

## Du cosmos au centre de la Terre : voyage au cœur de la matière grâce à la muographie

### Des particules pour créer des images

Imager l'intérieur des objets et des structures permet de répondre à de nombreuses questions. C'est une des activités récurrente et commune de la médecine humaine, qui propose fréquemment à un patient différents dispositifs – radiographie par rayons X, scanner, IRM, imagerie TEP, etc. – pour sonder l'intérieur de l'organisme et visualiser, suivant les caractéristiques propres à chaque système, le squelette ou les viscères et comprendre l'origine des dysfonctionnements. Les particules élémentaires – constituants auxquels on ne connaît pas de sous-structures, que l'on qualifie parfois d'« insécables » – jouent un rôle essentiel dans ces méthodes d'imagerie car elles peuvent sonder la matière avec des caractéristiques qui dépendent de leur interaction avec cette dernière. Une particule qui agit fortement avec la matière ne pénètre que sur de très faibles épaisseurs et fournit des informations sur les états de surface. À l'opposé, une particule interagissant faiblement peut sonder en profondeur, voire traverser un échantillon au moins partiellement.

Dans les années 1970, un physicien brillant, Luis Alvarez, propose d'utiliser ces propriétés de « sondes de la matière » des particules élémentaires pour chercher d'éventuelles cavités à l'intérieur des grandes pyramides d'Égypte (déjà...). Son résultat, non conclusif [1], a été une source d'inspiration pour le projet ScanPyramids [2] qui a annoncé en 2016 la découverte d'une nouvelle salle au sein de la pyramide de Khéops, grâce à une technique nouvelle, la muographie. La muographie, discipline innovante de l'imagerie de structures, utilise des principes voisins de la radiographie par rayons X et se développe rapidement depuis quelques années, portée par des besoins grandissants, notamment dans le domaine du contrôle non invasif et non destructif de l'industrie dans son ensemble. Elle propose ainsi des réponses nouvelles à des problématiques de stockage à long terme, d'encrassement ou de bouchage de tuyaux, d'analyse de structure interne, avec l'avantage capital d'être une méthode absolument passive – pas d'injection de signal d'aucune sorte à l'intérieur du système à imager – et disponible 24/7 sans opérateur. Elle permet ainsi non seulement une imagerie structurelle à l'instar d'autres techniques (ultrasons, radars, gammamétrie, etc.), mais également un suivi temporel des structures sur des périodes pouvant être particulièrement longues.

Cette technique nouvelle, sensible à la densité des matériaux mais également à leur composition chimique, en plein développement, offre de multiples possibilités d'imagerie des structures de l'industrie chimique, ayant des contenus statiques ou dynamiques, opaques aux techniques de sondage classiques du fait de leurs dimensions, de leur accessibilité ou de leur dangerosité.

### Des cascades de particules dans l'atmosphère

L'Univers est parcouru par des particules de très haute énergie qui sont libérées par les explosions d'étoiles en fin de vie ou d'autres phénomènes astrophysiques violents. Ces rayons cosmiques en provenance de l'espace interagissent avec les molécules qui composent les premières couches de notre atmosphère et provoquent des réactions particules-noyaux, comme dans un collisionneur de particules, au CERN ou ailleurs. Ces interactions créent d'autres particules, donnant ainsi une véritable cascade de particules dont l'énergie décroît à mesure qu'elles se rapprochent de la surface terrestre (figure 1). C'est la composante « atmosphérique » de la radioactivité naturelle. Parmi ces particules atmosphériques, certaines sont rapidement absorbées, parfois même avant d'arriver au sol. D'autres au contraire sont très pénétrantes : c'est le cas des muons, des particules

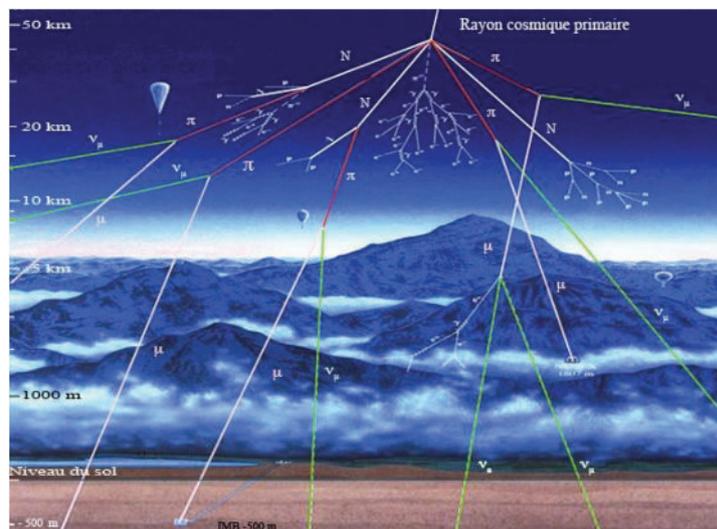


Figure 1 - Vue d'artiste d'une cascade de particules atmosphériques initiée dans les couches les plus hautes de l'atmosphère par l'interaction d'un rayon cosmique primaire très énergétique. Cette interaction primaire engendre de multiples particules qui peuvent ré-interagir à leur tour ; ainsi s'explique la multiplication des particules.

