

La tomographie par muons appliquée aux édifices volcaniques

Jean De Bremond D'Ars, Bruno Carlus, Serge Gardien,
Dominique Gibert, Claude Girerd, Jean-Christophe Ianigro,
Kévin Jourde, **Nolwenn Lesparre**, Jacques Marteau,
Jean-Luc Montorio, Pascal Rolland.

lesparre@ipgp.fr

8 Février 2013

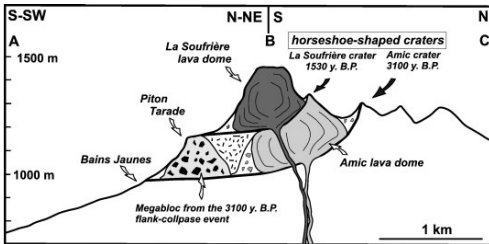


Sommaire

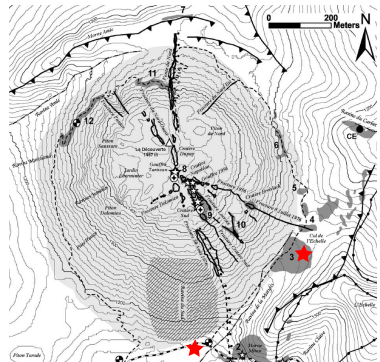
- 1 Problématique
Présentation de la Soufrière de Guadeloupe
- 2 Modélisation du flux de muons
- 3 Détection du flux de muons
- 4 Propriétés du télescope à muons
- 5 Imagerie du dôme de la Soufrière de Guadeloupe
- 6 Conclusions

La Soufrière de Guadeloupe

- Histoire du volcan présente une succession de mises en place et d'effondrements de dômes.
- Le dôme actuel présente plusieurs fractures radiales,
- il est également fragilisé par une activité hydrothermale intense.

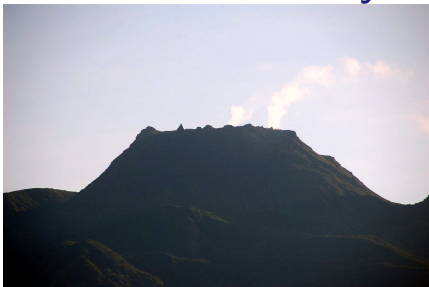


(Boudon *et al.*, 2008)



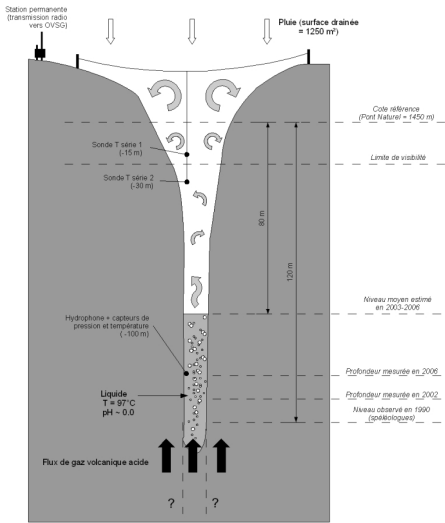
(Komorowski *et al.*, 2005)

Étude du système hydrothermal



Étude du système hydrothermal

Gouffre Tarissan : modèle de fonctionnement et instrumentation (juin 2006)

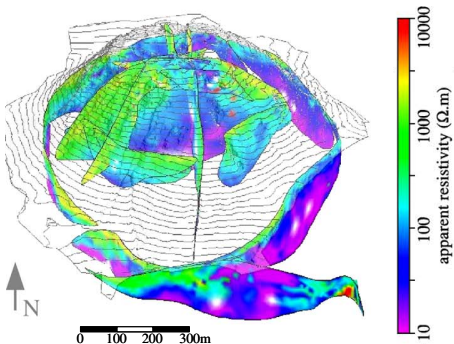


L'expérience DOMOSCAN

Objectifs :

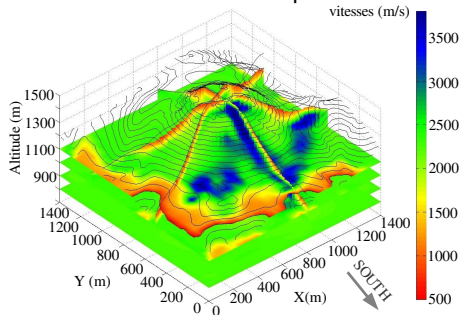
- mieux contraindre la géométrie des fractures et des zones altérées,
- évaluer le volume du système hydrothermal.

Résistivité électrique apparente



(Nicollin *et al.*, 2006)

Vitesses sismiques



(Coutant *et al.*, en prep.)

(Expérience DOMOSCAN financée par l'ANR)

La tomographie par muons

Atténuation du flux de muons à travers la matière,
mesure l'**opacité** de la roche : $\varrho = \int_L \rho(x) dx$ (g/cm²).

⇒ Dédution de la distribution de **masse volumique** afin de :

- caractériser la nature des roches ; contenu en eau, altération ;
- observer des transferts de masse.

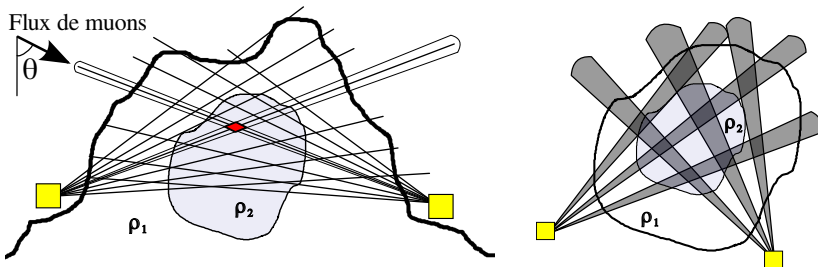
La tomographie par muons

Atténuation du flux de muons à travers la matière, mesure l'**opacité** de la roche : $\varrho = \int_L \rho(x) dx$ (g/cm²).

⇒ Déduction de la distribution de **masse volumique** afin de :

- caractériser la nature des roches ; contenu en eau, altération ;
- observer des transferts de masse.

