

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

SCAN
PYRAMIDS

HiP

HiP INSTITUTE
HERITAGE
INNOVATION
PRESERVATION



ARAB
REPUBLIC
OF EGYPT
MINISTRY OF
ANTIQUITIES



FACULTY OF
ENGINEERING
CAIRO
UNIVERSITY



La muographie HD, du plateau de Saclay au plateau de Gizeh

S. Procureur, D. Attié, S. Bouteille, D. Calvet, C. Filosa,
P. Magnier, I. Mandjavidze, M. Riallot

Séminaire LAPP, 25/05/2018



- Le rayonnement cosmique et la muographie
- WatTo, une expérience décisive
- ScanPyramids : préparation de la mission & découvertes
- Perspectives

Particules très énergétiques produites dans l'Univers



- Mise en évidence par Hess et Pacini en 1912
- Lieu de production: supernovae, AGN, Soleil, ...
- Composition: protons (~90%), noyaux d'hélium (~9%)
- Méga-énergétiques: mesurées jusqu'à $3 \cdot 10^8$ TeV

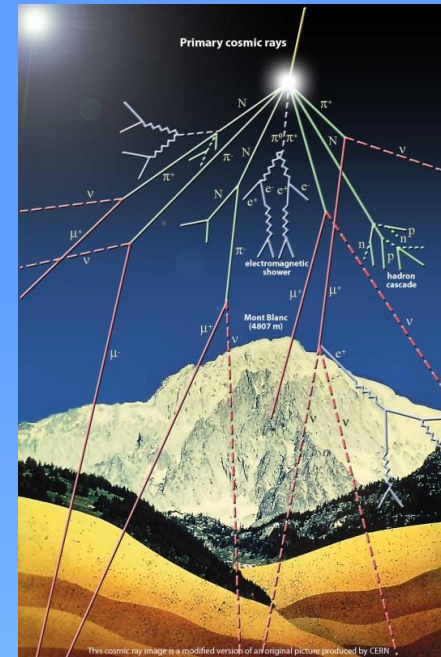
Protection de l'atmosphère contre cette radiation

- Produit une « gerbe » de particules: *pions, kaons, électrons, positrons, gamma, muons, ...*



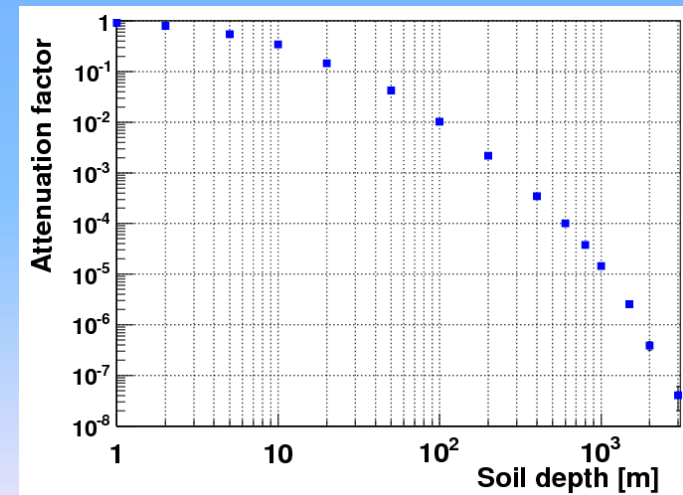
Une partie seulement de ces particules arrivent jusqu'au sol

- Flux au sol dominé par les muons
- ~ 1 muon par cm² et par minute



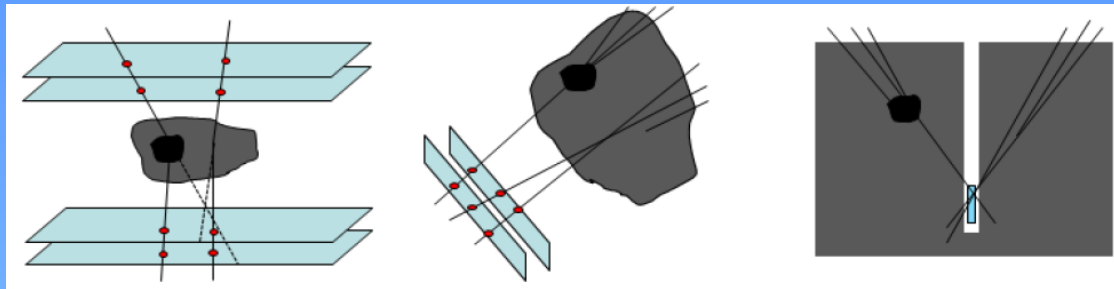
Propriétés intéressantes des muons cosmiques

- Instables mais pas trop ($\tau = 2,2\mu s$)
 - Spectre en énergie très large
 - Perdent peu d'énergie dans la matière
- ⇒ **Très pénétrants, peuvent donc sonder la matière qu'ils traversent** (et en plus c'est gratuit!)



Imagerie par muon = muographie (analogie forte avec la photographie)

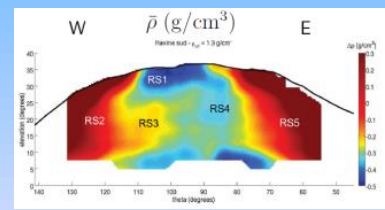
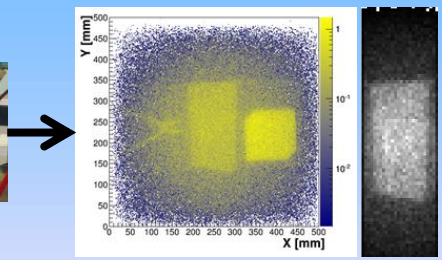
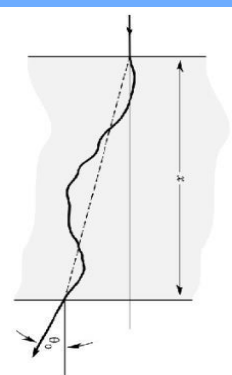
→ 2 modes différents, la déviation et l'absorption



$$\sigma = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta pc} \left[\sqrt{\frac{x}{\lambda_0}} + 0.038 \log(x/X_0) \right] \approx \frac{13.6 \text{ MeV}/c}{p} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

$$X_0 = \frac{716.4 (\text{g}/\text{cm}^2)}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log(287/\sqrt{Z})}$$

Matériau	Epaisseur	θ (deg)	$P_{\text{absorption}}$
Air	100 m	0.094	0.78%
Plomb	10 cm	1.01	2.9%
Eau	1 m	0.35	4.2%
Sol	100 m		99%

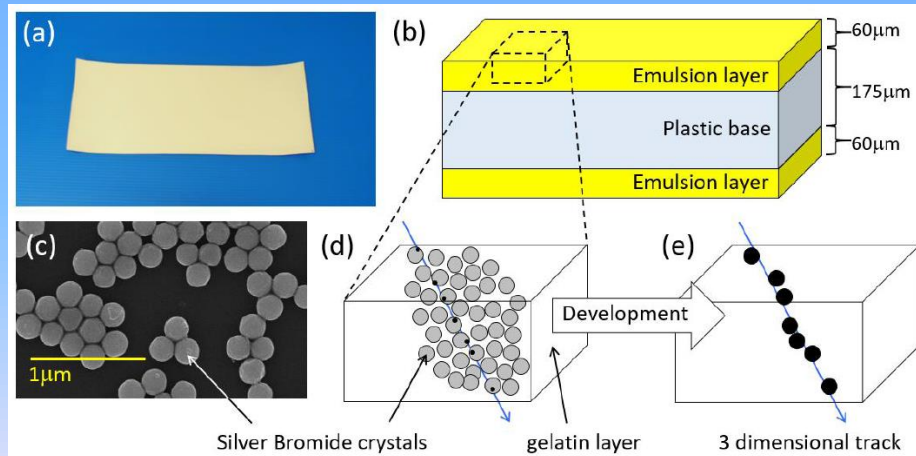
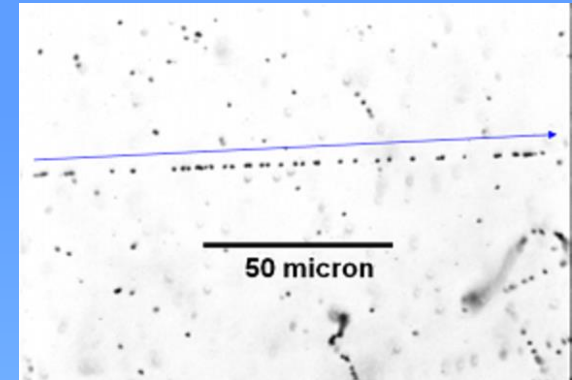


N. Lesparre et al.

→ Nombreuses applications...

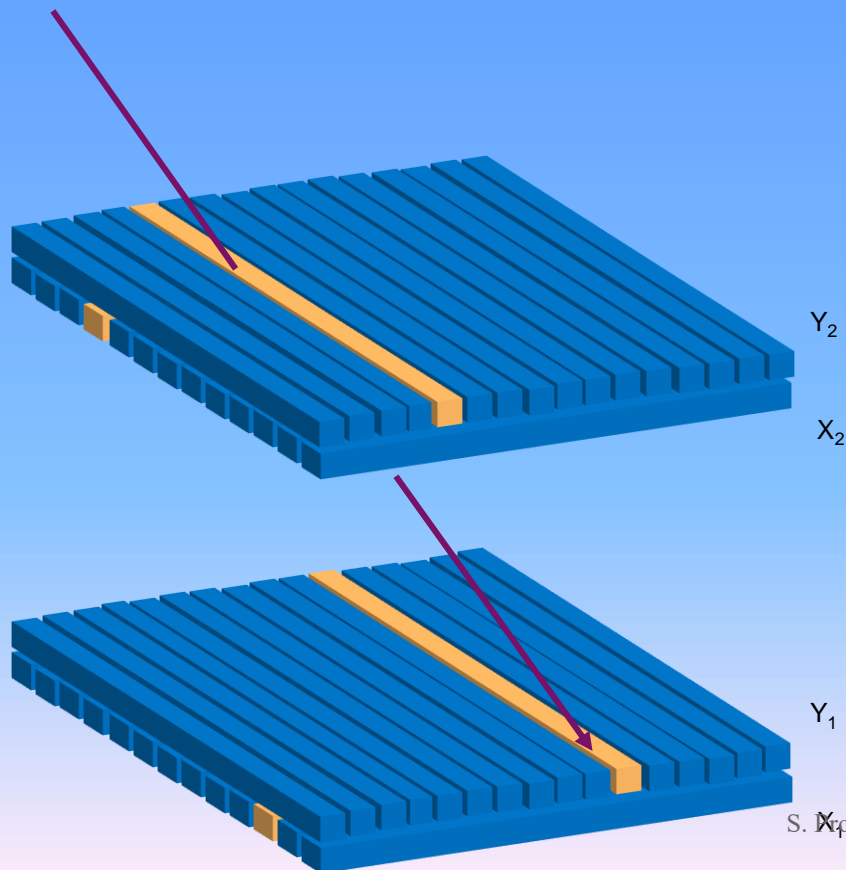
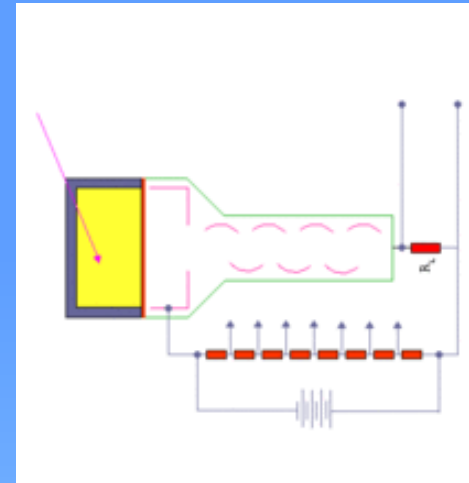
Plaque photographique qui permet d'enregistrer les traces des particules chargées

