

RAPPORT D'ÉTUDE  
INERIS-DRS-08-86108-07270A  
IRSN/DEI/SARG/2008-045

23/12/2008

**Le radon, synthèse des connaissances et  
résultats des premières investigations en  
environnement minier**





# **Le radon, synthèse des connaissances et résultats des premières investigations en environnement minier**


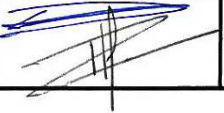
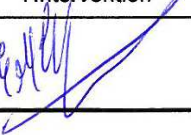


## PREAMBULE

Ce document est le résultat d'un partenariat entre l'INERIS et l'IRSN. Il s'inscrit dans le cadre d'un accord spécifique se conformant au protocole de collaboration signé le 14 septembre 2006 entre ces deux établissements.

Le lecteur utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du lecteur. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS et l'IRSN dégagent toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de sa destination initiale.

INERIS	Rédaction	Vérification		Approbation
<b>NOM</b>	C. LAGNY A. CHARMOILLE	Z. POKRYSZKA	P. GOMBERT	M. GHOREYCHI
<b>Qualité</b>	Ingénieurs à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des risques du sol et du sous-sol	Référent Technique Emission et Transfert Souterrains de Gaz à la Direction des risques du sol et du sous-sol	Responsable de l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des risques du sol et du sous-sol	Directeur de la Direction des risques du sol et du sous-sol
<b>Visa</b>				

 IRSN	Rédaction	Vérification	Approbation	
<b>NOM</b>	T. DOURSOUT R. AMEON	M. CUSHING	D. GAY	D. CHAMPION
<b>Qualité</b>	Ingénieurs au Bureau d'évaluation des risques liés à la Radioactivité Naturelle de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention	Chef du Bureau d'évaluation des risques liés à la Radioactivité Naturelle de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention	Chef du Service d'Analyse des Risques liés à la Géosphère de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention	Directeur de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention
<b>Visa</b>				

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>2. LE RADON .....</b>	<b>7</b>
2.1 Qu'est-ce que le radon ? .....	7
2.2 Désintégration du radon .....	7
2.3 Exhalation du radon .....	9
2.3.1 Emanation .....	10
2.3.1.1 Définition .....	10
2.3.1.2 Mécanismes d'émanation.....	10
2.3.1.3 Influence des caractéristiques du milieu.....	11
2.3.2 Transport .....	12
2.3.2.1 Transport par diffusion .....	12
2.3.2.2 Transport par advection/convection .....	12
2.3.2.3 Transport par l'eau .....	13
2.4 Risques sanitaires.....	13
<b>3. MESURE DU RADON .....</b>	<b>15</b>
3.1 Grandeurs physiques mises en jeu .....	15
3.1.1 L'activité volumique du radon .....	15
3.1.2 L'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du radon 222 .	15
3.1.3 L'énergie alpha potentielle volumique.....	16
3.1.4 Le facteur d'équilibre .....	16
3.2 Types de mesure .....	17
3.3 Mesures de l'activité volumique du radon 222 .....	18
3.3.1 Les mesures ponctuelles .....	18
3.3.1.1 Principe .....	18
3.3.1.2 Applications.....	18
3.3.1.3 Appareillages.....	18
3.3.2 Les mesures intégrées .....	19
3.3.2.1 Principe .....	19
3.3.2.2 Applications.....	19
3.3.2.3 Appareillages.....	19

3.3.3 Les mesures en continu.....	19
3.3.3.1 Principe .....	19
3.3.3.2 Applications.....	20
3.3.3.3 Appareillages.....	20
3.4 Mesure de l'énergie alpha potentielle volumique .....	20
3.4.1 Les méthodes intégrées .....	20
3.4.2 Les méthodes ponctuelles.....	21
3.5 Mesure du flux surfacique d'exhalation du radon 222 .....	21
3.5.1 Définition.....	22
3.5.2 Principe.....	22
3.5.3 Applications .....	22
3.6 Mesure de l'activité volumique du radon 222 dans l'eau .....	22
<b>4. ASPECTS DOSIMETRIQUES .....</b>	<b>24</b>
4.1.1 Unités utilisées .....	24
4.1.2 Dose résultant de l'exposition interne .....	24
4.1.3 Dose résultant de l'exposition externe .....	25
<b>5. ASPECTS REGLEMENTAIRES.....</b>	<b>26</b>
5.1 Organismes à l'origine de la réglementation .....	26
5.1.1 Les organismes internationaux.....	26
5.1.2 Les organismes français.....	26
5.2 Réglementation dans les établissements recevant du public et les lieux de travail.....	27
5.3 Réglementation pour les mesures relatives au radon et les organismes agréés .....	27
5.4 Protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition au radon...28	
5.5 Réglementation pour les lieux d'habitation.....	28
5.6 Réglementation sur le radon et l'eau.....	28
<b>6. LE RADON EN ENVIRONNEMENT MINIER .....</b>	<b>29</b>
6.1 Contexte minier .....	29
6.2 Quelques cas concrets.....	30
6.2.1 Cas des sites miniers uranifères.....	31
6.2.2 Cas des mines de charbon .....	31
6.2.3 Cas des mines de potasse .....	32
6.2.4 Cas des mines de phosphate .....	32

6.2.5 Cas des mines de cuivre .....	33
6.2.6 Cas des mines de fer.....	34
6.2.6.1 Mines de fer de Lorraine .....	34
6.2.6.1.1 Surveillance d'atmosphère dans les vides post-miniers à Moyeuivre-Grande.....	34
6.2.6.1.2 Surveillance d'atmosphère sur le reservoir nord du bassin ferrifere lorrain.....	35
6.2.6.1.3 Mesures en surface du sol à l'aplomb de zones exploitées non dépilées.....	35
6.2.6.2 Mines de fer de Normandie .....	36
6.2.6.2.1 Mines de Soumont .....	36
6.2.6.2.2 Mines de May-sur-Orne.....	36
<b>7. LE RADON DANS LES BATIMENTS .....</b>	<b>37</b>
7.1 Généralités.....	37
7.2 Mécanismes d'entrée .....	38
7.3 Les techniques de remédiation .....	39
<b>8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>40</b>
<b>9. REFERENCES .....</b>	<b>41</b>
<b>10. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUCTION

Les activités minières conduisent à des modifications de la situation environnementale initiale, qui peuvent être à l'origine de risques pour l'environnement et les populations.

La création de vides souterrains et la déconsolidation des terrains de recouvrement peuvent faciliter le transport jusqu'à la surface du gaz de mine et du radon présents dans les formations géologiques. Les mesures récentes réalisées par l'INERIS dans différents contextes miniers (bassin ferrifère lorrain, mine de fer de May-sur-Orne, bassin houiller du Centre-Midi...) montrent l'existence de radon dans l'atmosphère des vides miniers dans des proportions parfois très importantes, avec des teneurs pouvant dépasser  $10\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  en mesure ponctuelle. La migration de ce gaz depuis les vides miniers vers les bâtiments est susceptible d'exposer les personnes à un risque sanitaire.

Après une présentation des propriétés du radon et des effets sanitaires qu'il peut induire, le document aborde les différentes techniques disponibles pour la mesure du radon. Les aspects dosimétriques et réglementaires sont ensuite présentés.

Le document traite alors plus particulièrement du radon en environnement minier, notamment en présentant les différentes sources d'exposition possibles. La partie correspondante est illustrée par quelques cas concrets issus de la bibliographie et des études menées par l'INERIS dans certains grands bassins miniers français. Enfin, la dernière partie présente les mécanismes d'entrée du radon dans les bâtiments et les techniques de remédiation associées.

*Le rapport a été établi dans le cadre de l'accord de partenariat scientifique entre l'IRSN<sup>1</sup> et l'INERIS. Ce travail fait partie du programme d'appui technique de l'INERIS au MEEDDAT (Bureau du Sol et du Sous-Sol, B3S) relatif à la gestion de l'après-mine (programme EAT-DRS 03).*

---

<sup>1</sup> Direction de l'Environnement et de l'Intervention / Service d'Analyse des Risques liés à la Géosphère (DEI/SARG)

## 2. LE RADON

### 2.1 QU'EST-CE QUE LE RADON ?

Le radon est un gaz radioactif naturel omniprésent à la surface de la Terre, provenant de la désintégration d'atomes eux-mêmes radioactifs et présents dans la croûte terrestre comme l'uranium.

En effet, toutes les roches contiennent de l'uranium généralement en petite quantité (entre 1 et 3 parties par million). Certaines roches peuvent avoir des teneurs moyennes plus importantes, jusqu'à 100 ppm d'uranium : on peut citer les roches volcaniques, les granites, les schistes noirs, les roches sédimentaires qui contiennent des phosphates et les roches métamorphiques dérivées de ces roches. Les teneurs peuvent atteindre des valeurs allant jusqu'à quelques pourcents, voire dizaines de pourcents de manière très exceptionnelle, au sein de gisements miniers.

Le radon est un gaz rare, inodore, incolore et inerte chimiquement.

Il possède trois isotopes naturels ( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  et  $^{222}\text{Rn}$ ) descendants de radionucléides présents dans les sols ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , respectivement).

Leurs abondances respectives sont par conséquent fonction de la nature du sous-sol, c'est-à-dire des teneurs en  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$ , mais également de leur période radioactive (ou période de demi-vie)<sup>2</sup>. Ainsi, la période relativement longue du radon 222 vis-à-vis des deux autres isotopes, et les teneurs généralement plus importantes de ses précurseurs, impliquent que cet isotope est généralement le plus abondant dans l'environnement.

Le tableau 1 présente les principales sources de radon sur terre.

Sources	Production annuelle (Bq/an)
Sol	$9.10^{19}$
Océans	$9.10^{17}$
Extraction de gaz naturel	$3.10^{14}$
Extraction de charbon	$2.10^{13}$

Tableau 1 : Principales sources de radon sur terre (Pawula, 1997)

### 2.2 DESINTEGRATION DU RADON

La désintégration d'un atome radioactif comme le radon, causée par son instabilité, se manifeste par sa transformation spontanée en un autre atome

---

<sup>2</sup> La période radioactive est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes d'un isotope radioactif se désintègrent naturellement.



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. Une telle chaîne de désintégration peut être représentée graphiquement. En annexe 1, les chaînes complètes de désintégration des chaînes radioactives naturelles sont présentées.

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

- le rayonnement alpha ( $\alpha$ ) 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 ( $\beta$ ) 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 ( $\gamma$ ) 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.

Le tableau 2 récapitule le mode de désintégration ainsi que la période radioactive de l' $^{238}\text{U}$  (tête de sa chaîne de désintégration) et de ses descendants.

Radionucléide	Mode de désintégration	Période radioactive
Uranium 238	Alpha	4,5 milliards d'années
Thorium 234	Beta, gamma	24 jours
Protactinium 234m <sup>3</sup>	Beta, gamma	1,2 minute
Uranium 234	Alpha	250 000 ans
Thorium 230	Alpha, gamma	75 000 ans
Radium 226	Alpha, gamma	1600 ans
Radon 222 (gaz)	Alpha	3,82 jours
Polonium 218	Alpha	3 minutes
Plomb 214	Beta, gamma	27 minutes
Bismuth 214	Beta, gamma	20 minutes
Polonium 214	Alpha	0,00016 secondes
Plomb 210	Beta, gamma	22,3 ans
Bismuth 210	Beta	5 jours
Polonium 210	Alpha	138,5 jours
Plomb 206		stable

*Tableau 2 : Chaîne radioactive de l'uranium 238*

Chaque isotope radioactif possède sa propre vitesse de décroissance, caractérisée par sa période radioactive : celle du radon 222 est de 3,82 jours. Les quatre produits de filiation directement issus du radon 222 ont pour leur part une période encore plus courte, inférieure à l'heure. Il s'agit du polonium 218, du plomb 214, du bismuth 214 et du polonium 214. Ainsi, si tous les atomes de radon sont désintégrés, la radioactivité des descendants à vie courte disparaît rapidement. Contrairement au radon, ces radionucléides sont des aérosols solides et s'attachent aux fines poussières de l'atmosphère.

### 2.3 EXHALATION DU RADON

L'exhalation est le mécanisme par lequel un atome de radon produit à l'intérieur du matériau considéré parvient jusqu'à sa surface. Elle regroupe plus précisément deux étapes : l'émanation et le transport. Elle est couramment exprimée en flux surfacique d'exhalation du radon ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

---

<sup>3</sup> Le « m » signifie « métastable » et correspond à l'état excité du radionucléide observable lorsqu'il existe un retard dans la transition vers son état stable

## 2.3.1 EMANATION

### 2.3.1.1 DEFINITION

L'émanation du radon est le mécanisme par lequel un atome de radon quitte le grain individuel de matériau solide dans lequel il a été formé et arrive dans l'espace libre des pores.

Le facteur ou le pouvoir d'émanation du matériau permet de quantifier ce phénomène. Il est défini comme le rapport du nombre d'atomes de radon qui parviennent dans l'espace des pores du matériau par unité de temps et de volume sur le nombre total d'atomes de radon formés par unité de temps et de volume.

Ce facteur est compris entre 0 et 1. Le *tableau 3* présente le coefficient d'émanation de différents matériaux.

