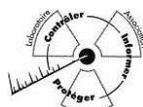


RADIOACTIVITE NATURELLE DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION DISPONIBLES EN RHONE-ALPES

RAPPORT N°12-75 V2



Etude réalisée par le **laboratoire de la CRIIRAD**
Avec le soutien financier de la **Région Rhône-Alpes**



CRIIRAD

Rhône-Alpes Région

Date de publication : 17 octobre 2012

Responsable d'étude :	Julien SYREN, ingénieur géologue, responsable du service radon
Relecture :	Bruno CHAREYRON, ingénieur en physique nucléaire, responsable du laboratoire (V1) Corinne CASTANIER, chargée de recherche en radioprotection (V2)
Gestion des questionnaires carrières et secrétariat :	Stéphane MONCHÂTRE, assistante du laboratoire
Interventions sur site	Christian COURBON, technicien interventions de terrain Julien SYREN, responsable du service radon
Préparation des échantillons pour analyses par spectrométrie gamma et tests de flux de radon	Jocelyne RIBOUËT, technicienne de laboratoire
Réalisation des analyses par spectrométrie gamma	Stéphane PATRIGEON, technicien métrologue

La CRIIRAD tient à remercier :

- la Région Rhône-Alpes, dont le soutien financier a permis la réalisation de cette étude ;
- les entreprises ayant bien voulu participer à cette étude :
 - o les propriétaires et gestionnaires de 41 carrières de Rhône-Alpes, et plus particulièrement M. Bard (carrières de Châtillon-Saint-Jean, Drôme)
 - o les magasins « Entrepôt du Bricolage » Valence et SAMSE Valence
- les bénévoles membres du conseil d'administration de la CRIIRAD (Pierre FERRANDON, Jacques REDOUX) ayant participé au prélèvement de matériaux

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	<u>4</u>
<u>1 REGLEMENTATION RELATIVE A LA RADIOACTIVITE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....</u>	<u>5</u>
1.1 SITUATION ACTUELLE : DIRECTIVE EURATOM 96/29.....	5
1.2 PROJET DE NOUVELLE DIRECTIVE EURATOM DITE « BSS »	6
1.2.1 MATERIAUX ET EXPOSITION EXTERNE	6
1.2.2 MATERIAUX ET EMISSION DE RADON	9
<u>2 CHOIX DE MATERIAUX A ANALYSER.....</u>	<u>10</u>
2.1 VUE D'ENSEMBLE	10
2.2 GRANULATS.....	11
2.2.1 GENERALITES.....	11
2.2.2 GRANULATS PRODUITS EN RHONE-ALPES.....	12
2.2.3 CHOIX DES CARRIERES	13
2.3 CIMENT.....	16
2.4 BLOCS BETON.....	18
2.5 BRIQUES.....	20
2.6 PLAQUES DE PLATRE.....	21
2.7 AUTRES MATERIAUX ECHANTILLONNES	21
2.7.1 SABLE DE CURAGE DE TORRENT	21
2.7.2 PRODUIT REFRACTAIRE.....	21
2.7.3 REVETEMENT EXTERIEUR.....	22
<u>3 ANALYSES PAR SPECTROMETRIE GAMMA.....</u>	<u>23</u>
3.1 METHODOLOGIE.....	23
3.1.1 ECHANTILLONS ANALYSES.....	23
3.1.2 PRELEVEMENT.....	23
3.1.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR ANALYSE.....	23
3.2 RESULTATS	26
3.3 COMMENTAIRES	28
3.3.1 PRODUITS DE CARRIERE	28
3.3.2 CIMENTS.....	28
3.3.3 BLOCS BETON ET BRIQUES	28
3.3.4 PLAQUES DE PLATRE	29
3.3.5 REVETEMENT EXTERIEUR.....	29
3.4 CORRELATION ENTRE INDICE I ET RELEVES RADIOMETRIQUES IN SITU	30
3.5 ELEMENTS DE COMPARAISON	31
<u>4 METHODE D'ESTIMATION DU FLUX DE RADON</u>	<u>34</u>
4.1 METHODOLOGIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	34
4.1.1 MESURES EN CHAMBRE FERMEE	34
4.1.2 MESURES EN CHAMBRE OUVERTE	36
4.1.3 TECHNIQUES DE DETECTION.....	36
4.1.4 COMPARAISON DES DEUX METHODES	36
4.1.5 MAITRISE DES PARAMETRES EXTERIEURS	37
4.2 METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE PAR LE LABORATOIRE DE LA CRIIRAD.....	38
4.2.1 PRESENTATION GLOBALE DU DISPOSITIF	38

4.2.2	CONTENEUR D'ACCUMULATION ET QUANTITE D'ECHANTILLON ANALYSE	39
4.2.3	PREPARATION DES ECHANTILLONS	39
4.2.4	INFLUENCE DU DEBIT DE LA POMPE ET DE LA LONGUEUR DE LA TUBULURE	39
4.2.5	CONCLUSION : PARAMETRES DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	42
4.3	RESULTATS	44
4.3.1	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	44
4.3.2	FLUX DE RADON, COMMISSION EUROPEENNE, 1997	44
4.3.3	FLUX DE RADON ET DE THORON, UJIC & AL., 2010.....	45
4.3.4	TAUX D'EMANATION DE RADON, SAKODA & AL., 2011.....	47
4.3.5	TESTS EFFECTUES PAR LE LABORATOIRE CRIIRAD.....	48
SYNTHESE ET CONCLUSION.....		50

BIBLIOGRAPHIE	53
----------------------------	-----------

ANNEXES	55
----------------------	-----------

ANNEXE 1	CARRIERES DE RHONE-ALPES ET GRANULATS : TOUR D'HORIZON	56
ANNEXE 1.1	VUE D'ENSEMBLE	56
ANNEXE 1.2	GRANULATS / RHONE (8,0 Mt 2009)	57
ANNEXE 1.3	GRANULATS / ISERE (7,4 Mt 2009)	58
ANNEXE 1.4	GRANULATS / AIN (6,3 Mt 2009).....	59
ANNEXE 1.5	GRANULATS / DROME (5,7 Mt 2009).....	60
ANNEXE 1.6	GRANULATS / HAUTE-SAVOIE (4,6 Mt 2009).....	61
ANNEXE 1.7	GRANULATS / LOIRE (4,0 Mt 2009)	62
ANNEXE 1.8	GRANULATS / SAVOIE (2,9 Mt 2009).....	63
ANNEXE 1.9	GRANULATS / ARDECHE (1,4 Mt 2009).....	64
ANNEXE 2	QUESTIONNAIRE A DESTINATION DES CARRIERES DE RHONE-ALPES.....	65
ANNEXE 3	SPECTROMETRIE GAMMA : AGREMENTS DU LABORATOIRE CRIIRAD	68
ANNEXE 4	CHAINES DE DESINTEGRATION RADIOACTIVE DES TROIS FAMILLES DE RADIONUCLEIDES NATURELS.....	69
ANNEXE 5	RESULTATS DETAILLES DES ANALYSES PAR SPECTROMETRIE GAMMA.....	72
ANNEXE 6	RESULTATS DETAILLES DES MESURES DE FLUX DE RADON	77

Photographie 1	: carrière de granulats – dépôts de rivière	15
Photographie 2	: carrière de granulats – dépôts fluvio-glaciaires	15
Photographie 3	: carrière de granulats – concassé de roches plutoniques	15
Photographie 4	: carrière de granulats – concassé de roches calcaires.....	15
Photographie 5	: prélèvement de mélange béton	16
Photographie 6	: granulats – concassé de roches calcaires	16
Photographie 7	: granulats – dépôts fluvio-glaciaires.....	16
Photographie 8	: ciment Portland (CALCIA).....	18
Photographie 9	: ciment Portland (VICAT)	18
Photographie 10	: ciment naturel prompt (VICAT)	18
Photographie 11	: ciment fondu (KERNEOS).....	18
Photographie 12	: bloc béton (Valence Agglos)	19
Photographie 13	: béton cellulaire (Xella Thermopierre).....	19
Photographie 14	: brique IMERYS (Optibric PV3+).....	20
Photographie 15	: revêtement extérieur (gneiss)	22
Photographie 16	: circuit de mesure de flux d'exhalation de radon	43

