

# TRAVAUX PRATIQUES DE RADIOACTIVITE

## U.E. PHY113

Université Joseph Fourier

Département Licence Sciences et Technologies

2010-2011

Yannick ARNOUD

Mise à jour 2010-2011 par Ingo Schienbein

Table des matières :

Questionnaire à Choix Multiples .....	3
Consignes de sécurité relatives à l'utilisation des sources radioactives .....	5
Eléments de radioprotection .....	7
Déroulement des travaux pratiques de radioactivité.....	12
Première séance : Découverte des aspects expérimentaux de la radioactivité au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie.....	14
Deuxième séance : Compteur Geiger Muller, Statistique de Poisson et de Gauss.....	17
Troisième séance : Atténuation des photons par la matière, Mesure de section efficace.....	27
Quatrième séance : Dispersion spatiale des photons, Mesure de dose et de dose équivalente	31



Vous allez être amené pendant les séances de travaux pratiques à utiliser des sources radioactives. La personne compétente en radioprotection (PCR) qui est responsable de la mise en place de la protection des utilisateurs a aussi un rôle de formation des personnes qui vont être en contact avec ces radioéléments.

Avant de manipuler les sources radioactives au DLST, vous remettrez le QCM rempli et signé à votre enseignant au début de la première séance.

## Questionnaire à Choix Multiples

Feuille à rendre à l'enseignant à l'occasion de la première séance de TP. Si vous avez des interrogations, n'hésitez pas à demander conseil à votre enseignant ou encore à la personne compétente en radioprotection. Vous trouverez de la documentation dans les pages à venir...

Une ou plusieurs bonnes réponses par question. Cochez la case si la réponse vous paraît correcte.

Question 1 : Les mesures effectuées par la personne compétente en radioprotection (PCR) ont montré que la dose intégrée totale reçue pendant les séances de TP était inférieure à  $2 \mu\text{Sv}$  (à comparer au maximum légal de  $1 \text{ mSv}$  par an).

- L'activité des sources radioactives est tellement faible que je peux les garder à proximité lorsque je ne les utilise pas, afin de ne pas perdre de temps si j'en ai ensuite besoin.
- Lorsque je manipule une source, je m'arrange pour augmenter au maximum la distance entre l'élément radioactif et mon corps.
- Je range les sources dans le château de plomb ou dans leur boîte en plomb dès que j'ai fini les mesures en cours. D'une part, ça minimisera l'exposition des étudiants dans la salle de TP, et d'autre part, ça évitera de perturber les détecteurs des autres binômes.
- À la fin de la séance, je contrôle avec l'enseignant que toutes les sources que j'ai utilisées ont bien été rangées dans le château de plomb, l'enseignant remplira en conséquence le registre de mouvement des sources.
- Je laisse les sources en place sur le banc de mesure pour qu'à la prochaine séance, les étudiants ne perdent pas de temps avant de démarrer leurs mesures.

Question 2 : Afin de diminuer la dose reçue, je peux :

- M'éloigner de la source,
- Interposer un écran en plomb entre la source et l'utilisateur,
- Diminuer le temps d'exposition.

Question 3 : La PCR a mesuré un débit de dose de 115  $\mu\text{Sv/h}$  au contact de la source la plus active, (Na22). Je dois utiliser cette source pour une mesure.

- Je m'attends à développer un cancer dans les années à venir,
- Je limite le temps d'utilisation de cette source,
- Je conserve cette source dans ma poche.

Question 4 : Comportement en séance de TP

- Je peux consommer des aliments pendant la séance de TP, surtout si j'ai été en contact avec des sources radioactives et des métaux lourds comme le cadmium et le plomb,
- À la fin de chaque séance, je vais systématiquement me laver les mains.

**Je soussigné (nom, prénom) atteste avoir reçu les informations nécessaires à la manipulation des sources radioactives scellées utilisées en séance de travaux pratiques.**

**En cas de doute, je sais que je peux contacter la personne compétente en radioprotection qui répondra à mes questions.**

Coordonnées de la personne compétente en radioprotection :

Monsieur Yannick ARNOUD Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie Polygone scientifique 53, avenue des martyrs 38026 Grenoble Tél : 04 76 28 41 54 Email : yannick.arnoud@lpsc.in2p3.fr
--

**Date :**

**Signature :**

## Consignes de sécurité relatives à l'utilisation des sources radioactives

Art.20 du décret n°86-1103 du 2 octobre 1986

### Sources de rayonnement gamma

C'est l'enseignant qui donne les sources et qui vérifie leur retour.

**Il est strictement interdit de boire ou de manger dans la salle de travaux pratiques dédiée à la radioactivité.**

Les sources radioactives sont scellées et donc protégées de tout contact extérieur. Elles ne présentent pas de risque direct de contamination (contamination = ingestion ou inhalation d'éléments radioactifs).

Par contre, ces sources présentent un risque d'irradiation, car les rayonnements émis par la source ionisent à distance. En conséquence, il est nécessaire de réduire l'exposition en jouant sur les paramètres temps, distance et écrans. En pratique :

- minimiser le temps de contact pendant le déplacement de la source,
- maintenir la source éloignée de votre emplacement de travail,
- replacer la source dans sa boîte individuelle en plomb dès que son utilisation n'est pas nécessaire.

A la fin de la séance de travaux pratiques, remettre la boîte en plomb dans l'armoire de stockage.

A la fin de la séance, pensez à vous laver les mains !

En cas d'incident, avertir immédiatement l'enseignant responsable qui prendra les mesures adaptées.

Personne compétente en radioprotection :

Monsieur Yannick ARNOUD  
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie  
Polygone scientifique  
53, avenue des martyrs  
38026 Grenoble  
Tél : 04 76 28 41 54  
Mail : yannick.arnoud@lpsc.in2p3.fr

Médecin du travail :

Docteur Marielle LACHENAL  
Centre de santé interuniversitaire  
Domaine universitaire  
180, rue de la piscine  
Tél : 04 76 82 76 80

Ingénieur Hygiène et Sécurité :

Monsieur Jean-Luc LACROIX  
Bâtiment administratif de l'UJF  
Tél : 04 76 51 42 34

Radioéléments utilisés : sources scellées de sodium 22 (400 kBq, pastille marron), cobalt 60 (400 kBq, pastille bleu clair) et césium 137 (400 kBq, pastille grise).

**En cas d'incident radiologique, numéro vert de l'Autorité de Sureté Nucléaire : 0 800 804 135  
(24h/7j)**



L'ASN assure, au nom de l'État, le contrôle du nucléaire pour protéger le public, les patients, les travailleurs et l'environnement. Elle informe les citoyens.

# Eléments de radioprotection

**Ces éléments seront reprises plus tard en cours et à l'occasion du 4<sup>ème</sup> TP.**  
**Ils sont présentés ici afin que vous en preniez connaissance avant la 1<sup>ère</sup> séance de TP.**

## 1 - Dose absorbée : D

Une source radioactive émet des rayonnements ionisants, porteurs d'une certaine énergie. Cette énergie peut se présenter soit sous forme d'énergie cinétique pour des particules de masse non nulle comme les particules  $\alpha$ ,  $\beta$  ou les neutrons, soit sous forme d'énergie électromagnétique pour les photons  $\gamma$  ou X. Lorsqu'un rayonnement rencontre la matière, il interagit avec elle en lui transférant de l'énergie. La **dose absorbée D** par la matière caractérise ce transfert d'énergie. La dose absorbée représente l'énergie E cédée (en Joules) par un rayonnement quelconque à la matière par unité de masse (en kg).

$$Dose = \frac{\text{énergie}}{\text{masse}}$$

L'unité S.I. de dose est le gray (Gy) : 1Gy = 1 J.kg<sup>-1</sup>  
 Ancienne unité le rad (rad) (de radiation absorbed dose) : 1 rad = 10<sup>-2</sup> Gy

Les effets biologiques des rayonnements ionisants sont liés aux doses reçues et à la durée d'exposition pendant laquelle ces doses sont absorbées : une même dose reçue en quelques secondes est considérablement plus dangereuse que si elle est reçue pendant plusieurs semaines.

En radioprotection, on mesure donc le débit de dose absorbée  $\dot{D}$ , exprimé généralement en dose absorbée par heure :

$$\dot{D} = D'(t) = \frac{dD}{dt} \quad \text{égal à } \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad \text{quand le débit est constant.}$$

## 2 - Equivalent biologique de dose absorbée : H

Dans les tissus vivants, il faut tenir compte des effets biologiques dus à l'irradiation qui diffèrent selon la **nature** des rayonnements. A dose absorbée égale, la quantité d'énergie déposée par unité de longueur par les particules  $\alpha$  le long de leur trajectoire est beaucoup plus importante que celle cédée par des particules  $\beta$  ou encore par les photons  $\gamma$ . Les dommages aux cellules créés par les particules  $\alpha$  seront donc plus importants.

Ainsi, une dose de 0,1 Gy déposée dans des tissus vivants par des particules  $\alpha$  provoque statistiquement 20 fois plus de cancers que la même dose déposée par des photons. Bien que la dose déposée soit la même, les dégâts sur le vivant sont différents.

Pour traduire les différences d'efficacité biologique des rayonnements selon leur nature, on introduit un **facteur de pondération radiologique  $W_R$**  qui relie la **dose absorbée  $D$**  à l'**équivalent de dose  $H$** , permettant une comparaison directe des risques de dommages causés aux tissus biologiques.

$$H = W_R \times D$$

$H$  s'exprime en *sievert* (Sv) si  $D$  est en grays.

Anciennement, on obtenait  $H$  en *rem* (radiation equivalent in man) lorsque  $D$  était en rad.

Type et gamme d'énergie	Facteur de pondération radiologique $W_R$
- Photons, toutes énergies	1
- Électrons et muons, toutes énergies	1
- Neutrons, énergie de moins de 10 keV	5
- Plus de 10 à 100 keV	10
- Plus de 100 keV à 2 MeV	20
- Plus de 2 MeV à 20 MeV	10
- Plus de 20 MeV	5
- Protons, autres que les protons de recul, énergie supérieure à 2 MeV	5
- Particules alpha, fragments de fission, noyaux lourds	20

On définit le débit d'équivalent de dose :

$$\dot{H} = H'(t) = \frac{dH}{dt} = W_R \times \dot{D} \quad \text{égal à } \frac{\Delta H}{\Delta t} \text{ quand le débit est constant.}$$

$\dot{H} = W_R \times \dot{D}$  est généralement exprimé en équivalent de dose par heure.

