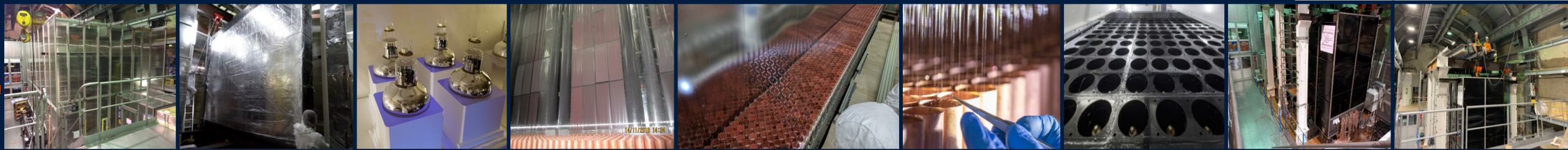


Stratégie anti-radon pour l'expérience SuperNEMO

15/05/2025

cnrs

Antoine Lahaie, pour la collaboration SuperNEMO



- Recherche de la désintégration $\beta\beta 0\nu$ et expérience SuperNEMO
- Le radon : un des bruits de fond majeur
- Stratégies pour réduire le niveau de radon
- Résultats préliminaires

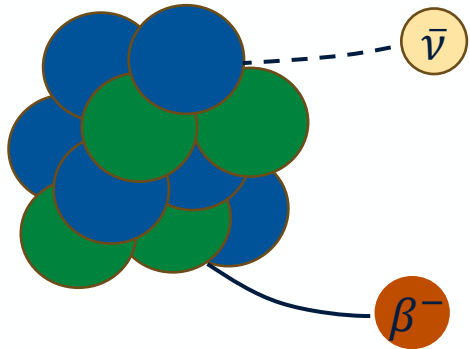
- Recherche de la désintégration $\beta\beta 0\nu$ et expérience SuperNEMO
- Le radon : un des bruits de fond majeur
- Stratégies pour réduire le niveau de radon
- Résultats préliminaires

La désintégration β^-

Désintégration β^-



● Neutron ● Proton



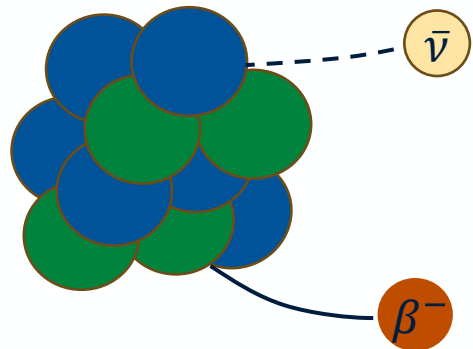
Neutron se transformant en Proton

La désintégration β^-

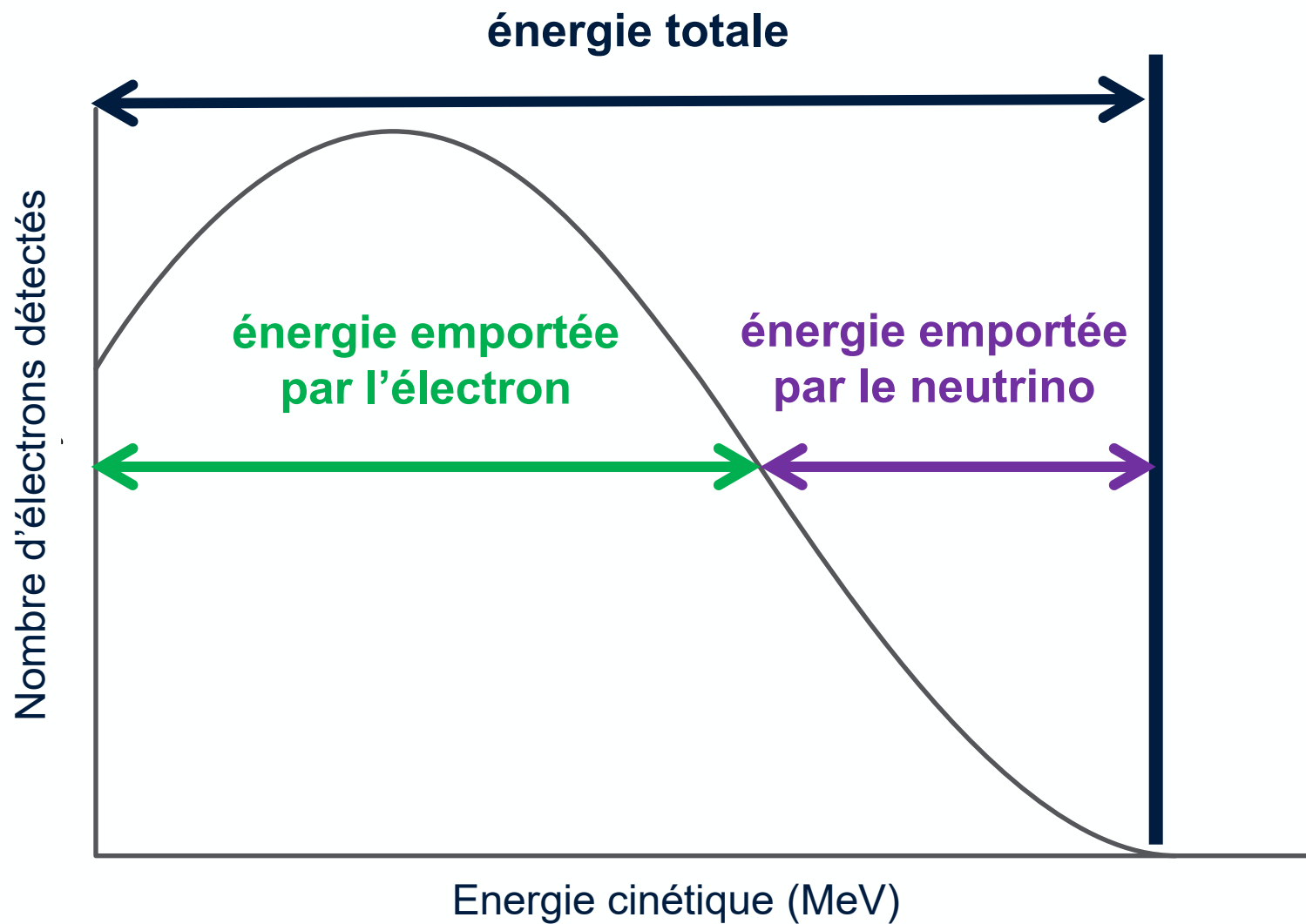
Désintégration β^-



● Neutron ● Proton



Neutron se transformant en Proton

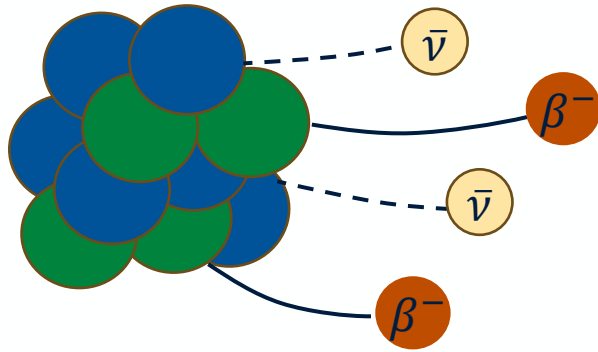


La désintégration $\beta\beta 2\nu$

Désintégration **double** β^- avec
émission de **2 neutrinos** :



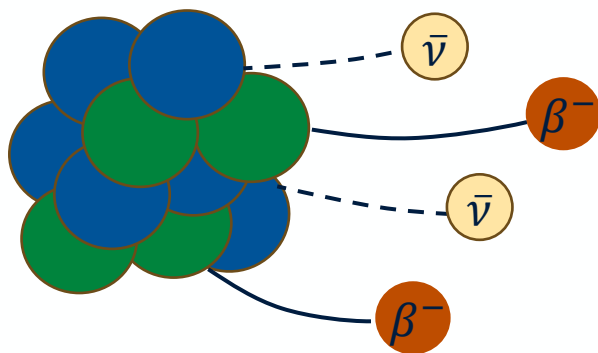
● Neutron ● Proton



La désintégration $\beta\beta 2\nu$

Désintégration **double** β^- avec
émission de **2 neutrinos** :

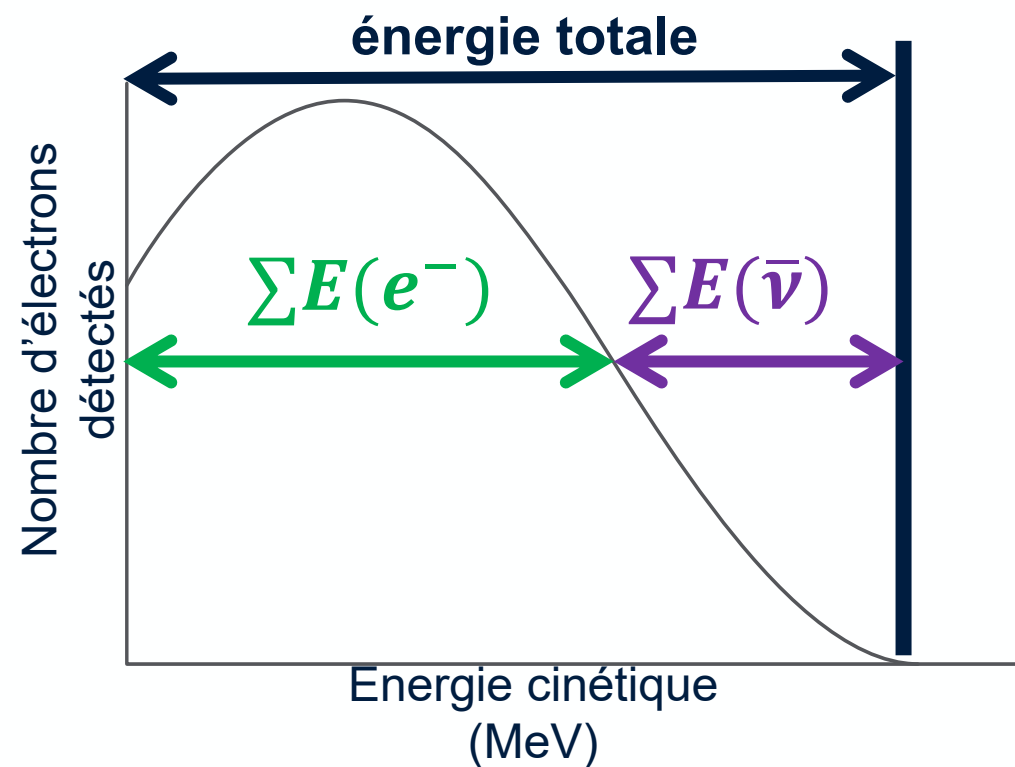
● Neutron ● Proton



Pour le ^{82}Se :

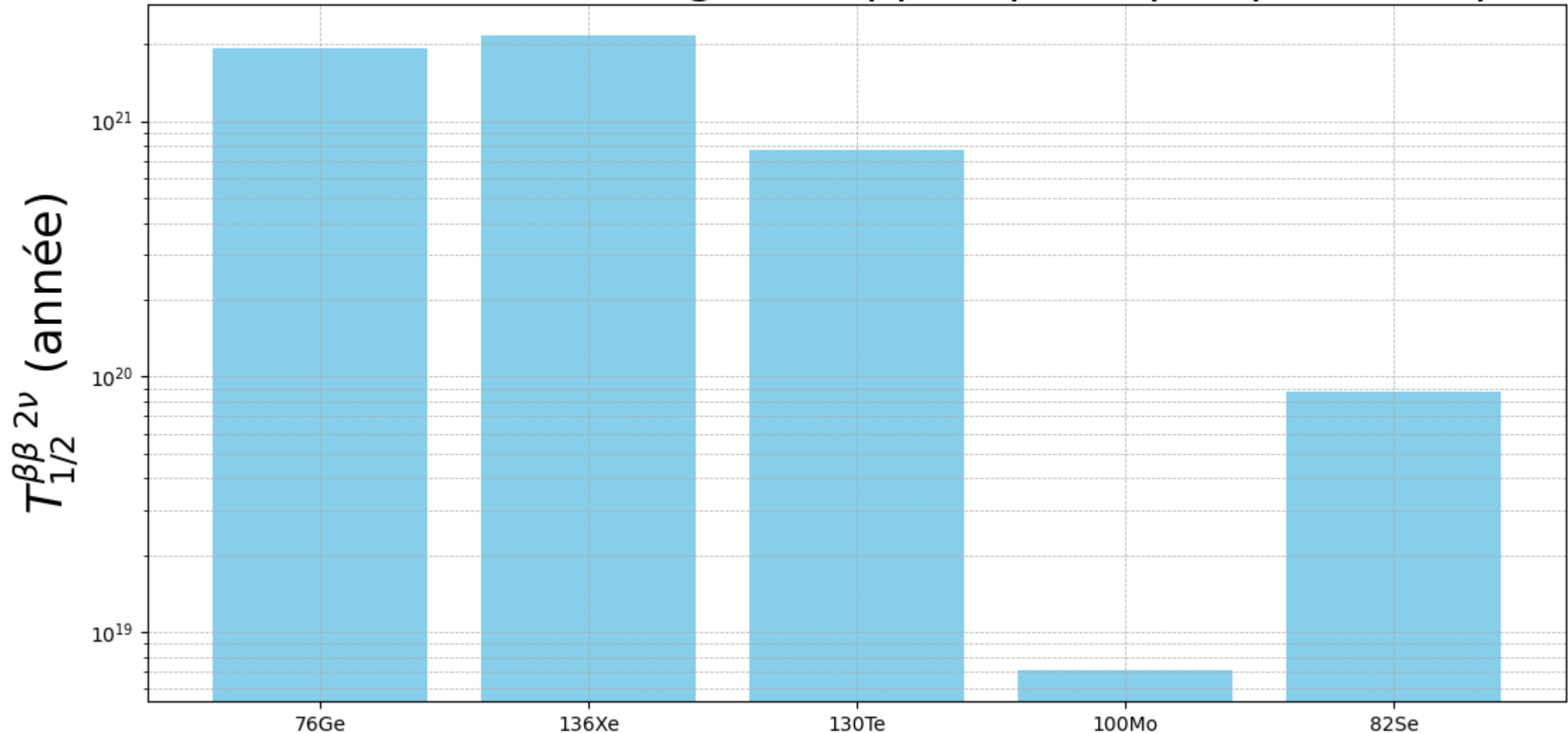
$$T_{1/2}^{2\nu} = 8,69 \pm 0,05(\text{stat})_{-0,06}^{+0,09}(\text{syst}) \times 10^{19} \text{ ans}^*$$

* CUPID-0, Phys. Rev. Lett. 131, (2023) 222501



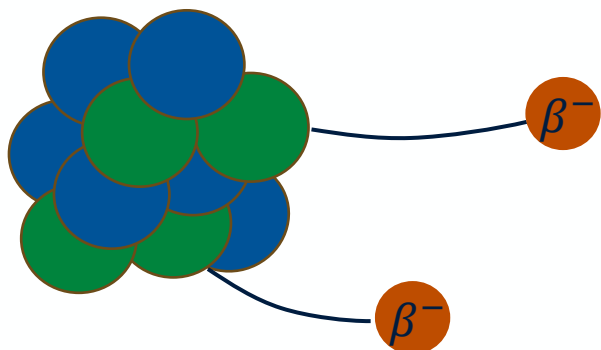
La désintégration $\beta\beta 2\nu$

Demi-vie de la désintégration $\beta\beta 2\nu$ pour quelques isotopes

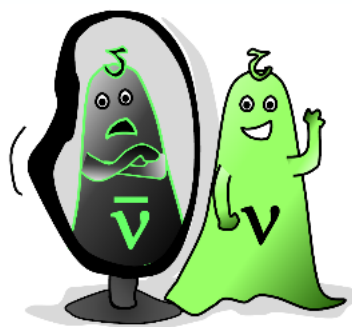


La désintégration $\beta\beta 0\nu$

● Neutron ● Proton

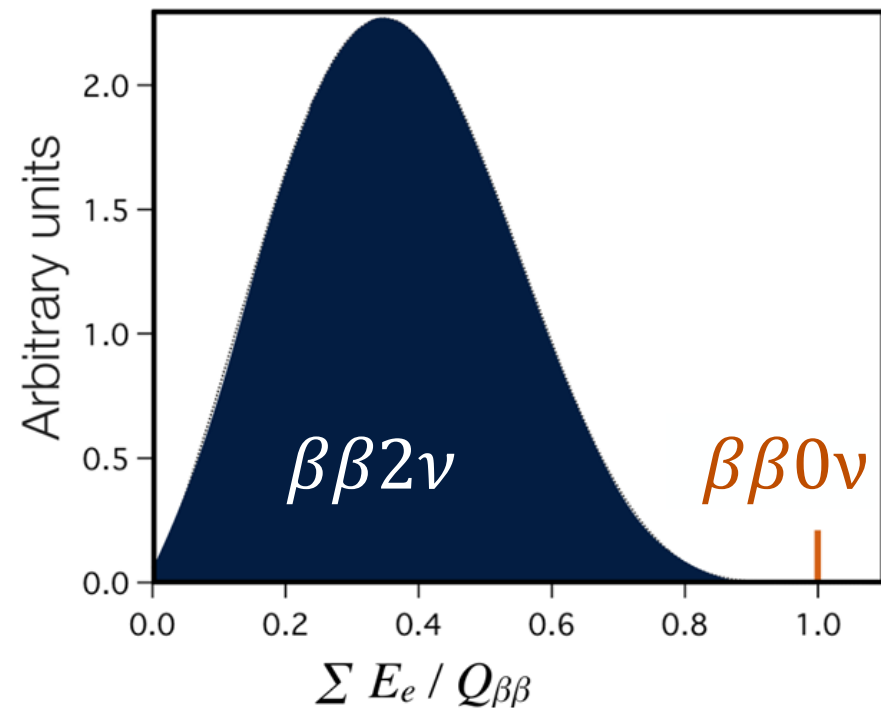


Décroissance $0\nu\beta\beta$ interdite par le Model Standard car non conservation du nombre Leptonique



