RAPPORT DE RECHERCHE

Programme de subventions de recherche

Mesures des taux d'émanation du radon provenant des matériaux de construction

Canada

SCHL CMHC
AU CŒUR DE L'HABITATION

LA SCHL : AU CŒUR DE L'HABITATION

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est l'organisme national responsable de l'habitation au Canada, et ce depuis plus de 60 ans.

En collaboration avec d'autres intervenants du secteur de l'habitation, elle contribue à faire en sorte que le Canada continue de posséder l'un des meilleurs systèmes de logement du monde. La SCHL veille à ce que les Canadiens aient accès à un large éventail de logements de qualité, à coût abordable, et elle favorise la création de collectivités et de villes dynamiques et saines partout au pays.

Pour obtenir des renseignements supplémentaires, veuillez consulter le site Web de la SCHL à l'adresse suivante : **www.schl.ca**

Vous pouvez aussi communiquer avec nous par téléphone : 1-800-668-2642 ou par télécopieur : 1-800-245-9274.

De l'extérieur du Canada : 613-748-2003; télécopieur : 613-748-2016.

La Société canadienne d'hypothèques et de logement souscrit à la politique du gouvernement fédéral sur l'accès des personnes handicapées à l'information. Si vous désirez obtenir la présente publication sur des supports de substitution, composez le 1-800-668-2642.

MESURES DES TAUX D'ÉMANATION DU RADON PROVENANT DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

par Lubomir Zikovsky, ing.
Département de génie énergétique
Le centre de développement technologique
de l'École Polytechnique
Montréal (Québec)
Avril 1991

Agent de projet de la SCHL : Don Fugler

Ce projet a été réalisé grâce à une subvention de la Société canadienne d'hypothèques et de logement, dans le cadre du Programme de subventions de recherche (No. de dossier 6585/Z5-1). Les idées exprimées sont celles de l'auteur et ne représentent pas le point de vue officiel de la Société.

NOTE: CONTAINS AN EXECUTIVE SUMMARY IN ENGLISH IMMEDIATELY FOLLOWING THE EXECUTIVE SUMMARY IN FRENCH.

SOMMAIRE

Les taux d'émanation de 57 matériaux de construction, disponible au Canada ont été mesurés à l'aide de la scintillation liquide et d'un compteur proportionnel. Les taux d'émanation par unité de surface des bétons (11), des briques (6), des gypses (7) et des tuiles (15) varient entre 1.2 et 22, 1.3 et 6.9, 0.5 et 2.0, 0.2 et 0.8 $nBq/cm^2/s$ respectivement. Les taux d'émanation par unité de masse de ces mêmes matériaux s'échelonnent entre 0.8 et 19, 0.5 et 3.3, 0.9 et 4.6, 0.2 et 1.5 nBq/g/s. Les taux d'émanation des graviers (3) et des laines minérales (3) s'étalent entre 1.3 et 2.1, 0.2 et 1.7 nBq/g/s respectivement. Les taux d'émanation de l'ardoise, du bois, du marbre et du verre sont très faibles. Par contre, la ponce et le panneau acoustique dégagent le radon à un taux modéré.

Les concentrations de radium dans les matériaux étudiés se situent entre 3.1 et 130 Bq/kg. Leurs coefficients d'émanation varient entre 0.1% et 38%.

Les taux d'émanation que nous avons mesurés ont été utilisés pour calculer les concentrations du radon venant des matériaux de construction dans l'air d'une maison canadienne typique. Elles varient entre 0.06 et 1.32 Bq/m^3 dépendant du taux considéré et de la pièce de la maison.

SUMMARY

The amount of radon given off by 57 construction materials available in Canada was measured using liquid scintillation and a proportional counter. The measurement rates per unit area of concrete (11), brick (6), gypsum (7) and tiles (15) vary between 1.2 and 22, 1.3 and 6.9, 0.5 and 2.0, 0.2 and 0.8 $nBq/cm^2/s$ respectively. The radon measurement per unit mass of these same materials varies between 0.8 and 19, 0.5 and 3.3, 0.9 and 4.6, 0.2 and 1.5 nBq/g/s. The gravel (3) and mineral wool (3) measurements are found on a scale between 1.3 and 2.1, 0.2 and 1.7 nBq/g/s respectively. The measurements for clay, wood, marble and glass are very low. On the other hand, pumice and acoustic panels give off radon at a moderate rate.

The concentrations of radium in the materials studied are between 3.1 and 130 Bq/kg. Their emanating powers vary between 0.1% and 38%.

The measurements which we have taken were used to calculate the concentration of radon, coming from construction materials, in the air of a typical Canadian house. This concentration varies between 0.06 and 1.32 Bq/m^3 depending on the rate considered and on the room in the house.

CMHC SCHL

Helping to house Canadians | **Question habitation, comptez sur nous**

National Office | Bureau National

700 Montreal Road
Ottawa, Ontario
K1A 0P7

700 chemin Montréal
Ottawa (Ontario)
K1A 0P7

Since a limited demand for this research document has been anticipated, only a summary of its contents has been translated.

If there is a significant demand for this report CMHC will proceed with translation.

By completing and returning this form you will help us to determine if there is a significant demand for this report in English. Mail the completed form to:

The Canadian Housing Information Centre
Canada Mortgage and Housing Corporation
C1-200
700 Montreal Road
Ottawa, Ontario
K1A 0P7

REPORT TITLE: _____

_____

I would prefer to have this report made available in English.

NAME _____

ADDRESS _____
Street *Apt.*

_____
City *Province* *Postal Code*

TELEPHONE ( ) _____

1946 SCHL 45 CMHC 1991

TEL. (613) 748-2000
Canada Mortgage and Housing Corporation | Société canadienne d'hypothèques et de logement

Canada

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans le concours de nombreuses personnes à l'École Polytechnique, à la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement ainsi que dans divers organismes extérieurs. Je tiens d'abord à remercier Don Fugler à la SCHL pour les discussions très utiles qui nous ont permis de bien orienter nos travaux. J'aimerais remercier nos secrétaires Diane Héroux et Carolyne Soo pour leur lutte courageuse avec les équations et les termes scientifiques bizarres.

Mon grand estime s'adresse également à Jean-Claude Juneau pour le travail impeccable qu'il a fait pour nous.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Gérard Degrange et René Phaneuf de génie civil pour les échantillons de béton et pour les coupes de matériaux avec la scie aux diamants ainsi qu'à André Désilets du génie métallurgique.

Je voudrais remercier Lise Laforce et France Morin du Centre de Développement Technologique pour la négociation du contrat et de la mise en page du rapport final.

Je suis très reconnaissant envers Dr. Ramesh Josh de l'Université de Calgary pour les échantillons de gypse.

Je suis redevable aussi à Craig P. Wray de Yuill and Associates pour la modélisation de l'émanation dans la maison standard.

Finalement, on doit souligner que ce travail a été rendu possible grâce à des fonds de recherche fournis par la SCHL.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE..... ii

REMERCIEMENTS..... iii

TABLE DES MATIERES..... iv

LISTE DES FIGURES..... v

LISTE DES TABLEAUX..... vi

LISTE DES ABREVIATIONS..... vii

INTRODUCTION..... 1

1. LA RADIOACTIVITE ET LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION. 2

2. RADON DANS L'ENVIRONNEMENT..... 7

3. METHODE DE MESURES DES TAUX D'EMANATION..... 11

4. PARTIE EXPERIMENTALE..... 22

5. ORIGINE DES ECHANTILLONS..... 32

6. DESCRIPTION DES ECHANTILLONS..... 33

7. LES RESULTATS ET DISCUSSIONS..... 41

8. CONCLUSIONS..... 52

9. RECOMMANDATIONS..... 53

10. BIBLIOGRAPHIE..... 54

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1: Schéma du système de mesures des taux d'émanation à l'aide d'un compteur à scintillation..... 23

Figure 4.2: Photo du système de mesures des taux d'émanation à l'aide de la scintillation liquide..... 25

Figure 4.3: Chambre d'émanation No. 2..... 26

Figure 4.4: Chambre d'émanation No. 3..... 28

Figure 4.5 Schéma du système de mesure des taux d'émanation à l'aide d'un compteur proportionnel..... 29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Concentrations de Ra-226 (en Bq/kg) dans les matériaux de construction..... 3

Tableau 2.1 Radon et ses produits de filiation..... 7

Tableau 3.1 Coefficients d'émanation des matériaux de construction..... 12

Tableau 3.2 Taux d'émanation (en Bq/g/s) du radon provenant des matériaux de construction..... 14

Tableau 3.3 Taux d'émanation (en $Bq/cm^2/s$) du radon provenant des matériaux de construction..... 16

Tableau 7.1 Concentrations de radium-226 (en Bq/kg) dans les matériaux de construction et les coefficients d'émanation..... 42

Tableau 7.2 Taux d'émanation de radon provenant des matériaux de construction..... 45

Tableau 7.3 Les coefficients de corrélation entre la teneur en radium et le taux d'émanation..... 47

Tableau 7.4 Les taux d'émanation utilisés en modélisation de la contribution des matériaux à la teneur en radon d'une maison canadienne typique..... 49

Tableau 7.5 Concentration de radon (en Bq/m^3) dans l'air due aux matériaux de construction..... 50

LISTE DES ABREVIATIONS

A	-	Activité
Bq	-	Becquérel (1 dps)
cpm	-	Coup par minute
cps	-	Coup par seconde
dpm	-	Désintégration par minute
dps	-	Désintégration par seconde
CE	-	Coefficient d'émanation
kg	-	Kilogramme
L	-	Litre
PF	-	Produit de filiation
PPO	-	2,5 diphényloxazole
POPOP	-	2,2 p-phénylénebis (5 - phényloxazole)
Ra	-	Radium
Rn	-	Radon
Sv	-	Sievert (100 rem)
TE	-	Taux d'émanation
V	-	Volume

INTRODUCTION

Le radon, gaz radioactif naturel, est largement répandu dans l'environnement terrestre. Il est produit par la désintégration du radium-226 et libéré continuellement par le sol, l'eau souterraine, les matériaux de construction et autres matières. Dans plusieurs pays, le débit d'équivalent de dose effective produit par le radon mesuré dans des habitations normales était compris entre 0.07 et 0.70 mSv ce qui indique que le radon contribue d'une façon importante à la dose totale de radiation reçue par l'homme. On estime qu'annuellement aux États-Unis, entre 5 000 et 20 000 cancers sont dus à la présence du radon dans l'air.

Plusieurs chercheurs ont constaté que certains matériaux de construction dégagent d'importantes quantités de radon et constituent un danger potentiel pour la santé.

Par conséquent, la connaissance des sources d'émanation de radon dans les habitations s'avère d'un grand intérêt. Les matériaux de construction en constituent une source importante et leur contribution à la teneur du radon dans l'air au Canada est encore mal connue.

Pour atteindre ce but il a fallu mettre au point une méthode de mesure du taux d'émanation du radon provenant des matériaux de construction basée sur l'emploi de la scintillation liquide.

Par la suite, nous avons appliqué cette méthode au dosage du radon émanant des matériaux de construction en vente au Québec. Nous avons étudié 57 échantillons tels que briques en argile et en béton, tuiles céramiques, gravel, panneaux de gypse, etc.

Finalement nous avons utilisé les taux d'émanation mesurés pour évaluer la contribution des matériaux de construction à la teneur en radon de l'air d'une maison standard.

1. LA RADIOACTIVITE ET LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION.

La radioactivité est un phénomène naturel et ancien. L'humanité est depuis toujours bombardée par les rayons cosmiques qui viennent de l'immensité sidérale ainsi que par la radiation émise par les radioéléments qui se trouvent dans le sol, les matériaux divers et dans le corps lui-même. Les matériaux de construction sont une des nombreuses sources terrestres de la radiation. La radioactivité des matériaux de construction est principalement due à la présence dans les matériaux de faible concentrations d'uranium , de thorium et de leurs produits de filiation et de potassium.

Le radium-226, un produit de filiation de l'uranium-238, est un radioélément important du point de vue de la radiotoxicité parce qu'il génère le radon-222. Ce gaz inerte peut causer le cancer du poumon et par conséquent, sa concentration dans l'air est étroitement surveillée. La teneur en radium d'un matériau est le premier indicateur de sa toxicité potentielle et elle constitue un renseignement important.

Pour cette raison, nous avons compilé les concentrations de radium, disseminées dans la littérature scientifique; elles se trouvent dans le tableau 1.1. L'examen des données dans ce tableau indique clairement la grande variabilité des concentrations mesurées. Elles vont de valeurs très faibles de 0.3 Bq/kg dans le bois, jusqu'à 2620 Bq/kg dans le cas du béton qui contient des schistes alumifères. D'autres matériaux de construction qui sont riches en radium sont les résidus des phosphates et des phosphogypses.

Les matériaux à faible activité sont le bois, le gypse naturel, le sable et le gravier (OMS87). Safonov (1972) a mesuré la radioactivité gamma des matériaux de construction en URSS et il a constaté que la scorie de fournaise et le granite sont assez radioactifs tandis que le gravier , le ciment, le béton, le sable, le gypse, la chaux, le calcaire, le grès et le marbre sont faiblement radioactifs.

La présence de radium dans les matériaux de construction se manifeste en pratique par la libération du radon, son principal produit de filiation. Le phénomène appelé émanation, a été observé pour la première fois au début de ce siècle par Boltwood (1905, 1907, 1908). Des chercheurs de renommée mondiale comme Madame Curie, avaient observé dès 1910 la scintillation du radon dans l'air.

Tableau 1.1 Concentrations du Ra-226 (en Bq/kg) dans les matériaux de construction.

Matériau(NE)	Pays	Conc.(Bq/kg)	Reférence
Béton bloc aéré(4)	Hollande	21,18-24	AcDBDJ85
Béton cendres vol.(311)	Tchécoslovaquie	135	KoMr89
Béton cendres vol.(4)	Grèce	11-17	UN88
Béton cendres vol.(5)	Hongrie	189-248,222	KoMr89
Béton cendres vol.(8)	Etats-Unis	19	UN88
Béton léger(19)	URSS	141	UN88
Béton lourd(18)	URSS	66	UNSCEAR
Béton schiste al.(70)	Suède	620-2620,1300	UN82
Béton(12)	Finlande	50-80,61	UN82
Béton(15)	Finlande	36-70,53	AcDBDJ85
Béton(5)	Grèce	24-73,46	AcDBDJ85
Béton(69)	Allemagne	67	AcDBDJ85
Béton(137)	Norvège	11-37,28	UN82
Béton(14)	Etats-Unis	52	KaEi83
Béton(14)	Suède	32-58,47	UN82
Béton(24)	Espagne	30	QuFe87
Béton(30)	Hongrie	4-22,11	KoMr89
Béton(475)	Tchécoslovaquie	32	KoMr89
Béton(50)	Etats-Unis	9-32	UN88
Béton(6)	Danemark	13-24,16	UN82
Beton(95)	Hongrie	13	UN82
Bois(2)	Finlande	0.3-0.5,0.4	UN82
Bois(2)	Hollande	9.9,9.1-10.7	AcDBDJ85
Brique	Italie	29-81	VeCo84
Brique	Mexique	16	EsGo86
Brique argile(14)	Hollande	39,29-47	AcDBDJ85
Brique argile(32)	Autriche	38,20-71	AcDBDJ85
Brique argile(38)	Finlande	80,37-134	AcDBDJ85
Brique argile(6)	Grèce	49,20-80	AcDBDJ85
Brique argile(25)	Grande-Bretagne	52	AcDBDJ85
Brique argile(14)	Belgique	40,15-85	AcDBDJ85
Brique argile(8)	Italie	47,32-56	AcDBDJ85
Brique argile(23)	Grande-Bretagne	52(26)	Ha71
Brique calcaire(3)	Finlande	20-25,22	UN82
Brique calcaire(5)	Danemark	6-11,8	UN82
Brique Granite(7)	Grande-Bretagne	88(56)	Ha71
Brique poreuse 20%CV(6)	Hollande	72,67-80	AcDBDJ85
Brique rouge	Pologne	18-22	PeSt78
Brique rouge(12)	URSS	50	UN88
Brique rouge(23)	Allemagne	281	UN82
Brique rouge(6)	Etats-Unis	45	UN88
Brique silicate	Pologne	7-14	PeSt78
Brique silicate(5)	Grande-Bretagne	7(6)	Ha71
Brique(109)	Allemagne	59	UN82

Brique(11)	Espagne	68	QuFe87
Brique(12)	Suède	41-152,96	UN82
Brique(15)	Hongrie	33-56,44	KoMr89
Brique(176)	Hongrie	56	UN82
Brique(18)	Norvège	63	UN82
Brique(191)	Tchécoslovaquie	47	KoMr89
Brique(24)	Etats-Unis	67	KaEi83
Brique(37)	Finlande	37-134,80	UN82
Brique(5)	Grèce	45	UN88
Brique(79)	Danemark	23-86,42	UN82
Brique(86)	URSS	7-136,67	KoMr89
Cendres volantes(14)	Hollande	12-316,181	AcDBDJ85
Chaux	Mexique	33	EsGo86
Chaux(4)	Autriche	2-19,9	KoMr89
Chaux(90)	Tchécoslovaquie	15	KoMr89
Ciment	Italie	17-81	VeCo84
Ciment	Mexique	26	EsGo86
Ciment	Pologne	7-26	PeSt78
Ciment cendres vol.(4)	Hollande	41-77,60	AcDBDJ85
Ciment Portland(6)	Hollande	10-49,27	AcDBDJ85
Ciment scories(6)	Hollande	42-116,82	AcDBDJ85
Ciment(12)	Hongrie	11-70,26	KoMr89
Ciment(14)	Allemagne	<26	UN82
Ciment(16)	Suède	20-168,41	UN82
Ciment(18)	Espagne	47	QuFe87
Ciment(294)	Tchécoslovaquie	44	KoMr89
Ciment(4)	Etats-Unis	50	UN88
Ciment(4)	Norvège	30	UN82
Ciment(6)	Danemark	9-30,20	UN82
Ciment(6)	Grande-Bretagne	22	UN82
Ciment(87)	URSS	22-107,33	KoMr89
Ciment(11)	Finlande	15-84,40	Mu84
Ciment(9)	Finlande	20-84,44	UN82
Granite(22)	Autriche	10-117,55	KoMr89
Granite(52)	Allemagne	100	UN82
Granite(7)	Grande-Bretagne	89	UN82
Gravier	Itadie	11-14	VeCo84
Gravier(4)	Hollande	9.5-10.1,9.7	AcDBDJ85
Grès(10)	Hollande	7.9-9.1,8.3	AcDBDJ85
Gypse	Grande-Bretagne	44	Ea75
Gypse	Mexique	22	EsGo86
Gypse	Pologne	26-740	PeSt78
Gypse chim.(18)	Autriche	11-49,27	KoMr89
Gypse nat. bloc(4)	Hollande	5-10,6.5	AcDBDJ85
Gypse nat. feuille(5)	Hollande	2.3-5.6,3.9	AcDBDJ85
Gypse nat.(23)	Allemagne	<19	UN82
Gypse nat.(69)	Grande-Bretagne	23(27)	Ha71
Gypse nat.(7)	Danemark	6-13,10	UN82
Gypse nat.(73)	Grande-Bretagne	22	UN82
Gypse nat.(8)	Suède	1-9,4	UN82

Gypse pho. feuille(3)	Hollande	320-700,450	AcDBDJ85
Gypse phosphat.(33)	Allemagne	555	UN82
Gypse phosphat.(60)	Grande-Bretagne	629	UN82
Gypse plâtre(13)	Hollande	4-600,200	AcDBDJ85
Gypse(12)	Etats-Unis	12	UN88
Gypse(16)	Autriche	6-315,48	KoMr89
Laine minérale(2)	Finlande	9-29,19	UN82
Laine minérale(8)	Finlande	4-31,16	Mu84
Laine minérale(3)	Hollande	31-37,34	AcDBDJ85
Laine minérale(3)	Suède	11-15,13	UN82
Laine minérale(5)	Danemark	40	UN82
Sable	Italie	8-11	VeCo84
Sable	Mexique	22	EsGo86
Sable(13)	Espagne	6.5	QuFe87
Sable(4)	Hollande	7.8-8.2,8.1	AcDBDJ85
Sable(513)	Tchécoslovaquie	20	KoMr89
Tuile toiture(6)	Hollande	30-54,43	AcDBDJ85
Tuile(5)	Finlande	63-91,78	UN82
Tuile(8)	Hollande	36-87,61	AcDBDJ85
Tuile(9)	Etats-Unis	70	KaEi83
Verre(2)	Hollande	4.6-12.4,8.5	AcDBDJ85

Conc. : Minimum-Maximum, Moyenne (écart type)
NE = Nombre d'échantillons

Gabrysh et Davis (1955) ont été les premiers à remarquer que l'émanation provenant des matériaux de construction pourrait présenter un danger pour la santé humaine. Cet avertissement a été ignoré pendant une vingtaine d'années jusqu'à 1977 quand la première conférence moderne sur le sujet (livre RW77) fût organisée. Par la suite, de nombreux chercheurs se sont penchés sur ce problème et présentement la littérature scientifique s'enrichit rapidement de nouvelles observations. On a constaté que la teneur en radon dans les maisons bien isolées ("energy efficient homes") est plus grande que dans les maisons ordinaires (FlMCTu83).