- Fragile
- Résolution micrométrique
- Sans alimentation
- Pas de temps réel



Détecteurs solides constitués d'un plastique scintillant

- Robuste
- Résolution millimétrique voire centimétrique
- Temps réel

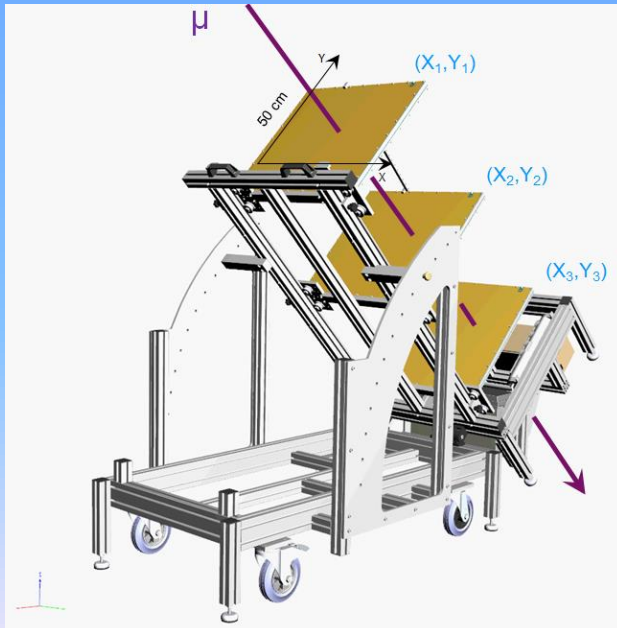


S. Kocureur



Détecteur utilisant l'ionisation du gaz par une particule incidente

- Robuste
- Résolution submillimétrique
- Temps réel

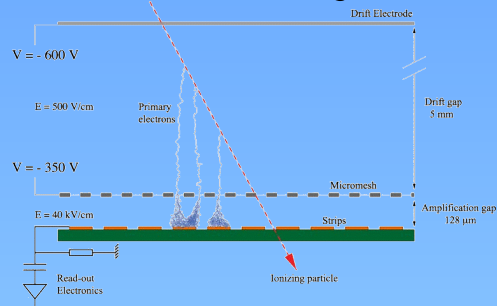


Détecteur idéal: précis, grande taille, temps réel, robuste, industrialisable

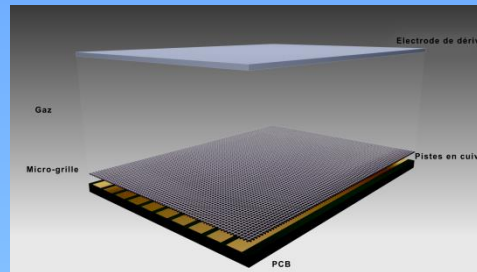
- Emulsions: pas de temps réel
- Scintillateurs: résolution médiocre
- Chambres à fils: fragiles, pas industrialisables

→ Un candidat: le Micromegas bulk multiplexé résistif à lecture 2D!

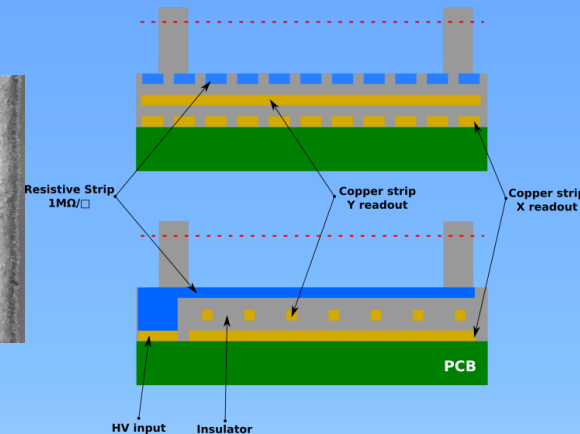
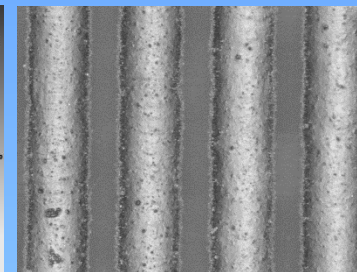
1996: Micromegas

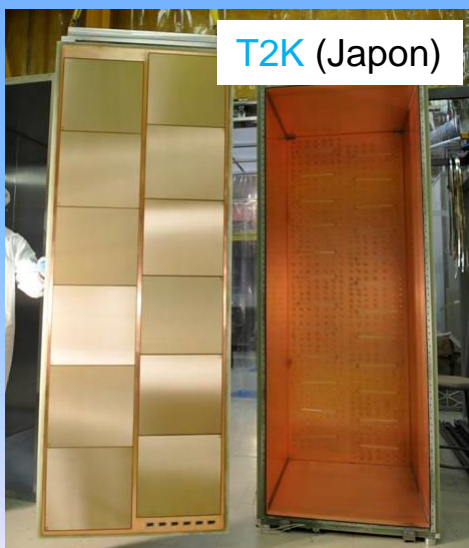
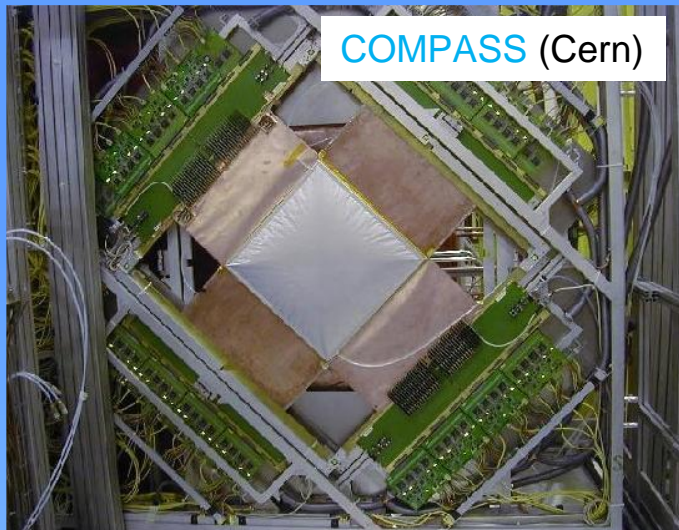


2005: bulk



2010: résistif



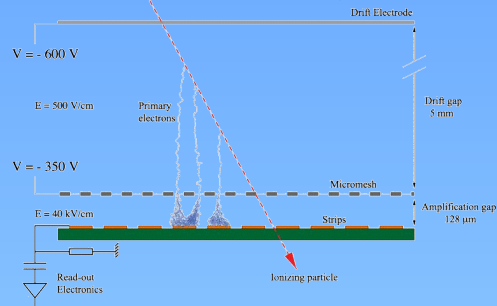


Détecteur idéal: précis, grande taille, temps réel, robuste, industrialisable

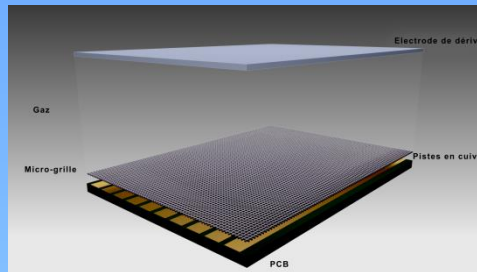
- Emulsions: pas de temps réel
- Scintillateurs: résolution médiocre
- Chambres à fils: fragiles, pas industrialisables

→ Un candidat: le Micromegas bulk multiplexé résistif à lecture 2D!

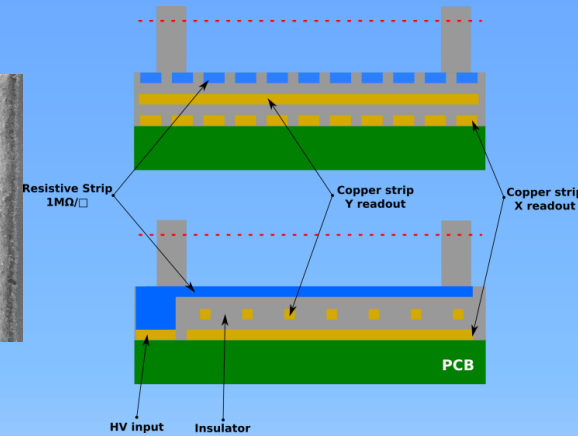
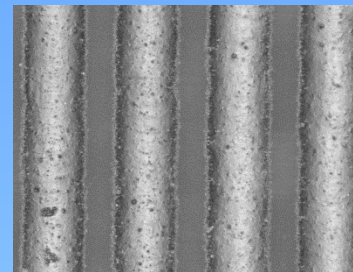
1996: Micromegas



