

## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements.....</b>	<b>i</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>ix</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>I. PARTIE THEORIQUE</b>	
<b>1. Généralités sur la radioactivité et le rayonnement gamma .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. La radioactivité.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1. Définition.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.2. Décroissance radioactive.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.3. Période radioactive.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.4. Activité.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Processus d'interaction du rayonnement gamma avec la matière .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Les mécanismes d'interaction .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.2. L'effet photoélectrique.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.3. La diffusion Compton .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.4. La création de paire .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.5. L'atténuation des photons .....</b>	<b>8</b>
<b>2. La dosimétrie et la radioprotection .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. La dosimétrie .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.1. Définition.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2. Grandeurs dosimétriques .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.1. Dose absorbée .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.2. Débit de dose absorbée.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.2.3. KERMA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. La radioprotection.....</b>	<b>12</b>

<b>2.2.1. Définition.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2. Principes généraux de la radioprotection .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2.1. Justification de la pratique .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2.2. Optimisation de la protection.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2.3. Limitation des doses .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3. Moyens de protection .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3.1. Activité de la source .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3.2. Distance .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3.3. Temps d'exposition .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.3.4. Ecran .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.4. Grandeur et unités .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4.1. Grandeur de protection.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4.1.1. Dose équivalente .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4.1.2. Débit de dose équivalente .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4.1.3. Dose efficace.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4.2. Surveillances individuelles.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4.2.1. Dose équivalente en profondeur Hp(10).....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4.2.2. Dose équivalente en surface Hp(0.07).....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.4.3. Surveillances environnementales : Dose environnementale H*(d).....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.5. Réglementation.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Appareils de mesure de dose .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.1. Dosimètre Thermoluminescent (TLD) .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2. Débitmètre.....</b>	<b>19</b>
<b>II. PARTIE METHODOLOGIQUE</b>	
<b>3. Etalonnage en dosimétrie.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Définition.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2. Principe .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Approximation de la réponse .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4. Incertitude de mesure .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4.1. Définition de l'évaluation d'incertitude de type A .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4.2. Evaluation de type A .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5. Etalon.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6. Facteur d'etalonnage.....</b>	<b>24</b>

---

<b>3.7. Chaîne d'étalonnage.....</b>	<b>25</b>
<b>4. Les matériels utilisés .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1. La salle d'irradiation .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2. La chambre d'ionisation.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3. L'électromètre .....</b>	<b>27</b>
<b>4.4. Le baromètre .....</b>	<b>28</b>
<b>4.5. Le pupitre de commande de la source de Cs-137 .....</b>	<b>28</b>
<b>4.6. Les sources .....</b>	<b>29</b>
<b>4.7. Les atténuateurs de Pb.....</b>	<b>30</b>
<b>4.8. Les débitmètres à étalonner .....</b>	<b>30</b>
<b>4.9. La caméra pour la lecture des charges et le micro-ordinateur .....</b>	<b>34</b>
<b>III. PARTIE EXPERIMENTALE</b>	
<b>5. Présentation du lieu de stage .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1. L'INSTN-Madagascar .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2. La disposition de la salle d'irradiation .....</b>	<b>36</b>
<b>5.3. La salle de commande .....</b>	<b>39</b>
<b>6. Les procédures à suivre pour l'étalonnage des débitmètres .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1. Vérification de la stabilité du système chambre-électromètre .....</b>	<b>39</b>
<b>6.2. Détermination du débit de kerma dans l'air .....</b>	<b>40</b>
<b>6.2.1. Pour le Graetz X5DE .....</b>	<b>40</b>
<b>6.2.2. Pour le Graetz X5C .....</b>	<b>41</b>
<b>6.2.3. Pour l'Identifinder 2 .....</b>	<b>42</b>
<b>6.3. Conversion du débit de kerma dans l'air en dose équivalente ambiante.....</b>	<b>43</b>
<b>6.3.1. Pour le Graetz X5DE .....</b>	<b>43</b>
<b>6.3.2. Pour le Graetz X5C .....</b>	<b>44</b>
<b>6.3.3. Pour l'Identifinder 2 .....</b>	<b>44</b>
<b>6.4. Irradiation des débitmètres .....</b>	<b>44</b>
<b>6.4.1. Pour le Graetz X5DE .....</b>	<b>45</b>
<b>6.4.2. Pour le Graetz X5C .....</b>	<b>45</b>
<b>6.4.3. Pour l'Identifinder 2 .....</b>	<b>46</b>
<b>6.5. Calcul du facteur d'étalonnage .....</b>	<b>47</b>
<b>6.6. Linéarité de la réponse des trois (3) débitmètres et l'évaluation de l'incertitude du type A .....</b>	<b>50</b>

---

<b>7. Discussion générale .....</b>	<b>53</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>57</b>

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**ADC** : Analogue to Digital Converter

**AIEA**: Agence Internationale de l'Energie Atomique

**ALARA**: As Low As Released Achievable

**BIPM**: Bureau International de Poids et de Mesure

**CIPR** : Commission Internationale de Protection Radiologique

**CIUMR** : Commission Internationale des Unités de Mesure Radiologique

**EMT** : Erreurs Maximales Tolérées

**INSTN** : Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

**KERMA**: Kinetic Energy Released in Material

**LEPD**: Laboratoire Primaire d'Étalonnage en Dosimétrie

**LPNPA** : Laboratoire de Physique Nucléaire et de Physique Appliquée

**LSED** : Laboratoire Secondaire d'Étalonnage en Dosimétrie

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**PSDL**: Primary Standard Dosimetry Laboratory

**SRS**: Safety Reports Series

**SSDL**: Secondary Standard Dosimetry Laboratory

**TLD**: Thermo Luminescent Dosimeter

**VIM**: Vocabulaire International de Métrologie

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b> La décroissance radioactive .....	3
<b>Figure 2 :</b> Effet photoélectrique .....	6
<b>Figure 3 :</b> Effet Compton .....	7
<b>Figure 4 :</b> Création de paire.....	8
<b>Figure 5 :</b> Importance relative des trois types d'interaction en fonction de l'énergie $h\nu$ du photon et du numéro atomique du milieu .....	9
<b>Figure 6 :</b> Ecrans de protection pour différents types de rayonnements .....	15
<b>Figure 7 :</b> Chaîne d'étalonnage.....	25
<b>Figure 8 :</b> Salle d'irradiation.....	26
<b>Figure 9 :</b> Chambre d'ionisation.....	27
<b>Figure 10 :</b> Electromètre.....	27
<b>Figure 11:</b> Baromètre.....	28
<b>Figure 12:</b> Pupitre de commande de la source de Cs-137 .....	29
<b>Figure 13:</b> Source Cs-137.....	29
<b>Figure 14 :</b> Atténuateurs en plomb .....	30
<b>Figure 15 :</b> Débitmètre Graetz X5DE.....	31
<b>Figure 16 :</b> Débitmètre Graetz X5C .....	32
<b>Figure 17 :</b> Débitmètre Identifinder 2.....	34
<b>Figure 18:</b> Caméra .....	34
<b>Figure 19 :</b> Micro-ordinateur .....	34
<b>Figure 20 :</b> Disposition de la salle d'irradiation .....	38

<b>Figure 21:</b> Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma du Graetz X5DE .....	48
<b>Figure 22:</b> Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma du Graetz X5C .....	49
<b>Figure 23:</b> Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma de l'Identifinder 2 .....	49
<b>Figure 24 :</b> Linéarité de la réponse du débitmètre Graetz X5DE .....	50
<b>Figure 25:</b> Linéarité de la réponse du débitmètre Graetz X5C.....	51
<b>Figure 26:</b> Linéarité de la réponse du débitmètre Identifinder 2.....	51

## LISTE DES TABLEAUX

<b><u>Tableau I</u></b> : Période radioactive du Cs-137 et du Co-60 ainsi que leurs activités.....	4
<b><u>Tableau II</u></b> : Limites règlementaires en vigueur à Madagascar .....	18
<b><u>Tableau III</u></b> : Coefficient « t » en fonction des nombres de mesure .....	23
<b><u>Tableau IV</u></b> : Débit de kerma dans l'air avec différents atténuateurs du Graetz X5DE .....	41
<b><u>Tableau V</u></b> : Débit de kerma dans l'air avec différents atténuateurs du Graetz X5C.....	42
<b><u>Tableau VI</u></b> : Débit de kerma dans l'air avec différents atténuateurs de l'Identifinder 2 .....	43
<b><u>Tableau VII</u></b> : Dose équivalente ambiante du Graetz X5DE .....	43
<b><u>Tableau VIII</u></b> : Dose équivalente ambiante du Graetz X5C .....	44
<b><u>Tableau IX</u></b> : Dose équivalente ambiante de l'Identifinder 2 .....	44
<b><u>Tableau X</u></b> : Valeurs affichées sur le Graetz X5DE lors de son irradiation avec le Cs-137 .	45
<b><u>Tableau XI</u></b> : Valeurs affichées sur le Graetz X5C lors de son irradiation avec le Cs-137 ..	46
<b><u>Tableau XII</u></b> : Valeurs affichées sur l'Identifiner 2 lors de son irradiation avec le Cs-137 ..	46
<b><u>Tableau XIII</u></b> : Facteur d'étalonnage et écart des trois débitmètres .....	47
<b><u>Tableau XIV</u></b> : Facteur d'étalonnage en fonction du débit de kerma dans l'air des trois débitmètres .....	48
<b><u>Tableau XV</u></b> : Mesures faites avec un atténuateur de Pb de 50 mm à différentes distances des trois débitmètres .....	50
<b><u>Tableau XVI</u></b> : Mesures faites avec un atténuateur de Pb de 50 mm à une distance de 2m des trois débitmètres .....	52
<b><u>Tableau XVII</u></b> : Valeur calculée à partir des valeurs de l'éalon de référence des trois débitmètres .....	53

## **INTRODUCTION**

La radioactivité est un phénomène qui existe depuis que les atomes se sont formés, il y a des milliards d'années, au commencement de l'univers. Elle fut découverte en 1896 par Henri Becquerel qui travaillait sur les rayons X.

Comme les rayonnements ionisants ne sont pas perceptibles par nos cinq sens, des détecteurs ont été conçus pour détecter la présence des radionucléides et mesurer leur activité.

Pour cela le Département de Dosimétrie et de Radioprotection de INSTN-Madagascar possède un Laboratoire Secondaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LSED) qui assure l'étalonnage des dosimètres utilisés pour la détection et la mesure des grandeurs physiques. Les besoins en radioprotection nécessitent l'étalonnage et la vérification de ces dosimètres.

Notre étude est basée sur la détermination de la fiabilité des appareils de mesure après l'étalonnage au Laboratoire Secondaire d'Etalonnage en Dosimétrie.

Le présent travail intitulé « Etalonnage des débitmètres pour la détection des rayonnements gamma » est divisé en trois grandes parties.

Une présentation générale du domaine d'étude est décrite dans la première partie, concernant les généralités sur la radioactivité et le rayonnement gamma, la dosimétrie et la radioprotection.

La deuxième partie expose la méthodologie comme l'étalonnage en dosimétrie et les matériels utilisés lors du présent travail.

Enfin dans la troisième partie sera présenté le lieu de stage suivi des procédures à suivre pour l'étalonnage des débitmètres ainsi que les résultats d'étalonnage des débitmètres et quelques discussions.

La conclusion générale est basée sur les résultats obtenus, sur les techniques, ainsi que sur les suggestions pour l'amélioration du laboratoire d'étalonnage.

# **I. PARTIE THEORIQUE**

## 1. Généralités sur la radioactivité et le rayonnement gamma

### 1.1. La radioactivité

#### 1.1.1. Définition

La radioactivité est une propriété de certains éléments chimiques à se transformer spontanément en d'autres éléments par désintégration du noyau atomique avec émission de particules accompagnées par des ondes électromagnétiques. La radioactivité peut être naturelle ou artificielle mais le phénomène est le même.

La radioactivité est naturelle quand les noyaux sources ont été produits dans la nature. Les sources terrestres occasionnent la majeure partie de l'exposition naturelle.

La radioactivité artificielle est générée par le bombardement des noyaux stables par des particules nucléaires comme les particules alpha et les neutrons. Il s'agit des isotopes synthétisés par l'homme dans les laboratoires et les centrales nucléaires.

#### 1.1.2. Décroissance radioactive

La décroissance radioactive donne la variation du nombre  $dN$  de noyau, lors de la désintégration nucléaire spontanée, en fonction de la durée de temps infiniment petit  $dt$ . Il s'agit d'une relation de proportionnalité entre le nombre d'atomes radioactifs et la durée de temps ( $dt$ ), soit :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (1)$$

Avec  $\lambda$  est la constante radioactive

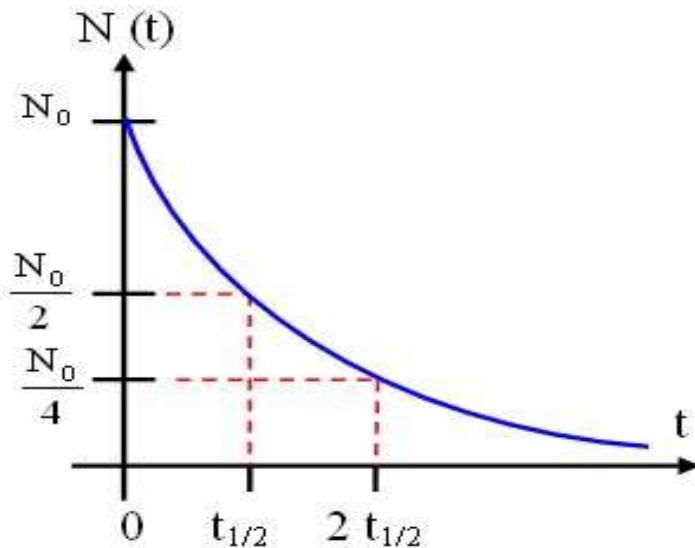
Par intégration en fonction du temps, on obtient :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Où  $N(t)$  : le nombre d'atomes radioactifs présents à l'instant  $t$ .

$N_0$  : le nombre d'atomes radioactifs présents à l'instant initial.

