

Soutenance de thèse

**Photométrie différentielle de supernovæ de type Ia lointaines  
( $0.5 < z < 1.2$ ) mesurées avec le télescope spatial Hubble et  
estimation des paramètres cosmologiques**



Julien Raux, LPNHE

Paris

(<http://supernovae.in2p3.fr/~raux/these>)



# Introduction

## Contexte :

Thèse débutée en 2000 dans le cadre du **Supernova Cosmology Project** (SCP) dans le groupe FROGS du LPNHE.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des recherches qui ont permis en 1999 au SCP de mettre en évidence l'accélération de l'univers et de la constante cosmologique.

Depuis 1999, le SCP s'est engagé dans la recherche et l'étude de supernovæ de type Ia à des décalages vers le rouge autour de 1 :

- Mesure difficile...
- mais permet d'apporter de meilleures contraintes sur :
  - la mesure de  $\Omega_M$  et  $\Omega_\Lambda$ .
  - de tester les modèles d'extinction.

Pour réaliser ces mesures, cette analyse a été réalisée avec des observations avec le télescope spatial **Hubble** qui seul permet des mesures suffisamment précises.



# Plan

- **Cosmologie avec des supernovæ: mode d'emploi**
  - Quelques rappels de cosmologie.
  - Pourquoi les supernovæ de type Ia?
  - La mesure en pratique.
- **Détection et suivi photométrique**
  - Détection des supernovæ.
  - Identification spectroscopique et mesure du décalage vers le rouge.
  - Suivi photométrique.
- **Construction et ajustement des courbes de lumière**
  - Photométrie différentielle au sol.
  - Photométrie différentielle spatial.
  - Simulation des courbes de lumière.
  - Ajustement des courbes de lumière et corrections.
- **Nouvelles contraintes sur  $\Omega_M$  et  $\Omega_\Lambda$** 
  - Construction d'un lot de supernovæ proches.
  - Diagramme de Hubble et relation de standardisation.
  - Mesure de la cosmologie.



# PARTIE I :

## COSMOLOGIE AVEC DES SUPERNOVAE DE TYPE IA



# Quelques rappels de cosmologie

On décrit la cosmologie dans le cadre de:

- La Relativité Générale (i.e. eq d'Einstein.)
- le “Principe Cosmologique” (l'univers est isotrope et homogène)

→ la métrique F.R.W :

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right)$$

- où  $R$  est le facteur d'échelle (ou d'expansion) de l'univers.
- $k = -1, 0$  ou  $1$ .

Dans ce cadre, l'équation d'Einstein se réduit à l'équation de Friedman:

$$\left( \frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_M + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{R^2}.$$

On définit:

- $H = \frac{\dot{R}}{R}$  la “constante” de Hubble.
- $\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H^2} \rho_M$  est le terme de matière ( $\rho_M$  est la densité de matière).
- $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}$  est le terme de constante cosmologique.
- $\Omega_k = -\frac{k}{R^2 H^2}$  est terme de courbure.

L'équation se réduit à :

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k$$



# Flux observé comme fonction de $z$ .

La distance de luminosité  $d_L$  est définie par:

$$f = \frac{\mathcal{L}}{4\pi d_L^2}$$

$f$  : flux observé

$\mathcal{L}$  : luminosité intrinsèque.

Plus c'est loin plus c'est faible :

- La surface ( $4\pi d_L^2$ ) sur laquelle la lumière se répartit augmente avec le temps ... d'une manière dépendante de la cosmologie.

Le  $z$  d'une source est défini par  $1+z = \frac{R(now)}{R(emission)}$   
 $\Rightarrow$  décalage des raies spectrales:  $z = \frac{\lambda_{reception}}{\lambda_{emission}} - 1$ .

La jolie formule :

$$d_L = \frac{c(1+z)}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} \mathcal{S}(\sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z [(1+z')^2 (1 + \Omega_M z') - z'(2+z')\Omega_\Lambda]^{-\frac{1}{2}} dz')$$

$$\mathcal{S}(x) = \begin{cases} \sin(x) & \text{si } k = 1 \\ x & \text{si } k = 0 \\ \sinh(x) & \text{si } k = -1 \end{cases}$$

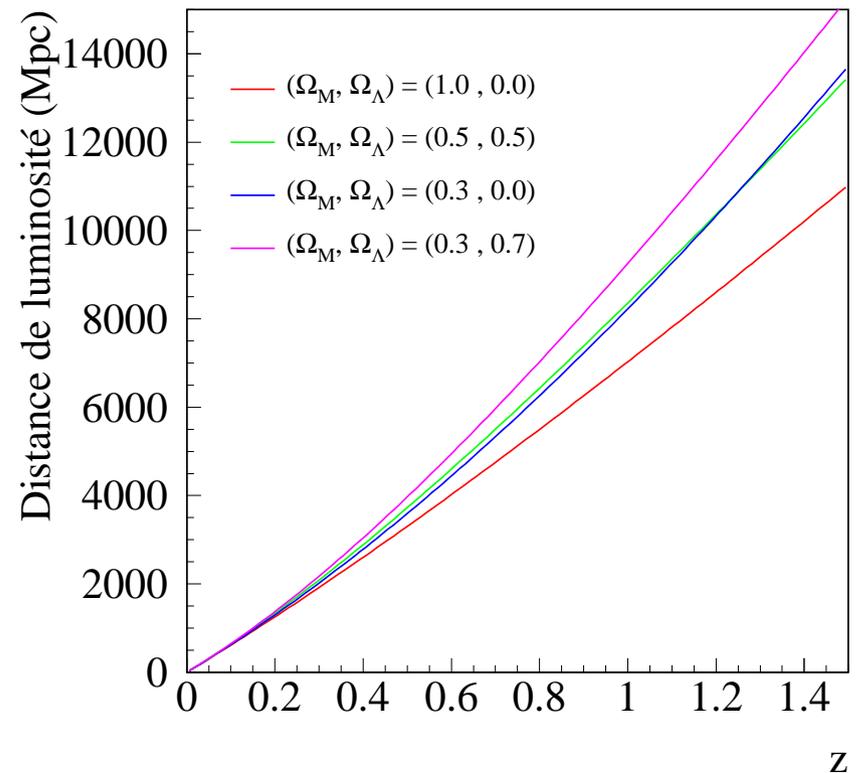


# Evolution de $d_L$ en fonction de $z$

On a besoin d'objets :

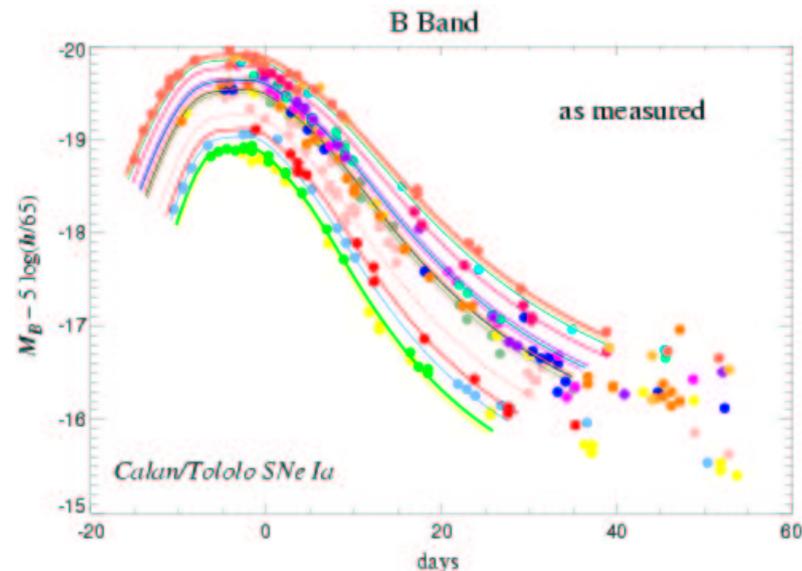
- De luminosité reproductible (chandelles standards).
- Identifiables.
- Visibles sur des distances cosmologiques.

⇒ Supernovæ de type Ia

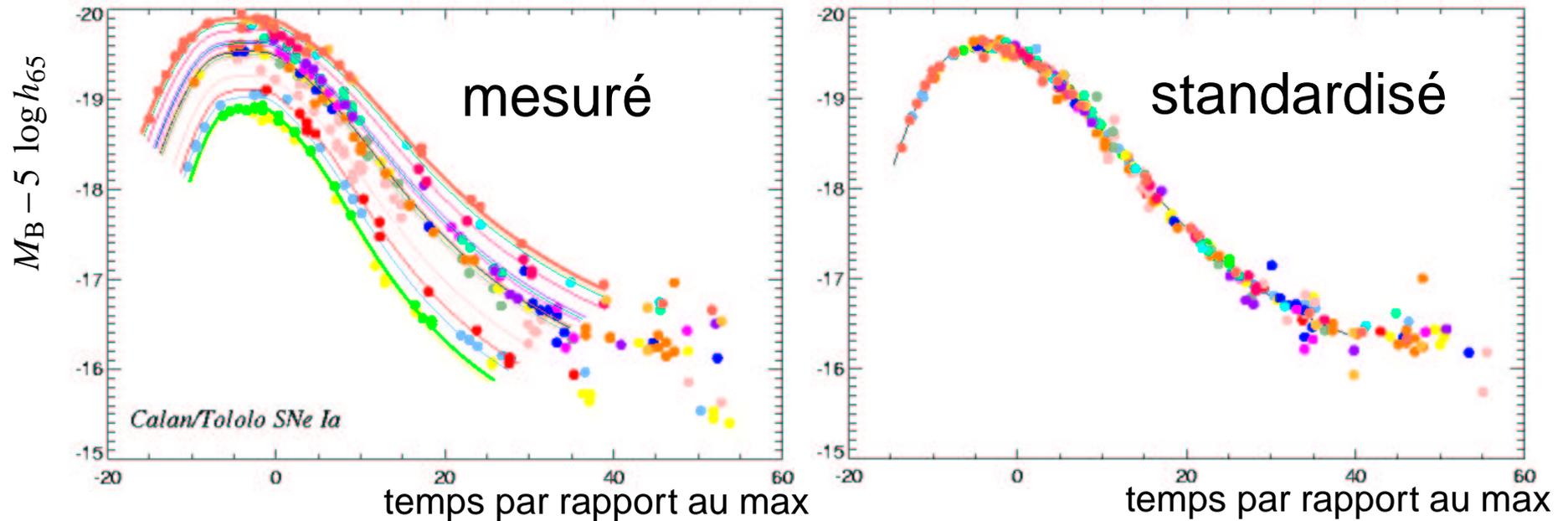


# Pourquoi les supernovæ de type Ia?

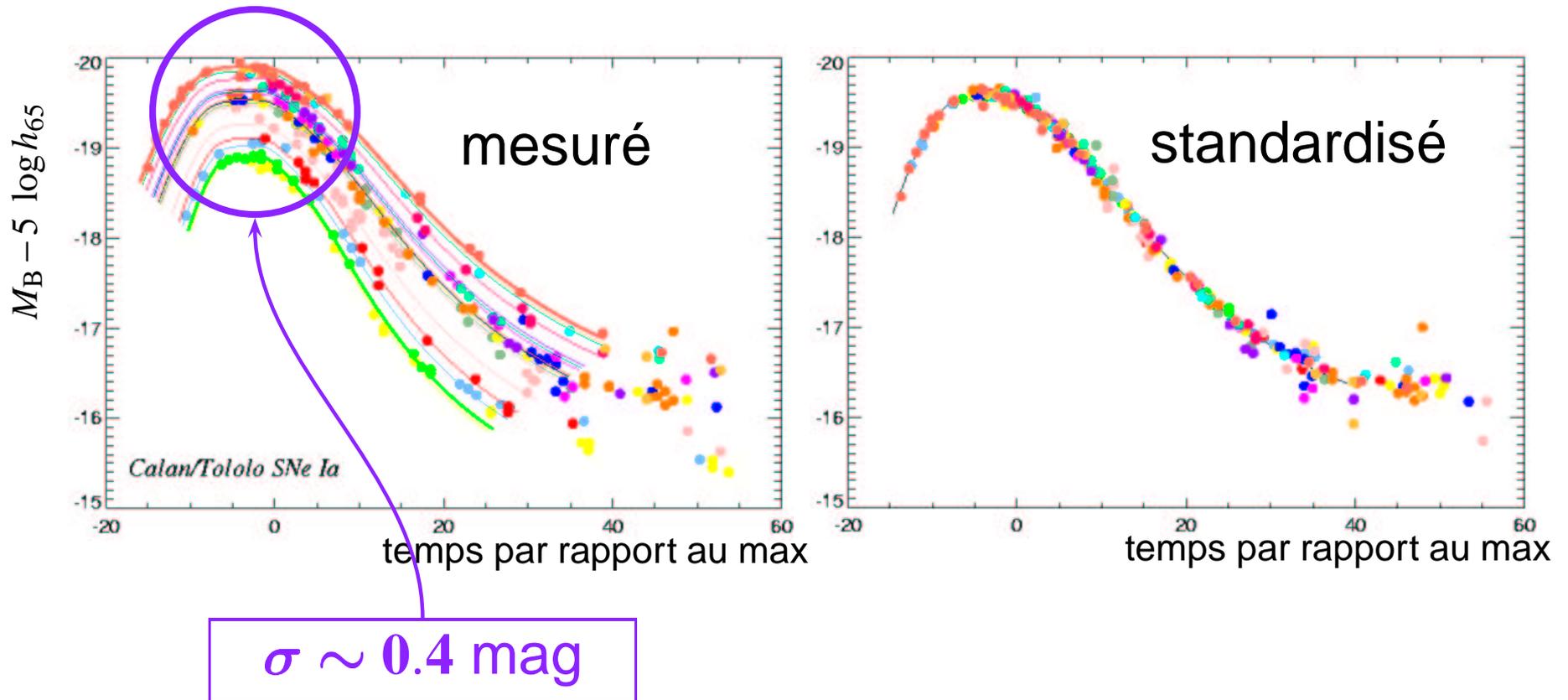
- Très lumineuses.
- Fugaces.
- Luminosité homogène (dispersion au max  $\simeq 50\%$ ).
- Chandelles standardisables?



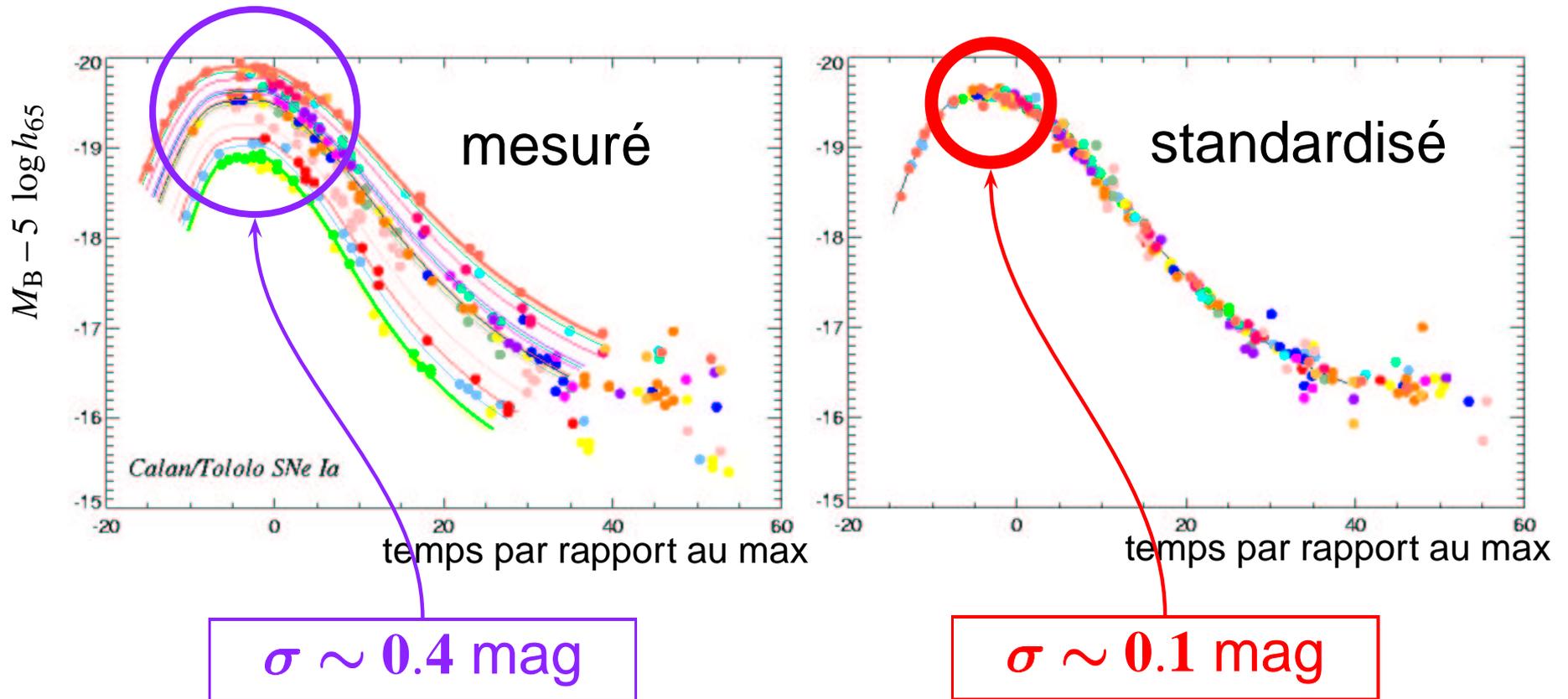
# SN Ia : des chandelles standards ?



# SN Ia : des chandelles standards ?



# SN Ia : des chandelles standards ?



**Supernovæ de type Ia : les meilleures chandelles standards connues!**



# SNe Ia et cosmologie

Deux observables :

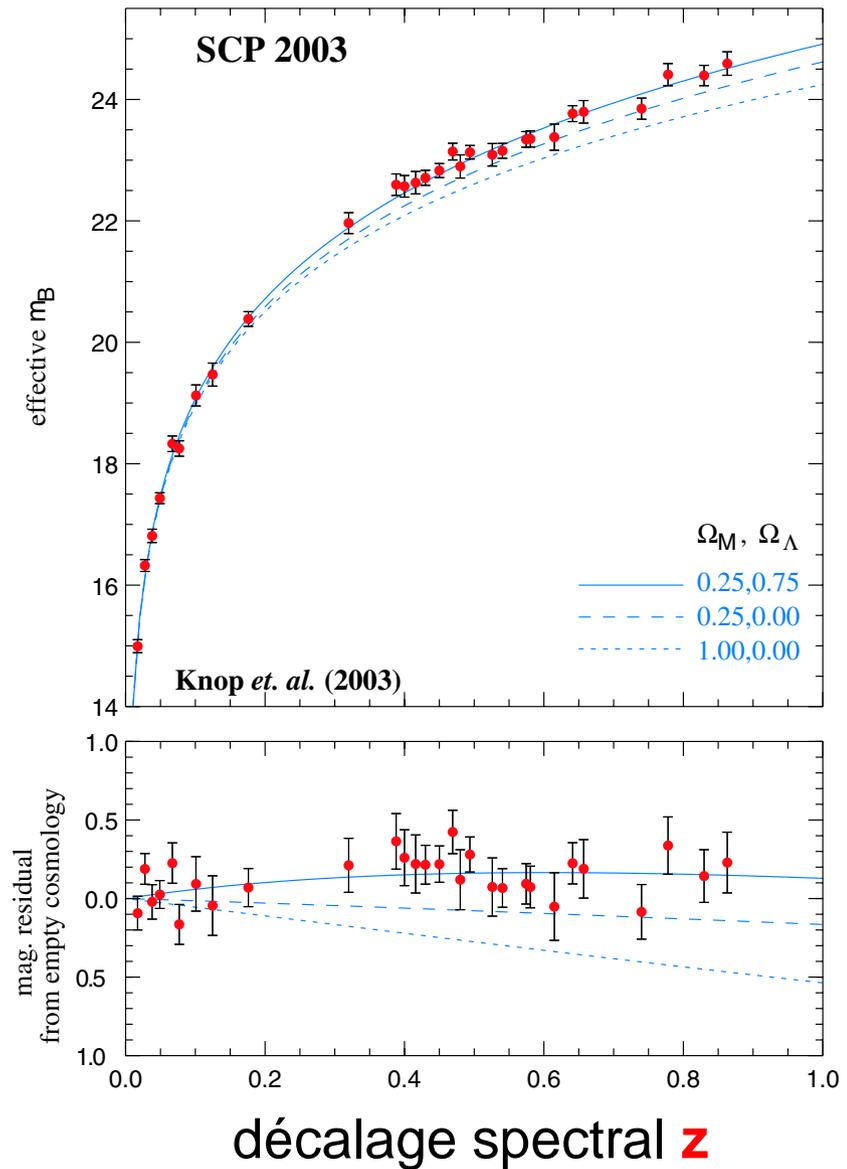
$$\text{flux} = \frac{\text{Luminosité}}{4\pi \cdot (\text{Distance})^2}$$

$$\text{Distance} = f(z, H_0, \Omega_{M_0}, \Omega_{\Lambda_0})$$

$$z = \frac{\lambda_{\text{observé}}}{\lambda_{\text{émis}}} - 1$$

$$-2.5 \cdot \log(\text{flux})$$

Diagramme de Hubble



# Résultats récents

Riess *et al.*, (1998, AJ, **116**, 1009)

Perlmutter *et al.*, 1999, ApJ, **517**, 565)

Tonry *et al.*, (2003, AJ, à paraître)

Knop *et al.*, (2003, ApJ, **597**)

● L'univers est en expansion **accélérée**.

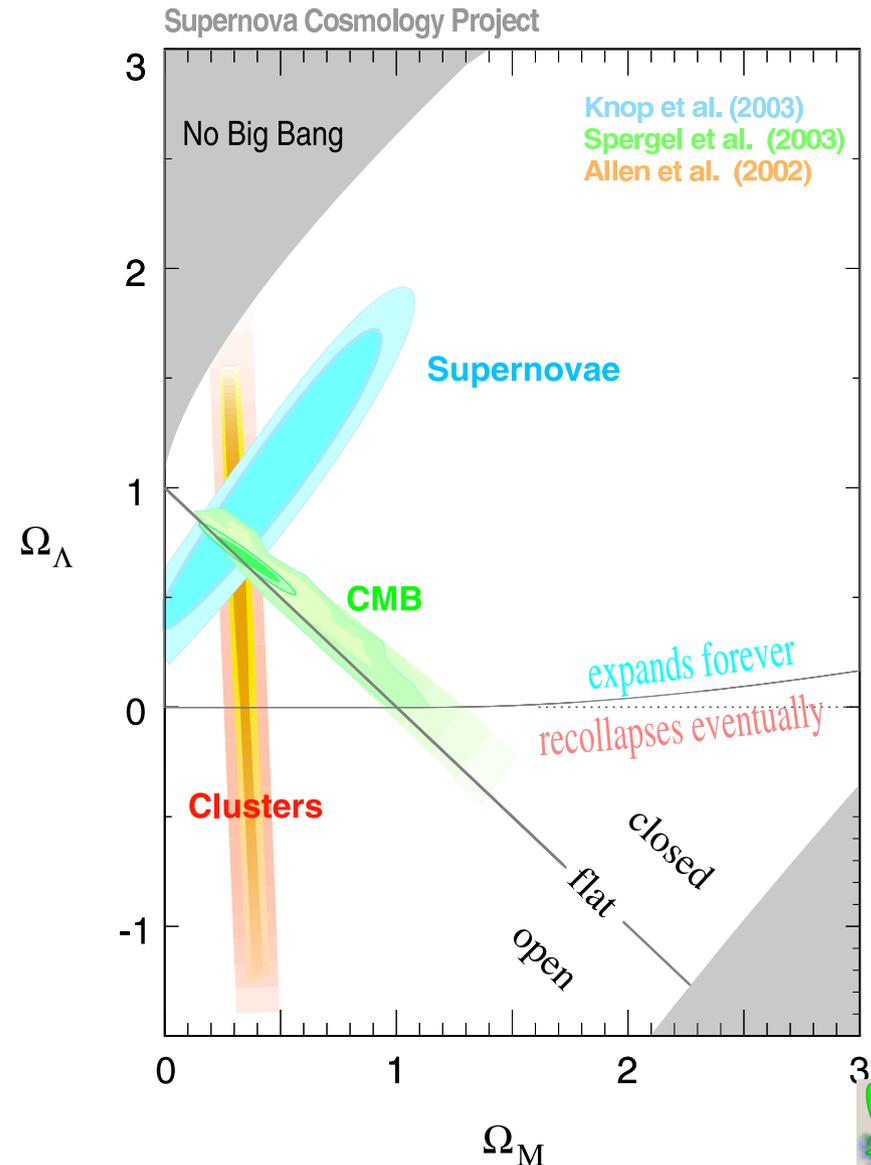
● En considérant un univers plat (*i.e.*

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1)$$

$$\Omega_M \simeq 0.3$$

$$\Omega_\Lambda \simeq 0.7$$

Energie Noire! Sa nature?



