

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université 20 août 1955 - SKIKDA

Faculté des Sciences

Département de Physique

Polycopié de Travaux Pratiques

Physique Nucléaire

Destiné aux étudiants de troisième année licence LMD physique fondamentale

Réalisé par : Dr. Kadid Soraya

Année Universitaire : 2021-2022

Avant- propos

Ce polycopié de travaux pratiques de physique nucléaire est adressé aux étudiants de troisième année de licence LMD, spécialité physique fondamentale et correspond au programme officiel de cette spécialité.

La physique est une discipline essentiellement expérimentale. Les travaux pratiques sont très importants pour l'illustration et la compréhension des phénomènes et concepts introduits par les cours théoriques. Ils permettent à l'étudiant de se familiariser avec les instruments de mesure et d'évaluer la précision des mesures effectuées. Ils lui permettent également de lire et de comprendre une méthode expérimentale donnée et d'apprendre à réaliser un compte-rendu scientifique comprenant le principe de la méthode, et surtout son appréciation personnelle concernant le principe et les résultats obtenus.

Les travaux pratique de physique nucléaire permettent aux étudiants de se familiariser avec la radioactivité, phénomène découvert en 1896 par Henri Becquerel sur l'uranium et vite confirmé par Marie Curie pour le radium. Ce phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, dits radio-isotopes, se transforment spontanément (« désintégration ») en noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers. Les rayonnements ainsi émis sont nommés, selon le cas, des rayons α , β ou γ .

L'enseignement de ces travaux pratiques est réparti sur quatre séances de 03 heures chacune s'étalant sur tout le second semestre et traitant chacune l'un des quatre thèmes suivants:

TP 1 : Etude et efficacité du détecteur Geiger-Müller.

TP 2 : Statistique nucléaire.

TP 3 : Atténuation des rayonnements β et γ dans l'aluminium (Al).

TP 4 : Atténuation des rayonnements β et γ dans le plomb (Pb).

Dans le premier TP, on étudiera les caractéristiques de fonctionnement d'un type particulier de détecteur à gaz, le compteur Geiger-Müller. On mesurera son temps mort et son efficacité. Dans la second TP, après un rappel concernant la statistique de comptage et ses applications, on utilisera le compteur Geiger Müller pour étudier l'aspect aléatoire de la désintégration radioactive. Dans le troisième et le quatrième TP, on étudiera respectivement l'atténuation des rayonnements β et γ dans l'aluminium et dans le plomb.

Programme ministériel 2018-2019
L3-Physique Fondamentale
(CPND-SM)

Semestre 6 :

Unité d'enseignement	Matière		Crédits	Coefficient	Volume Horaire Hebdomadaire			VHS (15 sem)	Autres	Mode d'évaluation	
	Code	Intitulé			Cours	TD	TP			Contrôle continu %	Examen %
UE Méthodologie											
Code : UEM 23	M232	TP Physique Nucléaire	3	2	-	-	1h30	22h30		50	50

Unité d'Enseignement Méthodologie (UEM23)

Matière : Travaux Pratiques de Physique Nucléaire

Objectifs de l'enseignement : L'objectif de ces travaux pratiques est l'illustration pratique de quelques notions acquises dans la matière physique nucléaire.

Contenu de la matière :

TP 1 : Etude et efficacité du détecteur Geiger- Müller.

TP 2 : Statistique nucléaire.

TP 3 : Atténuation des rayonnements β et γ dans l'Al.

TP 4 : Atténuation des rayonnements β et γ dans le Pb.

Table des matières

Avant-propos -----	2
Programme ministériel -----	3
TP1 : Etude et efficacité du détecteur Geiger- Müller -----	5
1 - But de la manipulation -----	5
2 - Partie théorique -----	5
3 - Partie expérimentale -----	7
3.1 – Mesure du temps mort -----	8
3. 2 - Mesure de l'efficacité du détecteur Geiger- Müller -----	10
TP2 : Statistique nucléaire -----	12
1 - But de la manipulation-----	12
2 - Rappels théoriques -----	12
3 – Travail expérimentale -----	23
3.1 – Expérience 1 : Etude d'une distribution de poisson -----	23
3.2 – Expérience 2 : Etude d'une distribution de Gauss -----	24
TP 3 : Atténuation des rayonnements β et γ dans l'Al -----	27
1 - But de la manipulation -----	27
2 - Rappels théoriques -----	27
3- Partie expérimentale -----	28
TP 4 : Atténuation des rayonnements β et γ dans le Pb -----	31
1 - But de la manipulation -----	31
2 - Rappels théoriques -----	31
3- Partie expérimentale -----	32
Bibliographie -----	36
Annexe 1 : Consignes de sécurité -----	37
Annexe 2 : Les sources radioactives utilisées en TP -----	39
Annexe 3 : Précision sur le taux de comptage -----	42
Annexe 4 : Les incertitudes de mesure en travaux pratiques -----	44
Annexe 5 : Régression linéaire simple -----	48
Annexe 6 : Signalisation du risque radioactif : pictogrammes et panneaux -----	51

TP1 : Etude et efficacité du détecteur Geiger- Müller

1- But de la manipulation

Les objectifs de ce TP sont :

- Etudier les caractéristiques de fonctionnement d'un détecteur à gaz le Geiger-Müller, en traçant son palier de fonctionnement et en mesurant son temps mort.
- Mesurer l'efficacité du détecteur.

2- Partie théorique

2.1- Définition

Le tube Geiger- Müller (G.M.) est un détecteur à gaz qui permet la détection des rayonnements α , β et γ . Le tube Geiger- Müller utilisé dans la manipulation est représenté dans la figure 1.



Figure 1 : Détecteur Geiger- Müller

2.2- Principes de fonctionnement

Le tube Geiger- Müller est constitué d'un cylindre métallique ayant en son axe une tige conductrice isolée et mince portée à un potentiel positif par rapport au corps du compteur. Cette tige constitue l'anode et le cylindre la cathode. Un gaz rare, l'argon maintenu à basse pression constitue le milieu ionisant sur lequel agissent les particules à détecter. La fenêtre d'entrée est constituée d'une mince feuille de mica d'épaisseur (environ 2 mg/cm^2) protégée par un cache en matière plastique (figure 2).

Pour faire fonctionner le tube Geiger- Müller, 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 (ou un photon) traverse le gaz interne, elle ionise le gaz en provoquant la libération d'un grand nombre de paires d'ions :

- Les électrons migrent vers l'anode,
- Les atomes de gaz ionisés migrent vers la cathode.

La vue en coupe d'un tube Geiger- Müller est donnée ci-après.

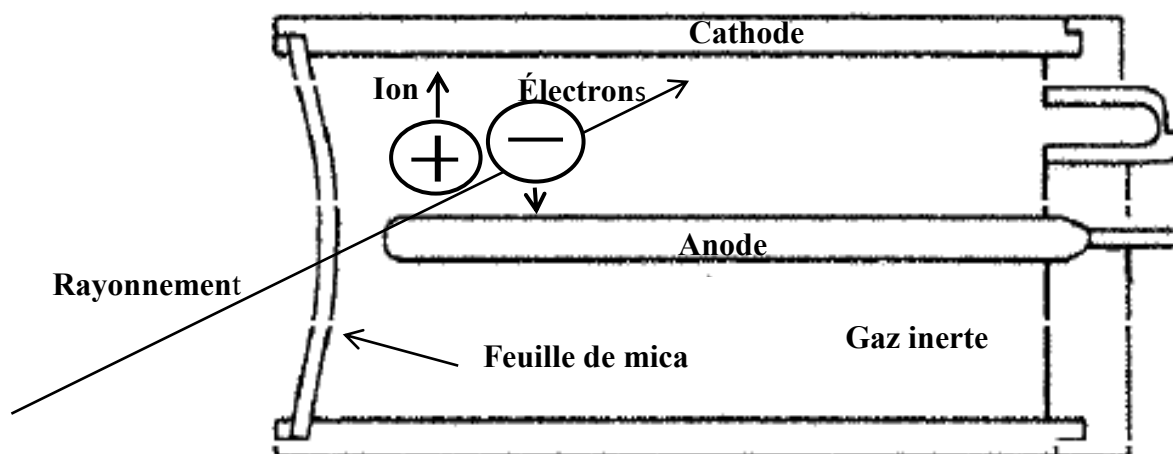


Figure 2 : Vue en coupe d'un tube Geiger- Müller

La caractéristique du tube, représentée à la figure 3, présente trois régions :

Région I : La totalité ou une partie des électrons libérés lors de l'ionisation se recombine avec les ions ; les électrons n'atteignent pas la tige et ne sont donc pas détectés

Région II : Tous les électrons libérés sont recueillis par la tige et donc détectés. Pour un même rayonnement, la mesure reste sensiblement constante quel que soit la ddp U . On appelle cette région : le plateau. Le point de fonctionnement est choisi au milieu du plateau. Le domaine de fonctionnement correct du G.M se situe dans cette région, soit U compris entre 450 et 600 V.

Région III : Les électrons accélérés par la ddp U excessive, produisent des ionisations secondaires par chocs, ce qui conduit à une augmentation de la mesure. Afin d'éviter l'endommagement du tube Geiger- Müller, il ne faut jamais dépasser la tension V_M (Fig. 3).

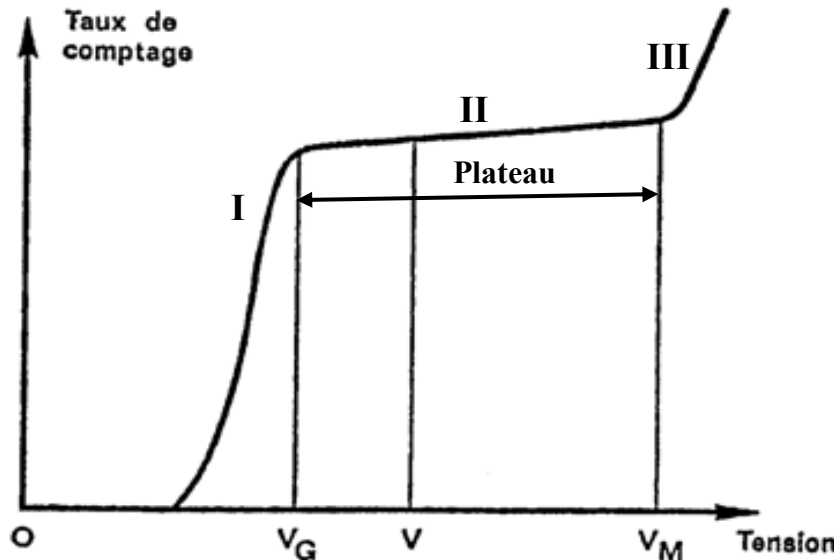


Figure 3 : Caractéristiques d'un détecteur Geiger- Müller.

3 - Partie expérimentale

a) Matériel utilisé

- Un tube Geiger- Müller avec son support et un câble.
- Un compteur digital (Fig. 4).
- Une source de ^{226}Ra ($1,6 \mu\text{Ci}$).
- Deux sources de ^{90}Sr ($2 \mu\text{Ci}$ chaque).

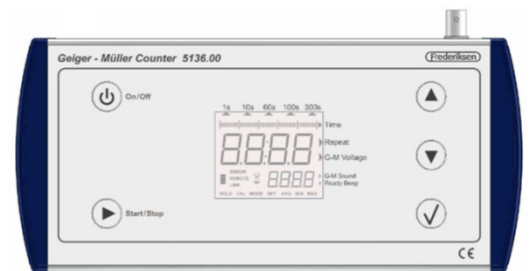


Figure 4 : Compteur digital

b) Mode opératoire

- Fixer la source de ^{226}Ra sur le support. La distance entre la source et le capteur doit être au maximum.
- La tension lue sur l'échelle de comptage est de 300V. Augmenter progressivement la tension par des pas de 10 volts jusqu'à la tension égale à 460 volts en notant à chaque fois le nombre N_1 pendant un temps t_1 (précision sur z_1 au moins inférieur à 5 %). Entre 450 V et 600 V, prendre des pas de 20 volts. Choisir un temps de comptage $t_1 = 100$ s.

