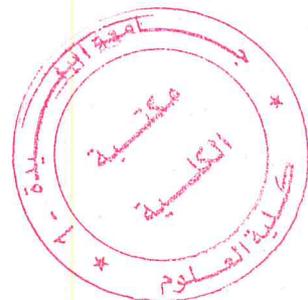


MA-530-141-1

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université Saâd DAHLAB-Blida 1



Faculté des Sciences
Département de Physique
Laboratoire de Physique Théorique et Interactions Rayonnement-Matière
(LPTHIRM)

Mémoire de Master

présenté à l'université Saâd DAHLAB-Blida 1
pour l'obtention du diplôme en :

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Contribution à la mesure des concentrations du radon dans la ville de Tamanghasset

Présenté par :

Aida Mebbani

Soutenu le 24 juin 2017 devant le jury composé de :

M.R.Khelifi	Professeur	U.S.D.-Blida	Président
M.A.Mouzali	Maître de conférences B	U.S.D.Blida 1	Examineur
M.M.AïtZiane	Chercheur assistant	C.R.N d'Alger	Promoteur

Blida 2017

MA-530-141-1

Table des matières

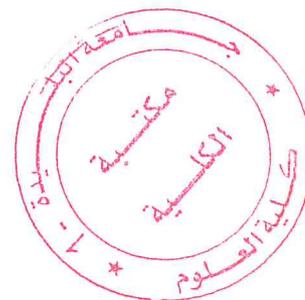


Table des matières	ii
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Remerciements	vi
Résumé	1
Introduction	1
1 GÉNÉRALITÉS SUR LE RADON	4
1.1 Introduction	4
1.2 Le radon	4
1.3 Formation du radon	5
1.4 Propriété du radon	6
1.5 Les sources du radon	6
1.6 Transfert du radon dans l'air	7
1.7 Risque sanitaire du radon	7
1.8 Les aspects réglementaires	9
1.9 Techniques de mesures du radon	10
1.10 Conclusion	11
2 DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES NUCLÉAIRES	12
2.1 Introduction	12
2.2 Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN)	12
2.3 Historique sur les DSTN	13
2.4 Caractéristiques des DSTN	13
2.4.1 DSTN massif : exemple le CR-39	13
2.4.2 DSTN en couches minces : exemple le LR-115	13
2.4.3 Interaction des particules α avec le DSTN	14
2.5 Transfert linéique d'énergie	14
2.6 Pouvoir d'arrêt massique	15
2.7 Parcours des particules α	16
2.8 Formation de la trace latente	17
2.9 Révélation de traces latentes	18

2.10 Géométrie des traces observées dans le LR-115	18
2.11 Vitesse d'attaque chimique surfacique V_B	19
2.12 La vitesse d'attaque le long des traces	19
2.13 Comptage des traces	20
2.13.1 Le microscope optique	20
2.13.2 Le compteur à étincelles	21
2.14 Conclusion	22
3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	23
3.1 Introduction	23
3.2 Étude des détecteurs LR-115	23
3.3 Détermination des conditions expérimentales optimales de développement	24
3.4 Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction de temps du développement	25
3.5 Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement	27
3.6 Variation de la masse en fonction du temps de développement	27
3.7 Détermination de la vitesse générale d'attaque V_B	28
3.8 Détermination des conditions expérimentales optimales de lecture	29
3.9 Influence du temps de développement sur la densité des traces	31
3.9.1 Films non irradiés (Bruit de fond)	31
3.9.2 Films irradiés	32
3.10 Etude de l'efficacité, bruit de fond et le vieillissement du LR-115	33
3.10.1 Détermination de l'efficacité du détecteur	34
3.10.2 Etude de bruit de fond du LR-115	35
3.11 Etude du vieillissement du LR-115	36
3.11.1 Détermination de la limite de détection	37
3.12 Conclusion	38
4 MESURE DU RADON DANS LES HABITATIONS	39
4.1 Introduction	39
4.2 Localisation et géologie de la région de Tamanghasset	39
4.3 Matériels et méthodes	40
4.4 Dosimètres à base de DSTN type LR-115	40
4.5 Calibration du système de détection	41
4.6 Concentrations du radon dans la ville de Tamanghasset	43
4.7 Conclusion	46
Conclusion générale	47
Références	49

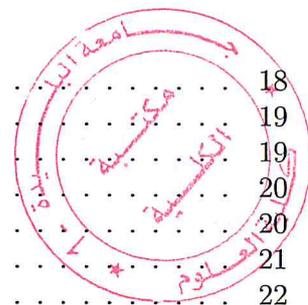


Table des figures

1.1	Chaîne de désintégration de ^{238}U	6
1.2	Modes de pénétration et de fixation du ^{222}Rn et de ses descendants.	8
2.1	DSTN en couches minces type LR-115.	14
2.2	Parcours des particules α dans certains milieux.	17
2.3	Traces de particules α révélées dans le LR-115.	18
2.4	Géométrie d'une trace latente.	20
2.5	Système de lecture des DSTN.	21
2.6	Circuit de base du compteur à étincelles.	22
3.1	Développement chimique.	24
3.2	Balance électronique.	25
3.3	Comparateur d'épaisseur.	25
3.4	Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement.	26
3.5	Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement.	27
3.6	Variation de la masse en fonction du temps de développement.	28
3.7	Compteur à étincelles.	30
3.8	Microscope optique.	30
3.9	Variation de la densité en fonction du temps par le compteur à étincelles.	31
3.10	Variation de la densité en fonction du temps par le microscope.	32
4.1	Carte géologique interprétative de la région de Tamanghasset.	40
4.2	Dosimètre de radon à base de LR-115.	41
4.3	Montage expérimentale pour transférer le radon libéré par la source étalon dans la chambre de calibration.	42
4.4	Concentration du radon mesurées par l'AlphaGUARD.	42
4.5	Concentration du radon dans différentes habitations autour de la ville de Tamanghasset.	44

Liste des tableaux

1.1	Isotope principaux du radon.	5
1.2	Limites des concentrations de radon dans les habitations.	10
3.1	Paramètres de développement chimique.	26
3.2	Variation de la vitesse d'attaque VB en fonction du temps a partir de l'épaisseur.	28
3.3	Comparaison de Vitesse d'attaque avec les anciens travaux.	29
3.4	Variation de la vitesse d'attaque en fonction de temps a partir de la masse.	29
3.5	Paramètres de lecture utilisés pour le compteur à étincelles.	31
3.6	Variation des densités de traces en fonction de la date de fabrication pour les deux séries des LR-115.	34
3.7	Limite de détection des films déterminée à l'aide du microscope et du compteur à étincelles.	37
4.1	Densité de traces enregistrées dans les films lors de la calibration.	43
4.2	Comparaison du facteur de calibration avec les anciens travaux.	43
4.3	Densité de traces Dt et concentration du radon dans les habitations de Tamanghasset par le compteur à étincelles.	45
4.4	Variation des concentrations mesurées à l'aide du compteur à étincelles et du microscope.	46
4.5	Concentrations moyennes du radon dans certains pays.	46

Remerciements

Ce travail a été réalisé au niveau de Laboratoire de Dosimétrie du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), dirigé par Madame Z. Mokrani chercheur expert que je remercie de m'avoir accueilli dans son laboratoire et de soutien qu'elle apporté à ce travail.

Je tiens tout d'abord, à exprimer ma reconnaissance et mon profond respect à mon promoteur

Monsieur M. Aït-Ziane, à la fois présent et disponible, qui ma constamment guidé et encouragé tout au long de ce travail qui porte son empreinte. Ses conseils et ses suggestions m'ont été utiles pour mener à bien ce mémoire.

Je remercie vivement Monsieur A. Mouzali, pour l'aide utile qu'il m'a apporté, pour ses conseils et ses encouragements.

J'exprime mon profond respect à Monsieur R. Khelifi, d'avoir accepté de présider mon jury.

Je remercie aussi mes dames : Meriem, Farah et Fouzia pour ses aides qu'elles m'ont apportés et leurs encouragements.

Je remercier tout particulièrement mes parents pour leurs contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Résumé

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle. Il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées dans les espaces confinés (bâtiments, mines souterraines, etc.). L'ensemble de la population est ainsi exposée au radon. En 1989, ce gaz a été reconnu comme cancérigène pulmonaire par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) et par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Il existe donc, de façon générale, un risque sanitaire lié à l'exposition au radon, à prendre en compte aussi bien dans le cadre professionnel que dans l'habitat.

Afin d'évaluer les concentrations moyennes du radon dans les habitations, la surveillance sur une long période est souvent utilisée. Ce type de mesure est généralement réalisé avec des techniques basées sur l'utilisation des Détecteurs Solides De Traces Nucléaires (DSTN).

Un développement chimique dans une solution NaOH, de concentration $2,5N$ à une température de 60° pendant 120 minutes permet d'enregistrer les traces de particules α sur un DSTN type LR-115 avec une vitesse d'attaque (V_B) égale à $(3,5 \pm 2,0)\mu m.h^{-1}$.

Une étude des mesures des concentrations de radon dans les habitations autour la ville de Tamanghasset a été réalisée en utilisant deux techniques de lecture a savoir : le microscope optique et le compteur à étincelles. Les résultats montrent que les concentrations du radon sont en moyenne égales à $48 Bq.m^{-3}$ et à $55 Bq.m^{-3}$ respectivement. Ces valeurs sont inférieures à la valeur de référence recommandée par la CIPR égale à $300 Bq.m^{-3}$.

Introduction

Depuis trois décennies, il a été montré que l'inhalation du radon et ses descendants radioactifs constitue la composante d'exposition aux rayonnements ionisants la plus importante pour le public [UNSCEAR, 2008].

Gaz radioactif d'origine naturelle, le radon est omniprésent et détectable même à très faible concentration. Il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées dans les espaces confinés (bâtiments, mines souterraines, etc.). L'ensemble de la population est ainsi exposée au radon. Durant ces dernières décennies, plusieurs études menées dans différents pays ont montré que l'inhalation de quantités importantes de radon augmente le risque de cancer du poumon.

En 1989, ce gaz a été reconnu comme cancérigène pulmonaire par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) et par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Il existe donc, de façon générale, un risque sanitaire lié à l'exposition au radon, à prendre en compte aussi bien dans le cadre professionnel que dans l'habitat.

La méthode de mesure du radon par l'utilisation des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) peut être très avantageuse par rapport aux autres méthodes, car elle est simple et peu coûteuse. Elle est basée sur l'enregistrement des traces des particules alpha émises par le radon et ses descendants dans le DSTN. Ces traces deviennent observables après un traitement chimique adéquat.

Dans le cadre de ce travail, nous rapportons dans le premier chapitre, des généralités sur le radon, le risque sanitaire engendré par l'inhalation de ce gaz, le cadre réglementaire et les différentes techniques qui existent pour le mesurer.

Les DSTN feront l'objet du second chapitre, où on va traiter leurs caractéristiques ainsi que leurs modes de développement.

Dans le troisième chapitre, nous exposons les procédures expérimentales relatives au DSTN type LR-115 en ce qui concerne l'optimisation de différents paramètres de révélation chimique

des traces d'une part, et les méthodes de lecture de ces traces après révélation d'autres part. Ce chapitre présente également les résultats de l'étude des caractéristiques intrinsèques du DSTN (densité, efficacité, bruit de fond et vieillissement) qui seront utilisés par la suite dans la détection des particules α émises par le radon.

Le chapitre cinq présente le dispositif expérimental de calibration ainsi que l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure du radon dans l'air des habitations situées autour la ville de Tamanghasset, et on terminera notre étude par une conclusion générale.

Chapitre 1

GÉNÉRALITÉS SUR LE RADON

1.1 Introduction

Les personnes du public sont soumises fortuitement et durablement à des expositions prolongées qui sont liées à des situations dans lesquelles elles se trouvent. Les expositions prolongées sont en général celles qui sont dues aux sources dites « naturelles » comme le rayonnement cosmique issu des réactions nucléaires dans les étoiles et galaxies et le rayonnement tellurique issu de la chaîne de désintégration des radionucléides naturelles.

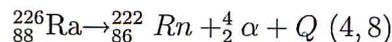
La mesure du radon (^{222}Rn) et de ses descendants dans l'environnement est devenue depuis quelques années une mission importante pour les laboratoires d'analyses et de mesures de la radioactivité environnementale. On estime que ce gaz est la source principale d'exposition radiologique naturelle pour l'homme. La connaissance de la concentration de ce gaz rare est essentielle pour l'évaluation du risque encouru par la population et pour la mise en œuvre des protections nécessaires afin de limiter la dose reçue.

Dans ce premier chapitre nous allons aborder des généralités sur cet élément, sa formation ses propriétés ses sources, le risque sanitaire qu'il représente, la protection du publique dans le cadre réglementaire et les techniques de mesure de ce gaz.