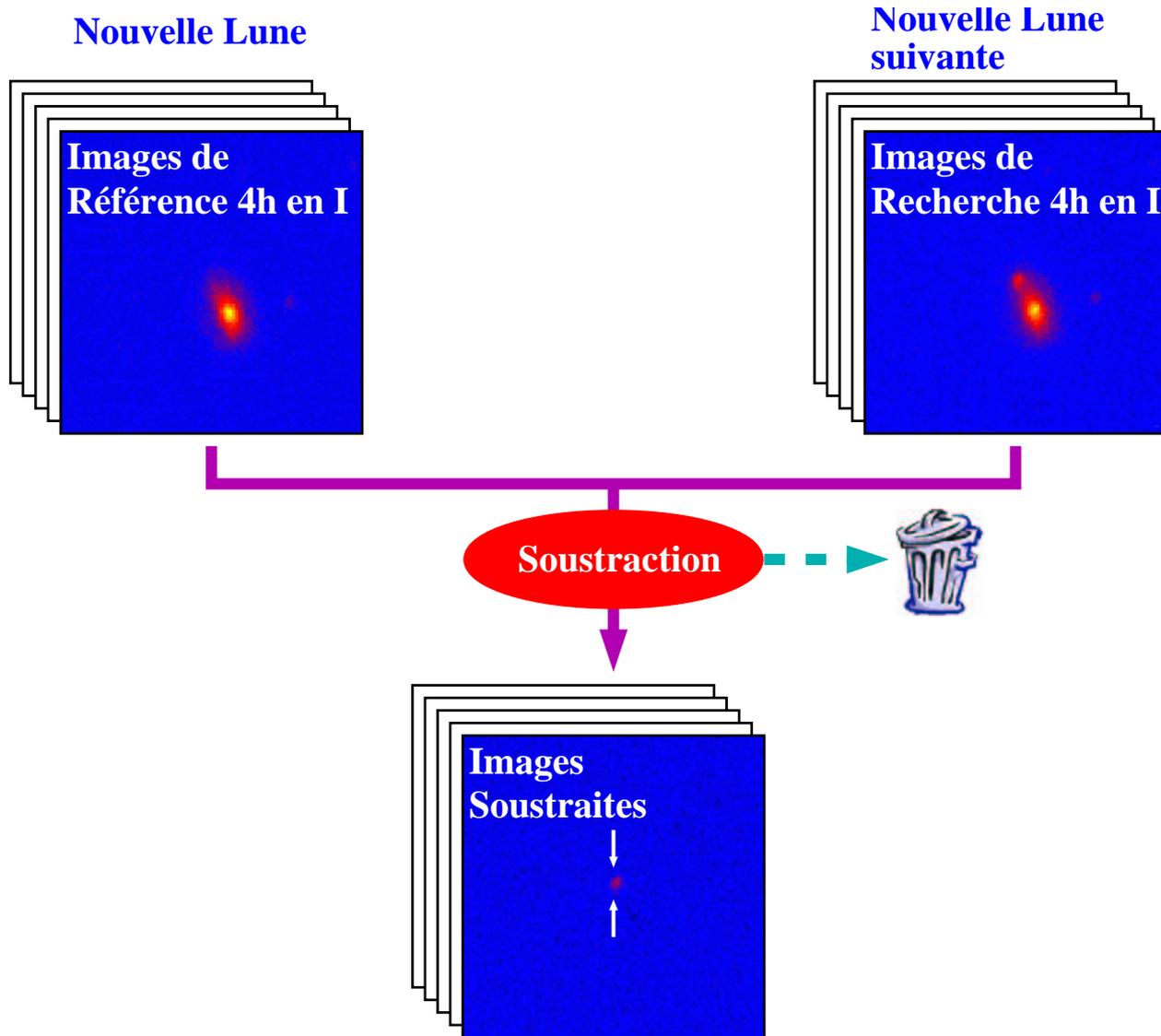
# Partie II :

# DETECTION ET SUIVI

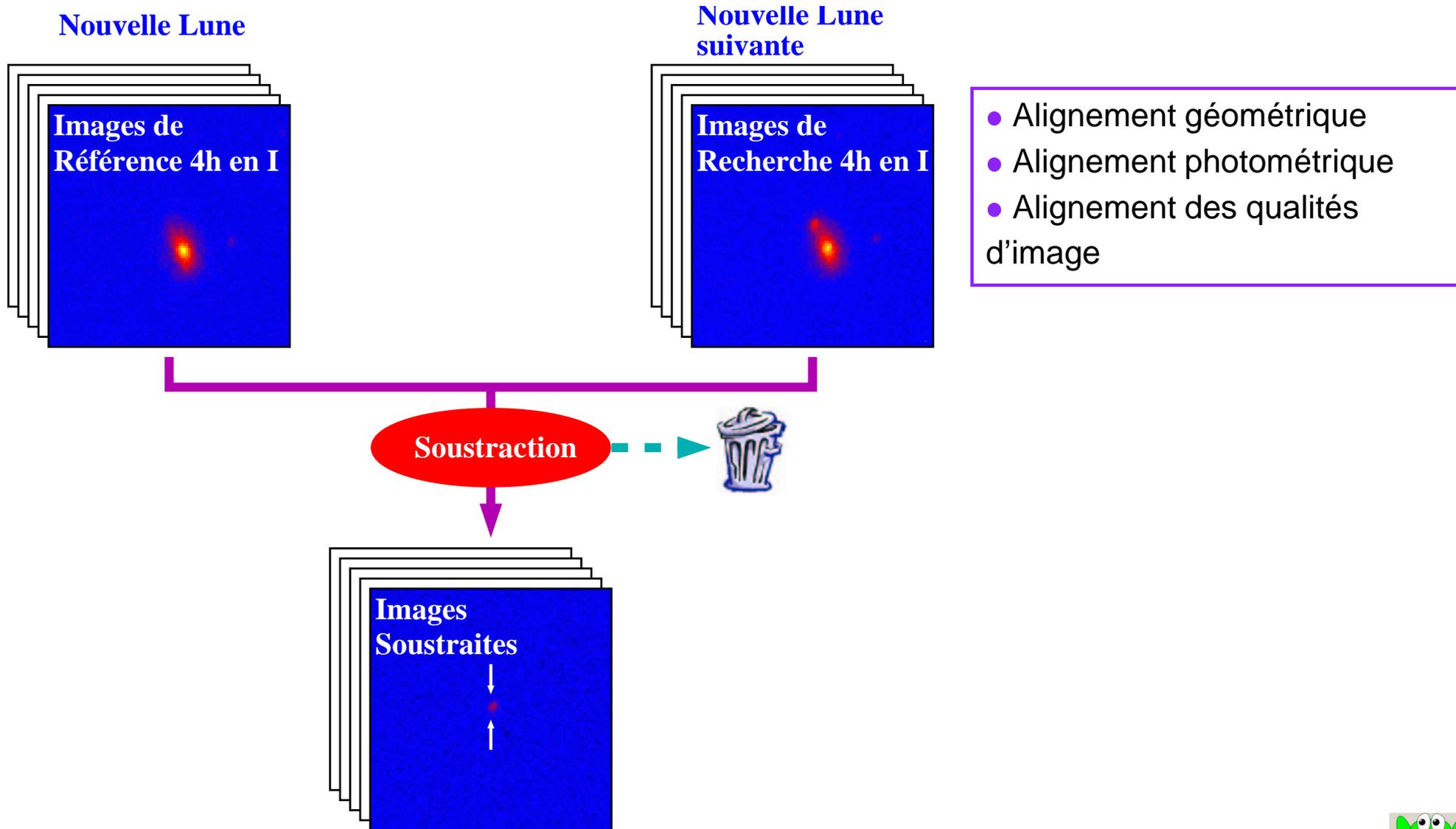
# PHOTOMETRIQUE



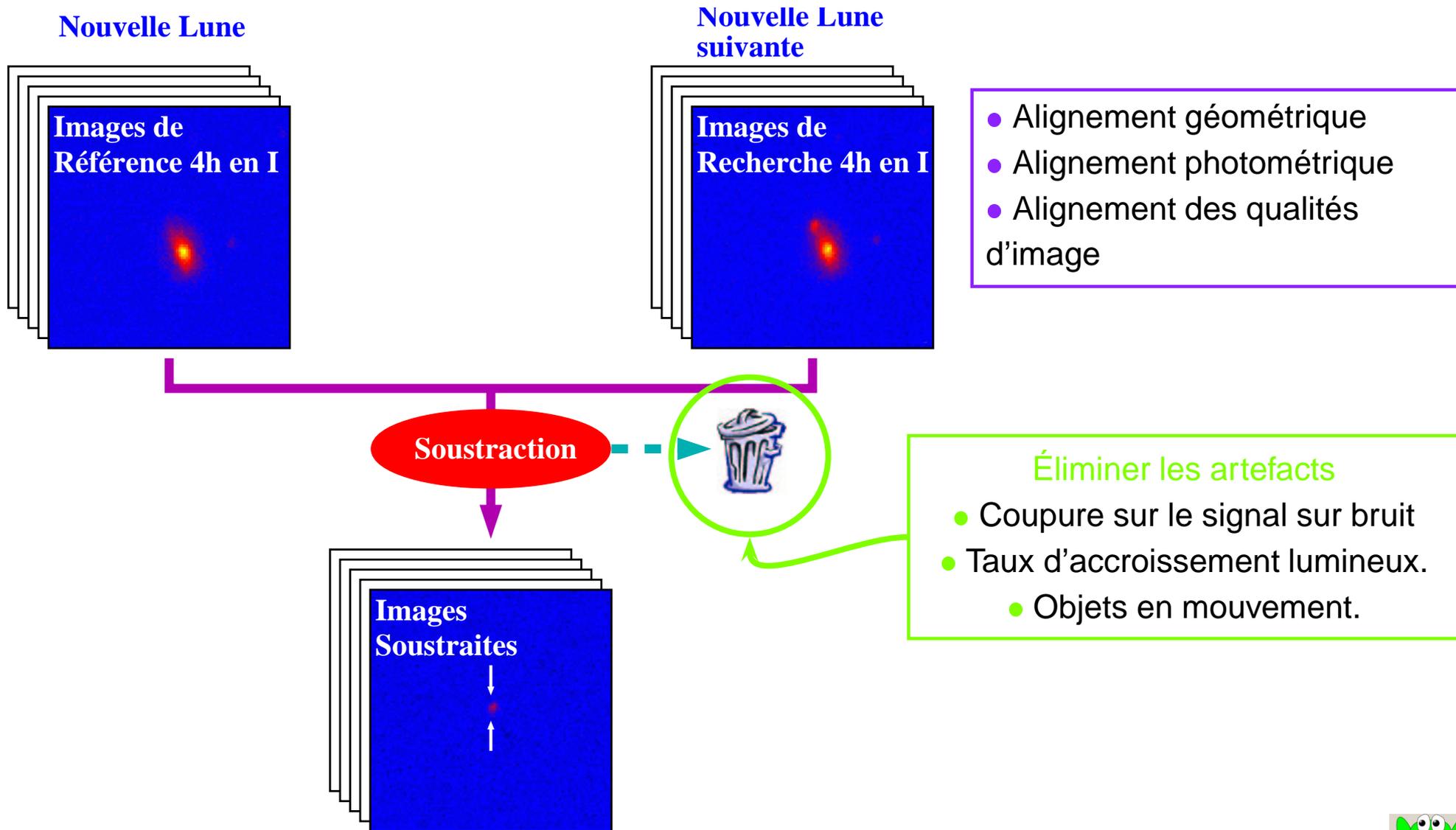
# La stratégie de recherche



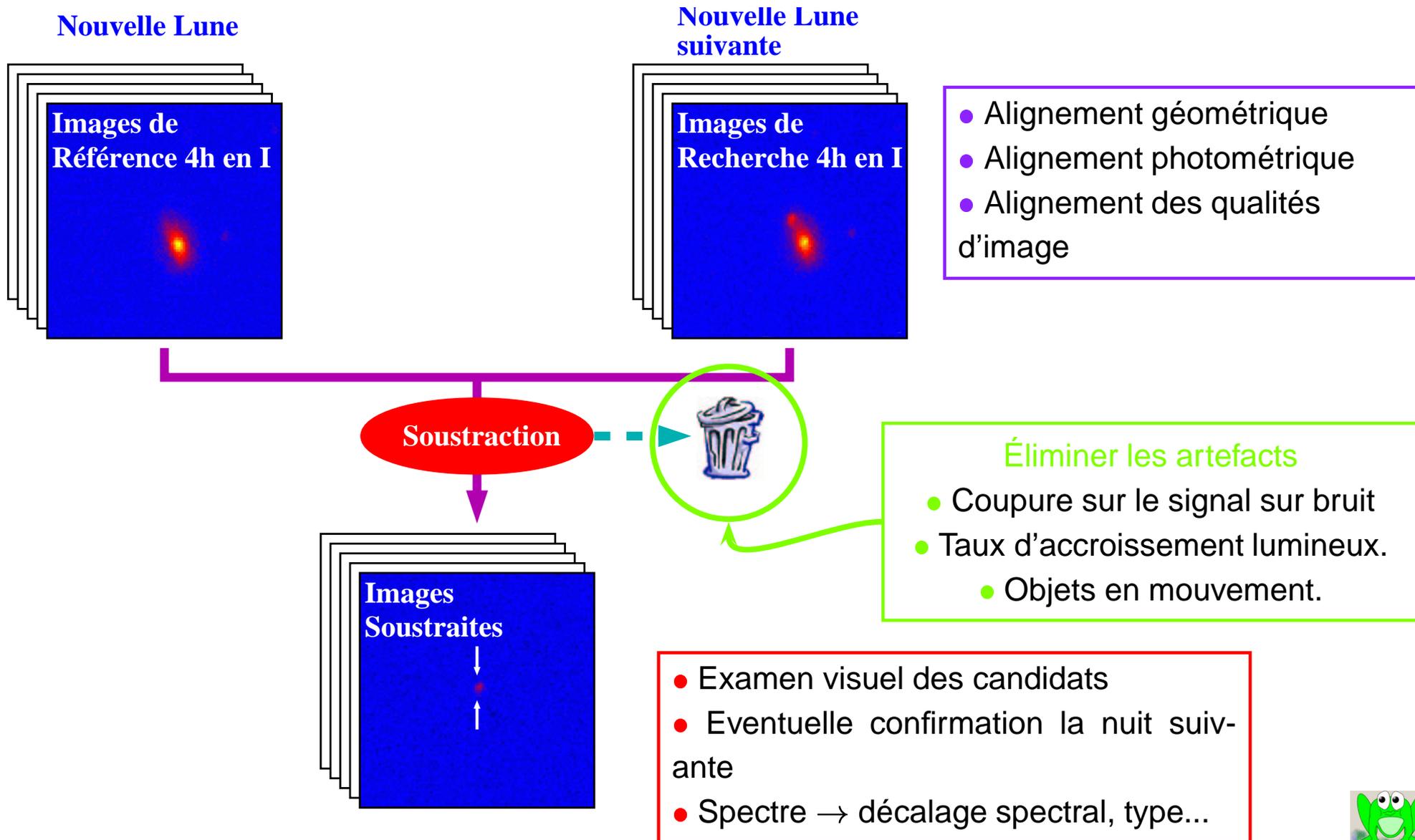
# La stratégie de recherche



# La stratégie de recherche



# La stratégie de recherche



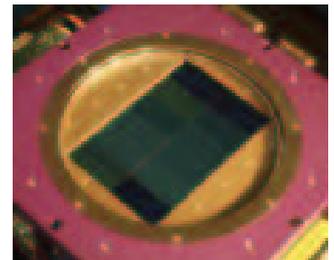
# La recherche SCP du printemps 2001

- CTIO MOSAIC II (4m), Chili.

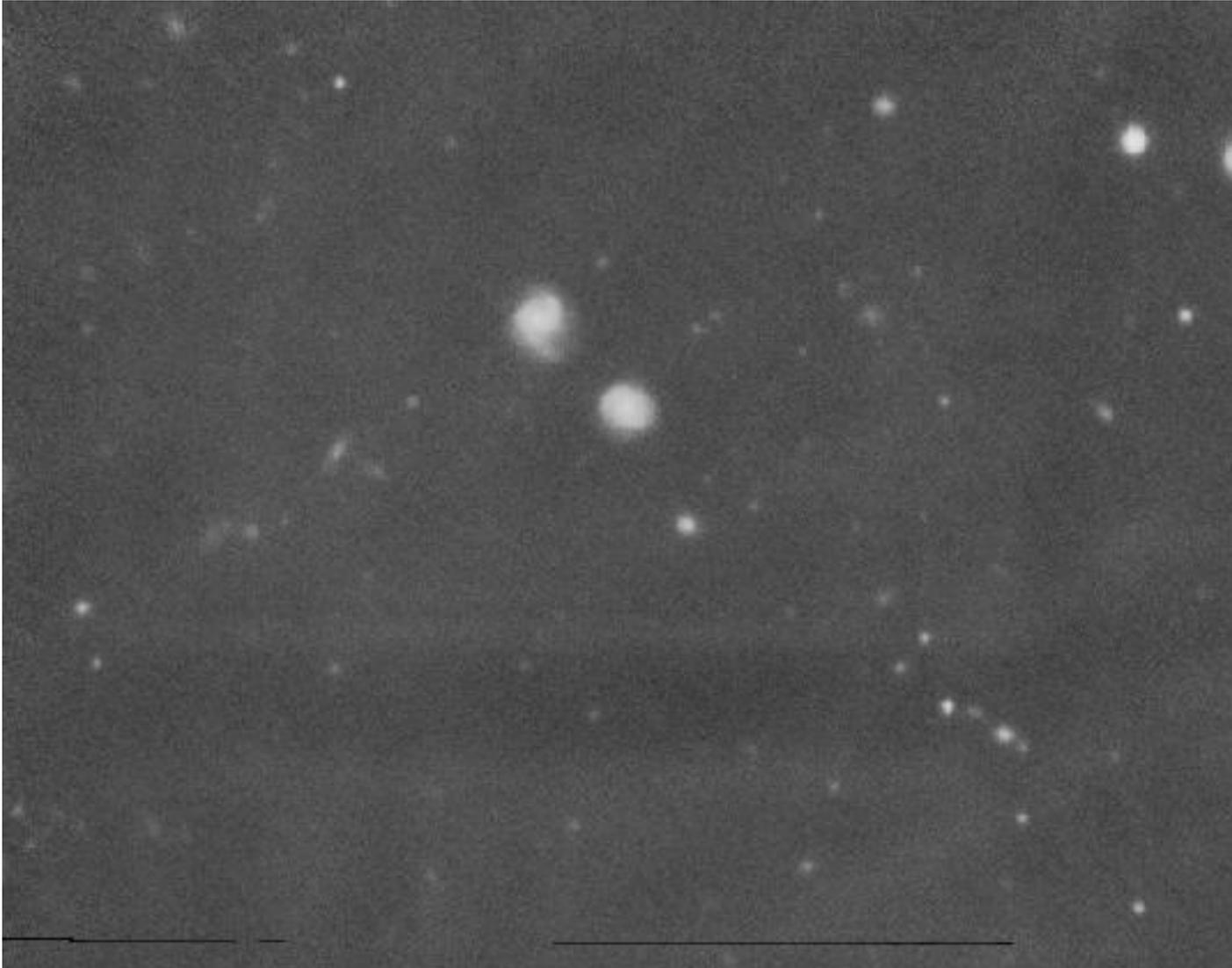
- Recherche profonde: 2 champs de  $1/3$  de degré carré en I.
- Recherche peu profonde : 23 champs de  $1/3$  de degré carré en R

- CFHT 12k (3.6m), Hawaii.

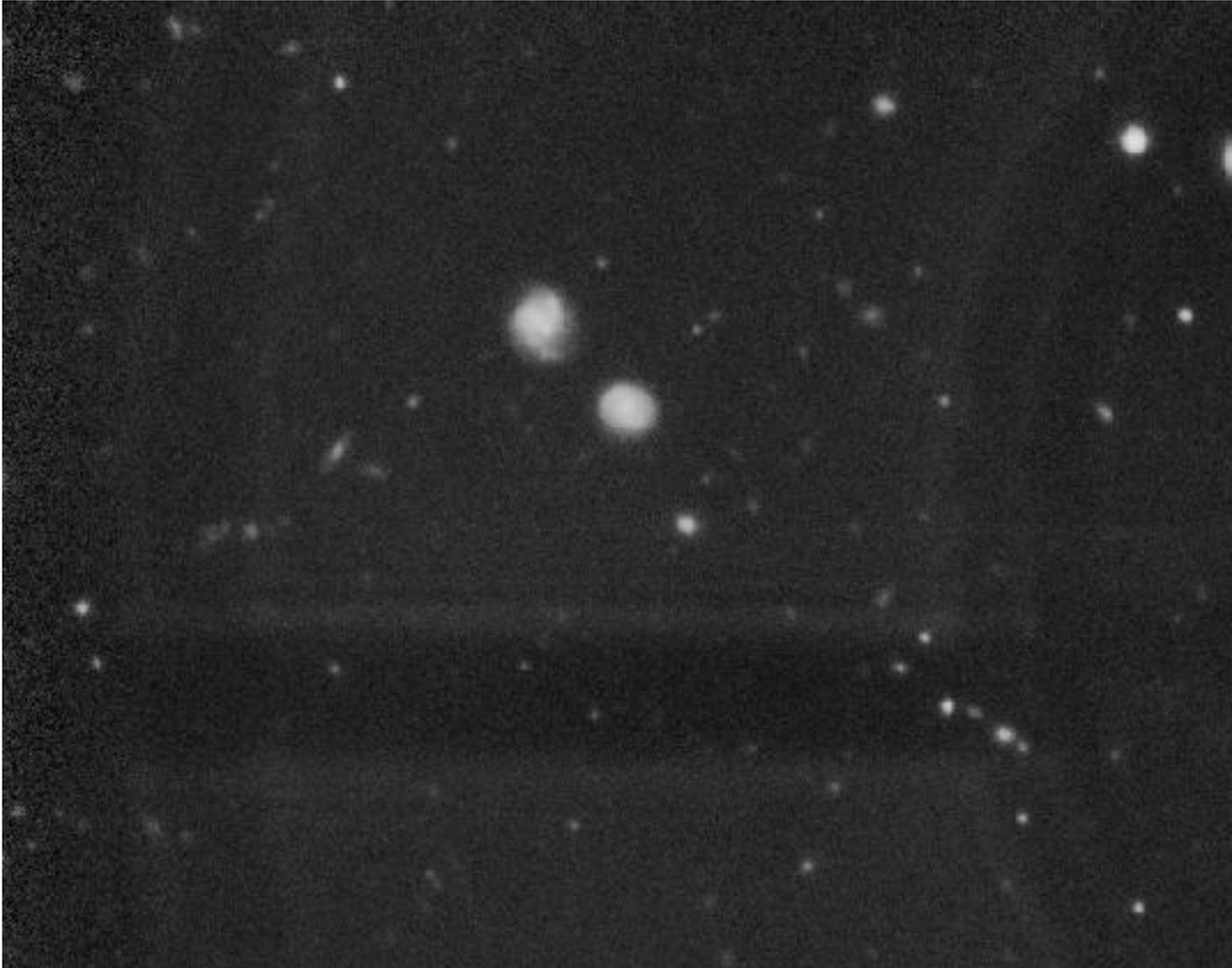
- Recherche profonde: 2 champs de  $1/3$  de degré carré en I



# Recherche : Soustraction un exemple



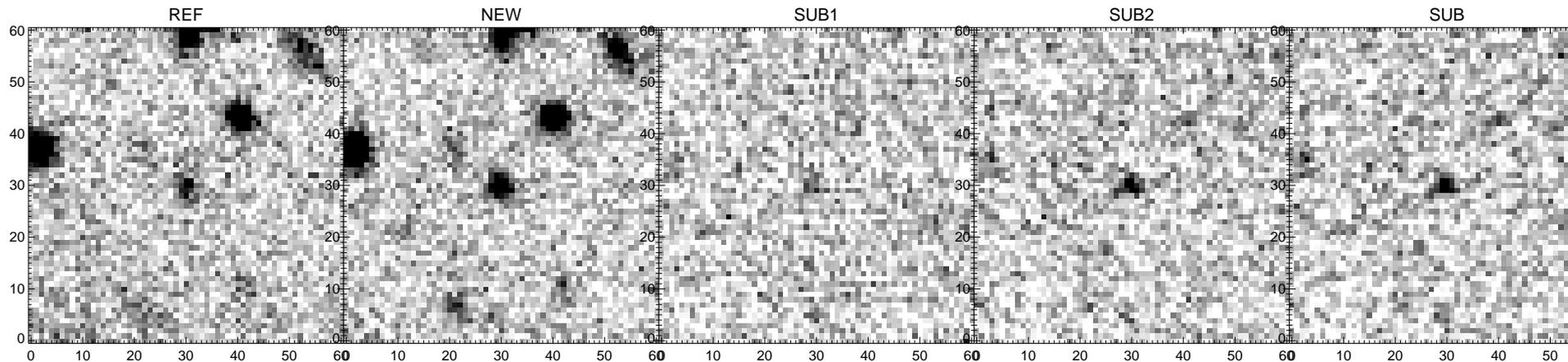
# Recherche : Soustraction un exemple



# Recherche : Soustraction un exemple



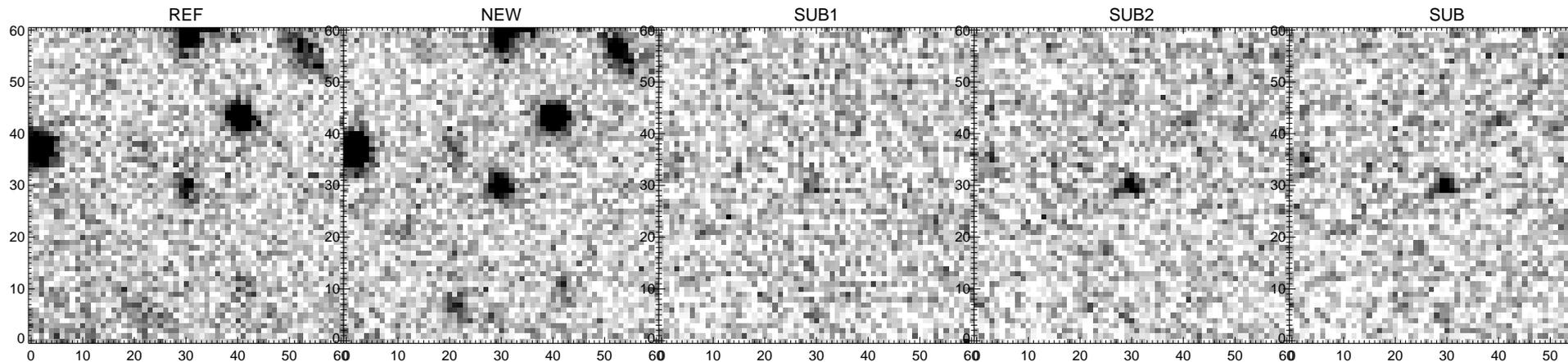
# Recherche : Un exemple



Position(x,y) = 1499.22 , 1674.71    Field :/data/leo/sub\_best/D4ccd10l  
Signal/Noise = 10.7144                Name : Loiret\_best\_split  
Signal/Noise sub1 = 4.89590  
Signal/Noise sub2 = 10.0548  
Flux = 44128.0  
Magnitude = 24.6176  
Increase = 1.13692  
RA,DEC (J2000) = 14:01:59.891 05:04:59.85  
DASS12 = 0.713224



