

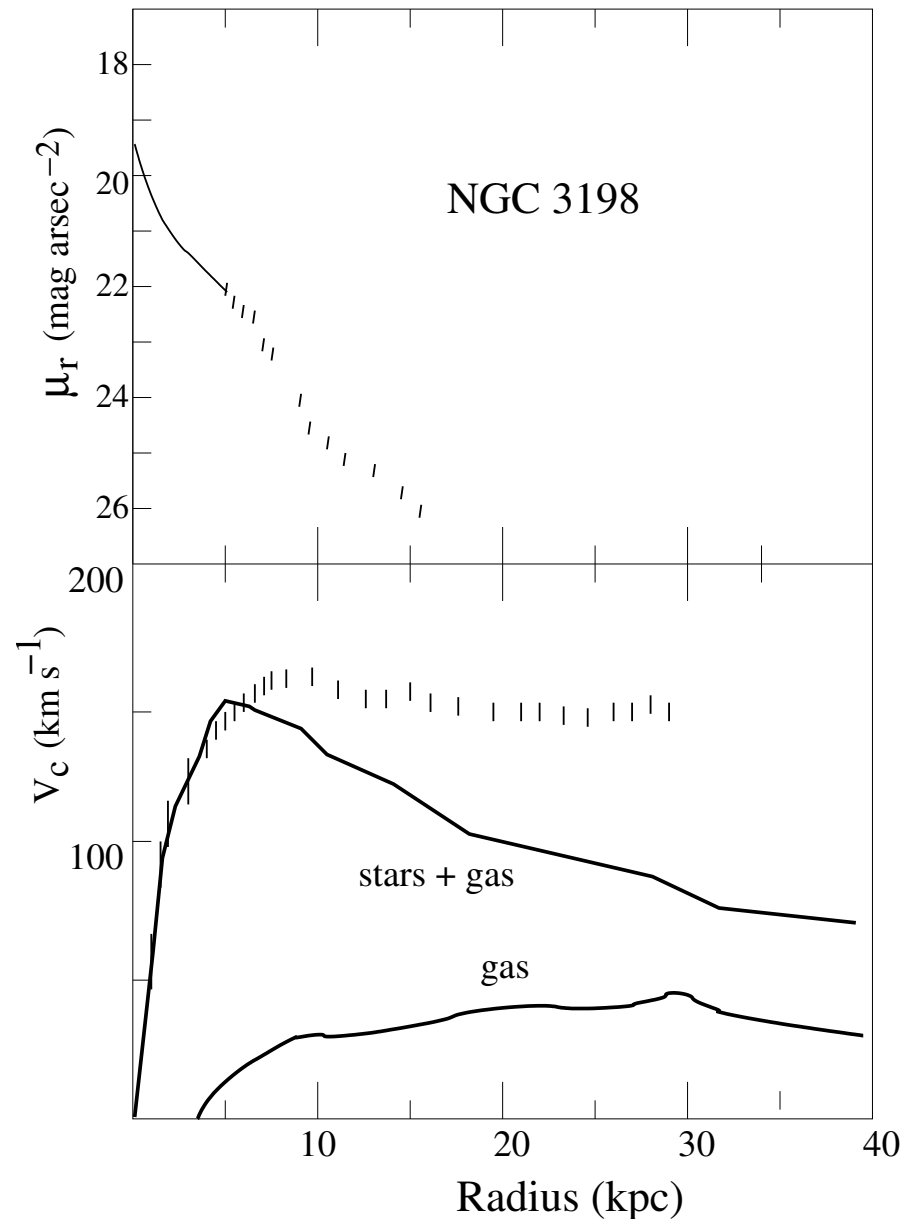
Les derniers résultats d'EROS 2

Clarisse Hamadache
CEA Saclay/DAPNIA

Plan

- Eros 2 : motivation
- Effet de microlentille gravitationnelle
- Eros 2 : Instrument et données
- Analyse des données du centre galactique
- Résultats (centre galactique et Nuages de Magellan)

Matière noire galactique

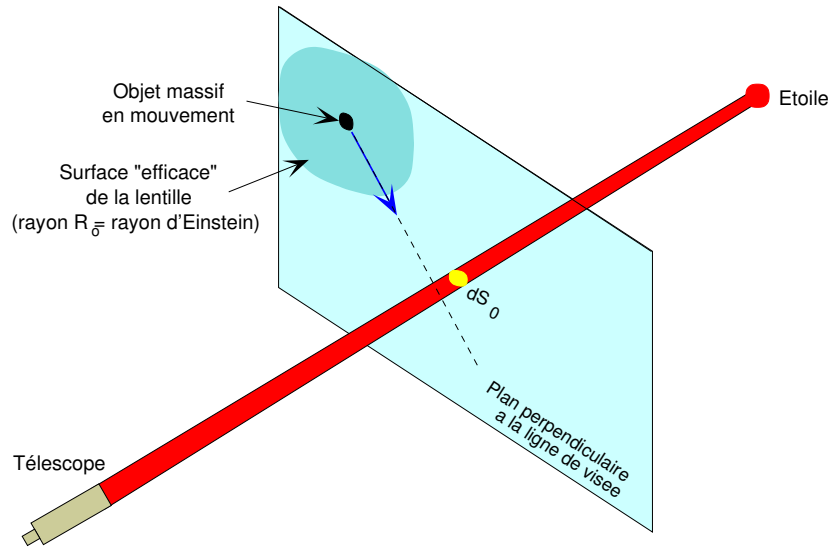


Surface Brightness

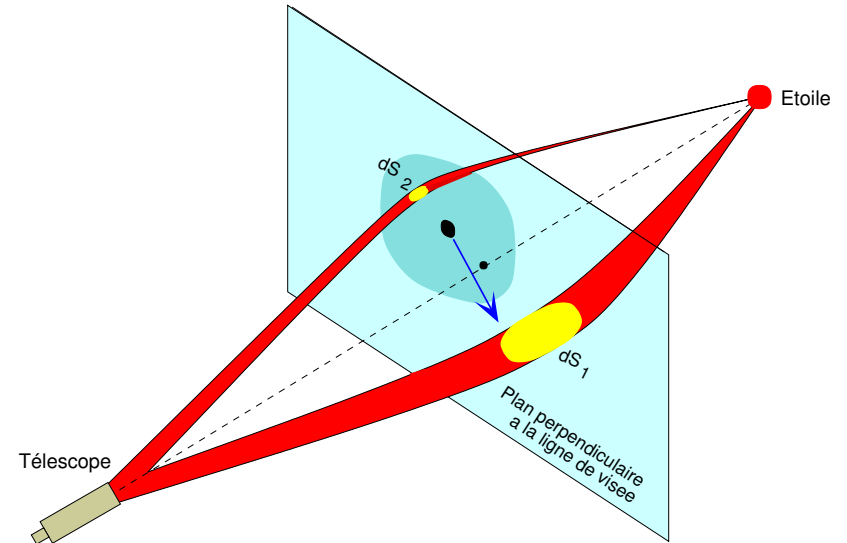
Rotation curve

total mass/luminous mass
 ~ 5

Microlentille gravitationnelle



Objet massif éloigné de la ligne de visée



Objet massif proche de la ligne de visée

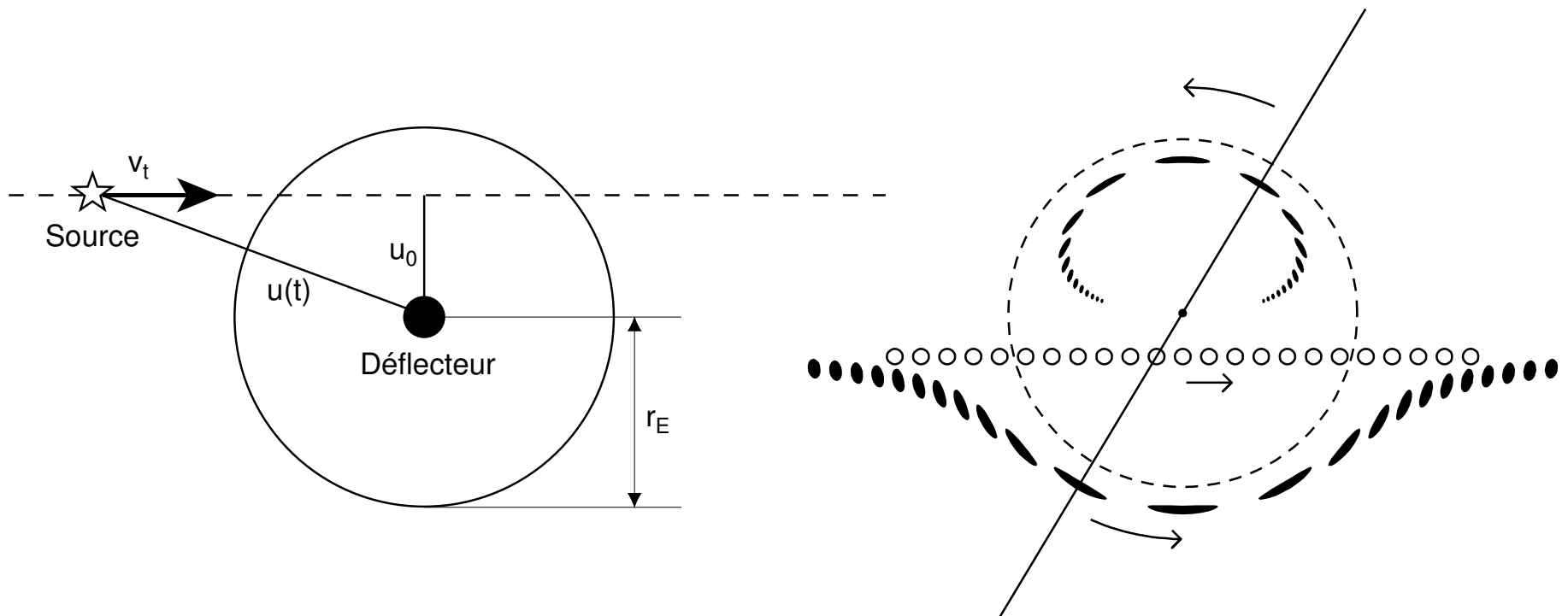
amplification totale $A = A_+ + A_- = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} > 1 \quad u = b/R_E$

rayon d'Einstein $R_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_l(D_s - D_l)}{D_s}}$

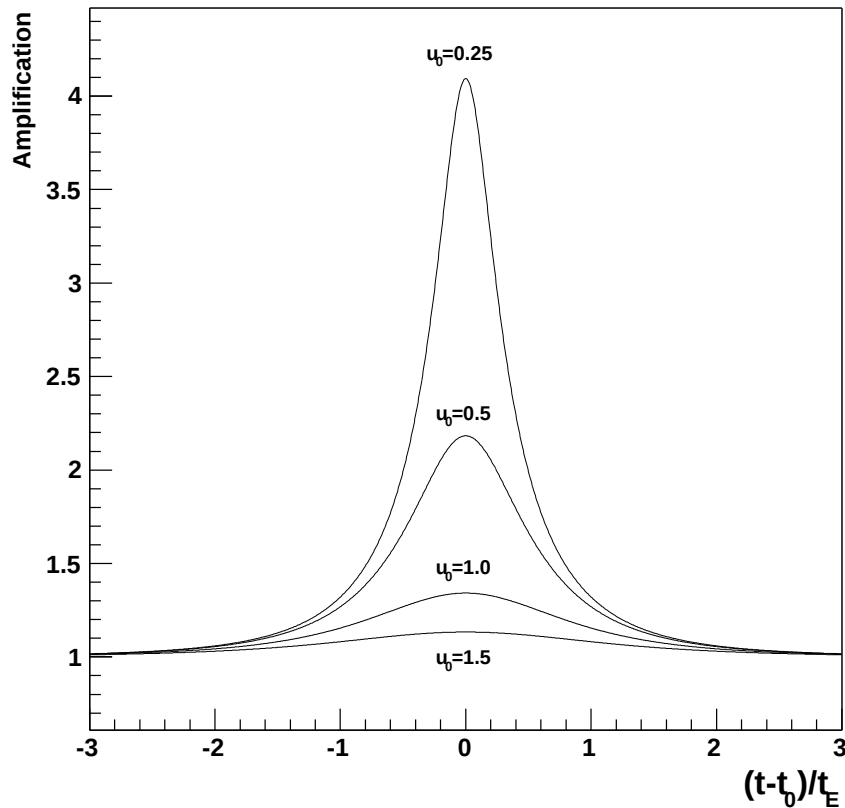
Effet de microlentille : dynamique

lentille et source en mouvement relatif

$$u(t) = \sqrt{u_0^2 + \frac{v_t(t - t_0)^2}{r_E^2}} \quad t_E = \frac{r_E}{v_t}$$



Courbe de lumière



échelle de temps t_E

$$t_E = \frac{R_E}{v_t} = \sqrt{M} f(D_l, D_s, v_t)$$

$A > 1.34$ pour $u < 1$

Signal symétrique et indépendant de la longueur d'onde.

