



**Etalonnage temporel du télescope à neutrinos ANTARES
et Applications à la détection indirecte de matière noire**

Guillaume Lambard

*Centre de Physique des Particules de Marseille
163, Av. de Luminy-Case 902 13288 Marseille Cedex 09*

Directeur de thèse : Paschal Coyle



PLAN

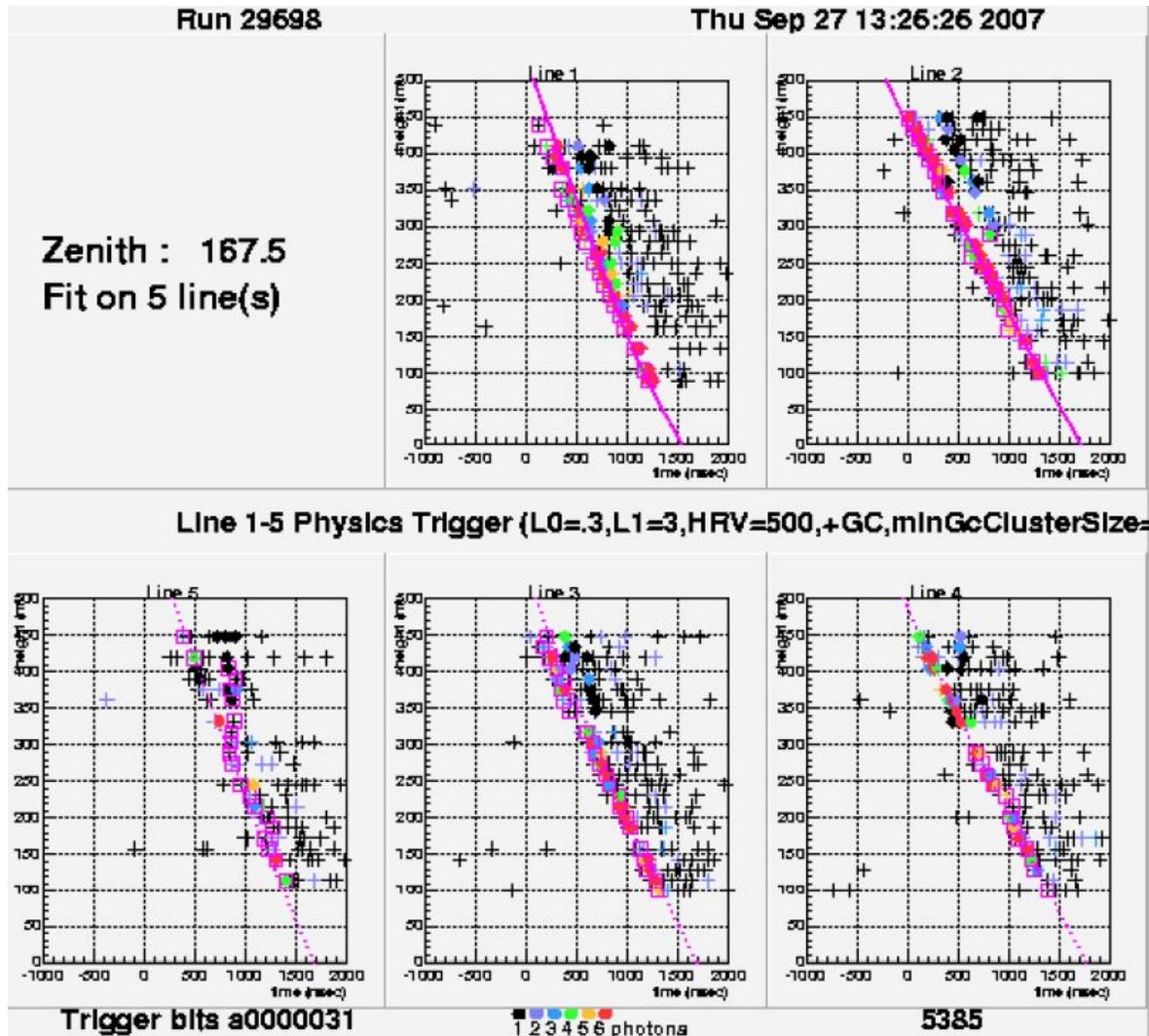


- **Etalonnage en temps du télescope sous-marin à neutrinos ANTARES et son utilité en terme de reconstruction des traces**
- **Applications à la recherche indirecte de matière noire dans le système solaire et au-delà...**
- **Perspectives et conclusion préliminaire**



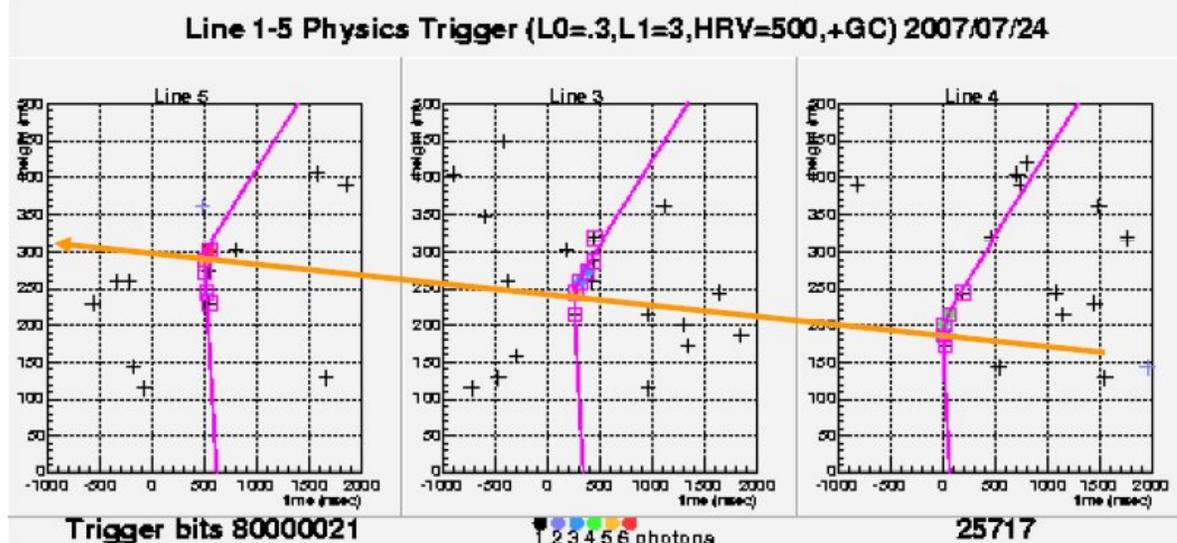
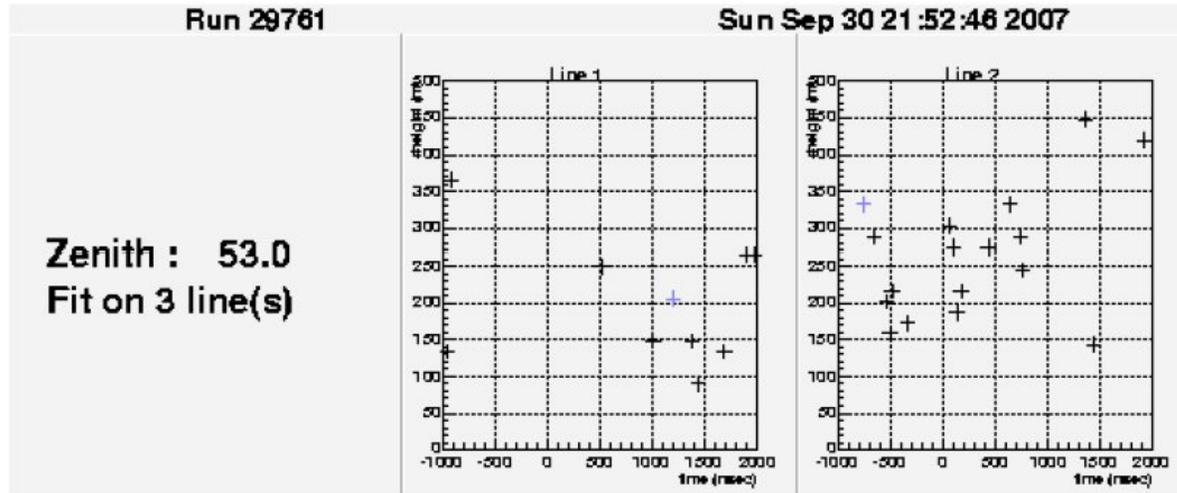
Exemple d'un muon descendant