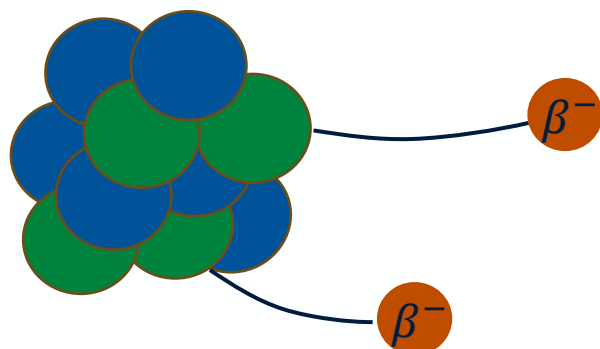
Matière Antimatière

$$\nu = ? \bar{\nu}$$



La désintégration $\beta\beta 0\nu$

● Neutron ● Proton

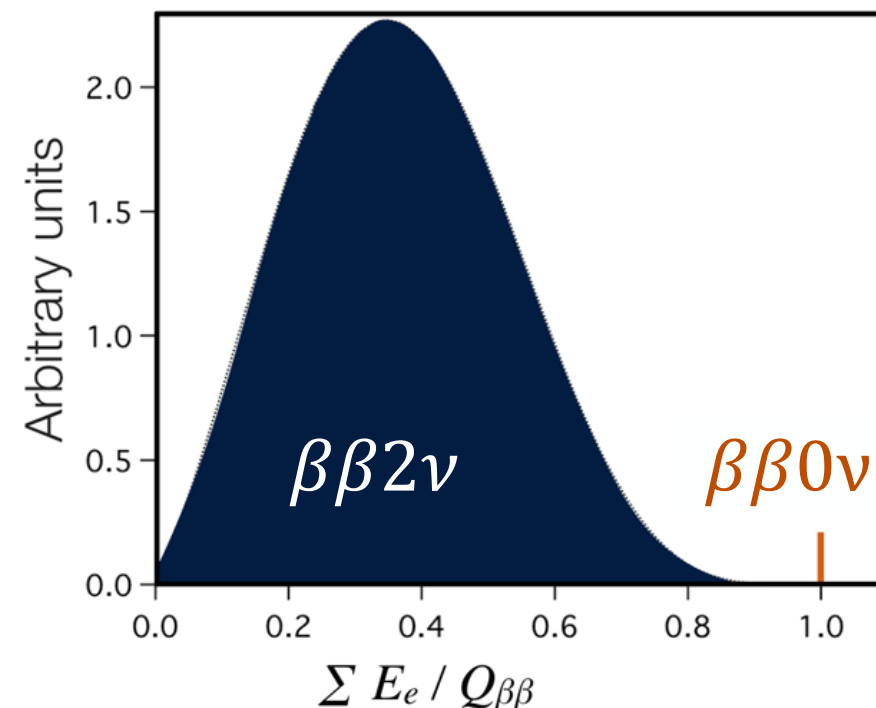


Décroissance $0\nu\beta\beta$ interdite par le Model Standard car non conservation du nombre Leptonique



Matière Antimatière

$$\nu = ? \bar{\nu}$$

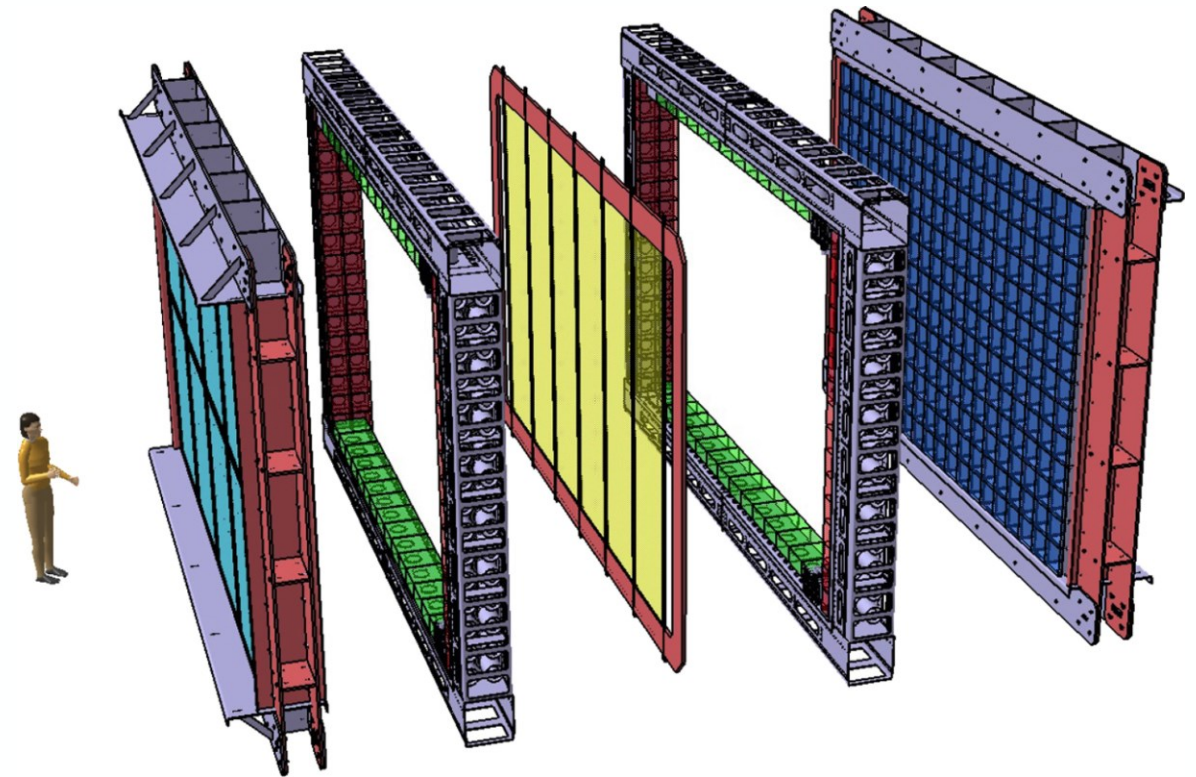
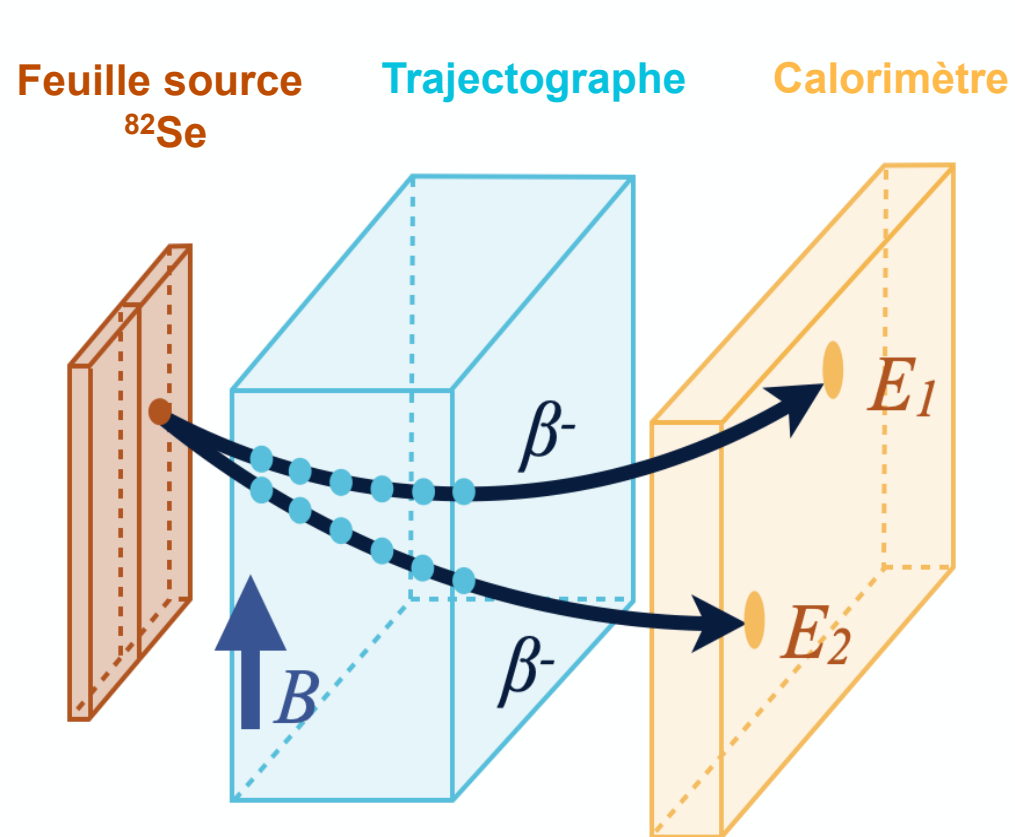


- Recherche de la $\beta\beta 0\nu$ pour les neutrinos de Majorana
- Recherche de 2 électrons avec $\Sigma E_{e^-} = Q_{\beta\beta}$
- $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{24}$ ans → Ultra bas bruit de fond requis !

L'expérience SuperNEMO et la $\beta\beta 0\nu$

Démonstrateur technologique pour la recherche de la $\beta\beta 0\nu$

Technologie trajecto-calorimétrique unique au monde



Feuille source ^{82}Se

Feuille source
 ^{82}Se

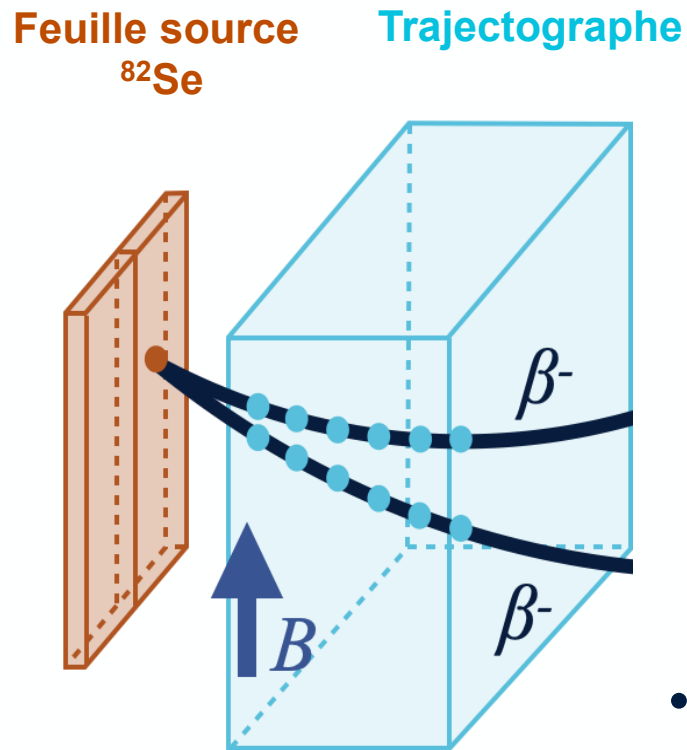


- 34 feuilles de ^{82}Se $\sim 300 \mu\text{m}$ d'épaisseur pour une masse totale de 6,11 kg
- Grande chaleur de réaction
 $Q_{\beta\beta} = 2.998 \text{ MeV}$
- $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = 8.69 \cdot 10^{19}$ années



Trajectographe

Détecteur de traces : permet de reconstruire la **trajectoire** des particules chargées



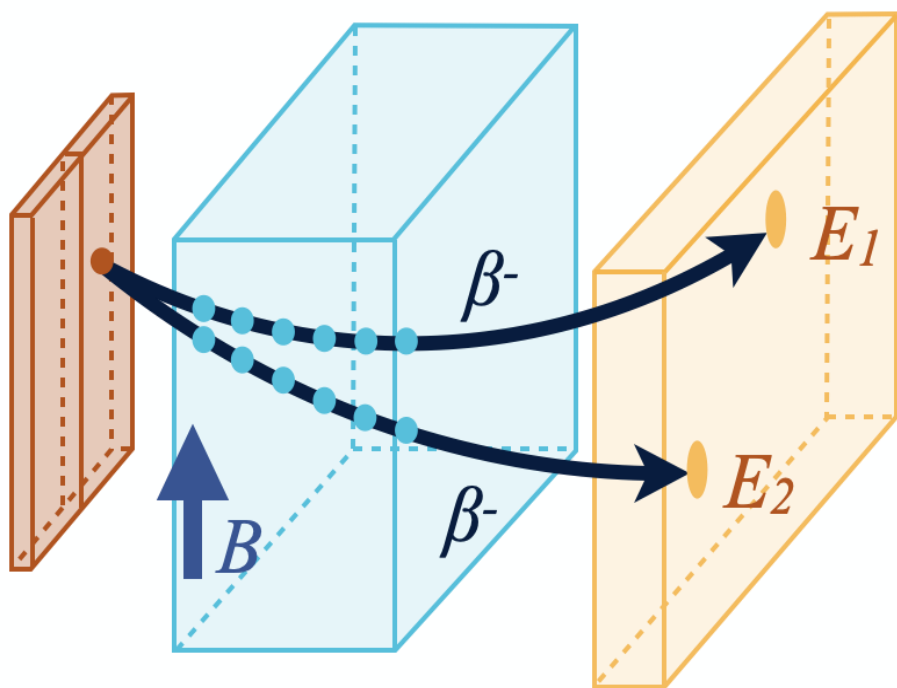
- 2034 cellules en régime Geiger (99 % en fonction)
- Gaz d'ionisation utilisé : **He** (95%) + Ar (1%) + Ethanol (4%)

Mesure individuelle de l'énergie et du temps de vol des particules

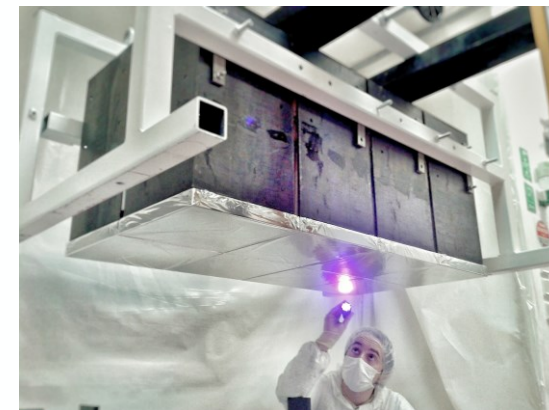
Feuille source
 ^{82}Se

Trajectographe

Calorimètre



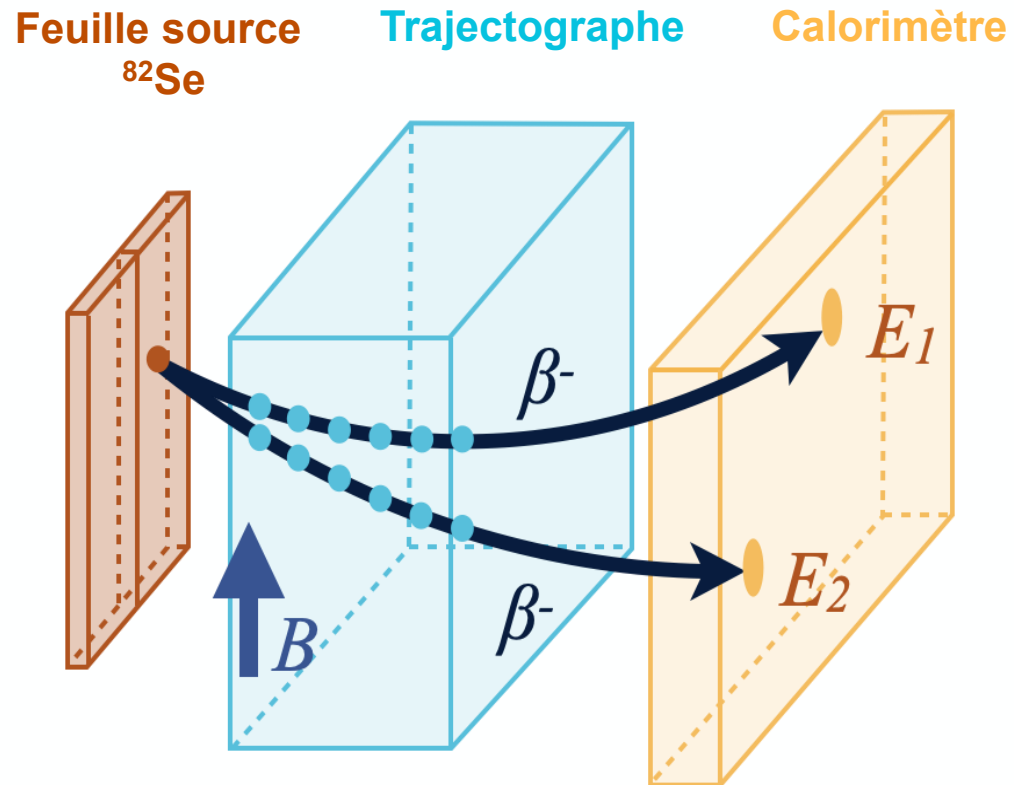
- 712 Modules Optiques
Scintillateur + photomultiplicateur 8" ou 5"
FWHM $\sim 8\%$ (e^- @ 1 MeV)
- Très bonne résolution temporelle
 $\sigma \sim 250 \text{ ps}$ (e^- @ 1 MeV)
- 97.4 % OMs opérationnels

