

Caractérisation des bruits de fonds dans les expériences de recherche d'événements rares en laboratoire souterrain

Maryvonne De Jésus
Institut de Physique Nucléaire de Lyon
In2p3/CNRS

Plan

- Origine des bruits de fonds
- Stratégies de protection/réduction des bruits de fonds
- Sélection des matériaux

Origine des bruits de fond

1. Rayonnements cosmiques
2. Radioactivité cosmogénique
3. Radioactivité naturelle
4. Radioactivité anthropogénique

Quelques rappels activité et unités :

Activité d'un nucléide : $A(t) = \lambda N(t)$

$A(t)$ = nombre de désintégrations par seconde

Unité : Bq (Becquerel)

(1Ci(Curie) = 3.7×10^{10} Bq = 37 GBq = Activité de 1g de ^{226}Ra pur)

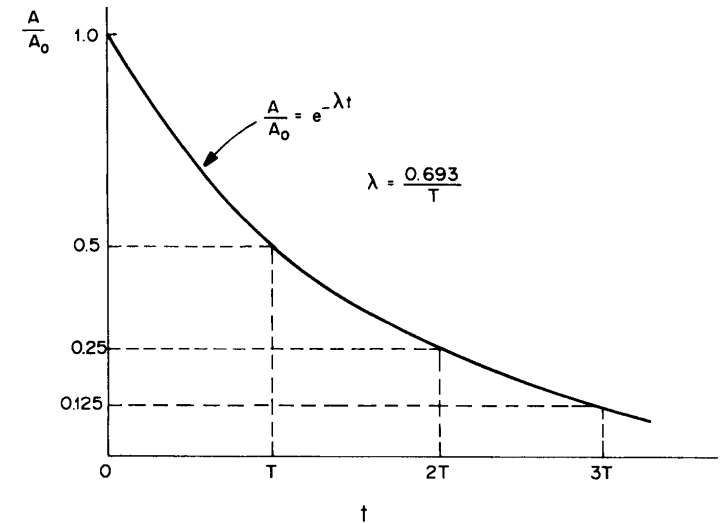
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} = \frac{A}{A_0} = e^{-0.693t/T}$$

Demi-vie , période

Donnée dans les tables T ($T_{1/2}$) $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$

Vie moyenne ,
Constante de
désintégration

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0.693}$$



Quelques rappels activité et unités :

Activité Spécifique $As = \frac{N \ln 2}{M T_{1/2}} f \text{ Bq/g}$

N = nombre d'Avogadro = 6.023×10^{23} atomes/mole

M = Masse atomique g

$T_{1/2}$ = période ou demi-vie s

f = taux d'embranchement de la décroissance considérée

Unités :

(Exercice)

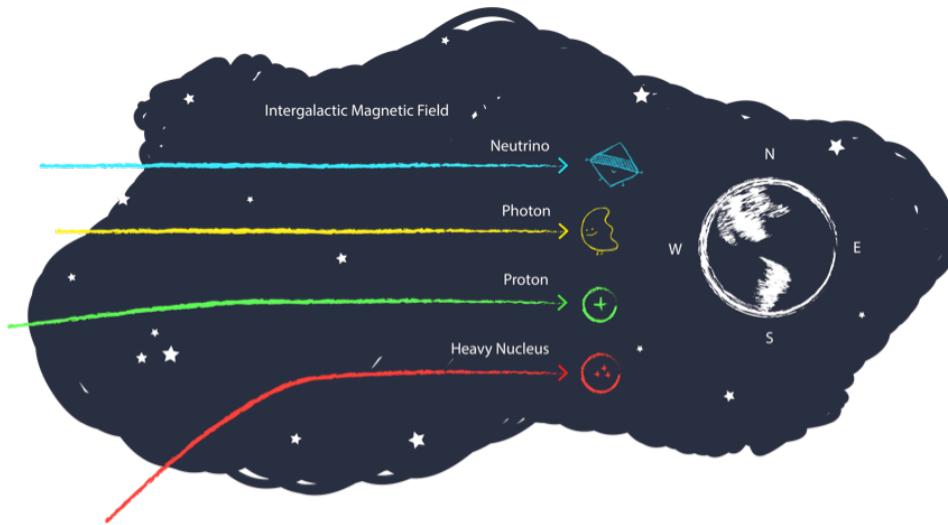
Fraction de masse	Activité Spécifique
1 ppb = 10^{-9} g/g	^{238}U 12,35 mBq/kg
	^{232}Th 4,06 mBq/kg
	^{40}K 31 $\mu\text{Bq/kg}$

$$1 \text{ ppm} = 10^{-6} \text{ g/g}, 1 \text{ ppt} = 10^{-12} \text{ g/g}$$

<http://radiopurity.in2p3.fr/conversion.html>

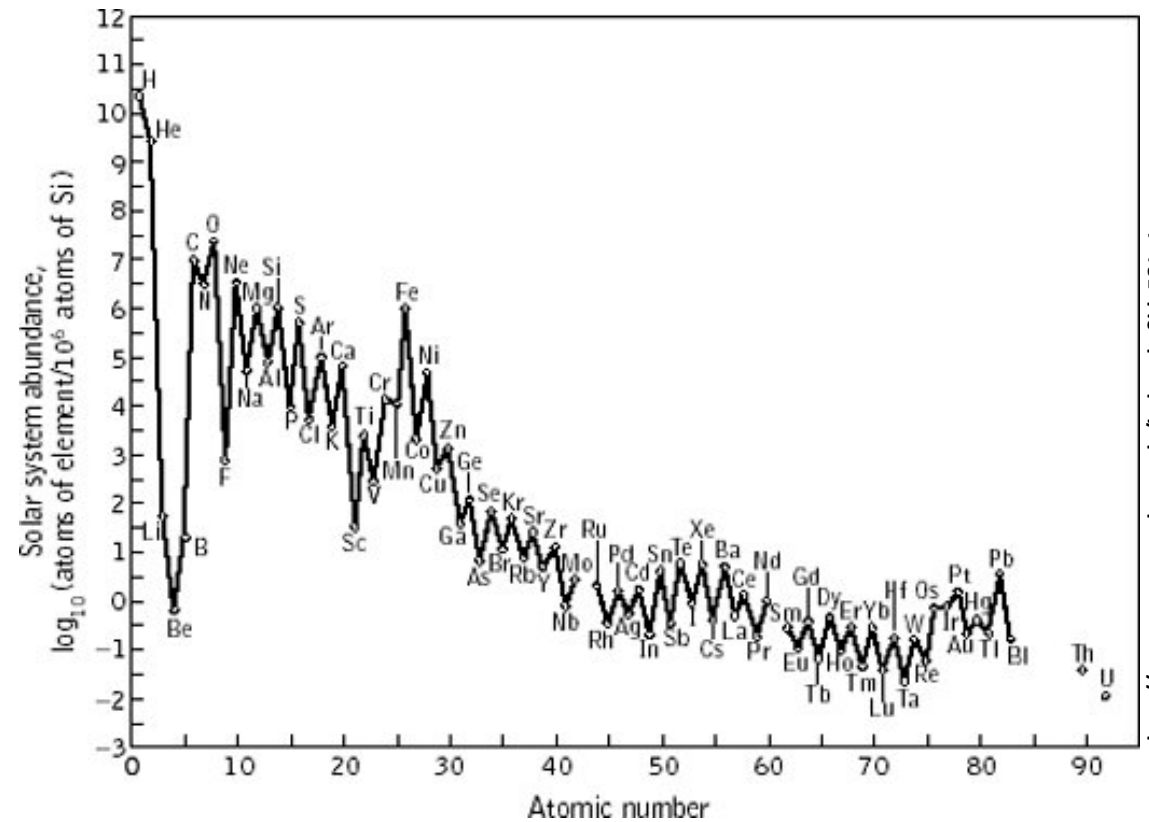
Activité Spécifique	Fraction de masse
^{238}U $81 \times 10^{-9} \text{ g/g} = 81 \text{ ppb}$	1 Bq/kg
^{232}Th $246 \times 10^{-9} \text{ g/g} = 246 \text{ ppb}$	
(1460keV) ^{40}K $32.3 \times 10^{-6} \text{ g/g} = 32.3 \text{ ppm}$	

Rayonnements cosmiques



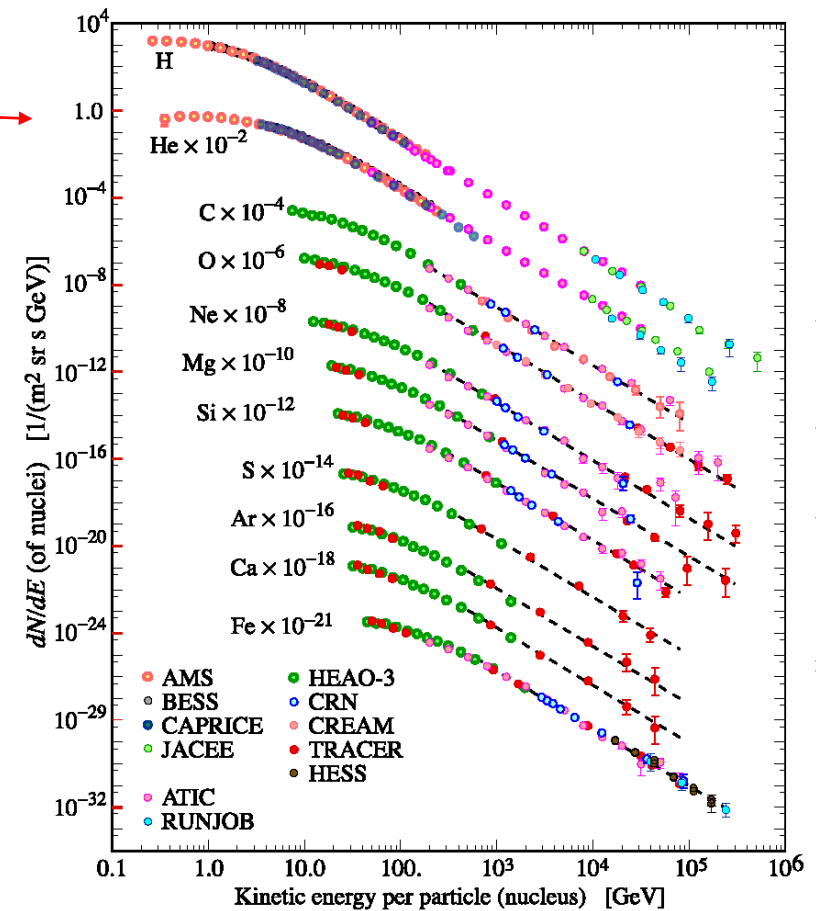
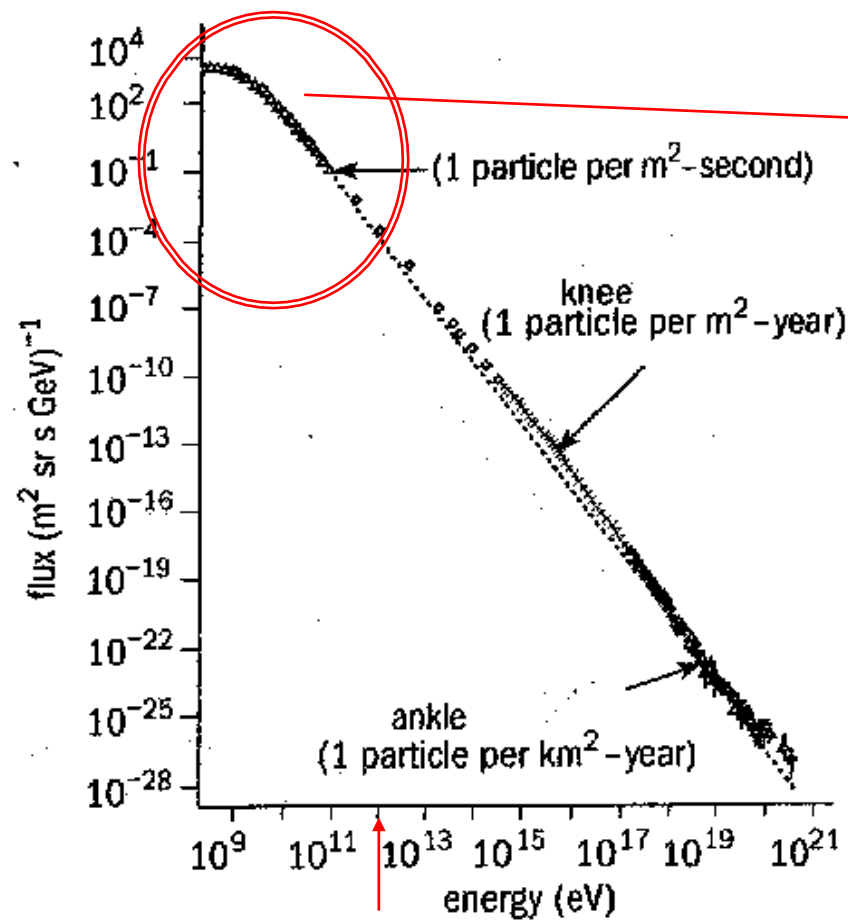
Nucléosynthèse primordiale + stellaire

Abondances des éléments au voisinage du soleil (/10⁶ Si)



<http://www.nucastro.ph.tum.de/index.php?id=5&L=1>

Rayonnements cosmiques



<http://w3.ihe.ac.be/~aguiar/PHYS-467/PA3.slides.html>

Rayonnements cosmiques

Spallation, photodésintégration, absorption de neutrons,...

Gaz constituants de l'air sec	Pourcentages en volume
Azote (N ₂)	78,09
Dioxygène (O ₂)	20,95
Argon (A)	0,93
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,035
Néon (Ne)	1,8 10 ⁻³
Hélium (He)	5,24 10 ⁻⁴
Krypton (Kr)	1,0 10 ⁻⁴
Hydrogène (H ₂)	5,0 10 ⁻⁵
Xénon (Xe)	8,0 10 ⁻⁶
Ozone (O ₃)	1,0 10 ⁻⁶
Radon (Rn)	6,0 10 ⁻¹⁸

Au niveau de la mer :

- Composante muonique : $\mu^+ \mu^-$
- Composante EM : $e^- e^+ \gamma$
- Composante hadronique : $p n N \dots$

+ Activation

-> Radioactivité cosmogénique

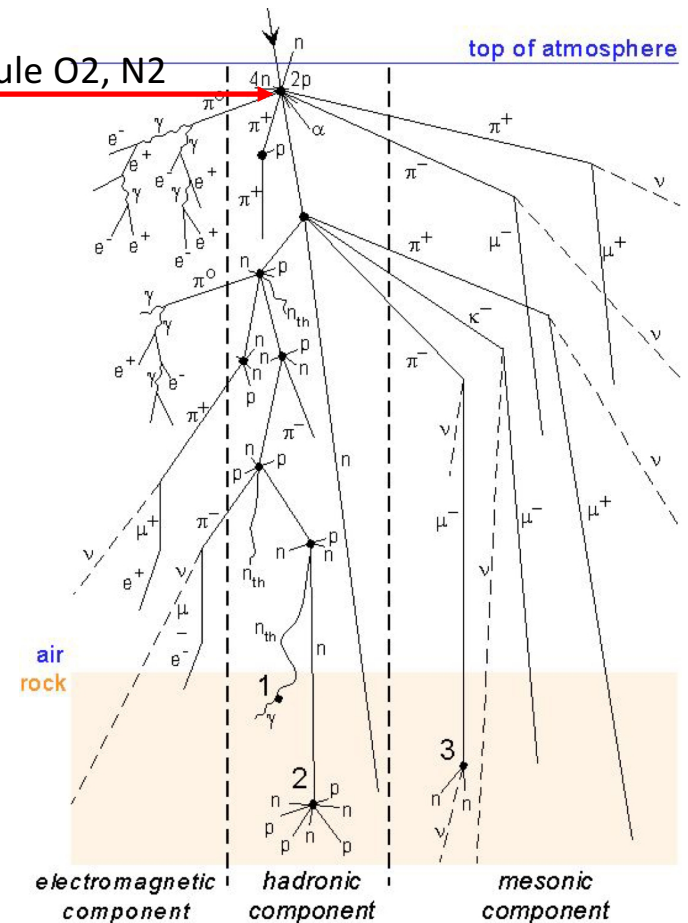
Interaction avec une molécule O₂, N₂

-> $\pi^+ \pi^-$, $K^+ K^-$, ...

$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

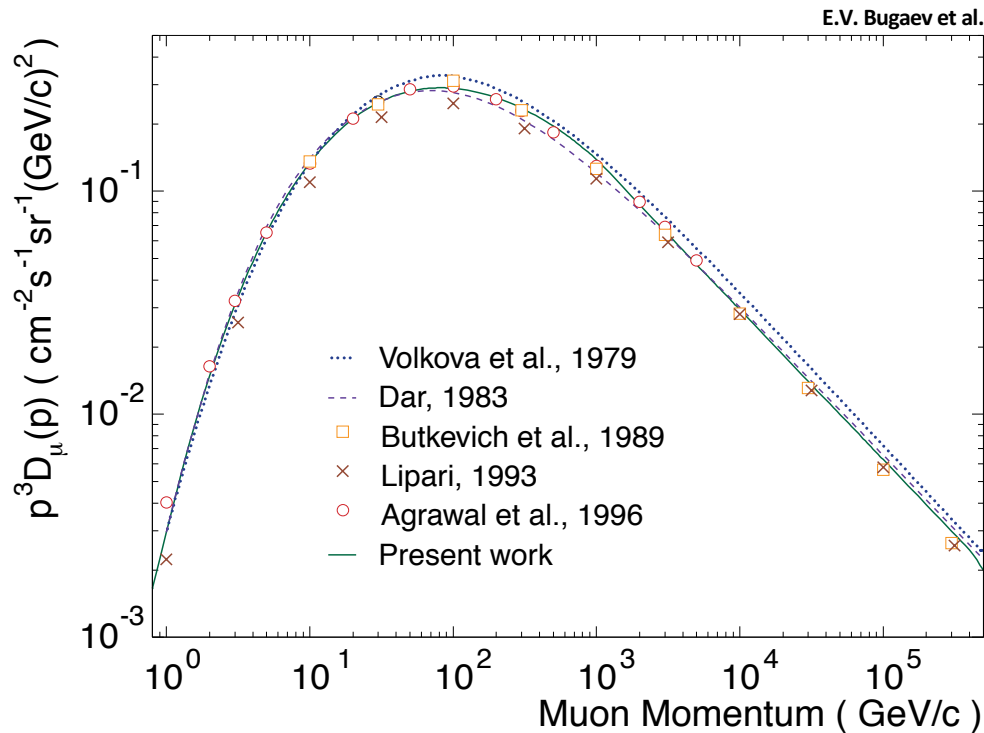
$\pi \rightarrow \mu + \nu$

...



Rayonnements cosmiques

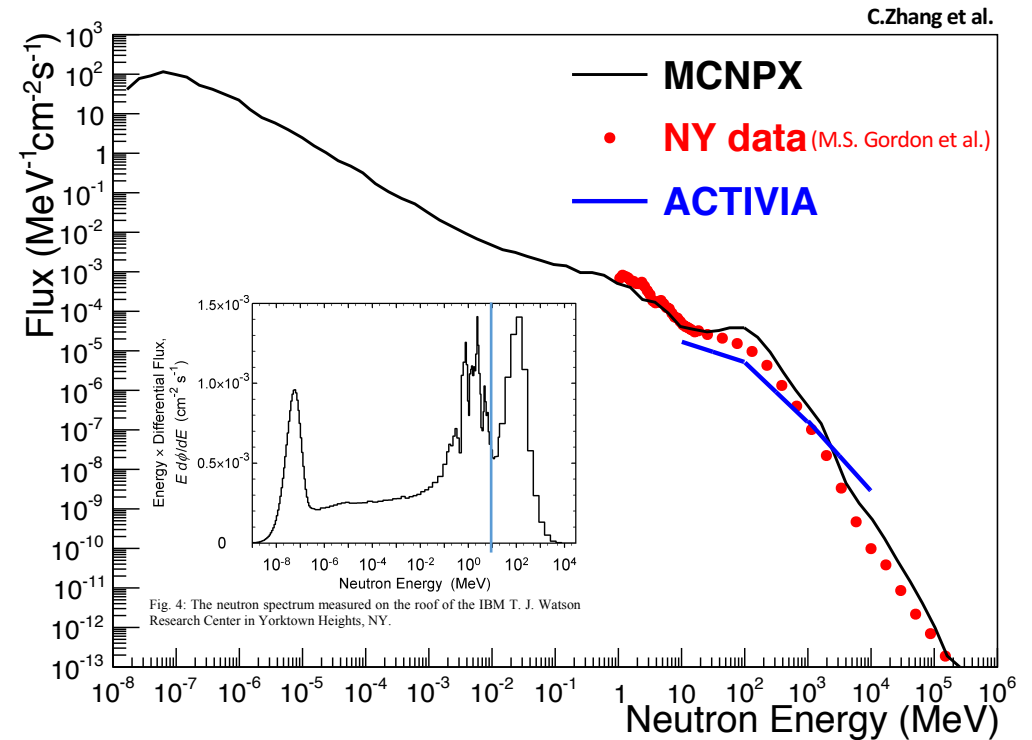
Flux de muons et neutrons au niveau de la mer



Flux muons à la surface :

$$\phi \sim 100\text{-}200 \mu / \text{m}^2/\text{s}$$

$$\langle E_\mu \rangle \sim 4 \text{ GeV}$$



Flux neutrons à la surface :

- $1 \times 10^{-8} - 4 \text{ MeV}$ $\phi \sim 20 \text{ n/m}^2/\text{s}$
- $E_n > 1 \text{ MeV}$ $\phi \sim 80 \text{ n/m}^2/\text{s}$

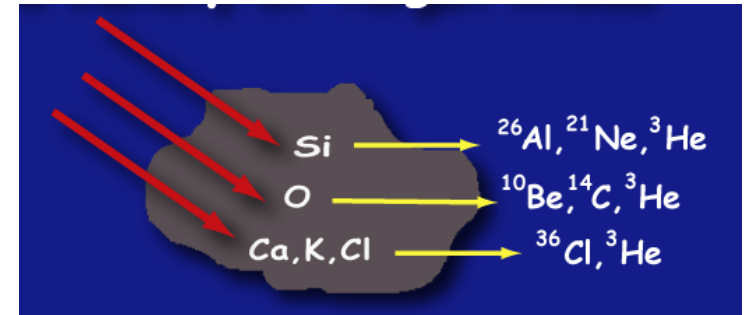
Radioactivité Cosmogénique

Le bombardement des molécules de l'air et des matériaux à la surface terrestre crée des isotopes radioactifs qui vont décroître en émettant des particules α β et γ qui vont contribuer au bruit de fond

Main cosmogenic nuclides

Nuclide	Main targets		$T_{1/2}$
	Atmosphere	In Situ	
^3He	N, O	O, Si, Fe, Mg	Stable
^{21}Ne	Ar	Mg, Al, Si, Fe	Stable
^{10}Be	N, O	O, Si, Fe, Mg	1,5 Ma
^{26}Al	Ar	Si, Al, Fe	730 ka
^{36}Cl	Ar	Fe, Ca, K, Cl	300 ka
^{41}Ca	-	Ca, Fe	100 ka
^{14}C	N	O, Mg, Si, Fe	5730 a

In Situ = Croute terrestre

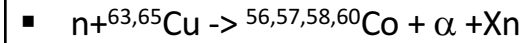


Radioactivité Cosmogénique

Isotopes radioactifs produits dans un cristal de Ge par les rayons cosmiques

Isotope	Décroissance T1/2	Energie déposée dans le cristal
³ H	β ⁻ , 12.33 a	E _{β⁻} = 18.6 keV
⁴⁹ V	EC, 330 j	E _K (Ti) = 5 keV
⁵⁴ Mn	EC, β ⁺ ,	E _γ = 840.8 keV, E _K (Cr) = 5.4 keV
⁵⁵ Fe	EC, 2.73 a	E _K (Mn) = 6 keV
⁵⁷ Co	EC, 271.8 j	E _γ = 20.81, 142.8 keV, E _K (Fe) = 6.4 keV
⁵⁸ Co	EC, β ⁺ , 70.9 j	E _γ = 817.2 keV, E _K (Fe) = 6.4 keV
⁶⁰ Co	β ⁻ , 5.27 a	E _{β⁻} = 318 keV E _γ = 1173.2, 1332.5 keV
⁶³ Ni	β ⁻ , 100.4 a	E _{β⁻} = 66.95 keV
⁶⁵ Zn	EC, β ⁺ , 244.3 j	E _γ = 1124.4 keV, E _K (Cu) = 8-9 keV
⁶⁸ Ge	EC, 270.8 j	E _K (Ga) = 10.37 keV
⁶⁸ Ga	EC, β ⁺ , 67.6 m	Q = 2921.1 keV

Activation du Cuivre :



...

émission de γ

Parameters used in computations [7]

Nuclide	% Abundance	Reaction	Cross section (b) σ_0	Half-life
³⁸ Ar	0.063	(n, γ)	0.8	–
³⁹ Ar	–	(n, γ)	600	269 yr
⁴⁰ Ar	99.6	(n, γ)	0.64	–
⁴¹ Ar	–	(n, γ)	0.5	1.827 h
⁴² Ar	–	–	–	32.9 yr
¹⁴ N	99.63	(n, p)	1.82	–
¹⁴ C	–	(n, γ)	$< 10^{-6}$	5730 yr

P.Cennini et al.

Aucun blindage ne peut éviter cette activation.