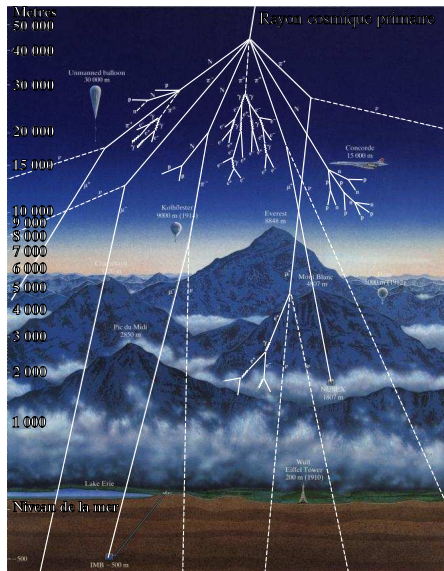
⇒ **Résolution** dépend de la géométrie du réseau de détecteurs.



(Alvarez *et al.* 1970 ; Nagamine 1995 ; Tanaka *et al.* 2005, 2007).

Intérêt des muons

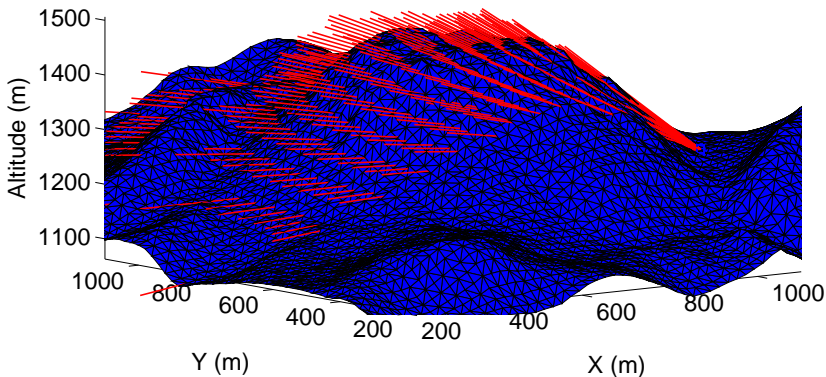
- Production de muons dans les cascades atmosphériques.
- Muons : particules chargées de faible section efficace
→ capacité de traverser les premiers kilomètres de la croûte terrestre.



La modélisation du flux de muons

Estimation du flux de muons :

- connaissance de la topographie et de la géologie du milieu,
- modélisation du détecteur,
- calcul des opacités de roche traversée,
- évaluation des pertes d'énergie,
- estimation du flux de muons.

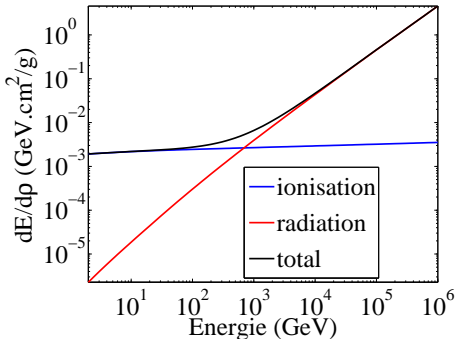


Les pertes d'énergie à travers la matière

Les pertes d'énergie sont dues à l'ionisation et à des processus radiatifs, absorption des muons les moins énergétiques à travers la matière.

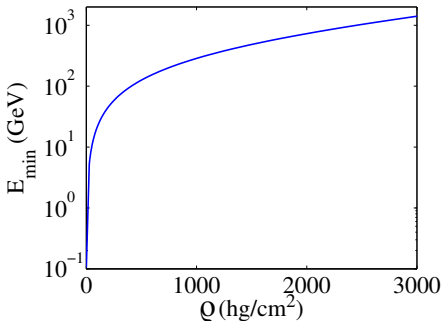
Pertes d'énergie $\frac{dE}{d\varrho}$:

$$\frac{dE}{d\varrho}_{\text{Tot.}} = \frac{dE}{d\varrho}_{\text{ion.}} + \frac{dE}{d\varrho}_{\text{rad.}}$$



Énergie minimale $E_{\min}(\varrho)$:

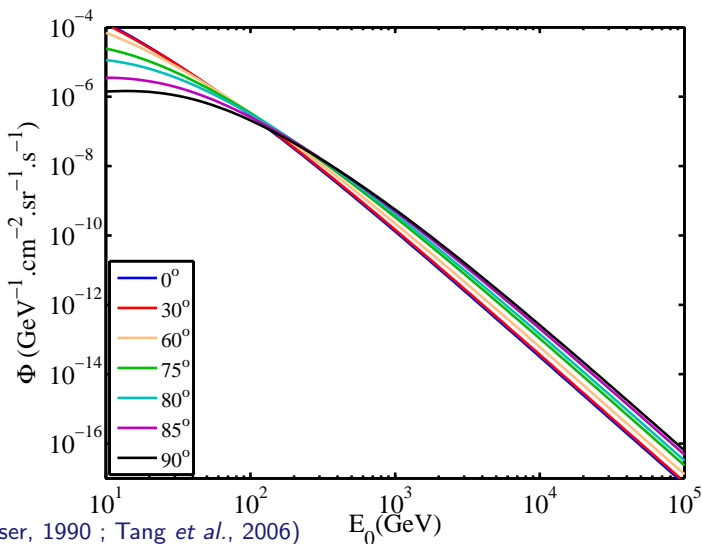
$$E_{\min}(\varrho) = E_{\mu} + \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho}_{\text{Tot.}} d\varrho$$



(Particle Data Group : Groom *et al.*, 2001 ; Bichsel *et al.*, 2010.)