Une augmentation de la teneur du radon a été également observée dans les maisons solaires qui utilisent la roche concassée pour storer la chaleur (GeKnFr83, St81).

L'origine d'un matériau détermine souvent son taux de radioactivité. Ainsi le phosphogypse contient souvent une concentration élevée de radium (Ha71, JaPoJa84) comme d'ailleurs le béton (KaEiCl83) et la laine minérale (PaKeLa87) qui contiennent des scories provenant des usines d'acide phosphorique.

Par contre, l'emploi des cendres volantes dans le béton a peu d'effet sur son TE (VaSc85). Les maisons construites en briques de terre séchée ("adobe") contiennent également plus de radon (Is88). Malgré la présence de radioéléments dans les matériaux de construction , ils ne constituent pas, selon l'opinion de certains chercheurs (In83, KaEiCl83, SiGh88) la source principale du radon dans l'air des maisons. Leur contribution à la teneur globale du radon dans l'air a été évaluée à 10% (QuNeWi87). Par contre, en Allemagne les matériaux de construction contituent la source principale du radon dans les maisons (KeFoMu84).

Cette différence d'opinion s'explique à notre avis par les types des maisons considérés dans les deux cas. En Europe on a étudié les maisons de plusieurs étages et dans ce cas les sources principales du radon sont l'air extérieur et les matériaux de construction.

En Amérique, on a mesuré le radon surtout dans les maisons unifamiliales. Dans ce cas le sol constitue la source la plus importante du radon.

2. RADON DANS L'ENVIRONNEMENT.

Les radons sont les gaz nobles dont le numéro atomique est 86. Cet élément possède 29 isotopes, tous radioactifs, dont les numéros de masse varient de 200 à 226. Seulement 3 de ces isotopes représentent un intérêt pratique, en occurence les radons 219, 220 et 222. Ils sont également connus sous leurs noms historiques, actinon, thoron et radon. Ces trois radons sont produits par la désintégration radioactive de U-235, Th-232 et U-238 resp. Parmi ces trois radioéléments, le radon 222 est le plus important à cause de sa demi-vie relativement longue.

Normalement, quand on parle du radon on pense isotope Rn-222. C'est un gaz rare dont la densité est 7.7 fois plus élevée que celle de l'air (Bu80). Le radon est instable et donne naissance à plusieurs produits de filiation (Tableau 2.1).

Les produits à période courte (Po-218, Pb-214, Bi-216 et Po-214) ne sont jamais vraiment en équilibre avec le radon présent dans l'air car ils se déposent sur toutes les surfaces à proximité. Selon des mesures effectuées à l'intérieur des habitations le facteur d'équilibre F serait égal à 0.5.

Tableau 2.1 Radon et ses produits de filiation

Isotope	Energie (MeV)			Période	NC	EA
	α	β	γ			MeV
Rn-222	5.0	-	-	3.824j	Rn	19.2
Po-218	6.0	-	-	3.05 m	RaA	13.7
Pb-214	-	0.65	0.29	26.8 m	RaB	7.7
Bi-214	-	1.67	1.05	19.7 m	RaC	7.7
Po-214	7.68	-	-	0.16ms	RaC'	7.7
Pb-210	-	0.018	0.047	22 a	RaD	6.5
Bi-210	-	1.17	-	5.0 j	RaE	6.4
Po-210	5.3	-	-	138 j	RaF	5.3
Pb-206	-	-	-	∞	RaG	0.0

EA= Energie par atome ; NC= Nom Commun

j= jour m= minute a= an s= seconde

Le radon, étant un gaz radioactif naturel, origine de toutes les substances qui nous entourent. Les sources de radon peuvent être divisées selon l'origine en sources naturelles et en sources anthropiques. Les sources naturelles les plus importantes sont le sol et l'eau, tandis que les sources anthropiques principales sont les matériaux, les combustibles et les engrais chimiques.

Selon les estimations récentes, les taux d'émanations à l'échelle du globe sont les suivants:

Sources	Taux (Bg/an)	Ref
Sol	8.9*E+19	Bu80
Plantes et eau	<2*E+19	Bu80
Ocean	8.5*E+07	Bu80
Sol	1.2*E+18	RaMu84
Gaz naturel	3.6*E+13	RaMu84
Centrales nucléaires	2.9*E+13	RaMu84
Combustion de charbon	1.3*E+13	RaMu84
Essais atomiques	1.4*E+12	RaMu84

$8.9*E+19 = 8.9*10^{19}$

Le TE du radon dans l'air dépend de l'état du sol, de sa porosité, de son humidité et de sa température. Dans un sol poreux et peu humide, le TE est plus élevé. Par contre, la neige, la pluie et une pression atmosphérique élevée ont pour effet de le diminuer.

La concentration du radon dans l'eau de surface est généralement très faible. Par contre, dans l'eau souterraine la teneur peut-être très élevée, pouvant atteindre jusqu'à 10000 Bg/L (Bu80). Une fraction du gaz est libérée pendant l'usage de l'eau et se retrouve à l'intérieur des maisons.

La combustion de gaz naturel est une autre source de radon. la teneur de radon dans le gaz dépend de sa teneur initiale, des délais de transport et du traitement subi par celui-ci; elle est égale typiquement à 0.7 Bq/L (Bu80) même si les concentrations peuvent atteindre 50 Bq/L (UN88, p69).

Les roches phosphatées servant à la fabrication d'engrais peuvent rejeter du radon à tel taux que des activités dans les entrepôts atteignent 1/10 de niveau opérationnel ("working level"). Les amas de résidus du traitement de l'uranium peuvent contenir 4-40 Bq/g de Ra-226. L'émanation du radon à partir de ces résidus est de 0.5 $Bq/m^2/s$ par Bq/g (UN88, p139).

L'émanation de radon se produit à partir de sources multiples et dispersées. Par conséquent, les concentrations de radon dans l'air varient considérablement.

Les concentrations du radon dans l'air extérieur dépend du taux d'émanation de la source et de la dispersion atmosphérique. Les concentrations les plus faibles (0.1 Bq/m^3) ont été mesurées au dessus des océans, tandis que au dessus des continents on trouve des valeurs de 1 à 10 Bq/m^3 (UN82, p.190).

La concentration du radon dans l'air des maisons dépend du sol sur lequel la maison est construite, des matériaux de construction employés, de la source d'eau, du gaz naturel et de l'air extérieur UN88, p.64). Le type de la maison et les méthodes de construction sont également des facteurs importants. Les mesures des concentrations moyennes dans différents pays varient de 9 Bq/m3 en Pologne à 120 Bq/m3 en Chine. La concentration moyenne en Europe et au Etats-Unis est de 51 Bq/m3, tandis que la moyenne des concentrations moyennes de divers pays en zone tempérée est de 55 Bq/m3 (UN88, p.76). Dans les pays tropicaux la teneur du radon dans l'air est plus faible et la concentration moyenne mondiale pondérée par la population à été évaluée à 15 Bq/m3.

La distribution des concentrations du radon dans l'air est log-normale (UN88, p.76) et des valeurs très élevées (500 Bq/m3 et plus) ont été observées. Dans un cas extrême, l'air dans une maison en Pensylvanie à contenue 100 Bq/L du radon (Ke88).

Le radon est un gaz toxique et son effet principal sur la santé est l'induction du cancer. Les organes les plus susceptibles sont les poumons et l'estomac. La plus grande partie de la dose

absorbée par les poumons provient du Po-218 et du Po-214 et non du radon lui-même. Etant un gaz inerte, le radon ne se fixe pas dans les poumons et cause peu de dommages. Ses PF par contre, s'attachent à l'épithélium bronchique et délivrent une dose moyenne de 1.1 m Sv (UN88, p.79).

Aux États-Unis, sur les 130 000 décès attribués au cancer du poumon en 1986, des chercheurs ont imputé environ 5000 à 20 000 cas directement au radon (EPA86). A cause de sa radioactivité élevée, les organismes nationaux et internationaux recommadent des actions correctives dans les bâtiments où la concentration de radon dépasse les limites suivantes (Co90):

Organisme (année)	Limite Bq/m3	
	PF	radon
Organisation Mondiale de la Santé (1985)	100	200
Commission Internationale de Protection Radiologique (1984)		400
National Radiation Protection Council, USA		350
Environmental Protection Agency USA (1986)	75	150
Radiation Protection Bureau, Canada (1985)	370	800

3. METHODES DE MESURES DES TAUX D'EMANATION.

Dans la littérature scientifique on retrouve plusieurs façons d'exprimer les taux d'émanation du radon provenant des matériaux. Une première approche montre (tableau 3.1) les taux d'émanation sont exprimés comme fraction du radon qui s'échappe du matériau. Dans ce cas, il faut connaître également la teneur en radium.

Une deuxième méthode (tableau 3.2) consiste à exprimer le taux d'émanation par unité de masse, i.e. en Bq/g/s. La relation entre le coefficient d'émanation (CE) et le taux d'émanation (TE) est la suivante:

$$TE = CE * A * CR$$

où A est l'activité de radium (Bq/g) CR est la constante radioactive du radon ($2.1 * 10-6\ s^{-1}$).

Dans la troisième méthode (tableau 3.3) on exprime le taux d'émanation par unité de surface du matériau, i.e. en $nBq/cm^2/s$.

En examinant le tableau 3.1, on constate que les coefficients d'émanation varient considérablement entre 0,07% et 28%. Cette variation s'explique principalement par la structure du materiau, en particulier par la surface spécifique et la porosité.

Il existe plusieurs méthodes de mesures des taux d'émanation. En principe on pourrait utiliser n'importe quelle des méthodes qui ont été mises au point pour le dosage du radon dans l'air, mais jusqu'ici seulement certaines de ces méthodes on été mises en pratique. Ces méthodes peuvent être groupées en deux grandes catégories:

1- L'utilisation d'une chambre d'émanation dans laquelle on place le matériau, on le laisse émaner quelques jours et on mesure l'activité du radon dans la chambre à l'aide d'un détecteur quelconque.

2- Mesure "in situ"; on fixe hermétiquement une boîte sur le matériau (le mur, le plancher, etc) pendant plusieurs jours et on mesure l'activité du radon qui s'accumule à l'intérieur.

Tableau 3.1 Coefficients d'émanation des matériaux de construction.

Matériau(NE)	Pays	CE %	Ra-226 Bq/kg	Référence
Basalte(4)	Italie	1-6	---	BaClAd72
Béton	Allemagne	4.0	44	PoWi78
Béton (1)	USA	1.7	22	PaKe87
Béton CV 4% (8)	USA,Knoxville	26	19	In83
Béton léger	Allemagne	4.2	122	PoWi78
Béton léger(19)	URSS	2.1	141	UN88
Béton lourd(18)	URSS	3.5	66	UN88
Béton(100)	Hongrie	28	13	UN88
Béton(12)	USA, Chicago	25	15	In83
Béton(13)	Tchécoslovaquie	9.5	---	KoMr89
Béton(21)	USA,San Francisco	23	20	In83
Béton(9)	Danemark	3-12	---	JoMc78
Béton(95)	Hongrie	30	15(4)	ToFeLa78
Brigue(158)	Hongrie	12	48(9)	ToFeLa78
Brique adobe(2)	USA,N.Mexique	6	29	In83
Brique béton	Allemagne	2.6	26	PoWi78
Brique rouge	Allemagne	0.2	74	PoWi78
Brique rouge(1)	USA	0.07	59	PaKe87
Brique rouge(12)	URSS	1.7	50	UN88
Brique rouge(200)	Hongrie	3.6	55	UN88
Brique rouge(6)	USA Californie	1	43	In83
Brique silicate	Allemagne	5.2	15	PoWi-78
Brique (18)	Norvège	1	63	UN88
Brique (2)	Danemark	3-22	---	JoMc78
Brique (5)	Grèce	2	45	UN88
Calcaire (5)	Italie	1- 3	---	BaClAd72
Calcaire (12)	USA	8.4(4)	39(34)	GaMcEy62
Ciment (4)	USA, San Francisco	1	56	In83
Gneiss (5)	Italie	0-15	---	BaClAd72
Granite (5)	Italie	4-17	---	BaClAd72
Granite (16)	USA	3-38	14(11)	DaHoDi87
Granodiorite (3)	Italie	5-17	---	BaClAd72
Gravier (4)	USA, San Francisco	7	15	In83
Grès (4)	Italie	4-12	---	BaClAd72
Gypse chim.	Allemagne	6.0	636	PoWi78
Gypse chim. (2)	Hollande	6.0	480	AcDBDJ85
Gypse nat.	Allemagne	6.8	7	PoWi78
Gypse phosph.	Belgique	14	430	JaPo84
Gypse (1)	Danemark	26	---	JoMc78
Gypse (1)	Pologne	3.5	26	UN88
Gypse (12)	USA, 4 endroits	28	12	In83
Quartzite (3)	Italie	1-6	---	BaClAd72
Sable (2)	USA	12	10	In83

Sable (2)	USA, San Francisco	16	34	In83
Sable (3)	Danemark	14	20	DaKo85
Sable (48)	Tchécoslovaquie	10	---	KoMr89
Tuile (50)	Tchécoslovaquie	1.1	---	KoMr89

CV = Cendres volantes CE = Coefficient d'émanation
NE = Nombre d'échantillons ( ) = Ecart type

Tableau3.2 **Taux d'émanation (en Bq/g/s) du radon provenant des matériaux de construction.**

Matériau(NE)	Pays	Taux d'émanation nBq/g/s	Référence
Basalte(4)	Italie	0-5	BaClAd72
Béton	Belgique	5.6	De90
Béton	Grèce	2.9-5	UN88
Béton 4% CV (8)	USA, Knoxville	8-19,10(1.6)	In83
Béton CV (4)	Grèce	6.4-20	UN88
Béton léger (19)	URSS	4.1	UN88
Béton lourd (18)	URSS	3.2	UN88
Béton SA (1)	Danemark	440	UN88
Béton SA (1)	Suède	580	UN88
Béton (1)	Inde	46(14)	SiGh88
Béton (100)	Hongrie	7.8	UN88
Béton (12)	USA, Chicago	3-14, 6.8(3.7)	In83
Béton (21)	USA, SanFrancisco	7-11, 8.5(1.3)	In83
Béton (3)	Danemark	1-5.2, 2.6	Jo83
Béton (3)	Hollande	1-3.5, 2.2	VaSc85
Béton (3)	Suède	11-31	UN88
Béton (4)	Danemark	4.7	UN88
Béton (50)	USA	2.5-20	UN88
Béton (9)	Danemark	2.5-440	JoMe78
Bois (2)	USA	0.2	In83a
Brique	Belgique	0.83	De90
Brique adobe (2)	USA N.Mexique	3.6	In83a
Brique rouge (12)	URSS	1.6	UN88
Brique rouge (2)	Danemark	0.17	UN88
Brique rouge (200)	Hongrie	3.9	UN88
Brique rouge (6)	USA, Californie	1.0	In83a
Brique (1)	Inde	59 (15)	SiGh88
Brique (2)	Danemark	0.17	JoMe78
Brique (3)	Tchécoslovaquie	3.8-4.5,4.1	SeSe89
Brique (5)	Grèce	0.3-7.5	UN88
Calcaire (4)	Italie	0-3	BaClAd72
Ciment (1)	Inde	100 (20)	SiGh88
Ciment (4)	USA	1.0	UN88
Gneiss (5)	Italie	0-9.3	BaClAd72
Granite (13)	Italie	0-42	BaClAd72
Granite (3)	Tchécoslovaquie	2.2 (1.5)	Va83
Granodiorite (3)	Italie	0-10	BaClAd72
Gravier (4)	USA	2.2	UN88
Grès (1)	Inde	19 (9)	SiGh88
Grès (4)	Italie	4-42	BaClAd72
Gypse nat.	Belgique	2.5	De90

Gypse nat. (1)	Belgique	0.6	JaPo84
Gypse pho.	Belgique	56.	De90
Gypse phosp. (1)	Belgique	120	JaPo84
Gypse (1)	Danemark	0.2	JoMe78
Gypse (12)	USA, 4endroits	6.3	In83a
Quartzite (3)	Italie	3-21	BaClAd72
Sable (1)	Inde	90(20)	SiGh88
Sable (2)	USA	12	UN88
Sable (2)	USA	3	UN88

Conc.: Minimum - Maximum, Moyenne (écart type)
CV = Cendres volantes NE = Nombre d'échantillons SA = Schiste Alunifère

Tableau 3.3 **Taux d'émanation (en nBq/cm2/s) du radon provenant des matériaux de construction.**

Matériau(NE)	Pays	Taux d'émanation	Référence
Béton	Allemagne	13-192, 102	PoWi78
Béton léger	Allemagne	12-52, 27	KeFo84
Béton léger	Allemagne	27-232, 148	PoWi78
Béton poreux	Allemagne	16-48, 27	PoWi78
Béton lourd	Allemagne	5-55, 35	KeFo84
Béton (1)	Canada	0.1 (0.03)	McAr81
Béton (9)	Finlande	5-88, 58 (23)	Mu84
Béton (16)	USA, NewYork	10-670, 260 (170)	BrKn79
Béton (7)	USA	1.1-3.7, 2.1	GeKn83
Béton (9)	Danemark	4-80	JoMc78
Brique	Allemagne	5	KeFo84
Brique béton	Allemagne	34-48, 42	PoWi78
Brique rouge	Allemagne	4-15, 7	PoWi78
Brique silicate	Allemagne	20-76, 50	PoWi78
Brique (2)	Danemark	0.2-0.5	JoMc78
Calcaire	Allemagne	35-300, 133	KeFo84
Calcaire 30cm	Allemagne	44	KeFoMo82
Grès	Allemagne	26	KeFo84
Grès (1)	Canada, Athabaska	1(0.1)	McAr81
Gypse	Allemagne	5-510, 79	KeFo84
Gypse chim.	Allemagne	1100	PoWi78
Gypse nat.	Allemagne	2-18, 12	PoWi78
Gypse chim. (2)	Hollande	190-270	AcDBDj85
Gypse chim. (7)	Finlande	130-1180,560(350)	Mu84
Gypse 10cm	Allemagne	19	KeFoMu82
Gypse (1)	Canada	0.033(0.01)	McAr81
Gypse (1)	Danemark	0.1	JoMc78
Marbre	Allemagne	5	KeFo84
Marbre 30cm	Allemagne	40	KeFoMu82
Ponce 10cm	Allemagne	63	KeFoMu82
Ponce 30cm	Allemagne	158	KeFoMu82
Ponce	Allemagne	13-175, 74	KeFo84

Conc.: Minimum - Maximum, Moyenne (écart type)
NE = Nombre d'échantillons

McCorkell et col. (1981) ont employés des détecteurs de traces nucléaires (Kodak - Pathé LR 115) et une cellule de scintillation de type "Lucas". L'échantillon et le détecteur LR 115 ont été placés dans une chambre d'émanation d'un volume de 4.5 L. Quelques jours plus tard, le détecteur LR 115 a été gravé chimiquement à l'aide d'une solution de 2,5 M NaOH à 60°C pendant 2 heures. La sensibilité de cette méthode est de (9.29 ± 0.15) 10^{-15} traces nucléaires /cm^2/désintégration.