Seule solution : laboratoire souterrain

Radioactivité Naturelle Primordiale

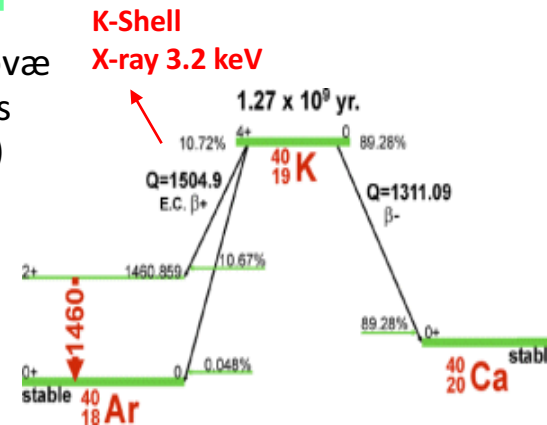
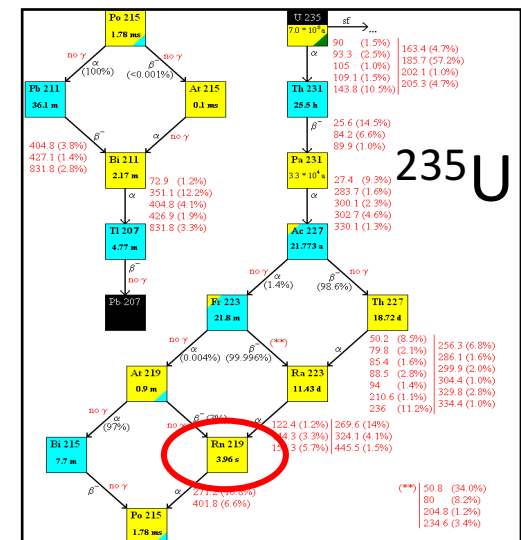
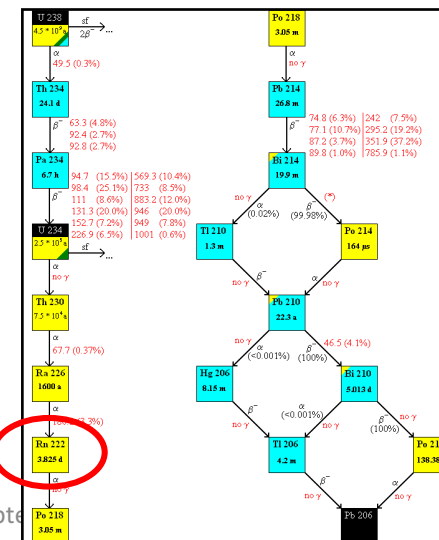
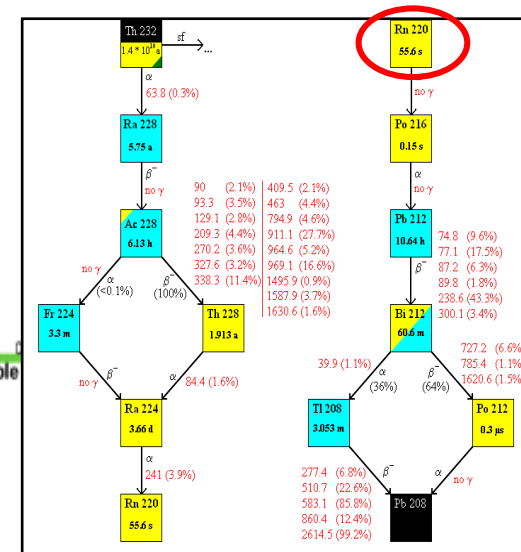
Eléments radioactifs qui sont issus de l'explosion de la supernovæ qui est à l'origine de la formation du système solaire et dont les durées de vies sont extrêmement longues ($\sim$ milliard d'années)

- Trois chaînes radioactives naturelles ($T_{1/2} > 10^8$ ans) et leurs descendants
- Potassium : 2,5% de la masse totale de la croûte terrestre
0,0117% ^{40}K dans $^{\text{nat}}\text{K}$

-> émission de particules α β et γ

-> émission de n et de fragments de fission

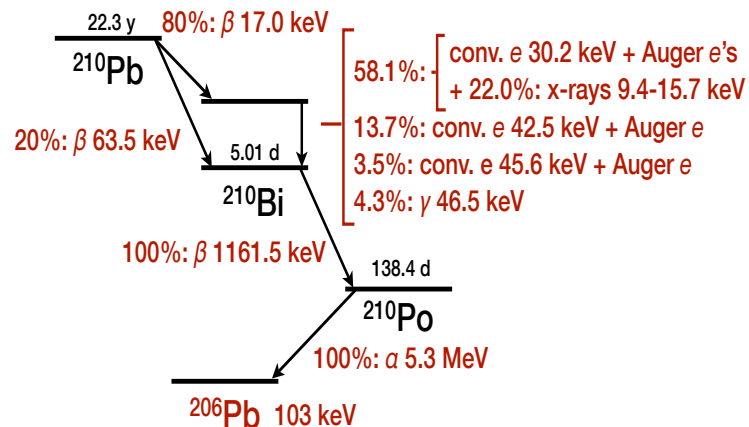
-> émission de Radon $^{222,220,219}\text{Rn}$ (gaz)

 ^{238}U 

Radioactivité Naturelle Primordiale

-> émission de Radon $^{222,220,219}\text{Rn}$ (gaz)

- $^{232}\text{Th} \rightarrow \text{Thoron } ^{220}\text{Rn} \dots$
- $^{235}\text{U} \rightarrow \text{Actinon } ^{219}\text{Rn} \dots$
- $^{238}\text{U} \rightarrow \text{Radon } ^{222}\text{Rn}$
... $\rightarrow ^{210}\text{Pb}$ ($T_{1/2}=22.3$ ans) ...



arXiv:1305.2405v3

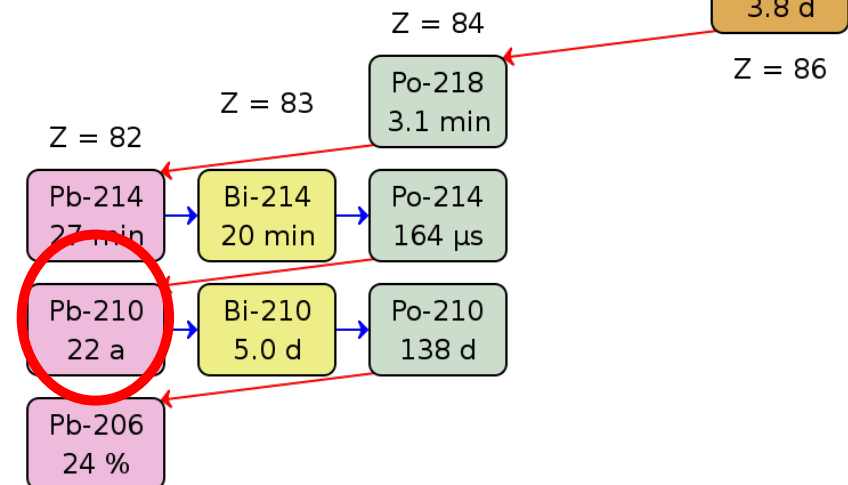
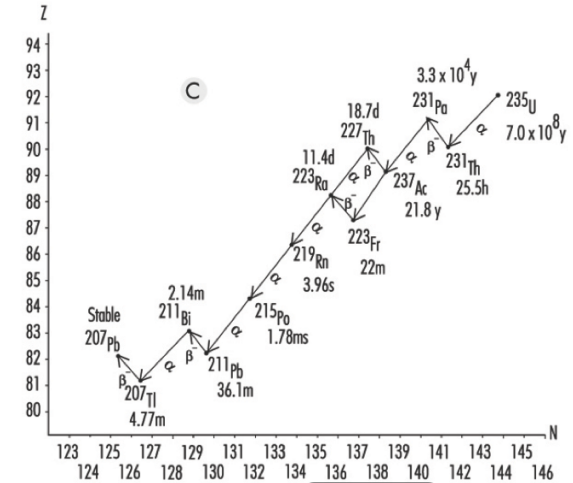
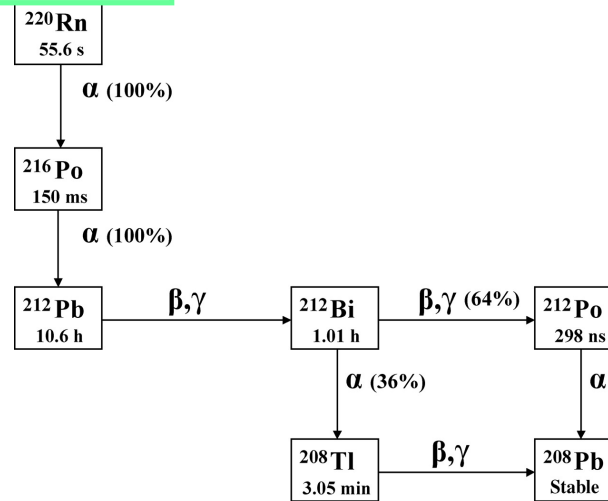
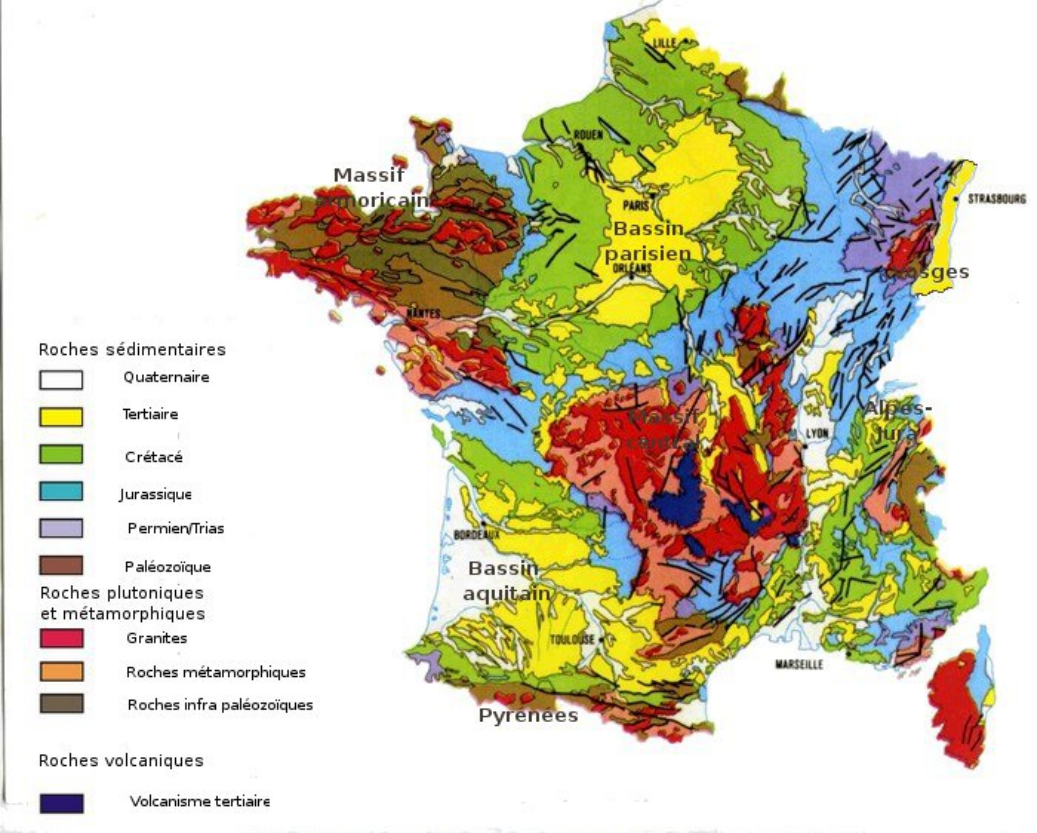
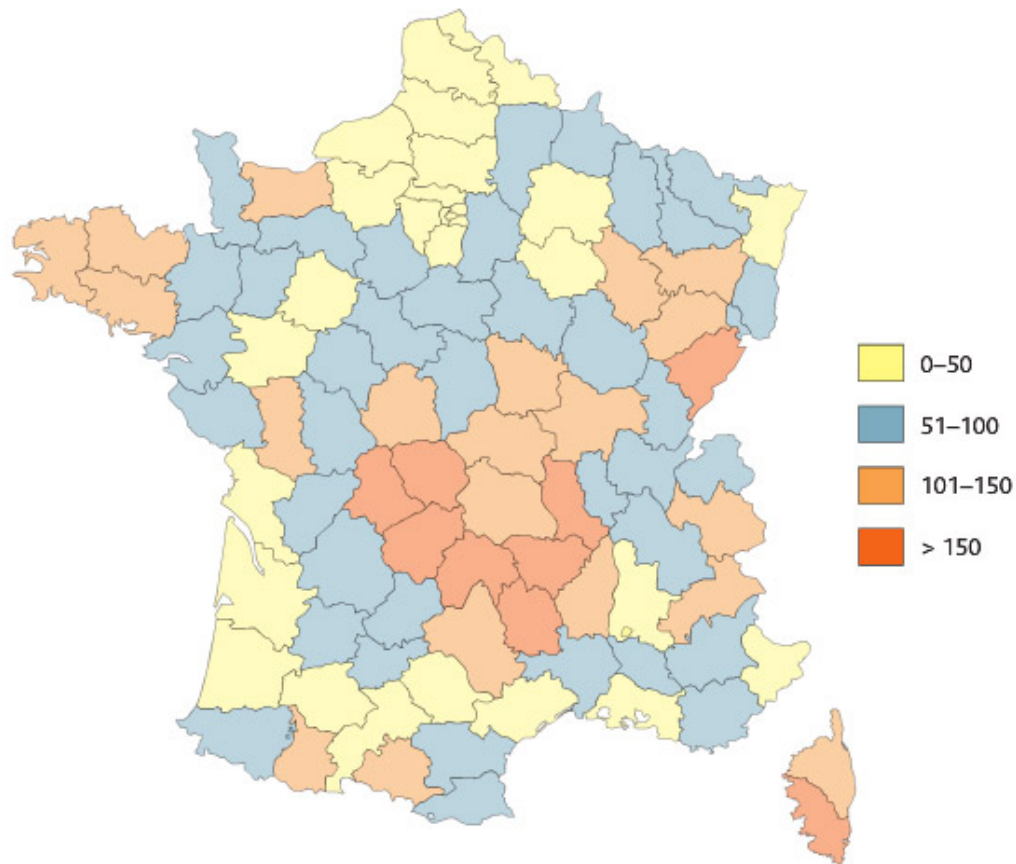


FIG. 2. Decay chain for ^{210}Pb showing the most significant decays which end in a ^{206}Pb nucleus from the ^{210}Po alpha decay.

Radioactivité Naturelle Primordiale

Carte de France représentant la concentration en radon dans l'air des habitations



Radioactivité Naturelle Primordiale

Quelques ordres de grandeurs :

Il n'existe aucun matériau sur Terre qui soit 100% « clean » radioactif !!!!!!!

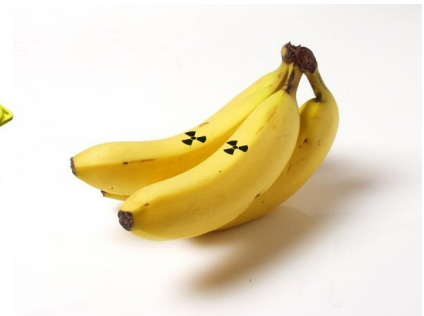
- Uranium naturel : 3 g/m³ de terre
3 mg/m³ d'eau de mer
- Thorium naturel : 12 g/m³ de terre

Dans 1 hectare (100x100m²) de 1m de profondeur
-> ~30 kg d'Uranium naturel (0,71% ²³⁵U) soit ~213g d'²³⁵U

Le corps humain (~70 kg) contient ~ 150g de ^{nat}K -> ~ 4500 Bq (Faire l'exercice)

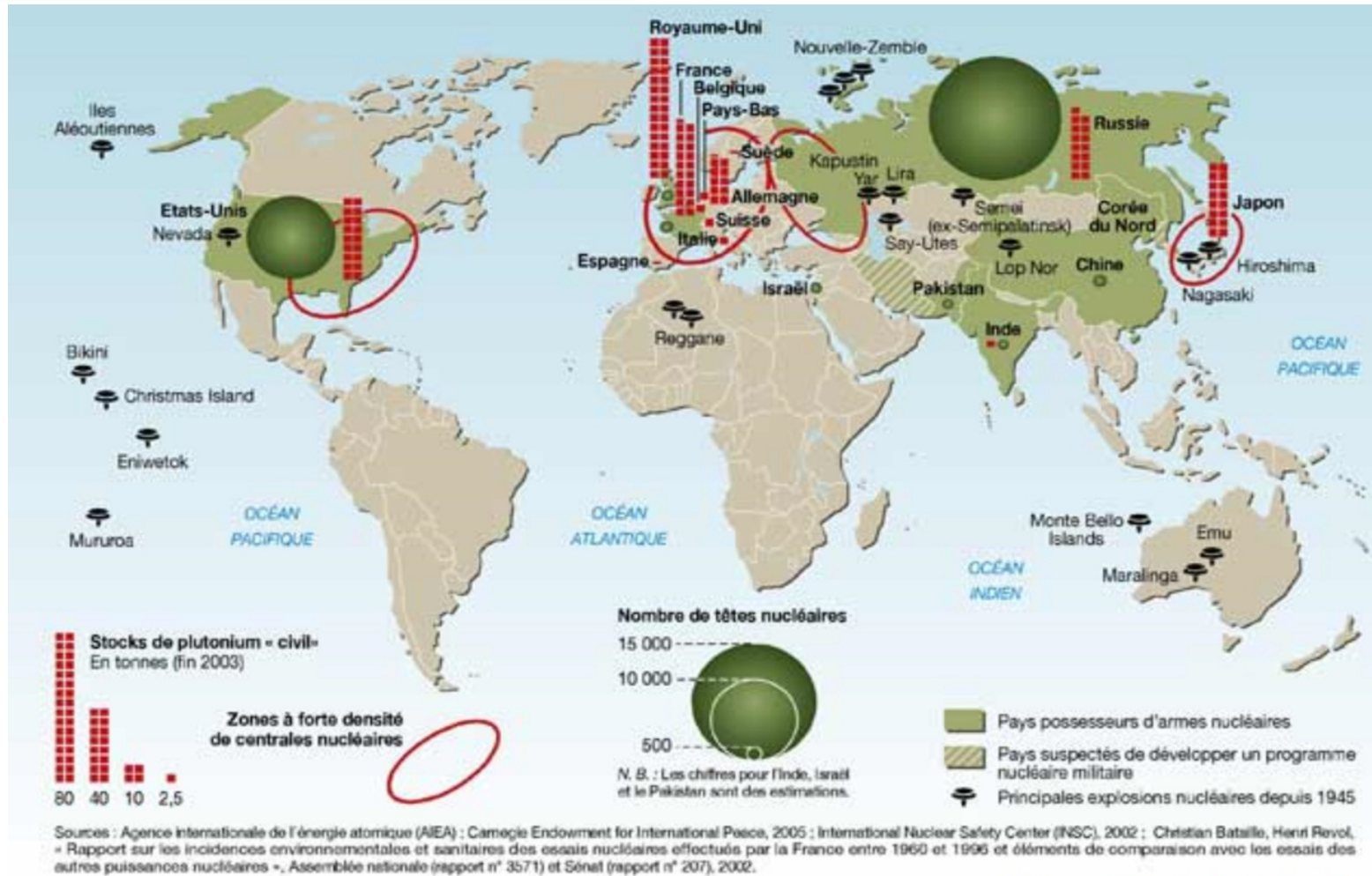
Banane -> 520 pCi/unité ~150g soit ~20 Bq ⁴⁰K

Noix du Brésil -> 12 nCi/kg ~ 500 Bq/kg



Radioactivité Anthropogénique

<http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/nuctestsum.html>



<http://www.monde-diplomatique.fr/cartes/nucleaire2>

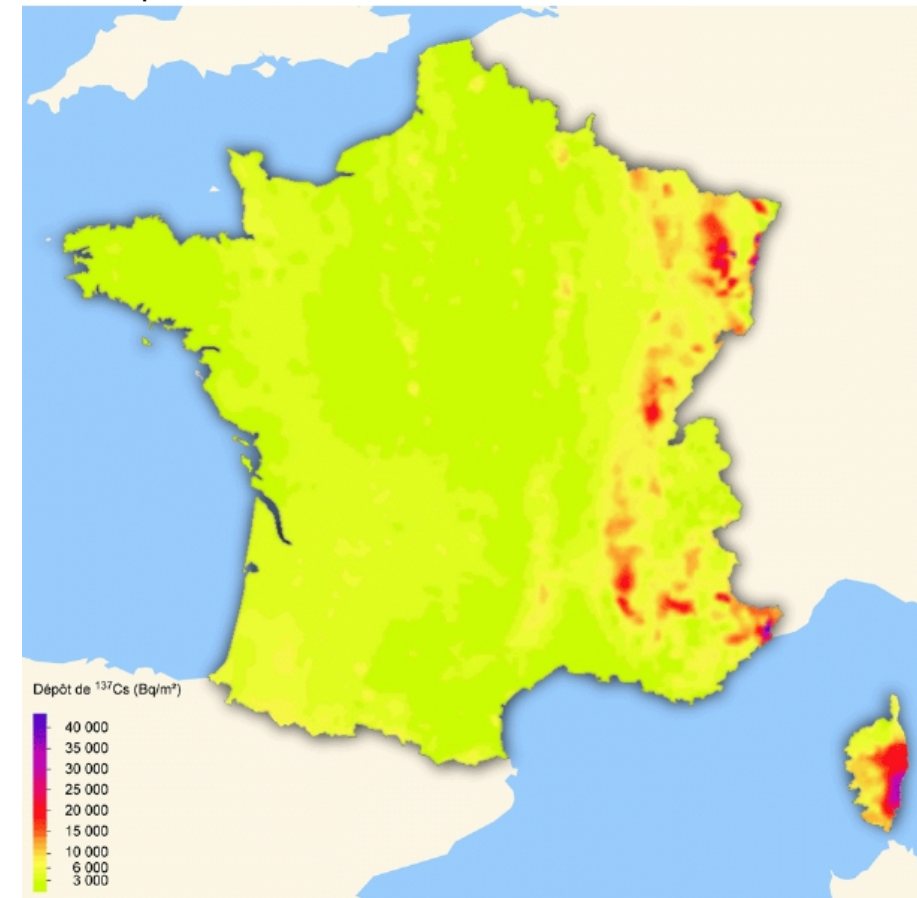
Radioactivité Anthropogénique

Principaux radionucléides artificiels présents dans l'environnement en France

Radionucléide	Période radioactive	Émissions principales	Principal descendant	Origines principales
3H	12,32 ans	Bêta	3He	Cosmique, essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire et horlogère
14C	5 730 ans	Bêta	14N	Cosmique, essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire et de la recherche
60Co	5,27 ans	Bêta, gamma	60Ni	Rejets de l'industrie nucléaire
90Sr	28,78 ans	Bêta	90Y	Essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire
131I	8 jours	Bêta, gamma	131Xe	Rejets de l'industrie nucléaire et des services de médecine nucléaire
137Cs	30,07 ans	Bêta, gamma	137Ba	Essais nucléaires, accident de Tchernobyl, rejets de l'industrie nucléaire
238P	87,7 ans	Alpha	234U	Essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire
239+240Pu	24 100 et 6 560 ans	Alpha	235+236U	Essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire

<http://www.irs.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite>

Activités potentielles de ^{137}Cs dans les sols en 2006

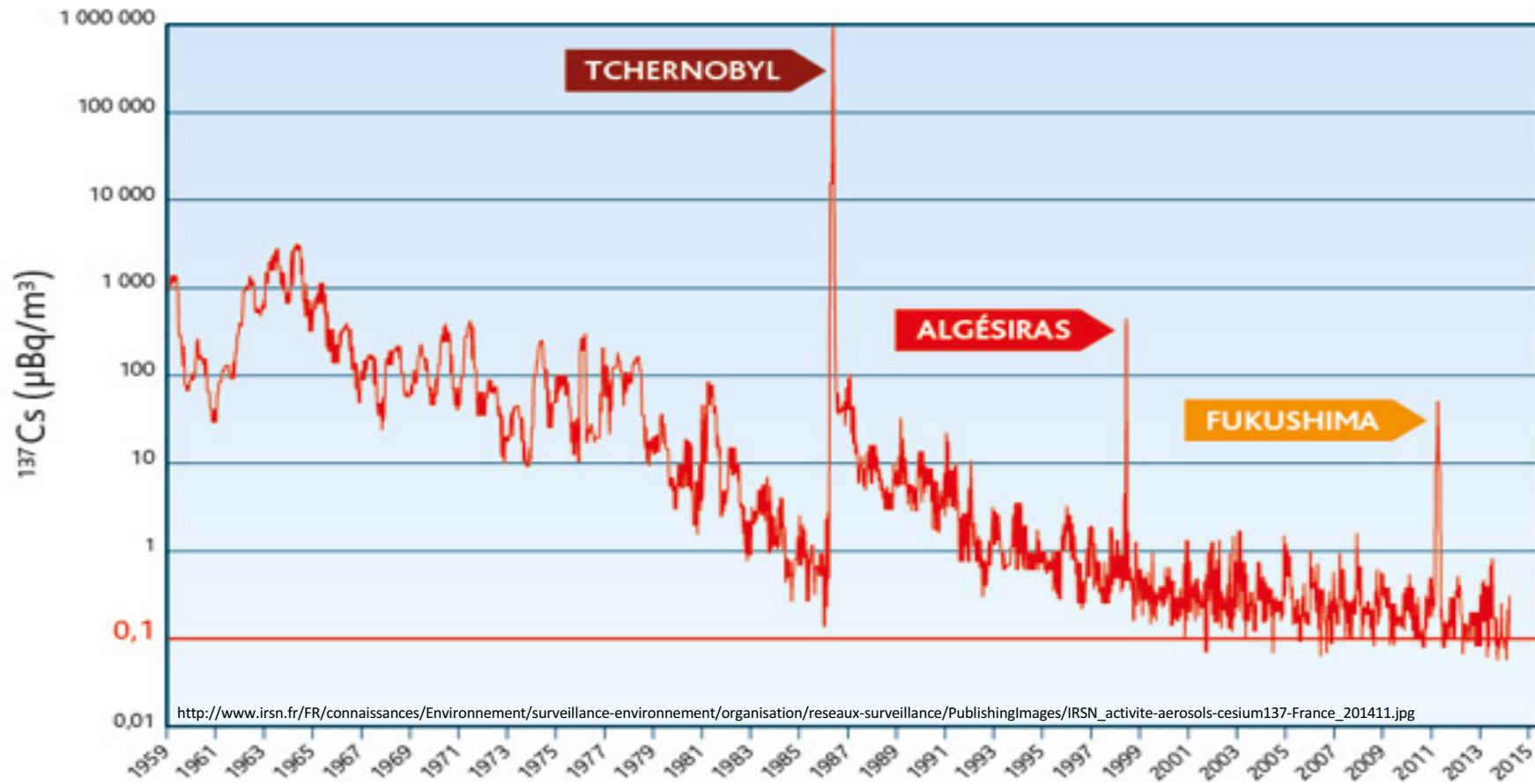


Source : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), 2010.

http://http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/L_essentiel_sur/Environnement/Sol_et_sous-sol/Le_sol/2014/sol2014-carte12a.jpg/

Radioactivité Anthropogénique

Activités en césium 137 des aérosols en France métropolitaine

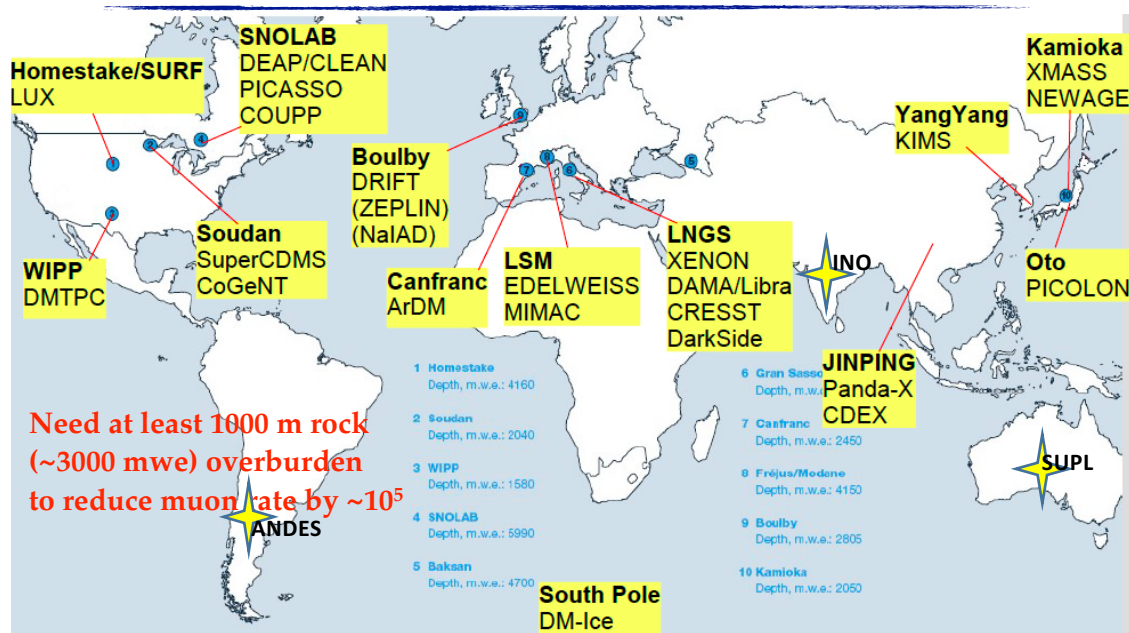


Stratégies pour la réduction des bruits de fond

- Installation en site souterrain profond
- Système de veto actif / muons résiduels
- Bruit de fond radiogénique, blindages passifs
- Salle propre
- Stratégies anti-radon



