

Tomographie avec des muons cosmiques

Application à un site archéologique grec “Apollonia”
Collaboration ARCHE (IPNL, LAPP, APC)

Max Chefdeville, Guillaume Deléglise, Sabine Elles, Corinne Goy, Yannis Karyotakis et Jean Jacquemier

Radiographie à Rayon X



Premier prix Nobel de
physique attribué à
W Rontgen en 1901

- Sonder avec des muons cosmiques de façon **non-invasive** des sites
 - naturels (volcans, ...)
 - industriels (barrage, centrales nucléaires,...)
 - archéologiques
- Ce type de projets s'inscrit dans une démarche de valorisation

GT12 – Applications associées : autres thématiques

Sébastien Incerti

Berrie Giebels (IN2P3), Olivier Drapier (CSI; LLR), Marin Chabot (IPNO), Jean Duprat (CSNSM), Véronique Van Elewyck (APC)

- Tomographie avec des muons atmosphériques, micro-météorites, ...

[Accès et inscription à la mailing list du groupe de travail GT12.](#)

[Contacter le comité de pilotage du groupe GT12.](#)

Prospectives
IN2P3

- Le site archéologique
- Rayons cosmiques et procédé de muographie
- Les activités au LAPP
 - Phase d'exploration (et d'apprentissage)
 - Activité qui reste secondaire pour les physiciens engagés

Le site archéologique (Grèce, Thessalonique)



D : 100 m / H : 20 m

Monument
excavé

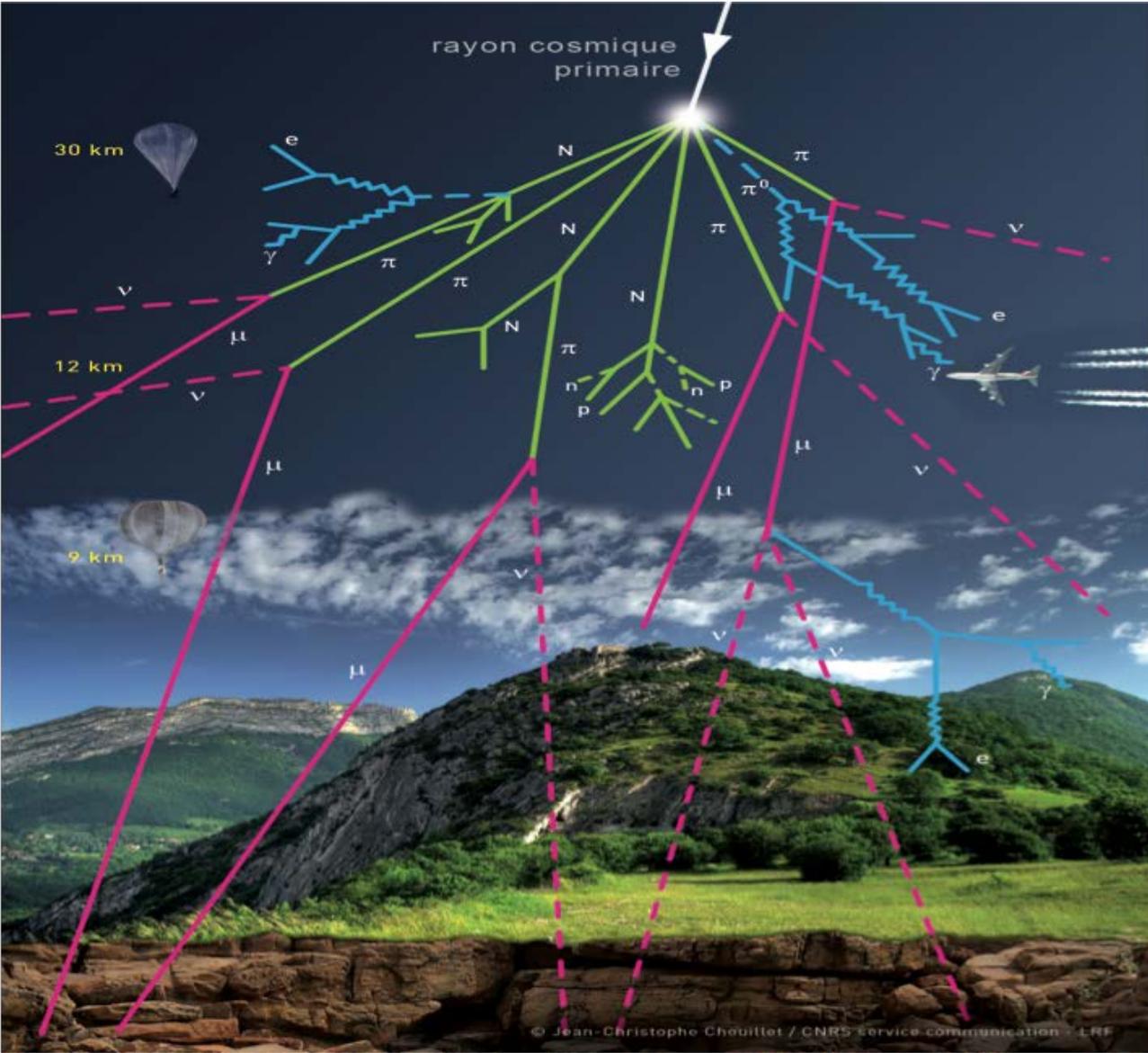


37 Astrium

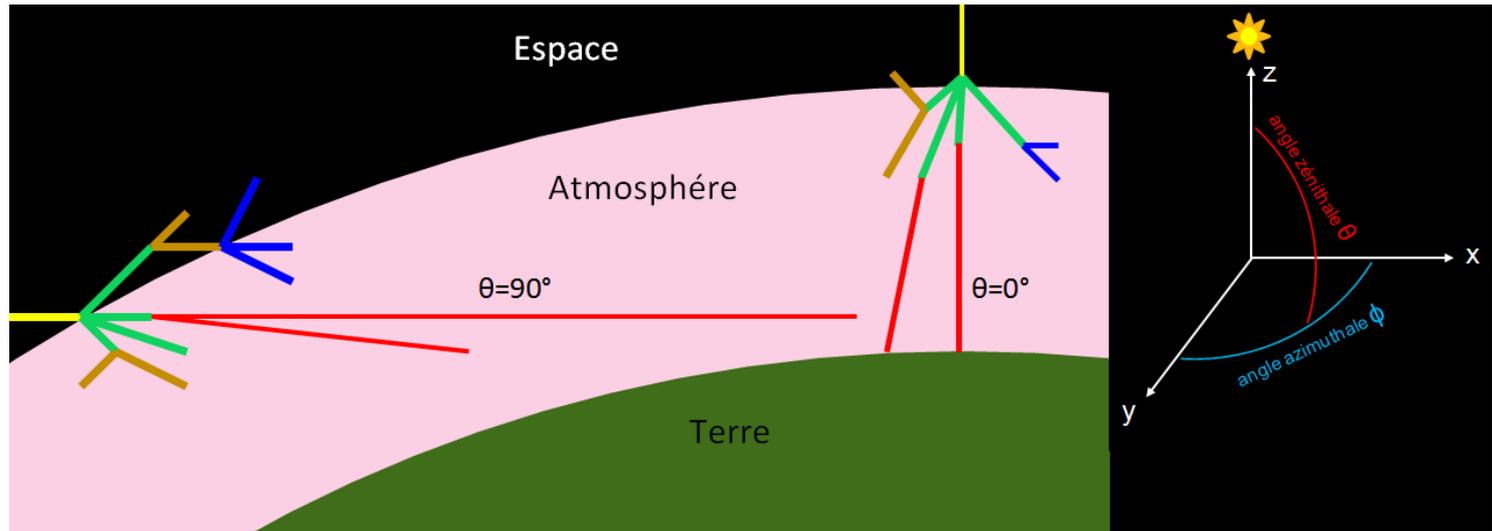
Date des images satellite : 15/2/201



90% p, 10%He, 1%e ...



Distribution des muons cosmiques



$$I(\theta) \cong I(\theta = 0) \cos(\theta)^2$$

- $\sim 1.2 \mu/\text{cm}^2/\text{mn}$ ($E > 0.3 \text{ GeV}$, au niveau de la mer)
- Moins de muons cosmiques horizontaux
- Et en moyenne à plus haute énergie

Interaction des muons dans la matière

➤ Perte d'énergie par ionisation

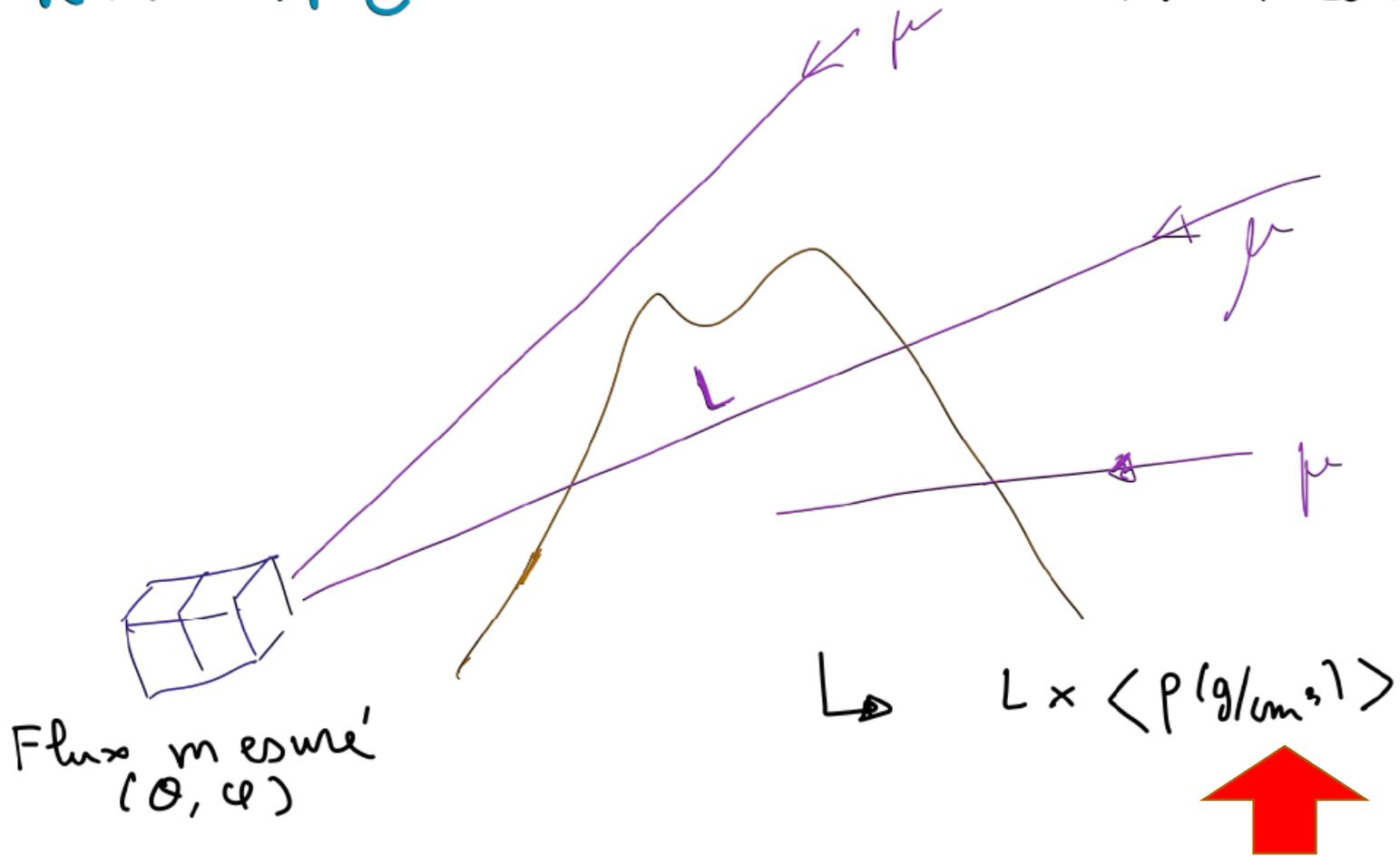
$$\frac{dE}{dx} \approx 2.3 \text{ MeV} / \underline{g} \cdot \underline{cm} / \underline{cm}^3$$

