

Exposition aux rayonnements d'origine naturelle tellurique et cosmique : les études franco-tchèques

F. SPURNÝ¹, J.-F. BOTTOLLIER-DEPOIS², J.-L. DECOSSAS³

(Manuscrit reçu le 6 novembre 2006, accepté le 28 février 2007)

RÉSUMÉ La collaboration de l'Institut de physique nucléaire de l'Académie des sciences de la République tchèque (IPN AS RTch) avec les laboratoires français de recherche en dosimétrie a commencé durant les années 1970. Pendant plusieurs années, elle s'est concentrée sur les sujets liés à la dosimétrie des neutrons. Les premières études concernaient l'utilisation des détecteurs thermoluminescents (DTL) dans les champs mixtes neutron-gamma (Spurný *et al.*, 1976). Par la suite, elles se sont surtout orientées vers l'utilisation des détecteurs solides de traces (Spurný *et al.*, 1987 ; Portal *et al.*, 1986). Toutes ces études ont été menées en collaboration avec le Service de dosimétrie de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire et une équipe de l'université de Limoges (Spurný *et al.*, 1995). Depuis le début des années 1990, la collaboration entre l'IPN et les laboratoires français s'est focalisée sur les problèmes liés à l'exposition aux rayonnements d'origine naturelle cosmique et tellurique.

ABSTRACT Exposure to terrestrial and cosmic radiation of natural origin: Czech-French studies. Collaboration of the Nuclear Physics Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic (NPI AS CR) with French dosimetry research laboratories had started in 70th's. During many years it was concentrated to the items related to neutron dosimetry. First studies concerned the use of thermoluminescent detectors (TLD's) in neutron-gamma mixed fields (Spurný *et al.*, 1976). Afterwards, the studies were oriented particularly to the neutron dosimetry with track etched and other detectors (Spurný *et al.*, 1987 ; Portal *et al.*, 1986). These studies were realized in collaboration with the Dosimetry Service of the IRSN and the team of Limoges University (Spurný *et al.*, 1995). Since the beginning of 90th's, the collaboration of NPI with French dosimetry research laboratories has focused to the topics related to the exposure to the natural radiation of both terrestrial and cosmic origin.

Keywords: natural radiation background / aircraft crew exposure / track-etch detectors / silicon detector

1. Exposition au rayonnement cosmique du personnel navigant

1.1. Introduction

Les études communes sur le sujet ont commencé au début des années 1990, après la publication 60 de la CIPR (ICRP, 1991) qui recommande de diminuer la limite

¹ Institut de physique nucléaire, Académie des sciences de la République tchèque, Prague, République tchèque.

² Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN, 92262 Fontenay-aux-Roses, France.

³ Pe@rL, 83 rue d'Isle, Limoges, France.

TABLEAU I

Comparaison des valeurs d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ [μSv] obtenues avec différents moyens de mesure pendant des vols Prague (PRG) – Dubaï (DBX) – Bangkok (BKK).

Comparison of ambient dose equivalent $H^*(10)$ values, in μSv , obtained with different measuring methods during flights Prague (PRG) – Dubai (DBX) – Bangkok (BKK).

| Détecteur | TEL | PRG-DBX | DBX-BKK | BKK-DBX | DBX-PRG | totale |
|-----------|------|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| NAUSICAA | | $9,4 \pm 1,4^*$ | $4,1 \pm 0,4$ | $3,1 \pm 0,5$ | $5,8 \pm 1,0$ | $22,4 \pm 3,7$ |
| NM2 | | $9,7 \pm 1,5$ | $4,7 \pm 0,7$ | $3,4 \pm 0,5$ | $7,0 \pm 1,1$ | $24,8 \pm 3,8$ |
| DBN-PDN | haut | $7,1 \pm 1,5$ | $2,9 \pm 1,0$ | $3,8 \pm 1,6$ | $9,5 \pm 2,5$ | $23,3 \pm 6,6$ |
| DBN-BD100 | | $8,5 \pm 1,7$ | $5,0 \pm 1,3$ | $4,0 \pm 1,6$ | $7,0 \pm 1,5$ | $24,5 \pm 6,1$ |
| Moyenne | | 8,7 | 4,1 | 3,6 | 7,3 | 23,5 |
| NAUSICAA | | $7,9 \pm 0,8$ | $4,5 \pm 0,7$ | $4,2 \pm 0,6$ | $7,4 \pm 0,9$ | $24,0 \pm 3,0$ |
| RP114 | | $8,6 \pm 0,9$ | $6,6 \pm 1,0$ | $5,2 \pm 0,8$ | $8,9 \pm 1,3$ | $29,3 \pm 4,0$ |
| D222 | bas | $9,4 \pm 1,4$ | $6,3 \pm 1,2$ | $5,6 \pm 1,2$ | $9,2 \pm 1,3$ | $30,5 \pm 5,1$ |
| DMC90 | | $6,2 \pm 1,6$ | $4,1 \pm 0,8$ | $3,7 \pm 0,8$ | $5,3 \pm 0,8$ | $27,6 \pm 4,2$ |
| DTL | | | | | | $30,0 \pm 6,2$ |
| Moyenne | | 8,0 | 5,4 | 4,7 | 7,7 | 28,3 |

