

Recherche de microlentilles gravitationnelles vers les bras spiraux de la Galaxie et spectroscopie de supernovæ dans EROS II

Youcef Rabah RAHAL

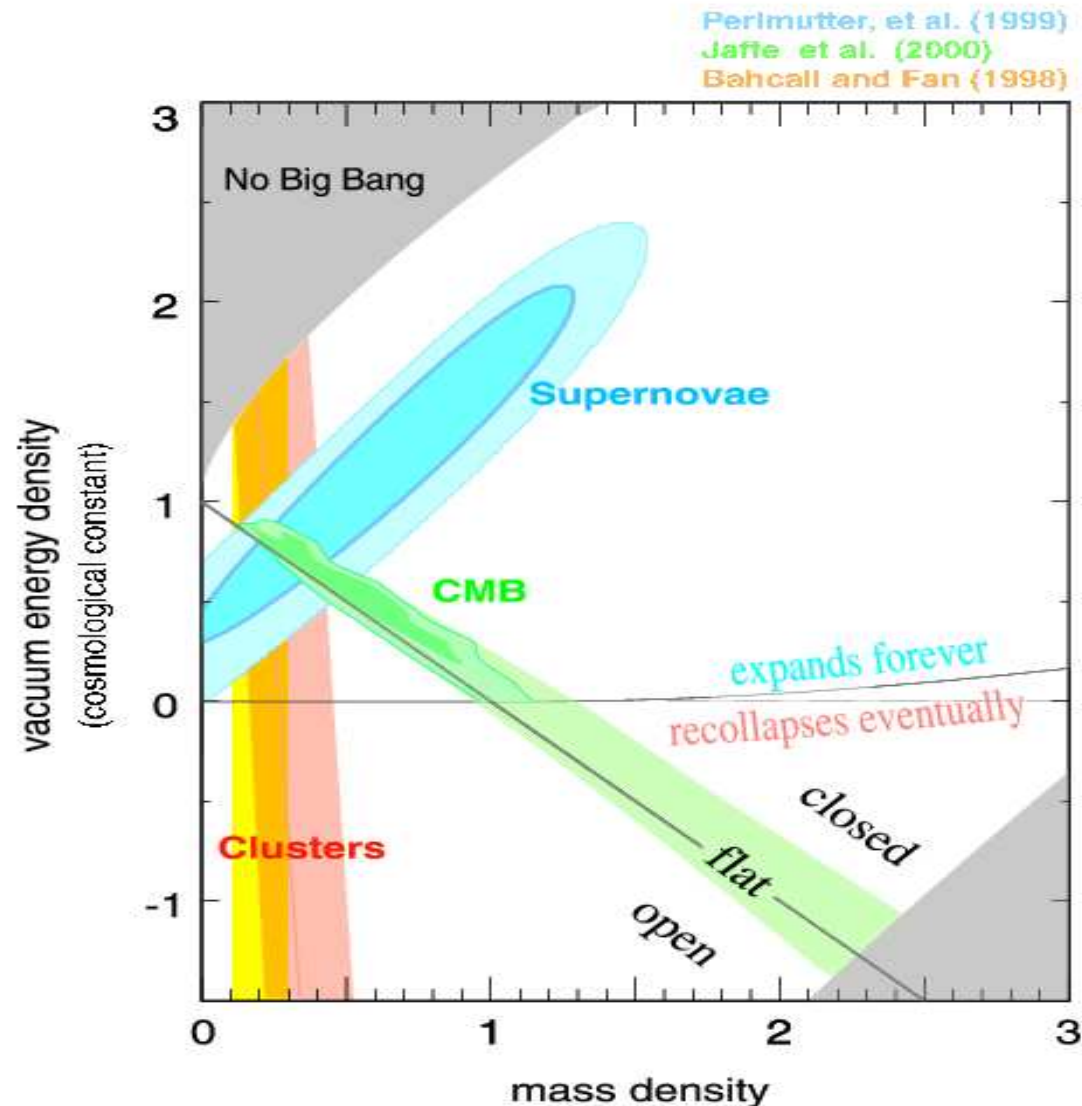
Collaboration EROS II
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay

Plan de l'exposé

- Le contexte.
- EROS II.
- Deux études:
 1. Spectroscopie des supernovæ de type Ia.
 2. Recherche de microlentilles gravitationnelles vers les bras spiraux de la Galaxie.
- Conclusion.

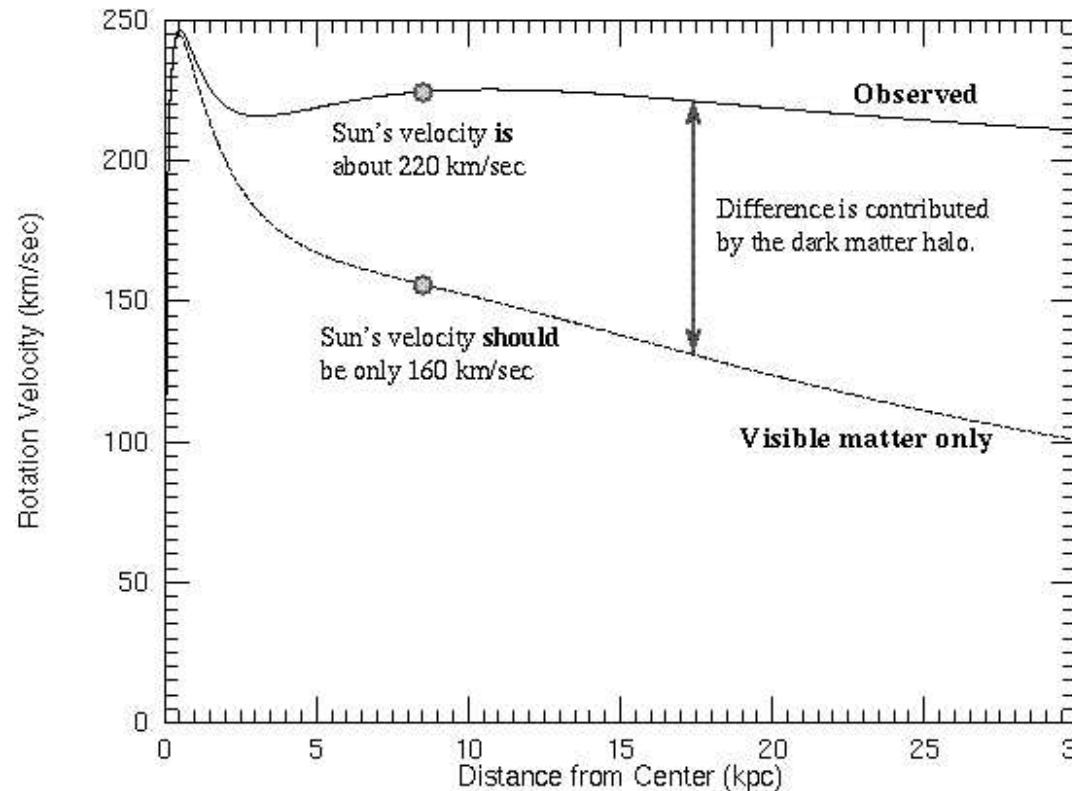
Le contexte (1)

- Cadre théorique: Modèle Standard Cosmologique → Relativité Générale + univers homogène & isotrope.
- Méthodes de mesure:
 1. Amas de galaxies.
 2. Supernovæ de type Ia.
 3. Fluctuations du fond diffus cosmologique.



Le contexte (2)

- Nucléosynthèse primordiale
→ 90% des baryons sont invisibles.
- Aussi, la matière lumineuse est insuffisante pour expliquer les courbes de rotation des galaxies.
- → un halo sombre constituerait la majeure partie de leur masse.
- Halo baryonique sous forme d'objets compacts ?



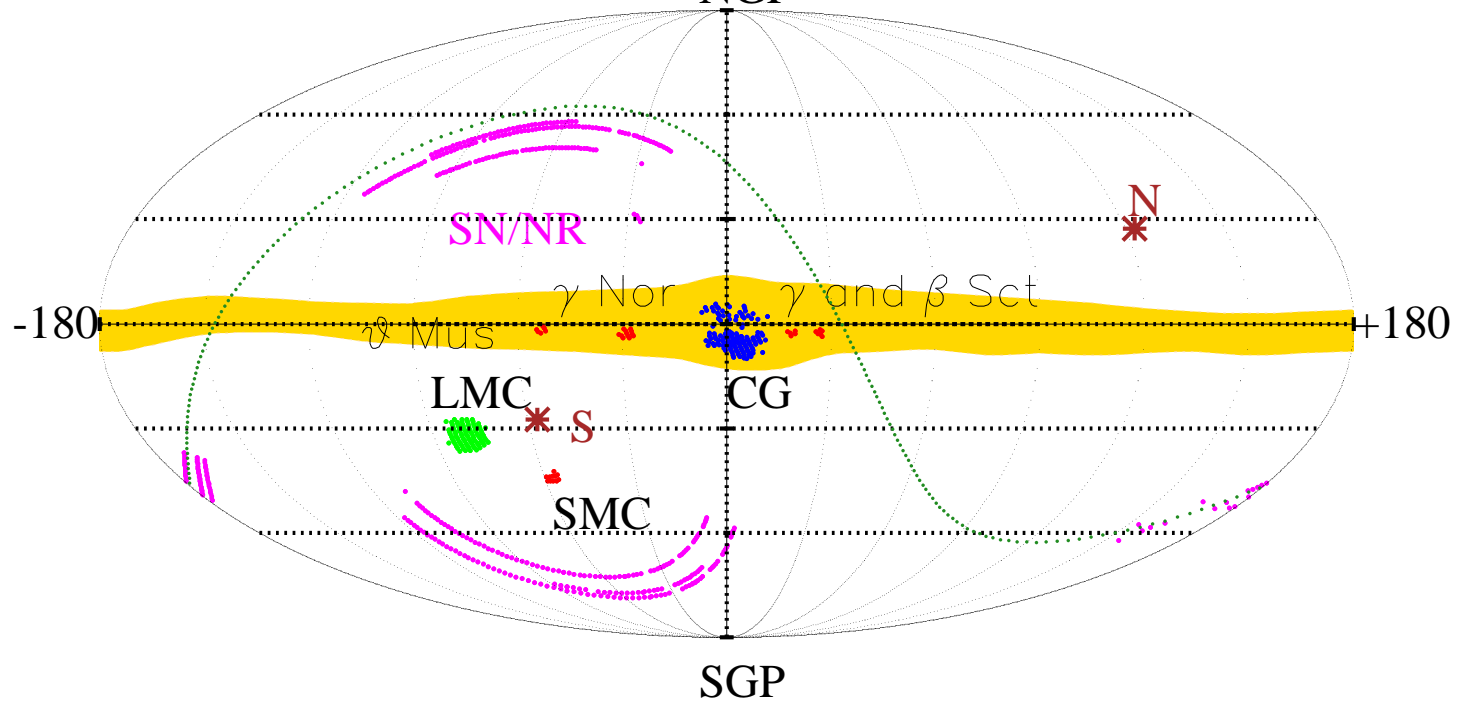
EROS II

- Observations: 07/1996 à 02/2003.
- Télescope de 1 *m* de diamètre situé à La Silla au Chili.
- Champ de 1 *deg*².
- Deux larges bandes passantes (Rouge/Bleu).
- Deux mosaïques: 8 CCD de 2048 × 2048 pixels.
- Pointage/guidage automatisés (LAL).



Les cibles d'EROS II

Champs etudies par EROS II - Coordonnees galactiques
NGP

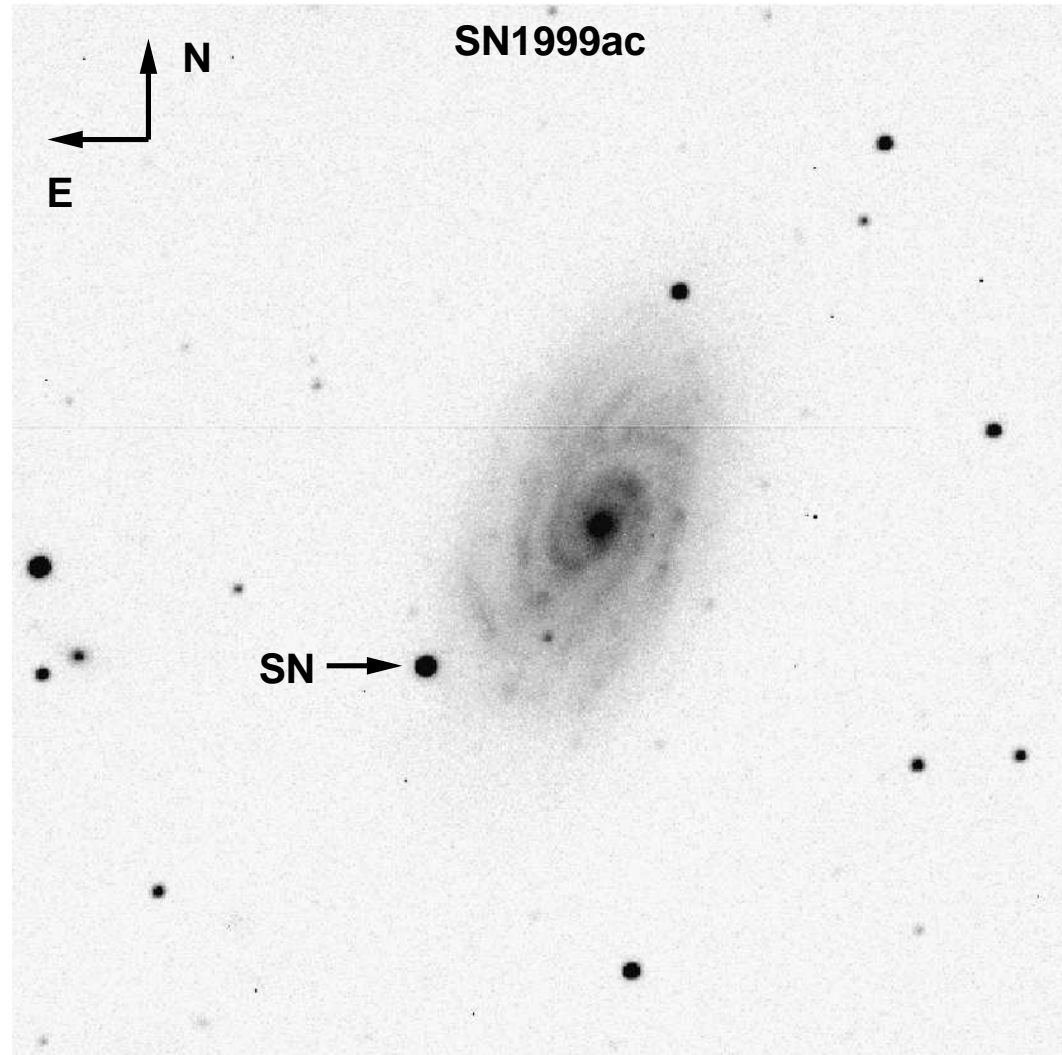


Spectroscopie des SNe Ia

- Les supernovæ de type Ia (SNe Ia).
- Standardisation.
- La chaîne de traitement.
- Standardisation spectroscopique.
- Conclusion.

Les supernovæ (SNe)

- SN = explosion d'une étoile en fin de vie.
- Aussi lumineuse qu'une galaxie.
- Rares $\rightarrow \sim 1\text{SN}/\text{Galaxie}/\text{Siècle}$.



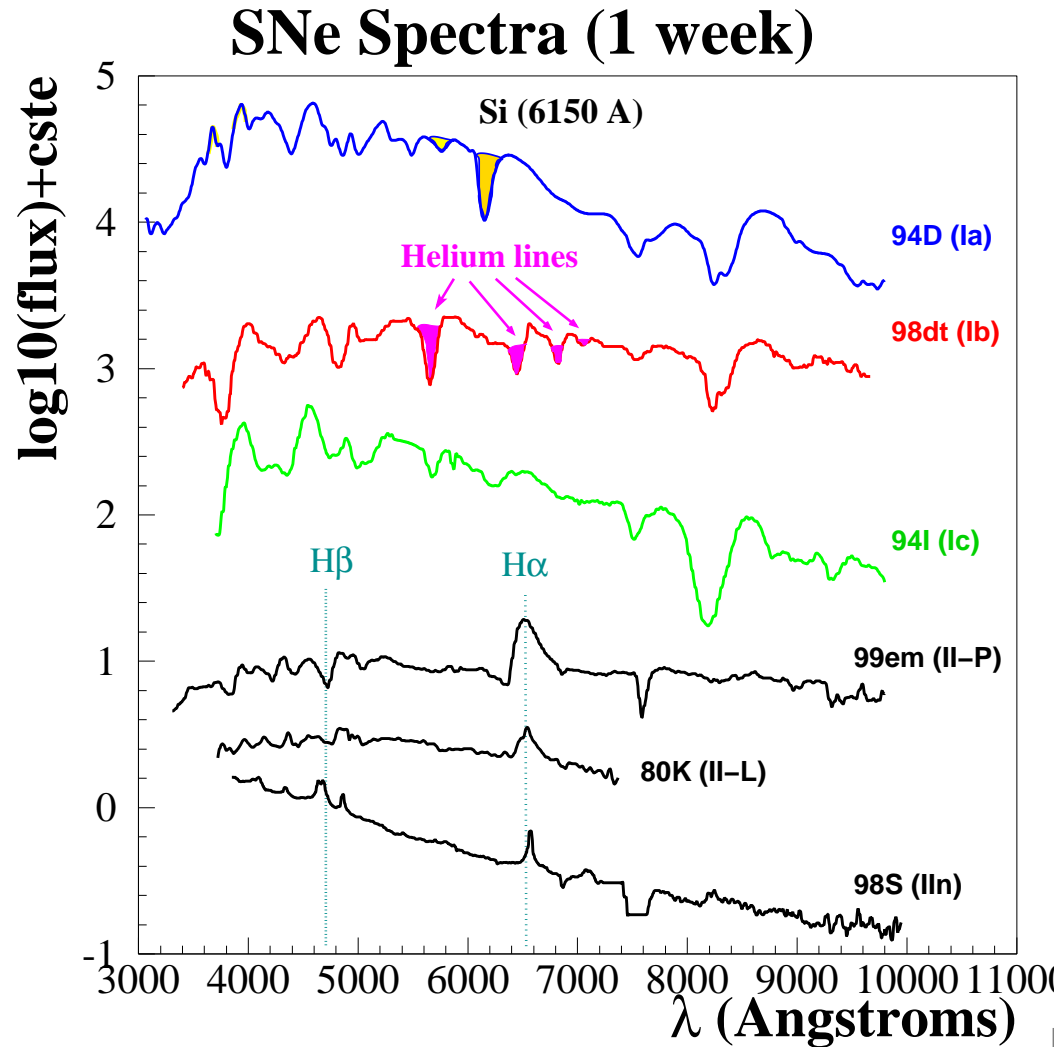
Les supernovæ (SNe)

Classées en type d'après les spectres ou les courbes de lumière:

● Pas de H → SN I.

