

Groupe Neutrino JUNO

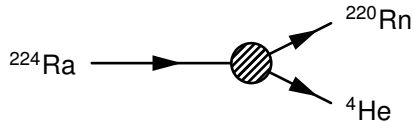
João Pedro Athayde Marcondes de André
représentant le groupe Neutrino

9 décembre 2025

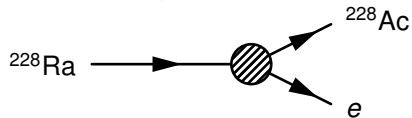
Radiation

1896 Becquerel découvre la radioactivité

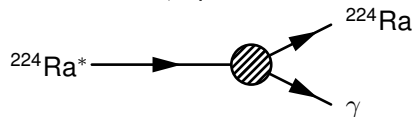
- ▶ radiation α : noyaux de ${}^4\text{He}$ émis



- ▶ radiation β : e émis



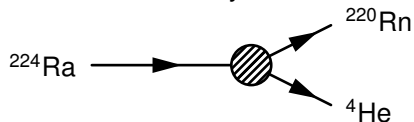
- ▶ radiation γ : photon émis



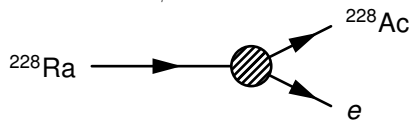
Radiation

1896 Becquerel découvre la radioactivité

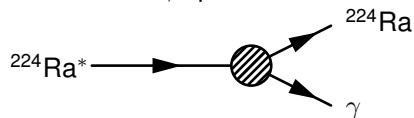
- ▶ radiation α : noyaux de ^4He émis



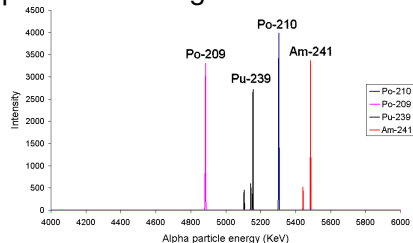
- ▶ radiation β : e émis



- ▶ radiation γ : photon émis



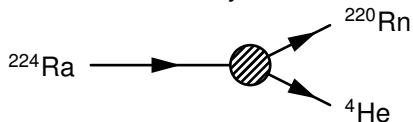
● Spectre en énergie de la radiation α



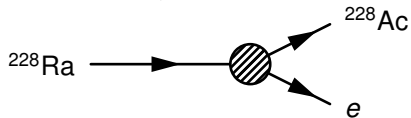
Radiation

1896 Becquerel découvre la radioactivité

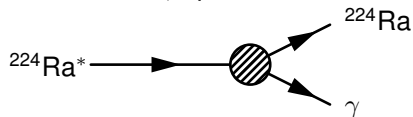
- ▶ radiation α : noyaux de ${}^4\text{He}$ émis



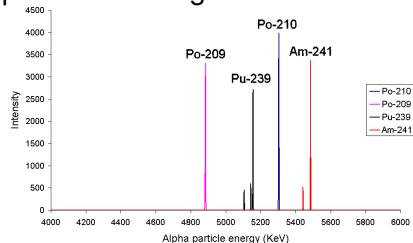
- ▶ radiation β : e émis



- ▶ radiation γ : photon émis

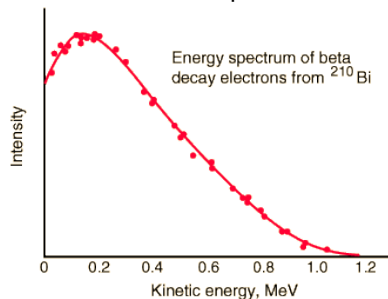


● Spectre en énergie de la radiation α



● Spectre en énergie de la radiation β

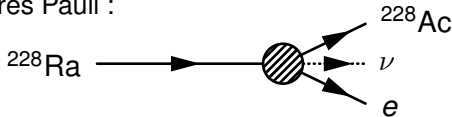
- ▶ Mesuré en 1914 par Chadwick



Histoire de la découverte du neutrino

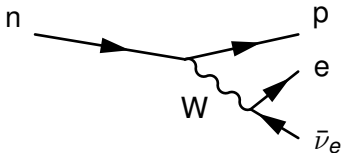
1930 Pauli propose le neutrino (ν)

- ▶ Découverte du neutron atomique en 1932 \Rightarrow « neutron » de Pauli devient le « neutrino »
- ▶ Le neutrino doit être :
 - ★ neutre : la charge total du système doit être conservée !
 - ★ léger : une particule lourde changerait le spectre β
 - ★ interagir peu : sinon on l'aurait déjà observé
- ▶ Radiation β d'après Pauli :



1934 Fermi ajoute le ν dans sa théorie "électrofaible"

- Représentation moderne ("Standard Model") de la désintégration β :



Première mesure de neutrinos : “Project Poltergeist”

- Premier pas : trouver une source de ν adaptée...

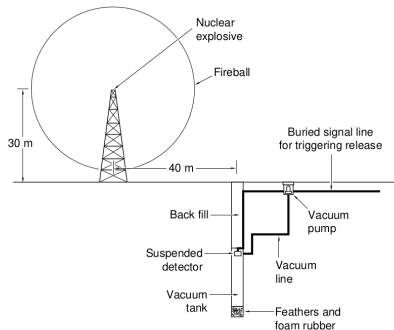
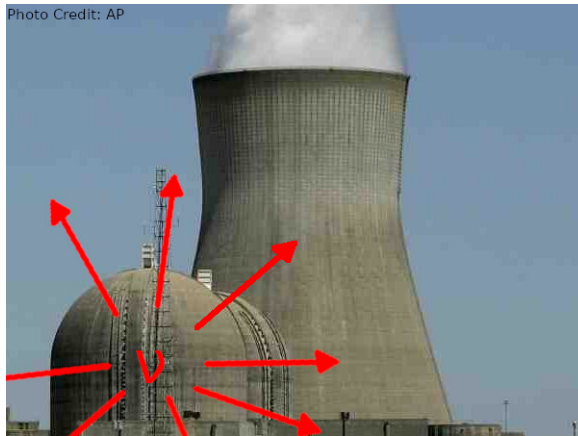


Figure 1. Detecting Neutrinos from a Nuclear Explosion

Antineutrinos from the fireball of a nuclear device would impinge on a liquid scintillation detector suspended in the hole dug below ground at a distance of about 40 meters from the 30-meter-high tower. In the original scheme of Reines and Cowan, the antineutrinos would induce inverse beta decay, and the detector would record the positrons produced in that process. This figure was redrawn courtesy of Smithsonian Institution.