Évènement descendant de très haute intensité



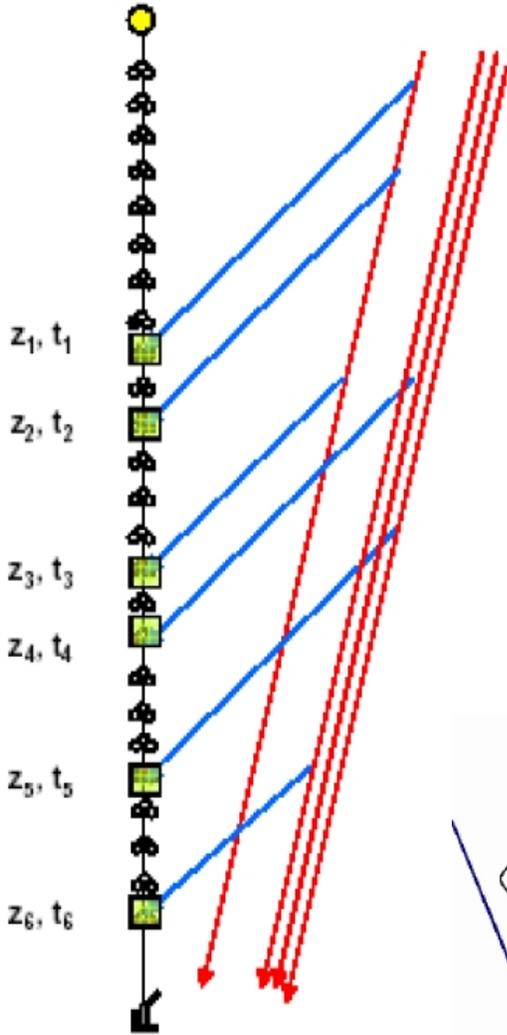


Exemple d'un muon montant



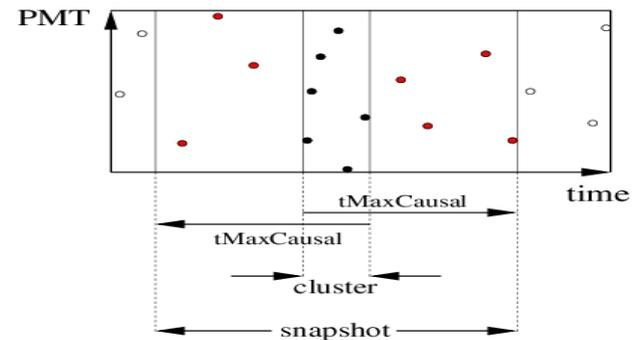
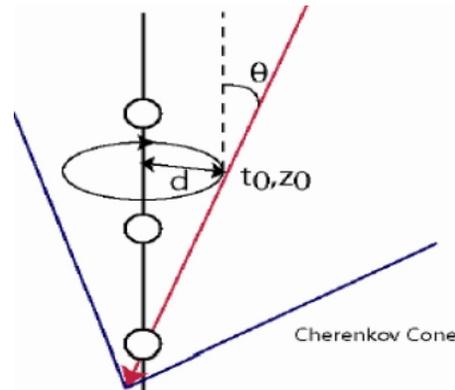
Évènement
montant
reconstruit
sur 3 lignes

Vue satellitaire du système de trigger



Avant de reconstruire une trace, il y a deux niveaux principaux de trigger lors de la prise de données pour détecter les évènements potentiels:

- Niveau 0 (L0) : tous les év.^{ts}
- Niveau 1 (L1) : recherche de coïncidence locale
 - photons dans une fenêtre en temps (~ 20 ns) sur 2 PMTs du même étage
 - et/ou charge $>$ seuil ($\sim 2.5/10$ p.e.)
- en ajoutant les évènements dans une fenêtre de causalité ($t_{\text{maxcausal}} \sim 2.2 \mu\text{s}$) autour des L1.





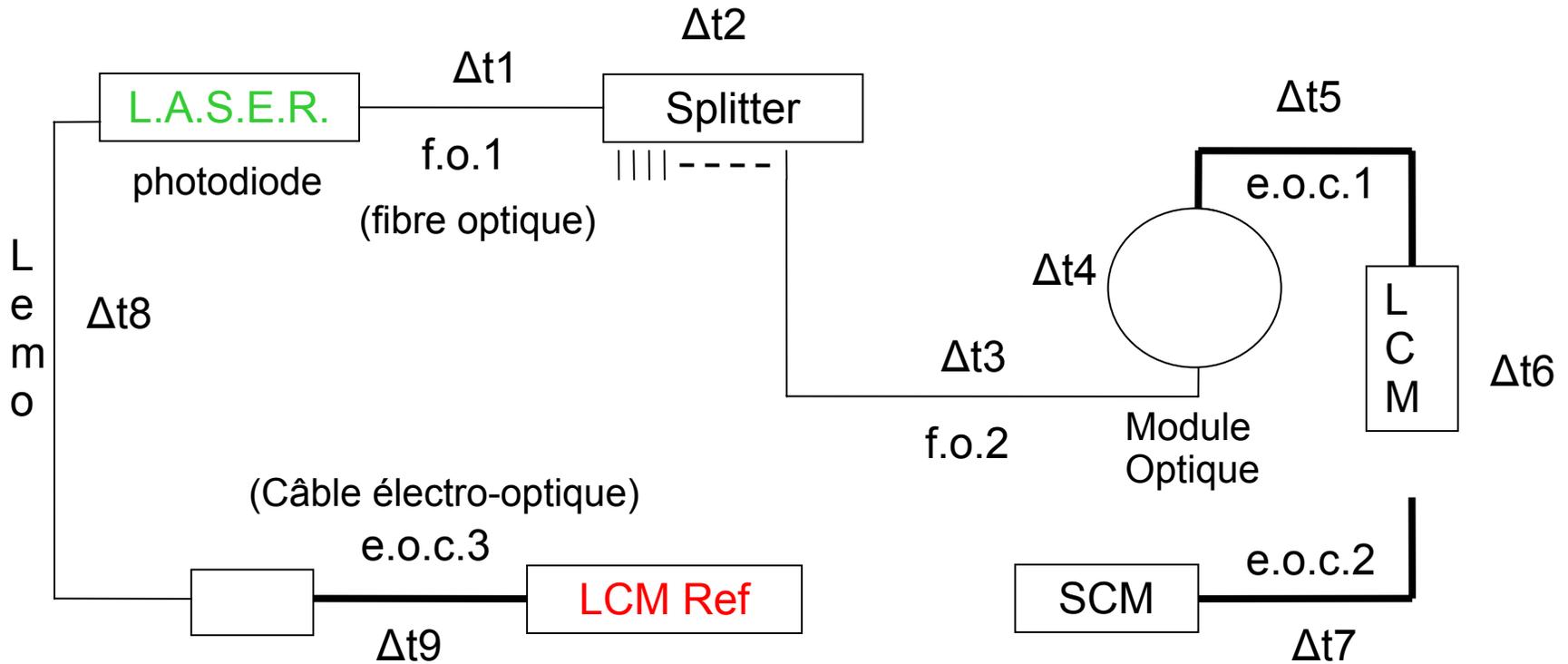
Nécessité de l'étalonnage en temps

La reconstruction des traces de muons demande une grande précision temporelle lors de la détection des photons Čerenkov ($\sim 1\text{ns}$) basée sur des coïncidences locales.

- › Nécessité d'un étalonnage en temps de chaque ligne avant immersion afin d'évaluer chaque offset:
 - . Phase d'horloge (temps entre l'envoi du signal par le SCM (base de la ligne) et l'acquisition électronique par le LCM (étage))
 - . Temps de transit des PMs (passage des photo-électrons de la photo-cathode à l'anode)
 - . Délais induits par le système de calibration (fibres optiques, cartes électroniques), etc...

et le bon fonctionnement de chaque module (LEDs internes, hydrophones, LEDs beacons, etc...).

Vue schématique du système de calibration



(Local control module)

Constitue le système de référence

Δt : différents décalages temporels à estimer de manière globale



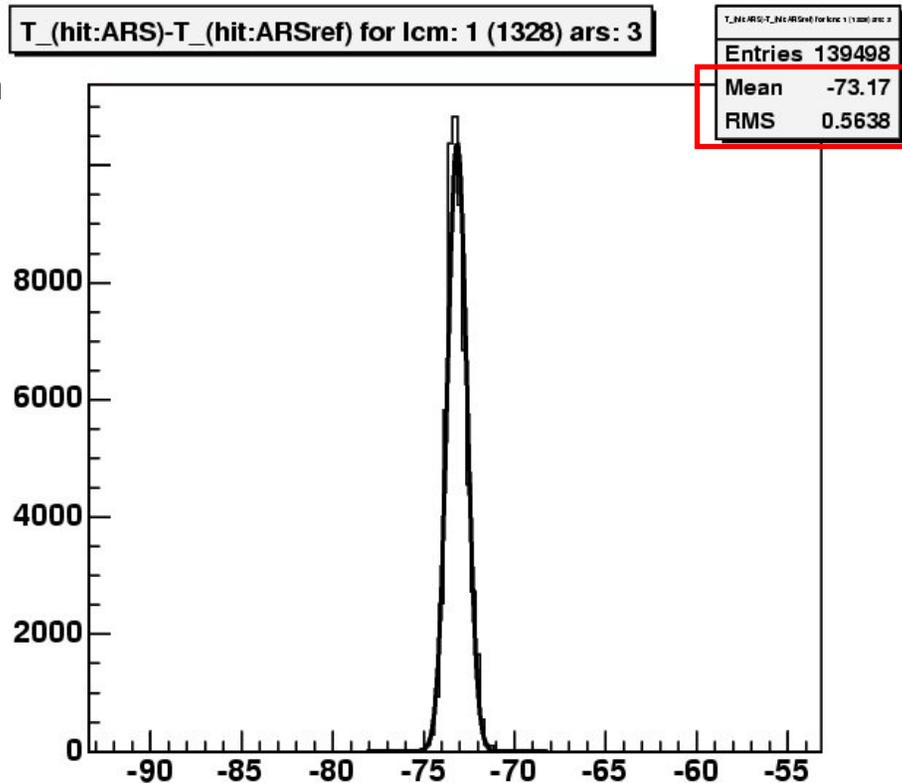
Obtention des délais en temps (exemple de la ligne 8)