* 2 déviations standard.

de la dose efficace à respecter pour le public à 1 mSv par an et d'inclure la surveillance des personnels navigants. Reprenant cette recommandation, la directive européenne du 13 mai 1996 demande que les dispositions nécessaires soient prises par les états membres pour que les entreprises exploitant des avions prennent en compte l'exposition au rayonnement cosmique du personnel navigant susceptible de subir une exposition supérieure à 1 mSv par an. Cette présentation donne un aperçu de différentes études communes sur le thème de la dosimétrie du rayonnement cosmique à bord des avions.

1.2. Les mesures à bord d'avions entre 1994 et 1997

Les premières mesures communes à bord d'avions ont été réalisées avec les appareils disponibles à l'époque dans les deux laboratoires : compteur proportionnel équivalent tissu (CPET NAUSICAA), rem-mètre (NM2), détecteurs à bulles (DBN), compteur (GM RP114), dosimètres individuels électroniques (D222, DMC90) et détecteurs thermoluminescents (DTL). Des résultats sont donnés à titre d'exemple dans le tableau I (Spurný *et al.*, 1996). On peut voir notamment que :

- l'accord entre les valeurs obtenues avec les différents détecteurs est satisfaisant, ceci pour les composantes à fort et faible TEL du rayonnement ;

TABLEAU II

Valeurs de l'équivalent dose ambiant $H^*(10)$ obtenues par les différents participants au cours des vols NRT-FAI-CDG avec des CPET de différents laboratoires.
Ambient dose equivalent $H^*(10)$ values obtained by different participants during the flight NRT-FAI-CDG by means of TEPC of different laboratories.

| Appareil - Laboratoire | Faible TLE (μSv) | Fort TLE (μSv) | Total (μSv) |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Hawk CPET - ARCS | 25 | 41 | 66 |
| Hawk CPET - IRSN | 27 | 32 | 59 |
| Hawk CPET - RMC | 22 | 32 | 54 |
| Sievert CPET - SSI | 25 | 47 | 72 |
| Moyenne | $24 \pm 2^*$ | $38 \pm 7^*$ | $62 \pm 7^*$ |

* Une déviation standard.

- en accord avec l'influence du champ magnétique terrestre, la composante de faible TLE prédomine près de l'équateur et devient comparable avec la composante à fort TLE à plus grande latitude.

1.3. Le projet européen DOSMAX

Entre 2000 et 2004, l'IPN a participé, en tant que sous-contractant de l'IRSN, au contrat européen DOSMAX, piloté par le Dublin Institute for Advanced Studies, pour l'étude de l'exposition au rayonnement cosmique à bord des avions en période d'activité solaire maximale (Report of the EC, 2005). Plusieurs études communes ont été réalisées dans ce contexte.

En 2002, une intercomparaison avec plusieurs appareils de mesure a été réalisée lors d'un vol Air France (B747 cargo) sur la route Paris (CDG) – Fairbanks (FAI) – Tokyo (NRT) aller-retour. Les tableaux II et III montrent des résultats obtenus par les différents participants (Bottollier *et al.*, 2004), la figure 1 présente la comparaison des résultats des mesures NPI-IRSN obtenus au moyen de l'énergie deposition spectromètre MDU-Liulin (Spurný and Dachev, 2002).

En 2003, plusieurs participants du projet DOSMAX ont réalisé, dans le cadre du projet CAATER, des mesures communes à bord d'un avion Falcon dans les conditions géomagnétiques fixes. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV. Cette campagne de mesures a permis de réaliser des mesures en un point fixe pendant plusieurs heures afin d'avoir une statistique suffisante et obtenir ainsi des résultats avec des incertitudes associées réduites.

