

**Recherche de matière noire Galactique  
par détection  
de microlentilles gravitationnelles  
en photométrie différentielle**

Laurent Le Guillou

Collaboration EROS

Soutenance de Thèse – 24/09/2003

# Plan de l'exposé

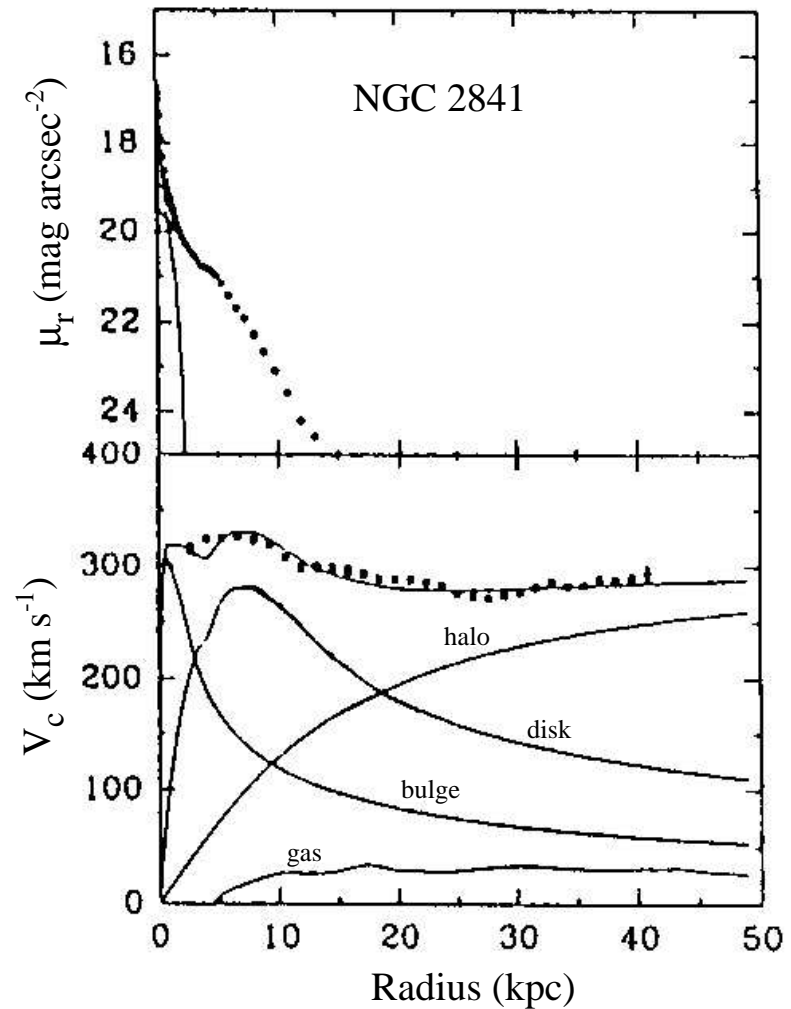
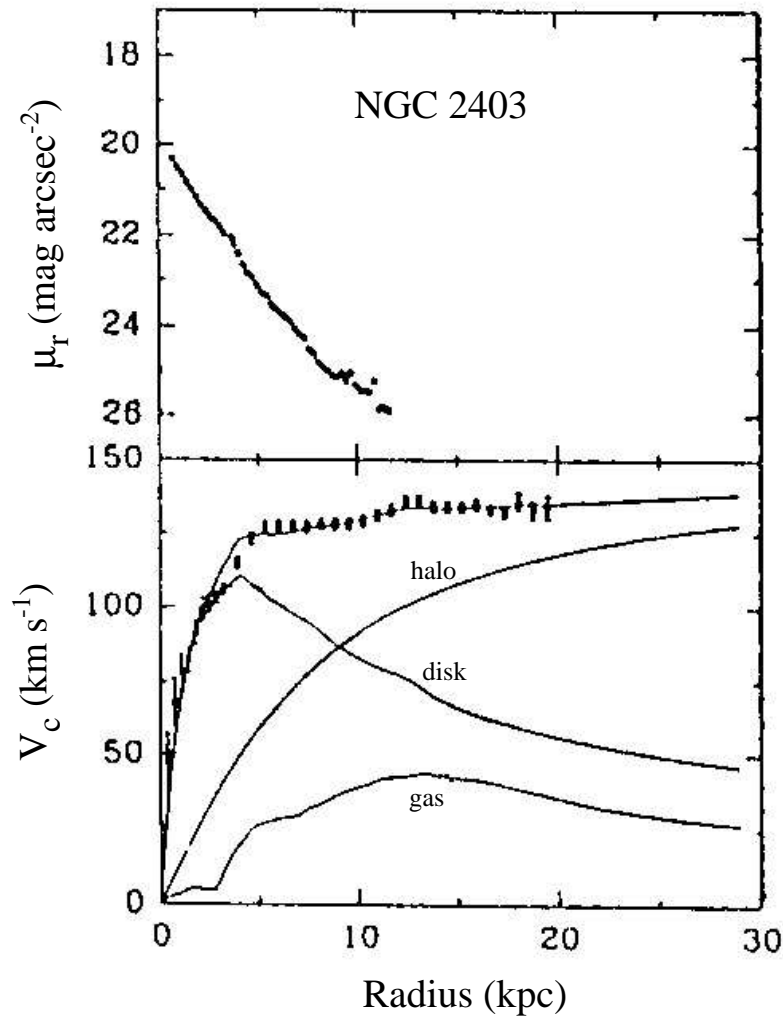
- La matière noire galactique
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- La soustraction d'images
- Réduction des images du SMC
- Recherche de microlentilles
- Recherche de nuages de gaz opaques
- Conclusion

# Plan de l'exposé

- **La matière noire galactique**
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- La soustraction d'images
- Réduction des images du SMC
- Recherche de microlentilles
- Recherche de nuages de gaz opaques
- Conclusion

# Courbe de rotation des galaxies

## Courbe de rotation des galaxies spirales NGC2403 et NGC2841



Nécessité d'un halo (sombre) autour des galaxies spirales

# Plan de l'exposé

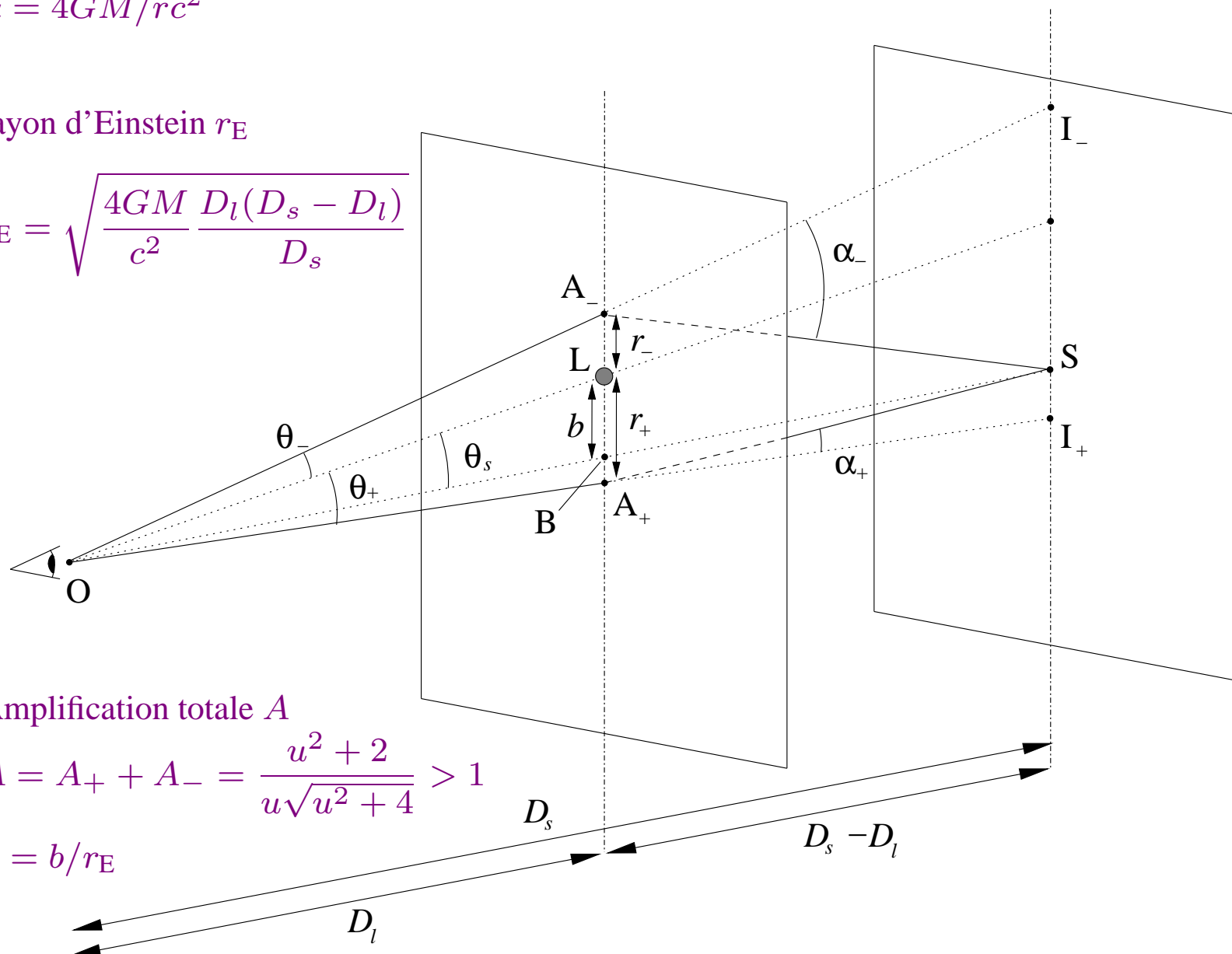
- La matière noire galactique
- **L'effet de microlentille gravitationnelle**
- La soustraction d'images
- Réduction des images du SMC
- Recherche de microlentilles
- Recherche de nuages de gaz opaques
- Conclusion

# Géométrie du phénomène

$$\alpha = 4GM/rc^2$$

rayon d'Einstein  $r_E$

$$r_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_l(D_s - D_l)}{D_s}}$$



Amplification totale  $A$

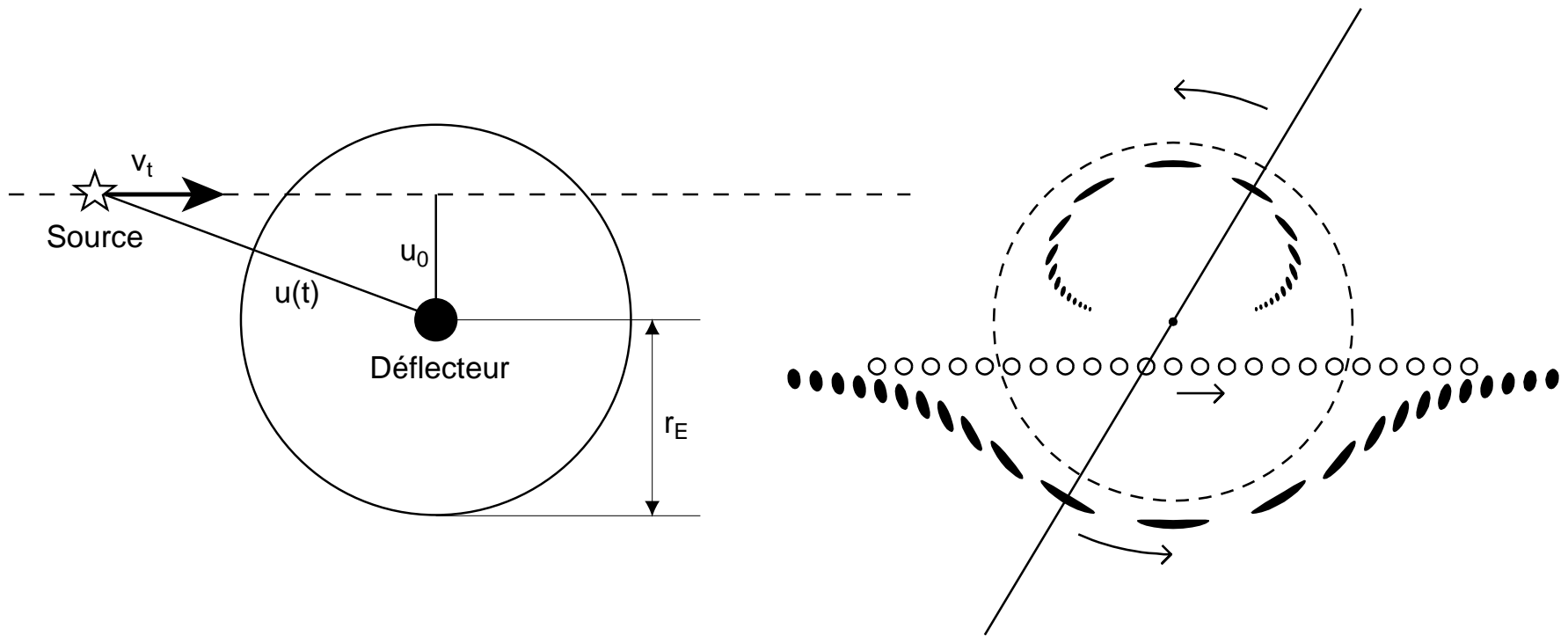
$$A = A_+ + A_- = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} > 1$$

$$u = b/r_E$$

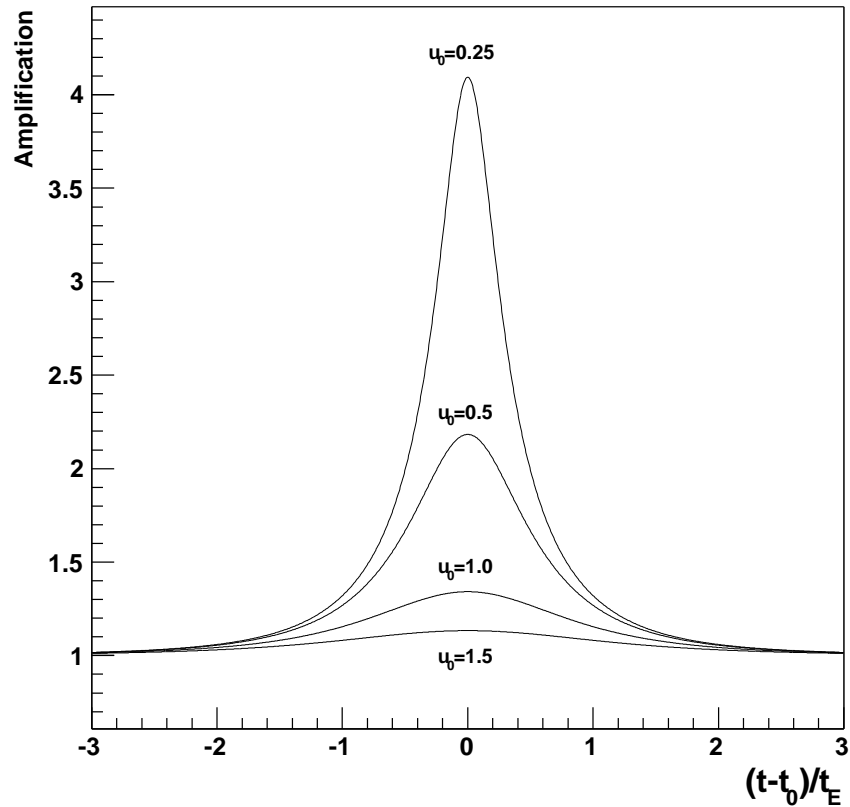
# Effet de microlentille : dynamique

déflecteur et source en mouvement relatif

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



# Amplification transitoire de l'étoile source



Courbe de Paczyński

Echelle de temps  $t_E$

$$t_E = \frac{r_E}{v_t} \propto \sqrt{M}$$

$$t_E = f(M, D_l, D_s, v_t)$$

Vers le SMC :  $t_E \sim 80 \text{ jours} \times \sqrt{M/M_\odot}$  ( $D_s \simeq 60 \text{ kpc}$ )

Signal symétrique et indépendant de la longueur d'onde.



# Un nouvel outil d'observation

- Sonder le contenu en *objets compacts*, éventuellement invisibles, d'une région de l'espace
- Nombre d'événements attendus

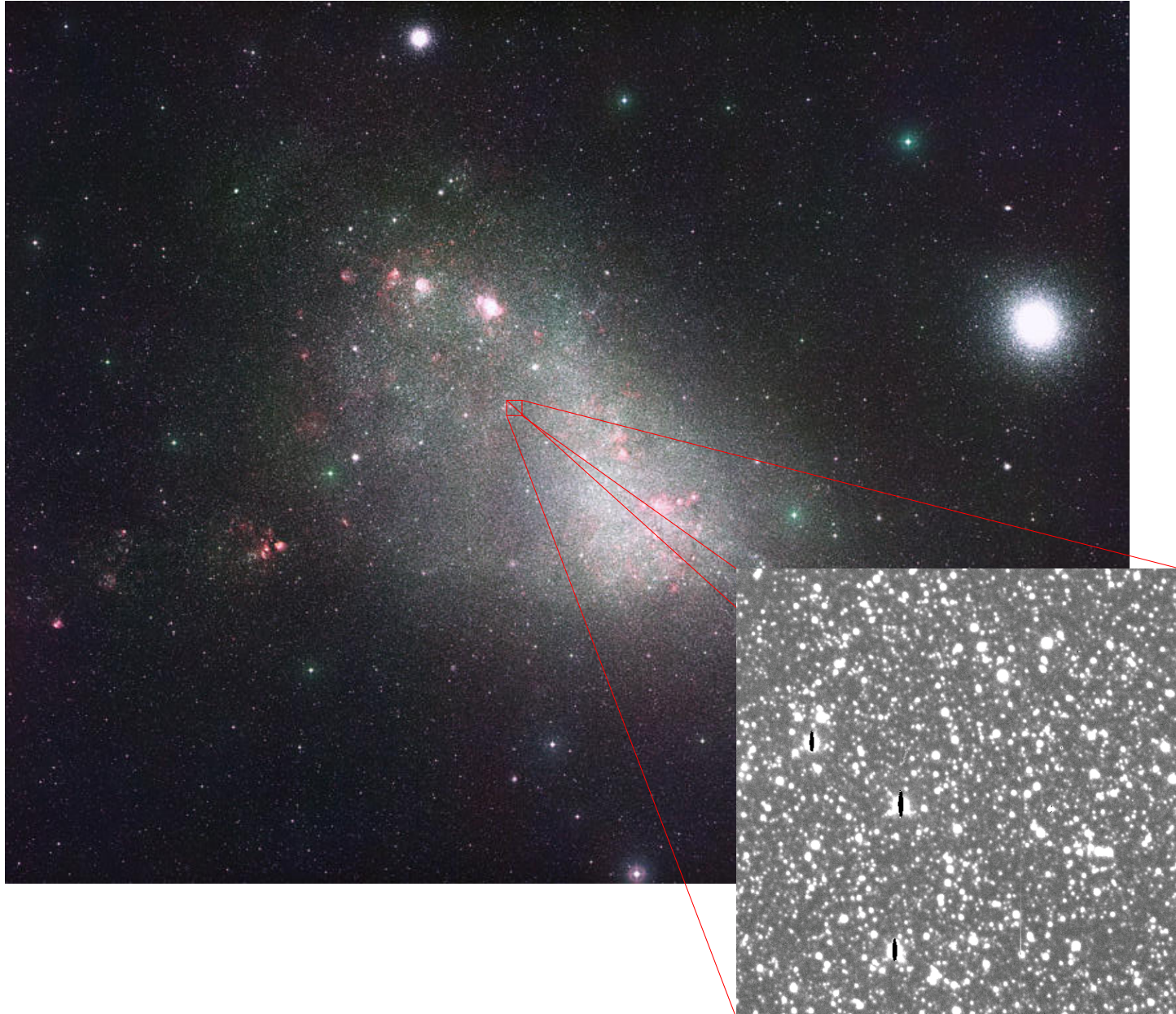
$$N_{event} = N_* \tau \frac{2}{\pi} \frac{T_{obs}}{t_E}$$

