Université Grenoble Alpes

Master 2 - Physique Subatomique et Cosmologie

2024-2025

Rapport de Stage

Étalonnage en énergie et en efficacité du veto muon de l'expérience RICOCHET à l'ILL

Gaby BRENOT

Encadrants : Jacob Lamblin & Louis Bailly-Salins

Structure d'accueil : Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

Table des matières

1 Introduction **2**

2 Contexte général de l'expérience RICOCHET **2**
2.1 Motivation scientifique 2
2.2 Description de l'expérience RICOCHET 4
2.3 Les sources de bruit de fond 4
2.4 Le veto muon 5
2.4.1 Description du dispositif 5

3 Étalonnage en énergie **6**
3.1 Principe 6
3.2 Amélioration de la méthode 7
3.3 Validation des nouvelles sélections 9
3.3.1 Comparaison ON/OFF 9
3.3.2 Suivi temporel du pic muon 10
3.3.3 Quantification des différences entre les périodes ON et OFF 13
3.4 Test de robustesse 13
3.5 Origine des événements résiduels 14

4 Suivi de l'efficacité du veto **16**
4.1 Méthode d'estimation de l'efficacité 16
4.2 Suivi temporel de l'efficacité 17
4.3 Comparaison simulation/données 18

Conclusion **20**

A Annexe : Système de déclenchement et d'acquisition (DAQ) **22**

B Annexe : Évolution des taux de trigger en fonction des sélections **22**

C Annexe : Résultats des ajustements sur les simulations **24**

1 Introduction

Ce stage de Master 2 s'inscrit dans le cadre de l'expérience RICOCHET, installée à proximité du réacteur de l'ILL à Grenoble. L'objectif de cette expérience est de détecter la diffusion cohérente élastique neutrino-noyau (CEνNS), une interaction prédite par le Modèle Standard mais encore très peu explorée expérimentalement. La mesure de ce processus, qui s'accompagne de reculs nucléaires d'énergie extrêmement faible, permettrait de tester la validité du Modèle Standard dans le domaine des très basses énergies, et d'apporter des contraintes sur d'éventuelles interactions non standard des neutrinos. La détection du CEνNS nécessite cependant une maîtrise fine du bruit de fond, en particulier celui lié aux muons cosmiques qui peuvent induire des événements similaires aux interactions des neutrinos. Dans ce contexte, le veto muon installé autour du détecteur joue un rôle essentiel. Il doit permettre de signer le passage des muons pour rejeter les événements en coïncidence. L'objectif du stage était d'améliorer la méthode d'étalonnage en énergie et d'étudier la stabilité temporelle. Une telle stabilité est essentielle pour garantir la validité d'une analyse basée sur les mesures réacteur ON et réacteur OFF visant à extraire le signal neutrino. Dans un premier temps, nous décrirons le contexte général de l'expérience RICOCHET, en présentant ses objectifs scientifiques, son principe de détection ainsi que les principales sources de bruit de fond. Nous aborderons ensuite l'amélioration de la méthode d'étalonnage du système de veto muon, en mettant l'accent sur la sélection des événements et la validation de la stabilité temporelle notamment avec l'étude des différences entre les périodes réacteur ON et OFF. Enfin, nous présenterons une estimation de l'efficacité des panneaux, son évolution dans le temps et sa comparaison aux simulations.

2 Contexte général de l'expérience RICOCHET

2.1 Motivation scientifique

La diffusion cohérente élastique neutrino-noyau (CEνNS) est une interaction dans laquelle un neutrino interagit de manière cohérente avec l'ensemble des nucléons d'un noyau via l'échange d'un boson Z^0 (cf. figure 1). Ce processus, prédit par le Modèle Standard dans les années 1970 [1] conserve le noyau dans son état fondamental et induit un recul nucléaire très faible, typiquement de l'ordre de quelques dizaines d'électronvolts à 1 keV. Ce canal d'interaction est resté expérimentalement inaccessible pendant plus de quarante ans, principalement à cause du très faible dépôt d'énergie qu'il engendre.

L'observation expérimentale du CEνNS a pour la première fois été réalisée en 2017 par la collaboration COHERENT [2], à l'aide d'un faisceau de neutrinos pulsé produit par un accélérateur et en utilisant un détecteur CsI. Bien que fondamentale, cette mesure présente une sensibilité limitée car elle se situe à relativement haute énergie ($\sim$ 30 MeV) et ne bénéficie pas pleinement du phénomène de cohérence. Elle a donc ouvert la voie à une nouvelle classe d'expériences visant à étudier le CEνNS à plus basse énergie, en utilisant des anti-neutrinos électroniques ($\bar{\nu}_e$) de réacteurs nucléaires. Une telle mesure permettrait de tester les prédictions du Modèle Standard dans le régime des très basses énergies, mais aussi d'apporter des contraintes sur des scénarios de nouvelle physique, comme l'existence d'un nouveau boson d'interaction Z', les interactions non standards des neutrinos (NSI) ou l'existence de neutrinos stériles [3] [4] [5]. De telles extensions du Modèle Standard pourraient se manifester par des déviations de la section efficace mesurée (cf. figure 2), ou par des comportements anormaux en fonction de l'énergie de

recul nucléaire. En particulier, le CEνNS étant sensible à tous les types de neutrinos, y compris les états stériles, il constitue un outil idéal pour explorer des oscillations à courte distance ou des couplages exotiques entre neutrinos et matière.

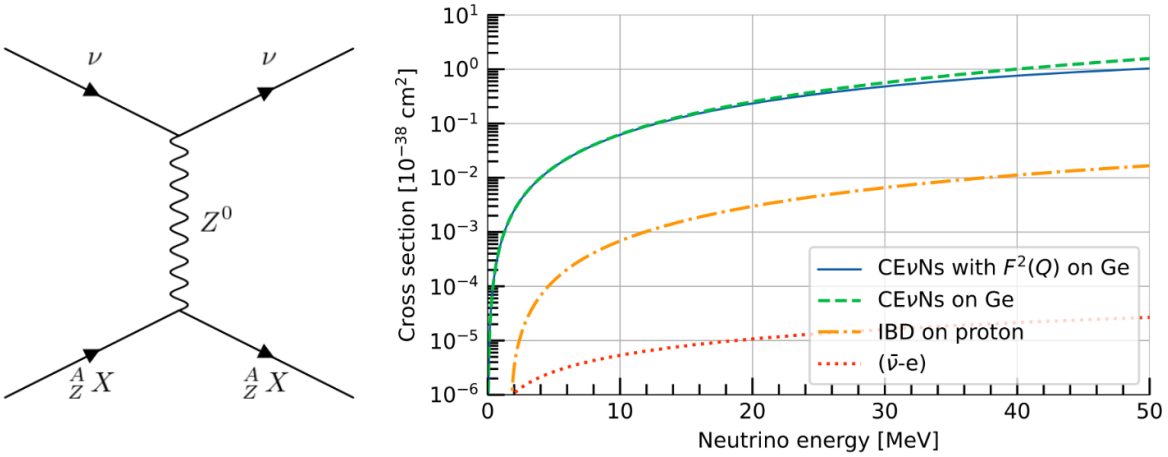


FIGURE 1 – **À gauche** : diagramme de Feynman du processus de diffusion cohérente élastique neutrino-noyau via l'échange d'un boson Z^0. **À droite** : comparaison avec les sections efficaces en fonction de l'énergie des neutrinos pour différents processus d'interaction. Le CEνNS présente une section efficace relativement élevée en comparaison de l'IBD généralement utilisée pour la détection des neutrinos et sans seuil, ce qui en fait un canal privilégié pour les détecteurs à bas seuil [5].

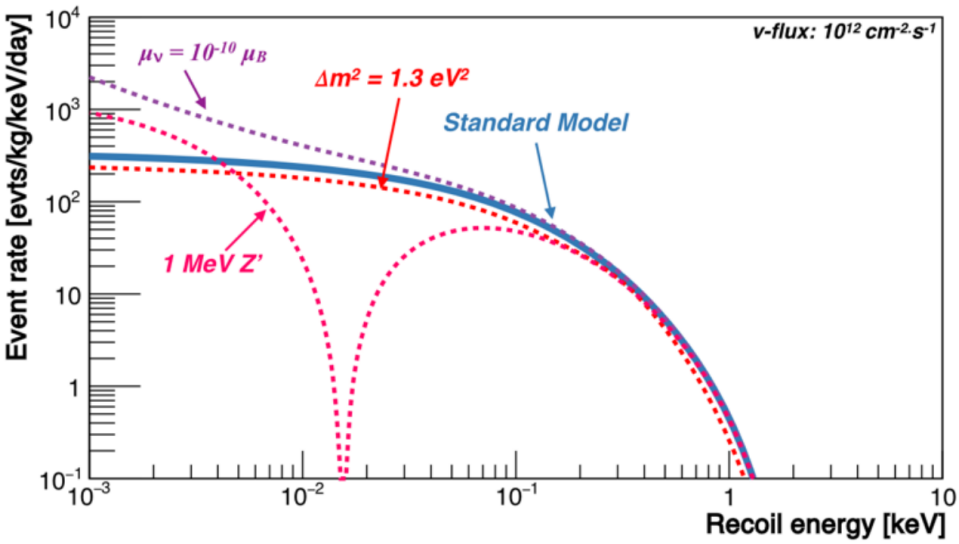


FIGURE 2 – Spectres en énergie théoriques des noyaux de recul induits par l'interaction des $\bar{\nu}_e$ pour différents scénarios : Modèle Standard (bleu), neutrino stérile (rouge), couplage magnétique (violet), boson Z' léger (rose). Cette figure illustre, sans les fluctuations statistiques ni erreurs expérimentales, comment différentes hypothèses de nouvelle physique pourraient théoriquement être testées à l'aide du CEνNS.

Au-delà de son intérêt fondamental, le CEνNS joue également un rôle clé dans le domaine de la recherche de matière noire. Ce processus constitue en effet le bruit de fond ultime pour les détecteurs sensibles aux WIMPs, que l'on appelle le plancher neutrino [4].

Une meilleure compréhension du CEνNS est donc indispensable pour identifier, caractériser et potentiellement contourner cette limite fondamentale dans les futures expériences de détection directe.

2.2 Description de l'expérience RICOCHET

RICOCHET est donc une expérience visant à mesurer la diffusion cohérente élastique neutrino-noyau (CEνNS) à très basse énergie, en utilisant les antineutrinos émis par le réacteur de recherche de l'ILL. Le flux de neutrinos produit par un réacteur nucléaire est continu, avec une énergie allant de 0 à 10 MeV, ce qui rend l'énergie du recul nucléaire associé encore plus faible que dans les expériences utilisant des faisceaux d'accélérateurs. Cela impose des contraintes expérimentales particulièrement fortes sur les seuils de détection.

Pour cela, l'expérience repose sur une technologie de détection cryogénique développée pour atteindre ces très faibles énergies. Le cœur du détecteur (cf. figure 3) est composé de cristaux de germanium, refroidis à une température de l'ordre de 10 mK. Ces détecteurs sont capables de mesurer simultanément la chaleur et l'ionisation induites par le recul d'une particule. Cette double mesure permet notamment une excellente discrimination entre les reculs nucléaires et les reculs électroniques. En effet, le rapport entre chaleur et ionisation dépend de la nature du recul. Cette double mesure est donc essentielle pour distinguer les événements CEνNS d'une partie du bruit de fond.

