ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

Rapport N° 2026-00178 du 21/09/2026

RAPPORT D'EXPERTISE

COEFFICIENT(S) DE DOSE POUR LE RADON DANS LES GROTTES TOURISTIQUES

SYNTHESE DES TRAVAUX EXPERMIMENTAUX CONDUITS PAR l'ASNR

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 5

2. OBJECTIFS, PRINCIPES ET MODALITES DE L'ETUDE 6

2.1. OBJECTIFS 6

2.2. PRINCIPES 6

2.3. MODALITES 7

2.3.1. Mesures nucléaires 7

2.3.2. Mesures granulométriques 8

3. CHOIX DES SITES 10

4. ETUDE MENEE DANS LA GROTTE N°1 13

4.1. GENERALITES 13

4.2. RESULTATS DE MESURES 13

4.2.1. Activité volumique du radon (A_v) 13

4.2.2. Fractions libre et attachée des descendants à vie courte 14

4.2.3. Granulométrie 15

4.2.4. Facteur d'équilibre (F) 16

4.3. BILAN DES MESURES IN SITU 17

4.3.1. Eléments généraux 17

4.3.2. Coefficients de dose 17

4.3.3. Conclusion 19

5. ETUDE MENEE DANS LA GROTTE N°2 20

5.1. GENERALITES 20

5.2. RESULTATS DES MESURES 20

5.2.1. Activité volumique du radon (A_v) 20

5.2.2. Fractions libres et attachées des descendants à vie courte 21

5.2.3. Granulométrie 23

5.2.4. Facteur d'équilibre 25

5.3. BILAN DES MESURES IN SITU 26

5.3.1. Eléments généraux 26

5.3.2. Coefficients de dose 27

5.3.3. Conclusion 28

ASNR

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

6. CONCLUSION GENERALE 29

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1 : Schéma de principe du calcul d'un coefficient de dose adapté à un lieu particulier 6

Figure 2 : Principaux appareils de mesure nucléaire utilisés dans le cadre de l'étude 8

Figure 3 : Schéma de principe des instruments de mesure de la distribution granulométrique 9

Figure 4 : liste des sites souterrains adhérents à la FFTS 10

Figure 5 : Activité volumique moyenne de radon suivant les saisons 11

Figure 6 : Résultats des mesures de l'activité volumique de radon effectuées par l'exploitant de la grotte n°1 entre 2021 et 2022. 11

Figure 7 : Résultats des mesures de l'activité volumique de radon effectuées par l'exploitant de la « grotte n°2 » entre 2021 et 2022 12

Figure 8 : Activité volumique du radon mesurée en continu durant plus d'une année au point 1 13

Figure 9 : Dynamique saisonnière de l'activité volumique du radon au niveau de cinq points de mesure (entre début août et mi-décembre 2022). 13

Figure 10 : CEE des fractions libre (FL, bleu) et attachées (FA, brun) des descendants à vie courte du radon au point de mesure P6 de mi-septembre à début décembre 2022. 14

Figure 11 : CEE des fractions libre (FL, bleu) et attachées (FA, brun) des descendants à vie courte du radon au point de mesure P1 de mi-juillet à fin septembre 2023. 14

Figure 12 : Distribution granulométrique (en nombre) de l'aérosol atmosphérique, moyenné sur une période de 24 heures, aux points P6 et P1 durant les campagnes hivernale (en haut) et estivale (en bas) 15

Figure 13 : Facteur d'équilibre (entre le radon et ses descendants à vie courte) entre septembre et décembre 2022 au point P6 16

Figure 14 : Facteur d'équilibre (entre le radon et ses descendants à vie courte) entre juillet et octobre 2023 au point P1 17

Figure 15 : Activité volumique du radon (en Bq/m^3) mesurée en continu aux points P1 et P2 d la grotte n°2 entre avril et novembre 2024 20

Figure 16 : Activité volumique du radon (en Bq/m^3) mesurée en continu aux points P3, P4, P5, P6 et P7 de la grotte n°2 entre avril et novembre 2024 21

Figure 17 : CEE des descendants du radon (en Bq/m^3) mesurée en continu au point P2 dans la grotte n°2 entre avril et août 2024 22

Figure 18 : CEE des descendants du radon (en Bq/m^3) mesurée en continu au point P5 de la grotte n°2 entre avril et septembre 2024 22

Figure 19 : CEE des descendants du radon (en Bq/m^3) mesurée en continu au point P6 de la grotte n°2 au mois de juin et entre fin septembre et début novembre 2024 23

Figure 20 : Distribution granulométrique (en nombre) de l'aérosol atmosphérique dans la grotte n°2, moyennée sur la durée de chaque campagne (septembre et novembre 2024) 24

Figure 21 : Facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte au niveau point P2 de la grotte n°2 entre avril et aout 2024 25

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Figure 22 : Facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte au point P5 de la grotte n°2 d'avril à mai puis de fin juin à mi-juillet 2024 25

Figure 23 : Facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte au point P6 de la grotte n°2 de juin à octobre 2024 26

Tableaux

Tableau 1 : Présentation des paramètres mesurés dans le cadre de l'étude de l'ASNR par rapport aux paramètres choisis par la CIPR 7

Tableau 2 : Equipements de mesure nucléaire utilisés dans le cadre de l'étude par l'ASNR 7

Tableau 3 : Calcul des fractions libre et attachée des descendants du radon à partir des différentes mesures de CEE dans la grotte n°1 15

Tableau 4 : Concentration, diamètre en nombre des particules mesurés dans la grotte n°1 et diamètre thermmodynamique médian en activité de la fraction attachée 16

Tableau 5 : Coefficients de dose calculés à partir des mesures réalisées dans la grotte n°1 (option 1) 18

Tableau 6 : Coefficients de dose calculés à partir des mesures réalisées dans la grotte n°1 (option 2) 18

Tableau 7 : Activité volumique moyenne du radon (en Bq/m^3) mesurée dans les divers points de mesure de la grotte n°2 [moyennes mensuelles et sur la période de mesure] 21

Tableau 8 : CEE totale, fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon mesurées aux points P2, P5 et P6 dans la grotte n°2 [moyennes mensuelles et sur la période de mesure] 23

Tableau 9 : Concentration et diamètre des particules mesurés dans la grotte n°2 24

Tableau 10 : Coefficients de dose moyens calculés pour l'ensemble de la période d'étude à partir des mesures réalisées dans la grotte n°2 (Option 1) 27

Tableau 11 : Coefficients de dose moyens calculés pour l'ensemble de la période d'étude à partir des mesures réalisées dans la grotte n°2 (Option 2) 27

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

SYNTHÈSE

A la suite de la demande de la direction générale du travail (DGT) visant à éprouver la robustesse des paramètres choisis par défaut par la commission internationale de protection contre les rayonnements ionisants (CIPR) pour l'évaluation des doses reçues par les personnels travaillant dans les grottes touristiques, l'ASNR a mené une étude expérimentale dans deux grottes touristiques de France métropolitaine. L'objet de cette étude était la mesure de deux paramètres d'entrée essentiels pour les modèles biocinétiques de la CIPR, à savoir la proportion des fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon et le diamètre médian (en activité) des aérosols présents dans ces grottes.

A l'issue de cette étude l'ASNR a comparé les valeurs mesurées est celle choisie par défaut par la CIPR. Si cette comparaison permet de mettre en avant quelques écarts, ces écarts sont généralement assez faibles et ne conduisent pas à remettre en cause fondamentalement les choix faits par la CIPR. Au contraire, dans la limite de son périmètre, cette étude conforte les choix faits par cette dernière et consolide le corpus de connaissances disponibles sur le sujet. Ainsi, en l'état actuel des références de protection et en l'absence de toute connaissance approfondie des caractéristiques de chaque grotte, le coefficient de dose proposé par la CIPR pour un travailleur non sédentaire (6 $mSv/mJ.h.m^{-3}$) ne parait pas indument « surprotecteur ».

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

1. INTRODUCTION

Les travaux scientifiques menés par les épidémiologistes dans les années 1990 et au début des années 2000 sur les cohortes de mineurs d'uranium et sur des cohortes de personnes exposées au radon dans l'habitat ont produit un ensemble de connaissances, suffisamment nouvelles et robustes pour que la commission internationale de protection contre les rayonnements ionisants (CIPR) décide en 2010 de ré-évaluer le niveau du risque de décès par cancer du poumon attribuable au radon [1]. Ainsi, à partir de 2010, le niveau de ce risque a été pratiquement doublé par rapport à la référence reconnue antérieurement [2][1]. Cette évolution a entrainé dans son sillage une mise à jour des normes et recommandations internationales concernant le radon, parmi lesquelles la directive européenne sur les normes de base de radioprotection en 2013 [3] et la publication n°126 de la CIPR relative à la protection radiologique contre le radon en 2014 [4]. La transposition de la directive européenne [3] dans le droit français est intervenue à partir de 2018, au travers le code de la santé publique [5] le code de l'environnement [6] et le code du travail [7]. Parmi les principales évolutions concernant le radon en France à l'issue de cette transposition et des évolutions réglementaires ultérieures, on peut citer :

(i) l'uniformisation du niveau de référence utilisé pour les lieux de travail, les établissements recevant du public (ERP) ou l'habitat domestique et son abaissement à la valeur unique de 300 Bq/m^3 ;

(ii) la mise en place d'un zonage des locaux de travail dans lesquels le niveau de référence est dépassé, d'une surveillance dosimétrique individuelle et d'un suivi médical spécifique des travailleurs lorsque leur exposition annuelle au radon est susceptible de dépasser 6 mSv/an.

Dans la ligne de ces évolutions, et notamment de la nécessité de calculer une dose au travailleur exposé au radon, deux coefficients de dose radon pour les travailleurs ont été publiés, l'un pour les travailleurs exerçant une faible activité physique (« sédentaire ») et l'autre pour les travailleurs exerçant une activité physique « significative » [8]. Le premier multiplie le coefficient de dose (unique) précédemment en vigueur [9] d'un facteur 2 et le second, d'un facteur 4 environ[2]. Le coefficient de dose à utiliser pour les lieux reconnus pour leur capacité à accumuler particulièrement le radon (encore appelés « lieux spécifiques »[3] [10]) doit être précisé par des dispositions spécifiques du code du travail. Dans l'attente, l'employeur peut soit se référer aux coefficients de dose proposés dans l'arrêté de 2023 [8] pour d'autres situations d'exposition en fonction de l'activité du travailleur soit en évaluer un plus adapté au lieu de travail sur la base des dispositions du guide pratique (« Prévention du risque radon ») publié par le ministère chargé du travail et l'autorité du sûreté nucléaire.

Si l'abaissement du niveau de référence a vraisemblablement conduit à un accroissement très sensible du nombre d'entreprises « concernées » par le risque radon [11], l'augmentation de la valeur du coefficient de dose a généré beaucoup d'incertitudes et de craintes de la part des employeurs quant aux conséquences pratiques de cette évolution, notamment en matière d'organisation du travail et de coût pour certains secteurs professionnels, notamment ceux dont l'activité s'exerce dans des lieux spécifiques. Anticipant de lourdes de conséquences pour son domaine d'activités, l'association nationale des exploitants des cavernes aménagées pour le tourisme (ANECAT)[4] a contesté l'utilisation, dans la réglementation française, du coefficient de dose proposé par la CIPR [12] et conclu avec le ministère chargé du travail un protocole pour l'accompagner dans la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives à la prévention du risque radon dans les grottes. Pour l'aider à répondre à certaines des questions adressées par l'ANECAT, la direction générale du travail (DGT) a demandé à l'institut de

[1] Le risque de décès par cancer du poumon attribuable au radon retenu par la Commission internationale de protection contre les rayonnements ionisants (CIPR) est passé de 2,8.10^{-4}/WLM (publication n°65, CIPR, 1994) à 5,0.10^{-4}/WLM (publication n°115, CIPR, 2010). N*ota : Le « WLM » ou Working Level Month est une unité de mesure « historique » de l'exposition au radon correspondant à une exposition à une concentration ambiante en énergie potentielle alpha des descendants à vie courte du radon de 1,3 × 10^8 MeV m^{-3} pendant 170 h (durée moyenne de travail mensuel des mineurs américains dans les années 50/60).*

[2] Le coefficient de dose du radon pour les travailleurs définis par l'arrêté de 2003 [9] était de 1,4 mSv/mJ.h.m^{-3}. Les deux nouveaux coefficients de dose applicables en fonction de l'activité physique (sédentaire ou significative) sont de 3 et 6 mSv/mJ.h.m^{-3} respectivement [8].