- B. Paczyński (1986) : Sonder le halo galactique en visant les Nuages de Magellan ( $\tau_{SMC} \sim 6 \times 10^{-7}$ )
- Champs très encombrés : *blending*

# Champs encombrés



# Champs encombrés



# Recherches vers les Nuages de Magellan

## ■ EROS

- ◆ 5 candidats vers le Grand Nuage  $t_E \sim 30$  jours
- ◆ 1 candidat vers le Petit Nuage  $t_E \sim 120$  jours

## ■ MACHO

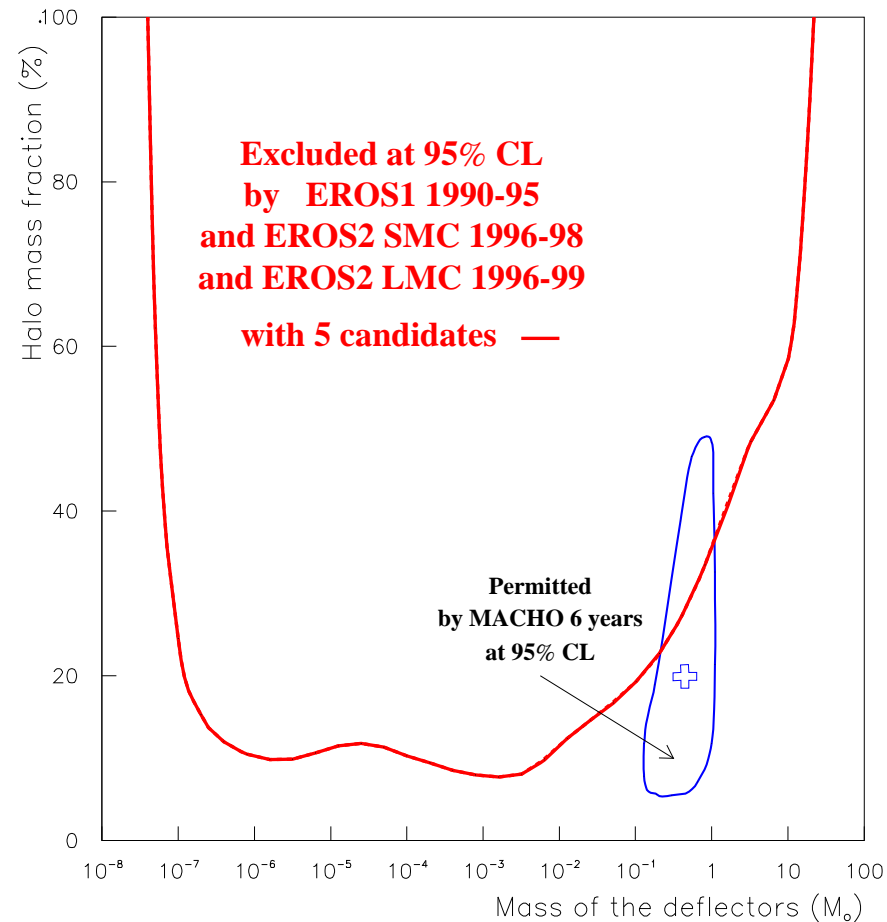
- ◆ 13 – 17 candidats vers le Grand Nuage  $t_E \sim 30$  jours
- ◆ 2 candidats vers le Petit Nuage, probablement dus à des défecteurs du SMC.

■ Les candidats sont-ils bien tous des microlentilles ?

■ Les défecteurs appartiennent-ils au halo ?

# Recherches vers les Nuages de Magellan

Interprétation : fraction du halo ( $4 \times 10^{11} M_{\odot}$  dans 50 kpc)



# Plan de l'exposé

- La matière noire galactique
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- **La soustraction d'images**
- Réduction des images du SMC
- Recherche de microlentilles
- Recherche de nuages de gaz opaques
- Conclusion

# Photométrie différentielle

## Motivations

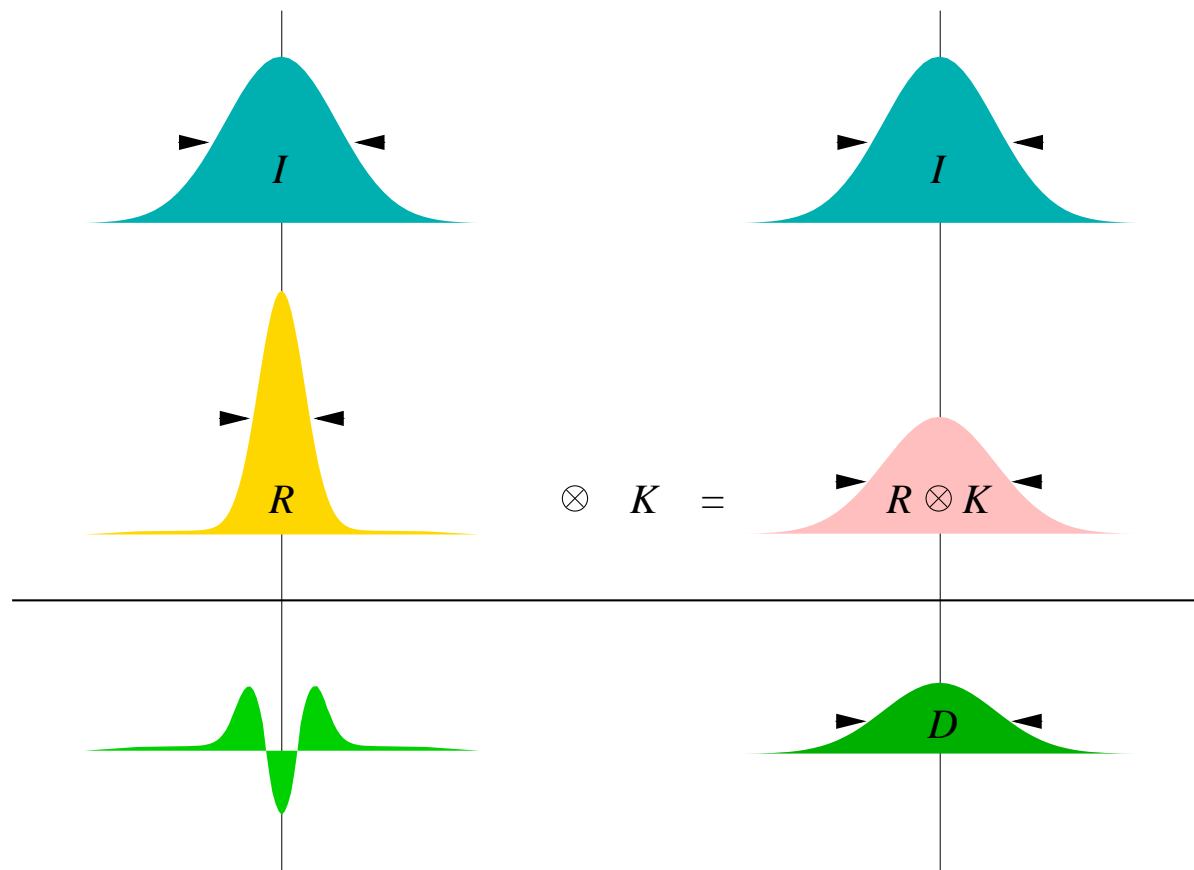
- Augmenter la sensibilité de détection : détection possible d'événements sur des étoiles non résolues
- S'affranchir de l'effet de confusion dû à l'encombrement des champs (*blending*)
- Améliorer la précision photométrique

## Principe

- Soustraire deux images
- Mesurer les variations de flux sur la différence

# Principe de l'algorithme

- Variation de PSF, du fond de ciel : soustraire deux clichés n'est pas trivial
- Principe : ramener l'image de meilleur *seeing* à la PSF de l'autre image.





# Détermination du noyau

Minimiser [Alard and Lupton, 1998]

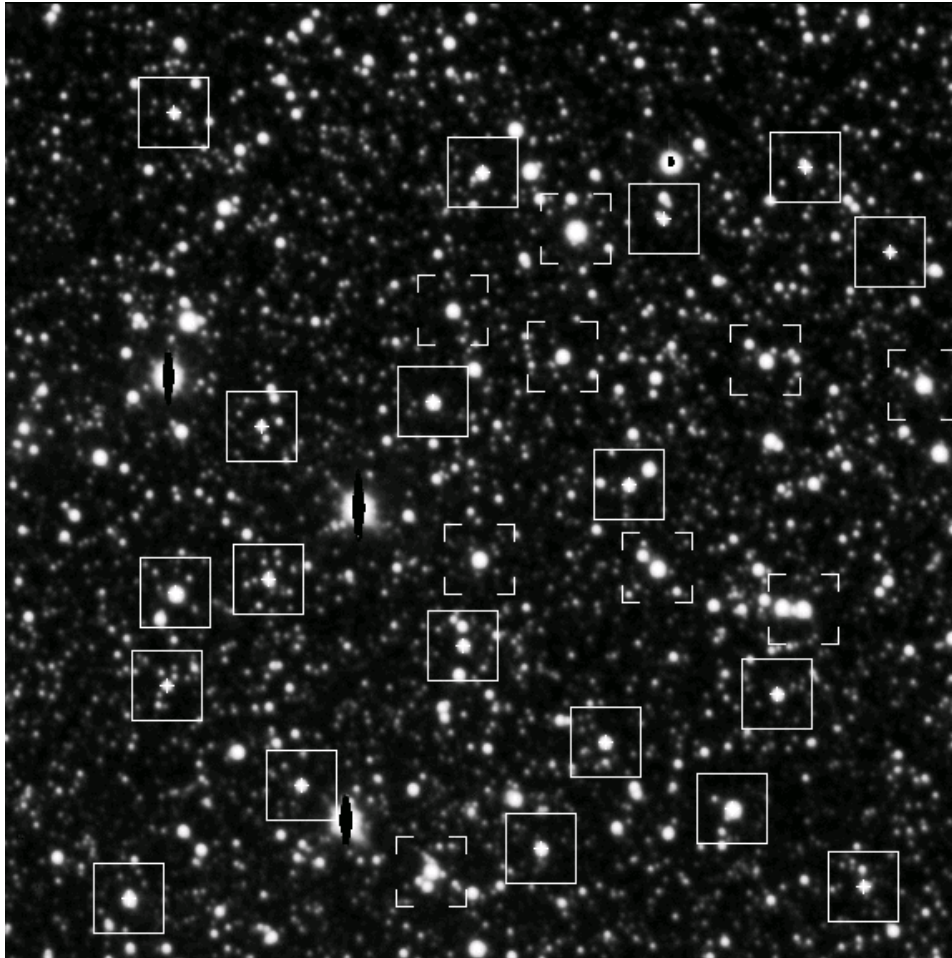
$$\chi^2 = \sum_{x,y} \frac{[I(x,y) - (R \otimes K)(x,y) - \Delta B(x,y)]^2}{\sigma^2(x,y)}$$

Développer le noyau sur une base de fonctions bien choisies

$$K(u,v) = \sum_{n=0}^{n=N-1} a_n K_n(u,v)$$

Base de fonctions testées : gaussiennes, *Dirac*, combinaisons

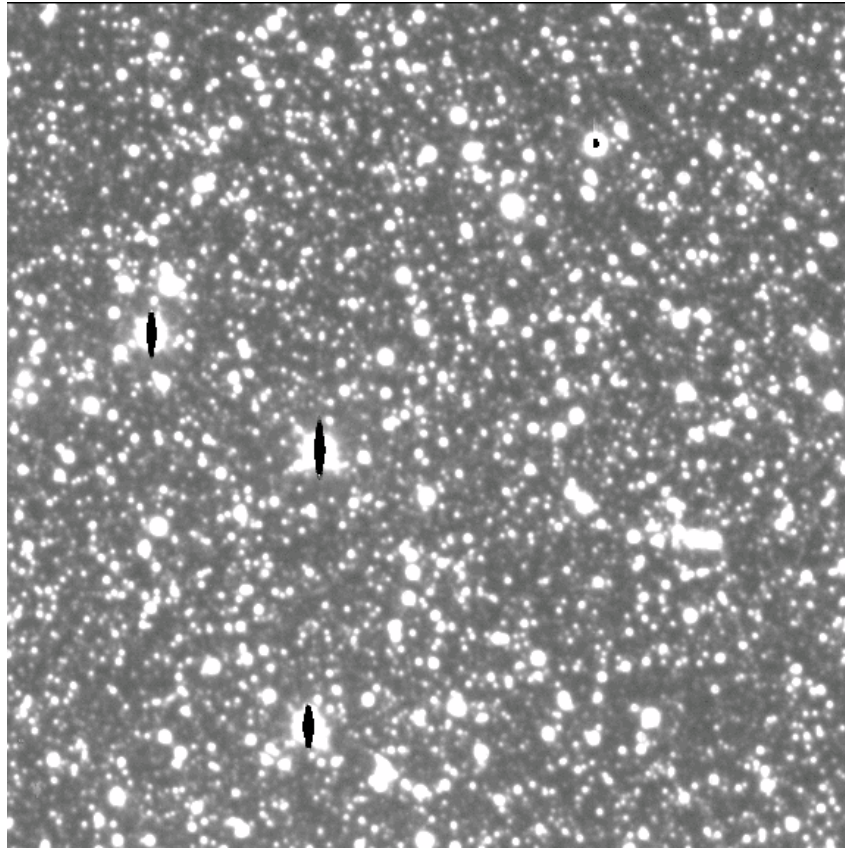
# Détermination du noyau



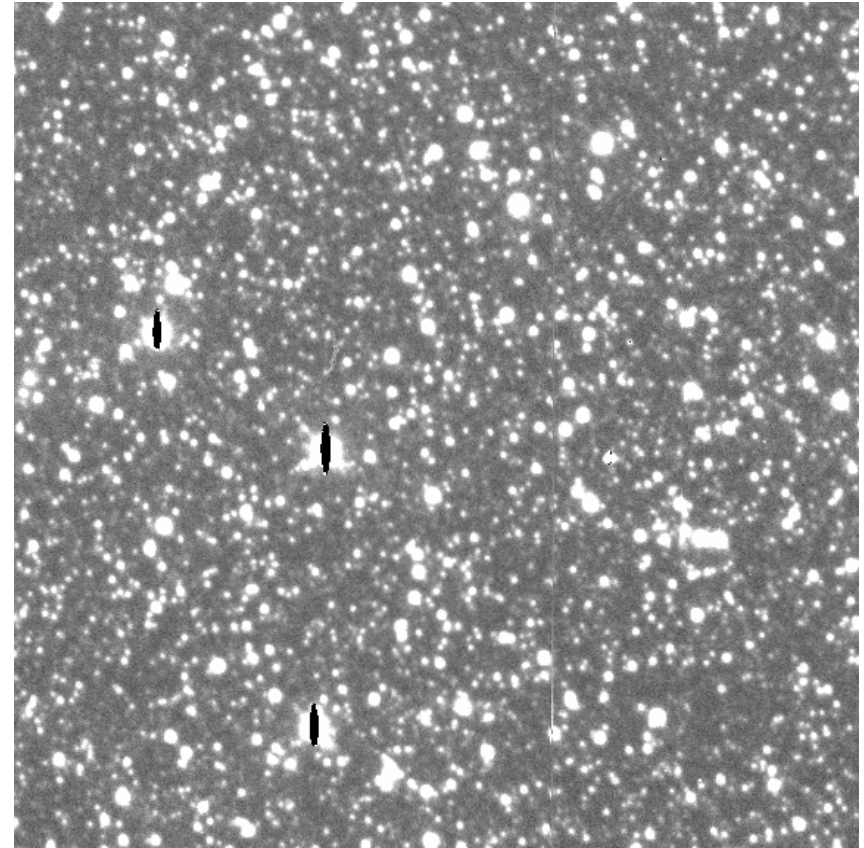
Calcul limité à un sous-ensemble de *vignettes*

- centrées sur des étoiles brillantes non saturées
- réjection itérative des étoiles variables

