

LE RADON ATMOSPHÉRIQUE DANS QUELQUES CAVITÉS FRANÇAISES

APPROCHE DE L'ÉVALUATION DU RISQUE POUR LES SPÉLÉOLOGUES

**J.M. Ostermann, J. Bauer, C. Herbillon, M. Bouthors, M. Faverjon,
A. Devos, B. Lismonde, C. Marget, B. Ournié, M. Wienin**



**Fédération française de spéléologie
Commission médicale**



Photographie de couverture : Dans le ruisseau souterrain de La Pépie (Dordogne), où des valeurs élevées de radon ont été découvertes (cliché J.M. Ostermann).

INTRODUCTION

Jean-Michel Ostermann

L'évaluation des risques auxquels sont soumis nos fédérés est une pratique discrète mais constante qui permet, depuis l'existence de la commission médicale FFS, d'établir un certain nombre d'observations visant directement à améliorer pratique et sécurité : syndrome épuisement-hypothermie, pathologie du harnais, intoxications aux gaz, pathologies infectieuses diverses (histoplasmoses, leptospirose, rage, SARS,...), mortalité cardio-vasculaire, etc. Ces travaux se font souvent à l'aide d'outils précieux gérés par d'autres commissions fédérales (analyses du Spéléo-secours Français, de la commission assurance, rapports d'expédition, ...).

En ce qui concerne le radon, nous avons pris connaissance du risque en analysant systématiquement les publications médicales internationales concernant, de près ou de loin, les cavernes.

Mais il nous manquait, pour évaluer ce risque chez nous, à la fois les valeurs possibles d'exposition, puis l'incidence possible d'une exposition à ces valeurs.

L'évaluation d'un risque obéit généralement à une stratégie bien établie par les épidémiologistes : une étude comparative de morbidité et mortalité de deux populations, une exposée à ce risque et l'autre non, permet de quantifier l'incidence du phénomène nocif étudié.

Pour le cas du radon dans le karst Français, la propos n'était malheureusement pas aussi simple : l'étude détaillée des différents travaux menés dans la population générale sur ce thème révèle que de nombreux biais existent : toxicité concomitante du tabac, variation des susceptibilités individuelles, extrapolation hasardeuse des faibles expositions prolongées aux valeurs plus fortes mais courtes,...etc.; les effets du radon ne s'évaluant par ailleurs qu'après plusieurs années d'exposition, cette stratégie n'était pas réalisable pour la population qui nous intéresse.

Il était donc nécessaire de connaître en premier lieu les valeurs auxquelles pouvaient être exposés les spéléologues Français, et les travaux publiés ne permettent d'en avoir la moindre idée...

La première étape consista donc à établir une stratégie de travail pour atteindre notre but, et à trouver les fonds nécessaires, puis à programmer des travaux de recherche sur le terrain, qui ne furent possibles que grâce à la participation de spéléologues sensibles à l'aspect scientifique de notre activité, que je remercie pour leur précieux travail.

Le soutien du Ministère de la jeunesse, des sports et de la vie associative a également été très précieux dans cette initiative.

Au total, quatre années furent nécessaires, à partir du jour où nous décidâmes ce travail, pour aboutir au présent rapport.

Nous soumettons donc ici nos observations à la communauté spéléologique, en ayant conscience que bien des questions restent encore à résoudre.

PLAN

Introduction	2
Plan	3

PRESENTATION DE L'ETUDE

1 Notions sur le radon.....	9
2 Le radon dans le karst.....	10
2.1 Origines du radon atmosphérique karstique	11
2.2 Variations du radon.....	13
3 Nocivité du radon en milieu karstique	16
3.1 Nocivité du radon	16
3.2 Les différentes unités et normes	17
3.2.1 Le working level month	17
3.2.2 Le Becquerel par mètre cube	17
3.2.3 Le Sievert	17
3.2.4 Normes d'exposition.....	17
3.3 Etudes de l'exposition en milieu karstique	18
3.3.1 Evaluation de l'exposition.....	19
3.3.2 Valeurs limite.....	19
4 Matériel et méthodes	20
4.1 Matériel	20
4.2 Méthode.....	22
4.2.1 Moyens humains.....	22
4.2.2 Choix des cavités	22
4.2.3 Choix des stations	22
4.2.4 Périodicité des relevés.....	22
4.2.5 Résultats.....	22
5 Bibliographie.....	23

ETUDE PRELIMINAIRE

1 Ruisseau souterrain de La Pépie	29
1.1. Contexte géomorphologique	29
1.2 Description de la cavité	30
1.3 Climatologie	30
1.4 Localisation des stations.....	31
1.5 Résultats.....	31
2 Grotte de Font de Gaume	32
2.1 Contexte géomorphologique	32
2.2 Description de la cavité	33
2.3 Climatologie	33
2.4 Localisation des stations.....	34
2.5 Résultats.....	34
3 Grotte des Combarelles	34
3.1 Contexte géomorphologique	34
3.2 Description de la cavité	36
3.3 Climatologie	36
3.4 Localisation des stations.....	36
3.5. Résultats.....	36

4 Conclusion	37
5 Bibliographie.....	37

ETUDES REGIONALES

Carte de localisation des sites d'étude	40
---	----

Étude de radioactivité radon dans deux cavités du Finistère. C. Marget

1 Grotte de Poul Lomic (Plogoff)	41
1.1 Contexte géomorphologique	41
1.2 Description de la cavité	41
1.2 Climatologie	41
1.3 Localisation des stations	42
1.4 Résultats.....	43
2 Grotte de Vengleuz Coz (Plougastel-Daoulas)	43
2.1 Contexte géomorphologique	43
2.2 Description de la cavité	43
2.3 Climatologie	45
2.4 Localisation des stations	45
2.5 Résultats.....	45
3 Analyse des résultats.....	46
3.1 Le cas extrême de Toul Lomic	46
3.2 Homogénéité à Vengleuz-Coz	47
3.3 Le facteur saisonnier.....	48
4 Synthèse.....	49

Le radon atmosphérique de deux cavités du Barrois : le Rupt du Puits, et la grotte de Savonnière (Meuse). A. Devos, C. Herbillon, J.M. Ostermann.....

1 Contexte général.....	51
2 Teneurs en radon du Rupt du Puits	52
2.1 Description sommaire	52
2.2 Localisation des stations.....	53
2.3 Résultats et interprétation	53
3 Teneurs en radon des carrières souterraines de Savonnières-en-Perthois.....	55
3.1 Description sommaire	55
3.2 Localisation des stations.....	55
3.3 Résultats et interprétation	56
4 Bibliographie.....	57

Teneurs en radon atmosphérique de deux cavités karstiques proches du socle: ruisseau souterrain de La Pépie et grotte des Borderies (Dordogne). J.M. Ostermann

1 Le radon atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie (Saint-Front sur Nizonne, Dordogne)	59
1.1 Contexte géomorphologique	59
1.2 Description de la cavité	61
1.3 Climatologie	61
1.4 Localisation des stations.....	62
1.5 Résultats.....	63
1.6 Discussion	64
1.6.1 Valeurs observées	64

1.6.2 Variations des valeurs	64
1.6.3 CO ² et radon	65
1.7 Conclusions	67
2 Le radon atmosphérique de la grotte des Borderies (Hautefort, Dordogne)	68
2.1 Contexte géomorphologique	68
2.2 Description de la cavité	69
2.3 Climatologie	70
2.4 Localisation des stations	70
2.5 Résultats	71
3 Bibliographie	71

Le radon atmosphérique d'une cavité volcanique, le Creux de Soucy, Besse (Puy-de-Dôme) M. Bouthors, J.M. Ostermann	73
1 Contexte géomorphologique et description de la cavité	73
2 Climatologie	74
3 Localisation des stations	74
4 Résultats des mesures et interprétation	76
5 Références	77

Etude de concentrations en radon dans la grotte de Capbis (Commune d'Asson. Pyrénées-Atlantiques). J. Bauer	79
1 Contexte géomorphologique	79
2 Description de la cavité	79
3 Climatologie	79
4 Localisation des stations	79
5 Résultats	80
6 Interprétation	80

Etude de concentrations en radon dans deux grottes du massif des Arbailles (Pyrénées-Atlantiques). J. Bauer	83
1 Le gouffre OX 655	83
1.1 Contexte géomorphologique	83
1.2 Description de la cavité	83
1.3 Climatologie	83
1.4 Localisation des stations	83
1.5 Résultats	83
1.6 Interprétation	84
2 L'Aven du Tonneau	84
2.1 Contexte géomorphologique	84
2.2 Description de la cavité	84
2.3 Climatologie	84
2.4 Localisation des stations	84
2.5 Résultats	84
2.6 Interprétation	84

Etudes sur la radioactivité dans les cavités du Languedoc oriental (Cévennes et Garrigues). M. Wienin	85
1 La grotte de Trabuc	85
1.1 Description sommaire	85
1.2 Géologie	86
1.3 Aérologie	87

1.4 Mesures effectuées	87
1.4.1 Dosimètres radon	87
1.4.2 Mesures au compteur Geiger.....	87
1.5 Remarques	89
1.5.1 Radioactivité de l'environnement rocheux	89
1.5.2 Radioactivité atmosphérique.....	89
2 La grotte de Soustelle	90
2.1 Description sommaire	90
2.2 Géologie.....	91
2.3 Aérologie	91
2.4 Mesures effectuées	91
3 Grotte du Barrage	93
3.1 Description sommaire	93
3.2 Géologie	93
3.3 Aérologie	93
3.4 Résultats.....	94
4 La grotte / aven de Malaval	96
4.1 Description sommaire	96
4.2 Géologie	96
4.3 Aérologie	96
4.4 Résultats.....	96
5 Conclusions.....	100
5.1 Origine de la radioactivité endokarstique	100
5.2 Radioactivité atmosphérique.....	102

Rapport sur quelques mesures de concentration en radon dans deux grottes du Vercors :

Cuves de Sassenage et grotte Favot. B. Lismonde	103
1 Les Cuves de Sassenage.....	103
1.1 Présentation de la cavité	103
1.2 Le choix des sites de mesure.....	105
1.3 Les mesures et leur interprétation.....	105
1.4 Interprétation des fortes valeurs.....	107
1.5 Interprétation des variations suivant le site	108
1.6 Peut-on interpréter les variations temporelles ?.....	109
2 La grotte Favot.....	110
2.1 Présentation de la cavité.....	110
2.2 Les mesures et leur interprétation	112
3 Conclusions.....	114
4 Bibliographie sommaire	114

Le radon atmosphérique de la grotte de St Marcel d'Ardèche. M. Faverjon.....	115
1 Contexte géomorphologique	115
2 Description de la cavité	116
3 Climatologie	117
4 Localisation des stations.....	118
5 Résultats.....	120
5.1 Mesures ponctuelles au scintillomètre et au radiamètre	120
5.2 Mesures de radon	120
5.3 Mesures de CO ²	121
6 Interprétations	121

6.1 Mesures ponctuelles d'activité.....	121
6.2 Mesures de radon	122
6.3 Mesures de CO ²	122
7 Conclusions	123
8 Remerciements	123

Données sur le radon de deux réseaux du Languedoc-Roussillon, Grotte du TM 71, et Système Fanges – Paradet. B. Ournié

1 Introduction.....	125
2 Contextes et caractéristiques des réseaux étudiés.....	125
2.1 Contexte régional.....	125
2.2 La Grotte du TM71	126
2.3 Le système Fanges – Paradet	127
2.3.1 L'Antre.....	127
2.3.2 Le réseau Fanges-Paradet	128
3 Les objectifs et les moyens	130
4 Localisations des dosimètres et mesures	130
5 Les données	131
5.1 Grotte du TM 71.....	131
5.2 Système Fanges-Paradet.....	132
5.3 Discussions	132
5.4 Variations temporelles et spatiales.....	133
5.4.1 La Grotte du TM71	133
5.4.2 Le Système Fanges-Paradet	133
5.4.3 Comparaison TM 71 et Système Fanges-Paradet.....	134
6 Conclusions.....	135
7 Bibliographie.....	135

Mesures de radon dans le Trou Souffleur de Saint Christol d'Albion (Vaucluse).

M. Faverjon	137
1 Contexte géologique et géomorphologique	137
2 Description de la cavité	137
3 Climatologie	139
4 Localisation des stations.....	139
5 Résultats.....	140
6 Interprétation.....	140
7 Remerciements	141
8 Bibliographie.....	141

CONCLUSIONS DE L'ETUDE

1 Analyse de la méthodologie.....	143
2 Teneurs en radon des cavités Françaises	143
2.1 Cavités karstiques à fortes teneurs	143
2.2 Cavités volcaniques (Creux de Soucy).....	145
2.3 Cavités granitiques (Poul Lomic)	145
3 Apports de l'étude et perspectives de recherche	145
3.1 Variations saisonnières du radon	145
3.2 Cavités profondes	146
3.3 Influence de la tectonique	146

3.4 Radon et eau.....	146
3.5 Radon et CO ²	147
4 Valeurs admissibles	147
4.1 Personnel travaillant dans les grottes	148
4.2 Spéléologues professionnels	148
4.3 Spéléologie de loisir.....	148
5 Prévention de la surexposition au radon en spéléologie	151
5.1 Poursuite des études sur le radon	151
5.2 Information	151
5.3 Prévention	152
6 Conclusions.....	152
7 Bibliographie.....	152
8 Remerciements	153

ANNEXES

Coordonnées des auteurs	157
Fiches techniques dosimètres	158
Glossaire	159
Eléments de bibliographie sur le radon et la radioactivité dans le karst.....	161

Présentation de l'étude

Jean-Michel Ostermann

Dans le cadre de l'évaluation des risques auxquels sont exposés les spéléologues, nous nous sommes posés la question de savoir à quelle dose de radioactivité les spéléologues Français pouvaient être exposés dans les grottes et gouffres du pays.

On sait en effet que le karst peut recéler des quantités non négligeables de radon, rendant même certaines cavités dangereuses en cas d'exposition prolongée.

Pour ce qui concerne le karst français, les publications sont malheureusement très rares, et une revue bibliographique approfondie nous força à constater qu'il n'était pas possible d'avoir une idée, ne serait-ce qu'approximative, de l'exposition à laquelle étaient soumis nos pratiquants.

La Commission médicale de la Fédération française de spéléologie engagea donc la présente étude, avec le soutien de nombreux partenaires.

Au préalable, nous effectuons une revue de littérature concernant la problématique du radon dans le karst, en abordant sommairement l'historique de son étude, ses origines et sa répartition, puis la question de la nocivité de ce gaz.

Suivent une étude préliminaire qui permet d'établir un protocole d'étude, puis le début d'une série d'observations réalisées dans plusieurs régions karstiques du pays. Des cavités non karstiques ont été incluses dans l'étude.

Nous présenterons enfin la synthèse des différentes études régionales, et quelques conseils destinés à éviter les expositions élevées en spéléologie.

1 Notions sur le radon

Le radon est un gaz radioactif produit dans le sol et sous-sol par désintégration du radium, provenant lui-même de la désintégration nucléaire de l'uranium et du thorium : trois radionucléides, l'uranium 235, le thorium 232 et l'uranium 238 conduisent par décroissances radioactives successives à une dizaine de radionucléides, puis à un isotope stable du plomb.

Ces produits se retrouvent dans de nombreuses roches dans des proportions variables, généralement très faibles.

Les principaux isotopes du radon sont le radon 219, le radon 220 et le radon 222 parmi les 27 connus (figure 1). Le radon se désintègre à son tour, avec émission de particules α ou β . La demi vie des deux premiers est de quelques secondes, alors que celle du Rn 222 est de près de quatre jours, ce qui explique sa prépondérance. Ces particules α ont été rendues responsables de la survenue de cancer du poumon chez l'homme, comme nous le verrons plus loin.

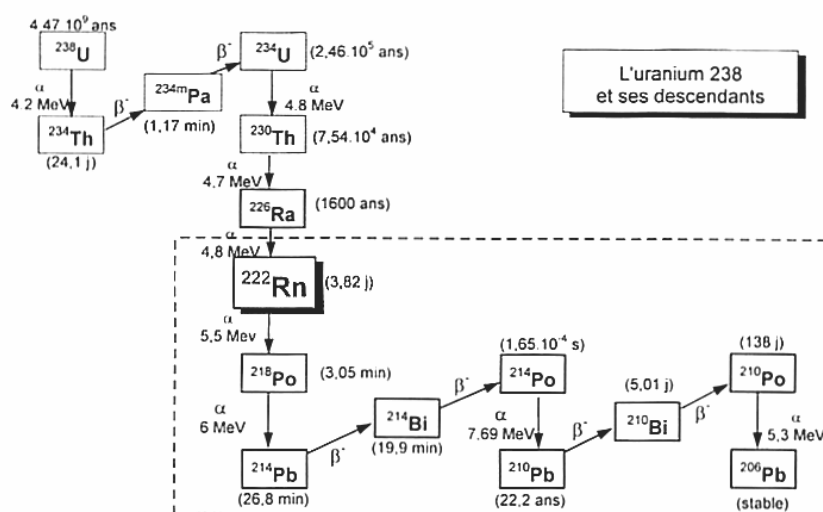


Figure 1 : Famille radioactive de l'uranium 238

Appartenant à la série des « gaz rares », le radon est un gaz chimiquement inactif dans les conditions environnementales habituelles, inodore et incolore, donc physiologiquement indétectable. C'est un gaz lourd, avec une densité de 7,5 fois celle de l'air. Le radon 222 est le plus abondant, et sera retenu pour la suite du texte. Sa période de demi-vie est de 3,8 jours, et il est soluble dans l'eau ($0,23 \text{ m}^3$ par m^3 d'eau à 20°C).

Le phénomène d'exhalation correspond à l'émanation du radon (l'atome de radon s'extrait du matériau dans lequel il est formé) puis à son transport. Une fois dans l'atmosphère, la dispersion du gaz se fait par l'air et par l'eau.

Dans l'air, cette dispersion dépend des conditions atmosphériques. La quantité décroît bien sûr en s'éloignant du sol. Il existe également des variations diurnes, avec une diminution de la diffusion atmosphérique nocturne par inversion des températures.

Malgré une demi-vie courte, le radon peut se retrouver parfois à des milliers de km de sa source, en raison de sa mobilisation par l'atmosphère ou l'hydrosphère, ce qui en fait un traceur naturel de ces fluides (SABROUX, 1998). Il est ainsi utilisé en hydrologie, géologie, géophysique, ... Cependant, la diffusion du gaz est généralement assez faible.

2 Le radon dans le karst*

Dès 1907, soit peu de temps après la découverte du radium, BERGET écrivait : « ... des faits déjà plus anciens avaient montré que l'air des caves et des grottes contient une forte

* Chapitre rédigé avec l'aide de M. WIENIN.

proportion d'émanation par rapport à l'air de la surface du sol environnant.» (Cité par METIVIER, 1998). Le radon n'était en effet pas encore connu, et les propriétés radioactives de l'air au contact du radium étaient nommées « émanations ». MARTEL (1911) n'y consacre que quelques lignes dans son « Evolution souterraine », rapportant que les « *recherches ont établi l'existence d'une certaine radioactivité propre au sol lui-même, mais n'ont pas réussi à séparer ni isoler cet agent actif* ».

En France, TROMBE (1952) mentionne la présence de gaz rares qui « *transportent leur radioactivité dans les argiles* ».

Les premières études du radon dans les cavités naturelles semblent débiter dans les années 1970, et se multiplient de manière exponentielle par la suite.

On peut citer en particulier le Royaume Uni, où des teneurs « record » de 20 kBq. m⁻³ ont parfois été constatées (HYLAND, 1995), l'Italie (CIGNA et al, 1981), les USA (EHEMAN et al, 1991), la Hongrie (SZERBIN, 1996), l'Australie (SOLOMON et al, 1996), l'Afrique du Sud (GAMBLE, 1981), le Venezuela (SAJO-BOHUS L. et al. 1995), le Mexique (BOSAU et al, 1993), etc.

Pour la France, alors que les travaux concernant les habitations et certains lieux publics sont maintenant réalisés de manière extensive, il apparaît que les études dans les cavités ont jusqu'à présent été très confidentielles. On peut mentionner cependant les travaux de CIEUR et Al., (1988) qui présentent une modélisation du radon 222 en continu dans le laboratoire souterrain de Moulis, ceux de MONNIN et Al. (1994) étudiant le radon dans les aquifères karstiques fissurés, et les quelques observations de SAUMANDE (1993) sur les grottes du Périgord. Des mesures ont été réalisées également dans la grotte de Clamouse (CHOPPY, comm. pers.), et dans la grotte de l'Aguzou (OURNIE, comm. pers.), dans l'aven d'Ornac et la grotte Chauvet (BOURGES et al, 2003) et certaines cavités de l'Hérault (NOIRIEL, comm. pers.). Par ailleurs, certaines dispositions réglementaires récentes concernant les grottes accueillant le public ont incité plusieurs équipes à effectuer des mesures en cavité (MANGIN, comm. pers.).

HAKL et al., (1997) ont réalisé une revue de littérature sur la question du radon dans le karst, et constatent que la radioactivité due à ce gaz s'étale de 0.1 à 20 kBq m⁻³, avec une moyenne arithmétique de 2.8 kBq m⁻³.

La détermination des origines du radon dans l'atmosphère d'un karst nécessite d'intégrer de nombreux paramètres, allant de la source originelle du radium aux processus d'exhalation et de diffusion, ce qui détermine la difficulté du propos.

2.1 Origines du radon atmosphérique karstique

Les roches carbonatées contiennent généralement peu de matières radioactives, donc produisent peu de radon. Dans les granites, la quantité moyenne d'uranium serait de 4.8 ppm, alors qu'elle n'est que de 2.0 ppm dans les calcaires. Cependant, les teneurs en uranium et thorium de certains calcaires peuvent être importantes,

comme c'est le cas pour les couches permo-carbonifère de certains karsts du Royaume Uni (Mendip Hills), (GILLMORE et al, 2000). A noter que les roches basaltiques en contiennent encore moins, puisqu'il est fait mention de 0.6 ppm. La radioactivité de l'air des cavités naturelles non karstiques a cependant semble-t-il très peu été étudiée.

Dans les calcaires, la sédimentation synchrone de l'uranium peut avoir deux modalités indépendantes :

- 1) Par transfert mécanique : des particules fines provenant du socle schisto-granitique ont été transportées jusqu'au lieu de dépôt et ont sédimenté par décantation. Il peut s'agir de matériaux seulement broyés (sable) ou au contraire altérés : argiles qui proviennent de l'hydratation des micas et des feldspaths. Plus un calcaire contient de sable (calcaire gréseux) et surtout d'argile (calcaire marneux, marne...) plus il contiendra d'uranium. Certains interlits marneux sont parfois plus de 20 fois plus radioactifs que le calcaire environnant et peuvent en venir à constituer de véritables niveaux repaires (la limite Hettangien-Sinémurien dans les Cévennes, par exemple).
- 2) Par transfert chimique : l'uranium, assez soluble en milieu oxydant, précipite en arrivant dans une zone réductrice : mer ou lac assez profond et riche en matière organique. Les calcaires et marnes gris (couleur due à de fines particules de charbon) contiennent toujours quelques ppm d'uranium tandis ceux blancs ou dorés, formés en milieu peu profond oxydant n'en contiennent en général pratiquement pas (< 1 ppm).

Dans certains lacs, l'association des deux phénomènes a conduit à des concentrations importantes (> 20 ppm), parfois même exploitables. Il s'agit souvent d'argiles (ou de schistes) sableuses et bitumineuses (cf. supra).

Enfin, les karsts situés à proximité de certaines roches éruptives ou métamorphiques peuvent voir leurs teneurs en radon anormalement élevées : ce pourrait être le cas d'une perte située à la jonction des deux types de roche, ou par exemple d'un karst de faible puissance sus jacent à une roche produisant le gaz, mais on se rapproche ici de l'origine profonde abordée plus loin.

Les remplissages allochtones, en particulier d'origine magmatique, jouent par contre un rôle majeur dans la présence de radon dans les cavités karstiques. Comme nous le verrons dans plusieurs de nos études, le rôle de piège joué par le karst favorise en effet le recueil d'éléments de couverture et sédiments divers issus de l'érosion de surface, l'intrusion se réalisant à l'aide des eaux météoriques et/ou de manière gravitationnelle. On retrouve ces alluvions dans les fissures, mais également dans les banquettes d'alluvions formées par les ruisseaux souterrains.

Dans certains cas, on peut penser que certaines concrétions agissent comme un piège à éléments radioactifs : dans la grotte de Malaval (Lozère), une campagne de mesures au scintillomètre a en effet mis en évidence des anomalies positives au

niveau de certaines coulées aragonitiques (WIENIN, dans ce volume), avec des valeurs atteignant 250 c/s¹.

Par ailleurs, il est bien établi que les zones tectoniquement actives favorisent le transfert du radon à partir de zones profondes. Cette propriété est d'ailleurs utilisée pour la prévision des séismes, ou la détection de fractures par exemple au niveau d'un karst (BAUBRON et al, 2002). La fracturation joue par conséquent un rôle non négligeable, à fortiori si les calcaires se situent au dessus de roches enrichies en uranium. On est donc ici dans le cas d'une source située à distance, mais avec apport de radon assuré par transport du gaz qui est entraîné par les fluides terrestres.

Enfin, les capacités de dissolution du radon 222 dans l'eau sont utilisées également pour rechercher l'exutoire de nappes souterraines dans le lit de rivières, par estimation des teneurs différentielles (SABROUX, 1998). L'eau peut ainsi contenir des teneurs variables en fonction de la lithologie de l'aquifère, mais allant jusqu'à 500 000 Bq.m⁻³ pour les nappes situées dans les granites (tableau 1).

Lithologie de l'aquifère	Rn 222 dans l'eau (Bq.m ⁻³)
Granites	500 000
Roches métamorphiques	150 000
Basaltes	15 000
Sables	10 000
calcaires	1 000

Tableau 1 : Concentration en radon 222 des eaux souterraines (d'après SABROUX, 1998)

Si les eaux météoriques n'apportent pas directement de radon dans le karst, elles peuvent après contact avec des roches ou des remplissages riches en radium représenter un moyen efficace d'enrichissement de l'air des cavités.

Les eaux thermales constituent quant à elles une source évidente de radon, parfois même exploitée en tant que radiovaporarium, thérapeutique très prisée dans les pays d'Europe orientale. De nombreux travaux ont d'ailleurs eu lieu dans ces cavités parfois karstiques exploitées commercialement, afin d'estimer l'importance de l'irradiation du personnel et des patients (SZERBIN, 1996). On peut rapprocher cela des apports profonds.

2.3 Variations

Si la production du radon peut être considérée comme constante, il existe cependant des variations d'apport notamment au niveau du karst, qui dépendent de plusieurs facteurs essentiellement climatologiques. Les inversions thermiques

¹ c/s = coups par seconde, chaque coup correspondant à une désintégration élémentaire

diminuent en effet fortement la diffusion atmosphérique du gaz (PELLEGRINI et al, 1998). A l'extérieur, les conditions météorologiques déterminent donc ces variations que l'on retrouve de l'échelle nycthémérale à l'échelle saisonnière.

Dans les habitations, les variations de teneurs dépendent essentiellement de la ventilation. Comme elle est moindre en hiver, on trouve alors des valeurs plus élevées à cette saison.

On observe exactement l'inverse dans le karst : en hiver, il y a un renouvellement plus important de l'air de la plupart des cavités, quasiment toutes les publications s'accordent sur ce point.

Les nombreuses observations sont donc concordantes sur l'existence de plus fortes teneurs en saison chaude, alors que la ventilation des cavités est diminuée (figure 2).

On retrouve d'ailleurs la même notion pour le gaz carbonique.

Reste cependant à compléter les mesures par l'étude des parties hautes de systèmes karstiques, qui pourraient montrer une relation inverse. La plupart des cavités étudiées sont en effet des cavités à développement horizontal ou sub-horizontal.

Par ailleurs, les variations au cours du nycthémère peuvent également être non négligeables, et s'expliquent également par les variations climatologiques externes (températures et pressions).

A noter enfin que les précipitations peuvent augmenter la diffusion du gaz dans les cavités, tant par le phénomène de dissolution que par la diminution de ventilation qu'entraîne l'imprégnation des sols en surface.

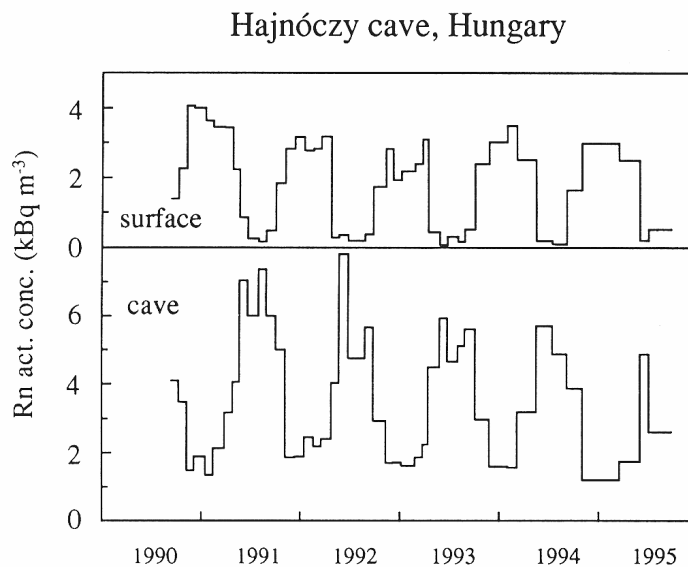


Fig 2 : variations annuelles des teneurs en Radon dans la grotte de Hajnoczy (Hongrie) d'après HLAKL et al.

Les courbes de la figure 2 sont caractéristiques d'un apport de radon par exhalation, d'une aérodynamique d'origine thermique et, pour la partie grotte, de la partie inférieure d'un tube à vent.

En surface, le radon est émis dans les horizons riches en éléments lithiques (horizons B ou C) du sol, voire au-dessous. En hiver, l'air du sol, plus chaud qu'à

l'extérieur, s'exhale et le radon avec lui, en été, la différence de pression joue en sens inverse et les pluies abondantes en climat continental entraînent le radon produit en profondeur.

Dans la grotte, le phénomène ci-dessus ne joue que faiblement à cause de la lenteur des infiltrations et de la solubilité du radon quand elles sont plus rapides. La plus grande partie de l'exhalation provient des parois (roche ou remplissage). En hiver, le tube fonctionne en cheminée (courant ascendant) et l'air a peu séjourné sous terre, il est pauvre en radon. En été, le courant est descendant et récupère pendant son trajet une charge de Radon plus importante. En saison intermédiaire, on a davantage d'alternances et l'air peut faire un aller-retour, peut-être même plusieurs et s'enrichir davantage en Radon, d'où les deux maxima de printemps et automne bien visibles.

Le schéma de GILLMORE et al. exprime bien la complexité des facteurs en jeu dans la concentration en radon du karst :

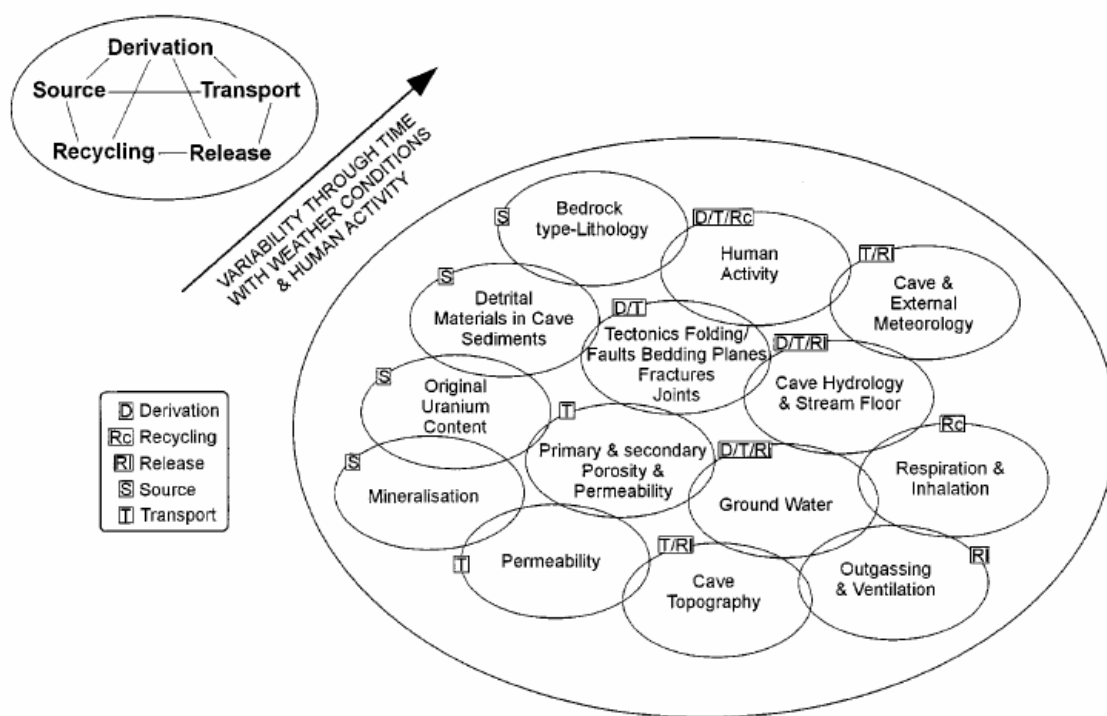


Figure 3 : Facteurs influençant les teneurs en radon dans le karst (GILLMORE, 2000)

A partir des sources du radon (parties gauche du schéma), ce gaz est transporté dans le karst, puis relâché en fonction de plusieurs facteurs (météorologie extérieure, topographie de la cavité, régime hydrologique). Certains facteurs peuvent entraîner une dérivation du gaz qui va alors s'échapper du karst. Le « recyclage » apparaît plus anecdotique sur le plan quantitatif.

3 Nocivité du radon en milieu karstique

L'inhalation du radon atmosphérique et de ses descendants représente la principale voie d'exposition à ce gaz, et la principale source d'irradiation naturelle. Les études épidémiologiques menées à partir des observations sur les mineurs d'uranium, et les études animales, ont formellement prouvé l'implication du radon dans la genèse de cancers pulmonaires. Le risque lors d'exposition en spéléologie dépend de l'intensité (qui peut être ici élevée) et de la durée d'exposition (généralement très faible).

3.1 Nocivité du radon

Dès 1924, les mesures effectuées par Ludewig et Lorenser dans les mines de Saxe et de Bohême établirent une corrélation étroite entre la présence du radon et la fréquence du cancer pulmonaire chez les mineurs (MASSE, 2003). Dès lors, une cohorte d'études permit d'établir la nocivité du gaz dans ce contexte professionnel, et de mettre en place des mesures de prévention pour les travailleurs exposés. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) reconnaît le radon comme cancérigène pulmonaire en 1987 (TIRMARCHE, 1998).

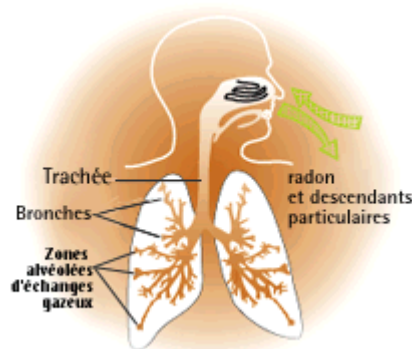
Lors de l'inhalation du radon et de ses descendants (la période de ^{222}Rn fait que celui contribue le plus à l'exposition), seule une petite partie est absorbée par l'organisme, le reste étant expiré. L'émission de particules alpha lors des désintégrations peut cependant endommager l'ADN des cellules des parois des voies respiratoires, et induire un cancer. Le nombre de cancers pulmonaires induits par ce gaz serait de 6 à 15%. Mais il est évident que le tabac est loin devant, et que son effet potentialise celui du radon.

Selon une récente analyse regroupant les principales études européennes, le risque de cancer pulmonaire augmente de 16% par tranche de 100 Bq/m^3 , et la relation dose-effet semble être linéaire (OMS, 2005). L'extrapolation de la toxicité à de fortes expositions sur courte durée à des faibles expositions sur des durées prolongées est cependant toujours sujette à discussion.

Le radon peut également contaminer l'homme par l'intermédiaire des eaux de boissons, lesquelles peuvent contenir jusqu'à 100 Bq/l .

Les calculs de doses absorbées indiquent cependant que le risque serait faible, mais plusieurs études n'ont pas encore livré leurs conclusions.

Par ailleurs, il faut mentionner l'effet bénéfique recherché lors d'expositions de courtes durée, telle qu'elle est pratiquée dans certains centres de crénothérapie, la station européenne la plus célèbre étant celle de Badgastein en Autriche. Plusieurs



travaux attribuent au radon des effets analgésiques, anti-inflammatoires ou immunostimulants, et l'efficacité dans le traitement de la polyarthrite rhumatoïde semble avoir été prouvée (FRANKE et Al., 2000). Il s'agit là cependant d'expositions à des doses élevées, mais de très courte durée.

3.2 Les différentes unités et normes

Il nous a paru utile de détailler les différentes unités employées lorsque l'on aborde la problématique du risque radon. On a en effet la possibilité d'établir des normes d'ambiance, avec des valeurs seuil généralement exprimée en Bq.m⁻³, mais aussi l'exposition directe des personnes, avec l'évaluation de doses absorbées

3.2.1 Le working level month (WLM)

Le WL est équivalent à une énergie de $1.3 \cdot 10^5$ MeV par litre d'air.

Unité historique, le WLM correspond à une exposition pendant 172 heures dans une atmosphère où la concentration en énergie α potentielle des descendants du radon est de 1 WL, soit de 3700 Bq. m⁻³.

3.2.2 Le Becquerel par mètre cube (Bq/m³).

1 Bq correspond à une désintégration par seconde. Le Bq/m³ est l'unité de mesure de concentration du radon dans l'air

3.2.3 Le Sievert (Sv)

Le Sievert (ou le rem) correspond à une mesure de l'irradiation, à la dose de radioactivité absorbée mais il tient compte du pouvoir ionisant du rayonnement électromagnétique ou corpusculaire. En effet, les particules α (hélium) présentent un pouvoir ionisant supérieur au rayonnement β (électrons) et au rayonnement γ . La dose absorbée est donc multipliée par un facteur de pondération pour aboutir à la notion de dose équivalente. Dans la mesure où les doses absorbées sont très petites, on utilise généralement le milliSievert (mSv).

3.2.4 Normes d'exposition

Dans certaines régions notamment granitiques, les pouvoirs publics de nombreux pays entreprirent l'étude de l'exposition des populations, tant au niveau domestique que professionnel. L'Union Européenne recommande depuis (directive 96/29 Euratom du 13 mai 1993) la mise en œuvre d'actions correctives lorsque la concentration moyenne annuelle en radon dans un bâtiment dépasse 400 Bq/m³. En outre, elle recommande que les bâtiments neufs soient conçus afin que cette concentration moyenne annuelle n'excède pas 200 Bq/m³.

En France, le propriétaire d'un lieu ouvert au public pour des séjours prolongés (établissement scolaire, sanitaire et social, thermal ou pénitentiaire) situé dans l'un des 31 départements prioritaires (moyenne des concentrations supérieures à 100 Bq/m³), est incité à mettre en œuvre des actions correctives si le niveau de l'activité volumique de radon dépasse 400 Bq/m³ en valeur moyenne annuelle. Ces mesures

deviennent impératives à partir de 1000 Bq/m^3 , conformément à la circulaire conjointe de la Direction générale de la Santé et de la Direction générale de l'urbanisme et de l'habitat n° 946 du 27 janvier 1999. Certains établissements publics furent ainsi temporairement fermés pour cause de teneurs élevées (cas par exemple de l'école de Bessine sur Gartempe, en Haute Vienne).

Précisons cependant que ces valeurs, qui paraîtront faibles par rapport à celles que nous avons relevées dans le karst, concernent une exposition dans les lieux de vie ou de travail habituels, avec donc une exposition prolongée et continue (la durée d'exposition professionnelle de référence est évaluée à 2000 heures par an).

Une évaluation plus précise de l'exposition au radon consiste à estimer les doses absorbées, ce qui a amené les législateurs à utiliser des normes en WLM (notamment dans les pays anglo-saxons), et en mSv.

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, sans que ces valeurs n'excèdent 50 mSv en une année.

Une directive européenne (Directive 96-29 partiellement transposée dans le code de la santé) s'intéresse plus généralement aux expositions aux rayonnements ionisants. Cette directive impose de contenir, pour le public et les travailleurs non exposés, l'exposition rajoutée par une activité donnée en deçà de 1 mSv/an . Cette limite passe à 5 et 20 mSv/an respectivement pour les travailleurs faiblement exposés ou exposés de l'industrie nucléaire, avec obligation de contrôles médicaux appropriés.

3.3 Etudes de l'exposition en milieu karstique

Les études d'exposition en milieu karstique sont désormais assez nombreuses dans la littérature (cf. bibliographie), bien qu'absentes semble-t-il pour notre pays. Elles concernent essentiellement un contexte professionnel.

La plupart font cependant référence à des valeurs seuil différentes : on a très souvent une évaluation globale de l'« ambiance » radioactive, telle que nous l'avons réalisé dans nos études régionales. Lorsqu'il s'agit d'étudier l'exposition du personnel travaillant dans des cavités, les normes appliquées dans tout établissement peuvent être utilisées, en tenant compte pour être précis de la durée de travail effective (nous sommes loin des 2000 h par an). Il faudrait donc ici introduire un facteur de pondération en fonction de cette durée d'exposition, ce qui ne semble pas être dans les projets de la nouvelle réglementation qui prévoit de ne pas dépasser 400 Bq. m^{-3} , ce qui devrait conduire à la fermeture de quasiment toutes les cavités aménagées...

3.3.1 Evaluation de l'exposition

Il est bien évident que l'évaluation la plus précise de l'exposition au radon se fait à l'aide de dosimètres individuels, ce qui est difficilement réalisable pour la spéléologie de loisir.

Une approche « utile » des valeurs seuil peut cependant être réalisée à partir des valeurs de radioactivité ambiante, mesurées en Bq. m⁻³, à partir de la formule suivante, inspirée de celle utilisée par PONCELA et Al. (2004):

$$E = 7,78 \times 10^{-6} \times F \times T \times C$$

où E est l'exposition en mSv,
F le facteur d'équilibre*,
T la durée d'exposition (en heures),
et C la concentration en radon (en Bq. m⁻³).

Si T et C sont aisément mesurables, il n'en est pas de même pour le facteur d'équilibre qui nécessite, pour être déterminé, du matériel très coûteux et fragile.

Le facteur d'équilibre est un facteur de pondération dans l'évaluation des expositions : en effet, les descendants à vie courte du radon 222 sont des particules solides qui se déposent en partie sur les parois ou sont éliminés par la ventilation. L'état d'équilibre n'est jamais atteint. Ils ne contribuent pas tous à l'exposition et ne sont pas tous mesurables. Aussi pour qualifier cet état de déséquilibre, on utilise le facteur F qui est le rapport entre l'énergie alpha potentielle d'un mélange de descendants du radon et l'énergie alpha potentielle relative au mélange s'il était en équilibre avec le radon (PIRARD et Al, 1998).

Pour le milieu karstique, CIGNA (2005) a effectué la compilation des valeurs du facteur d'équilibre à partir des données de la littérature (soit environ 880 mesures du facteur d'équilibre), et propose une moyenne de 0.57 utilisable lorsque cette valeur n'est pas calculée pour une cavité donnée. On remarque cependant que ce facteur varie de 0.19 à 1.94 dans les exemples cités.

3.3.2 Valeurs limite

Pour l'activité spéléologique de loisir, il n'existe pas de valeurs limites préconisées ayant fait l'objet d'un consensus, ni même de discussion semble-t-il : CIGNA (2005) propose, pour le personnel des grottes et les spéléologues, des valeurs d'exposition identiques à celles préconisées pour les travailleurs de l'industrie, soit 20 mSv par an. Il prend en compte cependant les valeurs limites de 3 et 5 mSv par an, et détermine ainsi un graphique permettant d'évaluer la durée maximale de séjour dans une cavité, en fonction des différents paramètres évoqués (voir figure 5). Signalons cependant que l'absorption d'une dose de 20 mSv nécessite théoriquement un suivi médical adapté.

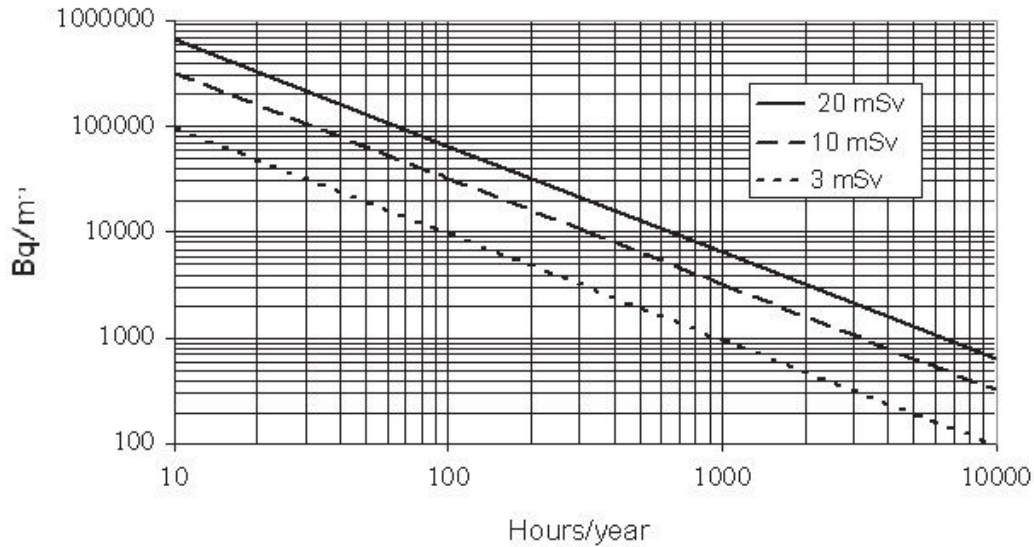


Figure 5 : Durée maximale d'exposition au radon en fonction des valeurs de radioactivité ambiante, et de trois valeurs seuil : 3, 10 et 20 mSv (d'après CIGNA, 2005)

4 Matériel et méthode

4.1 Matériel

Il existe de nombreuses méthodes et instruments permettant d'évaluer l'activité volumique de l'air en radon et descendants dans une atmosphère donnée. On peut différencier trois méthodes en fonction des caractéristiques du prélèvement d'air (ROBE et al., 1998):

- Les mesures ponctuelles sont effectuées sur une très courte durée (généralement moins d'une minute), avec comptage ultérieur.
- Les mesures intégrées, qui peuvent se réaliser sur plusieurs semaines ou mois. Elles consistent en une intégration temporelle d'un nombre de traces de désintégration.
- Les mesures en continu, nécessitant un matériel sophistiqué qui permet d'obtenir les variations temporelles de l'activité volumique.

Les méthodes de mesure ponctuelles n'étant pas adaptées à l'objectif que nous nous étions fixés, notamment en raison des importantes variations des teneurs en radon dans le karst, et les mesures en continu n'étant réalisables que sur un nombre de sites très limité, nous avons opté pour des mesures intégrées. Des mesures ponctuelles complémentaires au scintillomètre portatif ont cependant été effectuées dans quelques cavités (Grotte de Saint Marcel, de Malaval et de Capbis), permettant de mieux situer certaines sources radioactives, mais on doit garder à l'esprit qu'il s'agit alors de mesures d'émissions gamma.

Parmi les différentes techniques de mesures intégrées que sont thermoluminescence, spectrométrie γ et détection solide de traces nucléaires, cette dernière a retenu notre attention en raison de sa facilité de mise en œuvre.

Sur le plan de l'évaluation des doses auxquelles est exposée une population donnée, on peut employer les dosimètres individuels. On obtient ainsi avec beaucoup plus de précision une idée de la dose absorbée par la personne qui le porte. Mais dans le cadre de l'objectif que nous nous étions fixés, cette méthode n'aurait pas permis d'avoir une idée aussi précise des quantités de radon dans le karst en France, et de leur variation saisonnière. Elle aurait par ailleurs nécessité un relevé précis d'activité des sujets étudiés, par toujours facile à obtenir. Quels que soient les résultats, il nous aurait été difficile de les exploiter pour proposer éventuellement aux spéléologues d'autres régions des mesures de limitation d'exposition.

Après étude des diverses possibilités matérielles mises à la disposition par l'industrie pour les mesures de radon, notre choix a donc porté sur les dosimètres alpha passifs modèle DPR1, puis DPR 2 de la société Algade. Il s'agit d'un film Kodak LR 115 T2 placé dans un boîtier en Polystyrène chargé en carbone, étanche, avec système de verrouillage, qui permet la mesure intégrée d'activité radon (fig. 6). Ce système fonctionne même en milieu saturé en humidité grâce à l'existence d'un filtre.