Laboratoires souterrains

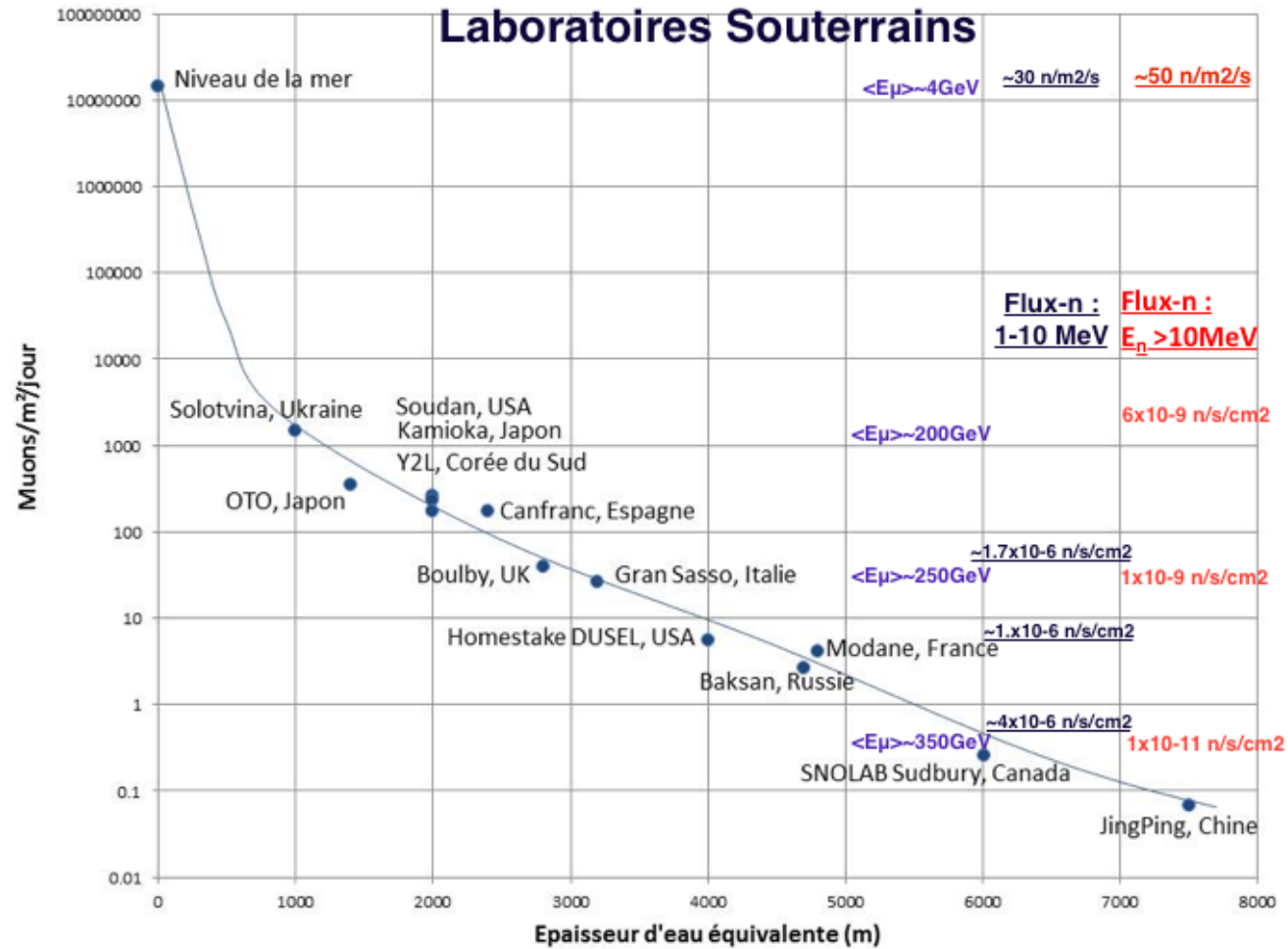


Jodi Cooley, Fermilab Academic Lectures Dec 2013

J.Formaggio

Laboratory	Depth (m)	Depth (mwe)	Rock Type	Lab area (m ²)	Access
Gran Sasso, Italy	1400	3800	Dedicated, rock	5400	Horizontal
Baksan, Russia	Up to 2000	Up to 4800	Dedicated, rock	600	Horizontal
Canfranc, Spain	Up to 860	Up to 2450	Dedicated, rock	172	Horizontal
Modane (Fréjus), France	1760	4600	Dedicated, rock	410	Horizontal
Solotvina, Ukraine	430	1000	Mine (salt)		
WIPP, U.S.	600	1600	Mine (salt; nuclear waste)	Up to 4000	Vertical Truck lift
Soudan, U.S.	710	2100	Non-op. mine (metals)	Up to 4000	Vertical
CUPP, Finland	To 980 m	Up to ~ 2700	Mine (metals)	Up to 4000	Vertical and truck ramp
Kamioka, Japan	1000	2700	Mine (metals)	Over 750	Horizontal
Boulby, U.K.	1100	3000	Mine (salt)	1000	Vertical
Sudbury, Canada	2160	6000	Mine (metals)	380 + new construction	Vertical
China Jinping Underground Laboratory (CJPL)	2400	7500	Dedicated, Rock	2Halls, 4000m ³	Horizontal

Laboratoires souterrains



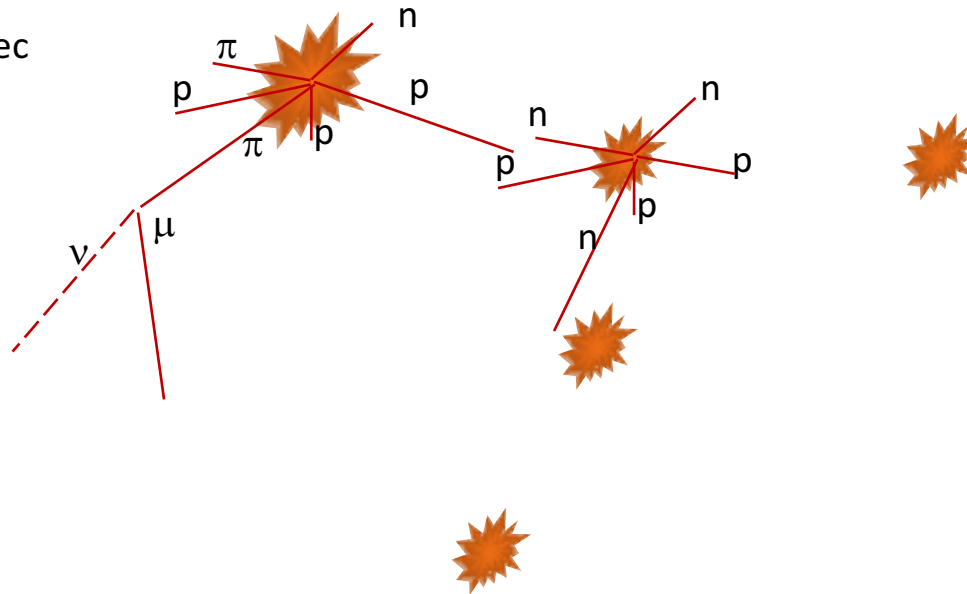
Veto muons actif

Flux de muons est réduit de plusieurs ordres de grandeurs ; néanmoins les muons qui survivent sont ceux ayant des énergies $> \text{TeV}$ à la surface ($\langle E_\mu \rangle \sim 260 \text{ GeV}$ pour LSM et Boulby).

Les muons vont interagir avec la roche, l'environnement du détecteur et le détecteur lui-même.

Ces interactions vont produire entre autres particules des neutrons avec une multiplicité et des énergies élevées.

→ Veto muon en coïncidence avec les détecteurs pour rejeter les périodes avec événement muon



Thèse Holger M. Kluck 2013

Thèse Cécile Kéfélian 2016

Veto muons actif

Flux de muons est réduit de plusieurs ordres de grandeurs ; néanmoins les muons qui survivent sont ceux ayant des énergies $> \text{TeV}$ à la surface ($\langle E_\mu \rangle \sim 260 \text{ GeV}$ pour LSM et Boulby).

Les muons vont interagir avec la roche, l'environnement du détecteur et le détecteur lui-même.

Ces interactions vont produire entre autres particules des neutrons avec une multiplicité et des énergies élevées.

➡ Veto muon en coïncidence avec les détecteurs pour rejeter les périodes avec événement muon

Ex: EDW (Thèse Cécile Kéfélian 2016)

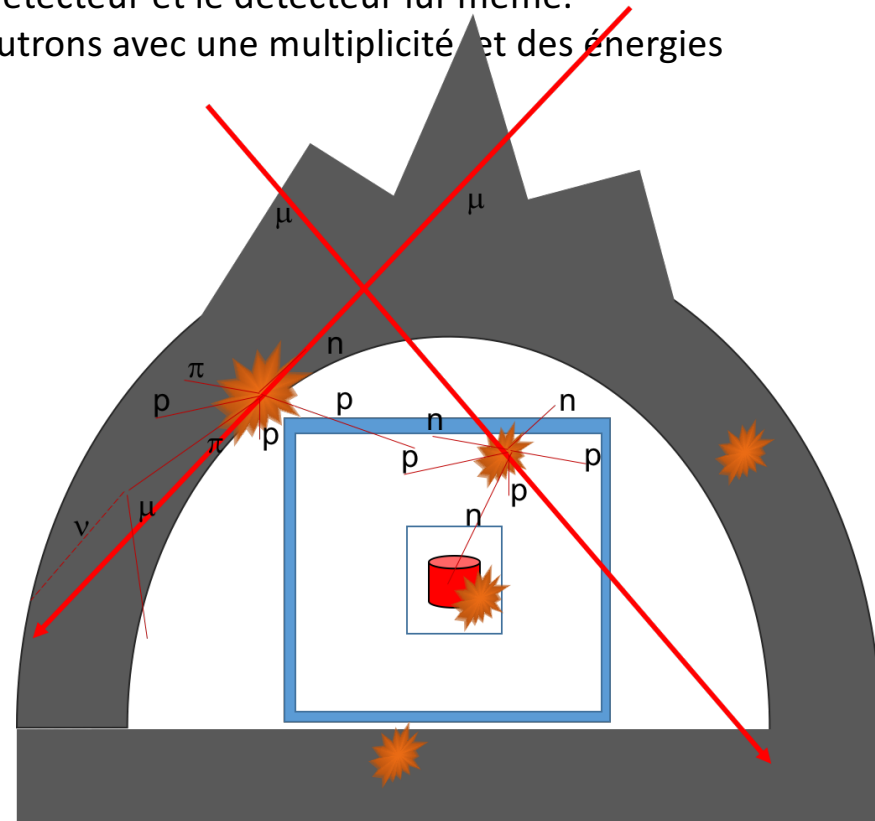
Taux de reculs nucléaires simples induits par des n cosmogéniques dans Edelweiss 10-200 keV

-> $R=0.36$ reculs pour 600 kg.jours

Après rejet coïncidences veto muons :

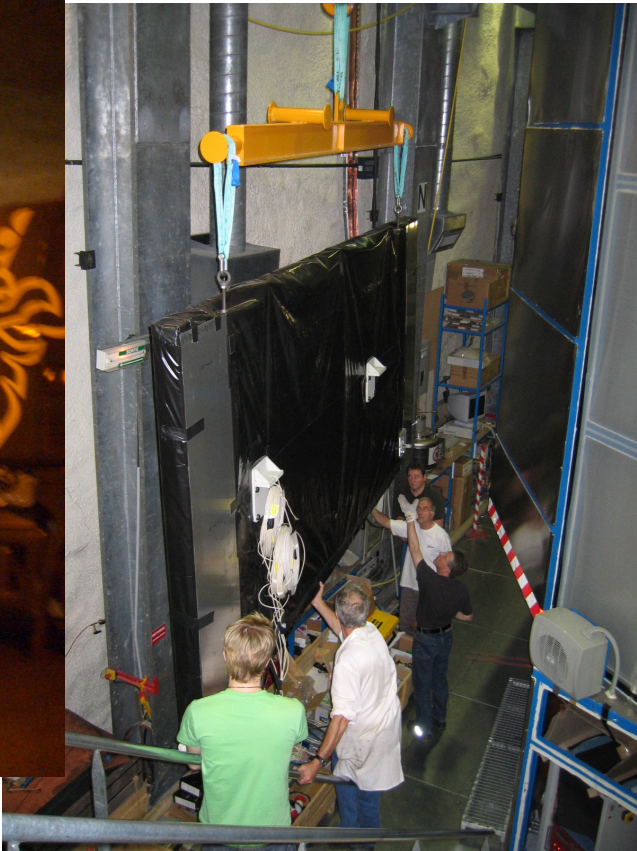
-> <0.06 reculs pour 600 kg.jours

Thèse Holger M. Kluck 2013

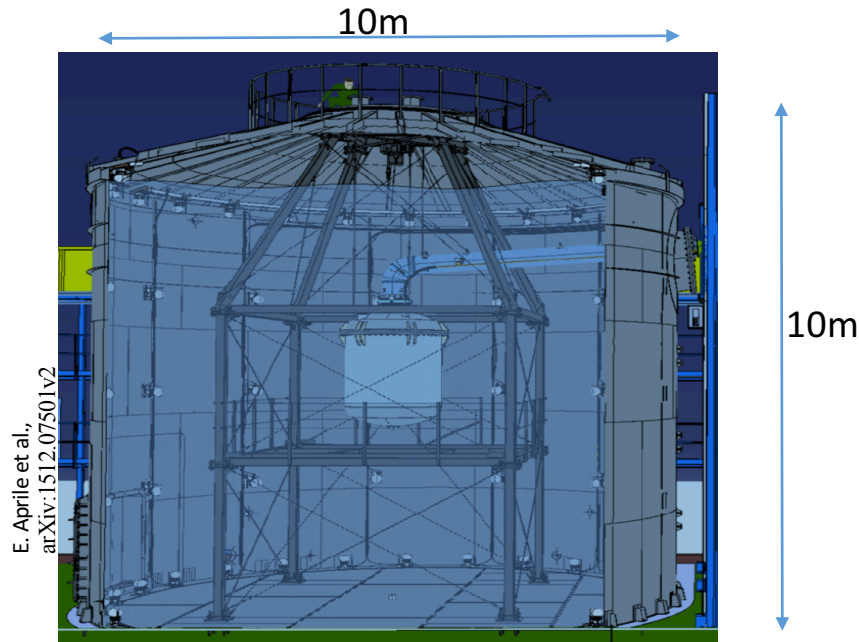


Veto muons Edelweiss

Montage Veto Muon EDELWEISS au LSM Scintillateurs plastiques



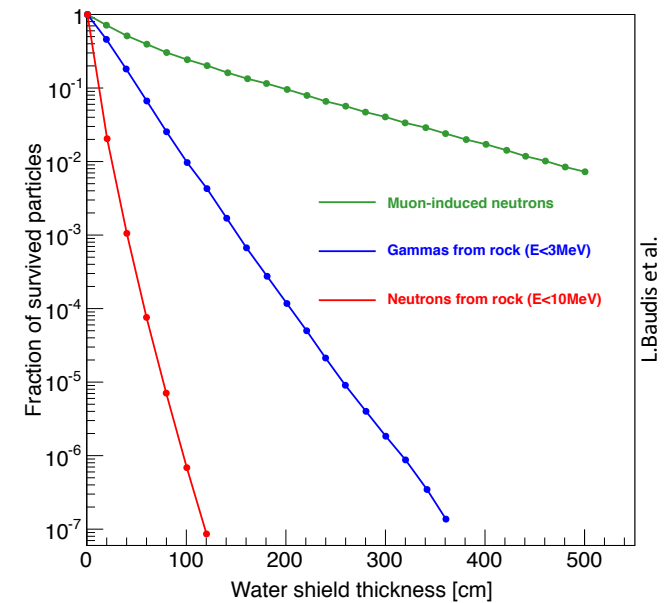
Veto muons Xenon1T -> Darwin 50T



Veto muons = eau + PM + réflecteur

Projet Darwin 50T LXe : $\varnothing = 14$ m

MC simulation for XENON1T

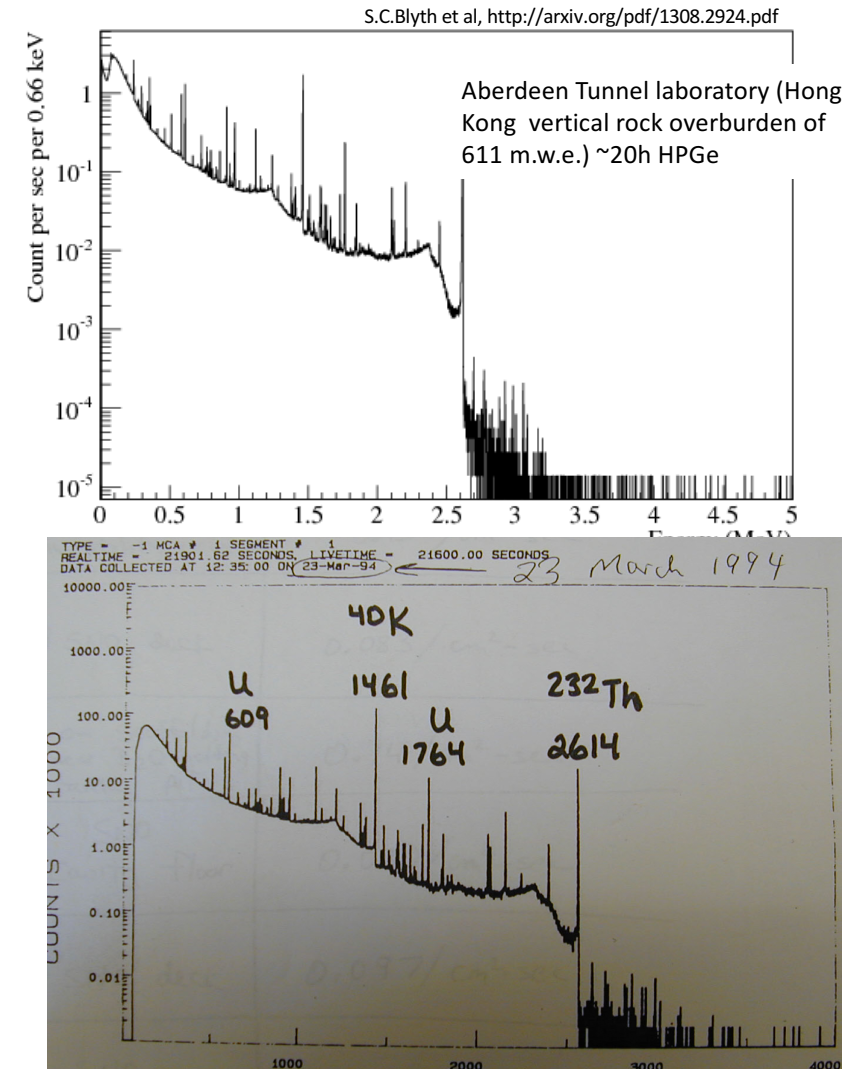
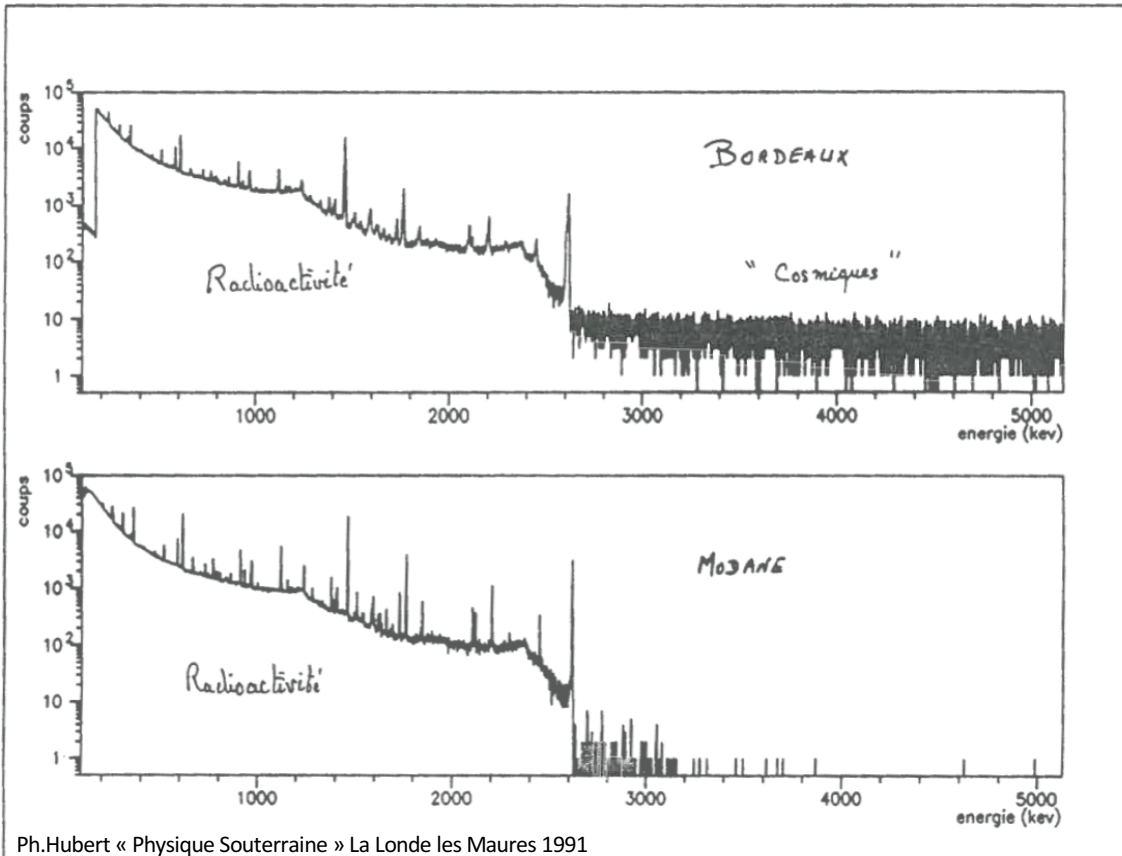


Cosmogenic (MC: 7.3×10^{-10} n/(cm² s) for $E_n > 10$ MeV)

- < 0.01 events/(t y) in XENON1T/nT shield
- **< 0.003 events/(t y) in 14 m diameter water shield**

Bruit de fond radiogénique

Spectres Ge 100 cm³ Sans blindage t=60h.

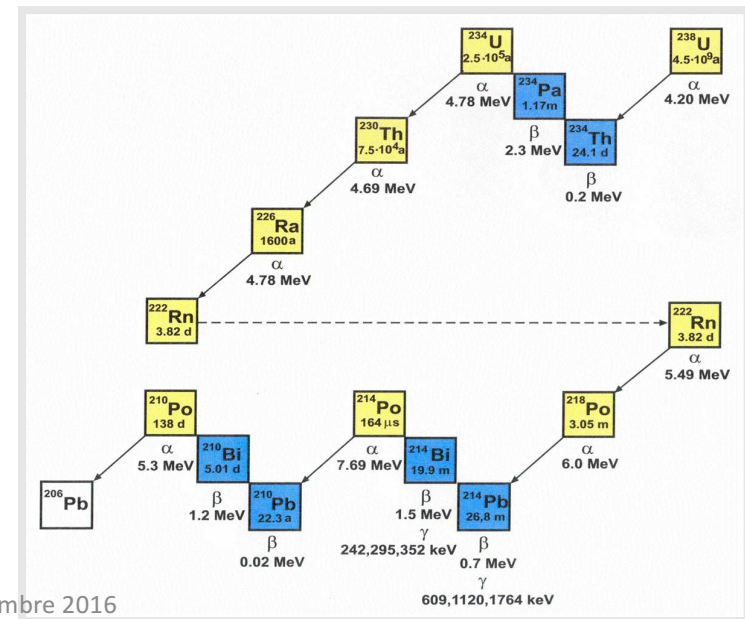
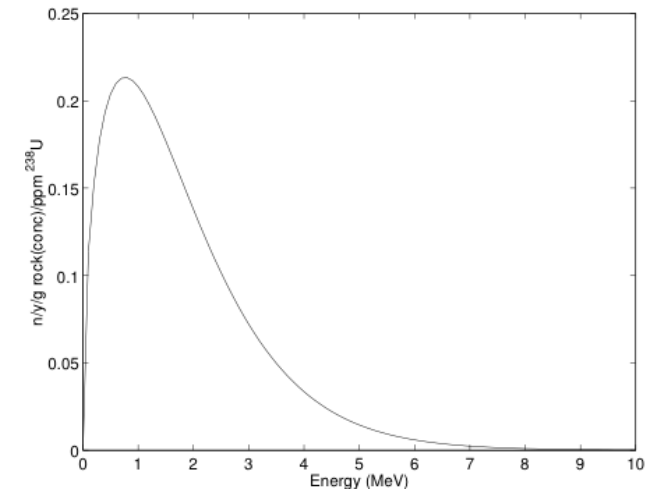


SNO cavity (6800ft UG ~2072m) Ge raw spectrum obtained in 1994

Blindage Passif

Radioactivité naturelle de la roche : uranium thorium potassium

- les α et β sont arrêtés dans l'air
- les γ et n vont pénétrer dans les matériaux
- neutrons
 - Fission $N(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{1/2}$
 - Réactions (α, n)
- Radon, Thoron, Actinon



Blindage Passif / gammas

²³⁸U

γ			α	β	from
E ^(b)	I ^(a)	(a,c) I _{c.e.}	E ^(b)	E ^(b)	
46.5	0.039	0.726	17.0		²¹⁰ Pb
63.3	0.043	0.018		106.0	²³⁴ Th
92.4	0.025	0.140		106.0	²³⁴ Th
92.8	0.024	0.004		106.0	²³⁴ Th
186.0	0.035	0.024	4602		²²⁶ Ra
186.0	0.025	0.003	4414		²³⁵ U
242.0	0.072	0.057	730.0		²¹⁴ Pb
295.0	0.177	0.083	730.0		²¹⁴ Pb
352.0	0.342	0.102	670.0		²¹⁴ Pb
609.0	0.428	0.009	2665		²¹⁴ Bi
768.0	0.046	7.4 × 10 ⁻⁴		1897	²¹⁴ Bi
934.0	0.029	7.2 × 10 ⁻⁴		1731	²¹⁴ Bi
1120	0.141	0.002	1545		²¹⁴ Bi
1238	0.056	7.1 × 10 ⁻⁴		1427	²¹⁴ Bi
1378	0.037	1.5 × 10 ⁻⁴		1897	²¹⁴ Bi
1408	0.027	1.0 × 10 ⁻⁴		1257	²¹⁴ Bi
1509	0.020	1.4 × 10 ⁻⁴		1156	²¹⁴ Bi
1730	0.028	7.3 × 10 ⁻⁵		1545	²¹⁴ Bi
1765	0.147	7.6 × 10 ⁻⁴		1510	²¹⁴ Bi
2204	0.046	1.5 × 10 ⁻⁴		1070	²¹⁴ Bi

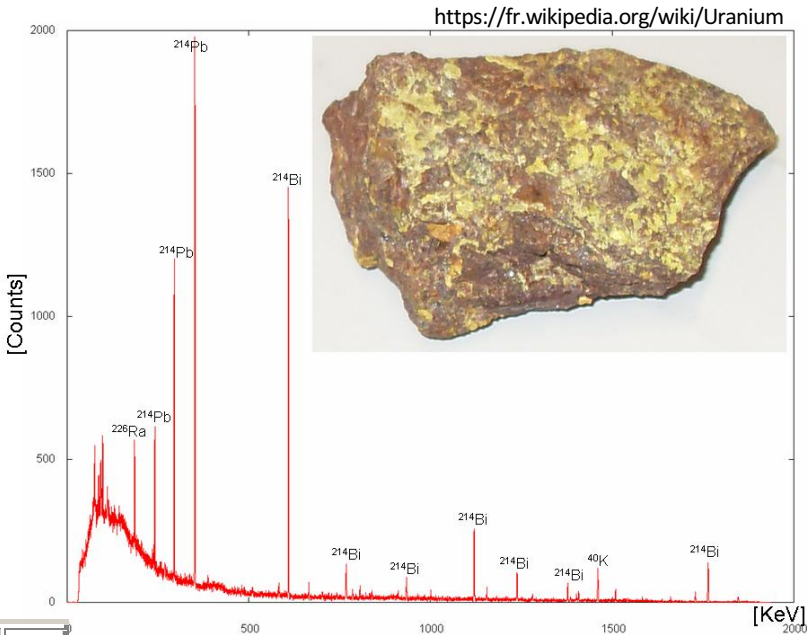
²³²Th

γ			α	β	from
E ^(b)	I ^(a)	(a,c) I _{c.e.}	E ^(b)	E ^(b)	
129.0	0.025	0.093		1955	²²⁸ Ac
209.0	0.039	0.003		1746	²²⁸ Ac
239.0	0.436	0.396	334.0		²¹² Pb
241.0	0.040	0.011	5449		²²⁴ Ra
270.0	0.034	0.002		1814	²²⁸ Ac
277.0	0.023	0.013		1519	²⁰⁸ Tl
300.0	0.033	0.016		157.0	²¹² Pb
328.0	0.030	9.0 × 10 ⁻⁴		1814	²²⁸ Ac
338.0	0.113	0.003		1746	²²⁸ Ac
463.0	0.044	0.002		710.0	²²⁸ Ac
511.0	0.081	0.009		1286	²⁰⁸ Tl
583.0	0.304	0.006	1796		²⁰⁸ Tl
727.0	0.067	9.4 × 10 ⁻⁴		1519	²¹² Bi
795.0	0.043	8.7 × 10 ⁻⁴		1019	²²⁸ Ac
861.0	0.045	0.001		1519	²⁰⁸ Tl
911.0	0.266	0.003	1173		²²⁸ Ac
965.0	0.051	5.6 × 10 ⁻⁴		1119	²²⁸ Ac
969.0	0.162	0.002		1173	²²⁸ Ac
1588	0.033	3.3 × 10 ⁻⁵		496.0	²²⁸ Ac
2615	0.356	0.003	2379		²⁰⁸ Tl