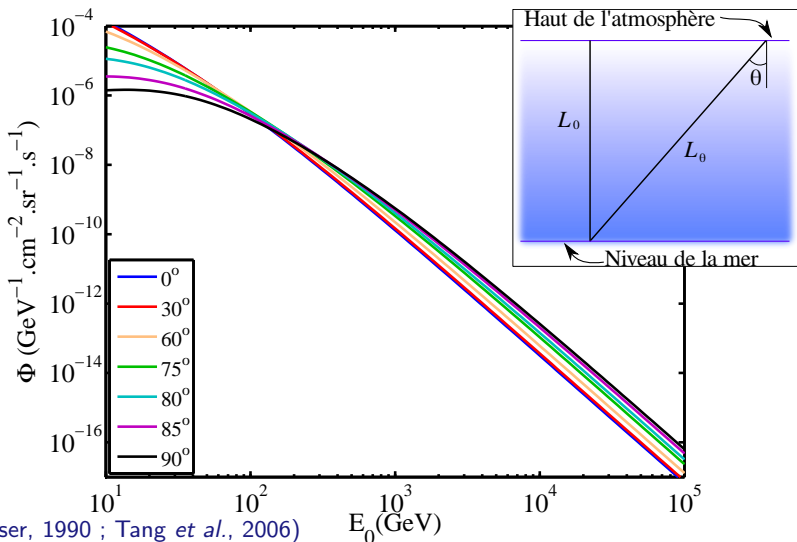
Le spectre énergétique des muons

Particules par unité d'énergie, de surface, d'angle solide et de temps.



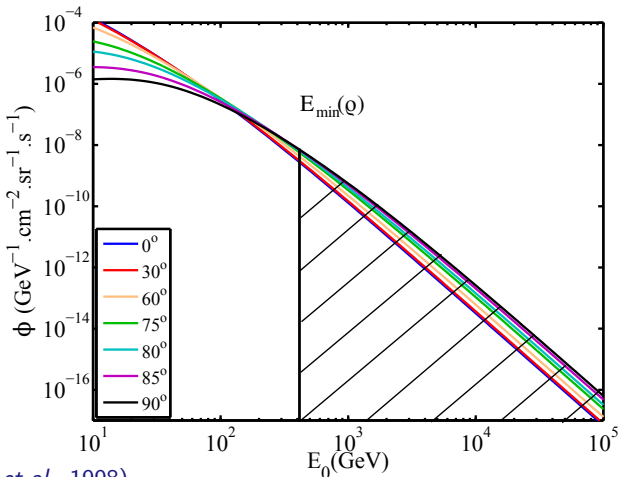
Le spectre énergétique des muons

Particules par unité d'énergie, de surface, d'angle solide et de temps.



Intégration du spectre énergétique

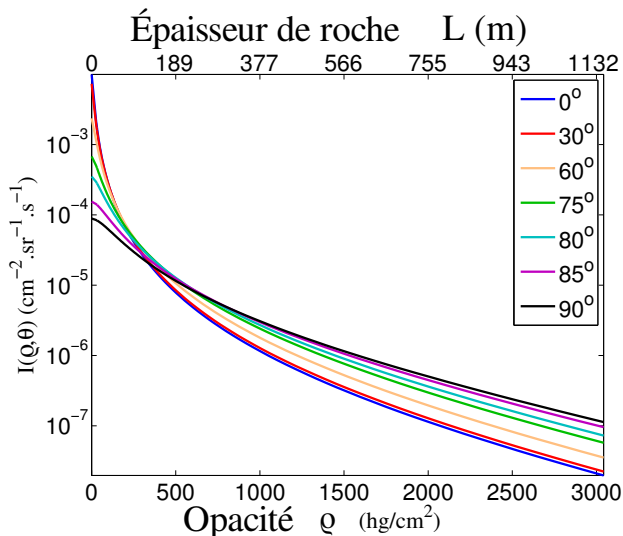
$$\rightarrow I(\varrho, \theta) = \int_{E_{\min}(\varrho)}^{\infty} \Phi(E_0, \theta) dE \text{ (cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$



(Agietta et al., 1998)

Le flux de muons souterrain

Particules par unité de surface, d'angle solide et de temps.



$$\theta = 70^\circ$$

$$\rho = 2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\mathcal{T} = 20 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$$

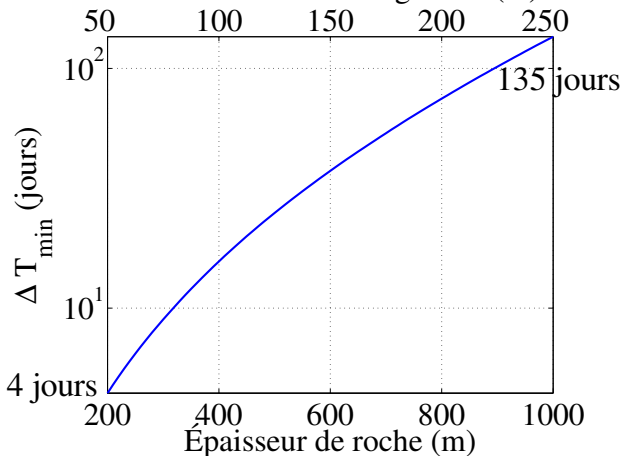
Épaisseur de roche	Flux de muons
50 m	243 par jour
100 m	75 par jour
500 m	2 par jour
1000 m	0,1 par jour

La durée minimale d'acquisition

Conditions expérimentales requises pour distinguer une hétérogénéité

$$\Rightarrow \Delta T \times \mathcal{T} > \frac{I(\varrho_0)}{\Delta I^2(\varrho_0, \delta \varrho)}$$

Dimension de l'hétérogénéité (m)



Exemple :

$$\mathcal{T} = 20 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$$

$$\rho_0 = 2,2 \text{ g/cm}^3$$

$$\delta \rho = 0,4 \text{ g/cm}^3$$

Dimension :

25% celle de l'objet.

Des télescopes à muons sur le terrain

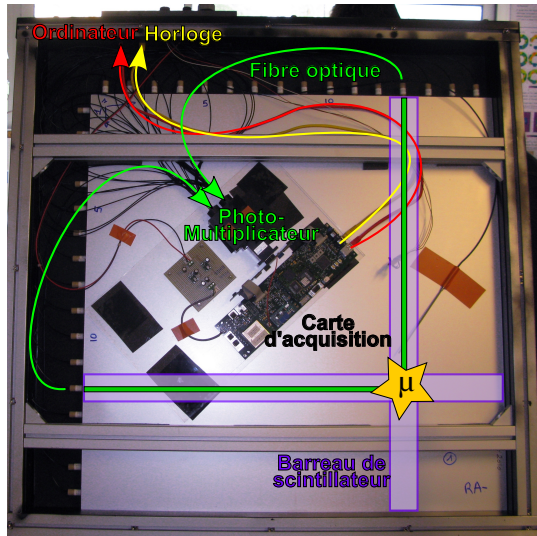
Adaptation des détecteurs de muons de l'expérience OPERA, conditionnés pour des applications géophysiques.