# Exemple de soustraction

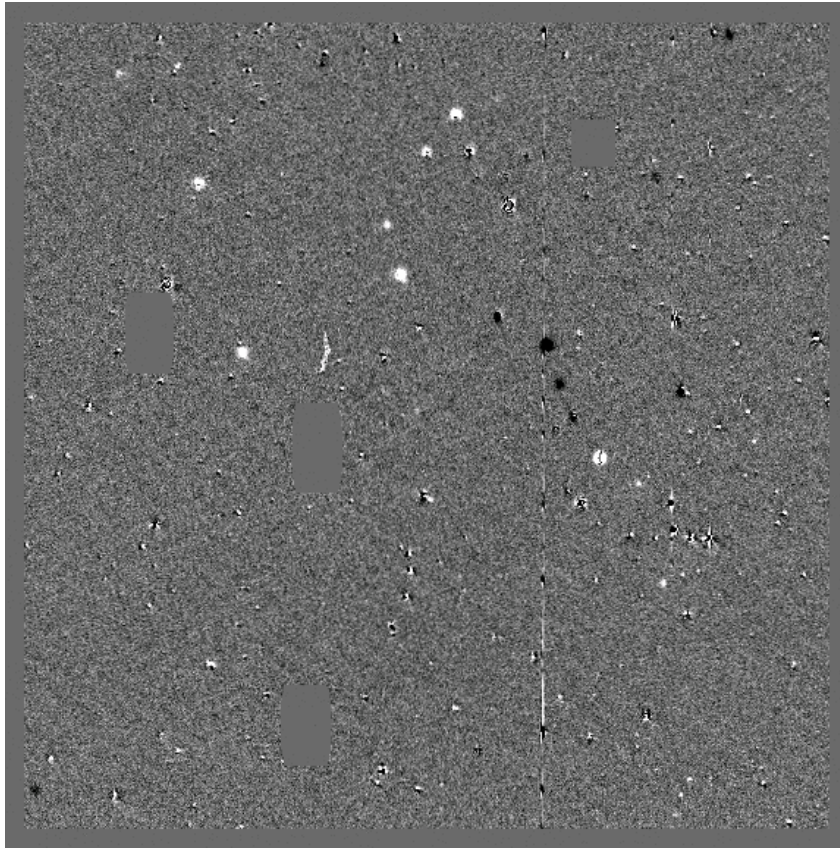


*Référence R*



*I (1998-11-07)*

# Exemple de soustraction



$$D = I - (R \otimes K + \Delta B)$$



*D (détail)*

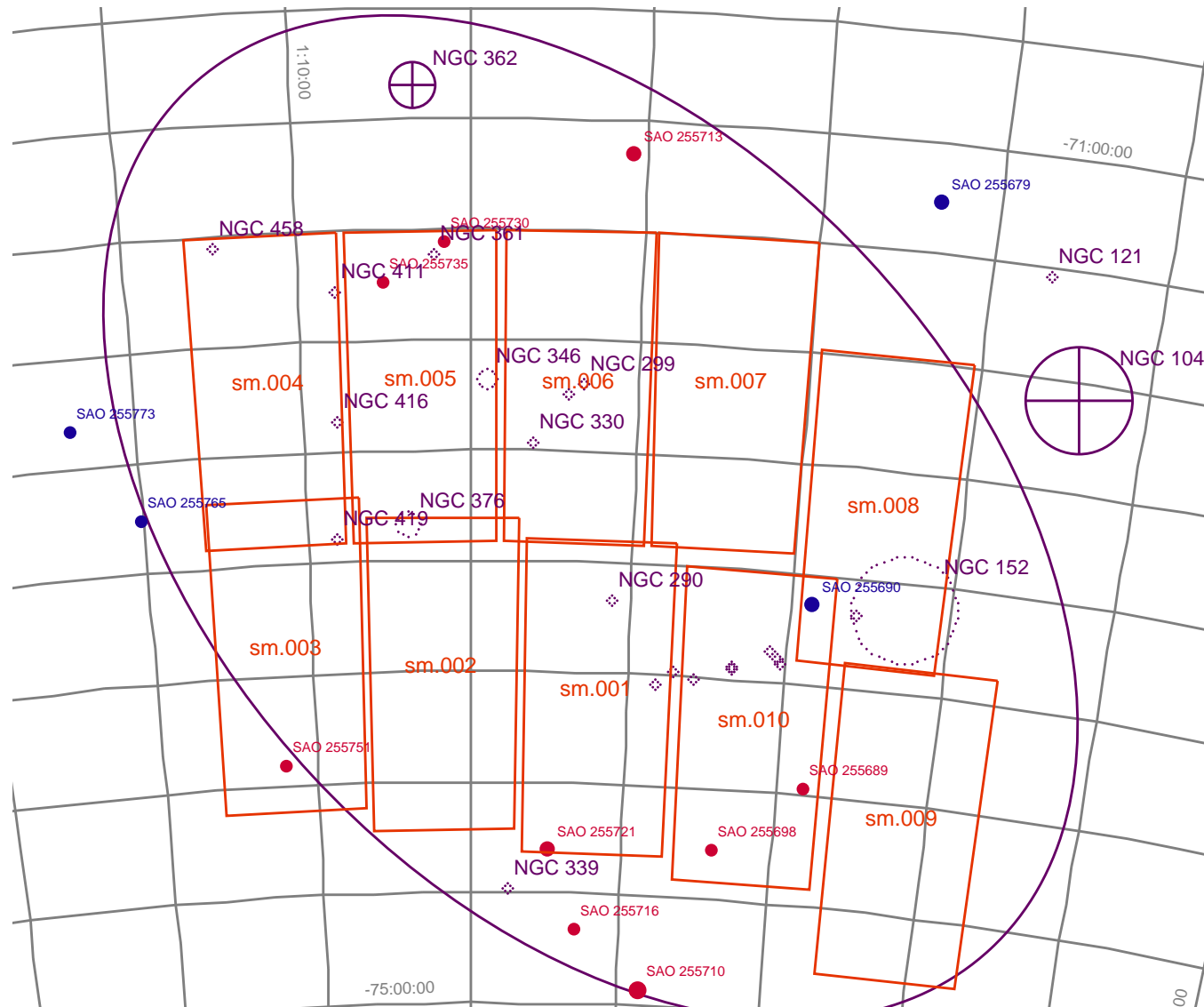
# Plan de l'exposé

- La matière noire galactique
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- La soustraction d'images
- **Réduction des images du SMC**
- Recherche de microlentilles
- Recherche de nuages de gaz opaques
- Conclusion

# Données 1996-2001 vers le SMC



# Données 1996-2001 vers le SMC



# Chaîne de réduction

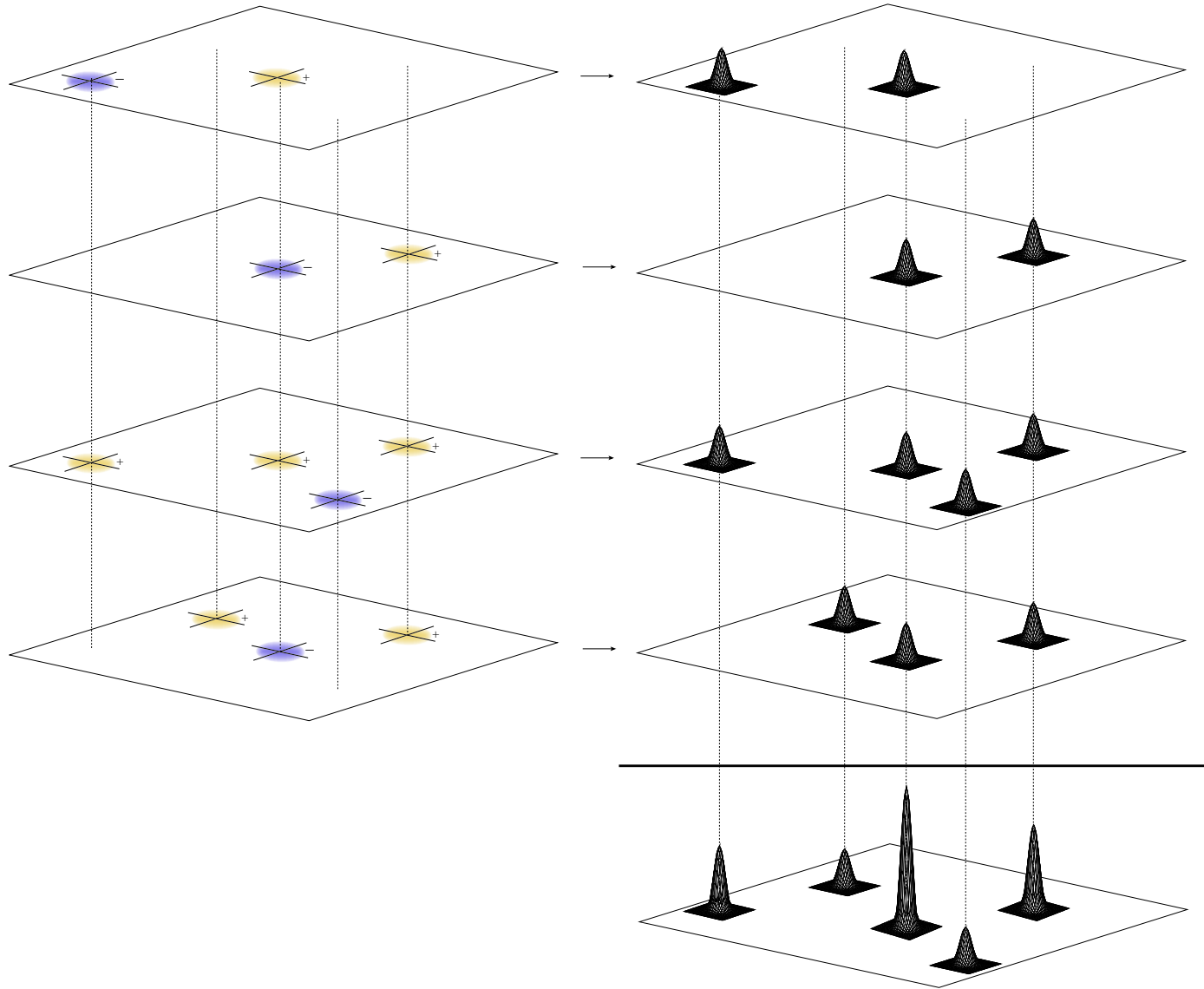
Réduction sans catalogue d'étoiles pré-établi

- Soustraction des images
- Détection des variations de flux sur les images différences
- Fusion des détections : liste d'objets variables
- Photométrie sur les images  $D$  (PSF tabulée)

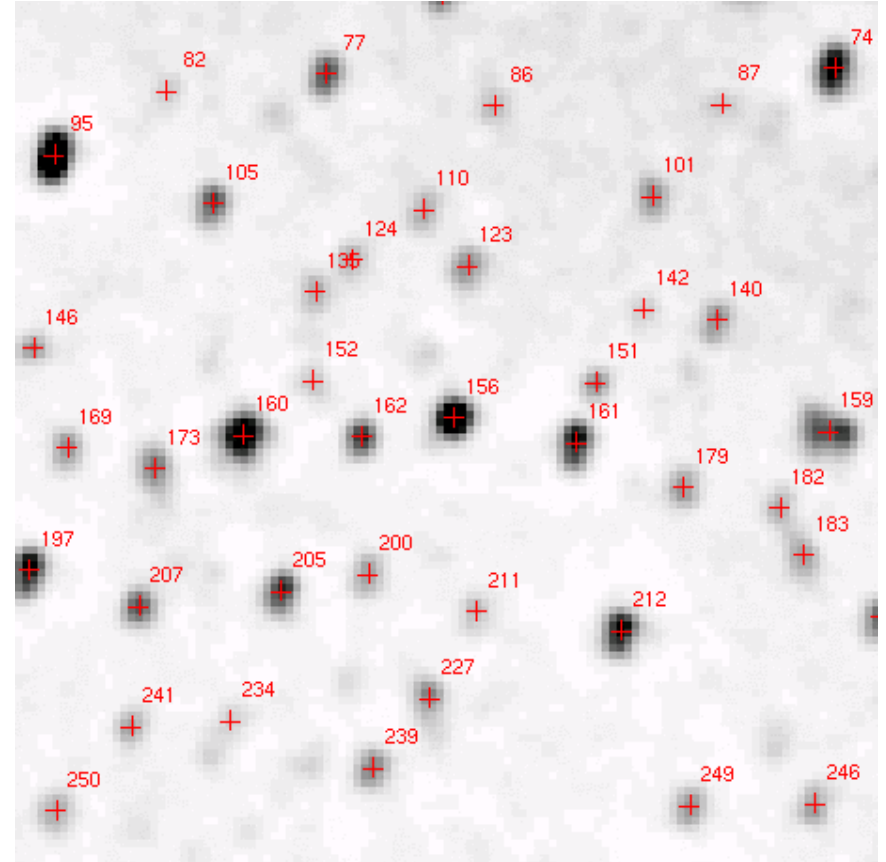
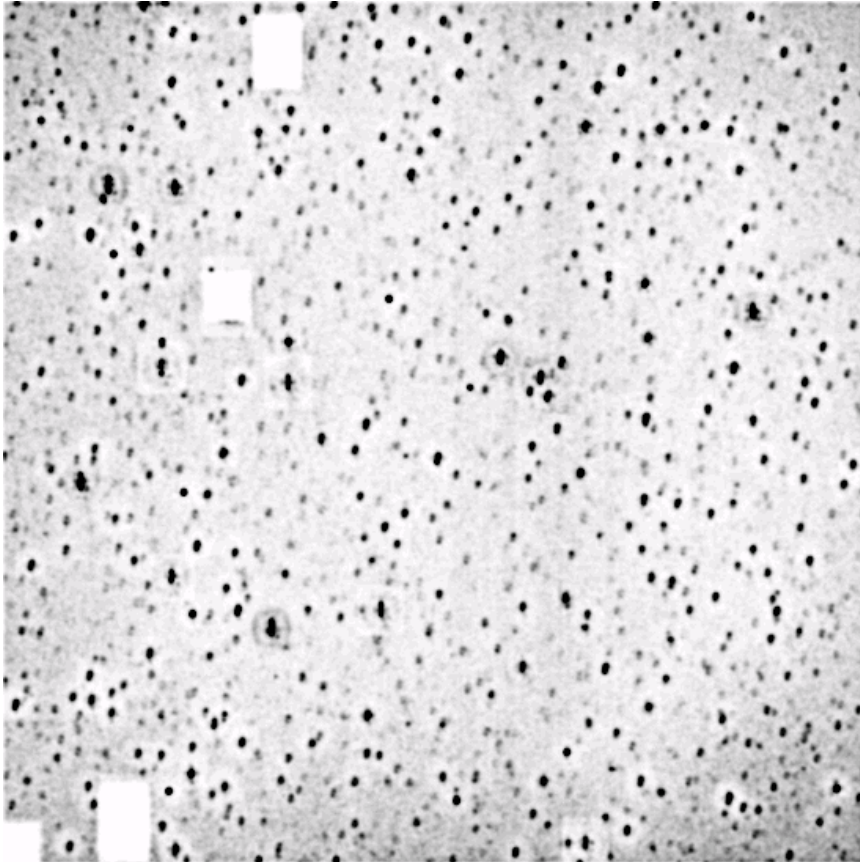
Traitement au CC-IN2P3 — Test grandeur nature du HPSS



# Fusion des détections



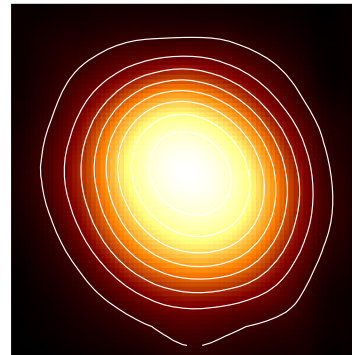
# Fusion des détections



- 60000 détections : dont artefacts, étoiles saturées

# Photométrie par ajustement de PSF tabulée

- Peu d'étoiles sur une image soustraite
- Modèle de PSF tabulée construite sur l'image courante  $I$



- Ajustement sur l'image différence, à position fixée  $(x_*, y_*)$ , en utilisant une image de poids

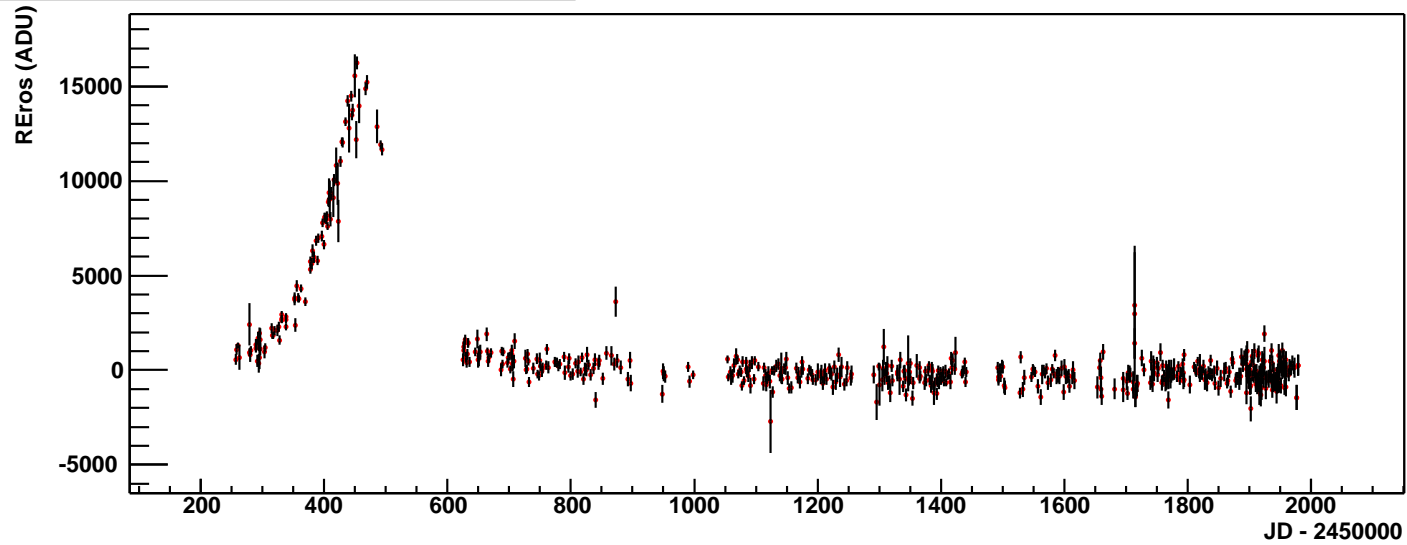
$$\chi^2 = \sum_{x,y} \frac{[D(x,y) - \Delta F \times \text{PSF}(I)(x - x_*, y - y_*)]}{\sigma_D^2(x,y)}$$

# Plan de l'exposé

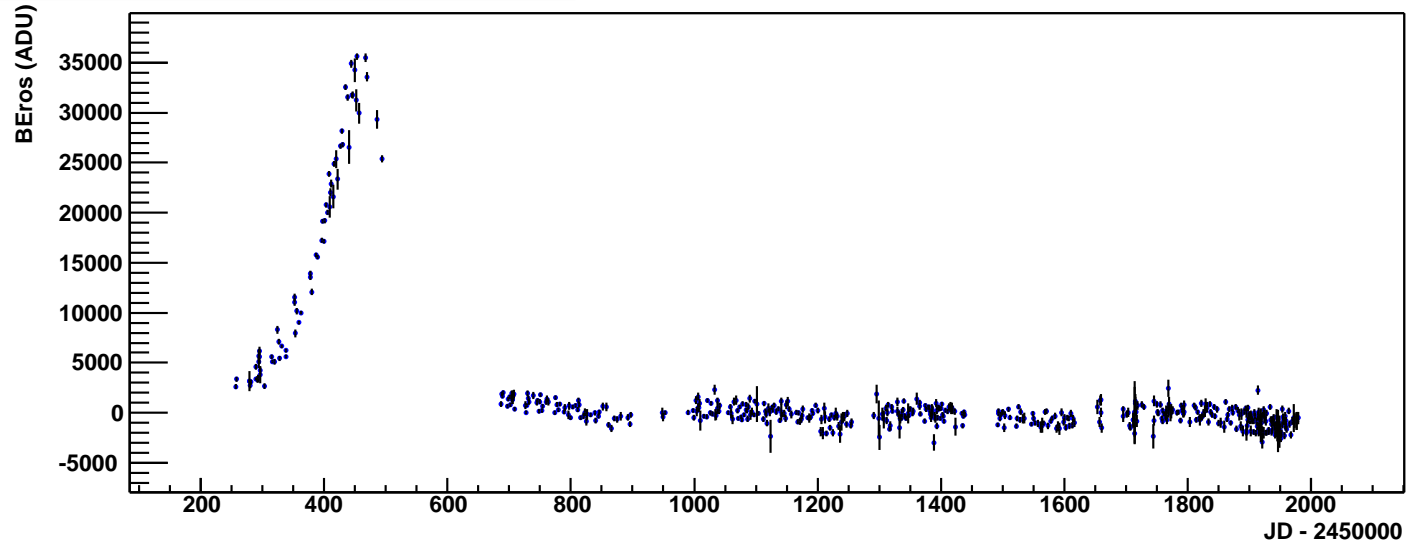
- La matière noire galactique
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- La soustraction d'images
- Réduction des images du SMC
- **Recherche de microlentilles**
- Recherche de nuages de gaz opaques
- Conclusion

# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm005\_48-543

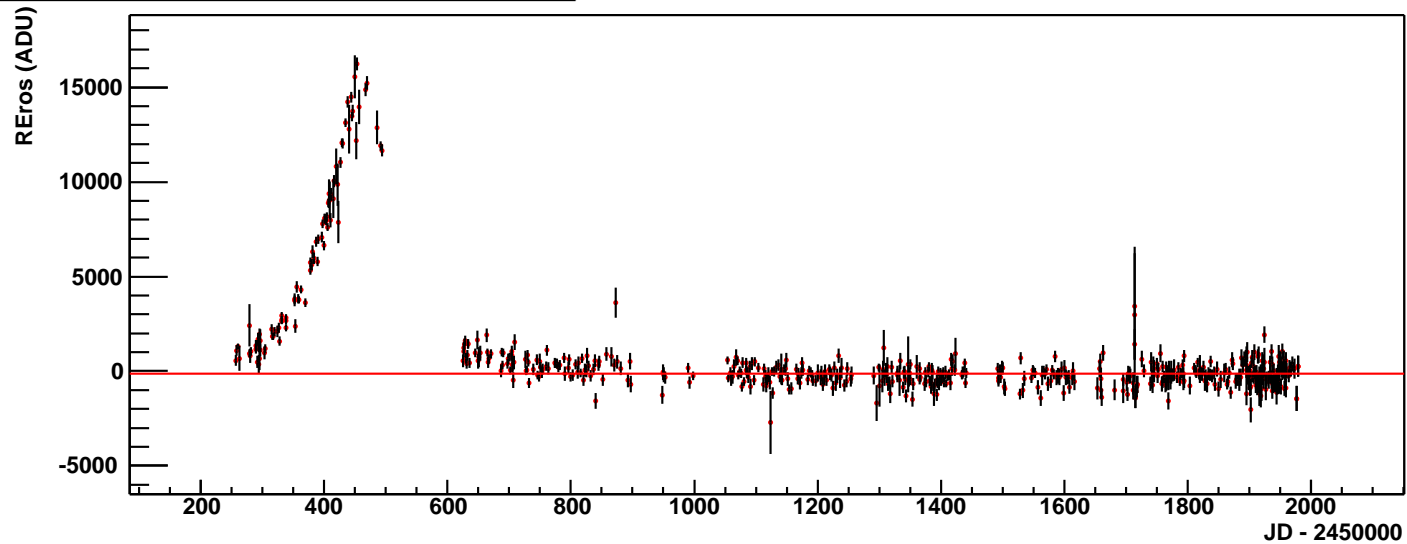


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm005\_48-543

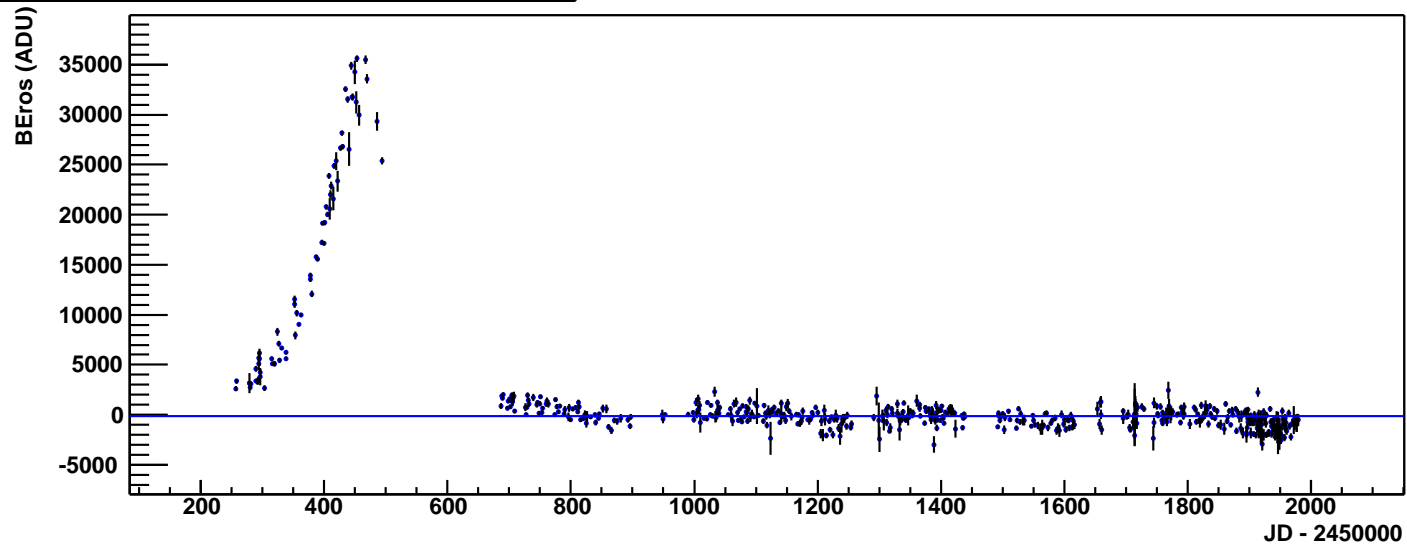


# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm005\_48-543

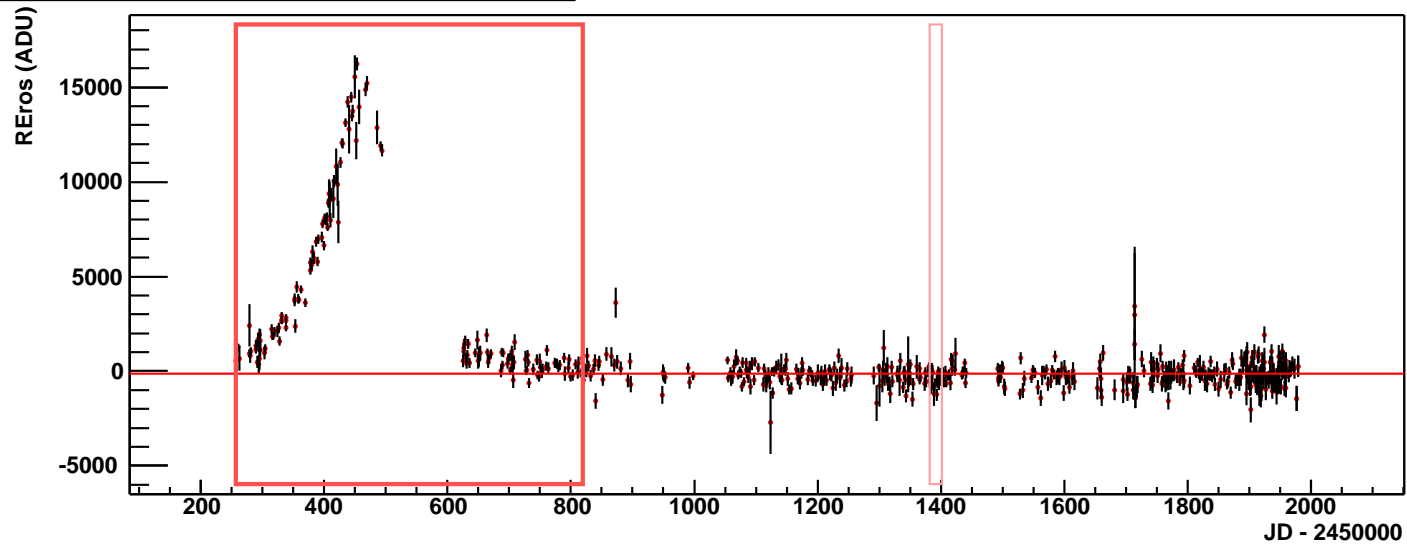


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm005\_48-543

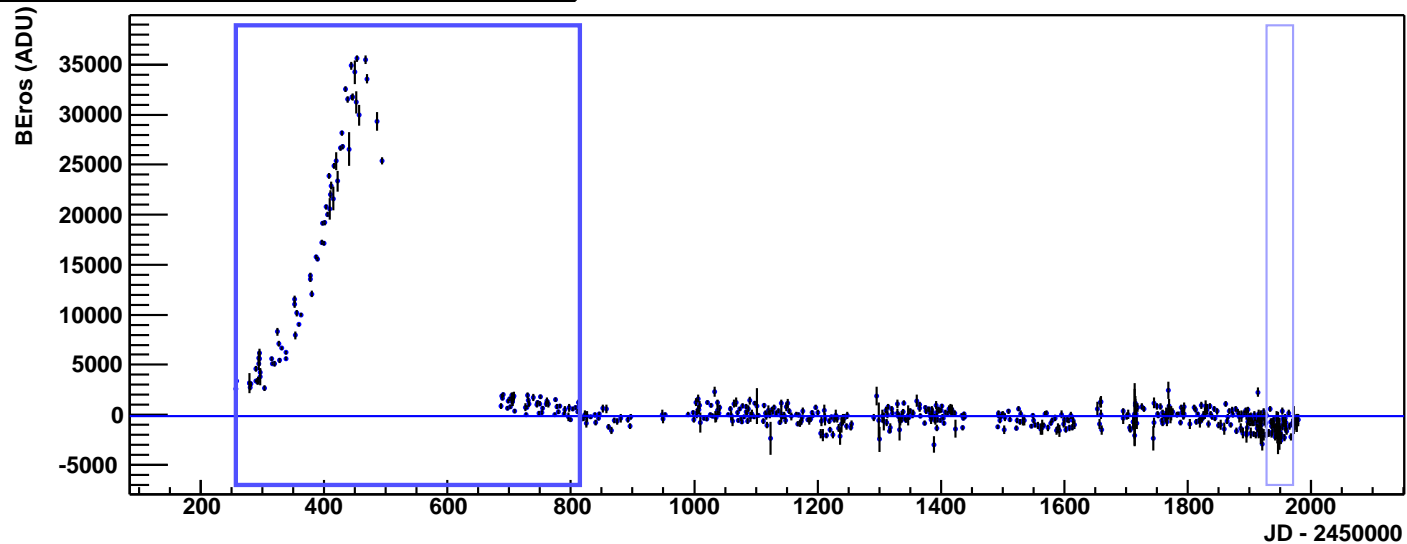


# Recherche d'un signal de microlentille

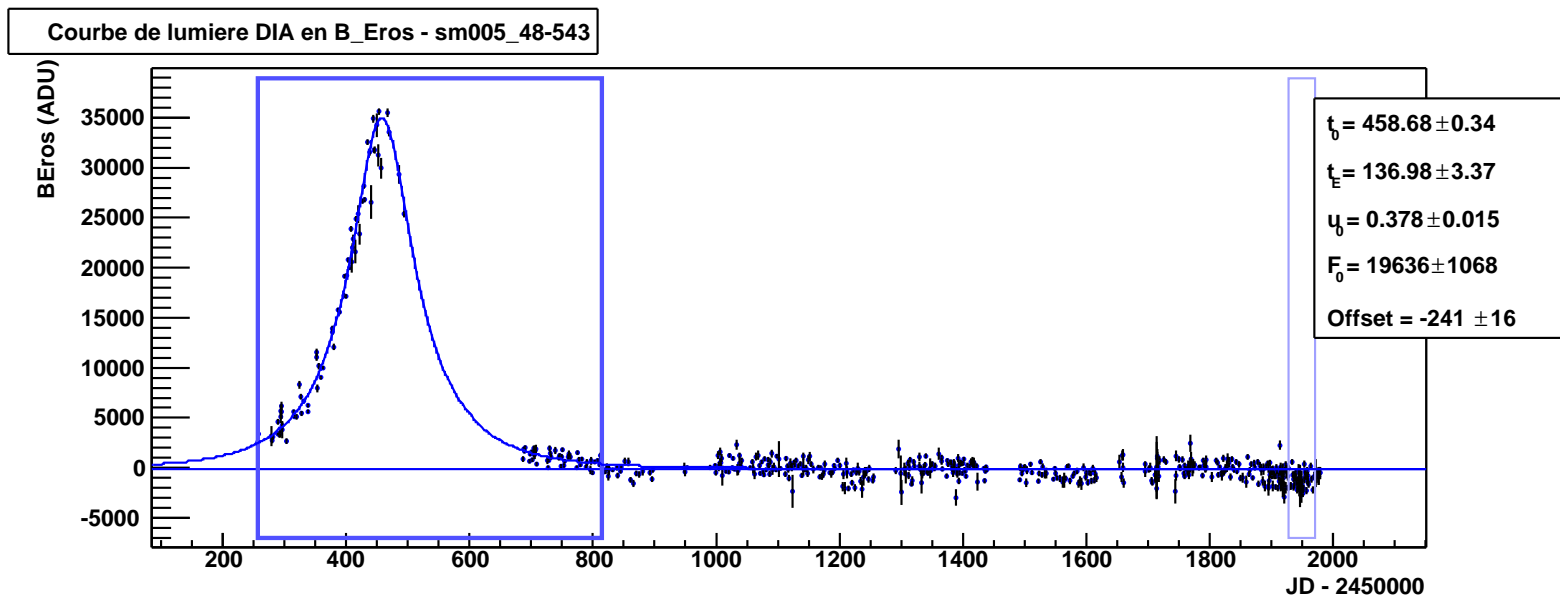
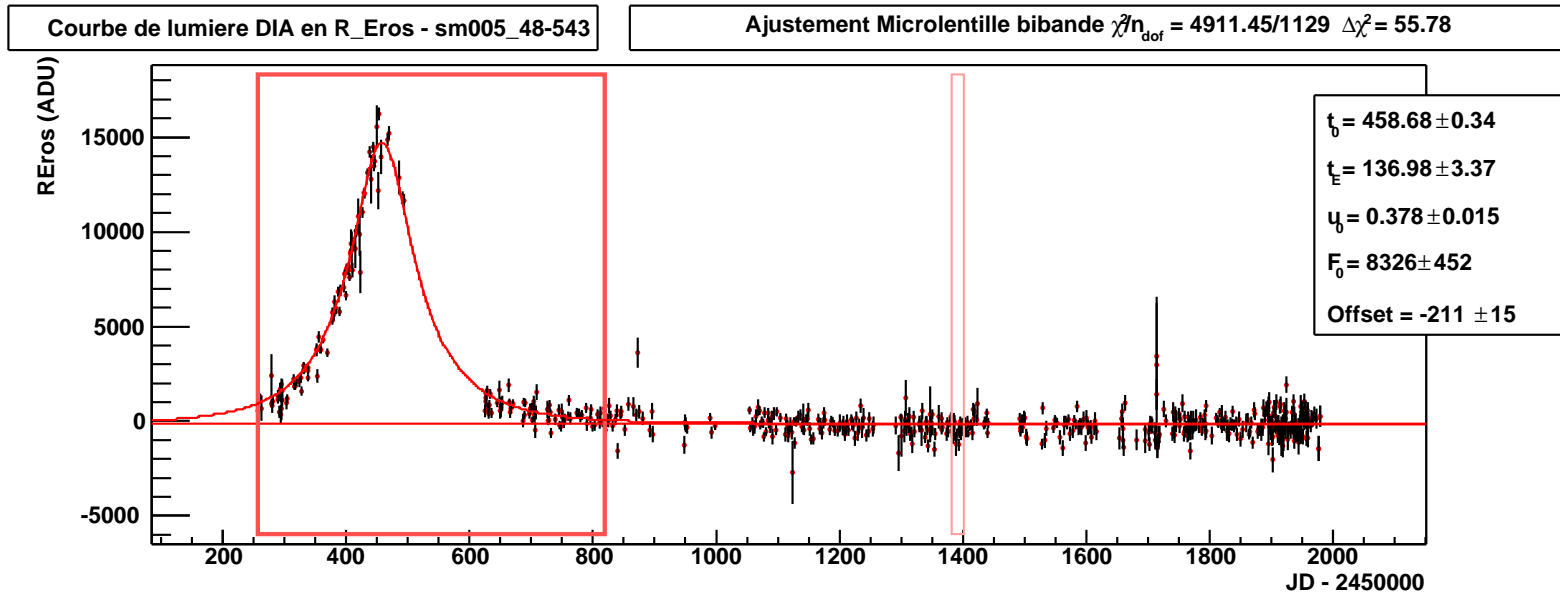
Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm005\_48-543



Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm005\_48-543



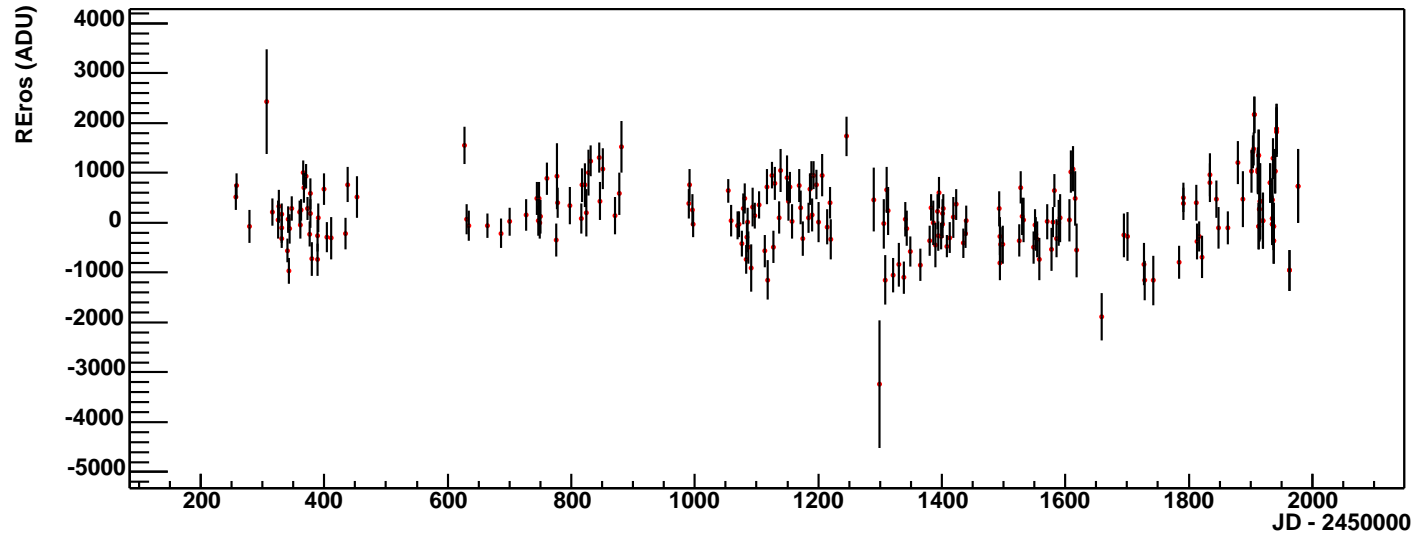
# Recherche d'un signal de microlentille