Etant donné le taux de comptage élevé, on ne tient pas compte du bruit de fond. Le taux de comptage est alors $z = Z_1 = N_1/t_1$. Pendant les mesures, la distance source- G.M doit rester constante.

c) Travail demandé :

1) Remplir le tableau suivant :

U (Volts)	N_1	t_1 (mn ⁻¹)	z (mn ⁻¹)	Δz (mn ⁻¹)

2) Tracer le graphe $z = f(U)$ avec les rectangles d'erreurs. Prendre $\Delta U = 1$ volt.

3) Donner la valeur de la tension U_{seuil} correspondant au début du comptage.

4) Le graphe doit posséder une partie droite légèrement en pente positive. Quel est le domaine d'utilisation correcte de la tension U ?

5) Exprimer la pente du palier en % par 100 volts.

Pour deux points 1 et 2 du plateau : $\Delta z = z_1 - z_2$, $\bar{z} = \frac{z_1+z_2}{2}$, $\Delta U = U_1 - U_2$

Pente du plateau = $\frac{\Delta z}{\Delta U} \frac{1}{\bar{z}} \times 100 \text{ volts} \times 100 \%$

3.1 - Mesure du temps mort : Méthode des deux sources.

a) Définition

Lorsque l'intervalle de temps entre deux événements successifs devient trop petit, le système de détection n'est plus capable de traiter les deux événements séparément. Le plus souvent, il ne traite que le premier, le deuxième étant perdu. L'intervalle de temps minimum est appelé temps mort. Si pendant cet intervalle de temps d'autres particules atteignent le détecteur, elles ne sont pas vues et ces événements sont donc perdus. Pour tenir compte de cette perte, on corrige le taux de comptage mesuré par le facteur « temps mort » pour retrouver le taux de comptage exact. On peut montrer, par des considérations de statistique, que si :

$Z_{mes} = \text{taux de comptage mesuré}$

Z_e = taux de comptage exact

τ = temps mort

Il en découle la relation suivante :

$$Z_e = \frac{Z_{\text{mes}}}{1 - \tau Z_{\text{mes}}}$$

Il est donc nécessaire pour caractériser un détecteur, d'évaluer son temps mort. Pour cela, il existe une méthode dite « méthode des deux sources » qui permet de calculer à partir de différents taux de comptage le facteur τ , et la procédure et celle décrite ci-dessous. Avec quelques approximations, on peut écrire :

$$\tau = \frac{Z_1 + Z_2 - Z_{12} - Z_0}{Z_{12}^2 - Z_1^2 - Z_2^2}$$

Où les Z_i sont les taux de comptages mesurés et Z_0 le bruit de fond.

b) Mode opératoire

- Fixer une source de ^{90}Sr sur un trou excentrique du support.
- Appliquer une tension d'environ 420 volts au G.M.
- Mesurer le taux de comptage Z_1 , sans enlever le bruit de fond, avec une précision inférieure à 5%
- Introduire la deuxième source de ^{90}Sr dans le deuxième trou excentré de la plaque sans bouger la première source.
- Mesurer le taux de comptage Z_{12} , toujours avec une précision inférieure à 5%.
- Enlever la première source sans bouger la seconde du support.
- Mesurer le nouveau taux de comptage Z_2 , sans enlever le bruit de fond, toujours avec une précision inférieure à 5%.
- Enlever les sources et les ranger dans leur boîtier. Mesurer le bruit de fond de l'appareillage avec une précision inférieure à 5%.

c) Résultats

1) Présenter les résultats sous la forme suivante :

	N	t	Z	ΔZ
Source 1				
Source 2				
Source 1+ 2				
Bruit de fond				

- 2) Quelle est l'origine du bruit de fond?
- 3) Pouvez- vous expliquer pourquoi Z_{12} est toujours inférieur à Z_1+Z_2 ?
- 4) D'après le taux de bruit observé, quelle est la limite inférieure du taux de comptage à partir de laquelle on peut négliger la contribution du bruit de fond avec une erreur inférieure à 2%.
- 5) Calculer le temps mort τ du G.M. Donner l'erreur correspondante.
- 6) D'après la valeur τ que vous avez trouvée, quel est le taux de comptage limite à partir duquel on peut négliger la correction due au temps mort? Conclusion.

3.2- Mesure de l'efficacité du détecteur Geiger- Müller

a) Définition

L'efficacité d'un détecteur est le rapport entre le nombre de particules détectées et le nombre de particules ayant traversé le détecteur. Elle dépend du détecteur, de la nature et de l'énergie du rayonnement.

Un rayonnement bêta ou gamma pénétrant dans le G.M. n'interagit pas nécessairement avec le gaz halogène et par conséquent n'est pas détecté.

L'efficacité (Eff) du détecteur pour les rayonnements bêta du ^{90}Sr et des gammas du ^{60}Co est :

$$E_{\text{ff}} = \frac{Z_{\text{mesuré}}}{Z_{\text{réel}}} \quad \text{avec} \quad Z_{\text{réel}} = A_a \frac{\Omega}{4\pi} \quad \Omega = \frac{\pi d^2}{4D^2}$$

Ω est l'angle solide de détection, d le diamètre de la fenêtre du détecteur, D la distance séparant la source du détecteur et A_a l'activité actuelle de la source.

b) Mode opératoire

- Fixer une source de ^{90}Sr sur un trou excentrique du support.
- Appliquer une tension d'environ 450 volts au G.M.
- Mesurer pendant un temps t_1 le nombre N_1 de coups détectés, avec une précision inférieure à 5%
- Opérer de la même façon avec le ^{60}Co , toujours avec une précision inférieure à 5%

c) Travail demandé

- 1) Donner Z_1 et Z pour les deux mesures, avec les précisions correspondantes.
L'activité des sources était $2 \mu\text{Ci}$ à l'origine. On donne $T = 5.27$ ans pour le ^{60}Co et 28.5 ans pour le ^{90}Sr .
- 2) Calculer leur activité actuelle A_a . Donner le détail du calcul
- 3) En supposant les sources ponctuelles et en tenant compte de l'angle solide, combien de particules atteignent le détecteur par seconde dans les deux cas? Détailler le calcul (on appelle $Z_{\text{réel}}$ ce résultat).
Le diamètre de la face d'entrée du G.M. est $d=2\text{cm}$.
- 4) Calculer l'efficacité (E_{ff}) du G.M. pour les rayonnements utilisés. Exprimer le résultat en %.
- 5) Donner une formule littérale complète de E_{ff} en fonction de D, Z, d, A_0, T et t . Faire le calcul d'erreur sur E_{ff} , en supposant T connu exactement, ainsi que l'activité d'origine de la source A_0 .

On donne d à 10% près, D à 2% près et $\Delta t = 1$ an. Calculer ΔE_{ff} .

- 6) Présenter les résultats sous forme de tableau :

	N_1	t_1	Z_1	$Z=Z_1-Z_0$	A_a	$Z_{\text{réel}}$	$E_{\text{ff}}(\%)$	ΔE_{ff}
^{90}Sr								
^{60}Co								

-Conclusions.

TP2 : Statistique nucléaire

1- But de la manipulation

Les objectifs de ce TP sont :

- Mettre en évidence la nature statistique du phénomène d'émission et de détection des particules nucléaires. On mesure pour cela le nombre de désintégrations, ou ce qui est proportionnel, le nombre de particules détectées par le détecteur pendant un intervalle de temps. On répète cette mesure autant de fois qu'il est nécessaire afin de mettre en évidence une loi de probabilité.
- Etudier les lois de distributions des « petits nombres » c'est-à-dire statistique à faible nombre (distribution de poisson) et des grands nombres (distribution de gauss).

2- Rappels théoriques

a) définition

L'émission de rayonnements par une source radioactive est un processus aléatoire. En particulier, le nombre de noyaux qui se désintègrent dans un intervalle de temps est une variable aléatoire. Il en résulte que le nombre de rayonnements émis par la source et donc aussi le nombre de rayonnements détectés par un détecteur sont des variables aléatoires. La statistique de comptage est l'ensemble des techniques statistiques à mettre en œuvre pour caractériser les résultats des expériences de comptage d'événements nucléaires. On peut alors, à partir de ces résultats expérimentaux, estimer la ou les grandeurs physiques que l'on souhaite mesurer.

1.1 - Rappels de statistique

2.1. 1- Description d'une série statistique

a) Distribution de fréquence

Une série statistique est constituée par un ensemble de valeurs numériques résultant de l'observation. Les résultats sont obtenus dans un ordre quelconque. On procède d'abord à la mise en ordre des données. On peut inscrire en face de chaque valeur observée x_i , le nombre de

fois F_i où on a observé x_i , c'est la fréquence de la valeur. L'ensemble des x_i et F_i constitue une distribution de fréquence.

Afin de comparer les séries statistiques entre elles, on rapporte les fréquences F_i au nombre de cas observés. On introduit une fréquence relative f_i .

$$f_i = F_i / N \quad \text{avec} \quad \sum F_i = N \quad \text{et} \quad \sum f_i = 1 \quad (1)$$

Exemple : Distribution du nombre x_i de garçons dans 1877 familles de 7 enfants (tableau1)

Tableau 1

x_i	0	1	2	3	4	5	6	7
F_i	21	111	287	408	529	304	126	19

On peut substituer à ce tableau une représentation graphique permettant de faire apparaître les caractéristiques essentielles de cette distribution, c'est le diagramme de fréquence (Fig. 1).

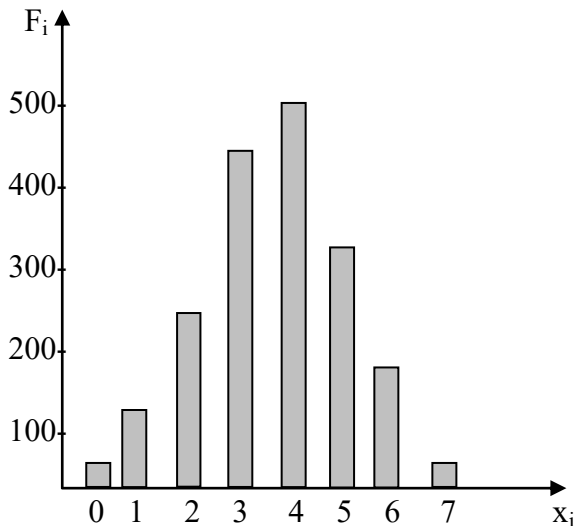


Figure 1 : Histogramme de l'ensemble des mesures

Chaque valeur est figurée par un rectangle dont la base correspond à l'intervalle de x_i et dont la hauteur est proportionnelle à F_i (ou à f_i). Le diagramme peut être symétrique de part et d'autre de la fréquence maximum ou asymétrique.

b) Paramètres caractéristiques d'une distribution de fréquence

Le tableau n'est pas toujours pratique et ne permet pas de comparer entre elles les distributions. On introduit un certain nombre de valeurs typique dites paramètres caractéristiques :

b₁) Moyenne : C'est la moyenne arithmétique, pondérée, lorsque l'évènement a été observée plusieurs fois.

$$\bar{x} = \sum_i \frac{x_i F_i}{N} = \sum_i x_i f_i \quad (2)$$

Dans le cas précédent : $\bar{x} = \frac{(0 \times 21) + (1 \times 111) + \dots + (7 \times 19)}{1877} = 3,5$

Il y a en moyenne 3,5 garçons dans une famille de 7 enfants.

b₂) Variance : Deux distributions peuvent avoir la même moyenne, mais les différentes valeurs peuvent se grouper plus ou moins étroitement autour de cette moyenne. La variance caractérise l'écart plus ou moins important de l'ensemble des valeurs de la distribution par rapport à la valeur moyenne.

Par définition, c'est la quantité :

$$V = \frac{\sum_i F_i (x_i - \bar{x})^2}{N} = \sum_i f_i (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{ou} \quad V = \frac{\sum_i F_i x_i^2}{N} - \bar{x}^2 \quad (3)$$

En développant. C'est la moyenne pondérée des carrés des écarts. On l'appelle aussi écart quadratique.

b₃) Ecart type : La variance est un carré. Afin d'avoir un indice de même dimension que la variable x_i , on est amené à considérer la racine carrée de la variance, homogène avec x_i :

$$\sigma = \sqrt{\sum_i f_i (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{V} \quad (4)$$

Plus σ est petit, plus les valeurs de x_i sont resserrées autour de la valeur moyenne \bar{x} .

