

Auscouter les dômes volcaniques avec des rayons cosmiques ?

Sandra GONCALVES, Jacques MARTEAU
Institut de Physique Nucléaire de Lyon
Université de Lyon / CNRS-IN2P3
marteau@ipnl.in2p3.fr

Soufrière, Guadeloupe

Collaboration DIAPHANE (ANR, 2014):

IPG Paris: Dominique Gibert (co-PI), Sébastien Deroussi, Michel Diamant, Kevin Jourde, Jean-Christophe Komorowski, Nolwenn Lesparre, Jean-Jacques Sibilla, Olivier Sirol

IPN Lyon: Jacques Marteau (co-PI), Bruno Carlus, Maryté Costa, Serge Gardien, Claude Girerd, Sandra Goncalves, Jean-Christophe Ianigro, Jean-Luc Montorio, Franck Mounier, Alexis Eynard, Alain Benoît, George Verdier, Titi Alliaume

Géosciences Rennes: Jean de Bremond d'Ars (co-PI), Bruno Kergosien, Florence Nicollin, Pascal Rolland

Observatoires OVSG (Guadeloupe), EOS (Singapour), Phivolcs (Philippines), Laboratoire du Mont-Terri (Swisstopo), Laboratoire de Tournemire (IRSN)

Autres collaborateurs : Daniele Carbone (INVG Catane), Fabrice Dufour, Quentin Gibert, Benoît Taisne (EOS Singapour), Nolwenn Lesparre (IRSN)

Quelques risques volcaniques

Les dômes volcaniques sont des structures instables, lacunaires, contenant de grandes quantités d'énergie thermique dans leurs réservoirs hydrothermaux.

Les volcans "tropicaux" sont soumis à une altération importante du fait des fortes pluies reçues régulièrement

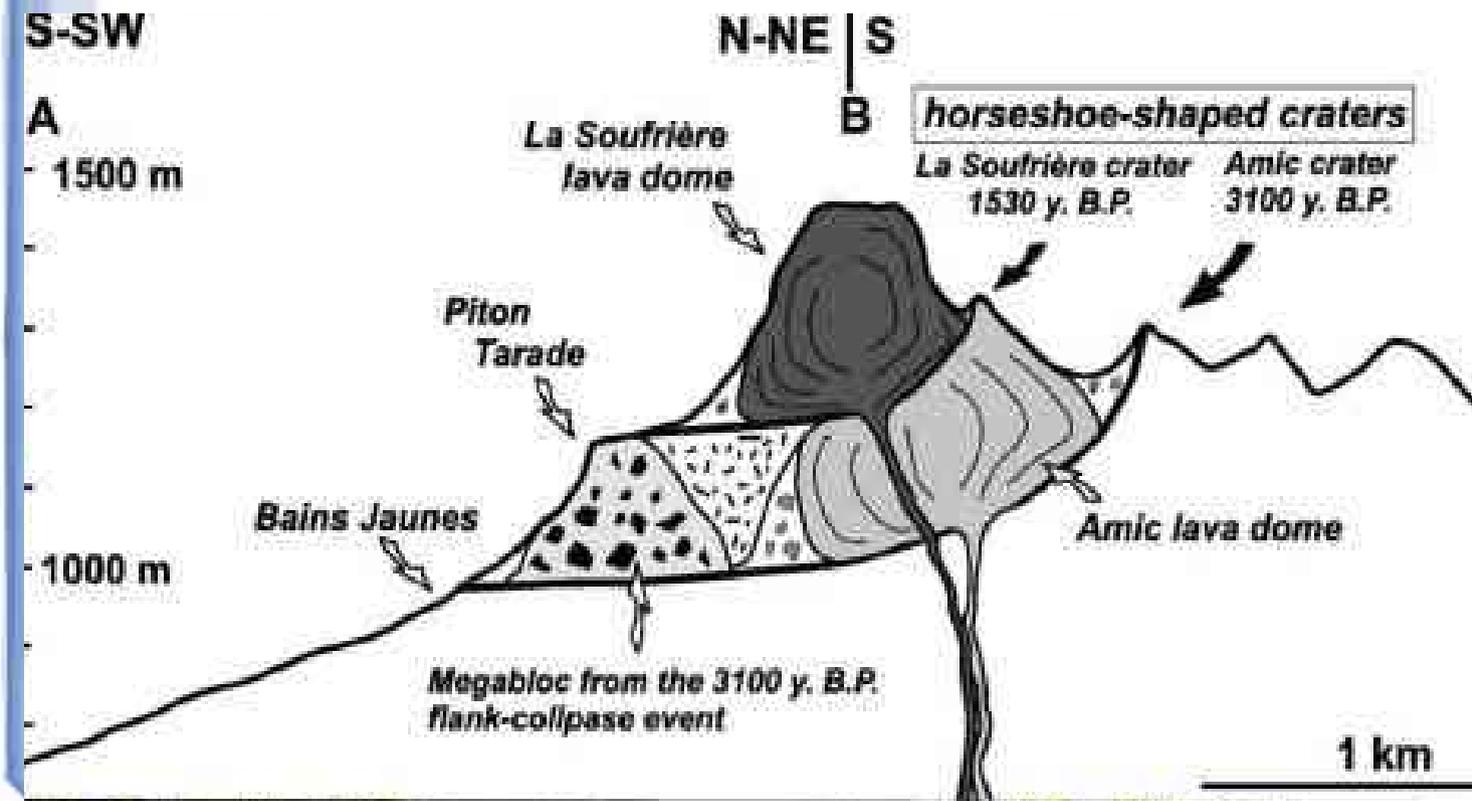


Schéma de la Soufrière de Guadeloupe, d'après Boudon et al, J.Volcanol. Geotherm. Res. (2008)

Les éruptions phréatiques

Les éruptions phréatiques et l'effondrement du dôme sont les risques principaux pour ce type de volcan

- Eruption phréatique = libération de l'énergie thermique contenue dans les réservoirs hydrothermaux (facteur déclenchant ?)
- L'effondrement du dôme peut être déclenché par une surpression, un léger tremblement de terre etc (circonstances aggravantes ?)

