

Démocratique et Populaire
وزارة الجمهورية الجزائرية
التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir L'Ibrahim – Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريديج »
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم علوم المادة



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : physique

Spécialité : Physique des matériaux

Thème

Le radon dans les habitations : Evaluation du risque

Présentée par : Doumane samia

Devant le jury :

Président : P^r

MCA (Univ. Bordj Bou Arreridj)

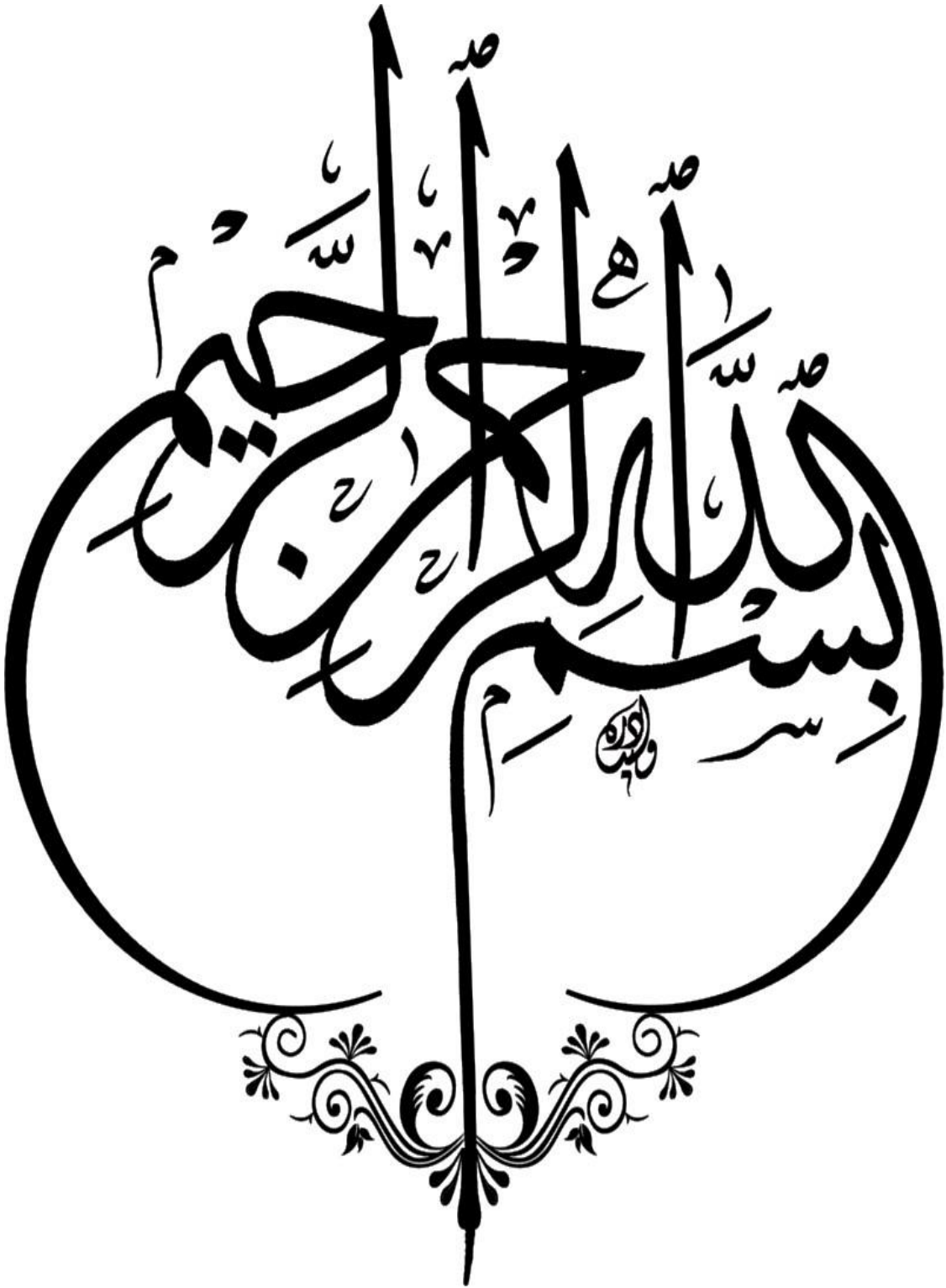
Rapporteur : D^r KEBIR HADDA

MAA (Univ. Bordj Bou Arreridj)

Examineur : D^r

MAA (Univ. Bordj Bou Arreridj)

Année universitaire : 2019/2020



REMERCIEMENTS

AVANT TOUT PROPOS, JE REMERCIE ALLAH LE TOUT-PUISSANT DE M' AVOIR
DONNE LE COURAGE ET LA VOLONTE POUR POUVOIR ELABORER CE TRAVAIL ET
LE PRESENTER.

EN EFFET, LE PRESENT MEMOIRE DE MASTER N' AURAIT PU AVOIR LE JOUR SANS
LA CONTRIBUTION DE NOMBREUSES PERSONNES, DONT JE ME FAITS AUJOURD' HUI
UN PLAISIR ET UN DEVOIR DE LES REMERCIER.

JE SUIS RECONNAISSANTE A MON ENCADREUR M^{ME} KEBIR HADDA

QUI M' A AIDE A PROGESSER DANS MA RECHERCHE GRACE A SES CONSEILS, SA
DIRECTIFS, SON ESPRIT CRITIQUE ET SON SOUTIEN TOUT LONG DE LA REFLEXION
DE CETTE RECHERCHE ET QUI A BIEN VOULU ASSURER LE SUIVI DE MON ETUDE A
TRAVERS SON ENCOURAGEMENT ET SES PRECIEUX CONSEILS QUI M' ONT ETE
TRES UTILES DANS L' ELABORATION DE CETTE RECHERCHE.

JE TIENS A REMERCIER VIVEMENT TOUS MES ENSEIGNANTS QUI M' ONT AIDE A
L' ACCUMULATION DES CONNAISSANCES NECESSAIRES DURANT LE CURSUS
UNIVERSITAIRE.

FINALEMENT, JE REMERCIE VIVEMENT LES MEMBRES DE JURY QUI ONT ACCEPTE
DE JUGER CE TRAVAIL.

MERCI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

À l'esprit de mon cher père, l'homme qui a fait beaucoup pour moi

À ma mère, qui a toujours été une source de tendance et d'encouragement

À mes belles sœurs : Manel et Aya

À mes frères : Walid, Khaled, Islem et Mouhamed Ayoub

Aux familles : Doumane et chaib dakou

À mon défunt grand père et grande mère

Ainsi qu'à tous mes amis

Et à toute la promotion de la physique des matériaux

2020,

À tous les enseignants qui m'ont enseigné durant toute ma formation

Doumane samia



Sommaire

Sommaire	
Abréviation	i
Liste des tableaux	ii
Liste des figures.....	iii
Introduction générale.....	
Chapitre I: Généralités sur le radon	
I.1.Généralités sur le radon.....	2
I. 1. 1. Historique	2
I. 1 .2. Caractéristiques physico-chimiques et radiologiques du radon.....	2
I. 1 .2. 1. Caractéristiques physico-chimiques.....	2
I. 1 .2. 2. Caractéristiques radiologiques.....	3
I. 1 .3. Sources et descendants du radon.....	4
I.1. 3. 1. Sources du Radon.....	4
a- Le sol.....	5
b- Les matériaux de construction.....	5
c- Le gaz naturel.....	5
d- L'eau.....	5
e- L'air extérieur.....	5
I.1. 3. 2. Descendants du radon.....	6
I .1. 4. Désintégration du ^{222}Rn	7
I. 1. 5. Origine du radon dans les bâtiments.....	9
I. 1. 5. 1. Voies d'entrée du radon dans les bâtiments.....	9
I. 1 .6. Exhalation du radon : émanation et transport dans l'environnement.....	10
I. 1. 6. 1. Emanation.....	11
I.1.6.1.1. Recul direct.....	13
I.1.6.1.2. Diffusion.....	14
I.1.6.1.3. Dissolution.....	14
I.1.6.1.4. Recul indirect.....	14
I.1.6.1.5. Paramètres influençant l'émanation.....	14
I.1.6.2.Transport.....	14
I.1.6.2.1.Transport par diffusion.....	14

Sommaire

I.1.6.2.2. Transport par convection ou advection.....	15
I.1.6.2.3. Transport par l'eau.....	15
Chapitre II : Impact de radon sur la santé et principe de mesure	
II. Impact du radon sur la santé et principe de mesure.....	16
II. 1. Impact du radon sur la santé.....	16
II. 1. 1. Le cancer du poumon.....	16
II. 1. 2. La leucémie.....	19
II. 1. 3. Le cancer d'estomac.....	19
II. 2. Mode d'exposition.....	19
II. 3. Principe de mesure du radon.....	20
II. 3.1. Les unités de mesure.....	20
II. 3. 2. Grandeurs physiques mises en jeu.....	20
II. 3. 2. 1. L'activité volumique du radon.....	20
II. 3. 2. 2. L'énergie alpha potentielle des descendants a vie courte du radon 222.....	20
II. 3. 2. 3. L'énergie alpha potentielle volumique.....	21
II. 3. 2. 4. Le facteur d'équilibre	21
II. 3. 3. Les niveaux de références.....	21
II. 3. 4. Mesurages.....	22
II. 3. 5. Communication des résultats.....	22
II. 3. 6. Zonage.....	22
II. 3. 7. Techniques de mesure du radon.....	22
II. 3. 7.1. Mesure ponctuelle.....	23
II. 3. 7.1. 1. Technique des fioles scintillante.....	24
II. 3. 7.1. 2. Technique de comptage avec un liquide scintillant.....	25
II. 3. 7. 2. Mesure en continu.....	25
II. 3. 7. 2. 1. Chambre d'ionisation.....	25
II. 3. 7. 2. 2. Compteur proportionnel.....	26
II. 3. 7. 3. Mesure intégrée.....	26
II. 3. 7. 3. 1. Spectrométrie gamma.....	26
II. 3. 7. 3. 2. Spectrométrie alpha.....	27
II. 3. 7. 3. 3. Comptage combiné alpha-bêta.....	27
II. 3. 7. 3. 4. Détecteur thermo-luminescent.....	27

Sommaire

II. 3. 7. 3. 5. Détecteurs Solide de Traces Nucléaires (D.S.T.N).....	28
Chapitre III : Evaluation du risque du radon et techniques de réduction	
III. 1. L'évaluation du risque du radon.....	30
III. 1. 1. L'évaluation dans les bâtiments.....	30
III. 1. 2. l'évaluation individuelle des travailleurs.....	31
III. 1. 2. 2. Conséquence de la zone radon.....	31
III. 2. Les techniques de réduction du radon.....	33
III. 2. 1. Les techniques de réduction passives (sans ventilateur).....	33
III. 2. 1. 1.Etanchéification.....	33
III. 2. 1. 2.Aération naturelle.....	34
III. 2. 2. Les techniques de réduction actives (avec ventilateur).....	35
III. 2. 2. 1.Ventillation créant une mise en surpression de la cellule habitée.....	35
III. 2. 2. 2.Ventillation créant une dépression sous la cellule habitée.....	37
Conclusion générale.....	39
Références Bibliographiques.....	

Abréviation

Abréviation

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

C.I.R.C : Centre international de recherche sur le cancer

D.S.T.N : Détecteurs Solides de Traces Nucléaires

IPSN : International conférence on information

BEIR VI : Biological Effects of Ionizing *Radiations VI*

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

CIPR : commission internationale de protection radiologique

Bq : becquerel

Sv : sievert

EAPv : Energie alpha potentielle volumique

UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations)

TEL : Transfert d'énergie linéique

MeV : Méga électron volt

ERP : Etablissements recevant du public

CHSCT : Le comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail

CT : Computed tomography scan

PCR : compétente en radioprotection

OCR : organisme compétent en radioprotection

VLEP : valeurs limites d'exposition professionnelle

SIR : suivi individuel renforcé

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	Propriétés physiques du Rn. (rapport NCRP n° 97, 1988).	03
Tableau 2	Propriétés nucléaires des trois principaux isotopes du radon.	04
Tableau 3	Principales sources de radon dans l'atmosphère et production Annuelle	06
Tableau 4	Coefficients d'émanation de différents matériaux (Pellegrini, 1997)	12
Tableau 5	Coefficient de diffusion du Rn dans différents milieux.	15
Tableau 6	Risque relatif de cancer du poumon en fonction de la concentration en radon (Bq/m ³) dans les habitations au cours des 5-34 Dernières années	18

Liste des Figures

Figures	Titre	Pages
Figure 1	Mécanisme de décroissance du radon et descendants.	07
Figure 2	Familles radioactives naturelles de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232.	08
Figure 3	Voies d'entrées du radon dans les habitations.	10
Figure 4	formation du radon et sources et voies d'entrée du radon dans les habitations (d'après Etude et traitement des situations impliquant du radon. M. C .Robé. Juin 2003)	11
Figure 5	Mécanismes élémentaires contribuant à l'émanation du radon : (1) recul direct, (2) diffusion, (3) dissolution et (4) cas particulier du recul indirect.	13
Figure 6	Sources d'exposition aux rayonnements ionisant de la population française (moyenne annuelle) Source IRSN (2011).	16
Figure 7	Influence du tabagisme (Extrait du BEH n°18-19).	18
Figure 8	Exemple de différents types de mesure Étude et traitement des situations	23

Liste des Figures

	impliquant du radon par Marie-Christine Robé,	
Figure 9	Schéma descriptif d'une fiole scintillante.	24
Figure 10	Schéma de principe d'une chambre d'ionisation.	26
Figure 11	Traces de particules α révélées dans les DSTN LR115	29
Figure 12	Traces de particules α révélées dans les DSTN CR39.	29
Figure 13	Techniques passives de réduction du radon	34
Figure 14	Ventilation créant une surpression de la cellule habitée par rapport au sol, (d'après « Etude de traitement des situations impliquant du radon ».M.C Robé. Contrôle 2003)	36
Figure 15	Ventilation créant une dépression sous la cellule habitée (d'après « Etude de traitement des situations impliquant du radon ».M.C Robé. Contrôle	37

Introduction générale

Introduction générale

Le radon est un gaz rare (noble) radioactif naturel, qui provient de la désintégration radioactive naturelle de l'uranium et de radium, présents dans la croûte terrestre en particulier dans les roches granitiques et volcaniques, Lorsque le radon présent dans le sol est libéré dans l'atmosphère, il se mélange à l'air avec une concentration trop faible pour être préoccupant. En revanche, lorsque le radon s'infiltré dans un espace clos tel que les habitations, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations susceptibles de mettre en danger pour la santé [1] En se désintégrant, le radon forme des particules radioactives qui peuvent se loger dans le tissu des poumons lorsque vous respirez.

Les particules du radon émettent alors de l'énergie qui peut endommager les cellules de vos poumons, lorsque les cellules des poumons endommagées, il peut en résulter un cancer, ce ne sont pas toutes les personnes qui exposées au radon qui développeront un cancer du poumon et il peut s'écouler des années et des années entre une exposition et le début de la maladie [2].