2.1.2- Notion de probabilité

a) Définition

Si on jette en l'air une pièce de monnaie, il y a une chance sur deux qu'elle retombe sur le côté pile. On dit que la probabilité de la pile est : $\frac{1}{2} = 0.5$.

Un sac contient une boule blanche et deux boules noires, identiques à la couleur près. Si on tire au hasard une boule, chaque boule a une chance égale de sortir. On a donc une chance sur trois de sortir une boule blanche et deux sur trois de sortir une boule noire. On dit que la probabilité de tirer une blanche est $1/3$ et la probabilité de tirer une noire est $2/3$.

La probabilité d'un événement se définit comme le rapport entre le nombre de cas favorables à l'arrivée (ici 2 pour la boule noire) et le nombre total de cas (ici 3), chacun de ces cas ayant une chance égale de se produire. Une probabilité est donc un rapport, elle est toujours exprimée par un nombre compris entre 0 et 1.

Dire que la probabilité de tirer la boule blanche est $1/3$ ne signifie nullement que si on répète 3 fois l'expérience, on tire forcément une fois la blanche et deux fois la noire. Mais si on répète le tirage (ou épreuve) un grand nombre de fois la fréquence relative de l'évènement « boule blanche » est voisine de $1/3$ et s'approche de plus en plus de cette valeur lorsque le nombre d'épreuves augmente. C'est ce qu'on appelle la loi des grands nombres (Bernoulli).

La probabilité est donc la limite vers laquelle tend la fréquence relative observée lorsqu'on augmente indéfiniment le nombre d'épreuves.

b) Distribution de probabilité.

L'ensemble des probabilités p_i des différentes valeurs x_i constitue une distribution de probabilité. La moyenne de cette distribution est :

$$\bar{x} = \sum_i x_i p_i \quad (5)$$

$$\text{La variance } V = \sum_i p_i (x_i - \bar{x})^2, \text{ l'écart type } \sigma = \sqrt{V} \quad (6)$$

On a remplacé la fréquence relative $f_i = \frac{F_i}{N}$ par la probabilité théorique p_i .

2.1.3- Exemple de distribution classique

2.1.3.1- Distribution binomiale

On l'utilise dans le cas des distributions discrètes et finies. L'évènement se réduit à une alternative. Appelons p et q les probabilités de chacun des cas, on a p+q = 1. On montre que la probabilité est donnée par la relation :

$$P(x) = \frac{N!}{x!(N-x)!} p^x q^{N-x} \quad , \quad \text{avec } x \text{ entier et } 0 \leq x \leq N \quad (7)$$

On a $x = N.p$, $V = N.p.q$

Exemple 1 : Cas du pile ou face. Probabilité d'avoir 2 fois face sur 10 lancers :

$$N=10, x= 2, p = q = 0,5 \quad P(2) = 0,044$$

Probabilité d'avoir 10 fois face : $P(10)= 0,001$

Exemple 2 : Les 1877 familles de 7 enfants. On peut considérer qu'il y a à chaque naissance une probabilité égale à 0,5 d'avoir une fille comme d'avoir un garçon (ce qui en réalité n'est pas exact). Il y a donc pour 7 naissances, 8 évènements possibles: 0, 1, 2,.....7 garçons (ou filles). Calculons la probabilité pour chacun de ces cas et comparons avec les résultats donnés précédemment (on a N=7) (tableau 2) :

Tableau 2

x_i	P_i	f_i	Effectif réel	Effectif théorique
0	$1/128 = 0,008$	0,011	21	15,01
1	$7/128 = 0,055$	0,059	111	103,2
2	$21/128 = 0,164$	0,153	287	307,8
3	$35/128 = 0,273$	0,256	480	512,4
4	$35/128 = 0,273$	0,282	529	512,4
5	$21/128 = 0,164$	0,162	304	307,8
6	$7/128 = 0,055$	0,067	126	103,2
7	$1/128 = 0,008$	0,010	19	15,01

Effectif théorique : $P_i \times 1877$

La moyenne est $x = 3,5$, la variance 1,32. Les résultats obtenus à partir de la loi binomiale sont très proches des résultats expérimentaux. On dit que la distribution est bien ajustée.

2.1.3.2 - Distribution de poisson

a) Définition: Cette distribution dérive de la loi binomiale lorsque l'une des éventualités a une probabilité très faible : Si un des termes q , devient très petit (inférieur à 0,03) et N très grand, en posant $m = N \cdot q$, on montre que l'expression donnant la probabilité devient :

$$p(x) = e^{-m} \frac{m^x}{x!} \quad \text{avec } x \text{ entier (ou } x_i) \quad (8)$$

Remarques : $e^m = 1 + \frac{m}{1!} + \frac{m^2}{2!} + \dots + \frac{m^x}{x!} + \dots$, d'où $\sum_i p(x_i) = e^{-m} \cdot e^m = 1$.

$$\text{On a aussi, en faisant le calcul, } x = m ; V = m ; \sigma = \sqrt{m} \quad (9)$$

L'expression mathématique de la distribution de poisson montre que les différents termes ne dépendent que du paramètre m . Si m est entier et supérieur à 1, il existe deux valeurs maximales de $p(x)$ correspondant à $x = m$ et $x = m-1$.

La distribution a un aspect en cloche dissymétrique avec étalement vers la droite.

b) Application de la distribution de poisson

La distribution de poisson dite encore loi des petites probabilités, peut s'appliquer dans certaines circonstances où des événements ont une probabilité faible. Elle se substitue à la distribution binomiale lorsque N est grand.

Exemple : Nombre d'accidents par jour relevés sur 50 jours (tableau 3) :

Tableau 3

Nombre d'accidents x_i	Nombre de jours F_i	$p(x_i)$	$N.p(x_i)$
0	21	0,4066	20,33
1	18	0,3659	18,30
2	7	0,1647	8,23
3	3	0,0494	2,47
4	1	0,0111	0,56
5	0	0,0020	0,10
6	0	0,0003	0,02

Le nombre moyen d'accidents par jour sera $x = 0,9$; $V = 0,97$ et $\sigma = 0,98$.
Considérons la distribution de poisson avec $m = 0,9$:

$$p(x) = e^{-0,9} \frac{(0,9)^x}{x!} \text{ avec } x = m = V = 0,9; \sigma = 0,95$$

Le nombre théorique de jours comportant x accidents est $N.p(x)$, puisque $p(x)$ représente la probabilité d'avoir x accidents dans la journée.

On constate un bon ajustement entre la distribution expérimentale et la distribution de poisson. On peut passer du cas empirique à une loi ;

- Nombre de jours sans accident dans une année : $365.p(x) = 148,1$ jours.
- Nombre de jours avec 5 accidents dans une année : $365.p(x) = 0,73$ jours

c) Aspect différentiel de la loi de poisson

Lorsque des évènements surviennent au hasard dans le temps, leur répartition peut se faire suivant une loi statistique de poisson ou de Gauss. Il en est ainsi du nombre d'atomes qui se désintègrent dans un intervalle de temps donné. Lorsqu'on mesure l'activité d'un radioélément, on enregistre au compteur un certain nombre d'impulsions. Si

on fait plusieurs comptages pour des intervalles de temps égaux, on obtient des valeurs différentes qui se répartissent autour d'une moyenne suivant une loi statistique.

L'analogie peut être faite par le tirage de boules dans un sac, le sac contenant 2 ou 3 boules blanches pour un très grand nombre de boules noires (1000 Par exemple). La probabilité de tirer une blanche est très faible. Répétons 10 fois l'expérience, on tire 0 ou quelques boules blanches. Si on recommence cette série de tirages, le nombre de boules blanches sera décrit par une loi de poisson.

Les boules blanches peuvent représenter les noyaux qui se désintègrent pendant la durée des tirages, les boules noires, les noyaux susceptibles de se désintégrer.

2.1.3.3 - Distribution normale

a) Définition : En faisant croître N indéfiniment dans le cas de la distribution binomiale, on montre que l'expression donnant la probabilité devient :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right] \quad \text{Loi de Gauss-Laplace} \quad (10)$$

$p(x)$ est une fonction continue de x .

On l'utilise dans le cas des distributions continues et infinies. On peut revenir au cas discret lorsque c'est nécessaire.

On peut poser $X = \frac{x-\bar{x}}{\sigma}$, écart réduit. Par changement de variable, l'expression devient :

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}X^2\right) \quad \text{Courbe normale de probabilité ou Gaussienne} \quad (11)$$

Cette courbe est symétrique par rapport à l'origine, elle est maximum pour $X = 0$ et elle tend rapidement vers 0 lorsque X tend vers l'infini. Elle possède un point d'inflexion pour $X = \pm 1$. On a bien sûr $p(X) \geq 0$ (tableau 4).

Tableau 4

X	p(X)	X	p(X)
0	0,39894	4	$1,3 \cdot 10^{-4}$
0,5	0,35207	5	$1,5 \cdot 10^{-6}$
1	0,24198	6	$6,1 \cdot 10^{-9}$
1,5	0,12952	7	$9,1 \cdot 10^{-12}$
2	0,05399	8	$5,1 \cdot 10^{-15}$
2,5	0,01753	9	$1,0 \cdot 10^{-18}$
3	0,00443	10	$7,7 \cdot 10^{-23}$

Autres propriétés :

- plus σ est petit, plus la courbe est resserrée sur l'axe (Oy).

- L'aire totale sous la courbe est égale à 1

- On montre que : $\int_{-1}^{+1} p(X)dX = \int_{-\sigma}^{+\sigma} p(x)dx = 0.68$

68 % de l'aire totale est comprise entre -1 et + 1

95% // // -2 et + 2

99,8% // // -3 et + 3

b) Application de la loi de Gauss

De nombreuses grandeurs obéissent à cette loi dans la nature. La loi de Gauss s'applique par exemple aux erreurs accidentelles : on admet que l'erreur accidentelle est le résultat d'un grand nombre d'erreurs partielles dont les causes sont indépendantes. La loi des erreurs accidentelles converge vers la loi normale.

La loi de Gauss peut s'appliquer lorsque la distribution n'est pas continue. On peut avoir une multitude de valeurs x_i et le diagramme de fréquence risque de ne pas être clair. On

est amené alors à grouper les x_i en classes de valeurs voisines. Chaque classe à deux frontières et la valeur moyenne de la classe est prise pour x_i .

Exemple : Une recette journalière s'étale entre 90 et 160 dinars par jour pendant 80 jours

Tableau 5

Classe	90-99	100-109	110-119	120-129	130-139	140-149	150-159	160-169
F_i	5	9	16	25	13	7	3	2
x_i	94,5	104,5	114,5	124,5	134,5	144,5	154,5	164,5

Il y a par exemple 5 jours (F_i) dont la recette est comprise entre 90 et 99 dinars. Les différentes recettes ont été rangées en classes de 10 dinars et on a pris pour valeur de x_i la valeur moyenne de la classe.

Les paramètres de cette distribution sont $\bar{x} = 123,9$ et $\sigma = 15,6$.

Lorsque le diagramme de fréquence d'une série est assez symétrique au voisinage de la moyenne et a sensiblement la forme d'une cloche, on peut supposer que la série obéit à la loi normale. On peut ajuster une courbe normale à la série donnée.

L'aire totale du diagramme de fréquence doit être égale à l'aire définie par la courbe normale.

Aire du diagramme = intervalle $\times \sum F_i = 10 \times \sum F_i = 800$, puisque $\sum F_i = N$

On a évidemment : $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1$

Dans l'exemple de la distribution de poisson, la largeur de l'intervalle était de 1, les x_i , du fait de leurs faibles valeurs, n'étaient pas regroupés en classes. Dans le cas présent, l'expression de $p(x_i)$ doit être multipliée par N et par la largeur de l'intervalle pour retrouver les valeurs de F_i .

$$p(x_i) = \frac{1}{15.6\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - 123.9}{15.6}\right)^2\right] \quad (12)$$

Bien remarquer qu'il faut multiplier ΣF_i par la largeur de l'intervalle. On peut définir $Y(x)$ tel que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y(x)dx = 800 \text{ et } Y(x_i) = \frac{800}{15.6\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - 123.9}{15.6}\right)^2\right] = F_i \text{ théorique. (13)}$$

On introduit X , écart réduit et $p(X)$ expression de la courbe normale, on a alors :

$$Y(x) = \frac{800}{15.6} p(X).$$

Tableau 6

x_i	F_i	X	$p(X)$	$Y(x_i)$
174,5	0	3,2436	0,0021	0,1
164,5	2	2,6026	0,0135	0,7
154,5	3	1,9615	0,0583	3,0
144,5	7	1,3205	0,1668	8,6
134,5	13	0,6795	0,3167	16,2
124,5	25	0,0385	0,3986	20,4
114,5	16	-0,6026	0,3327	17,1
104,5	9	-1,2436	0,1841	9,4
94,5	5	-1,8846	0,0676	3,5
84,5	0	-2,5256	0,0164	0,8

Pour $X = 0$, on a $Y(X) = 20,5$ valeur maximum.