# Recherche : Un exemple



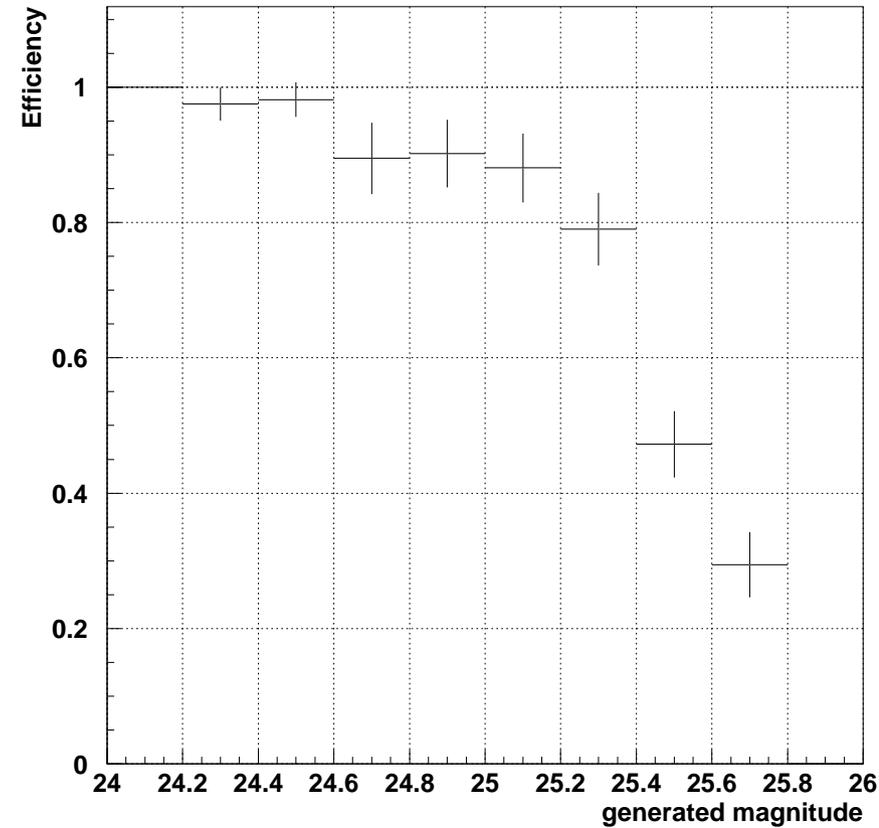
Position(x,y) = 1499.22, 1674.71    Field : /data/leo/sub\_best/D4ccd101  
Signal/Noise = 10.7144    Name : Loiret\_best\_split  
Signal/Noise sub1 = 4.89590  
Signal/Noise sub2 = 10.0548  
Flux = 44128.0  
Magnitude = 24.6176  
Increase = 1.13692  
RA,DEC (J2000) = 14:01:59.891 05:04:59.85  
DASS12 = 0.713224



# Efficacité de détection

Simulation de supernovæ :

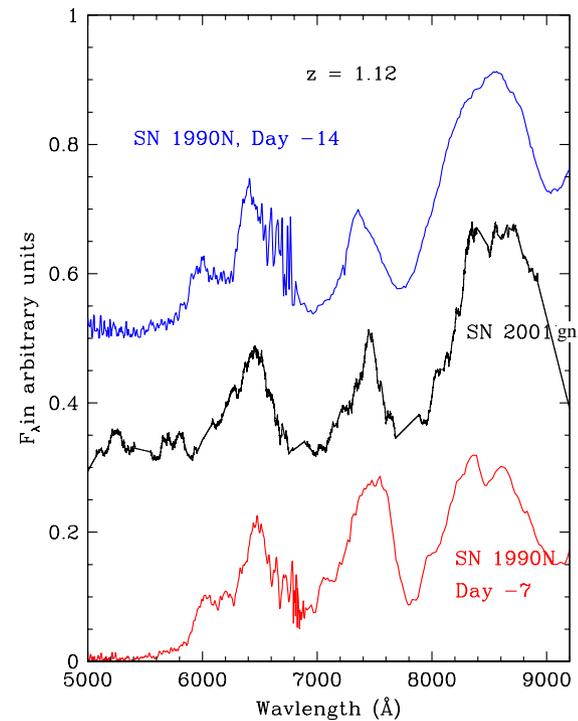
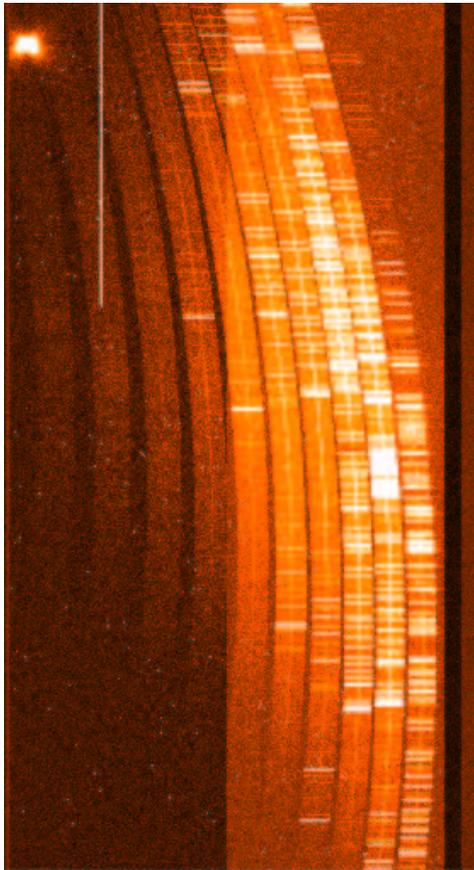
- Copier/déplacer/coller d'étoiles dans les images individuelles.
- Reprocessing complet jusqu'à la détection
- Comparaison simulée/déTECTÉE.



# Identification spectroscopique



Keck ESI 10m, Hawaii.



Intégration 6100s.



# Télégramme de découverte

## SUPERNOVAE

K. Schahmaneche, University of Paris VII, reports the discovery of 17 supernovae and five apparent supernovae by the Supernova Cosmology Project. SN 2000fr was discovered two weeks before maximum light and confirmed spectroscopically with the Keck II telescope (+ LRIS) and the Very Large Telescope UT1 (+ FORS1) on 2000 May 2 and 12.

SN	2000 UT	R.A. (2000.0)	Decl.	Mag.	z	Type
2000fr	Apr. 30	13 42 00.14	+ 4 43 42.4	24.5 R	0.543	Ia

The following 2001 supernovae were discovered at the Canada-France-Hawaii Telescope (in coadded images taken during 2001 Apr. 15-20, after subtracting coadded images from Mar. 29-31) or at with the Blanco Telescope at Cerro Tololo (in coadded images taken during Apr. 18-20, after subtracting coadded images from Mar. 28-30):

SN	2001 UT	R.A. (2000.0)	Decl.	Mag.	z	Type
2001gk	Apr. 15-20	14 01 32.32	+ 5 21 38.8	24.1 I	0.67?	?
2001gl	Apr. 15-20	14 01 16.60	+ 5 12 48.9	23.7 I	0.36	Ib/c
2001gm	Apr. 15-20	14 01 51.18	+ 5 05 38.5	23.4 I	0.478	Ia
2001gn	Apr. 15-20	14 01 59.90	+ 5 04 59.6	25.0 I	1.1	Ia
2001go	Apr. 15-20	14 02 00.95	+ 5 00 59.2	23.7 I	0.552	Ia
2001gp	Apr. 15-20	14 02 22.75	+ 4 55 24.0	25.3 I	1.067	?
2001gq	Apr. 15-20	14 01 51.38	+ 4 53 12.4	23.9 I	0.671	Ia
2001gr	Apr. 18-20	10 04 23.27	+ 7 40 48.3	23.3 R	0.541	Ia
2001gs	Apr. 18-20	10 00 52.68	+ 6 07 09.3	23.9 R	0.658	?
2001gt	Apr. 18-20	10 02 39.31	+ 7 16 33.0	22.7 R	0.56?	Ia
2001gu	Apr. 18-20	10 03 28.61	+ 7 24 38.9	23.7 R	0.32	Ia
2001gv	Apr. 18-20	10 00 21.18	+ 6 52 03.8	23.7 R	0.661	Ia
2001gw	Apr. 18-20	15 43 45.86	+ 7 57 50.3	22.0 R	0.363	Ia
2001gx	Apr. 18-20	10 36 10.31	+ 2 16 57.4	23.8 I	0.60	?
2001gy	Apr. 18-20	13 57 04.54	+ 4 30 59.8	23.4 I	0.511	Ia
2001gz	Apr. 18-20	13 56 04.09	+ 5 10 55.1	24.1 I	0.73?	?
2001ha	Apr. 18-20	10 06 33.50	+ 7 38 03.2	23.5 R	0.58	Ia
2001hb	Apr. 18-20	13 57 11.96	+ 4 20 26.9	24.8 I	1.05	Ia
2001hc	Apr. 18-20	9 44 31.52	+ 8 02 02.8	21.4 R	0.35	Ia
2001hd	Apr. 18-20	15 45 35.92	+ 8 16 50.6	22.8 R	0.511	Ia
2001he	Apr. 18-20	15 46 35.69	+ 8 11 26.4	23.0 I	0.582	Ia?

14 Ia découvertes  
avec  $0.35 < z < 1.12$

dont 4 au CFHT avec  
 $0.478 < z < 1.12$



PARTIE III :  
CONSTRUCTION ET  
AJUSTEMENT DES  
COURBES DE LUMIERE



# Lot d'analyse

Le lot de cette étude composé de 6 supernovæ de type Ia :

- Les plus lointaines de la campagne du printemps 2001
- Suivies avec le télescope spatial Hubble.
  - 2001gn,  $z = 1.12$ .
  - 2001go,  $z = 0.552$ .
  - 2001gq,  $z = 0.671$ .
  - 2001gy,  $z = 0.511$ .
  - 2001hb,  $z = 1.05$ .
- 2000fr ( $z = 0.543$ ) découverte au CFHT lors de la campagne SCP du printemps 2000 et suivie par Hubble.



# Suivi télescope spatial (WFPC2)

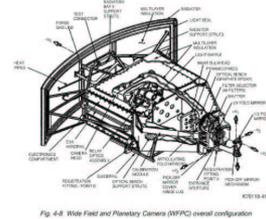
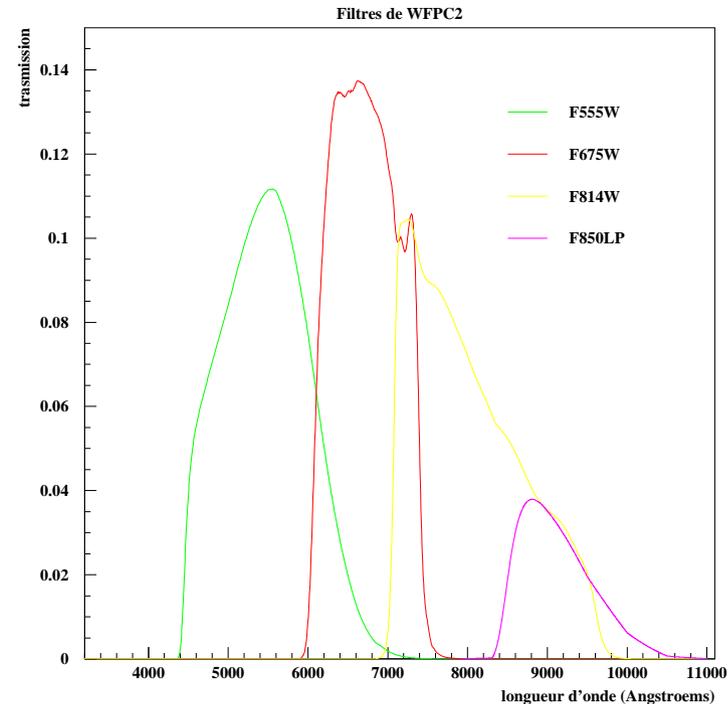


Fig. 4-8 Wide Field and Planetary Camera (WFPC) overall configuration

- 2 sne à  $z > 1$  suivies dans les filtres **F814W** et **F850LP**.
- 3 sne à  $0.45 < z < 0.67$  suivies dans les filtres **F675W** et **F814W**.

Pour chaque supernova **4 à 5 points** dans chaque filtre.



# Un exemple : 2001gn

Décalage vers le rouge : 1.12

CFHT (Filtre I)	
Date	Exposition (s)
30 mars 2001	9900
16 avril 2001	9900
20 avril 2001	3300
printemps 02	23400

WFPC2			
Filtre	# d'expo	Exposition (s)	Date
F814W	2	2300	1 <sup>er</sup> mai 2001
F850LP	6	7100	7 Mai 2001
F814W	4	4700	11 Mai 2001
F814W	4	4700	22 Mai 2001
F814W	6	7100	4 Juin 2001
F814W	5	7200	18 Juin 2001
Référence ACS			
F850LP	2	946	6 Mai 2003
F814W	2	946	6 Mai 2003

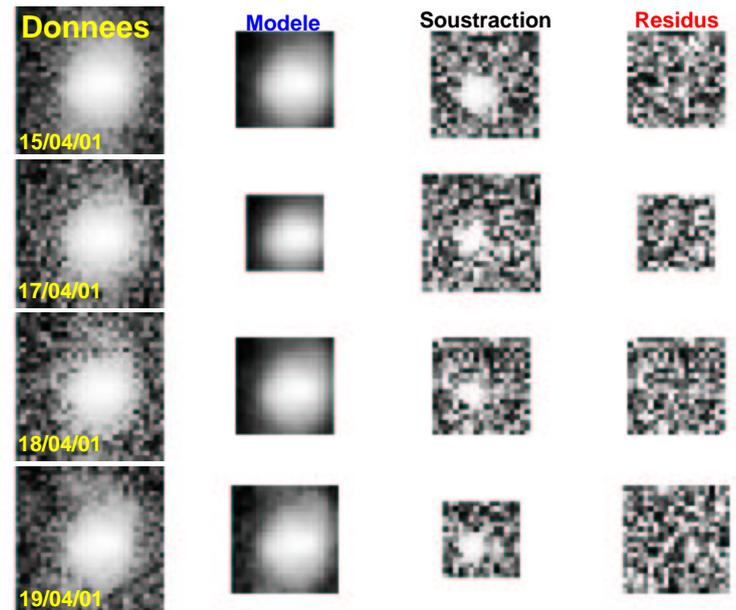


# Photométrie au sol

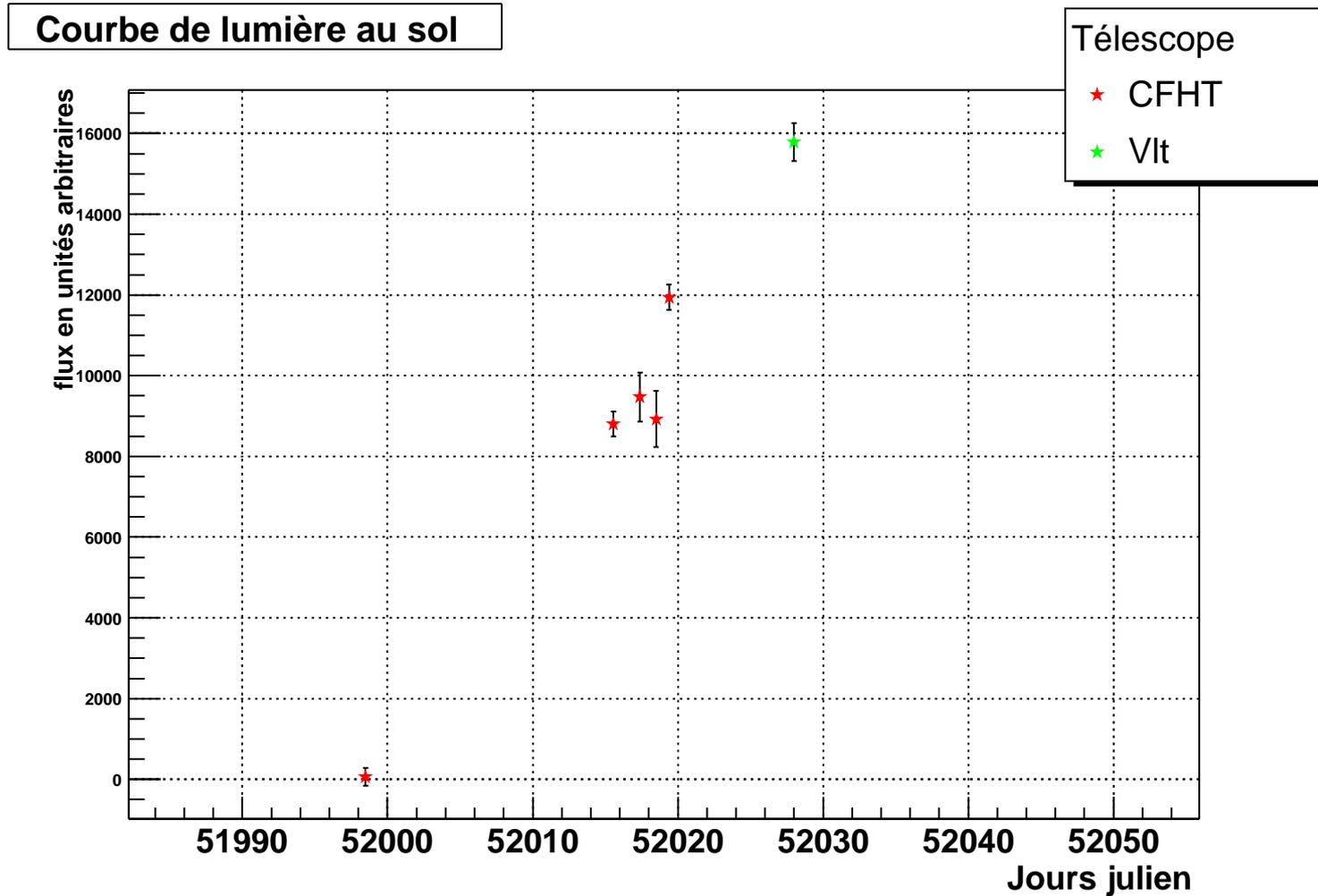
La méthode de Sébastien Fabbro :

- Homogénéisation de la qualité des images en utilisant la même méthode que pour la soustraction.
- Ajustement simultané du fond galactique sur les différentes images.

Les images de référence sont obtenues grâce aux observations des autres campagnes SCP (2000A et 2002A).



# Courbe de lumière au sol



Points de photométrie au sol obtenus pour 2001gq.



# Les avantages de l'espace

## Pas d'atmosphère :

- Pas d'absorption par l'atmosphère.
- Peu de lumière du fond de ciel et on peut faire les observations au moment de la pleine lune.
- Pas de variation de la qualité des images.

On a donc :

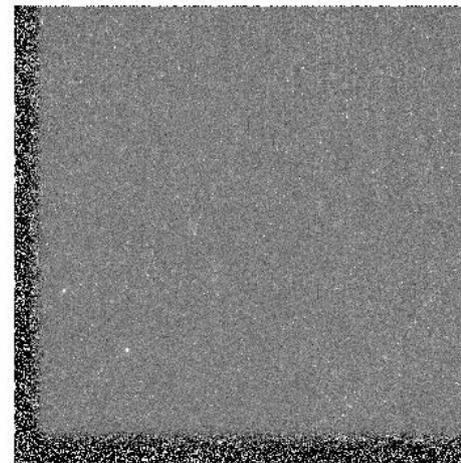
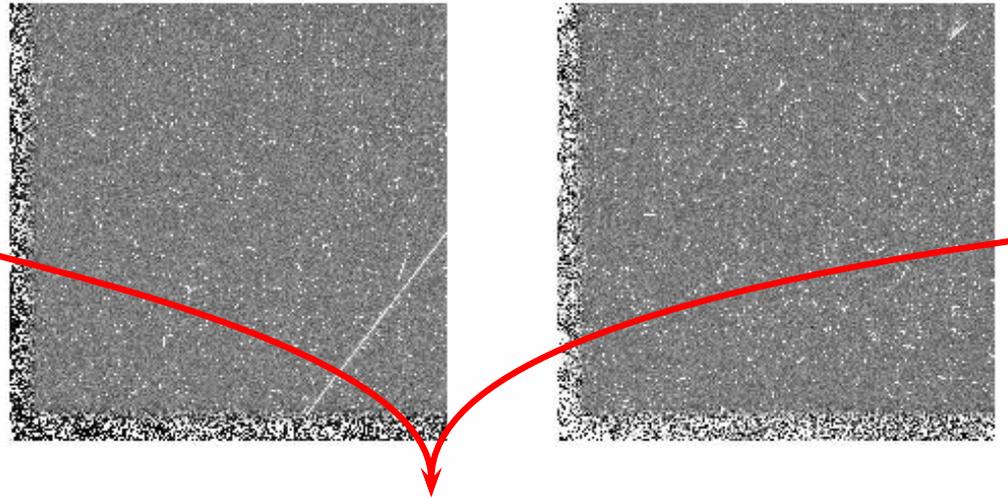
- **Des précisions photométriques** bien meilleures, pour un signal sur bruit équivalent exposition 7 fois plus courtes.
- **Pas d'homogénéisation** des images nécessaire.
- **Calibration bien connue** et constante dans le temps.



# Problèmes espace : les cosmiques

Le nombre de cosmiques est en moyenne 100 fois supérieur au nombre observé sur les images au sol.

Empilement des images en éliminant les cosmiques par **anticoïncidence**.



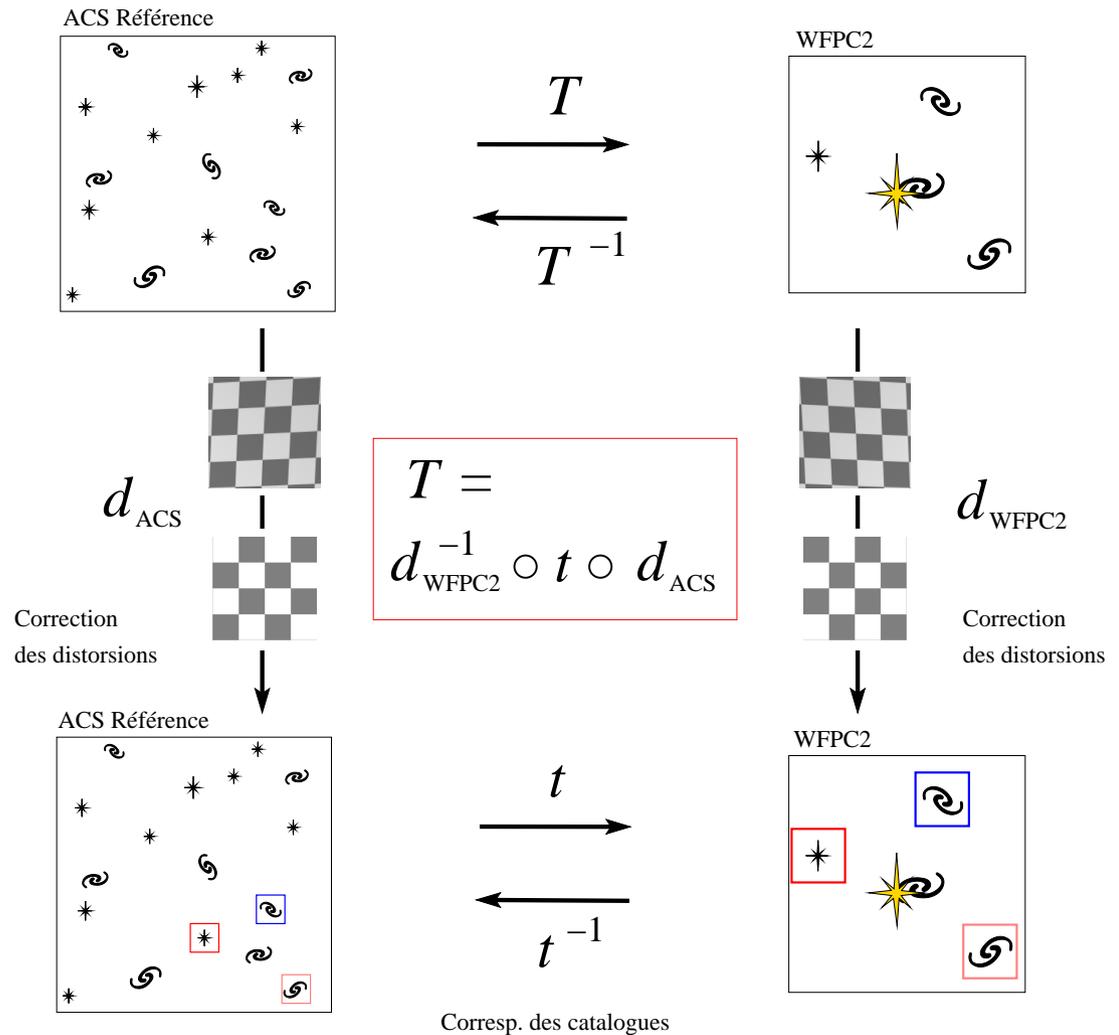
# Alignement géométrique des images

**But** : Alignement des images de référence prise avec ACS et des images de suivi prises avec WFPC2.

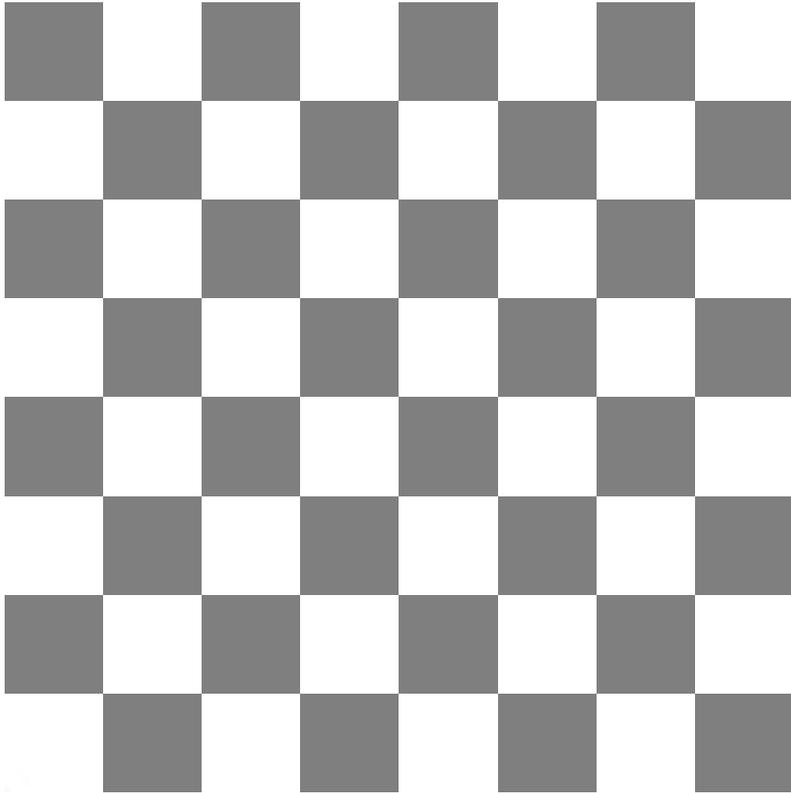
**Problèmes** :

- Taille de champ réduite pour WFPC2 (40'')  $\Rightarrow$  peu d'objets.
- Distorsion importante.