Profondeur optique

Profondeur optique :

probabilité qu'à un instant donné une étoile source subisse un effet de microlentille induisant une amplification apparente de flux de l'étoile de plus de 34% (i.e. $u_0 < 1$)

= probabilité que la ligne de visée vers une source donnée traverse le disque d'Einstein d'une lentille

$$\tau = \frac{4\pi G}{c^2} \int_0^{D_s} \rho_l \frac{D_l(D_s - D_l)}{D_s} dD_l$$

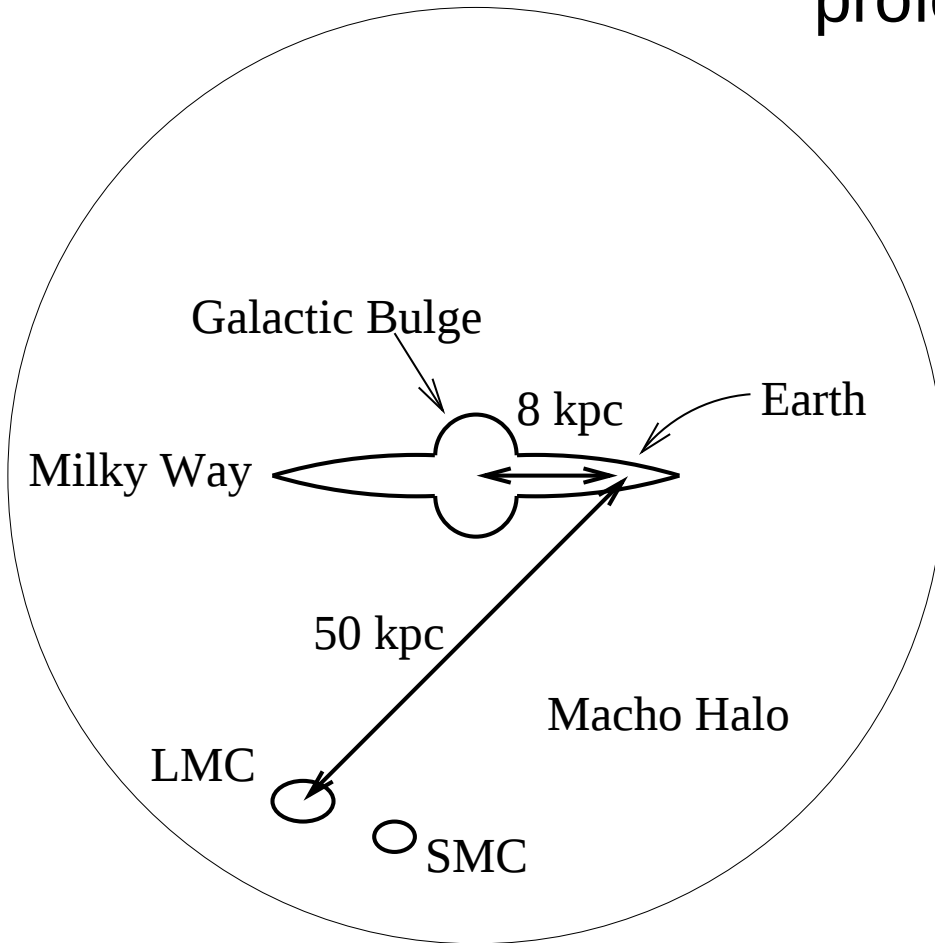
τ dépend de la densité de lentilles dans la région sondée et de la distance de la source et des déflecteurs

Détection d'objets compacts

“profondeur optique” = probabilité pour

$$A > 1.34 \quad (u_0 < 1) :$$

$$\tau = \int dr \, n(r) \pi R_E^2$$



Centre Galactique

lentilles = étoiles normales

$$\tau \sim (1 - 2) \times 10^{-6}$$

Nuages de Magellan

lentilles = hypothétiques machos

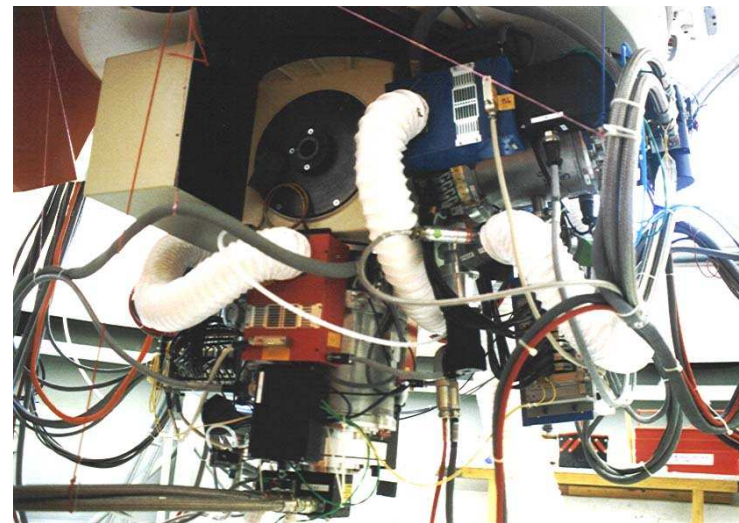
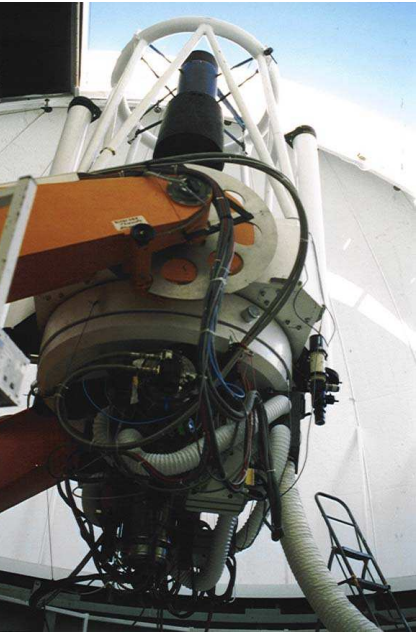
$$\tau \sim 5 \times 10^{-7}$$

EROS-2 : Expérience de Recherche d'Objets Sombres

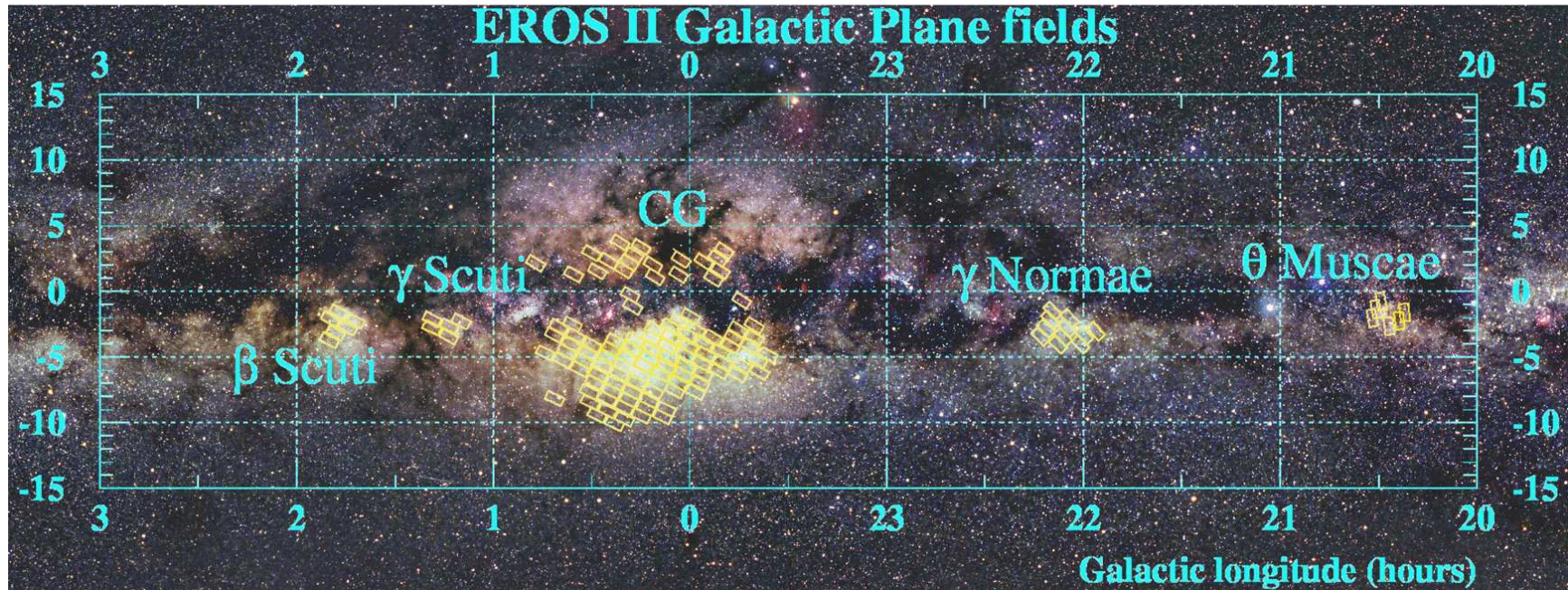
- télescope Marly $\varnothing$ 1 m, ESO LaSilla (Chili)
- 2 cameras CCD ($2 \times 1 \text{ deg}^2$)
 - 2 mosaïques de 8 CCDs, 2048×2048 pixels
- Prise de données : 1996-2003

→ 50 teraoctets de données

2 filtres dits
"rouge et bleu"

