

ÉTUDE DES MÉCANISMES DE RÉACTION DE FISSION ET CARACTÉRISATIONS DE DÉTECTEURS DE PHOTONS UTILISÉS

Vincent Trayter

Stage M2-PSA

23 Juin 2021

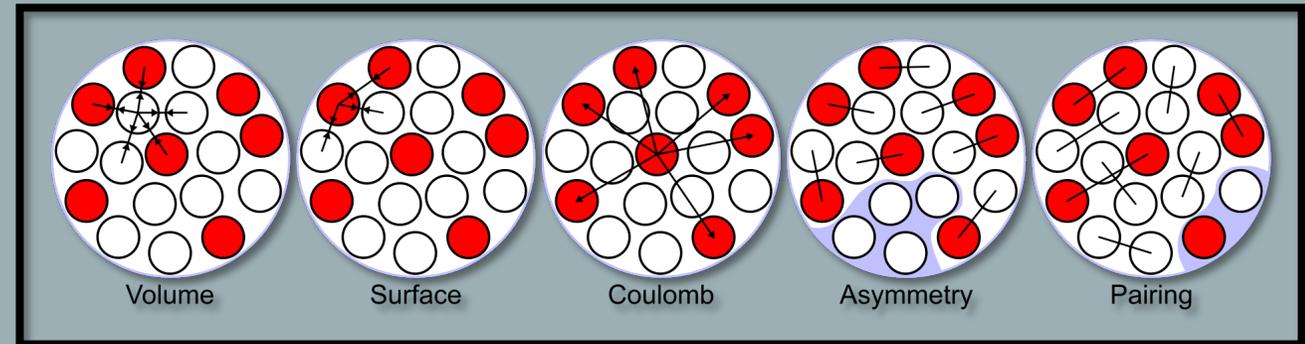
Sous la direction d'Olivier Dorvaux et de Christelle Schmitt

- Aspect théorique de la fission nucléaire
- Présentation et prédictions du modèle GEF
- PARIS
- Conclusion

Aspect théorique de la fission nucléaire

Le modèle de la goutte liquide chargée

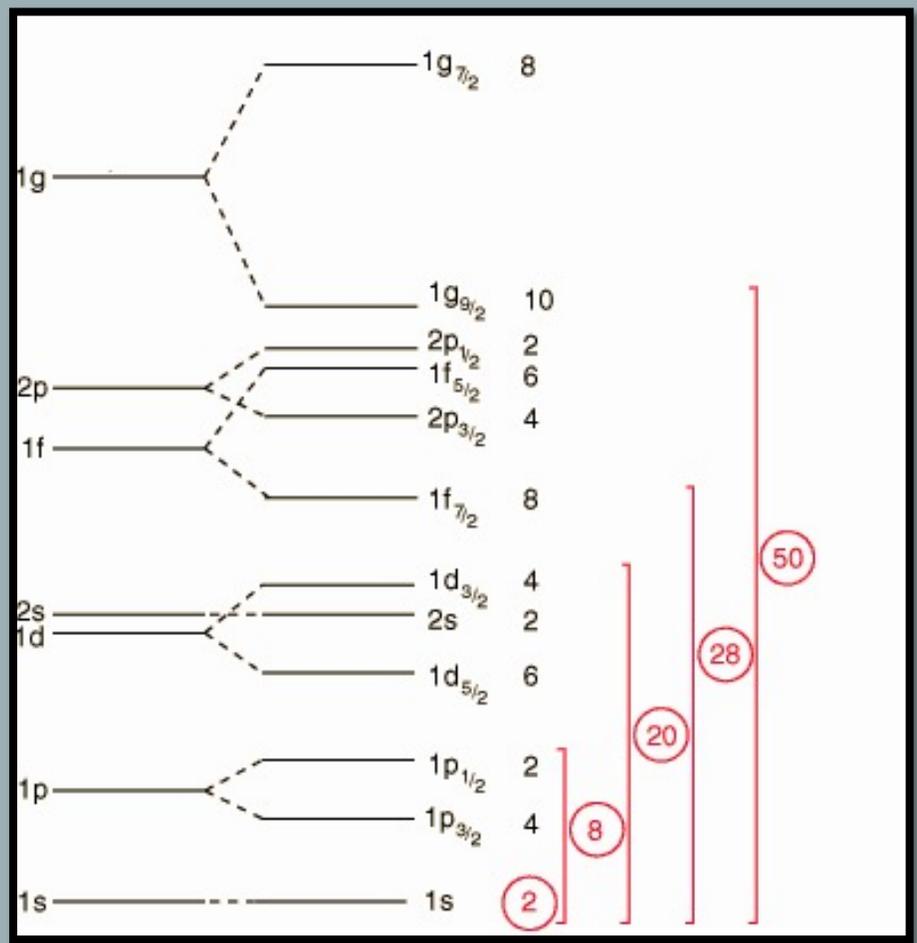
- Goutte homogène de fluide incompressible
- Equilibre de deux forces
- Terme de surface
- Terme de Coulomb
- Variation d'énergie = variation de déformation
- N'explique pas la fission asymétrique
- N'explique pas certaines énergies de liaison



Aspect théorique de la fission nucléaire

Le modèle en couches

- Niveaux d'énergie
- Nombres magiques

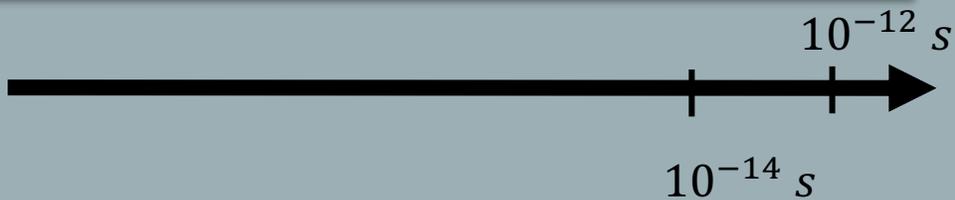
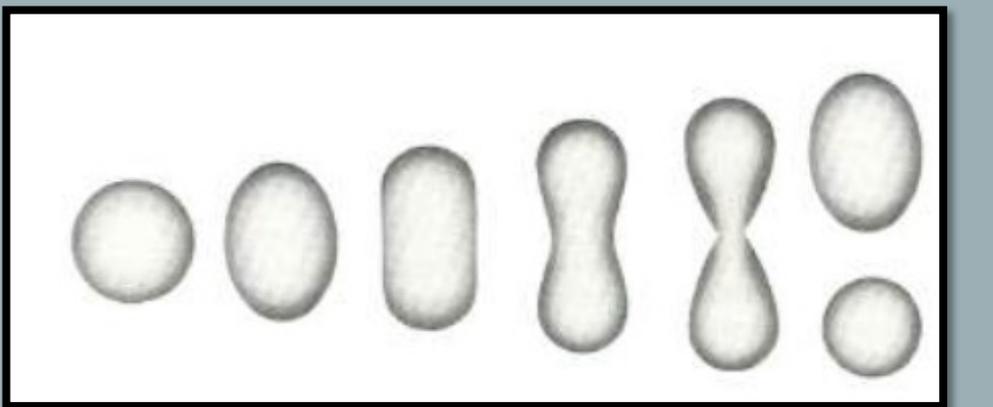


Niveau d'énergie modèle en couches

Aspect théorique de la fission nucléaire

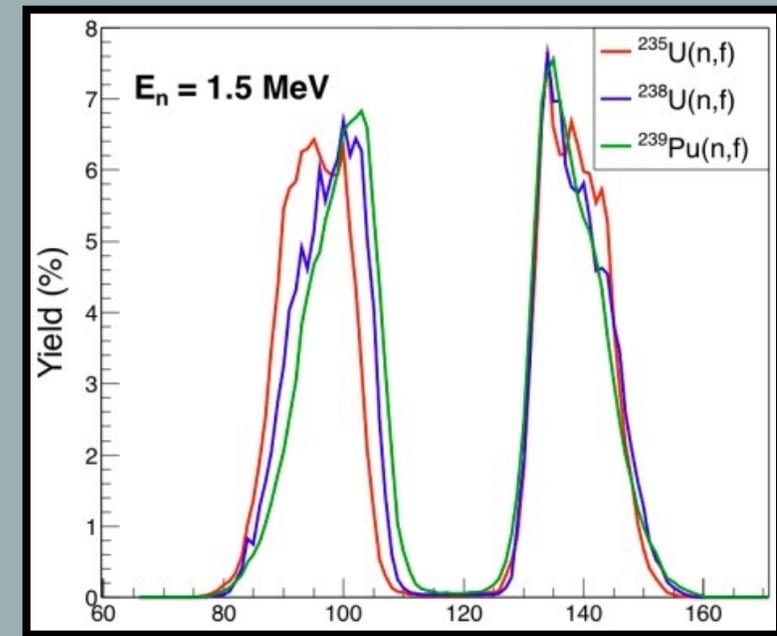
Mécanisme de fission nucléaire

- Fission induite
- Déformations
- Scission



Déformation du noyau jusqu'à scission.