Fumerolle active pendant l'éruption de 1976



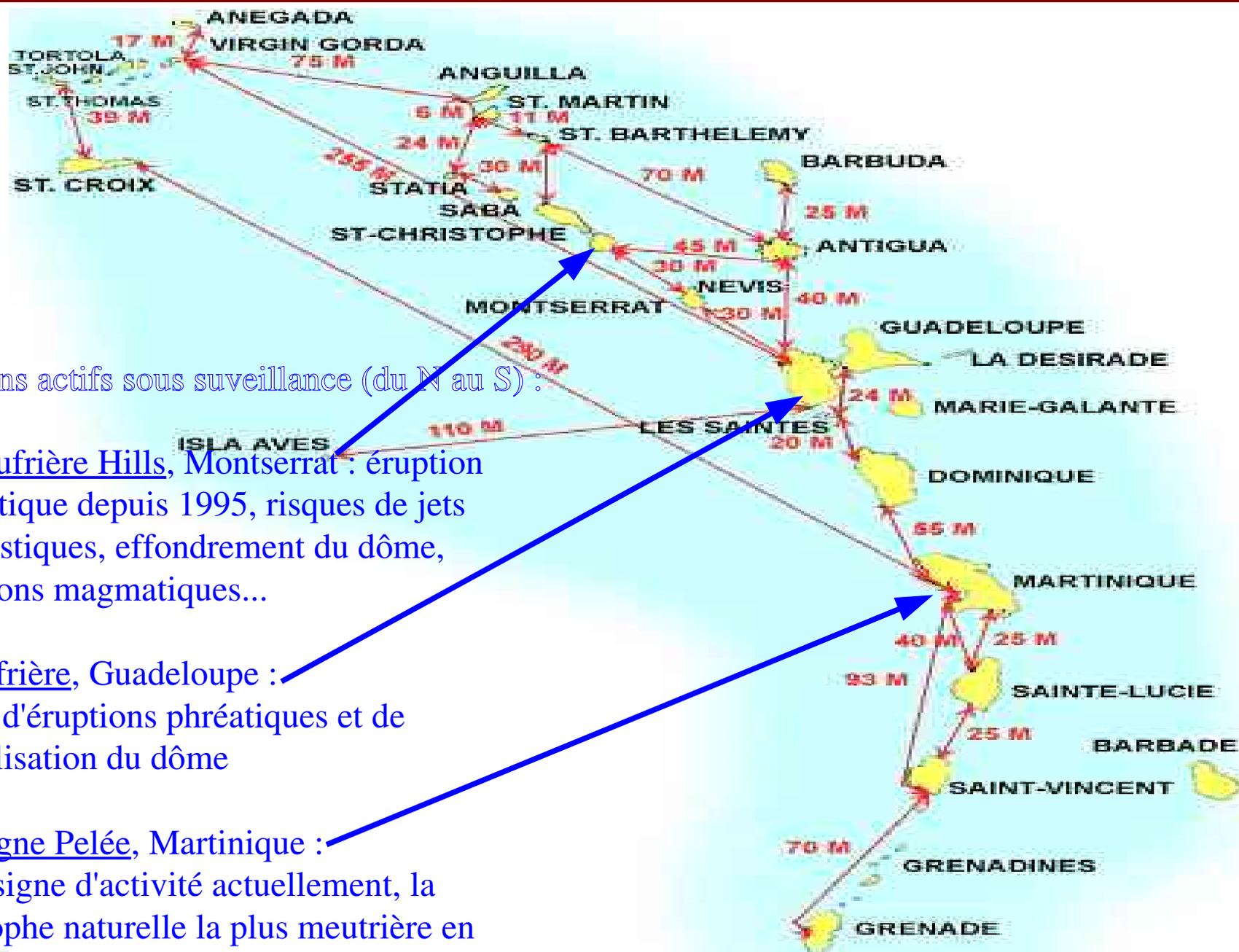
(c) 1976, M. Bof

... la même en 2010



2010, Q. Gibert

La surveillance étendue : ceinture des petites Antilles



3 volcans actifs sous surveillance (du N au S) :

The Soufrière Hills, Montserrat : éruption magmatique depuis 1995, risques de jets pyroclastiques, effondrement du dôme, explosions magmatiques...

La Soufrière, Guadeloupe : risques d'éruptions phréatiques et de déstabilisation du dôme

Montagne Pelée, Martinique : pas de signe d'activité actuellement, la catastrophe naturelle la plus meurtrière en France (1910)

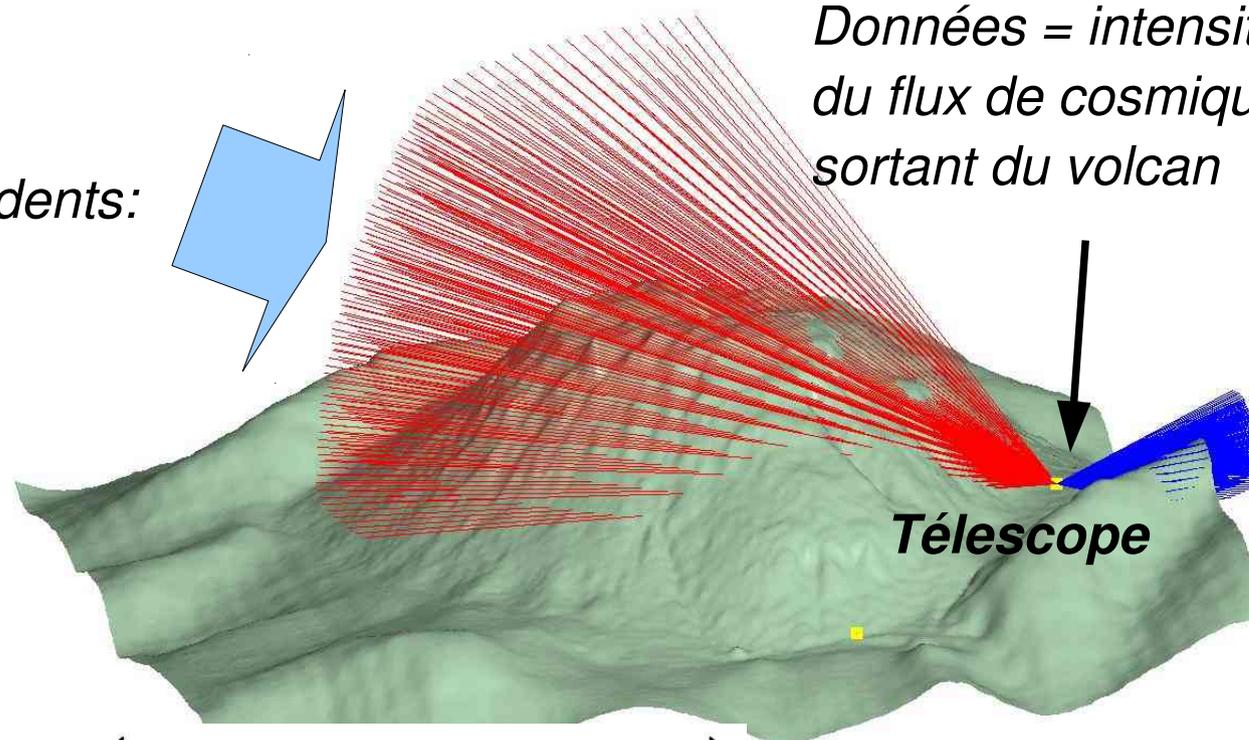
Radiographier avec des cosmiques

La perte d'énergie des particules lors de leur parcours est essentiellement contrôlée par la quantité de matière rencontrée
 => "radiographie clinique" par contraste de densité



Röntgen, 22 déc. 1895.

Flux de muons
 cosmiques incidents:
 $dN_{\mu}/dE_{\mu} d\Omega$



Données = intensité
 du flux de cosmiques
 sortant du volcan

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu} d\Omega} \approx \frac{0,14 E_{\mu}^{-2,7}}{\text{cm}^2 \text{ s sr GeV}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1,1 E_{\mu} \cos \theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0,054}{1 + \frac{1,1 E_{\mu} \cos \theta}{850 \text{ GeV}}} \right\}$$

