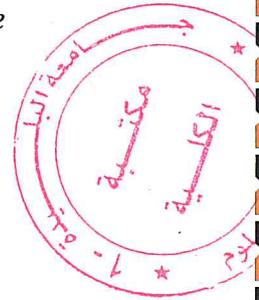
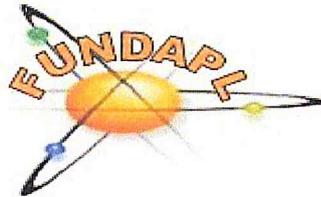


714.530.125-1

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences  
Département de physique  
*Laboratoire de Physique Fondamentale et Appliquée*



Mémoire de fin d'étude  
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique

Option : **Physique Appliquée**

Thème

Contribution à la mesure des concentrations du radon dans  
les habitations d'Adrar, de Tipaza et de la vallée du M'Zab

Présenté par :

**Mr Yacine HAMDI**

Soutenu le 07 /07 /2018 devant le jury composé de :

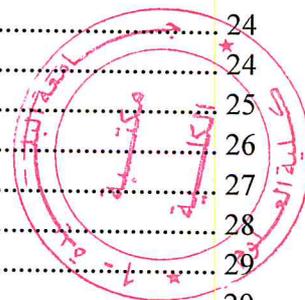
Mr M.A. BENAMAR	Professeur, U.S.D. Blida 1	Président
Mr A. BADREDDINE	Chercheur Confirmé, CRNA	Examineur
Mr D. TAIEB ERRAHMANI	Chercheur Assistant, CRNA	Examineur
Mr M. Aït-ZIANE	Chercheur Principale, CRNA	Encadreur

Blida 1-2017/2018-

MA-530-125-1

# TABLE DES MÉTIERS

TABLE DES FIGURES.....	4
LISTE DES TABLEAUX.....	6
RESUME.....	9
INTRODUCTION GENERALE.....	10
<b>1 CHAPITRE I : LE RADON ET LA RADIOACTIVITE NATURELLE.....</b>	<b>12</b>
1.1 INTRODUCTION.....	12
1.2 LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE .....	12
1.2.1 La radioactivité primordiale .....	13
1.2.2 La radioactivité cosmogonique.....	13
1.2.3 La radioactivité dans le corps humaine : .....	13
1.3 LE RADON.....	14
1.3.1 Propriétés du radon.....	14
1.3.2 Formation du radon .....	14
1.3.3 Les isotopes.....	15
1.3.4 Les sources du radon .....	16
1.3.5 Les risques sanitaires liés au radon .....	17
1.3.6 Le cadre règlementaire .....	18
1.3.7 Type de mesure du radon.....	20
<b>2 CHAPITRE II : DETECTEURS SOLIDES DE TRACES NUCLEAIRE.....</b>	<b>21</b>
2.1 INTRODUCTION.....	21
2.2 INTERACTION PARTICULE DSTN.....	23
2.2.1 Pouvoir d'arrêt linéaire SL .....	24
2.2.2 Transfert linéique d'énergie.....	24
2.2.3 Parcours des particules $\alpha$ .....	25
2.3 CRITERES D'ENREGISTREMENT DES TRACES.....	26
2.4 FORMATION DES TRACES LATENTES .....	27
2.5 REVELATION DES TRACES LATENTES .....	28
2.6 GEOMETRIE DES TRACES LATENTES.....	29
2.6.1 Vitesse d'attaque chimique surfacique $V_B$ .....	29
2.6.2 Vitesse d'attaque chimique $V_T$ le long de la trace .....	29
2.7 EFFICACITE DE REVELATION.....	30
2.8 COMPTAGE DES TRACES : .....	31
2.8.1 Microscope optique.....	31
2.8.2 Compteur à étincelles .....	32
<b>3 CHAPITRE III : ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR LE DSTN.....</b>	<b>33</b>
3.1 INTRODUCTION.....	33
3.2 DESCRIPTION DE DOSIMETRE.....	33



3.3	NATURE DE DETECTEUR UTILISE.....	34
3.4	DETERMINATION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES OPTIMALES DE DEVELOPPEMENT	34
3.4.1	Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement.....	35
3.4.2	Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement.....	37
3.5	DETERMINATION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES OPTIMALES DE LECTURE.....	39
7.1	DETERMINATION DU NOMBRE DE TRACES EN FONCTION DU TEMPS DE DEVELOPPEMENT	40
7.2	CORRECTION DE LA DENSITE DE TRACES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR ENLEVÉE .....	41
7.3	DETERMINATION DU L'EFFICACITE DU DETECTEUR .....	42
<b>4</b>	<b>CHAPITRE IV : MESURE DU RADON DANS LES HABITATIONS.....</b>	<b>44</b>
4.1	INTRODUCTION.....	44
4.2	LOCALISATION EL GEOGRAPHIQUE DES DIFFERENTES REGIONS D'ETUDE :.....	44
4.2.1	Première région d'étude : Wilaya d'Adrar .....	44
4.2.2	Deuxième région d'étude : Vallée de M'Zab .....	45
4.2.3	Troisième région d'étude : Wilaya de Tipaza.....	45
4.3	MATERIELS ET METHODES.....	46
4.4	CALIBRATION DU SYSTEME DE DETECTION .....	47
4.5	CONCENTRATION DU RADON DANS LES HABITATIONS.....	48
4.5.1	Concentration du radon dans la wilaya d'Adrar .....	49
4.5.2	Concentration du radon dans la wilaya de Tipaza .....	50
4.5.3	Concentration du radon dans la vallée du M'Zab.....	51
4.6	CONCLUSION .....	55
	<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERENCES .....</b>	<b>57</b>

## TABLE DES FIGURES

<b>FIGURE 1.1.</b> $^{238}\text{U}$ ET SES DESCENDANTS -----	16
<b>FIGURE 1.2.</b> $^{232}\text{Th}$ ET SES DESCENDANTS -----	16
<b>FIGURE 1.3.</b> $^{235}\text{U}$ ET SES DESCENDANTS -----	16
<b>FIGURE 1.4.</b> VOIES D'ENTREES DU RADON DANS LES HABITATIONS -----	17
<b>FIGURE 1.5.</b> SOURCES PRINCIPALE D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANT -----	17
<b>FIGURE 1.6.</b> MODE DE PENETRATION ET DE FIXATION DU RADON ET SES DESCENDANTS -----	18
<b>FIGURE 2.1.</b> TRACES DE PARTICULES A REVELEES DANS LES DSTN CR-39 -----	22
<b>FIGURE 2.2.</b> TRACES DE PARTICULES A REVELEES DANS LES DSTN LR-115 PHOTO PRISE PAR MICROSCOPE QUANTIMET 500 -----	23
<b>FIGURE 2.3:</b> POUVOIR D'ARRET DANS L'EAU ET DANS L'AIR DES PARTICULES ALPHA EN FONCTION DE L'ENERGIE -----	24
<b>FIGURE 2.4.</b> PARCOURS DE LA PARTICULE A DANS L'AIR -----	26
<b>FIGURE 2.5.</b> PARCOURS DE LA PARTICULE A DANS L'EAU -----	26
<b>FIGURE 2.6.</b> FORMATION DE LA TRACE LATENTE DURANT LA REVELATION CHIMIQUE -----	28
<b>FIGURE 2.7.</b> GEOMETRIE D'UNE TRACE LATENTE -----	30
<b>FIGURE 2.8.</b> EFFICACITE DE REVELATION DES TRACES -----	30
<b>FIGURE 2.9.</b> SYSTEME DE LECTURE DES DSTN PAR MICROSCOPE QUANTIMET 500 -----	31
<b>FIGURE 2.10.</b> CIRCUIT DE BASE DU COMPTEUR A ETINCELLES -----	32
<b>FIGURE 2.11.</b> COMPTEUR A ETINCELLES DE TYPE SPARK REPLICA COUNTER 710 P/S -----	32
<b>FIGURE 3.1.</b> DOSIMETRE DE RADON A BASE DE LR-115 -----	33
<b>FIGURE 3.2.</b> DETECTEUR SOLIDE DE TRACES NUCLEAIRE LR-115 TYPE II -----	34
<b>FIGURE 3.3.</b> PREPARATION DE LA SOLUTION CHIMIQUE -----	35
<b>FIGURE 3.4.</b> BAIN DE DEVELOPPEMENT CHIMIQUE -----	35
<b>FIGURE 3.5.</b> COMPAREUR D'EPaisseur DE TYPE MILLITRON -----	36
<b>FIGURE 3.6.</b> VARIATION DE L'EPaisseur RESIDUELLE EN FONCTION DU TEMPS DE DEVELOPPEMENT -----	37
<b>FIGURE 3.7.</b> VARIATION DE L'EPaisseur ENLEVEE EN FONCTION DU TEMPS DE DEVELOPPEMENT -----	37
<b>FIGURE 3.8:</b> COMPTEUR A ETINCELLE DE TYPE SPARK REPLICA COUNTER 710 P/S -----	39
<b>FIGURE 3.9:</b> SYSTEME D'IRRADIATION DES FILMS LR-115 -----	40
<b>FIGURE 3.10.</b> VARIATION DE LA DENSITE DE TRACES EN FONCTION DU TEMPS DE DEVELOPPEMENT -----	41
<b>FIGURE 3.11.</b> COMPARAISON L'EFFICACITE DE DETECTION ENTRE NOTRE TRAVAIL ET CELLE OBTENUE PAR MEBBANI [39]. -----	43
<b>FIGURE 4.1.</b> SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA WILAYA D'ADRAR -----	44

<b>FIGURE 4.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION DE VALLEE DE M'ZAB</b>	45
<b>FIGURE 4.3.SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA WILAYA DE TIPAZA</b>	46
<b>FIGURE 4.4 . MONTAGE EXPERIMENTAL POUR TRANSFERER LE 222RN LIBERE PAR LA SOURCE ETALON DANS LA CHAMBRE DE CALIBRATION</b>	47
<b>FIGURE 4.5.MONITEUR DE RADON TYPE ALPHA GUARD</b>	47
<b>FIGURE 4.6. CONCENTRATIONS DU RADON A L'INTERIEUR DE LA CHAMBRE D'ETALONNAGE</b>	48
<b>FIGURE 4.7. CONCENTRATION DU RADON DANS LES DIFFERENTES HABITATIONS DE LA WILAYA D'ADRAR</b>	50
<b>FIGURE 4.8.CONCENTRATION DU RADON DANS LES DIFFERENTES HABITATIONS DE LA WILAYA DE TIPAZA</b>	50
<b>FIGURE 4.9.CONCENTRATION DU RADON DANS LES DIFFERENTES HABITATIONS SITUEES DANS LA VALLEE DU M'ZAB</b>	53

## *Dédicaces*

Grâce à dieu le tout puissant, qui m'a donné la volonté, la force, et qui m'a éclairé vers le bon chemin, que rien ne peut se faire sans son désir.

Je dédie ce travail : A mes très chers parents qui ont tout sacrifié pour moi, grâce à vous que je suis là, grâce à vous que je serai très loin, vous restez toujours dans mon cœur.

A mes adorables frères et sœurs pour leurs encouragements, soutien moral, et leur compréhension, je leur souhaite tout le bonheur du monde. A toute personne de ma grande famille.

**YACINE**

## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements les plus chaleureux, et ma profonde gratitude et ma reconnaissance infinie à Monsieur M.A. BENAMAR., Professeur à l'Université de Bida pour ses encouragements, son aide, ses idées qui m'ont permis d'aller au fond des réflexions.*

*Je tiens à remercier Mr M. AIT -ZIANE, Chercheur principal au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, pour son encadrement et la patience avec lesquels il a répondu à mes nombreuses questions, ses conseils et son aide ainsi que pour tout le savoir qu'il m'a transmis.*

*Et un grand merci pour Mr A.W. BADREDDINE, Chercheur confirmé au CRNA, pour l'aide utile qu'il m'a apportée, pour ses conseils et ses encouragements.*

*Je ne peux omettre de remercier Mmes M. MEZAGUER et K. MEGHARI, pour leur gentillesse et leurs conseils avisés.*

*Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux que je n'ai pas cités et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et à l'accomplissement de ce projet.*

*A tous un grand MERCI*

## RÉSUMÉ

Le radon-222, gaz rare appartenant à la famille de l'uranium 238, est contenu à des teneurs variables dans les sols et les matériaux de construction. Il se désintègre pour donner des descendants solides. Ces derniers se fixent sur les aérosols présents dans l'air ambiant et leur inhalation conduit à leur dépôt dans l'appareil respiratoire. L'altération des cellules provoquée par l'énergie libérée lors de la désintégration alpha de ces corps radioactifs, peut causer des lésions pulmonaires.

Afin de déterminer la concentration du radon dans l'air des habitations, plusieurs méthodes sont utilisées et parmi elles les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN). Ces derniers peuvent être utilisés de façon très avantageuse par rapport aux autres méthodes du fait qu'ils soient simples et économiques. Leur principe de mesure est basé sur l'enregistrement des particules alpha émises par le radon et ses descendants.

Un développement chimique dans une solution NaOH, de concentration de 2.5 N à une température de 60°C pendant 110 min permet l'enregistrement des traces de particules  $\alpha$  sur le DSTN LR-115 type II avec une vitesse d'attaque  $V_B$  égale à  $(2.9 \pm 0.4) \mu\text{m/h}$ .

Dans ce travail, nous avons mesurés les concentrations du  $^{222}\text{Rn}$  dans les habitations de la wilaya d'Adrar, de la vallée du M'Zab et de la wilaya de Tipaza. Les concentrations moyennes obtenues sont égales à  $30 \pm 8$ ,  $43 \pm 7$  et  $31 \pm 12$  Bq/m<sup>3</sup> pour la wilaya d'Adrar, de la vallée du M'Zab et de la wilaya de Tipaza respectivement. Ces concentrations sont globalement inférieures à la valeur de référence de 200 Bq/m<sup>3</sup> qui est la valeur limite recommandée par l'AIEA.

