

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# Mesurage de l'activité volumique du radon dans les cavités et ouvrages souterrains

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

DEI/SARG/2009-020

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE L'INTERVENTION

Service d'analyse des risques liés à la géosphère

Demandeur	ASN
Référence de la demande	Compte-rendu de la réunion du GT "Radon travailleurs" du 8 juillet 2009 référencé DEP-DIS-N°463-2009 du 8 septembre 2009
Numéro de la fiche programme	03D/T01-002/09
Processus de rattachement	R1

### Mesurage de l'activité volumique du radon dans les cavités et ouvrages souterrains

#### Guide méthodologique

Bureau d'évaluation des risques liés à la radioactivité naturelle

R. AMÉON

Rapport DEI/SARG/2009-020

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur	Vérificateur	Chef du SARG	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	R. AMÉON	L. MARIE	D. GAY	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	24/11/09	25/11/09	27/11/2009	29/11/2009	
Signatures					 Denis BOULAUD

DIFFUSION : Libre  Interne  Limitée   Joint au Directeur de l'Environnement et de l'Intervention

---

---

## RESUME

LE PRESENT DOCUMENT CONSTITUE UNE MISE A JOUR DU GUIDE INITIAL, REFERENCE RAPPORT TECHNIQUE IRSN/DEI/SARG/2008-029. IL PRESENTE LA METHODOLOGIE APPLICABLE AU DEPISTAGE DU RADON DANS LES CAVITES NATURELLES ET LES OUVRAGES SOUTERRAINS. FONDEE A LA FOIS SUR LA DEMARCHE INITIEE PAR LA NORME AFNOR NF M60-771 POUR LA REALISATION D'UN DEPISTAGE ET SUR LES RESULTATS D'ETUDES REALISEES PAR L'IRSN DANS LES GROTTES KARSTIQUES, LES CAVITES SOUTERRAINES AGRICOLES FRANÇAISES ET LES TUNNELS, ELLE PRECONISE L'UTILISATION DES METHODES DE MESURE INTEGREE AVEC UN PRELEVEMENT PASSIF ET UNE ANALYSE EN DIFFERE CONFORMEMENT A LA NORME AFNOR NF M60-766. CETTE METHODOLOGIE S'APPLIQUE A TOUS TYPES DE CAVITES ET D'OUVRAGES SOUTERRAINS, QUELS QUE SOIENT LEUR CONFIGURATION, LEURS DIMENSIONS ET LEUR DEGRE D'ECHANGE AVEC L'EXTERIEUR.

---

---

## ABSTRACT

---

---

## MOTS-CLES

RADON, CAVITE, OUVRAGE SOUTERRAIN, METHODOLOGIE, DEPISTAGE

# SOMMAIRE

<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>2</b>
<b>2 MESURAGE DU RADON DANS LES CAVITES.....</b>	<b>3</b>
2.1 GENERALITES.....	3
2.2 METHODOLOGIE SUIVIE LORS DU DEPISTAGE .....	4
2.2.1 Visite préalable.....	5
2.2.2 Implantation des dispositifs de mesure .....	5
2.2.3 Pose et dépose des dispositifs de mesure .....	6
2.2.4 Expression des résultats de mesure.....	6
2.3 TYPE DE DISPOSITIFS DE MESURE DU RADON .....	7
<b>3 MESURAGE DU RADON DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS.....</b>	<b>8</b>
3.1 GENERALITES.....	8
3.2 METHODOLOGIE SUIVIE LORS DU DEPISTAGE .....	8
3.2.1 Visite préalable.....	8
3.2.2 Implantation des dispositifs de mesure .....	8
3.2.3 Pose et dépose des dispositifs de mesure .....	10
3.2.4 Expression des résultats de mesure.....	10
3.3 TYPE DE DISPOSITIFS DE MESURE DU RADON .....	11
<b>ANNEXE 1 : DOSIMETRES PASSIFS POUR LA MESURE DU RADON.....</b>	<b>12</b>
LES DETECTEURS SOLIDES DE TRACES NUCLEAIRES .....	12
LES DETECTEURS A ELECTRET .....	13
<b>ANNEXE 2 : FACTEURS D'EQUILIBRE DANS L'ATMOSPHERE DES CAVITES ET OUVRAGES SOUTERRAINS.....</b>	<b>15</b>
<b>4 DOCUMENTS DE REFERENCE .....</b>	<b>16</b>

# 1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la mise en place de la réglementation relative à la protection des travailleurs vis-à-vis de l'exposition au radon d'origine géologique (article R. 4457-6 du Code du Travail), des mesures de l'activité volumique du radon doivent être mises en œuvre dans des lieux souterrains, situés dans les départements ou parties de département prioritaires (article R. 1333-15 du Code de la Santé Publique) et concernés par des activités professionnelles particulières (cf. arrêté du 7 août 2008 relatif à la gestion du risque lié au radon dans les lieux de travail).

L'expression « lieux souterrains » désigne, au sens du Code du Travail, des bâtiments souterrains, des cavités naturelles ou anthropiques et des ouvrages souterrains.