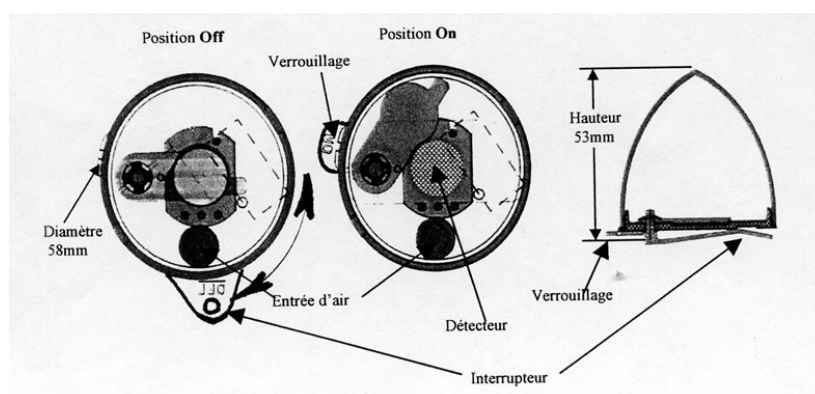


Figure 6 : Dosimètre DPR 2 de la société Algade

Après exposition, le matériel est adressé pour traitement au laboratoire. Le résultat de l'activité radon mesurée est donné en Bq.m^{-3} avec précision du domaine d'incertitude qui atteint 30 %. La durée d'exposition prévue à l'origine était de trois mois pour chaque dosimètre, mais des problèmes de planification ont dans les faits conduits à une exposition d'environ quatre mois lors de l'étude préliminaire.

Dans quelques cas, il a été possible de compléter les mesures intégrées par des mesures ponctuelles de radioactivité, effectuées au scintillomètre SPP2. Cet instrument permet de mesurer l'importance des émissions γ , chaque coup correspondant à une désintégration (les valeurs sont exprimées en coups/seconde).

4.2 Méthode

4.2.1 Moyens humains

L'étude n'aurait été possible sans la participation de spéléologues de terrain sensibilisés à ce type de recherche, connaissant bien les cavités, et facilitant l'accès à celles qui sont fermées ou aménagées. Chaque auteur de ce rapport a donc eu à coordonner localement les poses et déposes, la réception et l'envoi des dosimètres, et la rédaction de l'étude de la ou des cavités sous sa responsabilité.

4.2.2 Choix des cavités

Les cavités étudiées ont été choisies pour la plupart en fonction de leurs teneurs supposées élevées en radon, d'après les données de la littérature pour le karst : importance du remplissage, faible ventilation, proximité d'accidents tectoniques et/ou de roches uranifères, mais également de leur accessibilité, et d'une fréquentation faible ou encadrée afin d'éviter la perte des dosimètres, ou la perturbation trop importante de la climatologie de la cavité. Quelques cavités (y compris non karstiques) furent choisies pour l'étude à titre de comparaison.

4.2.3 Choix des stations

La mise en place des dosimètres eut lieu sur des stations précises durant un an, avec renouvellement des dosimètres tous les trois mois. Le choix des stations a été fait suivant des critères précis : accessibles, non ou peu visibles, préférentiellement dans des zones peu ventilées et/ou proche de remplissages. Chaque cavité, en fonction de son développement, aura de une à 5 stations.

4.2.4 Périodicité des relevés

Nous avons choisi une durée d'exposition de trois mois, permettant d'évaluer approximativement l'activité radon saisonnière. Par ailleurs, le nombre de dosimètres ainsi nécessaire était compatible avec nos nécessités budgétaires et la disponibilité des correspondants locaux. Nous nous sommes assurés que les dosimètres employés permettaient une utilisation excédant les deux mois préconisés pour les habitations et locaux publics, sans affecter la précision des mesures. Une date de pose synchrone était souhaitée afin de faciliter les interprétations interrégionales.

4.2.5 Résultats

Après dépose des dosimètres, ils ont été adressés au laboratoire Algade pour traitement, accompagnés d'une fiche signalétique indiquant date, heure et lieu de pose/dépose. Les résultats nous ont été régulièrement adressés dans un délai

approximatif de quinze à vingt jours, sous forme de tableau indiquant n° de dosimètre, date de réception et d'analyse, exposition mesurée (en kBq.m⁻³.h) pour chaque station, et un résultat final (activité volumique calculée en Bq.m⁻³) avec domaine d'incertitude.

5 Bibliographie

BOURGES F., MANGIN A., D'HULST D., 2003: Radon and CO² as markers of cave atmosphere dynamics: evidence and pitfalls in underground confinement analysis; application to cave conservation. Climate Changes: the Karst Record, III . Montpellier (FRANCE), 11th-14th May 2003, in press.

BOSAU J., GONZALEZ A., ESPINOZA G., GOLZARRI J.I., 1993: Measurements of radon levels inside Mexican caves. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 22, 287-288.

BAUBRON J.C., RIGO A., TOUTAIN J.P., 2002: Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas: the Jaut Pass example. Earth and Planetary Science Letters 196, 69-81.

CIEUR, M.; KLEIN, D.; CHAMBAUDET, A.; BAKALOWICZ, M.; D'HULST, D; MANGIN, A., 1988 : Mesure en continu du radon 222 dans le laboratoire souterrain du C. N. R. S. à Moulis et étude de ses variations en fonction de paramètres géophysiques et géochimiques. 12^{ème} Réunion Sc. Terre, Lille-Soc. Géol. Fr., Paris, p. 33.

CIGNA A., CLEMENTE G.F., 1981: Radiation hazards in natural caves. Proceed. 8th Int. Congress Speleo. Bowling Green 1981, 420-423.

CIGNA A., 2005: Radon in caves. Int. J. of Speleology 34, 1-2, 1-18.

DE BELLARD PIETRI E., 1981: Radioactivity in Venezuelan caves. Proceed. 8th Int. Speleo Congr., Bowling Green, USA, 650-651.

EHEMAN C., CARSON B., RIFENBURG J., HOFMAN D., 1991: Occupational exposure to radon daughters in Mammoth Cave National Park. Health Physics 60, 831-835.

FRANKE R., REINER L., PRATZEL H.G., RESCH F. et K.L., 2000: Long term efficacy of radon spa therapy in rheumatoid arthritis- a randomized, sham-controlled study and follow up. Rheumatology 39, 894-902.

FRIEND C.R.L., GOODING T.D., 2002: Variation in the concentration of the radon in parts of the Ogof Ffynnon Ddu system, Penwyllt, South Wales and estimates of the doses to recreational cavers. J. of the Environ. Radioactivity 58, 45-57.

GAMBLE F. M., 1981: Alpha radiation in karst caves of the Transvaal, South Africa. Trans. B.C.R.A. 8, 4, 254-260.

GÉCZY G., HUNYADI I., and HAKL J., 1991: Long-term radon studies at the thermal karst region of Budapest. Proceedings of the Second Workshop on Radon Monitoring

Radioprotection, Environmental and/or Earth Science. Roma, 1991. Ed.: G. Furlan, L. Tommasino. Singapore, World Scientific n°269.

GILLMORE G.K., SPERRIN M., PHILLIPS P., DENMAN A., 2000: Radon hazards, geology, and exposure of cave users: a case study and some theoretical perspectives. *Ecotoxicol. Environ.* 46, 3, 279-288.

HAKL J., HUNYADI I., VARHEGYI A., 1997: Radon monitoring in caves. in Radon measurements by etched track detectors. Ed. Durrani & Radomir Ilic, 260-283.

HYLAND R., GUNN J., 1994: International comparison of cave radon concentrations identifying the potential alpha radiation risks to British cave users. *Health Physics* 67, 2, 176-179.

MARTEL E.A., 1911 : L'évolution souterraine. Flammarion, 301 p.

MASSE R., 2003 : Le radon : aspects historique et perception du risque. Contrôle, revue de l'Autorité de sûreté nucléaire, N°153, [http:// www.asn.gouv.fr/publications /dossiers/c153/controle153.asp](http://www.asn.gouv.fr/publications/dossiers/c153/controle153.asp).

METIVIER H., 1998 : Le radon, un peu d'histoire. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 1-9.

MONNIN, M.; MORIN, J.-P.; PANE, M.-B., SEIDEL, J.-K., 1994: Radon-222 measurements in a fractured karst aquifer. Basic and applied hydrogeological research in French karstic areas, Montpellier - Millau Workshop 5-8 May 1994: 81-91.

Organisation Mondiale de la Santé, 2005 : Radon et cancer. Aide mémoire N° 291, 4 p.

PIRARD P., ROBE M.C., ROY M., 1998 : Expositions par inhalation du radon atmosphérique. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 83-106.

PELLEGRINI D., PERRES J.M., ROBE M.C., 1998: Origine, propriétés et abondance du radon. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 11-29.

QUINDOS PONCELA L., FERNANDEZ NAVARRO P., SAINZ FERNANDEZ C., GOMEZ AROZAMENA J., BORDONOA PEREZ M. 2004 Radiation exposure in uranium mining industrie vs exposure in tourist cave. *Radiation Protection Dosimetry* 2004 111(1): 41-44

ROBE M.C., TYMEN G., 1998: Métrologie du radon. Echantillonnage et mesure du radon et de ses descendants. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 55-82.

SABROUX J.C., 1998: Le radon, traceur de phénomènes naturels. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 31-53.

SAJO-BOHUS L., GREAVES E., MERLO G., PALFALVI J., URBANI F., 1995: Primeras mediciones de la concentración de radon en cuevas Venezolanas. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, 29, 17-19.

SAUMANDE P., 1993: La radioactivité dans les cavités naturelles (grottes et gouffres). *Spéléo Dordogne* 99, 15-38.

SOLOMON S.B., LANGROO R., and PEGGIE J.R., 1996: Occupational exposure to radon in Australian tourist caves. An Australia-wide study of radon levels. Final report of worksafe Australia research grant (93/0436), Australian radiation laboratory, 26 + 68 p.

SPERRIN M., DENMAN A.R., PHILLIPS P.S., 2000: Estimating the dose of radon to recreational cave users in the Mendips, U.K.. J. of Environm. Radioactivity 49, 235-240.

SZERBIN P., 1996: Natural radioactivity of certain spas and caves in Hungary. Environment Intern. 22, 389-398.

THÉ (de) Guy et TUBIANA Maurice, 2001 : Irradiation médicale, déchets, désinformation : un avis de l'Académie de médecine. Communiqué au nom de la Commission XIII (Santé publique - Epidémiologie - Environnement), 12 p.

TIRMARCHE M., 1998 : Evaluation par l'épidémiologie du risque de cancer lié à l'inhalation du radon. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 107-124.

TROMBE F., 1952: Traité de spéléologie. Payot Ed., 375 p.

VAUPOTI J., CSIGE I., RADOLI V., HUNYADI I., PLANINI J., and KOBAL I., 2001: Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia. Health Phys. 80, 2, 142-147.

WIENIN M., 2002 : Mesures de radioactivité dans la grotte de Malaval. Premiers résultats. Comm. pers. 5 p.

ETUDE PRELIMINAIRE

Etude préliminaire

Jean-Michel Ostermann

Une étude préliminaire était nécessaire afin d'évaluer les problèmes éventuels, notamment métrologiques, que pouvaient poser le protocole choisi, ainsi que l'exploitabilité des résultats.

Nous avons retenu en Dordogne le ruisseau souterrain de La Pépie au nord du département, la grotte des Combarelles, et la grotte de Font de Gaume comme cavité témoin car elle est bien ventilée et possède peu de remplissage.

Dans le sud du pays, les grottes de Trabuc et Soustelle (Gard), puis celle de Malaval (Lozère) ont été étudiées, et sont décrites dans les études régionales.

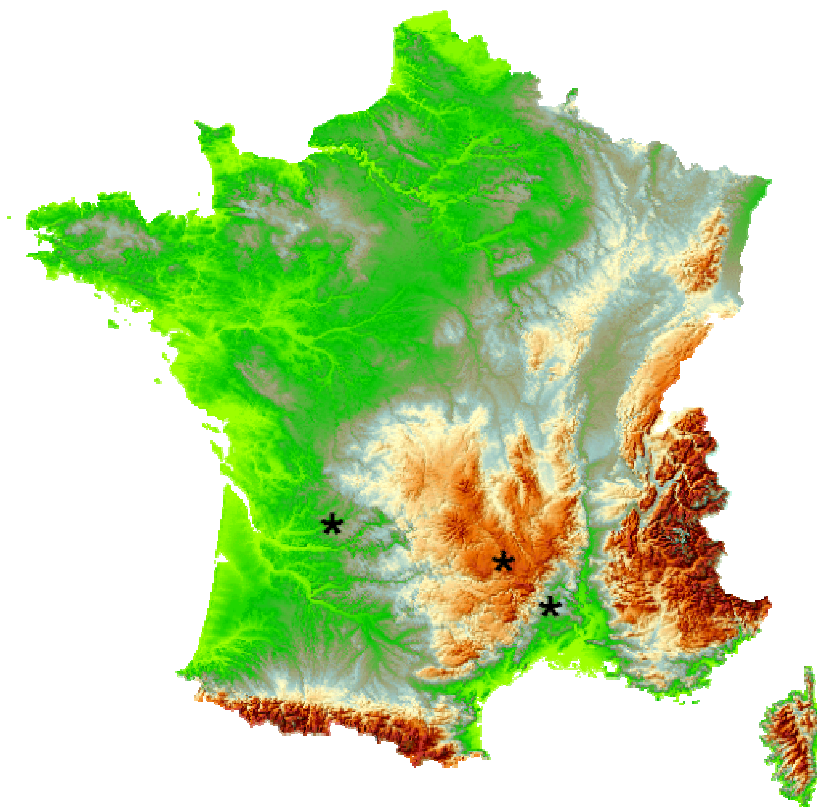


Figure 1 : Localisation des sites lors de l'étude préliminaire.

1 RUISSEAU SOUTERRAIN DE LA PÉPIE

1.1. Contexte géomorphologique

Le ruisseau souterrain de La Pépie s'ouvre sur la commune de Saint Front sur Nizonne, au nord du département de la Dordogne (coordonnées Lambert : $X = 467.00$ $Y = 52.82$ $Z = 195$ m), à proximité des premières failles du Limousin

distantes d'environ six km seulement. Explorée à partir de 1980 sur environ 1500 mètres (OSTERMANN et al, 1983), cette cavité se développe dans les calcaires du Turonien.

Le massif est un karst couvert d'une couche d'épaisseur métrique à pluri métrique, mentionnée comme « altérites colluvionnées » sur la carte géologique. Ce recouvrement est composé d'alluvions riches en silice avec une matrice argilo-sableuse parfois rougeâtre évoquant le sidérolithique très présent dans la région. Bordé de petites résurgences rarement pénétrables, ce massif comporte de très nombreuses dolines, et la cavité fut découverte par désobstruction de l'une d'entre elles. Une végétation typiquement silicicole (châtaignier, bruyère, ...) associée à une forêt de chênes et pins couvre l'ensemble de la région.

1.2. Description de la cavité

Après la doline d'entrée, une galerie d'environ 2 mètres de large permet d'atteindre rapidement un méandre qui mène au siphon amont. Le ruisseau, de débit très modeste (généralement aux alentours d' 1 l.s^{-1}), est ensuite parcouru jusqu'au fond de la cavité, en suivant toujours une galerie en méandre parfois interrompue par des salles, et une large galerie transversale.

Un étage supérieur est accessible dès la zone d'entrée, et peut être parcouru sur environ 350 mètres. Les connexions avec l'étage actif sont très nombreuses.

A noter également que la néotectonique semble avoir affecté certaines portions de la cavité, comme en témoignent l'existence de certaines fractures d'allure récente qui affectent la galerie principale.

Il existe un important remplissage clastique, et surtout allochtone composé de galets de silice et de sable, ainsi que de nombreux passages argileux. Les concrétions sont très rares. De nombreuses zones de soutirage de la couverture sont visibles, surtout au niveau de l'étage supérieur. Elles permettent l'intrusion dans la cavité d'éléments argileux et siliceux issus de la couverture alluviale.

1.3. Climatologie

La cavité est parcourue par un courant d'air soufflant vers l'extérieur en hiver, et aspirant en été. Elle n'est cependant pas assimilable à un tube à vent, une seule entrée existant dans la zone haute. La ventilation de la partie basse est assurée par les nombreuses dolines qui sont autant de points d'absorption de l'air (et des sédiments de la couverture).

La température moyenne de la cavité est d'environ 13° . Une étude climatologique sommaire a montré des teneurs en CO_2 variant de 0.8 à 2 % quelles que soient les saisons, avec peu de variations inter saisonnières (OSTERMANN, 1990). De nouvelles mesures réalisées pendant les levées de dosimètres permettent de confirmer ces observations, avec des valeurs oscillant entre 1,2 et 2%. Nous avons attribué ce fait à l'arrivée dans la cavité d'air extérieur en été, alors que le régime hivernal assure une redistribution de l'atmosphère notamment du réseau de fentes.

1.4. Localisation des stations

Les stations ont été dispersées pour avoir un aperçu éventuel de la cinétique du gaz dans la cavité. Elles sont toutes placées à une distance de l'entrée respectivement de environ 120 m, 170 m et 240 m, entre 2 et 2.50 m de hauteur par rapport à l'écoulement souterrain, le risque de crue n'étant pas inexistant. On aura donc des valeurs à priori moins élevées qu'au niveau du sol, le radon étant un gaz très lourd.

1.5. Résultats

	Date pose / dépose	Durée séjour	Radon Bq/m ³
Station 1	09/06/02 – 13/10/02	126 j	7460
Station 1	13/10/02 – 02/02/03	111 j	2270
Station 1	02/02/03 – 01/06/03	119 j	3380
Station 2	09/06/02 – 13/10/02	126 j	7110
Station 2	13/10/02 – 02/02/03	111 j	2710
Station 2	02/02/03 – 01/06/03	119 j	3620
Station 3	09/06/02 – 13/10/02	126 j	7830
Station 3	13/10/02 – 02/02/03	111 j	2970
Station 3	02/02/03 – 01/06/03	119 j	4400

Tableau 1 : Teneurs en radon du Ruisseau souterrain de La Pépie

La durée de séjour des dosimètres a été en moyenne de 118 j, permettant de distinguer une période estivale (juin – octobre), hivernale (octobre – février), et printanière (février – juin).

Ces résultats montrent des teneurs toujours supérieures à 2000 Bq/m³, donc élevées. Ainsi, la valeur moyenne pour la cavité est de 4639 Bq/m³. Il existe un net

maximum estival (contrairement au CO_2), une diminution pendant l'hiver, et ascension au printemps.

Bien que les courbes soient globalement parallèles, on remarque que la différence de valeur entre deux stations pour la même période atteint 720 Bq.m^{-3} en été (S2/S3), 700 Bq.m^{-3} en hiver (S1/S3), et 1020 Bq.m^{-3} au printemps (S1/S3). La station 3 présente par ailleurs les valeurs les plus élevées lors des trois périodes de mesures.

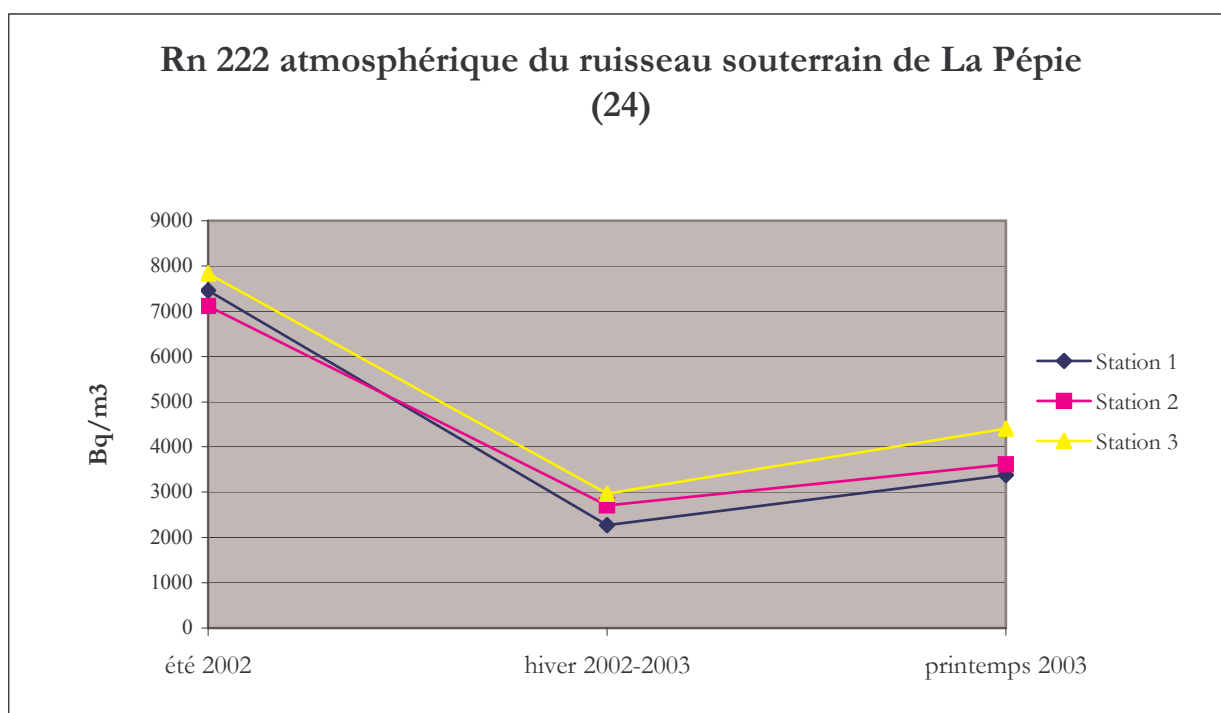


Figure 2 : Radon atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie

2 Grotte de Font de Gaume

2.1 Contexte géomorphologique

La cavité, creusée dans les calcaires gréseux du Coniacien, s'ouvre en milieu de falaise à proximité (et sur la commune) du village des Eyzies de Tayac, environ 35 m au dessus de la vallée de la Beune, affluente de la Vézère. La région est constituée de plateaux et collines calcaires arrondies (les « puechs ») incisés par les vallées de la Vézère et de ses affluents. La couverture sidérolithique, présente sur la région, n'existe plus aux environs immédiats de la cavité.

2.2 Description de la cavité

C'est une cavité préhistorique célèbre découverte en 1901. Elle comprend plus de 200 représentations pariétales Magdaléniennes et est aménagée pour le tourisme. Il existe deux entrées : l'une est fermée par une porte et sert à la visite, l'autre, distante de quelques mètres et plus au sud, n'est fermée que par des barres d'acier. La cavité se développe sur environ 400 mètres, présente un concrétionnement non négligeable, mais très peu du remplissage originel remplacé par un lit de petits galets de silice sur la zone d'entrée jusqu'au Rubicon. A environ 40 mètres de l'entrée touristique, une galerie latérale orientée au sud (la galerie Vidal) mène à l'autre entrée.

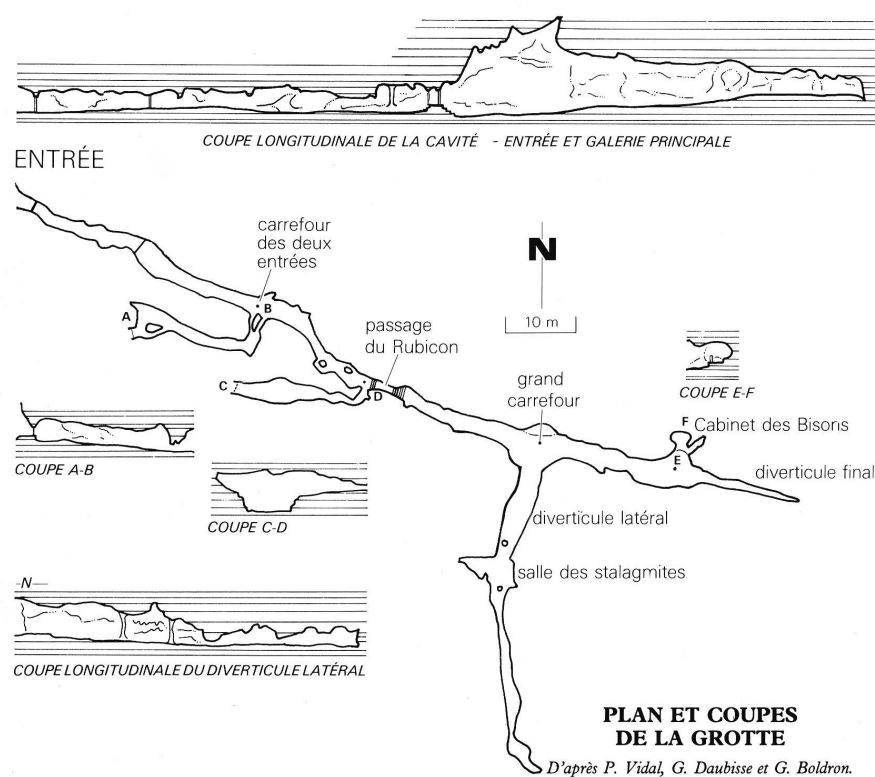


Fig. 3 : Topographie de la Grotte de Font de Gaume
D'après DAUBISSE et al., 1994.

2.3 Climatologie

La cavité a depuis longtemps fait l'objet d'une attention particulière concernant sa climatologie : un système de ventilation permettait en effet d'assurer un renouvellement de l'air (DAUBISSE et al, 1994). Le renouvellement se fait cependant naturellement en permanence en raison de l'existence des deux entrées, à

chaque ouverture de la porte lors des visites et par thermo ventilation alternée le reste du temps.

Les teneurs en CO² ont également été étroitement étudiées, et présentent d'importantes variations saisonnières, avec un maximum pouvant atteindre 2% l'été en période de grande affluence touristique. Les températures oscillent entre 13.5° et 15° pour la partie profonde.

2.4 Localisation des stations

La première station se situe dans la galerie Vidal, à 1.80 m de hauteur. La seconde dans la salle des stalagmites, à 1.50 m de hauteur.

2.5 Résultats

	Date pose/dépose	Durée séjour	Radon Bq m-3
station 1	27-06-2002/13-10-02	112 jours	90
station 1	17/10/02 - 29/01/03	104 Jours	130
station 2	27-06-2002/13-10-02	112 jours	140
station 2	17/10/02 - 29/01/03	104 Jours	30

Tableau 2 : Teneurs en radon de la grotte de Font de Gaume

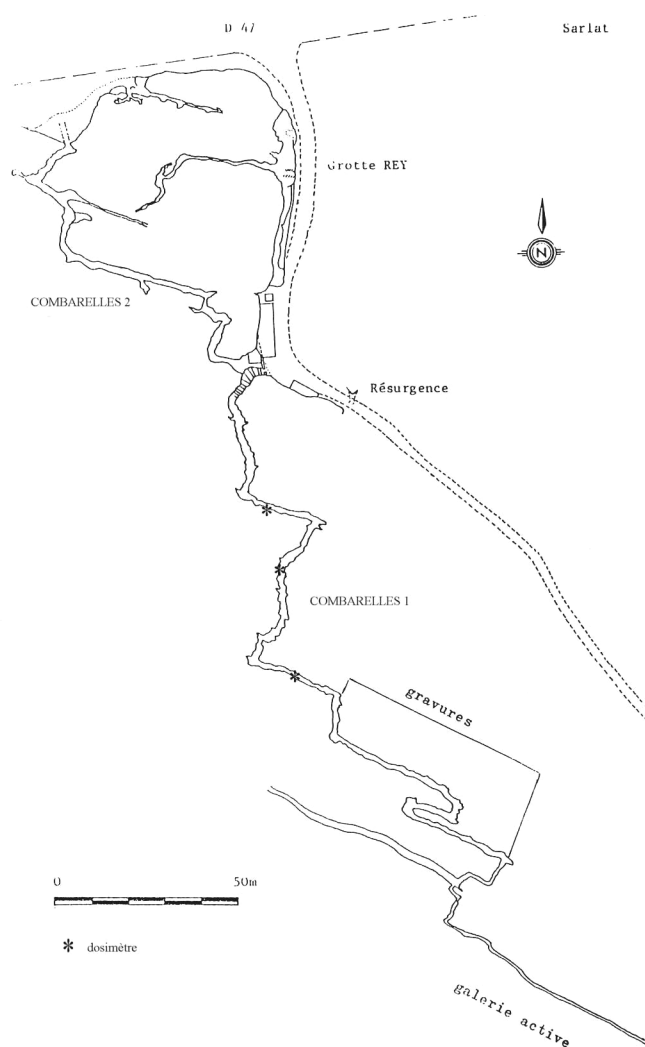
La durée moyenne de séjour des dosimètres a été de 108 jours. Deux périodes ont été évaluées ici : période estivale (fin juin/mi octobre), et hivernale (mi octobre/ fin janvier). La valeur moyenne pour l'ensemble des mesures est de 97.5 Bq/m³ ce qui est très bas, en raison certainement de la ventilation de la cavité, de son faible développement et du peu de remplissage. Le maximum est observé en été à la station 1, alors qu'on obtient l'inverse en hiver. Cela s'explique facilement par la ventilation des galeries : on a admission d'air extérieur majoritairement par la galerie Vidal en été. Nous n'avons pas d'explication pour la très faible valeur obtenue à la station 2 en hiver.

3 Grotte des Combarelles

3.1 Contexte géomorphologique

Cette cavité, qui se développe dans le Conacien, s'ouvre à l'altitude de 90 m, à la base d'un petit vallon affluent de la vallée des Beunes, tout près des Eyzies et sur le même massif que Font de Gaume. Il existe en fait deux grottes des Combarelles : la première, aménagée pour le tourisme, est l'objet de l'étude (Combarelles 1), la seconde se développant plus au nord à partir d'une entrée commune (Combarelles 2). Il s'agissait vraisemblablement d'un même conduit mis au jour par l'érosion du

vallon. La grotte est célèbre pour l'abondance des gravures qu'elle contient (environ 600).



*Fig. 4 : Topographie de la Grotte des Combarelles
D'après ARCHAMBAUD, 1997*

3.2 Description

Il s'agit d'un méandre de petites dimensions et d'environ 300 m de long, avec une partie active au fond de la cavité, à un étage inférieur. Les concrétions sont peu nombreuses, et le remplissage allochtone autrefois recouvert de calcite a été sur creusé et évacué du centre de la galerie pour l'aménagement. Il est composé de nombreux galets de silice de taille centimétrique au plus, et d'une matrice argilo-sableuse.

3.3 Climatologie

La cavité est peu ventilée et enrichie en CO_2 en été, ce qui contraint les conservateurs à limiter les visites. La porte d'entrée permet cependant un renouvellement partiel de l'air grâce à une grille supérieure. La température moyenne est de 11.5° . Les teneurs en CO_2 peuvent dépasser 2% l'été.

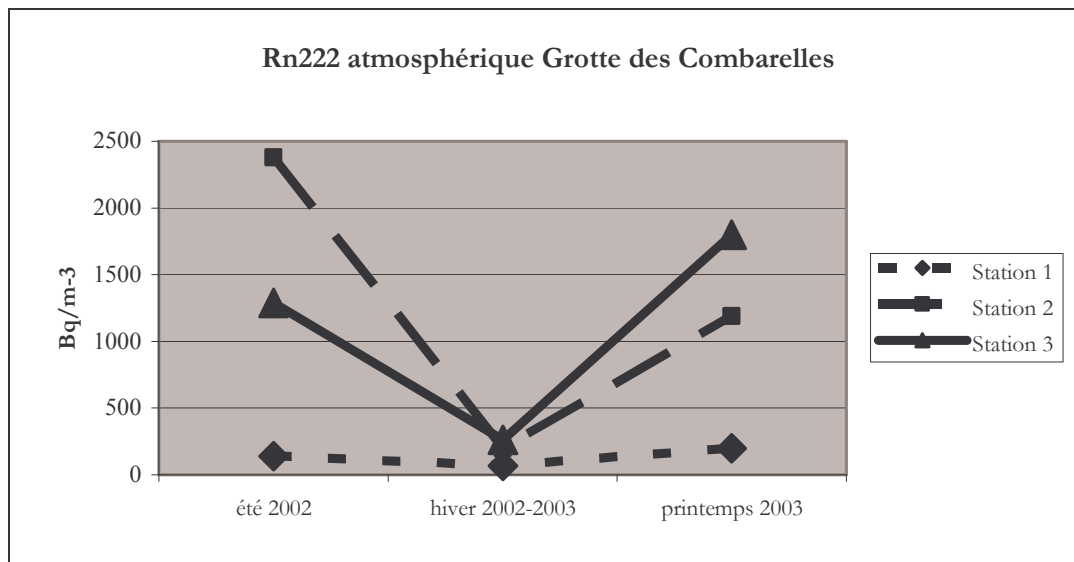


Figure 5 : Radon atmosphérique de la grotte des Combarelles

3.4 Localisation des stations

Trois dosimètres ont été placés le long du méandre de la partie aménagée. Le premier et troisième sont à moins d'un mètre de hauteur, alors que le second a été placé en sommet de galerie (1.80 m de haut).

3.5 Résultats

La durée moyenne de séjour des dosimètres a été de 118 jours, et la valeur moyenne pour l'ensemble des mesures est de 836 Bq/m^3 .

Les valeurs obtenues montrent d'importantes variations saisonnières possibles pour une même station, avec une amplitude pouvant atteindre 2180 Bq/m^3 (station 2) entre deux saisons. Les valeurs sont par ailleurs très basses en S1 (toujours moins de 400 Bq/m^3), et hétérogènes en S2 et S3 avec des teneurs beaucoup plus élevées en été, conformément aux données de la littérature. Cela signe un renouvellement efficace de l'air de la cavité en hiver.

	Date pose / dépose	Durée séjour	Radon Bq/m ³
Station 1	27/06/02 – 17/10/02	110	140
Station 1	17/10/02 – 29/01/03	104	70
Station 1	29/01/03 - 20/06/03	142	200
Station 2	27/06/02 – 17/10/02	110	2380
Station 2	17/10/02 – 29/01/03	104	200
Station 2	29/01/03 - 20/06/03	142	1190
Station 3	27/06/02 – 17/10/02	110	1290
Station 3	17/10/02 – 29/01/03	104	260
Station 3	29/01/03 – 20/06/03	142	1800

Tableau 3 : Teneurs en radon de la grotte des Combarelles

4 Conclusion

Cette étude préliminaire avait pour objectif essentiel d'évaluer une méthodologie utilisable pour un travail plus large. La technique de mesure du radon et descendants à l'aide de détecteurs solides de traces nucléaires apparaît simple à mettre en œuvre, suffisamment fiable pour notre objectif, et abordable en terme de coût.

La période d'exposition initialement prévue était de 12 semaines, et n'a pas été respectée, mettant en évidence l'importance d'une planification stricte des sorties à l'avance. Cela n'a cependant pas gêné outre mesure l'exploitation des résultats, qui montrent des variations importantes de teneurs dans les cavités étudiées. Les valeurs importantes obtenues au ruisseau souterrain de La Pépie nous ont incités à y poursuivre les mesures.

5 Bibliographie :

ARCHAMBAUD M. et C., 1997 : Les Combarelles. Fanlac éd., 31 p.

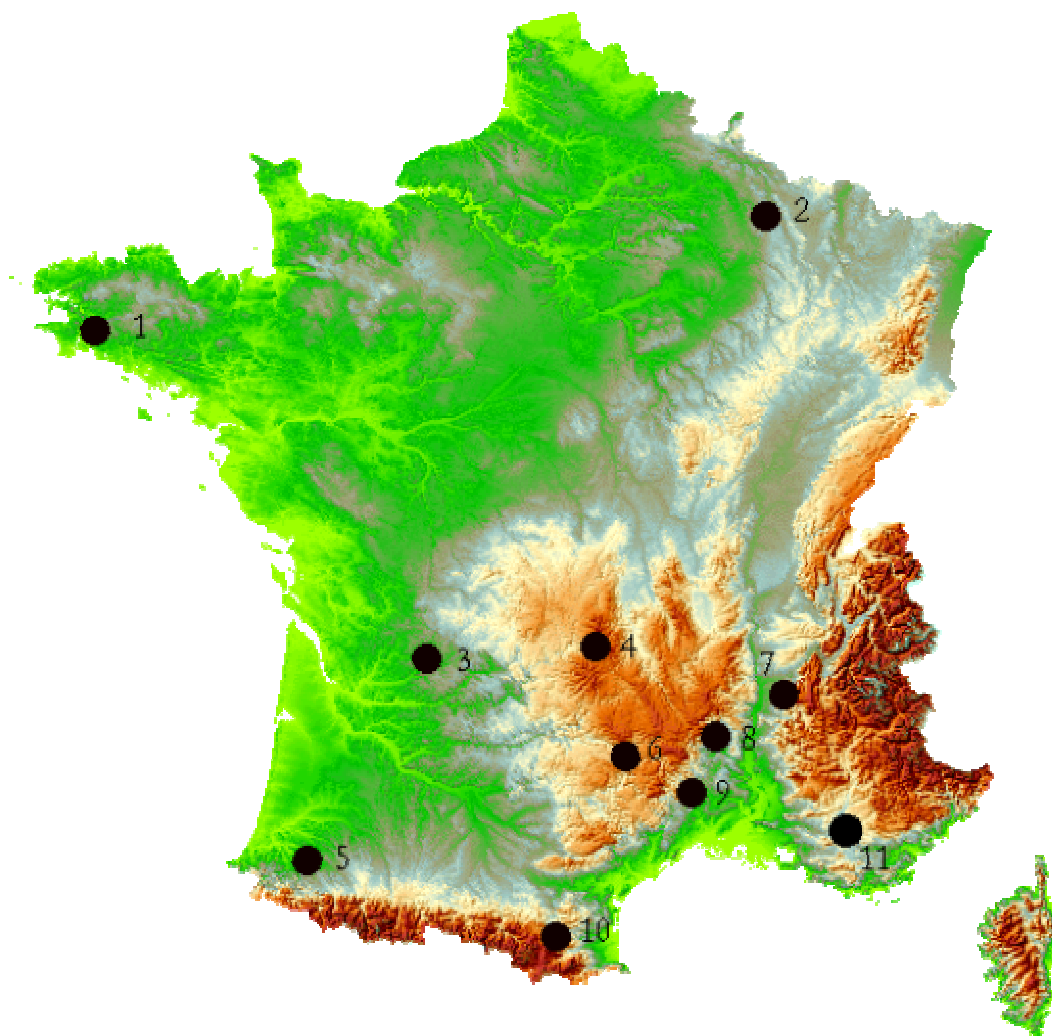
CARCAUZON C., 1981 : Le réseau hydrogéologique B. Pierret (grotte des Borderies – Ouillade de St Hilaire). Spéléo-Dordogne 78, 13-24.

DAUBISSE P., VIDAL P., VOUVE J., BRUNET J., 1994 : La grotte de Font de Gaume. Art pariétal, protection, conservation et intervention. Fanlac éd., 48 p.

OSTERMANN J.M., 1990 : Le gaz carbonique atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie. Périgord Explo N°3 p 57-62.

OSTERMANN J.M., GROISARD C., 1983 : Compte-rendu des explorations dans la commune de La Chapelle Montmoreau. Bull. G3S N°5, 3-12.

ETUDES REGIONALES



Carte de localisation des sites d'étude du radon dans le karst Français

- 1 : Grotte de Poul Lomic / Grotte de Vengleuz Coz (Finistère)
- 2 : Grotte du Rupt du Puits / Carrières de Besace (Meuse)
- 3 : Ruisseau souterrain de La Pépie / Grotte des Borderies (Dordogne)
- 4 : Creux de Soucy (Puy de Dôme)
- 5 : Gouffre OX 655, grotte du Tonneau / grotte de Capbis (Pyrénées Atlantiques)
- 6 : Grotte de Malaval (Lozère)
- 7 : Grotte Favot / Cuves de Sassenage (Isère)
- 8 : Grotte de Saint Marcel (Ardèche)
- 9 : Grotte du Barrage (Gard)
- 10 : Grotte TM 71 / système Fanges-Paradet (Aude)
- 11 : Trou souffleur (Vaucluse)

Étude de radioactivité radon dans deux cavités du Finistère

Christian Marget

Cette étude a porté sur deux cavités du Finistère, de caractéristiques très différentes :

- la grotte de Poul Lomic (commune de Plogoff) est une simple faille élargie en pied de falaise par l'action érosive de la mer, similaire à la plupart des « grottes marines » du littoral finistérien ;
- la grotte de Vengleuz-Coz (commune de Plougastel-Daoulas) est, elle, une authentique cavité karstique creusée dans l'un des rares bancs de calcaire métriques que l'on puisse trouver en Bretagne.

1 Grotte de Poul Lomic (Plogoff)

1.1 Contexte géomorphologique

Cette grotte s'ouvre dans le flanc sud-est de la pointe de Beg-ar-Houlmet, à l'est du port de Bestrée. Ces falaises de granite (Carbonifère supérieur) sont marquées par un réseau dense de failles et diaclases d'orientations NW-SE et NE-SW. Leur situation sur la côte sud du Cap Sizun, à proximité de la Pointe du Raz, les soumet à une intense érosion éolienne et marine.

1.2 Description de la cavité

Il s'agit d'une faille orientée principalement N315 dont la partie inférieure a été élargie par érosion marine. L'observation archéologique de sites similaires le long de cette côte du Cap Sizun laisse à penser qu'elle a connu une occupation humaine depuis le paléolithique, voire plusieurs successives. Les traces de cette occupation - s'il en est - sont aujourd'hui ensevelies sous plusieurs mètres de roches tombées de la voûte. Le plancher actuel se trouve donc beaucoup plus haut que son niveau d'origine, au point d'être émergé en permanence même à marée haute (voir photo). La cavité se présente comme un long trajet quasi-rectiligne d'un à deux mètres de large, de section généralement triangulaire, marqué par une alternance de passages bas (40 à 80 cm) et de « salles » où l'on peut évoluer debout. Vers le milieu, elle est coupée par un ressaut de 2 m dû à une rupture dans le niveau de fracturation de la voûte qui a causé son effondrement.

Dans la partie au-delà du ressaut, les parois sont souvent assombries par des dépôts de dioxyde de manganèse. Le développement total est de 42 m.

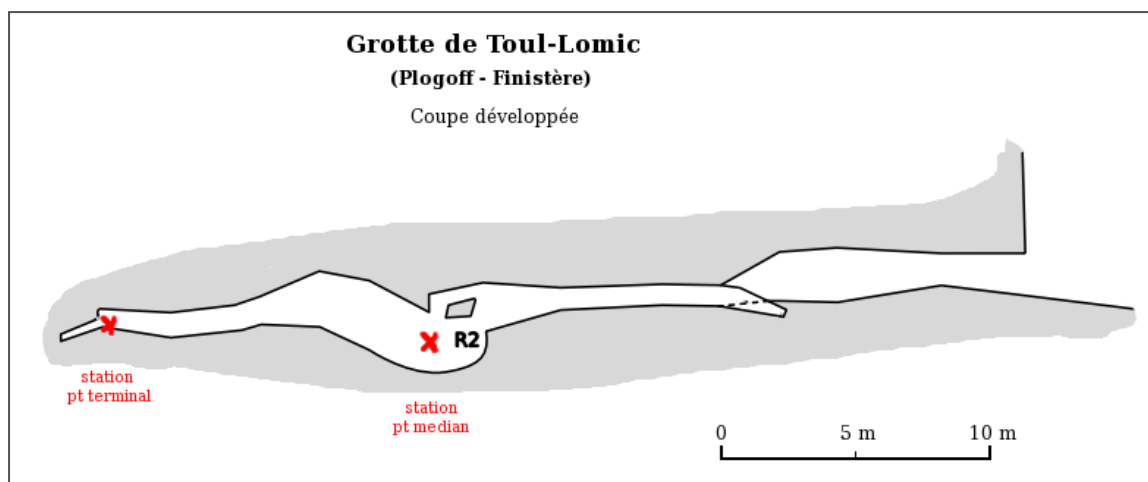


Figure 1: Localisation des dosimètres dans la grotte de Toul-Lomic

1.3 Climatologie

La plupart des grottes marines sont très ouvertes et généralement parcourues par la mer, au moins lors des marées hautes. L'influence maritime y est donc prépondérante (vent, embruns) et l'obscurité est la seule différence importante par rapport aux conditions extérieures. La grotte de Toul Lomic n'a pas dû faire exception à l'époque de son creusement mais son remplissage par les éboulis de la voûte a modifié considérablement cet environnement : d'une part le relèvement du plancher bien au-dessus de la zone des marées empêche désormais toute incursion de la mer en dehors de circonstances exceptionnelles ; d'autre part, la succession de passages étroits limite considérablement la pénétration du vent au-delà de la zone d'entrée. Passé les premiers mètres, l'atmosphère de la cavité est calme et la partie située au-delà du ressaut médian est même particulièrement confinée, comme en témoignent les mesures effectuées.

L'influence extérieure n'est cependant pas nulle : nous avons pu remarquer quelques suintements d'eau douce provenant des roches sus-jacentes et l'air est respirable dans toute la cavité comme en atteste la présence d'une chauve-souris que nous avons retrouvée - bien vivante - dans la partie terminale à chacune de nos visites.

La température est de l'ordre de 14 °C au point terminal (mesure effectuée début avril).

1.4 Localisation des stations

Nous avons choisi deux points de mesure, aux emplacements qui nous paraissaient les plus susceptibles de recueillir de forts taux de radon (voir coupe):

- le premier se situe au point terminal de la cavité, lieu où le confinement est maximal . Le capteur était simplement posé sur une pierre au niveau du sol ;

- le second se trouve au point bas qui suit le ressaut médian. Le capteur était calé dans une fissure à environ 1,20 m au-dessus du sol.

Lors de la relève de janvier, nous avons eu la mauvaise surprise de découvrir dans cette fissure un petit écoulement d'eau, dû évidemment aux fortes précipitations d'automne. Le dosimètre était atteint par cet écoulement et son filtre d'entrée était de ce fait saturé d'eau ; il est donc probable que cette mesure soit fortement sous-évaluée. Cet écoulement a persisté ensuite et il n'est pas possible d'assurer que la mesure n'en ait pas été perturbée (le capteur, placé hors du flux, était chaque fois humide).

1.5 Résultats

Les résultats bruts sont exposés dans le tableau ci-dessous. Ils sont discutés à la fin de ce document, dans le paragraphe 3.

Pose	Dépose	Point terminal	Point médian
5 juillet 2004	2 octobre 2004	92987 ± 44377	39596 ± 16888
2 octobre 2004	16 janvier 2005	128082 ± 64998	15954 ± 6141 (*)
16 janvier 2005	16 avril 2005	63717 ± 30705	6003 ± 2092
16 avril 2005	2 juillet 2005	124269 ± 63766	28825 ± 12259

(*) Capteur retrouvé mouillé

Tableau 1 : radioactivité alpha de la grotte de Toul Lomic

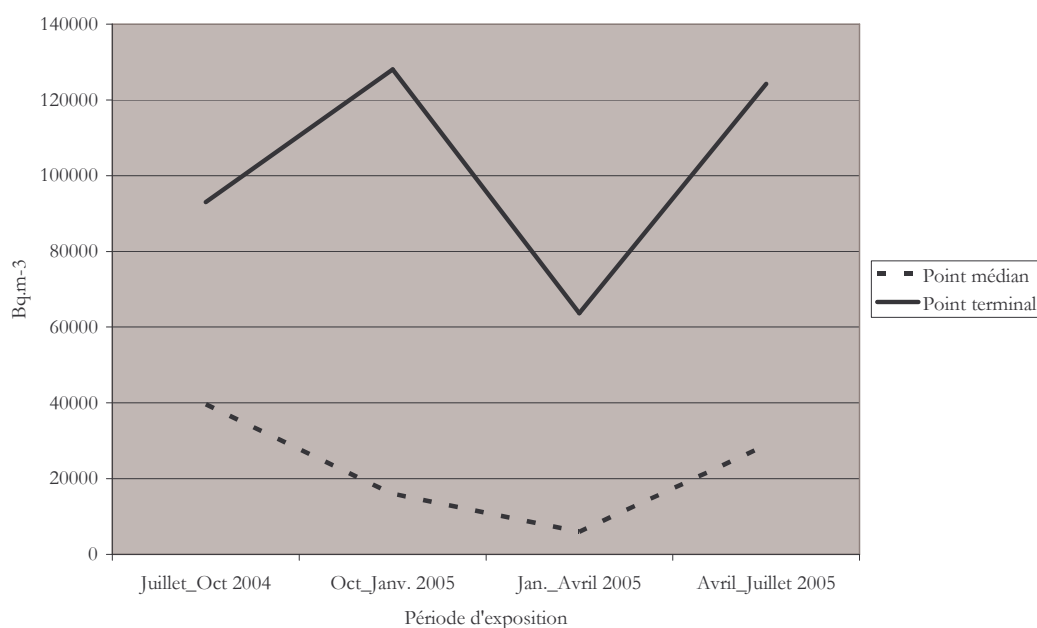


Figure 2 : radioactivité alpha de la grotte de Toul Lomic

2 Grotte de Vengleuz Coz (Plougastel-Daoulas)

2.1 Contexte géomorphologique

Cette grotte s'ouvre dans le flanc sud de l'ancienne carrière éponyme, près du village de Saint-Guérolé qui marque l'extrémité amont de l'anse de l'Auberlac'h (sud-ouest de la Presqu'île de Plougastel). Ces calcaires du Dévonien inférieur (schistes et calcaires de l'Armorique), se présentent en strates généralement décimétriques, parfois métriques, séparées par des épisodes schisteux. Offrant un faible pendage vers le sud, ces bancs sont fréquemment interrompus par des failles (majoritairement NW-SE mais également N-S et W-E). Ils ont été exploités comme pierre à chaux jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

2.2 Description de la cavité

L'entrée s'ouvre à environ 5 mètres au-dessus du sol, on y accède par une escalade de difficulté moyenne. Le plan de la cavité montre une configuration typique de réseau anastomosé, creusé au bénéfice de diaclases liées à la fracturation locale.

