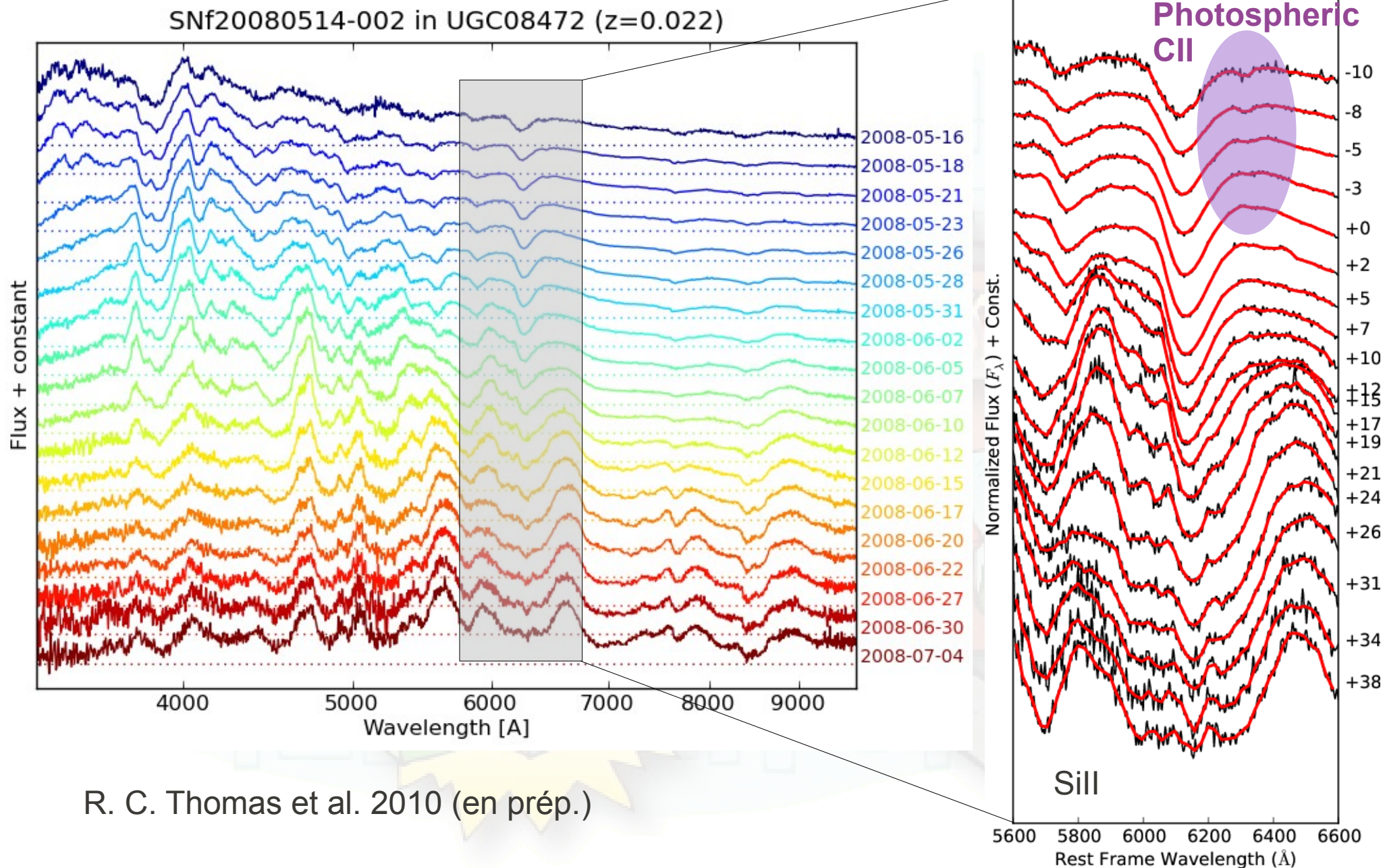


# Objets individuels

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



# SNF20080514-002 in UGC8472 ( $z=0.022$ )



R. C. Thomas et al. 2010 (en prép.)

# SNF20080514-002 in UGC8472 ( $z=0.022$ )



# Conclusions et perspectives

## • SNfactory (2004-2009)

### ▶ +200 séries temporelles spectro-photométriques, 3300 spectres

- Échantillon sans équivalent
- Derniers ajustements dans réduction et 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-étalonnage