Le phénomène de désintégration radioactive est indépendant de la température, de la pression, de l'état physique du corps et de toute combinaison chimique. L'allure de la décroissance est typiquement représentée par la figure 1.



**Figure 1 :** Courbe de la décroissance radioactive

### 1.1.3. Période radioactive

La période radioactive est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes radioactifs présents initialement se soit désintégrée. Elle est aussi appelée « demi-vie ». Elle est utilisée pour décrire le temps avec lequel un radionucléide se désintègre.

A  $t=T$ , on a

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (3)$$

En remplaçant  $N$  dans la relation (4), on obtient :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad (4)$$

D'où la période radioactive:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5)$$

### 1.1.4. Activité

L'activité d'un radionucléide est le nombre de désintégrations qui se produisent par unité de temps dans une quantité donnée de ce radionucléide. Elle est définie comme étant

le nombre de désintégrations par seconde des matériaux radioactifs.

L'activité **A** d'un radionucléide est le quotient du nombre **dN** de désintégrations nucléaires spontanées qui se produisent dans une quantité de matière par un intervalle de temps **dt**.

$$A = \left| -\frac{dN}{dt} \right| \quad (6)$$

Suivant la loi de décroissance radioactive, si à l'instant initial, **A<sub>0</sub>** est l'activité initiale, à l'instant t, l'activité radioactive est donnée par :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

L'unité de l'activité d'une source radioactive dans le système international est le **Becquerel (Bq)**. 1Bq correspond à une désintégration par seconde.

L'unité primaire est le **Curie(Ci)** qui correspond au nombre de désintégrations en une seconde dans un gramme de Radium-226.

**1Ci** correspond à **3,7.10<sup>10</sup> Bq**, ou **37 GBq**.

Le tableau II donne un exemple spécifique sur l'activité du radionucléide Cs-137 et du Co-60.

<b>Radionucléide</b>	<b>Période radioactive</b>	<b>Activité</b>
Césium-137	30,15 ans	296 MBq (Juillet 1993)
Cobalt 60	5,27 ans	3,7 GBq (27 Novembre 1995)

**Tableau II:** Période radioactive du Cs-137 et du Co-60 ainsi que leur activité

## 1.2. Processus d'interaction du rayonnement gamma avec la matière

### 1.2.1. Les mécanismes d'interaction

Les photons gamma sont des radiations électromagnétiques qui proviennent des transitions nucléaires ou des annihilations.

$$e^+ + e^- = \gamma_1 + \gamma_2$$

En pénétrant dans la matière, les photons gamma peuvent interagir avec les atomes de différentes matières. Ces interactions sont dues :

- aux électrons atomiques
- aux noyaux
- au champ électrique du noyau ou des négatons.

L'absorption d'un photon gamma est due essentiellement à trois effets : l'effet photoélectrique, l'effet Compton et l'effet de matérialisation ou la création des paires.

### 1.2.2. L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique consiste en l'absorption complète d'un photon par un atome, l'énergie du photon étant transférée à un négaton interne du cortège atomique qui se trouve éjecté.

On qualifie alors cet électron de photoélectrique. Celui-ci emporte une énergie cinétique :

$$E = h\nu - E_l \quad (8)$$

Où  $h\nu$  : l'énergie du photon incident avec  $h$ : la constante de Planck et  $\nu$  : la longueur d'onde

$E_l$  : l'énergie de liaison du négaton dans l'atome

Pour que l'effet photoélectrique se produise, il faut que le photon cède au négaton une énergie supérieure à son énergie de liaison pour les couches les plus internes de l'atome. Celle-ci varie de quelques kiloélectronvolts (keV) pour les matériaux légers à quelques dizaines de kiloélectronvolts (keV) pour les matériaux lourds.

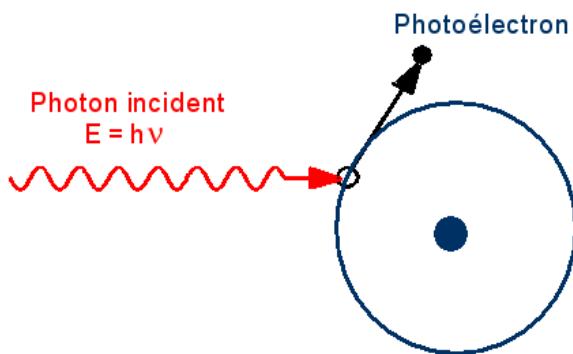
La section efficace de l'effet photoélectrique varie suivant l'équation (9).

$$\sigma_{photon} = C \frac{Z^{4,5}}{(h\nu)^3} \quad (9)$$

Où  $C$  est une constante et  $Z$  est le numéro atomique

Cet effet est donc prédominant à basse énergie et est favorisé dans les matériaux lourds. On considère essentiellement les couches électroniques K et L, car 80% de l'effet photoélectrique se produit avec des négatons de la couche K pour des photons suffisamment énergétiques pour apporter l'énergie de liaison correspondante.

L'effet photoélectrique est toujours suivi d'un arrangement du cortège électronique, c'est-à-dire qu'un négaton d'une couche supérieure vient combiner l'orbite vacante du photoélectron.



**Figure 2:** Effet photoélectrique

### 1.2.3. La diffusion Compton

Il s'agit de la diffusion d'un photon sur un négaton externe du cortège atomique que l'on peut considérer comme libre, l'énergie de liaison du négaton de la couche de valence est négligeable ainsi que le transfert d'une partie de l'énergie du photon incident au négaton.

L'énergie  $E'$  du photon diffusé se déduit des lois de conservation de l'impulsion et de l'énergie :

$$E' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \quad (10)$$

L'énergie transférée au négaton est :

$$E_{e^-} = \frac{h\nu}{1 + \frac{mc^2}{h\nu}(1 - \cos\theta)} \quad (11)$$

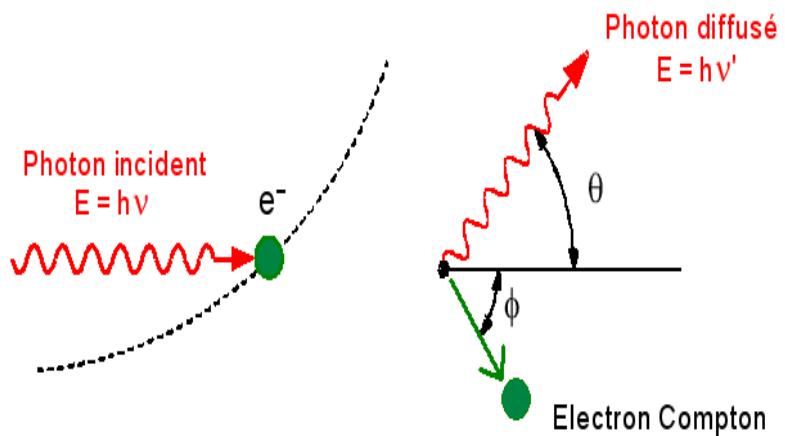
Où  $mc^2$  : l'énergie au repos du négaton

$\theta$  : l'angle de diffusion du photon gamma

$h\nu$  : l'énergie du photon incident

Pour un faisceau d'énergie  $E = h\nu$ , la probabilité que ce photon se diffuse suivant un certain angle  $\theta$  donné est exprimée par la section efficace Compton  $\sigma_c$ .

$$\sigma_c = C \cdot Z \cdot E^{-1} \quad (12)$$

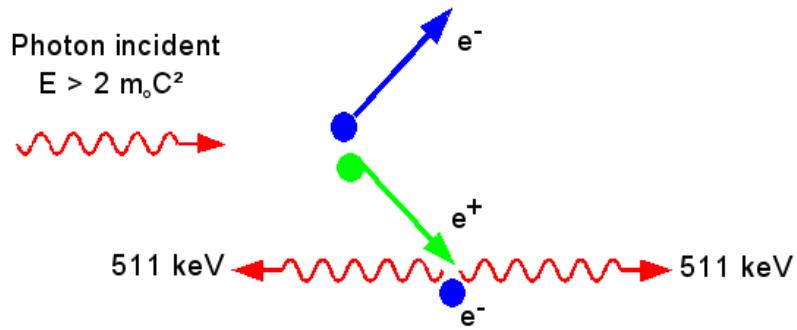


**Figure 3:** Effet Compton

#### 1.2.4. La création de paire

Ce phénomène consiste en la disparition d'un photon et la création d'un positon et d'un négaton. On parle aussi de la matérialisation d'un photon en un négaton et en un positon. C'est une réaction à seuil qui n'est possible que pour des énergies des photons incidents supérieurs à  $2mc^2 = 1,022 \text{ MeV}$ . L'excédent d'énergie étant emporté par le négaton et le positon sous forme d'énergie cinétique :

$$E_{e^-} = E_{e^+} = \frac{1}{2}(h\nu - mc^2) \quad (13)$$



**Figure 4:** Création de paire

### 1.2.5. L'atténuation des photons

Les photons interagissent très peu avec la matière. Ainsi, la probabilité pour qu'un photon traverse une épaisseur d'une matière sans interagir est élevée : un photon de 1 MeV a 74% de chances de ne subir aucune interaction en traversant 1 cm de Germanium. C'est pourquoi on ne parle pas de parcours des photons dans la matière mais plutôt de leur libre parcours moyen. Il s'agit de la distance moyenne parcourue par un photon d'énergie donnée avant la première interaction dans un matériau.

De même, on utilise la notion de coefficient d'atténuation résultant des différentes interactions que peut subir un photon dans un matériau.

Considérons un faisceau de photon monoénergétique traversant une épaisseur  $x$  d'un matériau. Le nombre de photons transmis  $I$  dépend du nombre total de photons émis par la source  $I_0$  comme l'indique la loi d'atténuation suivante :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (14)$$

Où  $\mu$  : le coefficient d'atténuation linéique totale, qui est relié au libre parcours moyen  $L_f$

avec

$$L_f = \frac{\int_0^\infty x e^{-\mu x} dx}{\int_0^\infty e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (15)$$

Où  $L_f$  : libre parcours moyen

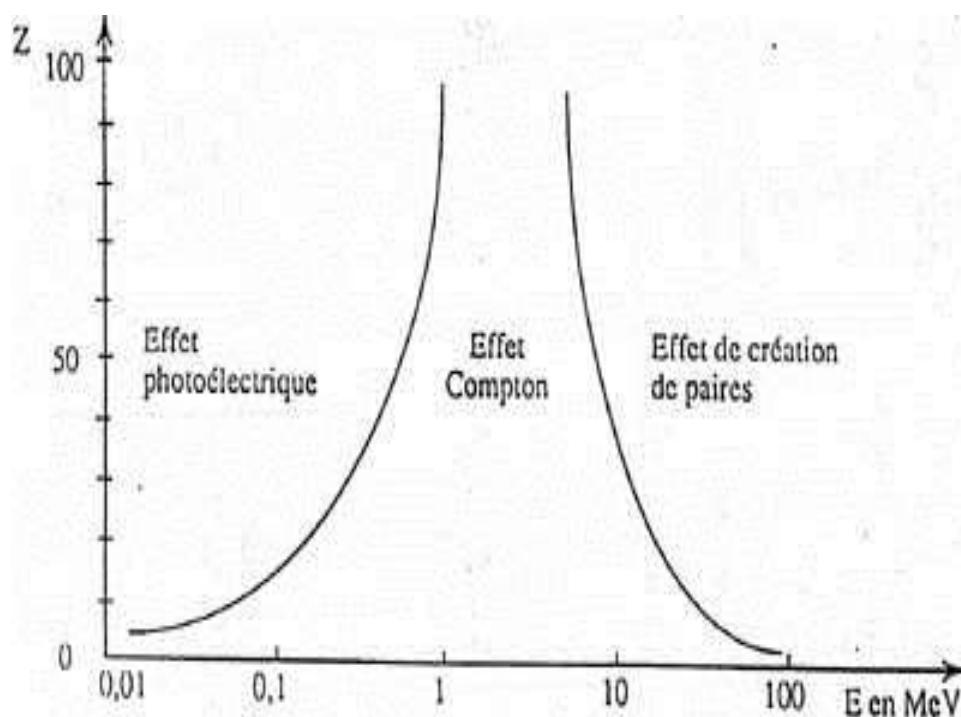
Le faisceau de photons gamma en traversant la matière subit une atténuation. Ainsi les trois types d'interaction tels que : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paire ont leur propre coefficient d'atténuation.

Où  $\mu_{\sigma_{photon}}$  : coefficient d'atténuation de l'effet photoélectrique

$\mu_{\sigma_c}$  : coefficient d'atténuation de la diffusion Compton

$\mu_k$  : coefficient d'atténuation de la création de paire

La figure 5 montre les zones de prédominance selon le type d'interaction.



**Figure 5 :** Importance relative des trois types d'interaction en fonction de l'énergie  $h\nu$  du photon et du numéro atomique du milieu

#### Explication de la figure 5 :

- L'effet photoélectrique est dominant à basse énergie. Dans les matériaux lourds, il cesse de l'être à partir de 500 keV.
- A haute énergie, c'est l'effet de production de paire qui est prédominant, il commence à le devenir à partir de 5 MeV dans les matériaux de  $Z$  élevée.

- Entre les deux, se situe un domaine où c'est l'effet Compton qui domine. Pour les milieux de faible Z (carbone, air, eau, tissus humains), ce domaine est extrêmement large (de  $\approx 20 \text{ keV}$  à  $\approx 3 \text{ keV}$ ) [8],[15].

## **2. La dosimétrie et la radioprotection**

### **2.1. La dosimétrie**

#### **2.1.1. Définition**

La dosimétrie est le traitement de mesure de dose ou de débit de dose absorbée résultant de l'interaction des rayonnements ionisants avec la matière dans un milieu.

Pour vérifier les doses émises par les sources radioactives, la dosimétrie active consiste à mesurer les doses environnantes et les débits de dose, paramètres très importants à connaître en cas d'irradiation accidentelle.

#### **2.1.2. Grandeurs dosimétriques**

Les normes concernant les grandeurs et unités dosimétriques sont essentiellement fondées sur les recommandations de la CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) et de la CIUMR (Commission Internationale des Unités et des Mesures Radiologiques). Ces grandeurs dosimétriques servent à caractériser l'effet physique des rayonnements ionisants sur la matière en termes d'énergies transférées ou déposées.

