

# Le télescope à muons du CEA

## PRINCIPE



Capter à l'aide de détecteurs gazeux un flux de muons venus de différentes directions pendant un laps de temps donné. Puis déduire des variations de ce flux, la variation de densité de la matière traversée : moins il y a de muons détectés, plus il y a de matière. Et former une image « en négatif » de l'objet étudié.

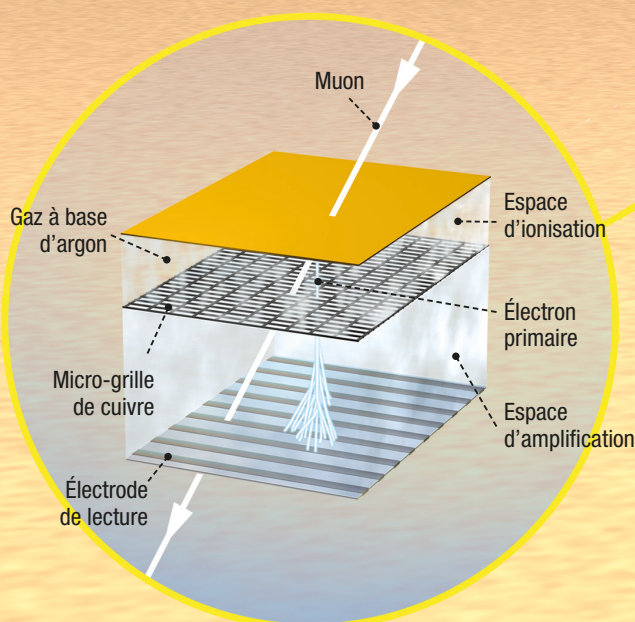
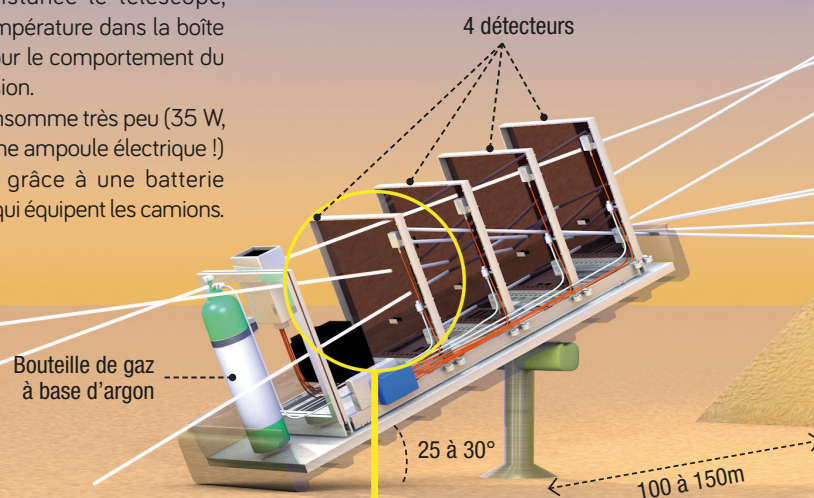
### Du télescope...

Il comprend 4 détecteurs gazeux Micromegas installés en ligne. Chacun capte et amplifie le signal électrique (électrons) produit lorsqu'un muon le traverse (il en arrive 5 à 10 par seconde). Tous les signaux enregistrés sont directement transmis à un nanoPC, équivalent de l'ordinateur d'un smartphone, qui traite l'information brute en temps réel et reconstruit précisément (résolution de 200 microns) la trajectoire de chaque muon. Puis, il communique les

données au laboratoire français du CEA par une connexion Internet 3G, toujours en temps réel.

À noter, le nanoPC permet aussi de contrôler à distance le télescope, ainsi que la température dans la boîte (importante pour le comportement du gaz) et la pression.

L'ensemble consomme très peu (35 W, l'équivalent d'une ampoule électrique !) et fonctionne grâce à une batterie comme celles qui équipent les camions.



### Détecteur « Micromegas » :

Il peut détecter les muons via les électrons qu'ils arrachent en passant dans le système.

Il se compose d'une plaque sensible contenant un volume de gaz à base d'argon (non toxique, non inflammable) divisé en deux espaces parallèles : espace d'ionisation et espace d'amplification.