1.2 Le radon

Après la découverte du radium (^{226}Ra) par Pierre et Marie Curie (France) d'autres radioéléments naturels ont été découverts, parmi eux, le ^{222}Rn . En 1900 Friedrich Ernst Dorn

(Allemagne) met en évidence que l'air au contact de composés du ^{226}Ra devient radioactif et que ce phénomène est dû à une émanation gazeuse issue du ^{226}Rn , c'est le ^{222}Rn . La même année, Rutherford (Grande-Bretagne) montre que ce gaz se forme lors de la désintégration du ^{226}Ra avec l'émission d'une particule alpha (α).



En effet, le ^{226}Ra est produit en permanence par la désintégration de l'uranium (^{238}U), celui-ci se transforme à son tour, lentement, en un gaz radioactif, le ^{222}Rn , qui va émaner des sols dans l'air que nous respirons.

On connaît 33 isotopes du ^{222}Rn , (3 naturels et 30 artificiels) depuis l'isotope 195 jusqu'à l'isotope 228. Les trois isotopes principaux ont pour masse atomique 219 (Actinon), 220 (Thoron) et 222 (Radon). Ils sont issus de chaînes de désintégration différentes qui ont pour origine des éléments à durée de vie très longues [Higueret, 2007].

TAB. 1.1: Isotope principaux du radon.

Nom	Isotope	Période	Désintégration	énergie de α (MeV)	Précurseur	Période (<i>ans</i>)
Actinon	^{219}Rn	3.96 s	α	6.8	^{235}U	7.04×10^8
Thoron	^{220}Rn	55.6 s	α	6.3	^{232}Th	1.405×10^{10}
Radon	^{222}Rn	3.82 j	α	5.5	^{238}U	4.458×10^9

1.3 Formation du radon

Les éléments radioactifs du sol, présents en proportions variables dans la plupart des roches sont notamment ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th . Ces éléments sont instables et se désintègrent progressivement jusqu'à l'élément stable Plomb ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb respectivement

Lorsque l' ^{238}U se désintègre, il est soumis à une série de 14 transformations appelée « chaîne de désintégration ». Ce processus peut s'échelonner sur des milliards d'années. A la fin de la chaîne de désintégration du ^{222}Rn , on obtient du ^{206}Pb , un élément non radioactif stable (Fig. I.1). Le ^{222}Rn appartient à la chaîne de désintégration du ^{226}Ra et de l' ^{238}U , et possède une période radioactive (le temps nécessaire à la désintégration en la moitié de la quantité originale) de 3,8 *jours* [CNSC, 2012].

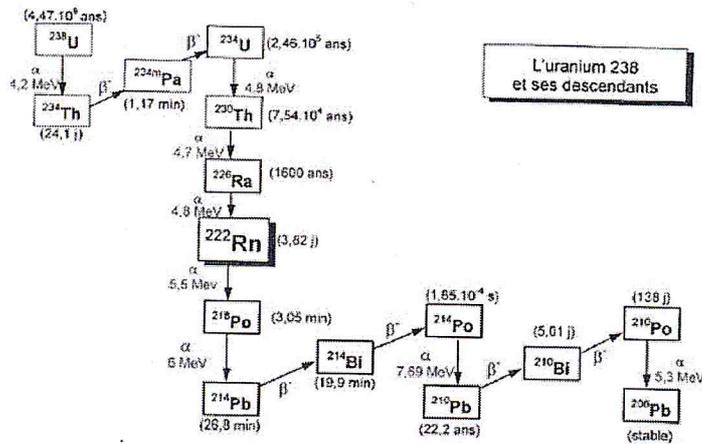


FIG. 1.1: Chaîne de désintégration de ^{238}U .

1.4 Propriété du radon

Étymologie du nom : vient du ^{226}Rn . Le ^{222}Rn été appelé niton, ce qui signifie brillant, inodore, incolore, insipide et radioactif. Il est invisible, qui s'est appelé historiquement émanation. Le est un gaz rare inerte, d'origine naturelle, de numéro atomique 86, c'est le gaz le plus lourd (densité $9,72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à 273°K , soit 8 fois plus que l'air). Les températures de fusion (-71°C) et d'ébullition (-61°C) qui sont les plus élevées parmi tous les gaz rares. Le ^{222}Rn est soluble dans l'eau et il s'adsorbe facilement sur les solides tels que charbon actif, paraffine, etc. . .

1.5 Les sources du radon

La concentration du ^{222}Rn dans un endroit donné dépend de plusieurs paramètres, en particulier de la concentration en ^{226}Ra . Il peut provenir de plusieurs origines, le sol, des matériaux de constructions, de l'eau ou de gaz naturel [Hakam, 1993].

- Le sol

Il constitue la source principale du ^{222}Rn puisque ce dernier se produit à partir de l' ^{238}U contenu dans les sols, les roches granitiques libèrent plus de ^{222}Rn que les terrains sédimentaires en raison de leur plus grande concentration d' ^{238}U , d'où il y'a une grande concentration du ^{226}Ra de moyenne approximative de $40 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- Matériaux de construction

Les matériaux généralement utilisés dans les constructions sont les briques, le béton, le plâtre et les pierres de décoration et les matériaux isolants comme le verre et le bois. Ces matériaux renferment du ^{226}Ra et contribuent à l'excès du ^{222}Rn dans les habitations, la concentration du ^{222}Rn dans les bâtiments peut atteindre exceptionnellement des taux extrêmes (10 et 20Bq.m^{-3}) jusqu'à 1000Bq.m^{-3} [Hakam, 1993].

- Eau

La solubilité du ^{222}Rn dans l'eau est plus importante que celle des autres gaz inertes d'où l'eau potable contient une quantité de ^{222}Rn approximativement variable de 5000 à 7000Bq.m^{-3} . On estime que seulement 2 % du ^{222}Rn à l'intérieur des habitations provient de l'eau [NCRP, 1979].

- Gaz naturel

Les combustibles naturels provenant du sol tels que le gaz naturel et le charbon peuvent contenir des quantités appréciables de ^{222}Rn . Des études ont montré que la concentration du ^{222}Rn dans le gaz naturel peut varier de 40 à 4000Bq.m^{-3} , mais sa contribution dans la concentration du ^{222}Rn dans les habitations est faible. [Hakam, 1993].

1.6 Transfert du radon dans l'air

Le gaz ^{222}Rn 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 confinée d'un bâtiment, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées

La proportion d'atomes de ^{222}Rn qui parvient jusqu'à l'air extérieur est finalement plus faible que celle des atomes de ^{222}Rn se désintégrant avant d'avoir atteint les interfaces sol-air ou matériau de construction-air.

1.7 Risque sanitaire du radon

Le ^{222}Rn , gaz radioactif, constitue un risque radiologique principal auquel est exposé chaque individu, il est considéré aujourd'hui comme étant la source principale d'exposition de la population aux rayonnements ionisants [Catelinois et al., 2007]. Le ^{222}Rn ainsi que ses produits de désintégrations également radioactifs sont respirés avec l'air. Les rayonnements ionisants de

ces éléments induisent de multiples dommages dans le système respiratoire. Ces dommages sont responsables de plusieurs cas de cancer des poumons dans la population.

A fin d'estimer le risque du ^{222}Rn , des études sur les mines d' ^{238}U ont prouvés que 15% des cancers des poumons sont dus au ^{222}Rn et à ses descendant [Azkour, 1999]. Il est noté aussi que la cigarette peut augmenter ce risque d'un facteur 10 chez les mineurs fumeurs [Al Doorie et al., 1993]. Le tabac est considéré dans ce cas comme un agent chimique qui favorise l'action cancérigène de la radioactivité α . Les données actuellement disponibles tendent à prouver que la dose annuelle due au ^{222}Rn et ses descendant représente près de 70% du bilan radiologique des populations a partir des sources radioactives naturelles.

Les personnes exposées à des concentrations élevées de ^{222}Rn présentent un risque accru d'être atteintes de cancer du poumon. Le degré de risque dépend de la teneur en ^{222}Rn de l'air et de la durée de l'exposition.

Les descendants du ^{222}Rn sont des particules solides, une partie se fixe sur des poussières infimes (aérosols) contenues dans l'air intérieur (fraction attachée), une autre partie reste libre (fraction libre). Lorsque ces descendants sont inhalés, la fraction attachée et la fraction libre de ces radioéléments se déposent dans les poumons, branches et jusqu'aux alvéoles (Fig. I.2) [Singh et al., 2006], là, ils vont émettre des particules α qui irradient les tissus pulmonaires avoisinants. Comme ces particules α 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.

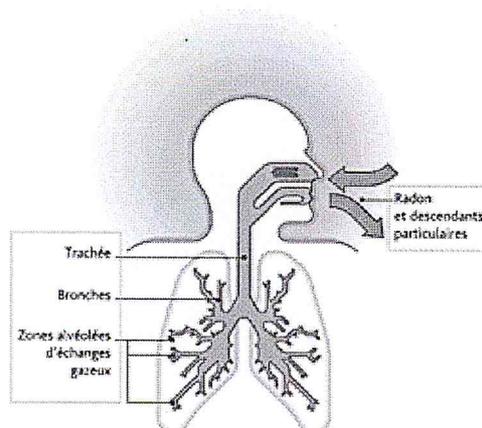


FIG. 1.2: Modes de pénétration et de fixation du ^{222}Rn et de ses descendants.

Les descendants du ^{222}Rn émettent aussi des particules bêta et des rayons gamma de faible intensité qui pénètrent plus profondément dans les tissus pulmonaires [Singh et al., 2006].

Des études menées en Europe, en Amérique du Nord et en Chine ont confirmé que le ^{222}Rn présent dans les bâtiments jouait, à l'échelle mondiale, un rôle substantiel dans l'apparition des cancers pulmonaires [Catelinois et al., 2007].

1.8 Les aspects réglementaires

La radioprotection est 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 directement ou indirectement sur les personnes. Les dangers de l'exposition apparurent très vite après la découverte de la radioactivité, qui nécessite d'avoir une protection et de définir les règles d'utilisation.

Le risque lié au ^{222}Rn est une question qui a mobilisé fortement les organisations internationales depuis plusieurs années, après avoir reconnu le ^{222}Rn comme cancérigène pulmonaire. L'Organisation Mondiale de la santé (OMS), a proposée en 1987 un niveau de référence de 300 Bq.m^{-3} pour réduire au minimum les dangers pour la santé liés à l'exposition au ^{222}Rn dans l'air intérieur, ce qui représente environ 10 mSv par an d'après les calculs récents effectués par la Commission internationale de protection radiologique [CIPR, 2010].

La législation concernant le ^{222}Rn est très variable selon les pays. Les normes sont basées sur l'activité volumique du ^{222}Rn (exprimée en (Bq.m^{-3})). Pour l'Union Européenne, le seuil est actuellement fixé à 400 Bq.m^{-3} pour les bâtiments existants et 200 Bq.m^{-3} pour les nouvelles constructions. La limite de 200 Bq.m^{-3} proposées par le Canada est inférieure à la marge du niveau de référence de 300 Bq.m^{-3} de l'CIPR. Le tableau ci-dessous présente les limites de concentration du ^{222}Rn , dans les habitations proposées par divers pays et organismes [Surleraux, 2011, CCSN, 2012].

TAB. 1.2: Limites des concentrations de radon dans les habitations.

Organismes/pays	Limites de ^{222}Rn ($Bq.m^{-3}$)	Organismes/pays	Limites de ^{222}Rn ($Bq.m^{-3}$)
Canada	200	Finlande	200
OMS	300	Suède	200
CIPR	300	Belgique	400
Etats-Unis	150	Suisse	400
Union Européenne	200	Royaume-Uni	200
GD Luxembourg	150	Autriche	200

1.9 Techniques de mesures du radon

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été décrites pour mesurer les concentrations volumiques du ^{222}Rn et de ses descendants dans l'atmosphère, qui sont basées sur la détection des particules α émises lors de sa décroissance radioactive. Ces techniques de mesure peuvent être classées en trois catégories selon le mode de prélèvement d'air : continue, ponctuelle et intégrées.

Ces méthodes nécessitent l'utilisation de technique active (ont besoin de source d'énergie pour fonctionner) tels que : les détecteurs à semi-conducteurs, les détecteurs à scintillation ou les détecteurs à gaz (chambre d'ionisation) et passive tel que les DSTN (LR-115 et CR-39) :

- Détecteurs à semi-conducteur : pour la détection des particules α , le matériau semi-conducteur utilisé est le silicium qui est placé dans un volume de détection optimisé pour que le maximum de particules α atteigne le détecteur. La charge émise par leur ionisation est convertie en impulsions de tension proportionnelle à l'énergie de la particule α détectée. Les semi-conducteurs sont depuis longtemps utilisés pour des mesures spectrométriques de rayonnements α dans les laboratoires ;

- Compteur à scintillation est un instrument composé d'un matériau qui émet de la lumière à la suite d'un dépôt d'énergie par interaction d'un rayonnement ionisant. Cette lumière est collectée dans un photomultiplicateur et transformée en courant électrique mesurable ;

- Détecteur à gaz (chambre d'ionisation, compteur proportionnel, Geiger Muller) est un détecteur qui repère le passage d'un rayonnement ionisant en mesurant la charge totale des électrons et des ions de l'ionisation du milieu gazeux provoquée par le rayonnement incident.

