

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

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

Option : Physique des Rayonnements

Thème :

**Contribution à la mesure de la concentration du gaz radon  
dans les habitations de la région de Blida**

Présenté par :  
Hassiba CHERIGUI  
Houda -Ellah BOUCHELOUCHE

Soutenu le 03/11/2020 devant le jury composé de :

Mr. M. Benrekia	Maître Assistant -A	U.S.D.B	Président
Mr. M. Aït-Ziane	chercheur principal	C.R.N.A	Promoteur
Mme. M. Mezaguer	chercheur principal	C.R.N.A	Examinatrice

Blida 1-2019/2020-

## REMERCIEMENTS

CE TRAVAIL A ÉTÉ EFFECTUÉ AU SEIN DU DÉPARTEMENT DE DOSIMÉTRIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS DU CENTRE DE RECHERCHE NUCLÉAIRE D'ALGER. NOUS TENONS À REMERCIER TOUS CEUX QUI NOUS ONT AIDÉES DANS LA RÉALISATION DE CE MODESTE TRAVAIL, EN PARTICULIER:

MME. Z. LOUNIS-MOKRANI, CHERCHEUR EXPERT SENIOR, DE NOUS AVOIR ACCUEILLIES AU SEIN DE LABORATOIRE ET SON ENCOURAGEMENT DURANT LA RÉALISATION DE CE MÉMOIRE ET POUR TOUS SES CONSEILS SI PRÉCIEUX.

MR. M. AÏT-ZIANE, CHERCHEUR PRINCIPAL, POUR SON ENCADREMENT EXEMPLAIRE SANS LEQUEL CE TRAVAIL N'AURAIT JAMAIS PU ÊTRE RÉALISÉ. NOS REMERCIEMENTS LES PLUS SINCÈRES POUR SA DISPONIBILITÉ ET LA PATIENCE AVEC LESQUELLES IL A RÉPONDU À NOS NOMBREUSES QUESTIONS, SES CONSEILS ET SON AIDE AINSI QUE TOUT LE SAVOIR QU'IL NOUS A TRANSMIS. ENCORE UNE FOIS, NOS REMERCIEMENTS POUR TOUTE SA DISPONIBILITÉ ET SON ÉTAT RÉCEPTIF. NOUS VOUS TÉMOIGNONS TOUTE NOTRE RECONNAISSANCE.

MR. M. BENREKIA, MAITRE ASSISTANT A, D'AVOIR ACCEPTÉ DE PRÉSIDER LE JURY,

MME. M. MEZAGUER, CHERCHEUR PRINCIPAL, D'AVOIR ACCEPTÉ D'EXAMINER CE TRAVAIL.

ENFIN, NOUS TENONS À EXPRIMER NOTRE GRATITUDE POUR TOUS CEUX QUE NOUS N'AVONS PAS CITÉS ET QUI ONT CONTRIBUÉES DE PRÉS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DE CE MÉMOIRE ET À L'ACCOMPLISSEMENT DE CE PROJET.

## *Dédicace*

*Grâce à dieu le tout puissant, qui nous a donné la volonté, la force, et qui nous a éclairés vers le bon chemin, que nul ne peut se faire sans son désir.*

*Nous dédions ce travail : À nos très chers parents qui ont tout sacrifié pour nous, c'est grâce à vous que nous sommes là, Vous restez toujours dans nos cœurs. À nos adorables frères*

*À nos chères sœurs Pour leurs encouragements, nous leurs souhaitons tout le bonheur du monde. À toute personne de nos grandes familles*

## Résumé

Dans votre maison circule un gaz dangereux Le radon, c'est un gaz radioactif d'origine naturelle produit par la dégradation de l'uranium, il s'accumule dans les espace clos . Il se désintègre pour donner une naissance à des descendants solides, une fois inhalé, ses descendants à vie courte se déposant le long des voies respiratoires provoquant ainsi des dégâts de tissus au niveau des cellules les plus sensibles des bronches. En 1987 Le centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) a été classé le  $^{222}\text{Rn}$  comme "cancérogène pulmonaire chez l'homme" suite à des études épidémiologiques, donc le cancer du poumon résulte de l'exposition fort du radon, Contrairement au poumon le radon peut causer un cancer d'estomac après l'ingestion de gaz et le cancer de la peau après une l'exposition externe au radon.

Puisque l'homme passe en moyenne plus de temps à l'intérieur d'un bâtiment, il est alors nécessaire de mesure les concentrations du radon dans les habitations à l'aide des Détecteur Solides des Traces Nucléaires (DSTN) de type LR-115 ses principe basé sur l'enregistrement des tracs de particule alpha. Ces tracs doit être observable au microscope optique après un développement chimique dans une solution de NaOH de molarité 2.5 N à une température  $60\text{ C}^0$  pendant 115 minutes avec une vitesse d'attaque chimique de  $3.5\ \mu\text{m/h}$ .

Après le développement en utilisant la technique de lecteur par un compteur à étincelle .les concentration moyenne du radon dans les habitations de Blida est égal  $19\ \text{Bq/m}^3$  ce qui correspond à une dose efficace annuelle  $0.47\ (\text{mSv/ans})$  et un facteur risque de cancer des poumons égal à  $0.41 \times 10^{-4}$ .

### Mots clés

Radon, Détecteurs Solides de Traces Nucléaires(DSTN), film LR-115

## تلخيص

الرادون هو غاز إشعاعي طبيعي ينتج عن تحلل اليورانيوم ، ويتراكم في أماكن مغلقة. يتفكك لينجب نسلاً صلباً ، عند استنشاقه ، يترسب نسله قصير العمر على طول الممرات الهوائية مما يتسبب في تلف الأنسجة في أكثر الخلايا حساسية في القصبات. في عام 1987 ، صنفت الوكالة الدولية لأبحاث السرطان على أنه "مادة مسرطنة للرئة لدى البشر" بعد الدراسات الوبائية ، وبالتالي ينتج سرطان الرئة عن التعرض القوي لغاز الرادون ، كما ان الرادون يمكن أن يسبب سرطان المعدة بعد تناوله أو سرطان الجلد بعد التعرض الخارجي للرادون ، فمن الضروري قياس تركيزات الرادون في المنازل باستخدام كاشفات التنبع النووية الصلبة

يجب ملاحظة هذه الآثار تحت المجهر الضوئي بعد التطور LR-115 يعتمد مبداه على تسجيل آثار جسيمات ألفا .  
الكيميائي في باستعمال محلول هيدروكسيد الصوديوم 2.5 مول عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة 115 دقيقة مع معدل هجوم كيميائي 3.5 ميكرومتر / ساعة. بعد التطوير باستخدام تقنية قارئ الحرارة ، يبلغ متوسط تركيز الرادون في المنازل في البلدية 19 بيكريل / م<sup>3</sup> وهو ما يعادل جرعة فعالة سنوية 0.47 (م سيفرت / سنة) وعامل خطر الاصابة بالسرطان مدى الحياة  $10 \times 0.41$ <sup>4</sup>

## الكلمات المفتاحية

الرادون ، كاشف الأثر النووي الصلب ، فيلم LR115

### **abstract**

Dangerous gas circulates in your house Radon is a naturally occurring radioactive pledge produced by the degradation of uranium, it accumulates in enclosed spaces. It disintegrates to give birth to solid offspring, when inhaled, its short-lived offspring depositing along the airways causing tissue damage in the most sensitive cells of the bronchi. In 1987 the International Agency for Research on Cancer (IARC) was classified the  $^{222}\text{Rn}$  as "lung carcinogen in humans" following epidemiological studies, therefore lung cancer results from strong exposure to radon, Unlike lung radon can cause stomach cancer after ingestion of gas and skin cancer after external exposure to radon.

Since humans spend on average more time inside a building, it is then necessary to measure the radon concentrations in homes using the Solid Nuclear Trace Detectors (SNTD) type LR-115. its principle based on the recording of alpha particle traces. These traces must be observable under an optical microscope after chemical development in a solution of NaOH of 2.5 N molarity at a temperature of 60 °C for 115 minutes with a chemical attack rate of 3.5  $\mu\text{m} / \text{h}$ .

After development using the spark meter reader technique, the average radon concentration in homes in Blida is 19 Bq /  $\text{m}^3$  which corresponds to an annual effective dose 0.47 (mSv / years) and a risk factor of lung cancer equal to  $0.41 \times 10^{-4}$

### **keyword**

Radon, solid nuclear trace detectors(SNTD), film LR-115

## Sommaire

Chapitre I: Le radon dans la radioactivité naturelle	
1. Introduction	7
2. Rayonnement ionisant	7
2.1 Rayonnements directement ionisants	7
2.2 Rayonnements indirectement ionisants	7
3 La radioactivité	8
4 La radioactivité naturelle	8
4.1 Rayonnement cosmique	8
4.2 Rayonnement tellurique (Terrestre)	8
5 Particules chargées lourdes	10
6 Interaction des particules alpha avec la matière	10
6.1 Pouvoir d'arrêt	10
6.2 Transfert linéique d'énergie	11
6.3 Parcours des particules chargées	12
7 Généralités sur le radon	13
7.1 Propriété du radon	13
7.2 Formation du radon	13
7.3 Émanation et migration du radon	14
7.3.1 Émanation du radon dans le sol	14
7.3.2 Migration du radon du sol aux habitations	14
Transport par diffusion	14
Transport par convection	15
7.4 Sources du radon	16
Le sol	16
Les matériaux de construction	16
L'eau	16
Le gaz naturel	16
7.5 Risque du radon	16
7.5.1 Expositions interne	16
Cancer du poumon	16
Cancer de l'estomac	17
7.5.2 Exposition externe	17
8 Cancer du Poumon en Algérie	17
9 Cadre réglementaire	18
10 Métrologie du radon	18
10.1 Mesure ponctuelle	18
	1

10.2	Mesure en continu	19
	Chambre d'ionisation	19
	Spectrométrie alpha	19
10.3	Mesure intégré	19
	Détecteur thermo-luminescent	19
	Spectrométrie gamma	19
	Détecteurs solides de traces nucléaires	19
Chapitre II : Détecteurs Solides de Traces Nucléaires		
1	Introduction	20
2	Les détecteurs solide de traces nucléaire (DSTN)	20
2.1	Principe de détecteur des traces nucléaire	20
2.1.1	DSTN en couche épaisse	20
2.1.2	DSTN en couche mince	21
3	Applications des DSTN	21
3.1	Datation par traces de fission.	21
3.2	Cartographie de l'uranium	21
3.3	Réactions nucléaires	21
3.4	Analyse élémentaire	22
3.5	Application en astrophysique	22
3.6	Radioprotection	22
4	Étude des traces nucléaires	22
4.1	Critères d'enregistrements des traces	22
4.2	Révélation des traces latentes	22
4.3	Formation des traces latentes	23
4.4	Géométrie des traces enregistrées dans les DSTN	23
4.4.1	Vitesse d'attaque chimique surfacique $V_B$	24
4.4.2	Vitesse d'attaque chimique le long de la trace $V_T$	24
4.5	Angle critique d'enregistrement	25
4.6	Comptage des traces	25
4.6.1	Microscope optique	25
4.6.2	Compteur à étincelage	26
Chapitre III : Paramètres d'exploitation des DSTN type LR-115		
1.	Introduction	27
2.	Dosimètres à base de LR-115	27
3.	Détermination des conditions expérimentales optimales de développement	28
3.1.	Détermination de l'épaisseur résiduelle	28
3.2.	Détermination de la vitesse générale d'attaque $V_B$	29
4.	Détermination des conditions expérimentales optimales de lecteur	31



Chapitre IV : Concentration du radon dans la wilaya de Blida	
1. Introduction	32
2. Localisation géographique de la région d'étude	32
3. Matériels et méthodes	34
4. Calibration du système de détection	35
5. Mesure de la concentration du radon dans les habitations de Blida	38
6. Conclusion	42
Conclusion générale	43

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Classification des rayonnements.....	7
Figure 2. Schéma de désintégration de $^{238}\text{U}$ .....	9
Figure 3. Schéma de désintégration de $^{235}\text{U}$ .....	9
Figure 4. Schéma de désintégration de $^{232}\text{Th}$ .....	10
Figure 5. Pouvoirs d'arrêt électronique et nucléaire des particules $\alpha$ dans l'air .....	11
Figure 6. Parcours des particules $\alpha$ dans l'air .....	12
Figure 7. Schéma des processus de libération du radon à l'échelle macroscopique.....	14
Figure.8 : La formation du radon et les sources et voies de transfert de radon dans un bâtiment.....	15
Figure 9: Modes de pénétration et de fixation du radon et de ses descendants.....	17
Figure 10: Formation de la trace latente durant la révélation chimique.....	23
Figure 11 : Schéma représentant la formation de la trace (forme conique) par ion s'arrêtant dans le détecteur .....	24
Figure 12 : Géométrie d'une trace latente .....	25
Figure 13 : Traces de particules $\alpha$ révélées dans les DSTN type LR-115et CR-39.....	26
Figure 14. Dosimètre du radon à base de DSTN type LR-115 .....	27
Figure 15. Schémas du dosimètre de radon à base de détecteurs solides de traces nucléaires et vue de haut de la chambre à diffusion associée.....	28
Figure 16 .Préparation de la solution chimique de NaOH .....	28
Figure 17. Le bain de développement chimique .....	28
Figure 18. Comparateur d'épaisseur résiduelle type Millitron .....	29
Figure 19. Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement.....	29
Figure 20. Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement .....	30
Figure 21. Communes de la wilaya de Blida .....	33
Figure 22. Montage expérimental pour le transfert du $^{222}\text{Rn}$ .....	35
Figure 23. Concentration du radon à l'intérieur de la chambre d'étalonnage.....	36
Figure 24. Variation des conditions environnementales dans la chambre d'étalonnage .....	37
Figure 25. Concentration du radon dans les habitations de la wilaya de Blida.....	40

## Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des isotopes du radon .....	13
Tableau 2. Coefficients de diffusion (D) du radon dans certains milieux .....	15
Tableau 3. Comparaison des vitesses d'attaques obtenues .....	30
Tableau 4. Paramètres de développement chimique des détecteurs type LR-115 .....	31
Tableau 5. Paramètres de lecture à l'aide du compteur à étincelage.....	31
Tableau 6. Localisation géographique des lieux d'échantillonnage et temps d'exposition (h)	34
Tableau 7. Comparaison du facteur de calibration avec les anciens travaux.....	37
Tableau 8. Concentrations moyennes du $^{222}\text{Rn}$ dans les habitations de différentes daïras .....	38
Tableau 9. Concentrations du $^{222}\text{Rn}$ dans les habitations de différentes communes.....	38
Tableau 10. Concentrations du $^{222}\text{Rn}$ dans différents habitations de la wilaya de Blida mesurées par les DSTN .....	39
Tableau 11. Comparaison entre les concentrations dans certaines régions d'Algérie. ....	41
Tableau 12. Concentration moyenne du radon dans certains pays. ....	41
Tableau 13. Concentration du radon, dose annuelle et risque cancer sur une vie entière dans la wilaya de Blida.....	41

# Introduction Générale

---

L'homme est exposé à des rayonnements ionisants d'origine naturelle présents dans notre environnement tels que les rayonnements cosmiques, les rayonnements telluriques issus de la désintégration des radionucléides  $^{2335}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  et le radon.

Le radon est un gaz radioactif, inodore et incolore, d'origine naturelle, provenant de la désintégration du radium et de l'uranium présents dans la croûte terrestre.