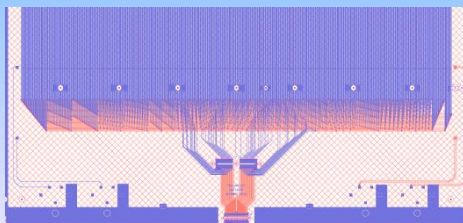
2005: bulk



2010: résistif

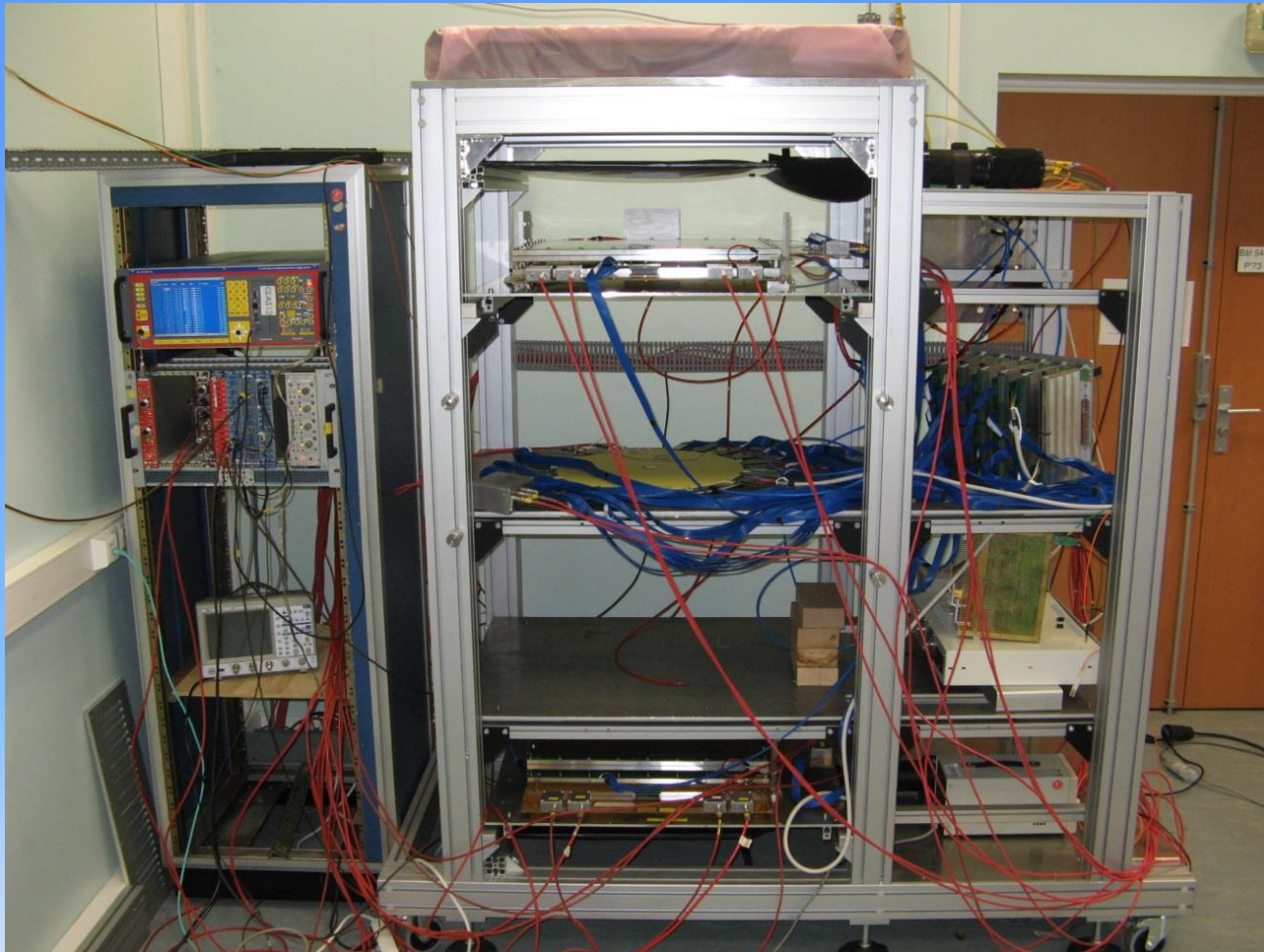


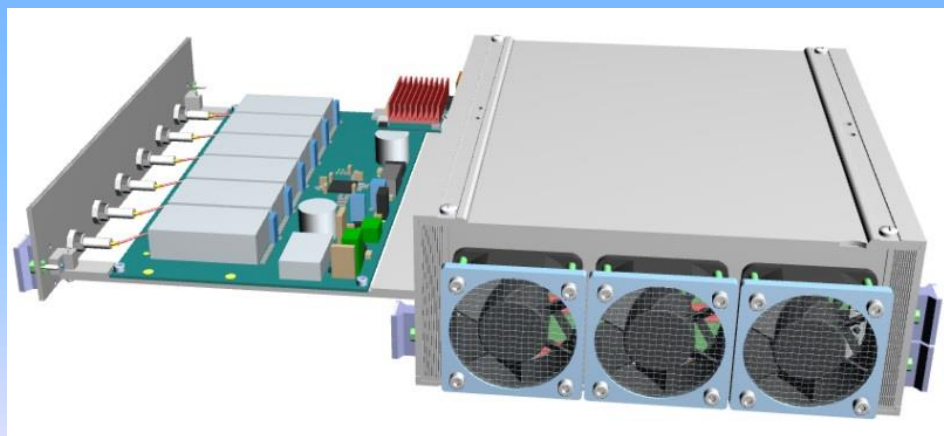
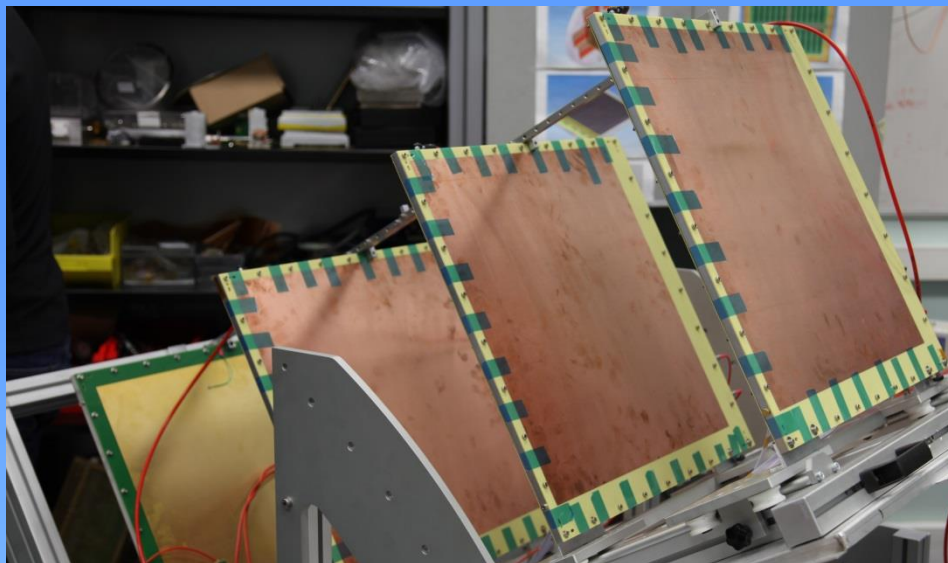
2012: multiplexage (brevet)



⇒ **Fin 2014: proposition de l'expérience WatTo**

Développé initialement pour le projet CLAS12





Boitier HT + électronique dédiée





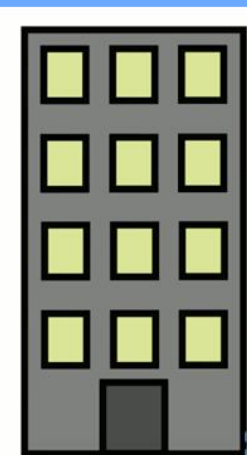
Position 1



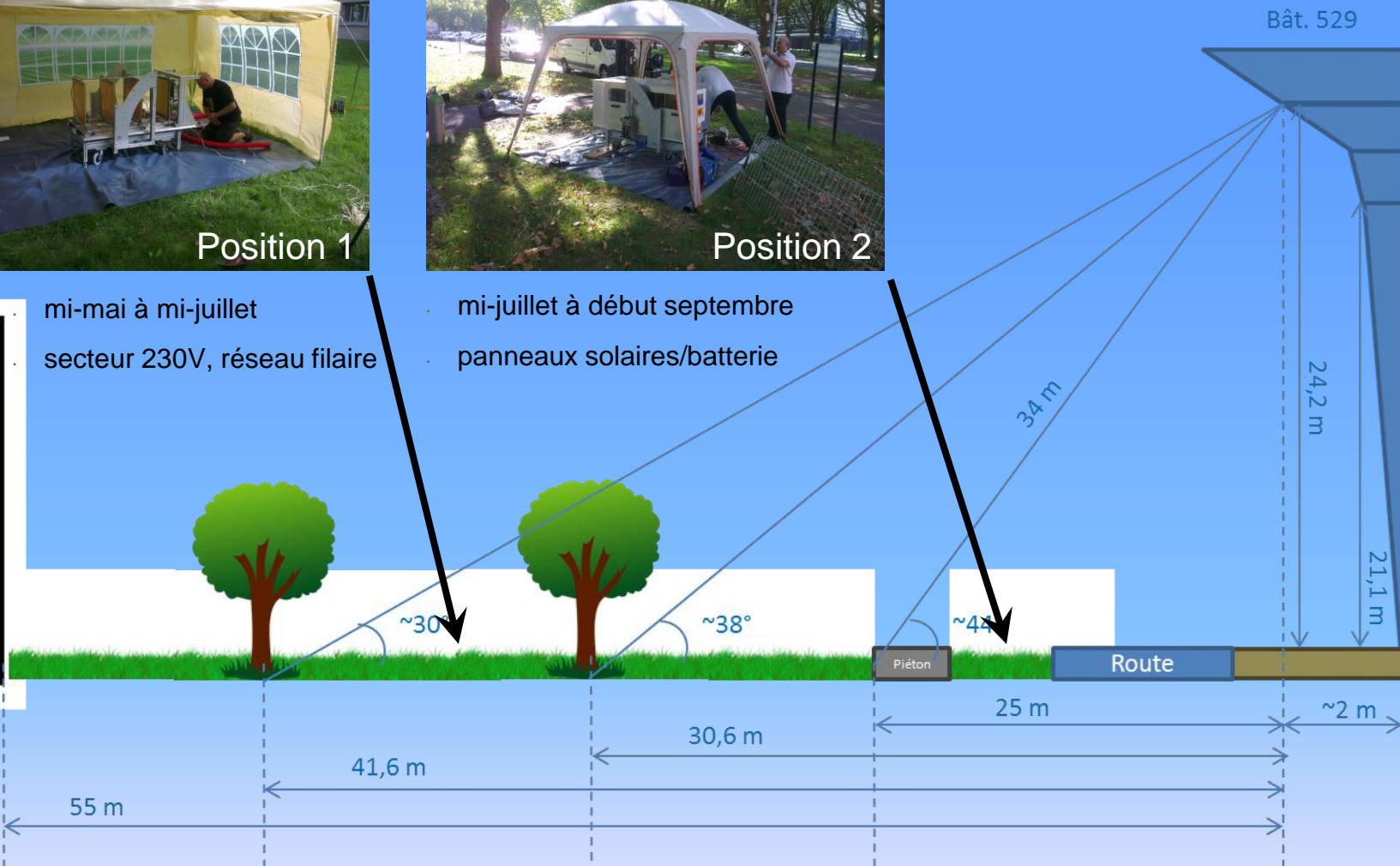
Position 2

mi-mai à mi-juillet
secteur 230V, réseau filaire

mi-juillet à début septembre
panneaux solaires/batterie



Bât. 547E



Muographie statique :