La mise en évidence de la présence de radon dans un lieu souterrain, par des mesures comparables aux valeurs d'intérêt fixées par les pouvoirs publics, doit être réalisée au moyen d'un dépistage. L'objectif de ce dépistage est de déterminer si tout ou partie du site investigué présente une valeur moyenne annuelle de l'activité volumique du radon supérieure à une ou des valeurs d'intérêt.

Contrairement aux bâtiments de surface pour lesquels le dépistage du radon est réalisé par des mesures intégrées de l'activité volumique du radon, conformément aux exigences de la norme AFNOR NF M60-771<sup>1</sup>, le mesurage du radon dans les lieux souterrains, quels qu'ils soient, n'est pas codifié par un texte normatif.

Afin d'harmoniser les pratiques et de disposer d'une méthodologie commune à tous les organismes habilités à procéder aux mesures de l'activité volumique du radon, l'Autorité de Sûreté Nucléaire a confié à l'IRSN l'élaboration de deux guides méthodologiques de mesurage du radon. Le premier est relatif aux bâtiments souterrains (cf. rapport IRSN/DEI/SARG/2009-019) et le second aux cavités et ouvrages souterrains.

Pour ce qui concerne spécifiquement les cavités naturelles et en réponse à une demande de l'ASN, une première version du guide méthodologique de mesure de l'activité volumique du radon a été rédigée en 2008 par l'IRSN.

Le présent document constitue une mise à jour du guide initial, référencé Rapport Technique IRSN/DEI/SARG/2008-029. Il présente la méthodologie générale applicable au dépistage du radon dans les cavités et les ouvrages souterrains, quel que soit le cadre réglementaire associé. Fondée à la fois sur la démarche initiée par la norme AFNOR NF M60-771 pour la réalisation d'un dépistage et sur les résultats d'études réalisées par l'IRSN dans les grottes karstiques, les cavités souterraines agricoles françaises et les tunnels (cf. rapports techniques référencés IRSN/DEI/SARG/2005-12, IRSN/DEI/SARG/2007-05 et IRSN/DEI/SARG/2007-27), elle préconise la mise en œuvre des méthodes de mesure intégrée avec un prélèvement passif et une analyse en différé, conformément à la norme

---

<sup>1</sup> relative à la méthodologie appliquée au dépistage et aux investigations complémentaires du radon dans les bâtiments.

AFNOR NF M60-766<sup>2</sup>. Cette méthodologie s'applique à tous types de cavités et d'ouvrages souterrains, quels que soient leur configuration, leurs dimensions et leur degré d'échange avec l'extérieur.

La mise en œuvre de cette méthodologie requiert des connaissances relatives au radon et aux cavités. Elle est, de ce fait, du ressort d'organismes compétents au sens de la réglementation.

## **2 MESURAGE DU RADON DANS LES CAVITES**

L'expression « cavité souterraine » désigne généralement l'ensemble des vides d'origine naturelle ou anthropique situés sous terre. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories :

- les cavités naturelles issues pour l'essentiel de la dissolution plus ou moins rapide de carbonates (calcaires, dolomies, craie, ...) ou de sulfates (gypse, ...) par des circulations d'eau au sein de la roche ;
- les vides anthropiques, hors concessions minières, parmi lesquels se trouvent les carrières souterraines relatives à l'extraction des matériaux destinés à la construction, les marnières, les caves ;
- les mines (charbon, métaux, sels, ...).

### **2.1 GENERALITES**

Les cavités karstiques, formées par l'érosion des carbonates, calcaires et dolomies, suite aux ruissellements et infiltrations d'eaux contenant de l'acide carbonique, ont des dimensions très variables. Le réseau karstique est constitué d'une série de salles et boyaux pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres. La hauteur de ces salles peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et leur extension plusieurs dizaines de mètres carrés.

L'activité volumique du radon dans une grotte dépend d'une inter-relation complexe entre différents facteurs externes (le gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur, la vitesse du vent, les variations de pression atmosphérique, l'humidité) et internes (géomorphologie karstique, porosité et teneur en radium des sédiments et de la roche). Elle peut toutefois s'apprécier plus simplement à partir de la prise en compte du terme **source de radon** et du **degré d'échange avec l'atmosphère extérieure**.

Dans le cas des cavités karstiques, les sédiments argileux (résidus insolubles primitivement contenus dans les carbonates) qui recouvrent le sol constituent généralement la source principale de radon, la roche calcaire encaissante (roche à faible teneur en uranium) ne représentant qu'une source secondaire. Parfois, l'eau est un vecteur non négligeable de radon dans les grottes, soit par percolation

---

<sup>2</sup> relative aux méthodes de mesure intégrée de l'activité volumique moyenne du radon dans l'environnement atmosphérique, avec un prélèvement passif et une analyse en différé.

de l'eau de pluie à travers la roche calcaire qui permet le transport du radon vers les profondeurs, soit par dégazage de l'eau circulante.

Dans une même cavité, il n'est pas rare d'observer des variations spatiales et temporelles de l'activité volumique du radon.