	Facteur d'émanation			
	min.	max.	moy.	
Sols	0,01 0,05	0,5 0,32	0,1 0,2	synthèse bibliographique 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		concassés secs et saturés ( $\phi_{50\%} < 75$ $\mu$ m) minerais concassés ( $\phi < 400$ $\mu$ m)
	0,02	0,26		
	0,03	0,18		
Résidus de traitement de minerais d'uranium				
	0,07	0,31		secs et saturés ( $\phi_{50\%} < 75$ $\mu$ 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 3 : Coefficients d'émanation de différents matériaux (Pellegrini, 1997)*

### 2.3.1.2 MECANISMES D'EMANATION

L'émanation peut être engendrée par quatre processus (Pellegrini, 1997) :

- **le recul direct** : lors de sa formation par désintégration d'un atome de radium, l'atome de radon est doté d'une énergie cinétique, appelée énergie de recul, qui lui permet d'être éjecté du grain du matériau. Dans un minéral de densité commune, la distance qu'il peut parcourir grâce à cette énergie est de l'ordre de 20 à 70 nm ;

- **la diffusion** : un atome de radon resté piégé dans le grain peut atteindre l'espace des pores par diffusion. Cependant, compte tenu de la lenteur de ce mécanisme, seuls les atomes de radon situés en surface des phases solides ont une chance d'émaner avant de se désintégrer ;
- **la dissolution de la phase solide** : ce mécanisme peut mener à la libération de l'atome de radon dans le cas de matériaux qui se décomposent facilement dans l'eau ;
- **le 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.

### 2.3.1.3 INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DU MILIEU

D'après les mécanismes décrits précédemment, le facteur d'émanation d'un milieu poreux dépend de la nature de la matrice solide, de la taille des particules, de la taille des pores et de la distribution du radium dans le grain (surfactive ou homogène dans la masse).

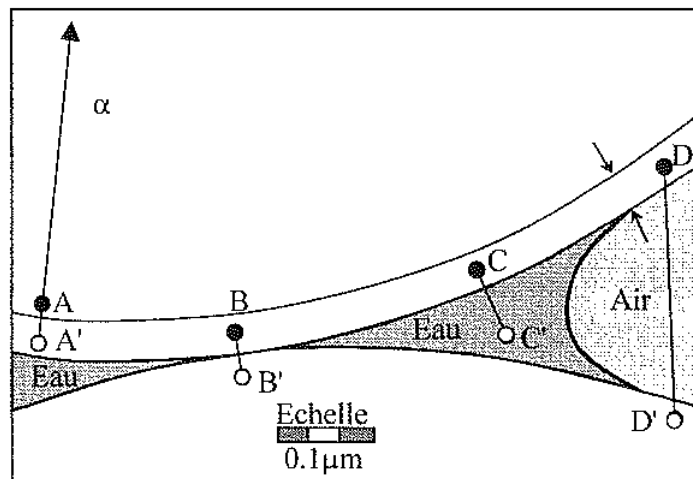


Figure 1 : Les scénarios de formation du  $^{222}\text{Rn}$  ; les grains ont un diamètre de  $2\ \mu\text{m}$  ; les points noirs sont des atomes de  $^{226}\text{Ra}$  ; les points blancs des atomes de  $^{222}\text{Rn}$  ; A' est piégé dans le grain dans lequel il est formé ; B' et D' sont piégés dans des grains voisins ; C' émane par recul direct, sa distance de recul étant réduite par la présence d'eau (d'après Ferry, 2000)

Ainsi, le facteur d'émanation d'un sol dépend de la texture de celui-ci. De plus, la distance de recul n'est pas la même dans l'eau que dans l'air (cf. figure 1), la probabilité de piégeage dans un grain voisin diminue avec la quantité d'eau présente dans les pores. La figure 2 présente l'influence de la teneur en eau du matériau sur le coefficient d'émanation. Pour la plupart des sols, entre 10 et 50% du radon produit pourra s'échapper du grain et entrer dans les pores.

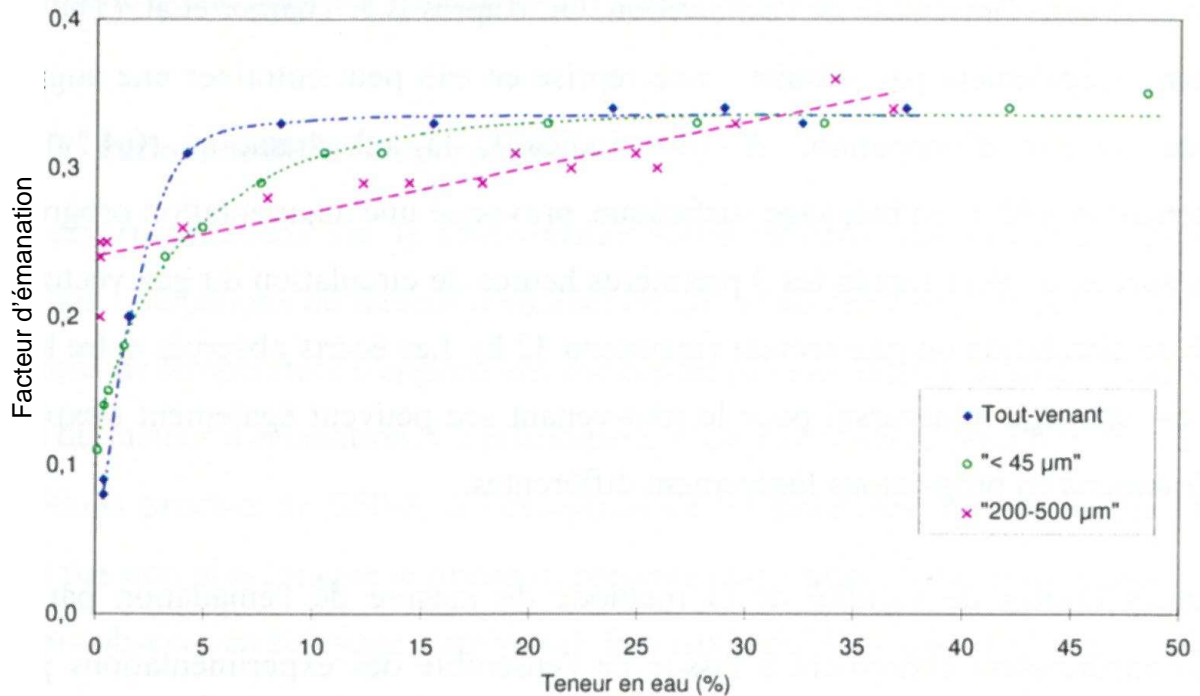


Figure 2 : Facteur d'émanation du tout-venant, de la fraction inférieure à 45 µm et de la fraction comprise entre 200 et 500 µm, en fonction de la teneur en eau massique, pour un résidu minier (d'après Pellegrini, 1997)

## 2.3.2 TRANSPORT

### 2.3.2.1 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.

### 2.3.2.2 TRANSPORT PAR ADVECTION/CONVECTION

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.

### 2.3.2.3 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.

Le coefficient d'Oswald, appelé souvent dans le cas de l'eau coefficient de Bunsen ( $\alpha$ ), est le rapport de l'activité volumique du radon dans l'eau sur l'activité volumique du radon dans l'air à une température donnée :

Ce coefficient  $\alpha$  est une fonction décroissante de la température de l'eau T (°C) :

$$\alpha = 0,105 + 0,403 \exp (-0,0502 T)$$

A 20°C,  $\alpha$  est ainsi égal à 0,245.

## 2.4 RISQUES SANITAIRES

Le radon est considéré aujourd'hui comme étant la source principale d'exposition de la population aux rayonnements ionisants<sup>4</sup> (Catelinois et al., 2007). L'exposition au radon représente en moyenne 59% de la dose due aux rayonnements d'origine naturelle. Sur la base des résultats des études expérimentales et épidémiologiques, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a classé le radon comme cancérigène pulmonaire certain chez l'homme.

Les effets sanitaires des faibles doses de rayonnements ionisants, encore mal connus, sont de plusieurs types :

- une augmentation des risques de cancer (les facteurs de risque utilisés pouvant, entre autres, être issus d'extrapolation des connaissances acquises sur les fortes doses) ;
- une augmentation possible des risques de transmissions d'anomalies génétiques ;
- des effets possibles sur les systèmes cardiovasculaire, nerveux, digestif ou endocrinien pouvant résulter d'une incorporation chronique de radionucléides.

Néanmoins ce schéma diffère pour le radon, car il pénètre surtout dans l'organisme avec l'air inhalé, plus rarement avec l'eau de boisson ingurgitée. Après inhalation, le gaz radon est exhalé car il possède une faible affinité avec les tissus biologiques. Par contre, ses descendants particuliers, fixés ou non sur les

---

<sup>4</sup> L'ionisation est la transformation d'atomes neutres en ions chargés électriquement.

aérosols atmosphériques, se déposent le long des voies respiratoires selon leur granulométrie. La plupart des descendants ont un effet limité sur les tissus proches du site de dépôt, les cellules cibles étant les cellules de l'épithélium bronchique.

Par conséquent, l'accroissement du risque de cancer pulmonaire est le principal danger résultant d'une forte exposition au radon.

Ainsi, pour les populations de mineurs, des études ont conclu à une surmortalité par cancer pulmonaire (Laurier et al., 2007), le risque augmentant de façon linéaire avec l'exposition cumulée au radon et à ses descendants.

Pour le public, des études menées en Europe, en Amérique du Nord et en Chine ont confirmé que le radon présent dans les bâtiments jouait, à l'échelle mondiale, un rôle substantiel dans l'apparition des cancers pulmonaires. Selon de récentes études (Catelinois et al., 2007), en fonction des modèles de risque, entre environ 1 200 et 2 900 décès par cancer du poumon seraient attribuables chaque année à l'exposition domestique au radon soit entre 5 et 12% des décès par cancer du poumon. Parallèlement, environ 8 à 11% des décès par cancer du poumon chez les fumeurs seraient attribuables à l'exposition au radon d'origine domestique.

L'analyse groupée des principales études européennes (Collignan et Pirard, 2005) basée sur l'étude de cas-témoins européens estime que le risque de cancer pulmonaire augmente de 16 % par tranche de  $100 \text{ Bq.m}^{-3}$  pour une exposition survenue entre 5 et 34 ans auparavant. La relation dose-effet semble être linéaire, sans palier, ce qui signifierait que le risque de cancer pulmonaire existe y compris à très faible dose et augmente proportionnellement avec l'exposition au radon.

D'après les résultats de cette étude, lorsqu'un non-fumeur est exposé à des concentrations en radon de 0, 100 et  $400 \text{ Bq.m}^{-3}$ , le risque de cancer pulmonaire à l'âge de 75 ans est respectivement de 4, 5 et 7 pour 1 000. Pour les fumeurs, le risque est multiplié par un coefficient de l'ordre de 25, c'est-à-dire qu'il atteint respectivement 100, 120 et 160 pour 1000. La plupart des cancers pulmonaires induits par le radon surviendraient donc chez les fumeurs, le tabac jouant le rôle de facteur aggravant.

### 3. MESURE DU RADON

#### 3.1 GRANDEURS PHYSIQUES MISES EN JEU

##### 3.1.1 L'ACTIVITE VOLUMIQUE DU RADON

L'**activité** est le nombre de désintégrations nucléaires spontanées qui se produisent dans une quantité donnée de matière par unité de temps. L'activité s'exprime en becquerels. Un becquerel correspond à la désintégration d'un atome par seconde.

L'activité est donnée par la relation :

$$A = \lambda N$$

où :

A est l'activité, exprimée en becquerels (Bq) ;

$\lambda$  est la constante de désintégration ( $s^{-1}$ ) ;

N est le nombre d'atomes de l'élément considéré.

La constante de désintégration,  $\lambda$ , est reliée à la période radioactive (cf. tableau 2) par la relation :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

où :

T est la période radioactive exprimée en seconde (s).

L'**activité volumique du radon** est l'activité par unité de volume d'air. Elle s'exprime en becquerels par mètre cube ( $Bq.m^{-3}$ ).

##### 3.1.2 L'ENERGIE 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<sup>5</sup> avec ses descendants à vie courte, l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du  $^{222}\text{Rn}$  est égale à  $5,55.10^{-9}$  J.

Elle est donnée par la relation :

$$EAP_{222} = 2,19.10^{-12} (N^{218}\text{Po}) + 1,23.10^{-12} (N^{214}\text{Pb} + N^{214}\text{Bi} + N^{214}\text{Po})$$

où

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

$N^{218}\text{Po}$  est le nombre d'atomes de  $^{218}\text{Po}$  ;

---

<sup>5</sup> Equilibre entre le nombre de noyaux de radon et celui de ses descendants



$N^{214}\text{Pb}$  est le nombre d'atomes de  $^{214}\text{Pb}$  ;

$N^{214}\text{Bi}$  est le nombre d'atomes de  $^{214}\text{Bi}$  ;

$N^{214}\text{Po}$  est le nombre d'atomes de  $^{214}\text{Po}$ .

Note : le nombre d'atomes de  $^{214}\text{Po}$  présents dans l'atmosphère étant faible, il peut être négligé dans le calcul.

