

Reconstruction de traces pour des muons atmosphériques dans le cadre de l'expérience JUNO

Adrian BARRIÈRE

Supervisé par J.P. ATHAYDE MARCONDES DE ANDRÉ

I. Contexte scientifique

I. Neutrinos

II. JUNO et le Top Tracker

II. Outils

I. Architecture des données

II. Classification

III. Visualiseur d'évènements

III. Résultats

I. Distribution angulaire

II. Efficacité

III. Corrélation

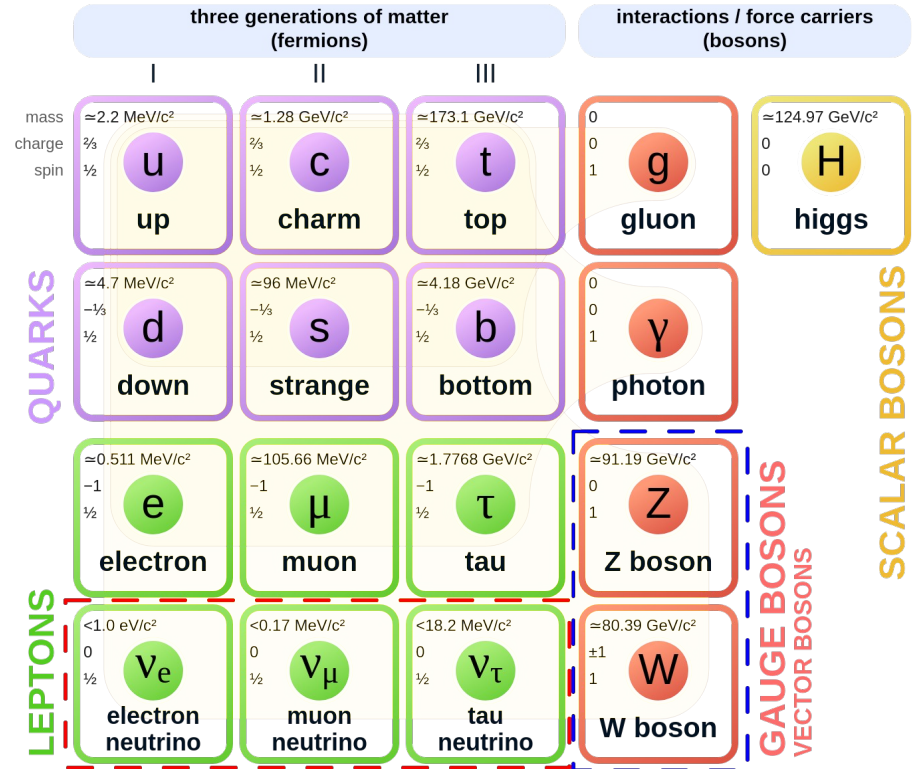
IV. Plans Futurs

V. Conclusion

Contexte – Neutrinos

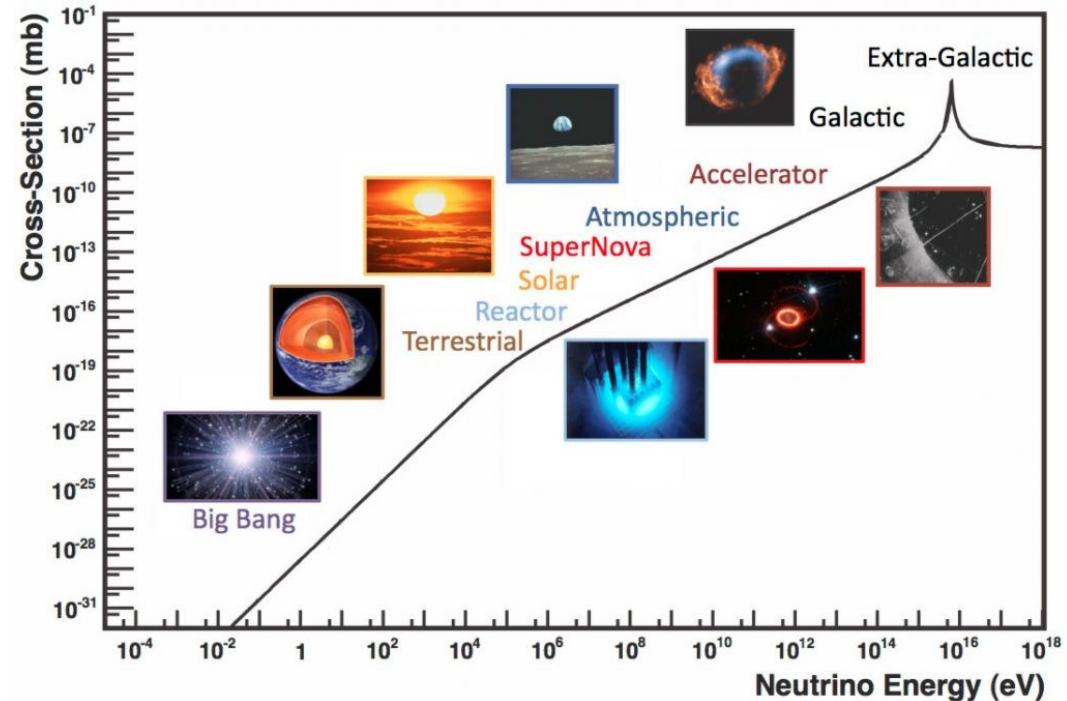
- Théorisé en 1930 par Wolfgang Pauli
- Première observation du ν_e en 1956 par Clyde Cowan et Frederick Reines
- Interagit seulement par la force faible
- 3 Saveurs : électronique, muonique, tauique

Standard Model of Elementary Particles



Ressources : [Standard Model](#) , Public domain, via Wikimedia Commons

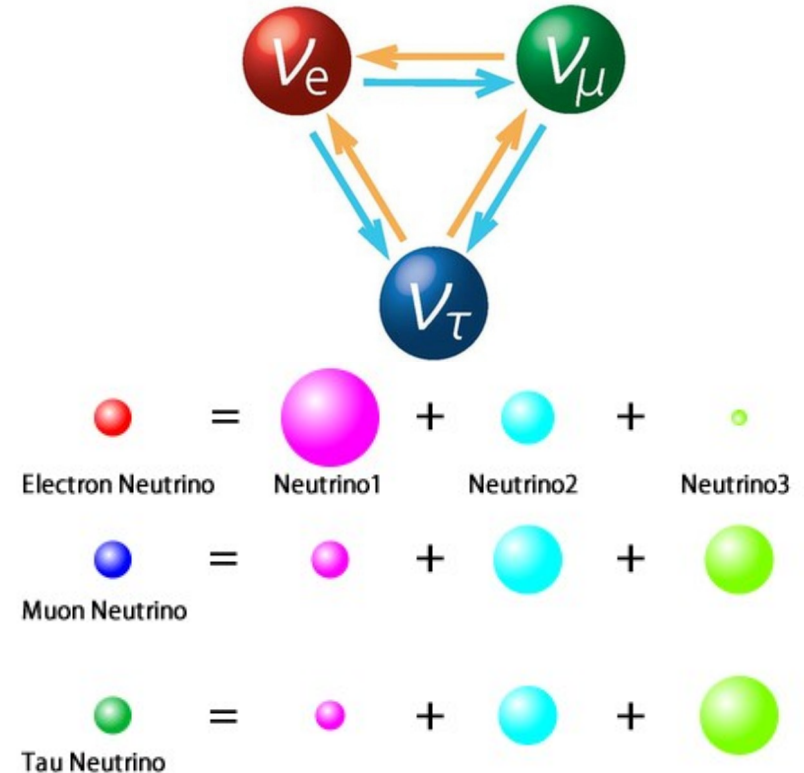
- Sources Naturelles
 - Réactions nucléaires : étoiles, géologiques...
 - Interaction entre un rayon cosmique et l'atmosphère
 - Supernovæ
 - Source extragalactique, Big Bang
- Sources Artificielles
 - Réacteurs nucléaires
 - Accélérateurs