Financement BQR de l'IPGP, collaborations avec Géosciences Rennes et l'IPNL

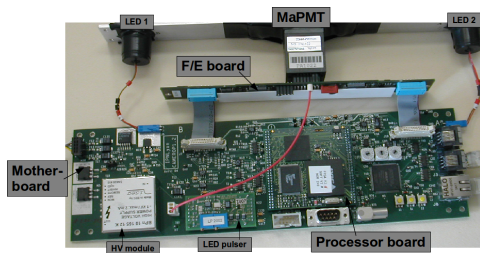
La détection de particules chargées

- Les barreaux de scintillateur forment un échiquier
→ localisation de l'interaction.
- Processus d'ionisation :
interaction entre le muon et le détecteur
→ émission de photons dans la matière scintillante.
- Conversion du signal lumineux en signal électrique.



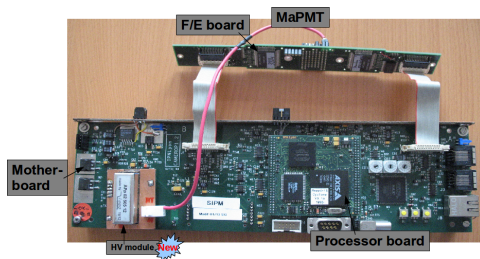
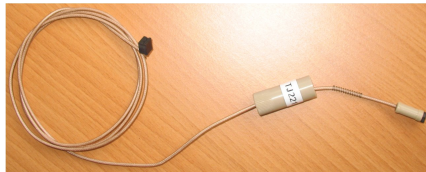
Derniers développements technologiques

- Horloge à la ns
 - Amélioration de la précision du marquage temporel
- Mise en place de SiPM à la place des MaPMT
 - Réduction du cross-talk
 - Meilleure statistique sur les photons détectés
 - Gain en efficacité de détection des muons
- Électronique simplifiée, amplificateur haut gain
 - Sélection externe ou à déclenchement automatique
- Adaptation de la front-end
 - Possibilité de connecter des télescopes hybrides

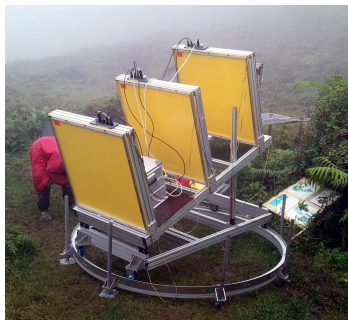
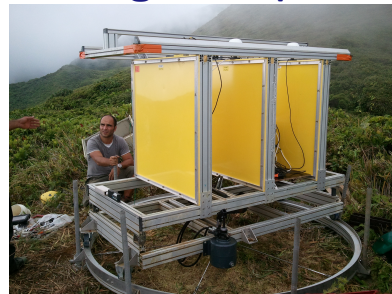


Derniers développements technologiques

- Horloge à la ns
 - Amélioration de la précision du marquage temporel
- Mise en place de SiPM à la place des MaPMT
 - Réduction du cross-talk
 - Meilleure statistique sur les photons détectés
 - Gain en efficacité de détection des muons
- Électronique simplifiée, amplificateur haut gain
 - Sélection externe ou à déclenchement automatique
- Adaptation de la front-end
 - Possibilité de connecter des télescopes hybrides

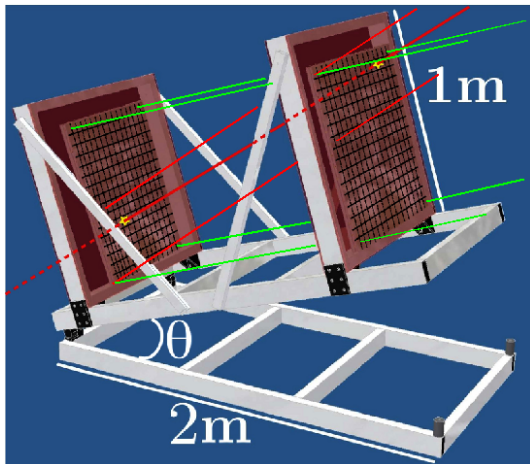


Derniers développements ergonomiques



La reconstitution de la trajectoire des particules détectées

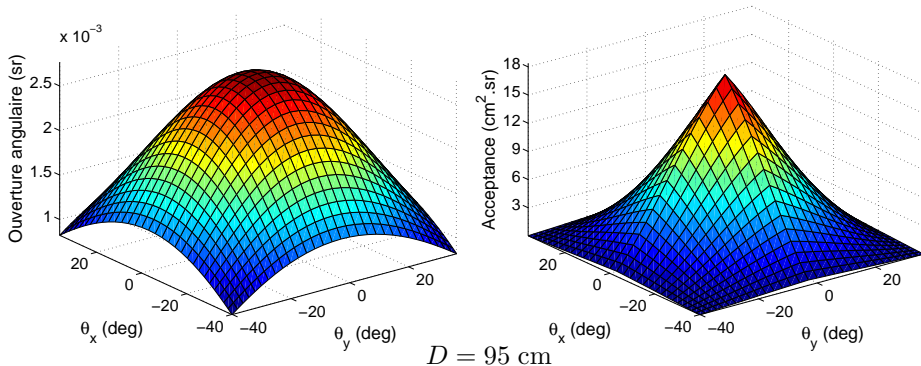
- Détection simultanée d'une particule par deux matrices parallèles,
- Matrices 16×16 pixels
→ combinaison de 961 angles de vue.



La modélisation des propriétés du télescope

Distance entre les matrices influence :

- l'ouverture angulaire du capteur → résolution spatiale,
- la capacité de détection du capteur → acceptance \mathcal{T} du télescope.



