

# Recherche et Étude de Supernovæ

## Mesure du Taux d'Explosion



Guillaume Blanc

*sous la direction de James Rich*

*Service de Physique des Particules*

*CEA Saclay – DAPNIA*

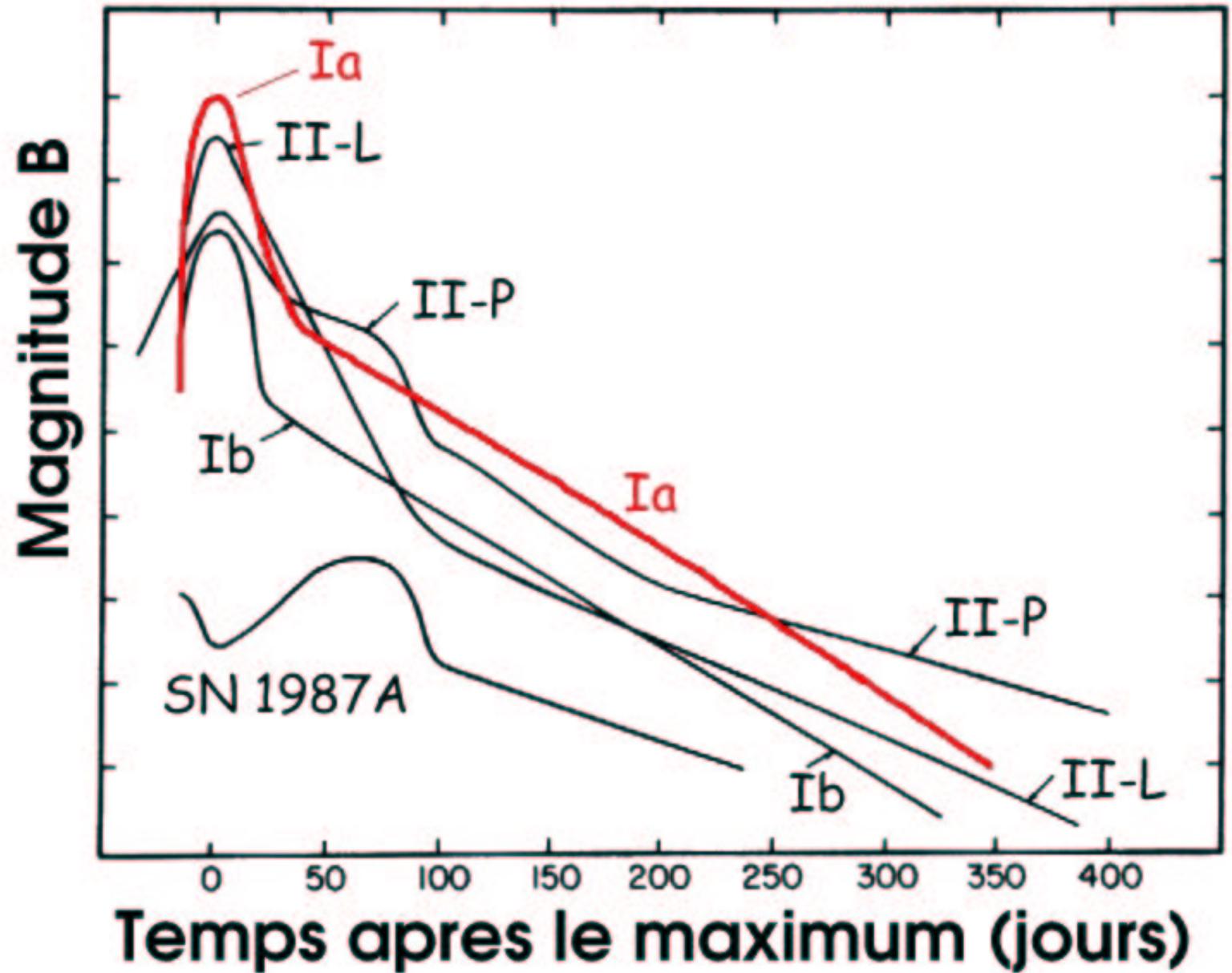
# Aperçu

- Les supernovæ : des feux d'artifice cosmiques
- La recherche de supernovæ avec EROS
- La mesure du taux d'explosion de supernova de type Ia

# Des explosions d'étoiles !

- ▶ On observe différents types de supernovæ (classifiées selon leurs spectres essentiellement) :
  - **type II, Ib/c** = *effondrement gravitationnel d'une étoile massive*
  - **type Ia** = *explosion thermonucléaire d'une naine blanche*
- ▶ Grande homogénéité observationnelle des supernovæ de type Ia

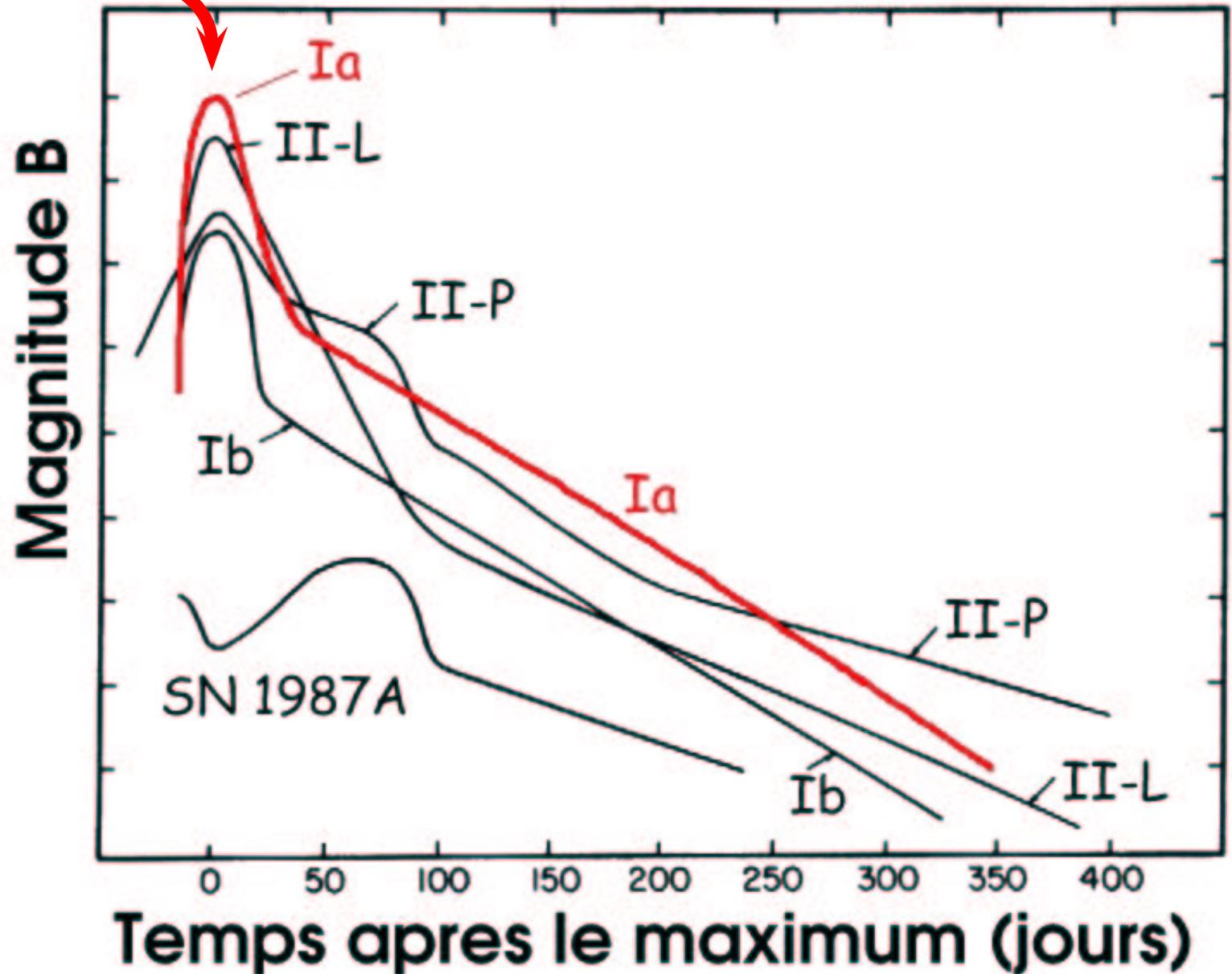
# Les courbes de lumière



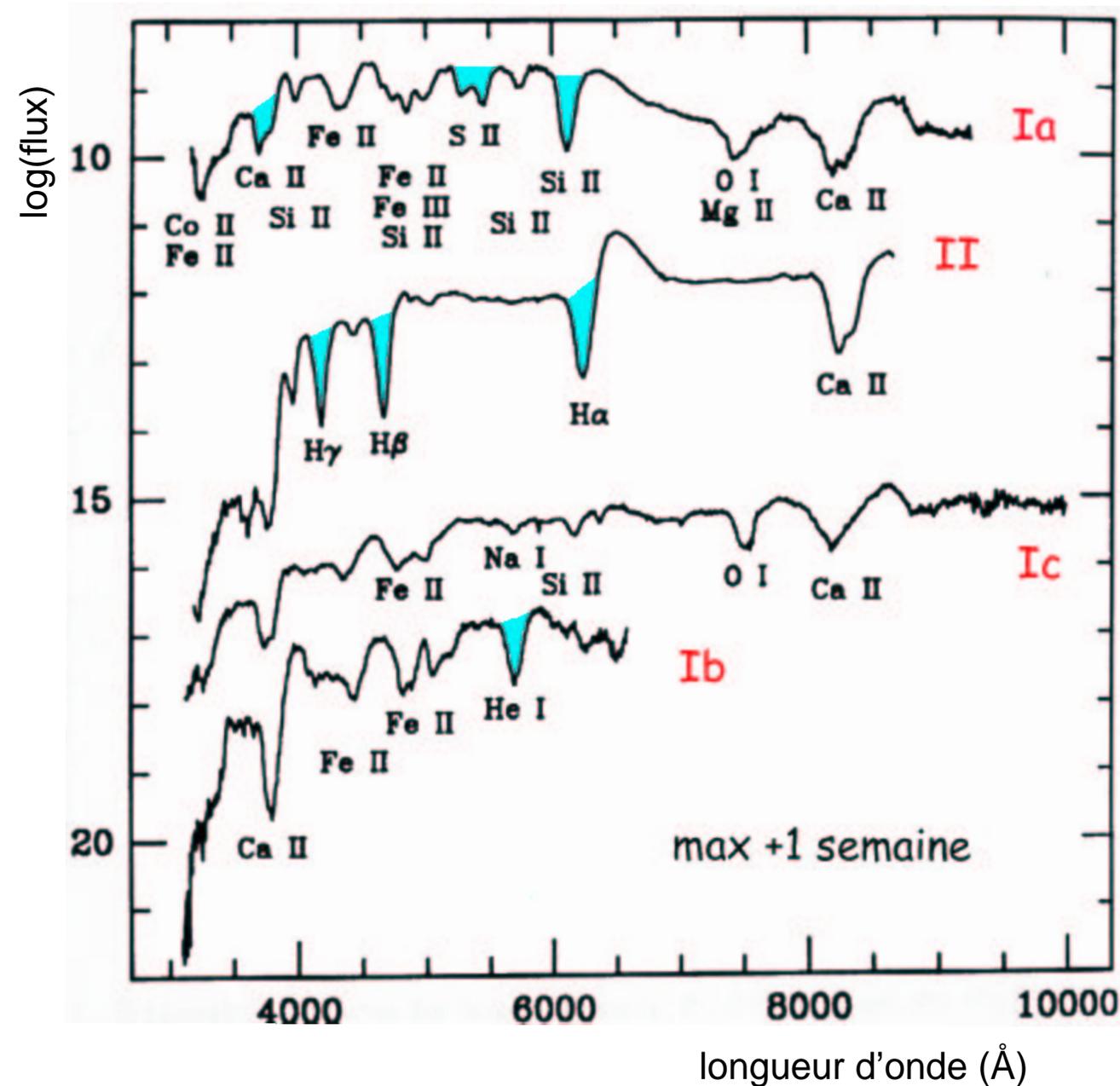
# Les courbes de lumière

**SNe Ia : les plus lumineuses au maximum de lumière**

exceptée une poignée de SNe Ic : des hypernovæ...



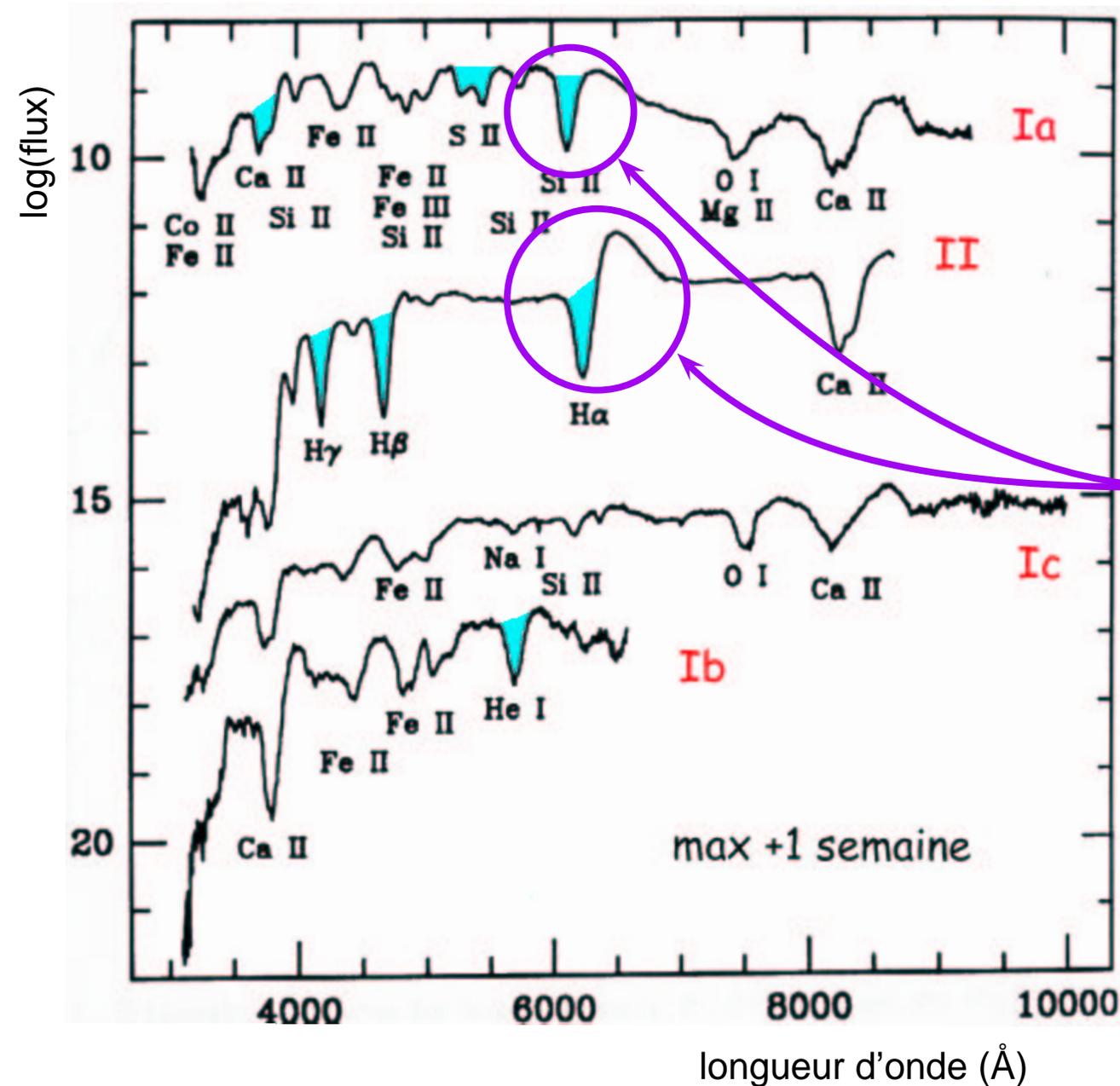
# Les spectres...



De nombreuses raies  
larges (vitesses  
d'expansion  
 $\sim 10\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Raies en profils P-Cygni,  
typiques des atmosphères  
en expansion

# Les spectres...

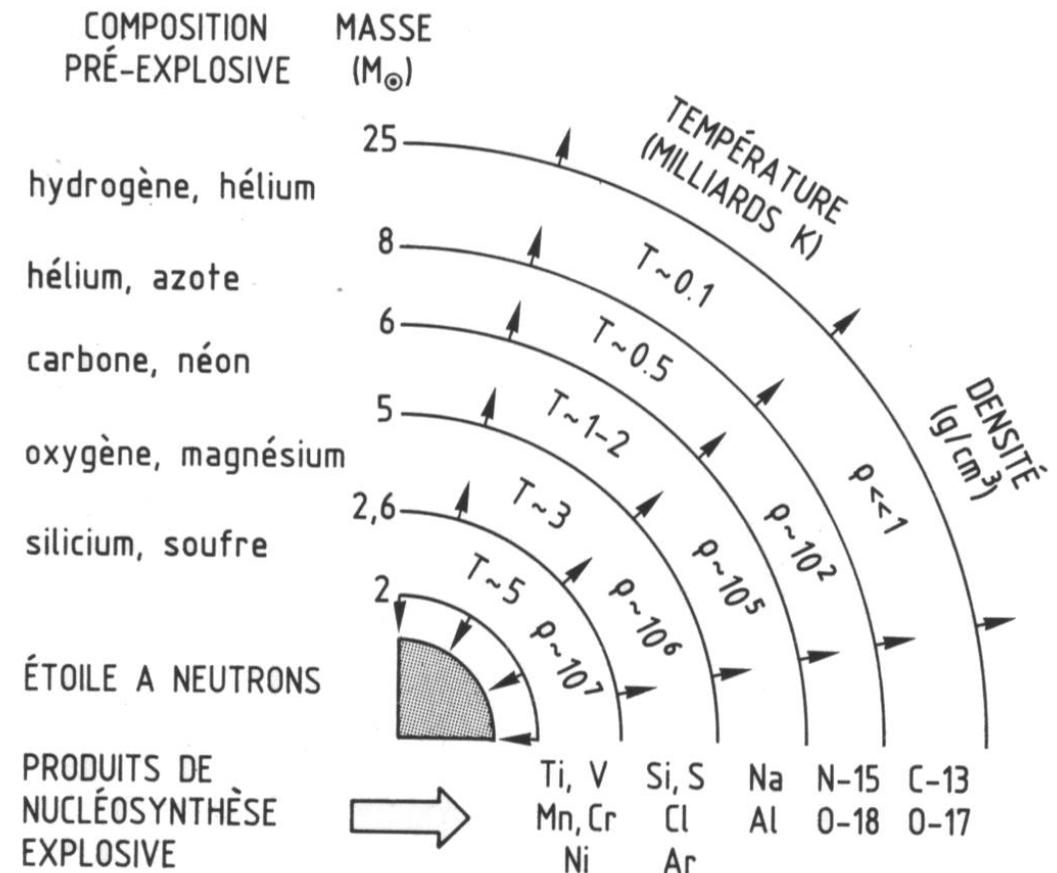


De nombreuses raies  
larges (vitesses  
d'expansion  
 $\sim 10\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Raies en profils P-Cygni,  
typiques des atmosphères  
en expansion

# Effondrement gravitationnel : SNe II, Ib/c

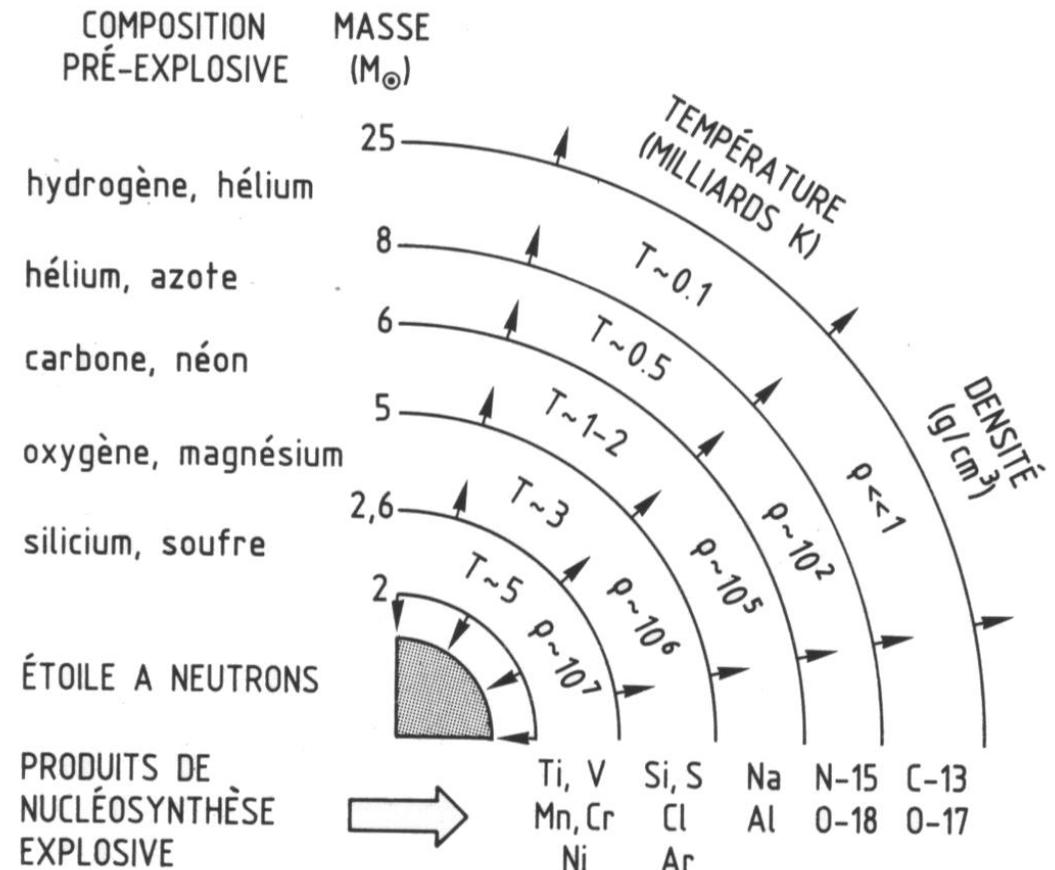
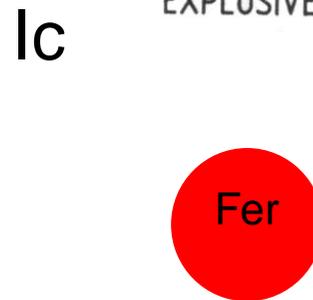
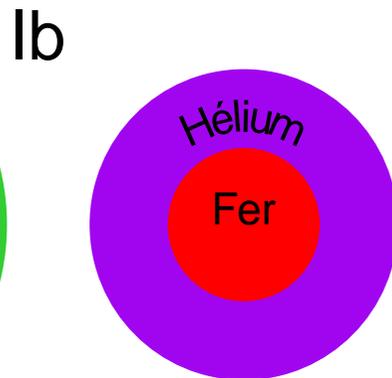
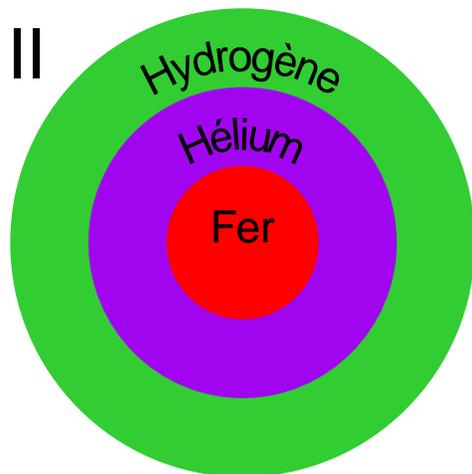
Épuisement du combustible nucléaire : le cœur de fer s'effondre  
 → Étoile à neutrons (trou noir ?)  
 L'enveloppe rebondit sur la surface de l'astre compact → **SUPERNOVA !**



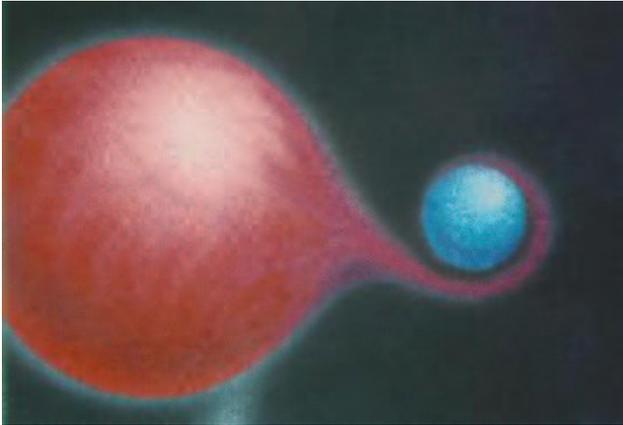
# Effondrement gravitationnel : SNe II, Ib/c

Épuisement du combustible nucléaire : le cœur de fer s'effondre  
 → **Étoile à neutrons** (trou noir ?)  
 L'enveloppe rebondit sur la surface de l'astre compact → **SUPERNOVA !**

**Le progéniteur : étoile de masse  $> 8 M_{\odot}$**



# Explosion thermonucléaire : SNe Ia



- Système binaire (Naine Blanche C/O + Étoile de la Séquence Principale ou Géante Rouge)
- Accrétion d'hydrogène/hélium ( $\sim 10^{-7} M_{\odot}/\text{an} \rightarrow$  combustion stable en surface)

$$M_{\text{NB}} \nearrow \implies \rho_{\text{centre}} \nearrow$$

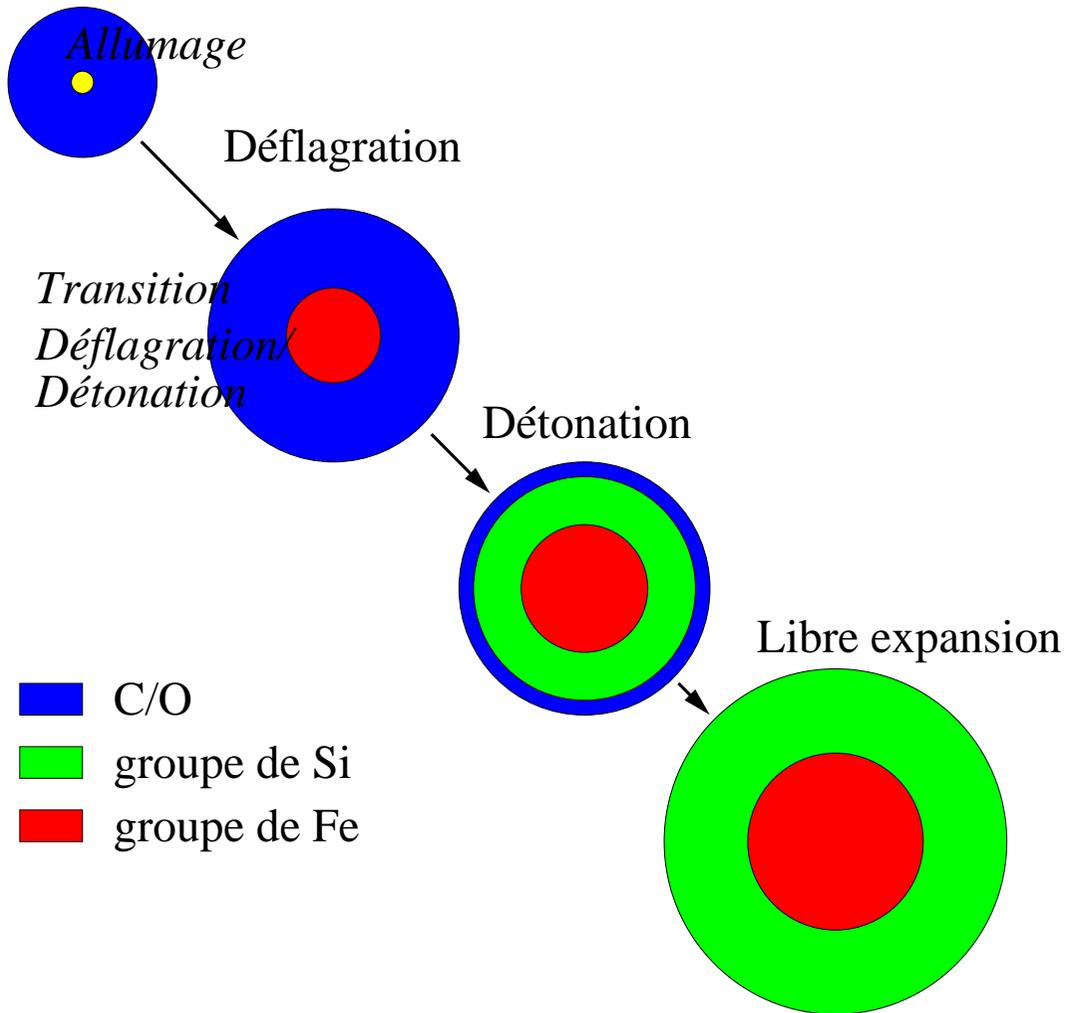
Pour  $\rho_{\text{centre}} \sim 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , la combustion du carbone s'allume

( $M_{\text{NB}} \lesssim$  Masse de Chandrasekhar —  $1.4 M_{\odot}$ ,  $\rho_{\text{ch}} \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Naine Blanche = gaz d'électrons dégénérés :  $P \propto \rho^{\Gamma}$

Quand  $T \nearrow$ ,  $P$  n'augmente pas : équilibre hydrostatique impossible  
 $\rightarrow$  *explosion!*

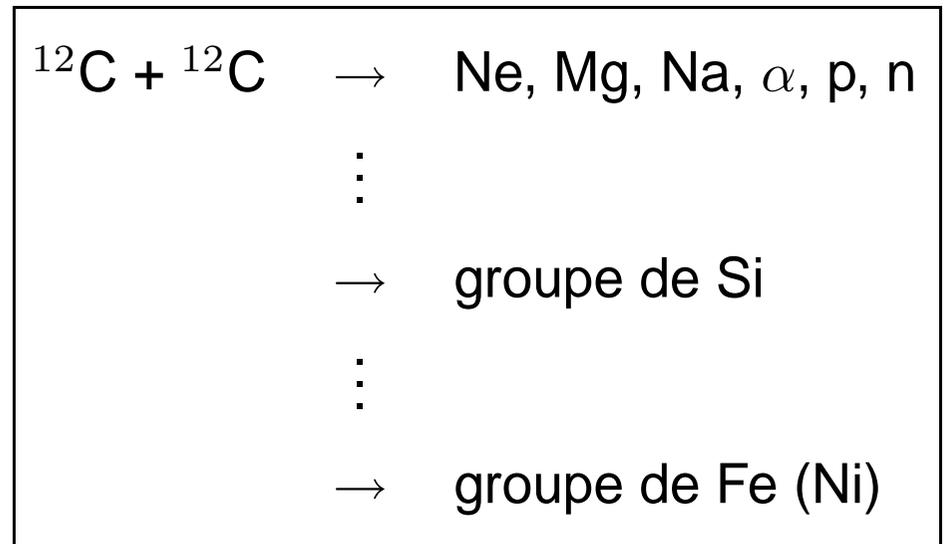
# SN Ia : l'explosion !



**Déflagration** = combustion par conduction électronique (subsonique)

**Détonation** = onde de choc supersonique

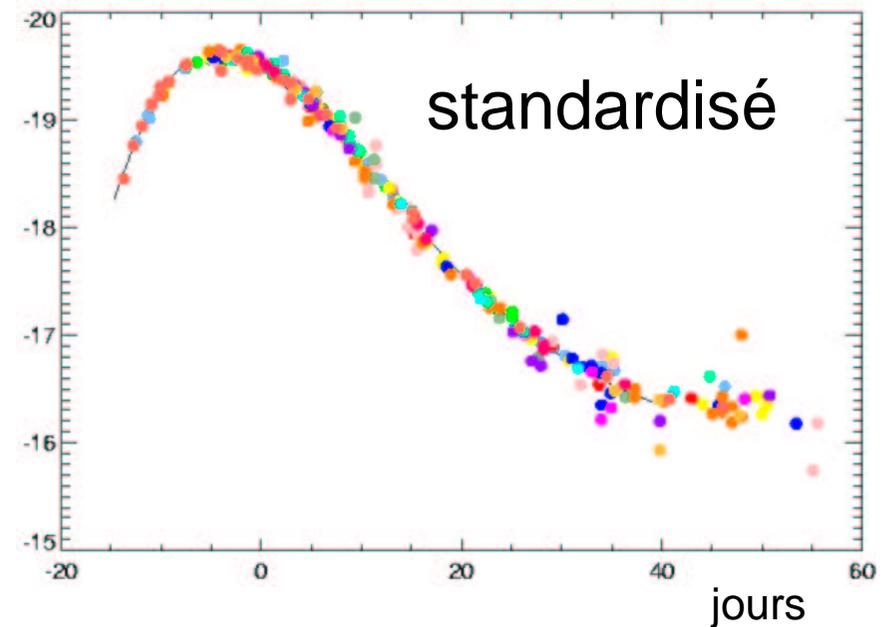
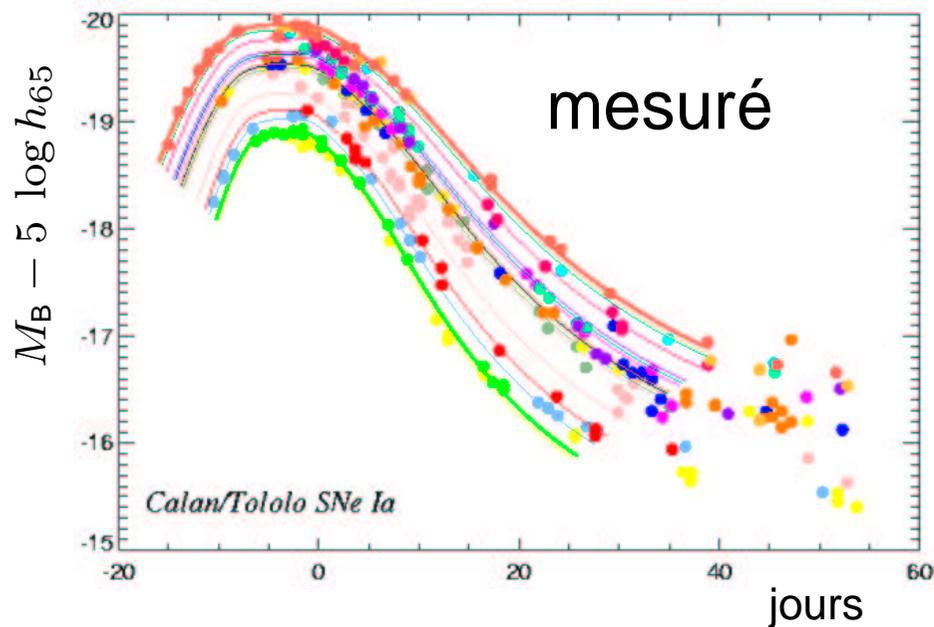
*La naine blanche est entièrement détruite*



$\rightarrow \sim 0.6 M_{\odot}$  de Ni produit !