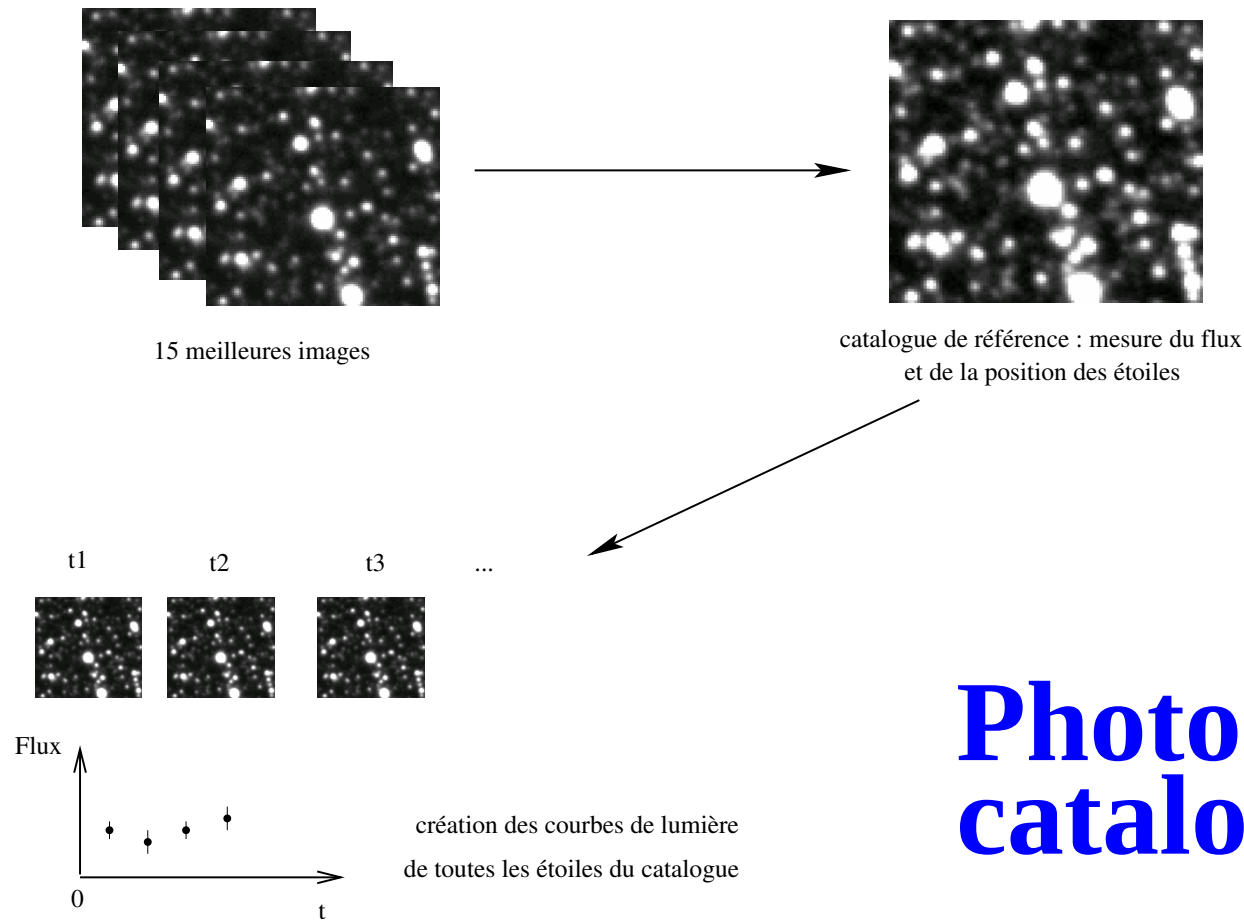


EROS-2 : champs du plan galactique



Centre Galactique observable entre février et octobre

Photométrie : principe



Photométrie sur catalogue

Photométrie en champs encombrés

66 deg² (6 ans) $\Rightarrow$

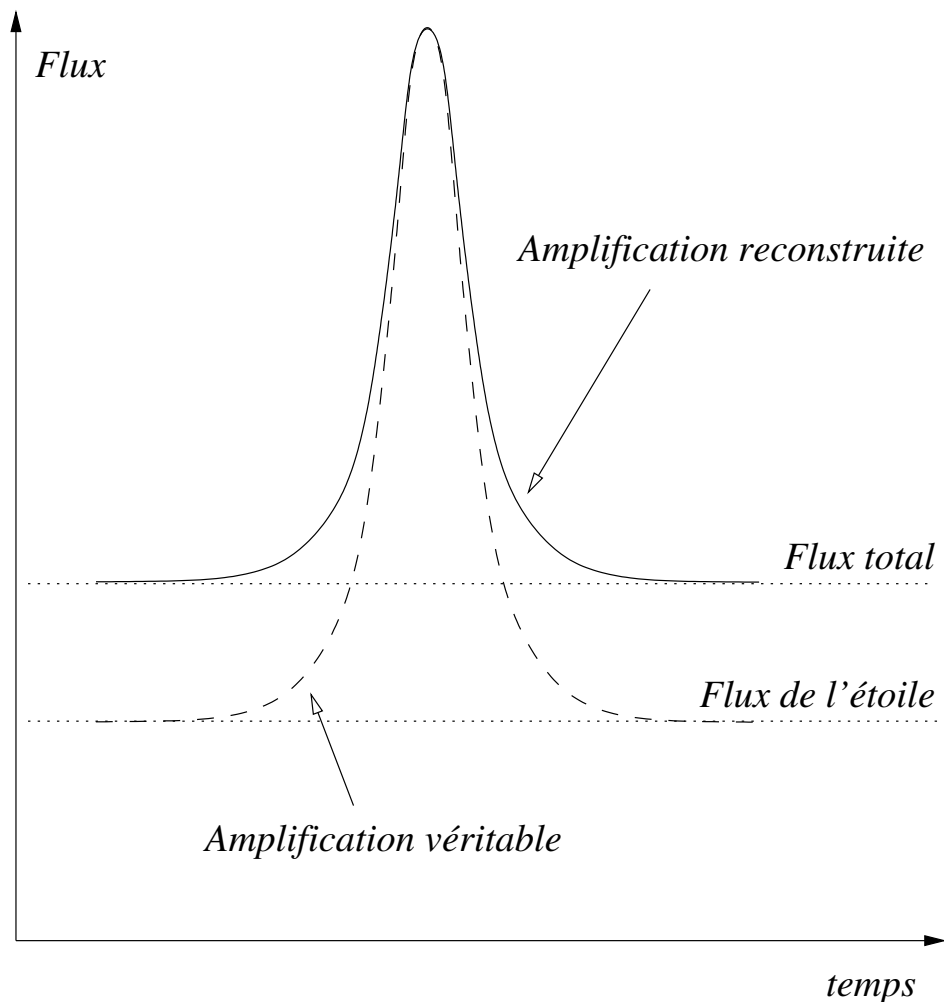
$\sim$ 50 million d'étoiles

$\sim$ 1000 mesures par étoile ($\sim$ 500 par couleur)

$\rightarrow \sim$ 4 To (images CCD), $\sim$ 3 To (courbes de lumières)



Effet de confusion (“blending”)

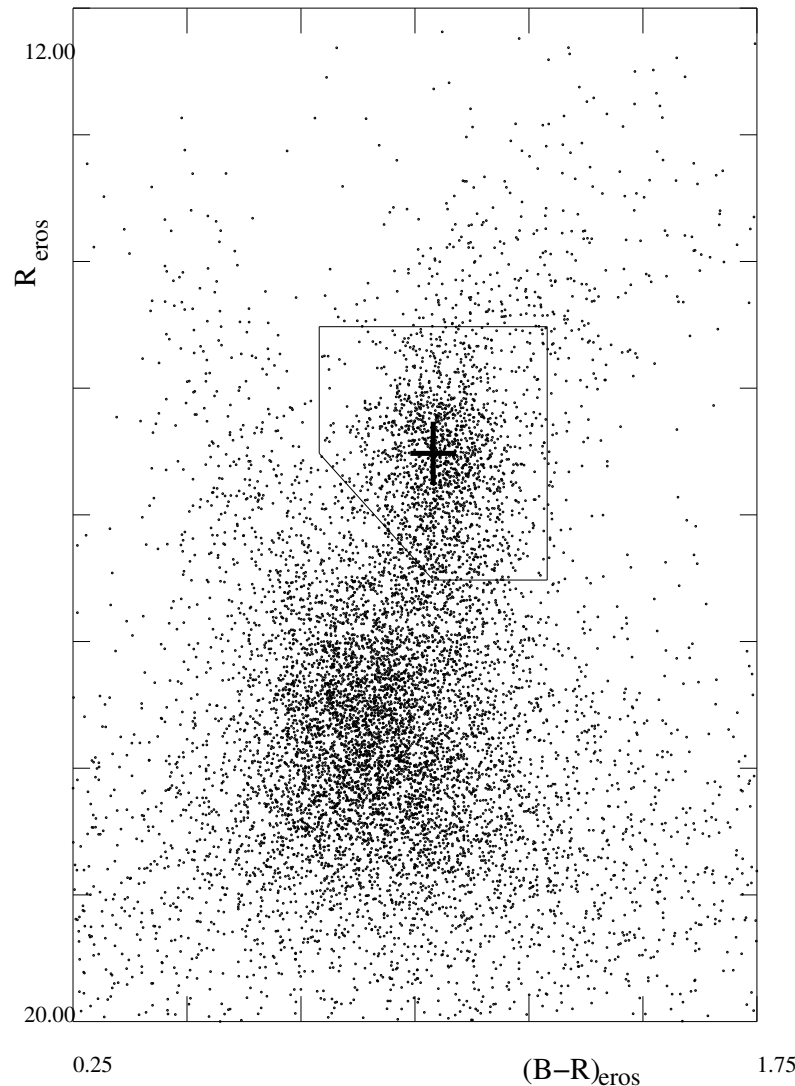


amplification
sous-estimée

t_E sous-estimé

étoile brillante => effet négligeable

Sélection des étoiles sources

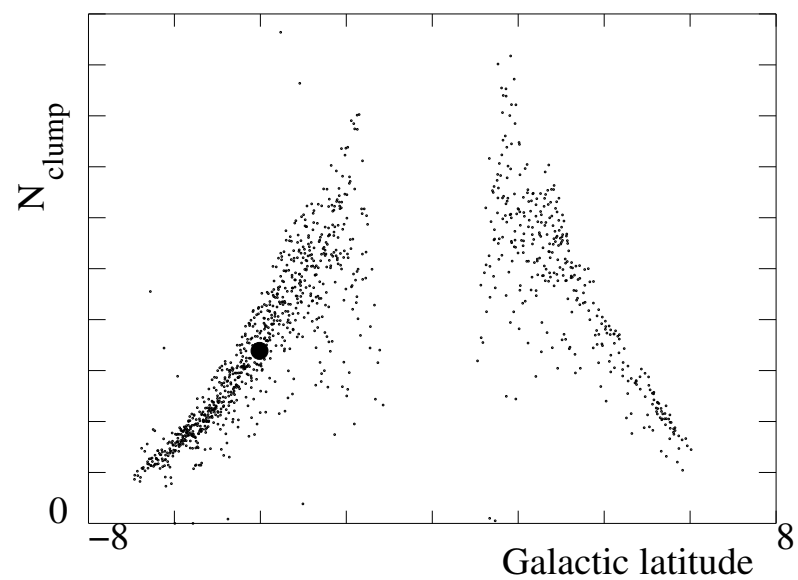
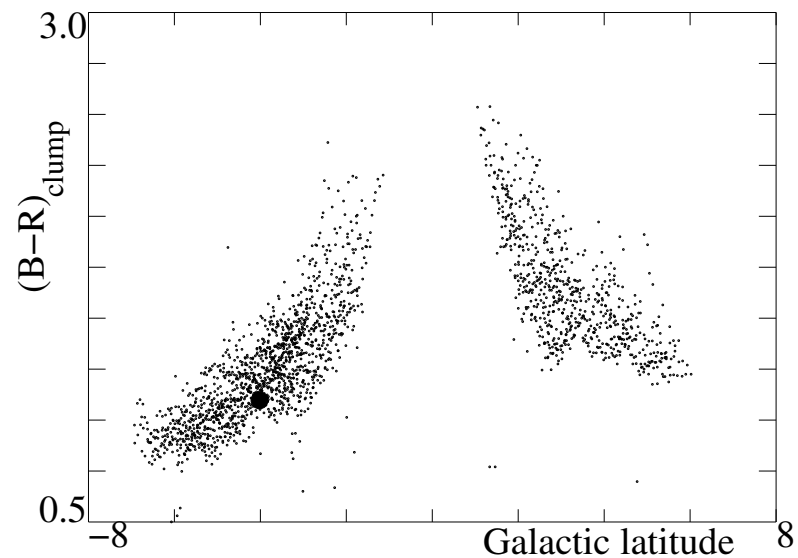
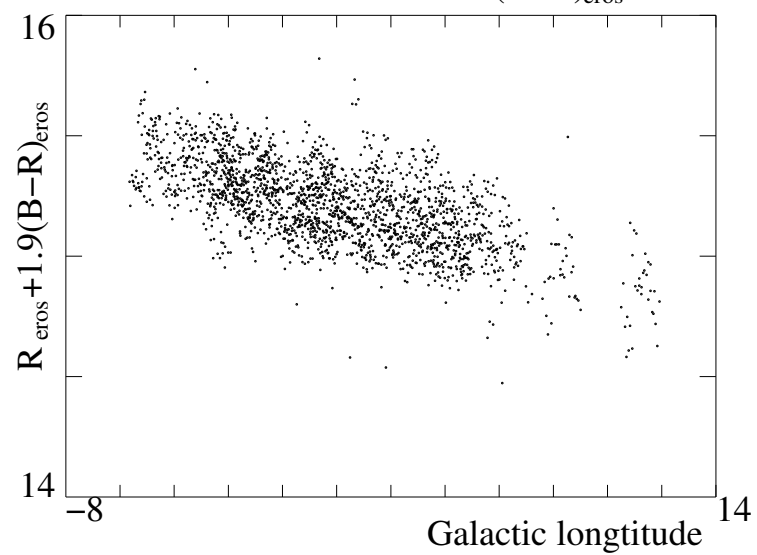
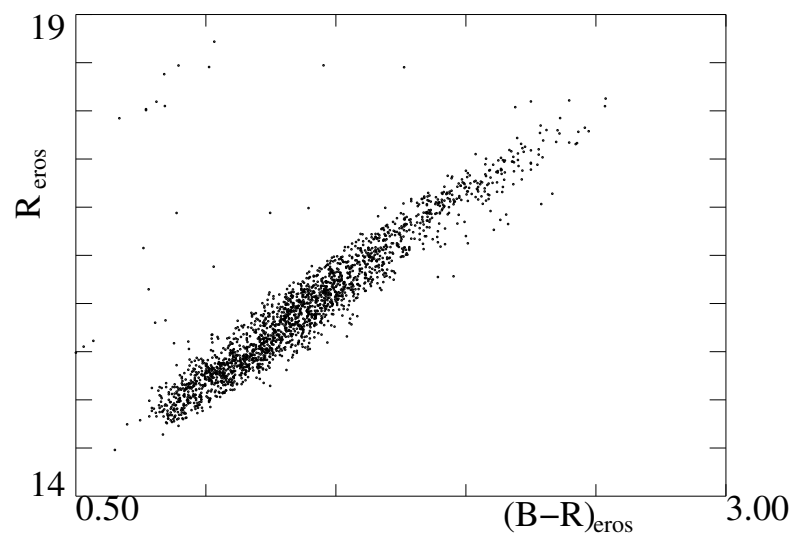


champs encombrés, distance des sources inconnue
sources = étoiles géantes rouges

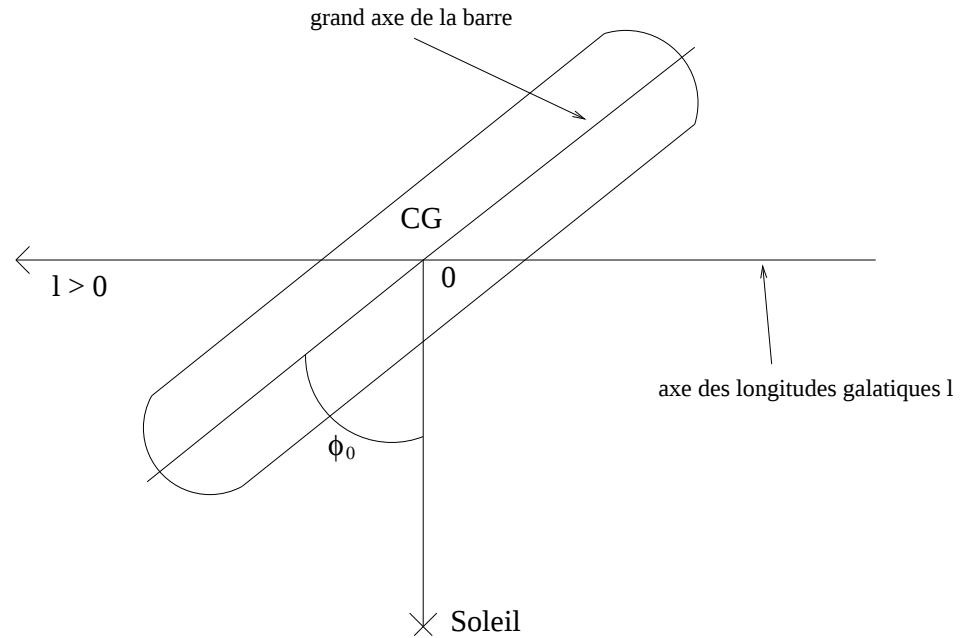
5.6×10^6 étoiles dans la région du *clump* sélectionnée
(total pour les 66 champs)

Diagramme couleur-magnitude typique

Le “Clump”