[3] Les cavités souterraines naturelles ou artificielles, les ouvrages d'art enterrés ou en partie enterrés, les galeries ou ateliers techniques en milieu souterrain, les lieux de résurgence d'eau souterraine.

[4] L'association a depuis lors été transformée en fédération : la fédération française du tourisme et patrimoine souterrain (FFTS)

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

radioprotection et de sureté nucléaire (IRSN)[5] de réaliser une étude expérimentale permettant d'éprouver la robustesse des coefficients de dose proposés par la CIPR pour les grottes touristiques.

2. OBJECTIFS, PRINCIPES ET MODALITES DE L'ETUDE

2.1. OBJECTIFS

Le principal grief généralement fait vis-à-vis du coefficient de dose pour le radon dans les grottes touristiques réside dans le faible nombre de publications sur lesquelles s'appuie la CIPR pour choisir les principaux paramètres d'entrée pour ses modèles dosimétriques et partant, leur faible représentativité au regard de la diversité possible des situations d'exposition. C'est pourquoi la direction générale du travail (DGT) a demandé à l'ASNR de réaliser une étude de caractérisation du radon et de ses descendants à vie courte dans des grottes touristiques françaises pour accroitre le nombre de données disponibles et en tirer un avis sur les coefficients de dose proposés par la CIPR.

Pour ce faire, l'ASNR s'est attachée à évaluer *in situ* et de manière expérimentale les principaux paramètres d'exposition pour ce coefficient à savoir, la part relative des fractions libre (FL) et attachée des aérosols (FA) de descendants à vie courte du radon d'une part et leur diamètre thermodynamique médian en activité (DTMA) d'autre part, pour *in fine* les comparer à ceux choisis par défaut par la CIPR et recalculer les coefficients de dose en découlant.

2.2. PRINCIPES

Une fois fixées les valeurs du débit respiratoire de la personne de référence et l'écart type de la loi (log-normale) de distribution des aérosols des descendants à vie courte du radon, le calcul du coefficient de dose radon ne dépend que de la part relative de l'activité de ses fractions libre et liée et du « centrage » de chaque pic de distribution. L'équation correspondant à ce calcul est la suivante :

$$\mathbf{Cd_{222Rn} = Cd_{FL}.\%FL + Cd_{FA}.\%FA}$$

où - Cd_{FL} et Cd_{FA}, sont les coefficients de dose correspondant au diamètre médian des aérosols de descendants à vie courte du radon (DTMA) ;
- %FL et %FA, sont les proportions en activité des fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon.

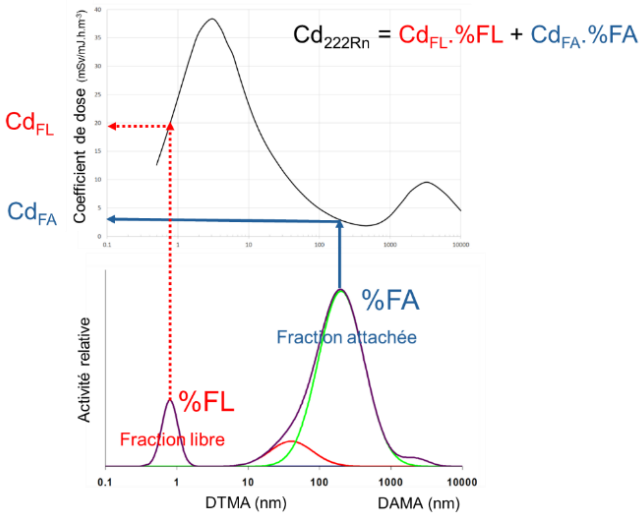

Figure 1 : Schéma de principe du calcul d'un coefficient de dose adapté à un lieu particulier

[5] Aujourd'hui, autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). Dans le reste du rapport, l'acronyme ASNR sera utilisé quel que soit le contexte d'usage.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

La « profondeur » de l'adaptation du coefficient de dose aux situations d'exposition dépend du type de données expérimentales susceptibles d'être acquises *in situ*. Si la distribution granulométrique n'est pas disponible, alors l'estimation des fractions libre et attachée permet un premier ajustement du coefficient de dose, étant entendu que dans cette hypothèse, les paramètres par défaut de la CIPR concernant le diamètre médian de l'aérosol sont conservés. Si les données granulométriques sont également disponibles, l'adaptation du coefficient de dose au diamètre devient possible.

Dans le cadre de cette étude, l'ASNR a réalisé la mesure de la proportion des fractions libre et attachée des aérosols (qui permet d'accéder à un premier niveau d'ajustement du coefficient de dose, « option 1 ») ainsi que celle de la granulométrie de la fraction attachée (qui permet un ajustement complémentaire du coefficient de dose aux paramètres d'entrée du modèle, « option 2 »)[6] (tableau 1).

Tableau 1 : Présentation des paramètres mesurés dans le cadre de l'étude de l'ASNR par rapport aux paramètres choisis par la CIPR

Grottes touristiques	Fraction libre (FL)	Fraction attachée (FA)	DTMA (FL)	DTMA (FA)
Proposition de la CIPR (pub. N° 137)	15%	85%	1 nm	200 nm
Etude ASNR (option 1)	Valeur mesurée	Valeur mesurée	1 nm	200 nm
Etude ASNR (option 2)	Valeur mesurée	Valeur mesurée	1 nm*	Valeur mesurée
** Mesure in situ de ce diamètre impossible avec les moyens disponibles*				

2.3. MODALITES

2.3.1. Mesures nucléaires

Pour obtenir l'ensemble de données de mesure nécessaires (et notamment l'activité relative des fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon déduites de la mesure de leur concentration à équilibre [CEE]), l'ASNR a disposé un ensemble de détecteurs à mesure continue dans différentes zones des grottes à étudier.

Tableau 2 : Equipements de mesure nucléaire utilisés dans le cadre de l'étude par l'ASNR

Dénomination de l'équipement	Marque	Radionucléides mesurés	Nature des résultats de mesure	Type de mesure	Technologie de prélèvement	Technologie de détection
EQF 3220	SARAD	^{222}Rn, ^{220}Rn et descendants à vie courte du ^{222}Rn et du ^{220}Rn	Av, CEE_{libre}, $CEE_{attachée}$, F	Continue	Aspiration + Filtration	Spectrométrie alpha (semi-conducteur au silicium)
RPM 2200	SARAD	Descendants à vie courte du ^{222}Rn et du ^{220}Rn	CEE_{totale}	Continue	Aspiration + filtration	Spectrométrie alpha (semi-conducteur au silicium)
BWLM-PLUS-2S	TRACERLAB	^{222}Rn, ^{220}Rn et descendants à vie courte du ^{222}Rn et du ^{220}Rn	CEE_{libre}, CEE_{totale}	Continue	Aspiration + Filtration	Spectrométrie alpha (semi-conducteur au silicium)
RDM-PLUS-S	TRACERLAB	Descendants à vie courte du ^{222}Rn et du ^{220}Rn	CEE_{totale}	Continue	Aspiration + filtration	Spectrométrie alpha (semi-conducteur au silicium)
BMC2	ALGADE	^{222}Rn et descendants à vie courte	Av, F	Continue / Semi-continue	Passive	Spectrométrie alpha (semi-conducteur au silicium)
AlphaGUARD	BERTIN	^{222}Rn, ^{220}Rn et descendants à vie courte	Av, F	Continue	Aspiration + Filtration Passive (Diffusion)	Spectrométrie alpha (chambre d'ionisation)

Av = activité volumique, CEE = concentration équivalente à l'équilibre des descendants à vie courte, CEE_{libre} = CEE de la fraction libre, $CEE_{attachée}$ = CEE de la fraction attachée, CEE_{totale} = CEE totale, F = Facteur d'équilibre.

[6] L'ASNR ne disposant pas de tous les outils métrologiques nécessaires, la distribution granulométrique des fractions les plus fines n'a pas pu être mesurée dans le cadre de cette étude.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Figure 2 : Principaux appareils de mesure nucléaire utilisés dans le cadre de l'étude

Ces appareils[7] ont été laissés en place aussi longtemps que possible pour disposer de chroniques de mesure suffisamment longues et avoir la meilleure représentation possible des niveaux moyens dans chaque zone. Pour autant, l'ASNR ne disposant pas d'autant d'appareils que de zones dans lesquelles faire des mesures, certains ont dû être déplacés d'une zone à une autre de sorte que la durée de mesure des zones correspondantes s'en est trouvée réduite.

Même si elles ne sont pas directement utiles pour l'objectif de cette étude, les mesures conjointe de l'activité volumique du radon (A_v) et de la concentration équivalente à l'équilibre des descendants du radon (CEE) ont permis de calculer des facteurs d'équilibre (F) propres aux grottes étudiées ($F=CEE/A_v$).

2.3.2. Mesures granulométriques

Le dispositif expérimental utilisé *in situ* a tout d'abord été qualifié en laboratoire. Il est composé des éléments suivants :

- une tête de prélèvement CAThIA (capteur alvéolaire, thoracique, inhalable d'aérosols). Les fractions collectées sont conformes aux normes EN-481, ISO-7708 et FD CEN/TR-15230 ;
- un sécheur à membrane à résine échangeuse d'ions (Nafion®) pour sécher les aérosols provenant d'atmosphères humides (ce qui est le cas dans les grottes touristiques) ;
- un granulomètre (NanoScan®) à haute résolution utilisant la spectrométrie de mobilité électrique (SMPS) pour mesurer la distribution granulométrique des particules de taille nanométriques ;
- deux compteurs utilisant la technologie de comptage optiques de particules (OPS) pour mesurer les particules de 0,3 à 10 µm. L'un d'eux est relié à la ligne de séchage et l'autre mesure directement les aérosols prélevés dans l'atmosphère ;
- un compteur de particules à condensation (CPC) pour mesurer la concentration totale de particules en nombre ;
- un néphélomètre pour le suivi de la concentration massique ;
- une sonde et deux dataLog pour le suivi de la température et de l'humidité relative.

[7] Tous les instruments de mesure en continu ont été étalonnés : étalonnage constructeur plus étalonnage en lien avec un étalon primaire pour les mesures de gaz, et étalonnage aux laboratoires d'étalonnage de BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) et de Sujchbo (National Institute for NBC protection) pour les instruments de mesure des descendants du radon (CEE). Nota : il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'étalon primaire pour les descendants du radon.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

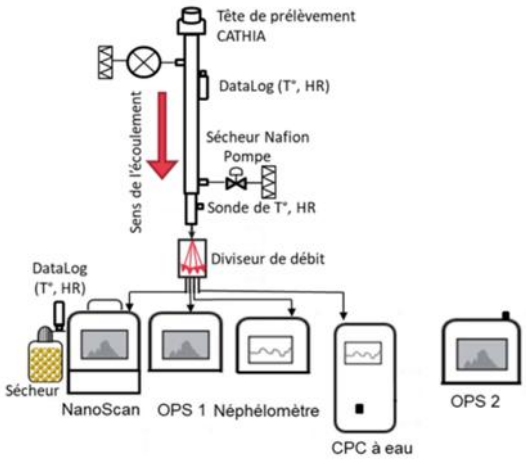

Figure 3 : Schéma de principe des instruments de mesure de la distribution granulométrique

Du fait de la rareté des équipements et de la nécessaire présence des opérateurs auprès de ce type d'équipement lors de son utilisation, les campagnes de mesure ont été de plus courte durée (de l'ordre d'une semaine par point d'étude). A l'issue des mesures, la distribution granulométrique en taille (nombre de particules par classe de taille) est transformée en distribution granulométrique normalisée en activité (ce qui permet de calculer un DTMA).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable.
Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

3. CHOIX DES SITES

L'étape préalable au lancement de l'étude était le choix des sites. En effet, l'ASNR disposant de moyens humains et matériels limités, il n'était pas possible de réaliser une étude exhaustive des grottes et cavités souterraines adhérentes de la FFTS exploitées pour des activités de tourisme (près de 80 sites en France métropolitaine).