Ces appareils sont chers, fragiles, volumineux, et nécessite une alimentation électrique et des chaînes électroniques associées sophistiquées.

- Détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) : dans ce type de détecteur, les parti-

cules α issues de la désintégration du ^{222}Rn et de ses descendants à vie courte laissent des zones de dégâts appelés « traces latentes » qu'une attaque chimique ultérieure permet de les rendre observables par microscope optique.

On parle alors de traces révélées, qui se présentent sous la forme de trous ou de cavités dont le nombre est proportionnel à l'activité volumique moyenne en ^{222}Rn à laquelle les détecteurs ont été exposés.

Le faible coût de cette technique et sa fiabilité ont contribué à son large développement dans tous les domaines d'application du ^{222}Rn [Fleischer et al., 1975, Duyport et al., 1978, Jönsson, 1987, Tommansino, 1988, Klein et al., 1991].

1.10 Conclusion

Selon L'OMS, les effets du ^{222}Rn sur la santé sont complexes car ils sont liés à la forme chimique du composé qui pénètre dans l'organisme. L'inhalation de ^{222}Rn , émetteur α , et de ces descendants constitue un risque sanitaire reconnu [Woodfork, 2008, Henshaw et al., 1990].

Dans ce chapitre, on a cité les principales caractéristiques sur le ^{222}Rn ainsi que les différents techniques de sa mesure.

Chapitre 2

DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES NUCLÉAIRES

2.1 Introduction

La détection des particules est basée plutôt sur leurs interactions avec la matière, ou en général une partie de l'énergie d'une particule incidente est déposée dans la cible signalant sa présence. Pour la mesure du ^{222}Rn et de ses descendants dans les habitations et dans les lieux de travail, on utilise des détecteurs sensibles aux α émises par ces radionucléides et insensibles aux électrons et aux radiations électromagnétiques.

Dans ce travail, nous avons utilisé le détecteur solide de traces nucléaire (DSTN) type LR-115 qui présente une très grande sensibilité à l'énergie des particules α .

2.2 Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN)

Les DSTN sont utilisés depuis les années 1960 dans des secteurs aussi variés que la géologie (prévisions volcaniques et sismiques, etc..), la biologie (détermination de la teneur et répartition du Pb dans les dents et les os) [Fremlin et Edmond, 1980], l'archéologie (datation par traces de fission,..), science des matériaux, l'analyse élémentaire (l'analyse des échantillons lunaires et météorites en astrophysique,..) [Hakam, 1993], la physique nucléaire (prospection de l'uranium, étude des réactions nucléaire, ..), la radioprotection (la filtration des cellules cancéreuses par des films microporeux en radio diagnostique,..) et l'environnement [Fleischer, 1998].

2.3 Historique sur les DSTN

Les premiers à avoir travaillé dans le domaine des DSTN était Young [1958], Silk et Barnes [1959]. Par la suite, beaucoup de travaux ont été entrepris par la communauté scientifique internationale sur les mécanismes de formation des traces des ions lourds à l'intérieur des matériaux isolants, les possibilités d'attaque chimique et en particulier les nombreuses applications possibles des DSTN, ont permis le développement de cette technique de détection qui se caractérise par sa simplicité et son faible coût.

2.4 Caractéristiques des DSTN

2.4.1 DSTN massif : exemple le CR-39

Historiquement, de très nombreux DSTN massifs ont été utilisés, les plus répandus aujourd'hui sont les polycarbonates (CR-39, 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 DSTN massif CR-39 ($C_{12}H_{18}O_7$) est un polymère transparent, amorphe et sensible aux particules ionisantes [Nachab, 2003]. Il se présente souvent sous forme de feuilles de 0,5 mm d'épaisseur pour les applications nucléaires. Ce détecteur a l'avantage d'enregistrer des particules α ayant un angle d'incidence allant jusqu'à 75° et une énergie comprise entre 0 et 20 MeV.

2.4.2 DSTN en couches minces : exemple le LR-115

Il s'agit du film LR-115 fabriqué par Kodak. Il est constitué d'une couche de nitrate de cellulose ($C_6H_8N_2O_9$), fortement teintée en rouge, de 11 μm d'épaisseur en moyenne, sur un support inerte de 100 μm en polyester. Le LR-115 est parmi les DSTN les plus sensibles aux particules α . Il peut enregistrer et conserver les impacts ou les traces des particules α d'énergie comprise entre 1,4 et 4,7 MeV émises par le ^{222}Rn et ses descendants qui peuvent être lus ultérieurement, avec un angle d'incidence allant jusqu'à 50° [Higueret, 2007].

L'insensibilité du LR-115 aux rayonnements gamma et aux électrons présente un grand intérêt pour son utilisation en champs mixte de rayonnements.

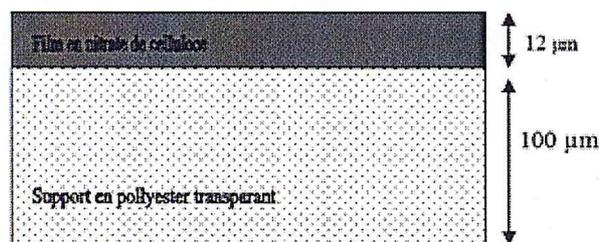


FIG. 2.1: DSTN en couches minces type LR-115.

2.4.3 Interaction des particules α avec le DSTN

Lors de leur passage dans la matière, les particules α perdent leur énergie par collisions inélastiques et élastiques avec les électrons et les noyaux atomiques du milieu. La perte d'énergie totale est la somme de ces deux contributions : pouvoir d'arrêt électronique et nucléaire [Balashov, 1997].

Le premier processus est l'effet principal responsable de la perte d'énergie des particules chargées lourdes. Dans ce type de collision, l'énergie 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 très faible par rapport à 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 [Nachab, 2003].

Le processus d'interaction entre les particules chargées peut être quantifié par les grandeurs suivantes :

- Transfert linéique d'énergie ;
- Pouvoir d'arrêt massique ;
- Parcours des particules chargées.

2.5 Transfert linéique d'énergie

Pour étudier le ralentissement des particules chargées ; et pour évaluer l'énergie perdue par la particule dans le milieu traversé, on introduit la notion de transfert linéique d'énergie qui représente la perte d'énergie par unité de longueur de trajectoire des particules incidentes. Son expression en est donnée par la formule de Bethe Bloch [Nachab, 2003] :

$$TLE = \left| \frac{dE}{dx} \right| = \frac{z^2 e^4}{4\pi \epsilon_0^2 m_0 v^2} = NZ \left[\log\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right) - \log\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} - \frac{C_k}{z} \right] \quad (2.1)$$

Où z et v sont la charge et la vitesse de la particule incidente (α);

m_0 et e sont la masse au repos et la charge de l'électron;

ϵ_0 est la permittivité du vide, égale à $8,854 \times 10^{-12} F.cm^{-1}$;

c est la vitesse de lumière dans le vide, égale à $3 \times 10^8 m.s^{-1}$;

N et Z sont le nombre des noyaux cibles par unité de volume et le numéro atomique du matériau absorbant (LR-115), ils sont égaux 25 et 130 respectivement;

$-C_k$ est un terme de correction effet de Croches dépend de l'énergie et de Z lorsque l'ion tient compte de la structure complète des noyaux de la matière;

I est la valeur moyenne du potentiel tenant compte de l'ionisation et de l'excitation des atomes ralentisseurs. Il est donné par la formule semi empirique (en eV):

$$I = 1,9 Z (1 + 1,9 Z^{2/3}) \quad (2.2)$$

2.6 Pouvoir d'arrêt massique

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 est appelé pouvoir d'arrêt linéaire noté S_L , exprimé en $eV.\mu m^{-1}$ ou $keV.\mu m^{-1}$ et donné par la formule suivante :

$$S_L = \frac{dE}{dx} \quad (2.3)$$

Si le milieu a une densité ρ , le rapport entre le pouvoir d'arrêt linéaire S_L et la densité est appelé le pouvoir d'arrêt massique :

$$\frac{S_L}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad (2.4)$$

Cas des particules α

Pour le cas des particules α 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 :

$$TLE = \frac{16\pi e^4}{m_0 v_1^2} NZ \left[\log \frac{2m_0 v_1}{I} - \frac{C_k}{z} \right] \quad (2.5)$$

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

1. Il n'y a pas de capture ou de perte d'électrons pendant le passage de la particule,
2. Le terme $\frac{ze^2}{m_0 v_1^2}$ est assez petit pour que la diffusion nucléaire et le rayonnement de freinage puissent être négligés,
3. 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 de la particule α est supérieure à $2MeV.u.m.a^{-1}$. Cependant, lorsque sa vitesse 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.

2.7 Parcours des particules α

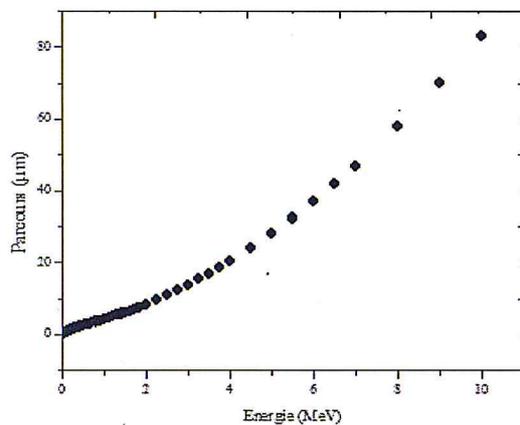
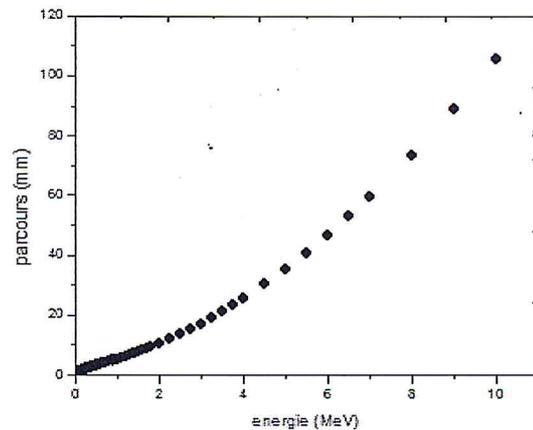
Lorsqu'une particule chargée pénètre dans une matière donnée elle va parcourir une certaine distance puis elle s'arrête. Le parcours d'une particule chargée dans un matériau donné est le trajet nécessaire pour que cette particule perde complètement son énergie cinétique. Considérons un faisceau de particules chargées initialement monocinétiques d'énergie E_0 qui pénètre dans un matériau absorbant (DSTN). 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 :

$$R = \int_0^R dr \quad (2.6)$$

Puisque l'énergie incidente de la particule α et l'épaisseur du matériau cible sont interdépendante, alors on peut les inter-changer dans l'équation (2.6); on aura donc :

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dr}{dE} dE = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dr}\right)^{-1} dE = \int_0^{E_0} -\frac{1}{TLE} dE \quad (2.7)$$

R s'exprime en cm si TLE est en $MeV.cm^{-1}$, et E_0 est l'énergie de la particule α émise par le ^{222}Rn , elle est égale à $5.49MeV$. La figure 2.2 et le parcours des particules α dans le DSTN type LR-115 et dans l'air respectivement.

Parcours des particules α dans le LR-115.Parcours des particules α dans l'air.FIG. 2.2: Parcours des particules α dans certains milieux.

2.8 Formation de la trace latente

Durant les cinq dernières décennies, plusieurs travaux [Vaginay, 2001] 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. Les zone de dommage créées le long des trajectoires des particules α dans un matériau détecteur sont appelées traces latentes [Nachab, 2003].

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. Pour les particules α , les dimensions radiales sont de l'ordre de l'angström, nous pouvons donc assimiler la trace latente à un segment puisque le diamètre de la trace est petit par rapport à sa longueur [Nachab, 2003]. 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 (température, concentration de bain d'attaque et temps de développement).

2.9 Révélation de traces latentes

L'attaque par un réactif chimique tel qu'un acide où une base s'effectue préférentiellement dans les parties endommagées par le passage des particules, les traces latentes sont ainsi agrandies et deviennent visibles au microscope optique (Fig. 2.3) [Hakam, 1993].