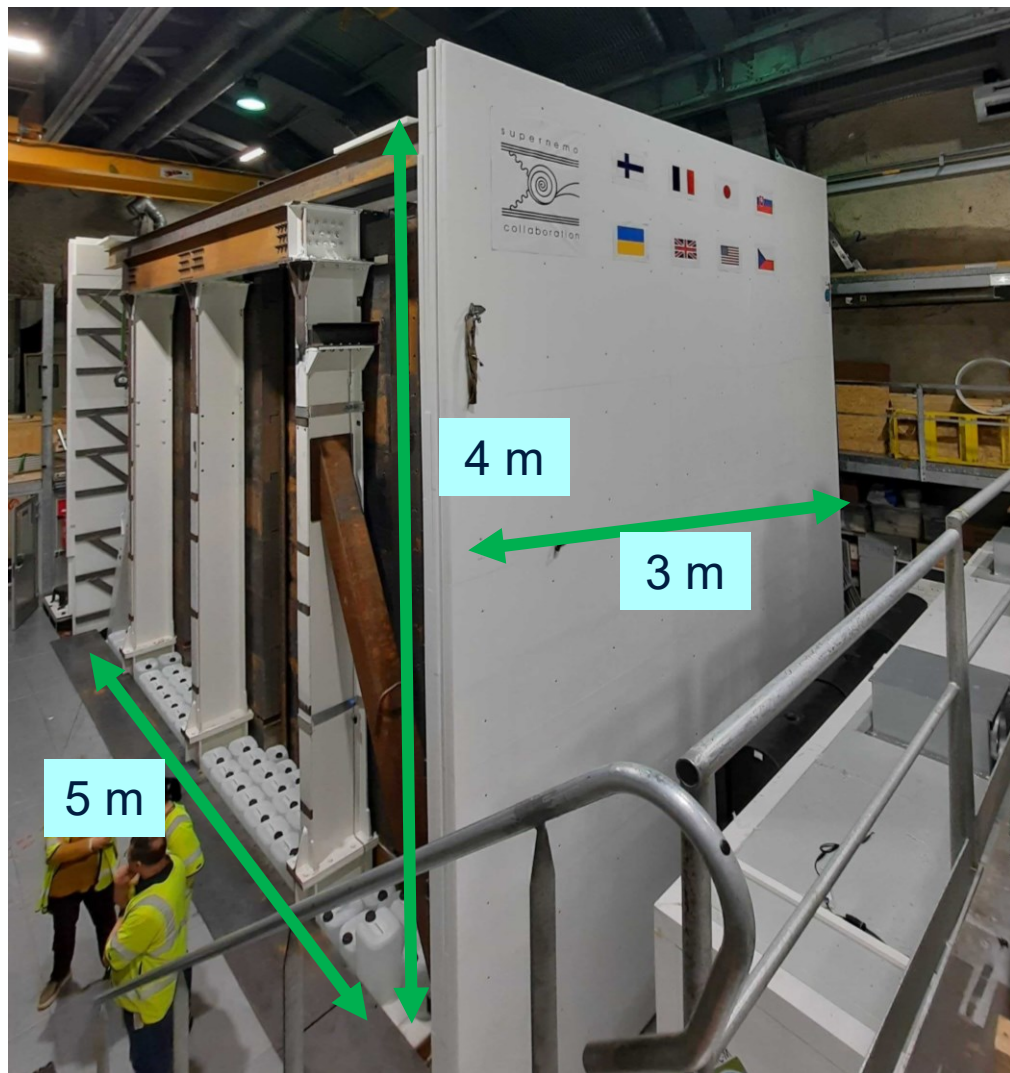


Module optique 8''

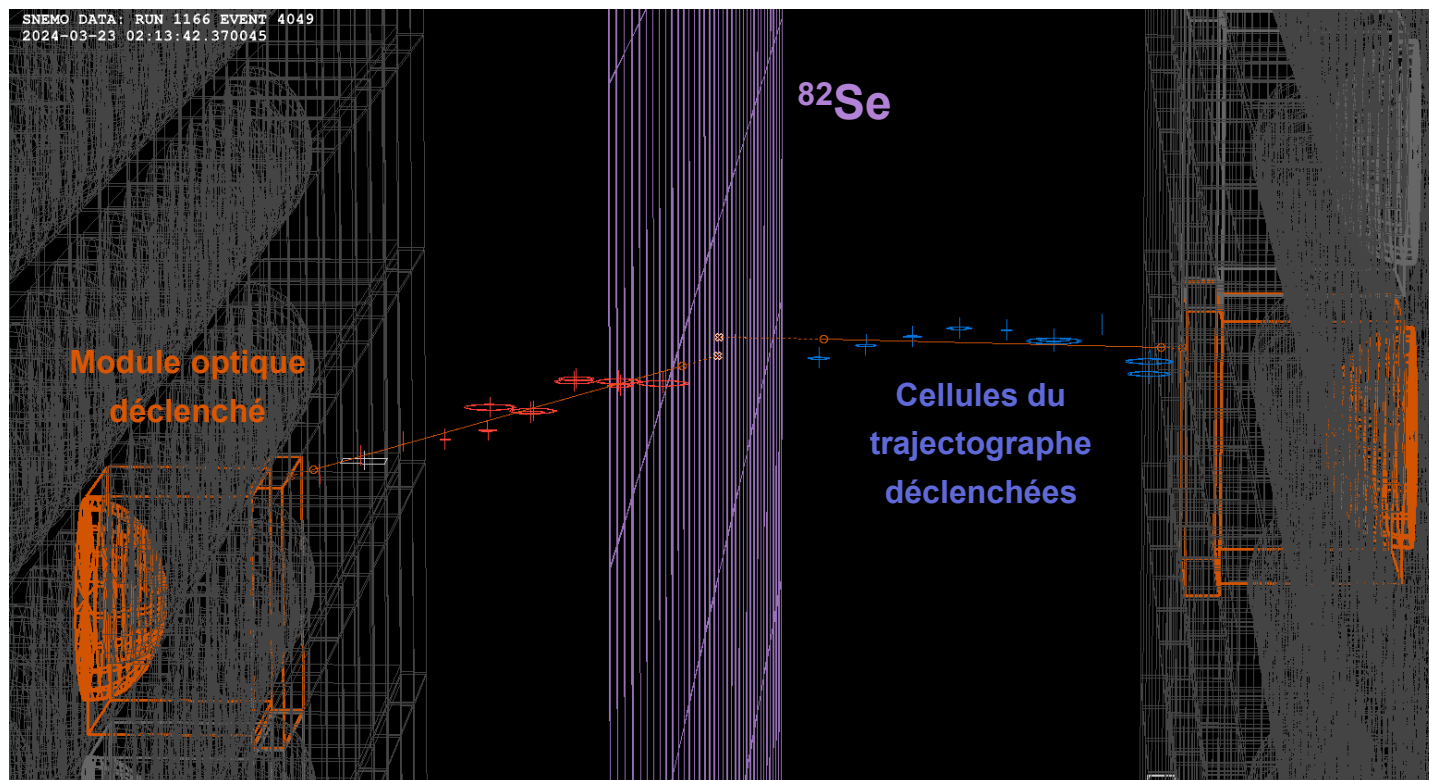
Calorimètre

Mesure individuelle de l'énergie et du temps de vol des particules





Événement réel à deux électrons vu de côté

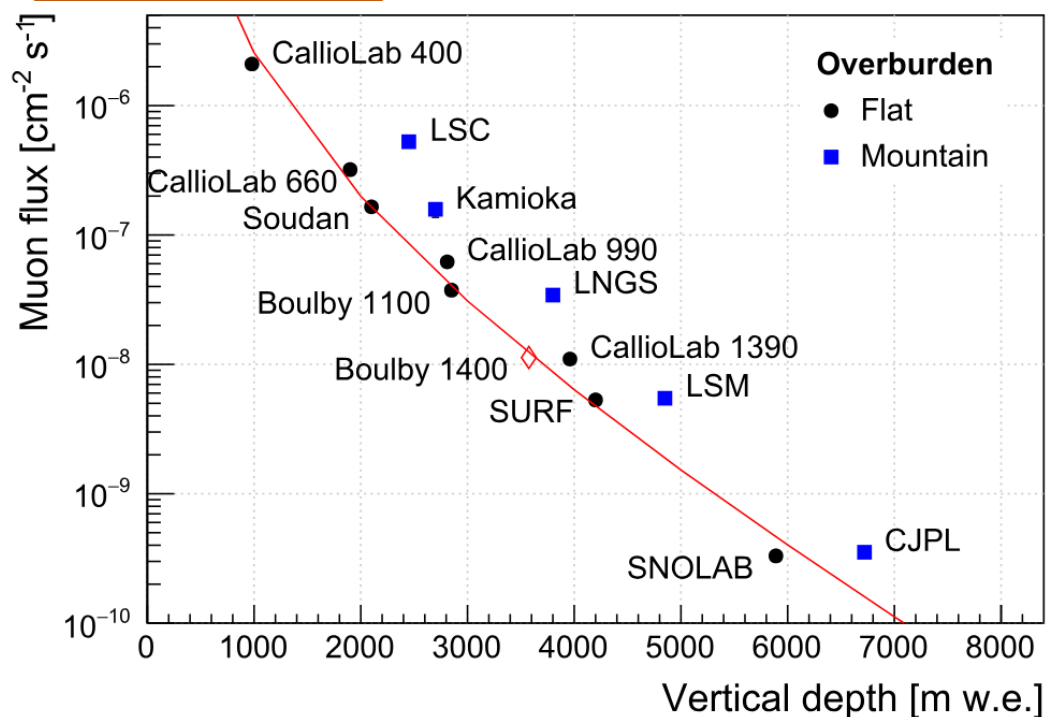


Reconstruction topologique complète

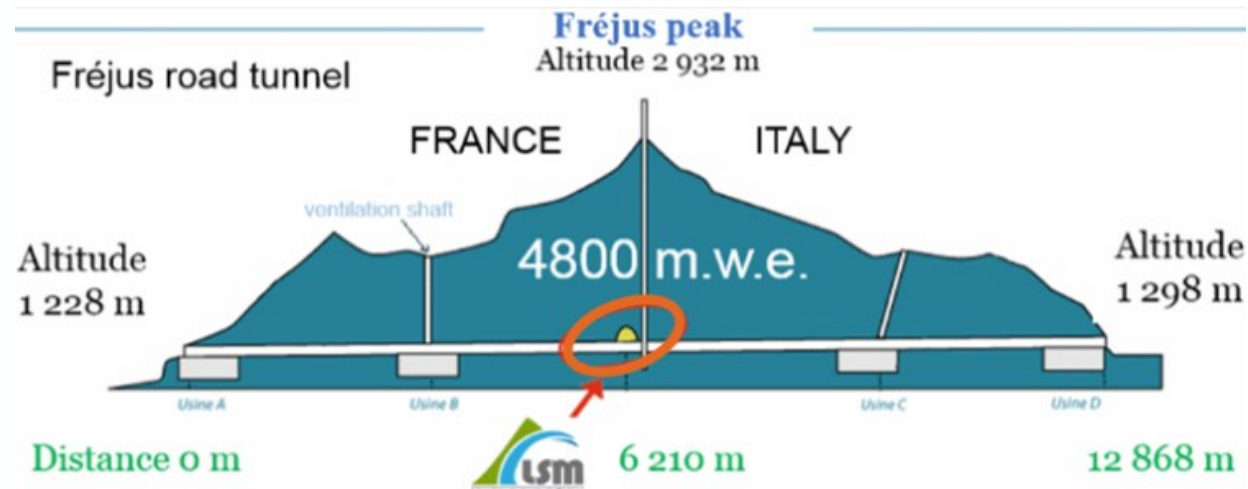
Bruit de fond possible [0 – 3,5] MeV

- **Neutrons** : spallation (muons), fission, réactions (α, n)
 - Blindage polyéthylène (24 cm)
- **Gamma** : radioactivité naturelle et capture des neutrons
 - Blindage en fer (18 cm)
- **Radon** : émanation des matériaux et diffusion du radon ambiant
 - stratégie spécifique (suite)

Bruit de fond muons et neutrons induits



Laboratoire Souterrain de Modane (LSM)



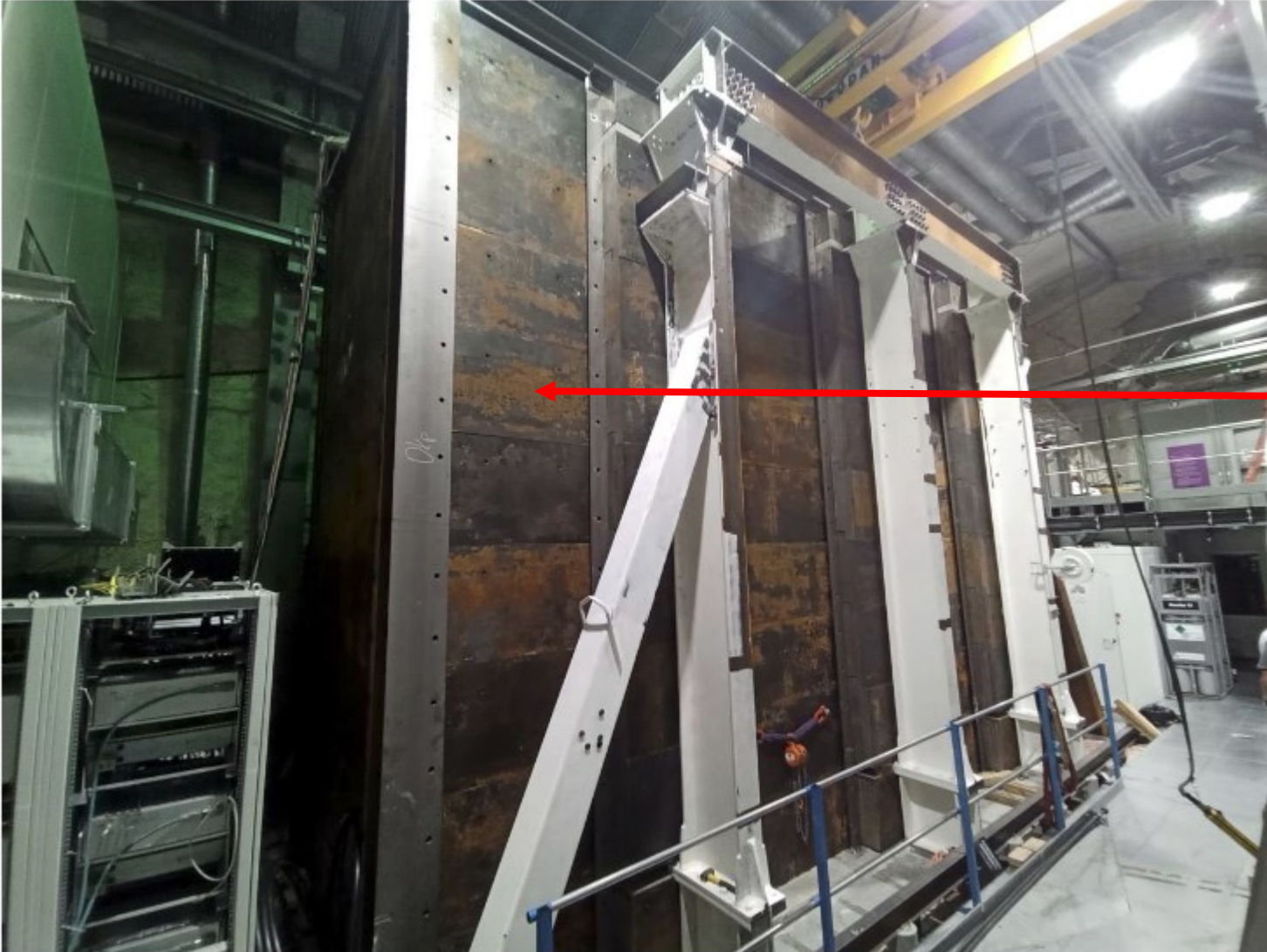
Réduction du flux de muons d'un facteur 10^6