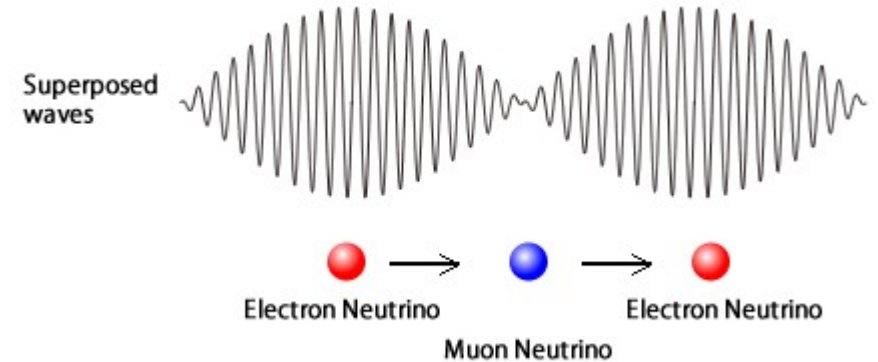
Énergies et sources des différentes sources de neutrinos

Ressources : [arXiv:1305.7513](https://arxiv.org/abs/1305.7513) [hep-ex], J.A. Formaggio, G.P. Zeller

- Originellement sans masses
 - Phénomènes d'oscillations indiquent le contraire
 - Neutrino atmosphérique : Super-Kamiokande (1998)
 - Neutrino solaire : SNO (2002)
- Oscillations entre les 3 saveurs
- Superposition de 3 états de masse



- Les oscillations dépendent de 6 paramètres
 - 2 différences de masses au carré $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$
 - 3 angles de mixages θ_{ij}
 - δ_{CP} une phase liée à la violation de charge-parité
- Cas simple : oscillation entre deux états, avec L la distance parcourue par le neutrino et E son énergie



$$P_{ij} = \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right)$$

- Passage des états de masses aux saveurs par la matrice de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS)

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

Avec c_{ij} et s_{ij} respectivement le cosinus et le sinus de l'angle de mixage θ_{ij}

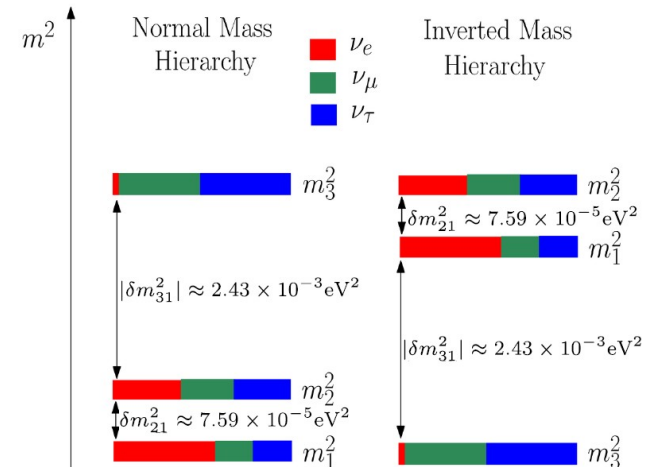
Contexte – JUNO et le Top Tracker

- Collaboration internationale de 77 instituts
- Observatoire à Neutrinos en construction à Jiāngmén en Chine à 700 m de profondeur
- Observe le flux de d'anti-neutrinos électroniques de deux centrales nucléaires à 53 km : Yángjiāng et Táishān



- Plusieurs intérêts pour la physique des neutrinos
 - Hiérarchie des masses
 - Détection de Supernovæ (CCSN)
 - Fond diffus de neutrinos de Supernovæ (DSNB)
 - Neutrinos géologiques
 - Neutrinos solaires

- Hiérarchie des masses
 - Mesure de Δm_{31} , Δm_{21} , $\sin^2(\theta_{12})$
Précision meilleure que 1 %



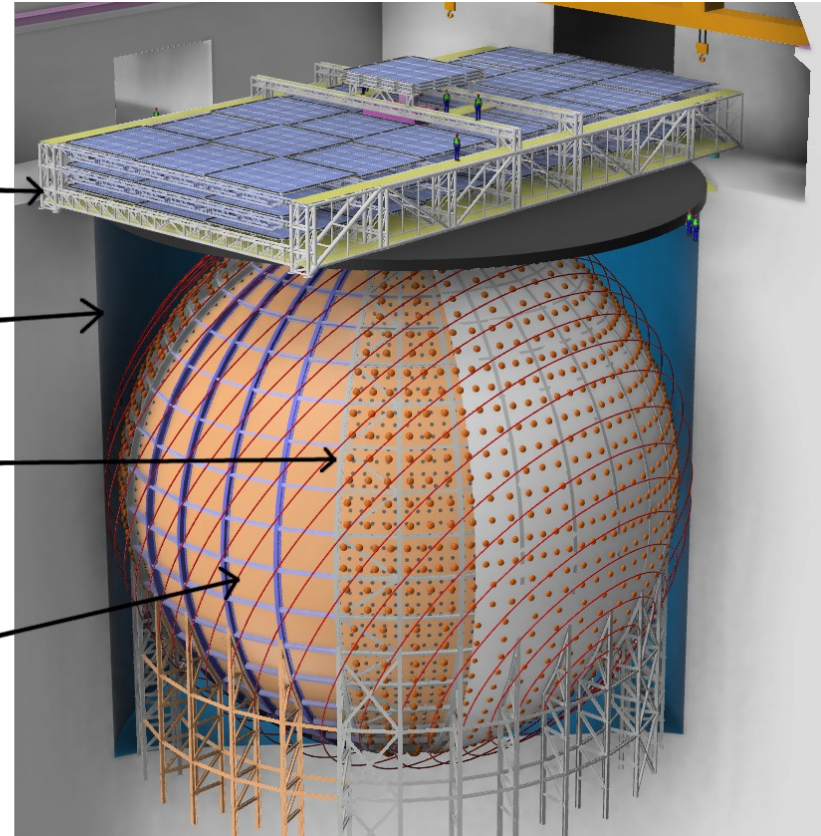
Contexte – JUNO et le Top Tracker

Top Tracker

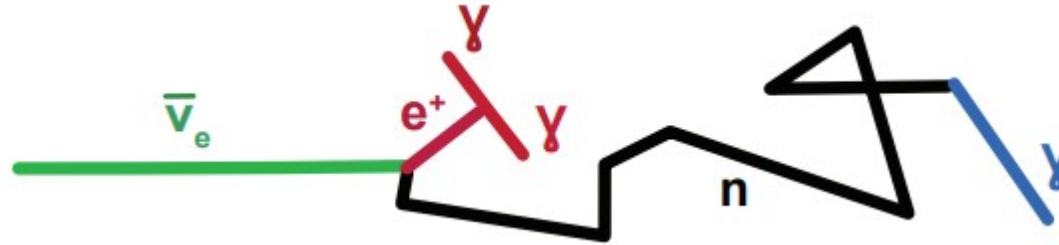
Water Cherenkov
detector (WCD)

18,000 20-inch PMTs
25,000 3-inch PMTs

Central Detector (CD)
Acrylic sphere
(20 kt Liquid Scintillator)



- Réaction observée : l'inverse d'une décroissance Beta (IBD)



- Signal caractéristique
 - Positron : Double émission de rayons γ (511 keV) « prompt »
+ Scintillation
 - Neutron : Simple émission de rayons γ (2.2 MeV) « delayed »
- 200 μ s entre le signal « prompt » et « delayed »