Après sa libération des pores où il a été formé, le radon s'accumule dans les espaces clos et peut atteindre, par effet de confinement, des concentrations élevées à l'intérieur des habitations. Après inhalation, il se désintègre en émettant des particules alpha et des produits de filiations solides eux-mêmes radioactifs (le plomb, le polonium, le bismuth). Ces descendants vont se déposer le long des voies respiratoires selon leurs granulométries tout en irradiant les cellules pulmonaires.

En 1987, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé le radon comme un gaz cancérigène. Certain pour l'homme sur la base des résultats des études expérimentales sur animaux et sur des études épidémiologiques en milieu professionnel (mineurs d'uranium). Conscient de ce risque, une étude visant à évaluer le risque cancer de poumon dans la wilaya de Blida a été menée.

Pour cela, les concentrations du radon dans les habitations dans différentes régions de la Wilaya de Blida ont été mesurées à l'aide des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN). Ce mémoire est divisé en quatre principaux chapitres :

- le chapitre un (I) présente des généralités sur les rayonnements ionisants ainsi que sur le radon. Il permet de fournir les notions de base nécessaires pour une bonne compréhension de la problématique étudiée.
- Dans le chapitre deux (II) nous présentons les propriétés générales des DSTN où nous développons leurs caractéristiques, leurs diverses utilisations ainsi que leurs interactions avec les particules  $\alpha$ ,
- Le chapitre trois (III) est consacré à la description des procédures expérimentales relatives au DSTN type LR-115 en ce qui concerne l'optimisation des différents paramètres de révélation chimique des traces nucléaires,
- Le quatrième chapitre (IV) présente le dispositif expérimental utilisé pour la calibration des dosimètres utilisés ainsi que l'ensemble des résultats obtenus lors de la mesure du radon dans les habitations de la wilaya de Blida. Une comparaison des résultats obtenus avec les valeurs de référence établies par les organisations internationales compétentes en matière de radioprotection est effectuée. Enfin, nous avons déterminé le facteur risque de cancer de poumon à vie entière associé au radon, puis nous l'avons comparé avec le facteur risque calculé à partir des données épidémiologiques fournies par les établissements sanitaires.

# Chapitre I : Le radon dans la radioactivité naturelle

## 1. Introduction

L'homme est soumis fortuitement et durablement à des rayonnements ionisants dus aux sources naturelles comme ceux issus de la chaîne de désintégration de l'uranium.

Le radon est un gaz radioactif dangereux, constituant un risque radiologique et sanitaire, il peut pénétrer jusqu'aux poumons du corps humain et endommager les cellules. Dans ce premier chapitre nous allons aborder des généralités sur cet élément, ses sources, ses mécanismes de transport et le risque qu'il représente ainsi que les différentes techniques pour mesurer sa concentration.

## 2. Rayonnement ionisant

Un rayonnement est un processus d'émission ou de transmission d'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques ou de particules (Fig.1).

Un rayonnement est dit ionisant quand il est susceptible d'arracher des électrons à la matière. On peut classer les rayonnements ionisants selon leur mode d'interaction avec la matière en deux catégories.

### 2.1. Rayonnements directement ionisants

Sont composés de particules chargées qui délivrent leur énergie directement à la matière, par le jeu des forces coulombiennes s'exerçant avec les électrons du milieu. Les transferts d'énergie dépendent des masses des particules en mouvement et il y a lieu de distinguer les particules chargées lourdes (proton, deuton, alpha, ions lourds) des électrons.

### 2.2. Rayonnements indirectement ionisants

Électriquement neutres, sont susceptibles de transférer une fraction ou la totalité de leur énergie en une seule interaction à des particules chargées du milieu. Ce sont ensuite, des particules secondaires qui ionisent le milieu. Dans ce cas, l'ionisation se fait en deux étapes. Les rayonnements électromagnétiques ( $X$  et  $\gamma$ ) et les neutrons entrent dans cette catégorie, mais leurs modes d'interaction sont différents.

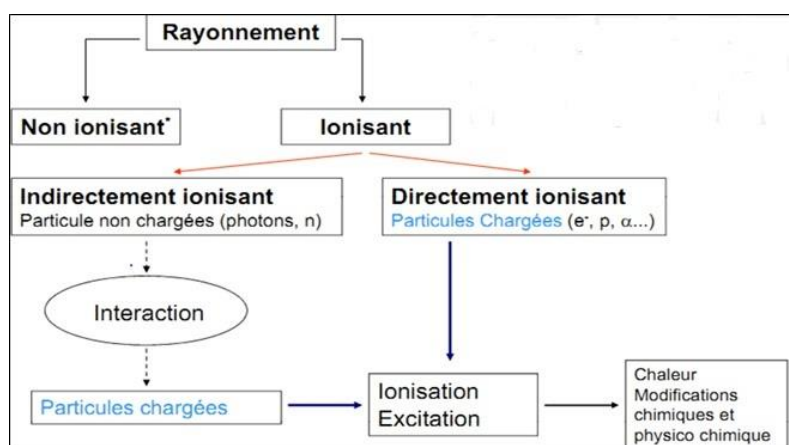


Figure 1. Classification des rayonnements

### **3. La radioactivité**

La radioactivité est un phénomène naturel découvert à la fin du XIXe siècle par Henri Becquerel, elle existe sur la terre depuis sa formation, elle provient des éléments radioactifs naturelles comme l'uranium, le thorium et le potassium 40. Ces éléments présents dans les roches terrestres qui ont une demi de vie d'environ 5 milliards d'années [Métivier, 2007].

Ces éléments radioactifs sont instables et se désintègrent en éléments stables, en émettant des rayonnements ionisants : alpha ( $\alpha$ ), bêta ( $\beta$ ) et gamma ( $\gamma$ ). Les rayonnements gamma ( $\gamma$ ) sont des ondes électromagnétiques tandis que les rayonnements alpha ( $\alpha$ ) et bêta ( $\beta$ ) sont des particules qui sont respectivement un noyau d'hélium et un électron.

### **4. La radioactivité naturelle**

Les rayonnements ionisants naturels présents sur notre planète proviennent de nombreuses sources et génèrent la majeure partie de la radioactivité qui nous entoure. Dans la nature, il y a plus de 80 radioéléments présents avec des concentrations détectables et ils sont généralement regroupés en deux types, cosmique et tellurique [Omale et al., 2014, Lehto et al., 2010] :

#### **4.1. Rayonnement cosmique**

Il nous provient directement de l'espace sous forme de rayonnement de haute énergie, Le passage des rayonnements cosmiques dans l'atmosphère crée des réactions nucléaires avec des éléments de l'atmosphère et engendre des isotopes radioactifs ou radioéléments cosmiques. On retrouve principalement  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$  et  $^{22}\text{Na}$ , Ces radioéléments cosmogoniques sont transportés à la surface de la terre par l'eau de pluie [UNSCEAR, 2008].

#### **4.2. Rayonnement tellurique (Terrestre)**

Il est naturellement présent dans la croûte terrestre et dans l'atmosphère, on peut le trouver dans les sols, les roches, l'eau, les océans, les végétations et les matériaux de construction. Ce rayonnement est issu des radioéléments appartenant aux trois familles radioactives naturelles  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  qui représentent la source la plus importante de rayonnement ionisant sur la terre (Fig. 2, 3 et 4) [Dinh et al., 2011].

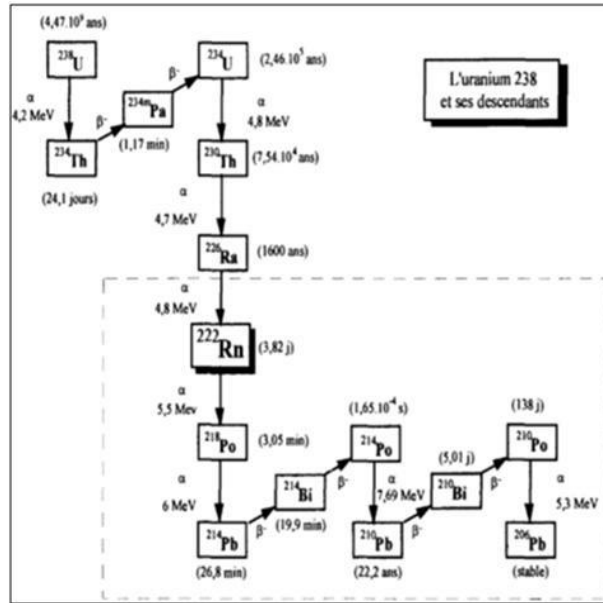


Figure 2. Schéma de désintégration de  $^{238}\text{U}$  [Ferry, 2001]

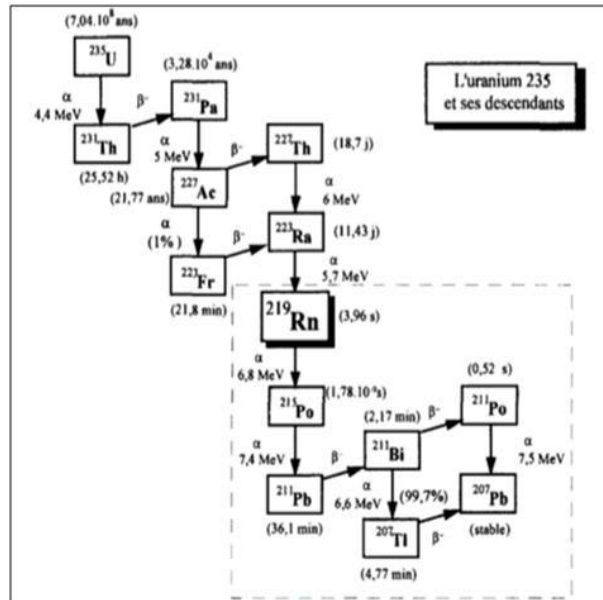


Figure 3. Schéma de désintégration de  $^{235}\text{U}$  [Ferry, 2001]

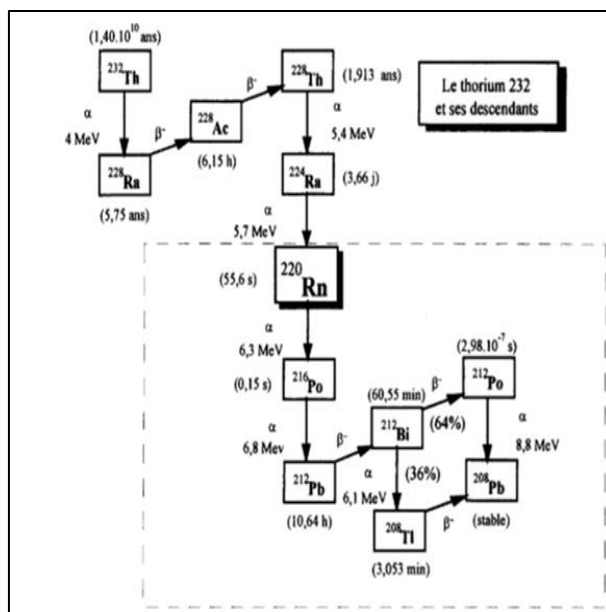


Figure 4. Schéma de désintégration de  $^{232}\text{Th}$  [Ferry, 2001]

## 5. Particules chargées lourdes

Les particules chargées lourdes sont principalement les ions lourds et les noyaux lourds tels les produits de fission et les produits de réactions nucléaires, les particules alpha, les deutons et les protons [Lyoussi, 2010].

Le rayonnement alpha ( $\alpha$ ) est une particule chargée, directement ionisante, à un très faible pouvoir de pénétration dans l'air, une feuille de papier suffit pour l'arrêter. Bien que ce rayonnement soit peu pénétrant, il est par contre très ionisant. Il est de ce fait particulièrement dangereux, si des poussières radioactives sont inhalées, ingérées ou si elles sont en contact direct avec la peau.

## 6. Interaction des particules alpha avec la matière

Les processus de ralentissement des particules  $\alpha$  dans la matière s'effectuent par ionisation ou par excitation. Leur charge électrique et leur masse plus élevées que celles des électrons font que la probabilité d'interaction avec les noyaux atomiques (freinage) est très faible. Leur parcours dans l'air est de quelques centimètres ainsi que dans les tissus biologiques est de quelques dizaines de micromètres. Leur trajectoire rectiligne est courte donc on peut considérer que la portée et le parcours sont identiques [Métivier, 2007].

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

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

### 6.1. Pouvoir d'arrêt

Le pouvoir d'arrêt ou la perte d'énergie par unité de parcours est une grandeur physique fondamentale qui caractérise la pénétration des particules chargées énergétiques dans la



matière. De nombreuses théories et des modèles semi-empiriques ont été proposés pour l'évaluation du pouvoir d'arrêt, et qui demeurent toujours d'actualité. Il est donné par la relation suivante :

$$S = \frac{dE}{dl} \quad (1.1)$$

Si le milieu a une densité  $\rho$ . Le pouvoir d'arrêt est appelé le pouvoir d'arrêt massique, il sera donné par la relation suivante :

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (1.2)$$

En réalité, le pouvoir d'arrêt massique est composé de trois termes représentés par la relation suivante :

$$\frac{S}{\rho} = \frac{S_{el}}{\rho} + \frac{S_{nuc}}{\rho} + \frac{S_{rad}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{el} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{nuc} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{rad} \quad (1.3)$$

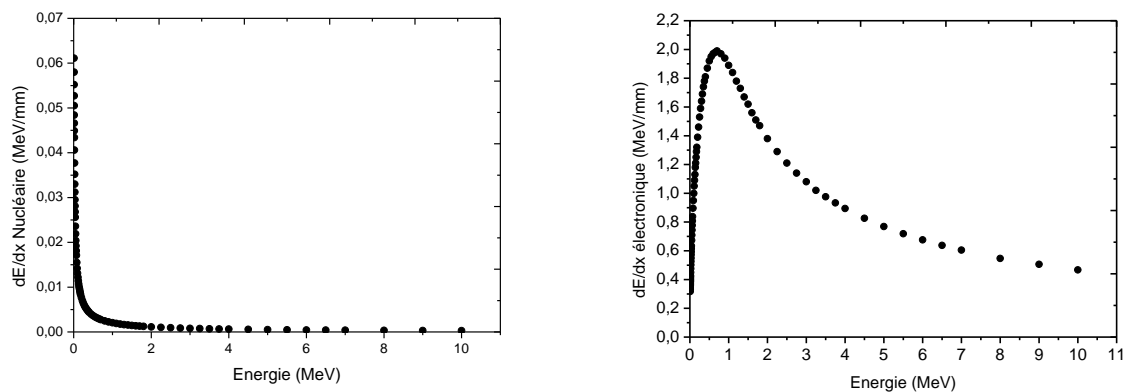
$\frac{S_{el}}{\rho}$ : Le pouvoir d'arrêt massique électronique (ou de collision) dû aux collisions avec les électrons atomiques ;

$\frac{S_{nuc}}{\rho}$ : Le pouvoir d'arrêt massique nucléaire dû aux collisions élastiques coulombiennes dans lesquelles l'énergie de recul est impartie aux atomes. Il ne se rapporte pas à des interactions nucléaires.

$\frac{S_{rad}}{\rho}$ : Le pouvoir d'arrêt massique radiatif provenant des émissions de rayonnement de freinage dans le champ électrique des noyaux ou des électrons atomiques ;

Le terme le plus important dans la relation (1.3) est le premier terme ( $\frac{S_{el}}{\rho}$ ) où l'interaction dominante est l'interaction électromagnétique.