L'ensemble est installé dans un cryostat ultra-basse température, positionné à près de 9 mètres du cœur du réacteur de l'ILL. Cette configuration permet de bénéficier d'un flux de neutrinos très intense, de l'ordre de 10^{12} $\nu/\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}$. En contrepartie, cette proximité complique fortement la gestion du bruit de fond ambiant, ce qui constitue l'un des principaux défis expérimentaux.

L'expérience a été installée à l'ILL fin 2023. Une phase de validation a eu lieu en 2024 avec seulement deux cristaux de germanium et la prise de données avec les 18 détecteurs va commencer à l'été 2025. Les données qui ont été utilisées pour les analyses de ce stage ont été enregistrées entre juin et septembre 2024, lorsque le veto muon était installé.

2.3 Les sources de bruit de fond

La détection du CEνNS repose sur l'identification de signaux correspondant à de très faibles énergies de recul. Or, de nombreux processus peuvent produire des signatures similaires. Le bruit de fond environnemental comprend notamment :

- les rayonnements gamma d'origine naturelle ou induits par le fonctionnement du réacteur et des expériences voisines et dont l'énergie va jusqu'à 8 MeV ;
- les neutrons, soit thermiques qui vont induire des rayonnements gammas par capture, soit rapides, qui peuvent provoquer des reculs nucléaires et dont le spectre en énergie peut aller jusqu'à 10 MeV ;
- les muons cosmiques, qui peuvent traverser ou interagir avec les matériaux du détecteur ou du blindage, générant des événements secondaires difficiles à rejeter, comme par exemple des neutrons de spallation dans le blindage qui vont entraîner des reculs nucléaires similaires à ceux du CEνNS.

Pour extraire le CEνNS de ce fond complexe, l'expérience adopte une stratégie d'analyse différentielle ON - OFF. En soustrayant aux données collectées pendant le fonctionnement du réacteur (phase ON) celles acquises lorsqu'il est arrêté (phase OFF), il est

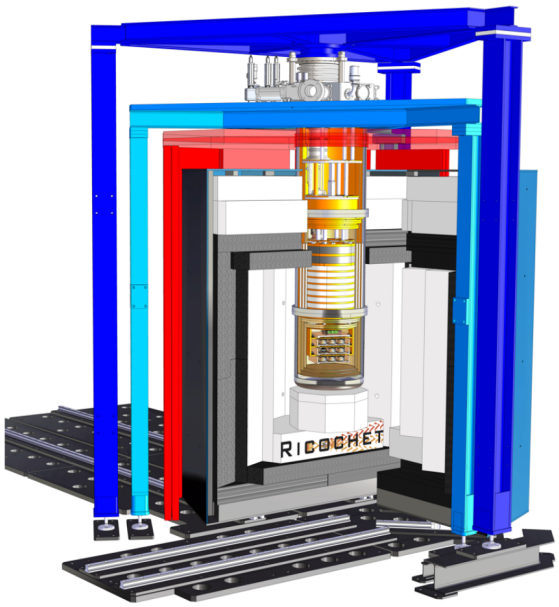


FIGURE 3 – Vue en coupe schématique du détecteur RICOCHET. Le cryostat contenant les détecteurs cryogéniques est suspendu à une structure métallique interne (cyan). Le système est entouré de blindages en plomb (gris foncé) et en polyéthylène (blanc), ainsi que du veto muon (en rouge). L'ensemble est maintenu par une structure externe (bleu) intégrant les équipements de cryogénie.

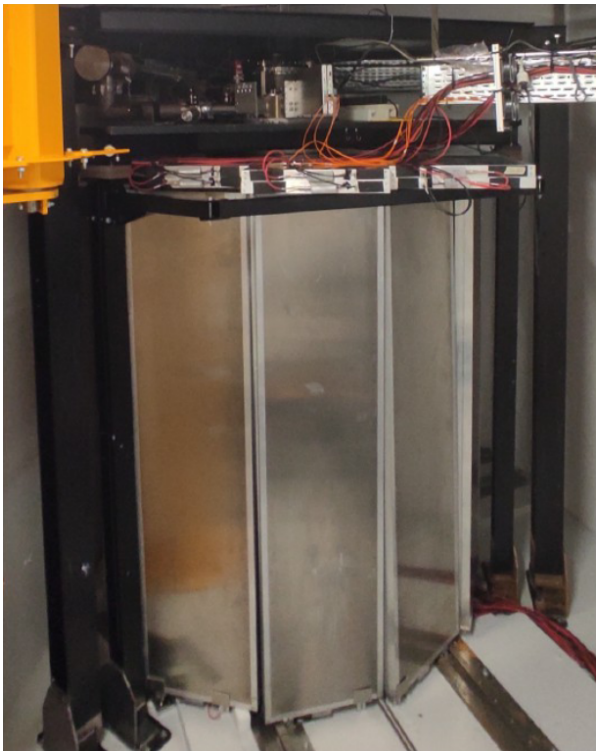


FIGURE 4 – Photo de l'extérieur du détecteur RICOCHET, montrant une partie du veto muon constitué de panneaux scintillateurs encapsulés dans une protection en aluminium.

possible de ne conserver que les événements corrélés au fonctionnement du réacteur, dont les neutrinos qu'on recherche, et de rejeter le bruit de fond cosmogénique. Cette méthode impose en retour que le système de détection reste stable sur l'ensemble de la période d'acquisition, aussi bien en termes de gain que de bruit de fond résiduel.

2.4 Le veto muon

2.4.1 Description du dispositif

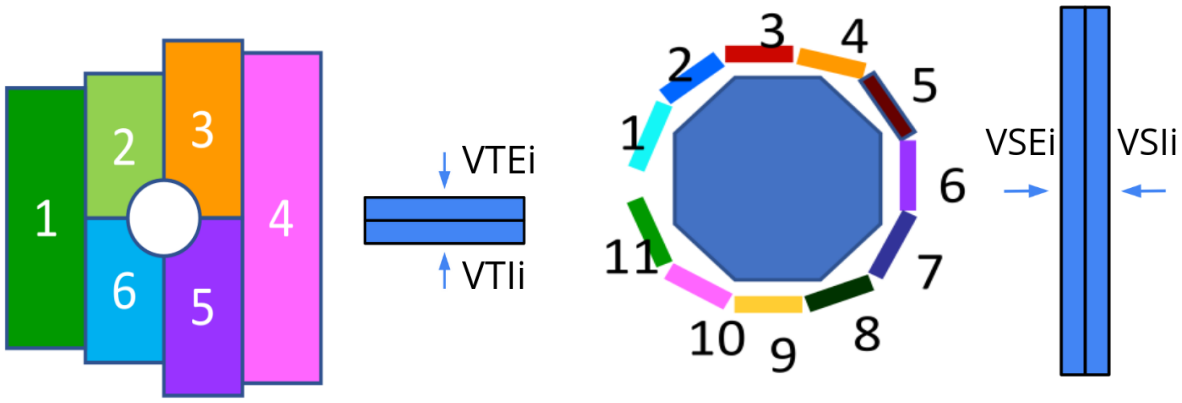
Parmi les sources de bruit identifiées, les muons cosmiques constituent une composante majeure. Pour en limiter l'impact, un veto muon a été déployé autour du cryostat. Il est constitué de 34 panneaux scintillateurs de 3 cm d'épaisseur, disposés en paires (un panneau interne et un panneau externe) pour effectuer des coïncidences et ne déclencher que pour des muons et pas pour les rayonnements gammas ou les neutrons. Ces paires sont réparties autour du cryostat afin de maximiser la couverture géométrique comme on peut le voir sur la figure 5, il y a des paires supérieures horizontales et des paires latérales verticales.

La nomenclature adoptée pour désigner chaque panneau suit une convention simple :

- **VTE**i : *Veto Top External* numéro i ;
- **VTI**i : *Veto Top Internal* numéro i ;
- **VSE**j : *Veto Side External* numéro j ;
- **VSI**j : *Veto Side Internal* numéro j.

Par exemple, le panneau **VTE1** correspond au panneau du dessus de la paire supé-

rieure numéro 1, tandis que **VSI8** désigne le panneau latéral interne de la paire numéro 8. Cette convention est utilisée tout au long du rapport.



(a) Panneaux supérieurs, vue du dessus. Les panneaux sont organisés en 6 paires, chaque paire étant composée d'un panneau interne (VTI) et d'un panneau externe (VTE).

(b) Panneaux latéraux, vue du dessus. Les panneaux entourent le blindage passif octogonal et le cryostat et sont répartis en 11 paires, avec un panneau interne (VSI) et un externe (VSE) pour chaque paire.

FIGURE 5 – Disposition géométrique des panneaux du veto muon dans l'expérience RICOCHET.

Lorsqu'un muon traverse un panneau, il dépose une énergie réémise sous forme de lumière de scintillation, collectée par des fibres optiques disposées de part et d'autre du scintillateur et reliées à un photomultiplicateur qui convertit la lumière en signal électrique. Ce signal est ensuite numérisé et intégré pour obtenir une observable de l'énergie notée Q_{tot} dans la suite. Une première sélection d'événements est effectuée dès l'acquisition. En effet, un événement ne sera enregistré que si un signal a dépassé un seuil en amplitude pour au moins un panneau externe et un panneau interne.

3 Étalonnage en énergie

3.1 Principe

La figure 6 représente les spectres en énergie en OFF et en ON pour un même panneau scintillateur. Le pic observé dans les spectres correspond à l'énergie déposée par un muon traversant perpendiculairement le scintillateur. Il se situe généralement autour de 6 MeV pour une épaisseur de scintillateur de 3 cm (dépôt de 2 MeV/cm) . Ce pic est utilisé pour étalonner chaque panneau. Le modèle utilisé pour ajuster les spectres ADC est une fonction de Landau convoluée avec une gaussienne, qui permet de modéliser la distribution attendue pour les signaux muoniques.

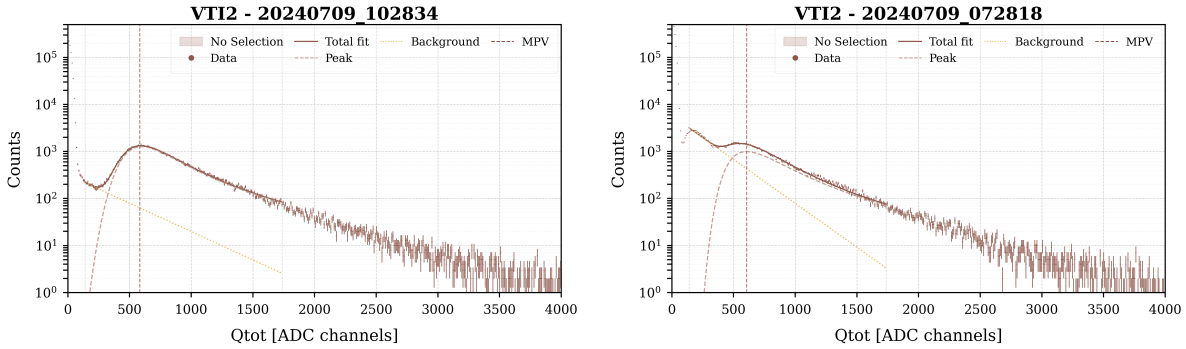
Cette forme du spectre s'explique par la superposition de plusieurs phénomènes physiques. Le dépôt d'énergie d'un muon dans le scintillateur suit une distribution de Landau, principalement en raison d'un effet géométrique : les muons peuvent traverser le scintillateur selon des trajectoires plus ou moins inclinées, ce qui entraîne des longueurs de parcours variables dans le scintillateur, et donc une dispersion asymétrique des énergies déposées, avec une longue queue vers les hautes valeurs. Une dispersion gaussienne reproduit la résolution en énergie liée aux effets instrumentaux, notamment la collecte

de la lumière dans les fibres optiques et la réponse du photomultiplicateur. En complément, une composante exponentielle décroissante est ajoutée pour modéliser le bruit de fond gamma, qui se manifeste sous forme d'un excès à basse énergie. Il est beaucoup plus important en période de réacteur ON.