L'ensemble des résultats obtenus, généralement dans une fourchette de $\pm 25\%$ (2 s), sont globalement satisfaisants si l'on considère la nature complexe du rayonnement cosmique. Par ailleurs, ces résultats sont cohérents avec ceux

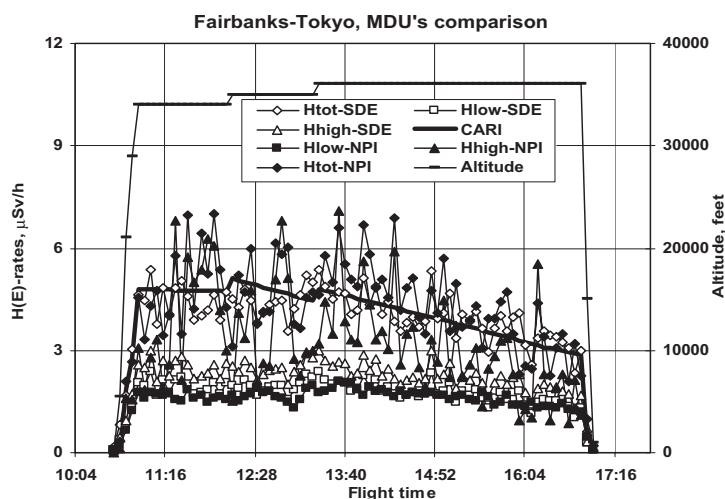


Figure 1– Comparaison des résultats de mesure NPI-IRS et de calcul avec CARI 6 obtenus au cours du vol AF avec le spectromètre MDU-Liulin.

Comparison of the results of measurements NPI-IRS and those calculated with CARI code obtained during an AF flight by means of MDU-Liulin spectrometer.

Tableau III

Équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ mesuré au cours du vol CDG-FAI-NRT avec différents détecteurs.

Ambient dose equivalent $H^*(10)$ values established during the flight NRT-FAI-CD6 with different detectors.

| Système | Composante non-neutron (μSv) | Composante neutron (μSv) | Total (μSv) |
|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|
| CPET- moyenne | 49 | 69 | 118 |
| MDU-Liulin - IPN | 58 | 84 | 142 |
| Compteur GM - IRSN | 78 | - | - |
| EPD - IPN | 65 | - | - |
| DTL + traces | 51 | 77 | 124 |
| Détecteur à bulles | - | 67 | - |
| Moyenne | $54 \pm 5^*$ | $76 \pm 9^*$ | $129 \pm 10^*$ |

* Une déviation standard.

obtenus par calcul avec les différents modèles qui sont en pratique utilisés pour la surveillance dosimétrique des personnels navigants.

TABLEAU IV

Comparaison des valeurs mesurées par les différents participants et celles calculées (EPCARD) pour des vols dans les conditions géomagnétiques constantes (projet CAATER).

Comparison of $H^*(10)$ rate values measured by different participants and those calculated with EPCARD code during the flights at constant geomagnetic conditions (CAATER project).

| Laboratoire | Appareil | Débit $H^*(10)$ pour les différents vols ($\mu\text{Sv/h}$) | | | |
|----------------|------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 1 ¹⁾ | 2 ¹⁾ | 3 ¹⁾ | 4 ¹⁾ |
| SSI Stockholm | Siev. CPET | 6,16 ²⁾ | 3,74 | 4,07 | 2,74 |
| Univ. Munich | Amira CPET | 6,42 | 3,40 | 3,95 | 1,75 |
| PTB Braunsch | GACS CPET | 7,40 | 3,90 | 4,20 | 2,20 |
| NPI Prague | MDU-Liulin | 6,40 | 4,00 | 5,20 | 3,40 |
| IRSN | Hawk CPET | 6,55 | 3,85 | 4,21 | 2,87 |
| ARCS Wien | Hawk CPET | 6,04 | 3,39 | 4,29 | 2,42 |
| GSF Neuherberg | EPCARD | 6,32 | 4,00 | 3,91 | 2,62 |
| | Moyenne | 6,5(0,5) | 3,7(0,3) | 4,3(0,4) | 2,6(0,5) |

¹⁾ Vols 1 et 3 – 40 000 pieds ; 2 et 4 – 32 000 pieds ; 1 et 2 – Aalborg ; 3 et 4 – Rome.

²⁾ 1 déviation standard est estimée à environ 10-15 %.

1.4. Activités dans le cadre EURADOS

L'IPN et l'IRSN ont toujours participé activement aux travaux menés dans le cadre d'EURADOS, en particulier à ceux liés à l'exposition du personnel navigant au rayonnement cosmique. L'ensemble des résultats ont été compilés dans le rapport du groupe de travail 5 (EC-DG TREN, 2005). Les deux instituts sont également impliqués dans le projet CONRAD (6^e PCRD, 2005-2007), en particulier sur les thèmes suivants :

- caractérisation dosimétrique de champs complexes auprès d'accélérateurs européens haute énergie et de réacteurs à fusion thermonucléaires ;
- élaboration d'un modèle pour l'évaluation de la dose au niveau de vol des avions dans le cas d'éruptions solaires importantes.

Le groupe de travail 5 de l'EURADOS, piloté par l'IRSN, poursuit son activité en s'attachant plus particulièrement à l'harmonisation des pratiques en termes de radioprotection des personnels navigants à l'échelle européenne.