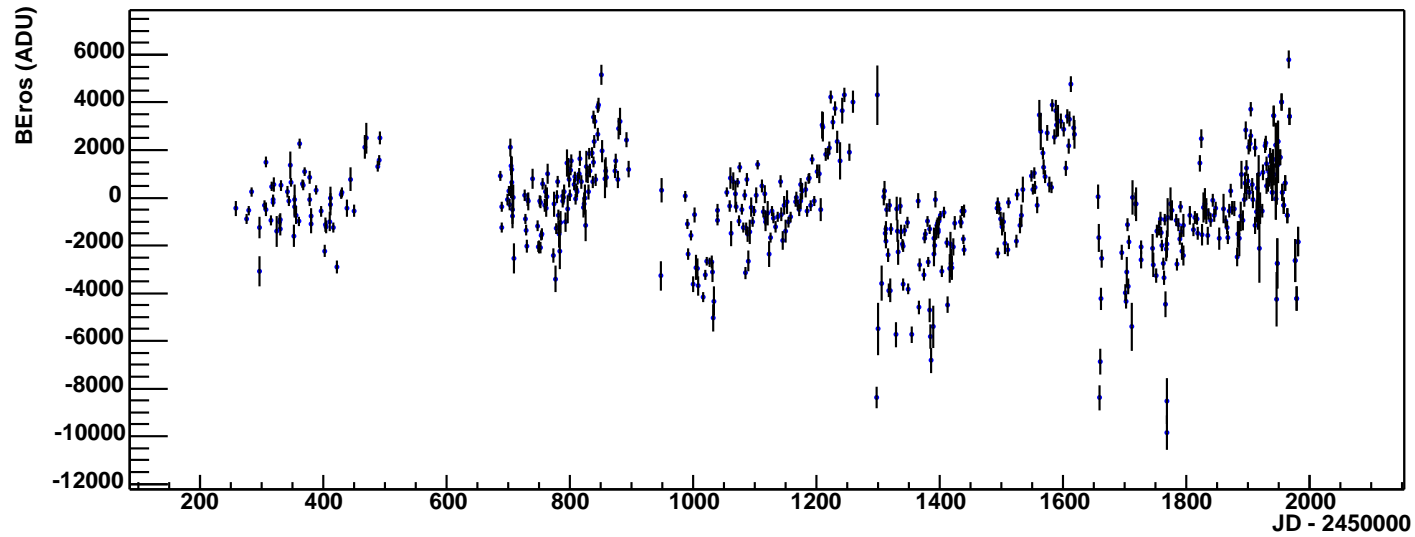


# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-34

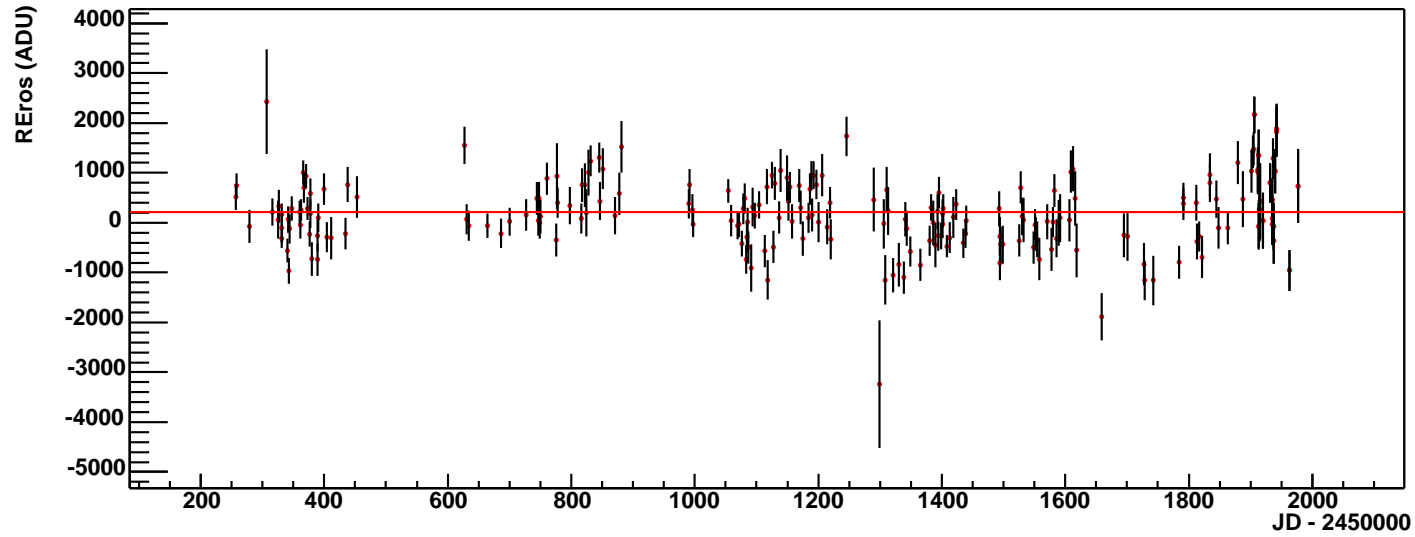


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-34

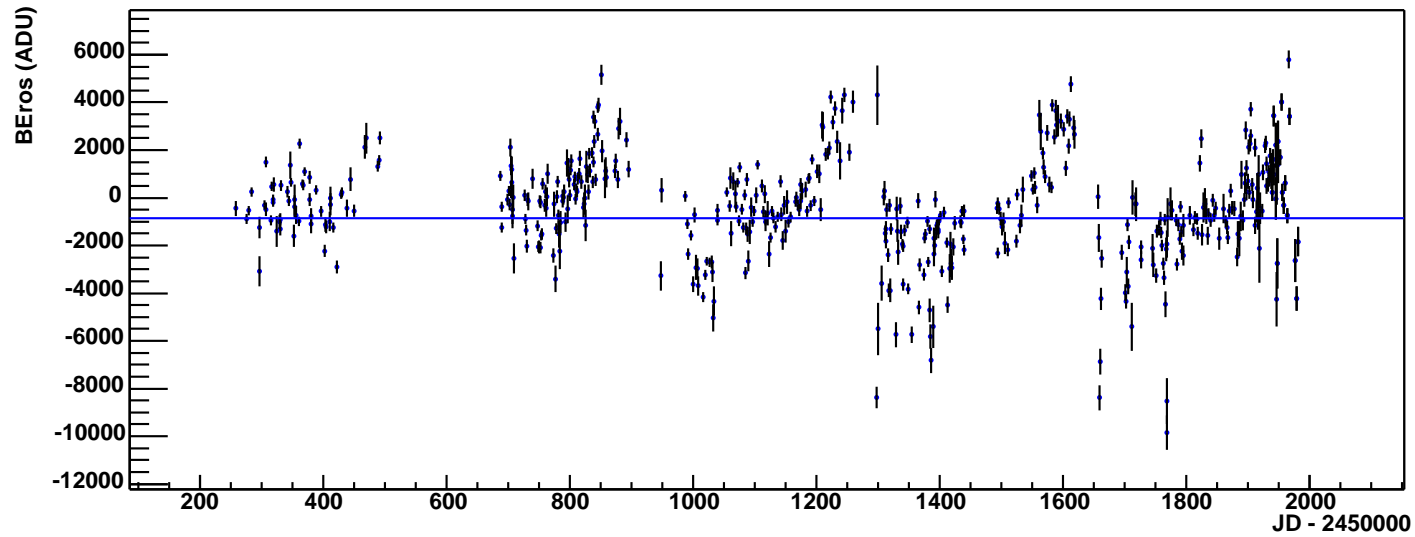


# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-34

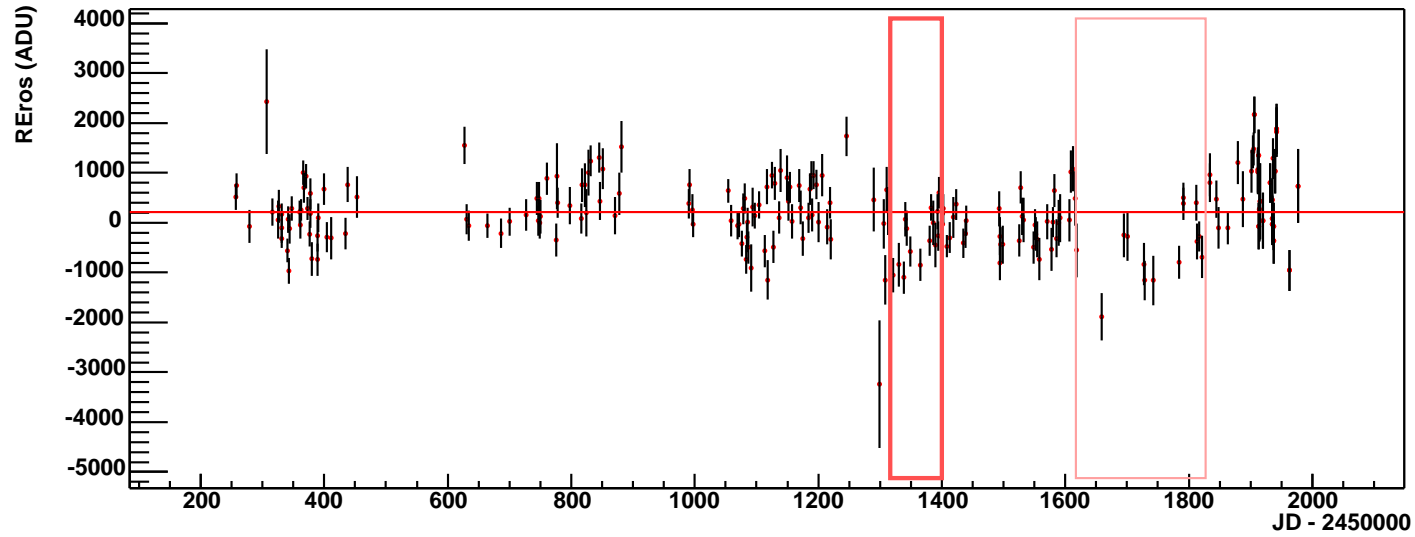


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-34

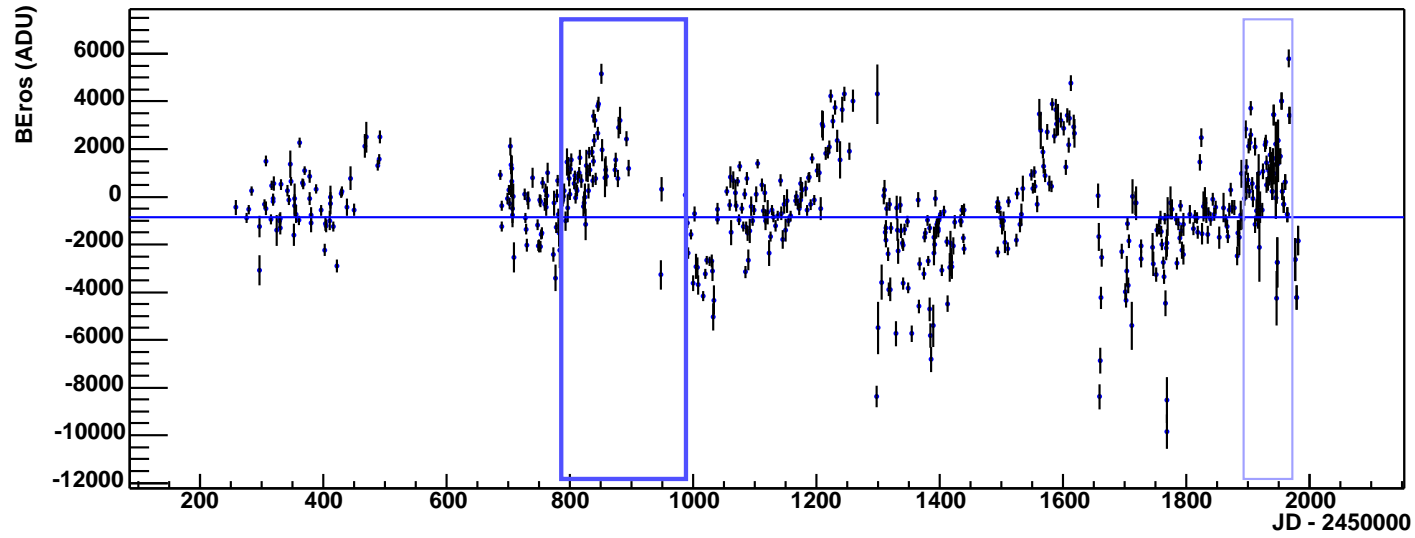


# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-34

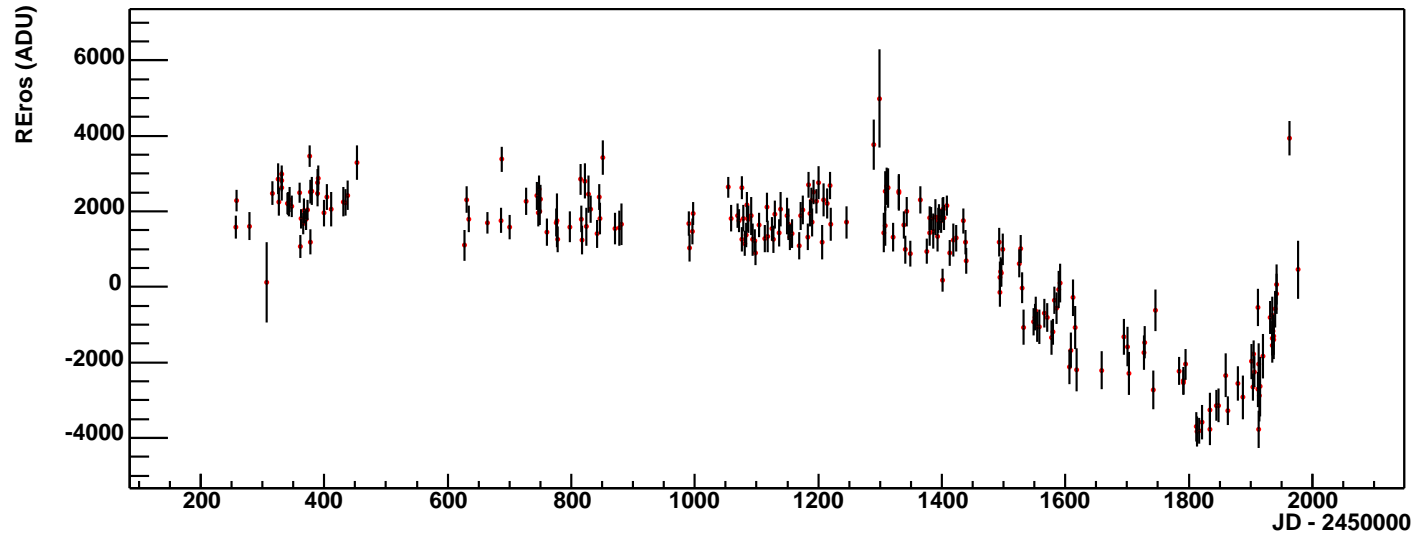


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-34

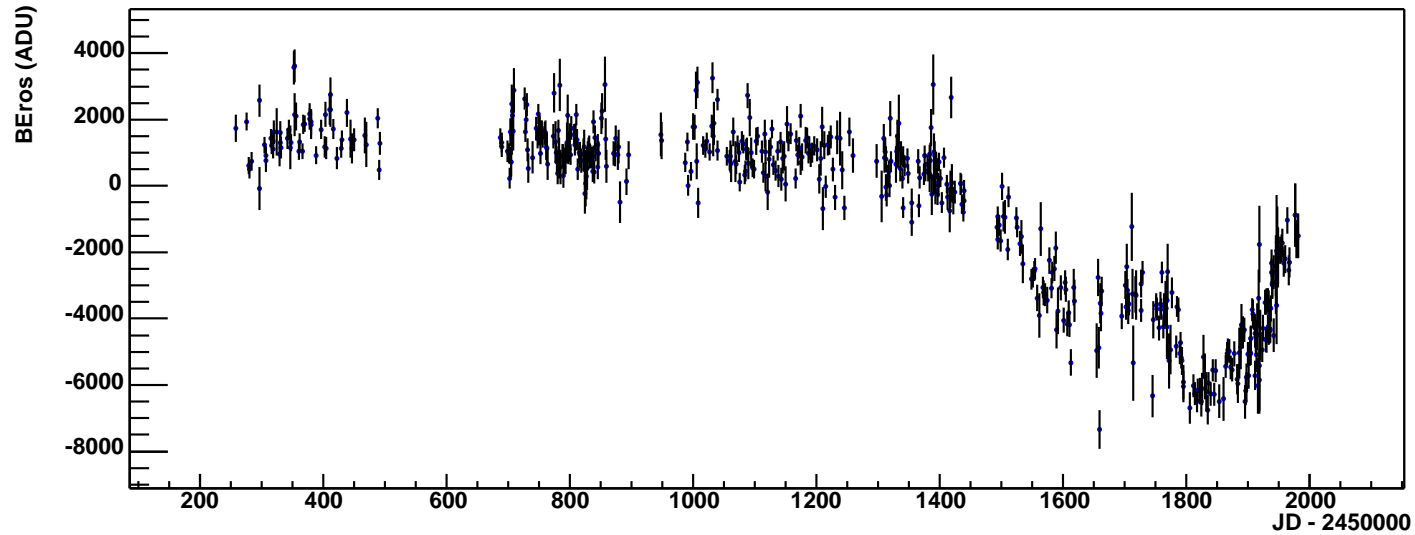


# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-748

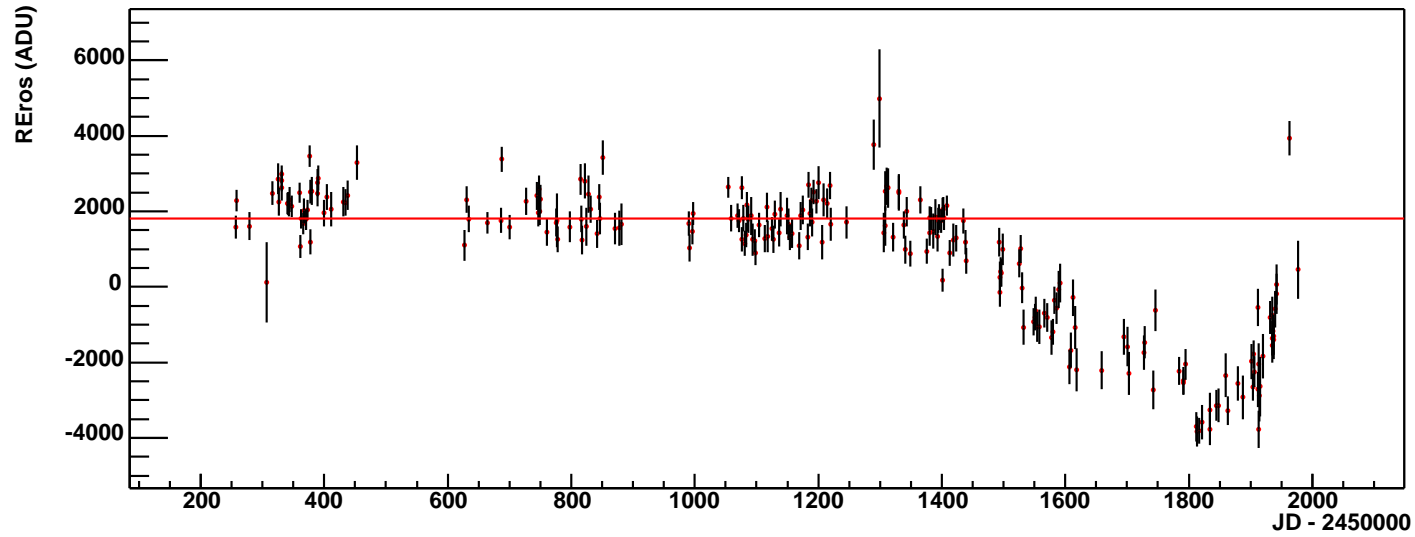


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-748

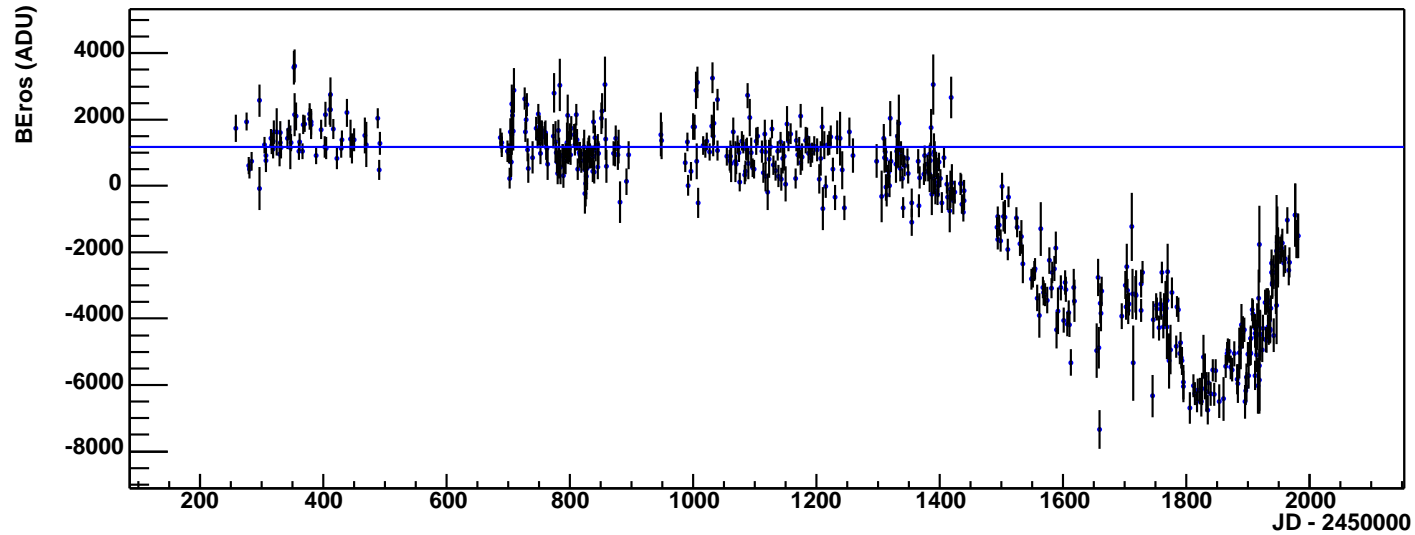


# Recherche d'un signal de microlentille

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-748

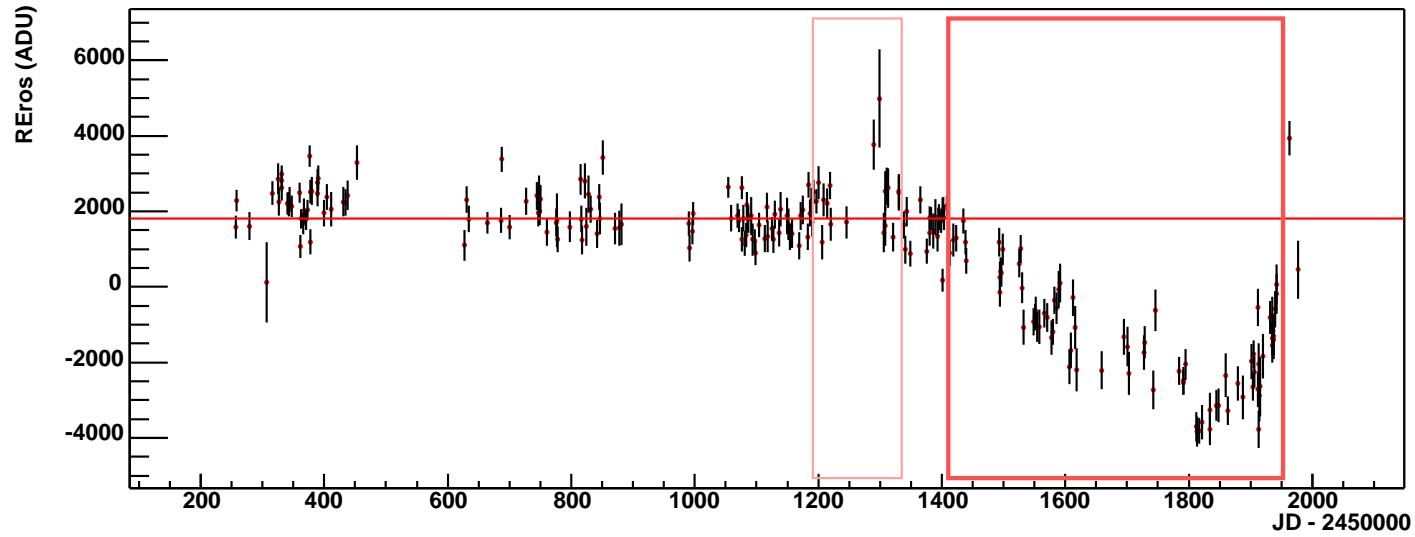


Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-748

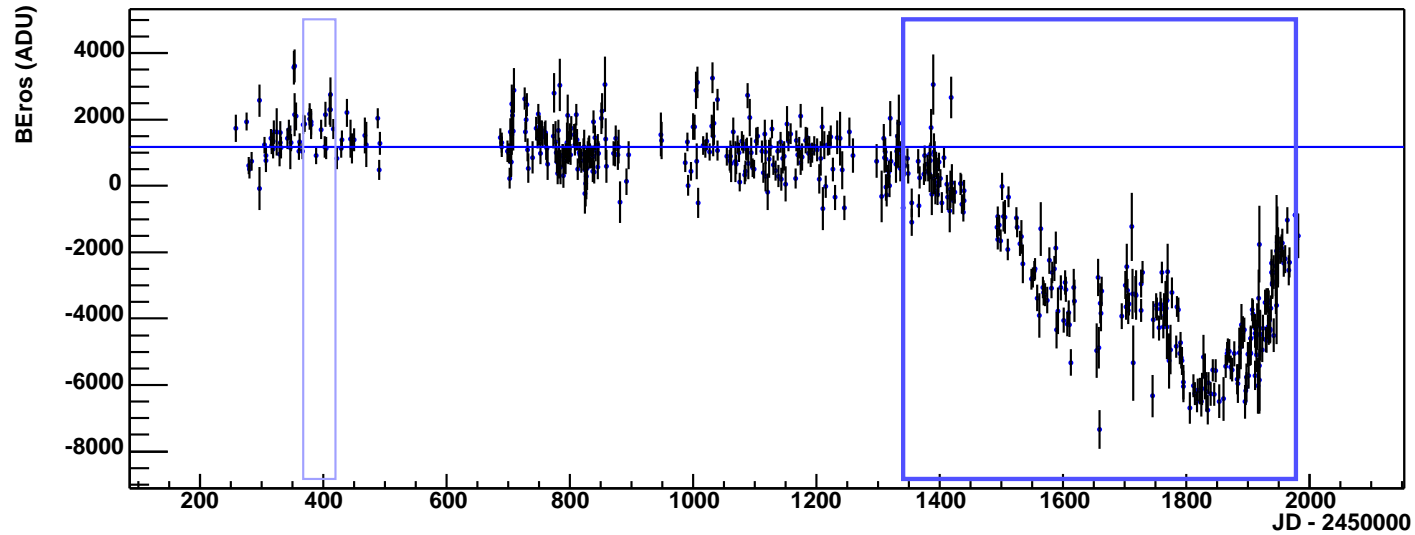


# Recherche d'un signal de microlentille

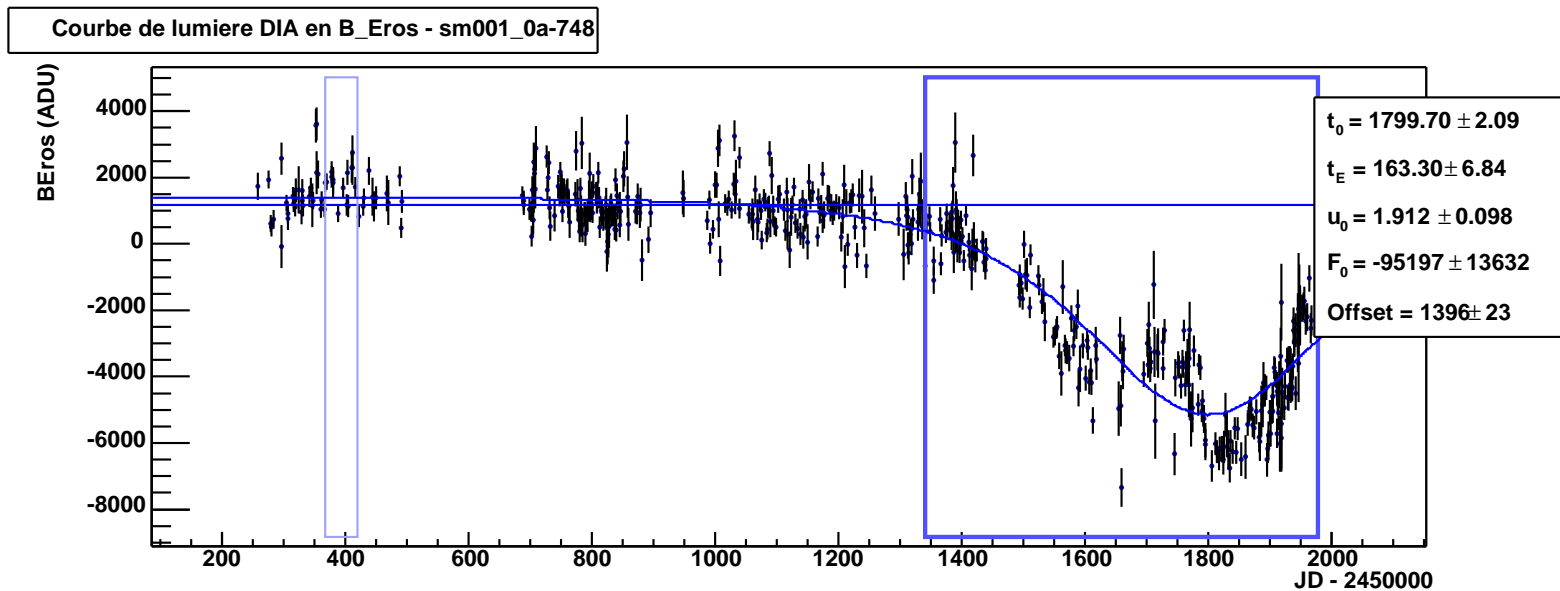
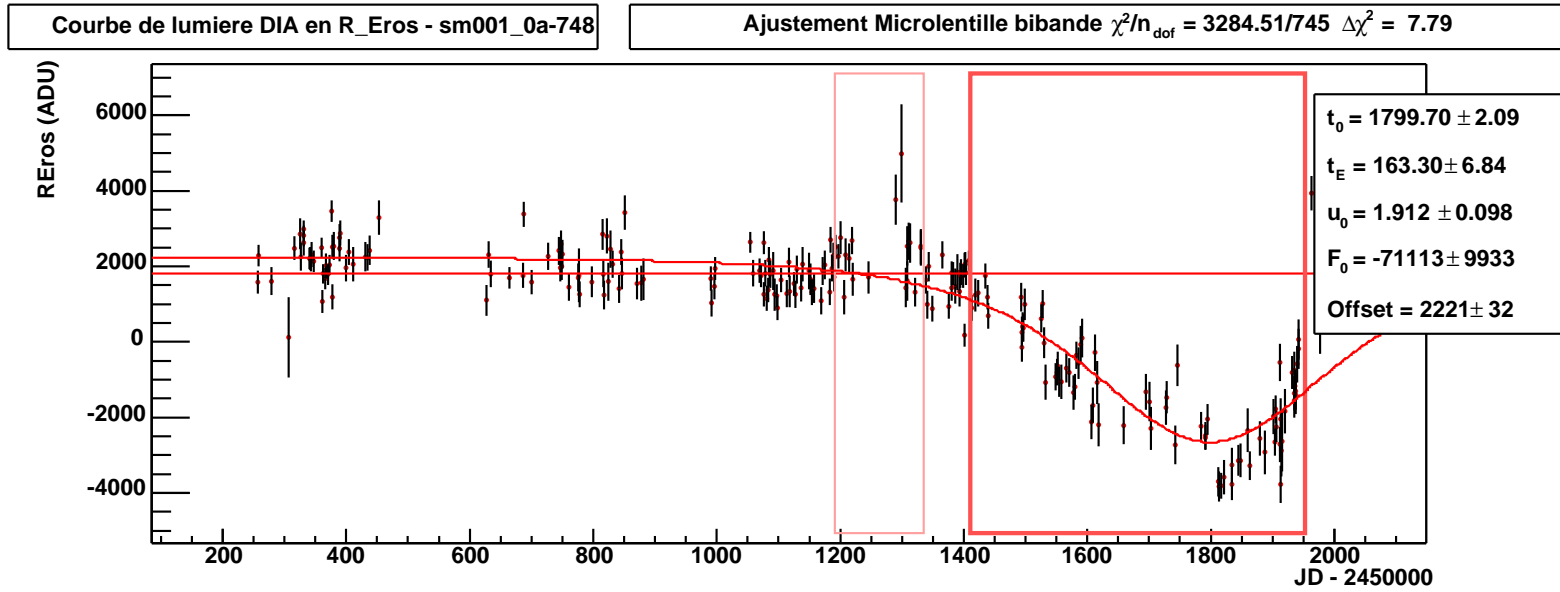
Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-748



Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-748



# Recherche d'un signal de microlentille



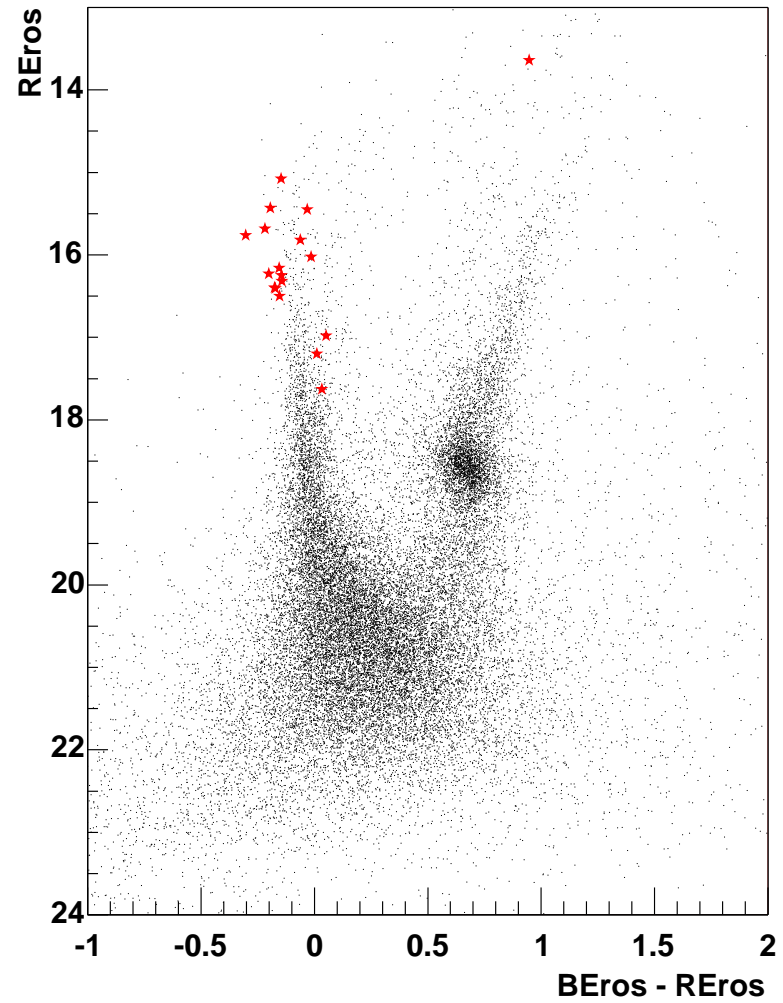