**Mots clés :** Radon, particule alpha, détecteur solide de traces nucléaires (DSTN), LR-115

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le radon, gaz rare, radioactif, d'origine naturelle, est présent partout sur la surface de la terre. Il provient de la désintégration du radium, un descendant de l'uranium qui est lui-même, un constituant de la croûte terrestre. Lorsque le radon présent dans le sol est libéré dans l'atmosphère, il se mélange à l'air avec une concentration trop faible pour être préoccupante. En revanche, lorsque le radon s'infiltré dans un espace clos tel que les habitations, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations susceptibles de mettre en danger la santé humaine [1]

Présent dans les habitations, le radon entre dans le corps humain par la respiration. Il se désintègre en émettant des particules alpha et engendre des produits de filiations solides (le plomb, le polonium, le bismuth) qui se lient aux particules d'air et se fixent ensuite sur les bronches et les poumons. Ces produits de filiations de courte durée de vie se désintègrent en émettant des particules alpha. Quoique peu pénétrants, les particules alpha ont une capacité plus grande que les rayons gamma d'altérer les cellules bronchiques et engendrer des mécanismes susceptibles de causer le cancer [2]

Depuis le début des années 1980, des efforts considérables ont été déployés dans divers pays pour connaître le comportement, la distribution du radon, et pour réduire sa concentration dans les habitations. En 1987, le radon fut reconnu comme cancérigène pulmonaire pour l'homme par le Centre International de Recherche sur le Cancer (C.I.R.C) après de nombreuses études épidémiologiques chez les mineurs d'uranium et de charbon. La présence du radon dans l'environnement a, toutefois ressurgi comme une problématique environnementale avec l'apparition en 1998 du rapport Biological Effect of Ionizing Radiation (B.E.I.R). Des études épidémiologiques sur une population totale de plus de 30000 mineurs ont montré que le risque relatif de cancer broncho-pulmonaire augmente de façon significative d'environ 0,49 % par WLM [2] [3]

Pour toutes ces raisons, nous avons mené une étude visant à évaluer la concentration du radon dans les habitations dans les régions d'Adrar, de la vallée du M'Zab et de Tipaza en utilisant les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (D.S.T.N). Ce travail se divise en quatre principaux chapitres :

- Le premier chapitre présent les généralités sur la radioactivité naturelle et le radon que l'être humain est exposé, il permet de fournir les notions de bases nécessaires pour une bonne compréhension de la problématique étudiée,
- Le second chapitre est consacré aux propriétés générales des DSTN où nous allons développer les caractéristiques de ces détecteurs ainsi que leurs interactions avec les particules  $\alpha$ ,
- Le troisième chapitre où nous exposons les procédures expérimentales relatives au DSTN LR-115 type II en ce qui concerne l'optimisation de différents paramètres de révélation chimique des traces d'une part, et l'efficacité d'enregistrement des particules  $\alpha$  des dosimètres disponibles au niveau du laboratoire de dosimétrie du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) d'autre part
- Le quatrième chapitre présente le dispositif expérimental de calibration ainsi que l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure du radon dans l'air dans les habitations des différentes régions d'étude. Une comparaison des résultats obtenus avec ceux de différents pays ainsi que des valeurs de référence établies par les organisations internationales compétentes en matière de radioprotection.

# CHAPITRE I : Le radon et la radioactivité naturelle

## 1.1 Introduction

La radioactivité est un phénomène qui se produit dans les noyaux au plus profond des atomes. Le phénomène est difficile à observer : il a fallu attendre 1896 pour que soient décelés des rayonnements d'origine inconnue, émis par des sels d'uranium.

Certains noyaux atomiques instables sont la source de rayonnements, désignés par les trois premières lettres de l'alphabet grec : alpha ( $\alpha$ ), bêta ( $\beta$ ) et gamma ( $\gamma$ ). Ces rayonnements sont des particules émises par des noyaux avec une grande énergie. Les rayons  $\alpha$  sont des noyaux légers d'hélium, les rayons  $\beta$  des électrons négatifs ou positifs et les rayons  $\gamma$  des photons de grande énergie, analogues aux rayons X.

Ce qui distingue un atome radioactif d'un atome ordinaire, c'est cet instant unique où il se transforme en émettant un rayonnement. Cette émission survient au bout de temps très variables, pouvant atteindre des milliards d'années. En dehors de cet instant, un atome radioactif se comporte exactement comme un atome ordinaire, avec les mêmes propriétés physiques, chimiques ou biologiques. Durant toute son existence, il n'est pas plus mobile ou ni plus nocif que ses homologues non radioactifs [4]

## 1.2 La radioactivité naturelle

Nous ingérons et inhalons des éléments radioactifs présents naturellement dans notre environnement (l'air, l'eau, les aliments...). Cependant, la radioactivité naturelle provient principalement des radioéléments produits dans les étoiles, il y a des milliards d'années ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ), dont les traces et les descendants se trouvent dans l'environnement. L'exposition naturelle provient : des rayonnements telluriques émis par les roches et les sols (0,45 à 0,54 mSv), des rayons cosmiques (0,30 à 0,36 mSv), de la radioactivité propre du corps humain (0,25 à 0,30 mSv) et surtout des émanations de radon (1,0 à 1,2 mSv). Il y a trois types de radioactivité dans l'environnement.

### 1.2.1 La radioactivité primordiale

La radioactivité primordiale est due à des radioéléments existant depuis la création de l'univers. Ils ont vécu longtemps avec des demi-vies de l'ordre de centaines de millions d'années [5].

**Tableau 1.1.** Radionucléides primordiaux

Nucléide	Symbole	Demi-vie
Uranium-235	$^{235}\text{U}$	$7.04 \cdot 10^8$ ans
Uranium-238	$^{238}\text{U}$	$4.47 \cdot 10^9$ ans
Thorium-232	$^{232}\text{Th}$	$1.41 \cdot 10^{10}$ ans
Potassium-40	$^{40}\text{K}$	$1.28 \cdot 10^9$ ans

### 1.2.2 La radioactivité cosmogonique

La terre est toujours bombardée par des rayons cosmiques qui sont des particules de très haute énergie en provenance de l'espace galactique [5]. Il s'agit de :

- Noyaux d'hydrogène (85%),
- Noyaux d'hélium (12,5%),
- Electrons (1,5 %),
- Noyaux lourds (1 %)

**Tableau 1.2.** Radionucléides cosmogéniques

Nucléide	Symbole	Demi-vie
Carbone 14	$^{14}\text{C}$	5730 ans
Hydrogène 3	$^3\text{H}$	12, 3 ans
Béryllium 7	$^7\text{Be}$	53,28 jours

### 1.2.3 La radioactivité dans le corps humaine :

Notre corps est légèrement radioactif, l'irradiation interne vient de  $^{14}\text{C}$  et de  $^{40}\text{K}$  et qui pénètre dans l'organisme humain par ingestion. Au total, 8000 atomes de  $^{40}\text{K}$  et de  $^{14}\text{C}$  se désintègrent dans notre corps par seconde pour générer, en moyenne, une irradiation interne égale à 0,2 mSv/personne/ans [5].

**Tableau 1.3.**Radioactivité dans le corps humain

Nucléide	Masse ( $\mu\text{g}$ )	Activité (Bq)	Ingestion quotidienne ( $\mu\text{g}$ )
Uranium-238	90	1.1	1.9
Thorium-232	30	0.11	3
Radium-226	$31 \times 10^{-3}$	1.1	-
Carbone-14	95	15000	1.8
Tritium	$6 \times 10^{-5}$	23	$3 \times 10^{-6}$
Polonium-218	$2 \times 10^{-4}$	37	0.6

### 1.3 Le Radon

Après la découverte du radium par Pierre et Marie Curie d'autres radioéléments naturels sont découverts. Parmi eux, le radon. En 1900, Friedrich Ernst Dorn (Allemagne) met en évidence que l'air au contact de composés du radium devient radioactif et que ce phénomène est dû à une émanation gazeuse issue du radium, c'est le radon. La même année, Rutherford montre que ce gaz se forme lors de la désintégration du radium avec l'émission d'une particule alpha.

La mesure du radon et de ses descendants dans l'environnement est devenue depuis quelques années une mission importante pour les laboratoires d'analyses et de mesures de la radioactivité environnementale. On estime que cet élément est la source principale d'exposition radiologique naturelle pour l'homme.

#### 1.3.1 Propriétés du radon

Étymologie du nom vient du radium, le radon a été appelé initialement nitons, ce qui signifie brillant, Inodore, incolore, insipide et radioactif. Il est invisible, qui s'est appelé historiquement émanation.

Le radon ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ) est un gaz rare inerte, d'origine naturelle, c'est le gaz le plus lourd (densité  $9,72 \text{ kg/m}^3$  à  $273 \text{ °K}$ , soit 8 fois plus que l'air). Il se liquéfie à  $-68 \text{ °C}$  et se solidifie à  $-71 \text{ °C}$ . Le radon est soluble dans l'eau et il s'adsorbe facilement sur les solides : charbon actif, silicagel, paraffine, etc... Cette propriété est d'ailleurs mise à profit dans certaines méthodes de dosage [6]

#### 1.3.2 Formation du radon

Les éléments radioactifs du sol, présents en proportions variables dans la plupart des roches sont notamment  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$ . Ces éléments sont instables et se désintègrent

progressivement jusqu'à l'élément stable  $^{206}\text{Pb}$ . En se désintégrant, ces éléments donnent naissance à des descendants eux-mêmes radioactifs comme le radium et le radon

La formation du  $^{222}\text{Rn}$  dans un endroit donné se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, le radon, formé par désintégration alpha du radium présent dans les grains du sol, ces particules libérées gagnent l'espace des pores du réseau cristallin, en effet, lors de cette désintégration sur l'action de l'énergie libérée, l'atome du radon subit un recul de longueur  $d$  dans le réseau [7]. Dans un deuxième temps, les atomes du radon migrent à travers l'espace des pores jusqu'à ce qu'ils atteignent l'atmosphère ou jusqu'à ce qu'ils se désintègrent.

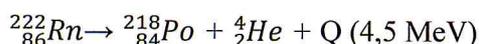
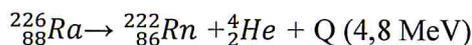
La proportion d'atomes de radon qui parviennent jusqu'à l'air extérieur est finalement plus faible que celle des atomes de  $^{222}\text{Rn}$  se désintègrent avant d'avoir atteint les interfaces sol-air. Cela se traduit par un coefficient d'émanation qui peut varier d'un matériau à l'autre. Cette proportion du radon atteignant l'atmosphère libre dépend de la distance entre le lieu de formation et l'interface sol-air. Seul le radon produit à une certaine profondeur du sol arrivera.

### 1.3.3 Les isotopes

Le radon a une vingtaine d'isotopes radioactifs, dont trois seulement sont à l'état naturel :

- Radon :  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,8$  jours)
- Thoron :  $^{220}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 54,2$  secondes)
- Actinon :  $^{219}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,92$  secondes)

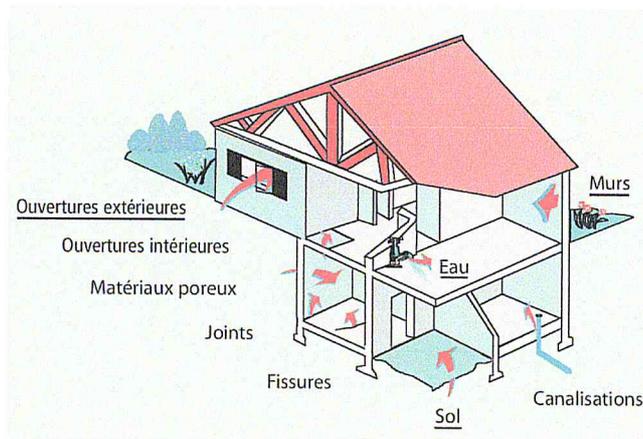
Il est important de mentionner que le paramètre physique qui différencie ces isotopes est leur période radioactive ( $T_{1/2}$ ). La désintégration de ces isotopes se fait par l'émission d'une particule alpha pour donner un isotope instable du polonium.



Les trois isotopes du radon (radon, thoron et actinon) appartiennent respectivement aux familles radioactives naturelles de  $^{238}\text{U}$ , de  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{235}\text{U}$ .

Dans ces trois familles, les trois éléments pères possèdent une période très longue et engendrent des séries de descendants radioactifs jusqu'à l'apparition d'un élément stable : isotope du plomb. Les différents radioéléments formés sont des solides (à température et pression normales) à l'exception d'un par famille qui est l'isotope du radon.



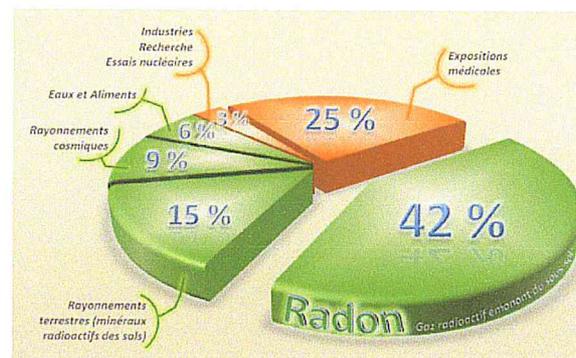


**Figure 1.4.** Voies d'entrées du radon dans les habitations [8]

Des conditions locales comme la nature du sol sous la maison, peuvent engendrer des concentrations élevées. Enfin, la concentration en radon varie au cours de la journée (plus élevée le matin), d'une saison à l'autre (plus élevée en hiver) et en fonction des conditions météorologiques. Plus on s'éloigne de la source de ces infiltrations (de la cave dans les maisons anciennes), plus la concentration diminue.

### 1.3.5 Les risques sanitaires liés au radon

Le radon constitue la principale source d'exposition naturelle aux rayonnements ionisants (Fig.1.5), il est reconnu comme cancérigène pulmonaire certain par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) depuis 1987. L'exposition au radon est le second facteur de risque de cancer du poumon après le tabac.

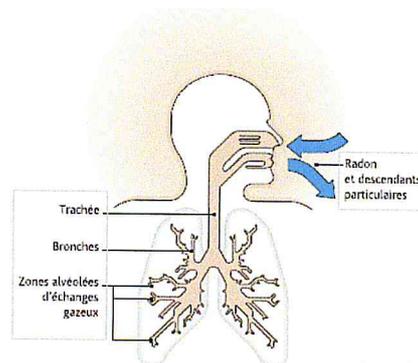


**Figure 1.5.** Sources principale d'exposition aux rayonnements ionisant [9]

Généralement, le gaz radon diffuse dans l'air à partir du sol ou de l'eau où il peut être dissous. A l'air libre, sa concentration est faible : il est dilué par les vents. Mais dans l'atmosphère plus confinée d'un bâtiment, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées. Le seuil

d'alerte est égal à  $1000 \text{ Bq/m}^3$ , dans les normes internationales. Les matériaux de construction constituent la deuxième source de radon. Mais elle ne dépasse généralement pas quelques dizaines de  $\text{Bq/m}^3$  alors que le sol de l'habitation peut être la source de concentrations de radon de quelques centaines de  $\text{Bq/m}^3$ . La concentration de radon que nous respirons est généralement très faible ; moins de  $10 \text{ Bq/m}^3$  en moyenne.

Les produits de filiation du radon sont des particules solides. La plupart des produits de filiation du radon se fixent sur des particules de poussière infimes (aérosols) contenues dans l'air intérieur. Une fraction variable reste libre. Lorsque les produits de filiation du radon sont inhalés, une fraction des particules fixées et des particules libres se dépose dans les poumons (Fig.1.6) [10].



**Figure 1.6.** Mode de pénétration et de fixation du radon et ses descendants

À l'intérieur des poumons, les produits de filiation du radon émettent des particules alpha qui sont absorbées dans les tissus pulmonaires avoisinants. Comme les particules alpha ne peuvent pas pénétrer à plus d'une fraction de millimètre dans le tissu, le dommage est confiné au tissu pulmonaire de la zone située à proximité immédiate.

### 1.3.6 Le cadre réglementaire

La radioprotection a pour but de protéger l'homme contre les rayonnements ionisants tout en lui permettant de les utiliser. Les dangers de l'exposition apparurent très vite après la découverte de la radioactivité, d'où la nécessité d'avoir une protection et de définir les règles d'utilisation.

La réglementation est un ensemble de règles, de règlements et de prescriptions qui concernent un domaine particulier. En matière de radioprotection, celle-ci constitue un volet des dispositions plus générales relatives à l'hygiène et à la sécurité des travailleurs et à la

protection du public. Elle est définie comme étant l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement [11].