● H → SN II.

SNe Ia → classe homogène.

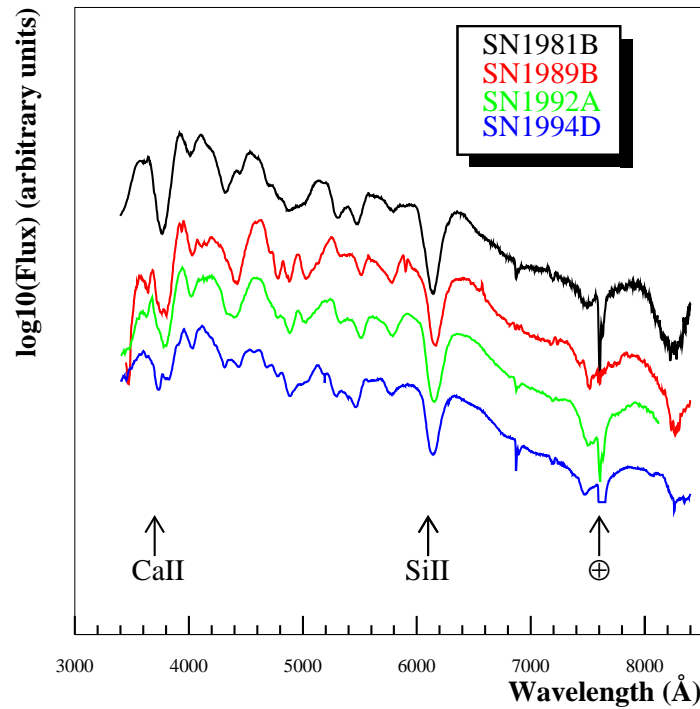


Les supernovæ de type Ia (SNe Ia)

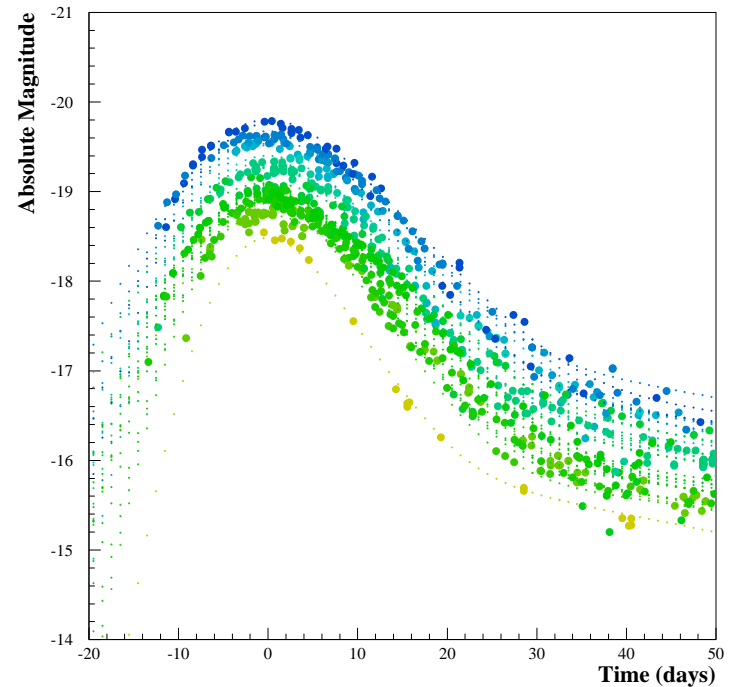


- Système progéniteur binaire.
- Naine blanche accrétant de la matière d'un compagnon.
- Explosion de la naine blanche dès que $M = M_{ch} \sim 1.4$ masse solaire.

Les supernovæ de type Ia (SNe Ia)



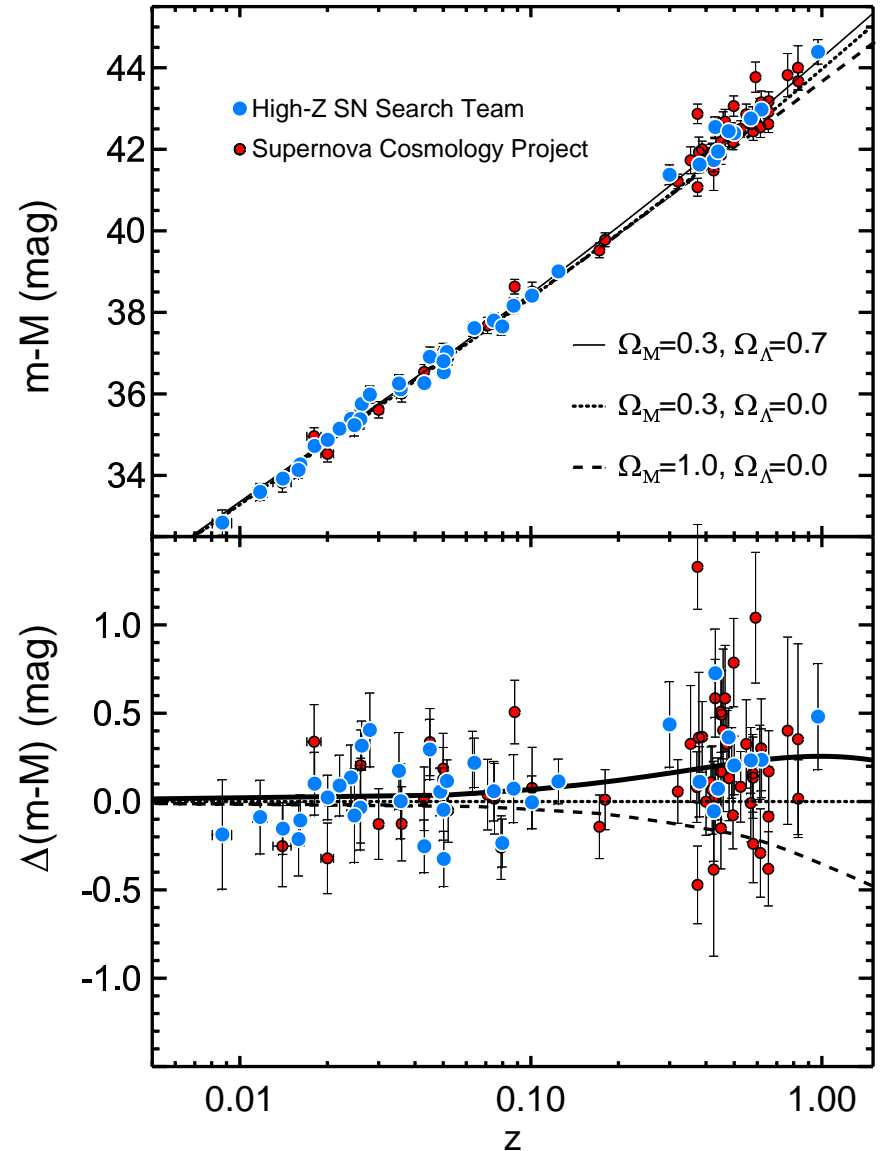
SNIa B lightcurves



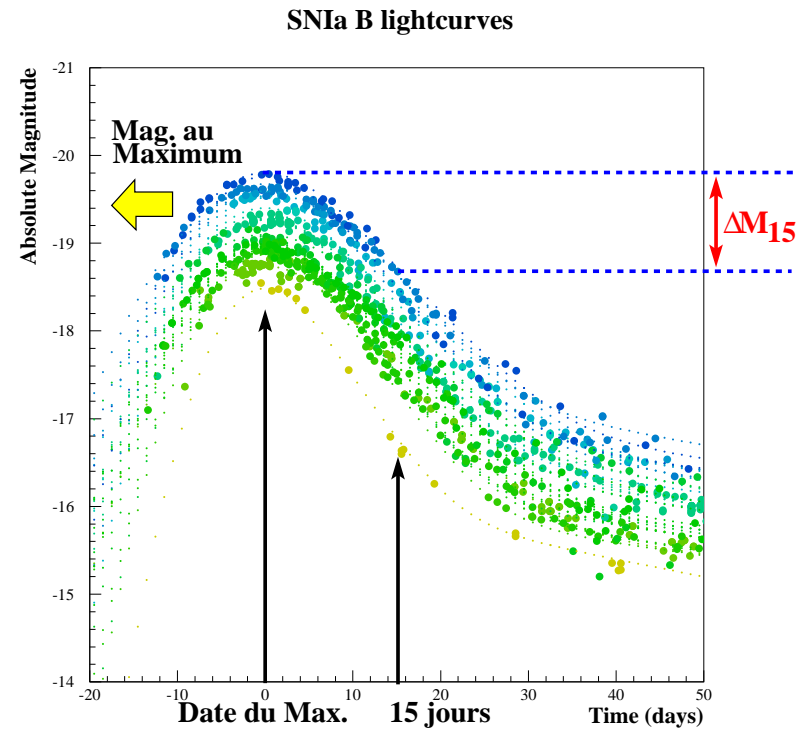
magnitude = $-2.5 \times \log_{10}(\text{flux}) + C$
Dispersion au maximum ~ 0.5 magnitudes

Intérêt de l'étude des SNe Ia

- $\text{flux} \propto \mathcal{L}/d^2$
- Mesure du flux connaissant \mathcal{L} permet d'avoir d (chandelle standard).
- SNe Ia: homogènes + lumineuses → utiles pour mesurer $d \sim 1 \text{ Gpc}$.
- Nécessité de comprendre les systématiques.

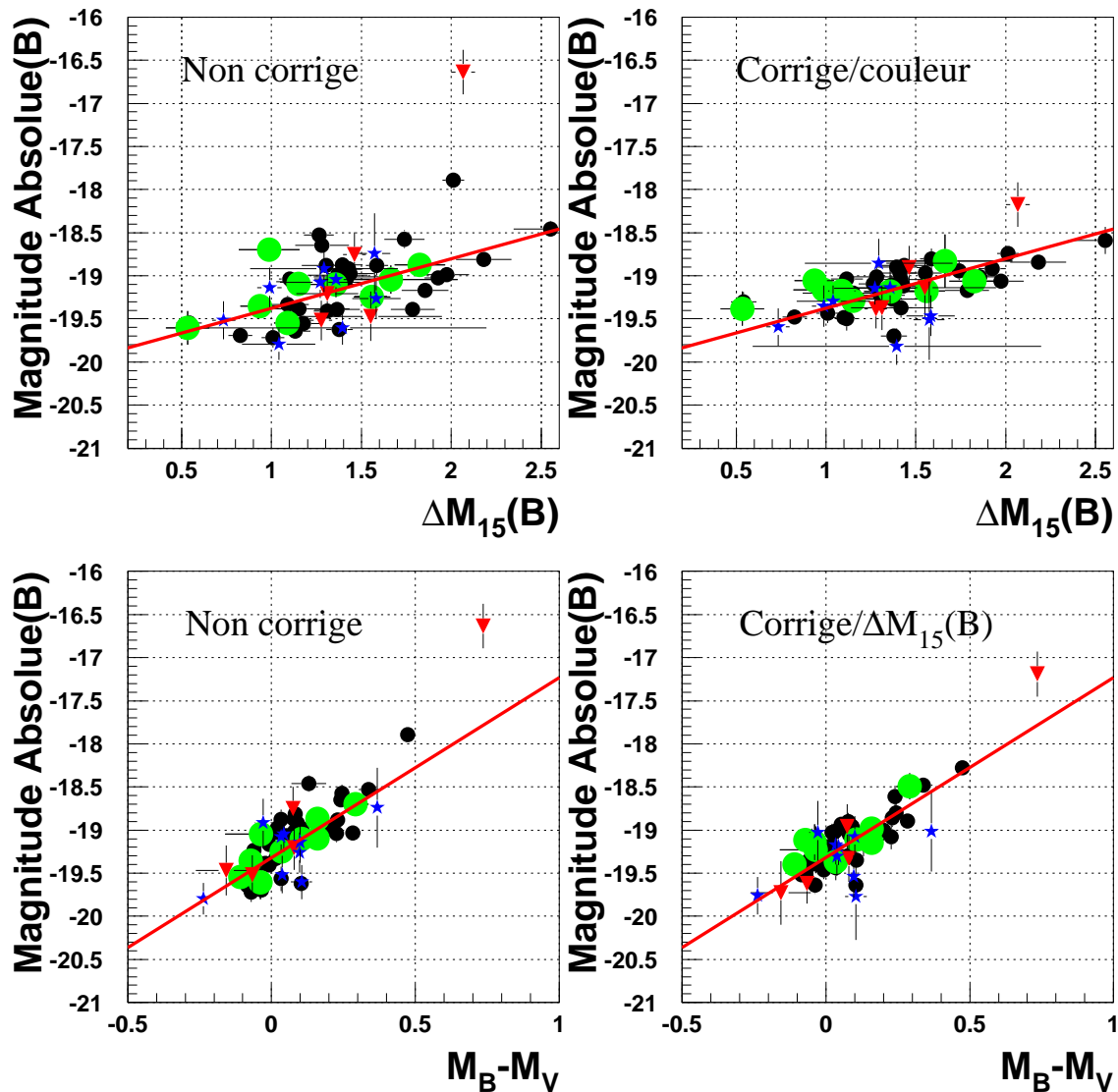


Standardisation des SNe Ia



Dispersion de M au maximum ~ 0.5 magnitude (d mesurée à 25%)

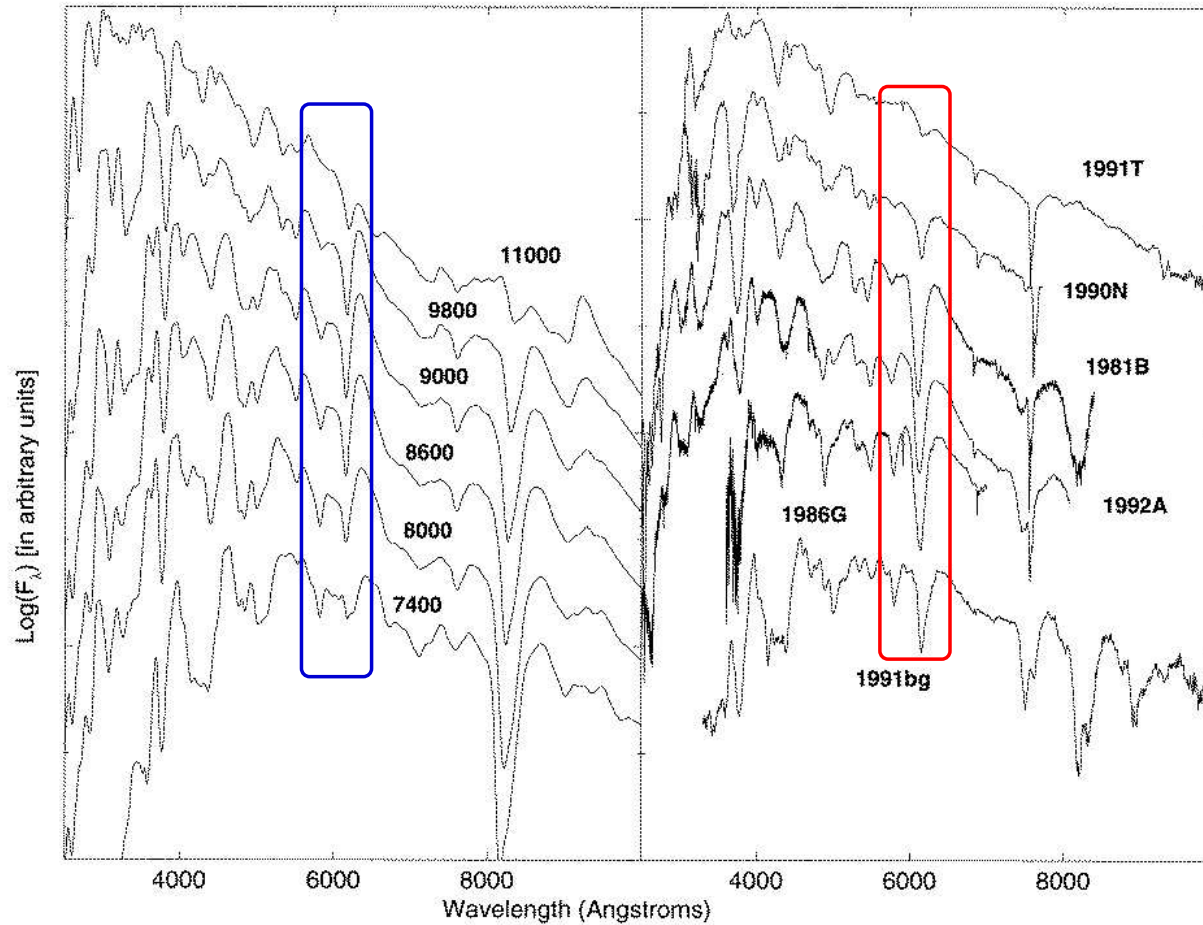
Standardisation des SNe Ia



Thèse N. Regnault (LAL, 2000)