Tableau 1 : caractéristiques des carrières dont les exploitants ont répondu positivement au questionnaire CRIIRAD	14
Tableau 2 : traitement des produits de carrière avant analyse	24
Tableau 3 : traitement des produits manufacturés avant analyse	25
Tableau 4 : principaux résultats des analyses par spectrométrie gamma de produits de carrière	26
Tableau 5 : principaux résultats des analyses par spectrométrie gamma d'échantillons de produits manufacturés	27
Tableau 6 : Flux de rayonnement gamma mesurés in situ sur les produits de carrière	30
Tableau 7 : radioactivité des matériaux de construction utilisés en Europe	32
Tableau 8 : indices I de bétons fabriqués à partir des granulats et ciments analysés par le laboratoire CRIIRAD	32
Tableau 9 : mesures de flux d'exhalation de radon de matériaux (source : RP 96)	45
Tableau 10 : flux d'exhalation de radon et de thoron de matériaux (source : Ujic & al., 2010).....	45
Tableau 11 : doses efficaces annuelles induites par des matériaux de construction (source : Ujic & al., 2010).....	46
Tableau 12 : corrélation entre flux de radon/thoron et teneurs en Ra226/Th232 (source : Ujic & al., 2010)..	46
Tableau 13 : Taux d'émanation de radon moyens de matériaux divers (source : Sakoda et al, 2011)	47
Tableau 14 : flux d'exhalation de radon de matériaux mesurés par le laboratoire CRIIRAD.....	49
Figure 1 : estimation de la répartition par type des granulats produits en Rhône-Alpes	12
Figure 2 : répartition par type des granulats produits dans le Rhône	57
Figure 3 : répartition par type des granulats produits en Isère.....	58
Figure 4 : répartition par type des granulats produits dans l'Ain	59
Figure 5 : répartition par type des granulats produits dans la Drôme	60
Figure 6 : répartition par type des granulats produits en Haute-Savoie.....	61
Figure 7 : répartition par type des granulats produits dans la Loire	62
Figure 8 : répartition par type des granulats produits en Savoie.....	63
Figure 9 : répartition par type des granulats produits en Ardèche	64
Graphe 1 : impact des taux de fuite et de rétrodiffusion sur l'augmentation de la concentration en radon dans un conteneur d'accumulation	35
Graphe 2 : influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur le signal « thoron ».....	40
Graphe 3 : influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur le signal « radon ».....	41
Graphe 4 : influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur le taux de fuite	42
Graphe 5 : résultats des principales études relatives à la mesure du taux d'émanation de radon des matériaux (source : Sakoda et al, 2011).....	48
Schéma 1 : circuit de mesure du flux d'exhalation d'un matériau au moyen d'un moniteur Alphaguard (source : Saphymo).....	38

INTRODUCTION

Les radionucléides naturels primordiaux (uranium 238, thorium 232, potassium 40) et leurs descendants sont omniprésents dans la croûte terrestre et les matériaux de construction. Leur présence dans les sols et les matériaux de construction est à l'origine des principales voies d'exposition à la radioactivité naturelle, à travers :

- l'**inhalation du radon**, gaz radioactif naturel issu de la désintégration de l'uranium. Selon l'InVS¹, il serait responsable de 1 500 à 3 000 décès annuels par cancer du poumon en France,
- l'**irradiation externe** induite par les rayonnements provenant de ces radionucléides.

Il existe des solutions pour réduire cette exposition. Par exemple, l'irradiation peut être réduite en choisissant des matériaux pauvres en radionucléides naturels. A l'inverse, une méconnaissance de ces voies d'exposition peut entraîner une augmentation du risque.

Depuis les années 90, la réglementation tend à prendre en compte progressivement l'exposition à la radioactivité naturelle. Une nouvelle étape devrait être franchie avec une directive européenne devant paraître en 2013. D'ici quelques années, en application de cette directive, les catégories de matériaux susceptibles de présenter un risque devraient faire l'objet d'une caractérisation radiologique et, si nécessaire, être soumis à des restrictions d'usage. Ceci devrait concerner les matériaux présentant naturellement une radioactivité élevée (roches granitiques par exemple) ainsi que les matériaux dans lesquels la radioactivité naturelle a été concentrée (cendres volantes, phosphogypse, sous-produits des industries sidérurgiques et minières,...).

La littérature scientifique internationale comporte des milliers de données relatives à la radioactivité des matériaux de construction produits et/ou utilisés dans de nombreux pays (Italie, Grèce, Pologne, Egypte, République Tchèque, Egypte, Syrie, Brésil, Chine, Japon, ...), mais en France, et a fortiori en Rhône-Alpes, très peu d'études ont été réalisées.

Comme le montrent les retours d'expérience des formations dispensées par la CRIIRAD dans le cadre du partenariat avec la Région Rhône-Alpes, les professionnels du bâtiment sont pourtant très demandeurs de données scientifiques concrètes et d'éléments de comparaison sur cette question.

Partant de ce constat, afin d'anticiper les évolutions réglementaires à venir, la CRIIRAD a proposé d'effectuer un premier état des lieux non exhaustif en collectant 40 matériaux de construction produits et/ou utilisés en Rhône-Alpes et de déterminer leurs caractéristiques radiologiques.

Cette étude a comporté 4 volets :

- dans un premier temps, une recherche bibliographique a permis de dresser une liste des principales familles de matériaux de construction à contrôler, d'établir un plan d'échantillonnage et de collecter les matériaux ;
- les échantillons ont ensuite fait l'objet d'analyses par spectrométrie gamma au laboratoire CRIIRAD, afin d'évaluer le risque lié à l'irradiation externe ;
- une méthodologie d'évaluation du flux d'exhalation de radon produits par ces matériaux a ensuite été testée, en sachant qu'à ce jour, ce type de mesure ne fait pas encore l'objet d'une norme internationale ;
- enfin, les résultats des analyses ont été interprétés à la lumière des dispositions du projet de nouvelle directive européenne. Il convient de signaler qu'une analyse critique de ce projet serait nécessaire, mais nécessiterait une étude spécifique et ne rentre pas dans le champ du présent rapport.

¹ Catelinois O. & al., Évaluation de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France, InVS, Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire n°18-19, 15 mai 2007

1 REGLEMENTATION RELATIVE A LA RADIOACTIVITE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

1.1 SITUATION ACTUELLE : DIRECTIVE EURATOM 96/29

On peut distinguer trois types de matériaux de construction riches en éléments radioactifs.

- 1. Radioactivité naturelle** : les matériaux fabriqués à partir de matières premières naturellement riches en éléments radioactifs, comme par exemple certaines roches granitiques (utilisées telles quelles sous forme de pierres de taille, ou incorporées au béton après concassage).
- 2. Radioactivité naturelle renforcée** : les matériaux contenant des produits dans lesquels un processus industriel a concentré les éléments radioactifs naturellement présents dans les matières premières. Il peut s'agir par exemple des cendres volantes issues de la combustion de charbon en centrale thermique, ou des sous-produits des industries sidérurgiques et métallurgiques (laitiers de hauts-fourneaux, boues rouges issues de la production d'aluminium, ...). Ces matériaux sont parfois appelés RNR (à Radioactivité Naturelle Renforcée) ou TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials).
- 3. Activités nucléaires** : l'ajout volontaire de substances radioactives dans les matériaux de construction ou le recyclage de matières provenant d'une activité nucléaire et susceptibles d'être contaminées ou activées.

La présente étude concerne uniquement les catégories n°1 et 2, et plus particulièrement la première catégorie (radioactivité naturelle). La question de la réglementation relative à la catégorie n°3 (activités nucléaires) est complexe et nécessiterait une étude spécifique².

Pour la France et les autres membres de l'Union Européenne, les réglementations nationales relatives à la protection contre les dangers des rayonnements ionisants découlent de directives européennes.

Actuellement, les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants sont établies par la directive Euratom 96/29 du 13 mai 1996.

Cette directive introduit un début de réglementation relative à la radioactivité naturelle : « conformément au titre VII, [la présente directive] s'applique également aux activités professionnelles qui ne sont pas couvertes par le paragraphe 1³ mais qui impliquent la présence de sources naturelles de rayonnement et entraînent une augmentation notable de l'exposition des travailleurs ou du public, non négligeable du point de vue de la protection contre les rayonnements »⁴.

Selon le titre VII de la directive, une surveillance de l'exposition et, « selon les besoins », des actions correctives et des mesures de protection doivent être mises en œuvre pour plusieurs catégories professionnelles, et notamment les « activités professionnelles entraînant la production de résidus, non considérés habituellement comme radioactifs, mais qui contiennent naturellement des radionucléides

² Concernant ce point, rappelons simplement que la CRIIRAD a mené des campagnes de mobilisation qui ont contribué à la mise en place, dans le dispositif réglementaire français, d'un régime d'interdiction (assorti toutefois de possibilités de dérogation), plus restrictif que le régime d'autorisation préalable tel que défini par la directive 96/29/EURATOM. Pour plus de renseignements sur ce sujet : <http://www.criirad.org/mobilisation/5mai2009.html> .

³ « Risque dû aux rayonnements ionisants émanant soit d'une source artificielle, soit d'une source naturelle de rayonnement lorsque les radionucléides naturels sont traités, ou l'ont été, en raison de leurs propriétés radioactives, fissiles ou fertiles » (directive 96/29/EURATOM du Conseil du 13 mai 1996, extrait du titre II, article 2, alinéa 1).