## • Perspectives

### ▶ **SNfactory-II**

- Prolongation sur 3 ans
  - Nouvelle collaboration
  - Nouvelle recherche (p.ex. PTF), suivi identique (SNIFS)
- Échantillon accru, phases précoces
- Encore en discussion

### ▶ Nécessité d'un suivi spectro-photométrique des sondages photométriques

- PanStarrs, DES, LSST, etc.
- Proposition Fireball (PI: Al Postdam)
  - Multi-IFU sur VLT
  - MàJ OzPOZ/FLAMES



# Publications

- Papiers de la collaboration

- ▶ SN2007if (super-Chandra)
  - Childress et al. 2010 (soumis)
  - Scalzo et al. 2009, ApJ 713, 1073
- ▶ « *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

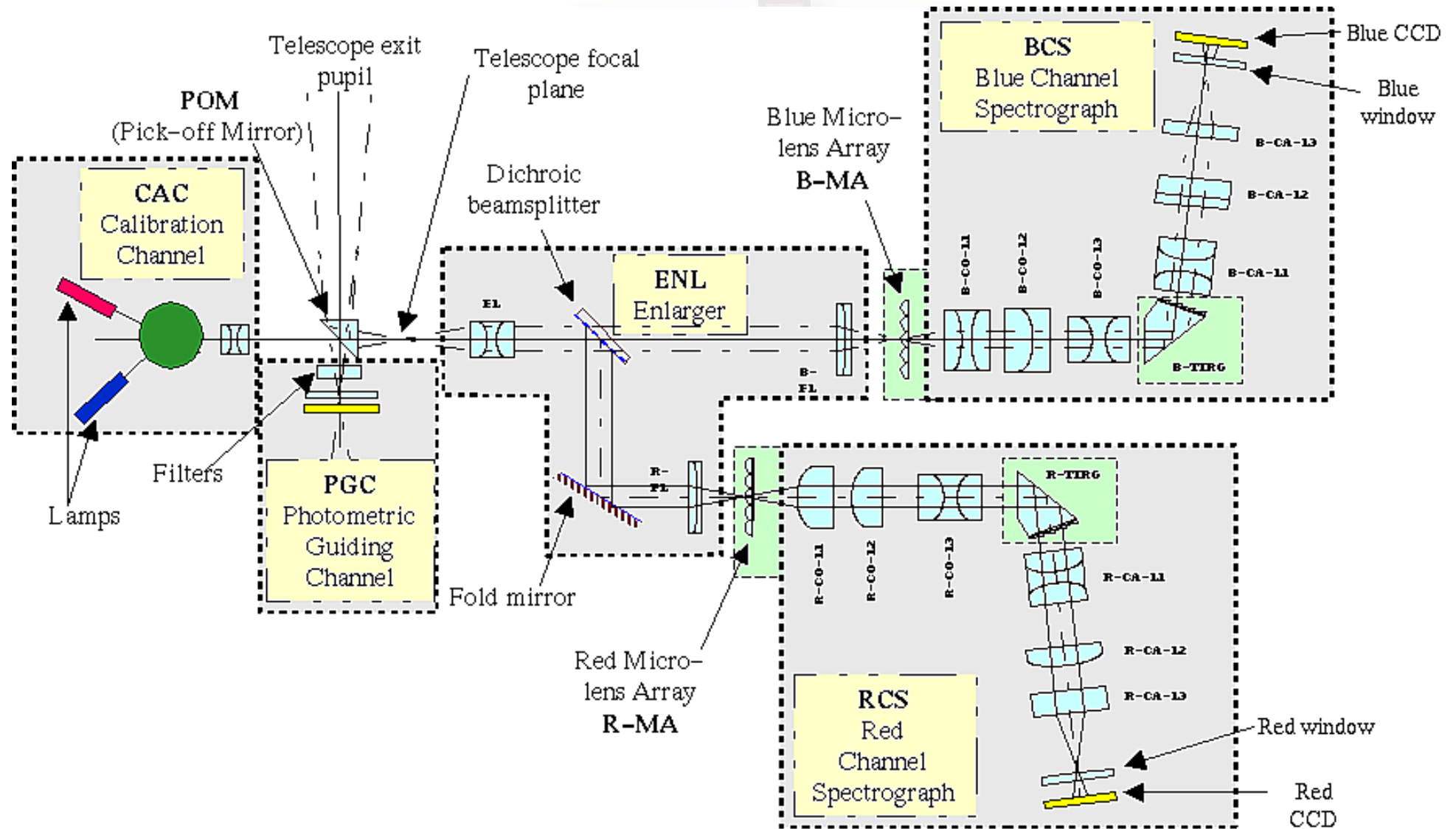
- Papiers utilisant des données SNIFS (hors SNfactory)

