

CoMed

Infos

2020 - N°60



Fédération Française
de Spéléologie



Fédération Française de Spéléologie
Commission Médicale

NUMÉRO THÉMATIQUE

LE RADON EN SPÉLÉOLOGIE ACTUALISATION 2020

EDITORIAL

Dr Jean-Pierre Buch

En 2007, la CoMed publiait un rapport très complet et innovant sur le radon en milieu souterrain, gaz cancérigène naturel auquel sont exposés les spéléologues et les professionnels.

Le Dr Jean-Michel Ostermann était le coordinateur de ce travail colossal mené sur diverses régions et cavités en France, avec des résultats concrets sur la teneur en radon des cavités étudiées.

Le taux moyen était élevé, 3049 Bq/m³, alors que la réglementation concernant les bâtiments construits était au maximum de 400 Bq/m³.

Le point de départ du présent travail était de mettre à jour les données suite à la refonte de la réglementation de 2018 et de faire un dossier pédagogique destiné à tous ceux qui fréquentent le milieu souterrain, en particulier les professionnels.

Cette nouvelle réglementation sur les rayons ionisants a modifié la limite du radon en la baissant à 300 Bq/m³. Il ne s'agirait que de ce paramètre, il n'y aurait pas de différence fondamentale dans le traitement et la prévention de ce risque.

Mais les instances internationales ont récemment recommandé des calculs de dose plus près de la réalité actuelle (les précédentes mesures faites par les pouvoirs publics dataient des années 90), qui majorent de manière très importante les doses reçues par l'être humain. Cela impacte désormais les spéléologues de loisir, et surtout les professionnels, qu'ils soient guides ou employés d'une structure comme une cavité aménagée.

Nous espérons que ce dossier vous aidera à mieux comprendre la problématique assez complexe du radon, mais surtout à vous aider à la gérer au mieux. Nous n'avons pas de réponse à tout car chaque cas est différent, mais nous pensons que l'outillage fourni vous sera utile.

Commission médicale FFS

Rédaction : Dr J.-P. Buch, 655 B Vieille route d'Anduze, 30140 BAGARD, <jpbuch1@sfr.fr>

Relecture collective

SOMMAIRE

1) Introduction	page 1
2) Liste des abréviations	page 2
3) Quelques définitions	page 2
4) Le radon - nature – toxicité	page 2
- La chimie	page 2
- Les origines	page 3
- La toxicité	page 3
- la pathologie	page 4
- Radon et thérapeutique	page 4
5) Le radon en France et en milieu souterrain	page 5
- Données géologiques	page 5
- Cartographie du radon	page 5
- Le radon en spéléologie	page 7
6) Résumé de la conclusion de l'étude de 2007	page 7
7) Qu'est ce qu'un risque ?	page 10
8) La prévention des risques ?	page 10
- Les niveaux de prévention	page 10
- L'application dans nos activités	page 11
9) Notions réglementaires	page 11
10) Quelles sont les personnes concernées ?	page 15
- En fonction de la géographie	page 15
- En fonction de l'activité professionnelle	page 15
- Les autres cas	page 16
11) Les principes et règles de la prévention	page 16
12) Les moyens de prévention	page 19
- Modifier la ventilation de la cavité	page 19
- Limiter la durée d'exposition au radon	page 20
- Limiter le nombre de personnes exposées au radon	page 20
- Le suivi dosimétrique du radon	page 21
- La lutte contre le tabagisme	page 21
13) Les solutions concrètes	page 21
- Rappel des éléments de base	page 21
- Les solutions techniques	page 21
- Les solutions organisationnelles	page 22
- Le suivi médical	page 22
14) Et si on passait à la pratique... ?	page 22
- Le pratiquant spéléologue de loisir	page 22
- Le guide professionnel	page 24
- La cavité aménagée pour le tourisme	page 24
- Les autres activités pratiquées à la FFS	page 25
- Retour d'expérience	page 25
- Radon et pénibilité	page 25
15) Résumé de la démarche technique	page 26
16) Conclusion	page 27
17) Remerciements	page 27
18) Bibliographie	page 27

LE RADON EN SPÉLÉOLOGIE ACTUALISATION 2020

D^{rs} Jean-Pierre Buch¹, Cécile Morvant²

Introduction

L'exposition au radon en spéléologie a été étudiée entre 2003 et 2006 par la Commission médicale (CoMed) de la Fédération Française de Spéléologie (FFS), la coordination étant assurée par le D^r Jean-Michel Ostermann, président de la Commission médicale à cette période.

Après une étude préliminaire effectuée en Dordogne, l'étude s'était étendue à différents karts français, totalisant vingt cavités, réparties dans douze départements : Ardèche, Aude, Dordogne, Finistère, Gard, Isère, Lozère, Meuse, Puy-de-Dôme, Pyrénées-Atlantiques, Pyrénées-Orientales et Vaucluse.

Ce très important travail a été publié en 2007 dans un rapport complet de 165 pages.

Nous rappellerons les conclusions de ce rapport plus loin, mais nous renvoyons le lecteur au texte complet pour en voir tous les détails.

Il est téléchargeable sur le site de la CoMed, <http://comed.ffspeleo.fr/index.php?page=accueil>, onglet « Documents », rubrique « Articles généraux ».

Nous sommes en 2020, pourquoi reprendre le sujet ?

Précisons d'abord que le but n'est pas de refaire ce qui avait été fait et très bien fait en 2005, autrement dit de relancer des campagnes de mesure de radon dans des cavités et de faire un point sur les publications internationales.

Par contre nous suivrons une démarche analogue dans ce dossier et nous utiliserons certaines données du rapport.

La réglementation de l'exposition aux rayons ionisants, dont celle portant sur le radon, a été modifiée de manière notable en 2018, ce qui nous a incité à reprendre le dossier pour actualiser les données réglementaires et éclaircir dans la mesure du possible les démarches à entreprendre.

Il nous a paru également important de refaire le point sur l'exposition au radon en spéléologie, que ce soit pour le pratiquant de loisir ou surtout le professionnel, qu'il soit breveté d'état indépendant ou salarié, **d'autant que le calcul de l'exposition risque d'être considérablement modifié et majoré par l'application de nouvelles normes internationales.**

Ce salarié peut être employé par une association, y compris une structure fédérale, ou par une entreprise comme une cavité aménagée pour le tourisme.

En conséquence de ces critères d'exposition et des risques existant pour la santé, il était logique d'aborder ensuite le chapitre des moyens de prévention vis-à-vis d'un agent classé cancérigène en raison de sa radioactivité.

Enfin, donner des repères pratiques pour comprendre cette démarche de prévention et faire le point sur ce qui peut être concrètement mis en place par les structures professionnelles, qui relèvent par ailleurs du Code du travail.

¹ Médecin fédéral national, président de la CoMed FFS

² Médecin de médecine physique et réadaptation

Liste des abréviations

ANECAT	Association nationale des exploitants de cavernes aménagées pour le tourisme
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
CIPR	Commission internationale de protection radiologique (ICRP en anglais)
CIRC	Centre International de recherches sur le cancer
CRIIRAD	Commission de recherche et d'information indépendantes sur les radiations
ERP	Établissement recevant du public sur la radioactivité
FFS	Fédération française de spéléologie
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
IRSN	Institut de radioprotection et de sécurité nucléaire
OMS	Organisation mondiale de la santé (WHO en anglais)

Quelques définitions

Sievert (Sv)

C'est l'unité qui quantifie l'exposition aux rayons ionisants par une dose moyenne sur le corps entier, ou dose efficace. Elle pondère la dose absorbée par l'organisme en fonction de la radiotoxicité de l'élément, de son type de rayonnement et de la radiosensibilité des organes et des tissus biologiques. Le Sievert reflète le risque sanitaire de l'exposition. Ses valeurs étant en général basses, on utilise le milli Sievert ou mSv.

Becquerel (Bq)

C'est l'unité qui définit la radioactivité d'un élément. Il correspond à une désintégration par seconde.

Becquerel par mètre cube (Bq/m³)

C'est l'unité de mesure de la concentration du radon dans l'air.

Le radon - nature - toxicité

La chimie

De symbole chimique **Rn**, le radon est un gaz naturel. Il fait partie des gaz rares, présents en très faible proportion dans l'air atmosphérique, comme l'hélium ou le néon.

C'est un gaz ubiquitaire, présent partout sur la planète, inodore, incolore, chimiquement inerte, soluble dans l'eau. C'est un gaz lourd, huit fois plus dense que l'air, qui tend à s'accumuler dans les parties déclives et qui est très dépendant de la ventilation locale. Ce qui explique son accumulation dans les zones confinées.

C'est enfin un gaz naturellement radioactif, dont la demi-vie, c'est à dire le temps nécessaire à ce que sa radioactivité diminue de moitié, est de 3,8 jours, durée relativement courte. Il disparaît donc en une vingtaine de jours environ, mais il est produit en permanence.

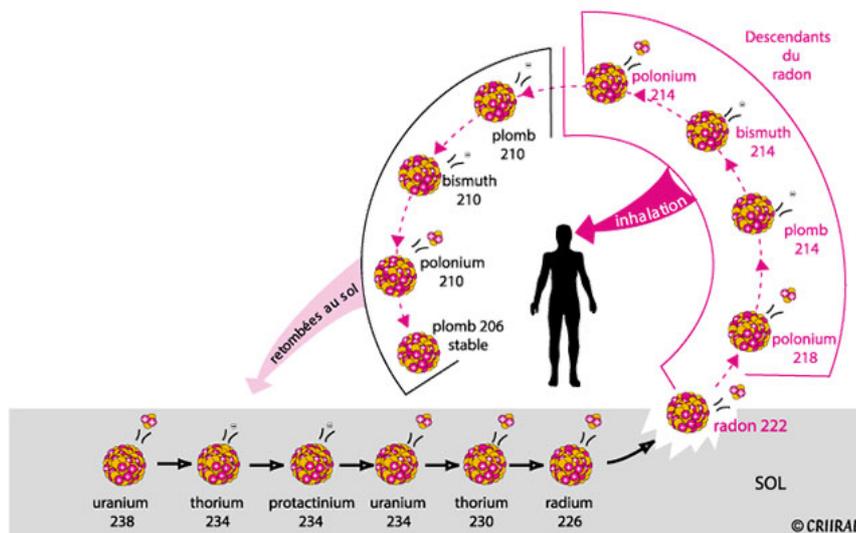
Le radon fait partie de la chaîne de désintégration de l'uranium, partant de l'uranium 238, passant par le radium 226 (son ascendant immédiat, dont la demi-vie est de 1600 ans...) pour aboutir en fin de chaîne au plomb 206 qui est un élément stable. Le radon est le seul élément gazeux de cette chaîne de désintégration, tous les autres éléments sont des solides.

Son rayonnement est du type *alpha*, rayonnement peu pénétrant mais très énergétique une fois dans les cellules.

Le radon possède trois isotopes, mais le plus important est le radon 222, c'est lui qui fait l'objet du mesurage dans la démarche de prévention de l'exposition.

(Infographie CRIIRAD)

Emanation du radon 222 et dispersion de ses descendants



Dans cette chaîne de désintégration, le radon est le seul élément gazeux, les autres étant des solides. On verra plus loin que la toxicité du radon est en grande partie liée aux éléments solides issus de sa propre désintégration, ses « descendants », qui sont le polonium 218 et 214, le bismuth 214 et le plomb 214.

L'activité du radon, son taux atmosphérique ou sa concentration, est exprimé en Becquerel par mètre cube (Bq/m^3).

Les origines

Le radon est présent dans les roches de la croûte terrestre, directement lié à la teneur en uranium de ces roches. On le trouve principalement dans les terrains cristallins comme le granite ou métamorphiques comme les schistes. Les roches sédimentaires comme le calcaire sont par contre pauvres en uranium, le radon y est donc très peu présent naturellement.

Les roches volcaniques sont variables, le basalte est pauvre en uranium, mais les remontées magmatiques profondes peuvent être riches.

Le radon circule ensuite au travers des fissures des roches et se répand dans l'atmosphère, ce que l'on appelle l'exhalation. Il peut également être relargué par les eaux souterraines dans lesquelles il a pu se dissoudre. Les eaux thermales peuvent être particulièrement riches en radon du fait de leur origine profonde.

Le radon est la principale source naturelle d'exposition aux rayonnements ionisants que nous recevons tous au quotidien. Celle-ci a été évaluée en 2015 par l'IRSN à 4,5 mSv par an, dont un tiers est liée au radon. Mais cette proportion devrait prochainement être réévaluée à la hausse en application des nouvelles recommandations de la CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique. Cf. publications de la CIPR n°115 (2010) et 137 (2017).