Figure 4 : liste des sites souterrains adhérents à la FFTS

De la même manière, il était supposé que, pour différentes raisons (accord de principe des exploitants, possibilité matérielle d'instrumentation, continuité de fourniture de services…), tous les exploitants de ce type de lieux ne pourraient pas participer à l'étude. C'est pourquoi il était convenu que seules deux grottes seraient instrumentées et que le choix de chacune de ces deux grottes serait fait parmi des sites volontaires et disposant de caractéristiques distinctes (pour tenter de couvrir une gamme de situations d'exposition la plus grande possible). Il était également entendu que les sites retenus seraient des sites dont les teneurs en radon pourraient constituer un enjeu au regard de la réglementation. La recherche de caractéristique permettant d'orienter le choix a été rendu possible grâce à un travail d'information préalable et d'enquête de la FFTS auprès de ses adhérents. Les dossiers reçus par l'ASNR à la suite de cette enquête, via la FFTS ou directement de la part d'exploitants, comprennent de manière plus ou moins exhaustives un ensemble d'informations, depuis les données de classification typologique des sites souterrains jusqu'aux résultats de campagnes de mesure du radon ou de dosimétrie individuelle des travailleurs, en passant par les principales caractéristiques d'exploitation du site ou les temps de présence des travailleurs (cf. § 2 du rapport IRSN 2024-00103). De l'analyse de l'ensemble des données obtenues par l'ASNR, il ressort les points suivants :

- sur les près de 80 sites recensés, 43 ont fait l'objet de documentation (i.e. un peu moins de la moitié n'a pas répondu) ;
- à la date de l'enquête, seuls 16 disposaient de séries complètes de mesure du radon (i.e. des campagnes de mesures suffisamment longues en été et en hiver) ;
- 84% des sites souterrains avaient une teneur moyenne annuelle dépassant 300 Bq/m^3 ;
- les regroupements typologiques des sites n'ont pas permis de dégager de tendance très claire (et de réaliser des regroupements par nature) au regard des teneurs en radon. Il en va ainsi :
    - de la distinction de nature des lieux souterrains (concrétions, grand vides (gouffres et aven), rivières souterraines, sites préhistoriques) ;
    - de l'existence (rare) de ventilations mécaniques par rapport à la très large majorité de sites à ventilation naturelle ;

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

- du nombre ou la taille des ouvertures vers l'air extérieur ;

- certains sites sont caractérisés par de fortes variations saisonnières de la teneur en radon. D'autres non ;
- certains sites révèlent parfois des différences significatives de teneur en radon en fonction des cavités dans lesquelles sont réalisées les mesures. D'autres présentent au contraire des activités moyennes assez comparables d'une cavité à l'autre.

Les principaux résultats de mesure obtenus dans le cadre de cette analyse préalable sont présentés en figure 14.

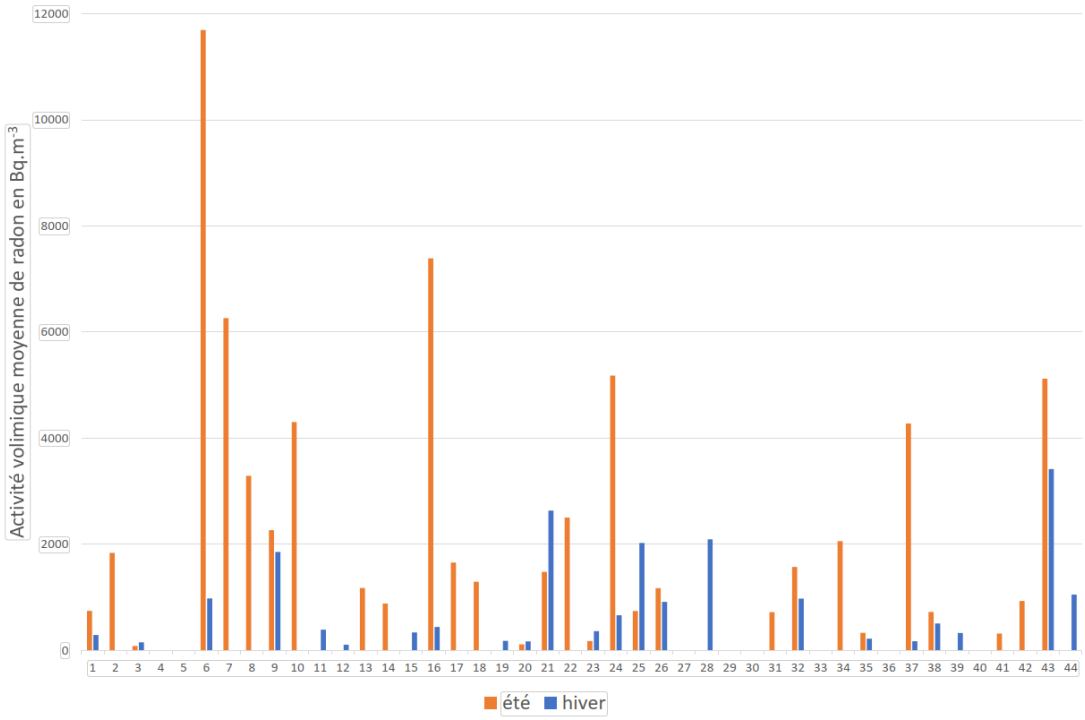

Figure 5 : Activité volumique moyenne de radon suivant les saisons

(été = orange, hiver = bleu) et les sites (n° de l'axe des abscisses)

A l'issue de cette analyse, deux sites se sont portés volontaires pour participer à cette étude expérimentale. Le premier (« grotte n°1) est caractérisé par de fortes variations saisonnières mais de faibles variations de la teneur en radon entre les différentes zones de la grotte (figure 6).

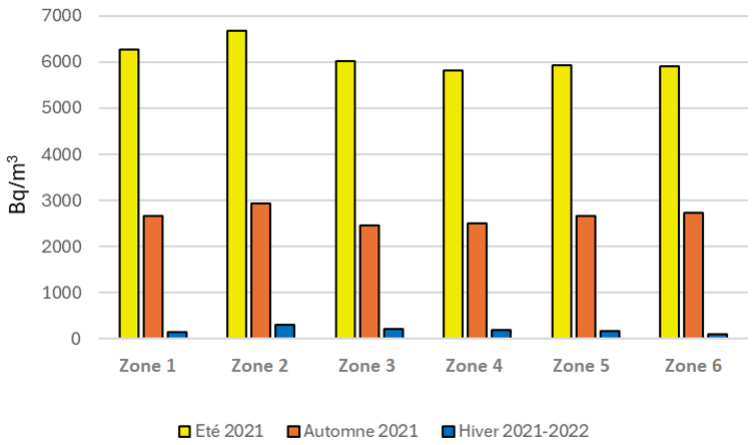

Figure 6 : Résultats des mesures de l'activité volumique de radon effectuées par l'exploitant de la grotte n°1 entre 2021 et 2022.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Légende : en jaune la moyenne durant la période estivale (du 04/07/2021 au 09/09/2021), en orange, la moyenne de la période automnale (du 09/09/2021 au 08/11/2021, en bleu, la moyenne de la période hivernale (du 12/11/2021 au 24/02/2022).

Le second (« grotte n°2 ») est caractérisé par de faibles variations saisonnières mais des variations significatives de la teneur en radon entre les différentes cavités (figure 7).

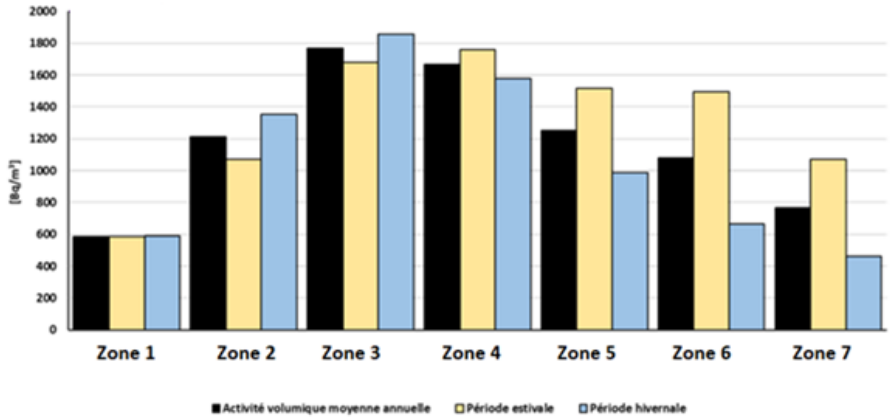

Figure 7 : Résultats des mesures de l'activité volumique de radon effectuées par l'exploitant de la « grotte n°2 » entre 2021 et 2022

Légende : en noir, la moyenne annuelle, en jaune la moyenne durant la période estivale (du 07/07/2021 au 27/09/2021), en bleu, la moyenne de la période hivernale (du 02/12/2021 au 15/03/2022).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

4. ETUDE MENEE DANS LA GROTTE N°1

4.1. GENERALITES

Les mesures d'activité volumique de radon, de descendants du radon (CEE totale, libre et attachée) ont été effectuées en six points (dénommés « P1 » à « P6 ») afin de caractériser au mieux l'atmosphère de la grotte n°1.

Les mesures granulométriques ont été réalisées en deux points, un localisé au début du parcours d'une visite (P1) et un au point situé à l'extrémité de ce parcours (P6).

4.2. RESULTATS DE MESURES

Même si les données recherchées pour cette étude sont le ratio des fractions libre et attachée et le diamètre en activité des descendants à vie courte du radon (§ 4.2.2 et § 4.2.3.), la présentation des résultats de mesure débute par celle de l'activité volumique du radon (§ 4.2.1) car, pour ce type de mesure, l'ASNR disposait de suffisamment d'équipements pour ne pas avoir à les déplacer et de ce fait, était en mesure d'établir des chroniques longues en un même point, chroniques constituant des références pour tous les autres paramètres. Le calcul du facteur d'équilibre est également présenté (§ 4.2.4).

4.2.1. Activité volumique du radon (A_v)

Comme les mesures initiales faites par l'exploitant l'avaient déjà montré, les mesures continues de l'activité volumique du radon faites par l'ASNR confirment sa très forte fluctuation saisonnière. En été, elle s'établit à près de 6 000 Bq/m^3 au point P1 alors qu'en hiver, elle oscille plutôt à des niveaux compris entre les limites de détection et quelques centaines de Bq/m^3 (figure 8).

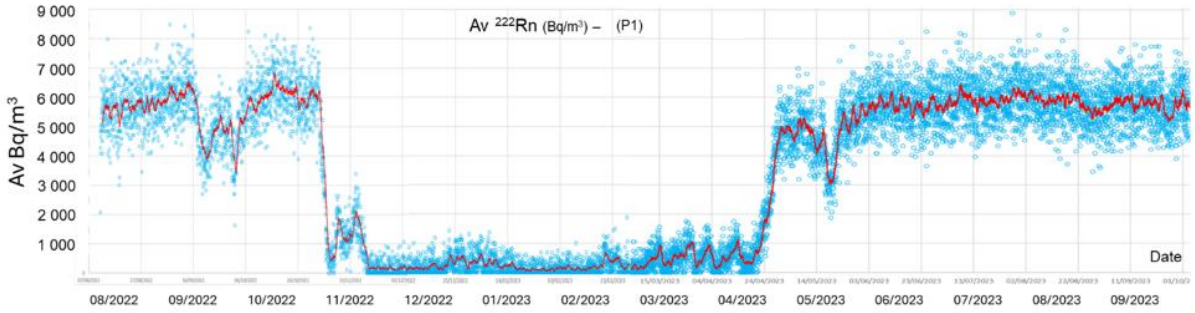

Figure 8 : Activité volumique du radon mesurée en continu durant plus d'une année au point 1

Les mesures réalisées montrent les mêmes dynamiques en tous points de mesure, même si les niveaux moyens estivaux sont légèrement plus faibles aux points P5 et P6 (figure 9).

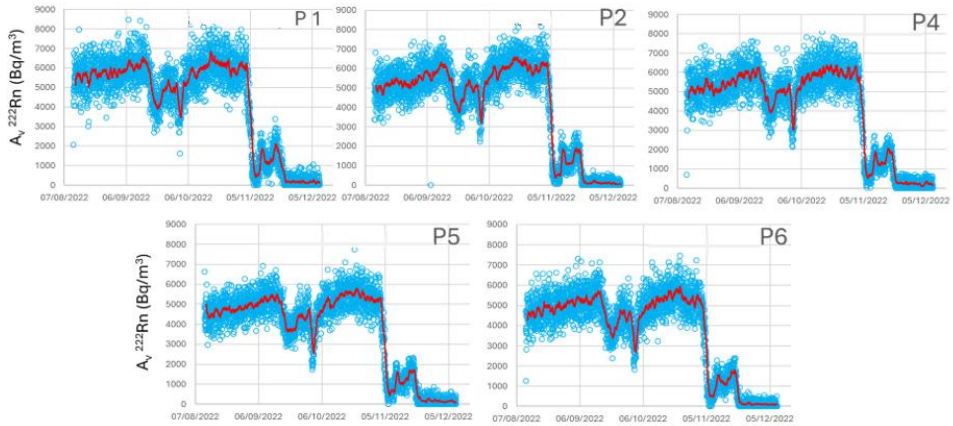

Figure 9 : Dynamique saisonnière de l'activité volumique du radon au niveau de cinq points de mesure (entre début août et mi-décembre 2022).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

4.2.2. Fractions libre et attachée des descendants à vie courte

La proportion des fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon a été évaluée par la mesure de la concentration équivalente à l'équilibre desdites fractions (CEE). La durée des campagnes dans chaque zone de la grotte a été principalement déterminée par la disponibilité des équipements de sorte qu'aucune d'entre-elle ne dépasse 3 mois (contrairement à la mesure de l'activité volumique du radon) (cf. § 4.2.1.).