Le radon est reconnu par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme substance cancérigène depuis 1988. Et classé par le Centre international de recherche sur le cancer (C.I.R.C) comme cancérigène certain pour le poumon depuis 1987. De nombreuses études épidémiologiques confirment l'existence de ce risque chez les mineurs de fond mais aussi, ces dernier années, dans la population générales, D'après les évaluations conduites en France, le radon serait la seconde cause de cancer du poumon, après le tabac et devant l'amiante : sur les 25 000 décès constatés chaque année, 1 200 à 3 000 lui attribuables [3].

La publication récente d'étude épidémiologique est démontré l'existence d'un risque sanitaire suite à l'exposition au radon dans les habitations.

La concentration du radon dans les habitations se mesure en Bq/m³ (becquerel1 par mètre cube).en utilisant les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (D.S.T.N).

Ce rapport se divise en trois principaux chapitres. D'abord, le premier chapitre présent la généralité sur le radon. Ensuite le second chapitre présent l'impact du radon sur la santé et quelques techniques de mesure. Enfin, le dernier chapitre sera consacré à l'évaluation du risque du radon et techniques de réduction.

Chapitre I

Généralités sur le radon

I.1. Généralités sur le radon

I.1.1. Historique

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 (radon 220). 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 (radon 222). En 1902, F. Giesel découvre *l'action* (radon219) 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 [4].

I.1.2. Caractéristiques physico-chimiques et radiologiques du radon

I.1.2.1. Caractéristiques physico-chimiques

Le radon fait partie de la classification chimique 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, il est pratiquement inerte chimiquement, soluble dans l'eau et plus encore dans les solvants et composés organiques (exemples : toluène, chloroforme).

Le radon est le gaz le plus lourd que l'on connaisse (densité $9,72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à 273 K, soit 8 fois plus que l'air). Il se liquéfie à -68°C et se solidifie à -71°C . Son coefficient de diffusion est moins important dans l'eau que dans l'air, soit à 18°C $1,15\cdot 10^{-9} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'eau et $1,02\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'air. Il s'adsorbe facilement sur les solides : charbon actif, silicagel, paraffine, etc... Cette propriété est d'ailleurs mise à profit dans certaines méthodes de dosage [5].

Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Radon	
Numéro atomique (Z)	86
Gamme isotopique	200-226
Potentiel d'ionisation (eV)	10,7
Densité à 0 °C et 1 atm	9,73 g.l ⁻¹
Température de fusion (°C)	-71
Point d'ébullition (°C, à 1 atm)	-62
Densité (kg.m ⁻³) :	
- phase liquide au point d'ébullition	4400
-gaz à 0°C et 760 mm Hg	9,73
Coefficient de diffusion dans l'air	0,1 cm ² .s ⁻¹
Viscosité à 1 atm et 20 °C	229 micropoise
Pression critique	62 atm
Température critique	105 °C
Solubilité (cm ³ .l ⁻¹) dans l'eau à une pression	
Partielle de 1 atm et une température de 0 °C.	510

Tableau 1. Propriétés physiques du Rn. (rapport NCRP n° 97, 1988).

I.1.2.2. Caractéristiques radiologiques

Le radon a trois principaux isotopes qui appartiennent chacun à une famille radioactive naturelle dans laquelle certains isotopes ont disparu à cause de leurs périodes relativement courtes, La découverte des trois isotopes du radon remonte au début du siècle suite à celle du radium par Pierre et Marie Curie en 1898, On distingue l'isotope [1] :

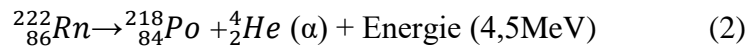
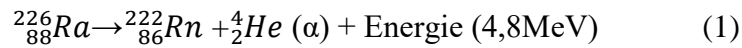
■ Le radon (²¹⁹Rn), autrefois appelé «actinon», appartient à la famille de l'uranium ²³⁵U dont l'isotope stable est le plomb²⁰⁷Pb. La faible concentration de ²³⁵U et la courte période de ²¹⁹Rn qui est de 4 secondes, rend la mesure de cet isotope difficile car il disparaît aussitôt qu'il est produit.

■ Le radon (²²⁰Rn), autrefois appelé «thoron», appartient à la famille du thorium ²³²Th dont l'isotope stable est le plomb ²⁰⁸Pb. Son flux dans le sol de 1,5 Bq m⁻².s⁻¹ est le plus important

par rapport aux autres isotopes et cela est dû à l'abondance de ^{232}Th dans la croûte terrestre, La courte période de ^{220}Rn qui est de 55,6 secondes rend délicate sa mesure.

■ Radon (^{222}Rn), appartient à la famille de l'uranium ^{238}U dont l'isotope stable est le plomb ^{206}Pb . Son flux de $17 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ est 100 fois moins que celui de ^{220}Rn . Sa période de 3,82 jours relativement long par rapport aux autres isotopes permet une large distribution dans l'atmosphère. Pour cela, c'est l'isotope ^{222}Rn et ses descendants qui seront pris en compte dans notre travail.

Il est important de mentionner que le paramètre physique qui différencie ces isotopes est leur période radioactive $T_{1/2}$. La désintégration de ces isotopes se fait par l'émission d'une particule alpha pour donner un isotope instable du polonium [6].



Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Précurseur de La famille Radioactive	Isotope du radon	Nom	Mode et énergie de désintégration (MeV)	Période radioactive
^{235}U	^{219}Rn	actinon	α (6,8)	3,96 s
^{232}Th	^{220}Rn	thoron	α (6,3)	55,6 s
^{238}U	^{222}Rn	radon	α (5,5)	3,82 j

Tableau 2. Propriétés nucléaires des trois principaux isotopes du radon.

I.1.3. Sources et descendants du radon

I.1.3.1. Sources du Radon

La concentration de ^{222}Rn dans un endroit donné dépend de plusieurs paramètres, en particulier de la concentration en ^{226}Ra ; Il peut donc provenir de plusieurs origines, du sol, des matériaux de construction, de l'eau ou du gaz naturel [7].

a- Le sol

Il constitue la source principale du ^{222}Rn puisque ce dernier est produit à partir de ^{238}U contenu dans les sols ; les sols granitiques libèrent plus de radon que les terrains sédimentaires en raison de leur plus grande concentration de ^{238}U donc du ^{226}Ra .

b- Les matériaux de construction

Les matériaux généralement utilisés dans les constructions sont les briques, les carreaux, le béton, le plâtre et les matériaux isolants comme le verre et le bois. Ces éléments renferment plusieurs radionucléides notamment du ^{226}Ra qui produisent du ^{222}Rn en se désintégrant ; la teneur de ces matériaux est étroitement liée à celle des constituants de base qui ont servi à leur fabrication ; il y'a donc d'importantes variations suivant leur régions d'origines.

Leur contribution à l'excès du ^{222}Rn dans les bâtiments est estimée entre 10 et 20 Bq/m³, mais peut atteindre exceptionnellement des taux extrêmes jusqu'à 1000 Bq/m³ [7].

c- Le gaz naturel

Les combustibles naturels provenant du sol tels que le gaz naturel et le charbon peuvent contenir des quantités appréciables de radon, mais en général, leur contribution dans la concentration du radon dans les habitations est faible [7].

d- L'eau

La solubilité du ^{222}Rn dans l'eau est plus importante que celle des autres gaz inertes d'où sa présence dans les eaux naturelles de surfaces et souterraines, mais à des niveaux d'activité volumique variables [7].

e- L'air extérieur

La diffusion atmosphérique conduit en général à une dilution rapide du radon émanant du sol. Cependant, dans certains cas (vallée encaissée, phénomènes d'inversion de température conduisant à des mouvements d'air faible, exutoires de mines), la concentration en radon de l'air extérieur peut être significative. Il est donc important de garder en mémoire ce terme source qui peut représenter un pourcentage non négligeable de la concentration moyenne en radon dans l'habitat [8].

La concentration varie fortement d'une région à l'autre, en fonction de la nature géologique du sous-sol. Les concentrations de radon sont ainsi plus élevées dans les régions à sous-sols granitiques et volcaniques : Limousin, Auvergne, Bretagne, Corse, Vosges. La concentration varie également d'une maison à l'autre dans une même zone géologique, en fonction des caractéristiques de construction et d'usage [9].

Sources	Production de radon (Bq.an ⁻¹)
Sol	9.1019
Océan	9.1017
Habitatio ns	3.1016
Gaz naturel	3.1014
Charbon	2.1013

Tableau 3 : Principales sources de radon dans l'atmosphère et production annuelle (Gue90).

I.1.3.2. Descendants du radon

Le radon et ses principaux descendants à l'équilibre sont des radionucléides qui se désintègrent par transitions alpha ou bêta [10], Le risque sanitaire du radon n'est pas lié au gaz lui-même, mais à ses produits de filiation. Fixés ou non sur les aérosols atmosphériques, les descendants du radon peuvent alors être inhalés et se déposer dans l'arbre broncho-pulmonaire, plus ou moins profondément, selon leur taille [11], le radon possède un cortège de descendants à vie plus ou moins longue [12] :

_Le ²¹⁸Po et le ²¹⁴Po, émetteurs alpha comme le radon, mais non gazeux à température ambiante, se désintègrent peu de temps après lui. Ils peuvent donc être utilisés pour mesurer indirectement l'activité de radon.

_Le bismuth-214, qui suit aussi de près le radon-222, est un émetteur beta-gamma souvent utilisé dans la prospection aérienne de l'uranium.

_le plomb-210, le bismuth-210 (émetteurs beta et gamma) et le polonium-210 (émetteur alpha) qui succèdent aux descendants dits "a vie courte", possèdent une demi-vie beaucoup plus longue (22,3 ans pour le 210Pb) et se fixent à l'aérosol atmosphérique. Ils permettent donc d'étudier des phénomènes caractérisés par des échelles de temps plus longues, et sont utilisés, entre autres, pour étudier le cycle des aérosols.

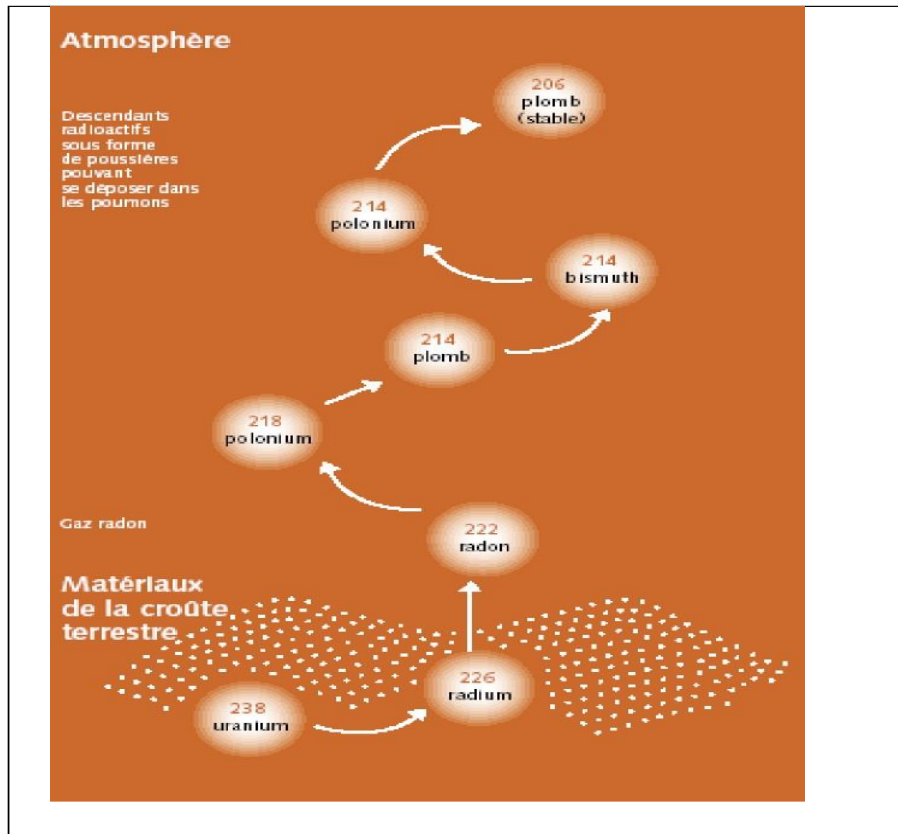


Figure 1. Mécanisme de décroissance du radon et descendants.

I.1.4. Désintégration du ^{222}Rn

La désintégration d'un atome radioactif comme le ^{222}Rn , causée par son instabilité, se manifeste par sa transformation spontanée en un autre atome appelé « produit de désintégration », « produit de filiation » ou « descendant ». Cette transformation est systématiquement accompagnée de l'émission de rayonnements ionisants. Lorsque le descendant est lui-même radioactif, il se désintègre également en un autre atome et ainsi de suite jusqu'à parvenir à un atome stable non radioactif, en l'occurrence un isotope du plomb. On définit ainsi une filiation radioactive comme la succession de réactions de désintégration conduisant à la stabilisation d'un atome instable.

Trois types de rayonnements ionisants sont rencontrés dans le contexte d'une désintégration radioactive :

-Le rayonnement alpha (α) se caractérise par l'émission d'un noyau d'hélium.

Cette particule alpha, assez lourde, interagit fortement avec la matière qu'elle traverse ne pouvant de ce fait parcourir que de courtes distances. Une feuille de papier suffit ainsi à l'arrêter, c'est-à-dire à absorber la totalité de son énergie ;

- Le rayonnement bêta (b) se caractérise par l'émission d'un électron ou un positron. Cette particule bêta est légère et possède un pouvoir de pénétration dans la matière plus important qu'une particule alpha : une feuille d'aluminium permet cependant de l'arrêter ;
- Le rayonnement gamma (g) se caractérise par l'émission d'un photon très énergétique. Ce rayon gamma possède un grand pouvoir de pénétration dans la matière, que seules de grandes épaisseurs de matériaux denses (comme le plomb ou le béton) peuvent arrêter [8].

En résumé, Il existe trois isotopes naturels du radon :

- Le ^{222}Rn , descendant du ^{226}Ra (chaîne de l'uranium 238), de période radioactive de 3.82 jours (représenté dans la figure ci-dessous)
- Le ^{220}Rn (thoron), descendant du ^{224}Ra (chaîne du thorium 232), de période radioactive de 55.6 s.
- Le ^{219}Rn (actinon), descendant du ^{223}Ra (chaîne de l'uranium 235) de période radioactive de 3.9s.