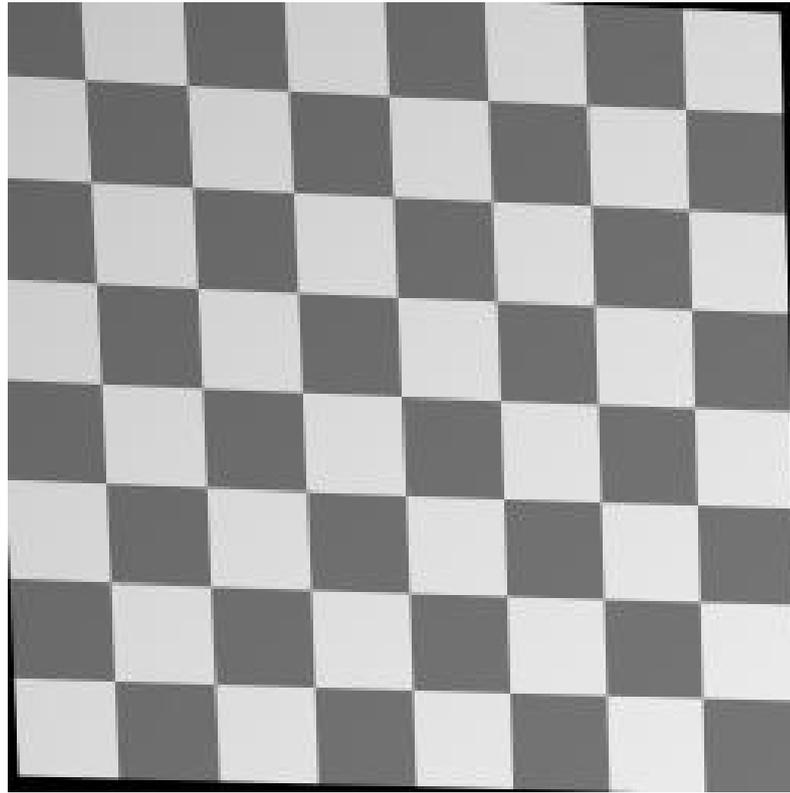
**NOTE** : Les images qui contiennent la supernova ne sont **jamais** rééchantillonnées  $\rightarrow$  pas de corrélation entre les pixels.



# Distortions ACS

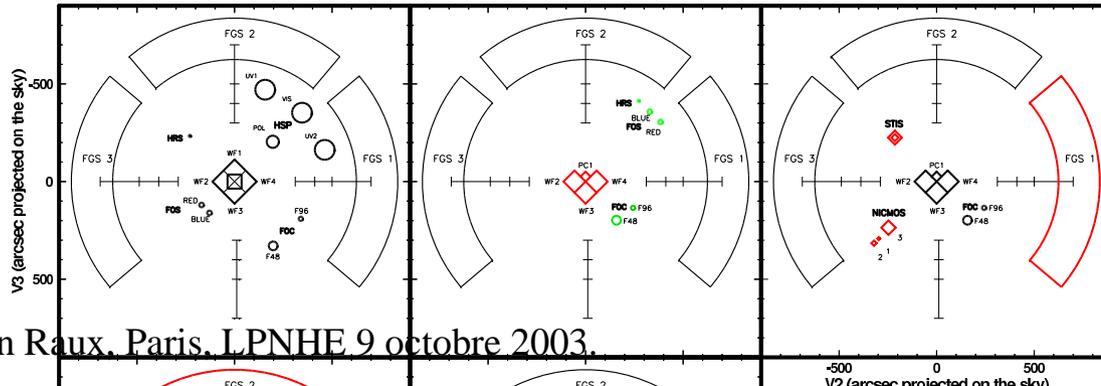


Launch (1990)



SM1 (1993)

SM2 (1997)



# Alignement photométrique

**Difficulté** : trop peu d'objets pour une estimation empirique.

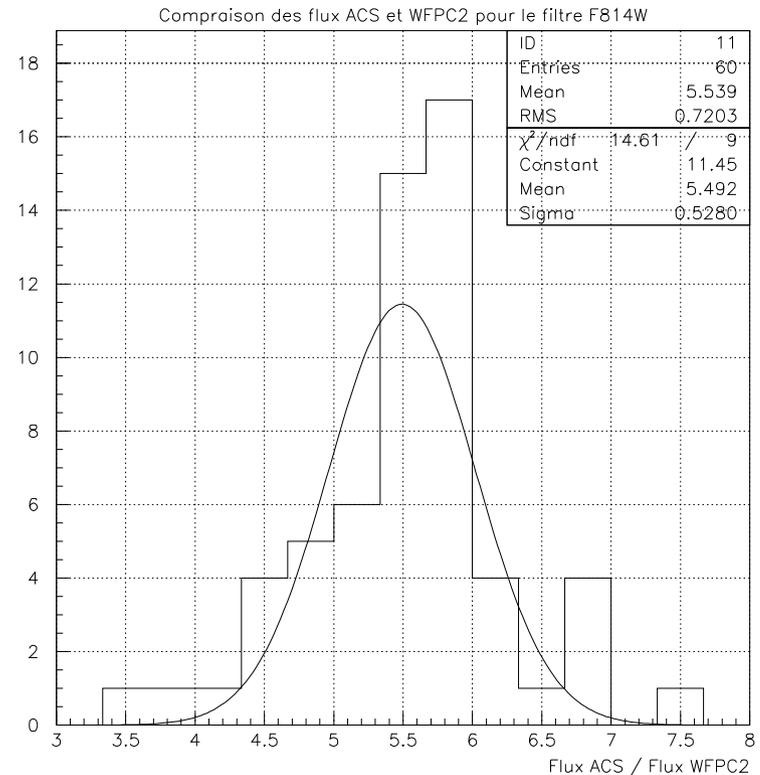
⇒ Erreur importante dans le rapport photométrique.

Le rapport photométrique est donc estimé en utilisant :

- Les temps de pose des images.
- Le rapport des efficacités quantiques moyennes des deux caméras

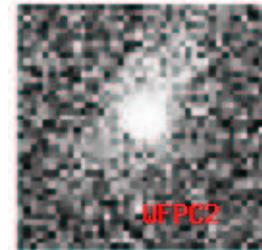
Dans le filtre F814W, ce rapport est :

$$\frac{f_{ACS}}{f_{WFPC2}} = 5.49$$



# Tentative de photométrie différentielle

Estimation des flux de la supernova par **ajustement simultané**.

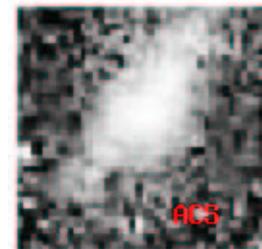


- Pour chaque époque  $k$ , on ajuste  $flux_k$ .
- La **position** est ajustée de manière **simultanée**.

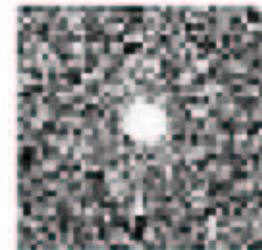
Construction du modèle :

- Construction du modèle d'étoile (PSF).
- On minimise :

$$\chi^2 = \sum_k \sum_{i,j} \left( \frac{PSF_k(i,j) * flux_k + Gal(i,j) - I_k(i,j)}{\sigma_k(i,j)} \right)^2$$



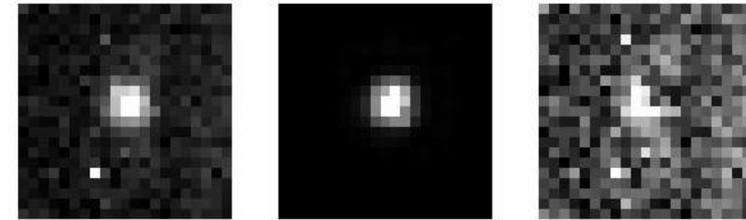
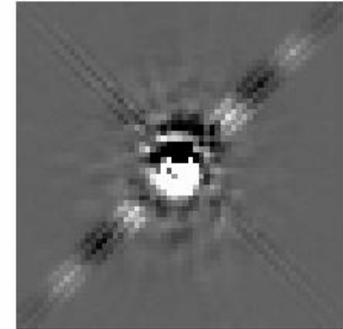
=



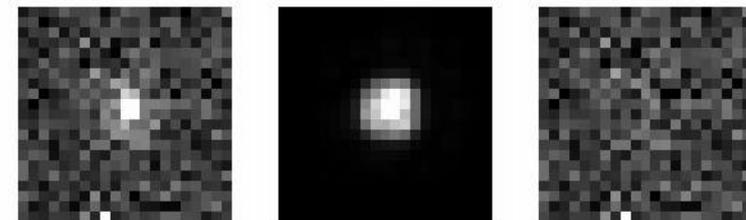
# Photométrie Hubble : Pratique

## Problèmes :

- Trop peu d'objets pour un alignement correct ( $\simeq 10$  par image).
- Autres CCDs de la caméra inutilisables pour l'alignement (décalages mal connus et variables avec le temps).
- Le modèle d'étoile reproduit mal les données  $\Rightarrow$  Biais dans l'estimation du flux.



Etoile brillante.



Etoile faible.

## Enfin :

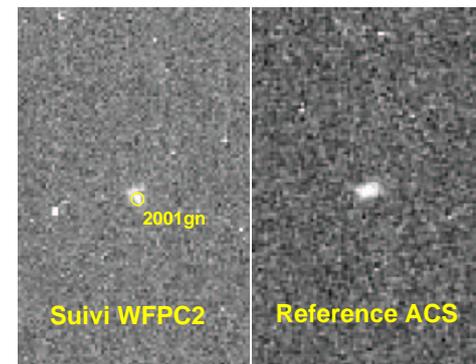
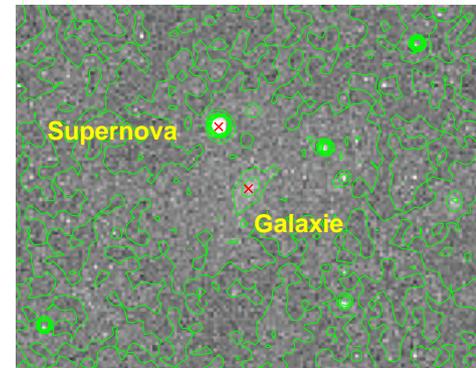
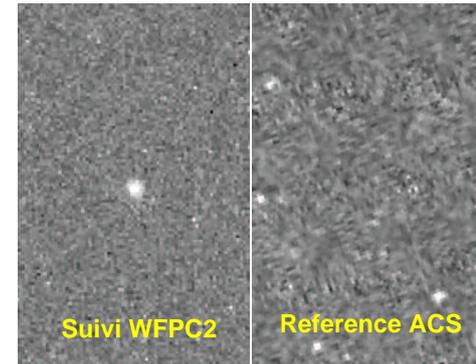
- Pas de soustraction pixel à pixel.
- Photométrie de PSF uniquement pour les objets faibles.



# Estimation des flux des supernovæ

Plusieurs cas de figure :

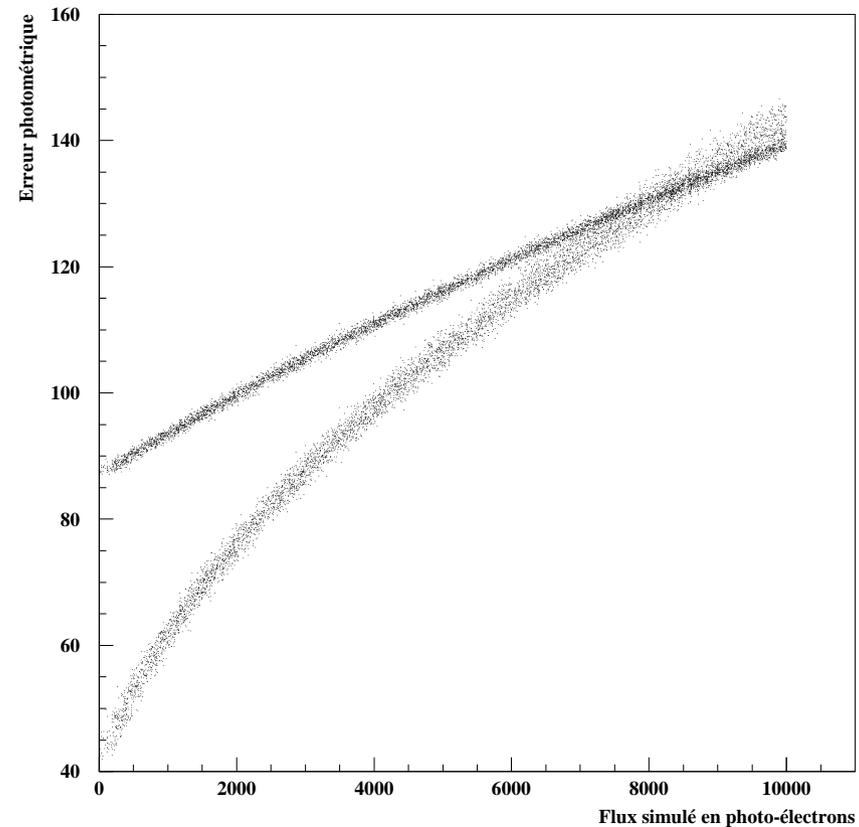
- Pas de galaxie hôte et flux faible
  - Flux par ajustement de modèle d'étoile (1 SN).
- Pas de galaxie hôte et flux important
  - Flux d'ouverture petit rayon (2 SNe).
- Galaxie hôte importante
  - Soustraction de flux d'ouverture grand rayon (3 SNe).



# Comparaison flux de PSF et d'ouverture

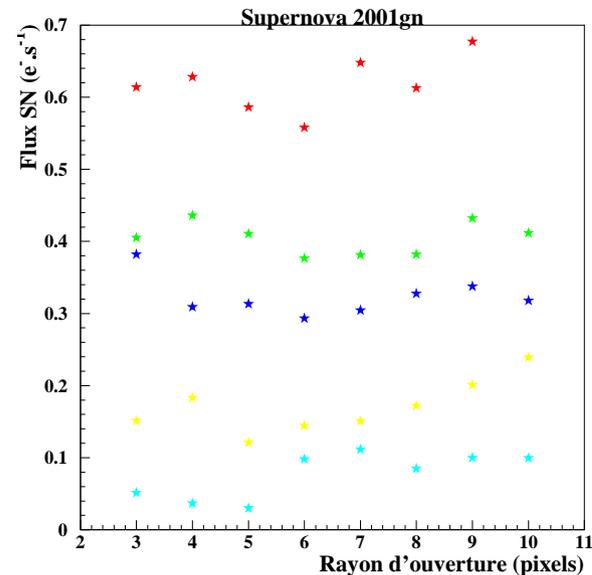
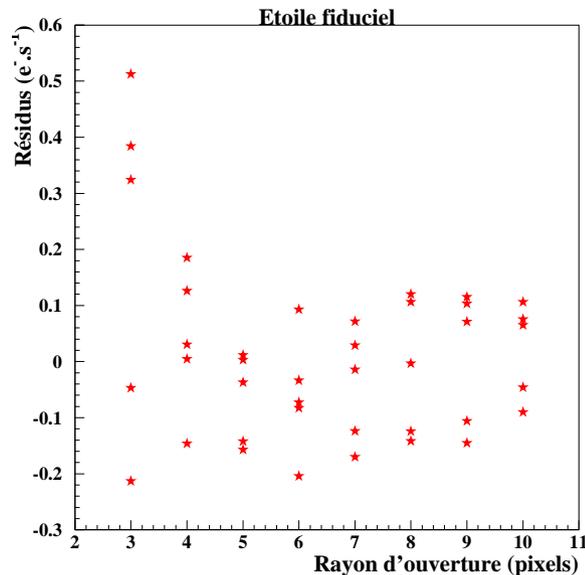
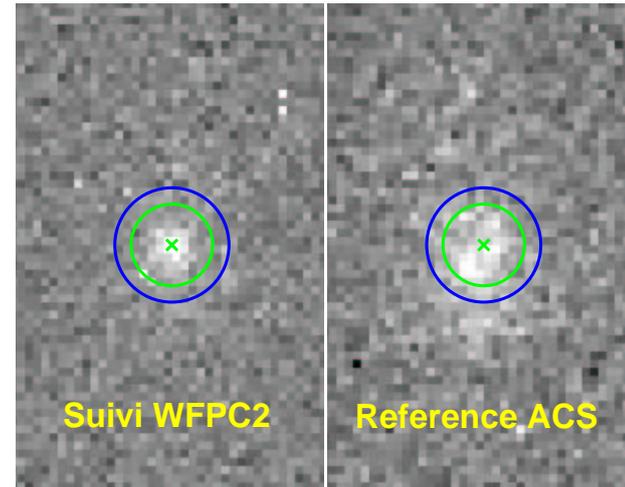
- Flux de PSF : Méthode optimale.
- Flux d'ouverture : Optimal dans la limite des grands flux.

Comparaison des erreurs photométriques



# Photométrie différentielle

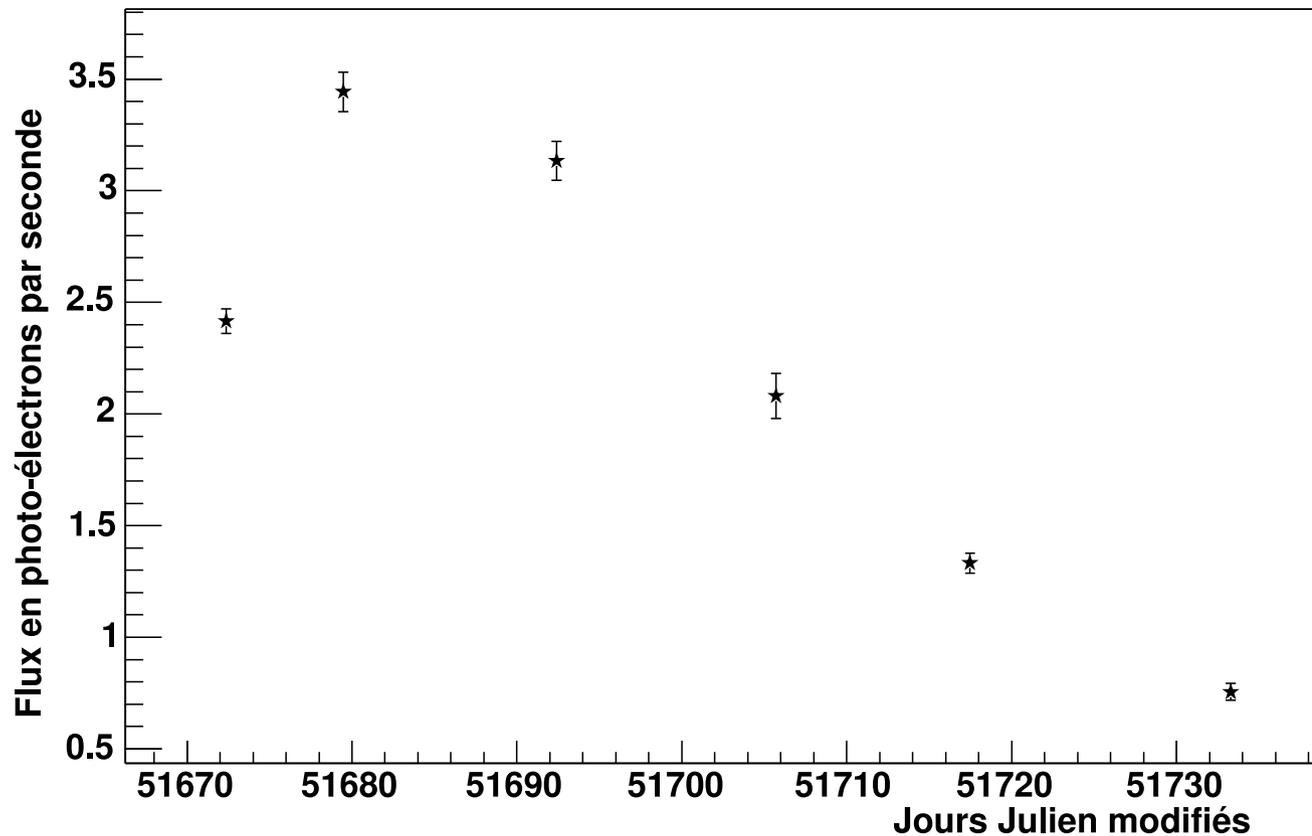
A partir d'ouvertures de 4 à 5 pixels : plus de biais en fonction l'ouverture employée.



# Une courbe de lumière Hubble

Courbe de lumière de 2000fr ( $z=0.543$ ) en I.

Courbe de lumière en I



# Calibration

$$Mag_{SN} = -2.5 \log_{10} (flux_{SN})_{ins} + 2.5 \log_{10} (flux_{vega})_{ins} + 2.5 \log_{10} \left[ \left( \frac{flux_{SN}}{flux_{vega}} \right)_{std} \left( \frac{flux_{vega}}{flux_{SN}} \right)_{inst} \right]$$

Point zéro

Terme de couleur

Calibration photométrique pour passer des flux observés à des magnitudes dans le système standard (Johnson-Cousins) :

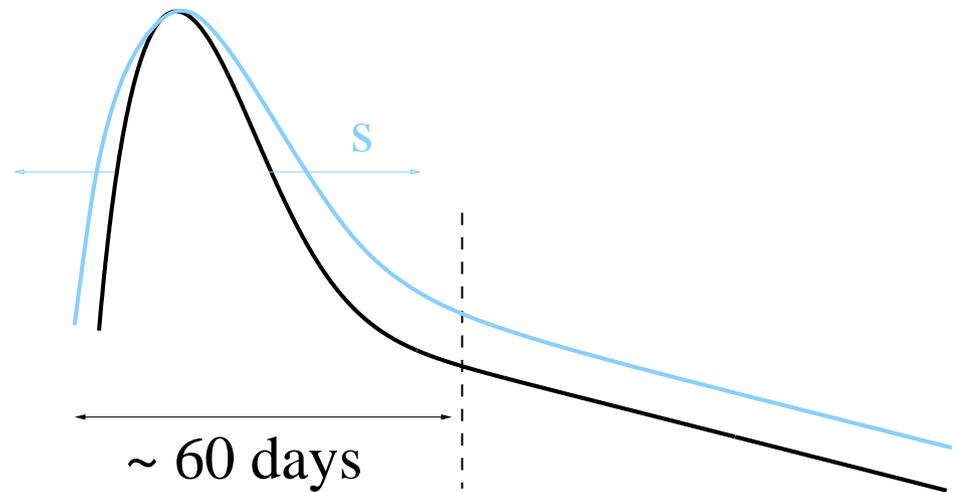
- De manière standard pour les observations **au sol** (points zéros , termes de couleur,... déterminés empiriquement).
- Pendant l'**ajustement** pour les observations **spatiales**.