Au début du mois de septembre, alors que commence la phase de réduction globale de la teneur en radon dans l'ensemble des cavités de la grotte (cf. § 4.2.1.), on observe tout d'abord, au point P6, une première chute de la CEE de la fraction attachée des descendants du radon alors que la CEE de la fraction libre se maintient. C'est au début du mois de novembre que la chute radicale de la CEE des fractions attachée et libre intervient, pour s'établir fin novembre à des niveaux de l'ordre de 70 et 5 Bq.m^{-3} respectivement (figure 10).

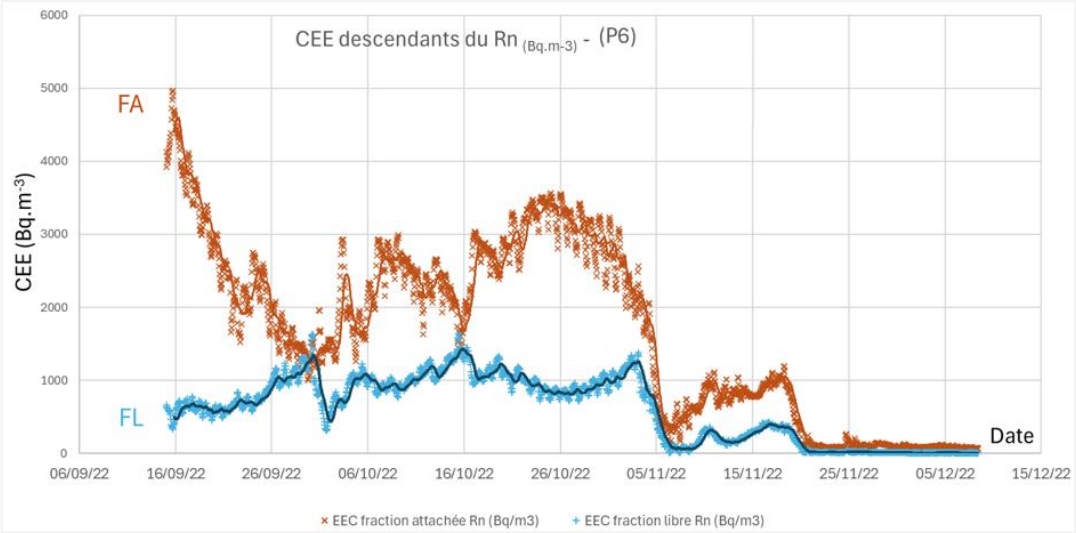

Figure 10 : CEE des fractions libre (FL, bleu) et attachées (FA, brun) des descendants à vie courte du radon au point de mesure P6 de mi-septembre à début décembre 2022.

Durant l'été 2023, la CEE de la fraction libre des descendants du radon au point P1 a été relativement stable (aux alentours de 1500 Bq/m^3). Durant la même période, la CEE de la fraction attachée a été beaucoup plus inconstante, oscillant entre 2000 et 4000 Bq/m^3 (figure 11).

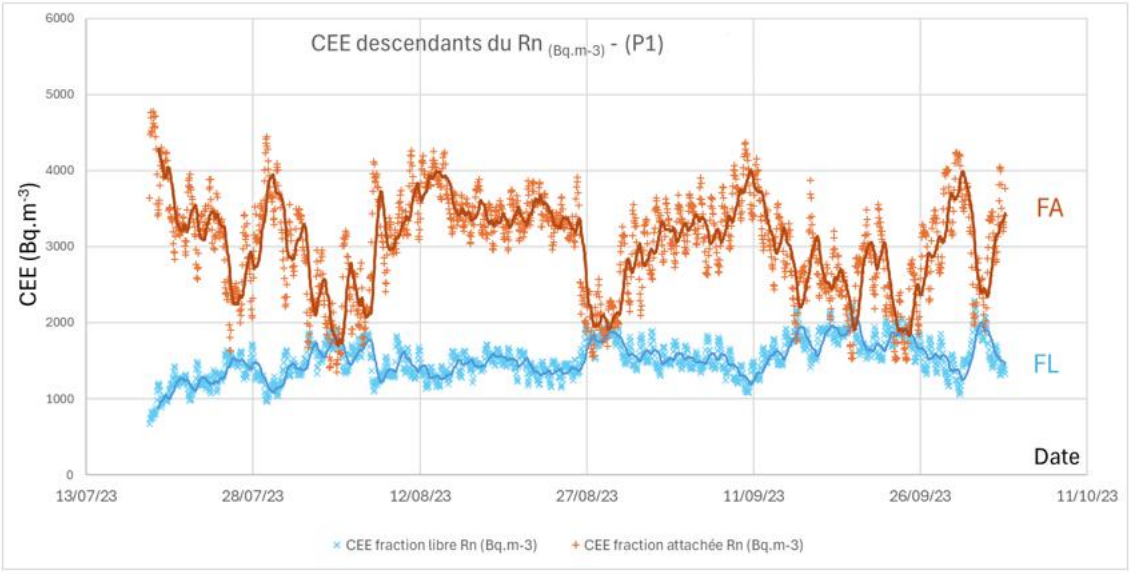

Figure 11 : CEE des fractions libre (FL, bleu) et attachées (FA, brun) des descendants à vie courte du radon au point de mesure P1 de mi-juillet à fin septembre 2023.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Le résultat de l'ensemble des mesures est présenté dans le tableau 3.

Tableau 3 : Calcul des fractions libre et attachée des descendants du radon à partir des différentes mesures de CEE dans la grotte n°1

Point	Période	Instrument de mesure	Fraction libre (FL)	Fraction attachée (FA)
P1	mai-juin 2023	BWLM	27%	73%
	juillet-septembre 2023	EQF	34%	66%
P2	du 16 au 21 septembre 2022	EQF	16%	84%
P3	oct-22	BWLM	22%	78%
	du 6 au 9 novembre 2022	BWLM	7%	93%
P5	du 8 au 19 décembre 2022	EQF	8%	92%
	août-septembre 2023	BWLM	19%	81%
P6	du 21 septembre au 5 novembre 2022	EQF	30%	70%
	du 6 au 20 novembre 2022	EQF	21%	79%
	du 21 novembre au 8 décembre 2022	EQF	9%	91%
	du 8 au 20 décembre 2022	BWLM	5%	95%

En hiver, lors de la chute de l'A_v du radon et de la CEE de ses descendants, il semble que la fraction libre diminue considérablement (par rapport à la situation estivale).

4.2.3. Granulométrie

La mesure de la concentration et de la granulométrie des aérosols a été menée en deux campagnes d'une semaine chacune, l'une en été et l'autre en hiver, aux points P6 et P1 (figure 12) et pour des gammes granulométriques allant de la dizaine de nanomètres jusqu'à la dizaine de microns (i.e. dans la gamme de diamètre correspondant aux fractions attachées des descendants à vie courte du radon).

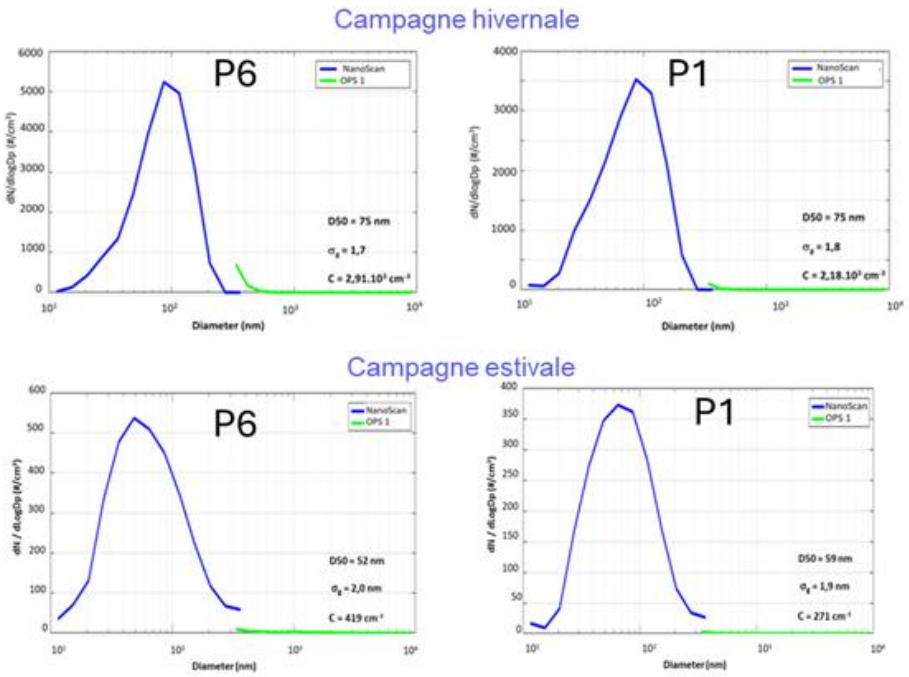

Figure 12 : Distribution granulométrique (en nombre) de l'aérosol atmosphérique, moyenné sur une période de 24 heures, aux points P6 et P1 durant les campagnes hivernale (en haut) et estivale (en bas)

Les concentrations mesurées en hiver sont supérieures (de près d'un ordre de grandeur) à celles mesurées en été. Celles mesurées au point P6 sont légèrement supérieures à celles mesurées au point P1. En été, la taille des particules est inférieure à celle des particules mesurées en hiver. Dans une représentation log-normale, la

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

distribution est unimodale. Les principaux indicateurs tirés de ces deux campagnes sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau 4).

Tableau 4 : Concentration, diamètre en nombre des particules mesurés dans la grotte n°1 et diamètre thermmodynamique médian en activité de la fraction attachée

Période de mesure		Point de mesure	Granulométrie en nombre des aérosols					Distribution en activité calculée		Distribution en activité retenue*	
			Concentration (nb/cm^3)		d médian (nm)	d moyen (nm)	σ g	DTMA (nm)	σ g	DTMA (nm)	σ g
Hivernale	28/02/23-01/03/23	Point 1	min	1 324	81	75	1,74	116	1,6	100	2
			max	1 851				118	1,5		
			moy	1 612				116	1,5		
	03/03/23-09/03/23	Point 6	min	1 686	87	81	1,68	115	1,5	100	2
			max	3 079				117	1,5		
			moy	2 310				118	1,5		
Estivale	09/08/23-10/08/23	Point 1	min	246	70	70	1,88	146	2,0	150	2
			max	453				184	2,0		
			moy	297				139	1,8		
	08/08/23-09/08/23	Point 6	min	303	64	64	1,95	150	2,1	150	2
			max	1 553				137	1,9		
			moy	519				144	1,9		

DTMA = diamètre thermodynamqie médian en activité, σ g = écart type géométrique, * pour le calcul de coefficient de dose

Les diamètres thermodynamiques correspondants (DTMA) pour la fraction attachée des descendants du radon ont été déduits de l'étude granulométrique. Aux fins du calcul de dose, ils sont arrondis à la cinquantaine de nm la plus proche.

4.2.4. Facteur d'équilibre (F)

Les périodes durant lesquelles des facteurs d'équilibre ont pu être calculés sont les périodes durant lesquelles il a été possible de disposer à la fois de données d'activité volumique de radon et de données de concentration équivalente à l'équilibre de ses descendants[8]. Au point P6 par exemple, ce facteur est assez stable (autour de la valeur de 0,6) de septembre à octobre 2022 (période « estivale ») alors qu'il croit à partir de novembre pour atteindre une valeur proche de 1 à partir de décembre (période « hivernale ») (figure 13). Cette évolution intervient lors de la chute de la concentration globale en radon dans la grotte (cf. § 4.2.1).