Dans la figure ci-dessous on donne le pouvoir d'arrêt électronique et le pouvoir d'arrêt nucléaire de la particule  $\alpha$  dans l'air.



**Figure 5. Pouvoirs d'arrêt électronique et nucléaire des particules  $\alpha$  dans l'air**

## 6.2. Transfert linéique d'énergie

Pour étudier le ralentissement des particules chargées, on introduit la notion de transfert linéique d'énergie, qui représente la perte d'énergie par unité de longueur de trajectoire des particules incidentes consécutivement à leurs chocs avec les électrons. Selon la théorie de Bethe-Bloch, son expression en mécanique relativiste est donnée par la formule suivante :

$$TLE = \left\| \frac{dE}{dx} \right\| = \frac{z^2 e^4}{4 \pi \epsilon_0^2 m_e v^2} NZ \left[ \log \left[ \left( \frac{2 m_e v^2}{I} \right) - \log \left( 1 - \frac{v}{c} \right) \right] - \frac{v}{c^2} - \frac{C_k}{z} \right] \quad (1.4)$$

N, Z: sont le nombre des noyaux cibles par unité de volume et de numéro atomique,

z, v: sont la charge et la vitesse réduite du projectile ;

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

$m_e$ , 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<sup>-1</sup> ;

$C_k$ : est le terme de correction qui dépend de l'énergie et de Z lorsque l'on tient compte de la structure complète de la matière ;

I: est la valeur moyenne du potentiel tenant compte de l'ionisation et de l'excitation des atomes cibles (en eV). Elle est donnée par :

$$I = 9.1 \cdot Z \cdot (1 + 1.9 \cdot Z^{-2/3}) \quad (1.5)$$

Bien que les effets biologiques varient d'un rayonnement à un autre, en règle générale, l'effet d'une particule chargée croît proportionnellement avec le TLE.

### 6.3. Parcours des particules chargées

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. 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 suivante [Mouhssine, 2004]:

$$R = \int_0^R dr \quad (1.6)$$

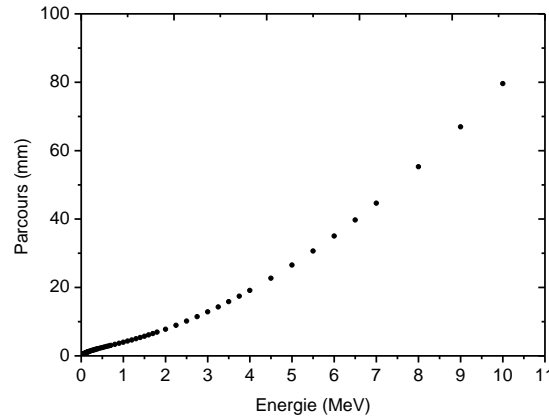


Figure 6. Parcours des particules  $\alpha$  dans l'air

Puisque l'énergie incidente de la particule et l'épaisseur du matériau cible sont interdépendante, alors on peut l'inter changer dans l'équation (1.6), on aura donc :

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dr}{dE} dE = \int_0^{E_0} -\left(\frac{dE}{dr}\right)^{-1} dE = \int_0^{E_0} \frac{1}{TLE} dE \quad (1.7)$$

La figure (6) montre le parcours de la particule  $\alpha$  dans l'air en fonction de l'énergie.

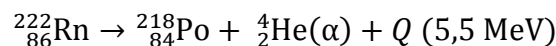
## 7. Généralités sur le radon

En 1899, M. et P. Curie observent que tout objet enfermé dans une enceinte étanche avec une source de radium 226 devient lui-même radioactif. Ils constatent que cette «radioactivité induite» disparaît au bout de quelques jours. En 1900, E. Rutherford, observant que la mesure de radioactivité de sels de thorium à l'air libre varie au gré des courants d'air, conclut à un transport de radioactivité à l'état gazeux et propose le terme d'émanation. Inspiré par cette découverte, F.E. Dorn explique en 1901 le phénomène de la radioactivité induite par la présence d'un gaz radioactif émis par les sources de radium. En 1902, F. Giesel découvre l'actinon émanant de l'actinium. Le terme radon sera adopté à partir de 1923 pour désigner le radioélément dont les trois principaux isotopes sont découverts dès 1902 [Ferry, 2001].

### 7.1. Propriété du radon

Le radon est un gaz radioactif émetteur alpha [Ferry, 2001]. Il fait partie des gaz rares comme l'hélium, l'argon, le néon, le krypton et le xénon. Il est monoatomique, inodore, incolore et sans saveur. Comme tout gaz rare, le radon est chimiquement inerte, soluble dans l'eau et plus encore dans les solvants et composé organiques tels que le toluène et le chloroforme. Il est le gaz le plus lourd qu'on connaît (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  $-71\text{°C}$ . Son coefficient de diffusion est moins important dans l'eau que dans l'air.

Les trois isotopes naturels les plus importants (tableau 1) sont: le Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), le Thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) et l'Actinon ( $^{219}\text{Rn}$ ). Ces trois isotopes se désintègrent en émettant une particule  $\alpha$  pour donner un isotope instable du polonium [Demongeot, 1997].



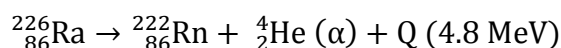
**Tableau 1. Caractéristiques des isotopes du radon [Demongeot, 1997]**

Isotope	Période (T)	$\lambda(\text{s}^{-1})$	Energie de désintégration de $\alpha$ en (MeV)
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3.82 J	$2,1 \times 10^{-6}$	5.5
$^{220}_{86}\text{Rn}$	54.2s	$1,28 \times 10^{-2}$	6.3
$^{219}_{86}\text{Rn}$	3.92s	$1,77 \times 10^{-1}$	6.8

### 7.2. Formation du radon

Les éléments radioactifs  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  sont des éléments instables présents dans la terre, ces éléments présents dans les roches se désintègrent jusqu' à l'élément stable  $^{206}\text{Pb}$ , ils donnent naissance à des descendants radioactifs comme le  $^{226}\text{Ra}$  et le  $^{222}\text{Rn}$ . La formation du  $^{222}\text{Rn}$  dans un endroit donné se déroule en deux étapes [Rannou, 1985] :

Dans un premier temps, le  $^{226}\text{Ra}$  se désintégrant, il donne une particule  $\alpha$  et un noyau de radon, ce dernier acquiert une énergie cinétique de recul de 4.8 MeV. Cette énergie lui permet de parcourir une certaine distance dans un milieu donné.



Dans un deuxième temps, la migration de  $^{222}\text{Rn}$  à travers l'espace des pores jusqu'à ce qu'ils atteignent l'atmosphère. La proportion d'atomes de  $^{222}\text{Rn}$  dans l'air extérieur est plus faible que les atomes de  $^{222}\text{Rn}$  qui se désintègrent avant d'avoir atteint les interfaces (sol-air). Cela se traduit par un coefficient d'émanation qui peut varier d'un milieu à l'autre. Cette

proportion dépend de la distance entre le lieu de formation et l'interface sol-air [Rannou, 1985].

### 7.3. Émanation et migration du radon

Avant qu'un atome de radon puisse migrer vers l'atmosphère, il doit d'abord quitter le réseau cristallin où il a été formé.

#### 7.3.1. Émanation du radon dans le sol

L'émanation est le mécanisme par lequel un atome de radon est libéré du grain solide.

A partir de la désintégration d'un atome de radium, la plus grande partie de l'énergie en excès est transportée par la particule (pour le  $^{222}\text{Rn}$ ,  $E_{\alpha} = 5,5 \text{ MeV}$ ). A l'intérieur du grain minéral où la désintégration a lieu, l'énergie de recul du radon se traduit par un déplacement de l'atome de gaz de plusieurs dizaines de nanomètres suivant le matériau ou le fluide considérés. Si l'atome de radium est situé au sein du réseau cristallin à une distance supérieure au parcours de recul, l'atome de radon reste piégé dans la roche mère (cas de  $A \rightarrow A'$ ). Si la désintégration a lieu à proximité d'un joint de grains dans une direction où les phases inter cristallin sont reversées sont inférieures à ce parcours, le radon viendra se piéger dans un grain voisin (cas de  $B \rightarrow B'$  et  $E \rightarrow E'$ ) [Aït-Ziane, 2017].

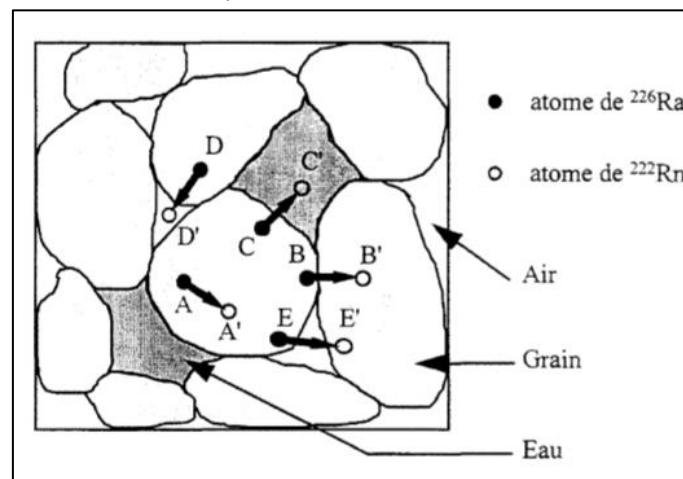


Figure 7. Schéma des processus de libération du radon à l'échelle macroscopique

Enfin, dans le cas où la direction du parcours n'entraîne aucune interaction avec les grains voisins, l'atome de radon sera libre dans l'espace des pores dans une phase liquide ou gazeuse ( $C \rightarrow C'$  et  $D \rightarrow D'$ ) [Demongeot, 1997].

#### 7.3.2. Migration du radon du sol aux habitations

Après l'échappement du radon de l'espace de réseau cristallin, il doit migrer jusqu'à l'atmosphère.

- **Transport par diffusion**

Le premier processus de transport dans un matériau, dont l'une des faces est à l'air libre, est la diffusion, le radon migre dans le sol, où les atomes de radon se déplacent à l'intérieur des fluides (liquide ou gaz) qui occupent les pores et les fractures de la roche sous l'effet d'un gradient de concentration selon la loi de Fick [N'Gussan, 2014, Ferry, 2001].

$$J_d = \frac{-D}{\varepsilon} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1.8)$$

Avec :

$J_D$  : est le flux de radon à travers une surface donnée (en  $\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ;

$D$  : est le coefficient de diffusion (en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) ;

$\varepsilon$  : est la porosité du milieu ;

$C$  : est la concentration en radon (en  $\text{Bq.m}^{-3}$ ) ;

$z$  : est la distance par rapport à l'origine (en m).

Le coefficient de diffusion du radon dans l'air étant  $10^4$  fois supérieur à celui du radon dans l'eau (tableau 2).

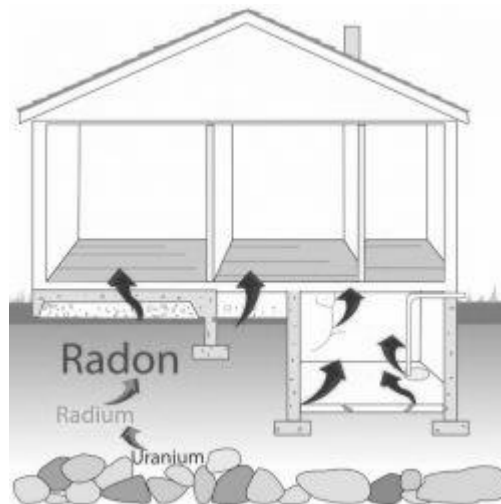
**Tableau 2. Coefficients de diffusion (D) du radon dans certains milieux [Fabrice , 2014]**

Milieux	D ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
Air	$10^{-1}$
Sol poreux	0.05
Eau	$10^{-5}$

- **Transport par convection**

Le radon migre également par advection ou par convection, où le fluide se meut dans les interstices du sol en transportant le radon avec lui. Les mouvements de ces fluides dans les pores peuvent résulter de l'existence de gradients de pression (convection) dans l'air du sol ou de gradients de température (advection) [Ferry, 2001].

Le radon provenant du sol s'infiltré principalement dans les habitations à travers les fissures de la dalle, la cavité du mur, les jointures du plancher. Le radon progresse également entre les blocs de béton et à travers l'interface mur/dalle. Il se trouve piégé à l'intérieur d'un bâtiment insuffisamment ventilé. La nature du sol, les conditions météorologiques (température, pression, vent) sont des facteurs influents sur la concentration en radon dans les habitations [N'Gussan, 2014].



**Figure.8 : La formation du radon et les sources et voies de transfert de radon dans un bâtiment.**

## 7.4. Sources du radon

La concentration du  $^{222}\text{Rn}$  dépend principalement de la concentration en  $^{226}\text{Ra}$  dans le milieu, ce qui traduit la diversité des sources du  $^{222}\text{Rn}$  dans l'environnement : le sol, les matériaux de construction, l'eau et le gaz naturel.

- **Le sol**

Le  $^{222}\text{Rn}$  provient de la désintégration radioactive de  $^{226}\text{Ra}$  contenu dans les roches donc de la concentration du  $^{238}\text{U}$ . Les concentrations de  $^{226}\text{Ra}$  dépendent fortement de la nature de la roche, les plus fortes teneurs sont rencontrées dans les roches granitiques (10 à 117  $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) et les plus faibles dans les roches ultrabasiques (0.37  $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) [Aït-Ziane, 2017].

- **Les matériaux de construction**

Il s'agit des matériaux constitués d'éléments naturels et artificiels, qui ont des concentrations élevées d' $^{238}\text{U}$ , Les matériaux naturels qui tirent leur origine du sol, les matériaux tels que le bois, les plâtres naturels. Les matériaux artificiels sont les différents types de béton constitués de matériaux riches en uranium [Rannou, 1985]

- **L'eau**

L'utilisation de l'eau qui provient des puits de forage et qui est contient du  $^{222}\text{Rn}$  lorsque ces puits sont creusés dans la roche granitique. Le radon est soluble dans l'eau, il est donc diffusé dans les locaux d'habitations [N'Gussan, 2014].

- **Le gaz naturel**

Les combustibles naturels provenant du sol tels que le gaz naturel et le charbon peuvent contenir des quantités appréciables de radon. En général, la contribution du gaz naturel dans la concentration du radon dans les habitations est faible [Hakam, 1993].

## 7.5. Risque du radon

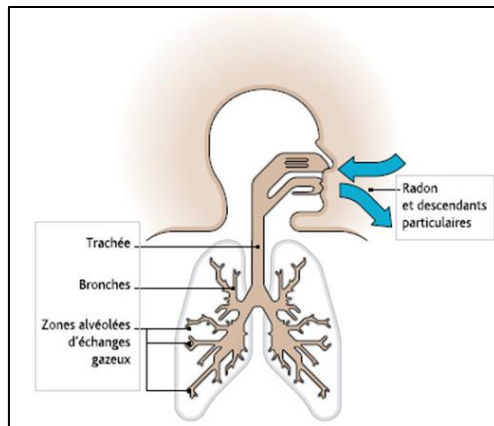
L'exposition aux rayonnements ionisants peut être provoquée soit par une exposition interne et soit par une exposition externe.

### 7.5.1. Expositions interne

L'exposition interne se produit lorsque les produits radioactifs pénètrent dans l'organisme soit par inhalation, par ingestion ou par injection.