Le risque lié au  $^{222}\text{Rn}$  est une question qui mobilise fortement les organisations internationales depuis plusieurs années, après avoir reconnu le radon comme cancérigène pulmonaire, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a mis en place en 2005 un projet international sur le radon dans le cadre duquel plus de trente pays ont constitué un réseau de partenaires chargés d'identifier et de promouvoir des programmes visant à réduire les effets sanitaires du radon. A l'issue de ce projet, l'OMS a publié en 2009 un manuel sur le radon intitulé « WHO Handbook on indoor radon ». Sur la base de ce guide, l'OMS recommande un niveau de référence de 100 Bq/m<sup>3</sup> et appelle les pays membres à établir ou à renforcer leurs programmes visant à contrôler la présence de radon dans les habitations, afin de réduire le risque de cancers qui y est associé [12] [13].

La Commission Internationale de la Protection Radiologique (CIPR), en utilisant les données scientifiques et publications de l'UNSCEAR, a de son côté, souligné l'importance de la mesure de la concentration du gaz radon en radioprotection et proposé des limites d'inhalation pour les mineurs et des normes d'exposition pour le public. Ainsi, dans sa publication n°126, elle recommande un niveau de référence commun de 300 Bq/m<sup>3</sup> ou de 10 mSv/an en fonction du temps d'exposition visant ainsi à réduire à la fois le risque global et les expositions les plus élevées [19] [20].

La réglementation en vigueur en Algérie en ce qui concerne la surveillance radiologique est une vieille activité, le premier document officiel relatif à la radioprotection est le décret n°86-132 du 27 Mai 1986 basé sur la publication 26 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) fixant les règles de protection des travailleurs contre les risques des rayonnements ionisants ainsi que celles relatives au contrôle de la détection et de l'utilisation des substances radioactives et des appareils émettant des rayonnements ionisants. Après apparition de la publication 60 de la CIPR en 1990 en réduisant les limites annuelles d'exposition aux rayonnements ionisants pour les travailleurs et pour le public, de 50 mSv à 20 mSv et de 5 mSv à 1 mSv respectivement, le décret n°05-117 du 11 avril 2005 a traduit cette évolution. En ce qui concerne les limites radiologiques propres au  $^{222}\text{Rn}$ , aucun texte n'a été fixé, l'Algérie se joint et respecte les valeurs recommandées par les organisations

internationales compétentes en la matière. Un nouveau décret devrait paraître afin de prendre en compte les nouvelles recommandations parues dans la publication 103 de la CIPR éditée en 2007 [21].

### 1.3.7 Type de mesure du radon

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'activité volumique du radon-222 et l'énergie alpha potentielle volumique de ses descendants à vie courte dans l'atmosphère. Les techniques de mesure peuvent être classées en trois catégories selon le mode de prélèvement [22] :

- **Les méthodes de mesure ponctuelle** : qui consistent à prélever le radon sur une courte durée (inférieure à 1 h) en un point donné de l'espace : Sur un laps de temps très bref, quelques secondes à 1 min au maximum, qui donne une « photographie de la situation à un moment donné. On prélève le volume défini de l'atmosphère à analyser par pompage, dans une fiole à travers un filtre, ou directement dans une chambre d'ionisation. Puis on détermine l'activité du radon et de ses produits de filiation au moyen d'un ou de plusieurs comptages, par scintillation ou ionisation.
- **Les méthodes de mesure en continu** : qui consistent en un prélèvement effectué en continu dont les durées doivent être adaptées à la dynamique du phénomène étudié. Qui permet de suivre l'évolution de la concentration en fonction de temps. Comme, par exemple, celles liées aux Changements de pression atmosphérique ou celles liées aux habitudes de vie (ouverture des fenêtres, mise en route d'une ventilation...).
- **Les méthodes de mesure intégrée** : qui nécessitent une durée de prélèvement minimale d'une semaine afin d'inclure un certain nombre de cycles de variation journalière. Ce sont les mesures les plus utilisées pour dépister le radon. Parmi les dispositifs les plus répandus, on peut citer le détecteur solide de traces nucléaires (DSTN). Il est constitué d'un polymère ayant la particularité d'être sensible aux particules alpha du radon. Lors de leur parcours dans le matériau, les particules alpha transfèrent leur énergie en ionisant ou excitant les atomes du polymère. Cette énergie cédée au milieu traversé laisse des zones de dégâts appelées « traces latentes ». Ces traces sont ensuite révélées par un traitement chimique approprié puis observées par microscope optique. Le nombre de traces est proportionnel à l'activité volumique moyenne de radon à laquelle le détecteur est exposé.

## CHAPITRE II : Détecteurs Solides de Traces Nucléaire

### 2.1 Introduction

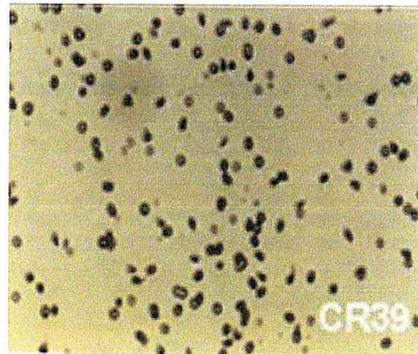
Les particules chargées peuvent être également détectées par l'observation de traces nucléaires, zone de dommage créée le long des trajectoires de ces particules dans le matériau détecteur. Toutefois, l'enregistrement du passage d'une particule chargée dans un solide n'est pas réalisé d'une façon systématique pour toute particule et pour tous les matériaux. Seuls certains Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) mémorisent le passage de particules chargées, lorsque ses propriétés sont en corrélation avec les seuils de détection.

Historiquement, Price et Walker en 1962 ont mis au point la technique d'observation en microscopie optique de traces individuelles des fragments de fission créés en profondeur dans les milieux condensés. Ils ont montré qu'une attaque chimique différentielle par un acide ou par une base s'effectue préférentiellement le long de la trajectoire des particules dans le détecteur. Ces traitements élargissent les traces jusqu'à atteindre 0,5  $\mu\text{m}$  et les rendent ainsi observables au microscope. Les premiers travaux de Fleischer, Price et Walker en 1975 [23] ont donné une description des mécanismes du développement chimique et de la formation des traces. Ils ont ainsi étendu le champ d'application de l'étude des traces nucléaires à des domaines aussi variés que la géologie, la biologie, l'archéologie, la physique nucléaire, l'étude des météorites ou des échantillons lunaires. On distingue deux grandes différences entre les traces latentes présentes dans deux classes majeures de solides qui sont, soit des minéraux (verre, mica, apatite, quartz, feldspath, ...) soit des matériaux organiques polymériques tels que les dérivés cellulosiques (nitrate de cellulose, diacétate et tri acétate de cellulose) et les polycarbonates (CR39, Lexan, ...).

Tous les résultats (nombre de traces, diamètres, bruit de fond, ...) d'un DSTN dépendent principalement des conditions de développement et de comptage. Dans tous les cas, une densité de traces bien homogène est le signe d'une bonne maîtrise de la mesure et il s'en suit une moindre fluctuation des résultats [6]. Dans la pratique, on distingue deux sortes de DSTN :

- **DSTN Massifs**

Historiquement de très nombreux DSTN massifs ont été utilisés. Les plus répandus aujourd'hui sont des polycarbonates (CR39, Makrofol, ...). Il s'agit de feuilles en Plexiglas, plus ou moins souples, de l'ordre du millimètre d'épaisseur. Les traces ressemblent à des cônes de différentes tailles dont les vertex se situent dans la masse du détecteur. Le CR-39 ou Polycarbonate d'allyldiglycol ( $C_{12}H_{18}O_7$ ) est un polymère transparent, amorphe et sensible aux particules ionisantes [24]. Il se présente souvent sous forme de feuilles de 0.5 mm d'épaisseur pour les applications nucléaires. Ce polymère est également utilisé pour la fabrication des verres de lunettes. Un développement chimique est nécessaire à la révélation des traces produites par le passage des particules  $\alpha$ . Ce détecteur a l'avantage d'enregistrer des particules  $\alpha$  ayant un angle d'incidence allant jusqu'à  $75^\circ$  et une énergie comprise entre 0 et 20 MeV. La figure 2.1 montre des traces alpha révélées dans le CR-39 ; les formes plus ou moins elliptiques de ces traces sont représentatives des différents angles et énergies des particules incidentes. Ces conditions d'attaque chimique se résument à une durée de 6 heures dans une solution de KOH de molarité 6.25M à une température de  $60^\circ C$ .



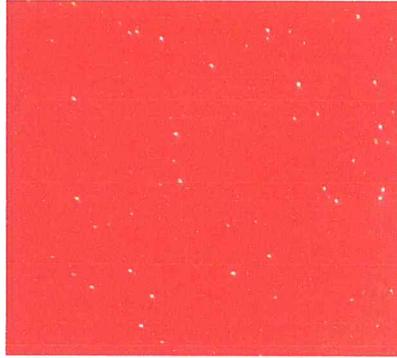
**Figure 2.1.** Traces de particules  $\alpha$  révélées dans les DSTN type CR-39

- **DSTN en couches minces**

Il s'agit du film Kodak type LR-115. Il est constitué d'une couche de nitrocellulose ( $C_6H_8N_2O_9$ ), fortement teintée en rouge, de  $12\mu m$  d'épaisseur moyenne, sur un support inerte de  $100\mu m$  en polyester. Le nitrate de cellulose est parmi les DSTN les plus sensibles aux particules alpha. Il peut enregistrer des particules  $\alpha$  d'énergie comprise entre 1, 4 et 4, 7 MeV avec un angle d'incidence allant jusqu'à  $50^\circ C$  [25]. L'insensibilité du LR-115 aux rayonnements électromagnétiques et aux électrons présente un grand intérêt pour son

utilisation en champs mixte de rayonnements. Sa révélation chimique se fait pendant 2 heures dans une solution de NaOH de molarité 2,5 M à une température de 60°C.

Après traitement chimique, chaque impact de particule  $\alpha$  laisse un micro-trou dans la couche rouge, de 1 à 15 $\mu$ m de diamètre. La figure 2-2 montre des traces alpha révélées dans le LR-115.



**Figure 2.2.** Traces de particules  $\alpha$  révélées dans les DSTN type LR-115

## 2.2 INTERACTION PARTICULE DSTN

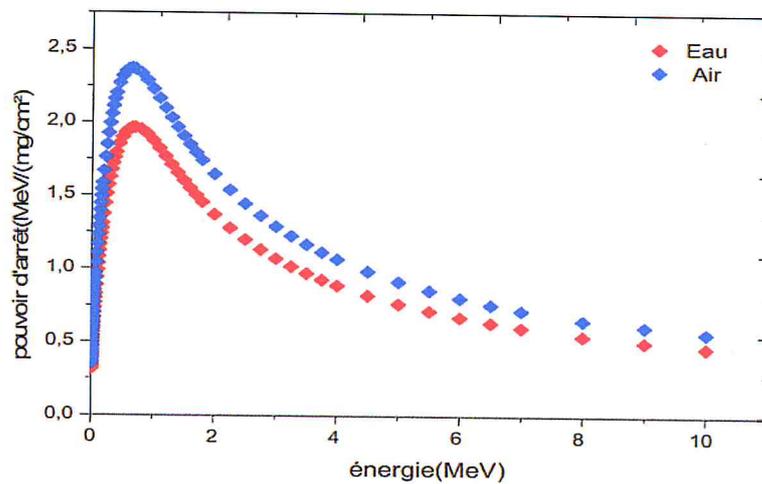
Le passage d'une particule chargée à travers le DSTN génère des endommages le long de sa trajectoire. L'endommagement du matériel est induit par des échanges énergétiques entre la particule incidente et les atomes environnants [26] ; en pénétrant dans un milieu, elle interagit avec ces atomes et se ralentit. Lors de leur passage dans la matière, les particules  $\alpha$  perdent leur énergie par collisions inélastiques et élastiques avec les électrons et les noyaux atomiques du milieu ralentisseur. La perte d'énergie totale est la somme de ces deux contributions : pouvoir d'arrêt électronique et nucléaire [27].

Le premier processus est l'effet principal responsable de la perte d'énergie des particules chargées lourdes. Dans ce type de collisions, l'énergie est transférée de la particule à l'atome en produisant une ionisation ou une excitation de l'atome. La quantité d'énergie transférée lors de chaque collision est une très faible portion de l'énergie cinétique de la particule incidente. Cependant le nombre de collisions par unité de parcours est tellement grand que l'on peut observer une perte d'énergie substantielle même dans des matériaux de faibles épaisseurs [14].

### 2.2.1 Pouvoir d'arrêt linéaire $S_L$

Lorsqu'une particule chargée traverse un milieu donné (solide, liquide), il se produit une interaction électromagnétique avec les électrons de ce milieu à cause de leurs charges. Cette particule perd son énergie progressivement dans ce milieu. L'élément d'énergie moyenne perdue  $dE$  par la particule chargée parcourant un élément de distance  $dx$  dans le milieu appelé pouvoir d'arrêt linéaire noté  $S_L$  s'exprime en  $eV/\mu m$  ou en  $keV/\mu m$  et donné par la formule suivante :

$$S_L = \frac{dE}{dx} \quad (2.1)$$



**Figure 2.3:** Pouvoir d'arrêt dans l'eau et dans l'air des particules alpha en fonction de l'énergie

### 2.2.2 Transfert linéique d'énergie

Lorsqu'on s'intéresse au milieu absorbant (et non plus à la particule), on utilise le TLE (LET Linear Energy Transfer) qui est par définition l'énergie moyenne déposée localement au milieu absorbant par une particule d'énergie  $E$  qui traverse une distance donnée dans le milieu [28].

$$TLE = \left[ -\frac{dE}{dx} \right] = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0 m^1 v^2} NZ \left[ \log\left(\frac{2mv^2}{I}\right) - \log\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} - \frac{Ck}{z} \right] \quad (2.2)$$

Où :

$z$ , et  $v$ , sont la charge et la vitesse de la particule incidente ;

$m$ , et  $e$ , sont la masse au repos et la charge de l'électron ;

$\epsilon_0$ , est la permittivité du vide, égale à  $8,854 \times 10^{-10}$  F/cm ;

$c$ , est la vitesse de lumière dans le vide :  $3 \times 10^8$  m/s

$N$ , et  $Z$  sont le nombre des noyaux cibles par unité de volume et le numéro atomique du matériau absorbant (LR-115)

$C_K$  est un terme de correction qui dépend de l'énergie et de  $Z$  lorsque l'on tient compte de la structure complète des noyaux de la matière ;

$I$ , est la valeur moyenne du potentiel d'ionisation tenant compte de l'ionisation et de l'excitation des atomes ralentisseurs, donnée par la formule semi empirique (en eV) :

$$I = 9.1 Z (1 + 1.9 Z^{-2/3}) \quad (2.3)$$

### Cas des particules alpha $\alpha$

Pour le cas des particules  $\alpha$  de vitesse  $v_1$ , émises durant la désintégration des noyaux et d'énergie comprise entre 2 et 10 MeV, la perte d'énergie se réduit à :

$$TLE = \frac{16\pi e^4}{m^1 v^{12}} NZ \left[ \log \left( \frac{2mv^{12}}{I} \right) - \frac{Ck}{Z} \right] \quad (2.4)$$

Cette expression est valable si les trois conditions suivantes sont réunies :

- Il n'y a pas de capture ou de perte d'électrons pendant le passage de la particule,
- Le terme  $\frac{Ze^2}{m^1 v^{12}}$  est assez petit pour que la diffusion nucléaire et le rayonnement de freinage puissent être négligés,
- Il n'y a pas de polarisation du milieu traversé.

Cette formule donne de bons résultats pour l'évaluation des pertes d'énergie par unité de longueur lorsque l'énergie est supérieure à 1MeV/u.m.a. Cependant, lorsque la vitesse de la particule devient très faible devant la vitesse de l'électron orbital, par exemple en fin de parcours, la perte d'énergie par interaction dite nucléaire n'est plus négligeable.