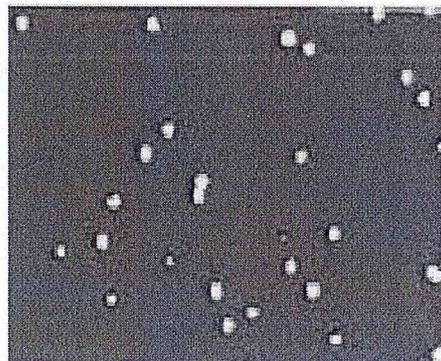


FIG. 2.3: Traces de particules α révélées dans le LR-115.

2.10 Géométrie des traces observées dans le LR-115

La forme des traces révélées est régie par l'effet de la dissolution chimique du matériau le long du canal entouré de dégâts latents selon les deux paramètres suivants :

- la vitesse d'attaque surfacique chimique V_B du détecteur ;
- la vitesse d'attaque chimique V_T propre aux traces latentes.

2.11 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 pendant une durée donnée, elle est donnée par deux méthodes :

- Méthode des épaisseurs : durant le traitement chimique, la surface du détecteurs est décapée couche par couche et son épaisseur diminue progressivement. La vitesse V_B est donnée comme un rapport de l'épaisseur enlevée sur la durée de l'attaque chimique :

$$V_B = \frac{e}{t} \quad (2.8)$$

Où e est l'épaisseur enlevée (épaisseur initiale – épaisseur résiduelle) en μm ;
 t est la durée de l'attaque chimique en heure.

- Méthode gravimétrique : elle consiste à suivre la variation de la masse avec le temps, elle est donnée par :

$$V_B = \frac{m}{\rho \times S \times t} \quad (2.9)$$

Où m est la masse du détecteur ;
 t est le temps en heure ;
 S est la surface de l'échantillon ;
 ρ est la masse volumique de l'échantillon.

2.12 La vitesse d'attaque le long des traces

C'est la vitesse avec laquelle la solution chimique se propage le long de la trajectoire laissée par les particules α dans le film [Somogyi et Szalay, 1973] (Fig. 2.4), notée V_T . Elle est donnée par :

$$V_T = V_B \frac{1 + \left(\frac{d}{2l}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{2l}\right)^2} \quad (2.10)$$

- Où V_T , est la vitesse d'attaque le long de dégâts latente ;
 V_B est la vitesse d'attaque surfacique ;
 d est le diamètre de la trace d'une particule α ;
 e est l'épaisseur enlevé dans un temps t .

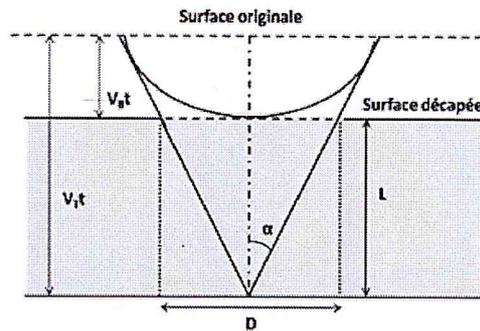


FIG. 2.4: Géométrie d'une trace latente.

2.13 Comptage des traces

Une fois que les détecteurs sont développés, leur lecture devient nécessaire pour en extraire les informations désirées. 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 généralement par un microscope optique ou un compteur à étincelle.

2.13.1 Le microscope optique

C'est le moyen le plus couramment employé pour l'observation directe des traces. Dans le cas des détecteurs solides de traces LR-115 et CR-39, qui sont des matériaux transparents, 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. Pour le 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 ou jaune et grâce auquel chaque trace apparaît comme un point vert ou jaune sur un fond noir (Fig. 2.5) [Hakam, 1993].

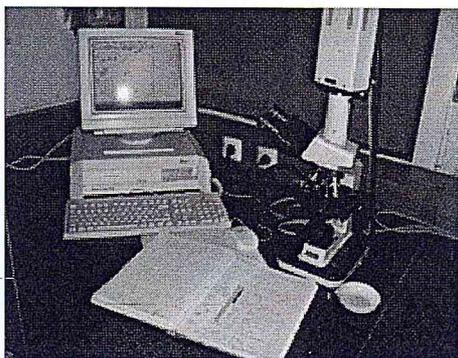


FIG. 2.5: Système de lecture des DSTN.

2.13.2 Le compteur à étincelles

Cette technique proposée par Cross et Tommasino [1970], a été améliorée par Somogyi et ses collaborateurs pour en faire un moyen de comptage automatique, rapide et reproductible. Dans sa forme originale, comme elle a été décrite par Cross et Tommasino, cette technique est basée 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. Cette dernière est constituée en fait d'une couche mince d'aluminium d'une dizaine de nanomètres déposée par évaporation thermique sous vide sur un film en polyester de $8 \mu m$. Une haute tension continue est appliquée à travers un circuit RC (Fig. 2.6) aux bornes des électrodes [Hakam, 1993]. Des photons lumineux sont ainsi créés et dénombrés par un photomultiplicateur, le nombre de photons est relié directement aux nombre de traces dans le film.

Deux tensions sont généralement appliquées :

- La tension de claquage : pour élargir les traces et perforer celles qui n'ont pas été complètement trouées lors du développement chimique ;
- La tension de lecture : pour compter le nombre de traces.

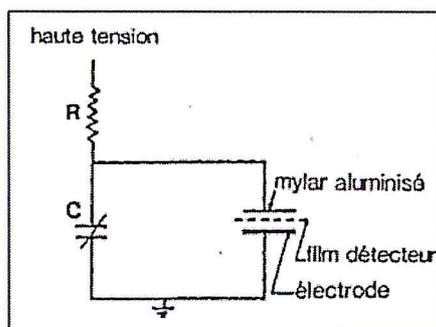


FIG. 2.6: Circuit de base du compteur à étincelles.

2.14 Conclusion

Les DSTN peuvent enregistrer les traces des protons de $0,55MeV$, des particules α et des fragments de fission, ce type de film LR-115 est très sensible aux particules alpha avec une gamme de sensibilité en énergie allant de $1,4$ à $4,7MeV$. Les traces enregistrées ne sont pas directement visibles au microscope optique et doivent être agrandies à l'aide d'un traitement chimique approprié. Dans ce chapitre des généralités sur le DSTN ainsi que sur les traces générées par les particules α : géométrie, vitesse d'attaque et les moyens de comptage de ces dernières.

Chapitre 3

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

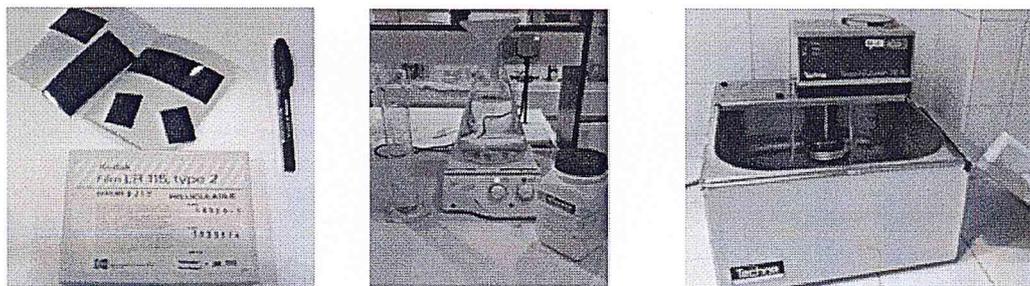
3.1 Introduction

Nous avons vu que les effets des rayonnements ionisants dans les DSTN ne sont pas directement visibles par le microscope optique. Afin de rendre observables, il faut agrandir les traces par une attaque chimique appropriée,

Dans ce chapitre, nous allons déterminer les différents paramètres de développement et de lecture afin d'optimiser les informations fournies par les dosimètres.

3.2 Étude des détecteurs LR-115

Les films ont été découpés et codés, choisissant la forme $(2,5 \times 3,5)cm^2$ prolongés dans un bain chimique approprié de NaOH de normalité fixée à $2,5 N$ à $60^\circ C$ de température [Hakam, 1993], pendant un temps de développement qui variés de 60 à 130 *min*. Il est à noter que le bain thermostatique doit être allumé au moins deux heures avant l'introduction des détecteurs afin d'obtenir une stabilité de la température pendant toute la durée du développement (Fig. 3.1).



Films LR-115.

Préparation de la solution.

Bain de développement chimique.

FIG. 3.1: Développement chimique.

3.3 Détermination des conditions expérimentales optimales de développement

Le développement chimique est caractérisé par trois paramètres, la concentration, la température et le temps de développement qui sont dépendants l'un de l'autre. Une diminution de la température peut être compensée par une augmentation de la concentration ou du temps de développement.

Une attaque forte (haute température, haute concentration) donne généralement un développement rapide mais avec un bruit de fond plutôt élevé, alors qu'une attaque douce donne des traces moins larges et mieux définies. C'est pourquoi, les conditions de développement sont variées dans une large mesure suivant les conditions spécifiques des expériences et aussi suivant les préférences et les habitudes de l'expérimentateur.

De nombreux travaux effectués dans plusieurs laboratoires sur le choix du réactif chimique ont montré que la soude ($NaOH$) est la plus satisfaisante pour la révélation des traces dans le LR-115. La forme des traces est fonction de l'angle d'incidence des particules enregistrées; elle est généralement en forme de bâtonnet conique.

Après le développement chimique, les DSTN ont été lavés à l'eau courante pendant 5 minutes, puis rincés à l'eau distillée pour arrêter l'attaque de la solution chimique et éliminer les suspensions de matériaux dégradés qui sont déposés sur la surface des détecteurs. Les films de LR-115 ont été pesés à l'aide d'une balance électronique modèle *SARTORIUS* d'une précision de 0,1 mg (Fig. 3.2), et leurs épaisseurs mesurées à l'aide d'un comparateur d'épaisseur de type

Militron (*MahrFeinpruf*[®], Allemagne) (Fig. 3.3).



FIG. 3.2: Balance électronique.



FIG. 3.3: Comparateur d'épaisseur.

3.4 Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction de temps du développement

Il a été constaté que malgré que la température et la concentration de la solution chimique du bain d'attaque soient constantes, on n'obtient pas pour une durée de développement donnée, des résultats reproductibles [Hakam, 1993]. Nous étions donc dans l'obligation de faire un développement séquentiel en mesurant l'épaisseur résiduelle des détecteurs après chaque temps de développement. L'épaisseur initiale des détecteurs n'est pas toujours constante pour le LR-115, variante d'un lot à l'autre fluctuante entre 10,2 et 12,6 μm , il est donc nécessaire de mesurer son épaisseur initiale et d'en tenir compte lors du développement. L'épaisseur résiduelle

du détecteur joue un rôle dominant pour le comptage de traces à l'aide du compteur à étincelles, elle doit être comprise entre deux limites. Une limite inférieure, qui est l'épaisseur minimale en dessous de laquelle le film ne peut être détaché 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 $7\mu m$ respectivement [Hakam, 1993].

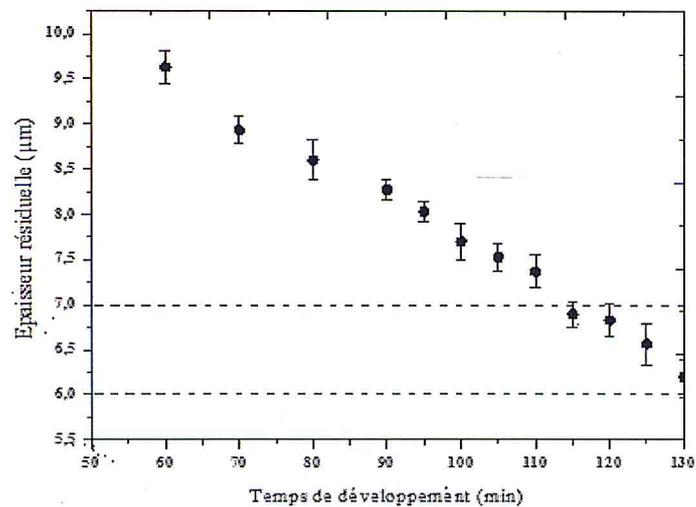


FIG. 3.4: Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement.

La figure 3.4 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 120 *min*, l'épaisseur résiduelle des films est égale à $(6,8 \pm 0,2) \mu m$. Sachant que l'utilisation de la lecture à étincelage nécessite une épaisseur optimale qui est comprise entre 6 et $7 \mu m$, donc le temps de développement de notre étude sera fixé à 120 *min*.

TAB. 3.1: Paramètres de développement chimique.