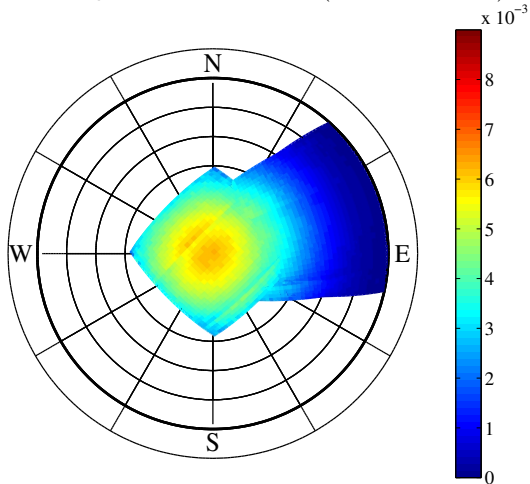
Calibration des télescopes à muons

Mesures à ciel ouvert pour obtenir une statistique importante
Analyse des événements détectés par l'avant/l'arrière du télescope

- Ajustement des efficacités des barreaux de scintillateur
- Ajustement des horloges

⇒ Utilisation du recuit simulé

Flux de particules détectées ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)



Calibration des télescopes à muons

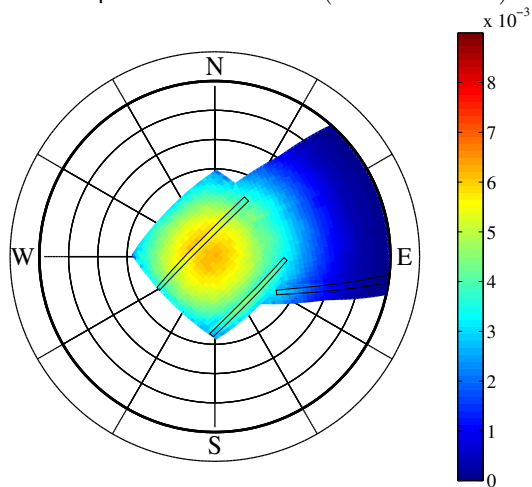
Mesures à ciel ouvert pour obtenir une statistique importante

Analyse des événements détectés par l'avant/l'arrière du télescope

- Ajustement des efficacités des barreaux de scintillateur
- Ajustement des horloges

⇒ Utilisation du recuit simulé

Flux de particules détectées ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)



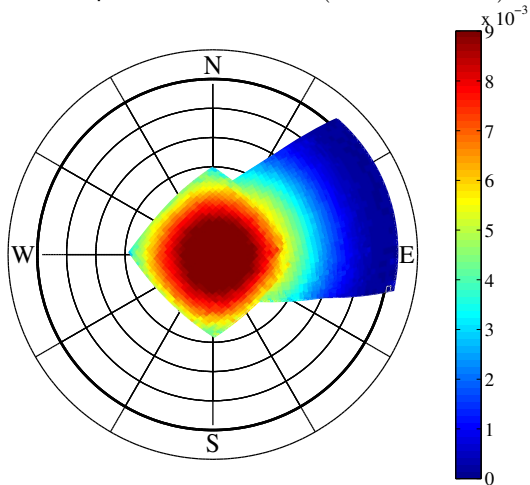
Calibration des télescopes à muons

Mesures à ciel ouvert pour obtenir une statistique importante
Analyse des événements détectés par l'avant/l'arrière du télescope

- Ajustement des efficacités des barreaux de scintillateur
- Ajustement des horloges

⇒ Utilisation du recuit simulé

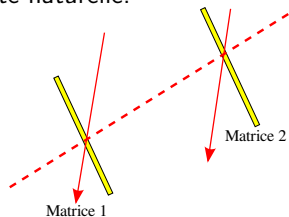
Flux de particules détectées ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)



Le bruit de fond

Produit par **toute particule chargée** : électrons/positrons issus des cascades de rayons cosmiques ou de la radioactivité naturelle.

- Bruit de fond décorrélé : émis par des particules distinctes détectées simultanément par les différentes matrices



Taux de coïncidences fortuites

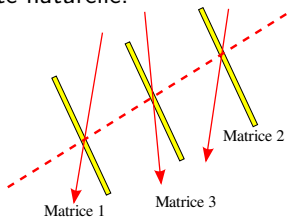
2 Matrices	
~ 1/heure	

Le bruit de fond

Produit par **toute particule chargée** : électrons/positrons issus des cascades de rayons cosmiques ou de la radioactivité naturelle.

- Bruit de fond décorrélé : émis par des particules distinctes détectées simultanément par les différentes matrices

→ Mise en place d'une **troisième matrice de détection**



Taux de coïncidences fortuites

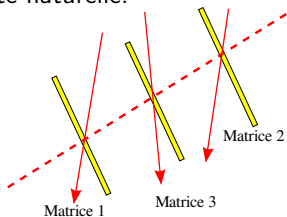
2 Matrices	3 Matrices
~ 1/heure	~1/30 ans

Le bruit de fond

Produit par **toute particule chargée** : électrons/positrons issus des cascades de rayons cosmiques ou de la radioactivité naturelle.

- Bruit de fond décorrélé : émis par des particules distinctes détectées simultanément par les différentes matrices

→ Mise en place d'une **troisième matrice de détection**

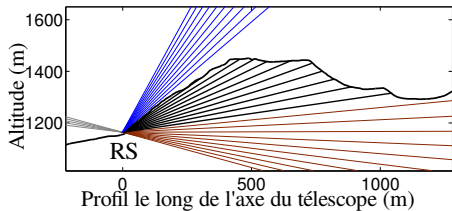


Taux de coïncidences fortuites

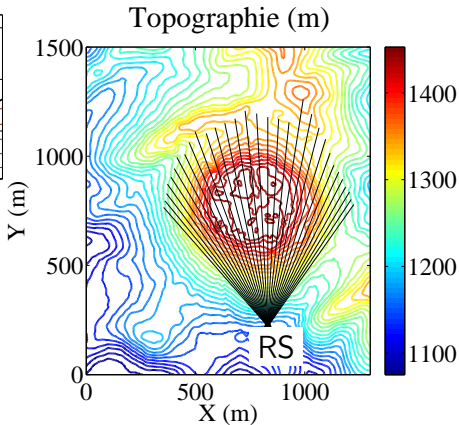
2 Matrices	3 Matrices
~ 1/heure	~1/30 ans

- Bruit de fond corrélé : produit par les particules dont l'énergie est suffisante pour traverser l'ensemble du télescope
→ Mise en place d'**écrans d'absorption**.