##### **2.1.2.1. Dose absorbée**

La dose absorbée **D** est une grandeur fondamentale en dosimétrie. Elle est l'énergie transmise par un rayonnement par unité de masse de l'organe ou tissu traversé.

Elle est donnée par la relation :

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (16)$$

Où **E** : l'énergie du rayonnement exprimée en **J (joule)**.

**m** : la masse de l'organe traversé exprimée en **kg (kilogramme)**.

L'unité de la dose absorbée est le **gray (Gy)** et **1Gy (gray)** vaut  **$1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  (joule par kilogramme)**.

Dans la pratique, on utilise les sous-multiples de Gy (**gray**) tels que le **mGy**, **µGy**.

#### 2.1.2.2. Débit de dose absorbée

Le débit de dose absorbée correspond à la quantité d'énergie qui est absorbée localement par les tissus pendant un intervalle de temps.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (17)$$

L'unité du débit de dose absorbée est le **Gy.h<sup>-1</sup> (gray par heure)**.

Cette notion de débit de dose absorbée permet d'expliquer les effets déterministes sur l'organisme au cours d'une période bien déterminée.

Les effets déterministes sont l'ensemble des effets pour lesquels il existe un seuil d'apparition en fonction du niveau d'exposition. Ce sont des effets obligatoires à partir d'une dose seuil de 0,1 Sv délivrée en une seule fois, au-delà de laquelle, la gravité de l'effet est proportionnelle à la dose. Ces effets sont liés à la mort cellulaire et détectable lorsque le nombre de cellules tuées est assez élevé.

#### 2.1.2.3. KERMA (Kinetic Energy Released in Material)

Le Kerma est l'énergie cinétique de la première particule chargée issue de l'interaction d'un rayonnement indirectement ionisant avec la matière.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (18)$$

Où **dE<sub>tr</sub>** : la somme des énergies cinétiques initiales de toutes les particules chargées libérées par des particules ionisants non chargées dans une masse **dm** d'un matériau donné. C'est donc une grandeur utilisée pour les photons et les neutrons qui sont indirectement ionisants.

L'unité SI de kerma est le **J.kg<sup>-1</sup> ou Gy**.

Le débit de Kerma est défini par :

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (19)$$

L'unité du débit de kerma est **Gy.h<sup>-1</sup>**.

## **2.2. La radioprotection**

Toute exposition associée aux risques causés par les rayonnements ionisants peut engendrer des dangers néfastes pour l'homme. Pour le protéger, un système de protection contre les rayonnements ionisants est instauré, c'est la « *Radioprotection* ».

### **2.2.1. Définition**

La radioprotection est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour protéger les travailleurs, le public et l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements ionisants.

### **2.2.2. Principes généraux de la radioprotection**

La radioprotection se base sur trois principes :

- la justification de la pratique
- l'optimisation de la protection et de la sûreté
- la limitation des doses.

#### **2.2.2.1. Justification de la pratique**

Une pratique ou une source associée à une pratique ne devrait pas être utilisée et autorisée que si la pratique procure aux individus exposés ou la société un avantage suffisant pour compenser les effets radiologiques nocifs qu'elle pourrait entraîner, c'est-à-dire la pratique est justifiée compte tenu des facteurs sociaux et économiques et d'autres facteurs pertinents.

#### **2.2.2.2. Optimisation de la protection**

Pour l'exposition due à toute source associée à une pratique sauf dans les cas des expositions médicales et thérapeutiques, la protection et la sûreté sont optimisées de façon que la valeur des doses individuelles, le nombre des personnes exposées et la probabilité de subir des expositions soient maintenues au niveau le plus bas qu'il est raisonnablement possible d'atteindre (**A.L.A.R.A** : **As Low As Reasonably Achievable**). Les facteurs économiques et sociaux de la dose délivrée par la source aux individus doivent faire l'objet de contrainte de dose.

### **2.2.2.3. Limitation des doses**

L'exposition normale des individus est restreinte de façon que ni la dose effective totale, ni la dose équivalente totale aux organes ou tissus conservés résultant de l'association éventuelle d'exposition due à des pratiques autorisées, ne dépasse pas toute limite de dose applicable qui est spécifiée dans la réglementation nationale en vigueur.

## **2.2.3. Moyens de protection**

La réduction de l'exposition des individus travaillant sous rayonnements ionisants peut s'opérer sur quatre facteurs : l'activité de la source, la distance, le temps d'exposition et l'écran.

### **2.2.3.1. Activité de la source**

L'activité d'une source est toujours élevée. Il faut bien vérifier que l'activité de la source utilisée soit strictement minimale, nécessaire pour la pratique.

### **2.2.3.2. Distance**

A mesure qu'on s'éloigne de la source de rayonnement, on diminue le risque d'exposition. Il faut maintenir la plus grande distance possible entre la source de rayonnement et le manipulateur sans influencer sur l'efficacité du travail à réaliser.

On peut calculer la dose à une distance précise par la relation :

$$\dot{D}_1 d_1^2 = \dot{D}_2 d_2^2 \quad (20)$$

Où  $\dot{D}_1$  : le débit de dose à une distance  $d_1$

$\dot{D}_2$  : le débit de dose à une distance  $d_2$

Ainsi, si on veut calculer le débit de dose à une distance donnée, on utilise la formule

$$\dot{D}_2 = \dot{D}_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (21)$$

Réiproquement, la distance s'obtient avec :

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{\dot{D}_1}{\dot{D}_2}} \quad (22)$$

### 2.2.3.3. Temps d'exposition

Plus on passe beaucoup de temps au voisinage de la source de rayonnement, plus la probabilité d'exposition est élevée. Donc, le temps est un moyen de protection le plus simple pour réduire l'exposition aux rayonnements ionisants.

Alors on doit réduire au minimum strictement nécessaire le temps passé aux alentours de la source. Les mesures à mettre en œuvre pour minimiser le temps d'exposition :

- ❖ bien planifier son intervention ou son expérience
- ❖ simuler au préalable son intervention
- ❖ si possible partager le temps d'exposition
- ❖ tenir compte des formations reçues.

### 2.2.3.4. Ecran

On peut utiliser comme écran les matériaux permettant de stopper les rayonnements ionisants. Dans le cas d'une exposition externe, il est possible d'utiliser des écrans de protection entre la source et les personnes. Ces écrans sont choisis en fonction des caractéristiques des rayonnements ionisants émis.

Pour avoir l'épaisseur de l'écran nécessaire pour réduire la dose dans le cas des photons, on peut utiliser la relation suivante :

$$\dot{D} = \dot{D}_0 e^{-\mu x} \quad (23)$$

Où  $\dot{D}$  : le débit de dose avec écran

$\dot{D}_0$  : le débit de dose sans écran

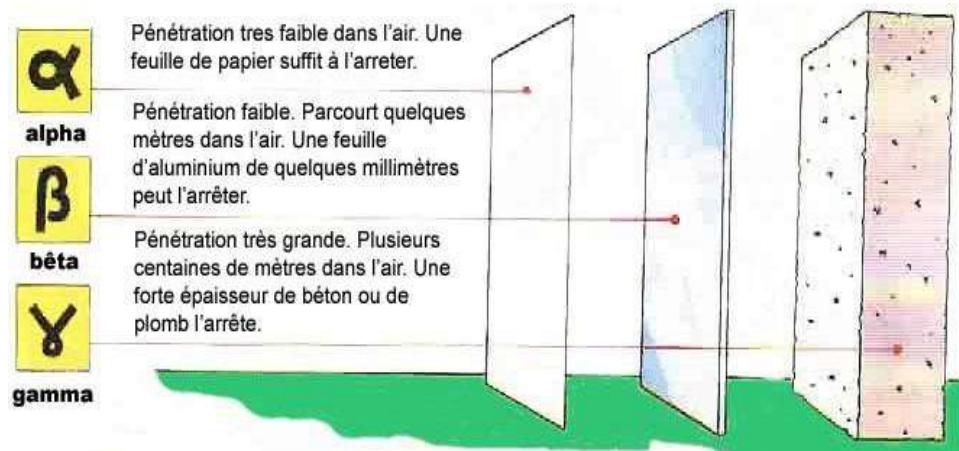
$\mu$  : le coefficient d'atténuation linéique du matériau

$x$  : l'épaisseur de l'écran nécessaire

On obtient l'épaisseur de l'écran :

$$x = \frac{1}{\mu} \ln \frac{\dot{D}_0}{\dot{D}} \quad (24)$$

La figure 6 montre les écrans pour stopper les rayonnements ionisants.



**Figure 6 :** Ecrans de protection pour différents types de rayonnements

#### 2.2.4. Grandeur et unités

##### 2.2.4.1. Grandeur de protection

Les grandeurs de protection sont destinées à quantifier le risque encouru par un individu lorsqu'il est soumis à une exposition interne ou externe.

###### 2.2.4.1.1. Dose équivalente

La dose équivalente **H** est l'énergie transmise par un rayonnement à la masse de l'organe ou tissu traversé en tenant compte de la qualité du rayonnement.

Elle est donnée par la relation :

$$H = w_R \cdot D \quad (25)$$

Où **w<sub>R</sub>** : un facteur de pondération pour le rayonnement R.

**D** : la dose absorbée (**Gy**)

La dose équivalente est exprimée en **sievert (Sv)**.

Si on a plusieurs rayonnements, alors la dose équivalente est donnée par :

$$H = \sum_R w_R \cdot D \quad (26)$$

#### 2.2.4.1.2. Débit de dose équivalente

Le débit de dose équivalente est la variation de dose équivalente pendant l'intervalle de temps  $dt$ .

Il est représenté par la relation :

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (27)$$

Le débit de dose équivalente est exprimé en **Sv.h<sup>-1</sup>**.

#### 2.2.4.1.3. Dose efficace

La dose efficace est une grandeur notée par  $E$ , définie comme étant le produit des doses équivalentes aux tissus ou organes par leurs facteurs de pondération tissulaires respectifs en tenant compte de la radiosensibilité du tissu ou organe exposé.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (28)$$

Où  $w_T$ : facteur de pondération tissulaire pour le tissu T

$H_T$  : dose équivalente au tissu T

La dose efficace est exprimée en **sievert (Sv)**.

Le débit de dose efficace est la variation de dose effective  $dE$  par unité de temps  $dt$ .

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} \quad (29)$$

Le débit de dose efficace est exprimé en **Sv.h<sup>-1</sup>**.

#### 2.2.4.2. Surveillances individuelles

L'équivalent de dose individuelle,  $H_p(d)$ , est l'équivalent de dose au tissu mou en dessous d'un point spécifié de la surface du corps à une profondeur appropriée  $d$ .

##### 2.2.4.2.1. Dose équivalente en profondeur $H_p(10)$

Pour les rayonnements très pénétrants, une profondeur de 10 mm est recommandée avec la notation  **$H_p(10)$** . On l'appelle dose en profondeur.

#### 2.2.4.2.2. Dose équivalente en surface $H_p(0.07)$

La valeur recommandée de  $d$  est 0,07 mm pour les rayonnements peu pénétrants, d'où la notation  **$H_p(0,07)$** . On l'appelle dose à la peau.

#### 2.2.4.3. Surveillances environnementales : Dose environnementale $H^*(d)$

La dose environnementale  **$H^*(d)$**  est l'équivalent de dose qui serait produit par le champ unidirectionnel et expansé correspondant dans la sphère CIUMR à une profondeur  $d$  sur le rayon opposé à la direction du champ unidirectionnel. Une profondeur de 10mm est recommandée pour les rayonnements très pénétrants.

### 2.2.5. Règlementations

La détention et l'utilisation des sources radioactives ont besoin d'une réglementation très rigoureuse pour une sûreté maximale des travailleurs ainsi que du public. Cette réglementation doit être conforme à la loi n° 97-041 du 02 Janvier 1998 relative à la protection contre les dangers des rayonnements ionisants et à la gestion des déchets radioactifs à Madagascar qui est basée sur la norme de sécurité de l'AIEA n° 115 (BSS 115).

Les quatre décrets d'application de cette loi ont été promulgués en 2002.

- **Le décret N°2002-569 :** Fixant les attributions et le fonctionnement des divers organes chargés de la protection contre les dangers des rayonnements ionisants et de déchets radioactifs à Madagascar.
- **Le décret N°2002-1161 :** Fixant les principes généraux régissant la détention et l'utilisation des sources de rayonnements ionisants destinés à des fins médicales ou odontostomatologie.
- **Le décret N° 2002-1199 :** Fixant les principes généraux de la protection contre les dangers des rayonnements ionisants.
- **Le décret N°2002-1274 :** Fixant les principes généraux de la gestion des déchets radioactifs.

La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) est un élément qui contribue à l'élaboration de ces lois. La CIPR est un organisme regroupant des spécialistes du nucléaire et de la santé qui fournit les recommandations relatives aux principes et aux

normes de radioprotection qui servent de base à l'élaboration de la réglementation.

Concernant l'exposition du fait des activités humaines, les normes internationales de radioprotection comportent trois (3) principes repris par la Directive européenne 96/29 du 13 mai 1996 (recommandations adoptées par le CIPR en 1985):

- la justification de la pratique
- l'optimisation de la sûreté et la protection
- la dose maximale annuelle admissible

Le principe de limitation indique que l'exposition doit être maintenue strictement en dessous de limites, afin de garantir que, la personne exposée ne présentera pas d'effets déterministes et que le risque dû aux effets stochastiques sera maintenu à un niveau acceptable. La loi et ses décrets d'application sont basés sur la publication N°60 de la Commission Internationale de Protection Radiologique en 1991 et les Normes Fondamentales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements ionisants de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique en 1997.

Dans le but d'atteindre le principe d'optimisation de la protection et de la sûreté, les normes internationales en vigueur établissent que les doses doivent être limitées.

