

# Nouvelle méthode d'analyse globale de spectres pour la mesure aéroportée en temps-réel

Congrès National de la SFRP – 17/06/2025

Charles-Philippe Mano<sup>1</sup>, Hugues Paradis<sup>1</sup>, Luc Patryl<sup>1</sup>, Frédérick Carrel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA/DAM/DIF

<sup>2</sup> CEA/DRT/LIST/DIN/SIMRI

Auteur correspondant : [hugues.paradis@cea.fr](mailto:hugues.paradis@cea.fr)

# Sommaire

- 1. Contexte de la thèse**
- 2. Spectrométrie gamma et démixteur**
- 3. Sensibilité du démixteur**
- 4. Application à la mesure aéroportée**
- 5. Variation des signatures spectrales**
- 6. Conclusion & Perspectives**

# La mesure embarquée pour les missions du laboratoire

## Missions du laboratoire

Surveillance du territoire français

Cartographies radiologiques

Sécurisation d'évènements

Intervention en cas d'accident nucléaire

Assistance internationale (AIEA)

## Systèmes de mesure embarqués

AUTONUC

HELINUC

## Technique de mesure

Interaction rayonnements-matière, Spectrométrie  $\gamma$



Deux détecteurs embarqués sur le système HELINUC.



Un détecteur embarqué sur le système AUTONUC.

# Les systèmes de mesure embarqués

## Système HELINUC

- ❑ Altitude de vol : 40 mètres
- ❑ Vitesse de vol : 70 km/h
- ❑ Déport entre les lignes : 80 m à 150 m
- ❑ Surface couverte : 5 à 10 km<sup>2</sup> par heure de vol

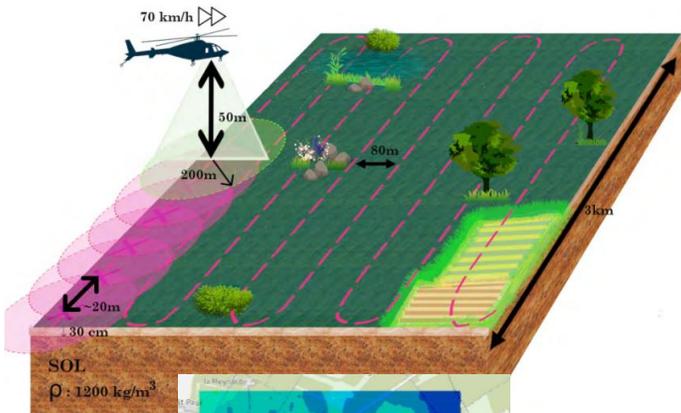
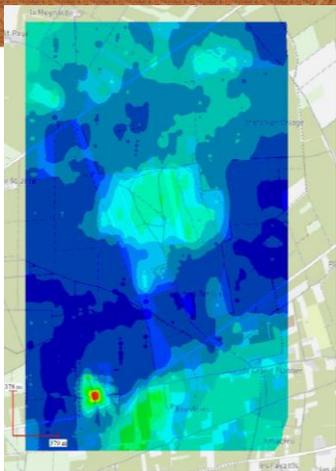


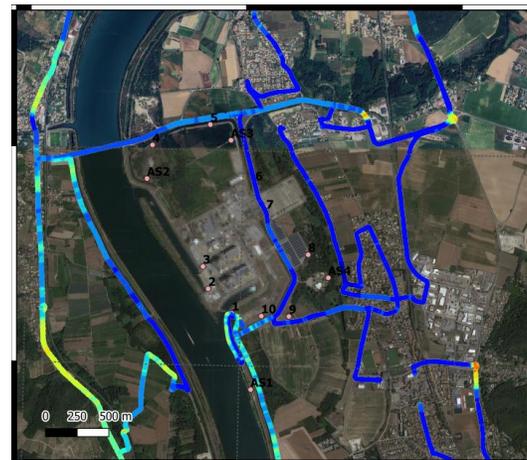
Schéma explicatif d'une mesure de spectrométrie  $\gamma$  aéroportée [1].



Exemple d'une cartographie radiologique avec le système HELINUC.

## Système AUTONUC

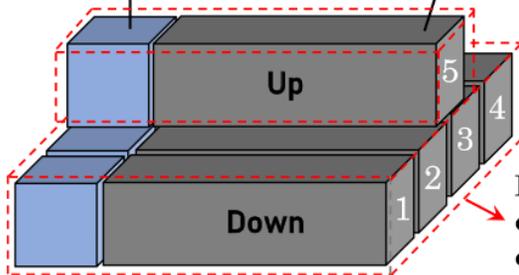
- ❑ Cartographies radiologiques
- ❑ Outil de R&D pour la mesure embarquée



Exemple d'une cartographie radiologique avec le système AUTONUC.

Tube photo-multiplicateur et spectromètre

Cristaux de NaI(Tl) (4 L)



Enveloppe en fibre de carbone

Détecteur embarqué RSX5 utilisé sur les systèmes AUTONUC et HELINUC [1].

[1] Julien Amestoy, 2021, Manuscript de thèse.

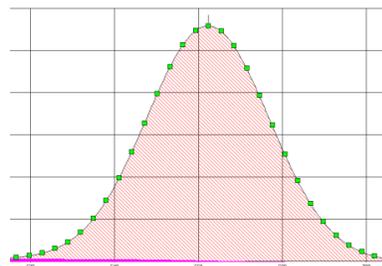
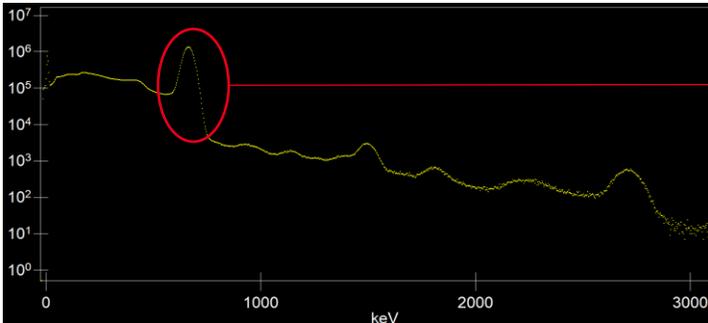