- **Cancer du poumon**

C'est le risque de cancer du poumon qui motive la vigilance à l'égard du radon dans les habitations et dans les lieux de travail. Le cancer du poumon est l'un des cancers les plus répandus et les plus mortels dans le monde. Le radon et ses descendants solides pénètrent dans les poumons avec l'air respiré. Les descendants solides émettent des rayonnements  $\alpha$ , peu pénétrants, qui irradient les cellules les plus sensibles des bronches. Ce phénomène peut induire le développement d'un cancer.



**Figure 9: Modes de pénétration et de fixation du radon et de ses descendants**

- **Cancer de l'estomac**

Après ingestion d'une eau riche en  $^{222}\text{Rn}$ , il expose l'estomac. La dose reçue par l'estomac dépend de la répartition du radon par rapport aux cellules radiosensibles.

Une concentration élevée en radon dans l'eau potable peut entraîner un risque important de développer des cancers des organes internes, principalement des cancers de l'estomac et du tube digestif [Zhuo et al. 2001; Kendal et al.2002]. Sur la base d'un rapport de l'académie Américaine de sciences, l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (EPA) a estimé que le radon dissout dans l'eau potable cause environ 168 décès par cancer par an; 89% sont des cancers du poumon causés par la respiration du radon libéré de l'eau dans l'air intérieur, et 11% sont des cancers de l'estomac causés par la consommation d'eau contenant du radon [USEPA, 1991].

### 7.5.2. Exposition externe

L'exposition externe est provoquée par une source radioactive située à une distance de l'être humain. Cette source peut émettre des rayonnements qui interagissent avec le corps humain en créant des ionisations et des excitations. Cette exposition peut être globale ou partielle.

Contrairement au poumon, l'irradiation de la peau par le radon est de nature externe, ce gaz s'attache aux particules présentes dans l'air, qui adhèrent elles-mêmes à la peau, la peau est ainsi le deuxième organe exposé au radon après le poumon.

Naturellement présent dans les régions à sol granitique ou d'origine volcanique, le radon pourrait être lié au cancer de la peau, révèle une étude suisse [Loury, 2017]. En effet, après l'Australie et la Nouvelle-Zélande, la Suisse est le troisième pays le plus touché au monde par ce cancer, avec une incidence annuelle de 20.3 cas pour 100000 personnes contre 35.8 cas pour l'Australie. Il est à noter que la France enregistre 10.2 cas pour 100000 personnes par an [Loury, 2017].

## 8. Cancer du Poumon en Algérie

Selon le registre national du cancer, 2992 nouveaux cas de cancer du poumon ont été enregistrés en 2014 avec un taux d'incidence brut égal à 14.9 pour 100000 habitants. En 2015, l'Algérie à enregistrée 3338 nouveaux cas du cancer du poumon avec un taux d'incidence brut égal à 16.9, soit une augmentation de 10% par rapport à l'année 2014 [Hamdi, 2015,

2017]. Les plus récentes données publiées sont ceux de Boudrissa et Chellai où près de 3500 nouveaux cas de cancer du poumon par an ont été enregistrés en Algérie [Boudrissa et Chellai, 2018].

En se basant sur ces données épidémiologiques, les valeurs des facteurs risque calculé pour les années 2014, 2015 et 2018 sont égales à  $7,87 \times 10^{-5}$ ,  $8,45 \times 10^{-5}$  et  $8,33 \times 10^{-5}$  cas par habitant respectivement.

## **9. Cadre réglementaire**

La protection de l'homme contre les rayonnements ionisants est assurée dans chaque pays par l'application de dispositions réglementaires qui se fondent toutes sur une doctrine élaborée au niveau international par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), une commission créée en 1928 par le Congrès international de radiologie.

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 sur les personnes directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement.

Les premières recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) sur la quantification du risque ont été publiées en 1977 dans sa publication n° 24, qui portaient principalement sur la protection radiologique dans les mines d'uranium et autres type de mines [CIPR, 1977]. En 1993, le CIPR dans sa publication n° 65, a recommandé de choisir un niveau d'action compris entre 200 et 600 Bq.m<sup>-3</sup> ce qui correspond à une dose efficace annuelle d'environ 3 à 10 mSv [CIPR, 1993]. En 2010, la CIPR a proposé dans sa publication n°115 "Statement on Radon" de réduire la valeur max du niveau de référence dans les habitations de 600 Bq.m<sup>-3</sup> à 300 Bq.m<sup>-3</sup> [CIPR, 2010]. En 2014, la CIPR a proposé dans sa publication n°126 "Radiological Protection against Radon Exposure" et en tenant compte des principaux résultats scientifiques de ses publications n°103 et n°115, que les autorités nationales devraient fixer un niveau de référence national aussi bas que raisonnablement possible dans l'intervalle 100 à 300 Bq.m<sup>-3</sup> [CIPR, 2014]. Enfin, et en 2018, la CIPR et dans sa publication n°137 "Occupational Intakes of Radionuclides" a fixé pour une concentration en radon de 300 Bq.m<sup>-3</sup> une dose efficace annuelle de 4 mSv pour les travailleurs et de 14 mSv pour les habitations [CIPR, 2018].

## **10. Métrologie du radon**

La mesure de l'activité volumique en radon ou de ses descendants est réalisée à partir de plusieurs méthodes et techniques qui peuvent être classées en trois catégories selon le mode de prélèvement : mesures ponctuelles, mesures en continu et mesures intégrées.

### **10.1. Mesure ponctuelle**

La mesure consiste en un prélèvement d'échantillon instantané qui sera effectué sur une période courte. Le résultat du comptage de l'échantillon représente alors la valeur de la concentration du radon à un instant donné. Plusieurs détecteurs peuvent être utilisés mais le plus connu est la fiole scintillante ou Cellule de Lucas. Elle est basée sur une fiole remplie par un gaz du radon et contenant une feuille recouverte du sulfure de zinc dopé avec des atomes d'argent. La particule  $\alpha$  émise par le radon sera absorbée par les couches électroniques



du sulfure de zinc activé à l'argent, où elle perdra toute son énergie, cette énergie est transformée en un flash lumineux qui sera détecté par un tube photomultiplicateur [Labeled, 1991, Charuau, 1996].

## 10.2. Mesure en continu

Le prélèvement est effectué en continu, le résultat du comptage étant connu à tout moment et généralement enregistré pendant toute la durée de la mesure. Plusieurs techniques sont utilisées :

- **Chambre d'ionisation**

Le flux d'air à analyser traverse l'enceinte contenant de l'air ou du gaz sous pression, une différence de potentiel  $V$  est établie entre la paroi métallique de l'enceinte (cathode) et une électrode axiale (anode). Lorsqu'un mélange gazeux contenant du radon traverse le volume actif de la chambre, les particules  $\alpha$  émises par le radon et ses descendants ionisant le gaz, les ions et les électrons alors formés entraînés par un champ électrique sont respectivement collectés sur la cathode et l'anode, on observe alors un courant d'ionisation proportionnel à l'activité du radon [Aït-Ziane, 2017].

- **Spectrométrie alpha**

La spectrométrie alpha utilise un détecteur semi-conducteur, par exemple le silicium, qui délivre des impulsions d'amplitude proportionnelle à l'énergie des particules  $\alpha$  émises par le radon [Charuau, 1996].

## 10.3. Mesure intégrée

Le prélèvement est effectué sur une période longue correspondant à la valeur moyenne de la concentration du radon mesurée pendant la période considérée. Plusieurs détecteurs peuvent être utilisés à savoir:

- **Détecteur thermo-luminescent**

Dans des matériaux à structures cristallines, l'énergie des rayonnements ionisants peut être absorbée pour créer des défauts dans cette structure. Lorsque l'on chauffe ces matériaux, l'agitation thermique détruit ces défauts et la structure cristalline se rétablit. Au cours de ces « réparations », il y a émission d'une lumière ; c'est le phénomène de thermoluminescence. La quantité de lumière émise est proportionnelle à la dose reçue [Mouhssine, 2004].

- **Spectrométrie gamma**

Parmi les descendants du  $^{222}\text{Rn}$  il existe des émetteurs  $\gamma$  : le  $^{214}\text{Pb}$  et le  $^{214}\text{Bi}$ . En piégeant le gaz sur le charbon actif et après établissement de l'équilibre radon et ses descendants, il est possible d'estimer la concentration moyenne en  $^{222}\text{Rn}$  pendant la durée d'exposition du détecteur à partir de la mesure du rayonnement  $\gamma$  émis par l'échantillon à l'aide d'une chaîne spectrométrique équipée d'un détecteur à semi-conducteur (Ge-Hp) ou d'un scintillateur (NaI :Tl)[Labeled, 1991].

- **Détecteurs solides de traces nucléaires**

Les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) sont des plastiques qui enregistrent les impacts du rayonnement  $\alpha$  émis par le radon. La particule  $\alpha$  crée une zone de dommage (traces latentes) dans le plastique qui sera observable après un traitement chimique approprié.

# Chapitre II : Détecteurs Solides de Traces nucléaires

## 1 Introduction

Lorsque le rayonnement se propage dans la matière, il laisse des traces latentes. Ce phénomène a été observé pour la première fois en 1958 par D.A. Young dans un cristal de LiF préalablement en contact avec une feuille d'uranium. Une année plus tard Silk et Barn ont observé des zones de dommage (encore appelées traces latentes) dans le mica en utilisant un microscope électronique à transmission. Fleicher et ses collaborateurs ont réalisé plusieurs travaux et ont amélioré les précédents en décrivant les mécanismes de développement chimique, de formation des traces dans des matériaux comme les minéraux, plastiques et verres. Depuis, il y a eu une diversification du champ d'application de ce type de détecteurs (i.e. Détecteurs Solides de Traces Nucléaires) dans plusieurs domaines [Traore, 2013]. Dans ce chapitre, nous allons aborder sur le principe, les applications de ces détecteurs (DSTN) et les critères d'enregistrements des traces.

## 2 Détecteurs solide de traces nucléaire (DSTN)

Les Détecteurs Solide de Traces Nucléaires (DSTN) sont des diélectriques qui permettent de matérialiser le passage de particules ionisantes en leur sein et ce, après une attaque chimique. Les DSTN sont des détecteurs passifs, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas besoin de source externe d'énergie pour fonctionner. Ils sont sensibles aux rayonnements à haut transfert d'énergie linéique (TEL) [N'Guessan, 2014].

### 2.1 Principe de détecteur des traces nucléaire

Lorsque les particules chargées traversent la matière, des ionisations apparaissent le long de leurs trajectoires et forment des zones d'endommagement dans les milieux traversés. Certains matériaux conservent les effets du désordre autour de la trajectoire des particules incidentes sous forme des zones de dommage. Ces zones de dommage s'étendent sur des dimensions de l'ordre du parcours des particules chargées dans les matériaux qui dépendent principalement de l'énergie initiale des particules incidentes. Cette trace est observable par microscope électronique et peut être rendue visible au microscope optique sous l'action d'un agent chimique dont le rôle est d'agrandir l'étendue des zones endommagées, la trace latente prend alors une forme conique et prend des formes ellipsoïdale ou circulaire en fonction de l'angle d'incidence de la particule incidente par rapport à la surface du DSTN [Fleischer et al ,1964]

#### 2.1.1 DSTN en couche épaisse

Ce type de DSTN comprend toute la famille des polycarbonates (PADC, Makrofol, Lexan, etc.). Ils ressemblent à des petits morceaux de plexiglas, plus ou moins souples, de l'ordre du millimètre d'épaisseur. Les traces obtenues ressemblent à de petits cratères de surface de différentes tailles [Andru, 1998].

Le CR-39 à une formule chimique brute  $C_{12}H_{18}O_7$ , ce polymère massif de Polycarbonate d'Allyle Diglycol (PADC), commercialisé sous le nom de CR-39 est transparent, amorphe, isotrope et beaucoup plus sensible aux particules ionisantes que le LR-115. Il présente

l'avantage d'enregistrer des particules chargées d'énergie comprise entre 0,5 à 20 MeV avec un angle d'incidence allant jusqu'à 75° [Mouhssine, 2004].

### 2.1.2 DSTN en couche mince

L'exemple le plus connu est le film Kodak type LR-115. Il est constitué d'une couche de nitrocellulose (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>O<sub>9</sub>) de 12 µm d'épaisseur en moyenne. Ce type de film est très sensible ; sa gamme d'énergie s'étend de 1.4 à 4.7 MeV avec des angles d'incidence inférieurs à 50°.

Lorsqu'une particule α atteint cette couche de nitrate de cellulose, l'énergie libérée au cours de son ralentissement induit des modifications à l'échelle moléculaire. La dégradation produite le long du parcours de la particule chargée se traduit ainsi par une trace latente, visible au microscope optique, dans les conditions d'attaque chimique expropriées [Rannou, 1985].

## 3 Applications des DSTN

Le champ d'application des DSTN s'étend à des domaines aussi variés que la géologie, la biologie, la radioprotection, la physique nucléaire, la microanalyse et l'astrophysique [Hakam, 1993].

### 3.1 Datation par traces de fission

Les minéraux des roches sont des détecteurs nucléaires naturels, les traces de fission peuvent servir d'outil de mesure de la teneur et de la répartition microscopique de l'uranium des roches, permettant ainsi de déterminer l'âge des roches. Un minéral enregistre et emmagasine régulièrement des traces latentes issues de la fission spontanée de l'uranium 238 qu'il renferme. Sa datation repose sur la connaissance du nombre de traces fossiles, après une attaque chimique. La fission de l'uranium 235, engendre de la même façon que pour la fission spontanée de l'isotope 238. L'âge du minéral est proportionnel au rapport des densités de traces fossiles et induites, déterminées par comptage au microscope [Hakam, 1993].

### 3.2 Cartographie de l'uranium

Les DSTN peuvent être utilisés pour l'enregistrement des particules α produites par la désintégration de <sup>238</sup>U dans un échantillon, ce dernier est irradié dans un flux de neutrons thermiques qui induisent la fission de l'isotope <sup>235</sup>U, un DSTN (Makrofol ou Lexan) est utilisé pour l'enregistrement des traces des fragments de fission de l' <sup>235</sup>U, Une fois les traces révélées, elles reflètent la répartition de l'uranium dans l'échantillon étudié [Hakam, 1993].

### 3.3 Réactions nucléaires

Les détecteurs solides de traces peuvent être utilisés pour l'étude des réactions nucléaires. Cette étude est basée sur la détermination de la section efficace de cette réaction après la mesure de densité de traces produites par les particules émises lors de la réaction étudiée [Hakam, 1993].

$$\text{En effet, on a : } \sigma = \frac{D}{\phi \cdot N_0 \cdot R \cdot C} \quad (2.1)$$

Avec :

σ: est la section efficace de la réaction étudiée ;

D : est la densité de traces enregistrées;

$\Phi$ : est la fluence des particules incidentes.

$N_0$ .est la densité atomique de l'élément cible ;

R : est le parcours moyen dans l'élément cible des particules avant leurs détection par le DSTN ;

C : est la concentration d'atomes qui subissent la réaction étudiée ;

### **3.4 Analyse élémentaire**

Les DSTN permettent de mesurer la concentration et de déterminer la distribution de nombre des éléments radioactifs émetteurs  $\alpha$ , tels que le plutonium, polonium, lithium et des éléments fissiles tels que l'uranium et le thorium [Hakam, 1993].

### **3.5 Application en astrophysique**

Les DSTN peuvent être utilisés pour obtenir des informations sur l'histoire de la surface des planètes grâce à l'étude des traces fossiles dans des échantillons extraterrestres prélevés des météorites, de la lune et de la planète Mars.