Standardisation $\rightarrow \sigma_M \sim 0.2$ magnitude (d mesurée à 10%)

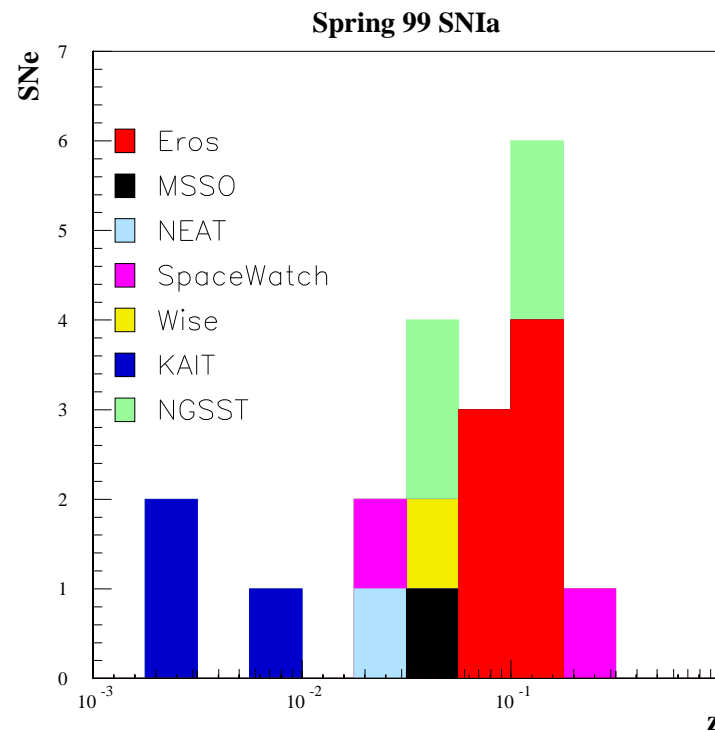
Standardisation des SNe Ia



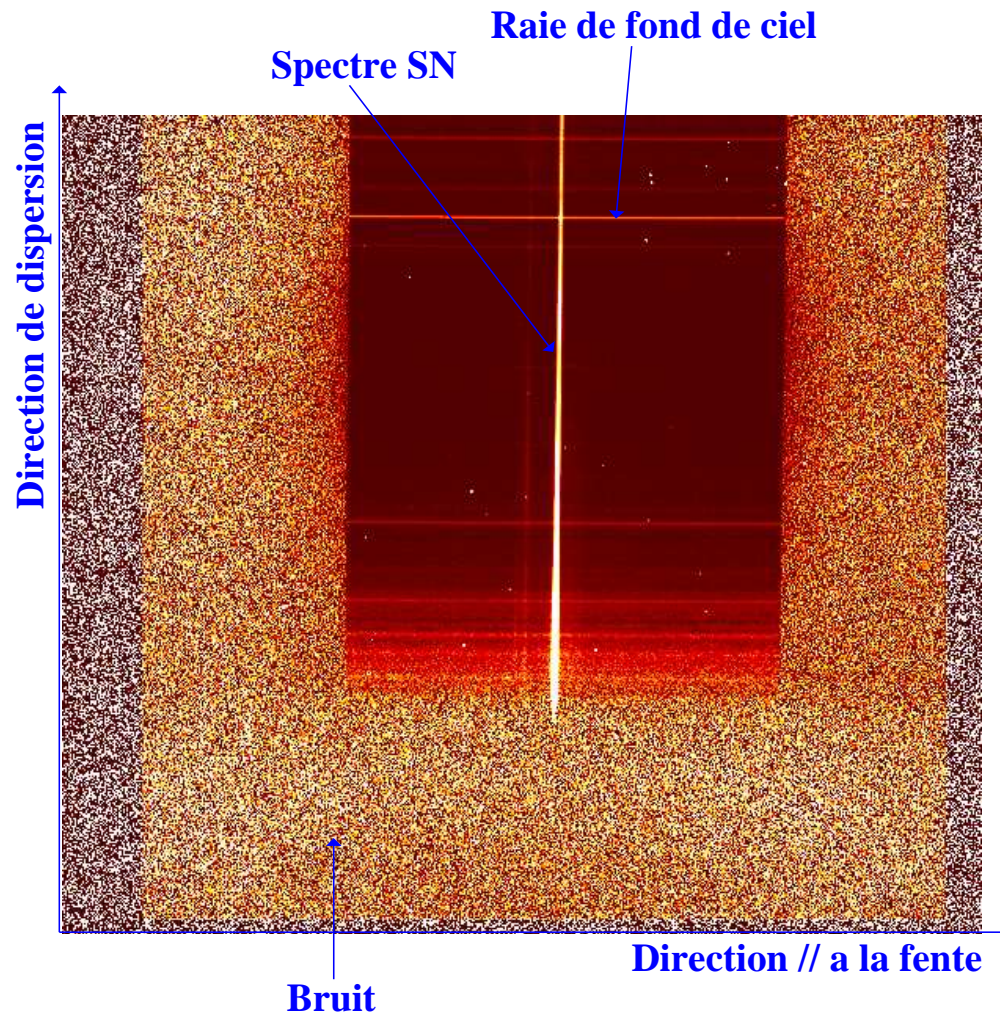
Standardisation spectroscopique → Nugent *et al* (1995).

Les données analysées

- Campagne internationale (1999):
8 groupes.
- 11 télescopes pour la
photométrie,
8 pour la spectroscopie.
- 50 SNe découvertes
(dont 20 par EROS II, 1 SN/2h).
- 20 SNe la suivies.
- 10000 images + 3000 spectres.
- Données photométriques:
thèse N. Regnault (2000).



La chaîne de traitement

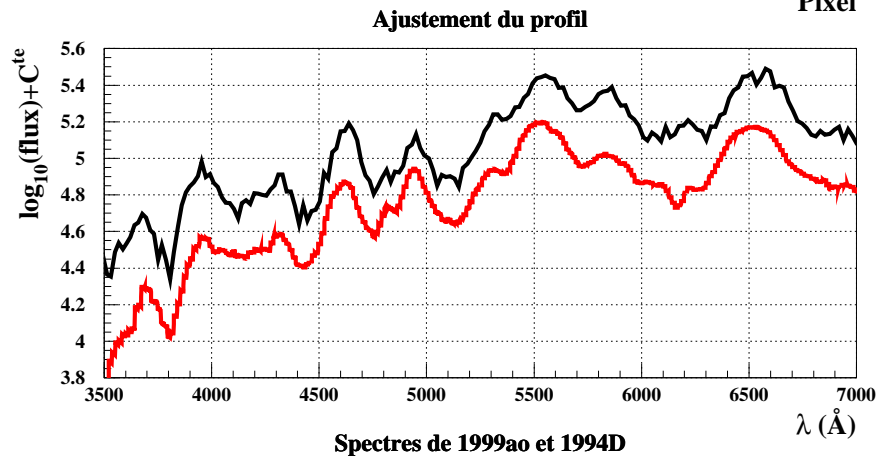
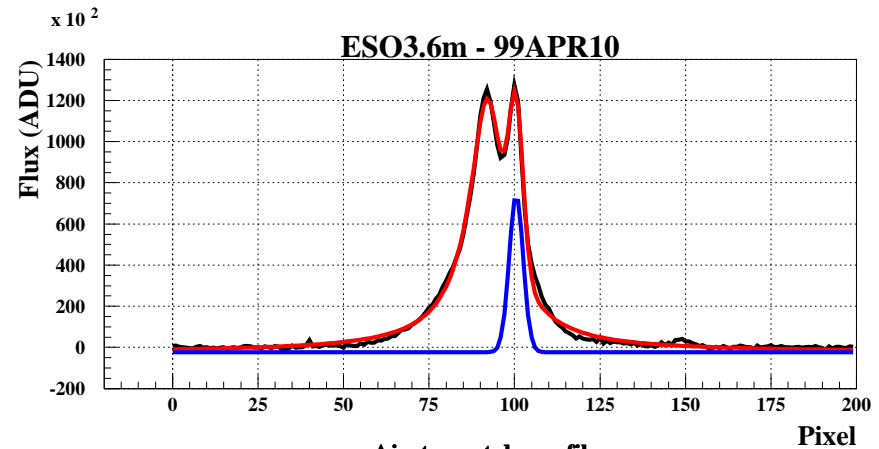


Développement d'une chaîne de traitement originale pour séparer SN et Gal.

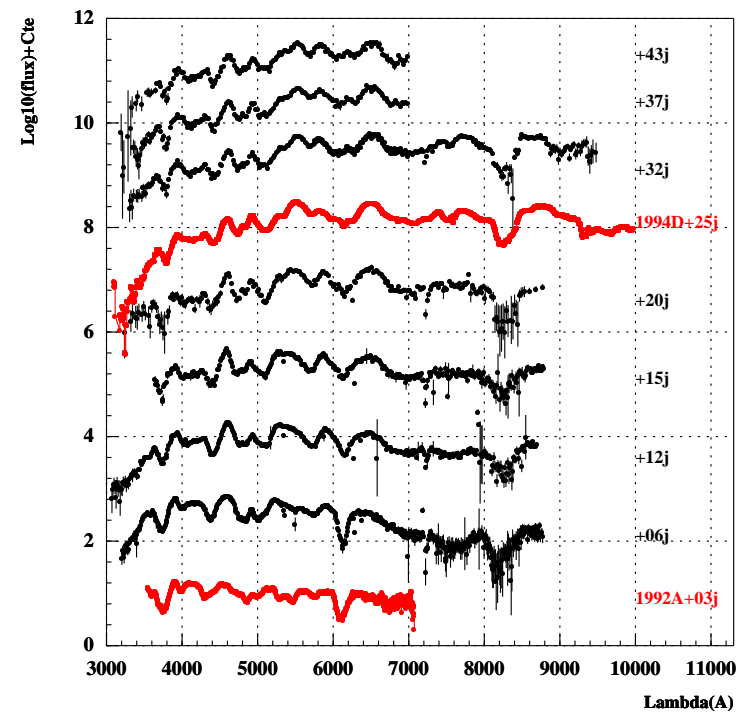
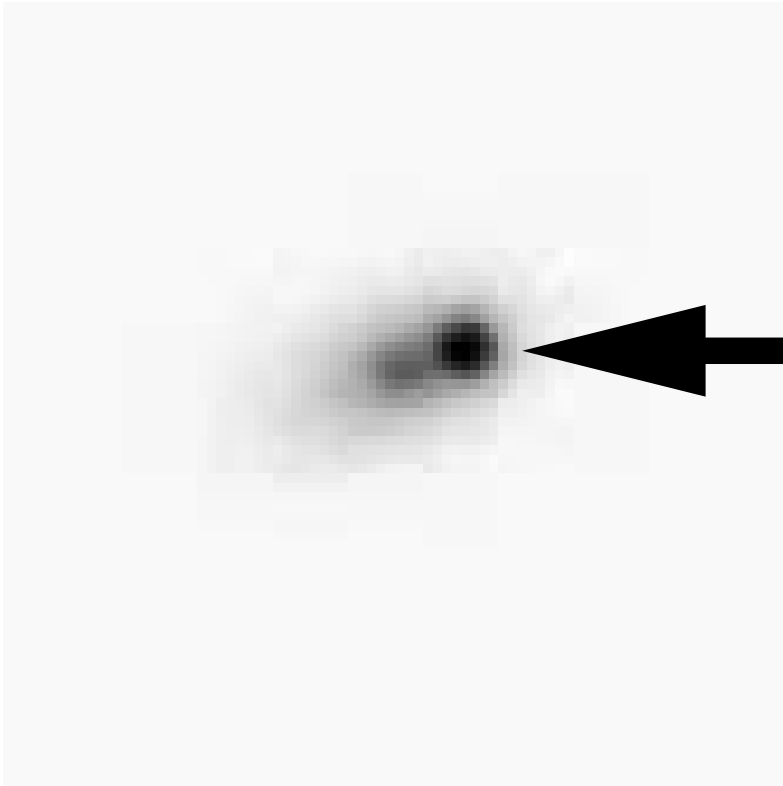
Au final, ~ 100 spectres utilisables pour ~ 20 SNe la

Spécificité de la chaîne de réduction

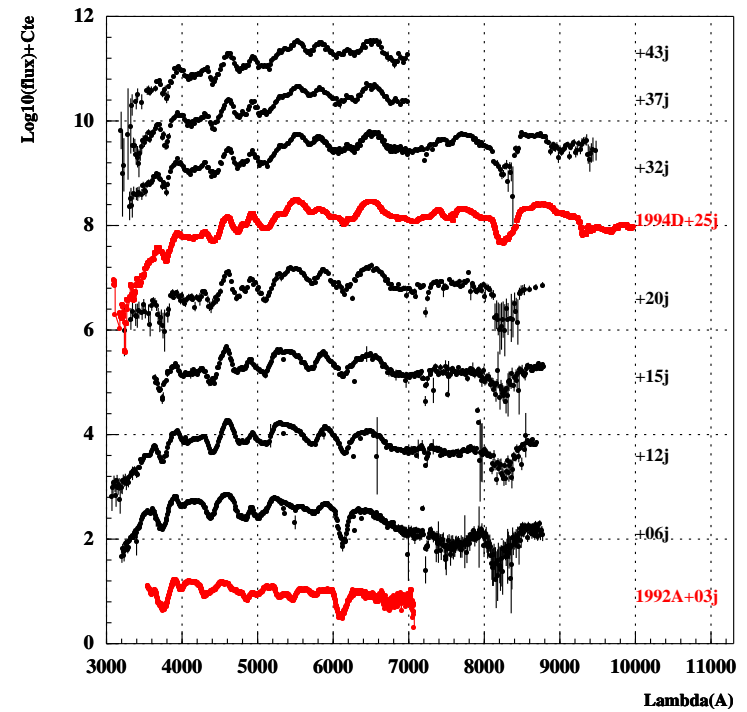
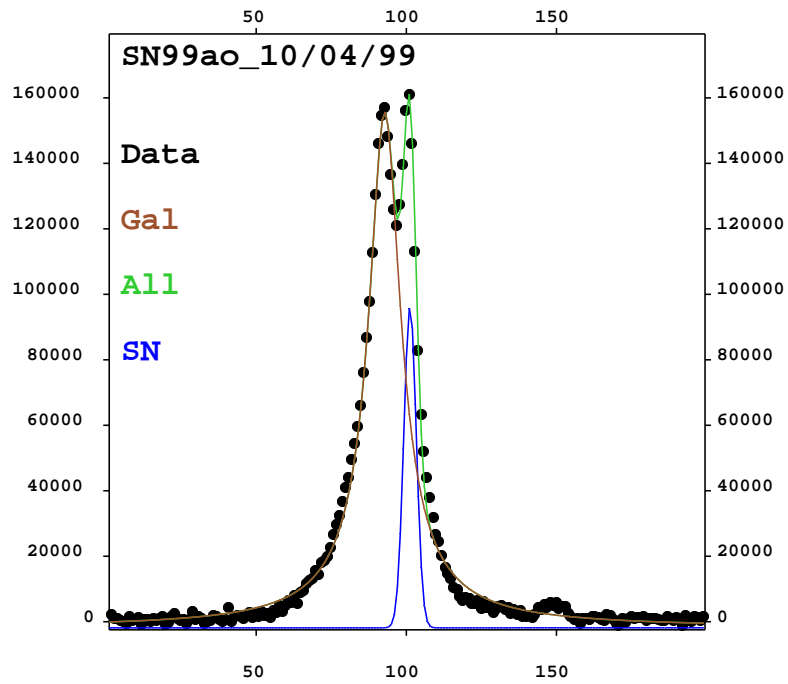
- SN peu brillante ou résolution limitée → SN+Gal mélangés.
- Ajustement simultané de deux fonctions sur le profil.