# 2. Spectrométrie $\gamma$ et démélangeur

# Méthodes d'analyse de spectres $\gamma$

## Régions d'Intérêts (ROI)

Les pics apparaissant dans le spectre sont déconvolués



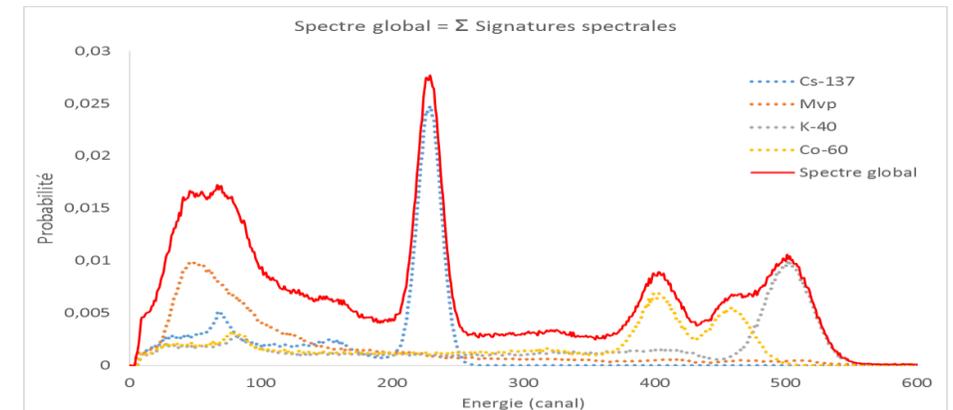
Région d'intérêt encadrant un pic

**Centroïde (énergie) du pic  $\Leftrightarrow$  identification**

**Surface du pic  $\Leftrightarrow$  quantification**

## Démélangeur spectral

Le spectre est décomposé en signatures individuelles



$$S = \sum_{\text{tous les radionucléides } i} a_i \Phi_i$$

S : Spectre global  
 $\sum$  : tous les radionucléides  $i$   
 $a_i$  : Proportion des radionucléides dans l'échantillon mesuré  
 $\Phi_i$  : Signature du radionucléide  $i$ .e. spectre correspondant au radionucléide seul

### ROI

- × Une partie de l'information du spectre
- × Approximation gaussienne
- × Expert

✓ Pas de bibliothèque de spectres de référence

### Démélangeur spectral

- ✓ Toute l'information du spectre
- ✓ Statistique de Poisson
- ✓ Analyse automatique

× Bibliothèque de spectres de référence

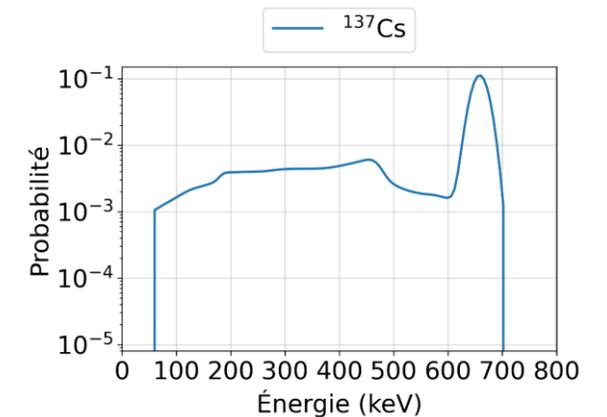
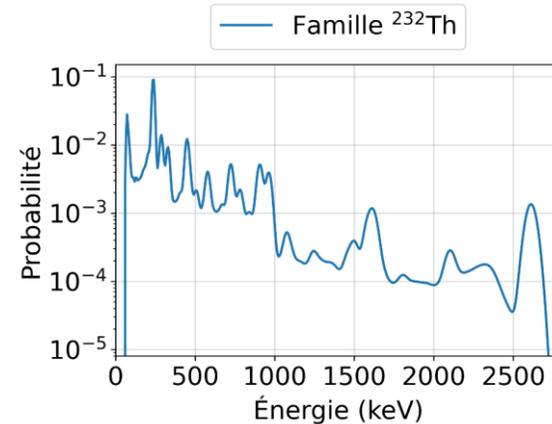
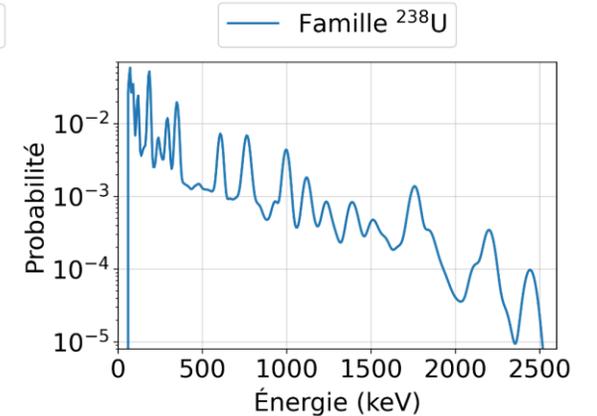
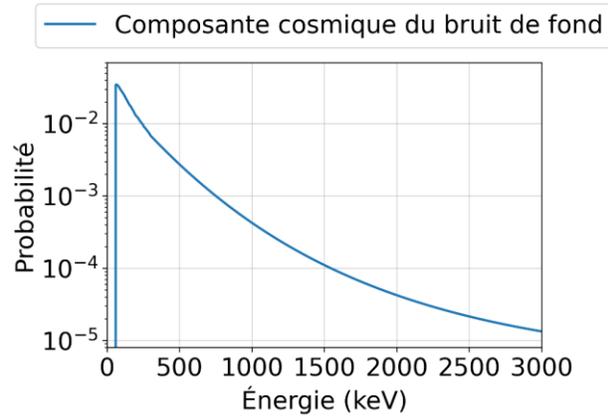
# La bibliothèque de radionucléides du démélangeur

Bibliothèque simulée par simulation Monte-Carlo (MCNP) :

- Pour les radionucléides naturels : source volumique dans 10 cm de sol,
- Pour les radionucléides artificiels : source ponctuelle.