Institution.

Los Alamos Science Number 25 1997



<http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-97-2534-02>

Histoire de la découverte du neutrino : première mesure de neutrinos

1956 Reines et Cowan détectent les ν produits dans les réacteurs à Savannah River (🏆 1995)

- ▶ radiation β : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- ▶ Pour mesurer neutrinos, “inverser” ce processus :
 $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$
- ▶ Même interaction utilisée dans JUNO !

1962 Lederman, Schwartz, Steinberger découvrent le ν_μ (🏆 1988)

- ▶ Il y a plus qu'un type de ν !

1967 Modèle Standard de la Physique des Particules est proposé

- ▶ Neutrinos ne peuvent pas interagir avec Higgs. . .
- ▶ . . . donc $m_\nu = 0$

PMT+liquid scintillator

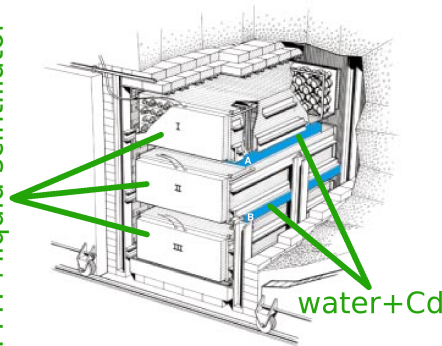
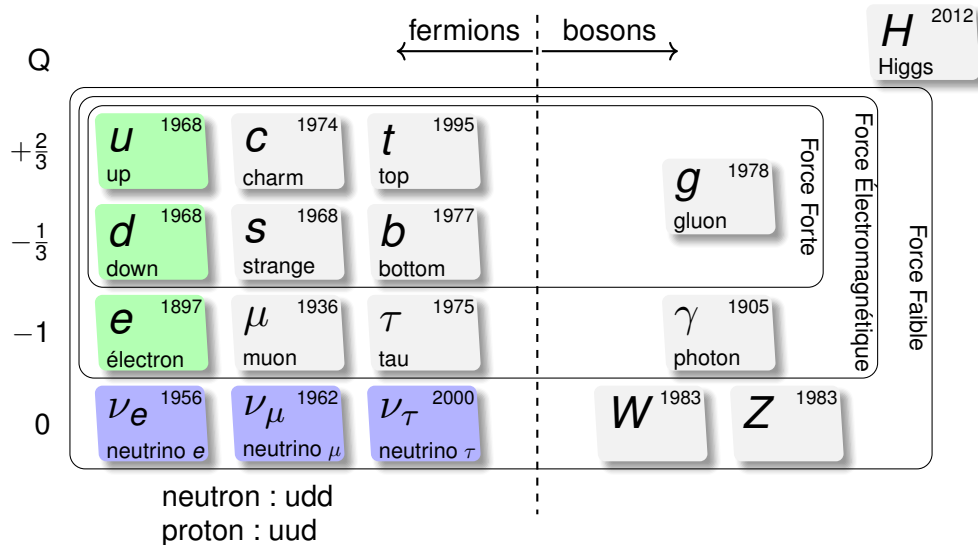


Figure 4. The Savannah River Neutrino Detector—A New Design
The neutrino detector is illustrated here inside its lead shield. Each of two large, flat plastic tanks (pictured in light blue and labeled A and B) was filled with 200 liters of water. The protons in the water provided the target for inverse beta decay; cadmium chloride dissolved in the water provided the cadmium nuclei that would capture the neutrons. The target tanks were sandwiched between three scintillation detectors (I, II, and III). Each detector contained 1,400 liters of liquid scintillator that was viewed by 110 photomultiplier tubes. Without its shield, the assembled detector weighed about 10 tons.

Los Alamos Science Number 25 1997

Le Modèle Standard de la Physique des Particule (~1970)

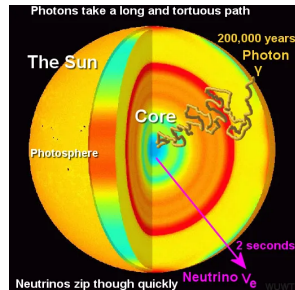


Le ν pour étudier l'univers !

- Le modèle Solaire prévoit la production de ν_e pendant les réactions de fusion.

Par exemple :

- 1 $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{He} + \gamma$
- 2 $^2\text{He} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$
- 3 $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$
- 4 $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2\ ^1\text{H}$

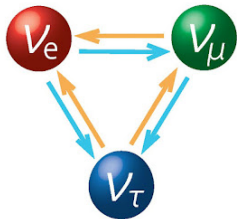


- ▶ Mesures de 1970 – 1994 @ Homestake : seulement 30% du flux attendu détecté
- ▶ Autres mesures montrent aussi déficit de neutrinos
- ▶ Modèle du soleil vérifié par d'autres observations !
- Autres anomalies sur ν atmosphériques aussi observées
- Découverte de l'oscillation des neutrinos (1998/2002) $\Rightarrow m_\nu \neq 0$ (🏆 2015)

Oscillation de Neutrinos

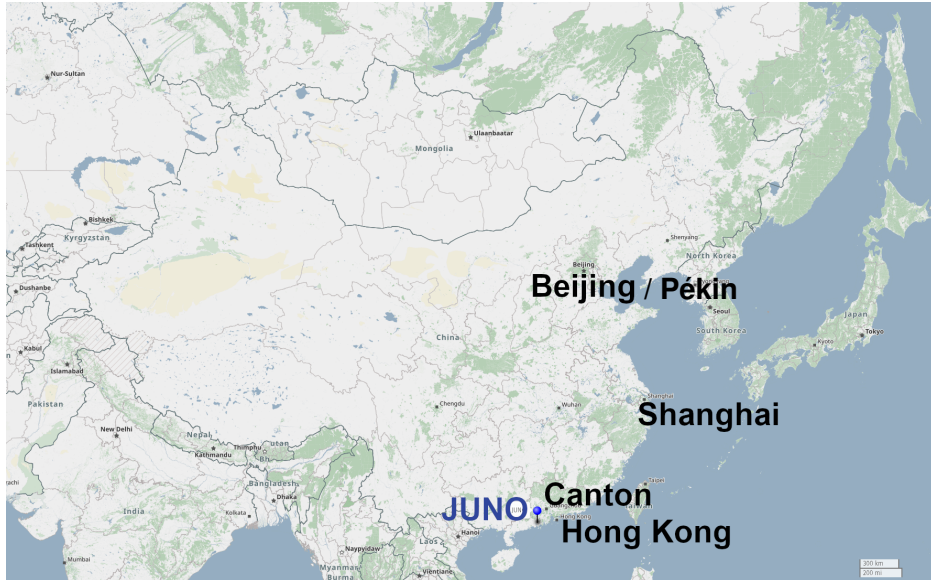


- 3 types (« saveurs ») de ν : ν_e , ν_μ , et ν_τ
- Une saveur peut se transformer en une autre saveur...