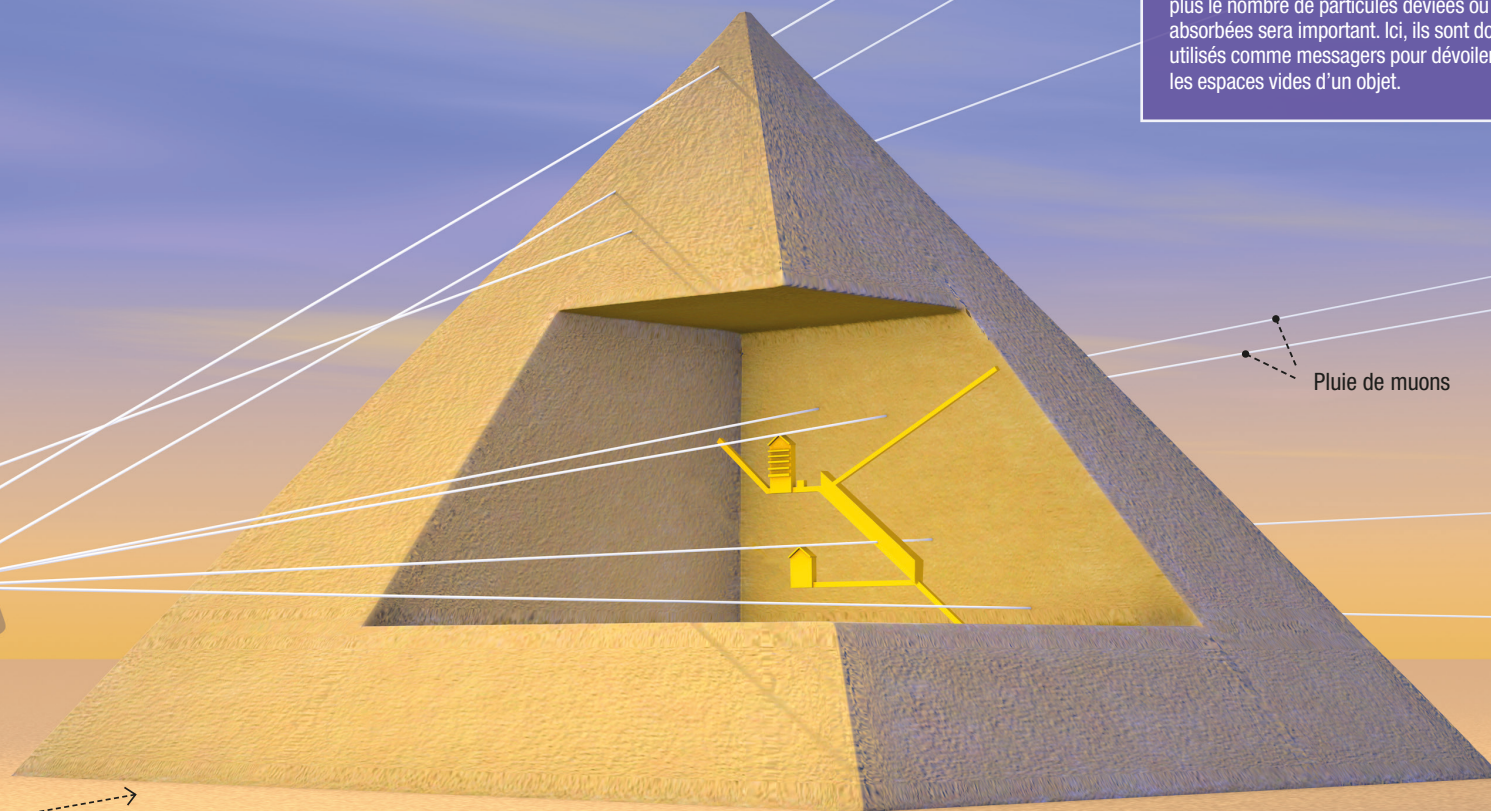
En traversant le détecteur, un muon arrache quelques électrons au gaz de l'« espace d'ionisation ». Le signal est alors faible. Mais ces électrons primaires sont accélérés sous l'effet d'un champ électrique (1 kV/cm) créé par des boîtiers de haute tension et traversent une micro-grille de cuivre. Ils atteignent alors l'« espace d'amplification », qui présente un champ électrique 50 fois plus intense, pour subir une nouvelle accélération et obtenir assez d'énergie pour ioniser de nouveau le gaz. En résulte une avalanche de nouveaux électrons (quelques dizaines de milliers) permettant aux pistes de l'électrode de lecture la détection du signal amplifié.