Les différentes composantes du modèle d'ajustement (Landau convoluée avec une gaussienne pour le pic muon, et exponentielle décroissante pour le fond) sont représentées sur les courbes ajustées.

Ce modèle permet d'extraire la position du pic muon, ou Most Probable Value (MPV), en comparant avec la simulation qui sert de référence pour l'étalonnage en énergie (voir Annexe C). C'est à partir de cette valeur que seront définis les seuils en énergie utilisés pour la sélection des événements muoniques dans les panneaux.

L'ajustement est réalisé de manière indépendante pour chaque panneau et pour chaque run d'une heure, ce qui permet de produire un étalonnage horaire. L'étalonnage peut évoluer dans le temps en raison de paramètres tels que la température ou le vieillissement des scintillateurs, c'est pour cette raison qu'il faut l'effectuer régulièrement.



(a) Spectre OFF (b) Spectre ON

FIGURE 6 – Spectres en énergie avant étalonnage du panneau VTI2, en périodes OFF (a) et ON (b), sans sélection autre que le déclenchement de l'acquisition. Le modèle ajusté est superposé, avec ses différentes composantes : pic muon (Landau-Gauss) et fond gamma (exponentielle décroissante).

3.2 Amélioration de la méthode

Cependant, comme nous le verrons par la suite, l'analyse des données a mis en évidence des fluctuations importantes de l'étalonnage pendant la période de réacteur ON ainsi que des variations subites. Ces variations peuvent avoir une origine physique (variations du flux de muons incidents, changement de l'alimentation haute-tension du PM) ou être dues à un changement du bruit de fond gamma. Dans ce dernier cas, cela introduit un biais qui compromet directement l'analyse différentielle ON/OFF en modifiant le seuil de sélection des muons. Or, cette sélection doit rester stable pour garantir que les événements exclus (cosmogéniques) le soient de manière équivalente en ON et en OFF.

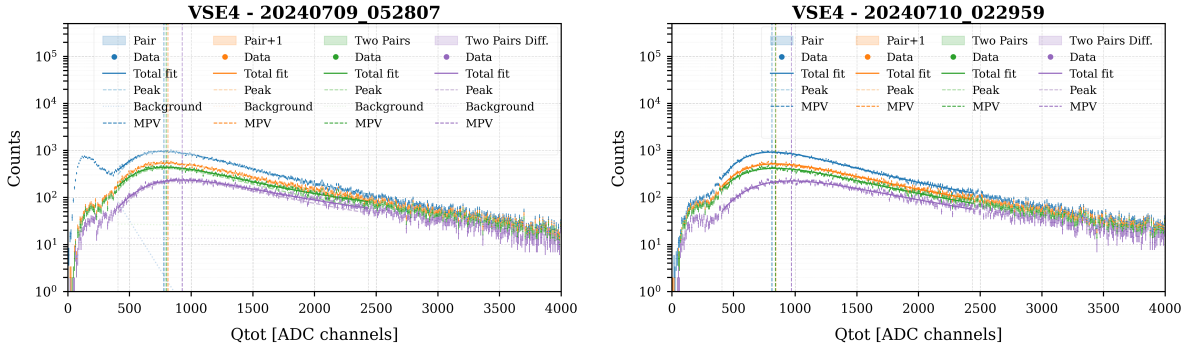
La fiabilité de l'étalonnage en énergie du pic muon repose donc sur la qualité de la sélection des événements utilisés avant d'ajuster les spectres en énergie. Dans un premier temps, plusieurs paramètres de l'ajustement ont été explorés, notamment l'intervalle d'ajustement. L'attention a été portée sur la borne inférieure, plus sensible au bruit de

fond. Ces ajustements ont toutefois montré des limites : les variations observées sur la position du pic muon restaient significatives, en particulier en période ON.

L'amélioration principale est venue de la sélection des événements. L'objectif était d'augmenter la pureté de l'échantillon de muons tout en réduisant la contamination par les rayonnements gammas ou les neutrons. Pour cela, des critères plus stricts ont été introduits, nous allons les détailler.

Les sélections sont construites, pour un panneau donné, en appliquant des seuils sur les autres panneaux du système. Le seuil est défini comme une fraction de la position du pic muon (MPV), typiquement comprise entre un tiers et un demi du pic muon. Ce seuil permet d'écarter la majorité des signaux de faible énergie, généralement des gammas, tout en conservant les événements muons.

- **Paire** : on applique un seuil sur le panneau partenaire (par exemple VTI1 pour VTE1), autrement dit, le panneau qu'on étudie fait-il potentiellement partie d'une paire déclenchée. Cela correspond à la sélection la plus simple, utilisée initialement, et inclut aussi bien des événements muons que du bruit de fond résiduel.
- **Paire+1** : en plus de la coïncidence avec le panneau partenaire, un troisième panneau quelconque doit aussi être au-dessus du seuil. Cette condition élimine une grande partie des muons verticaux mais améliore la pureté de l'échantillon.
- **Deux paires** : une seconde paire complète doit être au-dessus du seuil. Cette condition sélectionne préférentiellement des muons inclinés traversant plusieurs paires de scintillateur.
- **Deux paires de types différents** : enfin, on exige en plus que la seconde paire soit de type différent (supérieure ou latérale) par rapport à la du au panneau analysé. Cela permet de rejeter les coïncidences de deux paires supérieures qui ne sont pas physiquement possibles pour un muon, même si cela reste possible pour des gerbes électromagnétiques induites par des muons.



(a) Spectre en énergie en phase ON (b) Spectre en énergie en phase OFF

FIGURE 7 – Comparaison des spectres en énergie obtenus pour un même panneau du veto muon, en période ON (a) et OFF (b), avec les différentes sélections d'événements appliquées (« paire », « paire+1 », « deux paires », « deux paires de types différents »). On observe que le bruit de fond est significativement plus important en période ON, notamment dans la zone à basse énergie. En revanche, le pic muon reste bien visible quelle que soit la sélection, ce qui permet un étalonnage précis dans les deux cas.

La figure 7 illustre l'effet de ces sélections sur les spectres en énergie obtenus en période ON et OFF. On y observe que les sélections plus strictes permettent de réduire significativement le fond à basse énergie, en particulier en période ON, tout en préservant

la visibilité du pic muon.

Un autre effet important est le déplacement du pic selon les sélections. En effet, les configurations simples favorisent les muons verticaux, qui traversent une seule paire de panneaux sur une courte distance. Les sélections plus contraignantes sélectionnent des muons inclinés, souvent associés à des coïncidences entre panneaux supérieurs et latéraux. Ces muons parcourent une distance plus longue dans le scintillateur, et déposent donc plus d'énergie. Cela explique pourquoi le pic se déplace vers des valeurs ADC plus élevées lorsque la sélection est plus stricte.

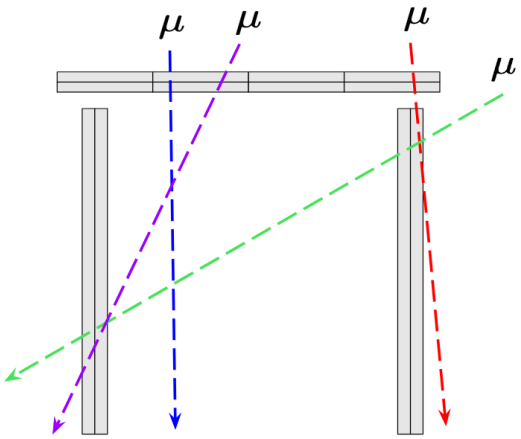


FIGURE 8 – Schéma illustrant plusieurs types d'événements muons traversant le système de veto. La sélection « paire » inclut tous les types d'événements représentés. La sélection « paire+1 » exclut les événements comme le muon bleu. La sélection « deux paires » exclut les muons bleu et rouge. Enfin, la sélection « deux paires de types différents » exclut les muons bleu, rouge et vert, ne conservant que les événements comme le muon violet. Cette figure permet d'illustrer la logique d'inclusion stricte des sélections.

La figure 8 illustre cette différence géométrique. Selon la trajectoire du muon, la distance parcourue dans le panneau peut varier de manière significative, ce qui influe directement sur l'énergie déposée. En pratique, l'énergie de 6 MeV souvent citée pour le pic muon correspond à un muon vertical traversant 3 cm de scintillateur. Mais, pour les sélections les plus strictes, cette valeur est sous-estimée. Seule la comparaison avec la simulation permet de connaître la position du pic muon.

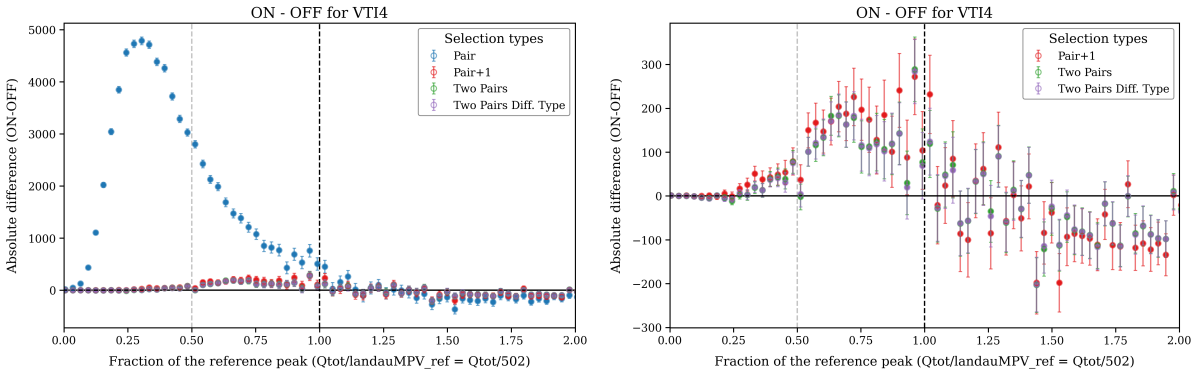
Enfin, on note que dans les configurations (« paire+1 » et celles plus strictes), le fond est suffisamment réduit pour que l'on puisse se passer de la composante exponentielle dans l'ajustement. Cela simplifie le modèle, améliore la stabilité de l'ajustement et réduit les erreurs sur la valeur extraite du pic muon, en particulier en période ON.

