

Introduction

Lors d'opérations de contrôle ou de démantèlement, il est souvent nécessaire d'imager l'intérieur d'une zone hautement contaminée. Ainsi, des méthodes de contrôle non-destructif (CND) sont à l'étude comme la muographie. Un procédé d'imagerie qui utilise les muons naturels : des particules élémentaires similaires à l'électron. Des applications en volcanologie, géologie ou l'archéologie⁽⁴⁾ existent déjà avec la muographie par absorption.

Certaines images données par les premiers télescopes à muons pour imager les Pyramides de Khéops⁽⁵⁾ relèvent d'une grande qualité. En 2023 le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) expérimente un télescope à muons pour imager le réacteur G2 à Marcoule⁽¹⁾. L'enjeu serait d'appliquer ce procédé au secteur du nucléaire de façon viable. **Ainsi, comment ces télescopes peuvent s'intégrer dans la filière nucléaire comme une imagerie non-destructive pour observer des composants sensibles ?**



Figure 1. Un des trois télescopes à muons utilisés au Japon. (Fuji, Hara, Hayashi, Kakuno, Kodama, Nagamine, Sato, Kim, Suzuki, 2020).

I – Principe de la muographie par diffusion

Le principe général repose sur les interactions entre le muon (μ) et la matière. Les muons sont naturels et formés dans la haute atmosphère. Ils retombent par gravité.

Principe d'obtention d'une image :