Ressources : Neutrino Physics with JUNO,” J. Phys. G43 (2016) no.3, 030401

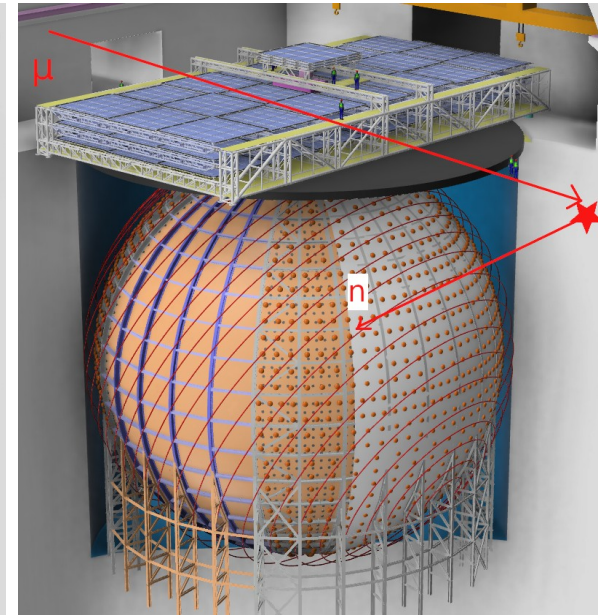
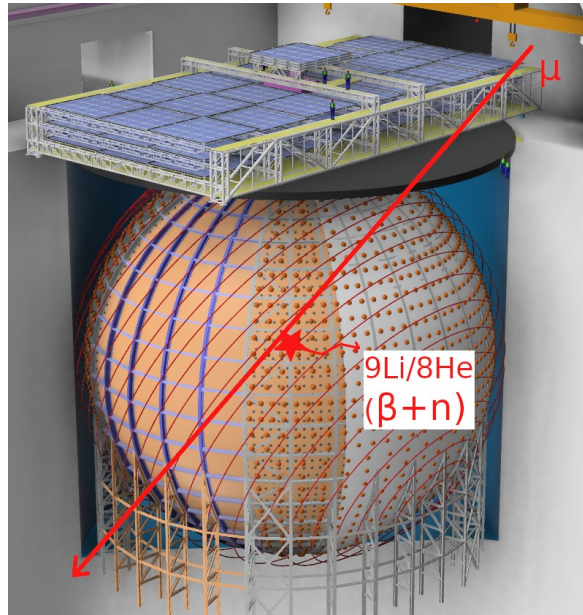
- Multiples bruits de fond : neutrinos géologiques, radioactivité ambiante, interaction d'un muon issu de rayons cosmiques (${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$, Fast n)...

Selection	IBD efficiency	IBD	Geo- ν s	Accidental	${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	Fast n	(α, n)
-	-	83	1.5	$\sim 5.7 \times 10^4$	84	-	-
Fiducial volume	91.8%	76	1.4	410	77	0.1	0.05
Energy cut	97.8%	73	1.3		71		
Time cut	99.1%						
Vertex cut	98.7%						
Muon veto	83%	60	1.1	0.9	1.6		
Combined	73%	60	3.8				

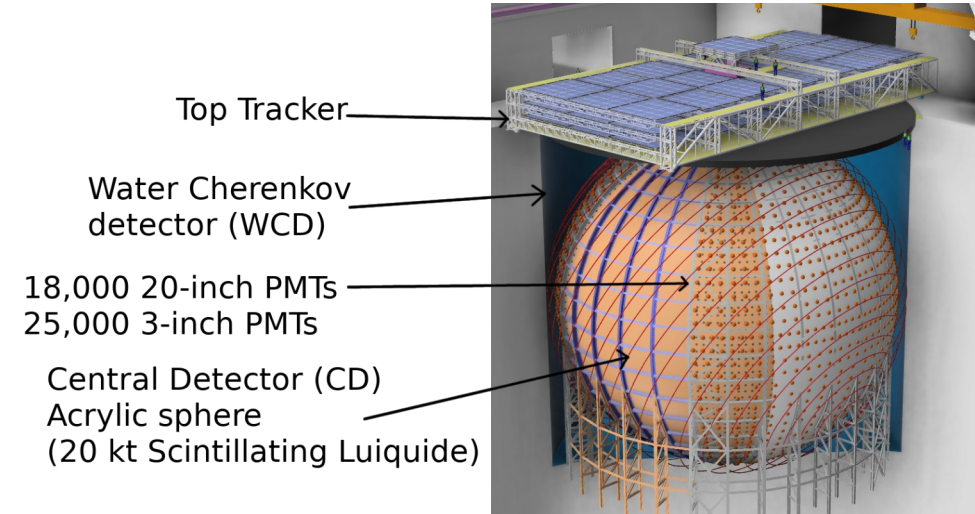
- Hypothèse pour la mesure des IBD : 99 % des muons doivent être reconstruits

Ressources : Neutrino Physics with JUNO," J. Phys. G43 (2016) no.3, 030401

- Deux cas problématiques imitant le signal des IBD
 - ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$: peuvent se décomposer en $\beta+n$
 - Fast n : muon interagissant dans la roche produit un neutron imitant le signal delayed



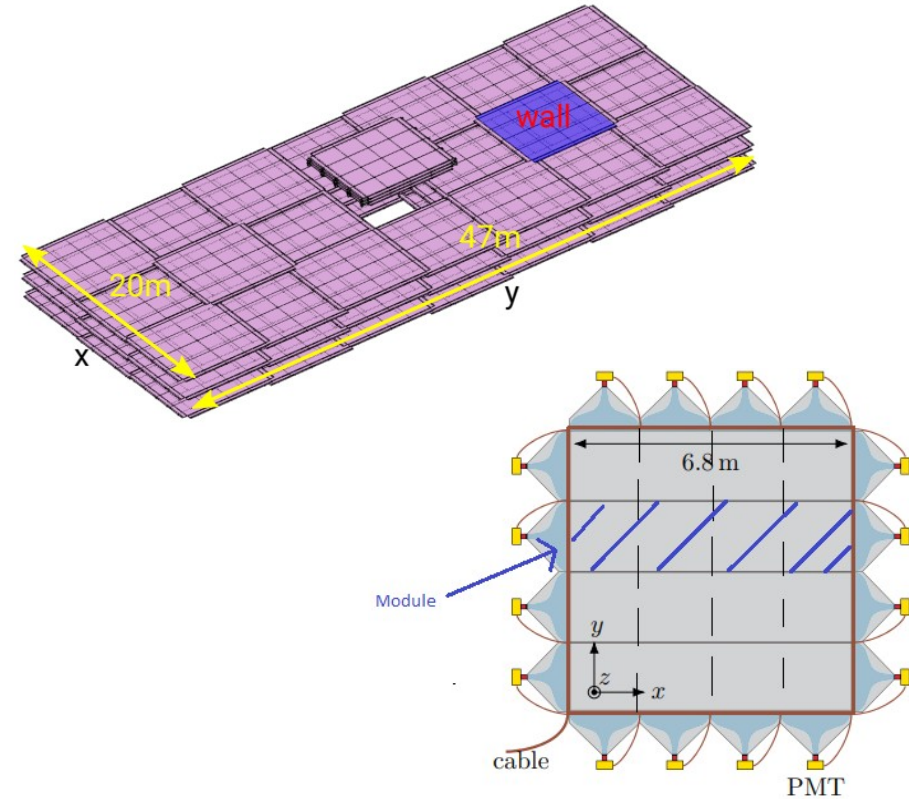
- Utilisation d'un système de veto de muons
 - Détecteur central (CD)
 - Water Cherenkov Detector (WCD)
 - Élimine une partie de la radioactivité ambiante
 - Utilise l'effet Tcherenkov pour reconstruire les muons
 - Top Tracker
 - Recouvre 60 % de la surface au-dessus du détecteur central