Obtention des distributions du délai en temps pour chaque ARSs considérés avec:

$$\Delta t_{\text{hit (ARS}_i)} = [(t_{\text{hit(ARS}_i)} + \text{Clockphase}_{\text{LCM}_i}) - t_{\text{hit(ARS}_{\text{ref}})}]$$

ARS: (Analog Ring Sampler)

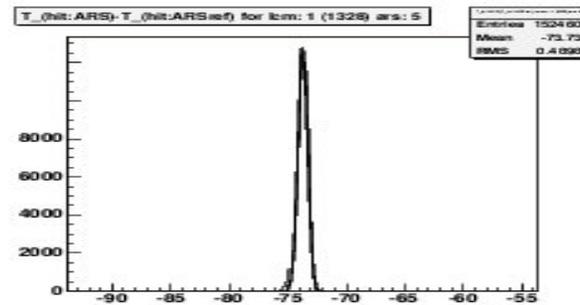
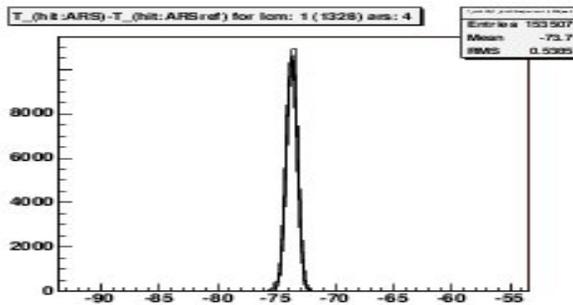
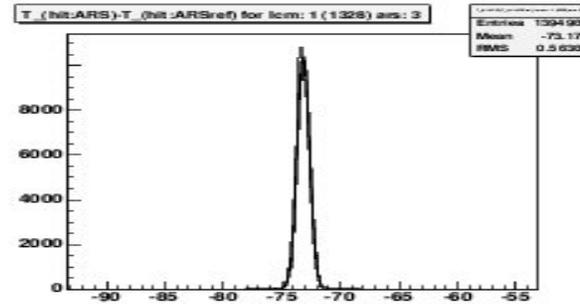
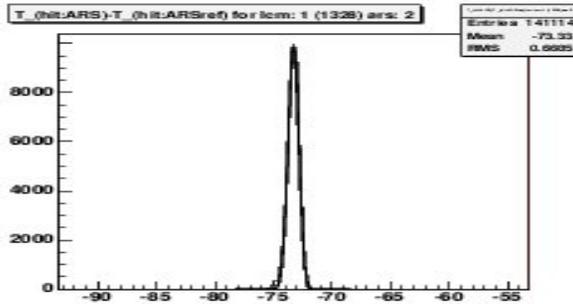
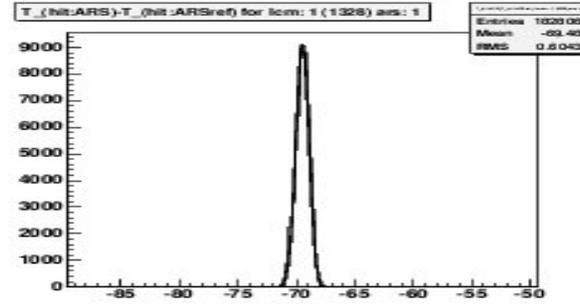
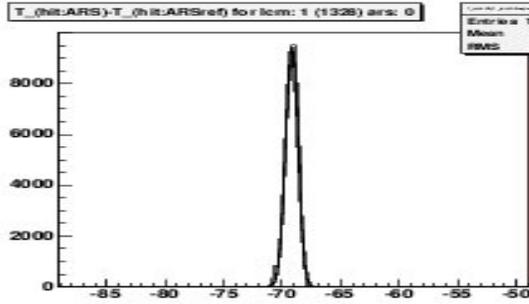
Carte d'aquisition des données en temps et en charge





Obtention des délais en temps (exemple de la ligne 8)

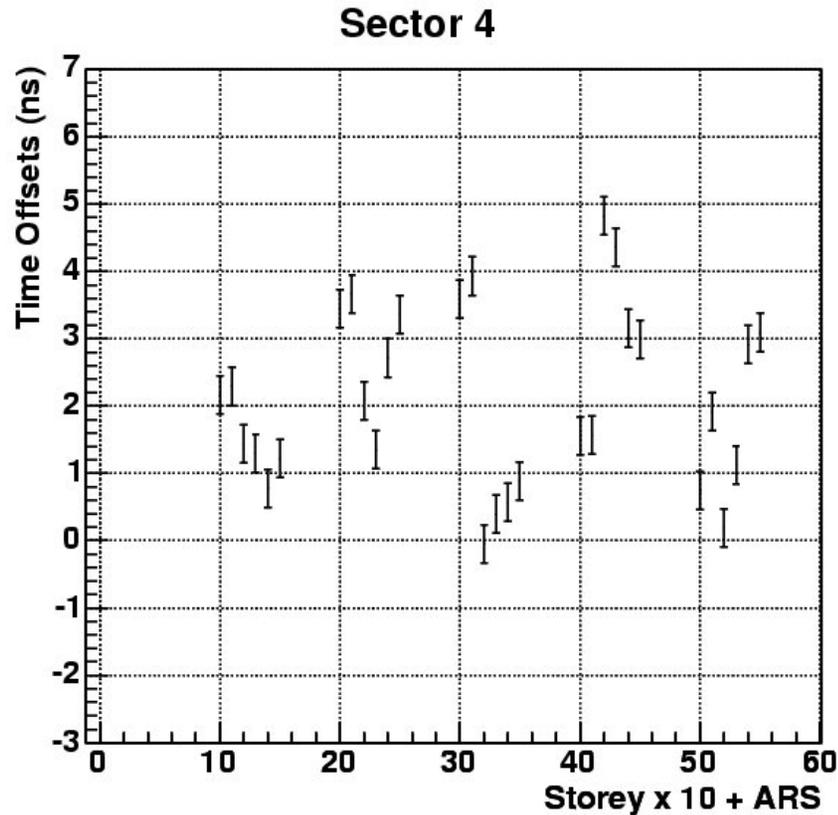
Exemple
du LCM 1
Ligne 8





Obtention des délais en temps (exemple de la ligne 8)

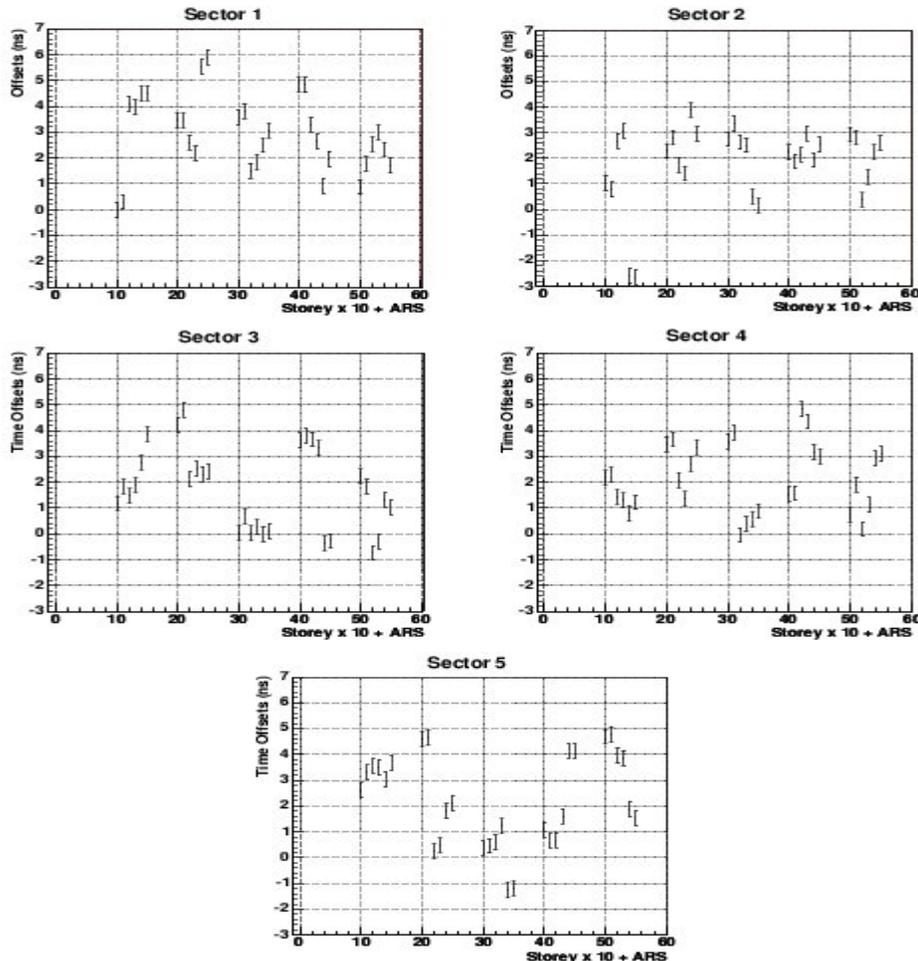
Exemple du secteur 4 avec le LCM 1 comme référence temporel pour toute la ligne.