# Courbe de lumière : les paramètres

Paramètres ajustés :

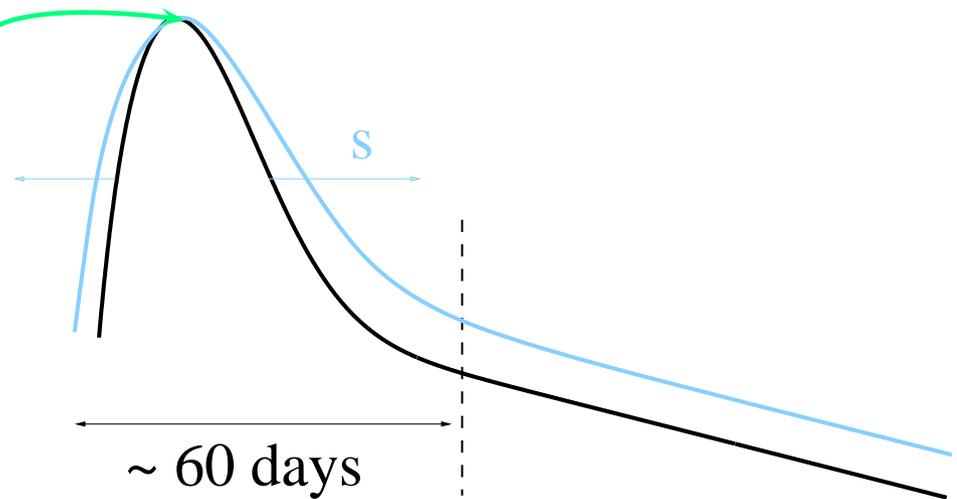
- Le jour du maximum ( $t_{max}$ ).
- Le flux ou magnitude au maximum dans chaque bande d'observation ( $f_{max}$  ou  $X_{max}$ ).
- Un facteur d'étirement temporel de la courbe de lumière ( $s_X$ ).



# Courbe de lumière : les paramètres

Paramètres ajustés :

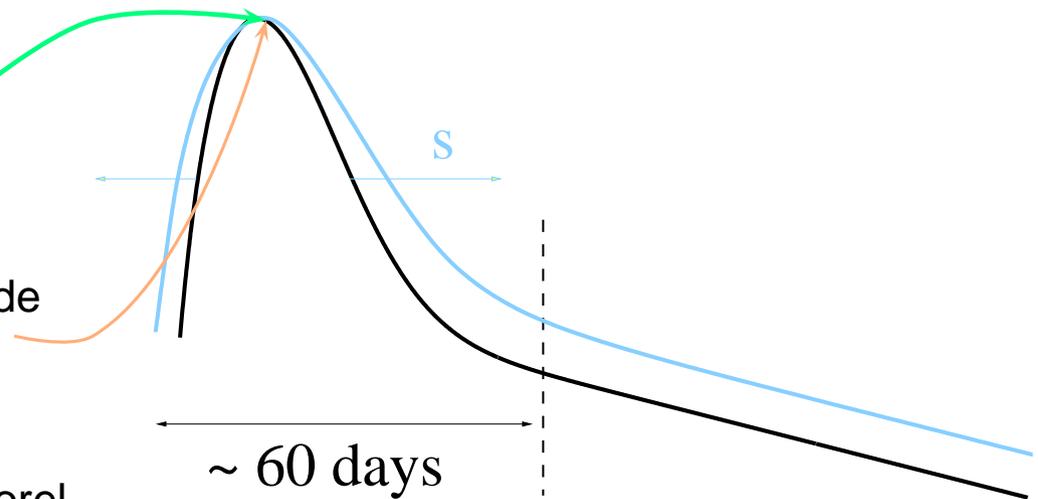
- Le jour du maximum ( $t_{max}$ ).
- Le flux ou magnitude au maximum dans chaque bande d'observation ( $f_{max}$  ou  $X_{max}$ ).
- Un facteur d'étirement temporel de la courbe de lumière ( $s_X$ ).



# Courbe de lumière : les paramètres

Paramètres ajustés :

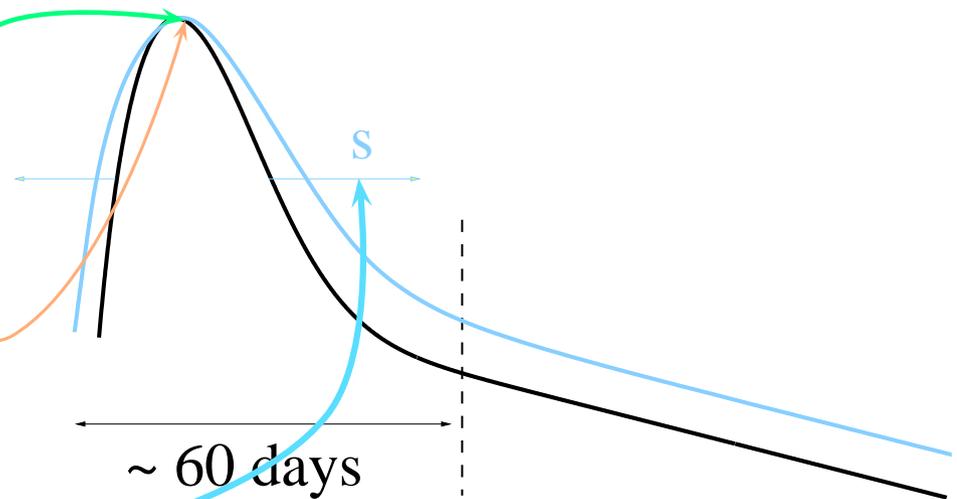
- Le jour du maximum ( $t_{max}$ ).
- Le flux ou magnitude au maximum dans chaque bande d'observation ( $f_{max}$  ou  $X_{max}$ ).
- Un facteur d'étirement temporel de la courbe de lumière ( $s_X$ ).



# Courbe de lumière : les paramètres

Paramètres ajustés :

- Le jour du maximum ( $t_{max}$ ).
- Le flux ou magnitude au maximum dans chaque bande d'observation ( $f_{max}$  ou  $X_{max}$ ).
- Un facteur d'étirement temporel de la courbe de lumière ( $s_X$ ).



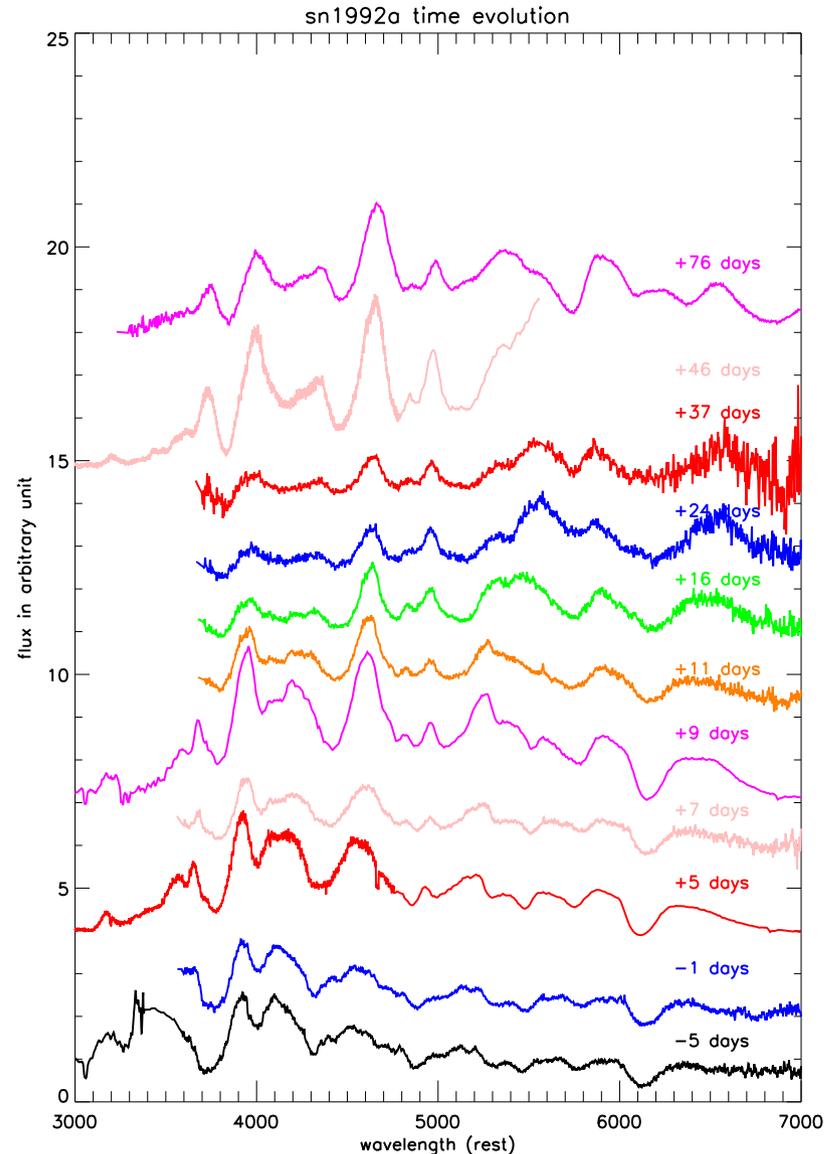
# Modèle de courbes de lumière

## Les ingrédients :

- Filtres.
- Un patron de spectre.
- Un décalage vers le rouge.
- Le spectre de Vega (étoile de référence photométrique).

## La méthode :

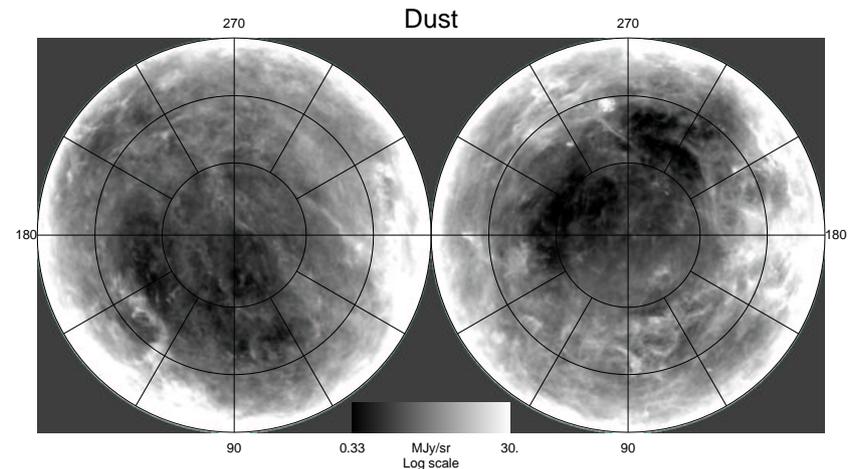
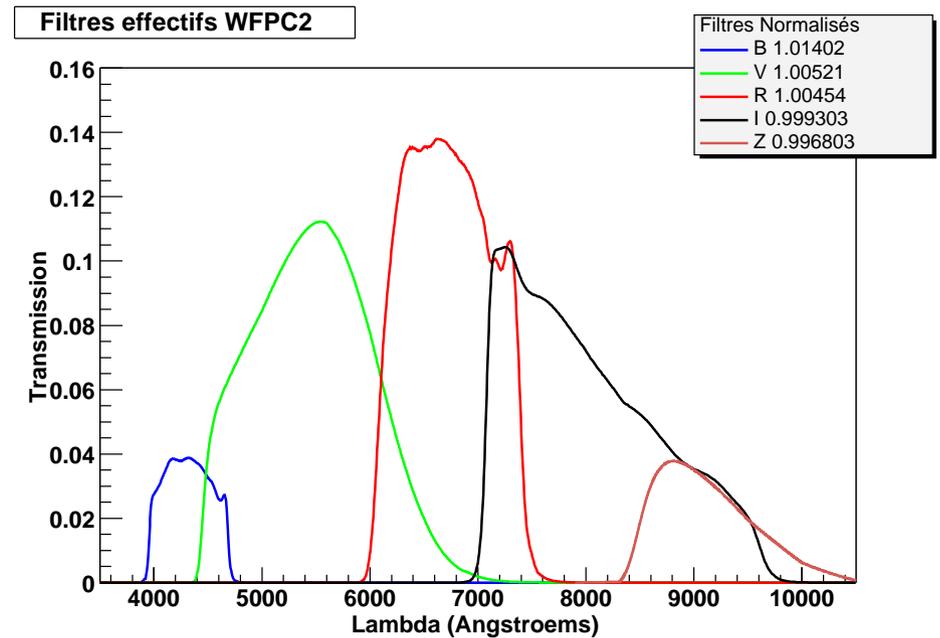
- On décale le patron de supernova vers le rouge.
- On intègre le spectre dans le filtre.



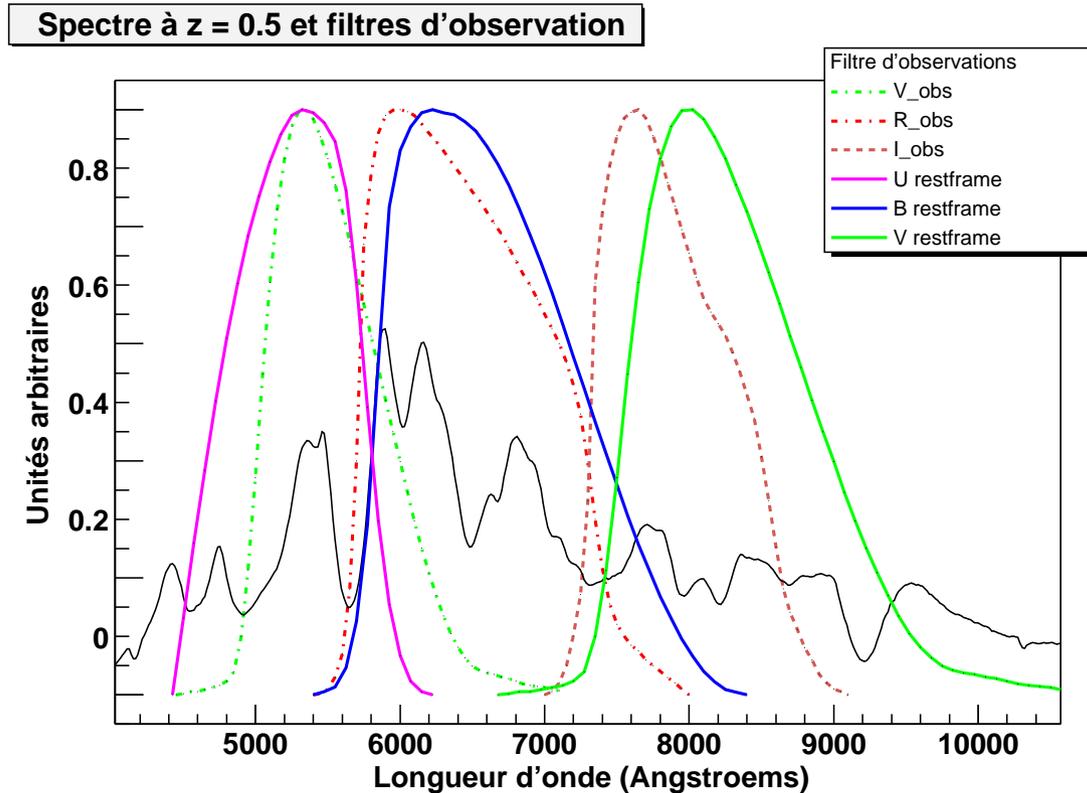
# Les filtres effectifs

On combine :

- Taille du **miroir** (normalisée pour reproduire les points zéros).
- Efficacité quantique des **CCDs**.
- Transmission de l'**optique**.
- Transmission des **filtres**.
- Transmission de l'**atmosphère** (observation au sol).
- **Absorption de la Voie Lactée**.



# Résultats et unités



On veut exprimer les magnitudes dans les **mêmes unités** :

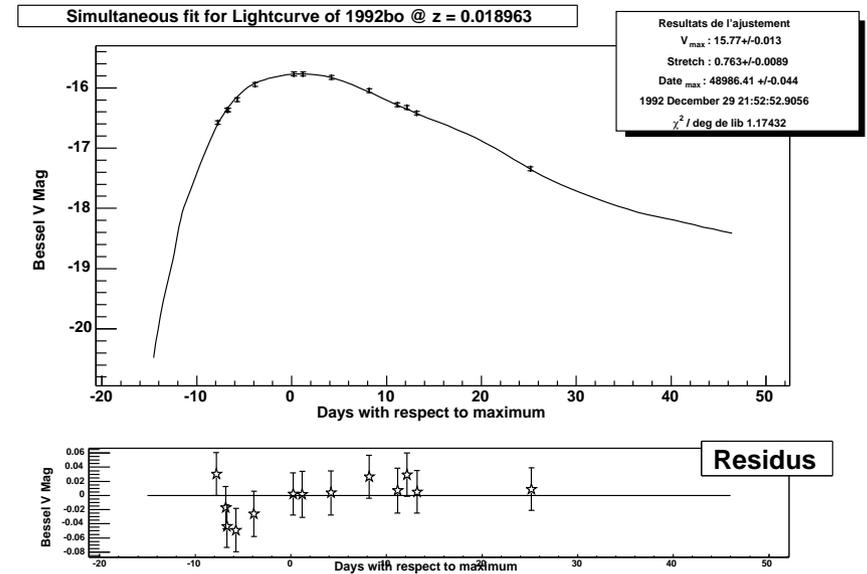
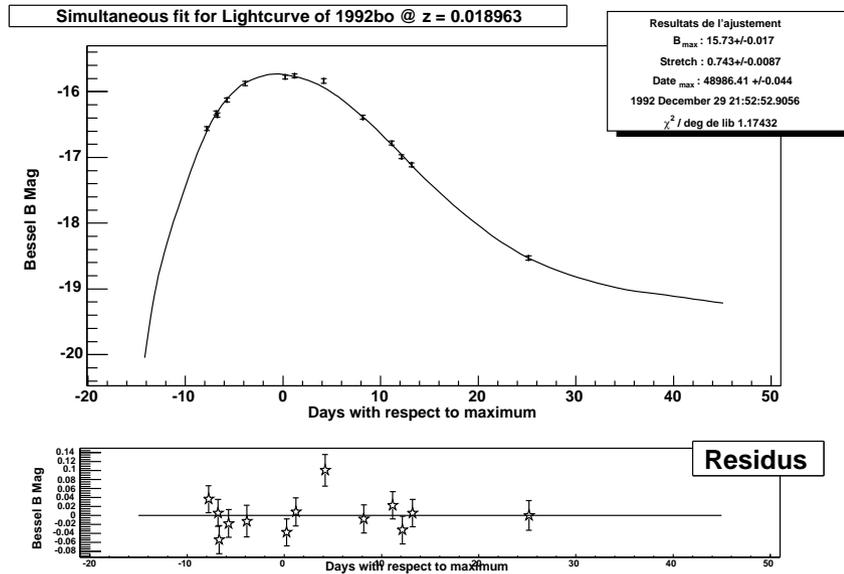
⇒ On se ramène dans les **filtres standards dans le référentiel de la supernova** (généralement **U**, **B**, **V**).

**Intégré directement dans l'ajustement.**



# Exemple d'ajustement

Courbe de lumière de 1992bo,  $z = 0.018$ .



Résultats :

- Magnitude  $B$  et  $V$  exprimées dans les filtres dans le référentiel de la sn.
- Un facteur d'étirement  $s$ .



# PARTIE IV :

# MESURE DE COSMOLOGIE



# Construction du lot de proches

● Lot de Hamuy *et al* (1994, AJ, (112, 2408)).

● 29 sne observées en BVRI.

● Lot de Riess *et al* (1999, AJ, (117,707)).

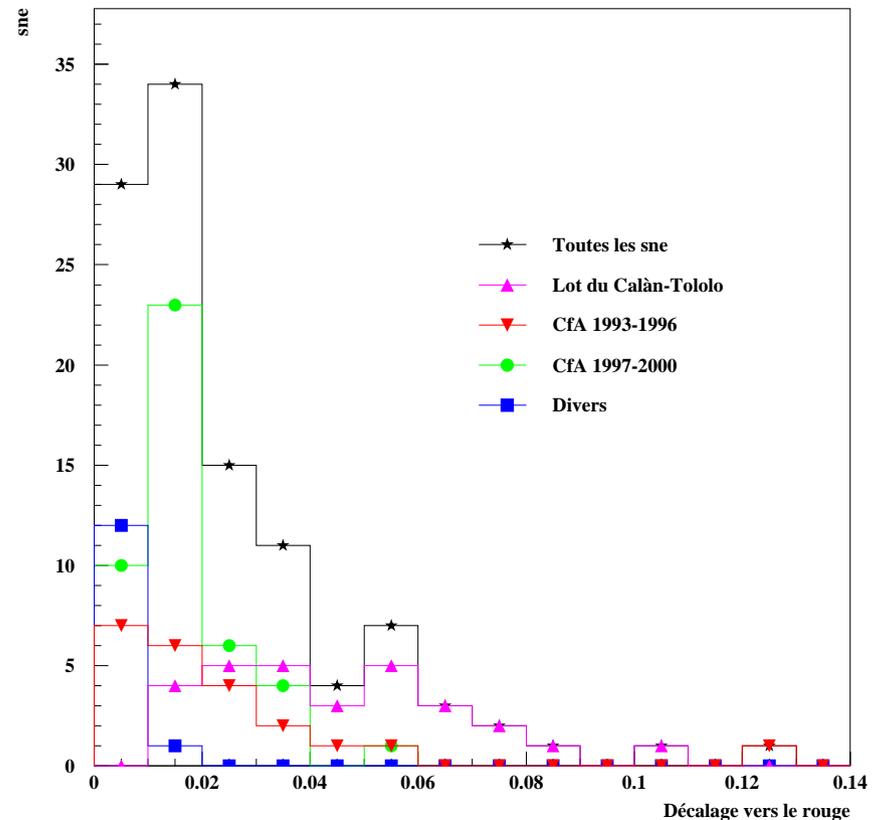
● 22 sne observées en BVRI.

● Lot de Jha (PhD thesis, 2002).

● 42 sne observées en UBVR

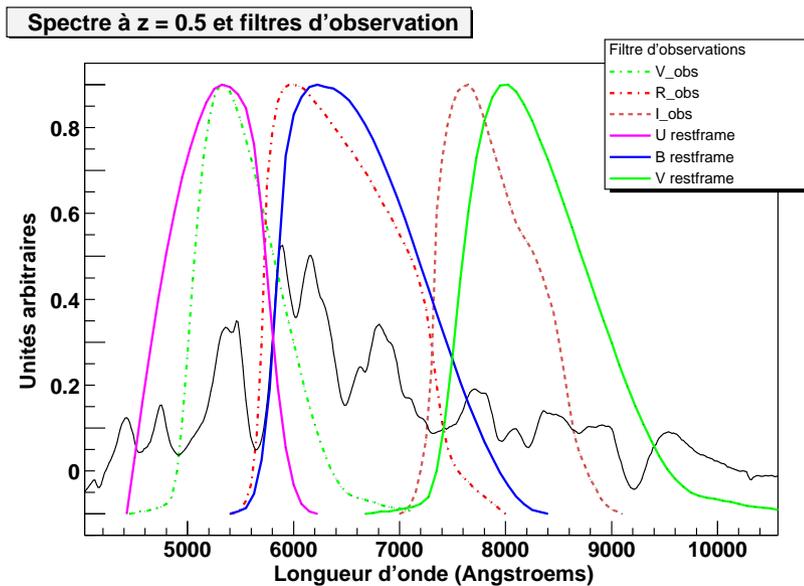
● Références diverses

● 13 sne observées en UBVR

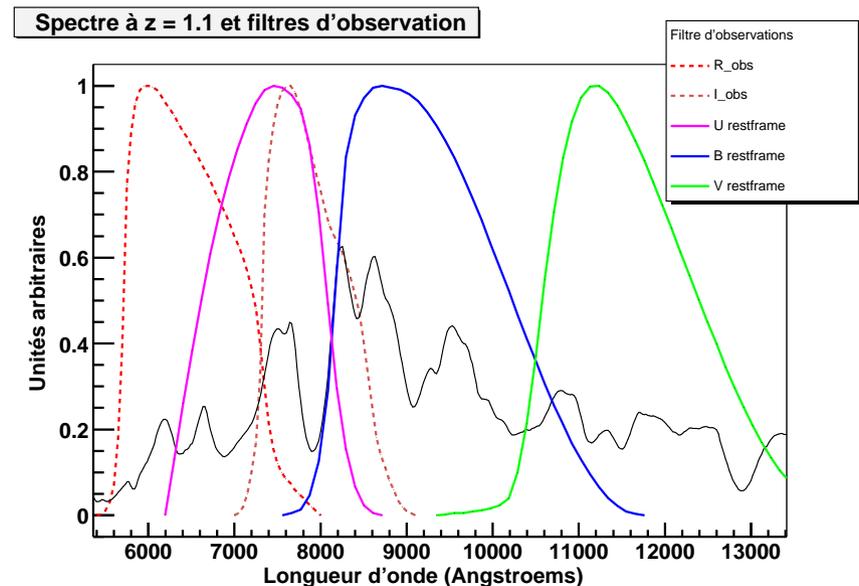


# Pourquoi une analyse en U?

Filtres dans le référentiel de l'observateur.



$z = 0.5$



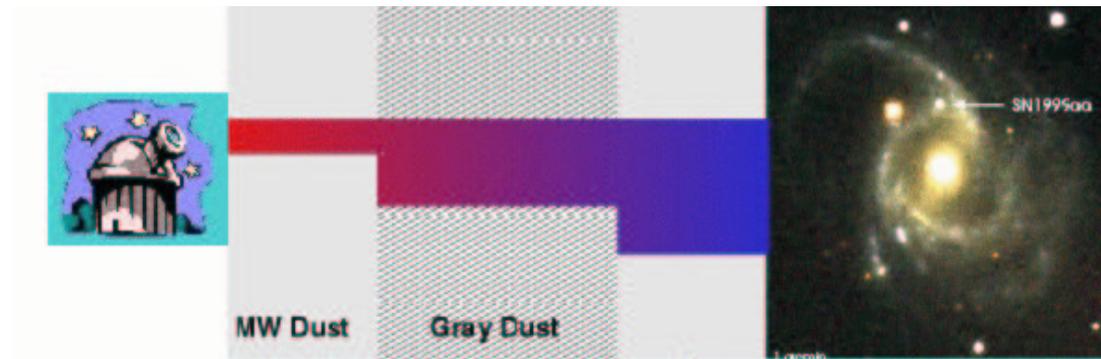
$z = 1.1$



# Les supernovæ et les couleurs

Couleur au maximum :

Information sur une éventuelle **absorption** par des poussières le long de la ligne de visée (galaxie hôte, poussières intergalactiques,...).