Densité

Typiquement , 100 m de terre
arrête des muons jusqu'à 60 GeV

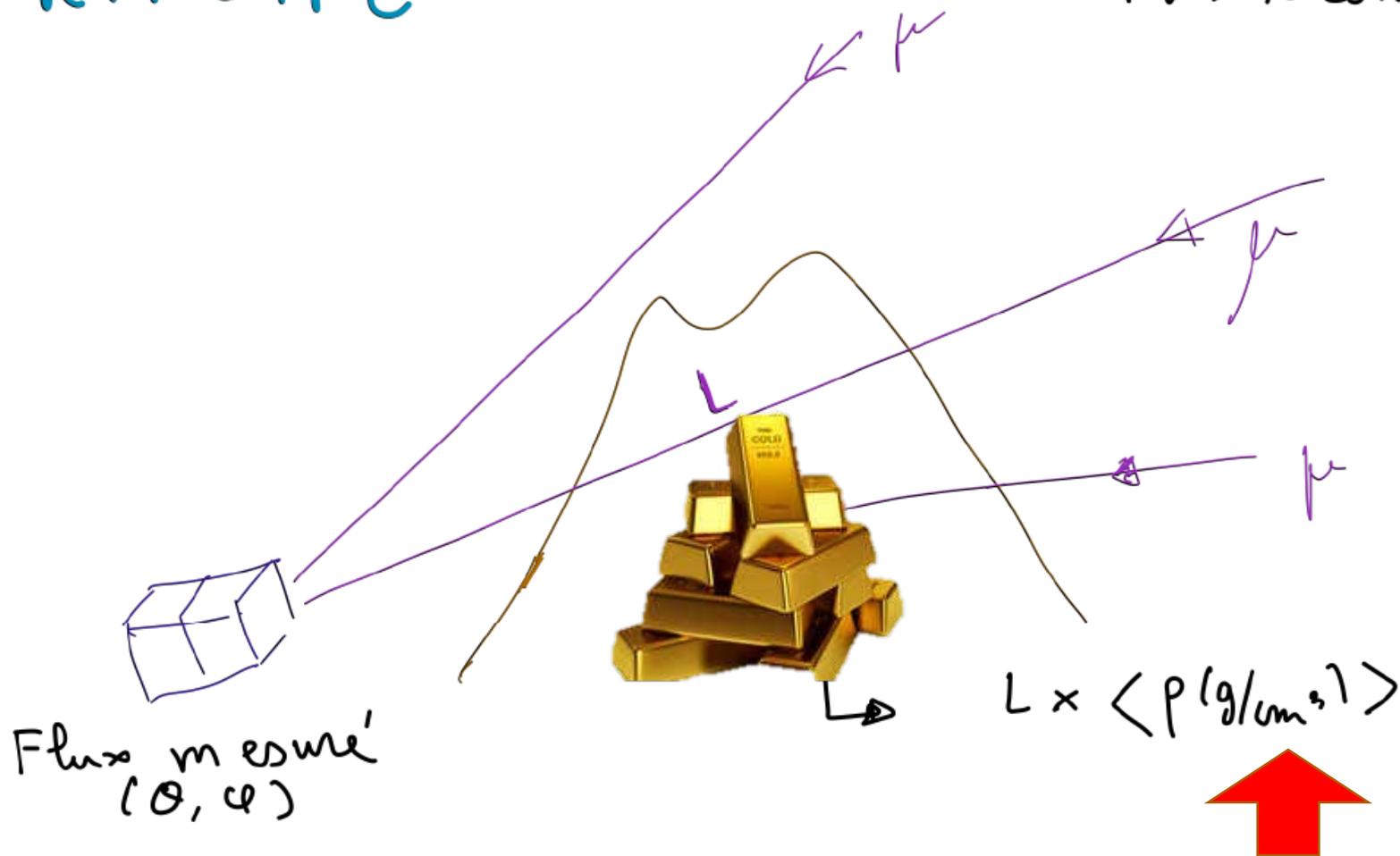
PRINCIPE

Fluxo n corre



PRINCIPE

Flux \propto n $\cos \mu$



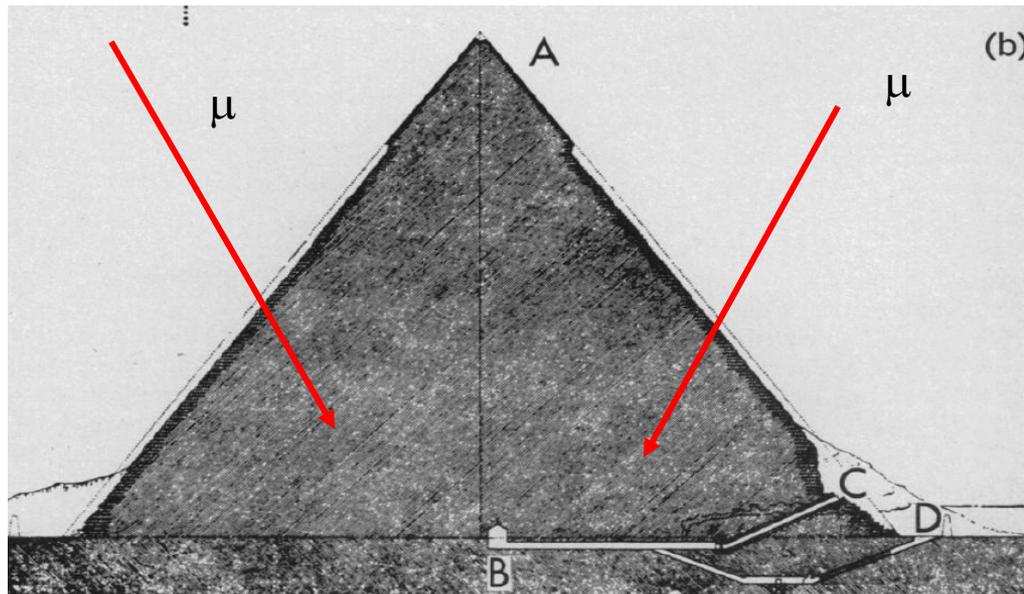
Idée originelle – 1970



Search for Hidden Chambers in the Pyramids

Luis W. Alvarez, Jared A. Anderson, F. El Bedwei, James Burkhard, Ahmed Fakhry, Adib Girgis, Amr Goneid, Fikhry Hassan, Dennis Iverson, Gerald Lynch, Zenab Miligy, Ali Hilmy Moussa, Mohammed-Sharkawi, Lauren Yazolino

Science, New Series, Volume 167, Issue 3919 (Feb. 6, 1970), 832-839.



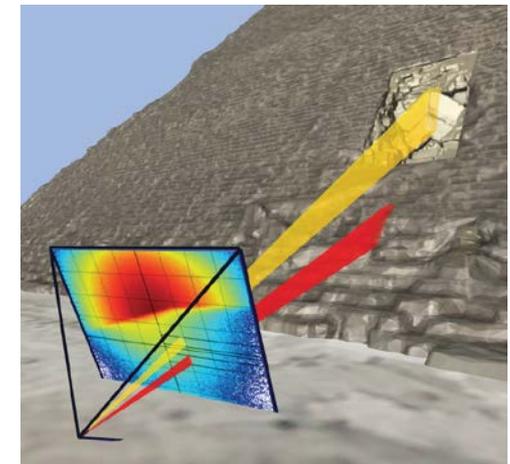
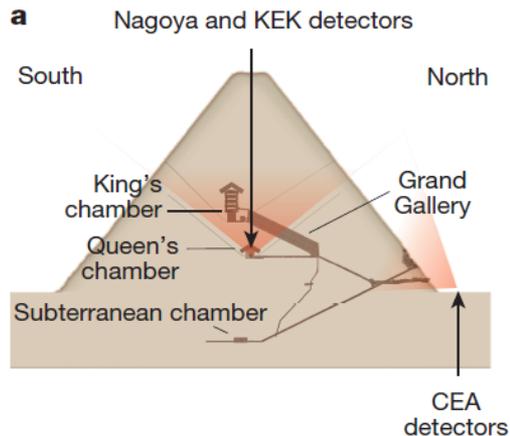
Pyramide de
Cephren
(Gizeh)

Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons

Kunihiro Morishima¹, Mitsuaki Kuno¹, Akira Nishio¹, Nobuko Kitagawa¹, Yuta Manabe¹, Masaki Moto¹, Fumihiko Takasaki², Hirofumi Fujii², Kotaro Satoh², Hideyo Kodama², Kohei Hayashi², Shigeru Odaka², Sébastien Procureur³, David Attié³, Simon Bouteille³, Denis Calvet³, Christopher Filosa³, Patrick Magnier³, Irakli Mandjavidze³, Marc Riallot³, Benoit Marini⁴, Pierre Gable⁵, Yoshikatsu Date⁶, Makiko Sugiura⁷, Yasser Elshayeb⁸, Tamer Elnady⁹, Mustapha Ezzy⁸, Emmanuel Guerriero⁵, Vincent Steiger⁴, Nicolas Serikoff⁴, Jean-Baptiste Mouret^{10,11,12}, Bernard Charlès¹³, Hany Helal^{4,8} & Mehdi Tayoubi^{4,13}

<https://www.dailymotion.com/video/x6yaf6k>

Pyramide de Kheops
(Gizeh)

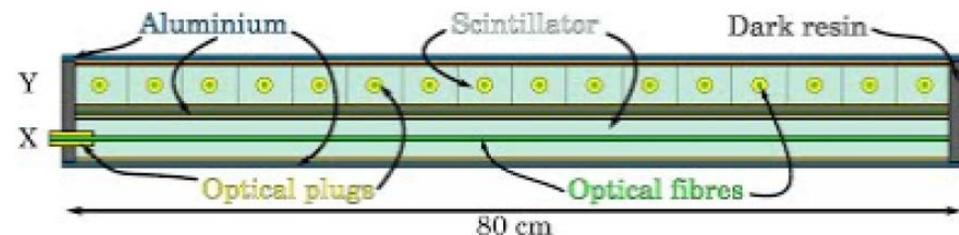




MUTOMO au LAPP

- Analyse des données
- Simulation de l'expérience (**MUST**)

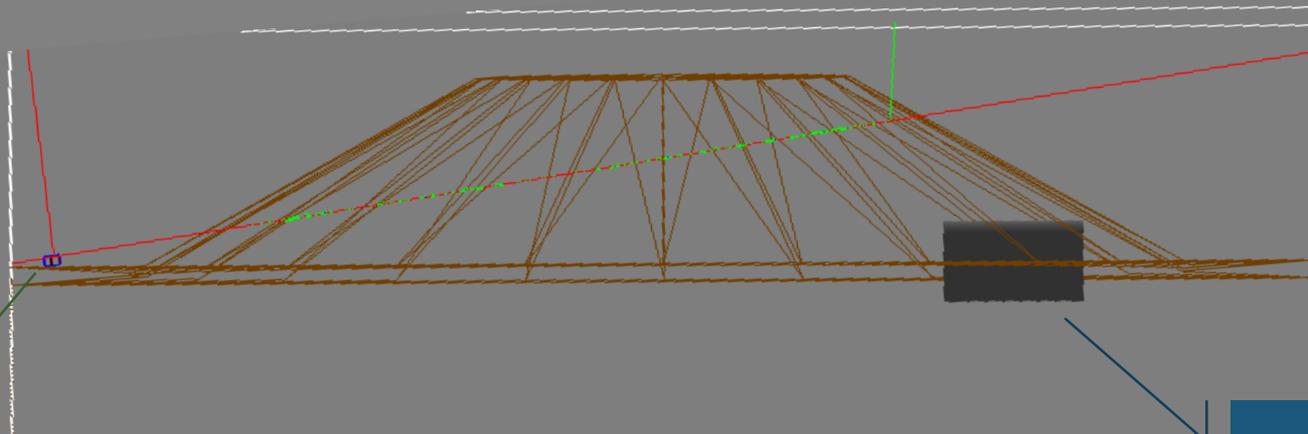
Détecteur DIAPHANE (IPNL)