Bibliothèque (24 radionucléides)				
Radionucléides naturels	Radionucléides artificiels d'intérêts		Radionucléides artificiels médicaux	
Bruit de fond cosmique	$^{60}\text{Co}$	$^{233}\text{U}$	$^{51}\text{Cr}$	$^{133}\text{Xe}$
Famille $^{238}\text{U}$	$^{133}\text{Ba}$	$^{237}\text{Np}$	$^{57}\text{Co}$	$^{192}\text{Ir}$
Famille $^{235}\text{U}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{241}\text{Am}$	$^{67}\text{Ga}$	
Famille $^{232}\text{Th}$	$^{137}\text{Cs}$		$^{99}\text{Mo}$	
$^{40}\text{K}$	$^{154}\text{Eu}$		$^{99\text{m}}\text{Tc}$	
	$^{201}\text{Tl}$		$^{111}\text{In}$	
	$^{232}\text{Th}$		$^{131}\text{I}$	

Bibliothèque de spectres de référence utilisée.



Exemple de spectres de référence inclus dans la bibliothèque.



# **3** ■ **Sensibilité du démélangeur**

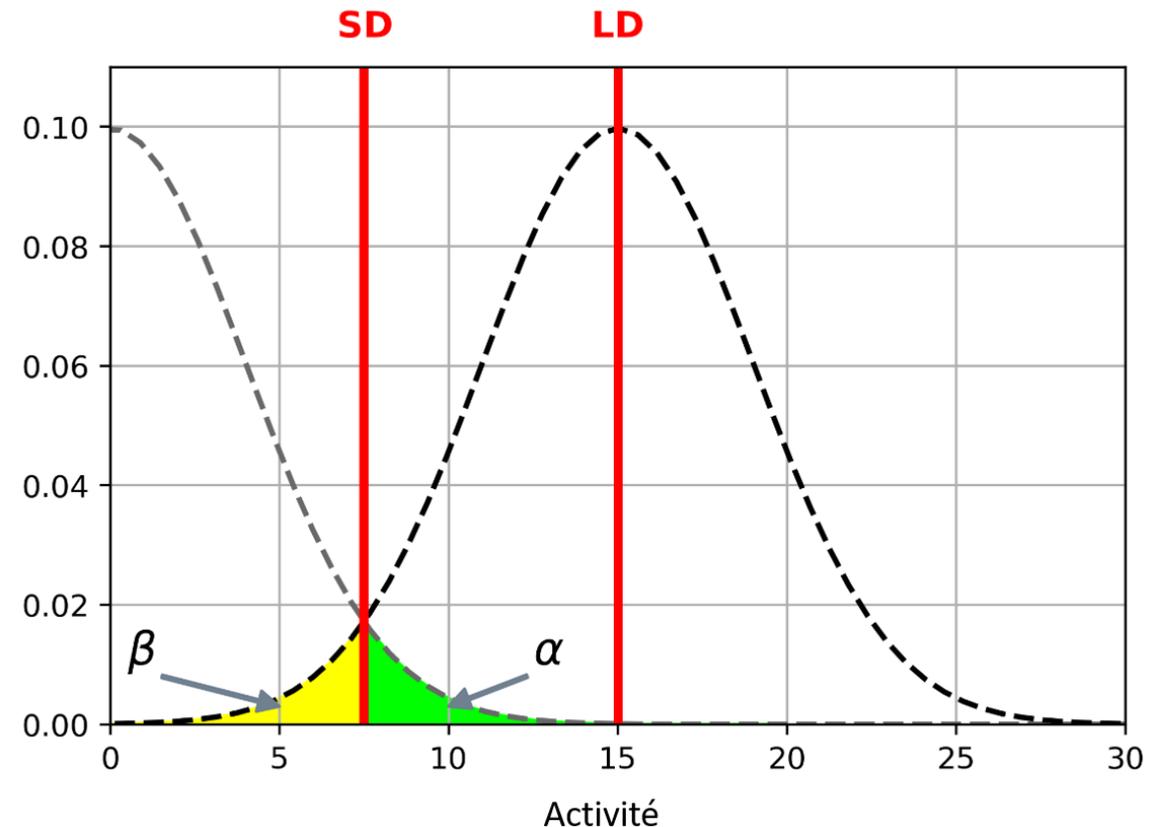
# Quantifier la sensibilité d'une méthode d'analyse

Sensibilité  $\Leftrightarrow$  capacité à détecter une source radioactive de faible activité

La sensibilité est quantifiée avec deux grandeurs :

- **Le seuil de décision (SD)** : seuil à partir duquel une fluctuation statistique est considérée comme significative.
- **La limite de détection (LD)** : activité maximale qui pourrait être présente dans l'échantillon si l'activité trouvée est inférieure au SD.

Dans le cadre des missions HELINUC, le seuil de décision est la grandeur d'intérêt.



Exemple de la détermination du SD et du LD dans le cas d'une distribution gaussienne.

# Calcul des seuils de décision

## Régions d'Intérêts (ROI)

Calcul des seuils de décision à partir d'un spectre expérimental.

Formules de Curie & ISO 11929 :

$$SD = k_{1-\alpha} \sqrt{2 * b_{ROI}}$$

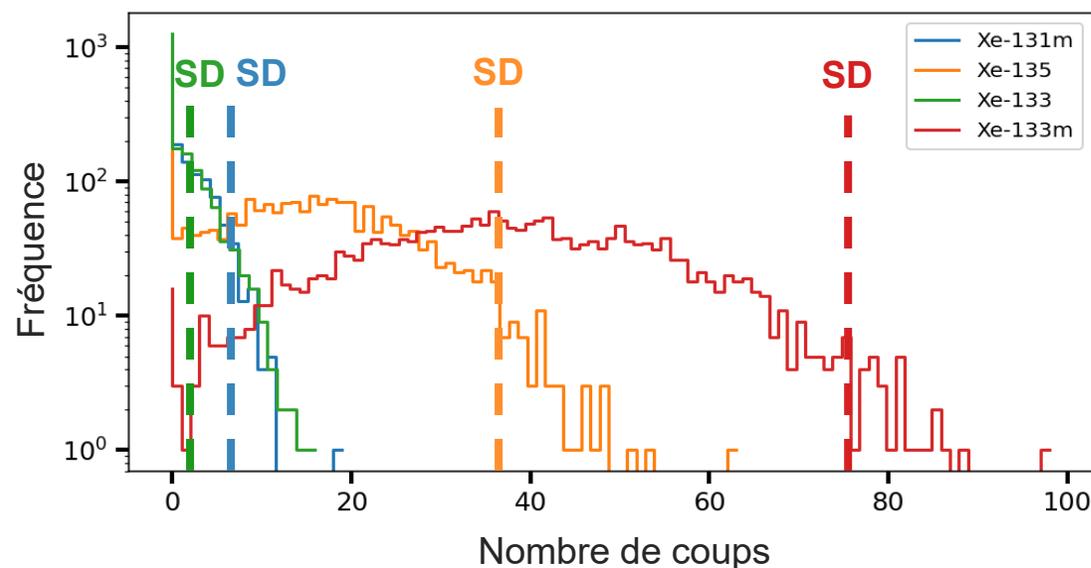
Facteur associé au taux de faux positif  $\alpha$

