



Plan

- Le rayonnement cosmique
- La muographie, applications & technologies
- Les débuts de la muographie HD: l'expérience WatTo
- La mission ScanPyramids
- Perspectives

S. Procureur
EAMEA| 08/11/2018
| 2

Le rayonnement cosmique - introduction

→ Origine longtemps mystérieuse

- Effets connus depuis le 18^{ème} siècle (décharge des électroscopes)
- Source terrestre ou extra-terrestre?
- Expérience de Wulf sur la Tour Eiffel (1910)

→ 2 expériences décisives en 1912

- Hess: vol en ballon pour mesurer la décharge d'électroscopes
- Pacini: mesure sur et sous la mer

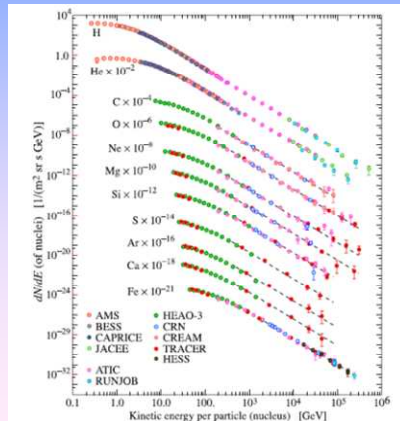
→ Nature du « rayonnement »?

- Effet de la latitude mesuré par Compton (1933)
- Effet Est-Ouest

S. Procureur
EAMEA| 08/11/2018
| 3

→ Particules de haute énergie produites dans l'Univers

- Activité solaire (basse énergie)
- Supernovae
- Noyaux actifs de galaxies
- ...



$$I_N(E) \approx 1.8 \times 10^4 \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \text{ s sr GeV}}$$

→ ~90% de protons et ~9% de He

→ Mesurées jusqu'à 3.108 TeV

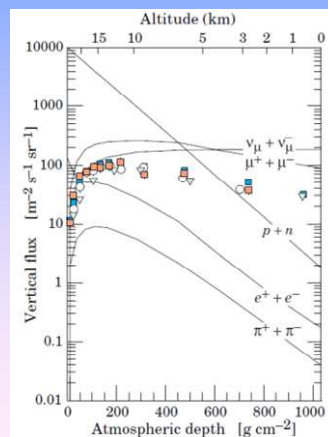
→ Flux anti-corrélé avec l'activité solaire

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 4

→ Produit une cascade de réactions en entrant dans l'atmosphère..

- « Gerbes cosmiques »
- Pions, kaons, électrons, muons,...



S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 5

→ Seule une partie arrive jusqu'au sol

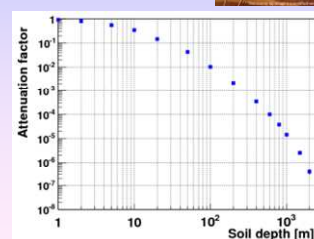
- Flux au sol dominé par les muons
- Flux de muons ~150 Hz/m², distribution en $\cos^2 \theta$

→ Propriétés intéressantes des muons cosmiques

- **Instables mais pas trop** ($\tau = 2.2\mu\text{s}$)

- 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!)



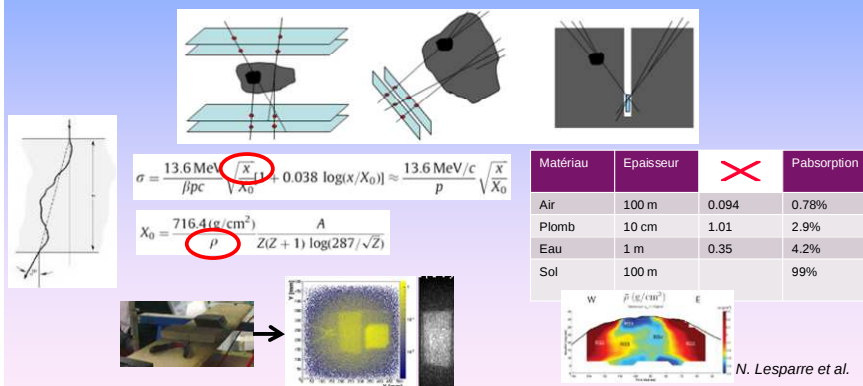
S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018

| 6

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

- 2 modes différents, la déviation et la transmission



- Nombreuses applications...