La cellule de scintillation était d'un volume de 130 ml et le scintillateur solide employé était le ZnS. Son bruit de fond était de 1-2 cpm et les limites de détection qu'on a pu atteindre avec cette cellule étaient de 1.9 nBq/cm^2/s et 11 nBq/g/s.

D'autres chercheurs qui se sont servi des détecteurs de traces nucléaires sont Singh et Ghuman (1988) et Abu-Jarad (1988).

La cellule de scintillation, inventée par Lucas (1957), a été utilisée par plusieurs scientifiques pour mesurer les taux d'émanation.

Scheibel et col. (1976,1979) ont décrit une cellule et un système de concentration du radon. Leur système emploi une trappe froide (-76°C) pour capter le radon, une colonne de $CaSO_4$, pour éliminer l'humidité et une colonne remplie de NaOH pour éliminer le gaz carbonique. Ce système permet une concentration du radon par un facteur de 10^3 à 10^4. En conjonction avec la cellule de scintillation on peut atteindre une sensibilité de 4 nBq/cm^2/s (4 pCi/m^2/h) pour un temps de comptage de 3 heures.

D'autres spécialistes qui ont fait usage d'une cellule de scintillation pour mesurer les TE sont Ingersoll (1983), Ingersoll et col. (1983) et Baretto et col. (1972).

Van der Lugt et Scholten (1985) ont employés une chambre d'émanation (V=17L), une colonne remplie de charbon activé et un détecteur gamma. Le radon qui émane du matériau est véhiculé par l'azote, (débit = 6L/h) entre la chambre et la colonne. Après 5 à 10 jours d'émanation, le charbon est versé dans un bécher de Marinelli (V=1.1L) et les PF du radon sont comptés à l'aide d'un détecteur Ge(Li). L'activité la plus faible qu'ils ont pu détecter est de 1 Bq.

Morawska (1983) s'est servi d'un détecteur Si(Li) pour mesurer les TE des matériaux par l'intermédiaire de produits de filiation (RaA et RaC) du radon. Son système consiste en une chambre d'émanation, d'une pompe et d'un précipitateur électrostatique. L'air est pompé dans un circuit fermé, les produits de filiation se déposent sur le précipitateur et sont comptés à l'aide du détecteur. La sensibilité de cette méthode est de 2.6 mBq/L (Ra A) et de 0.3 Bq/m^3 (RaC).

Carriveau et Harbottle (1979, 1982) ont eu recours à un détecteur au Ge(Li) pour mesurer les coefficients d'émanation de radon. Dans cette méthode, initialement proposée par Hahn (1936), le matériau est laissé au repos pendant un mois afin que l'équilibre entre le radon et ses PF puisse s'établir. Tout d'abord on mesure l'activité initiale (AI) des produits de filiation de radon par la spectrométrie gamma. Le matériau est placé par la suite dans un conteneur étanche et un mois plus tard on mesure l'activité finale (AF). Le coefficient d'émanation (CE) est calculé par la relation suivante:

$$CE = (AF - AI)/AF$$

On peut appeller cette technique "la boîte scellée". Austin et Droullard (1978) ont mesuré les CE de 950 échantillons de minerais d'uranium par la méthode de la "boite scellée". Ils varient de 1 à 91%, avec une moyenne de 26.5%, une médiane de 23.5% et le mode de 20.5%. L'émanation augmente avec la perméabilité du minerais et elle diminue avec la taille des grains.

La méthode "in situ" a été utilisée par plusieurs chercheurs (Jo82, AJ88, AJFr79, McJo78). Un canistre est fixé hermétiquement sur la surface dont le TE on veut mesurer. Une colle à expoxy est employée pour assurer l'étanchéité (McJo78). Abu-Jarad (1988) s'est servi de cette méthode et du détecteur de traces nucléaires (CR-39). Le détecteur doit être exposé au radon pendant au moins 3 mois. Cette technique a été également employée pour mesurer les TE dans une mine (ThCh69).

Une variante de la méthode "in situ" consiste en fixation sur la surface dont le TE on veut mesurer, un canistre qui contient le charbon actif (EML72). Le radon qui s'échappe s'adsorbe sur le charbon et on mesure quelques jours plus tard, l'activité de ses produits de filiation.

Emanation du radon à partir d'un matériau se fait par 3 mécanismes distincts (DaHoDi87): recul-alpha, diffusion et transport.

Le recul-alpha est un phénomène qui consiste en rebondissement du radon naissant de son lieu de formation. Quand le radium se transforme en radon par émission d'une particule alpha, il recueille une énergie cinétique qui lui permet de parcourir une distance qui varie de 10 à 10 000 nm dépendant du milieu dans lequel il se trouve. Cette distance permet au radon de s'échapper du matériau à condition que son parent (Ra) se trouve près de la surface .

La diffusion présente, pour le radon, une deuxième possibilité de se libérer du matériau. La longueur de diffusion dépend du milieu. Dans les solides elle est de l'ordre de 0.01 mm tandis que dans un liquide elle est égale à 2 cm et dans l'air à 200 cm. Ces longueurs sont les distances maximales mais à cause du parcours irrégulier, en pratique elles sont beaucoup plus courtes.

Le transport et un mouvement du radon par un milieu fluide (gaz en liquide). Ce mécanisme entre en fonction quand il existe un débit de l'air ou de l'eau à travers le matériau, qui entraîne le radon vers la surface. Ce mécanisme s'applique rarement aux matériaux de construction.

Le taux d'émanation (TE) d'un matériau dépend de plusieurs facteurs et en particulier de:

1- La teneur en radium
2- La structure du matériau
3- La porosité
4- L'humidité
5- La température
6- La pression

Les TE augmentent, évidemment, avec la teneur de radium du matériau. Mais il n'existe pas une correlation directe entre les deux et les coefficients d'émanation des matériaux varient énormément (tableau 3.1). La structure d'un matériau influence d'une façon importante les TE. Les matériaux dont la structure cristalline ne permet pas la "guérison" des défauts ponctuels générés par la désintégration de radium constituent les énamateurs puissants (BaClAd72).

Par contre, les matériaux qui possèdent une capacité d'un récuit spontanné et dans lesquels le radon diffuse surtout par les défauts mécaniques, par les joints de grains et par les dislocations, retiennent bien le radon (BaClAd72).

L'effet de la porosité sur les TE n'est pas clair. Certains chercheurs affirment que la porosité n'a pas d'effet, tandis que d'autres pensent qu'elle fait augmenter le TE.

McCorkell et col. (1981) déclarent que la pulvérisation des minerais a peu d'effet sur leurs TE. Ingersoll (1983) est arrivé à la même conclusion dans le cas du béton.

Par contre Singh et Ghuman (1988) ont mesuré une augmentation de 21% du TE de quartzite quand il a été pulvérisé.

Le taux d'humidité d'un matériau a un effet très marqué sur son TE. Ceci a été observé par plusieurs auteurs. Stranden et col. (1984) ont étudié l'émanation à partir du béton et ils ont constaté que le TE augmente neuf fois quand le taux d'humidité du béton varie de 0 à 5%. Van der Lugt et Scholten (1985) ont mesuré l'émanation du ciment. Le TE a augmenté a peu près dix fois quand le taux d'humidité a augmenté de 0 à 25%. L'effet d'humidité sur les TE s'expliquerait par la présence d'eau dans les pores du matériau, qui ralentit les atomes du radon naissant et empêche leur incorporation dans le matériau.

L'effet de la température sur les TE a été étudié par Stranden et col. (1984) et par Gabrysh et Davis (1975). Ils ont constaté que les TE augmentent avec la température mais d'une façon moins prononcée que l'augmentation avec l'humidité. L'augmentation de la température de 5 à 50°C a causée l'augmentation du TE par un facteur de 3.9 avec un écart type de 1.8. Par contre, Auxier et col. (1974) n'ont pas observé l'effet de la température sur le TE.

McLaughlin et Jonassen (1978) ont étudié l'effet de la pression négative sur les TE des matériau. Ils ont observé une relation linéaire avec cette dernière. Une diminution de pression de 20mm Hg sur 27 heures a doublé le TE. Le même effet a été observé dans le cas d'émanation du radon à partir des sols (Ko45).

La diffusion du radon dans le béton a été étudié par Jonassen et McLaughlin (1978). Ils ont mis au point un modèle de diffusion et ils ont mesuré le coefficient effectif de diffusion du radon (3.4 10-9 m^2/s) dans le béton. Zapalac (1983) a étudié la diffusion du radon à travers deux échantillons de béton. Il a mesuré les longueurs de diffusion (12.6 et 16.9 cm), les porosités (0.068 et 0.32) et les coefficients de diffusion (3.35 et 6.01 * 10^{-8} m^2/s) de ces échantillons.

Quand on mesure les TE du radon, il est nécessaire de vérifier l'étanchéité de la chambre d'émanation ainsi que de tous les matériaux qu'on utilise. McCorkell (1980) a étudié ce problème et il a constaté que le verre, le polyéthylène, le plexiglass (3mm d'épaisseur) et les bouchons de caoutchouc retiennent bien le radon. Seulement les tubes en caoutchouc de 2mm d'épaisseur se sont avérées perméables au radon et la graisse au silicone a absorbée facilement ce gas. Par conséquent, nous avons évité de se servir des tubes en caoutchouc dans notre système.

Hafez et Somogyi (1986) ont mesuré la perméabilité des plastiques vis à vis radon. Le polyéthylène s'est avéré le plus perméable tandis que le polyéthylène terephthalate a été le plus étanche. Dans une étude semblable de Ramachandran et col. (1987) la perméabilité du polycarbonate et du "Mylar" était la plus faible tandis que celle du caoutchouc naturel et des fibres de verre était la plus élevée.

L'émanation du radon des matériaux de construction devrait logiquement motiver l'établissement d'une norme régissant leur emploi dans les habitations. A notre connaissance, la seule norme qui existe est celle qui est en vigueur en Tchécoslovaquie et qui stipule que les matériaux et le sol sur lequel la maison est construite ne doivent pas dépasser un TE de 20nBq/g/s (Va83).

4. PARTIE EXPERIMENTALE.

Les taux d'émanation ont été mesurés à l'aide de deux méthodes différentes.

La première méthode est basée sur l'emploi de la scintillation liquide.

La chambre d'émanation No.1 est constituée d'un cylindre en acier d'un diamètre interne de 15 cm et d'une hauteur de 36 cm. Les extrémités sont fermées par 2 plaques en aluminium munis de joints étanches en caoutchouc et de 2 valves.

Le méthode de mesure de l'émanation du radon dans les matériaux de construction ce fait en 4 étapes: (Figure 4.1)

1- l'émanation du radon de l'échantillon

2- fabrication du scintillateur

3- barbotage

4- comptage du radon de l'échantillon

1) L'émanation du radon de l'échantillon

Il s'agit d'enfermer un échantillon des matériaux de construction dans la chambre d'émanation pendant 20h afin de permettre l'émanation et l'accumulation du radon. La chambre d'émanation est en acier, elle est hermétiquement fermée elle empêche l'échappement du radon sous forme de gaz. Avant de mettre l'échantillon dans la chambre on filtre l'air à l'aide d'un filtre au charbon afin de s'assurer que le radon obtenu après émanation provient de l'échantillon et non pas de l'air ambiant.

2) Le scintillateur

Le scintillateur utilisé est le xylène. On a ajouté au xylène 4 g/l de PPO et 0,4 g/l de POPOP dissous pour obtenir un scintillateur homogène qui augmente la sensibilité et le degré de scintillation. Le choix du scintillateur et la concentration du PPO et POPOP a été étudié au laboratoire en fonction du rapport: signal/bruit de fond.

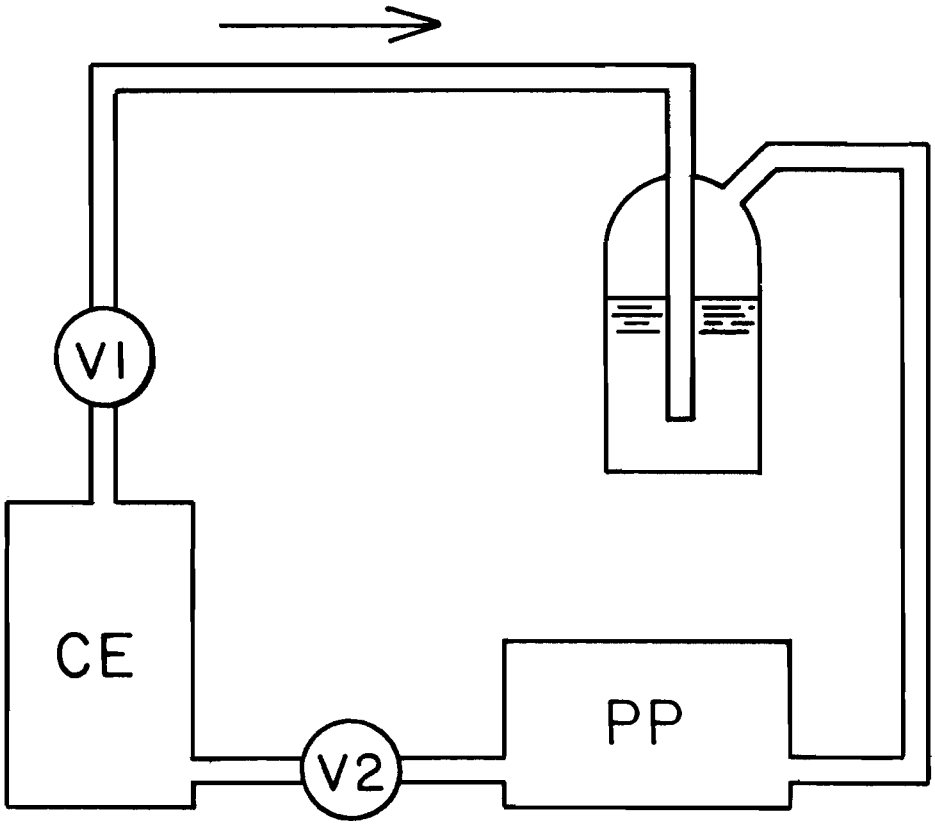

Figure 4.1 Schéma du système de mesures des taux d'émanation à l'aide d'un compteur à scintillation

CE = Chambre d'émanation
PP = Pompe péristaltique

3) Barbotage

On met le scintillateur dans une fiole, on pompe à l'aide d'une pompe péristaltique (PP) l'air de la chambre d'émanation ou se trouve l'échantillon enfermé depuis 20h approximativement.

L'air de la chambre passe à travers une barboteuse (B) qui contient le scintillateur liquide qui absorbe le gaz de radon.

Le barbotage se fait à une température de -20°C ceci favorise la dissolution du radon dans le scintillateur. (Figure 4.2)

4) Comptage du radon dans l'échantillon

Après un barbotage de 90 minutes à un débit de pompage précis, le scintillateur liquide contient une partie du radon obtenu après émanation de l'échantillon qui est un matériel de construction.

On utilise un photomultiplicateur et le scintillateur liquide qui est le xylène avec du PPO et POPOP pour détecter la radiation du radon.

Le signal est amplifié et compté par un système de comptage conçu pour mesurer le radon.

La deuxième méthode est basée sur l'emploi d'un compteur proportionnel.

Il s'agit d'un compteur fabriqué en cuivre ultra-pur dont le mouvement propre est très faible (0.2 cpm). Ce détecteur est d'une forme cylindrique, d'un diamètre interne de 7 cm et d'une hauteur de 12.4 cm. Il est muni d'une électrode centrale ultra-mince (0.08 mm) et d'une valve d'entrée de gaz.

Les échantillons sont placés dans deux chambres d'émanation. Nous avons utilisé deux chambres cylindriques de dimensions identiques (diamètre interne de 15 cm, hauteur de 15 cm). La première est (Figure 4.3) faite en acier (le cylindre) avec les plaques d'extrémité faites en polyvinylchlorure (PVC). La deuxième

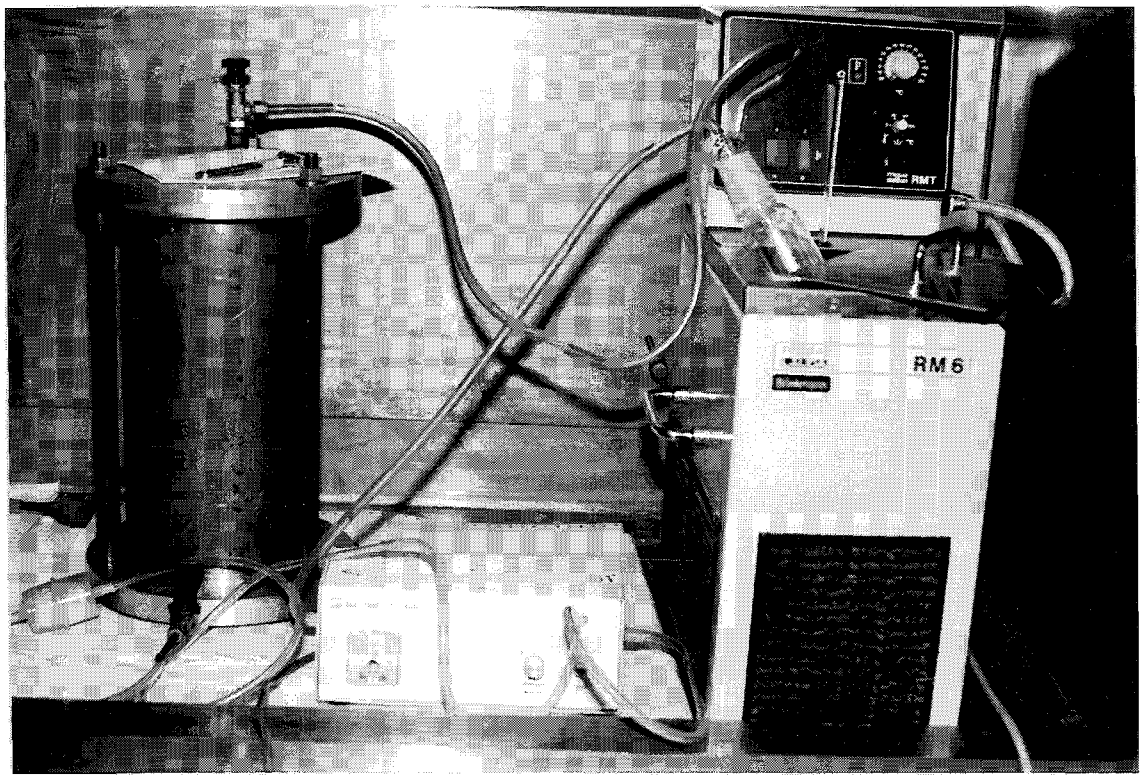

Figure 4.2 Photo du système de mesures des taux d'émanation à l'aide de la scintillation liquide.