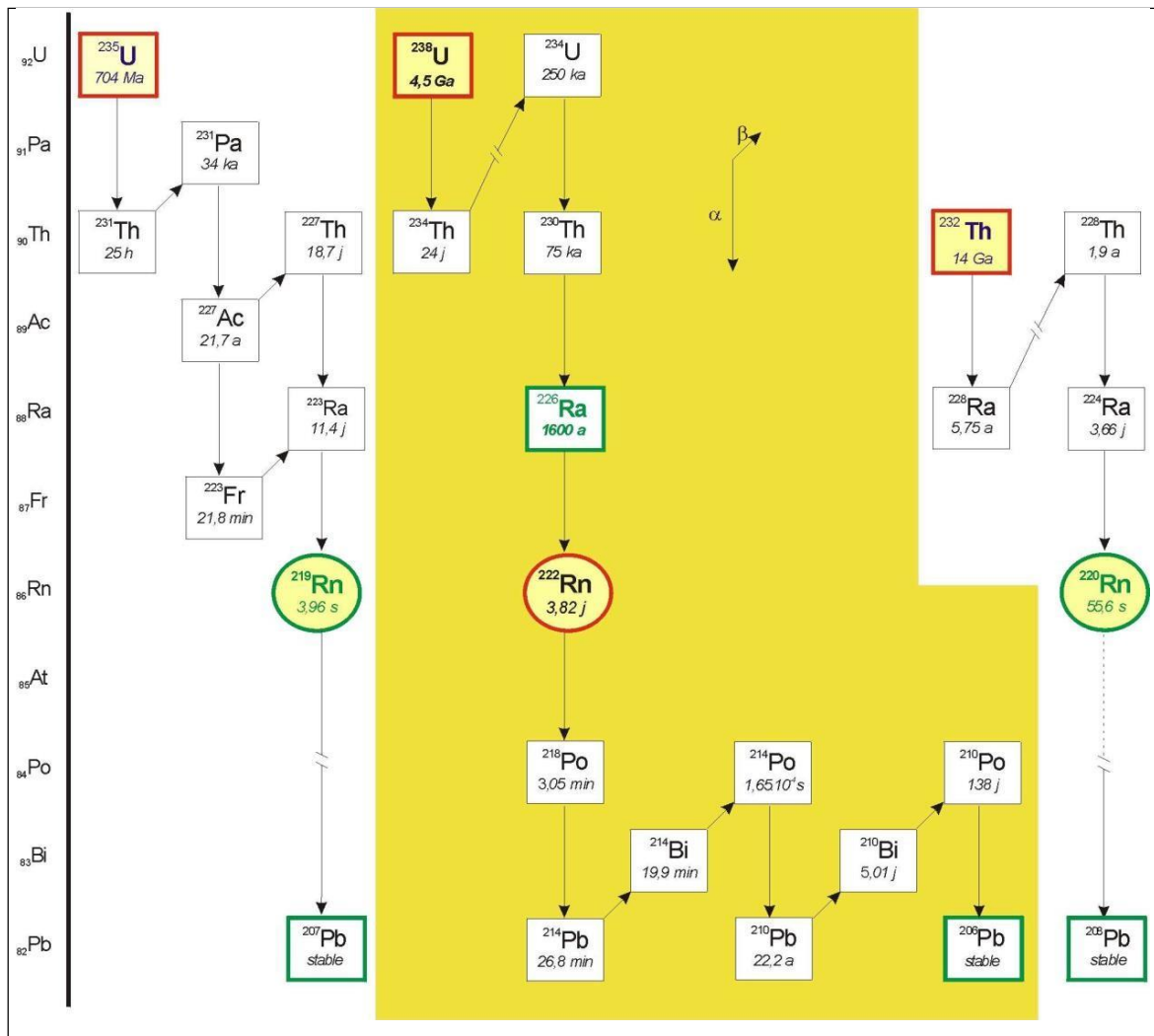


Figure 2. Familles radioactives naturelles de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232.

I.1.5. Origine du radon dans les bâtiments

Le radon présente des concentrations élevées dans les bâtiments en raison de plus faibles taux de renouvellements d'air présent dans les habitations. Le radon s'accumule dans l'air extérieur, la ventilation étant faible.

Les concentrations de radon à l'intérieur d'un bâtiment varient également en fonction :

- des propriétés géologiques et pédologiques locales ;
- des caractéristiques architecturales du bâtiment (propices ou non aux infiltrations et au confinement) ;
- du mode de vie de ses occupants : la concentration varie tout au long de la journée, en fonction notamment de l'ouverture des portes et des fenêtres ainsi qu'au cours de l'année ;
- des conditions météorologiques (températures extérieures, vent, précipitations, pressions) qui influent également sur la ventilation. Les concentrations sont plus élevées en hiver qu'en été [13].

I.1.5.1. Voies d'entrée du radon dans les bâtiments

Le radon pénètre dans un bâtiment par certains endroits préférentiels comme les fissures dans la dalle de fondation, les passages de canalisation ou encore le sol en terre battue. L'entrée du radon se fait soit par diffusion, en fonction de la différence de concentration en radon entre le sol et le bâtiment, soit par les phénomènes de convection induits par une différence de pression existant entre l'intérieur de la maison et le sol ; il existe en effet une légère dépression dans le bâtiment par rapport au sol sous-jacent responsable d'un mouvement d'air vers l'habitation.

En définitive, la présence de radon en grande quantité dans certains bâtiments s'explique par l'entrée directe de ce gaz en provenance du sol [13].

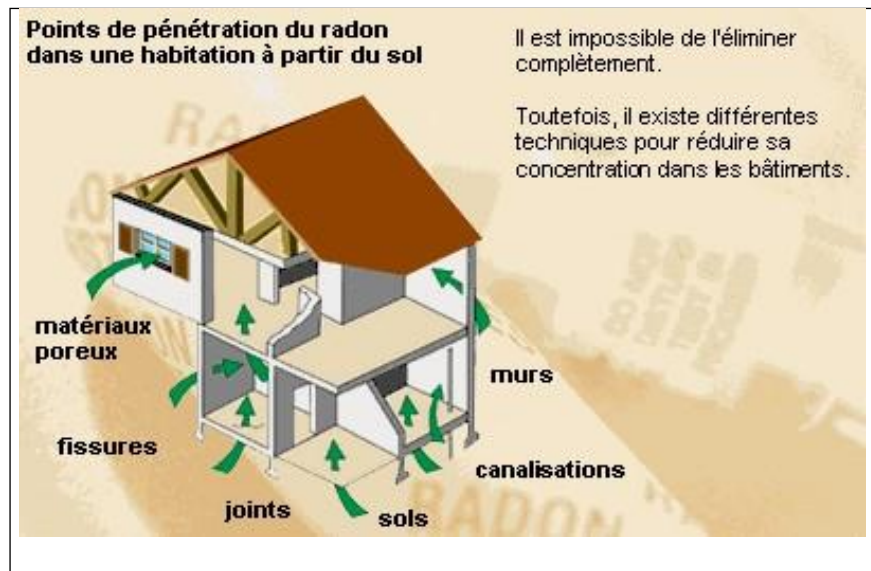


Figure 3. Voies d'entrées du radon dans les habitations.

I.1.6. Exhalation du radon : émanation et transport dans l'environnement.

Avant qu'un atome de radon puisse migrer vers l'atmosphère, il doit d'abord quitter le réseau cristallin où il a été formé. Les processus qui conduisent à l'exhalation, c'est-à-dire à l'émission du radon à la surface du milieu étudié, se divisent en deux étapes majeures : La première est la phase de production du radon dans les pores du matériau. C'est l'émanation. La seconde correspond à son transport dans le milieu :

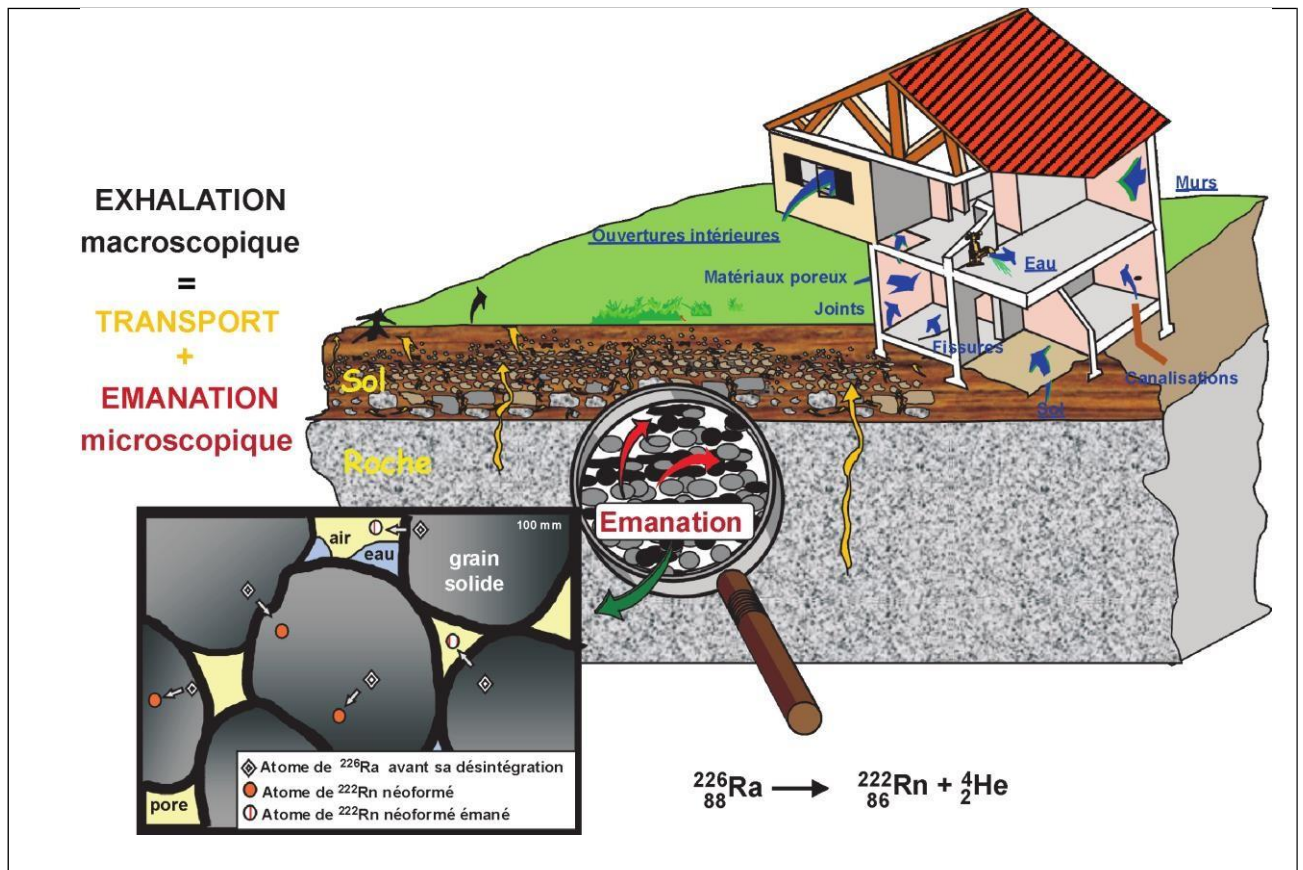


Figure 4. formation du radon et sources et voies d'entrée du radon dans les habitations (d'après Etude et traitement des situations impliquant du radon. M. C. Robé. Juin 2003)

I.1.6.1. Emanation

L'émanation du radon est le mécanisme par lequel un atome de radon est libéré du grain solide et atteint l'espace poral. Considérons, en effet, une roche ou un sol dont les grains minéraux contiennent du radium [1].

Le facteur d'émanation du matériau permet de quantifier l'émanation du radon. Il est défini comme le rapport du nombre d'atomes de radon parvenant dans les pores par unité de volume et de temps, sur le nombre total d'atomes de radon formés par unité de volume et de temps. Ce facteur est, par définition, compris entre 0 et 1, Il varie en fonction de la composition de la phase solide, de la répartition des atomes de radium dans le grain, de la taille des grains, de la taille des pores et de leur teneur en eau, En général le facteur d'émanation du radon augmente avec la teneur en eau du milieu. En effet, la distance de recul de l'atome de radon est bien moindre dans l'eau que dans l'air [14] : le Tableau 4 indique des ordres de grandeur du facteur d'émanation pour différents types de matériaux.

	Facteur d'émanation			
	min	max	moy	
Sols	0,01	0,5	0,1	synthèse bibliographique
	0,05	0,32	0,2	sols désagrégés saturés ($\phi < 2$ mm)
Roches et minéraux	< 0,01	0,40	0,08	roches concassées-synthèse bibliographique
Charbon	< 0,01	0,4		0-40 % de teneur en eau ($\phi < 1$ mm)
Minerais d'uranium	0,02	0,55		
	0,02	0,26		concassés secs et saturé
	0,03	0,18		minerais concassés ($\phi < 400\mu\text{m}$)
Résidus de traitement de minerais d'uranium	0,07	0,31		secs et saturés ($\phi_{50\%} < 75 \mu\text{m}$)
	0,09	0,27		
	0,10	0,12		secs
Matériaux de construction	< 0,01	0,3	0,05	synthèse bibliographique
	0,02	0,1	0,04	briques d'argile
	0,1	0,4	0,15	béton
	0,02	0,03		ciment

Tableau 4. Coefficients d'émanation de différents matériaux (Pellegrini, 1997)

L'émanation d'atomes de radon à partir de matériaux solides est un phénomène qui peut s'expliquer par la contribution de trois mécanismes élémentaires, schématisés par la Figure 1-3-2 : le recul direct, la diffusion et la dissolution de la phase solide, ainsi que le recul indirect, cas particulier des mécanismes précédents [15].

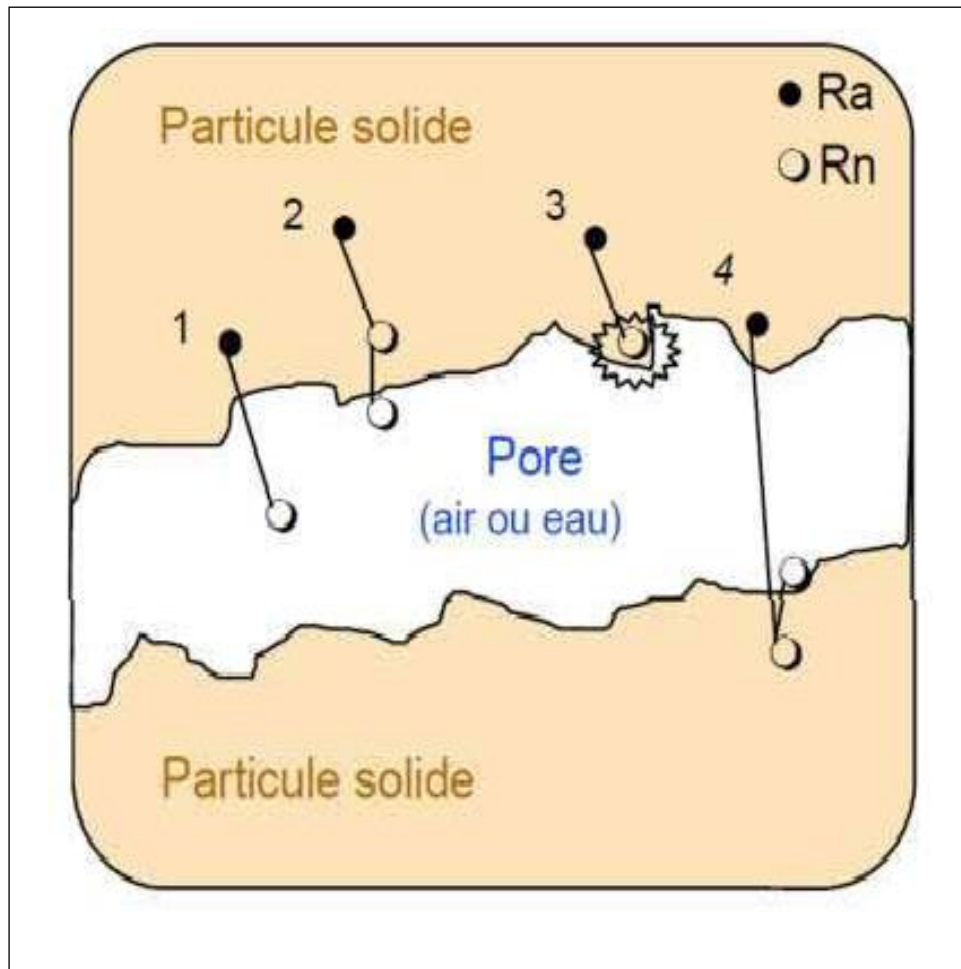


Figure 5. Mécanismes élémentaires contribuant à l'émanation du radon : (1) recul direct, (2) diffusion, (3) dissolution et (4) cas particulier du recul indirect.