### **3.6 Radioprotection**

Les DSTN peuvent être également utilisés en radioprotection, ils servent pour la mesure des concentrations du radon dans les habitations et pour le suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux neutrons.

## **4 Étude des traces nucléaires**

Le passage d'une particule ionisante dans certains matériaux laisse le long de la trajectoire une zone dégradée appelée trace latente. La production d'une trace dépend à la fois de la particule incidente et du matériau traversé.

### **4.1 Critères d'enregistrements des traces**

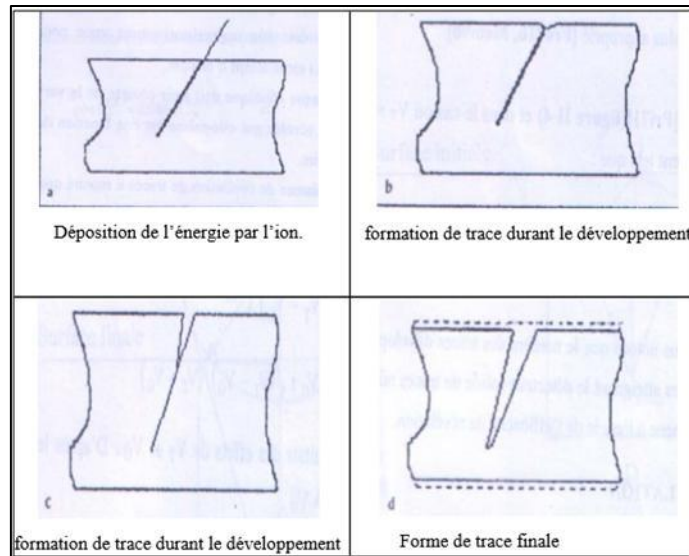
La visualisation d'une trace latente ne se réalise qu'à travers des conditions de plusieurs paramètres. Chaque type de détecteur est caractérisé par une perte d'énergie critique à la surface du détecteur en dessous de laquelle la détection des traces n'est pas observable. Ce critère a été rejeté car on a remarqué que les ions de fer relativistes n'étaient pas détectés dans le LR-115 tandis que le TEL est supérieur à  $(dE/dx)_c$  qui est la perte d'énergie critique. 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 donc des trois paramètres complémentaires suivants [Nachab, 2003] :

- l'angle d'incidence ;
- l'énergie de la particule incidente ;
- les conditions de révélation ou de développement (température, concentration de bain d'attaque et temps de développement).

### **4.2 Révélation des traces latentes**

La révélation de traces latentes de détecteur irradié se fait par un réactif chimique, ce dernier diffuse dans les zones endommagées pendant un certain temps appelé « temps d'induction de

l'attaque », ce réactif dégrade la zone endommagée en la dissolvant et en déplaçant des matériaux. La réaction continue et un canal se développe le long de la trajectoire de la particule (Fig. 10).



**Figure 10: Formation de la trace latente durant la révélation chimique**

En même temps, les surfaces du détecteur sont elles aussi attaquées, mais à un taux plus faible. Enfin, en érodant l'intérieur du canal, le réactif permet d'élargir ses dimensions pour donner une trace visible [Hakam, 1993].

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. Les solutions aqueuses de potasse (KOH) et de soude (NaOH) sont les meilleurs réactifs utilisés pour la révélation des traces sur les détecteurs organiques. Pour l'acétate de cellulose, par exemple, la potasse donne les meilleurs résultats d'attaque, tandis qu'une solution de soude est mieux appropriée dans le cas du nitrate de cellulose [Hakam, 1993].

### 4.3 Formation des traces latentes

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 [Mouhssine, 2004] :

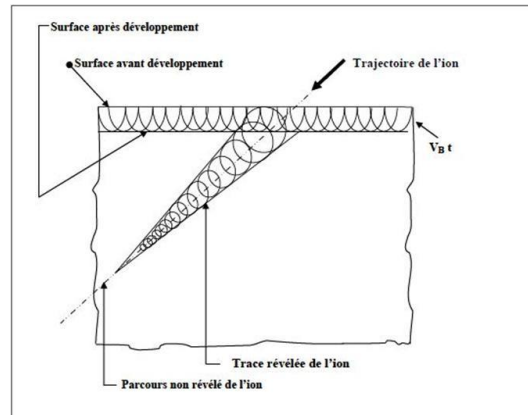
- une zone cylindrique de rayon  $r_0$  dite « cœur de la trace », dans laquelle les perturbations sont créées par le passage de la particule chargée (ionisation primaire),
- une zone appelée « halo de dommages », où les perturbations créées au cœur de la trace se propagent par les électrons secondaires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

### 4.4 Géométrie des traces enregistrées dans les DSTN

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  $V_T$  (c. à. d. le long de la trajectoire de l'ion) et de l'attaque globale de la surface du matériau non irradiée selon une vitesse  $V_B$  [Fleischer, 1975].

La forme la plus généralement observée est un cône dont l'axe est la trajectoire de la particule incidente (Fig. 11). Cette forme est obtenue en supposant que [Layachi, 2016]:

- $V_T$  soit constante le long de la trajectoire.
- $V_B$  soit constante et isotrope.



**Figure 11 : Schéma représentant la formation de la trace (forme conique) par ion s'arrêtant dans le détecteur [Layachi, 2016]**

Plusieurs études ont été effectuées sur ces deux paramètres qui permettent d'interpréter l'évolution de la forme des traces dans les DSTN [Nachab, 2003].

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

Cette vitesse du groupe correspond à la vitesse avec laquelle l'épaisseur du détecteur a été décapée lorsqu'il est soumis à un traitement chimique, elle est déterminée par les deux méthodes suivantes [Traore, 2013] :

- Variation d'épaisseur

Durant le traitement chimique, la surface du détecteur est décapée couche par couche et son épaisseur diminue progressivement. Pour calculer  $V_B$ , l'épaisseur du détecteur est mesurée avant le traitement chimique puis, remesurée à des intervalles de temps  $\Delta t$  régulier après chaque traitement. La vitesse d'attaque surfacique  $V_B$  est donnée par l'expression suivante :

$$V_B = \Delta x / \Delta t \quad (2.2)$$

Où :  $\Delta x$  représente la variation d'épaisseur après le temps  $\Delta t$  mis pour le décapage.

- Variation de masse

Cette méthode est basée sur la mesure de la variation de la masse  $\Delta m$  du détecteur avant et après traitement chimique, dans les mêmes conditions environnementales afin d'éviter les erreurs. A partir de la mesure de  $\Delta m$  et de la densité du détecteur on aura :

$$V_B = \Delta m / (2 \cdot S \cdot \rho \cdot \Delta t) \quad (2.3)$$

Où  $S$  est la surface du détecteur,  $\rho$  est la densité du détecteur et  $\Delta t$  est le temps de décapage.

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

Propre aux traces latentes, qui traduisent l'érosion interne de la trace. C'est-à-dire la vitesse avec laquelle la solution chimique se propage le long de la trajectoire laissée par les particules

incidentes dans le DSTN. La vitesse  $V_T$  dépend de l'énergie perdue par les particules incidentes, la température et la concentration de la solution [Traore, 2013].

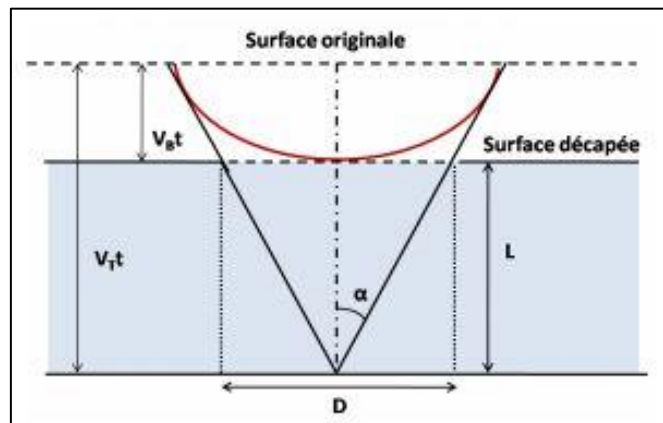


Figure 12 : Géométrie d'une trace latente

#### 4.5 Angle critique d'enregistrement

Quand un DSTN est irradié par des particules chargées, les traces dues aux particules d'incidence inclinées ne sont pas toutes observables après révélation chimique (une partie du film est décapée) même si les dégâts créés sont importants. Ceci est lié à la contrainte de l'angle critique d'enregistrement  $\theta_c$  engendré par la trajectoire de la particule incidente et la normale à la surface du détecteur [Nachab, 2003]. L'étude géométrique des traces permet d'établir des critères de révélation en fonction de  $V_T$  et  $V_B$  et de l'angle d'incidence des particules. La forme de la trace dépend, en effet de l'angle d'incidence de la particule dans le détecteur [Layachi, 2016].

- Si  $\theta < \theta_c$  la trace révélée ne peut être observée ;
- Si  $\theta = \theta_c$  angle à partir duquel une trace révélée peut être observée ;
- Si  $\theta > \theta_c$  la trace révélée est observable ;

#### 4.6 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. Le plus souvent, la lecture s'effectue simplement par un microscope optique [Hakam, 1993].

##### 4.6.1 Microscope optique

C'est le moyen le plus couramment employé pour l'observation directe des traces. Dans le cas des DSTN type CN-85 et du CR-39 (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.

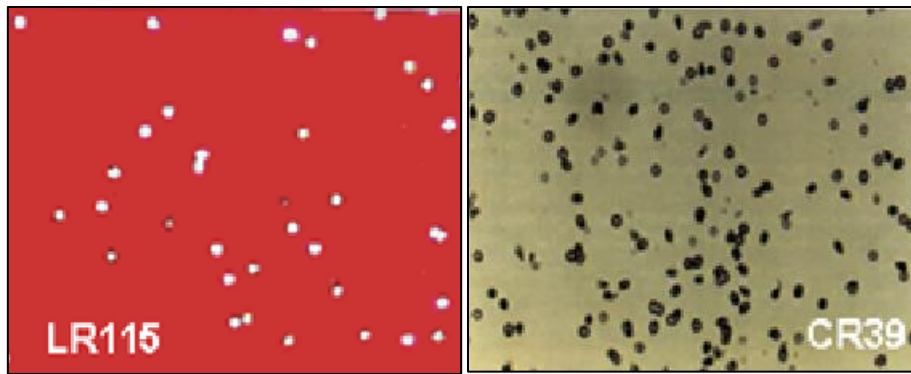


Figure 13 : Traces de particules  $\alpha$  révélées dans les DSTN type LR-115 et CR-39

Dans le cas du LR-115, la perforation des traces dans la couche sensible les montrent colorées en jaune [Hakam, 1993].

#### 4.6.2 Compteur à étincelage

Une haute tension est appliquée à travers un circuit RC aux bornes des électrodes. Sa valeur est inférieure à la tension limite de claquage du film mais supérieure à la tension de claquage au niveau de chaque trou. Cet écart de tensions limites résulte de la différence entre la rigidité diélectrique de l'air ( $\epsilon = 1$ ) et celle du film ( $\epsilon = 7$ ) (dans le cas des LR-115). Il se produit une décharge disruptive à travers un premier trou du film. L'énergie engagée dans cette décharge est suffisante pour vaporiser l'aluminium de l'électrode mince sur une large surface laissant ainsi le trou correspondant électriquement isolé, ce qui interdit toute nouvelle décharge en cet endroit. L'étincelle passe ainsi à un autre trou et ainsi de suite, sautant de l'un vers l'autre jusqu'à épuisement de toutes les traces. De cette façon, à la fin du claquage du film, l'électrode mince d'aluminium offre une réplique de la distribution des trous étincelés dans le détecteur original.

Le comptage automatique des impulsions électriques du courant de décharge s'effectue directement sur une échelle de comptage rapide [Boukhal, 1993].



# Chapitre III : Paramètres d'exploitation des DSTN type LR115

## 1. Introduction

Les traces dues à la particule  $\alpha$  après l'interaction dans les DSTN ne sont observables qu'après une attaque chimique par un réactif chimique. Dans ce chapitre nous allons déterminer les conditions de développement chimique et de lecture.

## 2. Dosimètres à base de LR-115

Le montage du dosimètre utilisé a été réalisé au niveau du laboratoire de dosimètre du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA). Ce dosimètre est constitué de deux DSTN type LR-115, fabriqué par kodak, de dimensions (2.3 cm  $\times$  3.2 cm). Les films sont recouverts par une feuille de mylar aluminisé qui sert à arrêter les descendants solides du radon ( $^{214}\text{Po}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ).

Le LR-115 présente un maximum de sensibilité aux particules  $\alpha$  dans la gamme d'énergie 1.5 – 4.5 MeV. Du fait que les particules  $\alpha$  émises par le radon et ses descendants possèdent 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, une feuille mince de mylar aluminisé de 20  $\mu\text{m}$  est introduite entre le volume de la chambre et le détecteur [Aït-Ziane, 2019 a].



Figure 14. Dosimètre du radon à base de DSTN type LR-115

L'ensemble est placé dans un support parallélépipédique fabriqué en PMMA scellé dans une poche en polyéthylène (0,92 g/cm<sup>3</sup>) de 35  $\mu\text{m}$  d'épaisseur afin de stopper la diffusion du gaz thoron dans le dosimètre (Fig. 14 et 15).

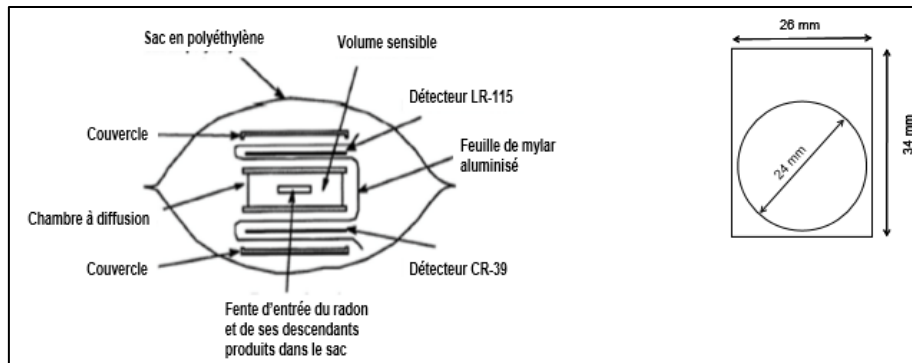


Figure 15. Schémas du dosimètre de radon à base de détecteurs solides de traces nucléaires et vue de haut de la chambre à diffusion associée [ Aït-Ziane, 2019 a]

### 3. Détermination des conditions expérimentales optimales de développement

Afin de déterminer les conditions de développement qu'ils sont importantes pour la réussite de cette expérience, nous avons commencé par la préparation de la solution chimique de concentration 2.5 N, par la dissolution de 249.9g de NaOH dans un volume de 2.5 l d'eau (Fig.16). La solution chimique est versée dans un bain avec d'un thermostat qui doit être allumé 1 heure avant pour la stabilité de la température à 60 C° (Fig. 17).