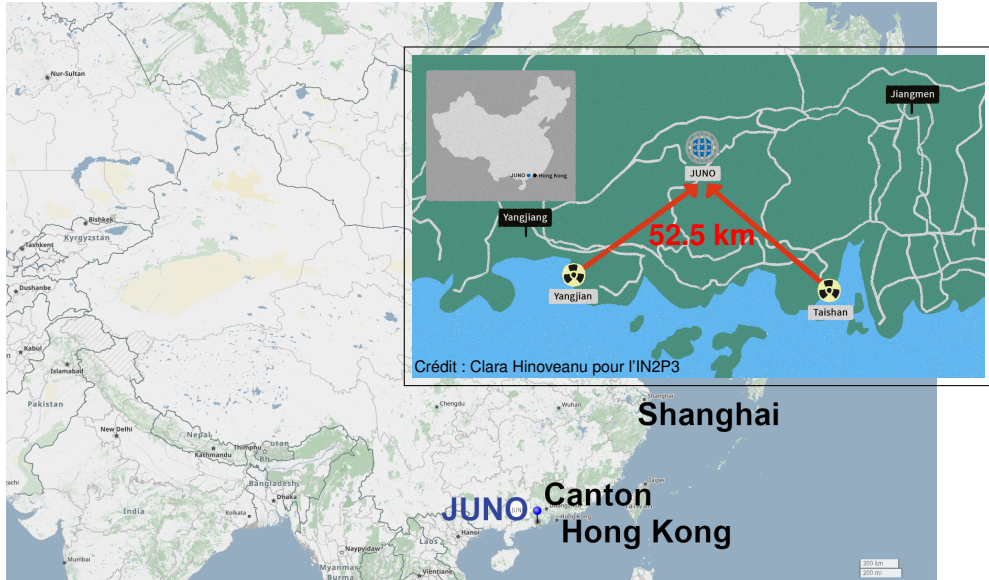


- Oscillation dépend de 6 paramètres
 - ▶ $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$: 'combien' de neutrinos oscillent entre 2 types ?
 - ▶ $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2, \Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2$: à quelle 'fréquence' ils oscillent entre deux types ?
 - ★ Voir l'oscillation implique que $\Delta m^2 \neq 0$... donc au $m_\nu \neq 0$ pour au moins 2 ν
 - ★ Mais n'a toujours pas réussi à mesurer m_ν
 - ▶ δ_{CP} : est-ce que les ν et $\bar{\nu}$ oscillent de la même façon ?

JUNO : Jiangmen Underground Neutrino Observatory



JUNO : Jiangmen Underground Neutrino Observatory



Le détecteur JUNO

Top Tracker (TT) :

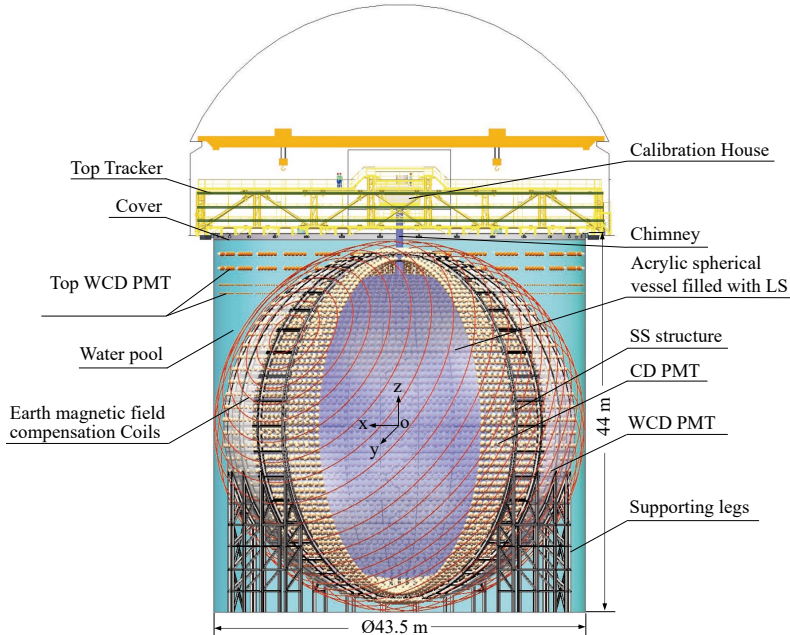
- 3 couches de $21\text{ m} \times 49\text{ m}$ de scintillateur plastique
- 60% couverture du WCD

Détecteur Cherenkov à Eau (WCD) :