3.3 Validation des nouvelles sélections

3.3.1 Comparaison ON/OFF

Afin d'identifier les contributions spécifiques liées au fonctionnement du réacteur, nous avons réalisé une analyse différentielle des spectres en énergie. Cette méthode consiste à soustraire les spectres acquis en période OFF des spectres acquis en période ON. Le spectre résultant met en évidence les contributions résiduelles liées exclusivement à l'activité du réacteur, tout en éliminant les événements d'origine cosmique stables dans le temps.

Les spectres ont été normalisés en divisant la charge totale détectée Q_{tot} par une valeur de référence du pic muon (MPV_{ref}), déterminée à partir d'un étalonnage antérieur. Cette normalisation permet de comparer directement les spectres entre panneaux, mais aussi d'observer l'effet de ces contributions sur la zone d'ajustement habituellement utilisée (typiquement comprise entre un demi et trois fois le MPV).



(a) Toutes les sélections (b) Sélections les plus strictes

FIGURE 9 – Spectres différentiels ON-OFF normalisés par la position du pic muon de référence ($Q_{\text{tot}}/MPV_{\text{ref}}$), pour différentes sélections. On observe du bruit de fond réactogénique à basse énergie, en particulier pour la sélection « paire ». Pour les sélections les plus strictes, un excès subsiste en dessous du MPV pour certains panneaux mais beaucoup plus faible.

La figure 9 illustre cette analyse. Le spectre différentiel associé à la sélection « paire » (figure a) présente un excès net d'événements à basse énergie probablement dus à des photons gamma ou à des neutrons. L'effet est beaucoup moins marqué pour les sélections plus contraignantes (figure b), ce qui confirme que ces configurations permettent d'éliminer efficacement une grande partie des événements non muons.

Cependant, même avec les sélections les plus strictes, des structures faibles persistent en dessous du MPV. Cela montre que certains événements liés au réacteur échappent encore à la sélection. Il pourrait s'agir d'interactions secondaires de rayonnements gammas dans les panneaux, ou de coïncidences accidentelles entre un muon physique et un signal parasite. Ces effets semblent particulièrement visibles sur certains panneaux, notamment ceux les plus exposés à l'expérience voisine (IN20) et sur les panneaux supérieurs.

Cette observation souligne l'importance d'un bon contrôle de la sélection des événements utilisés pour l'étalonnage. En effet, toute perturbation dans la zone d'ajustement peut modifier la position extraite du pic muon, et introduire un biais dans le suivi temporel de l'étalonnage.

3.3.2 Suivi temporel du pic muon

Afin d'identifier les instabilités de l'étalonnage et de les corréler avec les conditions expérimentales, un suivi temporel du pic muon a été réalisé sur l'ensemble de la période de validation de 2024 pour chaque panneau du système de veto. La composante exponentielle est ajoutée dans le cas de la sélection « paire » uniquement, qui est plus exposée aux événements accidentels.

La figure 10 présente l'évolution du pic muon pour le panneau latéral VSE8, selon quatre sélections d'événements : « paire », « paire+1 », « deux paires » et « deux paires de types différents ». Ces courbes permettent de visualiser l'effet des sélections sur la

stabilité de l'ajustement au cours du temps. Plusieurs périodes particulières peuvent être identifiées :

- une discontinuité nette entre la période ON et la période OFF du réacteur, principalement visible pour la sélection « paire », en raison d'une baisse d'événements gamma ou neutron ;
- une discontinuité pendant la phase « canal vide », où une partie du canal de transfert du combustible du réacteur, situé juste au-dessus de l'expérience, est vidé. Ce changement modifie le blindage contre les muons et donc les spectres en énergie et leurs distributions angulaires, ce qui influence le spectre en énergie déposée ;
- une perturbation visible lors de la campagne « AmBe », au cours de laquelle une source de neutrons AmBe est placée au-dessus des panneaux supérieurs pour l'étalonnage des détecteurs Germanium. Cette source ajoute du bruit de fond ;
- enfin, la période « Top only » correspond à une configuration expérimentale dans laquelle les panneaux latéraux avaient été retirés. Cela rend certaines sélections (impliquant des panneaux latéraux) inaccessibles à cette période.

La stabilité de l'ajustement est illustrée en bas par le suivi du χ^2/ndf, qui reste globalement constant dans le temps. À droite, l'histogramme des MPV pour chaque sélection confirme que les sélections plus strictes permettent non seulement de réduire les discontinuités ON/OFF, mais aussi de diminuer la dispersion des valeurs d'étalonnage pendant la période ON.

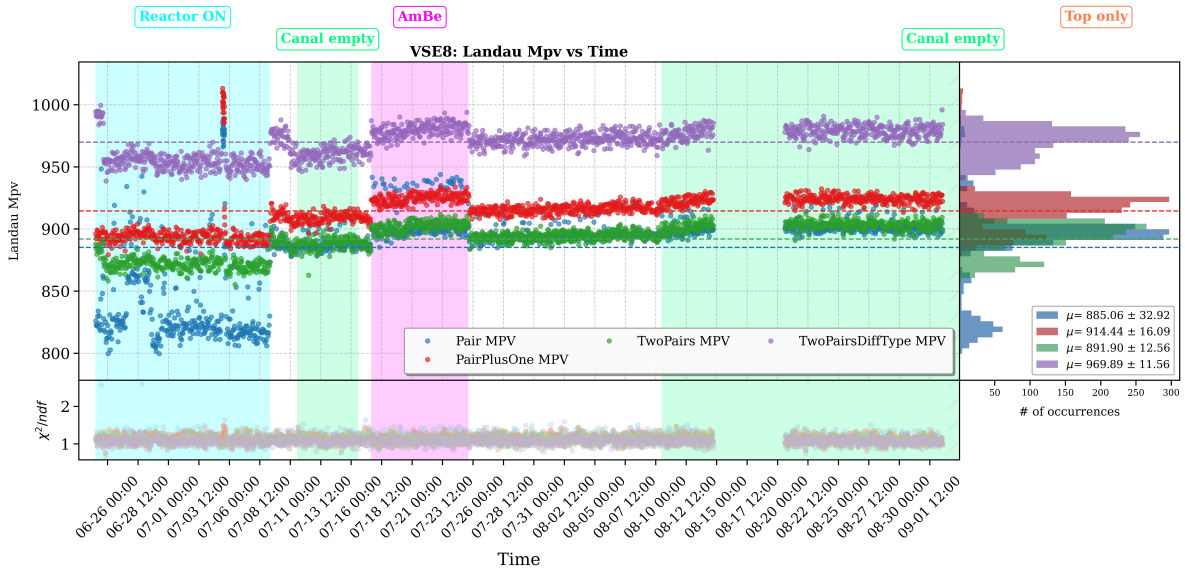


FIGURE 10 – Évolution temporelle du pic muon extrait de l'ajustement du pic muon pour le panneau latéral VSE8, selon quatre sélections : « paire », « paire+1 », « deux paires » et « deux paires de types différents ». En bas : χ^2/ndf de l'ajustement ; à droite : histogrammes pour chaque sélection.

Au-delà des effets expérimentaux visibles dans l'évolution temporelle des étalonnages, les différences observées entre les panneaux supérieurs et latéraux peuvent également s'expliquer par la géométrie du veto muon. En particulier, la similarité entre les sélections « paire+1 », « deux paires » et « deux paires de types différents » observée pour les panneaux supérieurs s'explique par le fait que pour un panneau supérieur donné, il existe relativement peu d'événements où plusieurs paires supérieures sont déclenchées simultané-

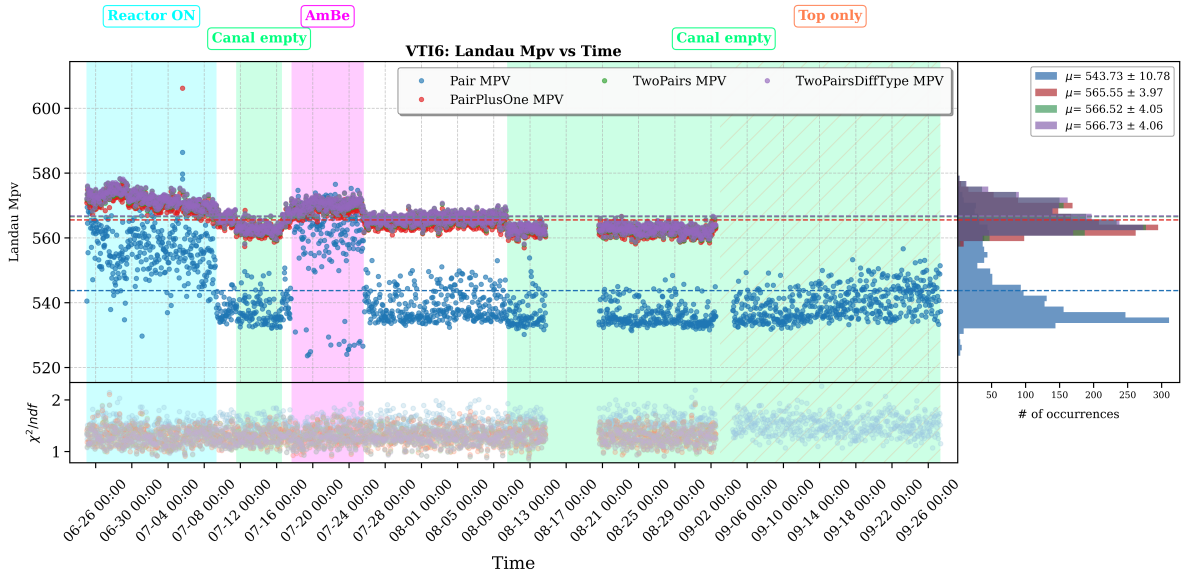
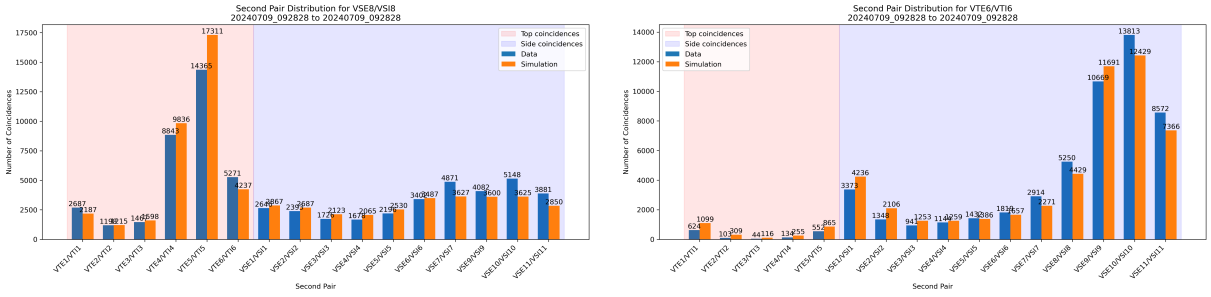


FIGURE 11 – Évolution temporelle du pic muon pour le panneau supérieur VTI6. Le comportement est similaire à celui de VSE8.

ment. Ainsi, les sélections « deux paires » et « deux paires de types différents » reviennent généralement à sélectionner une paire de panneaux supérieurs accompagnée d'une paire de panneaux latéraux. À l'inverse, pour les panneaux latéraux, il est fréquent que plusieurs paires latérales soient touchées lors d'un même passage de muon incliné.