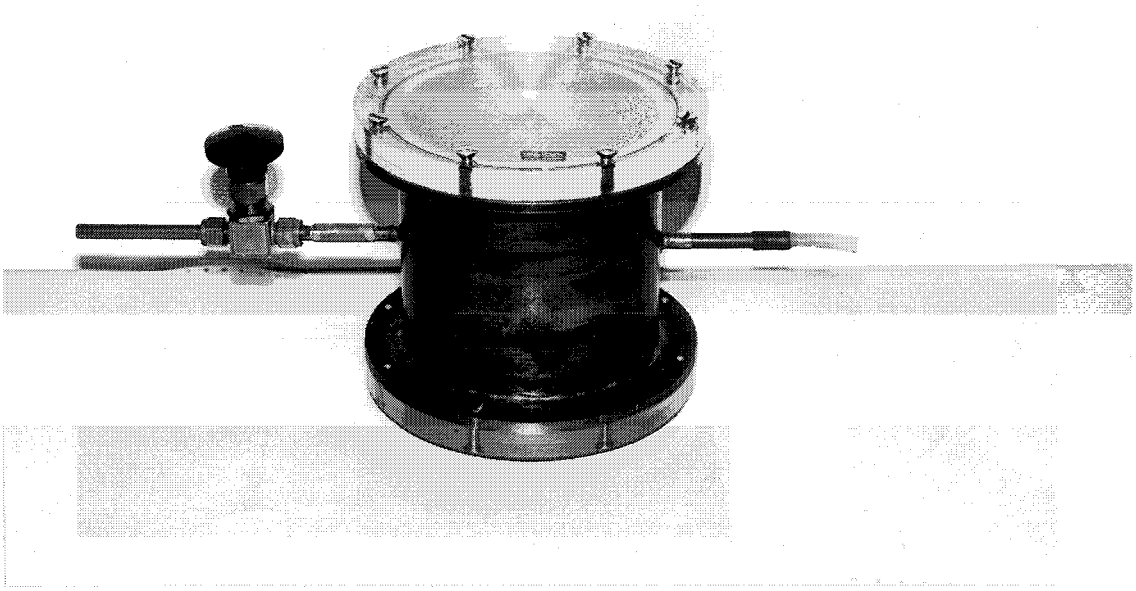

Figure 4.3 Chambre d'émanation No. 2

(Figure 4.4) est faite entièrement en PVC. L'émanation propre à chaque chambre est très faible (0.3 cpm après 1 jour). Chaque chambre est munie de deux valves afin de permettre l'entrée et la sortie du gaz.

La première opération consiste à évacuer l'air de la chambre d'émanation contenant l'échantillon. Par la suite on laisse entrer l'argon de haute pureté et on rinse la chambre 3 fois avec ce gaz. De cette façon on élimine les traces d'air. Finalement on remplie la chambre d'argon, on ferme les deux valves et on attend 1 à 10 jours.

Après ce temps d'émanation, on branche la chambre au compteur proportionnel (Figure 4.5) on ouvre les valves V3 et V4 et on fait le vide dans le système avec une pompe à vide (PV).

Pour éliminer les traces d'air dans la tuyauterie, on la rinse 3 fois avec l'argon. On fait le vide, on ferme les valves V3, V4 et V5, on ouvre la valve V1 et V6 et on laisse aspirer une fraction du contenu de la chambre d'émanation (CE) dans le compteur (C) proportionnel. On ferme la valve V1, on ouvre les valves V2 et V5 et on laisse pénétrer l'argon vierge dans la chambre d'émanation. Puis on ferme la valve V2 et on ouvre la valve V1. On répète cette dernière opération plusieur fois, jusqu'à ce que la pression dans le compteur atteigne la pression atmosphérique et on ferme la valve V6.

On applique un voltage de 1000V à l'électrode centrale du compteur. Les impulsions électriques générées dans l'argon par les particules alpha sont acheminées dans un pré-amplificateur (Ortec 109 PC), puis un amplificateur (Ortec Model 421) et un compteur (Nuclear Chicago 27105).

En utilisant un gain minimal et un discriminateur de 0.1V, seulement les particules alpha sont comptées. Dans ces conditions, l'efficacité pour les particules bêta du K-40 (Emax = 1.31 MeV) est très faible (0.00001).

Le temps de comptage a été typiquement de 100 minutes. A la fin de comptage, l'argon du compteur a été évacué par la pompe à vide afin de minimiser la contamination du compteur par les produits de filiation du radon. Malgré cela, si l'activité de l'échantillon a été élevée, le compteur n'était pas utilisable

(Figure 4.4) est faite entièrement en PVC. L'émanation propre à chaque chambre est très faible (0.3 cpm après 1 jour). Chaque chambre est munie de deux valves afin de permettre l'entrée et la sortie du gaz.

La première opération consiste à évacuer l'air de la chambre d'émanation contenant l'échantillon. Par la suite on laisse entrer l'argon de haute pureté et on rinse la chambre 3 fois avec ce gaz. De cette façon on élimine les traces d'air. Finalement on remplie la chambre d'argon, on ferme les deux valves et on attend 1 à 10 jours.

Après ce temps d'émanation, on branche la chambre au compteur proportionnel (Figure 4.5) on ouvre les valves V3 et V4 et on fait le vide dans le système avec une pompe à vide (PV).

Pour éliminer les traces d'air dans la tuyauterie, on la rinse 3 fois avec l'argon. On fait le vide, on ferme les valves V3, V4 et V5, on ouvre la valve V1 et V6 et on laisse aspirer une fraction du contenu de la chambre d'émanation (CE) dans le compteur (C) proportionnel. On ferme la valve V1, on ouvre les valves V2 et V5 et on laisse pénétrer l'argon vierge dans la chambre d'émanation. Puis on ferme la valve V2 et on ouvre la valve V1. On répète cette dernière opération plusieur fois, jusqu'à ce que la pression dans le compteur atteigne la pression atmosphérique et on ferme la valve V6.

On applique un voltage de 1000V à l'électrode centrale du compteur. Les impulsions électriques générées dans l'argon par les particules alpha sont acheminées dans un pré-amplificateur (Ortec 109 PC), puis un amplificateur (Ortec Model 421) et un compteur (Nuclear Chicago 27105).

En utilisant un gain minimal et un discriminateur de 0.1V, seulement les particules alpha sont comptées. Dans ces conditions, l'efficacité pour les particules bêta du K-40 (Emax = 1.31 MeV) est très faible (0.00001).

Le temps de comptage a été typiquement de 100 minutes. A la fin de comptage, l'argon du compteur a été évacué par la pompe à vide afin de minimiser la contamination du compteur par les produits de filiation du radon. Malgré cela, si l'activité de l'échantillon a été élevée, le compteur n'était pas utilisable

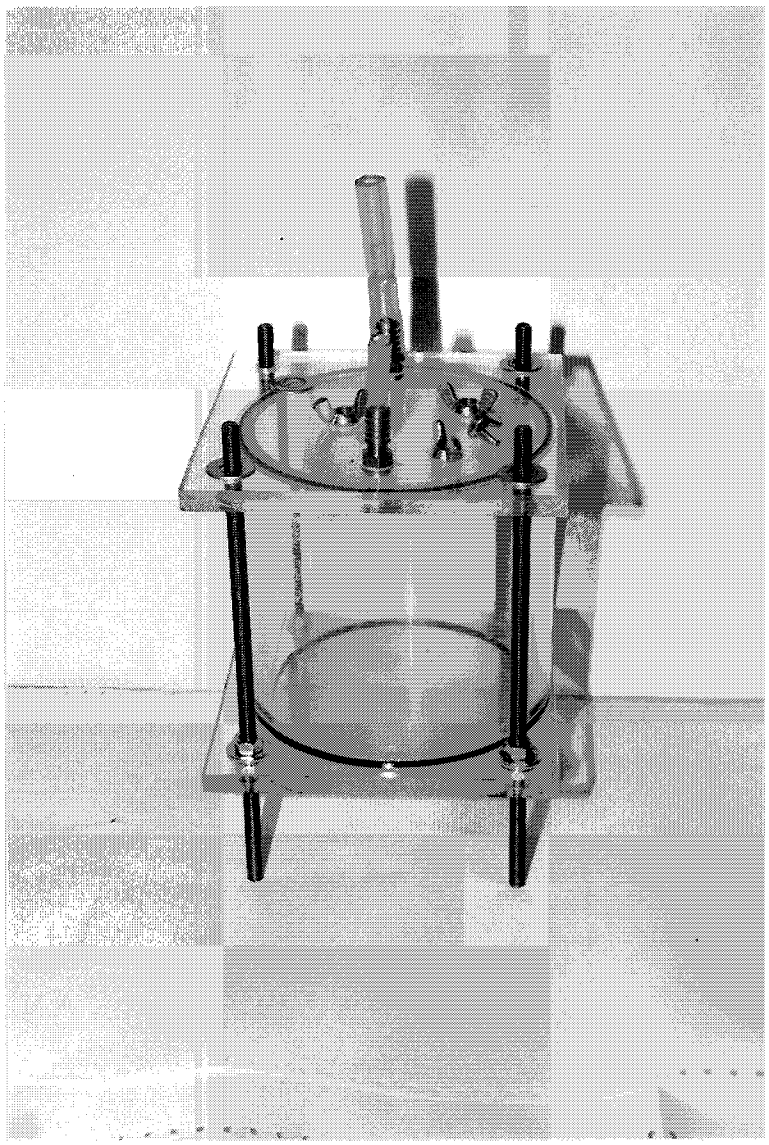

Figure 4.4 Chambre d'émanation No. 3

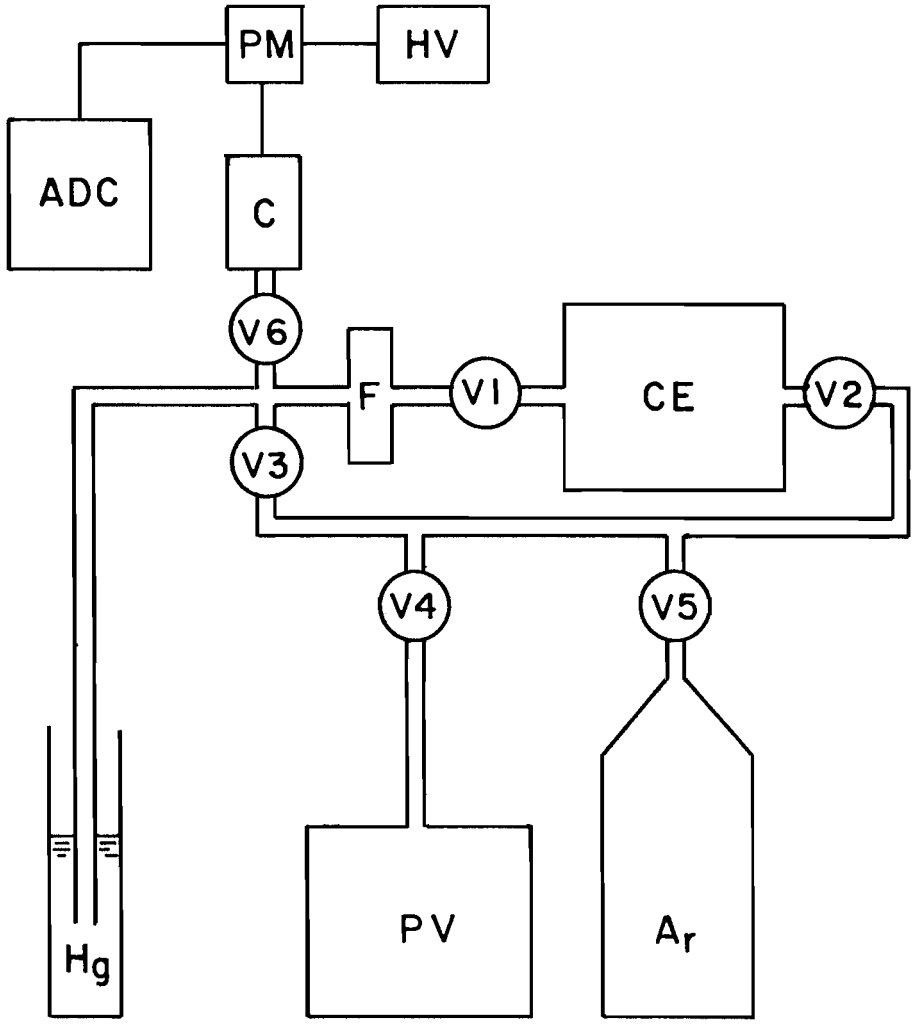

Figure 4.5 Schéma du système de mesure des taux d'émanation à l'aide d'un compteur proportionnel.

ADC = Amplificateur, discriminateur et une échelle de comptage
PM = Pré-amplificateur
HV = Haut voltage
F = Filtre
C = Compteur proportionnel
PV = Pompe à vide
V = Valve

pendant 3 heures après la fin du comptage. Après nombreuses utilisations du compteur, son mouvement propre augmente et il faut sabler l'intérieur pour le réduire.

Pour calibrer notre système nous avons utilisé un dépôt sec de radium d'une activité de 59 Bq. Ce dépôt a été obtenu par l'évaporation d'une solution-étalon contenant le radium et obtenue du "National Bureau of Standards" (Washington, D.C., USA). Ce dépôt a été placé dans la chambre d'émanation, comme s'il s'agissait d'un échantillon. Après un temps d'émanation qui a varié entre 1 et 5 jours, l'argon chargé du radon a été acheminé dans le compteur. L'efficacité ainsi mesurée a été de 0.09 coups par désintégration. L'étanchéité de la chambre a été vérifiée en mesurant l'efficacité pour différents temps d'émanation. Les résultats obtenus obéissent à loi théorique:

$$A(t) = AI * (1 - \exp(- C*t))$$

où: A(t) est l'activité après temps d'émanation t

AI est l'activité après un temps infini

C est la constante radioactive du radon (2.1 E-6).

Le taux d'émanation par unité de masse a été calculé de la façon suivante:

$$TE\ (Bq/g/s) = AI * C/P$$

où P est le poids de l'échantillon en grammes.

Le taux d'émanation par unité de surface a été calculé d'une manière analogue:

$$TE\ (Bq/cm^2/s) = AI * C/S$$

où S est la surface totale de l'échantillon en cm^2.

L'étanchéité de la chambre d'émanation a été testée également, en faisant le vide et en observant un manomètre pendant 24 heures.

Pour déterminer la masse d'un échantillon il a été tout simplement pesé et sa surface a été obtenue par calcul à partir de ses dimensions.

La teneur en radium a été déterminée à l'aide d'un détecteur Ge(Li) couplé à un analyseur multicanaux. Les échantillons on été comptés typiquement pendant 20 000 secondes. Le spectre des rayons gamma a été analysé à l'aide d'un programme d'ordinateur qui localise les photopics, calcule les surfaces, identifie les radioisotopes qui sont présents et calcule les activités.

Pour ces calculs nous avons utilisés le pic de 186 keV du radium lui-même et les pics de 352 keV du Pb-214 et de 609 keV du Bi-214. Ces deux derniers radioisotopes sont les produits de filiation du radon.

La surface du pic de 186 keV a été corrigée pour l'interférence due à U-235. Nous avons supposé que U-235 et U-238 sont en équilibre radioactif et dans ce cas il faut diviser la surface mesurée par 1.6 pour obtenir la fraction de la surface qui correspond à Ra-226.

En général, un bon accord a été constaté entre les activités calculées à partir du pic de 186 keV et celles calculées à partir des pics de 352 et 609 keV. Les pics secondaires du Bi-214 et du Pb-214 ont fournis les activités semblables à celles citées en haut.

5. ORIGINE DES ECHANTILLONS.

Les échantillons étudiés ont été obtenus de plusieurs sources:

1. Les échantillons No. 15 à 25, 29, 30, 37 à 47 ont été achetés dans les magasins des matériaux de construction dans la région de Montréal.

2. Les échantillons No. 4 à 7 ont été obtenus du Dr. Ramesh Josh de l'Université de Calgary.

3. Les échantillons No. 1 à 3, 12 à 14, 18, 26 à 28, 31 et 50 ont été ramassés à l'Ecole Polytechnique aux cours de rénovation des locaux.

4. Les échantillons No. 32 à 36 on été obtenus du laboratoire de structures de génie civil de l'Ecole Polytechnique. Leur composition chimique est bien connue. Le premier chiffre représente en kg/m^3 le poids du ciment, le deuxième celui de l'eau, le troisième du sable et le dernier des pierres.

5. Les échantillons No. 9 à 11 ont été ramassés à proximité de l'Ecole Polytechnique.

6. L'échantillon No. 51 à été prêté par le génie minérale de l'Ecole Polytechnique.

7. Les échantillons No. 52 à 57 ont été collectés à Mascouche dans un nouveau développement.

6. DESCRIPTION DES ECHANTILLONS

ECHANTILLON #1

Brique granuleuse de béton, rugueuse, grise avec quelques roches roses, blanches et gris pâle, séparée par des bulles d'air dispersées. Forme cubique rectangulaire uniforme: (19.9 cm x 9 cm x 5.5 cm), sa masse est de: 175.5g.
Nombre: 3 briques.

ECHANTILLON #2

Brique de ciment uniforme lisse, grise avec des petits points noirs, cubique rectangulaire avec une cavité sur une surface de dimension: (9.5 cm x 6.8 cm x 2.7 cm), sa masse est de 284g. Nombre: 3 briques.

ECHANTILLON #3

Plâtre (gyproc) blanc entre deux cartons gris sous forme de feuilles avec des bulles d'air dispersées, coupé en plusieurs morceaux de: (15.3 cm x 11.8 cm x 1.5 cm) et (29 cm x 21 cm x 1.5 cm), sa masse est de: 161.7g. Nombre de morceaux: 9.

ECHANTILLON #4

Plâtre (gyproc) blanc entre deux cartons gris pâle, sous forme de feuilles uniformes avec des bulles d'air dispersées, coupé en deux morceaux de: (6.7 cm x 14.5 cm x 1 cm), sa masse est de 132g chacun.

ECHANTILLON #5

Plâtre (gyproc) gris clair entre deux cartons gris et beige sous forme de feuilles uniformes avec des bulles d'air dispersées, dimension (15 cm x 7.5 cm x 1.3 cm), sa masse est de: 142g chacun.

ECHANTILLON #6

Plâtre (gyproc) gris foncé entre deux cartons beige sous forme de feuilles uniformes avec des bulles d'air dispersées, deux morceaux de: (8 cm x 7.5 cm x 1.3 cm) sa masse est de: 142g chacun.

ECHANTILLON #7

Plâtre (gyproc) gris entre deux cartons beige et gris sous forme de feuilles uniformes avec des bulles d'air dispersées, coupé en deux morceaux de: (15 cm x 7.5 cm x 1.2 cm) sa masse est de: 119g chacun.

ECHANTILLON #8

Plâtre (gyproc) entre deux feuilles de cartons beige et gris, sous forme de feuilles uniformes avec des bulles d'air dispersées, 4 morceaux de dimension et masse: (11 cm x 8.5 cm x 1 cm) 83g; (10 cm x 11 cm x 1 cm) 106g; (1.2 cm x 10.5 cm x 1 cm) masse 114g; (15 cm x 11.5 cm x 1 cm) 148g.