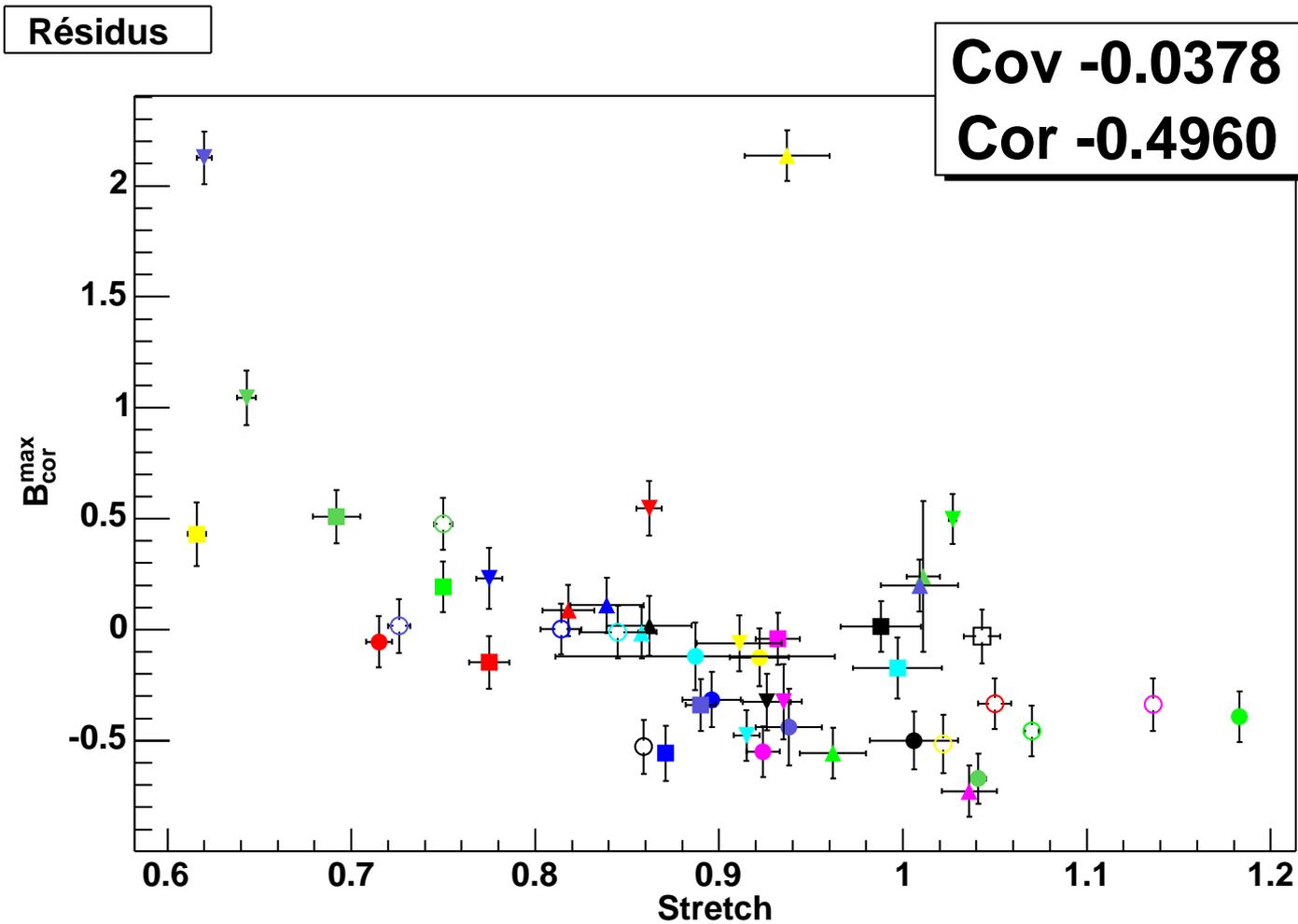


Correction de l'absorption :

- On sélectionne les supernovæ non éteintes.
- On utilise les lois d'absorption de la Voie Lactée.
- ...



# Corrélation luminosité en B - Stretch

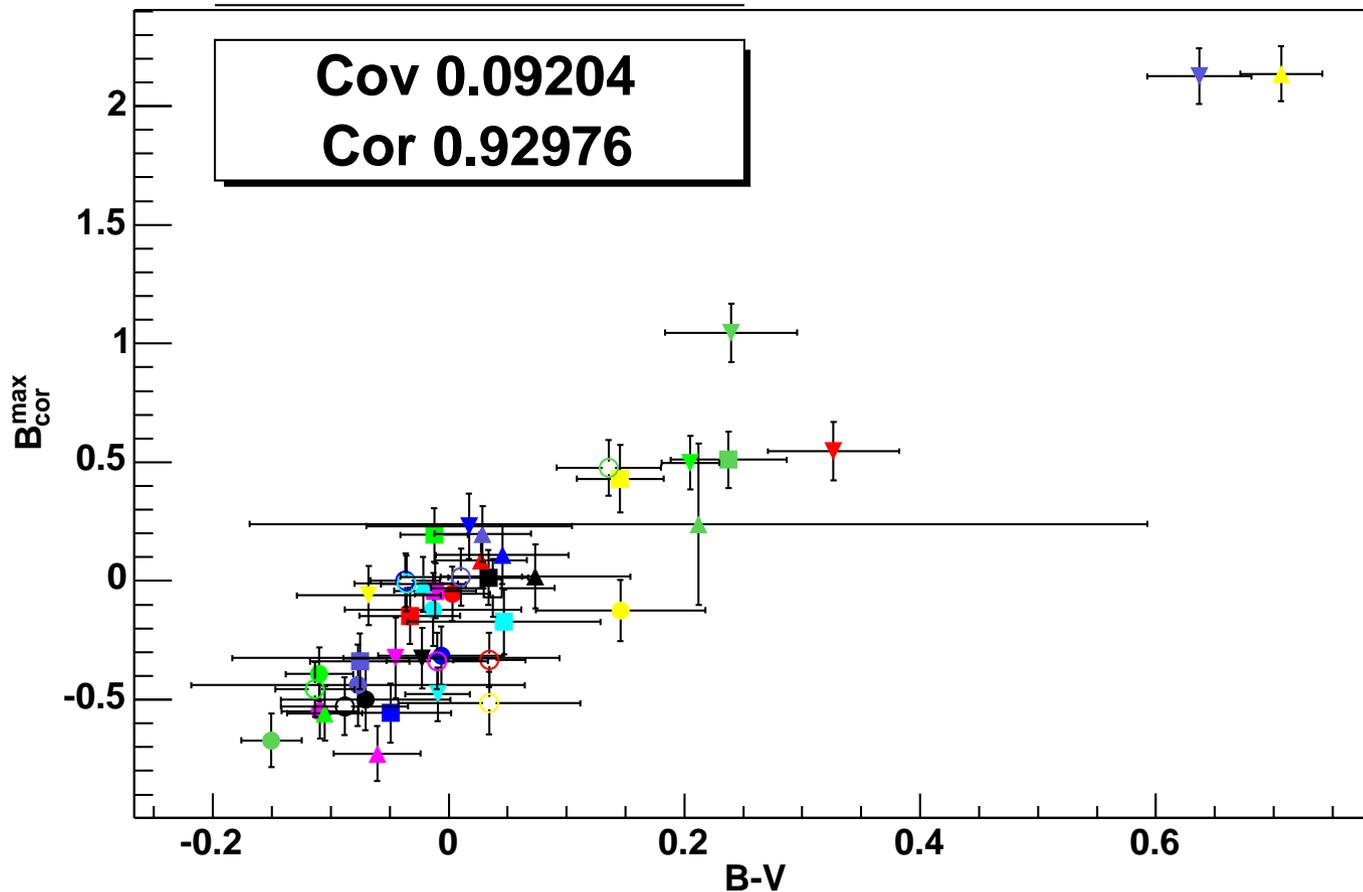


Les supernovæ les moins lumineuses ont la décroissance la plus rapide.



# Corrélation luminosité/couleur

Résidus

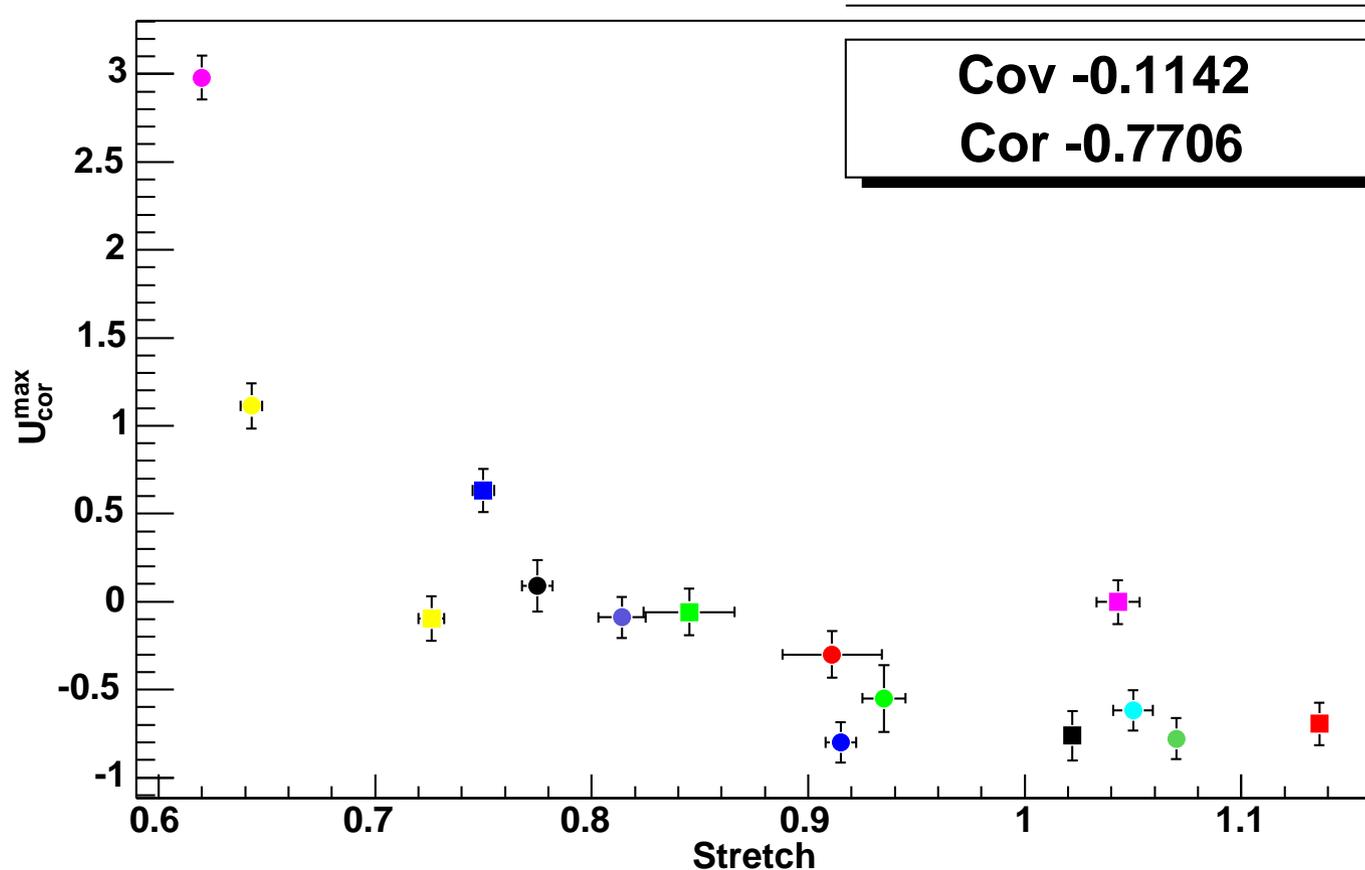


Les supernovæ les moins lumineuses sont les plus rouges.



# Corrélation luminosité en U - Stretch

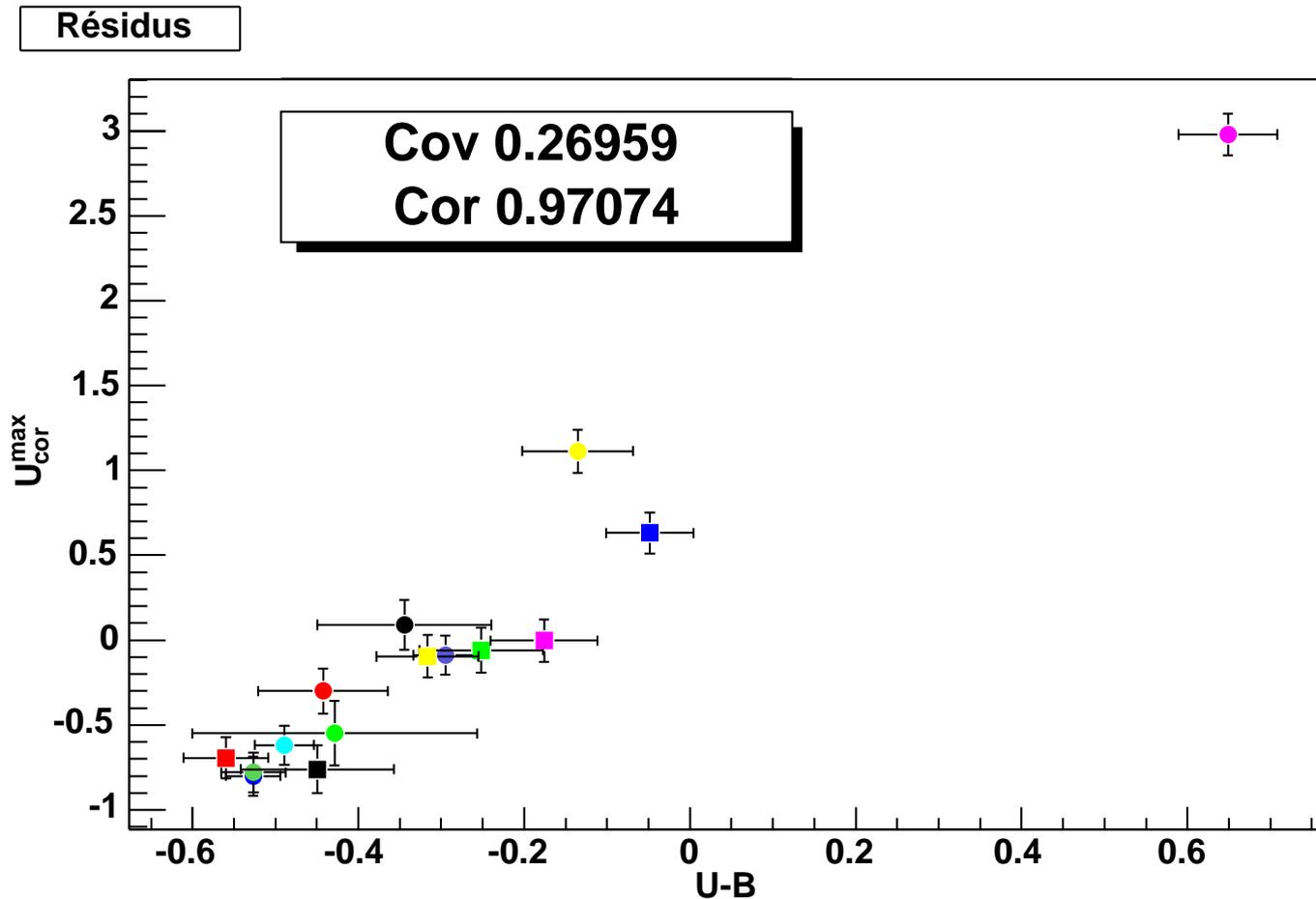
Résidus



Les supernovæ les moins lumineuses ont la décroissance la plus rapide.



# Corrélation luminosité en U /couleur



Les supernovæ les moins lumineuses sont les plus rouges.



# Estimateur de distance

$$\frac{f_{mes}}{\mathcal{L}} = \frac{1}{4\pi d_L^2}$$

avec

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 \times f(s) \times g(\text{couleur})$$

- $s$  est le facteur d'étirement
- $\text{couleur}$  la couleur de la supernova au maximum.

En passant en magnitude et en considérant des lois linéaires, on peut écrire la distance :

$$5 \log_{10} \mathcal{D}_L = \text{Mag}_{sn} + \alpha(1-s) + \beta(\text{couleur}) - 2.5 \log(\mathcal{L}_0)$$

$\alpha$ ,  $\beta$  et  $\mathcal{L}_0$  doivent être estimés de manière empirique.



# Diagramme de Hubble

Modèle :

$$\chi^2 = \sum \frac{\left[ X - \alpha(1 - s_X) - \beta(X - Y) - \left( \gamma + 5 \log_{10}(D_L(z, \vec{\Omega})) \right) \right]^2}{\text{Variance}}$$

$$\text{Variance} = (1 - \beta)^2 \text{Var}(X) + \beta^2 \text{Var}(Y) + \alpha^2 \text{Var}(s_X) + (0.18)^2 + \text{Var}(z)$$

$$X = (U_{max}^{corr}, B_{max}^{corr}), \quad Y = (B_{max}^{corr}, V_{max}^{corr})$$

$\alpha$  : terme de correction pour le facteur d'étirement.

$\beta$  : terme de correction pour la couleur.

$\gamma$  : terme de nuisance (prend en compte entre autre  $\mathcal{L}$ ).

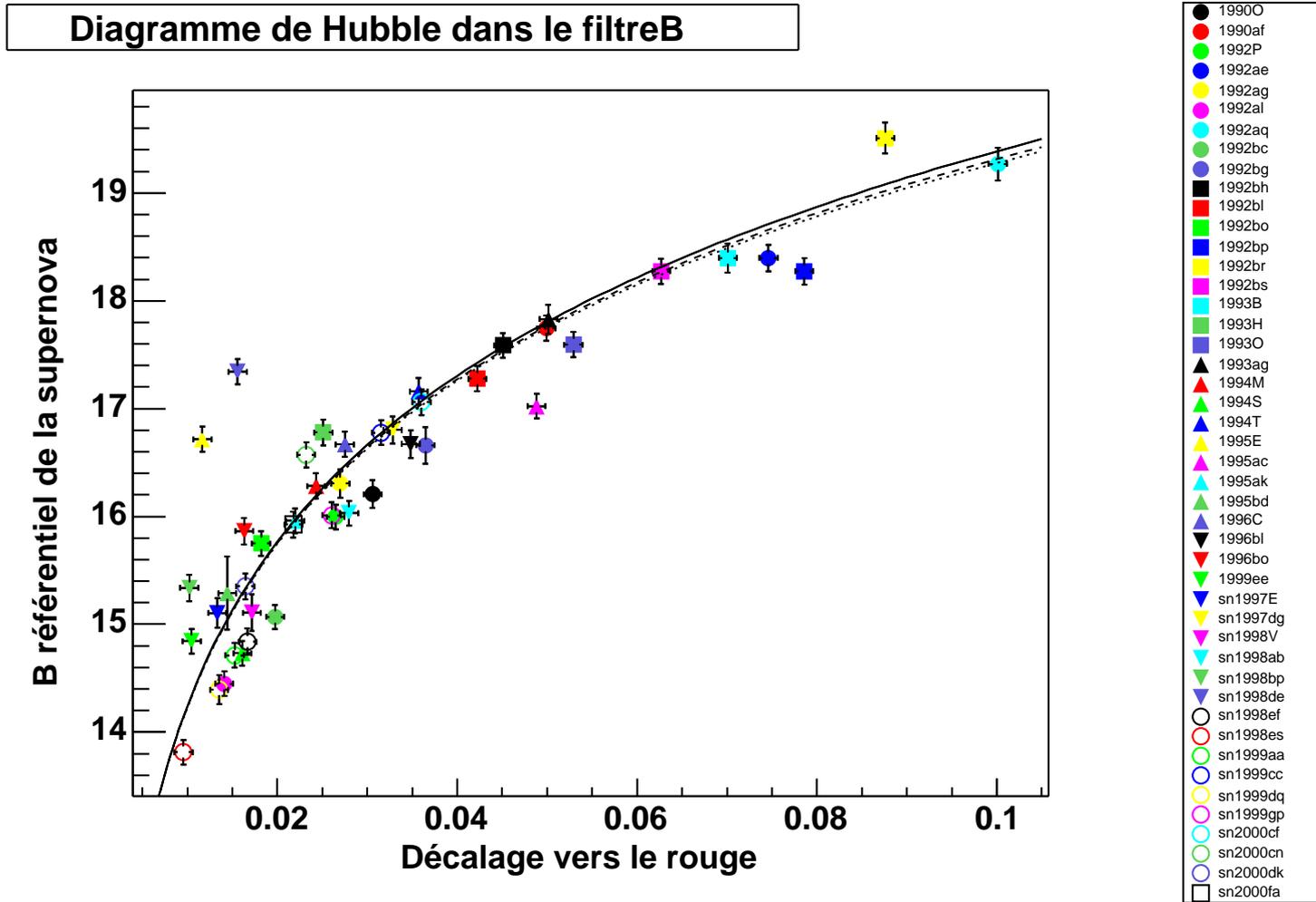
$\vec{\Omega}$  :  $\Omega_M, \Omega_\Lambda$ .

Coupures :

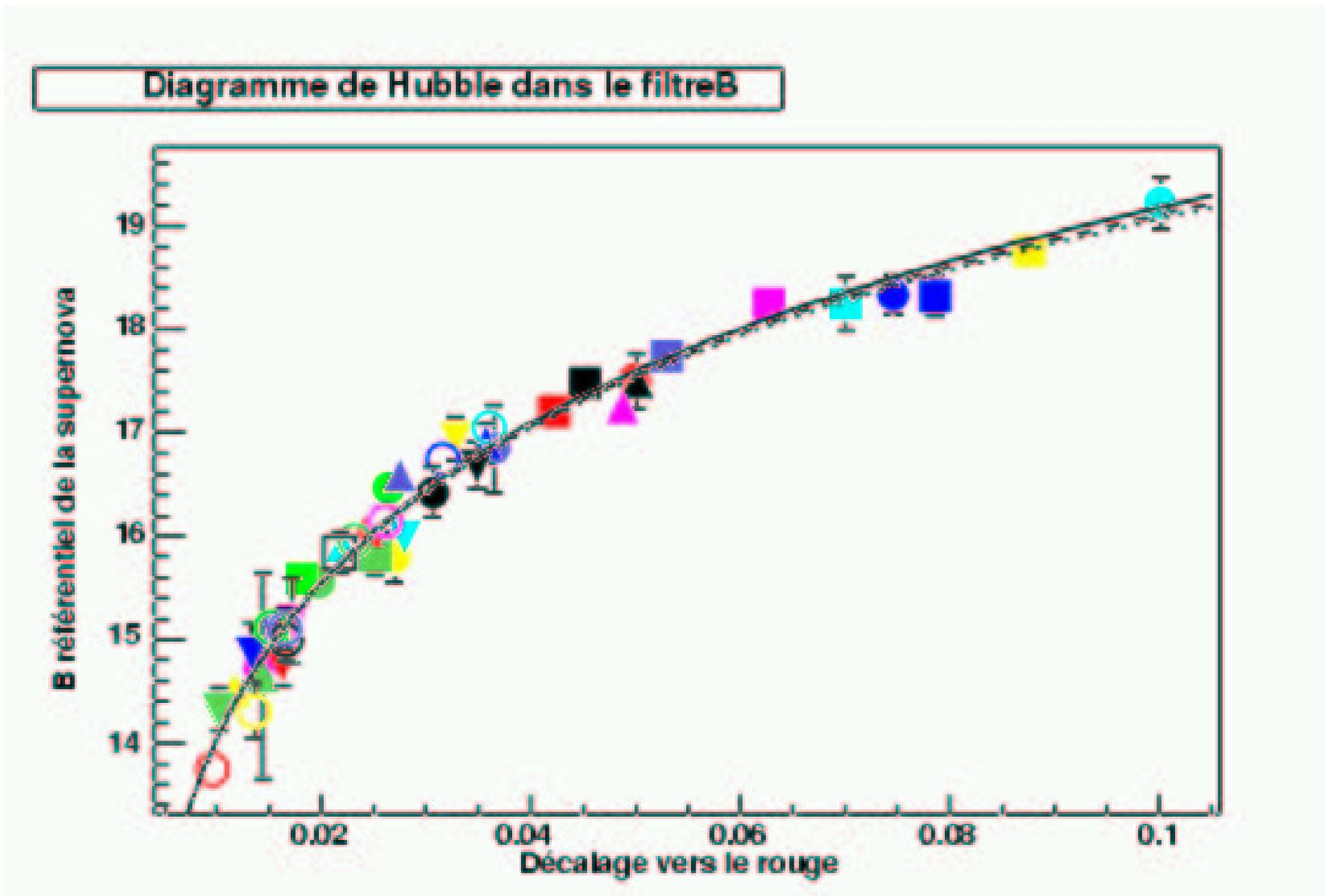
- $z > 0.01$  (dispersion intrinsèque 0.001)
- Observation avant  $t_{max} + 5$ .