# Analyse : recherche de microlentilles

## Analyse des courbes de lumière obtenues : critères

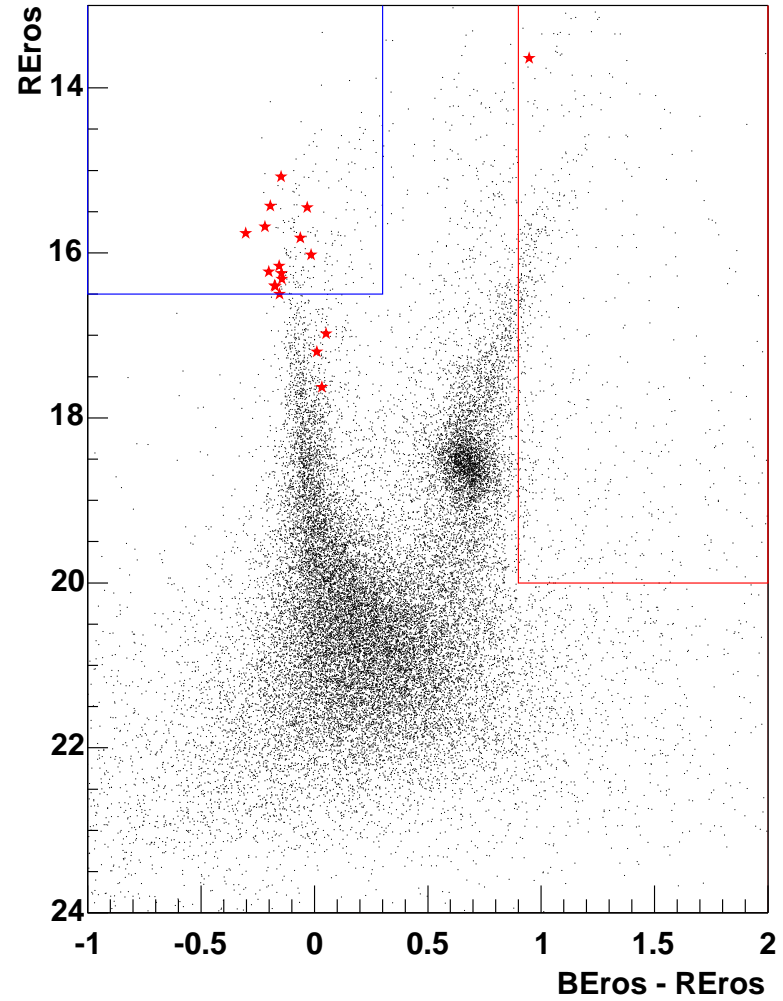
Coupure	étoiles restantes	fraction données	fraction simulation
—	574865	100.00 %	100.00 %
1 (1 fluctuation)	552958	96.18 %	89.63 %
2 (recouvrement R/B)	70652	12.29 %	60.31 %
3 (fluctuation > 0)	25137	4.37 %	53.10 %
4a (10 pts in.)	23274	4.04 %	51.04 %
4b (20 pts out.)	23203	4.03 %	51.04 %
5 (signification relative)	1476	0.25 %	43.69 %
6 (amélioration $\Delta\chi^2$ )	62	0.01 %	43.67 %
7a ( $F_0 > 0$ )	60	0.01 %	43.53 %
7b ( $t_0 \in I_{obs}$ )	44	0.0077%	39.26 %
7c ( $t_{1/2} < T_{obs}/3$ )	22	0.0038%	33.61 %



# Critères pour les étoiles résolues



# Critères pour les étoiles résolues



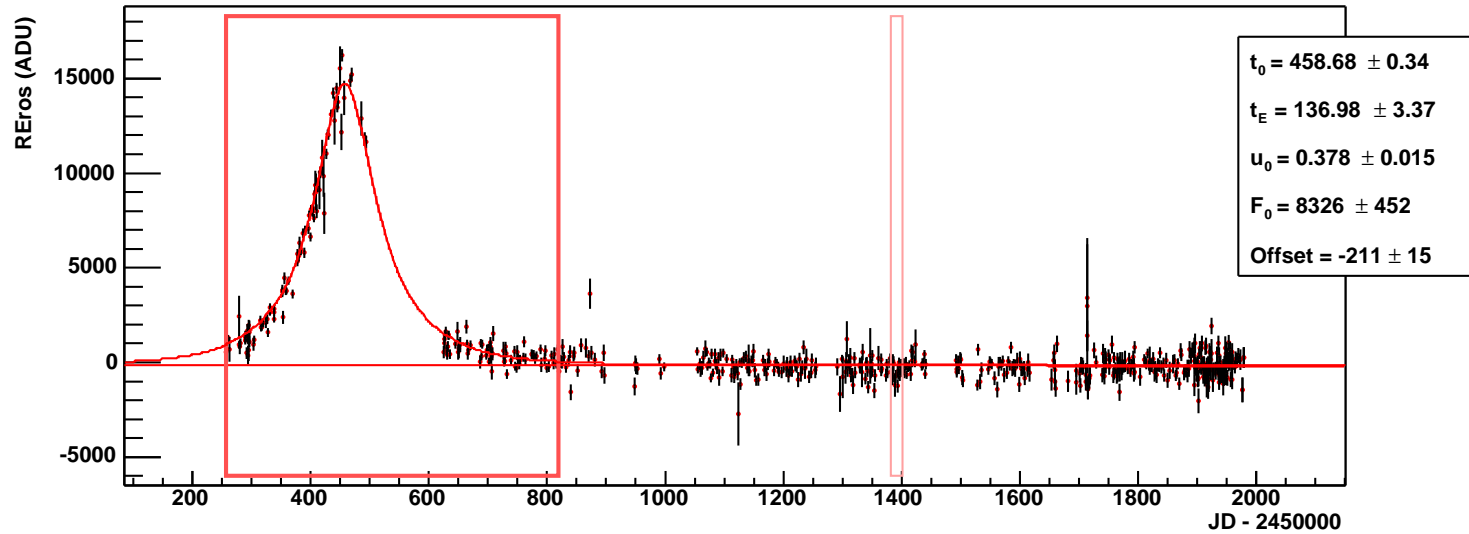
# Candidats

Candidat	$t_0$	$t_E$	$t_{1/2}$	$u_0$	$\Delta\chi^2$	$d_{a,SS}$	$R_{EROS}$	$B_{EROS}$
sm001_0a-924	1862.64	80.24	310.82	2.71	19.39	0.21	17.20	17.21
<b>sm005_48-543</b>	458.68	136.98	126.26	0.38	55.78	0.29	17.64	17.67
sm005_6e-389	1818.41	77.12	206.68	1.70	18.53	N.R.	—	—
sm005_7a-262	1944.85	34.65	113.61	2.21	14.64	0.16	16.67	—
<b>sm010_1b-758</b>	1734.75	158.18	221.41	0.67	118.65	0.24	16.50	16.36
sm010_3e-254	1903.34	81.56	256.08	2.09	16.72	0.02	16.97	17.02
sm010_46-721	1040.71	24.51	73.32	1.96	15.90	N.R.	—	—
sm010_46-1012	1890.64	71.79	0.03	0.00	12.14	N.R.	—	—