Obtention des délais en temps

(exemple de la ligne 8)



La **stabilité** du système de calibration temporel n'est plus à démontrer avec:

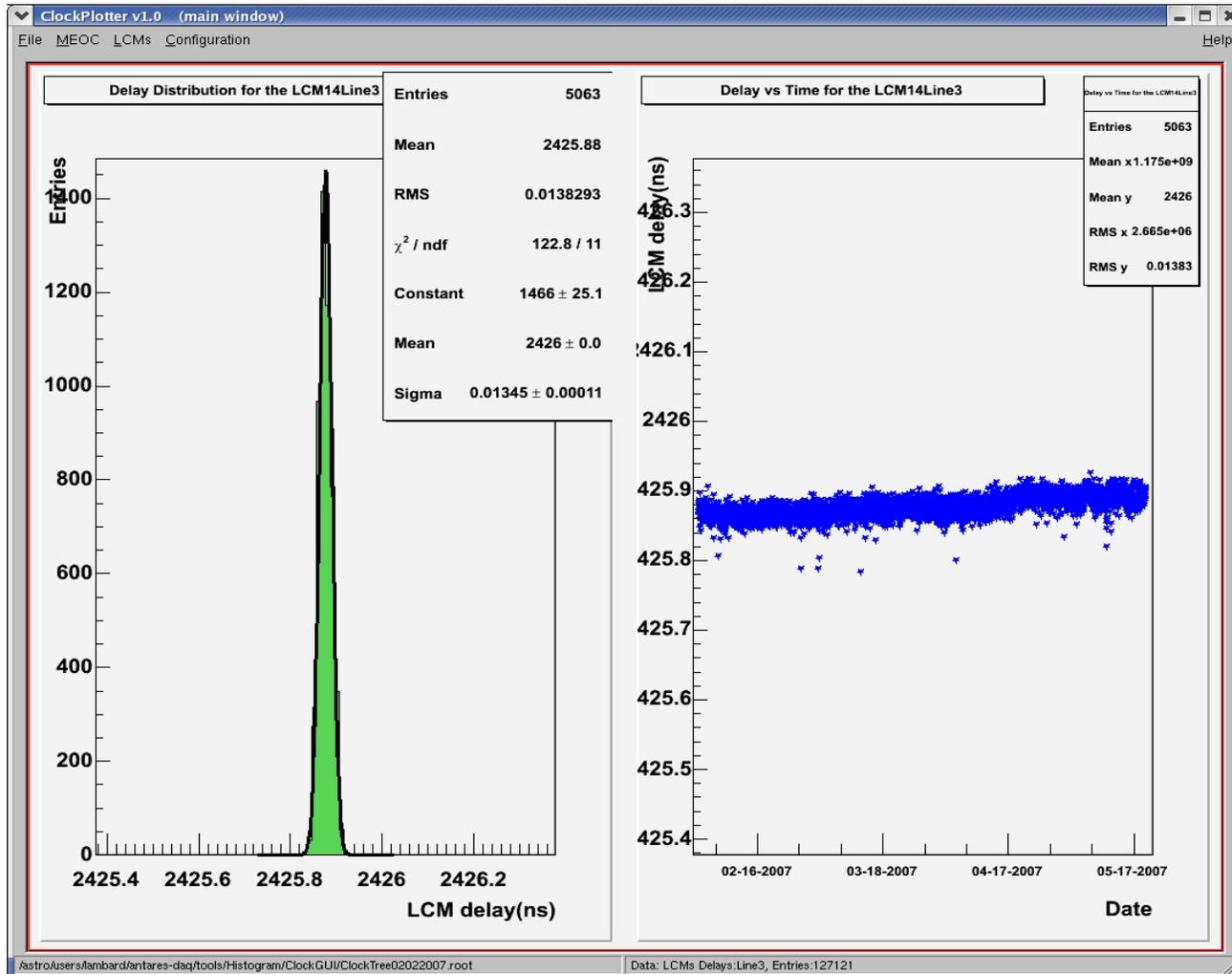
$$\sigma \sim 0.6\text{ns}$$

Après cette procédure d'étalonnage draconienne dont les tests ne sont pas tous présentés ici, tous les offsets en temps intervenant dans la détection et l'acquisition des signaux sont stockés en base de données et permettent de connaître avec précision le temps d'arrivée d'un photon Čerenkov en mer.



Obtention des délais d'horloge en temps réel

Développement d'une GUI (Graphical User Interface) pour faciliter l'obtention des données reliées à l'horloge et ce quelque soit le nombre de lignes connectées.

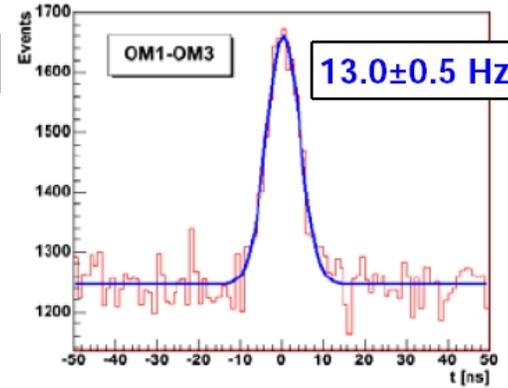
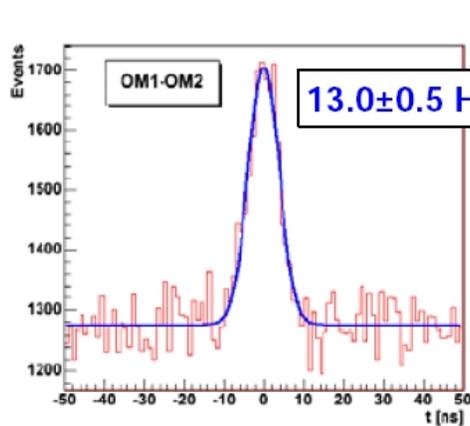




Qualité de l'étalonnage *in situ*

Taux de coïncidences sur la désintégration du ^{40}K ($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \nu_e$):

Photons Čerenkov produits par l'électron relativiste

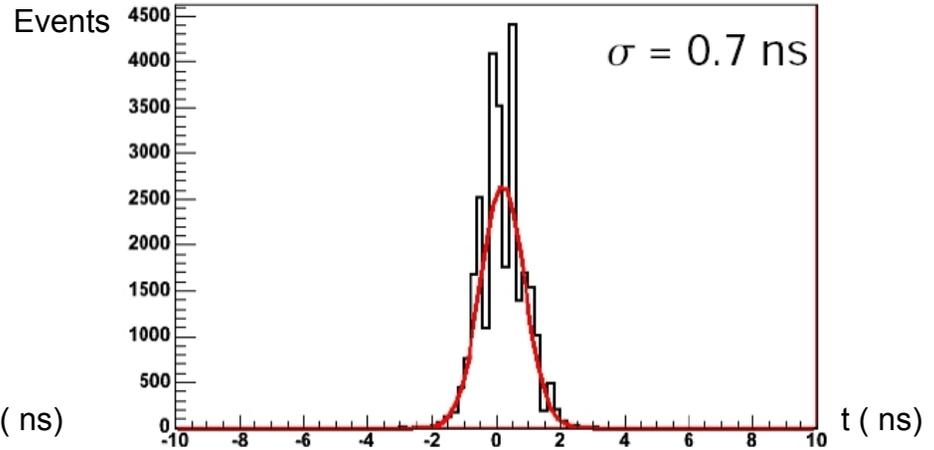
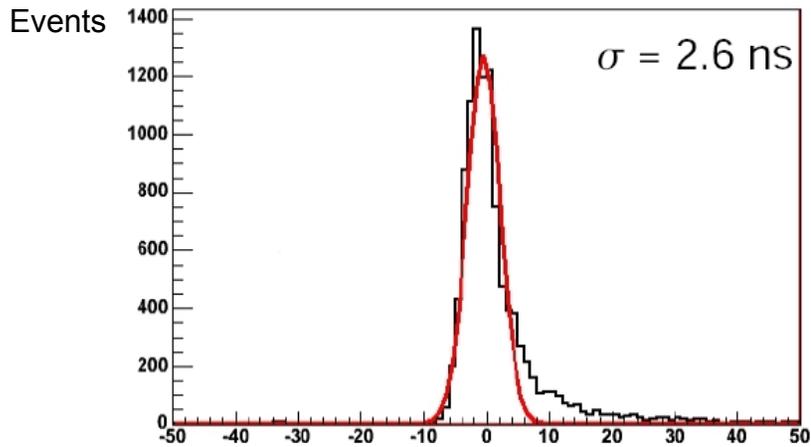