²³⁵U

γ			α	β	from
E ^(b)	I ^(a)	(a,c) I _{c.e.}	E ^(b)	E ^(b)	
25.6	0.006	0.029		305.0	²³¹ Th
27.4	0.004	0.015	5030		²³¹ Pa
50.2	0.004	0.002	5989		²²⁷ Th
144.0	0.005	0.001	4414		²³⁵ U
186.0	0.025	0.003	4414		²³⁵ U
236.0	0.005	3.4 × 10 ⁻⁴	5757		²²⁷ Th
256.0	0.003	7.6 × 10 ⁻⁴	5757		²²⁷ Th
269.0	0.006	0.005	5607		²²³ Ra
271.0	0.004	9.0 × 10 ⁻⁴	6553		²¹⁹ Rn
351.0	0.006	0.001	6279		²¹¹ Bi

Unités = keV



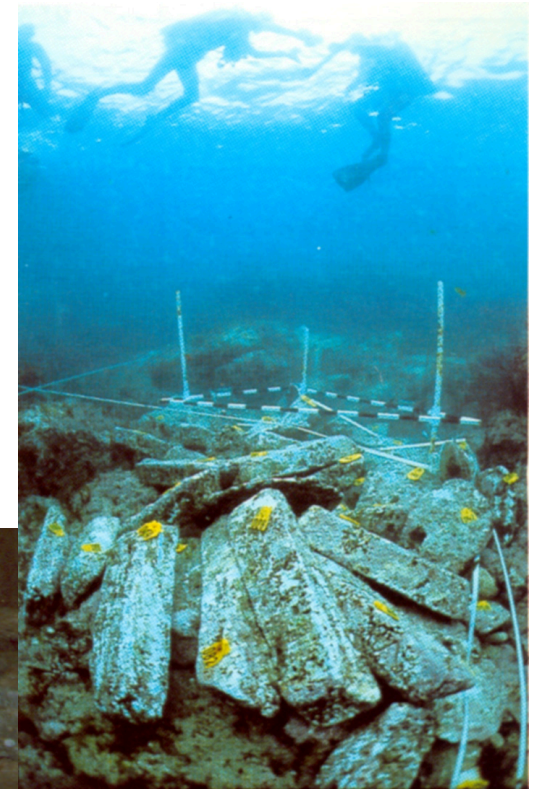
Minerai d'uranium

Blindage Passif / gammas

Blindages gammas : ~15cm de Pb efficace pour les gammas $< \sim 3$ MeV

- Plomb « normal » : ~ 130 Bq de ^{210}Pb /kg
- Plomb basse radioactivité : ≤ 30 Bq/kg
-> soit par écrémage soit récupération d'anciennes toitures
(Louvre, Cathédrale St Louis, ...)
- Plomb archéologique (*roman lead*) pour arrêter le 46 keV et les betas du Bi
-> épave de Ploumanac'h : < 0.02 Bq

Le plomb archéologique est aussi utilisé pour fabriquer de la soudure très basse radioactivité pour souder tous les éléments très proches des détecteurs.
(40% Pb archéologique et 60% d'étain de haute pureté)



Blindage Passif / neutrons

Neutrons :

- Fission $N(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{1/2}$
- Réactions (α, n) avec les éléments légers (H,C,O,Al,...) qui composent la roche

-> Suivant la composition de la roche le spectre total des neutrons va varier d'un laboratoire à l'autre

Composition chimique de la roche du LSM

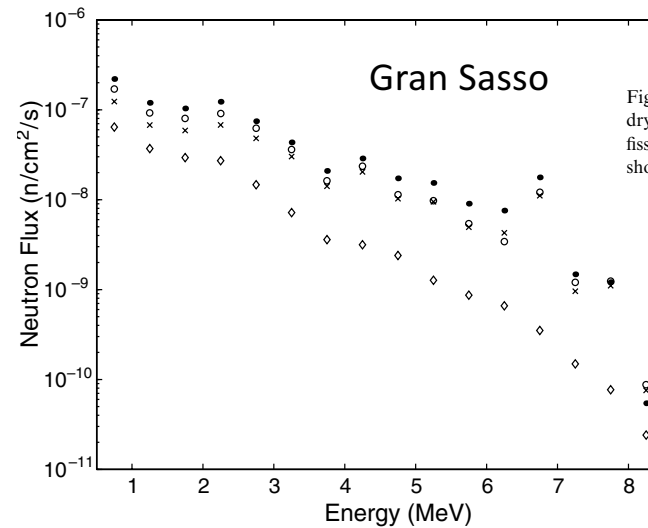
R.LemraniTAUP 2005

% mass	H	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Rock	1	6	50	0.44	0.84	2.6	7	0.06	0.21	31	0.07	0.03	1.9

Table 3.5 Chemical composition of LNGS rock.

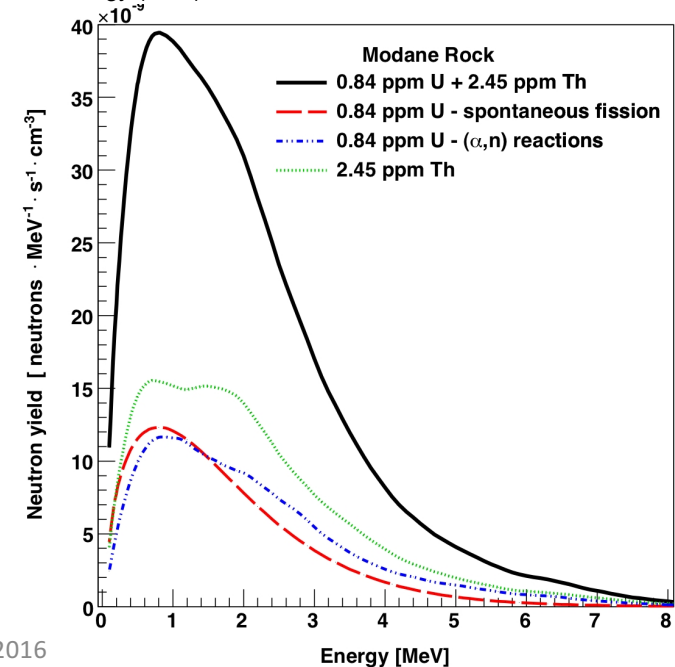
Element	Ca	C	O	Mg	Si	Al	K
% Weight	30.29	11.88	47.91	5.58	1.27	1.03	1.03

H.Wulandari 2003



H.Wulandari 2003

Fig. 3. Neutron flux at the Gran Sasso laboratory, ●: hall A, dry concrete, ×: hall A, wet concrete, ◇: hall A, dry concrete, fission reactions only and ○: hall C, dry concrete. Each point shows the integral flux in a 0.5 MeV energy bin.

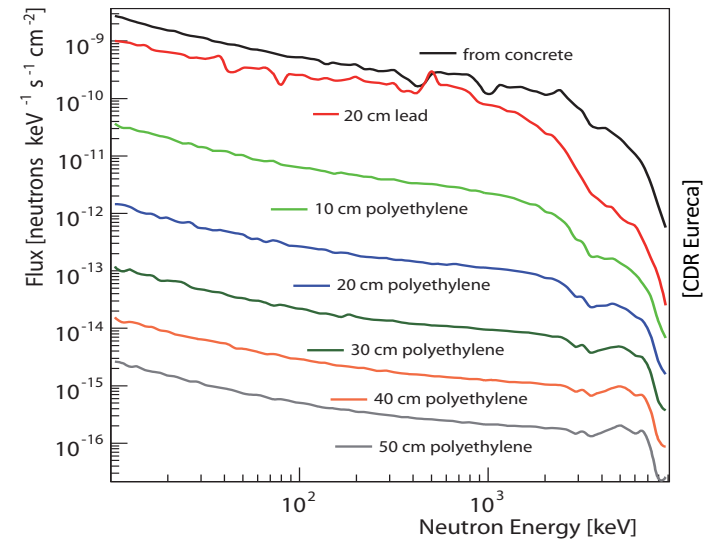


Blindage Passif / neutrons

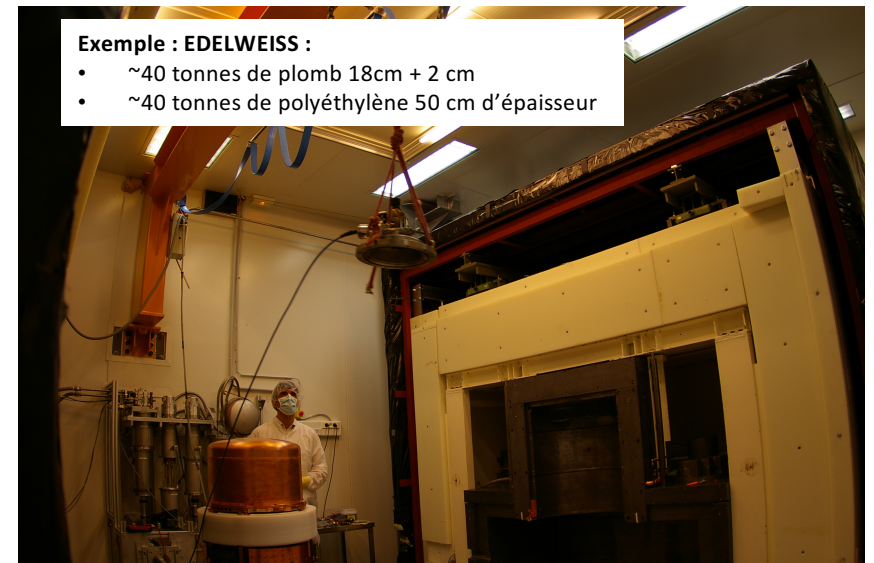
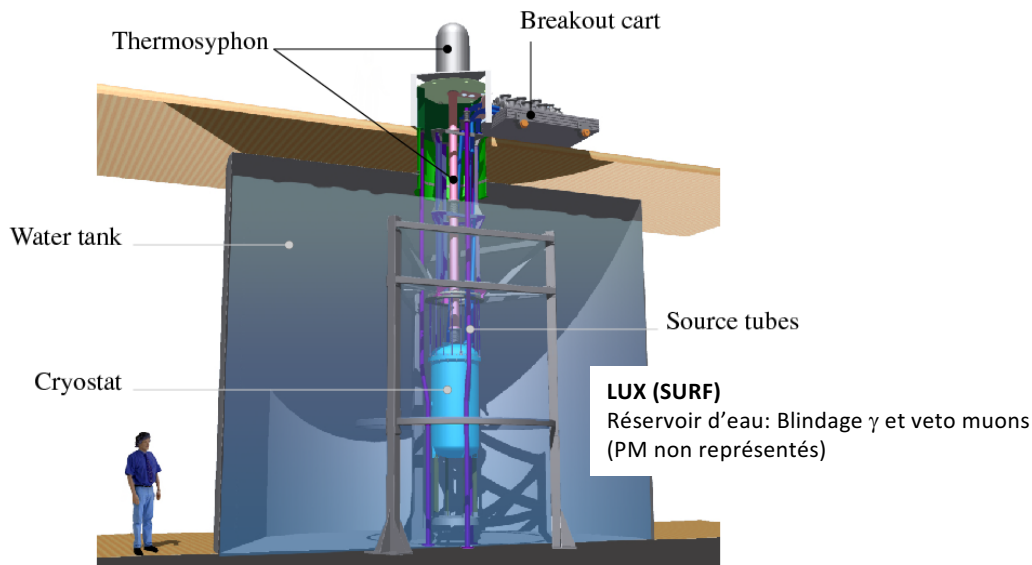
-> blindages neutrons $< \sim 10 \text{ MeV}$:

- éléments hydrogénés : polyéthylène $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$
- eau
- ...

Simulations du spectre des n sortant des murs du LSM



<https://inspirehep.net/record/1202984/plots>



Salle propre

Définition donnée par la norme NF EN ISO 14644 : «salle dans laquelle la concentration des particules en suspension dans l'air est maîtrisée et qui est construite et utilisée de façon à minimiser l'introduction, la production et la rétention de particules à l'intérieur de la pièce, et dans laquelle d'autres paramètres pertinents, tels que la température, l'humidité et la pression sont maîtrisés comme il convient ».



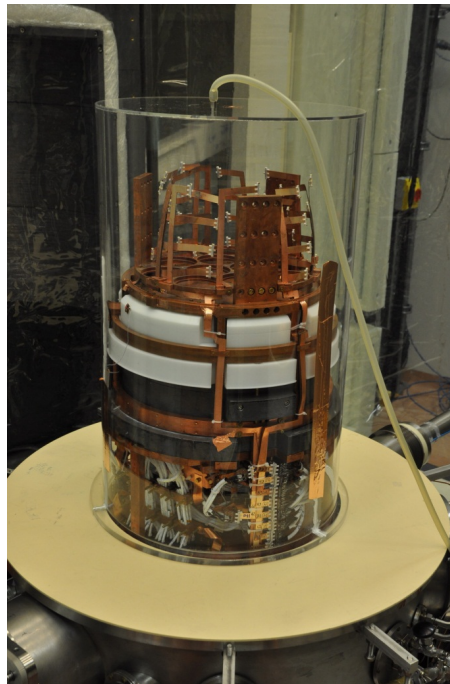
Classe ISO	Limites de concentration maximale (particules/m ³ d'air) pour des particules de taille supérieure ou égale à celles présentées ci-dessous.					
	≥ 0.1µm	≥ 0.2µm	≥ 0.3µm	≥ 0.5µm	≥ 1.0µm	≥ 5.0µm
Classe ISO 1	10	2				
Classe ISO 2	100	24	10	4		
Classe ISO 3	1,000	237	102	35	8	
Classe ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
Classe ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
Classe ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
Classe ISO 7				352,000	83,200	2,930
Classe ISO 8				3,520,000	832,000	29,300
Classe ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000



Salle propre



Salle propre classe 10 000



Ecole de Gif aussois 19-23 Septembre 2016

Balayage à l'azote des détecteurs
EDW pendant le stockage



Stratégies anti-Radon

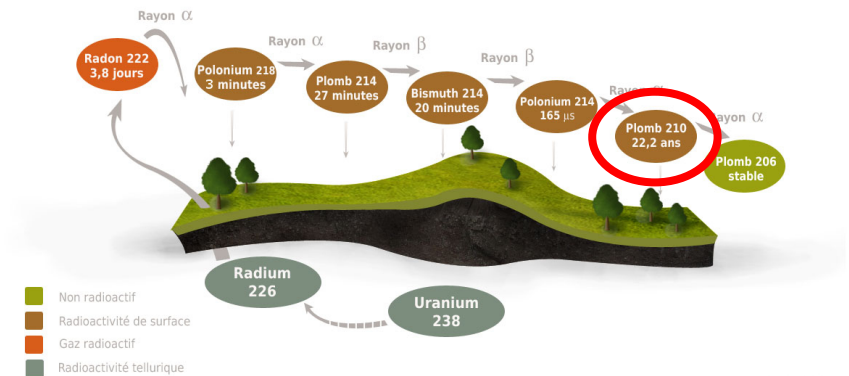
Emanation dans le laboratoire de radon ^{222}Rn émis par la roche des murs. Ce radon va se déposer sur toutes les surfaces et induire une radioactivité de surface en ^{210}Pb sur une très longue durée.

-> Protection avec film plastique étanche

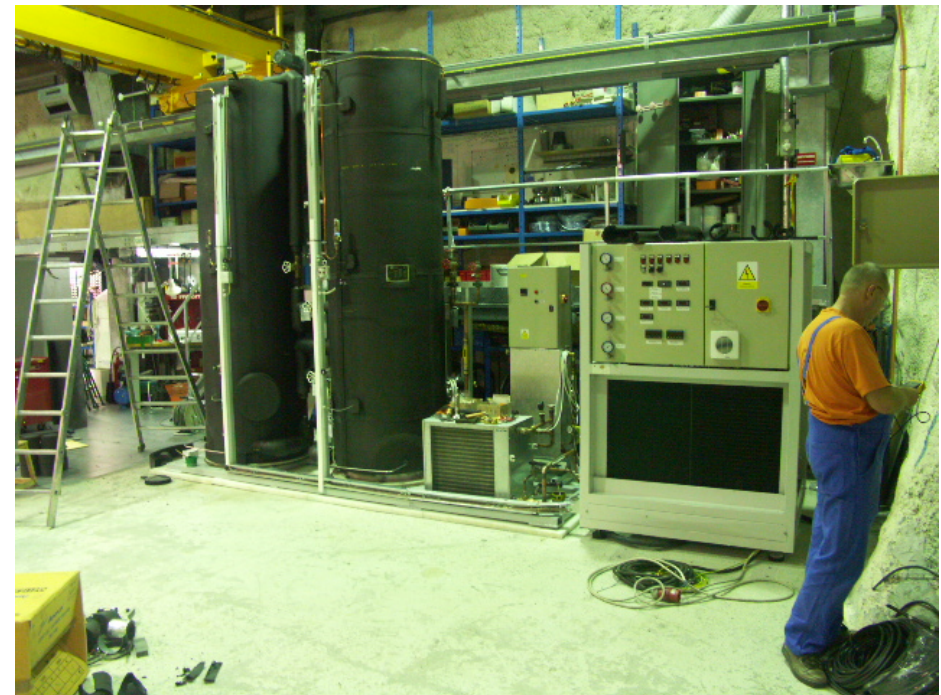
-> Equiper le laboratoire d'**usine « anti-radon »** qui va filtrer l'air et fournir de l'air déradonisé aux expériences.

Air du labo LSM $\sim 10\text{-}15 \text{ Bq/m}^3$ d'air

Air fourni par l'usine anti-radon $<0.1 \text{ Bq/m}^3$



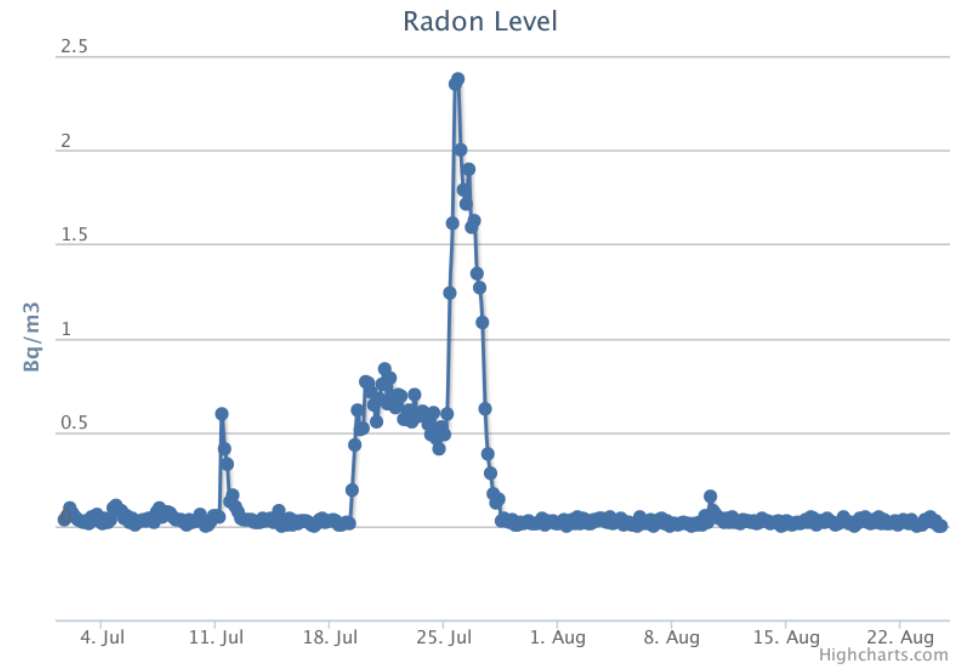
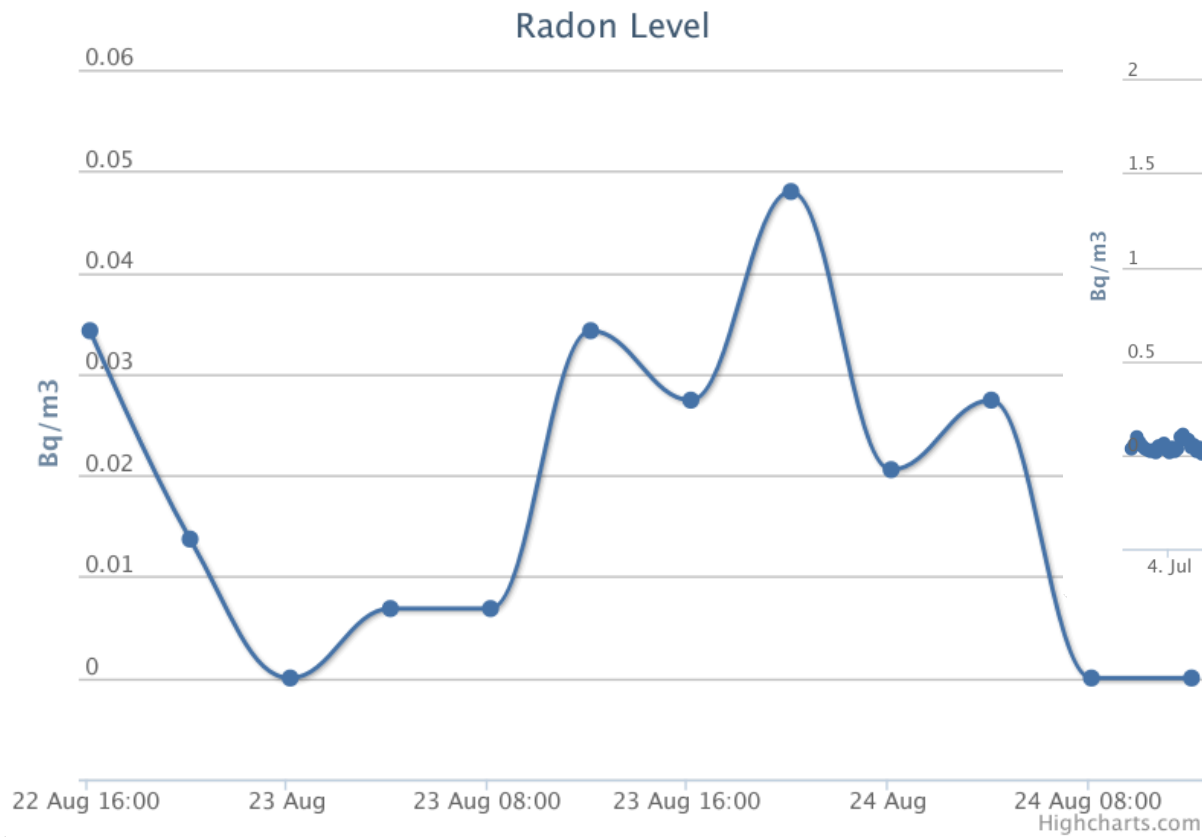
Aykow ©



Stratégies anti-Radon

https://edelweiss.cloudant.com/radon/_design/app/index.html

Monitoring Radon LSM

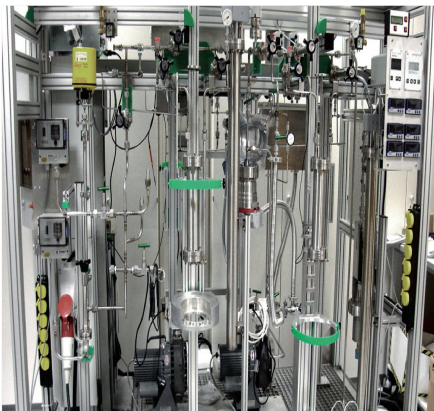


Stratégies anti-Radon des gaz nobles Xe et Ar

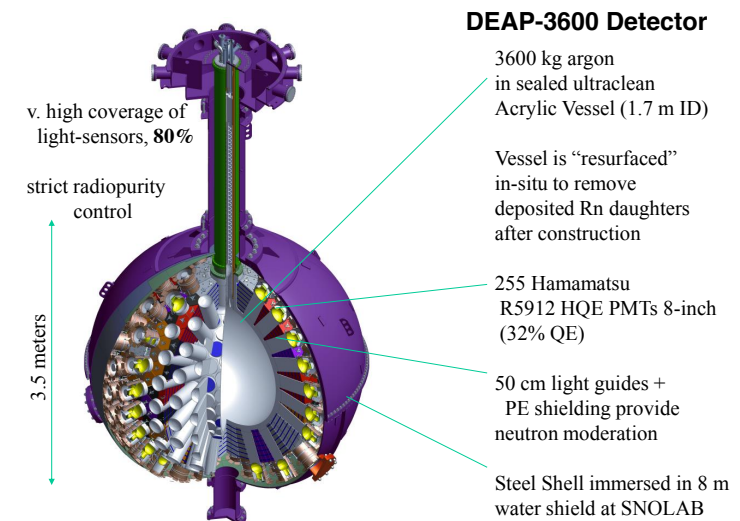
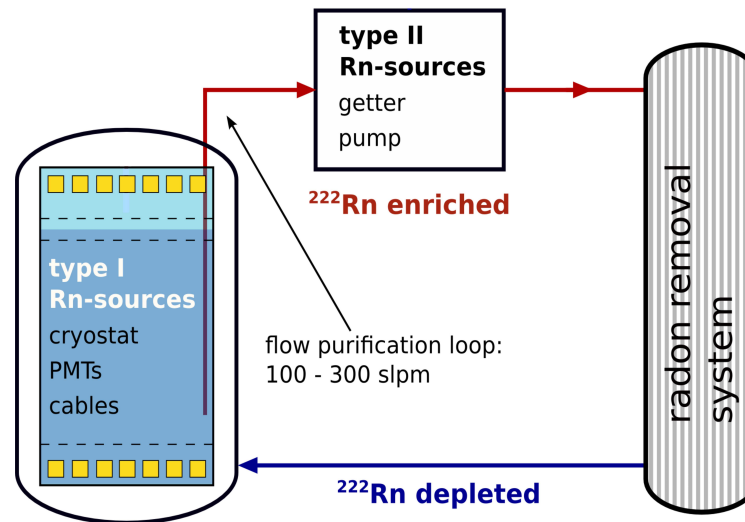
Du radon est en permanence émis par les parois des matériaux de l'ensemble de l'installation

-> Piège à ^{222}Rn intégré dans le circuit de refroidissement des gaz (LAr 87 K, LXe 173 K) :

Exemple : Xenon1T, DEAP-3600, ...

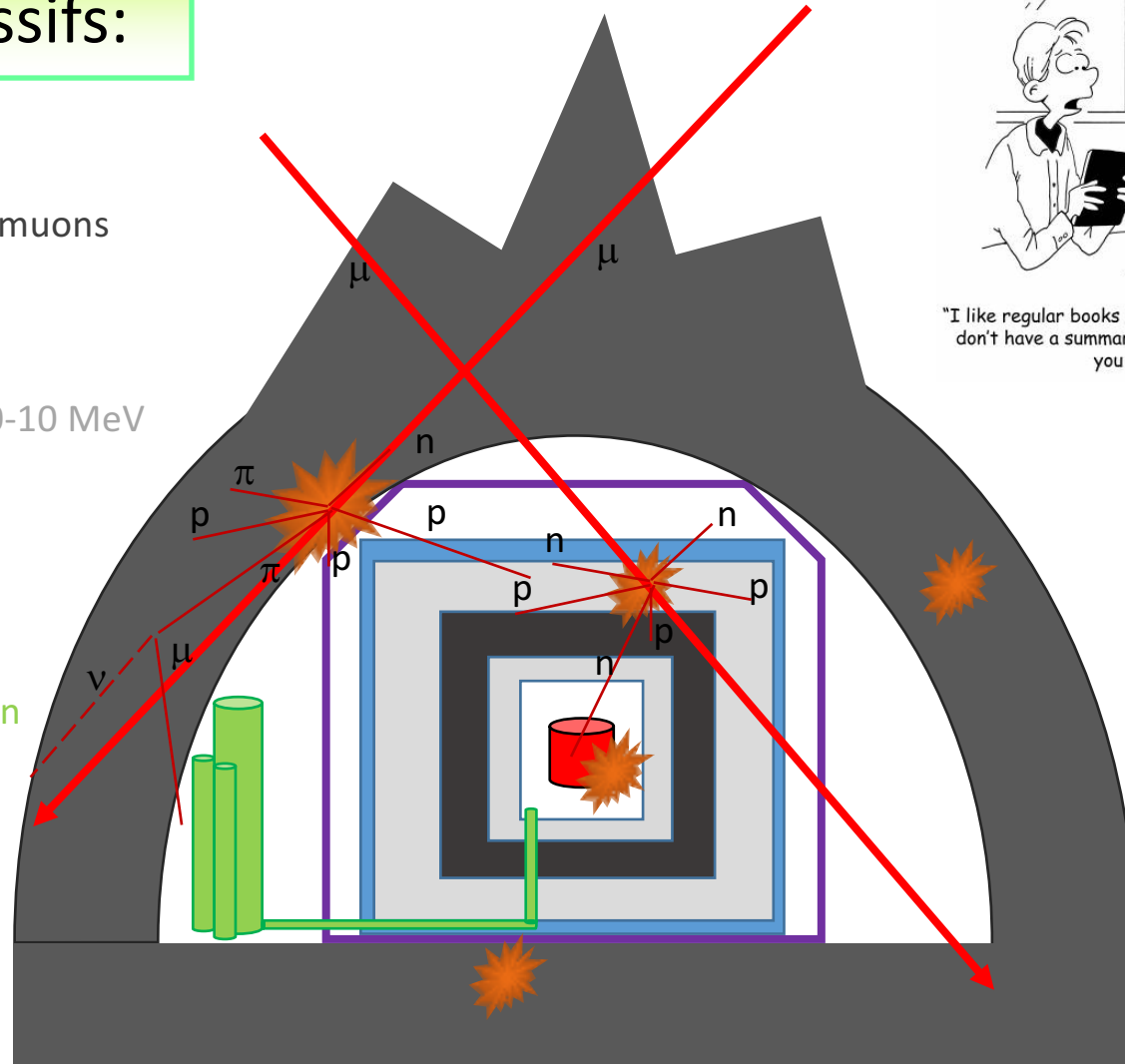


MoREx: Developing and testing the online radon reduction for XENONIT.