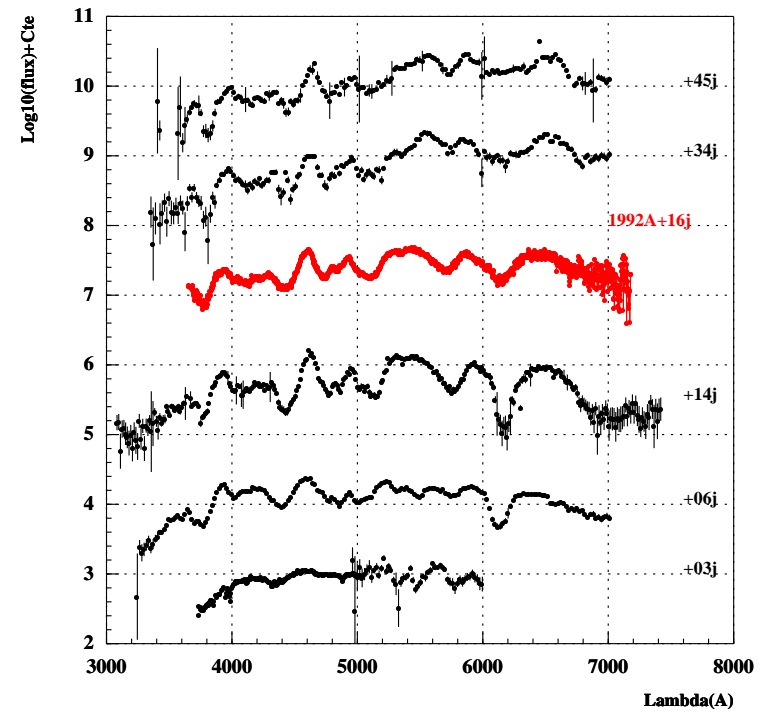
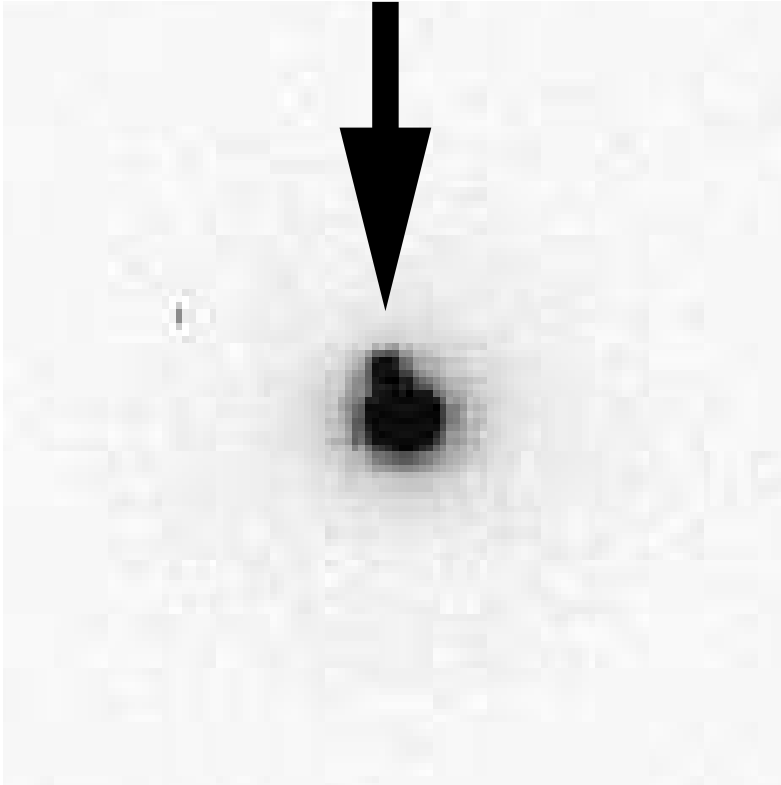
SN1999ao



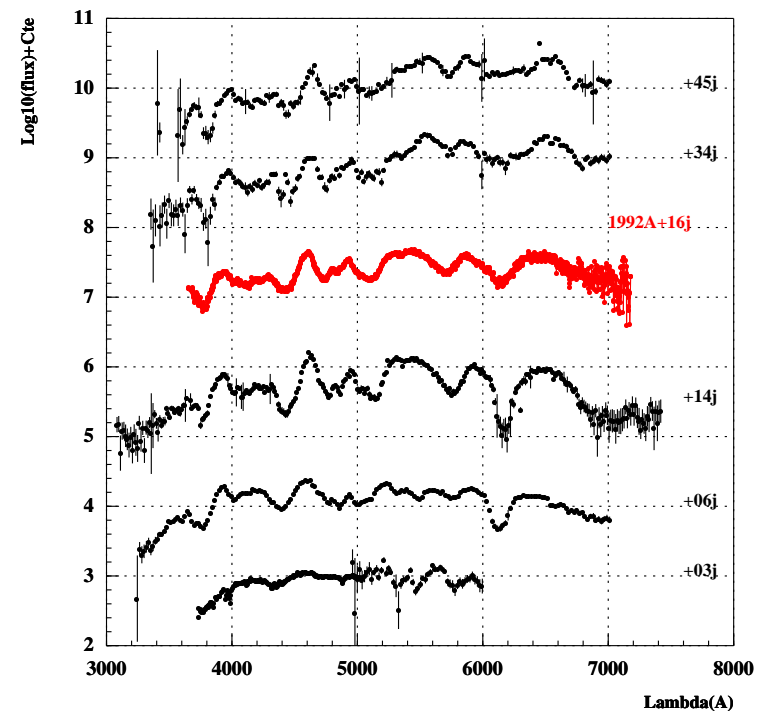
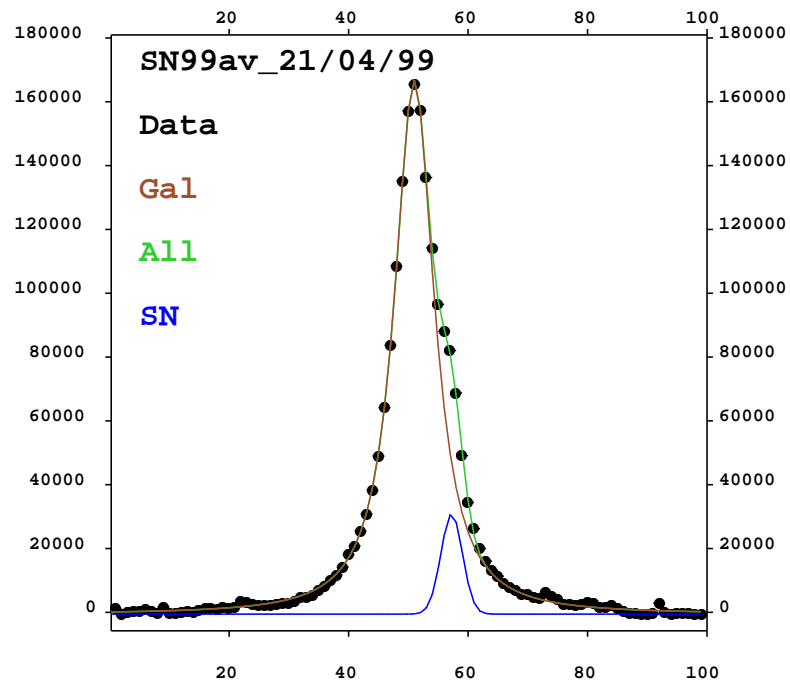
SN1999ao



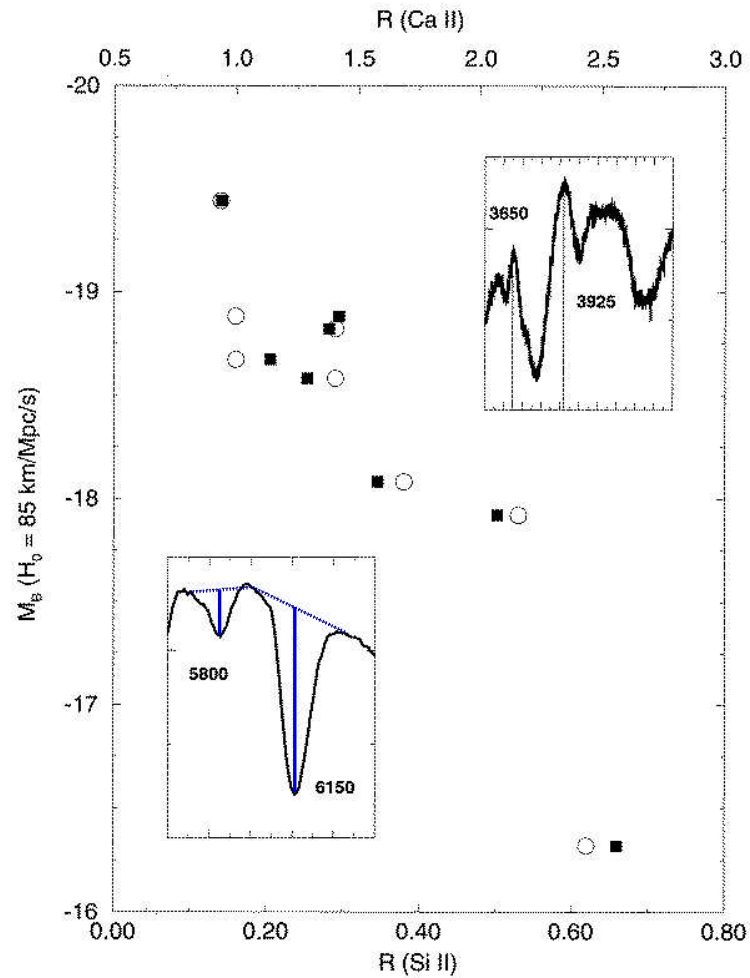
SN1999av



SN1999av



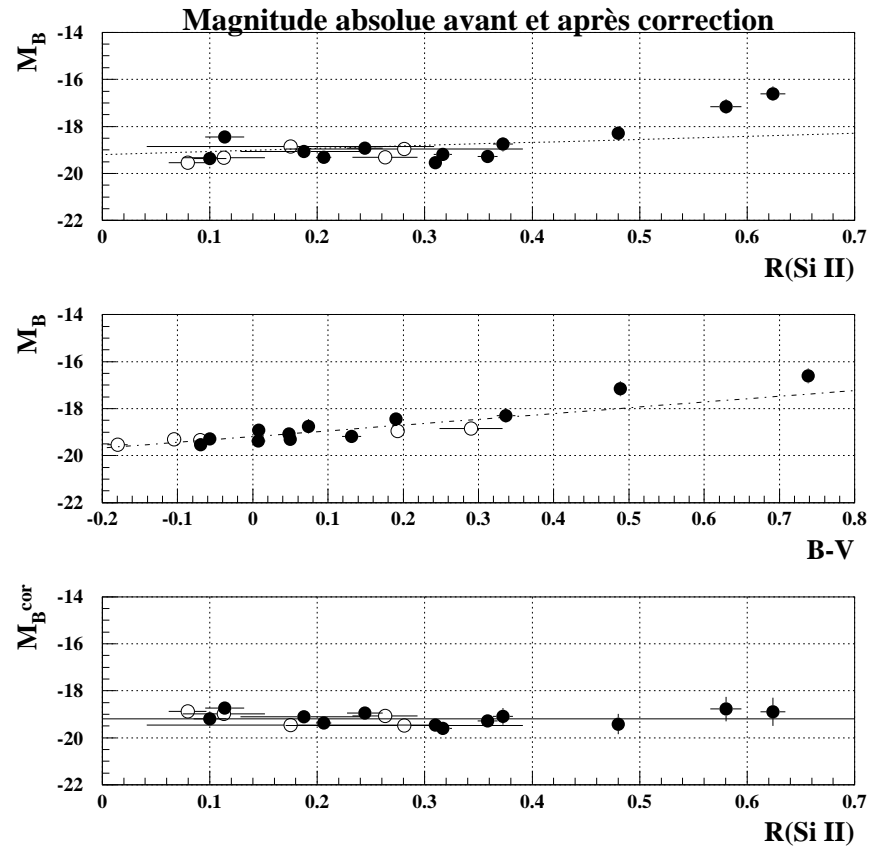
Standardisation spectroscopique



Nugent *et al* (1995) → spectres utiles pour standardisation: $\mathcal{R}(\text{Si II})$

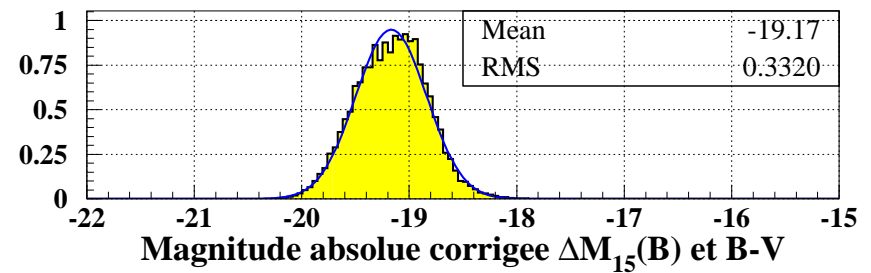
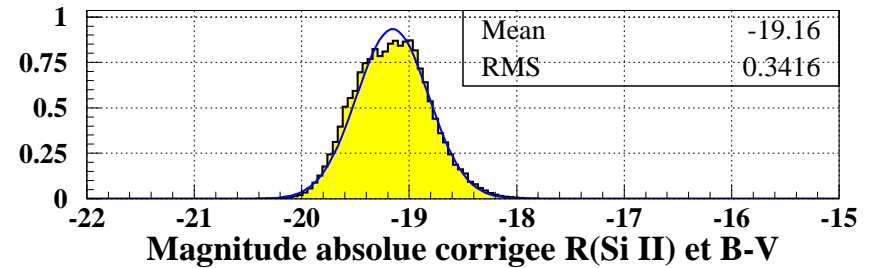
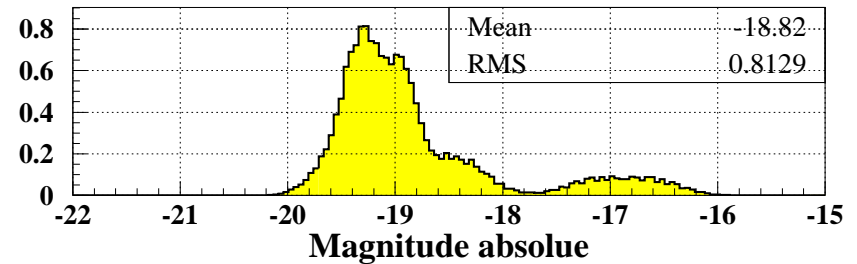
Résultats

- 17 SNe Ia: 5 Nearby99 + 12 “historiques”.
- Comparaison de deux standardisations:
 1. Couleur + $\mathcal{R}(SiII)$.
 2. Couleur + Δm_{15} .



Résultats

- 17 SNe Ia: 5 Nearby99 + 12 “historiques”.
- Comparaison de deux standardisations:
 1. Couleur + $\mathcal{R}(SiII)$.
 2. Couleur + Δm_{15} .



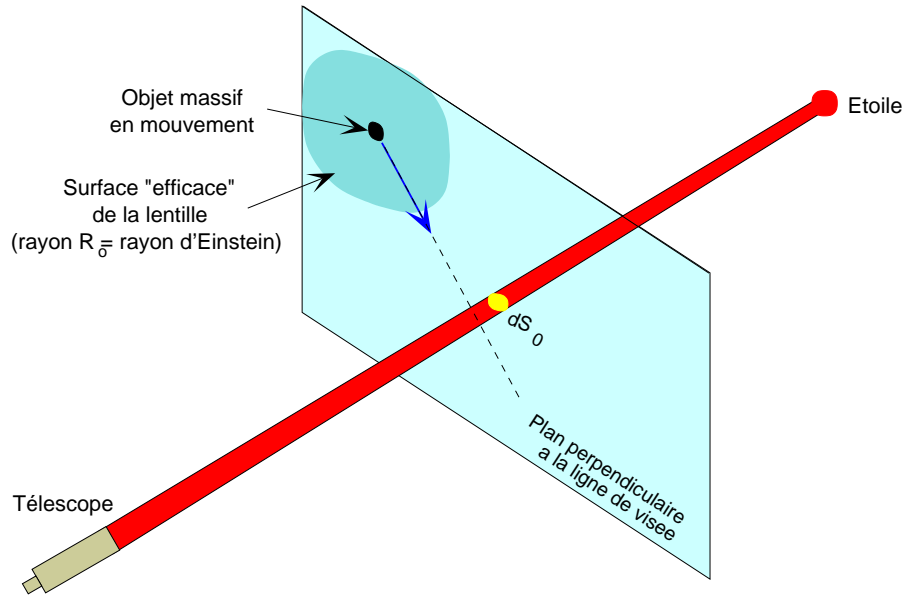
Conclusion

- Traitement de ~ 3000 images spectroscopiques.
- Optimisation pour le cas d'une SN "mélangée" avec sa galaxie hôte.
- La standardisation spectroscopique est aussi performante que celle photométrique.
- Suite \rightarrow SN Factory ?