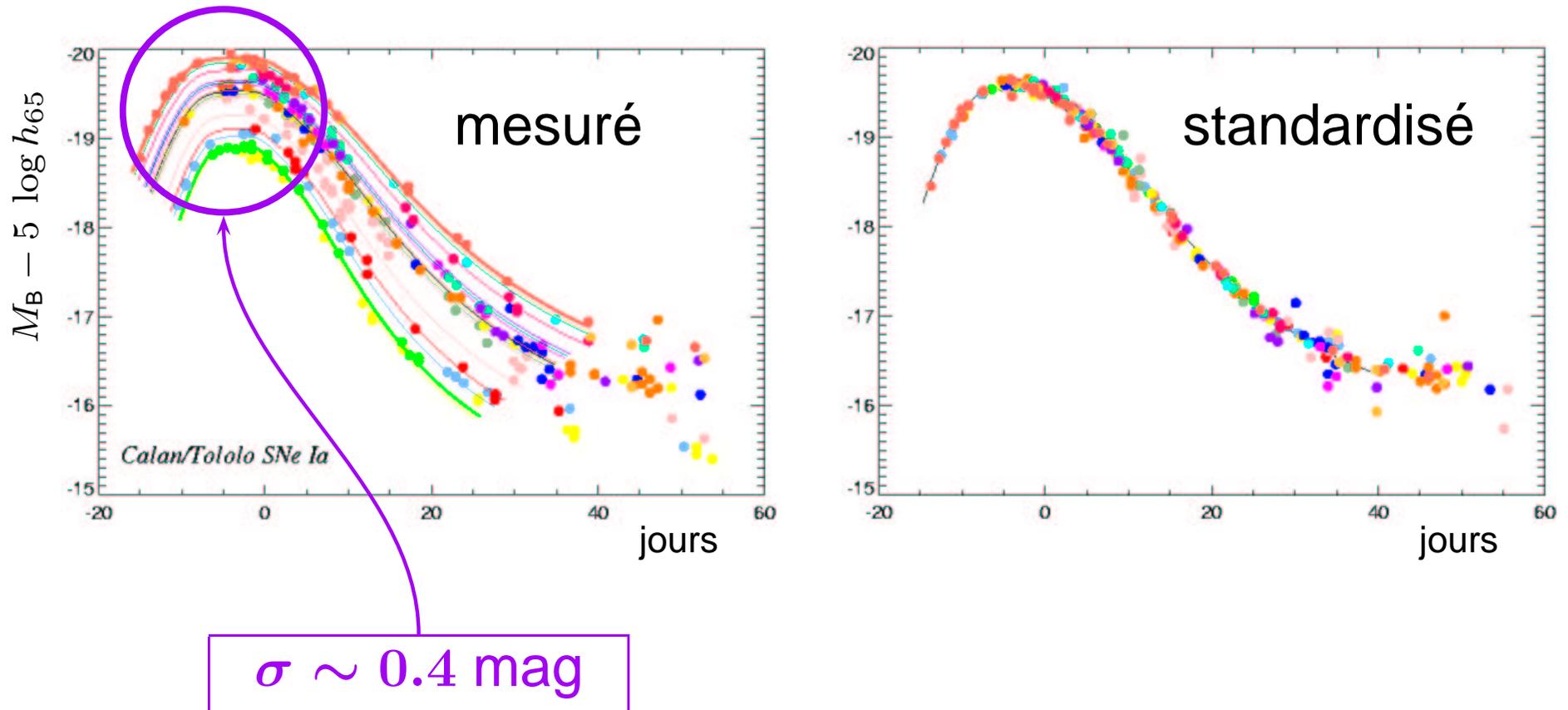
# SN Ia : des chandelles standards ?

**Chandelle standard** = objet dont la luminosité est constante d'un événement à l'autre



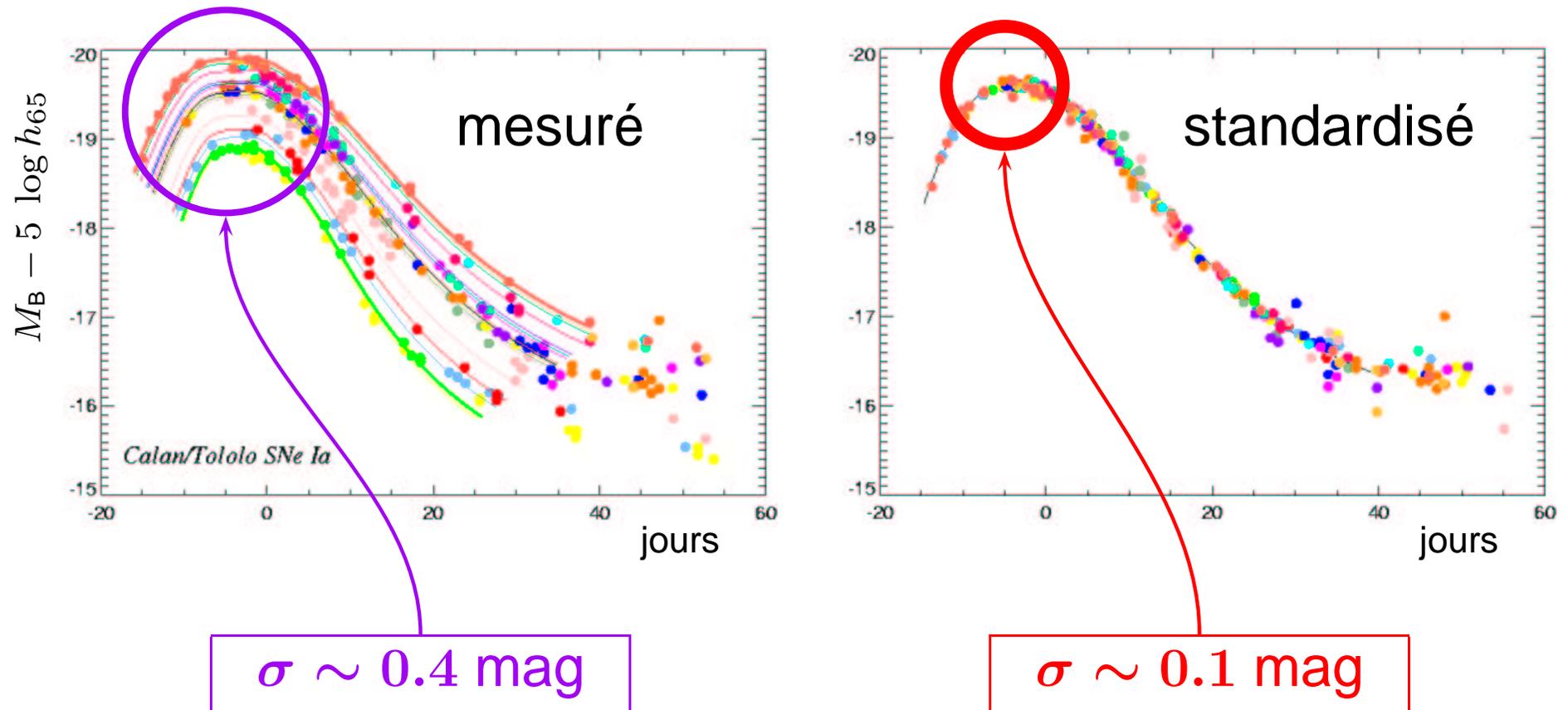
# SN Ia : des chandelles standards ?

**Chandelle standard** = objet dont la luminosité est constante d'un événement à l'autre



# SN Ia : des chandelles standards ?

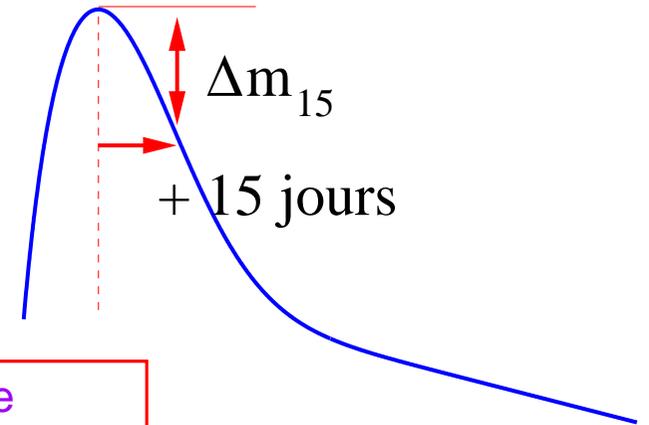
**Chandelle standard** = objet dont la luminosité est constante d'un événement à l'autre



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

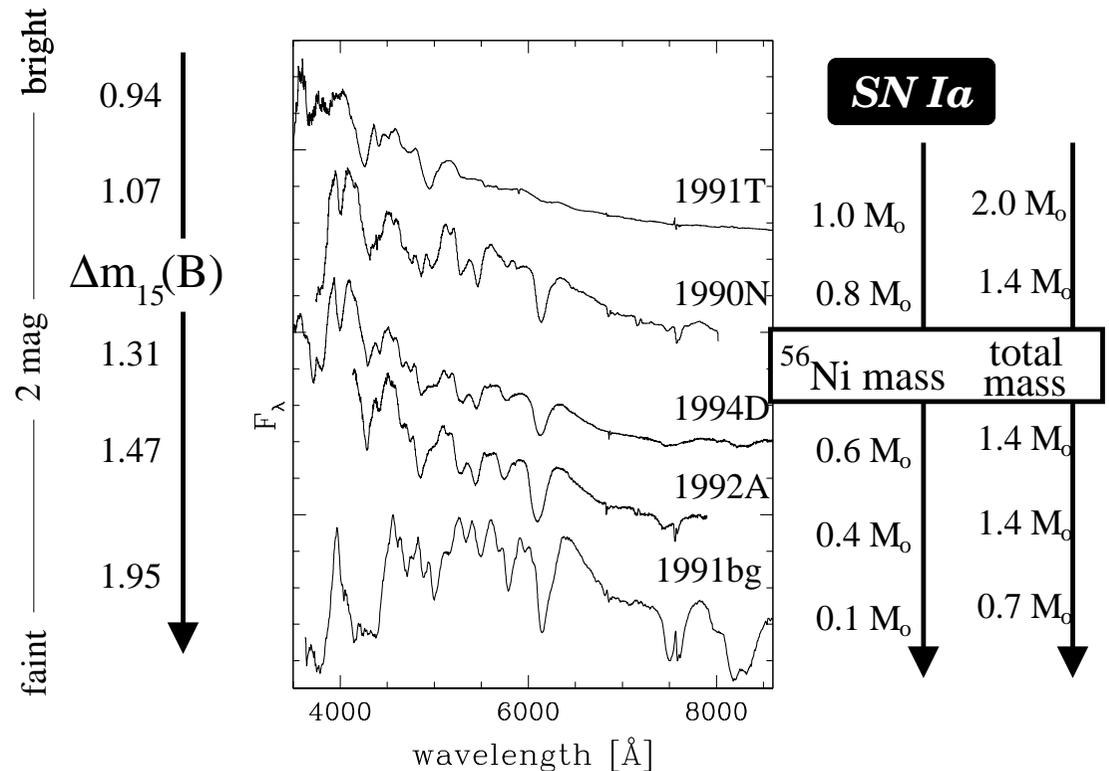
# « Standardisation »

Phillips (1993) —  $\Delta m_{15}$   
 (Luminosité au max)  $\propto$  (- Taux de décroissance)

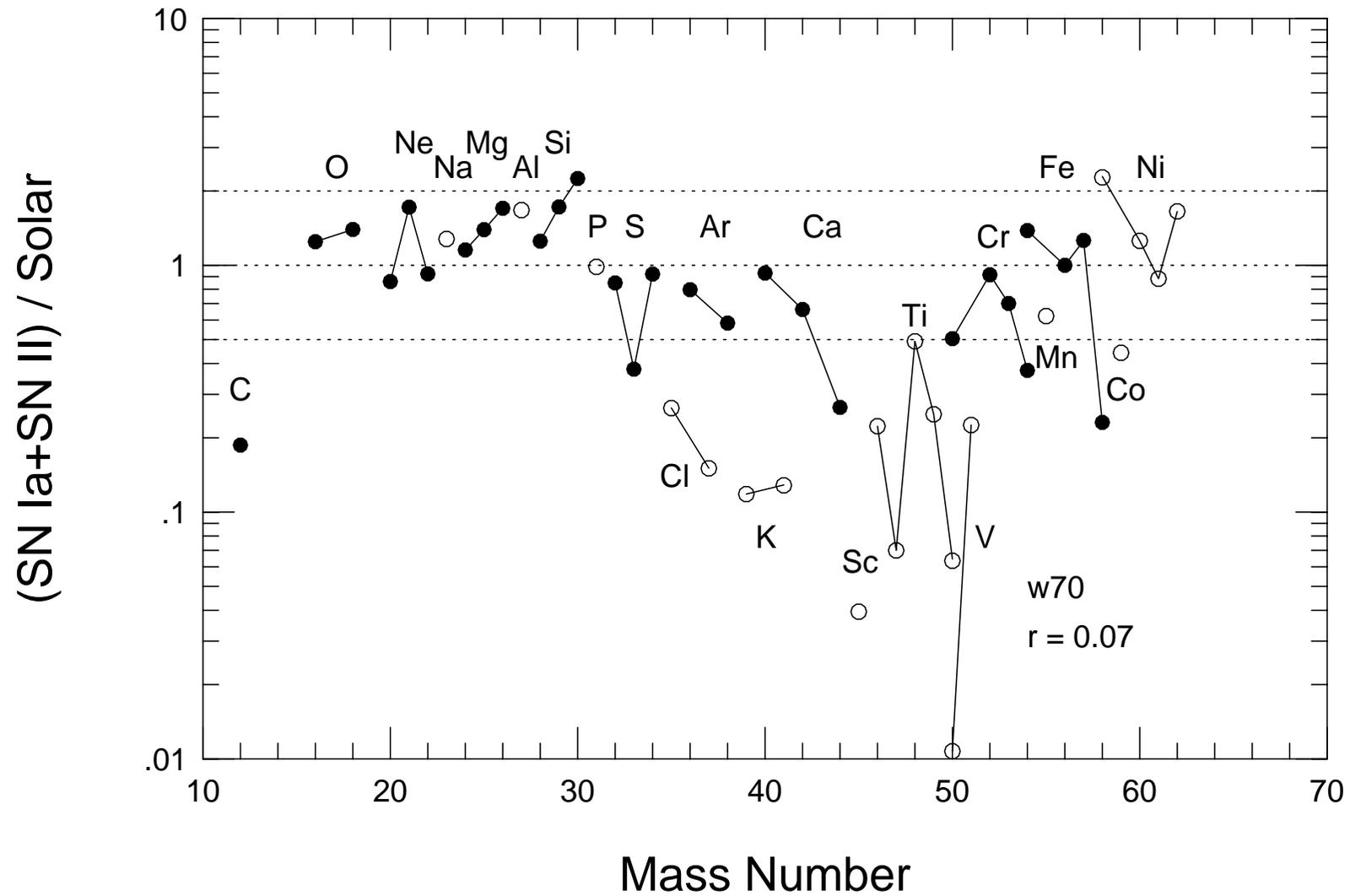


$\Delta m_{15} < 1.1$  : courbe de lumière large — déclin lent — plus lumineuse  
 $\Delta m_{15} > 1.1$  : courbe de lumière étroite — déclin rapide — moins lumineuse

$\Delta m_{15}$  dépend de l'opacité, qui dépend de la température qui dépend de  $M_{\text{Ni}}$



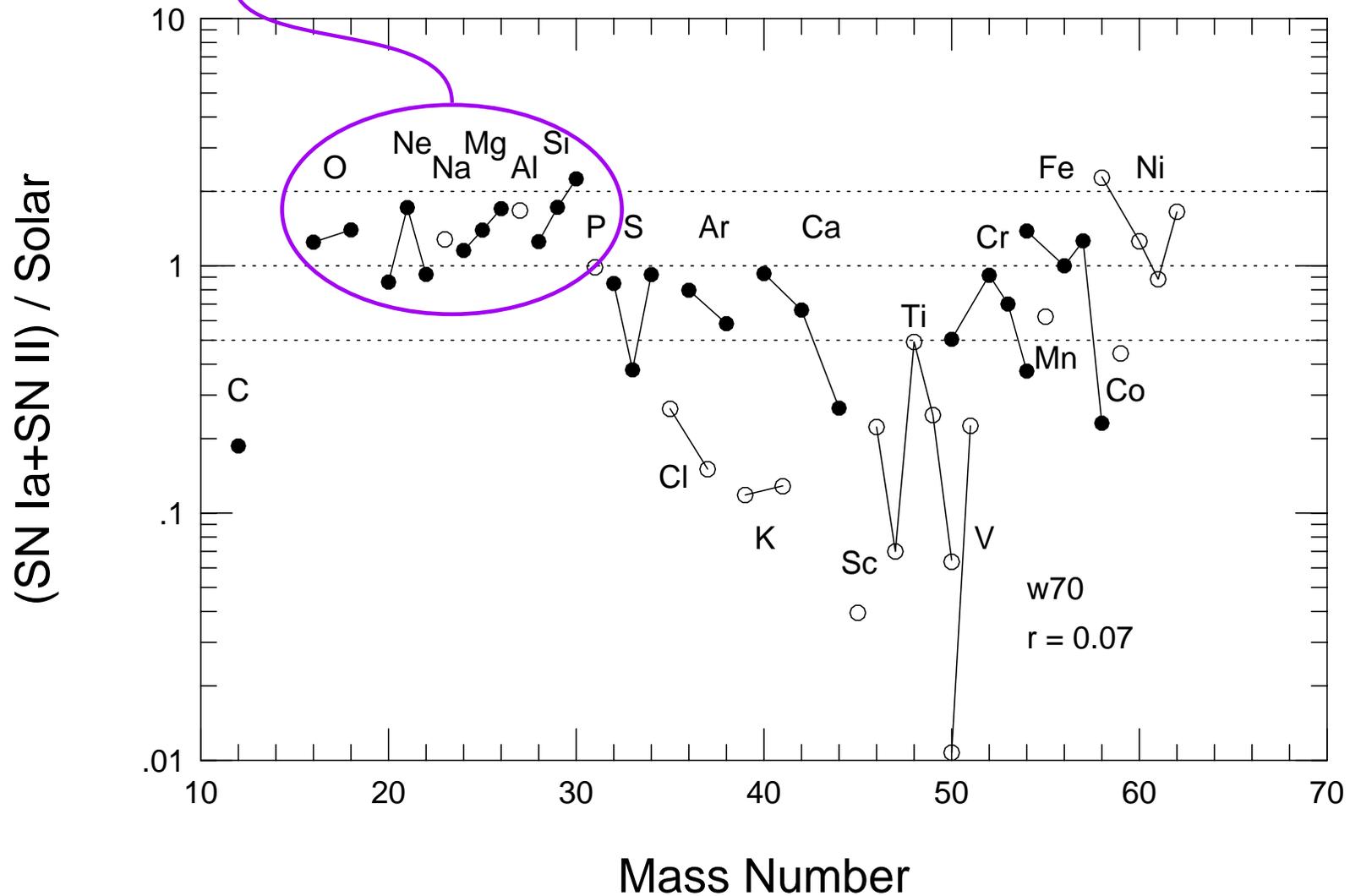
# Évolution chimique et SNe



# Évolution chimique et SNe

SNe II

~ 2 M<sub>⊙</sub> d'Oxygène / événement



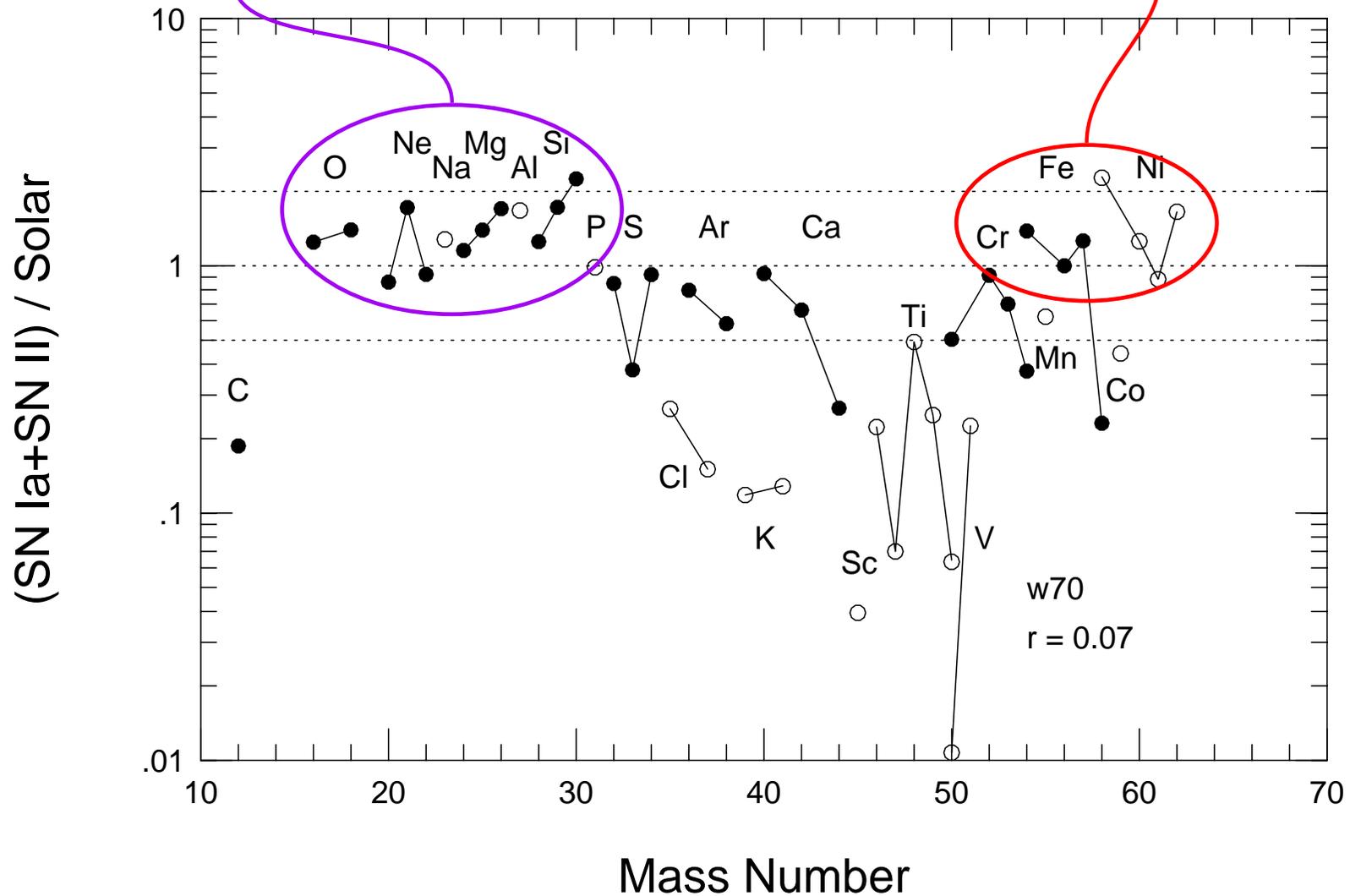
# Évolution chimique et SNe

SNe II

~ 2 M<sub>⊙</sub> d'Oxygène / événement

SNe Ia

~ 0.6 M<sub>⊙</sub> de Nickel / événement



# Taux de supernova

**SNe II**  $\rightarrow \lesssim 100$  millions d'années après la naissance du progéniteur

Taux d'explosion de SN II  $\propto$  Taux de formation d'étoiles

# Taux de supernova

**SNe II**  $\rightarrow \lesssim 100$  millions d'années après la naissance du progéniteur

Taux d'explosion de SN II  $\propto$  Taux de formation d'étoiles

**SNe Ia**  $\rightarrow \gtrsim 100$  millions d'années après la naissance du progéniteur

Taux d'explosion de SN Ia dépend de

- taux de formation d'étoiles
- progéniteur (système binaire, taux d'accrétion,...)

# Taux de supernova

**SNe II**  $\rightarrow \lesssim 100$  millions d'années après la naissance du progéniteur

Taux d'explosion de SN II  $\propto$  Taux de formation d'étoiles

**SNe Ia**  $\rightarrow \gtrsim 100$  millions d'années après la naissance du progéniteur

Taux d'explosion de SN Ia dépend de

- taux de formation d'étoiles
- progéniteur (système binaire, taux d'accrétion,...)

La connaissance de  
l'évolution du taux  
d'explosion



regard inédit sur  
l'évolution des  
galaxies

# **La recherche de supernovæ avec EROS**

# EROS : une Expérience de Recherche d'Objets *Superbrillants* ?

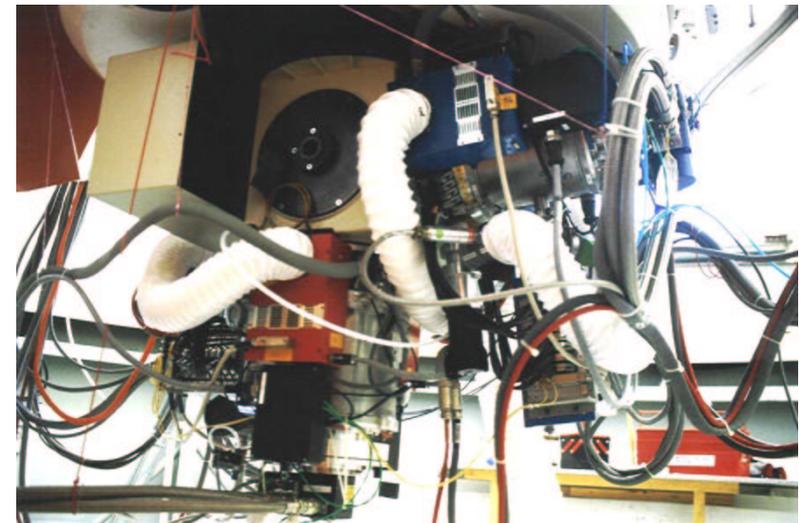


- Un télescope au Chili de  $\varnothing$  1 m
- Une caméra CCD à grand champ ( $1 \text{ deg}^2$ )  
mosaïque de 8 CCD de  $2048 \times 2048$  pixels
- Un système de pointage-guidage entièrement automatique

→ *permet de chercher des supernovæ !*

$$\begin{aligned} z_{\text{lim}} &\propto \varnothing^{1/2} \cdot T^{1/4} \\ n_{\text{SN}} &\propto \Omega \cdot z_{\text{lim}}^2 \end{aligned}$$

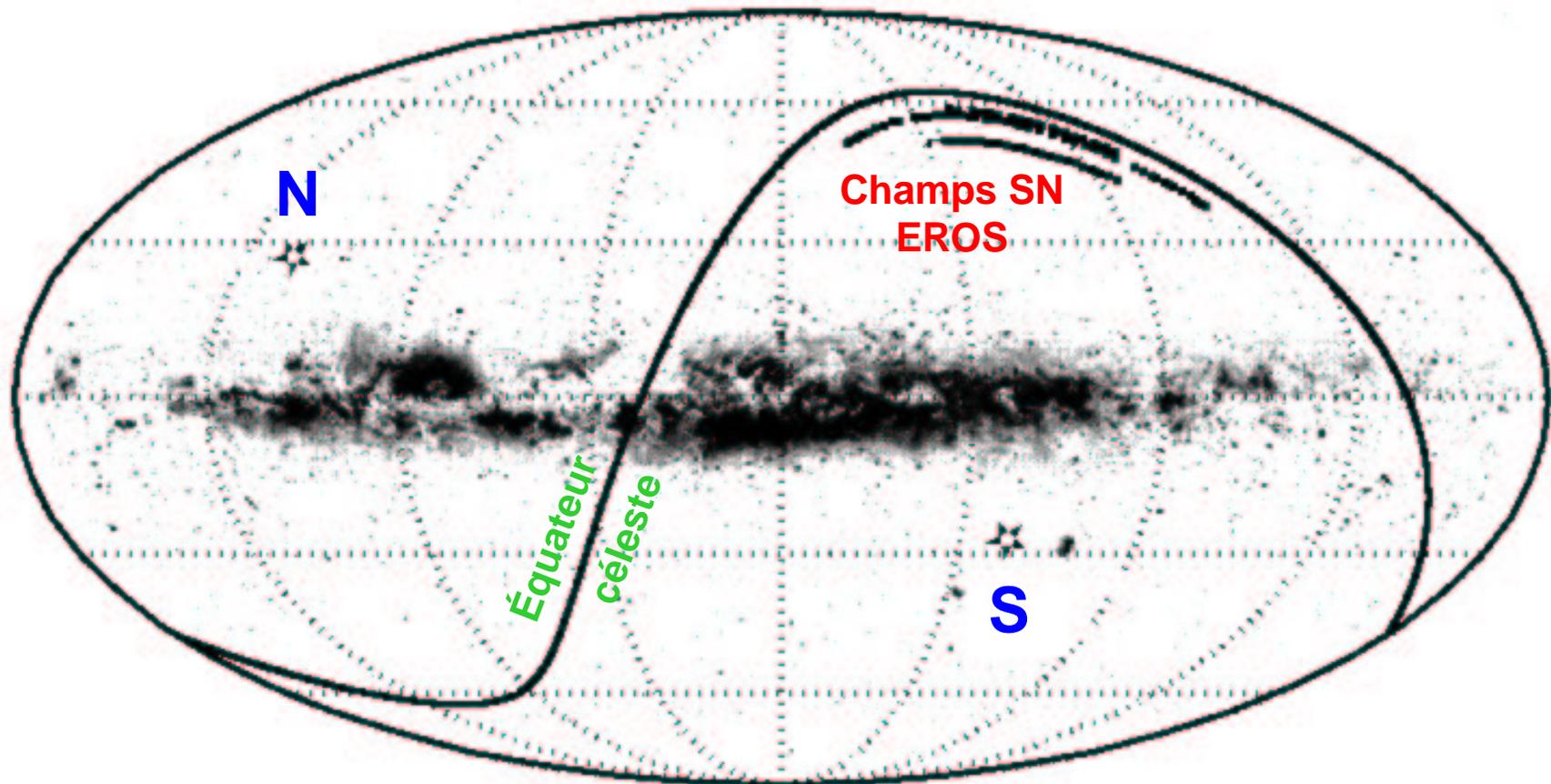
$(z_{\text{lim}}(\text{EROS}) \lesssim 0.3 \text{ et } n_{\text{SN}}(\text{EROS}) > 0)$