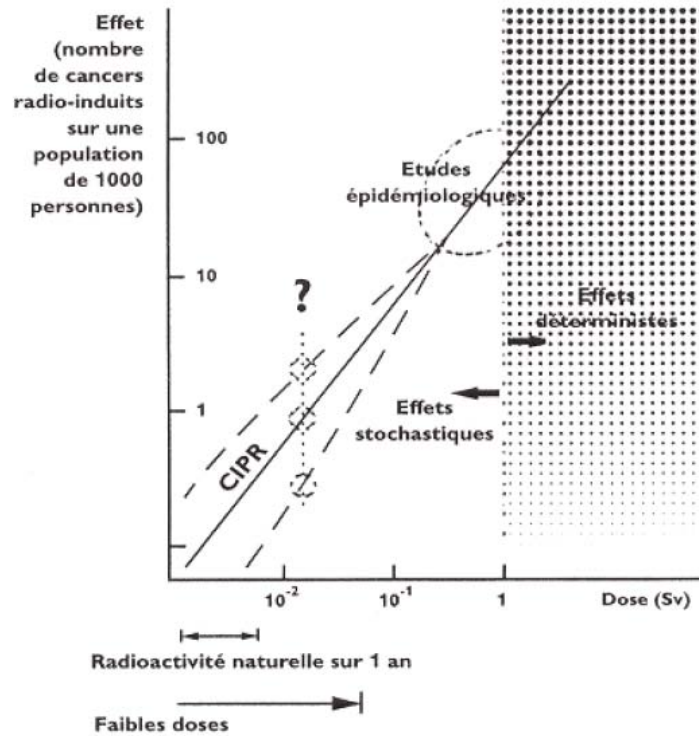
Si on a plusieurs types de rayonnements, on prend en compte toutes les contributions :  $H = \sum_R W_R \times D_R$  où

$D_R$  est la dose déposée par le rayonnement  $R$ .

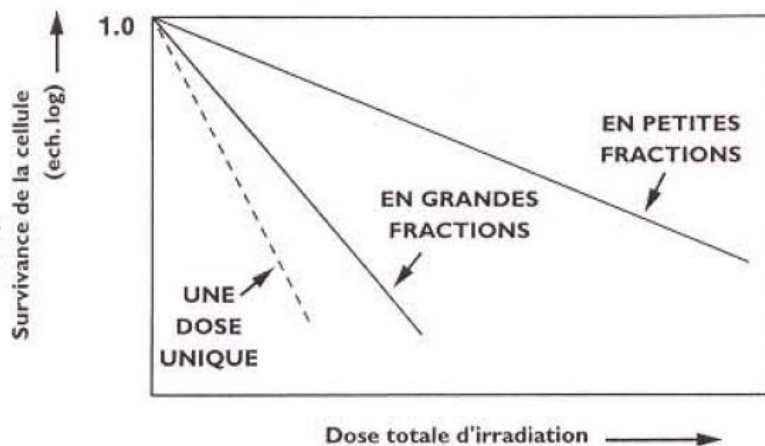


### 3 - Effets de seuil

Les effets des faibles doses sont mal connus, on peut seulement définir un caractère probabiliste de l'apparition de cancers :

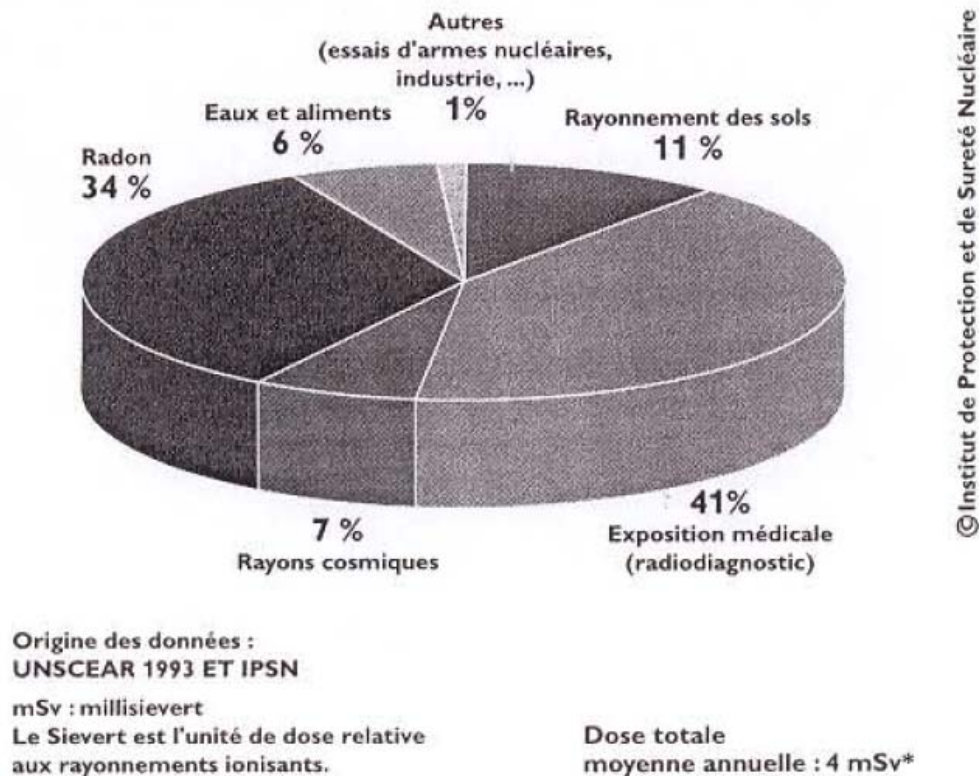


Enfin, une dose reçue en peu de temps (d'un bloc) est plus nocive que la même dose étalée sur une longue période.



### 4 - Ordre de grandeur des doses reçues par le public

La dose reçue par le public est d'environ 4 mSv par an, répartie à 50% sous forme d'irradiation naturelle et à 50% sous forme d'irradiation artificielle. **Attention aux examens radiologiques** qui contribuent fortement à la dose.

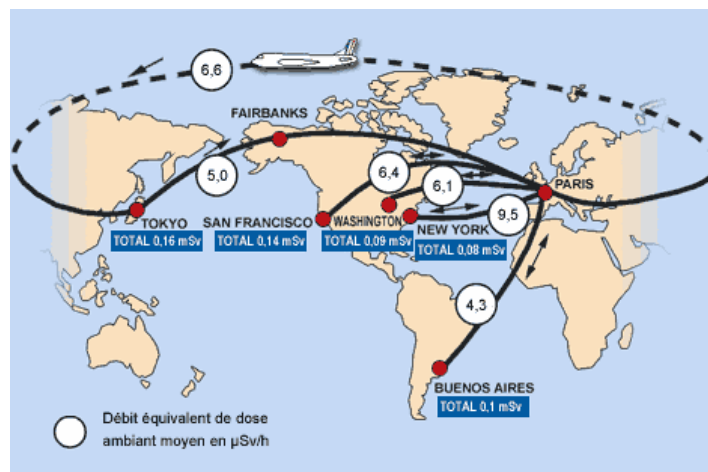


Les nouvelles normes en vigueur imposent que l'exposition supplémentaire à d'autres sources de radioactivité (ex : TP de physique nucléaire) ne contribue pas à plus de 25% de l'irradiation annuelle déjà acquise. On doit donc rester en deçà de 1mSv/an, pour un total annuel restant inférieur à 5 mSv.

Retenir les ordres de grandeur de dose équivalente et de débit de dose équivalente pour les risques radiologiques :

- **1 Sv** : effets biologiques déterministes (la dose reçue va entraîner l'apparition de cancers)
- **100 mSv** délivrés à fort débit de dose, c'est-à-dire en très peu de temps (ex. Hiroshima / Nagasaki) : effet cancérogène statistiquement significatif.
- **100 mSv / an** : dose annuelle reçue par les habitants de Ramsar en Iran où la radioactivité naturelle est très élevée. Pas d'effet visible sur l'apparition de cancers.
- **20 mSv / an** : dose maximale annuelle admise pour un travailleur suivi médicalement pour son exposition aux rayonnements ionisants.
- **4 mSv / an** : dose annuelle moyenne reçue par le public<sup>1</sup> (2 mSv radioactivité naturelle, 2 mSv examens médicaux).
- La législation en vigueur fixe à **1 mSv / an** la dose supplémentaire susceptible d'être reçue par le public, pendant les séances de TP par exemple.
- **300 µSv / an** : dose reçue par un individu à cause du rayonnement cosmique, mesuré au niveau de la mer.

<sup>1</sup> Par public, on entend toute personne majeure n'ayant pas un suivi médical lié à ses activités touchant aux rayonnements ionisants.



Mesures réalisées sur des routes représentatives des différentes situations d'exposition aux rayonnements cosmiques. Dans les cercles, est mentionné le débit d'équivalent de dose ambiant moyen sur le vol en microsieverts par heure ( $\mu\text{Sv/h}$ ). La dose totale est donnée pour un aller-retour en millisievert (mSv), pour le vol Paris-New York, la mesure est effectuée en Concorde.

Voici un résumé de la réglementation en vigueur (arrêté du 15 mai 2006) :

Dose efficace (corps entier)	débit par an débit par mois dose pendant une heure	$< 1 \text{ mSv / an}$ $< 80 \mu\text{Sv / mois}$	$1 \text{ mSv / an} < dH/dt < 6 \text{ mSv / an}$ $H < 7,5 \mu\text{Sv}$	$dH/dt > 6 \text{ mSv / an}$ $7,5 \mu\text{Sv} < H < 25 \mu\text{Sv}$	$dH/dt < 20 \text{ mSv / an}$ $25 \mu\text{Sv} < H < 2 \text{ mSv}$
Dose équivalente (extrémités)	débit par an dose pendant une heure	$< 50 \text{ mSv / an}$	$H < 200 \mu\text{Sv}$	$200 \mu\text{Sv} < H < 650 \mu\text{Sv}$	$650 \mu\text{Sv} < H < 50 \text{ mSv}$
Zone		Non réglementée	Surveillée	Contrôlée verte	Contrôlée jaune
Classement du personnel		Public	Catégorie B	Catégorie A	
Dosimétrie		Sans objet	Passive (film badge)	Passive (film badge) et opérationnelle (électronique)	

## Déroulement des travaux pratiques de radioactivité

L'ensemble de ces séances de TP vous permettra de vous familiariser avec la radioactivité.