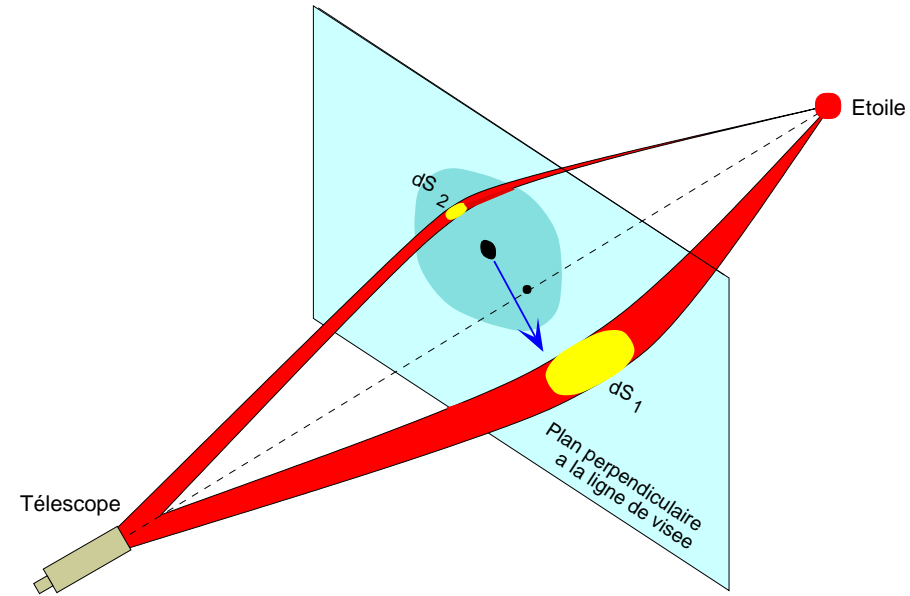
Les microlentilles gravitationnelles

- L'effet de microlentille gravitationnelle (MLG).
- Cibles et résultats d'EROS II.
- Traitement des données des bras spiraux.
- Les candidats retenus.
- Mesure de la profondeur optique et stabilité.
- Comparaison mesure/prédictions modèles.
- Conclusion.

Les microlentilles gravitationnelles

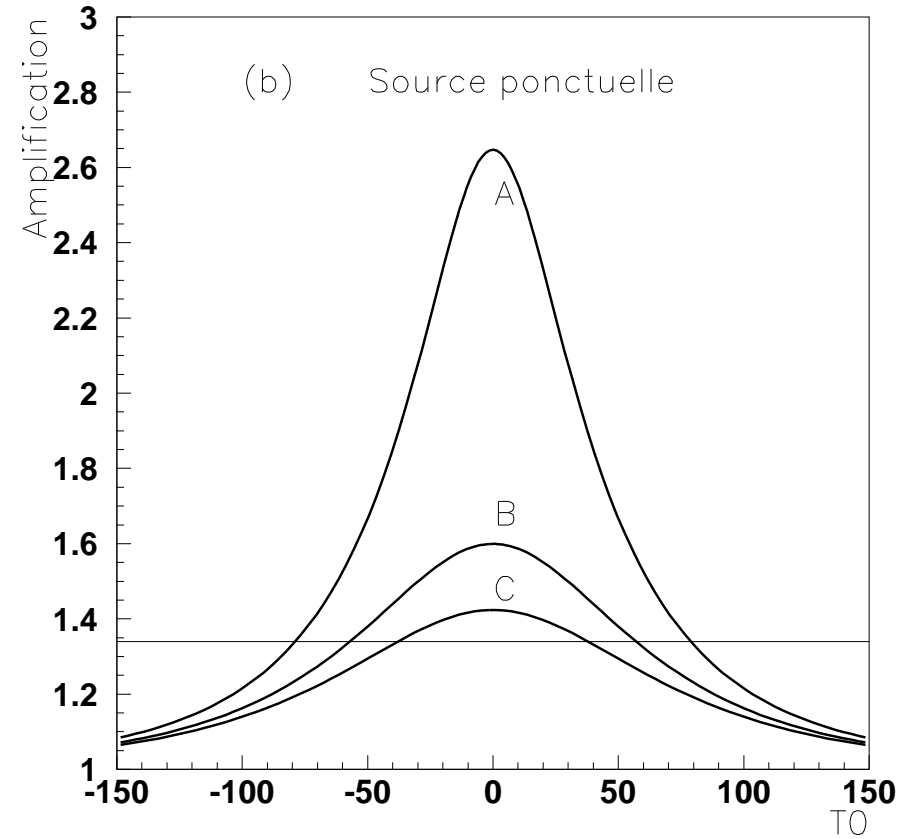
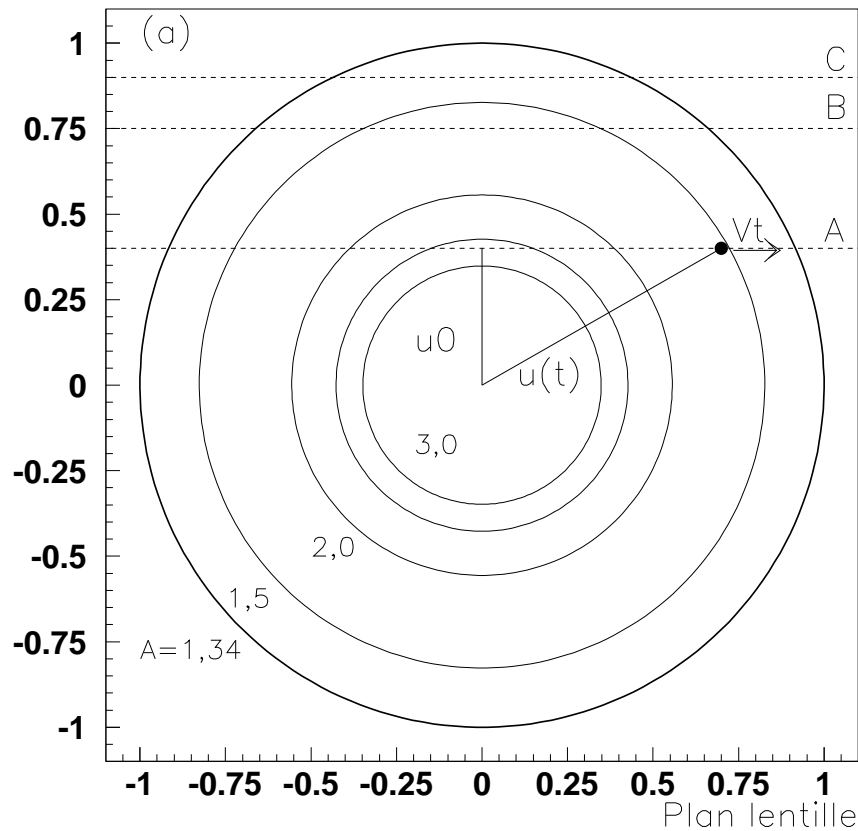


Objet massif éloigné de la ligne de visée



Objet massif proche de la ligne de visée

Les microlentilles gravitationnelles



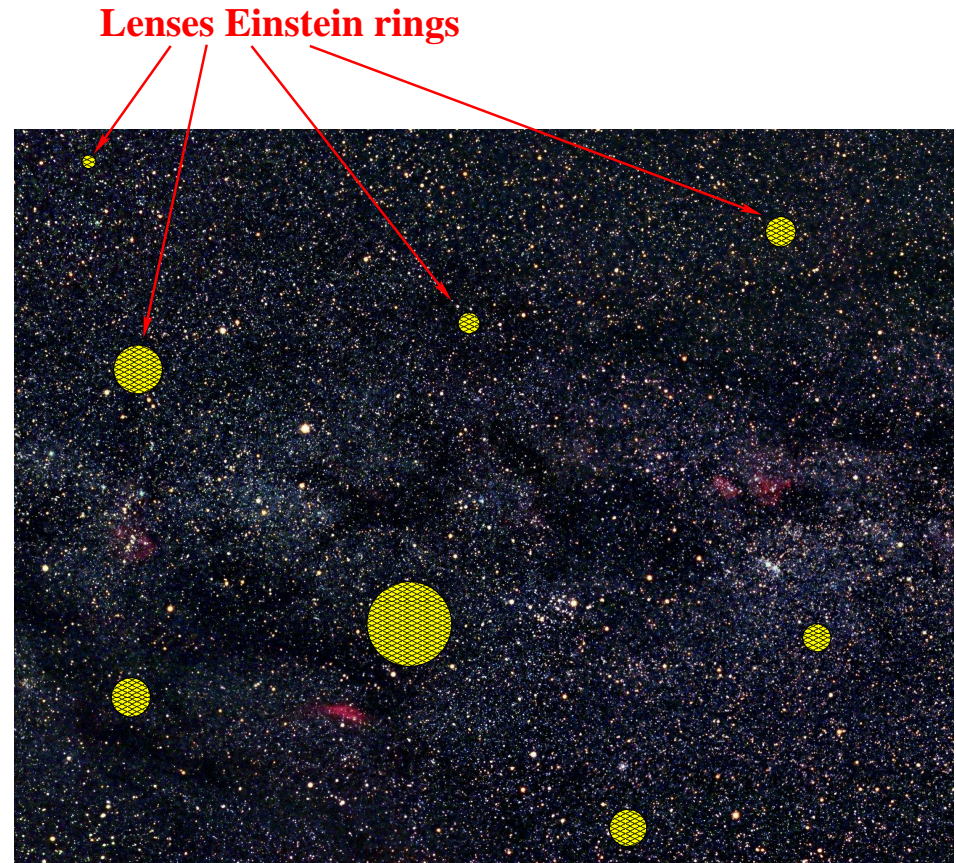
$$r_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_l d_s}{d_s}}$$

$$t_E = r_E / v$$

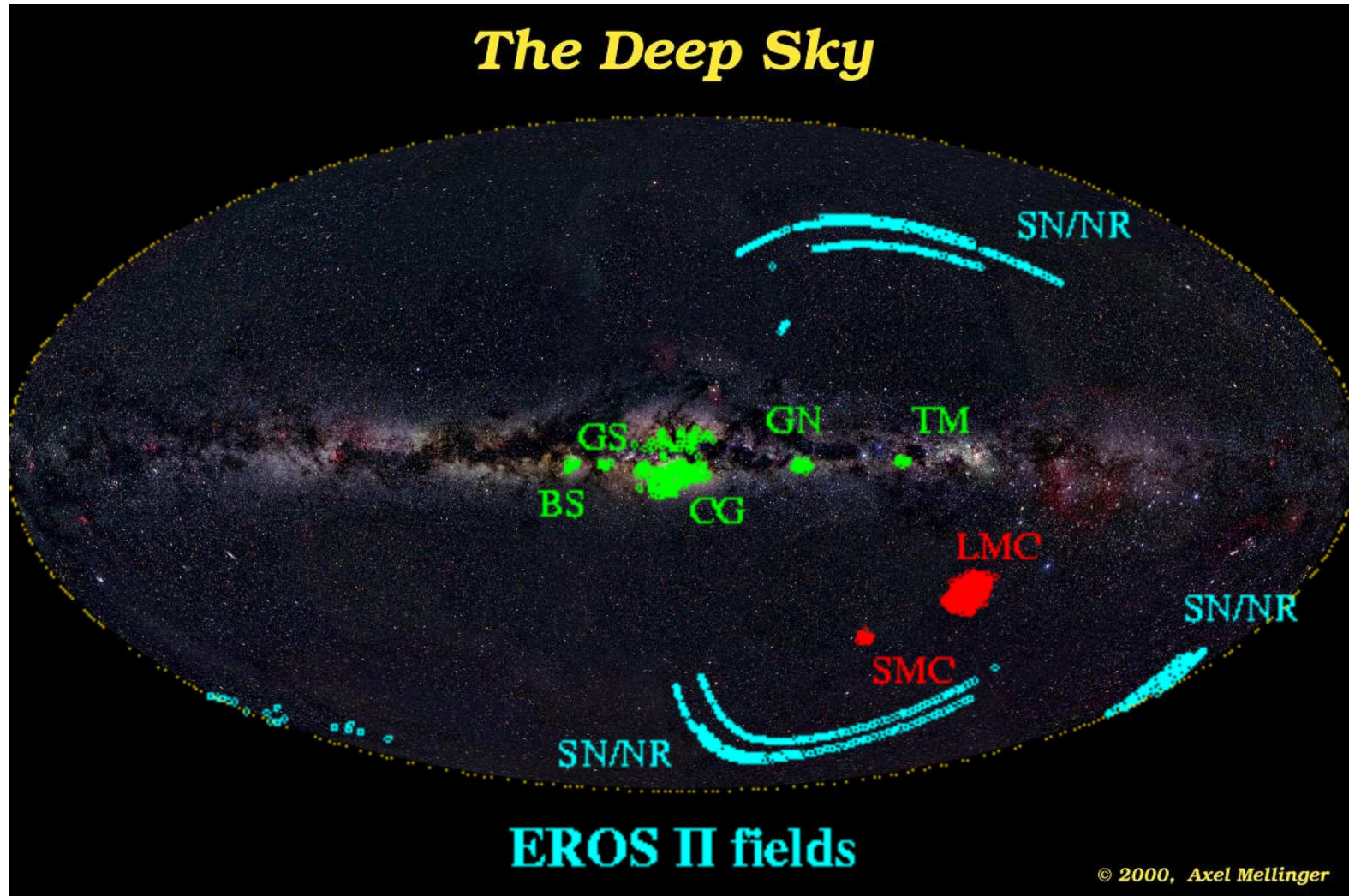
$$A(t) = \frac{u^2(t) + 2}{u(t) \sqrt{u^2(t) + 4}}, \quad u(t) = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{t-t_0}{t_E}\right)^2}$$

Notion de profondeur optique τ

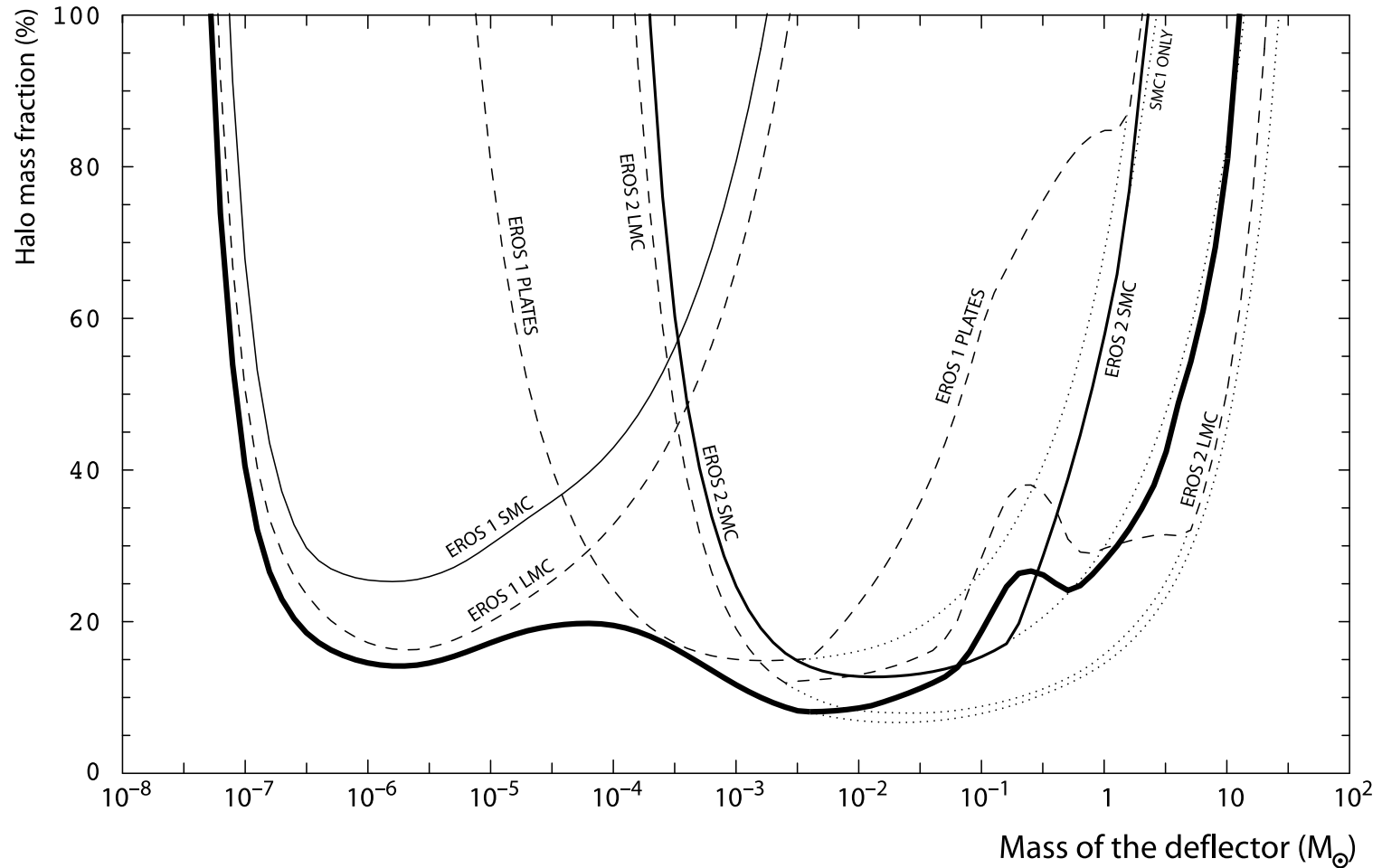
- τ = probabilité qu'une étoile source subisse un effet de MLG avec une amplification > 1.34 à un instant donné.
- $\tau = \sum \pi r_E^2 / \text{Surface totale}$.
- Expérimentalement: $\tau \propto$ au nombre d'évts. observés et à leurs durées.
- $\tau \sim 10^{-6}$ vers CG.