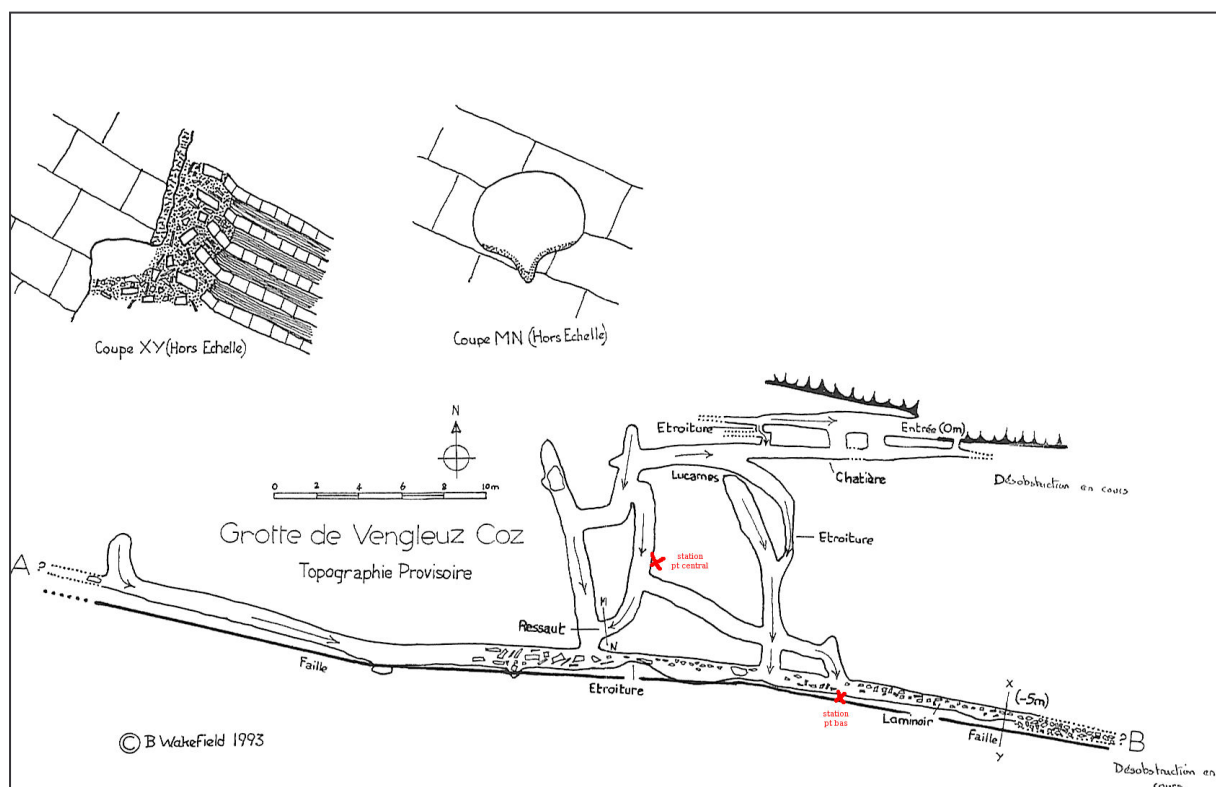


Figure 2: Topographie de la grotte de Vengleuz Coz

Les galeries suivent le pendage de la cavité, de 13° vers le SSE dans la partie supérieure, 18° dans la partie inférieure. Leur hauteur est variable, de l'ordre de 60 cm à 1,50 m, et le sol est caractérisé par un fort remplissage argileux. Un sondage dans ce remplissage a permis d'atteindre une profondeur de l'ordre du

mètre, en traversant plusieurs minces couches de roche, planchers stalagmitiques et intercalation schisteuses (une étude stratigraphique est en cours). L'essentiel du concrétionnement se trouve sur les parois et montre un faciès caractéristique d'une calcification en régime noyé. Cependant, quelques petites stalactites et draperies peuvent être trouvées en plafond, témoignant d'un concrétionnement à l'air libre depuis l'assèchement de la cavité jusqu'à nos jours.

Au sud, la cavité est interrompue par une faille inverse d'orientation globale W-E coïncidant avec une galerie préexistante. La majeure partie de cette galerie peut être parcourue debout. Ce fait et l'accroissement de pente des sols au voisinage de cette faille donnent à penser que cette fracture s'est produite alors que la grotte était encore noyée, occasionnant un soutirage important des sédiments proches et vraisemblablement une vidange (au moins temporaire) de la cavité.

Le développement total mesuré est de 120 m.

2.3 Climatologie

Seule la zone d'entrée est en relation directe avec l'extérieur et susceptible d'échanges atmosphériques notables. Échanges très limités d'ailleurs car la carrière de Vengleuz Coz forme un cirque ouvert à l'est au pied d'un plateau boisé, elle n'est donc pas exposée aux vents dominants. De plus, abandonnée à la végétation depuis plusieurs années, elle est elle-même très boisée et l'effet des vents s'y fait peu sentir. Le reste de la cavité est séparé de cette zone d'entrée par 3 étroitures en chicanes qui l'isolent de façon notable. Aucun courant d'air n'y est perceptible et seuls quelques écoulements mineurs se manifestent en période de forte pluviosité (goutte à goutte ou suintements).

La température mesurée en avril vers le centre de la cavité (près de la 2^e station de mesure) était de l'ordre de 12 °C.

2.4 Localisation des stations

Deux points de mesure ont été choisis, à des emplacements susceptibles de fournir des mesures représentatives (voir plan):

- dans la grande faille, au niveau du carrefour situé le plus à l'est, donc proche du point le plus bas de la cavité ;
- dans un renforcement de la paroi, à proximité de la patte d'oie la plus proche du centre de la cavité.

La cavité pouvant être épisodiquement visitée, les capteurs ont été cachés derrière des pierres et des panneaux d'avertissement ont été disposés dans le passage.

2.5 Résultats

Les résultats bruts sont exposés dans le tableau ci-dessous.

Pose	Dépose	Point bas	Point central
10 juillet 2004	13 octobre 2004	2539±737	4015±1243
13 octobre 2004	19 janvier 2005	4885±1565	4408±1391
19 janvier 2005	10 avril 2005	2448±740	2565±780
10 avril 2005	2 juillet 2005	4413±1449	4442±1459

Tableau 2 : radioactivité alpha de la grotte de Vengleuz Coz

3 Analyse des résultats

3.1 Le cas extrême de Toul Lomic

L'aspect qui saute immédiatement à l'oeil à la lecture des mesures effectuées est le niveau colossal de radioactivité mesuré au fond de Toul Lomic : 100 000 Bq/m³ en moyenne avec des pointes supérieures à 120 000 Bq/m³. Comparativement, les valeurs pourtant respectables mesurées au point médian de la même cavité (22 000 Bq/m³ en moyenne) paraissent faibles. On peut penser que ces taux considérables sont dus à la conjugaison de deux facteurs :

- la forte teneur naturelle des roches granitiques en radon. La Bretagne est connue pour être une région où l'on trouve dans les habitations une forte radioactivité naturelle (entre 100 et 150 Bq/m³) ;
- l'extrême confinement de cette partie de la cavité (cul-de-sac de dimensions réduites, éloigné de l'entrée), qui se voit ici indirectement confirmé. Le radon issu des roches environnantes reste concentré sur place faute d'être dispersé par les mouvements de l'air ;

La position du capteur médian, placé à mi-hauteur dans une salle de dimensions plus importantes (plus de 2 m de plafond) explique sans doute que les taux mesurés y soient plus faibles. De plus, on trouve des écoulements d'eau à cet endroit, et singulièrement dans la fissure où était placé le dosimètre. Le radon étant soluble dans l'eau, une partie est vraisemblablement entraînée par ces coulées, ce qui est une cause supplémentaire de baisse de teneur.

Cette baisse est quand même toute relative. Les taux moyens de radioactivité mesurés dans cette zone médiane sont quand même plus de 50 fois supérieurs à ceux tolérés dans l'habitat. Ces résultats doivent donc inciter à la prudence. Les spéléologues désireux d'étudier cette cavité - et de façon générale les cavités granitiques à faible circulation d'air - devront être conscients du risque radioactif et limiter leurs incursions au strict minimum. Heureusement, la plupart des grottes marines sont largement ouvertes et ne devraient pas nécessiter de précautions particulières.

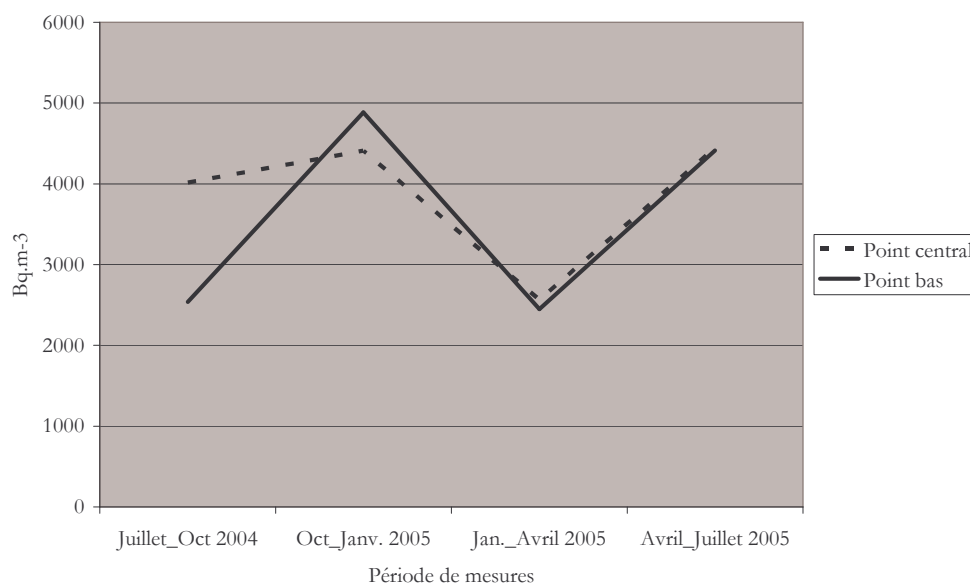


Figure 3 : Radioactivité alpha, grotte de Vengleuz-Coz

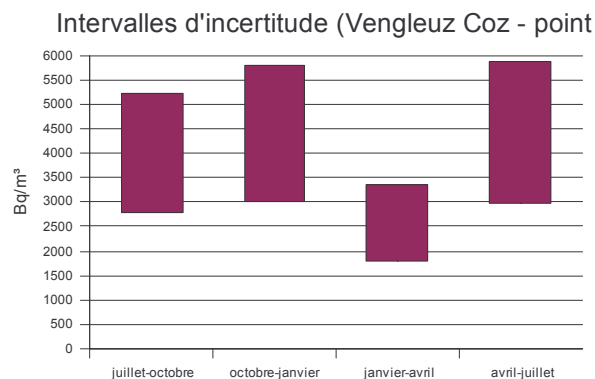
3.2 Homogénéité à Vengleuz-Coz

Les taux obtenus ici sont encore importants (de 2 500 à 5 000 Bq/m³). Une cause probable en est la proximité de substrats riches en éléments radioactifs (granite et grès armoricain) associée à l'intense fracturation de la région, qui facilite le transfert de ces éléments par dégazage.

Ces taux sont cependant plus « raisonnables » que ceux trouvés dans le granite et permettent d'envisager des visites épisodiques de cette grotte et des cavités voisines. Cette information est précieuse pour le spéléologue désireux de les étudier. Les cavités karstiques du Finistère constituent en effet un phénomène exceptionnel en Bretagne et n'ont pas - à notre connaissance - donné lieu par le passé à des études spécifiques.

Seule la première série de mesures (en été) montre une différence nette entre les deux stations. Pour les trois suivantes, les résultats apparaissent très proches. Compte tenu des configurations très différentes de ces stations et de la distance qui les sépare, on peut affirmer sans grande erreur que le taux de radioactivité est relativement homogène dans la cavité.

Nous ne connaissons pas à l'heure actuelle l'explication de la singularité qui frappe la première série de mesures. Une nouvelle campagne de mesure menée à la même époque permettrait peut-être de confirmer ou infirmer la différence constatée. À défaut, il est difficile de déterminer si cela correspond à une hétérogénéité réelle ou s'il faut incriminer simplement la forte imprécision relative de ces mesures. On peut constater en effet que chaque fois l'intervalle d'incertitude total est du même ordre de grandeur que la valeur moyenne mesurée.



3.3 Le facteur saisonnier

Si l'on observe l'évolution des mesures au cours de l'année, on trouve sur trois d'entre elles une corrélation marquée : deux maxima à l'automne et au printemps, un minimum l'hiver. En prenant comme référence pour chaque station la mesure effectuée au printemps et en calculant les rapports de chaque mesure avec la référence associée, la similitude est encore plus frappante.

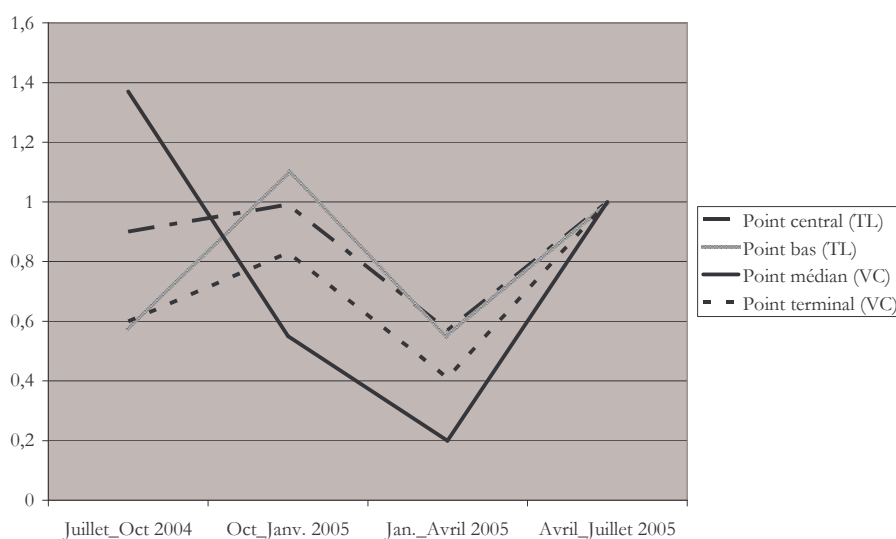


Figure 4 : évolutions relatives des valeurs en radon

On observe en effet une grande cohérence entre les mesures, malgré une certaine dispersion dans les valeurs d'été. Peut-être faut-il voir dans ce dernier point une influence hydrologique de l'extérieur. C'est en effet la seule période de l'année où les précipitations sont suffisamment faibles pour ne pas provoquer d'écoulements dans les cavités.

Une seule courbe se détache nettement, celle correspondant au point bas de Toul Lomic. Ce comportement atypique peut s'expliquer par l'emplacement du

dosimètre, à proximité d'une coulée d'eau qui a persisté de l'automne au printemps. Il est avéré qu'entre octobre et janvier le capteur a été atteint par cette coulée : le filtre d'entrée d'air a été retrouvé saturé d'eau, ce qui a dû bloquer toute arrivée d'air (et donc de radon) dans le capteur, probablement de façon définitive à compter du jour où c'est arrivé. On se retrouve donc logiquement avec une valeur basse au lieu du maximum attendu si l'évolution avait été la même que les autres stations. Lors des relèves de janvier et avril, les nouveaux dosimètres ont été placés dans la même fissure en les éloignant autant que possible du parcours de la coulée. Ils y étaient effectivement protégés du contact direct avec l'eau mais quand même soumis à l'influence humide du lieu : ils ont été retrouvés couverts de buée et le filtre était lui-même humide. Il en est probablement résulté une perte de sensibilité qui expliquerait les niveaux relativement bas relevés au printemps et surtout l'hiver (période des précipitations les plus abondantes).

On dispose donc de trois tracés remarquablement corrélés et un quatrième, atypique mais dont les écarts s'expliquent par des anomalies constatées dans les conditions de mesure. On peut donc légitimement penser que l'évolution commune aux trois premières courbes représente une tendance locale effective que l'on doit pouvoir extrapoler aux autres cavités du département : maxima de teneur en radon au printemps et en automne, minima en été et en hiver. Quant à la dispersion observée l'été, il est difficile d'en trouver une explication suffisamment étayée dans l'état actuel de nos connaissances.

4 Synthèse

Des taux considérables de radioactivité alpha (jusqu'à 130 000 Bq/m³) ont été mesurés au sol d'un cul-de-sac de Toul Lomic, cavité granitique à faible circulation atmosphérique. Dans un espace plus vaste de la même cavité, les teneurs sont plus faibles mais restent importantes, entre 10 000 et 40 000 Bq/m³. Malgré l'intérêt que les cavités de ce type peuvent présenter pour le spéléologue, ces mesures doivent inciter à en limiter les visites au strict minimum. Les grottes marines « ouvertes », bien qu'ayant la même origine géologique, ne devraient pas présenter le même inconvénient du fait des échanges atmosphériques auxquels elles sont soumises.

Dans la grotte karstique de Vengleuz-Coz, on trouve également une forte radioactivité sans doute liée au soubassement gréseux et granitique et à la forte fissuration constatée dans la région. Cependant, les taux mesurés (de 2 000 à 5 000 Bq/m³) sont beaucoup plus tolérables que ceux de Toul-Lomic et autorisent des visites épisodiques de ce type de cavité, dont les caractéristiques sont exceptionnelles dans notre région.

Les mesures effectuées témoignent d'une influence saisonnière marquée, avec des teneurs maximales à l'automne et au printemps, minimales en été et surtout en hiver.

Le radon atmosphérique de deux cavités du Barrois : le Rupt du Puits, et les carrières de Savonnière (Meuse)

Alain Devos, Claude Herbillon, Jean-Michel Ostermann

1 Contexte général

Le Barrois correspond au revers de la cuesta des Bars ou des calcaires tithoniens qui sont caractérisés par un karst de contact lithostratigraphique typique des régions de bas plateaux de l'Est de la France. La karstification bénéficie de totaux pluviométriques annuels soutenus (plus d'un mètre d'eau), de massifs forestiers denses (karst vert) et d'une couverture argilo-sableuse pourvoyeuse d'eau (karst couvert).

Il est limité à l'ouest par le Perthois représenté par les formations argilo-sableuses du Crétacé inférieur et à l'est par la dépression orthoclinale de la cuesta des Bars développée dans les marno-calcaires kimméridgiens. Le Barrois présente un paysage de bas plateaux (altitudes inférieures à 400 m) ondulé, incliné vers l'ouest et largement incisé d'une centaine de mètres par les vallées subméridiennes et quasi parallèles de la Marne, de la Saulx et de l'Ornain. Ces vallées déterminent les niveaux de base du karst dont l'organisation spatiale est conditionnée par le compartimentage tectonique de l'aquifère calcaire.

La structure monoclinale du Barrois (pendage généralisé vers l'ouest) est affectée par une tectonique souple, orientée NNE-SSO, réminiscence du Tréfonds hercynien et par une tectonique cassante subméridienne plus récente.

Des ondulations synclinale (« synclinaux » de Treveray et de Révigny-sur-Ornain) et anticlinale (« anticlinal » de Bar-le-Duc-Levoncourt) traversées par les grandes vallées citées plus haut conditionnent le gradient hydraulique du karst et les échanges nappes-rivières. En effet, Dans la traversée du synclinal de Treveray, les cours d'eau (Saulx, Orge) sont perchés par rapport à leur nappe et se perdent par des infiltrations diffuses et localisées (karst d'infiltration de type vadose) qui nourrissent la zone saturée mais profonde de l'aquifère. Cette dernière se vidange sur le flanc nord de l'anticlinal de Bar-le-Duc à la faveur de systèmes karstiques organisés en connexion avec un karst couvert sur le plateau.

A la différence des karsts de haute montagne assistés par une tectonique forte (souple et cassante), et qui bénéficient de forts gradients hydrauliques, le karst du Barrois, comme la plupart des karst de bas plateaux de l'est de la France, est un karst de contact lithostratigraphique. Ce sont les contrastes de perméabilité des roches qui déterminent véritablement la karstification. L'exokarst s'organise alors en front de karstification le long du contact Crétacé/Tithonien sous la forme de liséré, de vallon ou d'anneaux karstiques (butte). Gouffres, vallées aveugles et

dolines jalonnent ce front et nourrissent la zone endokarstique représentée par des gouffres en escaliers sous failles en système vadose et une série de collecteurs callés sur le principal mur aquifère (la Pierre Châline).

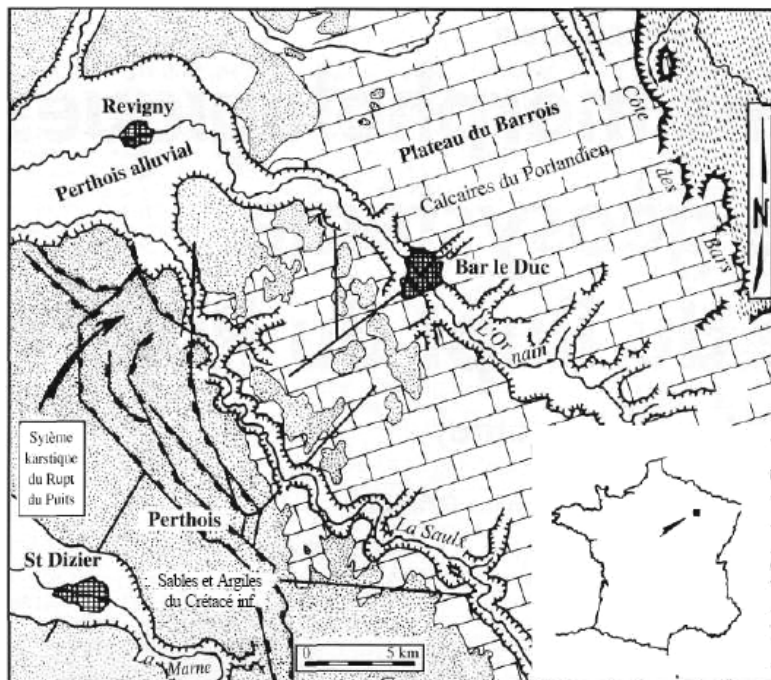


Figure 1 : Situation du système du Rupt du Puits (d'après Jaillet et al, 1995)

Le développement vertical de la zone d'infiltration ne dépasse pas 50 m alors que les collecteurs alternant zones épinoyées et zones saturées peuvent présenter de beaux réseaux pénétrables (Rupt-du-Puits).

Deux sites ont été retenus compte-tenu de leur fréquentation et de leur développement : Le Rupt-du-Puits et les carrières souterraines de Savonnières-en-Perthois.

Ces deux sites sont bien ventilés vu la densité de diaclases et d'ouvertures à l'extérieur. Les remplissages au Rupt-du-Puits sont d'origines naturelle et alluviale (galets, argiles et sables) alors qu'en carrière souterraine, ils correspondent à des remblais calcaires centimétriques à métriques entre les piliers tournés.

2 Teneurs en radon du Rupt du Puits

2.1 Description sommaire

Le Rupt-du-Puits (commune de Beurey sur Saulx) est incontestablement le réseau spéléologique de l'est de la France de bas plateau le plus visité avec ses 21 km de conduits topographiés et son bassin de 13 km² de surface (JAILLET et al, 1995). Le

collecteur et ses affluents présentent des galeries subhorizontales avec des marques de captures et d'incision (étagements, coudes). Les affluents sont légèrement perchés et davantage tributaires de la fracturation.

En incisant le mur aquifère, le collecteur présente un comportement hydrodynamique typique de rivière souterraine à régime vadose avec des mises en charge rapides, très courtes (quelques heures) et bien localisées (amont du siphon aval) en phase de crue (montée, décrue et ressuyage rapides).

Les remplissages au Rupt-du-Puits sont d'origines autochtone et allochtone alluviale (galets, argiles et sables).

2.2 Localisation des stations

Trois stations ont été choisies dans le réseau du Rupt-du-Puits :

- Station 1 : dans la galerie des macaronis, au niveau de la salle centrale, sur remplissage.
- Station 2 : dans la galerie du silence, sur remplissage (galerie fossile) derrière une cloison de calcaire
- Station 3 : à la confluence galerie des marmites et des téméraires sur remplissage.

2.3 Résultats et interprétation

Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Station	Période de mesures	Rn (Bq.m ⁻³)
1	27/06/03_03/10/03	5000
Marmite	03/10/03_17/01/04	4190
	30/01/2004_23/04/04	4500
	23/04/04_24/09/04	8110
2	27/06/03_03/10/03	6620
Silence	03/10/03_17/01/04	6570
	30/01/2004_23/04/04	930
	23/04/04_24/09/04	perdu
3	27/06/03_03/10/03	perdu
Macaronis	03/10/03_17/01/04	6350
	30/01/2004_23/04/04	6280
	23/04/04_24/09/04	179

Tableau 1 : Teneurs en radon du Rupt du puits

Suite à des problèmes logistiques, la durée d'exposition des dosimètres a été prolongée (5 mois) pour la dernière série de mesures.

On déplore la perte de deux dosimètres, et l'on peut considérer la valeur indiquée à la station 3 pour la période 23/04/04_24/09/04 comme extrêmement douteuse, de même pour le dosimètre concernant la période 30/01/2004_23/04/04 pour la

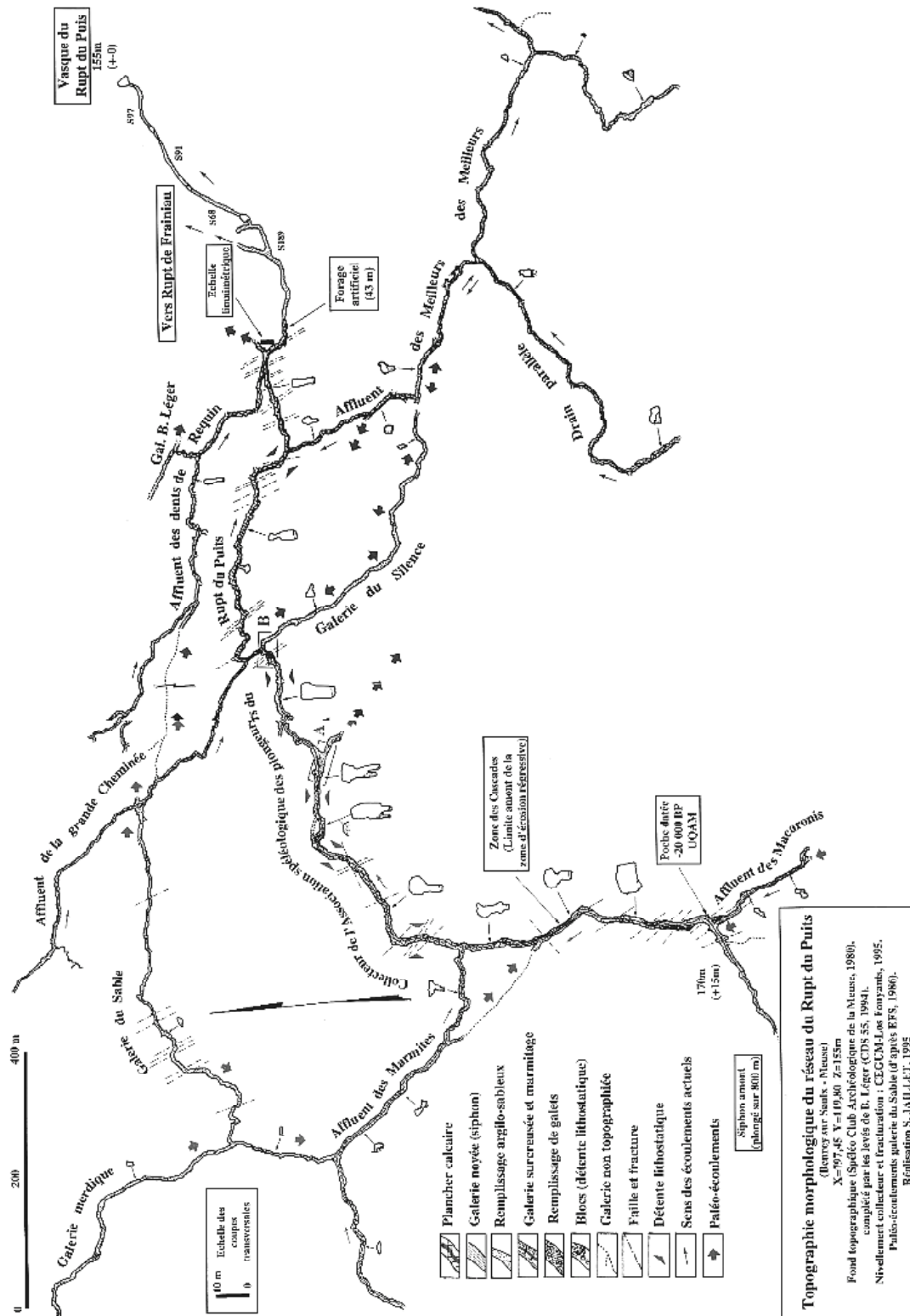


Figure 2 : Rupt du puits : Localisation des dosimètres radon
(Topographie d'après JAILLET et al. 1995)

station 2, à moins que le régime thermoclimatique pour la période considérée apporte une explication à ces valeurs anormalement basses tant pour la cavité (en comparant aux autres valeurs obtenues), que par rapport aux valeurs moyennes habituelles dans le karst. Soulignons de plus que la valeur 179 Bq/m³ concerne la période estivale, qui fournit habituellement les valeurs les plus fortes.

En tenant compte de ces restrictions qui limitent notablement les possibilités d'interprétation, on peut considérer que les teneurs en radon sont assez élevées dans l'ensemble du réseau, puisqu'une moyenne de 5394 Bq/m³ est observée (la valeur 179 n'a pas été incluse). Par ailleurs, il semble exister une relative homogénéité des teneurs.

Ces valeurs relativement élevées peuvent s'expliquer par l'importance de la couverture tertiaire de surface qui doit limiter les échanges gazeux entre le réseau de fentes et l'extérieur, et être également piégée dans le réseau karstique sous jacent. L'important développement du réseau offre une surface d'échange entre ces remplissages et l'air de la cavité.

Une étude climatologique soignée permettrait d'en savoir plus sur les modalités de répartition du gaz dans la cavité.

3 Teneurs en radon des carrières souterraines de Savonnières-en-Perthois

3.1 Description sommaire

Au cœur du Synclinal de Treveray représenté par une dynamique karstique d'infiltration de type vadose (gouffres), l'exploitation de la pierre de taille calcaire (Oolithe de Savonnières) dont le développement est estimé entre 300 et 350 km a recoupé une série de gouffres aveugles pratiqués par de nombreux spéléologues (réseau de la Sonnette, Besace). Des pseudo-galeries horizontales callées sur fracture, perchées et morpho-génétiquement liées à des paléo-circulations phréatiques noyées, sont désignées sous l'appellation locale de « viailles ».

Les sites de mesure du radon regroupent donc des cavités naturelles de type gouffres en escaliers sous failles, de type « viailles », et des vides artificiels liés à la technique d'exploitation en piliers tournés progressivement comblés par du remblais.

3.2 Localisation des stations

Trois dosimètres ont été posés :

- 1 : Dans la grande Viaille amont, sur calcaire à 1.5 m du sol dominant l'écoulement
- 2 : Au carrefour de la Belgique, posé derrière un pilier et sur remblais (passage de véhicule de spéléologues à proximité)
- 3 : A l'entrée n°2 de la Besace sur le calcaire et à 1.5 m du sol.

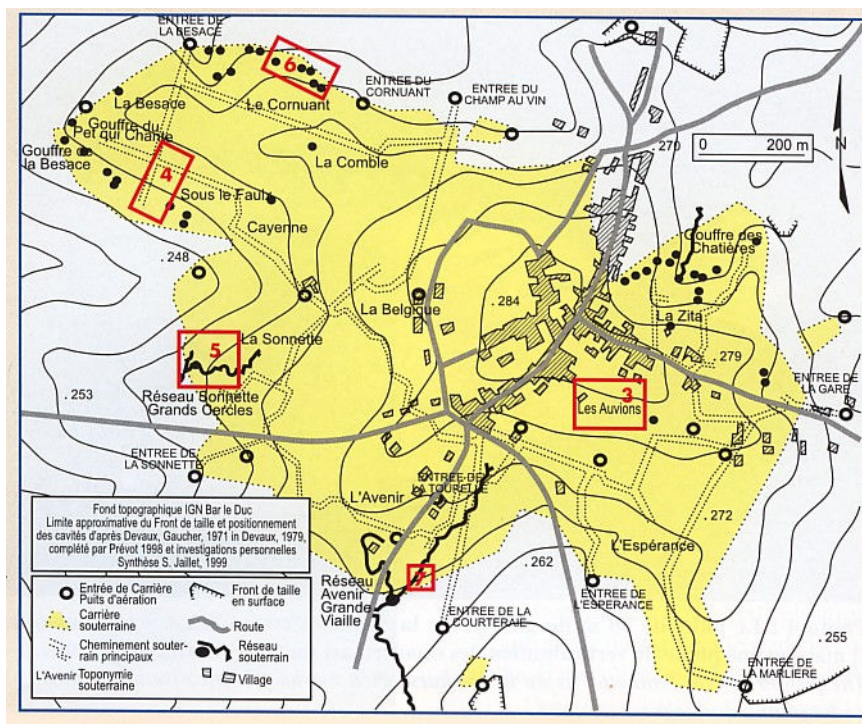


Figure 3 : Plan schématique des carrières et réseaux naturels des carrières souterraines de Savonnières-en-Perthois (d'après JAILLET et Al., 2002).

3.3 Résultats et interprétation

Station	Période de mesures	Rn (Bq.m ⁻³)
1	28/06/03_03/10/03	1560
Gde	03/10/03_17/01/04	180*
Viaille	17/01/2004_02/04/04	100
	02/04/04_10/09/04	2341
2	28/06/03_03/10/03	360
Belgique	03/10/03_17/01/04	150
	17/01/2004_02/04/04	170
	02/04/04_10/09/04	340
3	28/06/03_03/10/03	850
Besace	03/10/03_17/01/04	850
	17/01/2004_02/04/04	1240
	02/04/04_10/09/04	1658

Tableau 2 : Teneurs en radon des carrières de Savonnières

* = déplacé

Précisons que suite à des problèmes logistiques, ici aussi la durée d'exposition des dosimètres a été prolongée (5 mois) pour la dernière série de mesures.

La moyenne annuelle des valeurs en radon indiquées pour les carrières de Savonnières s'élève à 816 Bq.m⁻³, ce qui situe la cavité dans les faibles teneurs

relatives. Il existe cependant des disparités locales : au niveau de la Grande Vaille, on observe une amplitude de variation qui atteint 15, avec un minimum hivernal, reflet probable de la thermoventilation saisonnière.

Dans le carrefour de la Belgique, l'amplitude est plus faible (≈ 2), les résultats sont homogènes et assez faibles, avec ici aussi une variations saisonnière.

A l'entrée n°2 de la Besace, les résultats sont plus difficiles à interpréter sans données climatologiques plus précises. En effet, on observe des valeurs deux fois plus élevées en début 2004, et notamment pendant la saison estivale.

On peut donc expliquer ces résultats par une bonne ventilation des galeries, et la faible intrusion de remplissages venus de l'extérieur, les vailles étant de genèse essentiellement phréatique.

4 Bibliographie

JAILLET S., GAMEZ P., 1995 : Observations morphologiques sur le géosystème karstique du Rupt du Puits (Meuse, Lorraine). *Karstologia* 26-2, 27-38.

JAILLET S., DEPAQUIS JP, HERBILLON C., 2002 : "Le karst et les carrières souterraines du Barrois: un siècle et demi de relations Hommes/Milieu", *Karstologia* N°40-2, pp.27-38.

Teneurs en radon atmosphérique de deux cavités karstiques proches du socle : ruisseau souterrain de La Pépie et grotte des Borderies (Dordogne).

Jean-Michel Ostermann

Deux cavités du nord du département ont été choisies pour cette étude car elles présentaient un certain nombre de caractéristiques permettant de penser que le radon y serait élevé : il s'agit tout d'abord de cavités situées sur la bordure nord est du bassin Aquitain, au voisinage des terrains métamorphiques et éruptifs qui marquent le début de la région limousin. Ce sont par ailleurs deux cavités creusées au sein de massifs largement recouverts de terrains tertiaires et/ou quaternaires issus de l'érosion du socle.

1. Le radon atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie (Saint-Front sur Nizonne, Dordogne)

L'étude préliminaire ayant révélé de fortes teneurs en radon dans cette cavité avec une moyenne annuelle de 4639 Bq.m^{-3} , nous avons décidé d'en poursuivre l'étude.

1.1 Contexte géomorphologique

Le ruisseau souterrain de La Pépie s'ouvre sur la commune de Saint Front sur Nizonne, au nord du département de la Dordogne (coordonnées Lambert : X = 467.00 Y = 52.82 Z = 195 m).

Nous sommes ici au niveau de la bordure nord-est du bassin aquitain, et à proximité des premières failles qui le mettent en contact avec les terrains cristallins du limousin distants d'environ six km seulement. Cette région cristalline est essentiellement composée de granits (granodiorites) souvent fortement arénisés en surface, parfois sur plusieurs mètres d'épaisseur comme dans la zone de plateau. Il existe également des affleurements peu étendus de gneiss pélitiques.

Les failles, dont l'orientation majeure est NW-SE (faille du Puy), ont également une composante NE-SW, et mettent en contact le socle avec les assises sédimentaires tout d'abord du lias et jurassique, puis du crétacé dans lequel se développe la cavité étudiée.

Mises en place à l'âge Hercynien, ces failles ont subi des rejeux postérieurs et les déformations en relation avec la phase pyrénéo-alpine affectent les dépôts secondaires (FLOCH et al, 1981).

Exploré à partir de 1980 sur environ 1500 mètres (OSTERMANN et al, 1983), le ruisseau souterrain de La Pépie se développe dans les calcaires du Turonien, plus précisément de l'Angoumien supérieur. Il s'agit d'un calcaire riche en rudistes comme nous pouvons l'observer dans la cavité.

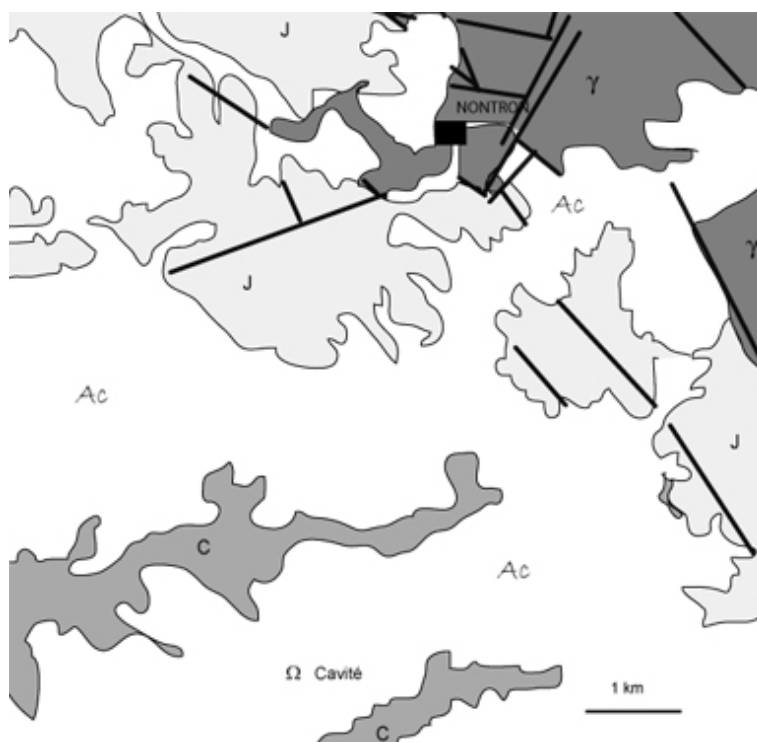


Figure 1 : carte géologique simplifiée de la région

Ac : altérites colluvionnées et sédiments divers ; J : calcaires jurassiques (Bathonien et Bajocien) ; C : calcaires crétacés ; γ : roches éruptives du socle.

Le massif au sein duquel s'ouvre la cavité est un karst couvert d'une couche d'épaisseur métrique à pluri métrique, mentionnée comme « altérites colluvionnées » sur la carte géologique. Ce recouvrement est un dépôt non fluviatile probablement quaternaire composé d'alluvions riches en silice avec une matrice argilo-sableuse parfois rougeâtre évoquant le sidérolithique très présent dans la région. Il s'agit notamment d'altérites du socle, dans lesquelles on retrouve une proportion non négligeable d'arènes gneissiques et granitiques. Bordé de petites résurgences rarement pénétrables, ce massif comporte sur sa zone centrale de très nombreuses dolines, et la cavité fut découverte par désobstruction de l'une d'entre elles.

Une épaisse végétation typiquement silicicole (châtaignier, bruyère, ...) associée à une forêt de chênes et pins couvre l'ensemble de la région.

1.2 Description de la cavité

Après la doline d'entrée, on pénètre par une étroiture dans une galerie sèche d'environ 2 mètres de large qui permet d'atteindre rapidement un méandre menant au siphon amont, début du réseau actif. Le ruisseau, de débit très modeste (généralement aux alentours d' 1 l.s^{-1} en moyenne), est ensuite parcouru jusqu'au fond de la cavité, en suivant toujours une galerie en méandre parfois interrompue par des salles de quelques mètres de diamètre, quelques puits ascendants, et une large galerie transversale obstruée à ses deux extrémités, la « Grande diaclase ». Le ruisseau la traverse et se poursuit dans une nouvelle galerie méandrique qui permet d'atteindre le fond actuel de la cavité, à environ 1500 m de l'entrée.

Un étage supérieur est accessible dès la zone d'entrée, et peut être parcouru sur environ 350 mètres. Les connexions avec l'étage actif y sont très nombreuses.

Il existe un important remplissage clastique, et surtout allochtone composé de galets de silice et de sable, ainsi que de nombreux passages argileux. Les concrétions sont très rares. De nombreuses zones de soutirage de la couverture sont visibles, surtout au niveau de l'étage supérieur. Elles permettent l'intrusion dans la cavité d'éléments argileux et siliceux issus de la couverture alluviale, parfois de manière massive au niveau des dolines en relation directe avec le réseau endokarstique. Au niveau de la Grande diaclase, le ruisseau a déposé, puis surcreusé une épaisse banquette argileuse à l'aspect parfois varvé. Un long chenal de voûte, situé à 3 m de haut, indique ici un creusement paragénétique initial, et l'importance jouée par le remplissage issu de la surface dans la genèse des formes endokarstiques.

On remarque par ailleurs le recoupement de plusieurs zones pseudo endokarstiques, qui se présentent sous forme de galeries partiellement évidées, mais où les fantômes de roche sont bien visibles (station 3 par exemple).

A noter également que la néotectonique semble avoir affecté certaines portions de la cavité, comme en témoignent l'existence de certaines fractures d'allure récente qui affectent la galerie principale.

1.3 Climatologie

La cavité est parcourue par un courant d'air soufflant nettement vers l'extérieur en hiver, et aspirant faiblement en été. Elle n'est cependant pas assimilable à un tube à vent, une seule entrée existant dans la zone haute. La température moyenne de la cavité est d'environ 13° . Une étude climatologique sommaire a montré des teneurs en CO_2 variant de 0.8 à 2 % quelles que soient les saisons, avec peu de variations inter saisonnières, et même une tendance à la hausse des valeurs en hiver (tableau 1), contrairement aux données habituelles dans le

karst. Nous avons attribué ce fait à l'arrivée dans la cavité d'air extérieur en été, alors que le régime hivernal assure une redistribution de l'atmosphère notamment du réseau de fentes (OSTERMANN, 1990).

	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Station 6	Station 7
Sept. 86	1.4 %	0.8 %		1.1 %		1.3 %	1.5 %
Janv.87		1.5 %	1.5 %			2 %	
Sept. 87	1 %	1.12 %	1.2 %		1.4 %		1.12 %

Tableau 1 : CO² atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie, 1986-1987

Afin de confirmer éventuellement ces données inhabituelles, de nouvelles mesures ont été réalisées à la pompe Draeger Accuro pendant les levées de dosimètres (tableau 2).

	Station 1	Station 2	Station 3
Juin 2003	1,2 %	1,25 %	1,7 %
Septembre 2003	1,5 %	2 %	1,8 %
Décembre 2003	2,3 %	2,5 %	3 %
Mars 2004	1,3 %	1,5 %	1,5 %

Tableau 2 : CO² atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie, 2003-2004

Ces mesures ont permis de confirmer sans ambiguïté les observations précédentes, avec des valeurs oscillant entre 1,2 et 3 %, et un maximum en décembre.

1.4 Localisation des stations

Les stations ont été dispersées pour avoir un aperçu éventuel de la cinétique du radon dans la cavité. Elles sont toutes placées à une distance de l'entrée respectivement de environ 120 m, 170 m et 240 m, entre 2 et 2.50 m de hauteur par rapport à l'écoulement souterrain, le risque de crue n'étant pas inexistant. On aura donc des valeurs à priori moins élevées qu'au niveau du sol, le radon étant un gaz très lourd.

La station 1 est située sur une banquette en rive droite à 2,30 m de hauteur, environ 15 m après le siphon. Il n'existe pas de remplissage au niveau de cette banquette. La zone est ventilée.

La station 2 est toujours en rive droite, à 3 m de hauteur, sur une banquette partiellement recouverte de sable (épaisseur environ 10 cm).

Enfin, la station 3 se situe dans un passage suspendu à gauche dans le méandre, dans un recoin mal aéré au contact immédiat d'une cavité pseudo-endokarstique à 2,50 m du bas de la galerie.

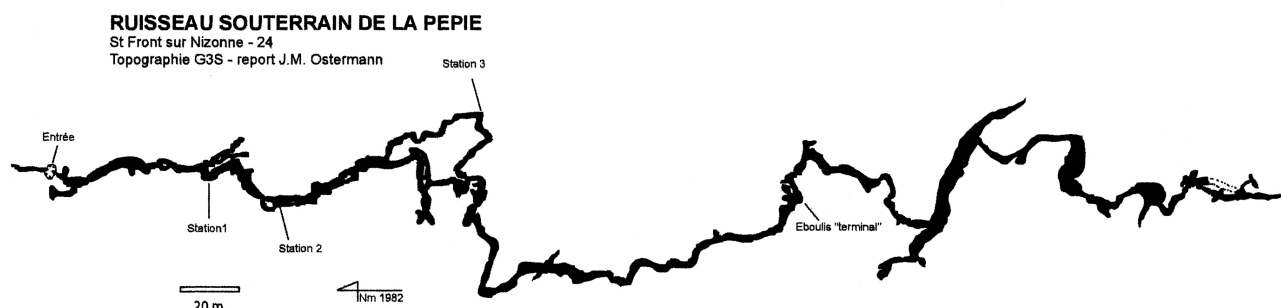


Figure 2 : Plan du ruisseau souterrain de La Pépie et localisation des stations

1.5 Résultats

Station	Période de mesures	Rn (Bq/m ³)
1	01/06/03_14/09/03	12930
	14/09/03_16/12/03	5070
	16/12/2003_28/03/04	3310
	28/03/04_12/07/04	12010
2	01/06/03_14/09/03	10030
	14/09/03_16/12/03	4990
	16/12/2003_28/03/04	4190
	28/03/04_12/07/04	10910
3	01/06/03_14/09/03	8770
	14/09/03_16/12/03	4500
	16/12/2003_28/03/04	4390
	28/03/04_12/07/04	12160

Tableau 3 : teneurs en radon du Ruisseau Souterrain de La Pépie

1.6 Discussion

Les valeurs mesurées lors de cette 2^e année d'étude confirment que le ruisseau souterrain de La Pépie est une cavité à très fortes teneurs en radon atmosphérique. On obtient en effet sur cette seconde période d'étude une valeur moyenne cette fois de 7771 Bq/m³, avec un minimum à 3310 Bq/m³ et un maximum à 12930 Bq/m³.

Les trois stations ont une variation homogène des valeurs, avec un net maximum estival. L'amplitude des variations pour les stations 1, 2, et 3 est respectivement de 3.9, 2.39, et 2.77.

Il existe une relative dispersion des valeurs entre les trois stations lors du premier trimestre de mesures (fig. 3), que l'on ne retrouve pas à la période estivale suivante. Nous allons interpréter les valeurs absolues, les variations de valeurs, et tenter une approche comparative de la cinétique de CO² et Radon.

1.6.1 Valeurs observées

Dans l'absolu, les teneurs en radon sont donc très élevées, avec la moyenne la plus forte parmi toutes les cavités karstiques étudiées à ce jour sur le pays. Cette valeur est d'ailleurs proche du « record » de 20 000 Bq/m³ observé par HYLAND (1995), d'ailleurs non retrouvée lors d'études ultérieures (FRIEND et al., 2002).