- Reconstruction précise des muons
- Calibre le WCD + CD

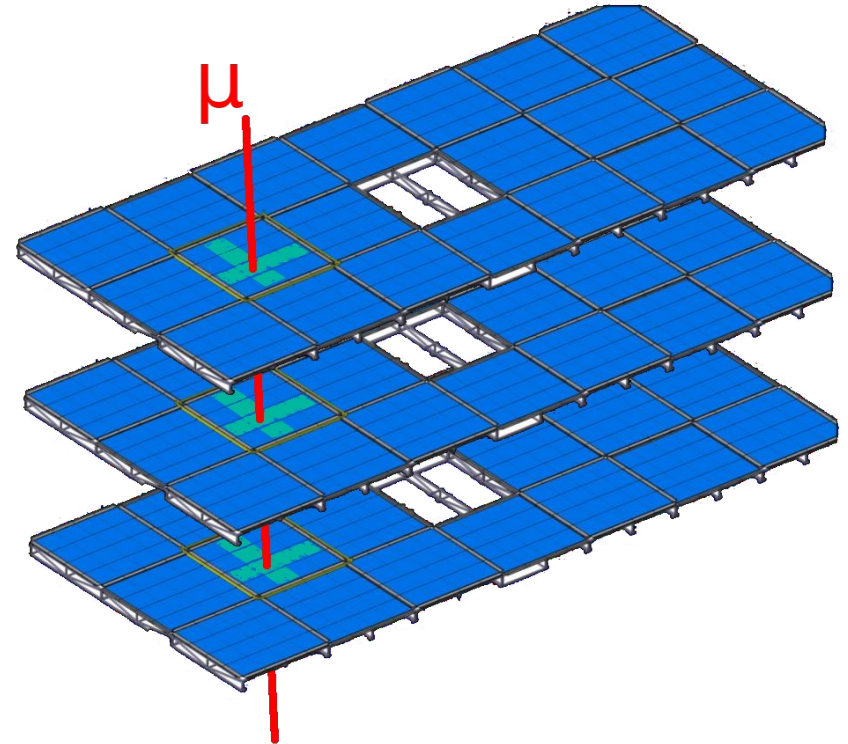
Contexte – JUNO et le Top Tracker

- Réutilise les modules de l'expérience OPERA
- Dispose sur une grille de 3 couches 3x7 murs
- Un mur est composé de 8 modules disposé sur 2 plans
- Au total 504 emplacements de modules possibles
- Seulement 496 modules disponibles

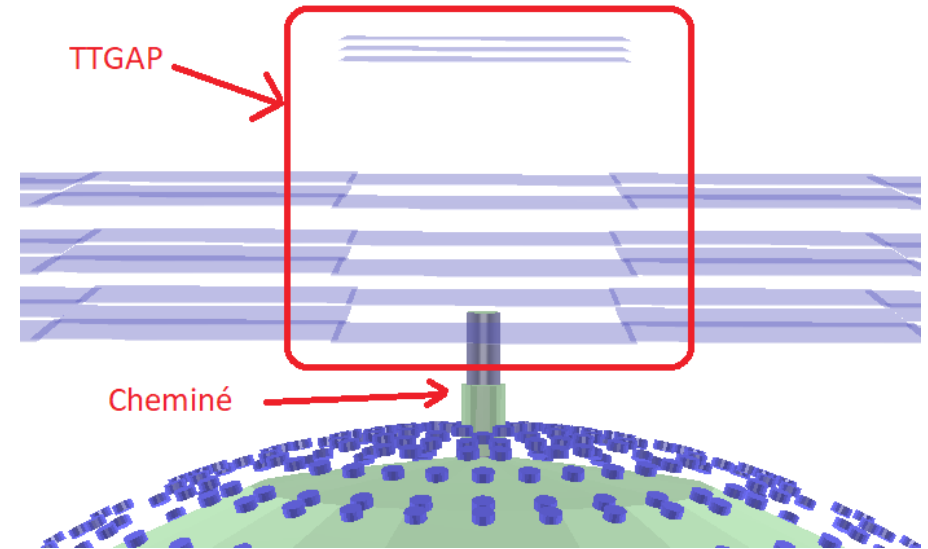


Ressources : Current status of JUNO Top Tracker. In 2019 European Physical Society Conference on High Energy Physics

- Condition de déclenchement par le Top Tracker
 - Topologie similaire à un muon
- Évènement sauvegardé seulement si les conditions sont remplies
 - 50 kHz de bruit de fond par PMTs
 - 3 Hz par des muons

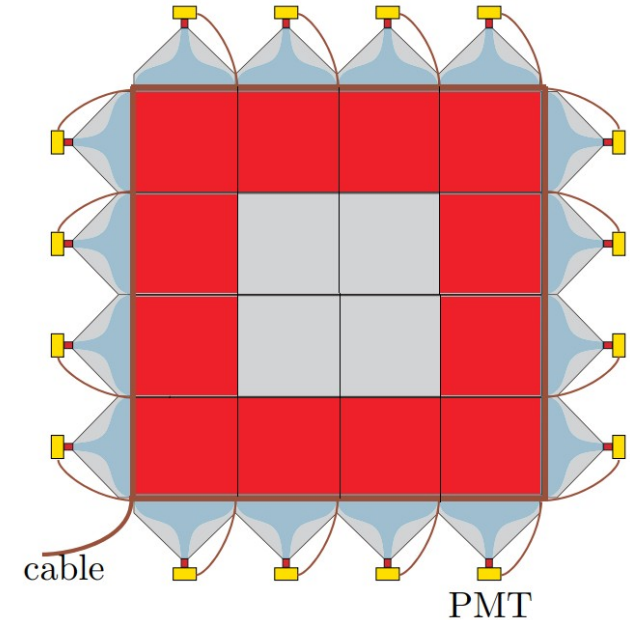


- Zones mortes au centre du Top Tracker
- Emplacement de la chambre de calibration
 - Surélève les murs centraux
- Cheminée
 - Empêche le placement de PMTs
 - Muons difficiles à reconstruire

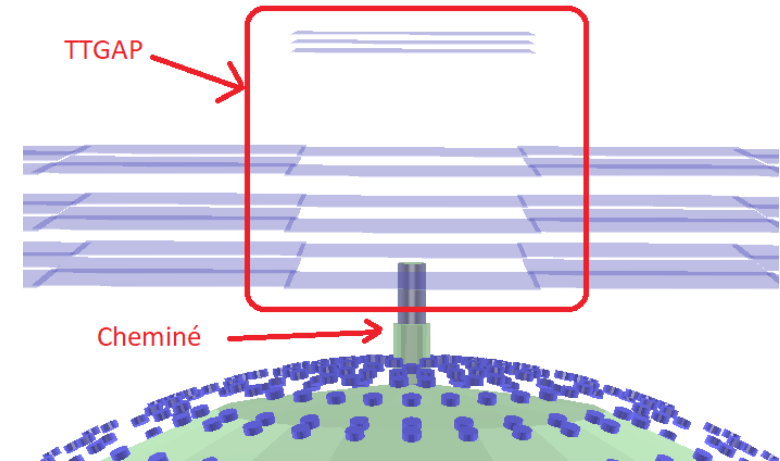


- Données issues de la simulation officielle de JUNO
 - Simule la propagation d'un muon dans le détecteur et l'ensemble du déclenchement de l'électronique
 - Pas de propagation des photons dans le WCD et le CD pour cette étude (Temps de simulation réduit d'un facteur 1000)
- Jeu de données de $1,94 \cdot 10^8$ évènements
 - Équivalent à 224 jours de prise de données
- Données stockées sous un format utilisant la bibliothèque ROOT