La distribution est bien ajustée, on peut passer des valeurs expérimentales à une loi.

3 - Travail expérimentale

3.1- Expérience 1 : Etude d'une distribution de poisson

3.1.1 - Conditions expérimentales

a) Matériel utilisé

On dispose de :

- un tube G.M. avec support et câble
- un compteur digital
- une plaque d'aluminium 800mg/cm^2 environ
- une source de ^{90}Sr de $2\ \mu\text{Ci}$.

b) Mode opératoire

- Fixer la source sur son support.
- Introduire entre la source et le G.M., la plaque d'aluminium.
- Régler la distance source-captteur de façon à mesurer environ 4 coups par seconde en moyenne.

c) Comptage

- Effectuer cinquante comptages, puis 200, puis 300. Pendant ce temps, ne pas toucher au montage expérimental et n'approcher pas de source parasite du capteur.

3.1.2- Travail demandé : (pour les trois comptages, 50, 200, 300).

1. Construire le diagramme de fréquence (histogramme), en représentant en abscisse le nombre de coups relevés x_i et en ordonnée, le nombre de fois F_i que ces évènements ont été mesurés. Les données sont ainsi mises en ordre.
2. Calculer la moyenne de la distribution. Que représente-t-elle ?
3. Calculer la variance et l'écart type. Est- elle égale à la valeur la plus probable ? Que peut-on dire de la dispersion qui apparaît sur l'histogramme ?
4. En comparant les histogrammes obtenus pour 50, 200, 300 mesures et éventuellement les écarts- types, que peut-on en conclure quant au degré de confiance de la valeur de la plus probable ?
5. L'utilisation de la distribution de poisson est-elle justifiée ? Pourquoi ? Donner l'expression numérique de la loi de poisson qui doit s'accorder avec la série expérimentale avec la moyenne et l'écart type choisis.
6. Sur le diagramme de fréquence, tracer la courbe continue et régulière des F_i calculés.
7. Comparer avec le diagramme de fréquence. Conclusion.

8. Présenter les résultats sous forme de tableau :

x_i	F_i	$p(x_i)$	F_i calculé

Attention : pour certains x_i , on a $F_i = 0$, mais $p(x_i) \neq 0$. Calculer F_i jusqu'à $x_i = 10$ au moins.

Applications : D'après les résultats précédents, en effectuant 10 mesures, combien de fois devons-nous avoir affiché 0, 10, 20 ?

Même question si on fait 300 mesures.

3.2- Expérience 2 : Etude d'une distribution de Gauss

3.2.1- Conditions expérimentale

a) Matériel utilisé

On dispose de :

- un tube G.M. avec support et câble
- un compteur digital GM
- une source de ^{90}Sr de $2 \mu\text{Ci}$. (Fig. 2).

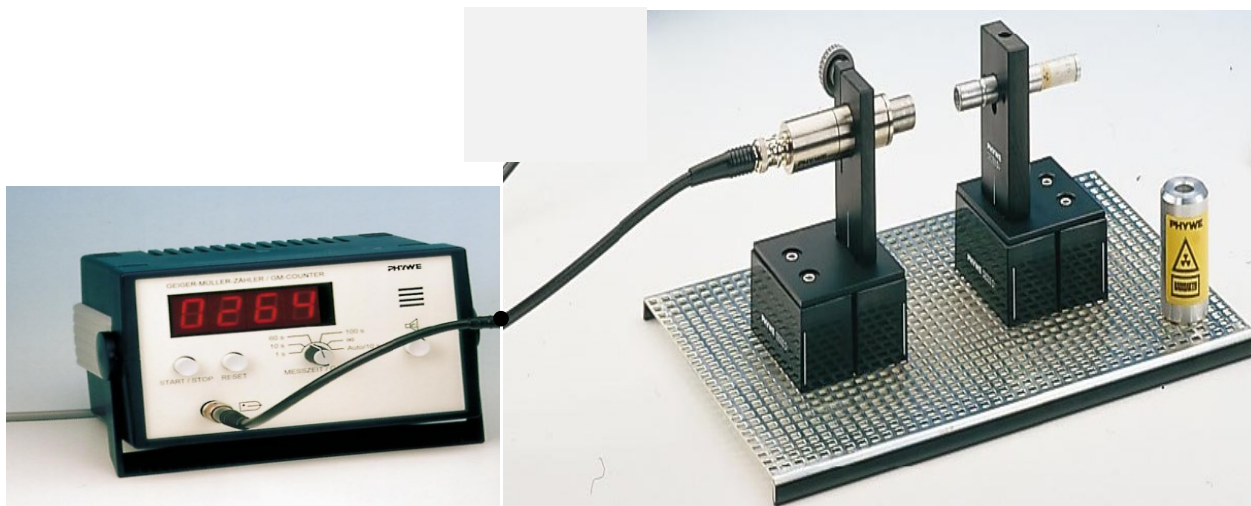


Figure 2 : Montage expérimental : Distribution de Gauss

b) Mode opératoire

- Ne pas modifier le montage expérimental. Voir les explications sur les appareils avant de commencer.
- Fixer la source sur son support.
- Enlever la plaque d'Al et régler la distance source capteur de façon à mesurer en moyenne 500 impulsions par seconde.

c) Comptage

- Relever de la même façon que précédemment, le nombre d'impulsions affichées par seconde, Effectuer 100 comptages, puis 500 comptages. On constate une grande dispersion dans les valeurs relevées.
- Grouper les résultats de valeurs voisines en classes (prendre une largeur de classe de 20 à 25).
- Tracer le diagramme de fréquence (histogramme) correspondant.

3.2.2- Travail demandé

1. Calculer la moyenne de la distribution, sa variance et son écart type.
2. L'emploi de la distribution de Gauss est-elle justifiée ? pourquoi ?
3. Donner l'expression de la loi normale (l'expression numérique complète) qui doit s'accorder avec la série expérimentale avec la moyenne et l'écart type choisis.
4. Sur le diagramme de fréquence, tracer la courbe continue et régulière de Y(x) en indiquant le maximum. Donner la valeur maximum de Y(x).
5. Comparer avec le diagramme de fréquence ? conclusion.
6. Présenter les résultats sous forme de tableau :

Classe de x_i	x (milieu de la classe)	F_i	X	p(X)	Y(x)

On rappelle que : $X = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$

Application :

On a vu que $\int_{-1}^{+1} p(x)dx=0.68$

1. En déduire le nombre d'impulsions devant se trouver entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$. Vérifier ce résultat sur l'ensemble des N valeurs relevées.
2. Lorsqu'on relève n impulsions dans une mesure, on prend l'erreur probable Δn due aux fluctuations statistiques, égale à \sqrt{n} , c'est à dire que la valeur la plus probable de la mesure est comprise entre $n + \sqrt{n}$ et $n - \sqrt{n}$. Cela paraît-il justifié ?
3. Conclusions.

TP 3 : Atténuation des rayonnements β et γ dans l'Al

1- But de la manipulation

L'objectif de ce TP est de déterminer expérimentalement le parcours e_{\max} des rayonnements bêtas dont l'énergie est E_{\max} et d'en déduire l'énergie maximum de l'émission β .

2- Rappels théoriques

2.1- Définition

Les rayonnements radioactifs sont absorbés par les différents matériaux que l'on intercale entre la source et le détecteur (atténuation par l'absorption). L'absorption est différente suivant la nature du rayonnement, du matériau interposé, et de son épaisseur. En règle générale plus le matériau est dense et épais, plus l'absorption est importante.

2.2- Interaction du rayonnement radioactif avec la matière

L'interaction du rayonnement radioactif avec la matière est liée au transfert d'énergie de ce rayonnement vers la matière ; c'est-à-dire à l'énergie transmise sous forme de chaleur par les particules α et β et le photon γ (au moyen des électrons secondaires qu'il génère) aux atomes de la matière considérée.

La perte d'énergie dans la matière dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement considéré ; c'est-à-dire : du rayonnement α , du rayonnement β , du rayonnement γ .

2.2.1- Interaction du rayonnement β avec la matière

En pénétrant dans la matière, une particule β va progressivement perdre son énergie suivant trois processus :

1. Excitation ou ionisation des atomes du milieu absorbant par collisions inélastiques du β avec les électrons de l'atome
2. Déviations dans le champ coulombien avec émission d'un rayonnement composé de photons X ("appelé Bremsstrahlung") dû au freinage des β au voisinage du noyau.

3. Diffusion élastique coulombienne.

Ce dernier processus est le plus probable avec les β du ^{90}Sr . Il produit des diffusions multiples avec de faibles pertes d'énergie.

La nature même de l'émission bêta fait que l'énergie du β n'est pas déterminée exactement, contrairement à l'émission α ou γ . Cette énergie est comprise entre 0 et E_{\max} , énergie maximum que peut avoir le β lors de l'émission.

L'énergie maximum (E_{\max}) des β peut être obtenue grâce à des relations empiriques (formules de Glendenin) reliant E_{\max} au parcours maximum e_{\max} .

- Pour des rayonnements β d'énergie inférieure à 0.8 MeV c'est-à-dire pour

$$E_{\max} < 0.8 \text{ MeV} ; \quad e_{\max} = 0,407 (E_{\max})^{1.38}$$

- Pour des rayonnements β dont l'énergie est comprise entre 0.8 MeV et 3.7 MeV c'est-à-dire pour

$$0.8 \text{ MeV} < E_{\max} < 3.7 \text{ MeV} ; \quad e_{\max} = 0.542 E_{\max} - 0,133$$

Le parcours e_{\max} des bêtas est exprimée en épaisseur surfacique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) ce qui permet de s'affranchir de la nature du milieu.

3 - Partie expérimentale

a) Matériel utilisé

- Un tube G.M. avec son support et un câble.
- Un compteur digital G.M.
- Jeu de plaques d'aluminium(en superposant les plaques, on doit arriver à environ $2000 \text{ mg}/\text{cm}^2$).
- Une source de Cs^{137} de $2 \mu \text{ Ci}$. (Fig.1).