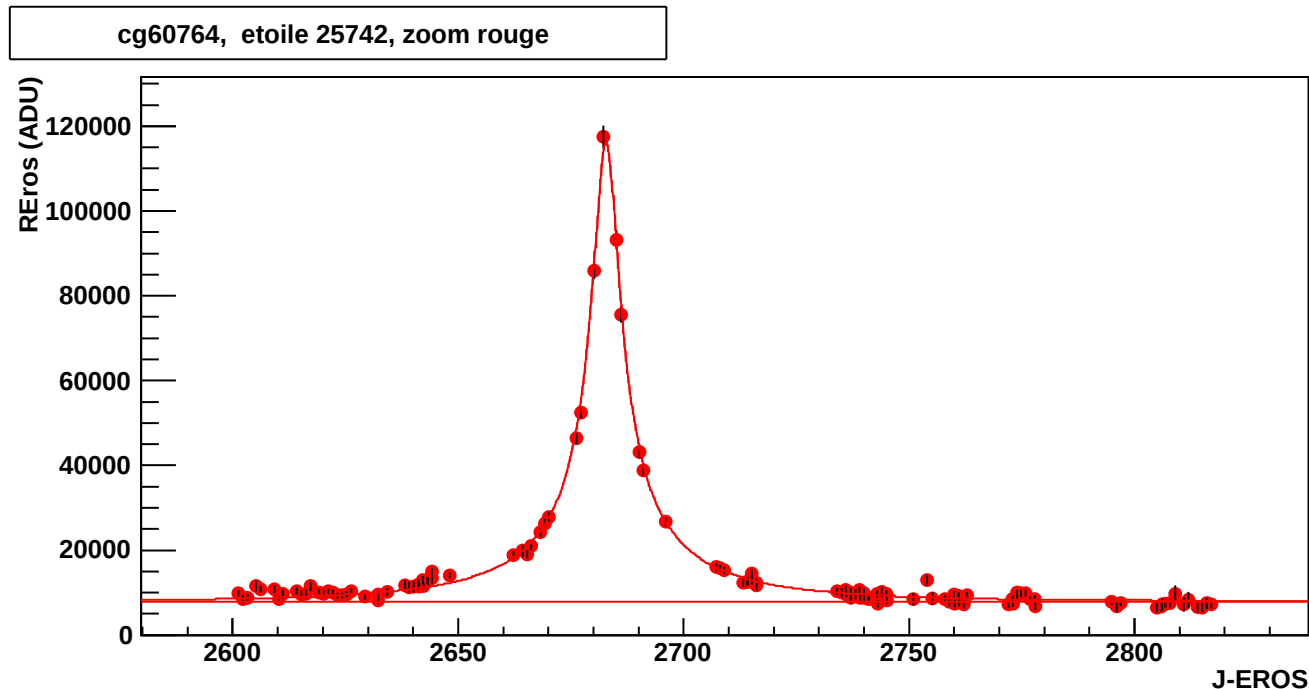
La barre galactique



bulbe en forme de barre

Recherche des candidats

- détermination d'une ligne de base
- recherche de fluctuations significatives et positives
- ajustement des fluctuations par une courbe de Paczýnski
- => coupures sur les paramètres u_0, t_E, t_0 , sur le χ^2 de l'ajustement et tests d'achromaticité

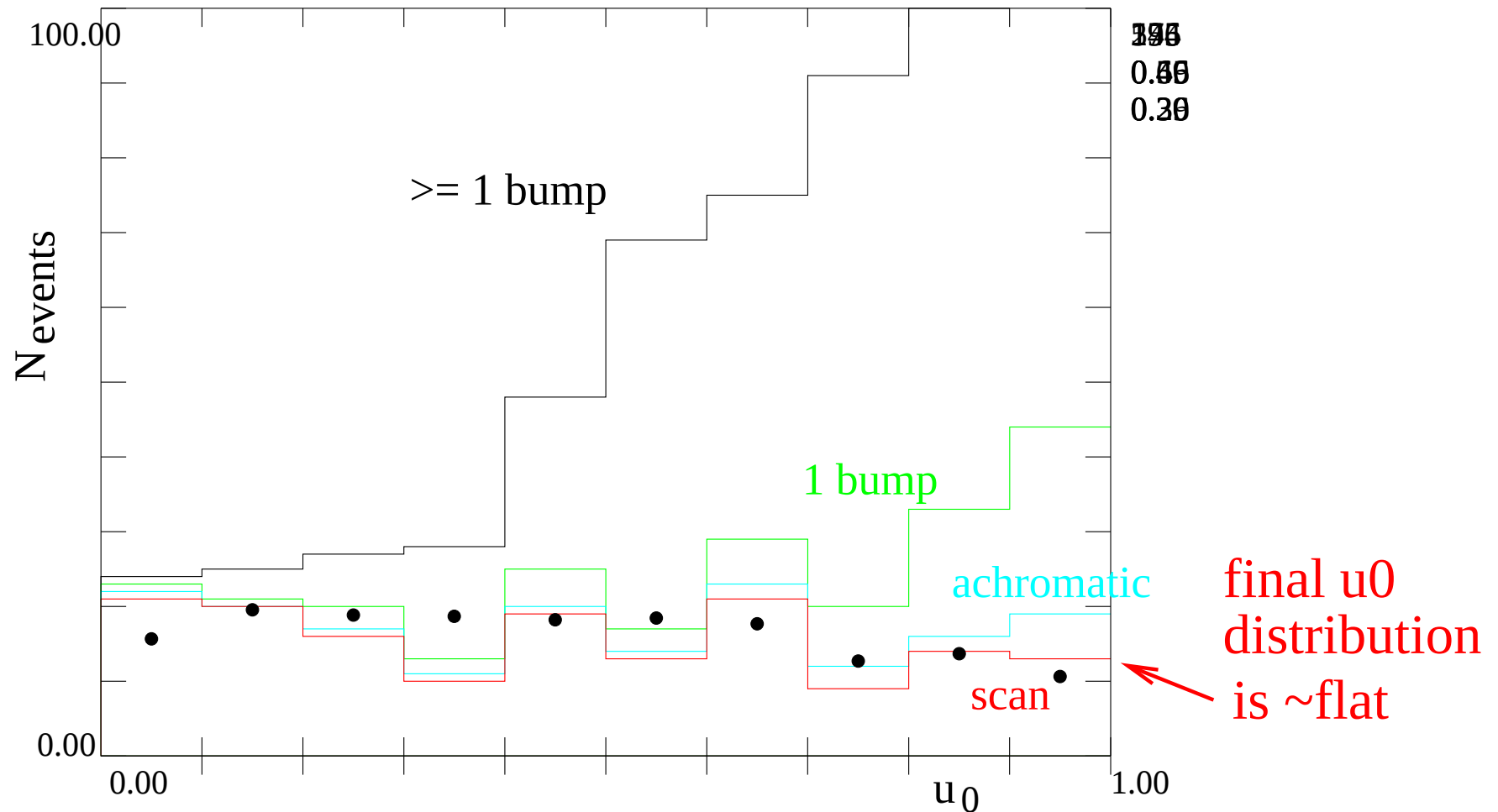


Coupures de sélection

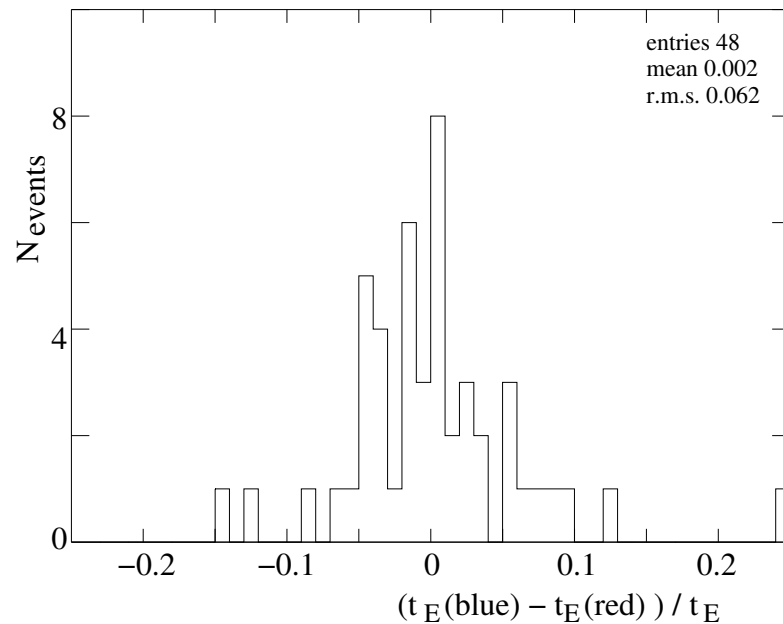
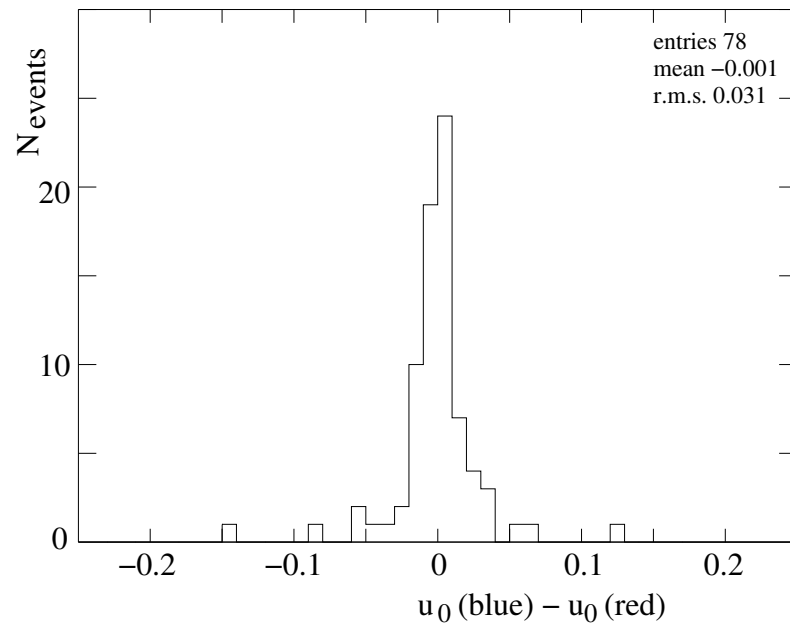
- C1 : $t_0 \in$ saisons d'observation
- C2 : $t_E < 400$ jours
- C3 : $t_E < 100$ jours si $t_0 < 3000$ (réalignement optique)
- C4 : ≥ 4 points avec $t_0 - t_E < t < t_0 + t_E$
 ≥ 8 points avec $t_0 - 2t_E < t < t_0 + 2t_E$
- C5 : $\frac{\chi_{base}^2}{N_{dof}} < 10$
- C6 : $\frac{t_0(bleu) - t_0(rouge)}{t_E} < 0.4$
- C7 : $\frac{t_E(bleu) - t_E(rouge)}{t_E} < 0.3$

Sélection des événements

distribution de u_0



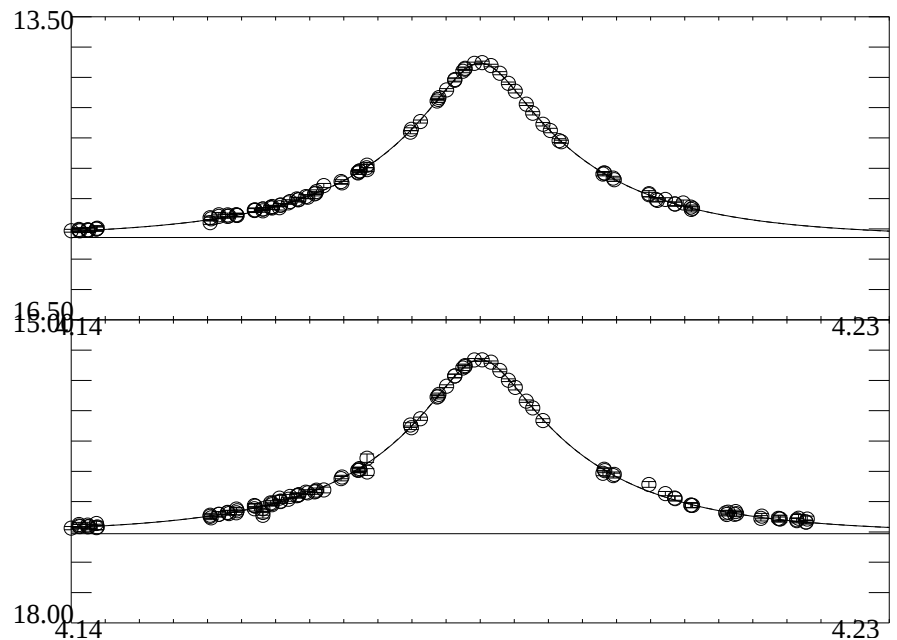
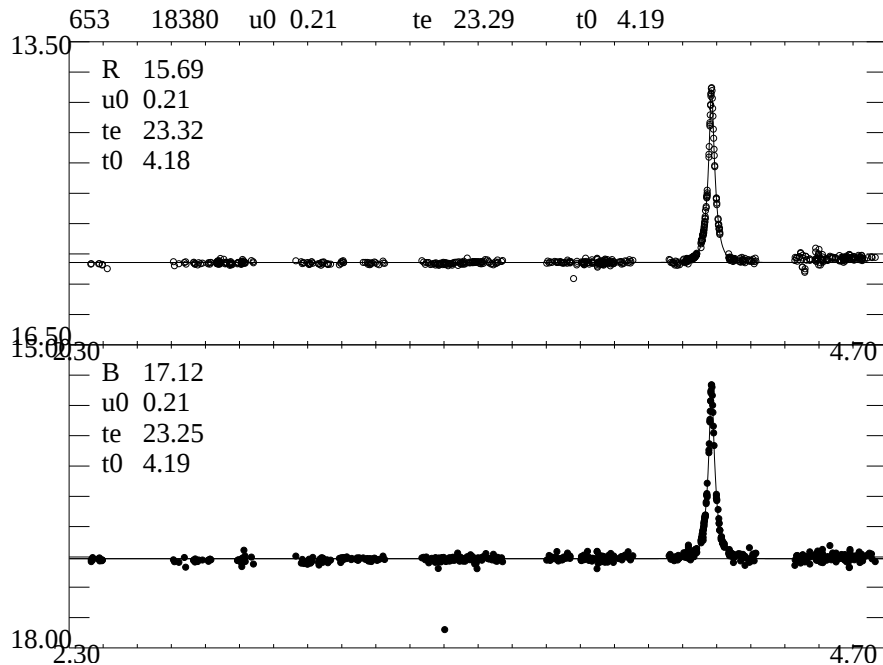
Compatibilité rouge/bleu