élémentaires dont les propriétés sont très semblables à celles des électrons (figure 1).

Même si les propriétés des muons sont actuellement l'objet de mesures ultrafines pour tester les limites du modèle standard [3], leur flux sur Terre est bien connu. Ainsi donc les muons sont des particules qui portent une charge électrique comme les électrons, mais qui se distinguent par leur masse, environ 200 fois plus élevée que celle des électrons. Cette différence de masse explique en grande partie que les muons interagissent beaucoup plus faiblement avec les atomes qui composent la matière ordinaire et que les plus énergétiques d'entre eux peuvent traverser jusqu'à plusieurs kilomètres de roche avant d'être absorbés ! Lors de cette traversée, les muons vont malgré tout interagir avec la matière et être déviés ou absorbés au passage. Ces modifications de leur trajectoire dépendent de la densité de la matière traversée. Si l'on place un détecteur à muons derrière une structure et que l'on parvient à compter les muons ou à mesurer les déviations subies par leur trajectoire, on peut ainsi remonter à la densité du milieu traversé. C'est le principe de la muographie qui peut donc s'appliquer à tous types de problématiques, de la recherche d'éléments denses au sein d'un petit conteneur à l'imagerie de structures aussi grandes que des dômes de volcans actifs, comme l'illustre la figure 2 qui montre un détecteur à muons analysant l'intérieur d'un volcan en Islande, le Snaefellsjökull, porte d'entrée du *Voyage au centre de la Terre* de Jules Verne [4].

### La muographie : méthodes et détection

La muographie dite « par absorption » consiste donc à placer un détecteur à muons derrière l'objet à étudier et à mesurer les trajectoires des muons ayant réussi à traverser ce dernier. La comparaison à un modèle théorique, en l'absence d'objet, du nombre de trajectoires de muons attendues sur le détecteur, permet de mesurer l'opacité relative des différentes zones de l'objet. L'opacité étant le produit de la densité et de la longueur de la trajectoire, l'extraction de l'information sur la densité seule passe par la résolution d'un problème inverse en utilisant des informations a priori en entrée,



Figure 2 - Vue d'un détecteur à muons face au dôme d'un volcan islandais, le Snaefellsjökull. Les trois plans de détection ont une surface d'un mètre carré ; le détecteur pointe vers le sommet du volcan, situé à plusieurs kilomètres. © Carol Müller.

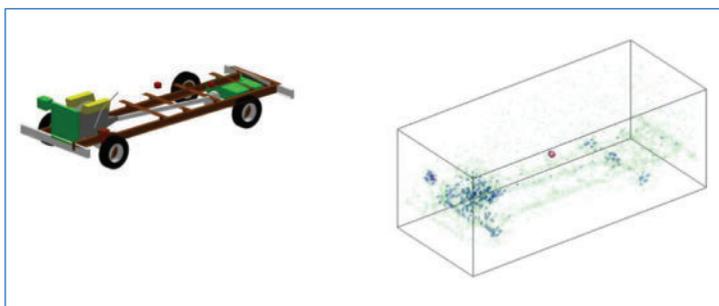


Figure 3 - Principe de l'imagerie par muographie par diffusion d'un véhicule à des fins de contrôle [5].

telles que la topographie de la structure étudiée par exemple. À noter qu'il existe un second mode d'utilisation de la muographie, dite « par déviation », qui consiste en la mesure de la différence d'orientation des trajectoires avant et après l'objet. Ces déviations sont également proportionnelles à la densité et à la composition chimique des matériaux traversés. Une des utilisations populaires de cette technique est l'imagerie de véhicules dans le cadre du « Homeland Security » pour en contrôler le contenu et identifier d'éventuelles anomalies (figure 3).

La détection des muons se fait grâce à un trajectographe (« tracker ») constitué généralement de plusieurs plans de détection pixelisés parallèles. Chaque pixel touché par un muon génère un signal, et l'alignement spatial et temporel de l'ensemble des pixels touchés sur les différents plans de détection permet de reconstruire la trajectoire de la particule incidente. Le détecteur de la figure 2 utilise par exemple des scintillateurs qui génèrent au passage des muons un signal optique collecté par fibres optiques jusqu'à un photosenseur [6].