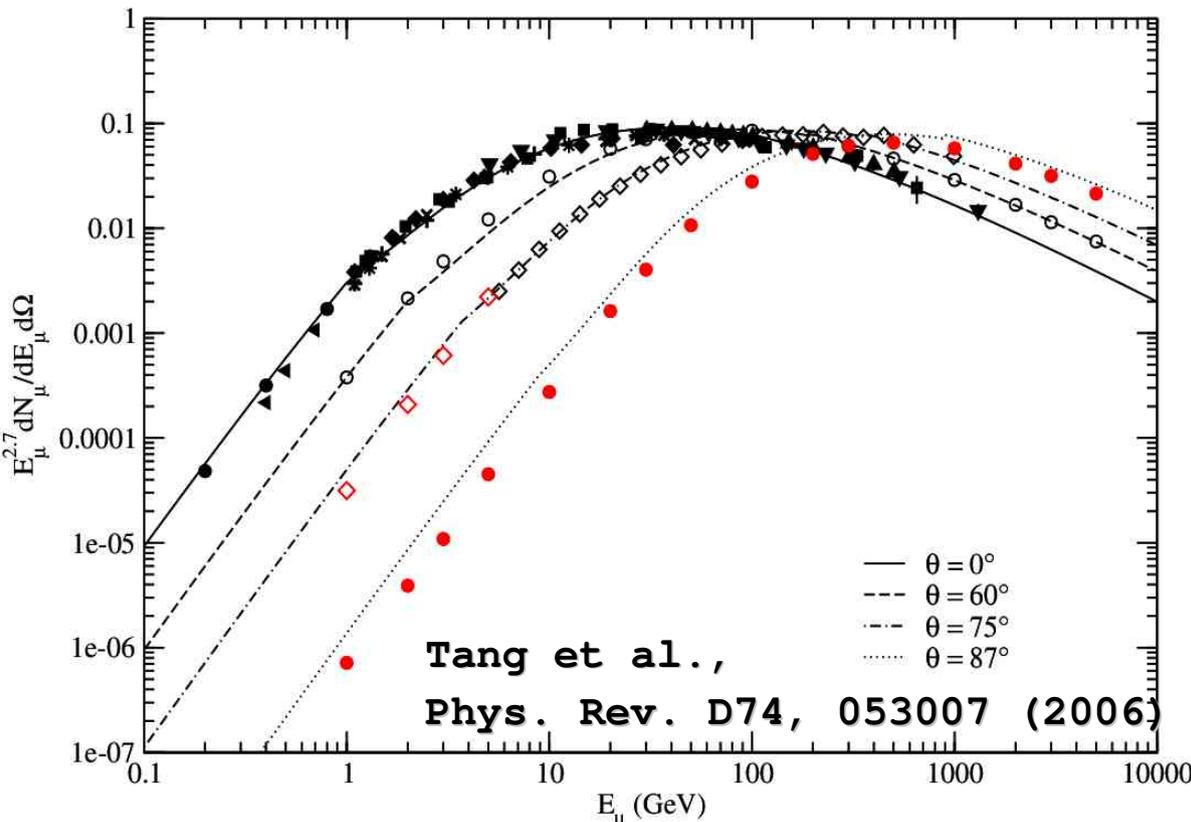
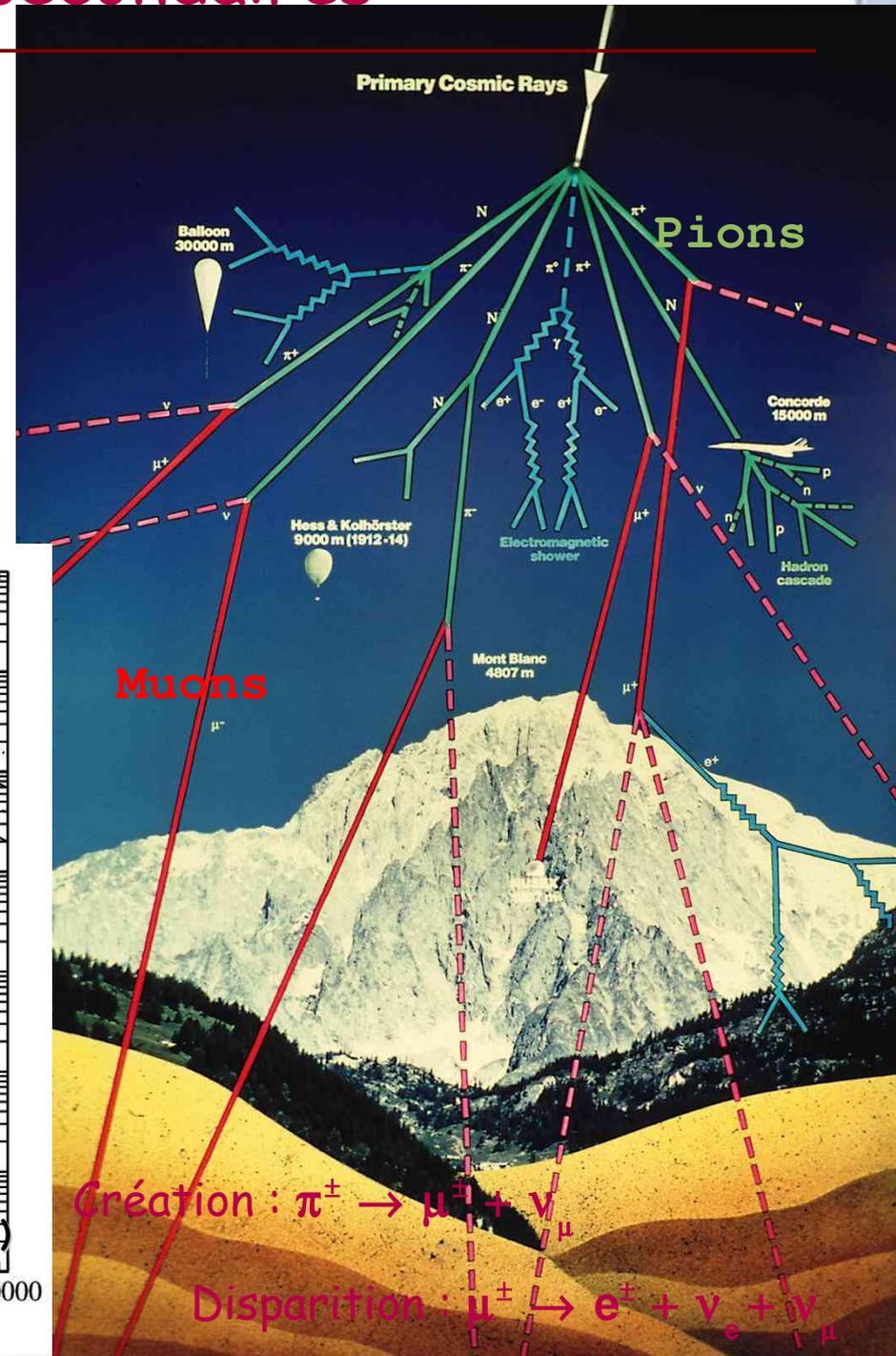
Méthode complémentaire à la gravimétrie, la tomo électrique, la sismologie.

Rayons cosmiques primaires et secondaires

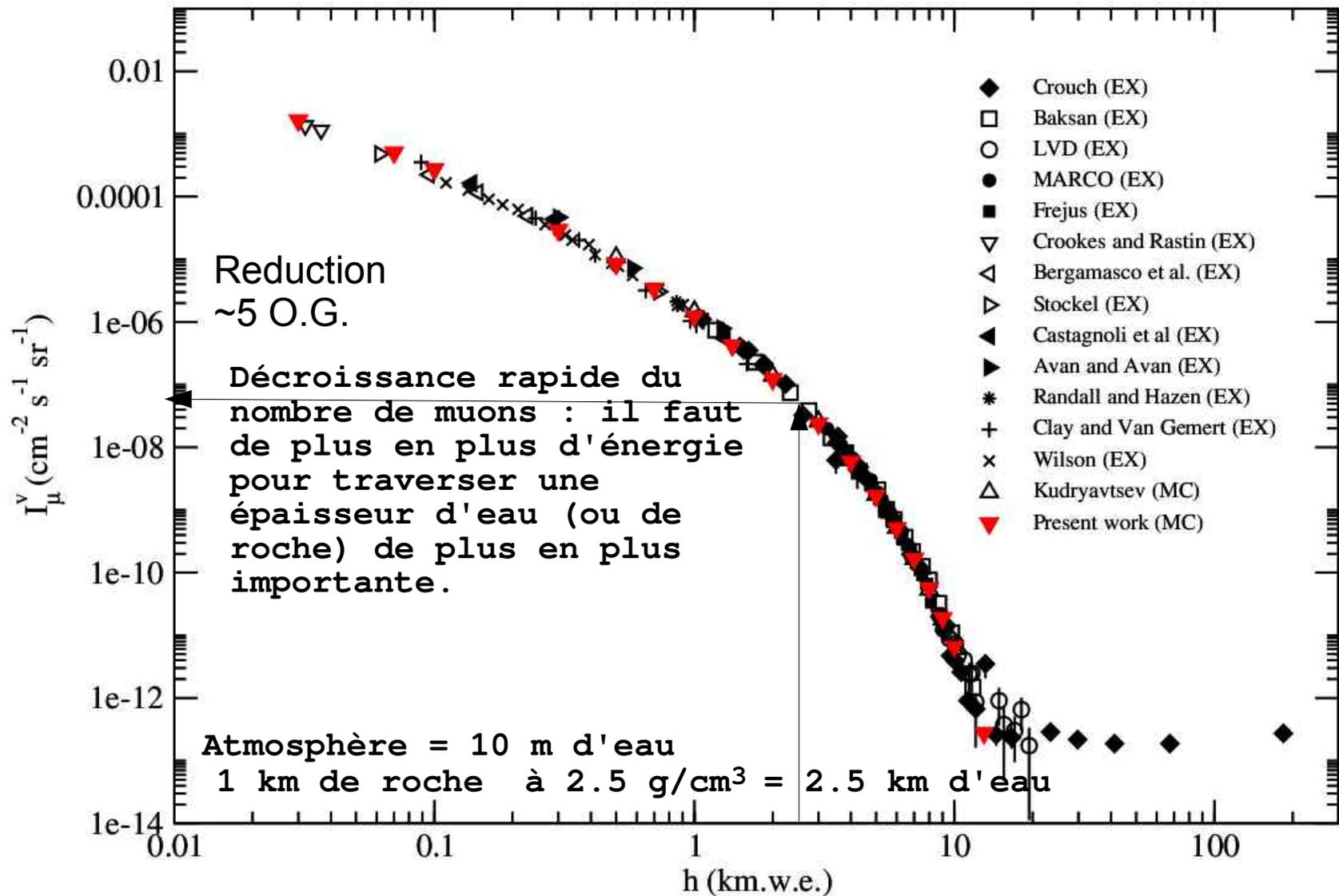
1938 - Walther Bothe (Nobel 1954) invente la détection coïncidente.