- ▶ 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



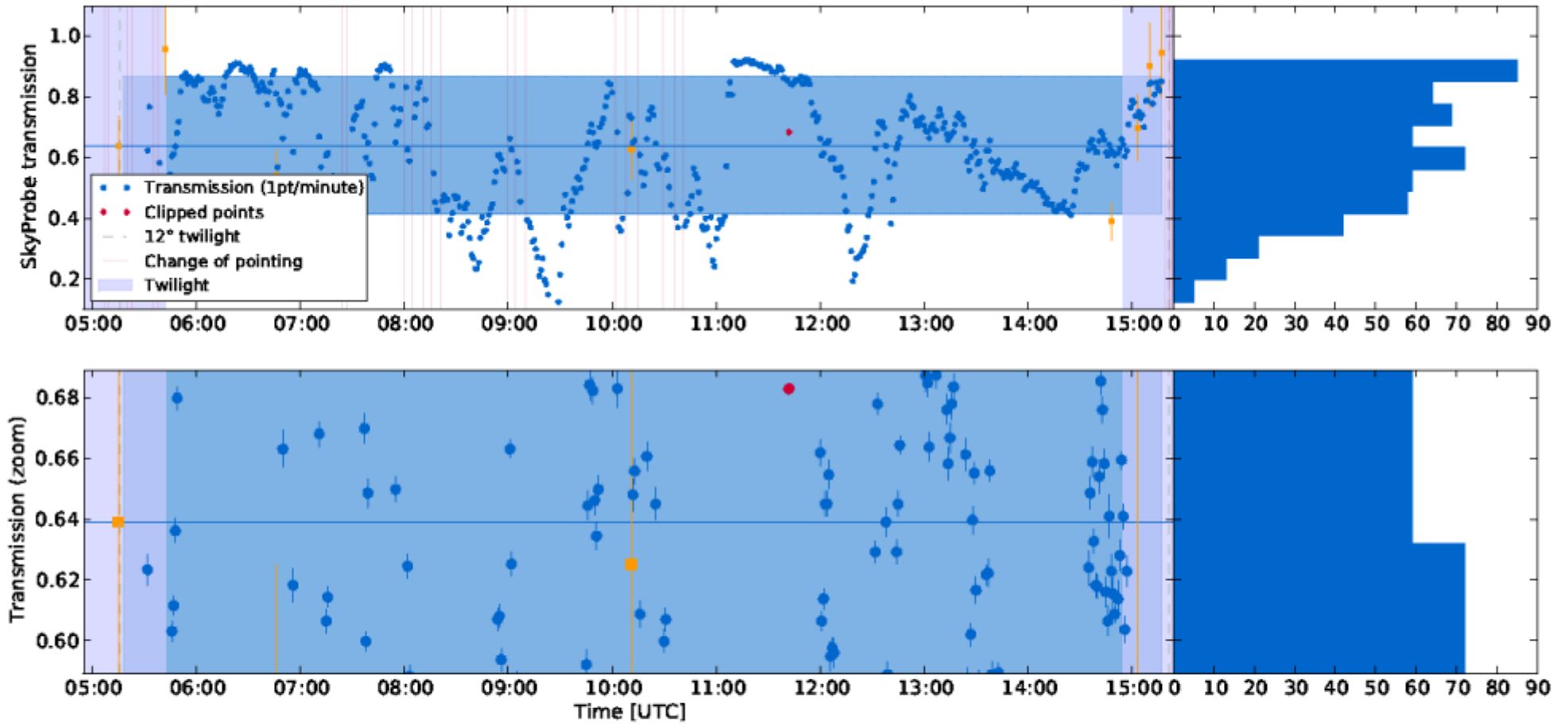
# Suppléments

# Schéma optique SNIFS



# Photométrie SkyProbe

Night 2007-09-12 [07\_255]