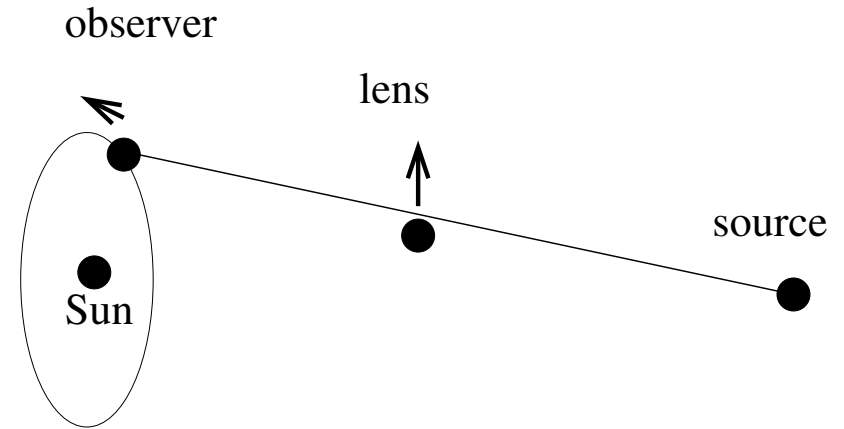
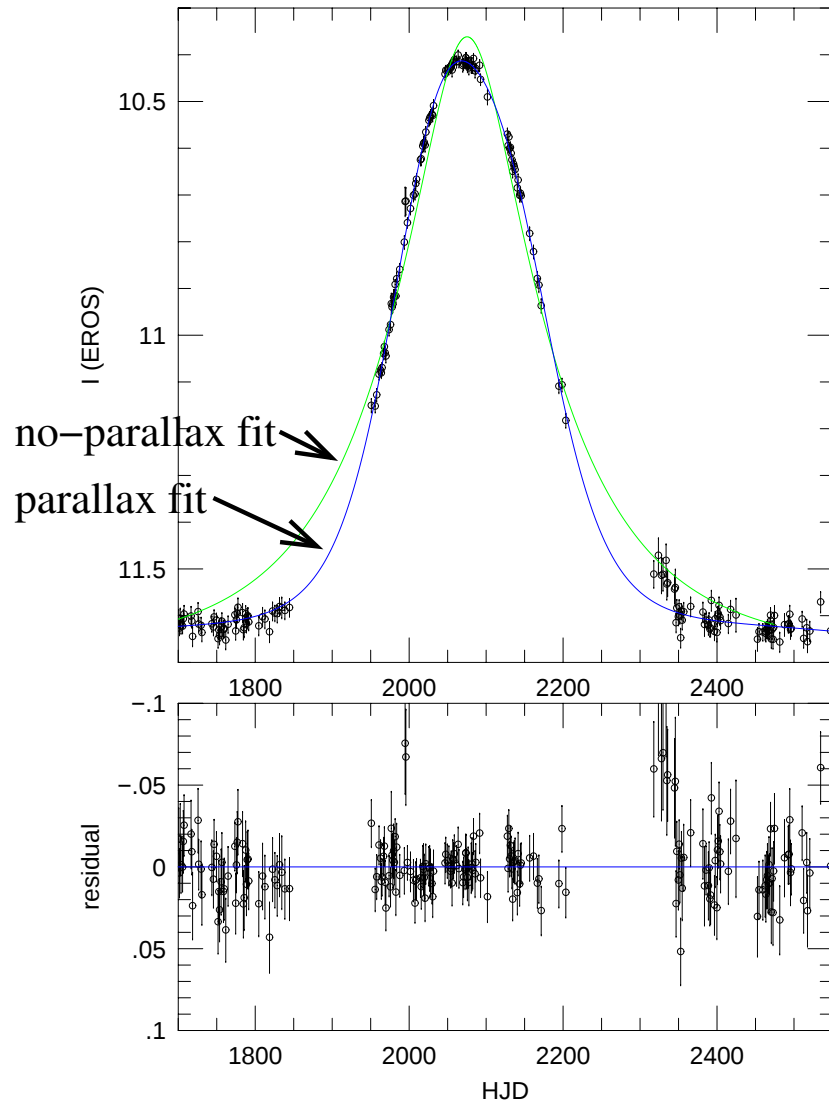
Candidats

- 120 candidats trouvés (source = géante rouge et $A_{max} > 1.6$)

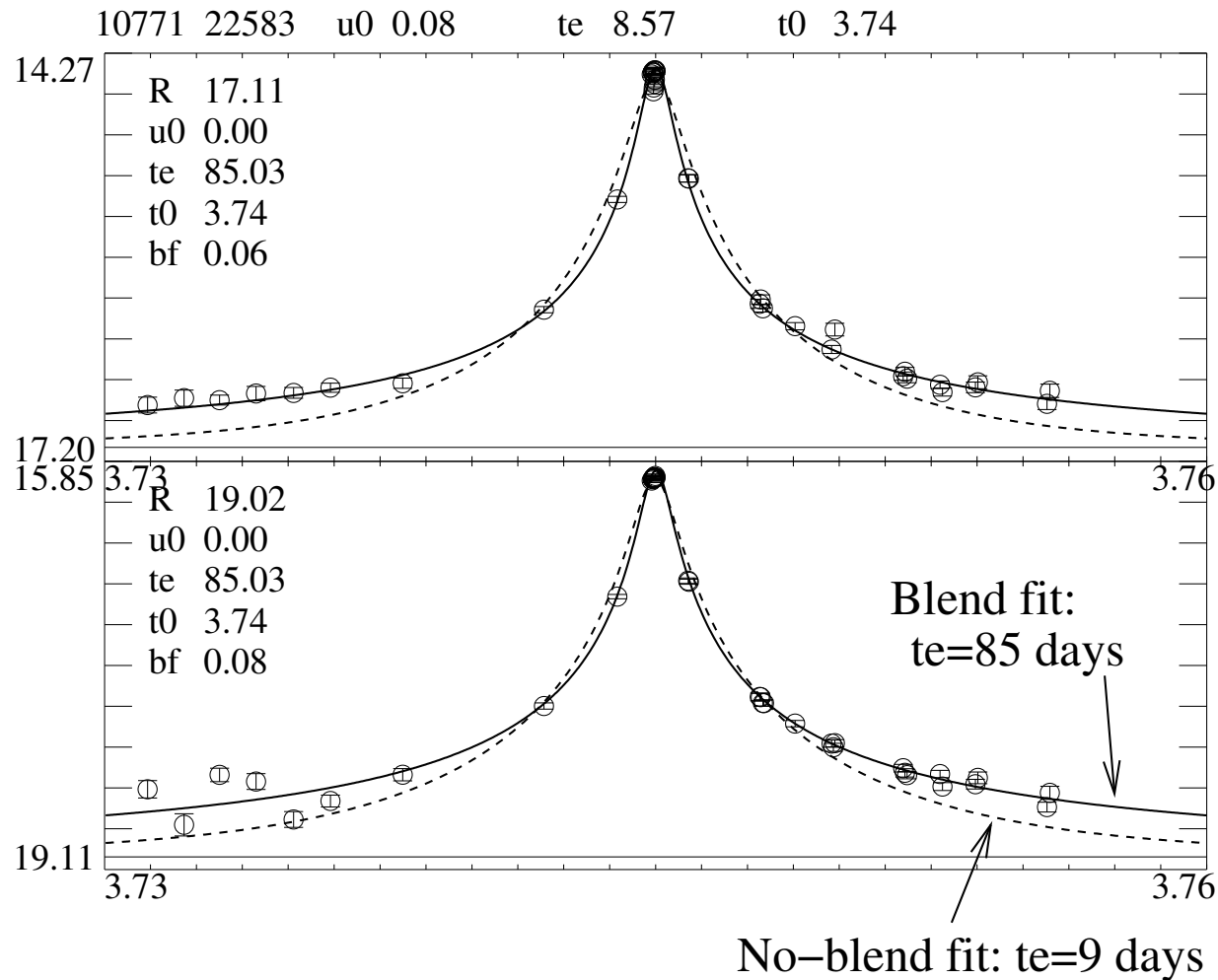
événement simple



Un événement avec effet de parallaxe



Événement fortement “blendé”



A dim star in the same
pixel as the clump giant

Contributions

événements simples : 79%

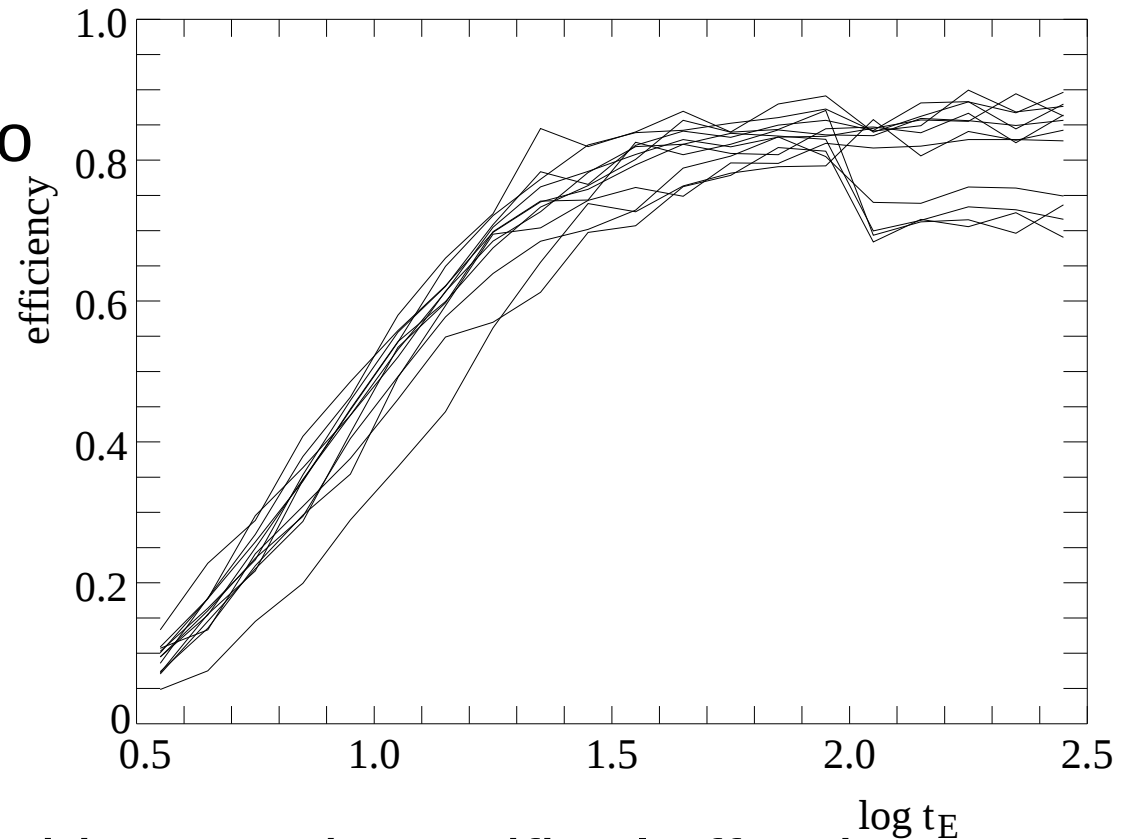
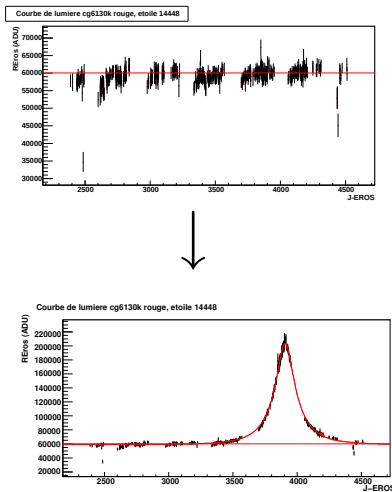
fort “blending” : 3%

parallaxe : 11%

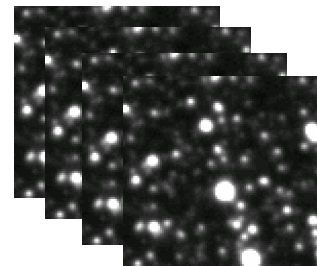
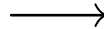
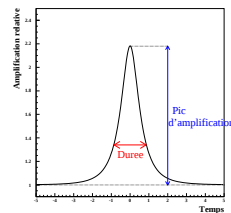
lentilles binaires : 7%