ECHANTILLON #9

Gros gravier avec des clivages, couleur gris foncé et des régions gris pâle coupé en morceaux de différentes grandeurs, non uniforme, dures et pointus, sa masse est de 1012g.

ECHANTILLON #10

Gravier moyen avec des clivages, couleur gris clair et des régions blanches et cristallinnes, coupé en petits morceaux de même grandeur, durs et pointus, sa masse est de 1065g.

ECHANTILLON #11

Gravier fin en poudre et en petites roches avec des régions blanchâtres de forme non uniforme, sa masse est de: 481g.

ECHANTILLON #12

Isolant en laine en fibre de verre, couleur rose, coupé en morceaux irréguliers, sa masse est de: 50g.

ECHANTILLON #13

Isolant sous forme de cheveux satinés de couleur blanche, sa masse est de: 120g.

ECHANTILLON #14

Isolant en laine plus dure de couleur jaune en fibre de verre, sa forme feuilletée, coupée en morceaux rectangulaires de (13 cm x 22 cm x 3,5 cm) de masse: 86,5g et les deux autres en (13.5 cm x 14.5 cm x 3.5 cm) sa masse est de: 73g chacun.

ECHANTILLON #15

Céramique dure pour plancher de surface rugueuse, couleur bleu avec des petits points blancs, de forme rectangulaire, l'autre face est brune, 5 céramiques de (20 cm x 10 cm x 0.7 cm) et sa masse est de: 309.5g chacune. Fabriqué en Italie.

ECHANTILLON #16

Céramique murale dure de surface lisse, grise avec des fleurs grises et bleues, de forme rectangulaire, l'autre face est brune, 4 céramiques de (19.8 cm x 13.2 cm x 0.7 cm) et la masse est de: 396g chacune. Fabriqué en Italie.

ECHANTILLON #17

Brique rugueuse, jaune beige de forme rectangulaire, 2 morceaux de: (23.0 cm x 11.2 cm x 6.2 cm) sa masse est de: 3580g chaque.

ECHANTILLON #18

Bois en épinette jaune avec des noeuds brun de forme rectangulaire, 2 morceaux (13.5 cm x 8.7 cm x 4.2 cm) sa masse est de: 201g chacun.

ECHANTILLON #19

Marbre blanc avec des touches grises lisse de forme rectangulaire avec un inclinaison de chaque côté, 4 morceaux de: (14 cm x 8.8 cm x 1.4 cm) sa masse est de: 461.5g chacun.

ECHANTILLON #20

Céramique murale lisse, grise avec un fond beige, la forme est carrée, 3 morceaux de (15.3 cm x 15.3 cm x 0.4 cm) sa masse est de: 187g chacune. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #21

Céramique murale lisse blanche avec des petits carreaux bleu et beige clair, la forme est carré, 3 morceaux de: (15.3 cm x 15.3 cm x 0.4 cm) la masse est de: 194.5g chacune, le fond de la céramique est beige. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #22

Brique réfractaire jaune beige, dure, lisse et poussièreuse, forme uniforme, 4 morceaux de: (11.3 cm x 11.3 cm x 3 cm) sa masse est de: 866.5g chacune.

ECHANTILLON #23

Vermivulite en morceaux de différentes grandeurs, forme uniforme, feuilletée, couleur beige, jaune, blanc et brun foncé, brillant, se brise et s'écrase facilement, sa masse est de: 236g.

ECHANTILLON #24

Brique pleine, dure uniforme, rugueuse, forme cubique rectangulaire, couleur rouge avec des petits morceaux gris, dimension: (29.7 cm x 6.8 cm x 6.5 cm) sa masse est de: 2325g.

ECHANTILLON #25

Brique pleine, dure uniforme, rugueuse, forme cubique rectangulaire, couleur mauve avec des petits points gris, dimension: (20.7 cm x 6.8 cm x 6.5 cm), sa masse est de: 2388g.

ECHANTILLON #26

Plâtre (gyproc) blanc entre deux cartons gris pâle et foncé, sous forme de feuilles uniformes avec des bulles d'air, coupés en 12 morceaux de: (10 cm x 10 cm x 1 cm), sa masse est de: 72g chacun. Fabriqué au Canada par les Industries Westrock Ltée.

ECHANTILLON #27

Bois en pin, couleur beige avec des noeuds brun, coupé en 6 morceaux de forme cubique rectangulaire (18.3 cm x 9 cm x 4.5 cm) sa masse est de: 310g chacun.

ECHANTILLON #28

Vitre transparente verte lisse, coupée en 8 morceaux de différentes grandeurs, la masse totale est de: 314g.

ECHANTILLON #29

Granite vitreux et lisse, de l'autre côté rugueux de couleurs noir, blanc, beige et brun, très dur, coupé en 4 morceaux rectangulaires avec les côtés obliques, les dimensions sont: (13.5 cm x 10 cm x 1.8 cm) et la masse est: 603.5g.

ECHANTILLON #30

Brique en argile, brune, rouge rugueuse avec des régions mauves, il y a des cavités sur un côté, d'une forme rectangulaire avec trois trous de 4 cm de diamètre, les dimensions sont: (20 cm x 9 cm x 8.8 cm), la masse est de: 1742g chacune. Il y a 4 briques.

ECHANTILLON #31

Bloc de béton gris pâle en béton avec deux grands trous rectangulaires de (15 cm x 8.5 cm), la forme du bloc est cubique rectangulaire de dimension (39 cm x 14 cm x 18.8 cm) la masse est de 3480g.

ECHANTILLON #32

Béton en bloc gris pâle avec des roches grises foncées, lisse, de forme cylindrique dont le diamètre est de: 15 cm et 2.5 cm de haut, sa masse est de: 1124g.

ECHANTILLON #33

Béton en bloc gris pâle avec des roches grises et bleues foncées, lisse de forme cylindrique dont le diamètre est de: 15 cm et 2.5 de haut, sa masse est de: 1040g.

ECHANTILLON #34

Béton en bloc gris pâle avec des roches grises et bleues pâle, lisse de forme sylindrique dont le diamètre est de: 15 cm et 2,5 cm d'épaisseur, sa masse est de: 1096g.

ECHANTILLON #35

Béton en bloc gris pâle avec des roches grises, blanches et brunes, lisse de forme cylindrique, le diamètre est de: 15 cm et 2.5 cm d'épaisseur, sa masse est de: 1190g.

ECHANTILLON #36

Béton en bloc gris pâle avec des roches grises, bleues et brunes, lisse de forme cylindrique, le diamètre est de: 15 cm et 2.5cm d'épaisseur, sa masse est de: 1106g.

ECHANTILLON #37

Céramique murale grise unie avec fond brun dur, la face est lisse, de forme carré, paquet de 10 tuiles, de dimension (15 cm x 15 cm x 0.5cm) chacune, masse totale: 2895g.

ECHANTILLON #38

Céramique murale beige avec fleurs orange clair et brune, le fond est beige dur, la face est lisse, de forme carré, paquet de 10 tuiles, dimension (15 cm x 15 cm x 0.3 cm) chacune, masse totale: 1670g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #39

Céramique murale grise pâle unie, le fond est beige clair et dur, la face est lisse, de forme carré, paquet de 10 tuiles, de dimension (15 cm x 15 cm x 0.3 cm) chacune, masse totale: 1708g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #40

Céramique pour plancher en terre cuite brun rouge, dure et rugueuse, de forme carré, paquet de 10 tuiles, de dimension (15.3 cm x 15.3 cm x 0.8 cm) chacune, masse totale: 5180g. Fabriqué en Angleterre.

ECHANTILLON #41

Céramique pour plancher grise unie avec fond beige, de forme carré, lisse, paquet de 10 tuiles, de dimension (15 cm x 15 cm x 0.5 cm) chacune, masse totale: 2990g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #42

Céramique pour plancher brune unie avec fond beige brun, rugueuse de forme rectangulaire, paquet de 10 tuiles, de dimension (19.8 cm x 9.8 cm x 0.6 cm) chacune, masse totale: 3405g. Fabriqué au Portugal.

ECHANTILLON #43

Céramique pour plancher beige unie avec fond beige verdâtre, lisse, de forme rectangulaire, paquet de 10 tuiles, de dimension (19.8 cm x 9.8 cm x 0.6 cm) chacune, masse totale: 3200g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #44

Céramique pour plancher blanche unie avec fond champagne, de forme rectangulaire, lisse, paquet de 10 tuiles, de dimension (20.2 cm x 9.7 cm x 0.6 cm) chacune, masse totale: 3207g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #45

Céramique pour plancher rouge avec petits points gris, le fond est brun en terre cuite rugueuse, paquet de 10 tuiles, de dimension (15 cm x 7.5 cm x 0.6 cm) chacune, masse totale: 2028g. Fabriqué en Italie.

ECHANTILLON #46

Céramique murale grise avec des taches grises plus foncées, lisse, le fond est beige, paquet de 4 (coupé en deux), dimension (15.2 cm x 9.7 cm x 0.4 cm) chaque morceaux, masse totale: 995g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #47

Céramique murale blanche avec motif gris, lisse, le fond est beige, paquet de 4 (coupé en deux), dimension (15.2 cm x 9.7 cm x 0.4 cm) chaque morceaux, masse totale: 930g. Fabriqué au Brésil.

ECHANTILLON #48

Ardoise grise avec des taches blanches, surface non uniforme rugueuse, l'autre surface est lisse, 1 morceau coupé en quatre, les dimensions du morceau (21.4 cm x 14 cm x 0.5 cm) masse totale: 515g.

ECHANTILLON #49

Vitre transparente verte, lisse et unie, paquet de 8 morceaux, de dimension (10.7 cm x 11.5 cm x 0.3 cm), forme presque carré, masse totale: 719g.

ECHANTILLON #50

Panneau acoustique pour faux plafond, blanc et gris avec des trous d'air, fait en carton mélangé avec une substance poussiéreuse et dure, se coupe facilement et s'émiette. Grand morceau coupé en 12, de forme carré, de dimension (14cm x 14 cm x 1.5 cm) chacun, masse totale: 645g.

ECHANTILLON #51

Pierre Ponce dure et de forme irrégulière, il y a 2 trous de 3 cm de diamètre l'un à côté de l'autre, la couleur est grise, sa dimension est (≃ 13 cm x 9.5 cm x 5 cm) sa masse est de: 404g.

ECHANTILLON #52 à 57

Béton de fondation de forme irrégulière et de masse variante de 1250 à 2300g.

7. LES RESULTATS ET DISCUSSIONS.

Les activités du Ra-226 dans les échantillons que nous avons étudiés ainsi que les coefficients d'émanation du radon de ces matériaux sont indiqués dans le tableau 7.1. Si on examine les valeurs qui s'y trouvent on constate que les activités dans les gypses canadien varient de moins de 4 à 43 Bq/kg. Si on compare ces valeurs avec les concentrations du Ra dans les gypses de différents pays (tableau 1.1) on constate que les gypses canadiens contiennent des concentrations tout à fait comparables.

On constate également que les gypses qui contiennent les cendres volantes (échantillons No. 4,6 et 7) contiennent nettement plus du radium que les gypses naturels (échantillons No. 3, 5, 8 et 24) dont la teneur en Ra est inférieure à notre limite de détection. La même situation prévaut dans d'autres pays (tableau 1.1).

La concentration mesurée de Ra dans le bois est très faible (moins que 4 Bq/kg), une constatation qui est confirmée par les données fournies par les Nations Unies (UN82).

Pour la laine minérale, nous avons obtenu les concentrations allant de 5 à 51 Bq/kg. Les chercheurs scandinaves (UN82, Mu84, AcDBDJ85) citent les concentrations moyennes qui s'étalent de 13 à 40 Bq/kg avec une moyenne pondérée de 25 Bq/kg. Nos résultats rejoignent ces derniers.

Les graviers que nous avons analysés contiennent 8 à 13 Bq/kg de radium, tandis qu'en Hollande et en Italie les chercheurs (VeCo84, AcDBDJ85) ont trouvé les activités qui varient entre 9 et 14 Bq/kg. Les briques que nous avons étudiées ont une teneur en Ra très variable (4 à 130 Bq/kg) comme d'ailleurs celles des autres pays (7 à 152 Bq/kg). L'activité des tuiles, généralement importées, s'échelonne de 31 à 121 Bq/kg. L'activité moyenne est de 63 Bq/kg. Comparons ces chiffres avec leurs analogues dans le tableau 1.1 (36 à 91 Bq/kg) pour constater que ces activités sont très similaires.

Le verre canadien contient peu de radium (3.1 Bq/kg) comme c'est le cas en Hollande (AcDBDJ85). Le granite dans lequel nous avons dosé le radium (8.7 Bq/kg) semble être beaucoup moins riche en ce radioélément important que les granites européens (10 à 117 Bq/kg). Etant donné que nous avons analysé un seul échantillon, il peut s'agir d'un hasard.

Tableau 7.1 **Concentrations de radium-226 (en Bq/kg) dans les matériaux de construction et les coefficients d'émanation.**

Matériau	NE	Ra-226 Bq/kg	CE %
Béton	1	4.2(2)	9.1
Béton	2	5.5(0.1)	7.8
Gypse "Sheetrock"	3	<4	>30
Gypse 30% CV Wabannun CT	4	28.5(1)	2
Gypse 0% CV	5	<4	>11
Gypse 30% CV Sundance CT	6	43(4)	2.3
Gypse 30% CV Forestberg CT	7	26(1)	1.8
Gypse	8	<4	>14
Gravier gros	9	13(1)	5.0
Gravier moyen	10	8(1)	8.0
Gravier fin	11	8.5(2)	12.
Laine minérale rose	12	<26	>3
Laine minérale blanche	13	<5	>15
Laine minérale jaune	14	51(4)	0.2
Tuile bleu Italie	15	56(4)	0.4
Tuile grise Italie	16	50(2)	0.2
Brique jaune	17	130(21)	0.2
Bois épinette	18	<4	---
Marbre	19	<4	>1
Tuile blanche, Brésil	20	71(2)	0.2
Tuile blanche, Brésil	21	54(5)	0.9
Brique réfractaire	22	92(2)	0.6
Vermiculite	23	<10	>6
Brique rouge en béton	24	4.2(0.4)	8.0
Brique brune en béton	25	4.3(0.7)	24.
Gypse Westroc Ltée	26	<4	>55
Bois pin	27	<4	---
Verre	28	<4	---
Granite	29	8.7(1.7)	4.3
Brique en argile	30	37(4)	0.8
Brique grise en béton	31	4.9(0.9)	32.
Béton 30c19e87s106p	32	7.5(0.9)	38.
Béton 40c18e66s104p	33	45(1)	20.
Béton 41c19e77s106p	34	8(1)	28.
Béton 34c19e84s106p	35	6.9(0.1)	36.
Béton 29c19e90s106p	36	6.5(1.7)	37.
Tuile grise, Italie	37	56(5)	1.2
Tuile blanche, Brésil	38	79(6)	0.7
Tuile blanche, Brésil	39	58(3)	0.6
Tuile rouge, Angleterre	40	33(2)	1.0
Tuile grise, Brésil	41	44(2)	1.1

Tuile brune, Portugal	42	61(2)	0.4
Tuile brune, Brésil	43	67(2)	0.4
Tuile blanche, Brésil	44	121(11)	0.2
Tuile rouge, Italie	45	31(2)	0.3
Tuile grise pâle, Brésil	46	73(2)	0.9
Tuile beige, Brésil	47	69(4)	0.3
Ardoise	48	37(2)	0.1
Verre	49	3.1(1.0)	1.6
Panneau acoustique,Canada	50	44(1)	16.
Ponce	51	44(14)	7.3
Béton de fondation	52	7(4)	14
Béton de fondation	53	8(4)	38
Béton de fondation	54	11(5)	32
Béton de fondation	55	11(9)	21
Béton de fondation	56	5(4)	20
Béton de fondation	57	8(3)	10

Notes: CT = Centrale thermique, CV = Cendres volantes
Les valeurs entre les parenthèses expriment l'écart type
NE = Numéro échantillon

Les bétons ont une teneur en Ra qui varie entre 4 et 45 Bq/kg avec une moyenne et l'écart type de 10(10). Il s'agit de valeurs semblables à celles du tableau 1.1.

En résumé, les concentrations de radium dans les matériaux de construction fabriqués au Canada sont à peu près les mêmes que celles des autres pays.

Un coefficent d'émanation (CE) est défini comme la fraction du radon qui s'échappe du matériau par rapport à sa teneur en radium. Un CE élevé indique que le matériau libère facilement le radon. Nous avons mesuré des CE qui varient du 0.1% à 38%. Selon le tableau 3.1 les CE oscillent entre 0.07% et 38%.

En général les matériaux poreux (les bétons, les gypses, le panneau acoustique) ont des CE élevés tandis que les matériaux préparés par la fusion (les verres, les granites) ou le frittage (les briques, les tuiles) ont des CE faibles. On arrive à la même conclusion en examinant les CE dans le tableau 3.1.

Les matériaux naturels granulaires où poreux (les graviers et le ponce) ont des CE moyens (5 à 12 %). Le même résultat (7%) a été obtenu par Ingersoll (IN83). Les matériaux naturels denses, comme l'ardoise présente un CE très faible (0.1%).

Examinons maintenant les taux d'émanation (TE) de radon (tableau 7.2). Ces taux sont exprimés soit par unité de masse, soit par unité de surface.

Les bétons canadiens ont des TE qui varient de 0.8 à 19 nBq/g/s avec une moyenne et l'écart type de 5.3(4.6). Les bétons qui ont été analysés par d'autres chercheurs (tableau 3.2) ont des TE moyens qui s'échelonnent de 2.2 à 10 nBq/g/s. La moyenne pondérée est de 6.9 nBq/g/s, une valeur très proche de la nôtre.

Les briques que nous avons étudiées dégagent du radon à des taux allant de 0.5 à 3.3 nBq/g/s avec une moyenne de 1.4(1.1). Les scientifiques qui ont mesuré les TE des briques ont trouvé les valeurs qui s'étalent du 0.2 à 4.1 nBq/g/s. Leur moyenne a été de 1.9 (1.7). Cette valeur est proche de notre résultat.

Les tuiles libèrent le radon à des taux qui varient entre 0.2 à 1.5 nBq/g/s. Le TE moyen est de 0.7(0.4) nBq/g/s. Malheureusement on ne peut pas comparer nos résultats avec les données dans la littérature scientifique, celles-ci n'étant pas disponibles.