Solution	Concentration	Température ($^{\circ}C$)	Temps de développement (<i>min</i>)
<i>NaOH</i>	2,5 <i>N</i>	120	60

3.5 Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement

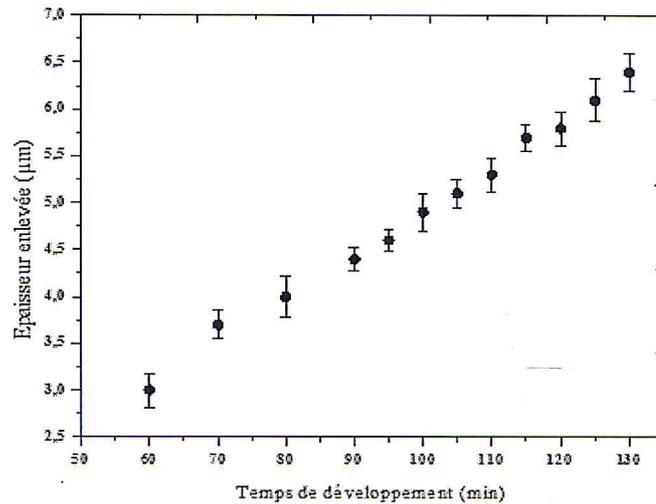


FIG. 3.5: Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement.

On remarque que l'épaisseur enlevée augmente linéairement sans seuil en fonction de temps de développement, avec une pente égale à $(0,050 \pm 0,001) \mu m \cdot min^{-1}$. Ce résultat est comparable à celui déterminé précédemment au niveau du laboratoire par Aouchar et Messaoudi $(0,056 \pm 0,001) \mu m \cdot min^{-1}$ [2015], et par Bouarar $(0,053 \pm 0,002) \mu m \cdot min^{-1}$ [2016].

La figure ci-dessous, (Fig. 3.5), représente l'épaisseur enlevée du détecteur LR-115 en fonction du temps de développement.

3.6 Variation de la masse en fonction du temps de développement

La variation de la masse en fonction de temps de développement est présentée dans la figure (Fig. 3.6).

On remarque que la masse des films varie en fonction du temps de développement avec une pente égale à $(-7,7 \pm 6,0) \times 10^{-5} g$, la masse initiale des détecteurs est de l'ordre de

$(0,0159 \pm 0,0003)g$, cette réduction est due à la dégradation du polymère après l'attaque chimique.

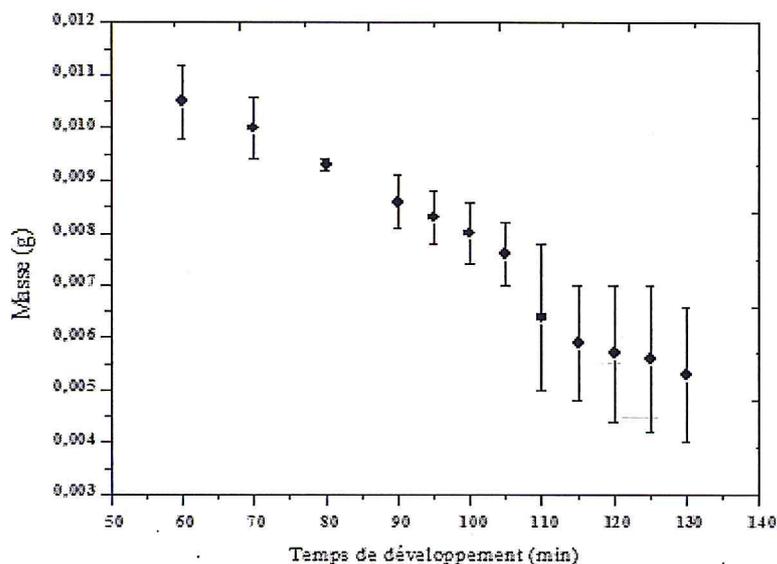


FIG. 3.6: Variation de la masse en fonction du temps de développement.

3.7 Détermination de la vitesse générale d'attaque V_B

Afin de déterminer la vitesse générale d'attaque V_B , nous avons utilisé les relations (2.8) et (2.9) données dans le chapitre 2.

TAB. 3.2: Variation de la vitesse d'attaque V_B en fonction du temps à partir de l'épaisseur.

t (min)	60	70	80	90	95	100	105	110	115	120	125	130
V_B ($\mu m.h^{-1}$)	3,0	3,17	3,02	2,91	2,90	2,96	2,91	2,87	2,99	2,90	2,91	2,97

Le tableau 3.2 donne les résultats de la vitesse générale d'attaque V_B obtenus pour différentes durées de développement, on obtient une vitesse générale d'attaque moyenne du LR-115 de $(3,0 \pm 0,1) \mu m.h^{-1}$ par une solution du NaOH de 2,5 N à $60^\circ C$. Ce résultat a été comparé avec ceux trouvés dans la littérature (Tableau 3.3).

Le résultat obtenu est très important, car il nous informe sur l'état des paramètres de développement chimique, dans notre cas, les conditions de développement sont bien respectées.

TAB. 3.3: Comparaison de Vitesse d'attaque avec les anciens travaux.

V_B ($\mu m.h^{-1}$)	Référence
$(3,4 \pm 0,2)$	Auchar et Messaoudi,2015
$(2,9 \pm 0,3)$	Hakam,1993
3,2	Salama et al.,2006
3,3	Nikezic et Janicijevic,2002
3	Djefal,1995
$(3,0 \pm 0,1)$	Ce travail

Le tableau 3.4 résume les résultats obtenus de V_B a partir de la masse final de LR-115 pour différentes temps de développement, on obtient une vitesse d'attaque moyenne $V_B = (3,5 \pm 2,0) \mu m.h^{-1}$, par conséquent la vitesse d'attaque calculée par la méthode gravimétrique est en bon accord avec celle trouvée par la méthode d'épaisseur.

TAB. 3.4: Variation de la vitesse d'attaque en fonction de temps a partir de la masse.

t (min)	60	70	80	90	95	100	105	110	115	120	125	130
V_B ($\mu m.h^{-1}$)	8,1	6,6	5,4	4,4	4,1	3,7	3,4	2,7	2,4	2,2	2,1	1,9

3.8 Détermination des conditions expérimentales optimales de lecture

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

- Les conditions du développement ;
- L'épaisseur résiduelle ;
- Le choix du l'objectif du microscope (le grossissement) ;
- La haute tension appliquée pour l'étincelage ;
- L'épaisseur de l'Aluminium utilisé.

Le temps de développement est choisi expérimentalement ; il est fonction du réactif chimique utilisé, de sa concentration et de sa température. II dépend aussi de la nature des particules ionisantes et de leur énergie. Il est plus ou moins important selon les dimensions que l'on souhaite donner aux traces.

Pour voir l'influence du temps de développement sur la densité de traces d'un film LR-115 ; on prend deux séries de films, l'une considéré comme bruit de fond, et la deuxième série est

irradié pendant 5 *min*, par une source de ^{239}Pu de 3055 *Bq* d'activité, qui émet des particules alpha d'énergie moyenne de 5,2 *MeV*. Comme ce type de film est très sensible dans la gamme d'énergie de 1,4 à 4,7 *MeV* [Higuret, 2007], on a utilisé un collimateur d'air en papier de 1,6 *cm* de hauteur afin de réduire l'énergie des particules α jusqu'à atteindre 3,5 *MeV* qu'on a choisie.

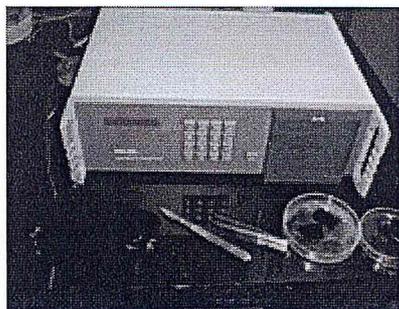


FIG. 3.7: Compteur à étincelles.

Le comptage du nombre de traces a été réalisé à l'aide d'un compteur à étincelles de type *SPARKAREPLICACOUNTER710P/S (Mi.El[®], Italie)* (Fig. 3.7), et à l'aide d'un microscope optique modèle Leica en utilisant l'objectif (40 × /65) (Fig. 3.8).

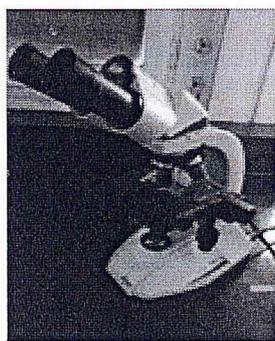


FIG. 3.8: Microscope optique.

Le compteur à étincelles est composé d'une cellule d'étincelage composé de quatre électrodes : deux de 5 *mm* et deux de 10 *mm* de diamètres et d'un module de commande avec lequel on introduit les valeurs des tensions ainsi que le temps de décharge électrique et de comptage. Sur une de ces électrodes place le détecteur une fois dépelliculé et on superpose un morceau de mylar aluminisé.

La tension appliquée entre les électrodes de l'étincelage est d'une grande importance pour la reproductibilité des lectures, la tension de claquage à un rôle d'élargir les traces et de les perforer. Dans notre travail nous avons compté le nombre de traces avec une tension de 1100V pour claquage et 500V pour la lecture [Aouchar et Messaoudi, 2015] (tableau 3.5).

TAB. 3.5: Paramètres de lecture utilisés pour le compteur à étincelles.

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

3.9 Influence du temps de développement sur la densité des traces

Les figures suivantes représentent le nombre de traces en fonction du temps de développement, pour les détecteurs irradiés et non irradiés.

3.9.1 Films non irradiés (Bruit de fond)

Les résultats de la première série de détecteurs non irradiés (bruit de fonds) comptés à l'aide du microscope et à l'aide du compteur à étincelles sont illustrés dans les deux figures (3.9) et (3.10) respectivement.

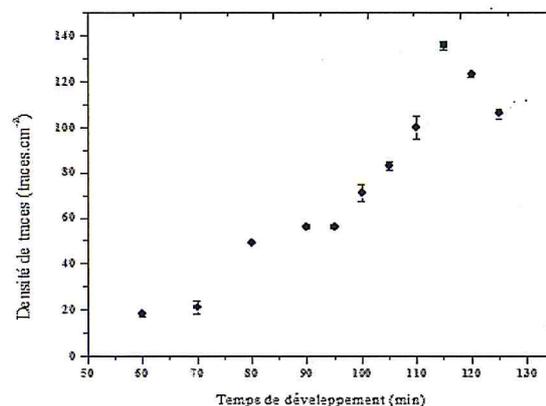


FIG. 3.9: Variation de la densité en fonction du temps par le compteur à étincelles.

On remarque que la densité de traces révélés qui désigne le bruit de fond des films augmente avec le temps de développement jusqu'à une densité maximale égale à $136 \text{ trace.cm}^{-2}$ pour le compteur à étincelle et à $143 \text{ traces.cm}^{-2}$ pour le microscope qui correspond à un temps de développement proche de 120 min .

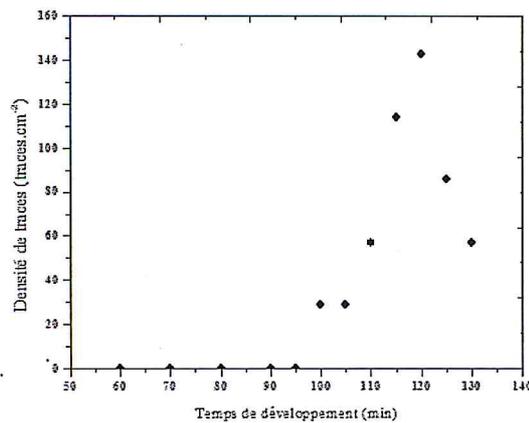


FIG. 3.10: Variation de la densité en fonction du temps par le microscope.

3.9.2 Films irradiés

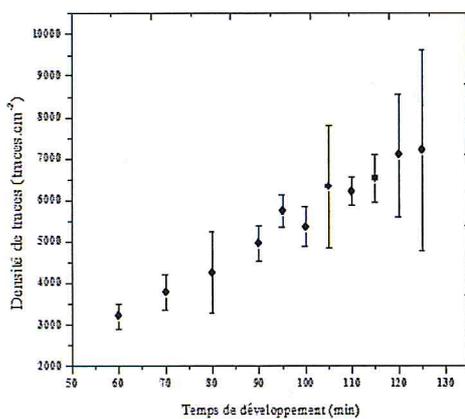


FIG. 3.11 Variation de la densité en fonction du temps par le compteur à étincelles.

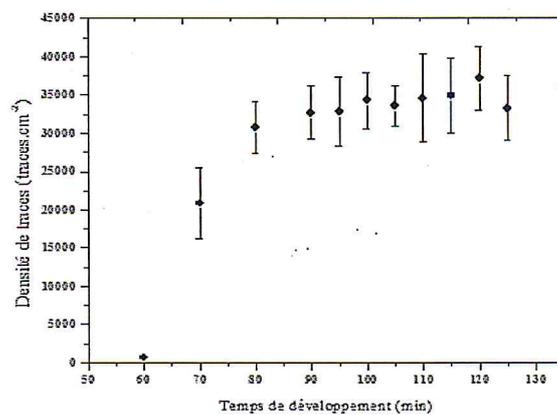


FIG. 3.12 Variation de la densité en fonction du temps de développement par le microscope

Pour la deuxième série des détecteurs LR-115 qui ont été irradiés par la source du ^{239}Pu , les densités de traces mesurées par compteur à étincelles et par microscope sont représentées dans

les figures (Fig. 3.11) et (Fig. 3.12) respectivement. La figure (3.11), montre que la densité de traces augmente en fonction du temps de développement avec une pente égale à $(83 \pm 50) \text{ traces.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, jusqu'à atteindre $7093 \text{ traces.cm}^{-2}$ pour un temps de développement de 120 min de développement.