Bruit de fond estimé dans la ROI considérée

## Démélangeur spectral

- Analyse d'un nombre  $N$  de spectres de bruit de fond ;
- Recherche du nombre de coup associé au taux de faux positif désiré.

→ Seuils de décision *a priori*



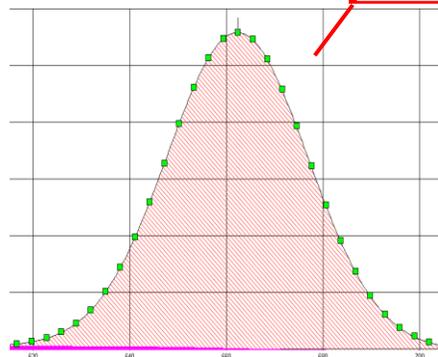
Exemple d'une distribution de résultats des démélanges de spectre de bruit de fond pour déterminer les SD.

# Test de la sensibilité pour une source immobile

Expérience en extérieur (environnement non contrôlé) :

- Système AUTONUC ;
- Source ponctuelle de  $^{137}\text{Cs}$  faiblement active (  $\sim 30 \text{ kBq}$  ) ;
- Différentes distances source-détecteur ;
- Comparaison avec différents algorithmes.

	Genie2000®	DETEC [2]	Démélangeur
Type d'analyse	ROI (IPF)	ROI	Spectre global
Contexte d'utilisation	Expertise, post-traitement	Temps-réel sur HELINUC	R&D



Exemple d'un traitement avec l'outil IPF de Genie2000®.

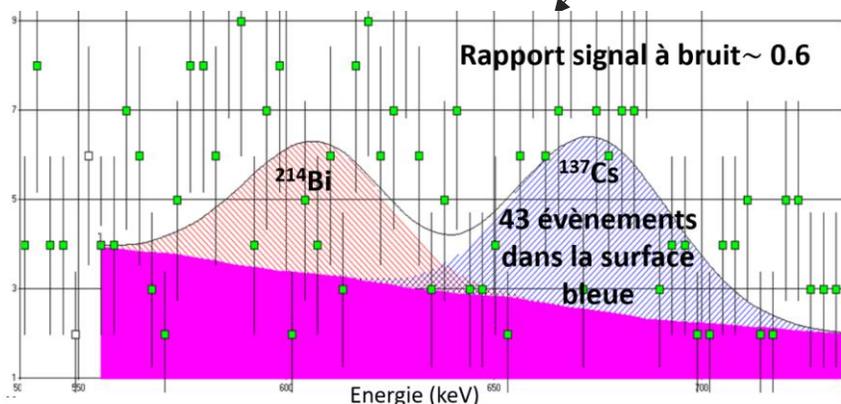
→ Permet l'ajustement de paramètres (résolution, pour repérer des pics même très peu visibles).

**IPF + expert ⇔ meilleurs résultats possibles par ROI**

# Résultats de sensibilité pour une source immobile

- ❑ 3 distances testées
- ❑ 1 spectre par seconde
- ❑ ~ 60 spectres par distance
- ❑ Taux de faux positif fixé à 2,5 %

Nombre de détections de la source de $^{137}\text{Cs}$				
Radionuclide	Distance source-detector	Genie2000®	DETEC	Démélangeur
$^{137}\text{Cs}$	2 m	54/62	23/62	<b>62/62</b>
	3 m	35/63	12/63	<b>63/63</b>
	3.5 m	26/64	12/64	<b>60/64</b>



- ➔ Très faible rapport signal à bruit
- ➔ Genie2000® + IPF : comparaison la plus complète

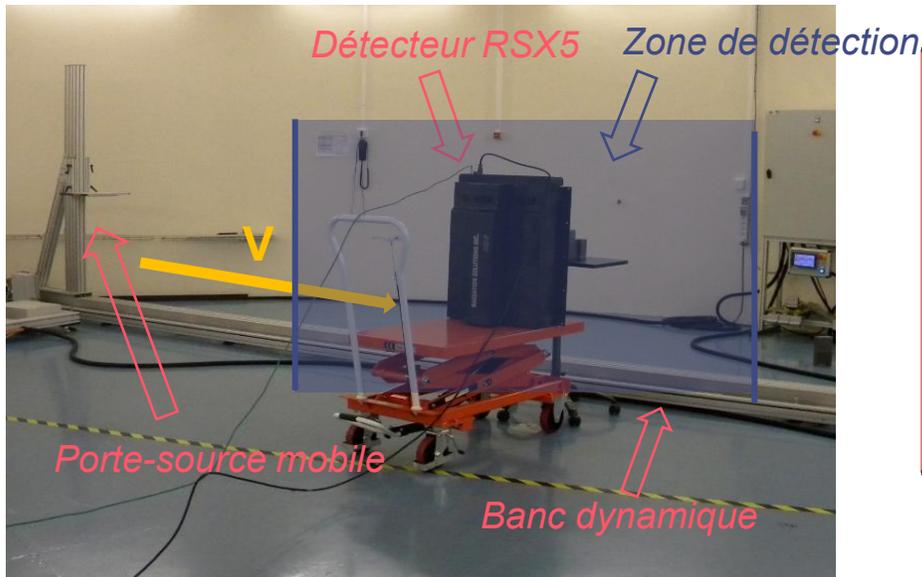
**Sensibilité<sub>Démélangeur</sub> > Sensibilité<sub>Genie2000®</sub> > Sensibilité<sub>DETEC</sub>**

Exemple d'un spectre pour la distance source-détecteur de 2m.