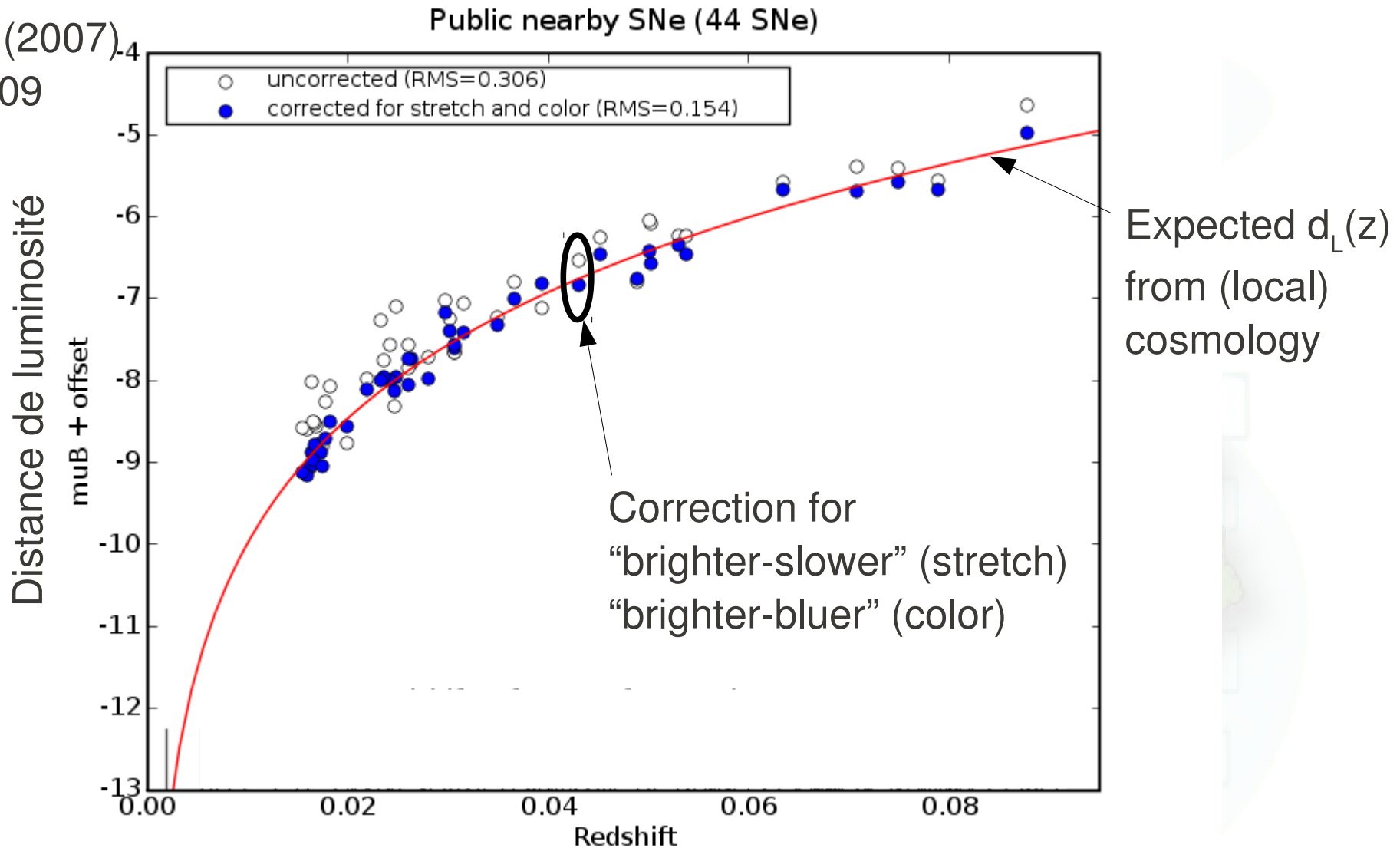


Median = 0.63915 nMAD = 22.57% RMS = 37.99%

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)