Simulations et efficacité de détection

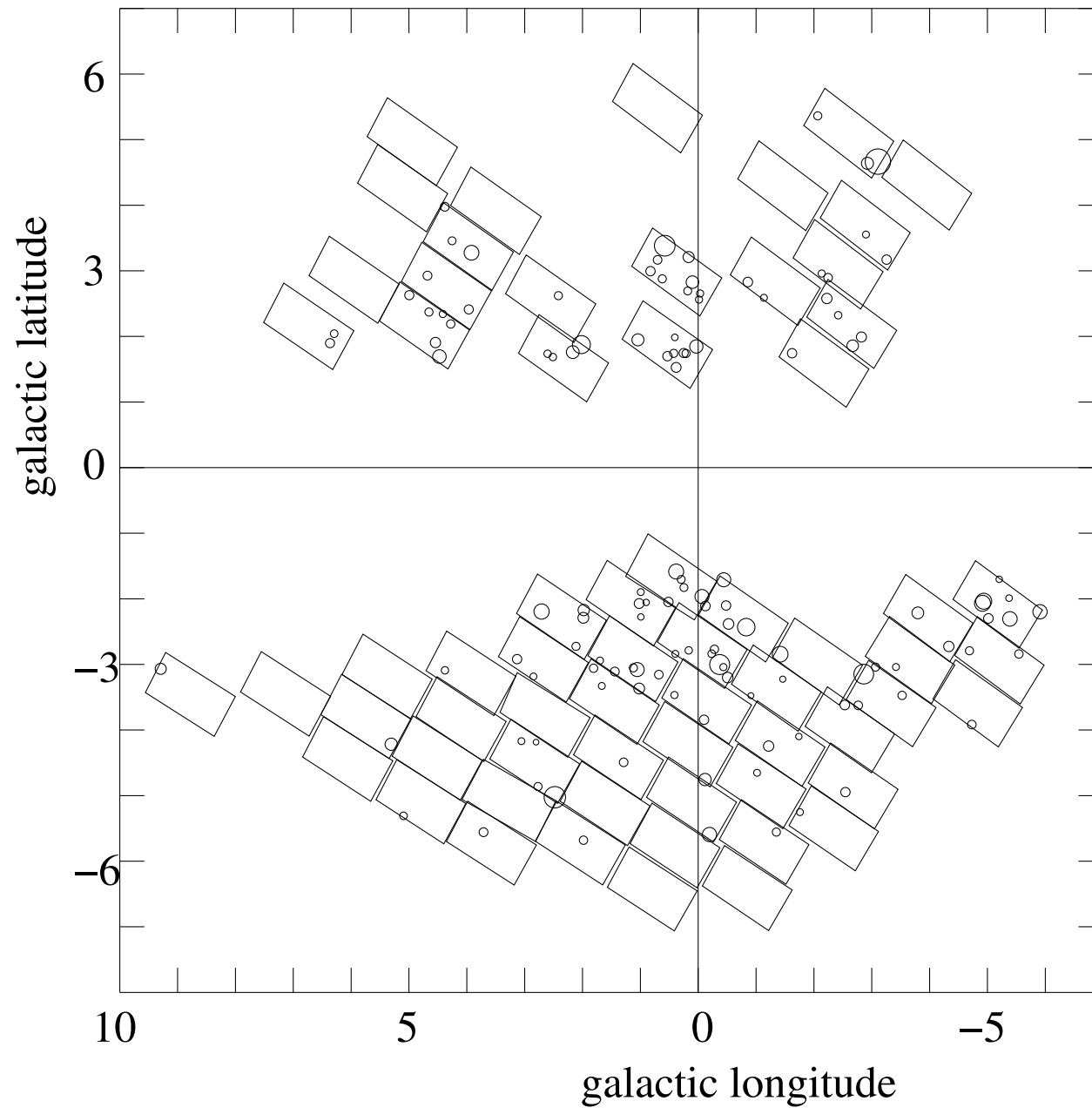
● Simulation Monte Carlo (standard)



● Simulation Monte Carlo d'images (quantifier l'effet de "blending")



Position des candidats



Profondeur optique

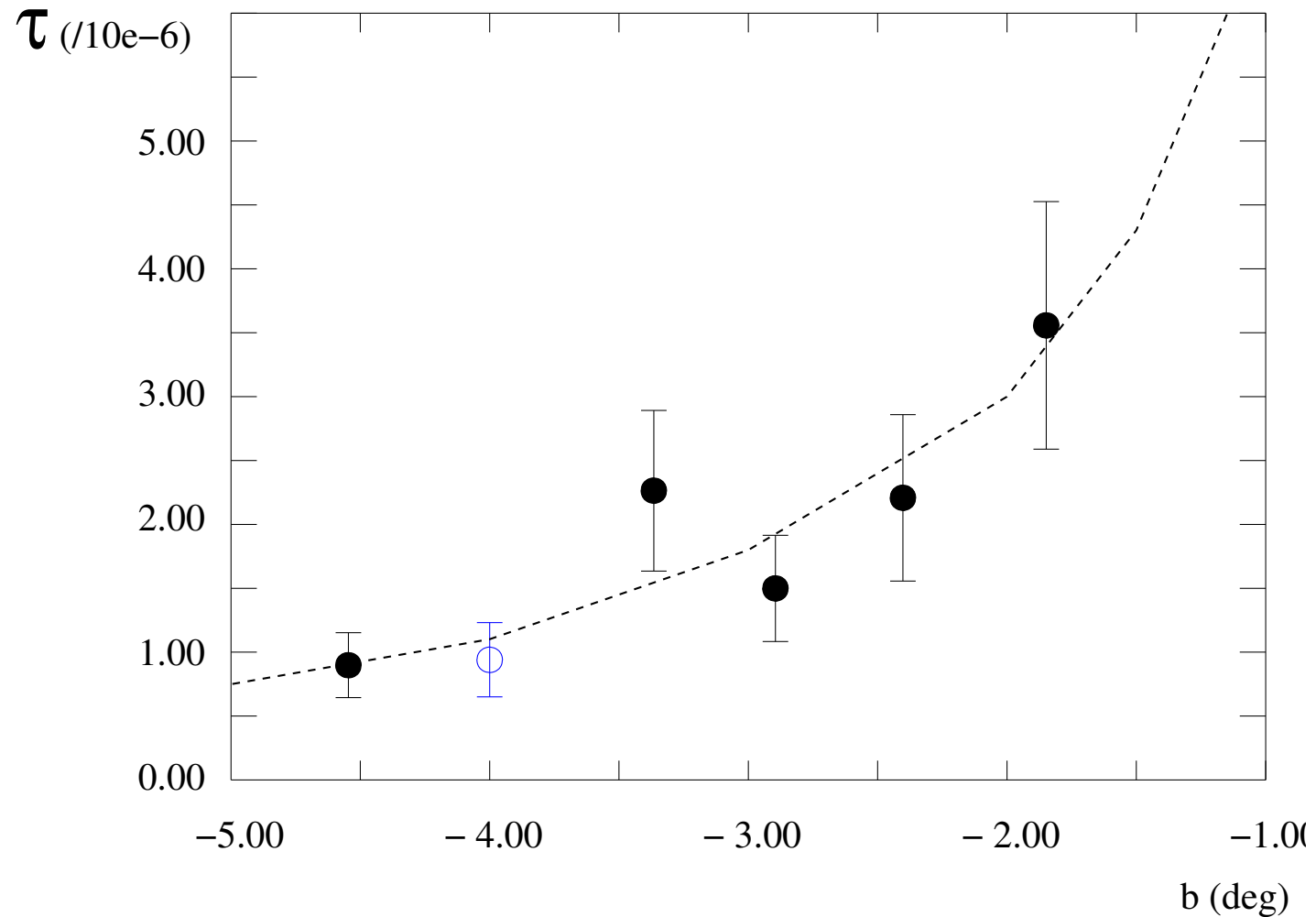
$$\tau = \frac{1}{N_{\star} T_{obs}} \frac{\pi}{2} \frac{1}{u_{0max}} \sum_{cand} \frac{t_E}{\epsilon(t_E)}$$

● profondeur optique moyenne :

$$\tau = (1.68 \pm 0.23) \times 10^{-6}, \quad \langle |b| \rangle = 3.43^{\circ}$$

cf publication : Hamadache et al., astro-ph/0601510
acceptée dans A&A le 10/04/2006

Profondeur optique

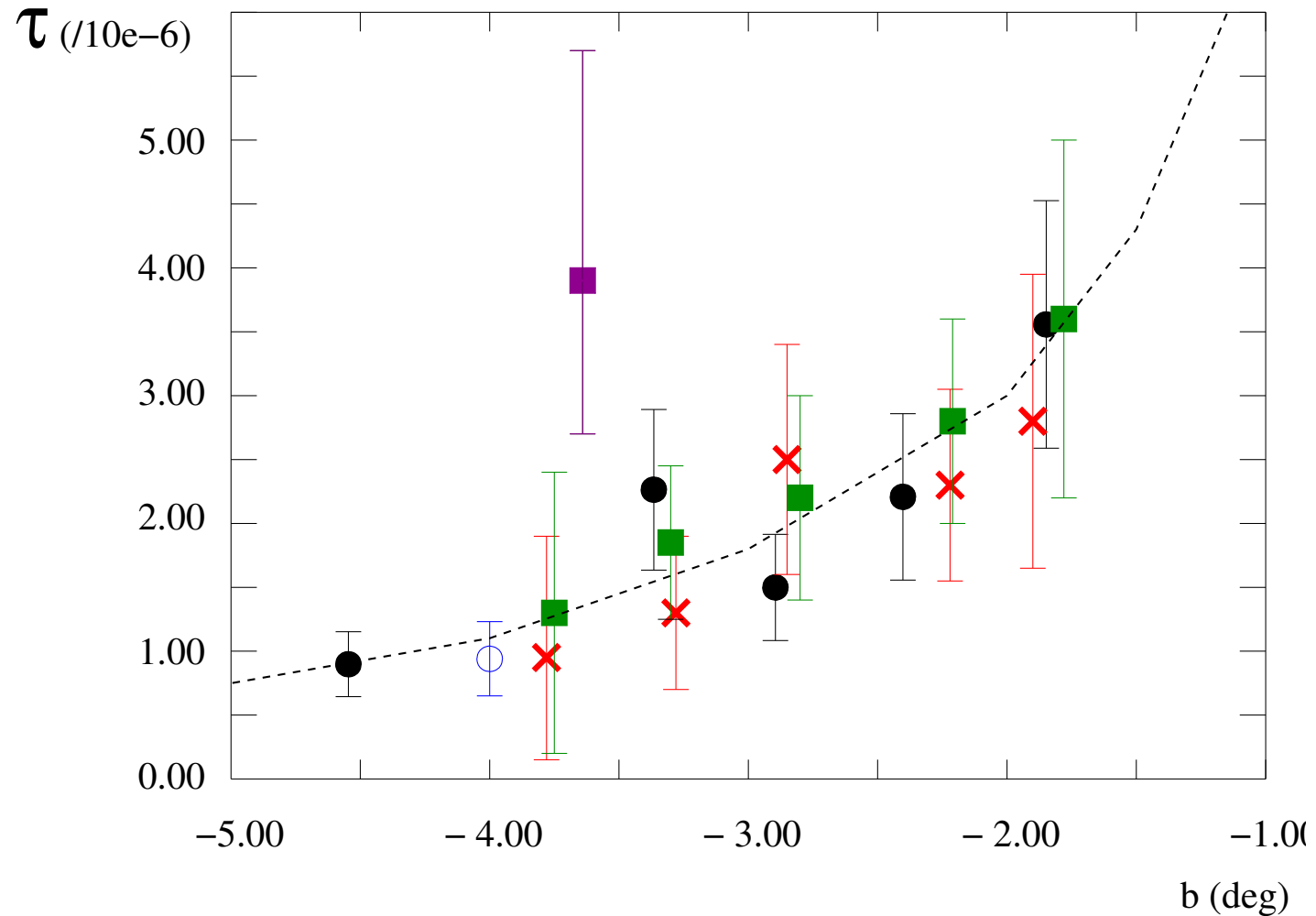


○ Eros (2003)

● Eros (Hamadache et al., 2006)

----- prédiction (Bissantz and Gerhard, 2002)

Profondeur optique



○ Eros (2003)

■ Macho (1997)