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 7

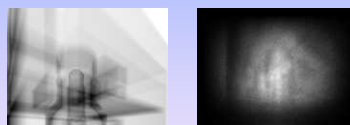
→ Sécurité du territoire: détection de matière nucléaire de contrebande

- Initié aux Etats-Unis (Los Alamos) en 2003
- 1er portique de détection en 2012 (Decision Science)



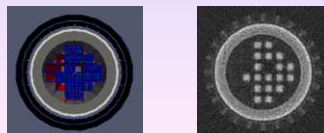
→ Imagerie de réacteurs

- Après catastrophe (Fukushima, TEPCO 2011)
- Avant démantèlement (intégrité des structures)



→ Imagerie de déchets nucléaires

- Caractérisation de fûts, suivi dans le temps
- Outil de surveillance (nucléaire non civil)

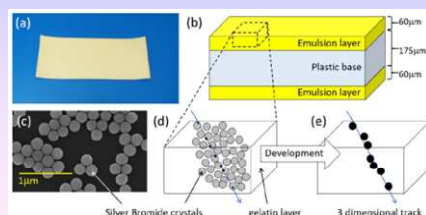
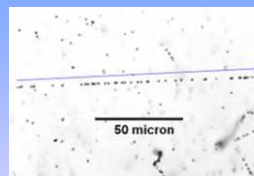


S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 8

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

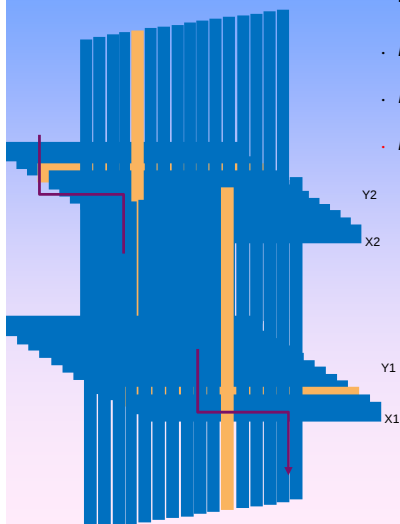
- Résolution micrométrique
- Sans alimentation
- Fragile
- Pas de temps réel



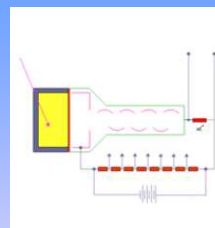
S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 9

→ Détecteur solide constitué d'un plastique scintillant



- Robuste
- Imagerie temps réel
- Résolution médiocre

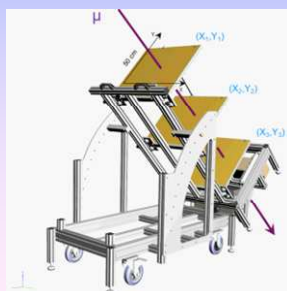


S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 10

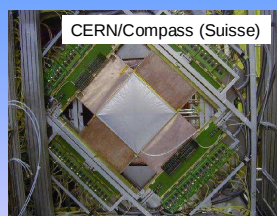
→ Détecteur utilisant l'ionisation d'un gaz par une particule incidente

- Robuste
- Imagerie temps réel
- Très bonne résolution



S. Procureur

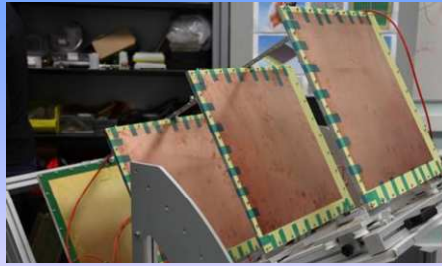
EAMEA| 08/11/2018 | 11



⇒ Fin 2014: proposition de l'expérience WatTo (1er télescope à muons)