De même, on remarque que la densité de traces mesurée par microscope augmente en fonction du temps de développement dans l'intervalle étudié.

Nous avons constaté qu'à partir de 120 min de développement, la densité de traces diminue clairement, cette diminution de la densité de traces est causée par la superposition des traces révélées (chevauchement) sur la surface de détecteur et cela dû 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.

3.10 Etude de l'efficacité, bruit de fond et le vieillissement du LR-115

Cette étude a été effectuée avec des lots de détecteurs fabriqués en différentes années (09/1986, 01/1989, 02/1997 et 01/1999).

A cet effet, pour chaque date de fabrications, deux séries de LR-115 fabriquées par Kodak-Pathé ont fait l'objet de cette investigation. La première série dite « témoin » a été utilisée pour l'estimation du bruit de fond propre aux détecteurs LR-115, et la seconde série dite « irradiée », destinée à l'étude du vieillissement, a été irradiée pendant un temps de 5 min avec une source de ^{239}Pu de $0,75 \text{ cm}$ de rayon en utilisant un collimateur d'air de forme cylindrique de $1,6 \text{ cm}$ de hauteur et de $1,3 \text{ cm}$ de rayon, ces paramètres permettent de calculer l'efficacité du détecteur.

Après développement chimique en utilisant les paramètres de développements cités au début de ce chapitre (tableau 3.1), les détecteurs étaient lus à l'aide du microscope optique et compteur à étincelles avec les paramètres de lecture mentionnés dans le tableau (3.5). Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau (3.6).

TAB. 3.6: Variation des densités de traces en fonction de la date de fabrication pour les deux séries des LR-115.

Date de fabrication du film	Série « témoin »		Série « irradiée »	
	Microscope	Compteur à étincelles (traces.cm ⁻²)	Microscope	Compteur à étincelles
09/1986	778 ± 2	132 ± 10	34814 ± 8	5150 ± 120
01/1989	447 ± 1	—	33039 ± 7	—
02/1997	166 ± 1	125 ± 2	36297 ± 8	6389 ± 435
01/1999	66 ± 1	130 ± 1	34351 ± 8	6116 ± 54

3.10.1 Détermination de l'efficacité du détecteur

Le nombre de particules α qui arrivent au point M sur la surface du détecteur par unité de temps (particule.cm⁻².s⁻¹) est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\dot{N} = A_S = \left[1 - \left(1 + \frac{r^2}{h^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3.1)$$

Où : A_S est l'activité surfacique de la source (particules.cm⁻².s⁻¹) ;

h est la hauteur de collimateur (cm) ;

r est le rayon de la source (cm).

La fluence (particule.cm⁻²) des particules α est donnée donc par la relation suivante :

$$N = \dot{N}(M) \times t \quad (3.2)$$

On combinant les deux relations (3.1) et (3.2), on aura :

$$N = \dot{N}(M) \times t = \dot{N} = A_S = \left[1 - \left(1 + \frac{r^2}{h^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \times t \quad (3.3)$$

L'efficacité de détection ε est donnée en générale par la relation :

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{détectés}}}{N} \quad (3.4)$$

Où : $N_{\text{détectés}}$ est le nombre de particules α détectées par le LR-115 (particules.cm⁻²) ;

N est le nombre de particules α émis par la source ($N = 103779$ particules.cm⁻²).

La figure 3.13 représente l'efficacité du film LR-115 en fonction de sa date de fabrication obtenue par microscope. L'efficacité du film LR-115 calculée est indépendante de la date de fabrication, et elle est comprise entre 30 et 35%. De même, l'efficacité obtenue par compteur à

étincelles en fonction de la date de fabrication est illustrée dans la figure 3.14.

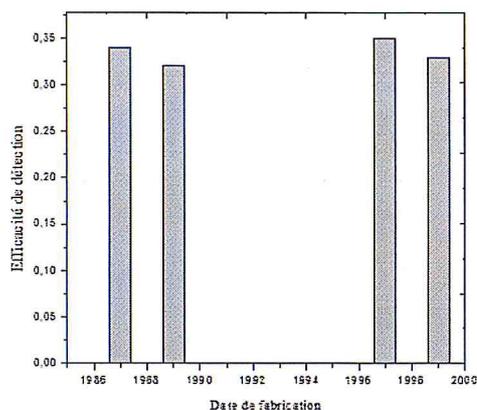


FIG. 3.13 Variation de l'efficacité du film LR-115 en fonction des dates de fabrication obtenue par microscope.

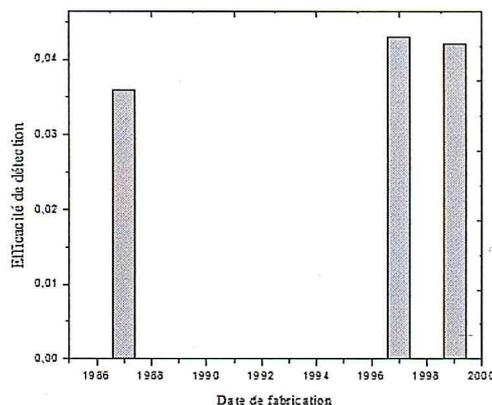


FIG. 3.14 Variation de l'efficacité du film LR-115 en fonction des dates de fabrication par le compteur à étincelles.

Nous pouvons constater que l'efficacité obtenue, comprise entre 3 et 4,5%, elle est très faible par rapport à celle obtenue par microscope. Cette différence est due à la lecture par étincelage qui ne distingue que les traces développées. En effet, les particules α qui arrivent sur le détecteur avec angle d'incidence faible ne forment pas des traces perfores après développement, d'où sous-estimation du nombre réel de traces par ce mode de lecture.

3.10.2 Etude de bruit de fond du LR-115

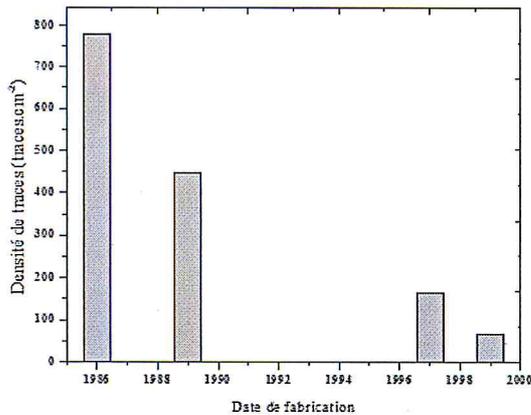


FIG. 3.15 Variation de bruit de fond en fonction des dates de fabrication par microscope:

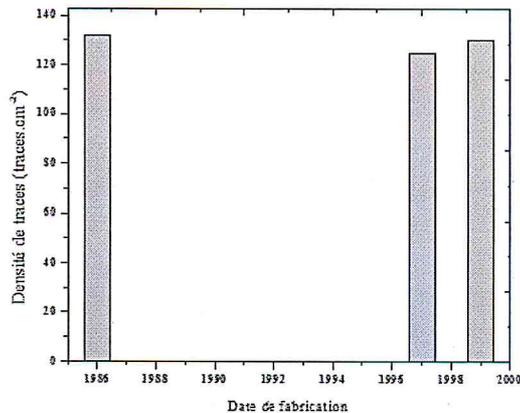


FIG. 3.16 Variation de bruit de fond en fonction des dates de fabrication par le compteur à étincelles.

La variation de bruit de fond en fonction des dates de fabrication a été étudiée pour les différents lots de LR-115 (série témoin) par le microscope et par le compteur à étincelles. Les résultats sont représentés dans le tableau III.6. et illustrés dans les figures 3.15 et 3.16 respectivement.

Une diminution du nombre de traces mesurés par le microscope en fonction de la date de fabrication a été observée pour la première série (Bruit de fond) (Fig.3.15). En effet, le LR-115 fabriqué en 1986 présente une densité de traces maximale ($778 \text{ traces.cm}^{-2}$), cette densité de traces diminue jusqu'à atteindre $66 \text{ traces.cm}^{-2}$ pour le LR-115 fabriqué en 1999. Contrairement au microscope, la densité de traces mesurées à l'aide du compteur à étincelles est indépendante de la date de fabrication, elle est égale à $(129 \pm 4) \text{ traces.cm}^{-2}$ (Fig. 3.16)

3.11 Etude du vieillissement du LR-115

L'effet du vieillissement du détecteur LR-115 a été étudié pour les différents lots de LR-115 (série irradiée) en fonction des dates de fabrication, les résultats sont présentés dans le tableau 3.6 et illustrés dans les figures (Fig. 3.17) et (Fig. 3.18) pour les deux moyens de lecture utilisés à savoir le microscope et le compteur à étincelles.

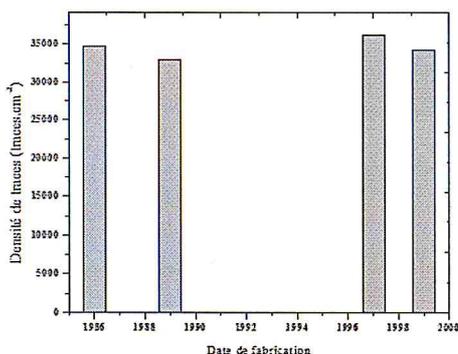


FIG. 3.17 Variation de La densité en fonction des dates de fabrication par microscope.

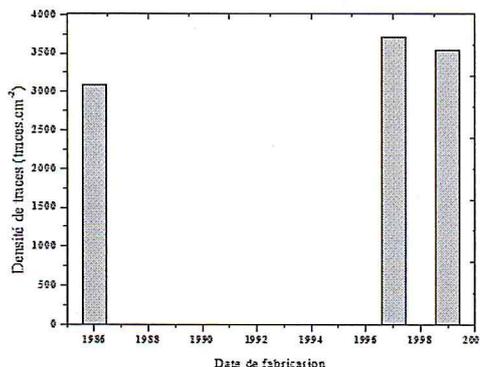


FIG. 3.18 Variation de la densité en fonction des dates de fabrication par le compteur à étincelles.

Les figures (3.17) et (3.18) montrent que les films LR-115 utilisés dans cette étude présente une densité de traces constant en fonction de la date de fabrication, elle est égale à $(34516 \pm 1) traces.cm^{-2}$ pour le microscope et $(3440 \pm 1) traces.cm^{-2}$ pour la lecture par compteur à étincelles.

Il est à noter que le résultat des détecteurs fabriqués de 1989 n'apparaît pas dans la figure 3.20 car nous n'avons pas pu retirer le polyester du film.

3.11.1 Détermination de la limite de détection

La limite de détection est une propriété inhérente de la mesure, c'est la plus petite activité au delà la concentration du radionucléide ne peut pas être déterminée, elle est généralement prise comme étant deux à trois fois la déviation standard sur le bruit de fond (σ_b) par rapport au facteur de calibration du détecteur (F_C).

$$LID = 3 \times \frac{\sigma_b}{F_C} \tag{3.5}$$

TAB. 3.7: Limite de détection des films déterminée à l'aide du microscope et du compteur à étincelles.

	Microscope	Compteur à étincelles
Bruit de fond($traces.cm^{-2}$)	99 ± 48	55 ± 52
LID ($Bq.m^{-3}$)	17	18

Les limites de détection, calculées en utilisant la formule (3.5), sont très proche pour les deux techniques de comptage (microscope et compteur à étincelles), elles sont égales à 17 Bq.m^{-3} et 18 Bq.m^{-3} respectivement. Ces deux limites sont comparables à celle donnée par la norme française *NF M 60 767* égale à 20 Bq.m^{-3} [1999].

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, les conditions optimales de développement ont été déterminées. Pour un développement chimique à base du NaOH de $2,5N$ à une température de 60° , le temps de développement optimal a été déterminé à 120 min . Les conditions de lectures ont été choisies $1100V$ tension pour le claquage et $500V$ pour la lecture, une vitesse d'attaque V_B égale à $(3,0 \pm 0,1) \mu\text{m.h}^{-1}$ par la méthode d'épaisseur et $(3,5 \pm 2,0) \mu\text{m.h}^{-1}$ par la méthode gravimétrique.

Chapitre 4

MESURE DU RADON DANS LES HABITATIONS

4.1 Introduction

Les concentrations du radon peuvent varier énormément entre deux habitations adjacentes, et même à l'intérieur d'une même habitation. Elles varient aussi suivant les saisons, les jours et même au cours d'une journée.