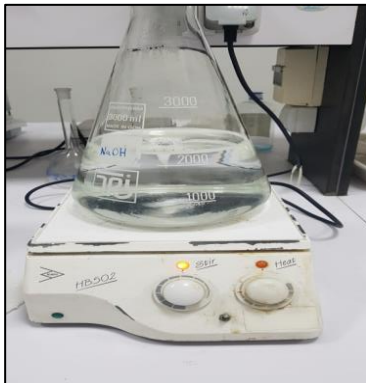


Figure 16 .Préparation de la solution chimique de NaOH



Figure 17. Le bain de développement chimique

#### 3.1. Détermination de l'épaisseur résiduelle

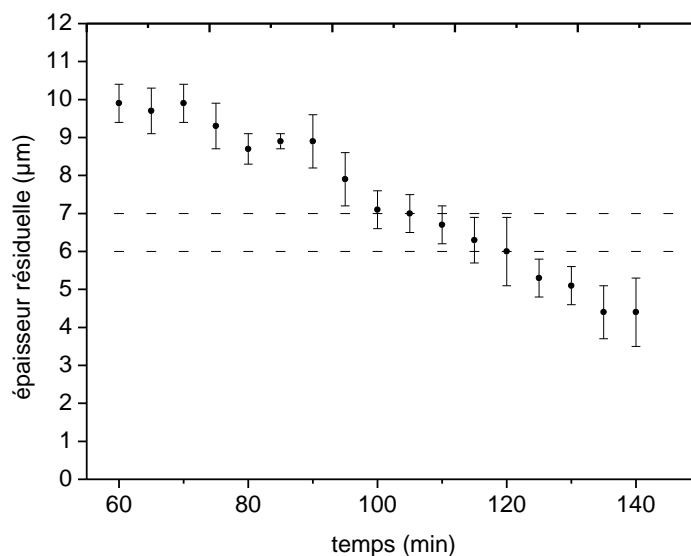
Les films ont été plongés dans le bain chimique pendant un temps de développement variant de 60 min à 140 min, les films retirés ont été lavés avec de l'eau courante pendant 5 min , puis on les a rincé à l'eau distillée pour arrêter toute attaque de la solution chimique et éliminer les suspensions des matériaux dégradés qui sont déposées sur la surface du détecteur. Après le rinçage, les films ont été placés sur une feuille de papier pour être séchés à l'air libre. Enfin, les épaisseurs résiduelles des films décollés du polyester, ont été mesurées à l'aide d'un comparateur d'épaisseur électronique de type Millitron (Mahr Feinprul, Allemagne) (Fig. 18). L'épaisseur résiduelle de film doit être comprise entre deux limites, une limite inférieure, qui est l'épaisseur minimale en dessous de laquelle le film ne peut être détaché de sa pellicule et supporter ainsi 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 [Messouadi et Aouchar, 2015].



**Figure 18. Comparateur d'épaisseur résiduelle type Millitron**

Dans la figure (19), nous représentons la variation de l'épaisseur résiduelle (épaisseur finale) du détecteur LR-115 en fonction du temps de développement. On remarque que pour un temps de développement de 115 min l'épaisseur résiduelle des films est égale à 6,5  $\mu\text{m}$ , cette valeur est comprise entre 6 et 7  $\mu\text{m}$ , l'intervalle d'épaisseur optimale pour notre lecture à étincelage utilisé.



**Figure 19. Variation de l'épaisseur résiduelle en fonction du temps de développement**

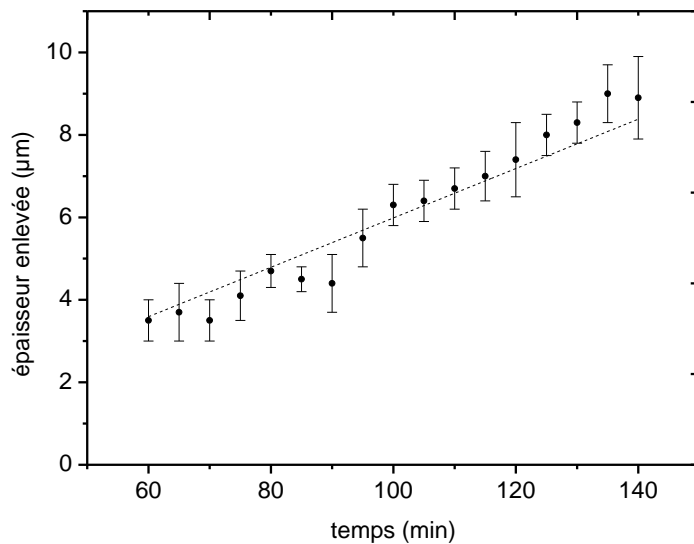
Par conséquent, et à partir de cette étude, le temps de développement est fixé à 115 min.

### 3.2. Détermination de la vitesse générale d'attaque $V_B$

Dans cette partie, nous avons déterminé l'épaisseur enlevée de détecteur ( $e$ ) à partir de la mesure de l'épaisseur avant le développement (épaisseur initiale  $e_0$ ) et l'épaisseur après le développement (épaisseur résiduelle  $e_{\text{fin}}$ ). Les résultats obtenus sont représentés dans la figure (20). On peut remarquer que l'épaisseur enlevée ( $e$ ) augmente linéairement avec le temps de développement.

En utilisant la relation (2.1), nous avons calculé la vitesse générale d'attaque  $V_B$ , la vitesse caractéristique de nos conditions de développement, elle est égale à  $(0.059 \pm 0.012) \mu\text{m}/\text{min}$ . Elle est comparable à celles déjà déterminées précédemment au niveau du laboratoire  $(0.048 \pm 0.002) \mu\text{m}/\text{min}$  [Hamdi, 2018] et  $(0.053 \pm 0.003) \mu\text{m}/\text{min}$  [Bouabdallah, 2019].

La vitesse moyenne d'attaque du LR-115 obtenue a été comparée avec celles trouvées dans la littérature (tableau. 3). Ce résultat est important car il nous informe si les conditions de développement chimique utilisées ont été bien respectées.



**Figure 20. Variation de l'épaisseur enlevée en fonction du temps de développement**

**Tableau 3. Comparaison des vitesses d'attaques obtenues**

$V_B$ ( $\mu\text{m}/\text{h}$ )	Référence
$2.9 \pm 0.3$	[Hakam, 1993]
3.0	[Djeffal, 1995]
3.3	[Nikezic, 2002]
$3.6 \pm 0.14$	[Yip et al, 2003]
3.2	[Salama et al, 2006]
$3.6 \pm 0.09$	[Palacios et al, 2010]
$3.7 \pm 0.14$	[Varshney et al, 2011]
4.2	[Metha et al, 2015]
$3.0 \pm 0.2$	[Messaoudi et Aouchar, 2015]
$3.2 \pm 0.1$	[Bouarar, 2016]
$3.0 \pm 0.1$	[Mebbani, 2017]
$2.9 \pm 0.4$	[Hamdi, 2018]
$3.2 \pm 0.2$	[Bouabdallah, 2019]
$3.5 \pm 0.2$	Ce travail

Les paramètres de développement chimique des détecteurs type LR-115 utilisés dans le cadre de ce travail sont représentés dans le tableau(4).

**Tableau 4. Paramètres de développement chimique des détecteurs type LR-115**

Solution chimique	Molarité	T(c)	Durée de développement
NaOH	2.5 N	60 ±1	115 min

#### 4. Détermination des conditions expérimentales optimales de lecture

C'était vérifier que les paramètres qui influent sur les conditions de lecture par le compteur à étincelles sont :

- Les conditions de développement chimique (la concentration de solution chimique, la température et le temps) ;
- L'épaisseur finale 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 est choisi expérimentalement, il est en fonction du réactif chimique utilisé : sa concentration et sa température. Il dépend aussi de la nature des particules ionisantes et de leurs énergies [Messaoudi et Aouchar, 2015]. Un compteur à étincelage de type SPARK REPLICA COUNTER 710 P /S (Mi.El<sup>®</sup>, Italie) a été utilisé pour le comptage des traces révélées, il est composé de quatre électrodes : deux de 5 mm et deux de 12 mm de diamètre.

Sur une de ces électrodes, le film est placé, une fois dépelliculé, sur lequel on superpose une feuille du mylar aluminisé. Une tension dite de « pré-claquage » est appliquée entre les bornes des électrodes afin d'élargir et de perforer les traces qui n'ont pas été complètement trouées, et une autre tension dite de « lecture » est appliquée pour le comptage de traces. Le tableau ci-dessous montre les paramètres de lecture, développés au niveau du laboratoire, utilisés dans le cadre de ce travail [Messaoudi et Aouchar, 2015].

**Tableau 5. Paramètres de lecture à l'aide du compteur à étincelage**

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

# Chapitre IV : Concentration du radon dans la wilaya de Blida

## 1. Introduction

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle issu de la désintégration de l'uranium, les teneurs élevées de l'uranium dans les constituants du sol peuvent engendrer des concentrations élevées du radon dans l'air, en relation avec plusieurs facteurs dont le mode de vie de ses habitants (aération).

Ce dernier chapitre portera sur les résultats de mesure des concentrations du radon dans les habitations de la wilaya de Blida.

## 2. Localisation géographique de la région d'étude

La wilaya de Blida est située dans le Tell central, elle est délimitée au nord, par les wilayas d'Alger et de Tipaza, à l'est par les wilayas de Boumerdès et de Bouira, et au sud, par les wilayas de Médéa et d'Aïn Defla. Elle se situe à environ 40 Km au Sud-ouest d'Alger. Dans la plaine de la Mitidja, une plaine réputée pour ses terres fertiles.

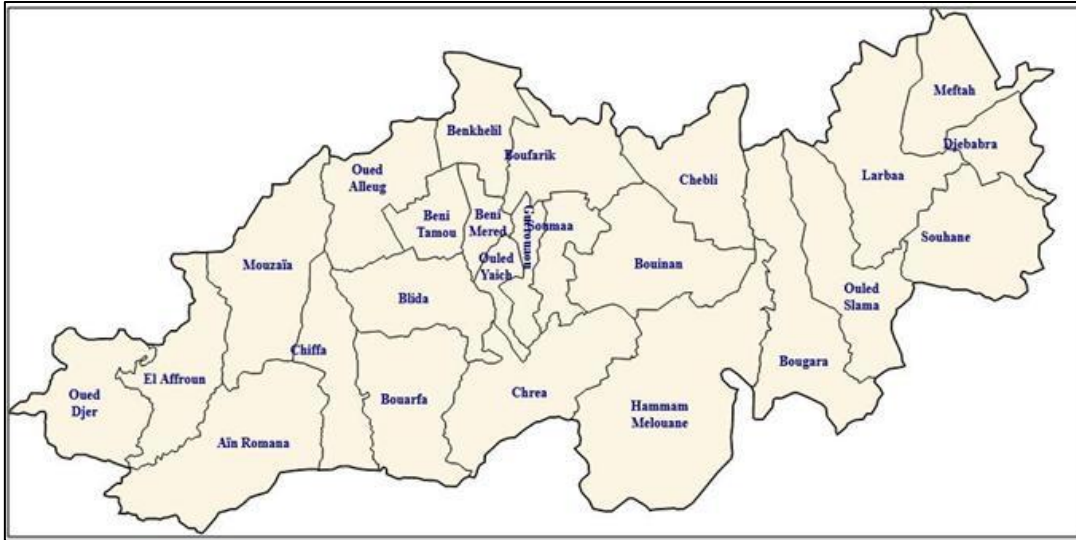
La wilaya de Blida est classée en zone 3 dans le zonage sismique de l'Algérie (RPA, 1999, version 2003). C'est donc une zone à forte sismicité.

Les conditions climatiques sont dans l'ensemble favorables. La pluviométrie est généralement supérieure à 600 mm par an en moyenne. Les précipitations atteignent leur apogée en Décembre-Février, mois qui donnent environ 30 à 40% des précipitations annuelles. Inversement, les mois d'été (juin-août) sont presque toujours secs.

Le relief de la wilaya se compose principalement d'une importante plaine (la Mitidja) ainsi que d'une chaîne de montagnes au sud de la wilaya (zone de l'Atlas Blidéen et Piémont):

**La plaine de la Mitidja** : un ensemble de terres très fertiles. La partie occidentale de cette plaine a une altitude qui va en décroissant du sud vers le Nord (150 mètres à 50 mètres). Les pentes sont faibles, parfois nulles. Elle offre les meilleurs sols de la wilaya. Les sols limoneux mêlés de cailloux sur le piémont de la Mitidja, des sols limoneux rouges, profonds, faciles à travailler dans la région de Mouzaïa, et des sols sablo-argileux de la basse plaine, plus lourds.

**La zone de l'Atlas Blidéen et le piémont** : la partie centrale de l'Atlas culmine à 1600 mètres. Les pentes très fortes (supérieures à 30%) sont sujettes à une érosion intense, là où la couverture forestière fait défaut.



**Figure 21. Communes de la wilaya de Blida**

La population de la wilaya de Blida est estimée à 1178205 habitants au 31/12/2014 [DSPB, 2014].

### 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. Plus de quatre-vingt-cinq (85) dosimètres ont été préparés et déployés dans différentes habitations situées dans la wilaya de Blida pendant une durée d'exposition de 3 à 7 mois. Après exposition, ces dosimètres ont été récupérés pour développement et lecture des traces au niveau du laboratoire de dosimétrie du CRNA. Les paramètres de développement et de lecture utilisés ont été déterminés et cités dans les tableaux 4 et 5 chapitre III.

Les concentrations du radon  $C_{Rn}$  (Bq.m<sup>-3</sup>) mesurées par les dosimètres à base de DSTN sont déterminées par la relation suivante :  $C_{Rn} = \frac{D_t - BDF}{F_C \times t}$  (4.1)

Où :

$D_t$  est la densité des traces (traces. cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) ;

$BDF$  est la densité des traces due au bruit de fond naturel (traces. cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) ;

$F_C$  est le facteur de calibration (Bq<sup>-1</sup>.m<sup>3</sup> traces. Cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) [Bouabdallah, 2019] ;

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

$$\Delta C_{Rn} = C_{Rn} \sqrt{\left[ \frac{\Delta(D_t) + \Delta BDF}{(D_t - BDF)^2} + \frac{\Delta(F_C)}{F_C^2} \right]} \quad (4.2)$$

Les doses efficaces annuelles résultantes  $D_{Rn}$  (mSv) sont déterminées par la relation suivante : [UNSCEAR, 2000]

$$D_{Rn} = C_{Rn} \times F_{eq} \times F_{occ} \times t \times G \quad (4.3)$$

Où :