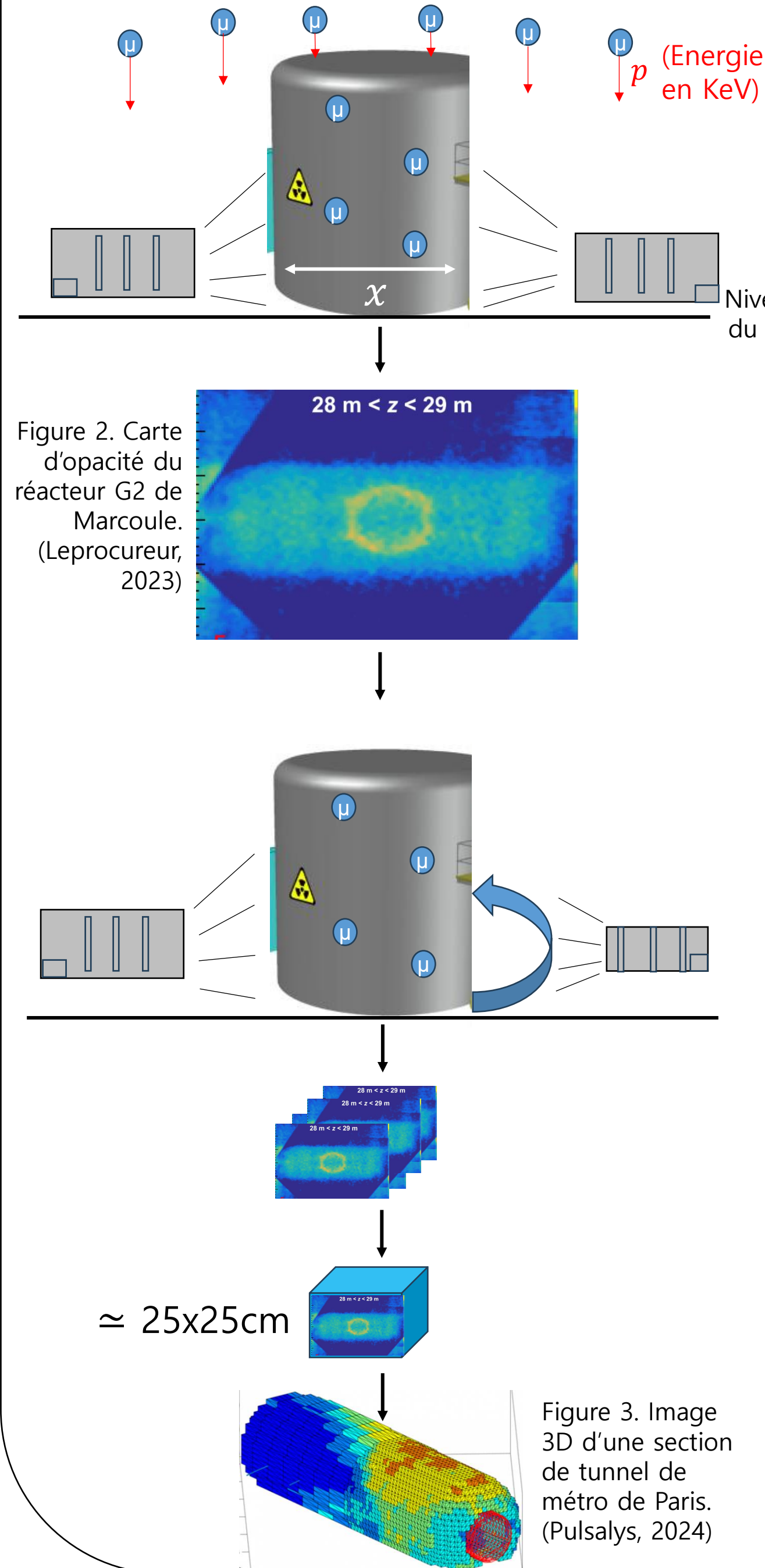


Figure 2. Carte d'opacité du réacteur G2 de Marcoule. (Leprocureur, 2023)

Figure 3. Image 3D d'une section de tunnel de métro de Paris. (Pulsalsys, 2024)

Minimum 2 détecteurs sont placés autour de la cible

Obtention de cartes d'opacité.

Basées sur :

- le transfert d'énergie muon/matière, avec la formule de Bethe⁽⁵⁾ : $-\frac{dE}{dx}$
- l'angle de diffusion coulombien du muon « σ_θ » :

Loi de Highland⁽²⁾ :

$$\sigma_\theta = \frac{13,6 \text{ MeV}}{\beta \cdot c \cdot p} \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left[1 + 0,038 \ln \left(\frac{x}{x_0 \beta^2} \right) \right]$$