La toxicité

Comme tout élément radioactif, le radon est toxique pour la cellule vivante. La radioactivité modifie certaines molécules chimiques par ionisation et altère les chaînes d'ADN. Le radon est classé comme cancérigène avéré (catégorie 1) depuis 1987 par le Centre International de Recherches sur le Cancer (CIRC) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

La pénétration du radon dans l'organisme se fait par la voie respiratoire, par l'air inhalé, et concernera donc les poumons qui concentrent 90% de la dose reçue et de l'exposition. Les autres tissus et organes peuvent être exposés par dissémination sanguine des particules mais de manière beaucoup plus faible.

À noter que la voie digestive peut exister également par le radon dissous dans l'eau.

La toxicité tient au radon lui même mais beaucoup plus à ses descendants solides, surtout le polonium 218 et 214, mais aussi le bismuth 214 et le plomb 214. Ces éléments radioactifs ont une demi-vie très courte mais leur énergie est élevée et le fait qu'ils adhèrent à la paroi alvéolaire rend compte de leur toxicité importante.

Sur le terrain, la proportion entre ces divers composants est importante à distinguer.

En effet, le radon gazeux transite peu de temps dans les poumons, juste le temps d'un ou de quelques cycles respiratoires d'inspiration-expiration. Le temps de contact entre les molécules gazeuses et la muqueuse respiratoire est donc très court.

Par contre, ses descendants solides, sous forme de poussières inhalables fines, vont se déposer à la surface des bronches et surtout dans les alvéoles pulmonaires. Ces particules de poussière vont rester sur place, amenant une toxicité beaucoup plus grande que le radon gazeux.

Il faut noter que l'hyperventilation, qu'elle soit liée à l'effort physique ou à la présence de gaz carbonique, va augmenter la pénétration pulmonaire du radon et de ses descendants solides, majorant ainsi l'exposition finale.

La toxicité sera donc différente en fonction de la proportion de ces particules solides.

On détermine un facteur d'équilibre entre radon et descendants solides pour affiner le risque.

On admet un facteur habituel de 0,3 ou 0,5 dans les situations courantes, comme le travail de bureau, l'habitation ou l'air des grottes. Dans les mines, où la ventilation est en principe contrôlée, ce facteur est de 0,2, paradoxalement moins toxique.

L'effet nocif des faibles doses a longtemps fait débat mais il est désormais clairement établi pour ce qui concerne le radon.

Dernière notion, il semble que l'exposition chronique, même à faible dose, soit plus toxique qu'une exposition courte même à forte concentration.

La pathologie

La pathologie induite par le radon et ses descendants est le cancer du poumon, comme l'ont attesté les études portant sur les mineurs d'uranium qui avaient un sur-risque important. Il n'est pas décrit de pathologie des voies aéro-digestives supérieures et la possibilité d'autres localisations n'a pas été étayée (leucémie).

Le risque dépend de l'intensité de l'exposition et sa durée dans le temps. Il a été mis en évidence à partir d'une exposition chronique de 30 ans et d'une concentration de 200 Bq/m³, mais il n'y a pas d'effet de seuil.

Le risque de cancer augmente de 16% par tranche de 100 Bq/m³ supplémentaire.

La règle générale est de toujours limiter au maximum l'exposition en maintenant la concentration du radon au niveau le plus faible possible.

On estime que 10% environ des cancers broncho-pulmonaires seraient liés à l'exposition au radon soit 3000 décès annuels sur les 30 000 cas. Le radon serait donc la deuxième cause de ce cancer après le tabac d'après une étude de 2008 de l'IRSN et *Santé Publique France*. En comparaison, d'après l'ANSES, 10 à 20 % des cancers du poumon seraient dus à l'amianté en France.

Les cancers liés au radon sont observés chez les fumeurs comme chez les non fumeurs, mais dans 75% des cas ils concernent les fumeurs.

Radon et thérapeutique

Il peut paraître étrange d'associer radon, gaz radioactif cancérigène, et bénéfique en termes de santé. Pourtant, la radioactivité est très utilisée dans le traitement du cancer, en radiothérapie ou curiethérapie.

Le radon semble participer aux principes de la spéléothérapie, qui consiste à faire séjourner un patient dans une cavité naturelle ou une ancienne mine. Cette thérapeutique, initiée en Italie au XIXe siècle, s'est surtout développée dans les pays de l'est après la seconde guerre mondiale et reste encore présente.

Le radon (utilisé parfois même en inhalation directe), serait un des facteurs thérapeutiques des grottes dites « chaudes », à orientation surtout rhumatologique, par un effet antalgique (?). Ce principe est encore utilisé dans les vaporarium de certaines stations thermales françaises comme Bagnères-de-Luchon.

Le radon en France et en milieu souterrain

La France est concernée par l'exposition au radon comme tous les autres pays.

Son territoire présente plusieurs entités géologiques qui déterminent le niveau potentiel d'exposition car les taux de radon varient beaucoup d'une région à l'autre.

Dans l'air libre ambiant, on compte généralement en France une concentration de radon de moins d'une dizaine de Bq/m³. À ce niveau de concentration il n'y a aucun risque à craindre.

Les facteurs météorologiques vont influencer cette concentration en fonction du vent, de la température, de la pluviosité et de l'humidité.

Il n'en est pas de même dans les locaux fermés comme les habitations ou surtout les cavités et ouvrages souterrains, ou le confinement des lieux peut occasionner des concentrations de radon de plusieurs milliers voire dizaine de milliers de Bq/m³.

Dans les cavités, le radon est très sensible à la ventilation du réseau. Plus celui-ci est ventilé plus basse sera la concentration de radon.

Dans les habitations, la moyenne arithmétique française sur 12641 mesures s'établit à 90 Bq/m³ d'après une campagne menée dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix par les pouvoirs publics. Après pondération en fonction des saisons, des logements et de la densité de population, la moyenne s'établit à 63 Bq/m³ (IRSN, 2000). Le plus bas est de 24 Bq/m³ à Paris, le plus haut est de 264 Bq/m³ en Lozère.

Pour mémoire, la recommandation de l'OMS est de ne pas dépasser 100 Bq/m³ dans les habitations.

Données géologiques

Le radon est présent au sein même des roches de la croûte terrestre. Il peut s'en échapper par trois voies :

- La porosité de la roche ;
- Les failles et fissures, plus globalement la fracturation des roches, qui permet au gaz de circuler dans les milieux telluriques ;
- La dissolution dans les eaux souterraines, avec un relargage quand celles-ci sortent à l'air libre, soit sous terre soit à la source extérieure.

Le radon étant issu de la désintégration de l'uranium, sa production et son exhalation seront directement proportionnelles à la teneur en uranium des roches présentes et à l'importance des voies de circulation, fracturation et circulation d'eau.

Les roches présentent une richesse en uranium variable :

- Les roches magmatiques : les roches plutoniques comme le granite sont les plus riches, les roches volcaniques ont des teneurs variables (le basalte par exemple en contient peu). Les eaux thermales sont par contre très riches ;
- Les roches métamorphiques comme les schistes et gneiss ont des teneurs variables ;
- Les roches sédimentaires : le calcaire en contient très peu, les argiles ont des teneurs variables.

Pour la France, les régions les plus concernées par le radon seront donc les massifs cristallins et volcaniques : Armorique, Alpes, Massif-Central, Vosges, Corse.

Cartographie du radon

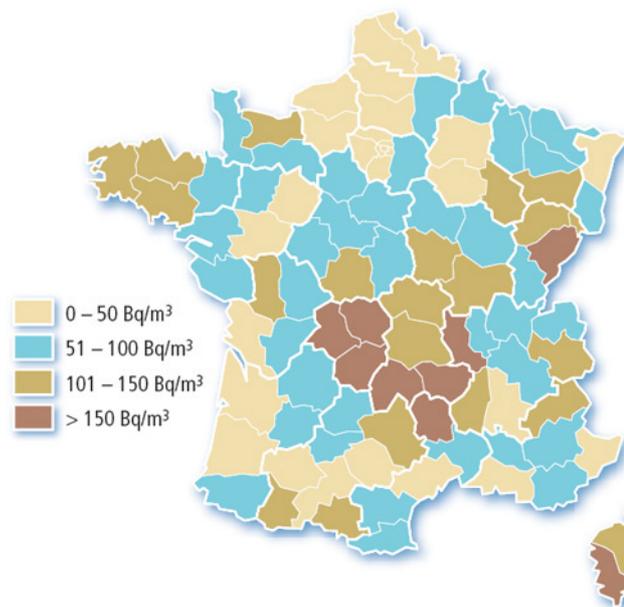
La réglementation de 2004 (Arrêté du 22 juillet 2004), suite à des investigations de l'IRSN réalisées en 2000, avait identifié 31 départements où la législation du radon devait s'appliquer avec l'obligation de mesurer l'activité volumique du radon. Un « Atlas Radon » avait été créé.

Ces départements étaient les suivants :

03 Allier, 05 Hautes-Alpes, 07 Ardèche, 09 Ariège, 12 Aveyron, 14 Calvados, 15 Cantal, 19 Corrèze, 20 Corse-du-Sud et Haute-Corse, 22 Côtes-d'Armor, 23 Creuse, 25 Doubs, 29 Finistère, 36 Indre, 42 Loire, 43 Haute-Loire, 48 Lozère, 52 Haute-Marne, 56 Morbihan, 58 Nièvre, 63 Puy-de-Dôme, 65 Hautes-Pyrénées, 69 Rhône, 70 Haute-Saône, 71 Saône-et-Loire, 73 Savoie, 79 Deux-Sèvres, 87 Haute-Vienne, 88 Vosges, 90 Territoire de Belfort.

Les DOM-TOM n'étaient pas concernés car aucune campagne de mesure n'y avait été menée.

Moyenne par département des concentration en radon dans l'air des habitations (en Bq/m³) :



Infographie IRSN

En 2018, à la demande de l'ASN, considérant que cette limitation départementale n'était pas assez satisfaisante, une approche différente a été mise en place par l'IRSN, afin de délimiter des zones prioritaires, en métropole comme dans les départements, régions et collectivités d'outre-mer.

Il a été déterminé trois niveaux :

- Potentiel géogénique faible : 84,5% de la surface du territoire ;
- Potentiel géogénique moyen : 10% de la surface du territoire ;
- Potentiel géogénique élevé : 5,5% de la surface du territoire.

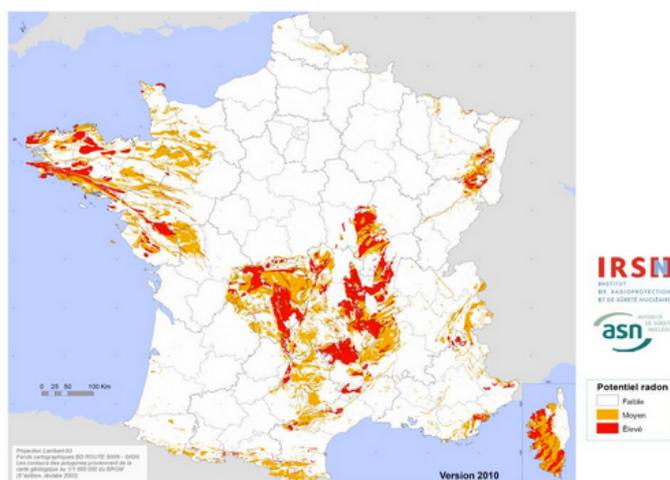
La cartographie prédictive de la présence de radon a concerné cette fois tout le territoire et chaque commune a été identifiée et classée selon trois catégories de « potentiel radon ». Il s'agit bien d'un potentiel, la présence d'une commune dans une catégorie ne signifiant pas *ipso facto* que ses habitations ou structures aient une activité volumique rattachée à sa catégorie. En effet la configuration de bâtiments joue un rôle très important dans l'accumulation de radon.

La cartographie ne remplace donc en aucun cas le mesurage de l'activité radon, c'est un indicateur.

Cette classification est donc fonction de la nature géologique du sous-sol et de ses caractéristiques structurales :

- **Catégorie 1** : potentiel faible. Ces communes sont celles localisées sur les formations géologiques présentant les teneurs en uranium les plus faibles. Ces formations correspondent notamment aux formations calcaires, sableuses et argileuses constitutives des grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain) et à des formations volcaniques basaltiques (Massif central, Polynésie française, Antilles...);
- **Catégorie 2** : potentiel faible mais avec présence de facteurs pouvant faciliter le transfert du radon. Ces communes sont celles localisées sur les formations géologiques présentant des teneurs en uranium faibles mais sur lesquelles des facteurs géologiques particuliers peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments. Les communes concernées sont notamment celles recoupées par des failles importantes ou dont le sous-sol abrite des ouvrages miniers souterrains... Ces conditions géologiques particulières peuvent localement faciliter le transport du radon depuis la roche jusqu'à la surface du sol et ainsi augmenter la probabilité de concentrations élevées dans les bâtiments ;
- **Catégorie 3** : potentiel significatif. Ces communes sont celles qui, sur au moins une partie de leur superficie, présentent des formations géologiques dont les teneurs en uranium sont

estimées plus élevées comparativement aux autres formations. Les formations concernées sont notamment celles constitutives de massifs granitiques (Massif armoricain, Massif central, Guyane française...), certaines formations volcaniques (Massif central, Polynésie française, Mayotte...) mais également certains grès et schistes noirs.