Temps de pose: 4 semaines (position 1)

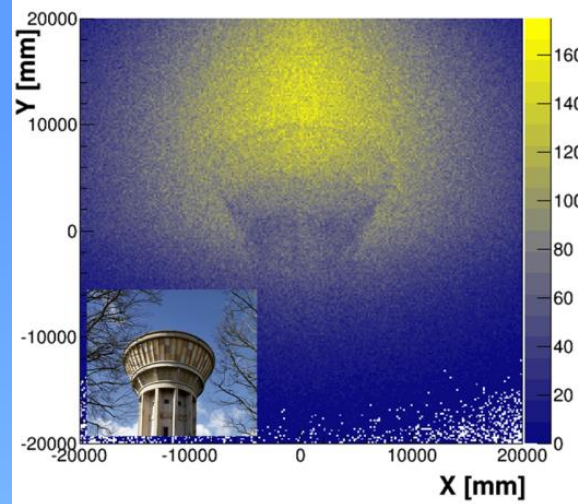
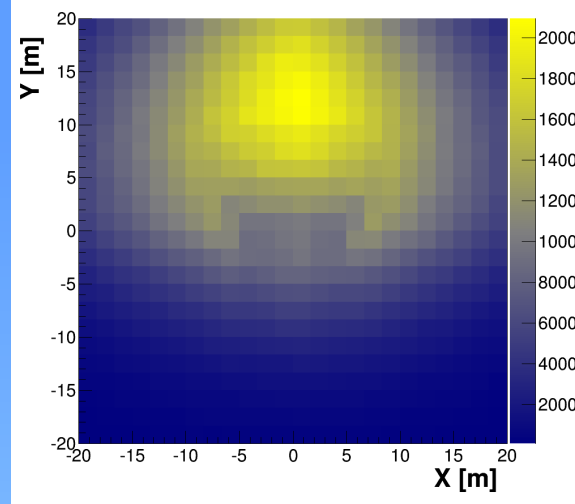


Image d'un télescope à scintillateurs de même compacité



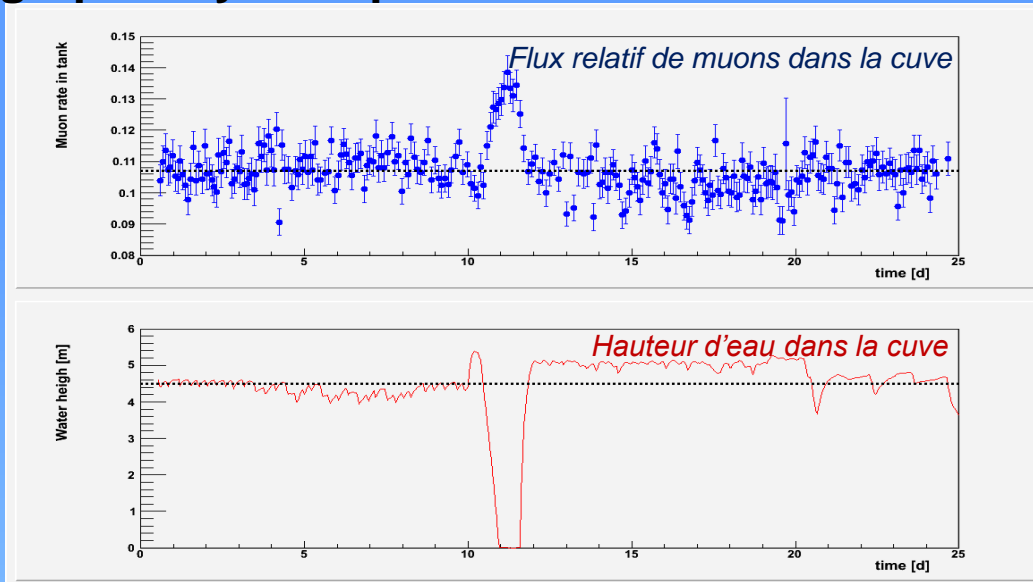
→ Première muographie « reconnaissable » d'une structure

Comment lire une muographie:

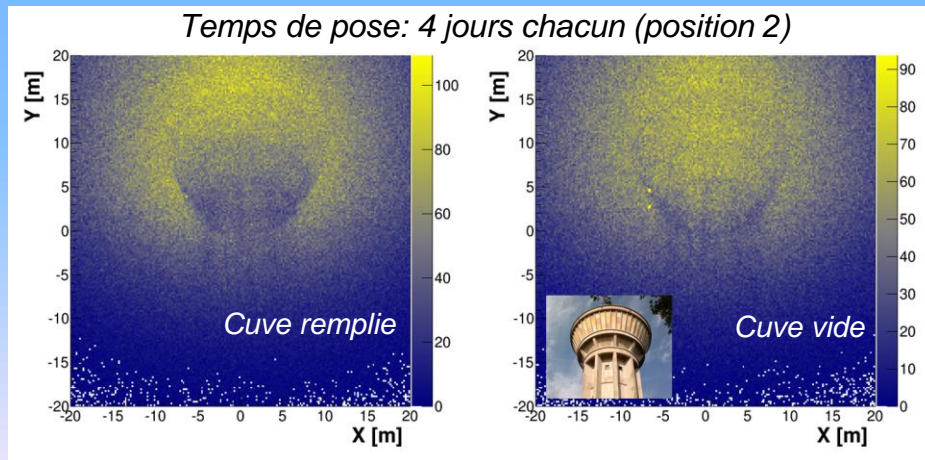
- Chaque pixel contient un nombre (ou flux) de muons reconstruits dans la direction correspondante
- Couleur claire → plus de muons → moins d'absorption → moins de matière
- Couleur sombre → moins de muons → plus d'absorption → plus de matière



Muographie dynamique:



- Tests sur panneaux solaires (30 W)



Fin de l'expérience WatTo le 9 septembre 2015...

... et annonce du lancement de ScanPyramids le 25 octobre

- *Email à Mehdi Tayoubi le 26*
- *1^{ère} réunion mi-décembre à Paris*
- *1^{ère} mission de reconnaissance en janvier 2016*
- *Annonce de la participation CEA en avril 2016*
- *1^{ère} installation des télescopes début juin 2016*



SCAN PYRAMIDS



HIP INSTITUTE
HERITAGE
INNOVATION
PRESERVATION



ARAB
REPUBLIC
OF EGYPT
MINISTRY OF
ANTIQUITIES



FACULTY OF
ENGINEERING
CAIRO
UNIVERSITY

Collaboration internationale

- Coordonnée par l'Institut HIP (M. Tayoubi) et la faculté d'ingénierie du Caire (H. Helal)
- Sous l'autorité du Ministère des Antiquités Egyptiennes

Objectif: scanner les 4 grandes pyramides de la IV^{ème} dynastie

- Pyramide rhomboïdale
- Pyramide rouge
- Pyramide de Kheops
- Pyramide de Khephren

Dashour

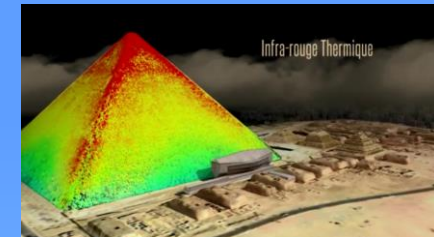


Gizeh



Plusieurs technologies “innovantes”:

→ Thermographie (faiblement pénétrant): Université de Laval

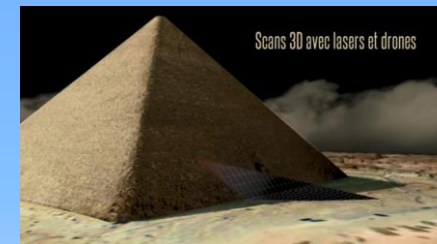


→ Muographie (très pénétrant): Nagoya, KEK, CEA

Nagoya & KEK à l'intérieur, CEA à l'extérieur



→ Drones (reconstruction de surfaces): Université du Caire

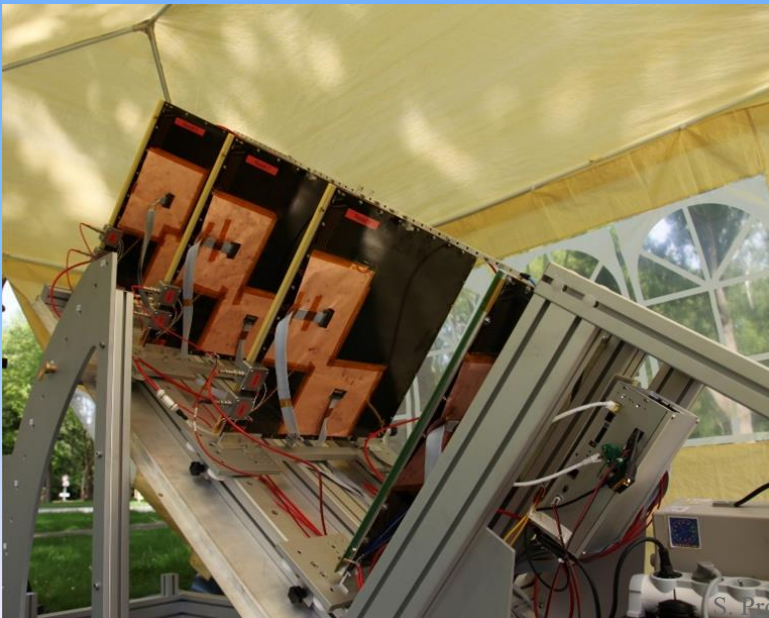


→ Photogrammétrie & modèles 3D: Emissive

→ + Simulateur temps réel

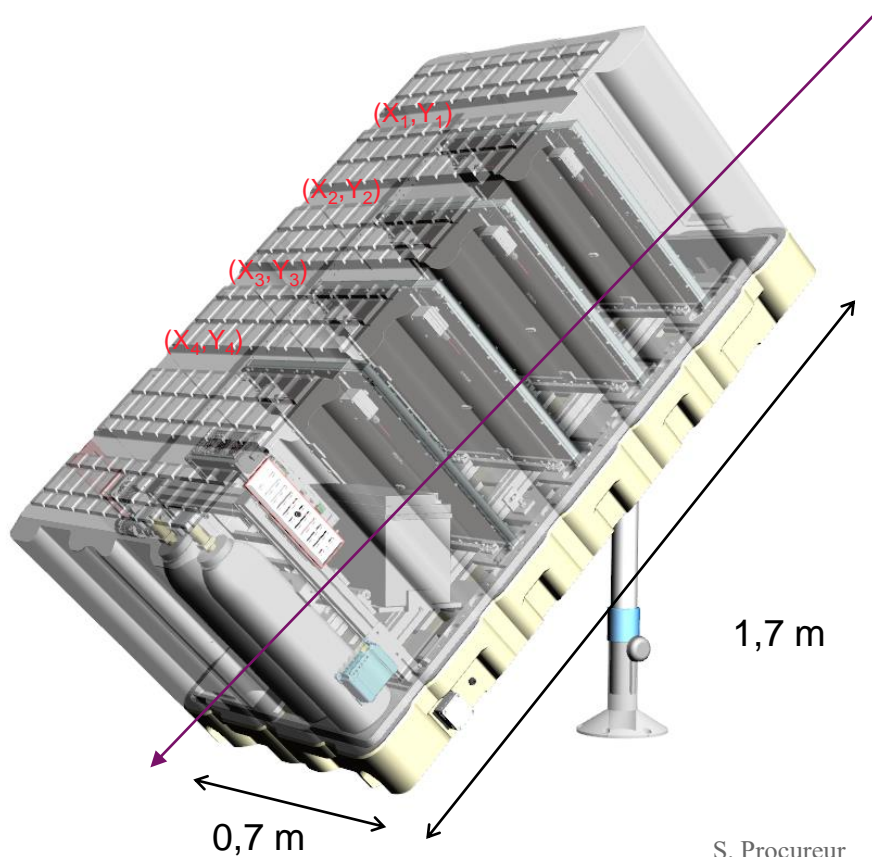


- Télescopes : 1 → 3
- Châssis → valise
- Détecteurs : prototype (Cern) → série (Industriel Elvia)
- Durée de construction : 9 mois → 3 mois
- Poids : ~ 200 kg → ~ 130 kg
- Données : brutes → brutes + pré-analysées

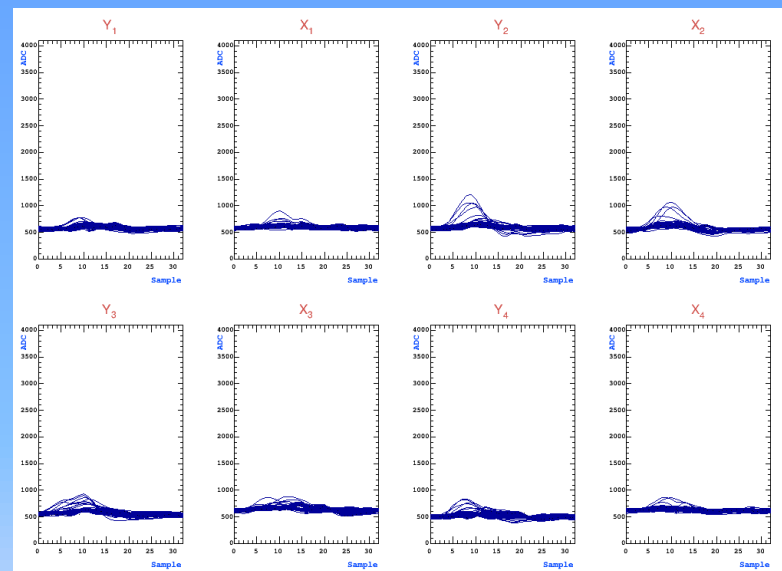


Nouveaux télescopes :

- transportable et facilement opérationnel
- accessible via le réseau 3G



S. Procureur



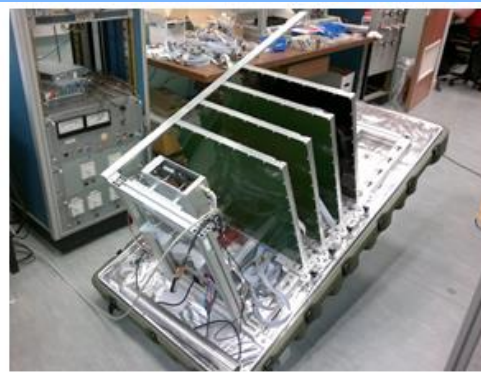
Intégration en salle blanche et tests en extérieur



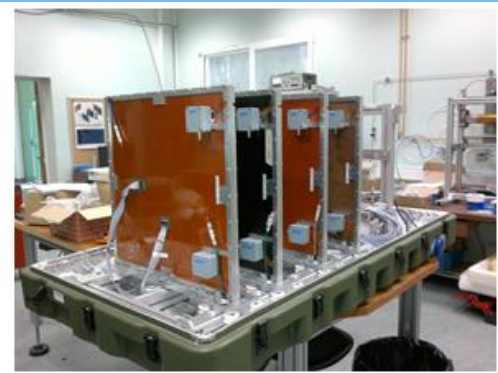
3 télescopes envoyés en avril 2016



Alhazen (n°1)



Alvarez (n°2)

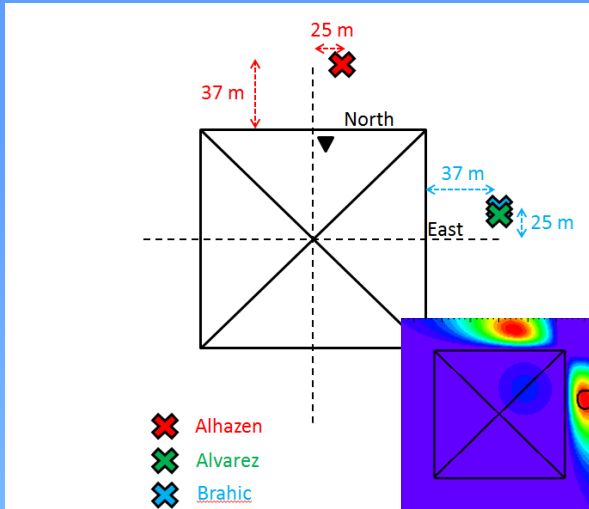


Brahic (n°3)

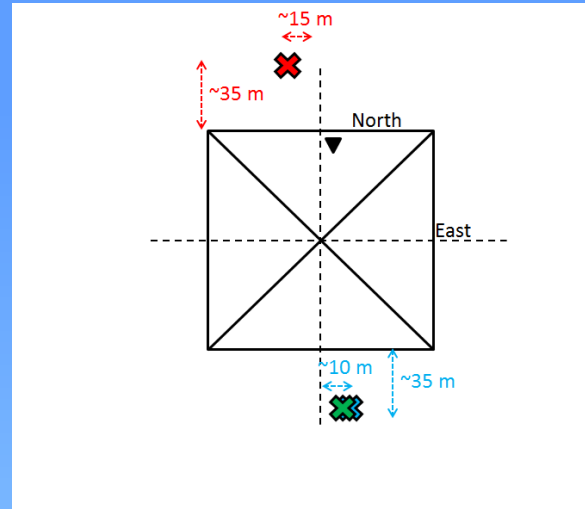


3 missions entre 2016 et 2017

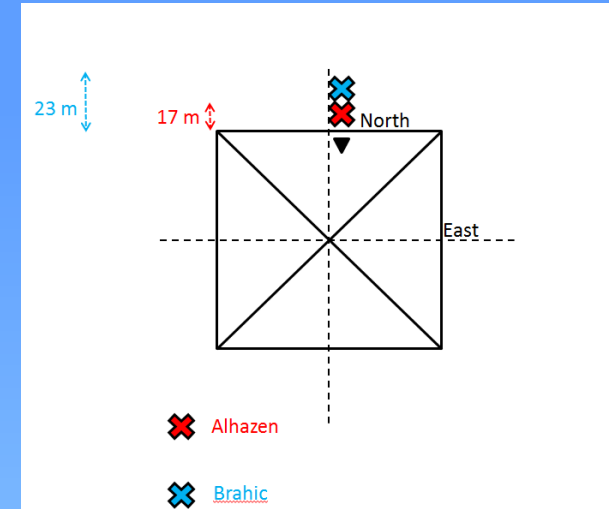
Mission 1 (juin-août 2016)



Mission 2 (janvier-avril 2017)

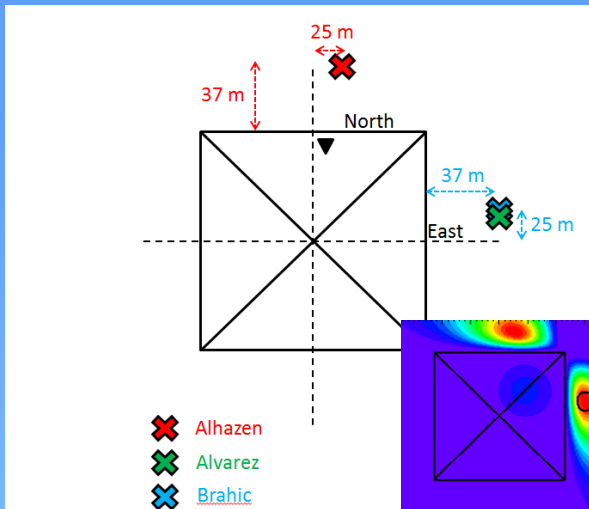


Mission 3 (mai-juillet 2017)