- Effets de couche
- Fragment lourd prioritaire pour les noyaux lourds

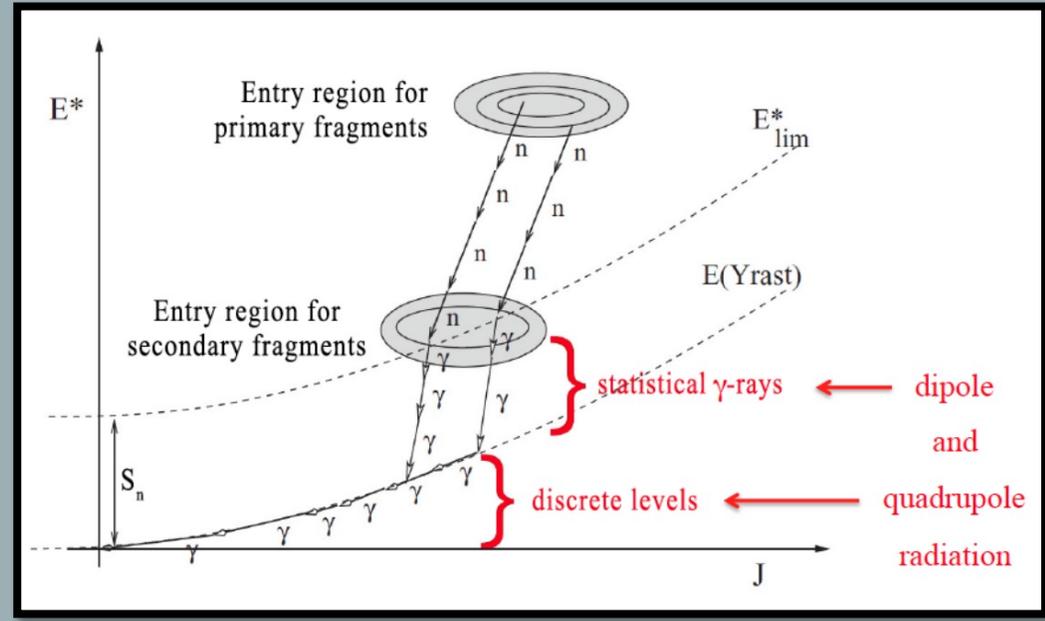


Distribution en masse des fragments de fission issus de la fission induite du ^{235}U , du ^{238}U et du ^{239}Pu
 (https://doi.org/10.1036/1097-8542.458400)

Aspect théorique de la fission nucléaire

Désexcitation des fragments de fission

- Relaxation de forme

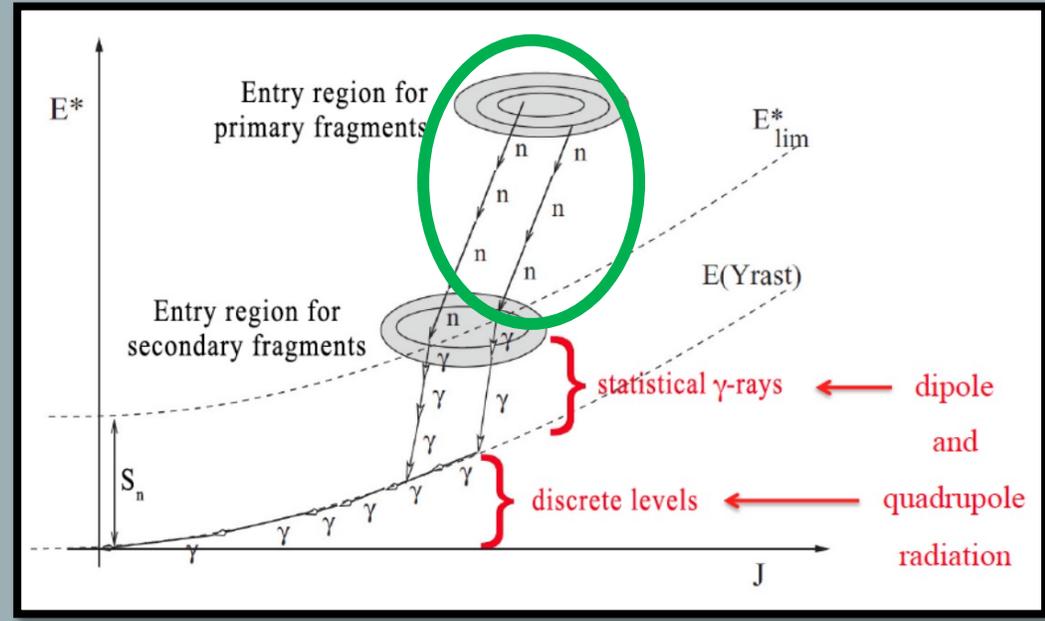


Energie d'excitation en fonction du moment angulaire pour un noyau excité donné
 (<https://doi.org/10.1051/epjconf/201819303005>)

Aspect théorique de la fission nucléaire

Désexcitation des fragments de fission

- Relaxation de forme
- Emissions de neutrons prompts

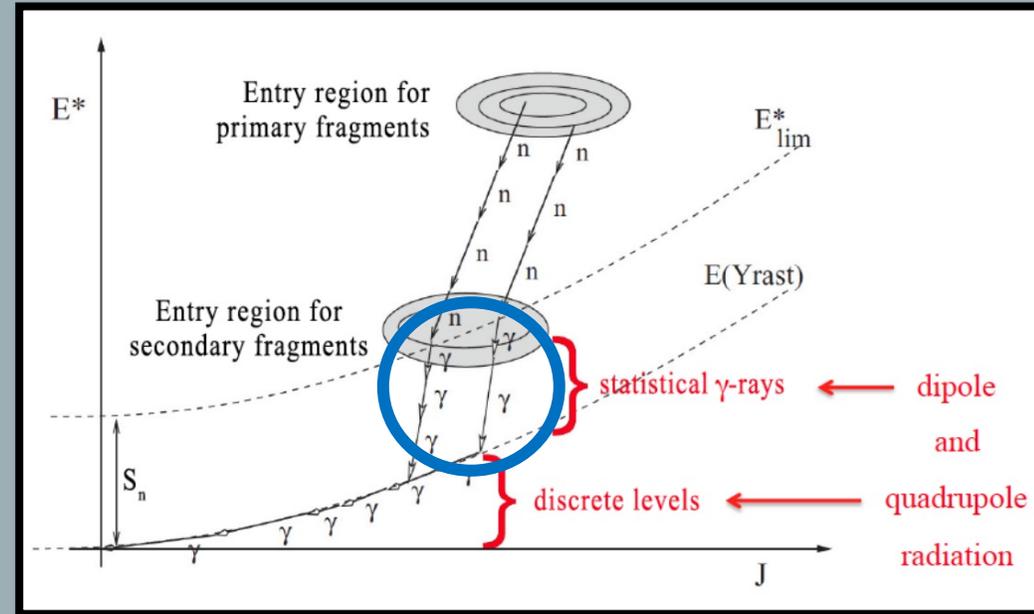


Energie d'excitation en fonction du moment angulaire pour un noyau excité donné
 (<https://doi.org/10.1051/epjconf/201819303005>)

Aspect théorique de la fission nucléaire

Désexcitation des fragments de fission

- Relaxation de forme
- Emissions de neutrons prompts
- Emission de gammas statistiques
- Grande densité de niveau d'énergie qui donne l'impression d'un spectre en énergie continu

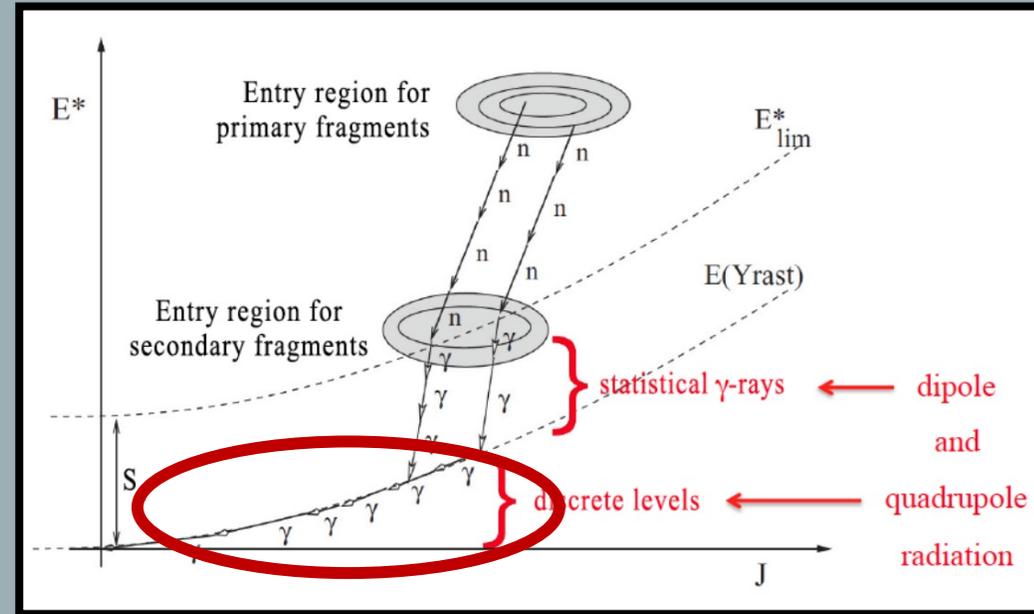


Energie d'excitation en fonction du moment angulaire pour un noyau excité donné
(<https://doi.org/10.1051/epjconf/201819303005>)

Aspect théorique de la fission nucléaire

Désexcitation des fragments de fission

- Relaxation de forme
- Emissions de neutrons prompts
- Emission de gammas statistiques
- Grande densité de niveaux d'énergie qui donne l'impression d'un spectre en énergie continu
- Emission de gammas discrets



Energie d'excitation en fonction du moment angulaire pour un noyau excité donné
(<https://doi.org/10.1051/epjconf/201819303005>)

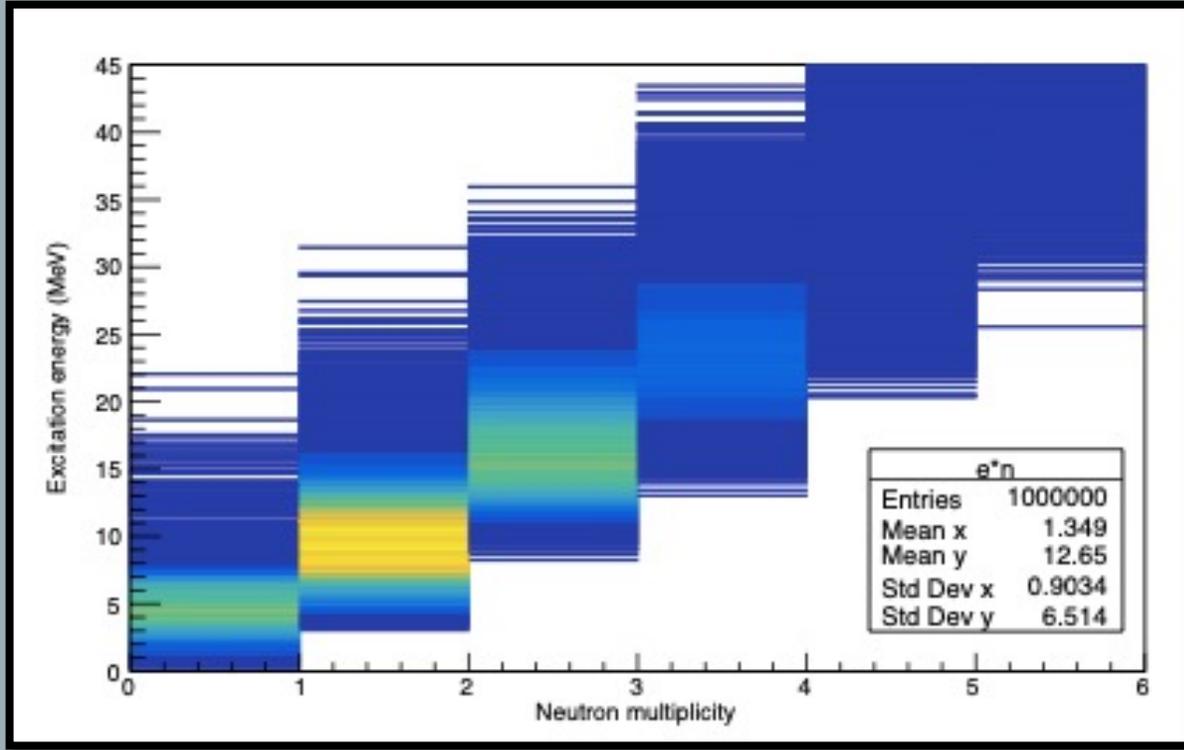
General description of Fission observable