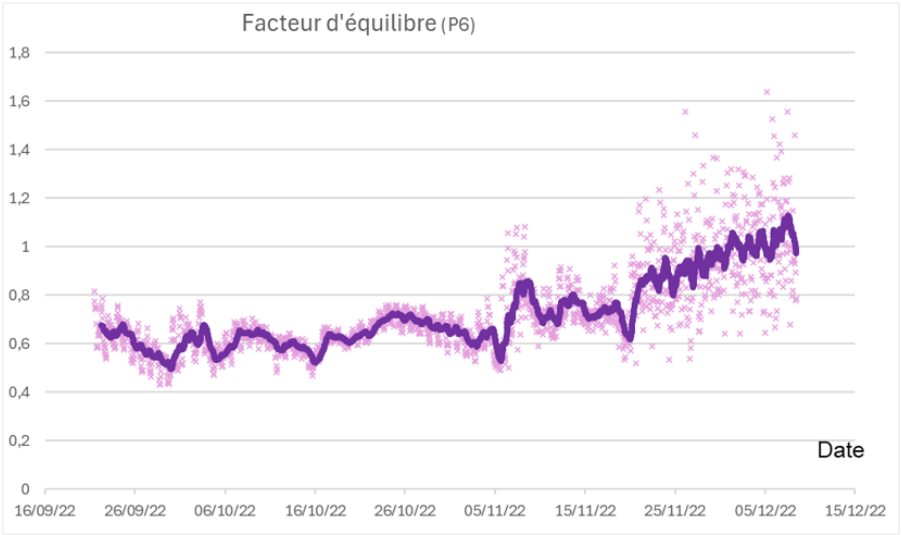

Figure 13 : Facteur d'équilibre** (entre le radon et ses descendants à vie courte) **entre septembre et décembre 2022 au point P6

[8] $F = CEE_{descendants}/Av_{radon}$.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Au point P1, ce facteur oscille autour de la valeur de 0,64 de mi-juillet à début octobre 2023, période durant laquelle la concentration en radon est stable et correspond à un niveau d'activité en radon estival à peu près constant (figure 14).

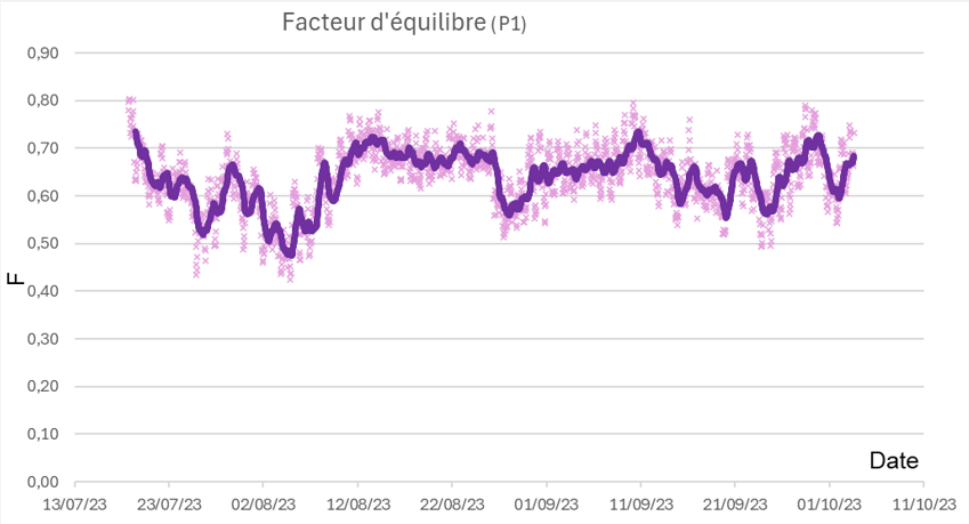

Figure 14 : Facteur d'équilibre** (entre le radon et ses descendants à vie courte) **entre juillet et octobre 2023 au point P1

4.3. BILAN DES MESURES IN SITU

4.3.1. Eléments généraux

L'ensemble des mesures réalisées durant cette étude confirment que les concentrations en radon dans les diverses parties de la grotte sont homogènes. Les niveaux d'activité volumique de radon, de CEE totale et de fraction libre des descendants du radon varient au cours de l'année avec des valeurs élevées en été et beaucoup plus basses en hiver. Cette nette différence saisonnière résulte probablement de l'alternance de deux régimes aérauliques correspondant à des caractéristiques atmosphériques bien distinctes. Le régime correspondant aux valeurs les plus élevées de fraction libre (de 16% à 34%) est probablement celui durant lequel l'atmosphère de la grotte reste majoritairement confinée avec une concentration faible d'aérosols (l'été). L'autre régime, où une dilution s'opère avec de l'air extérieur plus chargée en aérosols mais moins en radon (avec une circulation d'air venant probablement de l'entrée naturelle vers les sorties plus hautes de la grotte), montre des fractions libres inférieures à 10% (l'hiver).

Dans une représentation log-normale, la distribution granulométrique des aérosols de taille supérieure à 10 nm apparait comme unimodale. Le diamètre thermodynamique médian calculé à partir de ces mesures est légèrement plus faible en été (100 nm) qu'en hiver (150 nm) ; il est sensiblement plus faible que celui retenu par défaut par la CIPR pour la fraction attachée des descendants du radon (200 nm). L'impact de cet écart (valeur par défaut/valeur mesurée) sur le coefficient de dose doit être regardé conjointement avec l'écart entre les fractions libre et attachées mesurées et les valeurs par défaut de la CIPR (voir § 4.3.2).

Au-delà, il peut être souligné que le facteur d'équilibre (F) entre le radon et ses descendants à vie courte calculé à partir de ces campagnes de mesures est compris entre 0,6 (en été) et près de 1 (en hiver). Il est donc assez différent de celui retenu par défaut par la CIPR (0,4) ; ceci confirme que dans ce type de milieu, l'usage d'un facteur d'équilibre conventionnel pour en dériver une CEE n'est pas une méthode adaptée.

4.3.2. Coefficients de dose

Les calculs de coefficients de dose ont été réalisés pour tous les lieux et périodes pour lesquels ont été évaluées les fractions libre et attachées des descendants du radon (option 1) et pour tous les lieux et périodes pour lesquels ont été évalués en plus le DTMA de leur fraction attachée (option 2).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

- Calculs Option 1 :

Les calculs sont réalisés pour un travailleur de référence effectuant une activité de guide touristique. Lors des visites guidées, le débit respiratoire retenu est de 1,2 m^3/h, ce qui correspond à 2/3 du temps en exercices légers et 1/3 en repos ou assis. Dans cette option de calcul, le diamètre thermodynamique médian en activité (DTMA) retenu pour le calcul n'est pas une valeur mesurée mais la valeur paramétrique définie par défaut par la CIPR (tableau 5).

Tableau 5 : Coefficients de dose calculés à partir des mesures réalisées dans la grotte n°1 (option 1)

Période de mesure		Lieu	DR (m^3/h)	FL (%)	FA (%)	DTMA FL (nm)	DTMA FA (nm)	σ (FL)	σ (FA)	Cd (mSv/mJ/h.m^{-3})
Estivale	mai-juin 2023	P1	1,2	27	73	1	200	1,3	2	9,1
	juillet-septembre 2023		1,2	34	66	1	200	1,3	2	10,6
	du 16 au 21/09/2022	P2	1,2	16	84	1	200	1,3	2	6,8
	octobre 2022	P3	1,2	22	78	1	200	1,3	2	8,1
	août-septembre 2023	P5	1,2	19	81	1	200	1,3	2	7,4
	du 21/09 au 5/11/2022	P6	1,2	30	70	1	200	1,3	2	9,8
	du 6 au 20/11/2022		1,2	21	79	1	200	1,3	2	7,9
	Moyenne		1,2	**24**	**76**	-	-	-	-	**8,5**
Hivernale	du 6 au 9/11/2022	P3	1,2	7	93	1	200	1,3	2	4,9
	du 8 au 19/12/2022	P5	1,2	8	92	1	200	1,3	2	5,1
	du 21/11 au 8/12/2022	P6	1,2	9	91	1	200	1,3	2	5,3
	du 8 au 20/12/2022		1,2	5	95	1	200	1,3	2	4,5
	Moyenne		1,2	**7**	**93**	-	200	1,3	2	**4,9**
Rappel des valeurs retenues par la CIPR			**1,2**	**15**	**85**	**1**	**200**	**1,3**	**2**	**6**

DR = Débit respiratoire, FL (%) et FA (%) = Fraction libre et attachée (valeurs issue de la mesures), DTMA FL et FA = Diamètre thermodynamique médian des fractions libre et attachée (valeurs paramétrique de la CIPR), σ (FL) et σ (FA) = écart type de la distribution granulométrique des fractions libre et attachée, Cd = coefficient de dose

La moyenne des coefficients de dose des descendants à vie courte du radon pendant la majorité de la période d'ouverture de la grotte (à l'exception de la période du 6 novembre au 13 novembre 2022) est estimée à près de 8,5 mSv/mJ.h.m^{-3}. La moyenne des coefficients de dose des descendants à vie courte du radon pendant la période hivernale est estimée à 5 mSv/mJ.h.m^{-3}.

- Calculs Option 2 :

Dans cette option de calcul, fractions libre, attachée (FL et FA) et DTMA de la fraction attachée remplacent la valeur paramétrique choisie par défaut par la CIPR. Le DTMA de la fraction libre reste une valeur par défaut (tableau 6).

Tableau 6 : Coefficients de dose calculés à partir des mesures réalisées dans la grotte n°1 (option 2)

Période de mesure		Lieu	DR (m^3/h)	FL (%)	FA (%)	DTMA FL (nm)	DTMA FA (nm)	σ (FL)	σ (FA)	Cd (mSv/mJ/h.m^{-3})
Estivale	mai-juin 2023	P1	1,2	27	73	1	150	1,3	2	9,6
	juillet-septembre 2023		1,2	34	66	1	150	1,3	2	11,0
	du 16 au 21/09/2022	P2	1,2	16	84	1	150	1,3	2	7,4
	octobre 2022	P3	1,2	22	78	1	150	1,3	2	8,6
	août-septembre 2023	P5	1,2	19	81	1	150	1,3	2	8,0
	du 21/09 au 5/11/2022	P6	1,2	30	70	1	150	1,3	2	10,2
	du 6 au 20/11/2022		1,2	21	79	1	150	1,3	2	8,4
	Moyenne		1,2	**24**	**76**	-	**150**	-	-	**9,0**
Hivernale	du 6 au 9/11/2022	P3	1,2	7	93	1	100	1,3	2	6,9
	du 8 au 19/12/2022	P5	1,2	8	92	1	100	1,3	2	7,1
	du 21/11 au 8/12/2022	P6	1,2	9	91	1	100	1,3	2	7,3
	du 8 au 20/12/2022		1,2	5	95	1	100	1,3	2	6,6
	Moyenne		1,2	**7**	**93**	-	**100**	1,3	2	**7,0**
Rappel des valeurs retenues par la CIPR			**1,2**	**15**	**85**	**1**	**200**	**1,3**	**2**	**6**

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Le coefficient de dose moyen calculé pour la période estivale avec apport de la mesure granulométrique est très légèrement plus élevé (près de 9 mSv/mJ.h.m^{-3}) que celui calculé sans l'apport de l'étude granulométrique (près de 8,5 mSv/mJ.h.m^{-3}). Cet accroissement est lié au fait que le coefficient de dose pour une distribution granulométrique centrée sur 150 nm pour la fraction attachée (4,3 mSv/mJ.h.m^{-3}) est légèrement plus élevé que celui calculé pour une distribution granulométrique centrée sur 200 nm (3,4 mSv/mJ.h.m^{-3}).

Cet accroissement relatif est amplifié pour la période hivernale (coefficient moyen de près de 7 mSv/mJ.h.m^{-3} contre 5 mSv/mJ.h.m^{-3}) puisque le coefficient de dose pour une distribution granulométrique centrée sur 100 nm (5,7 mSv/mJ.h.m^{-3}) est sensiblement plus élevé que celui calculé pour une distribution granulométrique centrée sur 200 nm (3,4 mSv/mJ.h.m^{-3}).

4.3.3. Conclusion

Le calcul de coefficients de dose adaptés aux conditions d'exposition de la grotte n°1 montre que, pour un débit respiratoire conventionnel de 1,2 m^3/h (correspondant au scénario des visites guidées), ce coefficient est toujours supérieur à 6 mSv/mJ.h.m^{-3} en période estivale (période principale d'exposition des travailleurs dans ces lieux). En période hivernale, ce coefficient est sensiblement plus faible (compris entre 5 et 7 mSv/mJ.h.m^{-3} suivant la méthode de calcul), mais toujours supérieur à la valeur de 3 mSv/mJ.h.m^{-3}.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

5. ETUDE MENEE DANS LA GROTTE N°2

5.1. GENERALITES

Dans le cadre de son étude expérimentale, l'ASNR a positionné les systèmes de mesure d'activité volumique de radon ne nécessitant pas d'apport électrique permanent (BMC2) au niveau des points d'arrêt principaux d'une visite ordinaire (P1, P2, P4, P5, P6), en un point reliant deux cavités (P3) ainsi qu'à la sortie (P7). Les appareils de mesure nécessitant une alimentation électrique pour la mesure des descendants à vie courte du radon (EQF, BWLM et RDM-PLUS) ont été installés dans les lieux disposant déjà de telles alimentations, à savoir aux points P2, P5 et P6. Les campagnes de mesure ont eu lieu entre avril et novembre 2024.