# Test de sensibilité sur des sources mobiles

Expérience en salle de métrologie (environnement contrôlé) :

- 4 sources radioactives se déplaçant à vitesse constante devant le détecteur RSX5 ;
- 3 vitesses constantes :  $7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- 10 passages par vitesse.



Dispositif expérimental

Nombre total de détections dans la zone bleue:	Radionucléide	DETEC	Démélangeur
nombre de détections nombre de spectres	$^{137}\text{Cs}$	80 %	100 %
	$^{60}\text{Co}$	44 %	100 %
	$^{133}\text{Ba}$	18 %	100 %
	$^{241}\text{Am}$	33 %	100 %

**Taux de détection Démélangeur > Taux de détection<sub>DETEC</sub>**



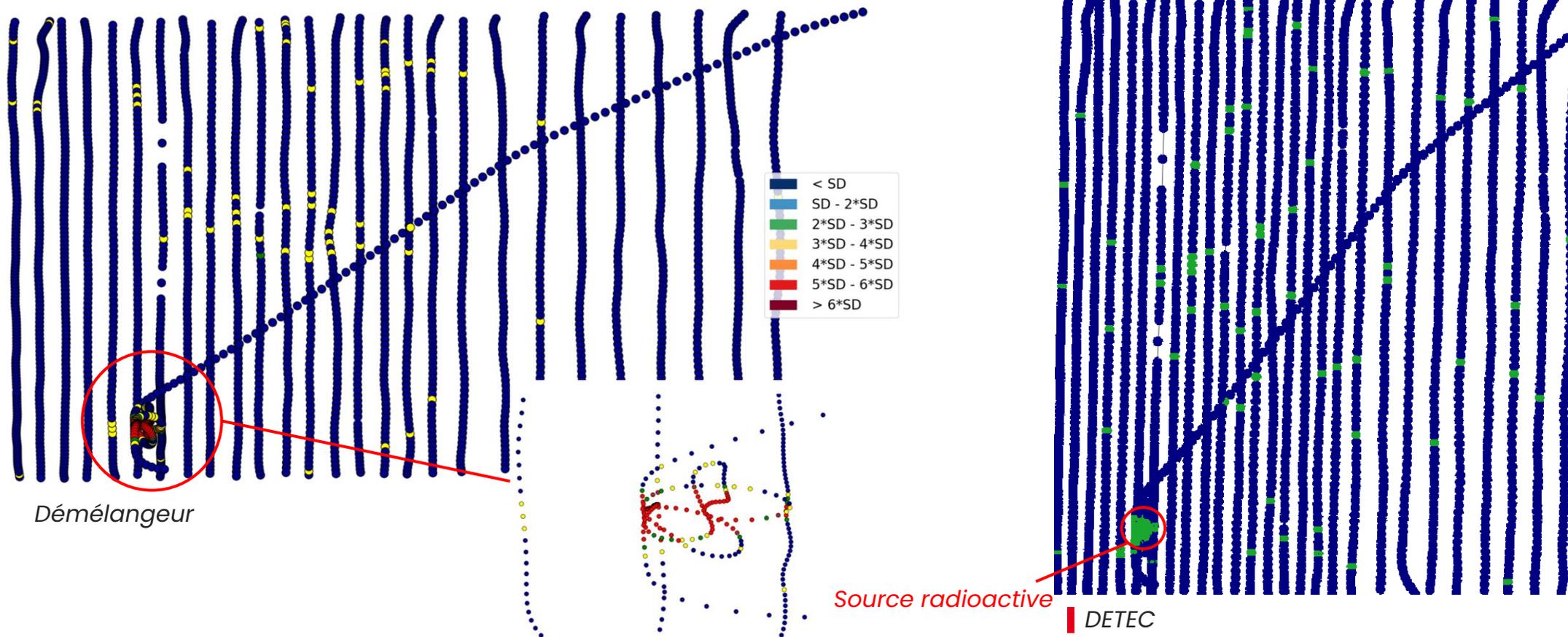
# **4. Application à la mesure aéroportée**

# Application à la mesure aéroportée

- Exercice international d'inter-comparaison (Allemagne, Italie, République Tchèque, France)
  - Deux sources radioactives de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$  cachées sur une zone à survoler
  - HELINUC : 1 spectre par seconde
  - ~ 50 minutes de vol
  
- Analyse : Démélangeur & DETEC
  - Taux de faux positifs fixé à 2,5 % pour le démélangeur