- Traite de la fission induite et de la fission spontanée jusqu'à une énergie d'excitation de 100 MeV
 - Basé sur des lois de statistique et de mécanique quantique
 - Grand pouvoir de prédiction de description du processus de fission
 - Permet une description de toutes les observables de fission
 - Préserve les corrélations entre elles
-
- Appréhension de son fonctionnement
 - Construction de script pour l'analyse des données
 - Interprétation des données
 - Corrélations entre observables de la fission nucléaire et observables expérimentales

Présentation et prédictions du modèle GEF

Multiplicité des neutrons et énergie d'excitation

- Corrélation forte
- Environ 10 MeV par neutron prompt

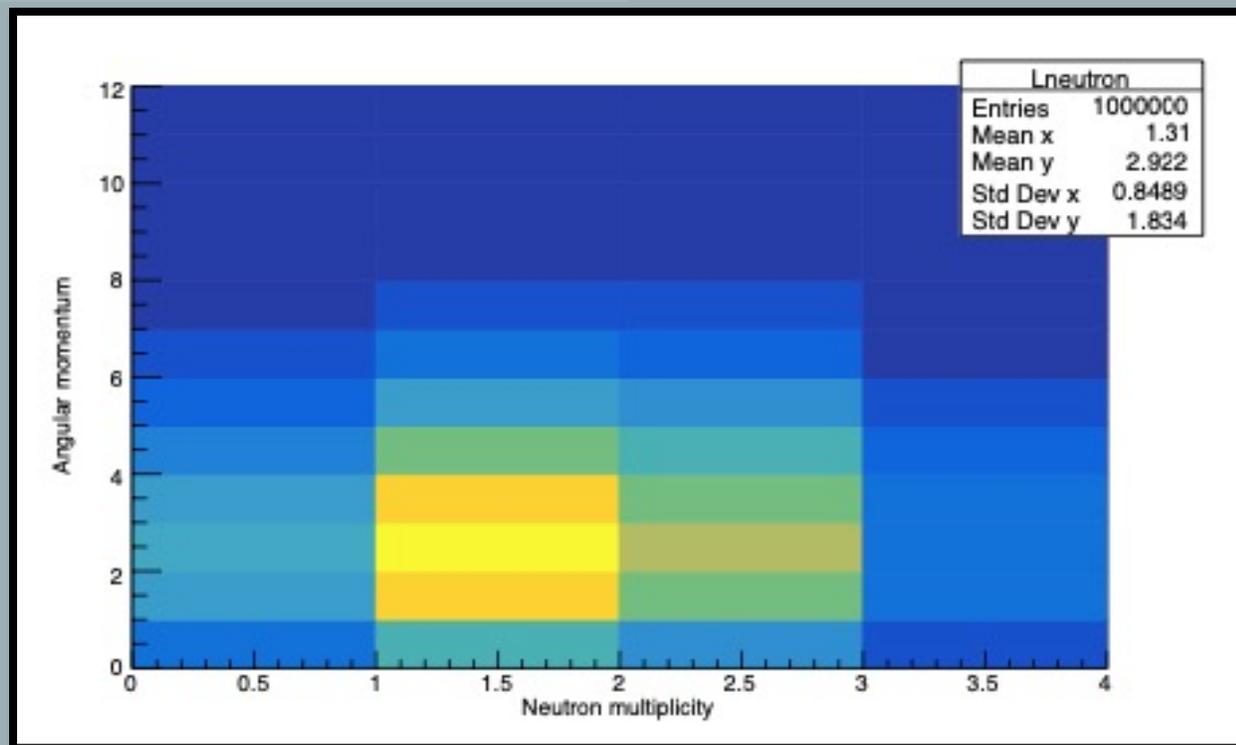


Energie d'excitation en fonction de la multiplicité des neutrons émis par les fragments de fission issus de la fission du ^{235}U

Présentation et prédictions du modèle GEF

Multiplicité des neutrons et moment angulaire

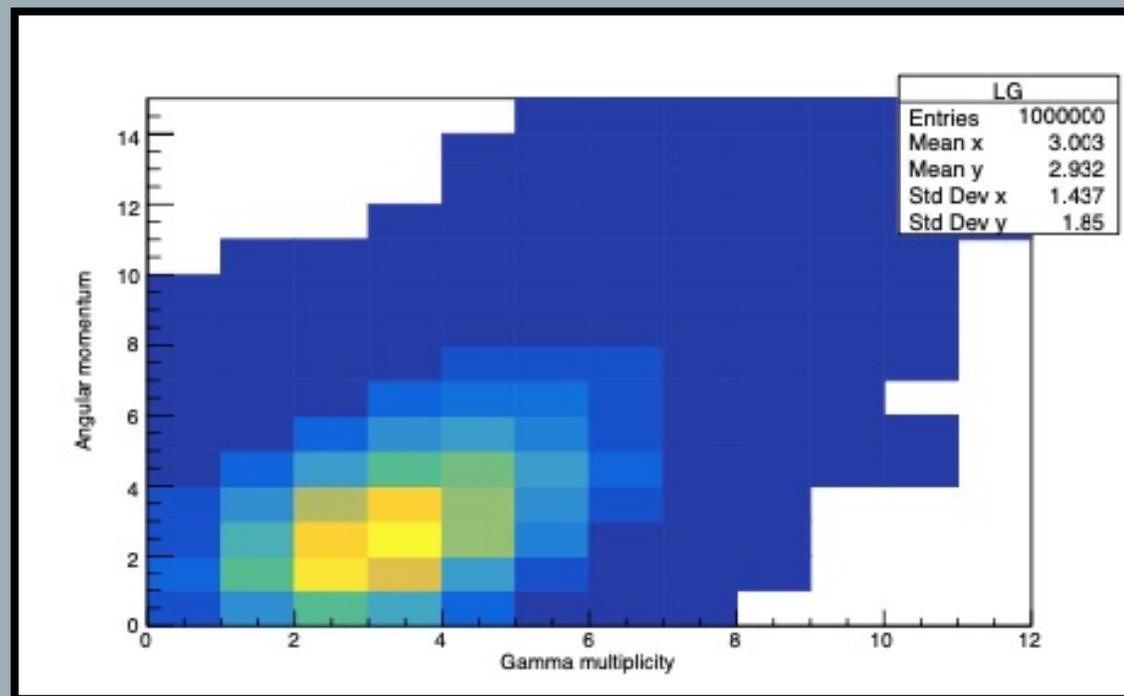
- Corrélation faible
- Environ $1\hbar$ par neutron prompt



Moment angulaire en fonction de la multiplicité des neutrons émis par les fragments de fission issus de la fission du ^{235}U

Multiplicité des gammas et moment angulaire

- Corrélation forte
- Environ $1\hbar$ par gamma prompt

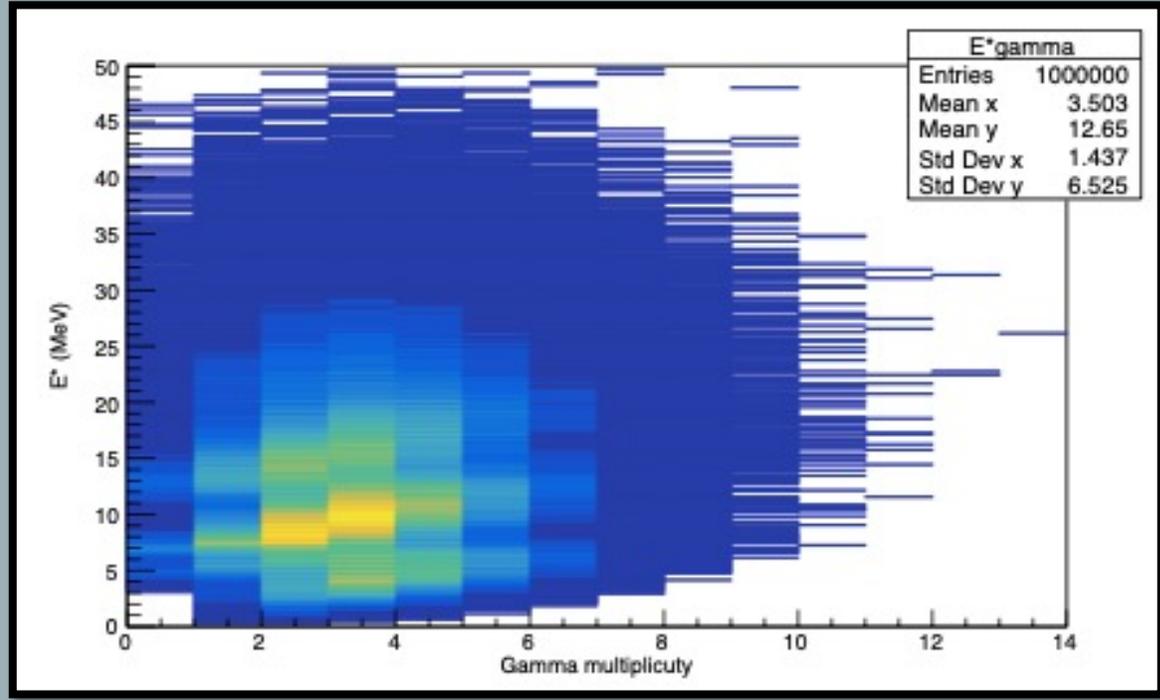


Moment angulaire en fonction de la multiplicité des gammas émis par les fragments de fission issus de la fission du ^{235}U