Il semble évident que l'on puisse attribuer ces fortes teneurs à l'importante exhalation des remplissages allochtones de la cavité. Ils sont en effet omniprésents, et l'on a vu qu'ils sont issus de l'érosion du socle granitique distant de quelques kilomètres seulement, et qui est très arénisé. On sait d'ailleurs que les granits du Limousin sont riches en uranium, puisque plusieurs gisements y sont exploités. L'épaisse couche d'alluvions qui recouvre le karst, issue en grande partie de cette érosion, a joué un rôle probablement majeur dans la spéléogénèse de la cavité en acidifiant les eaux météoriques, et en assurant une diffusion constante de ces eaux acides. L'observation de plusieurs zones de pseudo endokarst pourrait le confirmer. La forme des galeries semble également avoir été dictée par ces alluvions qui se retrouvent piégées en de multiples zones dans les deux niveaux du réseau. L'intrusion se fait essentiellement au niveau des nombreuses dolines du secteur, mais également au niveau de diaclases observées en grand nombre dans la cavité.

On ne peut cependant écarter formellement un rôle éventuel de la tectonique (par apport d'origine profonde) dans les teneurs en radon de la cavité. En effet, la proximité immédiate d'accidents majeurs (faille du Puy par exemple) et l'observation in situ de fractures récentes sont des indices à ne pas négliger.

1.6.2 Variations des valeurs

Les variations observées correspondent aux données de la littérature (HAKL et al, 1997) avec un maximal estival et minimum hivernal, les variations endokarstiques

étant induites par la climatologie extérieure qui favorise le renouvellement de l'air des cavités. Celles-ci se comportent généralement en piège à air froid.

Plus difficile est l'interprétation du fait que ces variations ne suivent pas celles du CO² atmosphérique, notamment si l'on considère que les deux gaz sont des traceurs interprétés comme fiables des ventilations souterraines. Ceci impose une analyse séparée de chacun de ces gaz, réalisée au § 6.3.

Par ailleurs, les mesures ayant été réalisées sur deux années consécutives, cela nous autorise à effectuer des comparaisons interannuelles : la valeur moyenne sur la période 2002-2003 était de 4639 Bq/m³, alors que l'on trouve 7771 Bq/m³ pour la période 2003-2004. On a donc une importante variation interannuelle, avec une amplitude proche de 1,7. Bien que la durée moyenne de séjour des dosimètres ait été différente sur les deux périodes (4 mois contre 3), ce qui n'autorise pas une analyse plus fine, on peut attirer l'attention sur le fait que toute étude d'exposition au radon devra tenir compte de cette possible variation d'une année à l'autre.

1.6.3 CO² et radon

Bien qu'il soit délicat de comparer les mesures intégrées de Radon avec les mesures ponctuelles de CO², nous possédons suffisamment d'éléments pour remarquer que les deux gaz ont un comportement totalement différent, puisque le maximum de l'un correspond au minimum de l'autre, et inversement (fig. 3). Si les valeurs obtenues pour le radon sont conformes aux données acquises pour le karst, il en va différemment pour le gaz carbonique, habituellement beaucoup plus élevé dans les cavités en été qu'en hiver. La dispersion des deux gaz n'obéit donc pas à la même logique dans La Pépie, et c'est là un problème intéressant à étudier.

Concernant le CO², nous avons vu que les plus fortes valeurs s'observent en hiver. La structure même du karst, plateau fissuré avec forte couverture alluviale jouant le rôle à la fois de producteur de CO² biogénique, et de couverture atténuant les échanges cavité/atmosphère externe notamment en saison humide, peut expliquer le phénomène. Il faut considérer la cavité comme un volume ouvert sur l'extérieur, situé à l'intérieur d'un beaucoup plus vaste volume constitué par le réseau de fentes, très enrichi en CO² d'origine pédologique. Cette notion de « volumes emboîtés » a été développée par RENAULT (1992). En été, l'air extérieur pénètre dans la cavité par l'entrée et probablement plusieurs fissures en position haute par rapport à l'ensemble des conduits, et cet air tend à atténuer les teneurs en CO² des conduits. En hiver, l'air chaud de la cavité s'échappe par l'entrée, et les valeurs hautes de dioxyde de carbone sont à rapprocher d'un équilibre se produisant entre conduits et réseau de fentes.

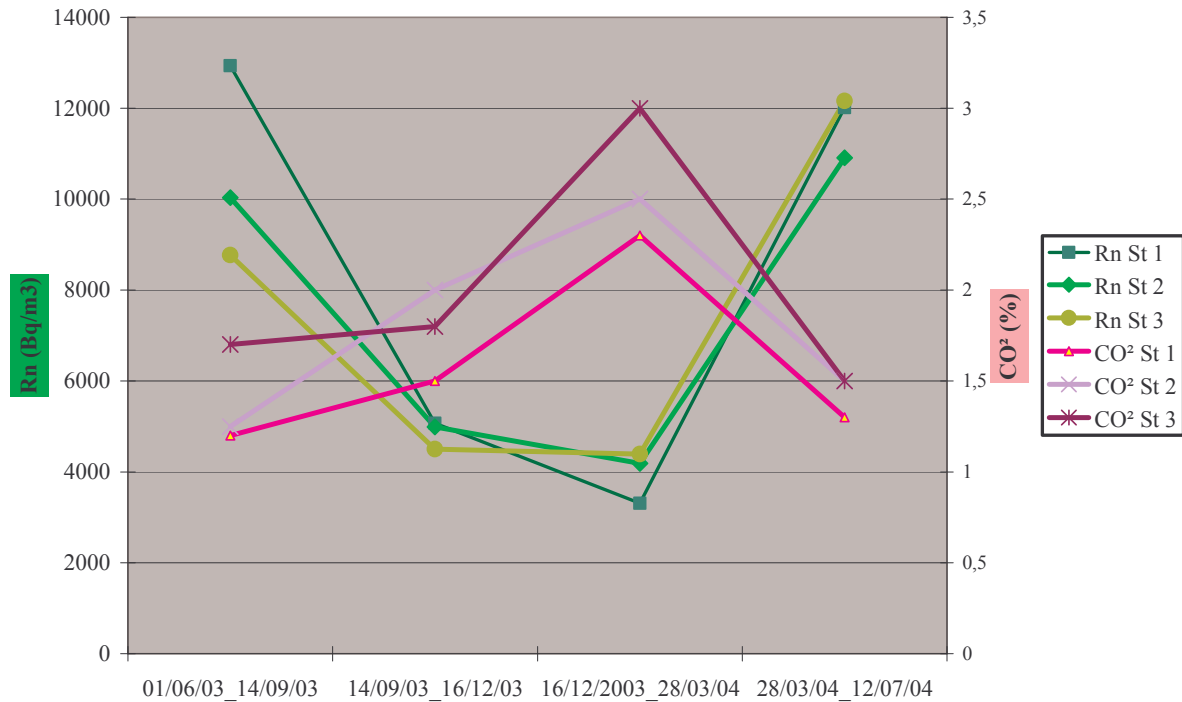


Figure 3 : graphique combiné CO² / Radon, Ruisseau souterrain de La Pépie
(mesures de CO² ponctuelles et réalisées au début de la période considérée, et mesures de Rn intégrées sur 3 mois)

Concernant le radon, la production étant à priori quasi exclusivement endocavitaire, la diminution hivernale peut s'expliquer par une meilleure ventilation des conduits à cette période, comme le prouve la forte ventilation vers l'extérieur à l'entrée. En saison estivale, l'air extérieur pénètre dans la cavité, mais cela ne suffit pas à diluer le radon qui se trouve piégé puisqu'il n'y a pas d'entrée basse. Les échanges entre conduits et extérieur sont négligeables à cette saison, ce qui explique les fortes teneurs observées.

On pourrait résumer en attribuant au ruisseau souterrain de La Pépie une morphologie complexe de volumes emboîtés, avec une ventilation efficace des conduits en hiver, avec circulation de l'air dans le sens réseau de fentes / conduits / extérieur, et l'inverse en été. On suppose bien entendu dans ce schéma que le radon n'est pas stocké par le réseau de fentes, ce qui peut s'expliquer par sa masse moléculaire élevée, et des échanges essentiellement barométriques entre les deux compartiments. On admet par ailleurs que le radon existe essentiellement au niveau de sa zone de production soit dans les conduits, et au niveau de la couverture alluviale qui pourrait enrichir les fissures du karst, mais avec une demi-vie de 3,8 jours, ne fait pas de ce réseau de fentes un réservoir en radon comme c'est le cas pour le CO².

1.7 Conclusions

Le ruisseau souterrain de La Pépie offre l'exemple d'une cavité à fortes teneurs en radon, ce qui s'explique par la proximité du socle qui a généré une épaisse couverture riche en uranium, piégée par le karst. Le type morpho-climatique de la cavité participe également à la faible évacuation du gaz à l'extérieur. La comparaison avec les valeurs en CO² atmosphérique permet de mettre en évidence un comportement différencié entre les deux gaz : le radon apparaît ici comme un traceur plus spécifique de la ventilation des conduits karstiques.

Les teneurs élevées de la cavité peuvent inciter à limiter les visites, notamment en période estivale.



Photographie 1: Mise en place d'un dosimètre dans le ruisseau souterrain de La Pépie

2. Le radon atmosphérique de la grotte des Borderies (Hautefort, Dordogne)

La grotte des Borderies, tout comme celle de La Pépie, est située au nord du département de la Dordogne. Bien que de développement bien moindre, son étude dans le cadre des observations sur le radon était intéressante en raison de certaines similitudes : karst couvert, remplissages importants, proximité du contact avec le socle...

2.1 Contexte géomorphologique

La région dans laquelle s'ouvre la grotte des Borderies est commune à trois entités géologiques : le bassin houiller et permien de Brive à l'est, le socle métamorphique du Limousin au nord, et le bassin aquitain sédimentaire au sud et à l'ouest.

- Le Limousin, situé à environ 4 km de la cavité, est composé essentiellement de formations métamorphiques et éruptives : schistes, gneiss, rhyolites,... les granits étant assez peu représentés dans cet ensemble.

- Le bassin de grès permien de Brive est composé de conglomérats associés à des schistes, grès et argiles rouges, les lambeaux houillers étant en fait exceptionnels.

- Le bassin aquitain est représenté ici par les calcaires du jurassique : Hettangien, Sinémurien, Domérien et Toarcien, au contact des terrains métamorphiques ou en buttes témoin sur les grès, puis calcaires oolithiques du Bathonien et Bajocien (caractéristiques du « Causse Périgourdin »). C'est dans ce dernier étage que s'ouvre la cavité. Tout comme pour la région du ruisseau souterrain de La Pépie étudié précédemment, une couverture d'alluvions tertiaires masque une partie des roches sédimentaires. Il s'agit d'une couverture de sables et argiles ferrugineuses à rapprocher du sidérolithique, formés à l'éocène aux dépens de calcaires érodés. Il existe aussi des formations argilo sableuses à galets : nappe de galets de quartzites, à rapprocher des sables du Périgord (miocène).

Sur le plan tectonique, l'accident le plus proche de la cavité est la faille de Châtres, d'orientation NO-SE. Elle est située environ 10 km au sud, affectant essentiellement les terrains sédimentaires et créant un contact anormal avec les grès de Brive.

La région est traversée par l'Auvézère qui, après un parcours encaissé et tumultueux sur le socle, a creusé une large vallée au niveau du Périgord sédimentaire, entourée de plateaux calcaires de faible altitude (environ 200 m) aux versants régulés. De nombreuses cavités y ont été explorées, dont la grotte des Borderies.

2.2 Description de la cavité

La grotte des Borderies, découverte en 1981 sur la commune de Hautefort (CARCAUZON, 1981), s'ouvre sur le flanc abrupt d'une doline asymétrique où se perd un ruisseau drainant les prés avoisinant. L'entrée, fermée par une grille pour des raisons de protection, se situe à mi-hauteur de cet escarpement, et débute par une étroite galerie de quelques mètres de long. On rejoint alors une galerie plus large (2 à 3 m en moyenne) vite obstruée en amont, que l'on parcourt jusqu'au fond de la cavité, à environ 280 m de l'entrée. Elle se termine par une petite salle qui permet un accès ponctuel au ruisseau souterrain sous jacent, puis par un éboulis volumineux qui la colmate presque entièrement. Seul un passage latéral ventilé permettrait de prolonger l'exploration, mais l'instabilité des lieux n'y incite guère. A quelques mètres de ce terminus existe en surface la perte des Borderies N°2, explorée en 1995 (OSTERMANN, 1998), qui permet de rejoindre l'aval du ruisseau souterrain et de le parcourir sur une centaine de mètres.

La galerie principale est formée surtout aux dépends de plusieurs diaclases, et on remarque des formes de creusement en régime noyé (coupoles). La forme actuelle révèle cependant surtout une galerie à banquettes, sur lesquelles sont d'ailleurs parfois disposés des lits d'alluvions. Plusieurs passages témoignent d'un effondrement secondaire de massifs stalagmitiques, en raison d'un travail de creusement sous jacent par le ruisseau souterrain actuel.

La grotte nous a intéressé car elle présente d'importants remplissages, avec tout d'abord un concrétionnement esthétique ayant justifié sa fermeture. Par ailleurs, il est notable que d'importants apports de la surface ont participé au colmatage de la galerie. Il existe en effet un gisement paléontologique contenant notamment ursidés, capridés, bovidés, cervidés,... mentionné par les inventeurs, et l'on doit signaler également la présence de silex taillés, tout comme dans la perte N°2 où ils sont attribués au Moustérien. Les remplissages alluviaux sont facilement observés en de nombreux endroits dans la galerie principale, où ils ont été surcreusés lors des périodes de fortes eaux. Ils sont composés surtout d'éléments grossiers, avec des galets de silice pris dans une matrice argilo sableuse. On distingue ici aussi quelques nodules de pyrite, le tout provenant bien entendu de la couverture du karst en particulier par les pertes étagées, et probablement d'entrées actuellement colmatées qui ont pu favoriser l'occupation des lieux par *Ursus spelaeus* entre autres.

La galerie d'accès est un ancien affluent du conduit principal qui est désormais inactif, avec cependant plusieurs regards sur une circulation souterraine qui fut retrouvée dans la perte des Borderies N°2, dont l'entrée se trouve à environ 250 m de la première.

Sur le plan hydrologique, la cavité représente donc un regard sur la circulation souterraine qui ressort à la résurgence de l'Ouillade de St Hilaire, à une distance d'un peu moins d'un kilomètre, dans la vallée de l'Auvézère (coloration du 7 janvier 1981).

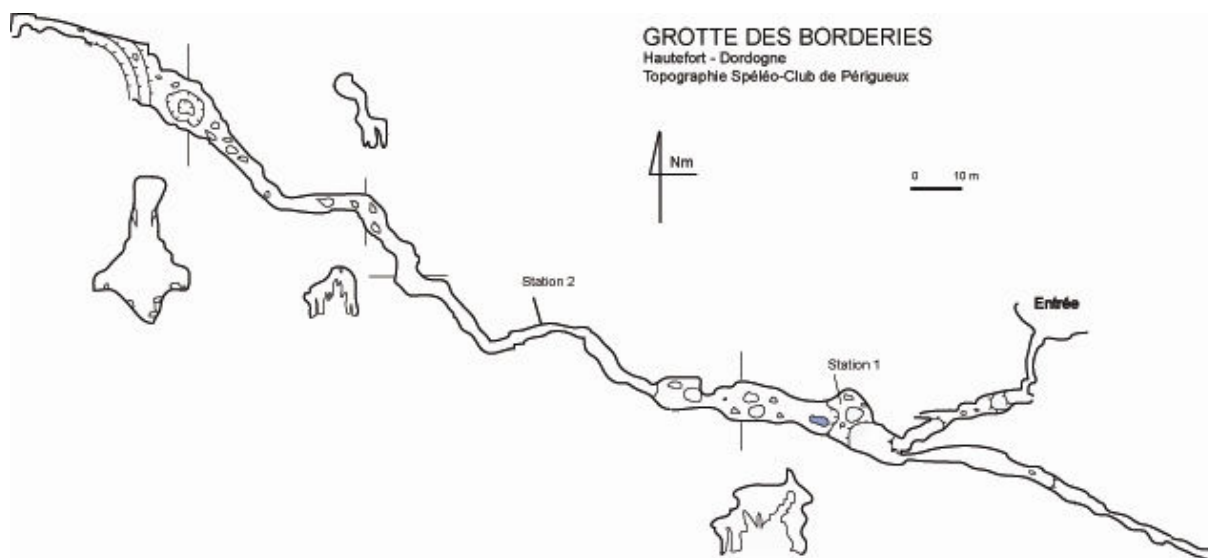


Figure 4 : Localisation des stations de la grotte des Borderies.

2.3 Climatologie

Cette cavité de morphologie très simple est modérément ventilée avec un courant d'air soufflant en hiver, ce qui confirme que l'entrée actuelle est haute par rapport au développement des galeries connues ou non. Il existe très certainement un développement en amont, mais ne présentant aucune communication d'air avec les parties actuellement explorées. Côté aval, l'éboulis terminal présente un courant d'air net, et signe une communication avec la perte N°2, distante de quelques mètres seulement. La température moyenne de l'air est de 12.8°C, pour une hygrométrie relative toujours supérieure à 96 %.

Quelques mesures de CO² réalisées en avril 2004 au niveau des stations ont montré des teneurs de 0.3 et 0.35 %, confirmant une relativement bonne ventilation de la cavité.

2.4 Localisation des stations

Le développement de la cavité étant faible, seules deux stations furent créées :

- La première est située à environ 40 m de l'entrée, dans la galerie principale à proximité d'un joli gour. Le dosimètre était placé à même le sol (argileux à cet endroit), à l'abri des ventilations.
- La seconde station était placée à proximité immédiate d'une importante zone de remplissage, au milieu de la cavité, sur le sol d'une galerie surélevée par rapport au niveau moyen de la cavité principale. Aucune ventilation n'est perçue à cet endroit.

2.5 Résultats

Station	Période de mesures	Radon (Bq/m ³)
1	04/10/03_18/01/04	1600
	18/01/2004_24/04/04	perdu
	24/04/04_05/09/04	3870
	05/09/04_11/12/04	2610
2	04/10/03_18/01/04	1050
	18/01/2004_24/04/04	1280
	24/04/04_05/09/04	2830
	05/09/04_11/12/04	1680

Tableau 4 : Teneurs en radon de la Grotte des Borderies

Avec 7 mesures espacées sur l'année en deux stations et un dosimètre perdu, on évalue la teneur moyenne en radon de la cavité à environ 2131 Bq/m³.

L'amplitude des variations atteint 2.41 à la station 1 et 2.69 à la station 2, avec ici aussi un maximum estival marqué.

La localisation de la seconde station laissait penser que les valeurs y seraient plus élevées (éloignement de l'entrée, à l'écart des courants d'air, et proche de remplissages), or il n'en est rien. Mais sa situation à mi hauteur dans la galerie explique peut être cela.

Bien que le socle proche ait influencé la composition des remplissages allochtones de la cavités, la nature même de ce socle, dont on a vu qu'il était composé de schistes, gneiss, rhyolites, avec peu de granits, a déterminé la présence d'éléments radioactif mais en quantités bien moindre qu'à La Pépie. La bonne ventilation de la cavité participe de plus à une dispersion rapide du radon. On est cependant dans une cavité à teneurs non négligeables, et très proches de la moyenne mondiale (2800 Bq/m³) établie par HAKL et al.

3. Bibliographie

CARCAUZON C., 1981 : Le réseau hydrogéologique B. Pierret (grotte des Borderies – Ouillade de St Hilaire). Spéléo Dordogne 78, 13-24.

FLOCH J.P., ROGER P., SELIER E., PLATEL J.P., LAVIL H., RECOING M., 1981 : Anticlinaux du Périgord Blanc. Carte géologique de la France à 1/50 000. Ed. BRGM.

GUILLOT P.L., FEYS R., LEFAVRAIS-RAYMOND A., RAYNAL J.P., RECOING M., 1978 : Bassin permien de Brive. Carte géologique de la France à 1/50 000. Ed. BRGM.

HAKL J., HUNYADI I., VARHEGYI A., 1997: Radon monitoring in caves. in Radon measurements by etched track detectors. Ed. Durrani & Radomir Ilic, 260-283.

OSTERMANN J.M., GROISARD C., 1983 : Compte-rendu des explorations dans la commune de La Chapelle Montmoreau. Bull. G3S N°5, 3-12.

OSTERMANN J.M., 1998 : Le ruisseau souterrain des Borderies (Hautefort, Dordogne). Périgord Explo 7, 29-33.

OSTERMANN J.M., 1990 : Le gaz carbonique atmosphérique du ruisseau souterrain de La Pépie. Périgord Explo N°3 p 57-62.

OSTERMANN J.M., 2003 : Le radon dans quelques cavités françaises : étude préliminaire. 13^e Rencontre d'octobre. Spéléo-club de Paris, Saint-Christophe-la-Grotte, p 108-114.

RENAULT P., 1992 : Les risques atmosphériques en spéléologie. Actes Symp. Int. Spéléologie et sécurité, Spelunca mém. 18, Ed. FFS, Carpentras 1990, 65-81.

Le radon atmosphérique d'une cavité volcanique, le Creux de Soucy, Besse (Puy-de-Dôme)

Michel Bouthors
Jean-Michel Ostermann

Dans le cadre de la campagne de mesure du radon dans les cavités du pays, il était intéressant d'évaluer les teneurs dans une cavité non karstique. Le Creux de Soucy, cavité volcanique du massif central relativement facile d'accès, nous a semblé apte à jouer ce rôle.

1 Contexte géomorphologique et description de la cavité

Le creux de Soucy (coordonnées Lambert X = 643,175, Y = 2053,500, Z = 1255 m), s'ouvre en plein forêt au sud du lac Pavin par un large entonnoir d'environ 25 mètres de diamètre au fond duquel se situe le gouffre. Nous sommes sur le flanc sud du Puy de Montchal ou Montchalm (1386 m), volcan lié à la création du lac Pavin situé au nord. Une clôture récente évite à l'imprudent de s'approcher de l'ouverture du gouffre. En bas de l'entonnoir, la rambarde financée par E-A MARTEL en 1892 subsiste toujours, mais donne des signes de faiblesse...

Un puits d'environ 22 mètres permet d'arriver sur le classique talus d'éboulis pouvant être submergé sous une hauteur d'eau pouvant aller jusqu'à six mètres. Nous sommes au fond d'une salle d'environ 60 x 40 mètres dont la voûte est constituée essentiellement de basalte. Un "lac" pérenne dont le niveau peut fluctuer d'une dizaine de mètres selon les saisons et le montant des précipitations baigne le bas de la salle, principalement côté sud. Un important éboulis de gros blocs de basalte occupe une grande partie de la salle. Au pied de la voûte, on peut voir des argiles rubéfiées, et un dépôt sédimentaire contenant sable et graviers.

L'eau du lac est de couleur verte, probablement par conjonction de la lumière du jour et des matériaux végétaux dans l'eau. Sa température assez constante a été publiée entre 1,2 et 1,8°C. Ce lac a été sondé à 9,55 m par M. BERTHOULE, maire de Besse en 1892. Il a depuis fait l'objet de plusieurs plongées, en particulier par le Groupe Spéléo Auvergnat à partir de 1966, avec notamment une tentative de désobstruction à -25 m. Plus récemment, A. FROMANT y aurait plongé à plus de 70 m. Le lac présente un entonnoir plongeant à la verticale d'une petite falaise au sud de la salle. Une partie plus ou moins horizontale se développerait vers -10 mètres.

Le Creux de Soucy draine une quantité d'eau fort importante dont le débit moyen est estimé par BAKALOWICZ à au moins 2 m³/s.

La formation de la cavité fait l'objet de plusieurs hypothèses :

E-A Martel pensait d'abord à l'éclatement d'une bulle de gaz au sein du basalte, puis à une poussée de vapeur quand la coulée de lave en fusion a rencontré une nappe d'eau. M. BAKALOWICZ pense que la voûte s'est effondrée en plusieurs phases sur un vide préexistant, une faille pouvant être à l'origine d'un affaiblissement ponctuel. J. SESIANO envisage une sorte de colline souterraine, sapée par l'écoulement de la nappe d'eau, ayant permis l'effondrement de la voûte.

La faune aquatique et terrestre y est assez pauvre (voir bibliographie). Quelques chauves-souris peuvent s'y trouver malgré les conditions peu favorables. En décembre 2004, un minioptère de Schreiber a été observé, ce qui constitue une première.

2 Climatologie

La cavité se présente donc comme un piège à air froid, avec un puits d'entrée largement ouvert sur l'extérieur. On peut donc s'attendre à des faibles teneurs en radon (et CO²) pendant la période hivernale, assez prolongée dans la région, et à une élévation des teneurs en été.

Concernant le CO², bien que MARTEL (1894) et ses collaborateurs en aient trouvé une teneur assez forte, il semble que depuis plusieurs décennies la concentration de ce gaz soit suffisamment faible pour ne pas provoquer de symptômes perceptibles à l'observateur.

Des mesures de température effectuées en décembre 2004 ont montré, pour une teneur extérieure de -1.5°C, une moyenne à l'intérieur de la cavité de 2.7 °C.

3 Localisation des stations

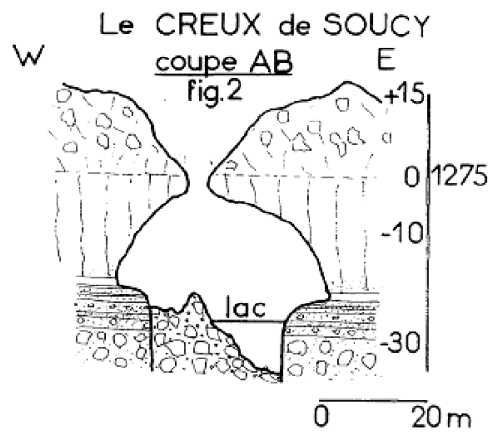
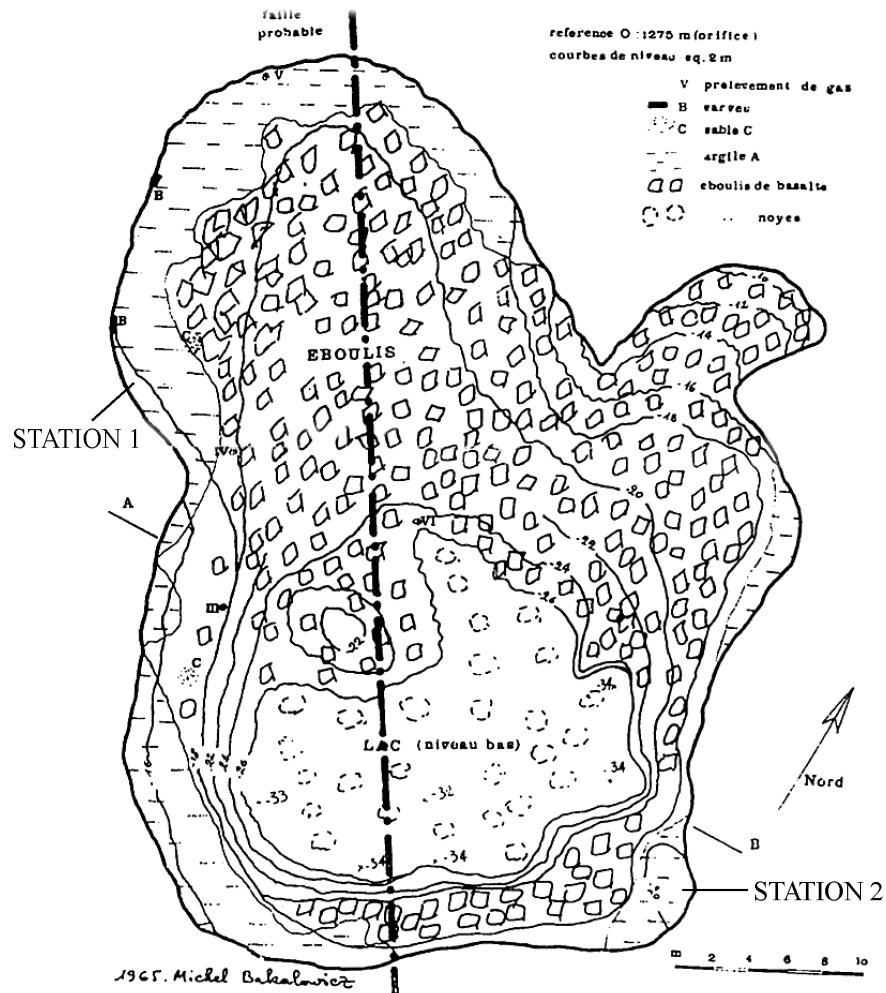
La campagne de mesure de radon dans la cavité a été réalisée de juin 2003 à juin 2004 par M. BOUTHORS, conformément au protocole établi par la CoMed.

Compte tenu du faible développement de la cavité, les mesures n'ont été effectuées que sur deux stations :

- La station 1 est située au pied de la voûte de basalte, près de la limite avec les argiles rubéfiées, dans une petite niche de paroi formant un confinement peu sujet aux courants d'airs
- La station 2 est sur une large banquette d'argile, à l'écart cependant du cheminement potentiel des éventuels visiteurs, et signalée par une affiche.

L'implantation des capteurs est indiquée sur le plan de la cavité publié par BAKALOWICZ (1971).

CREUX DE SOUCY : PLAN COUPE ET LOCALISATION DES STATIONS



d'après BAKALOWICZ, I

Le remplacement des deux capteurs chaque trimestre de façon synchrone avec les autres collaborateurs de l'étude en France devait permettre de mettre en relation la concentration avec les variations saisonnières.

4 Résultats des mesures et interprétation

Station	Période d'exposition	Radon (Bq/m ³)
1	27/06/2003-25/09/2003	1980
	25/09/2003-28/12/2003	600
	28/12/2003-25/03/2004	130
	25/03/2004-25/06/2004	2294
2	02/07/2003-25/09/2003	2120
	25/09/2003-28/12/2003	300
	28/12/2003-25/03/2004	160
	25/03/2004-25/06/2004	2729

Tableau 1 : teneurs en radon au creux de Soucy

La première observation concerne la variation d'amplitude, puisqu'elle atteint 15 pour la station A, et 13 pour la station B. Ceci s'explique facilement au regard de la morphologie de la cavité, piège à air froid dont l'air est fortement renouvelé en hiver. Ainsi les teneurs sont très basses à cette saison, alors qu'en saison chaude l'air froid du gouffre ne peut s'échapper.

La valeur moyenne en radon pour la période d'étude est de 1024, ce qui est en dessous de la plupart des autres valeurs observées pour le karst, mais peut donc s'expliquer en partie par la thermo ventilation de la cavité.

En considérant la période estivale propice aux plus fortes teneurs, les valeurs dépassent à peine 2000 Bq/m³, ce qui est tout de même plus bas que la moyenne pour le karst établie par HAKL (1997). On peut expliquer ces relatives faibles teneurs également par le fait que le volcanisme de la région est ancien, sans connexion actuelle avec les fluides profonds. Selon SABROUX (1998), les basaltes présentent même une radioactivité inférieure à la moyenne de la croûte terrestre continentale.

Enfin, on remarque des valeurs comparables pour les deux stations, signe d'une homogénéité de la masse d'air occupant la cavité.

Les mesure en cavité volcanique sont rares : PONCELA et al. (2004) mentionnent cependant également des valeurs relativement faibles pour la Cueva de Los Verdes (Lanzarote, Canaries), avec une moyenne annuelle aux environs de 500 Bq/m³.

L'origine du radon dans la cavité peut être attribué, comme dans le karst, à la présence de dépôts sédimentaires, mais la mention de présence de CO² (au moins par MARTEL) incite à évoquer également une possible origine profonde.

5 Références bibliographiques

BAKALOWICZ M., 1971 : Le Creux de Soucy (Besse-en Chandesse, Puy-de-Dôme. Annales de spéléologie, tome 26, fascicule 2, pp 387-406.

HAKL J., HUNYADI I., VARHEGYI A., 1997: Radon monitoring in caves. in Radon measurements by etched track detectors. Ed. Durrani & Radomir Ilic, 260-283.

MARTEL Edouard-Alfred, 1894: Les abîmes. Édition Delagrave, pp 387-393.

QUINDOS PONCELA L., FERNANDEZ NAVARRO P., SAINZ FERNANDEZ C., GOMEZ AROZAMENA J., BORDO-NOBA PEREZ M. 2004: Radiation exposure in uranium mining industrie vs exposure in tourist cave. Radiation Protection Dosimetry 111, 1, 41-44.

SABROUX J.C., 1998: Le radon, traceur de phénomènes naturels. In «Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 31-53.

SESIANO Jean, 1996 : Le Creux de Soucy (Auvergne, France). Stalactite N°46, 1996 pp 7-14.

Groupe Spéléologique Auvergnat : divers documents non publiés faisant mention de plongées à partir de 1966 (dont une avec émission ORTF le 3 juin 1967) dans le lac descendu jusqu'à -25 m avec vue au-delà d'une trémie ayant fait l'objet d'une désobstruction les 20 et 21 mars 1971. Article de presse du 16/07/1970.

Etude de concentrations en radon dans la grotte de Capbis (Commune d'Asson. Pyrénées-Atlantiques)

Jacques Bauer

1 Contexte géomorphologique.

La grotte de Capbis s'ouvre sur le flanc nord d'un chaînon calcaire de la zone nord-pyrénéenne, dans un contexte de karst barré : les calcaires d'âge aptien plongent d'une quarantaine de degrés vers le sud et sont barrés au nord par des marnes schisteuses albiennes qu'ils chevauchent à la faveur d'une faille inverse.

2 Description de la cavité.

La grotte comprend deux branches aujourd'hui inactives : une branche principale longue d'environ 360 m et une branche ouest (dite "branche de droite") à peu près rectiligne longue d'environ 200 m et orientée E-SE - W-NW.

Le porche d'entrée s'ouvre 17 m au dessus du niveau de base. De là, le réseau s'enfonce jusqu'à un petit plan d'eau ("la baignoire") situé à la cote relative de + 7 m puis remonte progressivement vers la cote + 30 m avant de redescendre à + 17 m au niveau d'un siphon terminal. La branche principale se compose de trois tronçons orientés respectivement NE - SW, NW - SE et NE - SW. Le premier comprend deux galeries formant une boucle; le second, creusé à la faveur d'un système de fractures de pendage E-NE, s'établit en partie comme une vaste salle déclive vers le nord; le troisième est caractérisé par une galerie de hauteur irrégulière parfois importante. Il est orné sur la partie aval de son cours par un important dépôt de calcite formant la "Rivière blanche" et comprend juste avant le siphon final une haute salle.

Des indices de néotectonique caractérisent le tronçon NW - SE : stalactites basculées et pilier stalagmitique fendu par flambage dans sa longueur.

Les traçages ont montré que la grotte se situe à la limite de partage des eaux entre deux systèmes distincts aboutissant à deux ensembles d'émergences séparés.

3 Climatologie.

Aucun courant d'air n'affecte le milieu souterrain qui reste généralement très humide. En période de pluies prolongées l'infiltration provoque de légers ruissellements en particulier au niveau de la Rivière blanche. La température ambiante est d'environ 10°C.

4 Localisation des stations (voir plan).

Trois stations ont été choisies : l'une au niveau de la "Baignoire", point le plus bas, proche des indices de néotectonique, la seconde au coeur d'un diverticule vers l'extrémité aval de la Rivière blanche et la troisième dans la grande salle du fond. La première se situe dans un étroit renforcement formant cul de sac, sans remplissage

notoire. La seconde occupe un fond de galerie basse au niveau d'un remplissage limoneux assez important. La troisième est en bordure de la grande salle finale dans une zone où le remplissage forme essentiellement un revêtement argileux d'épaisseur modeste.

5 Résultats.

Ils sont donnés sur le tableau ci-après. Les valeurs les plus élevées caractérisent la Grande salle du fond, puis vient le diverticule au bas de la Rivière blanche. Des mesures au scintillomètre SPP2 ont donné 150 cps dans la Grande Salle et 50 cps dans le diverticule, pour un fond extérieur de 50 cps et une valeur de 20 cps à l'intérieur juste au nord de la Baignoire.

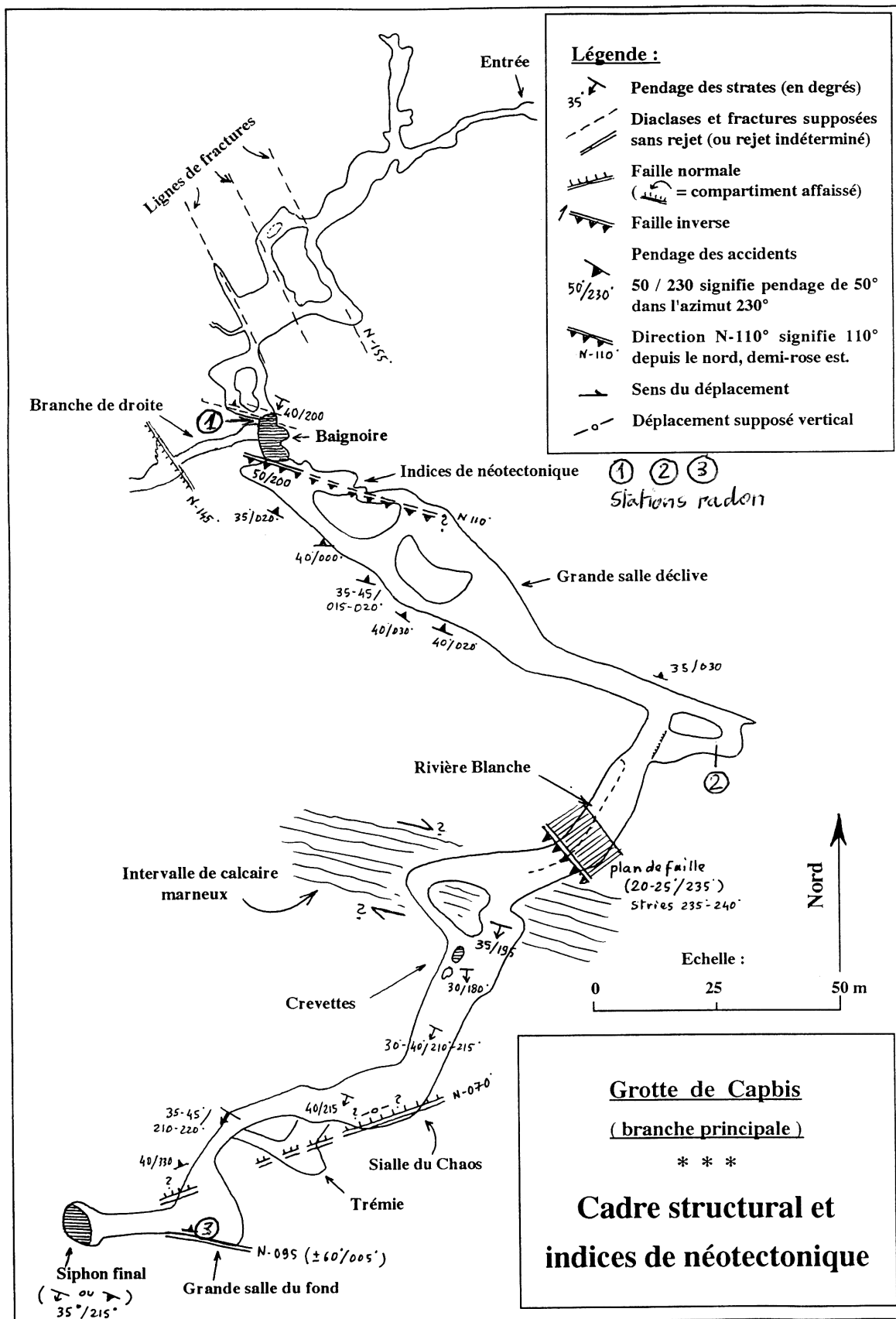
Station	Période d'exposition	Radon (Bq/m ³)
1	01/07/2003_30/09/2003	4080
Baignoire	30/09/2003_31/12/2003	3360
	31/12/2003-29/03/2004	2390
	29/03/2004-07/07/2004	4195
2	01/07/2003-30/09/2003	5370
Rivière blanche	30/09/2003_31/12/2003	3680
	31/12/2003-29/03/2004	3360
	29/03/2004-07/07/2004	4447
3	01/07/2003-30/09/2003	9190
Salle du fond	30/09/2003_31/12/2003	5120
	31/12/2003-29/03/2004	4560
	29/03/2004-07/07/2004	6282

6 Interprétation.

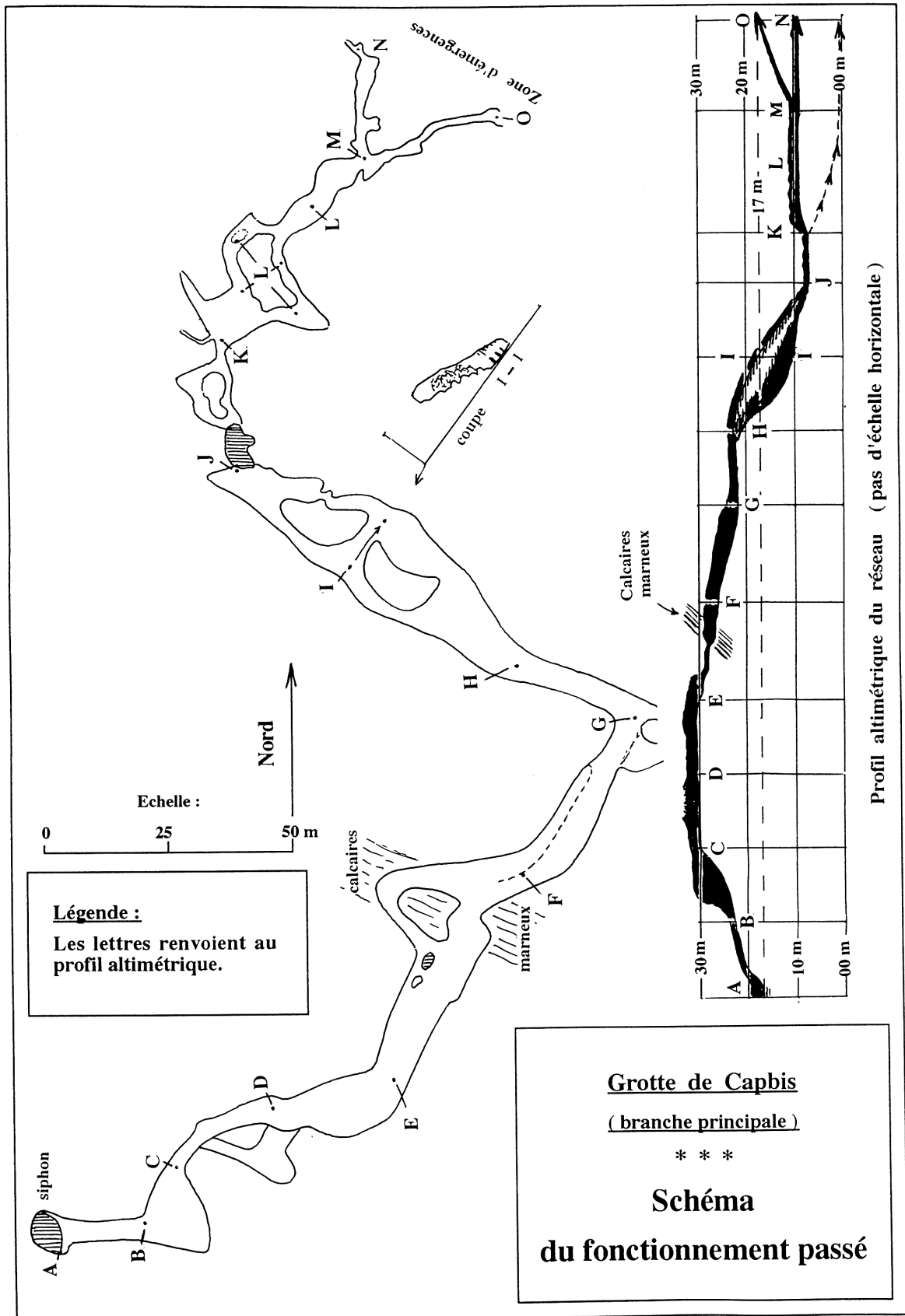
Les concentrations semblent montrer un maximum vers la période d'été. Vu la climatologie apparemment très stable de la cavité, ce n'est peut-être là qu'une coïncidence. On note une corrélation entre les teneurs et les valeurs SPP2 mais c'est à la station 2 (diverticule au bas de la Rivière blanche) que le remplissage paraît le plus important. On ne peut donc pas, à priori, attribuer les anomalies radon à ce remplissage. D'ailleurs la grotte se trouve loin de toute influence d'alluvions susceptibles d'émettre du radon.

Peut-être doit-on invoquer le contexte tectonique de la cavité, située à proximité du massif du Jaout au sein duquel ont été relevées des valeurs anormales en ²²²Rn, CO² et ⁴He liées à des failles actives (Baubron et Al., 2002)¹. Mais il faut expliquer aussi le rayonnement gamma mesuré par le scintillomètre dans la Grande Salle.

1: Jean-Claude Baubron, Alexis Rigo, Jean-Paul Toutain: *Soil gas profiles as a tool to characterise tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrénées, France)*.- Earth and Planetary Science Letters 196 (2002) 69-81 - Elsevier.



J. BAUER - Avril 1997



J. BAUER - Avril 1997

Etude de concentrations en radon dans deux grottes du massif des Arbailles (Pyrénées-Atlantiques)

Jacques Bauer

Deux grottes du massif des Arbailles ont été sélectionnées pour des mesures de radon en raison de leur liaison possible avec une spéléogénèse hydrothermale. Il s'agit du gouffre OX 655 et de l'"aven" du tonneau. Les résultats ne montrent aucune anomalie notable. Ils sont donnés sur le tableau ci-joint.

1 Le gouffre OX 655

1.1 Contexte géomorphologique.

Le gouffre OX 655 s'ouvre près du sommet d'une colline dans l'est du massif. Il a été interprété comme pouvant s'être formé au moins partiellement par spéléogénèse hydrothermale.

1.2 Description de la cavité.

L'OX 655 est un gouffre à développement essentiellement vertical profond de 230 m. Il débute par un train de 70 m de puits classiques puis se développe en une série de grandes salles plus ou moins superposées. Vers la base du train de puits s'étire une galerie horizontale creusée en régime noyé.

1.3 Climatologie.

Sauf dans les puits d'entrée, il n'y a pratiquement pas de courants d'air dans la cavité.

1.4 Localisation des stations.

Deux stations ont été choisies : l'une dans la première grande salle au bas du train de puits de 70 m, la seconde au niveau de la galerie horizontale.

1.5 Résultats.

Ils sont donnés sur le tableau ci-après.

Station	Période d'exposition	Radon (Bq/m ³)
1	21/06/2003_02/10/2003	2330
	02/10/2003_02/01/2004	1580
	02/01/2004_06/04/2004	950
	06/04/2004_18/07/2004	1827
2	21/06/2003_02/10/2003	2280
	02/10/2003_02/01/2004	1360
	02/01/2004_06/04/2004	1100
	06/04/2004_18/07/2004	1437

1.6 Interprétation.

Les concentrations sont moyennes. Elles semblent montrer un maximum vers la période d'été. Vu la climatologie apparemment très stable de la cavité, ce n'est peut-être là qu'une coïncidence. Le choix des stations de mesure n'était en fait pas très judicieux et est peut-être la cause du bas niveau des valeurs. Mais la cavité se trouve loin de tout alluvionnement susceptible de donner des émissions de radon et le remplissage y est essentiellement argileux.

2 L'Aven du Tonneau

2.1 Contexte géomorphologique.

Il s'agit d'une petite grotte qui s'ouvre par une entrée verticale sur le flanc nord d'une colline dans le nord-est du massif. Elle a été interprétée comme pouvant s'être formée au moins partiellement par spéléogénèse hydrothermale.

2.2 Description de la cavité.

L'Aven du Tonneau est une petite grotte de développement globalement subhorizontal longue d'environ 60 m, se terminant par un puits de 8 mètres de profondeur.

2.3 Climatologie.

Aucun courant d'air n'affecte la cavité.

2.4 Localisation des stations.

Une station a été choisie : dans un point bas pourvu d'un léger remplissage argilo-détritique, vers le fond de la cavité.

2.5 Résultats.

Ils sont donnés sur le tableau ci-après.

Station	Période d'exposition	Radon (Bq/m ³)
1	04/07/2003_09/10/2003	2250
	09/10/2003_12/01/2004	1230
	12/01/2004_15/04/2004	1240
	15/04/2004_08/07/2004	1673

2.6 Interprétation.

Les concentrations semblent montrer un maximum vers la période d'été. Vu la climatologie très stable de la cavité, ce n'est sans doute là qu'une coïncidence.

Etudes sur la radioactivité dans les cavités du Languedoc oriental (Cévennes et Garrigues)

Michel Wienin

Une étude de la radioactivité de diverses cavités des Cévennes et des Garrigues du Languedoc oriental a été commencée dès 1999, indépendamment du travail sur le radon initié par la CoMed de la FFS. Ces mesures ponctuelles d'activité ont été réalisées avec un scintillomètre γ SAPHIMO SPP2 CEA appartenant à l'Ecole des Mines d'Alès, de même type que celui utilisé par Marc Faverjon à Saint-Marcel d'Ardèche. Ces mesures ont été poursuivies parallèlement à la pose de dosimètres radon et les résultats des deux types de recherche de radioactivité peuvent être mis en parallèle. Divers problèmes techniques ont perturbé le programme et un accident début 2004 est venu l'interrompre. Nous disposons ainsi d'un nombre non négligeable de résultats mais pas de vraies séries continues et complètes.