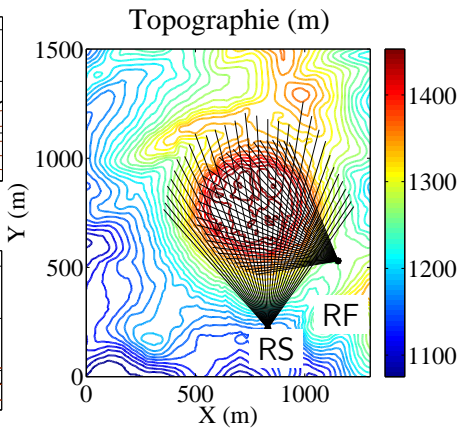
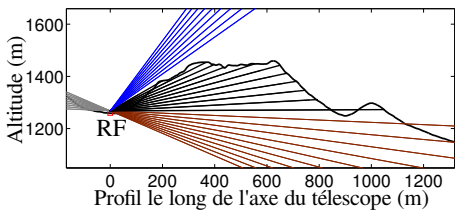
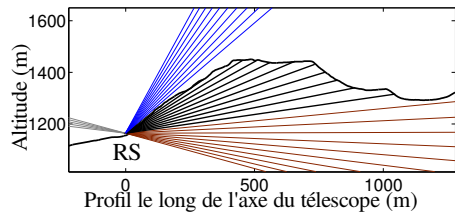
La configuration du réseau d'acquisition



Ouverture angulaire = 3°
⇒ résolution spatiale $\sim 25\text{m}$.

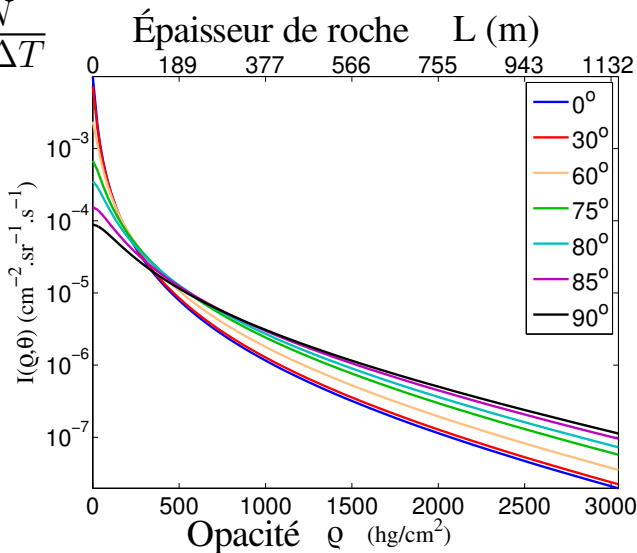


La configuration du réseau d'acquisition



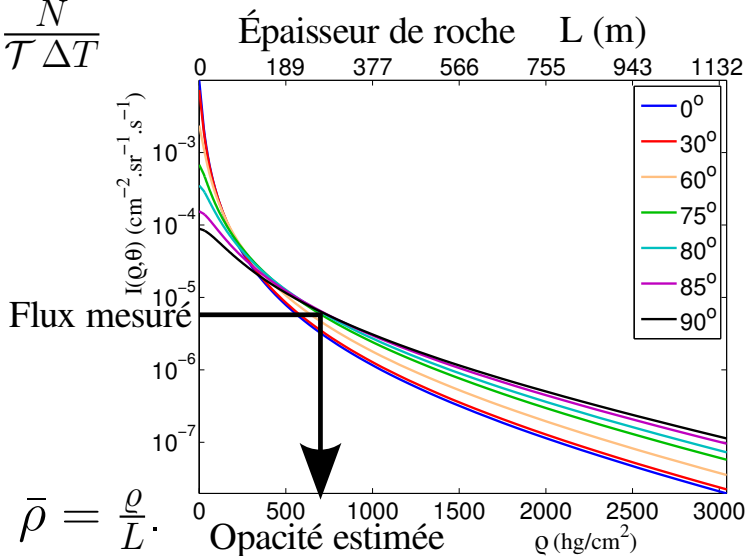
Vers une imagerie de masse volumique

$$I = \frac{N}{T \Delta T}$$

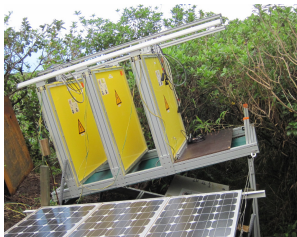


Vers une imagerie de masse volumique

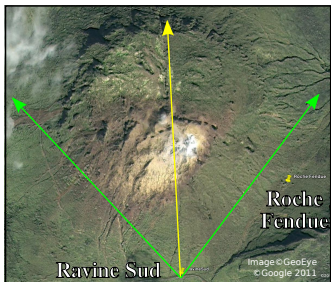
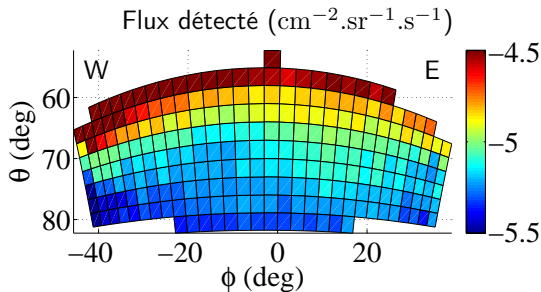
$$I = \frac{N}{T \Delta T}$$



Première tomographie depuis Ravine Sud

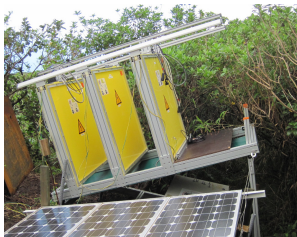


$\Delta T = 82$ jours.
altitude = 1163 m.