Présentation et prédictions du modèle GEF

Multiplicité des gammas et énergie d'excitation

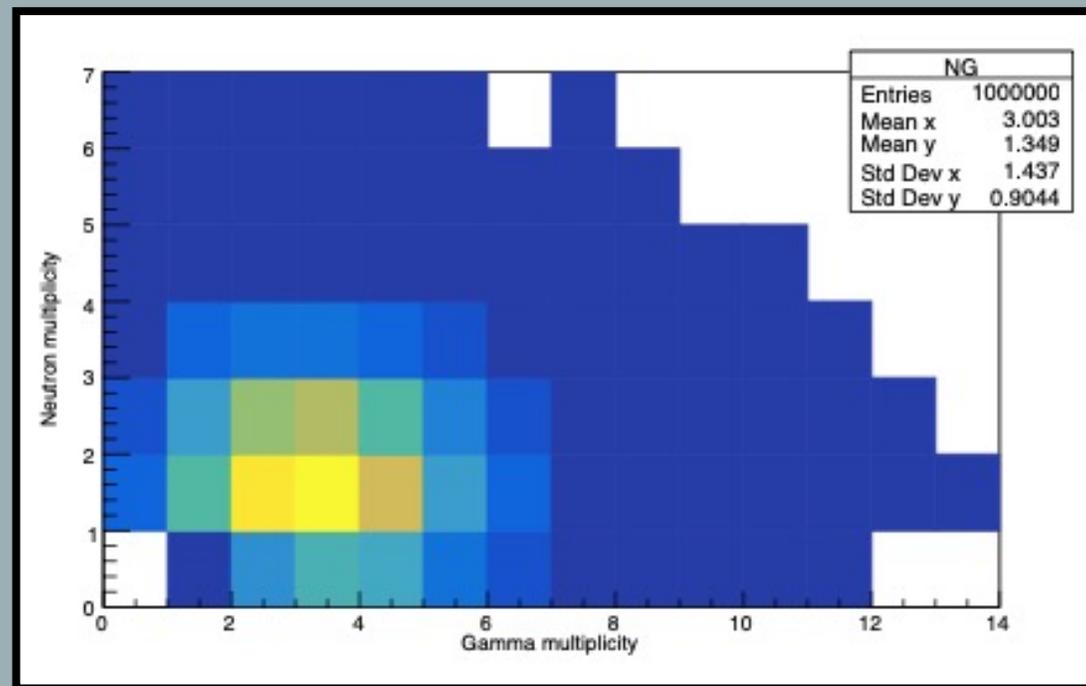
- Corrélation faible
- Environ 2 MeV emmenés par les gammas prompts



Energie d'excitation en fonction de la multiplicité des gammas émis par les fragments de fission issus de la fission du ^{235}U

Multiplicité des neutrons et des gammas

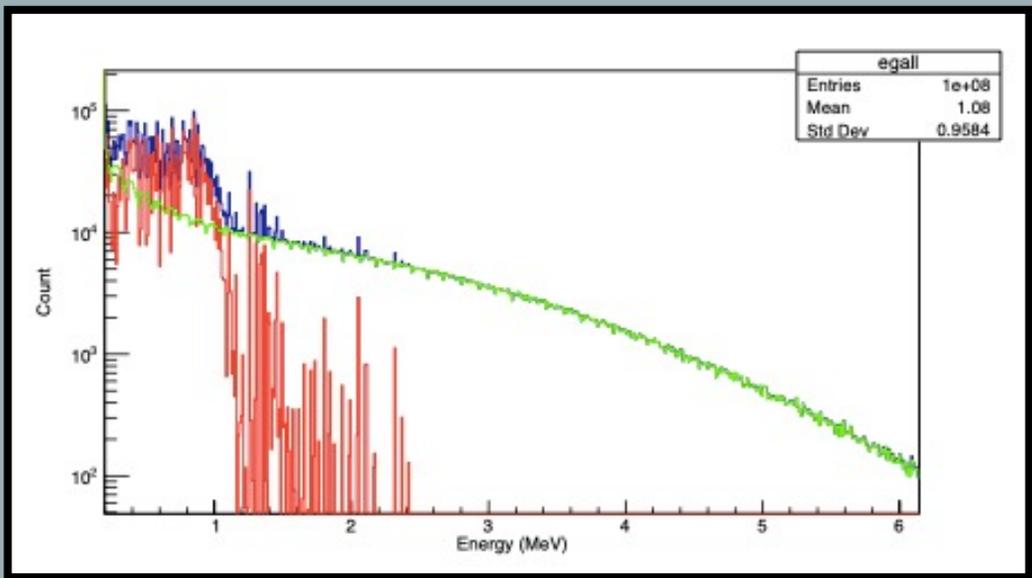
- Corrélation faible
- Compétition gammas neutrons autour de l'énergie de séparation de neutron



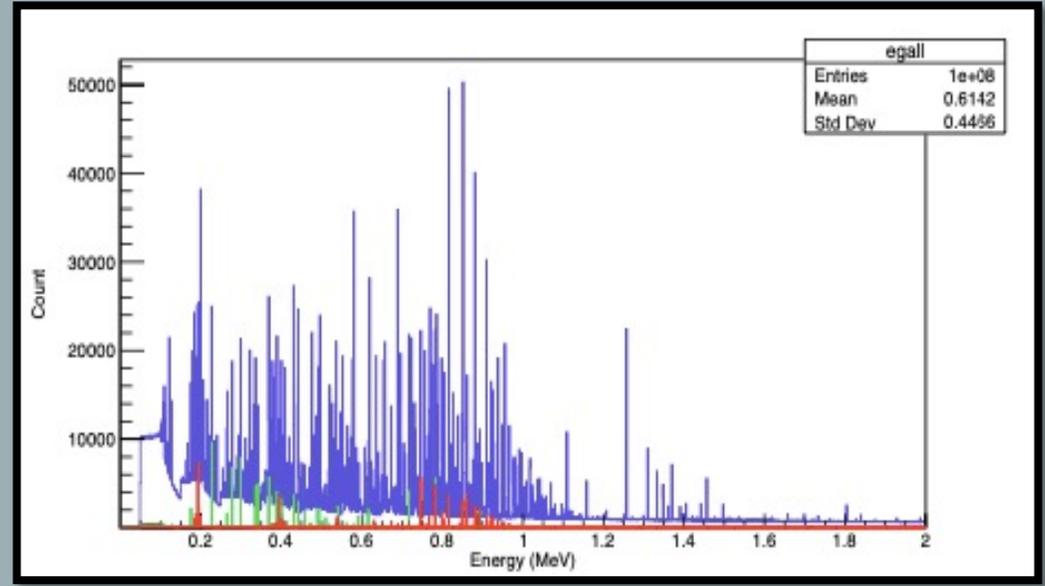
Multiplicité des neutrons en fonction de la multiplicité des gammas émis par les fragments de fission issus de la fission du ^{235}U

Présentation et prédictions du modèle GEF

Gammas statistiques et gammas discrets



Distribution en énergie des gammas statistiques (en vert) et des gammas discrets (en rouge) en comparaison de la distribution d'énergie totale des gammas issus de la fission du ²³⁵U (en bleu)



Distribution en énergie des gammas discret émis par du ⁹²Kr (en vert) et par du ¹³⁶Te (en vert) en comparaison de la distribution d'énergie totale des gammas issus de la fission du ²³⁵U (en bleu)

Expérience PARIS

- Collaboration internationale
- Les propriétés des noyaux exotiques chauds en rotation produits lors des réactions de fusion-évaporation par décroissance gamma du GDR
- Des nouveaux modes d'excitation
- La structure en couches des noyaux légers
- La dynamique des réactions nucléaires



Phoswich

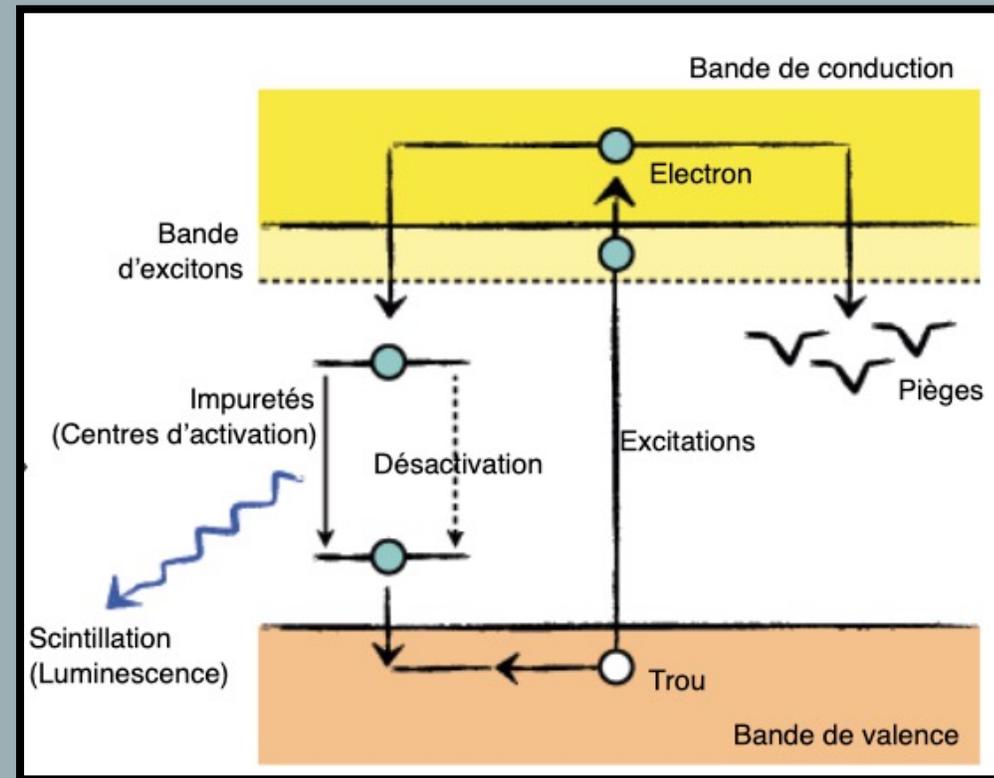
- Deux cristaux scintillants $\text{LaBr}_3::\text{Ce}$ et $\text{NaI}::\text{Tl}$
- Cluster de 9 phoswich
- Phase finale avec 24 clusters