Cette différence est illustrée à la figure 12, qui montre les paires déclenchées en coïncidence avec une paire donnée. On y voit qu'une paire latérale (VSE8/VSI8) est souvent accompagnée d'autres paires latérales, tandis qu'une paire supérieure (VTE6/VTI6) coïncide principalement avec des paires latérales, et rarement avec d'autres paires supérieures.



(a) Coïncidences pour la paire VSE8/VSI8 (latérale)

(b) Coïncidences pour la paire VTE6/VTI6 (supérieure)

FIGURE 12 – Distribution des coïncidences pour deux paires de vetos : un panneau latéral (VSE8/VSI8) et un panneau supérieur (VTE6/VTI6). Les histogrammes montrent les autres paires déclenchées simultanément. Les données mesurées sont comparés à la simulation

Les données sont ici comparées aux résultats d'une simulation GEANT4 prenant en compte la géométrie complète du système de veto, ainsi que le spectre en énergie et la distribution angulaire attendue des muons cosmiques. Cette simulation permet de valider l'interprétation géométrique des coïncidences observées et montre un bon accord global avec les distributions mesurées.

3.3.3 Quantification des différences entre les périodes ON et OFF

Après avoir visualisé qualitativement l'évolution temporelle du MPV, une quantification plus précise des discontinuités entre les périodes OFF et ON a été réalisée.

Pour chaque panneau et chaque sélection, nous avons extrait le paramètre $\delta_{\mathrm{ON/OFF}}$ défini comme :

$$\delta_{\mathrm{ON/OFF}} = \frac{\langle MPV_{\mathrm{ON}} \rangle - \langle MPV_{\mathrm{OFF}} \rangle}{\langle MPV_{\mathrm{OFF}} \rangle}$$

Les moyennes $\langle MPV_{\mathrm{ON/OFF}} \rangle$ sont calculées à partir des cinq runs ON et des cinq runs OFF les plus proches temporellement du moment d'arrêt du réacteur, tout en excluant systématiquement les runs de transition. Ce choix permet de comparer les périodes stables tout en restant au plus proche de la transition, limitant ainsi l'influence des autres sources de variation.

La moyenne est pondérée en fonction de l'incertitude sur le paramètre MPV issu de l'ajustement. Cette incertitude varie typiquement de 1% pour les sélections strictes à environ 5% pour la sélection « paire ». L'erreur sur le taux $\delta_{\mathrm{ON/OFF}}$ est ensuite obtenue par propagation quadratique des incertitudes associées aux deux périodes.

Ce protocole est répété pour l'ensemble des panneaux et pour chaque stratégie de sélection. La figure 13 montre l'évolution relative du paramètre MPV entre les périodes ON et OFF du réacteur, exprimée en pourcentage, pour l'ensemble des panneaux et selon les différentes stratégies de sélection.

On remarque tout d'abord que la sélection « paire » présente des variations importantes, atteignant jusqu'à 12% pour certains panneaux. Comme déjà mentionné, cette forte instabilité s'explique par la présence d'un bruit de fond résiduel plus important.

En revanche, des sélections plus restrictives (« paire+1 », « deux paires » et « deux paires de types différents ») permettent de fortement atténuer ce saut. Pour la grande majorité des panneaux, les variations sont alors inférieures à 2 %, et rarement au-delà de 3–4 %. Parmi les cas les moins stables, on peut citer les panneaux VTI4, VSE4 et VSE9, qui présentent des taux d'évolution légèrement plus élevés, même avec des sélections strictes.

Ces résultats démontrent l'intérêt de recourir à des sélections basées sur des coïncidences multiples pour garantir un étalonnage robuste, indépendant de l'état du réacteur. Cela est essentiel pour préserver une efficacité de veto constante, indispensable à la fiabilité de l'analyse du signal neutrino. En revanche, les trois nouvelles sélections sont presque équivalentes (« paire+1 », « deux paires » , « deux paires de types différents »).

3.4 Test de robustesse

Dans cette partie, nous avons voulu vérifier que les résidus faibles mais visibles dans les spectres ON-OFF (cf. figure 9) sont bien à l'origine des discontinuités d'étalonnage entre les périodes ON et OFF observées précédemment et que ce n'est pas plutôt un problème de convergence de l'ajustement. Pour cela, nous avons appliqué une méthode simple consistant à reproduire artificiellement l'effet du réacteur dans une période OFF en y ajoutant un spectre ON-OFF.

Principe de la méthode

Nous avons sélectionné deux runs autour de l'arrêt du réacteur le 9 juillet 2024 à 08h40 :

— un run ON à 07h28 (juste avant l'arrêt),

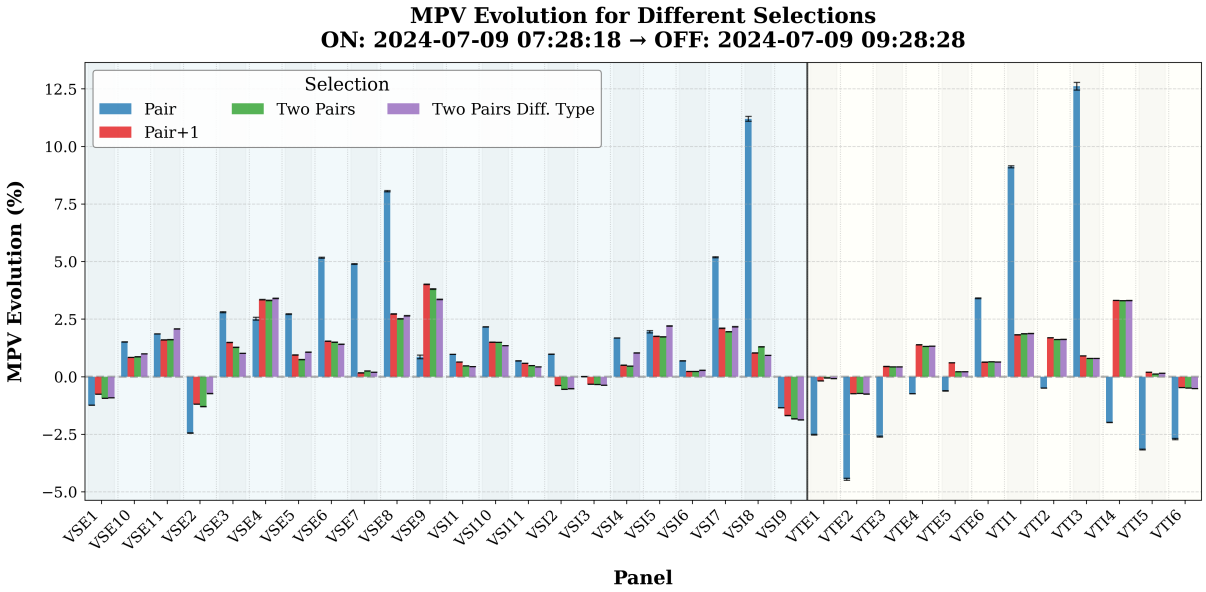


FIGURE 13 – Évolution relative du MPV entre les périodes ON et OFF pour chaque panneau et pour chaque stratégie de sélection. Les sélections « paire+1 », « deux paires » et « deux paires de types différents » permettent de limiter efficacement la discontinuité.

— un run OFF à 09h28 (juste après l'arrêt, sans inclure le run de transition).

Le spectre différentiel ON-OFF est calculé avec la sélection « deux paires » et est défini comme :

$$\text{Spectre}_{\text{ON-OFF}} = \text{Spectre}_{\text{ON}} - \text{Spectre}_{\text{OFF}}$$

Ce spectre a ensuite été ajouté à une période OFF ultérieure, sur plusieurs jours, afin de simuler une période OFF contaminée par les effets résiduels du réacteur :

$$\text{Spectre}_{\text{OFF corrigé}} = \text{Spectre}_{\text{OFF}} + \text{Spectre}_{\text{ON-OFF}}$$

Nous avons appliqué exactement le même ajustement (Landau convoluée avec une gaussienne) que précédemment sur ces spectres corrigés, uniquement pour la sélection « deux paires », jugée la plus robuste.

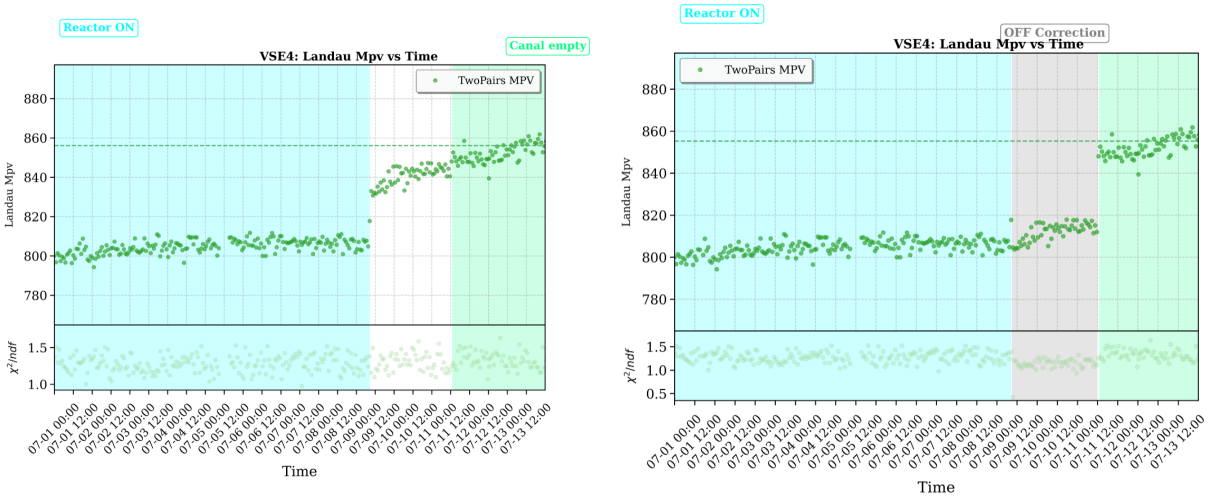
Résultats

La figure 14 présente l'évolution temporelle du MPV pour le panneau VSE4 avant (a) et après (b) correction. Le saut net visible entre les périodes ON et OFF dans le graphe (a) disparaît largement après correction dans le graphe (b), ce qui confirme que l'effet est bien imputable aux structures résiduelles contenues dans le spectre ON-OFF.

Ce test démontre que les discontinuités d'étalonnage observées dans les suivis temporels peuvent bien être expliquées par la différence de spectre entre les périodes ON et OFF.