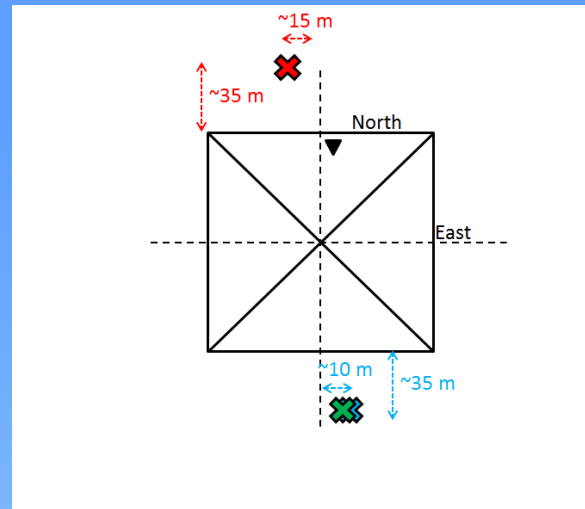


3 missions entre 2016 et 2017

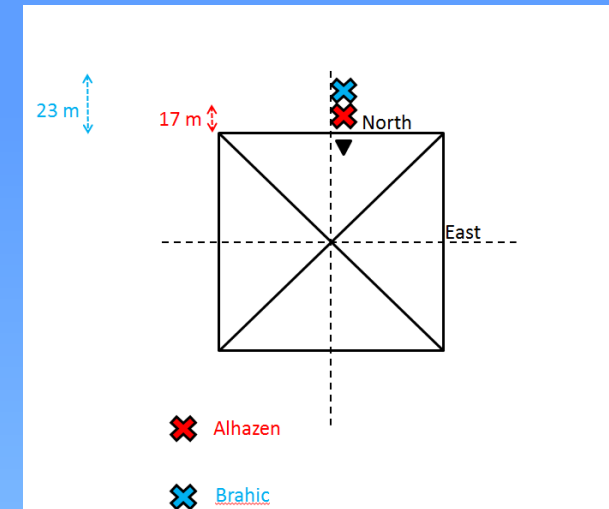
Mission 1 (juin-août 2016)



Mission 2 (janvier-avril 2017)



Mission 3 (mai-juillet 2017)



Statistique accumulée: près de 200 millions de muons!

Télescope	Mission1	Mission2	Mission3
Alhazen	29,0 millions	34,1 millions	16,6 millions
Brahic	24,6 millions	25,6 millions	16,9 millions
Alvarez	18,3 millions	28,0 millions	X
Total	71,9 millions	87,7 millions	33,5 millions

Globalement sans histoires...
avant

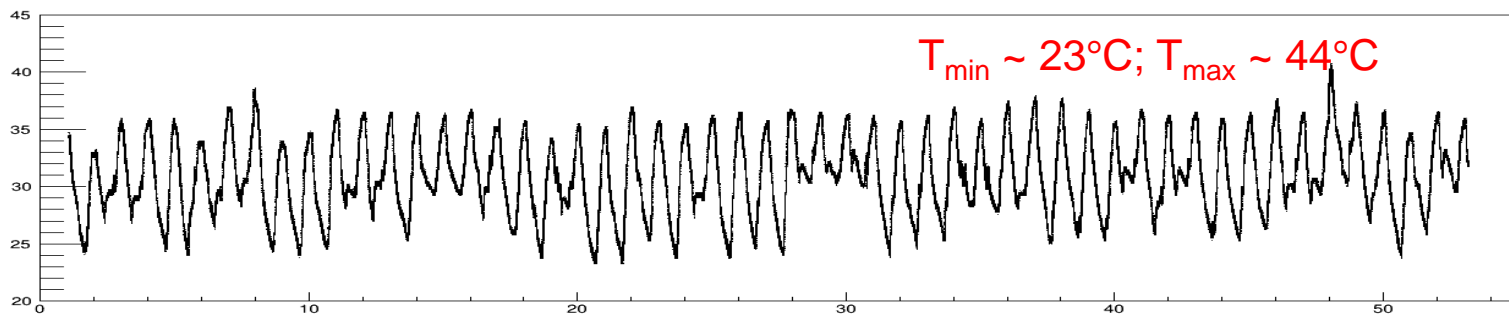


après



+ problème réseau 3G/4G
+ ...

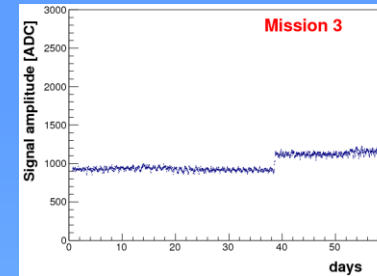
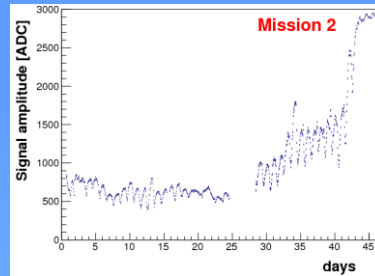
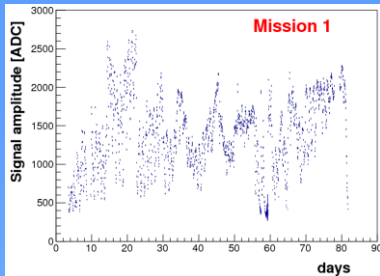
Variations de température (gaz & électronique)



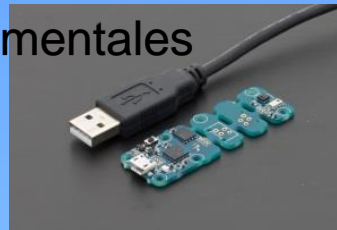
(télescopes qualifiés à Saclay entre 2°C et 55°C)

Améliorations successives des instruments

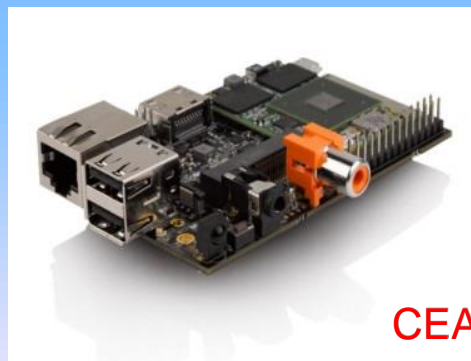
Stabilité du signal



Suivi des conditions environnementales



Analyse complète en ligne sur nano-PC (smartphone)



CEA



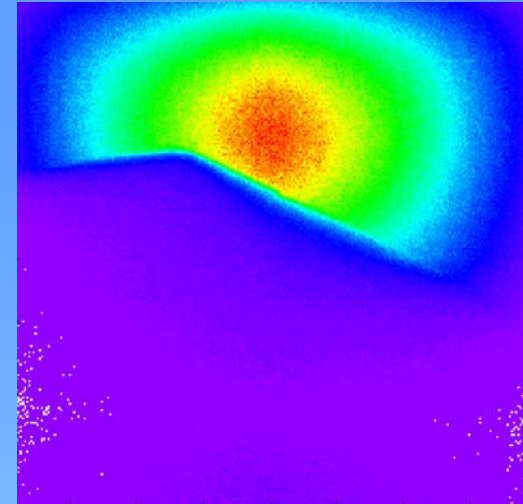
Nagoya

Muographie: image 2D de la direction des muons détectés

photo

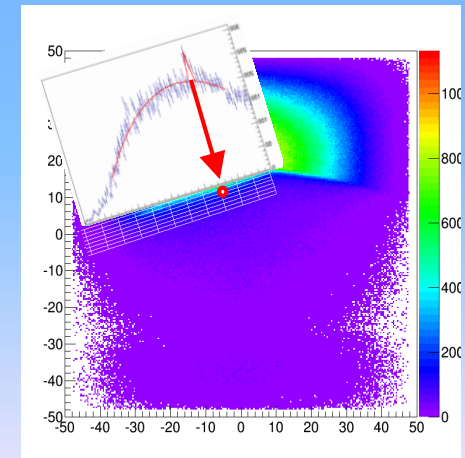
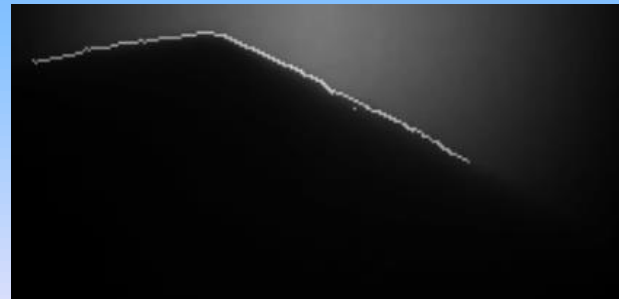
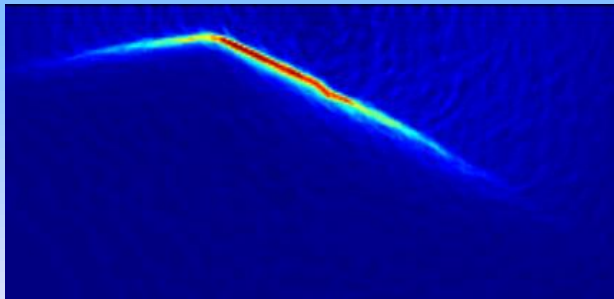


muo

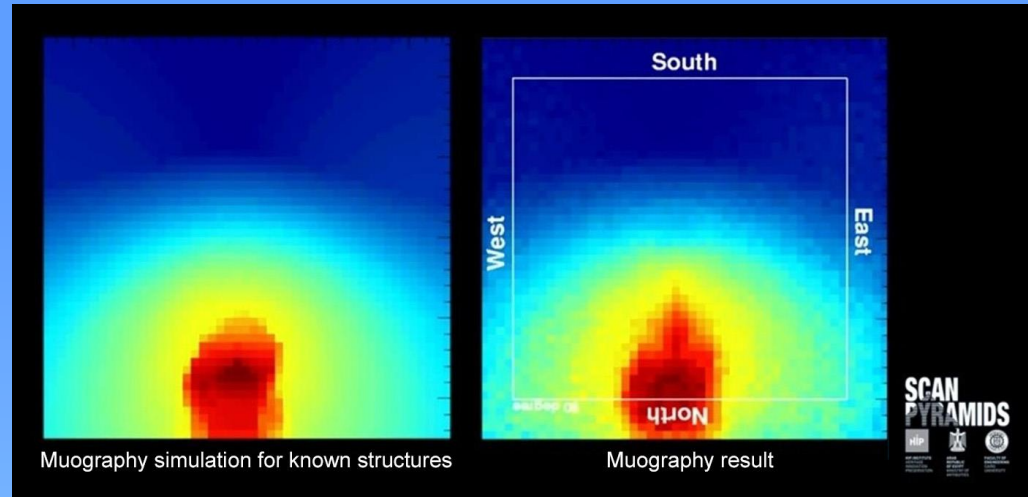
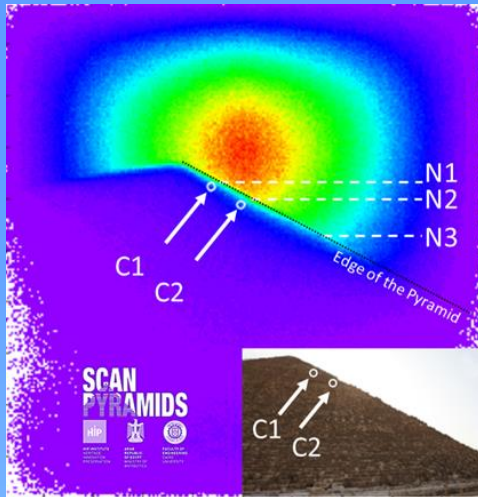