De haut en bas, phoswich PARIS, cluster de 9 phoswich, cube 4π de 24 clusters (PARIS White Book)

Cristaux scintillants

- Conversion en lumière proche du visible
- Excitation de la bande de valence vers les niveaux supérieurs
- Création de niveaux d'énergie grâce aux impuretés
- Désexcitation
- Scintillation



Principe de fonctionnement d'un scintillateur

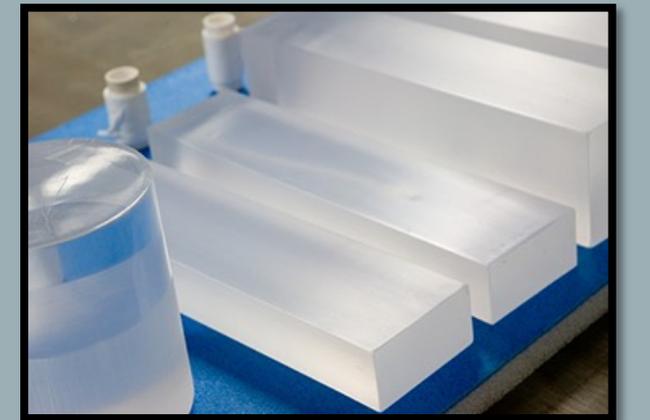
Cristaux scintillants LaBr₃::Ce et NaI::TI

- Résolution en énergie de 2.6 % à 662 keV
- Très bonne résolution en temps < 100 ps
- Efficacité 188 % supérieure au NaI
- Rendement lumineux de 63 photon/keV
- Idéal pour des expériences avec un haut taux de comptage
- Discrimination neutrons/gammas basée sur l'analyse du temps de vol



Scintillateur LaBr₃ (@Saint-Gobain)

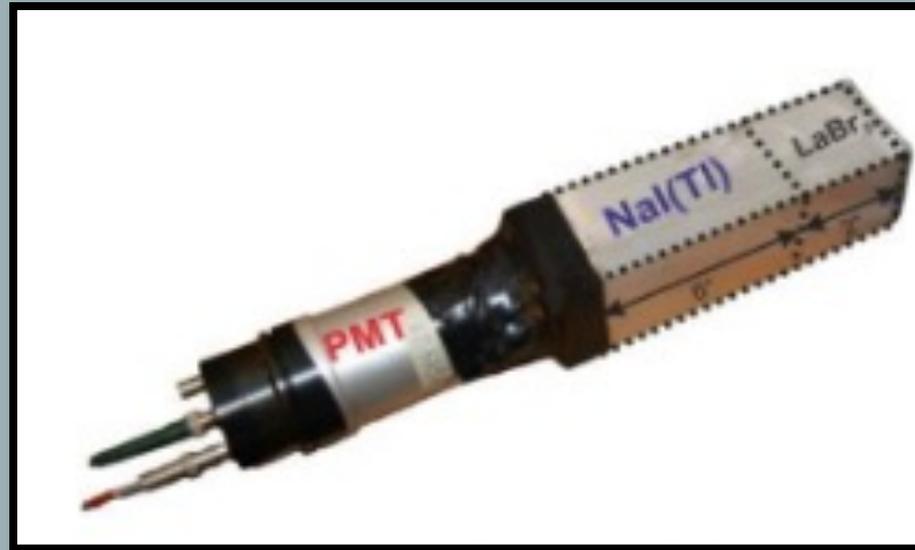
- Très haute efficacité lumineuse
- Grand choix de taille et de géométrie



Cristal scintillant NaI (@Saint-Gobain)

Montage expérimental

- Photomultiplicateur Hamamatsu R7723-100
- Excellente efficacité
- Diamètre compatible avec le phoswich
- Gain de 10^6



phoswich PARIS
(PARIS White
Book)

Montage expérimental

- Numériseur TNT 2.0
- 4 voies mais 2 voies d'acquisitions utilisées
- Conversion analogique vers numérique
- Fréquence d'échantillonnage de 100 MHz
- Ajout d'un préamplificateur pour un échantillonnage adapté



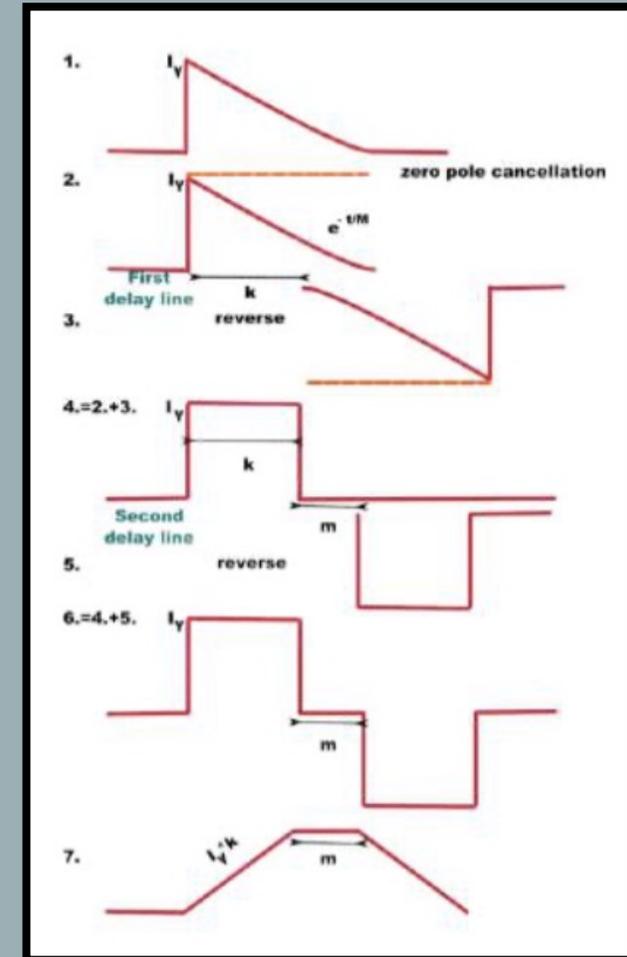
Préamplificateur CREMAT-113



Numériseur TNT 2.0

Création des spectres mono- et bidimensionnels

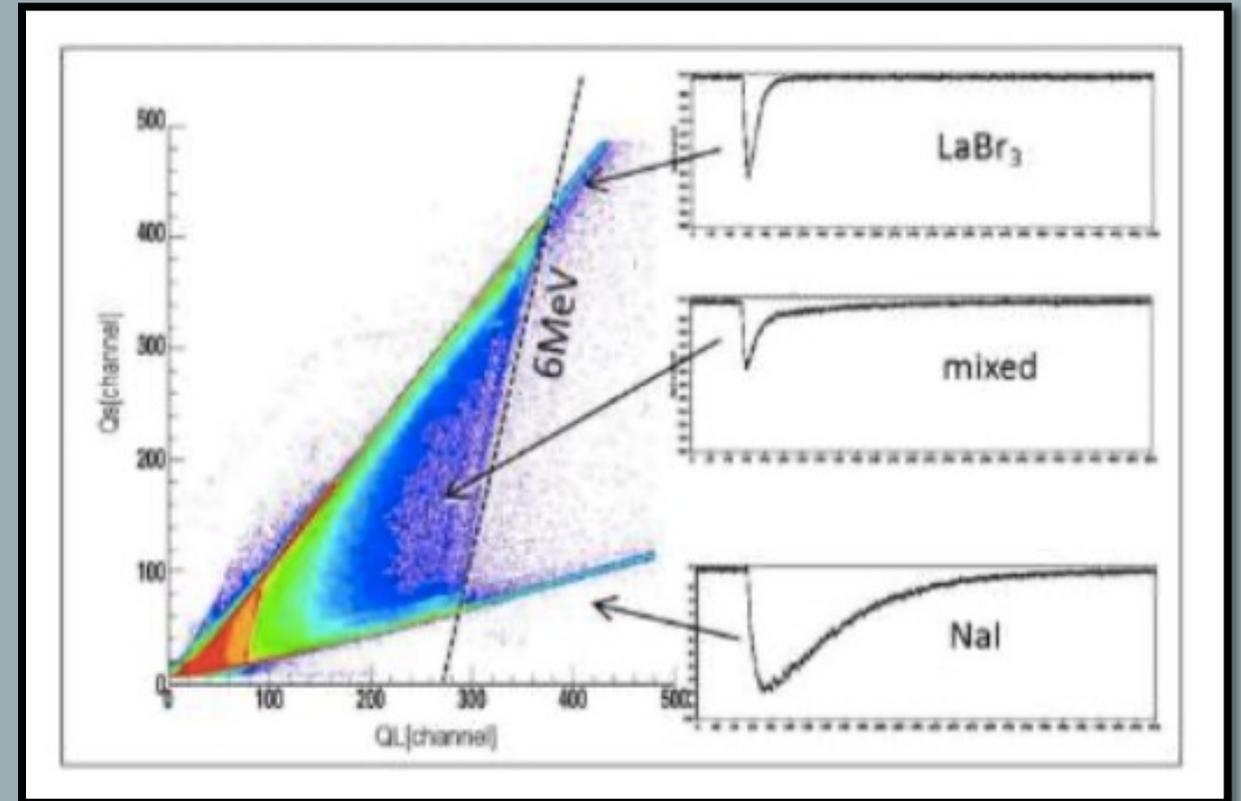
- Algorithme de Jordanov
- Un filtre passe haut est utilisé pour éliminer le temps de décroissance exponentiel
- Le signal est retardé d'un facteur k
- Le signal est inversé
- Les étapes 2 et 3 donnent un signal rectangulaire de largeur k
- Le signal est retardé d'un facteur m
- Le signal est inversé
- Les étapes 4 et 5 enlèvent les basses fréquences
- On intègre au point 6
- Deux trapézoïdes paramétrés par k (la pente) et m (la largeur du plateau)
- Un trapézoïde par cristal scintillant par voie