Pour le  $^{220}\text{Rn}$ , l'énergie alpha potentielle est donnée par la relation suivante :

$$EAP_{220} = 2,34 \cdot 10^{-12} (N^{216}\text{Po}) + 1,25 \cdot 10^{-12} (N^{212}\text{Pb} + N^{212}\text{Bi}) + 1,41 \cdot 10^{-12} (N^{212}\text{Po})$$

où :

$EAP_{220}$  est l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du  $^{220}\text{Rn}$  exprimée en joules ;

$N^{216}\text{Po}$  est le nombre d'atomes de  $^{216}\text{Po}$  ;

$N^{212}\text{Pb}$  est le nombre d'atomes de  $^{212}\text{Pb}$  ;

$N^{212}\text{Bi}$  est le nombre d'atomes de  $^{212}\text{Bi}$  ;

$N^{212}\text{Po}$  est le nombre d'atomes de  $^{212}\text{Po}$ .

### 3.1.3 L'ENERGIE ALPHA POTENTIELLE VOLUMIQUE

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

### 3.1.4 LE FACTEUR D'EQUILIBRE

Pour un volume d'air contenant du radon, le facteur d'équilibre est défini comme étant le rapport entre l'EAPv 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  $^{222}\text{Rn}$  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 :

$$F = \frac{EAP_v}{5,55 \cdot 10^{-9} \times A_v}$$

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.

Le facteur  $5,55 \cdot 10^{-9}$  représente l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du radon 222 calculée pour 1 Bq de radon 222, à l'équilibre avec ses descendants à vie courte, et exprimée en joules par becquerel.

Lorsque l'équilibre total est atteint, ce facteur devient égal à 1. A l'inverse, plus l'atmosphère est ventilée, moins l'équilibre peut s'établir et plus ce facteur est faible.

Pour ce qui est des lieux souterrains (Améon et Brenot, 2004), comme les mines, on peut habituellement attribuer un facteur d'équilibre de 0,2 pour les mines ventilées et de 0,4 et plus pour les mines non ventilées.

### 3.2 TYPES DE MESURE

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 :

- les méthodes de mesure ponctuelle qui consistent à prélever le radon sur une courte durée (inférieure à 1 h) en un point donné de l'espace ;
- les méthodes de mesure intégrée qui nécessitent une durée de prélèvement minimale d'une semaine afin d'inclure un certain nombre de cycles de variation journalière ;
- les méthodes de mesure en continu qui consistent en un prélèvement effectué en continu dont la durée doit être adaptée à la dynamique du phénomène étudié.

L'ensemble de ces méthodes est codifié par les normes AFNOR.

La norme NF M 60-763 donne des indications générales pour mesurer l'activité volumique du radon 222 et l'énergie alpha potentielle volumique de ses descendants à vie courte dans une atmosphère libre (environnement) ou confinée (bâtiments). Elle permet de choisir la technique de mesure et sa durée en fonction :

- du but recherché (observation phénoménologique, mesure à caractère sanitaire, etc) ;
- du niveau d'activité attendu.

Nous présentons en annexe 2, pour information, l'organisation des normes relatives à la mesure du radon 222 et de ses descendants à vie courte dans l'atmosphère telle qu'elle figure dans la norme NF M 60-763.

La *figure 3* illustre à titre d'exemple les résultats des trois types de mesure de l'activité volumique du radon.

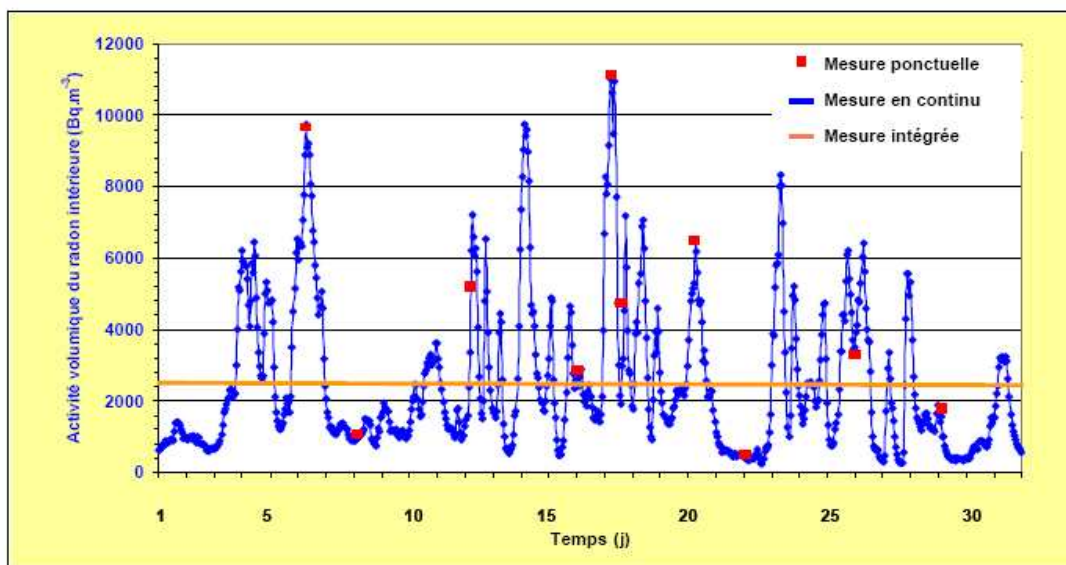


Figure 3 : Résultats obtenus suivant le type de mesures utilisées (continues, intégrées ou ponctuelle) (source IRSN)

### 3.3 MESURES DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DU RADON 222

#### 3.3.1 LES MESURES PONCTUELLES

##### 3.3.1.1 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 (cf. figure 3).

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, ...).

##### 3.3.1.2 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.

##### 3.3.1.3 APPAREILLAGES

Parmi les dispositifs pouvant répondre aux exigences de la norme AFNOR, on trouve les fioles scintillantes dont celles proposées par la société ALGADE. Il s'agit de fioles d'un volume connu recouvertes sur une partie de leur surface intérieure de sulfure de zinc activé à l'argent. La fiole est mise sous vide préalablement à son utilisation. Le prélèvement de radon se fait par aspiration

dans la fiole au travers d'un filtre destiné à arrêter les aérosols contenus dans l'air et en particulier les descendants du radon. Les particules alpha émises par le radon et ses descendants formés dans la fiole excitent le sulfure de zinc qui émet alors des photons. Ceux-ci sont transformés en électrons par un photomultiplicateur et comptabilisés par une chaîne de comptage. On obtient ainsi un nombre de particules  $\alpha$  émises pendant une durée donnée directement proportionnel à l'activité volumique du radon.

### **3.3.2 LES MESURES INTEGREES**

#### **3.3.2.1 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.

#### **3.3.2.2 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.

#### **3.3.2.3 APPAREILLAGES**

Parmi les dispositifs répondant aux exigences de la norme NF M 60-766, le plus répandu est le détecteur solide de traces nucléaires (DSTN). Le DSTN est constitué d'un polymère ayant la particularité d'être sensible aux particules alpha du radon. Lors de leur parcours dans le matériau, les particules alpha transfèrent leur énergie en ionisant ou excitant les atomes du polymère. Cette énergie cédée au milieu traversé laisse des zones de dégâts appelées « traces latentes ». Ces traces sont ensuite révélées par un traitement chimique approprié puis observées par microscope optique. Le nombre de traces est proportionnel à l'activité volumique moyenne de radon à laquelle le détecteur est exposé.

### **3.3.3 LES MESURES EN CONTINU**

#### **3.3.3.1 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.

### 3.3.3.2 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, ...

### 3.3.3.3 APPAREILLAGES

Parmi les différents appareils pouvant répondre aux exigences de la norme AFNOR NF M 60-767 se trouvent les chambres d'ionisation et les semi-conducteurs adaptés à un volume connu d'air.

La sonde Barasol (BALise du RAdon dans le SOL) développée par la société ALGADE est un appareillage de mesure semi-continue de l'activité volumique du radon.

Un détecteur silicium 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.

Alimentée par un boîtier de piles alcalines, elle est conçue pour mesurer des concentrations de radon de quelques centaines de  $\text{Bq.m}^{-3}$  à  $10^9 \text{Bq.m}^{-3}$  avec une autonomie de l'ordre de l'année.

Il existe également des appareillages d'un autre type, comme l'appareil AlphaGUARD commercialisé par la société SAPHYMO qui est muni d'une chambre d'ionisation d'un volume connu, dotée d'un filtre en entrée, retenant les aérosols présents dans l'air ambiant. Le radon 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  $\text{Bq.m}^{-3}$  et  $10^6 \text{Bq.m}^{-3}$ . 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.

## 3.4 MESURE DE L'ENERGIE ALPHA POTENTIELLE VOLUMIQUE

Il existe également des méthodes de mesure intégrée et ponctuelle de l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon 222.

### 3.4.1 LES METHODES INTEGrees

Les méthodes intégrées de l'EAPv, codifiées par la norme AFNOR NF M 60-764 (septembre 2004), sont basées sur :

- le prélèvement sans interruption, sur une membrane filtrante de haute efficacité, des descendants à vie courte du radon contenus dans un volume d'air représentatif de l'atmosphère étudiée ;
- l'accumulation pendant toute la durée du prélèvement, d'une grandeur physique mesurable (nombre de traces nucléaires, impulsions électriques...) sur un dispositif approprié ;
- la mesure du nombre de désintégrations alpha des descendants collectés, au moyen d'un détecteur sensible aux particules alpha permettant leur discrimination.

Le but du prélèvement est de recueillir en continu tous les aérosols porteurs des descendants à vie courte du radon, quelle que soit leur taille. Pour que le prélèvement soit représentatif pendant toute sa durée, le débit d'aspiration doit être stable. Ensuite, le but est de discriminer puis de dénombrer les particules alpha émises par les descendants du radon collectés sur la membrane filtrante.

Le nombre de particules de différents types ainsi comptabilisées permet, après calcul, d'en déduire la valeur de l'énergie alpha potentielle.

### **3.4.2 LES METHODES PONCTUELLES**

Elles consistent en un prélèvement effectué sur une courte durée (inférieure à une heure) en un point donné de l'espace suivi d'une analyse réalisée simultanément ou après un délai déterminé. La norme NF M 60-765 (septembre 2004) en décrit les principes.

Ces méthodes sont basées sur :

- le prélèvement ponctuel, sur une membrane filtrante, des descendants à vie courte du radon contenus dans un volume d'air représentatif de l'atmosphère étudiée au temps  $t$  ;
- la mesure du nombre de désintégrations alpha des descendants collectés, au moyen d'un détecteur sensible aux particules alpha permettant ou non leur discrimination en énergie.

Les concentrations des différents émetteurs sont déterminées à partir des lois de décroissance radioactive, par des comptages de durée prédéfinie, répétés à des temps donnés (pour plus de détails, se référer à la norme NF M 60-765). Le comptage débute soit pendant le prélèvement, soit après l'arrêt du prélèvement.

Parmi les détecteurs qui peuvent être utilisés, on citera, entre autres, un photomultiplicateur associé à une surface sensible scintillante (ZnS(Ag)) ou un semi-conducteur au silicium sensible aux émissions alpha. Le détecteur utilisé est relié à un système de comptage d'impulsions.

### **3.5 MESURE DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DU RADON 222**

La norme AFNOR NF M 60-768 (octobre 2002) donne des recommandations sur l'estimation du flux surfacique d'exhalation du radon 222 en un point et à un instant donnés par la méthode d'accumulation.

### 3.5.1 DEFINITION

Le flux surfacique d'exhalation du radon 222 est le nombre d'atomes de radon 222 traversant une surface de référence pendant un temps de référence.

### 3.5.2 PRINCIPE

Il est basé sur la mesure de l'activité volumique du radon 222 dans un conteneur d'accumulation, pendant un temps donné.

Le flux surfacique est estimé à partir du calcul de la variation de l'activité volumique du radon entre deux instants, de la surface utile du conteneur d'accumulation en contact avec la surface étudiée et de son volume utile.

Le flux surfacique d'exhalation du radon est estimé à partir de la variation de l'activité volumique du radon contenu dans l'air du conteneur d'accumulation en fonction du temps, donnée par la relation suivante :

$$\frac{dA_v}{dt} = \frac{\phi \cdot S}{V} - A_v \cdot \lambda$$

où :

$\phi$  est le flux surfacique d'exhalation du radon, exprimé en becquerels par mètre carré et par seconde ;

$A_v$  est l'activité volumique du radon de l'air prélevé dans le conteneur d'accumulation, au temps  $t$ , exprimée en becquerel par mètre cube ;

$S$  est la surface utile de la face ouverte du conteneur d'accumulation appliquée sur la surface étudiée, exprimée en mètres carrés ;

$V$  est le volume utile du conteneur d'accumulation, exprimé en mètres cubes ;

$\lambda$  est la constante de désintégration du radon ( $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ).

La résolution de l'équation permet d'expliquer le flux surfacique d'exhalation selon :

$$\phi = \frac{A_v \cdot V \cdot \lambda}{S \cdot (1 - e^{-\lambda t})}$$

où  $t$  est le temps écoulé depuis le début de l'accumulation, exprimé en secondes.

### 3.5.3 APPLICATIONS

Cette méthode est seulement estimative car elle dépend de l'influence de nombreux paramètres difficilement quantifiables. Elle revêt tout son intérêt dans le cas d'une recherche de sources de radon dans un bâtiment ou d'une étude comparative des flux sur un même site.