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 12



Boîtier HT + électronique dédiée



S. Procureur

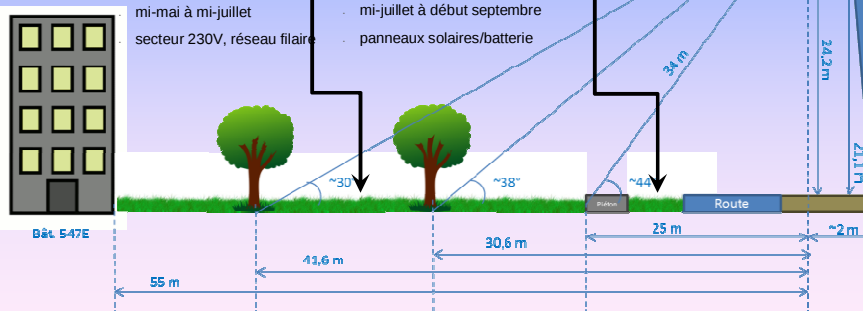
EAMEA| 08/11/2018 | 13



Position 1



Position 2



S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 14

→ Muographie statique

Temps de pose: 4 semaines (position 1)

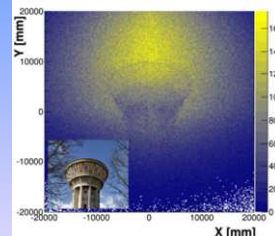
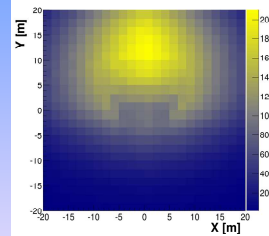


Image d'un télescope à scintillateurs de même compacité



⇒ Première muographie « reconnaissable » d'une structure (HD)

→ Comment lire une muographie:

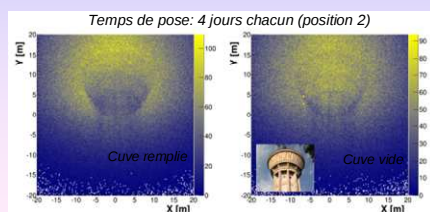
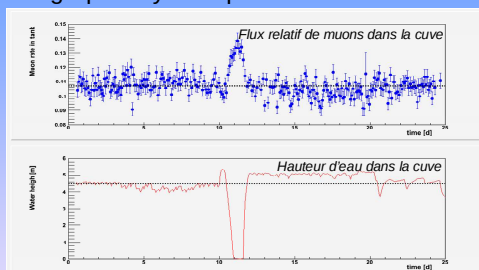
- Chaque pixel contient un nombre (ou flux) de muons reconstruits dans la direction correspondante
- Couleur claire □ plus de muons □ moins d'absorption □ moins de matière
- Couleur sombre □ moins de muons □ plus d'absorption □ plus de matière



S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 15

→ Muographie dynamique



S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 16

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
- 1ère réunion mi-décembre à Paris
- 1ère mission de reconnaissance en janvier 2016
- Annonce de la participation CEA en avril 2016
- 1ère installation des télescopes début juin 2016

**SCAN
PYRAMIDS**


S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 17

**SCAN
PYRAMIDS**

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 IVème dynastie

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

Dashour



Gizeh

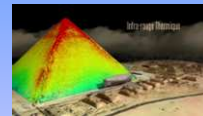


S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 18

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

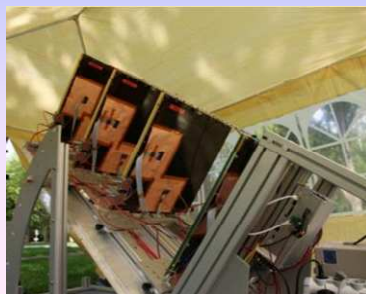


→ + Simulateur temps réel

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 19

- 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

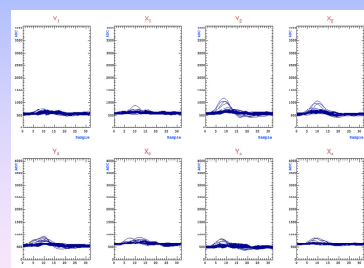
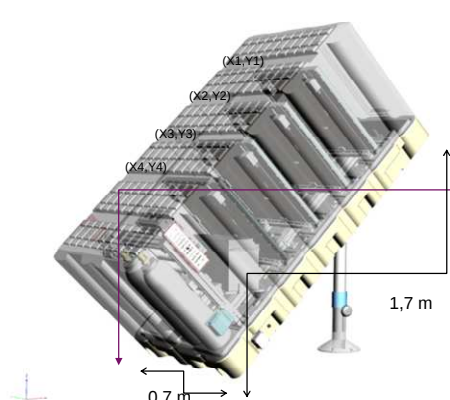