2. Évaluation de l'exposition aux rayonnements d'origine tellurique

2.1. Introduction

Les mesures communes concernant l'exposition aux rayonnements d'origine tellurique dans le cadre d'une collaboration entre l'IPN et plusieurs laboratoires

français ont commencé au cours des années 1990 (Gaillard-Lecanu *et al.*, 2002). Néanmoins, le programme le plus important dans ce domaine a été réalisé entre l'IPN et l'université de Limoges. Plusieurs sujets ont été étudiés, un aperçu des résultats obtenus est présenté.

2.2. Dosimétrie de rayonnement d'origine naturelle terrestre gamma

Tout d'abord, le statut de « laboratoire de métrologie de rayonnement gamma de République tchèque » de l'IPN a été mis à contribution pour l'étalonnage de détecteurs. Les DTL de l'université de Limoges (LiF:Mg,Cu,P) ont été irradiés à Prague auprès d'une source de ^{60}Co (K_{air} entre 10 et 3 000 μGy) et lus à Limoges avec un lecteur FIMEL. L'étalonnage a conduit à la droite de régression (Spurný, 1998) :

$$D = 86,9 + 774,7 K_{\text{air}} [\mu\text{Gy}] \text{ avec } R^2 = 0,99998.$$

Dans le même temps, on a procédé à une comparaison de mesures du bruit de fond naturel gamma par les DTL et des systèmes actifs :

- un dosimètre individuel électronique CAFP utilisant une diode Si comme élément actif ;
- un débitmètre RP 114 basé sur un compteur GM, et doté d'un écran de Fe pouvant diminuer l'hypersensibilité aux photons de basse énergie ;
- un débitmètre 6150AD possédant deux éléments sensibles : un scintillateur plastique (scint.), et un compteur GM (GM). Les mesures ont été effectuées dans les locaux du CEMRAD, en 13 points différents.

Les résultats des mesures rapportés aux mesures DTL et les incertitudes type correspondantes suivants ont été obtenus :

| Appareil de mesure | Mesure relative | Incertitude type |
|--------------------|-----------------|------------------|
| CAFP | 0,936 | 0,058 |
| RP114 (Fe) | 0,937 | 0,048 |
| RP114 (nu) | 1,084 | 0,059 |
| 6150AD (scint.) | 0,964 | 0,050 |
| 6150 AD (GM) | 1,135 | 0,050 |

On voit que les résultats sont cohérents avec toutefois une légère sur-réponse des RP114(nu) et 6150AD(GM) qui possèdent un seuil inférieur de détection en énergie plus faible. Cela pourrait donc être lié à la présence des photons de faible énergie dans le fond gamma naturel. Cet ensemble de moyens de mesure a été ultérieurement complété par un spectro-dosimètre MDU (Spurný and Dachev,

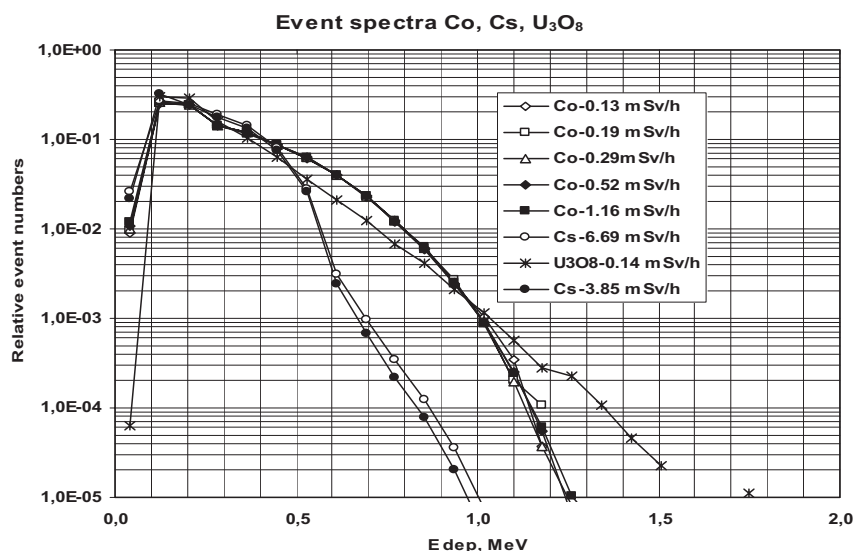


Figure 2 – Spectres des dépôts d'énergie mesurés par le MDU dans des faisceaux de photons pour divers débits d'équivalent de dose.

Energy deposition spectra measured with MDU in photon beams at different ambient dose equivalent rates.

2002) qui utilise une diode Si comme élément actif. Tout d'abord, on a étudié les spectres de dépôt d'énergie dans cet appareil auprès de différentes sources de rayonnement gamma. Ces spectres sont présentés dans la figure 2. On constate notamment que le spectre pour le ^{60}Co est un peu plus « dur » que pour le ^{137}Cs . Par contre, le spectre mesuré auprès d'une source de pechblende (*cf. infra*) présente des similitudes avec celui obtenu dans le cas du ^{60}Co .