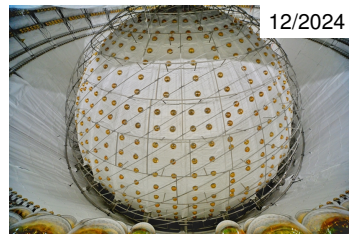
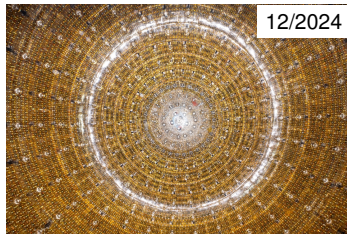
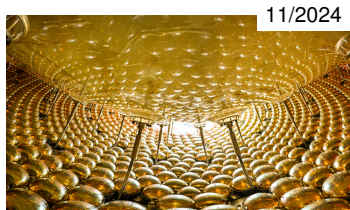
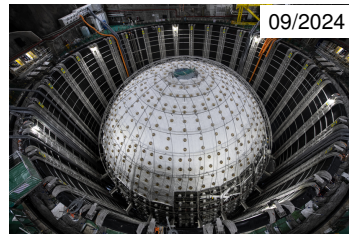
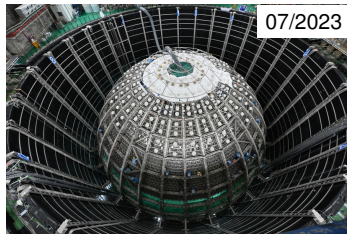
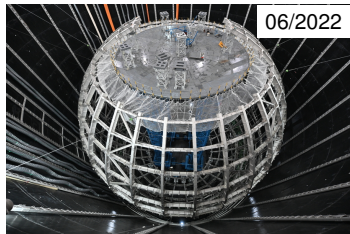
- 35 kt d'eau ultra-pure
- PM dans SS : 2.4k 20"
- Top PM : 384 20" + 600 8"

Détecteur Central (CD) :

- Sphère acrylique $\varnothing=35.4\text{ m}$
- 20 kt de liquide scintillant
- PM : 17.6k 20" + 25.6k 3"



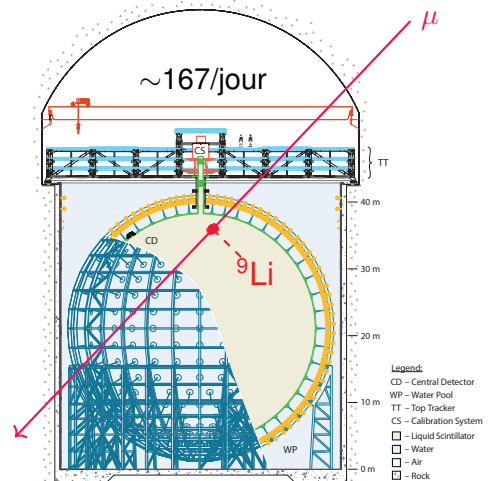
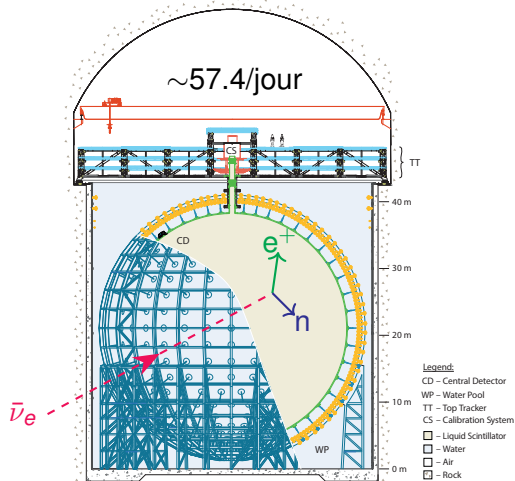
Quelques photos de la construction du CD et WCD de JUNO



Signal et bruit de fond induit par des μ dans JUNO

Signal : IBD des $\bar{\nu}_e$ de réacteur

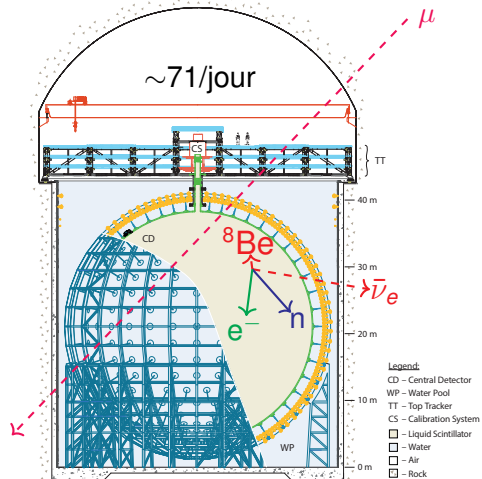
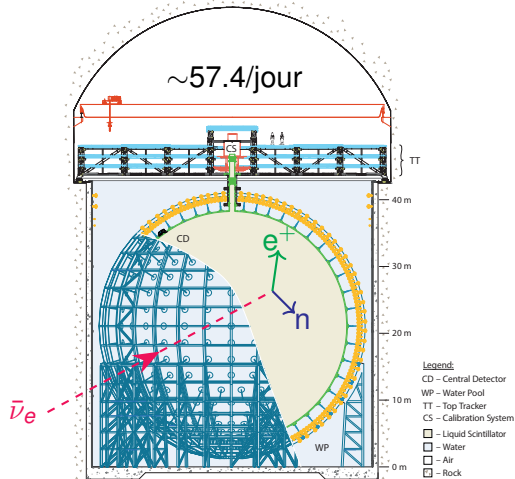
Bruit de fond cosmogénique (^9Li , ^8He)



Signal et bruit de fond induit par des μ dans JUNO

Signal : IBD des $\bar{\nu}_e$ de réacteur

Bruit de fond cosmogénique (^9Li , ^8He)

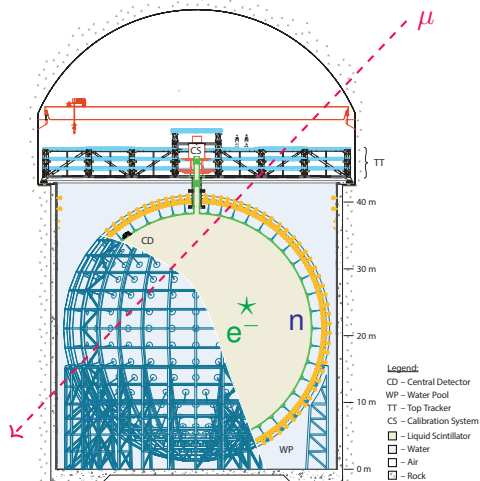
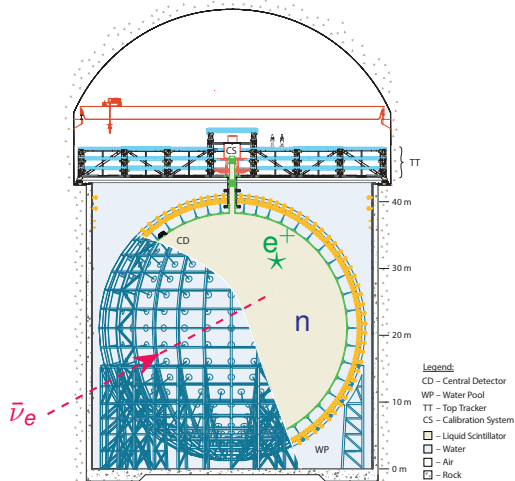