Coïncidences entre modules optiques



$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- \rightarrow 2\gamma$

Calibration en temps des lignes en mer par des système de LEDs répartis sur les lignes (4 par ligne):

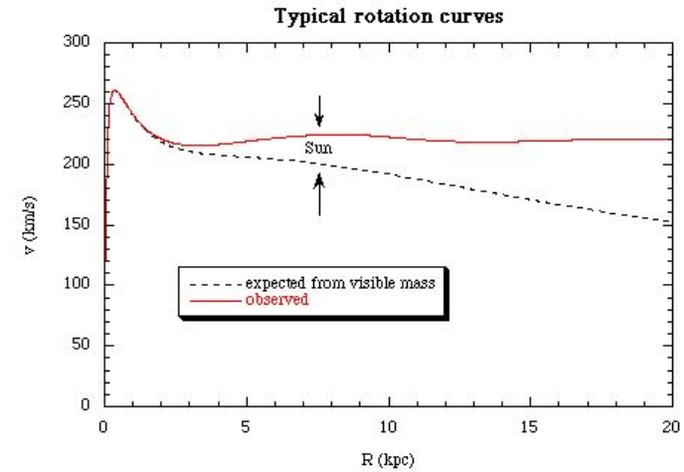


Exemple de calibration en mer pour la ligne 1 par illumination des étages par le système de LEDs. Le centrage en zéro valide les données temporelles

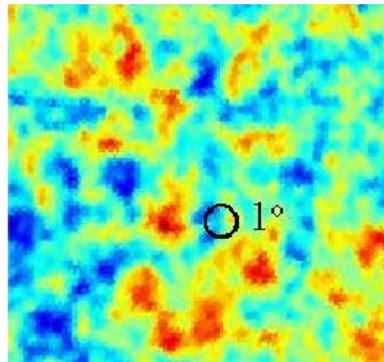
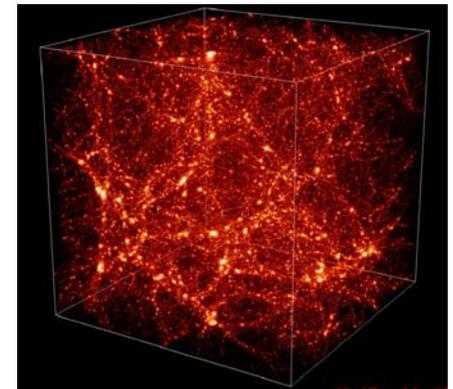
Mise en évidence de la matière noire

Mise en évidence de la matière noire

- Dynamique des galaxies
- arcs gravitationnels
- Formation des structures à grande échelle
- CMB ...



Cold dark matter
 $\Omega_{\text{CDM}} h^2 \sim 0.11$





Modèle étudié



Modèle UED (Universal Extra-Dimensions): Tous les champs du modèle standard se propagent dans les extra-dimensions (espace-temps conventionnel + 1 dimension d'espace avec une échelle de compactification R)

Modèle Kaluza-Klein (KK):

Conservation de la parité du type Kaluza-Klein en théorie effective à 4 dimensions:

état KK \rightarrow Candidat de matière noire

La LKP (Lightest KK Particle), non-baryonique et neutre correspond au premier niveau des modes KK du boson de gauge de l'hypercharge $B^{(1)}$ avec ces paramètres (Servant-Tait) :

$$m_{LKP} \approx \frac{1}{R} > 300 \text{ GeV} \quad 400 \text{ GeV} \leq m_{LKP} \leq 1200 \text{ GeV}$$

. Particules stables de Kaluza-Klein (avec UED: $B^{(1)}$) :

$$B^{(1)} B^{(1)} \rightarrow ff, hh, \nu\nu \\ \searrow \nu, p, \bar{p}, e^+, e^-, \gamma$$



Des LKPs aux muons



- . Capture des particules $B^{(1)}$ au sein de corps massifs par diffusion élastique et surtout par gravitation
- . Accrétion au coeur du corps massif
- . Auto-annihilation $B^{(1)} - B^{(1)}$ en neutrinos primaires et secondaires
- . Oscillations des neutrinos sur le parcours Source-Terre
- . Production de muons au travers de l'interaction neutrino-milieu terrestre
- . Détection avec ANTARES...



Capture et accrétion

Au sein du soleil, les WIMPs perdent leur énergie par interaction élastique avec les noyaux. L'équilibre est atteint lorsque le taux capture = taux d'annihilation

$$\Gamma \propto (1000 \text{ GeV} / m_{B(1)})^{-6} * \tanh^2(m_{B(1)}^{-13/4})$$

Dans l'auto-annihilation, on considère les canaux :

- › Neutrinos primaires $B^{(1)} B^{(1)} \rightarrow \nu\nu$, $dN/dE = 1/M_{B(1)}^2$
- › Neutrinos secondaires (Bertone, Servant, Sigl) $B^{(1)}B^{(1)} \rightarrow q q \rightarrow \pi^{+/-} \rightarrow \nu_{\mu} \mu \rightarrow e\nu_e \nu_{\mu} \nu_{\mu}$,
- › Neutrinos secondaires de la désintégration des quarks lourds (av. Hadronisation) : **b, t**
- › Neutrinos secondaires de la désintégration des **leptons tau**

$$\frac{dN_{\nu}}{dE_{\nu}} = \frac{\Gamma_A}{4\pi d^2} \sum_{F,f} B_{B^{(1)}f}^{(F)} \frac{dN_{f\nu}}{dE_{\nu}} \quad (\text{GeV}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1})$$

Application de l'oscillation $\nu_e/\nu_{\mu}/\nu_{\tau}$ sur la distance Soleil-Terre.

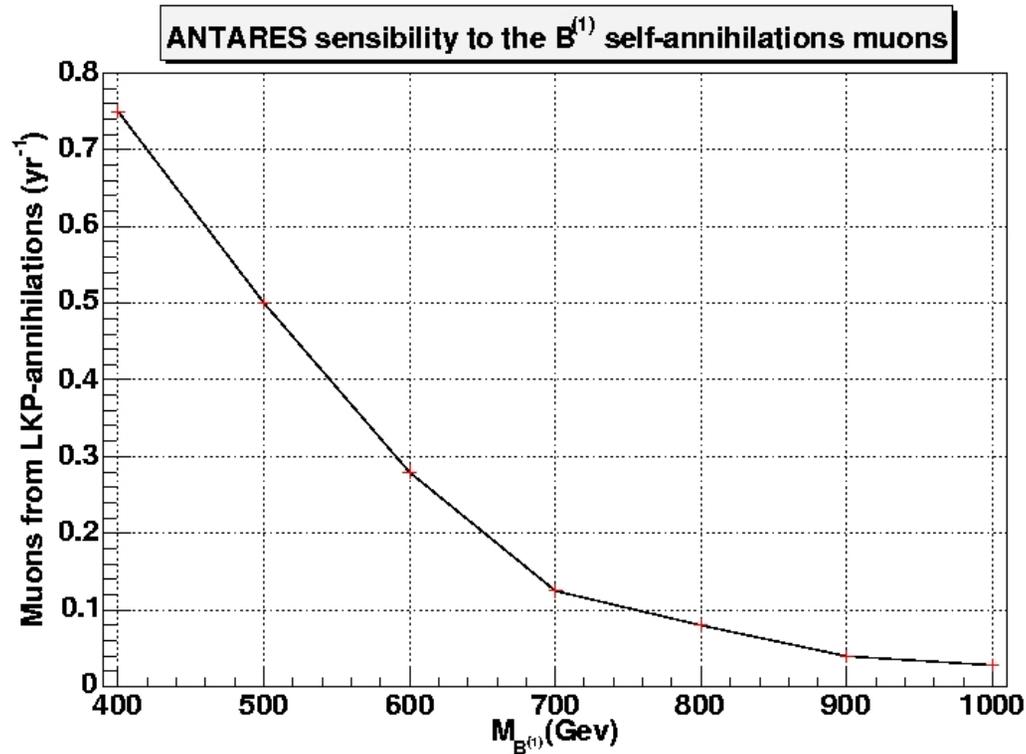


Flux de muons attendu

- Flux de muons,

$$\text{rate} = \int_{E_{\mu}^{\text{thr}}} dE_{\nu} \int_0^{1 - \frac{E_{\mu}^{\text{thr}}}{E_{\nu}}} dy A(E_{\mu}) P_{\mu}(E_{\nu}, y; E_{\mu}^{\text{thr}}) \frac{d\Phi_{\nu}}{dE_{\nu}},$$

- pour les neutrinos et antineutrinos séparément.