Afin de disposer d'un étalon secondaire pour des étalonnages opérationnels, un dispositif à base de pechblende a été mis au point et caractérisé. Cet irradiateur est constitué d'un double cylindre en Al, de diamètres extérieur de 68 mm et intérieur de 42 mm, d'épaisseur de paroi égale à 2 mm. L'espace entre des deux parois a été rempli par de la pechblende. La hauteur de l'irradiateur est de 400 mm.

Pour l'étalonner, les deux appareils MDU et 6150AD (scint.) ont été exposés à mi-hauteur de l'irradiateur. La distance entre la paroi extérieure de l'irradiateur et le centre des volumes sensibles des appareils varie entre 0 et 500 mm pour MDU, 50 et 550 mm pour l'appareil 6150AD (scint.). Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 3. On peut y voir que les valeurs lues sont assez proches les unes des autres bien que l'étalonnage des deux appareils soit légèrement différent. Parmi les différences, notons aussi celle qui concerne la taille

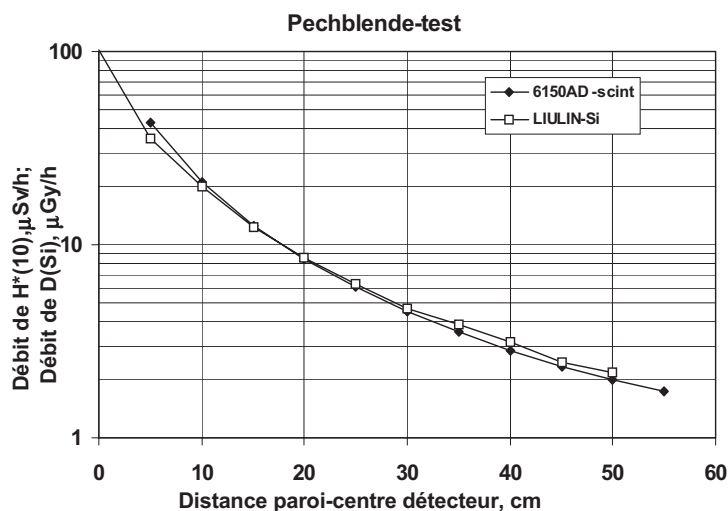


Figure 3 – Résultats de mesure avec deux appareils adaptés aux mesures en environnement dans le champ de l'irradiateur opérationnel à base de pechblende.

Results of measurements with two equipments for environmental radiation in the field of an operational radiator based on pechblend.

des deux détecteurs, les dimensions du scintillateur étant beaucoup plus importantes que celles de la diode ($1,0 \times 2,0 \text{ cm}^2$), ce qui se traduit par une géométrie d'irradiation sensiblement différente.

2.3. Dosimétrie du Rn et ses descendants au moyen des détecteurs passifs et actifs

La République tchèque est connue dans ce domaine pour son bruit de fond naturel élevé, du fait de la concentration élevée en ^{238}U de son sous-sol. Cela a été une des raisons du développement à l'IPN de méthodes de mesure passive utilisables en habitation ou dans le sol (Turek, 1996). La région Limousin est également, de par sa géologie, naturellement riche en ^{238}U donc en radon, ce qui motive ces essais.

Dans un premier temps, on a mesuré la concentration radon dans le sol (Spurný, 1998) en zone rurale. Une sonde fabriquée à l'IPN a été introduite dans le sol près d'une maison traditionnelle de la région. Deux détecteurs solides de traces (PADC) ont été positionnés à l'intérieur de la sonde, respectivement à 30 cm et 50 cm de la surface du sol. Le temps d'exposition a été 96 heures, conduisant à une densité de traces d'environ 3000 cm^{-2} . Les concentrations de radon correspondantes sont respectivement égales à 105 et 91 kBq.m^{-3} .

TABLEAU V
Résultats de mesure du Rn à l'intérieur des deux locaux à Limoges.
Results of Rn-measurements obtained in two locations at Limoges area.

| local | local | [Rn], Bq.m ⁻³ | | |
|----------------|----------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| | | Détecteurs | AlphaGUARD série 1 | DST ¹⁾ série 1 |
| CEMRAD | bureau | 142 ± 12 ²⁾ | 184 ± 19 | 110 ± 19 |
| | pièce centrale | 152 ± 19 | 233 ± 29 | 225 ± 28 |
| | Labo chimie | 207 ± 30 | 227 ± 20 | 253 ± 26 |
| | Cave SUFOP | 2 250 ± 110 | 2 100 ± 200 | 3 790 ± 330 |
| | salle à manger | 74 ± 10 | 800 ± 110 | 580 ± 110 |
| Maison rurale | séjour | | 690 ± 160 | 510 ± 70 |
| traditionnelle | chambre | | 370 ± 50 | 223 ± 60 |
| | cellier | 340 ± 30 | 310 ± 20 | 280 ± 10 |

¹⁾ en supposant le facteur d'équilibre égal à 0,5 ; ²⁾ 1s, incertitude statistique uniquement.