3.5 Origine des événements résiduels

Malgré l'utilisation de sélections strictes (« paire+1 », « deux paires », « deux paires de types différents »), l'analyse ON-OFF a montré la persistance d'un excès d'événements en gamma et/ou en neutron en dessous du pic muon. Or, il est très peu probable qu'un

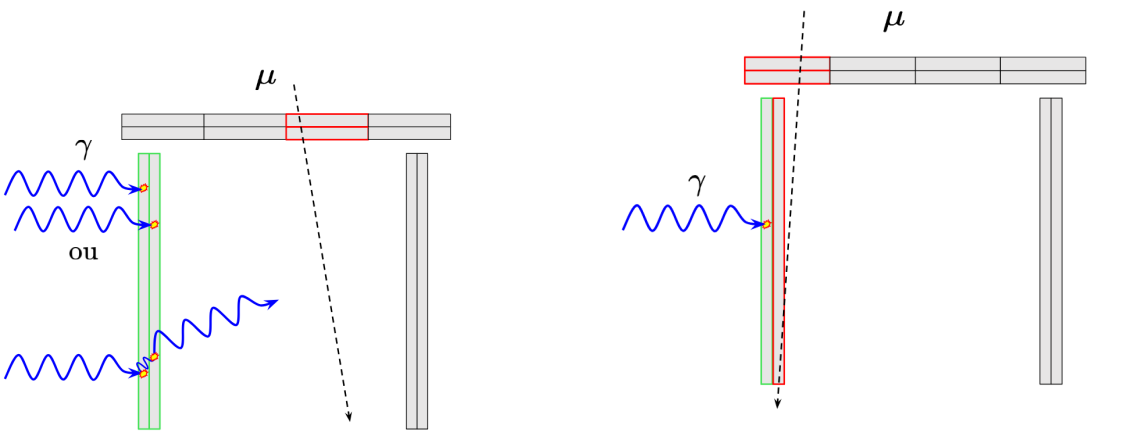


(a) Avant correction

(b) Après correction

FIGURE 14 – Évolution du MPV dans le temps pour le panneau VSE4. Le saut entre les périodes ON et OFF, visible avant correction (a), est fortement atténué après ajout du spectre ON-OFF (b).

gamma ou un neutron puisse interagir dans trois ou quatre panneaux différents en y déposant à chaque fois plus de 3 MeV. En revanche, on peut imaginer deux types de coïncidences fortuites comme illustré sur la figure 15.



(a) Cas 1 : deux paires indépendantes

(b) Cas 2 : un muon traversant 3 panneaux + un événement accidentel complétant une paire

FIGURE 15 – Schémas des possibilités de coïncidences fortuites

Cas 1 : Coïncidence fortuite de deux événements de type paire (par exemple un muon sur une paire i et un bruit de fond sur une paire j), une estimation simple du taux de coïncidences fortuites donne :

$$R^{\text{ON}}_{\text{fortuit},i,j} = R^{\text{ON}}_{\text{pair}\,i} \times R^{\text{ON}}_{\text{pair}\,j} \times \Delta t \tag{1}$$

Cependant, l'ordre de grandeur des taux de déclenchement des paires varie de 30 à 100 s^{-1}. En tenant compte de la fenêtre temporelle d'acceptation Δt de 40 ns, le taux de coïncidences fortuites attendu entre deux paires indépendantes reste inférieur à 10^{-4} s^{-1}.

Or, les excès d'événements résiduels observés après soustraction ON-OFF sont typiquement de l'ordre de 10^{-2} s^{-1}, soit deux ordres de grandeur au-dessus des attentes. Une telle différence exclut donc la possibilité que ces résidus soient dus à des coïncidences totalement indépendantes entre paires non corrélées.

Cas 2 : Coïncidence fortuite entre un muon traversant trois panneaux (par exemple une paire complète $i = (i_1, i_2)$ ainsi qu'un panneau j_1) et un événement de bruit de fond indépendant qui vient compléter une deuxième paire (en déclenchant le panneau j_2). Le taux d'un tel événement peut s'écrire comme :

$$R_{\text{acc},i,j} = R_{i+j_1} \times R_{j_2} \times \Delta t \tag{2}$$

où R_{i+j_1} désigne le taux de coïncidence entre la paire i et le panneau j_1, R_{j_2} est le taux individuel du panneau manquant, et $\Delta t = 40$ ns la fenêtre temporelle d'acceptation.

Les taux individuels mesurés indépendamment montrent qu'ils sont de l'ordre de 10^3 s^{-1}, ce qui est suffisant pour expliquer les excès d'événements résiduels observés de l'ordre de 10^{-2} s^{-1}. Toutefois, les incertitudes sur les taux différentiels $R^{\text{ON}} - R^{\text{OFF}}$ sont trop importantes pour pouvoir faire une comparaison précise avec le taux d'accidentels $R_{\text{acc},i,j}$. Cette hypothèse constitue néanmoins une explication plausible des événements accidentels restants.

4 Suivi de l'efficacité du veto

4.1 Méthode d'estimation de l'efficacité

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la stabilité de l'efficacité des panneaux du veto muon joue un rôle central. Or, l'efficacité repose sur la sélection des événements et particulièrement sur le seuil en énergie défini comme une fraction du pic muon. Pour que la soustraction ON - OFF fonctionne correctement, il faut que les échantillons comparés soient équivalents. Toute variation de l'efficacité introduit un biais dans la sélection des événements. Il est donc essentiel de s'assurer que les fluctuations de la position du pic muon n'induisent pas trop de variation d'efficacité. L'objectif est d'atteindre des variations d'efficacité inférieures à 1 %.

L'efficacité de chaque panneau du veto a pu être initialement mesurée au LPSC en utilisant un banc de test dédié. Le principe repose sur une géométrie contrôlée et bien connue, dans laquelle un panneau du veto est encadré par deux scintillateurs de référence de petite taille servant de déclenchement à l'acquisition. Lorsque ces scintillateurs détectent un muon en coïncidence, on sait avec certitude que celui-ci est passé à travers le panneau central, ce qui permet de mesurer directement sa probabilité de réponse. Les mesures effectuées dans ce contexte ont montré que l'efficacité intrinsèque des panneaux était supérieure à 96 % pour la quasi-totalité d'entre eux. Cette méthode repose sur une configuration expérimentale impossible à reproduire in situ dans l'environnement complexe de l'ILL.

C'est pourquoi une nouvelle méthode a été développée spécifiquement dans le cadre de ce stage, afin d'estimer l'efficacité de chaque panneau directement à partir des données collectées par le système de veto pendant les périodes de prise de données. Cette méthode n'offre pas une mesure absolue de l'efficacité intrinsèque, car elle est convoluée avec des effets d'acceptance géométrique liés à la configuration spatiale des panneaux. En revanche,

elle présente l'avantage majeur de pouvoir être appliquée run par run, et permet un suivi temporel robuste de l'efficacité des panneaux.

Cette efficacité est définie comme la probabilité qu'un panneau détecte un muon, conditionnellement au fait que ce muon a été détecté dans plusieurs autres panneaux en coïncidence. La méthode repose sur la sélection dite « deux paires de types différents », combinée à un seuil énergétique fixé à une fraction du pic muon (généralement 1/2), issu de l'étalonnage effectué avec cette même sélection. Si un panneau ne déclenche pas alors que les autres de la sélection le font, cela indique une inefficacité.

Concrètement, pour un panneau supérieur (par exemple VTI_x), l'efficacité est définie par :

$$\epsilon_{\mathrm{VTI}_x} = \frac{\sum_{y=1}^{11} N(\mathrm{VTI}_x \cap \mathrm{VTE}_x \cap \mathrm{VSE}_y \cap \mathrm{VSI}_y)}{\sum_{y=1}^{11} N(\mathrm{VTE}_x \cap \mathrm{VSE}_y \cap \mathrm{VSI}_y)}$$

De manière symétrique, pour un panneau latéral (par exemple VSE_y), on définit :

$$\epsilon_{\mathrm{VSE}_y} = \frac{\sum_{x=1}^{6} N(\mathrm{VSE}_y \cap \mathrm{VSI}_y \cap \mathrm{VTE}_x \cap \mathrm{VTI}_x)}{\sum_{x=1}^{6} N(\mathrm{VSI}_y \cap \mathrm{VTE}_x \cap \mathrm{VTI}_x)}$$

où $N(...)$ désigne le nombre d'événements pour lesquels les panneaux spécifiés ont été au-dessus du seuil.

Ce calcul est réalisé indépendamment pour chaque run, ce qui permet de suivre finement l'évolution de l'efficacité heure par heure. Cela constitue une amélioration significative par rapport aux approches précédentes, où une valeur moyenne d'efficacité était attribuée à chaque panneau pour toute une période ON ou OFF. À noter que l'incertitude statistique associée à cette efficacité est estimée selon une loi binomiale classique.[6]

Il est important de noter que l'efficacité ainsi définie n'est pas l'efficacité intrinsèque du panneau pris isolément. Elle dépend à la fois :

- de l'efficacité intrinsèque du panneau (efficacité de scintillation, de lecture optique et d'électronique),
- de la géométrie des trajectoires muoniques sélectionnées,
- de la définition du seuil utilisé dans la sélection.

Il peut arriver, avec la sélection « deux paires de types différents », qu'un muon traverse effectivement trois panneaux mais pas le quatrième, pour des raisons purement géométriques. Cela se traduit alors par une sous-estimation apparente de l'efficacité, sans que le panneau soit défaillant. Ce biais géométrique est indissociable de la définition même de notre méthode mais ne pose pas de réel problème puisque nous recherchons à suivre l'évolution temporelle de l'efficacité.

4.2 Suivi temporel de l'efficacité

Afin d'évaluer la stabilité temporelle du veto, nous avons étudié l'évolution de l'efficacité apparente, calculée run par run selon la méthode présentée précédemment. Pour chaque run, l'efficacité d'un panneau donné est recalculée en ajustant le seuil Q_{tot} à partir de la position du pic muon obtenue lors de l'étalonnage correspondant. Le seuil, fixé à la moitié du pic muon, est donc mis à jour dynamiquement, ce qui permet de prendre en compte les éventuelles fluctuations du MPV.

La figure 16 montre cette évolution pour un panneau latéral, VSE2, sur une période étendue incluant la transition entre les phases ON et OFF du réacteur.

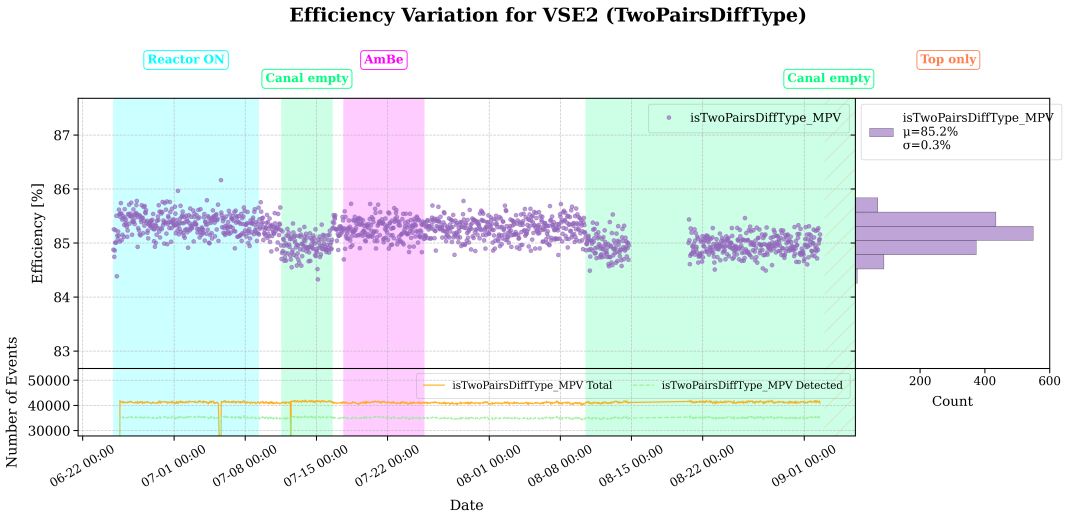


FIGURE 16 – Évolution de l'efficacité apparente du panneau VSE2, calculée run par run avec un seuil fixé à la moitié du pic muon mis à jour dynamiquement. On observe une excellente stabilité, y compris à travers la transition réacteur ON/OFF.