## 3.6 MESURE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DU RADON 222 DANS L'EAU

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'activité volumique du radon 222 dissous dans l'eau.

La norme française NF M 60-761-1 (août 2007) donne des indications générales pour le prélèvement, le conditionnement, le transport et la mesure de l'activité volumique du radon 222 dans des échantillons d'eau.

Les méthodes de mesure décrites sont soit directes (spectrométrie gamma, méthode codifiée par la norme NF M 60-761-2, en préparation), soit indirectes (après dégazage du radon dissous dans l'eau, méthode codifiée par la norme NF M 60-761-3, mai 2008). Elles peuvent être mises en œuvre en laboratoire ou sur site.

La figure présentée en annexe 3 schématise les techniques de mesure du radon dans l'eau. Pour plus de détails, on se reportera aux documents de référence cités ci-dessus.



## **4. ASPECTS DOSIMETRIQUES**

Il existe des difficultés à caractériser les doses permettant de quantifier l'impact des rayonnements ionisants sur les tissus biologiques. En effet, le radon se présente comme un « casse-tête dosimétrique » en raison de la complexité de son état physique résultant de l'équilibre du gaz et des produits de filiation solides de faible période radioactive, de la faible pénétration des émissions alpha et de l'incertitude de localisation exacte des cellules sensibles aux effets des rayonnements ionisants dans le poumon.

### **4.1.1 UNITES UTILISEES**

Pour une dose absorbée donnée, les particules alpha produisent plus de dommages que les particules bêta, les rayons gamma et les rayons X.

Afin de tenir compte de cette différence, on exprime la dose de rayonnement sous forme d'un équivalent de dose en sieverts (Sv). Le sievert mesure l'effet biologique produit sur un individu par le rayonnement absorbé (pour le corps entier, on parle de dose efficace). A valeur d'activité volumique de radon identique, la dose exprimée en sieverts varie donc selon que le facteur d'équilibre est voisin ou très inférieur à 1.

La dose efficace totale reçue par un individu résulte de son exposition externe et interne.

Ceci a conduit à proposer l'utilisation d'une unité d'exposition nouvelle, l'Energie Alpha Potentielle cumulée<sup>6</sup>. Cette unité est basée sur la notion d'exposition à une activité volumique donnée mesurable pendant un temps donné et exprimée en joule-heure par mètre cube ( $J.h.m^{-3}$ ). Cette grandeur est affectée d'une équivalence en Sv par comparaison directe de l'excès de cancers (poumon) induits.

### **4.1.2 DOSE RESULTANT DE L'EXPOSITION INTERNE**

Pour l'exposition interne (inhalation, ingestion), les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants sont données pour les descendants du radon 222 et du radon 220 dans l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003. Cet arrêté définit notamment des facteurs de conversion conventionnels exprimant la dose efficace par unité d'exposition à l'énergie alpha potentielle cumulée (en  $Sv.h^{-1}.J^{-1}.m^3$ ).

La relation d'équivalence est différente pour les personnes évoluant sur leur lieu de travail et les personnes séjournant dans leur lieu d'habitation.

Pour une exposition au radon 222, le facteur de conversion vaut  $1,1 Sv.h^{-1}.J^{-1}.m^3$  sur les lieux d'habitations et  $1,4 Sv.h^{-1}.J^{-1}.m^3$  sur les lieux de travail.

Pour une exposition au radon 220, le facteur de conversion vaut  $0,5 Sv.h^{-1}.J^{-1}.m^3$  sur les lieux de travail. Aucune valeur n'est fournie pour cet isotope sur les lieux d'habitations.

---

<sup>6</sup> cf. publication 65 de la Commission Internationale de Protection Radiologique ou CIPR.

Les facteurs de conversion exprimant la dose efficace par unité d'exposition à l'énergie alpha potentielle volumique (en  $\text{Sv.h}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{m}^3$ ) pour une exposition au radon 222 sont de 1,1  $\text{Sv.h}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{m}^3$  sur les lieux d'habitations et 1,4  $\text{Sv.h}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{m}^3$  sur les lieux de travail.

Pour le radon 220, le facteur de conversion vaut 0,5  $\text{Sv.h}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{m}^3$  sur les lieux de travail. Aucune valeur n'est fournie pour cet isotope sur les lieux d'habitations.

#### **4.1.3 DOSE RESULTANT DE L'EXPOSITION EXTERNE**

Pour l'exposition externe, la dose équivalente exprimée en sievert est égale au produit de la dose absorbée et d'un facteur de pondération pour les rayonnements. Pour les rayons gamma, ce facteur vaut 1.

## **5. ASPECTS REGLEMENTAIRES**

Nous nous proposons de faire le point sur la législation en France dans les domaines suivants : les mesures de radon et les organismes agréés, la réglementation dans les établissements recevant du public et les lieux de travail, la réglementation relative à la protection des travailleurs et enfin la réglementation sur les lieux d'habitation et sur l'eau. Avant d'aborder la réglementation elle-même, nous présentons les principaux organismes qui en sont à l'origine.

### **5.1 ORGANISMES A L'ORIGINE DE LA REGLEMENTATION**

#### **5.1.1 LES ORGANISMES INTERNATIONAUX**

De nombreux organismes participent aux travaux de synthèse scientifique et de définition des normes en matière de radioprotection.

On peut citer :

- La C.I.P.R : La Commission Internationale de Protection Radiologique est un organisme fondé en 1950 et affilié à l'Organisation Mondiale de la Santé depuis 1956. Cet organisme émet des recommandations sous forme de publications.
- L'UNSCEAR : Le Comité Scientifique des Nations Unies pour l'Etude des Effets des Rayonnements Ionisants a pour mission de regrouper et d'analyser les informations concernant la radioactivité ambiante et les résultats de recherche sur les effets pathologiques.
- L'A.I.E.A. : l'Agence Internationale de l'Energie Atomique est une organisation autonome intergouvernementale créée par les Nations Unies en 1956. Elle a pour mission d'encourager la recherche sur l'énergie atomique, de favoriser l'échange de résultats scientifiques et de technologies dans ce domaine, de veiller à la non-prolifération de l'arme atomique et de promouvoir la sûreté des installations nucléaires.
- L'EURATOM : La Communauté Européenne de l'Energie Atomique a été instaurée en 1957 par le traité de Rome qui imposait à tous les pays membres d'avoir le même niveau de sécurité radiologique. A cet effet, elle définit des normes élaborées à partir des recommandations de la C.I.P.R.

#### **5.1.2 LES ORGANISMES FRANÇAIS**

- L'A.S.N. : l'Autorité de Sûreté Nucléaire assure, au nom de l'Etat, le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France pour protéger les travailleurs, les patients, le public et l'environnement des risques liés aux activités nucléaires. Il contribue à l'information des citoyens.
- L'I.R.S.N : l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire est en charge de l'évaluation scientifique du risque nucléaire et radiologique. Dans le cadre de ses travaux sur le radon, il mène des recherches sur les méthodes de mesure, procède à des analyses dans les bâtiments et l'environnement et évalue les actions à entreprendre.

- Certains organismes décentralisés de l'état, tels que les DDASS ou les DRIRE, peuvent intervenir à différents niveaux dans l'assistance, la prévention et le contrôle en termes de radioprotection.

## **5.2 REGLEMENTATION DANS LES ETABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC ET LES LIEUX DE TRAVAIL**

Suite à la transposition de la Directive EURATOM 96/29 dans le droit français, les pouvoirs publics ont émis le Décret n°2002-460 du 4 avril 2002 modifié par le décret 2007-1582 du 7 novembre 2007 relatif à la protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.

L'arrêté d'application du 22 juillet 2004 précise que des mesures de l'activité volumique du radon doivent être réalisées dans quatre types de lieux ouverts au public (établissements d'enseignement, sanitaires et sociaux, thermaux et pénitentiaires) situés dans 31 départements prioritaires. Les mesures doivent être par l'IRSN ou des organismes agréés.

Deux niveaux d'action au-delà desquels des actions visant à réduire l'exposition doivent être mises en œuvre sont fixés :

- lorsqu'au moins un des résultats de mesure de radon dépasse  $400 \text{ Bq.m}^{-3}$  et qu'ils sont tous inférieurs à  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ , le propriétaire met en œuvre sur le bâtiment des actions simples ;
- lorsqu'au moins un résultat de mesure dépasse  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ , le propriétaire effectue sans délai des actions simples, suivies immédiatement d'un diagnostic du bâtiment.

## **5.3 REGLEMENTATION POUR LES MESURES RELATIVES AU RADON ET LES ORGANISMES AGREES**

L'arrêté du 15 juillet 2003 modifié par l'arrêté du 4 juillet 2007 précise les conditions d'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures de l'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public. La demande d'agrément doit être déposée auprès de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN).

Cet arrêté définit deux niveaux d'agrément :

- N1 : niveau d'agrément pour réaliser le dépistage du radon dans les bâtiments ;
- N2 : niveau d'agrément pour réaliser des mesures de radon, nécessaires pour identifier la source et les voies de transfert du radon dans les bâtiments.

De plus, un avis pris en application de l'article 6 de l'arrêté du 22 juillet 2004 liste les normes AFNOR de mesures du radon en vigueur<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Voir le Journal Officiel de la République française n°186, texte n°72, 12 août 2004 : page 14428.

#### **5.4 PROTECTION DES TRAVAILLEURS CONTRE LES RISQUES LIES A L'EXPOSITION AU RADON**

L'article R4457-6 du code du travail (décret 2008-244 du 7 mars 2008) prévoit la mise en œuvre de mesures du radon dans les établissements, situés dans les 31 départements prioritaires (dont la liste figure à l'article R1333-15 du code de la santé publique), où les travailleurs en raison de la situation de leurs lieux de travail sont exposés au radon.

L'arrêté d'application du 7 août 2008 précise la liste des activités ou catégories d'activité professionnelles concernées par les dispositions de cet article.

Une décision de l'ASN, en cours de parution, précisera les niveaux au-dessus desquels le chef d'établissement met en œuvre des actions nécessaires à réduire l'exposition à un niveau aussi bas que raisonnablement possible.

#### **5.5 REGLEMENTATION POUR LES LIEUX D'HABITATION**

A ce jour, la réglementation ne prévoit pas de dispositions particulières pour la gestion du risque associé à la présence de radon dans les lieux d'habitation. Nous présentons ci-dessous ce qui est proposé dans d'autres pays.

En ce qui concerne la présence de radon dans les habitations, le ministère de la santé au Canada recommande de prendre des mesures correctives lorsque l'activité volumique moyenne annuelle du radon dépasse 200 Bq.m<sup>-3</sup>. Aux Etats-Unis, l'EPA a établi cette limite à 150 Bq.m<sup>-3</sup>.

De nombreux pays (Angleterre, Suède, Finlande, ...) ont fixé entre 200 et 400 Bq.m<sup>-3</sup> le niveau au-delà duquel des actions sont à entreprendre pour diminuer la concentration en radon dans l'air à l'intérieur des habitations. Le choix des niveaux d'action se fonde en général sur la notion de risque acceptable, c'est-à-dire de niveau correspondant, selon les estimations, à un risque sanitaire pour la population semblable à d'autres risques quotidiens.

#### **5.6 REGLEMENTATION SUR LE RADON ET L'EAU**

En ce qui concerne l'eau de boisson, les "Directives de qualité pour l'eau de boisson" de l'OMS et la Commission Européenne recommandent de mettre en place des contrôles (dosages répétés par exemple) si le radon dépasse 100 Bq.L<sup>-1</sup> dans le réseau d'alimentation en eau potable. Au-delà de 1000 Bq.L<sup>-1</sup>, la Commission Européenne préconise de prendre des mesures correctives. Il a en effet été estimé que 1000 Bq.L<sup>-1</sup> de radon dans l'eau de distribution entraînent une augmentation de la concentration de radon dans l'air à l'intérieur des bâtiments de l'ordre de 100 Bq.m<sup>-3</sup> en moyenne (UNSCEAR, 1993 ; Nazaroff et al., 1987).

## **6. LE RADON EN ENVIRONNEMENT MINIER**

### **6.1 CONTEXTE MINIER**

Du fait de leur exposition professionnelle, les populations de mineurs de fond ont été les premières à bénéficier d'un suivi épidémiologique pour évaluer le risque de cancer lié à l'inhalation du radon. Les études effectuées dans ce cadre ont été réalisées aussi bien chez les mineurs d'uranium que chez les mineurs d'étain, de fer et de fluorspar (appelé aussi spath fluor ou fluorine) dans différents pays.

On peut trouver dans la littérature, des communications relatives aux valeurs d'activité volumique de radon à proximité d'anciennes mines métalliques, dans les maisons et à l'extérieur (Somlai et al., 2006 ; Gillmore et al., 2001 ; Quindos Poncela et al., 2004).

Certains auteurs (Wysocka et al., 1999) avancent que l'incidence des travaux miniers à faible profondeur (50 m) revient à amplifier d'un facteur 4 l'activité volumique du radon dans les habitations.

Les zones sédimentaires de la Lorraine forment un ensemble géologique caractérisé par des teneurs en uranium faibles, mais certains secteurs peuvent en contenir davantage comme les zones argileuses et plus particulièrement celles contenant de la pyrite, ou encore les zones avec présence de matières organiques (zones argilo-marneuses).