Bruit de fond neutron



24 cm
Polyéthylène

Bruit de fond gamma

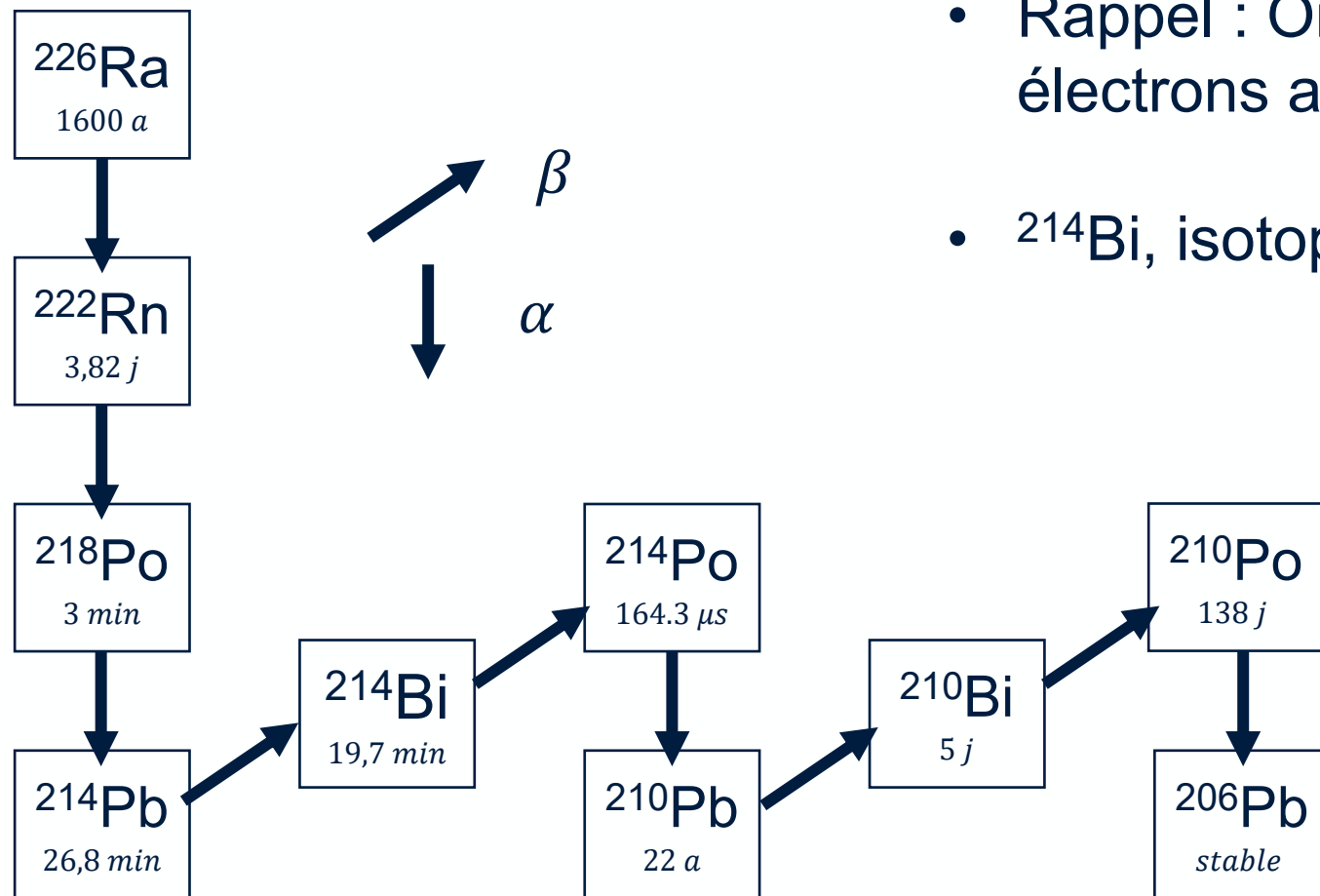


240 tonnes de fer pur

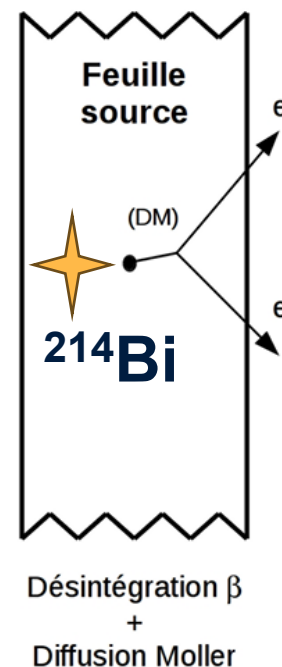
18 cm d'épaisseur

- Recherche de la désintégration $\beta\beta 0\nu$ et expérience SuperNEMO
- Le radon un des bruits de fond majeur
- Stratégies pour réduire le niveau de radon
- Résultats préliminaires

Bruit de fond radon



- Rappel : On recherche un événement avec 2 électrons avec $\sum E_{e^-} \sim 3 \text{ MeV}$
- ^{214}Bi , isotope fils du radon avec $Q_{\beta^-} = 3,269 \text{ MeV}$

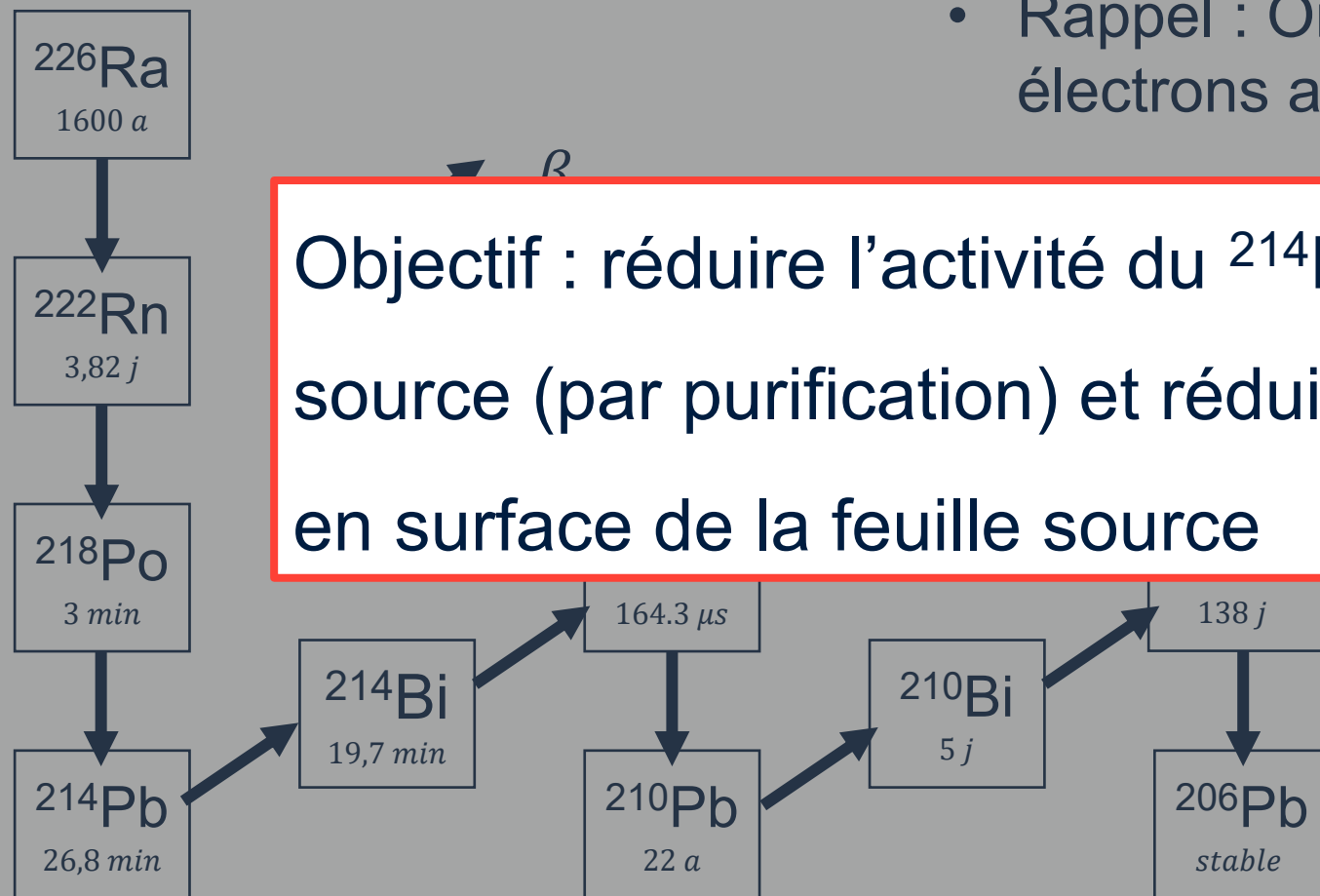


Le β émis par le ^{214}Bi dans ou sur la feuille de ^{82}Se peut créer 2 électrons et mimer le processus $\beta\beta 0\nu$

Bruit de fond radon

- Rappel : On recherche un événement avec 2 électrons avec $\sum E_{e^-} \sim 3 \text{ MeV}$

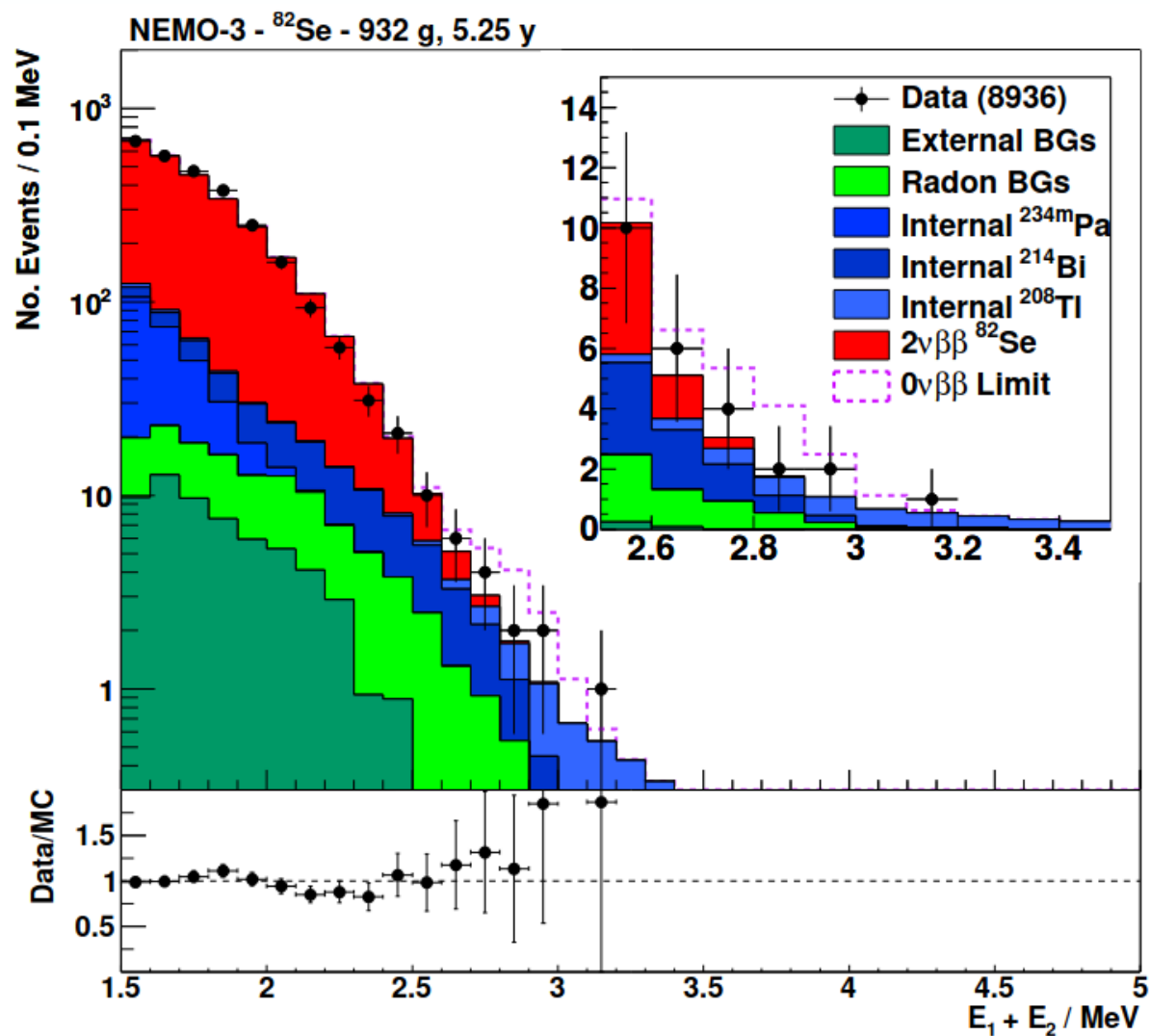
Objectif : réduire l'activité du ^{214}Bi dans le volume de la feuille source (par purification) et réduire le possible dépôt de radon en surface de la feuille source



Désintégration β
+
Diffusion Moller

sur la feuille de ^{82}Se peut créer 2 électrons et mimer le processus $\beta\beta 0\nu$

REX de l'expérience précédente NEMO 3



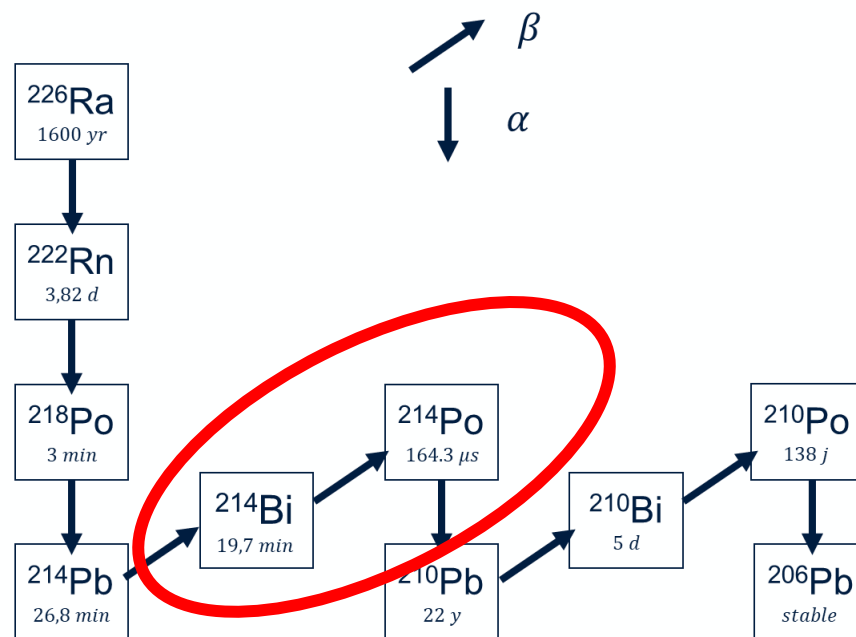
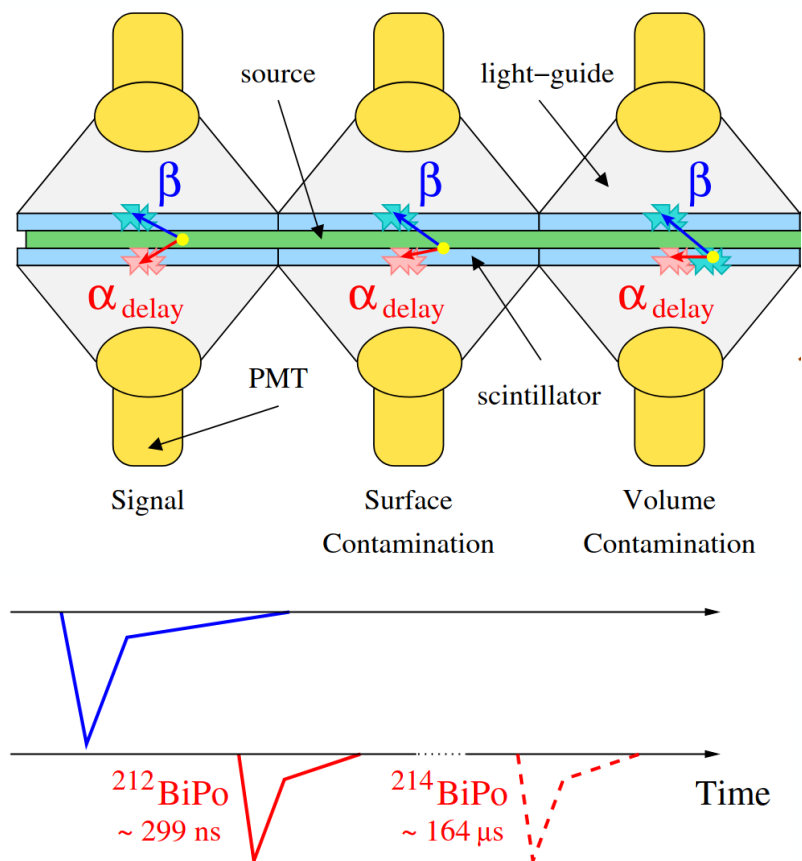
NEMO3 : contribution du radon dans la région d'intérêt

SuperNEMO : il faut aller plus loin !