Petits détails, pas visibles directement

⇒ Analyse d'image



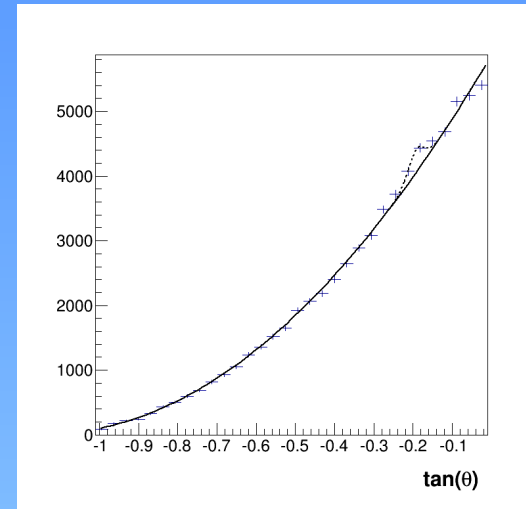
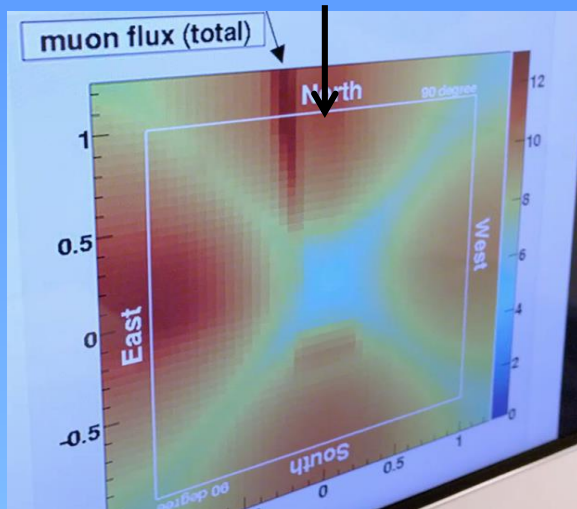
Octobre 2016: annonce de la découverte de 2 vides dans la pyramide



⇒ **Question pour les égyptologues: quelles sont les fonctions de ces cavités?**

Début 2017: résultats des plaques de Nagoya dans la chambre de la Reine

Excédent de muons significatif au voisinage de la grande galerie (sur l'image) Des anomalies apparaissent également sur la chambre de la Reine (chambre de la Reine) et sur celle du CEA (face



La modélisation 3D suggère que ces excédents pointent vers une même région

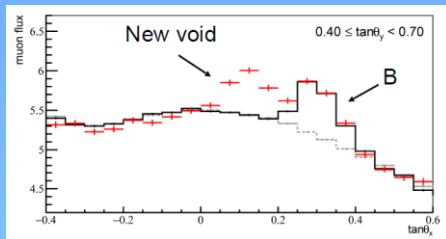
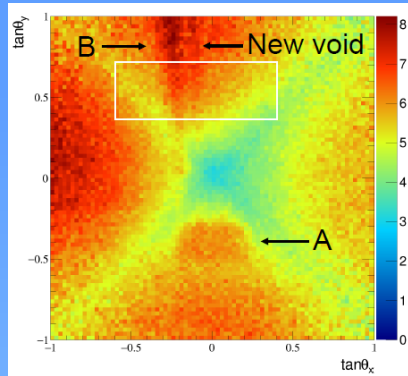
⇒ Lancement d'une campagne de mesures dédiées

- Chambre de la Reine: nouvelles plaques de Nagoya et déplacement
- Extérieur: déplacement de Alhazen et Brahic en face des chevrons

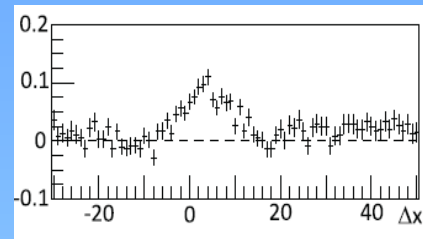
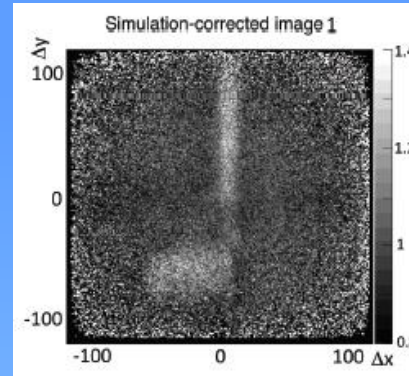


Ces mesures confirment la présence d'un vide au-dessus de la Grande Galerie

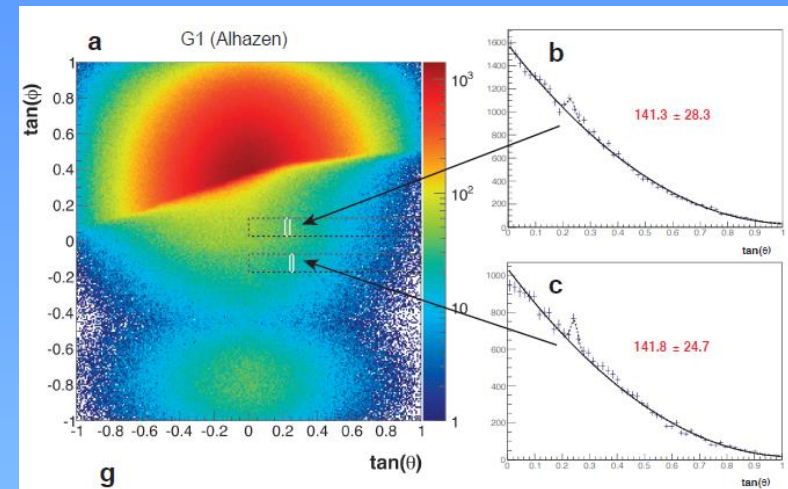
Nagoya



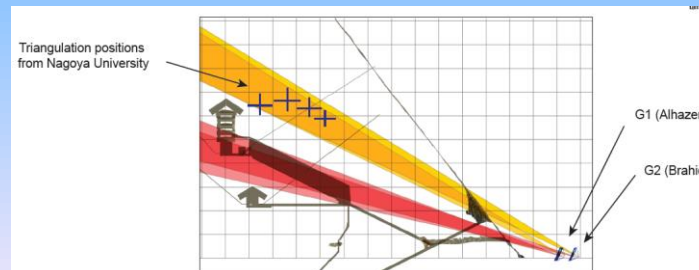
KEK



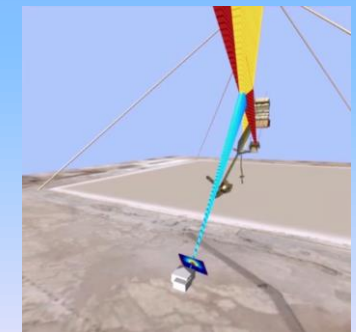
CEA



La 3D confirme que les excédents viennent de la même zone

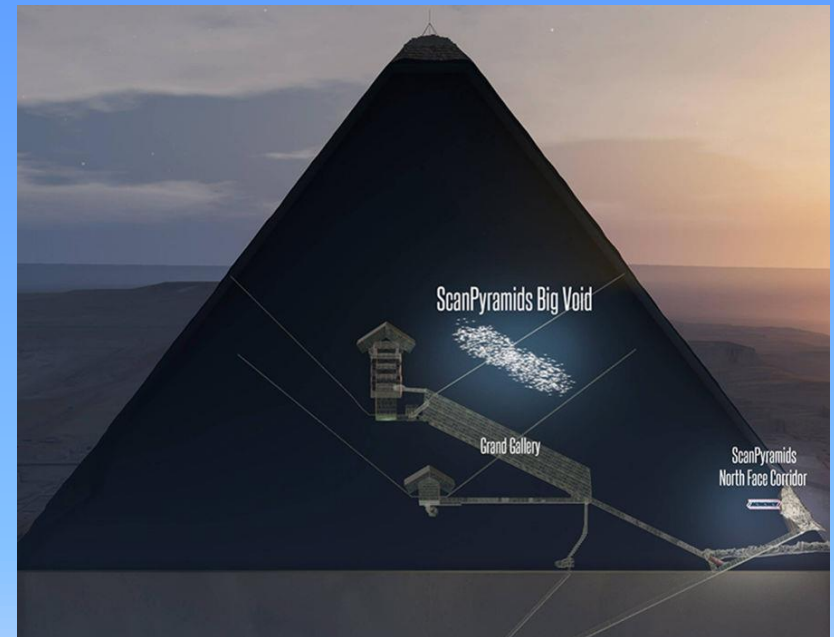
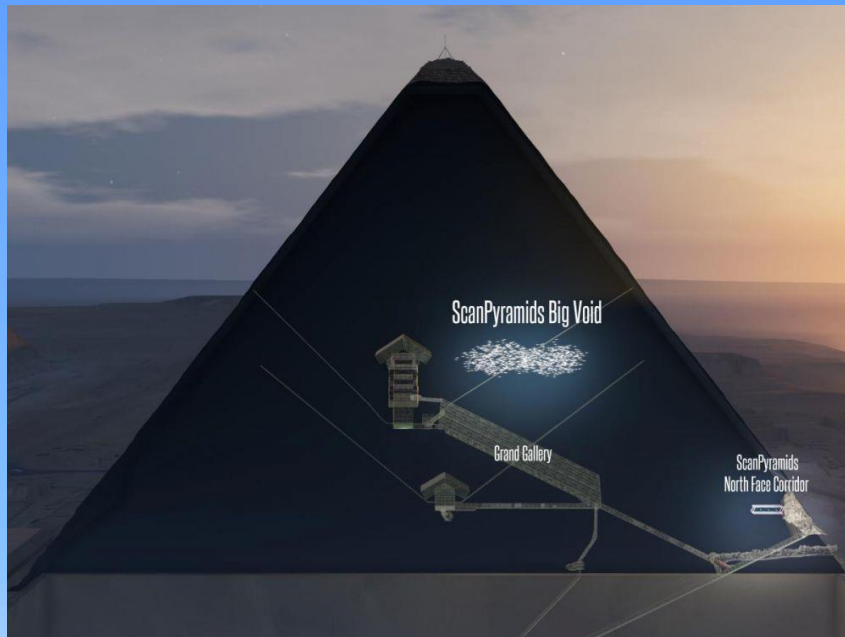
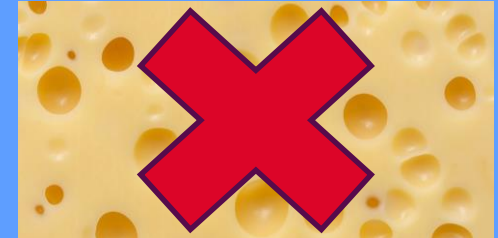


S. Procureur



Faits remarquables du ScanPyramids Big-Void:

- Dans le même plan que les autres structures connues
- Forte sous densité, et uniquement à cet endroit



- Volume estimé à plusieurs centaines de m³
- Longueur d'au moins 30 m
- Vide horizontal ou incliné. Nécessite d'autres mesures!