S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 20

Nouveaux télescopes :

- Transportables & facilement opérationnels
- Accessibles via le réseau 3G



S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 21

Intégration en salle blanche et tests en extérieur



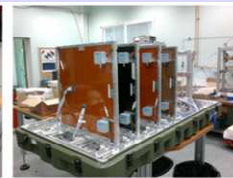
3 télescopes envoyés en avril 2016



Alhazen (n 1)



Alvarez (n 2)



Brahic (n 3)

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 22

Installation sur le Plateau de Gizeh



S. Procureur

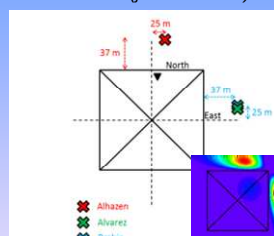
EAMEA| 08/11/2018 | 23

Campagnes de mesure

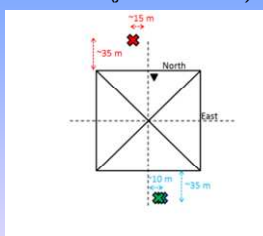


3 missions entre 2016 et 2017

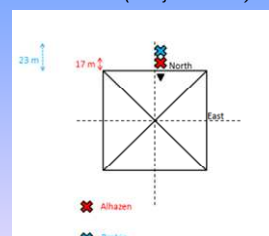
Mission 1 (juin-août 2016)



Mission 2 (janvier-avril 2017)



Mission 3 (mai-juillet 2017)

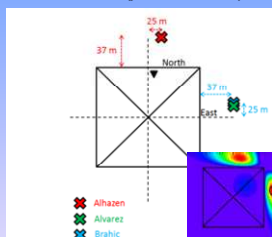


S. Procureur

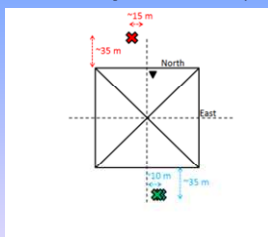
EAMEA| 08/11/2018 | 24

3 missions entre 2016 et 2017

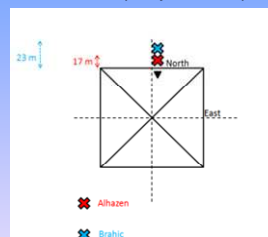
Mission 1 (juin-août 2016)



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

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 25

Globalement sans histoires...

avant

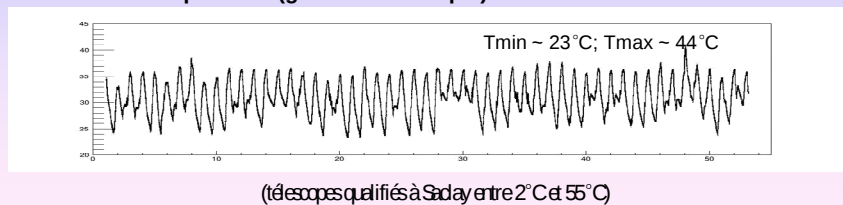


après



+ problème réseau 3G/4G
+ ...

Variations de température (gaz & électronique)

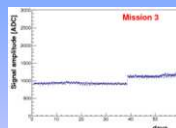
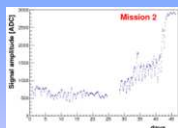
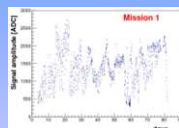


S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 26

Améliorations successives des instruments

Stabilité du signal



Suivi des conditions environnementales



Analyse complète en ligne sur nano-PC (smartphone)