**Les quatre séances auront lieu au Département Licence Sciences et Technologies (DLST)** sur le campus universitaire, au 2<sup>ème</sup> étage du bâtiment B. Après une première découverte (séance 1) on étudiera le fonctionnement d'un détecteur de rayonnement : le compteur Geiger Muller (séance 2) ainsi que deux façons de se protéger de la radioactivité gamma : en intercalant un écran (atténuation par l'absorption, séance 3) ou en s'éloignant de la source (atténuation du rayonnement par la dispersion spatiale, séance 4). On établira et on vérifiera expérimentalement les lois associées à ces phénomènes.

Le caractère aléatoire des désintégrations radioactives sera utilisé pour mieux comprendre les incertitudes de mesure expérimentales.

Avant chaque séance, il faudra vous familiariser avec l'expérience proposée en lisant les énoncés et en répondant aux questions des exercices préparatoires. Ces questions sont encadrées.

### En séance

Les étudiants de chaque groupe sont répartis en binômes pour les effectifs de 12.

Nous avons à notre disposition pour les TP 6 postes de travail avec des compteurs Geiger-Müller.

Il faut garder le même poste de travail pendant les quatre séances !

### Notation des TP

La note du compte rendu est basée sur les points suivants :

- Travail de préparation pour les séances 2, 3 et 4 (à rédiger par chaque étudiant **avant** la séance)
- La participation pendant les séances
- La qualité des comptes rendus

Séance 1 (DLST) :

Découverte :

- Questionnaire général sur la radioactivité
- Caractérisation de la radioactivité à l'aide d'un compteur Geiger Muller.
- Influence des écrans de protection, de la distance, de la durée de la mesure.
- Fluctuations statistiques.
- Déroulement des TP à venir

Séance 2 :

Le compteur Geiger Muller (I) :

- étalonnage du compteur,
- choix du point de fonctionnement,
- mesure du bruit de fond ambiant.

Statistique :

- histogrammes du taux de comptage,
- distributions de Poisson et de Gauss,
- incertitudes de mesure, propagation des incertitudes.

Séance 3 :

Atténuation des photons par la matière :

- mesure de l'atténuation linéique du rayonnement gamma par l'aluminium et le laiton,
- calcul de la section efficace d'interaction, utilisation de papier millimétré semi-logarithmique.

Séance 4 :

Dispersion spatiale des photons :

- mesure de la variation du taux de comptage en fonction de la distance,
- détermination du coefficient de dispersion spatiale, utilisation de papier millimétré à double échelle logarithmique.

Dépôt d'énergie dans la matière par le rayonnement radioactif :

- mesure de dose, de dose équivalente.

# Première séance : Découverte des aspects expérimentaux de la radioactivité au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

Le but de cette première séance est de vous faire découvrir les premiers concepts expérimentaux de la radioactivité, qui seront ensuite étudiés de façon formelle pendant les séances de cours / TD, et étudiés en TP.

Le travail de préparation consiste à relire vos notes de cours de terminale sur la radioactivité. Vous serez ainsi plus à même de remplir le questionnaire.

Vous aborderez avec votre enseignant au cours de la séance de TP collectif les points suivants :

## 1 - Introduction

- Rendre le Questionnaire à Choix Multiples signé à l'enseignant
- Correction du QCM
- Remplir le questionnaire
- Correction du questionnaire, discussion du principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable) et les consignes de sécurité relatives à l'utilisation des sources radioactives

## 2 - Détecteur Geiger-Müller, mesures de radioactivité

- Mesure qualitative de la radioactivité d'une source scellée de césium 137 (voir figure 8) à l'aide d'un détecteur Geiger (bruit de crépitement caractéristique).
- Mesure quantitative avec un détecteur Geiger relié à un compteur d'impulsions. Etude de la variation du taux de comptage avec :
  - le bruit de fond
  - l'utilisation d'écrans entre source et détecteur (atténuation)
  - la distance source – détecteur (dispersion)
  - l'instant de la mesure (décroissance)

Fluctuations statistiques de mesure, concept d'histogramme.

Distributions de Poisson et de Gauss.

**IL Y A UN ORDRE À RESPECTER POUR LA MISE EN ROUTE OU L'ARRÊT DES APPAREILS**

### **En début de séance**

vérifier que le potentiomètre du réglage de la Haute Tension est à zéro (tiroir de gauche).  
mettre en route l'alimentation de l'électronique de comptage (tiroir de droite),  
puis mettre en route la Haute Tension.

**NE JAMAIS ARRÊTER LES APPAREILS EN COURS DE SÉANCE**

### **En fin de séance**

mettre la Haute Tension à zéro (tiroir de gauche),  
arrêter la Haute Tension (tiroir de gauche),  
arrêter l'alimentation (tiroir de droite).

### 3 - Atténuation des rayonnements bêta et gamma

Utilisation d'une sonde spécifique au rayonnement bêta, puis au rayonnement gamma pour étudier les propriétés des différents rayonnements. En particulier, on évaluera les effets d'écrans divers pour arrêter les particules bêta.

### 4 – Déroulement des TP à venir

Définition de ce qu'on attend dans le compte rendu des TP à venir.

Structure possible d'un compte rendu :

- titre
- introduction : objectif de l'expérience
- théorie (quelle loi à tester, ...)
- description de l'expérience (conditions de prise de mesure [type de source, de détecteur, conditions expérimentales], on fait quoi et pourquoi ?)
- exploitation des mesures expérimentales/présentation des résultats : voir tableau, voir graphe 1, voir graphe 2, ...
- description des résultats
- interprétation des résultats (comparaison avec la théorie) bien séparé de la pure description
- conclusion

A faire attention :

- Bien structurer le compte rendu
- Donner toutes les informations pour être reproductible [quelle source, quel compteur, la température (c'est pertinent?), le relevé des mesures, ...]
- Traitement des incertitudes de mesure
- Qualité des graphes (absence de ratures, nom et échelle des axes, titre du graphe)

## Questionnaire

La radioactivité a été inventée par l'homme	Vrai	Faux
Il existe des éléments naturellement radioactifs	Vrai	Faux
L'homme est capable de synthétiser des particules radioactives	Vrai	Faux
L'apparition de la vie sur terre est en partie liée à la présence de la radioactivité	Vrai	Faux
Est-il vrai que l'on respire, ingère ou boit, chaque jour, des substances radioactives ?	Vrai	Faux
Y a t-il un risque pour la santé ?	Oui	Non
Pourquoi distribue-t-on de l'iode aux personnes habitant à proximité des centrales nucléaires ?		
Quand je passe une radio, suis-je irradié ?	Oui	Non
Il paraît que pour certains examens médicaux, on introduit des matières radioactives dans l'organisme. Est-ce qu'on est radioactif ensuite ?	Oui	Non
En prenant un minimum de précautions, on peut se protéger complètement de la radioactivité.	Vrai	Faux
Les éléments radioactifs qui se désintègrent peuvent donner naissance à des rayonnements qui ionisent la matière, y compris à l'intérieur des cellules humaines, et en particulier dans le noyau où se trouve l'ADN.	Vrai	Faux
Quand on parle de radioactivité, on sous-entend qu'il s'agit de :		
• molécules radioactives	Vrai	Faux
• d'atomes radioactifs	Vrai	Faux
• de noyaux radioactifs	Vrai	Faux
Certaines des particules émises lors de désintégrations radioactives n'ont ni masse, ni charge électrique et transportent pourtant de l'énergie	Vrai	Faux
Les particules alpha sont aussi connues sous une autre appellation. Laquelle ?		
Les particules beta sont aussi connues sous un autre nom. Lequel ?		



## Deuxième séance : Compteur Geiger Muller, Statistique de Poisson et de Gauss

### I - Introduction

#### 1 - Le compteur Geiger Muller

##### Description

Un compteur Geiger Muller (GM) est un détecteur cylindrique. Le cylindre qui est relié à la masse forme la cathode et l'anode se présente sous la forme d'un fil de tungstène, à l'intérieur du cylindre. Celui-ci est rempli d'un mélange de gaz inerte (argon ou néon) à une pression de 100 torr<sup>2</sup> et d'un gaz d'amortissement (vapeur de gaz halogène) à une pression de 10 torr.

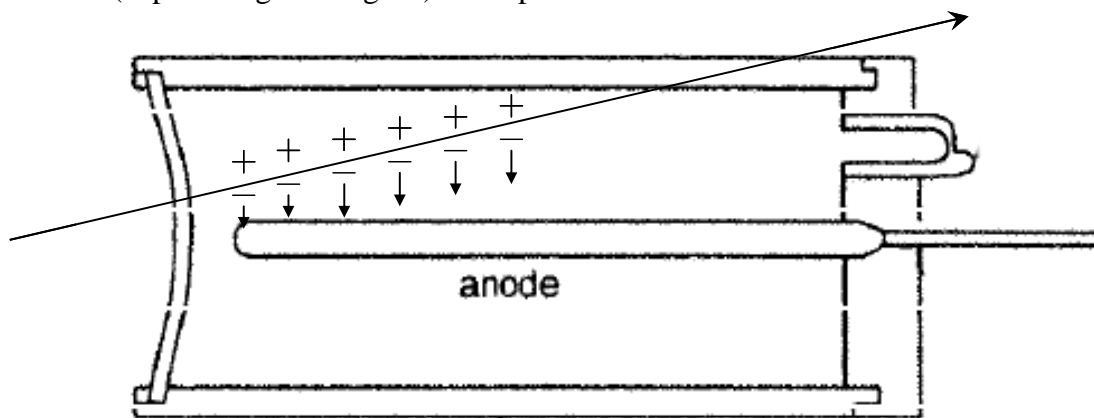


Figure 1 : Vue en coupe d'un tube de compteur Geiger Muller.

Pour permettre aux particules ionisantes de rentrer à l'intérieur du détecteur, l'extrémité du tube est bouchée par une très fine feuille de mica.

##### Principe de fonctionnement

Pour faire fonctionner le détecteur, on applique une différence de potentiel de quelques centaines de volts entre l'anode et la cathode afin d'obtenir un champ électrique radial important au voisinage du fil d'anode.