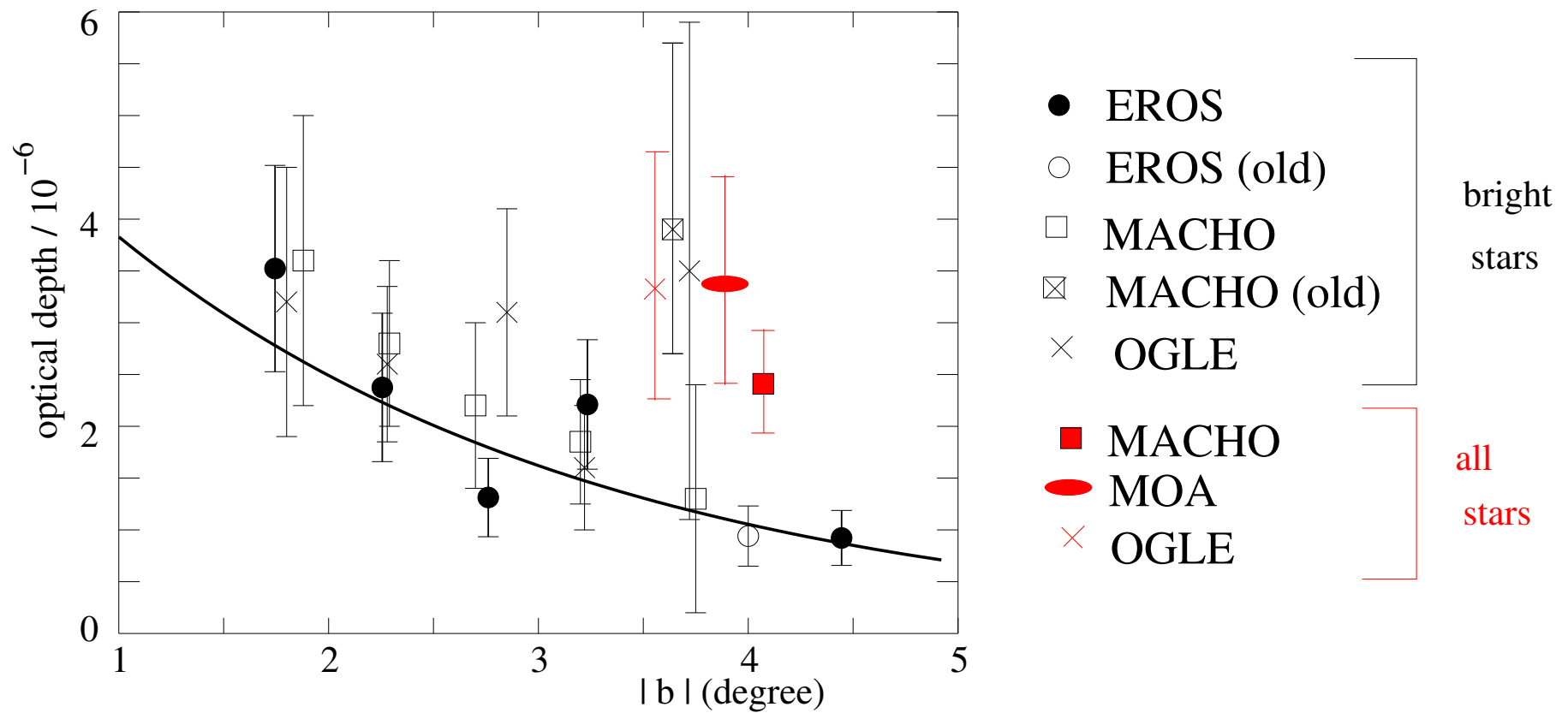
■ Macho (2004)

● Eros (Hamadache et al., 2006)

✕ Ogle (2005)

----- prédiction (Bissantz and Gerhard, 2002)

Profondeur optique



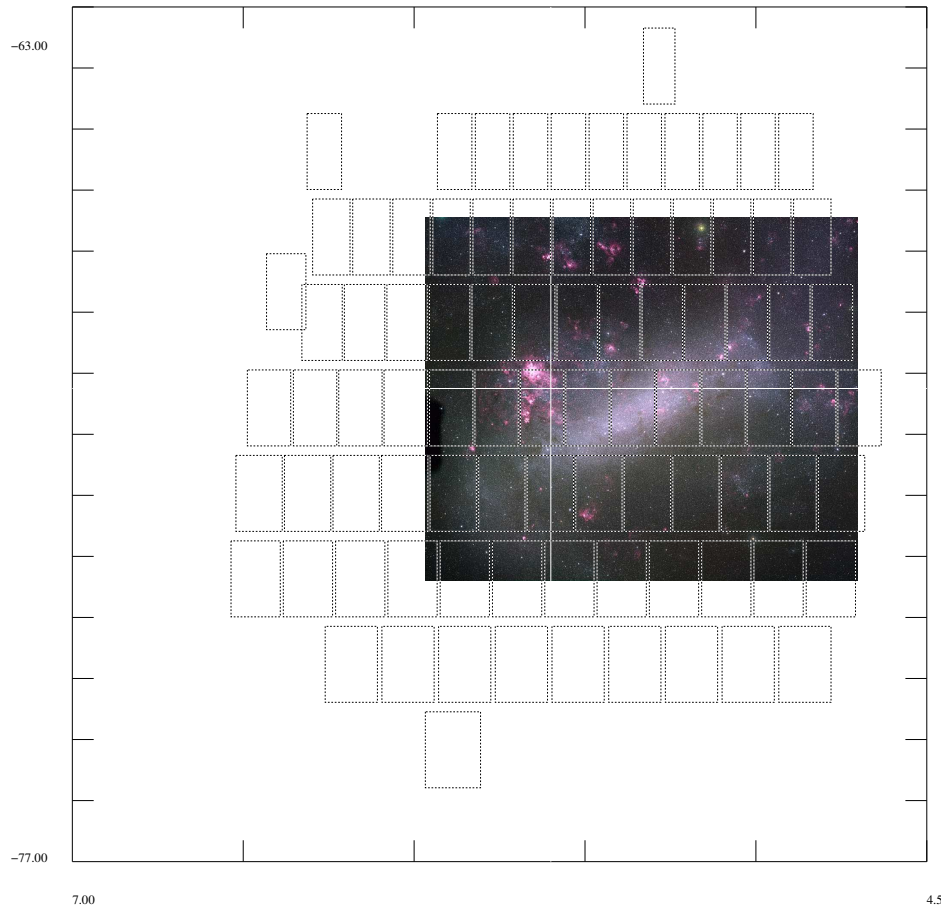
Vers les Nuages de Magellan **Analyse finale**

Macho(s) : fraction du halo (historique)

Nuages de Magellan :

- MACHO (Alcock et al 2000) :
 $0.08 < f < 0.50$ avec $0.15m_{\odot} < M < 0.9m_{\odot}$
- EROS (Afonso et al, 2003)
 $f < 0.15$ @ $M = 0.4m_{\odot}$
- EROS (Tisserand et al, à soumettre)
 $f < 0.08$ @ $M = 0.4m_{\odot}$

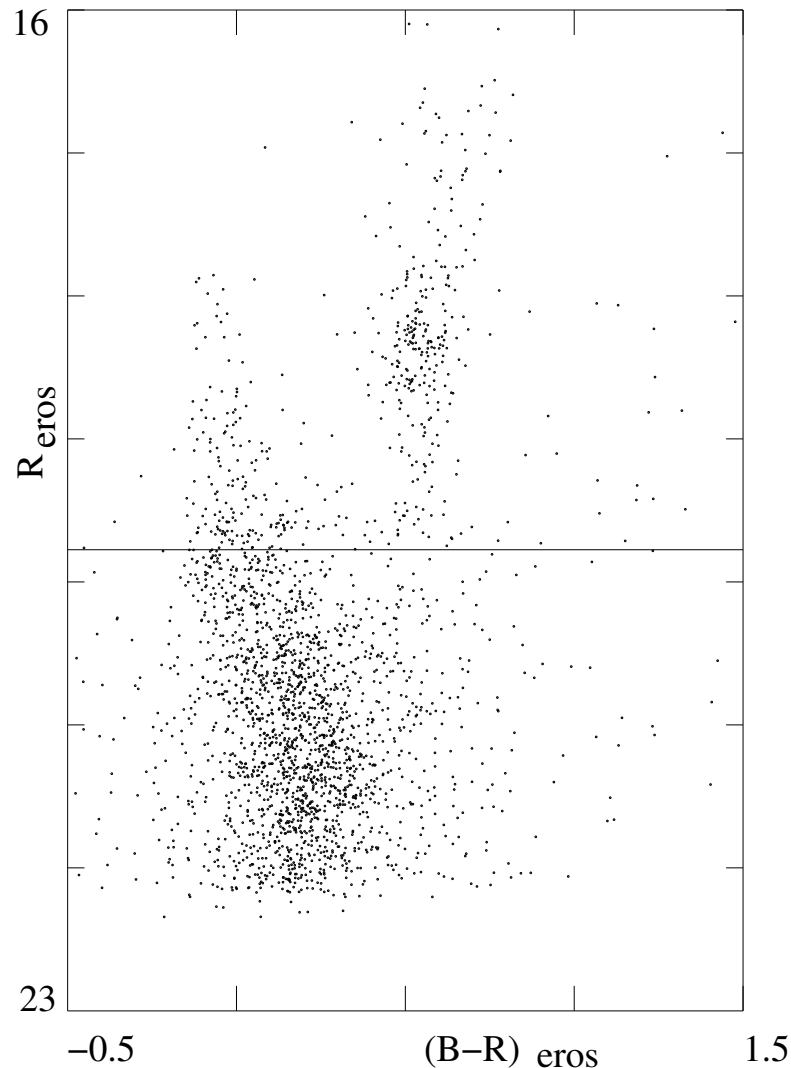
EROS-2 : champs LMC (SMC)



88 deg², 29 millions
d'étoiles suivies dont 6
millions de brillantes

SMC => 10 deg², 4 millions d'étoiles suivies dont 0,9
millions de brillantes

Les étoiles sources LMC (SMC)

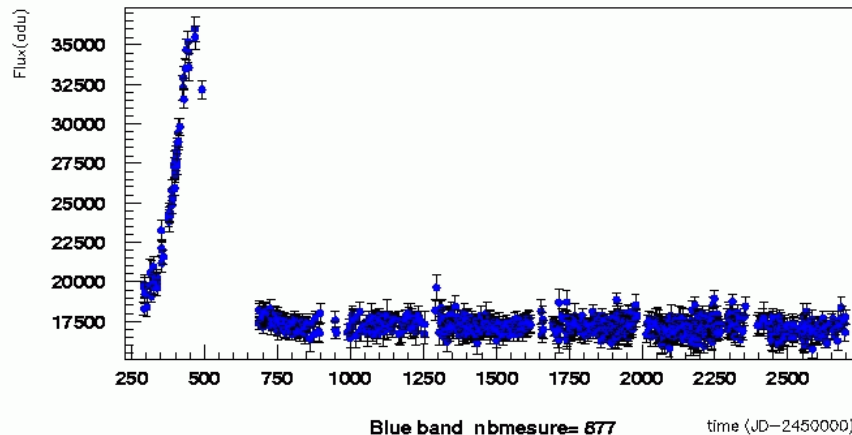
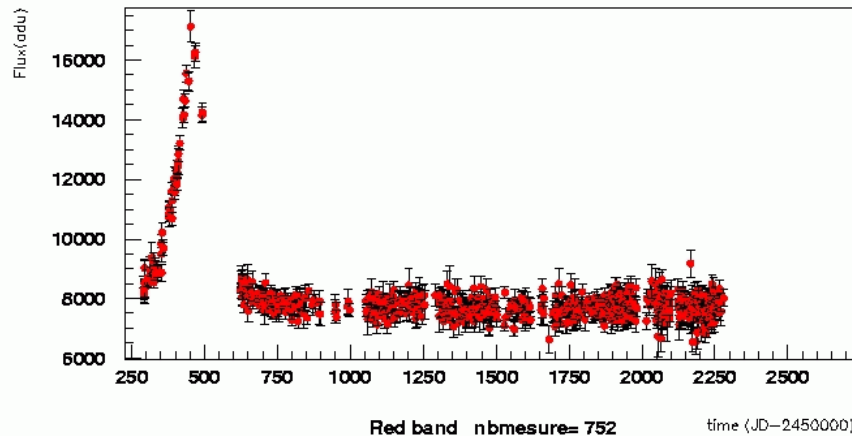


étoiles brillantes (difficulté d'interprétation pour les candidats dont l'étoile source est faible)

Diagramme couleur-magnitude

Le seul candidat EROS

(étoile source brillante)



Source dans le SMC

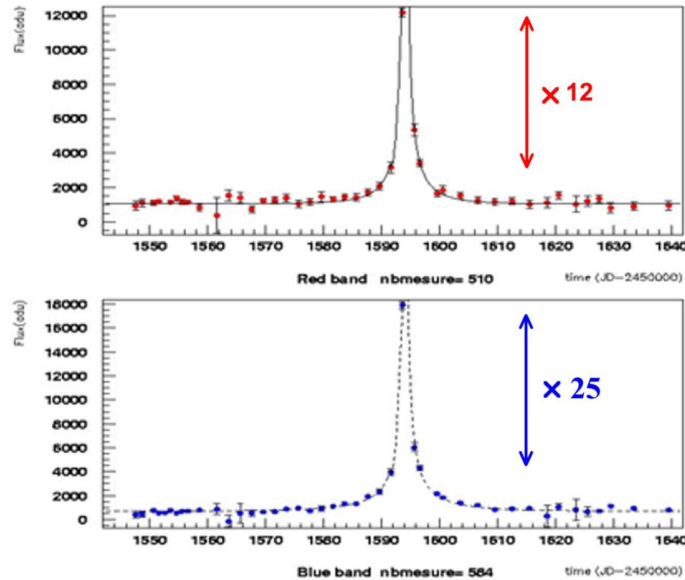
$$t_E = 125 \text{ jours}$$

(plus long que tous
les événements LMC)

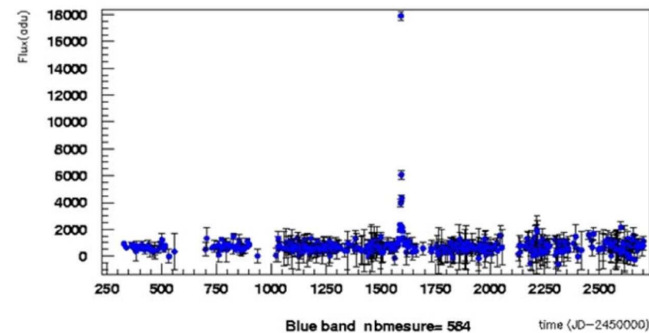
⇒ lentille dans le SMC ?
(compatible avec du
self-lensing)

Un événement MACDO

EROS2-LMC#8 :

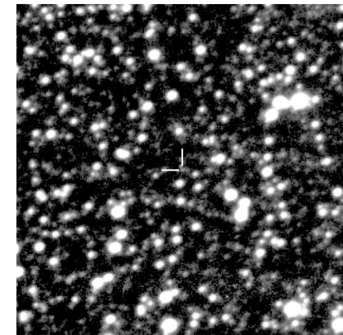


Increase by 3.5 magnitudes !