Eur Phys J C (2018) 78:821

Caractérisation du ^{214}Bi dans la feuille de ^{82}Se

Mesure de la **radio-pureté** des feuilles de ^{82}Se avec le détecteur « BiPo »

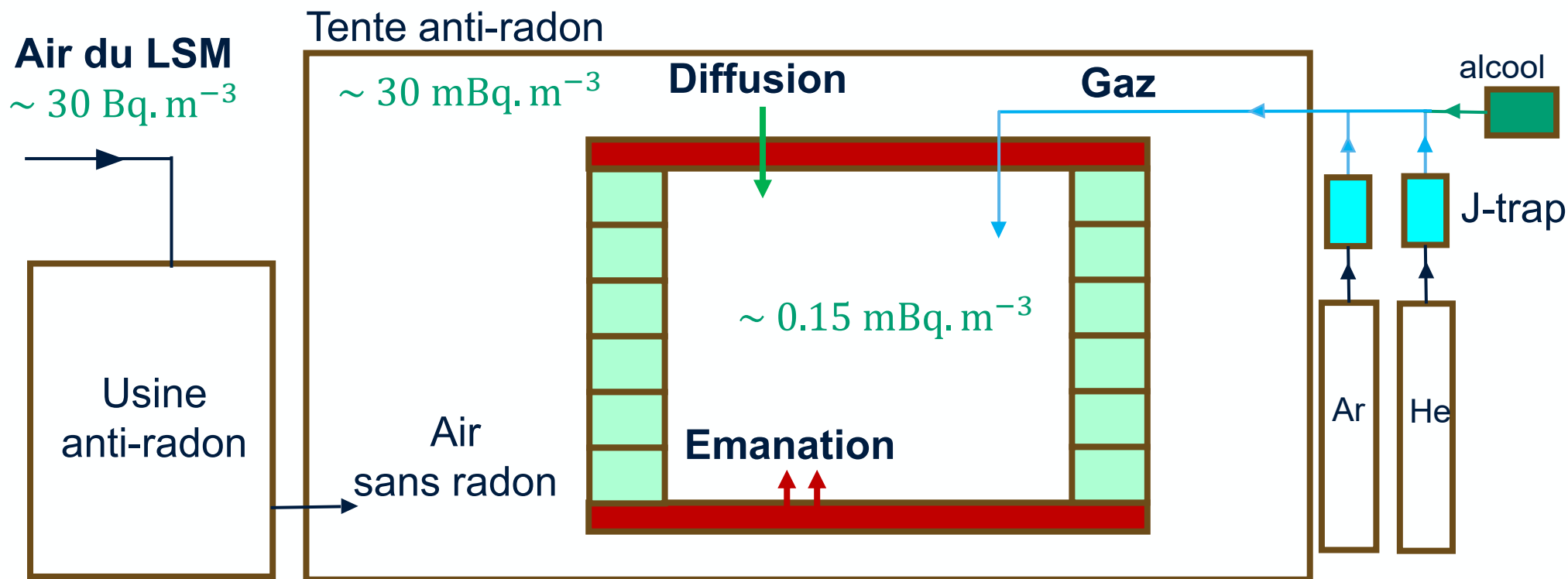


$$A(^{214}\text{Bi}) < 300 \mu\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ (90\% CL)}$$

- Recherche de la désintégration $\beta\beta 0\nu$ et expérience SuperNEMO
- Le radon un des bruits de fond majeur
- Stratégies pour réduire le niveau de radon
- Résultats préliminaires

Stratégie Anti-radon

D'où vient le radon ?



Sélection des matériaux

Pour atteindre l'objectif d'une activité de $0,15 \text{ mBq.m}^{-3}$:

1. Stratégie « **passive** »:

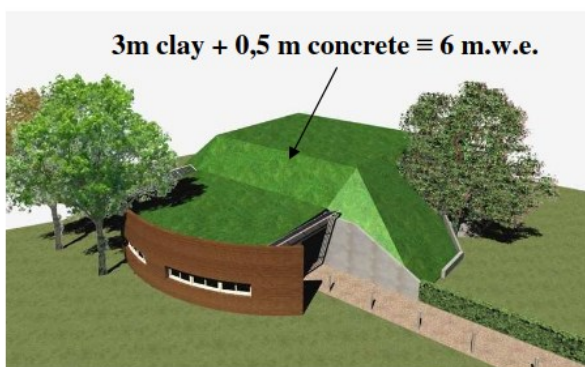
- Sélection des matériaux en contact avec le gaz du trajectographe
- Etanchéité du trajectographe

2. Stratégie « **active** » :

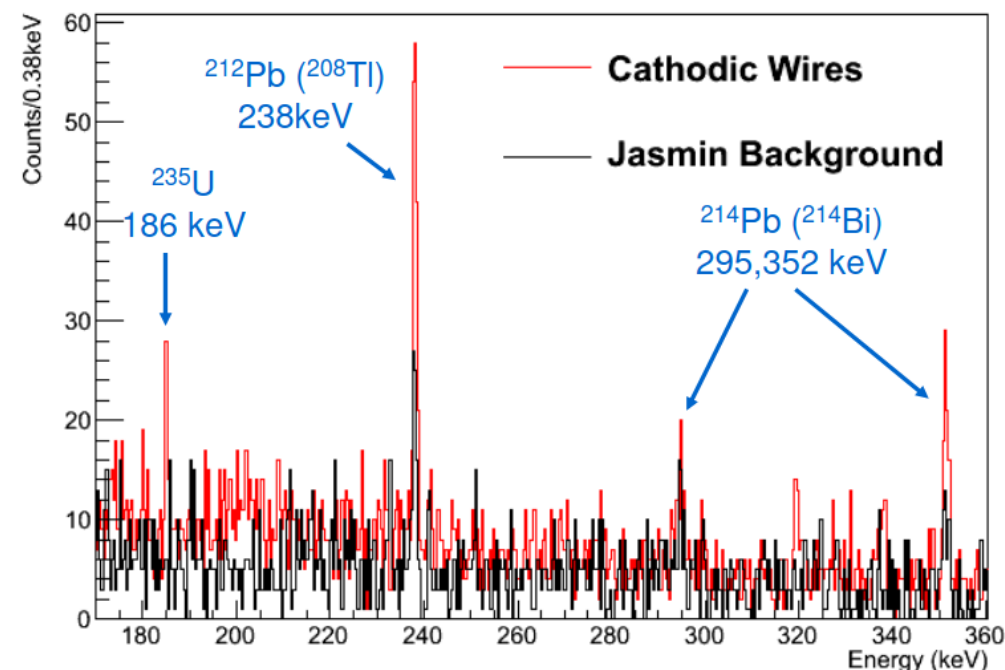
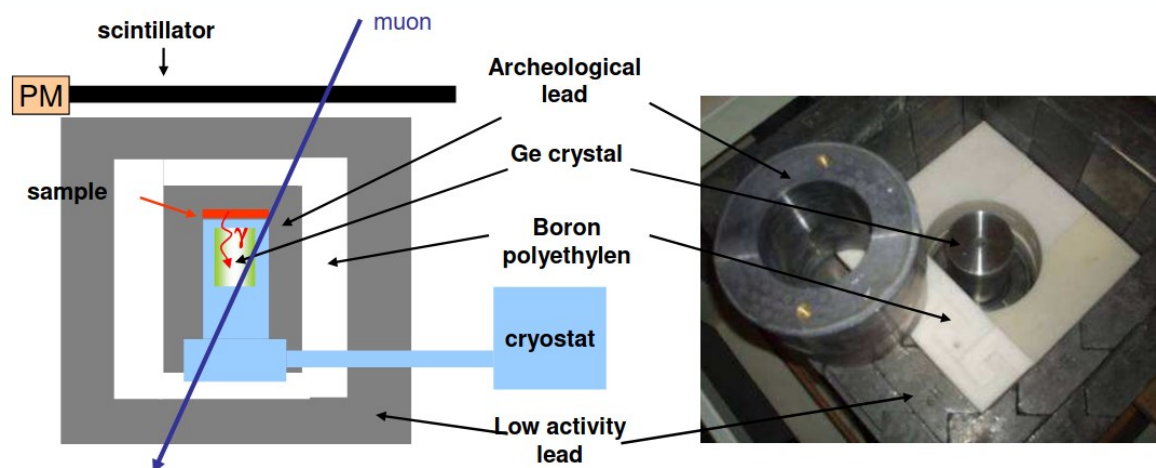
- Purification du gaz,
- Volume tampon avec la tente anti-radon
- Usine anti-radon

Plateforme de spectroscopie gamma HPGe

Plateforme PRISNA au LP2I Bordeaux



Mesure du ^{214}Bi car équilibre séculaire avec le ^{226}Ra

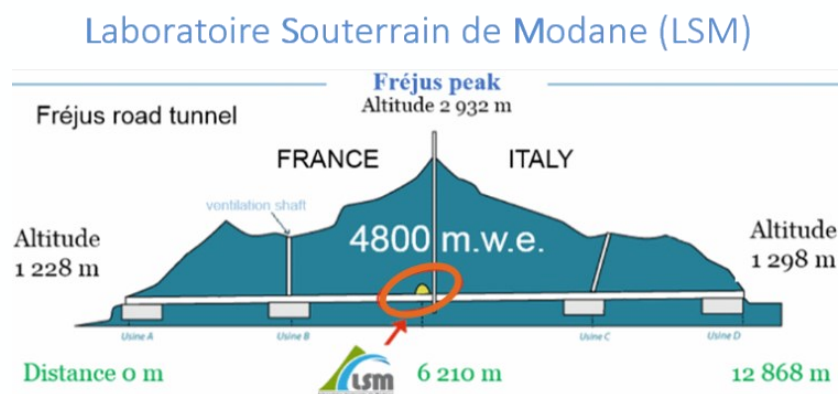


Détection limite (^{214}Bi) avec PRISNA* :
 $25 \text{ mBq} \cdot \text{kg}^{-1}$

Pré-sélection (car sensibilité pas assez suffisante)

*100g d'échantillon et 7 jours de mesure

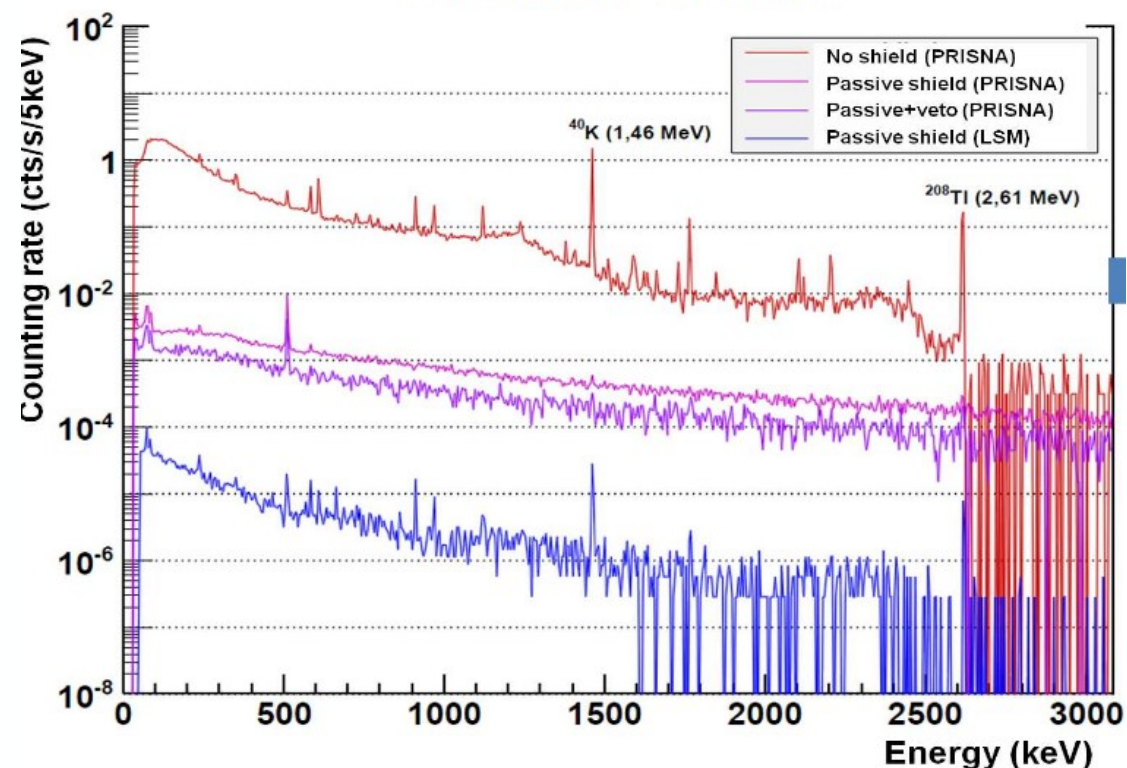
Détecteurs HPGe au LSM



Détection limite (^{214}Bi) au LSM* :
 $0,2 \text{ mBq} \cdot \text{kg}^{-1}$

* 1kg d'échantillon et 30 jours de mesures

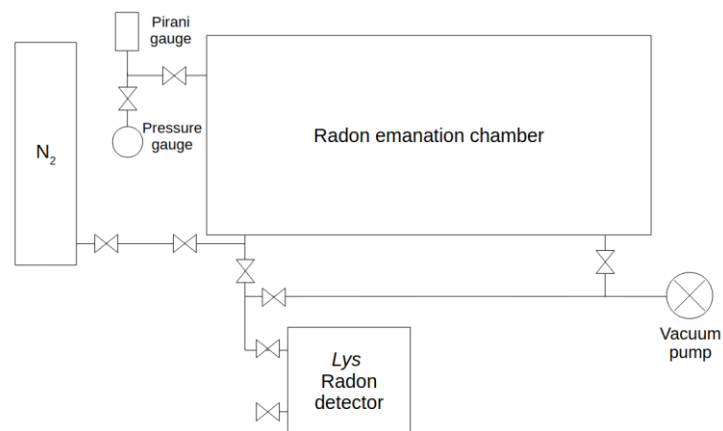
Background gamma spectrum : PRISNA vs LSM