Simulation – GEANT4

- GEometry ANd Tracking :
A toolkit for simulating the passage of particles through matter.
- Generation d'événements
- Appareillage
 - Tumulus
 - Détecteur
- Réponse du détecteur ↔ données

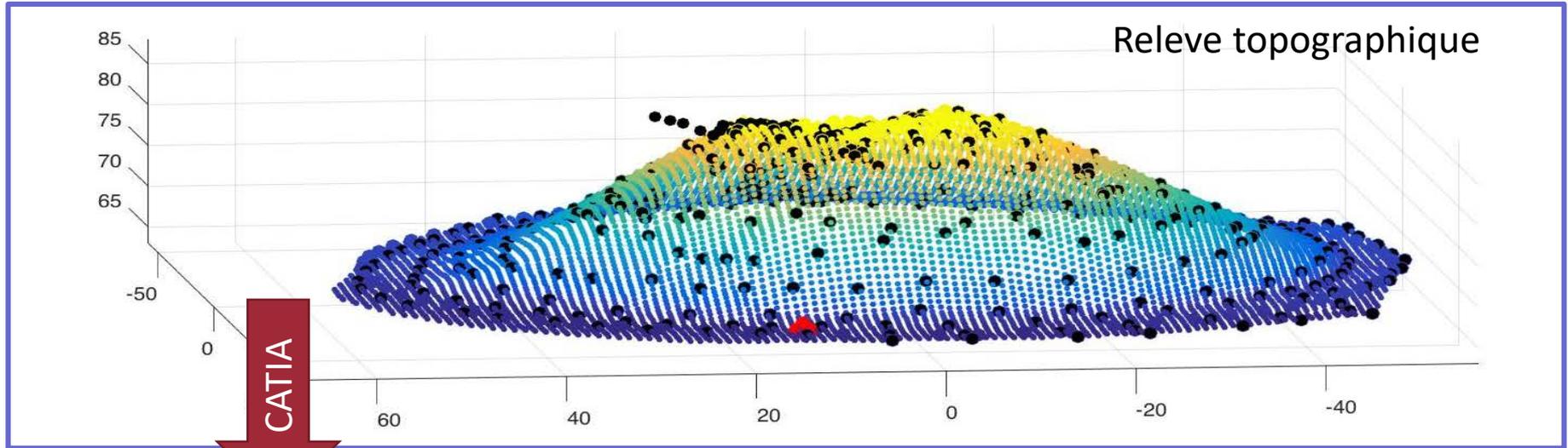
Simulation – 1ere version



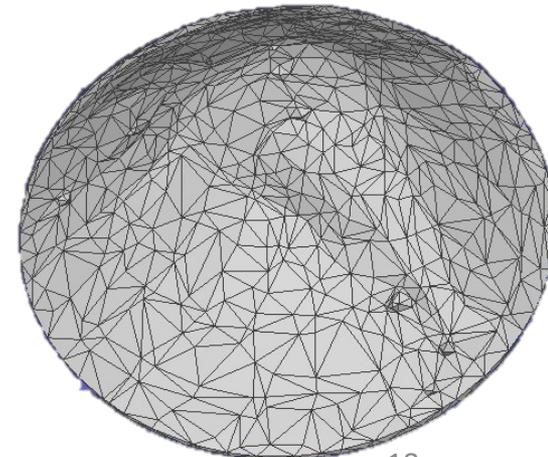
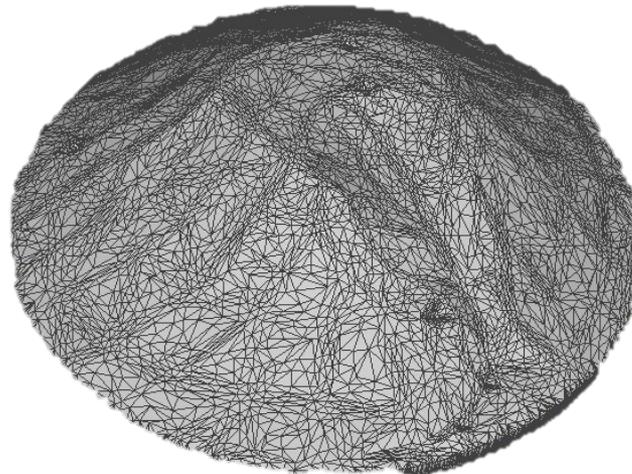
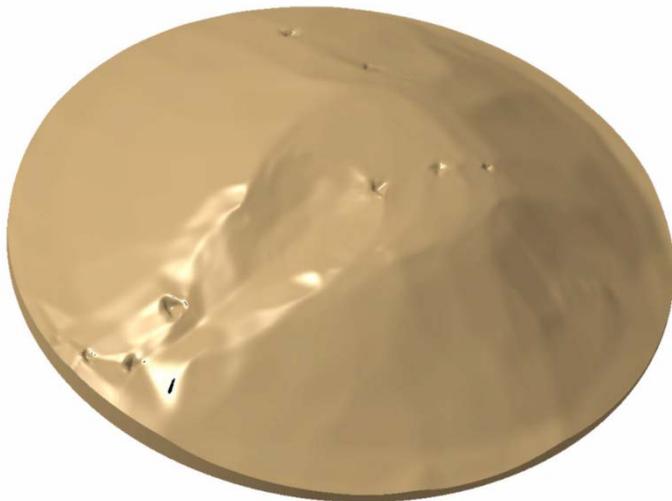
Le détecteur

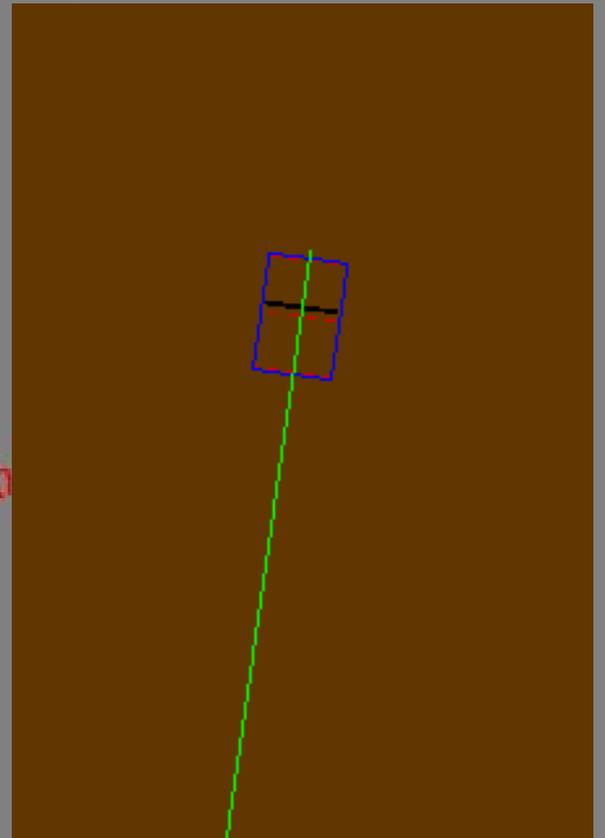
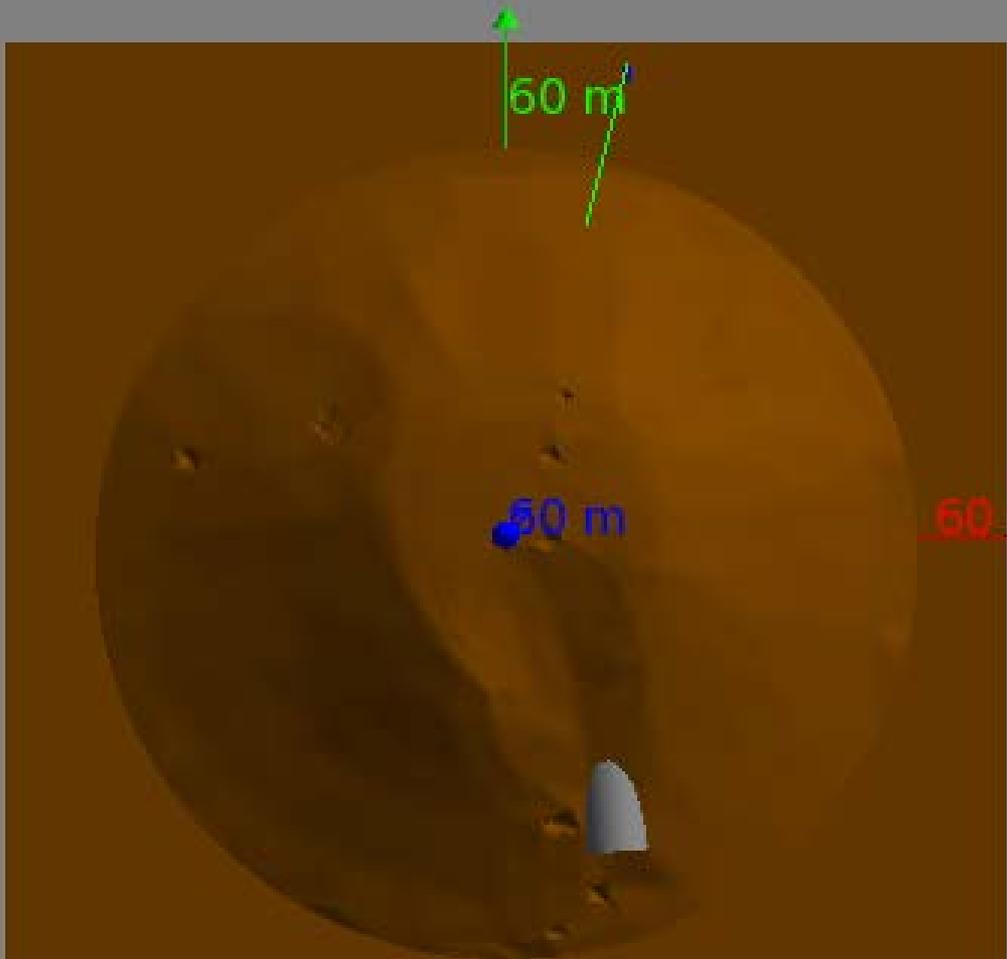
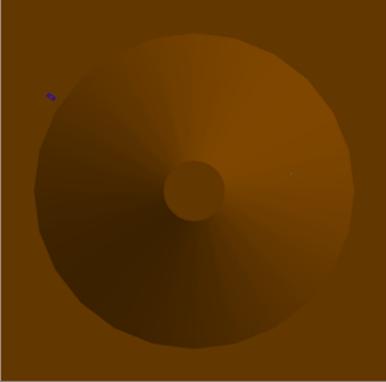
Le monument