I.1.6.1.1. Recul direct

Au moment de sa formation, l'atome de radon est doté d'une énergie cinétique de 86 keV (énergie de recul) qui lui permet de parcourir une distance finie (distance de recul) dépendant de la nature du milieu traversé (composition et densité), dans un minéral de densité moyenne ($2,7 \text{ g.cm}^{-3}$), la distance de recul est de l'ordre de 20 à 70 nm. L'atome de radon peut ainsi être éjecté à l'extérieur du grain. La distance de recul étant de probabilité égale dans toutes les directions, (Andrews and Wood, 1972) ont calculé que le pourcentage d'atomes de radon émanant d'un minéral d'un diamètre est de 49%. Il chute à 0,049% pour un minéral de 100 μm de diamètre. Quand la distance entre l'atome de radium parent et les pores devient trop importante, l'émanation par recul direct devient un mécanisme négligeable [16].

I.1.6.1.2. Diffusion

Un atome de radon resté « piégé » dans un grain peut ensuite rejoindre les pores de la roche par diffusion à travers la phase solide. Le coefficient de diffusion moyen dans un matériau cristallin à 20°C est de $10^{-24} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tanner, 1980) [16].

I.1.6.1.3. Dissolution

La dissolution des minéraux constitutifs d'une roche joue un rôle important dans la composition chimique des fluides des pores. En revanche, elle joue un rôle très négligeable dans l'émanation du radon, la période radioactive de ce radioélément étant beaucoup trop courte par rapport aux cinétiques des réactions de dissolution des minéraux. Il ne faut cependant pas négliger ce mécanisme qui participe à la déstabilisation des réseaux cristallins des minéraux et facilite ainsi la diffusion des atomes de radon dans le milieu solide [16].

I.1.6.1.4. Recul indirect

Un atome de radon extrait de la phase solide par recul direct peut s'insérer dans le grain opposé si son énergie résiduelle est suffisante. Par diffusion, cet atome peut ensuite revenir dans l'espace des pores [8].

I.1.6.1.5. Paramètres influençant l'émanation

Les mécanismes de l'émanation font intervenir certaines caractéristiques du matériau radifère, qui deviennent alors des paramètres : La nature du matériau, la teneur en eau, la localisation du radium, la granulométrie, la porosité, la surface spécifique et la température, sont ceux recensés dans la littérature. Bien que des liens existent entre ces paramètres, nous avons choisi de les présenter un à un par souci de clarté. Nous indiquerons pour chacun d'eux les éventuelles interactions avec d'autres paramètres [15].

I.1.6.2. Transport

I.1.6.2.1. Transport par diffusion

C'est un mécanisme lent qui intervient au sein des zones plus perméables que constituent les pores d'une roche ou d'un sol. Le radon migre sous l'effet d'un processus de diffusion moléculaire qui tend à homogénéiser spatialement les teneurs en radon [8].

Milieu	Coefficient de diffusion ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)
Air	0,1
Eau	10^{-5}
Milieu cristallin	10^{-20}
Granite	10^{-10} - 10^{-7}

Tableau 5. Coefficient de diffusion du Rn dans différents milieux.

I.1.6.2.2. Transport par convection ou advection

La convection et l'advection sont deux processus physiques actifs de transport de matière, dont l'énergie provient respectivement d'un gradient de température (convection) et d'un gradient de pression (advection). Le mouvement s'effectue des secteurs à températures (ou pressions) élevées vers des secteurs à températures (ou pressions) faibles. Les discontinuités (fissures, failles, fractures...) qui fragmentent à toutes les échelles la croûte terrestre constituent les lieux préférentiels dans lesquels interviennent ces processus de transport. Le radon a peu de mobilité propre (gaz dense, absence de réaction chimique, concentration infime...). Il est donc transporté, d'une part, par les autres gaz du sol et du sous-sol (gaz vecteurs) et, d'autre part, par l'eau du sol. Les vitesses de transport associées à ces processus sont d'un à plusieurs ordres de grandeur plus importants que celles induites par les mécanismes de diffusion : plusieurs dizaines de centimètres à plusieurs dizaines de mètres par heure. Ainsi, le radon atteignant la surface pourra provenir d'une zone située plus profondément. En fonction de l'importance des différents processus en jeu, le radon est ainsi présent en concentrations variables au sein des eaux souterraines [8].

I.1.6.2.3. Transport par l'eau

Le radon est présent dans pratiquement toutes les eaux naturelles de surface et souterraines, à des niveaux d'activité volumique qui s'échelonnent de quelques becquerels (eaux de surface) à plusieurs milliers de becquerels par litre (aquifère profond, puits ou forage, source thermale, etc.).

Il a deux origines :

_la première, minoritaire, est due à la décroissance radioactive du radium 226 dissous dans l'eau ;

_la seconde, majoritaire, provient de la dissolution du radon dans la roche encaissante ou dans la roche réservoir [8].

Chapitre II
Impact de radon sur la
Santé et principe de mesure

II. Impact du radon sur la santé et principe de mesure

II.1. Impact du radon sur la santé

Le radon est considéré comme un cancérigène pour l'humain. Il fait partie des classes « A » du United States Environmental Protection Agency et « 1 » du Centre international de recherche sur le cancer. En 1998, les membres du comité Biological Effects of Ionizing Radiations VI (BEIR VI) utilisaient les études épidémiologiques effectuées chez les travailleurs pour étayer des modèles d'analyse de risque applicables aux concentrations d'exposition retrouvées dans les résidences et accrédiétaient l'hypothèse que ces études semblaient supporter une légère augmentation du risque de cancer du poumon [17].

Le risque pour la santé lié au radon ne provient pas tant du gaz lui-même que de ses descendants solides, eux-mêmes radioactifs : polonium, plomb, bismuth. Ils émettent tous des rayonnements alpha. Inhalés avec le radon, ils se déposent le long des voies respiratoires et irradient les cellules les plus sensibles des bronches, ce qui peut entraîner le développement d'un cancer du poumon [9] donc le radon n'a pas d'impact direct ou immédiat sur la santé, ce sont ses descendants solides à courte période qui sont responsables des principaux risques sanitaires qui sont présentés ci-dessous.

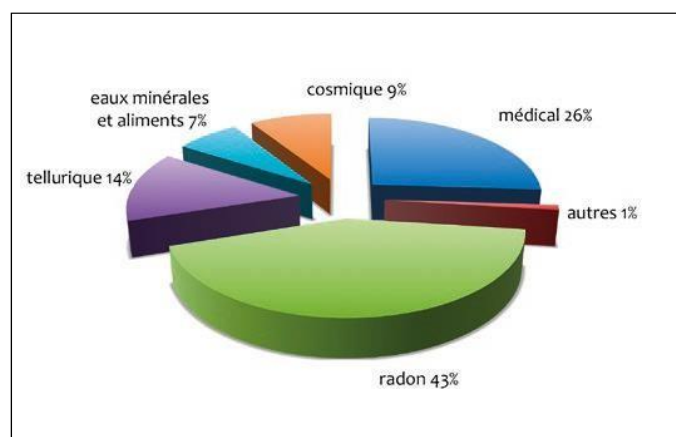


Figure 6. Sources d'exposition aux rayonnements ionisants de la population française (moyenne annuelle) Source IRSN (2011).

II.1.1. Le cancer du poumon

Le radon a été classé cancérigène pulmonaire certain pour l'homme par le CIRC en 1987 sur la base des résultats des études expérimentales sur l'animal et des études épidémiologiques en milieu professionnel (mineurs d'uranium) [1],

L'exposition à long terme au radon est la deuxième cause en importance du cancer du poumon après le tabagisme et la première chez les non-fumeurs, En se désintégrant le radon forme des particules radioactives qui peuvent se loger dans le tissu des poumons lorsque vous respirez, Les particules du radon émettent alors de l'énergie qui peut endommager les cellules de vos poumons, Lorsque les cellules des poumons sont endommagées, il peut en résulter un cancer. Ce ne sont pas toutes les personnes qui sont exposées au radon qui développeront un cancer du poumon et il peut s'écouler des années et des années entre une exposition et le début de la maladie, La majorité des décès liés au cancer du poumon sont causés par le tabagisme) [2].

Trois modèles sont utilisés par les scientifiques pour prévoir la relation entre la dose délivrée par une substance cancérigène et l'effet, c'est-à-dire le développement du cancer relatif à cette dose [1] :

- Le modèle de seuil qui suppose qu'il n'existe aucun effet à très faible dose. Mais lorsque la dose augmente, on atteint un seuil à partir duquel un effet apparaît.
- Le modèle linéaire qui suppose que la dose et l'effet varient linéairement.
- Le modèle quadratique qui suppose qu'aux faibles doses, l'effet diminue beaucoup plus vite que la dose. Dans ce modèle, l'effet augmente approximativement comme le carré de la dose.

Ces trois modèles supposent qu'il n'y a aucun effet à dose nulle, et indiquent le même effet sur la santé à forte dose parce qu'ils se basent sur toutes les données disponibles à partir des études faites sur les mineurs.

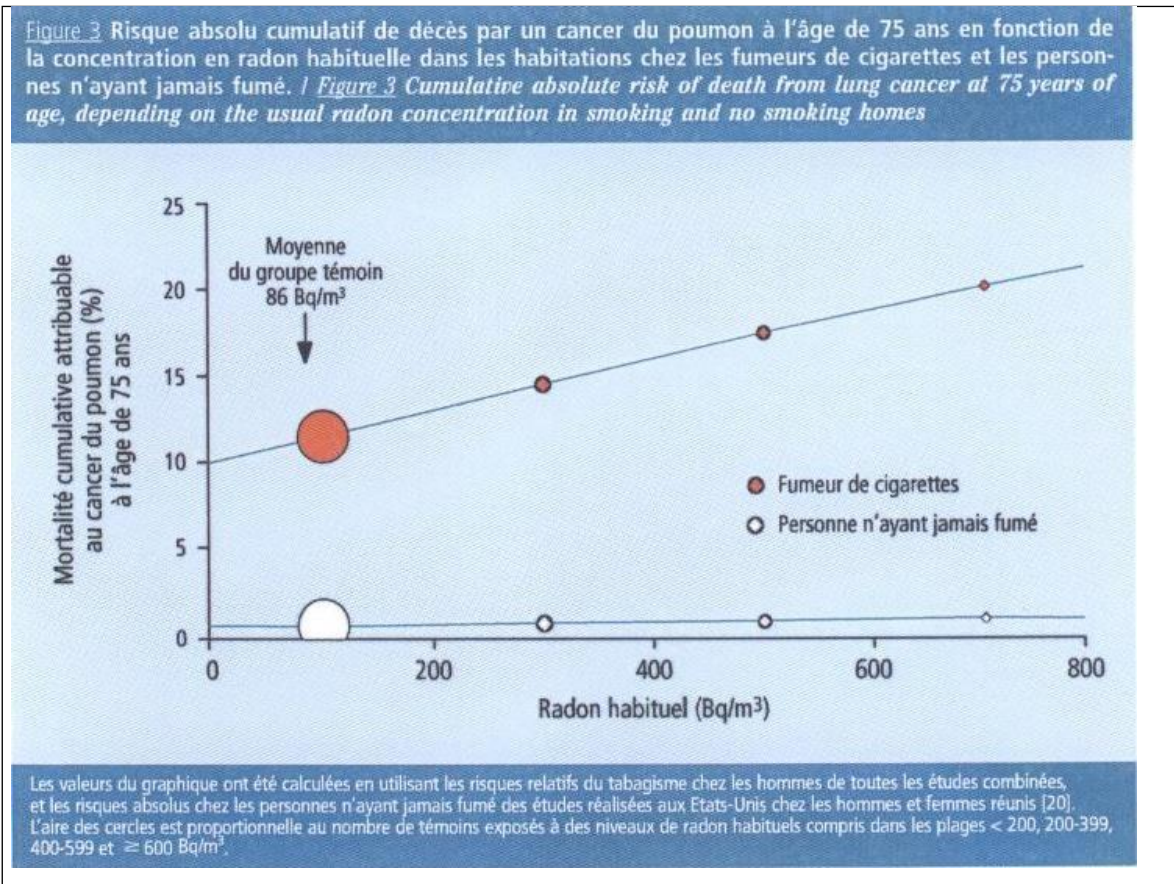


Figure 7. Influence du tabagisme (Extrait du BEH n°18-19).

Plage de la valeur mesurée	Moyenne (Bq/m ³)		N° de cancers du poimon Cas / témoins	Risque relatif (IC 95 %)
	Valeurs mesurées	Valeurs Habituelles estimées		
< 25	17	21	566/1474	1,00 (0,87 à 1,75)
25-49	39	42	1999/3905	1,06 (0,98 à 1,15)
50-99	71	69	2618/2247	1,03 (0,96 à 1,10)
100-199	136	119	1296/2247	1,20 (0,8 à 1,32)
200-399	273	236	434/936	1,18 (0,99 à 1,42)
400-799	542	433	169/498	1,43 (1,06 à 1,92)
> 800	1204	678	66/15	2,02 (1,24 à 3,31)
Total	104/97²	90/86²	7148/14208

Tableau 6. Risque relatif de cancer du poumon en fonction de la concentration en radon (Bq/m³) dans les habitations au cours des 5-34 Dernières années

II.1.2. La leucémie

Les études sur les mineurs d'uranium n'ont montré d'augmentation de risque en fonction de l'exposition cumulée au radon pour des cancers autres que le cancer du poumon. Depuis les années 1990, plusieurs auteurs ont estimé qu'une partie de l'irradiation due à l'inhalation de radon peut être délivrée au niveau de la moelle osseuse hématopoïétique. L'hypothèse a été émise que cette irradiation pourrait entraîner un risque accru de leucémie chez l'homme. Une telle association est supportée par les résultats de certaines études écologiques. Néanmoins, les études de cohortes sur les mineurs d'uranium ou les études cas-témoins qui ont été réalisées n'ont pas confirmé l'existence d'une relation entre l'exposition au radon et le risque de leucémie. Une revue critique de la littérature scientifique a été effectuée récemment par l'IRSN. Elle conclut que l'ensemble des résultats épidémiologiques actuellement disponibles ne fournit pas de support à l'hypothèse d'une relation causale entre le risque de leucémie et l'exposition au radon [18].