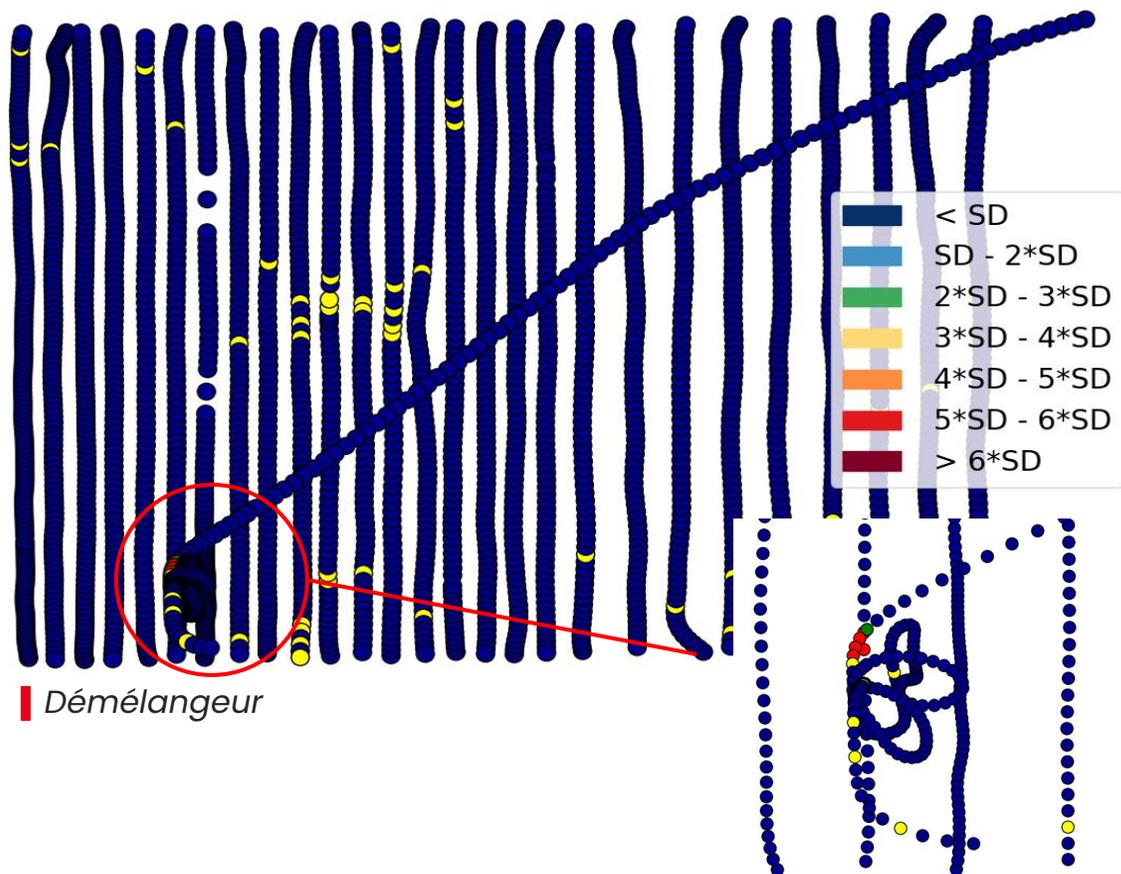
# Application à une source de $^{137}\text{Cs}$



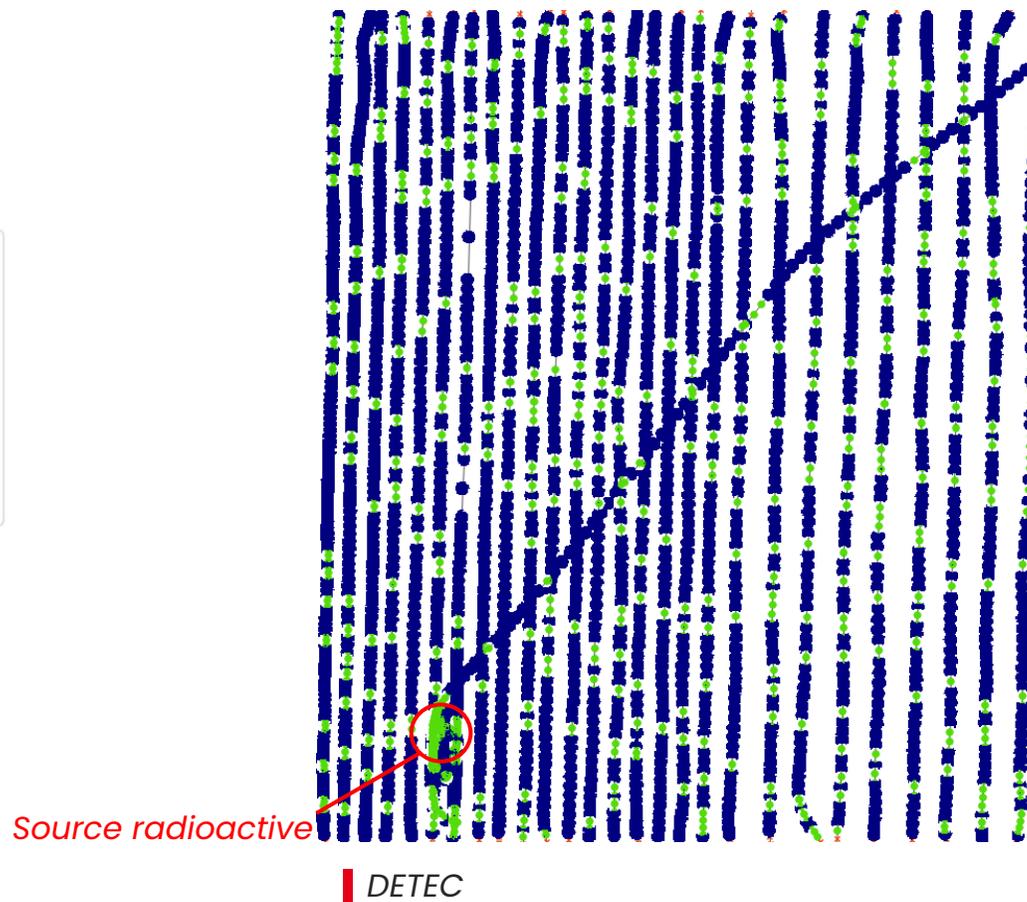
Taux de faux positifs<sub>Démélangeur</sub> (~2,5 %) = Taux de faux positifs<sub>DETEC</sub> (~2,5 %)

# Application à une source de $^{241}\text{Am}$

Source de  $^{241}\text{Am}$



Démélangeur



Source radioactive

DETEC

Taux de faux positifs<sub>Démélangeur</sub> (~2,5 %) < Taux de faux positifs<sub>DETEC</sub> (~16 %)