Le BRGM a proposé une méthode pour identifier l'origine (profonde ou superficielle) du radon dans le cas de présence de travaux miniers sous-jacents par exemple (Baubron et al. 2004). Elle consiste à assurer le suivi de l'activité volumique du radon à plusieurs niveaux (sous le niveau du sol, dans la pièce au contact avec le sol) en fonction du temps. Ensuite, une modélisation en réponse impulsionnelle est réalisée pour observer si l'évolution de l'activité volumique répond à des cycles journaliers ou de 12 heures. La vitesse de transfert du gaz depuis le sol est déterminée puis une analyse est menée pour savoir si c'est l'advection ou la diffusion qui contrôle le processus d'exhalation et si le chauffage des locaux est un paramètre influent ou non.

D'après les études réalisées, un certain nombre de paramètres météorologiques agit sur l'activité volumique du radon dans les pores du sol, comme la température atmosphérique, la pression barométrique, la pluviosité, l'humidité de l'air et le vent. Les valeurs maximales sont généralement mesurées vers minuit et les minima à midi. Cela est dû en grande partie au cycle diurne de la température qui modifie la diffusion atmosphérique du radon. Les mesures effectuées montrent également que l'augmentation de l'activité volumique du radon dans le sol est observée lors des chutes de pression barométrique.

Ainsi, en période de dépression, la dilatation de gaz du sol favorise une plus grande exhalation du radon. Cependant, ces variations de pression n'expliquent pas à elles seules les variations de l'activité volumique du radon observées à l'échelle d'une année.

La succession des mécanismes suivants est avancée pour expliquer la présence de radon à la surface du sol :

- les roches dégazent naturellement ; le gaz résultant, dont les flux peuvent être amplifiés par les circuits convectifs utilisant les anciens travaux miniers, chemine par les fractures naturelles ou consécutives aux travaux d'exploitation du minerai en profondeur ;
- au cours de la traversée d'horizons riches en radon, ces gaz profonds se chargent en radon. L'ensemble des gaz émane en surface sur un laps de temps qui s'il est suffisamment court permet au radon de ne pas décroître en totalité. Les habitations mal isolées du sous-sol, qui se situent sur des terrains comportant des fractures ou déconsolidés par des affaissements miniers, peuvent être contaminées par ces gaz profonds chargés en radon. Mais dans des secteurs situés en dehors des exploitations minières, la fracturation naturelle peut avoir la même incidence.

Ainsi, en se reportant au guide méthodologique relatif à l'élaboration des plans de prévention des risques miniers (INERIS, 2006a), il est avancé un certain nombre de mécanismes ou scénarios initiateurs susceptibles de contribuer à la migration de gaz de mine vers la surface.

Les mécanismes suivants sont proposés :

- la production de gaz au sein des anciens travaux ;
- le pistonage par remontée de la nappe ;
- les variations de pression atmosphérique ;
- le tirage naturel thermique ;
- la diffusion ;
- le transport sous forme dissoute ;
- les mécanismes exceptionnels tels que les séismes.

Un certain nombre de ces mécanismes a pu être observé et suivi. Notamment, le rôle du tirage naturel thermique a clairement été identifié dans la sortie de radon par les exutoires en relation avec les travaux miniers non ennoyés du bassin ferrifère lorrain (cf. § 6.2.6.1).

## 6.2 QUELQUES CAS CONCRETS

Les cas qui vont être présentés ci-après sont issus d'une part des recherches menées par l'INERIS dans le cadre de l'évaluation du risque de radon lié aux anciennes activités minières et d'autre part du résultat d'un travail bibliographique s'intéressant aux données récoltées en France et à l'étranger.

Dans l'environnement minier, on peut relever deux vecteurs potentiels de la radioactivité : l'eau et l'air. La caractérisation des teneurs en radon dans les eaux est un élément important des politiques de prévention vis-à-vis du risque sanitaire présenté par ce gaz. Dans les établissements thermaux en particulier, le dégazage forcé d'eau utilisée en grande quantité engendre des valeurs d'activité volumique dans l'atmosphère intérieure de certaines stations de plusieurs milliers de becquerels par mètre cube d'air (Améon, 2003).

Lors de nos différentes recherches bibliographiques et études sur site, nous nous sommes exclusivement intéressés aux mesures dans l'air.

### **6.2.1 CAS DES SITES MINIERS URANIFERES**

Près de 200 sites miniers uranifères ont été exploités en France entre 1945 et 1985 (MIMAUSA ; IRSN, 2007). La plupart de ces sites sont désormais totalement réaménagés et certains font l'objet d'une surveillance par AREVA. L'importance de cette surveillance est proportionnelle à la taille des sites, ainsi qu'aux impacts associés. Elle concerne l'eau, les sédiments des cours d'eau et des retenues et l'air avec la mesure de l'exposition externe, de l'activité volumique des poussières et du radon.

En ce qui concerne le radon, sa mesure dans l'environnement est réalisée par l'intermédiaire de l'EAPv, laquelle est très dépendante des conditions climatiques (et notamment de l'humidité) et de la situation topographique de la station de contrôle (les situations en fond de vallée étant plus favorables à l'accumulation du radon que les situations sommitales).

De nombreuses données existent et sont, pour les plus récentes, regroupées dans une base de données gérées par AREVA. On peut citer à titre d'exemple les données de la surveillance autour des anciennes mines de la Division de la Crouzille en Haute Vienne, qui permettent de disposer d'un retour d'expérience de plus de 10 ans après le réaménagement. Les niveaux mesurés varient de quelques dizaines à plusieurs centaines de  $\text{nJ.m}^{-3}$ . En 2006, les valeurs maximales ont été mesurées sur le stockage de résidus de Bellezane dans la MCO<sup>8</sup> 105 et à la station Vieux Moulin sur le Site Industriel de Bessines avec une EAPv de l'ordre de  $600 \text{ nJ.m}^{-3}$  en moyenne<sup>9</sup>.

Toutefois, concernant les galeries souterraines, aucune donnée relative au radon ou ses descendants n'est disponible pour ces sites.

### **6.2.2 CAS DES MINES DE CHARBON**

Les études relatives au radon ont été menées dans des habitations situées à l'aplomb de mines de charbon fermées du bassin houiller lorrain.

On peut citer l'étude menée conjointement par le BRGM et l'INERIS (Baubron et al., 2002) qui s'est attachée à déterminer la contribution des travaux miniers à la présence de radon dans les habitations situées dans l'emprise des concessions minières.

L'analyse menée dans le bassin houiller lorrain sur une zone où les anciens travaux sont particulièrement proches de la surface montre qu'il n'y a pas de contamination des habitations par l'air de la mine. Il est cependant souligné que le captage de gaz mis en place sur les anciens travaux de la mine doit contribuer à limiter la migration du radon vers les habitations. L'arrêt de ce captage pourrait modifier les conditions actuelles de migration du gaz.

---

<sup>8</sup> Mine à ciel ouvert

<sup>9</sup> Le bruit de fond régional (Ile-de-France) est en valeur moyenne annuelle estimé à environ  $40 \text{ nJ.m}^{-3}$  pour les descendants du  $^{222}\text{Rn}$  et  $30 \text{ nJ.m}^{-3}$  pour les descendants du  $^{220}\text{Rn}$  (IPSN, 1998).



### 6.2.3 CAS DES MINES DE POTASSE

Un certain nombre d'études a été conduit sur différents sites en France. Les études menées par Baubron et al. (2003) sur les mines de potasses d'Alsace ont mis en évidence des valeurs d'activité volumique du radon importantes. Les concentrations les plus élevées ont été identifiées dans certains établissements situés dans la plaine d'Alsace et en particulier deux bâtiments situés à Pulversheim. Cette commune est entourée de plusieurs mines de potasse maintenant abandonnées. Dans le contexte géologique du fossé rhénan, les valeurs d'activité volumique mesurées en surface ont plusieurs origines possibles :

- la nature du proche sous-sol (alluvions provenant des massifs granitiques vosgiens) ;
- la présence des vides d'exploitation minière par foudroyage ;
- le contexte tectonique particulier du secteur (zones de fractures profondes et d'anomalies thermiques).

L'étude réalisée ne permet pas de trancher sur l'origine précise du radon, ni sur la part attribuable à la présence de structures tectoniques et à la nature géologique du secteur, ni sur celle qui proviendrait d'un flux anormal en relation avec les travaux miniers.

### 6.2.4 CAS DES MINES DE PHOSPHATE

La radioactivité dans les phosphates provient des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232. Les concentrations des radionucléides de la chaîne du thorium 232 sont souvent faibles. Par contre, celles de la chaîne de l'uranium 238 sont relativement élevées.

Ainsi, le minerai moyen de phosphate marocain contient entre 100 et 130 g d'uranium par tonne de minerai, et celui de Floride entre 100 et 180 g/t (Moisset, 1980). Ces radionucléides peuvent se retrouver pour partie dans le phosphogypse, comme l'indique le tableau 4 qui fournit l'activité massique de certains d'entre eux pour le minerai de phosphate et pour le phosphogypse.

La fraction fine du phosphogypse a tendance à concentrer les impuretés puisqu'il est possible d'y trouver des valeurs de l'ordre de 6 000 Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$  et de  $^{210}\text{Pb}$  (Rutherford *et al.*, 1996).

A titre de comparaison, l'activité massique du  $^{226}\text{Ra}$  dans une roche granitique dont la teneur en uranium atteint 100 ppm est de l'ordre de 1 000 Bq/kg.

<b>Radionucléide</b>	<b>Activité massique dans le minerai de phosphate (Bq/kg)</b>	<b>Activité massique dans le phosphogypse (Bq/kg)</b>
radium 226	40 à 5 022	52 à 3 219
plomb 210	240 à 1 835	250 à 1 833
polonium 210	238 à 1 835	355 à 1 765
thorium 230	867 à 1 957	90 à 513
uranium 234	985 à 2 183	68 à 470
uranium 238	90 à 4 800	23 à 468
thorium 232	11 à 622	2 à 39
protactinium 231	46	14
actinium 227	46	14
uranium 235	46	7
radium 228	30	24
thorium 228	30	9

*Tableau 4 : Activité massique des radionucléides contenus dans les minerais de phosphate et dans le phosphogypse [van der Heijde & Passchier., 1988 ; Berish, 1990 ; Conklin, 1992 ; Burnett et al., 1995 ; Rutherford et al., 1996 ; Scholten and Timmermans, 1996 ; Battelle, 1999 ; Mahjoubi et al., 2000]*

### **6.2.5 CAS DES MINES DE CUIVRE**

Des études ont été menées sur d'anciennes mines de cuivre. On peut citer les travaux de Grattan et al. (2004) qui ont pu relever des valeurs de l'activité volumique du radon entre 300 et 3000 Bq.m<sup>-3</sup> dans des galeries mal ventilées des anciennes mines du roi Salomon en Jordanie.

Le cas le plus impressionnant est celui d'une galerie abandonnée (Gillmore et al., 2001) dans une mine de cuivre en Angleterre (la mine de Bushdown dans le Devon). La mesure ponctuelle d'activité volumique de radon mesurée en 1993 avec un détecteur Alphatrack, à 100 m de l'entrée de la mine a atteint ponctuellement 7 millions de Bq.m<sup>-3</sup>.

Les auteurs montrent l'importance des paramètres météorologiques dans la valeur de l'activité volumique mesurée. Ils citent le rôle de la variation de pression barométrique, de la contrainte exercée par les marées (qui génèrent une pression pulsée sur l'espace libre des pores de la roche), du gradient de pression (et également de température) sur le contrôle de l'exhalation du radon.

## 6.2.6 CAS DES MINES DE FER

### 6.2.6.1 MINES DE FER DE LORRAINE

Des anciennes exploitations non-ennoyées du bassin ferrifère lorrain peuvent être divisées en un certain nombre de réservoirs de gaz subdivisés par les fronts d'ennoyage et les limites d'exploitation des différentes concessions, elles-mêmes délimitées par les différentes unités géologiques régionales.

Des mesures continues de gaz émanant des vides miniers, incluant des mesures de l'activité volumique du radon, ont été réalisées sur certains exutoires du bassin ferrifère lorrain. Elles sont accompagnées de la mesure des paramètres météorologiques comme la température et la pression barométrique ainsi que des paramètres relatifs à la nature et l'intensité des écoulements.

En parallèle, des mesures ponctuelles des paramètres aérauliques et de la composition gazeuse ont été réalisées sur de très nombreux orifices miniers du bassin.

#### 6.2.6.1.1 SURVEILLANCE D'ATMOSPHERE DANS LES VIDES POST-MINIERS A MOYEUVE-GRANDE

Les mesures ponctuelles réalisées à la surface ont montré que certains quartiers de l'agglomération de Moyeuve-Grande sont affectés par des émanations de mélanges gazeux sous-oxygénés, chargés en radon et en dioxyde de carbone provenant de l'ancienne mine abandonnée (Pokryszka et Jodart, 2000).

Afin de mieux comprendre le mécanisme de ces émissions, deux stations de mesure en continu des paramètres météorologiques et aérauliques ont été mises en place par l'INERIS à l'exutoire de deux galeries d'accès à l'ancienne mine de Moyeuve-Grande :

- dans la galerie (G37) qui débouche dans le sous-sol d'une pharmacie ;
- et à l'extrémité sud de la galerie d'Hayange (G7) qui débouche dans une rue de Moyeuve-Grande.