Cibles d'EROS II

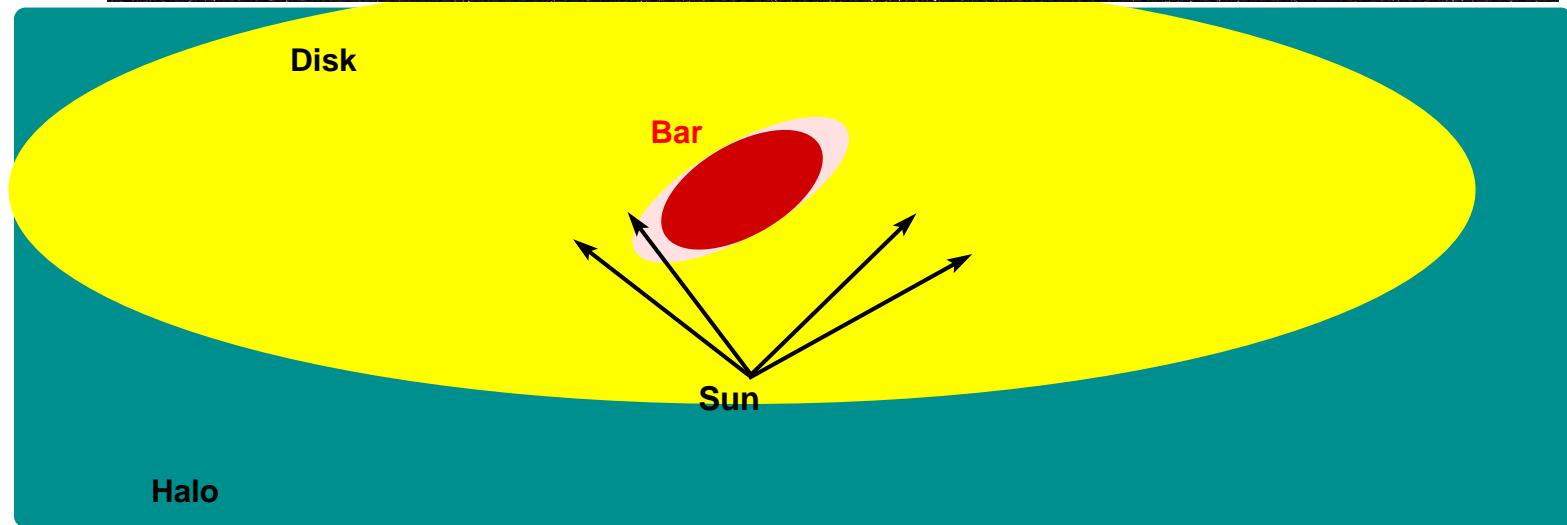
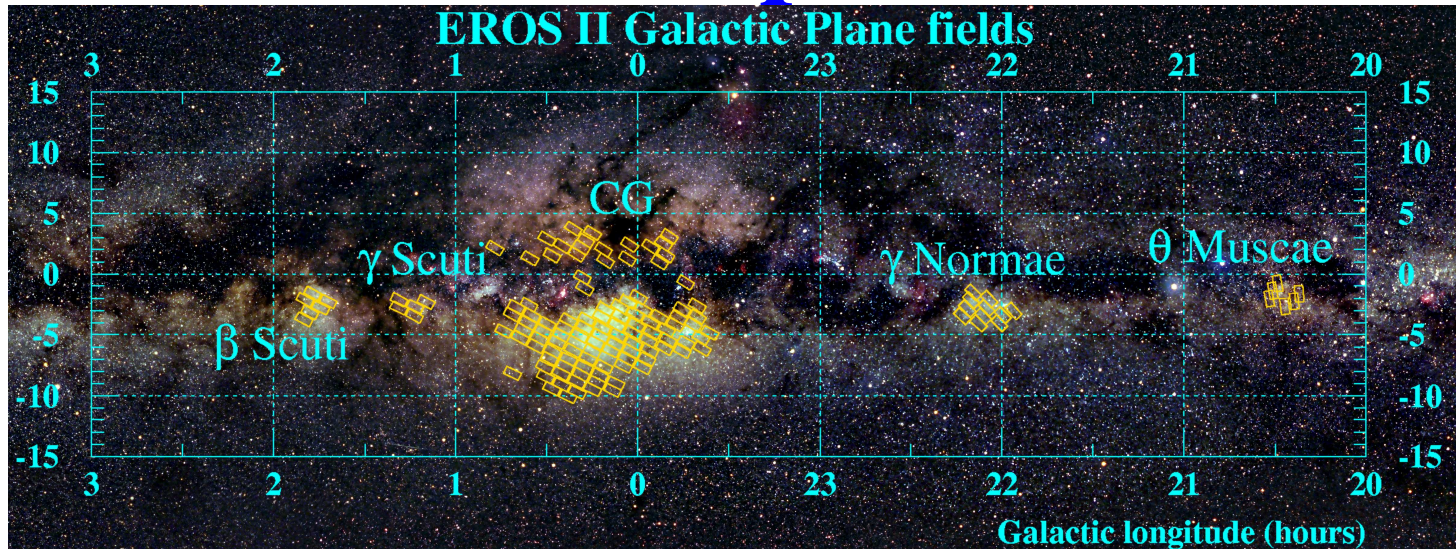


Résultats d'EROS II vers LMC/SMC



6 événements observés, ~ 50 attendus

Les bras spiraux



~ 16 millions d'étoiles dans 29×1 degré²

~ 450 mesures pendant 7 ans

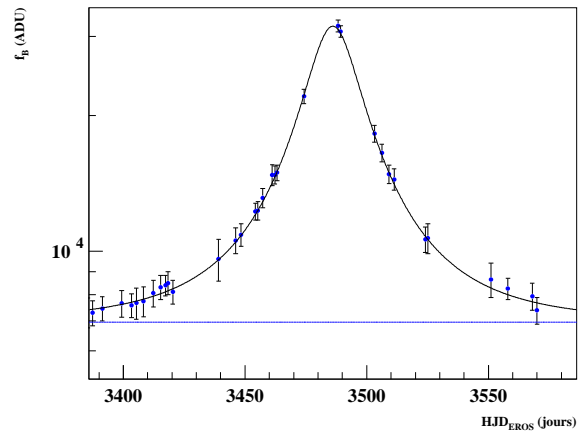
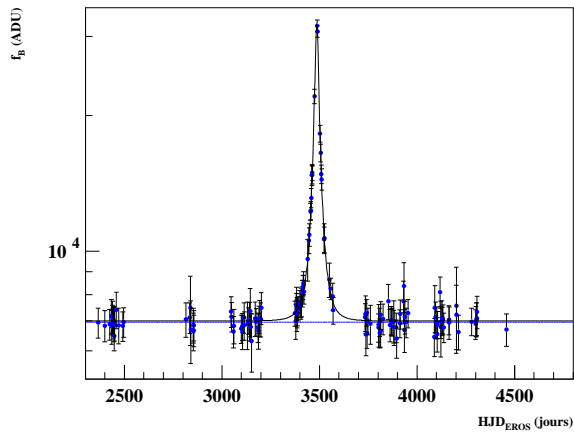
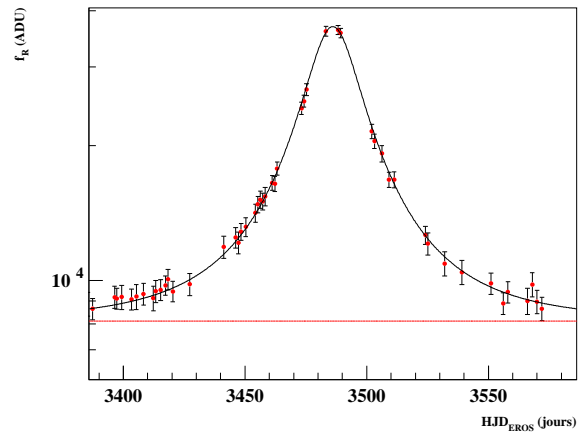
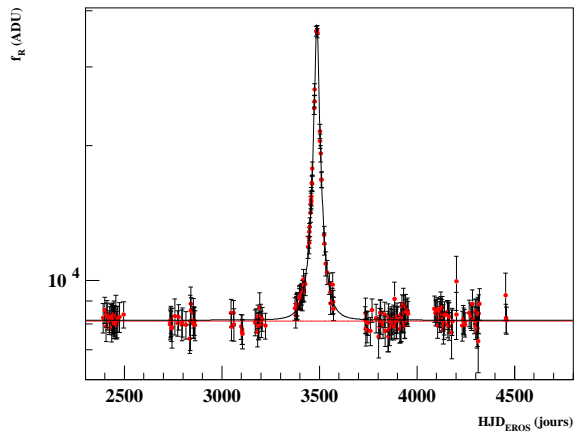
Exclusivité EROS II

Traitement des données

- Principe (au CC-IN2P3):
 1. Compositage (création des images de référence).
 2. Création des courbes de lumière.
 3. Sélection de 15% des courbes de lumière les plus variables, soit ~ 2.5 millions.
 4. Recherche des candidats MLG.
 5. En parallèle, simulation d'effet de MLG sur 2% des courbes de lumière.

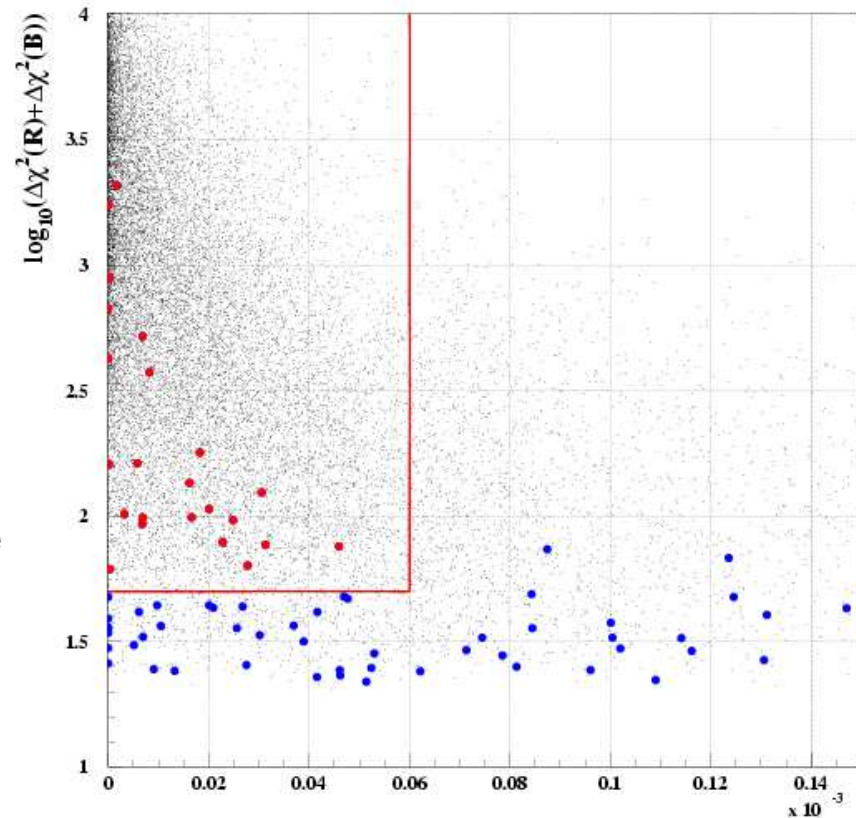
Les critères de sélection

gs 203 CCD 0 Quart m



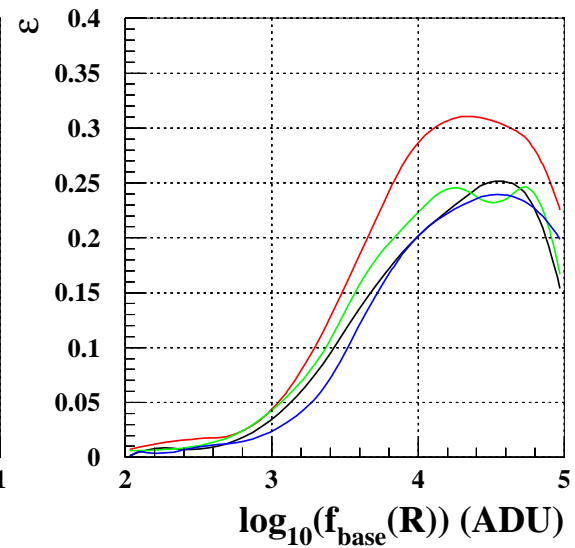
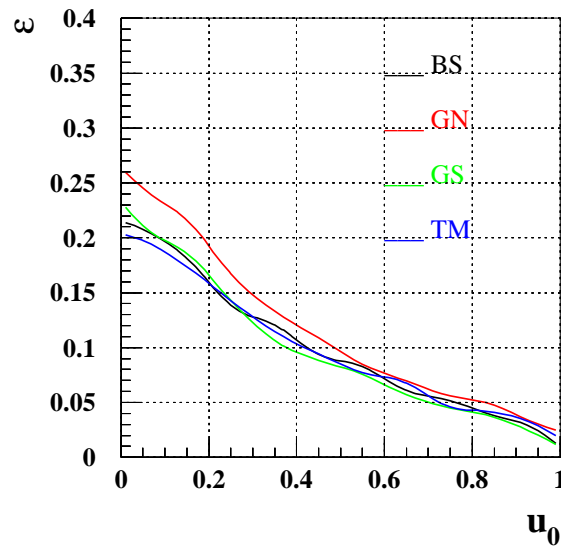
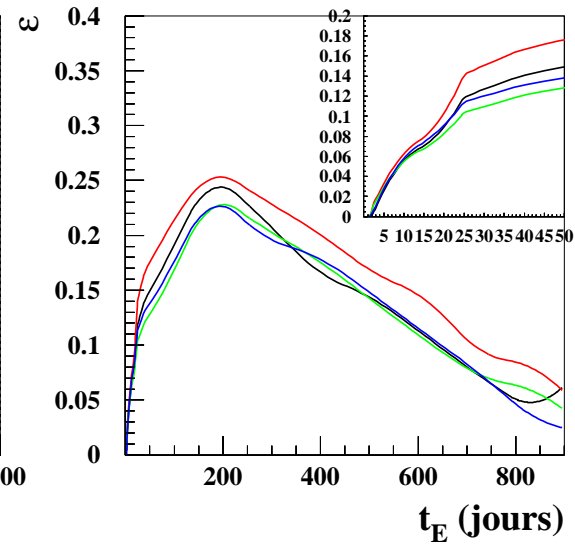
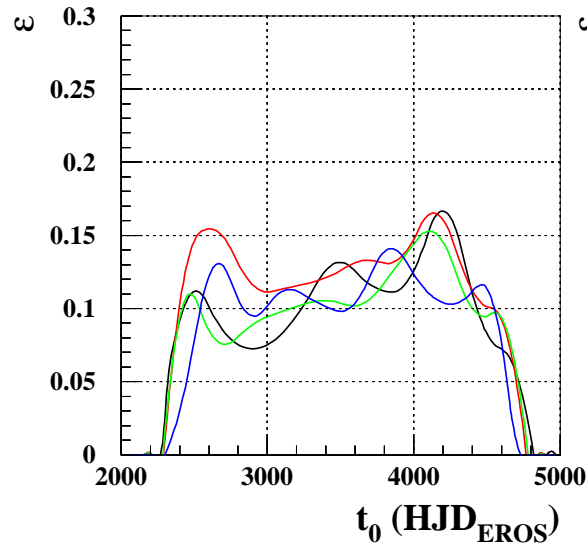
Les critères de sélection

- Recherche d'une variation significative, unique et présente dans les deux couleurs.
- Elimination d'artefacts et d'étoiles variables.
- Amélioration de S/B de la courbe de lumière.