Pierre Auger découvre les "gerbes cosmiques"

Les muons sont les particules d'intérêt géophysique car ils peuvent traverser plusieurs kilomètres de roches.

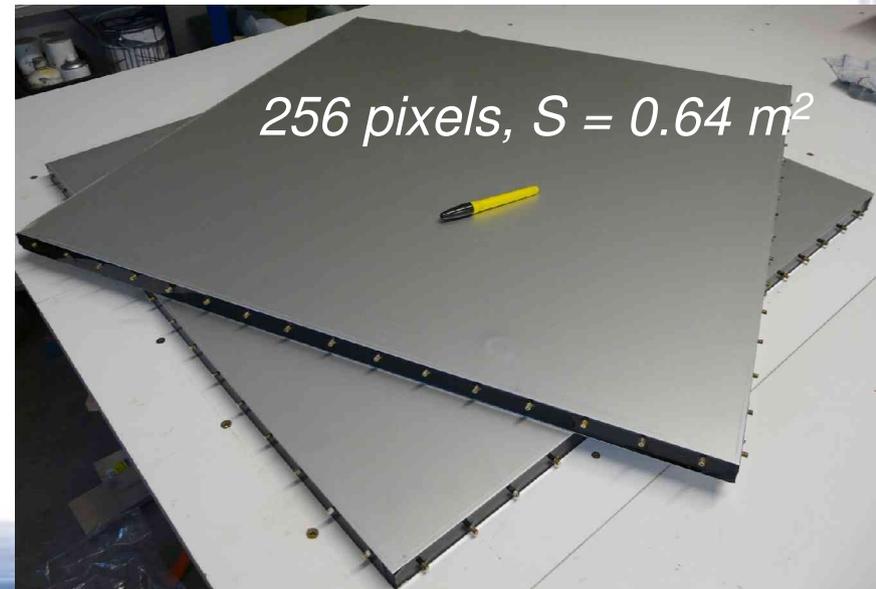
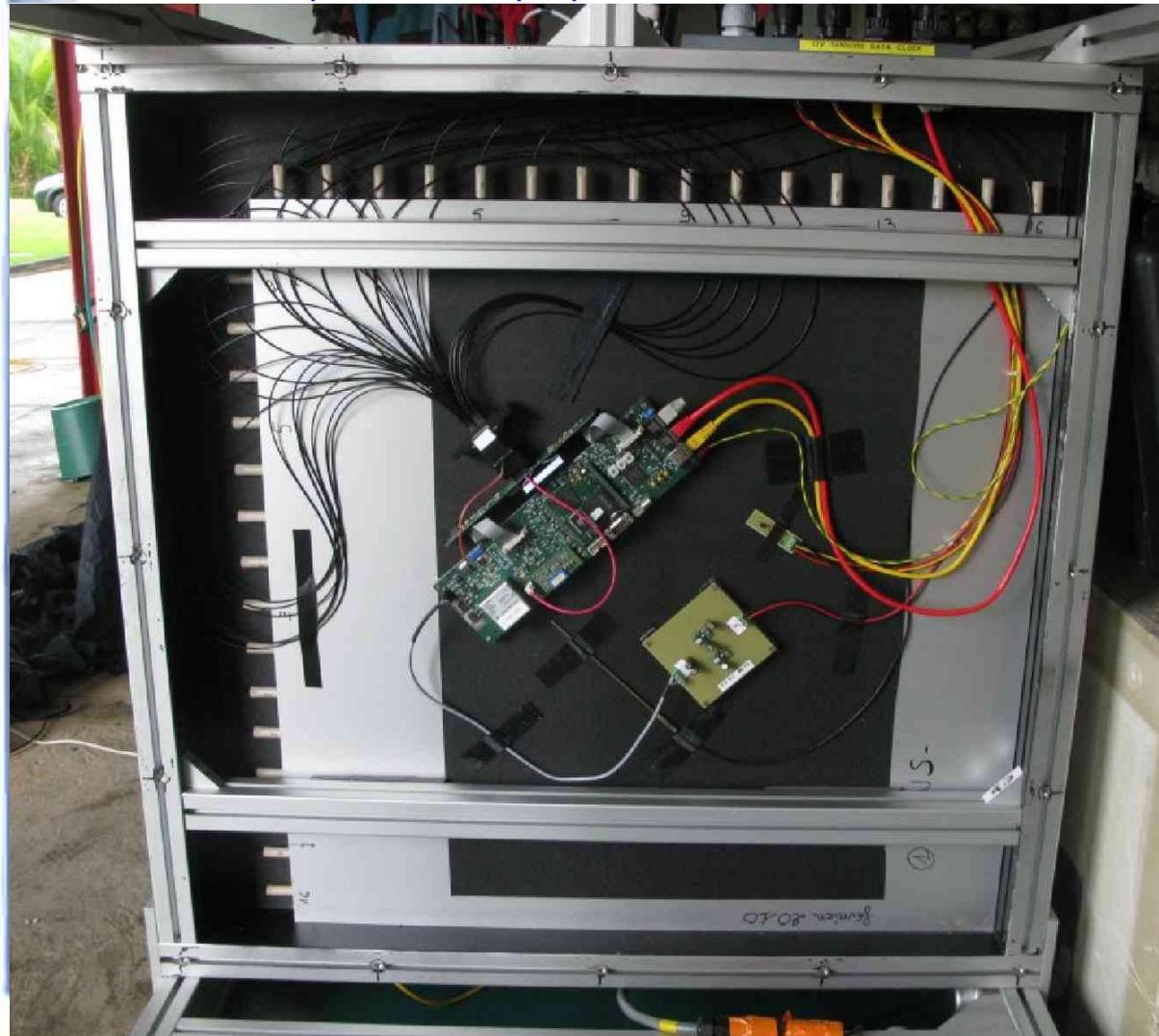


Interactions des muons avec la matière



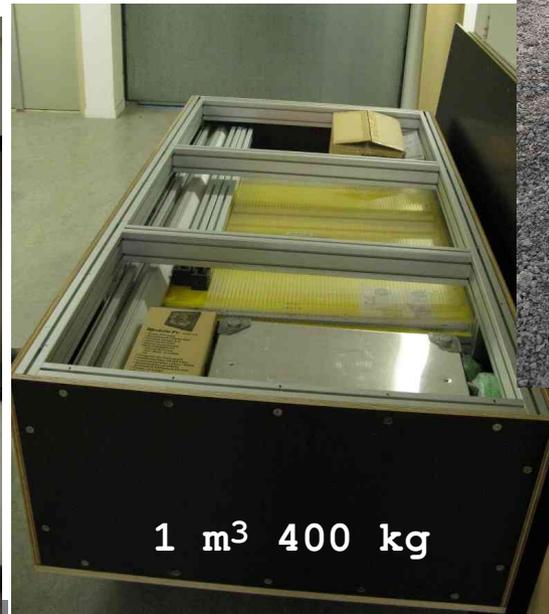
Les matrices de détection

- 256 = 16 x 16 pixels. Scintillateurs + WLS + MaPMT/SiPM
- Même électronique pour tous les types de matrices / photodétecteurs
- Électronique adaptée de celle de l'expérience OPÉRA.
- Clock commune verrouillée sur le GPS
- Vernier temporel à 100ps pour les mesures de *tof*



Intégration des télescopes

- Modulaires, hélitreuillables, adaptés aux techniques de travaux sur cordes.
- Résistants aux conditions climatiques difficiles.
- Autonomes, faible conso. et contrôlables à distance.