La galerie G37 est équipée depuis 2000 et la galerie G7 depuis 2002. Les courbes donnant l'évolution entre avril 2000 et fin novembre 2002 de la température extérieure, du sens du flux et de l'activité volumique du radon dans la galerie G37 sont présentées à titre d'exemple en annexe 4.

L'interprétation des données obtenues sur plusieurs années montre les éléments suivants (Pokryszka et Grabowski, 2003) :

- le tirage thermique est la force motrice principale des écoulements ;
- les points topographiquement bas sont soufflants en période estivale et aspirants en hiver ;
- les points topographiquement hauts sont aspirants en période estivale et soufflants en hiver ;
- l'homogénéité et la stabilité relative de la composition des gaz émis du réservoir durant les périodes du flux globalement sortant. Ainsi, sur la galerie

G37, les valeurs d'activité volumique du radon dans le mélange gazeux sortant peuvent atteindre 7000 à 10000 Bq.m<sup>-3</sup> ;

- une certaine stabilité du comportement des orifices : certains orifices gardent leur caractère soufflant ou entrant pendant plusieurs mois même si des perturbations périodiques peuvent être observées ;
- une corrélation évidente entre l'évolution du flux (sens et intensité) et la température extérieure ;
- une inversion très claire du sens des écoulements sur presque tous les orifices suivis quand la température moyenne hebdomadaire descend au-delà de la température du réseau souterrain (12-14°C) ;
- des fluctuations systématiques du sens d'écoulement dans les périodes pendant lesquelles la température extérieure se situe dans la fourchette de 12 à 14°C.

L'ensemble des mesures effectuées a permis de conclure que les modifications provoquées par les activités minières sont susceptibles d'avoir une influence sur l'émission et la circulation de gaz, et notamment du radon. En particulier, les vides miniers peuvent favoriser l'accumulation de radon tandis que les orifices et la fracturation des terrains induite par l'exploitation facilitent sa migration vers la surface. Cette migration suit le sens général des écoulements imposé par le tirage thermique auquel s'ajoutent les phénomènes secondaires (fluctuations de la pression barométrique, effets dynamiques du vent, ...).

#### 6.2.6.1.2 SURVEILLANCE D'ATMOSPHERE SUR LE RESERVOIR NORD DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Dans le cadre du suivi de l'ennoyage de la partie nord du bassin ferrifère lorrain, quatre stations de mesure et d'acquisition ont été installées par l'INERIS sur quatre exutoires représentatifs de cette partie du bassin. Ce dispositif est destiné à suivre la nature, le sens et l'intensité des émissions gazeuses sur des ouvrages en relation avec les anciens travaux souterrains.

Les premiers résultats des mesures ponctuelles réalisées ont permis de mettre en évidence des valeurs d'activité volumique du radon dans le flux gazeux sortant du réservoir post-minier supérieures à 1000 Bq.m<sup>-3</sup> et pouvant atteindre 10000 Bq.m<sup>-3</sup>. Encore une fois la température extérieure joue un rôle majeur dans les processus d'exhalation. Un flux sortant fortement concentré en radon apparaît aux exutoires se comportant comme des points bas du réseau minier lorsque la température extérieure dépasse 15°C. Inversement de s températures extérieures inférieures à 12°C induisent une entrée d'air atmosphérique dans le milieu souterrain. Les flux d'air fortement chargés en radon s'accompagnent de fortes teneurs en CO<sub>2</sub>, d'une augmentation de la température et d'une diminution des concentrations en O<sub>2</sub>.

#### 6.2.6.1.3 MESURES EN SURFACE DU SOL A L'APLOMB DE ZONES EXPLOITEES NON DEPILEES

Des mesures ponctuelles de l'activité volumique du radon (technique des fioles scintillantes, cf. § 3.3.3.3) ont été réalisées sur deux profils à l'aplomb des anciens

travaux miniers de Moyeuvre-Grande. Il s'agissait de travaux non totalement ennoyés avec un recouvrement variant de 40 m à 150 m.

Les cinq campagnes de mesures réalisées dans des conditions climatiques différentes n'ont pas permis d'identifier clairement l'influence des vides miniers et de l'épaisseur des terrains de recouvrement sur les émanations diffuses de gaz de mines. Ces résultats ont conduit à constater que, dans le contexte étudié (épaisseur de recouvrement significative à importante), l'influence des phénomènes pouvant être attribués à la présence de vides miniers est faible.

#### 6.2.6.2 MINES DE FER DE NORMANDIE

Des investigations relatives au radon ont été réalisées par l'INERIS dans les anciennes mines de fer de Soumont (14) et de May-sur-Orne (14) dans le cadre d'une étude effectuée entre 2005 et 2006 pour GEODERIS.

##### 6.2.6.2.1 MINES DE SOUMONT

Des mesures ponctuelles d'activité volumique ont été réalisées dans des sondages soufflants communiquant avec des vides miniers ainsi que dans le sol à l'aplomb et en dehors des anciens travaux non ennoyés (INERIS, 2006b).

Les valeurs d'activité volumique mesurées dans les sondages ou dans le sol varient de 2200 Bq.m<sup>-3</sup> à 20000 Bq.m<sup>-3</sup> que ce soit à l'aplomb ou en dehors des vides post-miniers.

Les mesures réalisées dans le sol à plusieurs kilomètres des travaux miniers ont montré des valeurs du même ordre de grandeur que celles relevées dans les sondages en relation avec les travaux miniers ou dans le sol à l'aplomb des travaux.

Ceci met en évidence que sur le secteur étudié, les teneurs en radon dans le sol sont variables et que, compte tenu du fond géochimique naturel, la présence de ce gaz n'est pas forcément liée à la présence de travaux miniers en profondeur.

##### 6.2.6.2.2 MINES DE MAY-SUR-ORNE

La mine de May-Sur-Orne est une ancienne exploitation de minerai de fer utilisée suite à sa fermeture comme stockage souterrain d'hydrocarbure liquide. Ce stockage fut abandonné à son tour.

Des mesures en continu ont été réalisées à l'aide de sonde Barasol pour mesurer les valeurs d'activité volumique du radon dans le sol (INERIS, 2005a, 2005b). Les valeurs s'étendent de 8000 Bq.m<sup>-3</sup> à 23000 Bq.m<sup>-3</sup> suivant le secteur de la mine considéré.

Ces mesures seront prochainement complétées par un suivi continu des gaz de mine (méthane, CO<sub>2</sub> et radon) sur deux orifices débouchant dans la partie nord des réservoirs post-miniers.

## **7. LE RADON DANS LES BATIMENTS**

### **7.1 GENERALITES**

Outre les facteurs géologiques ou climatiques, la présence de radon dans les bâtiments dépend de leur emplacement par rapport aux sources de radon, du positionnement par rapport au vent dominant, de la structure du bâtiment et du mode de vie de ses habitants.

Le sol est, en général, la cause principale de présence de radon dans l'air intérieur des bâtiments<sup>10</sup>. L'entrée du radon dans un bâtiment résulte de nombreux paramètres (teneur en radium dans le sol, perméabilité et humidité du sol, présence de fissures ou de fractures dans la roche sous-jacente) et notamment des caractéristiques propres au bâtiment (type de construction, fissuration de la surface en contact avec le sol, système de ventilation...).

Dans une moindre mesure, la présence de radon dans les bâtiments peut cependant avoir d'autres origines :

- 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 ;
- les matériaux de construction : l'utilisation de matériaux de construction très spécifiques ayant une teneur en radium élevée (pierres en granite, briques en terre cuite, plâtre) peut contribuer à augmenter l'activité volumique du radon dans l'air intérieur ;
- l'eau à usage domestique : on peut trouver des concentrations en radon très élevées dans l'eau à usage domestique lorsque celle-ci provient de nappes souterraines situées, par exemple, en terrain granitique.

La présence d'uranium dans le sol et la roche donne une bonne indication des endroits où il peut exister du radium et du radon.

Le plancher et les murs en béton des sous-sols ralentissent l'infiltration, dans les bâtiments, du radon contenu dans le sol. Cependant, les fissures dans le plancher, les jonctions dalle/mur et les passages de tuyauterie permettent au radon de s'infiltrer dans un bâtiment.

Les bâtiments avec de faibles pressions d'air intérieur, des fondations peu étanches, et plusieurs points d'entrée à partir du sol peuvent avoir jusqu'à 20% de l'air intérieur qui provient du sol (source CSTB).

---

<sup>10</sup> cf. site Internet <http://www.cstb.fr/actualites/webzine/editions/mai-2004/forum-radon-2eme-edition-nationale.html>

Les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur dépendent du mode de construction de la maison, des habitudes des résidents en matière d'aération et de l'étanchéité des ouvertures (portes et fenêtres).

Les teneurs en radon sont généralement les plus élevées dans les caves et les sous-sols, car ces locaux se situent au plus près de la source et sont souvent mal ventilés.

## 7.2 MECANISMES D'ENTREE

Le radon peut pénétrer dans un bâtiment par convection (cf. figure 4) ou diffusion depuis le sol sous-jacent, mais également parfois par diffusion à travers les matériaux de construction.

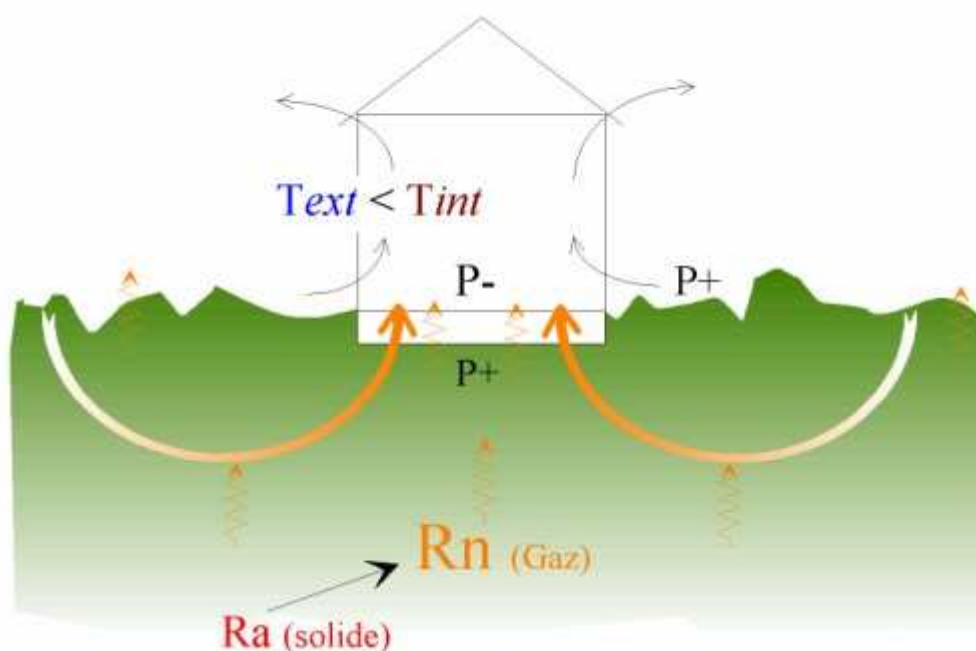


Figure 4 : Mécanismes régulant l'entrée de radon dans les bâtiments (source CSTB)

Les valeurs d'activité volumique du radon peuvent varier énormément entre deux bâtiments adjacents, et même à l'intérieur d'un même bâtiment. Elles varient aussi suivant les saisons, les jours et même au cours d'une journée. Du fait de ces fluctuations, l'estimation de l'activité volumique moyenne annuelle de radon à l'intérieur d'un bâtiment suppose de procéder à des mesures fiables pendant au moins deux mois, et de préférence encore plus longtemps. Les mesures sur le court terme ne donnent que des informations limitées. L'activité volumique moyenne dans l'air extérieur se situe généralement entre  $5$  et  $15 \text{ Bq.m}^{-3}$ , mais de fortes variations sont parfois observées. Un bilan des mesures effectuées sur l'ensemble du territoire français entre 1982 et 2000 a été réalisé par l'IRSN et compilé sous la forme d'un atlas. L'ensemble de ces données révèle que la moyenne pondérée, calculée comme la moyenne des moyennes départementales pondérées par leurs nombres d'habitants, est égale à  $63 \text{ Bq.m}^{-3}$  (Baysson et al.,

2003). De très fortes valeurs d'activité volumique du radon ( $> 1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ ) ont cependant été mesurées dans des bâtiments construits sur des sols très riches en uranium et/ou très perméables. De nombreux pays dans le monde comptent des dizaines de milliers de bâtiments avec des valeurs d'activité volumique de radon dépassant le niveau de référence, c'est-à-dire 200 à 400  $\text{Bq.m}^{-3}$ .

Pour réduire les teneurs en radon à l'intérieur des bâtiments, il existe un certain nombre de techniques qui sont présentées ci-après.

### 7.3 LES TECHNIQUES DE REMEDIATION

Les principes des techniques visant à diminuer la présence de radon dans les bâtiments consistent :

- d'une part, à diluer la concentration en radon dans le volume habité ;
- d'autre part, à empêcher le radon venant du sol d'y pénétrer.

