

# Muography

Maxime Lagrange

18 avril 2022



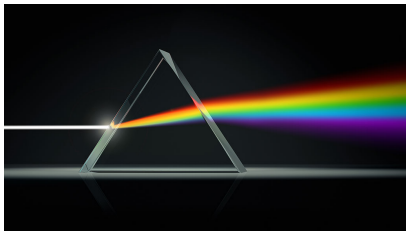
# Muographie : concept

**-graphie**

" Qui fixe, qui donne une forme imprimée ou écrite"

**Photographie** → **photons**

**Source** : Photons



**Muographie** → **muons**

**Source** : Muons



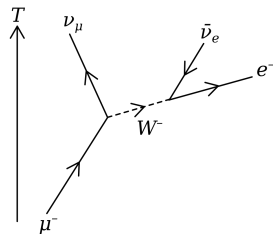
# Muons : qui sont-ils ?

## Propriétés

- Cousin de l'électron : même **charge**, mais plus **lourd** !

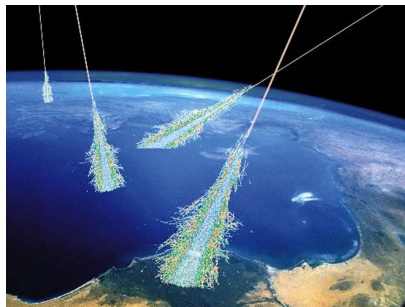
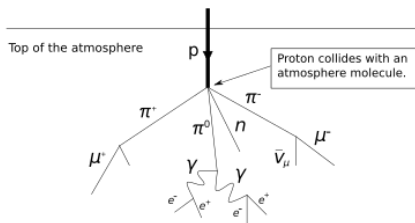
$$m_{\mu} = 200 \times m_e \quad (1)$$

- Particule **instable**, temps de vie moyen  $\tau = 2,2 \mu s$
- **Interagit "peu"** avec la matière, contrairement à l'électron



# Muons : d'où viennent-ils ?

Issus d'**interactions** violentes entre **particules cosmiques** et les **molécules** de l'atmosphère



**Flux** de muons (au niveau de la mer)  $\approx 10000/m^2/minute$

# I- Muographie par absorption

Technique basée sur la **mesure de l'absorption** des muons cosmiques par la **matière** (similaire à la **radiographie**)



- Flux **entrant**  $F_{in}$  connu
- Flux **sortant**  $F_{out}$  mesuré

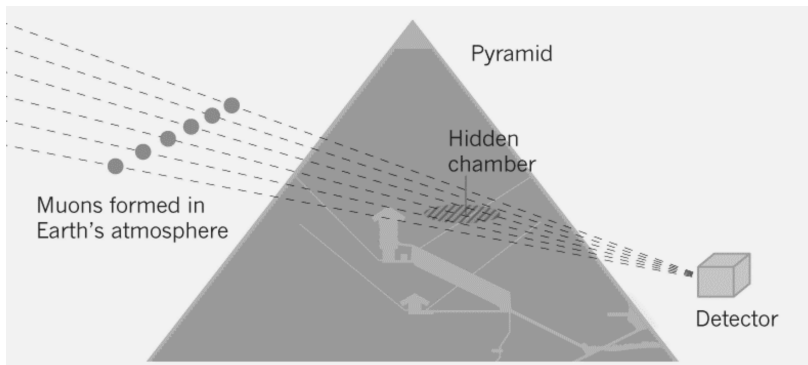
On calcule la **transmission**  $t$  :

$$t = \frac{F_{in}}{F_{out}} \quad (3)$$

La transmission trahit la densité de l'objet :