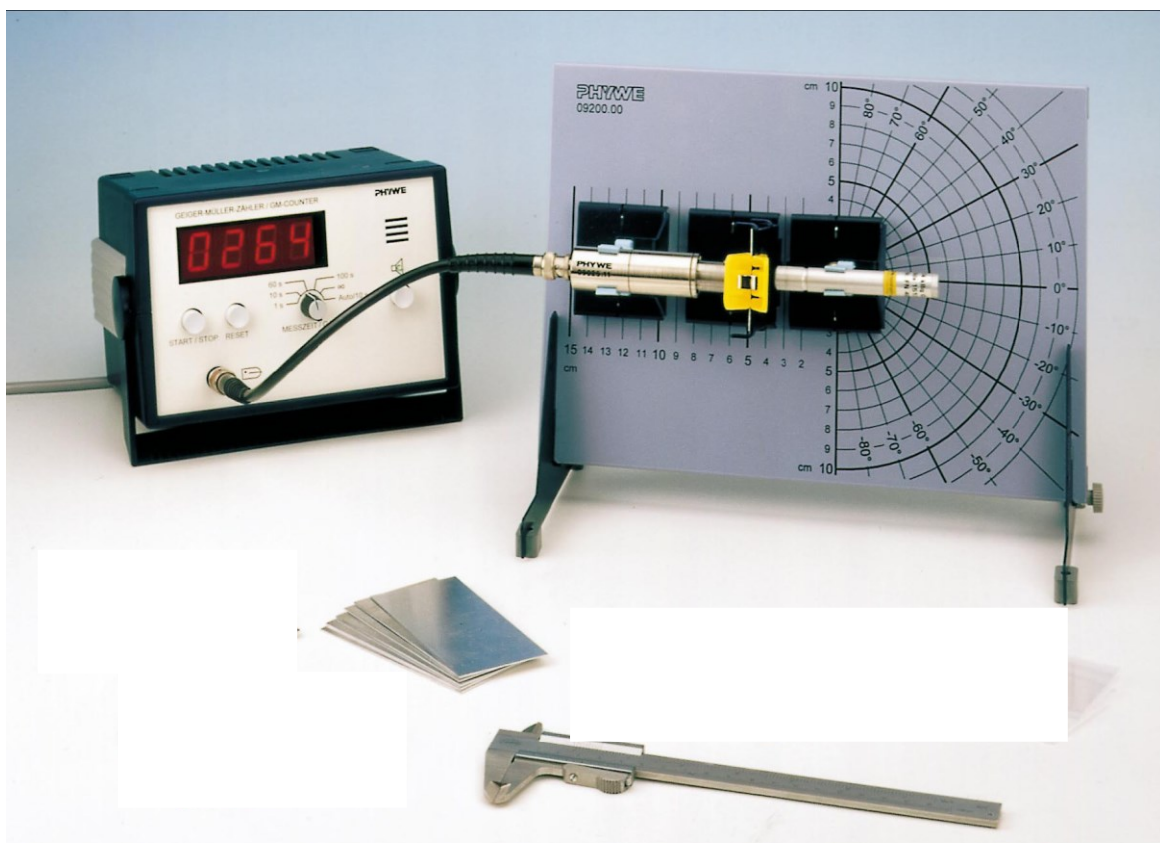


Figure 1 : Dispositif expérimental (Parcours des rayonnements β dans l'aluminium)

b) Mode opératoire

- 1) Mesurer le bruit de fond avec une erreur relative inférieure à 10% (voir annexe 3). Ne pas oublier de bien éloigner les sources du détecteur G.M.
- 2) Fixer la source de ^{90}Sr sur le support.
- 3) Régler la distance source-détecteur de façon à pouvoir introduire l'ensemble des plaques d'Aluminium (épaisseur maximum). Cette distance doit absolument rester constante pendant les mesures.
- 4) Mesurer le taux de comptage Z correspondant à une épaisseur nulle, c'est à dire sans plaque, avec une erreur relative inférieure à 2%.
- 5) Placer successivement entre la source et le détecteur des plaques d'aluminium d'épaisseur x variant de 0.1 à 0.7 mm par pas de 0.1 mm (équivalent à une épaisseur surfacique d'environ 30 à 200 mg/cm^2). Environ, 12 mesures sont nécessaires en répartissant

convenablement les épaisseurs. Augmenter le temps de comptage (plus de 15 mn) pour les grandes épaisseurs.

- 6) Mesurer le taux de comptage z_1 avec une précision inférieure à 5%.

c) Travail demandé

Prendre la minute pour unité de temps.

- 1) Donner la valeur du bruit de fond z_0 ainsi que Δz_0 .
 2) Présenter les résultats sous forme de tableau en indiquant les unités.

e (g/cm ²)	N ₁	t ₁ (mn)	z ₁ (mn ⁻¹)	z = z ₁ -z ₀ (mn ⁻¹)	z/Z	Log (z/Z)	(Δz)/z	Δ Log (z/Z)

- 3) Donner le détail du calcul d'erreur sur z, Z et log (z/Z).
 4) Construire le graphe log (z/Z)= f(e) avec les barres d'erreurs. On négligera l'incertitude sur l'épaisseur des plaques. e_{max} est la valeur du parcours maximum correspondant à l'absorption totale des bêtas. Au delà de $e = e_{max}$, il ne reste que des gammas dont le comportement dans la matière suit une loi d'absorption linéaire. On constate que les gammas sont très peu absorbés par l'aluminium.
 5) A partir de la valeur e_{max} déterminée expérimentalement, trouver l'énergie cinétique maximale des électrons en utilisant la table des parcours des électrons dans l'aluminium donné ci-dessous (tableau 1) et effectuant une interpolation linéaire.
 6) D'après le graphe log (z/Z)= f(e), déduire le nombre de gammas détectés quand on ne met pas d'écrans (x=0) et le nombre total d'électrons détectés quand x=0.
 7) Sachant que l'efficacité d'un compteur Geiger- Müller est de 100% pour les particules chargées, en déduire le nombre d'électrons émis par la source en direction du détecteur pendant le comptage effectué en l'absence d'écran.
 8) En déduire l'efficacité du compteur pour les Gammas.

Energie (keV)	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1400	2000
Parcours (mg/cm ²)	5.7	18.7	58.1	108	165	226	290	355	421	488	555	865	1220

Tableau 1 : Parcours des électrons dans l'aluminium

TP 4 : Atténuation des rayonnements β et γ dans le Pb

1- But de la manipulation

L'objectif de ce TP est d'étudier l'absorption des rayonnements β et γ dans le plomb. En variant l'épaisseur de l'absorbant en Plomb, on détermine le coefficient d'atténuation massique et l'énergie des gammas considérés.

2 - Rappels théoriques

2.1- Atténuation d'un faisceau de rayonnement γ

Lorsqu'un faisceau de rayons γ traverse la matière, il est absorbé par effet photoélectrique, Compton et création de paires. L'intensité du rayonnement décroît alors en fonction de l'épaisseur du milieu absorbant. La variation est donnée par la loi :

$$I_x = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

où I_0 est l'intensité du faisceau incident et I_x l'intensité restante après traversé de l'écran (Fig. 1). Si x , l'épaisseur de l'absorbant est exprimée en cm, alors μ est défini comme coefficient d'atténuation linéaire. Afin d'introduire la densité ρ du matériau, il est plus commode de définir une épaisseur surfacique e telle que : $e = \rho \cdot x$

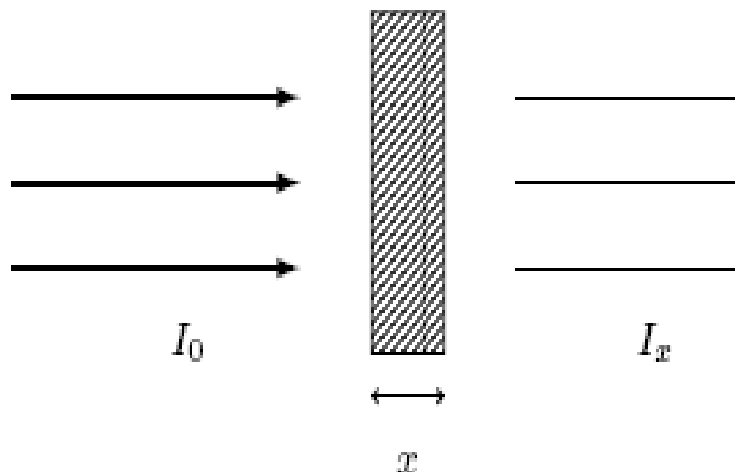


Figure 1 : Atténuation d'un rayonnement γ dans un écran d'épaisseur x

On utilise fréquemment le coefficient d'atténuation massique μ/ρ , l'épaisseur étant alors remplacée par l'épaisseur surfacique ρx . La relation (1) s'écrit alors :

$$I_x = I_0 e^{-(\mu/\rho) \rho x} \quad (2)$$

Le coefficient d'atténuation linéaire μ est également donné par la formule : $\mu = n \cdot \sigma_t$. Dans ce cas la relation (1) peut aussi s'écrire de la manière suivante :

$$I_x = I_0 e^{-\sigma_t n x} \quad (3)$$

Où n , désigne la densité atomique de l'écran absorbeur donné par : $n = \rho N_A / A$, où ρ désigne la masse volumique de l'écran, A la masse atomique des atomes absorbeurs et N_A le nombre d'Avogadro.

Le coefficient d'atténuation totale μ_t est donné par la formule :

$$\mu_t = \mu_{\text{photo}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{mat}} \quad (4)$$

Compte-tenu des relations (2) et (4) on peut écrire, en dissociant les trois effets :

$$I_x = I_0 e^{-[(\mu/\rho)_{\text{photo}} + (\mu/\rho)_{\text{Compton}} + (\mu/\rho)_{\text{mat}}] \rho x} \quad (5)$$

3 - Partie expérimentale

a) Matériel utilisé

- Un tube G.M. avec son support et un câble.
- Un compteur digital G. M.
- Jeu de plaques de plomb(en superposant les plaques, on doit arriver à environ 25 g/cm²).
- Une source de ⁶⁰Co de 2 μ Ci. (Fig. 2)

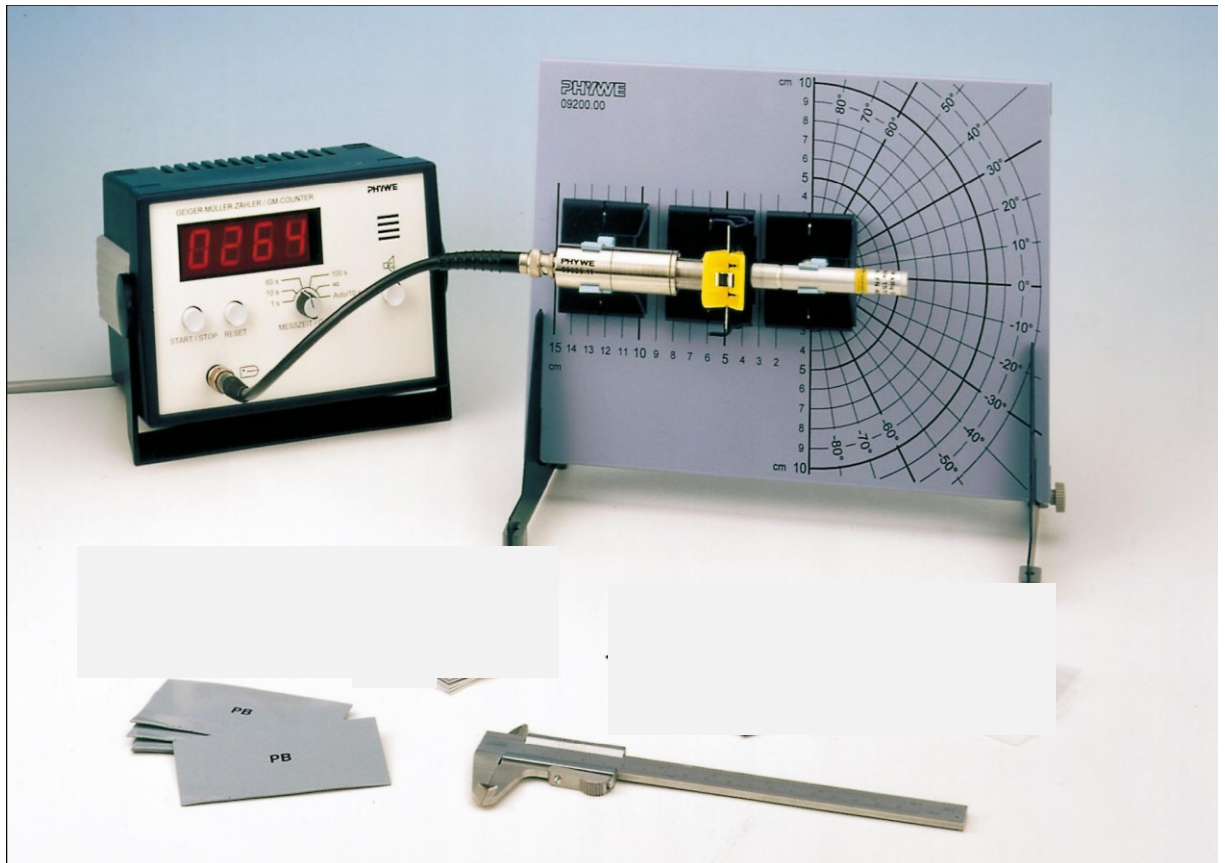


Figure 2 : Montage expérimental : Atténuation des rayonnements β et γ dans le Pb

b) Mode opératoire

- 1) Mesurer le bruit de fond avec une erreur relative inférieure à 10% (voir annexe 3). Ne pas oublier d'éloigner les sources du détecteur G.M.
- 2) Fixer la source de ^{60}Co sur le support.
- 3) Régler la distance source-détecteur de façon à pouvoir introduire l'ensemble des plaques de plomb (épaisseur maximum). Cette distance doit absolument rester constante pendant les mesures.