Situations d'exposition planifiée	Exposition professionnelle	20 mSv par an en moyenne sur cinq(5) années consécutives (100 msv en cinq ans) et 50 mSV en une seule année
	Exposition du public	Une dose efficace de 1mSv par an
Situation d'exposition existante	Exposition du public	Une dose efficace de 1 à 20 mSv par an

*Source : Décrets 2002-1199 du 07.10.2002 Fixant les principes généraux de la protection contre les rayonnements ionisants*

**Tableau II** : Limites réglementaires en vigueur à Madagascar

## **2.3. Appareils de mesure de dose**

### **2.3.1. Dosimètre Thermoluminescent (TLD)**

Un dosimètre Thermoluminescent (TLD) est un dispositif de détection de rayonnement ionisant. Il est utilisé pour la surveillance de la dose personnelle. Il mesure les doses équivalentes en surface  $H_p(0.07)$  et en profondeur  $H_p(10)$  de la personne qui le porte.

La lecture du TLD peut être faite selon des périodes variables : mensuelle, bimensuelle, trimestrielle, ou même biannuelle selon le planning du responsable de lecture. Mais pour le cas de Madagascar, la lecture du TLD se fait tous les trois mois à l’Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar).

### **2.3.2. Débitmètre**

Un débitmètre est un appareil de mesure de dose délivrée par une source de rayonnement ionisant. Il détecte la dose équivalente ambiante. C'est un dosimètre actif ou à lecture directe.

## **II. PARTIE METHODOLOGIQUE**

### **3. Etalonnage en dosimétrie**

#### **3.1. Définition**

L'etalonnage est la méthode qui consiste à comparer la valeur donnée par l'appareil à celle d'une valeur étalon donnée par le Laboratoire Primaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LPED) qui est secondée par le Laboratoire Secondaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LSED) afin d'assurer que la précision ou la réponse de l'appareil soit fiable.

#### **3.2. Principe**

Les principaux objectifs de l'etalonnage sont de:

- s'assurer que l'instrument fonctionne correctement et qu'il convient donc au but visé.
- déterminer l'indication d'un instrument en fonction de la valeur de mesure (la quantité à mesurer) dans un ensemble contrôlé de conditions normalisées. Cela doit être fait sur toute la gamme d'indication de l'instrument.
- ajuster l'etalonnage de l'instrument, si possible, afin que la précision de mesure globale de l'instrument soit optimisée.

Dans le rapport de sécurité SRS N°16, une gamme complète d'équipements et de techniques d'etalonnage est décrit. Toutefois, la portée des tâches exécutées par une installation particulière dépendra des types d'instruments qui doivent être étalonnés, ainsi que des conditions dans lesquelles les instruments sont susceptibles d'être utilisés. Les installations peuvent aller de celles qui effectuent des étalonnages de routine ou des contrôles à l'aide d'assemblages simples à des laboratoires hautement sophistiqués où des caractéristiques détaillées de réponse énergétique peuvent être déterminées. Les établissements les plus sophistiqués disposeront d'une gamme d'instruments de référence et de sources de référence qui, en général, seront comparés aux normes primaires nationales qui peuvent elles-mêmes faire l'objet d'une comparaison internationale.

#### **3.3. Approximation de la réponse**

L'approximation de la réponse est obtenue à partir de la comparaison entre la valeur mesurée et la valeur calculée du débit de dose absorbée.

La valeur calculée est donnée par la relation:

$$\frac{\dot{D}_1}{\dot{D}_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (30)$$

Où  $\dot{D}_1$  : le débit de dose à une distance  $d_1$

$\dot{D}_2$  : le débit de dose à une distance  $d_2$

### **3.4. Incertitude de mesure**

En métrologie, une incertitude de mesure caractérise la dispersion des valeurs attribuées à une mesure, à partir des informations utilisées.

- sa définition considérée comme une dispersion, elle fait appel à des notions de statistique;
- les causes de cette dispersion liées à différents facteurs influent sur le résultat de mesure, donc sur l'incertitude ;

Elle comprend de nombreuses composantes qui sont évaluées de deux façons différentes :

- certaines peuvent être évaluées par une évaluation dite de type A c'est-à-dire par une analyse statistique.
- Les autres composantes, peuvent être évaluées par une évaluation dite de type B par d'autres moyens, par exemple les facteurs influençant le système étalon et l'instrument.

#### **3.4.1. Définition de l'évaluation d'incertitude de type A**

L'évaluation d'une composante de l'incertitude de mesure par une analyse statistique des valeurs mesurées est obtenue dans des conditions définies de mesure.

Divers types de conditions sont à considérer telles que:

- La condition de répétabilité: condition de mesure comprenant la même procédure de mesure, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, en faisant des mesures répétées sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps;

- La condition de reproductibilité: condition de mesure comprenant soit des procédures de mesure, des lieux, des opérateurs ou des systèmes de mesure différents, mais avec des mesures répétées sur le même objet ou des objets similaires.

### 3.4.2. Evaluation de type A

#### Pour un grand nombre de mesure ( $n \geq 30$ )

Lorsqu'on fait une étude statistique d'une expérience, on répète « n » fois une mesure de la grandeur. On considère que la meilleure estimation varie pour la grandeur cherchée est la moyenne des valeurs donnée par :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (31)$$

L'incertitude sur cette moyenne est donnée par l'écart-type de la distribution des « n » mesures :

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (32)$$

Puis on calcule l'écart-type sur la moyenne qui sera l'incertitude-type :

$$\sigma_x = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (33)$$

#### Pour un petit nombre de mesures ( $n < 30$ )

Pour ce cas, on utilise la méthode de STUDENT : elle consiste à donner le coefficient de l'écart-type sur la moyenne en fonction du nombre de mesures effectuées. Ce coefficient, noté « t », est adapté à un intervalle de confiance. On peut choisir de faire confiance à 68% ou 95% à notre incertitude, les coefficients « t » sont donc donnés dans le tableau suivant:

Nombre de mesure n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coefficient t à 68%	1,84	1,32	1,20	1,14	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06
Coefficient t à 95%	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26

Source: «Incertitudes expérimentales», Février2013, page 10

**Tableau III:** Coefficient « t » en fonction des nombres de mesure

Le calcul de l'incertitude sera alors comme suit :

$$\sigma_x = t * \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (34)$$

### 3.5. Etalon

Dans le Laboratoire Primaire d'Etalonnage en dosimétrie (LPED), on irradie la chambre d'ionisation de l'étalon afin de collecter les charges de l'électromètre pour une source connue.

L'étalon de référence est défini par la dose équivalente ambiante à 10 mm **H\*(10)** relatif à chaque valeur de la charge obtenue au moment de l'étalonnage.

Avant de procéder à l'étalonnage, il est important de connaître les conditions standards de température et de pression, qui sont :

**T<sub>0</sub>= 20°C**

**P<sub>0</sub>= 1013,25mBar**

Ensuite, il faut appliquer les formules ci-après (35), (36), (37) pour obtenir la dose équivalente ambiante.

#### ➤ Facteur de correction de température et de pression

Il est exprimé à partir des conditions standards de température et de pression avec l'expression suivante :

$$k_{TP} = \frac{(273.2+T) \times P_0}{(273.2+T_0) \times P} \quad (35)$$

Où **T** : température dans la salle d'irradiation au moment de la mesure

**P** : pression dans la salle d'irradiation au moment de la mesure

➤ **Kerma dans l'air**

C'est la dosimétrie des faisceaux de particules sans charge. Il est noté par **K<sub>a</sub>** exprimé en gray par seconde (**Gy.s<sup>-1</sup>**).

$$K_a = \bar{M} \times N \times k_{TP} \quad (36)$$

Où **ℳ**: valeur de la charge obtenue à partir de l'électromètre

**N**: coefficient d'étalonnage obtenu à partir de **H\*(10)** qui est la valeur conventionnelle de la quantité à mesurer par rapport à la valeur **ℳ** indiquée par l'instrument. Ici **N=25,2μGy.nC<sup>-1</sup>**.

➤ **Dose équivalente ambiante**

La valeur référence de l'étalonnage **H\*(10)** exprimée en Sievert par heure (**Sv.h<sup>-1</sup>**) est donnée par la relation :

$$H^*(10) = h \times K_a \quad (37)$$

avec **h** : coefficient de conversion pour l'incidence normale obtenue par la table « Sources de radionucléides et le photon à haute énergie », SRS16, page 61 exprimé en **Sv.Gy<sup>-1</sup>**.

### 3.6. Le facteur d'étalonnage et l'écart

❖ **Le facteur d'étalonnage**

Le facteur d'étalonnage noté **N<sub>k</sub>** en appliquant les conditions de référence est donné par la formule suivante :

$$N_k = \frac{H^*(10)}{\bar{M}} \quad (38)$$

❖ **L'écart entre la valeur réelle et la valeur mesurée**

L'écart ou l'erreur intrinsèque relative, exprimé en pourcentage, est défini par la

formule ci-après :

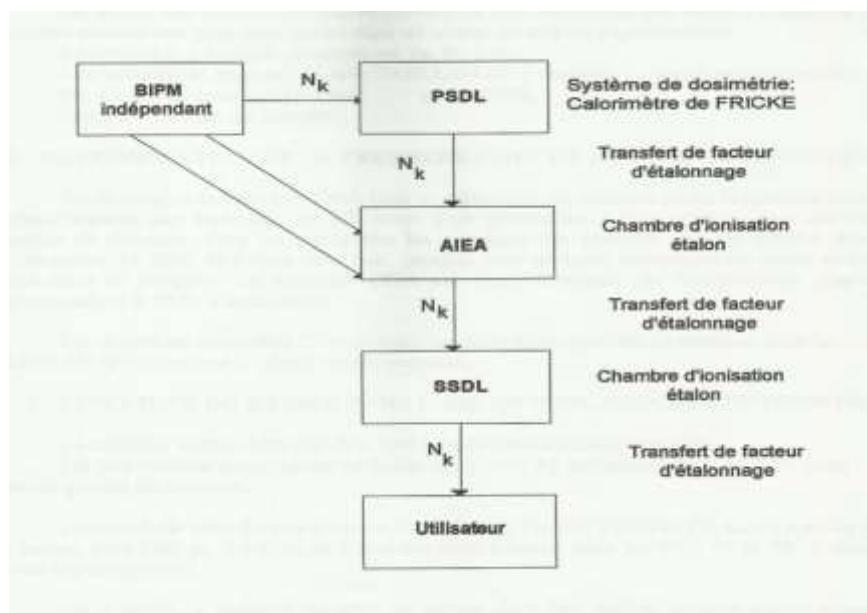
$$E = \frac{(H-M)}{H} \times 100 \quad (39)$$

où **H** est la valeur réelle et **M** est la valeur mesurée.

### 3.7. La chaîne d'etalonnage

Le Bureau international des Poids et de Mesures (BIPM) créé par la Convention du Mètre assure l'unification des mesures physiques dans le monde entier. Il est siége à Sèvres (près de Paris).

Les laboratoires Primaires d'Etalonnage pour la dosimétrie (LPED) détiennent les étalons primaires et font l'etalonnage des étalons secondaires des Laboratoires Secondaires d'Etalonnage en Dosimétrie (LSED). Dans le monde, il n'y a que quelques vingtaines de LPED, par conséquent, ils ne peuvent pas étalonner tous les dosimètres utilisés. Pour cette raison, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ont créé le réseau LSED afin d'établir les liens entre les LSED membres et le système de mesure internationale. Chaque LSED a pour rôle principal de garder le lien entre les utilisateurs des rayonnements ionisants et le système de mesure international. Ainsi, il procède à l'etalonnage des appareils de mesure de dose et des sources de rayonnements ionisants grâce aux étalons secondaires déjà étalonnés par un LPED.



**Figure 7 : Chaîne d'etalonnage**

## **4. Les matériels utilisés**

### **4.1. La salle d'irradiation**

INSTN-Madagascar possède une grande salle d'irradiation blindée contenant des sources radioactives qui sont utilisées pour l'irradiation du détecteur de l'appareil de mesure de dose. Une caméra de surveillance positionnée pour avoir une vue complète de la salle permet de contrôler ce qui se passe à l'intérieur.



**Figure 8 :** Salle d'irradiation

### **4.2. La chambre d'ionisation**

La chambre d'ionisation est utilisée pour la détermination de la dose émise par un rayonnement. Elle est fondamentalement formée d'une cavité remplie de gaz entourée d'une paroi externe. Elle possède aussi une électrode de rassemblement centrale. La paroi et l'électrode de rassemblement sont séparées avec un isolateur de qualité afin de réduire la fuite de courant quand la tension de polarisation est appliquée à la chambre.

Les mesures faites avec la chambre d'ionisation nécessitent une correction de la température et de la pression.

Elle est de type PTW UNIDOS 32002 LSO1#378 et composée de deux (2) fenêtres :

- Une fenêtre A pour la mesure du kerma dans l'air pour la gamme d'énergie de 20 à 250 keV pour les rayons X.
- Une fenêtre B pour la mesure du Kerma dans l'air pour la gamme de 0,25 à 1,5 MeV pour les photons gamma et de 0,3 à 2 MeV pour les rayons X.



**Figure 9:** Chambre d'ionisation

#### **4.3. L'électromètre**

L'électromètre de type PTW UNIDOS 10002#20261 relié à la chambre d'ionisation permet de mesurer la quantité de charge produite dans la chambre lors de l'interaction des molécules de gaz avec les photons.



**Figure 10 :** Electromètre

L’association de la chambre d’ionisation et de l’électromètre forme le système d’étalon secondaire. Ce système est très sensible, précis et stable. Il a été étalonné dans le laboratoire de l’AIEA en Août 1998.

#### **4.4. Le baromètre**

Le baromètre utilisé est un appareil de mesure permettant de mesurer la pression dans la salle. Ce baromètre est aussi muni d’un thermomètre où on peut aussi voir la température du milieu.



**Figure 11:** Baromètre

#### **4.5. Le pupitre de commande de la source de Cs-137**

Le pupitre de commande de la source de Cs-137 est utilisé pour lancer la source et/ou pour l’interrompre en cas de besoin.

Marque : IRRADIATORS STS

Modèle : AIEA

Numéro de série 939-23



**Figure 12 :** Panneau de contrôle de la source de Cs-137

#### **4.6. Les sources**

Le laboratoire LESD de l'INSTN-Madagascar possède trois (3) irradiateurs :

- une source de Cs-137 encore opérationnelle
- une source de Co-60 qui n'est plus utilisée à cause de la fin de sa décroissance radioactive qui est de 5,27 ans seulement.
- Un générateur de rayons X qui est en panne

Durant notre stage, on a utilisé la source de Cs-137 portant le numéro de série de 0082GY avec une activité de 740 GBq, ayant une période de 30,15 ans et une énergie de photon gamma de 0,66 MeV.