Raw fit parameters found:

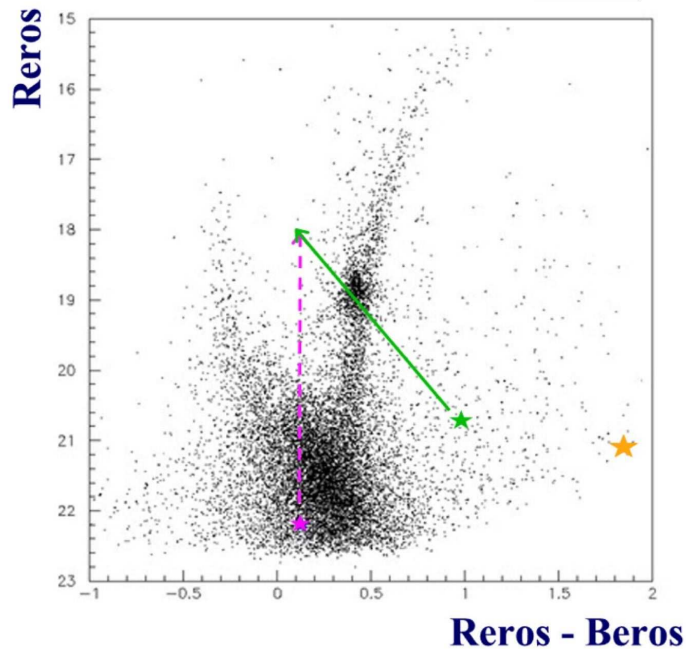
$$\begin{aligned} u_0 &\sim 0.06 & u_0 &\sim 0.03 \\ t_E &\sim 8 \text{ d} & t_E &\sim 12 \text{ d} \\ f_0 &\sim 1047 \text{ adu} & f_0 &\sim 683 \text{ adu} \end{aligned}$$



Un événement MACDO

Event LMC #8 = **MACDO !**
(Massive Astronomical Compact
Disk Object)

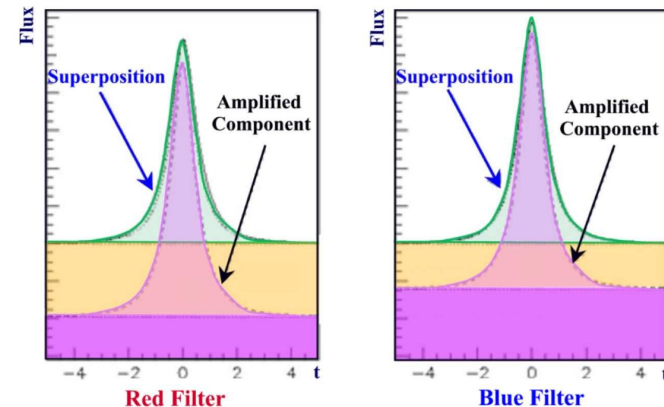
similar to MACHO-LMC#5



- ★ **Amplified Component**
- ★ **Non-amplified component**
- ★ **Superposition**

Red dwarf star M
at ~ 250 pc

BLENDING



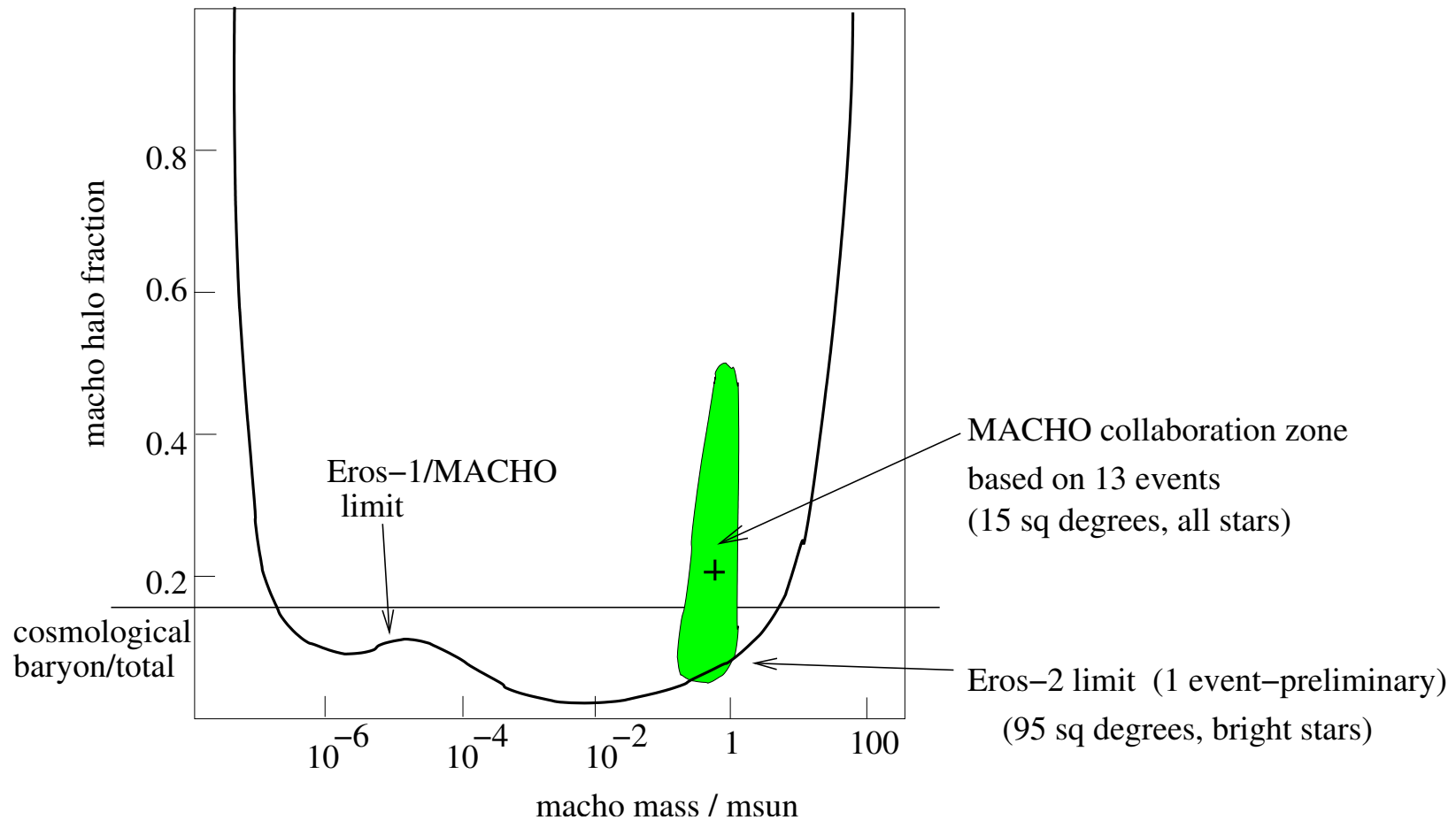
The lens dominates the flux and
allows this detection !

After correction for blending :

$$u_0 < 0.02$$

$$t_E \sim 23 \text{ j}$$

Limite sur la fraction du halo composée de MACHO



Les 13 (+4) événements Macho dans les données EROS

- 13 événements avant le début d'EROS-2 (Juillet 1996)
- MACHO LMC-23 : avant EROS-2 et nouvelle variation 7 ans plus tard chez EROS-2 :
⇒ étoile variable.
- MACHO LMC-14 : événement vu mais étoile source non brillante
- MACHO LMC-15 : étoile source plus faible que le seuil EROS
- MACHO LMC-20 (candidat B) : événement vu mais étoile source non brillante

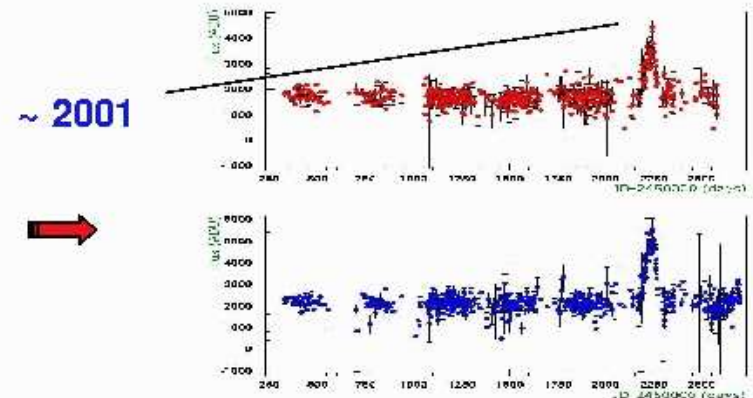
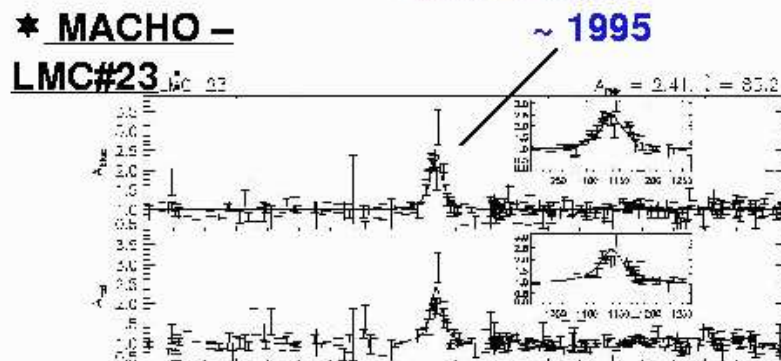
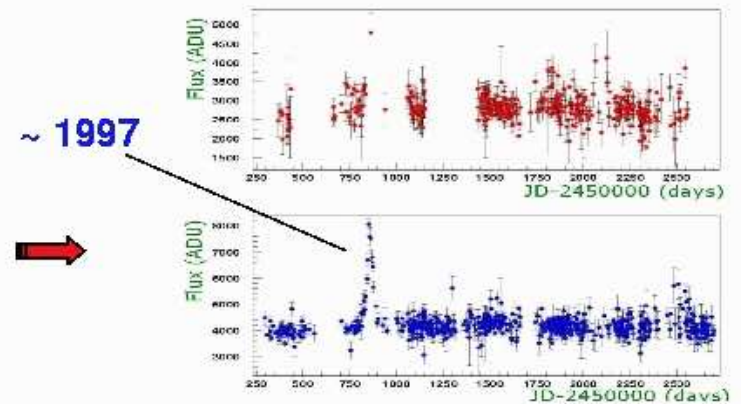
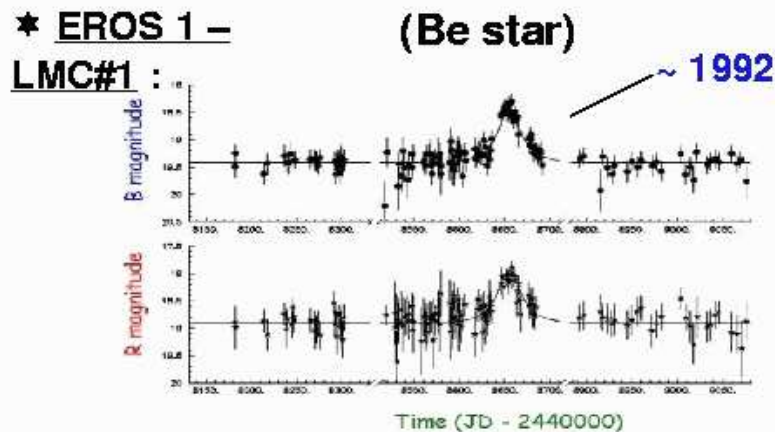
Candidates follow-up : longer baseline (+ 3 yrs)



3 candidates show a new bump a few years later !!

Variable Stars = Background

Withdrawn !



Origine possible du désaccord

- différence des populations d'étoile
- petit nombre d'événements (Macho,Eros)
- efficacité de détection sur-estimée (Eros)
- efficacité de détection sous-estimée (Macho)
- “blending” sous-estimé (Macho)
- contamination par des étoiles variables (Macho)
- self-lensing dans le LMC (Macho)

Conclusion

- Taux d'événements microlentille vers le centre galactique : les expériences sont en accord entres elles. Les modèles du disque et du bulbe galactique sont en accord avec les valeurs mesurées.
- Les MACHOs ne sont pas la principale composante du halo galactique
($10^{-7}m_{\odot} < M < 20m_{\odot}$)