- 4) Mesurer le taux de comptage Z correspondant à une épaisseur nulle, c'est à dire sans plaque, avec une erreur relative inférieure à 2%.
- 5) Interposer entre la source et le détecteur des écrans de plomb d'épaisseurs différentes et en superposant plusieurs plaques jusqu'à une épaisseur de 25 g/cm^2 . Environ 8 mesures sont nécessaires. Mesurer le taux de comptage z_1 avec une précision inférieure à 5%.

c) Travail demandé

Prendre la minute pour unité de temps.

- 1) Donner la valeur du bruit de fond z_0 ainsi que Δz_0 .
- 2) Présenter les résultats sous forme de tableau en indiquant les unités.

e (g/cm ²)	N ₁	t ₁ (mn)	z ₁ (mn ⁻¹)	z=z ₁ -z ₀ (mn ⁻¹)	z/Z	Log (z/Z)	(Δz)/z	ΔLog (z/Z)

- 3) Donner le détail du calcul d'erreur sur z , Z et $\log (z/Z)$.
- 4) Construire le graphe $\log (z/Z)= f(e)$ avec les barres d'erreurs. On négligera l'incertitude sur l'épaisseur des plaques.
- 5) Que peut-on dire du graphe ? En déduire la formule donnant z en fonction de e .
- 6) En traçant les deux droites de pentes extrêmes, donner d'après le graphe les valeurs de μ/ρ et $\Delta(\mu/\rho)$. Attention à l'échelle et aux unités employées. Le calcul de μ/ρ peut être effectué par la méthode de la régression linéaire (annexe 5).
- 7) Evaluer l'énergie E_γ des gammas d'après la courbe donnant le coefficient d'absorption massique en fonction de l'énergie du photon (Fig.3).
- 8) Pour quelle épaisseur de plomb, le rayonnement du ⁶⁰Co a-t-il son intensité divisée par 2, par 1000 ? On a $\rho = 11,34 \text{ g/cm}^2$

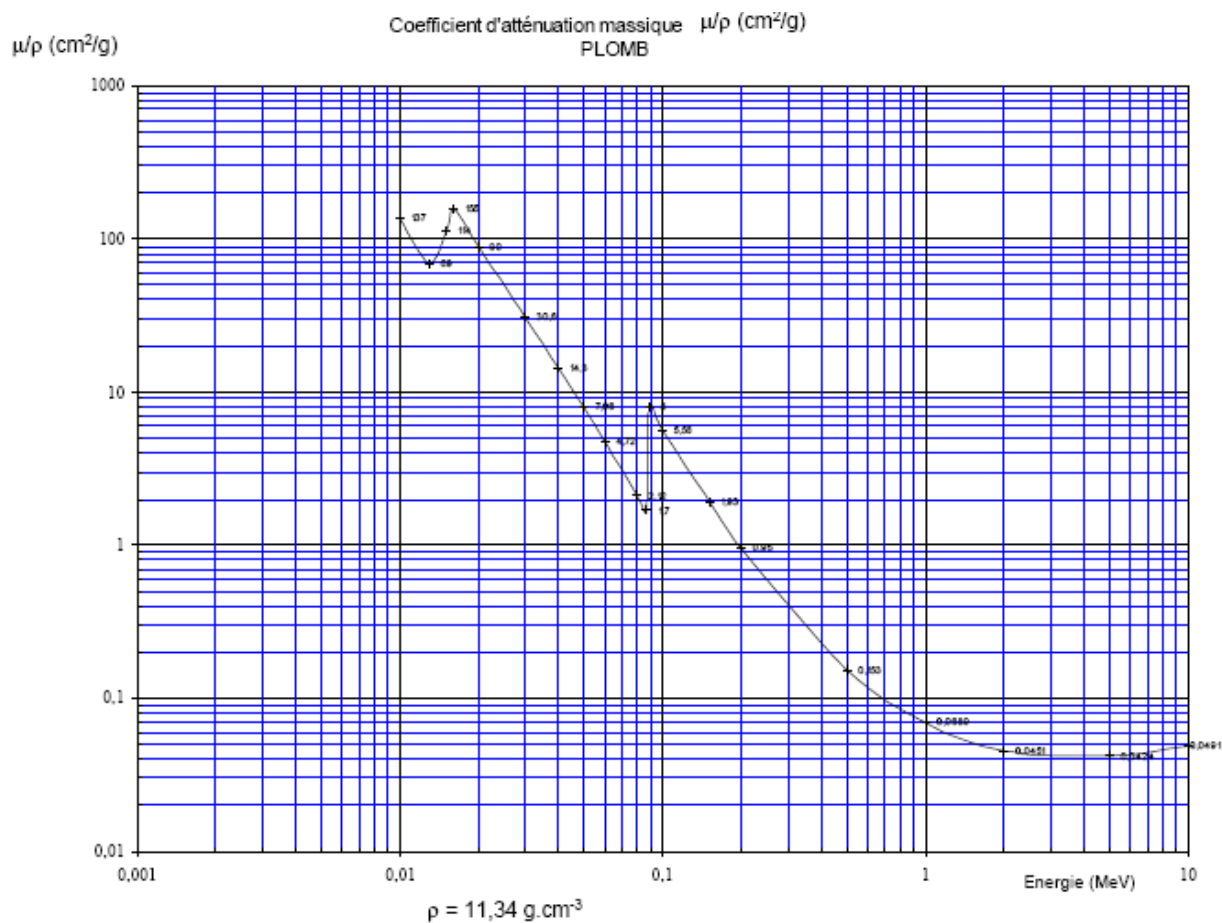


Figure 3 : Coefficient d'absorption massique du plomb en fonction de l'énergie du photon

Bibliographie

1. C. L. Sech, C. Ngô, Physique nucléaire : Des quarks aux applications. Cours et exercices corrigés, 2^{ème} Ed, Dunod, (2020).
2. K. Siegbahn, Alpha- Beta and Gamma Ray Spectroscopy, Elsevier, (2012).
3. W. Makower, H. Geiger, Mesures pratiques en radioactivité, Gauthier- Villars, (2015).
4. M. Maalem, A. Bouhenna, Travaux pratiques de physique, L₁- SNV et L₁- STU, USTHB, Faculté de physique, (2010/2011).
5. L. Boufatah, Introduction aux travaux pratiques de physique, EPST Tlemcen, (2012/2013).
6. Md. Akhlak Bin Aziz, Md. Faisal Rahman, Md. Mahidul Haque Prodhan, Comparison of Lead, Copper and Aluminum as Gamma Radiation Shielding Material through Experimental Measurements and Simulation Using MCNP Version 4c, International Journal of Contemporary Research and Review. 9(8), 20193 (2018).
7. W. Kuthe, K. Timmermann, Nuclear physics experiments, 2nd Ed, Amersham Buchler GmbH & Co KG, Braunschweig, (1997).
8. «Symboles graphiques et pictogrammes, Couleurs et signaux de sécurité». Norme française homologuée. NF X08-003. Association française de normalisation (AFNOR) 1994 (erratum de mars 1995), 47p.

Annexe 1 : Consignes de sécurité**1- Les sources radioactives**

- a. Manipuler les sources radioactives avec précaution. Tenir la source par le support sans mettre les doigts sur la partie active.
- b. Ne jamais glisser une source radioactive dans la poche.
- c. Ne pas accumuler plusieurs sources radioactives sur la table de manipulation.
- d. C'est l'enseignant qui donne les sources et qui vérifie leur retour.
- e. A la fin de la séance de travaux pratiques, pensez à vous laver les mains.

N.B. Les sources radioactives que nous utiliserons en TP sont scellées et donc protégées de tout contact extérieur. Les sources ont une activité très faible, de l'ordre du μCi et sont donc presque inoffensives. Mais, il s'agit surtout de prendre de bonnes habitudes.

2- Les appareils électriques

Afin de permettre un fonctionnement correct des appareils utilisés et leur maintien en bon état, il est demandé à l'étudiant de suivre scrupuleusement les recommandations suivantes :

- a. Avant de mettre l'appareil en marche (on), vérifier le montage et appelez l'enseignant.
- b. A la fin de la manipulation, éteindre l'appareil d'abord (off) avant de débrancher le câble.
- c. En cas de coupure brutale de courant, mettre immédiatement tous les appareils en positions off.
- d. En cas de problème avec un des éléments du montage (mauvais fonctionnement, panne...), appeler l'enseignant.
- e. Avant de quitter la salle de TP, veiller à ce que tous les appareils soient éteints.

3 -Les Détecteurs

- a. Eviter absolument de faire subir un choc aux détecteurs (surtout ne pas les faire tomber!)
- b. Ne pas toucher la fenêtre d'entrée du Geiger-Muller
- c. Lorsqu'il y a une source de haute tension (H.T) dans le montage :
 1. Vérifier d'abord que le bouton de réglage est sur la position 0 volt.
 2. Mettre le tiroir de la H.T. en marche.
 3. Appliquer la valeur de la H.T. désirée progressivement. Ne jamais envoyer par exemple 1000 volts directement sur un photomultiplicateur.
 4. En fin de manipulation, remettre le bouton de réglage sur 0 volt.

4 -Les Câbles« BNC »

Les câbles dits BNC sont des câbles coaxiaux qui permettent d'acheminer le signal électrique d'un élément de la chaîne de détection à l'autre. Ils sont, de par leur conception, sensibles à des pressions ou torsions, et leur détérioration entraîne un mauvais transport du signal (par exemple depuis le détecteur vers l'amplificateur). Aussi, il convient de :

1. Ne pas marcher sur les câbles.
2. Ne pas tirer sur les câbles pour débrancher.

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

Annexe 2 : Les sources radioactives utilisées en TP

Les sources radioactives utilisées dans nos travaux pratiques sont :

1- Strontium 90 ($^{90}_{38}\text{Sr}$)

Le strontium 90 a une période radioactive de 28.5 ans. Il conduit par désintégration β^- à l'yttrium 90, lui-même émetteur β^- de période radioactive courte (64 heures). La figure 1 illustre le schéma de désintégration du strontium 90.

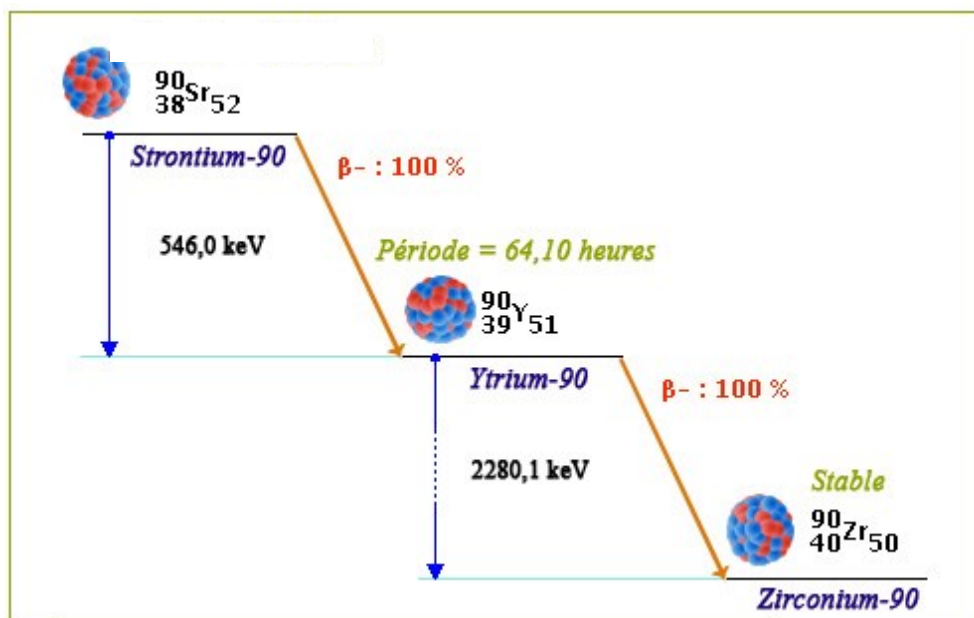


Figure 1 : Schéma de désintégration du strontium 90.

2- Césium 137 $^{137}_{55}\text{Cs}$

Le césium 137 a une période radioactive de 30.1 ans. Il conduit par désintégration β^- au baryum 137 de période de 2.6 minutes. La figure 2 illustre le schéma de désintégration du césium 137.