Stratégie de reconstruction utilisée



- étape 1 : pré-ajustement linéaire par minimisation de χ^2 sur les coïncidences locales et la charge des évènements
- étape 2 : minimisation d'un M-estimateur

$$G = \sum_i K(-2\sqrt{1 + A_i r_i^2/2}) - (1 - K)f_{\text{ang}}(a_i)$$

A_i = charge, r_i = résidus en temps, f_{ang} = facteur angulaire, $K=0.05$ (MC simulation)

- étape 3 : maximisation de la vraisemblance

$$P(\text{event} | \text{track}) = \text{prod}_i P(t_i | t_i^{\text{th}})$$

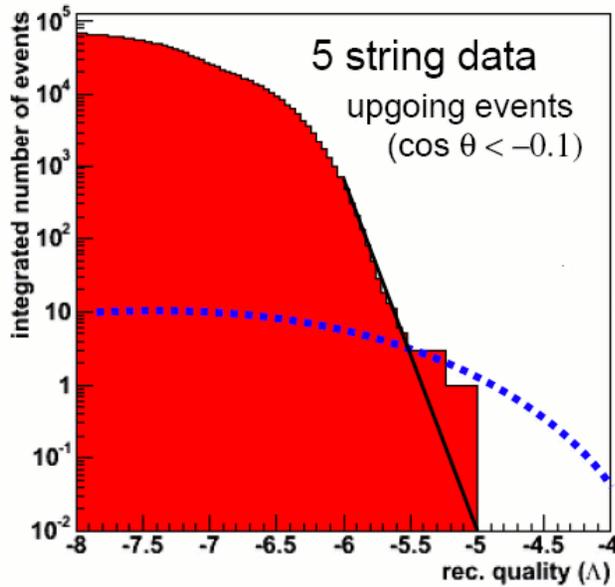
Les étapes 2 et 3 sont répétées plusieurs fois avec translations et rotations du pré-ajustement afin d'obtenir la meilleure vraisemblance possible

Une coupure sur la vraisemblance de l'ensemble des évènements est menée afin d'extraire les neutrinos potentiellement montants

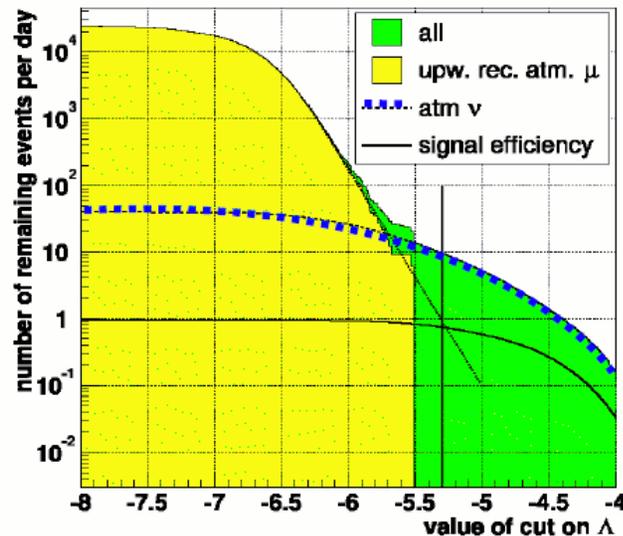


Paramètre de coupure et contrainte angulaire

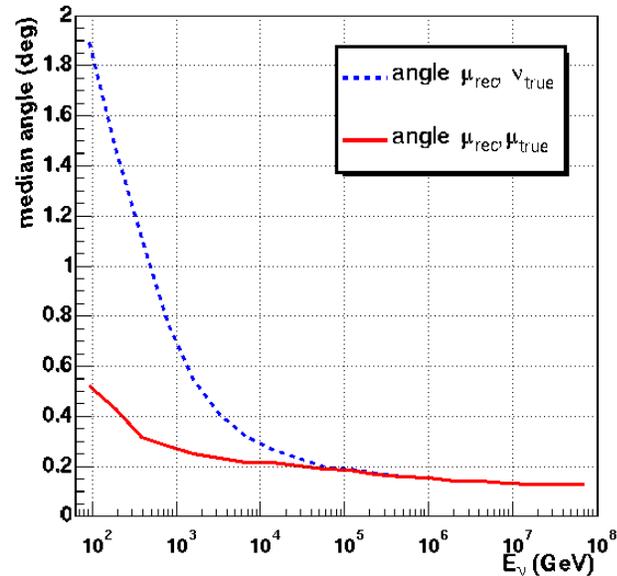
Concordance des données réelles/MC



Coupure à -5.3 (encore à l'étude)



Angular resolution



$E < \sim 10\text{TeV}$: cinématique
 $E > \sim 10\text{TeV}$: détecteur

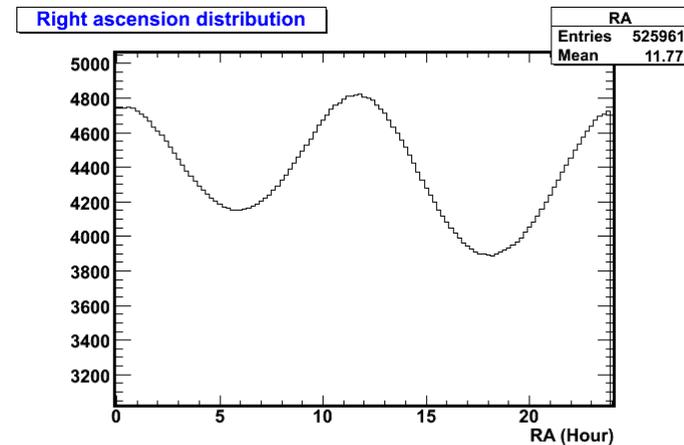
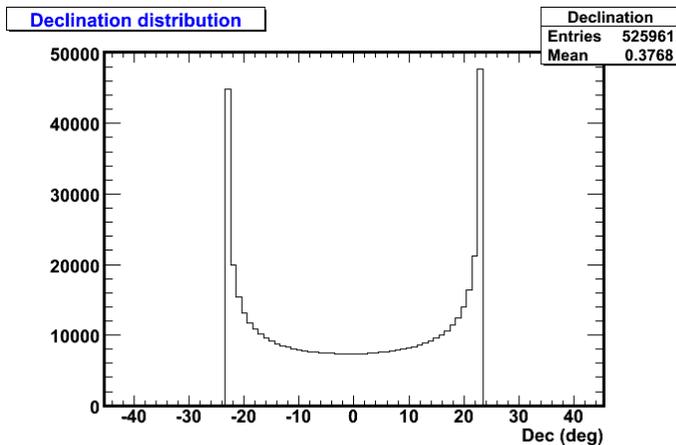
Résolution angulaire domine à basse énergie ($\sim 2^\circ$)

Cas du Soleil



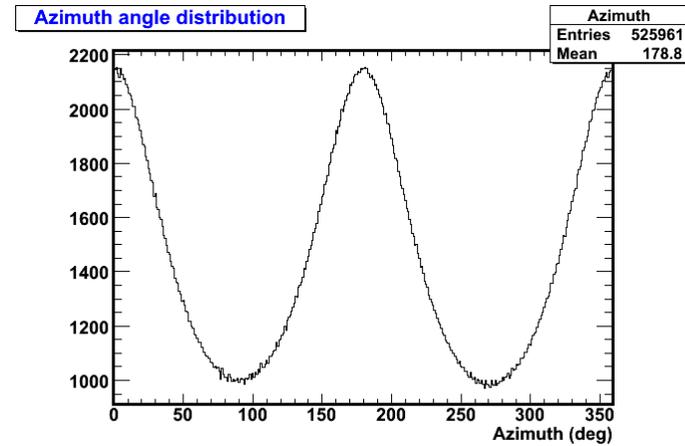
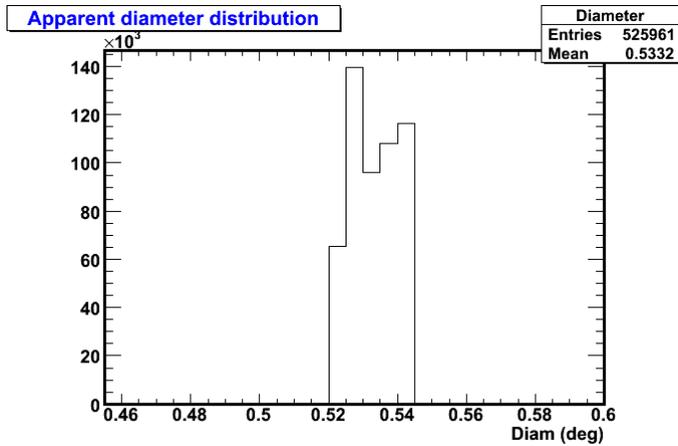
- étude systématique des données par coupure angulaire, méthode du ON/OFF zone (contraint par résolution angulaire principalement). Extraction des données montantes dans un cône d'ouverture 2°
- coupure sur la vraisemblance