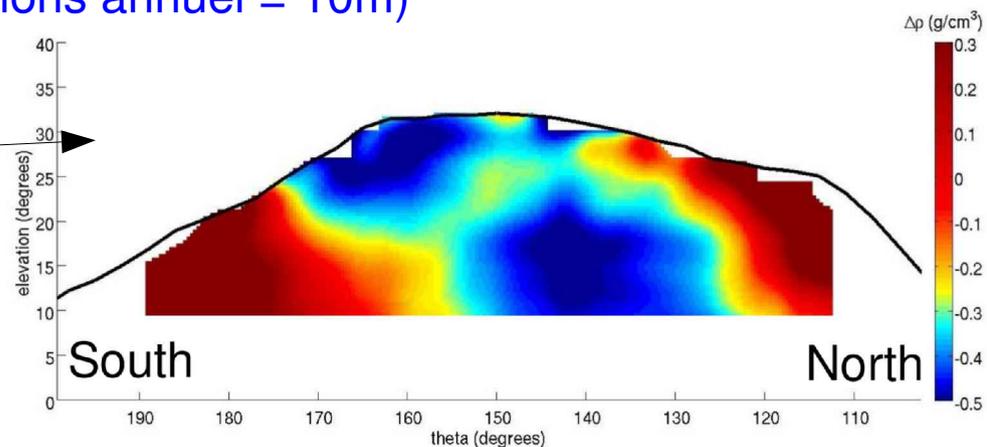
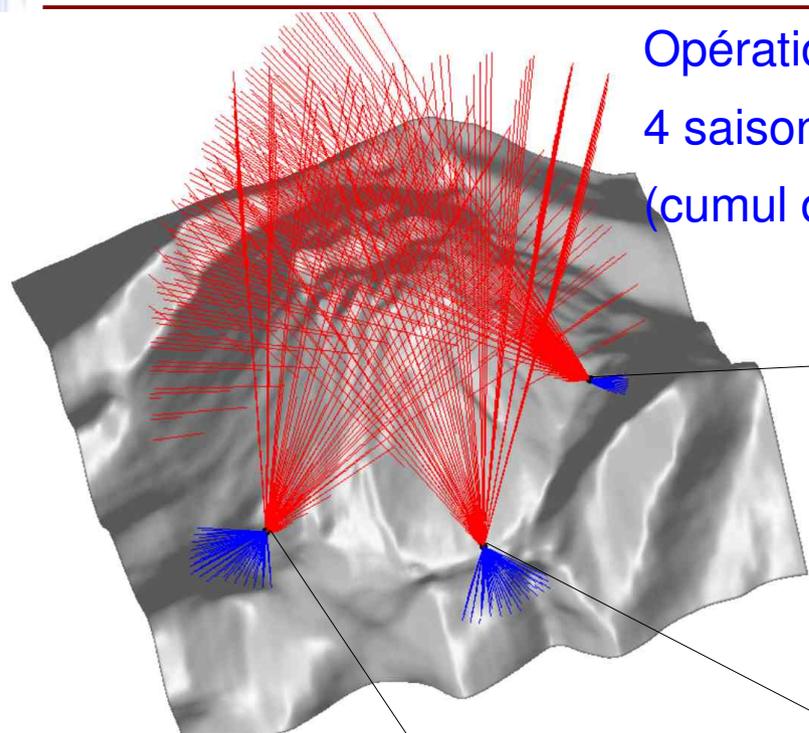
Sur la Soufrière de Guadeloupe

Opération sur plus de 4 ans

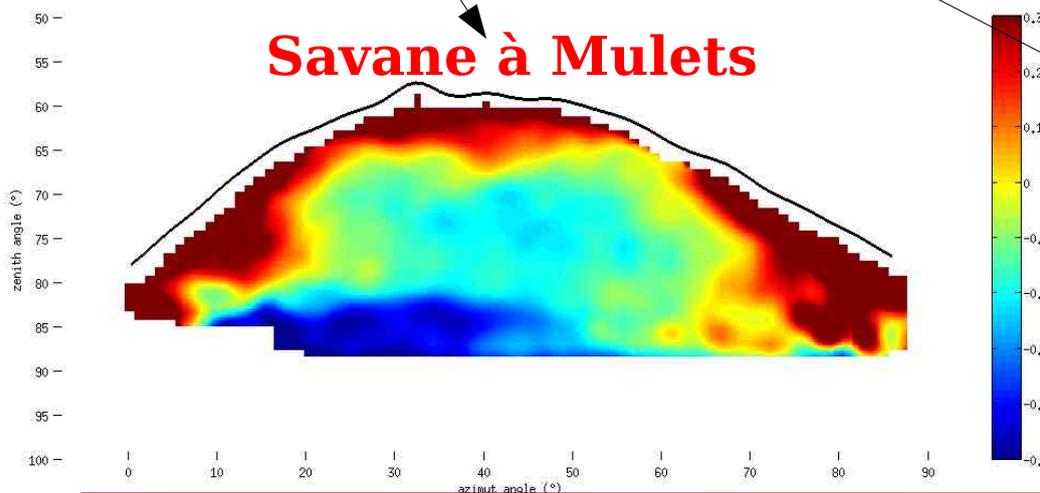
4 saisons des cyclones

(cumul de précipitations annuel = 10m)