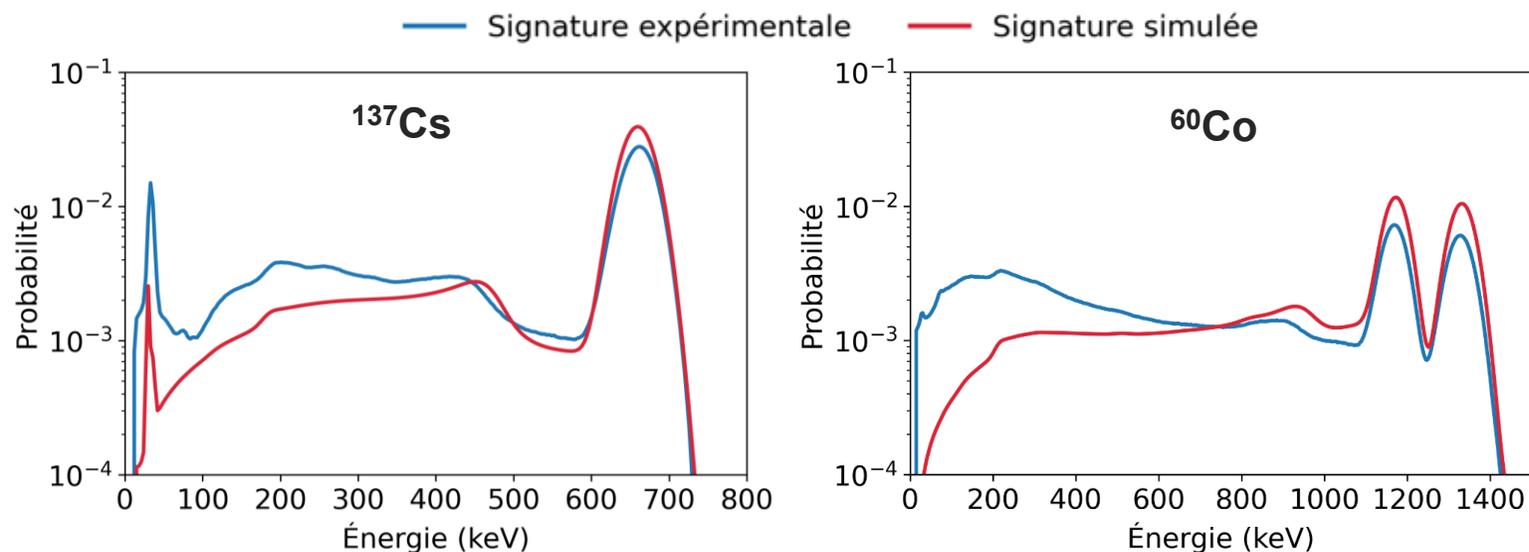
# **5. Variabilité des signatures spectrales**

# Problématique liée à la variabilité des spectres de référence

Problème : les signatures simulées diffèrent beaucoup des signatures réelles :

- Bibliothèque en sources ponctuelles ;
- Multi paramètres influent sur les spectres de référence : altitude, hygrométrie...

Différences déjà visibles en salle de métrologie :



■ Comparaison des signatures expérimentales et simulées pour le  $^{137}\text{Cs}$  (à gauche) et le  $^{60}\text{Co}$  (à droite).

Nécessite une approche pour faire varier les signatures spectrales, qui doit être tractable en conditions opérationnelles.

# Prendre en compte la physique à l'œuvre

La solution doit prendre en compte la physique à l'œuvre :

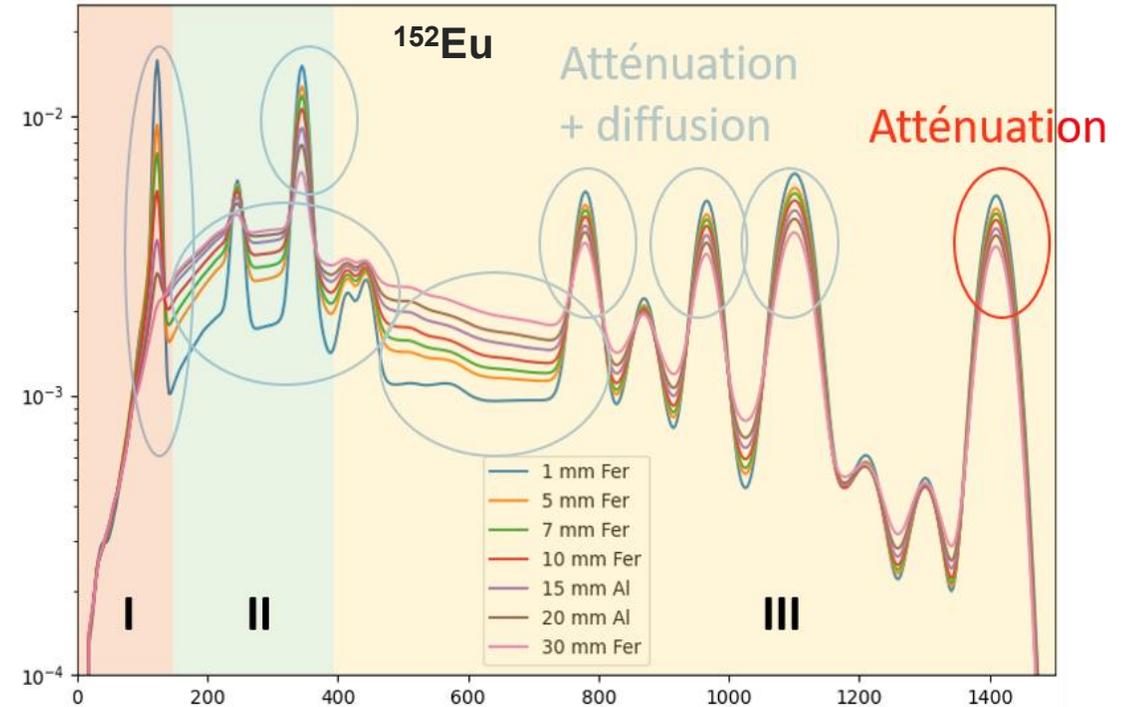
- Atténuation des photons ;
- Diffusion des photons.

Création d'une nouvelle bibliothèque  $\phi^{\text{new}}$  à partir de  $\phi$

$$\phi^{\text{new}} = \phi * f_{\text{atténuation}} + g_{\text{diffusion}}$$

$$f_{\text{atténuation}} = e^{-\theta_{eq}E}$$

$$g_{\text{diffusion}} = \begin{cases} \alpha_1 E + \beta_1 & \text{(I)} \\ \alpha_2 E^2 + \beta_2 E + \gamma_2 & \text{(II)} \\ \alpha_3 E + \beta_3 & \text{(III)} \end{cases}$$