Carte du potentiel radon des formations géologiques, version 2010 [IRSN, ASN] [3]

Près de 7000 communes françaises, réparties dans 70 départements, sont listées en catégorie 3. Pour plus de précision chacun peut consulter la carte-radon « *Connaître le potentiel radon de ma commune* » sur le site www.irsn.fr, ou directement <https://www.irsn.fr/carte-radon>.

Le radon en spéléologie

Puisque l'uranium et le radon sont très peu présents dans les calcaires, comment peut-on retrouver ce radon dans les cavités karstiques ? Plusieurs sources peuvent l'expliquer :

- Les remplissages argileux, dans la mesure où ces argiles peuvent être riches en uranium ;
- La proximité d'un socle granitique ou schisteux ;
- La présence de roches granitiques ou schisteuses piégées dans les conduits (galerie, diaclase)
- La présence d'eau souterraine profonde pouvant dégazer du radon ;
- Dans le cas d'un réseau alimenté par une perte, la nature du bassin de drainage hydrographique pouvant être riche en uranium.

Le rapport radon FFS de 2007 a bien montré que le radon était présent dans toutes les cavités étudiées, dont certaines avec des taux très élevés, et un taux moyen de 3049 Bq/m^3 , taux dix fois plus élevé que celui de la réglementation pour les bâtiments...

Résumé de la conclusion de l'étude de 2007

« *Le radon atmosphérique dans quelques cavités françaises* »

(Dr Jean Michel Ostermann et coll.)

Avertissement

Ce chapitre est un rappel de l'étude de 2007. Ces données sont donc « historiques » et cette conclusion n'est plus d'actualité pour la situation en 2020.

Ce travail a permis de réaliser des observations sur les teneurs en radon atmosphérique de plusieurs cavités du pays considérées comme représentatives, tenant compte des paramètres géologiques et climatologiques.

Les dosimètres étaient renouvelés selon une période de trois mois environ, avec une mesure durant au total une année.

Teneur en radon des cavités françaises

- **Cavités karstiques** : fortes teneurs en radon
La valeur moyenne de 3 000 Bq/m³ est la valeur seuil retenue au delà de laquelle on considère que la cavité est à forte teneur en radon.
Sur 17 cavités étudiées, 7 présentent des valeurs supérieures à 3 000 Bq/m³, dont 6 cavités karstiques.
Dans ces 6 cavités karstiques à teneur en radon supérieure à 3 000 Bq/m³ sont évoqués ou retenus comme facteurs favorisant une haute teneur en radon : les remplissages, les conduits, les zones tectoniques/failles, le rôle de l'eau.
- **Cavités volcaniques** : le volcanisme basique est peu favorable à l'émission de radon
- **Cavités granitiques** : risque de forte exposition au radon.
La seule cavité granitique étudiée est celle qui présente les plus fortes valeurs en radon (Paul Loumic, 63 048 Bq/m³ en moyenne). Cependant les cavités granitiques sont très rares.

Au total, il est apparu difficile d'établir une typologie de cavités à radon : certains réseaux bien ventilés présentent de fortes valeurs, les sources de radon apparaissent primordiales dans la détermination des valeurs. L'influence de la tectonique reste à préciser ; l'eau semble être un vecteur efficace pour le transport du gaz. Il faut donc prendre en considération tous ces paramètres pour supposer l'existence de teneurs élevées en radon. Seules les mesures *in situ* permettent de conclure sur la présence de fortes valeurs.

Cette étude a permis de mettre en relief des données inédites, de dégager des pistes pour de futures recherches.

Variations saisonnières du radon : On retient une diminution des teneurs en radon en période hivernale. On peut considérer la plupart des cavités globalement comme des pièges à air froid. Cependant pour les cavités *a priori* sans ventilation, on observe aussi cette variation saisonnière, qui est probablement liée à de micro courants d'air.

Cavités profondes : l'étude d'une cavité à forte dénivellation telle que le *Trou souffleur*, n'a pas permis de retrouver une variation altitudinale autre que celle justifiée par la climatologie de la cavité ; on a même une diminution du gaz dans les parties profondes, peut être par dissolution.

Influence de la tectonique : les résultats de l'étude n'ont pas permis de déterminer de manière formelle le rôle éventuel de failles dans la remontée de radon d'origine profonde. L'étude conclue à la nécessité de poursuivre les travaux de recherche sur le rôle de la tectonique dans l'apport de radon endokarstique.

Radon et eau : le rôle de l'eau dans le transport du radon sous terre, ou son évacuation hors du système karstique, n'est pas clairement établi dans l'étude. Une action de l'eau est soupçonnée, l'eau serait un vecteur d'évacuation du radon hors du système karstique ; on aurait aussi l'atténuation du radon atmosphérique lors du recouvrement des alluvions par les crues hivernales ; enfin le rôle de l'humidité est également évoqué. Il serait intéressant de pouvoir quantifier le radon dissous dans l'eau afin de préciser l'origine et le transfert de ce gaz.

Radon et CO₂ : ils ont des caractéristiques très différentes et semblent marquer des volumes karstiques différents. La demi vie du radon en fait un marqueur privilégié des conduits alors que le CO₂ est plus représentatif du réseau de fentes. À ce jour il n'existe pas de modèle suffisamment général et cohérent capable d'expliquer toutes les évolutions divergentes de ces gaz atmosphériques. C'est probablement le développement des études climatologiques de ces deux gaz qui permettra de mieux cerner leurs caractéristiques respectives.

Valeurs admissibles

La dose limite d'exposition recommandée par l'International Commission on Radiological Protection (ICRP) est de 20 mSv par an sur une moyenne de 5 ans.

Mais une directive européenne impose de ne pas dépasser la dose de 1 mSv par an pour le public et les travailleurs non exposés ; la dose de 6 mSv par an pour les travailleurs faiblement exposés ; la dose de 20 mSv par an pour les travailleurs de l'industrie nucléaire, avec obligation de contrôles médicaux appropriés.

L'effet nocif des faibles doses n'est pas encore formellement établi.

Concernant les valeurs d'activité, on a trois valeurs de référence : moins de 200 Bq/m³ pour les bâtiments à construire ou moins de 400 Bq/m³ pour les bâtiments existants. Pour ces derniers si la valeur est entre 400 et 1000 Bq/m³ il est préconisé des actions correctrices simples, et si la valeur est supérieure à 1000, ces actions correctrices doivent être réalisées à bref délai.

Personnel travaillant dans les grottes : la dose maximale d'exposition annuelle devrait amener à limiter la durée d'exposition puisque la plupart des cavités ont au moins des teneurs en radon de 1000 Bq/m³.

Spéléologues professionnels : alors que plusieurs pays ont pris en charge ce risque d'exposition, ce n'est pas le cas en France. Or ce risque peut ne pas être négligeable. La loi impose de ne pas dépasser 1mSv/an. Pour un professionnel pratiquant 400 à 600 heures par an dans des cavités ayant une teneur en radon de 3000 Bq/m³, on a une exposition d'environ 5 à 20 mSv.

La prévention idéale serait la gestion par un service de médecine du travail de dosimètres individuels.

Spéléologie de loisir : on peut parler de « **risque acceptable** », même si ce risque mérite d'être quantifié. Le problème réside dans le choix des valeurs limites d'exposition à proposer, sachant que l'estimation de la durée d'exposition et la valeur du radon à laquelle on est exposé sont des paramètres difficiles à connaître.

Pour un spéléologue pratiquant 100 heures par an dans des cavités ayant 3000 Bq/m³ de teneur en radon, on obtient par calcul la durée de 376 heures de pratique spéléologique possible avant d'atteindre la dose de 5 mSv et de 75 heures avant d'atteindre la dose de 1mSv. Ou bien, autrement dit, il a une dose d'exposition de 1.3 mSv. Ainsi dans une majorité de situations, le spéléologue non professionnel n'a pas d'augmentation significative du risque, d'autant plus qu'il est probable que beaucoup de cavités présentent une teneur inférieure à 3000 Bq/m³. Une étude (Craven et al. 2006) estime le risque de cancer du poumon pour un spéléologue s'exposant environ à 50 heures par an sa vie entière, à 1/12 500.

Prévention de la surexposition au radon en spéléologie

Poursuite des études sur le radon : l'étude réalisée ne permet pas de déterminer des règles simples permettant de soupçonner l'importance de la teneur en radon dans une cavité. Les études doivent donc être poursuivies et faire l'objet d'un travail inter commissions au sein de la FFS, de recherches sur le terrain *via* les commissions scientifiques et ou environnement régionales. Les cavités les plus fréquentées sont à choisir en premier lieu. Par ailleurs il faut poursuivre l'analyse des données et publications internationales par la commission médicale FFS pour améliorer les connaissances dans ce domaine.

Information des pratiquants : par la diffusion du rapport, la publication d'articles de vulgarisation, par des exposés dans les stages de formation de la FFS.

Prévention : elle nécessite de connaître les cavités à forte teneur en radon c'est à dire à plus de 3000 Bq/m³ de moyenne annuelle et d'y observer des règles simples de prévention (éviter les visites estivales trop prolongées, les bivouacs). On peut fixer une valeur de 5 mSv comme valeur maximale d'exposition.

Conclusion

L'exposition au radon dans les cavités karstiques ne semble pas présenter un risque important pour la pratique de spéléologie de loisir car elle n'expose que rarement à des valeurs supérieures à 1 mSv par an.

Les spéléologues professionnels sont par contre plus à risque du fait de la durée d'exposition (c'est à dire le temps passé dans ces cavités) qui est bien supérieure.

La prévention passera par une meilleure connaissance des teneurs en radon des cavités du pays *via* des mesures *in situ*.

Qu'est ce qu'un risque ?

Commençons par définir ce qu'est un risque. C'est très simple !

En tout cas en milieu de travail, domaine où le risque et sa prévention occupent un large domaine réglementaire et juridique, sans parler des aspects concernant la santé et l'environnement.

Le risque est la rencontre entre un danger (un outil par exemple), un être humain (le travailleur) et une situation de travail qui les réunit tous les deux.

Mais ces trois éléments sont chacun sujets à divers facteurs comme :

- Pour l'outil : sa conception, son état, son entretien,... ;
- Pour le travailleur : sa fatigue, sa vigilance, son stress, sa formation, son expérience,... ;
- Pour la situation de travail : l'éclairage, la nature du sol, la température, l'encombrement du local, la coactivité...

Cette définition s'applique et se transpose dans tous les milieux, qu'ils soient domestiques, familiaux ou, pour le cas qui nous intéresse, **sportifs**.



On peut distinguer plusieurs familles de risques, toujours dans le monde du travail, données ici sans exhaustivité :

- **Les risques physiques** : le bruit, les vibrations, les manutentions manuelles, les gestes répétés, les poussières inhalables, les rayons ionisants ;
- **Les risques chimiques** : tout produit chimique possède une « Fiche de données de sécurité » (FDS), comportant seize rubriques dont une consacrée aux risques pour la santé ;
- **Les risques biologiques** : ce sont les agents infectieux à l'origine de pathologies, regroupant les bactéries, les virus, les parasites, les moisissures ;
- **Les horaires atypiques** : le travail de nuit, les 3x8 et autres horaires variables dans le temps ;
- **Les risques psychosociaux** : stress, harcèlement, souffrance au travail, violences, *burn out*, suicide ;
- **Les risques émergents** : les risques à effets différés, le vieillissement des travailleurs, la pénibilité, les nanoparticules ;
- **Les risques environnementaux** : pesticides, déchets nucléaires, pollutions diverses, accidents industriels.

En milieu sportif on aura bien sûr des déclinaisons différentes, adaptées à chaque activité.

La prévention des risques

Les niveaux de prévention

On distingue trois niveaux de prévention des risques.

- **La prévention primaire**

C'est la prévention à la source pour limiter ou supprimer un risque ou des facteurs de risque. Par exemple la conception des machines et des locaux, les protections collectives, les vaccinations, la formation professionnelle, la lutte contre les addictions, etc.

La prévention primaire est logiquement le fondement conceptuel de toute bonne prévention.

- **La prévention secondaire**

C'est le dépistage et l'évaluation des maladies en relation avec le travail, si possible avant qu'elles ne se déclarent. Elle fait appel au suivi médical comme l'audiométrie, les épreuves fonctionnelles respiratoires, la dosimétrie, la radio pulmonaire, la courbe de poids, etc.

Mais dépister une maladie ce n'est pas l'éviter, même si on peut admettre que ses conséquences pourront être moins lourdes en cas de dépistage précoce.

- **La prévention tertiaire**

C'est traiter ou limiter les conséquences d'une pathologie, indemniser la maladie (la *réparer* au sens de la Sécurité Sociale), c'est aussi la réinsertion ou le reclassement professionnel.