Pour éliminer bruit de fond cosmogénique besoin de savoir par où μ passe ! \Rightarrow TT

Signal et bruit de fond induit par des μ dans JUNO

Signal : IBD des $\bar{\nu}_e$ de réacteur

Bruit de fond cosmogénique (^9Li , ^8He)

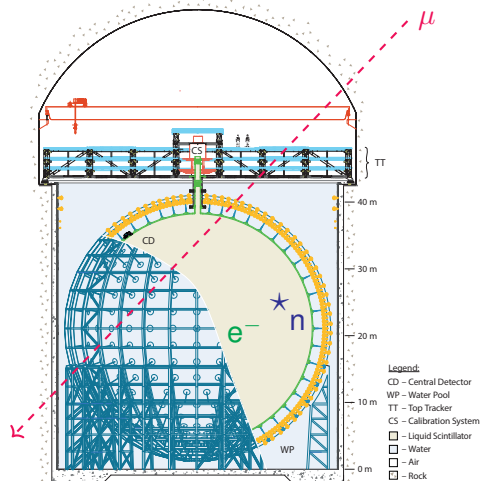
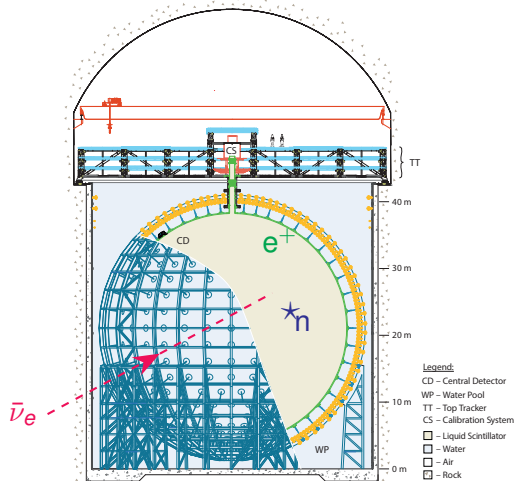


Pour éliminer bruit de fond cosmogénique besoin de savoir par où μ passe ! \Rightarrow TT

Signal et bruit de fond induit par des μ dans JUNO

Signal : IBD des $\bar{\nu}_e$ de réacteur

Bruit de fond cosmogénique (^9Li , ^8He)



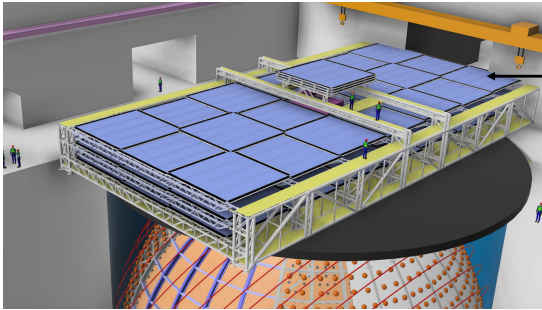
Pour éliminer bruit de fond cosmogénique besoin de savoir par où μ passe ! \Rightarrow TT

Présentation du Top Tracker de JUNO

M. Fozé

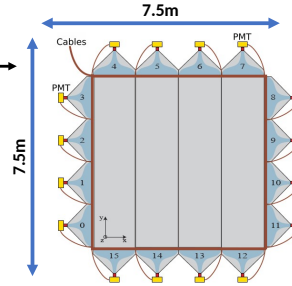
Journée scientifique et technique IPHC

Le Top Tracker



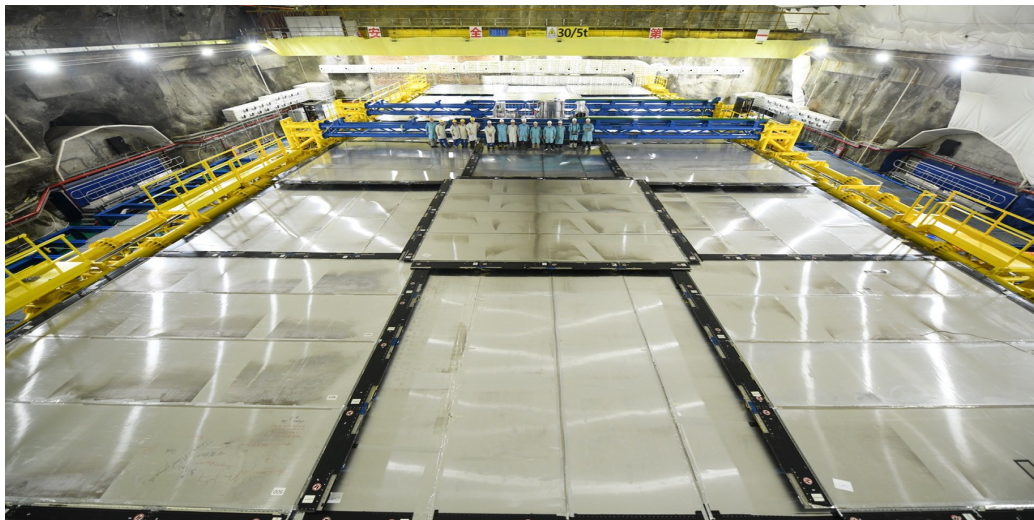
- Réduire le bruit de fond de JUNO : Détection des muons atmosphériques (trajectoire, énergie ...)
- Dimension : 49m x 21m
- Couvre 60% du détecteur central