La variation spatiale est due, par ordre d'importance, à :

- des taux de ventilation variables dans différentes zones de la cavité, les concentrations étant d'autant plus élevées à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée. Des différences d'un facteur 8 peuvent ainsi être mises en évidence entre l'entrée et le fond d'une grotte où l'atmosphère est plus confinée. Des accès multiples et séparés peuvent permettre une meilleure ventilation des cavités et ainsi expliquer des teneurs en radon plus basses dans certaines zones ;
- des variations des propriétés texturales et chimiques des sédiments (teneur en radium, taille des particules, porosité, perméabilité). Ces propriétés influencent le phénomène d'exhalation du radon en interférant à la fois sur l'émanation du radon (formation du radon à l'échelle microscopique) et son transport dans le sol. Ceci se traduit par des variations du flux d'exhalation mesuré en divers endroits d'une cavité.

Les fluctuations temporelles de l'activité volumique du radon peuvent être observées à l'échelle de la journée. Elles sont alors liées à des changements de ventilation du fait de l'activité humaine dans la cavité. Plus généralement, de grandes variations saisonnières sont mises en évidence du fait de gradients thermiques et de gradients de pression existant entre l'intérieur et l'extérieur de la cavité :

- les gradients thermiques sont favorables à un transport vertical convectif à travers de grandes ouvertures. C'est le cas des grottes ayant de larges entrées ou de multiples accès. La température à l'intérieur des cavités reste stable tout au long de l'année et seule la température extérieure évolue en fonction des saisons, engendrant ainsi des variations saisonnières de l'activité volumique du radon. En majorité, les grottes présentent des teneurs en radon plus élevées l'été que l'hiver et leur évolution au cours de l'année est corrélée avec la température extérieure ;
- les gradients de pression engendrent un mouvement d'air à travers les fissures. Dans le cas des grottes confinées, ces changements de pression atmosphérique, en influençant le transport du radon, sont responsables des variations de concentration.

## 2.2 METHODOLOGIE SUIVIE LORS DU DEPISTAGE

Le dépistage du radon dans une cavité suit un protocole en quatre phases :

- visite préalable de la cavité ;
- choix de l'implantation des dispositifs de mesure ;
- pose et dépose de ces dispositifs ;
- expression et interprétation des résultats de mesure par rapport aux valeurs d'intérêt.

Seules les méthodes de mesure intégrée avec un prélèvement passif et une analyse en différé sont utilisées dans le cadre du dépistage radon. Ces méthodes et les dispositifs de mesure associés doivent être conformes à la norme AFNOR NF M60-766.

### **2.2.1 VISITE PREALABLE**

Compte tenu de la complexité des réseaux des cavités à dépister, qu'elles soient d'origines naturelle ou anthropique, une visite préalable du site doit obligatoirement être réalisée.

Cette visite préalable doit permettre :

- d'identifier les secteurs réellement concernés par la présence des personnes ou par une ou des activités professionnelles<sup>3</sup> ;
- de dimensionner le dépistage à mettre en œuvre (les parties des cavités non fréquentées par des personnes doivent être exclues) ;
- d'appréhender les paramètres nécessaires à la définition des zones homogènes.

### **2.2.2 IMPLANTATION DES DISPOSITIFS DE MESURE**

Les dispositifs de mesure sont implantés dans les « zones homogènes » de la cavité.

#### **2.2.2.1 Détermination des zones homogènes**

Une zone homogène est une zone dont les caractéristiques vis-à-vis de la pénétration du radon (sol, roche encaissante, sédiment, eau souterraine) et de sa répartition à l'intérieur des volumes (ventilation naturelle, gradient thermique, ventilation forcée) sont identiques ou très voisines.

En pratique, une zone homogène est principalement définie sur la base des critères suivants :

- même source potentielle de radon ;
- même degré d'échange avec l'atmosphère extérieure ;
- même volume apparent.

#### **2.2.2.2 Nombre de dispositifs de mesure à implanter**

Pour tenir compte de la grandeur et de la complexité de la cavité souterraine, le nombre de dispositifs à implanter est d'au moins un dispositif par zone homogène retenue, avec un minimum de deux par cavité ou galerie.

Si la zone homogène est de grande surface, au moins un dispositif doit être implanté par « tranche » de 200 m<sup>2</sup> de surface au sol.

#### **2.2.2.3 Implantation des dispositifs de mesure dans une zone homogène**

L'implantation des dispositifs de mesure est réalisée au regard de la fréquentation des lieux par des personnes. Ainsi, seules les zones homogènes « occupées » sont retenues.

---

<sup>3</sup> visées par la réglementation en vigueur.



D'un point de vue méthodologique, une zone homogène « occupée » est une zone dans laquelle des personnes sont susceptibles de séjourner plus d'une heure par jour.

Cette définition de l'occupation peut être adaptée en fonction du contexte réglementaire dans lequel le dépistage du radon doit être réalisé. A titre d'exemple, dans le cadre de la réglementation associée au Code du Travail, la notion d'occupation est définie selon les critères suivants : « somme des activités professionnelles, visées par l'arrêté du 7 août 2008, exercées une heure par jour ouvré, en continu ou discontinu, pour un même travailleur ou non, équivalent à 200 heures par an ».