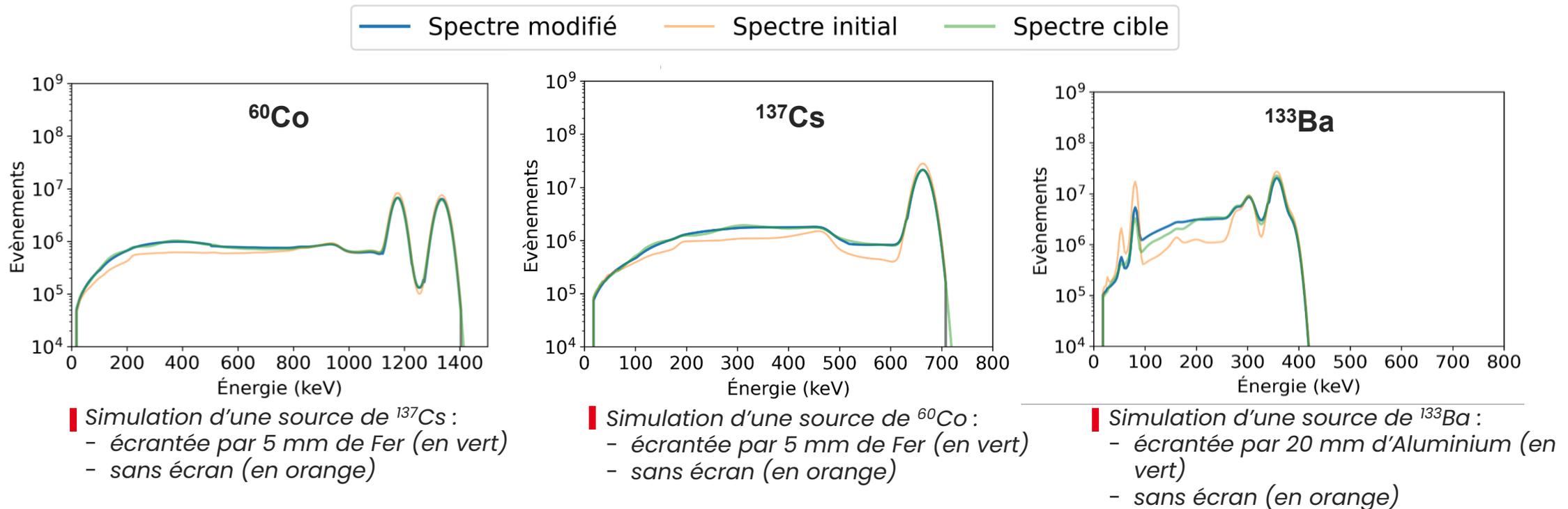
Simulation MCNP d'une source de ponctuelle de  $^{152}\text{Eu}$  écrantée par différents matériaux de différentes épaisseurs.

Les coefficients  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \alpha_3, \beta_3$  sont déterminés en amont par simulation Monte-Carlo.

# Validation de la variabilité sur données simulées

Validation sur simulations :

- Différents radionucléides (différentes énergies) ;
- Différents écrans.



**Très bonne reconstruction des signatures spectrales cibles**



# **6 ■ Conclusion & perspectives**

# Conclusion

- Meilleure sensibilité pour le démélangeur
  - Pour une source immobile à très faible rapport signal/bruit
  - Pour des sources mobiles
    - Très fort gain pour les sources multi-pics
- Bonne qualité de détection pour la mesure aéroportée
  - Taux de faux positif constant pour l' $^{241}\text{Am}$  contrairement à DETEC

Nombre de détection de la source de $^{137}\text{Cs}$				
Radionuclide	Distance source-detector	Genie2000®	DETEC	Démélangeur
$^{137}\text{Cs}$	2 m	54/62	23/62	<b>62/62</b>
	3 m	35/63	12/63	<b>63/63</b>
	3.5 m	26/64	12/64	<b>60/63</b>

Nombre total de détections dans la zone bleue: <u>nombre de détections</u> <u>nombre de spectres</u>	Radionuclide	DETEC	Démélangeur
	$^{137}\text{Cs}$	80 %	<b>100 %</b>
	$^{60}\text{Co}$	44 %	<b>100 %</b>
	$^{133}\text{Ba}$	18 %	<b>100 %</b>
	$^{241}\text{Am}$	33 %	<b>100 %</b>

# Perspectives

- Validation en cours de la variabilité sur des données expérimentales ;
- Possibilité d'implémenter la méthode en temps réel sur HELINUC et AUTONUC ;
- Publication d'un article prochainement dans le proceeding de la conférence ICRM 2025.
- Application du démélangeur au Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE)  
→ poster de K. Castillo

Nombre de détection de la source de $^{137}\text{Cs}$				
Radionuclide	Distance source-detector	Genie2000®	DETEC	Démélangeur
$^{137}\text{Cs}$	2 m	54/62	23/62	<b>62/62</b>
	3 m	35/63	12/63	<b>63/63</b>
	3.5 m	26/64	12/64	<b>60/63</b>

Nombre total de détections dans la zone bleue:  <u>nombre de détections</u> <u>nombre de spectres</u>	Radionuclide	DETEC	Démélangeur
	$^{137}\text{Cs}$	80 %	<b>100 %</b>
	$^{60}\text{Co}$	44 %	<b>100 %</b>
	$^{133}\text{Ba}$	18 %	<b>100 %</b>
	$^{241}\text{Am}$	33 %	<b>100 %</b>

# Perspectives

- Validation en cours de la variabilité sur des données expérimentales ;
- Possibilité d'implémenter la méthode en temps réel sur HELINUC et AUTONUC ;
- Publication d'un article prochainement dans le proceeding de la conférence ICRM 2025.
- Application du démélangeur au Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE)  
→ poster de K. Castillo

**Merci de votre attention**

Nombre de détection de la source de <sup>137</sup> Cs				
Radionuclide	Distance source-detector	Genie2000®	DETEC	Démélangeur
<sup>137</sup> Cs	2 m	54/62	23/62	<b>62/62</b>
	3 m	35/63	12/63	<b>63/63</b>
	3.5 m	26/64	12/64	<b>60/63</b>

Nombre total de détections dans la zone bleue:  <u>nombre de détections</u> <u>nombre de spectres</u>	Radionuclide	DETEC	Démélangeur
	<sup>137</sup> Cs	80 %	<b>100 %</b>
	<sup>60</sup> Co	44 %	<b>100 %</b>
	<sup>133</sup> Ba	18 %	<b>100 %</b>
	<sup>241</sup> Am	33 %	<b>100 %</b>