En pratique, on observe de nombreuses variantes techniques faisant appel à ces deux principes conjugués. De façon générique, on peut distinguer trois grandes familles de techniques (<http://www.kheops.champs.cstb.fr/Radon.html>) :

- en premier lieu, il est indispensable d'assurer la meilleure étanchéité à l'air possible entre le bâtiment et son sol sous-jacent ;
- une deuxième famille de solutions consiste à diluer le radon présent dans le bâtiment en augmentant le renouvellement d'air de ce dernier. L'efficacité de cette solution est cependant assez faible car on ne peut pas augmenter le renouvellement d'air sans tenir compte des contraintes énergétiques et de confort thermique ;
- la troisième famille de techniques consiste à traiter le soubassement (vide sanitaire, cave, dallage sur terre-plein). Ce traitement peut être effectué par aération naturelle ou par ventilation mécanique. Cependant, le principe de réduction de l'entrée du radon dans les bâtiments le plus efficace repose sur le système de mise en dépression du sol. En effet, l'objectif de cette technique consiste à générer un champ de pression dans le soubassement inférieur à celui régnant au niveau du sol du bâtiment. Pour cela, l'air du soubassement est extrait mécaniquement vers l'environnement extérieur où le radon se dilue rapidement.

Pour plus de détails, on pourra se reporter aux guides de proposition de solutions techniques édités par le CSTB :

- Réduire la concentration en radon dans les bâtiments neufs. Guide de proposition de solutions techniques, Cahiers du CSTB, Livraison 401, juillet-août 1999, Collignan B., Millet J.R., Cahier 3144.
- Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants. Guide de propositions de solutions techniques, Cahiers du CSTB, Livraison 401, juillet-août 1999, Collignan B., Millet J.R., Cahier 3143.



## **8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

La présence de radon dans les bâtiments est tout d'abord liée à l'existence naturelle de ce gaz dans le sol sous-jacent. Différentes études épidémiologiques montrent une augmentation du risque de cancer avec l'exposition cumulée au radon et à ses descendants radioactifs. Des techniques simples permettent de limiter l'exposition au radon dans ces bâtiments.

Il existe un réel impact des anciennes activités minières sur les flux d'exhalation de radon mesurés à l'aplomb des anciennes exploitations, la présence de vides miniers facilitant ce phénomène. C'est pourquoi la constitution d'une base de données est en cours à partir de mesures in-situ réalisées par l'INERIS dans différents anciens travaux miniers français et de données tirées de la bibliographie internationale.

La finalité de cette base de données est de mieux comprendre l'impact des vides post-miniers dans les mécanismes d'exhalation du radon et ainsi de mieux expliquer la variabilité des mesures réalisées en surface.

## 9. REFERENCES

R. AMEON, 2003 : Le radon dans les stations thermales : une source d'exposition aux rayonnements ionisants, Radioprotection 38 (2), 201-215, 2003.

R. AMEON et J. BRENOT, 2004 : Le risque lié à la présence du radon dans les bâtiments. 3<sup>ème</sup> forum national d'information ERRICCA 2 sur la gestion du radon dans les bâtiments, Toulouse, le 19 octobre 2004, Fédération française du bâtiment Midi-Pyrénées.

BATTELLE Memorial Institute, 1999 : Background report on fertilizer use, contaminants and regulations. Technical report n° 747-R-98-003, U. S. Environmental Protection Agency: Washington (USA), 131 pages.

J-C. BAUBRON, C. JEANDEL, G. FOURNIGUET, 2002 : Evaluation du potentiel de contamination par le radon des habitations du département de la Moselle (57). Rapport BRGM référencé BRGM/RP-51943-FR, novembre 2002.

J.-C. BAUBRON, G. JEANDEL, C. KIEFFER, P. ELSASS, 2003 : Contamination en radon des écoles de Pulversheim (Haut Rhin). Origine et voies de transfert du radon depuis le sol. Rapport BRGM/RP 51725.

J-C. BAUBRON, V. HAMM, J.L. PINAULT, 2004 : Elaboration de la méthodologie de mesurage et d'interprétation de la concentration en radon dans les habitations situées dans l'emprise des travaux miniers souterrains. Rapport BRGM/RP-53886-FR.

H. BAYSSON, S. BILLON, D. LAURIER, A. ROGEL, M. TIRMARCHE, 2003 : Seasonal correction factor for estimating radon exposure in dwellings in France. Radiation Protection Dosimetry, vol 104, No3, pp245-252.

C.W. BERISH, 1990 : Potential environmental hazards of phosphogypsum storage in central Florida. In Chang W. F., ed., Proceedings of the third International Symposium on Phosphogypsum: Orlando (USA). Publication n° 01-060-083, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), volume I, pp. 1-29.

W.C. BURNETT, J.B. COWART, P. LAROCK, C.D. HULL., 1995 : Microbiology and radiochemistry of phosphogypsum. Technical report n° 05-035-115, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), 225 pages.

O. CATELINOIS, A. ROGEL, D. LAURIER, S. BILLON, D. HEMON, P. VERGER et M. TIRMARCHE, 2007 : Evaluation de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France. Bulletin épidémiologique hebdomadaire. Numéro thématique – Impact sanitaire du radon domestique : de la connaissance à l'action, 15 mai 2007 / n°18-19, p 155-158.

B. COLLIGNAN et P. PIRARD, 2005 : Le radon dans l'air intérieur en France : contours et enjeux techniques et sanitaires de la problématique. Environnement intérieur, qualité de l'air et santé. Pollution atmosphérique n°187, p 333-344, juillet-septembre 2005.

C. CONKLIN, 1992 : Potential uses of phosphogypsum and associated risks; background information document. Technical report n° 402-R-92-002, U. S. Environmental Protection Agency: Washington (USA), 124 pages.

C. FERRY, 2000 : La migration du radon 222 dans un sol. Application aux stockages de résidus issus du traitement des minerais d'Uranium. Thèse soutenue le 21 Avril 2000 à l'Université Paris XI d'Orsay.

G.K. GILLMORE, P. PHILLIPS, A. DENMAN, M. SPERRIN and G. PEARCE, 2001 : Radon levels in abandoned metalliferous mine, Devon, Southwest England. *Ecotoxicology and Environmental safety*, vol 49, p 281-292, july 2001. [Environmental Research, section B].

D. GRABOWSKI, Z. POKRYSZKA, 2003 : Emissions gazeuses à partir de vides miniers dans le bassin ferrifère lorrain. Colloque International GISOS Après-mine, 5-7 février 2003, Nancy.

J.P. GRATAN, G.K. GILLMORE, D.D. GILBERTSON, F.B. PYATT, C.O. HUNT, S.J. MCLAREN, P.S. PHILLIPS and A. DENMAN, 2004 : Radon and king solomon's miners ; Faynan Orefield, Jordanian desert.

INERIS, 2005a : Note relative à la campagne de mesures de gaz dans les zones de sondages et travaux miniers de May-sur-Orne les 12 et 13 avril 2005. Rapport INERIS référencé DRS-05-68920R01.

INERIS, 2005b : Note relative à la campagne de mesures de gaz dans les zones de sondages et travaux miniers de May-sur-Orne le 2 juin 2005. Rapport INERIS référencé DRS-05-68920R02.

INERIS, 2006a : L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide Méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. Rapport INERIS référencé DRS-06-51198/R01 du 04/05/2006.

INERIS, 2006b : Mesures de radon à l'aplomb des anciens travaux miniers de Soumont (14). Rapport INERIS DRS-06-78783R01 du 12/06/06.

IPSN, 1998 : Le radon de l'environnement à l'Homme. Collection IPSN. EDP Sciences.

IRSN, 2007 : Inventaire national des sites miniers d'uranium, réalisé dans le cadre du programme MIMAUSA. <http://www.irsn.fr/>.

D. LAURIER, B. VACQUIER, K. LEURAUD, S. CAER, A. ACKER, M. TIRMARCHE, 2007 : Risques associés au radon : l'apport des études de mineurs. INVS, BEH Thématiques 18-19.

H. MAHJOUBI, A.H. CHARFI, S. LABIDI, N. CHAHED, S. MTIMET, 2000 : Estimation des expositions associées à la présence du radon 222 dans les usines de traitement de phosphates et leurs environnements en Tunisie. *Radioprotection*, vol. 35 (2), pp. 201-215.

J. MOISSET, 1980 : Radium removal from phosphogypsum. In Borris D. P., Boody P. W., eds., PHOSPHOGYPSUM, Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum: utilization and/or disposal of phosphogypsum; potential barriers

to utilization: Lake Buena Vista (USA). Publication n°01-001-017, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), reprinted 1987, pp. 384-397.

W.W. NAZAROFF, S.M. DOYLE, A.V. NERO, R.G. SEXTRO, 1987 : Potable water as a source of airborne  $^{222}\text{Rn}$  in U.S. dwellings. A review and assessment. Health Physics, 52, pp281-295.

Norme française NF M 60-761-1 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Eau. Partie 1 : Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'eau : leurs origines et méthodes de mesure. Août 2007.

Norme française NF M 60-761-3 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Eau. Partie 3 : Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'eau : mesures par dégazage. Mai 2008.

Norme Française NF M 60-763 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'environnement atmosphérique : leurs origines et méthodes de mesure. Septembre 2004.

Norme Française NF M 60-764 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Radon 222 : Méthodes de mesure intégrée de l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon dans l'environnement atmosphérique. Septembre 2004.

Norme Française NF M60-765 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Radon 222 : Méthodes de mesure ponctuelle de l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon dans l'environnement atmosphérique. Septembre 2004.

Norme Française NF M 60-766 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Le radon 222 : Méthodes de mesure intégrée de l'activité volumique moyenne du radon, dans l'environnement atmosphérique, avec un prélèvement passif et une analyse en différé. Septembre 2004.

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

Norme Française NF M 60-768 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Le radon 222 : Méthodes d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation. Octobre 2002.

Norme Française NF M 60-769 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Le radon 222 : Méthodes de mesure ponctuelle de l'activité volumique du radon dans l'environnement atmosphérique. Novembre 2000.

Norme Française NF M 60-771 : Énergie nucléaire – Mesure de la radioactivité dans l'environnement – Air. Le radon 222 dans les bâtiments : Méthodologies appliquées au dépistage et aux investigations complémentaires. Septembre 2003.

A. PAWULA, 1997 : Contribution à l'explication des anomalies du radon 222 dans le milieu naturel. Point de vue d'un géologue. Séminaire SUBATECH, Ecole des mines de Nantes, Laboratoire de physique subatomique et des technologies associées.

D. PELLEGRINI, 1997 : Etude de l'émanation du radon à partir de résidus de traitement de minerais d'uranium. Mise en évidence de relations entre le facteur d'émanation et les caractéristiques du matériau. Thèse soutenue à l'U.F.R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté le 04/12/1999, 200 p.

Z. POKRYSZKA, A. JODART, 2000 : Emissions gazeuses à Moyeuve-Grande. Bilan de mesures et synthèse des connaissances sur le phénomène. Rapport INERIS référencé DRS-00-25024/R01 du 14 avril 2000.

Z. POKRYSZKA, D. GRABOWSKI, 2003 : On the surface noxious gas emissions from the old iron mines. 30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, 5-9 octobre 2003, Johannesbourg, Afrique du Sud.

L.S. QUINDOS PONCELA, P.L. FERNANDEZ NAVARRO, J. GOMEZ AROZAMENA, C. RODENAZ PALOMINO, C. SAINZ, J.L MARTIN MATARRANZ, J. ARTECHE, 2004 : Population dose in the vicinity of od spanish uranium mines. Science of the total environment 329 (2004), 283-288.

P.M. RUTHERFORD, M.J. DUDAS, J.M. AROCENA, 1996 : Heterogeneous distribution of radionuclides, barium and strontium in phosphogypsum by-product. The Science of the Total Environment, vol. 180 (3), pp. 201-209.

L.C. SCHOLTEN and C.W.M. TIMMERMANS, 1996 : Natural radioactivity in phosphate fertilizers. Fertilizer Research, vol. 43, pp. 103-107.

J. SOMLAI, Z. GORJANACZ, A. VARHEGYI and T. KOVACS, 2006 : Radon concentration in houses over a closed Hungarian uranium mine. Science of the total Environment 367 (2006) pp 653-665.

UNSCEAR, 1993 : Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2. United Nations, New York.

UNSCEAR, 2000 : Sources and Effects of Ionizing Radiation vol. 1 : Sources. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New-York, United Nations Publication.

H.B. VAN DER HEIJDE and P.-J. PASSCHIER, 1988 : Radiological impacts of the disposal of phosphogypsum. Radiation Protection Dosimetry, vol. 24 (1/4), pp. 419-423, 1988.

M. WYSOCKA, S. CHALUPNIK, A. MIELNIKOW and J. SKOWRONEK, 1999 : Extended survey of radon in dwellings in areas strongly affected by mining. Proceedings of the Fifth International Conference on Rare Gas Geochemistry, pp. 145-158.