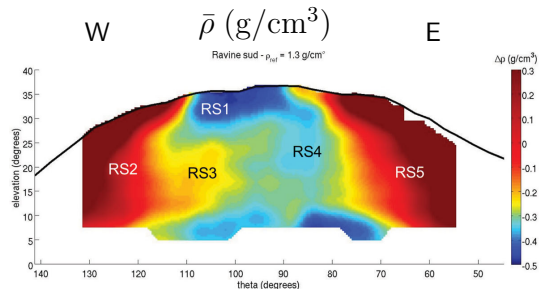
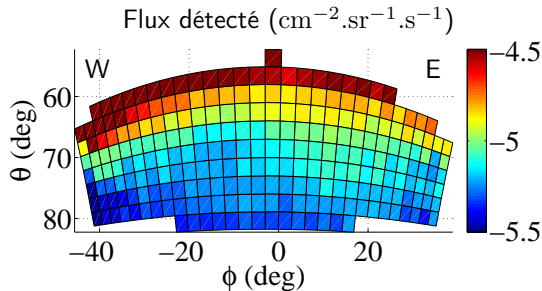
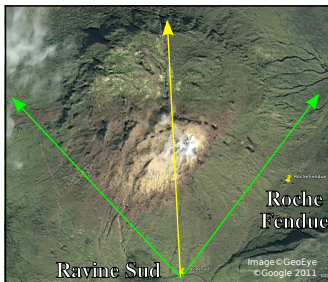


θ	Épaisseur de roche	Flux de muons
45°	0 m	698 par jour
60°	520 m	8 par jour
80°	1030 m	2 par jour

Première tomographie depuis Ravine Sud



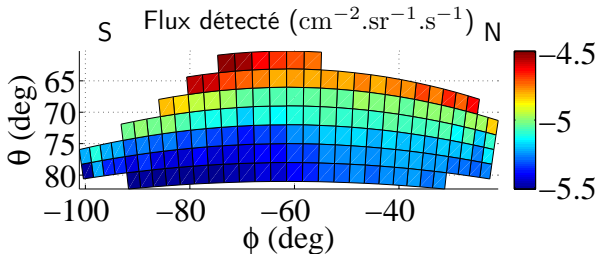
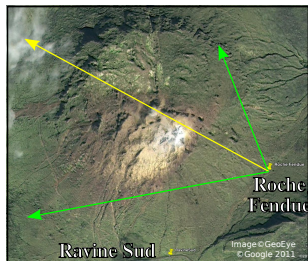
$\Delta T = 82$ jours.
altitude = 1163 m.



Tomographie depuis Roche Fendue



$\Delta T = 69$ jours.
altitude = 1268 m.



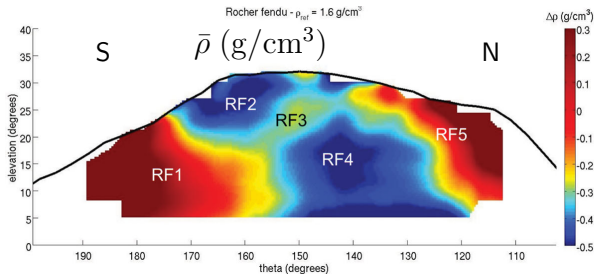
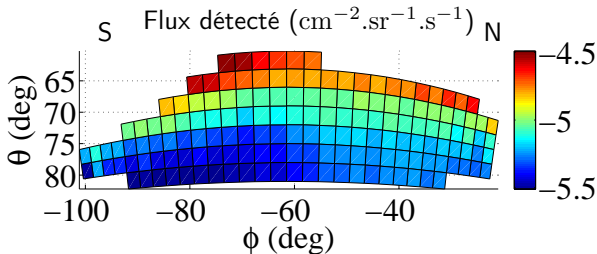
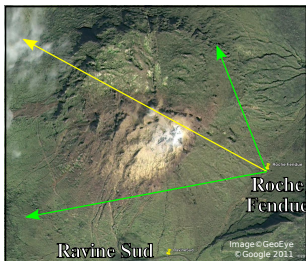
θ	Épaisseur de roche	Flux de muons
45°	0 m	685 par jour
60°	130 m	51 par jour
80°	680 m	5 par jour

Bruit de fond : 1 coïncidence fortuite / 140 ans

Tomographie depuis Roche Fendue

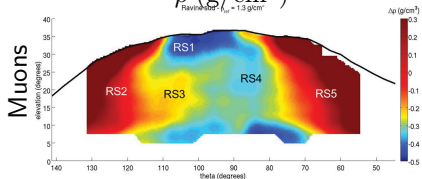


$\Delta T = 69$ jours.
altitude = 1268 m.

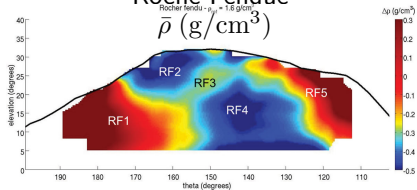
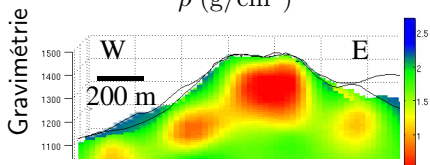
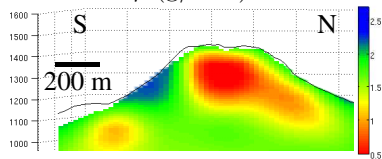


Interprétations

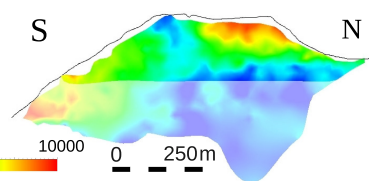
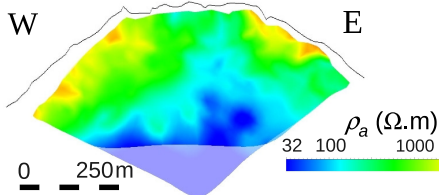
Ravine Sud

 $\bar{\rho}$ (g/cm³)Ravine Sud $\rho_{\text{air}} = 1.3 \text{ g/cm}^3$ 

Roche Fendue

Rocher fendu $\rho_{\text{air}} = 1.8 \text{ g/cm}^3$ $\bar{\rho}$ (g/cm³) ρ (g/cm³) ρ (g/cm³)