$F_{eq}$  est le facteur d'équilibre, égal à 0.4 [ICPR, 2017],

**Tableau 6. Localisation géographique des lieux d'échantillonnage et temps d'exposition (h)**

Commune	Code	Coordonnées	temps (h)	Commune	Code	Coordonnées	temps (h)
EL-AFFROUN	54	36°27'58''N2°37'57''E	4680	DJEBABRA	29	36°34'53''N3°15'55''E	4536
	35	36°31'19''N2°51'43''E	4632		28	36°36'48''N3°12'08''E	4584
BENI MERED	43	36°30'46''N2°50'58''E	4488	MEFTEH	25	36°37'01''N3°12'14''E	4632
	44	36°32'17''N2°51'19''E	4536		15	36°39'09''N3°12'14''E	4728
	45	36°31'28''N2°51'47''E	4536		6	36°35'53''N3°13'08''E	4560
	32	36°32'07''N2°49'09''E	4416		38		4656
BENI TAMOU	12	36°31'53''N2°49'04''E	4584	CHIFFA	48	36°32'52''N2°48'53''E	4200
	53	36°32'04''N2°49'15''E	4584		71	36°28'21''N2°49'04''E	5112
	55	36°32'52''N2°48'53''E	3888		72		5112
BENKHELIL	46	36°03'28''N2°50'16''E	4368	GUEROUAOU	11	36°32'02''N2°52'55''E	4536
					55	36°31'25''N2°53'22''E	3888
	9	36°28'10''N2°50'01''E	4560				
	62	36°29'18''N2°50'49''E	4416		27		4536
BLIDA	49	36°28'10''N2°49'54''E	4512	LARBAA	22	36°35'44''N3°08'11''E	4536
	37	36°29'08''N2°50'03''E	4632		13	36°35'44''N3°08'26''E	4704
	50	36°29'08''N2°50'03''E	4536		78	36°34'48''N3°07'43''E	4536
	30	36°28'16''N2°50'15''E	4584		76		4512
	2	36°29'09''N2°50'00''E	4008				
BOUFARIK	14	36°34'15''N2°55'07''E	4536	OUED ALLEUG	51	36°34'26''N2°41'24''E	4392
					40	36°27'55''N2°41'34''E	4488
BOUARFA	47	36°27'38''N2°48'37''E	4560	MOUZAIA	57	36°27'57''N2°41'24''E	4392
					70		5112
BOUGARA	10	36°32'33''N3°04'48''E	4728		60		4776
	21	36°32'20''N3°04'57''E	4728		23		4728
	80		4896	OULED SLAMA	17	36°33'08''N3°06'59''E	5112
	81		4896		85	36°33'09''N3°06'26''E	1776
	82		4896		84	36°33'14''N3°06'30''E	1776
	83		4896		77		4728
	8	36°34'33''N3°00'42''E	4728		74		2376
CHEBLI	31	36°34'30''N3°00'42''E	4728	SOUHANE	75		2376
	24	36°33'02''N2°58'59''E	5016				
	5	36°30'08''N2°52'39''E	4728		61	36°29'53''N2°51'51''E	4636
	16	36°30'06''N2°52'39''E	5136		34	36°30'37''N2°51'56''E	4656
SOUMAA	20	36°30'01''N2°52'53''E	5328		33	36°30'29''N2°51'30''E	4680
	36	36°30'22''N2°54'34''E	4440	OULED YAICH	42	36°29'57''N2°51'31''E	4512
	39	36°32'34''N2°54'33''E	3792		01	36°29'57''N2°52'48''E	4488
	3	36°30'01''N2°52'53''E	5328		52	36°30'03''N2°51'54''E	4416
					48	36°30'06''N2°52'30''E	4200



$F_{occ}$  est le facteur d'occupation, égal à 0.8,

$t$  est le temps d'occupation à l'intérieur de l'habitation, égal à 24 heures/ jours  $\times$  365 jours/ an = 8760 heures/an,

$G_{est}$  le facteur de conversion de dose du radon et ses descendants, égal à 9 nSv.  $(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$  [UNSCEAR, 2000].

Le risque de cancer de poumon à vie entière (ELCR) « Excess Life time Cancer Risk » a été revu par la CIPR dans sa publication n°115. Il a été défini pour évaluer la probabilité d'incidence du cancer pulmonaire dans une population de personnes durant une durée de vie spécifique (90 ans) à partir du niveau d'exposition et de données dose-réponse [CIPR, 2010]. L'ELCR d'une personne peut être calculé en multipliant son exposition cumulée (nombre de WLM) par le coefficient de risque vie entière de cancer du poumon, et est égal à  $5\cdot 10^{-4}$  par WLM [Bouabdallah, 2019].

Il est à noter qu'on peut utiliser l'unité  $(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})$  au lieu de l'unité WLM en émettant l'hypothèse suivante : 1 WLM correspond à l'exposition pendant une année à une atmosphère où la concentration du radon est de  $230 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  [CIPR, 2010].

#### 4. Calibration du système de détection

Afin de déterminer le facteur calibration des dosimètres à base de LR-115, un moniteur de radon de référence type AlphaGUARD fabriqué par Saphymo® (Allemagne) étalonné par laboratoire primaire allemand physikalische-Technische Bundesanstalt (PTB) a été placé avec ces dernières dans un récipient de calibration hermétiquement fermé où règne un air de concentration connue du  $^{222}\text{Rn}$ .

Le Laboratoire de Dosimétrie du CRNA dispose d'un récipient de calibration sous forme cylindrique de 70 cm de longueur et de 46 cm de diamètre, de volume 101,1 l pouvant être hermétiquement clos. Il dispose de vannes de départ (out) et d'arrivée (in), de connecteurs électriques permettant la prise de mesure en continu sans ouverture. Une fois le dispositif est monté, un appareil de référence de mesure du radon type AlphaGUARD et quatre (04) dosimètres à base de LR-115 ont été introduits à l'intérieur du récipient (Fig. 22).

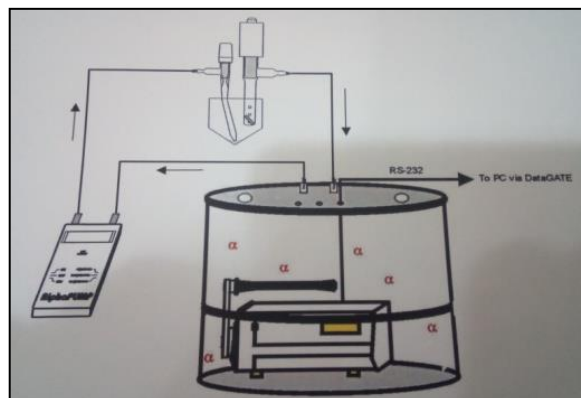


Figure 22. Montage expérimental pour le transfert du  $^{222}\text{Rn}$

À l'aide d'une pompe modèle AlphaPump, le gaz  $^{222}\text{Rn}$  est injecté à l'intérieur avec un débit de 0.5 l/min.

Il est à noter que le radon est généré par une ampoule SRM4973 contenant du  $^{226}\text{Ra}$ , certifiée par le National Institute of Standards and Technology (NIST), la source de  $^{226}\text{Ra}$  est placée à l'intérieur d'une ampoule en verre munie de deux vannes (Fig.21).

Le facteur de calibration utilisé ainsi que l'incertitude associée ont été déterminées par les relations suivante :

$$F_C = \frac{D_t - BDF}{t \times C_{Rn}} \quad (4.4)$$

$$\Delta F_C = \left[ \frac{\Delta D_t}{D_t} + \frac{\Delta BDF}{BDF} + \frac{\Delta C_{Rn}}{C_{Rn}} + \frac{\Delta t}{t} \right] \times F_C \quad (4.5)$$

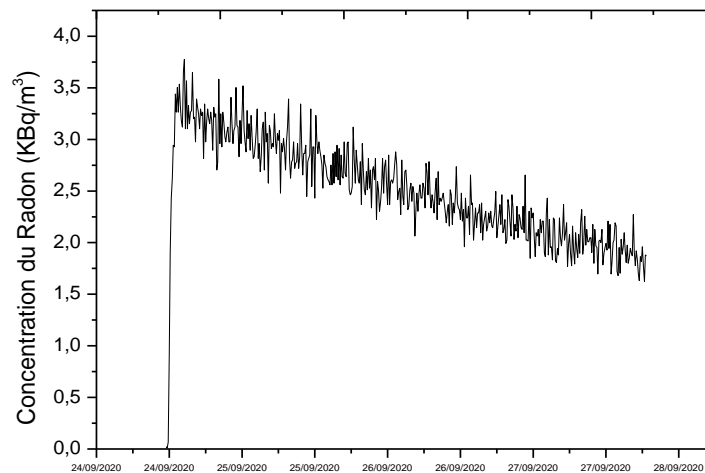
Où:

$D_t$  et  $\Delta D_t$  sont respectivement la densité de traces et l'incertitude associée en (traces.cm<sup>-2</sup>),

$BDF$  et  $\Delta BDF$  sont respectivement la densité de traces due au bruit de fond et l'incertitude associée en (traces.cm<sup>-2</sup>),

$C_{Rn}$  et  $\Delta C_{Rn}$  sont respectivement la concentration du radon à l'intérieur de la chambre et l'incertitude associée en (kBq.m<sup>-3</sup>) ; ( $\Delta C_{Rn} = 0.455 \text{ kBq.m}^{-3}$ ),

$t$  est le temps d'exposition ( $\Delta t = 0 \text{ h}$ ).



**Figure 23. Concentration du radon à l'intérieur de la chambre d'étalonnage**

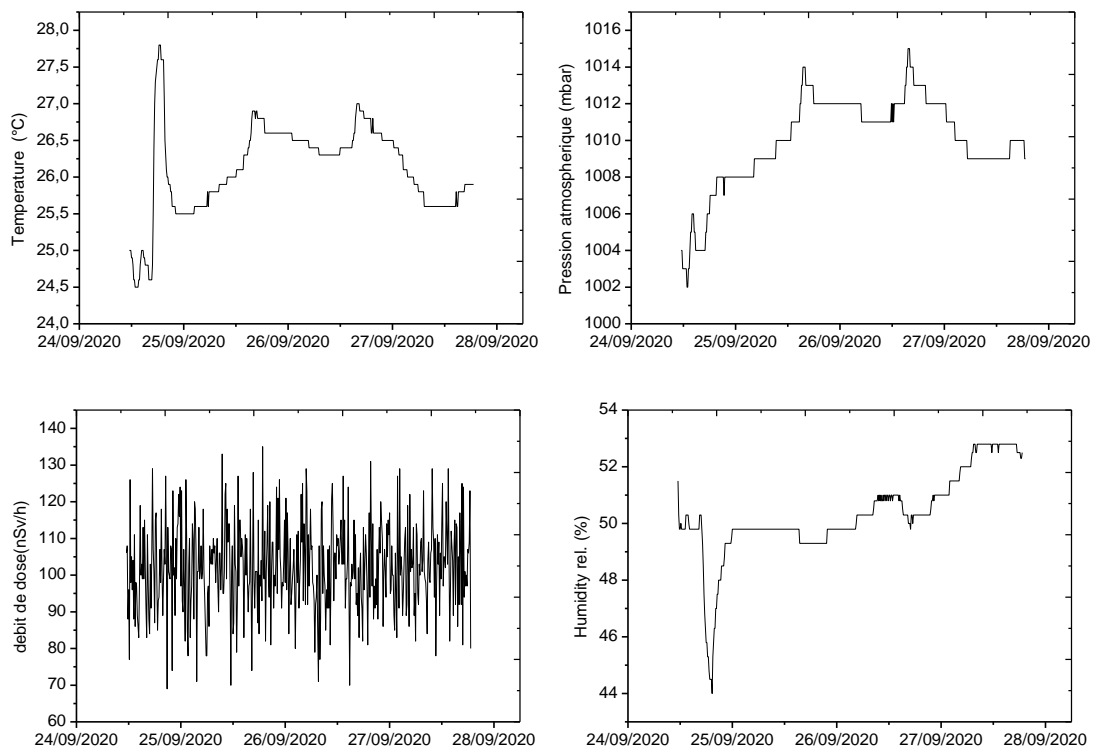
Après l'exposition des quatre (04) dosimètres à l'intérieur de la chambre de calibration pendant une durée de 97.6 heures à une concentration du  $^{222}\text{Rn}$  égale à  $(2.517 \pm 0,455) \text{ kBq.m}^{-3}$  (Fig. 23), ils ont été récupérés, et les films ont été développés chimiquement et lus à l'aide du compteur à étincelage sous les conditions citées dans les tableaux 4 et 5 du chapitre 3.

Le facteur de calibration obtenu pour la lecture des traces par le compteur à étincelage est égal à  $(2.41 \pm 0.86) \text{ traces.cm}^{-2} \cdot \text{KBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ . Ce résultat a été comparé à ceux déjà obtenus au niveau du laboratoire pour le même système de lecture, ils sont rapportés dans le tableau (7).

**Tableau 7 .Comparaison du facteur de calibration avec les anciens travaux.**

$F_C$ (traces.cm <sup>-2</sup> .kBq.m <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	Référence
$1.5 \pm 0.27$	[Djeffal, 1995]
$2.22 \pm 0.36$	[Messaoudi et Aouchar, 2015]
$1.02 \pm 0.47$	[Bouarar, 2016]
$0.55 \pm 0.05$	[Mebbani, 2017]
$1.06 \pm 0.14$	[Hamdi, 2018]
$0.82 \pm 0.10$	[Bouabdallah, 2019]
$2.41 \pm 0.86$	Ce travail

L'évolution des conditions environnementales : la pression atmosphérique, l'humidité relative, la température et le gamma ambiant à l'intérieur de la chambre de calibration sont représentée dans la figure (24).



**Figure 24. Variation des conditions environnementales dans la chambre d'étalonnage**

## 5. Mesure de la concentration du radon dans les habitations de Blida

Après Sept (7) mois d'exposition (de mois de mars au mois de septembre), soixante-quatorze (73) dosimètres ont été récupérés et analysés sur les quatre-vingt-cinq (85) dosimètres déployés dans les diverses localités de la wilaya de Blida (onze (12) dosimètres ont été égarés).

Les concentrations du radon dans les habitations mesurées à l'aide des détecteurs de traces (LR-115) ainsi que leurs incertitudes associées ont été déterminées à l'aide des relations (4.1) et (4.2) respectivement. Le tableau 10 présente les densités de traces ( $D_t$ ) enregistrées et les concentrations du radon mesurées ( $C_{Rn}$ ) dans les différentes localités de la wilaya de Blida. Les concentrations du radon obtenues varient entre 10 et 37  $Bq.m^{-3}$ , avec une moyenne arithmétique (AM) de  $19 \pm 6 Bq.m^{-3}$  et une moyenne géométrique (GM) de  $18 \pm 2 Bq.m^{-3}$ .