**Figure 13 :** Irradiateur de source Cs-137

#### 4.7. Les atténuateurs de Pb

Des plombs de différentes épaisseurs sont utilisés comme écrans pour varier la gamme de débit de dose délivrée par la source de césium 137 (Cs-137). Les épaisseurs sont de 10 mm, 20 mm, 40 mm.



**Figure 14 :** Atténuateurs en plomb

#### 4.8. Les débitmètres à étalonner

##### ❖ Graetz X5DE

###### ✚ Caractéristiques nucléaires

- Débitmètre portatif avec un compteur GM ; tube ZP 1200 (18503)
- Type de radiations détectées : gamma et RX
- Alarme sonore et visuelle disponible
- Gamme de mesures :  $0,1 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  à  $20 \text{ mSv.h}^{-1}$  (mesure de faible et moyen débit de dose)
  - Gamme d'énergies : 45 keV à 1,3 MeV
  - Incertitude de mesure :  $\leq \pm 30\%$

###### ✚ Caractéristiques électriques

Possibilités d'alimentation :

- Pile 9 V alcali-manganèse 6 LF22
- Accumulateur à NiCd rechargeable à l'intérieur de l'appareil ou alimentation fournie de l'extérieur : 8,5 V ; 5,5 V – 11 V

###### ✚ Caractéristiques mécaniques

Dimensions: - tube détecteur L = 40 mm

$$\emptyset = 15 \text{ mm}$$

$$e = 250 \text{ mg.cm}^{-3}$$

- débitmètre : 152\*82\*39 mm

Masse: 400 mg WB

Le boîtier est fait en plastique de grande résistance et étanchéité testée jusqu'à 1 m de profondeur d'eau pendant 1 h.

⊕ Condition d'utilisation

- Température de stockage : - 40°C à +70°C
- Température d'utilisation : - 30°C à +60°C
- Pression atmosphérique : 100 - 1300 mBar

⊕ Caractéristiques fonctionnelles

a) Affichage des résultats :

- Affichage en digits. Temps de réponse
- Affichage en barographe analogique à échelle semi-long

b) Changement automatique de la gamme de mesure

Gamme 1: 0 - 19,99  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$

Gamme 2: 20 - 199,99  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$

Gamme 3: 200 - 1999  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$

Gamme 4: 2 - 19,99  $\text{mSv.h}^{-1}$

c) Alarme sonore réglable suivant le seuil choisi. Niveau acoustique > 75 dB mesuré à 30 cm de distance



**Figure 15** : Débitmètre Graetz X5DE

❖ Graetz X5C

Le Graetz X5C est un débitmètre de même type que celui de Graetz X5DE sauf :

- ⊕ Caractéristiques nucléaires
- Gamme de mesure :  $1 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  à  $20 \text{ mSv.h}^{-1}$  (mesure de faible et moyen débit de dose)
- ⊕ Caractéristiques fonctionnelles
- Alarme sonore réglable suivant le seuil choisi. Niveau acoustique  $> 80 \text{ dB}$  mesuré à 30 cm de distance



**Figure 16** : Débitmètre Graetz X5C

❖ INDENTIFINDER 2

L'Identifinder 2 de la série N°910385-1251 est fabriqué par FLIR Radiation. Il a été conçu pour :

- La recherche de source de rayonnement gamma
- Le scannage des zones contaminées
- L'identification automatique des radionucléides par analyse des spectres de rayonnement gamma
- La mesure de dose et du débit de dose du rayonnement gamma
- La détection des neutrons avec un taux de comptage et de coups accumulés

Il est qualifié comme un petit ordinateur puissant avec clavier et écran LCD avec une mémoire interne de 2 Go.

⊕ Caractéristiques nucléaires

- Débitmètre portatif avec un compteur GM ; tube ZP 1200 (18503)

- Type de radiations détectées : gamma et neutrons
- Alarme sonore et visuelle disponible
- Gamme de mesure :  $0,001 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  à  $10 \text{ Sv.h}^{-1}$
- Gamme d'énergie (gamma) : 20 keV à 3 MeV
- Incertitude de mesure :  $\leq \pm 1\%$

 Caractéristiques électriques

Les possibilités d'alimentation :

- Boîtier pour 4 piles AA standard ou le powerPACK ultra 2 à NiH (Nickel Hydure) rechargeable à faible auto-décharge, à l'intérieur de l'appareil
- Alimentation fournie de l'extérieur avec un chargeur ou câble USB

 Caractéristiques mécaniques

Dimensions: 278 mm \* 93 mm \* 75 mm

Masse: 1180 g

 Conditions d'utilisation

- Température de stockage :  $10^\circ\text{C}$  à  $+35^\circ\text{C}$
- Température d'utilisation :  $-20^\circ\text{C}$  à  $+55^\circ\text{C}$
- Humidité relative :  $\leq 100\%$

 Caractéristiques fonctionnelles

- a) Affichage des résultats :
  - Affichage en digits. Temps de réponse
  - Affichage en barographe analogique à échelle semi-long
- b) Changement automatique de la gamme de mesure

Gamme 1: scintillateurs  $0,00 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  -  $500 \mu\text{Sv.h}^{-1}$

Gamme 2: Geiger Muller  $100 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  -  $10 \text{ mSv.h}^{-1}$

Gamme 3: surcharge  $10 \text{ mSv.h}^{-1}$  -  $10 \text{ Sv.h}^{-1}$

- c) Alarme sonore réglable suivant le seuil choisi



**Figure 17 : Débitmètre IDENTIFINDER 2**

#### **4.9. La caméra pour la lecture des charges et micro-ordinateur**

On utilise une caméra pour la lecture des doses affichées sur l'appareil car on ne peut pas rester dans la salle d'irradiation lors de l'étalonnage.



**Figure 18 : Caméra**

**Figure 19 : Micro-ordinateur**

Pour voir les doses affichées sur l'appareil à étalonner, la caméra est reliée au micro-ordinateur.

### **III. PARTIE EXPERIMENTALE**

## **5. Présentation du lieu de stage**

### **5.1. L'INSTN-Madagascar**

L'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaire (INSTN-Madagascar) est l'extension du Laboratoire de Physique Nucléaire et de Physique Appliquée (LPNPA) de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo qui a été fondé par le Professeur RAOELINA ANDRIAMBOLOLOLONA. Vu le succès obtenu par le LPNPA, il a été transformé en Institut National des Sciences et Techniques Nucléaire (INSTN-Madagascar) par le décret gouvernemental N°92/869 du 30 Septembre 1992.

INSTN-Madagascar est le seul institut qui possède le seul Laboratoire de Sciences et Techniques Nucléaires existant dans l'Océan Indien.

Notre stage a été fait dans le Département de Dosimétrie et de Radioprotection dont les activités sont les suivantes:

- Surveiller les personnels travaillant sous rayonnement ionisant : INSTN-Madagascar assure la surveillance dosimétrique individuelle dans des nombreux secteurs utilisant des sources radioactives comme les hôpitaux, les industries,....
- Délivrer une autorisation de détention des sources radioactives : toute utilisation et détention de source radioactive doit être autorisée par l'autorité de réglementation. Une autorisation est délivrée après étude des documents techniques et inspection pour vérification de la sûreté.
- Faire des contrôles de qualités de radiologies médicales à rayon X et en radiothérapie. Ce contrôle est obligatoire selon la législation nationale.
- Etalonner des appareils de dosimétrie : les appareils de mesure doivent être étalonnés afin d'avoir une bonne précision des valeurs affichées par chaque appareil.

Ce département fait aussi des recherches sur la dosimétrie par thermoluminescence, la dosimétrie en radiothérapie, la gestion des déchets radioactifs, les mesures des radionucléides naturels dans les échantillons environnementaux, la dosimétrie individuelle, l'assurance qualité en dosimétrie individuelle par thermoluminescence et l'étalonnage.

Grâce à un expert de l'AIEA, l'équipe de l'INSTN-Madagascar a pu installer en 1996 le Laboratoire Secondaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LSED) qui fait partie d'un réseau d'inter-comparaison des mesures depuis 1997.

## **5.2. La disposition de la salle d'irradiation**

La salle d'irradiation est entièrement construite en béton spéciale de densité déterminée pour ne pas avoir à l'extérieur des fuites de radiations provenant de l'intérieur de la salle. Ayant une dimension intérieure de  $10m \times 4m \times 3m$  (haut), la salle d'irradiation dispose des murs de béton de 40 cm d'épaisseur comme barrière de protection.

Des contrôles de débit de dose effectués à l'intérieur de la salle, avec toutes les sources de rayonnement en position d'irradiation totale, ont toujours conduit après plusieurs séries de mesure à des valeurs du niveau de radiations quasi-nulle à la surface du mur à l'extérieur.

Ces résultats remarquablement satisfaisants ont permis de confirmer que la salle d'irradiation a été conçue suivant les normes de construction d'enceinte spéciale du type « bunker » anti-irradiation.

Une grande porte blindée permet l'accès à la salle d'irradiation.

Dans la salle d'irradiation, on dispose des matériels suivants :

1) Un grand chariot sur lequel se trouvent 2 plates-formes superposées, mobiles suivant 2 degrés de liberté, fixes et munies d'un système spécial pour fixer les matériels à irradier (dosimètres à étalonner). Le chariot peut se déplacer sur des rails disposés suivant le sens de la longueur de la salle. Sa distance à la source d'irradiation peut varier de 80 cm à 7 m.

2) Les irradiateurs constitués par :

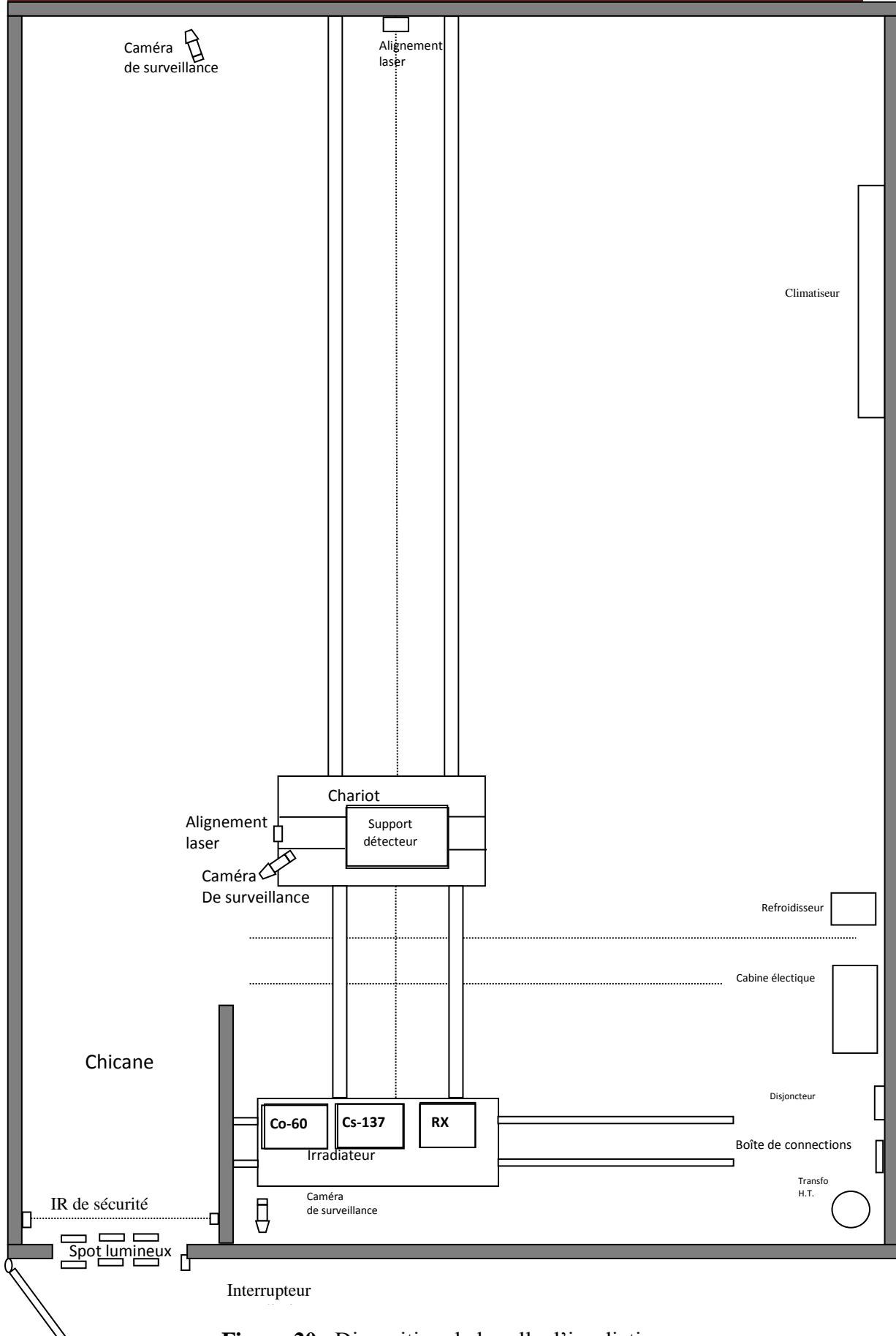
- Une source de Cs-137 (740 GBq, le 29 Juillet 1993)
- Une source de Co-60 (3,7 GBq, le 27 Novembre 1995)
- Un générateur de RX (tension maximale 160 kV)

Pour l'alimentation du générateur à RX, on dispose d'un disjoncteur à 415V/60A et d'une boîte de connexion des circuits.

3) Deux(2) appareils émettant des rayons LASER de longueur d'onde  $\lambda = 650$  mm et de puissance  $P = 1$  mW pour effectuer la mise au point des paramètres géométriques (alignement et distance) avec une grande précision.