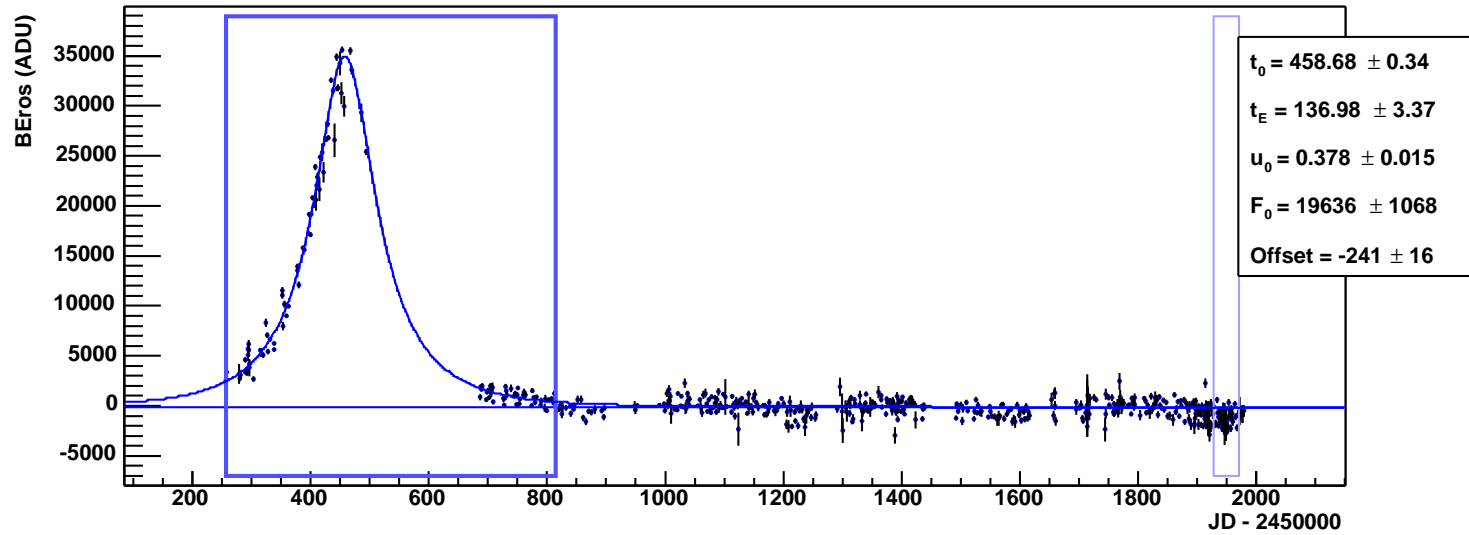
# sm005\_48-543 = EROS-1997-SMC-1

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm005\_48-543

Ajustement Microlentille bibande  $\chi^2/n_{\text{dof}} = 4911.45/1129$   $\Delta\chi^2 = 55.78$



Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm005\_48-543

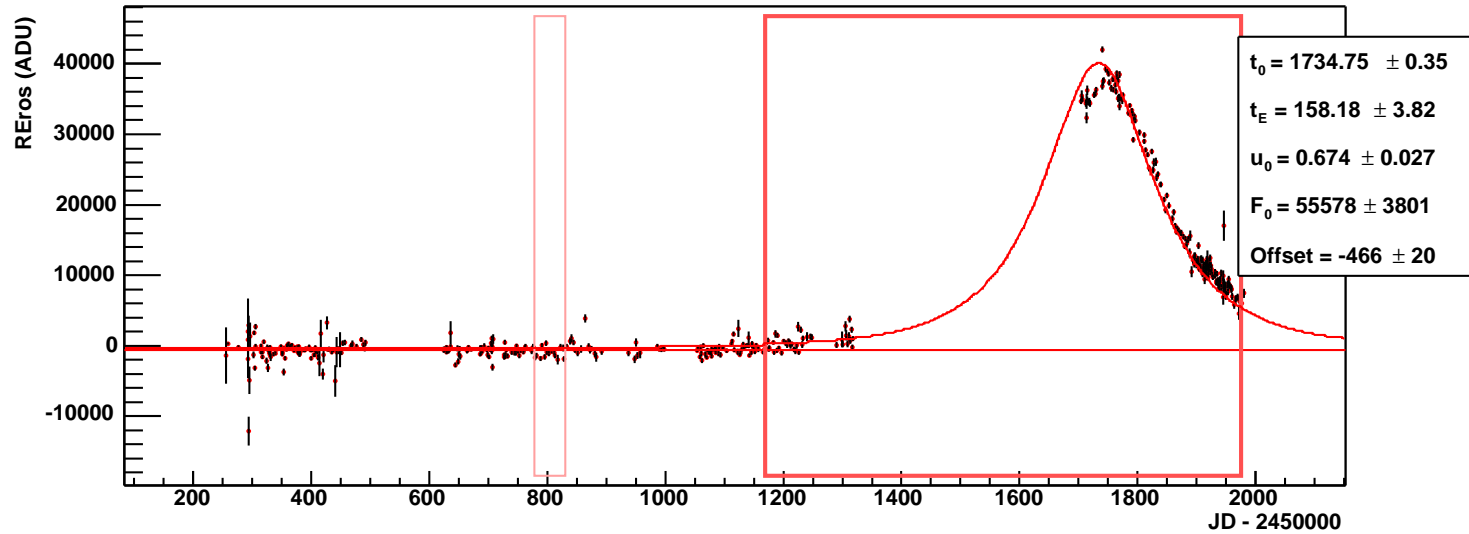


# sm010\_1b-758

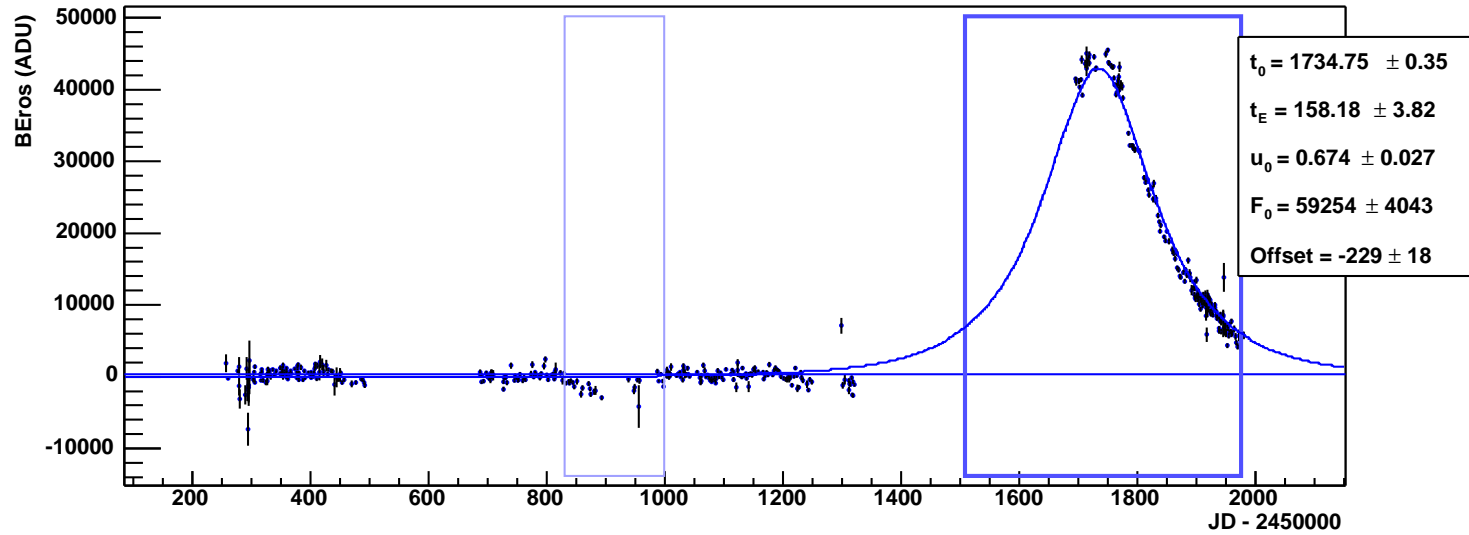
Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm010\_1b-758

Ajustement Microlentille bibande

$\chi^2/n_{\text{dof}} = 9092.50/933$   $\Delta\chi^2 = 118.65$



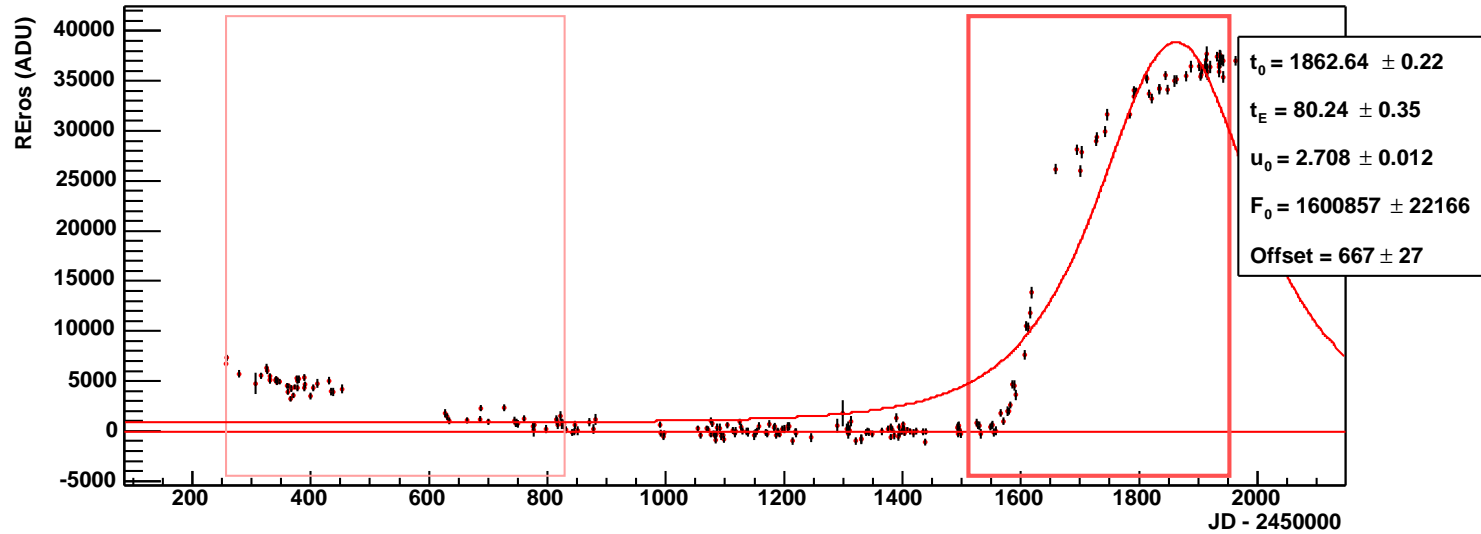
Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm010\_1b-758



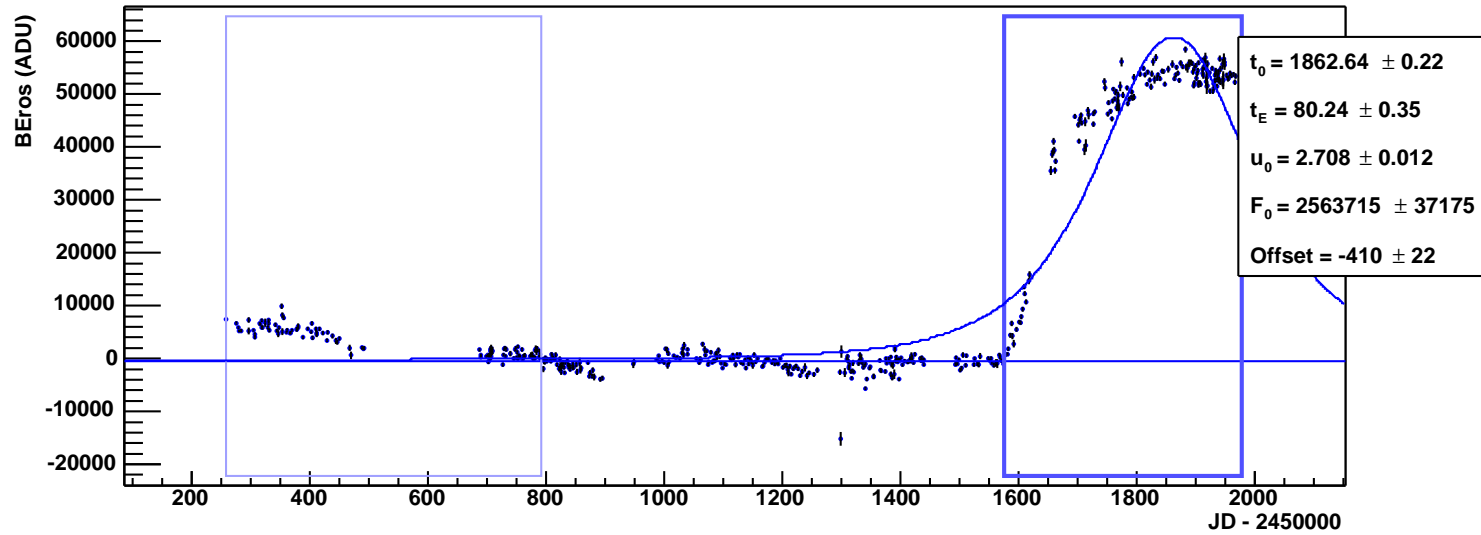
# sm001\_0a-924

Courbe de lumiere DIA en R\_Eros - sm001\_0a-924

Ajustement Microlentille bibande  $\chi^2/n_{\text{dof}} = 79438.64/745$   $\Delta\chi^2 = 19.39$



Courbe de lumiere DIA en B\_Eros - sm001\_0a-924

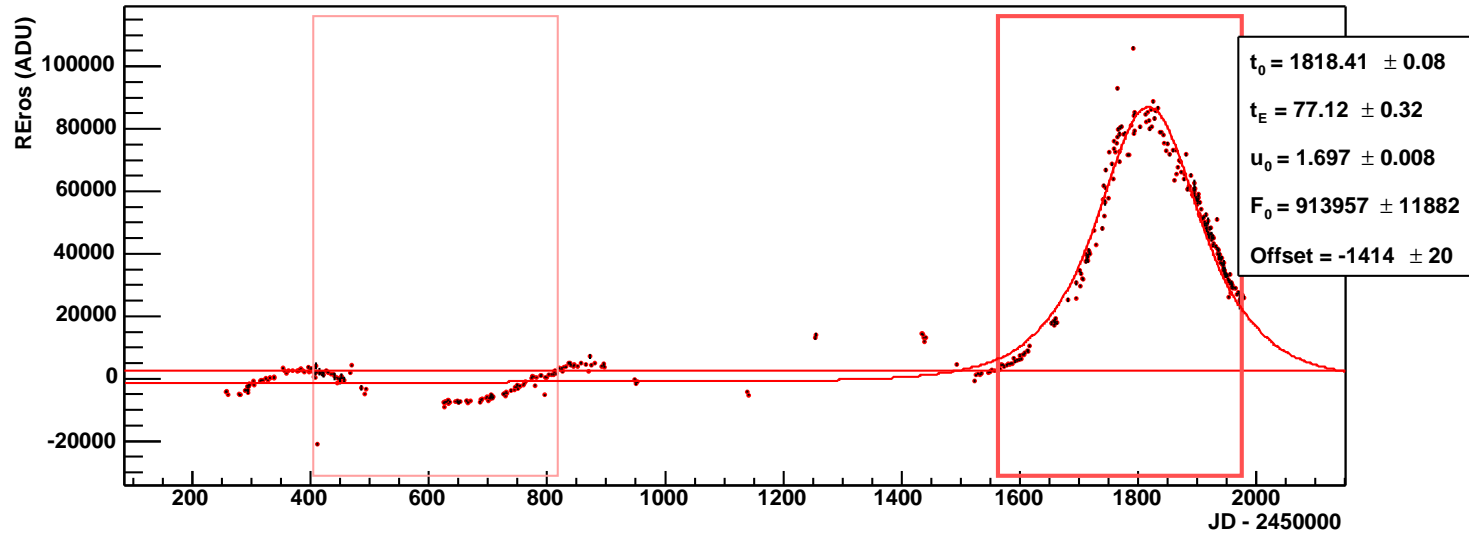


# sm005\_6e-389 (non-résolu)

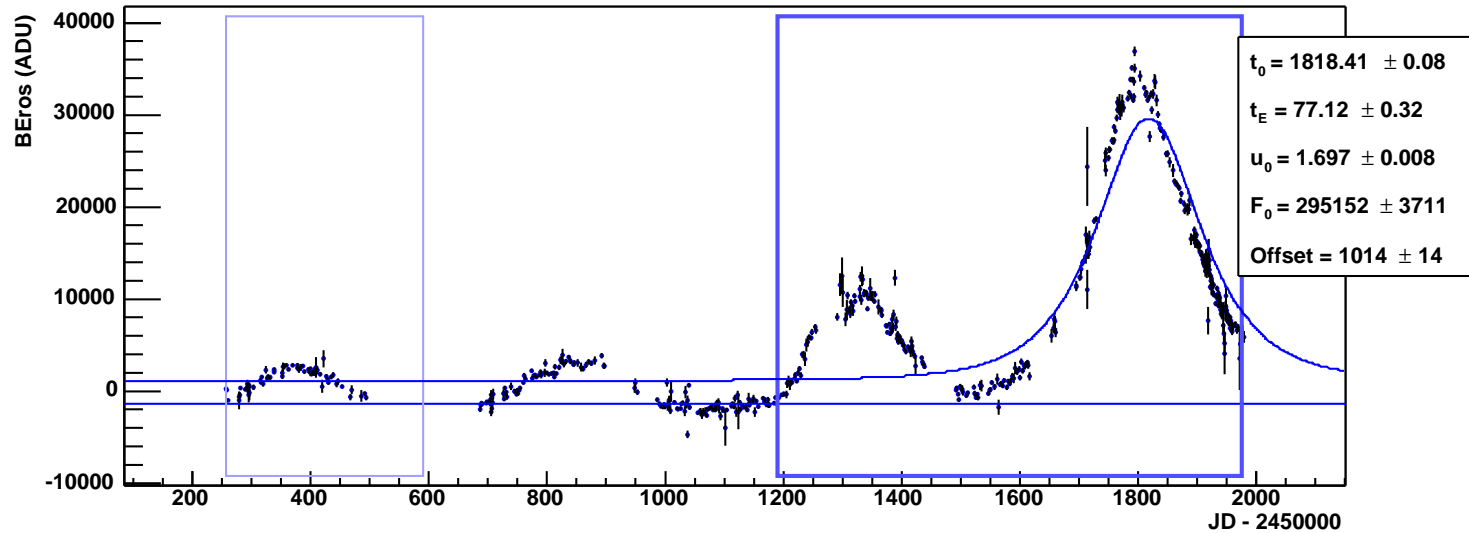
Courbe de lumière DIA en R\_Eros - sm005\_6e-389