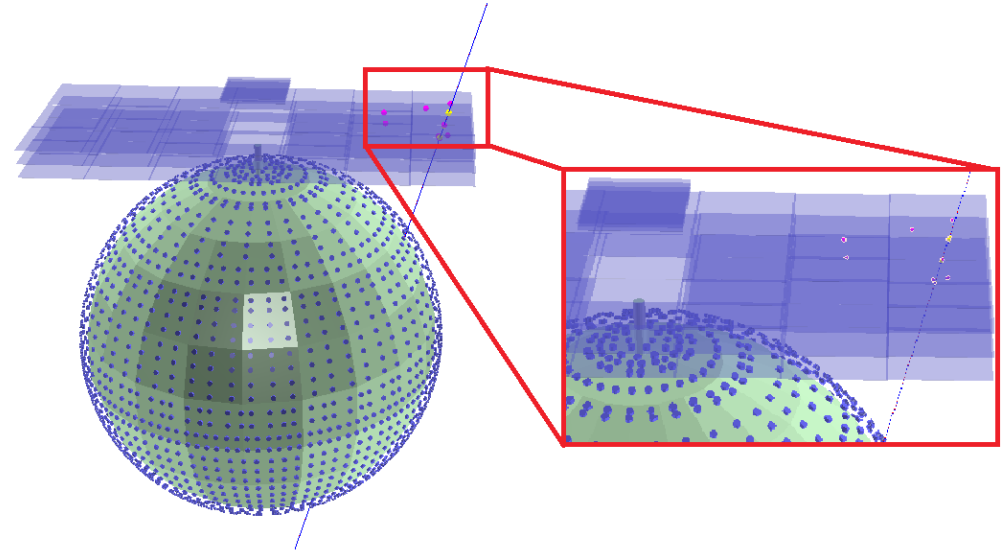
- Nombre de modules limité
- Nécessaire de choisir 8 emplacements sans modules
- 8 emplacements vides sont appelés une configuration
 - Stockés et manipulés par des classes C++
- Différentes configurations possédant le même motif sont de même « type » ou « famille »



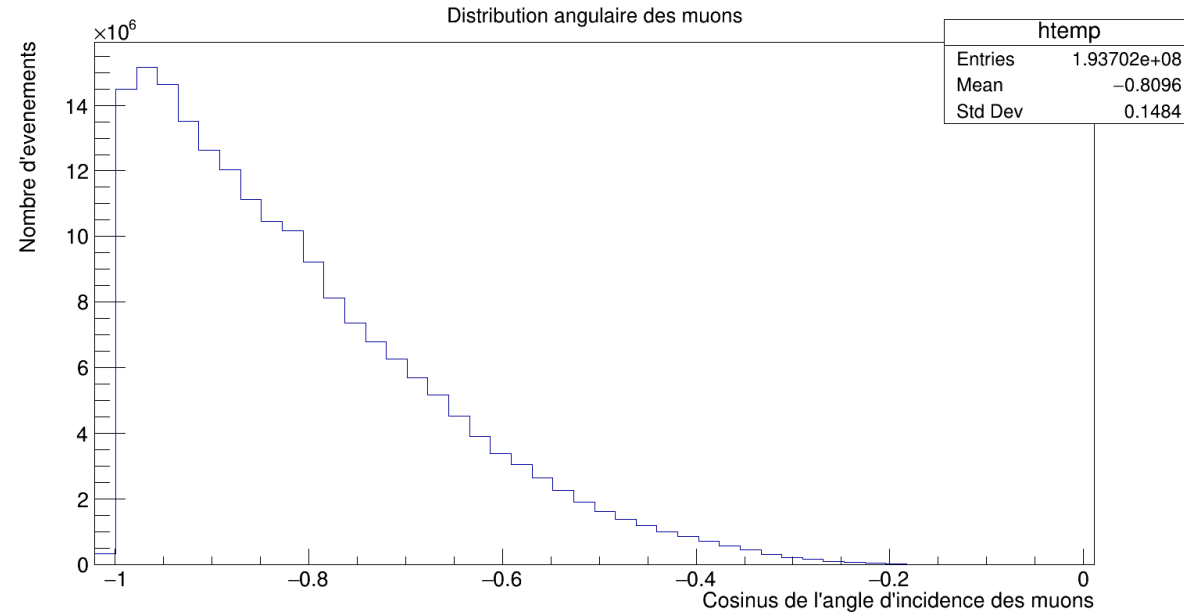
- Classification des muons sur des critères de géométrie
 - Passage dans la zone morte « TTGap »
 - Passage dans la cheminée
 - Passage dans le WCD
 - Passage dans la CD
- Autres critères propres aux muons
 - Angle d'incidence
- Critères non exclusifs



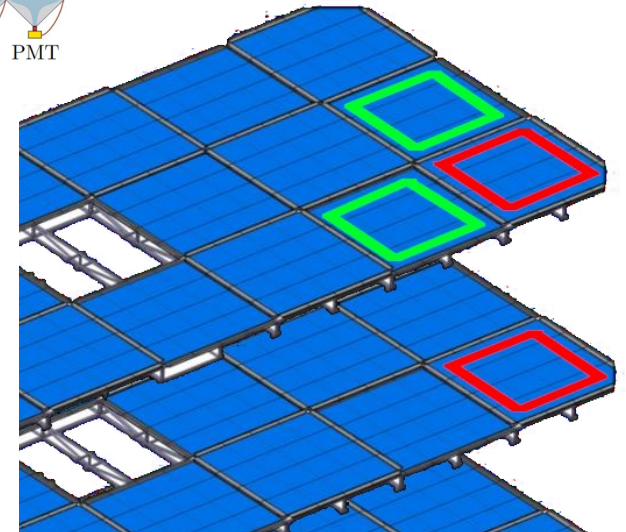
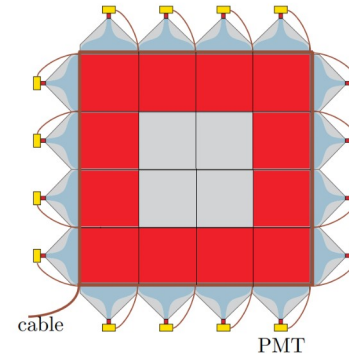
- Nécessaire pour valider la classification et la sélection d'événements
- Utilise le module « Eve » et « Geometry » de ROOT
- Initialise la géométrie manuellement ou à l'aide d'un fichier GDML
- Fichier GDML fourni avec la simulation officielle de JUNO