Facteur correctif
Longueur de radiation (selon le nombre Z du matériau traversé)

Déplacement d'un détecteur autour de la cible

Superposition des cartes d'opacité

Obtention d'un « voxel »⁽²⁾ par algorithme de reconstruction.

Assemblage : acquisition de l'image 3D

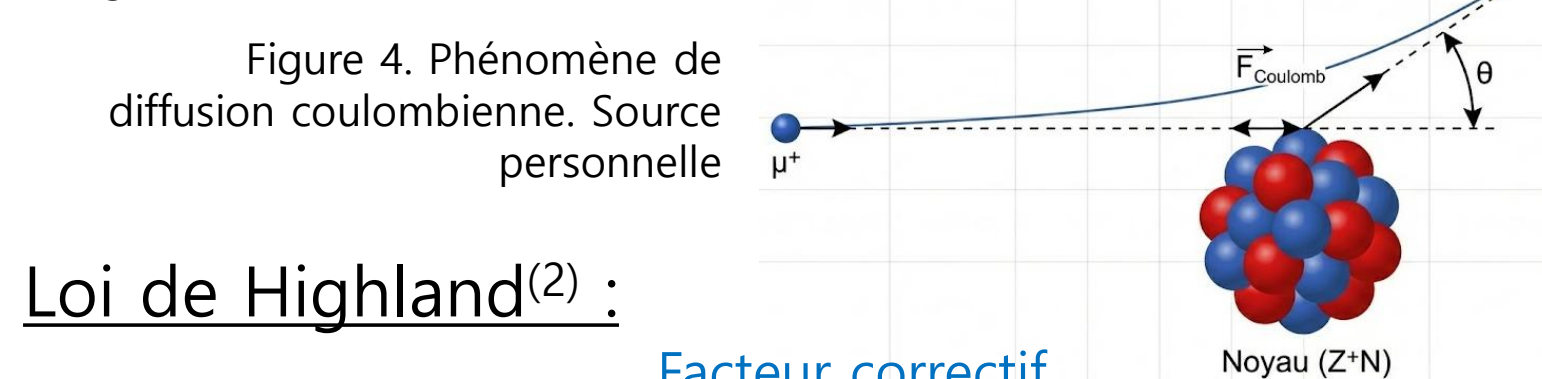


Figure 4. Phénomène de diffusion coulombienne. Source personnelle

II – Résultats dans la filière nucléaire

Deux réacteurs ont été imagés dans le monde. L'unité 1 du site de Fukushima Daiichi en 2015⁽³⁾ ainsi que G2 à Marcoule en 2023⁽¹⁾.