Mais là, on arrive clairement après la bataille, le mal est fait...

L'application dans nos activités

La spéléologie n'est évidemment pas une situation de travail, en tout cas dans son acceptation de loisir. Les enjeux et conséquences ne sont pas les mêmes, mais celles-ci ne sont pas moins graves pour autant.

Prenons l'exemple d'une descente de puits ou le passage d'un fractionnement, qui est la situation concrète réunissant le spéléologue et son outil, le couple corde-amarrage. Le danger est la faillite de ce couple et le risque est celui d'une chute.

Les éléments venant influencer ces trois éléments sont nombreux :

- Pour le spéléologue : sa maîtrise technique des bonnes pratiques, son expérience, sa fatigue et son état de santé, son psychisme, sa tenue vestimentaire, son équipement technique de progression, son éclairage ;
- Pour le couple « corde-amarrage » : la qualité objective de l'amarrage (*spit* ou autre, mousqueton, nœud), son positionnement par rapport au puits, le diamètre de la corde, son état d'usure, la longueur de la boucle, un éventuel frottement, l'oubli d'un nœud en bout de corde ;
- Pour la situation : qualité de la roche, présence éventuelle d'eau, purge insuffisante de la margelle, rythme de progression inadapté, inconfort éventuel du passage (plein gaz, étroiture), météo extérieure changeante, crue soudaine, présence de CO₂.

La chute, accident le plus fréquent sous terre, peut survenir à la descente ou à la remontée d'un puits, mais aussi lors de la progression dans une galerie, lors d'une escalade ou même durant la marche d'approche aller ou retour.

En canyoning on retrouve le même genre de situation, auquel on rajoute les risques liés à l'eau vive.

Pour la plongée souterraine, les risques liés à la plongée (profondeur, pression, toxicité des gaz) s'ajoutent à ceux de la spéléologie quand il y a des parties exondées.

On voit que les facteurs intervenant dans la notion de risque sont extrêmement divers, on considère d'ailleurs très souvent, lors de l'analyse d'un accident, que celui-ci a une origine multifactorielle.

Pour le risque lié au radon, le radon est présent partout mais à des taux très variables, ce sera notre « outil ». Le spéléologue y est exposé dès qu'il est sous terre, sans moyen de l'éviter.

Les deux facteurs influant directement le résultat seront la durée de l'exposition (le temps passé sous terre) et l'intensité de l'exposition (la concentration de radon dans l'air).

La situation d'exposition est donc permanente mais susceptible d'être adaptée dans une logique de prévention des effets délétères.

Notions réglementaires

La partie réglementaire traitant de l'exposition au radon fait partie d'une réglementation plus générale et vaste concernant les rayons ionisants, réactualisée par le décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire, complété par les décrets n° 2018-437 et 2018-438 du même jour. Le corpus réglementaire est donc très dense...

Comme tout texte législatif et réglementaire, l'analyse en est complexe.

Le résumé que nous en faisons n'est pas à l'abri d'une erreur d'interprétation.

Nous nous sommes appuyés principalement sur les documents et les interventions présentés lors de la journée organisée par l'IRSN le 6 juin 2019, que vous pouvez retrouver avec le lien suivant,

<https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/risque-radon-milieu-professionnel/Pages/1-journee-prevention-radon.aspx?dId=397e5fa7-29fa-4f24-94f2-41f4507a79a2&dwId=ddc66b2f-a3e6-4a00-b039-53240b5900c7#.Xj1rbz9Cc1g>

- Le texte concernant le radon dans le décret n°2018-434 se trouve au Chapitre 1, Section 2 puis sous-section 1, *réduction de l'exposition au radon* (vous suivez ?).

Il s'agit des articles R.1333-28 au R.1333-44, mais seuls certains articles sont applicables au milieu souterrain, car le cadre général du radon vise en premier lieu les bâtiments construits. La réglementation distingue trois catégories de bâtiments : les lieux de travail, les établissements recevant du public et l'habitat.

Attention !

Le milieu souterrain fait partie des lieux de travail spécifiques, pour lesquels des arrêtés techniques sont attendus dans un avenir proche, d'ici 2021 concernant les cavités naturelles, les cavités anthropiques, mais aussi les établissements thermaux et les lieux abritant une source de chaleur favorisant la diffusion du radon. Ces arrêtés conditionneront les mesures à prendre.

Le problème le plus difficile concerne le coefficient de dose applicable au milieu souterrain, que les recommandations de la CIPR ont considérablement augmenté.

- S'agissant des lieux de travail, le principe général de la démarche se déroule en deux étapes :

- La localisation géographique et la recherche documentaire ;
- Le mesurage du taux de radon atmosphérique, qui déterminera la suite de la démarche.

- **Le niveau de référence de l'activité volumique moyenne annuelle en radon est désormais fixé à 300 Bq/m³** (antérieurement c'était 400 Bq/m³), c'est le taux atmosphérique du radon (dans les bâtiments construits). À partir du moment où ce chiffre est atteint ou dépassé, il convient de mettre en œuvre des mesures visant à réduire le taux de radon. Il peut notamment s'agir d'améliorer l'étanchéité du bâtiment vis à vis des points d'entrée du radon ou d'améliorer le renouvellement de l'air des locaux.

- Un mesurage doit être fait par ailleurs si l'évaluation des risques révèle que l'exposition humaine est susceptible d'atteindre ou dépasser 1 mSv par an.

- Le territoire national est divisé en trois zones à potentiel radon définies selon l'exhalation du radon des sols. La liste des 31 départements concernés par la précédente réglementation est donc abrogée. On distingue désormais :

- Zone 1 : potentiel radon faible (essentiellement les régions calcaires, pauvres en uranium) ;
- Zone 2 : potentiel radon faible avec une teneur variable en uranium, mais sur lesquelles des facteurs géologiques particuliers peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments (failles, mines) ;
- Zone 3 : potentiel radon significatif du fait d'une teneur en uranium notable (essentiellement les régions granitiques, volcaniques et schisteuses).

La liste des communes de ces zones est consultable sur un site dédié :

<https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/5-cartographie-potentiel-radon-commune.aspx#.XjRxpTdCfFN>

- Le mesurage du radon doit être fait dans les zones 2 et 3 pour quantifier sa présence.

Pour la zone 1, le mesurage peut ne pas être fait, sauf si des informations complémentaires peuvent laisser penser que le taux limite peut être dépassé (par exemple une mesure faite dans un autre bâtiment de la zone).

Il s'agit toujours ici des bâtiments construits, ce qui ne préjuge en rien pour le milieu souterrain dans l'attente des arrêtés technique car il est possible que les cavités soient concernées automatiquement. Par ailleurs, le taux de radon en milieu souterrain semble dépasser largement les limites réglementaires... Le mesurage est donc recommandé même en zone 1 !!

- Le milieu souterrain n'est plus le seul concerné comme en 2004. **Désormais les lieux de travail en**

rez-de-chaussée et sous-sol sont également concernés par la réglementation.

- Le mesurage du radon ne concerne que les zones d'occupation humaine (ce n'est donc pas toute la cavité), c'est à dire les zones occupées au moins une heure par jour et 200 heures par an. Le capteur doit être laissé en place au moins deux mois pour être significatif. Si l'activité est saisonnière, il faut se référer aux périodes d'ouverture pour effectuer le mesurage. La période minimale de mesurage est de décembre à mars et de juin à septembre, le taux retenu étant la moyenne des deux périodes.

- S'agissant des établissements recevant du public, les obligations de dépistage sont limitées aux :

- Établissements d'enseignement, y compris les bâtiments d'internat ;
- Établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans ;
- Établissements sanitaires, sociaux et médico-sociaux avec capacité d'hébergement ;
- Établissements thermaux ;
- Établissements pénitentiaires.

Les cavités ouvertes au public ne sont donc pas mentionnées ici.

- Le mesurage permet de savoir si le taux de radon, en moyenne annuelle, dépasse ou non les 300 Bq/m³. Cette évaluation est la clé qui conditionne toute la suite de la démarche.

La norme du mesurage en milieu souterrain (cavité, ouvrages) est la Norme NF M60.772, vendue 113 euros en ligne (www.boutique.afnor.org).

Le mesurage peut être fait en interne à l'entreprise (bien décrire le protocole) ou être confié à un organisme compétent (liste sur le site de l'ASN).

Il faut déterminer les volumes cibles, homogènes en termes de température, de ventilation et de nature du sol, ainsi que les interfaces éventuelles avec des bâtiments.

Il faut poser un capteur pour 200 m² de surface avec au moins deux capteurs par zone.

Les capteurs doivent être positionnés entre un et deux mètres du sol, en laissant un espace libre autour.

Ils ne doivent pas être près d'une source de chaleur (par exemple un éclairage), d'une zone de passage ou d'ouvrants, ne pas être susceptibles d'être mouillés, ne pas être déplacés (leur présence doit être signalée).

- L'objectif de la démarche de prévention est de réduire l'exposition au niveau le plus bas possible, par des mesures améliorant la ventilation et l'étanchéité, ce qui n'est pas toujours simple en milieu souterrain naturel. Si cela s'avère insuffisant, il faut modifier l'organisation du travail afin de diminuer la durée et l'intensité de l'exposition des personnes, en particulier contrôler les accès en zone radon.

- Si au moins un des taux mesurés dépasse la limite réglementaire, il faut mettre en œuvre des mesures correctives dont l'efficacité devra être contrôlée par un nouveau mesurage.

Si les taux persistent au delà de la limite après ces mesures, il faut mettre en place une procédure d'expertise qualifiée précisant les causes de la présence du radon ainsi que des mesures correctives supplémentaires.

Si les mesures restent encore élevées après un nouveau contrôle, un signalement à l'IRSN doit être fait pour un mettre en place un dispositif renforcé.

Ces démarches doivent avoir lieu dans les 36 mois suivant le mesurage initial.

Les taux mesurés doivent être transmis au service de santé au travail.

- Les « zones radon » : ce sont les zones où l'exposition peut être supérieure à 6 mSv par an pour un travailleur temps plein. Elles nécessitent un balisage spécifique et un calcul de dose plus précis selon la formule suivante :

$$E = C \times T \times CD$$

E est la dose reçue, exprimée en mSv.

C est la concentration du radon en Bq/m³.

T est le temps d'exposition de la personne en heures.

CD est le coefficient de dose.

Dans la réglementation en vigueur depuis 2003, ce coefficient de dose est de $3,11 \cdot 10^{-6}$ mSv par Bq.h/m³ dans les lieux de travail (en supposant que le facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants est de 0,4)³. Mais en application des nouvelles préconisations de la CIPR, ce coefficient devrait être revu la hausse (la nouvelle réglementation de 2018 prévoit à cette fin la parution d'un nouvel arrêté). Le nouveau coefficient devrait être (toujours pour un facteur d'équilibre de 0,4) de $6,67 \cdot 10^{-6}$ mSv par Bq.h/m³ dans la plupart des configurations (habitat, lieu de travail de type bureau), et de $1,33 \cdot 10^{-5}$ mSv par Bq.h/m³ dans le cas des activités physiques professionnelles plus intenses ainsi que des grottes souterraines touristiques⁴.

- Le suivi des expositions individuelles au radon est précisé dans l'arrêté du 26 juin 2019, annexe 4. L'employeur doit se déclarer à l'IRSN, nommer un conseiller en radioprotection et être adhérent à un service de santé au travail.

Un dosimètre d'ambiance intégré est valable s'il est positionné dans une zone de concentration homogène, avec un facteur d'équilibre stable entre le radon et ses descendants à vie courte, au plus près des conditions de travail.

Si le salarié est amené à changer d'endroit ou si les lieux de travail ne sont pas homogènes, le port d'un dosimètre individuel nominatif est alors nécessaire. Sa lecture est différée en fonction de la périodicité de renouvellement du dosimètre, qui peut varier entre 1 et 3 mois selon le poste.

Le port d'un dosimètre individuel nominatif est prévu également quand un salarié est en « zone radon », c'est à dire une zone où son exposition peut atteindre (ou dépasser) 6 mSv pour 2000 heures de présence.

L'entreposage du dosimètre individuel en dehors des heures de travail doit être fait dans une zone neutre, elle-même dotée d'un dosimètre témoin de contrôle. L'exposition réelle du salarié sera calculée après soustraction de la valeur de ce dosimètre témoin.

- Limites de doses susceptibles d'être reçues :

- Pour l'organisme entier (dite « dose efficace »), la dose sur 12 mois consécutifs ne doit pas dépasser 20 mSv (sauf exceptions précisées dans le décret) ;
- Un salarié sera classé en catégorie B s'il est susceptible de recevoir une dose entre 1 et 6 mSv sur 12 mois consécutifs ;
- Un salarié sera classé en catégorie A s'il est susceptible de recevoir une dose entre 6 et 20 mSv sur 12 mois consécutifs ;
- Une femme enceinte ne doit pas recevoir de dose supérieure à 1 mSv ;
- Un jeune de moins de 18 ans ne doit pas recevoir de dose supérieure à 6 mSv et sera donc exclus des « zones radon ».