II.1.3. Le cancer d'estomac

Le radon peut être dissout dans l'eau. C'est en particulier le cas dans les eaux souterraines, lorsque celles-ci entrent en contact avec des roches riches en uranium. L'eau issue de réseaux d'adduction publics exploitant ces eaux souterraines peut ainsi, dans des situations particulières, présenter des concentrations de radon importantes, atteignant parfois jusqu'à plusieurs centaines, voire des milliers de Becquerels par litre.

En effet, après ingestion, le radon irradie la paroi de l'estomac. Suivant l'hypothèse faite sur sa période de rétention dans l'estomac, le radon ingéré est susceptible d'irradier aussi, dans une moindre mesure, les autres régions du tractus alimentaire. La dose reçue par l'estomac dépend de la répartition du radon par rapport aux cellules radiosensibles. Des études menées par la commission internationale de protection radiologique (CIPR) en 2006 ont montré que ces cellules radiosensibles sont situées à une profondeur de 60 à 100 μ m de la lumière de l'estomac, et la portée des particules alpha étant voisine de 50 μ m, ces cellules radiosensibles ne peuvent être irradiées que si le gaz diffuse au moins partiellement du contenu de l'estomac vers sa paroi. Les estimations dosimétriques suggèrent que l'estomac constitue le tissu le plus irradié à l'ingestion de radon via l'eau de boisson [19].

II.2. Mode d'exposition

Le radon peut entraîner un risque d'exposition interne, pouvant intervenir de 2 façons : **a-par l'inhalation du radon** lui-même qui contribue faiblement à la dose reçue (de l'ordre de 2 % à 5 %),

b-par l'inhalation de ses descendants solides à vie courte. Ceux-ci peuvent être libres ou fixés sur les molécules de vapeur d'eau ou de gaz présentes dans l'air, ou encore sur les aérosols atmosphériques (poussières en suspension). En effet, du fait de leur caractère solide, ces descendants, fixés ou non, peuvent être inhalés et se déposer dans les alvéoles broncho-pulmonaires. Les particules alpha qu'ils émettent vont irradier les cellules du poumon directement au contact.

L'exposition va donc être essentiellement due aux descendants solides à vie courte, qu'ils soient liés ou non aux poussières présentes dans l'air respiré.

D'autres facteurs jouent sur l'exposition, notamment :

- la **ventilation** : une ventilation importante va diminuer la formation des descendants solides,
- l'**activité physique** : l'augmentation du débit respiratoire va contribuer à accroître l'inhalation du radon et de ses descendants,
- la **taille des aérosols** présents dans l'air ambiant sur lesquels se fixent les descendants solides du radon : des poussières très fines vont pénétrer plus profondément dans l'arbre broncho-pulmonaire. À noter que les matériaux de construction peuvent aussi émettre du radon en fonction de leur nature (exemple : le granite) mais leur contribution à l'exposition reste très inférieure à celle due au sous-sol [20].

II.3.Principe de mesure du radon

II.3.1. Les unités de mesure

-Le **becquerel** (Bq) est une unité de mesure de la radioactivité qui correspond à une désintégration par seconde. 1 Bq de radon par m³ correspond à la désintégration d'un atome de radon par m³ et par seconde. C'est cette unité qui est utilisée pour le niveau de référence à partir duquel les entreprises doivent mettre en place des mesures de prévention.

-Le **sievert** (Sv) est l'unité de mesure des doses équivalente et efficace, qui permet d'évaluer l'impact du rayonnement sur la matière vivante. Les **valeurs limites d'exposition réglementaires** sont exprimées en sievert [20].

II.3.2. Grandeurs physiques mises en jeu

II.3.2.1. L'activité volumique du radon

L'activité volumique du radon est l'activité par unité de volume d'air. Elle s'exprime en becquerels par mètre cube (Bq.m⁻³) [8].

II.3.2.2. L'énergie alpha potentielle des descendants a vie courte du radon 222

Elle correspond à la somme des énergies des particules alpha émises lorsque tous les descendants à vie courte du radon 222 se sont désintégrés. Rappelons que pour une activité

d'un becquerel de radon 222 à l'équilibre avec ses descendants à vie courte, l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du ^{222}Rn est égale à $5,55 \cdot 10^{-9}$ J.

Elle est donnée par la relation :

$$EAP_{222} = 2,19 \cdot 10^{-12} (N^{218}\text{Po}) + 1,23 \cdot 10^{-12} (N^{214}\text{Pb} + N^{214}\text{Bi} + N^{214}\text{Po}) \quad (3)$$

Où :

EAP_{222} est l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du ^{222}Rn exprimée en joules

$N^{218}\text{Po}$ est le nombre d'atomes de ^{218}Po [8].

II.3.2.3. L'énergie alpha potentielle volumique

L'énergie alpha potentielle volumique (EAP_v) est l'énergie alpha potentielle par unité de volume d'air. Elle s'exprime généralement en joules par mètre cube ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$).

II.3.2.4. Le facteur d'équilibre

Pour un volume d'air contenant du radon, le facteur d'équilibre est défini comme étant le rapport entre l' EAP_v des descendants à vie courte du radon présents dans l'air et celle de ses descendants s'ils étaient à l'équilibre radioactif avec le radon.

En effet, les descendants à vie courte du ^{222}Rn présents dans une atmosphère sont très rarement à l'équilibre radioactif avec leur père et le facteur d'équilibre est alors utilisé pour quantifier cet état de « déséquilibre ». Le facteur d'équilibre est un paramètre sans dimension. Il est généralement compris entre 0 et 1. Dans les bâtiments, le facteur d'équilibre varie entre 0,1 et 0,9 avec une valeur moyenne égale à 0,4 (UNSCEAR, 2000). Il est donné par la relation suivante :

$$F = EAP_v / 5,55 \cdot 10^{-9} \times A_v \quad (4)$$

Où

F est le facteur d'équilibre (sans dimension) ;

EAP_v est l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon 222 exprimée en joules par mètre cube ;

A_v est l'activité volumique du radon 222, exprimée en becquerels par mètre cube [8].

II.3.3. Les niveaux de références

Les niveaux de références diffèrent d'un pays à l'autre. La France, n'a pas à ce jour pas défini de valeur de référence pour l'activité volumique du radon dans l'habitat privé. Cependant l'intégration de la mesure du radon dans le dossier sanitaire de l'habitat, exigé lors des transactions immobilières est actuellement à l'étude dans le cadre du Plan national Santé Environnement.

Il existe différentes recommandations au niveau européen et mondial :

Une recommandation européenne (document 390H0143) du 21 février 1990, relative à la protection de la population contre les dangers résultant de l'exposition au radon à l'intérieur des bâtiments, émet des préconisations :

Pour les bâtiments neufs : l'activité volumique du radon ne doit pas dépasser 200Bq/m³ ;

Pour les bâtiments anciens : l'activité volumique du radon ne doit pas dépasser 400Bq/m³.

L'OMS (organisation mondiale de la santé) a également émis ses préconisations et a appelé ses pays membres à établir ou renforcer leurs programmes pour contrôler la présence de radon dans les habitations. Un niveau de référence national de 100Bq/m³ a été choisi, si celui-ci n'est pas réalisable dans les conditions particulières du pays, la concentration de référence ne doit pas dépasser le 300Bq/m³ [21].

II.3.4. Mesurages

Les mesurages sont effectués si l'évaluation des risques conclut à un risque de dépassement du niveau de référence [20].

II.3.5. Communication des résultats

Si, après ces mesures, la concentration d'activité du radon dans l'air reste supérieure au niveau de référence, alors l'employeur doit communiquer les résultats à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

II.3.6. Zonage

L'employeur identifie alors les zones où l'exposition au radon peut dépasser 6 mSv/an en considérant la zone comme occupée en permanence. Cette zone est appelée « zone radon », elle doit être délimitée et son accès limité [20].

II.3.7. Techniques de mesure du radon

Nous avons défini le radon et le risque qu'il représente pour les populations. Nous allons présenter maintenant les techniques de mesures du radon les plus adéquates pour cette étude.

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

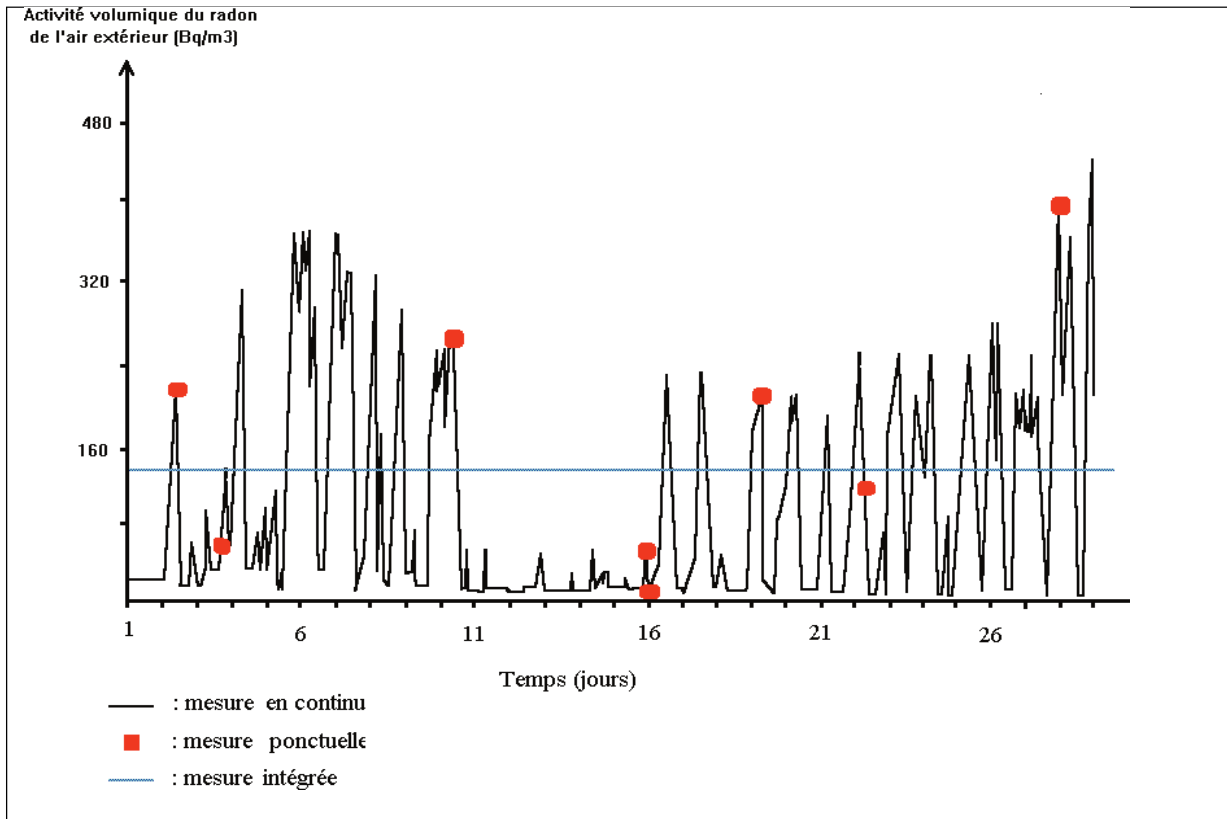


Figure 8. Exemple de différents types de mesure Étude et traitement des situations impliquant du radon par Marie-Christine Robé,

II.3.7.1. Mesure ponctuelle :

PRINCIPE

Les mesures ponctuelles, codifiées par la norme AFNOR NF M 60-769 (novembre 2000), consistent en un prélèvement effectué sur une courte durée (inférieure à une heure), en un point donné de l'espace, suivi d'une analyse (par exemple un comptage) réalisée simultanément ou après un délai déterminé.

Ces mesures ne sont représentatives que de l'instant même du prélèvement (de quelques secondes à quelques minutes). Elles permettent d'obtenir un ordre de grandeur de l'activité volumique du radon dans un milieu à caractériser (bâtiment, cavité, sol, ...).

APPLICATIONS

Dans le cadre de la gestion du risque radon dans les bâtiments, ce type de mesures est fréquemment utilisé lors de la phase des investigations complémentaires permettant :

- d'établir la cartographie des concentrations de radon dans un bâtiment ;
- de rechercher les sources et voies de transfert du radon [8].

II.3.7.1.1. Technique des fioles scintillante

Une mesure ponctuelle comprend un prélèvement effectué sur une courte période, de l'ordre de quelques minutes voire moins. L'analyse est effectuée soit en même temps soit en léger différé.

Parmi les différentes techniques ponctuelles qui existent, nous avons choisi d'utiliser la scintillation du sulfure de zinc activé à l'argent qui est l'une des plus anciennes techniques (Damon et Hyden, 1952 - Malvicini, 1954 - Lucas, 1957).

Le principe de la méthode est le suivant : le gaz à analyser est introduit à l'aide d'une seringue hypodermique dans une fiole cylindrique de volume donné dont la paroi intérieure est tapissée d'une couche de sulfure de zinc activé à l'argent.

Le parcours des particules alpha dans la matière étant très faible (quelques dizaines de micromètres), la particule cède toute son énergie en traversant le milieu scintillant. Cette énergie se retrouve sous la forme de photons lumineux qui peuvent être détectés à l'aide d'un photomultiplicateur et d'une chaîne de comptage. Le comptage des photons, après étalonnage de la réponse des fioles, permet d'accéder à l'activité volumique en radon 222 (Lucas, 1957). Afin d'avoir l'équilibre radioactif entre le radon et ses descendants (émetteurs alpha), on attend trois heures avant de placer la fiole sur le photomultiplicateur [5].