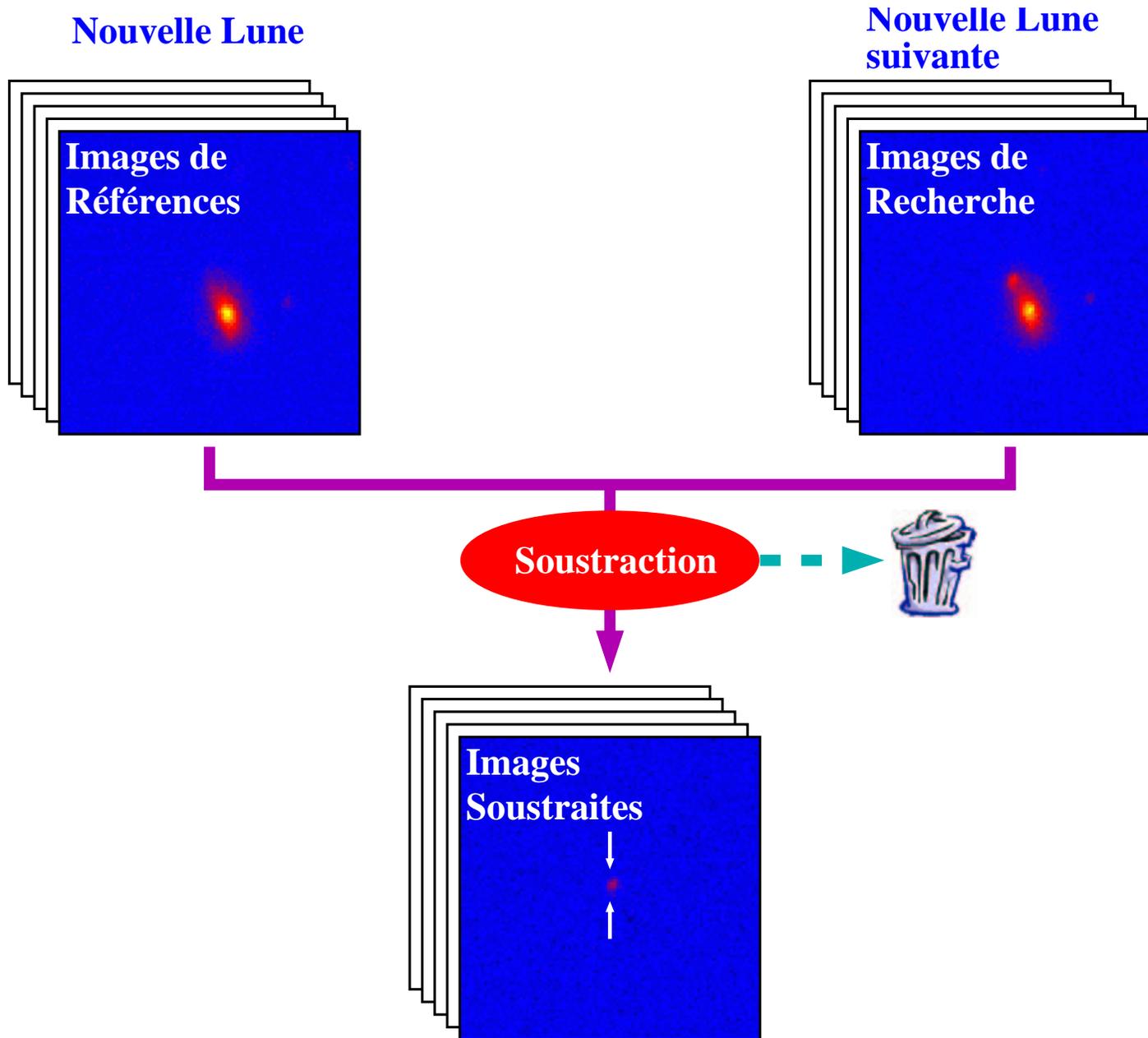
# Les champs de recherche d'EROS

250 champs de  $1 \text{ deg}^2$  proches de l'équateur céleste :

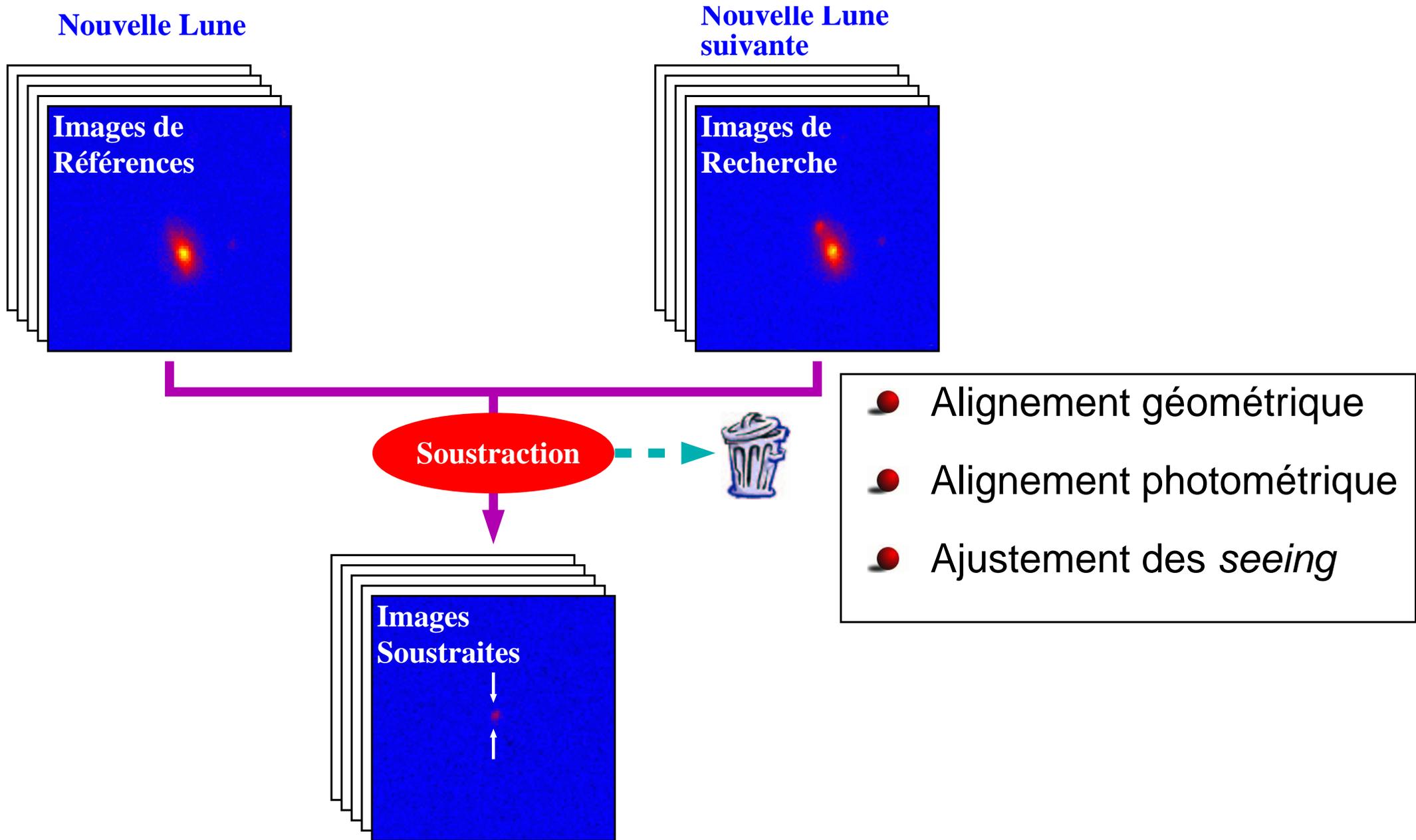
- visibilité depuis les deux hémisphères
- recouvrement partiel avec les champs du LCRS (Shectman et al. 1996)



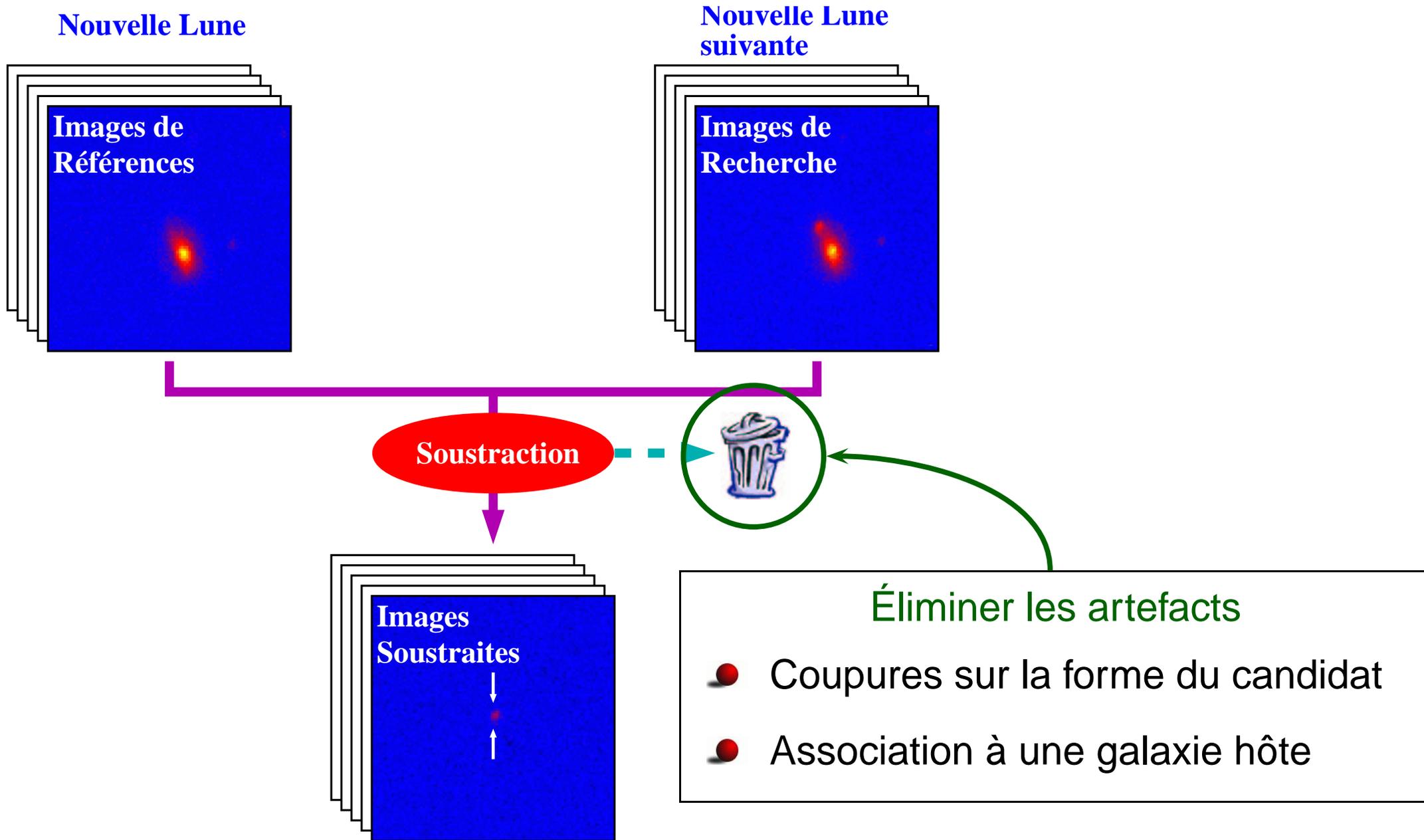
# La stratégie de recherche



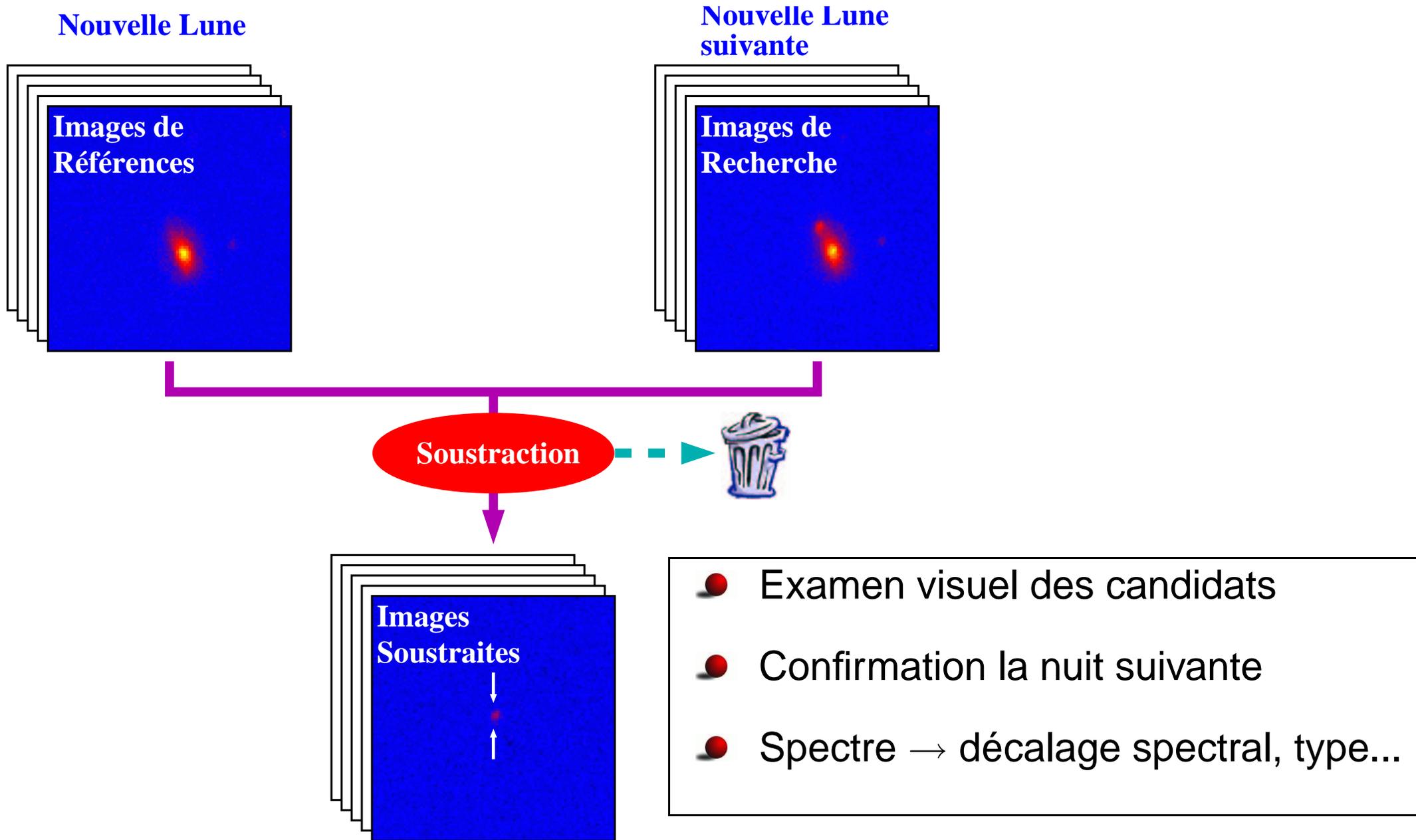
# La stratégie de recherche



# La stratégie de recherche

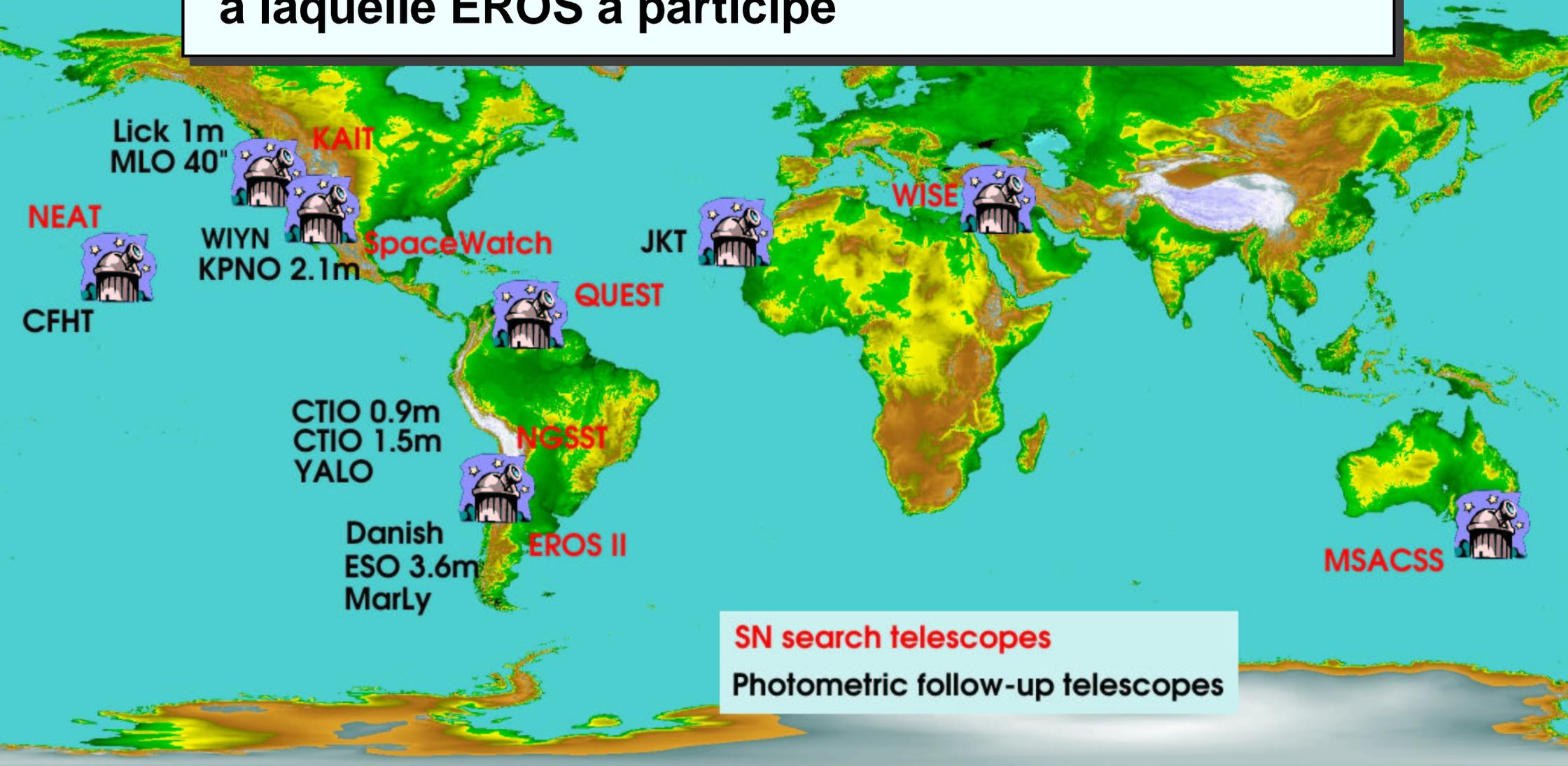


# La stratégie de recherche



# 1999 : une recherche internationale

Coordonnée par le *Supernova Cosmology Project*,  
à laquelle EROS a participé

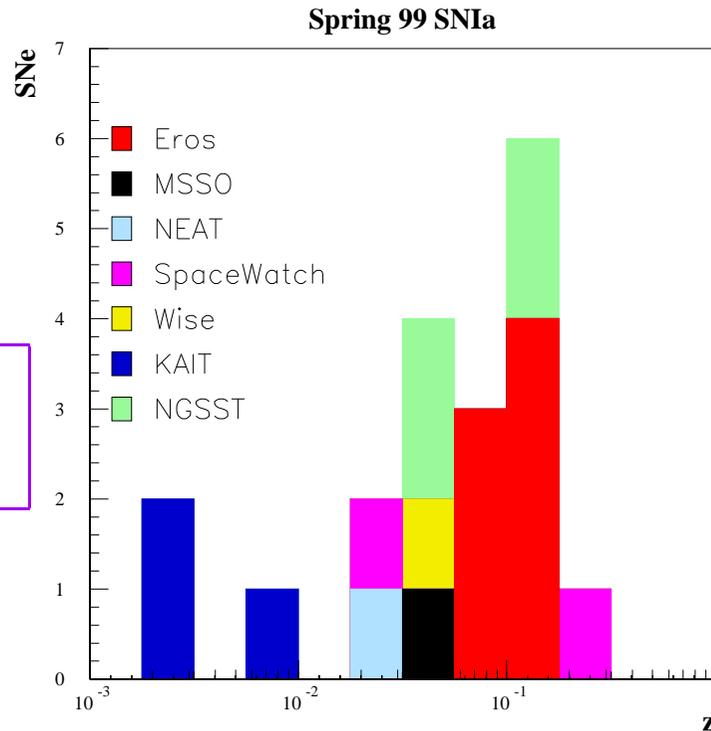


# Les supernovæ obtenues

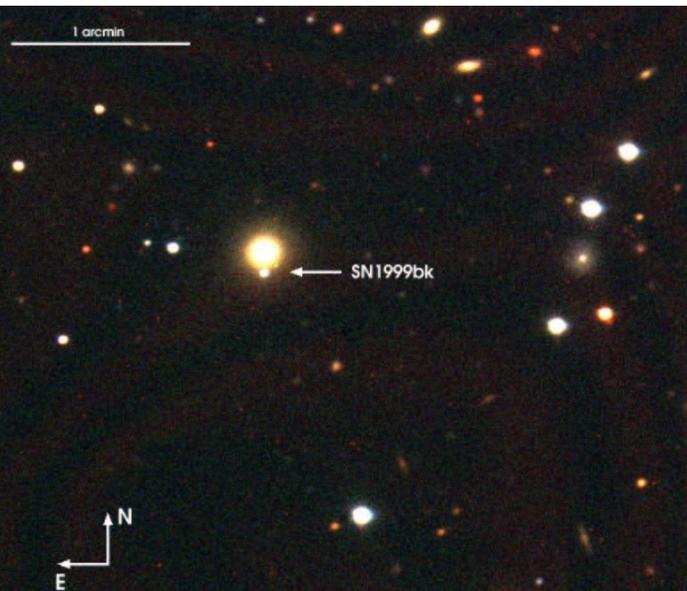
Globalement

35 SNe

19 de type Ia  
suivies



- 1 hypernova (Ic)  
(SN1999as)
- SN1999bw (Ia) plus  
brillante que son hôte...  
(Strolger et al 2002)

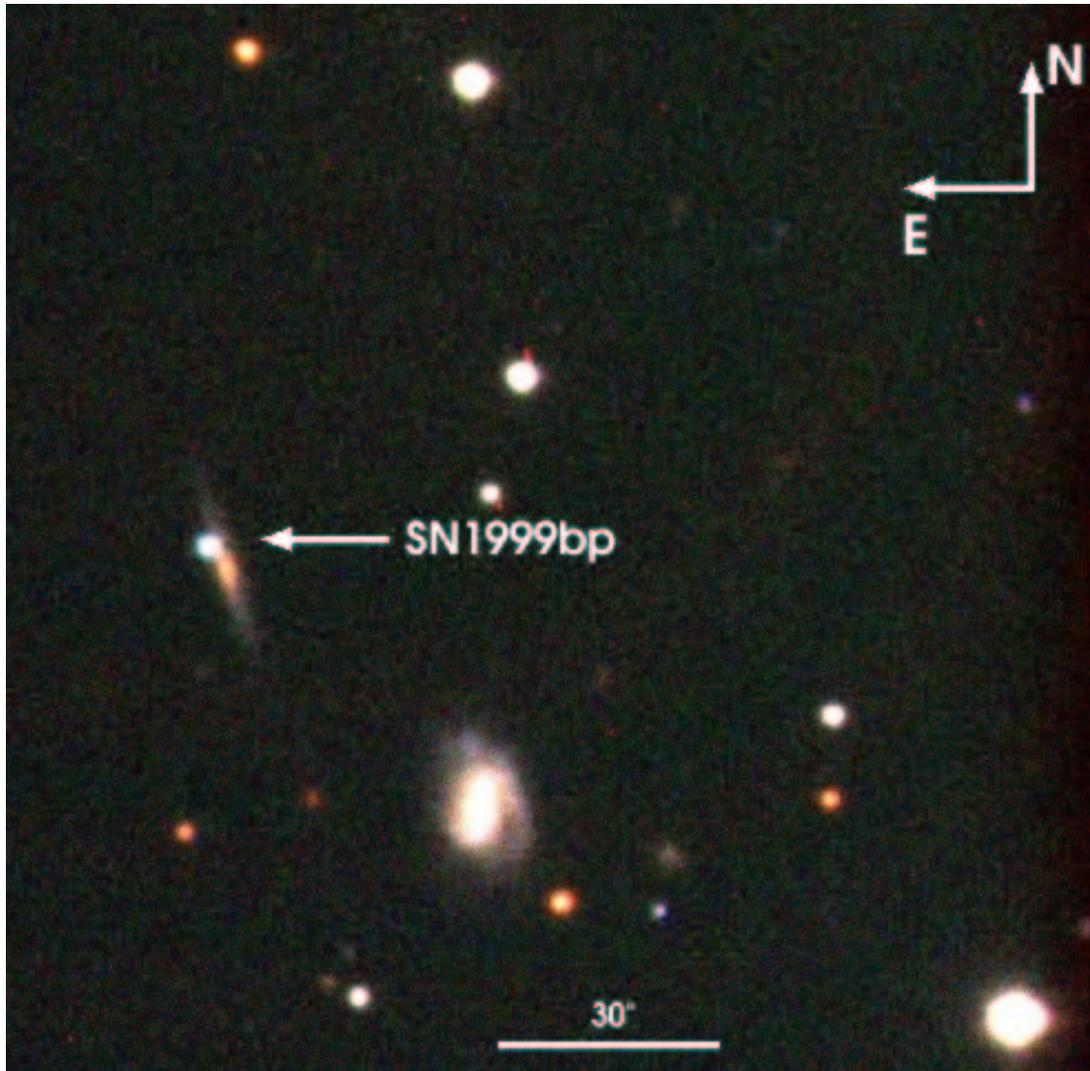


## EROS

$2 \times 250 \text{ deg}^2$

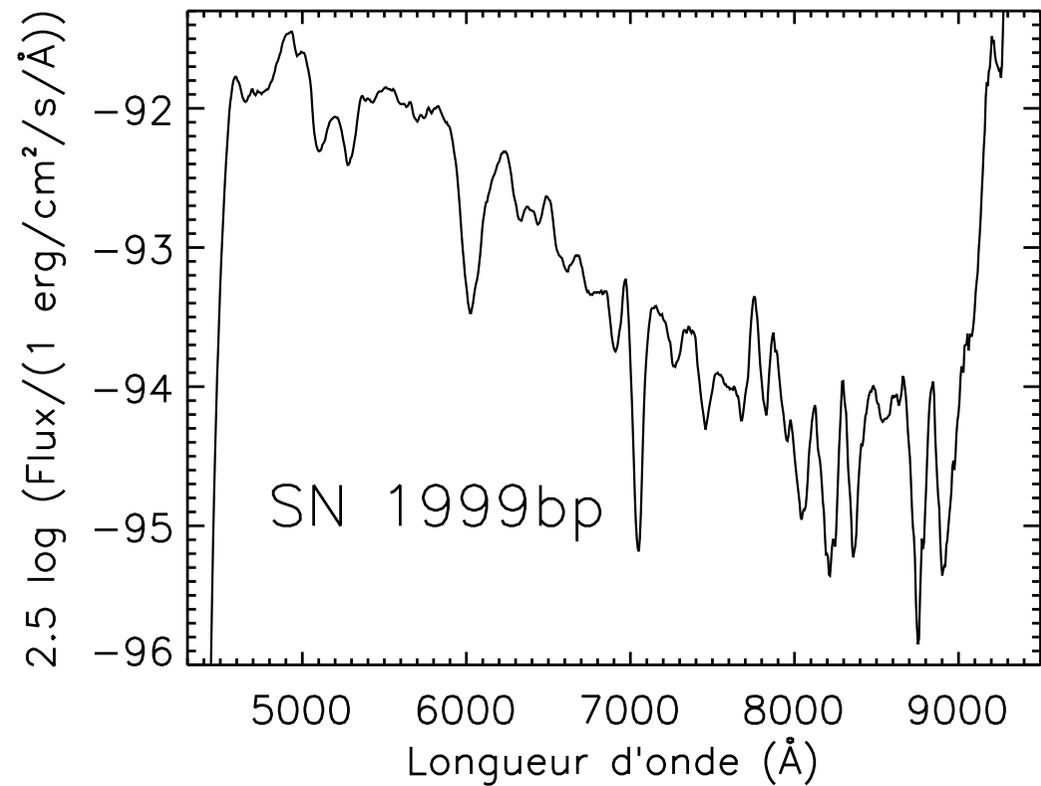
- 12 SNe Ia (7 suivies)
- 3 SNe II
- 1 SN Ic

# Un exemple : SN 1999bp



$z = 0.077$

Découverte  $\sim 8$  jours  
avant le maximum



# La campagne de 2000

170 deg<sup>2</sup> arpentés

- 4 SNe de type Ia
- 3 SNe de type II



Suivi photométrique et spectroscopique effectué aux Canaries et à l'ESO en collaboration avec le *European Supernova Cosmology Consortium*

# Le taux de supernova...

(Nombre d'explosions par unité de temps et de volume)

ou

(Nombre d'explosions par unité de temps et de luminosité galactique)

# La mesure du taux

*Hypothèse* : le nombre de supernova par galaxie par unité de temps est proportionnel à la luminosité galactique

*Le taux est donné par :*

$$\mathcal{R}_{\text{SN}} = \frac{\mathcal{N}_{\text{SNe trouvées}}}{\mathcal{N}_{\text{galaxies}} \cdot \langle \mathcal{L}_{\text{gal}}^B \rangle \cdot \mathcal{T}(\varepsilon_{\text{SN}})}$$

Nombre de galaxies  
auquel la recherche  
est sensible

Luminosité  
moyenne  
des galaxies

Intervalle de temps  
pendant lequel les  
SNe sont visibles

# La mesure du taux

*Hypothèse* : le nombre de supernova par galaxie par unité de temps est proportionnel à la luminosité galactique

*Si on connaît les redshifts de TOUTES les galaxies :*

$$\mathcal{R}_{\text{SN}} = \frac{\mathcal{N}_{\text{SNe trouvées}}}{\sum_{\text{galaxies}} \mathcal{L}_{\text{gal}}^B \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} dt \varepsilon(t, z)}$$

Luminosité  
de la galaxie

Efficacité de  
détection en  
fonction du temps  
 $t$  et du redshift  $z$

# La mesure du taux

*Hypothèse* : le nombre de supernova par galaxie par unité de temps est proportionnel à la luminosité galactique

*Cas général* :

$$\mathcal{R}_{\text{SN}} = \frac{\mathcal{N}_{\text{SNe trouvées}}}{\sum_{\text{galaxies}} \int_0^{+\infty} dz p(z|m_{\text{gal}}) \cdot \mathcal{L}_{\text{gal}}^B \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} dt \varepsilon(t, z)}$$

Densité de probabilité de  $z$  sachant la magnitude apparente de la galaxie  $m_{\text{gal}}$

Luminosité de la galaxie

Efficacité de détection en fonction du temps  $t$  et du redshift  $z$

# Les différentes étapes

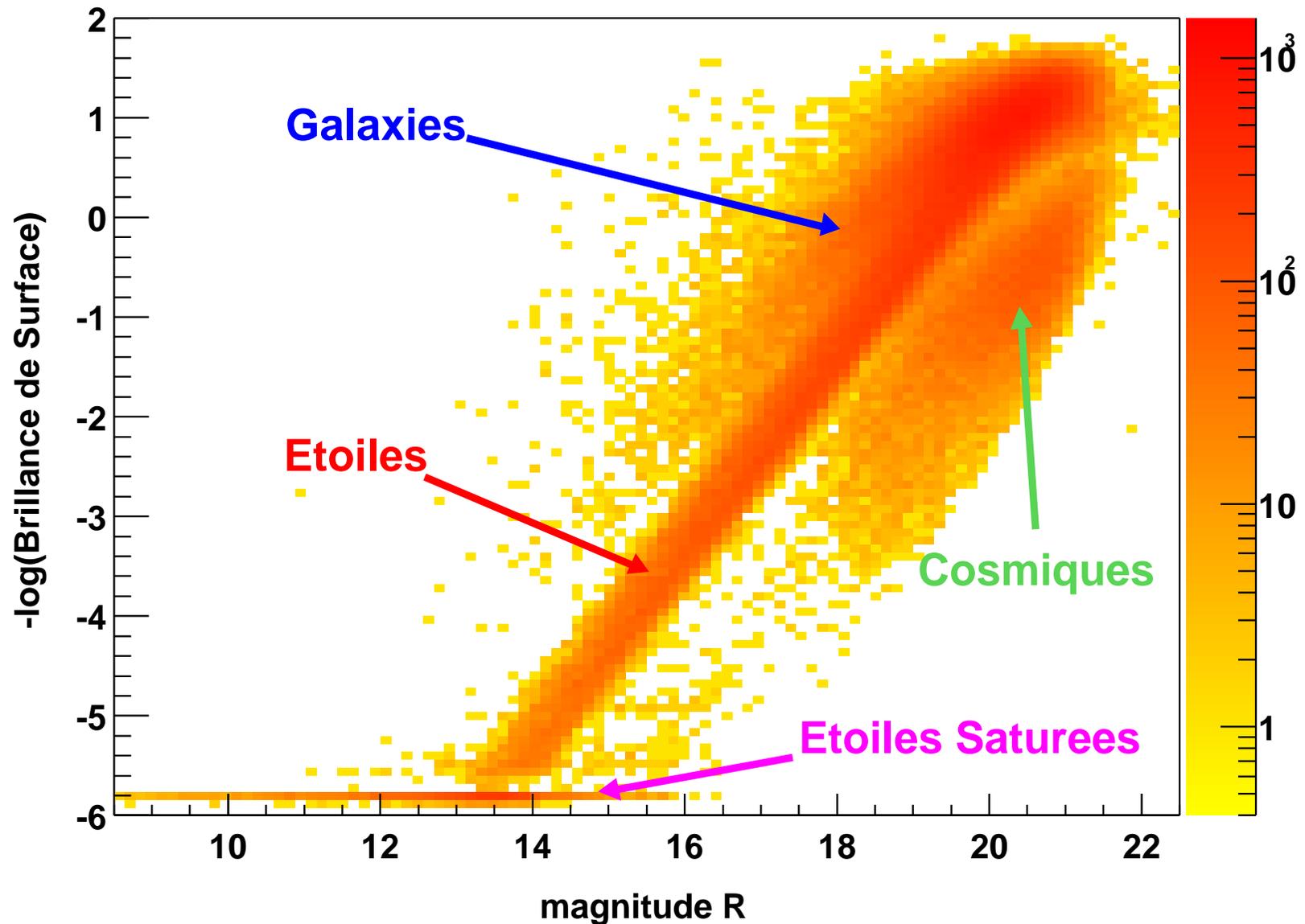
- Déterminer la population des galaxies sur les images
- Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
= simuler des supernovæ dans les galaxies
- Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :
  - ↪ la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )
  - ↪ le décalage spectral
  - ↪ la phase de la supernova
- Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations
- En déduire le taux — quantifier les systématiques