Tableau 7.2 **Taux d'émanation de radon provenant des matériaux de construction.**

Matériau	NE	nBq/g/s	nBq/cm2/s
Béton	1	0.8(0.3)	1.5(0.5)
Béton	2	0.9(0.3)	1.4(0.5)
Gypse "Sheetrock"	3	2.6(0.9)	1.4(0.5)
Gypse 30% CV Wabannun CT	4	1.2(0.4)	0.6(0.2)
Gypse 0% CV	5	0.9(0.3)	0.5(0.2)
Gypse 30% CV Sundance CT	6	1.9(0.7)	1.0(0.4)
Gypse 30% CV Forestberg CT	7	1.0(0.4)	0.5(0.2)
Gypse	8	1.2(0.5)	1.0(0.4)
Gravier gros	9	1.4(0.3)	--------
Gravier moyen	10	1.3(0.4)	--------
Gravier fin	11	2.1(0.5)	--------
Laine minérale rose	12	1.7(0.7)	--------
Laine minérale blanche	13	1.6(0.5)	--------
Laine minérale jaune	14	0.2(0.1)	--------
Tuile bleu, Italie	15	0.5(0.3)	0.2(0.1)
Tuile grise, Italie	16	0.2(0.1)	0.4(0.1)
Brique jaune	17	0.5(0.2)	2.0(0.7)
Bois épinette	18	<0.1	<0.1
Marbre	19	0.1(0.5)	0.3(0.1)
Tuile blanche, Brésil	20	0.3(0.2)	0.2(0.1)
Tuile blanche, Brésil	21	1.0(0.3)	0.4(0.2)
Brique réfractaire	22	1.2(0.3)	2.7(0.8)
Vermiculite	23	1.2(0.4)	--------
Brique rouge en béton	24	0.7(0.2)	2.2(0.6)
Brique brune en béton	25	2.2(0.6)	6.9(1.7)
Gypse Westroc Ltée	26	4.6(1.4)	2.0(0.6)
Bois pin	27	0.2(0.2)	0.2(0.2)
Verre	28	<0.1	<0.1
Granite	29	0.8(0.2)	1.3(0.7)
Brique en argile	30	0.6(0.2)	1.3(0.5)
Brique grise en béton	31	3.3(0.9)	5.5(1.6)
Béton 30c19e87s106p	32	6.0(2.0)	8.0(2.0)
Béton 40c18e66s104p	33	19.(6.0)	22.(7.0)
Béton 41c19e77s106p	34	5.4(1.6)	6.9(2.1)
Béton 34c19e84s106p	35	5.2(1.5)	7.7(2.3)
Béton 29c19e90s106p	36	5.1(1.5)	6.6(2.0)
Tuile grise, Italie	37	1.5(0.5)	0.8(0.2)
Tuile blanche, Brésil	38	1.2(0.4)	0.5(0.2)
Tuile blanche, Brésil	39	0.8(0.3)	0.3(0.1)
Tuile rouge, Angleterre	40	0.7(0.2)	0.8(0.2)
Tuile grise, Brésil	41	1.0(0.3)	0.6(0.2)
Tuile brune, Portugal	42	0.5(0.2)	0.4(0.1)

Tuile brune, Brésil	43	0.6(0.2)	0.5(0.2)
Tuile blanche, Brésil	44	0.6(0.2)	0.5(0.1)
Tuile rouge, Italie	45	0.2(0.1)	0.2(0.1)
Tuile grise pâle, Brésil	46	1.4(0.4)	0.2(0.2)
Tuile beige, Brésil	47	0.5(0.2)	0.3(0.2)
Ardoise	48	0.1(0.1)	0.1(0.1)
Verre	49	0.1(0.1)	0.1(0.1)
Panneau acoustique,Canada	50	15.(4.3)	1.5(0.4)
Ponce	51	6.8(2.1)	7.8(2.4)
Béton de fondation	52	2.1(0.6)	1.2(0.3)
Béton de fondation	53	6.3(1.8)	2.9(0.8)
Béton de fondation	54	7.3(2.1)	3.7(1.0)
Béton de fondation	55	5.0(1.4)	2.0(0.6)
Béton de fondation	56	4.2(1.2)	1.3(0.4)
Béton de fondation	57	3.3(0.9)	1.6(0.4)

Note: Les valeurs entre les parenthèses expriment l'écart type,
CT = Centrale thermique, CV = Cendres volantes
NE = Nombre d'échantillons

Nous pouvons également comparer les TE par unité de surface, mesurés par nous avec ceux du tableau 3.3.

Pour les bétons nous avons obtenu les valeurs s'échelonnant entre 1.2 et 22 $nBq/cm^2/s$, dont la moyenne est de 5(6). Des chercheurs d'autres pays citent pour les bétons des TE qui varient entre 0.1 et 670 $nBq/cm^2/s$. Certains de ces résultats ont été mesurés en se servant des bétons dont la teneur en radium est anormalement élevé.

Il est difficile de comparer directement nos résultats avec ceux de nos collègues, étant donné que les TE dépendent non seulement de la teneur en radium mais aussi de l'épaisseur du béton.

Les briques dégagent le radon à des taux qui oscillent entre 1.3 et 6.9 $nBq/cm^2/s$ avec une moyenne de 3.4(2.2). Des taux publiés varient de 0.2 à 76. Le nombre de mesures des TE étant très limité, il est difficile d'arriver à une conclusion définitive à ce sujet.

Pour les gypses nos valeurs s'échelonnent entre 0.5 et 2.0 $nBq/cm^2/s$ avec une moyenne de 1.0(0.6). Les gypses naturels "étrangers" dégagent le radon à des TE qui varient entre 0.03 et 19 $nBq/cm^2/s$. Encore ici, une comparaison directe s'avère difficile.

Parmi les matériaux que nous avons étudiés, l'émanateur le plus fort est le béton (échantillon No. 33) tandis que les émanateurs les plus faibles sont le bois (échantillon No. 18) et le verre (échantillon No. 28). Le premier parce qu'il contient peu de radium et le deuxième grâce à sa structure qui retient le radon à l'intérieur du matériau.

Par la suite, nous avons utilisé la méthode de régression linéaire pour déterminer s'il y a une corrélation entre la teneur en radium d'un matériau et son pouvoir émanateur. Un petit programme d'ordinateur à été employé pour calculer les coefficients de corrélation linéaire (tableau 7.3).

Tableau 7.3: Les coefficients de corrélation entre la teneur en radium et le taux d'émanation.

Matériaux	Coefficient de corrélation	
	Ra Vs. TEM	Ra Vs. TES
Tous	- 0.30	- 0.20
Bétons	+ 0.94	+ 0.88
Briques	- 0.3	+ 0.59
Gypses	+ 0.99	+ 0.99
Graviers	- 0.31	------
Tuiles	+ 0.14	- 0.07

TEM = Taux d'émanation par unité de masse

TES = Taux d'émanation par unité de surface

En examinant les résultats du tableau 7.3, on constate qu'il n'y a pas une corrélation significative entre les teneurs en radium et les taux d'émanation de briques, de graviers, de tuiles et de tous les matériaux considérés ensemble. Par contre on observe une bonne corrélation entre ces derniers dans le cas des bétons et des panneaux de gypse. On croit que cette différence s'explique par le fait que les bétons et les panneaux de gypse ont une structure similaire et dans ce cas les TE dépendent principalement de la teneur en radium.

Dans le cas des autres matériaux les structures sont fort différentes et ce sont elles qui dominent.

Il faut souligner, que nous avons étudié un nombre limité de matériaux de construction qui proviennent surtout du Québec et que les résultats recueillis doivent être considérés comme "préliminaires". Une étude plus vaste serait nécessaire pour avoir une idée plus juste de la situation qui existe au Canada dans le domaine de l'émanation et de la radioactivité des matériaux de construction.

Finalement, les taux d'émanation que nous avons mesurés ont été utilisés pour évaluer la contribution des matériaux de construction à la teneur en radon de l'air à l'intérieur des maisons.

Cette simulation numérique a été réalisée pour une maison canadienne typique par Yuill & Associates dont le rapport se trouve en annexe A. Tous les détails qui concernent le modèle de la maison sont indiqués dans leur rapport. Les taux d'émanation utilisés dans la modélisation sont fournis dans le tableau 7.4.

Tableau 7.4 **Les taux d'émanation utilisés en modélisation de la contribution des matériaux à la teneur en radon d'une maison canadienne typique.**

Matériau	Moyen	Maximum	Unité
Béton	1.5	22.0	$nBq/cm^2/s$
Bois	0.1	0.2	$nBq/cm^2/s$
Brique	1.3	2.0	$nBq/cm^2/s$
Réfractaire	2.7	2.7	$nBq/cm^2/s$
Gypse	1.0	2.8	$nBq/cm^2/s$
Tuiles	0.5	0.8	$nBq/cm^2/s$
Verre	0.1	0.1	$nBq/cm^2/s$
Laine Minérale	1.7	1.7	nBq/g/s

En se servant de ces valeurs Yuill and Associates ont calculé des concentrations indiquées au Tableau 7.5

Tableau 7.5 **Concentration de radon (en Bq/m^3)** dans l'air due aux matériaux de construction.

Avec taux d'émanation		
Pièce	Moyen	Maximum
Sous-sol	0.15	1.32
Salon	0.10	0.64
Corridor	0.08	0.21
Chambre No.1	0.06	0.16
Salle de Bain	0.09	0.24
Chambre No.2	0.08	0.22
Chambre No.3	0.06	0.18
Moyen	0.12	0.85

Si on compare ces valeurs avec les concentrations mesurées du radon dans l'air des maisons au Canada dont la moyenne géométrique varie de 5.2 à 57.0 Bq/m3 (LeMcWa84) on constate que:

1. La teneur calculée en utilisant le TE moyen correspond à 2% (0.2%) de la concentration mesurée la plus faible (élevée).

2. La teneur calculée en se servant du TE maximum est égale à 16% (1.5%) de la concentration mesurée la plus faible (élevée).

La concentration du radon dans l'air extérieur a été mesurée à Montréal et elle varie entre 0.7 et 30 Bq/m3 avec une moyenne de 4.4 Bq/m3 (ChZi90). Si on compare ces dernières valeurs aux calculs on s'aperçoit que la teneur moyenne calculée est égale à 17.7% de la concentration la plus faible mesurée, à 2,7% de la moyenne et à 0.4% de la plus forte.

Pour la teneur calculée maximale on obtient 121%, 19% et 2.8% dans les mêmes circonstances. On constate que les concentrations calculées sont du même ordre de grandeur que l'activité du radon dans l'air extérieur.

A Montréal la concentration moyenne géométrique mesurée dans les maisons est égale à 10.7 Bq/m3 (LeMcWa84), celle dans l'air extérieur est égale à 4.4 Bq/m3 (ChZi90) tandis que la concentration moyenne calculée est égale à 0.12 Bq/m3.

En se basant sur ces chiffres il semble que la source la plus importante de radon dans l'air des maisons est le sol (58%), suivi de l'air extérieur (41%) et des matériaux de construction (1%). La contribution d'autres sources comme l'eau potable, le gaz naturel et les produits de consommation est, à notre avis, négligeable.

Cette opinion rejoint les conclusions exprimées par Ingersoll (1983), Kahn et col. (1983), Singh et Ghumman (1988) et Quindos et col. (1987).

Il faut souligner, que les taux d'émanation ont été mesurés en utilisant une chambre d'émanation et des morceaux aux dimensions modestes. Il est possible que pour les bétons des mesures faites "in situ" fourniraient des valeurs plus élevées.

On sait que la longueur de diffusion du radon dans le béton est de l'ordre de 10 cm. (Nous avons trouvé dans la littérature scientifique quatre (4) valeurs pour la longueur de diffusion: Culot et col. (1976): 7.6 et 12.7cm; Zapalac (1983) 12.6 et 16.9 cm).

Ceci signifie que dans le béton le radon peut diffuser vers la surface des profondeurs qui dépassent 10 cm et que des "petits" échantillons générent les TE qui sont probablement trop faibles.

Dans un scénario pessimiste, en utilisant les TE maximaux dans les calculs (Tableau 7.5), on obtient une teneur moyenne de 0.85 Bq/m3 (1.32 Bq/m3 dans le sous-sol).

Dans ce cas, la contribution des matériaux de construction à la teneur moyenne du radon dans les maisons serait égale à 8% (12% dans le sous-sol) de la concentration moyenne; une valeur qui reste acceptable. On peut conclure que les matériaux de construction constituent une source faible de radon dans les maisons canadiennes.

8. CONCLUSIONS

Après avoir dosé le radium dans les 57 échantillons de matériaux de construction en vente au Canada et après avoir mesuré leurs taux d'émanation du radon, nous avons conclu que:

1. Les concentrations de radium dans les matériaux canadiens sont très similaires à celles qu'on a mesurées dans les autres pays. Elles se situent entre 3.1 et 130 Bq/kq.

2. Les taux d'émanation que nous avons mesurés varient de 0.1 à 19 nBq/g/s et de moins que 0.1 à 22 nBq/cm2/s. Ces taux ressemblent aux taux publiés dans la littérature scientifique.

3. Selon nos résultats, les émanateurs les plus importants sont les briques, suivis par les bétons, les gypses et les tuiles.

4. Les coefficients d'émanation des matériaux varient considérablement et s'échelonnent entre 0.1% et 38%.

5. Une bonne corrélation existe entre la teneur en radium et les taux d'émanation des bétons et des panneaux de gypse. Pour les autres matériaux il n'y a pas de corrélation entre les deux.

6. Les concentrations calculées du radon dans l'air d'une maison canadienne typique venant des matériaux de construction varient entre 0.06 et 1.32 Bq/m^3 dépendant du taux d'émanation utilisé et de la pièce de la maison.

7. La contribution des matériaux de construction à la teneur du radon dans une maison s'échelonne de 0.2% à 16% selon l'hypothèse avancée. Par conséquent, ils constituent une source faible du radon dans les habitations au Canada.

9. RECOMMANDATIONS

L'étude que nous avons réalisée est restreinte géographiquement essentiellement au Québec et le nombre des matériaux étudiés (57) est plutôt limité. Pour avoir une idée plus complète de la situation globale il serait souhaitable de:

1. Doser le radium et mesurer les taux d'émanation des matériaux de construction qui proviennent d'autres provinces canadiennes.

2. Réaliser des mesures de taux d'émanation des bétons "in situ" dans les maisons.

10. BIBLIOGRAPHIE

Une recherche bibliographique très complète a été effectuée à l'aide des "Chemical Abstracts". Elle couvre la période allant de 1905 à 1990. Les mots clés employés sont "radon", "radium", "building materials" et "construction matérials". Les références dans le texte sont citées en utilisant 2 façons.

1- Noms de famille de 2 premiers auteurs suivi de l'année de publication en parenthèse

   p.e.: Butler (1980)

2- Deux premières lettres du nom de famille de 3 auteurs (au maximum) suivi de l'année de publication

   p.e.: AuShKe74, identifie la publication de Auxier J.A., Shimpaugh W.H., Kerr G.D., Christian D.J., 1974,...

Les articles sont rangés dans l'ordre alphabétique.

Certaines publications se trouvent dans des ouvrages collectifs tels les compte-rendu de conférences et livres écrits avec la collaboration de plusieurs chercheurs. Dans ce cas, pour alléger la présentation, la référence à cet ouvrage collectif est présentée sous une forme abréviée, par exemple:

Abu-Jarad, F., Fremlin, J.H. book SSN79

On trouve l'ouvrage en question en annexe intitulé: "Livres sur le Radon".

Le numéro de la citation dans le "Chemical Abstract" (p.e., 93: 122237) dans le "Engineering Index" (p.e., EI 8702016397) ou dans le "Nuclear Science Abstract" (p.e., 31-8614) sont souvent indiqués à la fin d'une référence.

Abu-Jarad F., Fremlin J.H., 1979, Track etch detectors for radon measurements inside houses and for building material, book SSN79 599-607,93:122237.

Abu-Jarad F.A, 1988, Application of nuclear track detectors for radon related measurements, Nucl.Tracks Radiat. Meas. 15, 525-34, 111:29658.

Abu-Jarad F., Fremlin J.H., 1983, Effect of internal wall covers on radon emanation inside houses, Health Phys., 44(3), 243-8, 98(20): 168911v.

Abu-jarad F., Fremlin J.H., 1983, The indoor concentration of radon daughter in three different areas of the U.K., Health Phys., 44(5) 479-85, 98:223820.

Ackers J.G., den Boer J.F., de Jong P., Wolschrijn R.A., 1985, Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in the Netherlands, Sci.Total Env. 45, 151-6.

Austin S.R., Droullard R.F., 1978, Radon emanation from domestic uranium ores determined by modification of the closed-can gamma-only assay method, report RI8264, U.S. Bur. Mines, 65p.

Auxier J.A., Shinpaugh W.H., Kerr G.D., Christian D.J., 1974, Preliminary studies of the effects of sealants on radon emanation from concrete, Health Phys. 27,390-2.

Barretto P.M.C., Clark R.B., Adams J.A.S., 1972, Physical characteristics of Rn-222 emanation from rocks soils and minerals, Book NRE82,731-9.

Blaton-Albicka K., Pensko J., 1981, Assessment of radon exhalation rates in dwellings in Poland, Health Phys. 41, 548-51, 95:140600

Boltwood B.B., 1905, The origin of Radium, Phyl.Mag.Jour.Sci 9(6)603-13.

Boltwood B.B., 1907, On the ultimate disintegration products of the radioactive elements, The disintegration products of Uranium, Am.J.Sci 13,4th Ser., 77-88.

Boltwood B.B., 1908, Radioactivity of Uranium minerals, Am.J.Sci. 25(148), 4th Ser., 269-98.

Butler G.C., 1980, Radioactivity in the canadian environment, Report NRCC-18134, Ottawa, Can.,80-92.

Carriveau G.W., Harbottle G., 1979, Direct measurement of the fraction of radon loss in ceramics by gamma-ray spectrometry, Archaeo-Physika 10,423-7.

Carriveau G.W., Harbottle G., 1982, Radon and thoron emanation measurements and the effect of groundwater, PACT 6, 145-54, 98:164380.

Chang T.Y., Cheng W.L., Weng P.S., 1974, Potassium, uranium and thorium content in building material of Taiwan, Health Phys. 27(4)385-7, 31-5974.

Clavensjoe B., Ericson S.O., Erikson B.E., Haakansson B., Swedjemark G.A., 1982, Radon in dwellings, Report BFR-R-28-1982, 150 pp., 98(20):168918.

Cliff K.D., Meggitt G.C., Rhodes T., Ryden D.J., 1984, The standardization of radon and thoron emanation measurements, Report SRD R 298, 17p., 101:234748.

Cottens E., 1990, Actions contre le radon au niveau international, book JR90,1-10.

Culot M.V.J., Olson H.G., Schiager K.J., 1976, Effective diffusion coefficient of radon in concrete, theory and method for field measurements, Health Phys. 30,263-70.

Culot M.V.J., Olson H.G., Schiager K.J., 1978, Field applications of a radon barrier to reduce indoor airborne radon progeny, Health Phys. 34,498-501.

Culot M.V.J., Schiager K.J., Olson H.G., 1978, Development of a radon barrier, Health Phys. 35,375-80.

Curie P., 1910, Traite de radioactivite, Gauthier-Villars, Paris, p209.

Damkjaer A., Korsbech V., 1985, Measurements of the emanation of Rn-222 from Danish soils, Sci.Tot.Env. 45,343-50.

Davis N.M, Hon R., Dillon P., 1987, Determination of bulk radon emanation rates by high resolution gamma-ray spectroscopy, book RRR87, 111-29.

De Mets G., 1990, Radioactivity of building materials, design and improvement of houses, Colloque SRBII 900117.

Eadie G.G., 1975, Radioactivity in Construction Materials : A Land Bibliography, USEPA-ORP/LV 75-1, Las Vegas, Nevada.

Eichholz G.G., Matheny M.D., Kahn B., 1980, Control of radon emanation from building materials by surface coating, Health Phys. 39, 301-4, 93(18):175741.

EML, 1972, Environmental measurements laboratory procedure manual, HASL-300, US Dept. Energy, Wash. DC, USA.

EPA 1986, A Citizien's Guide To Radon, U.S.Env.Protection Agency OPA-86-004.

Espinosa G., Golzarri J.I., Gamboa I., Jacobson I., 1986, Natural radioactivity in mexican building material by SSNTD, Nucl.Tracks 12,767-70.

Fleischer R.L., Mogro-Campero A., Turner L.R., 1983, Indoor radon levels in the northeastern U.S. : Effects of energy-efficiency in homes, Health Phys. 45(2)407-12.