Électrique



Conclusions

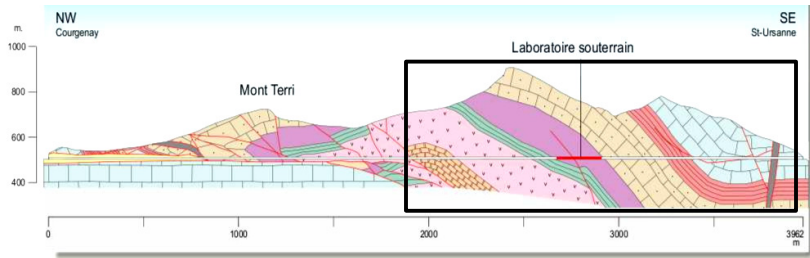
- **Instrumentation** : plus de deux ans de mesures en environnement tropical
⇒ validation du protocole de construction des télescopes et de leur adaptation au terrain.
- **Modélisation** : accord entre les modèles élaborés et les données acquises
⇒ validation des modèles développés.
- **Observations** : hétérogénéités à l'intérieur du dôme de la Soufrière de Guadeloupe
⇒ sensibilité de la méthode adaptée

Autre application : Le laboratoire souterrain du Mont Terri

→ Étude de la section d'argiles à Opalinus
matériau privilégié pour le stockage futur des
déchets radioactifs.



- Caractérisation des propriétés physiques et chimiques de cette argile,
- estimation de la faisabilité d'un dépôt de déchets radioactifs,
- mise en place d'expériences de démonstration.

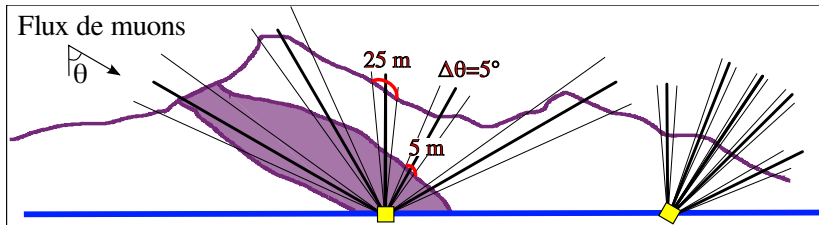


L'expérience *Muon Densitometry*

Développement méthodologique de la tomographie par muons :

- environnement géologique bien connu,
- conditions environnementales stables,
- logistique simplifiée (courant électrique, connexion Ethernet).

⇒ Préciser la géométrie des interfaces de la couche d'argile.



expérience MD financée par Swisstopo et CRIEPI



Merci !

Équation de faisabilité

$$\Delta N(\varrho_0, \delta\varrho) = \Delta T \times \mathcal{T} \times \Delta I(\varrho_0, \delta\varrho) > \delta N \quad ,$$

Distribution de Poisson $\delta N = \sqrt{N} \rightarrow$ probabilité $1 - \alpha = 0,68$,

$$N(\varrho) = \Delta T \times \mathcal{T} \times I(\varrho) \quad ,$$

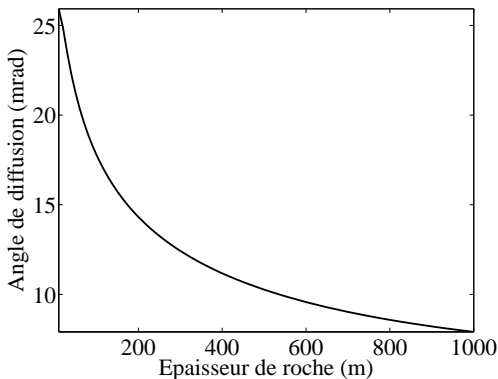
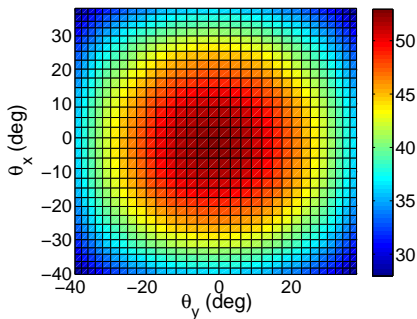
$$\Rightarrow \Delta T \times \mathcal{T} > \frac{I(\varrho_0)}{\Delta I^2(\varrho_0, \delta\varrho)} \quad .$$

Quelle est l'influence de la diffusion ?

- Diffusion aléatoire au cours de la traversée de la matière

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha}{E} \sqrt{\frac{\rho}{\xi_0}} \left(1 + \kappa \ln \frac{\rho}{\xi_0} \right) \quad ; \quad \alpha = 13,6 \text{ MeV}, \kappa = 0.038,$$

Matériau	Roche	Fe	Pb
ξ_0 (g/cm ²)	27	14	6



Bethe, 1953 ; Scott, 1963 ; Borozdin, 2003 ; Stanley, 2008.

Calcul du taux de coïncidences fortuites

Mesure en anticoïncidence du taux enregistré par chaque matrice.

Taux de coïncidences fortuites

Matrices	2	3
Estimation	$2 N_1 N_2 dt_{12}$	$4 N_1 N_2 N_3 dt_{123}^2$
Mont Terri	1/17 heures	
Soufrière de Guadeloupe	1/2 heures	1/144 ans
Ciel ouvert	1/40 minutes	1/32 ans

N_1, N_2, N_3 : taux détecté par chacune des matrices.

dt_{12}, dt_{123} : Intervalle de temps de coïncidence définissant la détection d'un événement.

Influence de la présence d'écrans d'absorption

- Énergie des électrons produits par la désintégration du ^{214}Bi
→ 3.3 MeV
- Le spectre énergétique des électrons/positrons est plus important que celui des muons pour des $E < 70$ MeV (Golden et al. 1995).

Écrans	1 Matrice	2 Matrices	3 Matrices + 25 mm fer
Opacité (g/cm^2)	2	5.8	33.4
$E_{\min} \beta$ (MeV)	3.1	9.9	108.3
$E_{\min} \mu$ (MeV)	16.3	30.4	93.2