Au Japon en 2015, 90 jours et 3 télescopes ont été nécessaires pour imager l'unité.

L'imagerie du cœur a permis d'affirmer :

- l'absence de matériaux lourds dans le cœur et donc de conclure à sa fonte ;
- un fonctionnement dans un environnement d'environ 500 $\mu\text{Sv/h}$;
- certains angles ne sont pas imageables facilement.

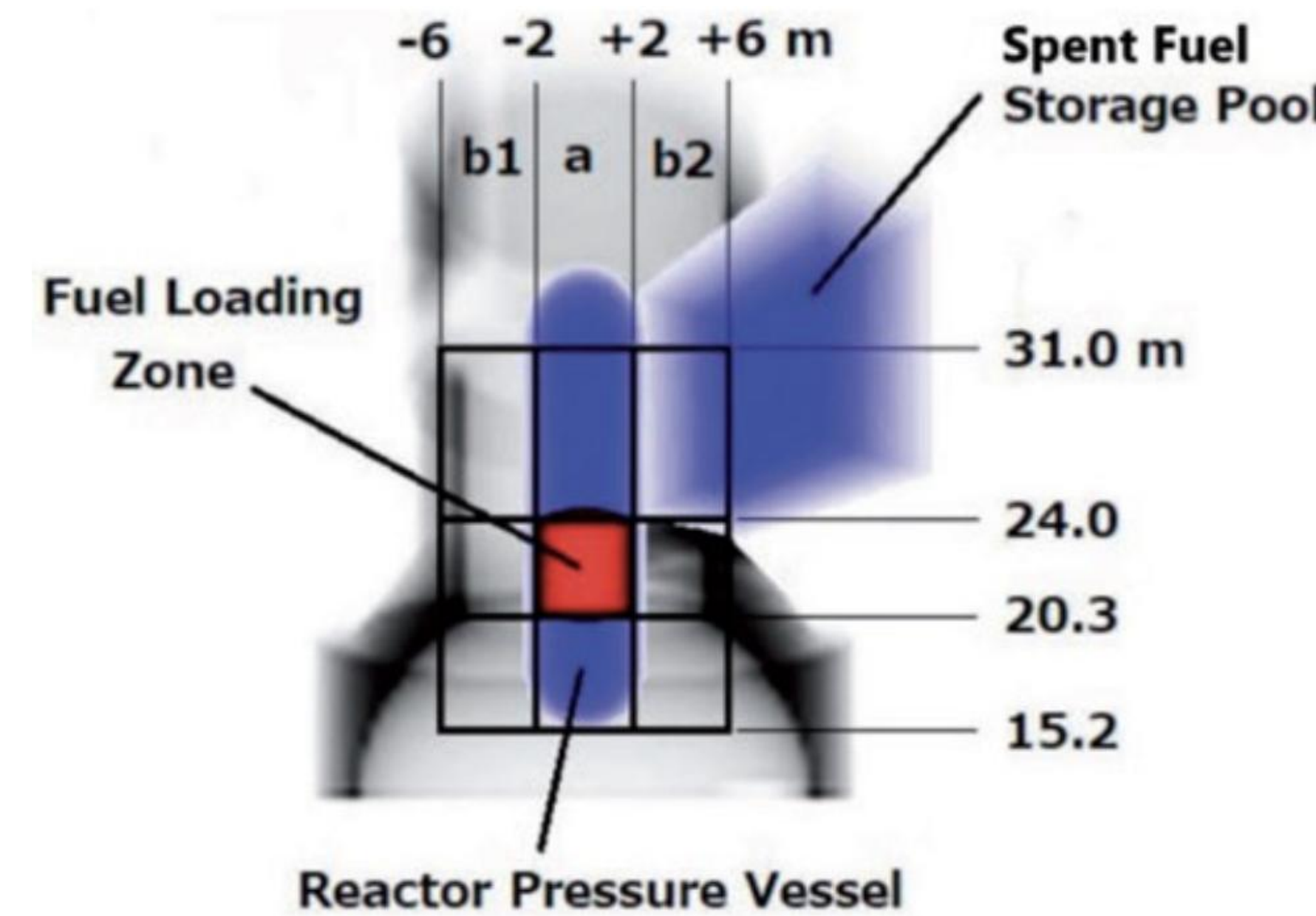


Figure 5. Muographie de la cuve de l'Unité 1 de Fukushima-Daiichi. (Fuji, Hara, Hayashi, Kakuno, Kodama, Nagamine, Sato, Kim, Suzuki, 2020).

À Marcoule, l'expérience a duré 81 jours avec 5 télescopes.

L'opération d'imagerie a démontré :

- une bonne distinction des structures de la cuve ;
- une densité obtenue des matériaux étudiés cohérentes avec les valeurs connues.

La résolution spatiale est de quelques dizaines de centimètres.