Lorsqu'une particule chargée (électron, proton, particule alpha, ...) traverse le gaz interne, elle ionise le gaz : production de paires ions-électrons (environ 10 par cm de gaz, c'est très faible). Sous l'influence du champ électrique qui règne dans la chambre, les électrons vont être accélérés en direction du fil central et acquérir une grande vitesse sur une courte distance. Cette vitesse élevée va permettre à ces électrons d'ioniser à leur tour d'autres atomes, et de libérer de nouveaux électrons. Cette multiplication des charges se répète très rapidement et produit une avalanche d'électrons autour du fil anodique : cela permet d'amplifier plus d'un million de fois le signal initial qui était très faible.

<sup>2</sup> Le Torr est une unité de mesure utilisée principalement en médecine ou en physique dans le cas de très basses pressions. Un Torr représente la pression générée par un mm de mercure. On a ainsi l'équivalence 1 atmosphère = 101325 Pascal = 760 Torr.

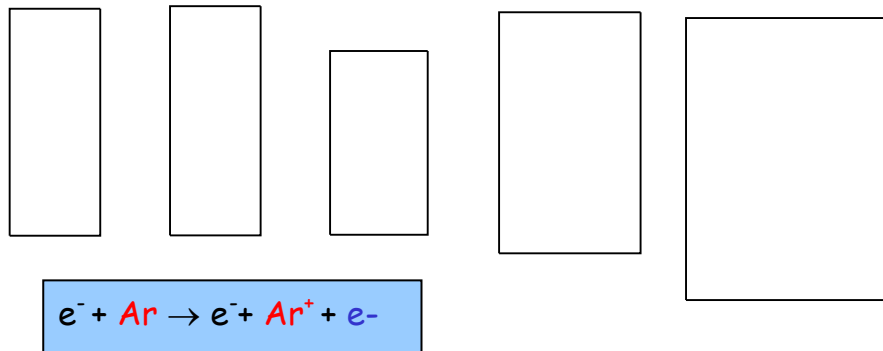
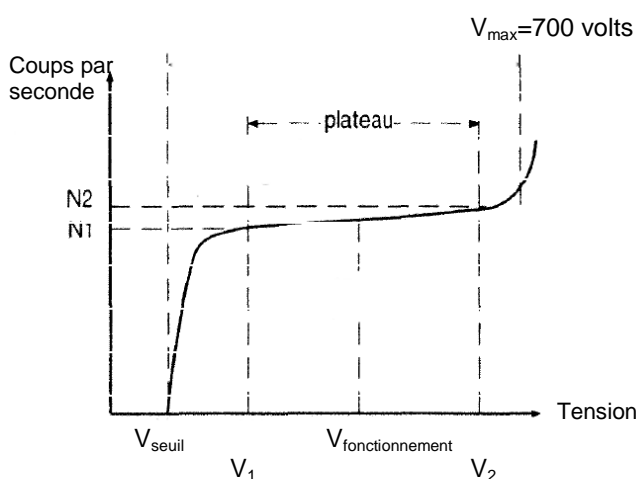


Figure 2 : Illustration de l'avalanche électronique au voisinage du fil anodique (marqué  $\oplus$ ) au centre du compteur Geiger Muller.

Il faut environ 0,2 millisecondes pour que les ions issus de l'avalanche soient évacués. Pendant ce temps, le compteur est aveugle. Ce qui veut dire que toute nouvelle particule ionisant le gaz ne donnera aucun signal électrique. Ceci génère un **temps mort** et le compteur ne sera donc pas capable de mesurer un taux de comptage supérieur à  $\sim 5000$  coups par seconde. C'est une des limitations de ce type de détecteur.

Le taux de comptage d'un compteur GM va dépendre de la tension appliquée entre anode et cathode.



Si la tension est trop faible, les électrons d'ionisation se recombinent avec les ions et on ne mesure aucun signal électrique.

Au delà d'une tension seuil  $V_{\text{seuil}}$ , on observe un signal lié à l'avalanche des électrons d'ionisation sur le fil anodique. Cette tension seuil est fonction du gaz utilisé et du diamètre de l'anode. Au delà de cette tension seuil, de plus en plus de coups sont mesurés. Cependant, sur une plage importante de tensions, ce nombre de coups est quasiment indépendant de la tension appliquée. On appelle cette zone le *plateau*. Le point de fonctionnement  $V_{\text{fonctionnement}}$  est choisi au milieu du plateau.

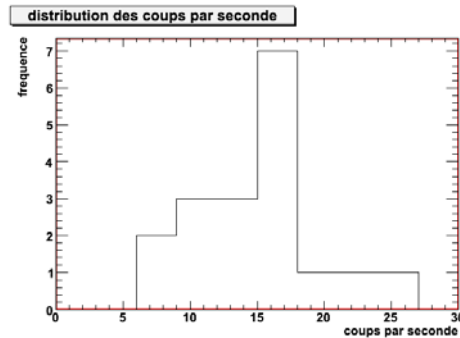
## 2 - Statistique de comptage - Mesure d'une grandeur aléatoire

Quand on mesure certaines grandeurs physiques, on n'obtient pratiquement jamais le même résultat même si les conditions expérimentales sont identiques. Ces fluctuations sont caractérisées par la probabilité de mesurer chaque valeur, qui dépend de la nature de la grandeur mesurée mais aussi de l'appareil de mesure.

Voici par exemple le résultat d'un ensemble de mesures de radioactivité effectuées à l'aide d'un compteur Geiger Muller, situé à 10 cm d'une source de césium 137 sur laquelle on a posé un écran d'1 mm de plomb. On compte le nombre de coups pendant une seconde et on remet le compteur à zéro pour la mesure suivante.

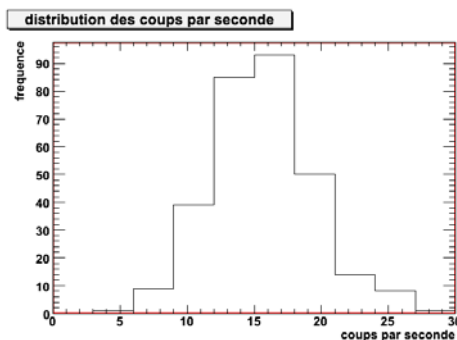
Mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Coups par seconde	15	11	13	17	17	16	8	12	22	25	6	9	9	12	15	17	20	15

On peut regrouper ces données sous la forme d'un histogramme, qui permet de visualiser comment sont distribuées ces données :



**Figure 3 : histogramme fréquentiel des 18 mesures. On a regroupé les mesures dans des divisions correspondant à une plage de 3 coups par seconde. Contenu de la première division : nombre de fois où on a mesuré un nombre de coups  $\geq 0$  et  $< 3$ , 2ème division, nombre de coups  $\in [3,6[$ , 3ème division, nombre de coups  $\in [6,9[$ , etc.**

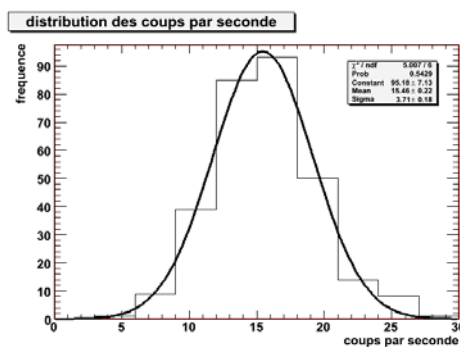
En cumulant 300 mesures, on obtient l'historgramme ci-dessous :



**Figure 4 : Histogramme de 300 mesures.**

Ainsi, à la mesure d'une grandeur physique est associée une distribution de probabilité qui est fixée par la nature de la grandeur et la façon dont on la mesure.

La distribution des grandeurs physiques que l'on mesure est le plus souvent décrite par une courbe de Gauss.



**Figure 5 : L'historgramme des 300 mesures précédentes, auquel on a superposé une courbe de Gauss.**

Une courbe de Gauss est caractérisée par deux grandeurs importantes : son centre (ou valeur moyenne)  $\mu$  et son écart type  $\sigma$ .

Dans notre cas, la valeur moyenne  $\mu$  vaut 15,46. Ce qui signifie que le compteur a mesuré en moyenne 15,46 coups par seconde. Si  $x_i$  représente une mesure individuelle ( $x_1 = 15, x_2 = 11, x_3 = 13, \dots$ ), alors on a :

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

L'écart type  $\sigma$  caractérise la dispersion des mesures. Plus sa valeur est petite, plus les mesures sont proches les unes des autres. Dans les 18 premières mesures, on avait des valeurs allant de 6 à 25. Mais beaucoup de mesures étaient proches de 15. L'écart type se calcule de la façon suivante :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$\sigma^2$  s'appelle la variance et sa racine carrée est l'écart type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

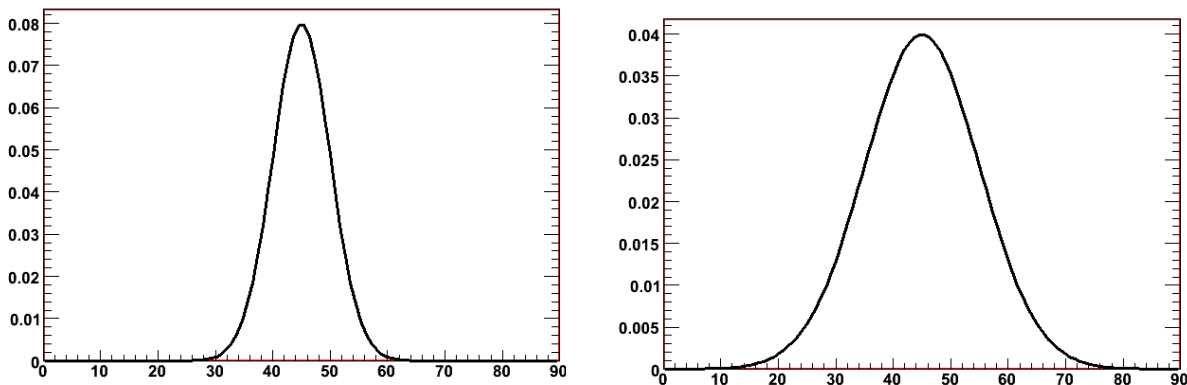


Figure 6 : Deux distributions gaussiennes de valeur moyenne égale à 45. A gauche, l'écart type vaut 5, à droite, il vaut 10. Plus l'écart type est grand, plus les valeurs sont dispersées.