Décomposition étape par étape de l'algorithme de Jordanov

Création des spectres mono- et bidimensionnels

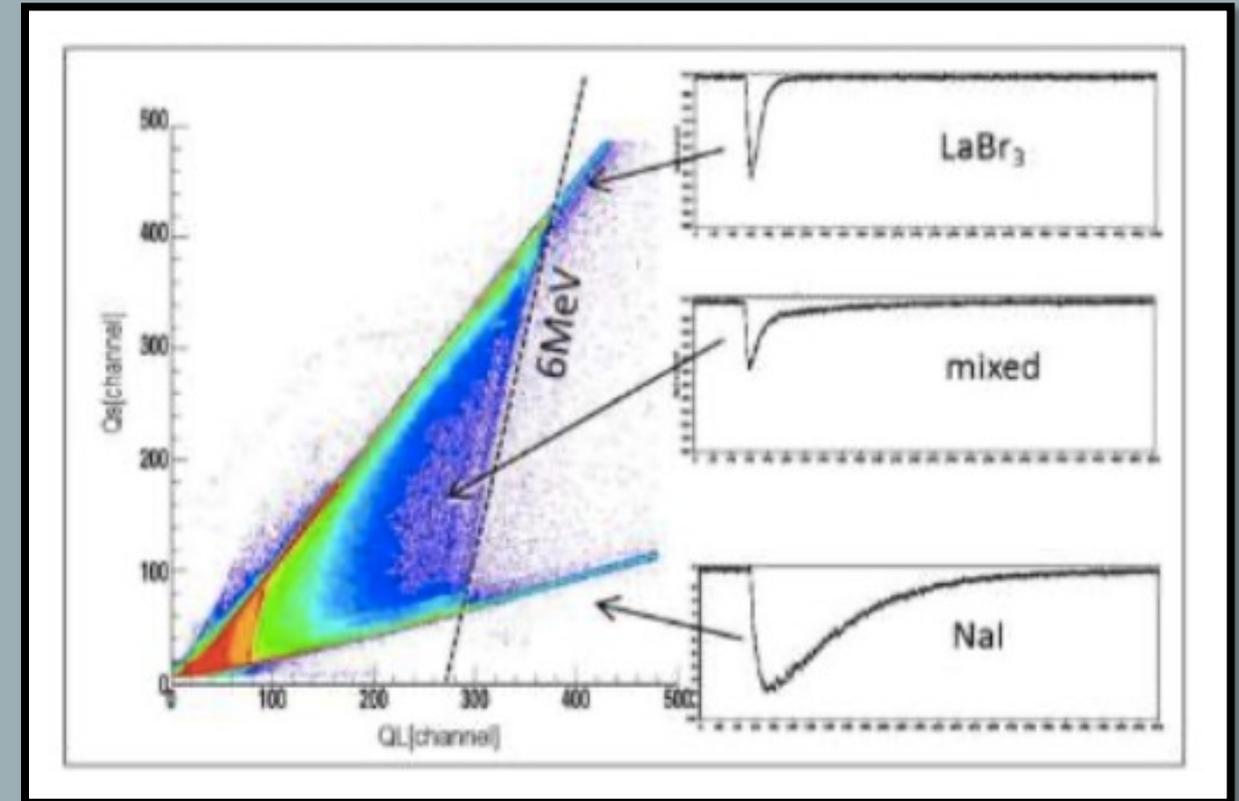
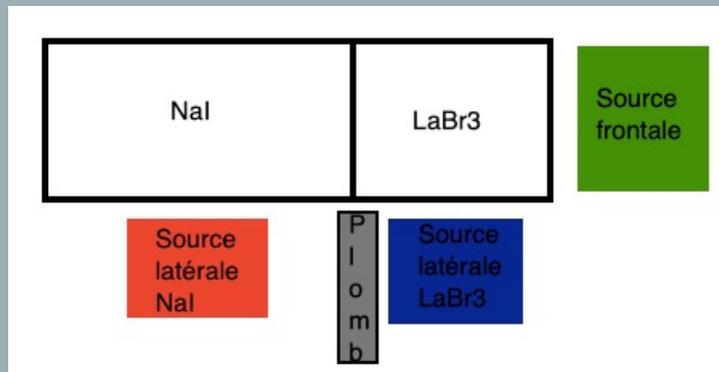
- Spectre bidimensionnel en traçant VI par rapport à V3
- 2 spectres monodimensionnels, 1 par voie



Spectre bidimensionnel composé de la voie VI en fonction de la voie V3 (PARIS White Book)

Création des spectres mono- et bidimensionnels

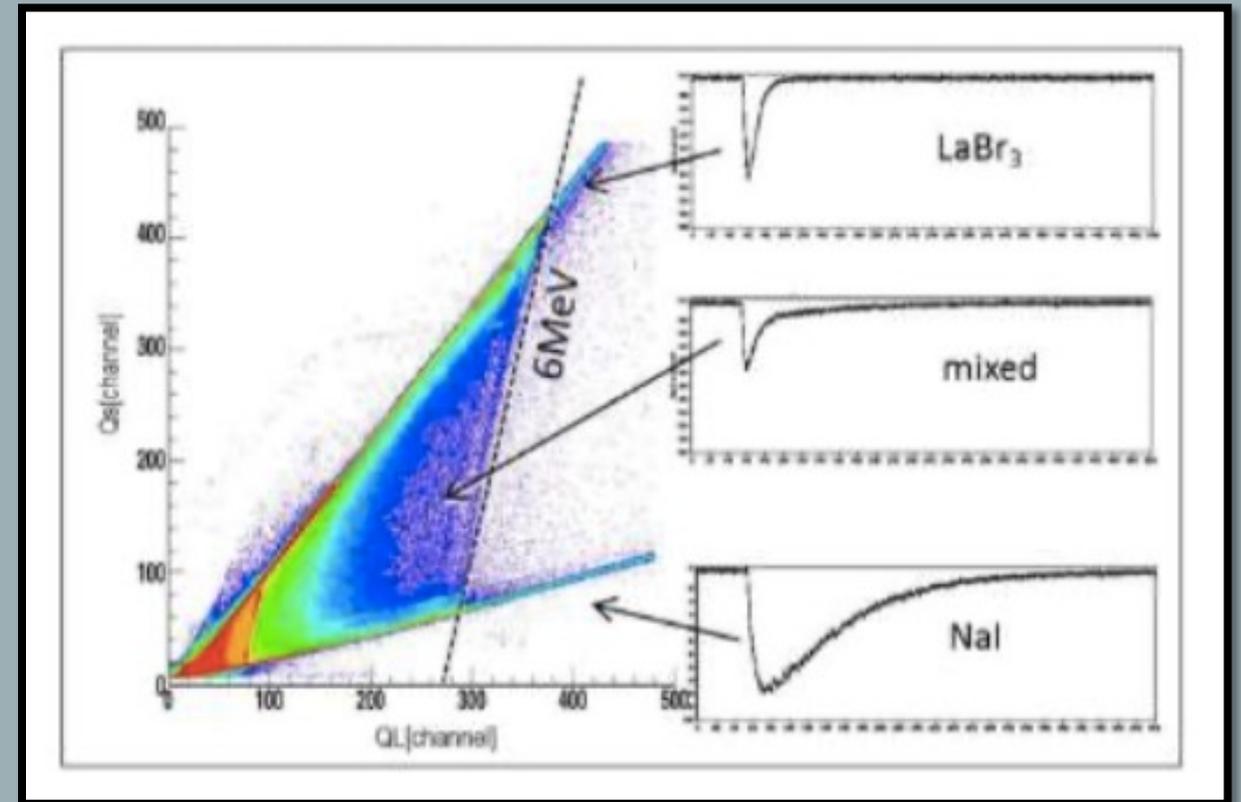
- Spectre bidimensionnel en traçant VI par rapport à V3
- 2 spectres monodimensionnels, 1 par voie



Spectre bidimensionnel composé de la voie VI en fonction de la voie V3 (PARIS White Book)

Création des spectres mono- et bidimensionnels

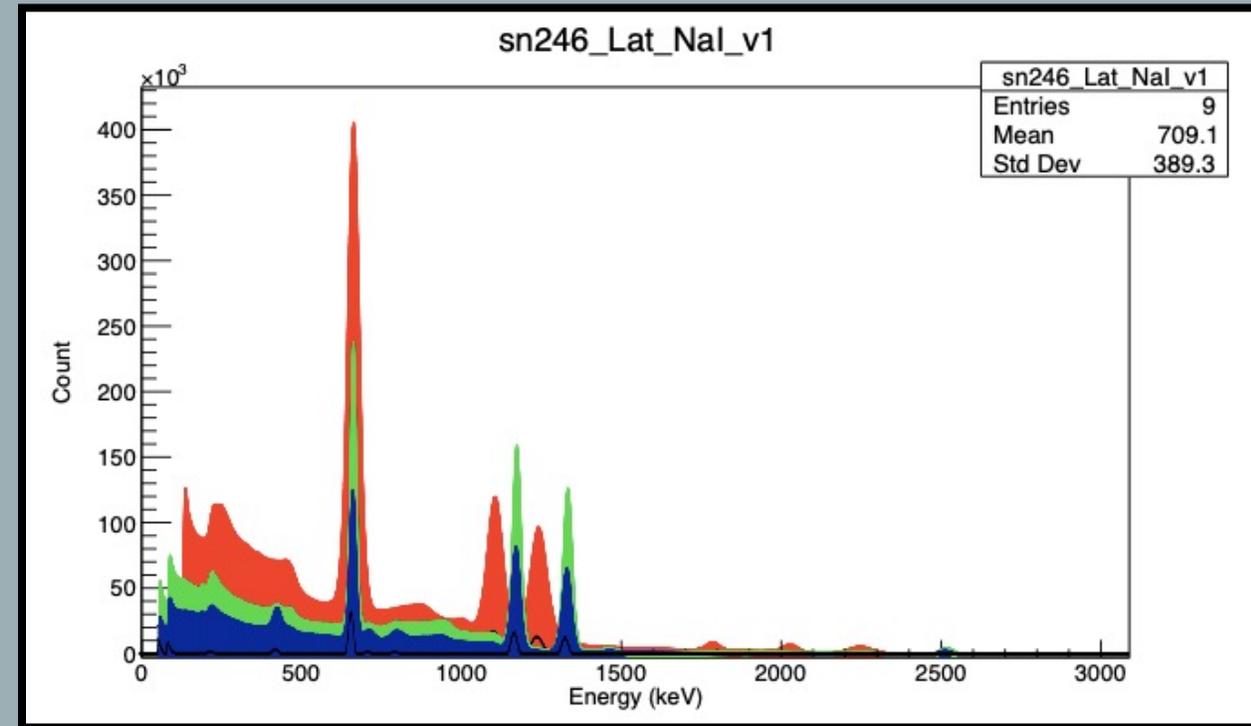
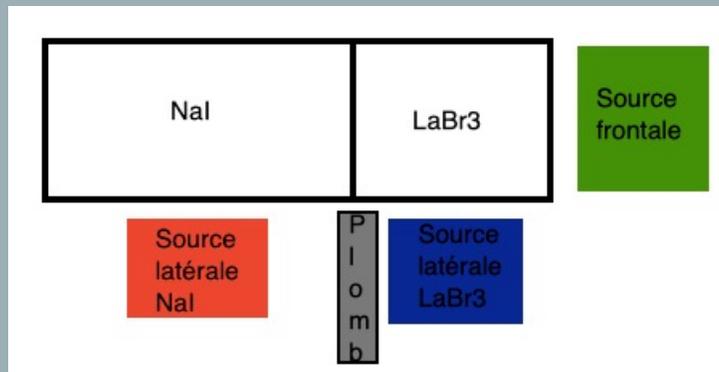
- Spectre bidimensionnel en traçant VI par rapport à V3
- 2 spectres monodimensionnels, 1 par voie
- Codage de scripts pour le tracé des spectres mono- et bidimensionnels (ROOT)
- Extraction des résolutions en énergie