Evolution – Outils de CAO



Optimisation du nombre de facettes



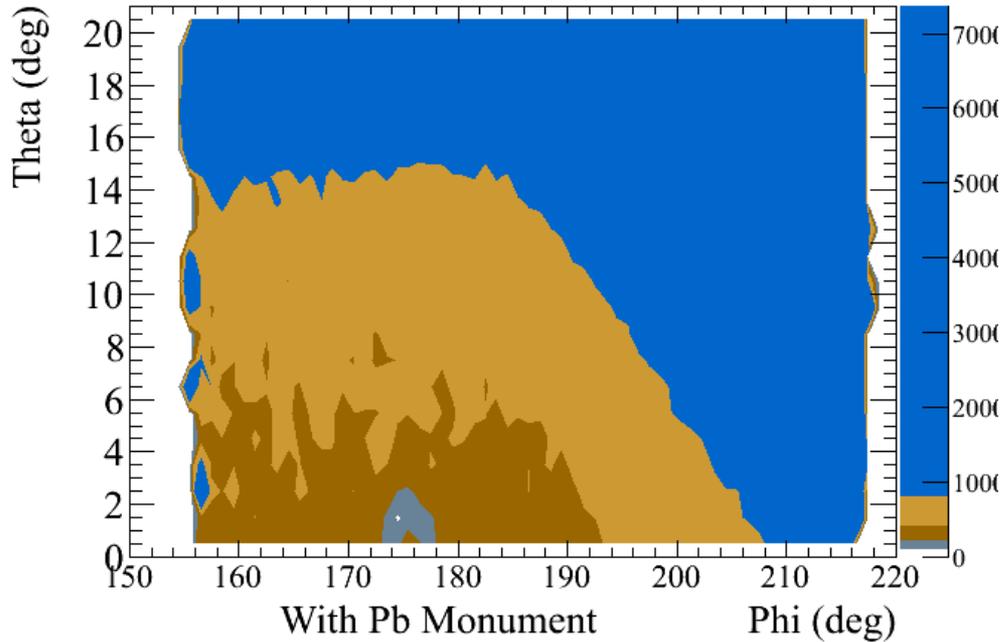


Quelques résultats de simulation et comparaison avec les données

Obtenus avec la 1ere version du tumulus

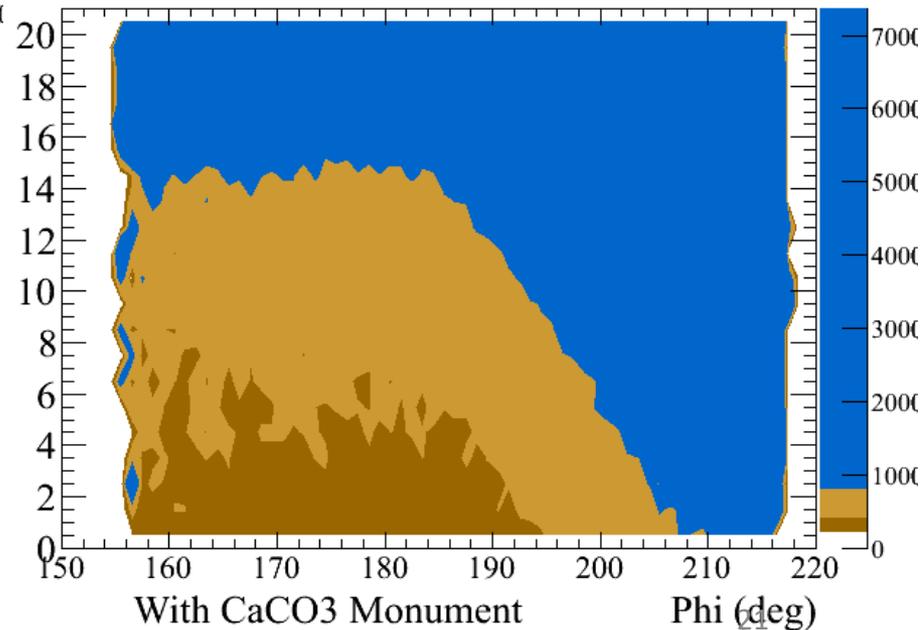
Dans un monde favorable

- Flux de muons isotrope ! i.e $I(\theta) = I(\theta=0)$



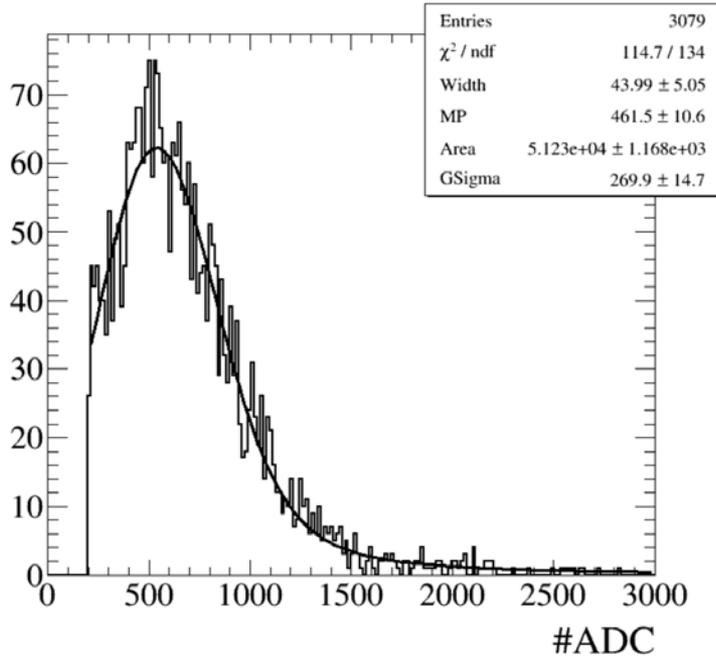
Monument en plomb ($\rho = 11.3 \text{ g/cm}^3$)

Monument en marbre ($\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$)
terre ($\rho = 2.1 \text{ g/cm}^3$)