**Tableau 8. Concentrations moyennes du  $^{222}Rn$  dans les habitations de différents daïras**

Daïra	Rn ( $Bq.m^{-3}$ )
Blida	18±1
Boufarik	23±2
Bougara	16±1
Bouinan	17±1
El-Affroun	10±1
Larbaa	19±1
Mefteh	19±1
Mouzaïa	16±1
Oued Alleug	23±2
Ouled Yaich	18±1

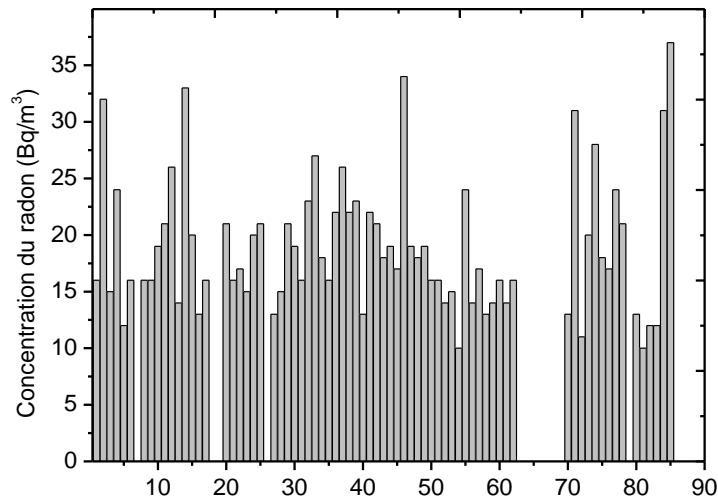
**Tableau 9. Concentrations du  $^{222}Rn$  dans les habitations de différentes communes**

Commune	Rn ( $Bq.m^{-3}$ )
Beni Mared	18±1
Beni Tmou	22±2
Benkhelil	34±2
Blida	20±2
Bouarfa	19±1
Boufarik	33±2
Bougara	16±1
Chebli	17±1
Chiffa	19±2
Djebabra	21±1
El-Affroun	10±1
Guerouaou	22±1
Larabaa	16±1
Mefteh	18±1
Mouzaïa	14±1
Oued Alleug	16±1
Ouled Slama	22±2
Ouled Yaich	18±2
Soumaa	17±2
Souhane	22±2

**Tableau 10. Concentrations du <sup>222</sup>Rn dans différents habitations de la wilaya de Blida mesurées par les DSTN**

Code	Densité (traces.cm <sup>-2</sup> )	Rn (Bq.m <sup>-3</sup> )	Code	Densité (traces.cm <sup>-2</sup> )	Rn (Bq.m <sup>-3</sup> )	Code	Densité (traces.cm <sup>-2</sup> )	Rn (Bq.m <sup>-3</sup> )
1	171±29	16±1	30	210±14	19±1	59	154±2	14±1
2	309±71	32±2	31	176±41	16±1	60	187±2	16±1
3	195±9	15±1	32	247±7	23±1	61	150±24	14±1
4	272±141	24±1	33	301±42	27±2	62	168±27	16±1
5	135±14	12±1	34	205±30	18±1	63	-	-
6	173±3	16±1	35	174±17	16±1	64	-	-
7	-	-	36	238±5	22±1	65	-	-
8	183±27	16±1	37	288±36	26±2	66	-	-
9	179±5	16±1	38	215±58	22±1	67	-	-
10	211±6	19±1	39	206±24	23±2	68	-	-
11	227±29	21±1	40	139±13	13±1	69	-	-
12	285±65	26±2	41	223±69	22±1	70	162±16	13±1
13	163±6	14±1	42	230±41	21±1	71	381±82	31±2
14	360±44	33±2	43	197±27	18±1	72	138±15	11±1
15	222±37	20±1	44	203±13	19±1	73	218±75	20±1
16	154±22	13±1	45	183±26	17±1	74	160±18	28±2
17	190±21	16±1	46	361±6	34±2	75	101±11	18±2
18	-	-	47	206±18	19±1	76	183±30	17±1
19	-	-	48	182±36	18±1	77	281±5	25±1
20	265±65	21±1	49	210±19	19±1	78	225±13	21±1
21	182±7	16±1	50	169±6	16±1	79	-	-
22	182±31	17±1	51	165±93	16±1	80	154±5	13±1
23	165±18	15±1	52	150±22	14±1	81	114±15	10±1
24	245±8	20±1	53	161±34	15±1	82	140±16	12±1
25	237±18	21±1	54	117±7	10±1	83	144±6	12±1
26	-	-	55	223±4	24±2	84	130±33	31±3
27	140±2	13±1	56	153±7	14±1	85	157±11	37±3
28	164±6	15±1	57	177±47	17±1	-	-	-
29	231±11	21±1	58	138±21	13±1	-	-	-

Ces valeurs sont inférieures au niveau de référence  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  recommandée par l'AIEA, organisme de référence en matière de radioprotection. La figure (25) présente la distribution des concentrations du radon dans les différentes habitations.



**Figure 25. Concentration du radon dans les habitations de la wilaya de Blida**

Cette variation de concentration du radon d'une région à une autre est due principalement à la nature géologique et pédologique du sol : type de roche, teneurs en uranium et en radium des sols et des roches, porosité des sols et des matériaux de construction, etc..... Elle dépend également des caractéristiques de l'habitation : l'élévation par rapport au sol, le taux de ventilation, les matériaux de construction, présence ou pas du vide sanitaire dans les habitations et les habitudes des occupants [Aït-Ziane et al. 2019a].

En effet, les concentrations du radon sont proportionnelles à la porosité des sols, et au taux d'exaltation du radon, et inversement proportionnelles au taux de l'aération.

Il est à noter que la saison joue un rôle important dans la variation de la concentration du radon dans l'habitation, il a été constaté que les concentrations enregistrées sont plus importantes en hiver qu'en été [Aït-Ziane et al. 2019b].

Le tableau (11) regroupe quelques résultats des concentrations du radon mesurées dans certaines wilayas. Une comparaison avec des données publiées dans la littérature a été présentée dans le tableau (12).

**Tableau 11. Comparaison entre les concentrations dans certaines régions d'Algérie.**

Concentration du radon (Bq.m <sup>-3</sup> )	La région	Référence
51± 2	Tamanghasset	[Bouarar, 2016]
48 ± 5	Adrar	[Hamdi, 2018]
79 ± 3	Ghardaïa	[Hamdi, 2018]
29 ± 8	Tipaza	[Hamdi, 2018]
78 ± 4	Chlef	[Djihad, 2019]
19 ±1	Blida	Ce travail

**Tableau 12. Concentration moyenne du radon dans certains pays.**

Pays	C <sub>Rn</sub> (Bq.m <sup>-3</sup> )	Référence
Italie	62	[WHO, 2001]
Inde	45	[Kumar et al. 2014]
Belgique	48	[WHO ,2001]
Allemagne	76	[INVS, 2014]
Suisse	75	[OFSP ,2000]
Canada	62	[CCSN ,2012]
Blida, Algérie	19	Ce travail

Les doses efficaces due au radon à l'intérieure des habitations de la wilaya de Blida varient de 0.25 à 0.93 mSv/ans avec une valeur moyenne arithmétique (AM) égale à  $0.47 \pm 0.15$  et une moyenne géométrique égale à  $0.45 \pm 0.12$  mSv/ans. Cette valeur est inférieure aux limites de doses recommandées par la CIPR, comprises entre 3 et 10 mSv/ans [CIPR, 1993].

Le facteur risque de cancer a vie entière obtenu à partir des concentrations du radon mesurées est égal à  $0.41 \times 10^{-4}$  ce facteur est comparable à celui calculé à partir des données épidémiologiques pour les années 2014, 2015 et 2018 qui sont de  $0.78 \times 10^{-4}$ ,  $0.84 \times 10^{-4}$  et  $0.83 \times 10^{-4}$  cas par habitant respectivement.

**Tableau 13. Concentration du radon, dose annuelle et risque cancer sur une vie entière dans la wilaya de Blida**

	Min	Max	AM±SD	GM±GSD
Concentration du radon (Bq.m <sup>-3</sup> )	10	37	19±6	18±2
Dose efficace (mSv/ans)	0.25	0.93	0.47±0.15	0.45±0.12
ELCR ( $\times 10^{-4}$ )	0.21	0.80	0.41±0.12	0.39±0.1

---

## 6. Conclusion

Les concentrations du radon dans les habitations de la wilaya de Blida ont été mesurées à l'aide des DSTN type LR-115. Les résultats obtenus, varient de 10 à 37 Bq.m<sup>-3</sup> avec une moyenne égale à  $18 \pm 1$  Bq.m<sup>-3</sup>, sont en deçà des valeurs de référence recommandées par AIEA : 200 Bq.m<sup>-3</sup>. Cette variabilité des résultats obtenus dépend de plusieurs paramètres tels que : la nature et la géologie du sol, la nature de matériaux de construction et le type de ventilation pour chaque habitation.

La dose efficace annuelle dans les habitations de la région de Blida varient de 0.25 à 0.93 mSv/an avec une moyenne égale à  $0.47 \pm 0.15$  mSv/an, sont en deçà des valeurs de référence recommandées par la CIPR: 3 à 10 mSv/an, le facteur risque de cancer à vie entière égal à  $0.47 \times 10^{-4}$ .



---

## Conclusion Générale

---

Ce travail est basé sur l'utilisation des détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) type LR-115 pour mesurer la concentration du radon dans les habitations, Ils 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 115 minutes permet d'enregistrer de manière optimale les traces des particules  $\alpha$  d'énergie comprises entre 1.5 et 4.5 MeV avec une vitesse d'attaque ( $V_B$ ) égale à  $(3.5 \pm 0.2) \mu\text{m/h}$ .

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 l'air des habitations dans différentes localités de la wilaya de Blida. Les concentrations obtenues sont inférieures à la valeur de référence de  $(200 \text{ Bq.m}^{-3})$  recommandée par AIEA. Ces concentrations sont variables d'une région à une autre car elles dépendent de plusieurs facteurs tels que la nature du sol (géologie locale et présence de failles sismiques), la nature de l'habitation (matériaux de construction) et mode de vie de ses habitants (aération). La dose efficace annuelle obtenue est égale à  $0.47 \pm 0.15$  (mSv/ans).

Enfin, nous avons déterminé le facteur risque de cancer de poumon à vie entière associé aux expositions du radon, il est égal à  $0.41 \times 10^{-4} \pm 0.12 \times 10^{-4}$ . Ce facteur est comparable à celui calculé à partir des données épidémiologiques publiées dans la littérature, il est entre  $0.78 \times 10^{-4}$  et  $0.84 \times 10^{-4}$ .

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

---

- Aït-Ziane M., Mesure du radon dans différents milieux : application en radioprotection .  
Thèse du Doctorat en sciences physiques, Université des Sciences de la Technologie  
Houari-Boumediène, 2017 .
- Aït-Ziane, M, et. al. Response verification of integrated device used for radon measurements  
in air. Brazilian Journal of Radiation Sciences 7, 2019a
- Aït-Ziane, M, et al. Preliminary study of effect of environmental parameter variations on  
indoor radon concentrations in Mediterranean climate, International Journal of Low  
Radiation 11 (2), 115-131, 2019b.
- Andru, J., La pratique des méthodes de détection du radon par les plastiques détecteurs de  
traces nucléaires, Radioprotection , Vol.33, n°4, pages 501 à 513 , 1998.
- Azkour, K. . Thèse de doctorat, Université Chouaib Doukkali, El Jadida (Maroc), (1999).
- Bouabdallah D., contribution à la mesure des concentrations du radon dans la région de  
Chlef, Mémoire de Master, Université de Saad Dahlab, Blida -1, 2019.
- Boudrissa, N. et chellai, F., Tabagisme et cancer du poumon : Modélisation de survie et effet  
Socio-économiques, 2018.
- Boukhal H., Etude des variations des émanations du radon du radon dans le sol au Maroc  
par la technique des détecteurs solides des traces nucléaires corrélations avec les  
paramètres atmosphériques et les activités sismiques. .Thèse du doctorat en physique  
nucléaire faculté des sciences , Université Mohammed V, Rebat, 1993.
- Charuau, JV., le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'environnement  
atmosphérique: origine et méthodes de mesure, Radioprotection , Vol .31 , n° 3 , pages 371  
à 388 , 1996,
- Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), Protection contre les  
radiations dans les mines d'uranium et autres, Publication 24 de la CIPR, 1977.
- Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), Recommandations of the  
International Commission on Radiological Protection, Publication 60 de la CIPR , 1991.
- Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), Protection contre le radon-  
222 dans les habitations et les lieux de travail, Publication 65 de la CIPR , 1993.
- Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), Lung Cancer Risk from  
Radon and Progeny and Statement on Radon, publication 115 de la CIPR, 2010.
- Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), Radiological Protection  
against Radon Exposure, ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43 (3), 2014.
- Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), Occupational intakes of  
radionuclides: Part 3, ICRP Publication 137. ICRP 46(3/4), 2018.
- Demongeot, S. Recherche des différents paramètres caractérisant le potentiel d'exhalation en  
radon des sols . département de protection et de l'environnement service d'études et de  
recherches sur la géosphère et l'élimination des déchets , Institut de Protection et de Sureté  
Nucléaire, rapport CEA-R-5795 , 1997 .
- Dinh, N., Chau, M. Dulinski, P. Jodlowski, J. Nowak, K, Rozanski, M. Sleziak and P.  
Wachniew, "Natural radioactivity in groundwater – a review", Isot. Environ. Healt. S. 47,  
415-437, 2011.

- 
- Direction de la Santé et de la Population de la wilaya de Blida (2014), [www.dsp-blida.dz/index.php/wilaya](http://www.dsp-blida.dz/index.php/wilaya)
- Ferry, C. Migration du radon 222 dans un sol Application aux stokages de residus issus du traitement des mineraux d'uranium . thèse du doctorat en sciences .Université Paris Xi Orsay, rapport CEA-R-5946 ,2001.
- Fleicher, RL. et al., Track registration in various solid-state nuclear track detectors, *Phy.Rev.*, Vol.133, N°5A1443-1450, 1964
- Fleischer RL & Price B. Nuclear track in solids principles and applications, University of California Press, Berkeley, 1975.
- Hakam, OK., Mesure les activités volumiques du radon dans l'air des habitations et des encientes de travail par les détecteurs solides de traces nucléaires. Faculté des sciences de Rebat, Maroc, 1993.
- Hamdi C. et al., .les cancers en Algérie données épidémiologiques du réseau national des registres du cancer 2015, 2017
- Hamdi C. et al.,. Cancer estimation of incidence and survival in Algeria, 2015.
- Hamdi Y. Contribution à la mesure des concentrations du radon dans les habitations d'Adrar, de Tipaza et de la vallée du M'Zab ,2018.
- Kendal, GM, Smith TJ. Dose to organs and tissues from radon and its decay products. *J. Radiol Prot* 22:389–406, 2002.
- Labad, V. Etude de la permeation du radon 222 a travers les membranes plastique. Application a une méthode de mesure du radon dans l'eau et les sols saturés, IPSN, Rapport CEA-R-5580, 1991 .
- Layachi, B. Détermination des distributions spatiales et énergétiques des neutrons autour d'un réacteur nucléaire . Thèse du Doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas-Setif 1, 2016.
- Lehto, L., Hou, X., Chemistry and Analysis of Radionuclides Laboratory Techniques and Methodology, Edition V. Wiley ,2010.
- Loury R. Le radon peut causer des cancers de la peau. *Journal de l'environnement*, 2017. 24
- Lyoussi, A. Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire, collection génie atomique, Institut National des Sciences et Technique Nucléaires. France : EDP Science, 2010.
- Messaoudi N. et Aouchar, K. Mesure du gaz radon à l'aide des détecteurs solides de traces nucléaires, 2015.
- Métivier, CJ. Personne compétente en radioprotection principe de la radioprotection-réglementation. France: EDP Sciences, 2007 .
- Mouhssine, D. Étude d'une nouvelle génération de dosimètre basée sur les détecteurs photostimulables type BaFBr(Eu) : caractérisation et application à la dosimétrie environnementale et personnelle, Université Louis Pasteur – Strasbourg 1, France, 2004.
- N'Guessan F., Impact du radon sur la santé de la population du district d'Abidjan: Cas de la commune d'Abobo. Mémoire de master, Université Felix Houphouët Boigny de Cocody, Côte-d'Ivoire 2014.
- Nachab, A. Etudes expérimentales et modélisations Monte Carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteurs CMOS .Thèse du doctorat ,Université de Louis Pasteur - Strasbourg I, France, 2003.

- 
- Omale PE., Okeniyi SO., Faruruwa MD. & Ngokat AB., “Determination for levels of radionuclides of uranium, thorium and potassium in water, sediments and algae.
- Rannou, A. Contribution à l'étude du risque lié à la présence du radon 220 et du radon 222 dans l'atmosphère des habitations. Institut de protection et de sûreté nucléaire. Rapport CEA-R5378, 1985.
- Traore, I. Etude et caractérisation des fonctions de réponse des détecteurs solides de traces nucléaires: applications à la dosimétrie radon et neutron. Université de Strasbourg, France, 2013 .
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, (New York: United Nations), 2008.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation vol. 1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York: United Nations Publication. ,2000.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA)—National primary drinking water regulations for radionuclides: notice of proposed rule-making. Fed Reg 56:33050–33127, 1991.
- Zhuo W., Iida T., Yang X. Occurrence of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and U in groundwater in Fujian province. Chin J Environ Radioact 53:111–12, 2001.
- .