Un Mur

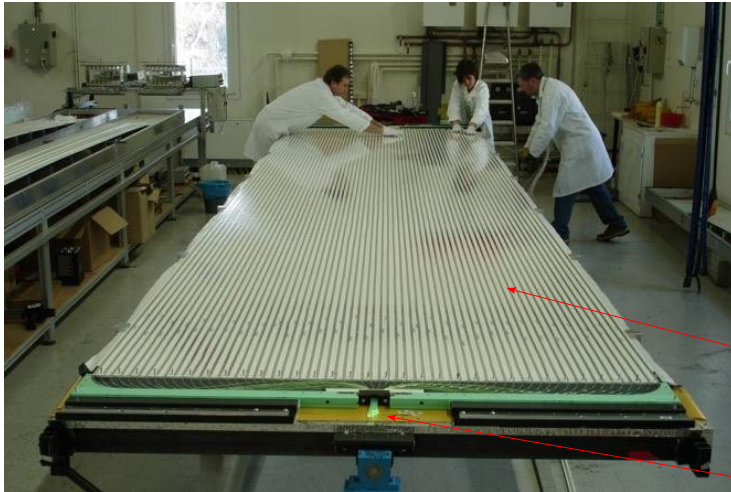


- Un mur est composé de 8 modules disposés en tamis, 4 verticaux et 4 horizontaux
- Réutilisation des modules d'OPERA
- 64 barreaux de scintillateur par module, 128 voies (64 de chaque côté)
- 1024 voies par mur
- 63 murs répartis sur 3 étages, 64k voies au total

Le Top Tracker – couche 3



Un Module ouvert



- Fabriqués et assemblés à Strasbourg entre 2004 - 2006
- Dimensions 1,7m x 7m

64 barreaux scintillateurs

Sorties des 64 fibres optiques



Connecteur 64 fibres
en bord de module

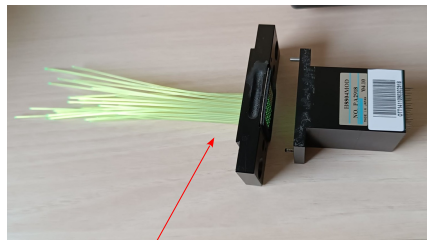


Fibres sortant des barreaux scintillateurs,
en bord de module



Échantillon de barreau scintillateur,
connecteur fibres et
photomultiplicateur (PM)

Connexion module PM-FEB-ROB



64 fibres venant
d'un coté d'un module



PM : Photomultiplicateur

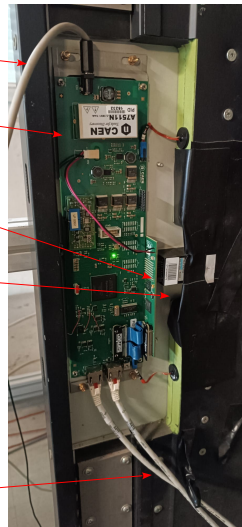
Cable
d'alimentation

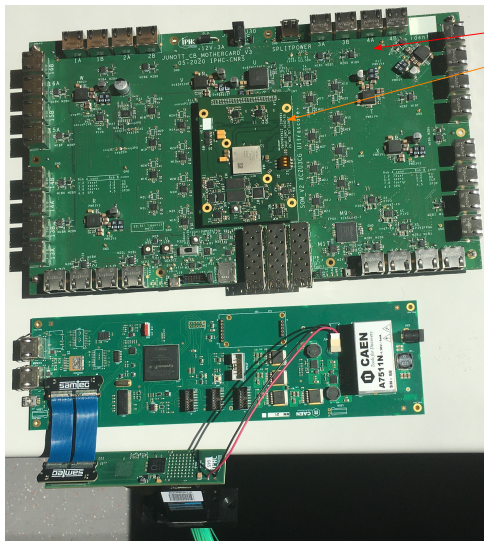
Read Out Board (ROB)

Front End Board (FEB)

PM, en fonctionnement
voit 50kHit/s

Cables de connexion,
vers la carte
Concentrateur (CB)





La carte concentrateur (CB) + la SOM (System On Module) :

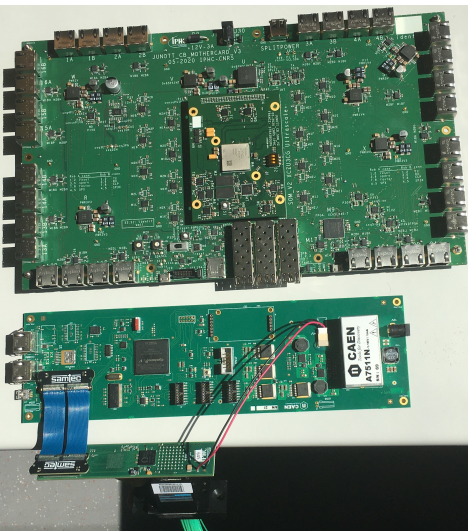
- Concentre le flux de données de 16 ROB/FEBs
- Valide ou pas l'incidence de particules sur un Mur
- Date chaque échantillon de donnée valide (ns)
- 1024 voies de déclenchement
- Réduit le débit de données de ~ 50 kHits/s par ROB à ~ 50 kHits/s par CB
=> Division par 16 du taux de déclenchement
- Dimensions 21 x 34 cm
- Consommation (carte mère + carte mezzanine) 25w

La ROB :

- Sert de passerelle entre chaque FEB et sa CB
- Vitesse de transmission ROB/CB 125Mbps
- Dimensions 8.5 x 30 cm
- Consommation 3w

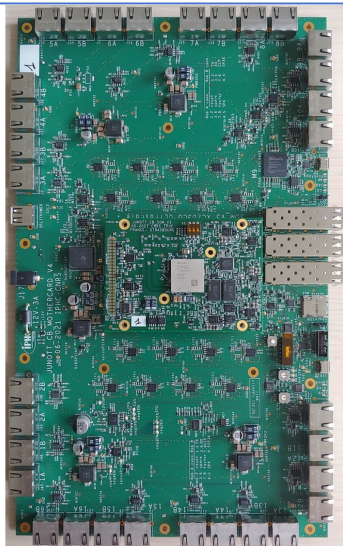
La FEB :

- Mesurer la charge des 64 voies du PM
- Sérialiser les 64 sorties d'incidences (hits) de muons
- Dimensions 3 X 13 cm
- Consommation 2w



	Par Mur	Au total
CB + SOM	X 1	X 63
ROB	X 16	X 1k
FEB	X 16	X 1k

La carte concentrateur

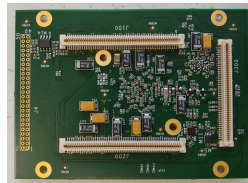
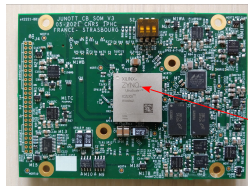


SC/WR-(UDP)

DAQ-(TCP)

TRIGGER L2

La carte fille (SOM) :