Fleisher R.L., Turner L.G., 1984, Indoor radon measurements in the New York capital district, Health Phys.46(5)999-1011.

Folkerts K.H., Keller G., Muth H., 1984, An experimental study on diffusion and exhalation of Rn-222 and Rn-220 from building materials, Radiat.Prot.Dosim. 9(1)27-34, RN16:030197.

Gabrysh A.F., Davis F.J., 1955, Radon released from concrete in radiant heating, Nucleonics 13,50.

Gabrysh N.D., McKee N.D., Eyring H., 1962, Determination of the radon emanation from carbonate rocks and its potential hazard in building materials, Mat.Res.Std. 2,256-8,57:1903i

George A.C., Knutson E.O., Franklin H., 1983, Radon and radon daughter measurements in solar buildings, Health Phys. 45(2)413-20.

Guimond R.J., Hardin J.M., 1989, Radioactivity released from phosphate-containing fertilizers and from gypsum, Radiat. Phys.Chem. 34(2)309-315.

Hafez A.F., Somogyi G., 1986, Determination of radon and thoron permeability through some plastics by track technique, Nucl. Tracks 12,697-700.

Hahn O., 1936, Aplied Radiochemistry, Cornell Un. Press, Ithaca, NY, p.193.

Hamilton E.I., 1971, The relative radioactivity of building materials, Am.Ind.Hygiene Ass.J. 398-403.

Hildingson O., 1984, Radon from gravel and aggregate, Report SP-RAPP-1983-28, 46 pp., 103(12):94665.

Ingersoll J.G., 1983, A survey of radionuclide contents and radon emanation rates in building materials used in the U.S., Health.Phys. 45(2)363-8.

Ingersoll J.G., Stitt B.D., Zapalac G.H., 1983, A fast and accurate method for measuring radon exhalation rates from building materials, Health Phys. 45(2)550-2.

Islam G.S. et al., 1988, A study of radon activity inside some houses in Bangladesh, Nucl.Tracks Radiat.Meas. 15,551-4, 111:46874.

Janssens A., Poffijn A., Jacobs R., 1984, Study of the radiation protection problem caused by the presence of Ra-226 in building materials, Book RRP84, 125-8.

Jonassen N., 1978, Exhalation of radon-222 from building materials, Proc.Int. Indoor Climatisation Symp., 94:19807

Jonassen N., 1982, Determination of total and specific radon exhalation rates from porous materials, book RHM81, 927-30, 97:152741.

Jonassen N., 1983, On determination of radon exhalation rates, Health.Phys. 45(2)369-76, 99:148141.

Jonassen N., McLaughlin J.P., 1978, Exhalation of Rn-222 from building materials and walls, Book NRE78 1211-24.

Kahn, Bernd, Eichholz, Geoffrey G., Clarke, Frank J., 1983, Search for building materials as sources of elevated radiation dose, Health Phys., 45(2), 349-61 , 99(18):148139s

Keller G., Folkertz K.H., Muth H., 1982, Method for the determination of radon and thoron exhalation rates using alpha spectroscopy, Rad.Prot.Dos. 3(1/2)83-9.

Keller G., Folkerts K.H., Muth H., 1984, Investigations on the increase of natural radiation exposure in buildings due to the inhalation of radon-222 and -220 daughters, Radiat., Risk, Prot., Int. Congr., 6th, Volume 1, 73-6.Kaul A.(ed.), 102:156601.

Kerr R.A., 1988, Indoor Radon: The Deadliest Polluant, Science, 240, 606-608.

Kominek A., Mrnustik J, 1989, Radioactivity of construction materials and the respective raw materials in Czech socialist republic, Radioisotopy 30(2)163-75.

Kovach E.M., 1944, An experimental study of the radon content of soil gas, Trans.Am.Geophys.Union 563-71, 39:22525.

Krisyuk E.M., Tarasov S.I. et al., 1974, Study and standardization of the radioactivity of structural materials, Report SZS-157, 22-7, 31-8614.

Lin W.J., Harbottle G., 1990, The simultaneous determination of the emmanation fractions of radon and thoron, J.Radioanal.Nucl.Chem., letters 145(5)377-83.

Lucas, H.F., 1957, Improved low-level alpha scintillation counter for radon, Rev. Sci. Instru., 28, 680.

Mahat R.H., Amin Y.M., 1990, Concentration of radon precursors in some malaysian building materials, J.Radioanal.Nucl.Chem., Letters 144(5)375-8.

Mamont-Ciesla K., Gwiazdowski B., Biernacka M., Zak A., 1982, Radioactivity of building materials in Poland, Book NRE82 551-6.

McCorkell R.H., Brameld M.P., 1980, An apparatus for the measurements of the rates of emanation of radon from rock specimens and powders, Rev.Sci.Instrum. 51(4)62-6.

McCorkell R.H., 1980, The leakage and absorption of radon in laboratory apparatus, CIM Bul. 73(11)111-2.

McCorkell, R.H., 1986, radon emanation rate studies: inter-laboratory standard reference materials and the effects of powdering and pelletizing., Cim bull. 79(894)66-69, EI8702016397.

McCorkell R.H., Archambault G., Brameld M.P., 1981, Laboratory apparatus for measuring radon emanation from solids, CIM Bull., 74(833), 90-6, 95(18):158478h

McLaughlin J.P., Jonassen N., 1978, The effect of pressure drops on radon exhalation from walls, Book NRE78 1225-36.

Morawska L., 1983, Influence of sealants on radon-222 emanation rate from building materials, Health Phys. 44(4)416-18, 98(22):187762.

Morawska L., 1989, Investigations of a specific surface area of a material on the basis of Rn-222 emanation coefficient measurements, Health Phys.57(1)23-7, 111:179965.

Mustonen R., 1984, Natural radioactivity ain and radon exhalation from Finnish building materials, Health Phys. 46,1195-1203.

OMS Organisation Mondiale de la Santé, 1987, Quelques radionucléides, 159-181, Genève, Suisse.

Papastefanou C., Manolopoulou M., Charalambous S., 1984, On the radioactivity of building materials, Book RRP84, 129-32.

Paredes C.H., Kessler W.V., Landolt R.R., Ziemer P.L., Paustenbach, D.J., 1987, Radionuclide content of and radon-222 emanation from building materials made from phosphate industry waste products, Health Phys., 53(1), 23-9, 107(10):85783

Paredes, Carmela Hernandez, 1985, Determination of radioactivity in and radon emanation coefficient of selected building materials and estimation of radiation exposure from their use , 183pp, 102:211320.

Pensko J., Wicke A., 1988, Meas. technique for the estimation of Rn-222 conc. and exhalation rate indoors and outdoors using an activated carbon, Pos.Fiz.Med. 23(4)263-70, 111:182844

Pensko J., Stpiczynska Z., Blaton-Albicka K., 1978, Emanating power of radon-222 measured in building materials, DOE Symp. Ser., 51 (Nat. Radiat. Environ. 3, v2, CONF-780422), 1407-14, 94(18):144516m

Porstendorfer J, Wicke A., 1978, Radon and radon daughters in dwellings, Book AEN78, 190-3.

Quindos L.S., Fernandez P.L., Soto J., 1987, Building materials as source of exposure in houses, Book IAQC87, Conf. 870853,365-9.

Quindos L.S., Newton G.J., Wilkening M.H., 1987, On dose rate indoors from building materials, Radiat. Prot. Dosim., 19(2), 125-8, 107:207070

Ramachandran T.V., Lalit B.Y., Mishra U.C., 1987, Measurement of radon permeability through some membranes, Nucl. Tracks Rad.Meas. 13(1)81-4.

Reim K., Thome M., Haupt W., 1984, Radon emanation at the Mullenbach research uranium mine and its effects on ventilation planning, book ORSM84, 200-3.

Ren T., Lin L., 1987, A passive integrating indoor radon detector with activated carbon, Radiat.Prot.Dosim. 19(2), 121-4, 107:207069
Safonov I.S., 1972, Radioactivity of building materials and radiation background of buildings, Ener.Stroit.Rubez. 4,17-9,31-3332.

Scheibel H.G., Wicke A., Porstendoerfer J., Schraub A., 1976, Measuring method to determine low radon exhalation rates from solid materials, Report AED Conf76-530-009, 89:11235.

Scheibel, Hans Georg, Porstendoerfer, Justin, Wicke, Andreas, 1979, A device for the determination of low natural radon-222 and radium-226 concentrations,Nucl.Instrum. Methods, 165(2), 345-8, 92:98655.

Sedlacek S., Sebesta F., 1989, Determination of the powdered materials emanation properties using the detection unit TESLA NE 1501, Radioisotopy 30(5)338-49.

Singh, Surinder, Ghuman H.S., 1988, The measurement of radon emanation rates from some rock specimens and building materials using radon emanometry and LR-115 plastic track detector, Nucl. Tracks Radiat. Meas., 15(1-4), 621-4, 111(4):29957p.

Stranden E., 1980, Radon in dwellings and influencing factors, Health Phys. 39, 275-84, 93:191266.

Stranden E., 1981, Radon in houses utilising stone magasines for heat accumulation, Health Phys. 41, 29-33, 95:105118

Stranden E., Kolstad A.K., Lind B., 1984, Radon exhalation : moisture and temperature dependence, Health Phys. 47(3)480-4
Subba Ramu M.C., Muraleedharan T.S., 1984, Evaluation of inhalation risk from man-made and natural sources of atmospheric radon, book RRP84, 81-3.

Thompkins R.W., Cheng K.C., 1969, The measurement of radon emanation rates in a canadian uranium mine, CIM Bul. 62,1356-62.

Toth A., Feher I., Lakatos et al., 1978, Distr. of natural radioactive isotope con. and emanation factors meas. on concrete and brick samples prod. in Hungary, Book NRE78 1396-1406.

Trefler, Martin, Wu, Xiaodong, Medora, Riasp P., 1986, Radon emanation from building materials, Proc. Int. Symp. Phosphogypsum, 2nd, Meeting Date 1986, Volume 1, 25-33., 110(20):178702h

UN77, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1977, Official Records of the General Assembly, 32nd Session, Suppl. No.40(A/32/40) p.75, United Nations, New York.

UN82, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1982, Official Records of the General Assembly, 37th Session, Sales No.E.82.IX.8, United Nations, New York.

UN88, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988, Official Records of the General Assembly, 43rd Session, Sales No.E.88.IX.7, United Nations, New York.

Van der Lugt G., Scholten L.C., 1985, Radon emanation from concrete and the influence of using fly ash in cement. Sci.Total Env.45, 143-50.

Vancl V., 1983, Radon and the daughter products in closed spaces, Radioisotopy 24(5)619-40.

Venuti G.C., Colilli S. et al., 1984, Methodology and results of a natural radioactivity assessment in a region of central Italy, book RRP84, 84-7.

Wojcik M., Morawska L., 1983, Radon con. and exhalation meas. with a semiconductor detector and electrostatic precipitator working in a closed circulation system, Nucl.Instr.Meth.Phys.Res. 212,393-402.

Zapalac G.H., 1983, A time-dependent method for characterizing the diffusion of Rn-222 in concrete, Health Phys. 45(2)377-83.

ANNEXE A

Final Report for
ECOLE POLYTECHNIQUE

Building Materials as a Source of Radon: Computer Simulation of Indoor Radon Concentrations

FILE: V9001/901002

Prepared by:
G.K. YUILL & ASSOCIATES (B.C.) LTD.
303-1111 Blanshard Street
Victoria, British Columbia
R3T 2A7

February 26, 1991

TABLE OF CONTENTS

	Page
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 CONAIR - A Multizone Airflow and Pollutant Dispersal Analysis Tool	2
3.0 HOUSE DESCRIPTION	3
4.0 DEFINITION OF INDOOR RADON SOURCE STRENGTHS	6
4.1 Supplied Radon Exhalation Rates	6
4.2 Distribution of Materials Indoors	6
4.3 Distribution of Indoor Radon Exhalation	8
4.4 Distribution of Indoor Radon Source Strengths	8
5.0 SIMULATION RESULTS	14
5.1 Airflows	14
5.2 Indoor Radon Concentrations	16
6.0 CONCLUSIONS	20
7.0 REFERENCES	21

1.0 INTRODUCTION

The objective of this project was to determine the mean and maximum contributions of building materials in a specific house to the indoor radon concentrations in that house, in the absence of contributions from outdoors and the soil.

A multizone airflow and pollutant dispersal analysis computer program (CONAIR) was used to predict steady-state airflows and radon concentrations in the house. The program used data collected in previous projects, and used indoor radon source strengths based on mean and maximum radon exhalation rates supplied by Ecole Polytechnique.

In the following sections, CONAIR, the house, and the development of indoor radon source strengths for each material in each room are described. These sections also present the predicted airflows and radon concentrations, and discuss the significance of these results.

2.0 CONAIR - A Multizone Airflow and Pollutant Dispersal Analysis Tool

CONAIR (Wray 1990, Wray and Yuill 1990a, 1990b; Yuill and Wray 1989) was used as the analysis tool in this project. It is a sophisticated multizone airflow and pollutant dispersal analysis microcomputer program. In this program, the rooms and outdoor environment are represented by nodes. Discrete airflow passages such as construction cracks, ducts, fans, doorways, and the soil are represented by airflow elements that connect the nodes to one another. Flows within these elements are determined using a finite-element method to simultaneously solve for the pressure at each node as a function of wind and stack effects and as a function of HVAC system operation, using well-established relationships between airflow rate and element pressure differential. It includes a wind flow model that can estimate the distribution of wind pressure coefficients on all four sides of a building, and that can account for the effects of terrain on the wind velocity profile. CONAIR also contains a model that accounts for two-way buoyancy-driven airflows in large openings such as doorways. The program calculates steady-state airflow rates on an hour-by-hour basis using hourly weather data such as wind velocity, wind direction, and outdoor temperature.

Time-varying or steady-state radon levels under the influence of these airflow rates can be predicted by the program. It determines the concentrations at discrete points within the building and in the soil surrounding it. The program can model: steady-state and/or time-varying radon mass transport due to air movement (infiltration, exfiltration, interzone airflows, and HVAC system airflows); removal of radon from the air by radio-chemical processes; and steady-state or time-varying generation of radon in the soil. Provisions for simulating one-dimensional convection-diffusion processes in the soil are included in the program.

CONAIR has been validated by comparing its predictions with those of other available programs or solution techniques to determine whether the predictions of CONAIR are reliable (Yuill and Associates 1991).

3.0 HOUSE DESCRIPTION

The house simulated in this project is an unoccupied one located in a suburban area of Winnipeg, Manitoba. It is a one-storey bungalow with a height of 3.6 m from grade to the eaves, a floor area of approximately 100 m^2 (not including the basement), an Equivalent Leakage Area (ELA) with all intentional openings sealed of 154 cm^2, and a total volume of 446.48 m^3.

The main floor of the house uses typical wood-frame construction (wood studs and rafters, fibreglass insulation, a polyethylene air barrier, and gypsum wallboard). The floor is wooden, with its bottom surface exposed in the basement, and its top surface carpeted or covered with vinyl tiles. Ceramic tiles are used in the kitchen and bathroom above the counters as a backsplash, and are used on the walls around the bathtub. A brick fireplace with a refractory brick lining in its firebox is located in the living room.

The basement walls are poured concrete with a thickness of 200 mm. The interior surfaces of these walls are covered with wood framing (38 x 89 mm studs), fibreglass insulation, and gypsum wallboard. The top of its poured concrete floor slab is 1.26 m below grade level. The slab is 75 mm thick and has dimensions of 7.5 m by 11.8 m. It has a lapped and caulked polyethylene moisture barrier underneath it. A layer of small-diameter gravel with a total thickness of 125 mm is located immediately beneath the moisture barrier. Subslab perforated piping connects the sump pit and drain tile system (the subslab piping can be isolated from the sump and drain tile system).

The test house is ventilated by a multi-port central exhaust fan that runs continuously. There are damper-controlled air inlets in each room to provide replacement air (fresh air) for the air that is exhausted. The fan is capable of exhausting air from as many as six locations with a total design flow rate of 62 L/s. In the test house, air is continually exhausted at a design flow rate of 17.5 L/s directly from each of the kitchen and the bathroom. To emulate a basement suction system, a duct from the exhaust fan was placed to exhaust air directly from the basement at a continuous design flow rate of 27 L/s. Heating for the house is provided by electric baseboard heaters.

For the simulations, the house was divided into the following eight zones:

1. basement;
2. kitchen/dining room/living room;
3. hallway joining living room, bathroom, and bedrooms;
4. bathroom (sink area);
5. bathroom (tub area);
6. master bedroom;
7. bedroom 2; and
8. bedroom 3.

The kitchen, living room, and dining room of the simulated house were lumped together as one zone because there are no significant flow resistances between these regions.

The house and outdoors along with the ventilation system were represented by a single network. Each room was considered to be a single zone. Indoor nodes were connected together with 14 convective flow elements. Above-grade coupling of the house to the outdoors was achieved using 26 convective flow elements. Below-grade coupling to the outdoors through the soil used a single convective flow element to represent the combined resistance of the soil and a crack at the basement floor-wall perimeter (Wray and Yuill 1990a). The ventilation system was represented by constant-flow convective elements exhausting air from the house to outdoors. The total network consisted of 9 nodes and 44 elements.

Using the total ELA of the house, which was obtained from blower door tests, and using assumptions of leakage area distributions based on surface area and ASHRAE (1989) estimates of door and window component leakages, inputs were developed for the airflow analysis section of CONAIR to characterize the magnitude and location of unintentional leaks in the building envelope. The only leaks considered between zones were interior doorways, which were simulated as if the doors were wide open.

All windows and exterior doors were simulated in their closed position. The fireplace damper was assumed to be closed, with no air leakage past the damper. Thus, the only source of natural ventilation in the house was infiltration and

exfiltration driven by wind and stack effects through unintentional leaks in the house envelope and through the air inlets.

Each damper-controlled air inlet was modelled using empirical airflow data determined in tests carried out by Yuill and Associates (Yuill and Comeau 1989). The ELA of each air inlet in the fully-open position was 23.6 cm^2 and the flow exponent was 0.57. In the fully-closed position, these tests indicated the ELA of the air inlet was reduced to 68% of that in the fully-open position. The air inlets were positioned so those in the living room were fully open, while those in the bedrooms were fully closed. These positions are typical of those that would be used during normal daytime occupancy.

The basement was assumed to be at a constant temperature of 20.00 °C. Every other room in the house was assumed to be at a constant temperature of 20.15 °C.

Wind pressure coefficients for the test house were estimated using the model contained in CONAIR (Swami and Chandra 1988).

All of the simulations were carried out using an outdoor dry-bulb temperature of -23.5 °C. A wind speed of 11.5 km/h and a wind direction from the North was used.

A constant outdoor air pressure of 101,325 Pa was used for all of the simulations.

Radon production rates and concentrations in the soil were assumed to be zero for this project, so the contribution of building materials to indoor radon levels could be examined separately. Similarly, the outdoor radon concentration was assumed to be zero.

Only steady-state simulations were carried out in this project, because budget constraints did not permit time-varying runs. The steady-state runs provide sufficient information for the purposes of this project.

4.0 DEFINITION OF INDOOR RADON SOURCE STRENGTHS

4.1 Supplied Radon Exhalation Rates

Mean and maximum radon exhalation rates for 11 different building materials were supplied by Ecole Polytechnique. These rates are listed in Table 4.1.

Table 4.1. Supplied Radon Exhalation Rates.