Spectre bidimensionnel composé de la voie VI en fonction de la voie V3 (PARIS White Book)

Spectres monodimensionnels

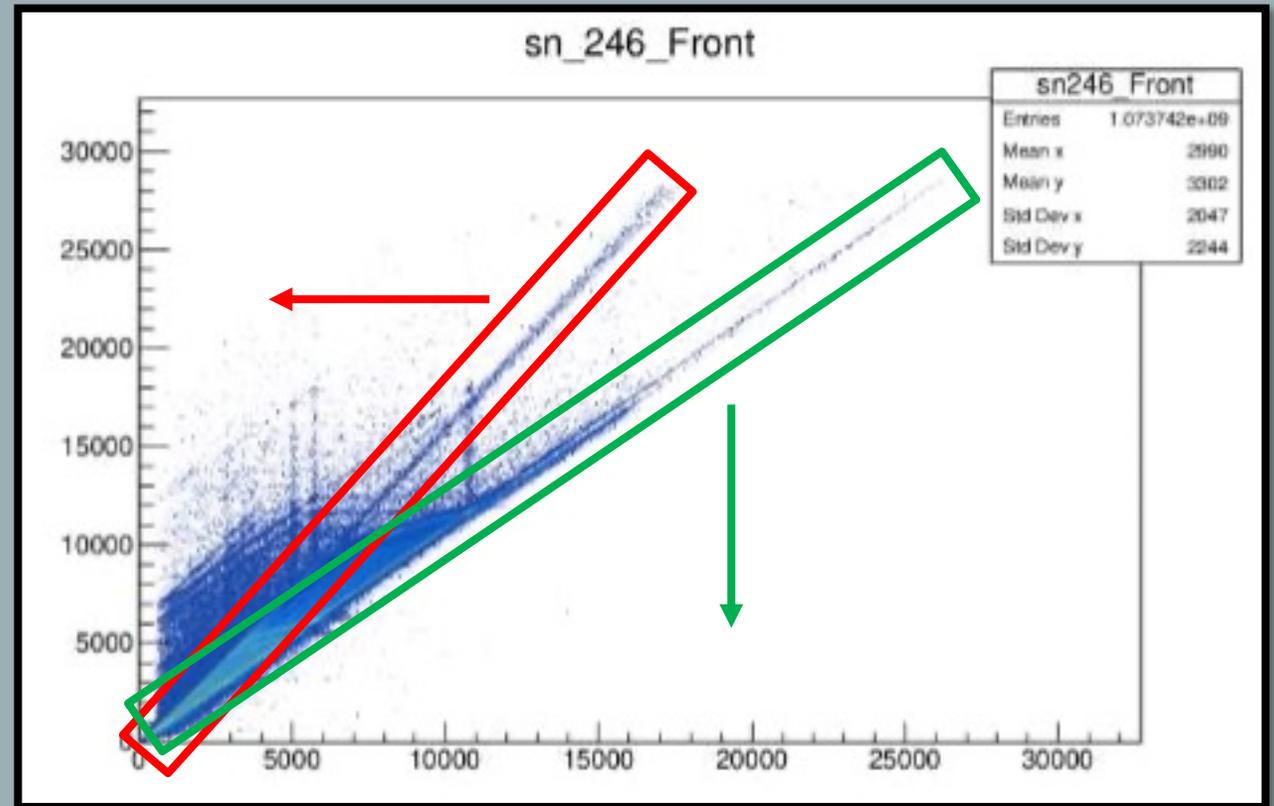
- Paramétrisation avec k et m en augmentant le temps d'intégration k
- Création de 2 spectres monodimensionnels à partir de VI et V3
- Propre à 1 cristal mais pollué par l'autre



Superposition des 3 spectres en énergie pour le détecteur sn246 obtenus via les spectres monodimensionnels de la voie VI pour la mesure latérale sur le NaI (en rouge), la mesure latérale sur le LaBr3 (en bleu) et la mesure frontale (en vert)

Spectres bidimensionnels

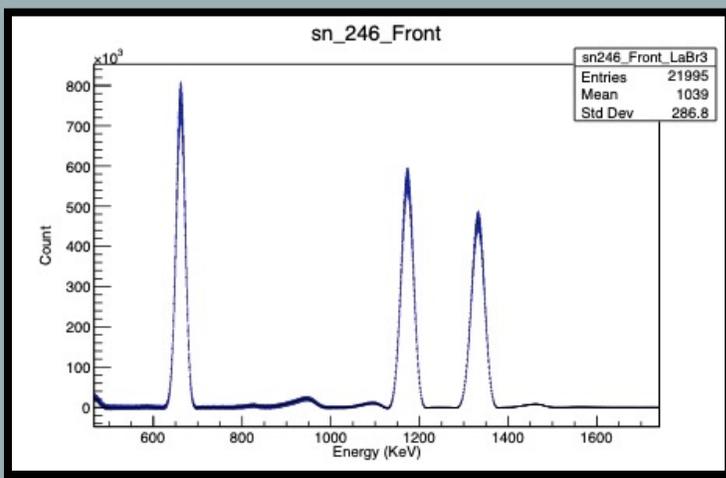
- Contour graphique autour d'une composante (ROOT)
- Projection sur l'axe associé (ROOT)



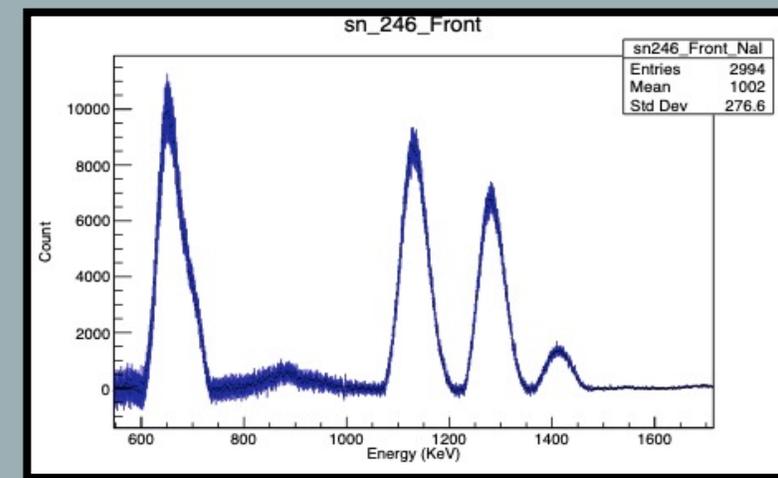
Spectre bidimensionnel du détecteur sn246 en mesure frontale