# Les différentes étapes

- **Déterminer la population des galaxies sur les images**
- Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
= simuler des supernovæ dans les galaxies
- Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :
  - ↳ la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )
  - ↳ le décalage spectral
  - ↳ la phase de la supernova
- Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations
- En déduire le taux — quantifier les systématiques

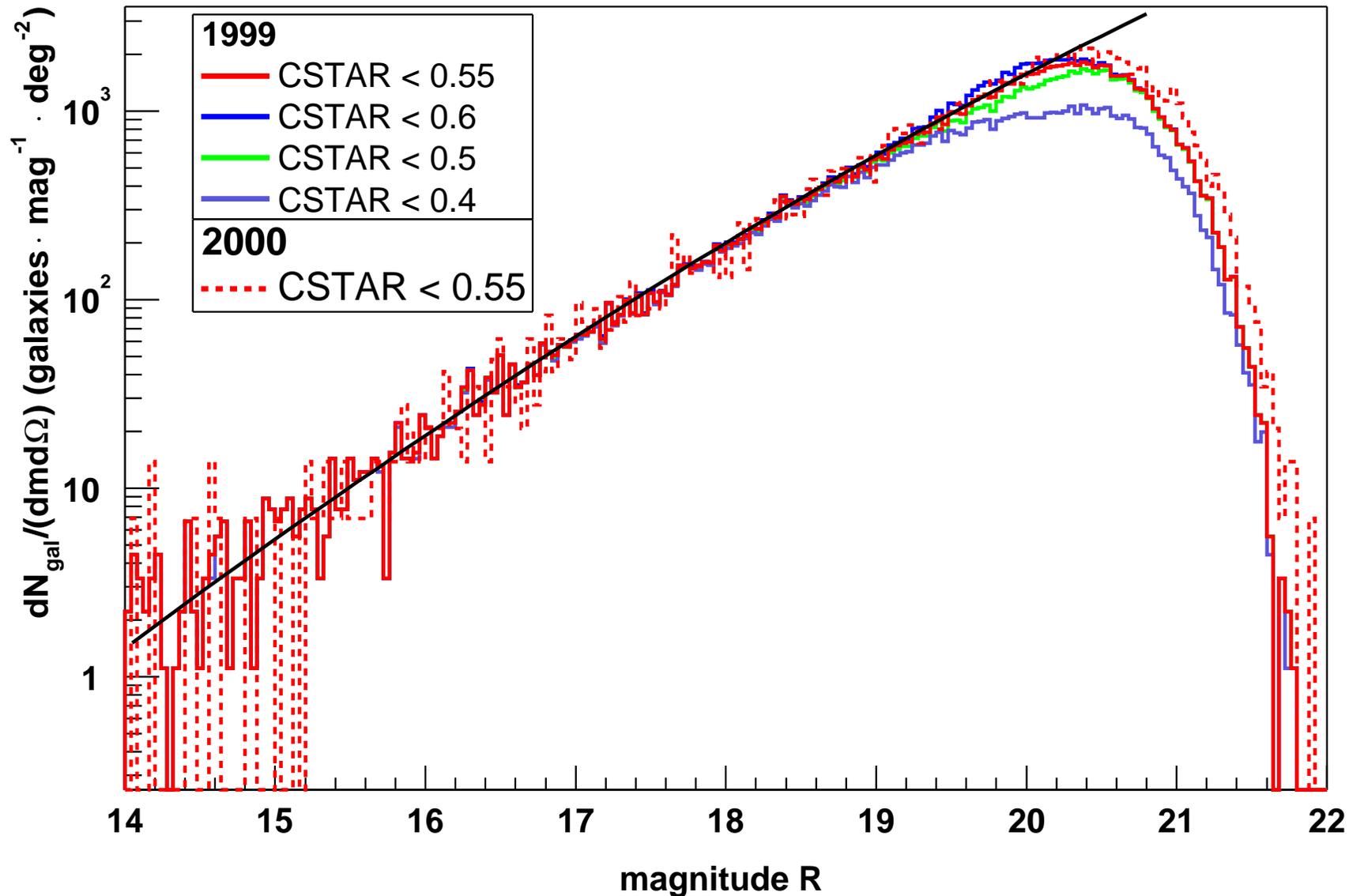
# Discriminer entre les différents objets

Les objets sont détectés sur les images avec le logiciel SExtractor (Bertin et al, 1996)



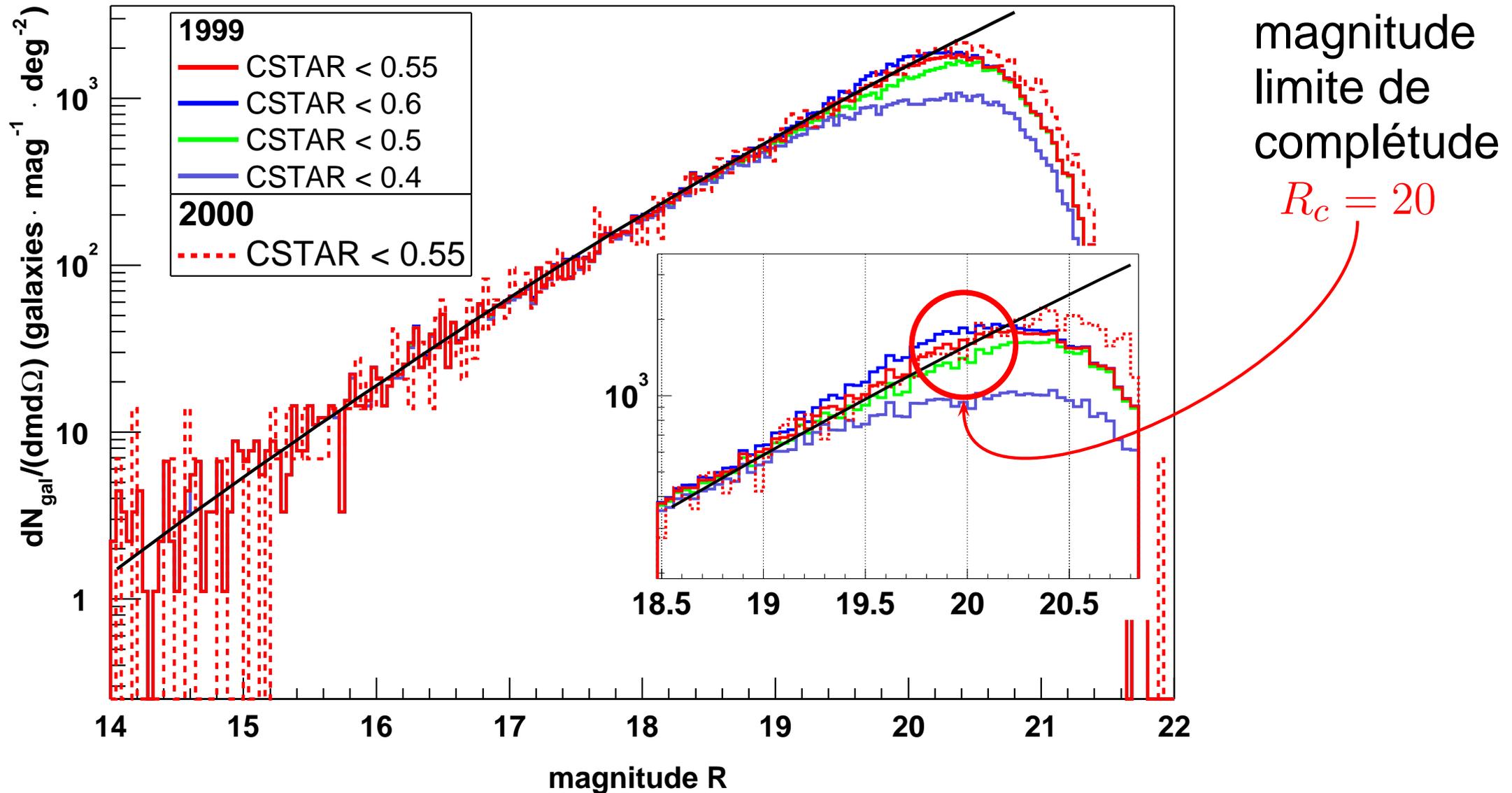
# La population des galaxies

Paramètre CSTAR : classification morphologique basée sur un réseau de neurones



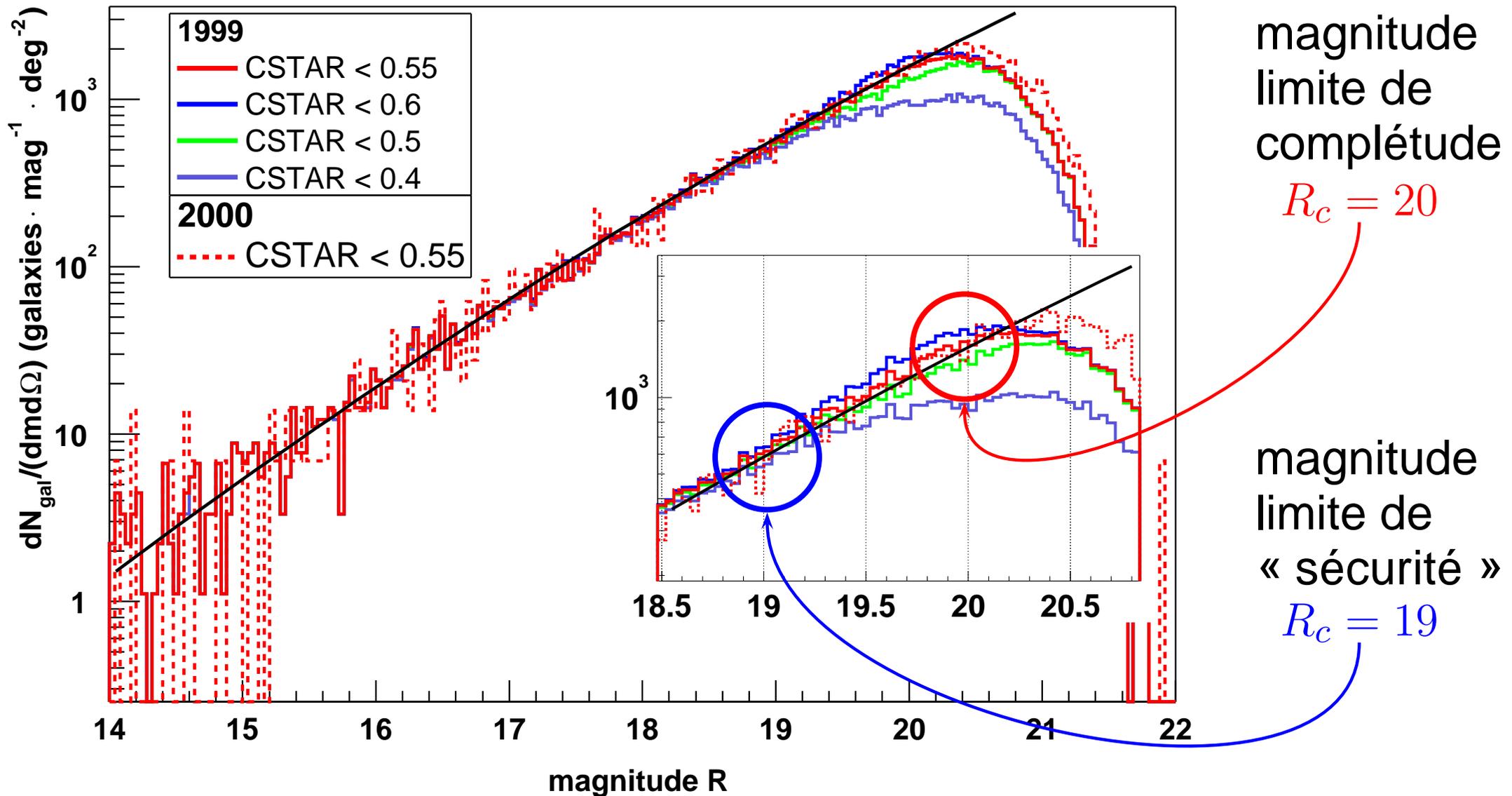
# La population des galaxies

Paramètre CSTAR : classification morphologique basée sur un réseau de neurones

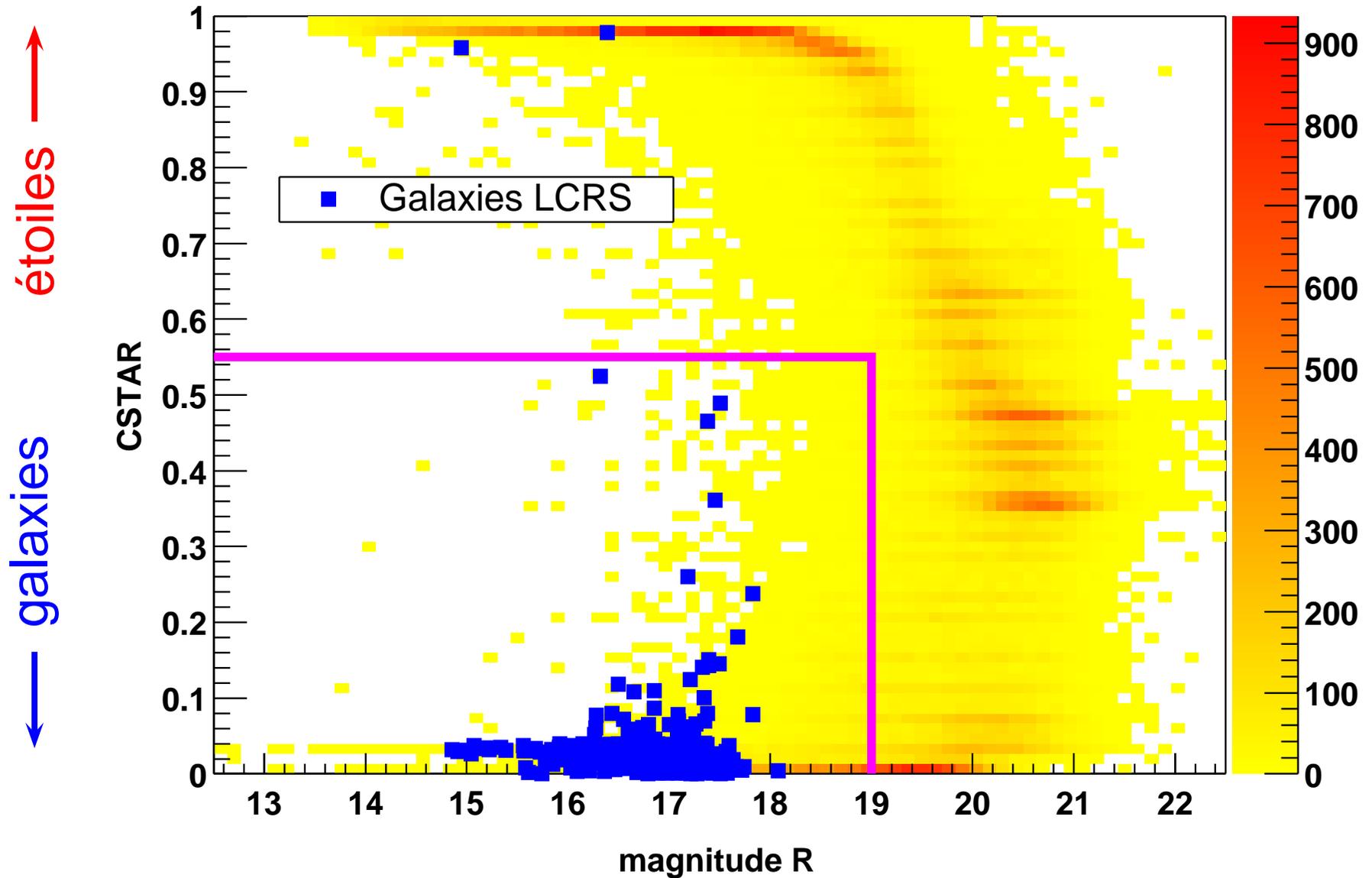


# La population des galaxies

Paramètre CSTAR : classification morphologique basée sur un réseau de neurones



# La coupure sur la magnitude des galaxies



# Les différentes étapes

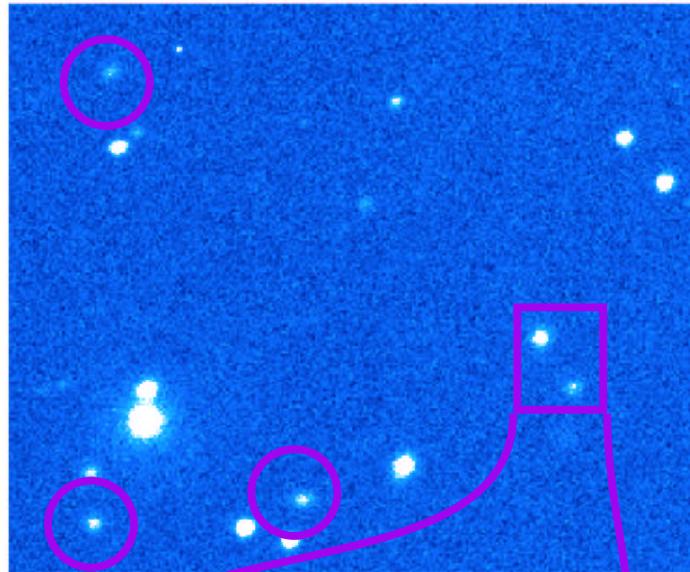
- Déterminer la population des galaxies sur les images
- **Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$**  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
**= simuler des supernovæ dans les galaxies**
- Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :
  - ↪ la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )
  - ↪ le décalage spectral
  - ↪ la phase de la supernova
- Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations
- En déduire le taux — quantifier les systématiques

# Collage d'étoiles

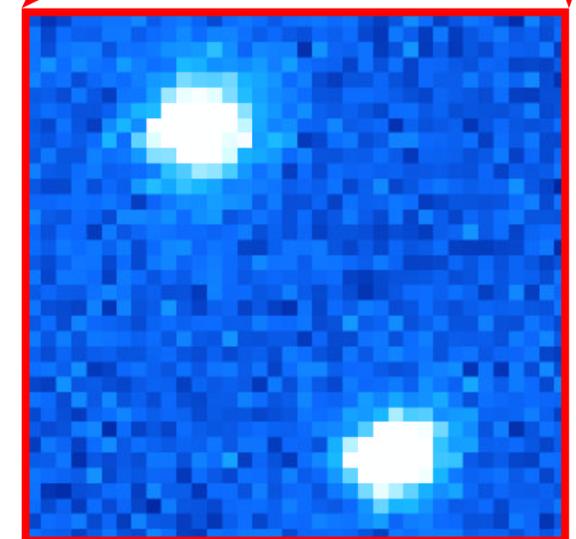
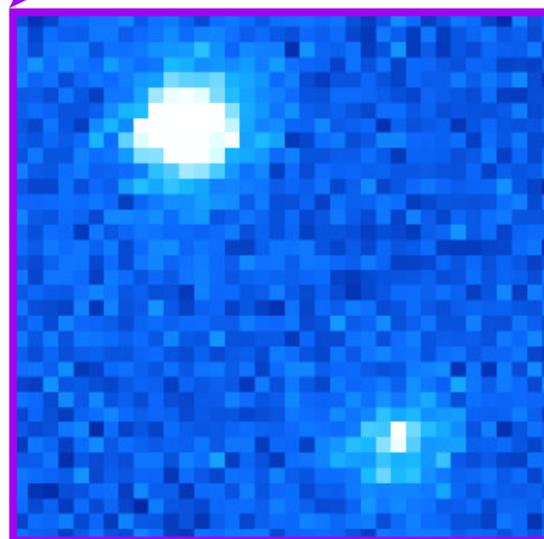
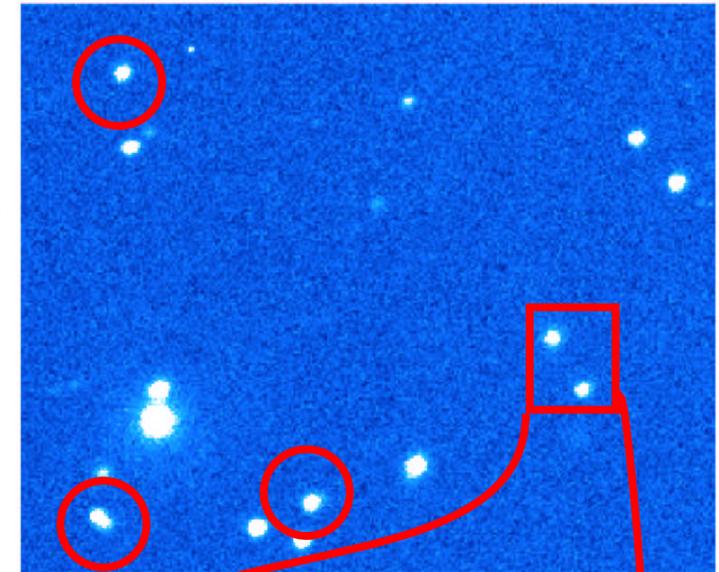
→ Des supernovæ sont simulées sur les images de recherche, dans les galaxies

- SN simulée = étoile brillante de la même image, déplacée et réajustée en flux
- Distribution des SNe sur la galaxie selon la brillance de surface

Avant



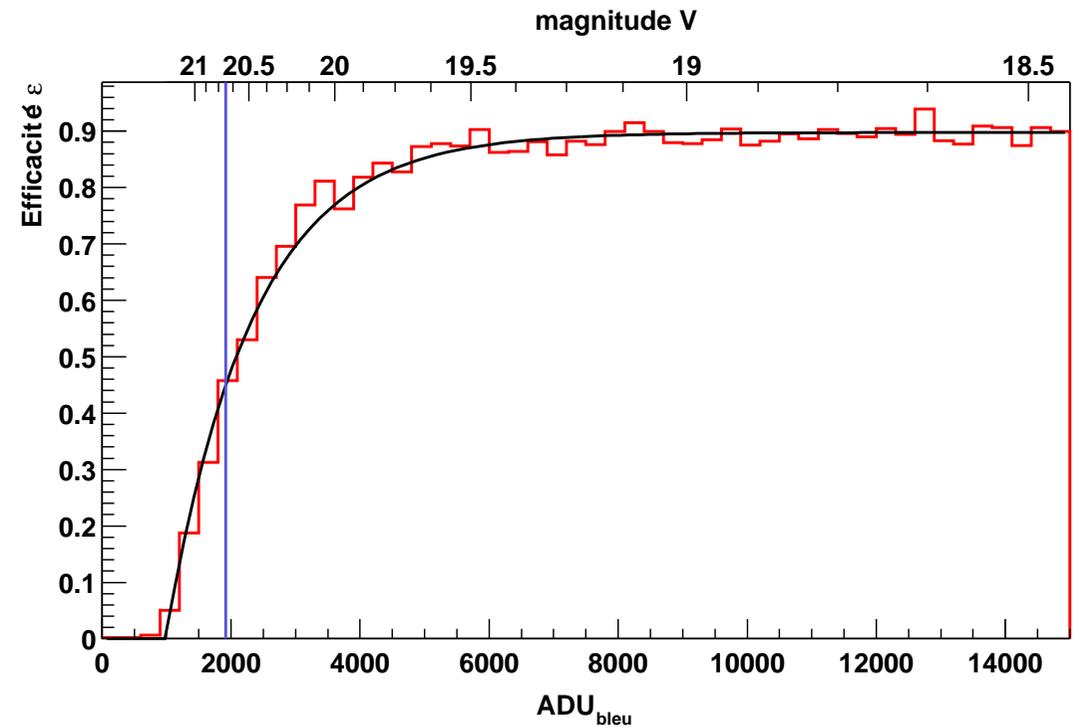
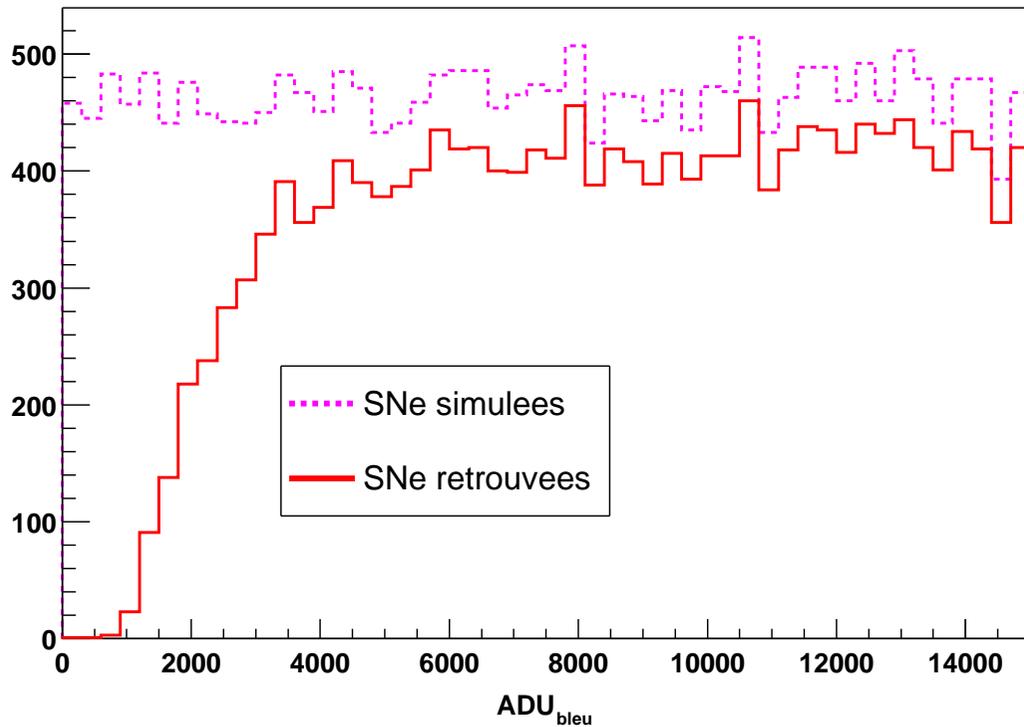
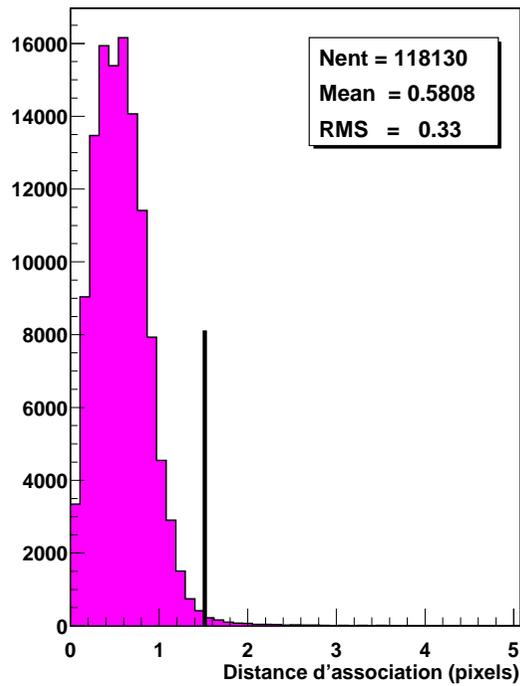
Après



# L'efficacité

SN retrouvée si  
distance (retrouvée - simulée) < 1.5 pixels

SNe retrouvées / SNe simulées



# Les différentes étapes

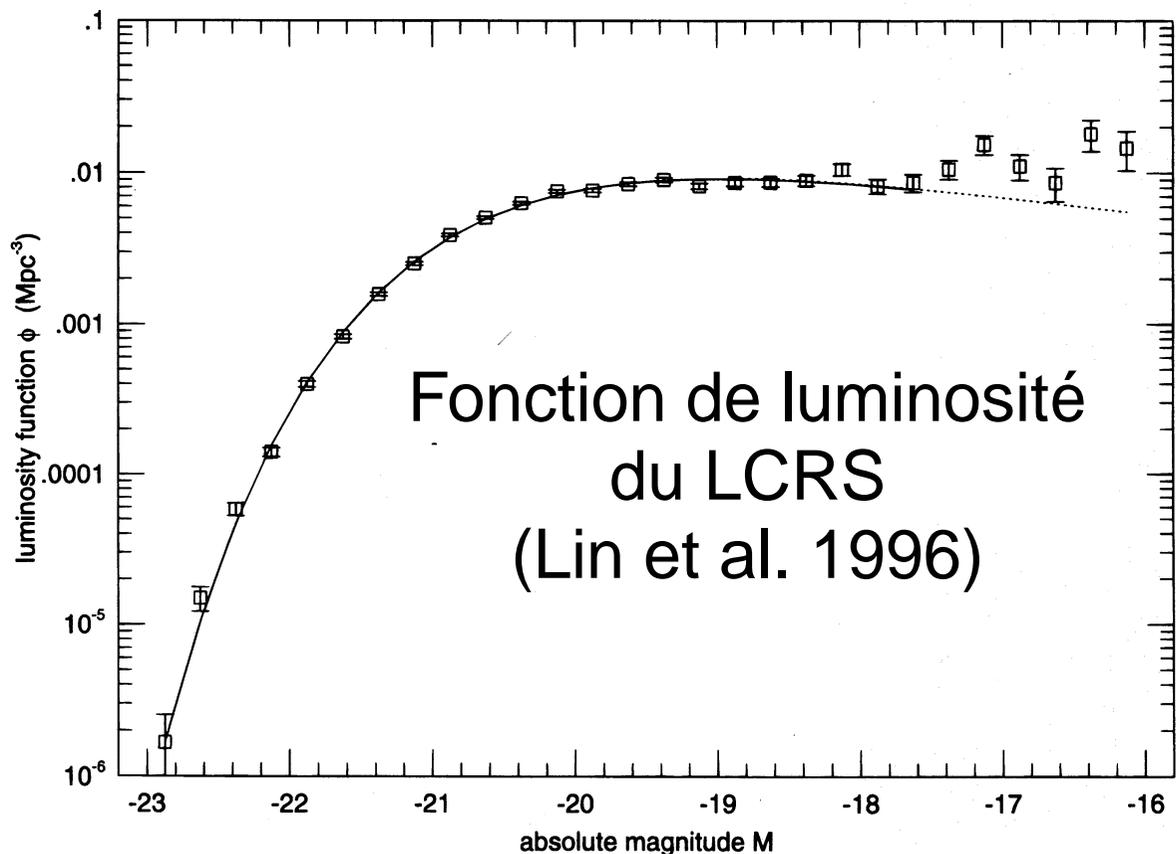
- Déterminer la population des galaxies sur les images
- Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
= simuler des supernovæ dans les galaxies
- **Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$**   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :
  - ↳ la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )
  - ↳ le décalage spectral
  - ↳ la phase de la supernova
- Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations
- En déduire le taux — quantifier les systématiques