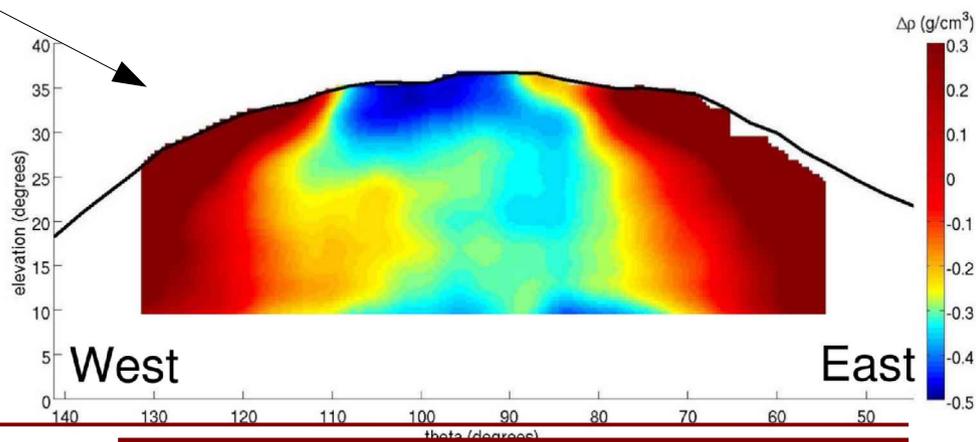
Rocher Fendu



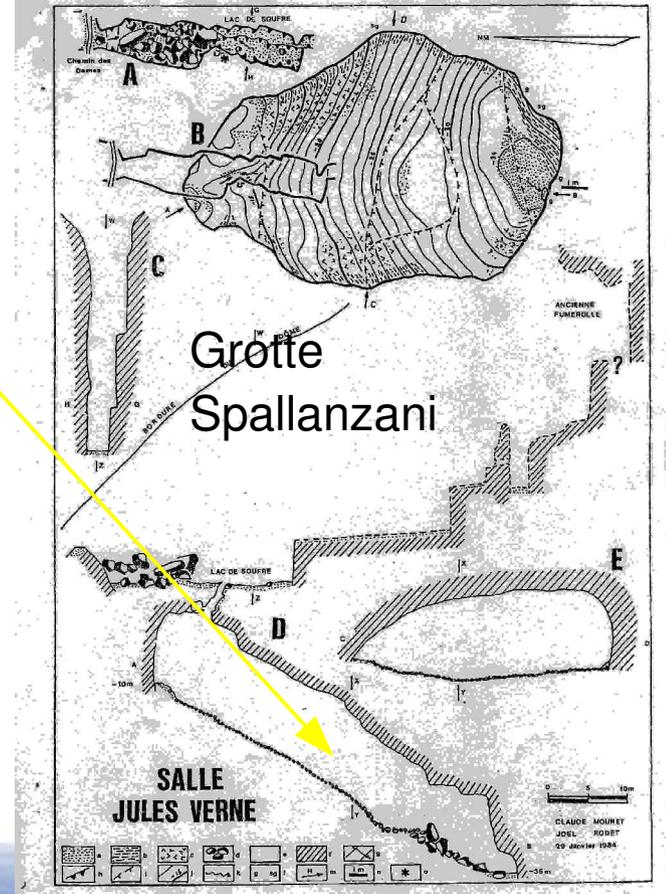
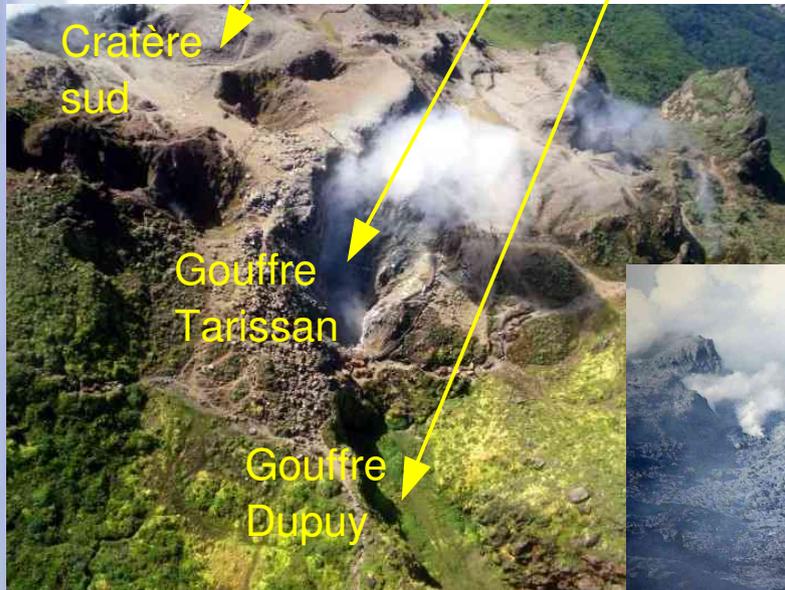
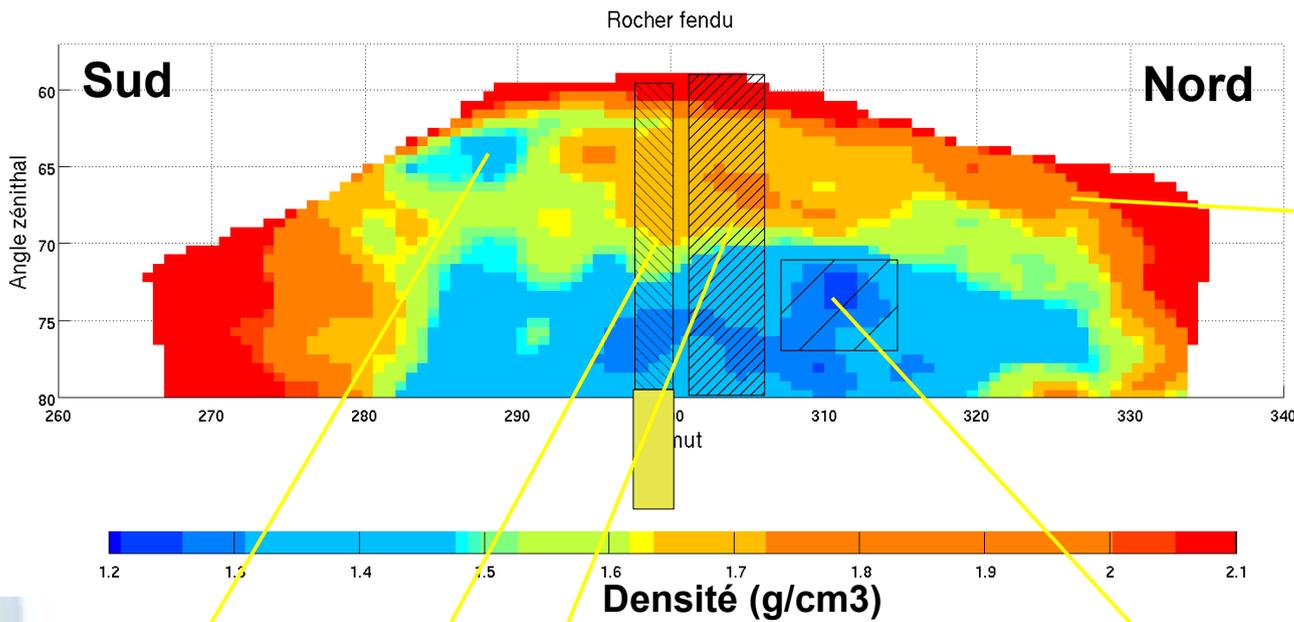
Savane à Mulets



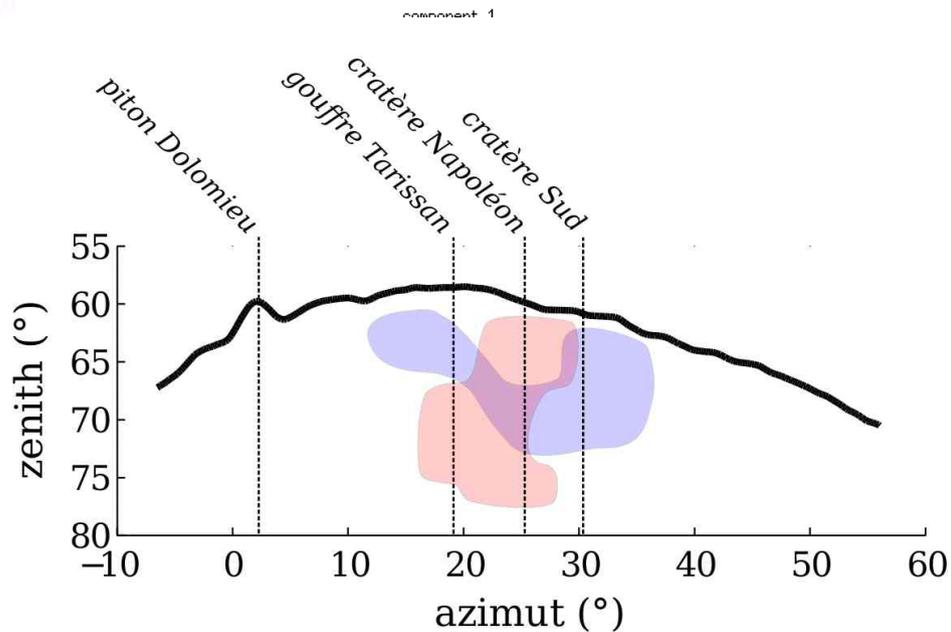
Ravine Sud



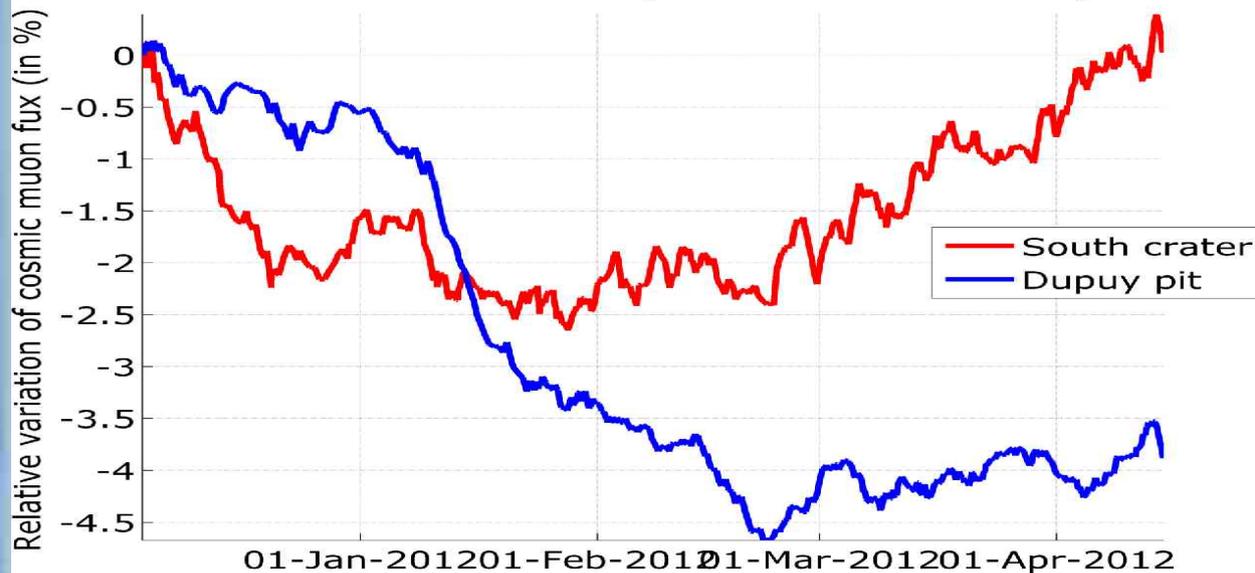
Imagerie structurale de la Soufrière



Suivi dynamique de l'activité (new !)