Pour des raisons d'accessibilité, les mesures de la granulométrie en nombre des aérosols ambiants présents dans l'atmosphère de la grotte n°2 ont été réalisées uniquement au point P2. Ces mesures ont été réalisées du 24/09/2024 au 26/09/2024 et du 05/11/2024 au 07/11/2024[9].

5.2. RESULTATS DES MESURES

Même si les données recherchées pour cette étude sont les fractions libre, attachée et la granulométrie des descendants à vie courte du radon (§ 5.2.2 et § 5.2.3), la présentation des résultats de mesure débute par celle de l'activité volumique du radon (§ 5.2.1) car, pour ce type de mesure, l'ASNR disposait de suffisamment d'équipements et était en mesure d'établir des chroniques longues en un même point, chroniques constituant des références pour tous les autres paramètres. L'évaluation du facteur d'équilibre est également présentée (§ 5.2.4).

5.2.1. Activité volumique du radon (A_v)

Comme les mesures initiales faites par l'exploitant l'avaient déjà montré, les concentrations évaluées sous la forme moyennes mensuelles aux points de mesure sont stables dans l'année mais peuvent différer grandement d'une salle/d'un point de mesure à une/un autre. Plus précisément, elles sont relativement stables en été et fluctuent de manière importante sur de courtes périodes en automne et au printemps (figure 15) (figure 16).

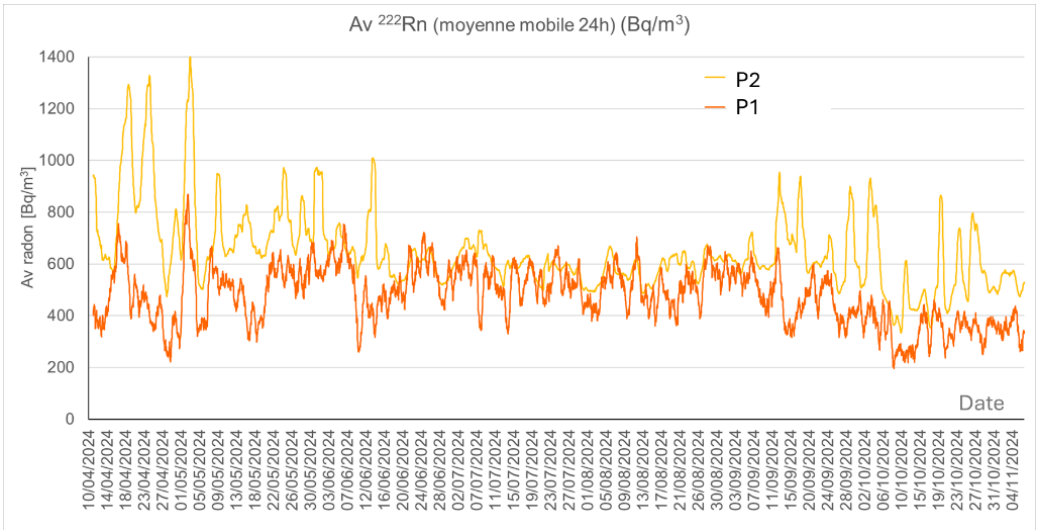

Figure 15 : Activité volumique du radon (en Bq/m³) mesurée en continu aux points P1 et P2 d la grotte n°2 entre avril et novembre 2024

[9] Ces mesures ont été réalisé en inter-saison (septembre et novembre 2024) car les périodes estivale et hivernale n'ont pas été propices (trop de contraintes liées à l'activité touristique en juillet-août et fermeture en hiver).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

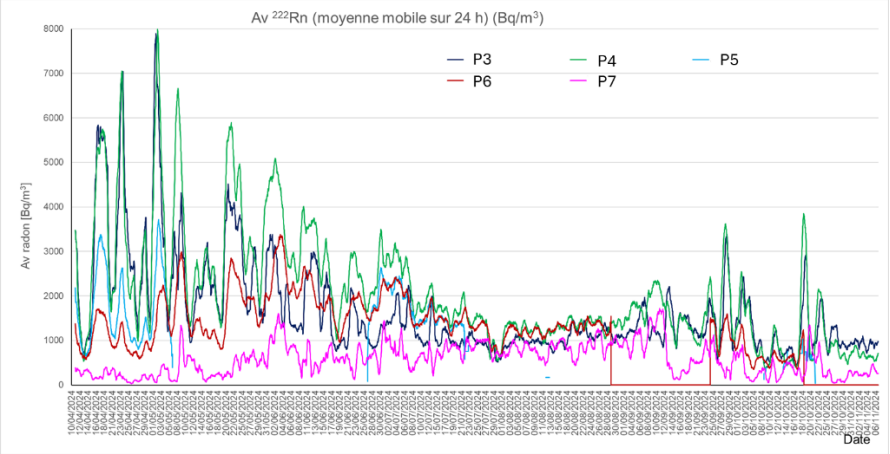

Figure 16 : Activité volumique du radon (en Bq/m³) mesurée en continu aux points P3, P4, P5, P6 et P7 de la grotte n°2 entre avril et novembre 2024

Les activités volumiques moyennes (mensuelles ou sur la période de mesure) sont synthétisées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Activité volumique moyenne du radon (en Bq/m³) mesurée dans les divers points de mesure de la grotte n°2 [moyennes mensuelles et sur la période de mesure]

Mois	P1	P2	P3	P4	P5	P5	Sortie P7
Avril	440	833	3059	2977	1588	1004	211
Mai	524	761	2796	3510	2397	1702	401
Juin	534	643	1656	2836	2013	2017	704
Juillet	530	599	1141	1786	1664	1502	760
Août	512	582	1052	1314	-	1260	832
Septembre	477	652	1414	1660	-	1136	738
Octobre	344	543	1112	1106	-	640	340
Novembre	345	538	930	668	-	-	276
Moyenne*	**463**	**644**	**1645**	**1982**	**1916**	**1323**	**533**

* Sur la période de mesure, du 10/04/2024 au 07/11/2024

5.2.2. Fractions libres et attachées des descendants à vie courte

La proportion des fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon a été évaluée par la mesure de la concentration équivalente à l'équilibre desdites fractions (CEE). La durée des campagnes de mesure dans chaque zone de la grotte a été principalement déterminée par la disponibilité des équipements.

Comme on a pu l'observer avec l'activité volumique du radon, la variabilité de mesure de CEE est beaucoup plus grande au printemps qu'en été au point P2 (figure 17).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

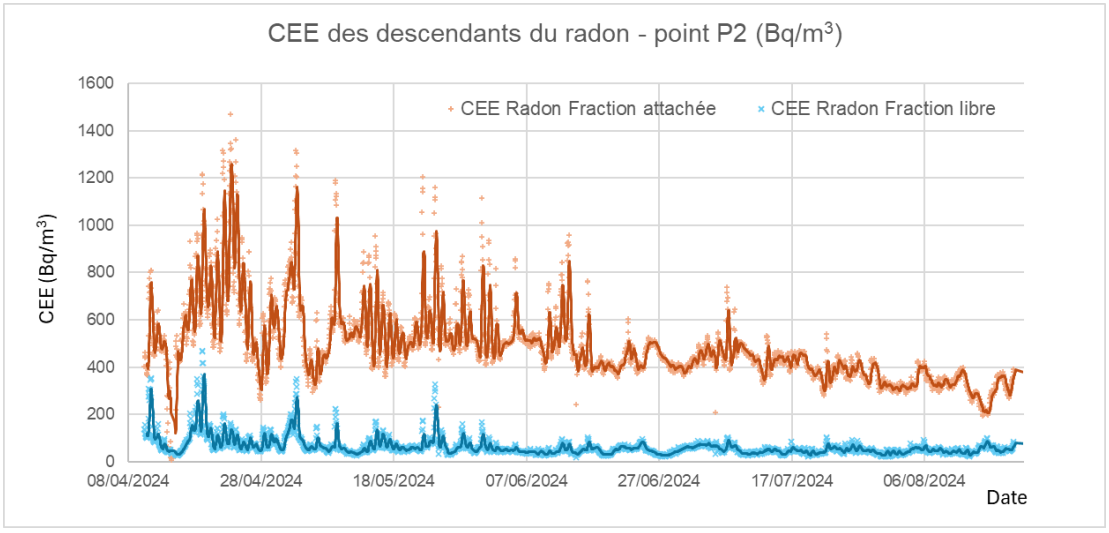

Figure 17 : CEE des descendants du radon (en Bq/m³) mesurée en continu au point P2 dans la grotte n°2 entre avril et août 2024

Le phénomène est encore plus marqué au point P5, à distance de la sortie (figure 18).

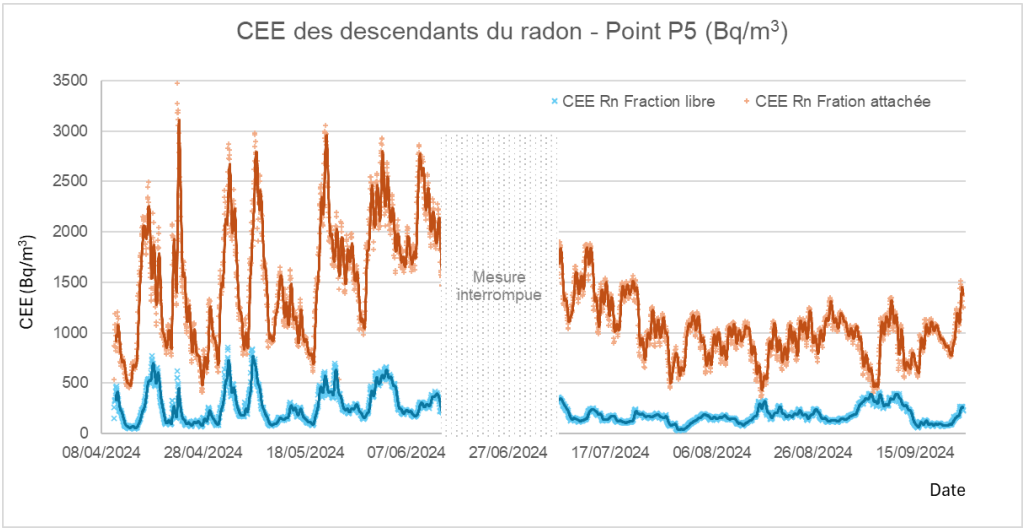

Figure 18 : CEE des descendants du radon (en Bq/m³) mesurée en continu au point P5 de la grotte n°2 entre avril et septembre 2024

(avec une interruption de mesure de la fraction libre entre mi-juin et début juillet)

La CEE globale au point P6, plus proche de la sortie, est inférieure au point P5. Elle varie sur de grandes amplitudes de fin septembre à début novembre (figure 19).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

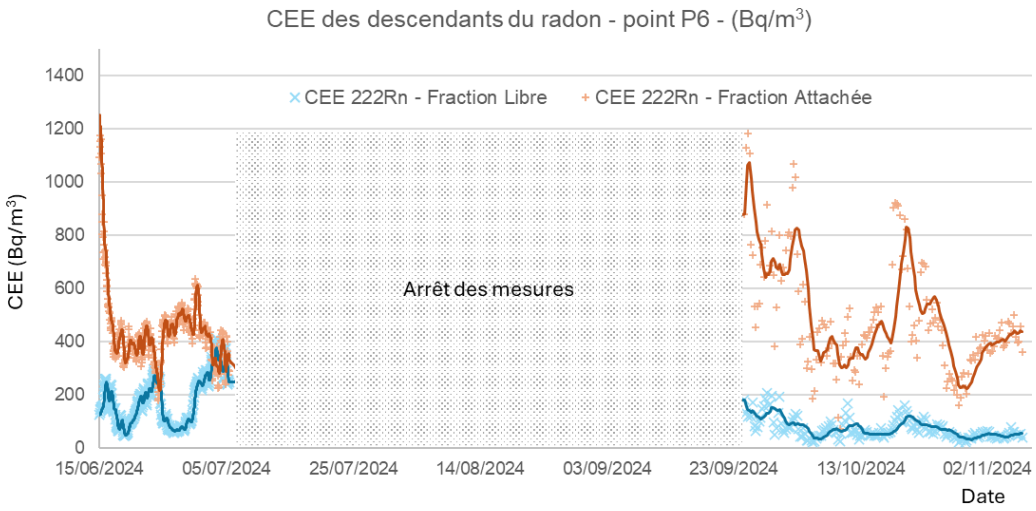

Figure 19 : CEE des descendants du radon (en Bq/m³) mesurée en continu au point P6 de la grotte n°2 au mois de juin et entre fin septembre et début novembre 2024

Le résultat de l'ensemble de la campagne de mesure est rassemblé dans le tableau 8.