# Le décalage spectral des galaxies

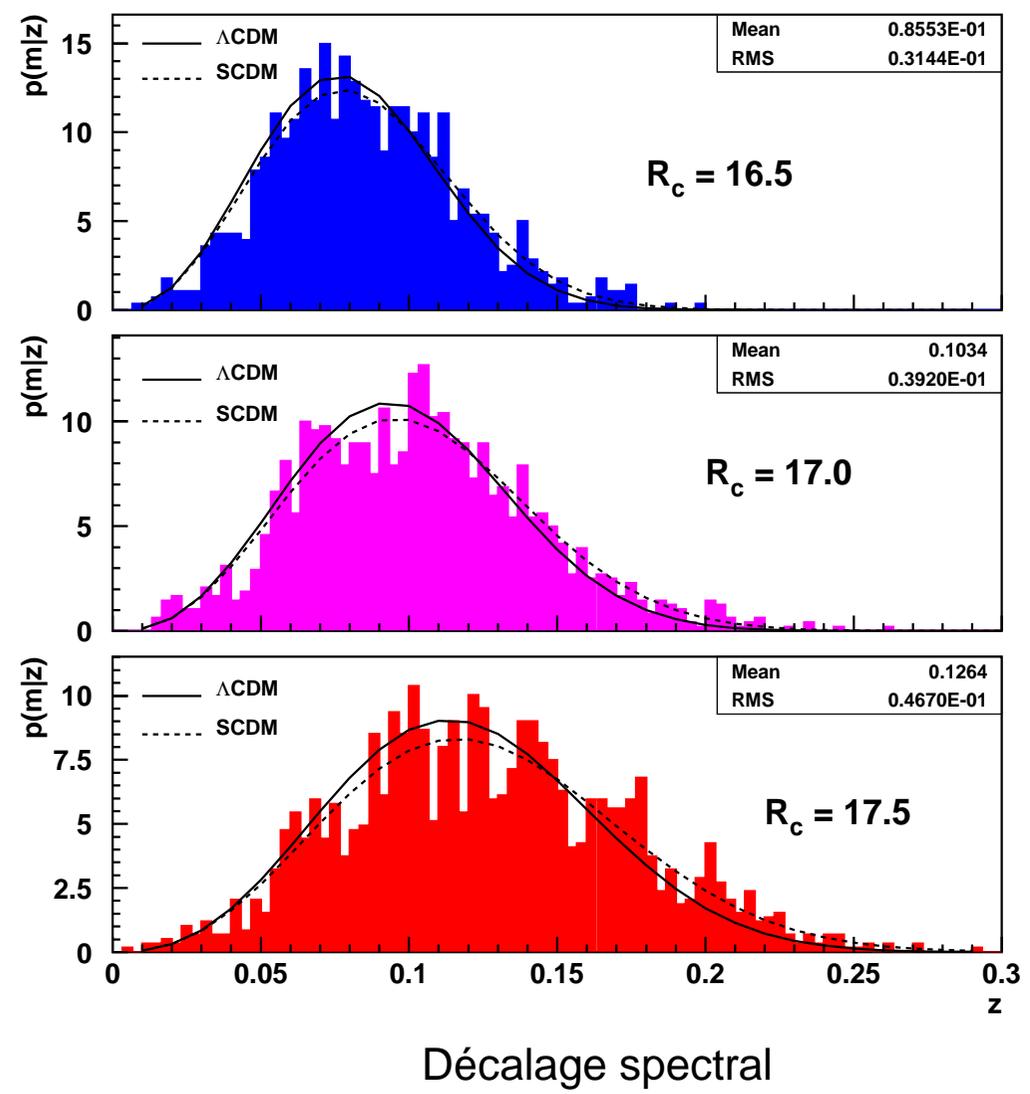
$$p(z|m_{\text{gal}}) \propto \frac{dV_c}{d\Omega dz} \cdot \frac{dN}{dM dV_c}$$

Élément de volume comobile

Fonction de Luminosité



$p(z|m_{\text{gal}})$  calculé vs LCRS  
(mag bin = 0.1)

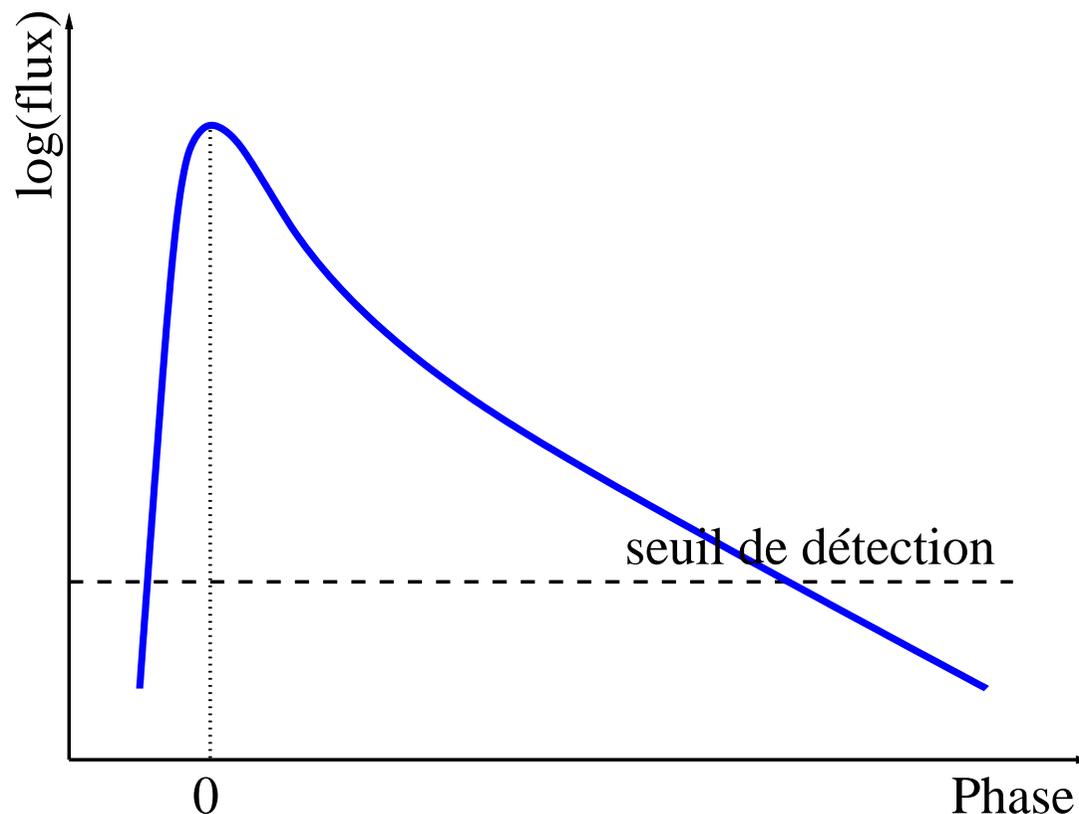


# Les différentes étapes

- Déterminer la population des galaxies sur les images
- Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
= simuler des supernovæ dans les galaxies
- Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- **Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :**
  - ↳ **la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )**
  - ↳ **le décalage spectral**
  - ↳ **la phase de la supernova**
- Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations
- En déduire le taux — quantifier les systématiques

# L'intégrale de l'efficacité « Le Temps de Contrôle »

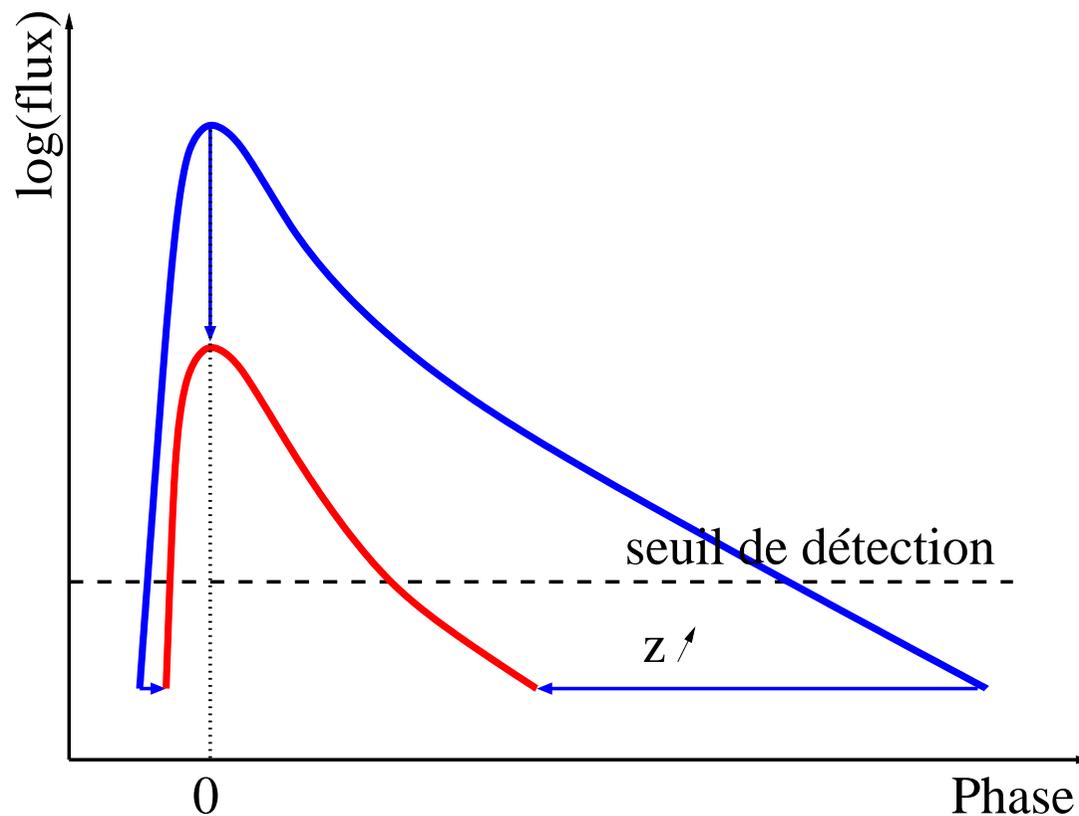
Calculée par une méthode de Monte-Carlo



Une courbe de lumière est tirée dans un lot de 17 publiées

# L'intégrale de l'efficacité « Le Temps de Contrôle »

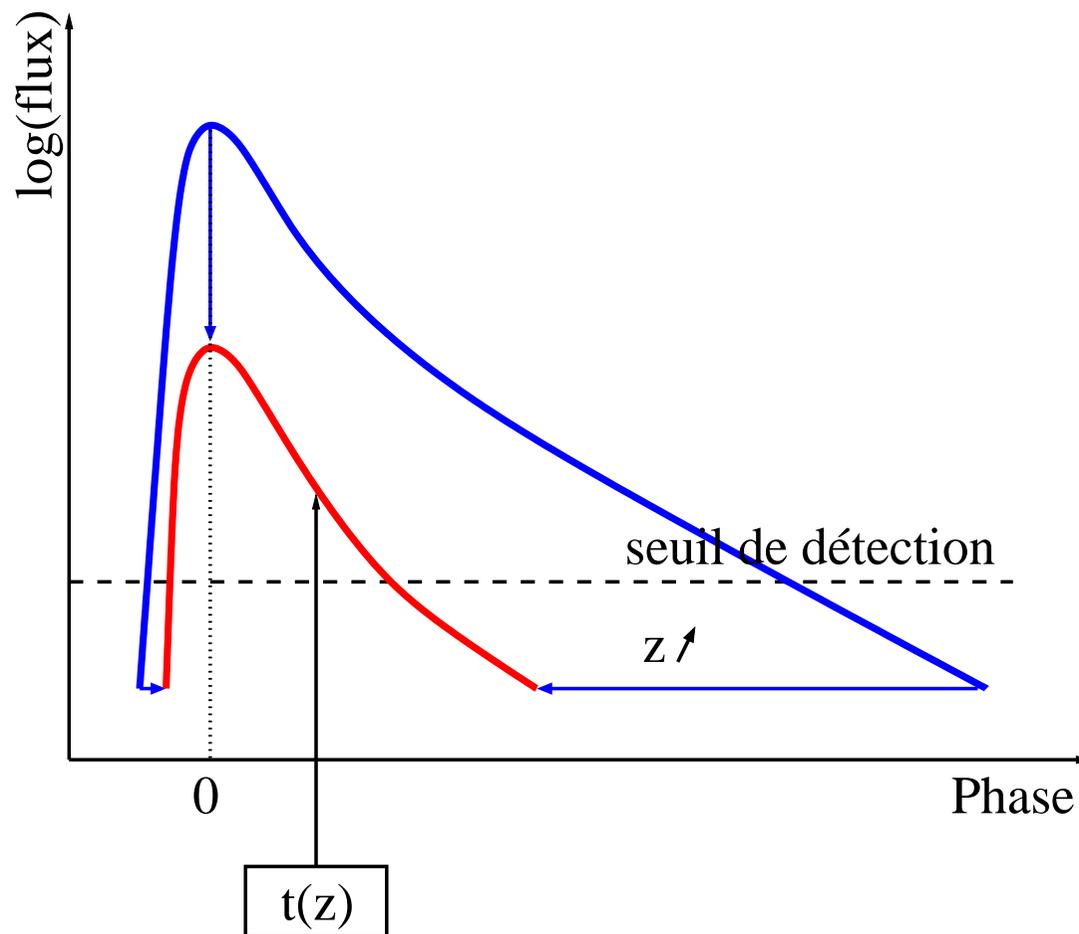
Calculée par une méthode de Monte-Carlo



On tire un «  $z$  »  
selon  $p(z|m_{\text{gal}})$

# L'intégrale de l'efficacité « Le Temps de Contrôle »

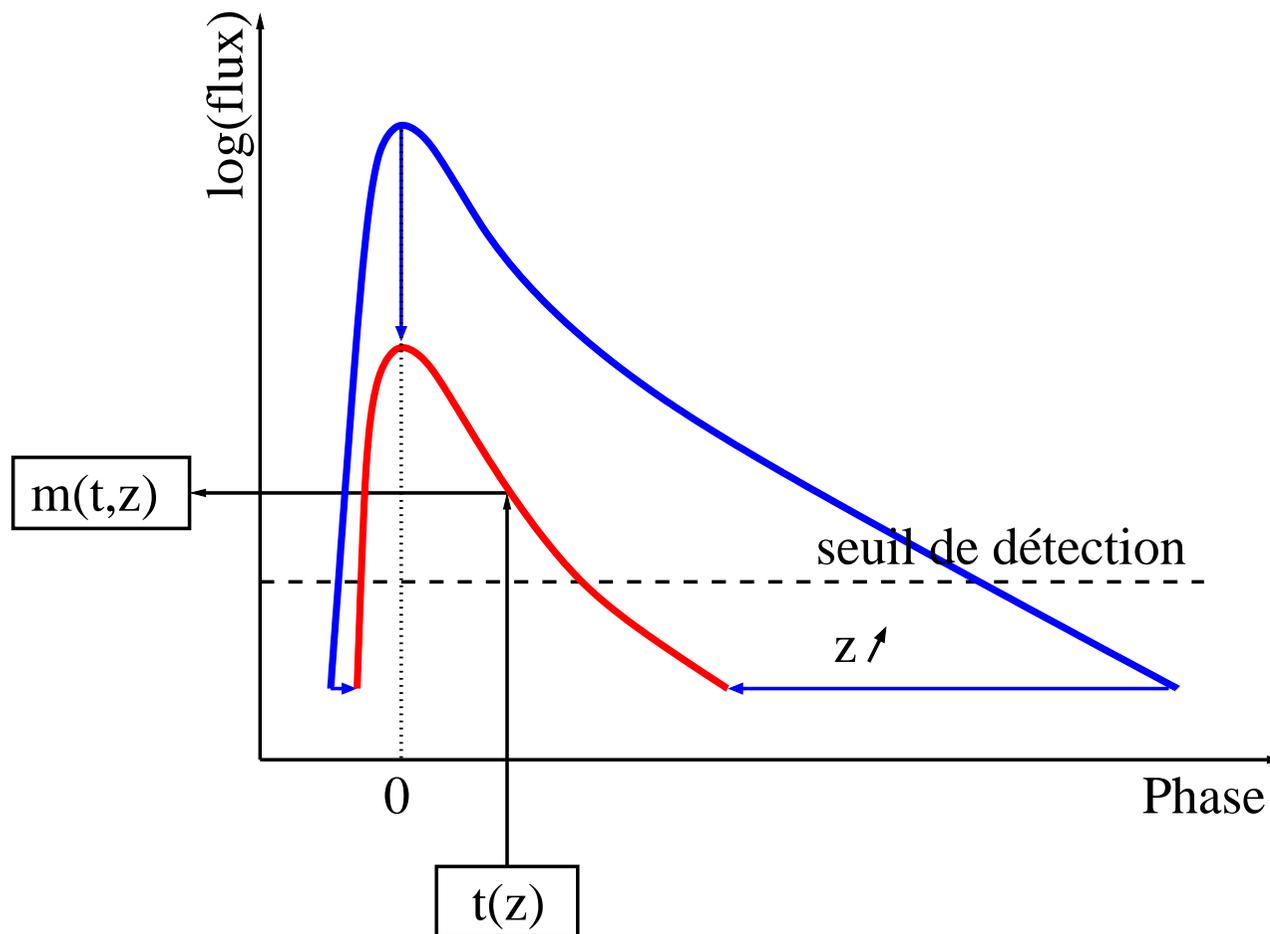
Calculée par une méthode de Monte-Carlo



On tire un instant de découverte

# L'intégrale de l'efficacité « Le Temps de Contrôle »

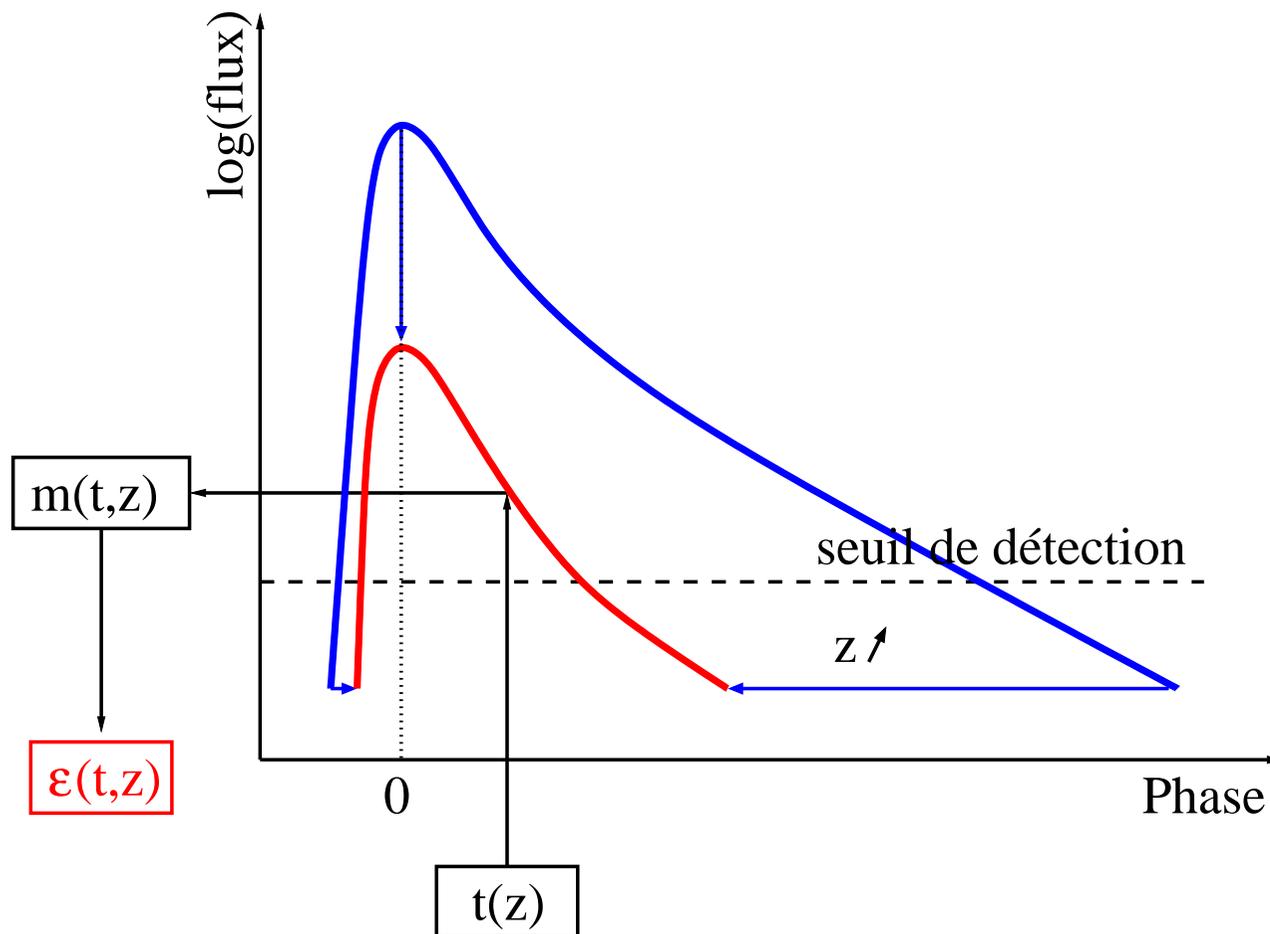
Calculée par une méthode de Monte-Carlo



Cela donne une  
magnitude

# L'intégrale de l'efficacité « Le Temps de Contrôle »

Calculée par une méthode de Monte-Carlo

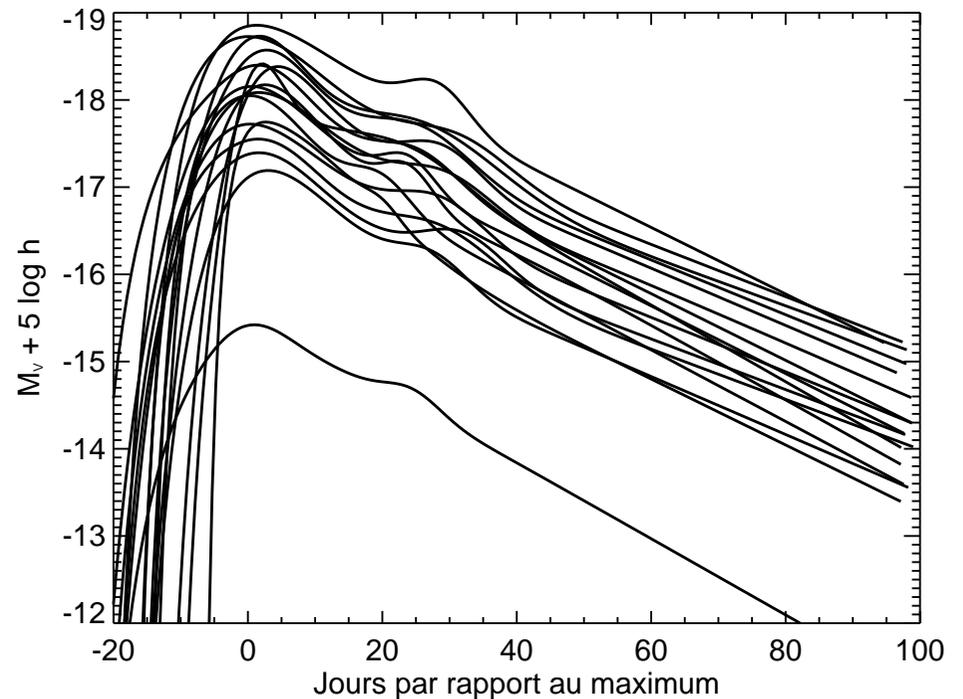
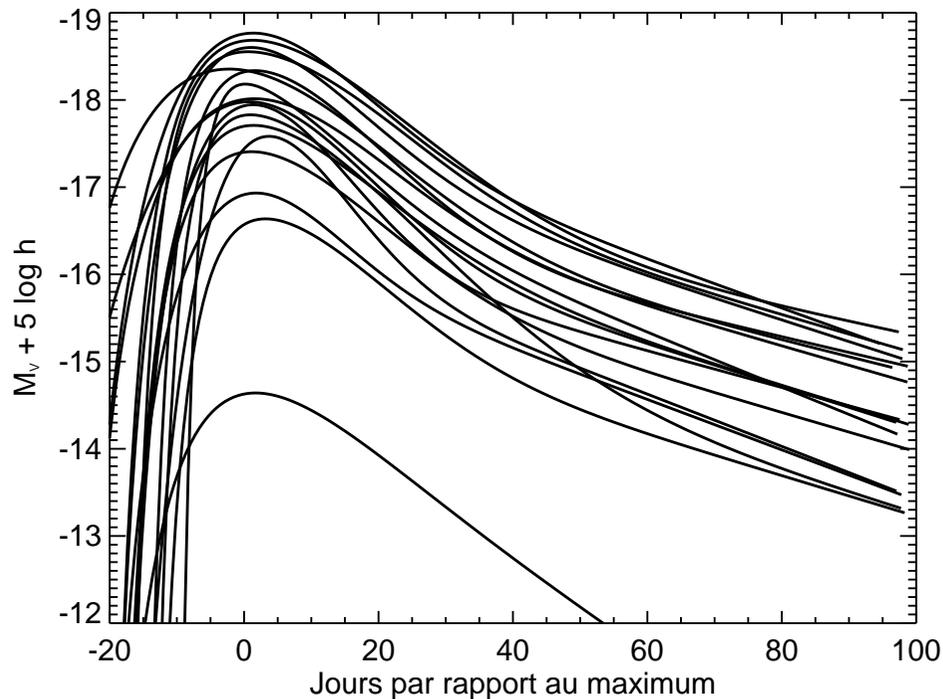


On va lire l'efficacité correspondante

# L'échantillon de courbes de lumières

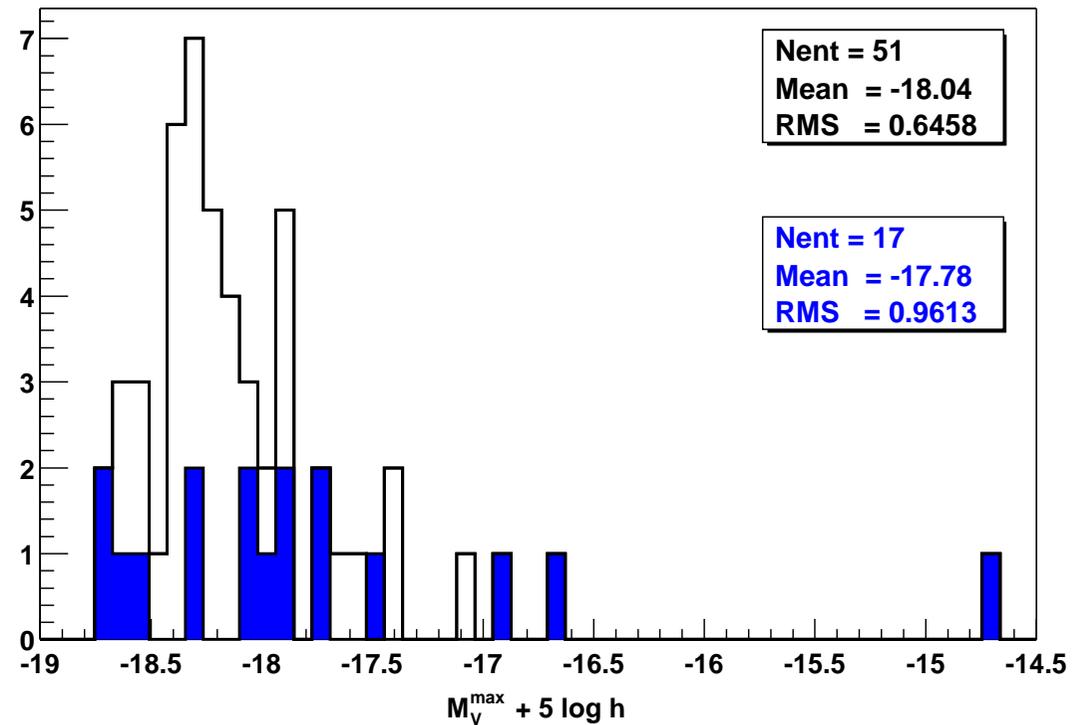
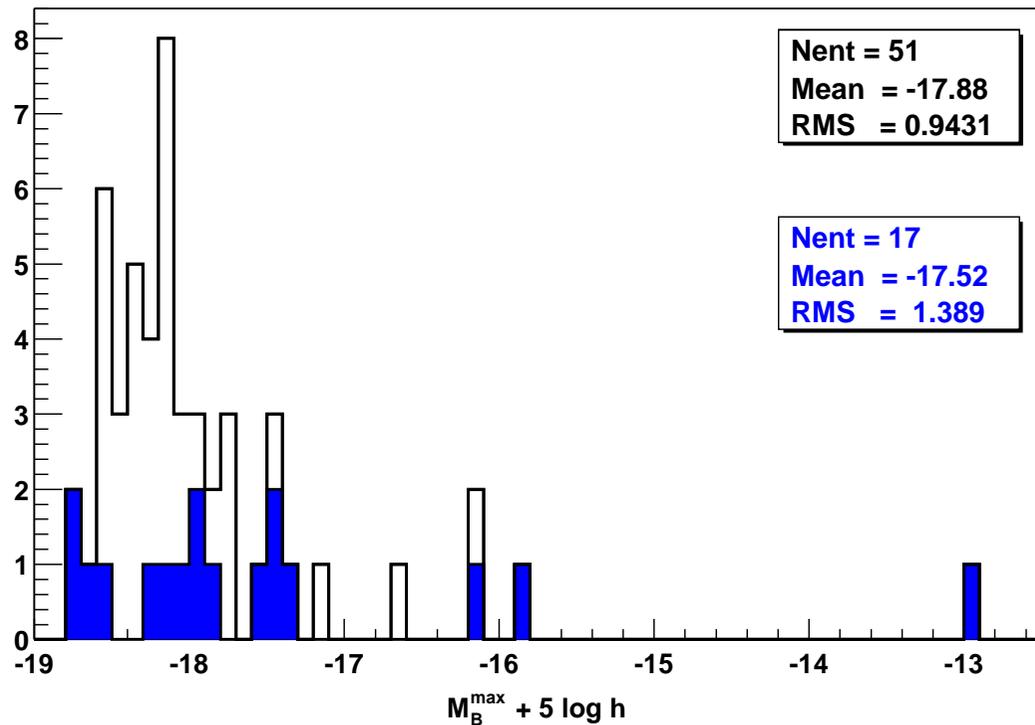
Parmi un ensemble de 51 courbes de lumière publiées (Hamuy et al. 1996, Riess et al. 1999), nous choisissons celles qui ont le meilleur échantillonnage dans les bandes  $V$  et  $R$ .