Réduction de la consommation en gaz (< 0.5 L/h)

- Etude de dégazage/nettoyage des matériaux
- Recirculation/filtration
- Objectif: systèmes scellés

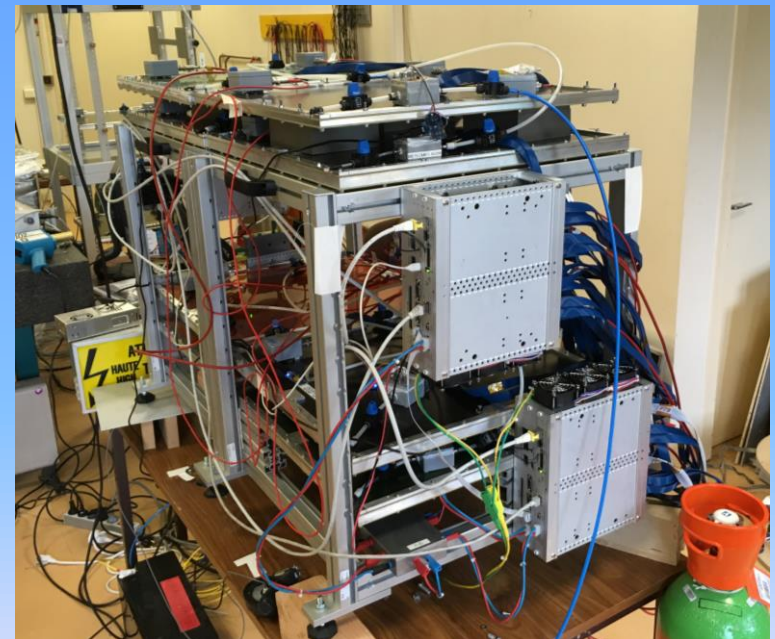
Autorisation pour mettre des télescopes à l'intérieur de la pyramide:

- Image précise du *Big Void*
- Recherche de couloir pour y accéder



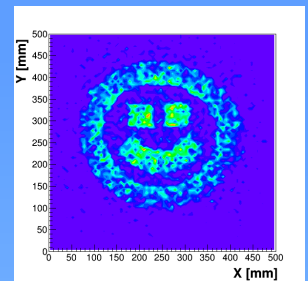
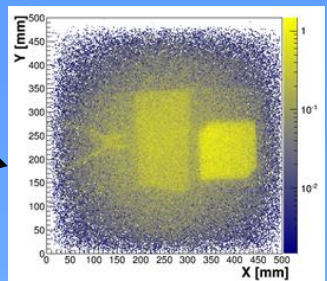
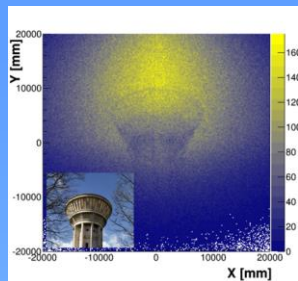
Le Canard enchaîné, 9 mai 2018

S. Procureur



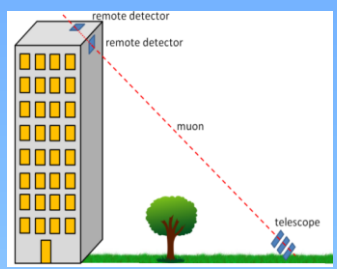
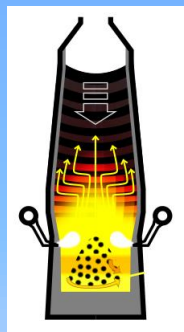
Imagerie (très) pénétrante: beaucoup d'autres applications!

Technologie suffisamment performante pour reconnaître des structures, et même de

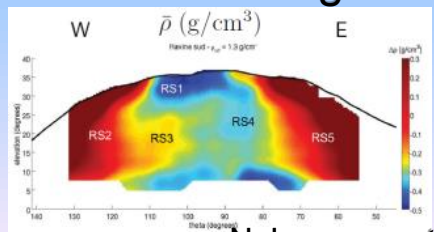


Génie civil, ouvrages de Démantèlement, déchets hauts fourneaux

Météologie (muonique)



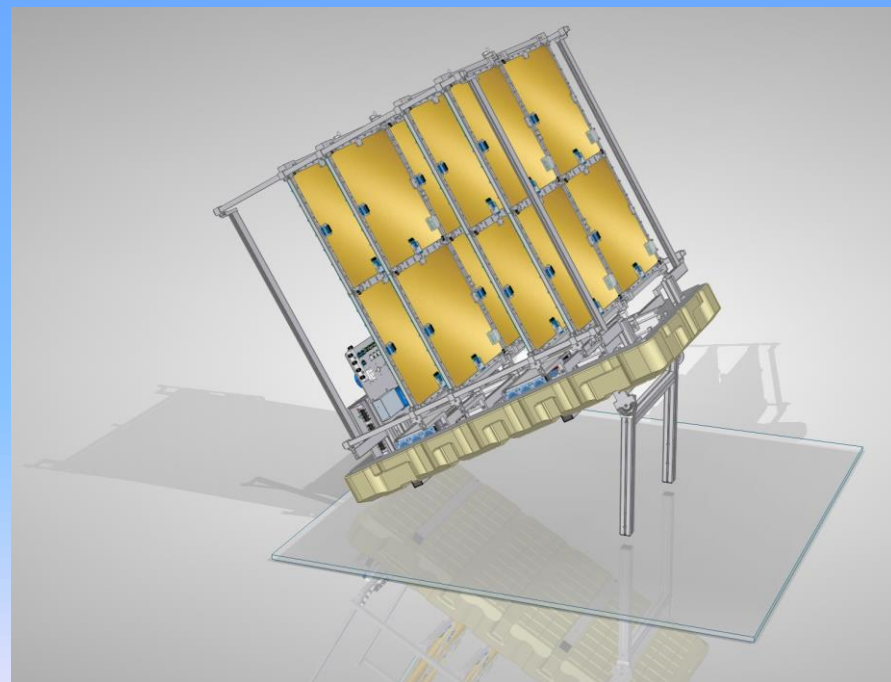
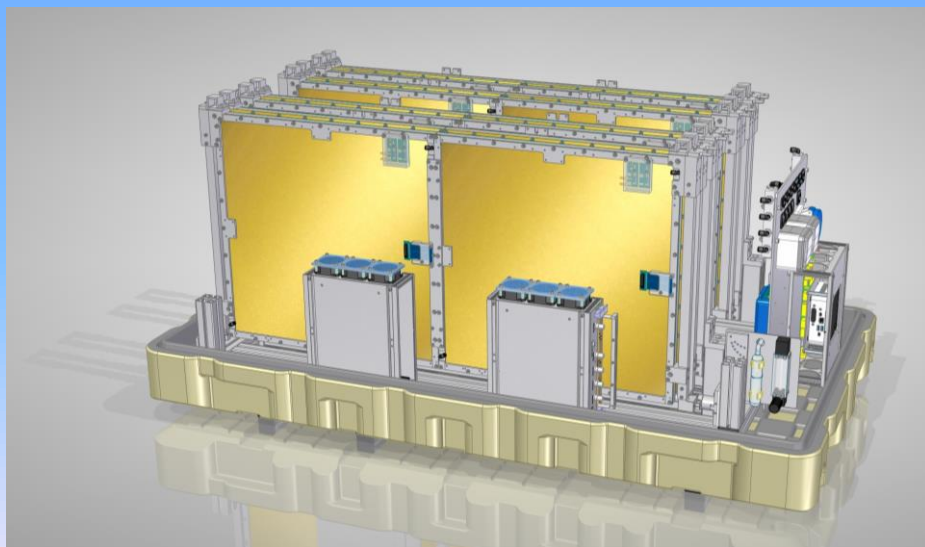
Volcanologie



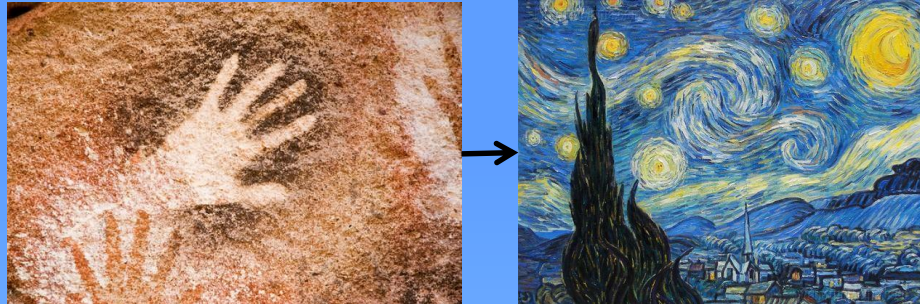
+ ...

Plateforme de R&D pour les applications de tomographie muonique

- *Maison de l'Imagerie Muonique Ouvertes aux applications Sociétales et Académiques*
- *Financement 400 k€ en 2016 (3 ans) par la région Ile-de-France*
- *Plateforme composée de :*
 - *1 banc cosmique de 2 m²*
 - *2 télescopes de 1 m²*



- Peinture



- Photographie



- Muographie?