Material	Mean	Maximum	Units
Concrete	1.5	22.0	$nBq/s/cm^2$
Wood	0.1	0.2	$nBq/s/cm^2$
Brick	1.3	2.0	$nBq/s/cm^2$
Refractory Brick	2.7	2.7	$nBq/s/cm^2$
Gypsum	1.0	2.8	$nBq/s/cm^2$
Ceramic Tile	0.5	0.8	$nBq/s/cm^2$
Marble	0.3	0.3	$nBq/s/cm^2$
Granite	1.3	1.3	$nBq/s/cm^2$
Glass	0.1	0.1	$nBq/s/cm^2$
Fibreglass	1.7	1.7	nBq/s/g
Vermiculite	1.2	1.2	nBq/s/g

4.2 Distribution of Materials Indoors

The test house contained eight of the 11 materials described in Section 4.1. For each zone, estimates of the area or mass of each of these eight materials were developed from building plans.

On the main floor, the following six materials were used:

- wood floors,
- brick fireplace,
- refractory brick liner in fireplace,

- gypsum walls and ceilings,
- ceramic tile on walls in kitchen and bathroom above counters and around bathtub, and
- glass windows.

No concrete, marble, granite, or vermiculite was used on the main floor. Although fibreglass and wood were contained in the walls and ceiling of the main floor, these materials were ignored, because it was assumed the polyethylene air barrier would eliminate their contributions to indoor radon levels.

In the basement, the following five materials were used:

- concrete walls and floor,
- wood ceiling and wall framing,
- gypsum walls,
- glass windows, and
- fibreglass insulation in wall cavities between studs.

No brick, refractory brick, ceramic tile, marble, granite, or vermiculite was used in the basement. Unlike the main floor, all of the wall materials were included in the basement, because there was no air barrier there to exclude their contributions to indoor radon levels. Based on data reported by ASHRAE (1989) for studs on 400 mm centers, the area of wood in the basement walls was assumed to be 15% of the total wall area. The area of fibreglass in these walls was assumed to be 85% of the total wall area. An average density of 18.4 kg/m^3 for the fibreglass was assumed, based on values reported by ASHRAE (1989).

In this project, it was assumed that the radon exhalation rate of a material was not affected by being part of a composite. Thus, the reported exhalation rates for each of the materials in the basement walls were used. It is not clear how composites such as these affect the total radon exhalation rate, although it is expected that the exhalation rates are attenuated in this situation. This means the predicted radon concentrations are expected to be overestimates of the levels that actually occur when composite materials are present.

Table 4.2 shows the amount of each material in each zone of the house. It also shows the total amounts of each material in the house, the total area of all materials in each zone, and their fractions of the total area of all materials in the house.

4.3 Distribution of Indoor Radon Exhalation

Using the distribution of building materials described in Section 4.2, the mean and maximum indoor radon exhalation distributions were developed. The mean exhalation rate for a particular material in a given zone is the product of the reported mean exhalation rate for that material and the area or mass of that material in that zone. Maximum exhalation rates are determined in a similar manner.

Tables 4.3 and 4.4 show the mean and maximum exhalation distributions respectively. In each case, they also show the total exhalation rate of each material in the house, the total exhalation rate of all materials in each zone, and their fractions of the total exhalation rate of all materials in the house.

4.4 Distribution of Indoor Radon Source Strengths

CONAIR cannot use the calculated exhalation rates directly. For radon production, the program uses units of radon atoms per hour. To determine the mean radon generation rate for each material in each zone, the mean exhalation rates listed in Table 4.3 were first converted from units of mBq/s to units of Bq/h. Then, these rates were divided by the radioactive decay constant for radon, which is 0.0076 h^{-1}. A similar procedure was carried out to determine the maximum radon generation rates. Tables 4.5 and 4.6 list the mean and maximum radon generation rates respectively.

Table 4.2. Distribution of building materials by area and mass.

Zone Name	Zone Number	Area [m^2] Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Total	% Total	Fibreglass [kg]
Basement	1	179.18	101.18	0.00	0.00	91.77	0.00	1.88	374.00	45.0	127.75
Living Room	2	0.00	55.74	4.18	1.35	149.92	1.60	9.44	222.23	26.7	0.00
Hallway	3	0.00	3.20	0.00	0.00	20.97	0.00	0.00	24.17	2.9	0.00
Bedroom 3	4	0.00	8.06	0.00	0.00	33.64	0.00	0.99	42.68	5.1	0.00
Bathroom (Sink)	5	0.00	4.33	0.00	0.00	15.50	0.60	0.00	20.44	2.5	0.00
Bathroom (Tub)	6	0.00	1.32	0.00	0.00	10.16	7.53	0.00	19.00	2.3	0.00
Master Bedroom	7	0.00	16.57	0.00	0.00	56.56	0.00	1.64	74.77	9.0	0.00
Bedroom 2	8	0.00	9.71	0.00	0.00	43.96	0.00	0.99	54.66	6.6	0.00
Outdoors	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00
	Total:	179.18	200.10	4.18	1.35	422.48	9.73	14.94	831.95	100.0	127.75
	% Total:	21.5	24.1	0.5	0.2	50.8	1.2	1.8	100.0		

Table 4.3. Distribution of mean exhalation rates.

		Mean Exhalation Rate [mBq/s]									
Zone Name	Zone Number	Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Fibreglass	Total	% Total
Basement	1	2.69	0.10	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.22	3.93	52.5
Living Room	2	0.00	0.06	0.05	0.04	1.50	0.01	0.01	0.00	1.66	22.2
Hallway	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.21	2.8
Bedroom 3	4	0.00	0.01	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.35	4.6
Bathroom (Sink)	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.16	2.2
Bathroom (Tub)	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.04	0.00	0.00	0.14	1.9
Master Bedroom	7	0.00	0.02	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.58	7.8
Bedroom 2	8	0.00	0.01	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.45	6.0
Outdoors	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
	Total:	2.69	0.20	0.05	0.04	4.22	0.05	0.01	0.22	7.48	100.0
	% Total:	35.9	2.7	0.7	0.5	56.5	0.6	0.2	2.9	100.0	

Table 4.4. Distribution of maximum exhalation rates.

		Maximum Exhalation Rate [mBq/s]									
Zone Name	Zone Number	Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Fibreglass	Total	% Total
Basement	1	39.42	0.20	0.00	0.00	2.57	0.00	0.00	0.22	42.41	81.4
Living Room	2	0.00	0.11	0.08	0.04	4.20	0.01	0.01	0.00	4.45	8.5
Hallway	3	0.00	0.01	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.59	1.1
Bedroom 3	4	0.00	0.02	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00	0.00	0.96	1.8
Bathroom (Sink)	5	0.00	0.01	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.45	0.9
Bathroom (Tub)	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.06	0.00	0.00	0.35	0.7
Master Bedroom	7	0.00	0.03	0.00	0.00	1.58	0.00	0.00	0.00	1.62	3.1
Bedroom 2	8	0.00	0.02	0.00	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00	1.25	2.4
Outdoors	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
	Total:	39.42	0.40	0.08	0.04	11.83	0.08	0.01	0.22	52.08	100.0
	% Total:	75.7	0.8	0.2	0.1	22.7	0.1	0.0	0.4	100.0	

Table 4.5. Distribution of mean source strengths.

Zone Name	Zone Number	Mean Source Strength [Rn atoms/h]									
		Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Fibreglass	Total	% Total
Basement	1	4.61E+06	1.74E+05	0.00E+00	0.00E+00	1.57E+06	0.00E+00	3.22E+03	3.73E+05	6.74E+06	52.5
Living Room	2	0.00E+00	9.56E+04	9.33E+04	6.24E+04	2.57E+06	1.37E+04	1.62E+04	0.00E+00	2.85E+06	22.2
Hallway	3	0.00E+00	5.49E+03	0.00E+00	0.00E+00	3.60E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.65E+05	2.8
Bedroom 3	4	0.00E+00	1.38E+04	0.00E+00	0.00E+00	5.77E+05	0.00E+00	1.70E+03	0.00E+00	5.93E+05	4.6
Bathroom (Sink)	5	0.00E+00	7.43E+03	0.00E+00	0.00E+00	2.66E+05	5.15E+03	0.00E+00	0.00E+00	2.79E+05	2.2
Bathroom (Tub)	6	0.00E+00	2.26E+03	0.00E+00	0.00E+00	1.74E+05	6.46E+04	0.00E+00	0.00E+00	2.41E+05	1.9
Master Bedroom	7	0.00E+00	2.84E+04	0.00E+00	0.00E+00	9.70E+05	0.00E+00	2.81E+03	0.00E+00	1.00E+06	7.8
Bedroom 2	8	0.00E+00	1.67E+04	0.00E+00	0.00E+00	7.54E+05	0.00E+00	1.70E+03	0.00E+00	7.73E+05	6.0
Outdoors	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0
	Total:	4.61E+06	3.43E+05	9.33E+04	6.24E+04	7.25E+06	8.34E+04	2.56E+04	3.73E+05	1.28E+07	100.0
	% Total:	35.9	2.7	0.7	0.5	56.5	0.6	0.2	2.9	100.0	

Table 4.6. Distribution of maximum source strengths.

		Maximum Source Strength [Rn atoms/h]									
Zone Name	Zone Number	Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Fibreglass	Total	% Total
Basement	1	6.76E+07	3.47E+05	0.00E+00	0.00E+00	4.41E+06	0.00E+00	3.22E+03	3.73E+05	7.28E+07	81.4
Living Room	2	0.00E+00	1.91E+05	1.43E+05	6.24E+04	7.20E+06	2.20E+04	1.62E+04	0.00E+00	7.64E+06	8.5
Hallway	3	0.00E+00	1.10E+04	0.00E+00	0.00E+00	1.01E+06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.02E+06	1.1
Bedroom 3	4	0.00E+00	2.77E+04	0.00E+00	0.00E+00	1.62E+06	0.00E+00	1.70E+03	0.00E+00	1.65E+06	1.8
Bathroom (Sink)	5	0.00E+00	1.49E+04	0.00E+00	0.00E+00	7.45E+05	8.24E+03	0.00E+00	0.00E+00	7.68E+05	0.9
Bathroom (Tub)	6	0.00E+00	4.52E+03	0.00E+00	0.00E+00	4.88E+05	1.03E+05	0.00E+00	0.00E+00	5.96E+05	0.7
Master Bedroom	7	0.00E+00	5.69E+04	0.00E+00	0.00E+00	2.72E+06	0.00E+00	2.81E+03	0.00E+00	2.78E+06	3.1
Bedroom 2	8	0.00E+00	3.33E+04	0.00E+00	0.00E+00	2.11E+06	0.00E+00	1.70E+03	0.00E+00	2.15E+06	2.4
Outdoors	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0
	Total:	6.76E+07	6.87E+05	1.43E+05	6.24E+04	2.03E+07	1.33E+05	2.56E+04	3.73E+05	8.94E+07	100.0
	% Total:	75.7	0.8	0.2	0.1	22.7	0.1	0.0	0.4	100.0	

5.0 SIMULATION RESULTS

5.1 Airflows

The airflows between indoor zones and between each zone and the outdoors, based on those predicted by CONAIR for the test house, are presented in Tables 5.1 and 5.2. An air density of 1.204 kg/m^3 at 20°C and 101,325 Pa was used to convert CONAIR predictions of mass flow rate to volumetric flow rates.

Table 5.1 shows all of the air removed from the house was by exhaust flows (not by exfiltration) and most of the infiltration (62 L/s) was directly from the outdoors. Only 0.3% of the infiltration into the house was soil gas, which entered through the crack at the basement floor-slab perimeter. Thus, the outdoor air change rate for the conditioned volume of this house was predicted to be 0.5 ach.

Table 5.2 shows that the basement was only slightly under-ventilated according to CSA Standard F326.1-M1989 (CSA 1989). Here, predictions show the basement received 9 L/s of outdoor air (even though the exhaust flow rate for the basement was 27 L/s). The standard calls for 10 L/s as a base flow rate for the basement. The remainder of the house was adequately ventilated based on the predicted airflows shown in Table 5.2 and according to this standard.

Table 5.1. Summary of predicted overall airflows.

House	Outdoors [L/s]	Soil [L/s]	Total [L/s]
Total infiltration from:	61.6	0.2	61.8
Total supply from:	0	0	0
Total exfiltration to:	0	0	0
Total exhaust to:	61.8	0	61.8

Table 5.2. Summary of predicted zonal airflows.

From	To	Flow [L/s]	Comment
Outdoors	Basement	8.9	Infiltration.
Soil	Basement	0.2	Infiltration.
Living Room	Basement	43.7	Interzone.
Basement	Living Room	25.8	Interzone.
Basement	Outdoors	26.9	Exhaust.
Outdoors	Living Room	31.9	Infiltration.
Basement	Living Room	25.8	Interzone.
Hallway	Living Room	3.4	Interzone.
Living Room	Basement	43.7	Interzone.
Living Room	Outdoors	17.4	Exhaust.
Outdoors	Bedroom 3	5.4	Infiltration.
Bedroom 3	Hallway	5.4	Interzone.
Outdoors	Master Bedroom	10.0	Infiltration.
Master Bedroom	Hallway	10.0	Interzone.
Outdoors	Bedroom 2	5.5	Infiltration.
Bedroom 2	Hallway	5.5	Interzone.
Hallway	Bathroom	17.4	Interzone.
Bathroom	Outdoors	17.4	Exhaust.

5.2 Indoor Radon Concentrations

The predicted contributions of each material to the radon concentration in each zone are shown in Table 5.3 for the case using mean exhalation rates, and in Table 5.4 for the case using maximum exhalation rates. For each case, these tables also show predictions of the radon concentration in each zone resulting from all materials in the zone, the contribution of each material to the average radon concentration in the house, and their fractional contributions to the average radon concentration in the house. The average radon concentration in the house is determined by summing the products of the predicted radon concentrations in each zone and the amount of air in each zone, and then dividing that sum by the total amount of air in the house.

Table 5.3 shows the predicted average radon concentration in the house was 0.1 Bq/m^3 when mean exhalation rates were used. In this case, the highest predicted concentration was 0.2 Bq/m^3, which occurred in the basement where 61% of the radon in the house was concentrated. Most of the remainder of the radon was located in the living room/dining room/kitchen area (25%).

For the case with maximum exhalation rates, Table 5.4 shows the predicted average concentration in the house was 0.9 Bq/m^3. The highest predicted concentration in this case was 1.3 Bq/m^3, which also occurred in the basement. Of the radon in the house in this case, 72% was concentrated in the basement. As in the case with mean exhalation rates, most of the remainder of the radon (23%) was located in the living room/dining room/kitchen area.

Of the materials considered, only concrete and gypsum were significant contributors to indoor radon levels. In the case using mean exhalation rates, concrete contributed 40% of the radon in the house, while gypsum contributed 53%. In the case with maximum exhalation rates, concrete contributed 79% of the radon in the house, while gypsum contributed 20%. Both of these materials were used extensively in the basement. Gypsum was also used more extensively in the living room/dining room/kitchen area than in other rooms on the main floor, because this area had partition walls. The maximum contribution of any of the other materials to the average radon level in the house was 3% (wood and fibreglass).

Table 5.3. Predicted radon concentrations with mean exhalation rates.

		Radon Concentration [Bq/m^3]									
Zone Name	Zone Number	Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Fibreglass	Zone Total	% Zone Total
Basement	1	0.08	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.15	61.2
Living Room	2	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.10	24.8
Hallway	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.08	1.1
Bedroom 3	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	2.4
Bathroom (Sink)	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	1.3
Bathroom (Tub)	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.09	1.1
Master Bedroom	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	4.4
Bedroom 2	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	3.6
Outdoors	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
House Total:		0.05	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.12	100.0
% House Total:		39.5	2.7	0.8	0.5	52.8	0.1	0.2	3.2	100.0	

Table 5.4. Predicted radon concentrations with maximum exhalation rates.

		Radon Concentration [Bq/m^3]									
Zone Name	Zone Number	Concrete	Wood	Brick	Refractory Brick	Gypsum	Ceramic Tile	Glass	Fibreglass	Zone Total	% Zone Total
Basement	1	1.13	0.01	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.01	1.32	72.2
Living Room	2	0.48	0.01	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.64	22.6
Hallway	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.21	0.4
Bedroom 3	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.18	0.9
Bathroom (Sink)	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.24	0.5
Bathroom (Tub)	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.26	0.4
Master Bedroom	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.16	1.7
Bedroom 2	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.22	1.4
Outdoors	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
House Total:		0.67	0.01	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.85	100.0
% House Total:		78.5	0.7	0.2	0.1	20.1	0.0	0.0	0.4	100.0	

The mean and maximum radon concentrations predicted were significantly lower than those normally occurring outdoors. The maximum radon concentrations predicted were greater than the mean concentrations, but were still significantly lower than those normally found outdoors. Radon concentrations in outdoor air are usually in the range of 4 to 15 Bq/m^3 (Nazaroff and Nero 1988). A typical value of the outdoor concentration is 10 Bq/m^3 (Bodansky et al. 1989).

In comparison to average residential concentrations, these predicted radon levels are negligible. Extensive surveys of houses in various countries have shown that the average radon concentrations in these houses range from 10 to 100 Bq/m^3, with levels sometimes in the range of 200 to 2000 Bq/m^3 (Nazaroff and Nero 1988).

6.0 CONCLUSIONS

The maximum radon concentration when mean radon exhalation rates for building materials were used was 0.2 Bq/m^3. When maximum exhalation rates were used, the maximum radon concentration was 1.3 Bq/m^3. Concrete and gypsum were the primary contributors to these indoor levels, regardless of which set of exhalation rates was used. The contributions of other materials were relatively insignificant.

The maximum radon concentrations predicted in this project are significantly lower than those normally found outdoors and are insignficant compared to the higher levels that can occur in homes. Thus, it is clear that building materials do not contribute substantially to typical indoor radon levels.

7.0 REFERENCES

ASHRAE. 1989. "Chapter 23: Infiltration and ventilation", *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

CSA. 1989. *CSA Preliminary Standard F326.1-M1989: Residential Mechanical Ventilation Requirements*. Canadian Standards Association.

Nazaroff, W.W.; and Nero, A.V. Jr. 1988. *Radon and its decay products indoors*. New York: John Wiley and Sons.

Swami, M. V. and Chandra, S. 1988. "Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow", *ASHRAE Transactions*, Vol. 94, Part 1.

Wray, C.P. 1990. "Development and application of a multizone airflow and contaminant dispersal analysis microcomputer program for simulating radon and radon progeny transport and accumulation in soils and houses with basements." *M.Sc. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, University of Manitoba.

Wray, C.P. and Yuill, G.K. 1990a. "Development of models to characterize soil gas flow and radon entry into basements." *Proceedings of the International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Toronto, Ontario.

Wray, C.P. and Yuill, G.K. 1990b. "Dynamic multi-compartment modelling: The transport of radon and its decay products indoors." *Proceedings of the International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology*, Atlanta, Georgia.

Yuill and Associates. 1991. "Preliminary investigation concerning the impact of subslab ventilation on radon entry rate, soil temperature, and energy consumption", *Report of G.K. Yuill and Associates Ltd. to Canada Mortgage and Housing Corporation*, February 15.

Yuill, G.K.; and Comeau, G.M. 1989. "Demonstration and performance testing of the laminar airflow super window - humidity controlled air inlet - baseboard heating

(LAFSW/HCAI/BH) system in a Winnipeg house", *Proceedings of the 1989 Annual SESCI Conference*. Penticton, British Columbia.

Yuill, G.K. and Wray, C.P. 1989. "A microcomputer program for evaluating the performance of buildings equipped with ventilator window/baseboard heating systems", *Proceedings of the SESCI Energy Solutions for Today Conference*. Penticton, British Columbia.