- 17 supernovæ répondent à ce critère
- ajustées avec un patron analytique (Contardo et al. 2000)



# La fonction de luminosité des SNe Ia :

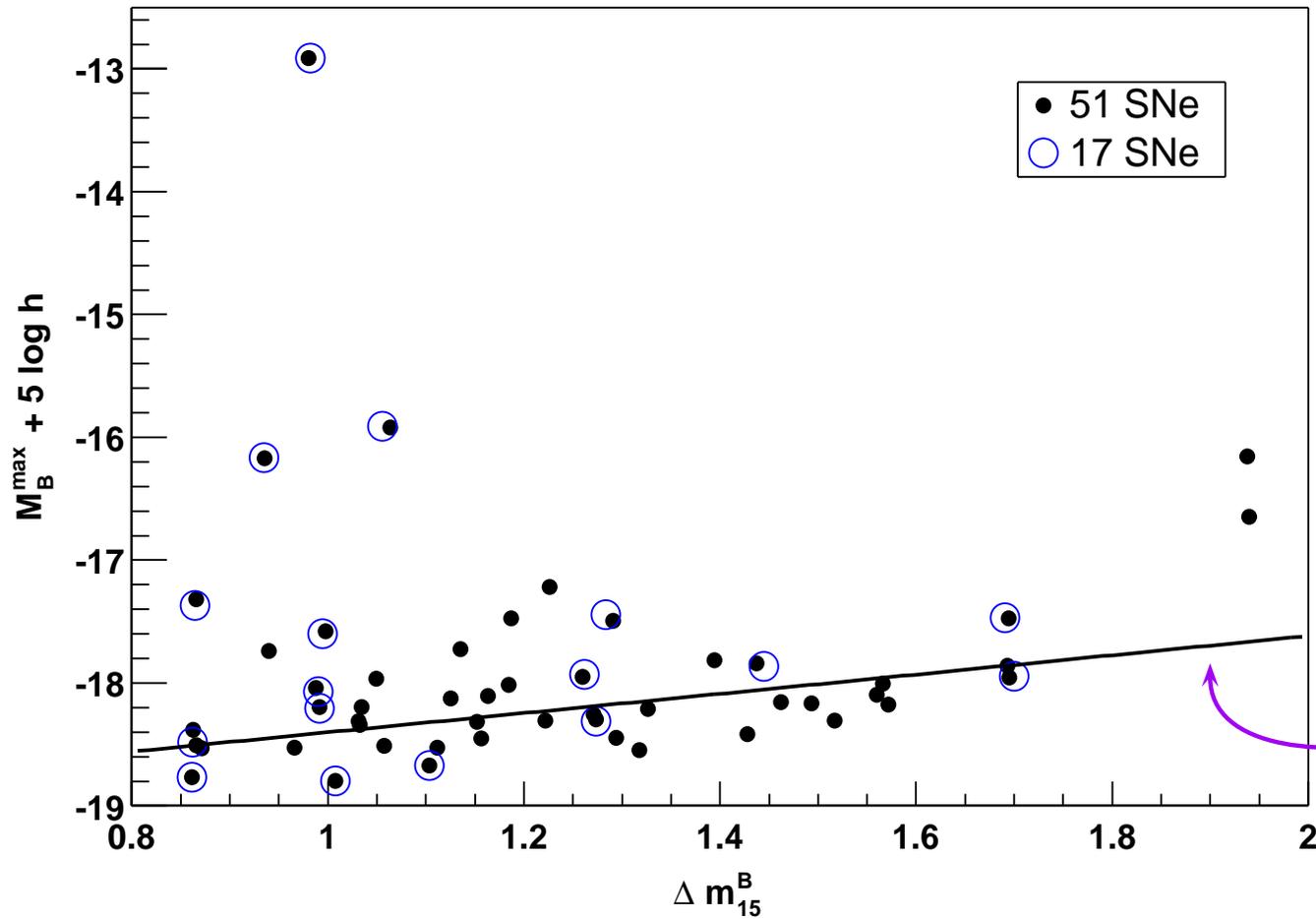
## La magnitude absolue au maximum



- Ce qui est important : la valeur moyenne
- Notre distribution est biaisée vers les faibles luminosités (écart de 0.26 mag)

# La fonction de luminosité des SNe Ia :

## La relation de Phillips



# Des magnitudes aux ADU

Supernovæ : *de la courbe de lumière aux ADU...*

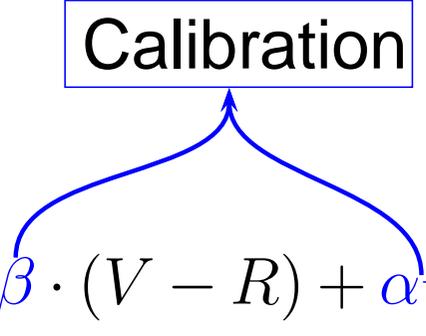
$$-2.5 \cdot \log \left( \frac{\text{ADU}}{\text{Tpose}} \right) = V + \beta \cdot (V - R) + \alpha_V$$

# Des magnitudes aux ADU

Supernovæ : *de la courbe de lumière aux ADU...*

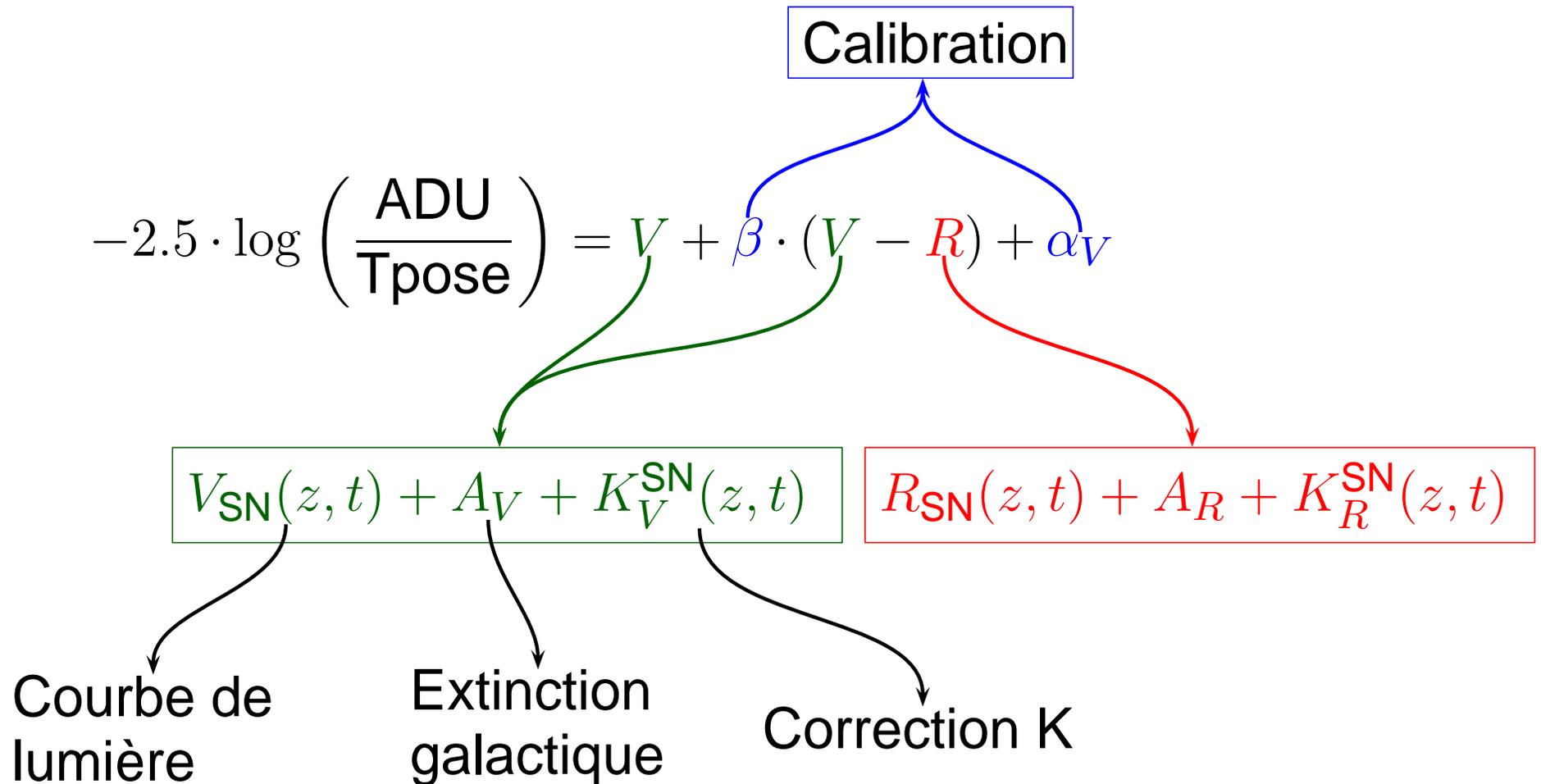
$$-2.5 \cdot \log \left( \frac{\text{ADU}}{\text{Tpose}} \right) = V + \beta \cdot (V - R) + \alpha_V$$

Calibration



# Des magnitudes aux ADU

Supernovæ : *de la courbe de lumière aux ADU...*



# La calibration

→ passer des unités logiques des images en magnitudes standards

$$-2.5 \cdot \log \frac{ADU}{T_{pose}} = V + \beta \cdot (V - R) + \alpha$$

- Intercalibration des CCD

- fond de ciel,
- DENIS,
- USNO

- Terme de couleur ( $\beta$ )

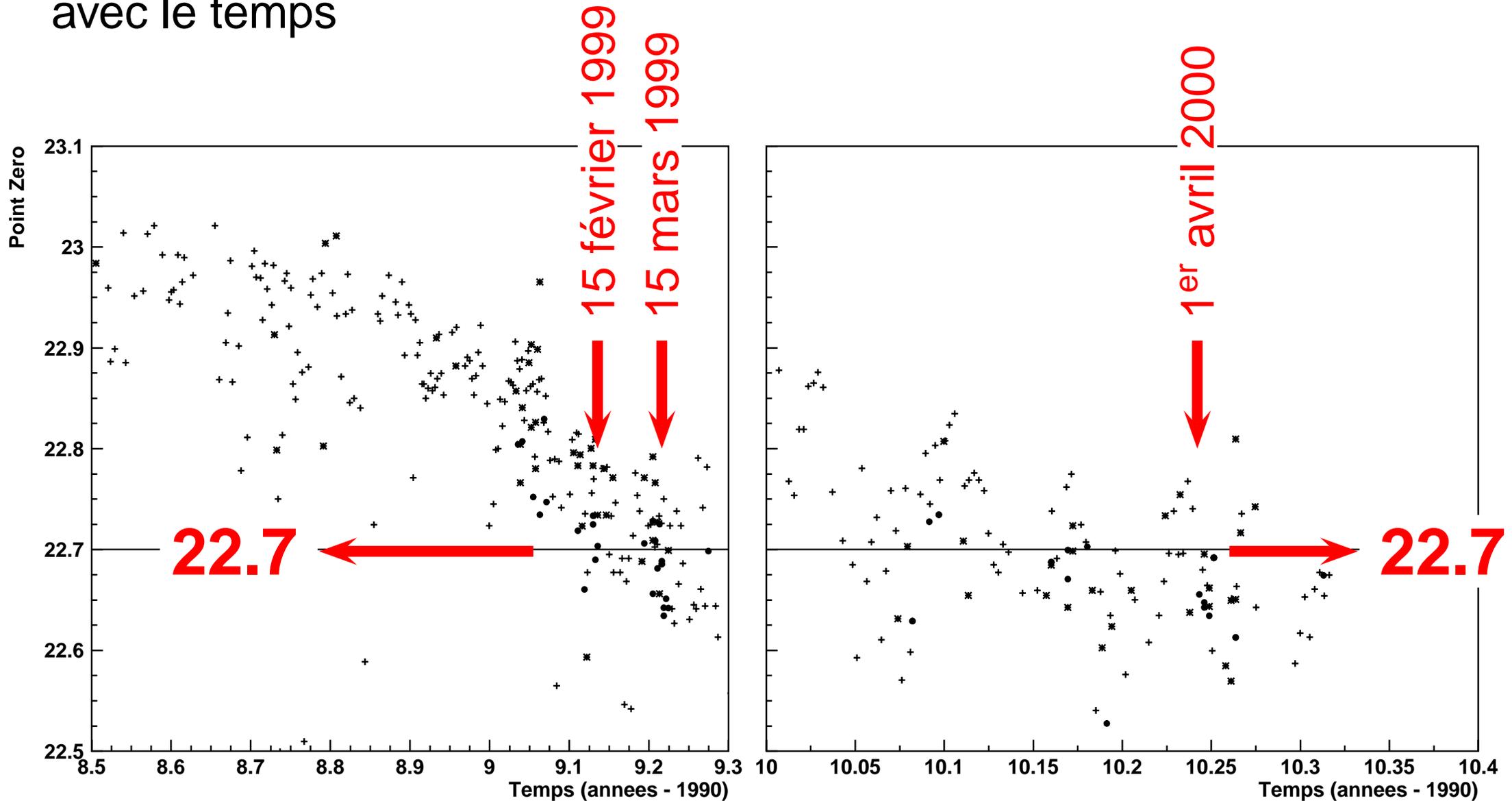
- OGLE,
- Landolt

- Point Zéro ( $\alpha$ )

- Landolt,
- étoiles secondaires  
SCP 1999

# Une calibration globale

Évolution du point zéro  
avec le temps

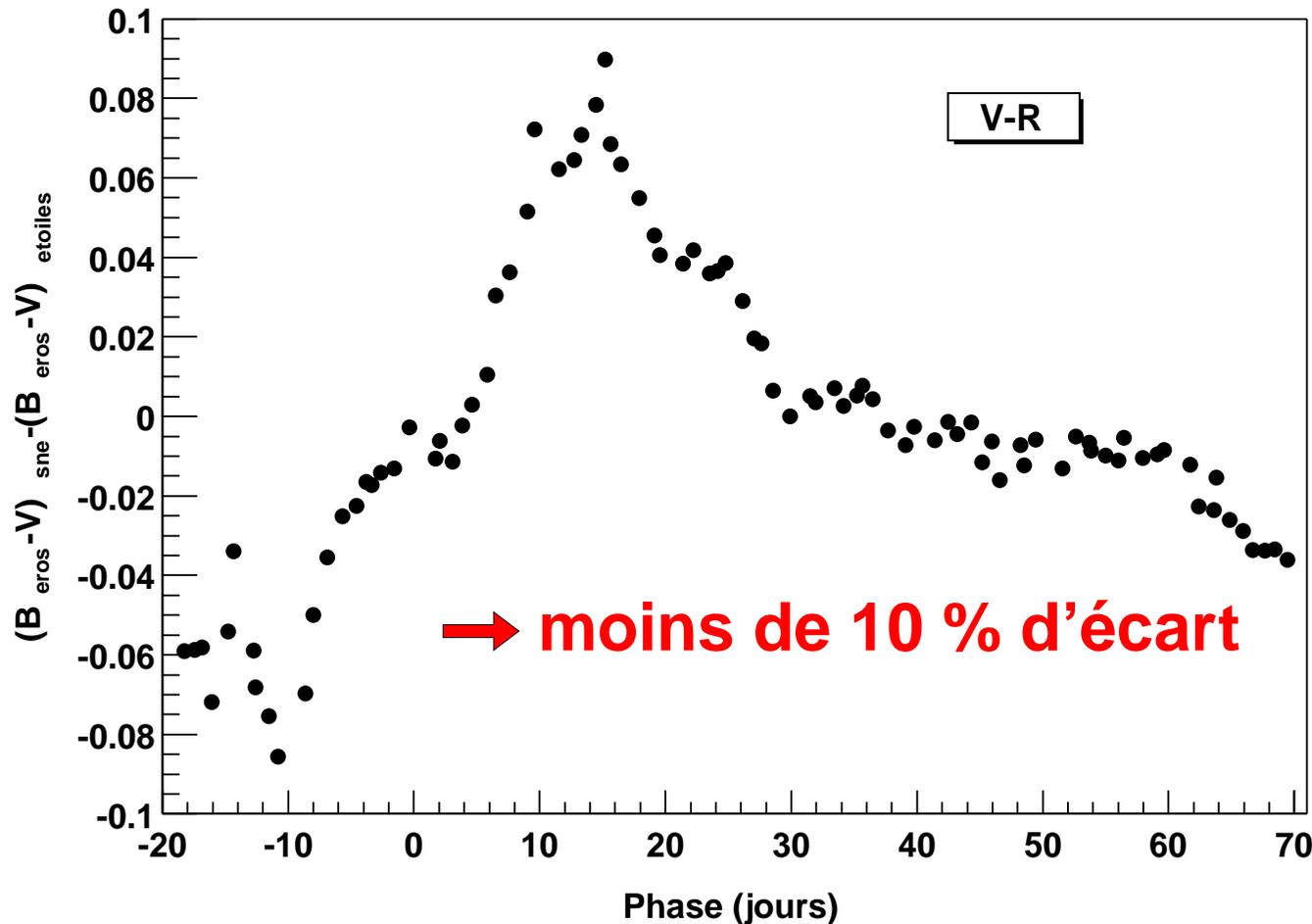


# Supernovæ et étoiles

*Peut-on calibrer des supernovæ avec des étoiles ?*

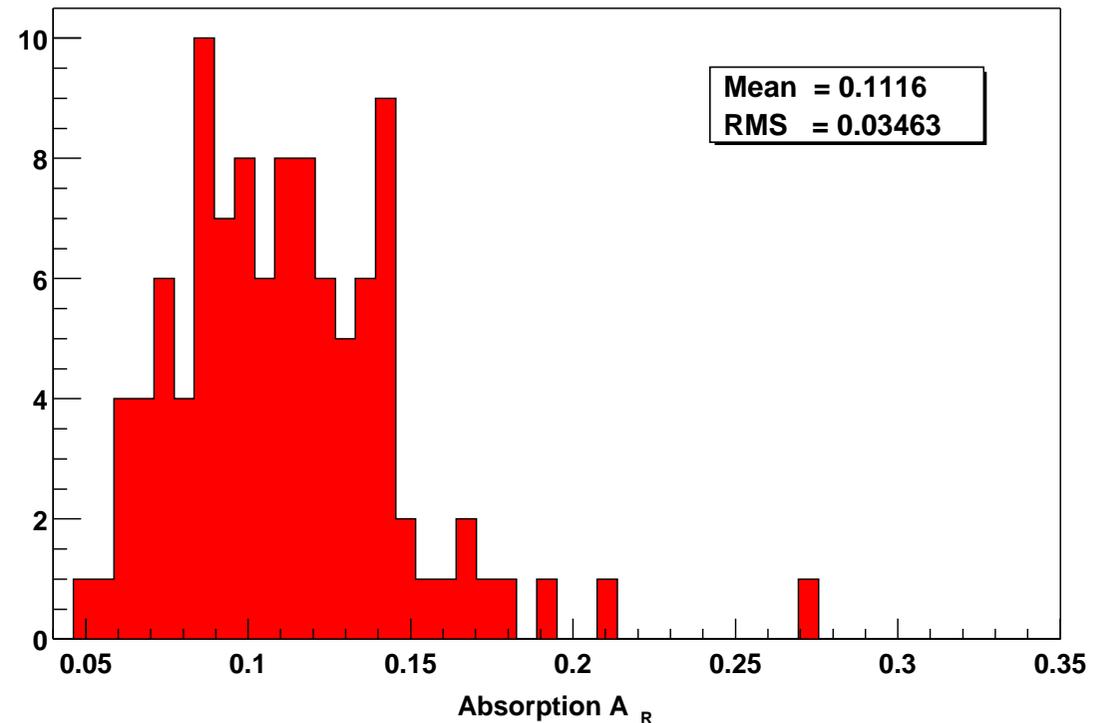
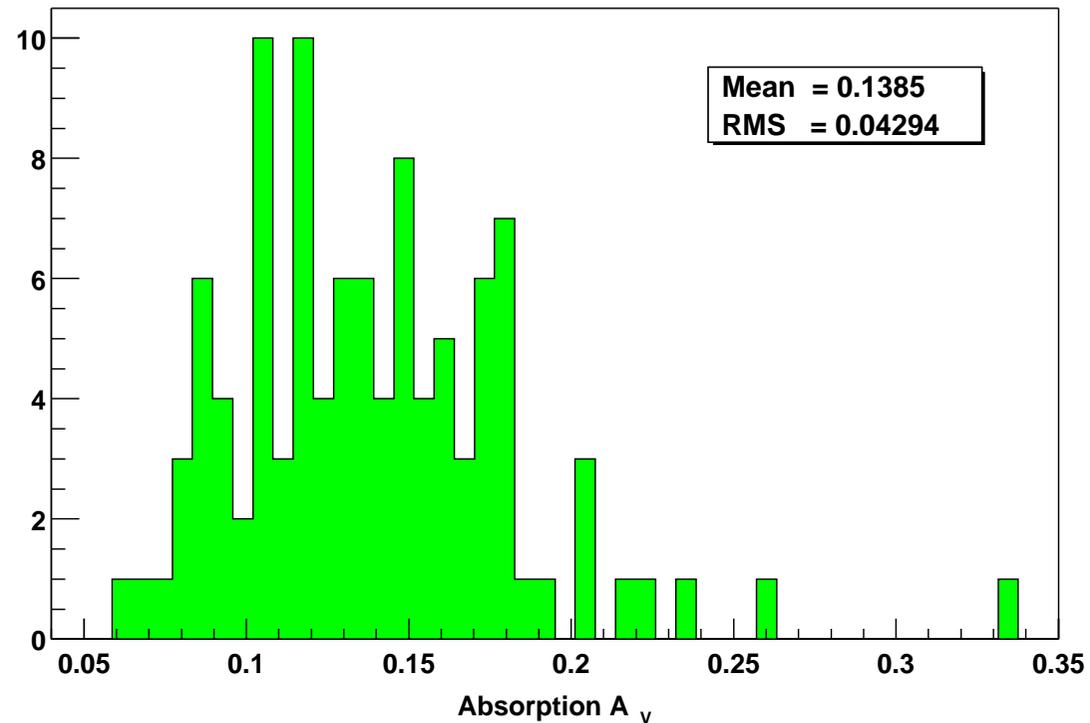
Étude à l'aide de patrons spectraux : pour des étoiles telles que  $(V - R)_{\star} = (V - R)_{\text{SN}}$ , on trace  $(\mathcal{B}_{\text{eros}} - V)_{\text{SN}} - (\mathcal{B}_{\text{eros}} - V)_{\star}$  :

écart à la calibration stellaire  
(magnitudes)



# L'extinction galactique

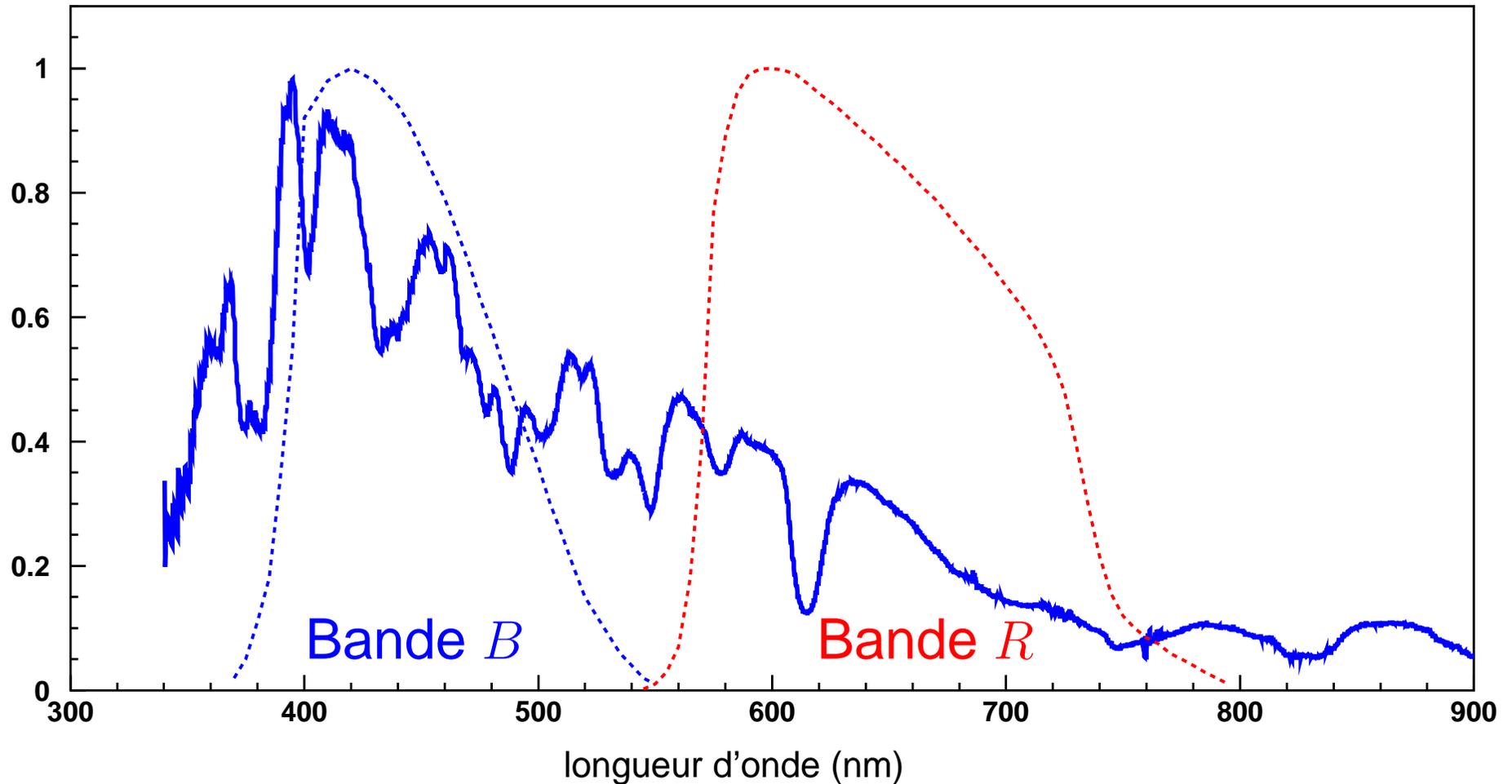
→ Déterminée champ par champ à l'aide des cartes de Schlegel et al. 1998



→  $\sim 0.12$  mag d'absorption

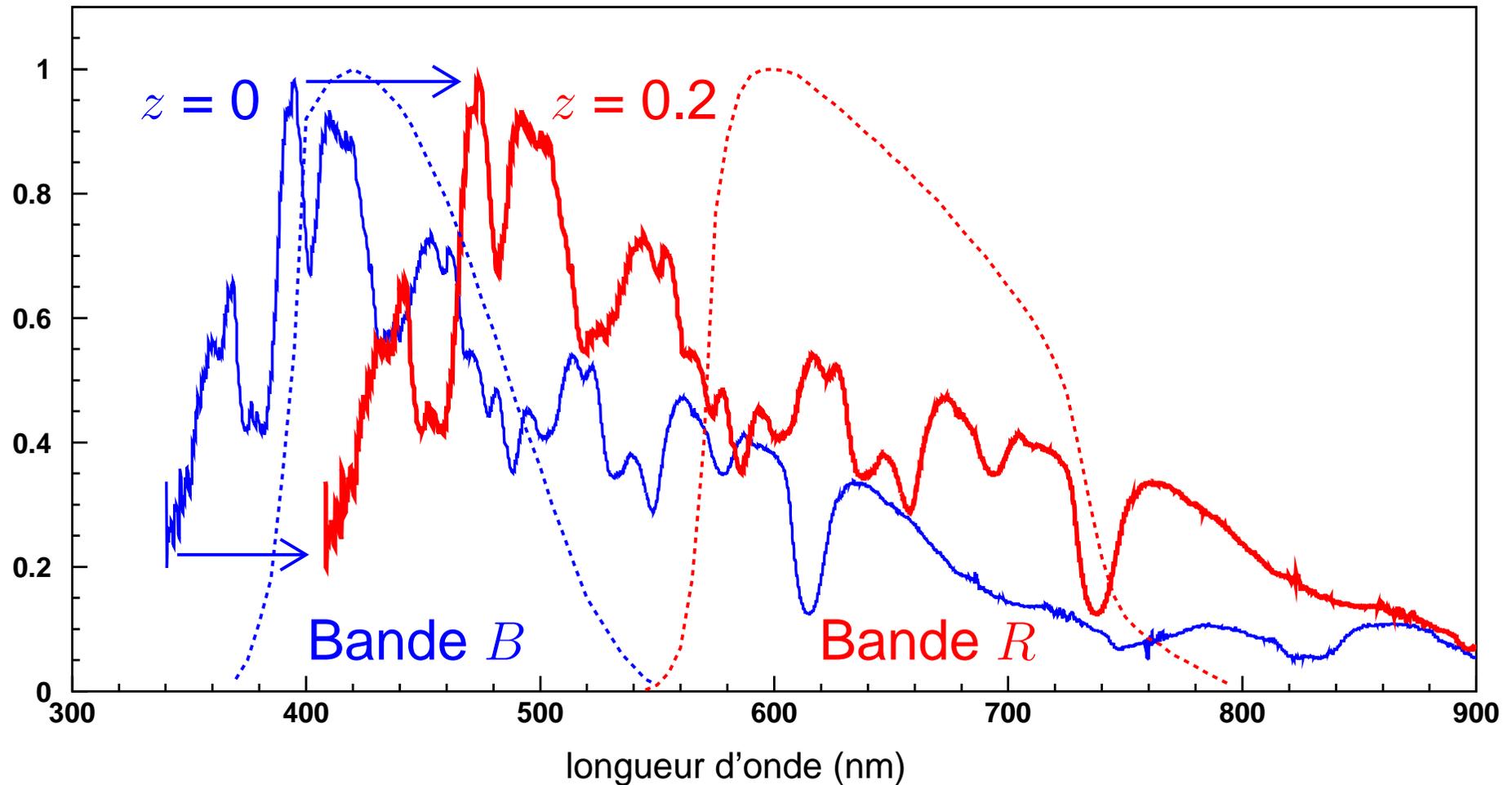
# La correction K

Le flux observé à travers une bande spectrale fixe varie en fonction du décalage spectral

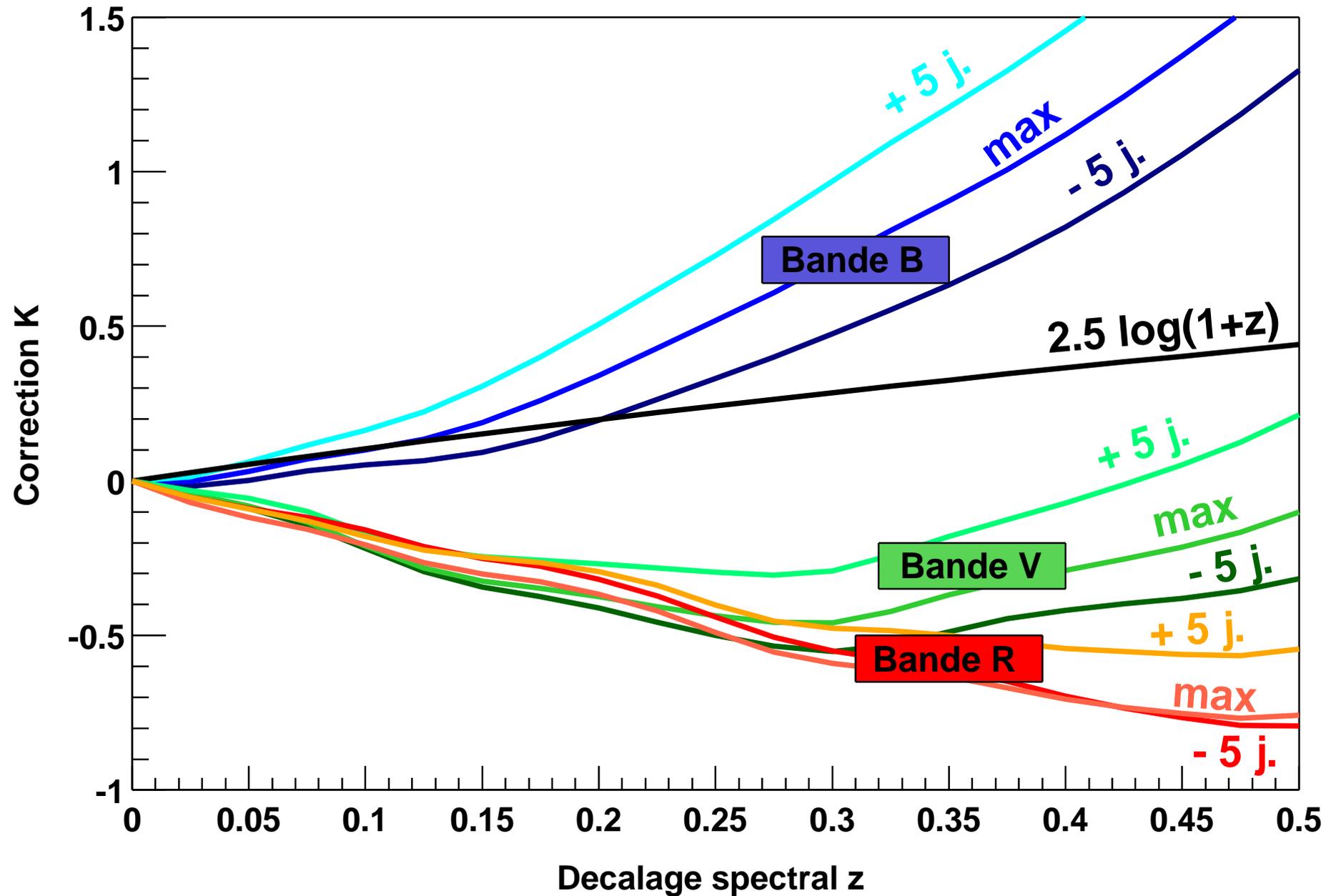


# La correction K

Le flux observé à travers une bande spectrale fixe varie en fonction du décalage spectral



# Corrections K pour les supernovæ

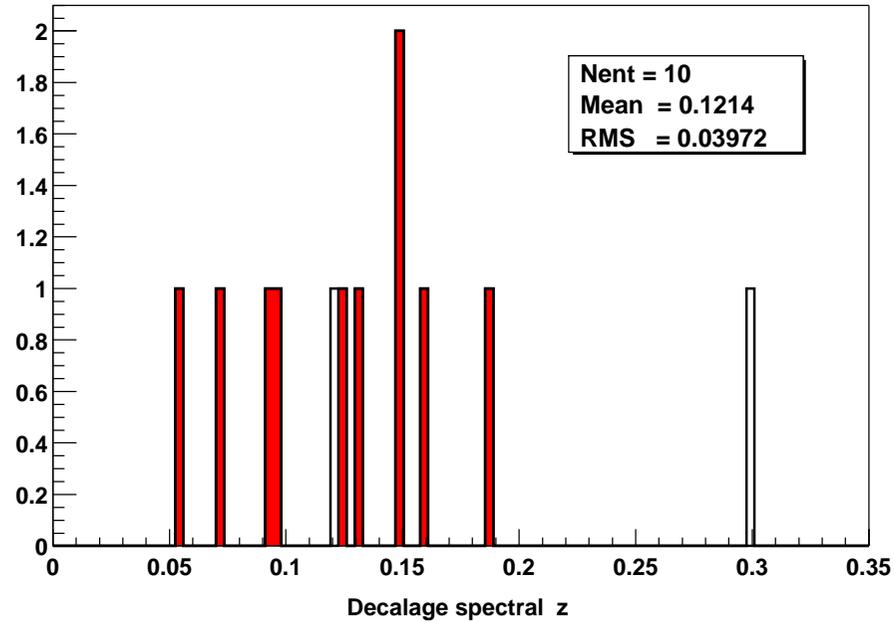


# Les différentes étapes

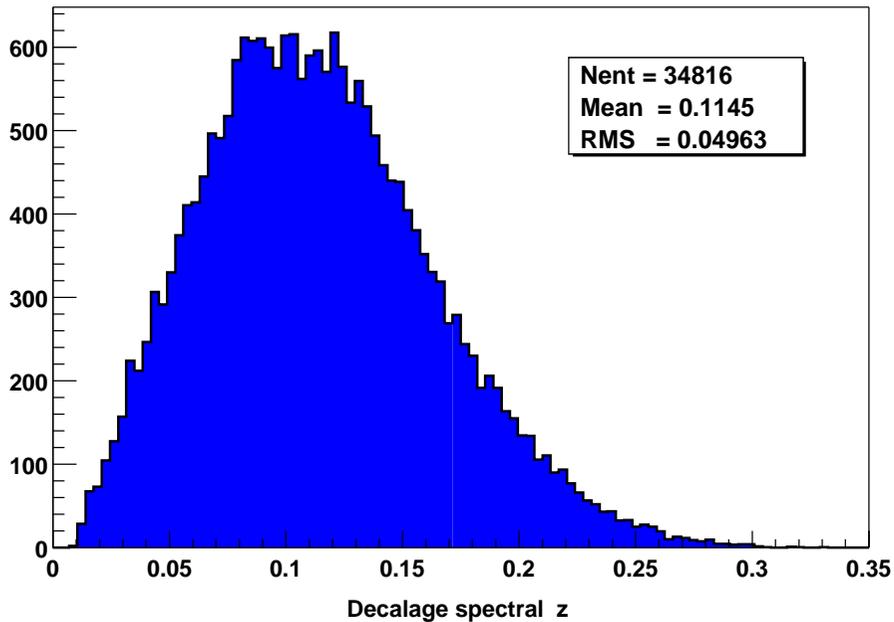
- Déterminer la population des galaxies sur les images
- Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
= simuler des supernovæ dans les galaxies
- Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :
  - ↳ la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )
  - ↳ le décalage spectral
  - ↳ la phase de la supernova
- **Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations**
- En déduire le taux — quantifier les systématiques