Commune	Dpt	Cavité	Mesures SPP2	dosimètres
Mialet	30	Grotte de Trabuc	Oui	oui
Sainte-Anastasie	30	Grotte du Barrage	Oui	oui
Soustelle	30	Grotte Silvain	Oui	oui
Les Bondons	48	Grotte de Malaval	Oui	Non

Tableau 1 : cavités étudiées et type de mesures

Les cavités étudiées sont importantes, pluri-kilométriques et comportent à la fois une rivière active et des parties fossiles. Trabuc et Malaval possèdent une ventilation spontanée importante, violente dans les étroitures, le Barrage et Silvain beaucoup plus faible mais néanmoins suffisante pour empêcher l'accumulation de gaz carbonique, phénomène assez fréquent dans les cavités descendantes fermées de la région.

1 La grotte de Trabuc

Elle est située sur la commune de Mialet (Gard), à environ 12 km à l'OSO d'Alès (Synonyme : grotte du Mont Roucoux).

Coordonnées Lambert 3 :

Entrée naturelle (entrée inférieure) : X = 0729,200 Y = 3201,681 Z = 186

Entrée artificielle (tunnel supérieur) : X = 0729,925 Y = 3202,156 Z = 321

1.1 Description sommaire

On peut sommairement diviser la grotte en trois grandes parties :

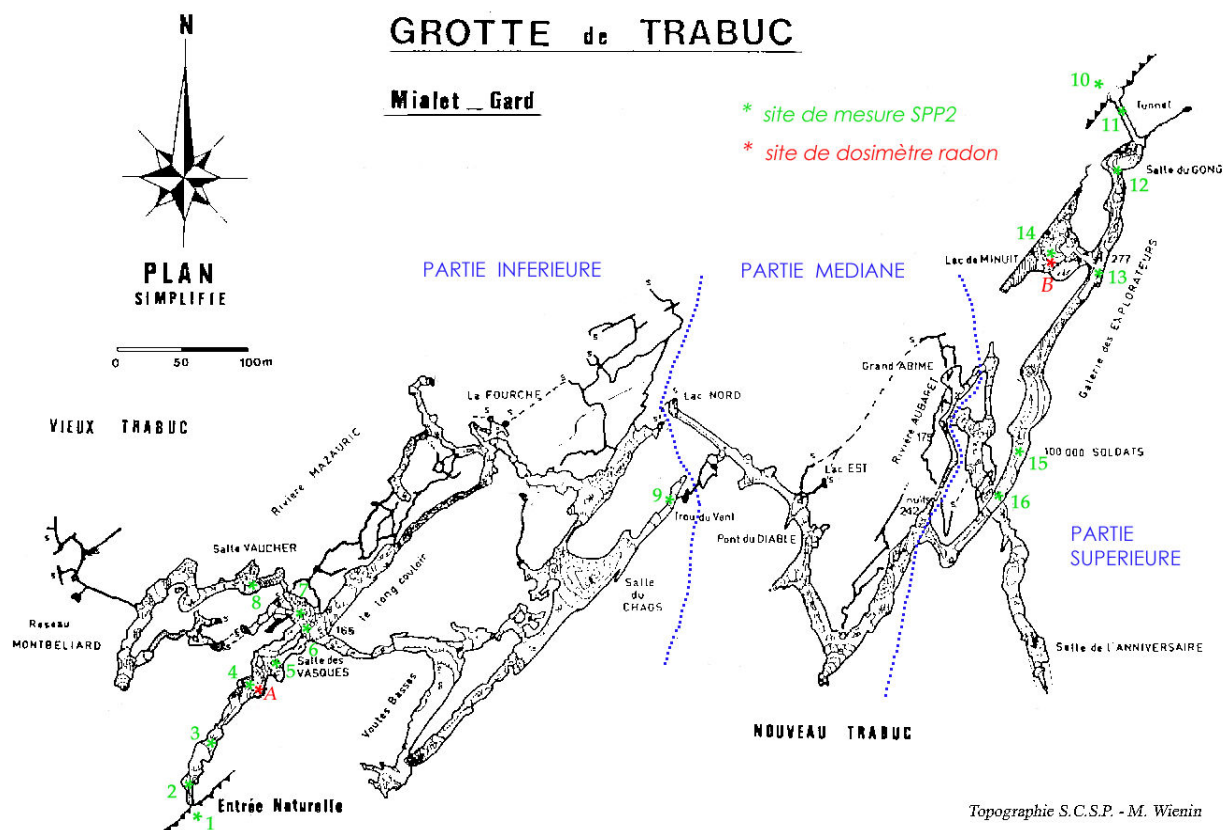


Figure 1 : Plan de la grotte de Trabuc

- le « vieux Trabuc » (environ 5 km de développement d'accès facile) : ensemble de galeries de type « carré » à dominante horizontales, sub-parallèles avec un niveau inférieur noyé (rivière Mazauric), entre l'entrée naturelle et le « Trou du vent », étroiture soufflante franchie en 1945.
- La partie médiane, entre le Trou du Vent et le « Carrefour de décembre » où dominant des structures tectoniques verticales (diaclasses, bandes cisillées) en escalier donnant accès vers le bas à une autre rivière (rivière Aubaret) et vers le haut aux réseaux fossiles (plus de 3 km au total).
- La partie supérieure est constituée de fragments disjoints de couloirs fossiles de grandes dimensions et souvent bien concrétionnés (2 km).

1.2 Géologie

Le niveau inférieur et la base des diaclasses intermédiaires jusqu'au « pont du diable » sont dans les dolomies massives, grise-brunâtre de l'Hettangien supérieur.

La partie supérieure se développe dans les calcaires plus ou moins marneux et siliceux, gris sombres, noduleux, beaucoup plus fragiles du Sinémurien.

Plusieurs niveaux d'ordre centimétrique de marnes verdâtres constituent des interbanes. Le plus important sépare les deux masses de dolomie et de calcaire. Ce sont des niveaux plus détritiques, relativement riches en argiles d'origine continentale (dégradation du socle hercynien).

1.3 Aérologie

Trabuc est connue pour son trou du vent avec un courant d'air qui peut dépasser 15 m/s, soit un débit de plus de 1 m³/s. Le fonctionnement semble de type thermique très classique : ascendant en hiver, descendant en été, accéléré alors par une surchauffe atmosphérique dans le vallon sec extérieur, très abrité et ensoleillé. Les températures dans la partie moyenne oscillent entre 12,8° et 13,5°. Malgré de grandes sections et des volumes importants, on a pu observer que le courant d'air traverse la cavité (environ 1400 m de trajet) en moins de 48 heures.

1.4 Mesures effectuées

1.4.1 Dosimètres radon

Station	Lieu étudié	Début	Fin	période	Rn222 en Bq.m ⁻³	+/- (incertitude)
A	Salle de la Rotonde. Sur butte d'argile à mi hauteur de la salle	13-06-02	27-10-02	Été	1970	580 (30 %)
B	Lac de Minuit (rocher 2 m au-dessus de l'eau, salle en cul de sac descendant)	13-06-02	27-10-02	Été	2180	650 (30 %)

Tableau 2 : mesures intégrées de radon dans Trabuc

Remarque : un troisième détecteur implanté dans la zone médiane a disparu, sans doute par suite d'une crue ou d'un vol courant septembre.

Il est difficile de comparer ces valeurs puisque le recouvrement des deux plages est de 50 %. Il est par contre clair qu'une valeur de l'ordre de 2000 Bq.m⁻³ est élevée et demande à être justifiée. On peut noter que les deux points se situent dans des positions potentiellement accumulatrices de radon :

- dans la partie aval, donc près de la sortie du courant d'air ayant balayé la majeure partie de la cavité pour le premier,
- dans la partie basse d'une salle de type cul de sac descendant qui constitue un piège à gaz lourds pour le second.

1.4.2 Mesures au compteur Geiger

Le 13-06-2002 et au 30-11-2002 en coups par seconde (**en gras** les valeurs dépassant 150 c/s). Courant d'air assez violent descendant (sortant par l'ancien Trabuc).

Pt	Localisation	13-06-02	30-11-02	Remarques
1	EXTERIEUR, près de l'entrée naturelle (bas)			
	- Bord du sentier	70	60	valeur normale sur les affleurements de dolomie hettangienne
	- Air sortant de la porte	200	-	
	INTERIEUR (ancien Trabuc)			
2	Couloir d'entrée	80-100	60	
3	Tranchée	100	80	
4	Salle de la rotonde			
	- sentier	160-200	150-185	(à 1 m, sur argiles, sous plafond décollé)
	- remplissage argileux varvé	130-150	130-145	150 au niveau du dosimètre 1970 , sur butte d'argile, à mi-hauteur.
5	Salle de la cascade	~120	120	(Ambiance)
6	Salle des vasques (descente)	160	150-160	éboulis argileux
7	Début de la descente vers la rivière Mazauric	120-130	130-140	
8	Lac de la salle Vaucher	~115	120	Zone concrétionnée
9	L'« Estrangladou »	140	120-130	
	Trou du vent	155	~150	Dans le courant d'air sortant
10	EXTERIEUR, près du tunnel artificiel (haut)			
	- Auvent du bâtiment d'accueil	70	50-60	
	- Entrée du tunnel	50-70	110	valeur normale sur les calcaires du Sinémurien
	INTERIEUR (partie supérieure)			
11	Tunnel d'accès, derrière la porte	80-85	130-140	(Ambiance)
12	Salle du Gong	70	120	(Ambiance)
	- Coulée sous le gong	55	100	(contact)
	- Roche calcaire en face	75	130	id.
	- Roche plus marneuse	100	130-140	id.
13	Galerie des Explorateurs	90-100	~120	(Ambiance), zone concrétionnée
14	Salle du Lac de Minuit			
	- Balcon aménagé au dessus du lac	180	180-190	(Ambiance)
	- Coulée au bord du lac	110-120	120	Dosimètre 47861 sur rocher, 2 m au dessus du lac
15	Galerie des 100 000 soldats			
	- Contre la paroi	~130	130	(contact)
	- Centre de la galerie	~180	~180	(au sol)
16	Carrefour avec galerie de l'anniversaire	135	155-160	(Ambiance)
17	Passage des 1001 nuits	105-115	135	Zone concrétionnée
18	Grande stalagmite	115-120	120-130	

Tableau 3 : radioactivité mesurée au compteur Geiger (grotte de Trabuc)

Ces résultats superposent trois origines de rayonnement :

- le rayonnement d'origine cosmique, uniquement pour les mesures en extérieur libre, de l'ordre de 30 c/s
- celui issu directement des parois : uranium présent dans la roche encaissante et ses successeurs. Il diffère entre l'extérieur où la source émissive = le sol représente entre 50 % (sol plat) et 70 % (situation encaissée en fond de vallon) du total des directions possibles (2π sr) et l'intérieur où l'angle solide plein est de règle puisque la roche est atteinte dans toutes les directions.
- celui de l'atmosphère : radon et ses successeurs, carbone 14 etc.

1.5 Remarques

1.5.1 Radioactivité de l'environnement rocheux

Diverses mesures prises sur les deux roches qui constituent l'encaissant donnent des valeurs moyennes de l'ordre de 70 c/s tant sur la dolomie hettangienne de la partie inférieure (vieux Trabuc) que pour les calcaires gris du Sinémurien de la partie supérieure (nouveau Trabuc). A l'intérieur, les valeurs baissent sensiblement quand les parois sont recouvertes d'un concrétionnement de calcite mais augmentent au contraire fortement quand la mesure est effectuée à la surface d'un remplissage argilo-alluvial (remaniement d'alluvions plus ou moins anciennes du Gardon : galerie à fond plat des 100 000 soldats) avec sable et graviers d'origine cévenole plutôt que simple argile de décalcification karstique ou de terre d'origine superficielle (sol brun) comme dans le couloir d'entrée du vieux Trabuc. Le rôle de ces remplissages exogènes est assez évident lors des mesures.

Le pic observé au niveau du balcon de la salle du lac de minuit semble lié à une sur-concentration locale d'atomes émissifs dans la roche correspondant à un niveau marneux interstratifié dégagé par les travaux d'aménagement.

1.5.2 Radioactivité atmosphérique

Deux phénomènes à noter :

- Les deux points de concentration violente du courant d'air (entrée naturelle et trou du vent) donnent des pics qui ne se retrouvent pas au voisinage. Il y a sans doute une explication mécanique mais je ne la connais pas.
- Si on compare la radioactivité prise directement dans le courant d'air non concentré, on trouve pour la période été une nette augmentation entre le tunnel supérieur et la salle du Gong (air entrant) d'une part et l'entrée inférieure ancienne d'autre part. Près de l'entrée supérieure, les valeurs mesurées se situent entre 55 et 100, près de la sortie, entre 80 et 120, hors effet de sol.

Cette augmentation est encore plus visible si on « neutralise » l'émission pariétale, ce qui correspond sensiblement à retrancher arbitrairement une valeur de l'ordre 60 c/s. On obtient ainsi : 0-30 pour le haut et 20-60 pour le bas.

Pour la période hiver, les résultats s'inversent : on trouve 40-70 pour le haut contre seulement 0-20 pour le bas. Le rôle de l'inversion du courant d'air entre ces deux saisons est évident et on assiste à un enrichissement progressif du courant d'air en atomes émissifs (Radon et successeurs,...) au cours de la traversée de la cavité, atomes émis par la désintégration de l'uranium contenu dans les parois.

2 La grotte de Soustelle

(Commune de Soustelle, Gard, environ 7 km au NO d'Alès)

(Synonymes : grotte Silvain, grotte de Cap de Rieusset / grotte de Soustelle)

Coordonnées Lambert 3 :

Entrée naturelle (entrée principale) : $X = 0734,650$ $Y = 3209,870$ $Z = 210$.

2.1 Description sommaire

La grotte est formée d'un ensemble de 4 galeries correspondant à d'anciennes pertes du Rieusset convergeant vers un niveau inférieur actif (soutirage actuel). Deux branches débouchent à l'extérieur. Le développement total dépasse 3 km et la profondeur est de l'ordre de 60 m.

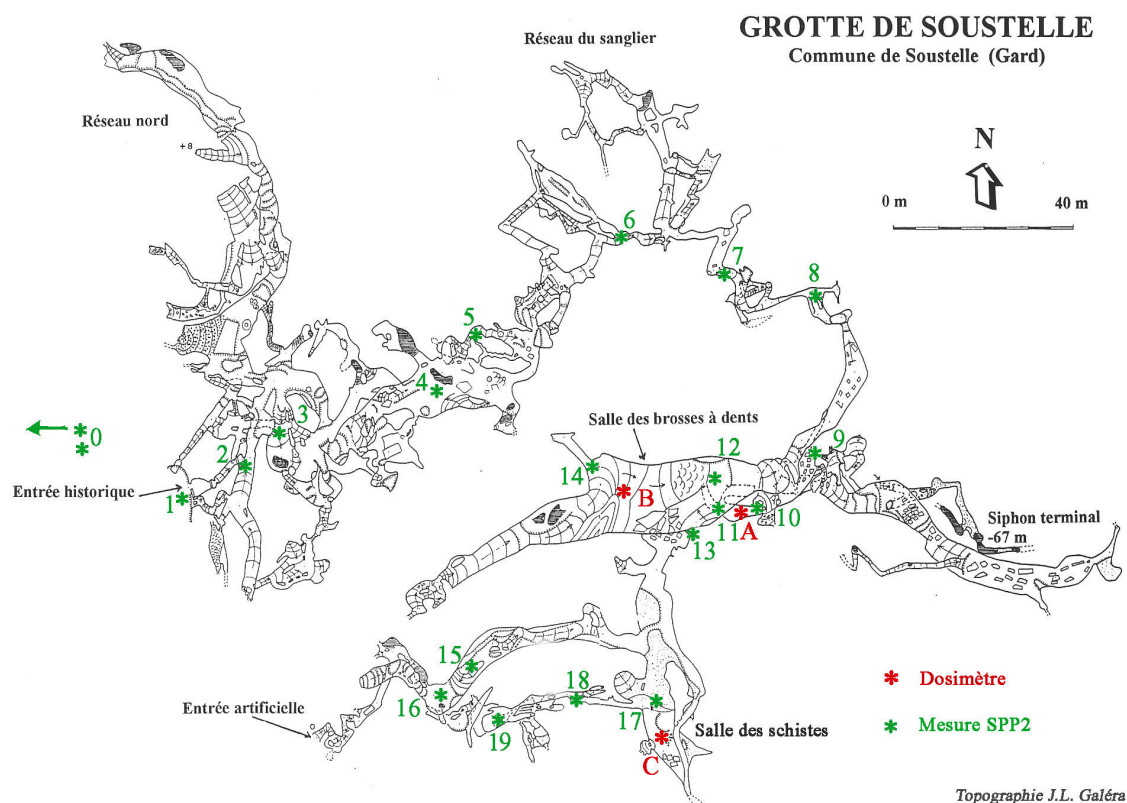


Figure 2 : Plan de la grotte de Soustelle

2.2 Géologie

Cette cavité présente la particularité de se développer au voisinage et de part et d'autre du contact entre la dolomie massive de l'Hettangien et des calcaires gris du Sinémurien (cf. Trabuc). D'autre part, le Rieusset suit assez exactement la faille de la Croix-des-Vents / Villefort et les entrées se trouvent à quelques dizaines de mètres du contact entre la série sédimentaire et les micaschistes métamorphiques hercyniens cévenols. Beaucoup de remplissages, parfois calcifiés et collés au plafond, sont constitués de limons et de galets en provenance directe du socle (micaschistes, quartz et microgranite).

2.3 Aérologie

Les deux entrées se trouvent à 120 m de distance, à même orientation (OSO) et altitude voisine. Il n'y a pas d'effet de tube à vent donc peu de circulation d'air. Elle est toutefois suffisante pour éviter l'accumulation de gaz carbonique par exemple.

2.4 Mesures effectuées

Point sur plan	Lieu étudié	Début	Fin	saison	Activité volumique calculée de Rn222 en Bq.m ⁻³	+/- (incertitude)
A	Passage des galets (salle du chaos) au sol	22/06/02	11/10/02	été	1840	520
B	Salle des Brosses à dents, sur coulée à 2 m de haut	22/06/02	11/10/02	été	1560	430
C	Salle des schistes, sur caillou à 20 cm du sol	22/06/02	11/10/02	été	1970	560

Tableau 4 : Radioactivité radon dans la grotte de Sonstelle

Une première remarque concerne le fait que les valeurs de la radioactivité sont globalement plus basses qu'à Trabuc mais que la teneur en radon est quasi-équivalente (les plages se recouvrent largement). On note toutefois des maxima qui correspondent à des volumes importants de remplissages et des mesures faites près du sol. Ce fait peut s'expliquer à la fois par une émission de rayonnement plus importante par une masse d'alluvions provenant du socle et par une décantation du radon, gaz lourd, près du sol. Les conditions d'observation (augmentation systématique au voisinage des parois et surtout des remplissages schisteux, pas d'accumulation dans les zones très concrétionnées) me font privilégier la première explication.

Lieu	28-06-02	06-12-02	Remarques
EXTERIEUR			
Ponceau – côté ouest	60-75	50-60	rive schisteuse du Rieusset
Ponceau – côté est	50	40-50	rive calcaire du Rieusset
Entrée de la grotte	70/80	80	
INTERIEUR			
Escalier	40	40	
Descente vers salle des cercles	90	80-90	RMS (= remplissage en matériaux du socle)
1ère salle : plafond	30-40	40-50	
- ambiance (h = 1,5 m)	60-70	60-70	
- sol	100-120	110-120	RMS
Galerie du Shunt (paroi)	90-100	110	marnes limite Hettangien-Sinémurien
Méandre : ambiance	30-40	40	
- zone avec remplissage	50	40	RMS peu important
- (paroi)	90	80	marnes limite Hettangien-Sinémurien
Entrée de l'étréiture triangulaire (sol)	80	80	
Salle du chaos : bas	85	100	
- Haut	60	90	
Passage sous galets de micaschiste	100	105	RMS (dosimètre n° 47858)
Salle des Brosses à dents : ambiance	80-90	90	
- zone de fantômisation	70	60-70	
- bas de la coulée	100-105	110	dosimètre n° 47859
Galerie du nénuphar :			
- avant la descente, ambiance	80-90	70	
- point bas	30-35	30-40	Zone très concrétionnée
Salle des schistes (ambiance)	90-100	110-120	RMS dosimètre n° 47860
Galerie nord des schistes	70-90	70-90	RMS
- puits de la salle terminale	125	125	Puits en partie dans RMS

Tableau 5 : Mesures de radioactivité dans la grotte de Soustelle

On notera que deux dosimètres ont été posés au voisinage de ces points où la radioactivité est plus importante. En l'absence ou presque de courant d'air, il peut y avoir accumulation de radon. Ce n'est pas le cas pour celui placé sur la coulée de la salle des brosses à dents où la sur-radioactivité ne semble pas liée au substrat (coulée stalagmitique et non alluvions) mais aux parois.

La fine couche (3-4 cm) de marnes verdâtres qui marque la séparation entre dolomie hettangienne et calcaire sinémurien est une source importante de radioactivité. Il suffit d'approcher le détecteur des endroits où elle est visible en

section de galerie pour voir largement dévier l'aiguille. Localement, elle forme des toits plats par effondrement de la dernière couche de dolomie, conduisant à une sur-radioactivité locale assez importante, c'est le cas près de la coulée au fond de la salle des brosses à dents. Elle est comparable aux niveaux analogues signalés à Trabuc et contient des apports terrigènes venant du socle plus riches en uranium que les calcaires siliceux et la dolomie dus principalement à de la précipitation chimique.

La différence entre hiver et été est beaucoup moins marquée qu'à Trabuc, ce qui doit s'expliquer par la quasi-absence de courant d'air. On n'observe pas un effet d'accumulation de radioactivité au cours du balayage de la cavité mais un simple équilibre entre la production des parois et la désintégration spontanée dans l'atmosphère de période relativement courte. Dans les parties entièrement non ventilées, les résultats sont stables (puits de la salle des schistes).

3 Grotte du Barrage

(Commune de Sainte-Anastasie, Gard, au fond des gorges du Gardon, environ 10 km au N de Nîmes)

Synonyme : grotte de Décamagne.

Coordonnées Lambert 3 :

Entrée naturelle : X = 0763,330 Y = 3183,850 Z = 35

3.1 Description sommaire

La cavité est constituée par trois branches dont deux sont des pertes fossiles du Gardon et la troisième une perte temporairement active. Elles convergent vers un siphon lié au Gardon souterrain et exploré jusque vers – 60 (40 m au dessous du niveau de la mer). Plusieurs branches latérales correspondent à des pertes fossiles à partir de la surface plateau.

3.2 Géologie

Cette cavité se développe dans les calcaires blancs massifs de l'Urgonien (Barrémien) dont elle ne sort nulle part. Ces calcaires, déposés en milieu oxydant, ne possèdent pas de radioactivité identifiable, l'émission par les parois est donc négligeable. Par contre, certaines parties du réseau comportent d'importants remplissages d'alluvions d'origine cévenole du Gardon :

- limons gris, fins, régulièrement remaniés, identiques à ceux de la plaine de débordement à l'extérieur, dans la partie inférieure active
- galets à dominante quartzo-micaschisteuse et argile limoneuse dans certaines parties fossiles. Ces dépôts sont analogues à ceux des terrasses extérieures du Gardon sans qu'il soit possible de les attribuer à une phase climatique identifiable. Les produits sont d'origine cévenole, principalement à partir de micaschistes hercyniens.

3.3 Aérologie

Outre son entrée naturelle, la grotte possède une petite entrée artificielle un peu au dessus et le courant d'air y est souvent présent mais toujours faible. Elle possède en outre diverses communications diffuses avec le versant des gorges et le plateau situé environ 120 m plus haut. La circulation d'air y est partout présente mais toujours discrète. Elle paraît de type à vent classique.

3.4 Résultats

Un ensemble de 4 dosimètres a été posé à trois reprises dans cette cavité mais nous avons été victimes d'une part de la grande crue du Gardon de septembre 2002 et d'autre part de vols car cette cavité est très fréquenté en particulier par des groupes d'enfants et de touristes.

Point sur plan	Lieu étudié	Début	Fin	période	Activité volumique calculée de Rn222 en Bq.m ⁻³	+/- (incertitude)
A	Salle des deux yeux	12/12/03	20/03/04	hiver	810	230
	id.	24/07/04	28/09/04	été	1083	273
B	Carrefour de la brèche	12/12/03	20/03/04	hiver	820	230
	id.	24/07/04	28/09/04	été	929	232
C	Queues de mouton (haut)	12/12/03	20/03/04	hiver	720	200
	id.	24/07/04	28/09/04	été	1404	362
D	Lac du grand pas	12/12/03	20/03/04	hiver	640	180
	id.	24/07/04	28/09/04	été	1366	352
E	Galerie des racines	23/10/04	105/02/05	Année complète	1241	343

Tableau 6 : Teneur en radon de la grotte du barrage

On peut noter la grande homogénéité des résultats relativement forts, encore que nettement plus faibles qu'à Trabuc et Silvain, en particulier dans la partie basse, active, où le remplissage alluvial est très important et dans la galerie des racines riche en galets et alluvions anciennes.

D'autre part, l'opposition entre hiver et été est très marquée puisque la moyenne hivernale est voisine de 750 tandis que la moyenne estivale approche les 1200 (soit + 60 %). Ce résultat qui peut paraître étonnant s'explique sans doute par la variation du niveau d'eau : dans la première période, l'entrée inférieure et les galeries actives au moins temporaires étaient en partie noyées, les zones supérieures

assez fortement humides, ce qui a pu entraîner à la fois un non balayage des surfaces alluviales recouvertes et le fait que l'émission de radon a dû rester en solution dans l'eau. Inversement, en été, les surfaces libres et sèches étaient nettement plus importantes et la libération de gaz radioactif en conséquence aussi.

Lieu	C/s	Nature du Sol	Parois / voûte
Parking (RD amont du pont)	80	Alluvions	
Entrée supérieure	35/40	Calcaire	- cosmique
1er carrefour	70	Remplissage argile + alluvions	Calcaire
Couloir 1er lac	80	Alluvions	Calcaire + alluvions
2e carrefour	50-65	Remplissage + alluvions	Calcaire
Petit lac	100	Alluvions	Alluvions (dosimètre)
Queues de mouton (bas)	50	Calcaire + calcite	Calcaire + calcite
Id. (haut)	45	Calcaire + calcite	Calcaire + calcite (dosimètre)
Passage du « poisson fossile »	50	Calcaire	Calcaire
Salle du carrefour du fond	65	Calcaire + alluvions	Calcaire
Brèche dans la remontée	35	Calcaire + calcite	Calcaire
1er siphon (au sol)	110	Alluvions (épaisses)	(Calcaire + alluvions)
Id. (au niveau de la voûte)	80	(Alluvions)	Calcaire + alluvions
Montée vers les rotondes (milieu)	60-70	Argile + alluvions	Calcaire
Salle des deux yeux (centre)	35	argile	Calcaire (dosimètre)
Salle des deux yeux (coulée du fond)	30	Coulée de calcite	Calcaire
Avant salle des racines (dernière bauge)	55-65	Alluvions anciennes	Calcaire (dosimètre)
Galerie des rotondes (sous plancher stalagmitique suspendu)	45-50	calcaire + argile	Parois : calcaire Plafond : placage de galets anciens calcifié
Carrefour de la brèche	40-45	Remplissage	Calcaire (dosimètre)

Tableau 7 : Mesures au SPP2 du 15 octobre 2003

Ici, la corrélation entre la présence d'un remplissage d'origine cévenole et la radioactivité est particulièrement nette.

4 La grotte / aven de Malaval

(Commune des Bondons, Lozère, environ 10 km au N de Florac)

Coordonnées Lambert 3 :

Entrée naturelle (entrée aval) : X = 0700,980 Y = 3233,280 Z = 900

Entrée supérieure artificielle : X = 0701,020 Y = 3234,560 Z = 1110

4.1 Description sommaire

La cavité est principalement constituée par le lit d'une rivière souterraine active qui se divise vers l'amont en deux branches. Les affluents secondaires sont marginaux. Des tronçons de galeries fossiles existent ça et là, principalement en amont. Total supérieur à 10 km dont 8,5 d'actif et 200 m de dénivelée.

4.2 Géologie

Cette cavité se développe dans les calcaires dolomitiques gris à patine beige de l'Hettangien, le plus souvent à faible distance du socle et atteint parfois localement les grès de base de la série sédimentaire. Les parties les plus hautes de la partie amont (super-blanches, extrême amont) atteignent la base du Sinémurien constitué de dolomies analogues mais moins massives et se délitant en bancs de quelques centimètres d'épaisseur. Toute la partie amont suit une faille qui met ces couches en contact avec le granite hercynien du Mont Lozère, localement riche en uranium. Une mine à ciel ouvert en a été exploitée il y a une vingtaine d'années à environ 3 km de l'entrée naturelle (mine du Cros ou des Bondons). Cette proximité et le fait qu'une partie des eaux peut provenir des granites permettait envisager une radioactivité relativement importante dans la cavité.

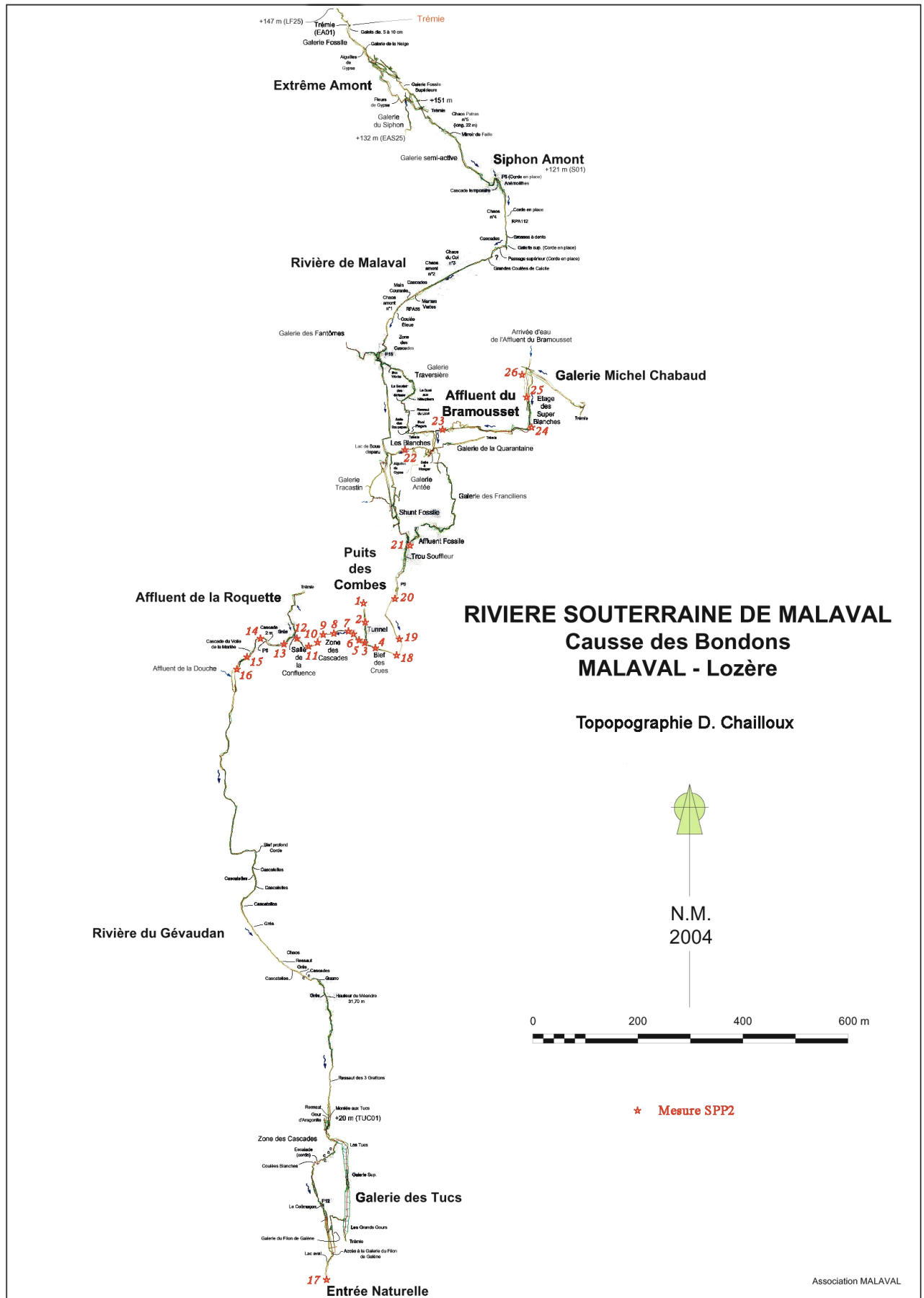
4.3 Aérologie

Fonctionnement en tube à vent classique et localement violent malgré le caractère diffus des communications entre les parties amont et l'extérieur.

4.4 Résultats

Remarque : Cette cavité avait été à priori retenue comme celle à étudier en priorité car nous travaillons beaucoup dessus. Malheureusement, une série d'événements imprévus nous ont empêché de mener à bien la campagne de pose de dosimètres : L'équipe qui s'était engagée à les installer a tout simplement oublié, la cabane située à l'entrée de la cavité et dans laquelle ils étaient restés a été détruite par la tempête de 2002 et finalement, j'ai eu un accident qui m'a empêché d'aller récupérer ceux qui avaient été installés. Par contre, les mesures au SPP2 ont été relativement nombreuses. Toutes ont été effectuées à partir du puits artificiel, par conséquent dans la moitié amont du réseau.

Mesures vers l'aval à partir de la galerie artificielle 31 mars et 01 avril 2002 en régime de courtant d'air instable, descendant au moment des mesures :



Lieu	Objet	c/s	Remarques
Entrée du puits	Ambiance	52-54	(dont cosmique)
Galerie artificielle	Ambiance	22-24	Effet d'écran des 30 m de roche
Niche à gauche	filonnet de galène	22-23	Pas de radioactivité spécifique de la galène
id.	Pointe de roche (dolomie)	27	Très petit indice
Galerie artificielle	Tas de bois	24-25	Très faible sur-radioactivité ?
Carrefour et 100 premiers mètres de la rivière	Ambiance	22-24	
Lac (10 m amont)	Eau (contact)	23-25	Très faible sur-radioactivité ?
Bas de la petite cascade	Taches noirâtres sur parois G et D (contact)	30 / 35	Très petit indice
Stalagmite « petit dôme noir »	Pointe plus sombre (contact)	38-40	Très petit indice
Coulées aragonitiques blanches	Contact	32-33	
Coup de barre à mine en RG (source ferrugineuse)	Contact	22	
Début des planches	Ambiance	24-26	
Milieu des planches	Ambiance	28-30	
Fin des planches	Ambiance	32-33	
Haut de la cascade	Ambiance	45	
Salle de la cascade	Ambiance	52-55	
Sortie salle de la cascade	Ambiance	56-58	
id.	Vieille coulée pulvérulente en RG (Contact)	150	Accumulation sensible
id.	coulée d'aragonite au fond d'une niche en RG Contact : Intérieur :	190 300	Accumulation très sensible
Petite coulée bleue	Coulée (contact)	58-60	
Rivière en aval sur 200 m	Ambiance	53-56	
Poudingues de galets	Contact	53-55	Volumes assez faibles
Id . : Coulées aragonitiques diverses	Contact : Intérieur :	75-180 170-250	Accumulation très sensible
Sortie naturelle	Ambiance Courant d'air	120-140	

Tableau 8: Mesures au SPP2 dans Malaval les 31 mars et 01 avril 2002

On notera tout d'abord que les valeurs près de l'entrée sont nettement inférieures à celles mesurées à Trabuc et Soustelle. L'explication logique tient au fait que les calcaires dolomitiques du causse sont plus pauvres en uranium que les dolomies massives ou les calcaires siliceux de la même période des basses Cévennes.

Mesures vers l'amont à partir de la galerie artificielle le 16 avril 2002 (régime instable, courant d'air descendant au moment des mesures) :

Lieu	Objet	c/s	Remarques
Zones rivière sans aragonite	Ambiance	40-70	Valeurs nettement supérieures à celles observées en aval
id. près de coulées d'aragonite massive	Ambiance Contact	60-100 80-150	L'appareil détecte au passage le voisinage de coulées
Rivière amont, remplissages à argile blanche	Ambiance Contact Galets de granite au sol	50-70 50-70 70-100	Pas de radioactivité détectable dans l'argile blanche (mais ce pourrait être dû à la faiblesse de la tranche visible)
Filon barytine +/- plombifère	Ambiance Contact	70-80 70-80	Pas de radioactivité spécifique détectable
Filons ferro-manganiques (Bramousset)	Ambiance Contact	80-90 80-90	Pas de radioactivité spécifique détectable
Echantillon de barytine et galène + mineral jaune	Contact	0	Aucune modification des valeurs d'ambiance
Super-blanches (début)	Ambiance	90-110	Valeur assez élevée
Super-blanches (partie médiane, zone sans coulées d'aragonite)	Ambiance	90-100	Valeur assez élevée
Super-blanches (partie médiane, zone avec coulées d'aragonite)	Ambiance Contact stalagmite active Contact stalagmite "morte" Contact coulées Contact lits de marne verte Contact amas argile brune	120-150 150-180 120-130 200-300 130-160 120-150	? ? pas de radioactivité propre détectable
Super-blanches (fond)	Ambiance - Calcaire seul - coulées aragonitiques - sol et/ou plafond en marnes vertes	90-110 158-170 120-150	Zones de décollement non lessivées, grandes surfaces marneuses verdâtres.
Super-blanches (fond, grosse coulée à droite après l'angle droit) :	- Ambiance - Contact arag. blanche - Contact arag. sombre - Contact recouvrement coulée de calcite	120-140 300-350 220 160-180	Coloration par manganèse probable (quelques cm seulement) effet d'écran
Super-blanches : double colonne à droite, 30 m plus loin	- Ambiance - Contact - Entre les colonnes	180-200 350-360 500-520	Record actuel pour la cavité.

Tableau 9: Mesures au SPP2 dans Malaval le 16/04/2002

Les mesures effectuées au voisinage de l'accès à la rivière sont très différentes 20-25 c/s le 31 mars et 40/70 15 jours plus tard. Il est probable que des variations dans la

ventilation (inversion diurne du courant d'air ? diminution d'intensité car températures extérieures se rapprochant des moyennes annuelles ?) soient à l'origine de ces différences.

Ces mesures permettent de mettre en évidence trois sites importants de production de radioactivité :

- les coulées d'aragonite massive : ce minéral accepte en solution solide des quantités d'uranium largement supérieures à celles de la calcite ou de la dolomie et les conditions de concrétionnement en ont fait un piège particulièrement efficace pour ces atomes. Par contre leur caractère compact se traduit par une sur-radioactivité locale assez importante mais pas par une augmentation vraiment sensible des valeurs d'ambiance, beaucoup plus liées au radon atmosphérique dans le voisinage.
- Les marnes verdâtres intercalées dans la série dolomitique au voisinage du passage au Sinémurien, comparables à celles observées à Soustelle et Trabuc, sans qu'il soit possible d'identifier strictement les niveaux. Dans les Super-blanches, un tel niveau, largement dégagé par effondrement de dalle, constitue le toit de la galerie sur des centaines de mètres carrés et est aussi largement présent au sol. Il est à l'origine de la forte sur-radioactivité du secteur.
- Lorsqu'il est assez important, le remplissage d'origine granitique extérieur est également une source de radioactivité marquée.

En suivant la rivière d'amont en aval et en ne prenant en compte que les secteurs hors coulées d'aragonite massive, le courant d'air associé voit sa radioactivité augmenter nettement vers l'aval, ce qui s'explique probablement comme à Trabuc par un effet d'accumulation progressive du radon émis par les parois. Au niveau de l'entrée naturelle, on observe comme à Trabuc mais en nettement plus violent à un véritable panache d'air nettement plus émissif que l'atmosphère environnante.

5 Résultats généraux

Un ensemble de problèmes fait que ces données sont très incomplètes et que les études demanderaient encore largement d'être poursuivies. Il me semble toutefois qu'un certain nombre de résultats peuvent être retenus :

5.1 Origine de la radioactivité endokarstique

On peut distinguer plusieurs types de roches productives de rayonnement et plusieurs facteurs de variation de leur concentration :

- le calcaire encaissant peut contenir de l'uranium provenant du lessivage d'un socle continental s'étant déposé en milieu réducteur : calcaires suffisamment profonds contenant de la matière organique non oxydée (carbone donnant une couleur grise à la roche), parfois du fer ferreux par exemple sous forme

de pyrite (Sinémurien des basses Cévennes : partie supérieure de Trabuc). Inversement, du calcaire déposé à faible profondeur, en milieu oxydant, blanc ou roux (fer ferrique), n'en contient pas en quantité identifiable (Urgonien : grotte du Barrage).

- Les niveaux plus détritiques (marnes correspondant à d'anciens limons de crues) intercalés dans la série calcaire et dont la richesse en éléments radioactifs en fait de véritables niveaux repères. Leur minceur fait qu'ils ne jouent toutefois un rôle significatif que dans des cas particuliers (plafonds de décollement des Super-blanches de Malaval).
- Le remplissage de décalcification (argile rouge plus ou moins sableuse) participe à l'émission quand le calcaire lui a fourni de l'uranium (Salle de la rotonde à Trabuc) mais pratiquement pas lorsque celui-ci n'en contenait pas déjà (le Barrage).
- Le concrétionnement peut concentrer l'uranium disséminé déjà présent dans l'encaissant : c'est le cas de l'aragonite massive (Malaval) dont le réseau cristallin permet l'inclusion d'ions de métaux lourds. Inversement, il peut être appauvri par suite d'une recristallisation sélective sous forme de calcite qui ne piège pas ces ions.
- Les remplissages allochtones d'alluvions anciennes ou actuelles en provenance du socle hercynien cévenol (micaschistes ou granite), nettement plus riche en uranium que les calcaires de couverture sont une source secondaire particulièrement importante, pratiquement la seule dans une cavité de l'Urgonien comme le Barrage. Les zones où ces remplissages sont importants donnent systématiquement des valeurs de radioactivité locale élevées ainsi de que des concentrations atmosphériques en radon particulièrement fortes quand la ventilation ne le disperse pas.

Ces alluvions présentent une structure discontinue et par conséquent une grande surface de contact solide/atmosphère. Leur perméabilité est réelle et leur volume suffisamment important pour fournir une quantité de radon largement sensible. Ces sols poreux pourraient ainsi se comporter comme de véritables zones productrices de radon, soumises à l'effet des variations de la ventilation mais aussi par exemple à celui de la remontée des nappes phréatiques qui, en remplissant les pores, chasse le gaz contenu entre les grains qui se répand alors dans l'atmosphère. Dans ce genre de situation qui est celui de la partie inférieure de la grotte du Barrage, on pourrait assister à des bouffées de radon comparables aux remontées rapides de CO² en période de mise en charge.

Inversement, l'uranium contenu dans les roches massives (calcaire, dolomie, aragonite) ne peut libérer que le radon produit par les atomes situés en surface, les autres restant prisonniers de la structure cristalline. On obtient alors une radioactivité localisée avec d'éventuelles concentrations ponctuelles (interlit marneux) mais une production gazeuse infime.

Il faut également noter le rôle que peuvent jouer les eaux d'infiltration-percolation dans le transport des produits radioactifs. Ce transport se fait à deux niveaux :

- les eaux acides et oxydantes peuvent transporter l'uranium libéré par la dissolution du calcaire. Ce fait est prouvé par la sur-radioactivité de certaines concrétions d'aragonite dont les matériaux proviennent de la roche de la voûte.
- Le radon étant relativement soluble dans l'eau, les eaux infiltrées ont pu s'enrichir en radon gazeux lors de la traversée de la masse calcaire et le libérer ensuite lors de la décompression à la percolation, comme le calcaire des stalactites. Dans une cavité vaste, où l'eau ruisselle en de nombreux endroits comme Trabuc, ce phénomène joue probablement un rôle important mais il faudrait des mesures en continu et leur corrélation avec les courbes météorologiques pour pouvoir le confirmer.

5.2 Radioactivité atmosphérique

Pour ce qui est de la radioactivité atmosphérique proprement dite (dosimètres) et de celle d'« ambiance », plus complexe mais qui lui est entre autres liée, deux types de secteurs donnent des valeurs particulièrement importantes en fonction du contexte local :

- les « pièges » à gaz : points bas peu ou pas ventilés, surtout lorsque des sources importantes existent à proximité : puits de la salle des schistes à Soustelle. On a là une accumulation statique sur le lieu d'émission.
- Les courants d'air sortant. Dans les cas où des mesures ont pu être réalisées, la teneur en radon croît au fur et à mesure que le courant d'air balaye la cavité et est maximale au niveau de la ressortie. On doit pouvoir expliquer ce phénomène par une accumulation dynamique du courant d'air qui balaie les parois et remplissages faiblement émissifs de la grotte, reçoit en même temps le radon transporté par l'eau de percolation, accumulant progressivement le produit de la radioactivité primaire.
- Il faut enfin signaler le rôle joué par l'eau et mis en évidence par la variation anormale au Barrage : l'émission de radon est réduite quand les alluvions, source de radioactivité reconnue, sont submergées ou sans doute largement mouillées en surface. Il serait intéressant d'une part de chercher à corréler l'émission avec l'hygrométrie, d'autre part de se poser la question pour une paroi mouillée de savoir si la fine pellicule qui la recouvre ne serait pas largement suffisante pour retenir le Radon. Dans ce cas, la climatologie de la cavité et en particulier l'état d'humidité des sols et des parois joueraient un rôle important.

Rapport sur quelques mesures de concentration en radon dans deux grottes du Vercors : Cuves de Sassenage et grotte Favot

Baudouin Lismonde

Dans le cadre de l'étude sur le radon dans différents karsts du pays entreprise par la CoMed, en Isère, c'est la commission scientifique du CDS Isère qui s'est occupée des opérations. Seize appareils ont été mis en place à l'occasion de quatre campagnes de trois mois environ. Les quatre campagnes permettaient de couvrir un cycle annuel. Cinq sites ont été retenus dans deux cavités différentes : les Cuves de Sassenage et la grotte Favot. Ces deux cavités du Vercors sont très fréquentées, la première est touristique et la seconde est une grotte d'initiation connue.

Nous allons présenter dans ce rapport les deux cavités en insistant sur le voisinage des sites où les capteurs de radon ont été implantés, puis nous analyserons les teneurs mesurées et essayerons d'interpréter les résultats.

1 Les Cuves de Sassenage

1.1 Présentation de la cavité

La grotte des Cuves de Sassenage se situe dans les Alpes, au nord du Vercors, au contact de la cluse de Grenoble, à 300 m d'altitude. Elle constitue la résurgence des eaux qui drainent le plateau de Sornin et le plateau Charvet. Elle développe actuellement 9,2 km pour une dénivellation d'environ 440 m et fera l'an prochain l'objet d'une monographie publiée par le CDS Isère.

Coordonnées Lambert de la porte supérieure de l'entrée des touristes : 860,363 x 328,417 x 307,5 m

Commune : Sassenage - Isère. Un sentier bien balisé conduit jusqu'à l'entrée de la grotte. Durée : 15 mn. La grotte est aménagée pour le tourisme jusqu'à la salle Saint Bruno à 300 m de l'entrée.

Le collecteur est constitué principalement des eaux provenant de Sornin et qui débouchent dans la partie connue des Cuves au siphon Bonnevalle (débit moyen 500 l/s). Un affluent important se développe parallèlement, dit affluent de Saint Nizier, dont le débit est plus modeste, quelques dizaines de litres/seconde.

Les Cuves se développent pour une grande part dans le Sénonien, au bas de la couche à silex et partiellement dans les lauzes. Au niveau du siphon Bonnevalle et surtout du 2^e siphon de la galerie Ouest, le réseau descend les couches et doit

presque atteindre l'Urgonien. Dans la partie amont de l'affluent de Saint Nizier, en amont de la salle Carrel, le réseau traverse le chevauchement du célèbre pli couché de Sassenage et se poursuit ensuite légèrement au-dessus comme le montre la stratification verticale des couches calcaires.

L'examen de la topographie, de la morphologie des galeries et du report sur la carte de surface montre qu'une ancienne sortie des Cuves était située plus en amont que la sortie actuelle, à l'altitude de la salle Saint-Bruno (+ 30 m par rapport à l'entrée des touristes). Un éboulis du quaternaire a obligé le Furon à s'orienter vers l'est, favorisant l'apparition d'une entrée plus basse. Le fonctionnement hydraulique actuel est celui d'une phase de creusement rapide dans le secteur d'entrée de la grotte. La présence de courant d'air dans ce secteur montre qu'il reste une faible communication, mais l'orifice extérieur du courant d'air n'a pas encore été trouvé. Il est très probable que l'ancienne sortie des eaux est cachée sous l'énorme éboulis au pied des falaises qui dominent le torrent du Furon.