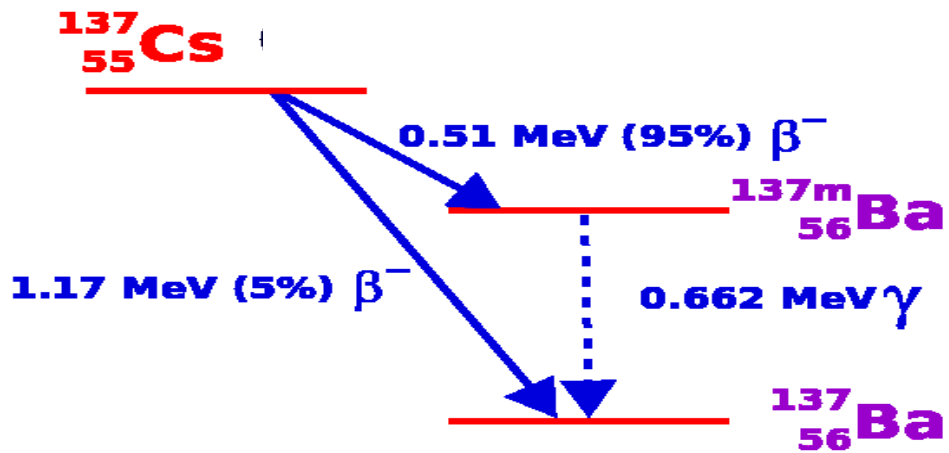


Figure 2 : Schéma de désintégration du césium 137.

3- Cobalt 60 $^{60}_{27}\text{Co}$

Le cobalt 60 a une période radioactive de 5.27 ans. Il donne par désintégration β^- du nickel. La figure 3 illustre le schéma de désintégration du cobalt 60.

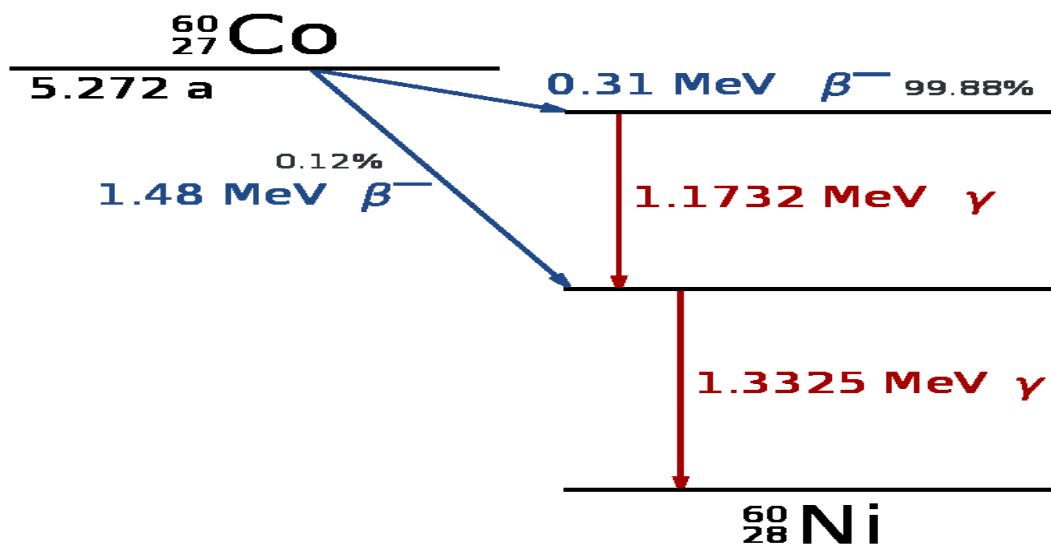


Figure 3 : Schéma de désintégration du cobalt 60.

4 -Radium 226 $^{226}_{88}\text{Ra}$

Le radium 226 a une période radioactive de 1600 ans. C'est un émetteur de particules alpha. Parmi les descendants du radium 226, on note le radon 222 de période de 3.8 jours. La figure 4 présente le schéma de désintégration du radium 226.

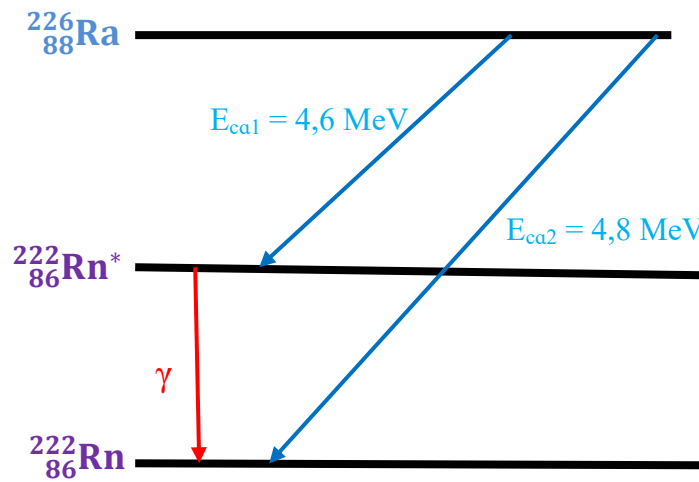


Figure 4 : Schéma de désintégration du radium 226.

Annexe 3 : Précision sur le taux de comptage

1- Calcul de l'incertitude relative sur le taux de comptage

Le compteur digital indique directement le nombre d'impulsions N_1 détectée par le G.M. Le taux de comptage ou nombre d'impulsions par unité de temps est $z_1 = N_1/t_1$. On prend la minute pour unité de temps.

- 1) L'erreur relative sur z_1 est : $(\Delta z_1)/z_1 = (\Delta N_1)/N_1 + (\Delta t_1)/t_1$.
- 2) L'erreur due aux fluctuations de l'activité sur une mesure N_1 est égale par convention à la déviation standard : $\Delta N_1 = (N_1)^{1/2}$.
- 3) L'erreur sur t_1 peut être prise égale à une seconde quelque soit t_1 (écart entre la lecture du temps et le déclenchement du compteur), donc :

$\frac{\Delta z_1}{z_1} = \frac{1}{(N_1)^{1/2}} + \frac{1}{60 t_1}$	$(t_1 \text{ en mn et } z_1 \text{ en mn}^{-1})$
---------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------

L'erreur relative sur z_1 dépend du taux de comptage et du temps de comptage, elle est d'autant plus petite que N_1 et t_1 sont élevés. Le tableau ci-dessous donne le N_1 minimum pour un temps de comptage t_1 . Si le N_1 n'est pas atteint pendant le temps t_1 , il faut augmenter le temps de comptage pour obtenir la précision demandée sur z_1 . De même pour le bruit de fond z_0 .

t_1 (mn)	$\Delta z_1/z_1 < 1\%$	$\Delta z_1/z_1 < 2\%$	$\Delta z_1/z_1 < 5\%$	$\Delta z_1/z_1 < 10\%$
1	Impossible	90000	900	145
2	360000	7400	576	120
3	50000	4800	506	113
4	30000	4000	476	110
5	23000	3600	460	108
6	20000	3400	450	106
8	17000	3200	436	105
10	15000	3000	430	104
15	13000	2900	420	103
20	12000	2800	415	102
∞	1000	2500	400	100

2- Comment mesurer la radioactivité naturelle

En absence de source radioactive, il existe une radioactivité naturelle due principalement au ^{40}K dans le béton (activité d'un kg de KCl : $0.4\mu\text{Ci}$), au radon dans l'atmosphère (un m^3 d'air a une activité de $10^{-4} \mu\text{Ci}$), aux rayonnements cosmiques. Il est nécessaire de connaître cette activité car elle se superpose aux activités propres des sources et le G.M. détecte l'ensemble des activités. Par conséquent, l'activité naturelle peut être considérée comme un bruit de fond qu'il est nécessaire de déterminer afin de le soustraire des mesures effectuées.

Opérer de la façon suivante :

1. Le G.M. étant fixé sur son support, le timer étant en position comptage ($\text{count}/10^3$).
2. Eloigner toutes les sources à au moins un mètre du capteur.
3. Remettre l'affichage à zéro et mesurer N_0 impulsions pendant un temps t_0 . La mesure doit être effectuée de façon à ce que l'erreur relative sur $z_0 = N_0/t_0$ soit inférieur à 10%. t_0 doit être égal à au moins 5 mn. Ce bruit de fond sera retiré de chaque mesure effectuée, car il constitue une erreur systématique. Le nombre d'impulsions par unité de temps dû à la source sera :

$$z = z_1 - z_0 = N_1/t_1 - N_0/t_0$$

et

$$\Delta z = \Delta z_1 + \Delta z_0$$

Annexe 4 : Les incertitudes de mesure en travaux pratiques

1- Les incertitudes

1.1 – L'incertitude absolue

Lorsque l'on fait des mesures expérimentales, les valeurs obtenues sont entachées d'erreurs de plusieurs origines: l'imperfection de l'instrument de mesure, les erreurs de manipulation de l'expérimentateur, les perturbations externes, etc. Le but de cette annexe est de donner les bases pour pouvoir quantifier (évaluer) ces erreurs.

Soit une grandeur physique X à mesurer. La valeur réelle est notée $x_{\text{réel}}$, évidemment elle est inconnue et tout le but de l'expérience est d'en chercher une valeur approchée, que l'on notera $x_{\text{mesuré}}$. On définit l'erreur de la mesure par $\delta x = x_{\text{réel}} - x_{\text{mesuré}}$ qui est aussi inconnue. Par contre on peut toujours donner une estimation de l'erreur maximale (en valeur absolue) que l'on appelle incertitude absolue. Elle est positive et est notée Δx . Le résultat de la mesure est donné alors sous la forme :

$$x_{\text{réel}} = x_{\text{mesuré}} \pm \Delta x \text{ unité} \quad \text{qui signifie} \quad x_{\text{mesuré}} - \Delta x \leq x_{\text{réel}} \leq x_{\text{mesuré}} + \Delta x$$

1.2- L'incertitude relative

L'incertitude absolue, lorsqu'elle est considérée seule, n'indique rien sur la qualité de la mesure. Pour juger de cette qualité, il faut comparer l'incertitude absolue à la grandeur mesurée. Le rapport de ces grandeurs est appelé incertitude relative, soit $\Delta x/x$.

L'incertitude relative est une grandeur sans dimension et s'exprime généralement en %. Plus elle est petite, meilleure est la mesure.

2- Calcul d'incertitude

Pour déterminer la valeur de la mesure et son incertitude. On a deux cas :

2.1- Mesure directe :

La grandeur X est mesurée directement avec un appareil de mesure. Selon la reproductibilité de la mesure, on distingue deux cas :

- 1- La même valeur $x_{\text{mesurée}}$ à chaque mesure : généralement, le constructeur de l'appareil fournit l'incertitude relative de son appareil, comme pour les voltmètres et les ampèremètres. Dans ce cas, il faut prendre cette incertitude bien que l'on peut prendre en compte d'autres sources d'erreurs.
- 2- Chaque mesure donne une valeur différente que l'on notera x_1, x_2, \dots, x_n . Dans ce cas, le traitement doit être statistique. Le plus simple est de prendre

$$x_{\text{mesuré}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{et} \quad \Delta X = \frac{|x_{\text{mesuré}} - x_1| + |x_{\text{mesuré}} - x_2| + \dots + |x_{\text{mesuré}} - x_n|}{n}$$

2.2- Mesure indirecte

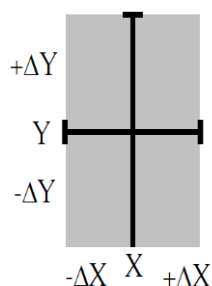
Dans ce cas X est une grandeur qui dépend d'autres grandeurs x_a, x_b, \dots . Ce sont ces dernières qui sont mesurées et qui donnent des valeurs avec les incertitudes correspondantes $x_a \pm \Delta x_a, x_b \pm \Delta x_b, \dots$. La question est quelle est l'incertitude sur la valeur de X ? Le calcul de l'incertitude est assez simple, il dépend de la relation qui lie ces grandeurs (voir tableau ci dessous).