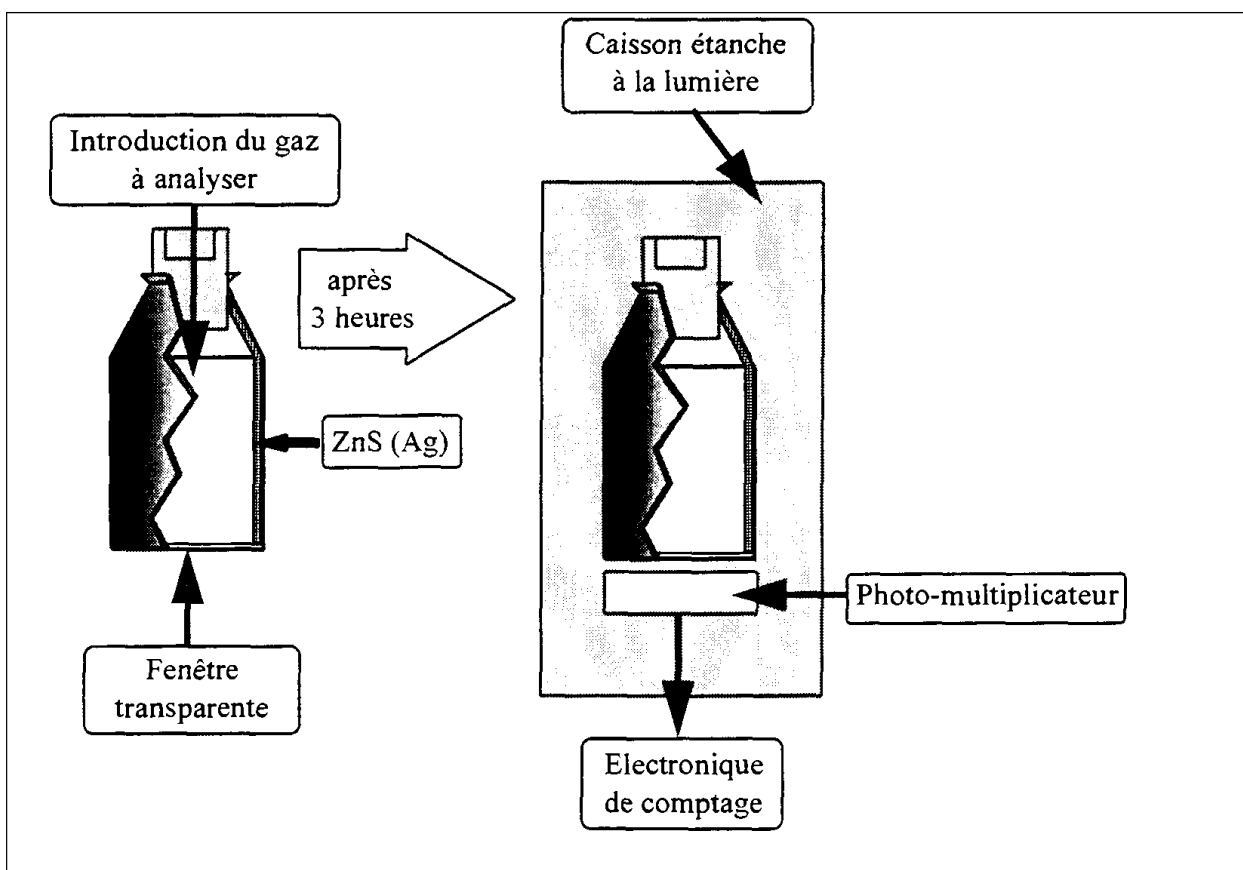


Figure 9. Schéma descriptif d'une fiole scintillante.

II.3.7.1.2. Technique de comptage avec un liquide scintillant

Cette fois un liquide scintillant est utilisé à la place du sulfure de zinc. Le ^{222}Rn se dissout dans un solvant organique contenu dans une enceinte où circule de l'air qui contient ^{222}Rn ; la solution solvant ^{222}Rn est introduite dans une fiole de comptage et mélangée avec un liquide scintillant. Chaque noyau de ^{222}Rn décroît au bout de quelques heures en quatre autres particules (2α et 2β), toutes ces particules seront détectées comme des événements qui donnent des larges signaux lumineux dans le phosphore [22].

II.3.7.2. Mesure en continu :

PRINCIPE

Elles consistent en un prélèvement effectué de façon continue (ou par pas d'intégration inférieur ou égal à une heure) et en une analyse réalisée simultanément ou en léger différé. Le principe de ces mesures est décrit dans la norme AFNOR NF M 60-767 d'août 1999.

APPLICATIONS

Ces mesures peuvent permettre d'observer des variations dans le temps, comme celles liées aux changements de pression atmosphérique ou de renouvellement d'air dans des locaux ou celles liées aux habitudes de vie. Pour ce faire, il est possible de procéder à des tests en relation avec différents paramètres : portes et fenêtres fermées, ventilation à l'arrêt puis en fonctionnement, aération importante, pièce habitée, ... [8].

II.3.7.2.1. Chambre d'ionisation

D'un volume connu, dotée d'un filtre en entrée, retenant les aérosols présents dans l'air ambiant. Le ^{222}Rn et ses descendants formés émettent des particules alpha qui ionisent l'air porteur. Le courant d'ionisation ainsi produit est proportionnel à l'activité volumique du radon. Cet appareil est capable de mesurer des concentrations comprises entre quelques Bq/m^3 et $10^6 \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Il permet également d'accéder à d'autres paramètres tels que la température, la pression atmosphérique et l'humidité relative. Des cycles de mesures rapprochés (10 min) permettent d'observer de faibles variations temporelles de concentration en radon [4].

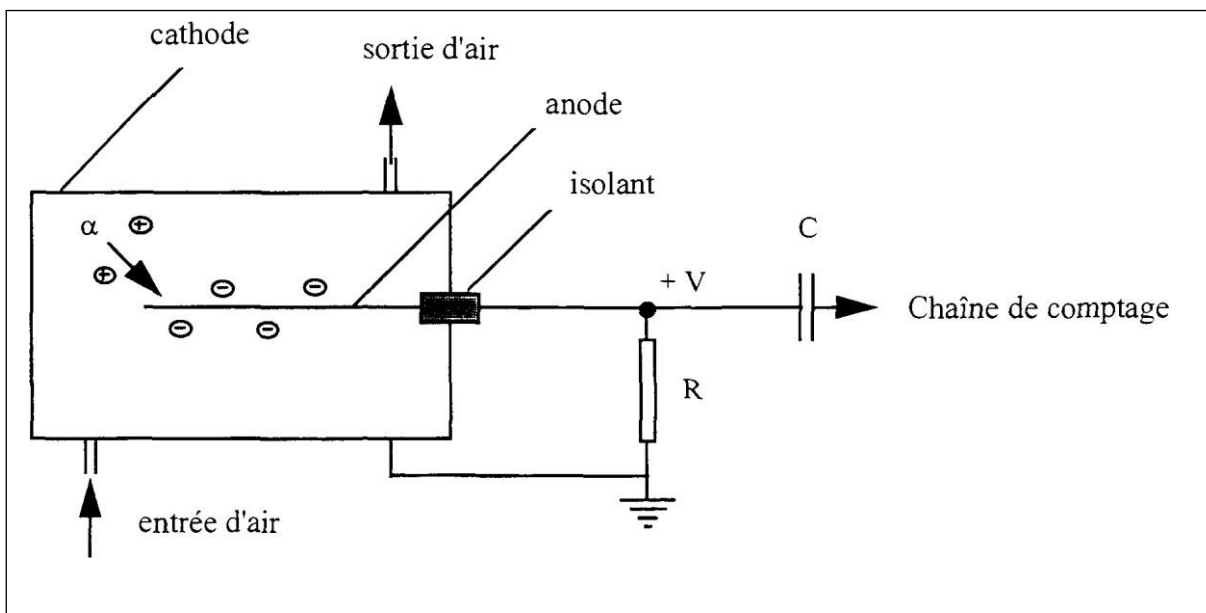


Figure 10. Schéma de principe d'une chambre d'ionisation.

II.3.7.2.2. Compteur proportionnel

Ce type de détecteur utilise le même principe de détection que la chambre d'ionisation, mais cette fois-ci la tension appliquée entre les deux électrodes est suffisamment élevée pour que les électrodes issues de l'ionisation des particules alpha créent des ionisations secondaires ; ce phénomène est appelé «avalanche de TOWSEND », le signal est donc amplifié [26].

II.3.7.3.3. Semi-conducteur

Pour la détection des particules alpha, le matériau semi-conducteur utilisé est le silicium qui est placé dans un volume de détection optimisé pour que le maximum de particules alpha atteigne le détecteur. La charge émise par leur ionisation est convertie en impulsions de tension proportionnelle à l'énergie alpha détectée. Les semi-conducteurs sont depuis longtemps utilisés pour des mesures spectrométriques de rayonnements alpha dans les laboratoires [22].

II.3.7.3. Mesure intégrée

PRINCIPE

Elles consistent en une accumulation au cours du temps sur un dispositif approprié de grandeurs physiques (nombre de traces nucléaires, nombre de charges électriques, etc.) liées à la désintégration du radon et/ou de ses descendants et en une analyse (par exemple, un comptage) réalisée simultanément ou après un délai déterminé. La norme NF M 60-766 (septembre 2004) décrit comment réaliser ces mesures dans l'environnement atmosphérique

avec un prélèvement passif sur une durée de quelques semaines à une année et comment réaliser une analyse en différé.

Ces mesures permettent de s'affranchir des variations temporelles de l'activité volumique du radon et d'obtenir à moindre coût une valeur moyenne de la concentration de radon dans une atmosphère donnée.

APPLICATIONS

Cette mesure, réalisée sur une durée d'au moins 2 mois (en période de chauffe du bâtiment), est utilisée pour le dépistage du radon dans les bâtiments (cf. norme AFNOR NF M 60-771, septembre 2003). Elle est requise par les textes réglementaires en vigueur pris en application du code de la santé publique, les méthodes utilisées sont [8] :

II.3.7.3.1. Spectrométrie gamma

La spectroscopie gamma est une des techniques de mesures utilisées en physique nucléaire pour quantifier un grand nombre de radionucléides via l'énergie de rayonnement gamma émis ; elle s'appuie notamment sur la physique des semi-conducteurs. Le rayonnement gamma est une radiation électromagnétique émise à la suite d'un rayonnement alpha ou bêta.

La détermination de l'activité volumique du ^{222}Rn dans l'eau est basée sur la mesure par spectrométrie gamma d'un échantillon conditionné dans un récipient approprié de géométrie et volume connu. L'activité volumique du ^{222}Rn est déterminée à partir de l'analyse des raies d'émission gamma émises par le ^{214}Bi et/ou le ^{214}Pb . Le comptage est effectué, sur une chaîne de spectrométrie gamma équipée d'un détecteur (de type NaI, Ge, etc.). La mesure est réalisée lorsque le ^{222}Rn est en équilibre radioactif avec ses descendants, soit au moins 3 heures après l'échantillonnage [23].

II.3.7.3.2. Spectrométrie alpha

Est une technique qui nous permet de distinguer le groupe de particules alpha émises par le ^{218}Po qui ont une énergie de 6 MeV et celles émises par le ^{214}Po d'énergie de 9,69 MeV et de les compter séparément. Une méthode automatique par spectrométrie alpha en utilisant un détecteur à barrière de surface a été utilisée pour la mesure des descendants du ^{222}Rn . Le nombre de particules alpha d'énergie 6 MeV donne la concentration initiale du ^{218}Po ; et les concentrations des ^{214}Pb , ^{214}Bi sont déterminées à partir du nombre de particules alpha d'énergie 7,69 MeV [22].

II.3.7.3.3. Comptage combiné alpha-bêta

Le comptage des particules bêta des noyaux ^{214}Pb et ^{214}Bi avec des scintillateurs plastiques en même temps que la spectrométrie alpha avec un détecteur à barrière de surface

Donne les concertations des trois descendants durant une seule période de mesure. Cette méthode est avantageuse en termes de rapidité de mesure, mais elle est complexe en termes d'équipement requis [22].

II.3.7.3.4. 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. Ces dosimètres sont très répandus car on peut adapter le matériau thermo-luminescent à la sensibilité requise pour l'utilisation prévue, ce qui rend leur utilisation assez souple. Ils sont utilisés aussi bien en dosimétrie individuelle que pour la surveillance de zones ou pour des études sur l'environnement [23].

II.3.7.3.5. Détecteurs Solide de Traces Nucléaires (D.S.T.N).

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 dosimètres 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) ou à haut pouvoir d'arrêt linéique.

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

Les DSTN les plus utilisés sont ceux commercialement appelés LR-115 et CR-39.

- Le DSTN type LR-115 est un film en couche mince de marque Kodak. Il est constitué d'une couche de nitrocellulose ($C_6H_8N_2O_9$) de 12 μm d'épaisseur moyenne, teintée en rouge et d'un support inerte de 100 μm en polyester. Le nitrate de cellulose est parmi les DSTN les plus sensibles aux particules alpha. Il peut enregistrer des particules α d'énergie comprise entre 1,4 et 4,7 MeV avec un angle d'incidence allant jusqu'à 50°.

L'insensibilité du LR-115 aux rayonnements électromagnétiques et aux électrons présente un grand intérêt pour son utilisateur en champ mixte de rayonnements. Pour la dosimétrie α , sa révélation chimique se fait pendant 90 minutes dans une solution de NaOH de molarité 2,5 M

à une température de 60°C. Après traitement chimique, chaque impact de particule α laisse un micro-trou de 1 à 15 μm de diamètre dans la couche rouge.



Figure 11. Traces de particules α révélées dans les DSTN LR115.

- Le DSTN type CR-39, constitué de carbonate de polyallyldiglycol (C12//I8D7), est transparent, amorphe et isotrope. Il présente l'avantage d'enregistrer des particules chargées d'énergie compris entre 0,5 à 20 MeV avec un angle d'incidence allant jusqu'à 75° [1].

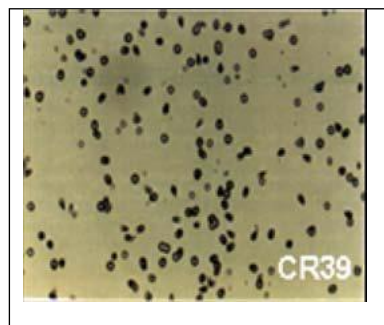


Figure 12. Traces de particules α révélées dans les DSTN CR39.

Chapitre III
Evaluation du risque du
radon et techniques de
réduction

III.1. L'évaluation du risque du radon

III.1.1. L'évaluation dans les bâtiments

L'évaluation du risque consiste à déterminer si la concentration d'activité du radon dans l'air dépasse le niveau de référence de 300 Bq/m³ (becquerel) en moyenne annuelle. Cette évaluation doit être réalisée :

- Au titre du code du travail (R4451-1, R4451-10) dans les sous-sols et rez-de-chaussée des bâtiments où sont réalisées des activités professionnelles ainsi que dans certains lieux définis à l'article 2 de l'arrêté du 07/08/08 (un nouvel arrêté est à paraître) ;
- Au titre du code de la santé publique (R1333-28, R1333-33) dans les établissements recevant du public (ERP) mentionnés à l'article D1333-32. Les résultats doivent être conservés 10 ans (code du travail, R4451-16) et sont communiqués au CHSCT ou au CT départemental le cas échéant.

Trois cas de figures peuvent se présenter [29] :

1. Si la concentration en radon est inférieure à 300 Bq/m³ : Une nouvelle mesure doit être réalisée tous les 10 ans dans les ERP et après la réalisation de travaux modifiant significativement la ventilation ou l'étanchéité du bâtiment (code de la santé publique, R1333-33). Si l'ensemble des mesures dans un bâtiment sont toutes inférieures à 100 Bq/m³ lors de deux campagnes successives, le mesurage décennal n'est plus obligatoire. Seule subsiste l'obligation de relancer une campagne de mesures après modification de la ventilation.