Résumé Blindages passifs:

- > Laboratoire Souterrain / $>10^6$ flux de muons
- > Veto muons / >100
- > Polyéthylène – Eau / $>10^5$ neutrons 0-10 MeV
- > Plomb / $>10^6$ gammas $<3\text{MeV}$
- > Salle propre
- > Usine anti-Radon / >100 taux de ^{222}Rn



Sélection/purification des matériaux



Sélection/purification des matériaux

- Modélisation/Simulation de l'expérience
- Techniques de mesures de la radioactivité des matériaux :
 - Spectrométrie gamma
 - Activation neutronique
 - Spectrométrie de masse
- Quelques exemples :
 - Œnologie
 - EDWIII
 - Xenon1T

Modélisation/Simulation de l'expérience

Etape cruciale dans la conception et la construction d'une expérience dédiée à la recherche d'événements rares.

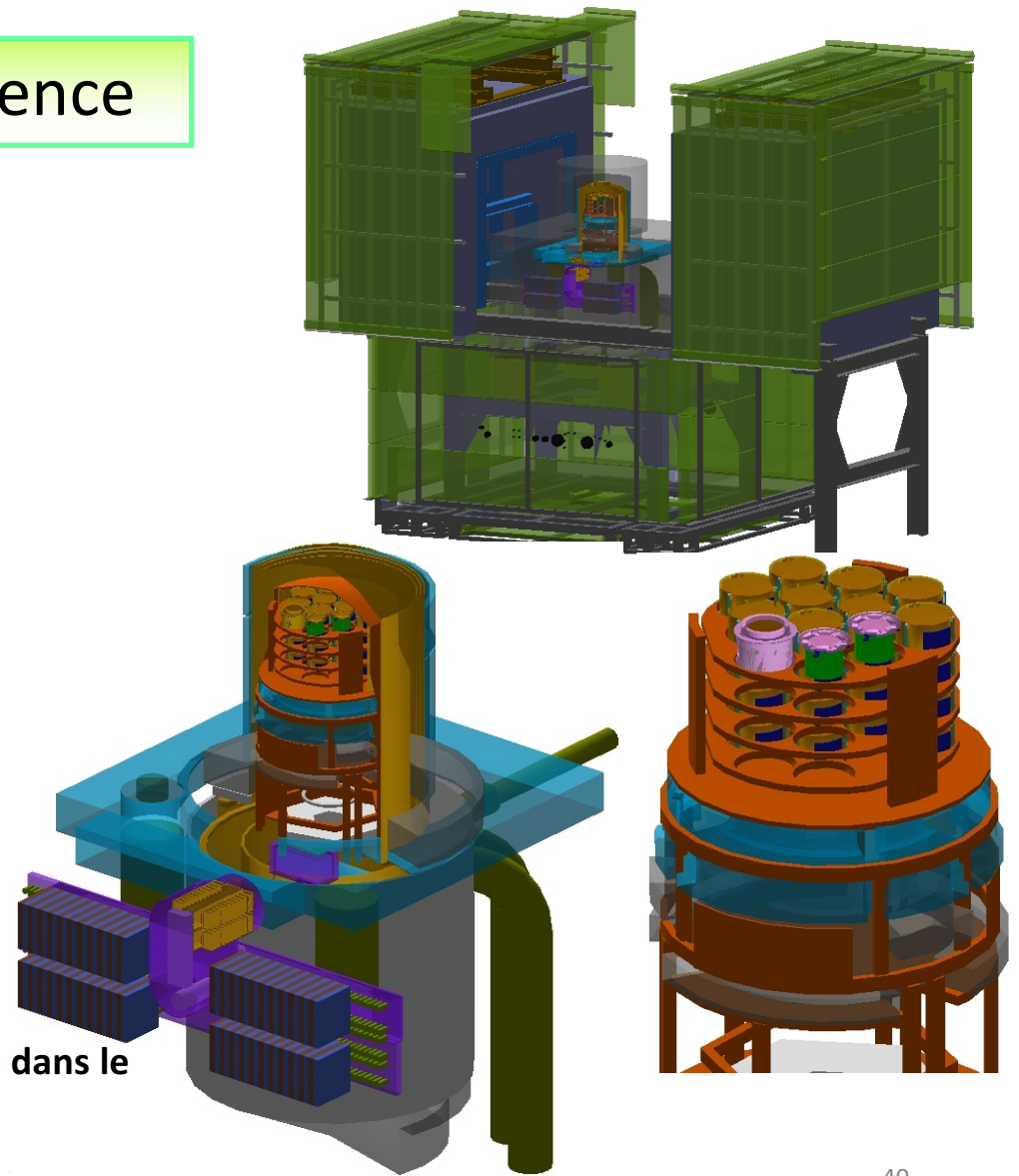
La sélection des matériaux est étroitement liée à une modélisation de l'expérience nécessitant un code de simulation

- > pour optimiser les blindages passifs et actifs
- > pour déterminer les limites de radiopureté acceptable par l'expérience

Des choix technologiques se font en fonction de la radiopureté des matériaux situés au plus près des détecteurs :

- > électronique, visserie, connecteurs, câblage, senseurs, colles,...

Ex : Géométrie Edelweiss telle qu'implémentée dans le code de simulation Geant4.10



Sélection/purification des matériaux



Détecteurs SuperCDMS à Soudan (USA)

<https://www.slac.stanford.edu/exp/cdms/>

Détecteur Xenon1T au Gran Sasso



Cryostat CUORE au Gran Sasso



<https://www.youtube.com/watch?v=ApEOAIQxHzQ>

Sélection des matériaux : Techniques de mesures

Techniques de comptage :

- Detecteurs Germanium : spectrométrie gammas
- Analyse par Activation Neutronique (Neutron Activation Analysis (NAA))
- Compteurs alpha / beta
- Detecteurs ^{222}Rn
- ...

Techniques par spectrométrie de masse :

- ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)
- TI-MS (Thermal Ionization Mass Spectrometry)
- SI-MS (Secondary ion Mass Spectrometry)
- GD-MS (Glow Discharge Mass Spectrometry)
- A-MS (Accelerator Mass Spectrometry)
- ...

Techniques de mesures : Spectrométrie γ

La spectroscopie gamma au moyen de détecteurs semi-conducteurs en germanium est la technique la plus couramment utilisée (G.F.Knoll). Elle permet l'identification et la mesure des radionucléides présents dans l'échantillon:

Néanmoins le détecteur lui-même doit être construit avec les meilleurs matériaux, au risque de ne mesurer que son propre bruit de fond
-> Collaboration très étroite entre le fabricant (Canberra, Ortec) et les scientifiques.

Les détecteurs Germanium HPGe (High Purity Germanium detector) :

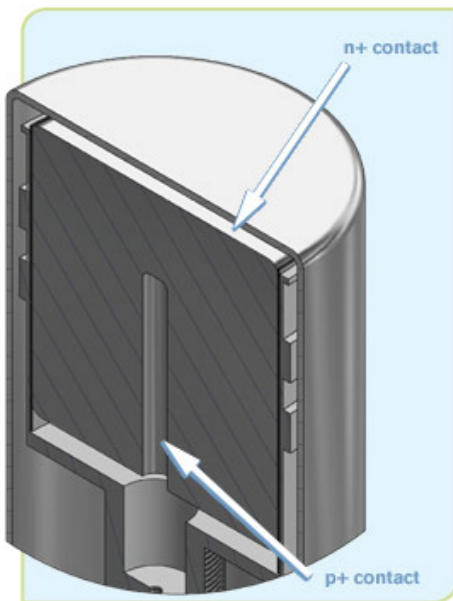
(<http://www.canberra.com/products/detectors/germanium-detectors.asp>)

- couvrent une large gamme en énergie
 - ✓ type n $\sim 20 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$
 - ✓ type p : $100-2700 \text{ keV}$
- excellentes résolutions permettant une bonne séparation des pics
 - ✓ $\Delta E/E < 2/1000$
- méthode non destructive
- volume d'échantillon important
 - ✓ quelques grammes à plusieurs dizaines de kg

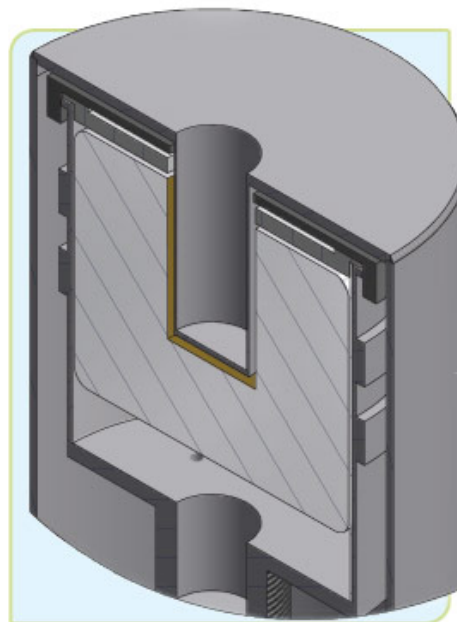


Spéctrométrie γ : le détecteur Ge

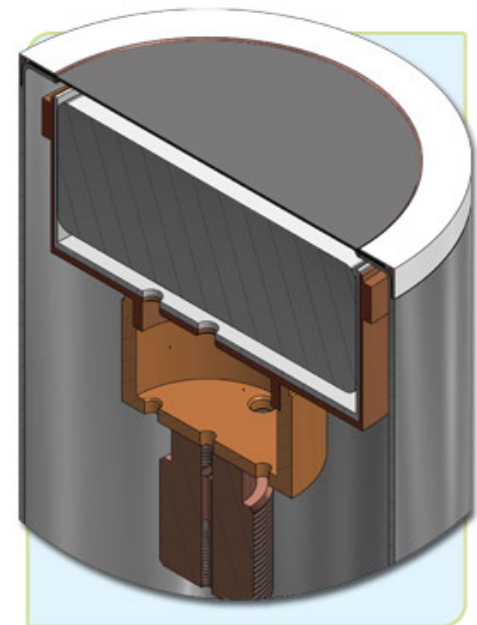
<http://www.canberra.com/products/detectors/germanium-detectors.asp>



Coaxial

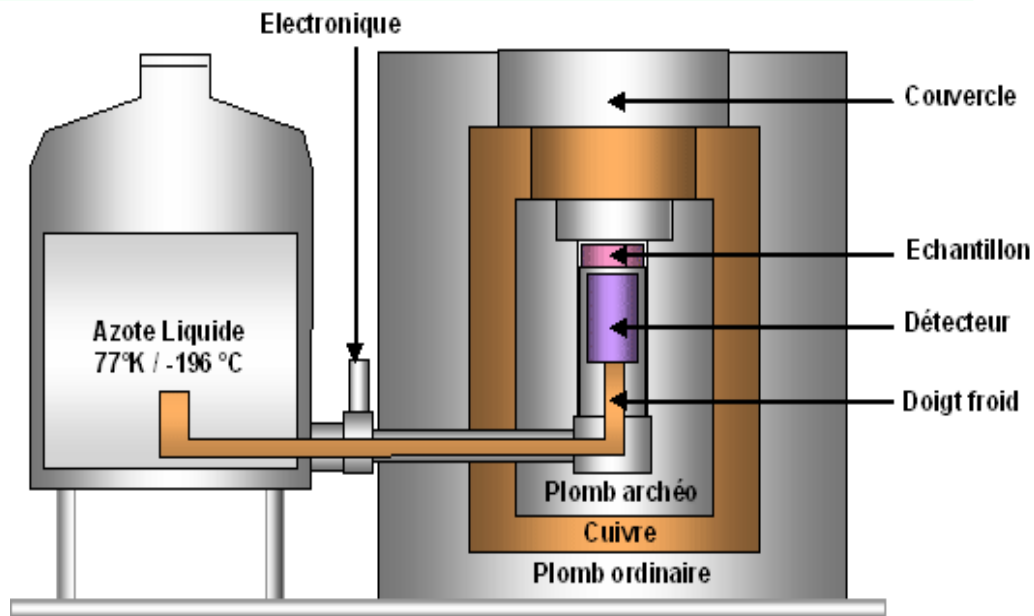


puits



planaire

Spectrométrie γ : le détecteur Ge



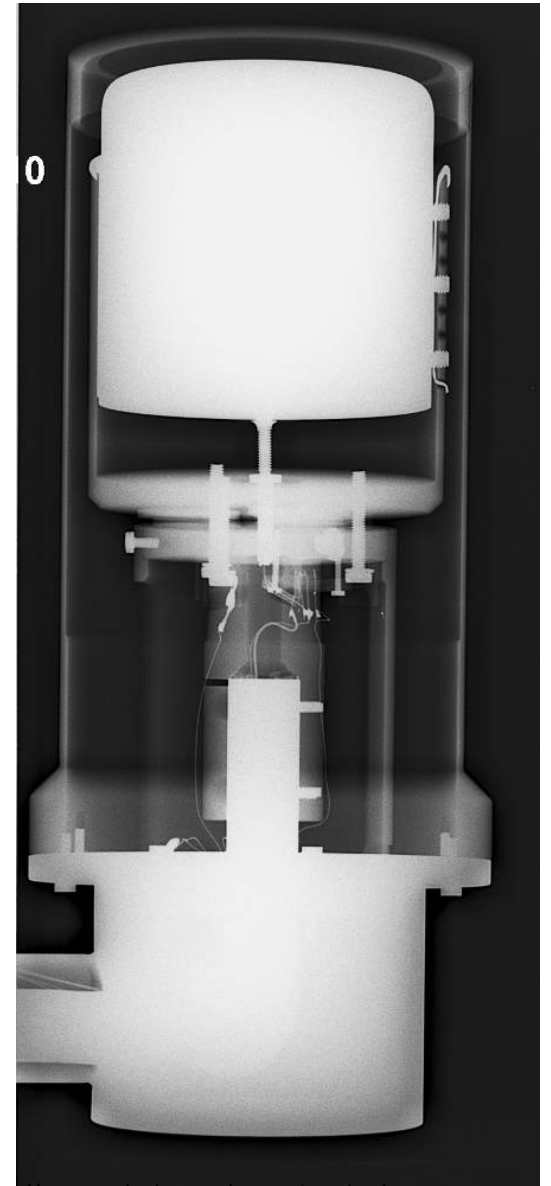
http://www-lsm.in2p3.fr/activites/basses_activ/basses_activ_Principe.htm

- Blindages plomb et cuivre très basse radioactivité
- Sélection drastique des matériaux entourant le cristal
- Sélection des composants électroniques très proches tels que le FET et le préampli
- ...

23/09/2016

Ecole de Gif aussois 19-23 Septembre 2016

Radiographie X

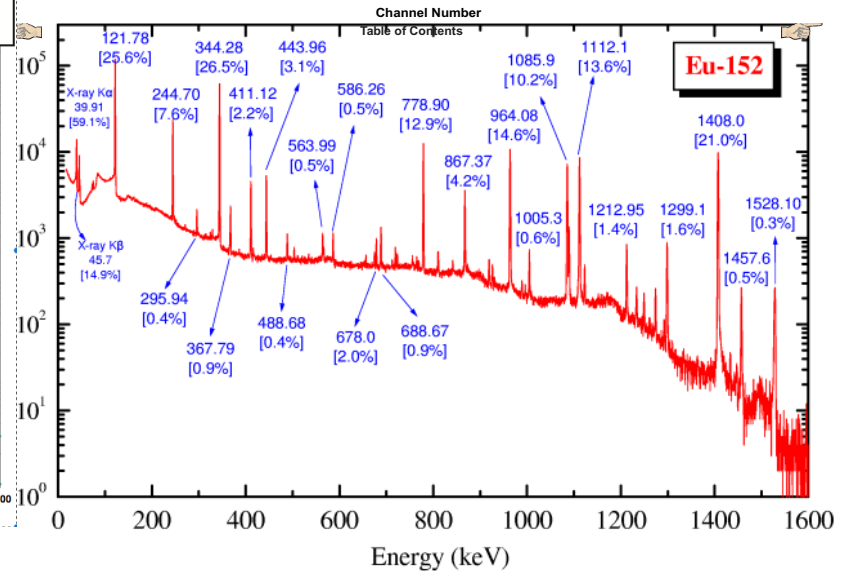
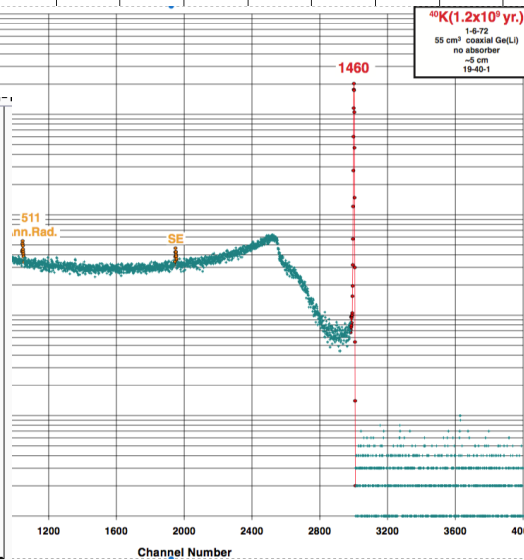
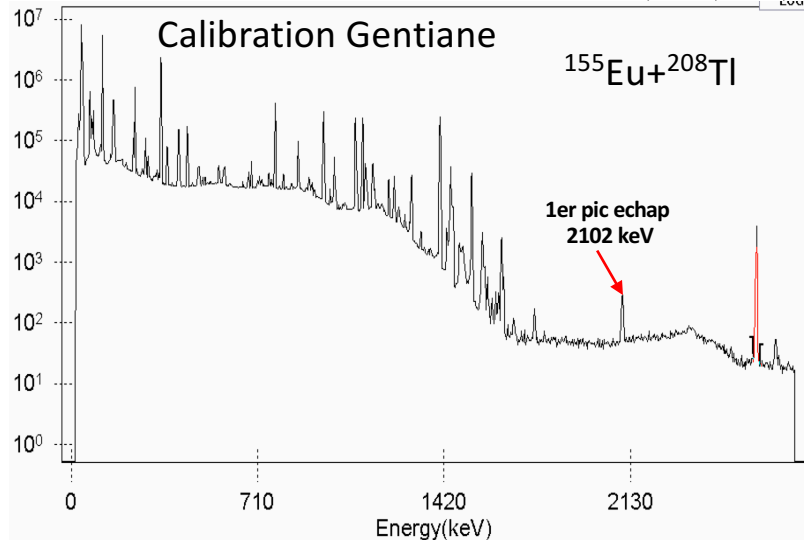
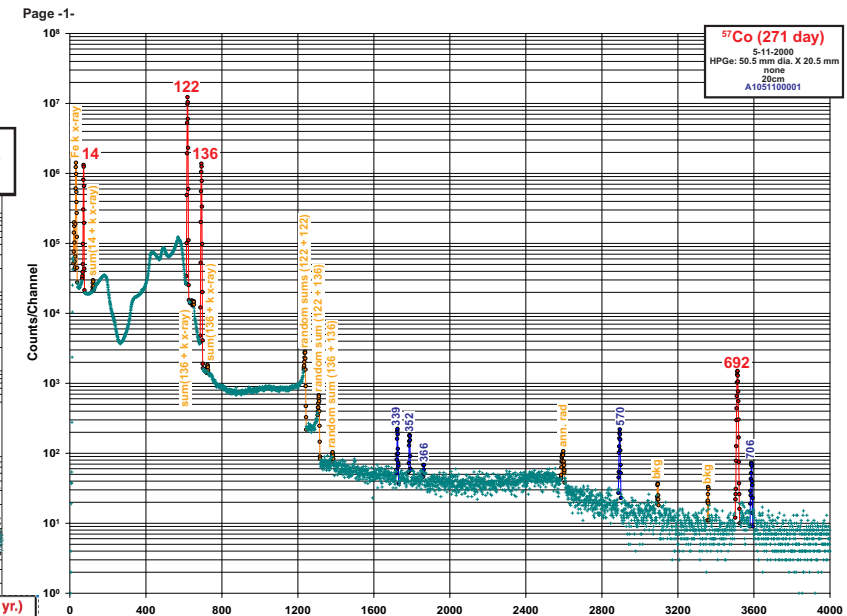
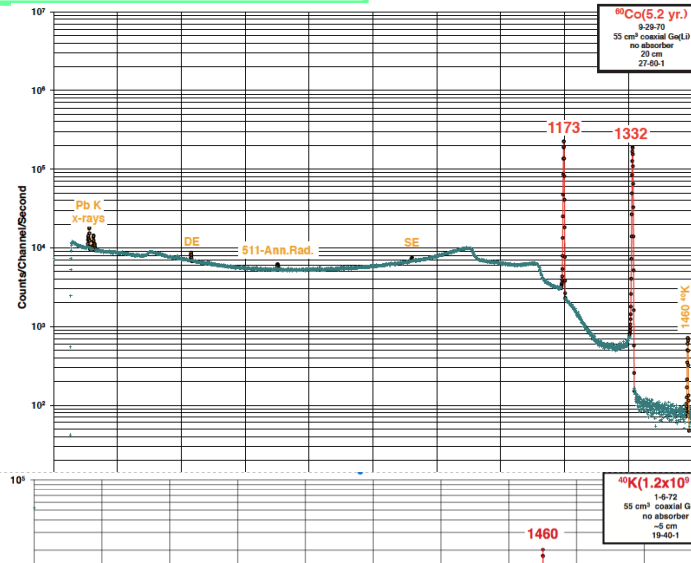


http://www.seph-alm.com/reparation_de_decteurs_ge_et_sili.ws

Spectrométrie γ : étalonnage

Etalonnage du détecteur avec différentes sources couvrant toute la gamme en énergie :

- ^{57}Co (122,136,692 keV)
- ^{60}Co (1173,1332 keV)
- ^{40}K (1461 keV)
- ^{152}Eu (122, 344, 1408 ... keV)
- ^{22}Na (511, 1274 keV)
- ^{208}Tl (2615 keV)
- ^{133}Ba (81, 356, ... keV)
- ...

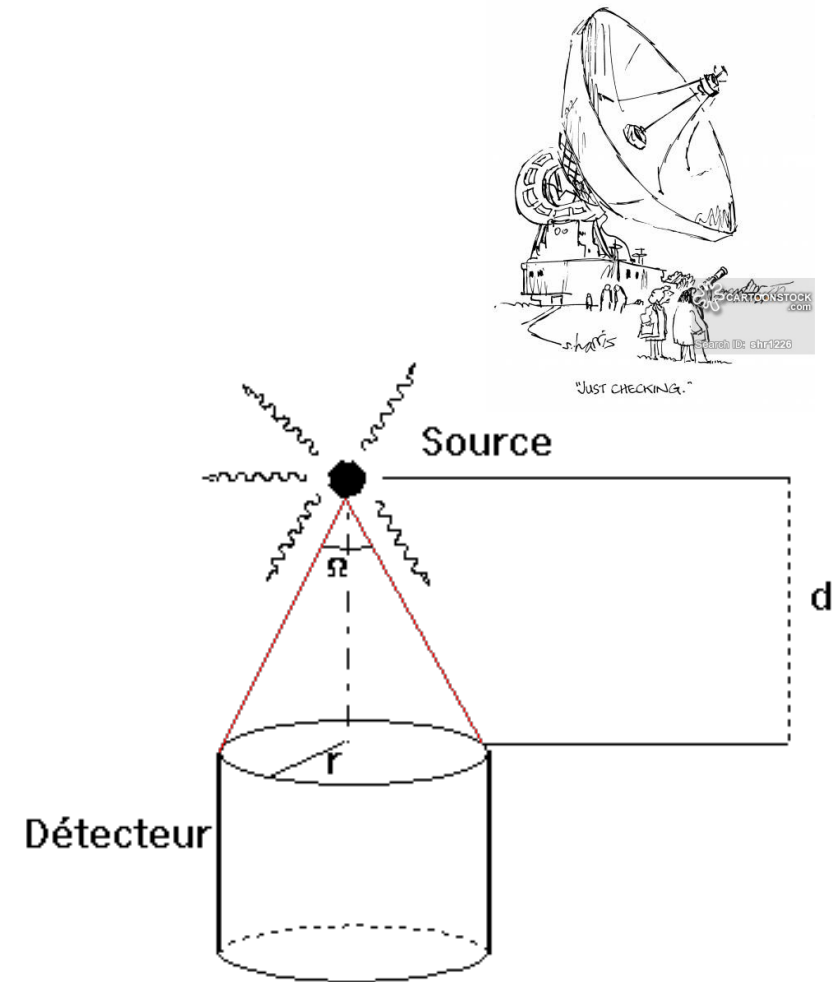


Ecole de Gif aussois 19-23 Septembre 20:

Analyse spectrale

Bruit de fond, modélisation, efficacité

- **Bruit de fond (bdf)** : Il faut que le bruit de fond soit mesuré sur une durée au moins égale à celle de l'échantillon. En général si la configuration n'est pas changée on fait un comptage de bruit de fond très long et de temps en temps sur des courtes périodes on vérifie que le taux de comptage reste stable.
- **Modélisation** : La géométrie introduite dans Geant4 doit être la plus précise possible, ce n'est pas toujours évident (secret fabrication...) vérification avec des sources d'étalonnage et des échantillons mesurés par d'autres détecteurs
- **Efficacité** : L'efficacité ε du détecteur en fonction de l'énergie du pic est déterminée en utilisant un code de simulation en général basé sur GEANT4 . Cette efficacité rend compte de l'absorption par les différents matériaux entre le point d'émission et le cristal, de l'émission sur 4π , de l'auto-absorption, ...