- Deux (2) faisceaux laser perpendiculaires pour l'alignement

- Deux (2) faisceaux laser perpendiculaires pour le paramètre distance
- 4) Trois (3) contacteurs de porte servent d'indicateur d'ouverture/fermeture de la porte, empêchant ainsi la mise en marche des irradiateurs si la porte n'est pas convenablement fermée et stoppant aussi automatiquement et dans l'immédiat les appareils irradiateurs en cas d'éventuelle tentative d'ouverture de la porte pendant l'opération d'irradiation.
- 5) Un système de barrière à infrarouge installé derrière la porte d'entrée et déclenchant, en cas de franchissement de l'accès à la salle pendant, le fonctionnement d'un dispositif de sécurité permettant d'arrêter immédiatement la machine.
- 6) Deux (2) caméras de surveillance à champ large, fixés en haut de la salle, orientés dans les deux directions opposées pour avoir une vue complète de la salle.
- 7) Deux (2) spots lumineux de couleurs rouges, pour chaque irradiateur, installés respectivement à l'intérieur et à l'extérieur de la salle, au-dessus de la porte et clignotant pendant l'opération d'irradiation pour avertissement.



**Figure 20 :** Disposition de la salle d'irradiation

### **5.3. La salle de commande**

Elle contient l'unité de contrôle et l'unité de commande.

- 1) L'unité de contrôle : elle est composée de trois écrans-vidéo moniteurs reliés aux caméras de la salle d'irradiation.
- 2) L'unité de commande qui est constituée du :
  - Pupitre de commande RX
  - Système de commande de chargement des filtres d'ouverture de fenêtre
  - Pupitres de commande des irradiateurs aux Co-60 et Cs-137

## **6. Les procédures à suivre pour l'étalonnage des débitmètres**

### **6.1. Vérification de la stabilité du système chambre-électromètre**

Pour assurer la performance du système chambre-électromètre, il faut irradier la chambre d'ionisation. Après avoir collecté les charges lors de l'irradiation de l'appareil, on doit les comparer avec les charges obtenues lors de l'étalonnage du système de référence donnée par l'AIEA.

Pour cela, il faut que l'écart entre les deux valeurs ne dépasse pas 1% pour que le système chambre-électromètre soit stable.

La procédure à suivre lors d'un étalonnage est décrite comme suit :

- Prendre la température et la pression dans la salle d'irradiation.
- Relier la chambre d'ionisation avec l'électromètre.
- Mettre en marche l'électromètre puis attendre quelques minutes pour qu'il y ait une stabilité de l'électromètre et un équilibre thermique.
- Noter la tension de polarisation de la chambre, la température et la pression.
- Configurer les paramètres de l'électromètre : T, P,  $k_{TP}$ , t (temps de collecte)
- Irradier la chambre d'ionisation avec la source de référence.
- Effectuer cinq (5) mesures en tenant compte de la température et de la pression.

Malheureusement à cause de la panne technique de l'électromètre qui n'est plus utilisé depuis un certain temps, il faut alors procéder à des calculs du débit de kerma dans l'air, ensuite on doit convertir ce débit de kerma en dose équivalente ambiante et enfin calculer le facteur d'étalonnage de l'appareil.

## 6.2. Détermination du débit de kerma dans l'air

Le débit de kerma dans l'air est obtenu à partir de l'irradiation du système étalon. Il faut varier ce débit de kerma en tenant compte de la variation de la température et de la pression lors de l'étalonnage du système et lors de l'irradiation.

### 6.2.1. Pour le Graetz X5DE

On calcule d'abord le facteur de correction de température et de pression avec la formule (35) :

$$k_{TP} = \frac{(273,2 + T) \times P_0}{(273,2 + T_0) \times P}$$

En remplaçant  $T$ ,  $P$ ,  $T_0$  et  $P_0$  par leurs valeurs respectives, on a :

$$k_{TP} = 1,167$$

avec  $T = 23^\circ\text{C}$  et  $P = 877\text{mBar}$

Ensuite, on calcule la valeur de  $M$  :

- Mesure sans atténuateur

Du 19 Décembre 2012, avec l'étalon de référence, on a trouvé :

$$M_0 = 6,2978 \text{ nC.100s}^{-1}.$$

D'après la loi de décroissance radioactive (3), on obtient la valeur de  $M$  à la date d'irradiation du 19 janvier 2017 :

$$M = M_0 e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}}$$

Où  $M$  : la valeur moyenne calculée

$M_0$  : la valeur moyenne de référence

$T$  = la période de la source Cs-137 qui est de 30,15 ans = 11012,29 j

(1 an = 365.25 j)

$t$  = temps écoulé du 19/12/2012 au 19/01/2017 = 1492 j

$$M = 6,2978 \times e^{-\frac{\ln 2 \times 1492}{11012,29}}$$

$$M = 5,733 nC \cdot 100s^{-1}$$

A partir de cette valeur de **M**, on peut calculer la valeur du kerma dans l'air en appliquant la formule (38) :

$$K_{air} = M \times N \times k_{TP}$$

Avec **N = 25, 2 µGy.nC<sup>-1</sup>**

$$K_{air} = 168,633 \mu\text{Gy} \cdot 100\text{s}^{-1} = 6070,782 \mu\text{Gy.h}^{-1}$$

Le résultat est donné dans le **tableau IV** suivant :

Atténuateurs	Moyenne de référence (nC.100s <sup>-1</sup> ) (19/12/2012)	Moyenne calculée (nC.100s <sup>-1</sup> ) (19/01/2017)	K <sub>air</sub> (µGy.100s <sup>-1</sup> )	K <sub>air</sub> (µGy.h <sup>-1</sup> )
Sans	6,2978	5,733	168,633	6070,782
20 mm de Pb	0,5440	0,495	14,566	524,389
40 mm de Pb	0,0853	0,077	2,284	82,229
50 mm de Pb	0,0350	0,031	0,938	33,796
60 mm de Pb	0,0144	0,013	0,387	13,933

**Tableau IV:** Débit de kerma dans l'air avec différents atténuateurs du Graetz X5DE

### 6.2.2. Pour le Graetz X5C

Le facteur de correction est :

$$k_{TP} = \frac{(273,2 + 22) \times 1013,25}{(273,2 + 20) \times 877}$$

$$k_{TP} = 1,163$$

- Mesure sans atténuateur

$$M = 6,2978 \times e^{-\frac{\ln 2 \times 1499}{11012,29}}$$

$$M = 5,731 \text{ nC} \cdot 100\text{s}^{-1}$$

Et la valeur du kerma dans l'air :

$$K_{\text{air}} = 168,322 \mu\text{Gy} \cdot 100\text{s}^{-1} = 6059,624 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

Le résultat est illustré dans le **tableau V** ci-après :

Atténuateurs	Moyenne de référence (nC.100s <sup>-1</sup> ) (19/12/2012)	Moyenne calculée (nC.100s <sup>-1</sup> ) (26/01/2017)	K <sub>air</sub> (μGy.100s <sup>-1</sup> )	K <sub>air</sub> (μGy.h <sup>-1</sup> )
Sans	6,2978	5,731	168,322	6059,624
20 mm de Pb	0,5440	0,495	14,510	522,389
40 mm de Pb	0,0853	0,077	2,275	81,915
50 mm de Pb	0,0350	0,032	0,935	33,796
60 mm de Pb	0,0144	0,013	0,385	13,879

**Tableau V:** Débit de kerma dans l'air avec différents atténuateurs du Graetz X5C

### 6.2.3. Pour l'Identifinder 2

Le facteur de correction est :

$$k_{TP} = \frac{(273,2 + 23) \times 1013,25}{(273,2 + 20) \times 876}$$

$$k_{TP} = 1,168$$

- Mesure sans atténuateur

$$M = 6,2978 \times e^{-\frac{\ln 2 \times 1503}{11012,29}}$$

$$M = 5,729 \text{ nC} \cdot 100\text{s}^{-1}$$

La valeur du kerma dans l'air est

$$K_{\text{air}} = 168,708 \mu\text{Gy} \cdot 100\text{s}^{-1} = 6073,509 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$

Le résultat est présenté dans le **tableau VI** suivant :

Atténuateurs	Moyenne de référence (nC.100s <sup>-1</sup> ) (19/12/2012)	Moyenne calculée (nC.100s <sup>-1</sup> ) (30/01/2017)	K <sub>air</sub> (μGy.100s <sup>-1</sup> )	K <sub>air</sub> (μGy.h <sup>-1</sup> )
Sans	6,2978	5,733	168,322	6059,624
20 mm de Pb	0,5440	0,495	14,510	522,389
40 mm de Pb	0,0853	0,077	2,275	81,915
50 mm de Pb	0,0350	0,032	0,935	33,796
60 mm de Pb	0,0144	0,013	0,385	13,879

**Tableau VI:** Débit de kerma dans l'air avec différents atténuateurs de l'Identifinder 2

### 6.3. Conversion de débit de kerma dans l'air en dose équivalente ambiante

Le but de cette conversion est de comparer la valeur de l'étalon avec celle du débitmètre. On utilise alors la formule (37) :

$$H^*(10) = h \times K_{air} \quad \text{avec } h=1,21 \text{ Sv.Gy}^{-1}$$

#### 6.3.1. Pour le Graetz X5DE

La valeur de la dose équivalente ambiante :

$$H^*(10) = 7345,64 \mu\text{Sv.h}^{-1}$$

Atténuateurs	K <sub>air</sub> (μGy.h <sup>-1</sup> )	H <sup>*</sup> (10) (μSv.h <sup>-1</sup> )
Sans	6070,782	7345,646
20 mm de Pb	524,389	634,512
40 mm de Pb	82,228	99,497
50 mm de Pb	33,795	40,893
60 mm de Pb	13,933	16,858

**Tableau VII:** Dose équivalente ambiante du Graetz X5DE

### 6.3.2. Pour le Graetz X5C

On a le **tableau VIII** suivant :

Atténuateurs	K <sub>air</sub> ( $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ )	H*(10) ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )
Sans	6059,624	7332,145
20 mm de Pb	522,389	632,091
40 mm de Pb	81,915	99,117
50 mm de Pb	33,667	40,737
60 mm de Pb	13,879	16,796

**Tableau VIII:** Dose équivalente ambiante du Graetz X5C

### 6.3.3. Pour l'identifinder 2

On a le **tableau IX** ci-dessous :

Atténuateurs	K <sub>air</sub> ( $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ )	H*(10) ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )
Sans	6073,509	7348,946
20 mm de Pb	524,626	634,797
40 mm de Pb	82,266	99,542
50 mm de Pb	33,812	40,912
60 mm de Pb	13,939	16,866

**Tableau IX:** Dose équivalente ambiante de l'Identifinder 2

## 6.4. Irradiation des débitmètres

Avant de procéder à l'étalonnage d'un appareil, tout d'abord, il faut mettre en place le système d'alignement. Ensuite, on ajuste la caméra afin de voir clairement la valeur affichée sur l'appareil irradié.

#### **6.4.1. Pour le Graetz X5DE**

Les conditions de mesure :

- Source : Cs-137
- Distance : 2 m
- Temps pré-irradiation : 100 s
- Temps d'irradiation : 100 s
- Température : 23 °C
- Pression : 877 mBar
- Date d'étalonnage : 19 Janvier 2017

Les mesures prises lors de l'irradiation de l'appareil sont données sur le **tableau X** suivant :

Mesures ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Atténuateurs de Pb				
	Sans	20 mm	40 mm	50 mm	60 mm
M1	6660	603	97,3	40,2	16,31
M2	6660	610	102	39,2	16,24
M3	6760	599	96,2	38,7	17,94
M4	6700	594	96,2	39,1	16,79
M5	6720	606	97,6	40,1	16,24
Moyenne	6700	602,4	97,86	39,46	16,704

Tableau X: Valeurs affichées sur le Graetz X5DE lors de son irradiation avec le Cs-137

#### **6.4.2. Pour le Graetz X5C**

Les mêmes conditions sauf pour la température, on a 22 °C au lieu de 23 °C.

La date d'irradiation est le 26 Janvier 2017.

Les valeurs prises sur le Graetz X5C se trouvent sur le **tableau XI** suivant :

Mesures ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Atténuateurs de Pb				
	Sans	20 mm	40 mm	50 mm	60 mm
M1	7980	666	110,7	42,2	16,91
M2	7990	670	105,4	42,3	17,01
M3	8000	676	105,8	43,1	17,2
M4	8001	676	106,1	42,1	16,96
M5	8003	691	106,7	44,7	16,92
Moyenne	8002	675,8	106,94	42,86	17

**Tableau XI:** Valeurs affichées sur le Graetz X5C lors de son irradiation avec le Cs-137

#### 6.4.3. Pour l'Identifinder 2 du 30 Janvier 2017

Les conditions de mesure sont les mêmes que celles du Graetz X5DE.

La date d'irradiation est le 30 Janvier 2017.

Les valeurs de mesures prises sont présentées sur le **tableau XII** suivant :

Mesures ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Atténuateurs de Pb				
	Sans	20 mm	40 mm	50 mm	60 mm
M1	7862	784,8	93,09	40,63	17,06
M2	7844	726,3	92,83	40,74	17,07
M3	7780	708,4	93,16	40,60	17,09
M4	7725	749,0	92,91	40,80	17,06
M5	7628	779,7	92,83	40,77	17,06
Moyenne	7767,8	749,02	92,964	40,708	17,068

**Tableau XII:** Valeurs affichées sur l'Identifinder 2 lors de son irradiation avec le Cs-137

## 6.5. Calcul du facteur d’étalonnage de l’appareil

On utilise les formules suivantes :

$$N_k = \frac{H^*(10)}{\bar{M}} \quad (38) \quad \text{et}$$

$$E = \frac{H-M}{H} \times 100 \quad (39)$$

Où **E** est l’écart exprimé en pourcentage.