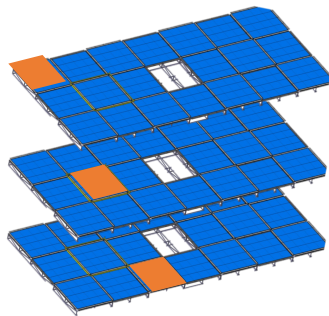
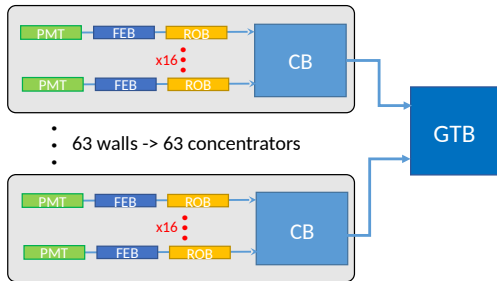


Firmware du SOC :

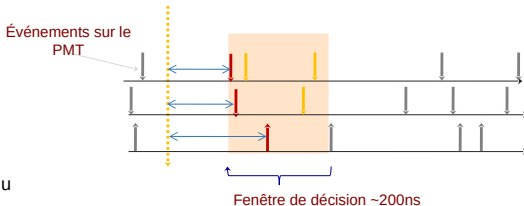
- Code C - 16000 lignes
- Code VHDL – 25000 lignes

- SOC (System on Chip) : ZYNQ Ultrascale+, XCZU3CG
- intègre des processeurs et un FPGA
- SDRAM DDR4

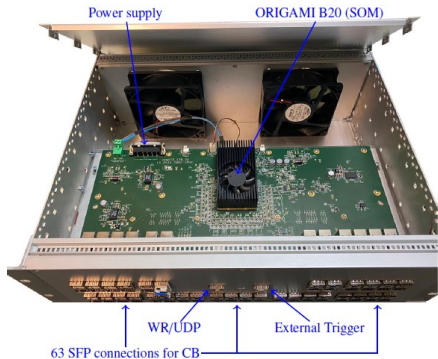
Global Trigger Board (GTB)



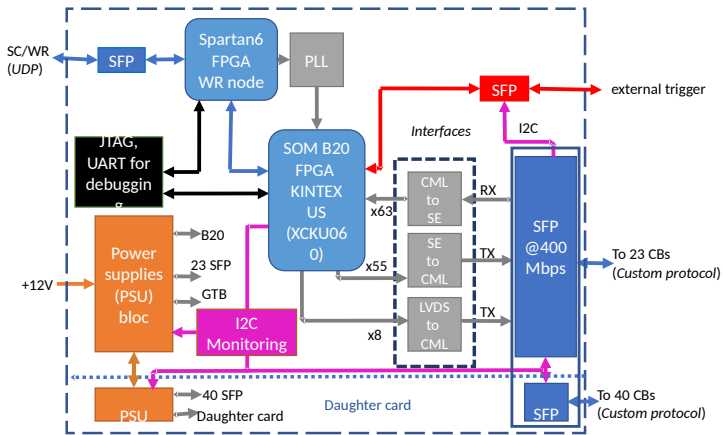
- Regroupe les données des 63 Concentrateurs
- Trigger niveau 2
 - Alignement trigger L1 sur les 3 étages
 - Fenêtre de temps glissante (200ns)
- Réduire le bruit de fond
 - Radioactivité ambiante
 - Réduit par 1000 le flux de données en direction du système d'acquisition



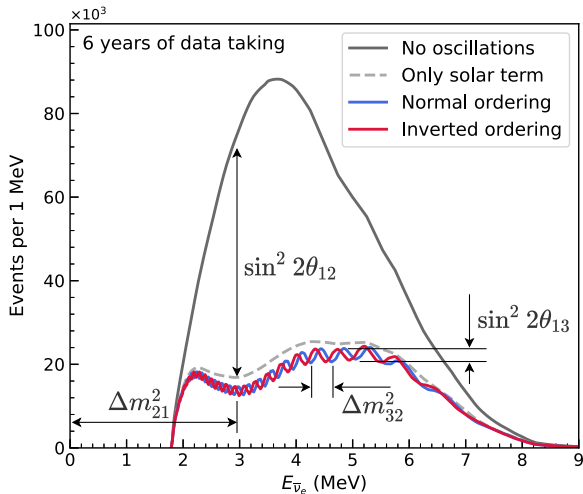
Global Trigger Board



→ Liens SFP testés à 400 Mbps

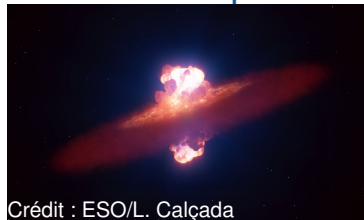
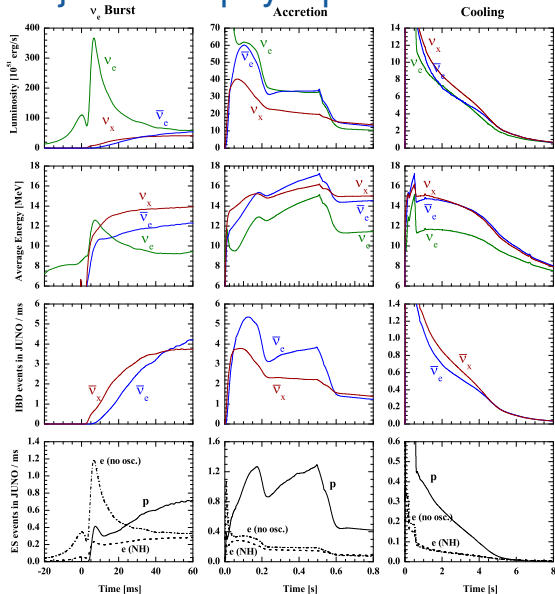


Objectifs de physique de JUNO avec Neutrinos de réacteur



- Mesure de précision des oscillations de neutrinos
 - ▶ voir les 2 fréquences d'oscillation en même temps
 - ▶ incertitude $< 0.5\%$ sur 3/6 paramètres après 6 ans
- Le ν_e est le ν le plus léger ou le plus lourd ?
 - ▶ Si léger, comme reste du Modèle Standard
- Test du modèle d'oscillations des ν