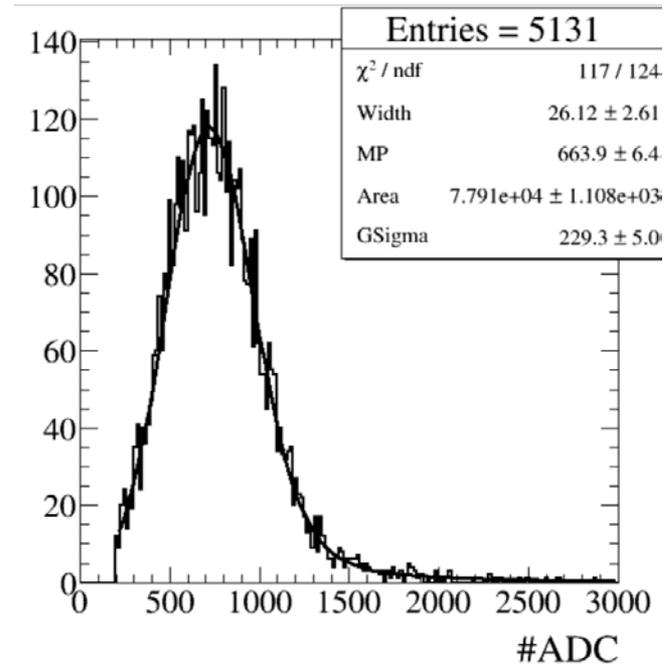


Comparaison Data/MC : Signal

Data

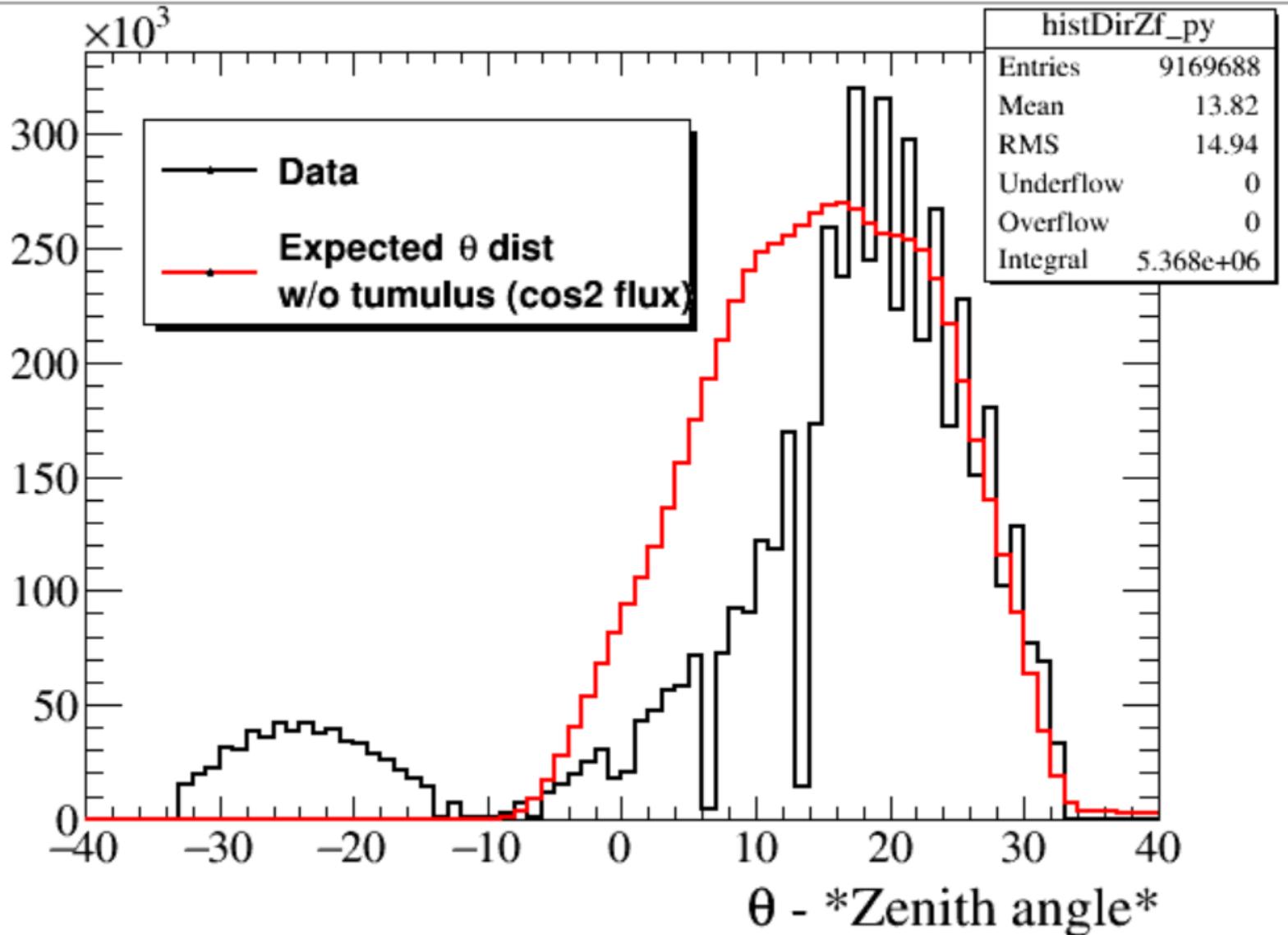


MC

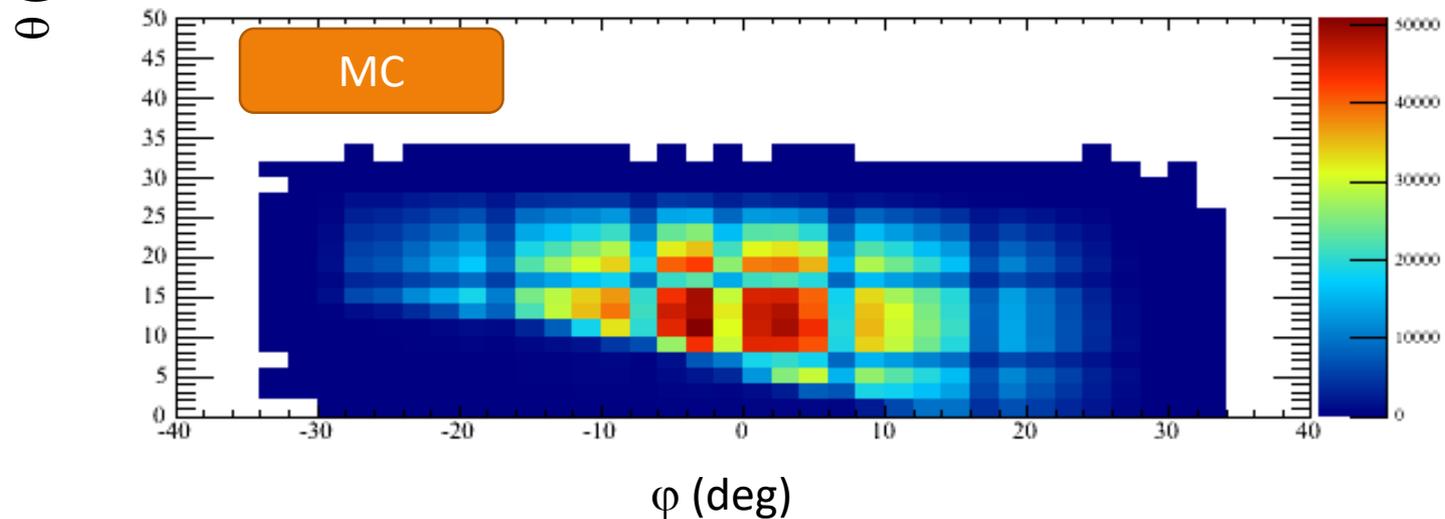
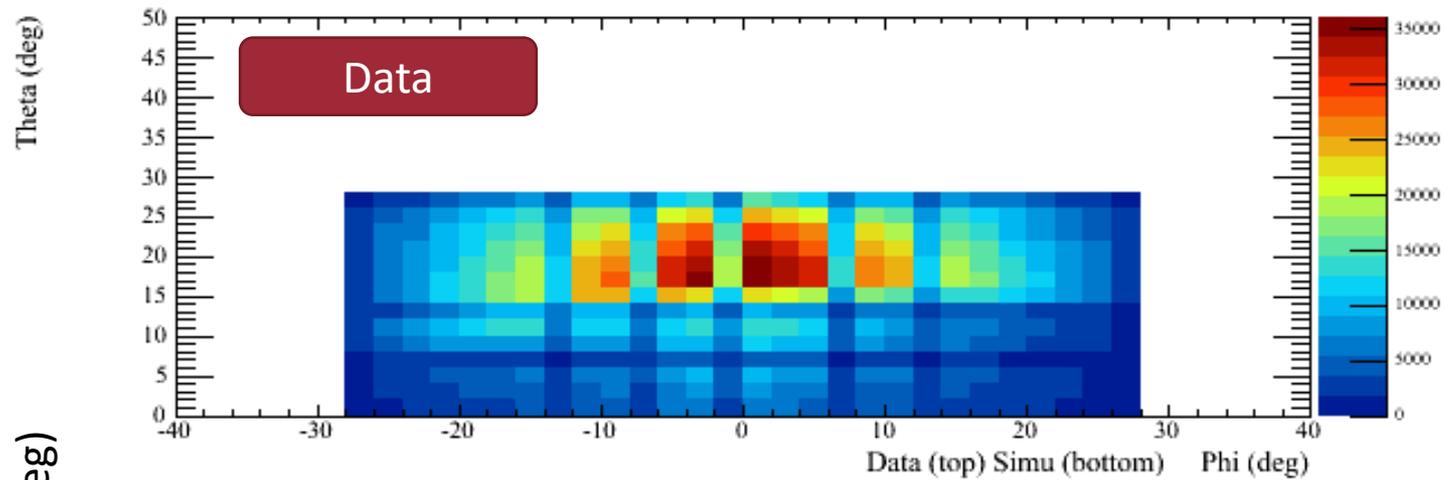


Le depot d'énergie d'une particule est décrit par une courbe de Landau : 3 paramètres à ajuster dans la simulation

Comparison Data/MC: flux



Comparison Data/MC: 1ere version

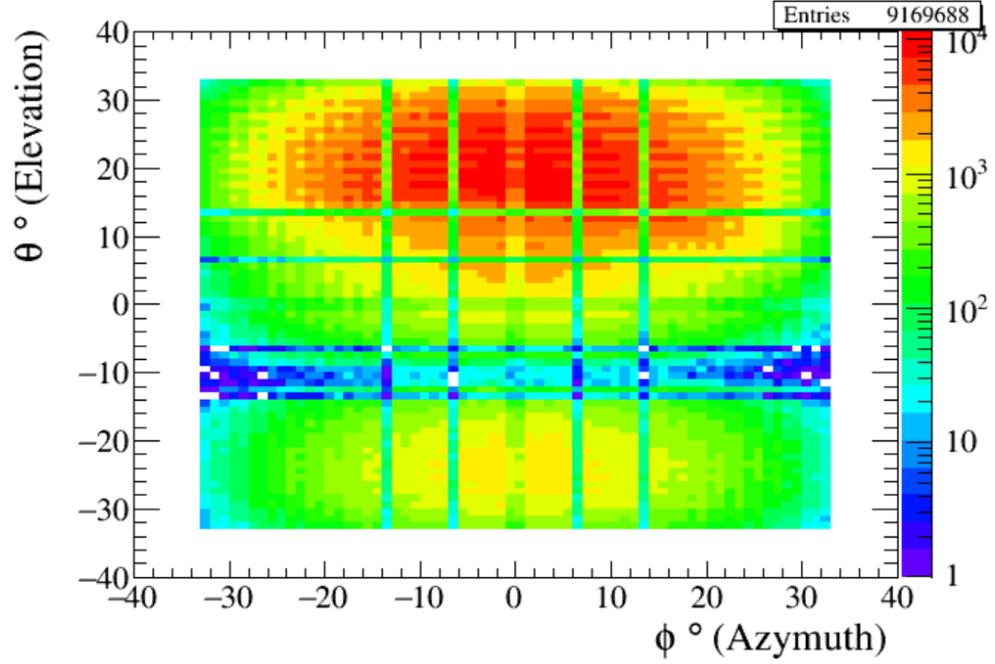


Status

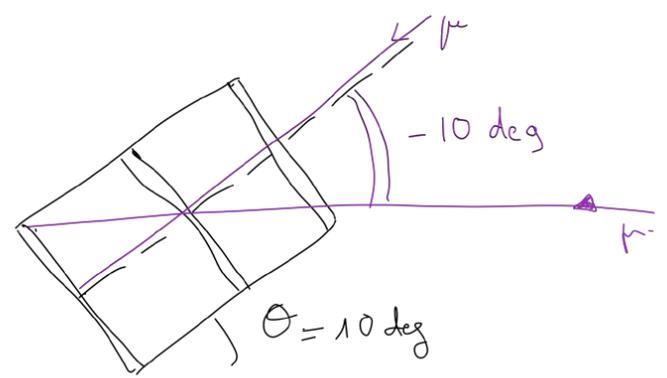
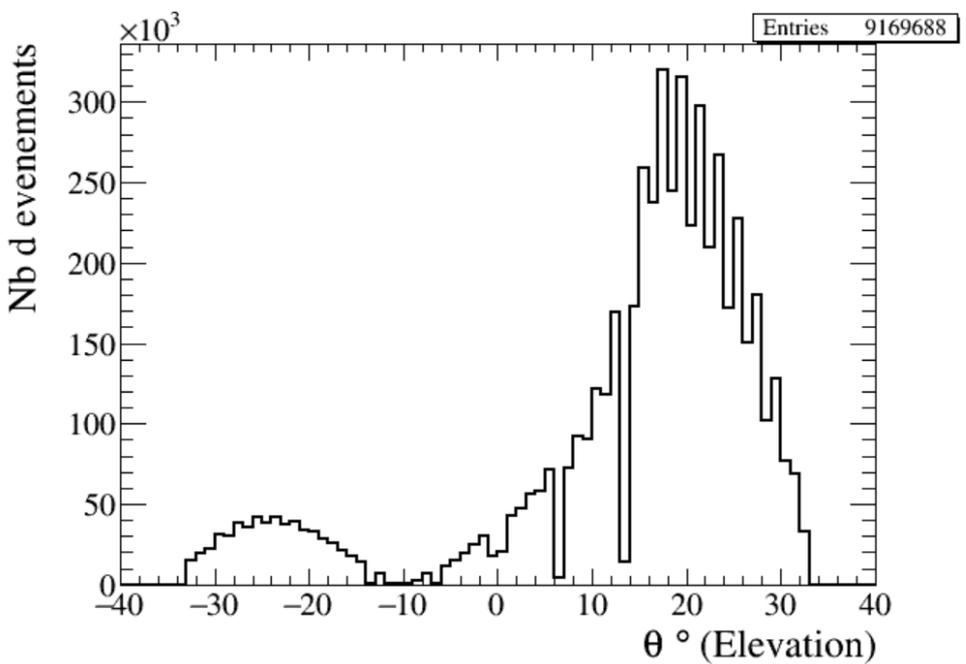
- Tumulus en terre et monument en marbre ne présentent pas une situation favorable
 - Faible différence de densité entre terre/marbre
 - Flux de muons horizontaux
- Bench mark
 - Accès à un site archéologique
 - Monument excavé
 - Anomalie connue à explorer

Futur

- Lettre d'intention au LAPP pour formaliser l'activité :
 - Montrer qu'on peut utiliser une simulation à la Géant pour résoudre le problème inverse
 - Voir ce que pourrait apporter la "mesure" de l'énergie ? De quelle résolution aurait-on besoin ?
 - Long terme : construire une station de détection autonome
 - + modulaire , transportable en voiture
- Séminaire a EDYTEM est prévu en Septembre
 - Convergence d'intérêt sur le procédé
 - ANR ?
- Contacts avec l'Université de Thessaloniki
 - en particulier des archéologues et des physiciens
 - identifier de meilleurs sites



Données:
Plus de 9 millions de
traces reconstruites.