<b>Atténuateurs de Pb</b>	<b>Graetz X5DE</b>		<b>Graetz X5C</b>		<b>Identifinder 2</b>	
	<b>N<sub>k</sub></b>	<b>Ecart (%)</b>	<b>N<sub>k</sub></b>	<b>Ecart (%)</b>	<b>N<sub>k</sub></b>	<b>Ecart (%)</b>
<b>Sans</b>	1,09	8,80	0,92	9,20	0,95	5,70
<b>20 mm</b>	1,05	5,10	0,94	6,90	0,85	18,00
<b>40 mm</b>	1,02	1,60	0,93	7,90	1,07	6,60
<b>50 mm</b>	1,04	3,50	0,95	5,20	1,01	0,50
<b>60 mm</b>	1,01	0,90	0,98	1,20	0,98	1,20

**Tableau XIII:** Facteurs d’étalonnage et écart des trois débitmètres

### Interprétation :

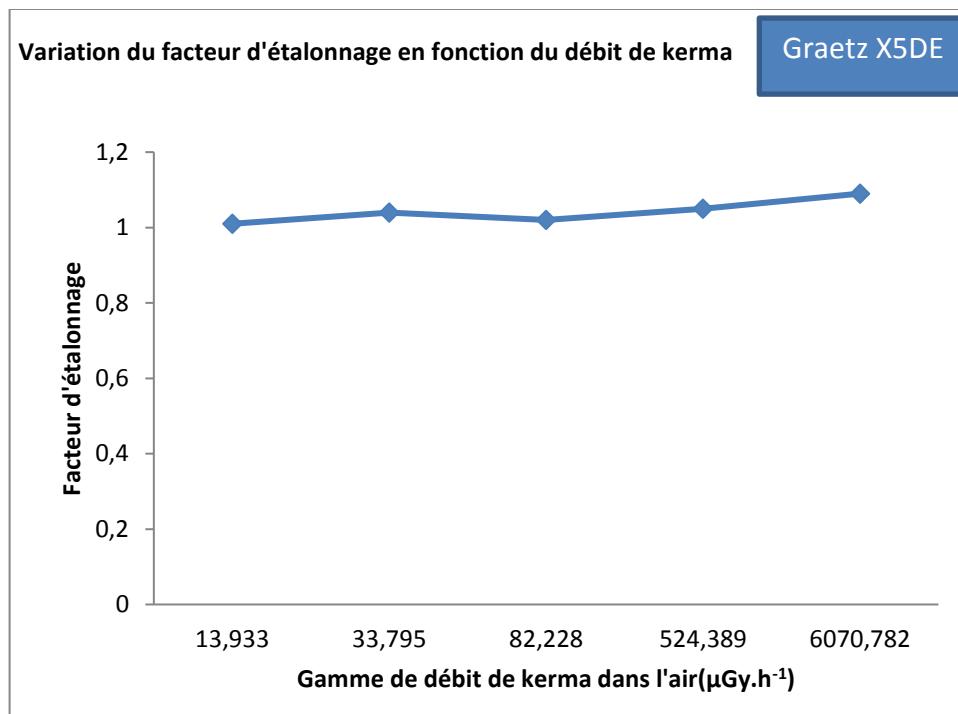
On remarque que les écarts sur les débits de dose en pourcentage ne dépassent pas la limite de tolérance qui est de 20 %. Ainsi, les trois (3) débitmètres (Graetz X5DE, Graetz X5C, Identifinder 2) sont en encore en bon état de fonctionnement et il n’est pas nécessaire d’appliquer le facteur de correction.

Pour l’Identifinder 2, avec l’atténuateur de 20 mm de Pb, on a un écart  $E = 18,00\%$ . Cela ne veut pas dire qu’il y a une faille ou un problème avec l’appareil, mais comme son nom l’indique, l’Identifinder 2 est utilisé pour identifier les types de radionucléides présents.

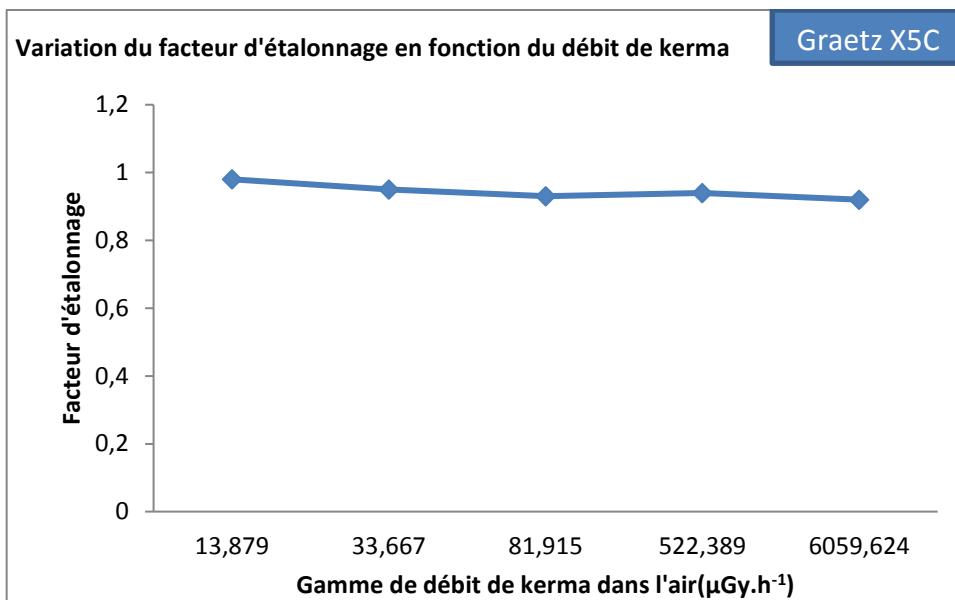
- ❖ Variation du facteur d'etalonnage en fonction du kerma dans l'air

Atténuateurs de Pb	Graetz X5DE		Graetz X5C		Identifinder 2	
	K <sub>air</sub> ( $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ )	N <sub>k</sub>	K <sub>air</sub> ( $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ )	N <sub>k</sub>	K <sub>air</sub> ( $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ )	N <sub>k</sub>
Sans	6070,782	1,09	6059,624	0,92	6073,509	0,95
20 mm	524,389	1,05	522,389	0,94	524,626	0,85
40 mm	82,228	1,02	81,915	0,93	82,266	1,07
50 mm	33,795	1,04	33,667	0,95	33,812	1,01
60 mm	13,933	1,01	13,879	0,98	13,939	0,98

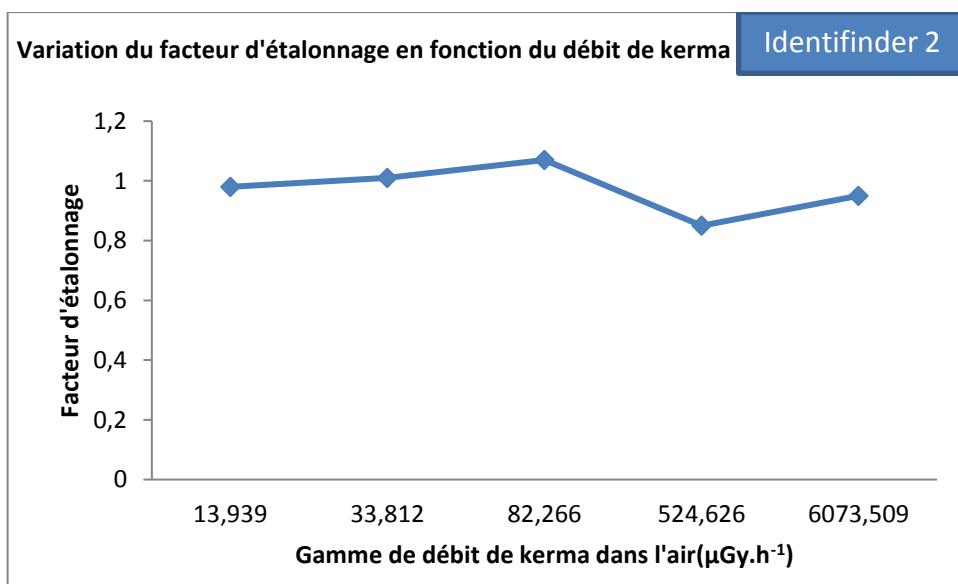
**Tableau XIV:** Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma dans l'air des trois débitmètres



**Figure 21:** Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma du Graetz X5DE



**Figure 22:** Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma du Graetz X5C



**Figure 23 :** Facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma de l'Identifinder 2

#### Observation des trois (3) courbes :

D'abord, pour le Graetz X5DE, le facteur d'etalonnage  $N_k$  est une fonction croissante du débit de kerma dans l'air.

Ensuite, pour le Graetz X5C, le  $N_k$  est une fonction presque constante du  $K_{\text{air}}$ .

Enfin, pour l'Identifinder 2, le  $N_k$  varie suivant le débit de kerma dans l'air.

D'après cette observation, c'est l'utilisation du débitmètre Graetz X5C qui est recommandée.

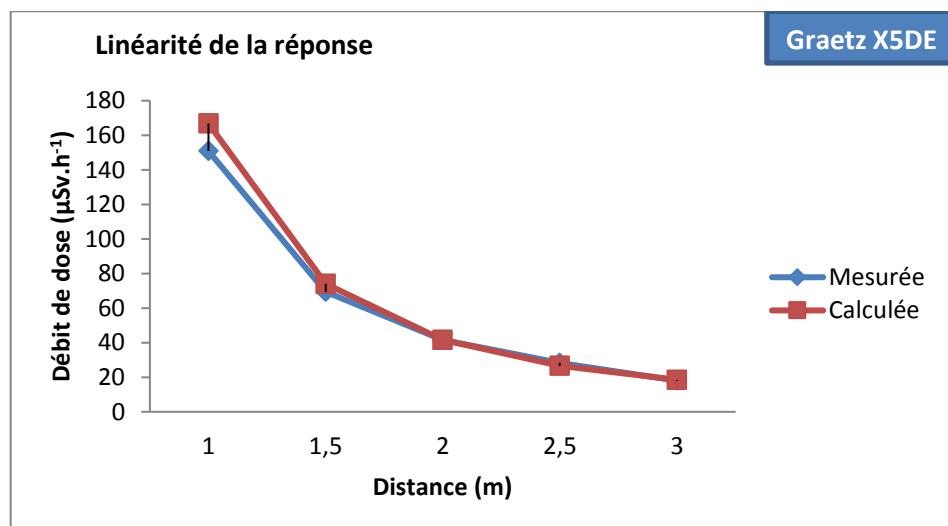
#### 6.6. Linéarité de la réponse des trois (3) débitmètres et l'évaluation de l'incertitude de type A

- ❖ Vérification de la linéarité de la réponse de l'appareil:

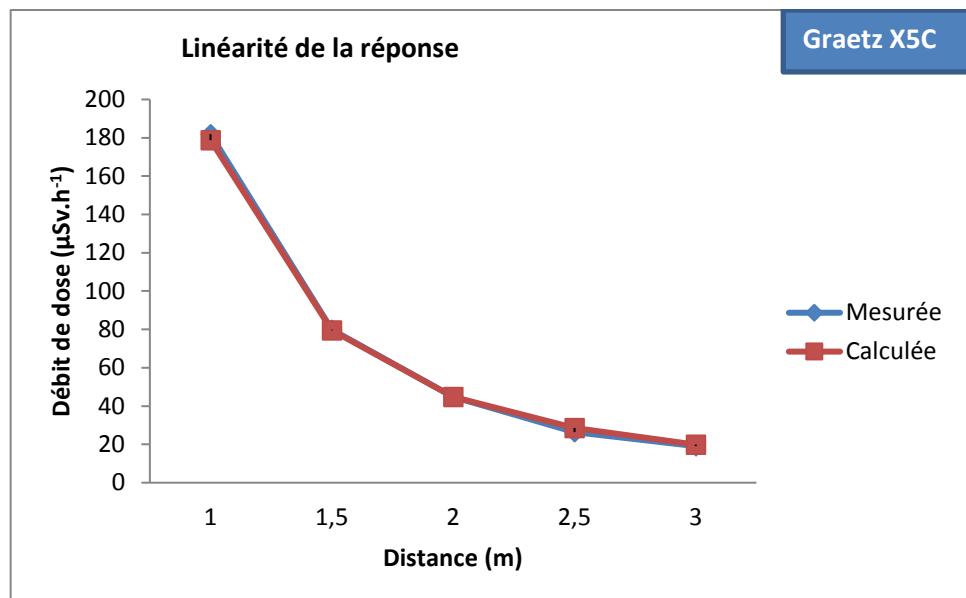
Dans le protocole standard, l'étalonnage a été effectué à une distance source-débitmètre de 2 m.

Distances (m)	Graetz X5DE		Graetz X5C		Identifinder 2	
	Débit de dose mesurée ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Débit de dose calculée ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Débit de dose mesurée ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Débit de dose calculée ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Débit de dose mesurée ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Débit de dose calculée ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )
1	150,90	166,80	181,90	178,80	149,20	163,20
1,5	69,50	74,13	79,90	79,46	70,74	72,53
2	41,70	41,70	44,70	44,70	40,80	40,80
2,5	28,30	26,68	26,40	28,61	26,96	28,12
3	18,01	18,52	19,09	19,86	18,71	18,13

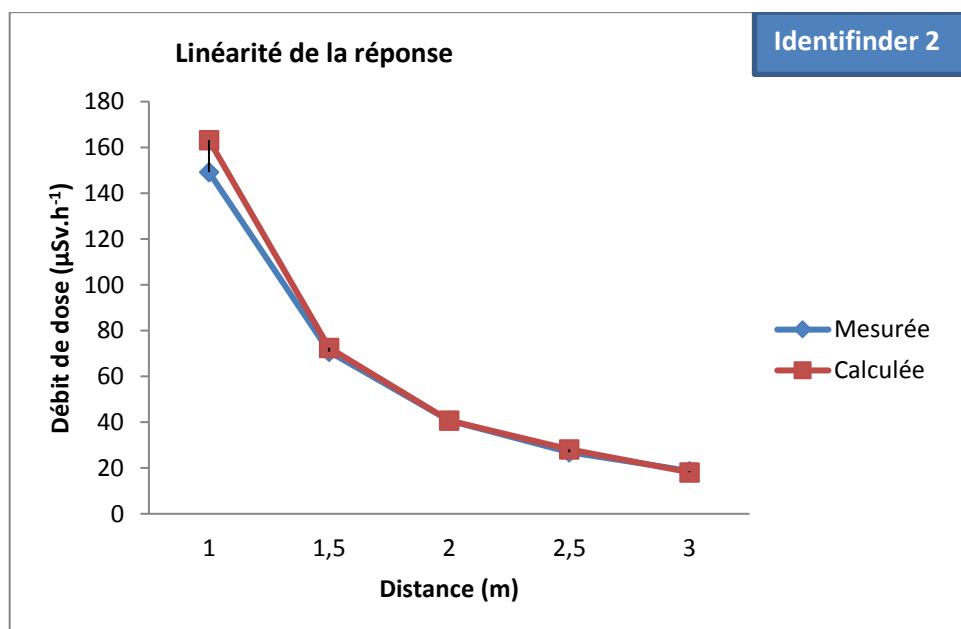
**Tableau XV :** Mesures faites avec un atténuateur de Pb de 50 mm à différentes distances des trois débitmètres



**Figure 24 :** Linéarité de la réponse du débitmètre Graetz X5DE



**Figure 25 :** Linéarité de la réponse du Graetz X5C



**Figure 26 :** Linéarité de la réponse de l'Identifinder 2

#### Interprétation des trois (3) courbes :

D'après ces trois (3) courbes, on trouve la linéarité de la réponse pour chaque débitmètre (Graetz X5DE, Graetz X5C, Identifinder 2) car les valeurs de débits de dose mesurée et calculée sont presque les mêmes pour les deux méthodes utilisées. Mais on peut dire que c'est le débitmètre Graetz X5C qui reproduit presque intégralement les valeurs de débits de dose mesurée et calculée.