Tableau 8 : CEE totale, fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon mesurées aux points P2, P5 et P6 dans la grotte n°2 [moyennes mensuelles et sur la période de mesure]

Période de mesure	Point P2			Point P5			Point P6		
	CEE (Bq/m³)	FL (%)	FA (%)	CEE (Bq/m³)	FL (%)	FA (%)	CEE (Bq/m³)	FL (%)	FA (%)
avril	718	14	86	1 391	15	85	582	-	-
mai	649	12	88	1 890	16	84	1 079	-	-
juin	526	9	91	1 883	14	86	621	23	77
juillet	465	11	89	1 385	12	88	809	45	55
août	369	13	87	1 110	15	85	793	-	-
septembre	345	9	91	1 121	19	81	762	15	85
octobre	-	-	-	669	-	-	519	13	87
novembre	-	-	-	460	-	-	467	11	89
Moyenne	**548**	**11**	**89**	**1 273**	**15**	**85**	**723**	**21**	**79**

5.2.3. Granulométrie

La mesure de la concentration et de la granulométrie des aérosols a été menée au point P2 de la grotte n°2, en deux campagnes de trois jours chacune, l'une fin septembre et l'autre début novembre 2024. Comme dans la grotte n°1, les gammes granulométriques étudiées vont de la dizaine de nanomètres à la dizaine de microns (i.e. dans la gamme de diamètre correspondant aux fractions attachées des descendants à vie courte du radon). A l'issue des deux campagnes de mesure, il apparait que dans une représentation log-normale, la distribution granulométrique est de type unimodale (figure 20).

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

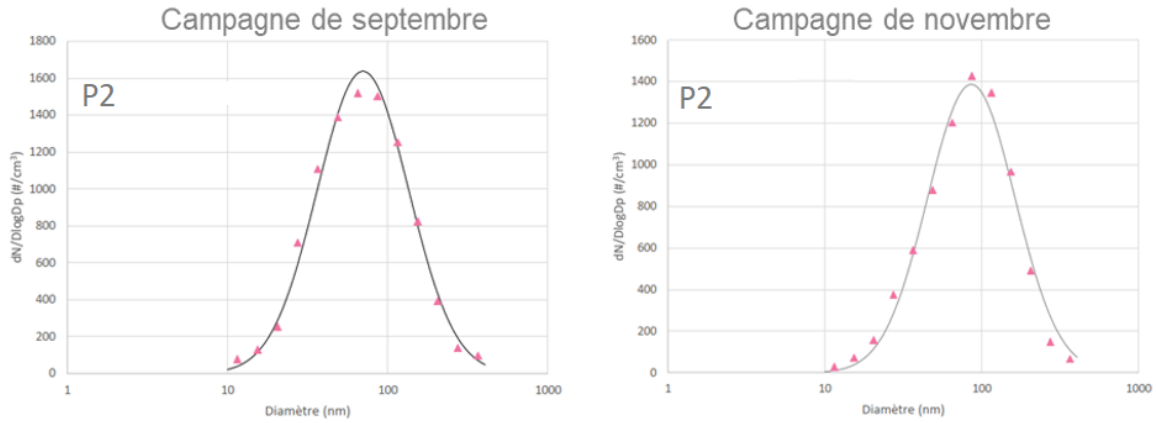

Figure 20 : Distribution granulométrique (en nombre) de l'aérosol atmosphérique dans la grotte n°2, moyennée sur la durée de chaque campagne (septembre et novembre 2024)

Le diamètre médian est très légèrement supérieur lors de la campagne de novembre alors que la concentration moyenne en aérosols est légèrement plus faible (tableau 9). L'écart type de la distribution log-normale est proche de 2.

Tableau 9 : Concentration et diamètre des particules mesurés dans la grotte n°2

Période de mesure	Point de mesure	Granulométrie en nombre des aérosols					Distribution en activité calculée		Distribution en activité retenue*	
		Concentration (nb/cm^3)		d médian (nm)	d moyen (nm)	σ g	DTMA (nm)	σ g	DTMA (nm)	σ g
24/09/24-26/09/24	P2	min	688	70	68	1,93	172,9	2,0	**150**	**2**
		max	1 400				107,5	1,6		
		moy	1 088				138,3	1,8		
05/11/24-07/11/24	P2	min	560	86	81	1,87	141,7	1,7	**150**	**2**
		max	857				136,3	1,6		
		moy	665				141,6	1,7		
DTMA = diamètre thermodynamqie médian en activité, σ g = écart type géométrique, * pour le calcul de coefficient de dose										

Les diamètres thermodynamiques correspondants (DTMA) pour la fraction attachée des descendants du radon ont été déduits de l'étude granulométrique. Aux fins du calcul de dose, ils sont arrondis à la cinquantaine de nm la plus proche.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

5.2.4. Facteur d'équilibre

Les périodes durant lesquelles des facteurs d'équilibre ont pu être évalués sont les périodes durant lesquelles il a été possible de disposer à la fois de données d'activité volumique de radon et de données de concentration équivalente à l'équilibre de ses descendants[10]. Au point P2, la valeur moyenne du facteur d'équilibre est proche de 0,9 au mois d'avril et elle décroit progressivement pour avoisiner 0,6 à la fin du moins de septembre. Pour autant, sur des pas de temps plus faibles (jour ou semaine), il oscille sur de grandes amplitudes.

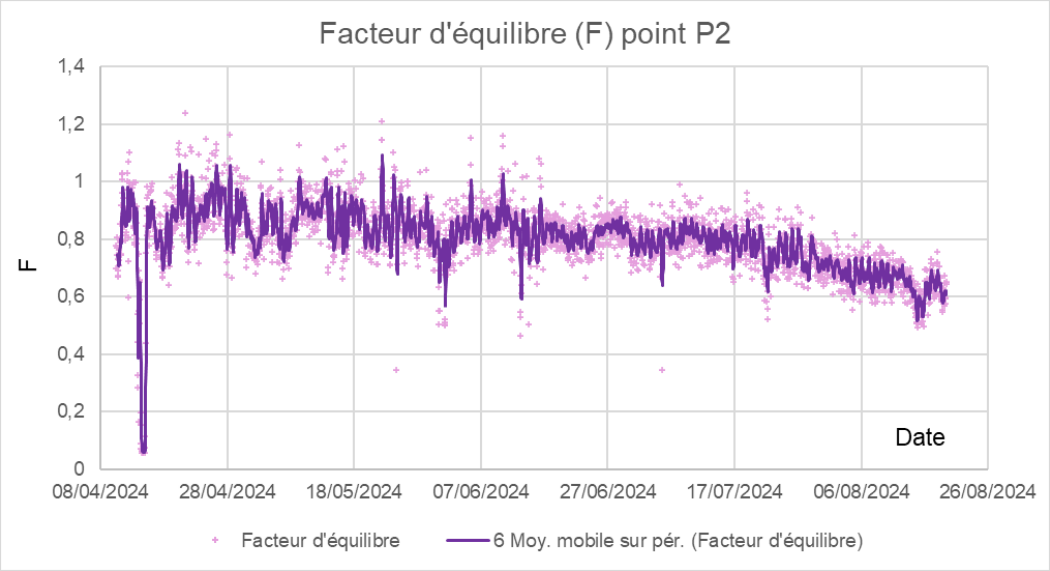

Figure 21 : Facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte au niveau point P2 de la grotte n°2 entre avril et aout 2024

Durant les périodes où les mesures ont permis l'évaluation du facteur d'équilibre, la valeur moyenne du facteur d'équilibre au point P5 de la grotte variait autour de la valeur de 1, avec des amplitudes de variations infra-hebdomadaires encore plus élevées (figure 22).

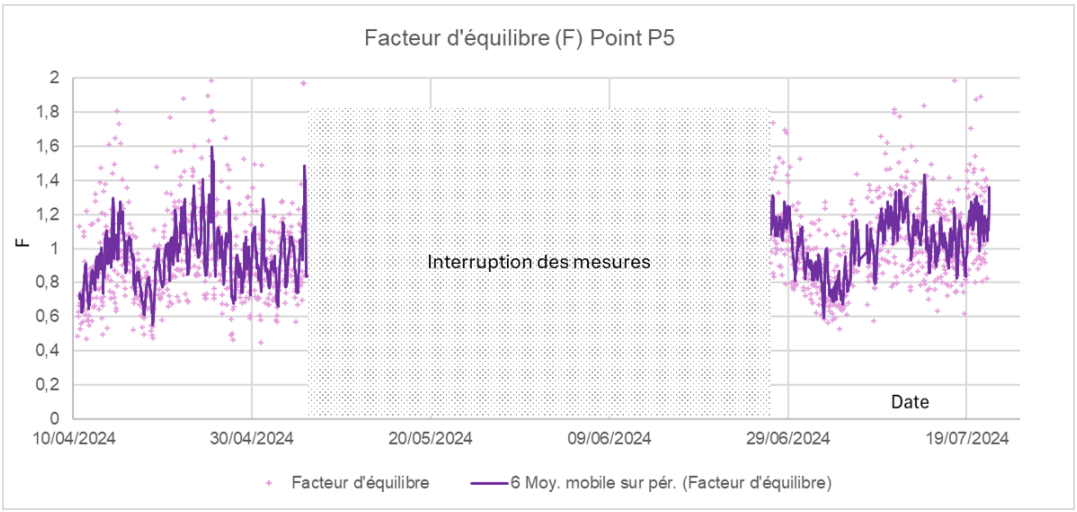

Figure 22 : Facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte au point P5 de la grotte n°2 d'avril à mai puis de fin juin à mi-juillet 2024

[10] $F = CEE_{descendants}/Av_{radon}$.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Durant la période de mesure (de juin à octobre 2024), le facteur d'équilibre estimé au plus proche de la sortie (P6) est plus faible que celui évalué plus au cœur des grottes (P5) (figure 23).

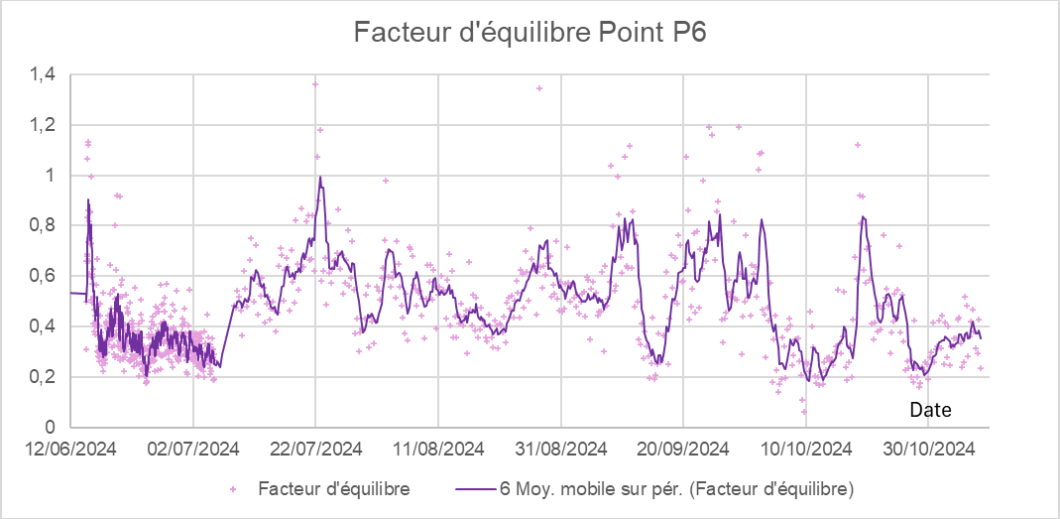

Figure 23 : Facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte au point P6 de la grotte n°2 de juin à octobre 2024

5.3. BILAN DES MESURES IN SITU

5.3.1. Eléments généraux

L'analyse du résultat des mesures réalisées montre que le comportement du radon ou de ses descendants dans la grotte n°2 est relativement complexe. Il semble néanmoins qu'on peut distinguer deux types de zones : les cavités éloignées des entrées et des sorties d'une part et celles qui sont en contact plus ou moins direct avec l'extérieur d'autre part :

- les premières sont caractérisées par une forte variabilité de l'activité volumique du radon sous de courtes échelles de temps et des activités moyennes plus élevées au printemps et en automne. Pour ces cavités, les activités volumiques sont moins variables et plus faibles est en été. Ceci est observé pour les cavités distantes de l'entrée et sortie de la grotte (P2, P3, P4, P5 et P6) ;
- les secondes sont caractérisées par une teneur moyenne plus faible au printemps ou en automne et globalement, par une variabilité plus faible sous de courtes échelles de temps (P1 et P7).