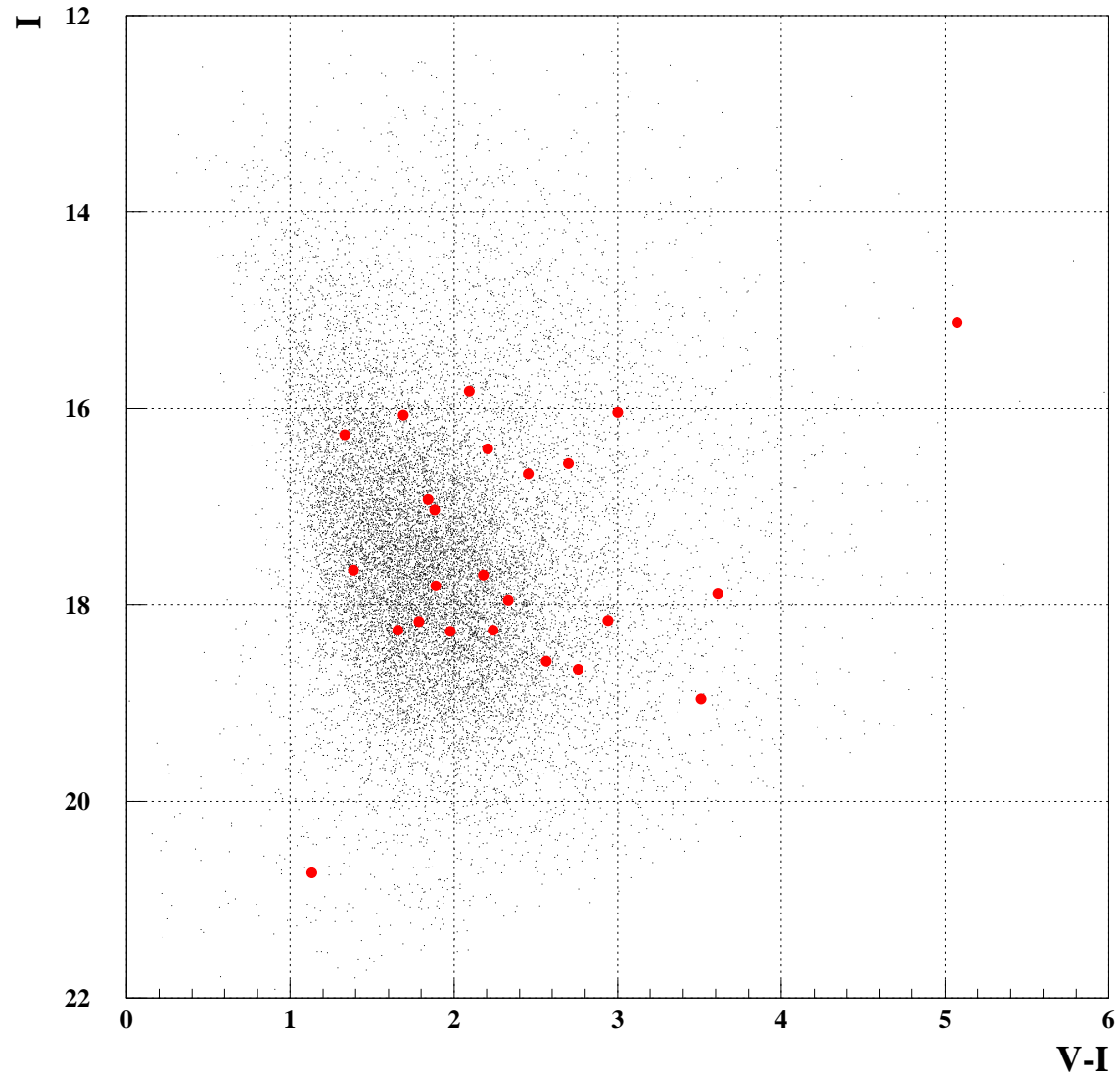


→ 24 candidats MLG sélectionnés

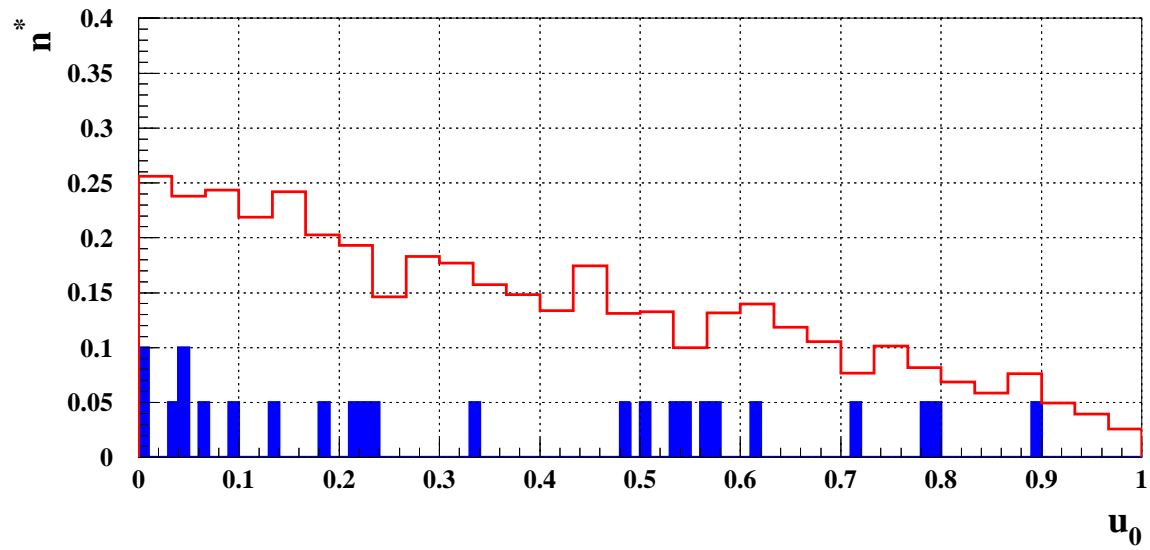
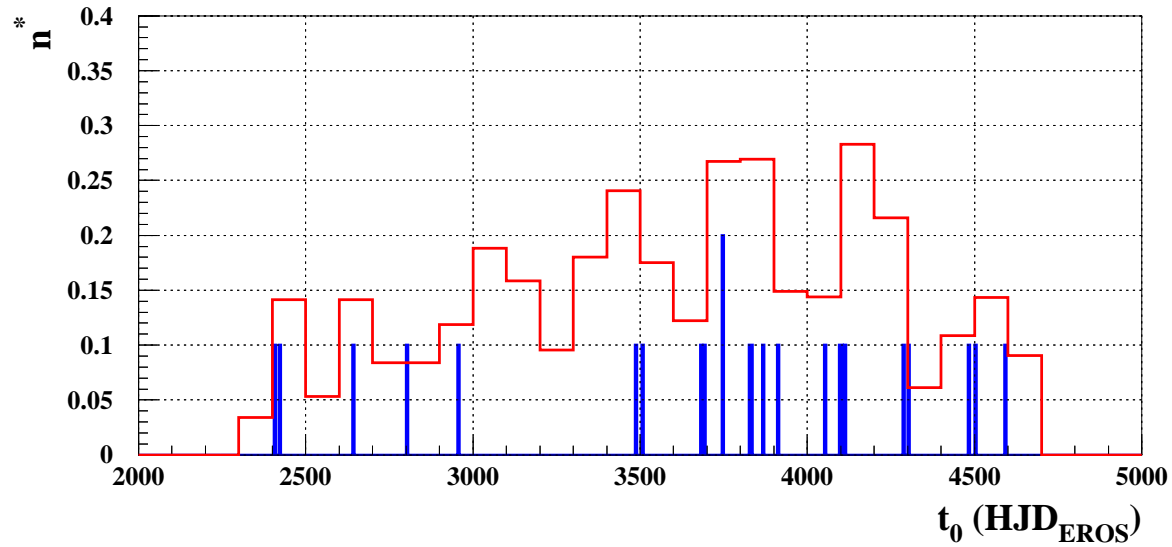
Efficacités de détection ($u_0 < 1$)



Statistiques des 24 candidats

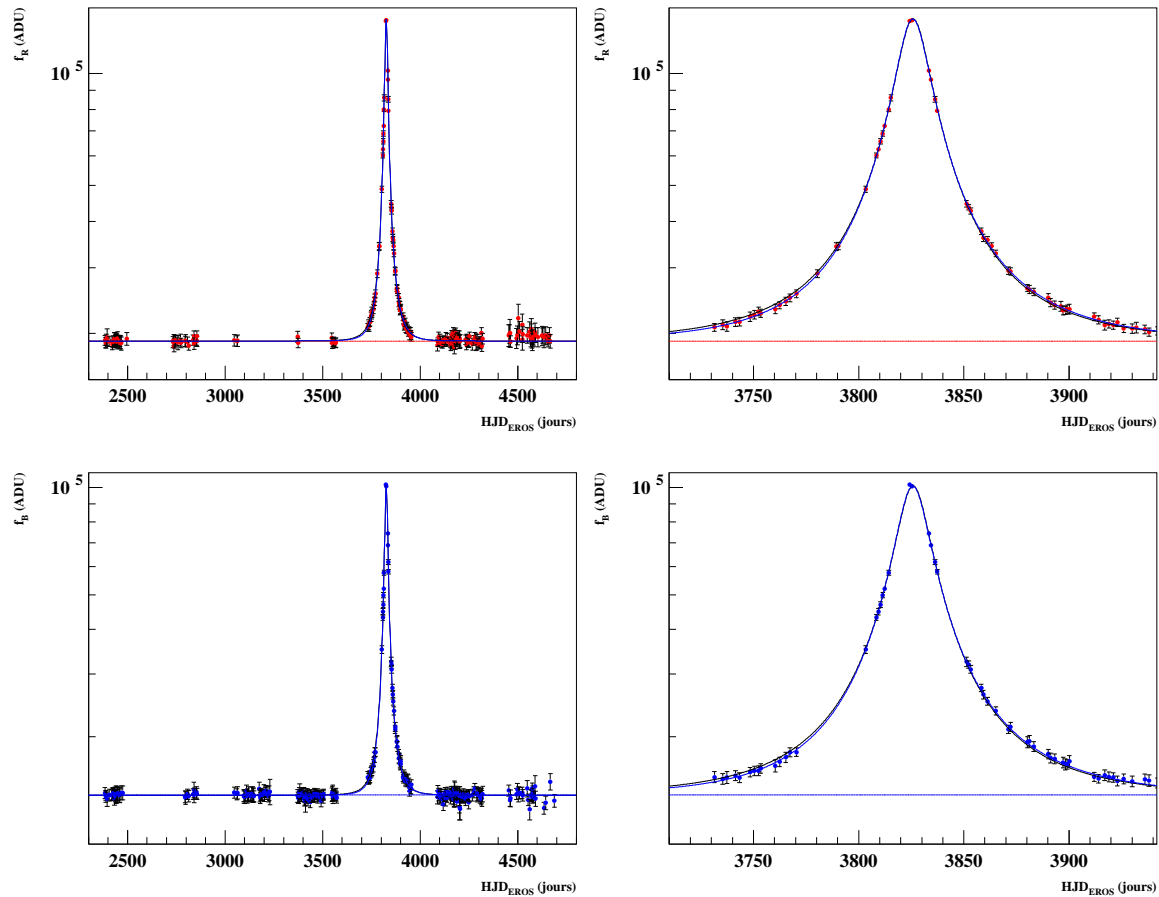


Statistiques des 24 candidats



bs3046m

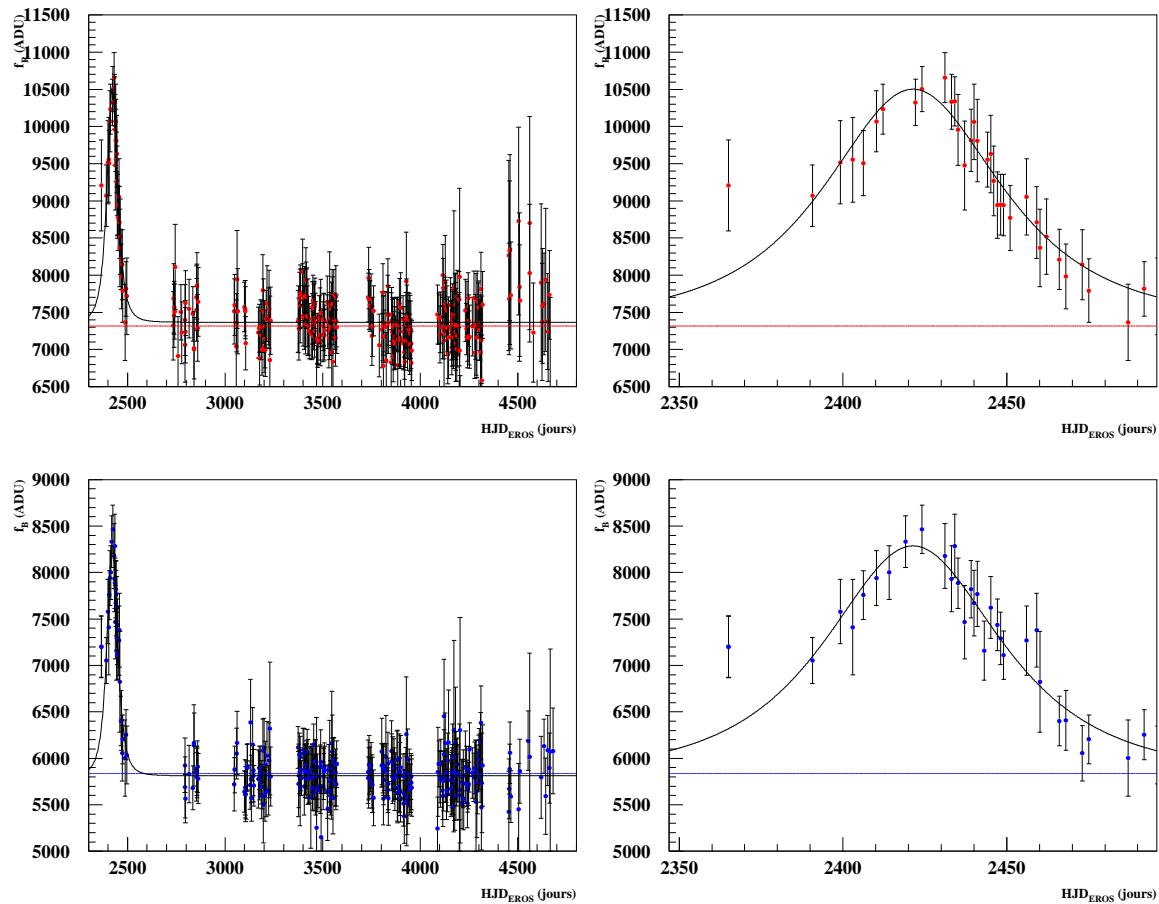
bs 304 CCD 6 Quart m



$$u_0 = 0.1370 \pm 0.0009, t_E = 55 \pm 2 \text{ jours}$$

gs2035m

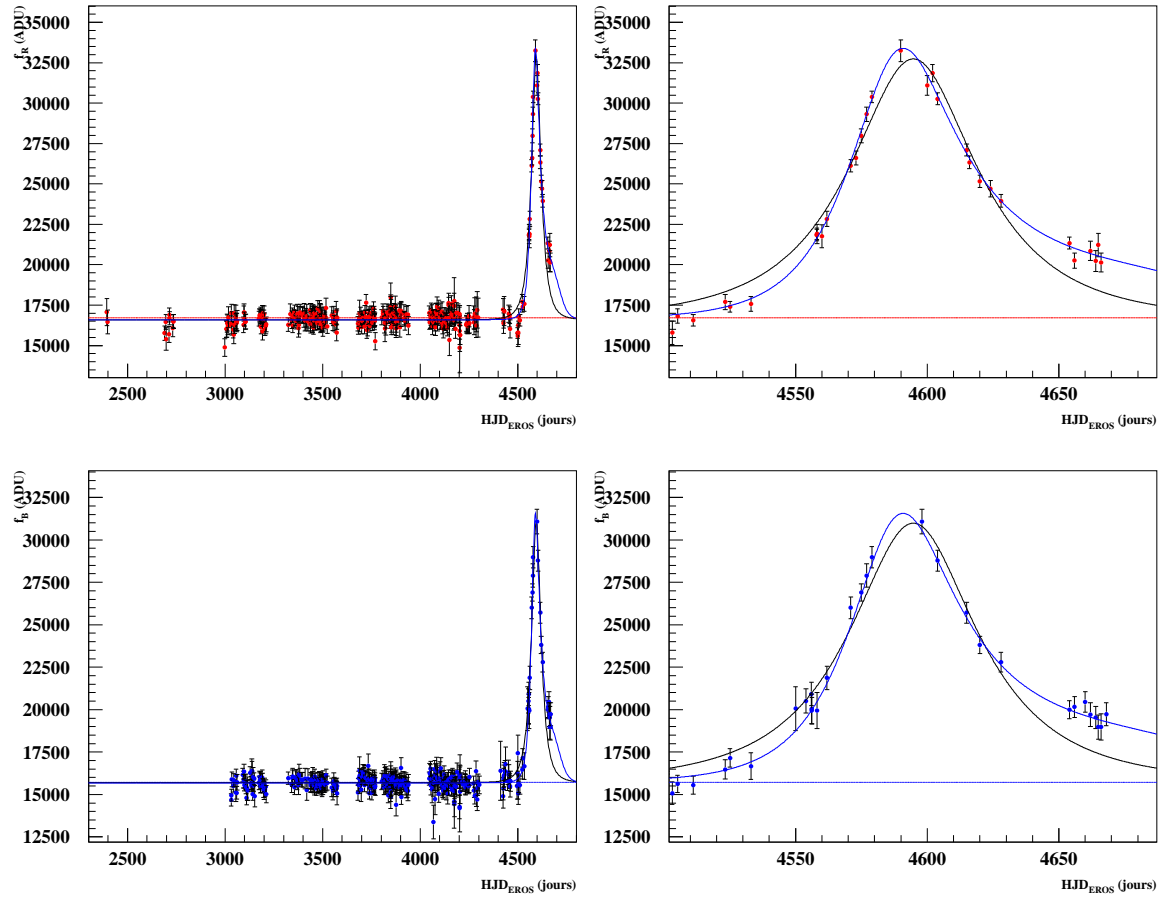
gs 203 CCD 5 Quart m



$$u_0 = 0.90 \pm 0.02, t_E = 37 \pm 2 \text{ jours}$$

gn40231

gn 402 CCD 3 Quart I



$$u_0 = 0.72 \pm 0.02, t_E = 40 \pm 5 \text{ jours}$$

Comparaison avec F. Derue (1999)

- 3 saisons de suivis (\sim 150 mesures)
→ 7 saisons (\sim 450 mesures).
- Nouvelles images de références
→ 75% d'étoiles suivies en plus.
- 4/7 candidats ne sont pas sélectionnés:
 1. Deux avec nouvelle variation.
 2. Deux ne vérifient plus les critères.