#### 2.2.3 Parcours des particules $\alpha$

Lorsqu'une particule chargée pénètre dans une matière donnée elle va parcourir une certaine distance puis elle s'arrête. Le parcours d'une particule  $\alpha$  dans un matériau donné est le trajet nécessaire pour que cette particule perde complètement son énergie cinétique. Considérons un faisceau de particules Alpha initialement monocinétiques d'énergie  $E_0$  qui pénètre dans un matériau absorbant. Chaque particule incidente a un parcours individuel. Les parcours individuels diffèrent et fluctuent autour d'un parcours moyen  $R$ , qui est défini par la relation:

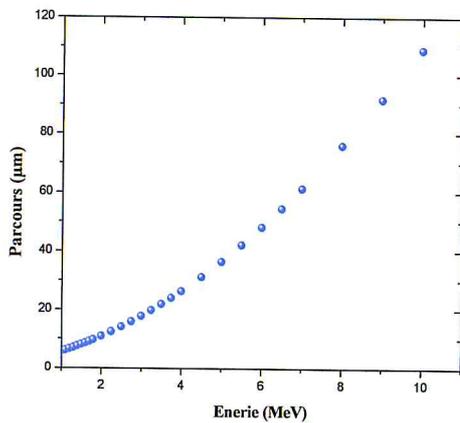
$$R = \int_0^R dr \quad (2.5)$$

Puisque l'énergie incidente de la particule et l'épaisseur du matériau cible sont interdépendantes, alors on peut les interchanger dans l'équation précédente ; on aura donc :

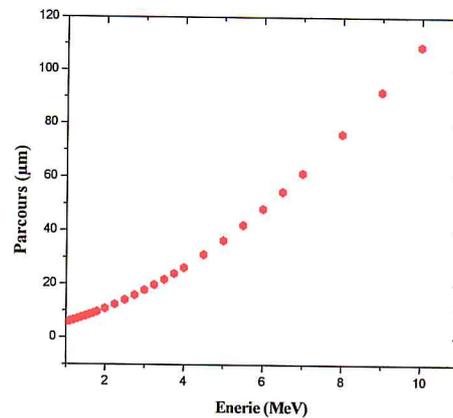
$$R = \int_E^0 \frac{dr}{dE} dE = \int_0^E \left(-\frac{dE}{dr}\right)^{-1} dE = \int_0^E \frac{1}{TLE} dE \quad (2.6)$$

R : s'exprime en cm si TLE est en MeV/cm.

Les figures 2.4 et 2.5 montrent le parcours des particules  $\alpha$  dans l'air et dans l'eau respectivement, les particules  $\alpha$  d'énergie 5.49 MeV issues du  $^{222}\text{Rn}$  dont le TLE est égal à 130 keV/ $\mu\text{m}$  dans l'eau, ont un parcours d'environ 40  $\mu\text{m}$  (Fig. 2.5).



**Figure 2.4.** Parcours de la particule  $\alpha$  dans l'air



**Figure 2.5.** Parcours de la particule  $\alpha$  dans l'eau

### 2.3 Critères d'enregistrement des traces

La visualisation d'une trace latente ne se réalise qu'à travers des conditions de plusieurs paramètres. Chaque type de détecteur est caractérisé par une perte d'énergie critique  $(dE/dx)_c$  à la surface du détecteur en dessous de laquelle la détection des traces n'est pas observable [23]. Ce critère a été rejeté car il a été remarqué que les ions de fer relativistes n'étaient pas détectés dans le nitrate de cellulose tandis que le TEL était supérieur à  $(dE/dx)_c$ . Cela a prouvé que l'enregistrement des traces dépend non seulement de la nature du matériau mais aussi de la nature des particules incidentes. L'apparition d'une trace dépend des trois paramètres complémentaires suivants :

- L'angle d'incidence,
- L'énergie de la particule incidente,
- Les conditions de développement, comme nous l'avons signalé auparavant.

## 2.4 Formation des traces latentes

Durant les cinq dernières décennies, plusieurs travaux [30] ont été effectués afin d'expliquer et de comprendre la distribution spatiale du dépôt d'énergie et les modèles de formation d'une trace dans un DSTN.

Parmi ces modèles nous citons plus particulièrement le modèle de la pointe thermique et le modèle d'explosion ionique. Ces modèles indiquent que la zone entourant l'axe de la trajectoire de la particule subit un maximum de dégâts créés par l'ionisation primaire. Les électrons issus de cette ionisation créent à leur tour des dommages le long de leur parcours. La trace est constituée de deux zones de perturbations :

- Une zone cylindrique de rayon  $r_0$  dite cœur de la trace, dans laquelle les perturbations sont créées par le passage de la particule chargée (ionisation primaire),
- Une zone appelée halo de dommages, où les perturbations créées au cœur de la trace se propagent par les électrons issus de l'ionisation primaire.

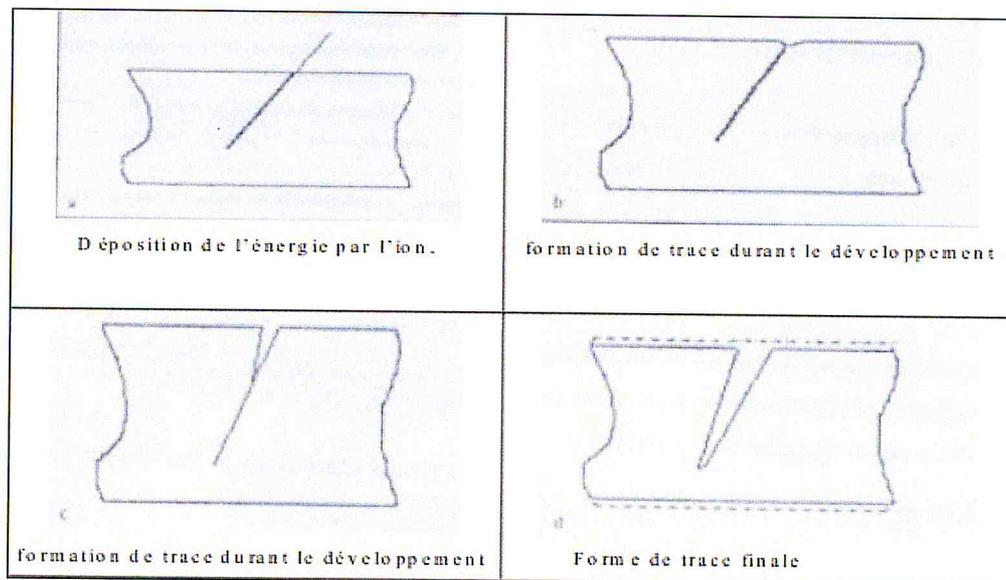
L'ensemble des dégâts, dans un polymère peut provoquer une réduction de la masse molaire, une augmentation du nombre de chaînes par cassure induite, une modification de la masse volumique et la formation de nouvelles espèces chimiques. Ces modifications structurales rendent possible la mise en évidence des traces par développement chimique.

En fait, la structure d'une trace révélée est complexe et difficile à quantifier même au microscope électronique. Elle peut être assimilée à un volume de révolution autour d'un axe de rayon  $r$  compris entre 1 à 150 Angströms et de 105 Angströms de longueur pour les fragments de fissions dans les polymères. Pour les particules  $\alpha$ , les dimensions radiales sont de l'ordre de l'Angströms, nous pouvons donc assimiler la trace latente à un segment puisque le diamètre de la trace est petit par rapport à sa longueur [6].

## 2.5 Révélation des traces latentes

L'attaque du matériau irradié se fait par un réactif chimique tel qu'un acide ou une base et s'effectue particulièrement au niveau des dommages qui constituent l'environnement immédiat de la trajectoire géométrique de la particule incidente. En immergeant le matériau irradié dans un réactif chimique convenable, ce dernier diffuse dans les zones endommagées pendant un temps dit « temps d'induction de l'attaque ». Ensuite ; le réactif pénètre dans les zones endommagées et crée un canal le long de la trajectoire de la particule (Fig. 2.6). En même temps, les surfaces non irradiées du détecteur sont aussi attaquées mais avec un taux moindre. En érodant l'intérieur du canal, le réactif permet d'élargir ses dimensions pour donner une trace visible. Les traces latentes sont ainsi agrandies et deviennent visibles au microscope optique ordinaire [31]. Le développement chimique est caractérisé par trois facteurs essentiels :

- Normalité de la solution de développement,
- Température du bain de développement ;
- Temps de développement.



**Figure 2.6.** Formation de la trace latente durant la révélation chimique

C'est selon les conditions spécifiques des expériences et aussi selon les informations qu'on veut tirer de ces expériences qu'on fixe ces paramètres

## 2.6 Géométrie des traces latentes

Le processus de développement chimique des traces latentes a fait l'objet de nombreux travaux. La révélation de la trace latente est un processus de compétition entre deux vitesses. Selon Fleischer et Price, la géométrie de la trace est dictée par l'action simultanée de la dissolution chimique du matériau le long du canal entouré de dégâts latents selon une vitesse  $V_B$  qui est l'attaque globale de la surface du matériau non irradiée et une vitesse  $V_T$  qui est le long de la trajectoire de l'ion [32].

### 2.6.1 Vitesse d'attaque chimique surfacique $V_B$

La vitesse d'attaque chimique surfacique  $V_B$  correspond à la vitesse avec laquelle l'épaisseur du détecteur a été décapée lorsqu'il est soumis à un traitement chimique [14]. Elle est donnée par la méthode dite des épaisseurs, où la vitesse  $V_B$  n'est que le rapport de l'épaisseur résiduelle du matériau  $h$  sur la durée de l'attaque chimique  $\Delta t$ .

$$V_B = \frac{h}{\Delta t} \quad (2.7)$$

### 2.6.2 Vitesse d'attaque chimique $V_T$ le long de la trace

La vitesse d'attaque chimique  $V_T$  est propre aux traces latentes, elle traduit l'érosion interne de la trace [33]. Elle est donnée par la relation suivante:

$$V_T = V_B \cdot \frac{1 + \left(\frac{d}{2h}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{2h}\right)^2} \quad (2.8)$$

Où :

- $V_T$  : la vitesse d'attaque le long de dégâts latente,
- $V_B$  : la vitesse d'attaque le long de la région non irradiée,
- $d$  : le diamètre de la trace d'une particule alpha,
- $h$  : l'épaisseur enlevé dans un temps  $t$  (qui est l'épaisseur initiale – l'épaisseur résiduelle dans un temps  $t$ )

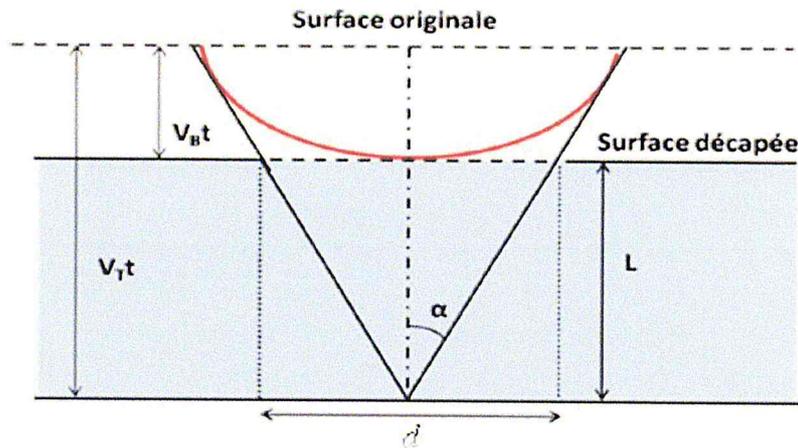


Figure 2.7. Géométrie d'une trace latente

## 2.7 Efficacité de révélation

Du fait du processus à deux vitesses de révélation, les traces inclinées ne sont pas toutes observables après révélation (Fig. 2.8). On définit un angle critique  $\theta_C$  entre la trajectoire de la particule incidente et la surface du détecteur [34]. Elle est donnée par :

$$\theta_C = \sin^{-1} \left( \frac{V_B}{V_T} \right) \quad (2.9)$$

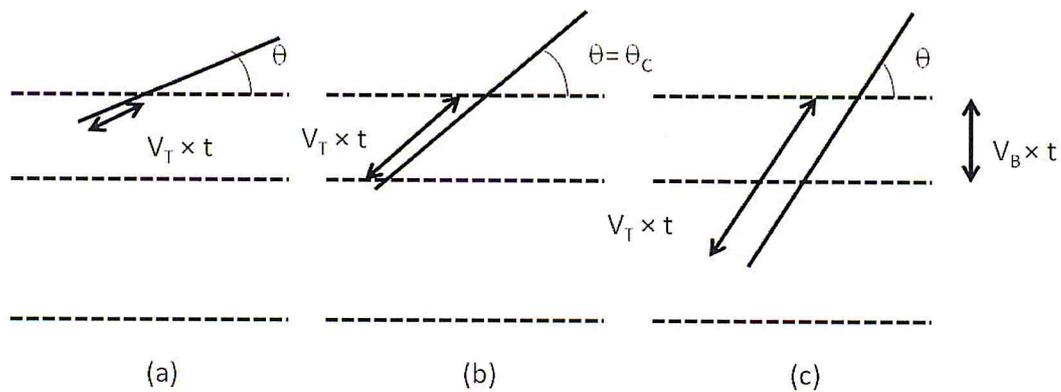


Figure 2.8. Efficacité de révélation des traces

- (a)  $\theta < \theta_C$  la trace révélée ne peut être observée,
- (b)  $\theta = \theta_C$  angle à partir duquel une trace révélée peut être observée,
- (c)  $\theta > \theta_C$  la trace révélée est observable

## 2.8 Comptage des traces :

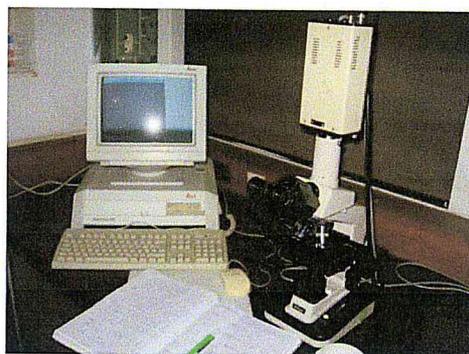
Une fois que les détecteurs sont développés, leur lecture devient nécessaire pour en extraire les informations désirées. Le plus souvent, la lecture consiste en un dénombrement des traces, mais dans certains cas, il s'agit de faire des mesures de dimension des diamètres et des longueurs. Le choix du moyen de lecture est généralement fait en fonction du détecteur, de l'étude faite par l'expérimentateur et du matériel disponible.

La lecture s'effectue simplement par un microscope optique. Cependant pour des mesures de routine, c'est un travail lent et il est indispensable de choisir un moyen de lecture automatique.

### 2.8.1 Microscope optique

C'est le moyen le plus couramment employé pour l'observation directe des traces. Il permet de les localiser avec une précision, de suivre leurs formes de mesure, leurs dimensions et de déterminer leur densité mais ces avantages sont contrebalancés par le fait que les mesures au microscope optique sont délicates, nécessitent beaucoup de temps, et sont très souvent des opérations fastidieuses [35].

La lecture s'effectue par transmission avec éclairage en lumière visible et les traces apparaissent sous forme de bâtonnets coniques sombres sur un fond clair. Dans le cas du nitrate de cellulose LR-115, la perforation des traces dans la couche sensible colorée en rouge facilite le comptage et le contraste de ce type de détecteur est largement amélioré par l'utilisation d'un filtre vert et grâce auquel chaque trace apparaît comme un point vert sur un fond noir [35].