Ce chapitre regroupe les résultats des concentrations du radon mesurées dans quelques habitations autour de la ville de Tamanghasset.

4.2 Localisation et géologie de la région de Tamanghasset

Tamanghasset, ville située à environ 2000 *km* au sud d'Alger, appartient au massif cristallin du Hoggar qui affleure sur plus de 500000 *km*²(Fig. 4.1).

La région d'étude est représentée dans sa majeure partie par des formations Gneissique, roches compactes paléo-protérozoïques, recoupées par des Granite panafricain (600 Million d'années) et des épanchements Basaltique plio-quaternaires (les plus vieux datant de 35 Million d'années) et des alluvions qui recouvrent le lit des oueds. Les formations précambriennes ont subi plusieurs phases tectoniques qui donnèrent naissance à de grands accidents majeurs subméridiens à l'échelle continentale. Le premier accident situé au 4°50' et le second au 8°30',

de plusieurs centaines de kilomètres soulignés par des mylonites et recoupés par un réseau filonien important. Ce contexte géologique et tectonique offre à cette région des caractéristiques intéressantes du point de vue de l'exploration de l'uranium [Bouarar, 2016].

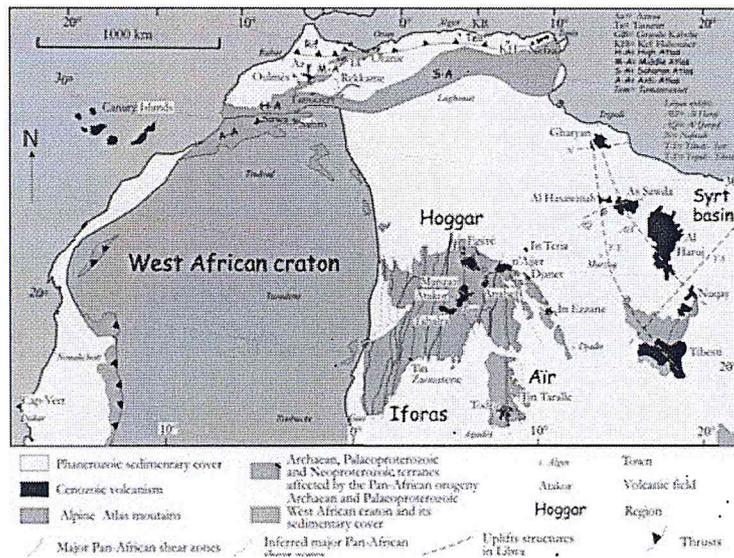


FIG. 4.1: Carte géologique interprétative de la région de Tamanghasset.

4.3 Matériels et méthodes

Les concentrations du gaz radon dans l'air des habitations ont été mesurées à l'aide des dosimètres passifs à base de DSTN type LR-115. Vingt six (26) dosimètres ont été préparés et placés dans différentes habitations situées autour la ville de Tamanghasset pendant une période d'exposition comprise entre 6 et 11 mois.

4.4 Dosimètres à base de DSTN type LR-115

Dans notre travail nous avons utilisé un dosimètre de type fermé de forme parallélépipédique disponible au niveau du laboratoire (Fig. 4.2). Ce dosimètre, proposé par Torri en 1989, est constitué d'une petite chambre à diffusion cylindrique de 24 mm de diamètre et de 11,5 mm de hauteur contenant deux films de type LR-115 placés sur les deux cotés du parallélépipède (34×26) mm².

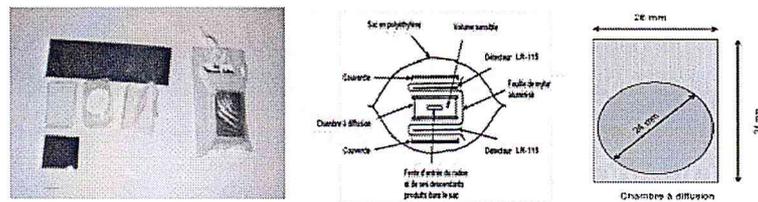


FIG. 4.2: Dosimètre de radon à base de LR-115.

Les détecteurs LR-115 ont un maximum de sensibilité aux particules alpha dans la gamme d'énergie $(2,5 - 4,0) \text{ MeV}$, et comme les particules α émises par le radon et ses descendants ont des énergies supérieures à 5 MeV , et que l'air présent dans le volume sensible de la chambre n'est pas suffisant pour dégrader ces énergies afin d'être enregistrés sur le détecteur, une feuille de mylar aluminisé d'épaisseur $20 \mu\text{m}$ est introduite entre le volume de la chambre à diffusion et le détecteur afin de ralentir ces énergies, cette feuille permettra d'empêcher, les descendants chargés positivement (^{218}Po , ^{214}Po), grâce à l'effets électrostatique. Afin de stopper la diffusion de l'isotope thoron dans la chambre, une poche en polyéthylène ($0,92 \text{ g.cm}^{-3}$) de $35 \mu\text{m}$ a été utilisée.

4.5 Calibration du système de détection

Afin de déterminer le facteur de calibration des dosimètres à base de LR-115, un moniteur de radon de référence type AlphaGUARD fabriqué par Saphymo[®] (Allemagne), étalonné par le laboratoire primaire Allemand Physikalisch-Technische-Bundesanstalt (PTB), a été placé avec ces dosimètres dans un récipient de calibration hermétiquement fermé de $101,1 \text{ l}$ de volume, 70 cm de hauteur et 46 cm de diamètre. Le ^{222}Rn injecté à l'intérieur du récipient est généré par une source étalon SRM 4973 contenant du ^{226}Ra certifié par le National Institute of Standards and Technology (NIST, Etats-Unis), cette source est placée à l'intérieur d'une ampoule en verre munie de deux vannes formant un circuit fermé avec le récipient (Fig.4.3).

La concentration moyenne du ^{222}Rn (C_{Rn}) à l'intérieur de la chambre de calibration mesurée par le moniteur AlphaGUARD est égale à $(2955,75 \pm 0,25) \text{ Bq.m}^{-3}$ (Fig. 4.4).

Après exposition des dosimètres pendant une durée de $74,5 \text{ heures}$, les dosimètres ont été récupérés, les films ont été développés chimiquement et lus à l'aide du microscope et le compteur

à étincelles. Les paramètres de développement chimique ainsi que de lecture ont été donnée dans les tableaux 3.1 et 3.5 respectivement.

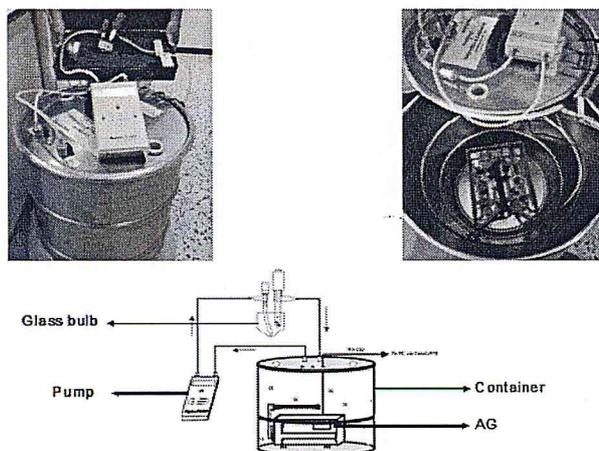


FIG. 4.3: Montage expérimentale pour transférer le radon libéré par la source étalon dans la chambre de calibration.

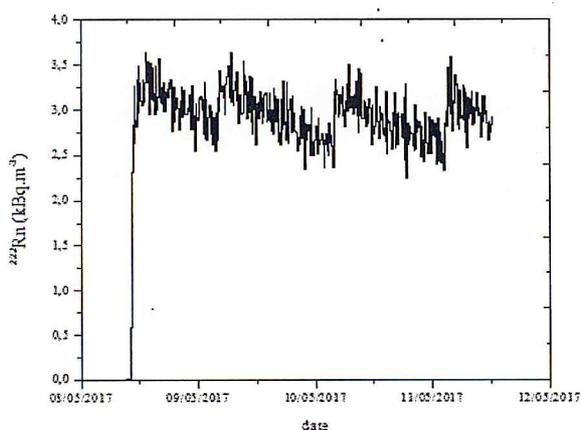


FIG. 4.4: Concentration du radon mesurées par l'AlphaGUARD.

Les facteurs de calibration (F_C) du dosimètre utilisé pour chaque technique de lecture ainsi que les incertitudes associées (ΔF_C) en ($traces.cm^{-2}.kBq^{-1}.m^3.h^{-1}$) ont été déterminées par les relations (4.1) et (4.2).

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

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

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

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

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

Les résultats sont rapportés dans le tableau 4.1. Les facteurs de calibration pour la lecture des traces par microscope et par le compteur à étincelles sont égal à $(0,98 \pm 0,89) \text{ traces.cm}^{-2}.\text{kBq}^{-1}.\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ et $(1,02 \pm 0,47) \text{ traces.cm}^{-2}.\text{kBq}^{-1}.\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ respectivement.

TAB. 4.1: Densité de traces enregistrées dans les films lors de la calibration.

Microscope		Compteur à étincelles	
$D_t(\text{traces.cm}^{-2})$	$F_C(\text{traces.cm}^{-2}.\text{kBq}^{-1}.\text{m}^3.\text{h}^{-1})$	$D_t(\text{traces.cm}^{-2})$	$F_C(\text{traces.cm}^{-2}.\text{kBq}^{-1}.\text{m}^3.\text{h}^{-1})$
222 ± 196	$0,98 \pm 0,89$	224 ± 104	$1,02 \pm 0,47$

Ces résultats ont été comparés avec ceux de Djefal [1995] et les anciens résultats du laboratoire en utilisant le compteur à étincelles (tableau 4.2).

TAB. 4.2: Comparaison du facteur de calibration avec les anciens travaux.

$F_C(\text{traces.cm}^{-2}.\text{kBq}^{-1}.\text{m}^3.\text{h}^{-1})$		
Microscope	Compteur à étincelles	Référence
$2,48 \pm 0,58$	$1,57 \pm 0,27$	Djefal, 1995
—	$2,22 \pm 0,36$	Bouarar, 2016
—	$0,55 \pm 0,05$	Aouchar et Messaoudi, 2015
$0,98 \pm 0,89$	$1,02 \pm 0,47$	Présent travail

4.6 Concentrations du radon dans la ville de Tamanghasset

Après l'exposition des dosimètres autour de la ville de Tamanghasset pendant une période comprise entre 6 et 11 *mois*, ils ont été récupérés afin de les développer et de déterminer les concentrations correspondantes.

Les résultats de mesures de concentrations du radon dans les habitations autour de la ville de Tamanghasset déterminées par la relation (4.1) pour des densités de traces lues par le compteur à étincelles sont regroupés dans le tableau 4.3 et présentés dans la figure (4.5).

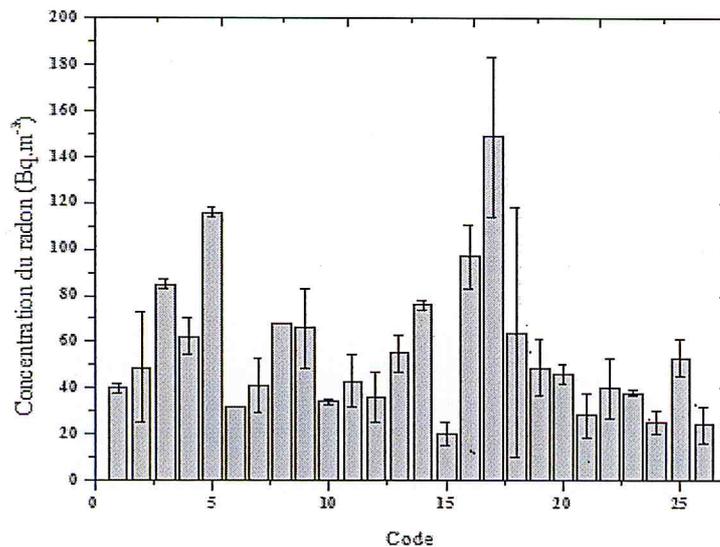


FIG. 4.5: Concentration du radon dans différentes habitations autour de la ville de Tamanghasset.

Les valeurs des concentrations du radon mesurées sont inférieures à 300 Bq.m^{-3} qui est la valeur limite recommandée par la CIPR [CIPR, 2009]. Elles varient de 20 à 149 Bq.m^{-3} avec une valeur moyenne arithmétique (AM) égale à $(56 \pm 30) \text{ Bq.m}^{-3}$ et une moyenne géométrique (GM) égale à $(50 \pm 3) \text{ Bq.m}^{-3}$ (tableau 4.3). La variabilité des résultats de mesure observée est due principalement à la nature du sol (géologie locale), la nature de l'habitation (matériaux de construction) et au mode de vie de ses habitants (aération). En effet, le renouvellement d'air joue un rôle important dans l'élévation de la concentration du radon dans une habitation. Dans une même pièce, 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 pièce est mal ventilée.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus précédemment par Bouarar

$(51 \pm 2) \text{ Bq.m}^{-3}$ pour la même région d'étude [Bouarar, 2016].