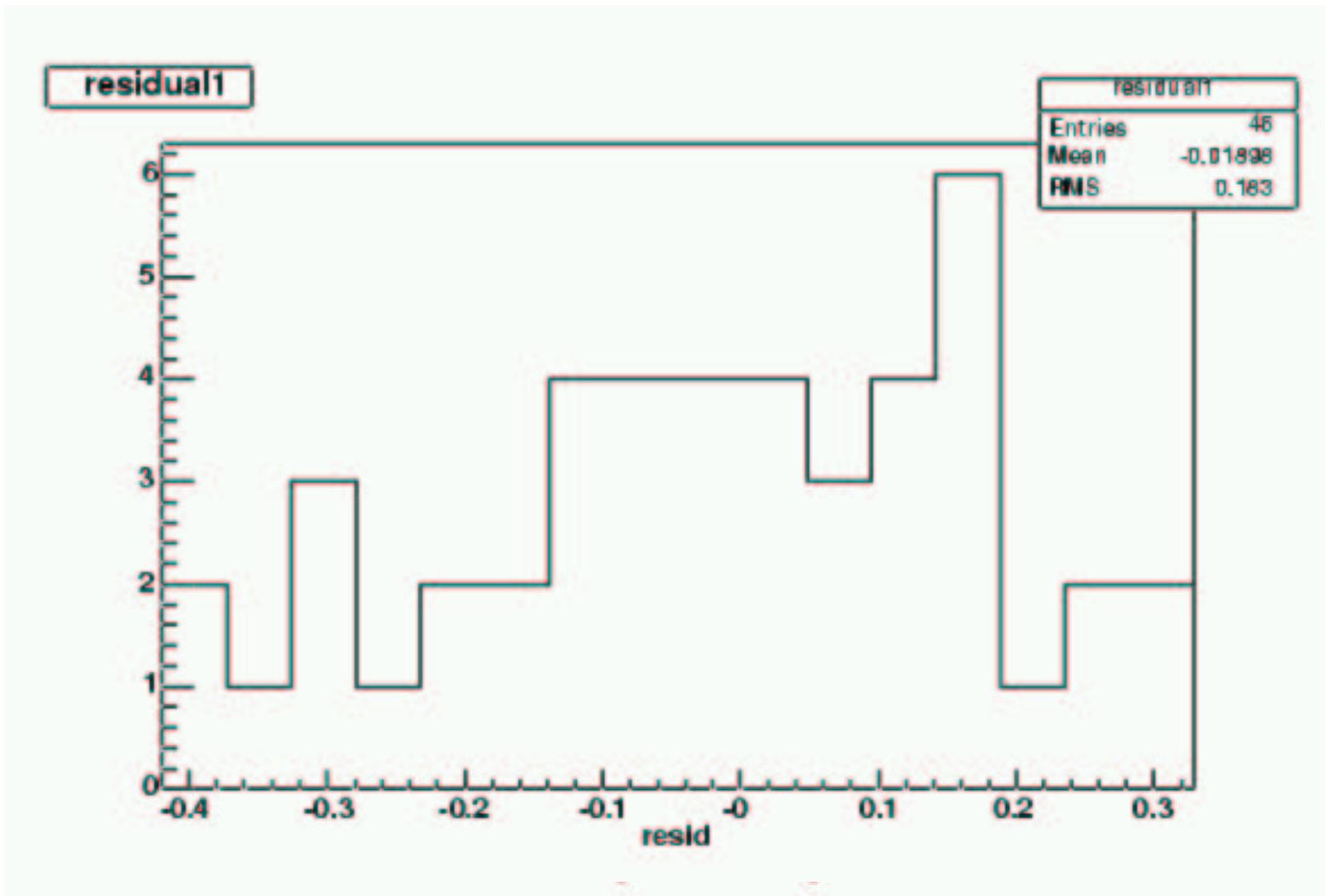
# Diagramme de Hubble en B – Proches



# Diagramme de Hubble en B –Proches



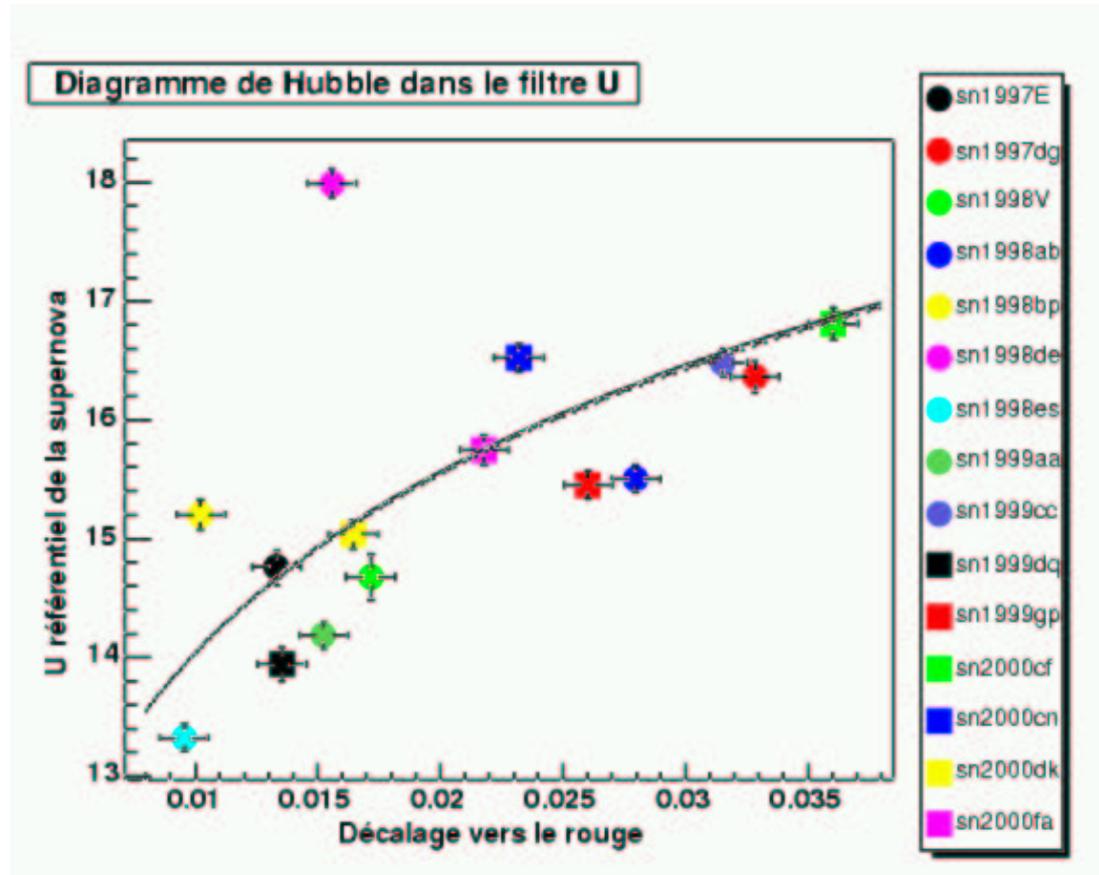
# Diagramme de Hubble en B – Proches



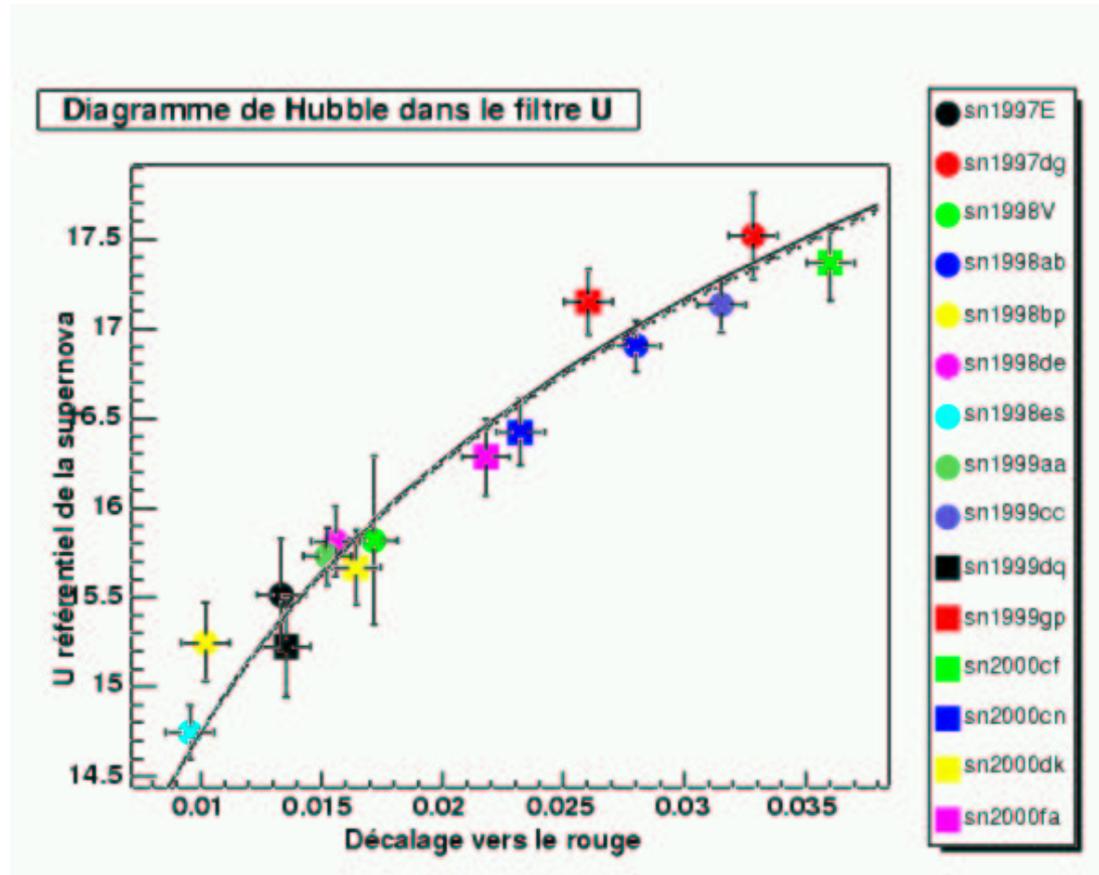
$$m_B(z) - 24.02 (0.07) = \mu(z, \vec{\Omega}) + 0.78 (0.47) \times (1 - s_B) + 3.04 (0.36) \times (B - V)_{MAX}$$



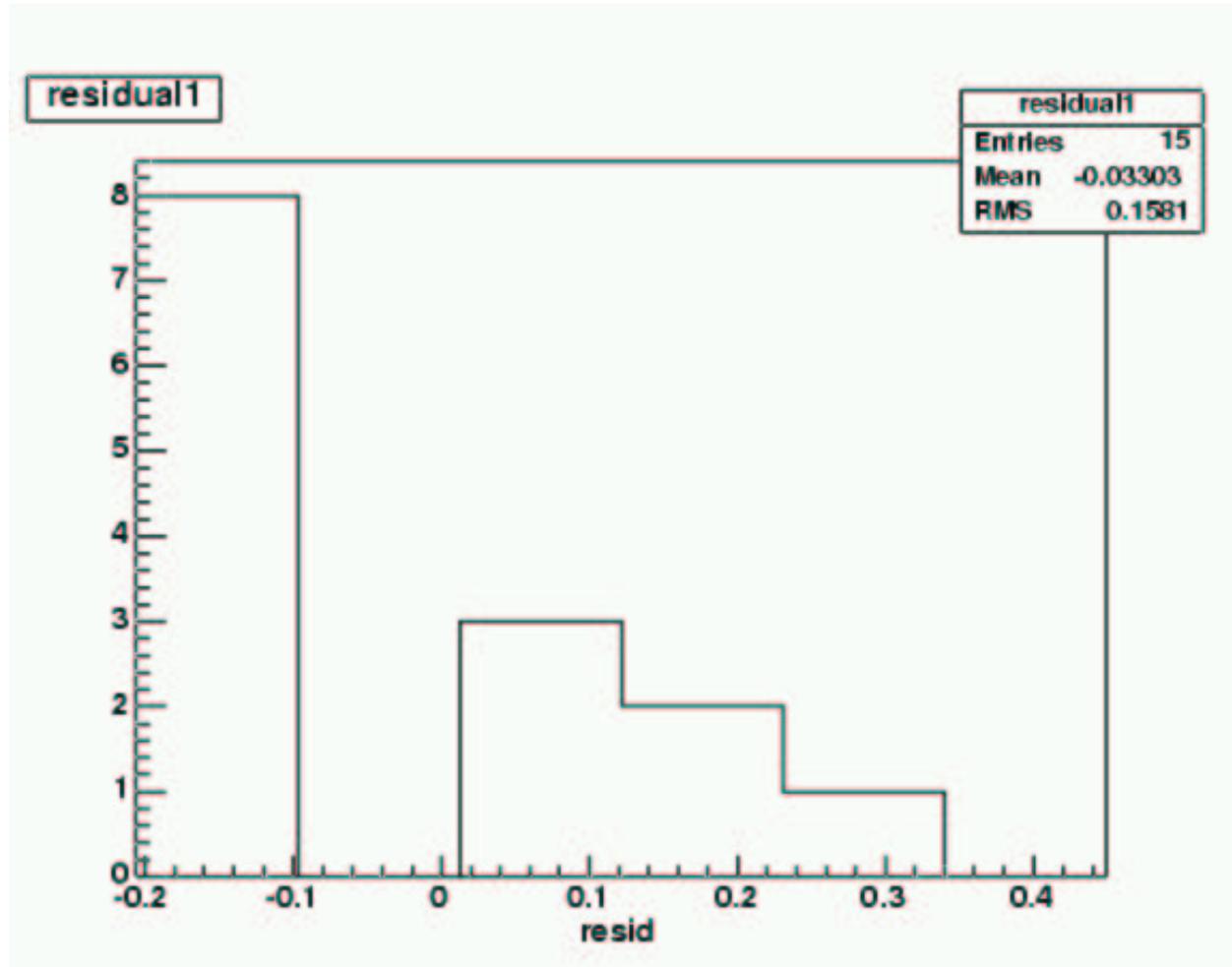
# Diagramme de Hubble en U –Proches–



# Diagramme de Hubble en U –Proches–



# Diagramme de Hubble en U –Proches–



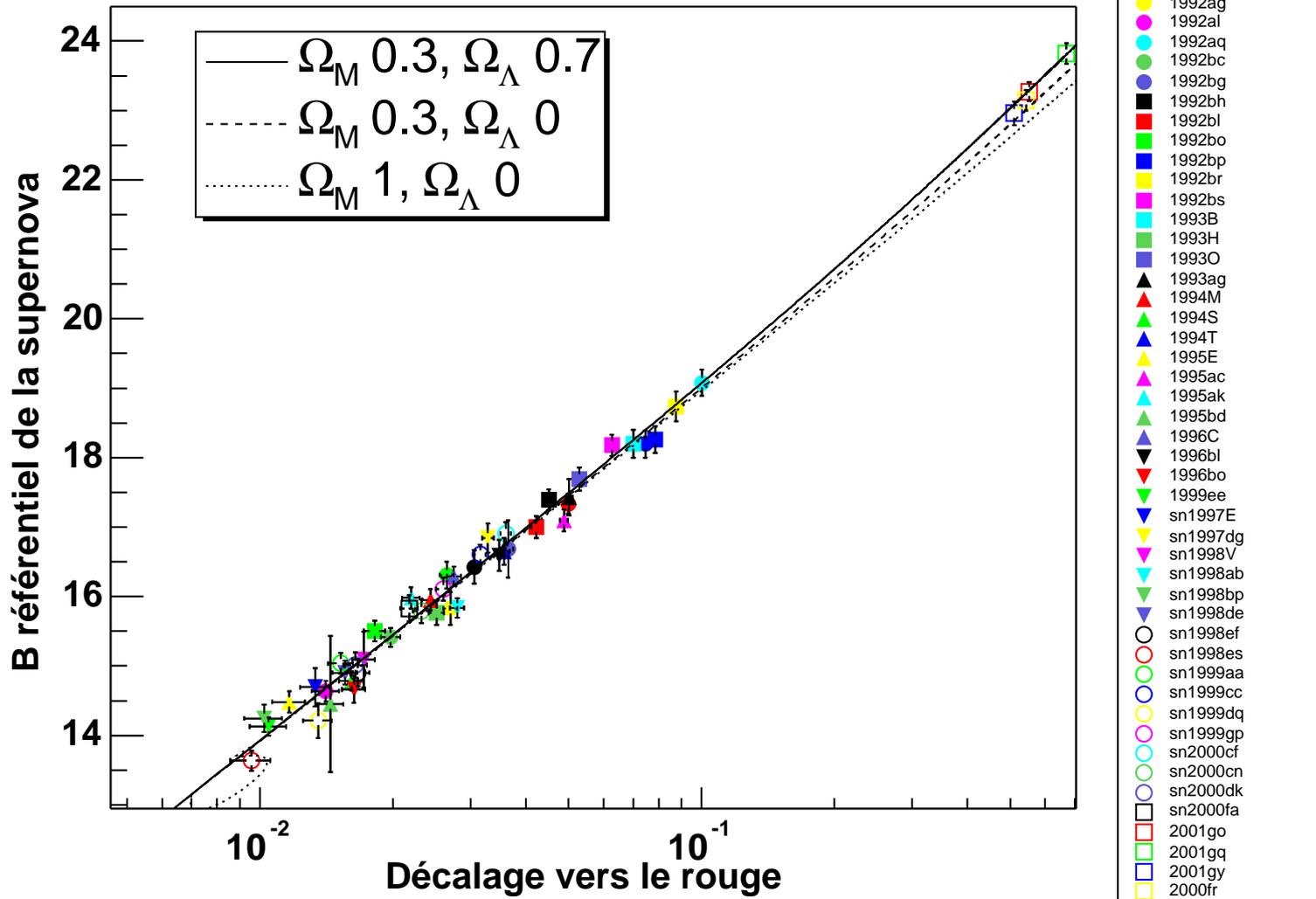
$$m_U(z) - 24.73 (0.26) = \mu(z, \vec{\Omega}) + 0.9 (0.9) \times (1 - s_U) + 2.8 (0.5) \times (U - B)_{MAX}$$

$\sigma_U \simeq \sigma_B \Rightarrow$  L'estimation de la distance en U est donc **possible**.



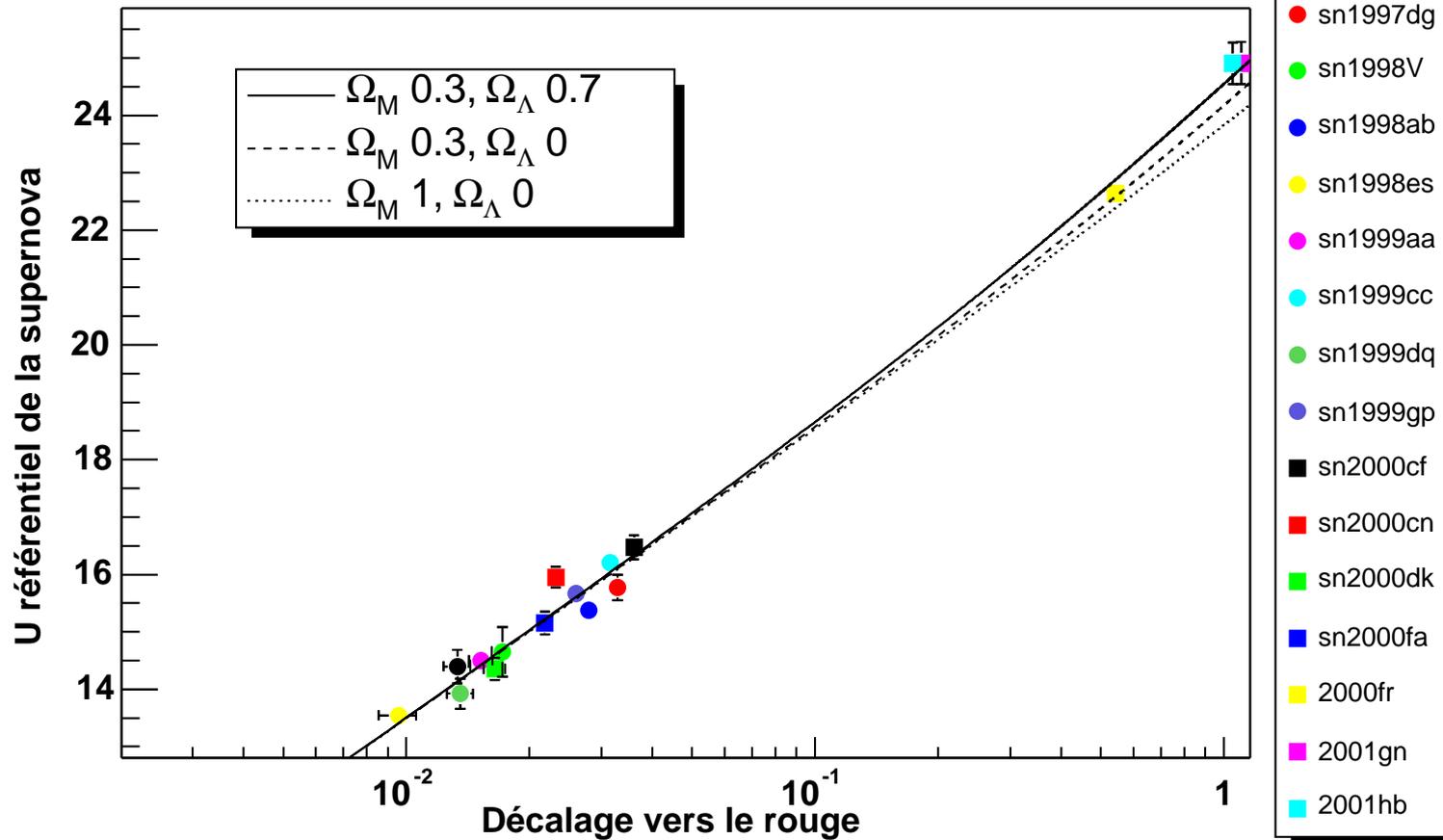
# Diagramme de Hubble en B

Diagramme de Hubble dans le filtre B



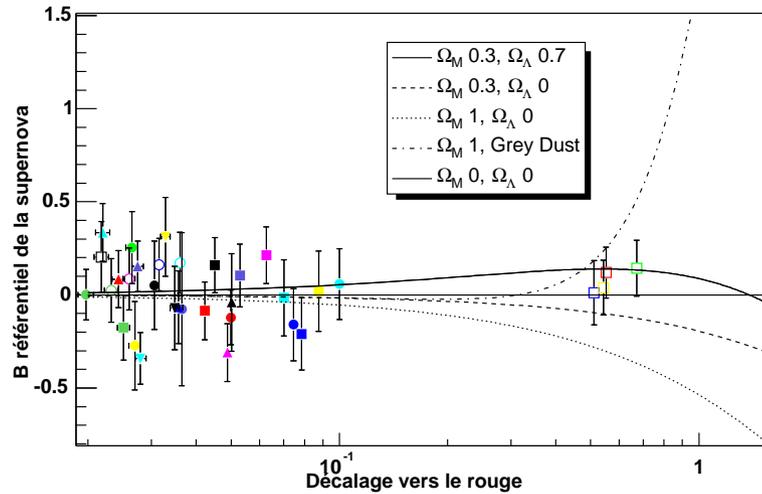
# Diagramme de Hubble en U

Diagramme de Hubble dans le filtre U



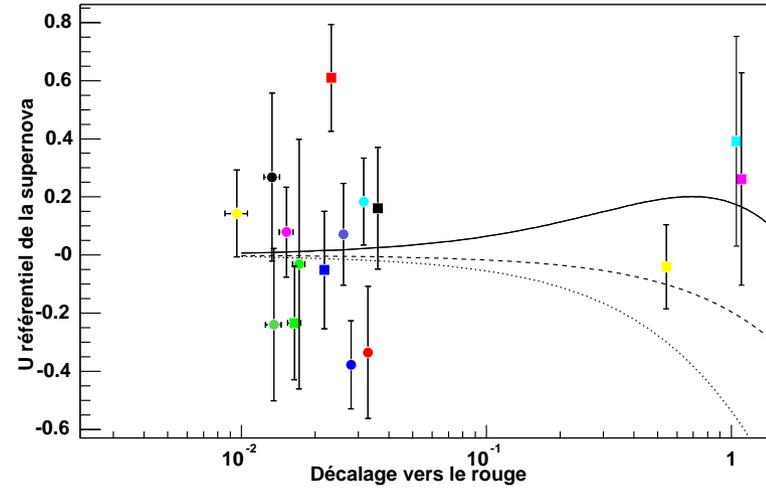
# Résultats

Diagramme de Hubble dans le filtre B



En B :  $\Omega_M = 0.35^{+0.2}_{-0.15}$

Diagramme de Hubble dans le filtre U

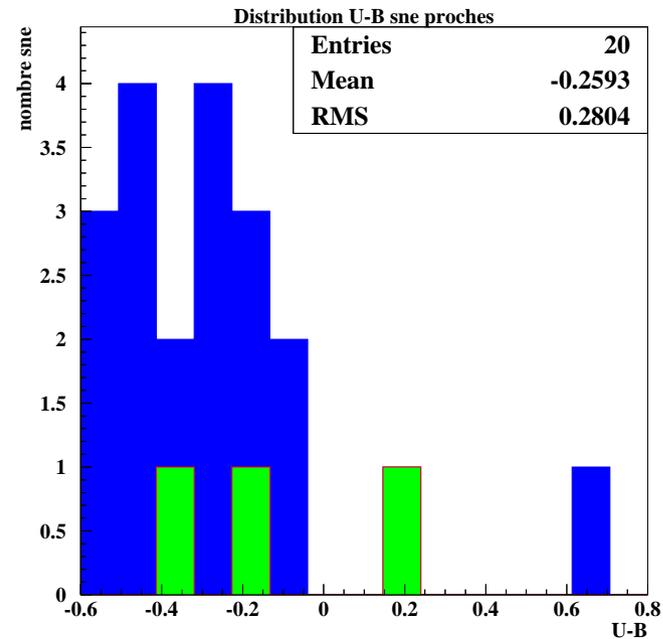
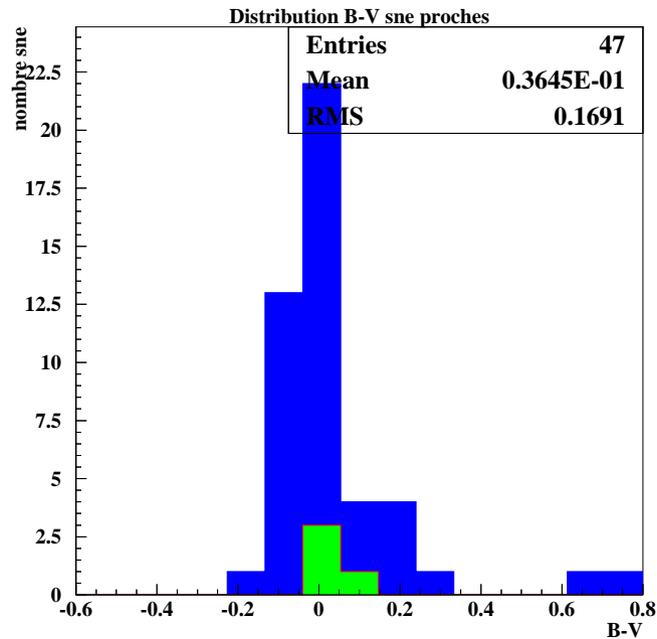


En U :  $\Omega_M = 0.22^{+0.3}_{-0.25}$

Pour un univers géométriquement **plat** (*i.e.*  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ ).