### La distribution de Gauss et incertitudes de mesure

L'expression d'une Gaussienne est la suivante :  $y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ .

On peut montrer que 68,3% de la surface de la Gaussienne est à  $\pm 1\sigma$  de la valeur centrale  $\mu$ . On a aussi 95,5 % de la surface de la gaussienne à  $\pm 2\sigma$  de la valeur centrale  $\mu$ .

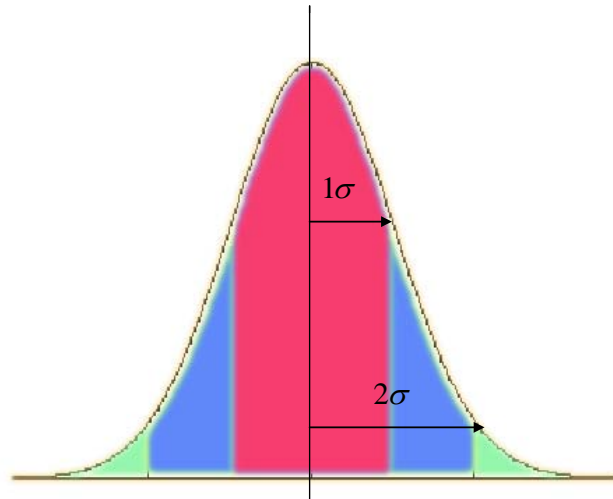


Figure 7 : Courbe de Gauss, centrée sur la valeur  $\mu$ . 95% de la surface totale de la courbe est à  $\pm 1$  écart type de la valeur centrale  $\mu$ .

Revenons à nos 18 mesures, qui sont comprises entre 6 et 25 coups par seconde. On va faire une synthèse de nos mesures en donnant la valeur moyenne  $\mu$  et un intervalle à 95% de confiance ( $\pm 2\sigma$ ), qui définit la plage où se trouvent 95% des valeurs mesurées.

On exprimera le résultat final à 95% de confiance sous la forme :  
« nombre de coups par seconde mesurés par le compteur =  $\mu \pm \Delta$  », avec  $\Delta = 2\sigma$ .

Calculer pour les 18 mesures précédentes la valeur moyenne et l'écart type. Calculer ensuite l'intervalle de confiance à 95% associé à ces 18 mesures.

### Cas d'une mesure unique

Parfois, nous n'effectuerons qu'une seule mesure  $x$ , et on sera obligé d'estimer  $\sigma$  car on ne peut pas calculer  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$  pour  $N=1$ .

On prendra l'approximation suivante :  $\sigma = \sqrt{x}$ , valable dans le cas de désintégrations radioactives. Cette hypothèse sera vérifiée au cours de la séance de TP. On prendra aussi  $\mu = x$ .

## II – Partie à préparer

### Exercice I

La source utilisée est une source de césium 137, de période  $T=30$  ans.

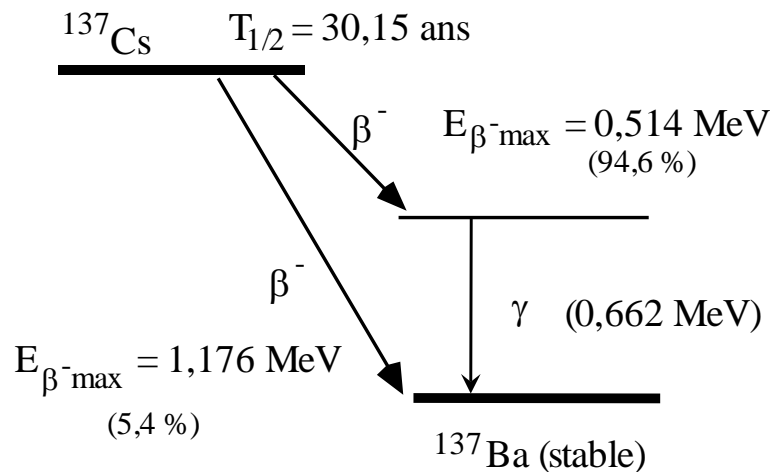


Figure 8 : Schéma de désintégration du césium 137

- 1) Quelles sont les particules émises lors de la désintégration du césium 137 ?
- 2) Ces particules interagissent-elles de la même façon dans la matière ?
- 3) Que doit-on faire si on veut que le compteur GM soit atteint uniquement par des photons ? (la réponse est à chercher dans l'interaction des particules avec la matière...)
- 4) Soit  $a_0$  l'activité de votre source de césium au 1/01/1998.
  - a. Rappeler (et redémontrer) la relation entre  $T$  et  $\lambda$ , la constante de désintégration.
  - b. Quelle est l'activité  $a_t$  de la source le jour de l'expérience ?
  - c. De combien l'activité a-t-elle diminué le jour de l'expérience ? (en pourcentage)
  - d. De combien va-t-elle diminuer au cours d'une séance de TP de 4 heures ?

## Exercice II

Lors des différentes expériences, on va enregistrer un certain nombre de coups (d'impulsions). On cherche dans cet exercice, à évaluer l'incertitude sur la mesure du nombre d'impulsions.

Pendant un temps  $\delta t$ , on enregistre  $x$  impulsions. Comme vous pourrez le constater lors des expériences, deux mesures répétées dans les mêmes conditions expérimentales ne donnent pas le même résultat.

Cela est dû au caractère aléatoire des désintégrations radioactives. La principale incertitude sur la mesure est donc statistique. Afin de pouvoir la déterminer, on fait l'hypothèse que nos mesures sont distribuées selon une loi de Gauss (on vérifiera cette hypothèse en pratique).

- 1) Comment doit-on choisir l'incertitude  $\Delta$  en fonction de l'écart type pour que l'intervalle  $\mu \pm \Delta$  contienne :
  - a) 68,3 % des mesures, (mesure à 68,3% de degré de confiance)
  - b) 95,4 % des mesures. (mesure à 95,4% de degré de confiance)

Pour la suite de l'exercice, et pour toutes les expériences du TP, on prendra comme niveau de confiance 95,4 %, c'est à dire que l'incertitude sur  $x$  sera celle déterminée en 1.b)

On suppose qu'on effectue une mesure unique  $x$ . On rappelle que dans ce cas,  $\mu = x$  et  $\sigma = \sqrt{x}$ .

- 2) Calculer le nombre de coups minimum  $x$  nécessaire pour que l'incertitude relative  $\frac{\Delta x}{x}$  sur  $x$  soit : 1 % , 3 % et 10 %
- 3) Dans les expériences suivantes que vous effectuerez en TP, on souhaite avoir une incertitude relative  $\Delta x/x < 10\%$ . Dans ce cas, quel est le nombre minimal ( $x_{\min}$ ) d'impulsions nécessaires ?

Le temps de comptage  $\delta t$ , variable selon les conditions des expériences, sera donc choisi de manière à avoir au moins  $x_{\min}$  impulsions.

### III – Partie expérimentale

#### 1 - Etalonnage du compteur

IL Y A UN ORDRE À RESPECTER POUR LA MISE EN ROUTE OU L'ARRÊT DES APPAREILS

##### **En début de séance**

vérifier que le potentiomètre du réglage de la Haute Tension est à zéro (tiroir de gauche).  
mettre en route l'alimentation de l'électronique de comptage (tiroir de droite),  
puis mettre en route la Haute Tension.

**NE JAMAIS ARRÊTER LES APPAREILS EN COURS DE SÉANCE**

##### **En fin de séance**

mettre la Haute Tension à zéro (tiroir de gauche),  
arrêter la Haute Tension (tiroir de gauche),  
arrêter l'alimentation (tiroir de droite).

#### La source radioactive

La source radioactive que vous utiliserez a une faible activité. Cependant, lorsque que vous ne l'utilisez pas, rangez-la dans sa boîte en plomb. Cela vous permettra d'une part de ne pas être exposé inutilement aux photons gamma de la source, et d'autre part les compteurs GM de vos voisins ne seront pas perturbés par votre source.

#### Description de l'appareillage

La chaîne de comptage comprend un détecteur (compteur Geiger-Müller) et une électronique de comptage. L'électronique de comptage permet :

- de fournir l'alimentation haute tension au compteur GM
- de dénombrer les impulsions détectées.

Trois modes de mesures sont possibles :

- en position **Manuel**, la durée du comptage est fixée par les commandes **Départ** et **Arrêt** commandées par le manipulateur.
- en position **Prétemps**, le temps de comptage est imposé. Il est fixé en secondes, minutes ou heures par le manipulateur.
- en position **Précompte**, le compteur s'arrête à un taux de comptage fixé à l'avance (la mesure est dite alors à "statistique constante" : la variable est le temps de comptage qui dépend de l'intensité du rayonnement).

Le compteur GM est installé sur une console à crémaillère qui permet de modifier sa distance à la source radioactive, fixe. Celle-ci est placée dans le logement inférieur d'un support à deux étages. La plateforme supérieure, percée d'un trou circulaire, permet d'intercaler des écrans absorbants entre la source et le compteur.

## Expérience préliminaire

**Etalonnage du potentiomètre multi tours** : Le galvanomètre intégré à l'alimentation haute tension donne une indication de la tension délivrée. Une valeur plus précise sera obtenue à l'aide du potentiomètre multi tours.

**Ordre de grandeur de la tension seuil** : Pour définir les conditions de fonctionnement du compteur il faut d'abord déterminer la tension seuil  $V_S$  de l'électronique associée, à partir de laquelle le compteur GM commence à détecter les premières impulsions.

Procéder de la manière suivante :

a) Placer la source radioactive dans son logement. Rapprocher le compteur au plus près de la source et le centrer par rapport à celle-ci.

Avant de mettre l'électronique en marche, vérifier que le *bouton de réglage de la haute tension est au minimum*.

Mettre en marche l'alimentation générale de l'électronique, puis l'affichage (**RAZ** = remise à zéro ) et la haute tension.

b) Choisir la position **Manuel**, et appuyer sur la commande **Départ**. Augmenter progressivement la HT jusqu'à ce que l'affichage commence à détecter des impulsions. La tension correspondante donne un ordre de grandeur de la tension seuil  $V_S$ .

c) pour la suite des mesures, pour effectuer un comptage, faire basculer le commutateur de fonction sur **Prétemps** et afficher le temps de comptage  $\delta t$  choisi (question 3 de l'exercice II).