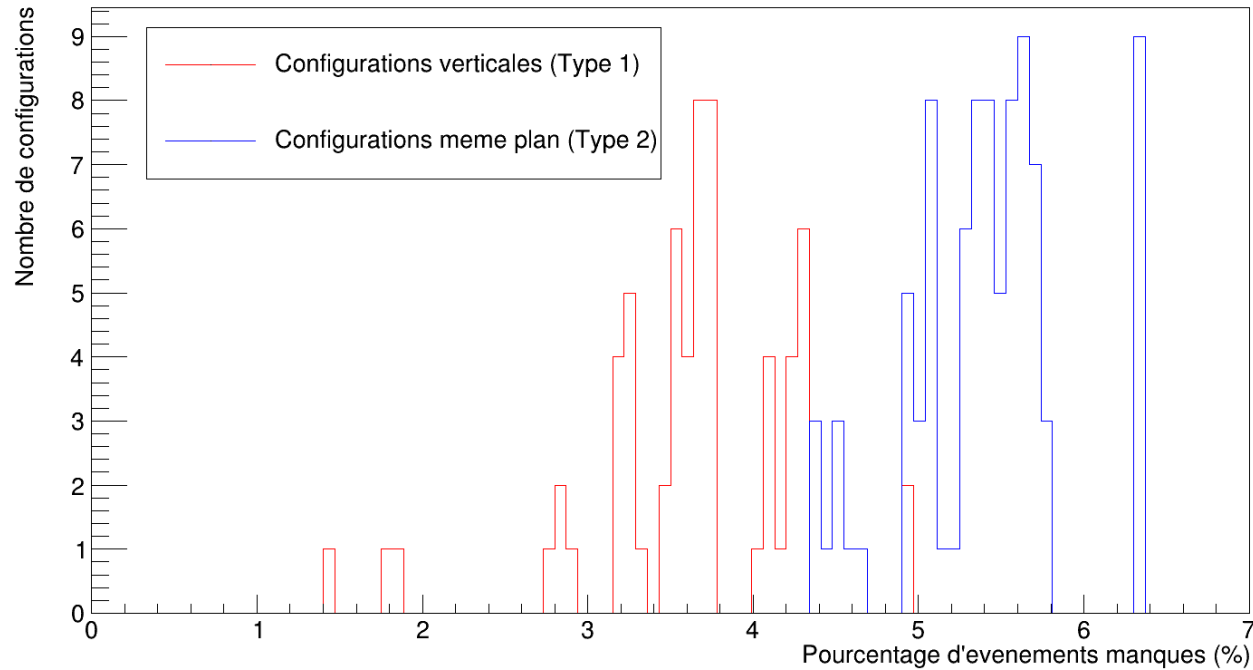
- Oriente le choix des configurations
 - Majorité de muons verticaux
 - Maximiser les modules retirés autour du même axe vertical
- Utile pour la calibration du WCD et du CD



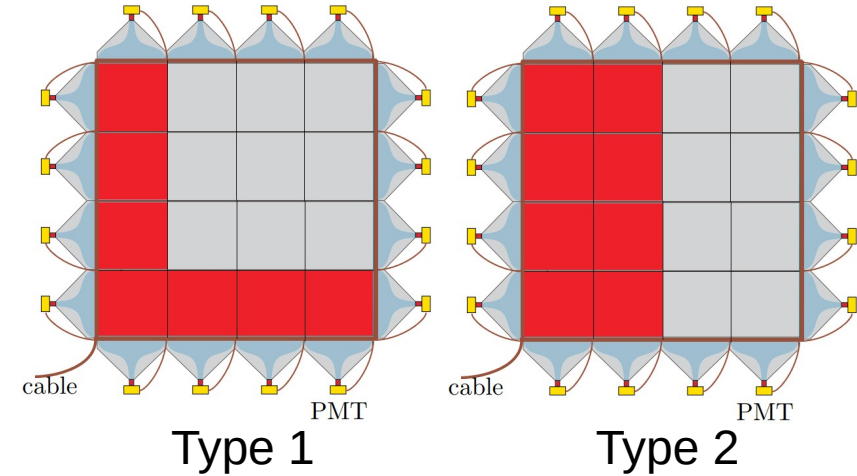
- Plusieurs axes de recherches possibles...
- Minimiser les pertes autour du même axe vertical : Répétition du même motif
 - Type 1 : Motif retiré sur deux murs autour du même axe vertical
 - Type 2 : Motif retiré sur deux murs de la même couche



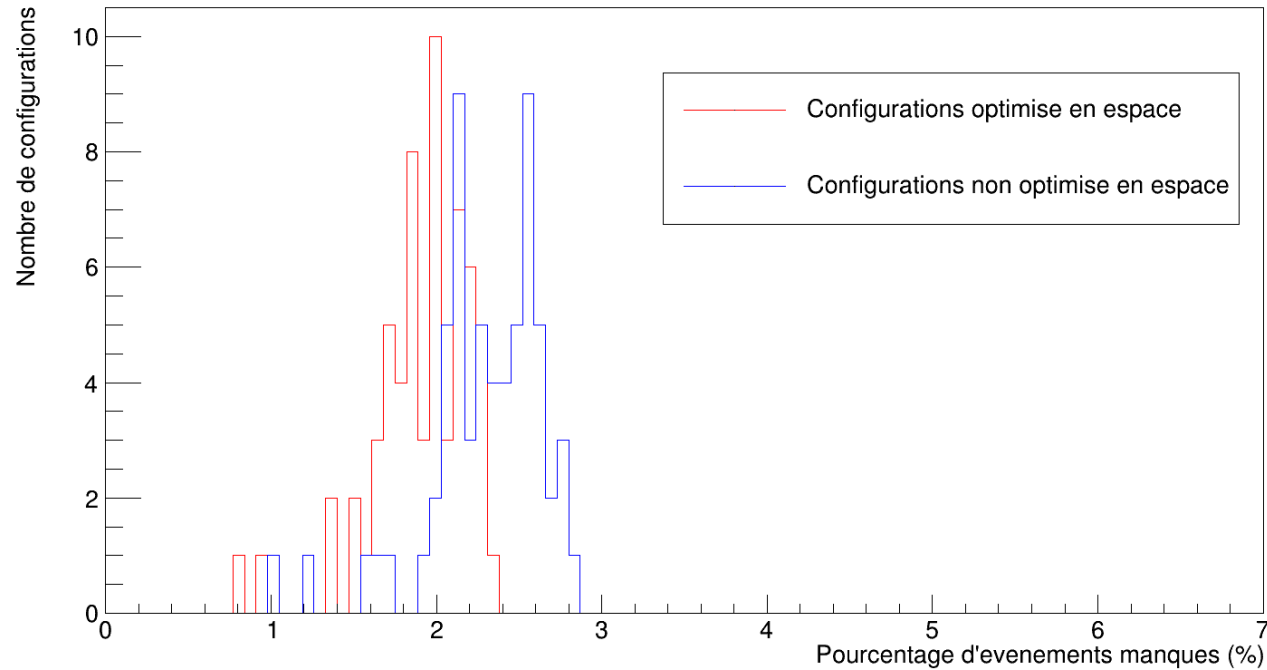
Comparaison des efficacites des differentes configurations



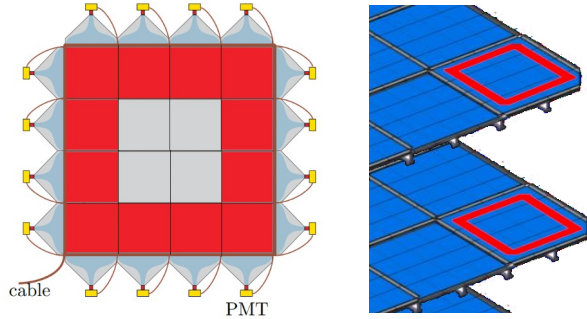
- Modules enlevés sur un même mur
- Minimiser les pertes liées à un seul mur : Répétition de deux motifs différents, sur deux murs identiques
 - Type 1 : Motif retiré répartissant les modules sur les deux plans
 - Type 2 : Motif retiré répartissant les modules sur un seul plan



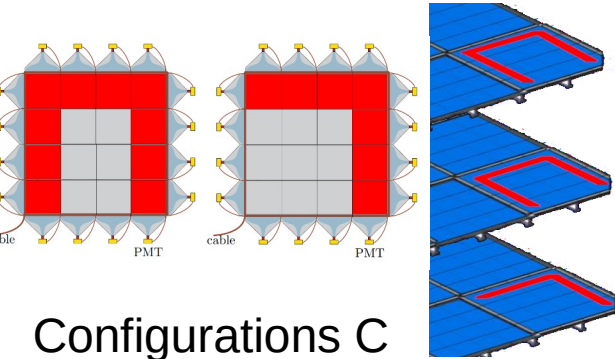
Comparaison des efficacites des differentes configurations



-
- The graph displays the effectiveness of random configurations, measured by the percentage of missed events. The y-axis, labeled 'Pourcentage d'évenements manqué par le TT (%)', ranges from 0 to 8. The x-axis, labeled 'Configurations', represents individual configurations. The data is represented by a blue line that fluctuates significantly, with values mostly between 4% and 8%, and a notable dip to around 3% for one configuration.