Ajustement Microlentille bibande

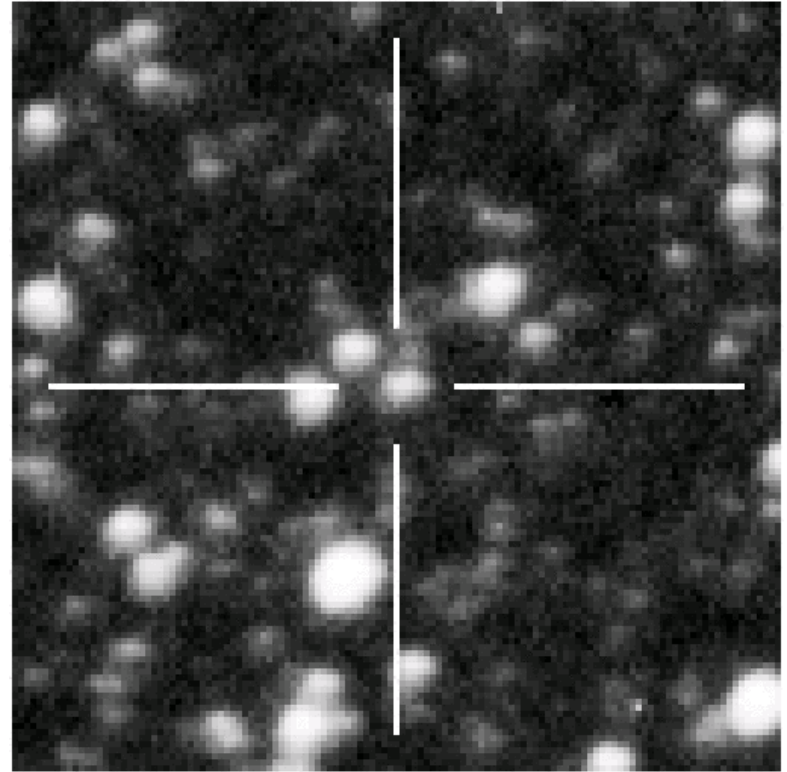
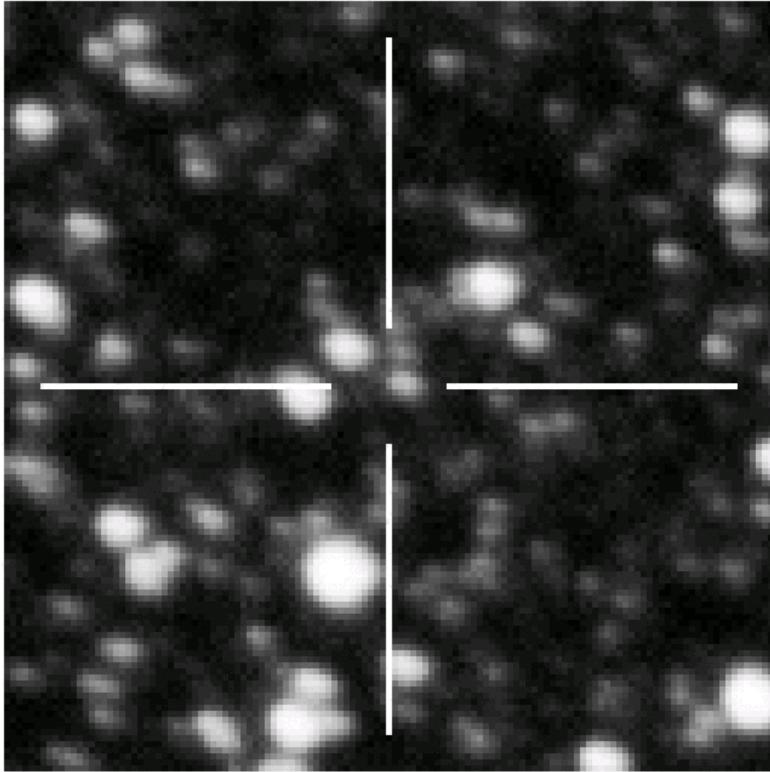
$$\chi^2/n_{\text{dof}} = 155874.11/970 \quad \Delta\chi^2 = 18.53$$



Courbe de lumière DIA en B\_Eros - sm005\_6e-389



# sm005\_6e-389 (non-résolu)





# Augmentation de la sensibilité

- Méthode de détection sensible aux variations d'étoiles non-résolues
- Sensibilité à des microlentilles de forte amplification sur des étoiles très faibles
- Estimation du nombre d'étoiles surveillées effectif :

$$N_*^{\text{effectif}} \sim 7 \times 10^6 \quad \text{contre} \quad 5.7 \times 10^6 \text{ étoiles résolues}$$

- Simulation complète nécessaire
  - ◆ génération d'images synthétiques réalistes
  - ◆ ajout d'effets de microlentilles simulés
  - ◆ réduction par soustraction d'images
  - ◆ en cours...

# Plan de l'exposé

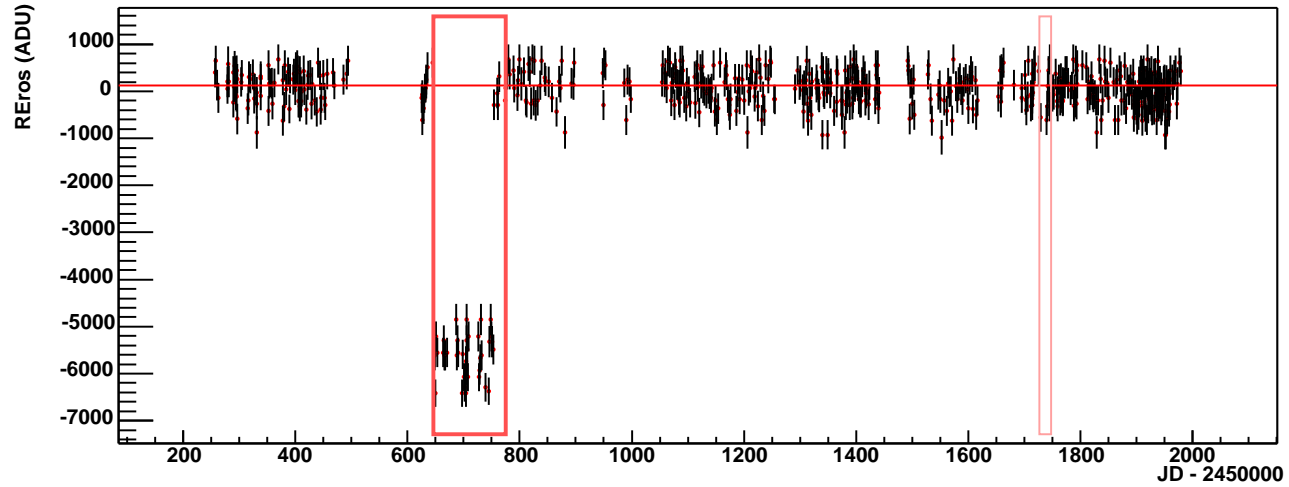
- La matière noire galactique
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- La soustraction d'images
- Réduction des images du SMC
- Recherche de microlentilles
- **Recherche de nuages de gaz opaques**
- Conclusion

# Eclipses par des Nuages de gaz

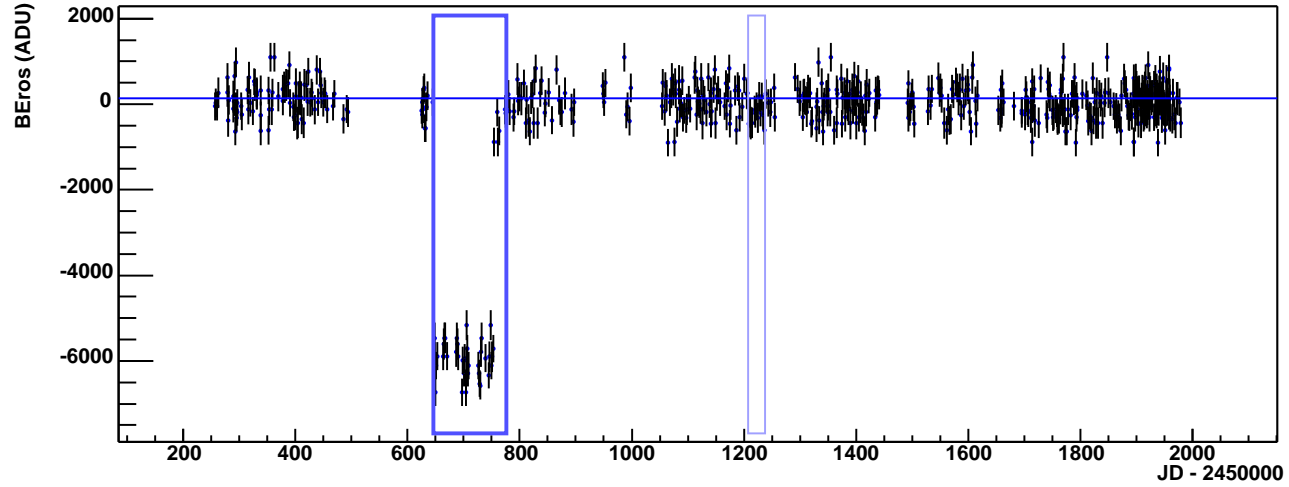
- Recherche de microlentilles sensible aux objets *compacts*
- Candidat matière noire galactique : du gaz (H<sub>2</sub> par ex.)
- Du gaz sous forme de nuages opaques (poussière) occulte les étoiles en arrière-plan
- Recherche de signal en absorption, signature des transits.
- Modèle [Kerins et al., 2002] : nuages typiques de 7 UA, transit de 60 jours pour des nuages du halo.
- Analyse des courbes de lumière SMC

# Signal Recherche

DIA LightCurve in R\_Eros band - mc201\_31-10



DIA LightCurve in B\_Eros band - mc201\_31-10

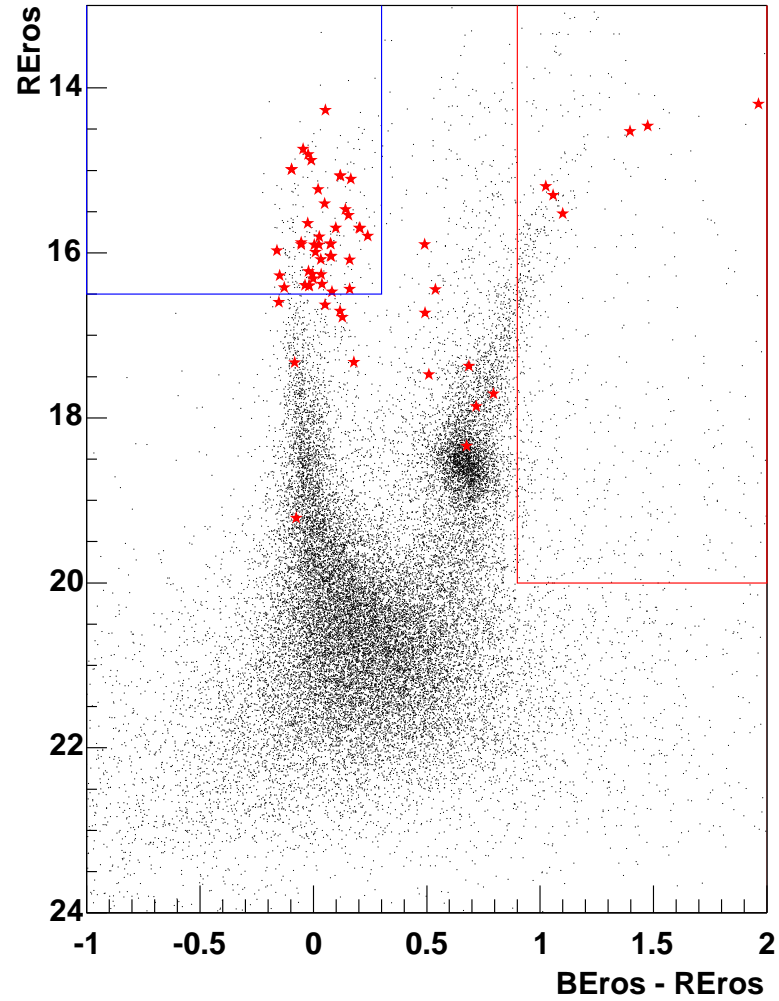


# Critères de sélection

Coupure	étoiles restantes	fraction données		fraction simulation	
—	575623	100.00	%	100.00	%
1 (1 fluctuation)	553702	96.19	%	86.06	%
2 (recouvrement R/B)	70730	12.28	%	40.76	%
3 (fluctuation < 0)	27723	4.81	%	38.98	%
4a (10 pts in.)	25681	4.46	%	38.49	%
4b (20 pts out.)	25511	4.43	%	38.49	%
5 (signif. relative)	1551	0.26	%	34.91	%
6 ( <b>profondeur/RMS</b> )	127	0.02	%	25.01	%

- 127 candidats dont 70 résolus
- 15 après coupures sur le diagramme couleur-magnitude
- Simulation effectuée avec des images synthétiques (sensibilité)

# Critères pour les étoiles résolues



# Sensibilité – Résultat

- Sensibilité de 25% pour la détection d'éclipses totales de 30 à 900 jours, sur des étoiles de magnitude  $R_{\text{EROS}} \lesssim 21$ .
- Nombre d'étoiles suivies

$$N_*(R_{\text{EROS}} \lesssim 21) \sim 3.8 \times 10^6$$

- Taux d'occultation prévu par [Kerins et al., 2002],

$$\Gamma_{\text{SMC}}(50 \text{ jours} < \Delta t < 500 \text{ jours}) \sim 2 \times 10^{-3} / \text{an}$$

- Nombre d'événements attendus :

$$N_{\text{éclipses}} = N_* \times T_{\text{obs}} \times \Gamma \times \epsilon \sim 10^4$$

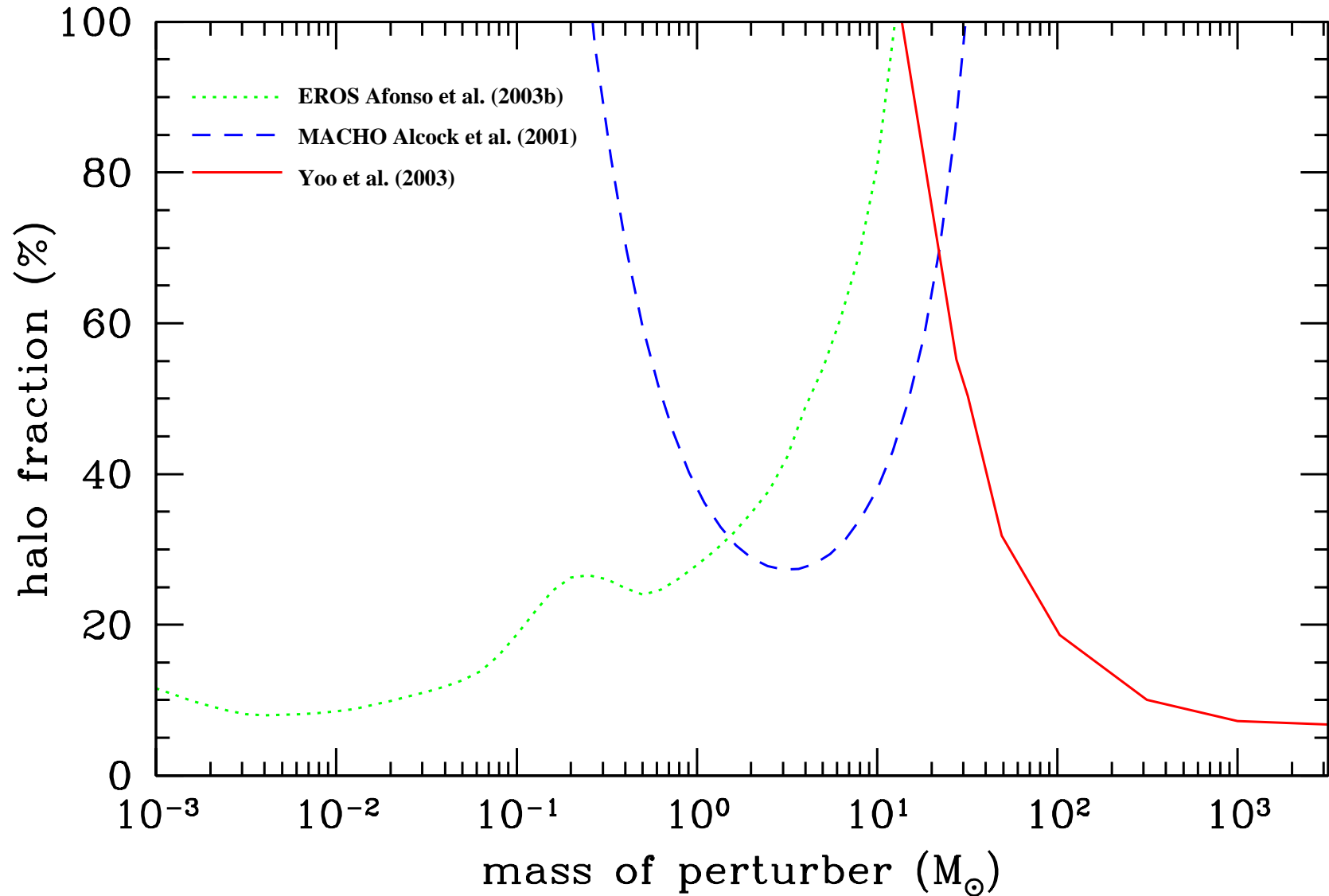
L'hypothèse d'un halo constitué de nuages de gaz opaques est exclue (en accord avec [Drake and Cook, 2003]). On peut cependant envisager des nuages transparents.

# Plan de l'exposé

- La matière noire galactique
- L'effet de microlentille gravitationnelle
- La soustraction d'images
- Réduction des images du SMC
- Recherche de microlentilles
- Recherche de nuages de gaz opaques
- **Conclusion**



# Conclusion : fin des MACHOs ?



# References

- [Alard and Lupton, 1998] Alard, C. and Lupton, R. H. (1998).  
A Method for Optimal Image Subtraction. *ApJ*, 503:325–+.
- [Drake and Cook, 2003] Drake, A. J. and Cook, K. H. (2003).  
A Search for Stellar Obscuration Events Due to Dark Clouds.  
*ApJ*, 589:281–288.
- [Kerins et al., 2002] Kerins, E., Binney, J., and Silk, J. (2002).  
Observable consequences of cold clouds as dark matter.  
*MNRAS*, 332:L29–L33.