Objet **dense** : muons absorbés, objet **peu dense** : muons transmis

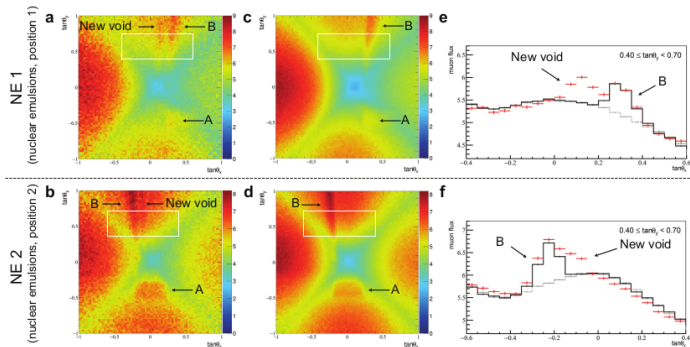
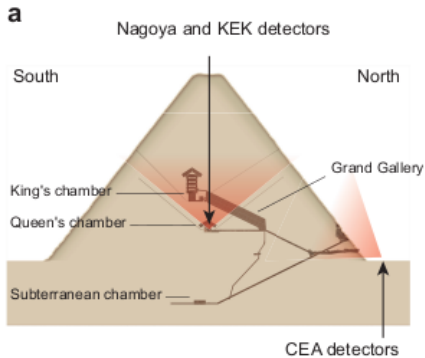
# I- Muographie par **absorption**



- Le détecteur mesure la **direction** ( $\theta, \phi$ ) des muons
- En comptant le nombre de muons, on est sensible à la **densité** de l'objet

# Application : Archéologie

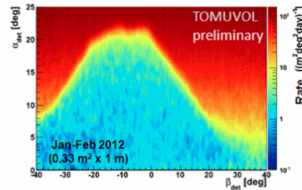
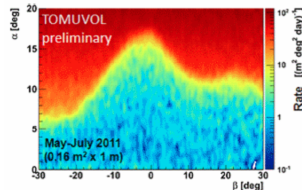
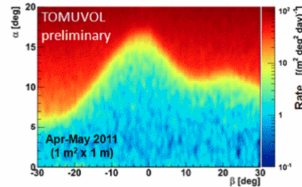
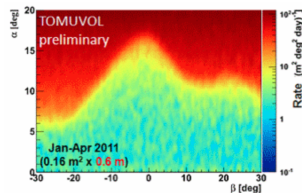
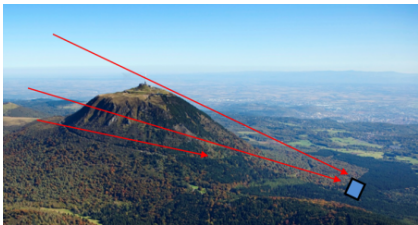
Recherche d'une pièce secrète dans la pyramide de Khufu



**a,b** Flux mesurés, **c,d** Flux simulés (hypothèse nulle)

# Application : Géologie

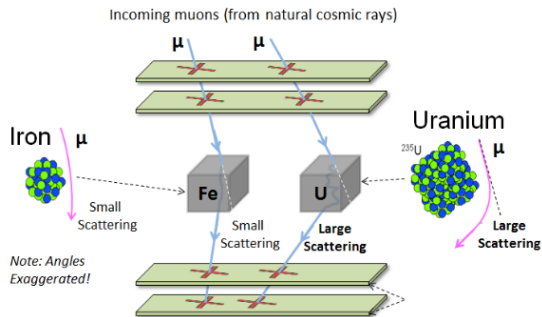
TOMUVOL, imagerie du Puy de Dôme, Clermont-Ferrand FRANCE





## II- Muographie par "Scattering"

Technique basée sur la mesure des **angles de déflexion** des muons pénétrant la **matière**

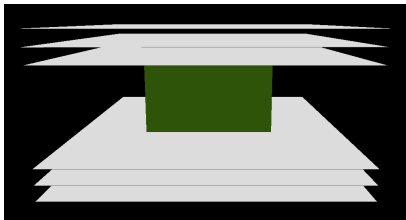


- Mesure la direction **entrante** et **sortante** du muon
- Estimer le **point d'interaction**
- Calculer l'**angle de diffusion**  $\theta_{msc}$
- Densité  $\propto \theta_{msc}$