⁴ Directive 96/29 EURATOM du Conseil du 13 mai 1996, extrait du titre II, article 2, alinéa 2.

provoquant une augmentation notable de l'exposition des personnes du public et, le cas échéant, des travailleurs »⁵.

Suite à l'adoption de cette directive, plusieurs articles ont été introduits dans le Code français de la santé publique :

- d'après l'article R. 1333-13 et l'arrêté d'application du 25 mai 2005, les chefs d'entreprise de certaines catégories d'activités professionnelles mettant en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides non utilisés en raison de leurs propriétés radioactives doivent mettre en place un dispositif d'évaluation de l'exposition aux rayonnements des travailleurs et de la population ;
- l'article R. 1333-14 prévoit qu'en cas de présence, dans les produits de construction, de radionucléides naturels non utilisés pour leurs propriétés radioactives, fissiles ou fertiles, les ministres chargés de la santé et de la consommation (conjointement, selon le cas, avec les ministres chargés de la construction ou de l'agriculture) peuvent fixer des contraintes de fabrication, notamment des limites de radioactivité dans les produits commercialisés, et définir les modalités suivant lesquelles il doit être procédé à une information des consommateurs. A ce jour, aucun texte n'a été publié dans ce cadre.

1.2 PROJET DE NOUVELLE DIRECTIVE EURATOM DITE « BSS »

En 2011, la Commission européenne a proposé un projet de nouvelle directive dont les dispositions visent spécifiquement la radioactivité des matériaux de construction. Cette directive, dite « BSS » (Basic Safety Standards) mentionne deux voies d'exposition induites par les matériaux : l'exposition externe au rayonnement et l'émission de radon.

1.2.1 MATERIAUX ET EXPOSITION EXTERNE

Selon l'article 2.3 du projet, « la présente directive s'applique à [...] l'exposition externe au rayonnement provenant de matériaux de construction ».

Les dispositions relatives à la gestion du risque lié à l'exposition externe sont présentées dans l'article 75.

Dans un premier temps, chaque Etat membre doit lister les catégories de matériaux susceptibles d'émettre un flux de rayonnement gamma élevé. Ils peuvent se baser sur la liste indicative de l'annexe XI du projet de directive :

«

1. Matériaux naturels
 - a. Schistes d'alun.
 - b. Matériaux de construction ou additifs d'origine magmatique naturelle, tels que :
 - le granit,
 - le gneiss,
 - les porphyres,
 - la syénite,
 - le basalte,
 - le tuf,
 - la pouzzolane,
 - la lave.

⁵ Directive 96/29 EURATOM du Conseil du 13 mai 1996, extrait du titre VII, article 40, alinéa 2c.

2. Matériaux contenant des résidus de secteurs d'activité traitant des matières radioactives naturelles, tels que :

- les cendres volantes,
- le phosphogypse,
- les scories phosphoriques,
- les scories tannifères,
- les scories de cuivre,
- les boues rouges (résidus de la production d'aluminium),
- les résidus de la sidérurgie. »

Dans un second temps, les secteurs d'activité mettant sur le marché les matériaux appartenant à l'une des catégories de la liste établie par chaque Etat membre doivent déterminer les concentrations de leurs produits en radium 226, thorium 232 (ou son produit de désintégration radium 228) et potassium 40⁶.

Ils calculent ensuite la valeur de l'indice de concentration d'activité **I** selon la formule suivante :

$$I = \frac{C_{Ra\ 226} (Bq / kg)}{300} + \frac{C_{Th\ 232\ ou\ Ra\ 228} (Bq / kg)}{200} + \frac{C_{K\ 40} (Bq / kg)}{3000}$$

Cet indice « s'applique au matériau de construction et non à ses composants. Pour appliquer l'indice à ces composants, et notamment aux résidus de secteurs d'activité traitant des matières radioactives naturelles qui sont recyclées dans des matériaux de construction, il convient d'appliquer un facteur de répartition approprié »⁷.

Les matériaux sont ensuite classés en fonction de la valeur de l'indice **I**.

Si **I** est **inférieur à 1** dans le cas de « **matériaux utilisés en grosses quantités** » ou à **6** dans le cas de « **matériaux de surface et autres matériaux à usage restreint** », on considère que l'exposition dans un bâtiment construit avec ce matériau est **inférieure à 1 milliSievert⁸ (mSv) par an**. Dans ce cas, les matériaux « ne sont soumis à aucune restriction en ce qui concerne leur mise sur le marché dans l'Union ». « La surveillance de ces matériaux de construction doit cependant être poursuivie pour garantir que la concentration d'activité reste conforme au niveau de référence ».

Si **I** est **supérieur à 1**, « **l'autorité compétente arrête des mesures appropriées pouvant aller de l'enregistrement et de l'application générale des codes de construction pertinents à des restrictions particulières à l'usage envisagé de ces matériaux** ».

Les résultats des tests (concentration en radium 226, thorium 232, potassium 40, indice **I** et classification du matériau) doivent être publiés « avant la mise sur le marché des types de matériaux de construction précités ».

L'origine des valeurs de référence de l'indice **I** est présentée dans la publication RP112⁹ de la Commission Européenne.

Selon ce texte, les paramètres de calcul sont les suivants :

- dimensions de la pièce : 4 m * 5 m * 2,8 m ;
- épaisseur des matériaux émetteurs : 20 cm ;

⁶ La version française comporte une erreur : « Ra-226, Th-232 (ou son produit de désintégration K-40) ». La version anglaise est correcte : « Ra-226, Th-232 (or its decay product Ra-228) ».

⁷ Le projet de directive ne donne pas de précisions concernant le facteur de répartition.

⁸ Le Sievert est l'unité utilisée pour évaluer quantitativement l'impact biologique d'une exposition à des rayonnements ionisants. Le choix de cette valeur de 1 milliSievert par an est sujet à critique, mais ceci sort du cadre de la présente étude.

⁹ European Commission, Radiation protection 112, Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, 1999.

- durée d'exposition annuelle : 7 000 heures (80% du temps, 19 heures par jour) ;
- structures à l'origine de l'irradiation : sol, murs et plafond.

A partir de ces paramètres, une exposition annuelle ajoutée par irradiation externe de 1 mSv serait atteinte pour une concentration dans les matériaux de construction de la pièce :

- d'environ 300 Bq/kg de radium 226 ou 200 Bq/kg de thorium 232 ou 3 000 Bq/kg de potassium 40¹⁰ pour des « matériaux utilisés en grosses quantités » c'est-à-dire un ensemble murs-sol-plafond de 20 cm d'épaisseur et de 2350 kg/m³ de masse volumique,
- d'environ 1 700 Bq/kg de radium 226 ou 1 500 Bq/kg de thorium 232 ou 21 000 Bq/kg de potassium 40¹¹ pour des « matériaux de surface » c'est-à-dire un matériau de 3 cm d'épaisseur et de 2600 kg/m³ de masse volumique recouvrant l'ensemble des murs.

Selon ces évaluations, une exposition ajoutée de 1 mSv/an correspondrait à un indice I arrondi à 1 pour les « matériaux utilisés en grosse quantité » et à un indice I arrondi à 6 pour les « matériaux de surface ».

Les résultats de ces évaluations doivent toutefois être pris avec précaution, dans la mesure où, dans la réalité, les paramètres de calcul peuvent varier selon les cas de figure :

- le modèle de calcul est basé sur une pièce de 20 m² de superficie. Dans une pièce de superficie plus faible, la dose induite par l'irradiation externe pourrait être plus élevée, du fait d'une réduction de la distance entre les personnes et les surfaces émettrices de rayonnement. Or dans un logement classique, les pièces les plus occupées (cuisine et surtout chambres) présentent généralement une superficie inférieure à 20 m². Par ailleurs, il n'est pas précisé à quel emplacement de la pièce se trouve la personne exposée dans le modèle. Or le flux de rayonnement diffère selon que la personne est située au centre de la pièce, près d'un mur ou dans un angle ;
- l'épaisseur et la masse volumique des matériaux émetteurs peuvent également varier d'un matériau à l'autre, et donc modifier la dose induite par l'irradiation externe.

Certains pays ont choisi de prendre en compte la variabilité des paramètres de calcul.

Ainsi, le standard israélien IS 5098 établit des limites relatives à la teneur en radionucléides naturels des matériaux de construction.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas consulté directement cette norme, mais une présentation qui en a été faite en 2005¹². Selon ce texte, le standard présente des tables de limites d'activités massiques en radium 226, thorium 232 et potassium 40. Les limites varient en fonction de la masse volumique du matériau (dans une gamme comprise entre 400 et 2 700 kg/m³) et de son épaisseur (dans une gamme comprise entre 2 et 24 cm).

Ces tables prennent également en compte l'émanation de radon : pour une densité et une épaisseur données de matériau, la valeur limite du radium 226 comporte trois valeurs, pour un taux d'émanation en radon de 1%, 3% ou 5%.