Echantillons :

De la préparation à la prise de décision :

- **Préparation des échantillons** : en salle propre/blanche ventilée avec port de gants, masque ...
- **Dimensionnement** : conditionné par le volume du détecteur, quelques dizaines de grammes à plusieurs dizaines de kilogrammes. Ca va d'un échantillon de matériau (morceau de cuivre, quelques vis, ...) à une pièce complète (PM, carte électronique, câblage, ...)
- **Nettoyage** : Bac à ultra-son, alcool, acide, ...
- **Conditionnement** : dans des conteneurs étanches pour éviter la contamination de surface par le ^{222}Rn
- **Traçabilité** : code barre (SCDMS) : fabricant, lot, date d'achat, masse, ...
- **Expédition au laboratoire souterrain** pour mesure
- **Analyse du spectre mesuré**
- **Répertorié dans la Base de données** <https://www.radiopurity.org/> ...
- **Simulation dans l'environnement de l'expérience**
 - > Acceptation
 - > Rejet

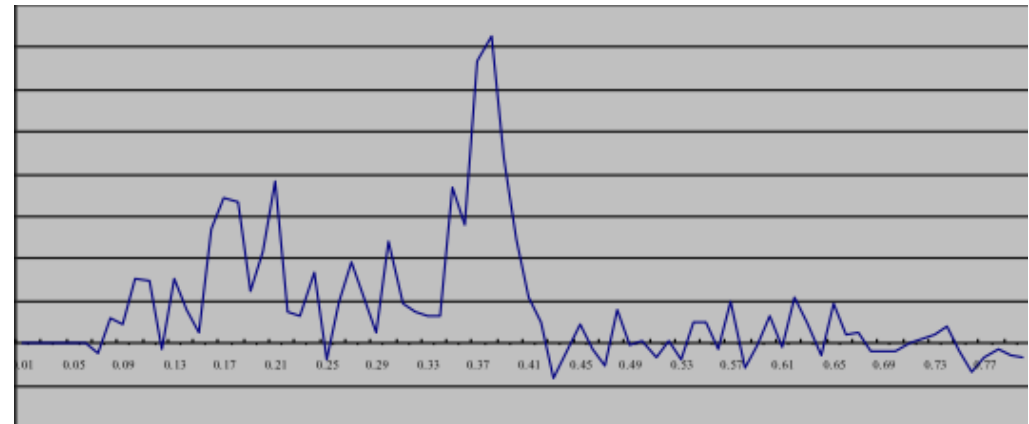
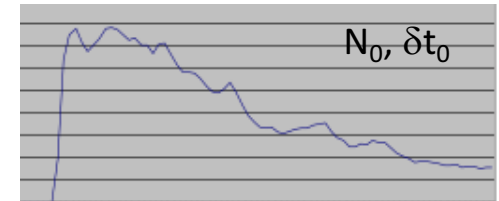
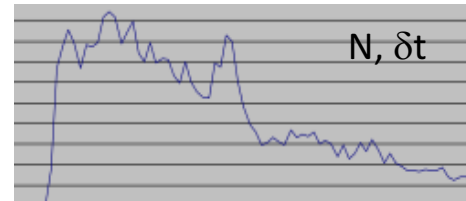


Analyse spectrale

Activité d'un échantillon pour un radionucléide donné à partir d'un pic identifié :

$$A = \left(\frac{N}{\delta t} - \frac{N_0}{\delta t_0} \right) \frac{1}{m \varepsilon I} \text{ Bq/kg}$$

- $N, \delta t$: nombre de coups mesurés dans le pic pendant la durée δt
- $N_0, \delta t_0$: nombre de coups mesurés dans le spectre de bruit de fond pendant la durée δt_0 et dans la même région d'intérêt (ROI)
- m : masse de l'échantillon en kg
- ε : efficacité du détecteur mesurée/simulée pour l'énergie et l'échantillon en question
- I : intensité ou rapport d'embranchement pour la raie en question



Analyse spectrale

A partir de quel taux de comptage au-dessus du bdf va-t-on considérer que notre échantillon est positif ? (L.A. Currie)

Seuil de décision SD :

- Valeur minimale d'une mesure qui peut être considérée comme un signal qui n'est pas du bruit de fond : risque de 1^{ère} espèce
H0 : les événements sous la cloche noire sont des bdf cependant pour ceux qui sont dans la zone rouge il y a $\alpha\%$ de chances qu'on se trompe et qu'on ait affaire à du signal
- SD ne dépend que du bruit de fond
- En général $\alpha=5\%$

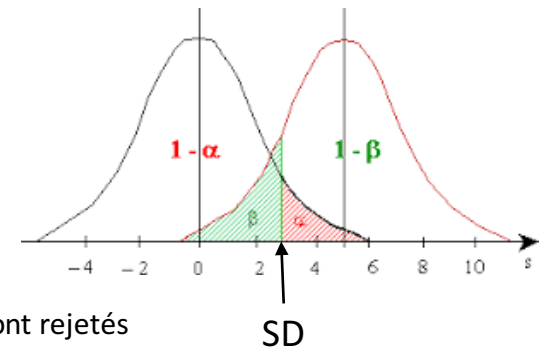
$$SD = K_{1-\alpha} \sigma_B$$

Limite de détection LD :

- Valeur maximale d'une mesure qui sera considérée comme du bruit de fond : risque de 2^{ème} espèce
H1 : les événements sous la cloche rouge sont du signal cependant ceux qui sont dans la zone verte sont rejetés et considérés comme du fond
- Si on prend $\alpha=\beta=5\%$

$$LD = (K_{1-\beta})^2 + 2 \times SD = (K_{1-\beta})^2 + 2 K_{1-\alpha} \sigma_B$$

- Distributions unilatérales $K_{1-\alpha} = K_{1-\beta} = 1,645$



Activité minimale détectable (AMD) est la plus petite quantité de radioactivité pouvant être détectée avec une limite de confiance de 100- α % (ex 95%) (Minimum Detectable Activity MDA), elle est calculée à partir de la limite de détectabilité :

$$MDA = \frac{LD}{\delta t \epsilon I m} \quad (\text{Bq/kg})$$

Analyse spectrale

Exemple : mesure du bruit de fond du détecteur HPGe 200 cm³ utilisé pour mesurer les matériaux Edelweiss

Seuil critique et limite de détection pour le pic potassium à 95% de confiance:

Durée de la mesure T= 2951043 s

Nbre de coups dans la région 1460 keV : N=22 (poissonien)

$$\sigma = \sqrt{N} = \sqrt{22} = 4,69$$

Seuil critique :

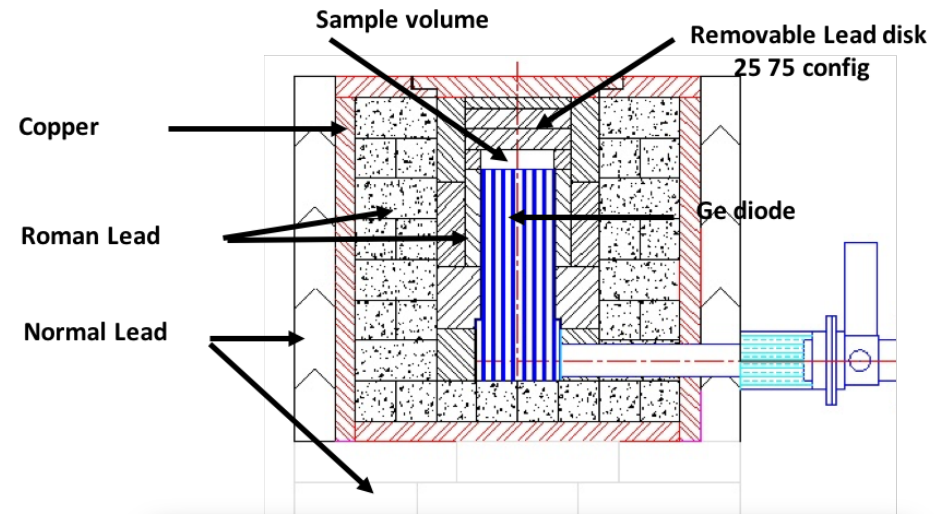
$$\begin{aligned} SD_0 &= K_{1-\alpha} \sigma_B \\ &= 1,645 * 4,69 = 7,72 \end{aligned}$$

$$\underline{SD = 7,72}$$

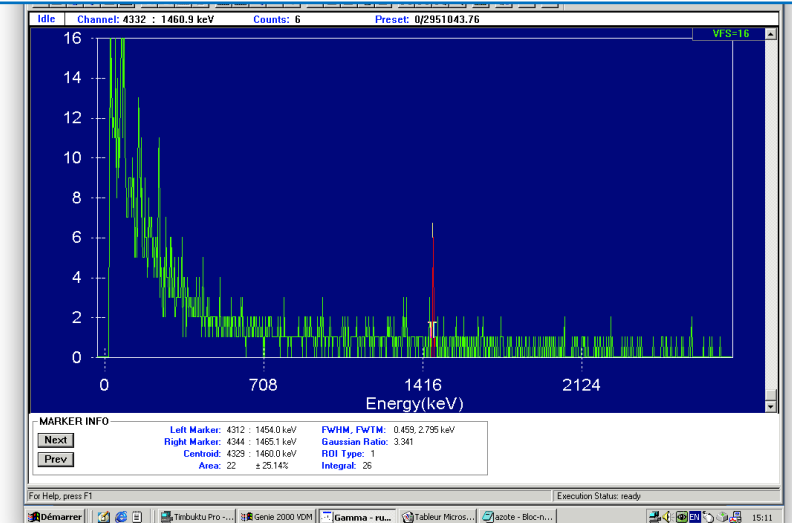
Limite de détection :

$$\begin{aligned} LD_0 &= (K_{1-\beta})^2 + 2 \times SD_0 \\ &= 1,645^2 + 2 \times 7,72 = 18,15 \end{aligned}$$

$$\underline{LD = 18,15}$$



Spectre de bruit de fond de Gentiane mesuré pendant 820h

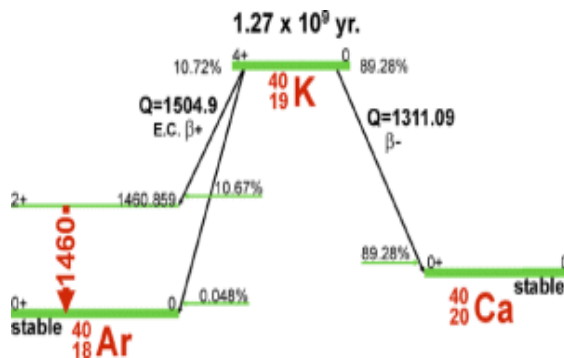
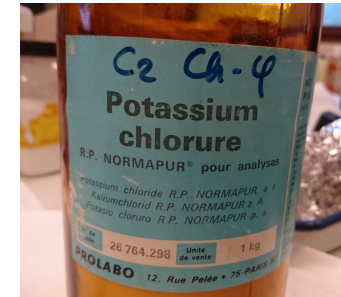


Analyse spectrale : exemple sels de potassium

Activité minimale détectable pour un échantillon de sels de potassium KCl sur le détecteur Gentiane

$$MDA = \frac{LD}{\delta t \varepsilon I m}$$

(Bq/kg)



Masse échantillon : M=81 g

Efficacité donnée par la simulation pour le pic à 1461 keV

$$\varepsilon = 2,26(1) \%$$

Intensité de la raie : I = 10,72%

$$MDA = 18,15 / (\delta t * 0,0226 * 0,1072 * 0,081) \text{ Bq/kg}$$

$$\delta t = 24\text{h} = 86400 \text{ s} \rightarrow \text{MDA} = \mathbf{1,07 \text{ Bq/kg}}$$

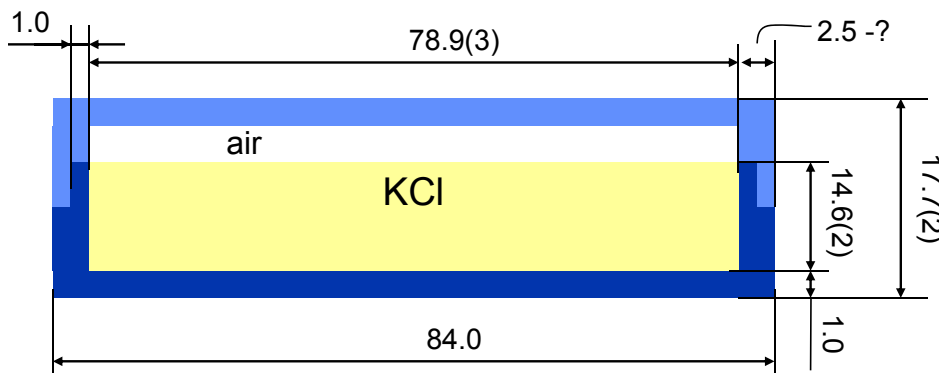
Conclusion : si mon échantillon fait moins de 1,07 Bq/kg on ne va rien détecter en 24h

Quelle durée de mesure pour avoir une limite de 50 mBq/kg ?

$$\delta t * MDA = 1,07 \text{ j.Bq/kg}$$

Pour 50 mBq/kg $\delta t = 20 \text{ jours}$

Conclusion : il faut que je mesure au moins 20 jours pour mettre une limite de 50 mBq/kg sur mon échantillon



Analyse spectrale : exemple sels de potassium

$$A = \left(\frac{N}{\delta t} - \frac{N_0}{\delta t_0} \right) \frac{1}{m \varepsilon I} \text{ Bq/kg}$$

Durée de la mesure $\delta t = 246183 \text{ s} = 2,85 \text{ j}$

$N = 649978 \pm 780$ coups

Masse échantillon : $M = 81 \text{ g}$

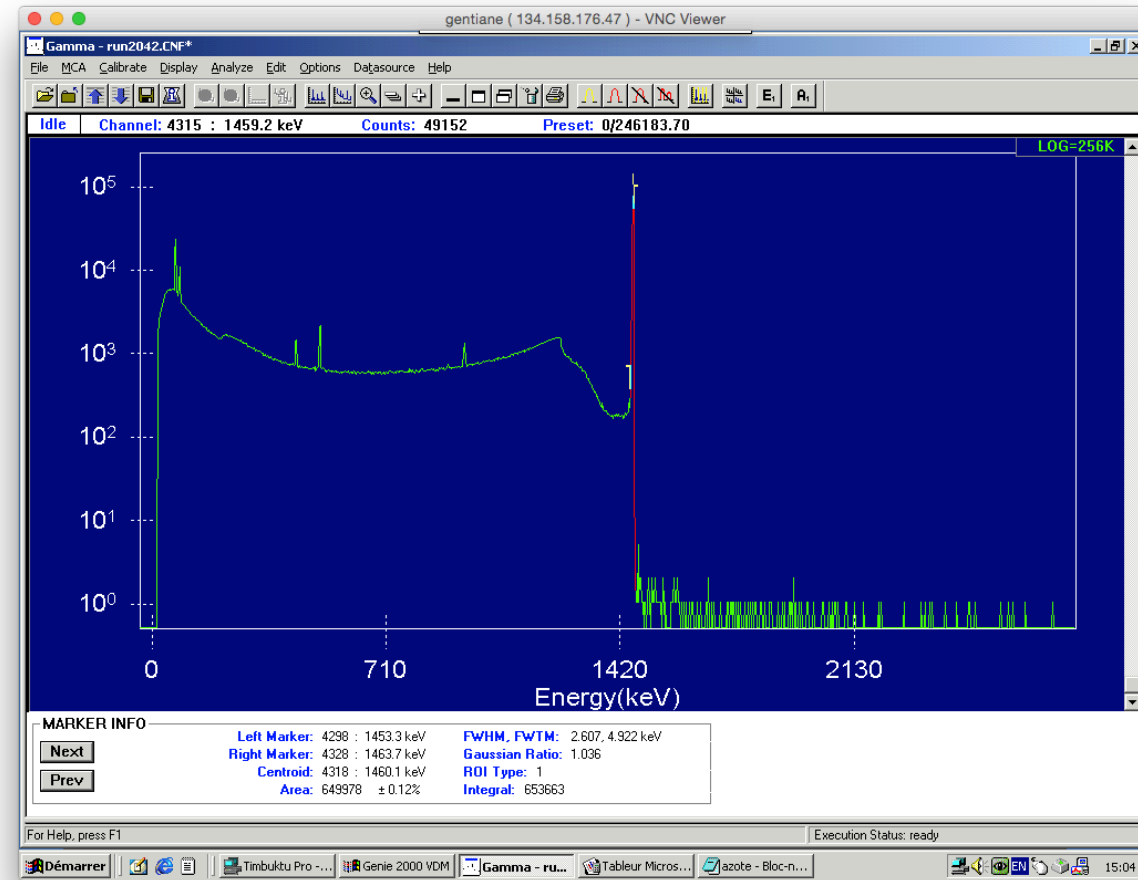
$\varepsilon = 2,26(1) \%$

$I = 10,72\%$

BDF : $T = 2951043 \text{ s}$ $N = 22$

$$A = (649978/246183 - 22/2951043)/0.081/0,0226/0,1072$$

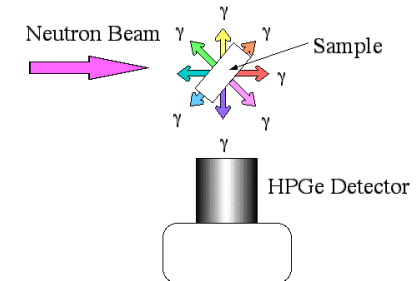
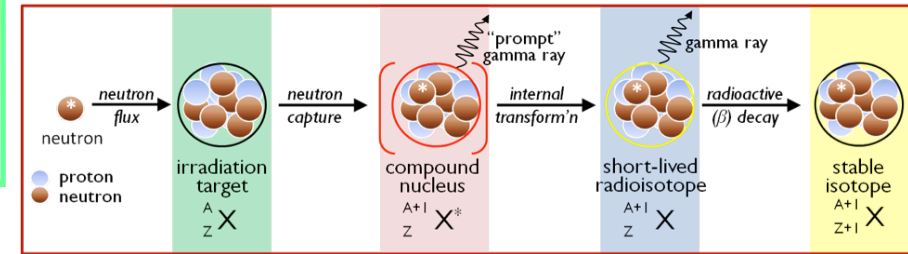
$$A = 13453 \text{ Bq/kg}$$



Techniques de mesures : analyse par activation neutronique (AAN ou NAA)

Principe : irradiation d'un échantillon par des neutrons et analyse par spectrométrie gamma des radioéléments créés

- Nécessite un réacteur avec des flux de neutrons $\phi_n > 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s}$
- Méthodes « non-destructive », petite taille des échantillons
- Gain facteur ~ 1000 HPGe
- Meilleure technique pour U Th K
 - ✓ $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{U} (T_{1/2}=23.5 \text{ mn}) \rightarrow {}^{239}\text{Np}^* (T_{1/2}=2.35\text{j})$
 $E_\gamma = 106; 228; 277; 210; 315; 334 \text{ keV}$
 - ✓ $n + {}^{41}\text{K} \rightarrow {}^{42}\text{K}^* (T_{1/2}=12.8\text{h})$
 $E_\gamma = 1524 \text{ keV} \rightarrow \text{on détermine la teneur en } {}^{41}\text{K}$
 $({}^{39}\text{K} : 93.1\%, {}^{40}\text{K} : 0.0118\% \text{ et } {}^{41}\text{K} : 6.88\%)$
- Risque d'activation non désirée d'éléments présents dans l'échantillon qui peuvent brouiller les radioéléments recherchés



<http://www.elementalanalysis.com/services/neutron-activation-analysis-naa/>

H

1 ppm

Li

Be

Na

Mg

K

Ca

Sc

Ti

V

Cr

Mn

Fe

Co

Ni

Cu

Zn

Ga

Ge

As

Se

Br

Kr

Rb

Sr

Y

Zr

Nb

Mo

Tc

Ru

Rh

Pd

Ag

Cd

In

Sn

Sb

Te

I

Xe

Cs

Ba

La

Hf

Ta

W

Re

Os

Ir

Pt

Au

Hg

Tl

Pb

Bi

Po

At

Rn

Fr

Ra

Ac

He

B

1 ppm

C

500 ppm

N

500 ppm

O

500 ppm

F

1,000

Ne

100

Al

10

Si

1,000

P

1,000

S

1.0

Cl

0.1

Ar

0.1

Ce

10

Pr

1.0

Nd

100

Pm

0.1

Sm

0.1

Eu

1.0

Gd

10

Tb

1.0

Dy

0.1

Ho

1.0

Er

10

Tm

1

Yb

0.1

Lu

0.01

Th

1.0

Pa

0.1

U

0.1

Np

0.1

Pu

0.1

Am

1.0

Cm

10

Bk

1.0

Cf

0.1

Es

0.1

Md

0.1

No

0.1

Lr

0.1

Limits of detection in parts per billion (assuming a 100 mg sample)

Prompt-Gamma Neutron Activation (PGNAA)

Instrumental Neutron Activation (INAA)

Fast Neutron Activation (FNAA)

Values reflect actual experimental data gathered over more than 3 years of application experience.

Not measured by NAA

Techniques de mesures : ICP-MS

Echantillon pulvérisé à très haute température et envoyé sur un spectromètre de masse pour la séparation isotopique (rapport masse/charge)

- Solide liquide ou gaz
- Pulvérisation de l'échantillon
- Suivant sa nature la technique de pulvérisation varie :
 - ❖ Cible : Laser Ionisation MS : LI-MS
 - ❖ Electrode : Spark Source MS : SS-MS
 - ❖ Cathode : Glow Discharge MS (décharge luminescente) : GD-MS
 - ❖ ...
- Extraction et accélération des ions E B
- Détection des ions

Ref : Johanna Sabine Becker

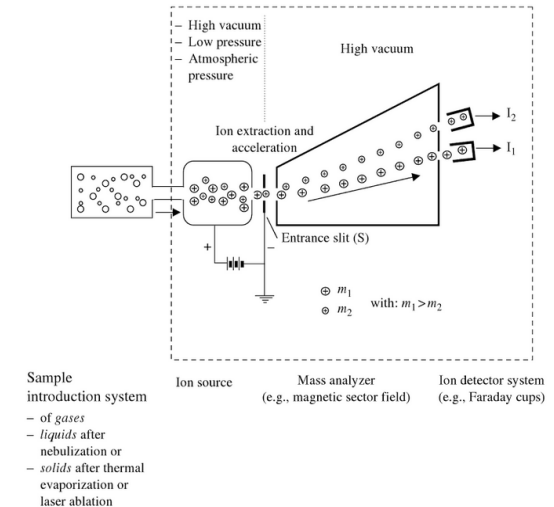
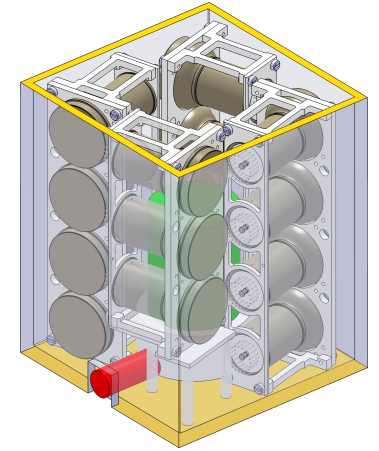
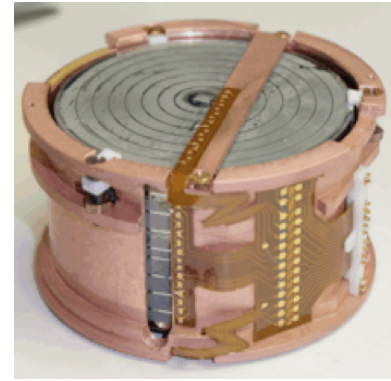


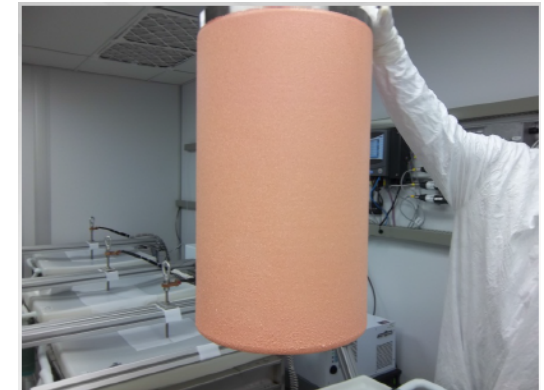
Figure 1.2 Principle of the operation of a mass spectrometer including sample introduction system, ion source, mass separator (e.g., a magnetic sector field) and ion detector system (e.g., double ion collectors for simultaneous measurements of two separated ion beams).



Quelques exemples :



- Œnologie
- Connecteurs Mill-Max EDWIII
- Xenon1T
- Activation cosmogénique de l'Argon
- Electrolyse du cuivre MAJORANA en laboratoire souterrain
- Production de Tritium dans les détecteurs Germanium d'EDW
- ...



Un petit coup de main à la répression des fraudes

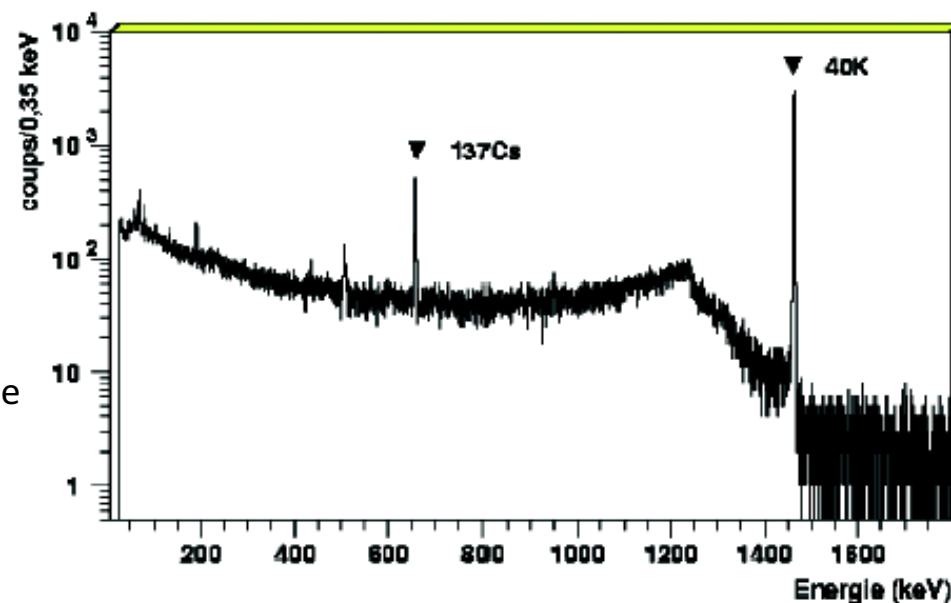
Ph. Hubert, <https://www.fichier-pdf.fr/2012/06/22/datation-vins1/>

Vérifier par spectrométrie gamma l'âge des grands millésimes compte tenu des sommes astronomiques que peuvent atteindre certaines bouteilles. Cela peut susciter les convoitises de quelques fraudeurs peu scrupuleux.

- Méthode non destructive, ça serait dommage si on a réellement affaire à un vin centenaire !!
- Méthode basée sur la mesure du Cesium-137

Attention :

- Présence de Cs137 : clairement pas centenaire
- Absence de Cs137 : on ne peut rien dire sur l'âge du capitaine

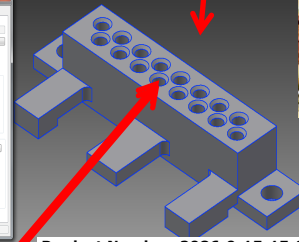
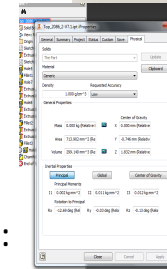
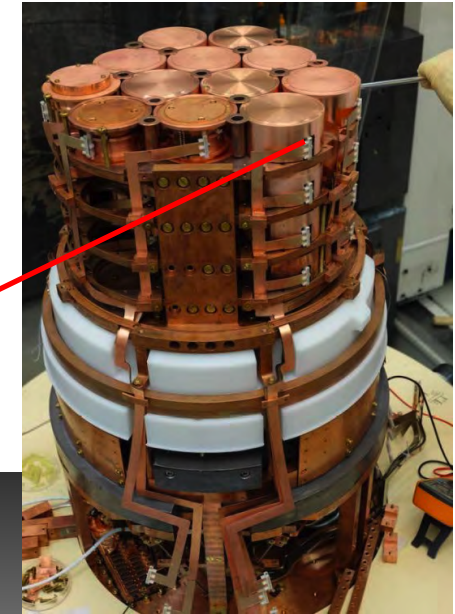
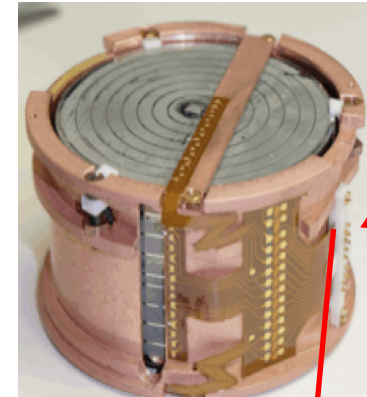


Connecteurs Mill-Max EDWIII

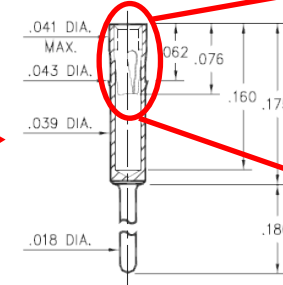
Quand un matériau passe au travers des mailles du filet !!!