On constate une excellente stabilité de l'efficacité dans le temps. Aucune discontinuité significative n'est observée entre les périodes ON et OFF. Cela s'explique par la forme du spectre en énergie (cf. figure 7), il y a peu d'événements au niveau du seuil en énergie donc des variations faibles du seuil ne modifient presque pas le taux d'événements. Quelques discontinuités plus faibles sont visibles et peuvent être corrélées à des événements spécifiques, comme le vidage ou le remplissage du canal de transfert situé au-dessus du détecteur. Ce canal, lorsqu'il est vide, modifie le surplomb et donc la distribution angulaires des muons, ce qui affecte légèrement la probabilité de coïncidence.

Afin de généraliser cette observation à l'ensemble du veto muon, l'efficacité moyenne et son écart-type ont été calculés pour chaque panneau sur la période OFF. Les résultats sont résumés dans la table 1, qui montre que la stabilité observée pour VSE2 se retrouve également sur l'ensemble des panneaux, avec des variations typiquement inférieures à 1 %.

TABLE 1 – Efficacité moyenne et écart-type des panneaux de veto pendant la période OFF.

Veto	Efficacité (%)	Ecart-type (%)
VTE (all)	88.35	0.14
VTI (all)	91.80	0.12
VSE (all)	83.75	0.19
VSI (all)	86.95	0.22
All	88.24	0.18

Ces résultats confirment que le veto présente une excellente stabilité temporelle, condition essentielle pour assurer un contrôle rigoureux du bruit de fond d'origine cosmique dans le cadre de l'analyse ON/OFF.

4.3 Comparaison simulation/données

Nous avons comparé les efficacités mesurées sur données aux résultats extraits d'une simulation GEANT4, utilisant le générateur de muons CRY, développé pour modéliser

fidèlement le spectre angulaire et énergétique des muons cosmiques dans l'environnement de l'ILL.

L'efficacité est calculée à partir des évènements simulés selon la même logique que pour les données : on cherche à vérifier si un panneau donné est déclenché au-dessus d'un certain seuil, conditionnellement à la détection du muon par le reste du système. Contrairement aux données, où les seuils sont définis en charge totale (Q_{tot}), la simulation permet un accès direct à l'énergie déposée. Le seuil est ici défini comme la moitié du pic muon extrait des spectres simulés, en reproduisant exactement la méthode d'étalonnage utilisée sur les données.

Pour chaque panneau et chaque sélection, le spectre en énergie est ajusté à l'aide d'un modèle Landau-Gauss, ce qui permet d'extraire le pic muon en MeV, ainsi que le seuil correspondant à la moitié du pic muon. Ce seuil est ensuite utilisé pour déterminer l'efficacité, c'est-à-dire la probabilité qu'un panneau soit traversé par un muon identifié par le reste du système, et que l'énergie déposée dépasse ce seuil.

Pour simuler la réponse réaliste du détecteur, les valeurs d'efficacité issues de la simulation sont multipliées par les efficacités intrinsèques des panneaux mesurées indépendamment au LPSC. Ces dernières, supérieures à 96 % pour la quasi-totalité des panneaux, tiennent compte des pertes dues à la scintillation, à la collecte optique, et à l'électronique de lecture.

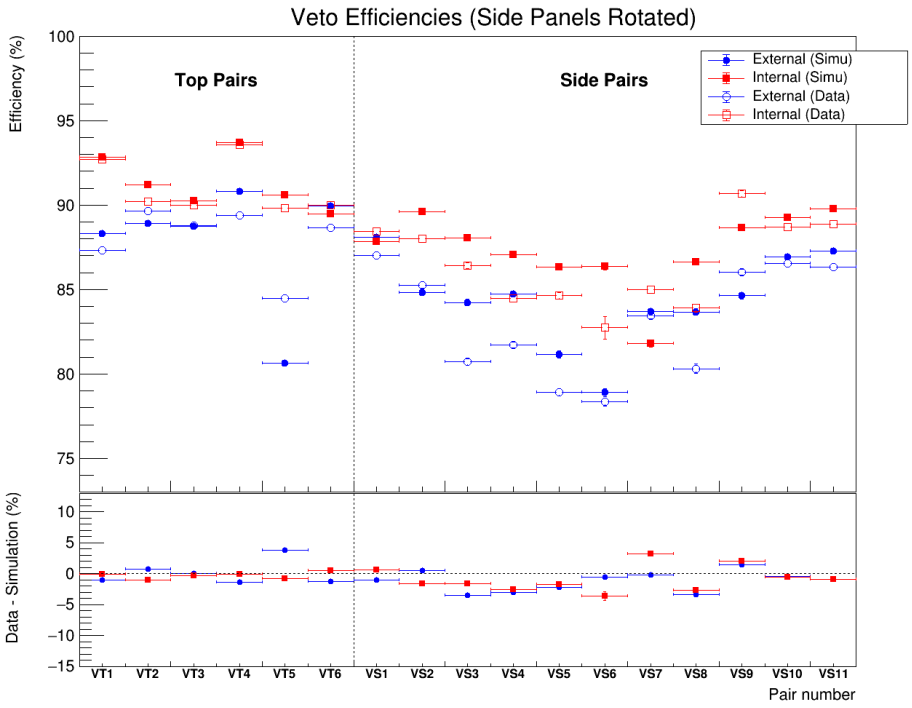


FIGURE 17 – Comparaison des efficacités mesurées sur les données (période OFF, canal plein) et simulées via GEANT4 pour les panneaux supérieurs et latéraux. Les marqueurs pleins indiquent la simulation corrigée par les efficacités intrinsèques ; les vides indiquent les données. Les panneaux internes sont en rouge, les externes en bleu.

La figure 17 présente la comparaison entre ces efficacités simulées corrigées et les efficacités moyennes mesurées avec les données, en période OFF avec canal plein (géométrie identique à celle utilisée dans la simulation).

On observe une très bonne cohérence globale entre les deux ensembles de points. Les efficacités mesurées suivent bien la tendance des simulations, ce qui valide à la fois le

modèle de reconstruction et la configuration géométrique utilisée dans GEANT4. Les écarts observés restent faibles et ne présentent pas de biais systématique.

Les petites différences résiduelles peuvent s'expliquer par :

— de légers désalignements entre la géométrie simulée et l'installation réelle ;
— l'approximation introduite dans la simulation des seuils (sans bruit électronique simulé) ;
— une mauvaise application de l'efficacité intrinsèque (dégradation des panneaux, valeur calculée pour des muons verticaux).

Cette comparaison conforte la validité de la méthode d'estimation d'efficacité mise en œuvre, et confirme que le comportement global du veto muon est bien compris, aussi bien sur le plan géométrique que statistique.

Conclusion

Ce stage s'inscrit dans le cadre de la préparation de l'expérience RICOCHET, qui vise à détecter la diffusion élastique cohérente de neutrinos sur noyaux à l'aide d'un détecteur cryogénique de nouvelle génération. Le veto muon joue un rôle central dans cette expérience, en permettant le rejet actif des événements cosmogéniques susceptibles de contaminer le signal attendu. La capacité à identifier ces événements repose à la fois sur la stabilité de l'efficacité du veto, et sur la stabilité temporelle du pic muon dans les spectres en énergie, qui conditionne directement la sélection des événements.

Dans ce contexte, un des objectifs majeurs de ce travail a été d'assurer un étalonnage in-situ, run par run, du veto muon. Une nouvelle stratégie de sélection des muons traversants a été mise en place, permettant d'extraire de manière fiable et automatique le pic muon sur l'ensemble des panneaux. Cette procédure a permis de construire un étalonnage temporel précis, démontrant la stabilité de la réponse en énergie au cours du temps, avec des variations inférieures à 4 % pour tous les panneaux.

L'efficacité de détection de chaque panneau du veto a ensuite été évaluée sur l'ensemble de la période de collecte de données. Les résultats montrent une excellente stabilité de l'efficacité run par run, avec des fluctuations également inférieures à 1 %, en accord avec les prédictions issues des simulations. L'ensemble du système est donc désormais calibré et monitoré de manière fiable, offrant une base solide pour les futures analyses ON-OFF.

Les outils développés au cours de ce stage seront essentiels pour la suite du programme RICOCHET, en permettant un contrôle rigoureux du bruit de fond d'origine cosmique et en assurant la reproductibilité des sélections dans le temps.

Références

[1] D.Z. Freedman, *Coherent effects of a weak neutral current*, Phys. Rev. D **9**, 1389 (1974).

[2] D. Akimov *et al.*, *Observation of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering*, Science **357**, 1123 (2017), arXiv:1708.01294.

[3] D. Akimov *et al.*, *New Physics Opportunities with CEνNS*, arXiv:1805.01798.

[4] J. Billard, E. Figueroa-Feliciano, L. Strigari, *Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments*, Phys. Rev. D **89**, 023524 (2014), arXiv:1307.5458.

[5] M. Cadeddu, F. Dordei, C. Giunti, *A view of coherent elastic neutrino-nucleus scattering*, Europhys. Lett. **143**, 34001 (2023), arXiv:2307.08842

[6] M. Paterno, *Calculating Efficiencies and Their Uncertainties*, lien

A Annexe : Système de déclenchement et d'acquisition (DAQ)

Le système d'acquisition du veto muon repose sur une architecture distribuée impliquant plusieurs modules d'électronique frontale (FE) et une carte de lecture centralisée (TRB, Trigger Readout Board). Il est conçu pour identifier et enregistrer efficacement les passages de muons à travers les panneaux de scintillateur, tout en rejetant la majorité du bruit de fond.

Chaque panneau de scintillateur est connecté à une carte d'électronique frontale. Dès qu'un signal dépasse un certain seuil en amplitude, cette carte génère un signal numérique, appelé T0, qu'elle envoie à la TRB. Tous les FE sont parfaitement synchronisés en temps.

La TRB reçoit l'ensemble des signaux T0 provenant de tous les canaux. Elle vérifie s'il existe une coïncidence temporelle dans une fenêtre de 40 ns entre :

— un T0 issu d'un panneau connecté à l'un des trois FE externes,
— et un T0 issu d'un panneau connecté à l'un des trois FE internes.

Si cette condition est satisfaite, la TRB valide un événement physique global. Elle envoie alors un signal de confirmation de déclenchement (T1) à tous les FE.

Une fois le signal T1 reçu, chaque carte FE :

— mesure précisément le temps de début du signal,
— intègre la charge du signal dans une fenêtre de 200 ns, définissant la variable Q_{tot} pour chaque canal actif.

Ces données (timestamp et Q_{tot}) sont ensuite renvoyées à la TRB, puis transférées et stockées sur disque pour être utilisées dans les analyses ultérieures.

Utilisation dans l'analyse

La quantité Q_{tot} constitue l'observable principale utilisée :

— pour l'étalonnage des panneaux (détection du pic muon),
— pour la sélection d'événements muoniques dans l'analyse ON/OFF.