Le dispositif de mesure doit être placé sur une surface dégagée à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m du sol, dans les conditions suivantes :

- l'emplacement est choisi en laissant un espace libre d'au moins 20 cm autour du dispositif de mesure, de sorte que celui-ci soit ouvert à l'ambiance de la zone ;
- l'emplacement est choisi de telle sorte que les conditions de pose ne soient pas modifiées pendant la mesure, pour une quelconque raison (aspersion d'eau, chute d'objets, intervention des techniciens de surface, curiosité, etc.). Le dispositif de mesure doit être placé en sécurité durant son exposition ;
- des recommandations doivent être faites aux occupants afin d'éviter la dégradation des conditions d'exposition du dispositif de mesure.

### **2.2.3 POSE ET DEPOSE DES DISPOSITIFS DE MESURE**

Afin d'approcher la valeur moyenne annuelle de l'activité volumique du radon dans la cavité et de ne pas la sous-évaluer, il est recommandé :

- de réaliser la mesure en périodes hivernale (du 21 décembre au 19 mars) et estivale (du 21 juin au 21 septembre) pour tenir compte des variations saisonnières de l'activité volumique du radon dans les cavités. Toutefois, si la présence des personnes (ou si l'activité professionnelle exercée) dans la cavité n'est que saisonnière, la période de mesure sera adaptée à la période de présence des personnes ;
- de laisser les dispositifs de mesure en place pendant une durée d'au moins deux mois pour chaque période de mesure définie.

Les dispositifs doivent être mis en position « mesure » au moment de la pose et en position « arrêt » lors de la dépose (voir recommandations des fournisseurs des dispositifs).

### **2.2.4 EXPRESSION DES RESULTATS DE MESURE**

Dans tous les cas et afin de pouvoir interpréter les résultats, les conditions de mesure doivent être correctement documentées.

Pour chaque période de mesure, une seule valeur d'activité volumique est attribuée par zone homogène.

Cette attribution est réalisée en considérant l'ensemble des résultats obtenus par zone.

- 1<sup>er</sup> cas : la disparité des résultats observée est inférieure aux incertitudes de mesure : on calcule alors la valeur moyenne sur l'ensemble de la zone considérée. Cette valeur est attribuée à la zone.
- 2<sup>nd</sup> cas : la disparité observée est supérieure aux incertitudes de mesure : on procède alors à une recherche des causes pouvant entraîner cette disparité. Si la cause n'est pas d'origine instrumentale ou méthodologique, la valeur la plus élevée est attribuée à la zone homogène.

Si une seule période de mesure est préconisée (présence ou activité professionnelle saisonnière), la valeur d'activité volumique attribuée par zone homogène, sans tenir compte de son incertitude, est comparée aux valeurs d'intérêt.

Si deux périodes de mesure sont préconisées (présence ou activité professionnelle annuelle), la valeur attribuée à chaque zone homogène correspond à la moyenne des valeurs d'activité volumique attribuées pour chaque période de mesure (hivernale et estivale). Cette valeur, sans tenir compte de son incertitude, est comparée aux valeurs d'intérêt.

## 2.3 TYPE DE DISPOSITIFS DE MESURE DU RADON

La mesure doit être réalisée au moyen de dosimètres intégrateurs passifs (détecteurs solides de traces nucléaires, DSTN, ou détecteurs à électrets) répondant aux exigences de la norme AFNOR NF M60-766 (cf. annexe 1).

Compte tenu de la forte variabilité du facteur d'équilibre dans l'atmosphère des cavités (cf. annexe 2), seuls les dosimètres intégrateurs passifs dits « en configuration fermée » sont utilisés dans le cadre du dépistage.

Ces dispositifs sont constitués d'une chambre qui sert de volume de détection et qui ne permet que la diffusion du radon. Ils permettent de s'affranchir de l'influence des descendants du radon présents dans l'atmosphère analysée. Dans ce cas, il n'est donc pas nécessaire de connaître la valeur du facteur d'équilibre.

En outre, de tels dispositifs possèdent l'avantage d'être moins sensibles à l'humidité que les détecteurs dits « en configuration ouverte ».

## **3 MESURAGE DU RADON DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS**

### **3.1 GENERALITES**

Dans le cadre de ce guide, sont considérés comme ouvrages souterrains :

- les ouvrages de génie civil tels que les tunnels de circulation (routiers, ferroviaires ou piétonniers), les galeries hydrauliques, les égouts, les aqueducs, ...;
- les ouvrages militaires tels que les fortifications souterraines, les galeries, les sapes de guerre, les casemates, ... ;

### **3.2 METHODOLOGIE SUIVIE LORS DU DEPISTAGE**

Le dépistage du radon dans un ouvrage suit un protocole en quatre phases :

- visite préalable de l'ouvrage ;
- choix de l'implantation des dispositifs de mesure ;
- pose et dépose de ces dispositifs ;
- expression et interprétation des résultats de mesure par rapport aux valeurs d'intérêt.