### L'interdisciplinarité en action : applications en géosciences et pour l'industrie

La muographie est une méthode qui bénéficie des apports de nombreuses disciplines allant de la physique des particules à l'imagerie médicale. Elle connaît un développement rapide, tant du point de vue instrumental que méthodologique. C'est une technique qui gagne en maturité et est maintenant bien répandue dans le monde, notamment auprès d'acteurs non académiques qui proposent des services d'imagerie dédiés [7]. Si les principales applications concernent essentiellement des besoins en imagerie structurelle, la disponibilité permanente du flux de muons permet en outre un suivi temporel des contenus d'un objet pour en assurer une imagerie fonctionnelle.

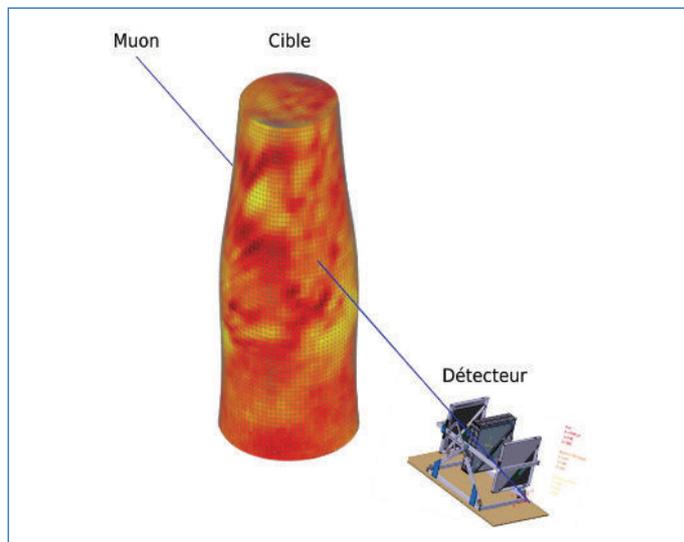


Figure 4 - Première image 3D d'un haut fourneau. La trajectoire fictive d'un muon à travers la cible jusqu'au détecteur est représentée sur l'image reconstruite.

Grâce à la validation des choix technologiques et méthodologiques, elle est aujourd'hui valorisée dans de nombreux domaines. Ainsi en géophysique, la méthode est utilisée pour la caractérisation de couches géologiques dans des problématiques d'enfouissement [8] ou de stockage à long terme (par exemple dans l'aval du cycle électronucléaire), ou encore la caractérisation de la dynamique d'un système hydrothermal [9] (application à l'hydrogéologie par exemple et à l'étude des nappes souterraines). La méthode a été appliquée également à la caractérisation d'un sous-sol urbain, au contrôle d'ouvrages d'art (recherche de ferrailage dans des ponts, caractérisation de tunnels), au contrôle non invasif et non destructif de nombreuses installations industrielles : hauts fourneaux, centrales de production d'énergie [10], silos de stockage, colonnes à distiller. Pour illustration, la première image 3D publiée d'un haut fourneau de production d'acier est donnée sur la figure 4 [11].

La capacité de surveillance d'une structure matérielle, grâce au suivi temporel, intéresse fortement le milieu de l'industrie lourde et ses problématiques de vidanges ou de remplissages de cuves, d'écoulements, de contrôles par jauge, d'injections ou remplacement de matériau, etc. Elle intéresse donc à plus d'un titre l'ensemble de l'industrie de la chimie par les possibilités de contrôles structurels et fonctionnels qu'elle propose.

[1] L.W. Alvarez *et al.*, Search for hidden chambers in the pyramids, *Science*, **1970**, *167*, 832839.

[2] [www.scanpyramids.org](http://www.scanpyramids.org)

[3] <https://www.pourlascience.fr/sd/physique-particules/le-muon-un-accroc-dans-le-modele-standard-21713.php>

[4] <https://lejournal.cnrs.fr/diaporamas/des-muons-en-islande>

[5] L. Schultz *et al.*, Statistical reconstruction for cosmic ray muon tomography, *IEEE Trans. Image Process.*, **2007**, *16*, doi 10.1109/TIP.2007.901239.

[6] N. Lesparre *et al.*, Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography, *Geosci. Instrum. Methods and Data Systems*, **2011**, *1*(1), p. 47-89.

[8] K. Jourde *et al.*, Improvement of density models of geological structures by fusion of gravity data and cosmic muon radiographies, *Geoscientific Instrumentation, Methods Data Syst.*, **2015**, *4*, p. 177-188.

[9] K. Jourde *et al.*, Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the la soufrière de Guadeloupe volcano, *Sci. Rep.*, **2016**, *6*, 33406.

[10] H. Fujii *et al.*, Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2020**, *4*, 043C02.

[11] <https://arxiv.org/abs/2301.04354>

Cette fiche a été préparée par **Jacques MARTEAU**, directeur adjoint de l'Institut de physique des 2 infinis de Lyon ([j.marteau@ip2i.in2p3.fr](mailto:j.marteau@ip2i.in2p3.fr)). Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON ([jp foulon@wanadoo.fr](mailto:jp foulon@wanadoo.fr)). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org).