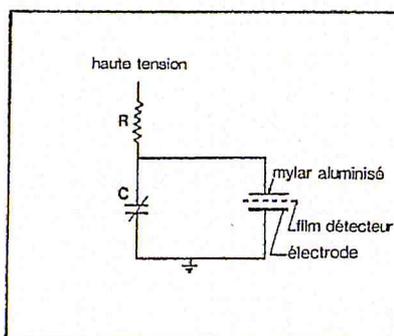


**Figure 2.9.** Système de lecture des DSTN par microscope QUANTIMET 500

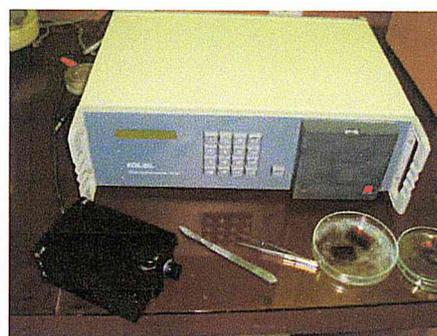
### 2.8.2 Compteur à étincelles

Le compteur à étincelle est un moyen de comptage automatique, il est rapide et reproductible de traces révélées. Proposé par Cross et Tommasino en 1970 et améliorée par Somogyi et ses collaborateurs en 1977, le compteur est basé sur le principe suivant : Un film très mince dont les traces sont, développées en canaux, est placé entre une électrode massive et une électrode très mince d'aluminium. Avec une haute tension continue est appliquée à travers un circuit RC aux bornes des électrodes (Fig. 2.10 et 2.11) des photons lumineux sont ainsi créés et dénombrés par un photomultiplicateur, le nombre de photons est relié directement aux nombres de traces existant dans le film [36]. Deux tensions sont généralement appliquées :

- « **Tension de préclaquage** » a pour rôle d'élargir les traces et perforer celles qui n'ont pas été complètement trouées lors du développement chimique
- « **Tension de lecture** » a pour rôle de compter le nombre de traces



**Figure 2.10.** Circuit de base du compteur à étincelles



**Figure 2.11.** compteur à étincelles de type SPARK REPLICATOR 710 P/S

# CHAPITRE III : Étude Expérimentale sur le DSTN

## 3.1 Introduction

Dans cette partie, on s'intéressera à voir la méthode de préparation des dosimètres à base des DSTN LR-115 type II pour la mesure du  $^{222}\text{Rn}$  dans l'air. Puis comment préparer la solution chimique et déterminer les paramètres de développement ainsi que la sensibilité et l'efficacité de détections

## 3.2 Description de dosimètre

Dans notre étude on a utilisé un dosimètre passif, permettent de mesurer la concentration due aux particules alpha issus du gaz radon seul qui sont créés uniquement à l'intérieur de la chambre à diffusion.

Ces dosimètres ont l'avantage d'être simples, solide et peu couteux, ils sont conçus pour être utilisés dans les habitations et dans les lieux de travail.

Ce dosimètre utilisé a été développé par ANPA en Italie, il est disponible au niveau du laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants du CRNA. Proposé par Torri en 1989, il est composé d'une petite chambre à diffusion cylindrique fabriquée en plexiglas de 24 mm de diamètre et 11.5 mm de hauteur contenant deux DSTN, accolés à ses bases, placés sur les deux cotés d'un parallélépipède de 3.4 cm de long, et de 2.6 cm de large (Fig.3.1) [37].

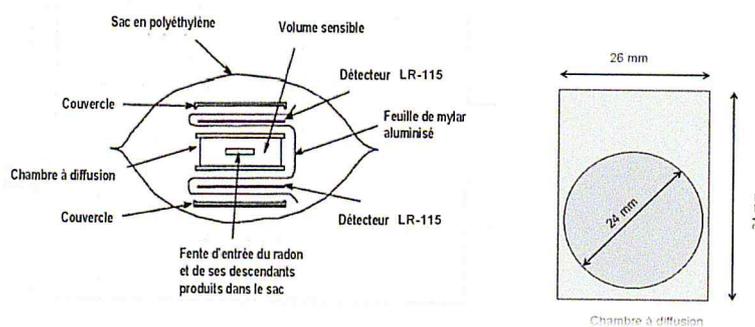


Figure 3.1. Dosimètre de radon à base de LR-115

Ce dosimètre a été conçu de manière à éviter la pénétration des descendants du  $^{222}\text{Rn}$  prenant naissance à l'extérieur de la chambre à diffusion, du  $^{220}\text{Rn}$  et de ses descendants ainsi que les poussières présentes dans ces milieux.

La réponse de ce dosimètre, exprimée en termes de densité de traces (traces/cm<sup>2</sup>) enregistrée par le détecteur, est proportionnelle à la concentration du radon (Bq/m<sup>3</sup>) qui règne à l'intérieur des sites de mesure ainsi qu'à la durée d'exposition. Le facteur de proportionnalité donné par le nombre de traces/cm<sup>2</sup> par kBq/m<sup>3</sup>. h.

### 3.3 Nature de détecteur utilisé

Le DSTN utilisé est le nitrate de cellulose (LR-115) type II fabriqué par KODAK (France). Il est destiné à enregistrer les particules  $\alpha$  émises par le radon présent dans le volume interne de la chambre à diffusion, il est constitué de deux parties distinctes (Fig.3.2) à savoir :

- Une pellicule composée du nitrate de cellulose colorée en rouge qui constitue la face sensible du détecteur. L'épaisseur de la pellicule est de 12 à 13  $\mu\text{m}$ ,
- Un support transparent en polyester d'épaisseur 100  $\mu\text{m}$  sur lequel est déposée la pellicule de nitrate de cellulose

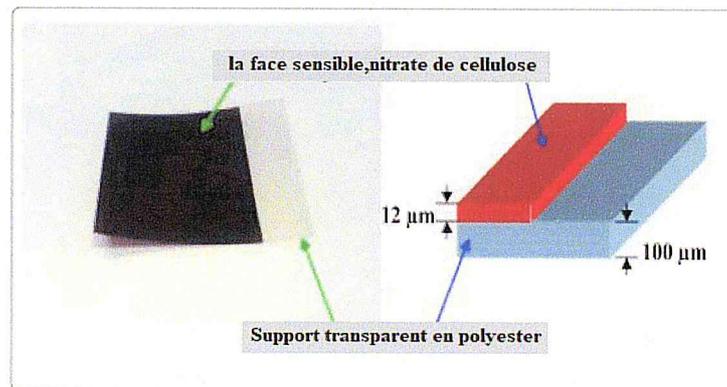
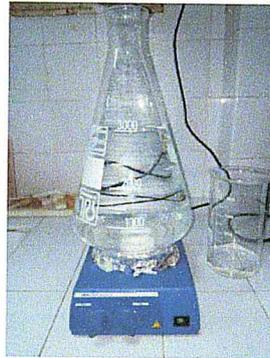


Figure 3.2. Détecteur solide de traces nucléaire LR-115 type II

### 3.4 Détermination des conditions expérimentales optimales de développement

Les paramètres de l'attaque chimique tels que la nature et la concentration de solution chimique, la température et enfin le temps de développement sont très importants pour la réussite de l'application envisagée. Les travaux menés au niveau du laboratoire de dosimétrie

ont conduit à l'adoption de l'hydroxyde de sodium (NaOH) avec une concentration fixée à 2,5 N. Cette concentration est obtenue après dissolution de 99,99 g de NaOH dans 1 l d'eau (Fig.3.3).



**Figure 3.3.**Préparation de la solution chimique

Les films à analyser sont plongés dans un bain chimique approprié maintenu à une température de 60°C, (Fig.3.4). Il est à noter que le bain doit être allumé au moins 2 heures avant l'introduction des détecteurs afin d'obtenir une stabilité de la température pendant toute la durée du développement.



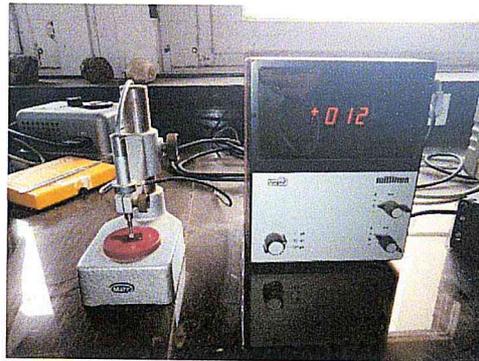
**Figure 3.4.**Bain de développement chimique

Après le développement chimique, les détecteurs ont été lavés à l'eau courante pendant 5 min, puis rincés à l'eau distillée pour arrêter l'attaque de la solution chimique et éliminer les suspensions de matériaux dégradés qui sont déposées sur la surface des détecteurs.

#### 3.4.1 Variation de l' épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement

Afin de déterminer le temps de développement nécessaire d'obtenir une épaisseur résiduelle du film comprise entre 6 et 7 $\mu$ m, trois séries de détecteurs ont été développés dans une

solution NaOH durant des temps variant de 60 à 150 min et leurs épaisseurs résiduelles ont été mesurées à l'aide d'un comparateur d'épaisseur de type Millitron (Mahr Feinpruf®, Allemagne) (Fig. 3.5).



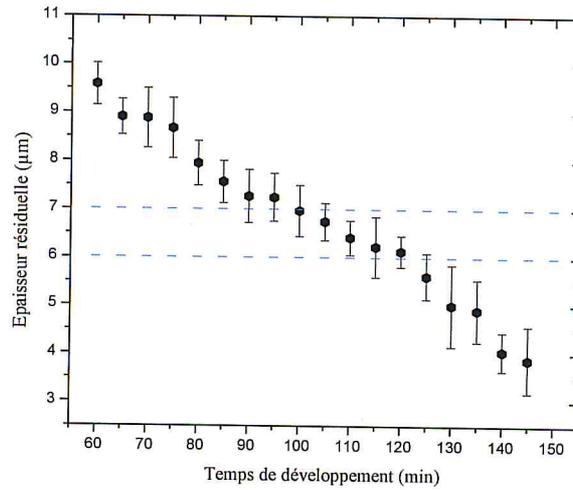
**Figure 3.5.** Comparateur d'épaisseur de type Millitron

D'après la bibliographie il a été constaté que malgré la température et la concentration des bains d'attaque soient constantes, on n'obtient pas, pour une durée de développement donnée, des résultats reproductibles [34]. Pour cela ; nous étions donc à faire le suivi du développement en mesurant systématiquement l'épaisseur initiale des détecteurs puis à intervalle de temps régulier lors du développement. L'épaisseur initiale des détecteurs n'est pas toujours constante pour le LR-115 ; elle fluctue entre 12 et 13,5  $\mu\text{m}$  d'un échantillon à l'autre. Avant de traiter un film, il est donc nécessaire de mesurer son épaisseur initiale et d'en tenir compte lors du développement.

Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un comparateur électronique (Fig.3.5), l'épaisseur résiduelle du détecteur joue un rôle efficace pour le comptage de traces à l'aide d'un compteur à étincelle, elle doit être comprise entre deux limites. Une limite inférieure égale 6  $\mu\text{m}$ , qui est l'épaisseur minimale en dessous de laquelle le film ne peut être détacher du support et d'autre part supporter la tension appliquée, et une limite supérieure qui est l'épaisseur supérieure maximale en dessus de laquelle les traces développées traversent le film. Ces limites ont été fixées à 6 et 7  $\mu\text{m}$  respectivement [34].

La figure 3.6 représente la variation de l'épaisseur résiduelle du détecteur LR-115 en fonction du temps de développement. On remarque que pour un temps de développement de 110 min l'épaisseur résiduelle moyenne ainsi que son incertitude des films est égale à  $(6.4 \pm 0.4)$   $\mu\text{m}$ , cette valeur est comprise entre 6 et 7  $\mu\text{m}$  qui sont l'intervalle de l'épaisseur recommandée

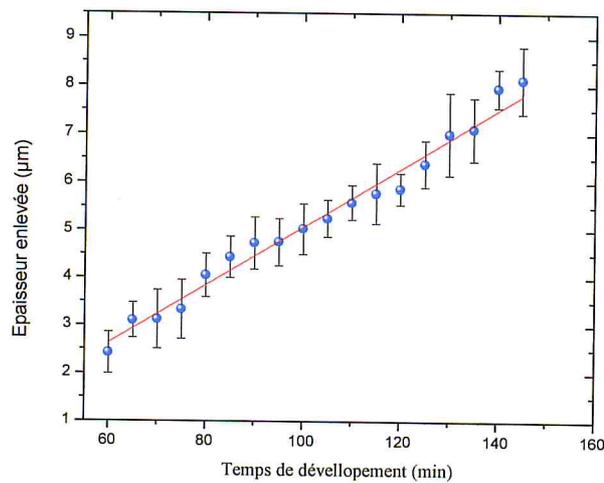
pour l'utilisation de la technique de la lecture à étincelage. Ainsi, durant toute notre étude, le **temps de développement sera fixé à 110 min.**



**Figure 3.6.** Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement

### 3.4.2 Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement

La détermination de l'épaisseur enlevée permet la détermination expérimentale de la vitesse d'attaque chimique  $V_B$  du détecteur (Eq.2.7).



**Figure 3.7.** Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement

La figure (3.7) représente la variation de l'épaisseur enlevée du détecteur LR-115 en fonction du temps de développement. On peut remarquer que l'épaisseur enlevée augmente linéairement avec le temps de développement et la vitesse d'attaque chimique  $V_B$  caractéristique de nos conditions de développement n'est que la pente de ce graphe, elle est égale à  $(0.048 \pm 0.002) \mu\text{m}/\text{min}$ .

La valeur de vitesse  $V_B$  est comparable à celle déterminée précédemment au niveau laboratoire  $(0.050 \pm 0.001) \mu\text{m}/\text{min}$  [39] et  $(0.053 \pm 0.002) \mu\text{m}/\text{min}$  [40]. Le tableau ci-après regroupe les résultats de la vitesse générale d'attaque  $V_B$  obtenus pour différents temps de développement pour une solution de NaOH de 2,5 N à 60°C.

**Tableau 3.1.** Variation de la vitesse d'attaque chimique en fonction du temps à partir de l'épaisseur

t (min)	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
h ( $\mu\text{m}$ )	2.1	4	2.7	2.9	3.7	4.2	4.6	5.1	4.5	5.1	5.3	6.1	5.9	6.4	7	6.7	7.8	8.1
$V_B(\mu\text{m}/\text{h})$	2.1	3.7	2.3	2.3	2.8	3	3.1	3.2	2.7	2.9	2.9	3.2	2.9	3.1	3.2	3	3.3	3.3

La vitesse moyenne d'attaque  $V_B$  du LR-115 obtenue égale à  $(2.9 \pm 0.4) \mu\text{m}/\text{h}$  a été comparé avec ceux trouvés dans la littérature (tableau 3.2). Le résultat obtenu est important car il nous informe sur les conditions de développement chimique utilisés qui ont été bien respectées.