Interaction des muons dans la matière

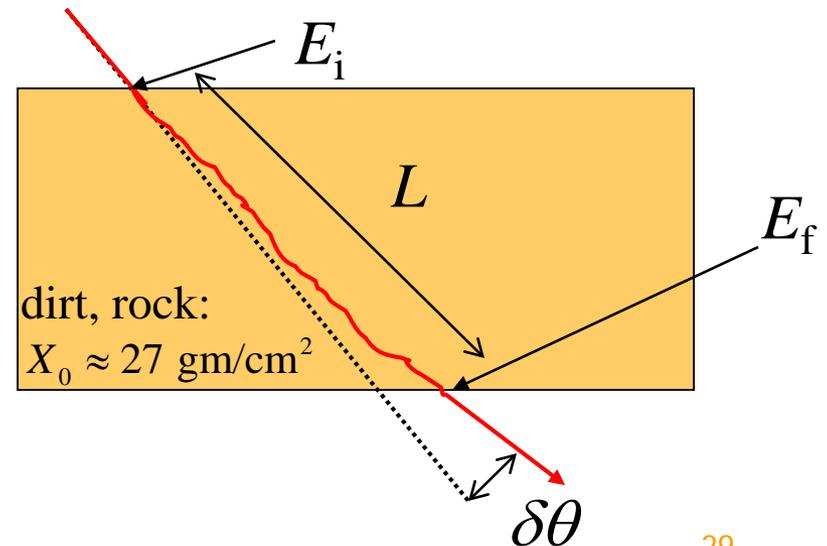
- Perte d'énergie par ionisation

$$\frac{dE}{dx} \approx 2.3 \text{ MeV/gm/cm}^2 \approx 0.6 \text{ GeV/m in rock}$$

- Multiple-Coulomb Scattering

$$\delta\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\sqrt{E_i E_f}} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

$$E_i - E_f = L \frac{dE}{dx}$$



Tumulus ailleurs dans le monde



USA



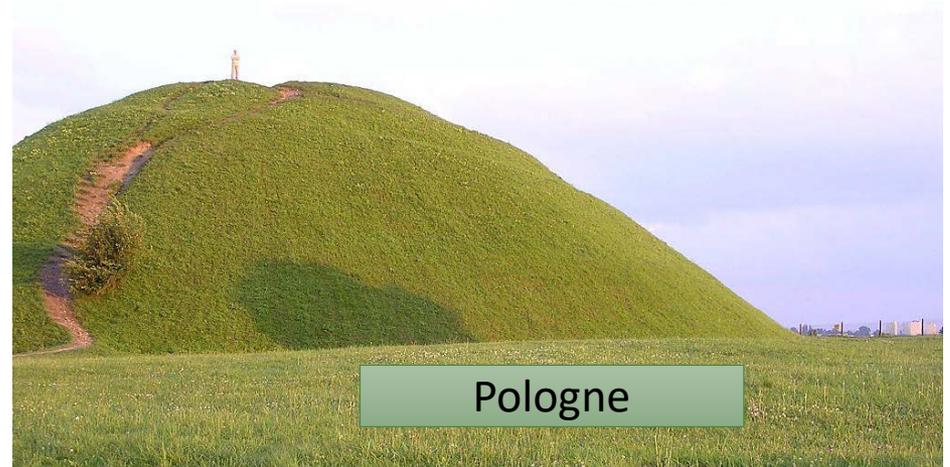
Angleterre



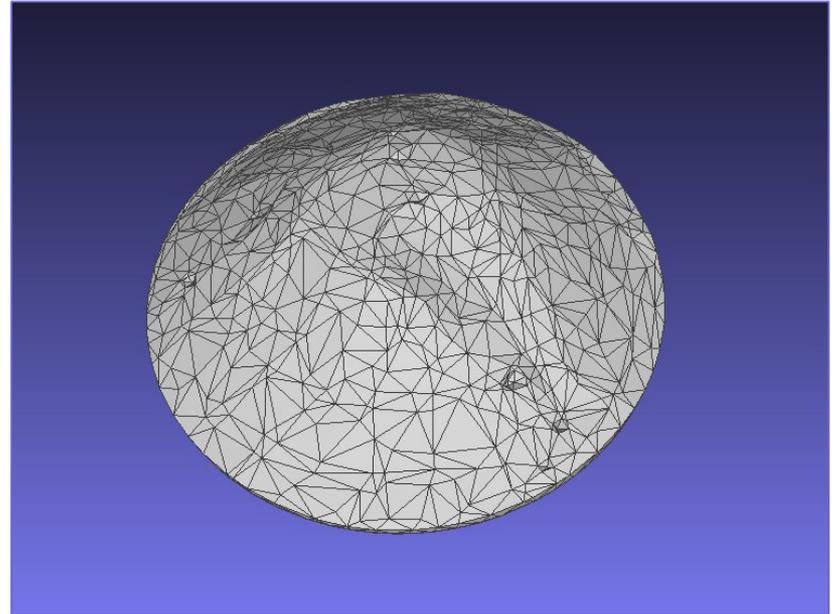
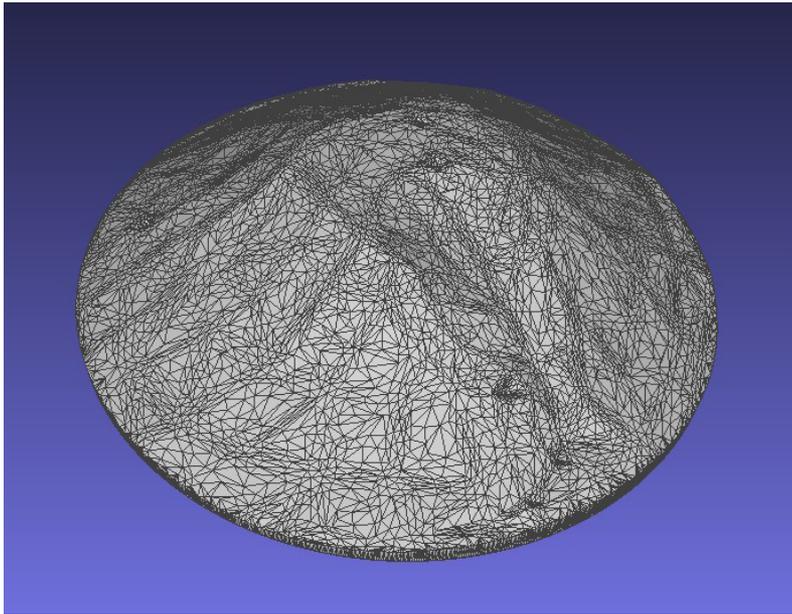
France