A titre d'exemple, pour un ensemble murs-sol-plafond de 20 cm d'épaisseur et un matériau de 2300 kg/m³ de masse volumique, les valeurs limites du standard israélien sont de 128 Bq/kg pour le

¹⁰ Selon le modèle de calcul de la publication RP 112, les valeurs exactes sont de 276 Bq/kg pour le radium 226, 231 Bq/kg pour le thorium 232 et 3 176 Bq/kg pour le potassium 40. Elles sont arrondies à la centaine pour le radium 226 et le thorium 232 et au millier pour le potassium 40.

¹¹ Selon le modèle de calcul de la publication RP 112, les valeurs exactes sont de 276 Bq/kg pour le radium 226, 231 Bq/kg pour le thorium 232 et 3 176 Bq/kg pour le potassium 40. Elles sont arrondies à la centaine pour le radium 226 et le thorium 232 et au millier pour le potassium 40.

¹² T. Schlesinger, Y. Grof, « Israeli Standard IS 5098 (Setting limits on the concentration of natural radionuclides in building products) », Workshop on environmental & health aspects of coal ash utilization in Israel, Tel Aviv, 23-24 November 2005

thorium 232, 52 à 116 Bq/kg pour le radium 226 (en fonction du taux d'émanation de radon) et 1 157 Bq/kg pour le potassium 40.

Ces valeurs sont plus restrictives que celles du projet de directive européenne. En effet, le standard israélien fixe une contrainte de dose de 0,45 mSv pour les matériaux. D'autre part, les paramètres utilisés pour l'estimation des doses sont plus contraignants : les dimensions de la pièce sont 3 m * 3 m * 2,7 m (soit 9 m² et non 20 m² comme dans le projet de directive européenne). Il est précisé que les doses sont modélisées pour une personne se situant au centre de la pièce.

Il convient enfin de noter que l'indice I tel que défini dans le projet de directive ne prend pas en compte l'exposition à d'autres types de rayonnement, notamment aux rayonnements bêta qui peuvent être non négligeables lorsque les personnes sont très proches des parois émettrices.

1.2.2 MATERIAUX ET EMISSION DE RADON

Le projet de directive mentionne le risque lié à l'émission de radon par les matériaux de construction, mais les prescriptions sont beaucoup moins précises que pour le risque lié à l'exposition externe. Dans le paragraphe établissant le champ d'application, le texte indique : « la présente directive s'applique à [...] l'exposition du public au radon à l'intérieur des bâtiments ».

L'article 74, consacré au « radon dans les logements et dans les bâtiments ouverts au public », indique : « Les Etats membres élaborent des codes de construction particuliers pour éviter la [...] pénétration de radon provenant des matériaux de construction ».

L'article 103 impose aux Etats membres la mise en place d'un plan d'action destiné à gérer le risque lié au radon, que celui-ci « provienne du sol, des matériaux de construction ou de l'eau ».

L'annexe XVI, qui liste les éléments devant figurer dans ce plan d'action, précise que doit être établi « un inventaire des matériaux de construction émettant du radon en quantité significative ».

Le projet de directive indique que les dispositions de l'article 75, consacré aux matériaux de construction, « sont applicables [...] aux matériaux de construction considérés par l'autorité comme préoccupants dans le cadre du plan national d'action sur le radon, conformément à l'article 103 ». L'article 75 ne donne toutefois pas plus de précisions concernant l'évaluation pratique de l'émission de radon par les matériaux.

Le projet de directive mentionne donc bien le risque lié à l'émission de radon, mais il reste très évasif sur cette question.

Certains textes nationaux abordent ce point de façon plus précise.

Le cas d'Israël a été évoqué dans le paragraphe précédent.

L'Autriche a publié un standard, ÖNORM S 5200, qui fixe des limites relative à la radioactivité naturelle des matériaux de construction.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas consulté directement ce standard, mais une présentation qui en a été faite en 1999¹³. Selon ce texte, le standard utilise une formule comparable à celle de l'indice I proposée dans le projet de directive européenne, mais un deuxième terme a été ajouté à l'élément radium. La formule de calcul de l'indice est de la forme suivante :

$$I = \frac{C_{Th\ 232} (Bq / kg)}{X} + \frac{C_{Ra\ 226} (Bq / kg)}{Y} * (1 + 0,15 * \varepsilon * \rho * d) + \frac{C_{K\ 40} (Bq / kg)}{Z}$$

ε correspond au taux d'émanation de radon, ρ à la masse volumique du matériau et d à son épaisseur.

¹³ F. Steger & K. Grün, "Radioactivity in building materials ÖNORM S 5200 : a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials (revised and definite version)", Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece.

2 CHOIX DE MATERIAUX A ANALYSER

2.1 VUE D'ENSEMBLE

Les matériaux de construction sont les matériaux utilisés dans le secteur du bâtiment et le secteur des travaux publics.

Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés aux matériaux utilisés dans le bâtiment.

En effet, compte tenu du temps d'exposition, c'est à l'intérieur des bâtiments, et plus particulièrement des logements, que la population est la plus exposée à la radioactivité des matériaux de construction. Selon une étude de l'InVS et du CSTB¹⁴, les français passent en moyenne 67,5% de leur temps dans leur logement. Pour 25% de la population, le temps passé dans le logement est supérieur à 83%.

Il existe une grande variété de matériaux de construction employés dans un bâtiment. Sauf cas particulier, l'exposition à la radioactivité est principalement due aux matériaux constitutifs des murs porteurs, compte tenu de l'importance de leur volume.

En 2007, les principaux éléments constitutifs des murs extérieurs ont été les suivants¹⁵ :

- **Maisons individuelles :**
 - **84% béton** (84% blocs béton)
 - **14% briques** (11% briques creuses, 3% briques pleines)
 - 2% autres
- **Logements collectifs :**
 - **92% béton** (60% béton banché, 32% blocs béton)
 - **4% briques** (2% briques creuses, 2% briques pleines)
 - 3% autres

En France, les murs extérieurs porteurs sont donc dans leur grande majorité constitués de béton. Le deuxième matériau le plus employé est la brique. On note une augmentation lente mais progressive de la part des briques par rapport à la part du béton.

Compte tenu de ces données, le choix des matériaux à analyser s'est essentiellement porté vers les principaux éléments constitutifs du **béton** ainsi que vers les **briques**.

En complément, le laboratoire CRIIRAD a analysé plusieurs échantillons présentant un intérêt spécifique :

- 5 échantillons de **plaques de plâtre**, dans la mesure où ce type de matériau est susceptible de présenter une teneur élevée en éléments radioactifs, notamment lorsqu'il est fabriqué à base de phosphogypse,
- du sable ponctuellement utilisé pour des travaux de voirie ou pour du béton de chantier, présentant potentiellement une teneur élevée en éléments radioactifs naturels car issu du curage d'un torrent situé dans un massif granitique alpin,
- un produit réfractaire utilisé en tant qu'additif dans le ciment, présentant potentiellement une teneur en éléments radioactifs plus élevée que les autres composants du ciment, car produit dans une carrière de Rhône-Alpes située dans une région granitique,
- un échantillon de pierre utilisée comme revêtement extérieur, ayant présenté un flux de rayonnement gamma plus élevé que les autres matériaux du même rayon, lors du balayage radiométrique effectué

¹⁴ A. Zegnoun & al., Estimation du temps passé à l'intérieur du logement de la population française, Novembre 2008.

¹⁵ Source : Yvon GOURLAOUEN, « les matériaux de construction », édition 2007, SESSI, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie

dans un magasin de distribution de matériaux de construction par un technicien CRIIRAD lors de l'achat de matériaux à analyser.

Il est important de noter que cette étude n'a pas pour objectif de donner une vision exhaustive de la radioactivité des matériaux de construction en Rhône-Alpes. Il s'agit de disposer d'un premier niveau d'information concernant la radioactivité des principaux types de matériaux produits ou commercialisés en Rhône-Alpes et de comparer ces données avec celles disponibles dans la littérature scientifique, abondante au niveau international mais très lacunaire en France.

L'étude n'a pas porté spécifiquement sur les catégories de matériaux connues pour présenter une radioactivité élevée (cendres volantes, scories, boues rouges, mâchefer, ...) mais s'est principalement orientée vers des matériaux naturels issus de la région.

2.2 GRANULATS

Les principaux éléments constitutifs du béton sont :

- les granulats, sables + graviers (environ 80% de la masse),
- le ciment (environ 15% de la masse),
- l'eau,
- les adjuvants (dose inférieure ou égale à 5% de la masse de la teneur en ciment).

2.2.1 GENERALITES¹⁶

Les granulats sont des fragments de roches d'une taille inférieure à 125 mm, utilisés pour les ouvrages de travaux publics, de génie civil ou pour les bâtiments.