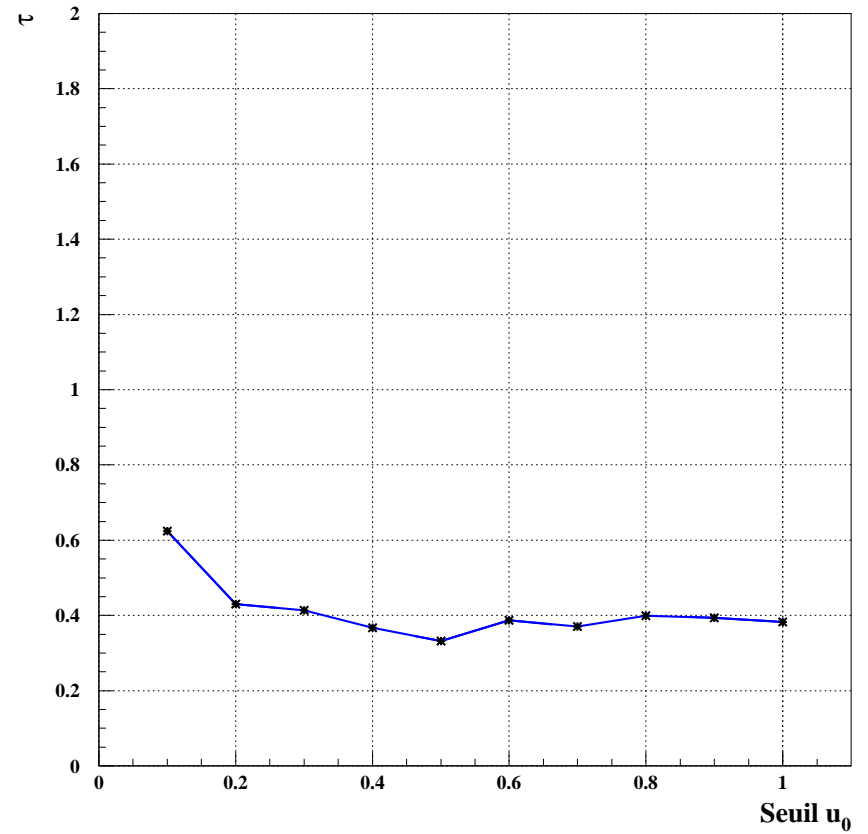
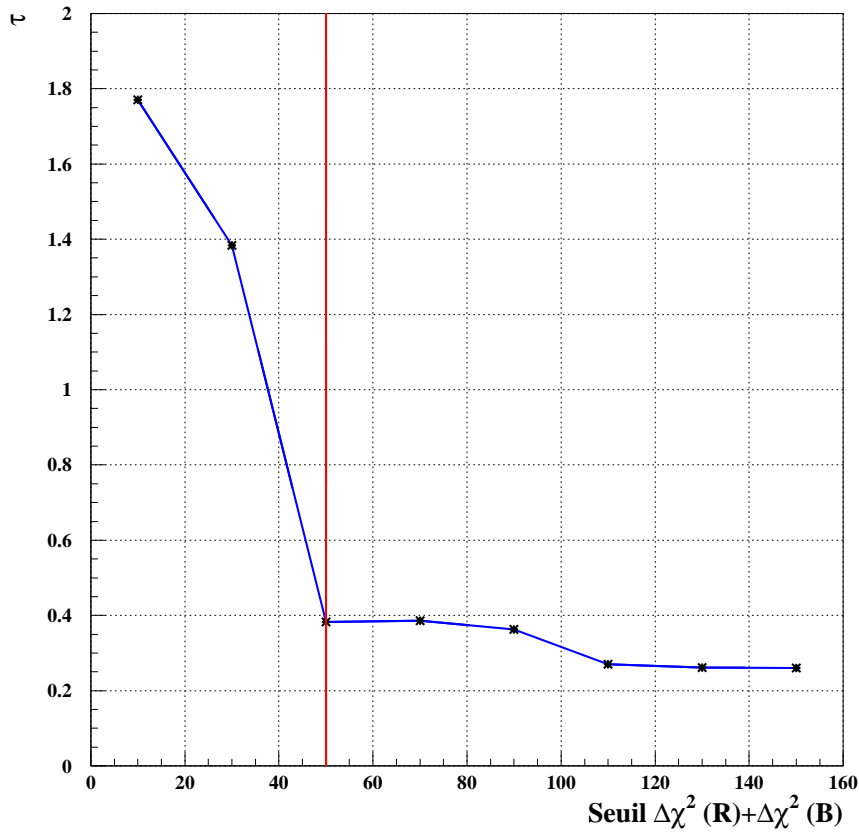
Mesure de la profondeur optique

- Estimateur:

$$\tau = \frac{1}{N_{obs} T_{obs}} \frac{\pi}{2} \sum \frac{t_{Ei}}{\varepsilon(t_{Ei})}$$

Cible	N_{evt}	$\langle t_E \rangle$ (jours)	τ ($\times 10^6$)	Résultat de F. Derue (1999)
ϑ Mus	2	50	$0.18^{+0.20}_{-0.11}$	< 0.64 (0 évts)
γ Nor	11	58	$0.39^{+0.13}_{-0.11}$	$0.27^{+0.36}_{-0.09}$ (2 évts)
γ Sct	7	49	$0.74^{+0.35}_{-0.29}$	$1.82^{+1.23}_{-0.50}$ (5 évts)
β Sct	4	59	$0.31^{+0.21}_{-0.13}$	< 1.08 (0 évts)
Total	24	55	0.38 ± 0.08	$0.45^{+0.24}_{-0.11}$ (7 évts)

Stabilité de la mesure

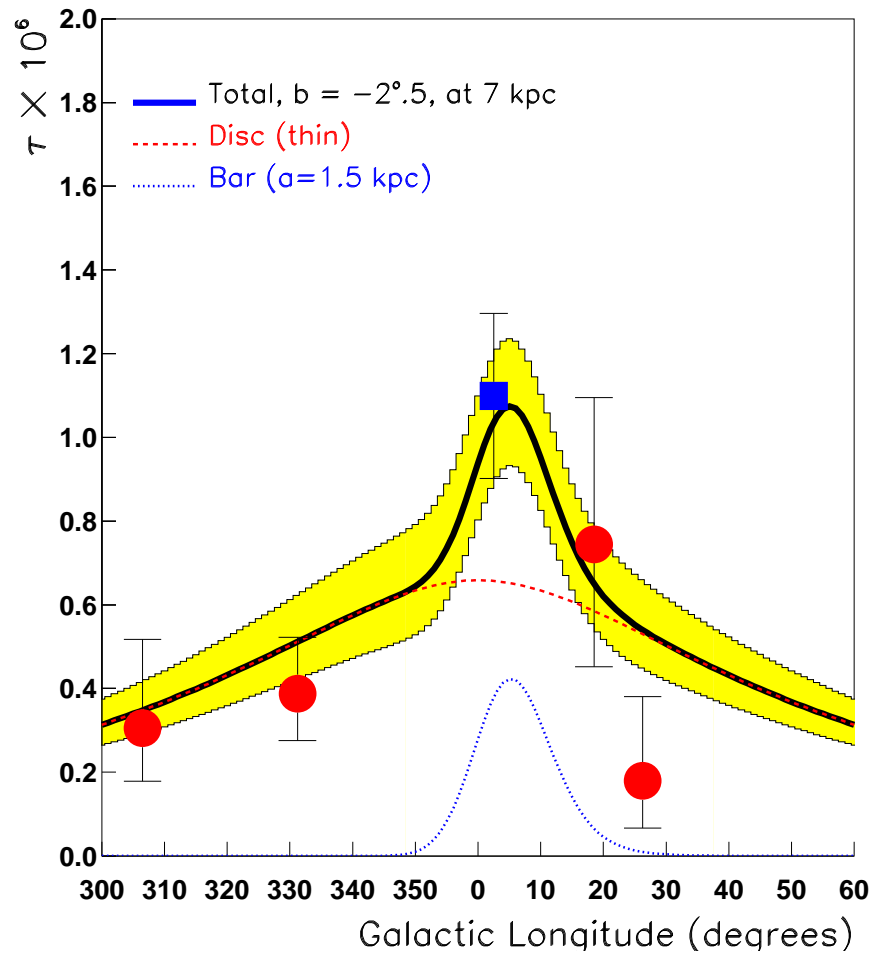


Comparaison aux modèles (1)

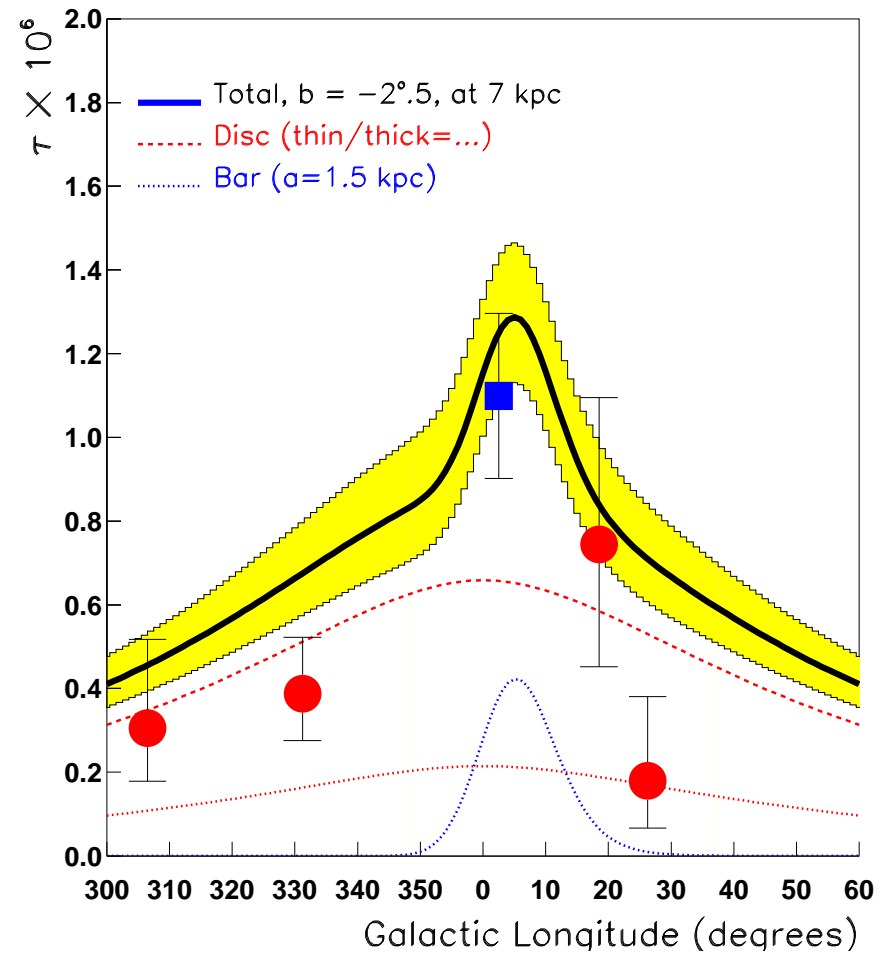
$\tau (\times 10^6)$	ϑ Mus	γ Nor	γ Sct	β Sct	CG
EROS II	$0.18^{+0.20}_{-0.11}$	$0.39^{+0.13}_{-0.11}$	$0.74^{+0.35}_{-0.29}$	$0.31^{+0.21}_{-0.13}$	0.94 ± 0.29
Derue 1999	0.34	0.49	0.65	0.56	—
Derue + disque épais	0.45	0.63	0.82	0.74	—
Binney <i>et al</i> (1995) [†]	0.32	0.48	0.79	0.60	0.9
Freudenreich (1998) [†]	0.47	0.78	1.11	0.95	2.0
Dwek <i>et al</i> (1995) [†]	0.34	0.51	0.85	0.64	1.2
Grenacher <i>et al</i> (1999)	0.32	0.56	0.41	0.38	—

[†] Calcul de τ par Evans et Belokurov 2002.

Comparaison aux modèles (2)

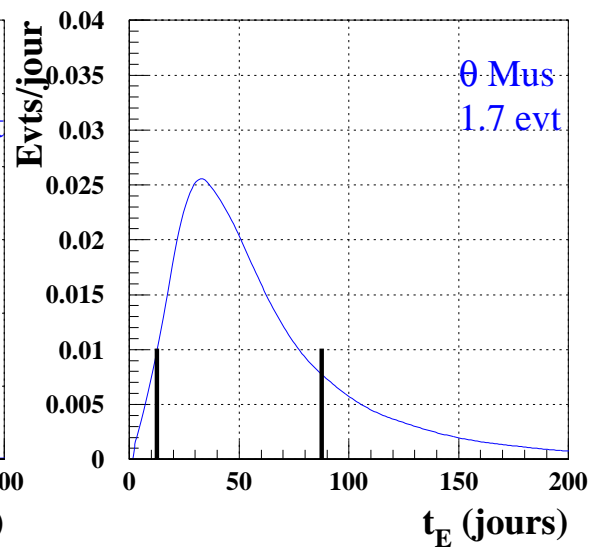
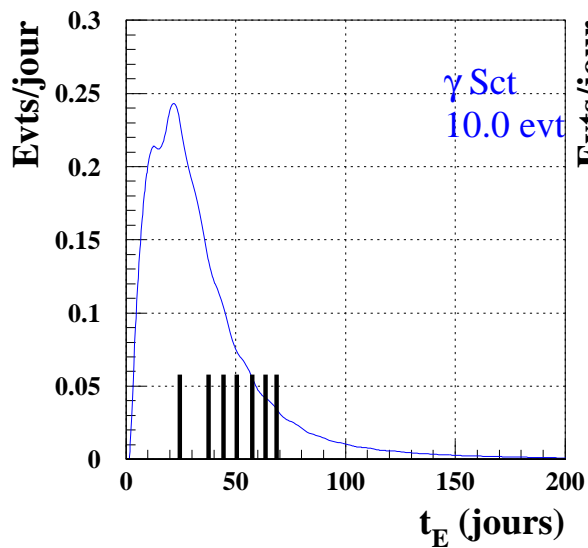
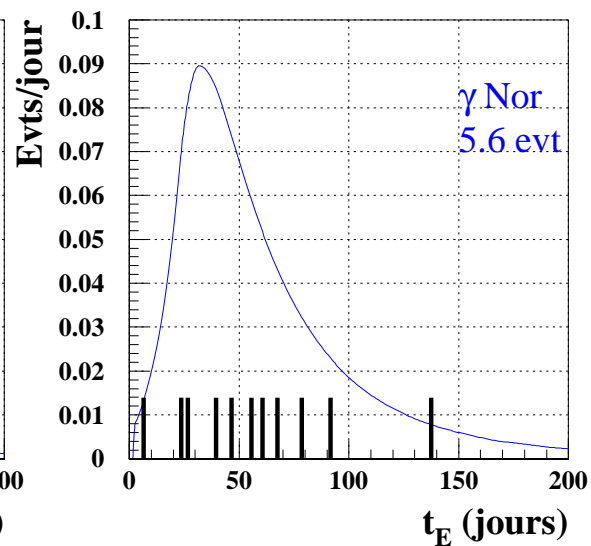
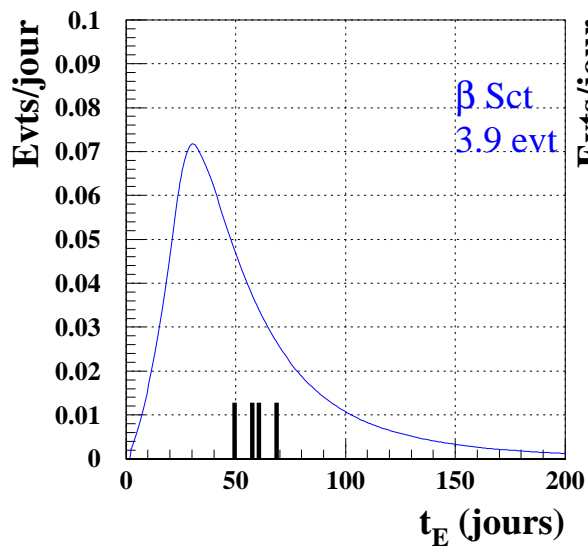


Modèle F. Derue (1999)



Idem + Disque épais

Comparaison aux modèles (3)



Conclusion

- Recherche de MLG parmi 16 M étoiles dans 29 degré² de part et d'autre du CG (**Exclusivité EROS II**).
- **24 candidats retenus.**
- Mesure de τ valable pour notre population stellaire et pour $t_E < 700$ jours.
- τ favorise plutôt des modèles à petite profondeur optique (sans matière noire compacte).
- La distance vers les sources reste mal connue
⇒ systématique.