Configurations B



Configurations C

Efficacité des configurations dans le Top Tracker

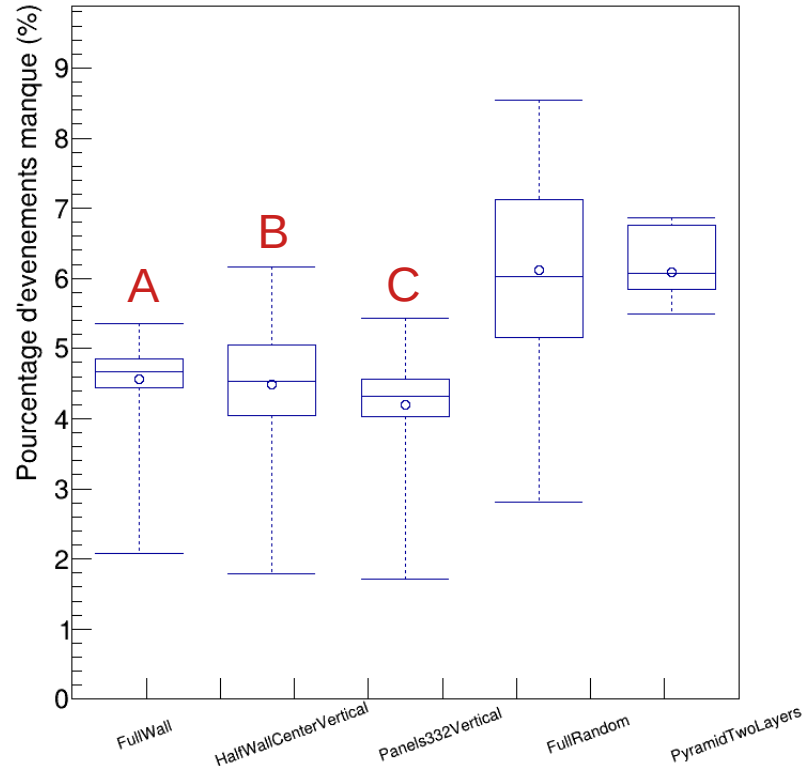
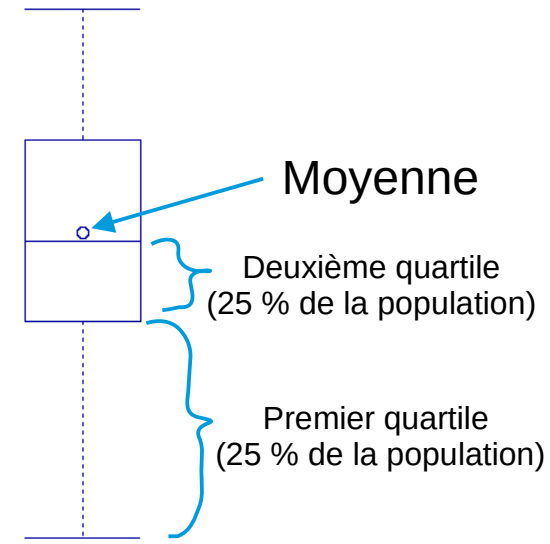
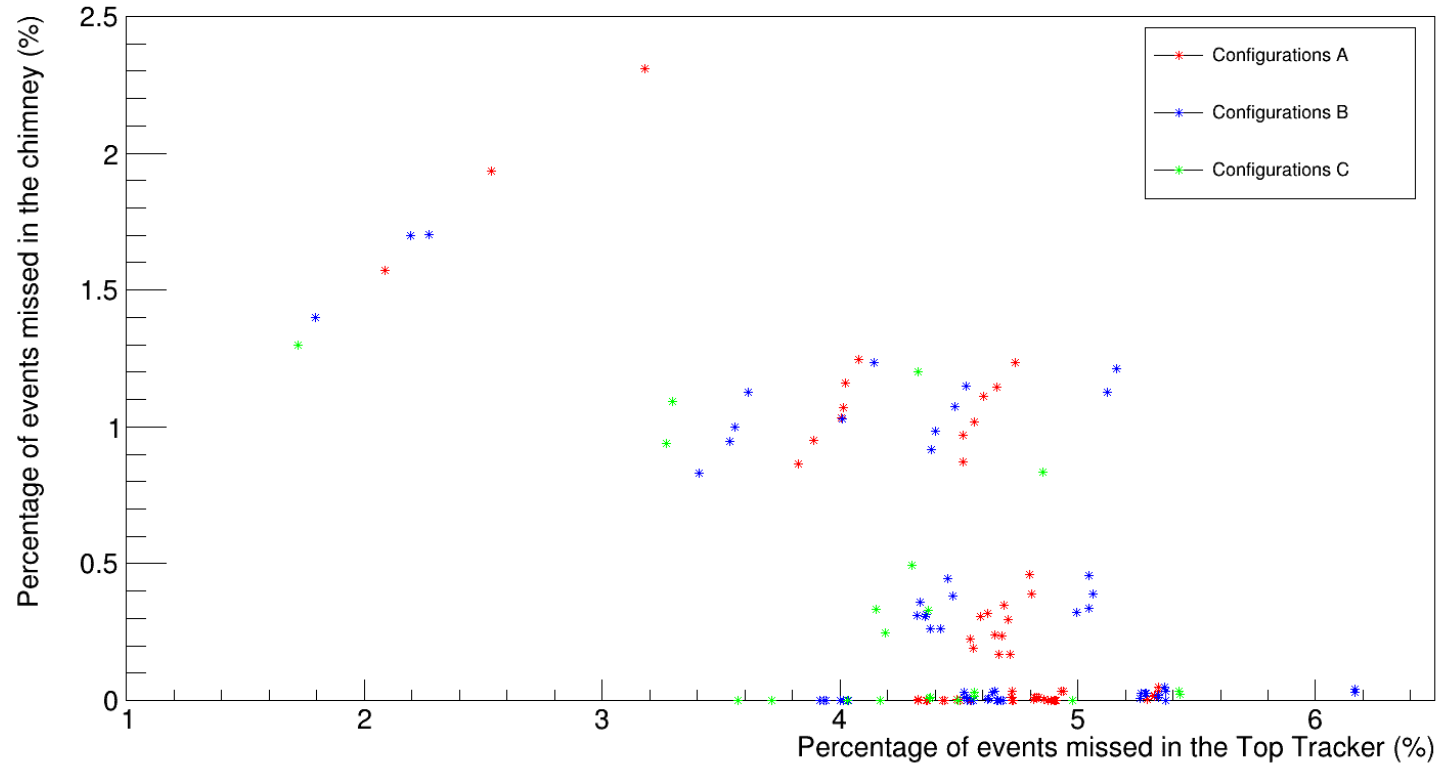