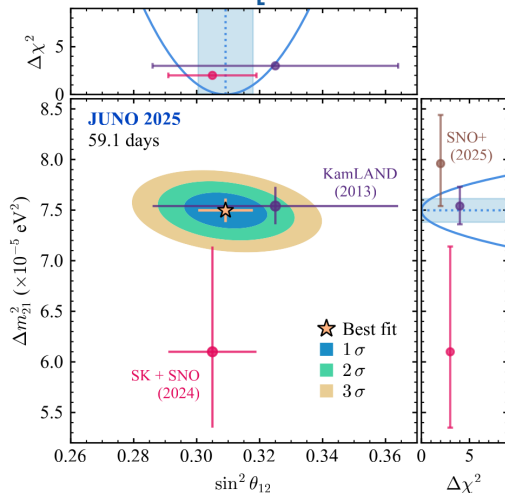
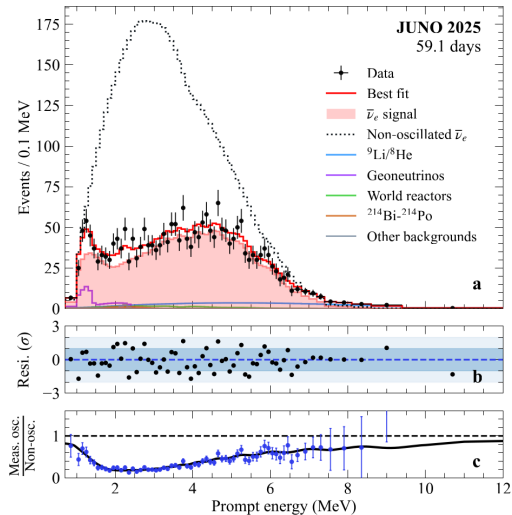
Objectifs de physique de JUNO avec Neutrinos de Supernovae



- Pour des supernovae galactiques :
 - ▶ SNs sont très rares : 1–3/siècle
 - ▶ Seule SN vue avec ν en 1987 (👤 2002)
 - ▶ Essentiel pour comprendre les mécanismes d'explosion d'une étoile en SN !
 - ▶ Mesure de la masse absolue des ν
 - ▶ Étude de l'oscillation des ν
- Étude de la population de SN dans l'univers avec les neutrinos des SN plus lointaines

Premiers résultats de JUNO!

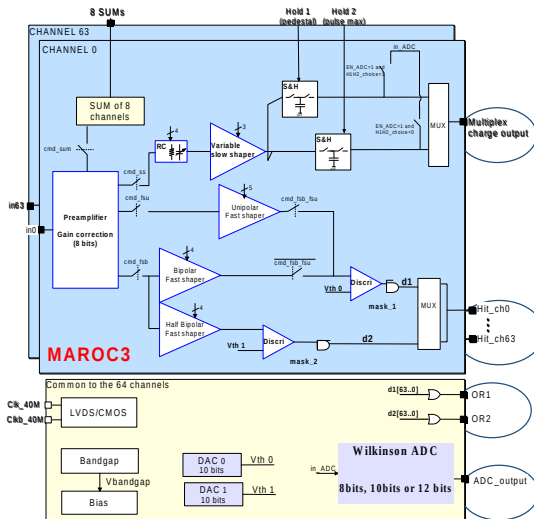
[arXiv:2511.14593]



- Premiers résultats de JUNO avec 2 mois de données, parus le 19/11/2025
- Déjà meilleure précision pour mesurer θ_{12} et Δm_{21}^2 que les moyennes globales



Merci pour votre attention !



Out_Q :
sorties multiplexée, images
des charges (impulsions
issues des bandeaux
scintillateurs

Triggers → les événements sont tous
remontés vers la Feb, où ils sont sérialisés
et envoyés sur les ROBs

OR des triggers → c'est le FastOr, il indique le premier
déclenchement, c'est cela qui compte pour la datation

Out_ADC :
sortie interne de l'ADC
Ce sont les valeurs « images » de l'énergie des impulsions
issues des bandeaux scintillateurs

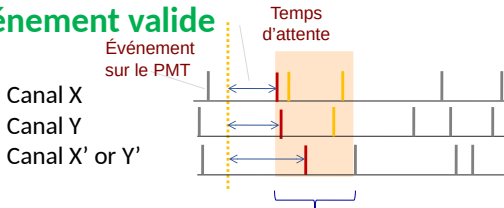
Annexe -2

Algorithme de veto L1 -VHDL

Coincidences valides = coincidence dans les coordonnées X-Y

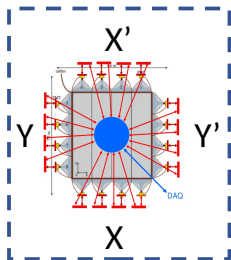
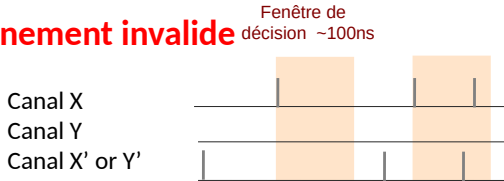
- Algorithme courant : croix partiel à 3 bras

événement valide



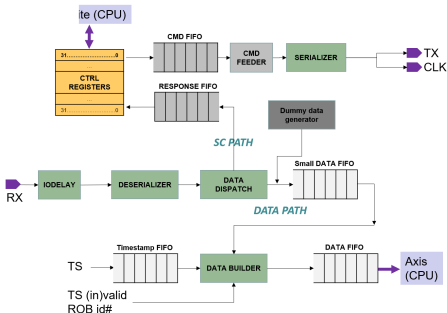
Canal X validé par des signaux dans le Canal Y et (X' ou Y')

événement invalide



Chemin de Donnée ROB <-> Carte concentrateur :

2021-11-21



Flux de de données total TT :

- chaque ROB sort 50Khit/s
- dans chaque CB 50Khit/s x 16 (robs), mais l'algorithme L1 divise par 16, donc en sortie de chaque CB on a 50Khit/s
- avant la GTB (63 Cbs) $\rightarrow 63 \times 50\text{Khit/s} = 3150 \text{ Khit/s}$
- après la GTB, l'algorithme L2 divise par 1000, Donc 3,15 Khit/s
- chaque hit fait 832 bits, donc on obtient au total, $3150 \times 832 = 2,6\text{Mbit/s}$