Compte tenu de la prépondérance du béton, les granulats sont en France le principal matériau employé pour les murs porteurs extérieurs d'un bâtiment. Toutefois, moins d'un quart des granulats est utilisé dans le bâtiment. Les routes consomment plus de la moitié des granulats. Le quart restant est utilisé pour les ouvrages de génie civil.

Les granulats peuvent être présents à l'état naturel (sables, graviers) ou obtenus par concassage.

Les granulats peuvent être classés selon trois types :

- les **granulats alluvionnaires** sont extraits des lits actuels ou anciens de rivières. Ces gisements meubles ne nécessitent généralement pas de concassage ;
- les **granulats de roches massives** sont produits par concassage de roches consolidées. Les roches d'origine peuvent être plutoniques¹⁷ (granites par exemple), métamorphiques ou sédimentaires (calcaires par exemple) ;
- les **granulats de recyclage**. Ces derniers sont obtenus par concassage de matériaux de démolition ou de sous-produits de l'industrie (laitiers, mâchefers, ...).

La production annuelle de granulats en France est de l'ordre de 400 millions de tonnes (Mt).

Compte tenu des contraintes environnementales, les autorités incitent les producteurs à réduire la part des granulats alluvionnaires (plus simples à exploiter mais perturbant le milieu aquatique) au profit des granulats de roches massives et des granulats de recyclage.

Ainsi, la part dans la production globale :

- des roches massives est passée de 42% en 1988 à 55% en 2009,

¹⁶ Sources :

- Yvon GOURLAOUEN, « les matériaux de construction », édition 2007, SESSI, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie
- UNPG, « Le marché des granulats en 2009 »
- UNICEM, « Enquête de branche 2009 »
- Wikipédia, article « granulat »

¹⁷ Les roches plutoniques sont formées par refroidissement d'un magma à une certaine profondeur. Au sens large, on ajoute à cette catégorie les roches filoniennes formées en périphérie des plutons.

- des roches meubles est passée de 55% en 1988 à 39% en 2009,
- des granulats de recyclage est passée de 3,5% en 1988 à 6% en 2009 (dont 4,3% de matériaux de démolition, 0,6% de schistes, 0,6% de laitiers et 0,6% de mâchefer).

2.2.2 GRANULATS PRODUITS EN RHONE-ALPES¹⁸

La région Rhône-Alpes est la première productrice française de granulats. En 2009, elle a fourni 40,5 Mt (soit plus de 10% de la production française), réparties de la manière suivante :

- 65% de roches meubles,
- 28% de roches massives,
- 7% de granulats de recyclage.

La part des roches meubles est donc nettement plus élevée qu'à l'échelle nationale, au détriment de la part de roches massives.

Les roches meubles d'origine des granulats sont classées en deux sous-types : alluvions et matériaux fluvio-glaciaires. Les alluvions sont les matériaux alluvionnaires de cours d'eau proprement dits. Les matériaux fluvio-glaciaires sont des sédiments continentaux contenant des matériaux transportés par des glaciers, puis repris par des cours d'eau.

Les roches massives sont également classées en deux sous-types : roches calcaires et roches éruptives (principalement granitiques).

Granulats produits en Rhône-Alpes

Estimation 2009 basée sur les SDC et
l'évolution du ratio France roches meubles / roches massives / recyclage

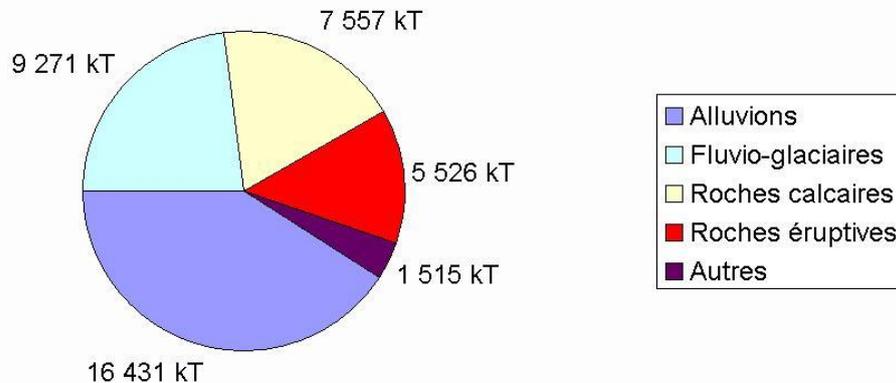


Figure 1 : estimation de la répartition par type des granulats produits en Rhône-Alpes

Toujours pour l'année 2009, les départements de Rhône-Alpes sont classés de la façon suivante :

1. RHÔNE : 8,0 Mt
2. ISERE : 7,4 Mt
3. AIN : 6,3 Mt
4. DRÔME : 5,7 Mt
5. HAUTE-SAVOIE : 4,6 Mt
6. LOIRE : 4,0 Mt
7. SAVOIE : 2,9 Mt
8. ARDECHE : 1,4 Mt

¹⁸ Sources : schémas départementaux des carrières (SDC).

Une description de la production de chaque département est présentée en ANNEXE 1 page 56.

2.2.3 CHOIX DES CARRIERES

Pour l'échantillonnage, le laboratoire de la CRIIRAD a adressé fin 2011 un questionnaire aux 409 carrières de Rhône-Alpes en exploitation à ce jour d'après l'Observatoire des matériaux¹⁹.

Ce questionnaire avait pour but :

- de vérifier que la base des carrières de l'Observatoire des matériaux était à jour, notamment en ce qui concerne le statut de la carrière (en activité ou non) et les coordonnées de l'exploitant,
- d'identifier les exploitants intéressés par des analyses gratuites d'échantillons de matériaux, étant entendu que, les résultats de ces analyses seraient exploités anonymement.

Compte tenu du faible nombre de réponses, une relance a été effectuée début 2012.

Au total, les exploitants de 64 carrières (soit 15% de l'ensemble des carrières) ont répondu au questionnaire.

Pour 41 carrières, l'exploitant a répondu positivement à la possibilité d'un échantillonnage de matériaux pour analyses radiologiques.

Pour les 23 autres carrières, la réponse a été négative.

A noter que pour tous les questionnaires retournés, l'exploitant a indiqué ne pas avoir déjà effectué d'analyses radiologiques sur le site.

¹⁹ Source : <http://materiaux.brgm.fr/>.

2.2.3.1 Réponses positives au questionnaire

Les caractéristiques des carrières ayant répondu positivement au questionnaire sont présentées dans le tableau ci-dessous.

La localisation des carrières n'est pas indiquée, afin de respecter l'anonymat des exploitants.

Les 16 carrières dont un échantillon a été analysé dans le cadre de cette étude sont surlignées.

Nom de carrière	Production 2010 (kt)	Béton prêt à l'emploi	Produits en béton	Bétons de chantier	Ciment	Produits hydro-carbonés	Produits inertes	Pierres naturelles	Autres	Géologie	Eau
Carrière 01	395	X	X	X		X	X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	En eau
Carrière 02	217	X	X	X			X			Alluvions (calcaire)	En eau
Carrière 03	130	X	X	X		X	X			Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 04	200	X	X	X			X			Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 05	86	X		X			X			Alluvions (argilo-calcaire)	Hors d'eau
Carrière 06	91	X		X			X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	En eau
Carrière 07	46	X		X			X			Alluvions (calcaire)	Hors d'eau
Carrière 08	46	X		X			X			Alluvions (calcaire)	Hors d'eau
Carrière 09	40	X		X			X			Alluvions (calcaire)	Hors d'eau
Carrière 10	200	X		X			X			Alluvions (plutonique)	En eau
Carrière 11	50	X		X		X	X			Roche plutonique (éboulis)	Hors d'eau
Carrière 12	480	X				X	X			Alluvions (calcaire)	En eau
Carrière 13	220	X					X			Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 14	480	X				X	X			Roche plutonique	Hors d'eau
Carrière 15	129		X				X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	Hors d'eau
Carrière 16	44		X				X	X		Alluvions (calcaire)	En eau
Carrière 17	7,7			X			X	X		Dépôts éoliens	En eau
Carrière 18	53			X			X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	Hors d'eau
Carrière 19	10			X			X			R. plutonique (dép. torrentiels)	Hors d'eau
Carrière 20	0			X			X			R. plutonique (dép. torrentiels)	En eau
Carrière 21	66,9			X			X	X		Alluvions (fluvio-glaciaire)	Hors d'eau
Carrière 22	1668				X		X			Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 23	63					X	X			Roche métamorphique	Hors d'eau
Carrière 24	13						X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	Hors d'eau
Carrière 25	-						X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	Hors d'eau
Carrière 26	20						X			Alluvions (fluvio-glaciaire)	Hors d'eau
Carrière 27	17						X	Murs en pierre massive	Blocs d'enrochements	Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 28	35						X			Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 29	70						X			Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 30	12						X			Roche calcaire (éboulis)	Hors d'eau
Carrière 31	17						X			Roche plutonique	Hors d'eau
Carrière 32	110						X			Roche plutonique	Hors d'eau
Carrière 33	5						X			Roche plutonique	Hors d'eau
Carrière 34	0,76							X		Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 35	50							X		Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 36	0,35							X		Roche calcaire	Hors d'eau
Carrière 37	0,14							X		Roche calcaire	NR
Carrière 38	6								Pierres réfractaires Fours à bois	Roche plutonique	NR
Carrière 39	13								Tuiles	Dépôts éoliens	Hors d'eau
Carrière 40	128,7									Roche calcaire (éboulis)	NR
Carrière 41	11									Roche calcaire (éboulis)	Hors d'eau

NR = non renseigné

Tableau 1 : caractéristiques des carrières dont les exploitants ont répondu positivement au questionnaire CRIIRAD

Sur les 41 carrières, 21 produisent des matériaux destinés à la fabrication de béton hydraulique, c'est-à-dire dont le liant est de type « ciment » (plutôt utilisés dans le bâtiment), par opposition aux bétons hydrocarbonés dont le liant est de type « bitume » (plutôt utilisé pour les travaux routiers). C'est dans ces carrières que le laboratoire de la CRIIRAD a choisi de prélever des échantillons de granulats à analyser.