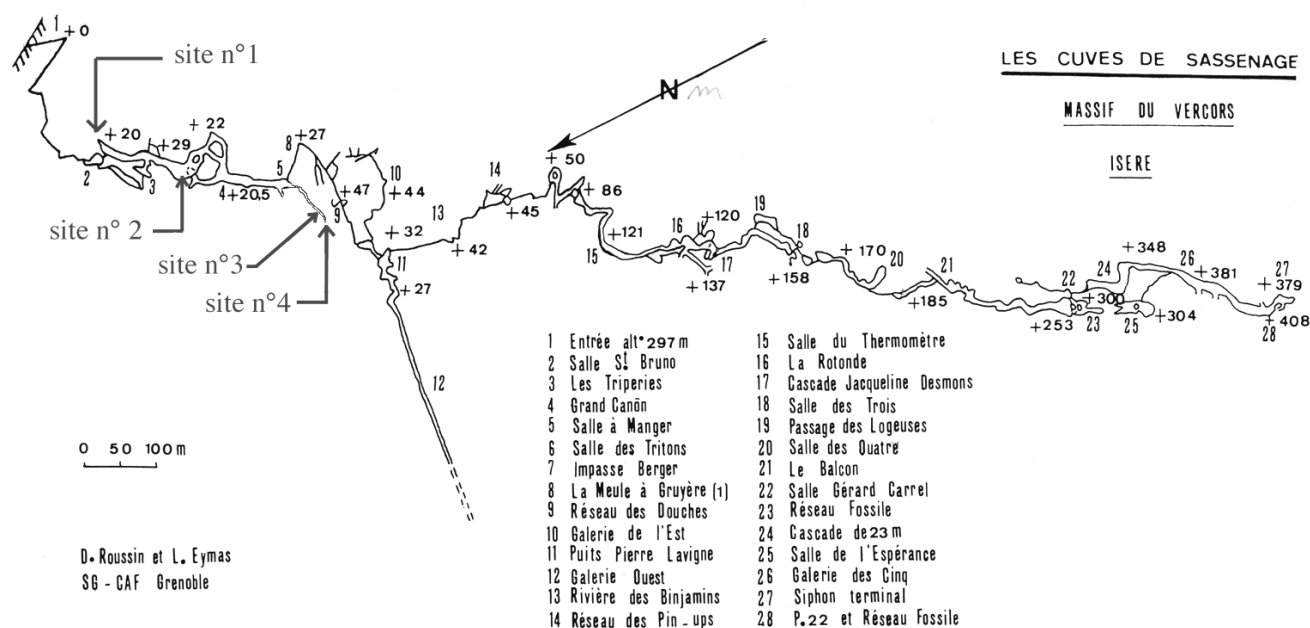


Fig. 1- Plan des Cuves avec l'implantation des quatre sites retenus (tiré de Roussin, 1969)

La suite du réseau est beaucoup moins ventilée. Le courant d'air y est insensible sauf à certains moments et dans quelques resserrements.

1.2 Le choix des sites de mesure

Les Cuves de Sassenage sont l'objet d'études diverses actuellement : étude du fonctionnement hydraulique, de la géologie. Une topographie du réseau est aussi en cours. L'étude des concentrations en radon bénéficie donc de ce contexte favorable. Le fait qu'elle est visitée par les touristes rajoute un surcroît d'intérêt.

La grotte est fort longue et la visite du fond nécessite plus de 12 heures. Il était donc raisonnable de choisir des sites pas trop loin de l'entrée. Un premier site a été trouvé dans la zone à courant d'air du circuit touristique au lieu-dit la salle de l'Éboulis à environ 200 m de l'entrée et à la cote +40 m. Cette salle marque la séparation entre le parcours ancien des eaux et le parcours actuel qui emprunte de petites galeries (fort actives en temps de crue). Le capteur a été installé à 1,5 m de hauteur derrière quelques blocs de la trémie qui obstrue la suite de la salle vers le haut.

Le second site a été choisi en dehors de la zone fortement ventilée. Mais nous sommes restés dans l'itinéraire principal de la cavité. Nous avons choisi la salle des Géants à 430 m de l'entrée et à la cote + 44 m. L'air y est renouvelé faiblement mais régulièrement. Le capteur a été posé sur le sol composé de limon et de sable dans une niche bordant le haut de la salle.

Pour le troisième site, nous avons recherché un endroit totalement à l'abri du courant d'air, si possible près d'un cul-de-sac. Et avec des dépôts sableux qui jouent un rôle de source possible pour le radon. La salle Berger qui est accessible sans équipements de remonté était tout indiquée, à 720 m de l'entrée environ et à la cote + 85 m. Le détecteur de radon a été mis à un mètre de hauteur dans une fissure de la roche en contrebas de la salle et invisible au visiteur éventuel.

Après les deux premières campagnes, le site de la salle de l'Éboulis ne nous a pas paru très intéressant du fait de la faiblesse de la teneur en radon. Aussi, nous avons préféré tester la possibilité d'une concentration plus grande en radon en installant le capteur au sol, dans une branche latérale en cul-de-sac du boyau creusé dans le sable par les spéléos, dans le réseau sous la salle Berger. Ce boyau n'est absolument pas ventilé et le radon doit stagner à cet endroit.

1.3 Les mesures et leur interprétation

Les campagnes de mesures se sont déroulées sur des périodes de l'ordre de 3 mois. Les décalages entre les récupérations et les poses pour la campagne suivante ont entraîné un léger recouvrement des périodes. Une mesure à la salle des Géants a fourni une valeur proche de 0, mais l'appareil était sur *off* au moment de la

recupération. Il y a donc eu vraisemblablement une erreur de manipulation au moment de la mise en place. Nous n'avons pas considéré ce résultat.

	Salle de l'Éboulis	Salle des Géants	Salle Berger	Boyau de sable sous salle Berger
du 29 juin au 21 sept. 2003	680	2230	5890	non mesuré
du 29 oct. 2003 au 25 janvier 2004	470	1440	2010	non mesuré
du 25 jan. Au 28 avril 2004	non mesuré	erreur	2310	2440
du 28 avril au 11 août 2004	non mesuré	2734	4748	4767

Tableau 1 : Teneurs en Radon aux Cuves de Sassenage

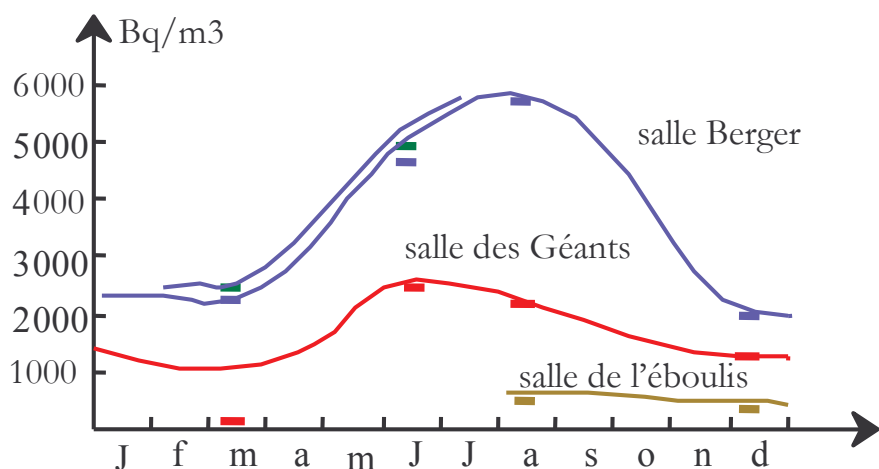


Fig. 2- Les mesures de Radon aux Cuves en 2003-2004

Nous avons représenté sur la figure ci-dessus les résultats des mesures aux Cuves de Sassenage. Cette présentation est plus facile à comprendre que les valeurs numériques du tableau. Ces courbes ne sont qu'indicatives puisque basées sur très peu de points.

De plus, l'imprécision des mesures est grande. Mais la fourchette d'erreur (+ -30%) donnée par Algade semble trop grande. On le voit facilement pour les mesures de la salle Berger. Cela provient sans doute de la difficulté qu'ils ont à étalonner leurs appareils et à l'incertitude sur la convection dans la boîte de mesure. L'incertitude

ne semble pas provenir de la mesure qu'ils font au microscope. Ce choix pessimiste les couvre sans doute juridiquement en cas de contestation. On peut raisonnablement estimer que les indications relatives d'un appareil à l'autre sont bien meilleures que 30 %, peut-être 5 à 10%, ce qui permet une bonne comparaison d'une campagne à l'autre.

D'un site à l'autre, la teneur en radon varie beaucoup. Le rapport entre la valeur maximale (boyau impasse Berger) et la valeur minimale (salle de l'Éboulis) atteint presque un facteur 10. On remarque aussi que les teneurs en radon présentent une périodicité annuelle. Le minimum se situe en décembre et le maximum en juillet. Le rapport entre le maximum et le minimum est voisin de deux pour tous les sites.

Nous allons essayer d'interpréter les valeurs observées, ainsi que les variations spatiales et temporelles.

1.4 Interprétation des fortes valeurs

On est étonné de voir de telles concentrations en radon dans certains secteurs des Cuves de Sassenage. Le socle granitique, sensé contenir l'uranium ou le thorium, est très profond. Au voisinage, on trouve principalement des calcaires avec silex et des marnes. Sous le Sénonien contenant la cavité, se développe toute la série des roches du secondaire (Urgonien, Hauterivien, Valanginien ...). Aucune ne contient du granite. On pourrait évoquer une migration du radon venant du socle (le seul gaz issu de la désintégration de l'Uranium). Mais avec une demi-vie de seulement 3,8 jours, on voit mal ce gaz traverser des centaines de mètres en quelques dizaines de jours. D'autant que sa forte masse atomique lui donne une diffusivité de masse assez faible.

On peut alors invoquer la présence dans la cavité d'éléments sédimentaires issus de la décomposition du granite et contenant des traces d'uranium. Le silex contenu dans le calcaire Sénonien peut-il contenir de l'uranium ? Ce silex provient d'animaux marins siliceux qui ont récupéré la silice directement de l'eau de mer. Le granite ne semble pas se glisser dans cette chaîne. On pense à l'argile et au sable. De fait, on trouve de bonnes quantités de sable dans la cavité. Par exemple tout le réseau Berger en contient. Mais on en trouve aussi de grandes quantités dans le secteur de la salle du Thermomètre. L'étude de la cavité a montré que ce sable se trouve dans des galeries qui ont été abandonnées par l'eau suite à un enfoncement de l'actif. D'où provient-il ?

On sait que la région fut couverte au Miocène de dépôts constitués de galets roulés issus de l'érosion des massifs alpins centraux déjà érigés. La roche qui résulte de la cimentation de ces dépôts s'appelle la molasse. Ces galets sont de toutes sortes et bien sûr certains d'entre eux sont en granite. Ces couvertures ont disparu des zones les plus élevées (Sornin), mais on trouve encore des placages miocènes dans les

creux (val de Lans et d'Autrans) et en particulier, on en trouve sur le plateau Charvet, à l'aplomb des Cuves de Sassenage. Par ailleurs et ultérieurement, les glaciers ont amené par eux-mêmes des roches granitiques dont on retrouve la trace au-dessus de l'affluent de Saint-Nizier sous la forme de belles moraines (plateau Charvet). De fait, le plateau Charvet est presque entièrement recouvert, soit de molasse résiduelle, soit de dépôts glaciaires plaqués sur le Sénonien.

À la fin des périodes glaciaires, à des époques où la végétation n'avait pas pu encore coloniser le paysage (la rhexistasie des géographes, Viers 1976), l'érosion pouvait jouer à plein. De grandes quantités de sédiments ont été injectés dans le karst. Pour ces périodes, le creusement ne se fait plus guère dans les cavités du fait de la faiblesse en dioxyde de carbone. Il s'agit donc de phases de comblement. Plus tard, la végétation a reconquis le paysage. L'érosion a été presque stoppée. Les dolines et les zones d'absorption se sont obturées. Les éléments grossiers ne pouvaient plus pénétrer dans les réseaux. Le colmatage des réseaux s'est arrêté. L'eau a pu reprendre son travail de creusement, d'autant plus que la teneur en dioxyde de carbone s'est trouvée multipliée par l'activité végétale et celle des sols (la biostasie des géographes). On remarque que les périodes de grande érosion de surface s'accompagnent d'un grand colmatage des réseaux et que les périodes d'arrêt de l'érosion s'accompagnent d'une grande activité de creusement souterrain. Les réseaux se creusent en période de biostasie.

Ces remplissages concernent plutôt l'amont du réseau. Un autre phénomène concerne surtout la partie aval de la grotte. À la fin des glaciations, les moraines glaciaires ont fait barrage à l'Isère. Par exemple à la fin du Wurm, un lac s'est établi à la cote +400 m, soit 100 m au-dessus de l'entrée des Cuves. La partie aval du réseau s'est donc trouvée noyée sur une grande longueur (siphon des Quatre ?) et la faible compétence du cours d'eau souterrain s'est traduite par de forts dépôts qui ont été attaqués par l'érosion une fois le lac disparu.

On en déduit que les dépôts de sable observés, amenés par des écoulements anciens, résultent probablement de l'altération des roches venant des massifs centraux alpins. La haute teneur en Radon appuie cette hypothèse et se trouve elle-même expliquée.

1.5 Interprétation des variations suivant le site

Nous avons déjà noté des variations qui atteignent presque un facteur 10 d'un site à l'autre. Il est tentant d'interpréter cette propriété, d'une part par la présence ou non de dépôts sédimentaires (sable en l'occurrence), et d'autre part par la ventilation de la cavité.

La salle de l'Éboulis (pour laquelle nous n'avons que deux mesures) se trouve dans le circuit touristique. Un bon courant d'air, alternatif suivant les saisons, la parcourt.

L'hiver, le courant d'air provient de l'entrée de la grotte. L'été, il provient d'une entrée supérieure inconnue. La teneur en radon est faible. Ce n'est pas étonnant puisqu'il est emporté dans le courant d'air.

La salle des Géants est située sur l'itinéraire principal de la cavité, mais le courant d'air est bien atténué et insensible. Le sens de ce courant d'air est le même qu'à l'entrée. La teneur en Radon est plus grande.

Enfin le secteur de la salle Berger est un cul-de-sac. On l'appelle aussi Impasse Berger. Aucun courant d'air n'est perceptible. De plus, il s'agit d'un point haut. On constate une teneur importante en radon.

On a vu plus haut l'origine des grandes quantités de sable à certains endroits des Cuves, les endroits qui ont été épargnés par la reprise d'érosion parce que l'actif s'était enfoui plus bas. C'est le cas du réseau Berger. Ce n'est pas le cas de la salle des Géants, encore parcourue de nos jours par les plus grandes crues.

Au vu de la grande teneur en radon de la salle Berger, nous avons installé pour deux campagnes un appareil dans un boyau en contrebas de cette salle (20 m plus bas). Il s'agit d'un chantier de désobstruction qui a été ouvert dans l'espoir de trouver une suite. Aucun courant d'air ne le parcourt. Le fond du boyau est un front de taille dans le sable. La teneur en radon est un peu plus élevée que celle de la salle Berger, mais tout à fait comparable. Il n'y a donc pas accumulation particulière à cet endroit. On en déduit qu'il n'y a pas de courant d'air, même faible, au réseau Berger.

1.6 Peut-on interpréter les variations temporelles ?

Si le radon provient des sédiments au voisinage des sites de mesure, la production est constante dans le temps. Les variations que l'on observe résultent donc d'un mouvement de l'air qui éloigne le radon de sa source de production, ou bien d'une circulation d'eau puisque le radon est soluble dans l'eau.

Le mouvement de l'air peut résulter d'une respiration de la cavité liée aux fluctuations de la pression atmosphérique. Il peut provenir aussi d'une convection sur place (cellule convective thermique) ou d'un mouvement d'ensemble de l'air du genre tube à vent. Il peut venir enfin d'un soufflage par l'entrée, lié à des précipitations (effet piston de l'eau qui pousse vers l'intérieur l'air de la zone voisine de la surface). Examinons successivement chacun de ces facteurs.

Respiration de la cavité. On sait que les variations de la pression atmosphérique appliquée à l'entrée d'une cavité constituent une sorte de piston qui fait entrer et sortir l'air de la cavité. La diffusion laminaire ou turbulente au sein de cet air apporte une sorte de diffusion (Lismonde, 2002) dont l'efficacité est beaucoup plus

grande que la diffusion moléculaire. Cet écoulement alternatif de l'air amène donc une dilution du radon le long de la cavité. Mais cet effet n'est pas lié aux saisons et ne permet pas d'expliquer l'effet saisonnier observé. Il pourrait seulement justifier l'augmentation de la teneur en fonction de la distance à l'entrée dans une grotte sans courant d'air

L'existence d'une cellule convective est tributaire d'une différence de température entre le haut et le bas de la galerie. Il faut que le haut soit plus froid que le bas pour qu'une instabilité se développe. Les infiltrations d'eau peuvent amener un gradient de ce type. Le plafond sera plus froid que le plancher à cause des infiltrations d'eau de fonte de neige. Il faut tenir compte aussi du déphasage induit par la propagation dans le massif. On peut donc s'attendre à une température de plafond plus basse que celle du plancher à la fin de l'hiver. Il y aura alors une cellule convective et une diminution de la teneur en radon par brassage. Ce mécanisme pourrait peut-être s'appliquer à la salle Berger, mais sans doute pas au boyau sableux au-dessous. Il est donc à rejeter comme explication générale.

Les Cuves de Sassenage sont parcourues par un courant d'air principalement au voisinage de la zone d'entrée (salle de l'Éboulis). L'hiver le courant d'air est entrant et comme les capteurs ont été installés pas très loin de la zone d'entrée, l'air est renouvelé. L'été, le courant d'air provient des zones situées en hauteur et lointaines. L'air peut donc se charger légèrement en radon, d'où le maximum observé. Mais cela s'applique aux zones ventilées. Le réseau Berger, surtout le boyau sableux, pourrait sembler échapper à cette explication. Mais en l'absence d'autres raisons, le renouvellement de l'air par un courant d'air très faible semble la seule explication possible (discussion avec M. Wienin). On en déduit qu'il existe d'autres réseaux au bout de l'Impasse Berger, réseaux qui restent à découvrir.

Examinons maintenant le rôle des circulations d'eau. Elles présentent elles aussi des variations saisonnières. Cette eau exerce un effet piston qui a tendance à pousser l'air vers l'entrée basse. La pluviométrie étant plus forte en hiver, on devrait obtenir un accroissement de la teneur en hiver. Ce n'est pas le cas. Les circulations d'eau ne jouent donc dans les Cuves de Sassenage qu'un rôle secondaire.

2 La grotte Favot

2.1 Présentation de la cavité

Coordonnées Lambert : 848,52 x 313,41 x 880 m - Rencurel - Isère. La grotte est pointée sur la carte IGN top 25 3235 OT.

Le développement total topographié est de 850 m, le point bas est à la profondeur 118 m.

Un vaste porche permet d'accéder à une première galerie basse de 50 m de longueur. Cette galerie débouche sur une plate-forme en falaise. À l'est, plonge le grand Tunnel, magnifique conduite forcée de 5 m de large, de section pentagonale, profitant de deux joints bien marqués, et descendant à 25° dans les strates. On accède alors à un complexe de salles et de galeries de grandes dimensions. À - 70 m, un puits (le grand Scialet) en deux ressauts (14 et 35 m) permet d'atteindre le point bas de la cavité à - 116 m. Au sud du fond du grand Scialet, un plan d'eau se révèle n'être qu'une laisse d'eau sans suite. On peut contourner le Grand Scialet sur sa gauche en franchissant une énorme coulée stalagmitique. La descente de l'autre côté permet d'accéder à la galerie des Lacs très photogénique. Au bout, une petite galerie, dite boyau des Fadas, a été entièrement creusée dans les limons et argiles plus ou moins calcités du colmatage.

La grotte se développe dans les calcaires à faciès Urgonien. Elle utilise un joint de strate situé à une soixantaine de mètres au-dessus des couches marneuses de l'Hauterivien. L'étude granulométrique du remplissage montre qu'il correspond à de faibles vitesses d'écoulements. Des phénomènes de décompression fort anciens sont à l'origine des gros blocs dans la galerie principale avant le Gué. Les concrétions qui ont poussé sur ces blocs sont plus vieilles que 350 mille ans. Pour une d'entre elles, l'âge de 310 mille ans a été retenu. La coulée sur les bords du puits a fourni, pour les parties superficielles au contact de la paroi, l'âge de 215 mille ans (DELANNOY, 1997).

Les mesures indiquent une température anormalement basse pour l'altitude. Il s'agit en réalité d'un magnifique piège à air froid (LISMONDE, 2003). Le fonctionnement en est le suivant : la grotte est globalement une galerie régulière descendante. En hiver l'air extérieur, plus froid que celui de la cavité, pénètre par le plancher de la grande galerie d'entrée. Il dévale le toboggan, se mélange à l'air chaud remontant. Le courant d'air diminue donc lentement et il est assez faible au niveau du Grand Scialet. Au boyau des Fadas, au bout de la cavité, le courant d'air est insensible, mais l'air est renouvelé. En été au contraire, l'air extérieur est plus chaud que l'air de la cavité. Cette situation est stable et l'air chaud ne peut pénétrer profondément dans la grotte.

La grotte est fossile, excepté un ruisseau au fond du grand puits, alimenté par la galerie des Lacs et le Gué. La grotte est l'ancienne sortie d'eau du bassin d'Autrans Méaudre, et elle a cessé de couler à l'issue de glaciations assez fortes pour entailler la Bourne et mettre au jour la fissure à l'origine de Goule Noire au-dessous.

2.2 Les mesures et leur interprétation

Les mesures ont été faites à l'entrée du boyau des Fadas sur le bord droit.

Période	Concentration en Bq/m ³
du 29 juillet au 7 octobre 2003	160
du 12 octobre 2003 au 23 janvier 2004	60
du 25 janvier au 28 avril 2004	110
du 2 juin au 28 juillet 2004	286

Tableau 2 : Mesures à la grotte Favot

On constate que la teneur en radon est très faible au fond de la grotte Favot. Une oscillation de périodicité annuelle se manifeste comme aux Cuves. Le maximum a lieu en juillet et le minimum en décembre. Le rapport entre le maximum et le minimum est de l'ordre de 4,5.

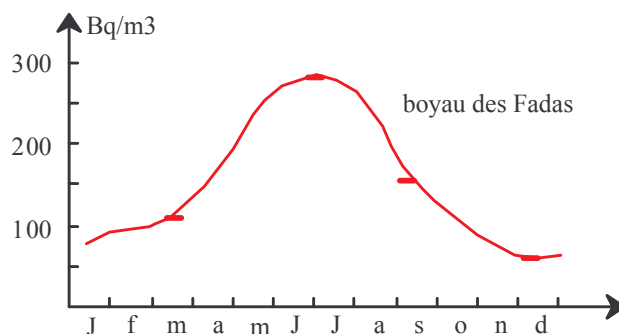


Fig.4- Teneur en radon du boyau des Fadas à la grotte Favot

La faible teneur en radon s'explique sans doute par l'absence de sédiment contenant de l'uranium. La grotte Favot est tournée vers l'intérieur du Vercors. Le bassin versant ancien du synclinal d'Autrans-Méaudre a été protégé des glaciations par sa position à l'ouest. Pourtant les molasses tertiaires se sont déposées elles aussi sur cette région. La couverture molassique s'observe encore dans le creux du synclinal. La seule différence par rapport aux Cuves est qu'on ne voit pas de sable dans la grotte mais des limons et argiles provenant des décantations à la fin des épisodes de crue. Et il n'y a pas de moraines sur le bassin versant.

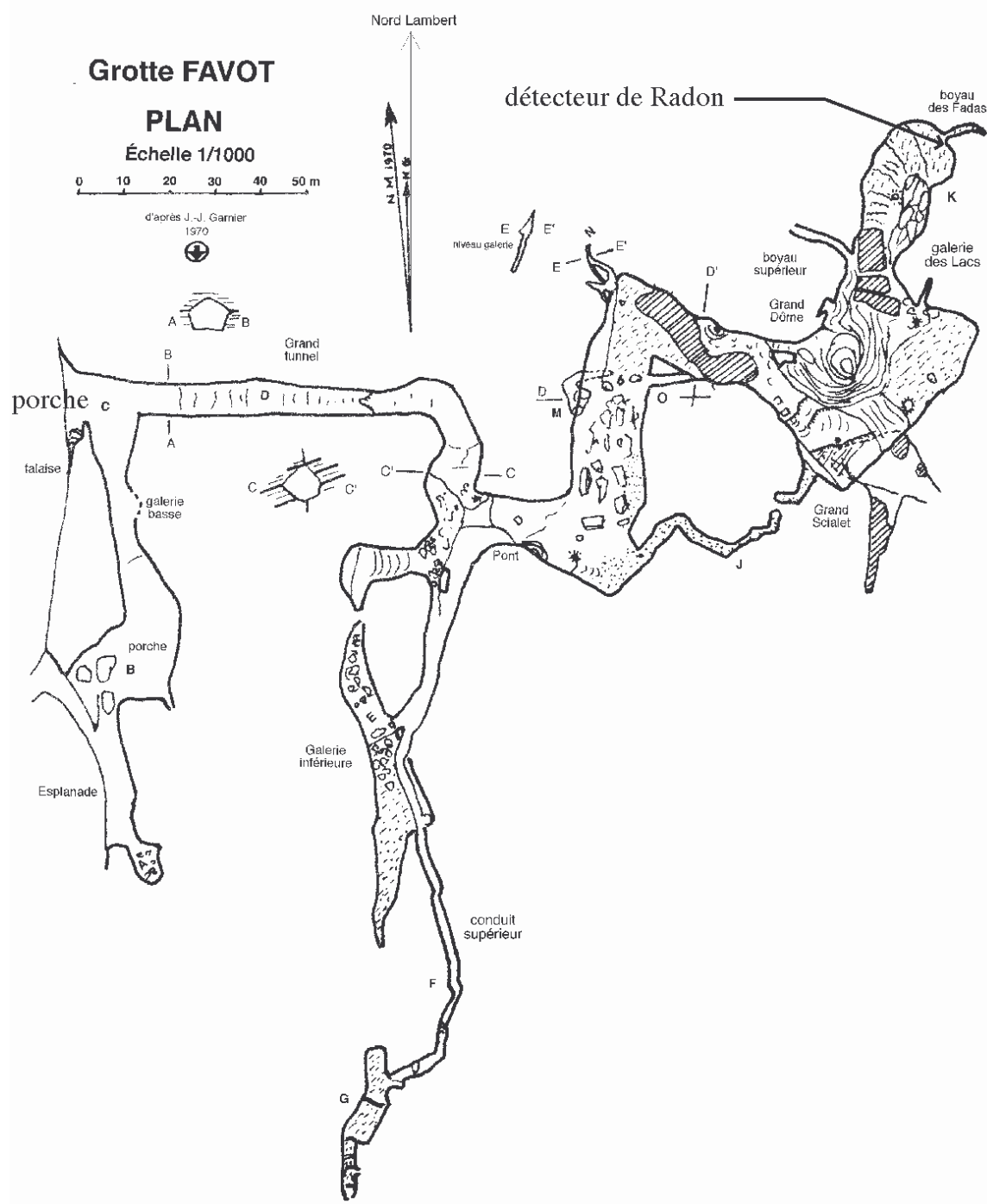


Fig. 3- Plan de la grotte Favot (topo tirée de Garnier, 1973)
 et emplacement du détecteur de Radon

Les variations annuelles peuvent s'expliquer par le fait que la grotte Favot est un piège à air froid. En hiver une circulation intense d'air peut s'établir par l'entrée unique. En été au contraire, les échanges d'air sont bloqués par la faible température du point bas de la grotte.

Est-ce que d'autres explications iraient dans le même sens ? Les circulations d'eau sont plus importantes en hiver qu'en été. Si l'eau entraîne le radon, l'explication conviendrait aussi.

3 Conclusions

La teneur en Radon présente une grande variabilité. D'un site à l'autre des Cuves de Sassenage, elle varie d'un facteur 8. Il est facile après coup de trouver une explication. Mais pouvait-on prévoir le résultat ? La réponse est clairement non. La mesure de Radon amène donc une information nouvelle sur la cavité. Information qui fournit dans le cas des Cuves peut-être l'origine du sable déposé dans la cavité, ou bien une indication sur le renouvellement de l'air.

Les variations saisonnières, quant à elles, nous renseignent sur les échanges d'air, même dans des endroits aussi peu ventilés que l'impasse Berger.

4 Bibliographie sommaire

DELANNOY J.-J., 1997 : Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst. Thèse d'état publiée aux éditions du Septentrion, 2000, 678 p.

GARNIER J.-J., 1973 : La grotte Favot. Spéléos n° 72 p 21-23 (plan et coupe).

LISMONDE B., 2002 : Climatologie du monde souterrain. CDS Isère éditeur, deux tomes.

LISMONDE B., 2003 : La grotte Favot : étude expérimentale des circulations d'air hivernales. 13^e Rencontre d'octobre. Spéléo-club de Paris, Saint-Christophe-la-Grotte, p 71-78.

OSTERMANN J.-M., 2003 : Le radon dans quelques cavités françaises : étude préliminaire. 13^e Rencontre d'octobre. Spéléo-club de Paris, Saint-Christophe-la-Grotte, p 108-114.

ROUSSIN D., EYMAS L., 1969 : Contribution à l'étude et à l'exploration des Cuves de Sassenage. Spelunca bull. 2, p 110-119.

VIERIS G., 1976 : Éléments de géomorphologie. Nathan, 208 p.

Le radon atmosphérique de la grotte de St Marcel d'Ardèche

Marc Faverjon

1 Contexte géomorphologique

Le réseau des grottes de Saint Marcel est un très vaste complexe souterrain s'ouvrant en rive gauche de l'Ardèche, dans la partie terminale de ses gorges sur la commune de Bidon, Ardèche.

Le plateau de Saint Remèze, sous lequel se développe le réseau, est une vaste entité calcaire s'étendant vers 300 – 400 mètres d'altitude et culminant à la Dent de Rez à 720 mètres d'altitude. Il s'étend sur plus de 900 km² entre le fossé d'effondrement d'Alès au nord ouest (Vallon Pont d'Arc) et la vallée du Rhône à l'est.

Le plateau est entaillé par le majestueux canyon de l'Ardèche qui s'est enfoncée de 300 mètres dans le substratum entre Vallon Pont d'Arc et Saint Martin d'Ardèche.

La structure principale est composée de calcaires à faciès urgonien du barremo bédoulien de plusieurs centaines de mètres de puissance. Cette formation est entrecoupée de plusieurs vires marneuses caractéristiques dans le paysage. La structure est subhorizontale, légèrement plissée et faillée par compartiments.

On observe de nombreuses surfaces d'aplanissement sur le plateau. L'ébauche de leur formation remonte sans doute au crétacé supérieur. Le paysage actuel est cependant hérité du miocène supérieur. Il a été modelé en corrélation avec les fluctuations de niveau du Rhône. On distingue à ce titre durant le messinien des phases importantes de creusement des gorges de l'Ardèche et des cavités environnantes suivies au pliocènes de phases de remplissage et de vidanges ayant affecté toute la partie basse des gorges. Ces phases de creusement messiniennes définissent les niveaux rencontrés dans la grotte de Saint Marcel.

Le relief est le paysage sur le plateau sont typiquement karstiques avec de nombreuses zones de lapiaz, quelques dépressions karstiques et de très nombreux avens et grottes.

La région est aride avec une végétation méditerranéenne de maquis composée essentiellement de chênes verts et buis, le « bartas ». Quelques zones centrales sur le plateau, fossé d'effondrement de Bidon et cuvette de Saint Remèze sont cultivées de lavande, vigne et prairie. Ces cultures n'affectent par contre pas les terrains sus-jacents au réseau de Saint Marcel.

Le réseau hydrographique pérenne aérien comprend uniquement l'Ardèche et le Rhône à l'est.

2 Description de la cavité

Le réseau des grottes de Saint Marcel d'Ardèche est le plus grand réseau souterrain ardéchois et l'un des plus longs de France. Une petite partie de la cavité est aménagée pour le tourisme.

Le réseau développe plus de 47,5 km de galeries connues dont plus de 10 km noyées.

Il s'étend sous une surface d'une quinzaine de kilomètres carrés (4,5 x 3,5 km) et sur 233 mètres de dénivelé entre les cotes NGF -9 m et + 224 m.

Les sources de l'Ecluse et du Bateau, la perte de la Cadière et l'aven de Noël tous proches bien que spéléologiquement non encore reliés au réseau font partie de ce même système.

L'entrée naturelle principale s'ouvre à 87 mètres d'altitude dans les gorges de l'Ardèche, 40 mètres au dessus de la rivière, légèrement en amont du Ranc Pointu.

Le réseau comprend d'autre part une entrée supérieure ouverte en 1972 et située sur le plateau à 224 mètres d'altitude, l'aven Despeysse ; une entrée artificielle s'ouvrant en bordure de la route des gorges à 195 mètres d'altitude et servant d'accès pour la partie touristique et une sortie basse en bordure de l'Ardèche reliée au réseau par plusieurs siphon, la grotte Deloly.

Le réseau a été exploré à partir de la deuxième moitié du 19^e siècle avec cependant une accélération dans les explorations à partir des années 1960. Les principaux groupes ayant travaillé dans le réseau depuis 1960 sont l'ESB, le SGF, le SCSM et l'AVENS.

Les grottes de Saint Marcel comprennent 5 réseaux principaux.

Le réseau 1 ou galerie principale s'étend sur plus de 4 km vers le nord avec de très larges galeries, environ 20 mètres, dont une partie est aménagée pour le tourisme. Il se développe à un niveau de +70 mètres par rapport à l'entrée naturelle. Il est richement concrétionné.

Le réseau 2, ou réseau Courbis, débute dans le réseau 1 à 600 mètres de l'entrée. Il développe plus de 18 km de galeries phréatiques plus ou moins basse et peu concrétionnées. Il se dirige vers le nord-est et rejoint dans sa partie médiane l'aven Despeysse. Il est creusé autour d'un niveau 0 par rapport à l'entrée naturelle.

Le réseau 3, ou des Stéphanois, se développe à l'ouest du système à proximité des gorges de l'Ardèche. Il comprend de belles galeries concrétionnées creusées autour d'un niveau +30 mètres et deux séries de puits permettant de rejoindre le niveau de base noyé.

Le réseau 4, ou des Saint Marcellois, débute à 3 km de l'entrée au lieu dit la Grande Barrière. Il se dirige vers le nord-ouest. Il comprend une large galerie phréatique et concrétionnée, en certains lieux plus chaotique et creusée au profit de fractures importantes.

Le réseau 5, d'exploration plus récente, est l'ensemble des galeries noyées et post siphon parcourues sous et autour du niveau de l'Ardèche, à -45 mètres par rapport à l'entrée naturelle. Il développe plus de 15 km et comprend la grotte Deloly. Il est superposé aux réseaux 1, 2, 3 et 4. On y accède par la grotte Deloly ou 8 autres puits ou galeries situées dans les réseaux historiques.

Les remplissages sont présents de façon discontinue dans la plupart des réseaux connus. Il s'agit de remplissages argileux mais aussi sableux ou de graviers dans certaines parties du réseau 2 et dans une moindre mesure du réseau 3. On rencontre des remplissages autochtones mais aussi allochtones transportés par l'Ardèche : graviers cristallins ou basaltiques.

Le réseau de Saint Marcel draine la partie du plateau délimitée par l'Ardèche, le fossé de Bidon et la limite urgonienne du plateau en direction de Saint Marcel. Il est aussi alimenté par des pertes de l'Ardèche, en particulier celle de la Cadière. Ses eaux résurgent aux sources du Bateau et de l'Ecluse, et sans doute pour une part plus en aval dans l'Ardèche.

Le réseau est affecté par les crues régulières de l'Ardèche et les pluies torrentielles fréquentes dans la région. On constate des mises en charge pouvant atteindre 50 mètres dans certains secteurs de la cavité.

3 Climatologie

La basse Ardèche est située à 100 km de la mer méditerranée dans le couloir rhodanien.

Elle se trouve à la limite nord du climat strictement méditerranéen qui domine cependant.

Les étés sont chaud et sec avec des températures estivales atteignant fréquemment 35°C.

Les hivers sont doux avec des températures minimales autour de -5°C.

Les printemps et automnes sont les saisons les plus humides.

La pluviométrie annuelle atteint 1500 mm concentrés sur les mois d'avril – mai et octobre – novembre en des pluies et orages souvent très violents.

Ces pluies sont à l'origine de crues violentes de l'Ardèche et dans les réseaux souterrains. Les rapports de débits entre l'étiage et les crues sont pour l'Ardèche proche de 100.

La neige est très peu présente. La moyenne annuelle se situe autour de 1 j de neige par an.

Les températures dans les grottes sont typiquement comprises entre 14°C et 15°C.

La plupart des cavités sont d'autre part affectées par la présence de CO². Les teneurs fluctuent au fil des saisons et peuvent atteindre 6% dans certains puits

borgnes du plateau. Des teneurs de 2% à 3% de CO² sont couramment mesurées dans le réseau de Saint Marcel.

Des courants d'air sensibles parcourent le réseau de Saint Marcel. Ils deviennent très importants à l'entrée naturelle en plein hiver et surtout en plein été sans pour autant pouvoir être comparés à des courants d'air plus violents encore rencontrés dans certaines cavités de montagne.

Le principal courant d'air s'établit entre l'aven Despeysse, entrée supérieure, et l'entrée naturelle du réseau située 137 mètres plus bas. Il est aspirant à l'entrée basse en hiver et soufflant en été.

4 Localisation des stations

Quatre stations de mesure ont été retenues dans le réseau en fonction de leur localisation vis à vis des courants d'air principaux, de leur position altimétrique et de leur relative facilité d'accès.

Station 1, Cathédrale

La station 1 est située à 600 mètres de l'entrée naturelle dans la partie sud de la salle dite de la Cathédrale, où confluent les réseaux 1 et 2. Cette station est située à l'extrémité aval du tube à vent reliant l'entrée naturelle à l'aven Despeysse. Elle est dans la partie basse de la salle de la Cathédrale haute de plus de 40 mètres.

Les capteurs étaient installés sur un bloc à 1,2 mètres du sol.

Le sol au niveau de la station est rocheux avec un fin dépôt argileux.

Point topographique correspondant : entre 13 et 14.

Station 2, base Despeysse

La station 2 est située à la base de la galerie venant de l'aven Despeysse, au niveau de sa confluence avec les galeries de Saint Marcel : carrefour N / N11 / N12. Cette station est située à l'extrémité amont du tube à vent reliant l'entrée naturelle à l'aven Despeysse.

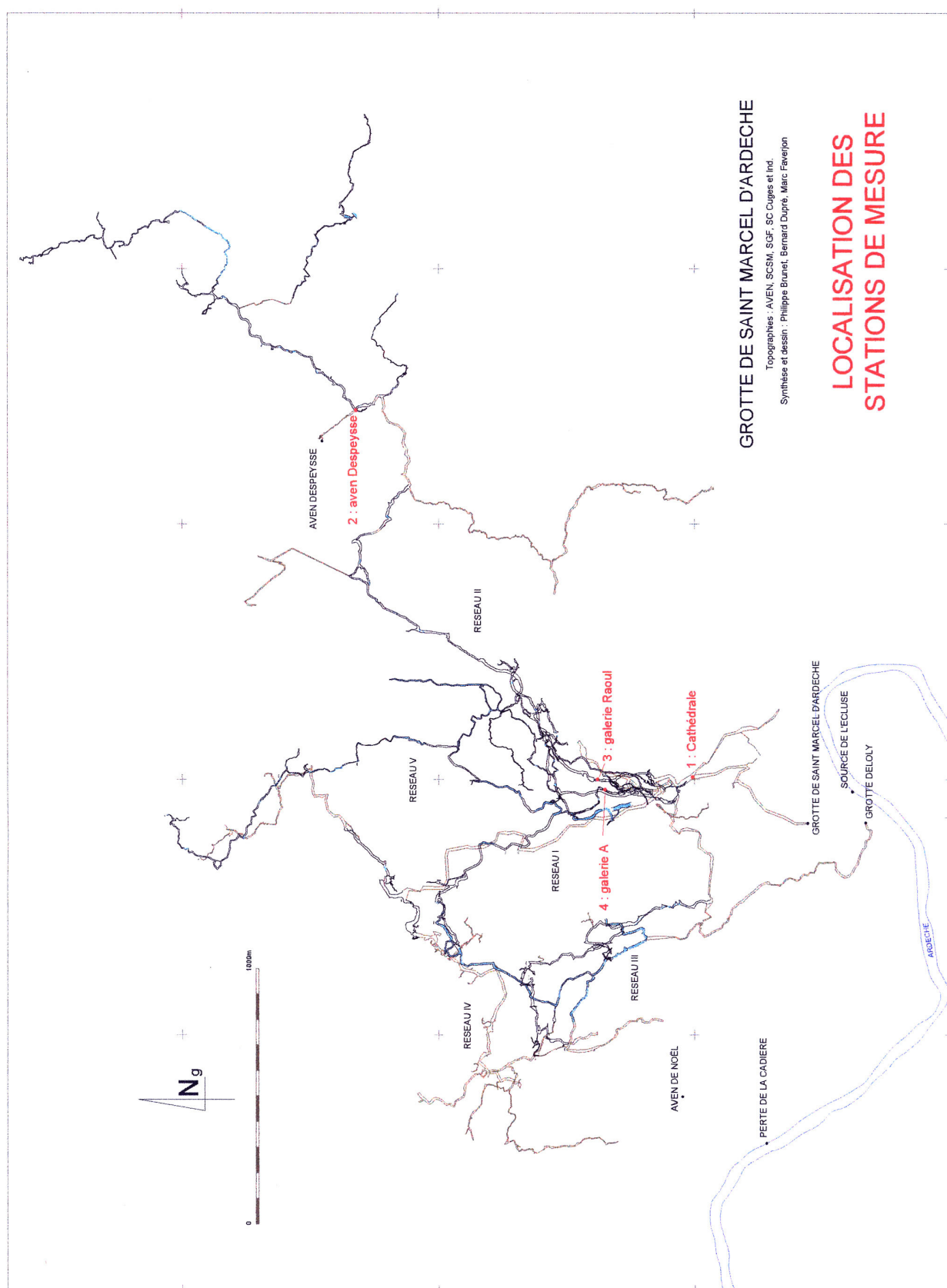
La station se trouve à 3850 mètres de l'entrée basse et à 350 m de distance de l'aven Despeysse.

Les capteurs étaient disposés sur le bord de la galerie à 1 mètre du sol.

Le sol au niveau de la station est rocheux avec présence de concrétionnement. Des dépôts d'argile centimétriques sont présents sur certaines parois de la galerie.

Cette zone de la cavité est affectée par des montées d'eau lors des grosses crues. Le capteur déposé le 11 octobre 2003 a été retrouvé le 29 décembre à 20 mètres de son lieu de dépôt sur une corniche de N11 à 5 mètres de haut ! Conclusion : l'écoulement en crue se fait en direction de N11 et les capteurs flottent bien !

Point topographique correspondant : 2NC0.



Station 3, galerie Raoul

La station 3 est située dans la galerie Raoul ou galerie des Concrétions au niveau de la chatière précédant la salle de l'escalade De Joly. La galerie Raoul se trouve dans la partie haute du réseau au dessus de la partie touristique, à la cote +67 mètres par rapport à l'entrée naturelle. La station est à 1125 mètres de l'entrée naturelle.

Les capteurs étaient disposés sur une corniche rocheuse à 1,5 mètre du sol et à 0,5 mètre du plafond.

Le sol de la galerie est rocheux avec un concrétionnement important.

Point topographique correspondant : 1-I-16

Station 4, galerie A

La station 4 est située dans la première partie de la galerie A faisant partie du Labyrinthe du réseau 2. Elle se trouve à 1075 mètres de l'entrée naturelle à la cote – 8 mètres par rapport à l'entrée naturelle. La galerie A se trouve dans la partie basse du réseau ; une de ces branches permet d'accéder au réseau 5 ou réseau noyé. Cette station peut se trouver ennoyée lors de crues importantes.

Les capteurs étaient posés sur une corniche rocheuse à 1,5 mètres du sol et 1 mètre du plafond.

Le sol de la galerie est un remplissage centimétrique à décimétrique d'argile et sable.

Point topographique correspondant : II-A-29.

5 Résultats

5.1 Mesures ponctuelles au scintillomètre et au radiamètre

Des mesures ponctuelles d'activité ont été réalisées avec un scintillomètre SAPHIMO SPP2 et un radiamètre ESM FH40G-L10.

Les mesures au SPP2 varient entre 40 et 105 cps pour un bruit de fond extérieur de 50 cps.

Les mesures au radiamètre varient pour la majorité des mesures entre 60 et 125 nSv/h pour un bruit de fond extérieur de 80 nSv/h. Deux valeurs atteignent 160 et 210 nSv/h.

5.2 Mesures de radon

Les mesures de radon 222 sont réalisées par intégration sur des périodes de 3 mois environ par des capteurs produits par la société Algade et développés en laboratoire. Norme NF M 60-766 et modes opératoires M-DE-6201 et M-AN-5201.

	juillet - août - septembre	octobre - novembre - décembre	janvier - février - mars	avril - mai - juin	moyenne annuelle
Cathédrale	3220	280	90	1384	1244
Despeysse	3770	940	730	1263	1676
Galerie Raoul	3190	500	410	-	1367
Galerie A	2890	1540	1190	1560	1795
Moyenne cavité	3268	815	605	1402	1530

Le 4^{ème} capteur positionné dans la Galerie Raoul a donné au développement une valeur nulle anormale retirée du tableau.

5.3 Mesures de CO²

Les mesures de CO² ont été réalisées avec un détecteur électronique portatif OLDHAM.

	28-juin	05-oct	29-déc	27-mars	07-juil	moyenne annuelle
Cathédrale	1,80%	1,95%	-	0,28%	1,75%	1,45%
Despeysse	-	-	-	0,54%	0,92%	0,54%
Galerie Raoul	1,75%	2,30%	-	0,32%	-	1,46%
Galerie A	2,70%	3,00%	-	0,46%	2,60%	2,19%
Moyenne cavité	2,08%	2,42%	-	0,40%	1,76%	1,51%

Nous n'avons pu faute d'organisation faire des mesures le 29 décembre. Les valeurs habituellement rencontrées en plein hiver sont comparables à celles mesurées le 27 mars.

6 Interprétations

6.1 Mesures ponctuelles d'activité

Les mesures ponctuelles montrent une activités comprise dans plus de 90% des cas dans la fourchette -10% / + 30% par rapport au bruit de fond.

Deux valeurs relevées au radiamètre dans la galerie N ont montrés des activités de 2 à 3 fois supérieures au bruit de fond. Ces dernières mesures ont été faites dans des secteurs où il existe un remplissage argileux important.

6.2 Mesures de radon

L'activité volumique moyenne annuelle s'établit à 1530 Bq/m³ pour la grotte de Saint Marcel.

Elle varie peu en module moyen annuel en fonction de la position des stations de mesure dans la cavité : 1250 à 1800 Bq/m³. La valeur maximale est cependant observée dans la galerie A qui correspond à la station la moins « ventilée » et le minimum à la Cathédrale qui correspond à la station la plus accessible par rapport à l'extérieur et la mieux « ventilée ». Elle est en effet située sur le trajet des deux courant d'air les plus important : Aven Despeysse / Entrée naturelle et Entrée touristique / Entrée naturelle. Elle est aussi reliée à l'extérieur via une très large galerie sans obstacle.

Les variations saisonnières de l'activité volumique sont par contre très importantes. Les pics d'activités ont été observés pour toutes les stations en été et les minima en hiver.

Les rapports entre les valeurs d'été et d'hiver vont de 3 à 35 selon les stations.

Les sens des courant d'air principaux influent sur certaines valeurs mais n'est pas le paramètre prépondérant qui gouverne ces variations saisonnières. L'influence des courants d'air apparaît limitée aux zones d'entrée dans les périodes où celles ci aspirent l'air extérieur avec une atténuation de l'effet de dilution du même ordre que celle de l'écart de température extérieur/intérieur. La différence de température liée à l'extérieur se ressent jusqu'à la Cathédrale affectée par une très faible valeur d'activité volumique en radon en hiver et à moindre mesure dans la galerie Raoul alors qu'il n'est pas sensible en été à la base des puits du Despeysse qui n'est affectée par aucune « anomalie ».

La station de la galerie A est celle où les écarts été / hiver est le plus faible.

La position altimétrique des stations dans la cavité ne semble pas avoir une influence importante.

6.3 Mesures de CO²

Seules les mesures de CO² correspondant aux stations étudiées sont présentées. De nombreuses autres mesures, dont nous utiliserons certains résultats, ont été réalisées dans le réseau.

Les valeurs de CO² relevées dans le réseaux varient de 0.28% à 4.10%.