Seules les méthodes de mesure intégrée avec un prélèvement passif et une analyse en différé sont utilisées dans le cadre du dépistage radon. Ces méthodes et les dispositifs de mesure associés doivent être conformes à la norme AFNOR NF M60-766.

#### **3.2.1 VISITE PREALABLE**

Compte tenu de la complexité des réseaux associés aux ouvrages souterrains à dépister, une visite préalable du site doit obligatoirement être réalisée.

Cette visite préalable doit permettre :

- d'identifier les secteurs réellement concernés par la présence des personnes ou par une ou des activités professionnelles<sup>4</sup> ;
- de dimensionner le périmètre dans lequel le dépistage doit être mis en œuvre (les parties des ouvrages non fréquentées par des personnes doivent être exclues) ;
- d'appréhender les paramètres nécessaires à la définition des zones homogènes.

#### **3.2.2 IMPLANTATION DES DISPOSITIFS DE MESURE**

Dans le périmètre d'intervention, les dispositifs de mesure sont implantés dans les « zones homogènes » de l'ouvrage souterrain.

---

<sup>4</sup> visées par la réglementation en vigueur.

### **3.2.2.1 Détermination des zones homogènes**

Une zone homogène est une zone dont les caractéristiques vis-à-vis de la pénétration du radon (sol, murs, sous-sol, fondations, niveau de l'ouvrage) et de sa répartition à l'intérieur des volumes (ventilation naturelle, gradient thermique, ventilation forcée) sont identiques ou très voisines.

En pratique, une zone homogène est principalement définie sur la base des critères suivants :

- même type d'interface sol-ouvrage ;
- même régime de ventilation ;
- même niveau de température.

### **3.2.2.2 Nombre de dispositifs de mesure à implanter**

Le nombre de dispositifs à implanter est d'au moins un dispositif par zone homogène retenue avec un minimum de deux par ouvrage.

Si le périmètre d'intervention représente un réseau de galeries d'une longueur inférieure à 2 kilomètres (petit réseau), au moins un dispositif doit être implanté par « tranche » de 200 m<sup>2</sup> de surface au sol.

Si le périmètre d'intervention représente un réseau de galerie d'une longueur supérieure à 2 kilomètres (grand réseau), au moins un dispositif doit être implanté par « tranche » de 1 000 m<sup>2</sup> de surface au sol.

### **3.2.2.3 Implantation des dispositifs de mesure dans une zone homogène**

L'implantation des dispositifs de mesure est réalisée au regard de la fréquentation des lieux par des personnes. Ainsi, seules les zones homogènes « occupées » sont retenues.

D'un point de vue méthodologique, une zone homogène « occupée » est une zone dans laquelle des personnes sont susceptibles de séjourner plus d'une heure par jour.

Cette définition de l'occupation peut être adaptée en fonction du contexte réglementaire dans lequel le dépistage du radon doit être réalisé. A titre d'exemple, dans le cadre de la réglementation associée au Code du Travail, la notion d'occupation est définie selon les critères suivants : « somme des activités professionnelles, visées par l'arrêté du 7 août 2008, exercées une heure par jour ouvré, en continu ou discontinu, pour un même travailleur ou non, équivalent à 200 heures par an ».

Le dispositif de mesure doit être placé sur une surface dégagée à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m du sol, dans les conditions suivantes :

- l'emplacement est choisi en laissant un espace libre d'au moins 20 cm autour du dispositif de mesure, de sorte que celui-ci soit ouvert à l'ambiance de la zone ;

- le dispositif de mesure ne doit pas être posé sur, ou à proximité, d'une source de chaleur (radiateur, appareil électrique, etc.) ;
- l'emplacement est choisi de telle sorte que les conditions de pose ne soient pas modifiées pendant la mesure, pour une quelconque raison (aspersion d'eau, chute d'objets, intervention des techniciens de surface, curiosité, etc.). Le dispositif de mesure doit être placé en sécurité durant son exposition ;
- des recommandations doivent être faites aux occupants afin d'éviter la dégradation des conditions d'exposition du dispositif de mesure.

### 3.2.3 POSE ET DEPOSE DES DISPOSITIFS DE MESURE

Afin d'approcher la valeur moyenne annuelle de l'activité volumique du radon dans l'ouvrage et de ne pas la sous-évaluer, il est recommandé :

- de réaliser la mesure en périodes hivernale (du 21 décembre au 19 mars) et estivale (du 21 juin au 21 septembre) pour tenir compte des variations saisonnières de l'activité volumique du radon dans les ouvrages. Toutefois, si la présence des personnes (ou si l'activité professionnelle exercée) dans l'ouvrage n'est que saisonnière, la période de mesure sera adaptée à la période de présence des personnes ;
- de laisser les dispositifs de mesure en place pendant une durée d'au moins deux mois pour chaque période de mesure définie.

Les dispositifs doivent être mis en position « mesure » au moment de la pose et en position « arrêt » lors de la dépose (voir recommandations des fournisseurs des dispositifs).

### 3.2.4 EXPRESSION DES RESULTATS DE MESURE

Dans tous les cas et afin de pouvoir interpréter les résultats, les conditions de mesure doivent être correctement documentées.