Relation	Incertitude	Remarque
$X = x_a \pm x_b \pm \dots$	$\Delta X = \Delta x_a + \Delta x_b + \dots$	Les incertitudes s'ajoutent toujours
$X = x_a \cdot x_b$	$\frac{\Delta X}{ X } = \frac{\Delta x_a}{ x_a } + \frac{\Delta x_b}{ x_b } + \dots$	Les incertitudes relatives s'ajoutent.
$X = k \cdot x_a$	$\Delta X = k \cdot \Delta x_a$	k est une constante parfaitement connue.
$X = \frac{x_a}{x_b}$	$\frac{\Delta X}{ X } = \frac{\Delta x_a}{ x_a } + \frac{\Delta x_b}{ x_b }$	Les incertitudes relatives s'ajoutent toujours.
$X = x_a^\alpha \cdot x_b^\beta$	$\frac{\Delta X}{ X } = \alpha \frac{\Delta x_a}{ x_a } + \beta \frac{\Delta x_b}{ x_b }$	α, β sont des réels quelconques positif ou négatif

3- Incertitude sur le graphe

Il est courant d'étudier graphiquement une propriété, en fonction d'un paramètre, pour en déduire ou vérifier une loi les reliant. Les rectangles d'incertitudes (ou les barres d'erreurs) doivent être portés sur le graphe pour juger de la validité de l'interprétation.

Soit un point expérimental défini par les coordonnées : X affecté de l'incertitude $\pm \Delta X$, et Y affecté de l'incertitude $\pm \Delta Y$. Le tracé de ce point sur un graphe correspond au schéma suivant :



La zone grise correspond à l'aire d'incertitude du point expérimental. Elle peut se réduire à une simple barre si l'une des incertitudes est très faible (on parlera alors de barres d'erreurs).

Une fois mis les rectangles d'erreur, on trace manuellement la meilleure courbe passant au mieux dans tous les rectangles d'incertitude.

3.1- Tracé du graphe

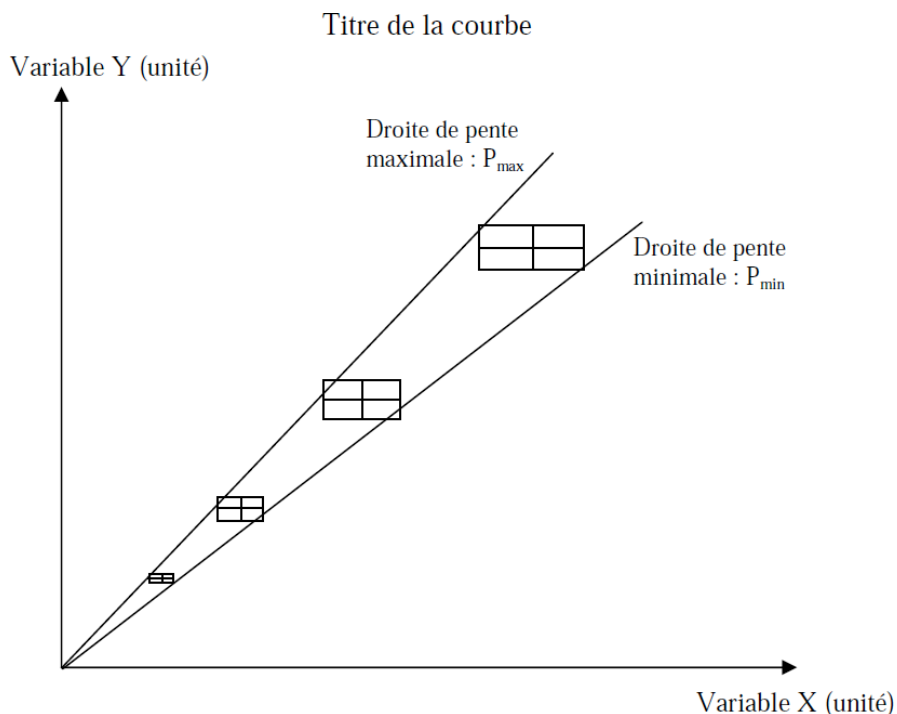
Pour obtenir, dans un temps raisonnable, un graphe exploitable où il est aisé d'analyser un phénomène, il est recommandé de suivre les neuf étapes suivantes :

- 1- Réaliser avec soin les différentes mesures et reporter les résultats dans un tableau.
- 2- Estimer les incertitudes Δx et Δy pour chaque couple (x, y) du tableau.
- 3 - Choisir convenablement l'origine des axes (il n'est pas indispensable que l'origine des axes corresponde à $x = 0$ et $y = 0$).
- 4 - Nommer les axes en indiquant les unités de x et de y .
- 5 - Choisir une échelle adéquate pour chacun des deux axes (les points expérimentaux doivent se répartir sur une grande partie de la feuille utilisée).

- 6- Indiquer sur chaque axe, en suivant l'échelle, quelques points correspondant à des nombres entiers formant une progression arithmétique.
- 7 - Représenter les points expérimentaux par des croix (+) dont les branches sont parallèles aux axes.
- 8 - Représenter les rectangles d'incertitudes de côtés $2\Delta x$ et $2\Delta y$ (il est possible que l'incertitude sur un axe soit négligeable, les rectangles d'incertitude deviennent alors des barres d'erreur).
- 9 - Dessiner la courbe $Y(x)$ qui doit couper tous les rectangles d'incertitude et avoir une pente variant de façon continue (pas de ligne brisée ni de zigzag).

Si $Y(x)$ est une droite, alors il existe tout un faisceau de droites passant par tous les rectangles d'incertitude. Il faut alors représenter deux droites : celle de pente minimale et celle de pente maximale.

La pente et son incertitude s'écriront alors : $P = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \pm \left| \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \right|$



Annexe 5 : Régression linéaire simple

1-Introduction

Dans la plupart des expériences des travaux pratiques, quelques mesures, quelquefois une seule, suffisent. Cependant, si le phénomène observé est aléatoire, si la dispersion des mesures est grande, ou si l'on désire estimer l'erreur due à l'expérimentateur (chronométrage par ex.) une série de mesures est nécessaire. Les résultats seront alors traités de manière statistique. Afin de faire face à l'incertitude concernant ces résultats, les statistiques s'avèrent être un outil adéquat. En particulier, l'analyse de régression est une des analyses statistiques intéressantes pour ceux qui travaillent avec des données quantitatives. Elle permet de produire un modèle de relation entre deux variables, d'estimer l'adéquation de ce modèle et de voir graphiquement la correspondance entre les données et le modèle.

On s'intéresse particulièrement au modèle de régression linéaire simple permettant de déterminer une relation linéaire entre une variable indépendante x (en abscisse) et une variable dépendante y (en ordonnée). Dans ce cas, x et y sont reliés par la relation linéaire :

$$y = ax + b. \quad (1)$$

2-Principe

Supposons qu'on dispose de n couples (x_i, y_i) , pour $i = 1, \dots, n$. Les valeurs x_i, y_i étant les valeurs expérimentales mesurées. Si on place dans un plan (xy) les points correspondants aux couples formés (x_i, y_i) , on obtient un nuage de points formant une courbe dite courbe de dispersion (voir Fig.1).

Effectuer une régression linéaire consiste à trouver la droite qui passe au plus près de l'ensemble des points de la courbe de dispersion. Cependant, il est possible de tracer une infinité de droites, chacune reliant un nombre divers de points. Donc, comment déterminer la meilleure droite possible ?

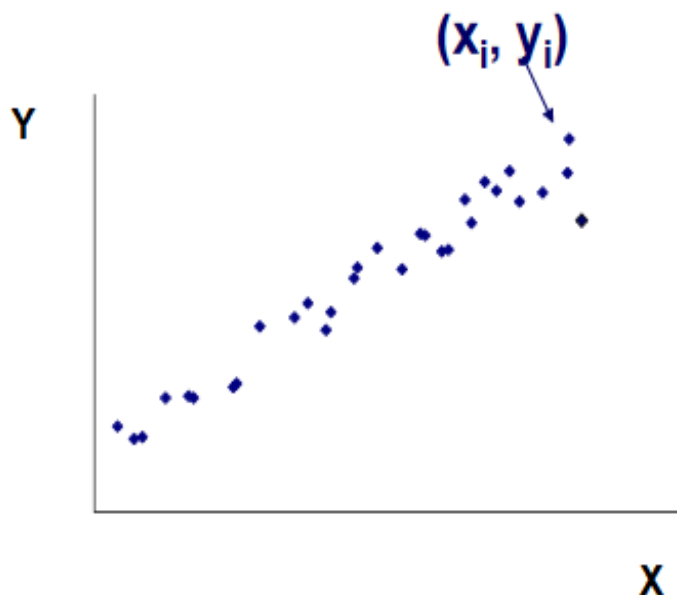


Figure 1 : Nuage de points

3- Estimation par la méthode des moindres carrés

Pour déterminer la meilleure droite possible, il y a de nombreux critères existants, le plus courant étant celui des "moindres carrés". Pour cela, on cherche une droite d'équation $y = ax + b$ (selon le modèle de régression linéaire), où a est la pente de la droite, et b l'intersection avec l'axe des y . Le problème est de trouver les meilleures valeurs a et b , qui permettent d'ajuster au mieux la droite aux points expérimentaux.

Soient n points de mesures : $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$. Pour chaque point (x_i, y_i) mesuré, on suppose que seules les erreurs sur les y_i sont significatives, et que les valeurs x_i sont connues. Soit $d_i = y_i - ax_i - b$, la déviation de l' i ème mesure. Les meilleures valeurs pour a et b sont celles qui minimisent la quantité :

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (2)$$

(d'où le nom de méthodes des moindres carrés).

Les paramètres a et b qui minimisent S sont solutions du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - ax_i - b) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

La première équation du système (3) donne : $\mathbf{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$
 $= \bar{y} - a\bar{x}$ avec $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ et $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

En remplaçant dans la deuxième on trouve : $\mathbf{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

Annexe 6 : Signalisation du risque radioactif : pictogrammes et panneaux

1- Signalisation

Les sources de rayonnements ionisants utilisées doivent être signalées y compris lors du transport. L'affichage doit être remis à jour périodiquement. Il rappelle notamment les risques d'exposition externe, et éventuellement interne, les consignes de travail adaptées à la nature de l'exposition et aux opérations envisagées ainsi que les consignes en cas d'urgence.

Les signaux d'avertissement doivent être placés sur les entrées de toute zone où les radiations ionisantes peuvent être présentes ainsi que sur tout appareil émettant des radiations.

2- Définition du pictogramme

Le pictogramme est un dessin figuratif ou une représentation graphique rendant explicite un objet ou un message dans les langues écrites. C'est également un symbole d'écriture ou un signe linguistique dans les langues non écrites. Contrairement au logo, le pictogramme n'est pas un nom mais une signification qui peut donner accès à « quelques choses ».

Les pictogrammes figureront sur les étiquettes du fournisseur des produits dangereux que vous utilisez au travail.

Le pictogramme a pour objectif d'être reconnu facilement pour l'action, l'objet ou le symbole qu'il représente.

Quelques exemples couramment utilisés dans le domaine de la radioprotection sont donnés dans le tableau suivant :





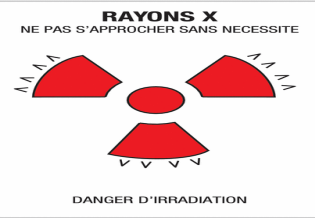

Pictogramme	Explication
	<p>Ce signal vise la signalisation des dangers liés aux radiations ionisantes que celles-ci soient produites par des matières radioactives ou par des appareils émettant des radiations ionisantes lors de leur mise sous tension (comme les appareils à Rx).</p>
	<p>Ce signal vise la signalisation des dangers liés aux radiations non ionisantes.</p>
	<p>Panneau de danger " Matières radioactives ou radiations ionisante" avec texte Franchissement réglementé risque de contamination informant vos employés d'un risque encouru dans cette zone.</p>
	<p>Signale les zones de travail où des habitudes particulières sont requises et où la surveillance du personnel est accentuée. Zone faisant l'objet de contrôle particulier renforcé. Ex : salle de scanner.</p>
	<p>Une signalisation claire, afin d'éviter tout risque d'irradiation.</p>
	<p>Selon l'institut de radioprotection et de sureté nucléaire (IRSN), l'organisation internationale de normalisation Iso vient de normaliser un nouveau pictogramme chargé d'avertir toute personne du danger présenté par une source radioactive. Ce pictogramme devrait être utilisé pour les sources dangereuses susceptibles de causer la mort ou des blessures sévères.</p>

Tableau des pictogrammes