## Expérience 1. Caractéristique du compteur Geiger Müller

Pour utiliser un compteur Geiger Müller, il faut au préalable déterminer son point de fonctionnement. Dans ce but, tracer sur une feuille de papier millimétré la caractéristique du compteur GM en mesurant le taux de comptage  $C$  en fonction de la tension  $V$ . Vous effectuerez une série de mesures tous les 20 V pour des valeurs allant de  $V_S$  à  $V_{MAX} = 660$  V.

Tension en volts	Nombre N de coups	$\Delta N$ (à 95% de confiance)



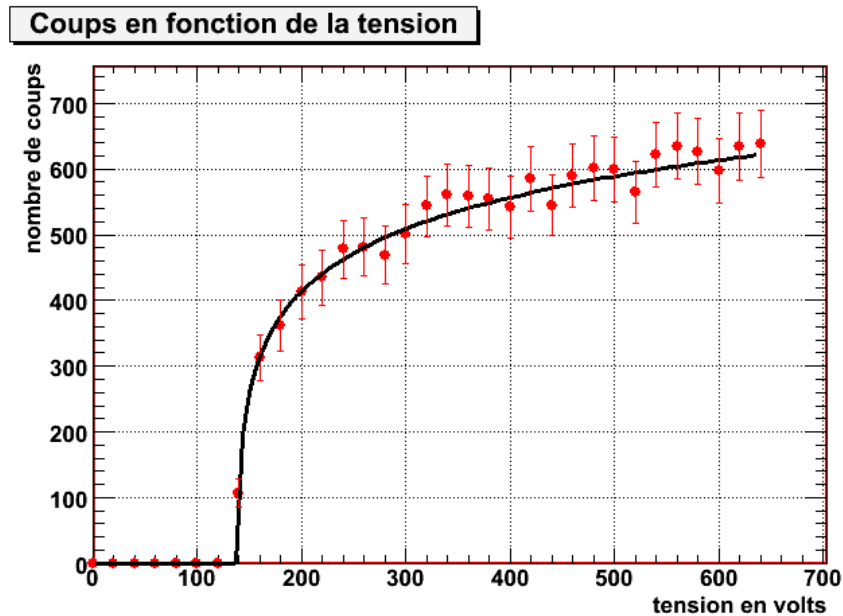


Figure 9 : Exemple de coups relevés avec le compteur Geiger Muller en fonction de la tension appliquée. La courbe caractéristique du compteur passe par les barres d'erreur (à 95% de degré de confiance).

### Méthode de travail :

Préparer le tableau de mesures (pensez aux incertitudes) et représentez votre graphique sur papier millimétré.

Attention au choix des échelles pour les deux axes.

Penser à prendre des points régulièrement répartis dans les parties linéaires et des points plus serrés dans les courbures.

Bien sûr, vous indiquerez sur cette courbe (comme sur les suivantes) les conditions de mesures : source,  $\delta t$  de mesure, distance source - compteur...

### Mesures :

- Afficher le temps  $\delta t$  pour le mode prétemps
- Déterminer les incertitudes pour chacun de vos comptages avec un intervalle de confiance à 95 % :  $x \pm \Delta x$  (cf exercice 2)
- Porter les valeurs obtenues avec les barres d'incertitudes en fonction de la tension et tracer *la caractéristique du compteur*, c'est à dire la courbe lissée des points obtenus. Porter sur le graphe les tensions  $V_s$ , seuil à partir duquel le compteur enregistre des désintégrations, et  $V_f$ , tension de fonctionnement qu'on choisira au milieu du plateau.

**La valeur  $V_f$  sera conservée pour toutes les mesures effectuées par la suite.**

## 2 – Distributions de Poisson et de Gauss

### Expérience 2. Distribution de Poisson

Dans cette partie, on va modifier les conditions expérimentales pour avoir un taux de comptage très faible, de l'ordre de 2 coups à chaque mesure. Modifier les paramètres suivants :

- insérez une plaque de laiton de 3 mm entre la source et le compteur,
- diminuez la valeur du temps de comptage  $\delta t'$  à 1 seconde,
- augmentez la distance entre le compteur GM et la source.

Configurez ensuite le compteur pour qu'il mesure automatiquement le nombre de coups pendant le temps  $\delta t'$  choisi.

Un des étudiants annoncera le nombre de coups mesurés, que l'autre étudiant reportera sur l'axe horizontal d'une feuille de papier millimétré. Vous obtiendrez après une cinquantaine de mesures un histogramme, similaire à une distribution de Poisson.

### Expérience 3. Distribution de Gauss

Modifiez les conditions expérimentales précédentes pour que le taux de comptage soit voisin de 15. De la même façon, vous construirez l'histogramme du nombre de coups mesurés, qui devrait être proche d'une distribution Gaussienne.

Une fois la distribution obtenue, calculez la moyenne  $m$  de vos mesures. Tracer ensuite à la main une Gaussienne, centrée sur cette valeur moyenne. Finalement, comparez la racine carrée de la moyenne de la distribution ( $\sqrt{m}$ ) à la moitié de la largeur à mi-hauteur (HWHM), qui vaut théoriquement  $\text{HWHM} = 1,18 \times \sigma$ . Vérifier que l'approximation  $\sqrt{m} \approx \sigma$  est justifiée.

### Expérience 4. Détermination du bruit de fond

On peut remarquer que le compteur détecte des impulsions même en l'absence de toute source radioactive. Ces impulsions sont dues aux rayonnements environnants d'origine terrestre (radioactivité naturelle du sol), ou extraterrestre (rayons cosmiques). Elles peuvent être aussi l'effet de parasites des circuits électroniques (bruit de fond électronique). L'ensemble de ces impulsions constitue le bruit de fond.

Quand on veut mesurer le taux d'impulsions dû au rayonnement d'une source radioactive, il faut retirer les impulsions parasites provoquées par le bruit de fond. Cette correction est d'autant plus nécessaire quand les sources étudiées ont des activités faibles.

Pour déterminer le bruit de fond, procéder de la manière suivante :

- se mettre au point de fonctionnement  $V_f$
- les sources radioactives proches doivent être enfermées dans leur boîte en plomb
- déterminer le nombre d'impulsions correspondant à un temps de comptage de 5 min.

En déduire le bruit de fond (**Bf**) et son incertitude à 95% de degré de confiance ( $\Delta \text{Bf}$ ) pour une durée de 1 seconde. Idem pour un temps de comptage  $\delta t$  quelconque.

On conservera pour les deux séances suivantes les valeurs :

- du point de fonctionnement  $V_f$
- du bruit de fond Bf ramené au temps  $\delta t$

## Troisième séance : Atténuation des photons par la matière, Mesure de section efficace

Vous êtes maintenant familiers avec l'utilisation du compteur Geiger Müller. Pendant cette séance, vous allez avoir à mener à bien un projet, de la façon la plus autonome possible.

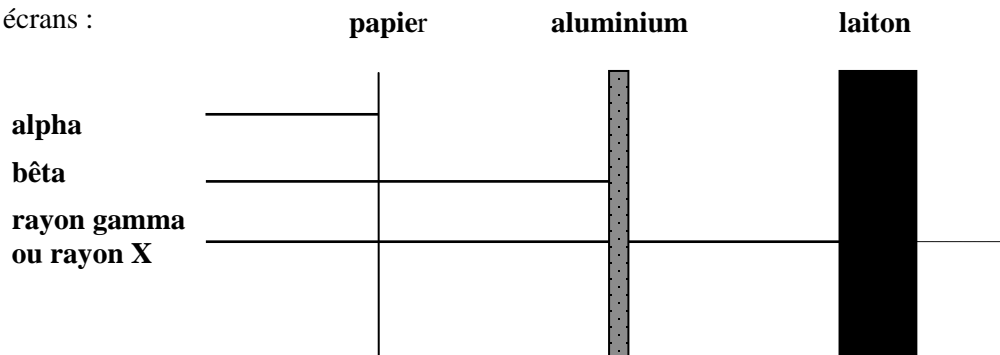
Vous exploiterez vos mesures expérimentales en utilisant du papier semi-logarithmique, afin de déterminer le coefficient d'atténuation linéique et la section efficace d'interaction des photons de la source de césium 137 avec le laiton et l'aluminium.

### I - Protection contre les rayonnements radioactifs

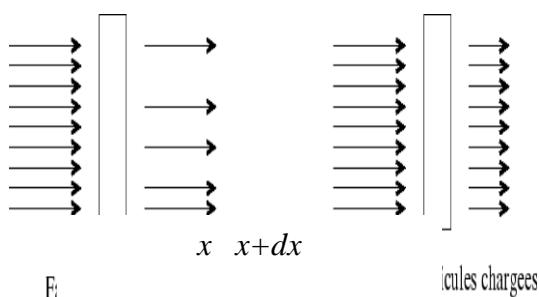
#### Atténuation par la matière

Pour limiter l'exposition à des rayonnements radioactifs, on peut :

- limiter le temps d'exposition
- augmenter la distance (l'atténuation par dispersion autour de la source ponctuelle sera examinée dans le deuxième projet)
- utiliser des écrans :



Pouvoir de pénétration des différents rayonnements



L'atténuation d'un faisceau parallèle de rayons par absorption est étudiée dans le projet 1. A l'échelle macroscopique, l'interaction du rayonnement  $\gamma$  avec la matière se traduit par l'atténuation du faisceau incident.

On va décrire l'interaction d'un faisceau de  $N$  photons traversant une épaisseur  $dx$  de matière. Soit  $N(x)$  le nombre de photons avant la plaque d'épaisseur  $dx$ , et  $N(x+dx)$  le nombre de photons émergeant de la plaque.

Après la traversée d'une épaisseur  $dx$  de matière, le nombre de photons  $N$  du faisceau (dans la direction du faisceau incident) a diminué d'une quantité  $dN(x) = N(x+dx) - N(x)$  proportionnelle :

- à l'épaisseur de matière traversée  $dx$
- au nombre  $N(x)$  de photons incidents.
- au coefficient d'atténuation linéique  $\mu = \sigma \times n$ , où  $\sigma$  est la section efficace qui traduit la probabilité qu'un photon interagisse avec un atome et  $n$  est le nombre d'atomes par unité de volume.