- calcul de la position du soleil dans le repère topocentrique (angle zénithal et azimutal) et géocentrique (déclinaison, ascension droite) (et éventuellement diamètre apparent) -> Utilisation librairie standard SLALIB (fortran)
- développement sous environnement ARK (ANTARES ROOT KIT) facilitant l'analyse(C++,ROOT)



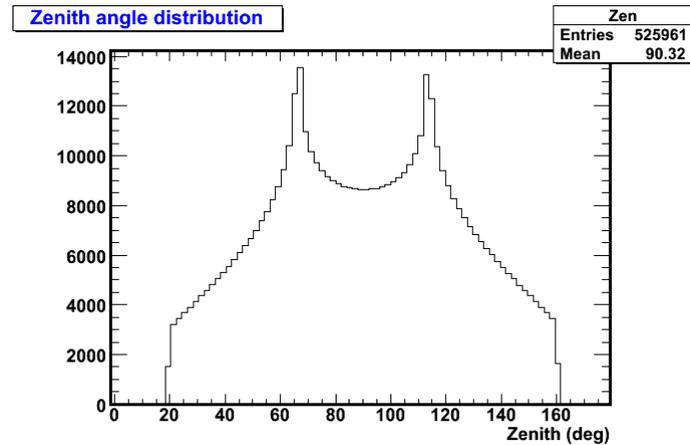


Cas du Soleil



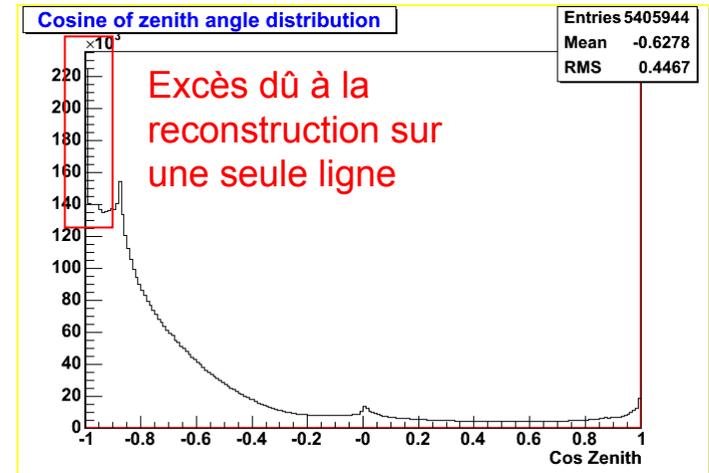
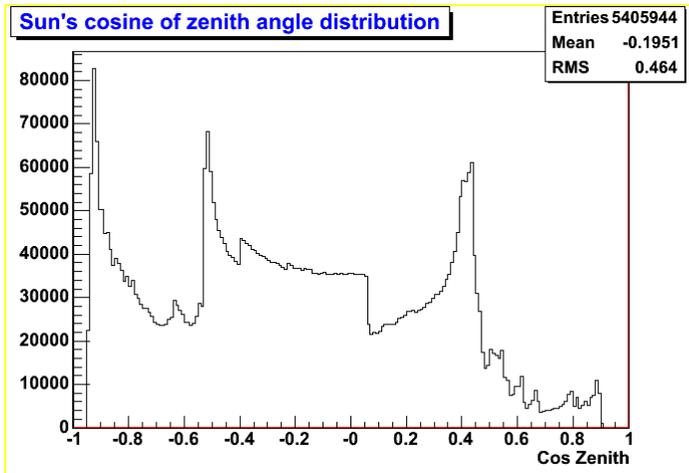
**Diamètre apparent
~0.53° -> la résolution
angulaire domine**

**Connaissance de la
position pour l'année
2007**

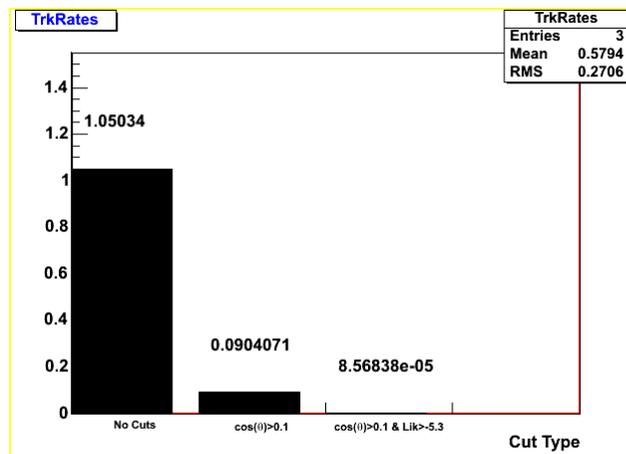




Comparaison aux données: Cas des données brutes sans coupures (reconstruction sur une seule ligne permise)



Position du soleil à chaque moment où un muon desc./mont. est reconstruit

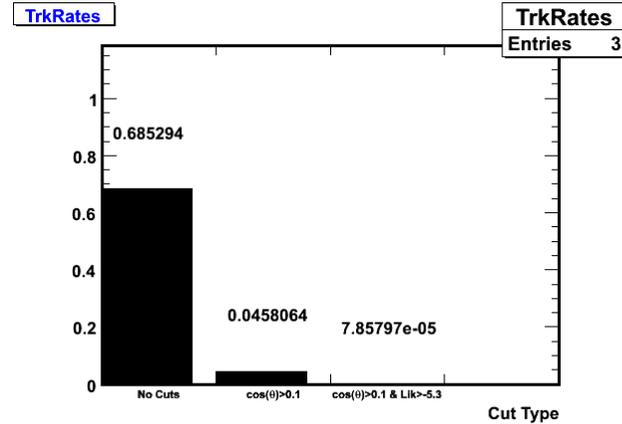
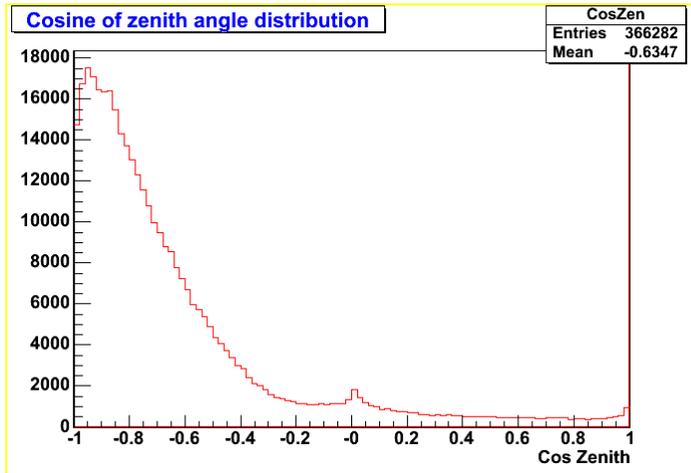


Taux de muons reconstruits

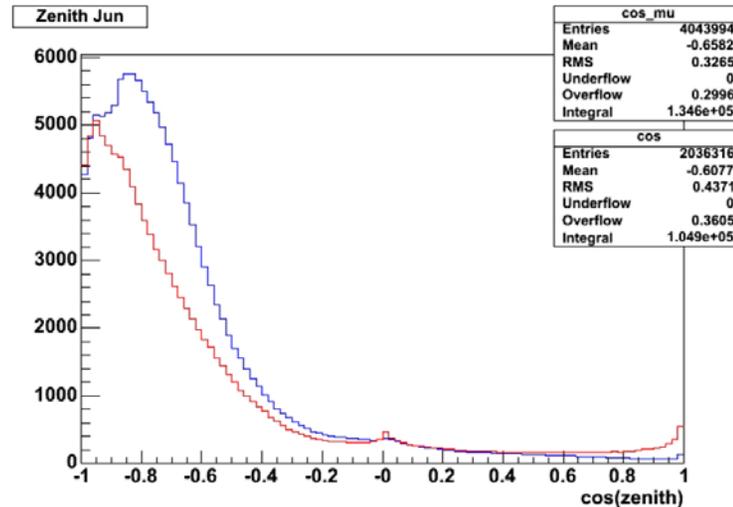


Comparaison aux données: Cas des données « Gold »

(reconstruction Lignes >1 et la burstfraction < 20%)



DATA/MC ~77%



Comparaison aux données:

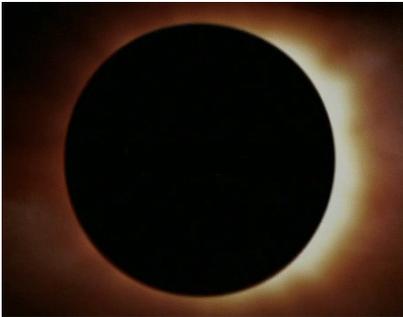
Cas des données « Gold »

(reconstruction Lignes >1 et la burstfraction < 20%)