# comparaison des couleurs proches/lointain



Les couleurs des supernovæ lointaines sont :

- Mesurées ici alors qu'auparavant on considérait  $\beta = 0$ .
- Compatibles avec les supernovæ proches.
  - Pas d'extinction différentielle (pas de biais).
  - Les objets sont similaires.



# Conclusion

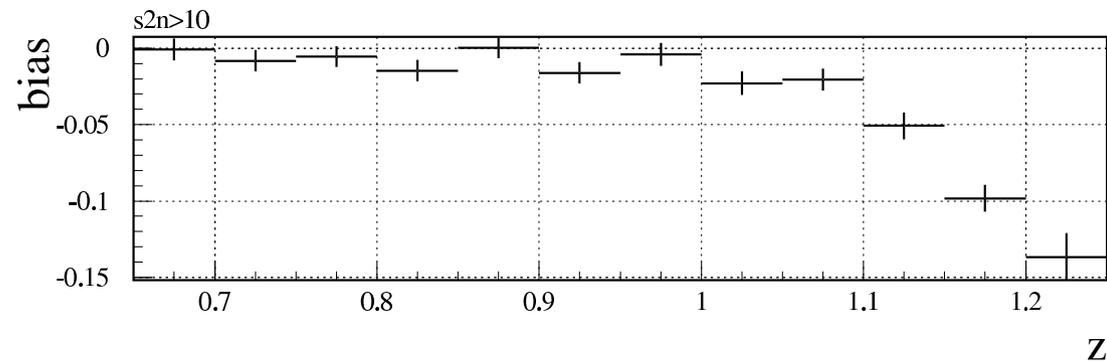
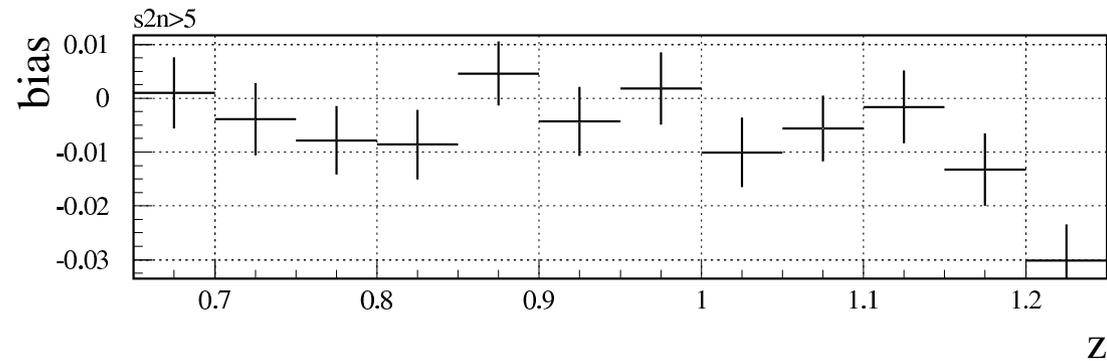
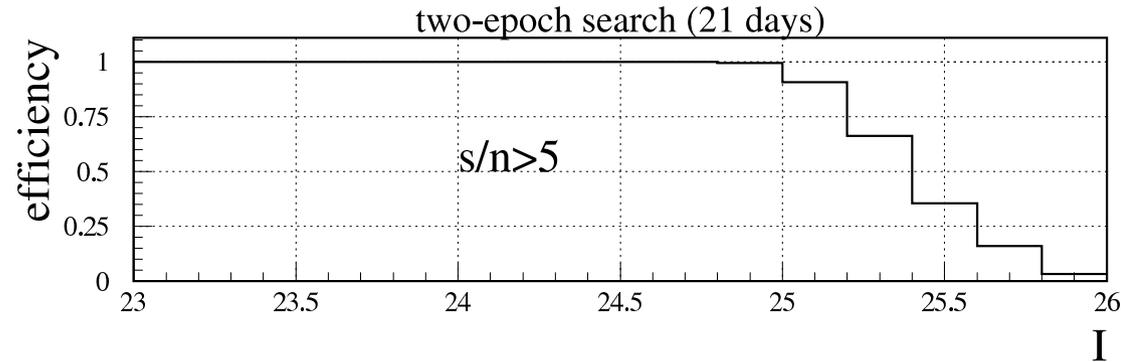
Ce travail constitue une **analyse complète** depuis la **recherche** jusqu'à la **mesure des paramètres cosmologiques**.

Ceci a impliqué :

- De développer des outils de **photométrie différentielle** avec le télescope Hubble.
- De développer une méthode d'**synthèse et ajustement des courbes de lumière**.
- D'étudier un **nouvel estimateur de distance** en utilisant les données dans le filtre **U** et ainsi permettre l'estimation de la distance de supernovæ à  $z \simeq 1$  mesuré avec des CCDs en silicium.
- De faire une **mesure de  $\Omega_M$**  confirmant les précédents résultats obtenus avec des supernovæ.



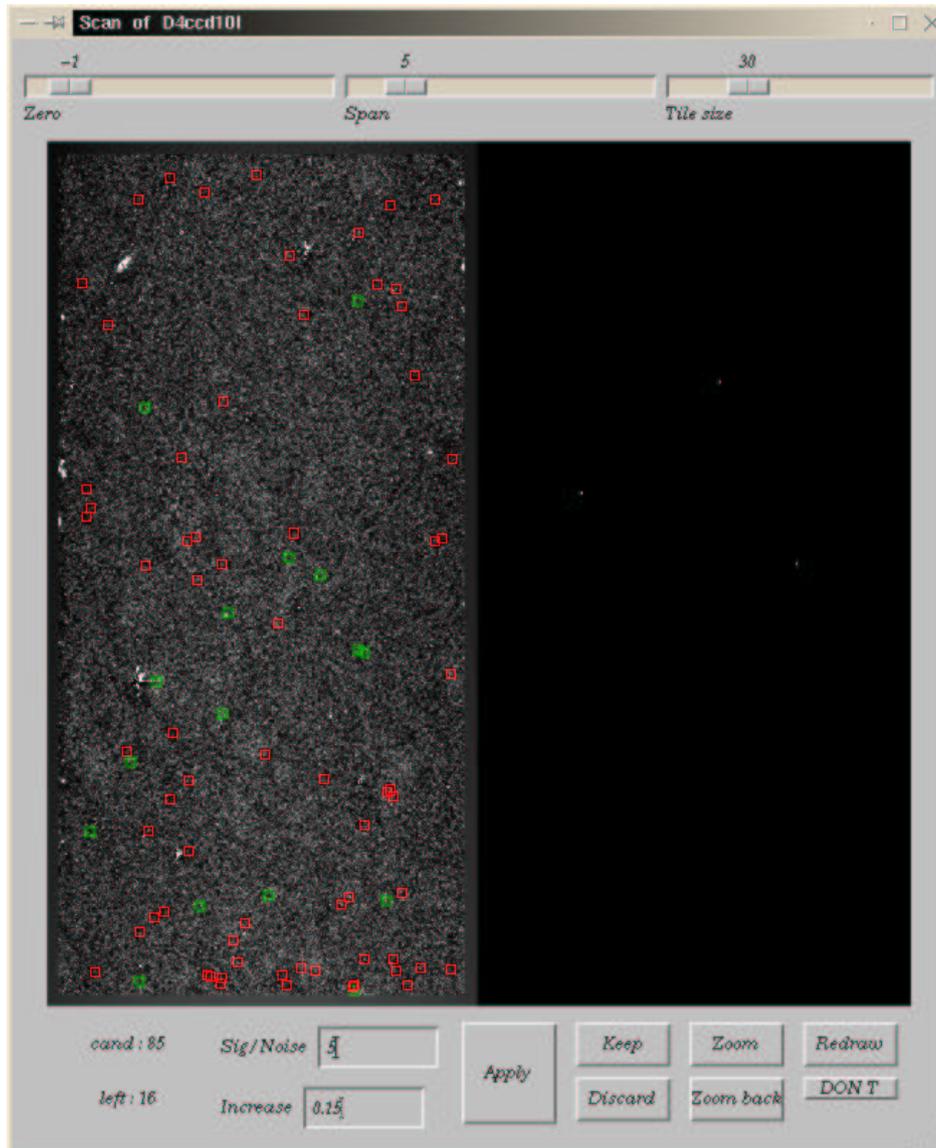
# Biais de Malmquist



Pour 2001gn ( $z = 1.12$ ), le biais est de l'ordre de 0.03 mag.

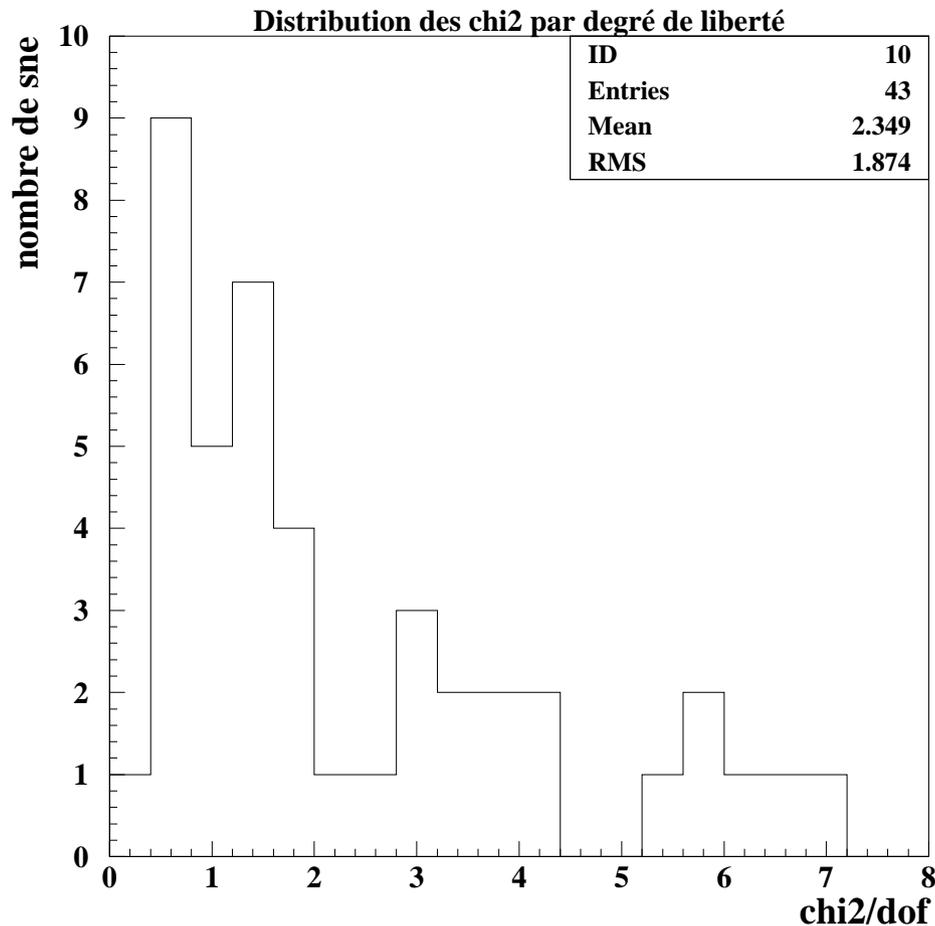


# Recherche : Inspection visuelle





# Distribution des $\chi^2$ pour un lot de proches



Le modèle de courbe de lumière reproduit les données.

A VOIR AVEC PIERRE



# Knop *et al* Submitted to ApJ : résultats

Présence d'objets physiques nouveaux  $x$

- Caractérisés par leur équation d'état :

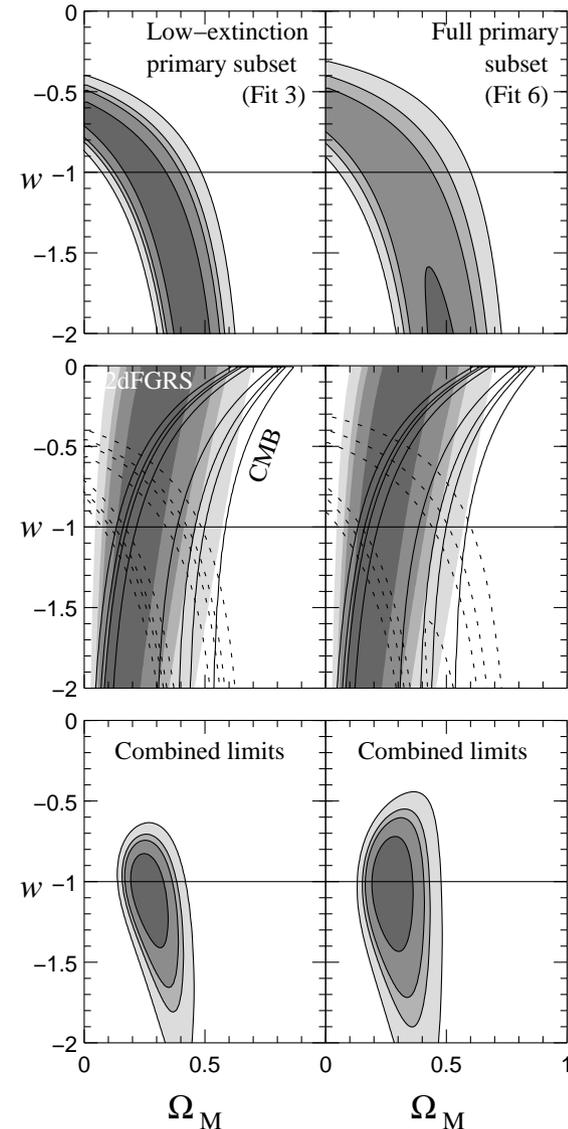
$$P_x = \omega_x \rho_x$$

- Et contribuant à la distance de luminosité :

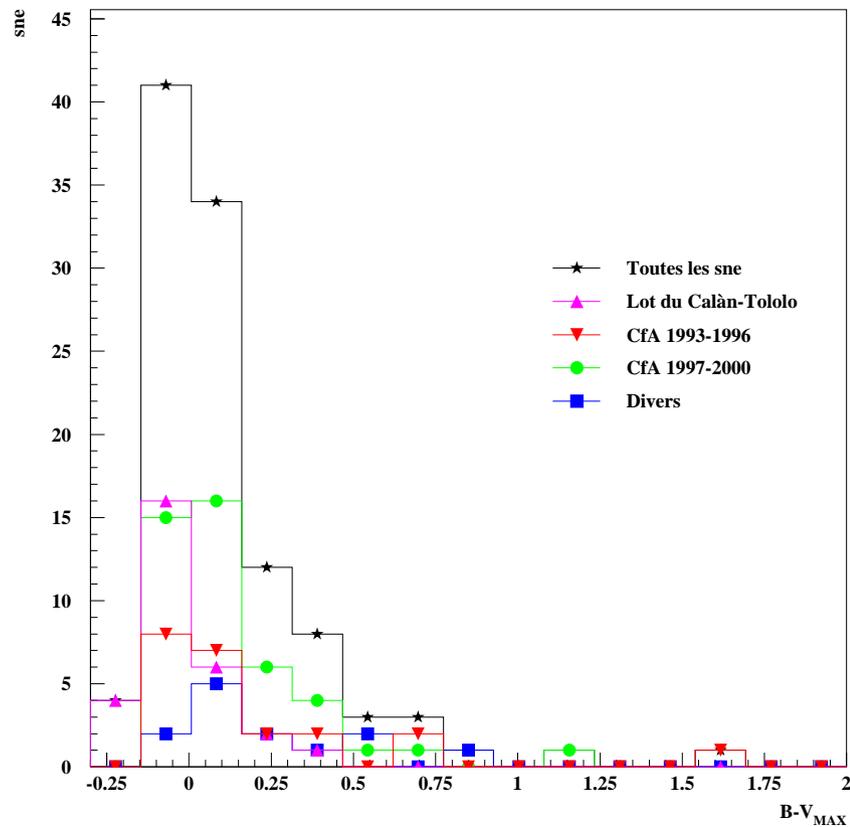
$$\Omega_x (1+z)^{(1+3\omega_x)}$$

● Contraintes dans le plan  $(\Omega_M, \omega)$  dans l'hypothèse d'un univers plat.

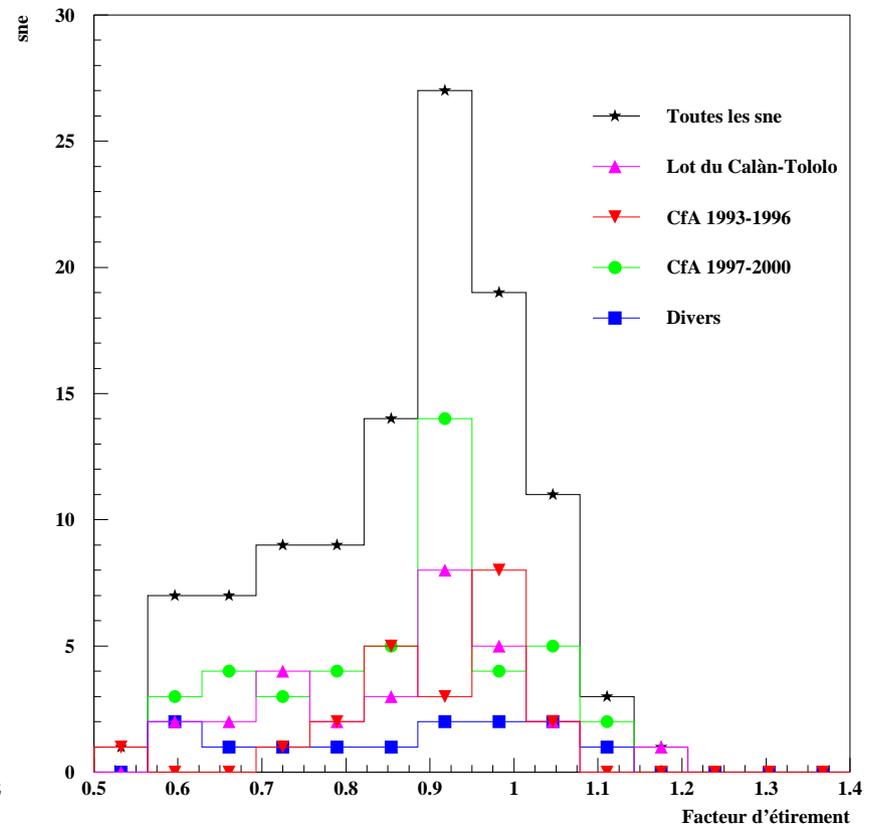
● Combinaison avec les données du CMB (WMAP) et des grandes structures (2DF-GRS).



# Supernovæ proches



Couleur



Facteur d'étirement



# Comment mesurer la cosmologie ( $\Omega_M, \Omega_\Lambda$ )

- **Comptages :**

Supposons que l'on sache comment la densité d'un type d'objets (galaxies en général) évolue avec le temps.

La dépendance observée de  $dN/dz$  indique comment le volume d'univers dépend de  $z$ .  
Très sensible. atteint  $z=3$  dans le Hubble Deep Field. Systématique: les galaxies évoluent et se mélangent.

- **Anisotropies du CMB** à faible échelle angulaire.

Vols ballons (passé et futur proche).

satellites : Cobe, MAP(2000), Planck (2007).

Très puissant. Mesure aussi  $H_0$  et plein d'autres choses.

Mais mesure surtout  $\Omega_M + \Omega_\Lambda$ .

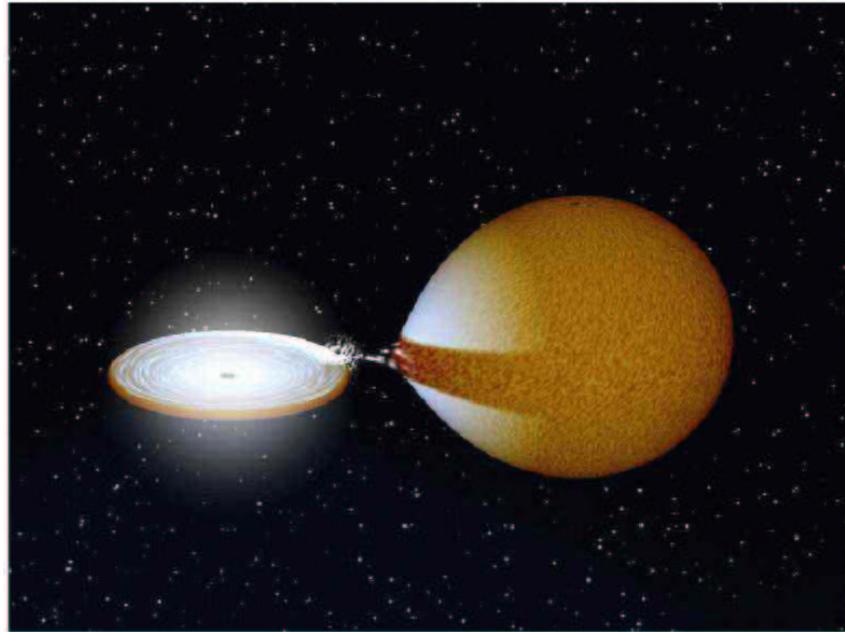
- **Distance de luminosité:**

mesurer comment le flux apparent d'une chandelle standard (ou supposée telle) dépend de  $z$ .

- **Lentilles faibles**



# SnIa : Pourquoi des chandelles standards



- Effet de seuil (La masse de Chandrasekhar).
- Basé sur la physique microscopique de la naine blanche (Gaz de Fermi).



# Recherche : le dépouillement

Principe : soustraction "Nouvelle image - référence".

Les étapes:

- Correction efficacité quantique / Défrangeage
- Alignement, rééchantillonnage et somme des images  
Optimisé pour les variations des conditions atmosphériques (lumière du fond de ciel et scintillation).
- Convolution + Soustraction  
Fit d'un noyau (Alard) tel que :  
 $Worst = best \otimes kernel$

- Detection  
Convolution de la soustraction.
  - 1<sup>er</sup> niveau de trigger
    1. Estimation du  $\sigma_{noise}$  de l'image convoluée.
    2. Trigger à  $3 \sigma_{noise}$  sur l'image convoluée.
  - 2<sup>nd</sup> niveau de trigger
    1. Evaluation du flux et de la position des objets.
    2. Coupure à  $S/N > 5\sigma$ .
    3. Taux d'accroissement de luminosité  $> 15\%$ .

- Inspection visuelle
- Calibration



# L'extinction Galactique

Correction pour l'extinction par  
les poussières de la Voie Lactée.

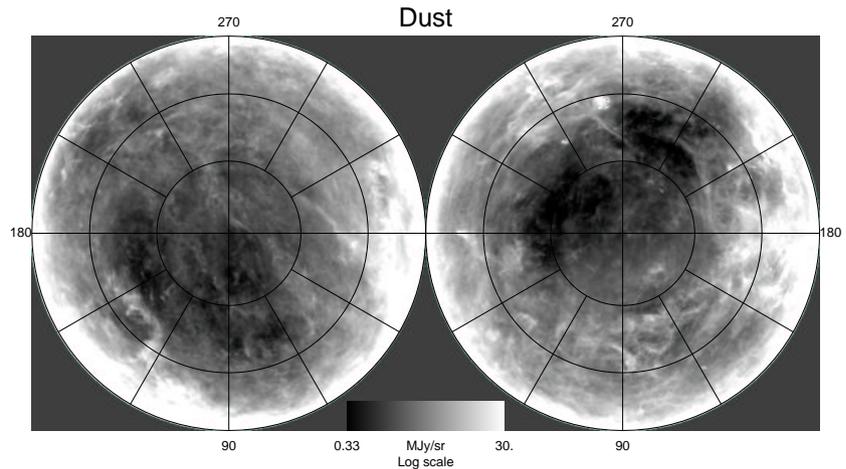
- Carte de poussière Galactique  
(Schlegel *et al.* 1998, ApJ,  
(500,525)).
- Loi d'extinction (Fitzpatrick 1999,  
PASP, (111, 63-75)).



# L'extinction Galactique

Correction pour l'extinction par les poussières de la Voie Lactée.

- Carte de poussière Galactique (Schlegel *et al.* 1998, ApJ, (500,525)).
- Loi d'extinction (Fitzpatrick 1999, PASP, (111, 63-75)).



# L'extinction Galactique

Correction pour l'extinction par les poussières de la Voie Lactée.

- Carte de poussière Galactique (Schlegel *et al.* 1998, ApJ, (500,525)).
- Loi d'extinction (Fitzpatrick 1999, PASP, (111, 63-75)).