2. Si la concentration en radon est comprise entre 300 Bq/m³ et 1000 Bq/m³ : Les résultats sont à transmettre à l'IRSN. Des actions correctives visant à améliorer l'étanchéité du bâtiment sont à mettre en œuvre (code du travail R4451-18, code de la santé publique R1333-34 et annexe 1 de l'arrêté du 26/02/19). Afin de vérifier l'efficacité des travaux, une nouvelle mesure doit être réalisée dans les 36 mois.

3. Si la concentration en radon est supérieure à 1000 Bq/m³ ou si les travaux mentionnés ci-dessus ne permettent pas d'abaisser le seuil sous les 300 Bq/m³ (uniquement pour les ERP) : Une expertise identifiant les causes de la présence de radon afin de mettre en œuvre des travaux doit être réalisée. Le contenu de cette expertise est précisé dans l'annexe 1 de l'arrêté du 26 février 2019. Afin de vérifier l'efficacité de l'expertise et des travaux, une nouvelle mesure doit être réalisée dans les 36 mois. Il est recommandé d'effectuer également ce diagnostic pour les établissements relevant des travailleurs. Dans les ERP, les résultats des

mesures doivent être affichés près de l'entrée principale selon le modèle de l'annexe 2 de l'arrêté du 26 février 2019.

III. 1. 2. l'évaluation individuelle des travailleurs

Cette étape s'applique, lorsque, malgré les travaux entrepris sur un bâtiment, le seuil de 300 Bq/m³ est dépassé. Il convient de déterminer s'il y a présence de « zones radon », zones où les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des doses efficaces supérieures à 6 mSv / an, entraînant la mise en place d'un dispositif de protection renforcé (R44151-23). La dose efficace est une dose biologique très utilisée en radioprotection, qui sert à évaluer l'exposition d'une personne individuelle aux rayonnements. Elle tient compte de la sensibilité des tissus affectés et de la nature des rayonnements [24].

III.1.2.1. Détermination de la présence de zone radon :

$$E \text{ (mSv)} = C \text{ (Bq/m}^3\text{)} \times 2000 \text{ (h)} \times CD \text{ (mSv par Bq.h.m}^{-3}\text{)}$$

C : est la concentration moyenne annuelle en radon ;

CD : le coefficient de dose (soit $3,11 \cdot 10^{-6}$ mSv par Bq.h.m⁻³ selon la réglementation en vigueur) ;

2000 h : correspond à une occupation permanente du lieu de travail (valeur fixée).

Si $E > 6$ mSv / an, le local est délimité « zone radon » et doit être signalé (il n'existe pas pour le moment d'affichage réglementaire).

Exemples :

1) La concentration dans un local est de **1170 Bq/m³**, la dose efficace pour 2000 heures de présence est égale à $1170 \text{ Bq.m}^{-3} \times 2000 \text{ h} \times 3,11 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/(Bq.h.m}^{-3}\text{)} = 7,25 \text{ mSv/an}$
=> le local est délimité « zone radon »

2) La concentration dans un local est de **300 Bq/m³**, la dose efficace pour 2000 heures de présence est égale à $300 \text{ Bq.m}^{-3} \times 2000 \text{ h} \times 3,11 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/(Bq.h.m}^{-3}\text{)} = 1,9 \text{ mSv/an}$ => le local n'est pas délimité « zone radon » [20].

III.1.2.2. Conséquence de la zone radon :

Si une zone radon a été délimitée, l'employeur doit mettre en place une organisation de la radioprotection [20].

Désigner un conseiller en radioprotection

Si ce conseiller est désigné en interne, c'est une personne compétente en radioprotection (PCR) qui doit détenir un certificat de formation délivré par un organisme de formation certifié. Si le conseiller est désigné en externe, c'est un **organisme compétent en radioprotection** (OCR) qui doit être certifié par un organisme certificateur accrédité par le Cofrac.

Vérification initiale

Les zones radon préalablement délimitées doivent être vérifiées à l'aide de mesurages réalisés par un organisme accrédité ou par un organisme agréé par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Vérifications périodiques

Sous la responsabilité de l'employeur, le conseiller en radioprotection vérifie les zones radon périodiquement ou, le cas échéant, en continu par des mesurages.

Modalités d'accès en zone radon

Les travailleurs peuvent accéder à cette zone sous réserve d'y être autorisés par l'employeur sur la base d'une évaluation individuelle de dose.

Evaluation individuelle de l'exposition au radon

Cette évaluation est effectuée pour tous les travailleurs accédant à une zone radon. Elle doit être communiquée au médecin du travail si la dose susceptible d'être reçue (uniquement due au radon) est supérieure à 6 mSv/an. Cette dose est calculée à partir de la concentration d'activité en radon en tenant compte du temps de présence effectif passé en zone.

Information des travailleurs

Les travailleurs accédant en zone radon doivent recevoir une information dont le contenu est précisé à l'article R. 4451-58 du Code du travail (notamment sur l'augmentation du risque de cancer broncho-pulmonaire en cas d'association avec le tabagisme).

Surveillance dosimétrique individuelle

Les travailleurs dont la dose préalablement évaluée est susceptible de dépasser 6 mSv/an font l'objet d'une surveillance individuelle de leur exposition à l'aide de dosimètres à lecture différée. Il n'y a pas de classement des travailleurs au titre de l'exposition au radon

Exclusivement. En revanche, les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) restent applicables et la dose reçue en lien avec l'exposition au radon s'ajoute aux doses liées à d'autres sources d'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants le cas échéant.

_Suivi de l'état de santé des travailleurs

Les travailleurs dont la dose peut être supérieure à 6 mSv/an bénéficient d'un suivi individuel renforcé (SIR). Ce suivi comporte un examen médical d'aptitude, effectué par le médecin du travail et renouvelé au moins tous les 4 ans (le médecin du travail décide de la fréquence). Une visite intermédiaire effectuée par un professionnel en santé au travail (médecin, collaborateur médecin, interne, infirmier) est réalisée au plus tard 2 ans après l'examen médical d'aptitude [20].

III.2. Les techniques de réduction du radon

La concentration de radon dans un bâtiment peut être diminuée par la mise en place de solutions techniques adaptées.

L'aération dans les bâtiments est souvent trop faible pour chasser le radon. Il est alors nécessaire de recourir à des actions visant soit à réduire la pénétration du radon dans le bâtiment, soit à augmenter son évacuation lorsqu'il a réussi à franchir l'interface sol-bâtiment.

En pratique, il existe deux groupes de techniques de réduction du radon : [13]

III.2.1. Les techniques de réduction passives (sans ventilateur)

III.2.1.1. Etanchéification

Les actions correctives consistent à supprimer des voies de transfert et à procéder à une étanchéification du bâtiment (figure 2.1.1). Il est toutefois à préciser qu'un colmatage parfait des voies d'entrée du radon est irréalisable. Les matériaux les plus utilisés pour réaliser cette étanchéification des voies d'entrée du radon sont les pâtes en polyuréthane, les membranes de PVC ou de polyéthylène, les peintures époxy, polyamide époxy, ou « waterproof ».

Dans le cas de sols en terre battue (dans la cave par exemple), la solution en général la plus efficace consiste à déposer une couverture qui peut être constituée d'une couche de gravillons, une membrane puis une dalle de béton.

Ces méthodes de réduction présentent généralement une efficacité limitée ; elles sont cependant un préalable nécessaire à la mise en œuvre d'autres méthodes. Il faut aussi savoir que la tenue des matériaux dans le temps n'est assurée que pour une dizaine d'années [13].

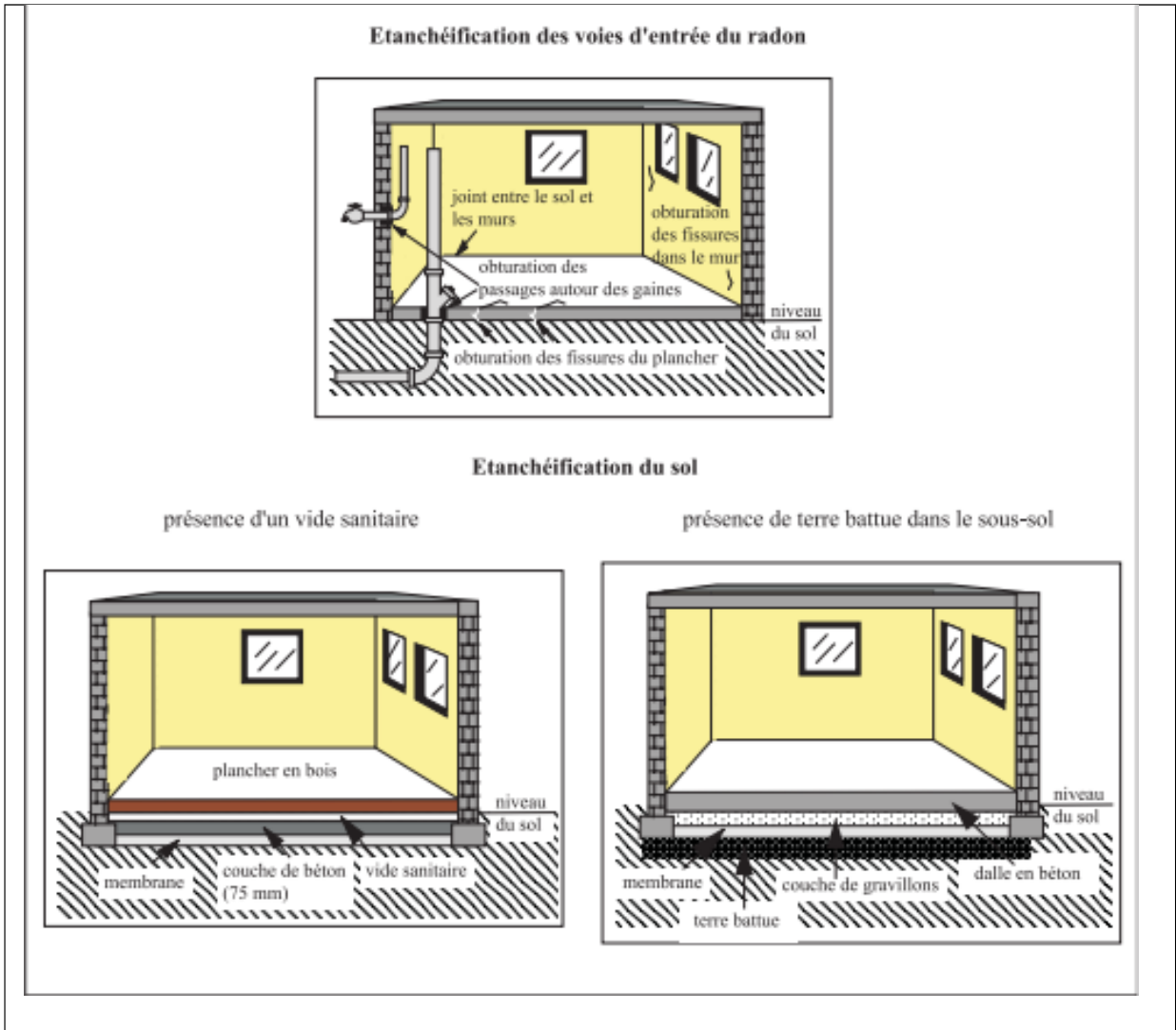


Figure 13. Techniques passives de réduction du radon

III.2.1.2. Aération naturelle

L'aération, remplacement de l'air intérieur par de l'air venant de l'extérieur, est caractérisée par un taux de renouvellement d'air (fraction du volume total de la pièce renouvelée en une heure). Dans la plupart des habitations, ce taux varie entre 0,3 et 1,5 h⁻¹ ; il peut descendre en dessous de 0,1 h⁻¹ dans une habitation très bien isolée et très mal ventilée. Ce taux de renouvellement d'air joue un rôle important sur les niveaux de radon dans l'atmosphère intérieure.

La réglementation en vigueur recommande un taux de 1 renouvellement d'air par heure.

L'aération naturelle peut être assurée par conduits spécifiques, par l'ouverture des fenêtres ou par la suppression du calfeutrement autour des portes et fenêtres. Cette méthode de réduction présente l'avantage d'une mise en oeuvre rapide et d'un coût d'installation minimale ; cependant elle induit un coût de fonctionnement lié à la nécessité d'accroître le chauffage qui peut être compris, en fonction des régions, entre une centaine et quelques centaines d'euros par an. De plus, elle peut occasionner une diminution du confort de vie de l'occupant. L'efficacité est variable et dépend des caractéristiques du bâtiment [13].

III.2.2. Les techniques de réduction actives (avec ventilateur)

Les méthodes communément adoptées pour réduire les niveaux de radon intérieurs reposent sur deux principes :

- la dilution du radon : elle se produit en augmentant le taux de renouvellement d'air dans le bâtiment par des moyens mécaniques ;
- l'inversion du rapport de pression entre l'intérieur et l'extérieur : l'intérieur du bâtiment est naturellement en dépression par rapport au sol. Par conséquent, la technique de réduction du radon doit inverser le phénomène naturel pour que la pression à l'intérieur du bâtiment soit supérieure à celle dans le sol. Ces deux principes sont habituellement combinés pour obtenir la réduction de radon [13].

III.2.2.1. Ventilation créant une mise en surpression de la cellule habitée

Cette technique est de préférence appliquée à des maisons ayant un taux de renouvellement d'air faible pour éviter une augmentation du phénomène de convection. La ventilation est assurée par un ventilateur soufflant de l'air frais à l'intérieur de la pièce. L'air intérieur est ensuite évacué par une fenêtre ou une ouverture sur un mur adjacent ou opposé.

Une ventilation forcée permet d'augmenter de 0,5 à 1,5 h⁻¹ le taux de renouvellement d'air d'une habitation avec des pertes énergétiques inévitables. Le coût d'installation, généralement de quelques centaines d'euros, s'accompagne d'un coût de fonctionnement qui peut être nettement plus élevé.

Un ventilateur avec échangeur de chaleur permet de diminuer les pertes énergétiques (coût énergétique réduit jusqu'à 80 %) mais l'investissement nécessaire pour l'installation s'avère plus élevé que précédemment. La ventilation avec un récupérateur de chaleur est plus adaptée aux bâtiments publics qu'aux habitations [13].