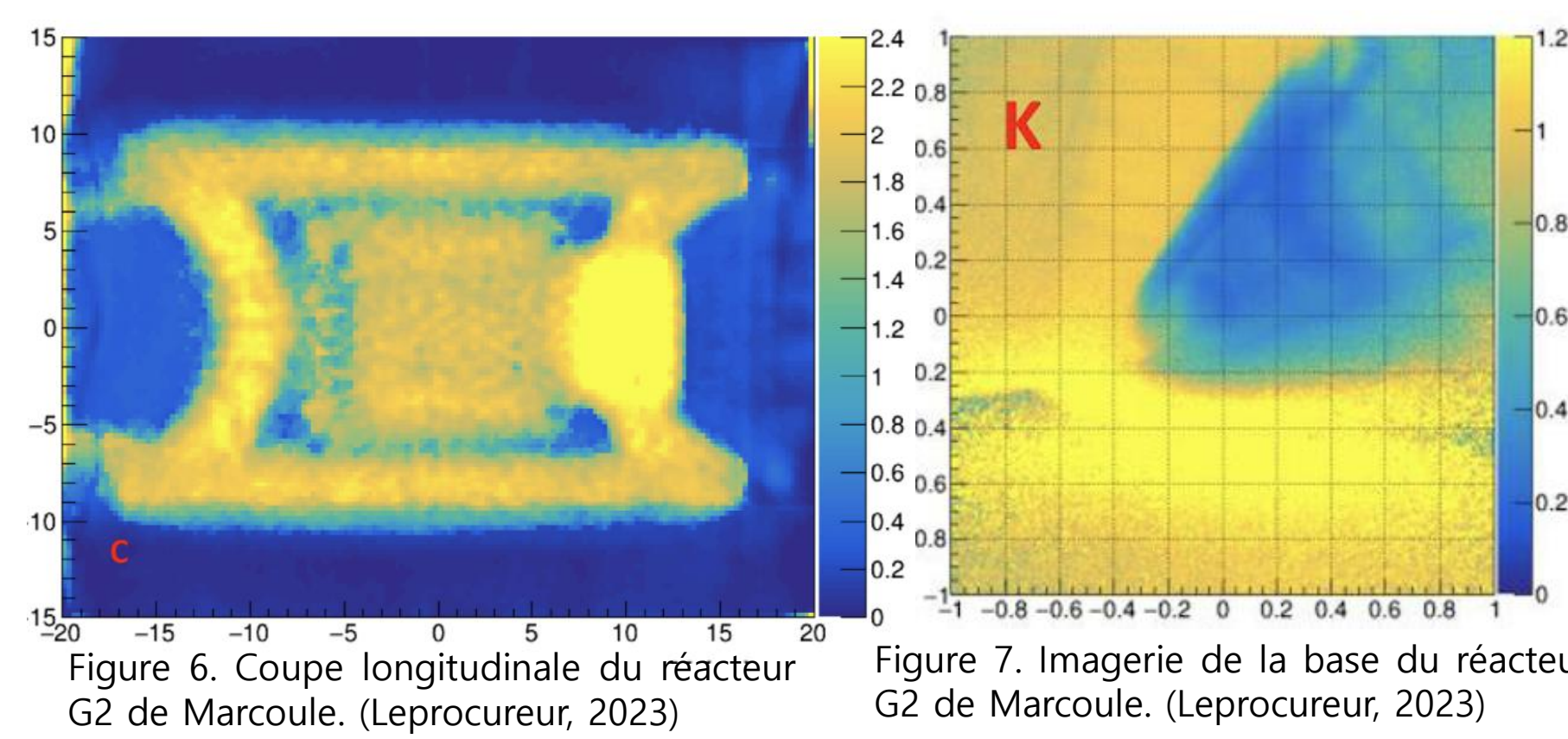


Figure 6. Coupe longitudinale du réacteur G2 de Marcoule. (Leprocureur, 2023)

Incertitude : $\leq 10\text{cm}$

Figure 7. Imagerie de la base du réacteur G2 de Marcoule. (Leprocureur, 2023)

III – Limites

1) Présence d'un Bruit de Fond « Combinatoire »⁽²⁾ (BFC) au niveau du sol

Cause : Agglomération par gravité des autres particules observables (ex : « faux muons »⁽²⁾).

Parades : Reprogrammation de l'algorithme + augmentation du temps de projection.

Conséquences : Complexification de l'algorithme, retard sur les chantiers, hausse des coûts de l'opération.