TAB. 4.3: Densité de traces Dt et concentration du radon dans les habitations de Tamanghasset par le compteur à étincelles.

Code	Densité de traces ($traces.cm^{-2}$)	Concentration du ^{222}Rn ($Bq.m^{-3}$)
	$AM \pm sd$	$AM \pm sd$
1	323 ± 17	40 ± 2
2	397 ± 197	52 ± 24
3	685 ± 12	85 ± 2
4	303 ± 38	63 ± 8
5	564 ± 11	116 ± 2
6	254 ± 4	32 ± 1
7	326 ± 99	42 ± 12
8	539 ± 1	68 ± 1
9	529 ± 134	68 ± 17
10	262 ± 12	34 ± 1
11	193 ± 48	44 ± 11
12	164 ± 52	37 ± 11
13	254 ± 37	56 ± 8
14	345 ± 7	76 ± 2
15	40 ± 63	20 ± 5
16	437 ± 63	97 ± 14
17	1151 ± 83	149 ± 35
18	500 ± 12	64 ± 54
19	376 ± 35	49 ± 12
20	353 ± 2	46 ± 4
21	215 ± 44	28 ± 10
22	309 ± 24	40 ± 13
23	292 ± 16	38 ± 1
24	193 ± 38	25 ± 5
25	248 ± 38	54 ± 8
26	193 ± 67	24 ± 8

Par ailleurs, les résultats des concentrations du radon déterminées par le microscope sont présentés dans le tableau 4.3. Ces valeurs varient de 19 à 179 $Bq.m^{-3}$ avec une valeur moyenne arithmétique (AM) égale à $(48 \pm 38) Bq.m^{-3}$ et une moyenne géométrique (GM) égale à $(40 \pm 3) Bq.m^{-3}$. Ce résultat est proche de celui trouvé précédemment par la technique de comptage à étincelage. Enfin, nos résultats ont été comparés avec ceux obtenus dans certains pays européens et américains (tableau 4.4).

Les concentrations du radon sont supérieures à celles trouvées dans le nord du pays ($16 \pm 2) Bq.m^{-3}$ [Aouchar et Messaoudi, 2015] et cela est dû à la nature du sol. En effet, la géologie de la région est très variable et le socle de chaque point d'échantillonnage de l'air peut être constitué d'un mélange de granit, de basalte, de gneiss, etc., et chaque type de roche possède

sa propre teneur en uranium, ce qui se traduit par la disparité des résultats trouvés.

TAB. 4.4: Variation des concentrations mesurées à l'aide du compteur à étincelles et du microscope.

	Concentration du radon ($Bq.m^{-3}$)		
	$AM \pm sd$	$GM \pm gsd$	$Min - Max$
Compteur à étincelles	56 ± 30	50 ± 3	20 – 149
Microscope	48 ± 38	40 ± 3	19 – 179

TAB. 4.5: Concentrations moyennes du radon dans certains pays.

Pays	$C_{Rm}(Bq.m^{-3})$	Références
Royenne-Uni	20	INVS, 2014
Finlande	120	ORS, 2006
République tchèque	120	ORS, 2006
Suisse	75	OFSP, 2000
Allemagne	76	INVS, 2014
Pays-Bas	30	WHO, 2001
Belgique	48	WHO, 2001
France	63	INVS, 2014
Canada	62	CCSN, 2012
Grèce	38	INVS, 2014
Danemark	47	WHO, 2001
Italie	62	WHO, 2001
Inde	45	Kumar et al., 2014
Tamanghasset	55	Présent travail

4.7 Conclusion

Les concentrations du radon dans les habitations autour la ville de Tamanghasset ont été mesurées à l'aide des dosimètres parallélépipédiques à base de LR-115. Les valeurs obtenues sont inférieures aux limites recommandée par les organisations compétentes en matière recommandé, elles sont très variable d'une habitation à une autre car elles dépendent de plusieurs facteurs notamment ceux liés à la géologie du sol ainsi que ceux liés aux habitudes humaines (ventilation). De plus, la concentration du radon est élevée par rapport à celle mesurée dans le nord du pays.

Conclusion générale

L'exposition du public au gaz ^{222}Rn dans les habitations a fait l'objet d'une prise de conscience croissante des autorités et entraîne une réglementation sanitaire au niveau européen de plus en plus contraignante.

Au niveau de Laboratoire de Dosimétrie de Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), nous avons utilisé une méthode basée sur l'utilisation des détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) afin de mesurer les concentrations du radon.

La forme et la trace développée dépendent, dans le cas le plus simple, de l'action de la vitesse d'attaque du réactif sur le détecteur de façon globale, représentée par V_B , et la vitesse d'attaque le long de la trace de la particule caractérisée par V_T .

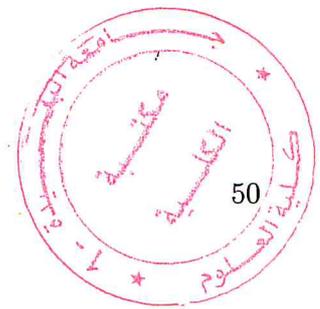
Dans l'étude des procédures de développement des DSTN, il ressort que les conditions optimales de révélation des traces ne peuvent être prévues et doivent être déterminées expérimentalement pour chaque détecteur. À la suite des travaux effectués sur ce sujet au niveau de ce laboratoire, les conditions optimales pour la révélation des traces de particules α dans le LR-115 ont été déterminées. En effet, un développement chimique dans une solution de soude (NaOH) de normalité 2,5 à 60°C de température pendant un temps de développement égal à 120min permet d'enregistrer de manière optimale les traces des particules α dont les énergies sont comprises en 1,4 et $4,7\text{MeV}$, les vitesses d'attaques obtenues sont égales à $(3,0 \pm 0,1)\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ par la méthode de l'épaisseur et à $(3,5 \pm 2,0)\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ par la méthode gravimétrique.

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 l'air des habitations dans différentes régions de Tamanrasset. Ces concentrations sont inférieures à la valeur établie par les organisations internationales compétentes en matière de radioprotection ($300\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Elles sont très variable d'une habitation à une autre car elles dépendent de plusieurs facteurs tels que la nature du sol (géologie locale), la nature de l'habitation (matériaux de construction)

et au mode de vie de ses habitants (aération). Les concentrations mesurées dans la ville de Tamanghasset (56 Bq.m^{-3}) sont élevées par rapport à celles mesurées dans le nord du pays (16 Bq.m^{-3}). Le présent travail sera suivi par des travaux similaires dans d'autres régions d'Algérie afin de compléter la carte nationale de la distribution de radon.

Références

- Al Doorie F.N., Heaton B., Martin Scotland C.J. & Envuron J., *Radioactivity*, 18, 1993, p 163-173.
- Aouchar K. & Messaoudi N., *Mesure du radon à l'aide des détecteurs solides de traces nucléaires*, mémoire de master 2, université de Bejaya, juin 2015.
- Azkour K., thèse de doctorat, Université Chouaib Doukkali, El Jadida (Maroc), 1999.
- Balashov V., *Interaction of particles and radiation with matter*, Spriger -Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co, 1997.
- Bouarar R., *Etude de la réponse de détecteur solide de trace nucléaire type LR-115*, mémoire master 2, université de Boumerdès, juin 2016.
- Catelinois O., Rogel A., Laurie D., Billon S., Hemon D., Verger P. & Tirmache M., 2007, *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, n°18-19, p 155-158.
- CCSN, Commission Canadienne de Sûreté Nucléaire, *Le radon et la santé*, 2012.
- Djefal S., Thèse de doctorat, *Etude expérimentales des détecteurs solide de traces nucléaires : application à la dosimétrie des neutrons, à la dosimétrie alpha et aux mesures d radon dans le sol*, université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne d'Alger (USTHB), juin 1995.
- Duyport P., Madelaine G., Zeetwoog P. & Pineau J. F. *Enregistrement des rayonnements alpha dans le dosimètre individuel et le dosimètre de site CEA*, *Sol, State Nucl. De*, 606-617, 1978.
- Fleischer R. L., Price B. P. & Walker R.M., *Nuclear tracks in solid : principals and application*, University of California Press, Berkley, U.S.A, 1997.
- Fleischer R. L., *Tracks to innovation nuclear tracks in science and technology*, 1998.



for LR-115-II Nuclear Track Detector

Fremelin J. H. & Edmonds M. I., The determination of lead in human tooth, 1980.

Hakam O., Thèse de doctorat, Mesure des activités volumiques du radon dans l'air des habitations et des enceintes de travail par les détecteurs solides de traces nucléaires, 1993.

Hanshaw D. L., Eatough J. P. & R. B. Richardson, Radon as a causative factor of myeloid leukaemia and other cancers, *The Lancet*, p 1008-1012, N° 335, 1990.

Higuret S., Développement d'un dosimètre électronique compact à base de capteurs CMOS pour la mesure du radon, 2007.

InVS, Institut de Veille Sanitaire, Les niveaux de radon et leurs déterminants dans les logements de France métropolitaine continentale, avril 2014.

IPSN, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Le radon dans les bâtiments, (www.irsn.org), décembre 1997.

IRSN, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Le Radon : Un gaz radioactif dans mon habitation, 2014.

Jimonet C. & Metivier H., *Personne compétente en radioprotection, principe de radioprotection-réglementation*, 2007.

Jönsson G., Indoor radon gas and its detection with KODAK plastic film, *Nucl Tracks. Radiat. Meas.* 13(1), 85-91, 1987.

Klein D., Chamboudet A., Cauchois Y., Barillon R. & Drezet L., Developing measuring technique in radioprotection for tracking radon 222 in situ. *Nucl Tracks. Radiat. Meas.*, 19(14), 363-364, 1991.

Kumar A., Rawat R. B. S., Kumar D. & Prachi, Natural Radioactivity Levels in Some Villages in Shahjahanpur, Uttar Pradesh (India), December 2014.

Mireles F1., Dávila JI. García ML., Pinedo JL. & López H., Evaluation of efficiency calibration parameters of the LR-115 radon detector, *Health Phys.* 2010 May ;98 Suppl 2 : S63-8. doi : 10.1097/HP. 0b013e3181d27376.

Nachab A., Thèse de doctorat, Etudes expérimentales et modélisation Monte Carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteurs CMOS, Université Chouaib Doukkali, El Jadida (Maroc), 2003.

NCRP. National Council on Radiation Protection and Measurements, control of radon in houses, NCRP 103, Bethesda, MD, p 11, 1979.

Nikezic D. & Janicijevic A., Appl. Radiat. Iso., p 57, 2002.

Norme Française NF M 60 767, Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air, Le radon 222 : Méthodes de mesure en continu de l'activité volumique du radon dans l'environnement atmosphérique, Août 1999.

OFSP, Office Fédéral de la Santé Publique, Roserens G.-A., Johner H.-U., Piller G. & Imbaumgarten P. (Office fédéral de la santé publique), Binz A., Fregnan F. & Lehmann G. (Institut für Energie, Muttentz), Stucki P. (Textbox, Berne), Manuel suisse du radon, 2000.

Salama T.A., Seddik U., Hegazy T.M. & Ahmed Morsy A., Direct Determination of Bulk Etching Rate, VIII Radiation Physics & Protection Conference, 13-15 November 2006, Beni Sueif - Fayoum, Egypt.

Singh K., Singh S., Mehra R., Singh M., Sahota H.S. & Papp Z., Measurement of radon and thoron progeny outdoors in Malout, India, using grab aerosol sampling and beta counting. Radiation measurements 41, 2006, p 108-111.

Surleraux C., La problématique du radon en Belgique, Service de Prévention et de Médecine de Travail des Communautés Françaises et Germanophone de Belgique (SPMT), juin 2011.

Tommansino L., Assesment of natural and man-made alpha emitting radionuclides. Nucl Tracks. Radiat. Meas., 15(1-14), 555-565, 1988.

Traore I., Etude et caractérisation des fonctions de réponses des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires : Application à la dosimétrie radon et neutron, 7 juin 2013.

United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR), "Sources and effects of ionizing radiation". Report to general assembly with scientific annexes, 2008, United Nations Sales Publications, United Nations New York.

Vaginay F., Thèse d'université Franche-Comté Besançon, 2001.

WHO, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2001, Air Quality Guidelines - Second Edition, Chapter 8.3, p 3-4.

Woodfork K., Environmental Lung Disease, xPharm : The Comprehensive Pharmacology Reference, p 1-21, 2008.