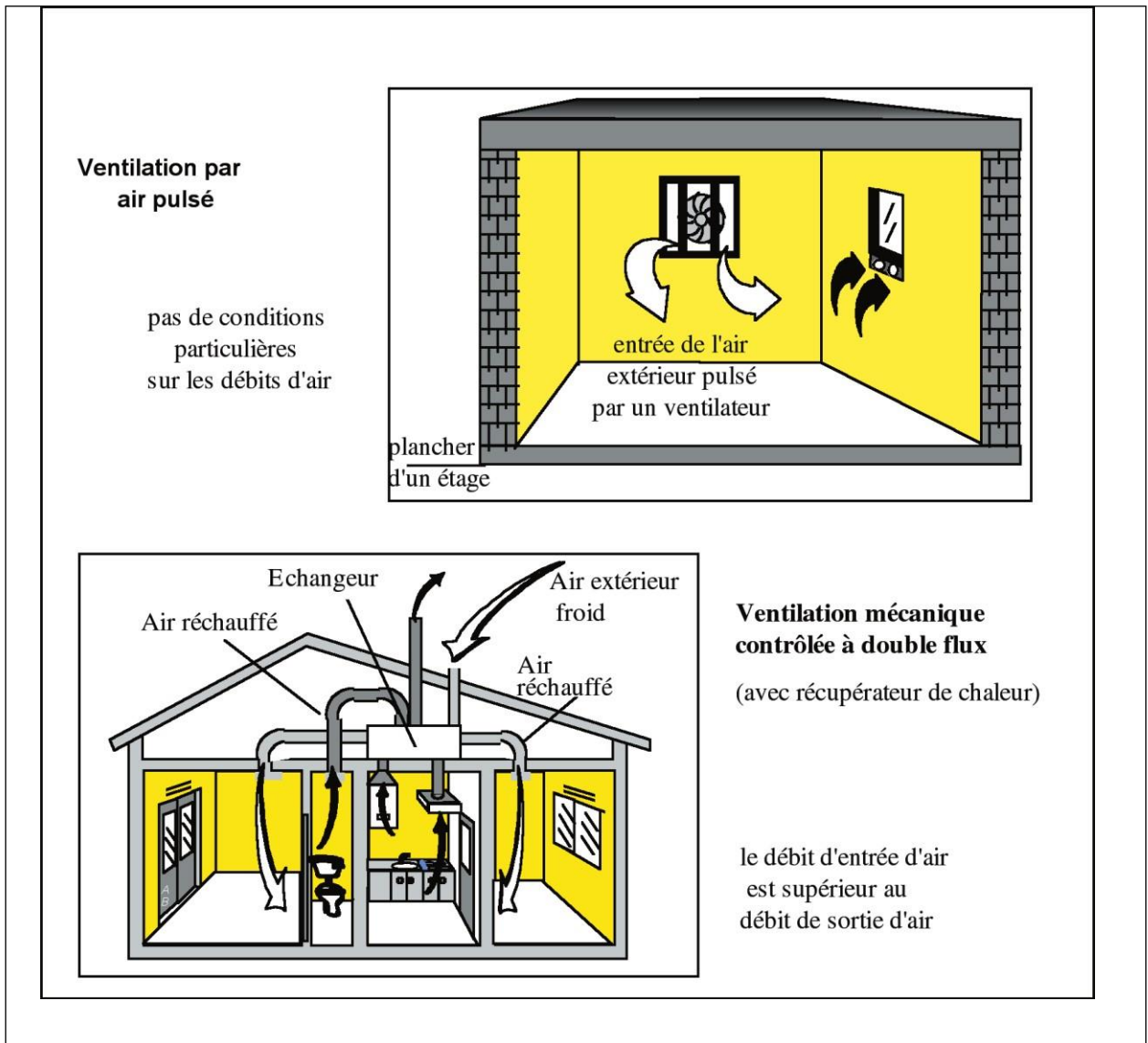


Figure 14. Ventilation créant une surpression de la cellule habitée par rapport au sol, (d'après « Etude de traitement des situations impliquant du radon ».M.C Robé. Contrôle 2003)

III.2.2.2. Ventilation créant une dépression sous la cellule habitée

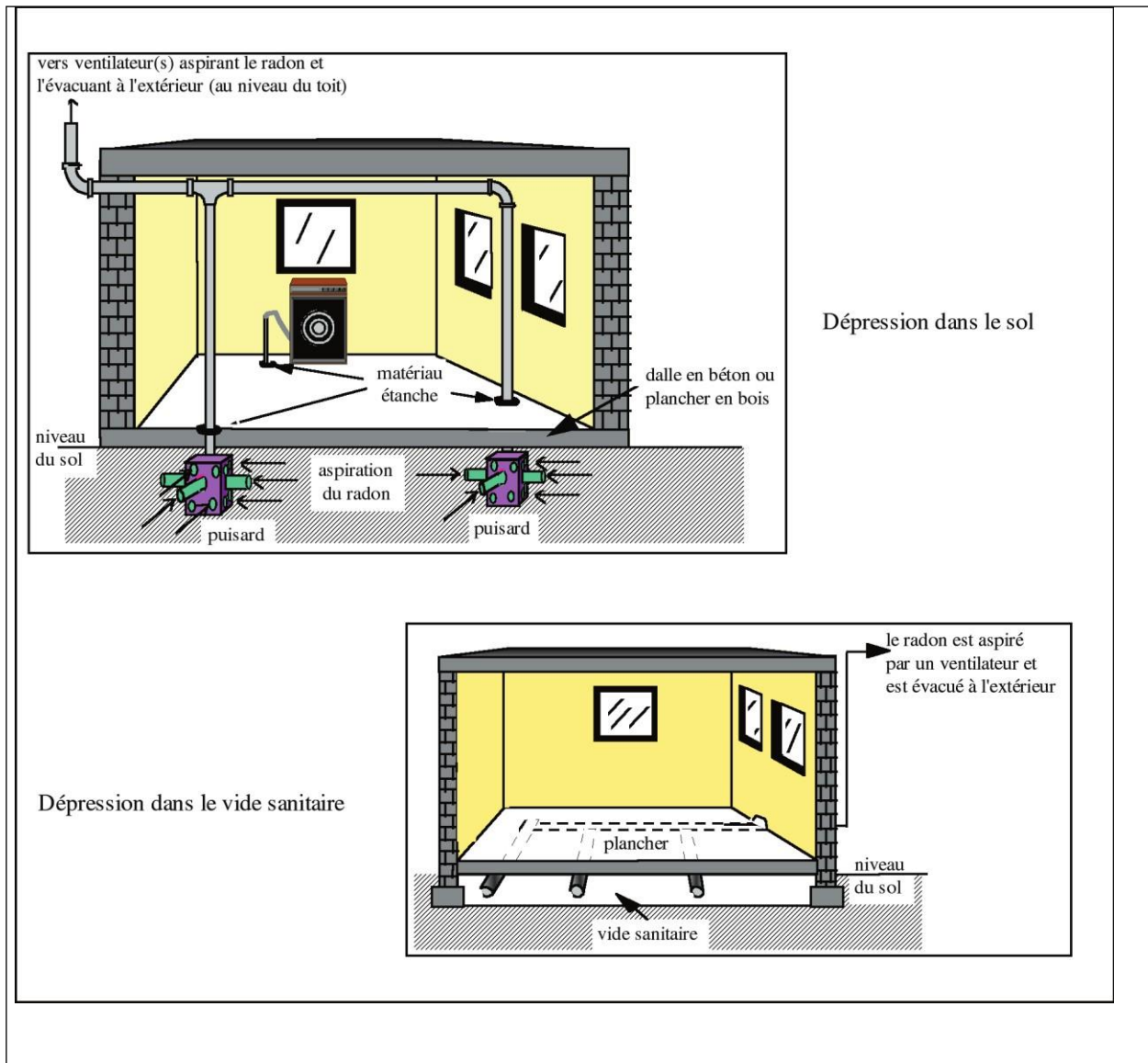


Figure 15. Ventilation créant une dépression sous la cellule habitée (d'après « Etude de traitement des situations impliquant du radon ».M.C Robé. Contrôle

Les systèmes de ventilation du sol ont pour objet d'éviter l'accumulation de radon sous le plancher bas de la maison (dalle, cave, vide sanitaire). On traite dans un premier temps les éléments constituant le plancher afin de les rendre plus étanches à l'air chargé en radon, puis dans un second temps, en vue d'améliorer cette réduction, on crée une légère dépression dans le sous-sol. Dans le cas d'un sol très perméable, la pressurisation du sous-sol est également envisageable.

Le système de dépressurisation du sol a pour objet d'inverser le sens de l'écoulement de l'air entre l'habitation et le sol. Le sol étant à une pression inférieure à celle de l'habitation,

la force motrice qui était à l'origine du transfert de radon entre le sol et l'habitat est ainsi éliminée. Le système de dépressurisation du sol est l'un des plus efficaces. Son coût de fonctionnement et d'entretien est faible [13].

Conclusion général

Au terme de notre travail, nous notons que l'utilisation des différents instruments de mesure de radon permet d'observer l'évolution de la concentration de radon, ainsi que l'utilisation des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) pour la mesure à long terme du radon a permis d'observer que la concentration du radon dans les habitations varie en fonction du type d'aération et de la hauteur de la fondation.

Les valeurs des concentrations du radon déterminées dans les différentes habitations sont exprimées en Bq/m³, la présence de radon entraîne des risques sanitaires pour la population, et pour cela nous étudions son évolution afin que son pourcentage ne dépasse pas 300 Bq/m³ au vu de cela L'OMS (organisation mondiale de la santé) a également émis ses préconisations et a appelé ses pays membres à établir ou renforcer leurs programmes pour contrôler la présence de radon dans les habitations.

Pour réduire au maximum les risques sanitaires, il est recommandé de procéder à un certain nombre d'aménagement de son habitation, afin de limiter au mieux la concentration en radon en utilisant des techniques de remédiation et de prévention visent à diminuer la présence de radon dans les bâtiments. Leur objectif est double :

- Fournir une bonne aération de l'habitation par des fenêtres régulièrement ouvertes ;
- Eviter la pénétration du radon par les fissures ou autres ouvertures de l'habitation ;
- Réduire l'infiltration du radon par le sol en élevant niveau de la fondation des habitations ;

Le radon est un problème réel pour notre santé, nous devons donc œuvrer ensemble pour réduire considérablement sa présence dans notre milieu de vie.

Références bibliographique

- [1] N'GUESSAN Kodjo Joéli Fabrice, IMPACT DU RADON SUR LA SANTE DE LA POPULAION DU DISTRICT D'ABIDJAN : CAS DE LA COMMUNE D'ABOBO 2014.
- [2] Santé Canada : Guide de réduction pour les canadiens SC pub 140041 Cat : H129-40/2014F. ISBN : 978-0-660-22118-2.
- [3] IRSN 2018, INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURÛTE NUCLEAIRE LE RADON : UN GAZ RADIOACTIF DANS MON HABITATIONNOVEMBRE 2018.
https://www.nouvelle-aquitaine.ars.sante.fr/sites/default/files/2016-12/IRSN_Fiche-Information-Radon_2014_0.pdf (10-05-2020, 11.00)
- [4] Métivier, H. et Robe, M.C. Le radon de l'environnement à l'Homme Paris EDP Sciences, collection IPSN, 1998,274 p
- [5] Stéphanie DEMONGEOT, RECHERCHE DES DIFFERENTS PARAMÈTRES CARACTÉRISANT LE POTENTIEL D'EXHALATION EN RADON DES SOLS, L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ ,1997.
- [6] Ahmed TEDJANI Détermination de la concentration en uranium et l'émanation du radon à partir de certains matériaux de construction, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE.
- [7] Hakam O, Mesure des activités volumiques du Radon dans l'air des habitations et des enceintes de travail par les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires ,1993.
- [8] Lagny C, Charmoille A, Doursout T, Ameon R, Rapport d'étude, Le radon, synthèse des connaissances et résultats des premières investigations enenvironnement minier
- [9] Professeur Gérard Huchon, LA LETTRE DU Souffle N°64 (NOVEMBRE, 2011).
- [10] M. Benoît Sabot, Étalonnage des instruments de mesure de l'activité volumique du thoron (^{220}Rn) dans l'air, L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY ,2015.
- [11] Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'environnement atmosphérique : origine et méthodes de mesure*, Radioprotection 1996, Vol. 31, n° 3, pages 371 à 388.
- [12] M. Pierre-Yves MESLIN, Le radon, traceur géophysique de l'environnement martien : étude de son transport, première mise en évidence et développement, L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 2008.
- [13] Sylvie, Anne- Marie DUDOGNON, LE RADON : ENVIRONNEMENT ET SANTE. BILAN D'ACTIVITE DU LABORATOIRE DE PATHOLOGIE EXPERIMENTALE DE RAZES, UNIVERSITE DE LIMOGES, AVRIL 2006.

Références bibliographiques

[14] Géraldine IELSCH MISE AU POINT D'UNE METHODOLOGIE PRÉDICTIVE DES ZONES À FORT POTENTIEL D'EXHALATION DU RADON, 2000.

[15] Delphine PELLEGRINI, Etude de l'émanation du radon à partir de résidus de traitement de minerais d'uranium. MISE EN EVIDENCE mise en évidence de relations entre le facteur d'émanation et les caractéristiques du matériau, L'université de FRANCHE-COMTE, 1997.

[16] Thomas LE DRUILLENNEC, Apport de la caractérisation de la variabilité des concentrations en radon-222 dans l'eau à la compréhension du fonctionnement d'un aquifère en milieu fracturé de socle : exemple du site de Ploemeur, Morbihan, L'université de Bretagne occidentale (U.B.O) ,2007.

[17] Institut National de la Santé du Québec(2014) : le radon au Québec.

Evaluation du risque à la santé et analyse critique des stratégies d'intervention...SBN2-550-4-3891-4.

[18] Roland Masse, Le radon, aspects historiques et perception du risque, Académie des technologies.

[19] O. Laurent, article : conséquence Dosimétrique et sanitaire de l'ingestion de radon via l'eau de boisson. DOI : 10.1051/radiopro/2010054.

[20] <http://www.inrs.fr/risques/radon/ce-qu-il-faut-retenir.html> (25-08-2020, 12.30)

[21] <https://www.sante-radon.com/wp-content/uploads/2015/03/Methodes-de-remediation-du-probleme-radon.pdf> (01-09-2020, 09.30)

[22] rapport interne du CRNA, 2017, Aït-ziane M, Le radon : techniques de mesure, interne.

[23] MESSAOUDI Nassiba et AOUCHAR Kahina, Mesure du gaz Radon à l'aide des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2015.

[24] Fiche prévention, L'évaluation du risque radon, Mois année : août 2019.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

في أطروحة درسنا جليل غاس انزادو في ان اسل ي خالل جقبي ان عي ييات (انخصائص، ان صادر... انخ... بشكم عاو، جت دراسة ان خاطز انصحبة نغاس انزادو عه انصحبة انعاية زمسك. نفا وذيها جيات نياس هذا الخيز. في ان هاية حذا جتي يخطز انزادو وبعض جيات انخفيض.

Résumé

Dans notre mémoire, nous avons étudié l'effet de radon dans les habitations en présentant ses généralités (caractéristiques, sources, exhalation...). On a étudié en général les risques sanitaires du radon sur la santé public des habitations. Nous avons présenté les techniques de mesure de ce dernier. A la fin nous avons identifié l'évaluation du risque du radon et quelques techniques de réduction.

Les mots clés : Radon, risques sanitaires, mesurage, évaluation, réduction.

summary

In our thesis, we studied the effect of radon in homes by presenting its generalities (characteristics, sources, exhalation ...). In general, the health risks of radon on the public health of dwellings have been studied. We have presented the techniques for measuring the latter. At the end we identified the radon risk assessment and some reduction techniques.

Key words: Radon, sanitary risks, measurement, Evaluation, Reduction.