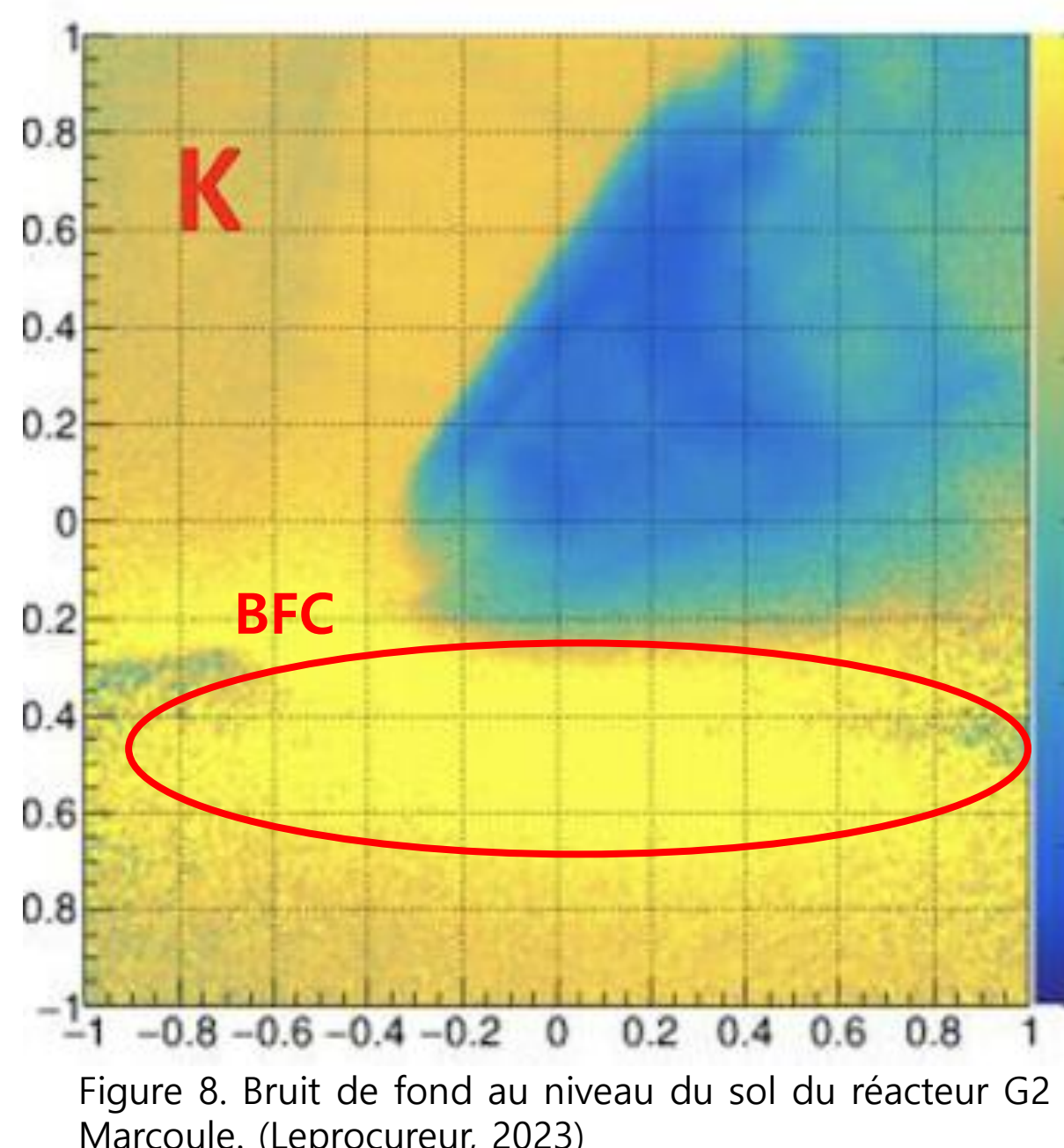


Figure 8. Bruit de fond au niveau du sol du réacteur G2 de Marcoule. (Leprocureur, 2023)