**Tableau 3.2:** Comparaison des vitesses d'attaque  $V_B$

$V_B (\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	Référence
<b><math>2.9 \pm 0.3</math></b>	[34]
<b>3.0</b>	[41]
<b>3.3</b>	[42]
<b>3.2</b>	[43]
<b><math>3.0 \pm 0.2</math></b>	[37]
<b><math>3.18 \pm 0.1</math></b>	[40]
<b><math>3.0 \pm 0.1</math></b>	[39]
<b><math>2.9 \pm 0.4</math></b>	Ce travail

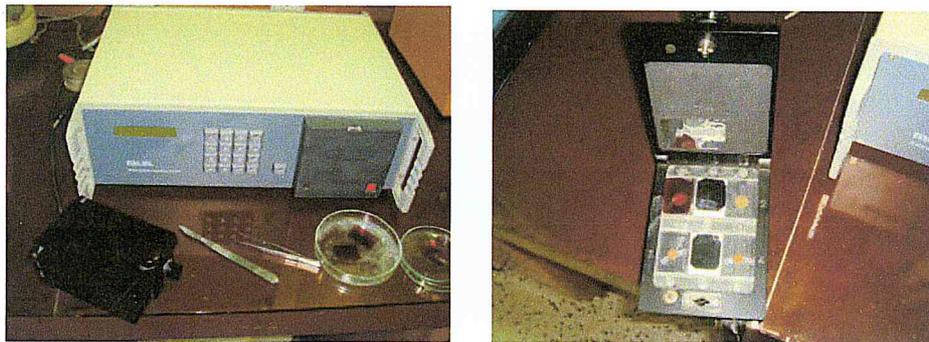
### 3.5 Détermination des conditions expérimentales optimales de lecture

Il a été vérifié que les paramètres qui influent sur les conditions de lecture par le compteur à étincelle sont :

- Les conditions de développement (la température, le temps, la concentration. etc),
- L'état final du film (épaisseur résiduelle),
- La haute tension appliquée pour le compteur à étincelage,
- L'état des électrodes,
- L'épaisseur de l'aluminium utilisé.

Le temps de développement qu'on ait choisi expérimentalement après la mesure de DSTN ; il est en fonction du réactif chimique utiliser (NaOH), la concentration et de sa température, ainsi que la nature des particules ionisantes et de leur énergie plus ou moins important selon les dimensions que l'on aimer donner aux traces [37].

A cet égard ; un compteur à étincelle de type SPARK REPLICA COUNTER 710 P/S (Mi.El<sup>®</sup>, ITALY) a été utilisé pour le comptage du nombre de traces (Fig.3.8). Il se compose de quatre électrodes : deux de 5 mm et deux de 12 mm de diamètres. Sur une de ces électrodes est placé le détecteur, une fois dépelliculé, sur lequel on superpose n morceau de mylar aluminisé.



**Figure 3.8:** Compteur a étincelle de type SPARK REPLICA COUNTER 710 P/S

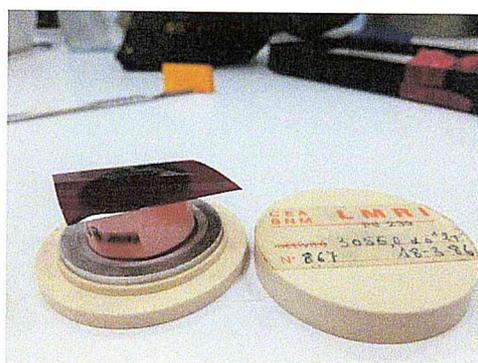
La tension appliquée entre les électrodes est d'une grande importance pour la reproductibilité des lectures, pour cela la tension de pré claquage doit être plus élevé que la tension de lecture afin d'élargir et perforer les traces qui n'ont pas été complètement trouées, le tableau ci-dessus donne les paramètres de lecture utilisés [37].

**Tableau 3.3:** Paramètre de lecture utilisé pour le compteur a étincelles

Tension de claquage (V)	Temps de claquage (s)	Tension de lecture (V)	Temps de lecture (s)
1100	15	500	30

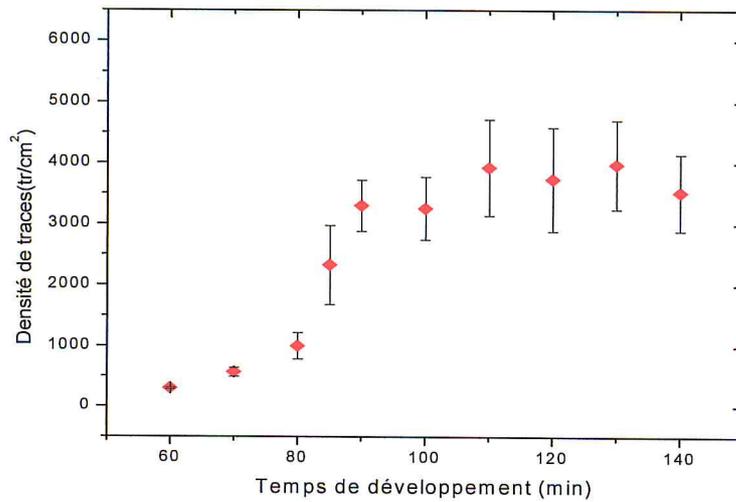
### 7.1 Détermination du nombre de traces en fonction du temps de développement

Nous avons découpés et codés manuellement une vingtaine de morceaux du LR-115 de dimensions  $(2.5 \times 3.5)$  cm<sup>2</sup>, Les films ont été placés dans un système d'irradiation approprié afin d'être irradiés par des particules alpha pour une durée de 5 min. Ce système d'irradiation (Fig.3.9) est composé d'une source de <sup>239</sup>Pu de 3055 Bq d'activité, qui émet des particules alpha d'énergie moyenne de 5,2 MeV et d'un collimateur d'air en papier de 24 mm d'hauteur

**Figure 3.9:** système d'irradiation des films LR-115

Le nombre de traces en fonction du temps de développement a été représenté dans la figure. On constate que la densité de trace augmente avec le temps de développement dans l'intervalle étudié. On remarque également qu'à partir de 95 min une saturation commence à se manifester.

La densité de traces diminue clairement à partir de 140 min. cette diminution est causée par la superposition des traces révélées (chevauchement) sur la surface de détecteur et cela du au nombre élevé de traces révélées, on parle alors du phénomène d'over lapping, c.-à-d. 2, 3 ou plus de traces formant une seule trace.



**Figure 3.10.** Variation de la densité de traces en fonction du temps de développement

## 7.2 Correction de la densité de traces en fonction de l'épaisseur enlevée

Nous avons constaté lors de nos expériences, que le développement chimique n'est pas toujours reproductible. En effet, bien que les conditions d'attaque soient, identiques, l'épaisseur enlevée du film n'est pas toujours la même. Comme la densité de traces dépend de l'épaisseur enlevée, il est nécessaire de faire une correction tenant compte de cette épaisseur.

Dans les conditions de traitement chimique que nous avons déterminées précédemment (NaOH 2.5 N, T° égale à 60°C pendant 110 minutes), l'épaisseur moyenne enlevée est de l'ordre de 6.4  $\mu\text{m}$ . Nous avons donc pour notre étalonnage normalisé la densité de traces de cette valeur.

Dans notre cas, la densité de traces D en fonction de l'épaisseur enlevée e est donnée par l'équation :  $D = (499 \times e) - 449$

Pour e = 6.4  $\mu\text{m}$ , on a :  $D_{6.4} = 2744$  traces/cm<sup>2</sup>

Selon les travaux de Hakam [34], le rapport  $\frac{D_{6.4}}{D}$  est donné donc par :

$$\frac{D_0}{D} = \frac{2744}{499 e - 449} \quad (3.1)$$

D'où, la densité de traces normalisée à 6.4  $\mu\text{m}$  peut s'écrire comme suit :

$$D_{6.4} = \frac{D}{0.19e^{-0.17}} \quad (3.2)$$

Le tableau suivant montre la densité de traces avant et après la correction en fonction de l'épaisseur enlevée.

**Tableau 3.4.** Densité de traces normalisée en fonction de l'épaisseur enlevée

Épaisseur enlevée ( $\mu\text{m}$ )	Densité de traces ( $\text{tr}/\text{cm}^2$ )	Densité de traces normalisées ( $\text{tr}/\text{cm}^2$ )	Ecart (%)
2.1	298	1365	78.2
2.9	569	1571	63.8
3.7	1002	1981	49.4
4	2329	4158	44
4.5	3301	5078	35
5	3256	4400	26
5.9	3928	4355	9.8
6.4	3738	3768	0.8
7.8	3979	3198	24.4
8.1	4712	3630	29.8

A la lecture des résultats rassemblés dans ce tableau, on voit bien que pour une épaisseur comprise entre 6 et 7  $\mu\text{m}$  qui l'intervalle de réponse de film par la technique du comptage par étincelage, la correction varie de 7.3 % à 10.4 % respectivement. Par conséquent, nous pouvons négliger cette correction si l'on travaille dans cet intervalle d'épaisseur.

### 7.3 Détermination de l'efficacité du détecteur

Le nombre de particule  $\alpha$  qui arrivent au point M sur la surface du détecteur par unité de temps ( $\text{particule} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$M = A_s \left[ 1 - \left( 1 + \frac{r^2}{h^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3.3)$$

Où :  $A_s$  est l'activité surfacique de la source ( $\text{particule} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$h$  : la hauteur de collimateur (cm)

$r$  : le rayon de la source (cm)

La fluence ( $\text{particule} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) des particule  $\alpha$  est donnée par la relation suivante :

$$N = M \times t = A_s \times \left[ 1 - \left( 1 + \frac{r^2}{h^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \times t \quad (3.4)$$

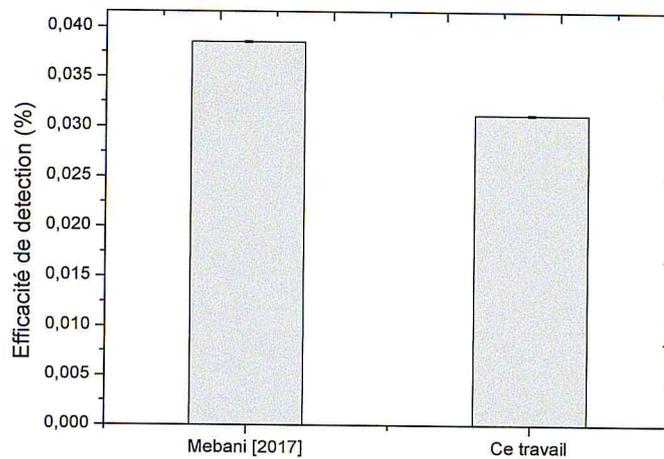
L'efficacité de détection  $\varepsilon$  est donnée en générale par la relation :

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{détectés}}}{N}$$

Où :  $N_{\text{détectés}}$  est le nombre de particule  $\alpha$  détectées par le LR-115 (particule.cm<sup>-2</sup>)

$N$  est le nombre de particule  $\alpha$  émis par la source ( $N=2062$  particule.cm<sup>-2</sup>)

L'efficacité obtenue par le compteur a étincelle est de 3.12 %, elle est comparable avec celle obtenue déjà par Mebbani [39] (égale à 3.85 %).



**Figure 3.11.** Comparaison l'efficacité de détection entre notre travail et celle obtenue par Mebbani [39].

## CHAPITRE IV : Mesure du radon dans les habitations

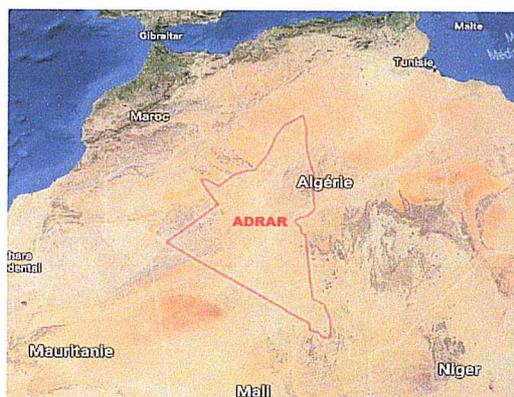
### 4.1 Introduction

Les teneurs élevées de l'uranium dans les constituants du sol peuvent engendrer des concentrations élevées du radon dans l'air et par conséquent des concentrations élevées dans les habitations bâties sur ces sols. Ces habitations, où l'être humain y passe de longues heures, deviennent la principale source d'exposition au radon. Dans ce travail, les concentrations du radon ont été mesurées dans certaines habitations des différentes régions à savoir : la région d'Adrar, la vallée du M'Zab et la région de Tipaza.

### 4.2 Localisation géographique des différentes régions d'étude :

#### 4.2.1 Première région d'étude : Wilaya d'Adrar

La wilaya d'Adrar s'étend sur une bonne partie du sud-ouest algérien et couvre une superficie globale de 427.968 km<sup>2</sup> soit 17,97% du territoire national (Fig.4.1).



**Figure 4.1.** Situation géographique de la wilaya d'Adrar

La structure du sol est formée généralement des formations gréso-calcaires plus ou moins compactes et caillouteuses, reposant sur un niveau argileux rougeâtre dont l'épaisseur augmente avec la profondeur, ils sont constitués d'un recouvrement graveleux, caillouteux et des sables éoliens (en surface). En outre, ces sols montrent une perméabilité élevée en surface

et en profondeur avec des valeurs supérieures à 9 cm/h jusqu'à 55 cm/h constituant des niveaux très perméables [44].

#### 4.2.2 Deuxième région d'étude : Vallée de M'Zab

La vallée du M'Zab se situe à 600 km au sud d'Alger, 300 km d'el Goléa, 200 km de Ouargla et 1200 km de Tamanrasset. Plus exactement à 32°30' N en latitude et à 3°45' E en longitude. La région d'étude est localisée dans un plateau rocheux dont l'altitude varie entre 300 et 800 mètres, Elle présente sous la forme d'une vaste étendue pierreuse et de roches brunes et noirâtres, les terrains sont calcaires, et leur structure à peu près horizontale indique qu'ils sont restés en place, à l'écart des mouvements orogéniques, depuis leur formation. Cette région s'étend donc sur une vallée déserte, sèche et aride, ce qui rend que la plupart des maisons ont des caves à cause du climat désertique rigoureux [45].

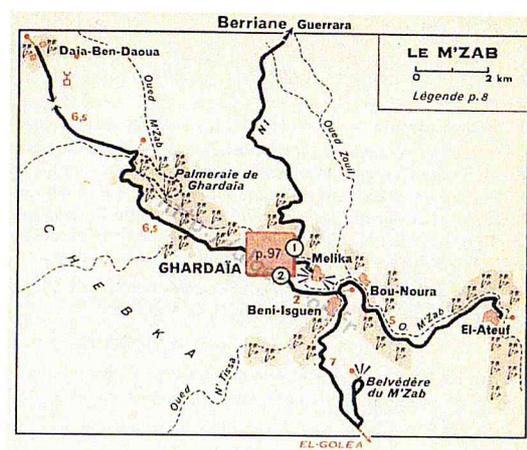


Figure 4.2. Situation géographique de la région de vallée de M'Zab

#### 4.2.3 Troisième région d'étude : Wilaya de Tipaza

La wilaya de Tipaza compte 28 communes regroupées en 10 Daïras limitée par la mer Méditerranée au nord, par les wilayas de Chlef à l'ouest, Aïn-Defla au sud-ouest, Blida au sud et Alger à l'est [46]. Le territoire de Tipaza se répartit comme suit :

- montagnes : 336 km<sup>2</sup> (19,6 %) qui sont des roches volcaniques,
- collines et piémonts : 577 km<sup>2</sup> (33,8 %),
- plaines : 611 km<sup>2</sup> (35,7 %),
- autres : 183 km<sup>2</sup> (10,8 %).

Le climat est de type méditerranéen, caractérisé par un été sec et chaud et un hiver humide et froid.