Parmi les 21 carrières, 14 ont été choisies, selon les critères suivants :

- couverture des 8 départements de la région. Les échantillons ont été prélevés dans 5 carrières de l'Ain, 2 carrières de l'Ardèche, de la Drôme et de la Loire, 1 carrière du Rhône, de la Haute-Savoie et de la Haute-Savoie,
- couverture des 4 principaux types géologiques de granulats (alluvions de rivière, alluvions fluvio-glaciaires, concassés de roches calcaires, concassés de roches plutoniques).



Photographie 1 : carrière de granulats – dépôts de rivière



Photographie 2 : carrière de granulats – dépôts fluvio-glaciaires



Photographie 3 : carrière de granulats – concassé de roches plutoniques



Photographie 4 : carrière de granulats – concassé de roches calcaires

Dans chaque carrière visitée, l'intervenant CRIIRAD a :

- prélevé un échantillon de mélange béton, c'est-à-dire un mélange de sable et de graviers préparé par l'exploitant et destiné à la fabrication du béton par ajout ultérieur de ciment et d'eau. La plupart des échantillons présentaient une granulométrie comprise entre 0 et 20 ou 22 millimètres. L'une des carrières proposait un mélange plus fin (0-15 mm), une autre proposait un mélange plus grossier (0-60 mm),
- effectué un relevé radiométrique au contact et à 1 mètre du tas de mélange béton disponible à la vente. Ce relevé avait pour but d'estimer le flux de rayonnement gamma typique du matériau dans son environnement. Il ne s'agissait pas d'étudier de manière détaillée la variabilité du flux de rayonnement gamma dans l'ensemble de chaque carrière : ceci aurait nécessité une intervention spécifique de longue durée sur chaque site, ainsi qu'un équipement de protection approprié compte tenu des risques liés aux lieux d'extraction proprement dits (éboulement, circulation d'engins de chantier, ...).



Photographie 5 : prélèvement de mélange béton

En complément des mélanges béton prélevés dans ces 14 carrières, le laboratoire CRIIRAD a également :

- prélevé et analysé un échantillon de sable issu du curage d'un torrent situé dans un massif granitique alpin. Les produits de cette exploitation ne rentrent pas strictement dans la catégorie « mélanges béton » car ils ne sont utilisés que ponctuellement pour du béton de chantier. Le laboratoire CRIIRAD a choisi d'intégrer cette exploitation à l'étude compte tenu de la teneur potentiellement élevée en radionucléides naturels de ce type de secteur ;
- analysé un échantillon de produit réfractaire utilisé en tant qu'additif dans le ciment. Ce produit est extrait d'une carrière de Rhône-Alpes située dans une région granitique. L'échantillon a été expédié par le producteur au laboratoire CRIIRAD.



Photographie 6 : granulats – concassé de roches calcaires



Photographie 7 : granulats – dépôts fluvioglaciers

2.3 CIMENT

Le ciment, second élément constitutif du béton, est un liant hydraulique provenant généralement de la cuisson d'un mélange de calcaire, d'argile et de gypse.

A ce jour il existe en France 5 cimentiers : LAFARGE CEMENTS (13 sites de production), CEMENTS CALCIA (10 sites de production), HOLCIM France (8 sites de production), VICAT (7 sites de production) et KERNEOS (3 sites de production).

Trois d'entre eux sont implantés en Rhône-Alpes : VICAT (3 sites de production en Isère), LAFARGE CEMENTS (deux sites de production, l'un dans le Rhône et l'autre en Ardèche), CALCIA (un site de production en Ardèche).

Il existe 5 types de ciments courants :

- les ciments Portland (CEM I) sont composés de clinker²⁰ à au moins 95% ;
- les ciments Portland composé (CEM II) sont principalement composés de clinker (65 à 94%). Ils peuvent contenir divers types d'autres constituants (laitiers, pouzzolanes²¹, cendres siliceuses, fumées de silice, cendres calciques, schistes, calcaires). Ce type de ciment est le principal commercialisé,
- les ciments de haut fourneau (CEM III) sont composés de clinker (5 à 64%) et de laitier de haut fourneau (36 à 95%),
- les ciments pouzzolaniques (CEM IV) sont composés de clinker (45 à 90%) et d'un mélange de pouzzolanes, de cendres siliceuses et de fumée de silice (10 à 55%),
- les ciments composés (CEM V) contiennent 20 à 64% de clinker, 18 à 50% de laitier de haut fourneau et 18 à 50% d'un mélange de pouzzolanes et de cendres siliceuses.

Il existe d'autres types de ciments, et notamment :

- le ciment prompt naturel (CNP), obtenu par cuisson d'un calcaire argileux de composition régulière. La société VICAT exploite en Isère le seul gisement européen de calcaire permettant de produire du ciment prompt d'origine naturelle ;
- le ciment alumineux fondu, ou ciment d'aluminate de calcium (CAC), obtenu par cuisson « d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30% de sa masse d'alumine »²².

Le laboratoire CRIIRAD a choisi d'analyser un échantillon des principaux types de ciment CEM II commercialisés dans les magasins de distribution de matériaux de construction et produits en Rhône-Alpes :

- CALCIA Technocem blanc, produit à Cruas (Ardèche),
- LAFARGE Le Classic, produit au Teil (Ardèche),
- VICAT Ouvrages courants, produit à Montalieu (Isère),
- LAFARGE Sensium technologie sans poussière, produit au Teil (Ardèche).

Les échantillons ont été principalement achetés dans un magasin de distribution de matériaux de construction de Valence (26), à l'exception du ciment CALCIA, non distribué dans ce magasin et acheté dans un autre magasin de Valence.

Lors de l'achat, le personnel du magasin a autorisé l'intervenant CRIIRAD à effectuer un balayage rapide au moyen d'un scintillomètre SPP2 sur les ciments disponibles à la vente. Tous les sacs de ciment présentaient un flux de rayonnement gamma classique (inférieur à 50 c/s), à l'exception d'un lot de ciment fondu (CAC) produit par la société KERNEOS à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), qui présentait un flux de rayonnement gamma d'environ 100 c/s. Le laboratoire CRIIRAD a décidé d'échantillonner également un sac de ce matériau.

Ont également été achetés un échantillon de ciment naturel prompt LE PROMPT VICAT produit à Saint-Égrève (Isère), ainsi qu'un sac de marque générique INDIBETON de produit béton prêt à l'emploi (mélange béton + ciment) produit à Montluel (Ain).

²⁰ Principal constituant des ciments, obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile.

²¹ « Produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques ». Source : Infociments, « La normalisation française des ciments » (www.infociments.fr/telecharger/CT-G56.pdf).

²² Source : cf. note 21.



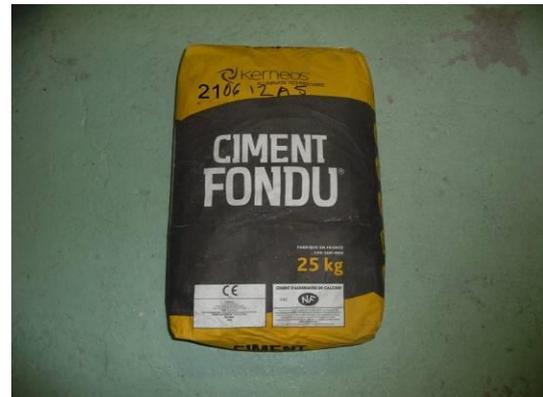
Photographie 8 : ciment Portland (CALCIA)



Photographie 9 : ciment Portland (VICAT)



Photographie 10 : ciment naturel prompt (VICAT)



Photographie 11 : ciment fondu (KERNEOS)

2.4 BLOCS BETON

Le béton est commercialisé sous trois formes principales : le béton prêt à l'emploi, le bloc béton ou le béton de chantier.