Rocher Fendu location (East side of lava dome)



L'augmentation du flux indique une baisse de densité dans le volcan. Cette baisse est corrélée à une augmentation de l'activité des fumerolles au sommet (vaporisation des fluides du réservoir hydrothermal du cratère sud)

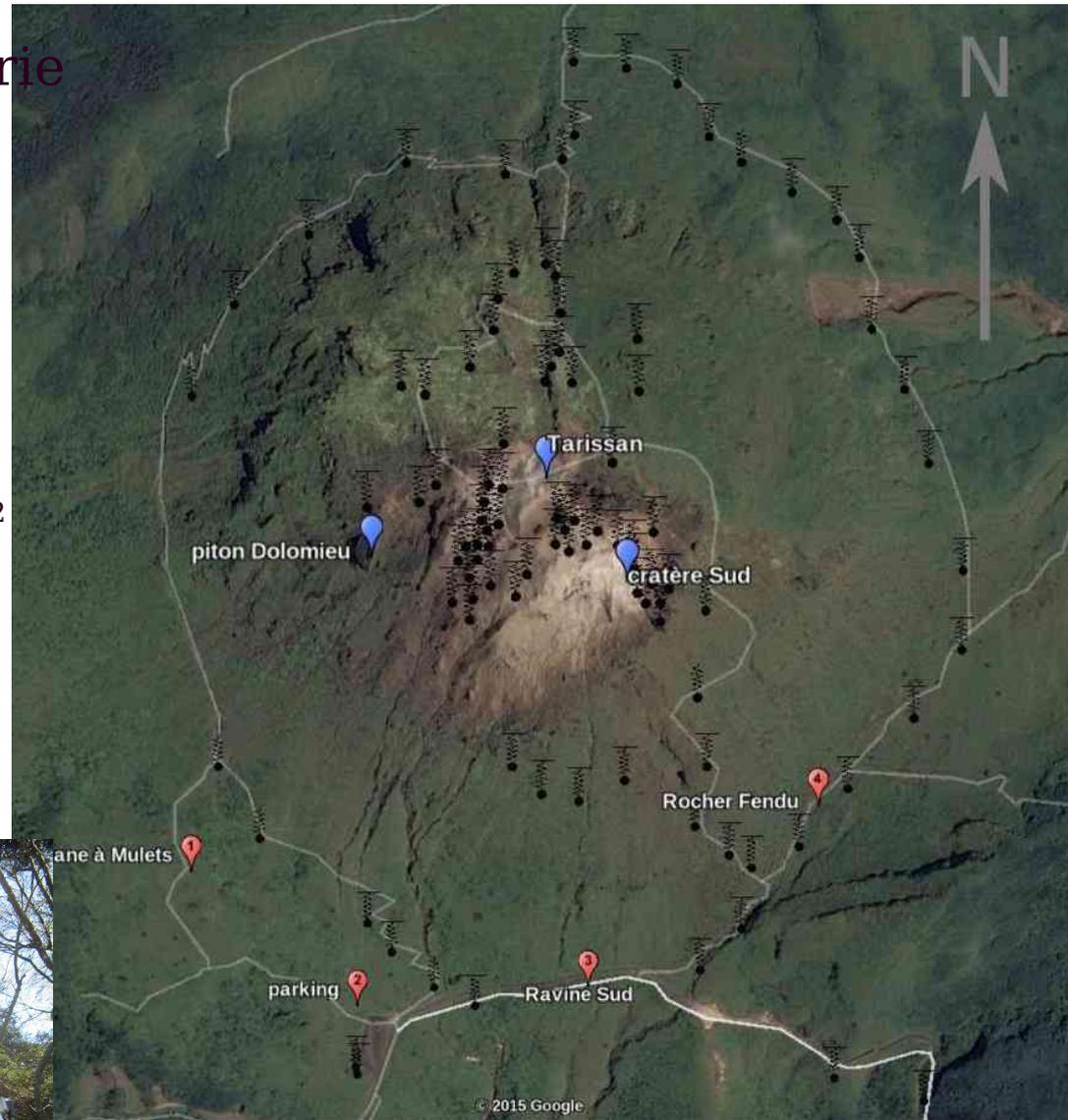
Couplage gravimétrie-muons (inversion conjointe)

2014/2015 campagne de gravimétrie sur la Soufrière :

- 146 mesures
- 2 gravimètres CG5 pdt 1 an
- 1.5km large, dénivelé 500m
- caractère insulaire
- précision : $40 \mu\text{Gal} = 0,0000004 \text{ m/s}^2$
- 1 mesure absolue

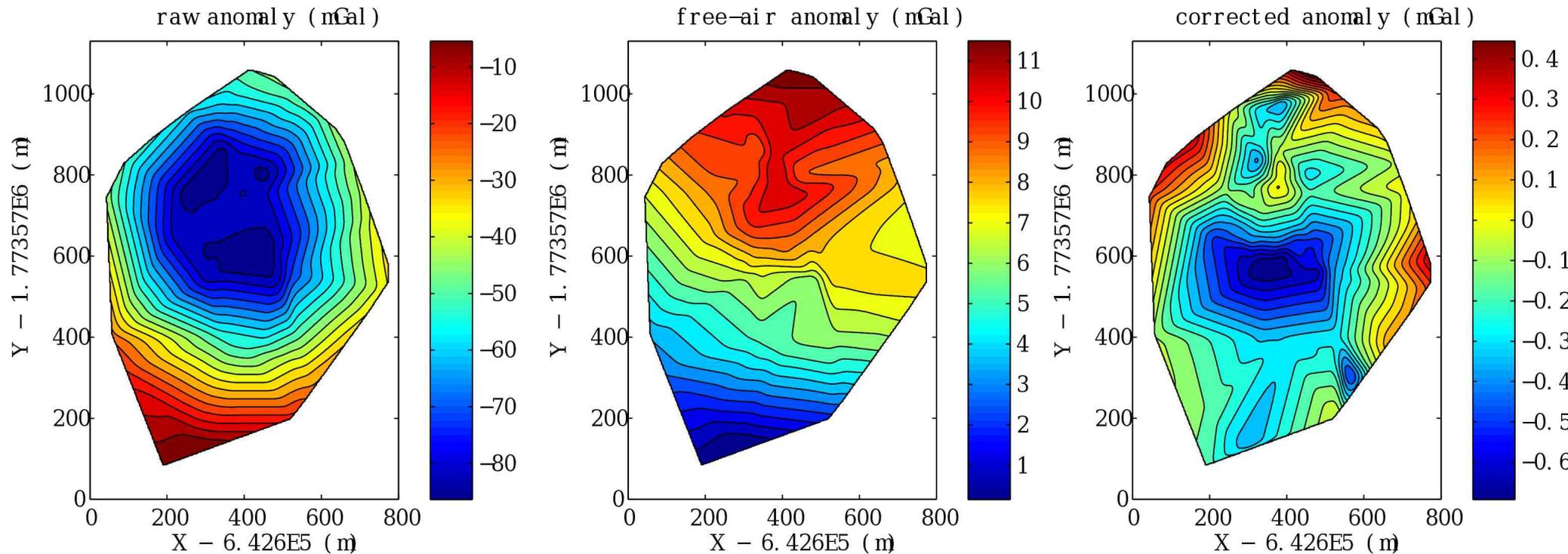
Nécessite des corrections complexes :

- geoid oscillations
- marées
- atmosphère
- courbure terrestre
- correction de Bouguer



Couplage gravimétrie-muons (inversion conjointe)