❖ Evaluation de type A de l'incertitude

L'incertitude  $\sigma_{n-1}$  et l'écart-type  $\sigma_x$  sont données par les formules suivantes:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{et} \quad \sigma_x = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Avec } \bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Les résultats trouvés avec un atténuateur de 50 mm de Pb à 2m de distance sont donnés sur le **tableau XIV** suivant:

Graetz X5DE				Graetz X5C				Identifinder 2			
Mesures ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Moyenne ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Ecart-type	Incrtitude	Mesures ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Moyenne ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Ecart-type	Incrtitude	Mesures ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Moyenne ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )	Ecart-type	Incrtitude
40,10	39,31	0,69	$\pm 0,23$	42,10	41,21	1,41	$\pm 0,47$	40,63	40,74	0,12	$\pm 0,04$
38,80				42,30				40,73			
39,50				39,90				40,90			
39,60				39,80				40,80			
38,70				42,70				40,77			
40,20				40,20				40,52			
38,40				43,40				40,64			
39,90				39,90				40,79			
38,60				40,60				40,86			

**Tableau XVI :** Mesures faites avec un atténuateur de Pb de 50 mm à une distance de 2 m des trois débitmètres

**Interprétation :**

D'après ces résultats, le débitmètre Identifinder 2 a la plus faible incertitude qui est de  $\pm 0,04$ .

- ❖ Vérification avec l'étalon de référence:

Atténuateurs de Pb	19/12/12	19/01/17	Debit de dose ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )								
			Graetz X5DE			Graetz X5C			Identifinder 2		
			Par décroissance radioactive	Ecart (%)	26/01/17	Par décroissance radioactive	Ecart (%)	30/01/17	Par décroissance radioactive	Ecart (%)	
Sans	8110,280	7345,646	7383,305	0,51	7332,145	7380,053	0,64	7348,946	7378,195	0,39	
20 mm	699,760	634,512	637,036	0,39	632,091	636,755	0,73	634,797	636,595	0,28	
40 mm	109,720	99,497	99,885	0,38	99,117	99,841	0,72	99,542	99,816	0,27	
50 mm	45,098	40,893	41,055	0,39	40,737	41,037	0,73	40,912	41,027	0,28	
60 mm	18,590	16,858	16,924	0,38	16,796	16,916	0,71	16,866	16,912	0,27	

**Tableau XVII:** Valeur calculée à partir des valeurs de l'étalon de référence des trois débitmètres

**Interprétation :** L'écart entre la valeur du débit de dose obtenue à partir de la procédure d'etalonnage et celle obtenue par décroissance radioactive est strictement très faible de l'ordre de 0,25% à 0,51%. Ainsi on peut dire qu'on peut aussi utiliser la loi de décroissance radioactive pour calculer le débit de dose.

## 7. Discussion générale

Tout rayonnement ionisant, d'origine naturelle ou artificielle, est susceptible de produire des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Ainsi, pour pouvoir mesurer les débits de dose environnementale, il faut utiliser des débitmètres. Cependant, tout instrument de mesure doit être étalonné pour que les valeurs affichées soient fiables.

D'après ce qu'on a vu auparavant les trois (3) débitmètres sont tous dans la norme car la limite de tolérance de 20 % n'est pas dépassée. Mais il faut remarquer que le débitmètre Identifinder 2 a l'écart le plus faible.

Pour la courbe du facteur d'etalonnage en fonction du débit de kerma dans l'air, c'est le débitmètre Graetz X5C qui a son facteur d'etalonnage presque constant en fonction du débit de kerma et ainsi il est préférable de l'utiliser.

Pour la linéarité, c'est encore le Graetz X5C qui reproduit presque intégralement pour les valeurs de débit de dose mesurée et calculée.

## **CONCLUSION**

Le Département de Dosimétrie et de Radioprotection de l'INSTN-Madagascar élargit de jour en jour ses activités de recherche ainsi que son rôle principal de protéger les personnes travaillant sous rayonnements ionisants et l'environnement contre les dangers de ces rayonnements. Avec la collaboration de l'INSTN-Madagascar et l'AIEA, le département a été doté d'un Laboratoire Secondaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LSED).

Pour les mesures des débits de dose équivalente ambiante, l'utilisation d'un débitmètre est recommandée car c'est un dosimètre actif où on peut voir immédiatement la dose environnementale. Pour avoir des valeurs exactes sur les instruments de mesure de dose, ces appareils doivent être étalonnés pour que les valeurs trouvées soient fiables.

Pour faire l'étalonnage de chaque appareil, il faut bien suivre chaque étape dans la procédure d'un étalonnage en dosimétrie et avoir un bon facteur d'étalonnage. Après la détermination du facteur d'étalonnage, si l'écart entre la valeur réelle et celle affichée sur l'instrument est dans la limite de tolérance de 20%, alors l'application du facteur d'étalonnage n'est pas nécessaire pendant les mesures sur terrain.

Durant notre stage, on a étalonné trois (3) débitmètres du LSED : le Greatz X5DE, le Greatz X5C et l'Identifinder 2 :

- On a pu obtenir les facteurs d'étalonnage et les écarts avec les différents atténuateurs. Comme on a observé que la limite de tolérance n'est pas dépassée pour chaque débitmètre, on pourra alors conclure que les doses affichées par ces instruments de mesure sont encore acceptables.
- Concernant les courbes du facteur d'étalonnage  $N_k$  en fonction du débit de kerma, c'est la courbe correspondante au débitmètre Greatz X5C qui est la presque constante.
- Pour la linéarité de la réponse des trois débitmètres, c'est le débitmètre Greatz X5C qui reproduit presque intégralement pour les valeurs de débits de dose mesurée et calculée.

Par conséquent, il est préférable de l'utiliser lors des mesures, de plus il possède la plus faible incertitude durant l'étalonnage.

Ce travail nous a permis de maîtriser la technique d'étalonnage des instruments de mesure en dosimétrie. Toutes les valeurs obtenues au cours de ce travail montrent encore le bon fonctionnement de ces trois (3) débitmètres.

Enfin pour améliorer le travail d'étalonnage au laboratoire « LSED », nous proposons les suggestions suivantes :

- de remplacer l'électromètre qui n'est plus en état de fonctionnement depuis un certain temps.
- de remplacer la source de Co-60 dans l'autre irradiateur étant donné que sa durée de vie a déjà expirée.
- de donner à chaque stagiaire un badge TLD pour le suivi dosimétrique pendant le travail dans la salle d'irradiation.
- d'enlever les autres matériels autres que ceux utilisés pour l'étalonnage dans la salle d'irradiation pour qu'elle ne soit pas une salle de dépôt.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Agence Internationale de l'Energie Atomique, «Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté, PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES DE SÛRETÉ», Collection normes de sûreté N°GSRP art I, Vienne, 2010.
- [2] Agence Internationale de l'Energie Atomique, «Glossaire de sûreté, Terminologie employée en sûreté nucléaire et radioprotection», Edition 2007, Vienne, 2007.
- [3] Agence Internationale de l'Energie Atomique, «Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements», Collection sécurité N°115, Vienne, 2007.
- [4] Agence Internationale de l'Energie Atomique, «L'optimisation de la radioprotection dans le cadre de la maîtrise de l'exposition professionnelle», Collection Rapports De Sûreté N°21, Vienne, 2003.
- [5] RAZAFINDRAMIANDRA Hary Andrianarimanana, « Evaluation des Rayonnements de fuites d'une installation d'inspection des bagages à rayons X », Mémoire de DEA, 2007.
- [6] RAKOTONDRAVONONA Jean Eric, « Optimisation de la Radioprotection et étalonnage des Gammadensimètres Humidimètres TROXLER », Mémoire de DEA, 2011.
- [7] Manuel d'utilisation du débitmètre IDENTIFENDER 2.
- [8] Manuel d'utilisation du débitmètre Greatz X5DE.
- [9] Manuel d'utilisation du débitmètre Greatz X5C.
- [10] Safety Reports Series N°16.
- [11] Incertitude & étalonnage – P Breuil, D Di Benedetto 2000 « Incertitude de mesure en instrumentation- Etalonnage »
- [12] RAZAFINDRANAIVO Andrianaina Harilala « Application de l'étalonnage des appareils de Radioprotection à l'évaluation des faibles débits de dose des équipements de contrôle aéroportuaire à Rayon X», Mémoire de DEA, 11 Octobre 1997.

- [13] RANDRIANTSEHENNO Hery Fanja « Etalonnage des chambres d'ionisation et détermination des doses absorbées par les faisceaux de photons », Mémoire de DEA, 8 Octobre 1996.
- [14] RANDRIANTSIZAFY Ralainirina Dina « Traitement des données de l'audit de qualité du laboratoire secondaire d'étalonnage pour la dosimétrie », Mémoire de DEA, 18 Août 1997.
- [15] HABIB Bouchra et GERYES Tony « La dosimétrie individuelle au Liban », Mémoire de Maîtrise, 06 Juin 2005.
- [16] TAMBASAFIDY Francisco Pascal Elias « Conception et réalisation d'un système de positionnement pour l'alignement des appareils à étalonner dans un LSED de l'INSTN », Mémoire de DEA, 08 Octobre 2014.
- [17] ANDRIAMAHALOVA Diarisoa « Application du débitmètre « Inspector » du LPNPE à l'évaluation de la radioexposition des travailleurs de l'OMNIS », Mémoire de Master, 04 Août 2016

## **Titre : Etalonnage des débitmètres utilisés pour la détection des rayonnements gamma**

### **RESUME**

Le Laboratoire Secondaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LSED) de l'INSTN-Madagascar assure l'étalonnage de tout appareil de mesure en dosimétrie dans les hôpitaux et les sociétés utilisant des sources radioactives. Il possède un étalon secondaire délivré et étalonné par le Laboratoire Primaire d'Etalonnage en Dosimétrie (LPED). Cet étalon est utilisé pour comparer ses valeurs de référence avec celles affichées sur les instruments à étalonner.

Durant notre stage, on a étalonné trois (3) débitmètres : le Greatz X5DE, le Greatz X5C et l'Identifinder 2. On a pu déterminer le facteur d'étalement de chaque débitmètre en faisant des calculs avec les valeurs de référence utilisées. En utilisant les trois débitmètres pour mesurer directement les radiations, on a pu voir que l'écart entre les valeurs affichées pour chaque débitmètre et les valeurs réelles ne dépasse pas la limite de tolérance qui est de 20 %. On peut donc dire que ces débitmètres sont encore en bon état de fonctionnement. Concernant la courbe du facteur d'étalement  $N_k$  en fonction du débit de kerma  $K_{air}$  pour le débitmètre Graetz X5C elle est presque constante. De même pour la linéarité de la réponse des débitmètres c'est encore le débitmètre Graetz X5C qui reproduit presque intégralement les valeurs de débits de dose mesurée et calculée. Ainsi, on peut donc en conclure que ce dernier est le plus recommandé à être utilisé lors des mesures de radiations.

Dans le cadre de collaboration PNAE et INSTN-Madagascar, ce travail a été une bonne et enrichissante expérience, qui nous a permis de mettre en pratique toutes les connaissances acquises durant nos années d'études.

**Mots clés :** LSED, étalonnage, débitmètres, facteur d'étalement, limite de tolérance.

**Title: Calibration of ratemeters used for the gamma radiation detection**

### **ABSTRACT**

The Secondary Standard in Dosimetry Laboratory (SSDL) of INSTN-Madagascar is in charge of the calibration of every dosimetry measurement instrument in hospitals and companies using radioactive sources. It has a secondary standard delivered and calibrated by the Primary Standard Laboratory in Dosimetry (PSLD). This standard is used to compare its reference values with those displayed on the instruments to be calibrated.

During our training period, three (3) ratemeters were calibrated, the Greatz X5DE, the GreatzX5C and the Identifinder 2. We have determined the calibration factor for every rater by doing calculation with the reference value. By using the three surveymeters for direct radiations measurements, it has been found that the difference between the displayed values and the real values of every ratemeter does not exceed the tolerance limit which is 20 %. Then we can conclude that these ratemeters are still in good condition of functioning. Concerning, the calibration factor curve  $N_k$  with the  $K_{air}$  we can observe that for the Graetz X5C ratemeter this curve is almost constant. It is still the Graetz X5C ratemeter which can reproduce almost integraly the measured and calculated dose rate values. So we can say that this ratemeter is the most recommended for the radiations measurements.

The work carried within the framework of collaboration between PNAE and INSTN-Madagascar has been a good and rewarding experience which allowed us to put into practice all knowledge acquired during our years of studies.

**Keys words:** PSDL, calibration, ratemeter, calibration factor, tolerance limit

**Encadreurs :**

Dr RAZANABOLOLONA Voahangy Hari-Lala

**Impétrante :** HANTANIRINA Philomène Alexandra

Dr RALAIVELO Mbolatiana Anjarasoa Luc

Email : [h.alexiahh@gmail.com](mailto:h.alexiahh@gmail.com)