Le béton prêt à l'emploi est « préparé dans des installations fixes puis transporté sur les lieux d'utilisation par camion »²³. Le béton de chantier est « fabriqué directement sur les chantiers par les entreprises du bâtiment »²⁴. Le bloc béton est un élément de maçonnerie moulé, couramment appelé « parpaing ».

Le laboratoire CRIIRAD a choisi d'inclure dans l'étude l'analyse de quelques échantillons de blocs de béton :

- un bloc de maçonnerie classique et un bloc de béton à bancher produits par VALENCE AGGLOS dans la Drôme,
- un bloc de maçonnerie classique produit par la société GGI en Savoie,
- un bloc de maçonnerie classique produit par la société COTTIN en Haute-Savoie.

Il convient de signaler que ces échantillons ne sont pas représentatifs de l'ensemble des blocs béton produits en Rhône-Alpes. En effet, il existe de nombreux fabricants répartis sur tout le territoire régional. A titre d'exemple, on trouve sur le site du CERIB²⁵ (qui n'est pas le seul organisme certificateur) 18 producteurs certifiés (1 dans l'Ain, 6 dans la Drôme, 3 en Isère, 2 dans la Loire, 3 dans le Rhône, 2 en Savoie et 1 en Haute-Savoie).

²³ Source : SESSI, « La filière béton en France », Le 4 Pages des statistiques industrielles, N°208, juillet 2005.

²⁴ Source : cf. note 23.

²⁵ Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Industrie du Béton.



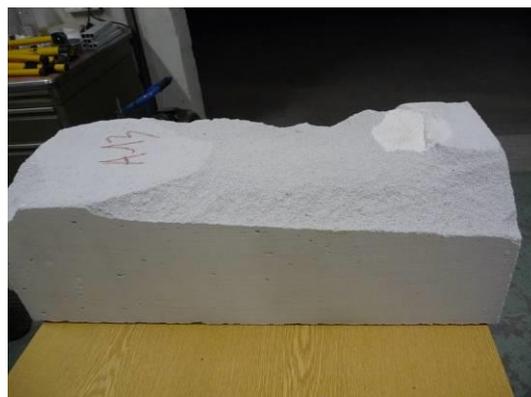
Photographie 12 : bloc béton (Valence Agglos)

Les blocs produits par Valence Agglos ont été achetés dans un magasin de distribution de matériaux de construction de Valence (Drôme).

Le bloc produit par GGI a été acheté dans un magasin de distribution de matériaux de Seynod (Haute-Savoie).

Le bloc produit par COTTIN a été donné par le producteur sur le lieu de fabrication.

Le laboratoire a également analysé un échantillon de bloc de béton cellulaire « XELLA THERMOPIERRE »²⁶ provenant de la seule usine de production de ce type de matériau située en Rhône-Alpes et certifiée par le CERIB (usine de Bourgoin-Jallieu).



Photographie 13 : béton cellulaire (Xella Thermopierre)

²⁶ Béton cellulaire : matériau composé de sable de quartz siliceux (65%), de ciment (20%), de chaux (15%), de gypse (1%), de pâte ou poudre d'aluminium (0,05%) et d'eau (source : http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_cellulaire). Ce matériau est beaucoup moins dense que le béton classique : un bloc est composé d'environ 80% d'air et de 20% de matière.

2.5 BRIQUES

D'après le SESSI²⁷, « les produits en terre cuite sont principalement fabriqués à partir d'argiles. Divers constituants sont ajoutés (sable, calcaire, ...) afin d'en améliorer les caractéristiques ou l'aspect extérieur. Après le mélange de ces constituants, les produits sont façonnés, séchés puis cuits ».

Les principaux matériaux de construction en terre cuite sont les tuiles et les briques.

S'agissant des briques, sur lesquelles l'étude a été focalisée, il existe en France 145 sites de production de répartis sur tout le territoire. Généralement, les usines sont situées à proximité des carrières d'argile d'où est extraite la matière première.

Les principaux producteurs français sont IMERYS (40% des parts de marché tuiles et briques), Wienerberger (30-35% des parts de marché briques), B. Leroux (15-20% des parts de marché briques), Terreal (10% des parts de marché briques et 30-35% des parts de marché tuiles), Monier (10-15% des parts de marché tuiles) et Koramlic (10% des parts de marché briques).

En Rhône-Alpes, il existe 6 sites de production de terre cuite :

- deux sites IMERYS briques implantés dans le Rhône,
- deux sites IMERYS tuiles implantés dans la Loire,
- un site Wienerberger briques implanté dans l'Ain,
- une tuilerie implantée à Givors (Rhône), la tuilerie Blache, spécialisée dans les tuiles de monuments historiques.

Le laboratoire CRIIRAD a choisi d'analyser des échantillons des principaux types de briques alvéolaires de murs porteurs commercialisés dans les magasins de distribution de matériaux de construction et produits en Rhône-Alpes.

Six échantillons (trois pour chacun des deux principaux producteurs de Rhône-Alpes) ont été achetés dans deux magasins de distribution de matériaux de construction de Valence (Drôme) :

- 3 briques IMERYS (OPTIBRIC PV3+, OPTIBRIC PV4G, MONOMUR 30),
- 3 briques Wienerberger (GF R20, GF R20Th+, BIOMUR R37).



Photographie 14 : brique IMERYS (Optibric PV3+)

²⁷ Service des études et des statistiques industrielles – Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Yvon GOURLAOUEN, Les matériaux de construction, Edition 2007.

2.6 PLAQUES DE PLATRE

Le plâtre est essentiellement²⁸ constitué de gypse.

La France est le premier producteur européen de plâtre.

Il existe trois producteurs de gypse en France : Knauf, Lafarge Plâtres, Placoplâtre.

75% de la production de gypse sont destinés à la fabrication du plâtre. Les 25% restants sont utilisés pour la fabrication du ciment, en addition au calcaire et à l'argile.

En Rhône-Alpes, il existe une carrière de gypse en Savoie, et une usine de production de plaques de plâtre à Chambéry.

Les gypses naturels sont connus pour présenter une radioactivité faible, toutefois certains fabricants utilisent du gypse artificiel : phosphogypse et désulfogypse. Certains de ces matériaux présentent une radioactivité élevée.

Compte tenu de ces éléments, le laboratoire CRIIRAD a souhaité vérifier la radioactivité des principaux types de plaques de plâtre commercialisés dans les magasins de distribution de matériaux de construction et produits en Rhône-Alpes. Les matériaux ont été achetés dans un magasin de distribution de matériaux de construction de Valence (Drôme). Le laboratoire CRIIRAD a échantillonné les 4 principaux types de plaques de marque Placoplâtre (plaque classique BA13 ; « placomarine » résistante à l'humidité ; « placophonique » isolée phoniquement ; « placoflam » résistante au feu). Un cinquième échantillon, correspondant à une plaque utilisée pour les parements de cheminée et produite en Allemagne (plaque RIGIDUR, marque RIGIPS), a été acheté.

2.7 AUTRES MATERIAUX ECHANTILLONNES

2.7.1 SABLE DE CURAGE DE TORRENT

L'une des carrières pour lesquelles le producteur a répondu positivement au questionnaire envoyé par la CRIIRAD correspond à « une plage de dépôt de matériaux torrentiels qui sont extraits sous forme de curages décidés en fonction des apports »²⁹.

Selon le producteur, les matériaux extraits sont utilisés pour la voirie ou, ponctuellement, pour du béton de chantier.

Bien que la production de cette carrière soit relativement faible et épisodique, le laboratoire CRIIRAD a souhaité inclure le site dans l'étude, compte tenu de la radioactivité potentiellement élevée de ce secteur cristallin.

2.7.2 PRODUIT REFRACTAIRE

L'une des carrières pour lesquelles le producteur a répondu positivement au questionnaire envoyé par la CRIIRAD correspond à un site de production de matériaux réfractaires utilisés soit en tant qu'additifs dans le ciment, soit en tant que matériaux de construction de fours à pain.

Compte tenu de l'intérêt porté par le producteur pour cette étude, le laboratoire a analysé un échantillon du matériau utilisé en tant qu'additif dans le ciment.

²⁸ Il contient également quelques dixièmes de % d'amidon, adjuvants, retardateurs, ...

²⁹ Source : questionnaire transmis par l'exploitant.

2.7.3 REVETEMENT EXTERIEUR

Lors de l'achat des matériaux à SAMSE Valence, l'intervenant CRIIRAD a effectué un balayage radiométrique rapide au moyen d'un scintillomètre SPP2 au niveau de l'ensemble des matériaux accessibles dans le lieu d'entreposage extérieur du magasin. Au rayon des aménagements extérieurs, tous les matériaux présentaient un flux de rayonnement gamma classique (autour de 50 c/s) à l'exception d'un gneiss provenant d'Italie (autour de 100 c/s). Un échantillon de ce matériau a été prélevé et inclus dans l'étude.