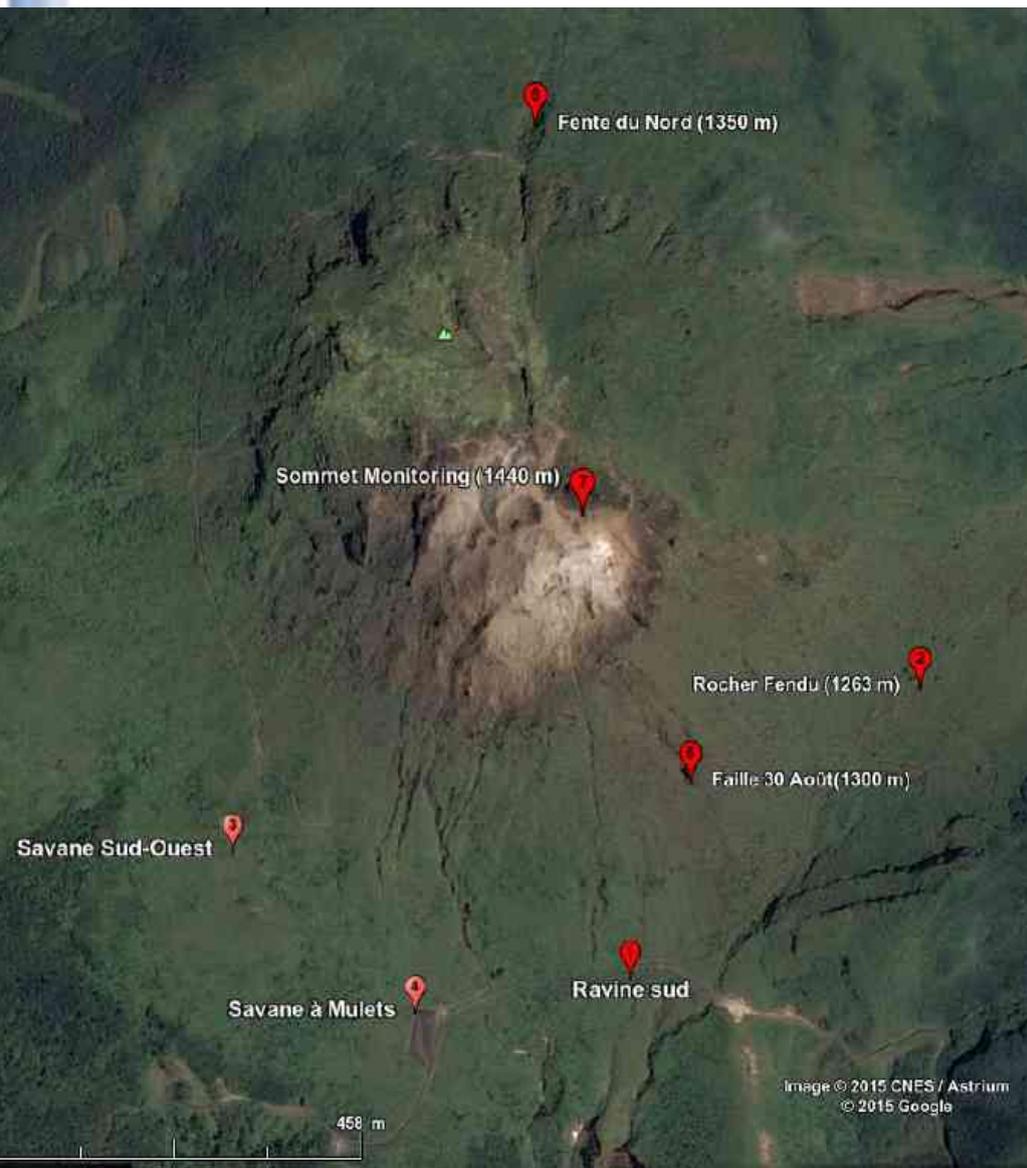
Résultats préliminaires...



Correction with a MNT derived from IGN land data, Aguadomar cruise swath bathymetry and SRTM model (provided by C. Deplus and N. Feuillet)

... pour atteindre une inversion de densité 3D du dôme, couplant les mesures en muons et en gravimétrie.

Diaphane 2008-2014-2018



- 2008 : début de la collaboration IPNL-IPGP-GR (IN2P3/INSU) (ANR domoscan).
- R&D, méthodologie, fonctionnement en RP (Swisstopo, E.O.Singapore, IRSN) et appels à projets (Particules & Univers, Instrumentation aux limites).
- 2009-2014 : plusieurs campagnes de mesures avec 1 télescope/cible (Soufrière de Guadeloupe, Etna, Mayon, tunnels)
- 2014 : ANR Diaphane obtenue
 - phase de maturation technique achevée ;
 - de la R&D à la surveillance d'un volcan en phase d'activation ;
 - plusieurs instruments autour du volcan (3 télescopes standard + 1 télescope réduit dans une faille) ;
 - intégration dans le réseau de surveillance ; suivi structurel dynamique du dôme, en temps réel et en 3D ;
 - couplage muons-gravimétrie
 - dissémination de la technique à l'île voisine de Montserrat (Soufriere Hills en éruption depuis 1995)

Projet ANR : règles générales

En fonction du type d'appel à projet (générique, JC...), les règles peuvent différer notamment en terme d'implication de personnels, de recrutement de personnel non permanent etc.

→ connaissance du texte de l'appel à projet.

Le taux d'aide pour les organismes publics est de 100 %. Toutes les dépenses rattachées à la réalisation du projet peuvent être subventionnées **sauf** la rémunération des personnels permanents et les frais d'environnement :

→ salaires des personnels non-permanents, frais de mission, fonctionnement, équipement, prestations de services (montant inférieur à 50 % du total)

L'ANR n'octroie pas d'aide d'un montant inférieur à 15000 €.

Les frais de gestion sont de maximum 4 % (pour les délégations).

Pas de frais de gestion pour les laboratoires.

S'il y a au moins une **entreprise partenaire**, obligation d'établir un **accord de consortium*** qui reprendra les conditions de la coopération, le partage des droits de la propriété intellectuelle et le régime de publication/diffusion des résultats.

* à transmettre dans un délai de 12 mois à compter de la signature de la Convention.

Projet ANR : implication des personnels

Le coordinateur scientifique devra être impliqué au minimum à hauteur de 30 % de son temps de recherche.

Recrutement de personnel financé par l'ANR :

- Le taux de précarité du projet doit être inférieur à 30 % : personnels non permanents financés par l'ANR / total des personnels permanents ou non permanents financés ou non par l'ANR.
Les doctorants et les stagiaires sont exclus du calcul mais éligibles.
- Le financement de chaque post-doctorant ne peut être inférieur à 12 mois.

La réglementation comptable applicable est celle de l'organisme gestionnaire.

ANR : processus de sélection en 2 étapes

1^{ère} étape : la pré-proposition

- 1 formulaire à compléter en ligne +
- 1 document descriptif du projet (5 pages) à déposer sur le site de soumission.

Il est important de bien y réfléchir car des modifications trop importantes entre la 1^{ère} étape et la 2^{ème} étape rendront la proposition non conforme (en particulier les demandes budgétaires ne doivent pas différer de plus de 15%).

Choix entre **9 défis sociétaux** ou **défi de tous les savoirs**.

Ex. DIAPHANE : « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique »

Durée du projet entre 12 et 48 mois.

2^{ème} étape : la proposition détaillée

- 1 formulaire à compléter en ligne +
- 1 document scientifique à déposer sur le site de soumission +
- 1 document administratif et financier signé par le représentant légal, le directeur du laboratoire et le responsable scientifique de chaque partenaire à déposer sur le site.

Projet ANR : document scientifique

Le document scientifique doit faire au maximum 30 pages sans annexe et de préférence en anglais.

Il faut saisir le détail des personnels impliqués dans le projet :

- * calcul du coût chargé des permanents en fonction de leur implication
- * calcul des salaires pour le recrutement

Il faut renseigner les informations administratives de l'organisme gestionnaire.

Projet ANR : suivi et justification

La répartition prévisionnelle des dépenses peut être modifiée sans contrainte particulière à l'intérieur du poste fonctionnement et équipement (sur demande et après accord de l'ANR si la modification excède 30%).

Pas de déclaration du temps d'implication des personnels.

La justification financière se fait à la fin du projet.

Il est recommandé de ne plus effectuer de dépenses 1 mois avant la fin du projet.

Le suivi scientifique : participation du coordinateur scientifique au séminaire de lancement des projets, fourniture régulière de compte-rendus intermédiaires d'avancement, compte-rendu de fin de projet.

Et après ?

- L'imagerie de densité par muons cosmiques est opérationnelle
 - Imagerie structurelle à distance
 - Monitoring sur des périodes longues
- Les télescopes de terrain de Diaphane ont démontré leur adaptation aux conditions de terrain les plus dures
- Evolution du projet: de la R&D, la faisabilité à l'intégration dans un parc d'instruments tournés vers la surveillance
- **Projet ANR:**
 - Adapté à ce type de projet à l'interface entre plusieurs disciplines / instituts de recherche
 - Phase de pré-sélection / sélection plus souple
 - Concurrence accrue → nécessité de soigner les volets administratifs, financiers et annexes (communication, structure des collaborations etc)