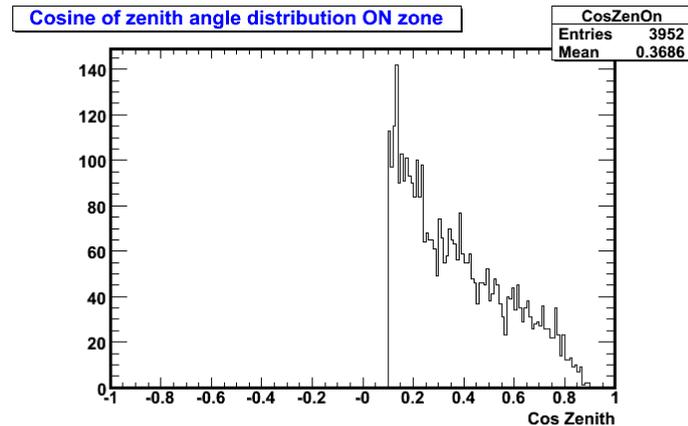
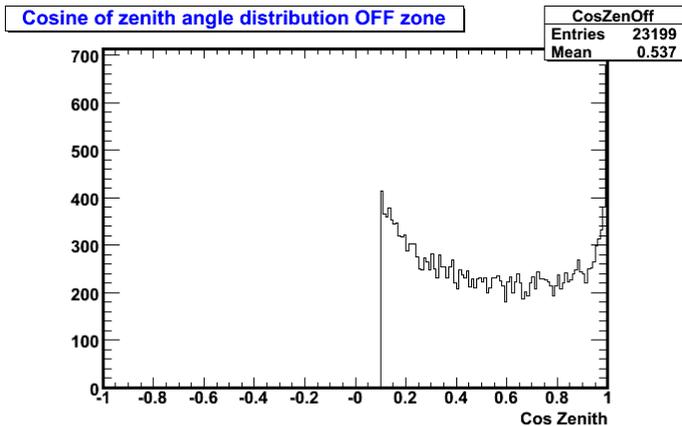
Stratégie ON/OFF zone

ON : év. Contenus dans un cône d'ouverture 2° autour de la position du soleil

OFF: sinon (+/-2° autour du soleil non inclus)



préliminaires



OFF

$\cos\theta > 0.1$

ON

(augmente pureté des év. montants)

Comparaison données/MC:

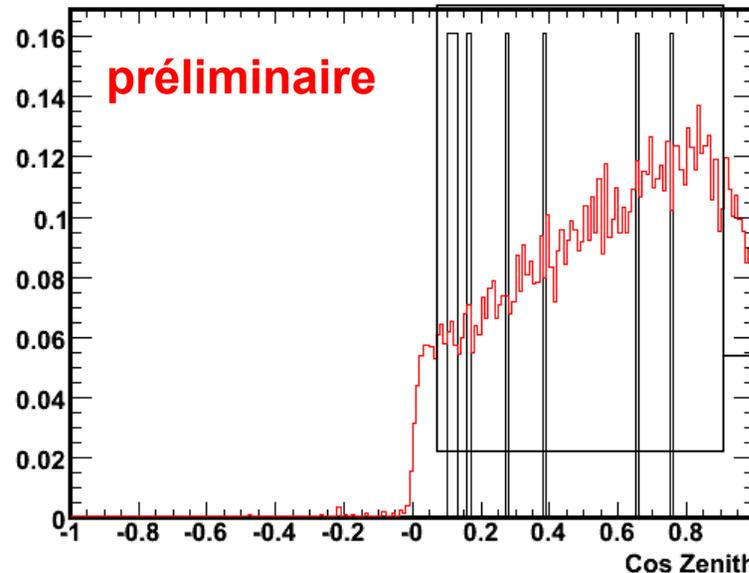
Cas des données « Gold »

(reconstruction $L > 1$ et la burstfraction $< 20\%$)

Stratégie ON/OFF zone

Sun ON zone VS Monte Carlo expected neutrinos (Lik > -5.3)

GdCosZenOn



Données et MC
normalisées à un
jour de prise
données

Ev. 75% fond atm.

Pureté de év. Reste à
vérifier (test de
significance?)

Data: coupure $\cos\theta > 0.1$, Lik > -5.3 et reconstruction Lignes > 1

MC : neutrinos atmosphériques (répartition isotropique), flux de référence Bartol

Neutrinos prévus : ~ 10 év.

Neutrinos trouvés : 8 év.



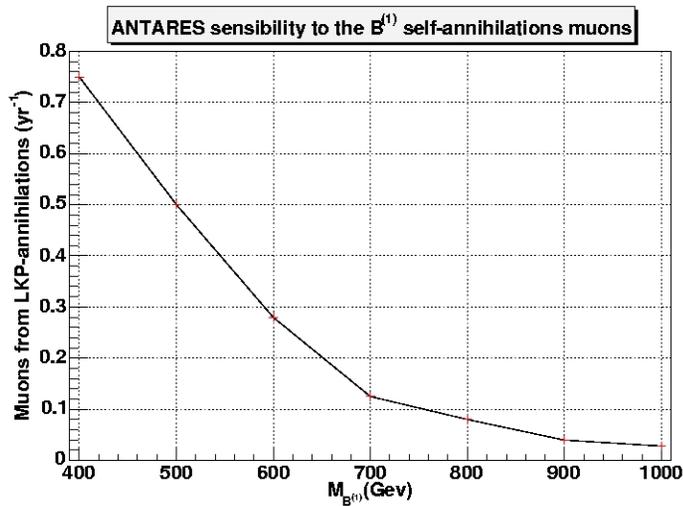
Comparaison données/MC:

Cas des données « Gold »

(reconstruction $L > 1$ et la burstfraction $< 20\%$)

Stratégie ON/OFF zone

Possibilité de mettre une première limite sur la masse de la LKP



Reste à vérifier la pureté, la topologie

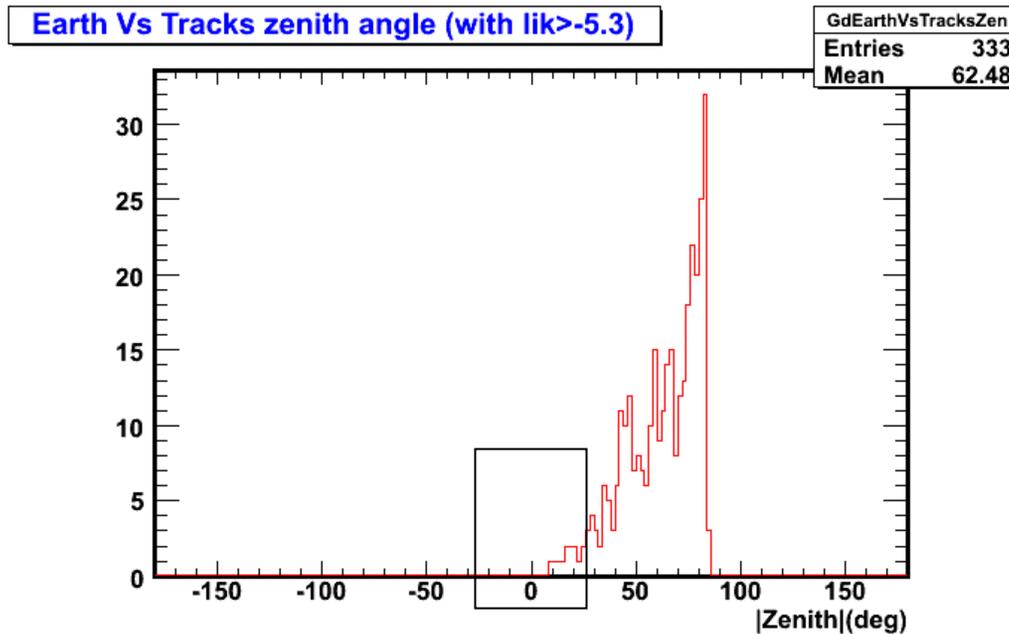
Possibilité d'interactions de rayon
cosmiques avec la couronne solaire

Cas Terrestre:

Comparaison données « gold »

Grand intérêt: les neutrinos provenant de l'annihilation sont verticaux et donc facile à extraire du fond atmosphérique...

Inconvénient: flux très faible, 2 à 3 ordres de grandeur plus faible que le Soleil



Data: coupure $\cos\theta > 0.1$, Lik > -5.3 et reconstruction Lignes > 1

-> inexistence autour de la verticale ($\pm 2^\circ$) de neutrinos montants remplissant tous les critères de sélection (reste à comparer au MC, particularité besoin d'une connaissance approfondie de la répartition angulaire et du taux d'annihilation)



Conclusion préliminaire:

- Grâce à une calibration précise du détecteur en temps, nous pouvons depuis le mois de février (avec 5 lignes) commencer l'analyse globale des données dans l'objectif d'extraire des sources potentielles
- La stratégie et l'analyse m'a permis d'extraire un ensemble d'évènements montants dans la direction du soleil

Perspectives:

- Améliorer l'efficacité de reconstruction à basse énergie (trigger, reconstruction, ...)
- Evaluer le flux de muons montants provenant du Soleil et centre galactique
- Limites sur la masse de la particule de matière noire pour différents modèles (SO(10) (particule LZP) ou supersymétrie...)
- Etude des trous noirs de masse intermédiaire (entre 20 et 10^6 masse solaire), hypothèse des clumps au sein du système solaire...