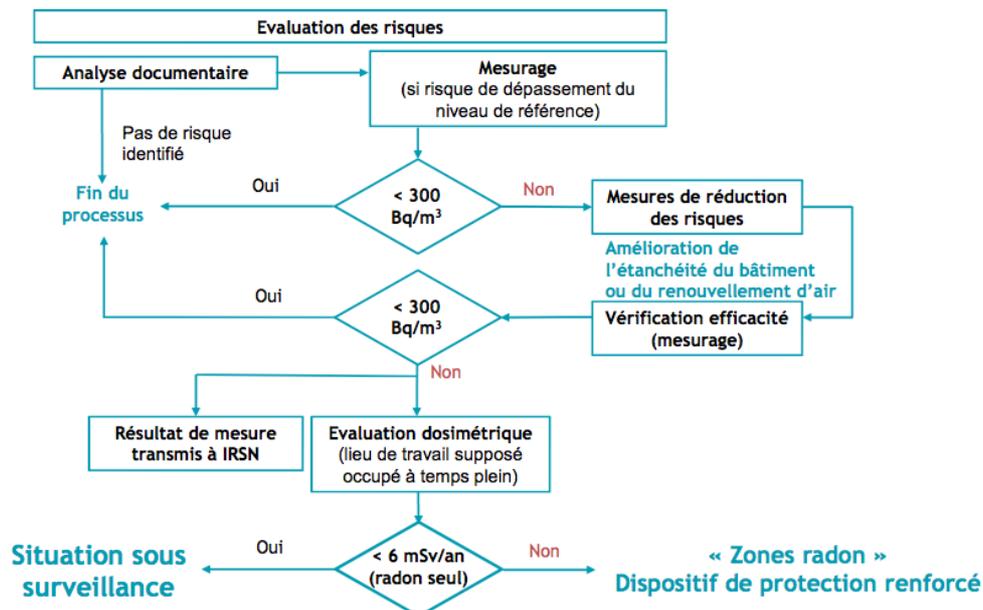
- Le dosimètre individuel ou Détecteur Solide de Traces Nucléaires (DSTN) doit être de type « fermé » pour ne pas être influencé par l'humidité ambiante du milieu souterrain.

Le dosimètre calcule l'exposition au radon 222 ainsi que l'exposition à ses descendants à vie courte.

³ Les coefficients actuellement en vigueur ont été fixés par l'arrêté du ministère de la Santé du 1er septembre 2003 (https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?id=JORFTEXT00000798700). S'agissant du radon, ces coefficients (1,1 mSv/mj.h/m³ pour le public et 1,4 mSv/mj.h/m³) sont ceux préconisés par la publication 65 de la CIPR, datant de 1993. 1,4 mSv/mj.h/m³ correspond à $3,11 \cdot 10^{-6}$ mSv/Bq.h/m³ (avec un facteur d'équilibre de 0,4).

⁴ Ces nouveaux coefficients sont recommandés par la publication 137 de la CIPR, datant de 2018. L'IRSN a publié une note explicative relative à ces nouveaux coefficients : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_PSE-SANTE-2018-00002_CIPR-137-coefficients-dose-radon.pdf.

- Logigramme résumant la démarche (source IRSN)



Quelles sont les personnes concernées?

En fonction de la géographie

On a vu que le radon est un gaz ubiquitaire, donc présent sur tout le territoire français. Mais, selon la nature géologique des terrains, le risque est très inégal d'une région à l'autre. Les régions à terrain granitique comme l'Armorique, les Vosges, les Alpes, les Pyrénées ou le Massif Central, sont les plus concernées, mais le reste du territoire réserve beaucoup de surprises.

La concentration moyenne en France de radon dans les habitations est de 92 Bq/m³ en données brutes, et 69 Bq/m³ après pondération par la population.

L'irradiation liée au radon, qui est la principale composante de l'irradiation naturelle, est estimée à 1,43 mSv par an (IRSN, 2015). Cette évaluation devrait être revue à la hausse en application des nouveaux coefficients de dose préconisés par la CIPR.

L'IRSN donne une fourchette du taux de radon dans les cavités françaises, de 500 à 20 000 Bq/m³, fourchette très large...

L'étude radon faite en 2003-2006 par la FFS retrouve également une fourchette, encore plus large, de 154 à 63 048 Bq/m³... mais ce dernier chiffre est exceptionnel et correspond à des cavités développées dans le granite. Si l'on fait abstraction de ce résultat hors norme, le maximum enregistré en moyenne annuelle est de 7771 Bq/m³, donc beaucoup plus resserré que celui de l'IRSN.

La moyenne calculée sur 19 cavités et les 160 mesures effectuées donne une valeur moyenne de 3049 Bq/m³.

En fonction de l'activité professionnelle

L'exposition au radon concerne toute personne travaillant en sous-sol et rez-de-chaussée. Cela fait beaucoup de monde, mais encore faut-il prouver et quantifier cette exposition par un mesurage du taux de radon.

La notion d'Établissement Recevant du Public (ERP) est très restrictive dans la réglementation. Cela concerne les établissements d'enseignement, les établissements d'accueil collectif des enfants de moins de 6 ans, les établissements sanitaires, sociaux et médico-sociaux, les établissements thermaux et les établissements pénitentiaires.

Les cavités aménagées n'en font donc pas partie et ne sont pas concernées par cet aspect précis. Elles sont par contre concernées pour leurs salariés ayant partie ou totalité de leur temps de travail en sous-sol ou en rez-de-chaussée : guides, agents d'entretien technique, employés commerciaux et administratifs selon leur lieu de travail. Les employés saisonniers ou en contrat précaire (intérim, CDD, stagiaires) sont également concernés.

Les professionnels de la spéléologie (BE, DE, diplômés fédéraux), qu'ils soient libéraux indépendants, salariés ou sous-traitants, sont bien évidemment concernés.

Les autres cas

- Le pratiquant spéléologue de loisir peut être concerné par le risque en fonction des cavités qu'il fréquente, à défaut de l'être par la réglementation.
- Le public visitant une cavité, que ce soit dans un cadre de grotte aménagée pour le tourisme ou de guidage par un guide breveté, peut être également concerné par le risque. Mais, en raison de la brièveté d'exposition, ce risque est totalement théorique et ne sera pas pris en compte, d'autant que la personne peut avoir par ailleurs une exposition personnelle en raison de sa région d'habitation ou de ses loisirs.

Les principes et règles de la prévention

Tout le monde connaît l'adage « *Mieux vaut prévenir que guérir* »...

Oui, mais la prévention en milieu de travail n'est pas chose simple, elle ne s'invente pas et obéit à des principes bien établis.

Nous resterons sur les grandes lignes de ce sujet, vaste et complexe, renvoyant le lecteur à la documentation officielle, notamment l'INRS pour les aspects techniques, *Légifrance* pour les aspects juridiques et réglementaires et enfin la presse professionnelle pour les retours d'expérience.

La prévention repose et nécessite d'abord un travail sur **l'évaluation des risques**.

A quoi cela servirait de chercher une prévention à un risque qui ne serait pas présent, qui serait mal compris ou mal analysé ?

L'évaluation des risques est une obligation de l'employeur depuis le décret 2001-1006 du 5 novembre 2001, dont la base est l'Article R. 230-1 :

« *L'employeur transcrit et met à jour dans un document unique les résultats de l'évaluation des risques pour la sécurité et la santé des travailleurs à laquelle il doit procéder en application du paragraphe III (a) de l'article L. 230-2. Cette évaluation comporte un inventaire des risques identifiés dans chaque unité de travail de l'entreprise ou de l'établissement* ».

L'employeur doit donc lister les risques professionnels présents dans son entreprise, ce qui est une première difficulté car il n'a souvent pas une vision exhaustive et claire des différents risques existants. Nous avons vu au chapitre « Qu'est ce qu'un risque » une liste indicative de risques professionnels.

Cette liste de risques n'est donc pas le fait du hasard, mais découle d'une analyse précise de l'environnement de travail. Elle peut nécessiter des campagnes de mesure pour confirmer la présence du risque et son importance. Par exemple le nombre de décibels pour le bruit, les valeurs limites pour un produit chimique, la mesure des vibrations transmises au corps...

Pour le radon, il faut mesurer la radioactivité ambiante des zones où il y a une présence humaine avec des capteurs qui seront ensuite analysés. Ce mesurage sera donc qualitatif (il y a du radon ou non) et quantitatif (à quelle dose ?). Si la présence de radon est confirmée, le taux observé permettra d'envisager les mesures de prévention nécessaires selon les textes réglementaires.

Une fois listés ces risques, il faut ensuite en évaluer pour chacun :

- La gravité (en terme de santé ou d'accidentologie) : se coincer le doigt dans une porte ou tomber d'un toit n'ont pas tout à fait les mêmes conséquences... ;
- La fréquence d'exposition : un antenniste sera exposé quotidiennement aux chutes de hauteur mais beaucoup plus rarement au risque chimique ;
- Le nombre de personnes concernées pour chaque risque.

De cette évaluation va découler la démarche de prévention par axes prioritaires, en sachant que chaque risque identifié peut nécessiter plusieurs actions préventives, immédiates ou planifiées dans le temps.

L'employeur doit retranscrire ces risques dans un « document unique », leur évaluation et les moyens de prévention (déjà existants ou à venir). Il n'a pas de forme réglementaire particulière mais un support informatique est cependant à privilégier, afin de faciliter la troisième étape de la démarche d'évaluation, qui est le suivi dans le temps.

La mise à jour de ce document est au moins annuelle ainsi qu'après toute modification des conditions de travail ou d'évaluation d'un risque.

En effet, si les risques ont peu de chance de changer ou d'évoluer (à moins que l'entreprise ne modifie ses objectifs), les mesures de prévention vont s'inscrire au fur et à mesure de leur mise en place, ce qui changera l'évaluation des risques dans le temps. Par exemple, pour un produit chimique toxique, la mise en place d'un circuit clos évitera en principe toute exposition humaine.

De nombreux organismes publics ou privés peuvent aider l'employeur dans la mise en place de ce document unique, mais celui-ci reste entièrement responsable de son contenu. Il a donc tout intérêt à suivre de près la démarche.

Une fois l'évaluation des risques inscrite dans ce « document unique », il reste l'étape finale, mettre en place concrètement les moyens de prévention. Nouvelle difficulté, car comment aborder ces moyens si on n'a pas une vision claire de ce que sont les principes de prévention au delà de quelques notions intuitives ?

La réglementation nous aide heureusement à fixer les cadres de la réflexion.

« Article L4121-1

L'employeur prend les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs.

Ces mesures comprennent :

1° Des actions de prévention des risques professionnels, y compris ceux mentionnés à l'article L. 4161-1

2° Des actions d'information et de formation ;

3° La mise en place d'une organisation et de moyens adaptés.

L'employeur veille à l'adaptation de ces mesures pour tenir compte du changement des circonstances et tendre à l'amélioration des situations existantes ».

On voit en préambule une notion très importante, la prévention ne fait pas appel uniquement à des moyens matériels, mais aussi à des aspects organisationnels, à la sensibilisation aux risques et à la formation des salariés.

Ensuite, le texte précise plus concrètement les **neufs principes généraux de la prévention**.

« Article L4121-2

L'employeur met en œuvre les mesures prévues à l'article L. 4121-1 sur le fondement des principes généraux de prévention suivants :

1° Eviter les risques ;

2° Evaluer les risques qui ne peuvent pas être évités ;

3° Combattre les risques à la source ;

4° Adapter le travail à l'homme, en particulier en ce qui concerne la conception des postes de travail ainsi que le choix des équipements de travail et des méthodes de travail et de production, en vue notamment de limiter le travail monotone et le travail cadencé et de réduire les effets de ceux-ci sur la santé ;

5° Tenir compte de l'état d'évolution de la technique ;

6° Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux ;

7° Planifier la prévention en y intégrant, dans un ensemble cohérent, la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants, notamment les risques liés au harcèlement moral et au harcèlement sexuel, tels qu'ils sont définis aux articles L. 1152-1 et L. 1153-1, ainsi que ceux liés aux agissements sexistes définis à l'article L. 1142-2-1 ;

8° Prendre des mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle ;

9° Donner les instructions appropriées aux travailleurs ».

Reprenons un par un ces principes, qui relèvent souvent du simple bon sens.

1) Éviter les risques

C'est une lapalissade... Si on supprime le risque ou si on l'évite, il n'est plus là ! Par exemple, supprimer un produit toxique ou remplacer une machine manuelle dangereuse par une machine automatisée.