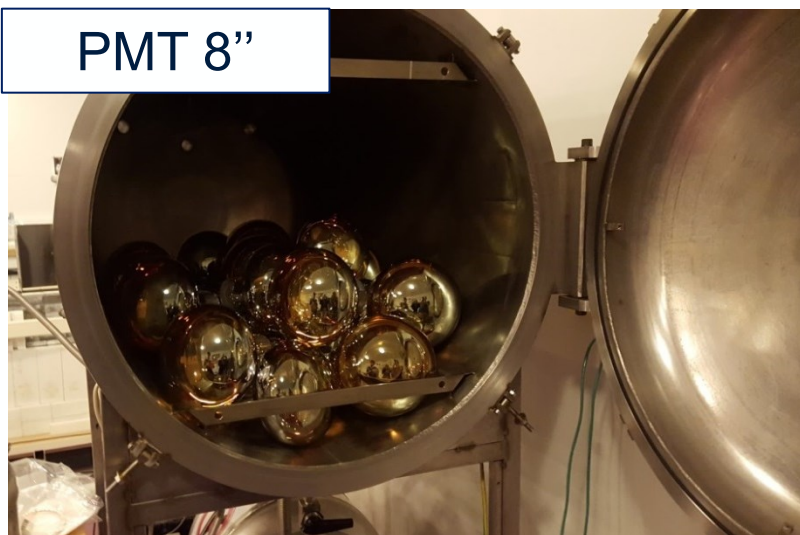
Mesure émanation radon à Bordeaux

Chambre d'émanation au LP2i Bordeaux

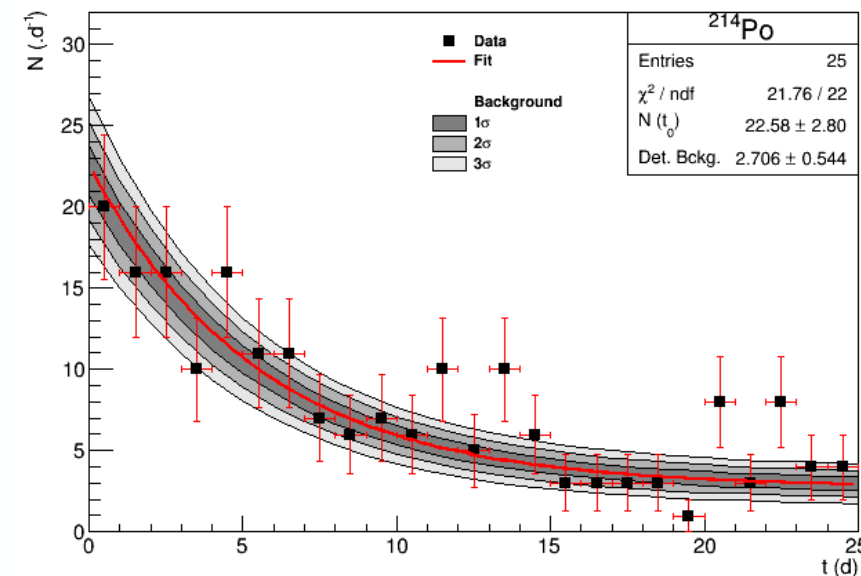
Emanation 30 x PMTs (5")



PMT 8"



Sensibilité de ~ 6 mBq
V = 710 L



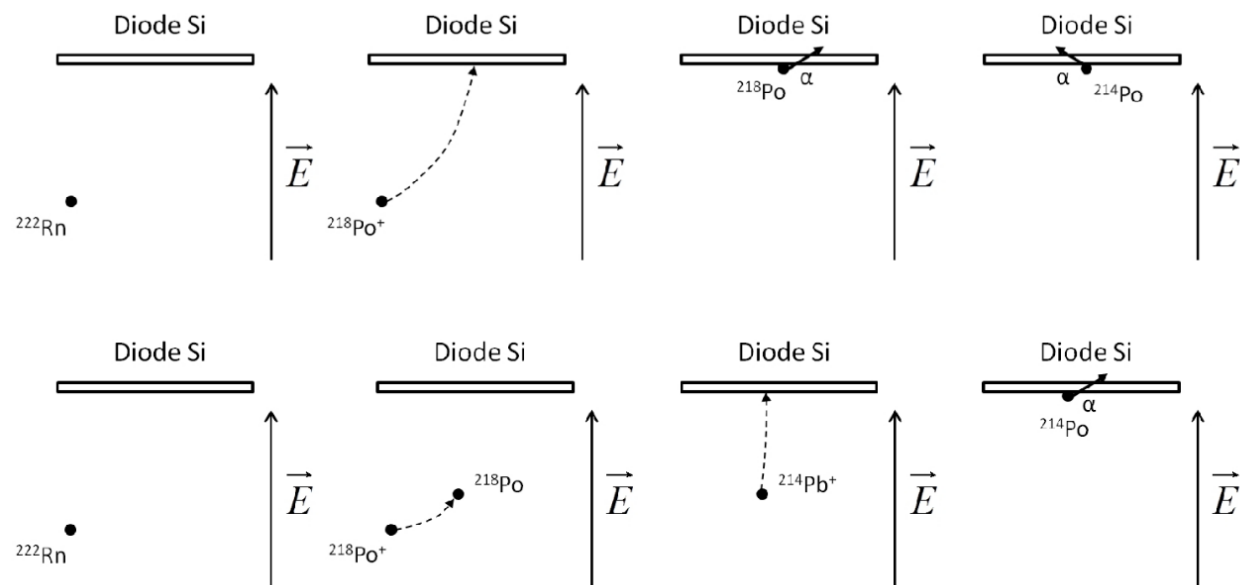
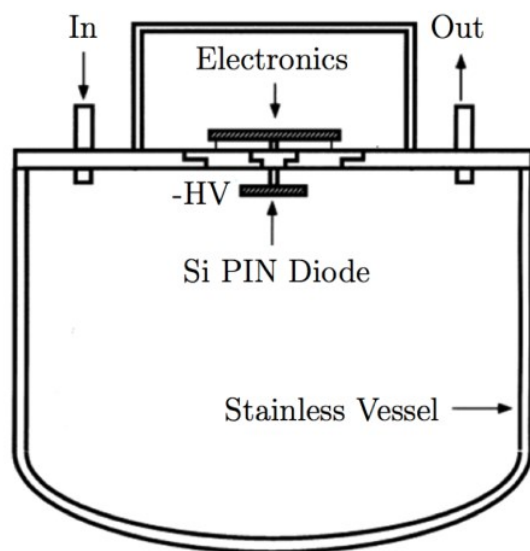
Mesure avec un détecteur
électrostatique de radon

L'émanation du radon des PMTs 8" compatible le bruit de fond et inférieur :

0,16 mBq/PMT

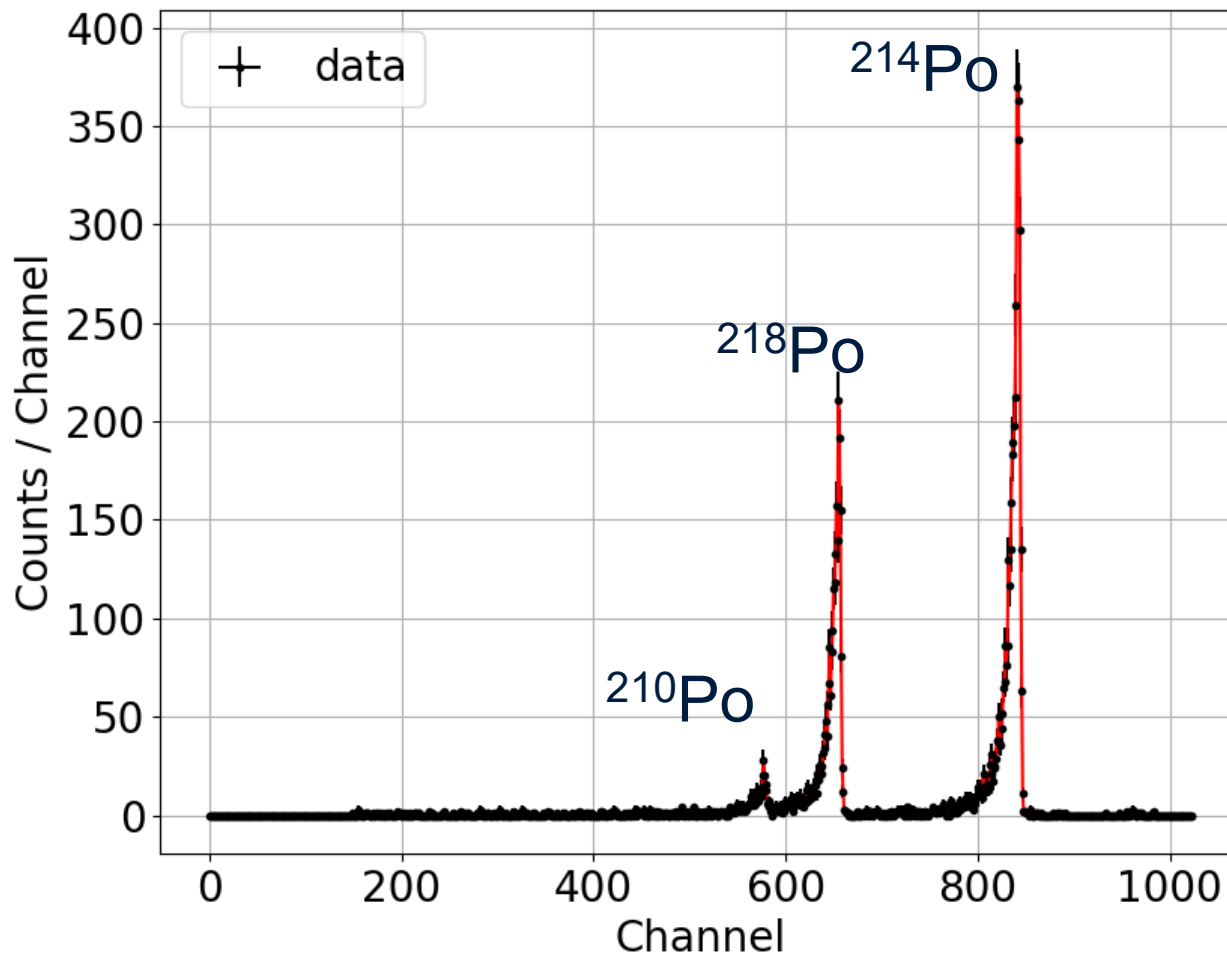
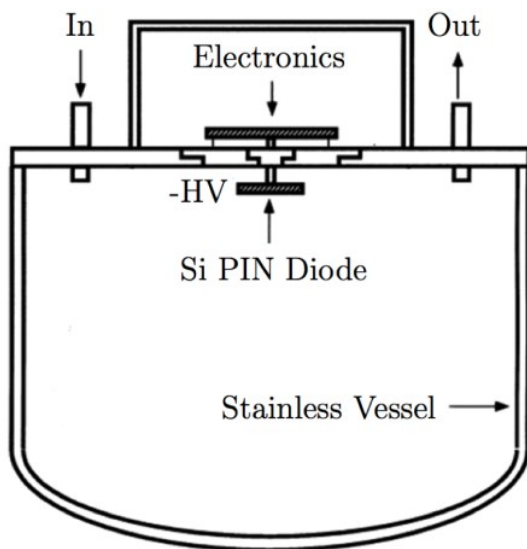
Chambre d'émanation (suite)

Détecteur électrostatique de radon



Chambre d'émanation (suite)

Détecteur électrostatique de radon

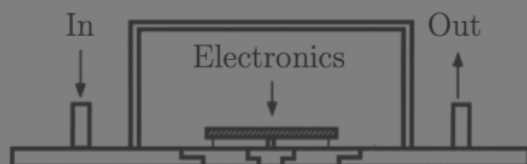


Efficacité de détection $\epsilon \approx 30 \%$

Activité minimum détectable : $1,7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$
(Objectif SuperNEMO $> 0,150 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$)

Chambre d'émanation (suite)

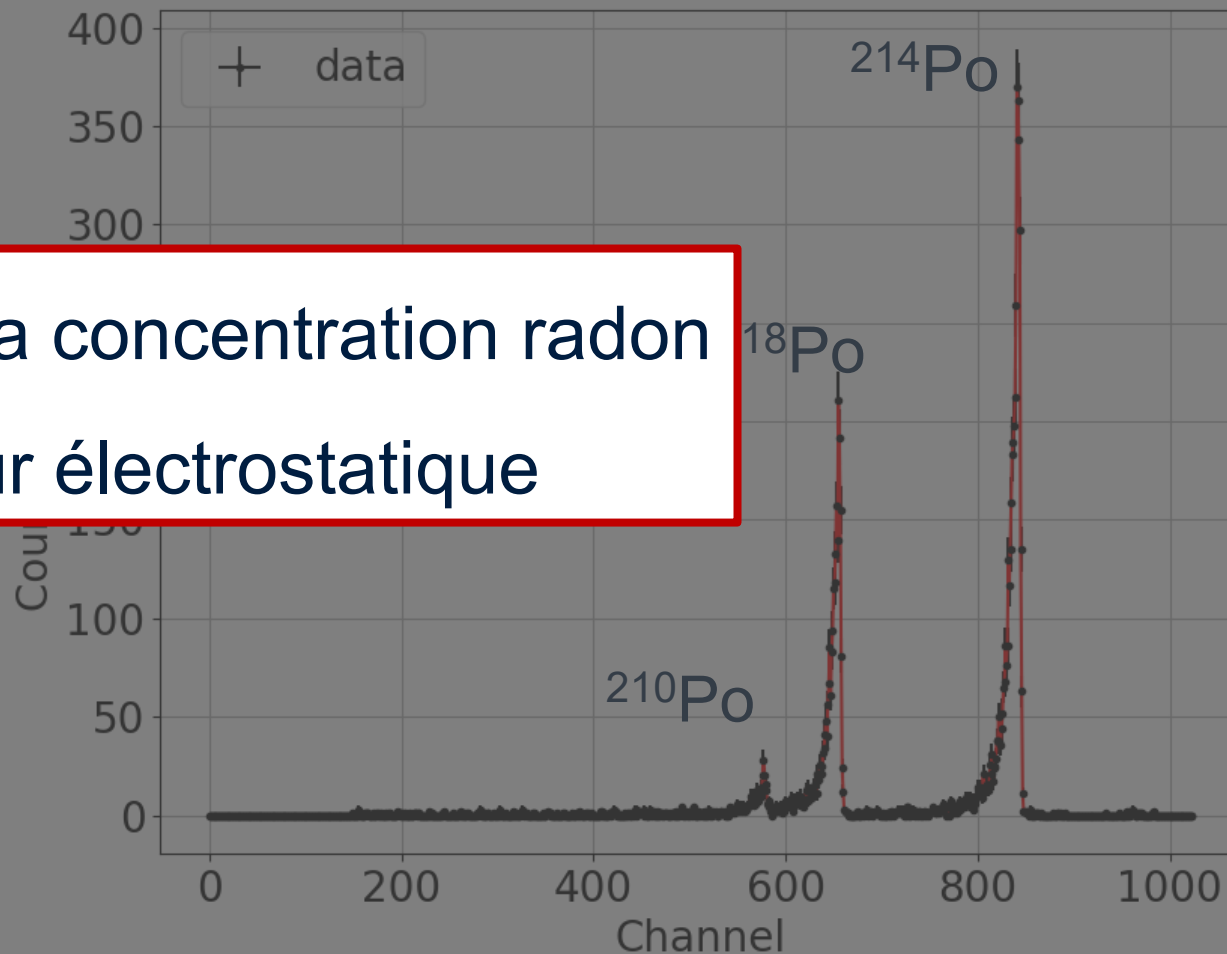
Détecteur électrostatique de radon



Besoin d'augmenter la concentration radon
dans le détecteur électrostatique

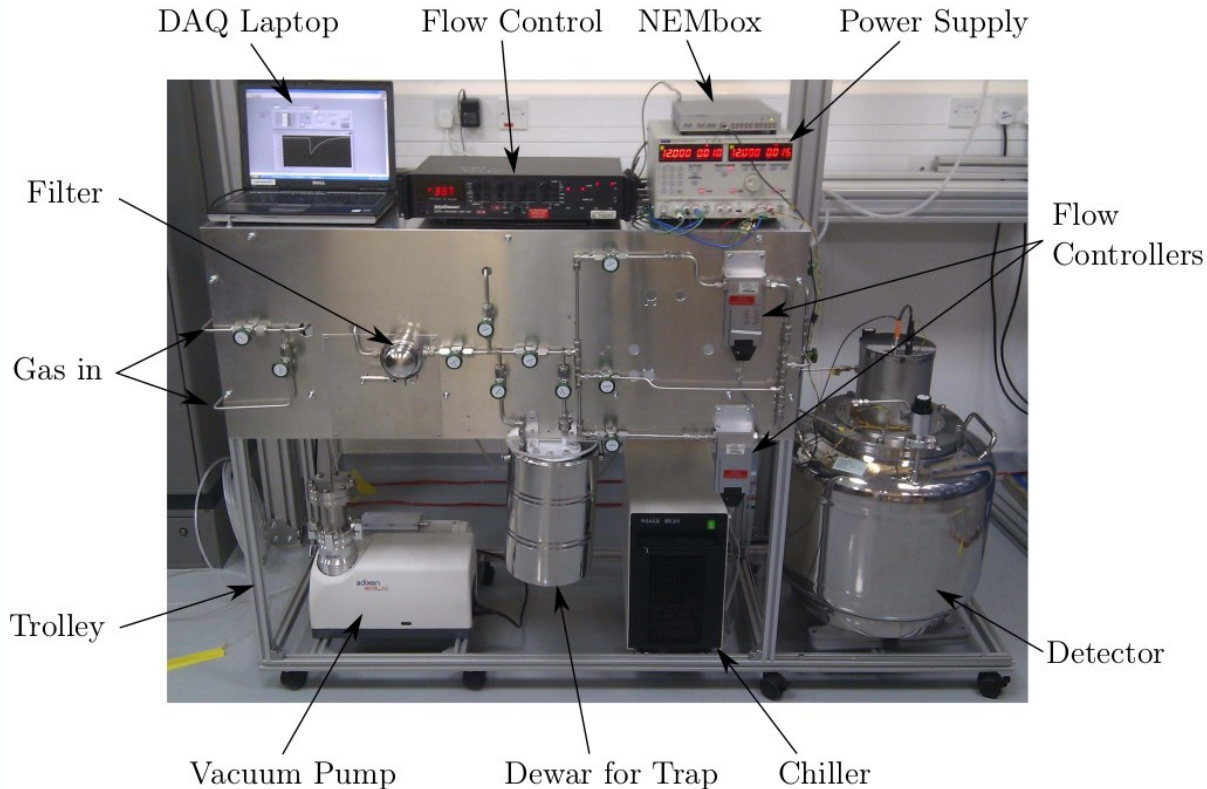
Efficacité de détection $\epsilon \approx 30 \%$