Elles subissent de très fortes variations saisonnières avec des minima en hiver et des maxima en été. Les valeurs les plus fortes en hiver sont de 1% environ, alors qu'en été pratiquement toutes les parties de la cavité se retrouvent avec des teneurs de 2% à 4%. Certaines galeries semblent jouer le rôle de « piège » ou de « générateur » à CO² : galerie A, qui a une topographie en cuvette, et N6 pour la première catégorie ; N9 en hivers et réseau III en été pour la seconde catégorie. L'influence de ces apports dans la répartition des teneurs en CO² sur la traversé Aven Despeysse / Entrée naturelle est significative.

7 Conclusions

Les teneurs en radon 222 dans le réseau des grottes de Saint Marcel varient entre 90 et 3800 Bq/m³. La moyenne annuel s'établie à 1500 Bq/m³.

Ces teneurs fluctuent considérablement en fonction des saisons. Elles sont d'autre part atténuées par les courants d'air principaux pour les secteurs proches des entrées aspirantes.

Les variations saisonnières des teneurs en radon sont en corrélation avec les variations saisonnières générales des teneurs en CO² dans la cavité.

L'exposition induite pour un spéléologue par la présence de radon est évaluée à 6 µSv/h. La durée d'exposition pour atteindre une dose de 1 mSv est donc de 166h.

8 Remerciements

Nous tenons à remercier la Mairie de Saint Marcel, propriétaire du réseau pour la confiance qu'elle nous accorde, leur aimable autorisation pour mener cette étude et le prêt de matériel de détection de CO₂. Ces remerciements s'adressent tout particulièrement à André Pesenti, Maire de Saint Marcel et Pierre Courtillat, Adjoint au Maire chargé des grottes.

Les mesures ponctuelles d'activité ont pu être réalisées grâce au matériel, scintillateur et radiamètre, prêté par la société Valoref à Bollène.

Les relevés de capteurs ont été réalisés par l'auteur avec l'assistance de Patrick Perez, Ludovic Mocochoin, Maud Faverjon, de la Co. Jeune FFS et du S.C. Vertaizon.

Données sur le radon de deux réseaux du Languedoc-Roussillon, Grotte du TM 71, et Système Fanges – Paradet

Bernard Ournié

1 Introduction

Ces travaux ont pour objet de réaliser une étude des teneurs en radon dans deux réseaux du Languedoc-Roussillon.

Leur situation géographique, l'originalité de l'environnement géologique, l'existence d'études antérieures ont présidé au choix de ces cavités.

Ils devraient permettre de compléter les travaux antérieurs et d'avoir une approche des teneurs auxquelles sont exposés les spéléologues.

Le Radon est un gaz incolore, inodore, et radioactif. Ce gaz rare, le plus lourd connu, a pour densité 9,2 g/l à 0°C (soit 8 fois plus que l'air). Il est très volatil et soluble dans l'eau et dans certains composés organiques.

Le radon émane du radium contenu dans le sol, une partie migre jusqu'à l'atmosphère par diffusion et convection.



Situation

2 Contextes et caractéristiques des réseaux étudiés

2.1 Contexte régional

Les réseaux étudiés sont situés en Languedoc-Roussillon, sur la bordure Nord des Pyrénées. Ils sont localisés entre le front Nord-Pyrénéen et la Chaîne Primaire Hercynienne. Ils se sont formés dans la couverture sédimentaire, localement métamorphisée.

C'est une zone fracturée, complexe, soumise à une activité sismique remarquable. Le dernier séisme important dans cette zone a eu pour épicentre une zone située sous la Commune de Saint-Paul-de-Fenouillet (le 18/02/1996, magnitude 5,6), à moins d'une dizaine de kilomètre du réseau Fanges-Paradet.

Cet activité coïncide avec un thermalisme actuellement non exploité mais bien présent (exemple : Clue de la Fou, à St Paul-de-Fenouillet).

Deux grands linéaments structurent cette zone, la direction E-W, direction de la faille nord-pyrénéenne ; la direction NE-SW, direction de la faille des Cévennes.

Les études réalisées ont montré, pour ces réseaux, de fortes anomalies concernant un déficit en oxygène, plus marqué pour le système Fanges-Paradet (jusqu'à 16,2 % O²) que pour la grotte du TM 71 (jusqu'à 18,3 % O²). Ce déficit mesuré n'est pas

compensé par le CO², comme on aurait pu le penser par un remplacement môle à môle.

Au delà de l'intérêt majeur que constitue la compréhension des atmosphères souterraines, ce phénomène révèle un processus gênant pour les explorateurs.

2.2 La Grotte du TM71

La Grotte du TM 71 s'ouvre dans les Gorges de l'Aude, la Haute Vallée, sur la Commune de Fontanès-de-Sault.

Elle se situe à une vingtaine de kilomètre au Sud-Ouest du réseau Fanges-Paradet.

Il s'agit d'une cavité creusée dans des calcaires métamorphiques fortement déformés d'âge Dévonien. Le développement est de plus de 11325 m et le dénivelé de 111 m.

Cette cavité est exceptionnelle de part la succession de galeries très concrétionnées, un remarquable miroir de faille visible sur 130 m de long, un réseau actif au fonctionnement complexe et un site paléontologique souterrain (*Ursus spelaeus*).

Ce patrimoine remarquable a nécessité son classement en « Réserve Géologique de France », actuellement la seule réserve souterraine minéralogique en milieu karstique².

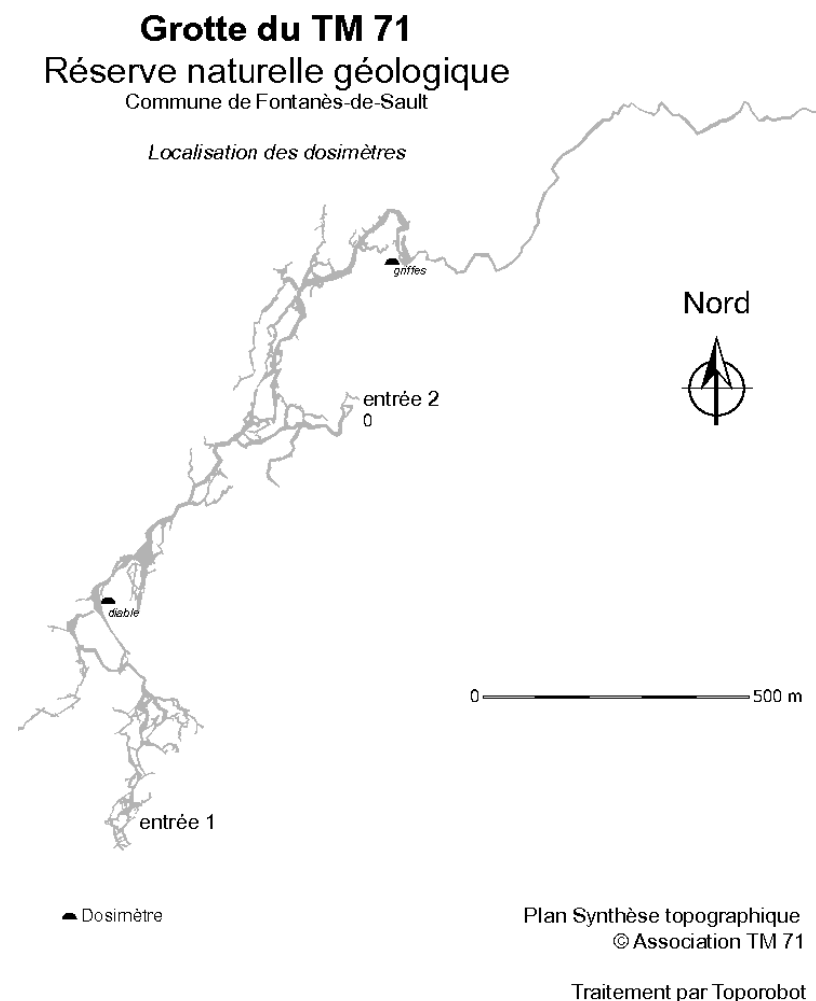
On observe la confluence d'un réseau creusé par des pertes de l'Aude (fleuve), temporaires et d'un réseau actif, complexe issu du Massif du Teillet. Ce réseau actif rejoint par plusieurs drains l'axe principal. Un de ces drains est pérenne, d'autres temporaires, pour un autre on observe un fonctionnement parfois intermittent (intermittences de 2 à 4 heures constatés).

Ces apports d'eaux présentent un bon équilibre thermique avec le milieu souterrain. Le TM 71 est soumis à un climat plus montagnard, hiver plus froid, précipitations plus abondantes que le réseau Fanges – Paradet.

La cavité est ventilée. Le régime est complexe, il rend compte à la fois d'un fonctionnement dynamique de l'atmosphère d'une cavité avec probablement plusieurs entrées (en terme de dynamique de l'air) dont deux entrées sont connues et utilisés pour les explorateurs et d'un fonctionnement hydraulique particulier (intermittences). Ce fonctionnement peut affecter le mouvement de déplacement de l'atmosphère souterraine jusqu'à en inverser le sens avec les mêmes intermittences, dans certaines parties du réseau.

Au niveau température il existe une légère variation saisonnière, une période froide (avril-juin), une période chaude (février-décembre). Cependant l'évolution des températures dénote une relative stabilité générale, elle n'est pas significative.

²L'association TM 71 assume la gestion de ce patrimoine exceptionnel, un modèle de gestion intégrant les propriétaires des terrains, les spéléologues inventeurs, le Comité Départemental de Spéléologie de l'Aude, les autorités locales et l'état.



2.3 Le système Fanges - Paradet

Le système Fanges – Paradet est défini comme un ensemble complexe constitué d'un réseau, le réseau Fanges-Paradet et de cavités annexes, non liées spéléologiquement mais dont les relations ne font pas doute de par la proximité et/ou l'intrication des conduits.

Nous considérerons pour cette étude l'ensemble constitué par le réseau Fanges–Paradet et le Puits de l'Antre.

Le choix d'associer cette dernière cavité s'explique par sa situation, et son fonctionnement.

2.3.1 L'Antre

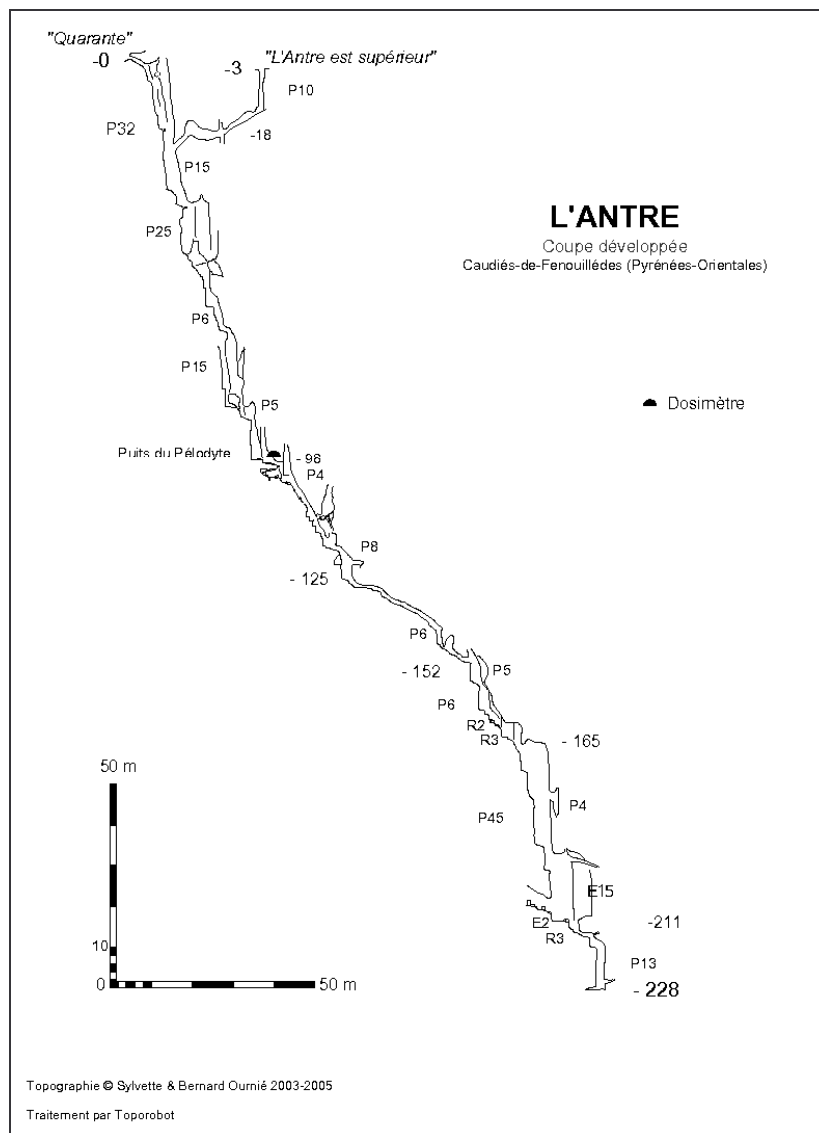
Cavité inédite, découverte en décembre 2003 (Sylvette et Bernard Ournié), cette cavité est située (Commune de Caudiès-de-Fenouillèdes) sur la haute surface topographique, surface d'érosion fini-Miocène. Elle pénètre jusqu'au niveau d'altitude de galeries du Cthulhu Démoniaque les plus proches en plan.

Le développement actuel de l'Antre est de plus de 500 m et de 228 m de dénivelé (+3, -225). A l'époque où le premier dosimètre a été placé dans cette cavité, cette cavité était explorée jusqu'à la côte -115 environ.

Il s'agit d'une cavité constituée d'une succession de puits méandriques de creusement récent, ils recoupent des galeries paragénétiques plus anciennes.

L'Antre est parcouru par une ventilation et des écoulements temporaires. Cette cavité comporte deux entrées proches.

Bien que la jonction humaine avec le réseau Fanges-Paradet ne soit pas réalisée à ce jour, il demeure plusieurs suites possibles, encore non exploitées.



2.3.2 Le réseau Fanges-Paradet

Il est constitué par la jonction de deux cavités le Cthulhu Démoniaque et le Puits de l'Engoulevent (Commune de Caudiès-de-Fenouillèdes). Ces deux entrées sont des exutoires temporaires.

Le développement du réseau Fanges-Paradet est de plus 17000 m et de 300 m de dénivelé (+180,-120).

Le Cthulhu Démoniaque collecte des écoulements provenant du Massif des Fanges. Le Puits de l'Engoulevent draine une partie du Massif du Paradet. Sous terre la jonction de ces deux cavités, s'effectue dans des amonts secondaires aux drains par le recoupement, chacun à une extrémité, d'un ancien axe de drainage, actuellement inactif.

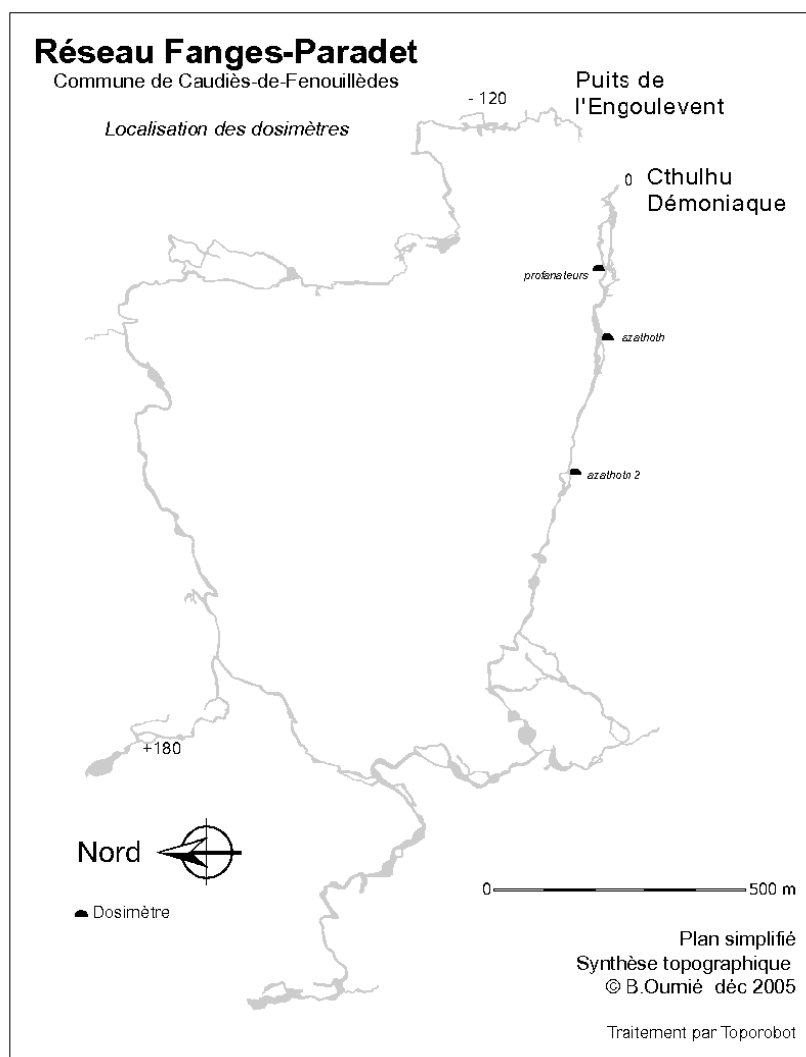
Ces entrées sont émissives, en fonctionnement vauclusien, lors de crues paroxysmiques avec un débit total (entrées et greffons alentours) estimé à 6 m³/s. La zone de battement a pu être exploré sur plus de 160 m de dénivelé.

L'exploration est toujours en cours, compliquée par le remplissage saisonnier de siphons temporaires.

Ce réseau est un ensemble complexe de galeries et de puits qui permet l'accès aux collecteurs profond d'un massif du Mésozoïque.

Il permet de traverser plusieurs unités stratigraphiques, des entrées (du Gargasien inférieur) jusqu'à des amonts (creusé dans le Jurassique supérieur).

Il est parcouru par une ventilation importante avec souffle (aux entrées) en été et alternance (souffle-aspiration) durant les intersaisons. Parfois de fortes crues internes (remplissage possible d'une quarantaine de siphons temporaires oblitère toute ventilation avec les entrées connues).



Il peut y avoir des crues importantes en été, exemple un 1^e juillet au Cthulhu...

3 Les objectifs et les moyens

L'objectif est donc de réaliser une étude des teneurs en radon ($Rn\ 222$) dans ces cavités.

Cette étude est réalisée par la mise en place de dosimètres passifs DPR 2 de la société Algade sur des stations précises durant un an, avec renouvellement des dosimètres tous les trois mois environ.

L'Association TM 71, et son Conservateur, Philippe Moreno ont apporté un soutien essentiel pour faciliter les relevés dans la grotte du TM 71.

Le choix des stations a été effectué en tenant compte des caractéristiques propres aux réseaux étudiés.

Le fonctionnement hydrologique du réseau Fanges-Paradet a posé des difficultés d'accès, le réseau n'ayant pas été accessible aux moments souhaités (fort risque de crues internes pouvant engager la sécurité des explorateurs).

Nous avons donc dû adapter notre campagne de pose et de prélèvement à la réalité du terrain, bien que les dosimètres aient été placés dans des lieux relativement proche de l'entrée et d'accès aisé (en étiage).

4 Localisations des dosimètres et mesures

Pour la grotte du TM 71, deux sites ont été sélectionnés, le premier est situé dans la Salle du Diable, choisi du fait de la présence du grand miroir de faille, le dosimètre est suspendu à un bloc. Ce bloc constitue un élément d'un chaos de blocs entre lesquels des interstices pénétrables permettent de descendre d'une quinzaine de mètres de dénivelé. Le plafond à cet endroit excède 20 m, nous sommes à environ 720 m de l'entrée, une dizaine de mètre au-dessus (entrée basse).

Le second est au près du Siphon des Griffes, une zone de forte anomalie de teneur en O_2 , à 1,2 m au dessus de la banquette alluviale argileuse, environ 2 m au-dessus du niveau moyen du siphon, plafond à une quinzaine de mètres, situé à 925 m de l'entrée basse à une douzaine de mètres en-dessous.

Pour le système Fanges-Paradet, il nous a paru intéressant de rechercher une distribution éventuelle du radon dans le système depuis la surface topographique jusqu'aux collecteurs temporaires profonds.

Pour ce faire nous avons placé un dosimètre dans l'Antre à la côte - 100 m environ, contre paroi à la base du Puits des Pélodites à 1,5 m du sol (sol de blocs, cheminée reconnue sur 10 m au-dessus), et trois (3) dans le Cthulhu Démoniaque. Nous sommes en ce point à une altitude de 220 m environ au-dessus du dosimètre le plus proche du Cthulhu.

Le premier dans le réseau d'entrée (réseau des Profanateurs de l'Ombre et du Nom) à 1,5 m de haut dans une courte galerie latérale (ventilée), sol rocheux et fissuré, à environ 230 m de l'entrée (-5).

Le second au début de la galerie Azathoth après le siphon du Scatophage.

Cette galerie se caractérise à cet endroit, par une succession de trois niveaux de creusement.

Le n°1 correspond au niveau du ruisseau temporaire qui peut couler en petite crue (section 5 x 2 m). Le n° 2 correspond au niveau atteint par des crues moyennes (section 10 x 10 m, situé 4-5 m au-dessus du niveau 1). C'est à cet endroit que le dosimètre a été placé, à environ 340 m de l'entrée à la cote +1 et à 1 m du sol (argile).

Le n°3 correspond à des crues paroxysmiques (section 2x3 m, situé 10 m au-dessus).

Le troisième a été placé dans une partie haute de la galerie Azathoth au niveau de la « Braguette des Catalans », à environ 620 m de l'entrée à la cote +20, à une quinzaine de mètres au-dessus du sol sur un replat de coulée calcitique (sol constitué d'un lit de ruisseau temporaire, gours métriques et quelques alluvions (argiles et graviers).

La localisation des DPR 2 est donc indiquée sur les topographies.

Pour tous ces sites on aura donc des valeurs à priori moins élevées qu'au niveau du sol, le radon étant le plus lourd des gaz rares.

5 Les données

5.1 Grotte du TM 71

<i>Sites</i>	<i>Périodes de mesures</i>	<i>Radon (Bq/m³)</i>	<i>Amplitude corrigée</i>
Diable	du 13/04/2004 au 24/07/2004	3351	2,23
	du 24/07/2004 au 11/11/2004	3576	2,21
	du 11/11/2004 au 26/02/2005	1576	1
	du 26/02/2005 au 12/06/2005	2697	1,73
Griffes	du 13/04/2004 au 24/07/2004	5274	2,39
	du 24/07/2004 au 11/11/2004	2378	1
	du 11/11/2004 au 26/02/2005	3851	1,66
	du 26/02/2005 au 12/06/2005	5375	2,35

5.2 Système Fanges-Paradet

<i>Sites</i>	<i>Périodes de mesures</i>	<i>Radon (Bq/m³)</i>	<i>Amplitude corrigée</i>
Profanateurs	du 2/08/2004 au 29/10/2004	8116	23,36
	du 29/10/2004 au 20/02/2005	450	1
	du 20/02/2005 au 05/06/2005	2540	6,13
	du 05/06/2005 au 9/11/2005	8877	14,32
Azathoth	du 2/08/2004 au 29/10/2004	7949	11,34
	du 29/10/2004 au 20/02/2005	908	1
	du 20/02/2005 au 05/06/2005	1762	2,11
	du 05/06/2005 au 9/11/2005	8175	6,54
Azathoth 2	du 2/08/2004 au 29/10/2004	7976	8,1
	du 29/10/2004 au 20/02/2005	1275	1
	du 20/02/2005 au 05/06/2005	3513	2,99
	du 05/06/2005 au 9/11/2005	8254	4,7
Antre	du 04/08/2004 au 27/10/2004	3094	6,46
	du 27/10/2004 au 13/03/2005	810	1,04
	du 13/03/2005 au 12/06/2005	519	1
	du 19/06/2005 au 24/08/2005	2437	6,47

5.3 Discussions

Les valeurs mesurées attestent de l'intérêt de ce type d'étude. Ces cavités présentent en effet des teneurs significatives en radon atmosphérique et des variations importantes des valeurs.

Nous n'avons pas pu effectuer certains levés de dosimètres aux dates choisies.

Nous avons donc corrigé les données recueillies. Cette correction augmente quelques peu le rapport entre l'amplitude de variations des valeurs minimales et maximales observées, de façon peu significative pour le TM 71 (0,1 point) mais qui peut atteindre près de 5,3 point pour le Réseau Fanges-Paradet.

De même pour comparer l'amplitude entre les sites du réseau Fanges-Paradet et de l'Antre nous avons effectué cette correction.

Ces corrections sont une approximation d'une réalité, mesurée de façon imparfaite sur une courte période aussi le lecteur considérera avec prudence les chiffres et retiendra plus sûrement les tendances qu'ils représentent... Il serait utile de poursuivre sur plusieurs années ces mesures, une variation interannuelle n'est pas à écarter.

5.4 Variations temporelles et spatiales

5.4.1 La Grotte du TM71

On remarque une variation saisonnière de la teneur avec des amplitudes de l'ordre de 1 à 2,4.

Pour le site du Diable un pic de plus haute teneur au printemps et en été, un minimum l'hiver.

Pour le siphon des Griffes, des teneurs en moyenne plus importantes tout au long de l'année, avec un minimum en période d'étiage (août-octobre) et un maximum au printemps (mars-juin), en période de hautes eaux.

C'est en hiver que l'amplitude entre le site du Diable et celui du siphon des Griffes est le plus important, de l'ordre de 240%, il reste important en période de hautes eaux. En étiage ce rapport s'inverse et c'est le site du Diable qui présente une amplitude de près de 160 %.

Il est possible que les apports d'eaux du Massif du Teillet jouent sur cette augmentation relative du radon atmosphérique.

Par quels mécanismes ? Transport et effet de chasse des gaz transitant dans l'endokarst, mise en équilibre avec l'atmosphère souterraine ?

On notera que la galerie d'accès au siphon des griffes présente sur plusieurs centaines de mètres des terrasses alluviales de granites, pegmatites, de roches métamorphiques. On pourrait penser que cette présence pourrait accroître les teneurs en radon au niveau du barrage naturel que constitue le siphon. Ce fait pourrait expliquer au moins en partie les teneurs plus élevées du siphon.

Ce qui aurait pour effet à minima pour ce site une teneur au moins égale (et probablement supérieure) à celui du Diable éloigné de plus d'un kilomètre.

Concernant l'origine tectonique possible, dans cette cavité nous n'avons pas constaté une augmentation de la teneur en radon le long de la grande faille de la Salle du Diable.

5.4.2 Le Système Fanges-Paradet

Ce réseau présente également une variation saisonnière, mais avec des amplitudes très importantes, de l'ordre de 1 à plus de 23.

Avec de hautes teneurs en périodes d'étiage et en été, des teneurs minimales en hiver.

Plus le site de pose est proche de l'entrée, plus on observe une augmentation des amplitudes.

Ainsi à l'Antre (environ 3000 m et 250 m plus haut, le rapport entre les teneurs maximales et minimale est de 1 à 6,46). A Azathoth 2, il n'est plus que de 8,1. A Azathoth il est de 11,84. Enfin la dernière station aux Profanateurs (230 m de l'entrée, le rapport est de 1 à 23,36).

Le gradient vertical semble établi, il faudrait cependant prendre en compte les différences de ventilation entre les sites. Le dosimètre de l'Antre a été posé dans

une zone moins bien ventilée que celles (en été) du Cthulhu, pour les relevés durant ces périodes on pourrait s'attendre à ce que le confinement a augmenté les teneurs. L'amplitude entre l'Antre et les sites du Cthulhu peuvent approcher les 0,12 pour cette période estivale.

En saison estivale la teneur plus importante de radon pourrait s'expliquer par l'effet de chasse de l'atmosphère sur ce gaz lourd, le karst évacuerait par ces drains les composés gazeux piégés en saison froide, par la mise en charge de nombreux siphons.

On notera que le CO² est évacué en saison chaude par les exutoires (voir bibliographie).

On observe que la diminution hivernale correspond pour ce réseau à des périodes d'interruption de la ventilation. Le confinement de ces parties aurait pu provoquer une augmentation des teneurs. Ce qui n'est pas le cas.

La fluctuation de la nappe aquifère dans la zone de battement que constitue le réseau Fanges-Paradet, ne semble pas favoriser une augmentation des teneurs.

Cependant, on peut émettre l'hypothèse que le radon, durant ses périodes d'absence ou de faible ventilation du karst migre vers le réseau de fissures, et de conduits, dont il est expulsé lorsque les conditions aérologiques et hydrologiques le permettent.

Il faudrait donc considérer un effet de concentration dans les parties basses du réseau dû à la ventilation estivale.

Pour autant nous n'en sommes qu'à des hypothèses.

5.4.3 Comparaison TM 71 et Système Fanges-Paradet

Clairement, les teneurs moyennes en radon sont plus importantes pour le système Fanges-Paradet.

C'est un peu étonnant, dans la mesure où les remplissages du TM 71 sont plus typiquement des sédiments susceptibles d'augmenter les taux (alluvions de la haute chaîne pyrénéenne).

Les alluvions piégées dans le réseau des Fanges-Paradet, sont beaucoup plus altérées, on en observe moins fréquemment. Il ne subsiste presque plus que des graviers et des sables de l'ancienne nappe alluviale (granitiques, pegmatites,...) piégés par le karst.

Cette teneur en moyenne plus importante est peut-être à rechercher dans un point de vue de variations annuelles (variation éventuelles que nous n'avons pas pu explorer). Peut-être également dans des conditions tectoniques particulières (néotectonique dans le réseau Fanges-Paradet, front Nord-pyrénéen).

Le phénomène « d'évacuation » du radon vers les exutoires semble être commun aux deux systèmes, mais avec un vecteur différent :

L'eau pour le TM 71, et l'air pour le système Fanges-Paradet.

6 Conclusions

Le TM71 et le système Fanges-Paradet sont deux exemples régionaux de cavités complexes à teneurs conséquentes en radon.

La comparaison entre les deux systèmes endo-karstique permet de mettre en évidence dans un contexte régional, un comportement différent des transferts, ainsi que des similitudes.

L'hypothèse selon laquelle une évacuation du radon s'effectue vers les zones d'exutoires, par en quelque sorte, lessivage du karst (cavités et réseaux de fentes) soit par l'eau soit par l'atmosphère, serait à préciser.

Quoiqu'il en soit il est bon de rappeler les limites de ce document. Il repose sur des données imparfaites, et ne prétend pas apporter de réponses mais simplement d'interroger sur le fonctionnement de ces deux réseaux.

7 Bibliographie

BOURGES F., 2004 - « Données sur l'environnement climatique de la grotte du TM -71 », *Association TM 71*, 18 p.

BOURGES F., 2004 - « Mesure physico-chimiques et analyses chimiques préliminaires de l'eau sur l'actif de la réserve du TM -71 », *Association TM 71, 01 juin 2004*, 11 p.

OSTERMANN J-M, 2002 « Projet d'étude du radon dans les grottes Françaises », *Commission Médicale FFS*, 4 p.

OURNIÉ S. et B., 1985 - « Le complexe souterrain du massif des Fanges et du chaînon du Roc Paradet, hypothèses de fonctionnement », *Spelunca* n°18, pp 30-36.

OURNIÉ B., 1987 - « Présentation spéléologique du Massif des Fanges et du Chaînon du Roc Paradet (Fenouillèdes, Aude et Pyrénées-Orientales) », *Karstologia* n°10, pp 1-6.

OURNIÉ B. et OSTERMANN J-M, 2002 - « Anomalies des teneurs en oxygène atmosphérique mesurées dans le réseau Fanges-Paradet (Aude/Pyrénées-Orientales) », *Karstologia*, N°40 – 2/2002, pp 45-50

Mesures de radon dans le Trou Souffleur de Saint Christol d'Albion (Vaucluse)

Marc Faverjon

1 Contexte géologique et géomorphologique

Le plateau d'Albion se situe à cheval sur les départements du Vaucluse et des Alpes de Haute Provence, en rive gauche du Rhône, à la hauteur d'Avignon. Il fait partie des Préalpes du sud.

Le plateau d'Albion est délimité à l'est par la vallée de la Durance, au sud par le bassin d'Apt, à l'ouest par la plaine du Comtat Venaissin et au nord par les vallées du Jabron et du Toulourenc. Le plateau d'Albion s'étend sur 60 km de long et 25 km de large.

C'est un vaste plateau relevé vers le nord et le sud ; son centre est occupé par la cuvette de Sault – Saint Christol d'Albion.

Il culmine à 1910 m d'altitude au Mont Ventoux. Son altitude moyenne est proche de 1000 m. Sur l'ensemble du plateau affleurent des calcaires karstifiés de faciès urgonien. Ils ont une puissance de 1000 m environ.

Les cavités sont nombreuses sur le plateau. Les quatre principaux gouffres sont le trou Souffleur, l'aven du Caladaire, l'aven Autran et l'aven de Jean Nouveau.

La plus connue reste par contre la fontaine de Vaucluse située en bordure sud ouest du plateau à 105 m d'altitude. C'est l'unique résurgence d'importance du massif. La Fontaine de Vaucluse a été explorée en plongée jusqu'à la profondeur de 300 m. Elle a débit moyen annuel de 19 m³/s.

La région est soumise à un climat méditerranéen pondéré par l'altitude.

Les précipitations se concentrent au printemps et à l'automne. Elles varient entre 600 mm en plaine et 1500 mm sur les hauteurs. Sur les hauteurs une part importante des précipitations a lieu sous forme de neige.

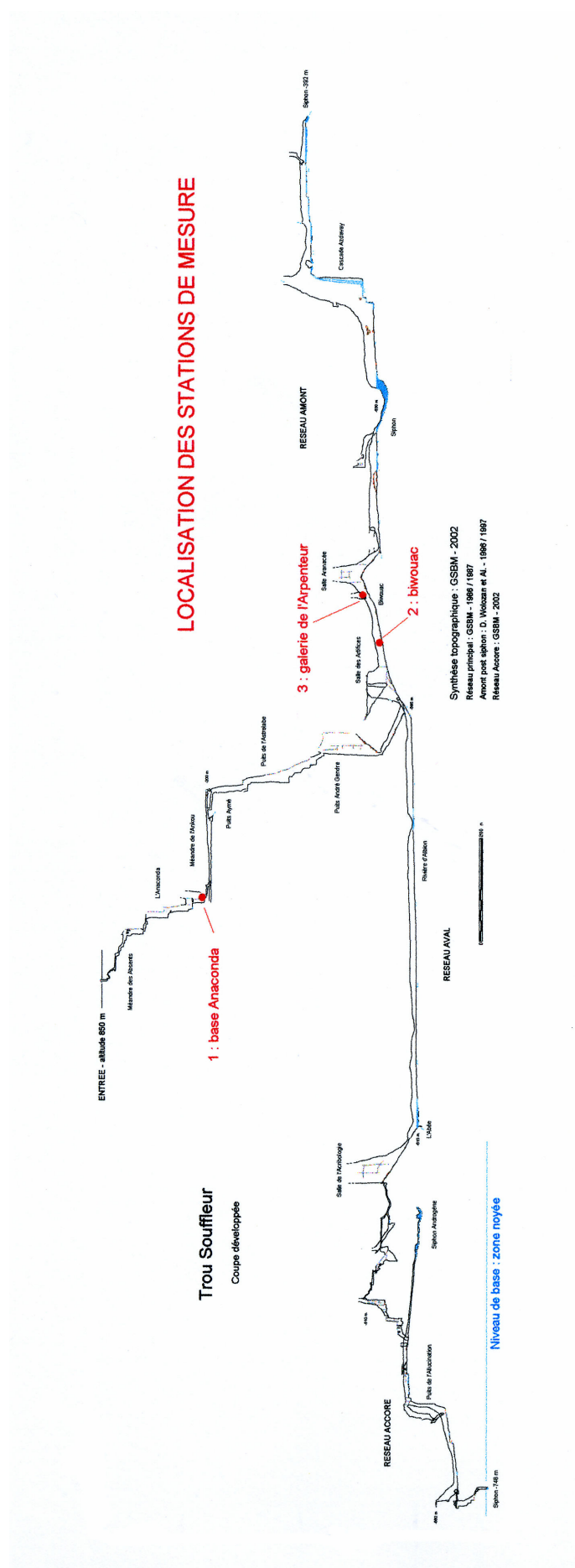
La température moyenne annuelle se situe au environ de 9°C sur le plateau.

Sur le plateau les sols sont minces et discontinus.

Le couvert végétal comprend des espaces de forêt sub-méditerranéenne basse ou le chêne vert domine, des landes à buis et des zones de cultures : lavande et céréales et de pâturages.

2 Description de la cavité

Le Trou Souffleur s'ouvre en bordure du village de Saint Christol d'Albion. Il est connu de très longue date. En 1986, le GSBM désobstrue un passage vers -30 m et progresse rapidement jusqu'à la rivière à -610 m. Dans les années 90 de nombreuses plongées permettent de progresser dans les amonts de la rivière. En



2002, le GSBM trouve un « by pass » du pertuis aval et explore une galerie semi active qui porte au point bas de la cavité : -796 m dans le siphon aval.

L'aven comprend une série de petits puits et passages étroits de 0 à -50 m. 150 m de larges puits lui font suite. A -200 m on rencontre un long méandre dont la partie aval porte à une nouvelle série de grands puits. Ces puits conduisent à la rivière d'Albion qui s'écoule sur près de 2 km dans de larges galeries et salles situées entre 500 et 600 m de profondeur. Un siphon défend l'accès à l'amont de la rivière. Cet amont a été remonté sur plus de 500 m de long pour 200 m de dénivelé. En aval la rivière s'infiltre dans un pertuis impénétrable.

Un by pass permet de rejoindre une grande galerie semi active qui plonge rapidement. On atteint alors un siphon situé à la profondeur de -746 m. Cette profondeur correspond au niveau de base du massif défini par l'altitude d'émergence de la Fontaine de Vaucluse.

3 Climatologie

Comme son nom l'indique le Trou Souffleur est caractérisé par des courants d'air notables.

En été la cavité souffle régulièrement. En hivers elle aspire l'air froid extérieur. L'abaissement de température dû au courant d'air se fait alors sentir jusqu'à l'entrée du méandre de -200 m.

La cavité est aussi caractérisée par des mises en charge importantes lors des fortes pluies. Un ennoiment complet de la cavité sur 250 m de dénivellée a été enregistré lors de crues décennales. La montée rapide des eaux peut provoquer un effet canon à l'entrée de l'aven.

La température dans la cavité varie entre 8° et 10°C. Elle est légèrement plus haute dans les grandes salles situées vers -600 m grâce à la rivière.

4 Localisation des stations

La cavité a été retenue pour sa configuration « profonde ». Il s'agit en effet d'une cavité s'ouvrant au milieu d'un large plateau et connaissant ainsi des échanges d'air avec l'extérieur que « par le haut ».

Pour des questions pratiques (montée des eaux) nous n'avons pu échantillonner la partie aval de la cavité située après le pertuis. Deux capteurs ont été positionnés dans les grandes galeries de -600 m et un troisième à -200 m.

Station 1, « -200 » :

Le capteur était positionné sur un bloc à la base du puits de l'Anaconda à -190 m de profondeur. Le fond du puits est incliné à 30° environ. Le capteur était situé dans la pente environ 5 m au dessus du point bas. Au point bas du puit débute une petite galerie qui conduit vers la suite de la cavité.

Station 2, « bivouac » :

Le capteur était positionné au sol dans un renforcement de la galerie des Alysamps peu avant le bivouac. Profondeur - 530 m.

Station 3, « Arpenteur » :

Le capteur était positionné sur un bloc dans le départ de la galerie de l'Arpenteur 20 m au dessus du bivouac. Profondeur - 500 m.

5 Résultats

Les mesures de radon 222 sont réalisées par intégration sur des périodes de 3 mois environ par des capteurs produits par la société Algade et développés en laboratoire. Norme NF M 60-766 et modes opératoires M-DE-6201 et M-AN-5201.

En raison de problèmes de logistique, une seule série de mesure a pu être faite. Ces mesures correspondent à la période hivernale (17 novembre au 19 mars).

Station	novembre – mars Radon (Bq. m ³)
-200	3819
Bivouac	3027
Arpenteur	202
Moyenne cavité	2349

6 Interprétation

Les valeurs rencontrées au niveau des capteurs 1 et 2 sont élevées ; à fortiori pour une période hivernale.

Le capteur 3 présente une valeur faible bien qu'il était positionné non loin du capteur 2 (100 m environ)

Ces mesures montrent une activité plus importante à - 200 m que dans les parties profondes de la cavité et une grande disparité entre les deux capteurs situés vers - 600 m.

Les résultats restent trop fragmentaires pour tirer des conclusions. Ces résultats plaident cependant contre l'hypothèse d'un accroissement important des concentrations en radon dans les parties profondes de la cavité comme pouvait le laisser supposé la morphologie de la cavité. La position locale des capteurs semble en effet être prépondérante par rapport à leur macro position dans la cavité.

7 Remerciements

La mise en place des capteurs a été fait en profitant des équipements et des descentes réalisées pour la fin des explorations au réseau Accore.

Je remercie à ce titre mes compagnons d'exploration, en particulier Patrick Perrez, Olivier Sausse et Jean Louis Galera.

8 Bibliographie

GAUBERT Gérard, LE FALHER Benoît et al., 1990 : Les cavernes d'Albion ; Ed. AREHPA , 231 pages.

Conclusions de l'étude

Jean-Michel Ostermann

1 Analyse de la méthodologie

Ce travail permet de réaliser, avec des moyens relativement limités (un dosimètre coûte aux environs de 20 € développement compris), d'intéressantes observations sur les teneurs en radon atmosphérique de quelques cavités du pays considérées comme représentatives.

Le protocole expérimental choisi nous paraît fiable, mais en tenant compte des restrictions interprétatives citées en préambule.

Sur l'ensemble des 161 dosimètres déposés, on note que 3 furent perdus ou subtilisés, 1 est resté sur la position « off », et 2 ont donné une valeur considérée comme aberrante. Par ailleurs, 2 dosimètres furent déplacés par l'eau sans visiblement de conséquences sur la mesure. On obtient donc environ 3.7% de perte d'informations sur notre étude, ce qui semble raisonnable.

Concernant l'intervalle temporel de trois mois décidé pour ce travail, il fut dans l'ensemble respecté à plus ou moins deux semaines près, avec cependant des dépassements pouvant atteindre deux mois. Un dosimètre fut par ailleurs laissé en place pendant une année (grotte du Barrage - 30), sans que cela ne semble affecter la lisibilité des résultats qui semblent en concordance avec les autres stations. Cependant, l'utilisation d'un dosimètre sur une durée aussi longue ne semble pas avoir été prévue par le constructeur, et il convient de le questionner sur la fiabilité des mesures dans ces conditions si l'on souhaite ainsi évaluer les teneurs moyennes d'une cavité.

2 Teneurs en radon des cavités Françaises

Ce travail a donc tenté d'évaluer les teneurs en radon de plusieurs types de cavités du pays en fonction de paramètres essentiellement géologiques et climatologiques.

2.1 Cavités karstiques à fortes teneurs

Afin de mettre en évidence les cavités à fortes teneurs, les teneurs moyennes sur (généralement) un an ont été consignées dans le tableau 1.

Cette évaluation des moyennes par cavité, même si elles n'est d'aucun intérêt pour l'étude de répartition ou de variation, permet néanmoins d'évaluer une dose moyenne d'irradiation avec une approximation exploitable en s'entourant des réserves qu'il convient. Cela permet en outre de rapidement classer les cavités, en retenant la valeur de 3000 Bqm³ proche de la moyenne mondiale établie précédemment par HAKL et al. (1997) : on considère donc que les valeurs supérieures indiquent les cavités à fortes teneurs.

Cavité	Nombre de stations	Valeur moyenne annuelle	Valeur minimale	Valeur maximale
Poul Lomic (29)	2	63048	6003	128082
La Pépie (24)	3	7771	3310	12930
Rupt du Puits (55)	3	5394	930	8110
FangesParadet (11)	4	4953	450	8877
Capbis (64)	3	4669	2390	9190
Vengleuz Coz (29)	2	3714	2448	4885
TM 71 (11)	2	3509	1576	5375
Cuves (38)	3	2701	470	5890
Souffleur (84)	3	2349	202	3819
OX 655 (64)	2	2191	950	2330
Borderies (24)	3	2131	3870	1600
Tonneau (64)	1	1598	1230	2250
Saint Marcel (07)	4	1530	90	3770
Soucy (63)	2	1289	130	2729
Barrage (30)	5	1126	640	1366
Savonnières (55)	3	816	100	2341
Favot (38)	1	154	60	286

Tableau 1 : Teneurs moyennes annuelles en radon, valeurs minimales et maximales des cavités étudiées

Entrent donc dans cette catégorie les sites suivants : La Pépie, Rupt du puits, Capbis, TM71, et Fanges.

Le cas particulier de la grotte de Poul Lomic, cavité granitique, sera commenté à part.

La Pépie : Il s'agit d'un réseau sub-horizontale, bien ventilé. L'origine du radon est clairement due aux remplissages de matériau issu du socle proche, et la répartition semble relativement homogène dans la cavité.

Rupt du Puits : C'est également réseau sub horizontal, avec comme origine très probable le remplissage sur la nature duquel nous n'avons malheureusement pas beaucoup de renseignements.

Le développement de ces deux cavités favorise l'enrichissement de l'air en radon le long des conduits.

Capbis : Les fortes teneurs trouvent ici difficilement une explication en relation avec le remplissage. L'influence de la tectonique semble être prépondérante.

TM 71 : Système bien ventilé, de développement important, situé en zone d'activité tectonique. Les teneurs semblent ici liées plus aux remplissages qu'à la tectonique (pas d'élévation des valeurs dans la faille). Un rôle possible joué par l'apport d'eau est évoqué.

Fanges Paradet : Cavité également bien ventilée, de développement important, en zone tectonique.

Vengleuz Coz : Cette grotte réunit la plupart des conditions pour présenter une teneur élevée en radon : faiblement ventilée, avec remplissages importants, présence d'une faille, proximité immédiate de roches granitiques...

2.2 Cavités volcaniques (Creux de Soucy)

Même si elles sont peu nombreuses en France, l'étude a intégré une cavité volcanique, ce qui permet une comparaison : les teneurs en radon se situent dans la moyenne de la plupart des cavités karstiques étudiées. Le volcanisme basique est peu favorable à l'émanation de radon.

2.3 Cavités granitiques (Poul Lomic)

A notre connaissance, aucune mesure de radon dans une cavité granitique n'avait été effectuée jusqu'à présent. Il faut dire que ce type de cavité est très rare, par rapport aux cavités karstiques, et le développement n'excède guère quelques dizaines de mètres, à l'exception des cavités formées par les chaos granitiques. En France, on relève tout de même la profondeur de – 180 m pour la Faille du Mont Sapey (Jarrier, Savoie), et un développement de 300 m environ pour le Trou du Diable ((Huelgoat, Finistère) (CHABERT et COURBON, 1997). Dans d'autres régions du monde, certains développements peuvent être plus conséquents : Goolie Cave en Australie (-120 m, dével. 600 m) ; TSOD Cave system aux Etats-Unis (dev. 3950 m) par exemple.

Les très fortes valeurs observées dans la grotte de Poul Lomic incitent à mettre l'accent sur le **risque de forte exposition que représente ce type de cavité**, même si elles sont rares.

Il apparaît difficile d'établir comme nous l'espérons une typologie des cavités à radon : nous avons vu que certains réseaux bien ventilés (TM 71, Cthulhu,...) présentaient de fortes valeurs. Les sources de radon apparaissent ici primordiales dans la détermination des teneurs. Par ailleurs, l'influence de la tectonique reste à préciser, et n'est peut être pas négligeable dans certains cas. L'eau semble pouvoir être un vecteur efficace pour le transport du gaz (TM 71). C'est donc la prise en considération de tous ces paramètres qui permet de supposer l'existence de teneurs élevées. On peut conclure que rien ne remplacera les mesures in situ.

3 Apports de l'étude et perspectives de recherche

Par rapport aux données recueillies dans la bibliographie (cf. supra), la présente étude permet de mettre en relief un certain nombre de données inédites, et dégager des pistes pour de futures recherches sur ce thème. Sans reprendre en détail les développements apportés pour chaque site, nous les évoquons ici rapidement.

3.1 Variations saisonnières du radon

Pour toutes les cavités étudiées, on a observé une diminution des teneurs en

période hivernale, ce qui est conforme aux travaux réalisés dans d'autres régions karstiques.

Elles sont assez nettes dans la plupart des cas, avec de plus fortes valeurs en été, mais l'étude d'une cavité qui aurait des galeries horizontales proches d'une entrée haute montrerait probablement l'inverse. Mais il est vrai que ce type de cavité n'obéit pas à la règle habituelle, la zone de transfert étant la plupart du temps à tendance verticale. On peut donc, à la lumière des observations sur le radon atmosphérique, considérer la plupart des cavités globalement comme des pièges à air froid.

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que pour les cavités à priori sans ventilation, on observe également cette variation saisonnière, à priori difficile à expliquer dans ce cas. L'hypothèse de l'existence de micro courants d'airs a été évoquée et fera l'objet d'une publication séparée (LISMONDE, à paraître).