La variation du nombre de photons après traversée d'une petite épaisseur  $dx$  est ainsi  $dN(x) = -\mu \times N(x) \times dx$ . La valeur de  $\mu$  dépend du matériau et de l'énergie de la particule incidente.

L'intégration de la relation différentielle ci-dessus conduit à la loi donnant le nombre moyen de photons restant après la traversée d'une épaisseur  $y$  de matière :

$$\frac{dN(x)/dx}{N(x)} = -\mu$$

$$\left[ \frac{dN(x)/dx}{N(x)} \right]_{x_{\min}}^{x_{\max}} = -[\mu]_{x_{\min}}^{x_{\max}}$$

$$\ln N(x_{\max}) - \ln N(x_{\min}) = -\mu \times (x_{\max} - x_{\min})$$

En posant  $x_{\max} = x$  et  $x_{\min} = 0$ , on a :

$$\ln N(x) - \ln N(0) = \ln N(x) - \ln N_0 = -\mu \times x$$

$$\ln \frac{N(x)}{N_0} = -\mu x$$

$$N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$$

où  $N_0$  est le nombre initial de photons et  $x$  l'épaisseur de matière traversée.

L'atténuation des photons dans la matière est exponentielle. On définit la longueur de demi-atténuation  $x_{1/2}$  par l'épaisseur de matière à utiliser pour atténuer le rayonnement de moitié :  $N(x_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$ .

Montrer que l'on a  $x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$ .

Exprimer le nombre de noyaux  $n$  par  $\text{cm}^3$  dans un matériau en fonction de sa masse atomique  $M$  (exprimée en g/mol) et de sa densité  $\rho$ .

## II – Partie à préparer pour l'exploitation des résultats

### 1 - Loi linéaire

Il est facile de vérifier avec un graphe si un ensemble de points expérimentaux  $(x_i, y_i)$  suivent une loi linéaire, du type  $y = ax + b$ .

Il suffit de placer de reporter ces points dans un graphe et de vérifier qu'on peut les relier par une droite. La pente de la droite donnera accès au coefficient  $a$  et l'ordonnée à l'origine donnera  $b$ .

### 2 - Loi exponentielle

On cherche à tester si un ensemble de mesures  $(x_i, N(x_i))$  suit une loi exponentielle, du type  $N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$ .

De façon pratique, on va transformer cette dépendance exponentielle en une dépendance linéaire, que l'on pourra facilement tester si les points expérimentaux sont alignés selon une droite.

L'expression  $N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$  peut se mettre sous la forme  $\underbrace{\ln N(x)}_{Y(x)} = -\mu x + \ln N_0$ , ou encore

$$Y(x) = Ax + B.$$

#### Papier millimétré standard :

En utilisant du papier millimétré standard, on porte sur l'axe des ordonnées la valeur  $Y(x_i) = \ln N(x_i)$  et sur l'axe des abscisses la valeur de  $x_i$ , et ce pour chacune des mesures  $(x_i, N(x_i))$ . Si les points sont alignés selon une droite, on a bien une dépendance logarithmique.

Vérifiez que le coefficient  $\mu$  peut être obtenu par  $\mu = -\frac{\ln N(x_2) - \ln N(x_1)}{x_2 - x_1}$

Comment déterminer graphiquement la valeur de  $N_0$  ?

#### Papier millimétré semi- logarithmique :

On peut aussi vérifier de façon plus rapide la dépendance logarithmique en utilisant du papier semi-log. Sur ce type de papier, un des deux axes est directement gradué en échelle logarithmique. Il n'est plus nécessaire de sortir la calculatrice pour déterminer la valeur de  $\ln N(x)$  ! Là encore, si les points alignés, c'est que leur dépendance est exponentielle.

### III - Projet 1. Etude de l'atténuation des photons par la matière

**IMPORTANT :**

Pour le projet, réfléchissez aux conditions expérimentales dans lesquelles vous devez vous placer (tension du compteur  $V_{HT}$ , temps de comptage  $\delta t$  nécessaire pour que  $\Delta N/N < 10\%$ , bruit de fond, distance source-compteur GM, incertitudes...).

Mesurer, pour l'aluminium et le laiton, l'absorption des rayonnements émis par la source. Vous déterminerez pour chacun des matériaux la valeur du coefficient d'atténuation linéique, la section efficace d'interaction des photons ainsi que la longueur de demi-atténuation.

matériel disponible :

- plaques d'aluminium
- plaques de laiton

choix de pistes à explorer :

- les rayonnements en jeu sont-ils absorbés de la même façon ?
- quelle épaisseur de matériau faut-il pour arrêter le rayonnement  $\beta$  ?
- comparer le pouvoir d'absorption des photons de chacun des matériaux
- quelle épaisseur de matériau faut-il pour diminuer le rayonnement gamma de moitié ?
- en représentant dans un graphe vos mesures expérimentales,
  - remonter à la loi  $N = f(\text{épaisseur})$
  - trouver les valeurs numériques des deux constantes de la loi, avec leurs unités
  - déduire du graphe les incertitudes expérimentales sur les deux constantes de la loi
  - calculer la section efficace d'interaction des photons du césium 137 avec l'aluminium et le laiton

données :

- aluminium :
  - masse atomique : 26,98154 g/mol
  - densité : 2,6987 g/cm<sup>3</sup>
- laiton : le laiton est un alliage composé de 70% de cuivre et de 30 % de zinc
  - densité : 8,55 g/cm<sup>3</sup>
- cuivre :
  - masse atomique : 63,546 g/mol
- zinc :
  - masse atomique : 63,38 g/mol

## Quatrième séance : Dispersion spatiale des photons, Mesure de dose et de dose équivalente

Vous aborderez dans cette dernière séance deux nouveaux aspects.

Dans un premier temps, vous vous intéresserez à l'atténuation des rayonnements par la dispersion spatiale, que vous étudierez sous forme d'un projet à préparer à l'avance. A la fin de ce projet, vous exploiterez vos mesures expérimentales en utilisant du papier à double échelle logarithmique.

Ensuite, vous mesurerez l'énergie déposée par des photons dans la matière, en abordant les notions de dose, qui rendent compte des dégâts effectifs des rayonnements radioactifs dans la matière vivante.

### I - Eléments de radioprotection

#### 1 - Dose d'irradiation absorbée : D

Une source radioactive émet un rayonnement d'une certaine énergie. Cette énergie peut se présenter soit sous forme d'énergie cinétique pour des particules de masse non nulle comme les particules  $\alpha$ ,  $\beta$  ou les neutrons, soit sous forme d'énergie électromagnétique pour les photons  $\gamma$  ou X.

Lorsqu'un rayonnement rencontre la matière, il interagit avec elle en lui transférant de l'énergie. La **dose absorbée D** par la matière caractérise ce transfert d'énergie. La dose absorbée représente l'énergie E cédée (en Joules) par un rayonnement (quelconque) à la matière par unité de masse (en kg).

$$Dose = \frac{energie}{masse}$$

L'unité S.I. de dose est le gray (Gy) :  $1\text{Gy} = 1\text{ J.kg}^{-1}$   
 ancienne unité le rad (rad) (de **r**adiation **a**bsorbed **d**ose) :  $1\text{ rad} = 10^{-2}\text{ Gy}$

Les effets biologiques des rayonnements ionisants sont directement liés aux doses reçues et à la durée d'exposition pendant laquelle ces doses sont absorbées : une même dose reçue en quelques minutes est considérablement plus dangereuse que si elle est reçue pendant plusieurs semaines.

En radioprotection, on mesure donc le débit de dose absorbée  $\dot{D}$  exprimé généralement en dose absorbée par heure :

$$\dot{D} = D'(t) = \frac{dD}{dt} \quad \text{égal à } \frac{\Delta D}{\Delta t} \text{ quand le débit est constant.}$$

Remarque : La notation compacte  $\dot{y} \left( = \frac{dy}{dt} \right)$  est utilisée pour exprimer la dérivée par rapport au temps.

#### 2 - Equivalent biologique de dose absorbée : H

Dans les tissus vivants, il faut tenir compte des effets biologiques dus à l'irradiation qui diffèrent selon la nature des rayonnements. A dose absorbée égale, la quantité d'énergie déposée par unité de longueur par

les particules  $\alpha$  le long de leur trajectoire est beaucoup plus importante que celle cédée par des particules  $\beta$  ou encore par les photons  $\gamma$ . Les dommages créés par les particules  $\alpha$  seront donc plus importants.

Ainsi, une dose de 0,1 Gy déposée dans des tissus vivants par des particules  $\alpha$  provoque statistiquement 20 fois plus de cancers que la même dose déposée par des photons. Bien que la dose déposée soit la même, les dégâts sur le vivant sont différents.

Pour traduire les différences d'efficacité biologique des rayonnements selon leur nature, on introduit un **facteur de qualité  $Q_R$**  qui relie la **dose absorbée  $D$**  à l'**équivalent de dose  $H$** , permettant une meilleure estimation des risques de dommages causés aux tissus biologiques.

$$H = D \times Q_R$$

$H$  s'exprime en *sievert* (Sv) si  $D$  est en grays et en *rem* (radiation equivalent in man) si  $D$  est en rad.

Nature du rayonnement	Energie (keV)	Facteur $Q_R$
Rayons X	100	1
	$10^3$	1
Photons $\gamma$	$10^3$	1
Positrons $\beta^+$	8	1
	500	1
Neutrons	400	10
	$10^4$	10
Rayonnement $\alpha$	$5 \cdot 10^3$	20

On définit le débit d'équivalent de dose :

$$\dot{H} = H'(t) = \frac{dH}{dt} = \dot{D} \times Q_R \quad \text{égal à} \quad \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{quand le débit est constant.}$$

$H = D \times Q_R$  est généralement exprimé en équivalent dose par heure. Il est nécessaire de prendre des mesures de protection dès que le débit équivalent de dose atteint quelques dizaines de mrem par heure.