Spectres bidimensionnels

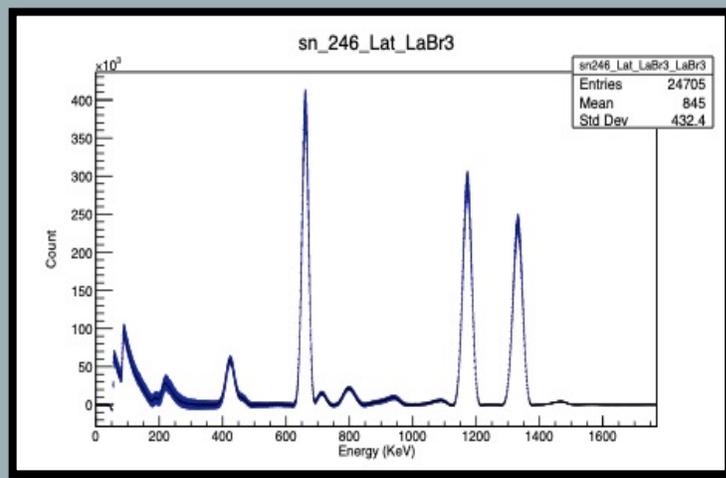
Spectre mesure frontale LaBr3



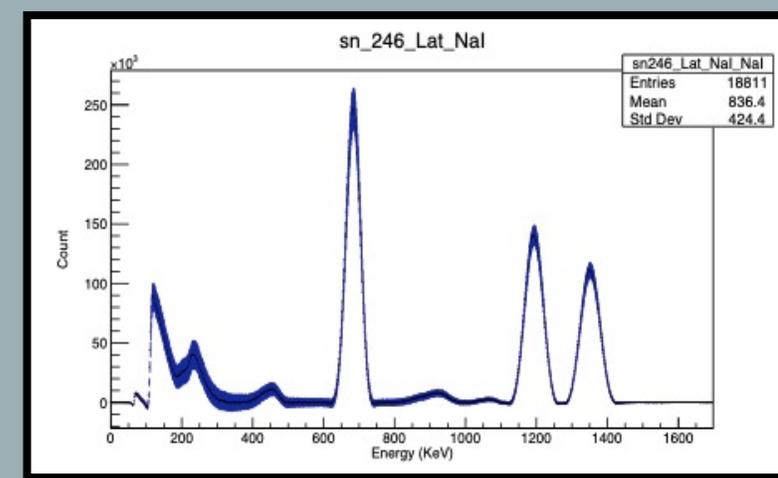
Spectre mesure frontale NaI



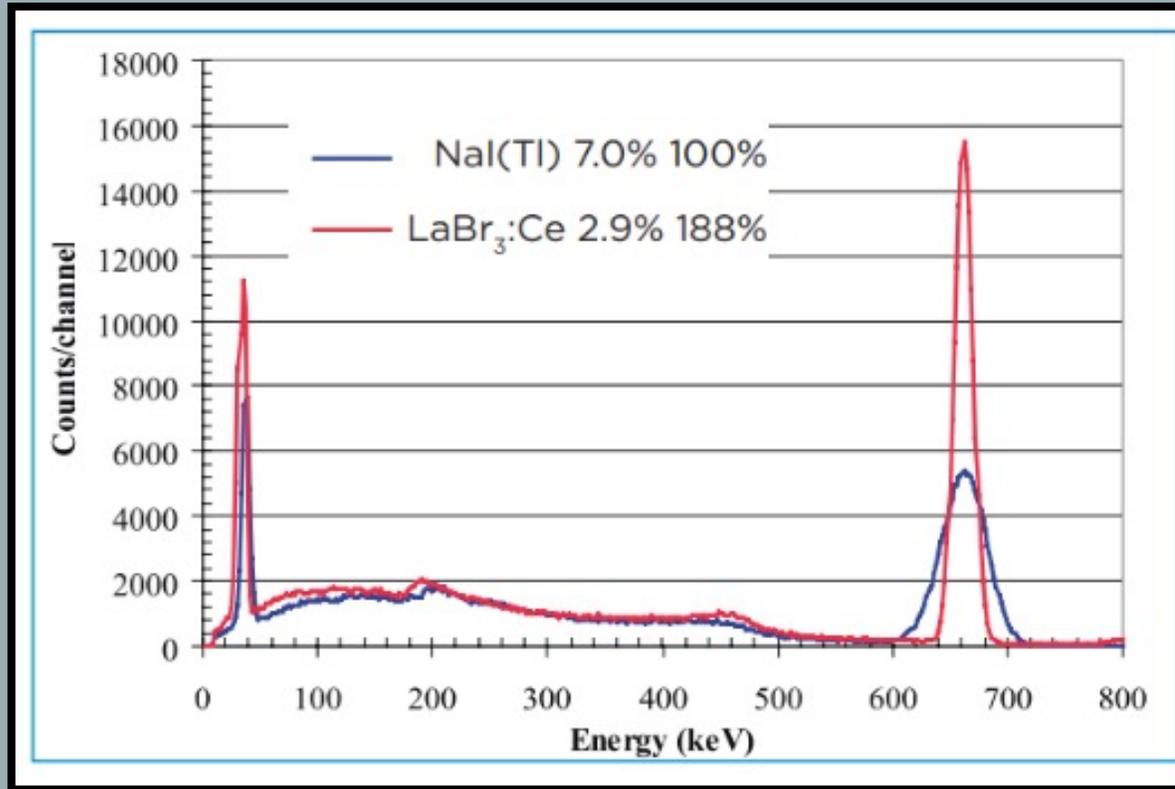
Spectre mesure Latérale LaBr3



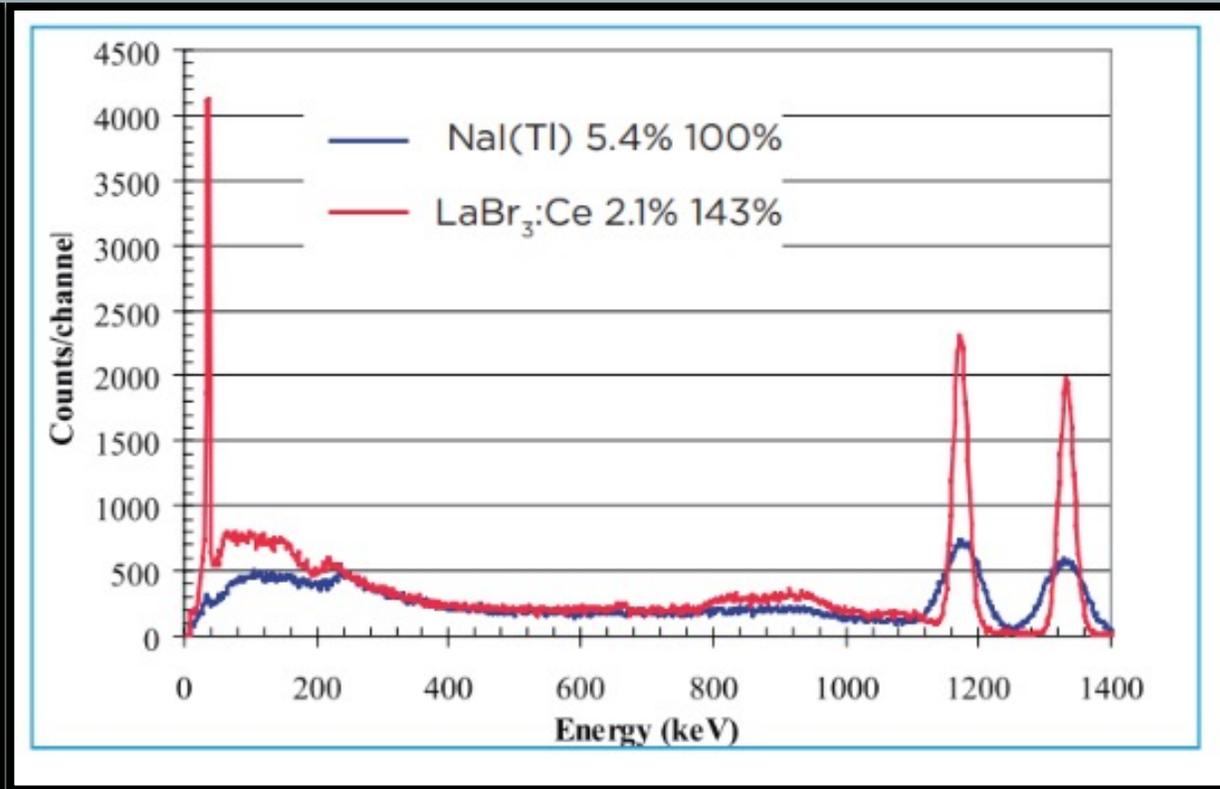
Spectre mesure Latérale NaI



Résolution en énergie



Données constructeur pour les résolutions en pics d'énergie des cristaux LaBr₃ (en rouge) et NaI (en bleu) pour la raie du Cs (@Saint-Gobain)



Données constructeur pour les résolutions en pics d'énergie des cristaux LaBr₃ (en rouge) et NaI (en bleu) pour les raies du Co (@Saint-Gobain)

Résolution en énergie pour les mesures frontales

- Bidimensionnels : résolution plus élevées mais discrimination LaBr3/NaI
- Monodimensionnels : meilleures résolutions mais pas de discrimination LaBr3/NaI

Spectre bidimensionnel			
Energie du pic	661.660 keV	1173.237 keV	1332.501 keV
sn246 NaI	10.0239 %	5.1%	4.2%
sn246 LaBr3	3.683%	2.574%	2.42%
sn247 NaI	9.255%	5.971%	4.168%
sn247 LaBr3	3.578%	2.599%	2.443%
Spectre monodimensionnel			
Energie du pic	661.660 keV	1173.237 keV	1332.501 keV
sn246 V1	2.376%	1.659%	1.533%
sn246 V3	2.3%	1.613%	1.492%
sn247 V1	2.369%	1.67%	1.549%
sn247 V3	2.293%	1.611%	1.493%

Résolutions en énergie des 2 phoswich sn246 et sn247 en mesure frontale obtenues via les spectres bidimensionnels et monodimensionnels

Résolution en énergie pour le LaBr3 en mesure latérale

- Peu de différences entre les 2 détecteurs
- Monodimensionnels : meilleures résolutions

		Spectre bidimensionnel	
Energie du pic	661.660 keV	1173.237 keV	1332.501 keV
sn246 LaBr3	3.619%	2.64%	2.479
sn247 LaBr3	3.573%	2.592%	2.428%
		Spectre monodimensionnel	
Energie du pic	661.660 keV	1173.237 keV	1332.501 keV
sn246 V1	2.418%	1.679%	1.551%
sn246 V3	2.327%	1.613%	1.492%
sn247 V1	2.393%	1.707%	1.568%
sn247 V3	2.322%	1.632%	1.522%

Résolutions en énergie des 2 phoswich sn246 et sn247 en mesure latérale obtenues via les spectres bidimensionnels et monodimensionnels pour le cristal LaBr3

Résolution en énergie pour le NaI en mesure latérale

- Bidimensionnels : résolutions attendues pour sn246, écartées pour sn247
- Monodimensionnels : résolutions trop élevées
- Pollution trop élevée du LaBr3

		Spectre bidimensionnel	
Energie du pic	661.660 keV	1173.237 keV	1332.501 keV
sn246 NaI	6.555%	4.537%	4.232%
sn247 NaI	3.888%	2.812%	2.62%
		Spectre monodimensionnel	
Energie du pic	661.660 keV	1173.237 keV	1332.501 keV
sn246 V1	14.345%	7.984%	7.078%
sn246 V3	11.726%	7.436%	6.645%
sn247 V1	12.763%	8.425%	7.282%
sn247 V3	11.273%	7.163%	6.448%

Résolutions en énergie des 2 phoswich sn246 et sn247 en mesure latérale obtenues via les spectres bidimensionnels et monodimensionnels pour le cristal NaI

Conclusion

- Les spectres bidimensionnels permettent une discrimination des 2 composantes, on va donc les favoriser pour la caractérisation des cristaux. Les résolutions peuvent être améliorées en réalisant la projection avec un angle plutôt qu'un contour graphique
- Pour travailler avec le phoswich on préférera les spectres monodimensionnels
- Trop peu de mesures actuellement pour caractériser correctement le détecteur

Conclusion

- ROOT/C++
- Compréhension des mécanismes au cœur de la réaction de fission
- Mise en parallèle avec l'expérience en vue d'une future expérience

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Vincent Trayter
Stage M2-PSA
23 Juin 2021

Sous la direction d'Olivier Dorvaux et de Christelle Schmitt