B Annexe : Évolution des taux de trigger en fonction des sélections

L'objectif de cette annexe est d'illustrer comment les différentes sélections appliquées aux événements muoniques affectent le taux de déclenchement (trigger rate) mesuré sur les panneaux de veto. Ces taux sont un indicateur direct de la capacité du système à discriminer les vrais muons des événements de bruit de fond.

Effet des sélections sur un panneau donné

Nous présentons ici l'évolution temporelle du taux de trigger pour deux panneaux représentatifs :

— VTE1 (panneau supérieur externe),
— VSE3 (panneau latéral externe).

Chaque courbe correspond à une sélection différente :

— *No selection* : tout événement qui déclenche un panneau,

— *Paire* : coïncidence avec un panneau partenaire,
— *Paire+1* : + un troisième panneau quelconque,
— *Deux paires* : coïncidence entre deux paires,
— *Deux paires de types différents* : une paire horizontale et une paire verticale.

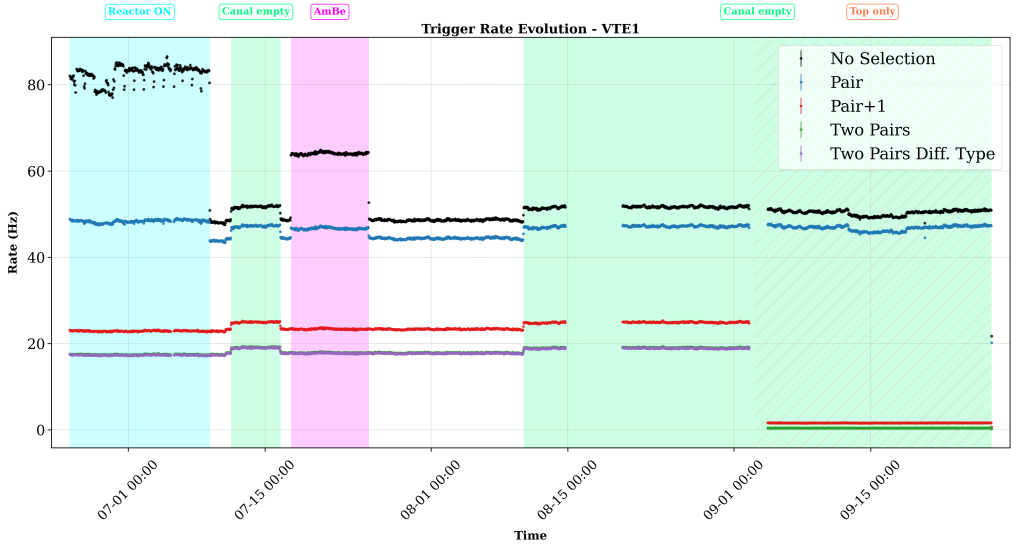


FIGURE 18 – Taux de trigger mesuré sur le panneau VTE1 pour différentes sélections. La stabilité des courbes associées aux sélections les plus strictes montre l'efficacité du rejet du bruit de fond.

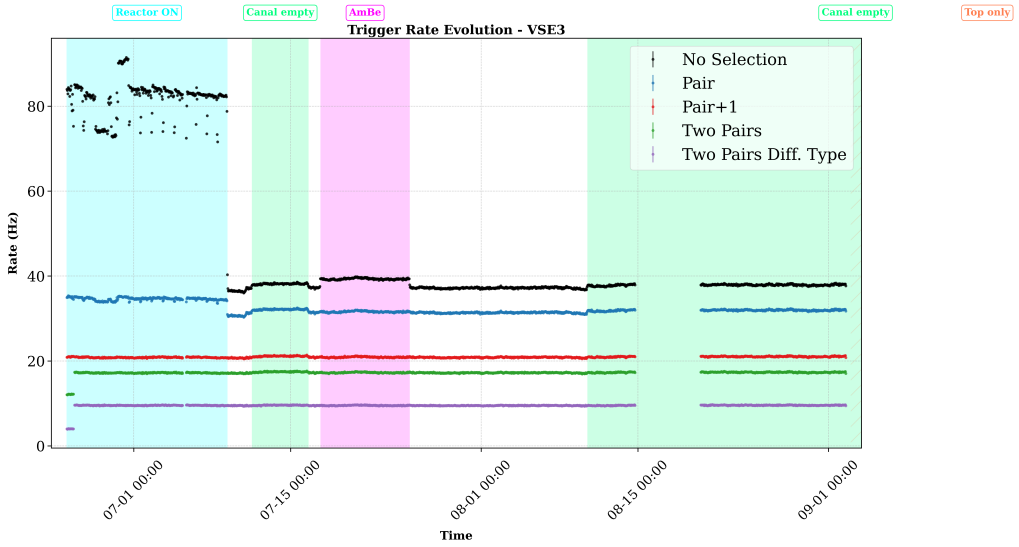


FIGURE 19 – Taux de trigger mesuré sur le panneau VSE3 pour différentes sélections. Le taux passe de 90 Hz sans sélection à 15 Hz avec les sélections les plus strictes, ce qui illustre l'efficacité du filtrage.

C Annexe : Résultats des ajustements sur les simulations

Les résultats présentés ci-dessous sont issus de l'ajustement des spectres d'énergie simulés pour différents panneaux de veto. L'objectif est d'évaluer la position du pic muon (MPV) pour chaque panneau et chaque sélection utilisée dans l'analyse. Ces valeurs sont essentielles pour l'étalonnage en énergie, car elles permettent d'estimer l'énergie moyenne déposée par les muons dans chaque sélection.

TABLE 2 – Valeur simulée du pic muon (MPV) pour chaque panneau supérieur, selon la sélection.

Panneau Ext.	**Sélection**	**MPV (MeV)**	**Panneau Int.**	**MPV (MeV)**
VTE1	Paire	6.56 ± 0.01	VSI1	6.61 ± 0.01
	Paire+1	6.59 ± 0.01		6.77 ± 0.01
	Deux paires	6.74 ± 0.01		6.83 ± 0.01
	Deux paires diff.	6.75 ± 0.01		6.83 ± 0.01
VTE2	Paire	6.46 ± 0.01	**VTI2**	6.63 ± 0.01
	Paire+1	6.85 ± 0.01		6.90 ± 0.01
	Deux paires	6.91 ± 0.01		6.96 ± 0.01
	Deux paires diff.	6.92 ± 0.01		6.97 ± 0.01
VTE3	Paire	6.44 ± 0.01	**VTI3**	6.53 ± 0.01
	Paire+1	6.75 ± 0.01		6.86 ± 0.01
	Deux paires	6.83 ± 0.01		6.84 ± 0.01
	Deux paires diff.	6.84 ± 0.01		6.88 ± 0.01
VTE4	Paire	6.39 ± 0.01	**VTI4**	6.45 ± 0.01
	Paire+1	6.57 ± 0.01		6.54 ± 0.01
	Deux paires	6.63 ± 0.01		6.67 ± 0.01
	Deux paires diff.	6.63 ± 0.01		6.68 ± 0.01
VTE5	Paire	6.50 ± 0.01	**VTI5**	6.55 ± 0.01
	Paire+1	6.76 ± 0.01		6.81 ± 0.01
	Deux paires	6.84 ± 0.01		6.89 ± 0.01
	Deux paires diff.	6.86 ± 0.01		6.91 ± 0.01
VTE6	Paire	6.58 ± 0.01	**VTI6**	6.59 ± 0.01
	Paire+1	6.86 ± 0.01		6.93 ± 0.01
	Deux paires	6.90 ± 0.01		6.99 ± 0.01
	Deux paires diff.	6.92 ± 0.01		7.00 ± 0.01

TABLE 3 – Valeur simulée du pic muon (MPV) pour chaque panneau latéral, selon la sélection.

Panneau Ext.	**Sélection**	**MPV (MeV)**	**Panneau Int.**	**MPV (MeV)**
VSE1	Paire	8.24 ± 0.02	**VSI1**	8.00 ± 0.04
	Paire+1	7.98 ± 0.05		7.89 ± 0.05
	Deux paires	7.96 ± 0.05		7.90 ± 0.05
	Deux paires diff.	8.76 ± 0.08		8.99 ± 0.03
VSE2	Paire	7.84 ± 0.05	**VSI2**	8.39 ± 0.02
	Paire+1	7.99 ± 0.05		8.14 ± 0.03
	Deux paires	7.96 ± 0.05		8.13 ± 0.03
	Deux paires diff.	8.65 ± 0.08		8.65 ± 0.05
VSE3	Paire	8.52 ± 0.04	**VSI3**	8.33 ± 0.04
	Paire+1	8.13 ± 0.07		7.79 ± 0.09
	Deux paires	8.08 ± 0.07		7.78 ± 0.09
	Deux paires diff.	8.86 ± 0.06		9.27 ± 0.05
VSE4	Paire	7.94 ± 0.05	**VSI4**	8.35 ± 0.03
	Paire+1	8.68 ± 0.03		8.42 ± 0.04
	Deux paires	8.64 ± 0.04		8.60 ± 0.03
	Deux paires diff.	10.24 ± 0.06		10.12 ± 0.04
VSE5	Paire	8.34 ± 0.03	**VSI5**	8.32 ± 0.03
	Paire+1	7.28± 0.09		8.26 ± 0.03
	Deux paires	7.03 ± 0.13		8.21 ± 0.04
	Deux paires diff.	9.58 ± 0.06		9.88 ± 0.05
VSE6	Paire	8.35 ± 0.03	**VSI6**	8.31 ± 0.03
	Paire+1	8.48 ± 0.02		7.82 ± 0.05
	Deux paires	8.40 ± 0.02		7.71 ± 0.06
	Deux paires diff.	9.23 ± 0.06		9.28 ±0.07
VSE7	Paire	7.76 ± 0.07	**VSI7**	8.31 ± 0.03
	Paire+1	8.24 ± 0.04		7.82 ± 0.05
	Deux paires	8.18 ± 0.05		7.71 ± 0.06
	Deux paires diff.	9.96 ± 0.05		9.28 ± 0.07
VSE8	Paire	8.08 ± 0.05	**VSI8**	7.88 ± 0.06
	Paire+1	8.62 ± 0.03		8.64 ± 0.01
	Deux paires	8.40 ± 0.04		8.49 ± 0.03
	Deux paires diff.	9.72 ± 0.05		9.95 ± 0.05
VSE9	Paire	7.91 ± 0.03	**VSI9**	7.94 ± 0.03
	Paire+1	8.46 ± 0.03		8.15 ± 0.03
	Deux paires	8.41 ± 0.03		8.29 ± 0.04
	Deux paires diff.	8.81 ± 0.05		9.85 ± 0.04
VSE10	Paire	7.70 ± 0.05	**VSI10**	8.19 ± 0.05
	Paire+1	7.25 ± 0.10		8.20 ± 0.04
	Deux paires	7.26 ± 0.10		8.22 ± 0.04
	Deux paires diff.	8.68 ± 0.06		8.67 ± 0.05
VSE11	Paire	7.99 ± 0.03	**VSI11**	8.46 ± 0.01
	Paire+1	8.14 ± 0.03		8.44 ± 0.02
	Deux paires	8.11 ± 0.03		8.43 ± 0.02
	Deux paires diff.	8.78 ± 0.05		8.72 ± 0.06