Exemple : Ressorts en CuBe des connecteurs

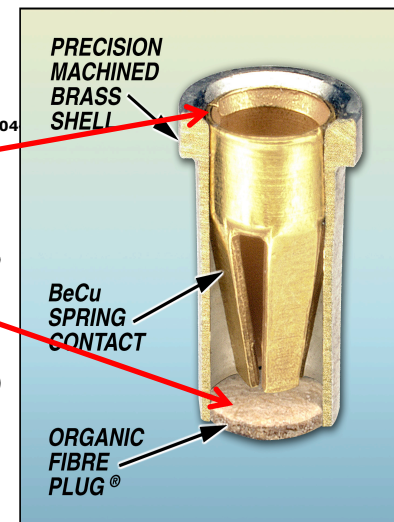
- Le Béryllium est connu des fabricants de détecteurs germanium HPGe pour être très difficile à purifier /U,Th.
- Réaction (α,n) sur le Béryllium très grande section efficace
- Très petite dimension 2,3mg par ressort, au total pour l'ensemble des détecteurs (42 connecteurs x 16 contacts) ~ 1,63 g
- Mesure par HPGe trop longue pour une masse aussi faible, mesure par IC-PMS:
 - > U : 11936 +- 2383 mBq/kg
 - > Th: 980 +- 196 mBq/kg
- Cuivre : deux types de Cu
 - > EDWII : U < 3 mBq/kg Th < 2 mBq/kg
 - > EDWIII : U < 0,016 mBq/kg Th < 0,012 mBq/kg



Product Number: 2086-0-15-15-21-27-04



2086-0-15-XX-21-XX-04-0
Press-fit in .040 mounting hole



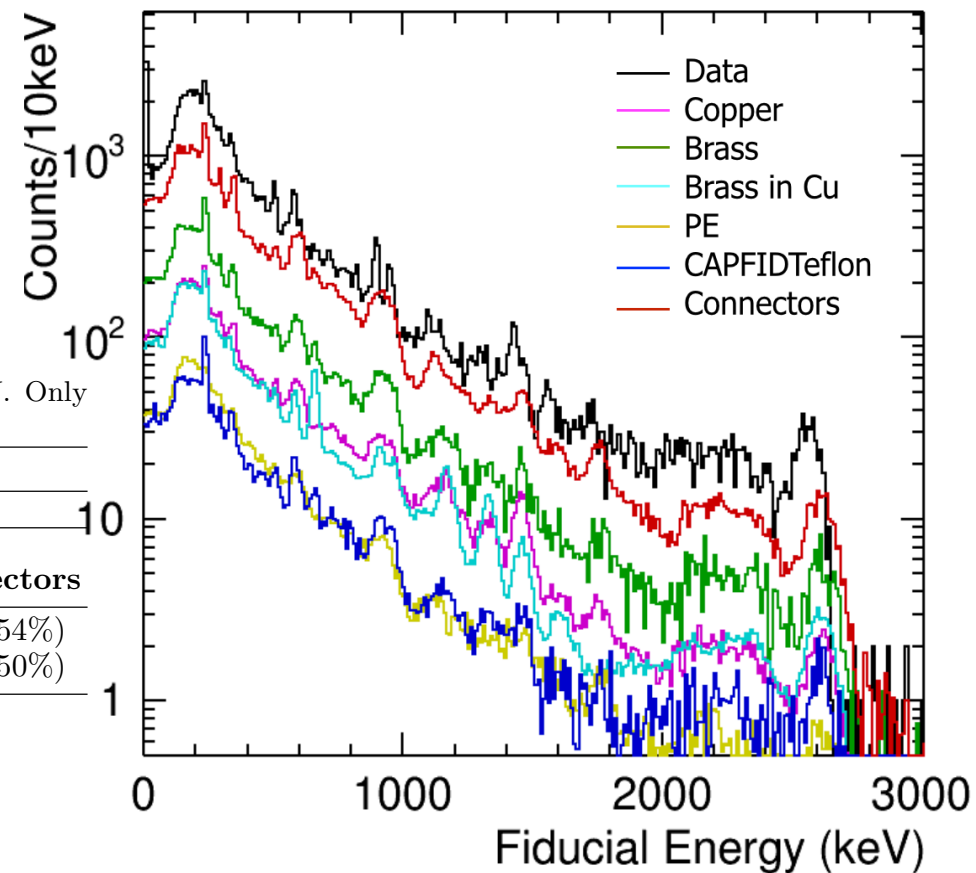
Fond gamma :

S. Scorza et al., "Background investigation in EDELWEISS-III » AIP Conf. Proc. 1672, 100002 (2015).

TABLE 3. Gamma event rate in the total and fiducial volume, in the ROI 20-200 keV. Only material with a contribution larger than 3% have been listed.

	Events/(kg·d)							
	Material							
Volume	Data	MC	Copper	Brass	Brass in Cu	PE	Teflon	Connectors
Fiducial	70	78	7.3 (10%)	14.7 (20%)	6.9 (9.4%)	2.6 (3.5%)	2.2 (3%)	39.7 (54%)
Total	125	128	12.8 (10%)	22.9 (18%)	10.3 (8%)	4.6 (3.6%)	4.0 (3%)	63.1 (50%)

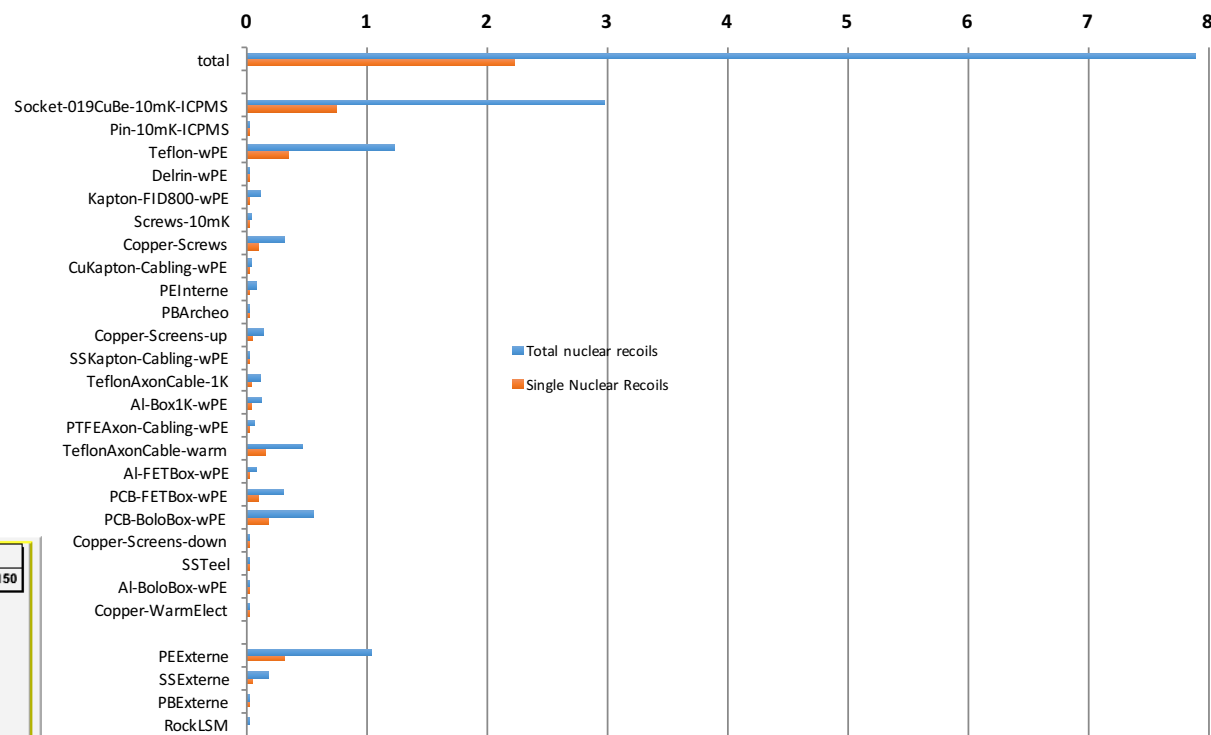
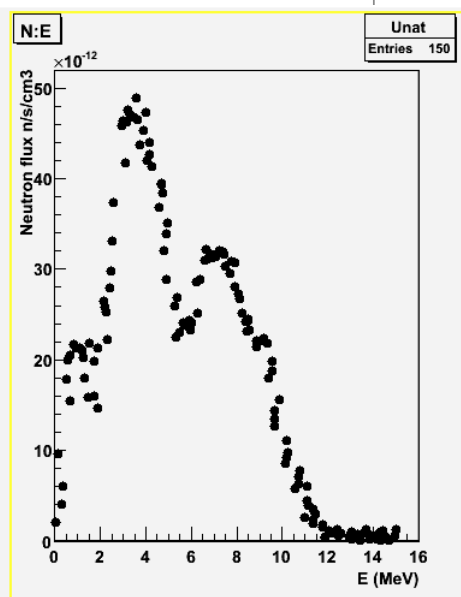
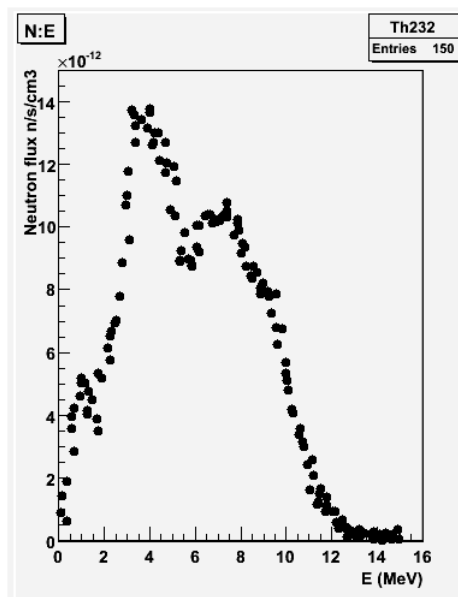
Comparison by Material - Fiducial Energy



Fond neutrons :

Réactions (α, n) :

Production de neutrons à partir des
teneurs en U – Th calculée par
SOURCES4A



Alliage : Cu (98.1%) Be (1.9%)

Flux U = 2.888×10^{-9} n/s/g

$\langle E \rangle = 5.207$ MeV

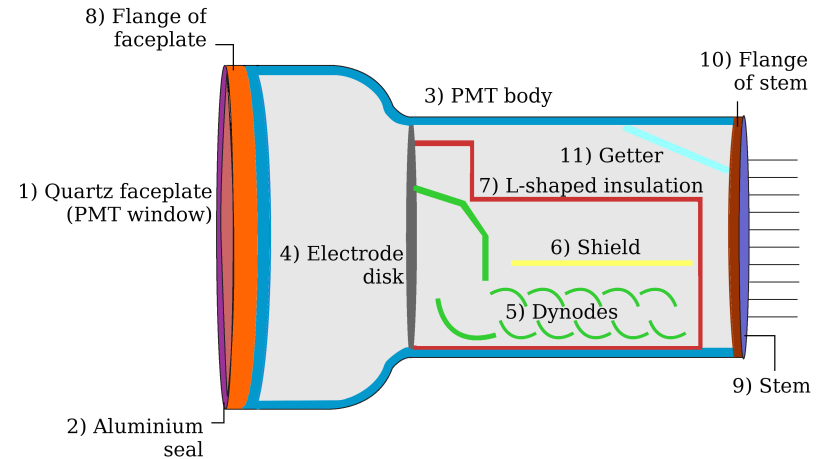
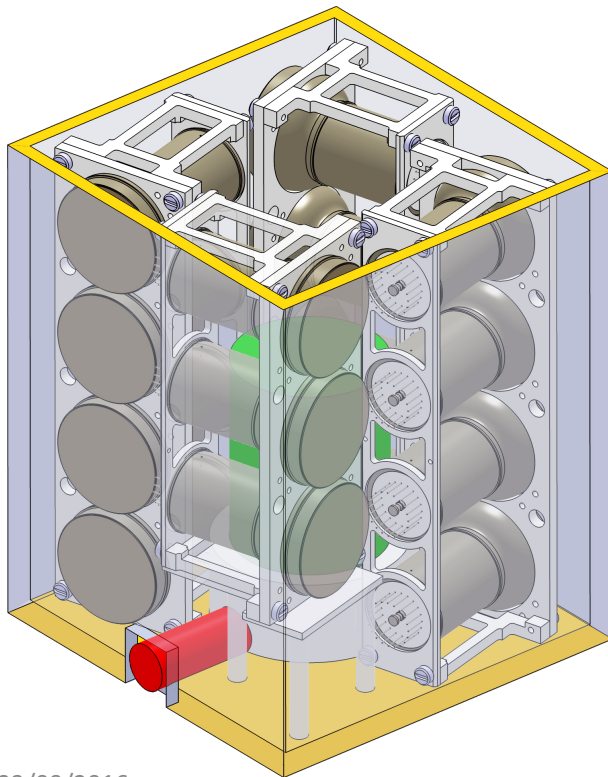
Flux Th = 9.130×10^{-10} n/s/g

$\langle E \rangle = 5.728$ MeV

Exemple : PM pour Xenon1T

« Lowering the radioactivity of the photomultiplier tubes for the XENON1T dark matter experiment » E. Aprile et al., [European Physical Journal C](#) 75(11) · March 2015

Fig. 3. Schematic view of 15 R11410-21 PMTs in the Gator detector chamber, held by custom-made, low-background PTFE support structure. The germanium detector in its cryostat is seen in green in the centre.



Parmi tous les matériaux à sélectionner il y en a de plus compliqués que d'autres :

- Les composants électroniques : cartes connecteurs câbles ... Al, U,Th
- Les céramiques U,Th , ^{40}K
- Les verres : ^{40}K

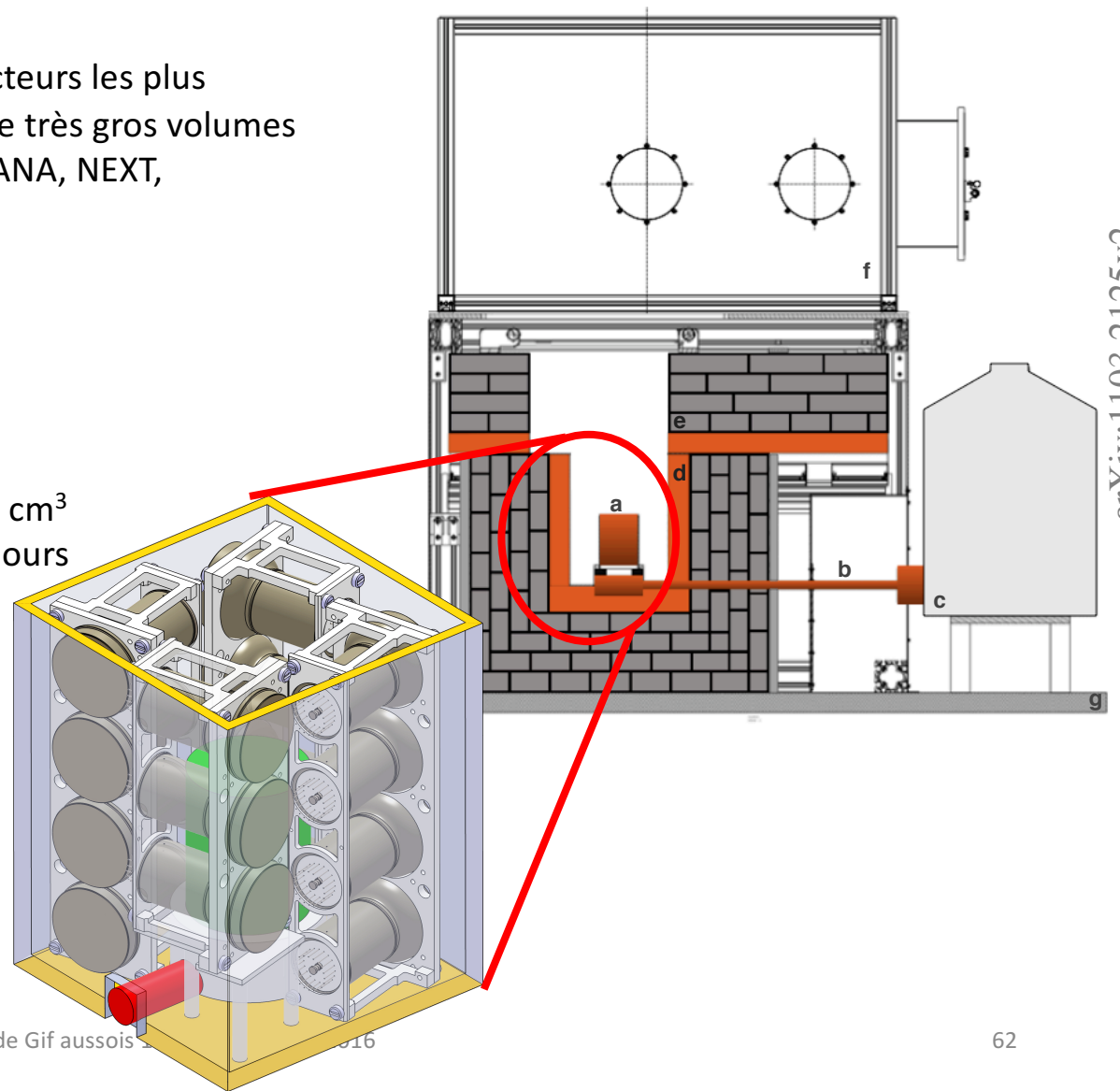
Exemple : PM pour Xenon1T

GEMPI et GATOR au Gran Sasso sont parmi les détecteurs les plus performants au monde et permettent de mesurer de très gros volumes pour les expériences DM ou $2\beta 0\nu$ (GERDA, MAJORANA, NEXT, XENON, DARWIN, ...)

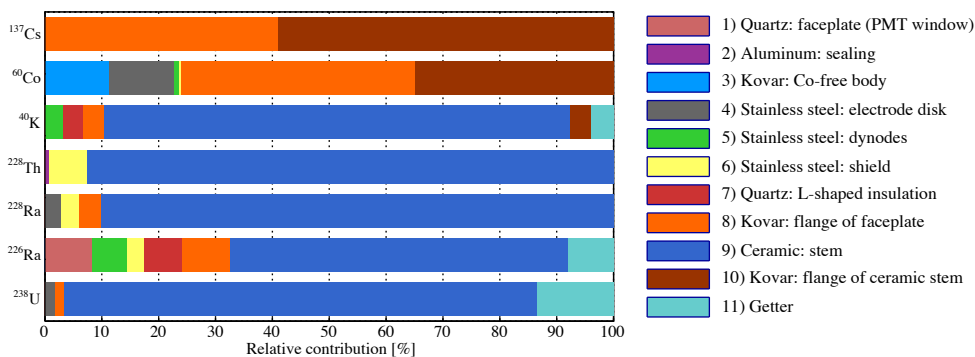
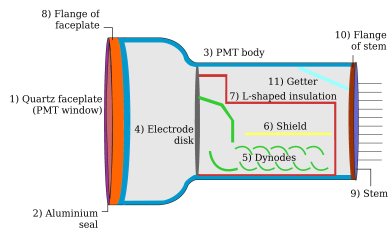
GATOR : HPGe (2.2 kg) type p:

- Balayage azote
- Blindage PE
- Blindage plomb très basse radioactivité
- Blindage cuivre très basse radioactivité
- Volume échantillon très important $25 \times 25 \times 30 \text{ cm}^3$
- Durée des mesures relativement courte ~ 20 jours

Empilement de 15 PM



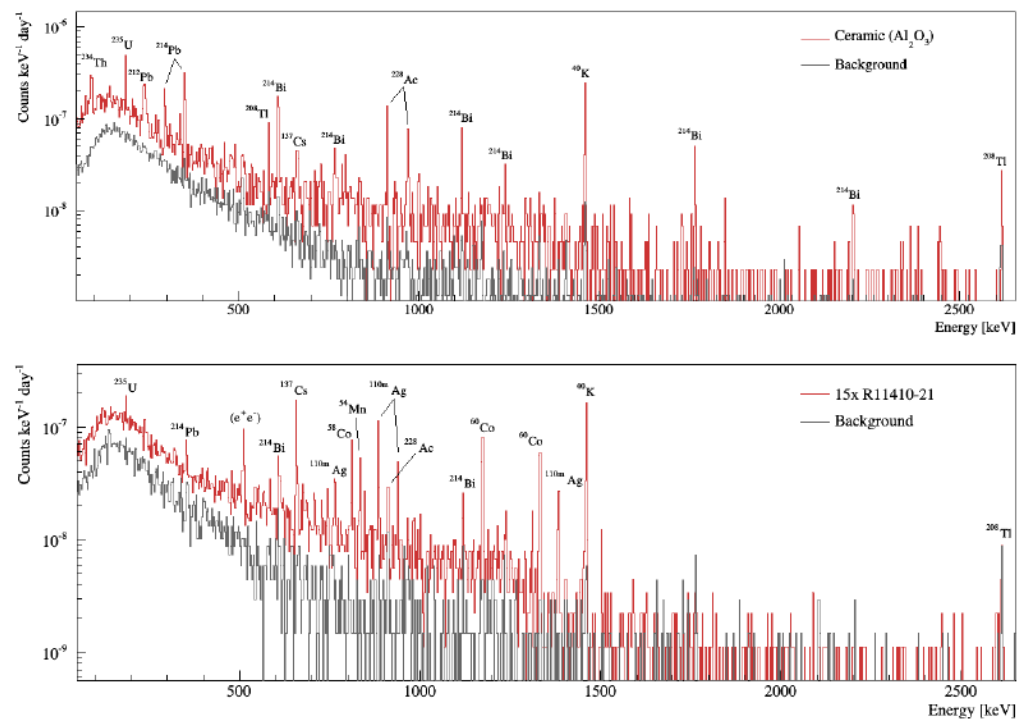
Exemple : PM pour Xenon1T



Extrait des résultats de « Table 5. Screening results for several R11410 PMT batches using a HPGe detector. The number of measured tubes and the measuring time, t, in days of each measurement are shown in the first columns. The ^{137}Cs upper limit is in the range $< (0.2 - 0.3) \text{ mBq/PMT}$ for all measured batches. »

PMT version (nr. of units)	Batch nr.	t [d]	Activity [mBq/PMT]							
			^{238}U	^{226}Ra	^{235}U	^{228}Ra	^{228}Th	^{40}K	^{60}Co	^{110m}Ag
v-20 (10)	0	15	< 18	< 0.82	< 0.79	0.9(3)	0.9(2)	12(2)	1.3(2)	< 0.21
v-21 (10)	1	26	< 18	0.4(1)	0.5(1)	< 1.1	0.4(1)	12(2)	0.7(1)	0.89(1)
v-21 (16)	2	15	< 16	0.5(1)	0.29(9)	< 0.85	< 0.61	13(2)	0.79(8)	1.1(2)
v-21 (15)	3	11	< 20	< 0.82	< 0.52	< 1.1	0.5(2)	13(2)	0.73(9)	0.51(7)

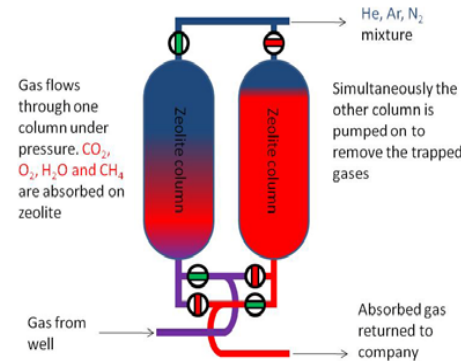
Fig. 2. (Top) Spectrum of the ceramic sample (nr. 9, red) along with the detector background (black). (Bottom) Spectrum of 15 Hamamatsu R11410-21 PMTs measured in July 2013 (red). The background spectrum of the Gator detector together with the PTFE support structure for the PMTs is also shown (black).



Exemple : Activation cosmogénique de l'Argon

Ex : Expérience DEAP

- Activation cosmogénique Ar dans l'atmosphère :
 - Capture : $n + {}^{38}\text{Ar} \rightarrow {}^{39}\text{Ar} \rightarrow {}^{39}\text{K}$
 - Spallation : $\alpha + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow {}^{42}\text{Ar} + 2p$
- ${}^{39}\text{Ar}$: $T_{1/2} = 269$ ans (β^- $Q=535$ keV)
- Argon de l'atmosphère : ${}^{39}\text{Ar}/{}^{40}\text{Ar} = 8.1 \times 10^{-16}$
 - > 1 Bq/kg
 - > détecteur 1 tonne : 1000kHz

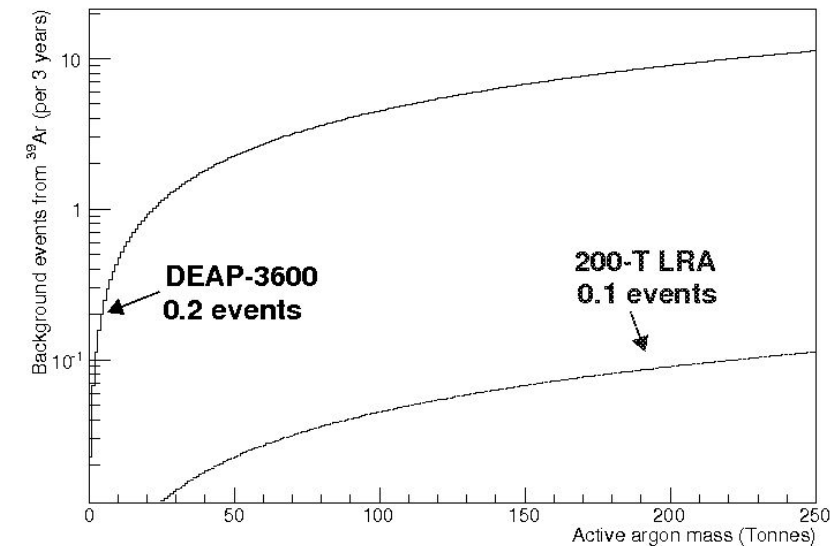


FERMILAB-CONF-11-470-AE-PPD

-> Extraction d'argon des gaz des mines de charbon car non-activé par les cosmiques avec une activité

Ex : GERDA $2\beta 0\nu$

- Double capture neutron sur ${}^{40}\text{Ar}$ dans l'atmosphère :
 - ${}^{40}\text{Ar} + n \rightarrow {}^{41}\text{Ar} + n \rightarrow {}^{42}\text{Ar} \rightarrow {}^{42}\text{K} \rightarrow {}^{42}\text{Ca}$
 - $T_{1/2}({}^{41}\text{Ar}) = 1,6$ h
 - $T_{1/2}({}^{42}\text{Ar}) = 32,9$ ans (β^- $Q=599$ keV)
 - ${}^{42}\text{K}$: $T_{1/2} = 12,36$ h (β^- $Q=3525$ keV, γ 1524 keV)
- Argon de l'atmosphère : ${}^{42}\text{Ar}/{}^{40}\text{Ar} = 1,2 \times 10^{-18}$



Exemple : Electrolyse du cuivre MAJORANA en laboratoire souterrain

Expérience $\beta\beta 0\nu$ avec du ^{76}Ge enrichi zone de recherche autour de 2039 keV