Tableau récapitulatif :

Dénomination	Unité S.I.	ancienne unité	relation
ACTIVITE (nombre de désintégrations par unité de temps) <b>A</b>	becquerel (Bq) $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dés. s}^{-1}$	curie (Ci) $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ dés. s}^{-1}$ (activité de 1g de radium)	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
DOSE ABSORBEE <b>D</b>	gray (Gy) $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$	rad (rd) $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J.kg}^{-1}$	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
EQUIVALENT DE DOSE <b>H = Q . D</b>	sievert (Sv)	rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$



DEBIT DE DOSE $\dot{D}$	gray par heure $Gy.h^{-1}$	rad par heure $rd.h^{-1}$	$1 Gy.h^{-1} = 100 rd.h^{-1}$
DEBIT D'EQUIVALENT DE DOSE : $\dot{H}$	sievert par heure $Sv.h^{-1}$	rem par heure $rem.h^{-1}$	$1 Sv.h^{-1} = 100 rem.h^{-1}$

Remarque : Depuis 1990, de nouvelles définitions de doses ont été adoptées. De H appelé « équivalent de dose », on est passé à  $H_{TR}$  ou  $H_T$  qui sera appelé « dose équivalente ».

$H_{TR}$  correspond à la dose équivalente déposée par le rayonnement R dans le tissu T alors que  $H_T$  est la dose équivalente déposée par tous les rayonnements en jeu dans le tissu T.

On appelle  $D_{TR}$  la dose moyenne d'un rayonnement R absorbé par un tissu T. La dose équivalente  $H_{TR}$  est alors définie à l'aide d'un facteur de pondération du rayonnement  $Q_R$  qui caractérise l'action moyenne d'ionisation du rayonnement R :  $H_{TR} = Q_R \times D_{TR}$ .

Dans le cas d'une irradiation d'un tissu biologique mettant en jeu plusieurs rayonnements R à la fois, on additionne les contributions de chacun des rayonnements sur le tissu T :  $H_T = \sum_R H_{TR} = \sum_R Q_R \times D_{TR}$ .

#### Facteur de pondération tissulaire pour les différents organes du corps humain.

Tissu ou organe	Facteur de pondération tissulaire $Q_T$
Gonades	0,20
Moelle rouge	0,12
Colon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Seins	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres	0,05

Finalement, si on prend en compte l'intégralité de l'irradiation sur le corps, la dose équivalente totale reçue est égale à la somme de la dose reçue par chacun des organes, en tenant compte de la sensibilité de chacun des organes à la radioactivité, sous la forme d'un coefficient de pondération tissulaire  $Q_T$  compris entre 0 et 1 :

$$H = \sum_T Q_T \times H_T \text{ où la somme est effectuée sur tous les tissus listés ci-dessus.}$$

## II – Partie à préparer pour l'exploitation des résultats

### 1 - Loi de puissance

On cherche à tester si un ensemble de mesures  $(x_i, N(x_i))$  suit une loi de puissance, du type  $N(x) = N_0 \times x^\alpha$ .

De façon pratique, on va transformer cette dépendance en loi de puissance en une dépendance linéaire, que l'on pourra facilement tester si les points expérimentaux sont alignés selon une droite.

L'expression  $N(x) = N_0 \times x^\alpha$  peut se mettre sous la forme  $\underbrace{\ln N(x)}_Y = \alpha \underbrace{\ln x}_X + \ln N_0$ , ou encore

$$Y(X) = \alpha X + B.$$

#### Papier millimétré standard :

En utilisant du papier millimétré standard, on porte sur l'axe des ordonnées la valeur  $Y(x_i) = \ln N(x_i)$  et sur l'axe des abscisses la valeur de  $X_i = \ln x_i$ , et ce pour chacune des mesures  $(x_i, N(x_i))$ . Si les points sont alignés selon une droite, on a bien une dépendance en loi de puissance.

Vérifiez que le coefficient  $\alpha$  peut être obtenu par  $\alpha = \frac{\ln N(x_2) - \ln N(x_1)}{\ln x_2 - \ln x_1}$

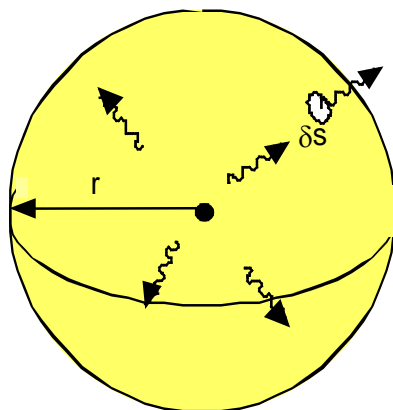
#### Papier millimétré à double échelle logarithmique :

On peut aussi vérifier de façon plus rapide la dépendance logarithmique en utilisant du papier à double échelle logarithmique. Sur ce type de papier, les deux axes sont directement gradués en échelle logarithmique. Il n'est plus nécessaire de sortir la calculatrice pour déterminer les valeurs de  $\ln N(x)$  et de  $\ln(x)$  !. Là encore, si les points alignés, c'est que leur dépendance est en loi de puissance. La pente de la droite donne accès au coefficient  $\alpha$ .

## 2 - Dispersion spatiale des rayonnements

### loi théorique

Vous devez trouver la loi théorique donnant la variation du taux de comptage en fonction de la distance source détecteur en vous aidant du raisonnement suivant :



On considère une source ponctuelle émettant de façon isotrope  $N_0$  particules par seconde. Imaginons que cette source soit placée au centre d'une sphère de rayon  $r$ .

- Combien de particules sortent par la surface totale de la sphère ?
- Combien de particules sortent par la surface totale de la sphère pendant un temps  $\Delta t$  ?
- Combien de particules sortent d'une petite surface  $\delta S$  de la sphère pendant un temps  $\Delta t$  ?

$\delta S$  peut représenter la surface d'entrée d'un détecteur.

En déduire la loi théorique donnant le taux de comptage en fonction de la distance  $r$  (distance source - détecteur).

En déduire comment varie le nombre de particules détectées  $N(x_i)$  en fonction de la distance  $x_i$ , et le type de graphe à privilégier pour vérifier la loi.

### III – Projet 2. Influence de la distance de la source au compteur sur le taux de comptage

#### Réflexions préliminaires :

- Que peut-on dire de la différence d'absorption par l'air des rayons  $\gamma$  et  $\beta$  émis par le césium ?
- Quel rayonnement voulez-vous conserver pour étudier uniquement la dispersion des photons dans l'espace ?
- En utilisant les résultats du projet 1, proposer une solution expérimentale.

#### Partie expérimentale du projet :

- Mesurer l'influence de la distance sur le taux de comptage pour des distances variant de 10 à 40 cm.

#### Conclusion :

- Comparer la loi théorique et la loi expérimentale. (Rappelons que graphiquement, seules les relations linéaires sont facilement vérifiables).

### IV – Dose, débit de dose et de dose équivalente

#### 1 - Doses absorbées

Les mesures de débit de doses sont faites avec des détecteurs portatifs (*RAM-ION* ou *Babyline*), conçus pour effectuer des mesures de débit de dose des rayonnements gamma, bêta et X. Ces détecteurs portatifs fonctionnent sur le principe des chambres d'ionisation, comme le compteur Geiger Muller.

Le courant qui apparaît dans le détecteur est proportionnel à l'énergie déposée dans la chambre par unité de temps. Justifier que le *RAM-ION* permet de mesurer des débits d'équivalent de dose.

La fenêtre avant est faite d'un matériau mince ( $7 \text{ mg/cm}^2$ ) qui simule une épaisseur de tissu biologique comparable à celle de l'épiderme.

Une seconde paroi plus épaisse ( $300 \text{ mg/cm}^2$ ), de même densité que la paroi de la chambre, peut être placée en recouvrement de la première et permet de simuler une épaisseur de tissu plus importante.

En radio protection, on parle de dose ou débit de dose à la peau ou en profondeur selon que la mesure est effectuée uniquement avec la paroi mince ou avec la paroi épaisse.

**ATTENTION :** Lorsque le capot est retiré, ne pas toucher la fenêtre avec la source (tout particulièrement avec la *Babyline*), ni avec n'importe quel autre objet.

Dès que vous avez terminé une mesure en paroi mince (capot retiré), replacer immédiatement le capot protecteur sur la fenêtre.

#### 2- Mesures des débits de dose $\left( \dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \right)$

Prendre connaissance de la notice d'utilisation dans les documents techniques.

Les mesures seront faites en approchant la source au plus près de la paroi de la chambre (la source ne doit cependant pas toucher la paroi fine de la chambre). Dans ces conditions, on estime que la source se trouve à 5 cm du centre physique de détection de l'appareil (fil conducteur central).

Mesurer successivement (les incertitudes ne sont pas demandées) :

- le débit de dose à la peau  $\dot{D}_{\text{peau}}$  (0.05m) (la paroi épaisse doit être retirée), correspondant au rayonnement ayant traversé l'épiderme, la source étant à 5 cm du centre de détection,
- le débit de dose en profondeur  $\dot{D}_{\text{prof}}$  (0.05m) (avec la paroi épaisse), correspondant au rayonnement après traversée du derme. La différence entre les deux débits donne la mesure du débit de dose de l'énergie déposée dans les premières couches des tissus biologiques.

### 3 - Equivalent de dose absorbée

Calculer la dose biologiquement équivalente reçue (H) par un expérimentateur se trouvant exposé de façon continue pendant 8 heures, au rayonnement de la source étudiée, à 1 mètre de distance.

Le facteur de qualité sera déterminé à partir du tableau de la section I-2, partie théorique. Les sources utilisées n'émettent que des rayons  $\beta$  et  $\gamma$ .

on utilisera :  $X_{\text{prof}}(1\text{m}) = X(0.05\text{m}) \times \frac{0.05^2}{1^2}$ , formule empirique utilisée en radioprotection ( $X = \dot{D}, \dot{D}, H, \dot{H}$ )

Comparer l'équivalent de dose ainsi calculé aux équivalents de dose suivants :

- 2 mSv /an (dose reçue) pour un individu au niveau de la mer (irradiation naturelle)
- 1 mSv /an (dose admissible, réglementation européenne) pour l'ensemble de la population (en dehors de la radioactivité naturelle)
- 20 mSv/an (dose admissible, réglementation européenne) pour les travailleurs soumis aux radiations et qui ont un suivi médical adapté.
- 100 mSv/an : dose annuelle reçue par les habitants de Ramsar en Iran où la radioactivité naturelle est très élevée. Pas d'effet visible sur l'apparition de cancers.

(Le débit de dose admissible se calcule pour le public comme pour les travailleurs sur la base de 8h d'exposition pendant 300 jours)