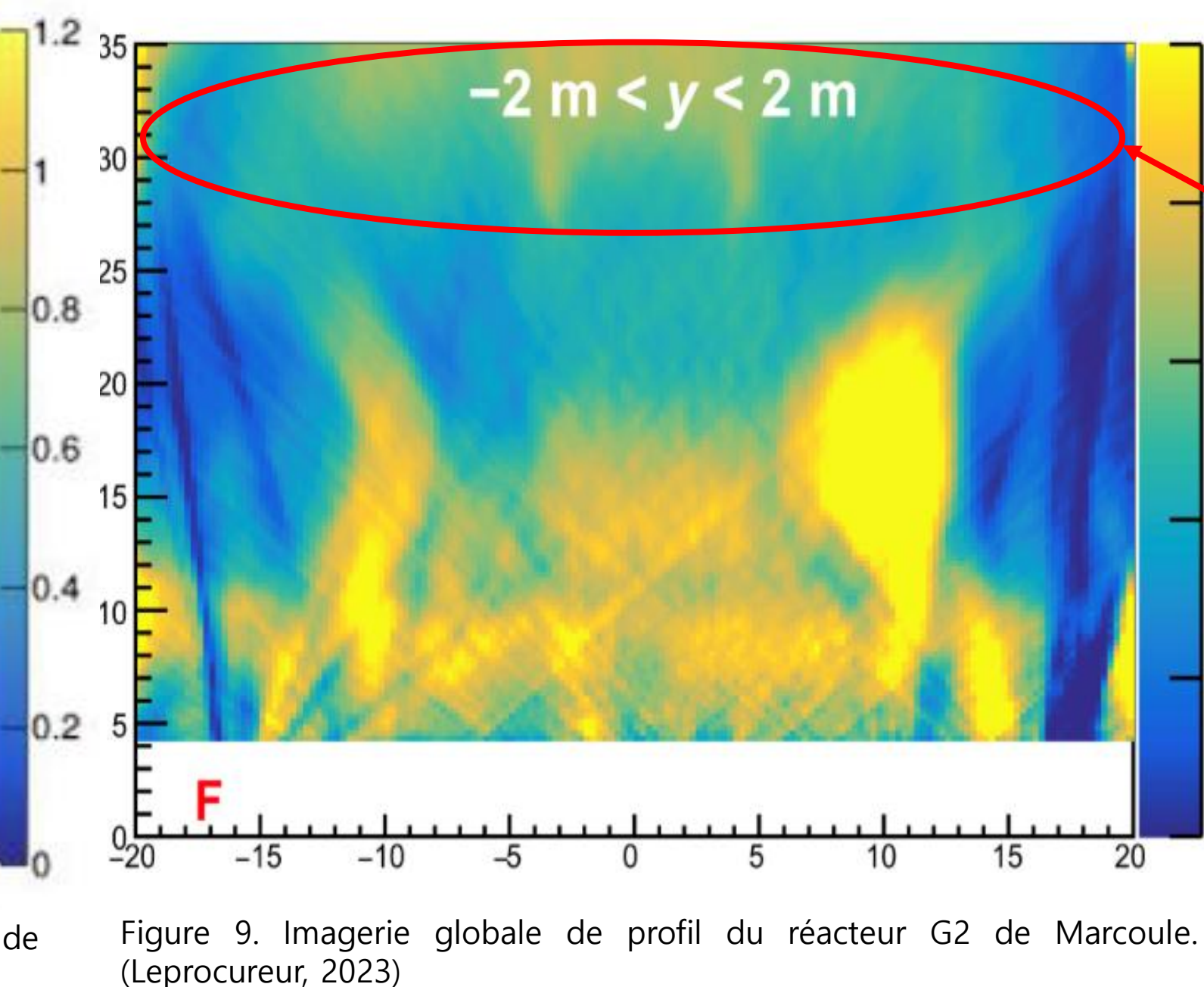


Figure 9. Imagerie globale de profil du réacteur G2 de Marcoule. (Leprocureur, 2023)

2) Imagerie difficile pour les grands angles (>45°)⁽¹⁾

Cause : Disposition des télescopes au sol limitant la triangulation des éléments en hauteur.

Parades : Manutention des télescopes + réduction de l'angle d'imagerie + fragmentation des zones.

Conséquences : Expertise nécessaire accrue, complexité de manutention d'un outil massif.

Synthèse et perspectives

En conclusion, nous pouvons affirmer que la muographie par diffusion pourrait redéfinir les méthodes d'imagerie actuelles dans le nucléaire. Cependant, ses limites se traduisent par une forte sensibilité aux paramètres environnementaux et constitue un défi quant à la durée de l'opération très variable.

La muographie par diffusion se veut plus pertinente pour des opérations exceptionnelles. Des opérations d'imagerie par muographie dans un contexte d'urgence ou de contraintes de production pourrait engendrer des conséquences trop importantes.

Actuellement, un grand nombre de projets sont à l'étude comme le détecteur portable⁽²⁾. Ainsi, la mise au point de détecteurs plus petits est à l'étude. Ces innovations permettraient dans le futur d'imager des structures plus petites. Par exemple, dans la filière des déchets nucléaires ces détecteurs pourraient permettre de contrôler les contenants des déchets : une brèche du contenant voire une zone de faiblesse de celui-ci pourraient être révélées.

Bibliographie

- 1 Sébastien Procureur et al. 3D imaging of a nuclear reactor using muography measurements. Sci. Adv. 9, eabq8431 (2023). DOI: [10.1126/sciadv.abq8431](https://doi.org/10.1126/sciadv.abq8431) (<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq8431#core-R1-1>) [Consulté le 17/09/2025].
- 2 Lorenzo Bonechi, Raffaello D'Alessandro, Andrea Giammanco, Atmospheric muons as an imaging tool, Reviews in Physics, Volume 5, 2020, 100038, ISSN 2405-4283, <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405428320300010>) [Consulté le 17/09/2025].
- 3 Hirofumi Fujii, Kazuhiko Hara, Kohei Hayashi, Hidekazu Kakuno, Hideyo Kodama, Kanetada Nagamine, Kotaro Sato, Shin-Hong Kim, Atsuto Suzuki, Takayuki Sumiyoshi, Kazuki Takahashi, Fumihiko Takasaki, Shuji Tanaka, Satoru Yamashita, Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2020, Issue 4, April 2020, 043C02, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa027> (<https://academic.oup.com/ptep/article/2020/4/043C02/5825417?login=false>) [Consulté le 17/09/2025].
- 4 Cimmino, L., Baccani, G., Noli, P. et al. 3D Muography for the Search of Hidden Cavities. Sci Rep 9, 2974 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39682-5> (<https://www.nature.com/articles/s41598-019-39682-5>) [Consulté le 17/09/2025].
- 5 S. Procureur, Muon tomography of large structures with 2D projections, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1013, 2021, 165665, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165665>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221006501>) [Consulté le 17/09/2025].