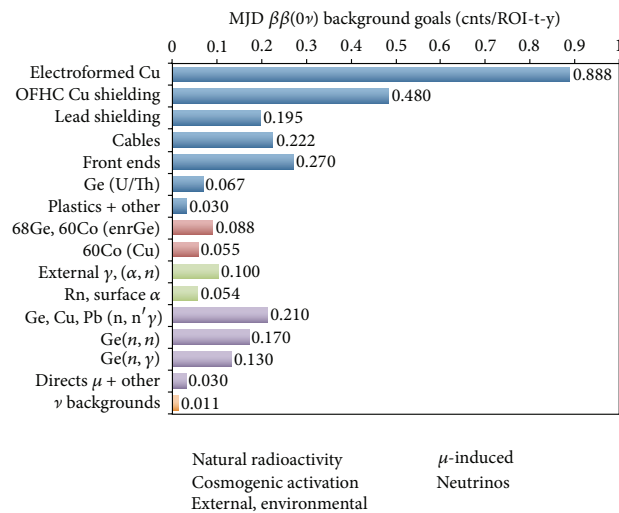
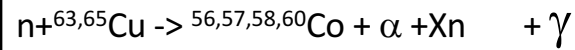
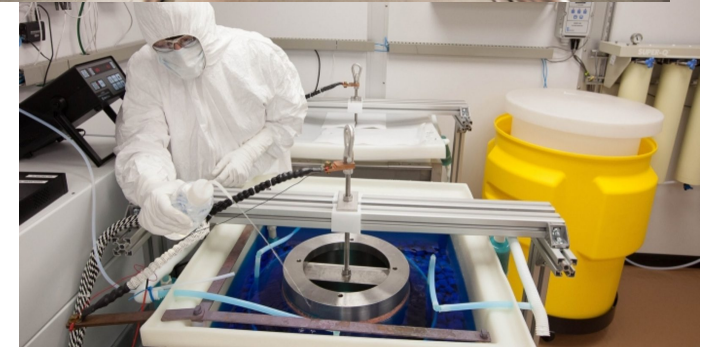
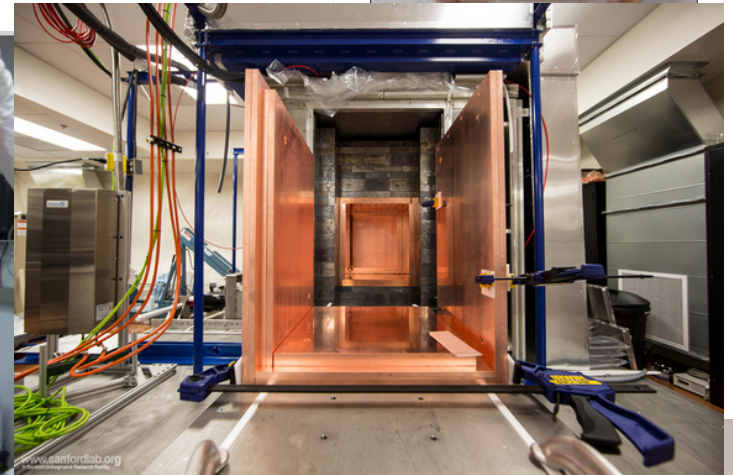
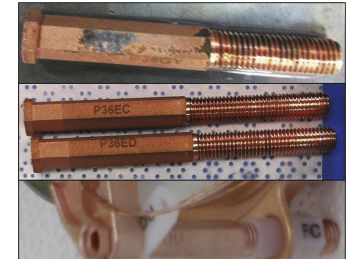
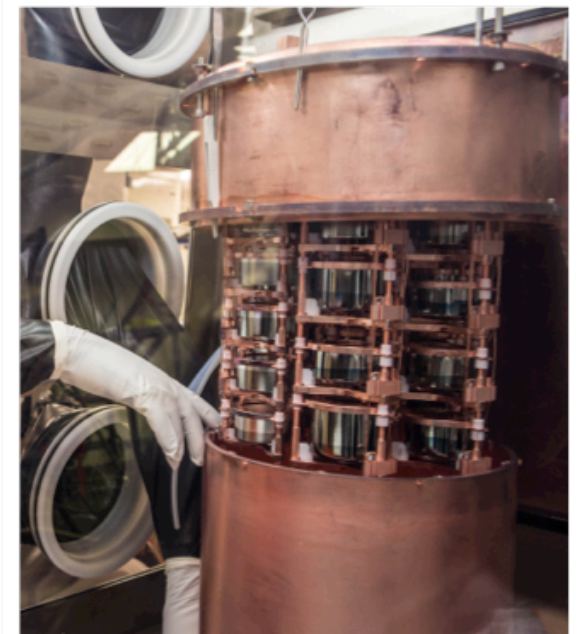
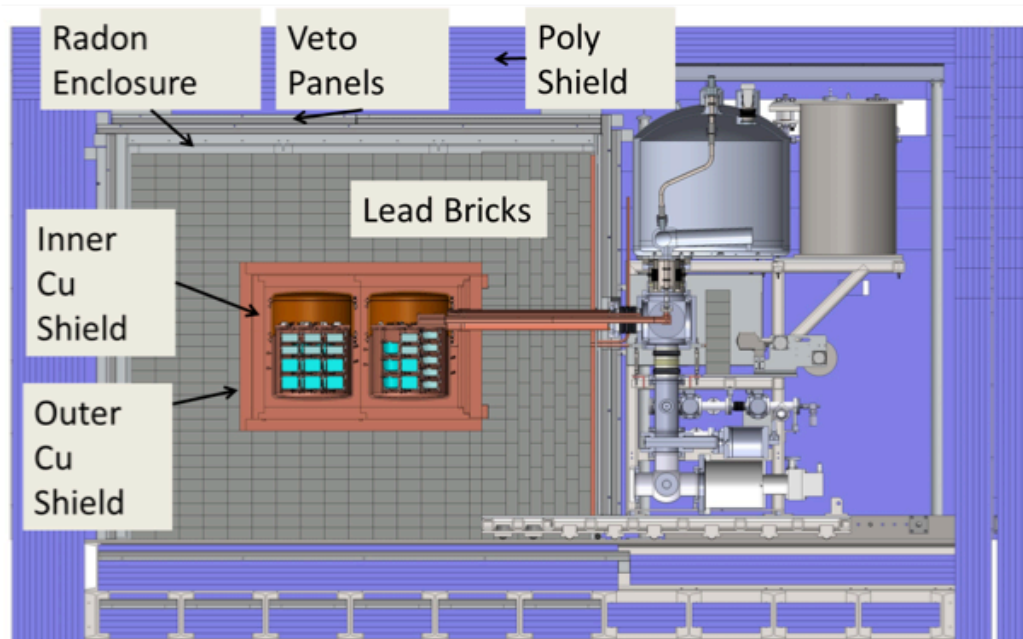


FIGURE 13: Estimated background contributions for the $\beta\beta(0\nu)$ -decay search. Backgrounds from natural radioactivity are shown in blue. Cosmogenic activation products are colored red. Green denotes backgrounds from the environment or those introduced during detector assembly. Purple is for μ -induced backgrounds at depth. An upper limit on the negligible background from atmospheric and other neutrinos is shown in orange. The contributions sum to 3.0 cnts/(ROI-t-y) in the MAJORANA DEMONSTRATOR.

Objectifs descendre en dessous de $0.1 \mu\text{Bq}$ en U ou Th par kg de Cu !!

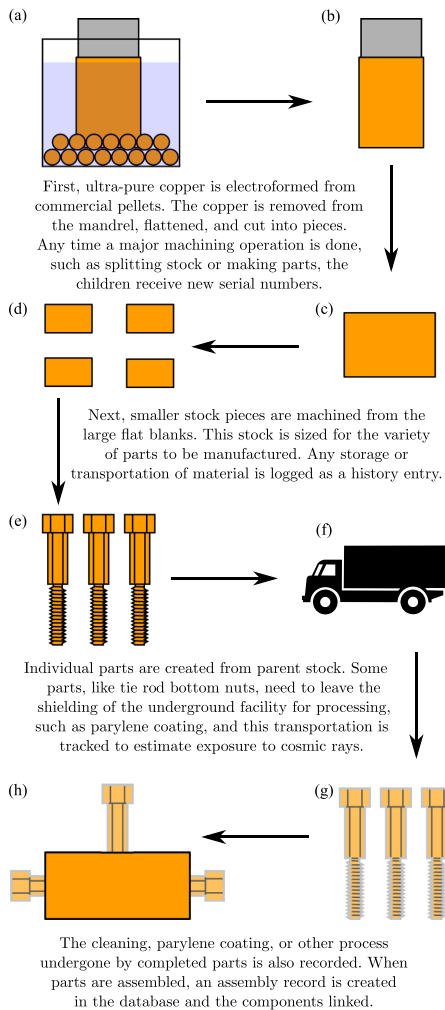




Exemple : Activation du cuivre ultra-pur MAJORANA pendant son transport

« The MAJORANA Parts Tracking Database »

N. Abgrall et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 779 (2015) 52–62



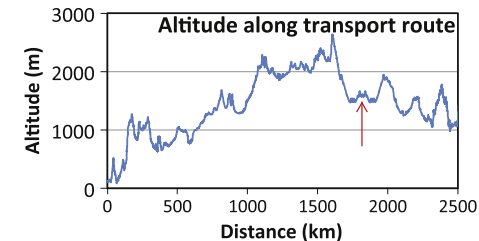
23/09/2016

Table 1

FedEx Tracking information (upper left table) and the inferred set of transportation and storage record entries for the PTDB (lower table). All dates occur in the calendar; 2012. The figure shown in the upper right presents the altitude variation experienced by the part during shipment, with a notable day long stop in Denver, CO located at red arrow.

FedEx Tracking data (reverse chronological order)

Date, Time	Activity	Location
Jun 13, 12:06	Delivered	Lead, SD
Jun 13, 10:37	Out for delivery	Rapid City, SD
Jun 13, 8:50	At local facility	Rapid City, SD
Jun 13, 5:00	At local facility	Rapid City, SD
Jun 12, 21:10	In transit	Denver, CO
Jun 11, 8:32	In transit	Boise, ID
Jun 9, 2:50	In transit	Hermiston, OR
Jun 8, 20:45	Left FedEx origin	Pasco, WA
Jun 8, 14:23	Picked up	Richland, WA

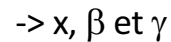
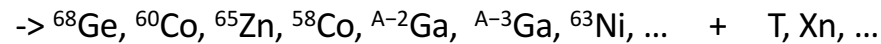
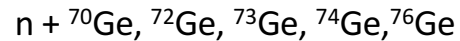


Parts Tracking Database records information (chronological order)

Record Type	Start – End (Date, Time) – (Date, Time)	Movement or Location (City, State)	Exposure calculation Sea-level Equivalent Exposure (hours)
Transport	Jun 8, 14:23 PDT – Jun 8, 14:43 PDT	Richland, WA → Pasco, WA	0.4
Storage	Jun 8, 14:43 PDT – Jun 8, 20:45 PDT	Pasco, WA	4.6
Transport	Jun 8, 20:45 PDT – Jun 8, 21:30 PDT	Pasco, WA → Hermiston, OR	0.9
Storage	Jun 8, 21:30 PDT – Jun 9, 2:50 PDT	Hermiston, OR	6.2
Transport	Jun 9, 2:50 PDT – Jun 9, 8:03 MDT	Hermiston, OR → Boise, ID	11.2
Storage	Jun 9, 8:03 MDT – Jun 11, 8:32 MDT	Boise, ID	114.9
Transport	Jun 11, 8:32 MDT – Jun 11, 20:42 MDT	Boise, ID → Denver, CO	95.2
Storage	Jun 11, 20:42 MDT – Jun 12, 21:10 MDT	Denver, CO	133.5
Transport	Jun 12, 21:10 MDT – Jun 13, 3:12 MDT	Denver, CO → Rapid City, SD	29.8
Storage	Jun 13, 3:12 MDT – Jun 13, 10:37 MDT	Rapid City, SD	21.1
Transport	Jun 13, 10:37 MDT – Jun 13, 11:34 MDT	Rapid City, SD → Lead, SD	2.9
Storage	Jun 13, 11:34 MDT – Jun 13, 12:06 MDT	Lead, SD	2.7

Exemple : production de Tritium dans les détecteurs Germanium

- Cosmogéniques sur le germanium (neutrons énergétiques) : Historiquement les expériences Heidelberg-Moscou et IGEX qui utilisaient du germanium ont observé du ^{68}Ge et du ^{60}Co (Yin Mei et al.)



- La production de Tritium est problématique pour les expériences cherchant des signaux dans la région $E < \sim 20\text{keV}$



$\rightarrow {}^3\text{H}$ Bruit de fond impossible à supprimer

- Taux de production de noyaux i

$$R_i = \sum_j N_j \int \phi(E) \sigma_{ij}(E) dE$$

N_j nbre de noyaux cibles, $\phi(E)$ flux ($\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$) de neutron cosmiques d'énergie E , σ_{ij} (cm^2) section efficace de production du noyau i à partir de j

Table 2

The cosmogenic production rate (per day per kg) of ${}^3\text{H}$ in various targets.

Target	Xe	NaI	CsI	TeO ₂	CaWO ₄
Rate (/kg/day)	16.0	31.1	19.7	43.7	45.5

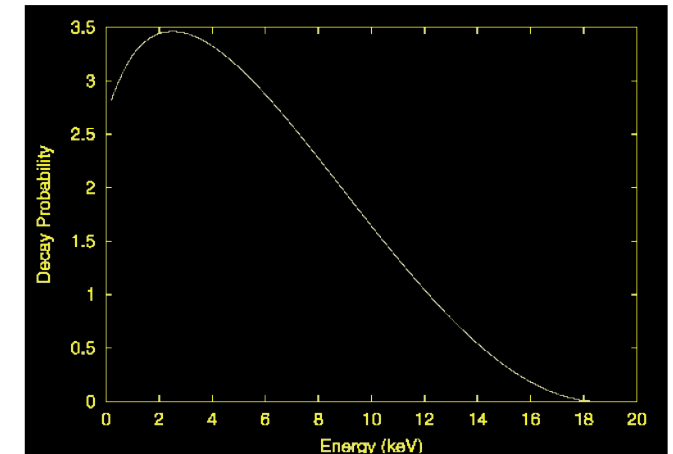


TABLE III

Cosmogenic production rates of some gallium isotopes that can result in the direct production of ${}^3\text{H}$ calculated with the atmospheric neutron spectra of references 1 and 2 (atoms produced per 10^{30} target nuclei per second)

TARGET NUCLEUS (${}^A\text{Ge}$)	ISOTOPE PRODUCED			
	Reference 1		Reference 2	
	$A-2\text{Ga}$	$A-3\text{Ga}$	$A-2\text{Ga}$	$A-3\text{Ga}$
${}^{70}\text{Ge}$	210	132	247	156
${}^{72}\text{Ge}$	143	117	167	137
${}^{73}\text{Ge}$	128	137	152	155
${}^{74}\text{Ge}$	106	92.8	125	113
${}^{76}\text{Ge}$	82.7	76.3	103	95.1

F.T. Avignone et. Al.

Exemple : production de Tritium dans les détecteurs Germanium

L'activation cosmogénique est négligeable pendant le processus de cristallisation. Par contre pendant tout le séjour en surface l'activation va croître. L'activité pour un isotope produit va être donnée par le taux d'activation auquel va se soustraire le taux de décroissance

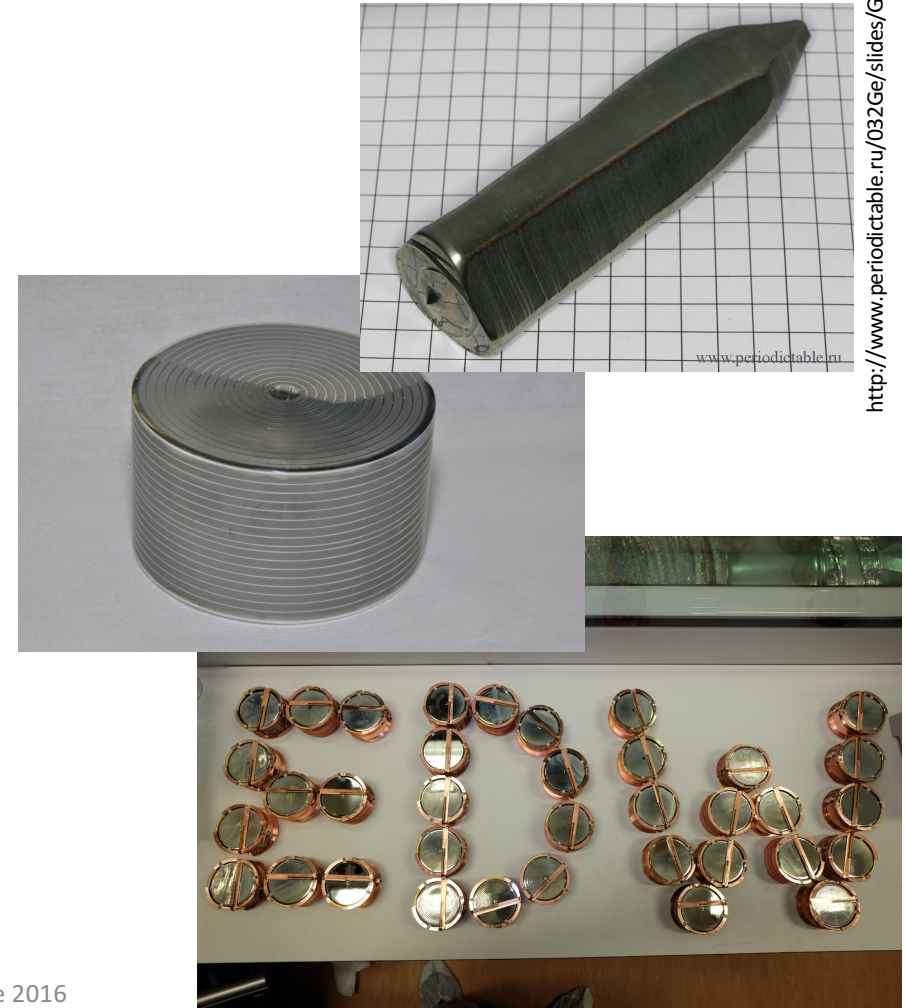
$$A(t) = R.(1-e^{-\lambda(t-t_c)})$$

avec t_c fin de la croissance du cristal et λ le taux de décroissance de l'isotope

Lorsque le cristal sera installé en site souterrain à t_s l'activation cessera et l'activité de l'isotope sera donnée par M

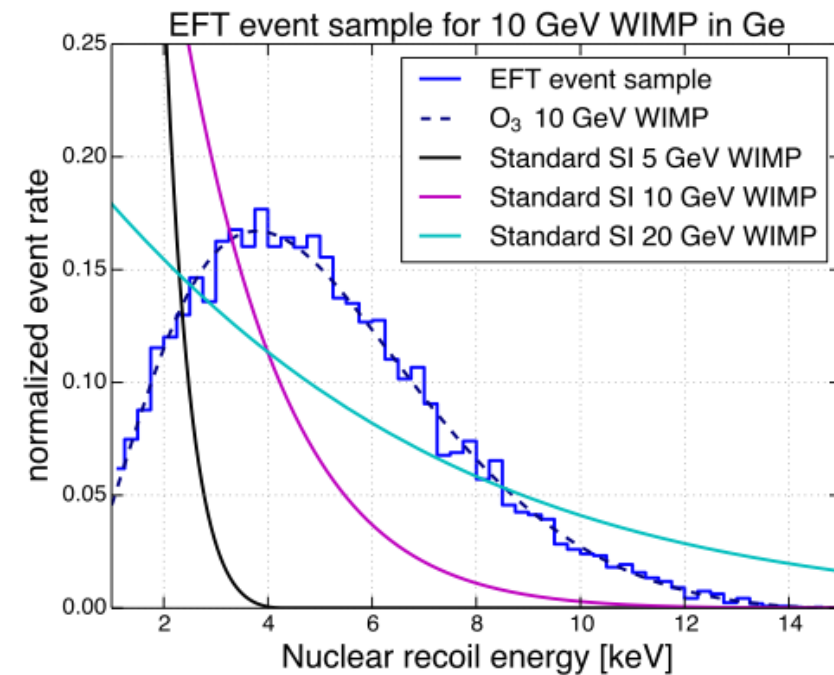
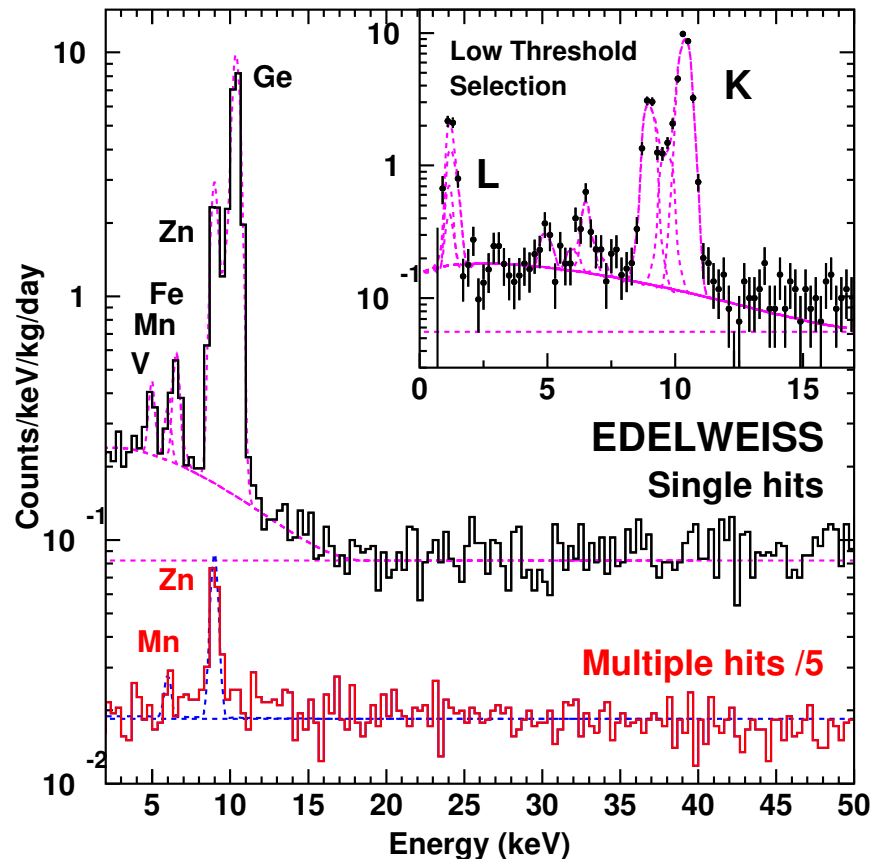
$$A(t) = R.(1-e^{-\lambda(t_s-t_c)}) . e^{-\lambda(t-t_s)}$$

Il est primordial de connaître l'historique du cristal dans les moindres détails !!!



Exemple : production de Tritium dans les détecteurs Germanium EDELWEISS

(S. Scorza et al., « Measurement of the cosmogenic activation of germanium detectors in EDELWEISS-III »)



Exemple : production de Tritium dans les détecteurs Germanium EDELWEISS

Table 6: Rates of production (expressed in $\text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) of isotopes induced in natural germanium at sea level as measured in EDELWEISS III germanium detectors, compared with previous estimates and measurements in Ref. [26], [5], [17], [27] and [4]. Errors on the production rate include statistical and for ^3H and ^{65}Zn systematic uncertainties, too. Systematic uncertainty is based on the minimization of the reduced χ^2 . Estimate in this work refers to ACTIVIA calculation, considering semi-empirical [19, 20, 21, 22, 23] (a) and MENDL-2P database (b) [24] cross sections. For ^{49}V , both calculations give the same result. An upper limit for ^3H from IGEX data (E) is shown together with calculations [5] for all isotopes. (I) and (II) refer to GEANT4 and ACTIVIA calculations from [17]. The lower limit for ^{68}Ge at saturation value is listed. It is derived from the fit value of 84 ± 6 at a 90% C.L. The last two columns refer to estimates from model [28] and experimental data (Exp.) from Ref. [4].

	This work		Ref. [26]		Ref. [5]	Ref. [17]	Ref. [27]	Ref. [4]	
	Exp.	Calc.	(Ziegler)	(Gordon)				From [28]	Exp.
^3H	82 ± 21	$46_{(a)}$ $43.5_{(b)}$			27.7 $< 21_{(E)}$	$48.3_{(I)}$ $52.4_{(II)}$		210	
^{49}V	2.8 ± 0.6	1.9 (a,b)							
^{65}Zn	106 ± 13	$38.7_{(a)}$ $65.8_{(b)}$	77	63	37.1		79	34.4	38 ± 6
^{55}Fe	4.6 ± 0.7	$3.5_{(a)}$ $4.0_{(b)}$	8.0	6.0	8.6		8.4		
^{68}Ge	> 74	$23.1_{(a)}$ $45.0_{(b)}$	89	60	41.3		58.4	29.6	30 ± 7

Résultat très important pour les futures expériences sensibles à ce fond en particulier pour la recherche de wimps de basse masse

Résumé

1^{er} principe : Tout matériau entrant dans la construction d'une expérience est coupable jusqu'à ce qu'il arrive à prouver son innocence !!!!

2^{ème} principe : Tout nouveau lot de pièce/matériel acheté doit être contrôlé

3^{ème} principe : Contrôler toute la chaîne de fabrication.
L'outillage et les produits de nettoyage doivent être irréprochables

4^{ème} principe : Dans une expérience il faut un gendarme inquisiteur qui sera en droit de demander tous les faits et gestes lors de la fabrication, manutention, transport et stockage de pièces ...

5^{ème} principe : Tout matériel mesuré doit entrer dans le fichier « interpol » de la radiopureté
www.radiopurity.org

....

N^{ième} principe :

Si vous êtes sûr que ce que vous observez n'est pas le signal recherché (wimps, $2\beta 0\nu$,...)

Si vous êtes sûr de votre code de simulation,

Si vous faites 100% confiance à vos collègues ...



Il y a de fortes chances qu'un processus rare négligé jusqu'aujourd'hui constitue une nouvelle composante de bruit de fond que vous n'aviez pas anticipé.

...



Yes, you're right... This dinner invitation from the French Embassy is highly suspicious!

© 2011 Ted Goff www.tedgoff.com



"Let's review the guidelines for some of the chemicals we handle."

Bibliographie

- **G. Heusser** « Low Radioactivity Background Techniques » Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995
<http://fisisist.web.cern.ch/fisisist/research/Low-RadioactivityBackgroundTechniques.pdf>
- **Joseph A. Formaggio and C.J. Martoff**, « Backgrounds to Sensitive Experiments Underground », Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 54 (2004) 361–412
- **Chaines Uranium et Thorium** http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/radioactivity/uth_chains.html
- **Juan A. Aguilar** <http://w3.ihe.ac.be/~aguilar/PHYS-467/PA3.html>
<http://w3.ihe.ac.be/~aguilar/PHYS-467/PA4.html>
- **P. K. F. Grieder** « Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book » Elsevier 2001
- **C.Zhang et al.**, « Cosmogenic Activation of Materials Used in Rare Event Search Experiments » Astropart.Phys. 84 (2016) 62-69
arXiv:1603.00098
- **M.S. Gordon et al.**, « Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground » IEEE Transactions on Nuclear Science · January 2005
- **E.V. Bugaev et al.**, « Atmospheric Muon Flux at Sea Level, Underground and Underwater » <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9803488v3>
- **A Study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS**
<http://inspirehep.net/record/541142/plots>
- **J. A., Simpson**, 1983, "Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays, *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science*, Vol. 33, 323-381.
- **Vito Tomasello** « Background Simulations for a Large-scale Cryogenic Dark Matter Experiment » Thesis University of Sheffield , november 2009
- **Holger Martin Kluck** « Measurement of the cosmic-induced neutron yield at the Modane underground laboratory » Thèse Karlsruher Instituts für Technologie , Decembre 2013
- **Cecile Kefelian** « Search for dark matter with EDELWEISS-III excluding background from muon-induced neutrons » Thèse Université Claude Bernard Lyon 1 / KIT 5 février 2016
- **G. Angloher et al.**, « EURECA Conceptual Design Report » [Physics of the Dark Universe Volume 3](#), April 2014, Pages 41–74
- **Hesti R.T. Wulandari** « Study On Neutron-Induced Background in the Dark Matter Experiment CRESST » Thèse Technischen Universität Munchen 2003

- **Glenn F. Knoll** « Radiation Detection and Measurement » John Wiley & Sons
- L.Baudis et al., « **GATOR: a low-background counting facility at the Gran Sasso Underground Laboratory** » arXiv:1103.2125v2
- **Laurence Lavergne** « Les détecteurs à semi-conducteurs silicium et germanium en physique nucléaire » Ecole Du détecteur à la mesure, Oléron, 18-25 juin 2009 » http://www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-09/oleron09_LL.pdf
- **L.A. Currie** , <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/16/034/16034060.pdf>
- **S.Hauf et al.**, « Radioactive Decays in Geant4 » <https://arxiv.org/pdf/1307.0996.pdf>
- **Johanna Sabine Becker** « Inorganic Mass Spectrometry: Principles and Applications », John Wiley & Sons
- **Yin Mei et al.**, « Studies on cosmogenic production as a background for rare physics processes » Nuclear Physics A 834 (2010) 823c–825c
- **F.T. Avignone et. al**, « Cosmogenic radioisotope production in germanium » Nucl. Phys. B (Proc. Suppl) 28 A 280 (1992)
- **S.Scorza et al.**, « Measurement of the cosmogenic activation of germanium detectors in EDELWEISS-III » arXiv:1607.04560v1
- **R. Agnese et al.**, “Demonstration of Surface Electron Rejection with Interleaved Germanium Detectors for Dark Matter Searches” arXiv:1305.2405
- **E. Aprile et al.**, « Physics reach of the XENON1T dark matter experiment. » arXiv:1512.07501v2
- **Laura Baudis et al.**, Xenon1T-DARWIN-DM2016
- **P. Cennini et al.**, “On atmospheric ^{39}Ar and ^{42}Ar abundance” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 356 (1995) 526-529