Diagramme en boîte

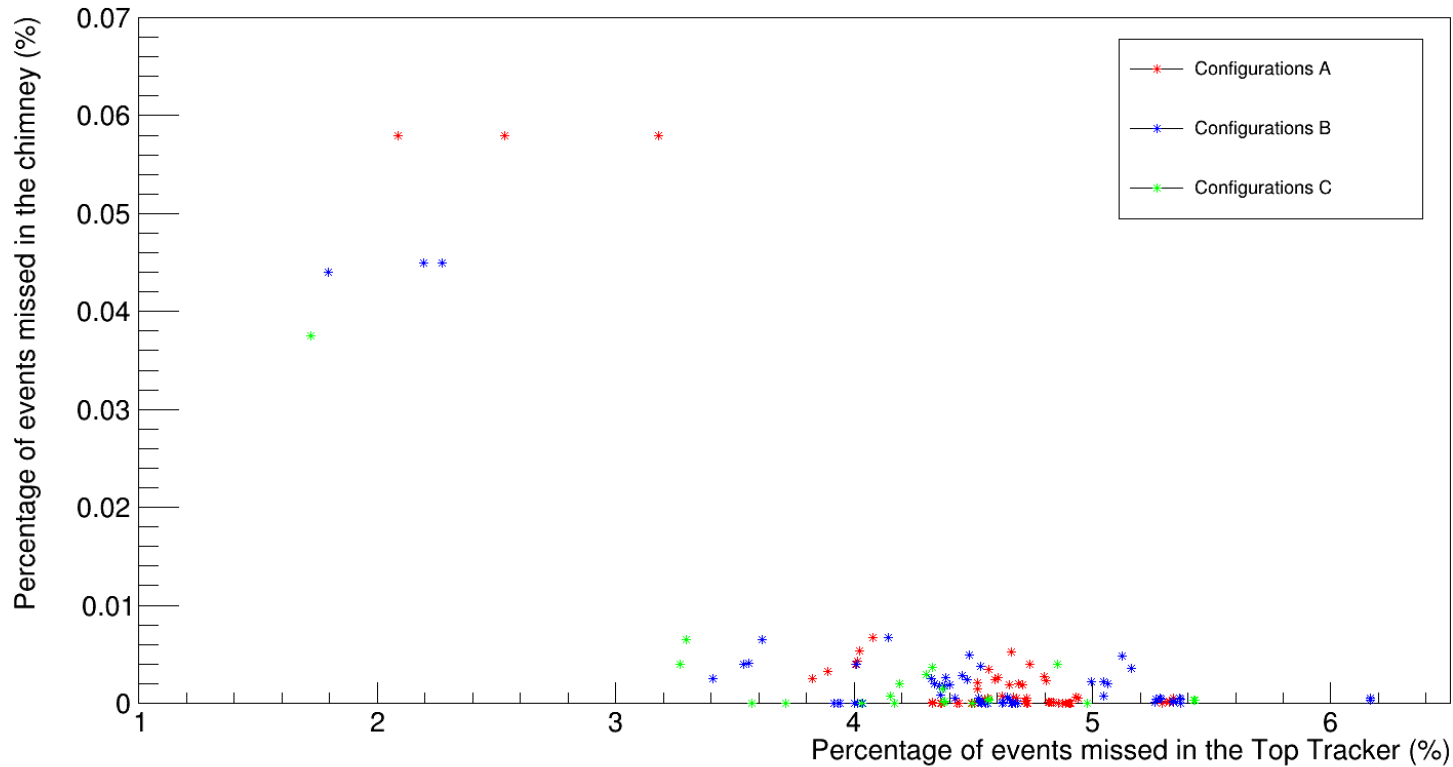


- Étude des configurations entre les différents critères de classifications
- Pas de relations simples entre deux critères
- Une seule configuration doit être choisie et ne peut être changée après l'installation du Top Tracker
- Les configurations n'impactant pas la cheminée sont privilégiées

Correlation between Chimney and the Total detector



Correlation between Chimney and the Total detector



- Projet encore en cours...
 - Étude d'un nouveau critère de classification pour les Fast neutrons
 - Étude de l'impact des configurations sur la distribution angulaire
 - Important pour la calibration du WCD et du CD
- Possible future implémentation d'un algorithme d'optimisation local / Monte Carlo pour la recherche de nouvelles configurations
 - Minimum locaux très présents dans cette étude
 - Avant l'installation du Top Tracker dans 1 an...

- Développement d'outils pour l'étude de la simulation de JUNO
- Classification des muons suivant des critères géométriques
- Deux configurations meilleures que celle par défaut choisies
 - La première (3.6 % de pertes totales, 0 % dans la cheminée)
 - La deuxième (1.8 % de pertes totales, 0.038 % dans la cheminée)
- Étude à venir
 - Impact sur la distribution angulaire
 - Impact sur les Fast neutrons

- P. Lipari. Introduction to neutrino physics. In 1st CERN-CLAF School of High-Energy Physics, 5 2001.
- M. Shiozawa. Evidence for neutrino oscillations in atmospheric neutrino observations. Nucl. Instrum. Meth. A, 433:307–313, 1999.
- Q. R. Ahmad et al. Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by 8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. Phys.Rev. Lett., 87:071301, 2001.
- Fengpeng An et al. Neutrino Physics with JUNO. J. Phys. G, 43(3):030401, 2016.
- Qinhua Huang and Joao Pedro Athayde Marcondes De Andre. Current status of JUNO Top Tracker. In 2019 European Physical Society Conference on High Energy Physics, volume EPSHEP2019, page 431, Ghent, Belgium, July 2019.
- Hewett, Joanne & Weerts, Hendrik & Butler, Joel & Casey, B. & de Gouvea, Andre & Essig, R. & Grossman, Y. & Hitlin, David & Jaros, J. & Kearns, Edward & Kumar, K. & Ligeti, Zoltan & Lu, Z. & Pitts, Kevin & Ramsey-Musolf, M. & Ritchie, J. & Scholberg, K. & Wester, William & Zeller, G.. (2014). Planning the Future of U.S. Particle Physics (Snowmass 2013): Chapter 2: Intensity Frontier.

Merci de votre attention

Isotopes	Q (MeV)	$T_{1/2}$	Rate (per day)
^3H	0.0186 (β^-)	12.31 year	1.14×10^4
^6He	3.508 (β^-)	0.807 s	544
^7Be	$Q_{EC}=0.862$ (10.4% γ , $E_\gamma = 0.478$)	53.22 day	5438
^8He	10.66 ($\beta^- \gamma$: 84%), 8.63 ($\beta^- n$: 16%)	0.119 s	11
^8Li	16.0 (β^-)	0.839 s	938
^8B	16.6 (β^+)	0.770 s	225
^9Li	13.6 (β^- : 49%), 11.94 ($\beta^- n$: 51%)	0.178 s	94
^9C	15.47 ($\beta^+ p$: 61.6%, $\beta^+ \alpha$: 38.4%)	0.126 s	31
^{10}Be	0.556 (β^-)	1.51e6 year	1419
^{10}C	2.626 ($\beta^+ \gamma$)	19.29 s	482
^{11}Li	20.55 ($\beta^- n$: 83%, $\beta^- 2n$: 4.1%)	0.00875 s	0.06
^{11}Be	11.51 ($\beta^- \gamma$: 96.9%), 2.85 ($\beta^- \alpha$: 3.1%)	13.76 s	24
^{11}C	0.960 (β^+)	20.36 min	1.62×10^4
^{12}Be	11.708 ($\beta^- \gamma$, $\beta^- n$: 0.5%)	0.0215 s	0.45
^{12}B	13.37 ($\beta^- \gamma$)	0.0202 s	966
^{12}N	16.316 ($\beta^+ \gamma$)	0.0110 s	17
^{13}B	13.437 ($\beta^- \gamma$)	0.0174 s	12
^{13}N	1.198 (β^+)	9.965 min	19
^{14}B	20.644 ($\beta^- \gamma$, $\beta^- n$: 6.1%)	0.0126 s	0.021
^{14}C	0.156 (β^-)	5730 year	132
^{15}C	9.772 (β^-)	2.449 s	0.6
^{16}C	8.010 ($\beta^- n$: 99%)	0.747 s	0.012
^{16}N	10.42 ($\beta^- \gamma$)	7.130 s	13
^{17}N	8.680 ($\beta^- \gamma$: 5%), 4.536 ($\beta^- n$: 95%)	4.173 s	0.42
^{18}N	13.896 ($\beta^- \gamma$: 93%), 5.851 ($\beta^- n$: 7%)	0.620 s	0.009
neutron			155 000

Efficacy of all the configuration in the Top Tracker