CEA



Nagoya

S. Procureur

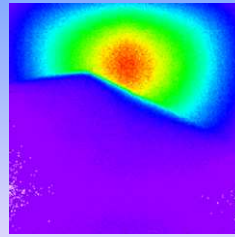
EAMEA| 08/11/2018 | 27

Muographie: image 2D de la direction des muons détectés

photo

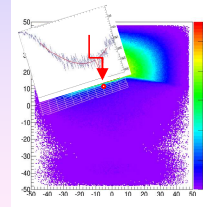
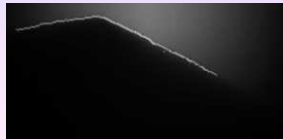
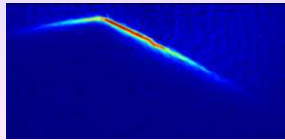


muo



Petits détails pas visibles directement

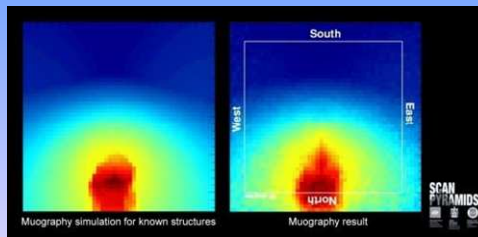
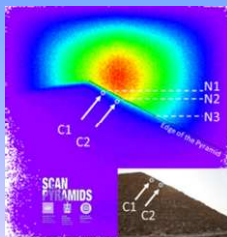
⇒ Analyse d'image



S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 28

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



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

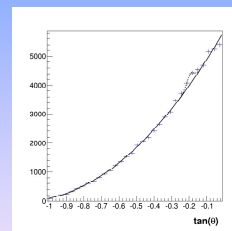
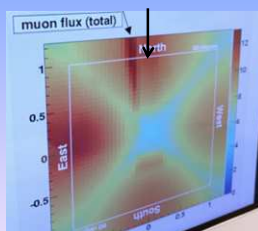
S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 29

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

Excédent de muon significatif au voisinage
de la grande galerie (sur l'image) ⇒ vide

Des anomalies apparaissent également sur la muo du KEK
(chambre de la Reine) et sur celle du CEA (face Nord)



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 du scintillateur KEK
- Extérieur: déplacement de Alhazen et Brahic en face des chevrons



S. Procureur

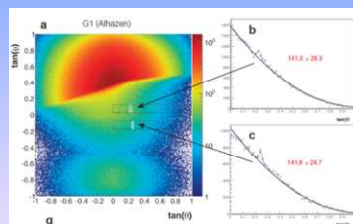
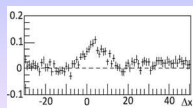
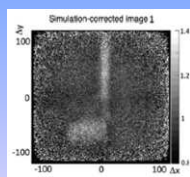
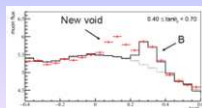
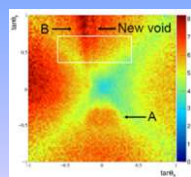
EAMEA| 08/11/2018 | 30

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

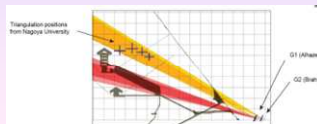
Nagoya

KEK

CEA



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



S. Procureur



EAMEA| 08/11/2018 | 31

Faits remarquables du ScanPyramids Big-Void:

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



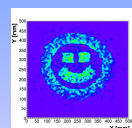
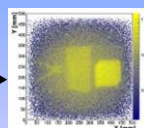
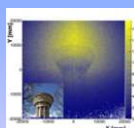
- Volume estimé à plusieurs centaines de m³
- Longueur d'au moins 30m
- Vide horizontal ou incliné... Nécessite d'autres mesures!

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 32

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

Technologies suffisamment performante pour reconnaître des structures, et même des petits objets



Génie civil, ouvrages d'art



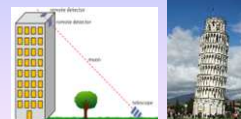
Démantèlement, déchets



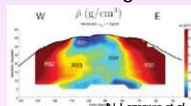
Haut fourneau



Métrologie (muonique)



Volcanologie



N. Lesparre et al.

+...

S. Procureur

EAMEA| 08/11/2018 | 33

. Peinture



. Photographie



. Muographie?



Affaire à suivre, donc !