3.2 Cavités profondes

Aucune étude n'existait à notre connaissance sur les teneurs en radon de cavités à forte dénivellation. L'étude du Trou souffleur de St Christol (600 m de dénivellation) réalisée par M. FAVERJON, n'a pas permis de retrouver une variation altitudinale autre que celle justifiée par la climatologie de la cavité. On a même semble-t-il une diminution du gaz dans les parties profondes (dissolution ?). Nos observations sont cependant pour l'instant trop fragmentaires pour conclure.

3.3 Influence de la tectonique

L'ensemble des résultats n'a pas permis de déterminer de manière formelle le rôle éventuel de failles dans la remontée de radon d'origine profonde. Il est vrai que la méthodologie n'était pas destinée à ce genre d'observation. Ce rôle est décrit dans la littérature, et il a été abordé en préambule, puis dans l'étude de La Pépie et Capbis. Les observations effectuées dans la grotte du TM 71 ne montrent pas de valeurs plus fortes au niveau de la faille. Mais certains résultats s'expliquent à priori difficilement par la présence d'alluvions (grotte de Capbis – Réseau Fanges-Paradet). De futurs travaux devraient permettre de mieux appréhender pour certaines cavités le rôle de la tectonique dans l'apport de radon endokarstique.

3.4 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 nos travaux (mais ça n'était pas là non plus notre objectif). Il apparaît cependant que dans certains cas, même des mesures intégrées permettent de soupçonner une action de l'eau à ce niveau, comme cela a été observé par B. OURNIE dans le TM 71, où l'on peut supposer que c'est un vecteur d'évacuation du radon hors du système karstique.

Par ailleurs, M. WIENIN évoque la possibilité d'atténuation du radon atmosphérique lors du recouvrement des alluvions par les crues hivernales dans la grotte de Décamagne. Le rôle de l'humidité pariétale est également à évoquer.

La quantification du radon dissous dans l'eau permettrait d'augmenter l'acuité des observations sur l'origine et le transfert de ce gaz.

3.5 Radon et CO²

Radon et gaz carbonique sont les deux traceurs le plus fréquemment utilisés pour l'étude climatologique des cavités. Ils ont cependant des caractéristiques physiques très différentes, qui expliquent qu'ils semblent marquer des volumes karstiques différents comme le prouvent nos observations dans le ruisseau souterrain de La Pépie. La demi-vie du radon en fait un marqueur privilégié des conduits, alors que le CO² est plus représentatif du réseau de fentes.

Dans une étude de ces deux gaz sur une période de six semaines dans l'aven d'Ornag et la grotte Chauvet, Bourges et Al (2003) remarquent un comportement identique des traceurs pour la première cavité, attribué à un phénomène de dilution, alors que les valeurs sont hétérogènes pour le CO², mais homogènes pour le radon de la grotte Chauvet. On a dans ce cas une production hétérogène du CO², dont les valeurs se trouvent rehaussées par l'existence de cellules de convection.

Selon F. Bourges (comm. pers.), il n'existe pas actuellement de modèle suffisamment général et cohérent capable d'expliquer toutes les évolutions divergentes de ces gaz atmosphériques.

La multiplication des études climatologiques comportant ces deux gaz permettra probablement de mieux cerner leurs caractéristiques respectives.

4 Valeurs admissibles

Nous avons vu (« Nocivité du radon en milieu karstique », p. 16 de ce volume), que 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 qu'une directive européenne (Directive 96-29 partiellement transposée dans le code de la santé) impose, pour le public et les travailleurs non exposés, de ne pas dépasser la dose de 1 mSv/an. Cette limite passe à 5 et 20 mSv/an respectivement pour les travailleurs faiblement exposés ou exposés de l'industrie nucléaire, avec obligation de contrôles médicaux appropriés.

Il est cependant à souligner que l'effet nocif des faibles doses n'est toujours pas formellement établi, et est sujet à discussions dans les milieux scientifiques (AURENGO, 2003), bien que de plus en plus d'études semblent confirmer cet nocivité.

En matière de valeurs d'activité, la circulaire du 27 janvier 1999 introduit trois niveaux de référence : 400 et 1 000 Bq/m³ pour les bâtiments existants, et 200 Bq/m³ pour les bâtiments à construire.

Ainsi, pour les bâtiments existants, la circulaire indique qu'en dessous de 400 Bq/m³, la situation ne justifie pas d'action correctrice particulière, entre 400 et 1000 Bq/m³, il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples et

au-dessus de 1 000 Bq/m³, des actions correctrices, éventuellement d'envergure, doivent être conduites à bref délai (ROUGY, 2003).

4.1 Personnel travaillant dans les grottes

La réglementation va prochainement imposer de ne pas dépasser l'exposition à une valeur de 400 Bq/m³, ou à la dose de 1 mSv/an, ce qui ne manquera pas de poser de nombreux problèmes. Il est en effet inconcevable de modifier la climatologie d'une cavité (à fortiori une grotte ornée) sans risquer d'importants dégâts sur celle-ci. Le seul moyen de régulation de l'exposition serait donc de limiter sa durée, en sachant que très peu de cavités ont des teneurs inférieures à 1000 Bq/m³.

4.2 Spéléologues professionnels

Il apparaît ici que le risque radon n'est pas actuellement pris en charge, alors que plusieurs pays ont accompli ce travail de longue date. Or, ce risque peut ne pas être négligeable. Les termes de la loi prévoient dans ce cas de ne pas dépasser la dose de 1 mSv, or la durée d'exposition de cette population est importante. Après discussion avec plusieurs professionnels, il apparaît qu'une durée d'exposition pour cette catégorie peut être estimée à environ 400 à 600 heures par an. A 3000 Bq/m³, on obtient une exposition de 6.5 mSv environ.

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

4.3 Spéléologie de loisir

Pour la spéléologie de loisir, le problème du radon ne peut être abordé en simples termes législatifs, car nous sommes loin d'un contexte de subordination à l'employeur comme dans les cas précédents. La pratique de cette activité enrichissante est à mettre en balance avec des risques multiples, comme pour toute activité physique de pleine nature (A.P.P.N.), et une morbidité globalement faible par rapport à des nombreux autres sports.

L'exposition à un risque, dans ce type d'activité, fait partie de la « règle du jeu », et même s'il est bien connu, il fait rarement l'objet de limitations particulières : il n'existe par exemple aucune limitation à l'hypoxie d'altitude subie par les alpinistes, malgré le danger mortel que cela représente. On peut développer ici la notion de « risque acceptable », soit semblable aux autres risques quotidiens (OMS, 2005). Il reste néanmoins évident que la quantification du risque est nécessaire à la pratique sereine de l'activité. Dans son travail de thèse, JOVIGNOT (1997) situe en effet la conscience du risque en deuxième position des aptitudes à la pratique de la spéléologie.

Le problème réside donc dans le choix de valeurs limite d'exposition à proposer, sachant que l'estimation de la durée d'exposition et surtout de la valeur à laquelle on est exposé, sont des paramètres difficiles à connaître pour la plupart des situations. Il existe par ailleurs, comme nous l'avons vu, de nombreuses imprécisions lors de l'évaluation des expositions (fonction des variantes

physiologiques individuelles, des variations de teneurs par rapport aux valeurs mesurées, aux incertitudes de mesure,...etc.). Imposer une contrainte de dose dans ce contexte semble donc inapproprié.

Il convient donc, dans un premier temps, d'estimer les valeurs d'exposition de la population des spéléologues. La dose reçue dépend de la durée d'exposition, et de son intensité. Si la durée est aisément estimable, il n'en est pas de même de l'intensité, qui nécessite comme nous l'avons vu un minimum de mesures sur le terrain. La prévention passera donc par une meilleure connaissance de la teneur en radon des cavités Française, comme nous le verrons plus loin.

La durée de pratique peut être estimée à environ 100 h par an pour la plupart des spéléologues actifs, ce qui représente 8 heures de pratique mensuelle.

L'évaluation dosimétrique étant impossible à réaliser dans ce contexte, on retiendra pour évaluer approximativement la dose absorbée (voir p. 20 de ce volume) la formule suivante :

$$E = \frac{T \times C}{226000}$$

dans laquelle E est l'exposition en mSv

T la durée d'exposition en heures

et C la concentration en radon, en Bq/m³

Cette formule intègre un facteur d'équilibre égal à 0.57, comme indiqué au paragraphe 3.3.1 p. 19 de ce document.

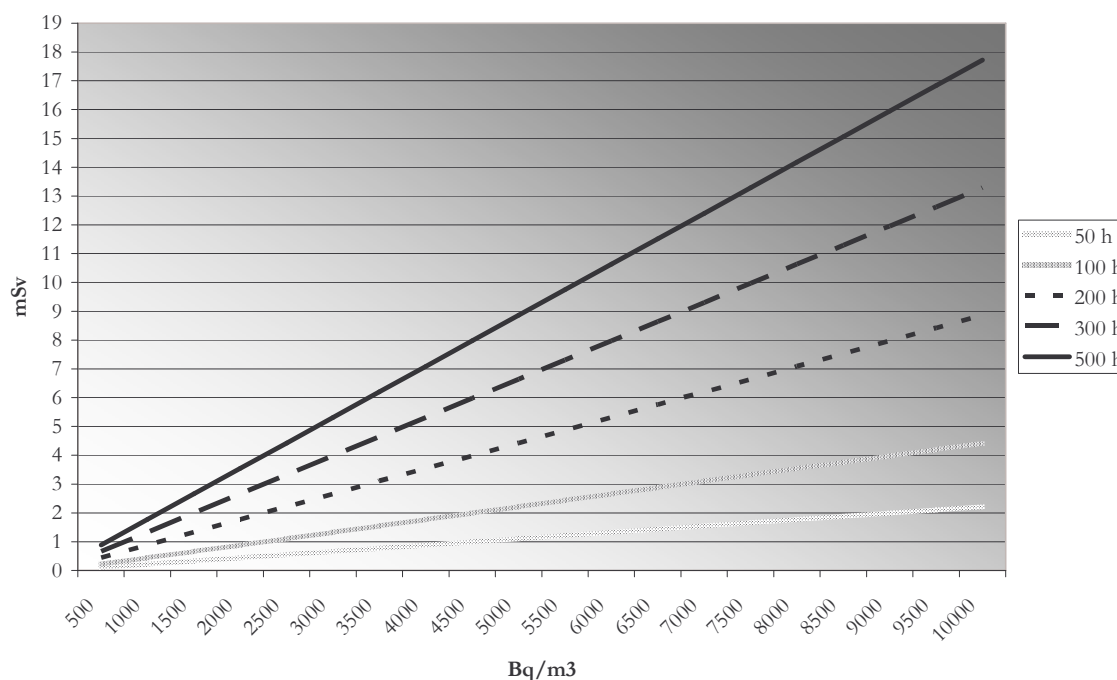


Figure 1 : Valeurs d'irradiation en fonction de la durée d'exposition et de la radioactivité α ambiante

A partir de cette formule, nous avons établi, dans la figure 1, les valeurs d'irradiation (en ordonnée), en fonction de la durée d'exposition représentée par les différentes courbes, et la radioactivité alpha ambiante (en abscisse).

Inversement, en connaissant la valeurs moyenne d'exposition, on peut déterminer la durée maximale de séjour pour une irradiation donnée : si l'on fixe 5 mSv comme valeur limite, la durée T d'exposition sera donc :

$$T = \frac{5 \times 226000}{C}$$

Ainsi (en gardant à l'esprit le caractère approximatif de cette formule), pour une cavité dans laquelle sont mesurées des valeurs de 3000 Bq/m³, on obtient environ 376 heures de séjour possible avant d'atteindre la dose de 5 mSv, et 75 heures pour une dose limite de 1 mSv. La figure 2 représente la durée de séjour possible (en ordonnées) pour des valeurs d'exposition de 1 et 5 mSv par an, en fonction de la radioactivité ambiante (en abscisse). Pour une cavité telle que le cas extrême (et exceptionnel) de Toul Lomic, où la teneur moyenne en radon est d'environ 60 000 Bq/m³, le séjour ne devra pas dépasser quelques heures. On arrive en effet à 5 mSv en 18 h...

Inversement, une pratique de 100 heures annuelles dans des cavité ayant en moyenne 3000 Bq/m³ induira une dose de 1.3 mSv.

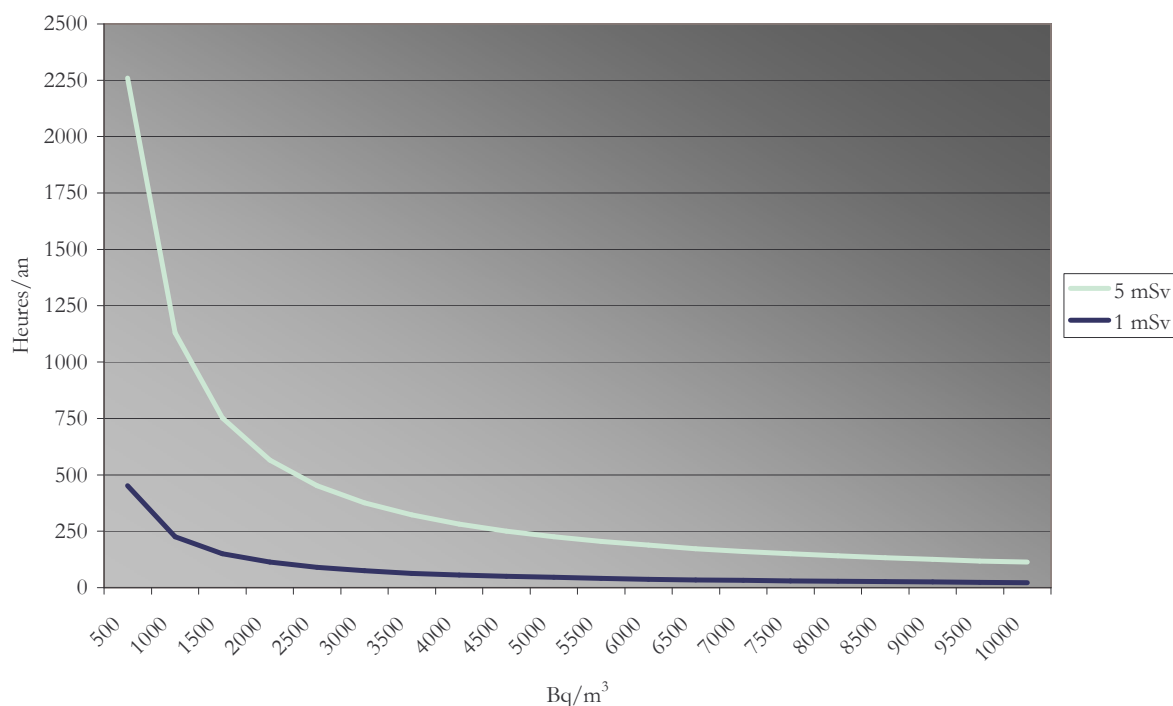


Figure 2 : Durée de séjour possible en fonction de la radioactivité ambiante, et de deux doses limite d'exposition.

On voit donc ici que pour une majorité de situations, le spéléologue non professionnel n'aura pas d'augmentation significative du risque, d'autant que pour

nos sites d'étude, nous avons choisi des cavités réunissant à priori plusieurs facteurs favorisant la présence de doses relativement élevées en radon. Il est probable que beaucoup de cavités présentent une teneur moyenne inférieure à 3000 Bq/m³.

Dans une étude récente, CRAVEN et al. (2006) estiment le risque de cancer du poumon pour un spéléologue s'exposant environ 50 heures par an sa vie entière, à 1/12500.

En ce qui concerne ce type de pathologie, le tabac représente en particulier une cause bien plus agressive dans ce domaine. A titre d'exemple, la consommation tabagique multiplie le risque de cancer du poumon d'un facteur 5 à 10, alors que dans les régions où l'exposition domestique (donc plusieurs heures par jour la vie entière) est supérieure à 400 Bq/m³, le risque relatif est de l'ordre de 1,2 à 1,5 (TIRMARCHE, 1998). Par ailleurs, il convient d'évaluer également l'exposition domestique et professionnelle, en raison de leurs durées. En effet, le calcul de l'évaluation du risque lié au radon d'une personne exposée doit logiquement faire partie d'une évaluation plus globale de ce risque, et de la prise en compte des autres carcinogènes.

5 Prévention de la surexposition au radon en spéléologie

La prévention d'une éventuelle surexposition au radon des spéléologues passe par plusieurs étapes :

5.1 Poursuite des études sur le radon

Une meilleure connaissance du phénomène radon en karstologie est nécessaire. L'étude que nous avons menée ne permet pas de déterminer des règles simples qui autorisent à soupçonner l'importance de la teneur en radon dans une cavité.

Les études de radon doivent par conséquent être poursuivies, et sont tout à fait à la portée des spéléologues. Elles pourraient faire l'objet d'un travail inter commissions au sein de la F.F.S. (commissions scientifique, médicale, environnement ...). L'initiative des recherches sur le terrain peut être confiée aux commissions scientifiques et/ou environnement régionales. Les cavités les plus fréquentées sont à choisir en premier lieu.

Par ailleurs, l'analyse des publications internationales sur la question, réalisée en permanence par la commission médicale F.F.S., doit être poursuivie afin de continuer à améliorer nos connaissances sur cette question.

5.2 Information

L'information des pratiquants est également une étape importante de la prévention. Elle se fera par la diffusion du présent rapport, et la publication d'articles de vulgarisation, dans la presse spéléologique et sur le site de la commission médicale. Le thème doit être abordé également lors des exposés présentés par la commission médicale dans les stages de l'Ecole Française de spéléologie.

5.3 Prévention

La prévention de la surexposition au radon nécessite donc de connaître les cavités à forte teneur (que nous avons fixées à 3000 Bq/m³ de moyenne annuelle), et d'y observer des règles simples d'exploration : on pourrait citer d'éviter les visites estivales trop prolongées, les bivouacs.

Se fixer une valeur de 5 mSv comme valeur maximum d'exposition nous semble un compromis acceptable, compte tenu de l'importance de l'incertitude des mesures, et de la faible élévation du risque relatif à cette dose.

6 Conclusion

L'exposition au radon dans les cavités karstique ne semble pas présenter un risque important pour la pratique de la spéléologie de loisir. Dans ce contexte, l'activité n'expose que rarement à des valeurs supérieures à 1 mSv par an. Les quelques mesures effectuées montrent par contre que dans certains cas, les valeurs d'exposition peuvent être non négligeables, surtout pour les spéléologues professionnels en raison de temps de séjour prolongés.

La prévention passera tout d'abord par une meilleure connaissance des teneurs en radon des cavités du pays, aucun élément ne permettant d'évaluer de manière fiable ces valeurs en dehors des mesures in situ.

7 Bibliographie

An., 1999 : Circulaire conjointe DGS/VS 5 et DGUHC n° 99-46 du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon. Direction Générale de la Santé. Bulletin Officiel 99/7, 11 p.

AURENGO A., 2003 : Le risque du cancer du poumon est-il surestimé ? Contrôle, revue de l'Autorité de sûreté nucléaire N° 153, 4-6. <http://www.asn.gouv.fr/publications/dossiers/c153/aurengo.pdf>

BOURGES F., MANGIN A., D'HULST D., 2003: Radon and CO² as markers of cave atmosphere dynamics: evidence and pitfalls in underground confinement analysis; application to cave conservation. Climate Changes: the Karst Record, III. Montpellier (FRANCE), 11th-14th May 2003, in press.

CHABERT C., COURBON P., 1997 : Atlas des cavités non calcaires du monde. Ed. U.I.S. /Pré de Mme Carle, 110 p.

CRAVEN S.A., SMIT B. J., 2006: Radon in caves: clinical aspects. Int. J. of Speleology 35 (2), 93-101.

HAKL J., HUNYADI I., VARHEGYI A., 1997: Radon monitoring in caves. In Radon measurements by etched track detectors. Ed. Durrani & Radomir Ilic, 260-283.

Institut National de Veille Sanitaire, 2003: Propositions pour la mise en place et le renforcement d'activités de surveillance des expositions et des risques associés à l'inhalation de radon, 108 p. <http://www.invs.sante.fr/publications/2003/radon/index.html>

JOVIGNOT F., 1997 : Etude des aptitudes, des motivations, des profils des spéléologues. Thèse STAPS, Université de Dijon, 388 p.

Organisation Mondiale de la Santé, 2005 : Radon et cancer. Aide mémoire N° 291, 4 p.

QUINDOS PONCELA L., FERNANDEZ NAVARRO P., SAINZ FERNANDEZ C., GOMEZ AROZAMENA J., BORDONOA PEREZ M. 2004 : Radiation exposure in uranium mining industrie vs exposure in tourist cave. Radiation Protection Dosimetry 2004 111(1):41-44.

ROUGY C., 2003 : Présentation des projets d'arrêté relatifs aux modalités de gestion du risque lié au radon et à l'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures d'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public. In INVS 2003 (cf supra).

TIRMARCHE M., 1998 : Evaluation par l'épidémiologie du risque de cancer lié à l'inhalation du radon. In « Le radon, de l'environnement à l'homme », Ed. EDP Sciences, 107-124.

8 Remerciements

Outre les spéléologues de terrain qui nous ont facilité l'étude des cavités mentionnées, nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à toutes les personnes avec qui nous avons eu des échanges, et auprès de qui nous avons bénéficié de conseils, ou de l'envoi de documents pour la réalisation de cette étude, en particulier :

C. Archambaud, H. Bourges, J. Choppy [†], M. Francillon, M. Meyssonier, P. Kernéis, G. Levy, X. Nogues, C. Noiriel, P. Saumande[†].

Par ailleurs, sans le soutien financier du Ministère de la jeunesse, des sports et de la vie associative, ce travail n'aurait pu avoir lieu.

Nous avons enfin également bénéficié de l'aide de plusieurs structures fédérales, en particulier du Comité spéléologique régional d'Aquitaine, de la Ligue spéléologique de Lorraine, et bien entendu de la commission scientifique F.F.S..

ANNEXES

Coordonnées des auteurs

Jacques BAUER (Géologue)
Chemin du Bois
64800 NAY BOURDETTES
Tel : 05.59.61.20.80

Michel BOUTHORS (Comité départemental de spéléologie du Puy de Dôme)
Route d'Enval
63200 SAINT GENES L'ENFANT
Tél. : 04.73.38.71.29
bouthors.michel@wanadoo.fr

Alain DEVOS (Association Géo Karst)
alain.devos@univ-reims.fr

Marc FAVERJON (Ingénieur- Spéléo Club Saint Marcellois)
Rue de Bidon
07700 SAINT MARCEL D'ARDECHE
Tél. : 04.75.98.76.46
marc-faverjon@ifrance.com

Claude HERBILLON (Association Géo Karst)
25 bd Hardeval, 54520 LAXOU
Tél. : 03.83.27.79.77

Baudoin LISMONDE (Université de Grenoble I - Comité départemental de spéléologie de l'Isère)
28 rue de la Bajatière
38100 GRENOBLE
Tél. : 04.76.42.59.16
baudouin.lismonde@wanadoo.fr

Christian MARGET (Comité départemental de spéléologie du Finistère)
16, rue Paul Fort 29200 BREST
Tél. : 02 98 46 82 04
cm2901@free.fr

Jean-Michel. OSTERMANN (Médecin fédéral national)
Le Bourg - 24800 CORGNAC SUR L'ISLE
Tel : 05 53 55 04 57
jeanmichel.ostermann@wanadoo.fr

Bernard OURNIE (Association ARKHAM)
55 rue Pierre et Marie Curie
34700 Lodève
Tél 04 67 44 30 14
b.ournie@free.fr

Michel WIENIN (Géologue - Société cévenole de spéléologie et de préhistoire)
Grd Rue
30360 VEZENOBRES
Tél : 04.66.83.53.80 / 06 74 02 19 75
michel@wienin.com

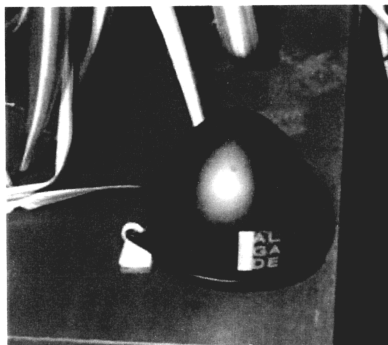
Fiche technique DPR 2

DPR 2 Dosimètre Passif Radon

- Pour la Mesure Intégrée de l'Activité Volumique du Radon 222, dans l'environnement atmosphérique, selon la Norme NF M 60-766.

APPLICATIONS :

- Dépistage du radon dans les lieux ouverts au Public selon la norme NF M 60-771.
- Surveillance des ambiances



CARACTERISTIQUES

- ☐ De type fermé : le radon pénètre dans un volume de détection par diffusion à travers une membrane spécifique qui laisse passer le gaz radon et arrête les descendants solides du radon.
- ☐ Utilise un détecteur solide de traces type KODAK LR115 T2.
- ☐ Possède un interrupteur de mise en route et d'arrêt de la mesure.
- ☐ Possède un système de verrouillage garantissant l'intégrité de la mesure.
- ☐ Température d'utilisation 0°C à +40°C.
- ☐ Boîtier en polystyrène chargé en carbone, diamètre 59mm; hauteur 53mm; masse 22g.
- ☐ Prélèvement passif et analyse en différé au laboratoire d'ALGADE.

UTILISATION

- Fourniture des DPR 2 par le laboratoire d'ALGADE,
- Exposition des DPR 2 dans les zones à mesurer pendant une période conseillée de 2 mois,
- Retour des détecteurs au laboratoire d'ALGADE,
- Analyse des détecteurs sous accréditation COFRAC,
- Calcul de l'activité volumique exprimée en Becquerels par m³ d'air (Bq/m³),
- Edition d'un rapport d'essais selon modèle approuvé par le COFRAC.



DOMAINE DE MESURE :

Pour une durée d'exposition de 2 mois :

la limite de détection est de 60 Bq/m³,

l'activité maximale mesurable est de 20000 Bq/m³.

Nous nous réservons le droit de modifier à tout moment les caractéristiques des appareils décrits dans cette documentation

NT-XFAB 518 207 ind A

ALGADE - 1, Ave. du Brugeaud - B.P.46 - F 87250 Bessines-sur-Gartempe
Tél. 33 (0)5 55 60 50 00 - Fax. 33 (0)5 55 60 50 59
E-mail : algade@algade.com - <http://www.algade.com>

Glossaire

Activité volumique : grandeur A pour une quantité d'un radionucléide dans un état énergétique donné à un instant donné, définie par la relation:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

où dN est la valeur attendue du nombre de transformations nucléaires spontanées correspondant à cet état énergétique dans l'intervalle de temps dt . L'unité SI d'activité est l'inverse de la seconde (s^{-1}), appelé becquerel (Bq).

Bq : unité exprimant l'activité. Elle correspond à une désintégration par seconde.

Bq.m⁻³ : unité de mesure de l'activité volumique du radon = nombre de désintégrations par seconde par mètre cube.

Contrainte de dose : restriction prospective et liée à la source pour la dose individuelle délivrée par la source, qui sert de plafond dans le processus d'optimisation de la protection et de la sûreté dans le cas de la source. Pour les expositions professionnelles, la contrainte de dose est une valeur de la dose individuelle liée à la source, qui est employée pour limiter la gamme des options considérées dans le processus d'optimisation. Pour l'exposition du public, la contrainte de dose est un plafond fixé pour les doses annuelles que des personnes du public devraient recevoir du fait de l'exploitation programmée de toute source sous contrôle. L'exposition à laquelle s'applique la contrainte de dose est la dose annuelle à tout groupe critique, obtenue par sommation sur toutes les voies d'exposition et résultant de l'exploitation prévue de la source sous contrôle. La contrainte pour chaque source est censée garantir que la somme des doses au groupe critique dues à toutes les sources sous contrôle ne sera pas supérieure à la limite de dose.

Demi-vie radioactive : temps nécessaire à une substance radioactive pour perdre 50 % de son activité de désintégration.

Dose : quantité d'énergie délivrée à un tissu à la suite d'une exposition.

Dose efficace : on l'obtient en faisant la somme pour tous les organes d'un produit qui prend en compte d'une part la dangerosité du rayonnement (coefficient WR , = 1 pour rayons X, bêta et gamma, >1 pour alpha et neutrons) et d'autre part le fait que les organes sont plus ou moins sensibles au rayonnement (coefficient WT = 0,05 pour la thyroïde).

Dose efficace = dose absorbée x WR x WT
Elle s'exprime en Sievert (Sv).

Equilibre radioactif : l'état d'équilibre radioactif est atteint quand l'activité volumique du radon gaz est égale à l'activité volumique de tous les produits de filiation du radon. Cet état est atteint dans un système fermé (pas d'ajout de source, pas de sortie de descendants) au bout d'un certain temps.

Facteur d'équilibre : les descendants à vie courte du radon 222 sont des particules solides, ils se déposent en partie sur les parois ou sont éliminés par la ventilation. L'état d'équilibre n'est jamais atteint. Ils ne contribuent pas tous à l'exposition et ne sont pas tous mesurables. Aussi pour qualifier cet état de déséquilibre, on utilise le facteur F qui est le rapport entre l'énergie alpha potentielle d'un mélange de descendants du radon et l'énergie alpha potentielle relative au mélange s'il était en équilibre avec le radon.

Isotopes : les nucléides qui ont un même nombre de protons dans leur noyau ont le même nombre atomique. Mais ils peuvent différer par le nombre de leurs neutrons et donc par leur nombre de masse.

On les appelle alors des isotopes. Ils ont presque toujours les mêmes propriétés chimiques, mais certains sont plus instables que d'autres d'où leurs propriétés radioactives.

Particule alpha : particule formée de deux neutrons et deux protons émise du noyau de certains isotope radioactifs lors du processus de désintégration. Cette particule est positivement chargée et ne peut être distinguée du noyau d'un atome d'Hélium.

Radiation : énergie émise sous forme d'ondes ou de particules par des atomes radioactifs résultant de la désintégration de ceux-ci.

Radiation gamma : champs électromagnétiques de très courte fréquence d'origine nucléaire, similaires aux rayons X mais usuellement d'énergie supérieure (100 KeV à 1 MeV).

Radiation ionisante : radiation suffisamment énergétique pour déloger un électron d'un atome causant la formation d'une paire d'ion. Les radiations ionisantes incluent les rayons gamma et x, les particules alpha (noyaux d'Helium), les particules beta (électrons) et d'autres formes de noyaux chargés. Les neutrons ont une action ionisante indirecte en percutant en premier les composants des noyaux..

Radioactivité : propriété liée à la désintégration d'un nucléide produisant des ondes ou des particules.

Radioactivité naturelle : il existe sur la terre plus de 50 radio nucléides d'origine naturelle.

Scintillomètre : les scintillomètres permettent de détecter les désintégrations dues aux rayons gamma, avec des résultats donnés en coups par secondes (c/s), mais sans précision sur l'isotope concerné. Ils ne permettent pas en particulier d'isoler les désintégrations du radon.

Sievert : L'unité SI d'équivalent de dose d'un rayonnement ionisant est le **sievert** (Sv). C'est la dose engendrée par un rayonnement ionisant dont l'effet est égal à celui d'un rayonnement X de 200 à 250 kV.

Le Sievert (ou le rem) correspond une mesure de l'irradiation, à la dose de radioactivité absorbée mais il tient compte du pouvoir ionisant du rayonnement électromagnétique ou corpusculaire. En effet, les particules alpha (hélions) présentent un pouvoir ionisant supérieur au rayonnement b (électrons) et au rayonnement g (on ne parle évidemment pas de l'explosion d'une supernova !!). La dose absorbée est donc multipliée par un facteur de pondération pour aboutir à la notion de **dose équivalente**. Dans la mesure où les doses absorbées sont très petites, on utilise généralement le milliSievert (mSv).

Le milliSievert correspond à la dose équivalente pondérée par un facteur de risque propre à chaque tissu. Il prend en compte l'incidence sur la santé grâce à un facteur de pondération tenant compte de l'effet biologique lié à la nature et à l'énergie du rayonnement pour donner la dose effective ou **dose efficace**. Par calcul on peut passer de la dose efficace à la dose équivalente et inversement ou connaître la dose reçue par une certaine partie du corps si l'on connaît la dose globale d'irradiation et vice-versa. Notons qu'une radiographie correspond à 0.2 mSv.

Working Level : unité de mesure de l'énergie alpha potentielle contenue dans un volume d'air, utilisée à l'origine pour les mines d'uranium. 1 WL est égal à $2,08 \cdot 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}$, ce qui correspond à une dose absorbée de 0.0735 mSv.

WLM (Working Level Month) : unité d'exposition utilisée pour les mineurs d'uraniums équivalent au fait de travailler 170 h (un mois) dans une atmosphère de 1 WL, soit 3700 Bq.m^{-3} .

Eléments de bibliographie sur le radon et la radioactivité dans le karst

Jean-Michel Ostermann

Il existe de nombreuses publications traitant du radon dans le karst, dont le lecteur intéressé pourra retrouver les références dans le Bulletin Bibliographique Spéléologique. Seules ont été retenues ici celles qui abordent le problème de la sécurité des visiteurs.

A.A., 1989: **An interim report by the Working Party on Radon.** Caves & Caving 47, 30-31.

A.A., 1993: **Radon in Clare Caves. High School students come close in Aer Lingus Young Scientists Competition.** SUICRO Newsletter, Speleological Union of Ireland/ Irish Cave Rescue Organisation 27, 5-7.

A.A., 1993: **Radon gas borehole.** Craven Herald 22nd January 1993, 11.

A.A., 1996: **Radon: the end of the beginning where next ?** Caves & caving 73, 14-15.

A.A., 2000: **Cave health risk claims are refuted.** Weston & Somerst Mercury 21 April, 6.

ALEY T., 1981: **Natural radiations in caves: the issue, the health risk, and the threat to caves.** Geo2 VIII, 2, 22-25.

AYTEKIN H., BALDIK R., CELEBI N., TASDELEN M., KOPUZ G., 2005: Radon measurements in the caves of Zongldak (Turkey). Radiation Protection Dosimetry

BALL T.K., 1990: **Radon and caving.** SWCC Newsletter, 107, 29-30.

BALL T.K., TALBOT D.K., 1994: **Radon risks.** World Tunnelling 7, 60-62.

BARNES C., JAMES J., WHITTLE - STONE S., 1997: **Radon and its decay products in caves.** Proceedings of the 21st

biennial conference of the Australian Speleological Federation, 27-34.

BARNES C., JAMES J., WHITTLESTONE S., 2001: **Radon studies in Jenolan toursit caves, New South Wales, Australia.** Poceed. Int. Cong. of Speleology, Brasilia 2001, 1, 51-56.

BARKER-READ G.R., FARNFIELD R.A., 1996: **Exposure to radon in Gilfield Mine.** Cave & Karst Science 23, 3, 125.

BEMATZKY G., LEINER G., ADAM H., 1994: **Schmerzhemmende Wirkung einer Heilstollenbehandlung.** 10. Int. Symp. für Speläotherapie, Bad Bleiberg 1992; in: Wissenschaftliche Beihefte zur Zeitschrift "Die Höhle", 48,162-173. (*effet thérapeutique du radon*)

BENNETT A., 1993 : **Le radon crée-t-il un risque spéléologique ?** Spéléo Dordogne, bull. du Spéléo Club de Périgueux, 2, 37.

BOWN W., 1992: **Caver risk cancer from underground radon.** New Scientist 135, 1838, 4.

CAPPA G., CIGNA A., TOMMASINO L., TORRI G., 1996: **Radiation protection and radon concentration measurements in Italian caves.** Bossea MCMXCV, Atti del simposio internazionale grotte turistiche e monitoraggio ambientale, Frabosa Soprana 1995, 169-181.

CHABERT J., 1994 : **Les spéléos sont ils menacés par le radon ?** Grottes et Gouffres, bull. S. C. Paris 131, 19.

CHIGNOLA R., TROTTI F., LANCIANI M., GIAROLA N., 1994 : **Misurazione della radioattività naturale in alcune grotte del Veneto.** Speleologia Veneta, N.s. 2, 60-67.

CHOPPY J., 1995 : **Le radon dans les grottes : restons calmes.** Grottes et Gouffres, bull. S.C.Paris 136, 30.

CIGNA A., 1987: **Is radon really a risk to cavers ? No it isn't and why we cannot find out!** NSS News 45, 10, 344.

CIGNA A., 1988 : **Il problema del radon nelle grotte.** Notiz. sez. C.A.I., Napoli 1, 7-8.

CIGNA A., 2005: **Radon in caves.** Int. J. of Speleology 34, 1-2, 1-18.

CIGNA A., CLEMENTE G.F., 1981: **Radiation hazards in natural caves.** Proceed. 8th Int. Congress Speleo. Bowling Green 1981, 420-423.

CRYSTALL B., 1993: **Radiation in the cave environment.** Central Indiana Grotto Newsletter May, 33-34.

CUNNINGHAM K.I., LAROCK E.J., 1991: **Recognition of microclimate zones through radon mapping, Lechuguilla Cave.** Health Physics 61, 493-500.

DUFFY J.T., MADDEN J.S., MACKING G.M., Mc GARRY A.T., COLGAN P.A., 1996: **A reconnaissance survey of radon in show cave in Ireland.** Environment Int. 22, supp. 1, S415-423.

EHEMAN C., 1991: **Occupational exposure to radon daughters in Mammoth Cave National Park.** Health Physics 60, 831-835.

EHEMAN C., CARSON B., RIFENBURG J., HOFMAN D., 1991: **Occupational exposure to radon daughters in Mammoth Cave National Park.** Health Physics 60, 831-835.

FERNANDEZ P.L., QUINDOS L.S., SOTO J., and VILLAR E., 1984: **Radiation exposure levels in Altamira cave.** Health Physics 46, 445-447.

FLETCHER S.E., GUNN J., PRIME O., 1987: **Radon levels in Peak and Poole's caverns, Derbyshire.** Cave Science 14, 3, 106.

FRIEND C.R.L., 1996: **Radon exposure during underground trips: a set of guidelines for caving and mine exploration in Britain.** Cave and Karst Science, 23, 2, 49-56.

FRIEND C.R.L., GOODING T.D., 2002: **Variation in the concentration of the radon in parts of the Ogof Ffynnon Ddu system, Penwyllt, South Wales and estimates of the doses to recreational cavers.** J. of the Environ. Radioactivity 58, 45-57.

GAMBLE F. M., 1981: **Alpha radiation in karst caves of the Transvaal, South Africa.** Trans. B.C.R.A. 8, 4, 254-260.

GAMMAGE R.B., OUDNEY C.S., WILSON D.L., SAULTZ R.J., BAUER B.C., 1992: **Subterranean transport of Radon and elevated indoor radon in hilly karst terrains.** Atmospheric environment 26A, 12, 2237-2246.

Radon Monitoring in a Cave of North-Eastern Italy Garavaglia M.; Braitenberg C.; Zadro M.

Physics and Chemistry of the Earth, Volume 23, Number 9, 1998, pp. 949-952(4)

GASCOYNE M., 1978: **The daughters of Radon- a dangerous family ?** Caving Int. Mag. 1, 31.

GILLIESON D., 1996: **The Radon risk in caves.** in Caves, processes, development, management, Ed. Blackwell Publishers Ltd, p. 247-250.

GILLMORE G.K., SPERRIN M., PHILLIPS P., DENMAN A., 2000: **Radon hazards, geology, and exposure of cave users : a case study and some theoretical perspectives.** Ecotoxicol. Environ. 46, 3, 279-288.

GILLMORE G.K., PHILLIPS P.S., DENMAN A.R., GILBERTSON D.D. 2002: **Radon in the Creswell crags Permian limestone caves.** J. Environ. Radioact, January 1, 62 (2) 165-79.

GILLMORE G., GILBERTSON D., GRATAN J., HUNT C., McLAREN S., PYATT B., BANDA R., BARKER G., DENMAN A., PHILLIPS P., REYNOLDS T., 2005: **The potential risk from 222 radon posed to archaeologists and earth scientists: reconnaissance study of radon concentrations, excavations, and archaeological shelters in the Great Cave of Niah, Sarawak, Malaysia.** Ecotoxicology and environmental safety 60 (2) 213-27.

GONZATO G., 1994: **Radioattività in grotta.** Speleologia Veronese, Anno 22, 18, 30-31.

GUNN J., FLETCHER S., PRIME D., 1988: **Some preliminary comments on radon and caver health.** Caves & Caving 43, 37-38.

GUNN J., FLETCHER S., PRIME D., 1989: **Radon daughter concentrations in British caves: implications for cavers and tourist cave operators.** Proceed. 10th Int. Cong. of speleology, Budapest, 1, 206-208.

GUNN J., FLETCHER S., PRIME D., 1990: **Research on radon in British limestone caves and mines 1970-1990.** Cave Science 18, 2, 63-65.

GUNN J., FLETCHER S., PRIME D., 1992: **Some preliminary comments on radon and caver health.** Baltimore Grotto News 25, 10, 4, 10.

GUNN J., FLETCHER S., MIDDLETON T., PRIME D., 1989: **Radon daughter concentrations in British caves: a progress report.** B.C.R.A. Cave Science Symp. Oct 89, in Cave Science 16, 3, 113. (*résumé*)

HYLAND R., GUNN J., FLETCHER S., 1993: **Preliminary results from the 1991-1992 : national cave radon survey.** Caves & Caving 59, 29.

HYLAND R., GUNN J., 1992: **Caving Risks.** New Scientist 135, 1838, 47.

HYLAND R., GUNN J., 1994: **International comparison of cave radon concentrations identifying the potential alpha radiation risks to British cave users.** Health Physics 67, 2, 176-179.

JOVANOVIĆ P., 1997: **Radon and its decay products in caves in Slovenia used for speleotherapy.** Protection and med. utilisation of karst environment, Int. Conf. 3-5 June 1997, Banská Bystrica, 95-97.

KENDALL G.M., 1995: **Limiting radiation exposure in caves and abandoned mines.** Radiation Protection Bull. 165, 16-17.

KENDALL G.M., DIXON D.W., 1997: **Controlling radon exposure during recreational caving and similar activities.** NRPB-R272, 8 p.

KOBAL I., SMODIS B., BURGER J., SKOFLJANEC M., 1987: **Atmospheric Rn222 in tourists caves of Slovenia, Yugoslavia.** Health Physics 52, 4, 473-479.

KOBAL I., SMODIS B., SKOFLJANEC M., 1986: **222 Rn air concentration in the Slovenian karst caves of Yugoslavia.** Health physics 50, 830-834.

LIVELY R.S., KRAFTHEFER B.C., 1995: **222 Rn variations in Mystery cave, Minnesota.** Health Physics 68, 590-594.

LYONS R.G., 1992: **Radon hazard in caves: a monitoring and management strategy.** *Helictite* 30, 2, 33-40.

LYONS R.G., 1993: **Radon : another caving hazard ?** *Tasmanian Cave & karst Research Group J.* 6, 10-20.

LYONS R., 1995: **Dr Ruth answers your questions on radon !** *Australasian Cave & Karst Management J.* 21, 4-11.

LYONS R.G., SOLOMON S.B., LANGROO R., and PEGGIE J.R., 1997: **Radon in New Zealand tourist caves.** *Proc. XII Australasian Conf. on Cave & Karst Management, Waitomo, NZ, April 1997*, 67-74.

MARTINI S., 1994 : **Grotte "radioattive" : origine e significato della presenza del radon negli ipogei naturali..** *Boll. Gruppo Speleologico CAI Bolzaneto*, 5, 39-43.

MEDICI F., 1991: **Radon in schweizerischen Karstsystemen.** *Actes 9° Cong. Nat.S.S.S. Carmey*, 77-81.

MEHEW R.D., 1989: **The radon problem : some thoughts on the Scottish scene.** *Grampian speleol. Group Bull.* 1, 2, 18-22.

MIDDLETON T., GUNN J., FLETCHER S., PRIME D., 1990: **Radon daughter concentrations in Giant' Hole, Derbyshire** *Cave Science* 18, 2, 67-70.

MIKI T., IKEYA M., 1980: **Accumulation of atmospheric radon in calcite caves.** *Health Physics* 39, 2, 351-354.

NAVRATIL O., STELCL O., 1989: **Mechanism of radon transport in the touristic caves of the Moravian Karst.** *Studia Carsol.* 3, 69-81.

NOVOTNY A., KRÄMER E., STEINBRUGGER B., FABIAN J., EBER E., SANDRI B., SCHUSTER E.W., ZACH M., 1994 : **Der therapeutische Einfluss von Radon - Inhalation und**

Hyperthermie im Gasteiner Heilstollen auf das Asthma bronchiale im Kindesalter. 10. Int. Symp. für Speläotherapie, Bad Bleiberg 1992; in: *Wissenschaftliche Beihefte zur Zeitschrift "Die Höhle"*, 48, 198-202.

OLDHAM A., 1976: **The daughters of radon.** *British Caver* 67, 3-6.

PHELAN A., 1994: **Gas worry for workers in popular caves.** *J.of the Sydney Speleo Society* 38, 7, 122.

PRIME D., 1995: **Radon, caves and rabbits.** *Cave and Karst Science* 22, 1, 46.

QUINDOS PONCELA L., FERNANDEZ NAVARRO P., SAINZ FERNANDEZ C., GOMEZ AROZAMENA J., BORDONOA PEREZ M. 2004: **Radiation exposure in uranium mining industrie vs exposure in tourist cave.** *Radiation Protection Dosimetry* 111, 1, 41-44.

SAJO-BOHUS L., GREAVES E., MERLO G., PALFALVI J., URBANI F., 1995 : **Primeras mediciones de la concentration de radon en cuevas Venezolanas.** *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleologia*, 29, 17-19.

SEYMORE F.W., RYAN R.M., CORELLI J. C., 1980: **Radon and radon daughter levels in Howe Cavern.** *Health Physics* 38, 858-859.

SOLOMON S.B., COOPER M.B., OBRIEN R.S., WILKIENSON L., 1992: **Radiation exposure in a limestone cave.** *Radiat. Prot. Dosim.* 45, 171.

SOLOMON S.B., LANGROO R., PEGGIE J.R., LYONS R.G., 1996: **Occupational exposure to radon in Australian tourist cave.** *Final report of worksafe Australia research grant (93/0436), Australian radiation laboratory, 26 +68 p.*
http: www.arpansa.gov.au/pubs/techrept/arl119a3.pdf

SPERRIN M., DENMAN A.R., PHILLIPS P.S., 2000: **Estimating the dose of radon to recreational cave users in the Mendips, U.K.** J. of Environm. Radioactivity 49, 235-240.

STELCL O., 1990: **"Some results of the radon measurements in the show caves of the moravian Karst"**. Slov. kras 29, 53-67.

STELCL O., 1991: **Radon accumulation in the caves of Moravian karst**. Proc. Int. Conf. on Environment changes in Karsts areas, Università di Padova 13, 345-352.

STELCL O., 1992: **Radon accumulation in the caves of Moravian karst**. Proc. Int. Conf. on Envir. Changes in Karst Areas (Italy, sept.1991); Quad. Dip. Geografia, Università di Padova, 13, 345-352.

SZERBIN P., 1996: **Radon concentrations and exposure levels in hungarian caves**. Health Physics 71, 3, 362-369.

SZERBIN P., 1996: **Natural radioactivity of certain spas and caves in Hungary**. Enviroment Intern. 22, 389-398.

THOMAS A., 1993: **Staff and visitors are in no danger. Cancer gas found in Dales show cave**. Westmoreland Gazette (Newspaper), 22 January, 12.

TORRENT N., 2000: **Radiation : les dangers de la spéléologie**. Le Point 443, 56.

TOYODA S.; IKEYA M., 1989: **Annual dose rate from atmospheric radon activities in the cave Kawachi- no- kaza- ana, Shiga Prefecture, Japan**. J. Speleol. Soc. Japan 15, 56-69.

VAUPOTIC J., DUJMOVIC P., KOBAL I., 1998: **Radiation doses due to radon and progeny in Postojna cave**. Acta Carsologica. Fourth international conference on Geomorphology - "M3-classical Karst, Lipica 1997, 27/1, 395-406.

VAUPOTIC, J., KOBAL, I. 2004: **Unattached fraction of radon decay products as a crucial parameter for radon dosimetry in Postojna Cave**, Acta carsologica, Volume 33, Issue 1.

VAUPOTIC J., CSIGE I., RADOLI V., HUNYADI I., PLANINI J., KOBAL I., 2001: **Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia**. Health Phys. 80, 2, 142-147.

WILSON D.L., RB GAMMAGE R.B., DUDNEY D.S., and SAULTZ R.J., 1991: **Summertime elevation of ²²²Rn levels in Huntsville, Alabama**. Health Phys., 60, 2, 189-97.

WILKENING M.H., WATKINS D.E., 1976: **Air exchange and Rn222 concentrations in the Carlbud caverns**. Health Physics 31, 139-145.

ZAHOROWSKI W., WHITTLE-STONE S., JAMES J. M., 1998: **Continuous measurements of radon and radon progeny as a basis for management of radon as a hazard in a tourist cave**. J. Radioanal. Nucl. Chem., 236, 1-2, 219 - 225.

ZAHOROSWSKI W., WHITTLESTONE S., and JAMES J.M., 1998: **Continuous measurements of radon and radon progeny as a basis for management of radon hazard in a tourist cave**. J. Radioanal. Nucl. Chem. 236, 219.

Edition Commission médicale de la
Fédération française de spéléologie
Site Internet :
<http://comed.ffspeleo.fr/>

Tirage : 250 exemplaires
Janvier 2007