## À SAVOIR



### Qu'est-ce qu'un muon?

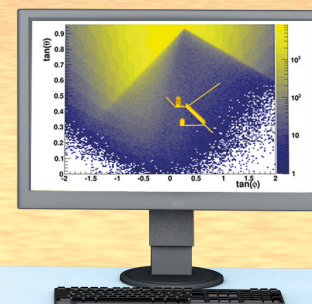
Sorte d'électrons lourds découverts en 1936, ces particules élémentaires sont issues des collisions entre les rayons cosmiques de notre environnement galactique et les atomes de l'atmosphère. Elles tombent en permanence sur la Terre à une vitesse proche de la lumière, avec un débit d'environ 10 000 particules par m<sup>2</sup> par minute. À l'instar des rayons X, les muons interagissent peu avec la matière et peuvent, de fait, la traverser très facilement. Pour autant, plus l'objet est épais et/ou dense, plus le nombre de particules déviées ou absorbées sera important. Ici, ils sont donc utilisés comme messagers pour dévoiler les espaces vides d'un objet.



### ... à l'image.

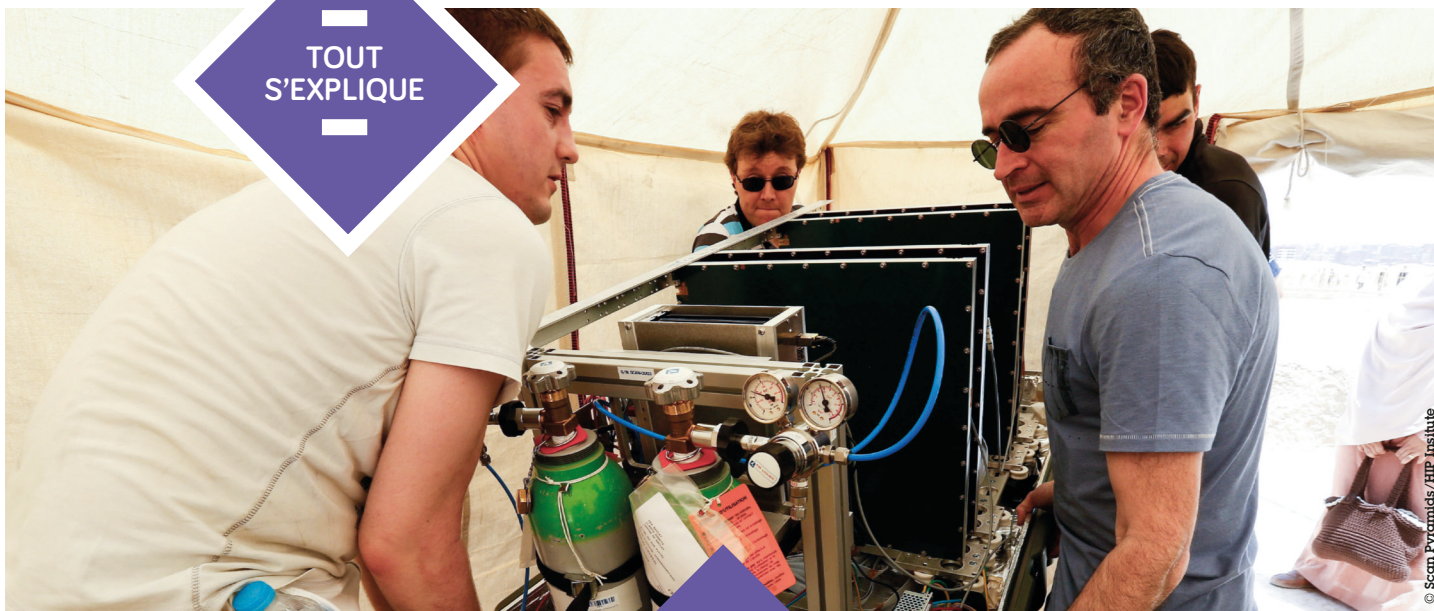
À partir des données envoyées par le nanoPC, une « image en négatif » de l'objet d'intérêt est reconstituée par un logiciel en laboratoire. Elle est issue de l'accumulation de muons captés par le télescope pendant 3 à 4 semaines : beaucoup de muons = peu de matière ; peu de muons = beaucoup de matière.

La qualité de l'image dépend de la distance du télescope à l'objet, de sa résolution angulaire et de son angle par rapport à l'horizon. Par exemple, plus le télescope est horizontal, moins il capte de muons, et plus le temps de mesure doit être long. Il faut donc trouver le meilleur équilibre entre ces trois paramètres.