# Distribution en $z$ (1999)

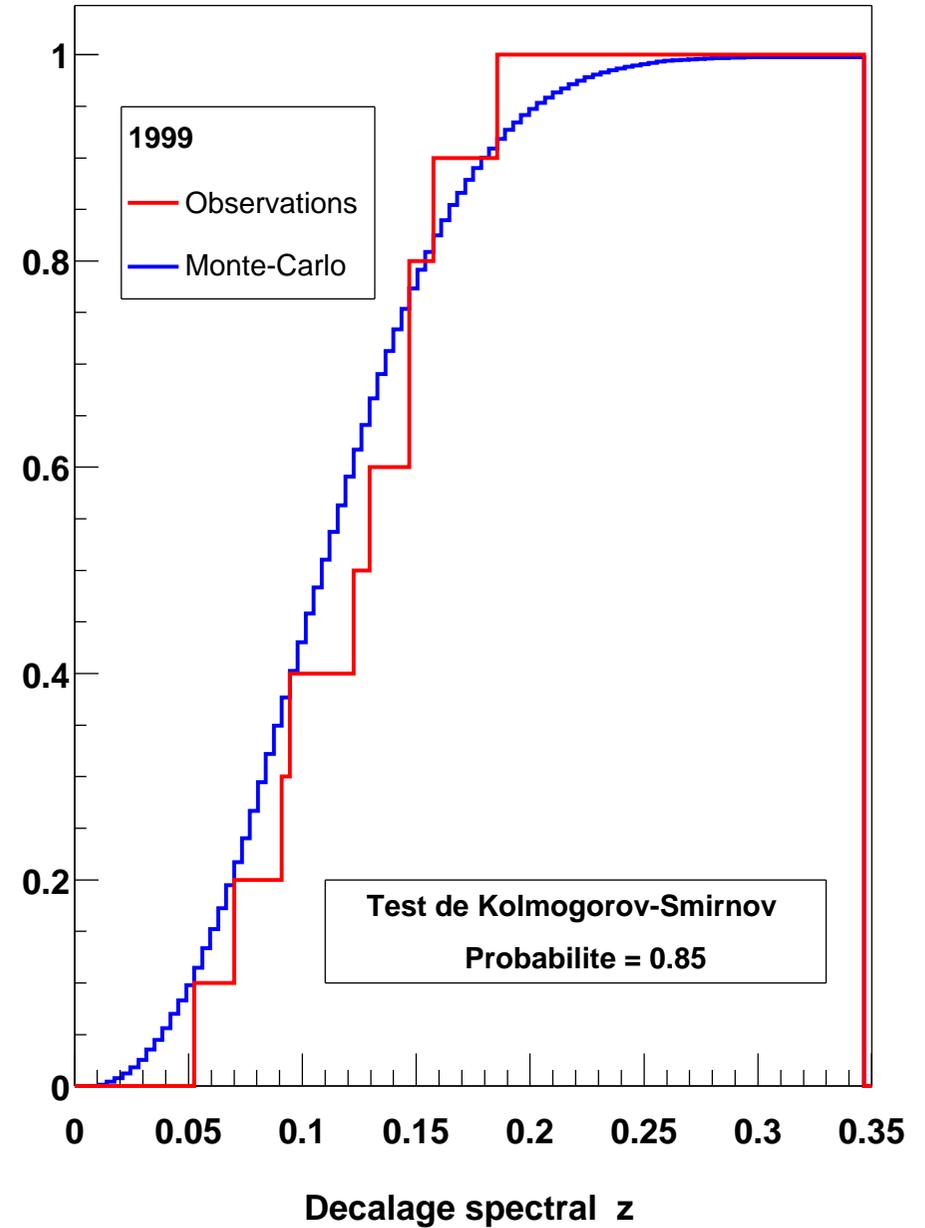
Observée



Simulée

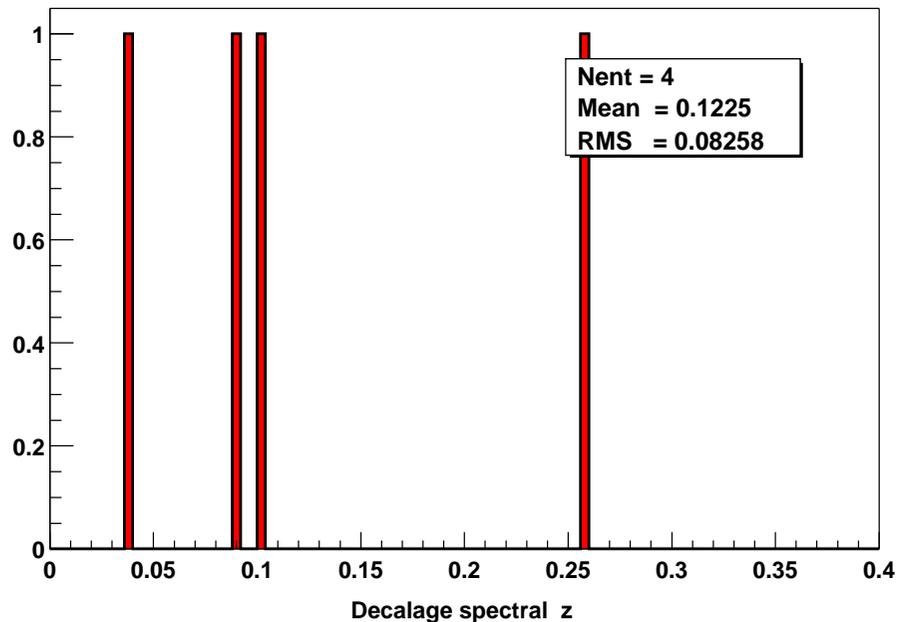


Cumulées

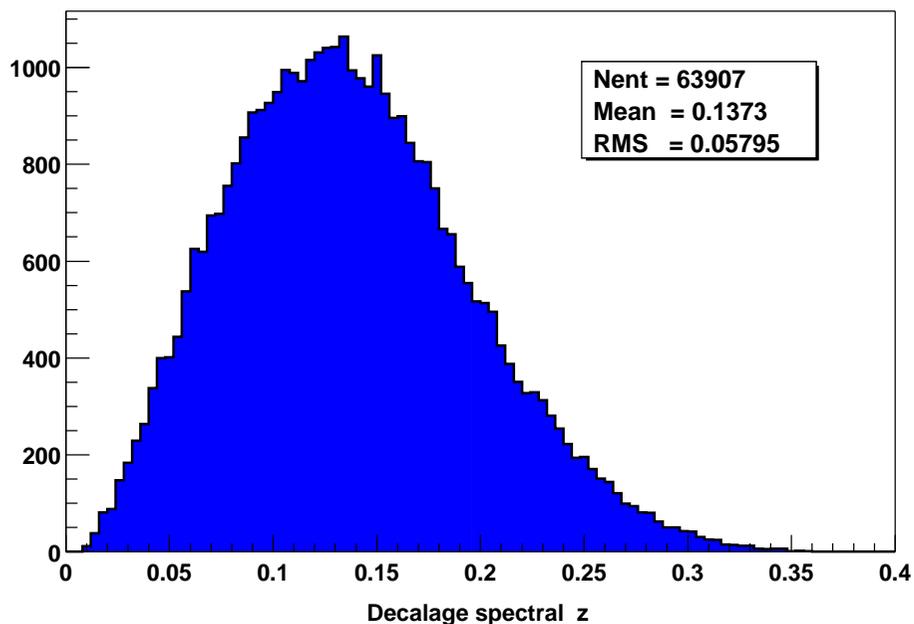


# Distribution en $z$ (2000)

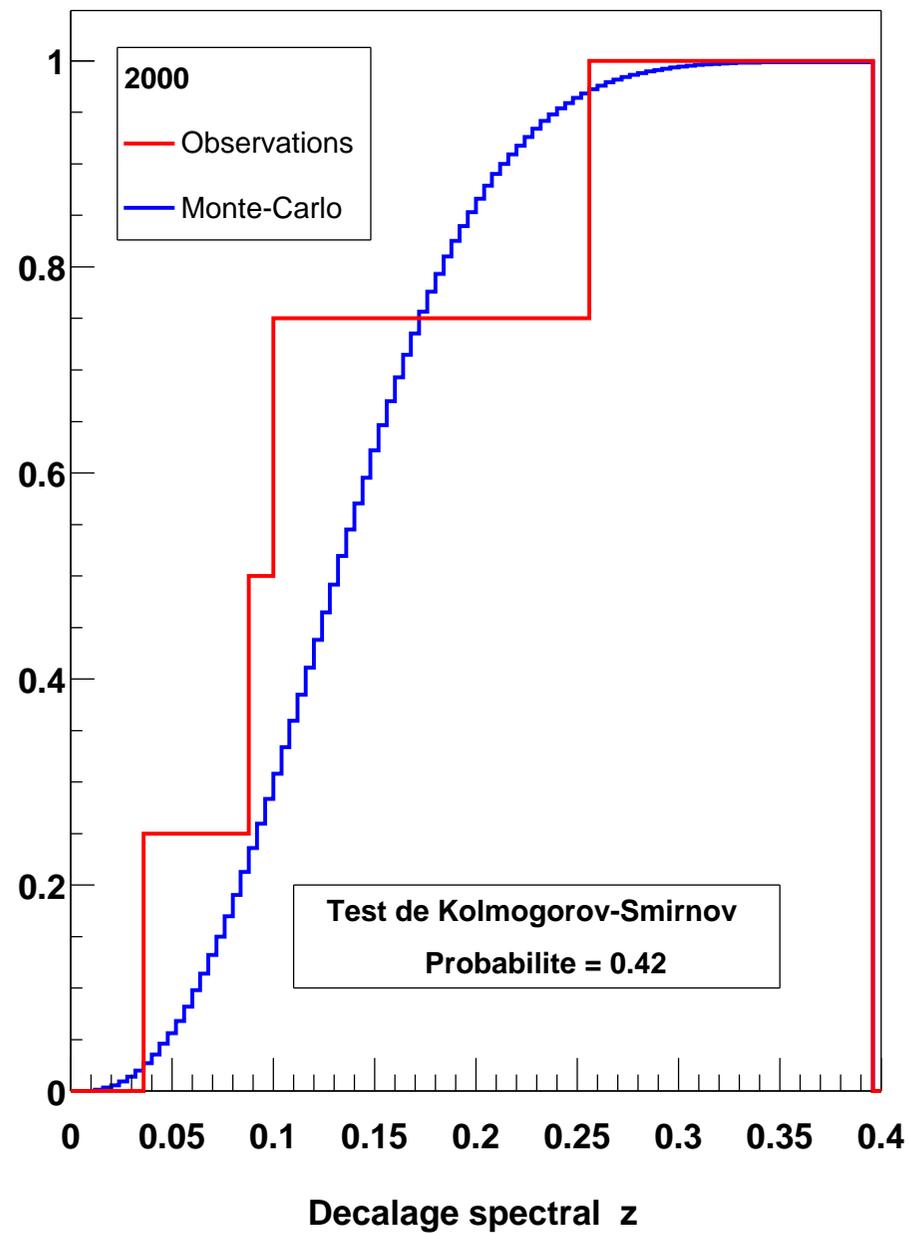
Observée



Simulée

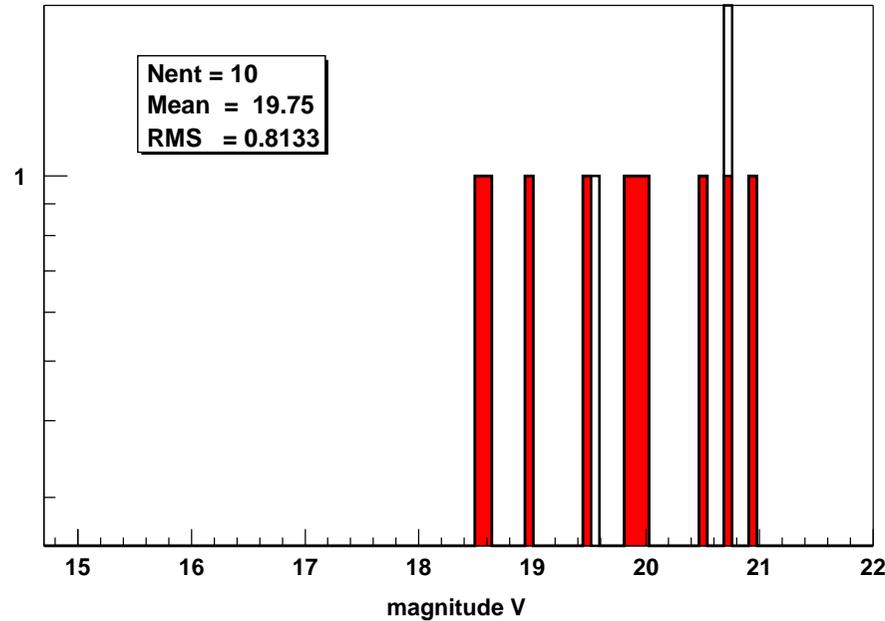


Cumulées

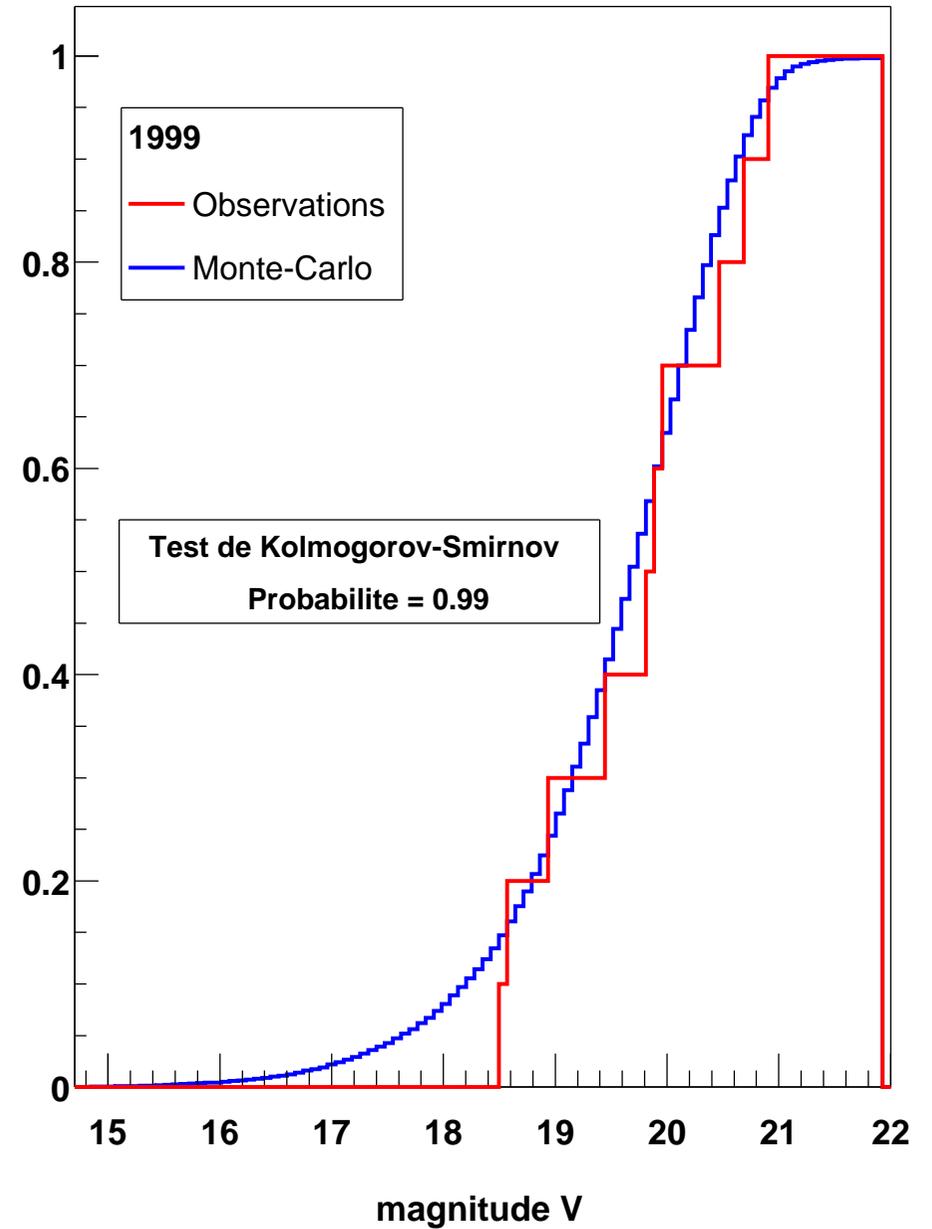
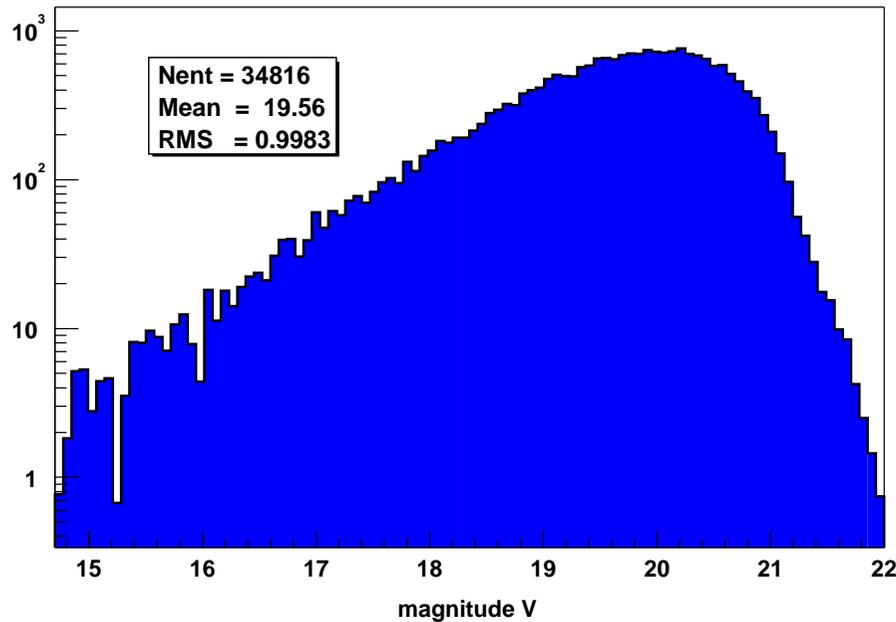


# Distribution en magnitude (1999)

Observée

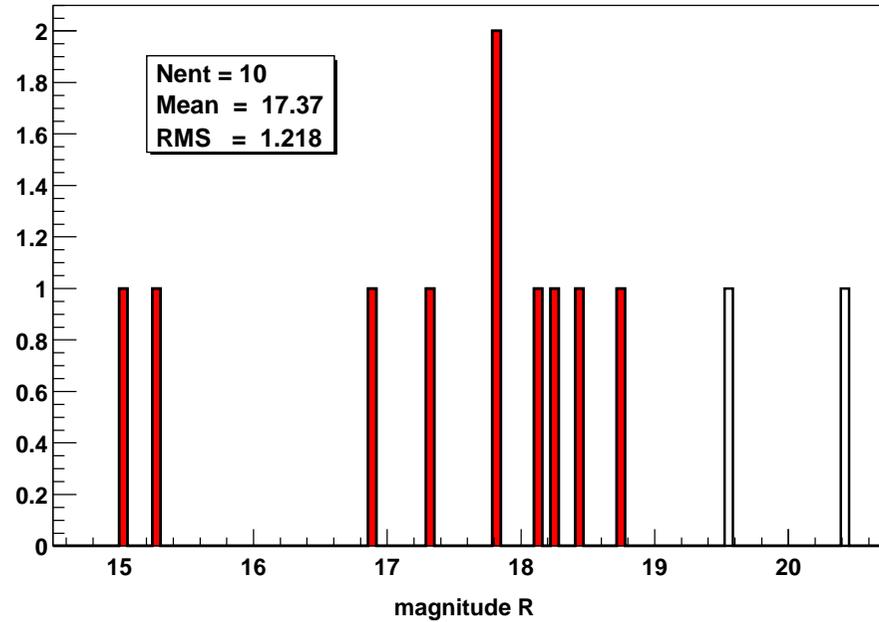


Simulée

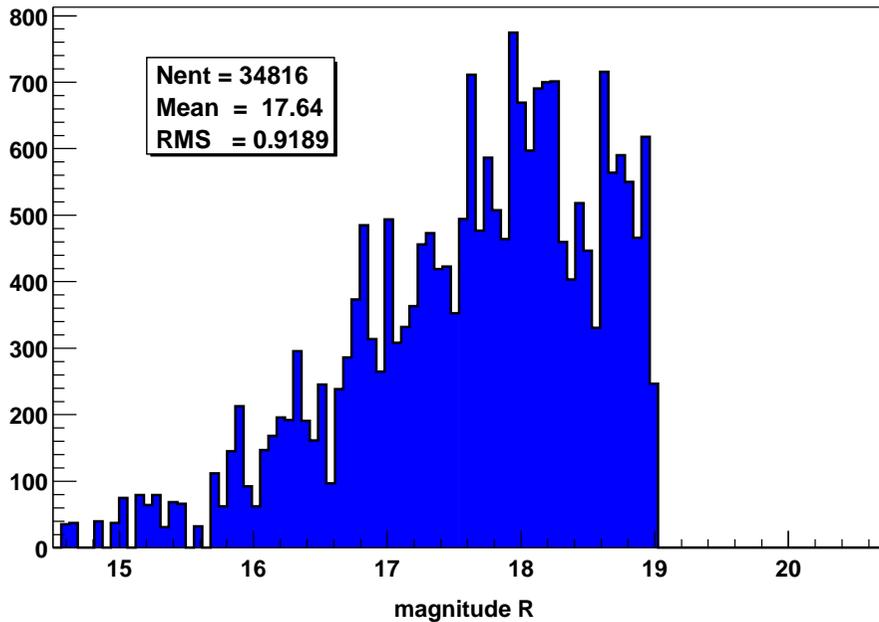


# Distribution en magnitude de l'hôte (1999)

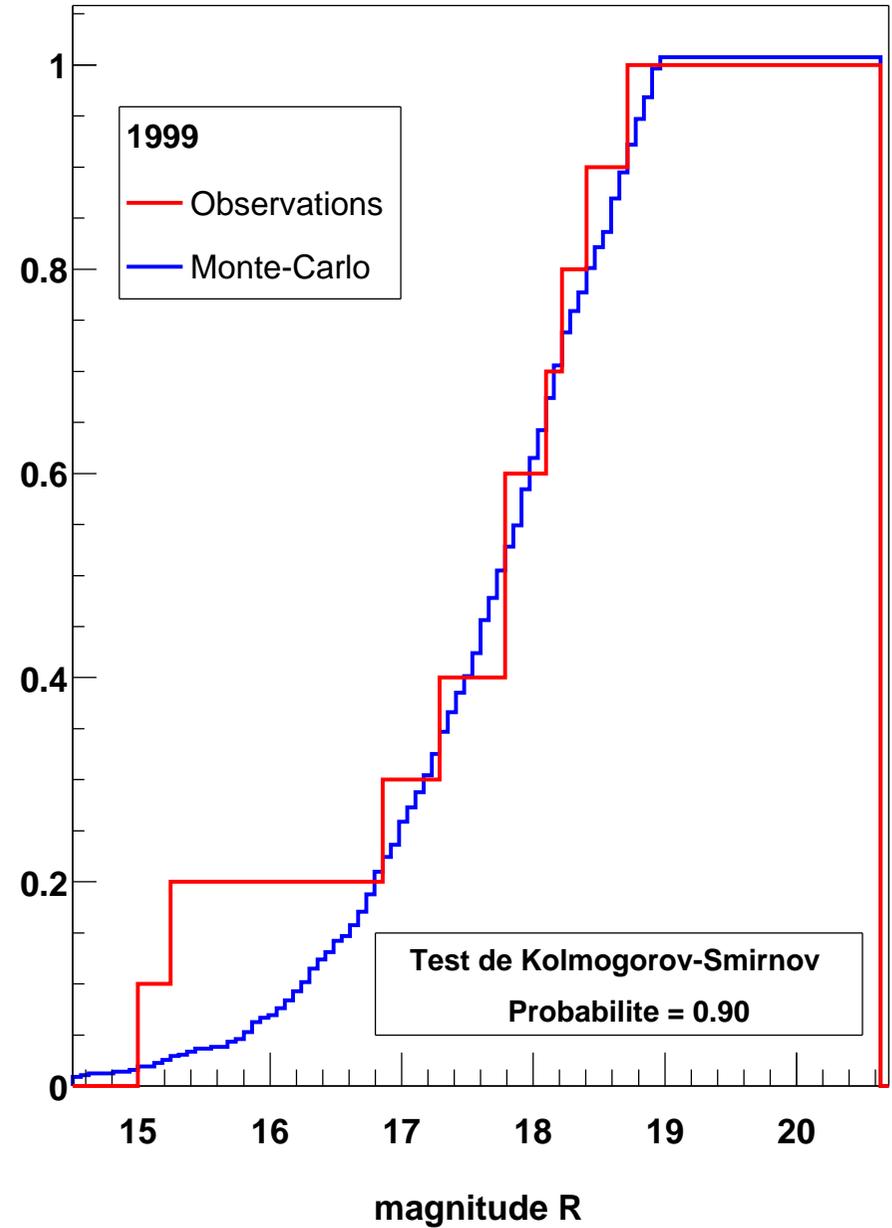
Observée



Simulée

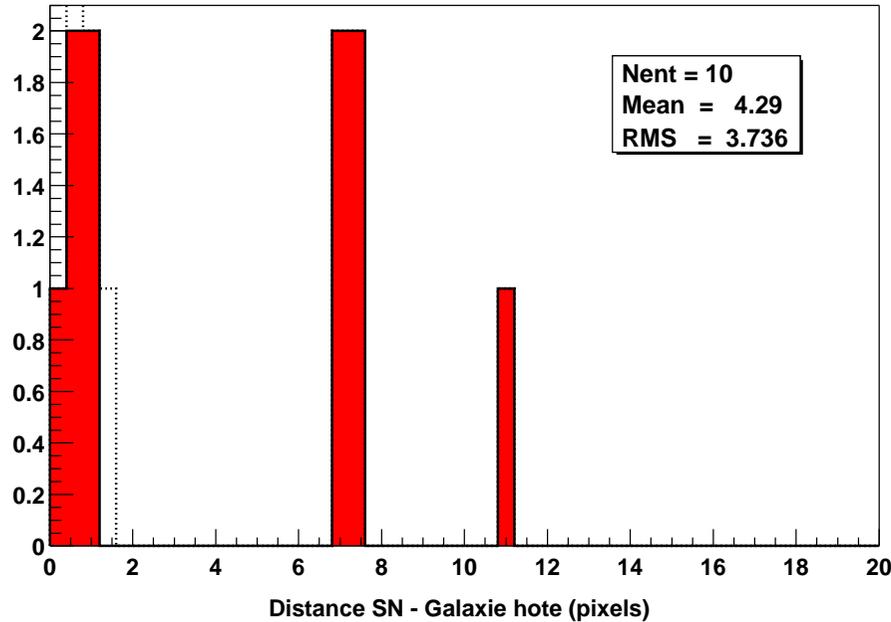


Cumulées

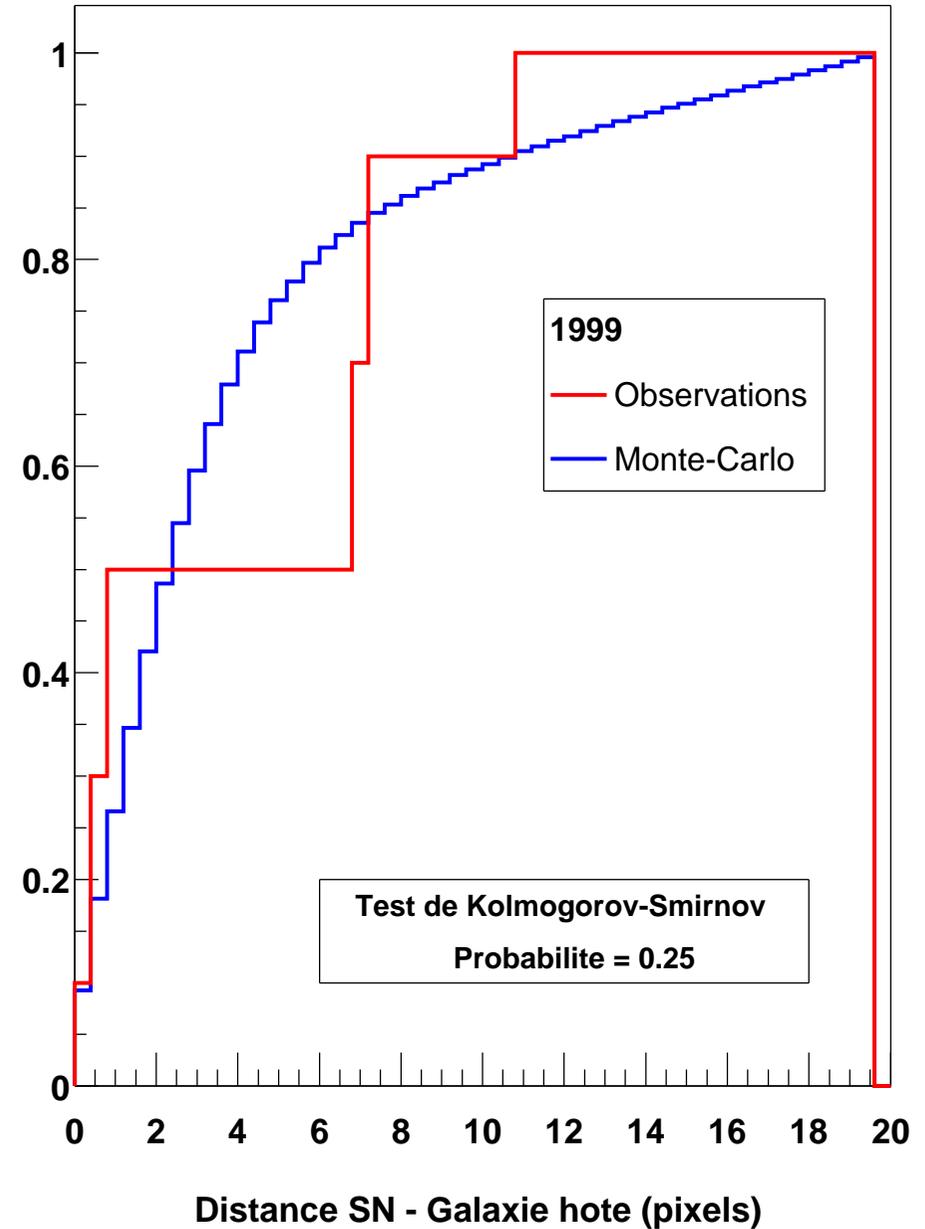
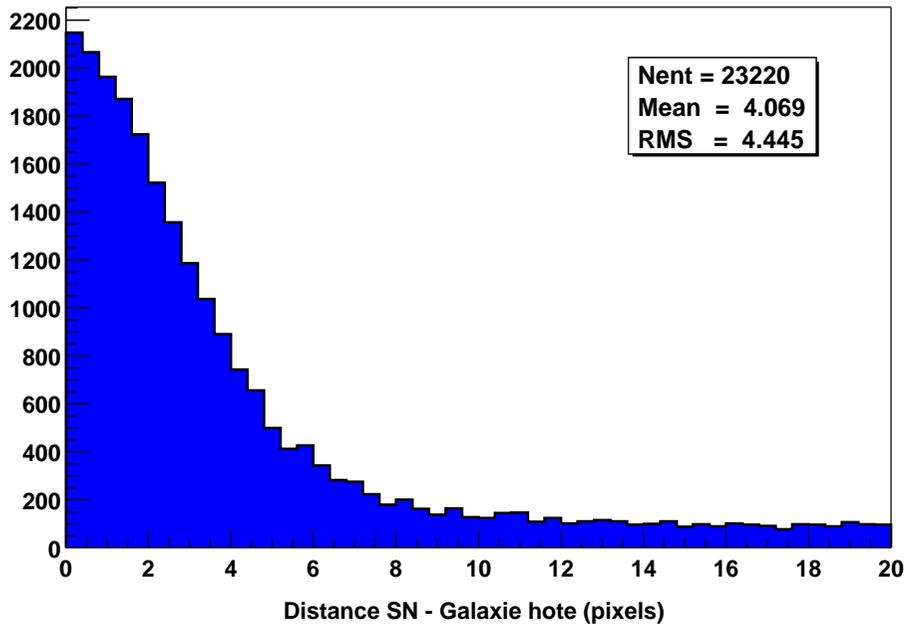