**Pour chaque période de mesure**, une seule valeur d'activité volumique est attribuée par zone homogène.

Cette attribution est réalisée en considérant l'ensemble des résultats obtenus par zone.

- 1<sup>er</sup> cas : la disparité des résultats observée est inférieure aux incertitudes de mesure : on calcule alors la valeur moyenne sur l'ensemble de la zone considérée. Cette valeur est attribuée à la zone.
- 2<sup>nd</sup> cas : la disparité observée est supérieure aux incertitudes de mesure : on procède alors à une recherche des causes pouvant entraîner cette disparité. Si la cause n'est pas d'origine instrumentale ou méthodologique, la valeur la plus élevée est attribuée à la zone homogène.

Si une seule période de mesure est préconisée (présence ou activité professionnelle saisonnière), la valeur d'activité volumique attribuée par zone homogène, sans tenir compte de son incertitude, est comparée aux valeurs d'intérêt.

Si deux périodes de mesure sont préconisées (présence ou activité professionnelle annuelle), la valeur attribuée à chaque zone homogène correspond à la moyenne des valeurs d'activité volumique attribuées pour chaque période de mesure (hivernale et estivale). Cette valeur, sans tenir compte de son incertitude, est comparée aux valeurs d'intérêt.

### 3.3 TYPE DE DISPOSITIFS DE MESURE DU RADON

La mesure doit être réalisée au moyen de dosimètres intégrateurs passifs (détecteurs solides de traces nucléaires, DSTN, ou détecteurs à électrets) répondant aux exigences de la norme AFNOR NF M60-766 (cf. annexe 1).

Compte tenu de la forte variabilité du facteur d'équilibre dans l'atmosphère des ouvrages (cf. annexe 2), seuls les dosimètres intégrateurs passifs dits « en configuration fermée » sont utilisés dans les différentes zones. Ces dispositifs sont constitués d'une chambre qui sert de volume de détection et qui ne permet que la diffusion du radon. Ils permettent de s'affranchir de l'influence des descendants du radon présents dans l'atmosphère analysée. Dans ce cas, il n'est donc pas nécessaire de connaître la valeur du facteur d'équilibre.

En outre, de tels dispositifs possèdent l'avantage d'être moins sensibles à l'humidité que les détecteurs dits « en configuration ouverte ».

## ANNEXE 1 : DOSIMETRES PASSIFS POUR LA MESURE DU RADON

La mesure doit être réalisée au moyen de dosimètres intégrateurs passifs répondant aux exigences de la norme AFNOR NF M60-766. Un dosimètre radon passif est composé d'un support, muni d'une chambre d'accumulation ou non, et d'un détecteur. Ces détecteurs sont soit des détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN), soit des électrets.

### LES DETECTEURS SOLIDES DE TRACES NUCLEAIRES

Le Détecteur Solide de Traces Nucléaires est constitué d'un polymère (nitrate de cellulose, polycarbonate, ...) ayant la particularité d'être sensible aux particules alpha. 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 microscopie optique. Le nombre de traces est fonction de l'activité volumique moyenne de radon à laquelle le détecteur a été exposé, sur la période considérée.

Les dispositifs dits «en configuration ouverte» sont sensibles à la présence des descendants à vie courte du radon et l'exploitation des résultats est tributaire de la connaissance du facteur d'équilibre<sup>5</sup> entre le radon et les descendants (cf. figure 1 (a)). En l'absence de mesure de ce paramètre, la valeur communément utilisée dans les bâtiments est égale à 0,4. Toutefois, en atmosphère fortement ventilée ou au contraire confinée, le facteur d'équilibre peut être très différent et varier de 0,1 à 0,9 respectivement. La méconnaissance de ce facteur peut entraîner des erreurs d'interprétation de la mesure pouvant atteindre 50% (Améon et al. 2002) (Hopke et al. 1995) (Ramachandran et Subba Ramu, 1994).

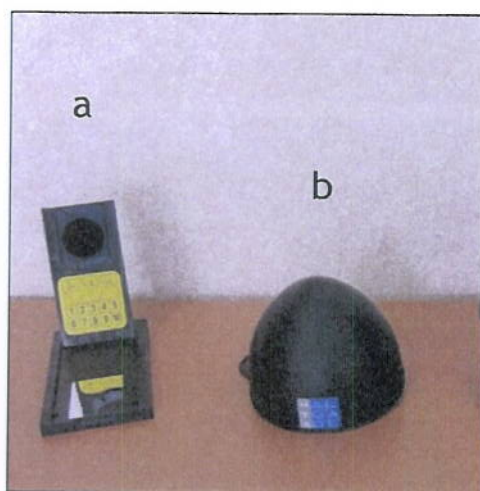


Figure 1 : Exemples de dosimètre intégrateur passif radon de type DSTN : (a) Kodalpha "configuration ouverte" (Dosirad), (b) DPR2 "configuration fermée" (Algade)

<sup>5</sup> pour un volume d'air contenant du radon, c'est le rapport entre l'énergie alpha potentielle volumique des descendants du radon présents dans l'air et l'énergie alpha potentielle volumique de ces descendants s'ils étaient à l'équilibre avec le radon (norme NF M 60-763).