- Beaucoup de muons captés = peu de matière
- Peu de muons captés = beaucoup de matière

TOUT  
S'EXPLIQUE



© Scan Pyramids / Irfu Institute

## L'histoire des détecteurs Micromegas

Le système Micromegas, évolution des chambres à films mises au point par le physicien et prix Nobel Georges Charpak, a été inventé en 1994 au CEA, à l'Irfu. Depuis, il a gagné en résolution spatiale, en capacité de fonctionner dans des flux de particules de plus en plus élevés, et avec des tailles et géométries variables. Seuls deux laboratoires dans le monde sont capables de produire ces détecteurs : l'un au CERN, principal réalisateur, et l'autre à l'Irfu. Des industriels européens ont toutefois acquis le savoir-faire pour réaliser de grandes surfaces.

Les Micromegas présentent un fort potentiel pour l'instrumentation nucléaire, biomédicale et industrielle, ainsi que pour des disciplines plus exotiques comme la vulcanologie et l'archéologie. Aujourd'hui, plus d'une dizaine d'expériences de l'Irfu exploitent ces détecteurs. Et les détecteurs du futur sont déjà imaginés, que ce soit pour le collisionneur post-LHC ou pour une mission spatiale.

## Les technologies de muographie du projet Scan Pyramids

Sous l'autorité du ministère égyptien des Antiquités, la mission Scan Pyramids vise à scanner, durant une année, les grandes pyramides d'Égypte (Kheops, Khephren, la pyramide Rhomboïdale et la pyramide Rouge). Pour cela, aux côtés d'instruments de thermographie, trois types

de technologie de muographie sont installés sur le site. Les résultats obtenus seront ensuite interprétés par des comités scientifiques de différentes disciplines, dont des égyptologues.

	Émulsions chimiques (Nagoya, Japon)	Scintillateurs (KEK, Japon)	Micromegas (CEA, France)
Résolution spatiale (qualité d'image)	Quelques microns	~ 3 mm	~ 200 microns
Imagerie temps réel/ dynamique	Non	Oui	Oui
Robustesse	Fragile	Robuste	Robuste
Sensibilité aux conditions extérieures	Très sensible à la température (T<25°C) et à l'humidité	Insensible	Très peu sensible
Temps d'exposition maximal	40 jours	Infini	Infini
Possibilité de réutilisation	Non (nouvelles émulsions)	Oui	Oui
Emplacement dans la pyramide	Intérieur	Intérieur	Extérieur
Surface de détection	~2x2 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	3 x ¼ m <sup>2</sup>
Obtention des images	Plusieurs mois	Quasi-direct	Quasi-direct (analyse online sur un nanoPC)

Avantages Limites

© www.groupeorangevif.fr

les défis 210  
du cea



## La muographie

Sonder un objet là où la photographie ne voit que sa partie superficielle. Voici la prouesse de la muographie. Non destructive et non invasive, cette technique innovante mesure la quantité de muons (particules cosmiques) reçue par un capteur dans un laps de temps défini. À partir de la variation de densité du flux (plus ou moins de muons), des cavités peuvent être repérées au milieu d'énormes quantités de matière.

### APPLICATIONS

Sortes d'électrons lourds, les muons sont des particules élémentaires issues du rayonnement cosmique. Ils tombent en permanence sur la Terre et peuvent, comme les rayons X, traverser très facilement des roches de grande épaisseur, telles que les montagnes ! Des caractéristiques exploitées par la muographie pour servir de nombreux domaines. Initialement utilisée en recherche fondamentale pour la physique nucléaire et la physique des particules au début des années quatre-vingt-dix, cette technologie a vu son champ d'action s'élargir considérablement : archéologie, génie civil, imagerie médicale... Elle est par exemple fréquemment utilisée dans l'observation des volcans, notamment par des équipes de recherche japonaise, avec leur technique par émulsions chimiques,

et française, avec des scintillateurs. Aujourd'hui, la muographie joue un rôle phare dans la mission Scan Pyramids pour scruter les pyramides d'Égypte. Objectif : révéler la présence de structures internes méconnues pour mieux comprendre à la fois le plan et la construction de ces grands monuments funéraires de la IV<sup>e</sup> dynastie. Pour cela, trois technologies des plus innovantes ont été retenues, dont le télescope à muons du CEA qui a rejoint la mission le 15 avril 2016. Issu de la recherche fondamentale de l'Irfu, cet instrument fonctionne à partir de détecteurs gazeux Micromegas contenant de l'argon. Aussi, la muographie ouvre-t-elle l'accès à des lieux inaccessibles pour l'Homme, et donc inexplorés jusqu'à présent.