# Distribution en distance à l'hôte (1999)

Observée



Simulée



# Les différentes étapes

- Déterminer la population des galaxies sur les images
- Mesurer l'efficacité de détection  $\varepsilon(\text{ADU})$  — (ADU = « Analog Digital Unit »)  
= simuler des supernovæ dans les galaxies
- Déterminer la distribution  $p(z|m_{\text{gal}})$   
(implique une calibration  $R_{\text{gal}} = f(\text{ADU}_{\text{gal}})$ )
- Calculer l'intégrale de l'efficacité sur :
  - ↳ la courbe de lumière (impliquant une calibration  $\text{ADU} = f(V, R)$ )
  - ↳ le décalage spectral
  - ↳ la phase de la supernova
- Vérifier l'adéquation entre la simulation et les observations
- **En déduire le taux — quantifier les systématiques**

# Résultat : taux de SN Ia à $z = 0.13$

Avec 14 supernovæ observées en 1999 et 2000, le taux de supernovæ de type Ia est :

$$\mathcal{R}_{\text{Ia}}^R = 0.220^{+0.085+0.053}_{-0.051-0.053} h^{-2} \text{ SNU}_R$$

où  $1 \text{ SNU}_R = 1 \text{ SNe} / 10^{10} L_{\odot}^R / \text{siècle}$

Avec  $(B - R)_{\text{galaxies}} = 1.11 \pm 0.25$  (Groggin et Geller 1999) on a :

$$\mathcal{R}_{\text{Ia}}^B = 0.231^{+0.089+0.077}_{-0.054-0.077} h^{-2} \text{ SNU}$$

Avec  $\rho_R = 1.9 \pm 0.47 \cdot 10^8 h L_{\odot}^R \cdot \text{Mpc}^{-3}$  on a :

$$\mathcal{R}_{\text{Ia}} = 4.18^{+1.62+1.19}_{-0.97-1.19} \cdot 10^{-5} h^3 \text{ Mpc}^{-3} \cdot \text{an}^{-1}$$

# Systematiques

## Calibration

$\partial\mathcal{R}/\partial pz \simeq -1$  : incertitude de 10 % sur  $PZ \Rightarrow$  incertitude de 10 % sur  $\mathcal{R}$

## Coupure sur la magnitude des galaxies hôtes

incertitude de 0.2 mag  $\Rightarrow$  incertitude de 6 % sur  $\mathcal{R}$

## Fonction de luminosité des supernovæ

$$\mathcal{R}_{\text{Ia}} = 0.22 \left( \frac{\mathcal{L}_{V\text{max}}}{2.07 \cdot 10^9 h^2 L_{\odot V}} \right)^{-0.85} \left( \frac{\Delta m_{15}^B}{1.1} \right)^{0.65}$$

incertitude de 6 % sur  $\Delta m_{15}^B \Rightarrow$  incertitude de 4 % sur  $\mathcal{R}$

incertitude de 24 % sur  $\mathcal{L}_{V\text{max}} \Rightarrow$  incertitude de 20 % sur  $\mathcal{R}$

## Mauvaise identification d'une supernova

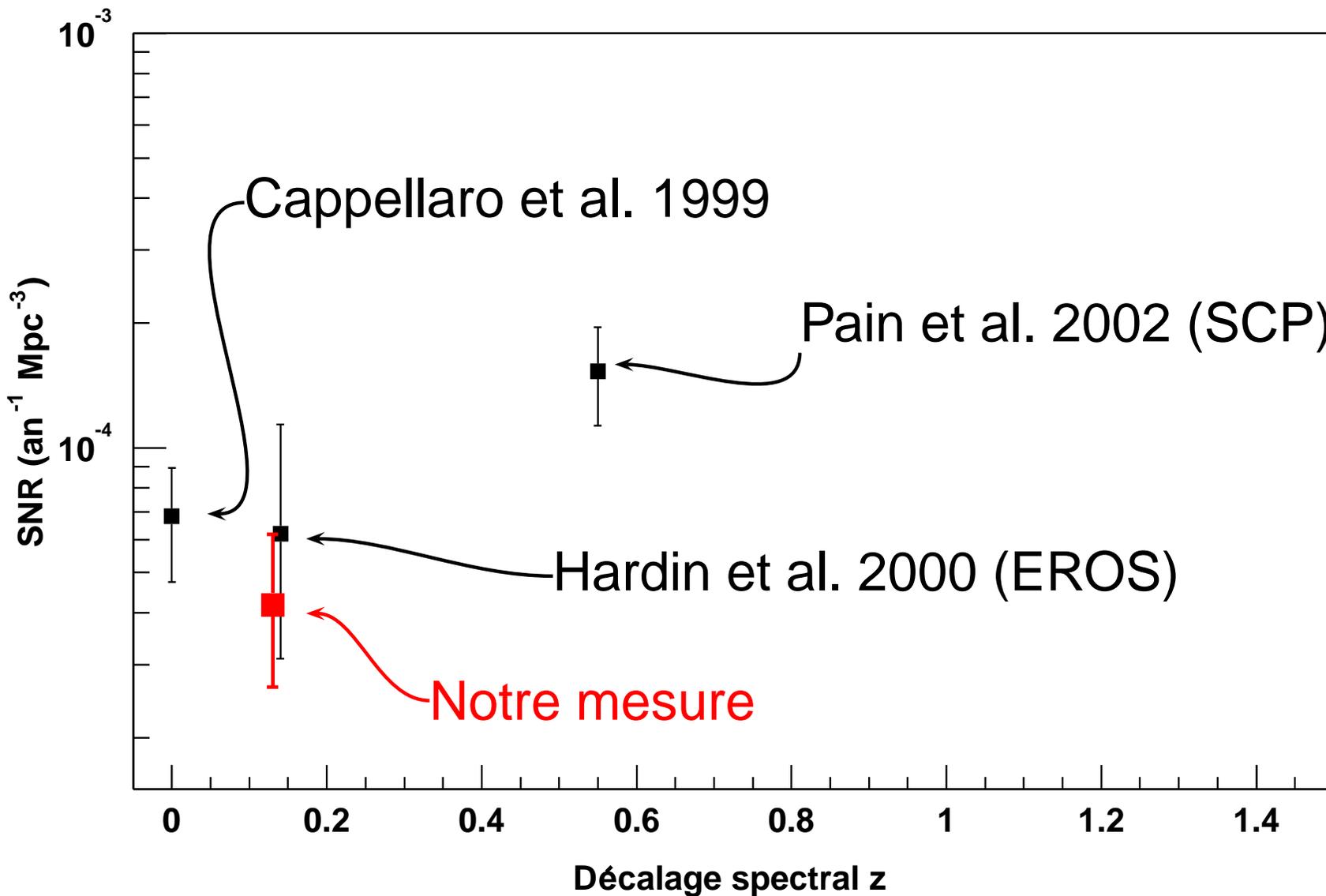
Erreur d'identification  $\Rightarrow$  incertitude de 7 % sur  $\mathcal{R}$

## Cosmologie

Pas de différence sur  $\mathcal{R}$  entre SCDM et  $\Lambda$ CDM

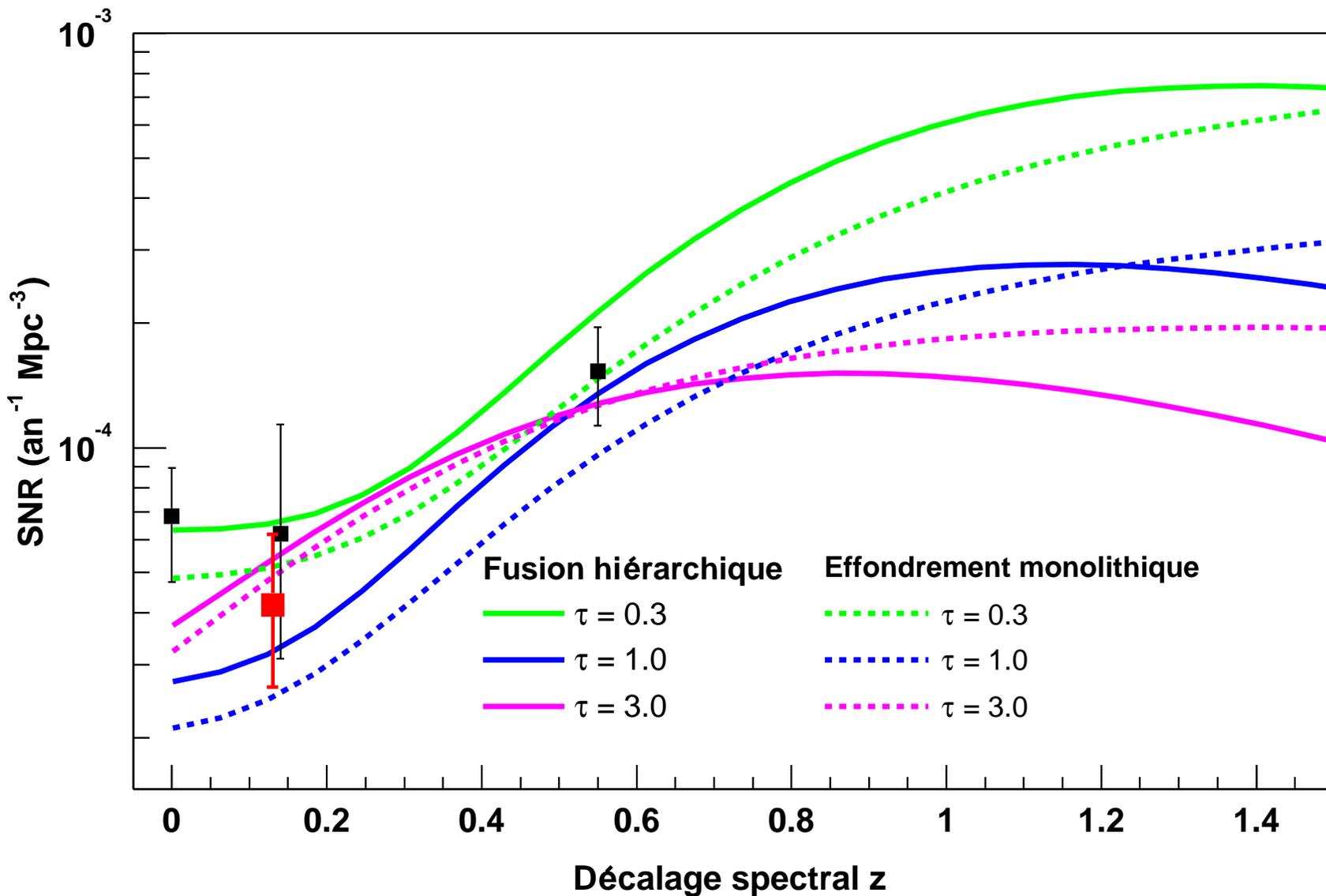
**TOTAL** :  $\pm 24$  %

# Autres mesures



→ évolution  
d'un facteur  
 $\sim 3$  entre  
 $z = 0.13$  et  
 $z = 0.55$

# Autres mesures



→ évolution  
d'un facteur  
 $\sim 3$  entre  
 $z = 0.13$  et  
 $z = 0.55$

# Conclusion et perspectives

- **Taux de SN la mesuré à  $z = 0.13$** 
  - Compatible avec la précédente mesure d'EROS — réalisée avec 4 événements (Hardin et al. 2000)
  - Compatible avec la mesure dans l'Univers local — entachée d'erreurs systématiques importantes (Cappellaro et al. 1999)
  - Comparaison avec valeur à  $z = 0.55$  (Pain et al. 2002) implique une évolution importante

# Conclusion et perspectives

- **Taux de SN Ia mesuré à  $z = 0.13$**
- **Suites logiques de ce travail**
  - Estimation du taux de SN II/Ib-c
    - 7 (?) événements en 1999 - 2000
  - Détermination du taux en fonction du type des galaxies hôtes

# Conclusion et perspectives

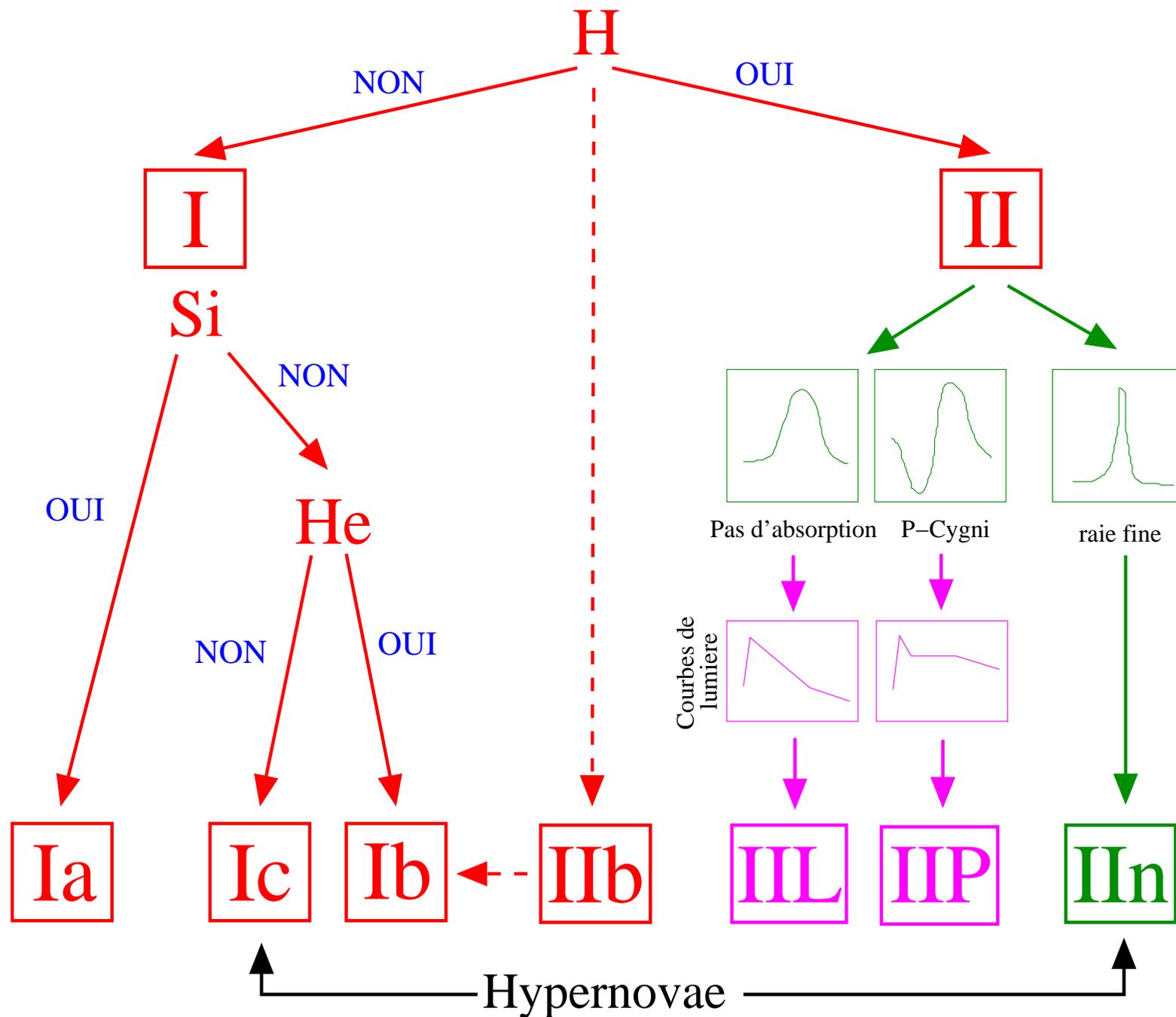
- **Taux de SN Ia mesuré à  $z = 0.13$**
- **Suites logiques de ce travail**
- **L'avenir du taux de supernova**
  - *Nearby Supernova Factory* (courant 2003) : taux de SN Ia et SN II dans l'Univers local
  - *CFHTLS - Supernovae* (mars 2003) : évolution du taux de SN Ia entre  $z \sim 0.3$  et  $z \sim 1.2$  et du taux de SN II jusqu'à  $z \sim 0.7$
  - Satellite *SNAP* (2010) : taux de SN Ia jusqu'à  $z \sim 1.7$

FIN!

A wide-angle photograph of a sunset over a large body of water, likely a bay or harbor. The sun is a bright, glowing orb on the horizon, casting a long, shimmering reflection on the water's surface. The sky is filled with dramatic, layered clouds, ranging from dark, heavy masses to lighter, wispy formations, all illuminated from below by the setting sun. The colors transition from deep blues and greys at the top to vibrant oranges and yellows near the horizon. In the foreground, the dark silhouettes of a city skyline and several suspension bridges are visible against the bright horizon. The overall mood is serene and conclusive.

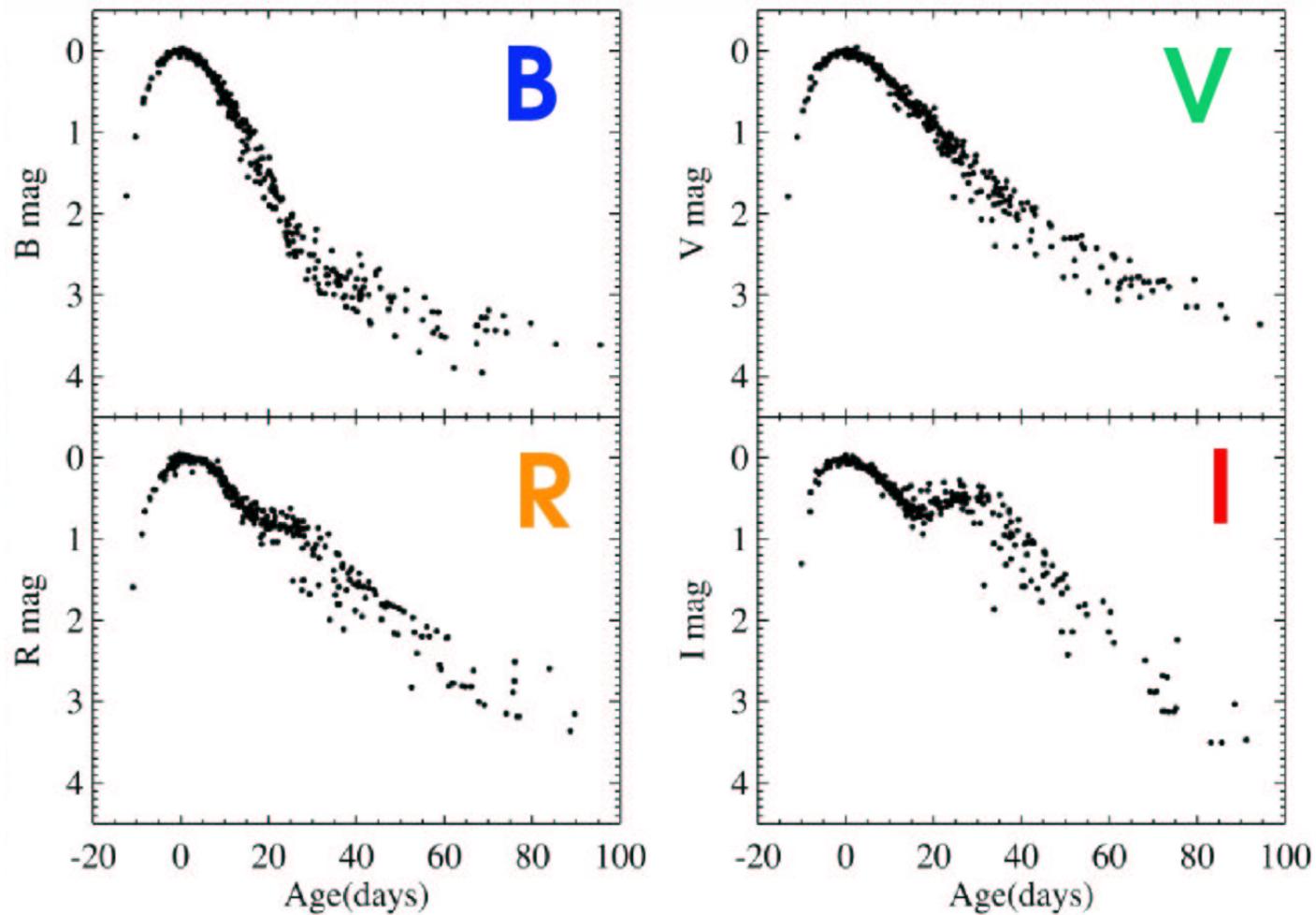
# Taxinomie

Classification basée sur le **spectre**, et éventuellement sur la **courbe de lumière** ou la **forme des raies**

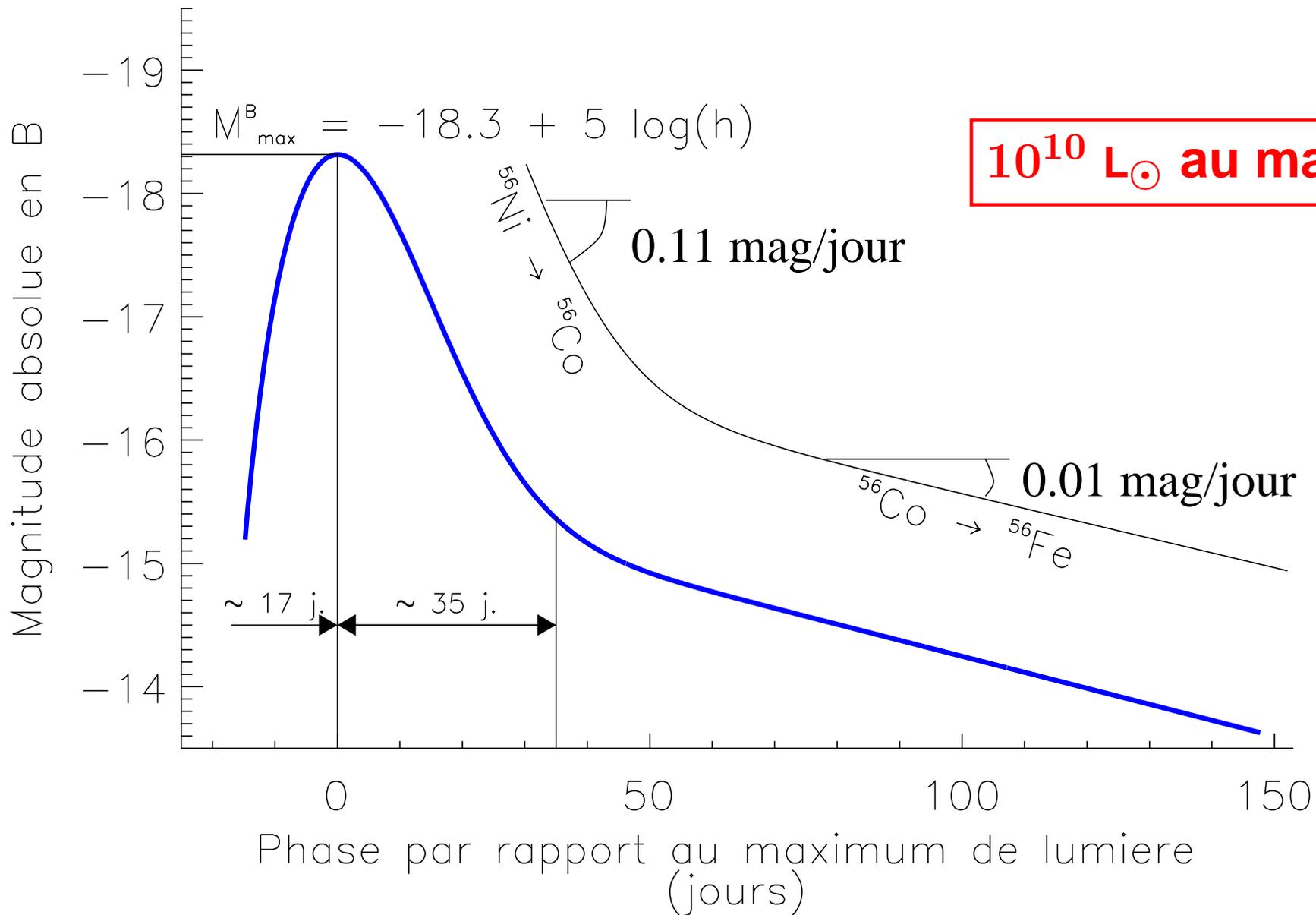


# Les courbes de lumière

SNe Ia en B, V, R et I

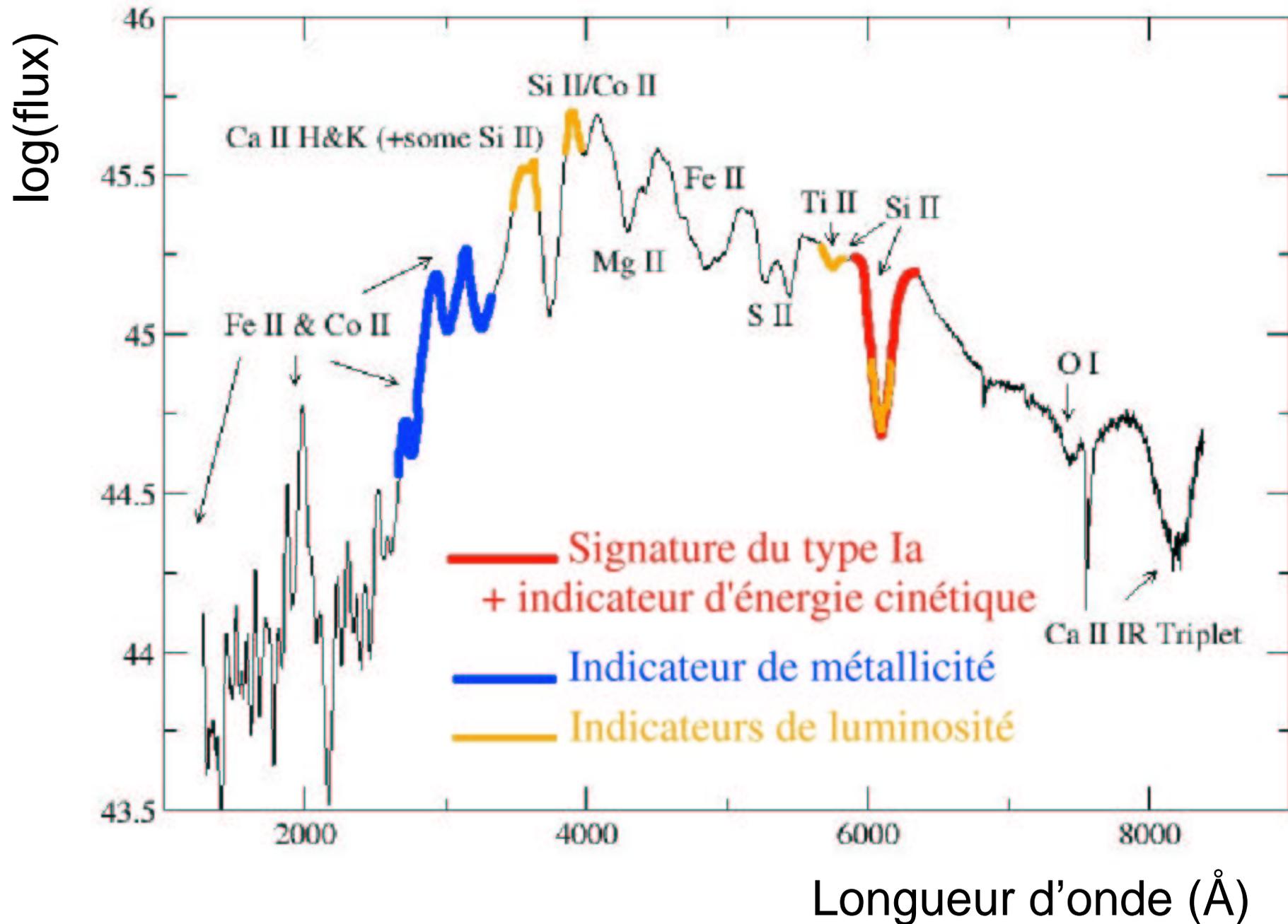


# SN Ia : la courbe de lumière



alimentée par la décroissance  $^{56}\text{Ni} \xrightarrow{6.1 \text{ j.}} ^{56}\text{Co} \xrightarrow{77.1 \text{ j.}} ^{56}\text{Fe}$

# SN Ia : le spectre



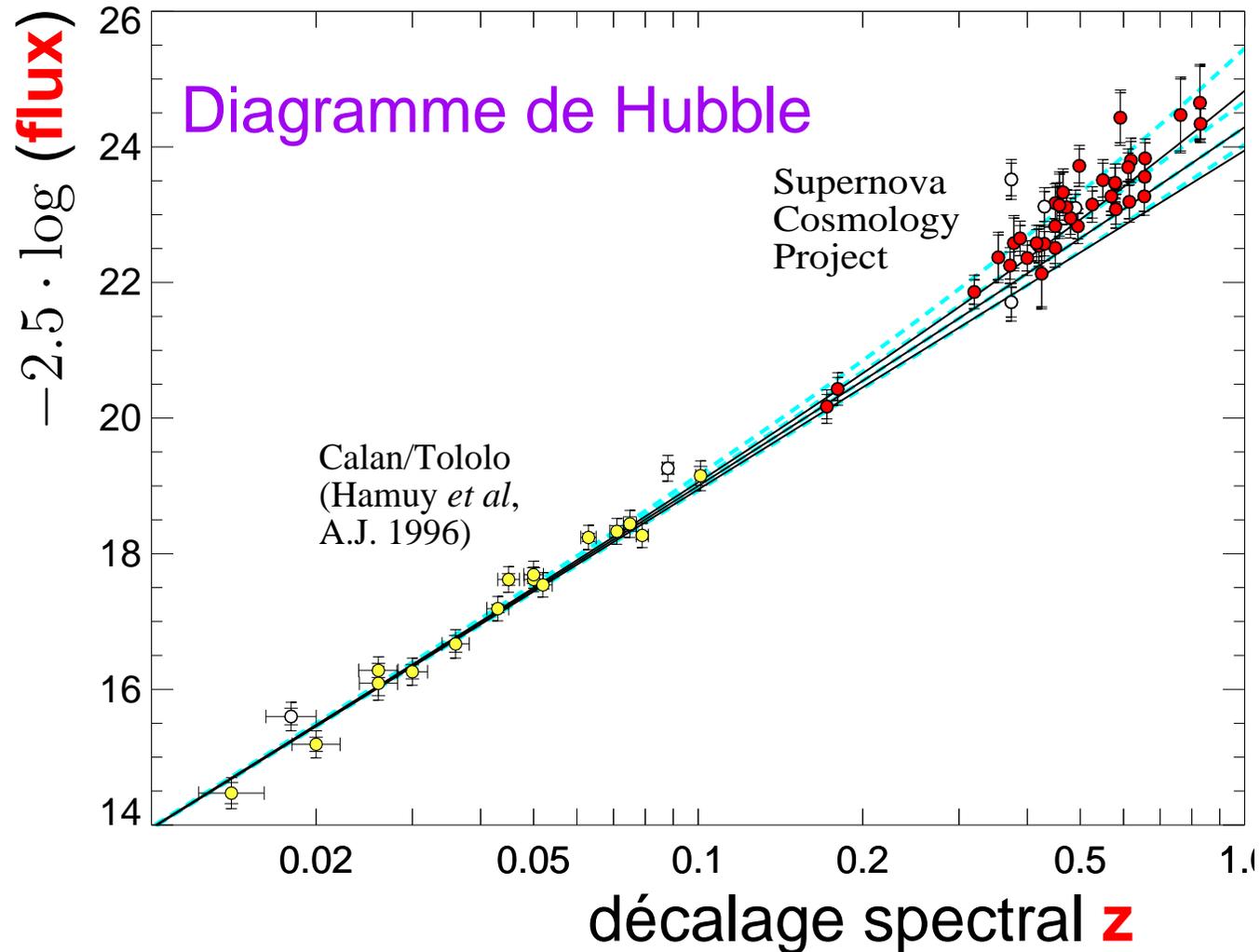
# SNe Ia et cosmologie

Deux observables :

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

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

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



# Des ADU aux magnitudes

Galaxies : *des ADU à la magnitude absolue...*  $\left\{ \begin{array}{ll} \text{probabilité} & p(z|m_{\text{gal}}) \\ \text{luminosité} & \mathcal{L} \end{array} \right.$

$$M_R = R - \mu(z) - A_R - K_R^{\text{gal}}(z)$$

# Des ADU aux magnitudes

Galaxies : *des ADU à la magnitude absolue...*  $\left\{ \begin{array}{l} \text{probabilité } p(z|m_{\text{gal}}) \\ \text{luminosité } \mathcal{L} \end{array} \right.$

Module de distance

$$\mu(z) = 5 \cdot \log \left[ \frac{D_L(z)}{1 \text{ Mpc}} \right] + 25$$

Extinction galactique

Correction K

$$M_R = R - \mu(z) - A_R - K_R^{\text{gal}}(z)$$

# Des ADU aux magnitudes

Galaxies : *des ADU à la magnitude absolue...*  $\left\{ \begin{array}{l} \text{probabilité } p(z|m_{\text{gal}}) \\ \text{luminosité } \mathcal{L} \end{array} \right.$

Module de distance

$$\mu(z) = 5 \cdot \log \left[ \frac{D_L(z)}{1 \text{ Mpc}} \right] + 25$$

Extinction galactique

Correction K

$$M_R = R - \mu(z) - A_R - K_R^{\text{gal}}(z)$$

calibration

$$R = -2.5 \cdot \log \left( \frac{\text{ADU}}{\text{Tpose}} \right) - \alpha_R^{\text{gal}}$$

# Corrections K pour les galaxies