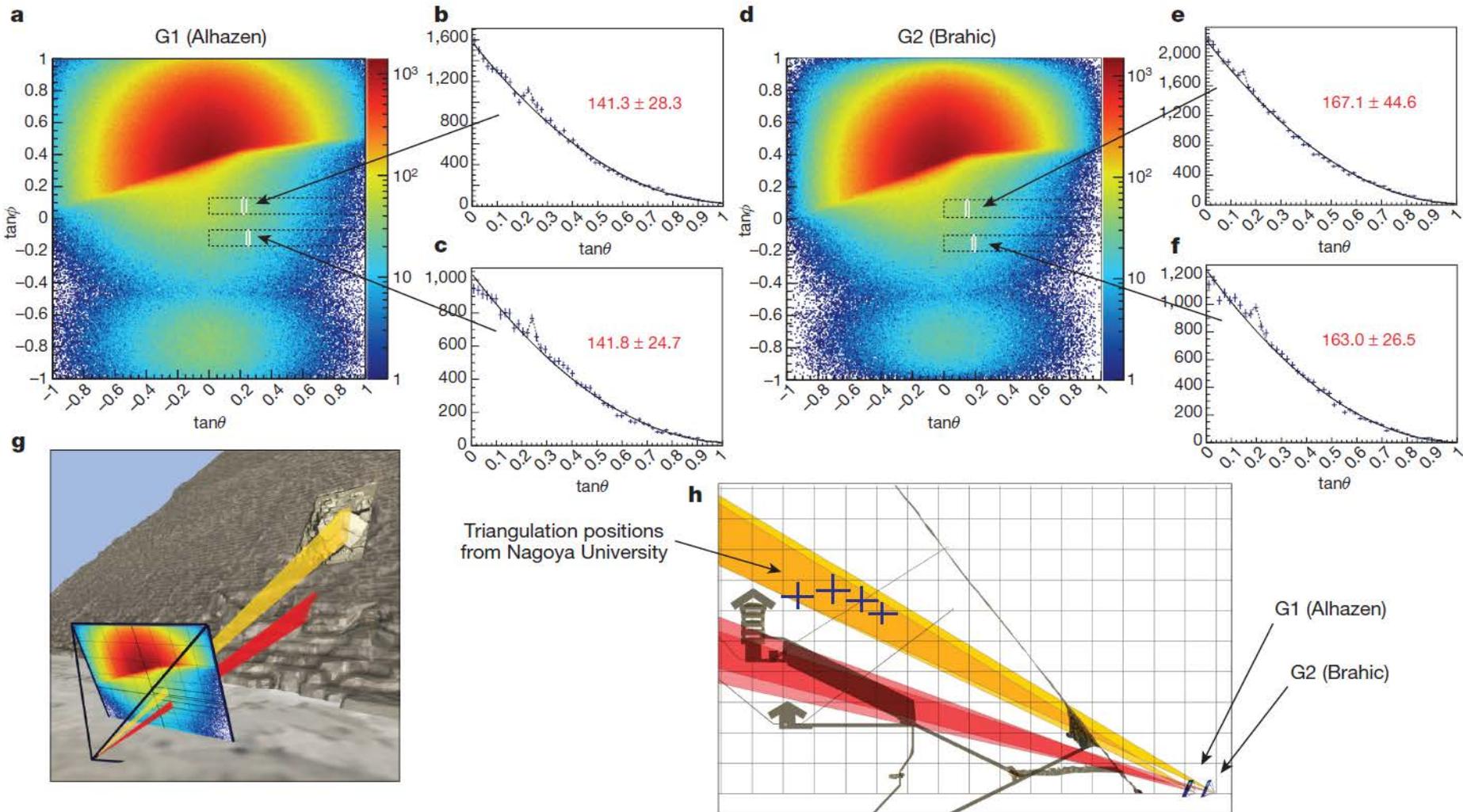


Danemark



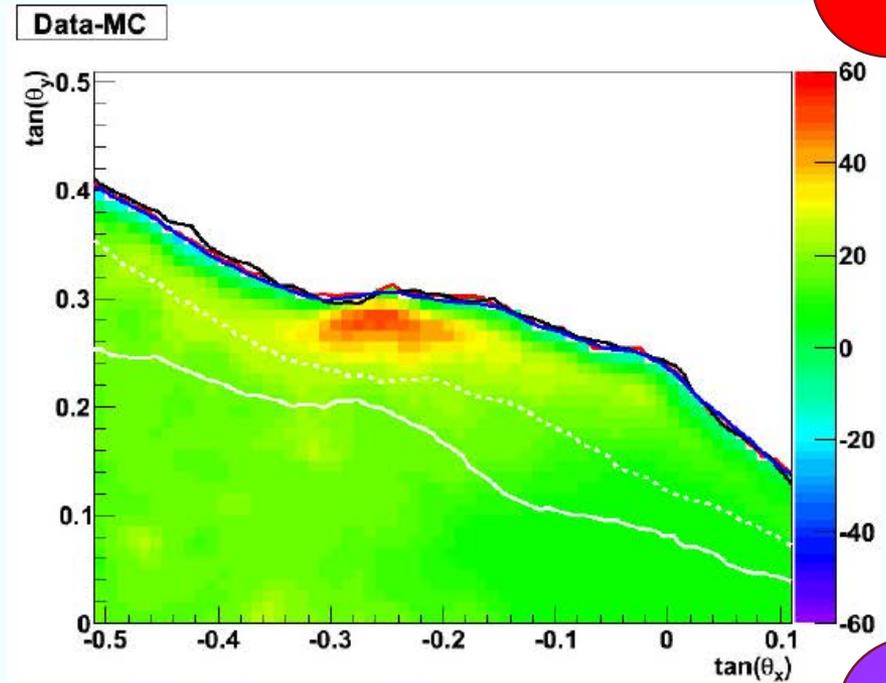
Pologne





Results from muography at Stromboli

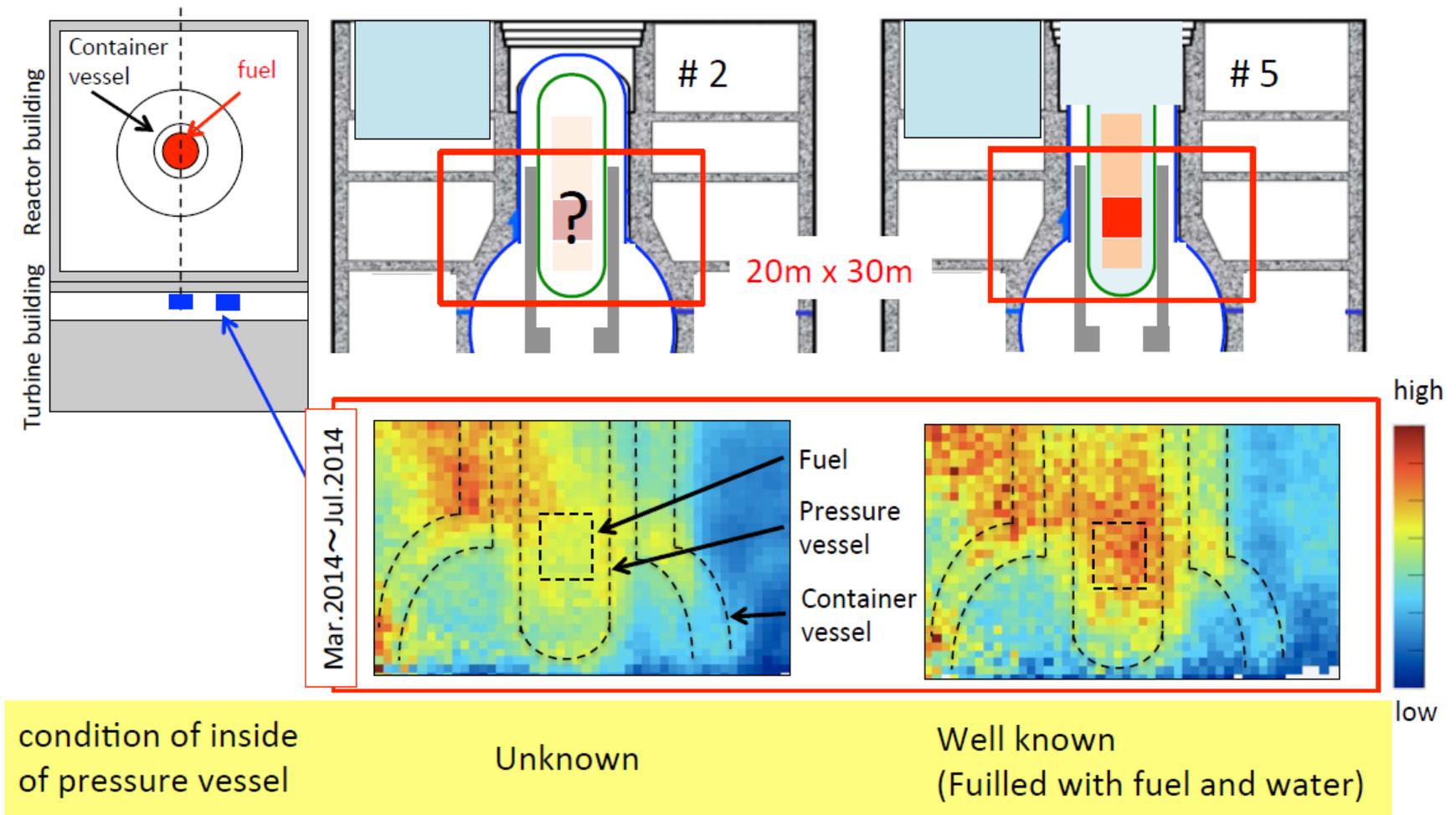
A low-density zone (1.7 vs. 2.2 g/cm²) was evidenced



Red: excess of muon flux respect Monte Carlo simulation

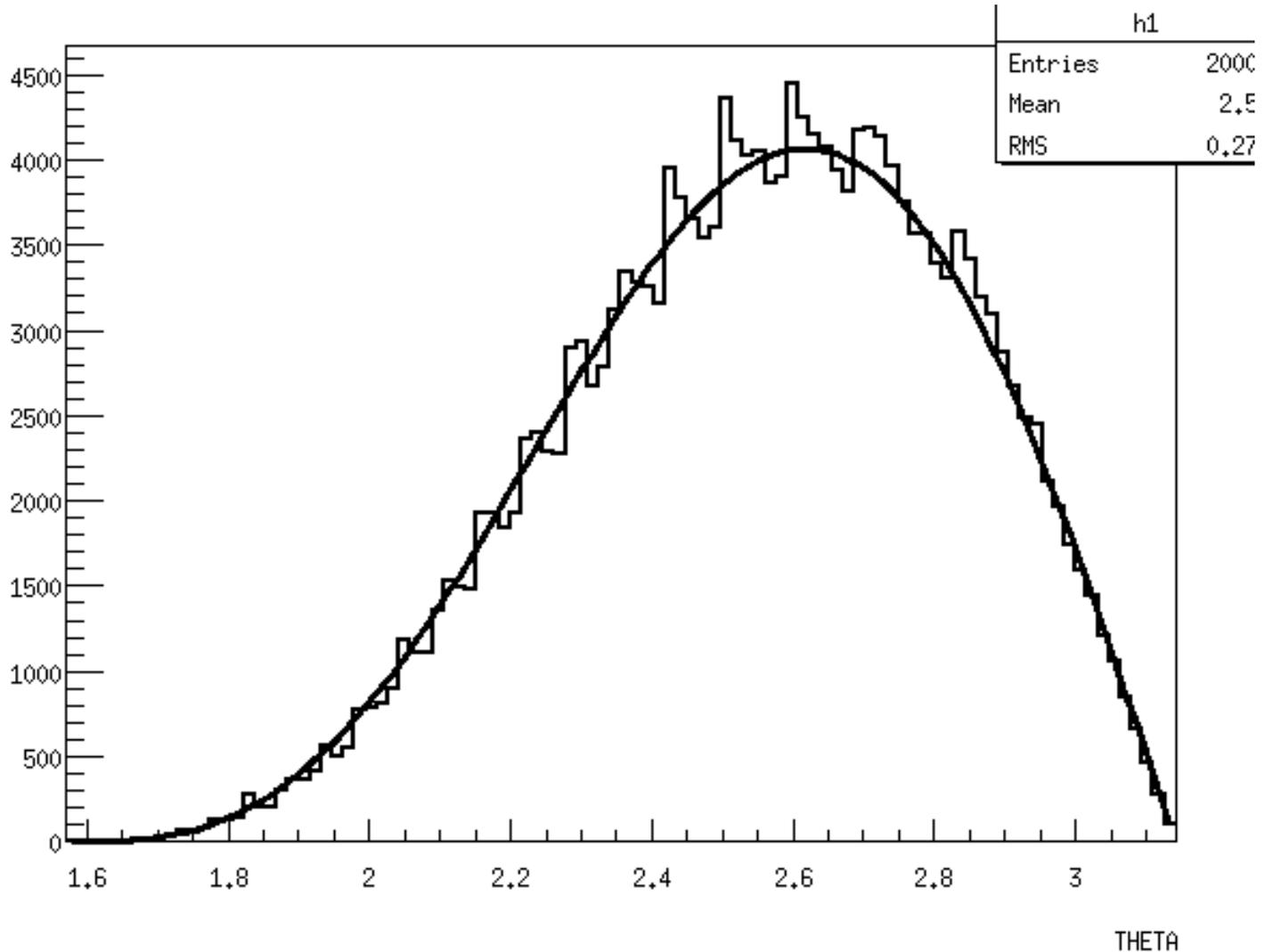
Basée sur une campagne de mesure précédente