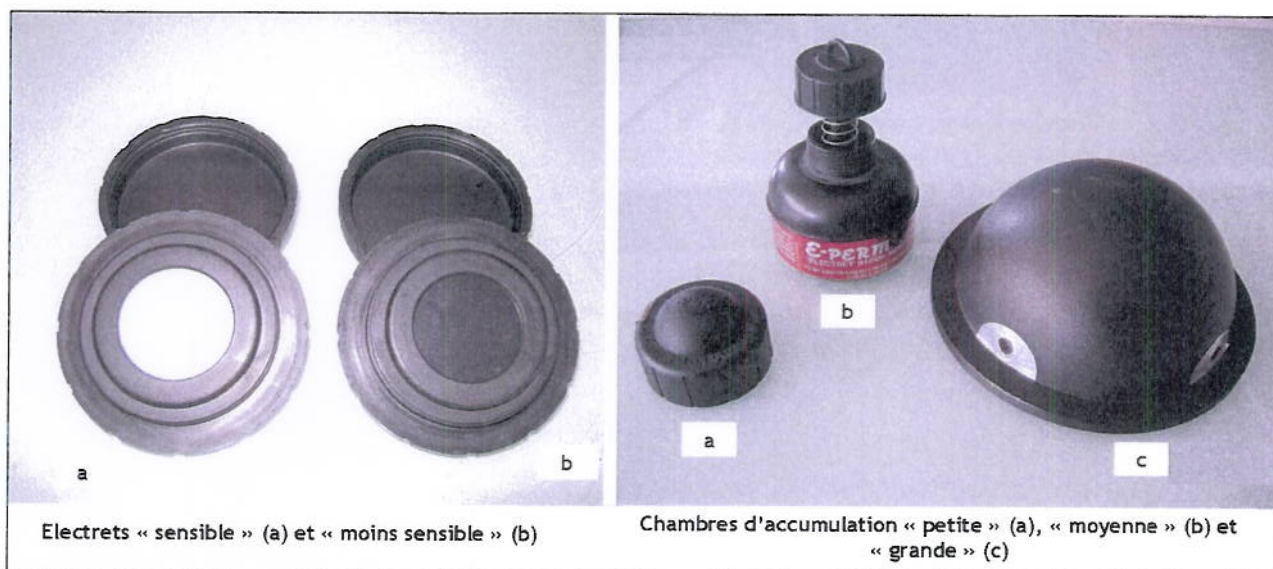
Les dispositifs dits «en configuration fermée» sont constitués d'une chambre qui sert de volume de détection et qui ne permet que la diffusion du radon (cf. figure 1 (b)). Ils permettent de s'affranchir de l'influence des descendants du radon présents dans l'atmosphère analysée. Dans ce cas, il n'est donc pas nécessaire de connaître la valeur du facteur d'équilibre.

## LES DETECTEURS A ELECTRET

Un détecteur à électret est constitué d'une chambre, en matériau plastique conducteur, de volume de détection déterminé et d'un disque de matériau diélectrique en polytétrafluorure d'éthylène (Téflon®) appelé électret. Le radon pénètre dans la chambre à travers un filtre qui arrête les différents aérosols ainsi que les descendants du radon.

L'électret est porté à un potentiel positif, initialement de l'ordre de plusieurs centaines de volts. Un champ électrostatique est ainsi créé entre la surface de l'électret et les parois de la chambre. L'électret sert à la fois de source de champ électrostatique et d'électrode collectrice. La présence de radon et de ses descendants dans l'air contenu dans la chambre provoque l'ionisation de cet air. Les électrons ainsi produits sont collectés sur l'électret dont le potentiel décroît. L'électret est utilisable plusieurs fois jusqu'à ce que sa valeur de tension limite<sup>6</sup> soit atteinte.

Il existe deux types d'électrets : les bleus de type S et les rouges de type L, moins sensibles que les précédents. On y associe trois types de chambre d'accumulation de volumes différents (petit, moyen et grand) (cf. figure 2).



**Figure 2 : Exemples de dosimètre intégrateur passif radon de type électret (détecteurs et chambres d'accumulation)**

<sup>6</sup> tension pour laquelle le champ induit est trop faible pour collecter les ions efficacement (moins de 200V (Kotrappa, 2002)).



Le choix du couple électret/chambre est effectué par l'opérateur, en prenant en compte la concentration de radon attendue et la durée d'exposition des dosimètres (cf. norme AFNOR NF M60-766).

Parmi les facteurs d'influence qui contribuent à la décharge de l'électret, le rayonnement gamma est le plus important. *Ainsi, une mesure du débit de dose doit toujours être réalisée au point de prélèvement afin d'estimer la valeur du facteur de correction du bruit de fond gamma à appliquer à la chute de potentiel mesurée.*

D'autre part, la chute et/ou le choc des électrets engendrent une décharge conséquente de l'électret. Ainsi, conformément aux exigences de la norme AFNOR NF M60-766, *la tension de l'électret doit être systématiquement mesurée, au point de prélèvement, à la pose et à la dépose du dosimètre.* Cette mesure est effectuée au moyen d'un électromètre dont la réponse est régulièrement contrôlée à l'aide d'un électret de référence.