Activité minimum détectable : $1,7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$
(Objectif SuperNEMO $> 0,150 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$)



Ligne de concentration radon

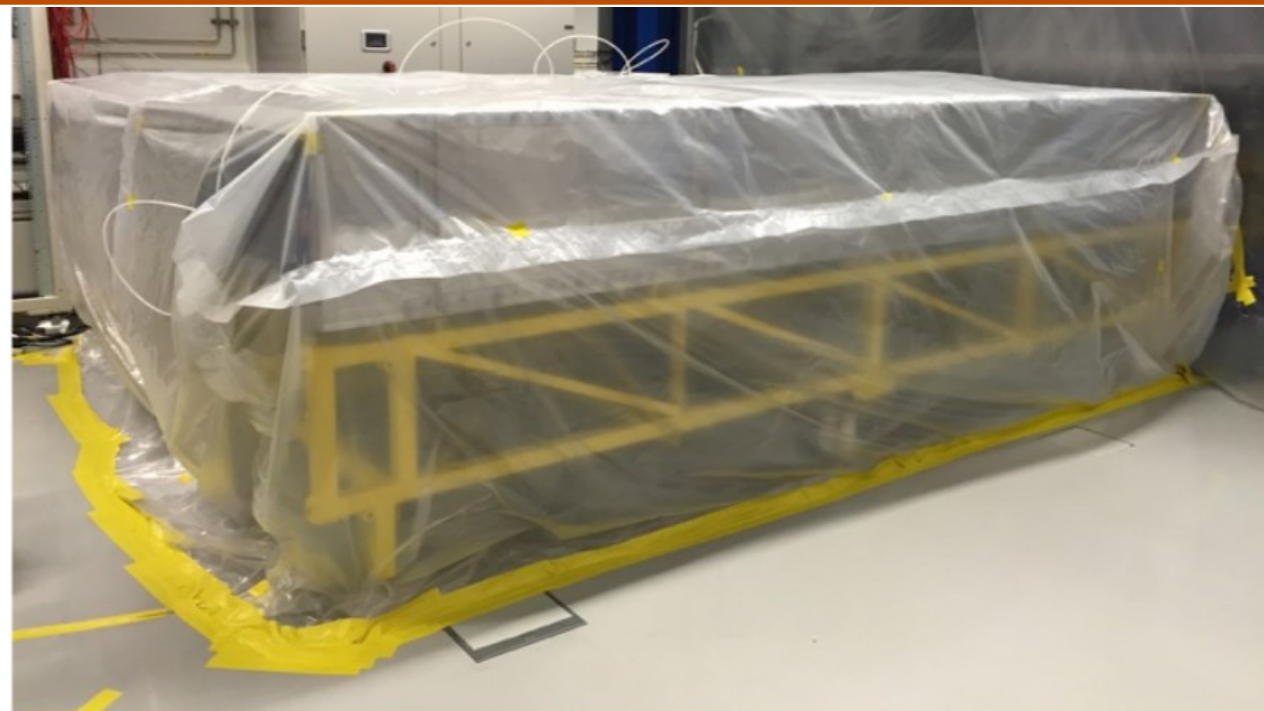
Ligne de concentration radon



- Le gaz étudié passe au travers d'un piège au charbon actif → Le radon est piégé.
- Le radon est dépiégé en chauffant à 220°C
- Le gaz est transféré vers le détecteur électrostatique

Sensibilité : $5 \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

Mesure radon d'une partie du trajectographe



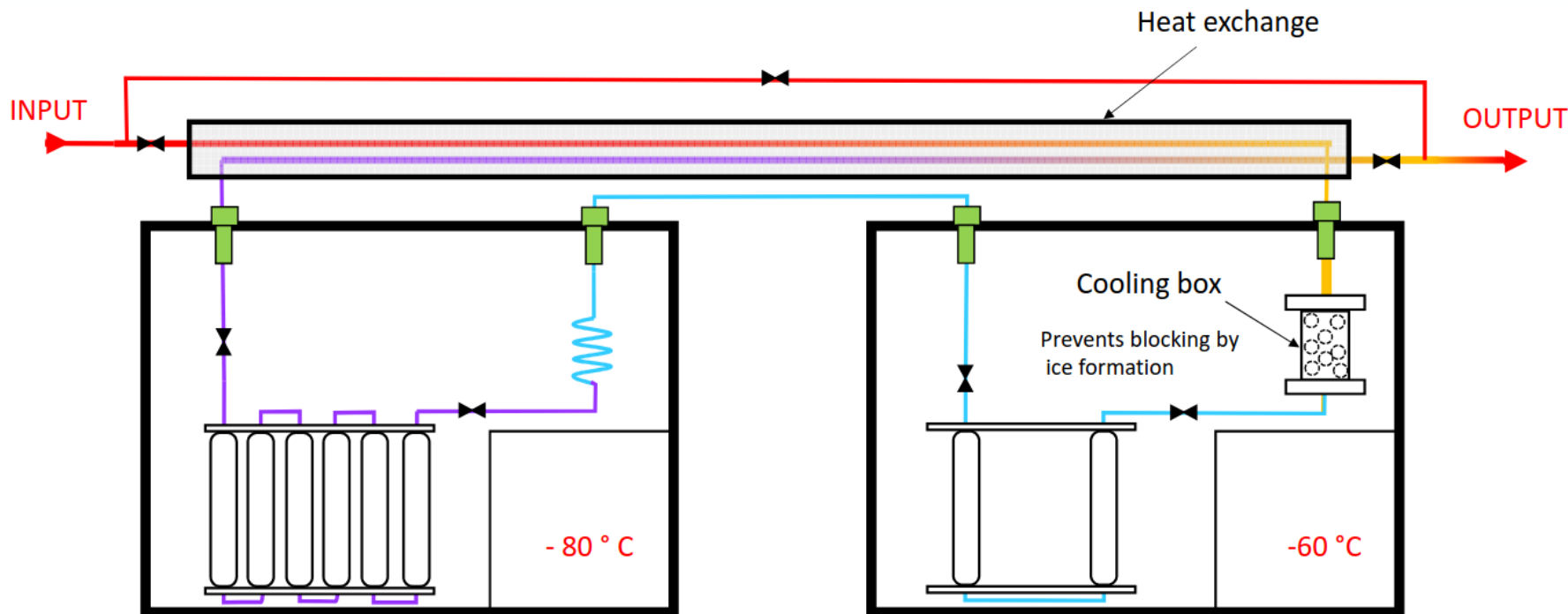
$$A_{\text{trajectographe}} = 2,7 \pm 0,3 \text{ mBq}$$

➔ $0,150 \pm 0,02 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ accessible si flux du renouvellement du gaz à $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

40

Purification du gaz en entrée « J-Trap »

Système de purification du radon du gaz de SuperNEMO : J-Trap

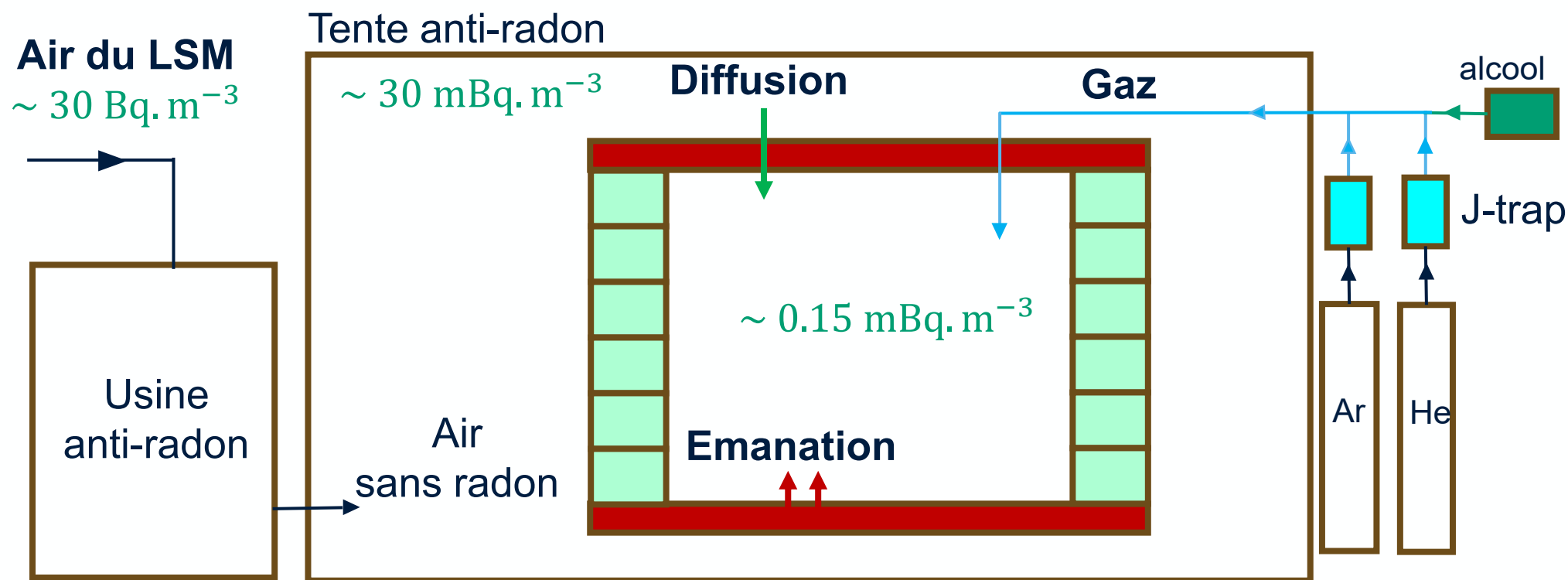


- 6 cartouches de 500 cm^3 (1,5 kg charbon)
- Absorption du radon

- 2 cartouches de 500 cm^3 (250g charbon)
- Pré-refroidissement, absorption traces d'eau

Stratégie Anti-radon

D'où vient le radon ?

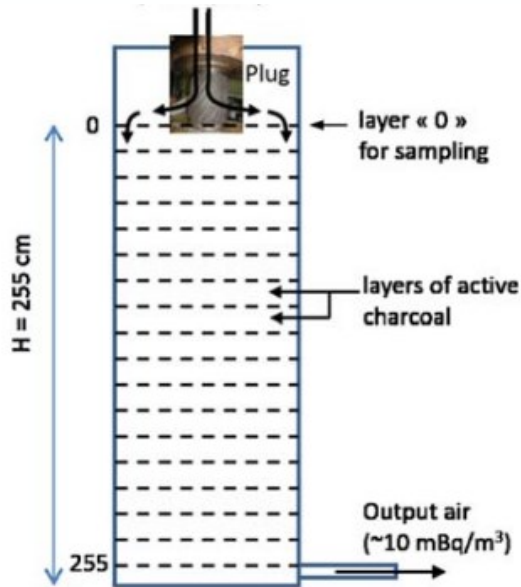


Usine anti-radon

Usine anti-radon* : même principe que l'expérience précédente NEMO-3

* Développée par le LSM

Piège à radon (charbon)



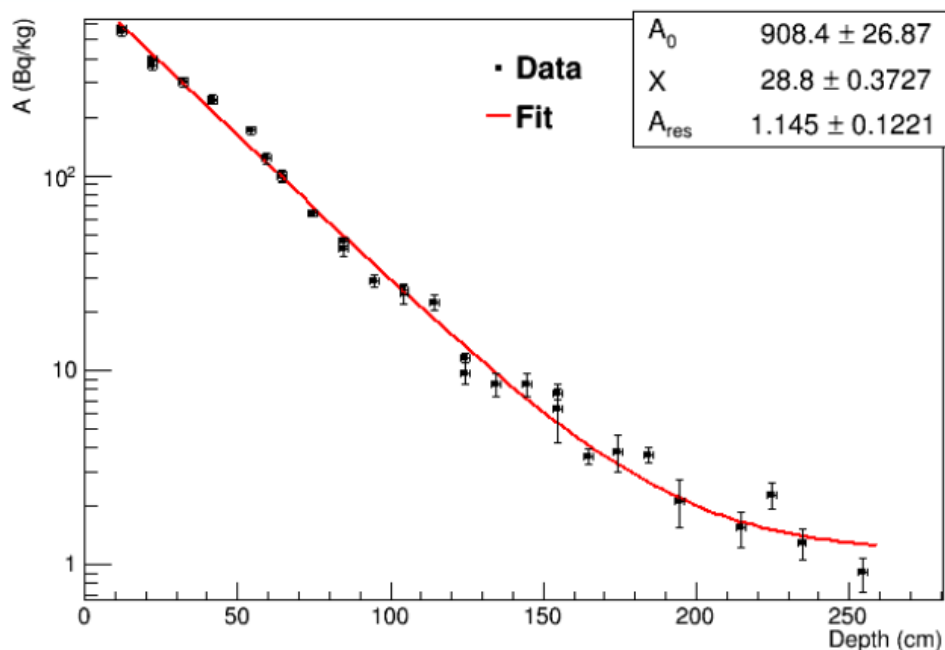
- Réduction d'un facteur 3000 de l'activité radon dans l'air : $30 \text{ Bq.m}^{-3} \rightarrow 10 \text{ mBq.m}^{-3}$
- Flux pour SuperNEMO : $150 \text{ m}^3.h^{-1}$

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **46** (2019) 115105

Usine anti-radon

Usine anti-radon* : même principe que l'expérience précédente NEMO-3

* Développée par le LSM



- Réduction d'un facteur 3000 de l'activité radon dans l'air : $30 \text{ Bq.m}^{-3} \rightarrow 10 \text{ mBq.m}^{-3}$
- Flux pour SuperNEMO : $150 \text{ m}^3.h^{-1}$

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **46** (2019) 115105

Volume tampon : tente anti-radon



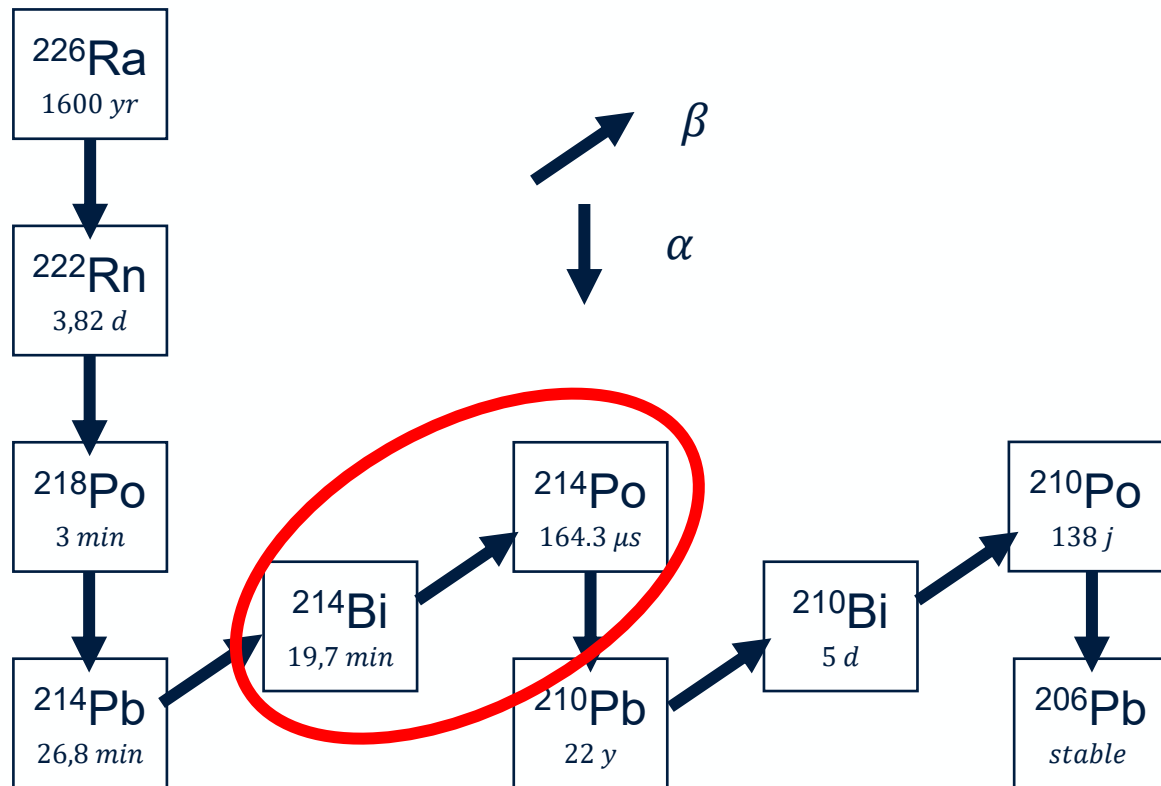
Tente anti-radon

- Structure en polyéthylène étanche au radon
- Volume d'air à renouveler avec l'usine anti-radon :

$$V = 34 \text{ m}^3$$

Identification du radon dans SuperNEMO

- radon 222 indirectement mesuré via l'**effet BiPo** :
cascade radioactive des isotopes fils: ^{214}Bi et ^{214}Po