Pour certaines des mesures actives nous avons utilisé un Alphaguard PQ 2000 qui permet la mesure de la concentration de radon entre 2 et 2×10^6 Bq.m⁻³, sans prendre en compte les descendants. Les premières séries de mesure ont été réalisées dans les locaux du CEMRAD et à l'intérieur d'une maison traditionnelle de la région. Pour les mesures en habitation, des détecteurs solides de traces ont été simultanément utilisés. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau V. On y voit que, à l'exception de la salle à manger de la maison traditionnelle, l'accord des résultats de mesure est, vu les incertitudes habituelles des mesures de Rn (facteur d'équilibre, conditions de ventilation, etc.), plutôt satisfaisant.

2.4. Évaluation de l'exposition due aux rayonnements d'origine naturelle en Limousin

Pour une estimation plus complète de l'exposition aux rayonnements d'origine naturelle dans quelques cas concrets, diverses mesures ont été effectuées. La durée du test étant de un mois, il ne s'agissait pas de mener une étude statistique mais de chiffrer quelques cas n'ayant d'autre valeur que celle d'exemples (Spurný *et al.*, 2004).

Tout d'abord, nous avons calculé la contribution du rayonnement cosmique à l'irradiation externe en utilisant les estimations fournies par le rapport de l'UNSCEAR 2000 (UNSCEAR, 2000). D'après cette référence, la ville de Limoges se situant à une altitude d'environ 300 m, le débit de dose efficace total dû aux rayonnements cosmiques est d'environ de 37,1 nSv par heure. La dose efficace totale annuelle d'origine cosmique est donc de 325 µSv.

TABLEAU VI
Conditions expérimentales.
Experimental conditions.

| Type d'exposition ¹⁾ | Grandeur et unités | Appareillage et méthodes |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
| externe | $H^*(10)$ [Sv] ou débit [nSv/h] | passifs : DTL actifs : MDU (spectres $E_{dép}$), 6150AD(GM, scint.), RP114(GM) |
| Par inhalation | Activités volumique [Bq/l] | Passifs : détecteurs à traces actifs : RADIM 3 |

¹⁾ l'exposition par ingestion n'est pas traitée dans cette contribution.

Les mesures des contributions complémentaires ont été effectuées au cours des mois de juin et juillet 2004 et les cas suivants ont été choisis : un bâtiment recevant du public, une maison traditionnelle du Limousin, un pavillon de construction récente et un appartement en ville.

Hormis les appareils déjà mentionnés pour les mesures actives du radon, nous avons également utilisé des RADIM 3. Cet appareil, développé, fabriqué et commercialisé par la société SMM à Prague, a été acquis en plusieurs exemplaires par le CEMRAD. Pour cet appareil, le fabricant indique que les résultats de mesure perdent leur signification en dessous d'un seuil situé entre 20 et 30 Bq.m⁻³ environ. Plusieurs études ont été réalisées. Tout d'abord, l'évolution journalière de la concentration du Rn a été étudiée dans plusieurs cas. À titre d'exemple, quelques résultats sont présentés dans les figures 4 et 5.

On peut y voir que le niveau de la concentration du Rn est dans l'appartement (3^e étage) plus ou moins constant (Fig. 4a) et se situe aux limites des possibilités de l'appareillage. Par contre pour les autres pièces (rez-de-chaussée), l'alternance jour-nuit est mise en évidence.

Les appareils utilisés pour l'estimation du niveau d'exposition (interne et externe) dans les cas étudiés sont ceux du tableau VI.

Pour ce qui concerne l'exposition par inhalation, la dose efficace annuelle (nSv) due à l'inhalation du Rn et de ses descendants peut se calculer à partir de l'expression extraite du rapport UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) :

$$E = 9 [Rn] * FE * X \quad (1)$$

où $[Rn]$ est l'activité moyenne annuelle du Rn, en Bq.m⁻³ ; FE est le facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants, traditionnellement pris comme étant égal à 0,4 pour l'habitation et à 0,6 pour l'extérieur ; et X est la durée moyenne conventionnelle de présence annuelle d'une personne dans l'ambiance radon, égale à 7 000 heures à l'intérieur de l'habitation, et à 1 760 heures à l'extérieur.

EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS D'ORIGINE NATURELLE TELLURIQUE ET COSMIQUE

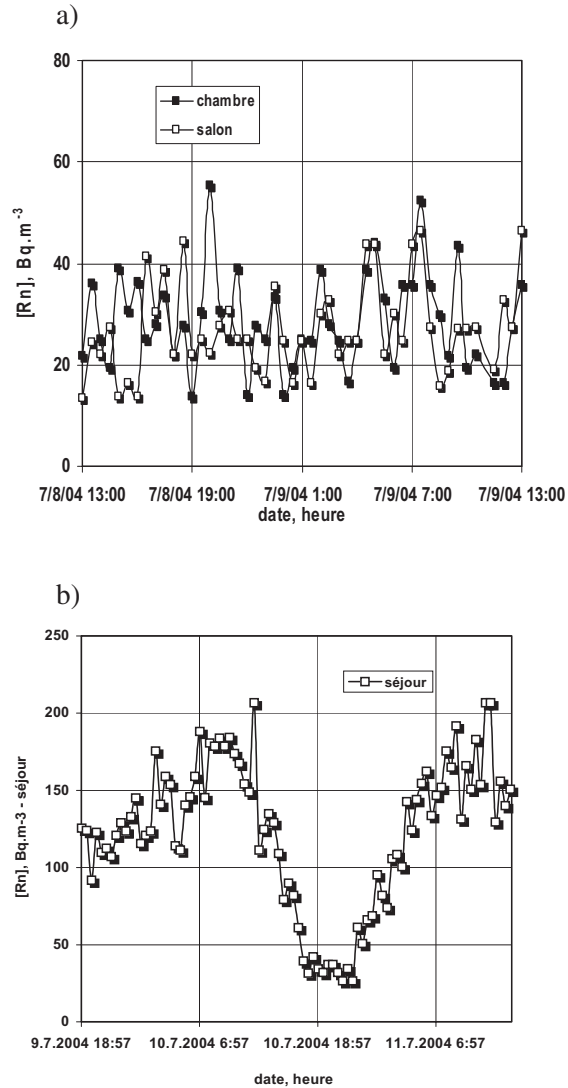


Figure 4 – Variations de la concentration de radon dans un appartement (a) et dans un pavillon (b).
Rn-concentration variations inside a flat (a) and a villa (b).

Une série de mesures dans les rues de la ville a été réalisée, les résultats ont montré que le niveau d'exposition externe annuel (cosmique et terrestre cumulé) varie entre 1,1 et 1,8 mSv, ce qui le situe au dessus de la valeur moyenne mondiale

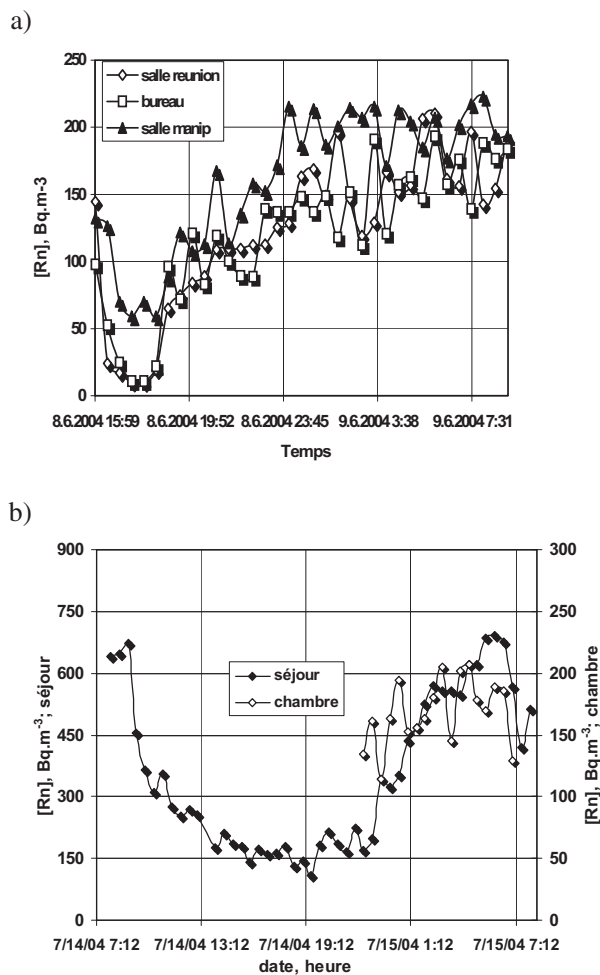


Figure 5 Variations de la concentration du Rn dans un bâtiment recevant du public (a) et dans une maison traditionnelle du Limousin (b).

Rn-concentration variations inside a public building (a), and inside of a traditional house of Limoges area (b).

pondérée (0,9 mSv) (UNSCEAR, 2000). Les résultats des mesures pour les cas choisis mentionnés sont présentés dans le tableau VII. Les valeurs obtenues sont généralement plus élevées que les valeurs moyennes mondiales pondérées, du fait de la géologie de la région.