Même si la concentration équivalente à l'équilibre totale (CEE) des descendants du radon suit la même dynamique que l'activité volumique (A_v) du radon où qu'on se place dans la grotte, les pourcentages de fractions libres moyennes évaluées à l'échelle mensuelle sont assez stables sur la totalité de la campagne de mesure[11] (comprises entre 11 et 15%) et assez proches de la valeur proposée par défaut par la CIPR (15%).

Dans une représentation log-normale, la distribution granulométrique des aérosols de taille supérieure à 10 nm apparait comme unimodale. Le diamètre thermodynamique médian calculé à partir de ces mesures est le même pour les deux campagnes de mesure (150 nm) ; il est très proche de celui retenu par défaut par la CIPR pour la fraction attachée des descendants du radon (200 nm).

Au-delà, il peut être souligné que le facteur d'équilibre (F) entre le radon et ses descendants à vie courtes calculé à partir de ces campagnes de mesures varie d'un point à un autre et d'une saison à l'autre. Il est en moyenne d'un peu plus de 0,8 au point P2, de près de 1 au point P5 et de près de 0,5 au point P6. Il est donc assez différent de

[11] Sauf en été à un point où elle a pu atteindre 45%. Mais il est assez difficile d'en tirer une conclusion définitive du fait de la relativement faible durée de la mesure durant le mois de juillet.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

celui retenu par défaut par la CIPR (0,4) ; ceci confirme que dans ce type de milieu, l'usage d'un facteur d'équilibre conventionnel pour en dériver une CEE n'est pas une méthode adaptée.

5.3.2. Coefficients de dose

Les calculs de coefficients de dose ont été réalisés pour tous les lieux et périodes pour lesquels ont été évaluées les fractions libre et attachées des descendants du radon (option 1) et pour tous les lieux et périodes pour lesquels ont été évalués à la fois les fractions libre et attachées des descendants du radon mais aussi la granulométrie de leur fraction attachée (option 2).

- Calculs Option 1 :

Les calculs sont réalisés pour un travailleur de référence effectuant une activité de guide touristique. Le débit respiratoire du travailleur retenu est de 1,2 m^3/h, ce qui correspond à 2/3 du temps en exercices légers et 1/3 en repos ou assis. Dans cette option de calcul, le diamètre thermodynamique médian en activité (DTMA) retenu pour le calcul n'est pas une valeur mesurée mais la valeur paramétrique définie par défaut par la CIPR.

Tableau 10 : Coefficients de dose moyens calculés pour l'ensemble de la période d'étude à partir des mesures réalisées dans la grotte n°2 (Option 1)

Période de mesure	Lieu	DR (m^3/h)	FL (%)	FA (%)	DTMA FL (nm)	DTMA FA (nm)	σ (FL)	σ (FA)	Cd ($mSv/mJ.h.m^{-3}$)
avril-septembre	Point P2	1,2	11	89	1	200	1,3	2	**5,8**
avril-septembre	Point P5	1,2	15	85	1	200	1,3	2	**6,6**
Rappel des valeurs retenues par la CIPR		**1,2**	**15**	**85**	**1**	**200**	**1,3**	**2**	**6**

DR = Débit respiratoire, FL (%) et FA (%) = Fraction libre et attachée (valeurs issue de la mesures), DTMA FL = Diamètre thermodynamique médian de la fraction libre (valeurs paramétrique de la CIPR), DTMA FA = Diamètre thermodynamique médian de la fraction attachée (valeur issue de la mesure), σ (FL) et σ (FA) = écart type de la distribution granulométrique des fractions libre et attachée, Cd = coefficient de dose

Dans ce mode de calcul, le coefficient de dose moyen est proche de 6, c'est-à-dire, proche de la valeur proposée par défaut par la CIPR. Regardé chaque mois de la période d'étude, il varie entre 5,3 et 7,4.

- Calculs Option 2 :

Lorsque la valeur paramétrique par défaut pour le DTMA de la fraction attachée est remplacée par la valeur obtenue à l'issue de la campagne de mesure granulométrique, le coefficient de dose moyen recalculé est très légèrement plus élevé au point P2 de la grotte n°2 (6,5 $mSv/mJ.h.m^{-3}$). (*Nota : si la granulométrie au point P5 était la même que celle mesurée au point P2, alors le coefficient de dose moyen serait alors de 7,4 $mSv/mJ.h.m^{-3}$*).

Tableau 11 : Coefficients de dose moyens calculés pour l'ensemble de la période d'étude à partir des mesures réalisées dans la grotte n°2 (Option 2)

Période de mesure	Lieu	DR (m^3/h)	FL (%)	FA (%)	DTMA FL (nm)	DTMA FA (nm)	σ (FL)	σ (FA)	Cd ($mSv/mJ.h.m^{-3}$)
avril-septembre	Point P2	1,2	11	89	1	150	1,3	2	**6,6**
Rappel des valeurs retenues par la CIPR		**1,2**	**15**	**85**	**1**	**200**	**1,3**	**2**	**6**

DR = Débit respiratoire, FL (%) et FA (%) = Fraction libre et attachée (valeurs issue de la mesures), DTMA FL = Diamètre thermodynamique médian de la fraction libre (valeurs paramétrique de la CIPR), DTMA FA = Diamètre thermodynamique médian de la fraction attachée (valeur issue de la mesure), σ (FL) et σ (FA) = écart type de la distribution granulométrique des fractions libre et attachée, Cd = coefficient de dose

Ceci s'explique par le fait que le coefficient de dose pour un DTMA de 150 nm (4,3 $mSv/mJ.h.m^{-3}$) est légèrement plus élevé que le coefficient de dose pour un DTMA de 200 nm (3,4 $mSv/mJ.h.m^{-3}$).

ASNR
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

5.3.3. Conclusion

Le calcul de coefficients de dose adaptés aux conditions d'exposition de la grotte n°2 montre que, pour un débit respiratoire conventionnel de 1,2 m^3/h (correspondant au scénario des visites guidées), ce coefficient est toujours très proche de 6 mSv/mJ.h.m^{-3}. Même s'il est difficile d'affirmer que la granulométrie des aérosols est identique en toutes saisons, il apparait que la proportion des fractions libre et attachée des aérosols de descendants du radon est relativement stable, ce qui induit une relative homogénéité des coefficients de dose durant toute la période étudiée.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

6. CONCLUSION GENERALE

En réponse à la question posée par la direction générale du travail quant à la robustesse des paramètres retenus par défaut par la CIPR pour établir les coefficients de dose pour les travailleurs dans les grottes touristiques, l'ASNR a réalisé des campagnes de mesure dans deux grottes situées en France métropolitaine. L'objet de ces mesures était l'estimation de deux paramètres d'entrée essentiels pour les modèles dosimétriques de la CIPR, à savoir la proportion des fractions libre et attachée des descendants à vie courte du radon et le diamètre thermodynamique médian (en activité) desdits descendants.

Les campagnes de mesure réalisées dans ce cadre ont confirmé la différence importante du fonctionnement aéraulique des deux grottes (justement choisies pour ces caractéristiques) :

- la grotte n°1 révèle un fonctionnement marqué par l'homogénéité des teneurs en radon et en descendants à vie courte dans les différentes salles accessibles à la visite. Celles-ci sont élevées, depuis la fin du printemps jusqu'au début de l'hiver, et sont très faibles en hiver. Durant la première période, la part de fraction libre des descendants à vie courte du radon (24% en moyenne) est plus élevée que celle retenue par la CIPR (15%) ; durant la seconde, elle est plus faible (7% en moyenne). Le diamètre thermodynamique médian en activité des descendants du radon est légèrement plus faible (100 et 150 nm) que celui retenu par la CIPR (200 nm) ;

- la grotte n°2 révèle des teneurs moyennes en radon et en descendants à vie courte plus homogènes entre les différentes saisons mais plus hétérogènes en fonction des lieux. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans les salles les plus éloignées des entrées / sorties et les plus faibles, au plus proche de celles-ci. Les fractions libres des descendants à vie courte du radon mesurées sont relativement homogènes (11 à 15 % en moyenne) et assez proches de celles retenues par défaut par la CIPR (15%). Le diamètre thermodynamique médian en activité des descendants du radon (150 nm) est très légèrement plus faible que celui retenu par la CIPR (200 nm).

En conséquence, les coefficients de dose adaptés aux conditions d'exposition spécifiques de chaque grotte sont soit très proches de la valeur proposée par défaut par la CIPR soit supérieurs : de l'ordre 6 $mSv/mJ.h.m^{-3}$ du printemps à l'automne pour la grotte n°2, compris entre 5 et 7 $mSv/mJ.h.m^{-3}$ en hiver et de l'ordre de 9 $mSv/mJ.h.m^{-3}$ en été pour la grotte n°1.

Même s'il est difficile d'évaluer la représentativité des observations faites dans ces deux grottes, la différence de caractéristiques aérauliques de ces deux sites laisse à penser que grâce à l'une et l'autre, l'étude doit couvrir un champ assez vaste de typologies susceptibles d'être rencontrées. Quoi qu'il en soit, force est de constater qu'aucune des mesures réalisées ne vient remettre en cause les choix faits par la CIPR sur le plan des paramètres d'exposition par défaut.

Il convient toutefois de noter que les facteurs d'équilibre évalués sur la base des mesures dans les deux grottes sont globalement supérieurs à celui suggéré par défaut par la CIPR (0,4). Cette observation confirme qu'il n'est pas souhaitable d'adapter un coefficient de dose à un lieu spécifique à partir de valeurs forfaitaires (non mesurées) du facteur d'équilibre.

ASNR

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

GLOSSAIRE

ANECAT : Association nationale des exploitants des cavernes aménagées pour le tourisme

Av : Activité volumique

CEE : Concentration équivalente à l'équilibre des descendants à vie courte du radon. La CEE est un estimateur de l'EAPv : pour le radon, CEE = EAPv/5,56.10^{-9}.

Cd : Coefficient de dose

CIPR : Commission internationale de protection contre les rayonnements ionisants

DTMA : Diamètre thermodynamique moyen en activité

EAP : Energie alpha potentielle des descendants à vie courte du radon (ou du thoron)

EAP_v = Energie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon (ou du thoron)

F : Facteur d'équilibre (rapport de l'activité volumique des descendants à vie courte du radon et de l'activité volumique du radon

FL : Fraction libre (part relative des descendants à vie courte du radon dont le DTMA est inférieur à 5 nm)

FA : Fraction attachées (part relative des descendants à vie courte du radon dont le DTMA est supérieur à 5 nm)

FFTS : Fédération française du tourisme et patrimoine souterrain

Granulométrie : distribution en taille de l'aérosol ambiant ou les descendants à vie courte du radon

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

REFERENCES

[1] ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).

[2] ICRP, 1994. Protection against 222-Radon and home and at work. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23 n°2.

[3] 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. JOUE, 17/01/2014, L13/1-L13/73.

[4] ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

[5] Art. R1333-28 à R1333-36 du code de la santé publique.

[6] Article R221-29 du code de l'environnement en application de l'article Article L221-7 relatif à la qualité de l'air intérieur. Articles R.125-10, R125-23 et R125-24 du code de l'environnement pour la prévention des risques naturels dans le cadre de la prévention des risques majeurs.

[7] Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants, Art. R4451-1 à R4451-146 du code du travail.

[8] Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. JORF du 25/11/2023.

[9] Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

[10] Arrêté du 30 juin 2021 relatif aux lieux de travail spécifiques pouvant exposer des travailleurs au radon. JORF du 11/08/2021.

[11] Avis de l'IRSN sur les nouveaux coefficients de dose pour le radon publiés par la Commission Internationale de Protection Radiologique dans sa publication 137, Rapport réf. 2020-00510.

[12] ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

ASNR

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

Siège social :
15 rue Louis Lejeune
92120 Montrouge

Adresse postale :
BP 17 - 92262
Fontenay-aux-Roses cedex

Divisions territoriales :
asnr.fr/nous-contacter

info@asnr.fr
Tél. : 01 58 35 88 88

asnr.fr