2) Évaluer les risques qui ne peuvent pas être évités

Quand un risque est intrinsèque à l'activité, par exemple une chute de hauteur pour un couvreur, il faut évaluer ce risque avec le plus grand soin, selon sa fréquence et sa gravité, et ne pas se retrancher derrière l'excuse des « risques du métier »...!

3) Combattre les risques à la source

C'est le principe de la prévention primaire et de l'ergonomie de conception, que ce soit pour les lieux de travail, les équipements ou les modes opératoires.

Si une machine est bruyante, il vaut mieux installer un capotage insonorisant ou isoler la machine, ce qui évitera la diffusion du bruit dans tout le local, que se contenter de donner un casque anti-bruit au salarié.

4) Adapter le travail à l'Homme

L'homme n'est pas un robot, ses caractéristiques morphologiques, comportementales et cognitives sont spécifiques, variables et évolutives dans le temps (vieillesse). Par exemple, la hauteur d'un plan de travail fixe ne conviendra pas à un certain nombre de personnes. Si le plan est à hauteur variable, on aura respecté le facteur humain qui évitera des pathologies induites et améliorera la performance et le confort des salariés.

Ce principe fait appel également à l'ergonomie et au confort du poste de travail, mais aussi au bien-être et à la qualité de vie au travail, vastes sujets d'actualité.

5) Tenir compte de l'état d'évolution de la technique

En matière de sécurité, les progrès sont constants. Ce qui est compliqué ou imparfait à un moment donné, peut devenir simple et efficace à terme. Cela demande un questionnement permanent et une veille technique et organisationnelle.

6) Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux

Question de bon sens, si un même résultat peut être obtenu par un processus ou un produit moins toxique, on doit le privilégier. Par exemple la substitution des peintures solvantées avec des produits pétroliers par des peintures à solvants aqueux.

7) Planifier la prévention

C'est avoir une cohérence dans la démarche, qui tiendra compte des éléments techniques, organisationnels, environnementaux et sociaux. Cela paraît compliqué de prime abord, mais cela reste encore une fois du bon sens.

Changer un chariot automoteur n'améliorera pas le risque lié aux vibrations si la zone de roulement n'est pas stabilisée et lissée.

8) Prioriser les mesures de protection collective sur les mesures individuelles

Pour reprendre l'exemple du bruit, capoter une machine protégera tout l'atelier, alors qu'un casque anti-bruit ne protégera qu'une personne. Cela rejoint le principe de combattre les risques à la source, dont les bénéfiques seront collectifs, contrairement aux mesures individuelles qui restent ponctuelles.

Les protections individuelles doivent être uniquement envisagées comme un complément des protections collectives quand celles-ci sont insuffisantes ou inexistantes.

9) Donner des instructions appropriées aux travailleurs

La mission est triple. Il faut sensibiliser le travailleur aux risques, dont la perception est très variable et parfois totalement absente, l'informer sur la nature et les conséquences des risques et enfin, le

former à la prévention. Par exemple comment utiliser une protection respiratoire ou mettre en place une protection antichute (harnais, ligne de vie, échafaudage, etc.).

Muni de ces principes généraux, on est beaucoup mieux préparé et armé pour évaluer les risques et mettre en place une stratégie adaptée à la situation concrète.

En matière de radioprotection, qui est la prévention spécifique envers les rayonnements ionisants (la radioactivité), trois autres principes réglementaires existent en parallèle. Nous les citons en complément, il s'agit des principes de :

- Justification : toute utilisation des rayonnements ionisants doit être évaluée selon les avantages pour les individus ou la collectivité et les nuisances apportées (on accepte mieux par exemple une irradiation médicale destinée à explorer ou traiter une maladie grave) ;
- Optimisation : maintenir les expositions aussi basses que possible en tenant compte des facteurs économiques et sociaux ;
- Limitation : limiter les doses individuelles cumulatives, en particulier en respectant les valeurs limites réglementaires.

Les moyens de prévention

Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, le radon est ubiquitaire, intrinsèque au milieu souterrain, sous la forme d'un gaz lourd, incolore, inodore et très sensible à l'aérogologie de la cavité.

Par ailleurs il ne donne aucun signe d'exposition, il n'y a pas d'intoxication repérable et ses graves effets délétères sont différés dans le temps de plusieurs dizaines d'années.

On voit d'entrée de jeu que le problème n'a rien de facile !

Comment lutter contre un ennemi aussi sournois ?

Théoriquement la réponse est pourtant simple, il faut éviter l'exposition comme le préconise le premier principe de prévention. En l'occurrence, il s'agit d'arrêter la pratique de la spéléologie et la visite de cavités...!

Gageons que cette éventualité n'est venue à l'idée de personne, en tout cas sûrement pas de la part du lecteur de ce texte, qui vient de ranger son matériel d'exploration et qui entend bien le ressortir le week-end prochain ! Quant à l'exploitant de grotte aménagée, la suppression d'un outil de travail ne fait en général pas partie des solutions envisageables...!

Pour la prévention, signalons deux possibilités pratiques :

- Éviter la visite de cavités lors des périodes où la concentration de radon est la plus élevée, en général l'été... Malheureusement c'est souvent la période la plus propice à la pratique de l'activité ! Par contre, si l'on dispose d'un mesurage de la concentration en radon de la cavité visitée, on peut effectivement prendre la précaution d'éviter les périodes de forte concentration ;
- La pratique du camp souterrain ou bivouac est à considérer sous le même angle.

Rappelons d'abord que la présence de radon doit être authentifiée, mesurée et comparée aux textes réglementaires. Une cavité ne dépassant pas les taux limites n'a pas besoin de mettre en place des mesures préventives, ce qui n'exclut pas de réfléchir au risque qui est présent même s'il ne dépasse pas les normes, car elles sont toujours susceptibles de changer dans le temps comme c'est le cas actuellement. On est en effet passé d'une limite de 400 Bq/m³ à 300 Bq/m³, alors que l'OMS recommandait en 2009 de ne pas dépasser la limite de 100 Bq/m³... Ce taux de 100 Bq/m³ étant d'ailleurs proche de la valeur moyenne relevée sur le territoire français...

Au passage, signalons que la pose de capteur pour déterminer le taux de radon est une méthode simple et très peu coûteuse.

Modifier la ventilation de la cavité

On revient à la question de départ, comment empêcher ou limiter la présence d'un gaz dans un local, en l'occurrence un volume naturel non clos ? La théorie nous livre deux possibilités :

- Étanchéifier le local pour empêcher la pénétration du radon en occultant toutes les entrées telluriques possibles : on imagine bien ça pour une cavité naturelle...! Mission impossible ! À moins de cloisonner le réseau, ce qui peut être envisagé dans certains cas ;
- Ventiler le local pour que le radon ne s'accumule pas sur place : là on entrevoit une solution possible, en mettant la cavité en surpression. En effet si on aspire l'air, on met la cavité en dépression et on augmentera l'arrivée du radon présent dans les roches et fissures. La technique de secours et de désobstruction mettant en jeu une ventilation en surpression, non aspirante, est bien connue. Mais la mettre en pratique en permanence sur tout un réseau, c'est autrement plus compliqué. Cette solution paraît envisageable pour les petits réseaux, un fac-similé de cavité ou si un cloisonnement du réseau est possible.

Ne pas oublier que le radon est un gaz lourd, qui aura donc tendance à s'accumuler dans les parties déclives du réseau comme le fait le dioxyde de carbone CO₂.

La présence d'une rivière souterraine est un facteur favorisant le dégazage du radon.

Ne pas oublier non plus que la répartition du radon n'est en général pas homogène dans le réseau.

Une cavité aménagée n'exploite en général qu'une petite partie du réseau souterrain, il faut donc faire les mesures d'ambiance uniquement dans les parties visitables et réfléchir aux éventuelles mesures de prévention à l'échelle de ces parties.

À ce stade, le lecteur et le préventeur commencent à déprimer sérieusement. Imaginer des investissements lourds, sans garantie formelle de résultat satisfaisant, voilà qui n'incite pas à l'optimisme... Et modifier profondément la climatologie et l'aérodologie d'une cavité n'est pas forcément sans conséquences environnementales pour la cavité, la conservation de ses concrétions et de sa faune locale comme les chiroptères ou les insectes cavernicoles. Mais rien n'est perdu !

On a quand même le droit de retenter sa chance avec la ventilation. En particulier dans les cavités aménagées (ou dans un fac-similé), si le réseau visitable par le public est bien limité et circonscrit à une zone de la cavité, que l'on peut éventuellement cloisonner sans conséquences environnementales. On peut aussi envisager de modifier le parcours touristique si cela est possible, par exemple pour éviter les parties déclives.

Le calcul du volume et du débit nécessaires à cette ventilation est une affaire de spécialistes mais cela reste une option possible.

Si on ne peut pas mettre en place de dispositif technique permettant de baisser le taux de radon, on ne peut alors jouer que sur la limitation de l'exposition humaine au radon.

À moins de porter un appareil respiratoire autonome en permanence, ce qui est inapplicable en pratique, la limitation ne peut porter que sur un facteur, la durée d'exposition, donc le temps de travail ou de présence en zone à risque. Ce qui pourrait sous entendre de suspendre l'exposition, donc arrêter l'activité, mais cette éventualité paraît *a priori* exceptionnelle.

Limiter la durée d'exposition au radon

Rappelons que le risque doit être authentifié et mesuré dans la zone où vont évoluer les humains et uniquement dans cette zone.

Si les taux excèdent les limites réglementaires, il faut limiter la durée d'exposition, donc le temps de présence dans la zone concernée. Le calcul de la dose potentiellement reçue permettra de préciser cette durée. Pour un travailleur salarié, cette limitation de temps d'exposition n'est pas nécessairement une diminution de son temps de travail car il peut être affecté à d'autres tâches au sein de l'entreprise, tâches non exposées ou moins exposées au risque radon.

Signalons au passage que le radon est beaucoup plus présent en été qu'en hiver ; supprimer ou limiter la présence des personnes durant cette période est donc *a priori* une bonne solution... Mais s'agissant justement de la période touristique, cela paraît difficile...

Certaines cavités aménagées ont généralisé la visite touristique avec un audio-guide, limitant de fait la présence et l'exposition des guides. C'est une perspective intéressante.

Limiter le nombre de personnes exposées au radon

Il s'agit bien ici de la dose résultant uniquement de l'exposition au radon,

Les personnes exposées sont classées selon leur niveau d'exposition calculée en milli Sievert (mSv), bien que ce classement ne soit pas prévu pour l'exposition uniquement due au radon :

- Personne considérée comme non exposée si le total des doses liées au radon est inférieur à 1 mSv sur 12 mois consécutifs ;
- Personne exposée en catégorie B si le total des doses liées au radon est supérieur à 1 mSv sur 12 mois consécutifs mais reste inférieur à 6 mSv ;
- Personne exposée en catégorie A si le total des doses liées au radon est supérieur à 6 mSv sur 12 mois consécutifs mais reste inférieur à 20 mSv ;
- Si l'exposition est supérieure à 20 mSv, le travail est interdit.

La complexité de la gestion du risque radon et ses éventuelles conséquences doit inciter à limiter le plus strictement possible le nombre de personnes concernées et de limiter au maximum la dose reçue. Le suivi médical est différent selon le classement des personnes exposées.

Le suivi dosimétrique du radon

Il peut être réalisé sous deux formes, la mesure environnementale et la mesure humaine.

1) La mesure environnementale peut être faite par :

- Une pose de capteurs temporaires, répartis dans le réseau, à relever périodiquement ;
- Une dosimétrie d'ambiance en continu.

2) La mesure humaine est réalisée par le port d'un *dosimètre alpha individuel*, durant toute la période d'exposition. Il se porte à la ceinture et doit être renouvelé régulièrement (généralement tous les mois).

La lutte contre le tabagisme

Elle n'est pas spécifique à la prévention envers le radon. C'est un très important problème de santé publique sur lequel nous ne reviendrons pas. Mais sa prise en compte concernant le radon est tout à fait justifiée, voire incontournable.

En effet, le tabagisme augmente la cancérogénicité du radon d'un facteur 3. Il est donc important d'inclure ce volet particulier à la démarche générale de prévention, par tout moyen possible : information, accompagnement, thérapies, etc.

Les solutions concrètes

Rappel des éléments de base

La réglementation concerne essentiellement les bâtiments construits.

Pour les cavités souterraines, des arrêtés techniques doivent paraître prochainement. L'application du nouveau coefficient de dose recommandé par la CIPR est un point central qui conditionnera l'avenir de nos pratiques.

La présence de radon est maximale l'été, il stagne dans les parties déclives et les zones confinées non ventilées.

La mesure du radon ne concerne que les zones où des personnes doivent évoluer.

La mesure du radon doit être prolongée dans le temps, idéalement sur une année entière, mais on peut extrapoler sur des données plus restreintes, en particulier en cas d'activité saisonnière.