TABLEAU VII
Niveaux typiques d'exposition pour les cas choisis.
Typical levels of exposure at different locations.

| Cas | cosmique | E_{annuelle} (mSv) | | |
|-----------------------|----------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | | Terrestre-intér. ¹⁾ | Terrestre-extér. ¹⁾ | Exposition Rn ²⁾ |
| Bâtiment public | 0,32 | 1,29 ± 0,10 | 1,14 ± 0,08 | 0,43 à 0,92 |
| maison traditionnelle | 0,32 | 1,03 ± 1,42 | 1,06 ± 0,07 | 6,6 |
| pavillon récent | 0,32 | 0,85 ± 0,04 | 0,78 ± 0,08 | 3,2 |
| appartement | 0,32 | 0,89 ± 0,07 | - | 0,70 |

¹⁾ 8 760 heures/an.

²⁾ 1 760 heures/an pour le bâtiment public, 7 000 heures/an pour l'habitation.

3. Conclusion

Cette contribution a pour objectif de montrer, sur quelques exemples concrets, le fruit d'une collaboration internationale ponctuée de visites et de séjours dans les laboratoires concernés. Les échanges fructueux ont permis de définir des programmes de travail, de mettre en place les conditions de leur réalisation et à travers la collaboration, de lier des liens étroits et durables. Les relations existant au sein de l'association des laboratoires de radiophysique et de dosimétrie ainsi que les rencontres régulières durant les journées scientifiques annuelles sont un atout certain pour le développement de collaborations efficaces, riches et variées.

RÉFÉRENCES

- Bottollier-Depois J.F., Tromprier F., Clairand I., Bartlett D.T., Beck P., Lewis B., Lindborg L., O'Sullivan D., Spurny F., Tommasino L. (2004) Exposure of aircraft crew to cosmic radiation: on-board intercomparison of various dosimeters, *Radiat. Prot. Dosim.* **110**, 411-415.
- EC-DG TREN (2005) Cosmic Radiation Exposure of Aircraft crew: Compilation of Measured and Calculated data. Editors: L.Lindborg, D. Bartlett, P. Beck, I. R. McAulay, K. Schnuer, H. Schraube and F. Spurný, EC-DG TREN, ISBN 92-894-8448-9, Luxembourg 2005.
- Gaillard-Lecanu E., Tromprier F., Chau Q., Bottollier-Depois J.F., Spurný F. (2002) Évaluation dosimétrique du rayonnement cosmique au dome C (Antarctique), *Radioprotection* **37**, 173-180.
- ICRP Publication 60 (1991) 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Ann. ICRP* **21** (1-3).
- Portal G. *et al.* (1986) Étude d'un dosimètre individuel passif multiélément pour la dosimétrie des neutrons, *Radioprotection* **21**, 269.
- Report of the EC (2005) Dosimetry of Aircrew Exposure to Radiation During Solar Maximum. Final Report of the EC Contract No. FIGM-CT-2000-00068, Project Coordinator: Denis O'Sullivan, Institute for Advanced Studies (DIAS), Ireland, Dublin 2005.
- Spurný F., Médioni G., Portal G. (1976) Transfert d'énergie des neutrons rapides dans quelques matériaux thermoluminescents, *Radioprotection* **11**, 219.

- Spurný F., Borden J.M., Portal G. (1987) Neutron personal dosimetry with Kodak CN 85 track detector, *Radiat. Prot. Dosim.* **20**, 85.
- Spurný F. *et al.* (1995) CEC Project FI3P-CT93-0072: Individual electronic neutron dosimeter - Final scientific report. Report DRD NPI AS CR 409/95, Prague, September 1995.
- Spurný F., Votočková I., Bottollier-Depois J.-F. (1996) Aircrew exposure on the board of a subsonic aircraft studied with complex set of dosimetric method, *Radioprotection* **31**, 91-100.
- Spurný F. (1998) Dosimétrie du Rn à Limoges : Résultats et analyses supplémentaires, *Rapport DDR IPN AS RT 450/98*, Prague/Limoges, juillet 1998.
- Spurný F., Dačev T. (2002) Aircrew onboard Dosimetry with a Semiconductor Spectrometer, *Radiat. Prot. Dosim.* **100**, 525-528.
- Spurný F., Granger V., Niort I., Royer A., Varelle J.C., Decossas J.L. (2004) Évaluation de l'exposition due aux rayonnements d'origine naturelle en Limousin : étude de cas. Dans : *21^{es} journées des LARD*, 21 et 22 octobre 2004, Limoges.
- Turek K. (1996) in *Results of EC intercomparison of passive Rn detectors. Final Report*. Eds.: Miles, J.C.H. *et al.*, EUR 16949 EN, EC Radiation Protection, 45-50.
- UNSCEAR (2000) Sources and Effects of Ionising Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, Sources, pp. 84-156.