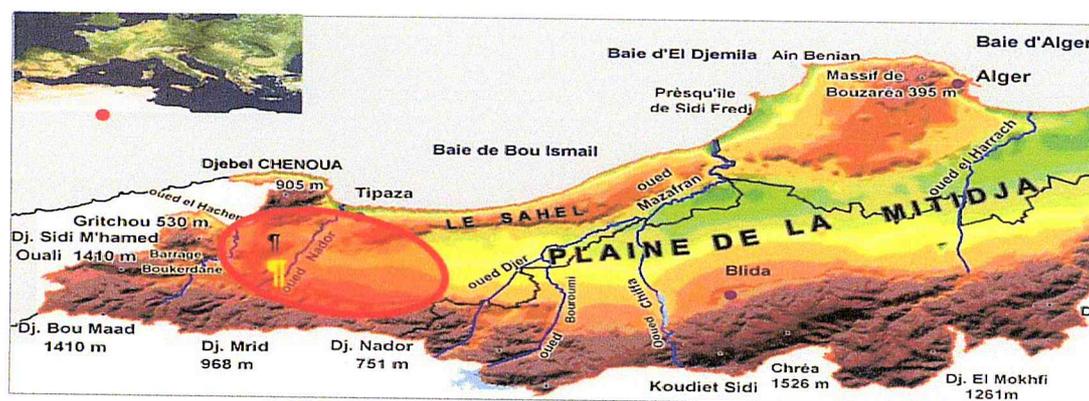


Figure 4.3. Situation géographique de la wilaya de Tipaza

### 4.3 Matériels et méthodes

Les concentrations du radon dans l'air ont été mesurées à l'aide des dosimètres passifs à base de DSTN type LR-115 décrit dans le chapitre II. Plus de 200 dosimètres ont été préparés et déployés dans différentes habitations de différentes régions citées ci-dessus pendant une période d'exposition comprise entre 1 et 2 mois. Après exposition, ces dosimètres ont été récupérés pour les exploités au niveau du laboratoire de dosimétrie du CRNA. Les paramètres de développement et de lecture utilisés ont été déterminés et cités dans le §3-5.

Les concentrations du radon ( $C_{Rn}$ ) mesurées ainsi que son incertitude sont déterminées par les relations (4.1) et (4.2) respectivement :

$$F_C = \frac{D_t}{C_{Rn}} \times t \quad (4.1)$$

Où,  $D_t$  est la densité de traces en (traces.  $\text{cm}^{-2}$ ),

$F_C$  est le facteur de calibration en (traces.  $\text{cm}^{-2}$ .  $\text{kBq.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$ ),

$t$  est le temps d'exposition en (h)

$$\Delta F_C = \left[ \frac{\Delta D_t}{D_t} + \frac{\Delta C_{Rn}}{C_{Rn}} + \frac{\Delta t}{t} \right] \times F_C \quad (4.2)$$

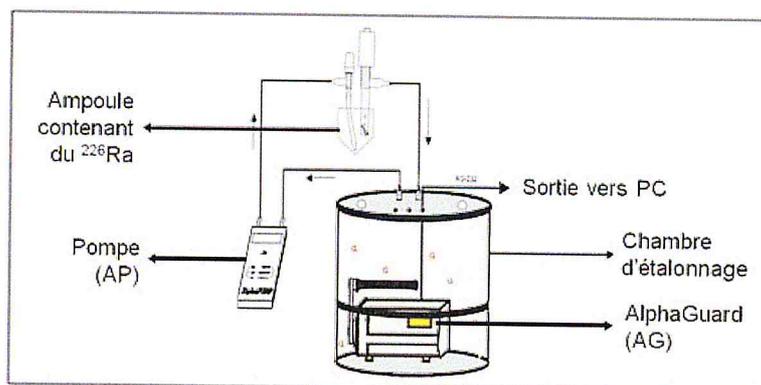
Avec  $\Delta C_{Rn} = 0.25 \text{ kBq.m}^{-3}$  et  $\Delta t = 0$

Où,  $D_t$ ,  $\Delta D_t$  sont la densité de traces et l'incertitude associée en (traces.  $\text{cm}^{-2}$ )

$C_{Rn}$ ,  $\Delta C_{Rn}$  sont la concentration du radon et l'incertitude associée en ( $\text{kBq.m}^{-3}$ )

#### 4.4 Calibration du système de détection

Le facteur de calibration ( $F_C$ ) a été déterminé en utilisant un banc de calibration mis en place au niveau du laboratoire de Dosimétrie (Fig. 4.4). Le  $^{222}\text{Rn}$ , injecté à l'intérieur d'un récipient hermétique de 101.1 l de volume à l'aide d'une pompe, est généré par une source étalon de  $^{226}\text{Ra}$  certifiée par National Institute of Standards and Technology (NIST). Un moniteur de référence type Alpha GUARD fabriqué par Saphymo® (Allemagne) (Fig.4.5), étalonné par le laboratoire primaire allemand Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), est placé à l'intérieur du récipient avec lequel les dosimètres à base de LR-115 ont été introduits.



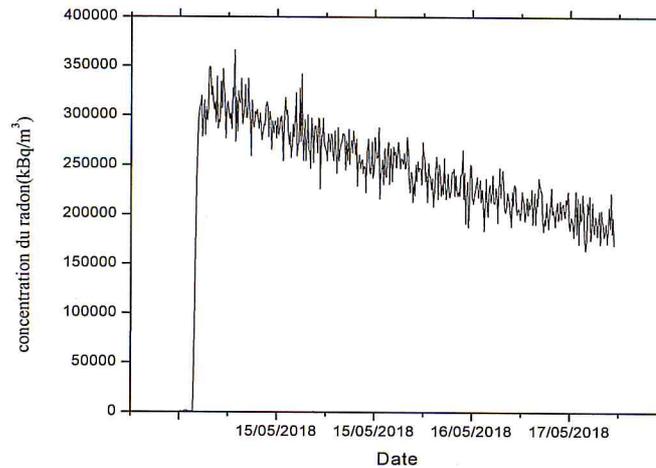
**Figure 4.4 .** Montage expérimental pour transférer le  $^{222}\text{Rn}$  libéré par la source étalon dans la chambre de calibration



**Figure 4.5.** Moniteur de radon type Alpha GUARD

Après exposition des dosimètres pendant une durée de 71 heures, les films sont développés chimiquement et lus à l'aide du compteur à étincelage avec les conditions citées dans les tableaux 3.4 et 3.5 respectivement. Les densités des traces obtenus ont une valeur moyenne de  $(288 \pm 10)$  tr/cm<sup>2</sup>

La concentration moyenne du  $^{222}\text{Rn}$  régnait à l'intérieure de la chambre de calibration donnée par le moniteur du radon Alpha Guard (Fig.4-6) est égale à  $(2.48 \pm 0.14)$  kBq/m<sup>3</sup>. Par conséquent, la valeur du facteur de calibration FC calculée à l'aide de la relation (4.1) est égale à  $(1.06 \pm 0.14)$  traces.cm<sup>-2</sup>. kBq.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup>.



**Figure 4.6.** Concentrations du radon à l'intérieur de la chambre d'étalonnage

Ce résultat a été comparé à ceux déjà obtenus par les anciens travaux du laboratoire, en utilisant le compteur à étincelle (tableau 4.1)

**Tableau 4.1.** Comparaison du facteur de calibration avec les anciens travaux

Fc (traces. Cm <sup>-2</sup> . kBq.m <sup>-3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Reference
<b>1.57 ± 0.27</b>	[41]
<b>0.55 ± 0.05</b>	[37]
<b>2.22 ± 0.36</b>	[36]
<b>1.02 ± 0.47</b>	[39]
<b>1.06 ± 0.14</b>	Présent travail

#### 4.5 Concentration du radon dans les habitations

Après exposition des dosimètres dans les trois régions pendant une période comprise entre 35 et 62 jours, ils ont été récupérés, développés et les concentrations correspondantes ont été déterminés à l'aide de la relation (4.1).

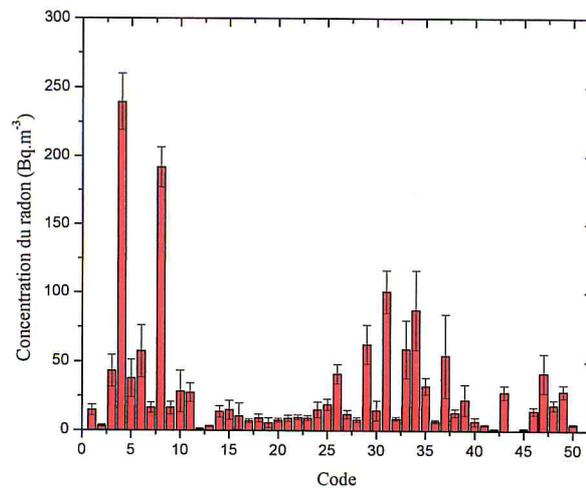
#### 4.5.1 Concentration du radon dans la wilaya d'Adrar

51 dosimètres ont déposés dans différentes régions autour de la wilaya d'Adrar. Les concentrations du radon déterminées sont présentées dans le tableau 4.2 et illustrées sur la figure 4.7.

**Tableau 4.2.** Densité de traces et concentrations du radon dans la wilaya d'Adrar

Code	Dt (tr/cm <sup>2</sup> )	CRn (Bq/m <sup>3</sup> )	Code	Dt (tr/cm <sup>2</sup> )	CRn (Bq/m <sup>3</sup> )
1	121±16	15±4	26	43±2	41±7
2	95±12	3±1	27	116±15	12±3
3	164±22	43±12	28	89±8	8±2
4	429±64	239±67	29	186±17	63±14
5	152±35	38±14	30	80±29	15±7
6	179±35	58±19	31	236±93	101±53
7	123±13	17±4	32	111±2	9±1
8	364±233	192±48	33	177±39	59±21
9	123±19	16±5	34	214±42	87±29
10	61±24	29±15	35	142±7	33±6
11	61±7	28±7	36	91±4	7±1
12	98±30	1±0	37	171±71	54±30
13	104±1	3±0	38	117±9	13±3
14	81±14	14±4	39	129±47	22±11
15	80±27	15±7	40	92±29	7±3
16	86±69	10±10	41	95±4	4±1
17	90±7	7±1	42	99±10	1±0
18	88±15	9±3	43	135±6	28±5
19	92±46	6±4	44	//	//
20	110±7	8±1	45	101±33	1±0
21	112±14	9±2	46	83±4	14±3
22	87±5	10±2	47	150±31	42±14
23	113±6	9±2	48	78±6	19±4
24	121±29	15±6	49	65±2	29±5
25	74±6	19±4	50	105±3	4±1
//	//	//	51	132±18	37±6

Elles varient entre  $(6 \pm 1)$  Bq.m<sup>-3</sup> et  $(239 \pm 67)$  Bq.m<sup>-3</sup>, avec une valeur moyenne arithmétique égale à  $(30 \pm 8)$  Bq.m<sup>-3</sup> et une valeur moyenne géométrique égale à  $(48 \pm 5)$  Bq.m<sup>-3</sup>.

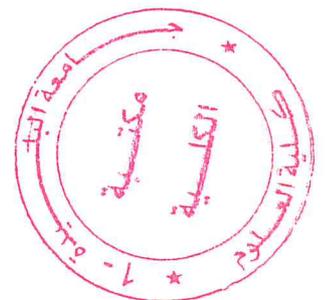
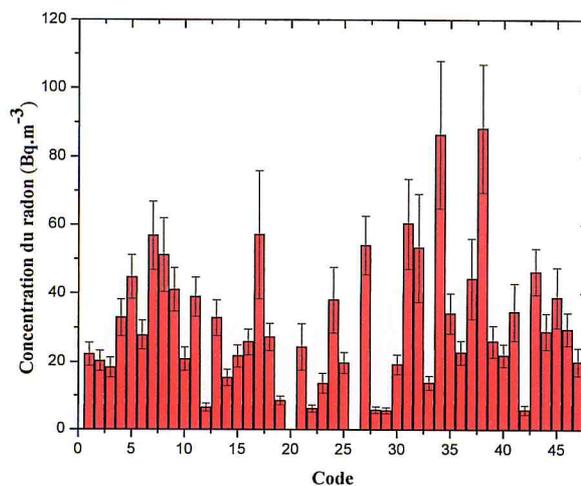


**Figure 4.7.** Concentration du radon dans les différentes habitations de la wilaya d'Adrar

#### 4.5.1 Concentration du radon dans la wilaya de Tipaza

Dans la région de Tipaza, nous avons déployés plus de 48 dosimètres répartis dans 10 Daïras.

Les concentrations du radon déterminées sont présentées dans le tableau 4.5.2 (Fig. 4.8).



**Figure 4.8.** Concentration du radon dans les différentes habitations de la wilaya de Tipaza

La concentration moyenne de radon dans région d'étude est égale à et une valeur moyenne arithmétique de  $(31 \pm 12)$  Bq.m<sup>-3</sup> et une valeur moyenne géométrique égale à  $(29 \pm 8)$  Bq.m<sup>-3</sup> avec des valeurs minimale et maximale comprissent entre 20 et 88 Bq.m<sup>-3</sup> respectivement.