Le milieu souterrain naturel semble présenter des taux de radon généralement au dessus des limites réglementaires si l'on se réfère aux quelques études réalisées. Mais cette appréciation globale nécessite une vérification concrète dans chaque situation.

Seules les zones où le taux de radon excède les limites réglementaires doivent faire l'objet d'une démarche de prévention.

Les solutions techniques

Elles se résument à un principe général, augmenter la ventilation des zones concernées, donc améliorer le renouvellement de l'air. La mise en surpression de ces zones est envisageable. Au besoin avec un cloisonnement si cela est possible selon le profil de la cavité et sans retentissement délétère sur le concrétionnement et la faune locale.

Pour les cavités souterraines, l'équation est difficile à résoudre, mais tout est affaire de cas particuliers, on ne peut pas généraliser.

On doit déterminer les zones de la cavité en fonction de leurs taux respectifs.

Le taux de radon doit bien sûr être vérifié après les éventuels aménagements, puis suivi régulièrement, en principe tous les dix ans ou après chaque plan d'aménagement modifiant la ventilation ou l'étanchéité des locaux.

Une dosimétrie d'ambiance peut être mise en place en fonction des zones, en continu ou par capteur trimestriel.

Les solutions organisationnelles

Il s'agit de supprimer l'exposition au radon, mais si cela est impossible, on peut jouer sur deux facteurs, limiter la durée de l'exposition et limiter son intensité.

La limitation de la durée d'exposition correspond à limiter le temps de présence des humains dans les zones concernées.

La limitation de l'intensité revient à la problématique de la ventilation, destinée à faire baisser le taux de radon dans l'atmosphère de la cavité.

Pour les cavités aménagées, l'utilisation d'un audio-guide peut permettre de limiter la présence de guides sur le parcours et donc limiter leur exposition.

On peut mettre en place des rotations de personnel en fonction des postes plus ou moins exposés (guidage, accueil, entretien, commercial, administratif, surveillance) ou en fonction des données saisonnières du taux de radon, en privilégiant les périodes à taux bas si cela est possible.

Le suivi médical

Si une personne est susceptible d'être exposée à une dose entre 1 et 6 mSv par an, elle est classée en catégorie B et le médecin du travail doit en être informé.

Entre 6 et 20 mSv par an, la personne est classée en catégorie A.

Tout travailleur classé bénéficie d'un suivi individuel renforcé (SIR) par le service de santé au travail.

Et si on passait à la pratique...?

Nous arrivons bientôt au terme de notre dossier.

Si vous êtes parvenu jusqu'ici, bravo, car le sujet n'est pas simple, voire carrément indigeste, mais vous avez pu glaner au long de ces pages nombre d'informations techniques mais aussi des ébauches de solutions pour faire face au risque du radon.

Nous avons effectivement vu ensemble, ce qu'est le radon, où il se trouve, comment il se comporte, quels sont ses risques, comment authentifier sa présence, comment le quantifier par des mesurages, comment faire le lien entre vous, le terrain et votre pratique, savoir ce que dit la réglementation, comment la mettre en pratique et envisager les mesures de prévention.

Muni de tout ce corpus théorique, il nous reste maintenant à voir comment aborder concrètement cette difficile problématique.

Nous allons pour cela considérer trois cas de figure, très différents :

- Le pratiquant spéléologue de loisir ;
- Le guide professionnel ;
- La cavité aménagée pour le tourisme.

Pour chacun nous pouvons estimer un temps annuel de présence sous terre, évidemment virtuel car dépendant de chaque personne. L'estimation de la dose reçue est encore plus virtuelle puisqu'elle dépend de chaque cavité visitée.

On saisit immédiatement la difficulté d'apporter des éléments factuels crédibles au questionnement du risque lié au radon.

La fourchette des taux de radon que donne l'IRSN pour les cavités naturelles, entre 500 et 20 000 Bq/m³, permet de déterminer des valeurs limites potentielles, qui restent théoriques.

Dans le rapport radon de 2007, une étude citée évalue la moyenne mondiale des cavités à 2800 Bq/m³, celle de la Belgique a été estimée à 1000 Bq/m³.

Le pratiquant spéléologue de loisir

Comment calculer le temps annuel passé sous terre par un pratiquant ?

On peut arbitrairement distinguer deux situations : un pratiquant régulier mais loin des massifs karstiques (tiens, au hasard, un parisien...), qui fera un week-end par mois, passera au maximum une centaine d'heures sous terre.

À l'opposé, un pratiquant acharné (si, si, il y en a...), sortira tous les week-ends et voire même un camp annuel. Une pratique donc intensive, qui peut être estimée à 400 heures par an.

Entre les deux, tous les intermédiaires sont permis, en particulier le spéléologue local, habitant une zone karstique avec des cavités à moins d'une heure de route, qui sortira plus souvent mais peut-être pour des durées moindres.

Il reste le pratiquant occasionnel, par exemple une sortie basique par trimestre, qui ne sera donc pas ou très peu concerné.

Nous avons vu comment calculer la dose reçue en fonction du taux de radon atmosphérique annuel moyen et du temps passé sous terre, la formule utilisée étant celle des « zones radon » :

$$E \text{ (mSv)} = C \text{ (Bq/m}^3\text{)} \times T \text{ (h)} \times CD \text{ (3,11} \times 10^{-6}\text{)}$$

Ce coefficient de dose (CD) est celui de la réglementation actuelle, datant de 2003, qui doit donc en principe évoluer.

Le coefficient de dose recommandé récemment par la CIPR 137 pour les grottes est différent. Si ce coefficient est transcrit dans la réglementation à venir, la dose reçue sera dans ce cas la suivante :

$$E \text{ (mSv)} = C \text{ (Bq/m}^3\text{)} \times T \text{ (h)} \times CD \text{ (1,33} \times 10^{-5}\text{)}$$

La différence entre ces deux coefficients est très importante, nous allons le voir dans les calculs théoriques d'exposition individuelle ci-après.

Le rapport sur le radon de 2007 a objectivé une moyenne du taux de radon dans les cavités étudiées de 3049 Bq/m³.

On peut donc facilement estimer la dose reçue :

- Pour 100 heures par an : 0,95 mSv, **4,1 mSv avec le nouveau coefficient ;**
- Pour 400 heures par an : 3,78 mSv, **16,3 mSv avec le nouveau coefficient.**

Si l'on utilise le nouveau coefficient de dose, la limite des 6 mSv n'est pas dépassée pour une pratique modérée (cependant non négligeable), mais on est très nettement au-delà de cette valeur pour une pratique intensive.

Rappelons que cette exposition de loisir se rajoute à l'irradiation moyenne annuelle reçue dans la vie de tous les jours, qui, pour mémoire, est de 4,5 mSv par an en France (IRSN, 2015), cumulant l'irradiation naturelle pour 2,9 mSv (dont le radon ambiant), celle liée aux examens d'imagerie médicale pour 1,6 mSv et celle liée aux sources industrielles et militaires pour 0,02 mSv.

Si l'on prend les limites maximales de l'IRSN, soit 500 et 20 000 Bq/m³, en distinguant les deux cas de figure de pratique, on aura les résultats suivants :

- Pour un taux de 500 Bq/m³ et 100 heures d'exposition : 0,15 mSv avec l'ancien coefficient, **0,67 mSv avec le nouveau ;**
- Pour un taux de 500 Bq/m³ et 400 heures d'exposition : 0,62 mSv avec l'ancien coefficient, **2,67 mSv avec le nouveau ;**
- Pour un taux de 20 000 Bq/m³ et 100 heures d'exposition : 6,2 mSv avec l'ancien coefficient, **26,7 mSv avec le nouveau ;**
- Pour un taux de 20 000 Bq/m³ et 400 heures d'exposition : 24,8 mSv avec l'ancien coefficient **106,8 mSv avec le nouveau**, chiffres hors limite incompatibles avec la réglementation. Mais un taux de 20 000 Bq/m³ est exceptionnellement rencontré.

On peut considérer que le spéléologue de loisir est bien concerné par l'exposition au radon, en particulier pour une pratique très intensive. À la réserve près que cela dépend encore et toujours du taux de radon dans les cavités visitées.

Il était a priori inutile (et assez compliqué), de mesurer le radon dans ce cadre de loisir en fonction des anciens coefficients. Mais avec les nouveaux la situation est très nettement différente, ce mesurage peut dès lors être recommandé même dans le cadre du loisir.

Cela peut tout particulièrement se recommander dans certains cas :

- Dans des cavités du granite, mais celles-ci sont de faible développement, ne nécessitant pas un temps de présence important, et par ailleurs souvent ventilées en bord de mer ;
- Dans des cavités karstiques développées près de terrains schisto-granitiques, volcaniques ou près de sources thermales, l'importance de la ventilation de la cavité prenant ici toute son importance ;
- Dans des cavités drainant des bassins d'alimentation riches en matériaux uranifères ;
- Dans des chantiers de désobstruction de très longue durée.

Le guide professionnel

Un professionnel peut se trouver dans trois situations différentes :

- En tant qu'indépendant, il assume son propre risque, mais il reste contraint par la réglementation ;
- En tant que salarié d'une structure, c'est le Code du travail qui s'impose ;
- En tant que sous-traitant d'une structure, la situation est plus complexe car il exerce en son nom, mais la structure, en tant qu'entreprise utilisatrice, peut être amenée à établir un plan de prévention. Il est recommandé d'avoir l'avis d'un juriste du travail sur ce point.

On retrouve la même difficulté que pour le pratiquant de loisir, comment chiffrer le temps passé sous terre par un professionnel ?

D'après les informations issues du milieu professionnel, ce temps annuel est estimé habituellement entre 500 et 700 heures sous terre, certains pouvant atteindre 900 heures.

En reprenant la valeur moyenne de 3049 Bq/m^3 , on obtient les doses annuelles suivantes :

- Pour 500 heures : 4,72 mSv avec l'ancien coefficient, **20,3 mSv avec le nouveau** ;
- Pour 700 heures : 6,6 mSv avec l'ancien coefficient, **28,5 mSv avec le nouveau** ;
- Pour 900 heures : 8,5 mSv avec l'ancien coefficient, **36,5 mSv avec le nouveau**.

On voit, avec les nouveaux coefficients que la dose reçue excède les valeurs réglementaires de 20 mSv de manière très rapide, dès 400 heures d'exposition. Toujours avec la réserve du taux effectif de radon mesuré dans les cavités fréquentées.

Doit-on et peut-on mesurer le radon des cavités dans ces situations professionnelles ?

Difficile d'apporter une réponse claire. On peut supposer qu'un guide spéléologue fréquente majoritairement un petit nombre de cavités, estimées entre 5 et 10 par zone de pratique, par ailleurs commune à plusieurs guides.

Il peut alors être envisagé de mesurer les taux de radon dans ces cavités afin d'avoir une notion plus précise de l'exposition annuelle.

Une autre solution envisageable, qui peut paraître plus satisfaisante de prime abord, mais qui est aussi plus complexe, est le port d'un dosimètre individuel. Celui-ci devra être porté à chaque sortie et entreposé le reste du temps dans un local neutre muni lui-même d'un dosimètre. Le calcul de dose réelle correspondra à la dose totale diminuée de celle du témoin, afin de ne tenir compte que de la dose reçue sous terre.

La cavité aménagée pour le tourisme

Traisons d'abord le cas du public qui visite une cavité, que celle-ci soit aménagée ou bien dans le cadre d'un guidage ou safari. L'exposition sera de très courte durée et de très faible intensité dans la mesure où les réseaux aménagés sont souvent de grands volumes où le radon sera dilué.

Si l'on prend comme exemple une personne visitant une cavité aménagée par trimestre (éventualité sans doute déjà rare), durant deux heures, toujours avec un taux théorique de 3049 Bq/m^3 , on aura une exposition estimée à 0,02 mSv par an avec l'ancien coefficient et **0,08 avec le nouveau coefficient**, pour une réglementation ayant comme limite admissible 1 mSv par an. On est loin de cette limite. L'exposition dans ce cas peut-être considérée comme négligeable.

Parlons maintenant des personnes salariées, qui peuvent relever de plusieurs catégories selon leur contrat (CDI, CDD, saisonnier, intérimaire) ou leur affectation (administratif, guidage, entretien technique). Dans tous les cas, ces salariés relèvent du Code du travail.

La mesure de radon souterrain est obligatoire dans ce cadre et permettra de savoir si la cavité et donc les salariés sont concernés par la réglementation et les mesures de prévention.

Rappelons qu'un temps plein représente 1607 heures par an et qu'un jeune entre 16 et 18 ans ne doit pas être exposé à une dose supérieure à 6 mSv/an.

Pour le cas d'une salariée enceinte, la dose doit rester inférieure à 1 mSv pour l'enfant à naître, notion différente de l'exposition de la femme enceinte.

Le calcul sera plus simple en milieu de travail puisque l'on aura un temps de présence effectif sous terre facilement identifié et un taux moyen annuel de radon mesuré.