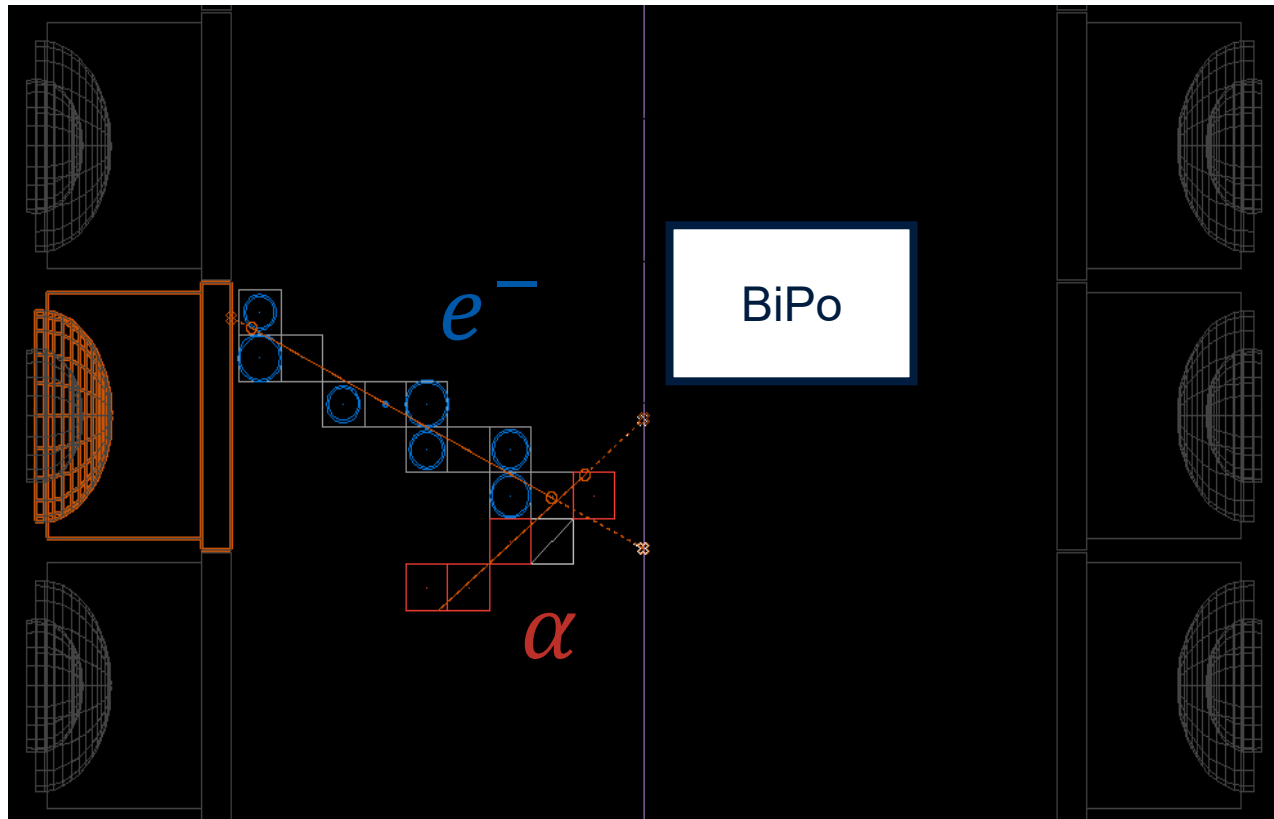


1 électron et 1 alpha retardé :

- $0 < E_e < 3,27 \text{ MeV}$
- $E_\alpha = 7,7 \text{ MeV}$
- $T_{1/2}(^{214}\text{Po}) = 164,3 \mu\text{s}$

Événement BiPo dans SuperNEMO

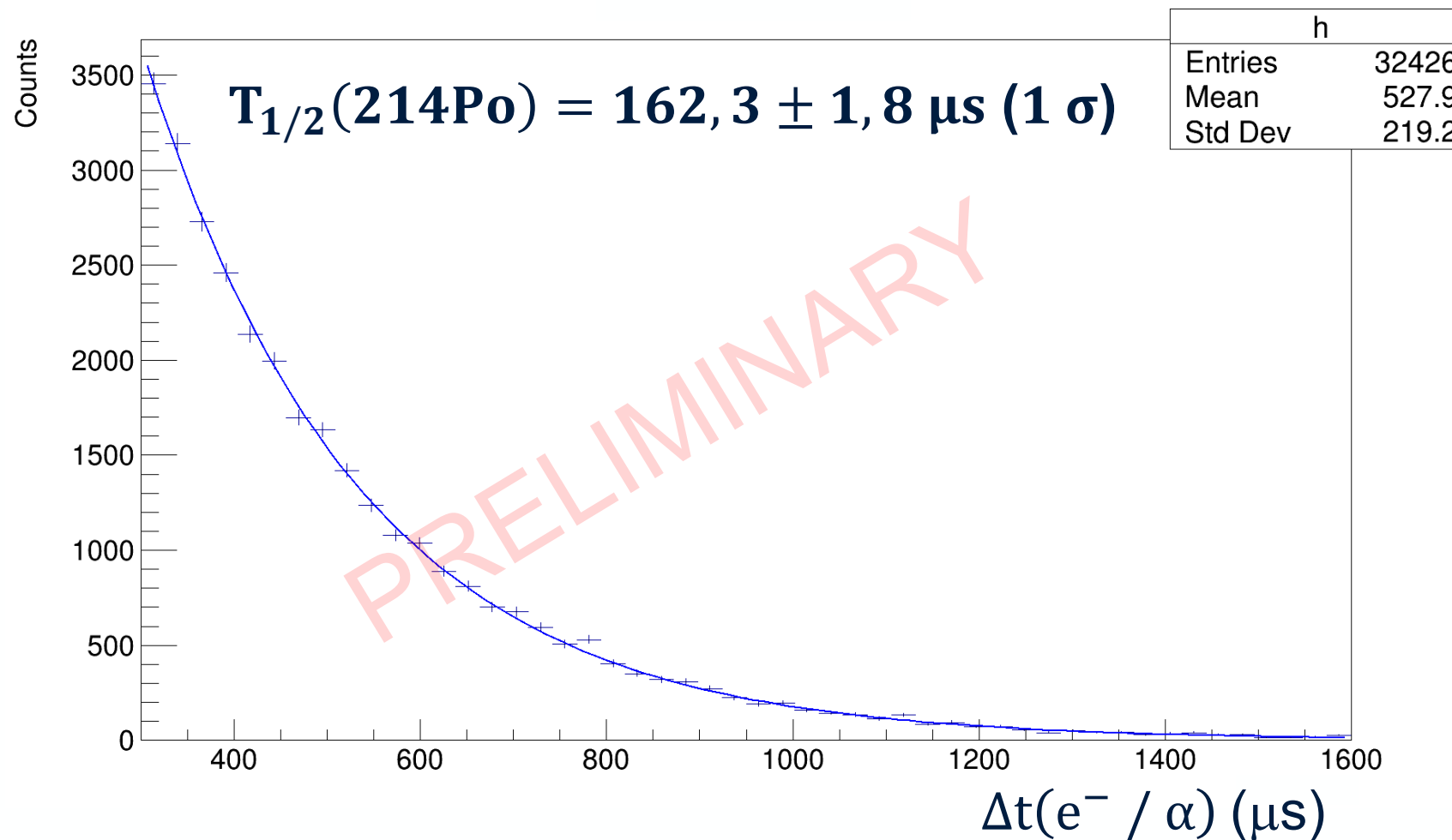
Événement BiPo vu du dessus dans SuperNEMO



Événement BiPo dans SuperNEMO :

- **Electron** : Longue trace + OM associé
- **Alpha** : Trace courte sans OM associé
- **Alpha retardé** : $\Delta t(e^- / \alpha) \in [300-1600] \mu s$

Identification du radon dans SuperNEMO



Conclusion

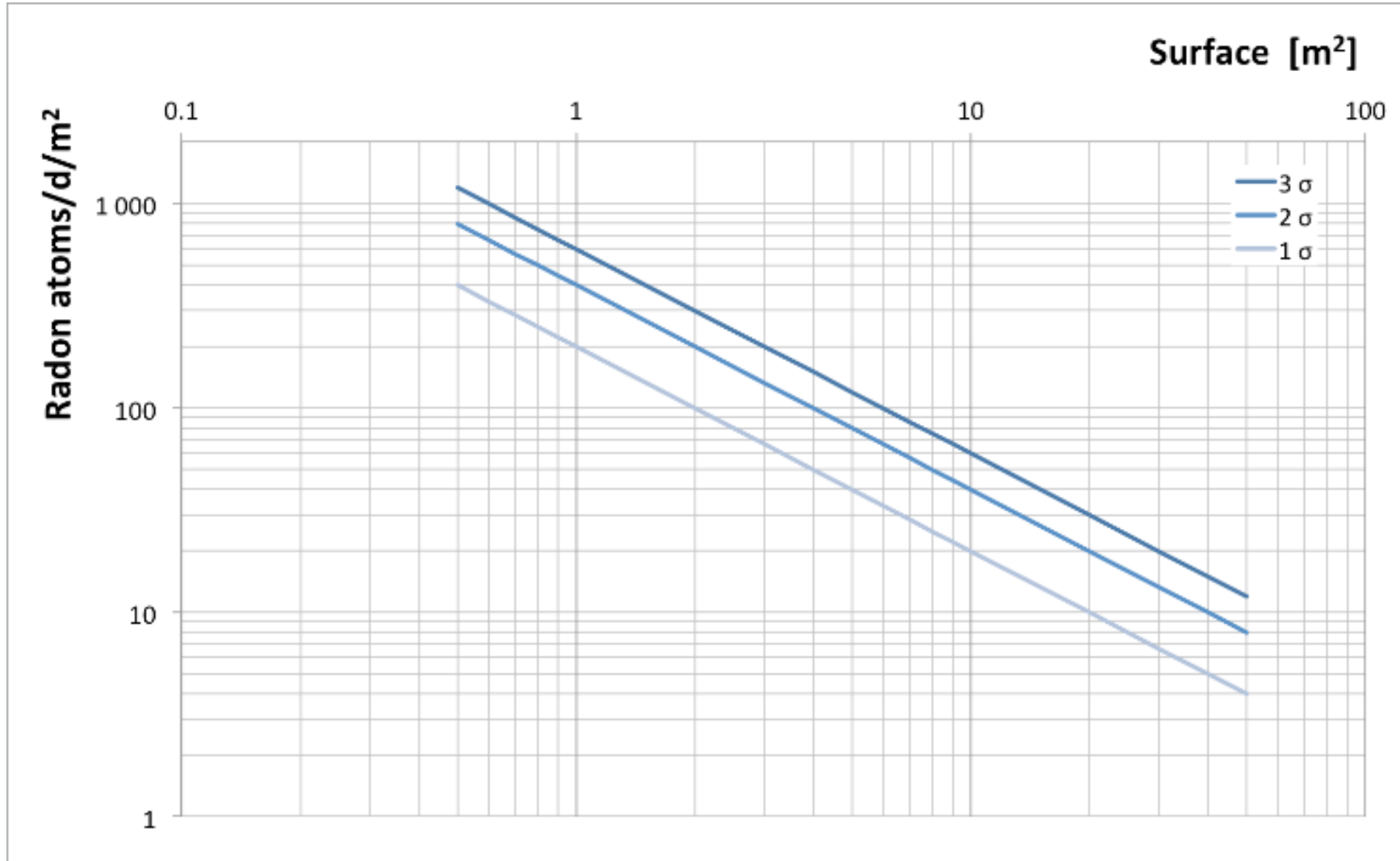
- Rejet de bruit de fond radon possible dans SuperNEMO grâce à l'accès à la topologie des événements BiPo
- Gros effort dans la sélection des matériaux pour atteindre $150 \mu Bq.m^{-3}$ (^{214}Bi)
- Protection active contre le radon
- Bientôt de nouveaux résultats sur l'activité radon dans SuperNEMO

Merci pour votre attention !

(Le radon c'est tabou, on en viendra tous à bout !)

Backup

Sensibilité chambre émanation Bordeaux

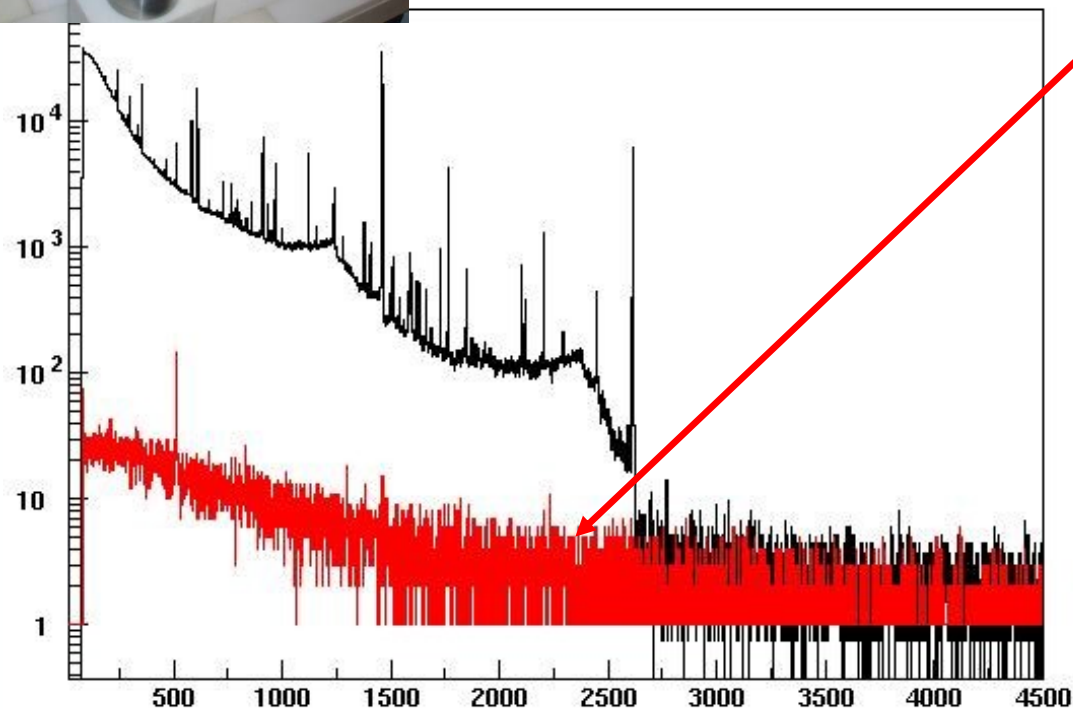
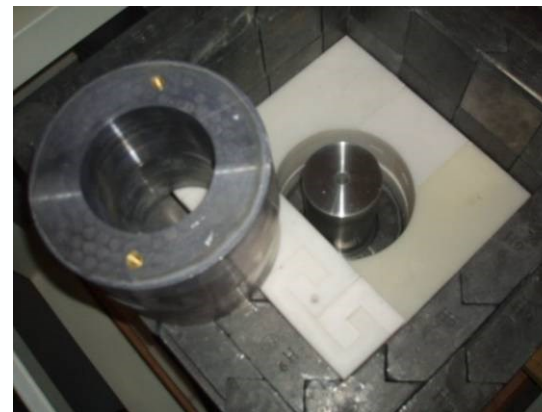


HPGe PRISNA



détecteur Ge puits

Blindage de Pb



Disparition des pics γ
du bruit de fond ambiant