**Tableau 4.3.** Densité de traces et concentrations du radon dans la wilaya de Tipaza

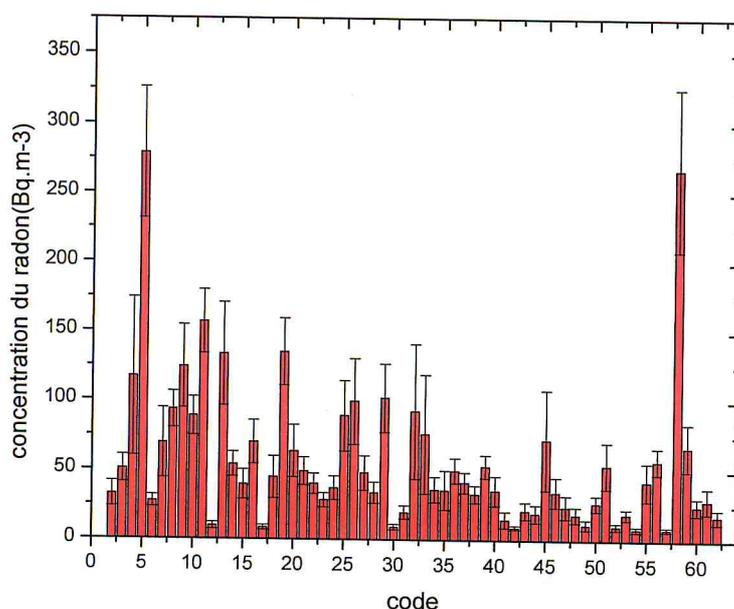
Code	Dt (tr/cm <sup>2</sup> )	CRn (Bq/m <sup>3</sup> )	Code	Dt (tr/cm <sup>2</sup> )	CRn (Bq/m <sup>3</sup> )
1	124±3	22±3	25	119±3	20±3
2	123±2	20±3	26	//	//
3	107±3	18±3	27	175±4	54±9
4	126±4	33±5	28	100±4	6±1
5	159±2	45±6	29	100±1	6±1
6	134±2	28±4	30	120±2	19±3
7	169±7	57±10	31	149±13	60±13
8	155±12	51±11	32	142±23	53±16
9	142±3	41±6	33	107±2	14±2
10	115±4	21±3	34	184±22	86±22
11	152±2	39±6	35	129±5	34±6
12	102±5	6±1	36	116±2	23±3
13	142±4	33±5	37	139±18	44±12
14	116±3	15±2	38	186±15	88±19
15	125±2	22±3	39	120±5	26±5
16	128±2	26±4	40	116±2	22±3
17	171±33	57±19	41	129±14	35±8
18	130±2	27±4	42	98±10	6±1
19	105±2	9±1	43	142±2	46±7
20	//	//	44	120±6	29±5
21	129±19	24±7	45	130±12	39±9
22	101±3	6±1	46	124±4	30±5
23	113±9	14±3	47	123±9	20±4
24	150±18	38±10	//	//	//

#### 4.5.2 Concentration du radon dans la vallée du M'Zab

Dans la région de la vallée du M'Zab, nous avons déployés plus de 75 dosimètres à l'intérieur des maisons répartis dans 7 k'sours de Mzab. Après exposition, nous avons pu récupérer seulement 63 dosimètres à cause de la perte de certains et la destruction d'autres. Les concentrations du radon déterminées sont présentées dans le tableau 4.4 et illustrées sur la figure 4.9. Les concentrations obtenues varient entre 9 Bq.m<sup>-3</sup> et 279 Bq.m<sup>-3</sup>, la valeur moyenne arithmétique est égale à  $(43 \pm 7)$  Bq.m<sup>-3</sup> et une valeur moyenne géométrique égale à  $(79 \pm 3)$  Bq.m<sup>-3</sup>

**Tableau 4.4.** Densité de traces et concentration du radon dans les habitations de la vallée du M'Zab

Code	Dt (tr/cm <sup>2</sup> )	CRn (Bq/m <sup>3</sup> )	Code	Dt (tr/cm <sup>2</sup> )	CRn (Bq/m <sup>3</sup> )
1	332±34	181±42	32	198±78	92±49
2	143±21	32±9	33	185±80	76±43
3	161±10	51±10	34	138±16	36±9
4	239±85	117±57	35	138±36	36±14
5	428±16	279±47	36	144±7	50±9
6	134±3	27±4	37	143±6	41±7
7	183±42	69±25	38	135±7	33±6
8	211±2	93±13	39	146±4	53±8
9	248±27	124±30	40	148±24	36±11
10	206±5	89±14	41	121±31	15±6
11	270±4	157±23	42	114±2	9±1
12	114±13	10±2	43	129±20	21±6
13	258±38	134±37	44	125±24	19±6
14	169±6	54±9	45	192±70	72±36
15	150±21	39±11	46	147±26	35±11
16	184±17	70±16	47	133±28	24±10
17	112±8	9±2	48	126±21	19±6
18	165±34	45±15	49	116±21	12±4
19	288±14	135±24	50	134±9	27±5
20	189±31	63±19	51	167±29	54±17
21	169±12	49±10	52	114±13	10±3
22	157±8	40±7	53	125±9	19±4
23	141±7	28±5	54	112±12	9±2
24	153±14	37±8	55	153±28	42±13
25	224±34	89±25	56	171±6	57±9
26	239±43	100±31	57	112±4	9±1
27	151±19	48±12	58	415±81	267±75
28	142±13	34±8	59	182±22	67±17
29	221±25	102±25	60	132±14	25±6
30	112±8	9±2	61	132±23	29±9
31	125±13	20±5	62	122±19	18±5



**Figure 4.9.** Concentration du radon dans les différentes habitations situées dans la vallée du M'Zab

Les valeurs des concentrations du radon mesurées varient pour les trois sites de 06 à 279 Bq/m<sup>3</sup> (tableau 4.5), elles sont globalement inférieures à la valeur de référence de 200 Bq/m<sup>3</sup> qui est la valeur limite recommandée par l'AIEA [42].

**Tableau 4.5.** Concentrations du radon dans les sites d'étude (Bq/m<sup>3</sup>)

La région	AM±SD	GM±SD	Min – Max
Wilaya d'Adar	30 ± 8	48 ± 5	7-239
Vallée du M'Zab	43 ± 7	79 ± 3	9-279
Wilaya de Tipaza	31 ± 12	29 ± 8	6-88

La variabilité des résultats de mesure est due principalement à : la nature du sol (géologie locale), la nature des habitations (matériaux de construction) et au mode de vie des habitants (aération, ouverture et fermeture de portes et fenêtres, etc....), ce qui traduit par l'augmentation de la concentration du radon dans certaines habitations de différents régions d'étude. Dans la région de la vallée de M'Zab, les concentrations élevées enregistrées sont dues au manque d'aération dans les caves où les dosimètres ont été placés. En effet, le renouvellement d'air joue un rôle assez important dans réduction de la concentration du radon

dans une habitation, la concentration du radon peut varier selon l'ouverture et la fermeture des portes et des fenêtres ; cette concentration sera d'autant plus élevée que la chambre est mal ventilée. De plus, la géologie de chaque région diffère d'un point à un autre (granit, basalte, gneiss, etc..) ce qui traduit par la variation de leurs teneurs en Uranium et en qui engendre la disparité des résultats trouvés.

Le tableau (4.6) regroupe les résultats obtenus des concentrations du radon dans les habitations investiguées ainsi que ceux des anciens travaux et ceux de certains pays européens.

**Tableau 4.6.** Concentrations moyennes du radon dans certains pays

Pays	$C_{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Références
Royenne-Uni	20	[48]
Finlande	120	[49]
République Tchèque	120	[49]
Suisse	75	[50]
Allemagne	76	[48]
Pays-Bas	30	[13]
Belgique	48	[13]
France	63	[48]
Grèce	38	[48]
Danemark	47	[13]
Italie	62	[13]
Alger, Algerie	7	[21]
Tamanghasset, Algerie	65	[36]
Tamanghasset, Algerie	55	[39]
Adrar, Algerie	30	Ce travail
Tipaza, Algerie	31	Ce travail
Vallée du M'Zab, Algerie	43	Ce travail

## 4.6 Conclusion

Les concentrations du radon dans les habitations autour de la wilaya d'Adrar, de la vallée du M'Zab et de la wilaya Tipaza ont été mesurées l'aide des dosimètres passifs à base de DSTN type LR-115. Ce dosimètre s'est avéré effectivement exploitable pour ce type de mesure, et les valeurs qu'il ait fournit sont acceptables aussi bien du point de vue de l'exactitude que celui de la reproductibilité.

Les concentrations du radon obtenues dans les habitations de la wilaya d'Adrar, de la vallée du M'Zab et de la wilaya Tipaza sont globalement inférieures à la limite recommandée par les organisations compétentes en matière de radioprotection (200 Bq/m<sup>3</sup>). Néanmoins, les valeurs obtenues sont très variables d'une habitation à une autre, car elles dépendent de plusieurs facteurs notamment ceux liés à la géologie du sol, les matériaux de construction ainsi que aux habitudes des occupants (aération artificielle, ouverture et fermeture de porte, etc.).

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le radon, gaz radioactif d'origine naturelle, omniprésent dans notre environnement et provenant de la désintégration de l'uranium et du radium, présents dans la croûte terrestre, a été reconnu, depuis 1987, par le Centre International de la recherche sur le Cancer (CIRC) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme cancérigène pulmonaire certain pour l'homme

Dans ce travail, nous avons utilisés une méthode très simple pour la mesure de la concentration du radon dans l'air des habitations. Cette méthode est basée sur l'utilisation des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) LR-115 type II qui enregistrent le passage des particules  $\alpha$  émises par le radon.

A la suite des travaux déjà effectués sur ce sujet au niveau du laboratoire de dosimétrie du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), les conditions optimales de développement des traces de particules  $\alpha$  dans le LR-115 ont été déterminées. En effet, un développement chimique dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) de concentration (2.5N) à une température de 60 °C pendant 110 minutes permet d'enregistrer de manière optimale les traces de particules  $\alpha$  d'énergie avec une vitesse d'attaque ( $V_B$ ) égale à  $(2.9 \pm 4.0) \mu\text{m/h}$ .

Après calibration du système de détection utilisé, basé sur un dosimètre parallélépipédique à base de LR-115, nous avons déterminé les concentrations du radon dans les habitations de trois régions d'étude a savoir la wilaya d'Adrar, la vallée du M'Zab et la wilaya Tipaza. Les concentrations obtenues sont variables mais en deçà de la valeur de référence établie par les organisations internationales compétentes en matière de radioprotection ( $200 \text{ Bq/m}^3$ ).

Il est clair et nécessaire que la présente étude puisse se poursuivre par la réalisation de travaux similaires dans d'autres régions d'Algérie. Cela permettra de compléter la carte nationale de la radioactivité naturelle et plus précisément celle du radon.

## RÉFÉRENCES

- [1] André Bonne Paris, coll. « L'homme et l'univers », Paris, 15, 225 (1960).
- [2] Collignan B. & Pirard P. 2005. Pollution atmosphérique, **187**, p 333-344.
- [3] Catelinois O., Rogel A., Laurier D., Billon S., Hemon D., Verger P. & Tirmarche M "Evaluation de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France. Bulletin épidémiologique hebdomadaire. Numéro thématique – Impact sanitaire du radon domestique : de la connaissance à l'action, 15 mai 2007 /," no. n°18-19, p 155-158., 2007.
- [4] Shapiro J., 1972. A guide for scientists and physicists, Harvard University press, Cambridge,
- [5] N. Reguigui, "Sources de radioactivités dans l'environnement.," 2009.
- [6] A. Tedjani, "memoire presente pour obtenir le diplome de magister en physique specialite : rayonnement et applications sur le theme détermination de la concentration en uranium et l'émanation du radon à partir de certains matériaux de construction".
- [7] A.B. Tanner, et al. The nat. Rad. Env. II, US ERDA, Springfield, 5 (1980).
- [8] IRSN. 2007. nstitut de radioprotection et de sureté nucléaire.le radon dans les batiment.(www.irsn.org)
- [9] IRSN, 2010.nstitut de radioprotection et de sureté nucléaire.le radon dans les batiment.(www.irsn.org )
- [10] K. Singh, S. Singh, R. Mehra, M. Singh, H.S. Sahota, Z. Papp. Measurement of radon and thoron progeny out doors in Malout, India, using grab aerosol sampling and beta counting. Radiation measurements 41(2006)108-111.
- [11] Jimonet C et Metivier H, Personne compétente en radioprotection, Principes de radioprotection – réglementation.2008
- [12] Poffijn A., 2012. Organisation mondiale de la Santé : Le radon, un enjeu de santé publique, Prague 2013
- [13] Organisation mondiale de la Santé (O.M.S.). 2009, WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective, edited by Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun
- [14] Nachab A, Etudes expérimentales et modélisation Monte Carlo de l'autoabsorption gamma et de la dosimétrie active par capteurs CMOS, 2003.
- [15] "Directive européenne relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine," 1998.
- [16] OMS"Organisation mondiale de la Santé , Guidelines for Drinking-water," Vols. Volume 1, chapter 9, 2008.
- [19] Lecomte J.F., 2011. Radon and the System of Radiological Protection, ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection October 24-26, 2011 – Bethesda, MD, USA
- [20] International Commission on Radiological Protection (ICRP). **2014**, Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP **43** (3), 2014.
- [21] M. AÏT-ZIANE, "Mesure du gaz Radon dans différents milieux : Application en radioprotection," no. 08 /2017-D/PH, 2017.
- [22] M. Ali, "Mastère en Physique Quantique "Mesure du gaz "radon" à l'intérieur d'une chambre construite", " 2009..

- [23] S.A. Durrani & R.K. Bull Solid State Nuclear Track Detection Pergamon Press (1987).
- [24] R.M. Casson & E.V. Benton Nucl. Track Detection. 2, 173, (1978).
- [25] M. Lferde, "these d'état Université Clermont Ferrand,," 1983.
- [26] Mokrani-Lounis Z, Contribution à l'étude du mécanisme de formation des traces nucléaires dans un détecteur solide de type organique (CR-39) : application à la spectrométrie et à la dosimétrie des rayonnements, 2006.
- [27] Balashov V V, Of particles and radiation with matter, Springer, 1997
- [28] Dorn F, Abh Naturforsch,Ges, 1900.
- [29] G. R. Gambini D, "Manuel pratique de radioprotection," 3eme editions 2007.
- [30] "L. Wielopolski Nucleare.,," 1977.
- [31] A.Yekhlif, Mémoire de Magister "Mesure par Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) de la radioactivité de l'environnement dans des échantillons géologiques," Université Mentouri Constantine, 2008.
- [32] Fleischer R L, Price P B, et Walker R M, Nuclear tracks in solids: principals and applications, *University of California Press*, Berkeley 1975.
- [33] A.B. Tanner, et al. The nat. Rad. Env. II, US ERDA, Sprinfield, 5 (1980).
- [34] Hakam. O, "Mesure des activités volumiques du Radon dans l'air des habitations et des enceintes de travail par les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires," 1993..
- [35] M. Aït-Ziane, "Le radon : procédure de mesure par détecteur Solide de Traces Nucléaire, rapport interne du CRNA," juin 2008..
- [36] R. Bouarar, "Mémoire de master .tude de la réponse du Détecteur Solide de Traces Nucléaires type LR-115 pour la détection des particules alpha," 2016.
- [37] N. Messaoudi & K..Aouchar, "Memoire de Master "Mesure du gaz Radon à l'aide des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires," Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2015.
- [38] S. Brahim, "Etude des modifications physico-chimiques induites par irradiation dans un détecteur solide de traces nucléaire de type organique," 2005.
- [39] A. Mebani, "contribution a la mesure de la concentration du radon dans la ville de tamanghasset," 2017.
- [40] R. Bourar ,mémoire de master "Étude de réponse de détecteur solide de traces nucléaires type LR-115," 2016.
- [41] S.Djeffal,these de doctorat "etude expirimentales des detecteurs solides de traces nucleaires: applications a la dosimetrie des neutrons a la dosimetrie alpha et aux mesures du radon dans le sol," 1995.
- [42] Nikezic A, Janicijevic, Appl. Radiat. Isot. 57, 2002
- [43] Salam et al. "Measurement of radon and thoron progeny outdoors in Malout,India,using grab aerosol sampling and beta counting,," Radiation measurements 41, pp. p 108-111, 2006.
- [44] B. Messaoud, "memoire de mafister ' aperçu hydrogeologique et hydrochimique sur le systeme de captage traditionnel des eaux souterraines « foggara » dans la region d'adrar," université badji mokhtar-annaba, 2013.
- [45] "http://alger-roi.fr," [Online].
- [46] S. GRIMES, "La destination touristique pilote en Algérie : la zone côtière de Tipasa," Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM, Juin 2011.
- [47] AIEA.International Atomic Energy Agency "Radiation oncology physics: a

- handbook for teachers and students", ISBN 92-0-107304-6 (Vienna, 2005)
- [48] INVS, Institut de Radioprotection et Sureté Nucleaire "les niveaux de radon et leurs determinants dans les logements de france métropolitaine continentale," avril 2014.
- [49] ORS, Oral Rehydration Salts "Activity: Participating in or organising an event > Participation in conference," 2006.
- [50] OFSP, Office Fédéral de la Santé Publique, Roserens G.-A., Johner H.-U., Piller G. & Imbaumgarten P., Binz A., Fregan F. & Lehmann G. (Institut Fur Energie, Muttenz), Stucki P. (Textbox, Berne), Manuel Suisse du radon, 2000.
- [51] ICRP. International Commission on Radiological Protection, "Recommendations of the," Oxford: Pergamon Press, no. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3), 1977.