## ANNEXE 2 : FACTEURS D'EQUILIBRE DANS L'ATMOSPHERE DES CAVITES ET OUVRAGES SOUTERRAINS

Le risque relatif à l'inhalation du radon n'est pas lié au gaz lui-même, mais à ses descendants à vie courte qui, fixés ou non sur les aérosols atmosphériques, peuvent être inhalés et se déposer dans l'arbre broncho-pulmonaire, plus ou moins profondément selon leur taille. Les descendants ne sont jamais en équilibre avec leur père le radon. Cet état de déséquilibre est caractérisé par le facteur d'équilibre, F. Ce facteur est un paramètre important qui intervient à la fois dans l'interprétation des mesures intégrées du radon (pour les détecteurs de type ouvert), mais également dans le calcul de l'estimation dosimétrique associée à l'inhalation du radon. S'il n'est pas mesuré, il est pris égal à 0,4 par défaut, valeur généralement admise pour les atmosphères intérieures (UNSCEAR 2000).

Selon les études issues de la littérature, le facteur d'équilibre dans l'atmosphère des grottes karstiques varie entre 0,04 et 0,95 avec une valeur moyenne de 0,5 (Hyland and Gunn, 1994 ; Madden, 1997 ; Gillmore et al., 2000). Comme pour le radon, des variations spatiales et temporelles du facteur d'équilibre peuvent être observées (cf. tableau 1). Ainsi, dans la grotte Crag en Irlande, des valeurs allant de 0,12 à 0,71 sont mesurées entre le fond et l'entrée de la cavité (Duffy et al. 1996). La variation temporelle du facteur d'équilibre, liée à la variation saisonnière du radon, montre des valeurs plus élevées l'hiver que l'été (Jovanovič, 1996).

Peu de données relatives aux valeurs du facteur d'équilibre rencontrées dans les ouvrages souterrains sont disponibles dans la littérature. Des valeurs comprises entre 0,61 et 0,78 ont été mises en évidence dans un tunnel en cul de sac dans les Alpes françaises (Richon et al. 2005).

Grotte		Facteur d'équilibre		Références
Pays	Nom	Gamme	Moyenne	
Irlande	Aillwee	0,12 - 0,46	0,34	Duffy et al. 1996
	Mitchelstown	0,13 - 0,42	0,28	
	Crag	0,12 - 0,71	0,35	
Australie	Royal	0,19 - 0,52	0,4	Solomon et al. 1992
Slovénie	Koščakova	0,25 (été) - 0,5 (hiver)		Jovanovič, 1996
	Medvejek	0,25 (été) - 0,6 (hiver)		
	Lipiška	0,25 (été) - 0,7 (hiver)		
France	Roselend	0,61 - 0,78		Richon et al. 2005

*Tableau 1 : Facteur d'équilibre mesuré dans les cavités et ouvrages souterrains (issu de la littérature)*

## **4 DOCUMENTS DE REFERENCE**

Améon R., 2005. *Le radon dans les grottes ornées. Définition et application d'un protocole de mesure.* Rapport Technique IRSN/DEI/SARG-05-012.

Améon R., Diez O., 2007. *Le radon dans les sites agricoles souterrains.* Rapport Technique IRSN/DEI/SARG-07-027.

Marie L., Améon R., Diez O., Dupuis M., 2007. *Le radon dans les grottes ornées. Campagne de mesures estivales et synthèse de l'étude.* Rapport Technique IRSN/DEI/SARG-07-005.

Duffy J.T., Madden J.S., Mackin G.M., McGarry A.T., Colgan P.A. 1996. *A reconnaissance survey of radon in show caves in Ireland.* Environment International, 22 (1), pp415-423.

Gillmore G.K., Sperrin M., Phillips P., Denman A. 2000. *Radon hazards, geology, and exposure of cave users : A case study and some theoretical perspectives.* Ecotoxicology and Environmental Safety, 46 (3), pp 279-288.

Hyland R., Gunn J. 1994. *International comparison of cave radon concentrations identifying the potential alpha radiation risks to British cave users.* Health Physics, 67, pp176-179.

Jovanovič P. 1996. *Radon measurements in karst caves in Slovenia.* Environment International, 22 (1), pp5429-5432.

Madden J.S. 1997. *Personal monitoring of tour guides in Irish show caves.* European conference on Protection against radon at Home and at Work, Prague, pp123-128.

Richon P., Perrier F., Sabroux J-C., Trique M., Ferry C., Voisin V., Pili E. 2005. *Spatial and time variations of radon-222 concentration in the atmosphere of a dead-end horizontal tunnel.* J. Environ. Radioact., 78, pp179-198.

Solomon S.B., Cooper M.B., O'Brien R.S., Wilkenson L. 1992. *Radon exposure in a limestone cave.* Radiat. Prot. Dosim., 45, pp171-174.

UNSCEAR, 2000 United Nations. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication E.00.IX.3. United Nations, New York, 2000.