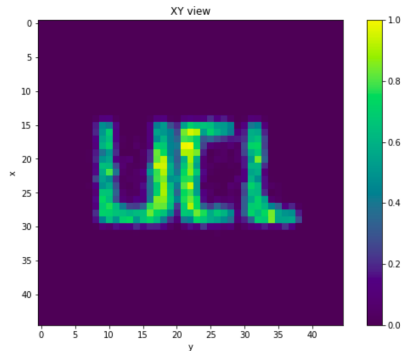
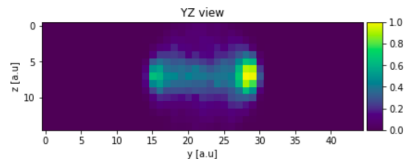
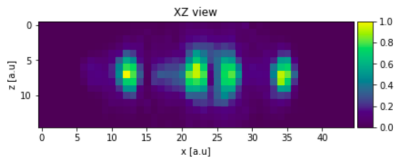
Le système de détection doit englober l'objet : **limite** la taille de l'objet à imager !

# Muographie par "Scattering" : exemple

On place l'objet à imager (vert) entre les détecteurs

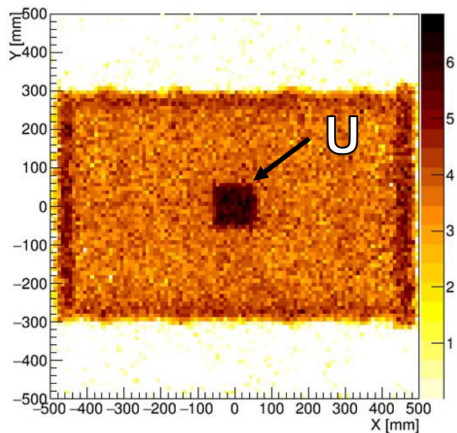


Après  $\approx 8$  min d'exposition (200 000 muons)

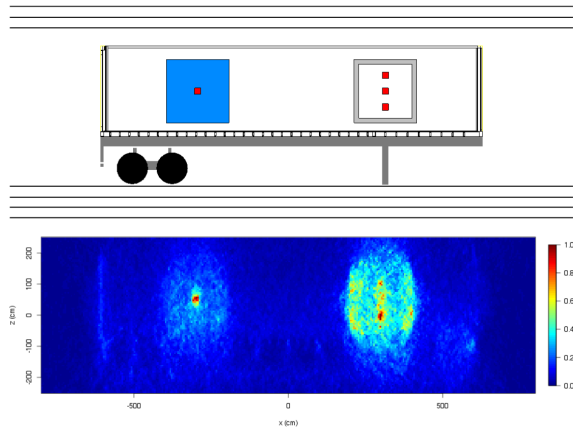


# Applications : Industrie, douanes

## Déchets nucléaires



## Cargo (douanes)



# Muographie : POURQUOI ?

## Avantages

- Imagerie **non-destructive** : n'altère pas l'objet (contrairement aux rayons X)
- Permet d'imager des objets **immenses** (immeubles, volcans, tunnels, etc..)

## Inconvénients

- **Temps d'acquisition** long (jusqu'à plusieurs mois pour de larges objets)
- **Flux** de muons cosmiques **variable** (contrairement à radiographie) : dépend des conditions météo, cycle solaire, etc...

1. Imagerie du Puy-de-Dôme TOMUVOL,  
*<http://www.obs.univ-bpclermont.fr/tomuvol/index.php>*
2. Imagerie Pyramide de Khufu *<http://www.scanpyramids.org/>*
3. General review about muography, *Atmospheric muons as an imaging tool*  
*<https://arxiv.org/abs/1906.03934>*