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

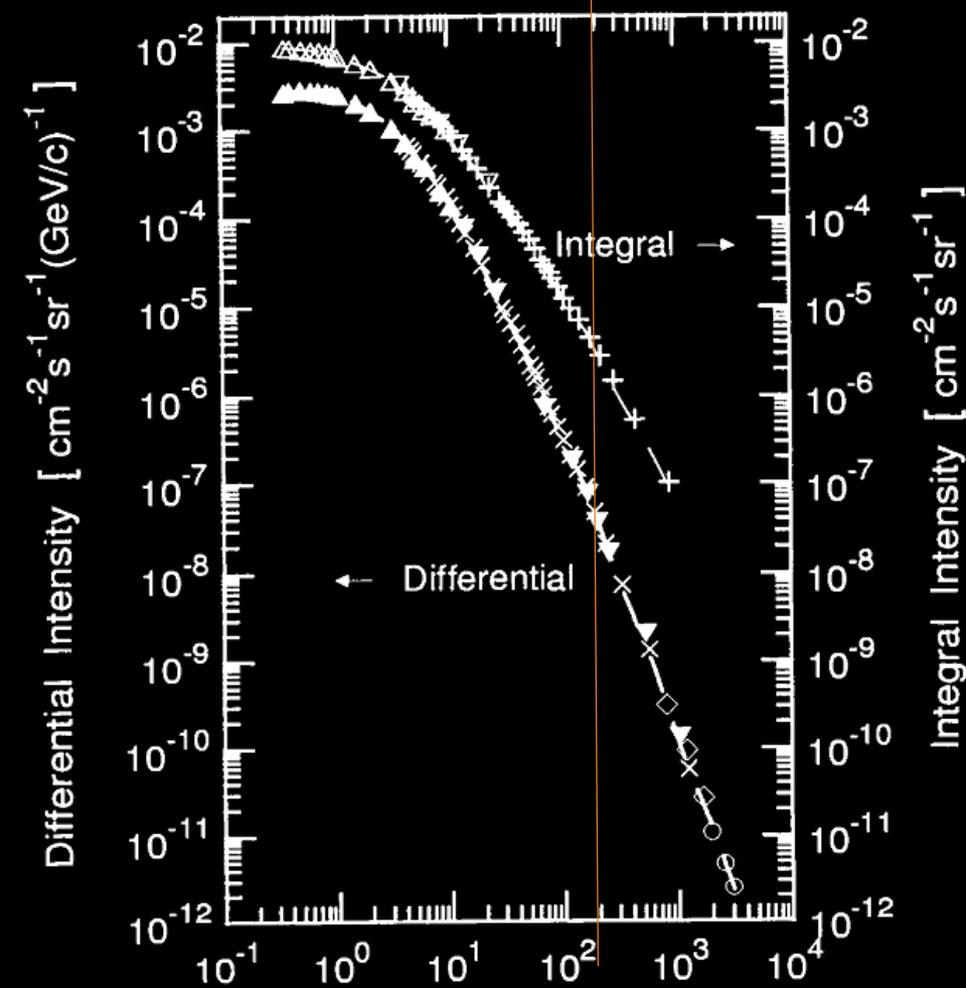


▪ Significant differences between 2nd and 5th → Melt down is confirmed

Diff Theta distribution of the CRY particle

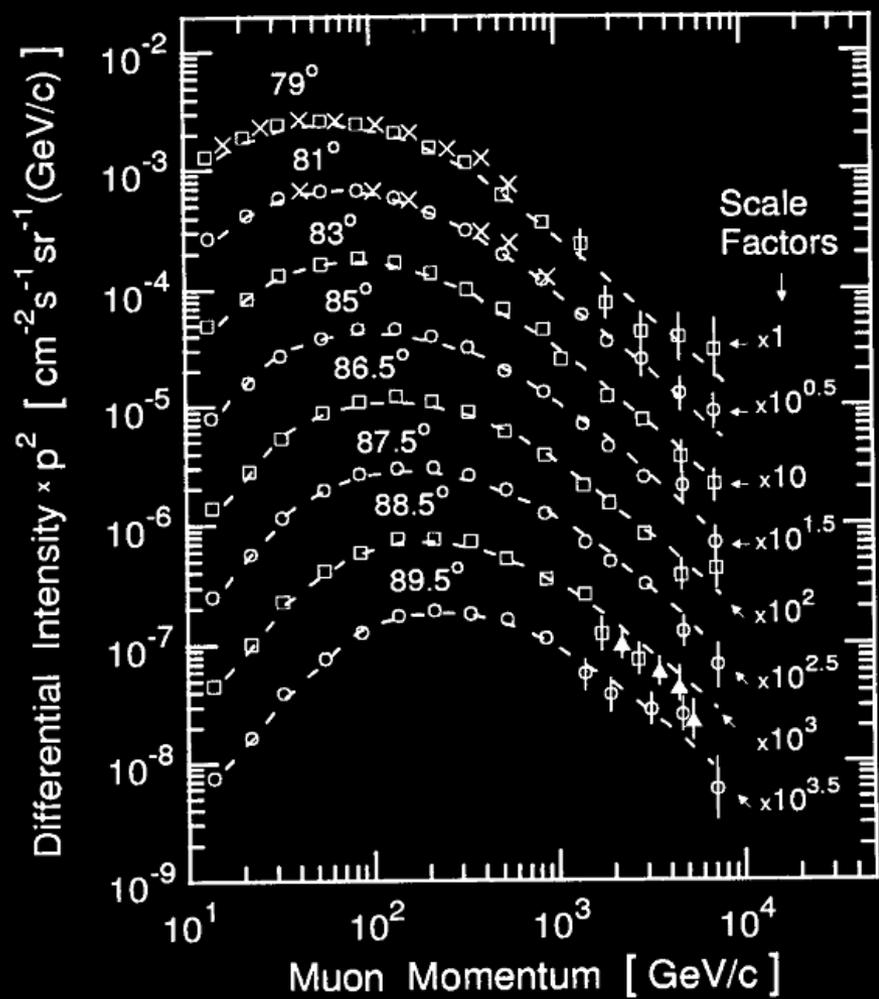


<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0550321385902949?via=ihub>



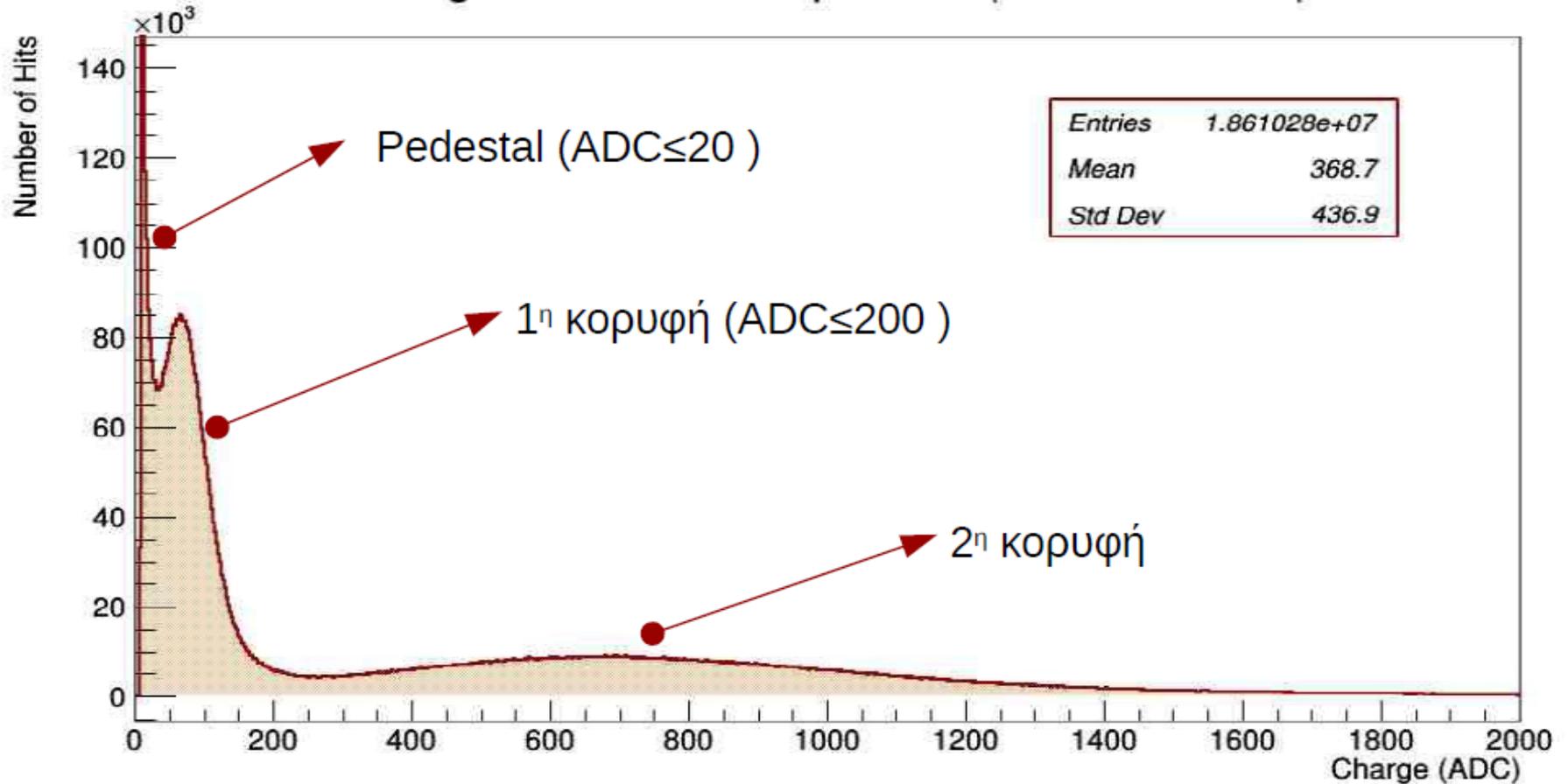
Muon Momentum [GeV/c]

- | | | | |
|------|--------------------------|------|---|
| ▼, ▽ | Appleton et al. (1971) | ▲, △ | Barbouti and Rastin (1983) |
| ×, + | Rastin (1984a) | ○ | Komori (1977) and
Komori and Mitsui (1979) |
| ◇ | Thompson et al. (1977b) | | |
| - - | best fit, Rastin (1984a) | | |



- | | |
|-------|---|
| □, ○ | DEIS 78° - 90°, Allkofer et al. (1979b, 1981) |
| × | Kiel-DESY, Allkofer et al. (1977b) |
| ▲ | MUTRON, Muraki et al. (1979) |
| - - - | model calculation, Maeda (1970, 1973) |

Charge Distribution Top Plane (X and Y coord)

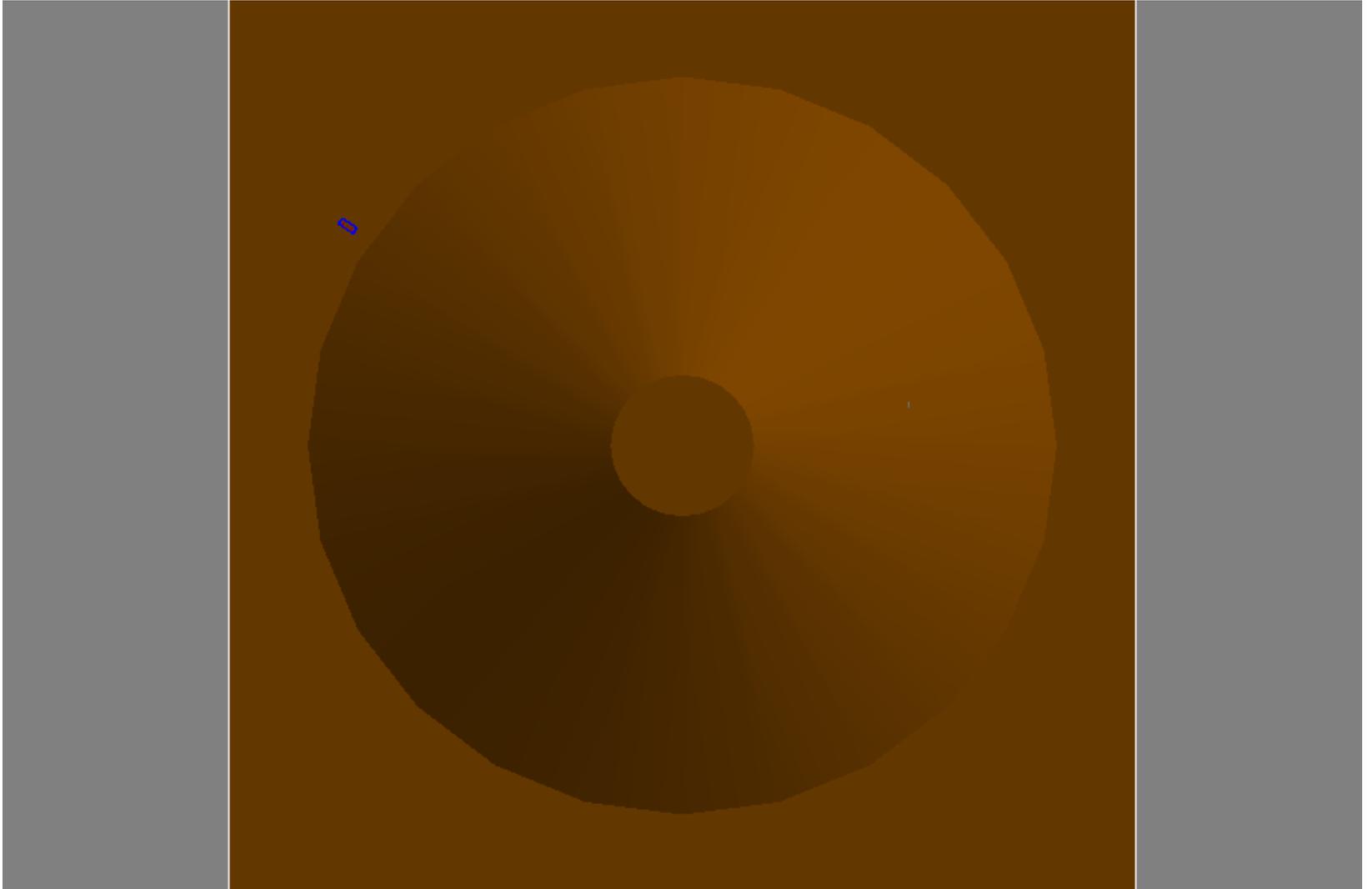




Site
archéologique
grec ?



Vue de dessus

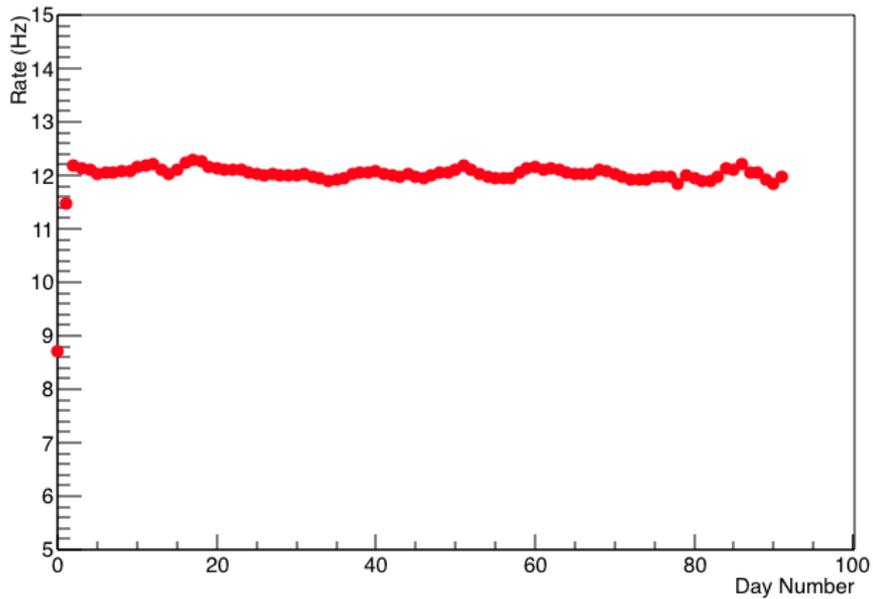


Le site d'Amphipolis





Acquisition Rates during Day



Prise de données à partir
de 7 juillet 2018 et pendant
3 mois