## 10. LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Chaînes de désintégration des familles radioactives naturelles	2 A4
Annexe 2	Organisation des normes relatives à la mesure du radon 222 et de ses descendants à vie courte dans l'atmosphère (norme AFNOR NF M 60-763 de septembre 2004)	1 A4
Annexe 3	Représentation schématique des techniques de mesure du radon dans l'eau (norme AFNOR NF M 60-761-1 d'août 2007)	1 A4
Annexe 4	Evolution entre avril 2000 et fin novembre 2002 de la température extérieure, du sens du flux et de l'activité volumique du radon	1 A4

## Annexe 1 : Chaînes de désintégration des familles radioactives naturelles

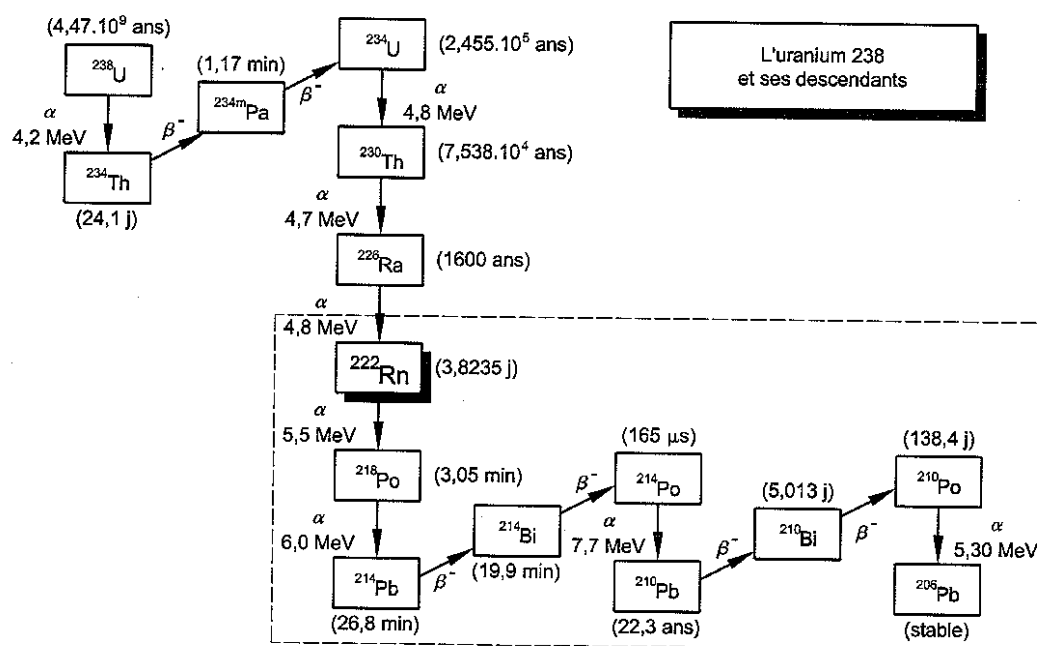


Figure 1 — L'uranium 238 et ses descendants

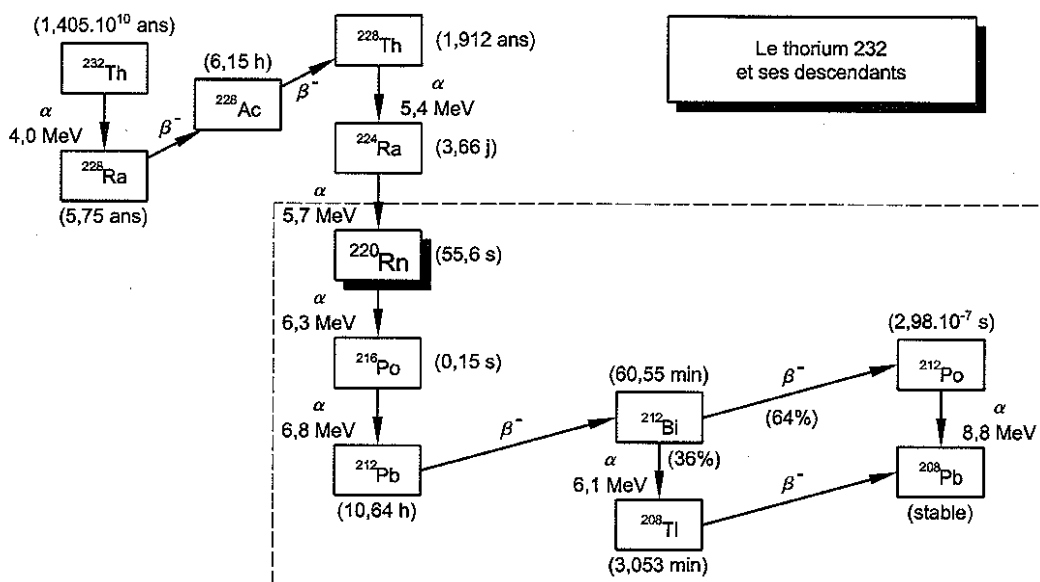


Figure 2 — Le thorium 232 et ses descendants

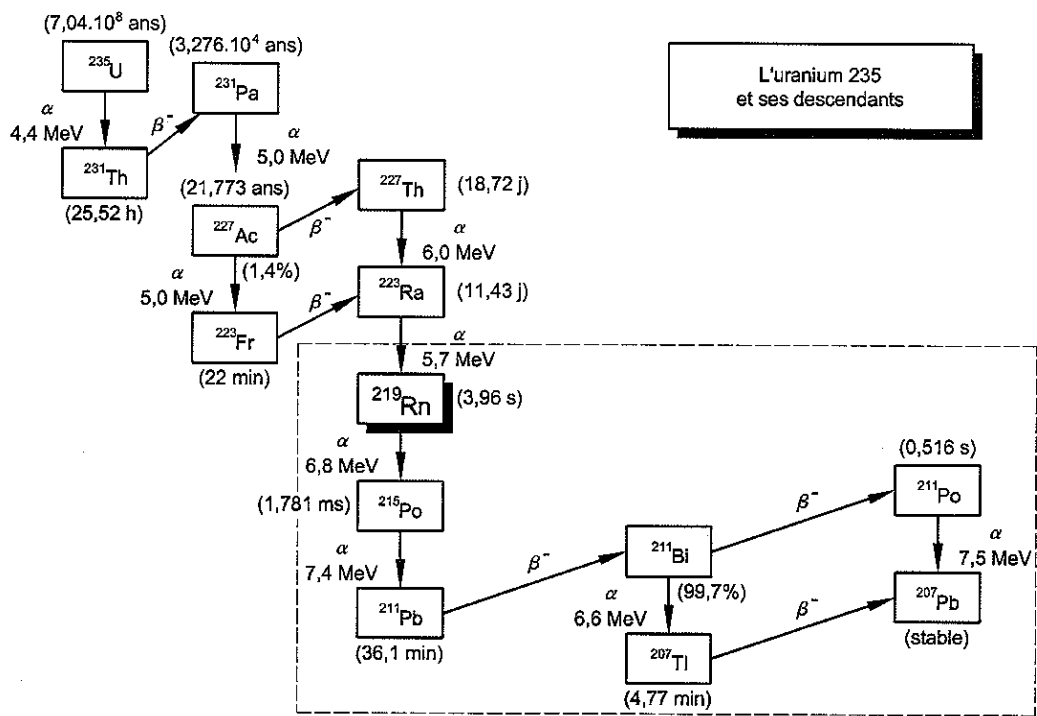
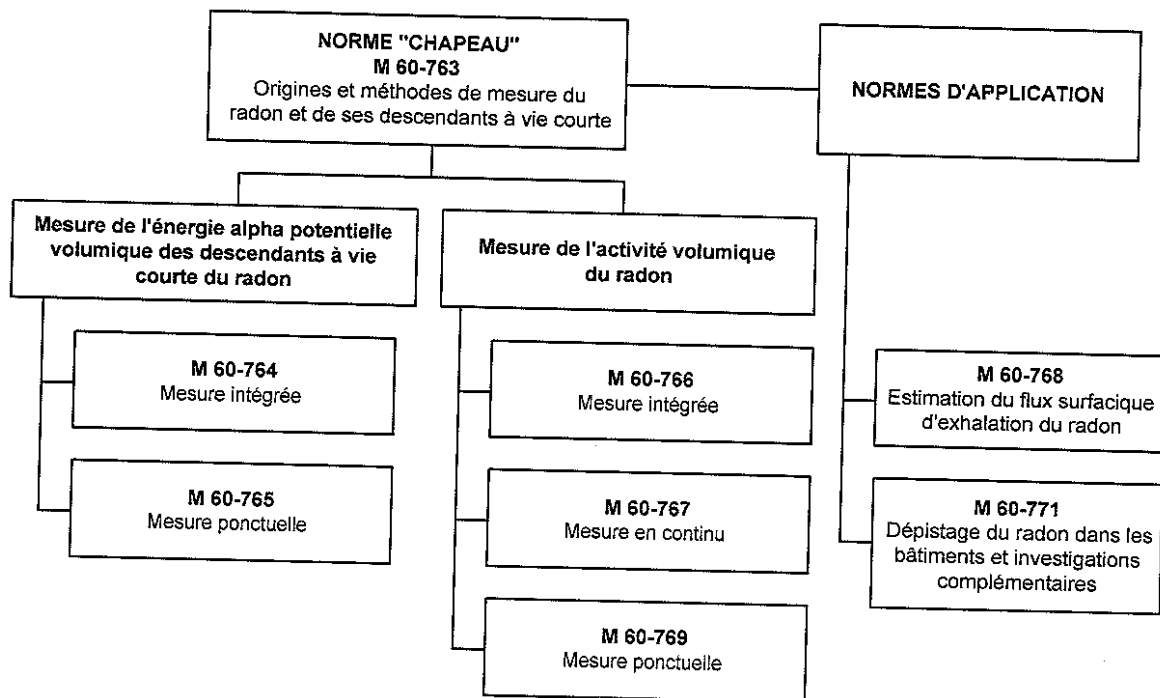


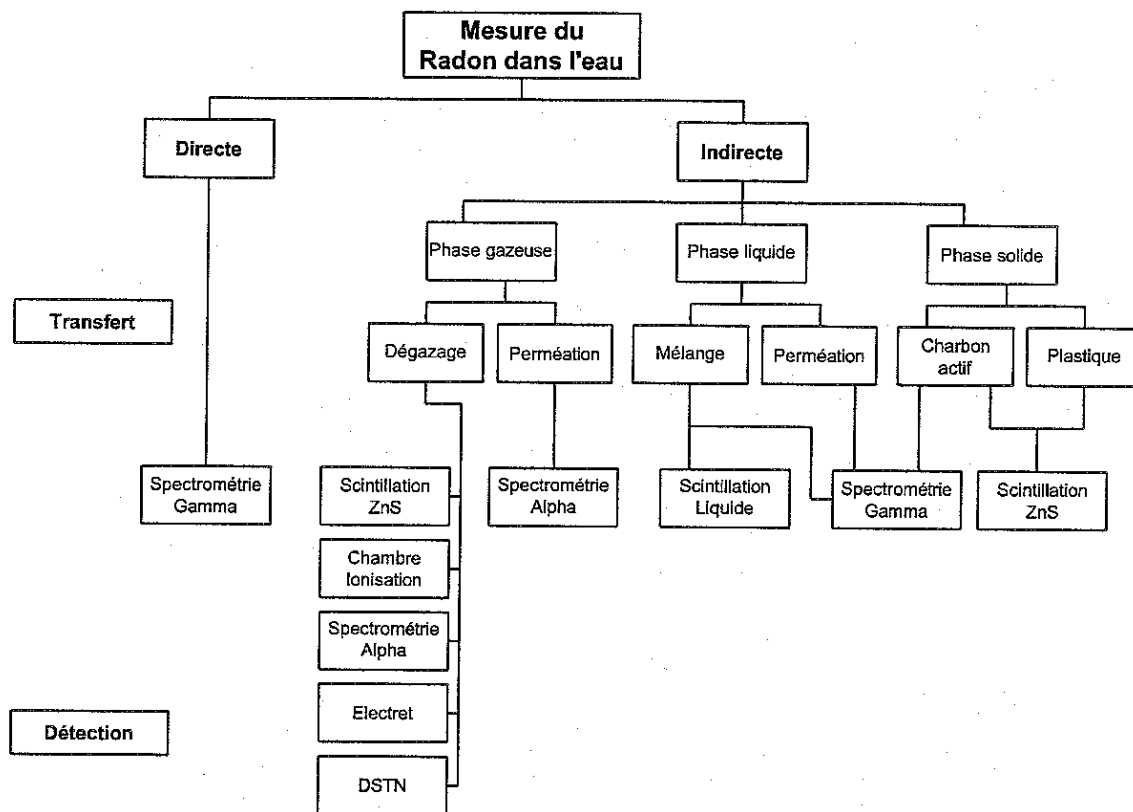
Figure 3 — L'uranium 235 et ses descendants



**Annexe 2 : Organisation des normes relatives à la mesure du radon 222 et de ses descendants à vie courte dans l'atmosphère (norme NF M 60-763 de septembre 2004)**



**Annexe 3 : Représentation schématique des techniques de mesure du radon dans l'eau (Norme AFNOR NF M 60-761-1 d'août 2007)**



**Annexe 4 : Evolution entre avril 2000 et fin novembre 2002 de la température extérieure, du sens du flux et de l'activité volumique du radon dans la galerie G37 débouchant dans les vides post-miniers de Moyeuve-Grande dans le bassin ferrifère lorrain. (GRABOWSKI, D., POKRYSZKA, Z., 2003)**