Si l'on prend comme exemple une personne travaillant sous terre 50% de son temps de travail (soit 800 heures) et un taux théorique de 3049 Bq/m³, le calcul donne une dose estimée de 7,5 mSv avec l'ancien coefficient (ce qui est déjà élevé) et **32,7 mSv avec le nouveau coefficient**, ce qui classe la personne en catégorie B (exposition entre 6 et 20 mSv/an) nécessitant un suivi renforcé selon l'ancien coefficient, **mais avec le nouveau coefficient, l'exposition à cette dose est interdite.**

Le calcul du **temps réel passé sous terre** et des **taux de radon par zones homogènes** est ici fondamental pour ne pas négliger une exposition à un cancérigène, mais ne pas la surestimer non plus. L'application éventuelle du nouveau coefficient va poser un sérieux problème pour l'organisation du travail en milieu souterrain.

Les autres activités pratiquées à la FFS

On l'aura compris, l'exposition au radon est clairement identifiée pour la pratique de la spéléologie.

Pour le canyonisme, où nombre de canyons sont creusés dans le granite ou les schistes, sans compter la présence de l'eau, on pourrait craindre une exposition notable. Il n'en est sans doute rien car le parcours en canyon est souvent bien plus court qu'une sortie sous terre, il se fait à l'air libre et le canyon est souvent très ventilé.

Pour la plongée souterraine, le spéléonaute sera exposé au radon lors des parcours exondés, d'autant qu'ils seront peu ventilés. Le gonflage des bouteilles devra se faire à l'air libre en dehors de tout bâtiment.

Signalons au passage deux situations particulières, les tubes de lave et la spéléologie sous-glaciaire, qui ne sont pas abordées habituellement et sur lesquelles nous n'avons pas de données.

Pour les tubes de lave, le terrain basaltique est en principe moins riche en radon, mais la présence proche de matériaux cristallins ainsi que la présence de fissures et failles profondes devrait inciter à la prudence et mettre en place un mesurage du radon.

Pour la spéléologie sous-glaciaire, trois éléments péjoratifs sont présents : un socle cristallin très souvent présent, la présence d'un actif qui peut dissoudre et relarguer du radon et enfin une « cavité » instable dans le temps ne permettant sans doute pas un mesurage significatif. Un élément peut cependant améliorer la situation, la présence fréquente d'un courant d'air important.

Retour d'expérience

Dès le départ de ce travail, la réalisation d'une enquête auprès des exploitants de cavités aménagées pour le tourisme avait été envisagée, auprès des adhérents de l'ANECAT, qui est aussi partenaire de la FFS, et qui fédère la plus grande partie des cavités aménagées en France.

Cette enquête, anonyme, a été bâtie afin de mieux connaître deux éléments :

- Les taux de radon mesurés, ce qui compléterait l'étude de la FFS. Les mesures faites dans des réseaux spéléologiques ne sont pas forcément représentatives de celles que l'on pourrait mesurer dans une cavité aménagée. Celle-ci a très souvent un volume bien plus important, pouvant diluer le radon ;
- Les mesures de prévention éventuellement prises, techniques et organisationnelles, ce qui pourrait être utile à toute la profession.

En fait, à peine plus d'un quart des cavités aménagées faisait partie des 31 départements concernés par les textes de 2004, dont la prise en compte a pris beaucoup de temps. Depuis la nouvelle réglementation, c'est toute la profession qui s'interroge sur la mise en application des textes, d'autant que les arrêtés techniques spécifiques ne sont pas encore parus, rendant bien difficile pour l'instant la mise en place d'une démarche cohérente.

Après contact avec l'ANECAT, cette action a donc été reportée à une date ultérieure.

Radon et pénibilité

Cette question ayant été soulevée, nous allons tenter d'y répondre.

La loi n°2010-133 du 9 novembre 2010, portant sur la réforme des retraites, a introduit la notion de pénibilité.

L'article D.4121-5 a défini ensuite dix facteurs de risque spécifiques, assortis de certaines compensations sociales, comme le droit à la formation, un aménagement de poste, ou un départ à la retraite anticipé.

Depuis, un grand nombre de textes sont parus, ces critères ont évolué, se sont précisés et ont fait l'objet de polémiques diverses, toujours d'actualités...

Le radon pourrait-il en faire partie ?

À l'heure actuelle nous ne pouvons pas répondre à cette question, car le dossier est complexe.

Certes, le radon est classé cancérigène en catégorie 1, il est donc susceptible d'entrer dans le critère de pénibilité lié aux « Agents chimiques dangereux », au titre de « l'environnement physique agressif ».

Mais il s'agit d'un gaz naturel, auquel chacun de nous est exposé au quotidien, ce n'est pas un produit chimique classique.

Il faudra donc qualifier et quantifier l'exposition purement professionnelle et se référer aux seuils admissibles, en sachant qu'un seuil de pénibilité peut être défini un jour. Ce seuil pourrait définir une durée d'exposition et une intensité d'exposition, pour l'instant inexistantes. Par ailleurs, en l'absence d'accord collectif de branche, il faut un référentiel de branche professionnel homologué par la tutelle, définissant les postes, métiers ou situations de travail concernés, tenant compte des mesures de prévention collectives et individuelles mises en place.

Ces seuils peuvent déterminer l'exclusion du dispositif si les mesures de prévention sont suffisantes.

Ce n'est donc pas la présence du risque qui compte, mais sa réalité une fois les mesures de prévention mises en place.

La place du radon dans le processus de pénibilité ne nous semble pas encore d'actualité...

Résumé de la démarche technique

Une fois digéré tout ce qui précède, et avant de conclure, il est temps de résumer en quelques phrases la démarche à adopter pour gérer l'exposition au radon en milieu professionnel.

Rappelons que les textes actuels sont essentiellement prévus pour les bâtiments construits, ceux concernant les **lieux spécifiques** comme les **cavités aménagées** ne sont pas encore promulgués.

La démarche sera donc à affiner quand ces textes seront disponibles.

Première étape

Déterminer dans quelle zone de potentiel radon l'on se situe.

La concentration de radon en milieu souterrain semble très majoritairement dépasser le taux de 300 Bq/m³ d'après les études faites, il est donc recommandé de faire une mesure de ce taux en moyenne annuelle quelle que soit la zone concernée.

Deuxième étape

Si le taux ne dépasse pas les 300 Bq/m³ en moyenne annuelle, il n'y a pas d'aménagement à faire.

Si le taux dépasse les 300 Bq/m³, il faut prendre des mesures visant à le faire baisser pour limiter l'exposition des personnes.

Ces mesures visent à améliorer la ventilation par le renouvellement de l'air et/ou à améliorer l'étanchéité du lieu en colmatant les entrées de radon. Ces mesures sont essentielles et relativement faciles dans un bâtiment construit, il n'en va évidemment pas de même dans une cavité naturelle.

Troisième étape

Si ces mesures font baisser le taux en dessous des 300 Bq/m³, le tour est joué et il s'agira de vérifier son efficacité dans le temps.

Si le taux ne baisse pas suffisamment on passe à une gestion plus complexe concernant la radioprotection des personnes, pour lesquelles on va devoir quantifier leur exposition en calculant leur dose reçue. À ce niveau, l'appel à une structure habilitée par l'ASN est recommandée. Il faut déterminer si l'exposition humaine atteint ou dépasse les 6 mSv par an, délimiter des zones radon où l'accès sera contrôlé, mettre en place une dosimétrie individualisée et un suivi médical en santé-travail renforcé.

Conclusion

On l'aura compris, la gestion de l'exposition au radon en milieu souterrain est complexe, c'est le moins que l'on puisse dire... Et elle est encore évolutive en attente des arrêtés techniques prévus.

Cette évolution liée au coefficient de dose recommandé par les instances internationales (CIPR) va être un bouleversement majeur dans nos pratiques, professionnelles comme de loisir.

Si la réglementation française suit les recommandations de la CIPR, il faudra complètement changer nos comportements. L'avenir nous le dira.

Il est fort probable que les détecteurs de radon portatifs deviendront aussi indispensables que les détecteurs de CO₂ actuellement...

La démarche de prévention n'est pas hors de portée, ni à comprendre, et les enjeux ne sont pas minces quand on parle d'agent cancérigène, ni à mettre en œuvre.

Nous n'avons pas la prétention d'avoir été exhaustif, très loin de là, mais nous espérons que ce modeste dossier vous aidera à avancer dans la connaissance du problème et à sa résolution.

Le spéléologue de loisir sera peut-être rassuré (en partie seulement...), le professionnel aura des clés concrètes pour la gestion du risque. Mais c'est certain, avec les nouveaux coefficients, s'ils sont appliqués (et il y a peu de raison qu'ils ne le soient pas), l'impact en milieu professionnel sera majeur ! Tels étaient nos objectifs, nous espérons qu'ils auront été atteints.

Remerciements

Nous ne pouvons pas clore ce dossier sans rendre hommage au travail colossal fait par le D^r Jean-Michel OSTERMANN, président de la commission médicale de la FFS en 2005, qui a initié et coordonné la première étude dans ce domaine très méconnu à l'époque.

Nous remercions amicalement notre confrère de la commission médicale le D^r Jean-Noël DUBOIS pour sa relecture attentive et ses corrections typographiques toujours bienvenues.

Nous remercions chaleureusement Mr Julien SYREN, ingénieur géologue à la CRIIRAD, pour la relecture éclairée de ce travail, pour ses multiples conseils et remarques, sans lesquelles ce travail n'aurait pas eu la même pertinence, en particulier sur les calculs d'exposition selon les nouveaux coefficients. Un grand merci pour ses éclaircissements et sa sympathique collaboration.

Bibliographie

Textes réglementaires

- Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire.
- Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants.
- Décret n° 2018-438 du 4 juin 2018 relatif à la protection contre les risques dus aux rayonnements ionisants auxquels sont soumis certains travailleurs.
- Arrêté du 27 juin 2018 portant délimitation des zones à potentiel radon du territoire français
- Arrêté du 26 juin 2019 relatif à la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants.
- Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom.
- Directive 96/29/EURATOM du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.
- Instruction DGTASN2018229 du 2 octobre 2018.

Publications techniques

- *Guide pratique pour la gestion du risque radon dans la conception et la réalisation de travaux en souterrain*, Recommandations de l'AFTES, Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 2014
- *Mesurage de l'activité volumique du radon dans les cavités et ouvrages souterrains. Guide méthodologique*, DEI/SARG/2009-020. IRSN, 2009
- « Nouveaux coefficients de dose pour le radon » recommandés par la CIPR dans sa *Publication 137*, Note explicative, Rapport PSE-SANTE|2018-00002 Pôle Santé et Environnement
- AJROUCHE R., ROUDIER C., CLERO E., LELSCH G., GAY D., GUILLEVIC J., MARANT MICALF C., VACQUIER B., LETERTRE A., LAURIER D., "Quantitative Health Impact of indoor radon in France"; *Radiat. Environ. Biophys.*; 2018 May 8
- MOUREAUX Patrick, « Le radon, quelle prévention en entreprise ? », *Hygiène et sécurité du travail* n°256, INRS, septembre 2019
- *Fiche Hygiène et sécurité n°36*, Centre de gestion de la fonction publique territoriale du Puy-de-Dôme, février 2020
- « Rayonnements ionisants : cas particulier du radon. Fiche pratique », *Caisse Nationale de Retraites des Agents des Collectivités Locales (CNRACL)*
- BOURDIEU A., « Exposition au radon : comment se fait l'évaluation du risque ? », *Références en santé au travail* n°160, INRS, décembre 2019
- ROBE M.-C., *Étude et traitement des situations impliquant du radon*, INRS

Autres publications

- OSTERMANN J.-M., BAUER J., HERBILLON C., BOUTHORS M., FAVERION M., DEVOS A., LISMONDE B., MARGET C., OURNIE B., WIENIN M., *Le radon atmosphérique dans quelques cavités françaises. Approche de l'évaluation du risque pour les spéléologues*, Commission médicale, Fédération Française de Spéléologie, 2005
- *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, n°18-19, 15 mai 2007
- AMEON R., « Le radon dans les stations thermales : une source d'exposition aux rayonnements ionisants », *Radioprotection*, vol. 38, n°2, 2003
- VAISSIERE. R., *À propos du thermalisme : revue générale de la spéléothérapie en Europe et essai d'étude de certains effets physiologiques et biologiques d'une cure au radiovaporarium de Bagnères-de-Luchon*, *Étude personnelle sur 65 cas*, Thèse de médecine, Toulouse, 1983

Sites internet

- Site internet de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, www.irsn.fr
- Site internet de l'Autorité de Sûreté Nucléaire, www.asn.fr
- Site de l'Institut National de Recherche et de Sécurité, www.inrs.fr
- Site de la Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioprotection, www.criirad.org
- Légifrance, www.legifrance.fr
- Site de l'ANECAT, <http://www.grottes-en-france.com>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radon>