Photographie 15 : revêtement extérieur (gneiss)

3 ANALYSES PAR SPECTROMETRIE GAMMA

3.1 METHODOLOGIE

3.1.1 ECHANTILLONS ANALYSES

Le laboratoire CRIIRAD a prélevé et analysé par spectrométrie gamma 40 échantillons de matériaux de construction, dont :

- 16 produits de carrières :
 - 14 échantillons de granulats destinés à la fabrication de bétons hydrauliques (mélanges béton),
 - 2 autres échantillons (un sable de curage de torrent, ponctuellement utilisé pour du béton de chantier ou en tant que produit inerte pour routes et VRD ; un produit réfractaire utilisé en tant qu'additif pour le ciment) ;
- 24 produits manufacturés :
 - 6 ciments,
 - 4 blocs béton,
 - 6 briques,
 - 5 plaques de plâtre,
 - 3 autres échantillons (un sac de mélange béton prêt à l'emploi, incluant granulats et ciment ; un bloc de béton cellulaire ; un échantillon de pierre utilisé en tant que revêtement extérieur).

3.1.2 PRELEVEMENT

Les produits de carrière ont été prélevés sur les lieux de production, à l'exception du produit réfractaire (additif pour ciment), acheminé du producteur à la CRIIRAD par transporteur. Tous les échantillons ont été gracieusement donnés par les producteurs. La quantité d'échantillon prélevé est d'environ 2 litres.

Chaque échantillon a été prélevé de manière aléatoire sur le tas de mélange béton en libre service.

Les matériaux de construction ont été achetés dans des magasins de distribution, à l'exception d'un bloc béton donné par le fabricant sur le lieu de production. La quantité d'échantillon prélevé est d'une unité (dans le cas des briques et blocs béton : un bloc ; dans le cas des produits en vrac : un sac).

3.1.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR ANALYSE

Les échantillons ont été conditionnés en boîte de Pétri³⁰ pour analyse.

Du fait de la faible quantité de matière analysée, les limites de détection sont relativement élevées (de l'ordre de 30 à 50 Bq/kg pour le thorium 234). Mais la faible épaisseur des échantillons permet de minimiser les phénomènes d'auto-atténuation susceptibles d'impacter l'analyse des émetteurs gamma de basse énergie (plomb 210 et du thorium 234).

Certains échantillons ont fait l'objet d'un séchage et/ou d'un concassage avant conditionnement. Le traitement des échantillons avant conditionnement est synthétisé dans les deux tableaux ci-après.

³⁰ Diamètre : 8,7 cm ; volume : 66 cm³.

Tous les échantillons ont été analysés au moins 3 semaines après conditionnement (délai de mise à l'équilibre entre le radium 226 et ses descendants émetteurs gamma plomb 214 et bismuth 214).

Le laboratoire CRIIRAD est agréé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement (cf. ANNEXE 3 page 68).

PRODUITS DE CARRIERE

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Séché	Concassé
MELANGES BETON						
280312B1	C26775	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	X	X
120412B3	C26759	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	X	X
030512B1	C26780	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	X	X
120412B1	C26771	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	X	X
060412B5	C26761	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	X	X
040512A1	C26773	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	X	X
300412B2	C26795	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (argilo-calcaire)	X	X
120412B2	C26777	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	X	X
270112A1	C26758	Mélange béton 0-15/1	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	X	X
300412B3	C26760	Mélange béton 0-22,4	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	X	X
060412B1	C26767	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche plutonique	X	X
300412B1	C26784	Mélange béton 0-21	Rhône-Alpes	Roche plutonique (éboulis)	X	X
060412B2	C26793	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (plutonique)	X	X
060412B3	C26787	Mélange béton 0-60	Rhône-Alpes	Roche plutonique	X	X
AUTRES						
060412B4	C26778	Sable (curage de torrent)	Rhône-Alpes	Roche plutonique (dépôts torrentiels)	X	X
200712C1	C26837	Pdt réfractaire (additif ciment)	Rhône-Alpes	Roche plutonique		

Tableau 2 : traitement des produits de carrière avant analyse

PRODUITS MANUFACTURES

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Séché	Concassé
CIMENTS						
260612A6	C26803	CALCIA Technocem blanc (CEM II / B-LL 42,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-		
210612A1	C26791	LAFARGE Le Classic (CEM II / B-LL 32,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-		
210612A2	C26792	VICAT Ouvrages courants (CEM II / B-LL 32,5 R)	Rhône-Alpes	-		
210612A3	C26796	LAFARGE Sensium (CEM II / B-LL 42,5 N)	Rhône-Alpes	-		
210612A4	C26799	VICAT LE PROMPT (CNP PM)	Rhône-Alpes	-		
210612A5	C26801	KERNEOS Ciment Fondu (CAC)	PACA	-		
BLOCS BETON						
200712B2	C26876	GGI Bloc béton	Rhône-Alpes	-		X
200712B1	C26874	COTTIN Bloc béton	Rhône-Alpes	-		X
210612A12	C26808	VALENCE AGGLOS Bloc béton à bancher	Rhône-Alpes	-		X
210612A11	C26813	VALENCE AGGLOS Bloc béton	Rhône-Alpes	-		X
BRIQUES						
260612A7	C26834	WIENERBERGER GF R20 Th+ (1,32 m².K/W)	Rhône-Alpes	-		X
260612A8	C26832	WIENERBERGER GF R20 (0,72 m².K/W)	Rhône-Alpes	-		X
060712A1	C26872	WIENERBERGER BIOMUR R37 (2,87 m².K/W)	Rhône-Alpes	-		X
210612A9	C26810	IMERYS OPTIBRIC PV4G (1,32 m².K/W)	Rhône-Alpes	-		X
210612A10	C26828	IMERYS MONOMUR 30 (2,61 m².K/W)	Rhône-Alpes	-		X
210612A8	C26816	IMERYS OPTIBRIC PV3+ (1,00 m².K/W)	Rhône-Alpes	-		X
PLAQUES DE PLÂTRE						
260612A2	C26826	PLACOPLÂTRE PLACOMARINE	Rhône-Alpes	-		
260612A5	C26814	RIGIPS RIGIDUR	Allemagne	-		
260612A4	C26817	PLACOPLÂTRE BA13	Rhône-Alpes	-		
260612A3	C26812	PLACOPLÂTRE PLACOPHONIQUE	Rhône-Alpes	-		
260612A1	C26835	PLACOPLÂTRE PLACOFLAM	Rhône-Alpes	-		
AUTRES						
210612A6	C26806	INDIBETON (Mélange béton + ciment prêt à l'emploi)	Rhône-Alpes	-		X
210612A13	C26804	XELLA Thermopierre	Rhône-Alpes	-		X
210612A7	C26815	Revêtement extérieur (Gneiss)	Italie	-		X

Tableau 3 : traitement des produits manufacturés avant analyse

3.2 RESULTATS

Les principaux résultats des analyses par spectrométrie gamma de matériaux sont présentés ci-dessous.
Les résultats détaillés sont présentés en ANNEXE 5 page 72.

PRODUITS DE CARRIERE

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Chaîne de l' uranium 238	Chaîne du thorium 232		Potassium 40	Indice I**
					Ra 226*	Ac 228	Pb212	K40	
MELANGES BETON									
280312B1	C26775	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	8,8 ± 2,9	< 10	3,7 ± 1,4	< 80	< 0,07
120412B3	C26759	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	13,2 ± 3,8	< 11	5,2 ± 2,0	< 60	< 0,09
030512B1	C26780	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	7,9 ± 2,6	< 7	5,9 ± 1,6	< 110	< 0,09
120412B1	C26771	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	16,5 ± 4,3	< 7	5,4 ± 1,9	< 60	< 0,10
060412B5	C26761	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	12,1 ± 3,7	< 7	6,3 ± 2,2	< 140	< 0,12
040512A1	C26773	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	13,5 ± 4,1	< 10	< 5	< 80	< 0,12
300412B2	C26795	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (argilo-calcaire)	15,4 ± 3,5	< 8	7,0 ± 1,7	< 140	< 0,13
120412B2	C26777	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	14,6 ± 3,5	< 11	9,0 ± 2,1	< 170	< 0,15
270112A1	C26758	Mélange béton 0-15/1	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	14,2 ± 3,3	13 ± 5	12,6 ± 2,5	226 ± 41	0,19
300412B3	C26760	Mélange béton 0-22,4	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	18,8 ± 4,0	21 ± 7	22,3 ± 3,6	360 ± 60	0,29
060412B1	C26767	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche plutonique	69 ± 11	40 ± 10	40 ± 6	730 ± 110	0,67
300412B1	C26784	Mélange béton 0-21	Rhône-Alpes	Roche plutonique (éboulis)	45 ± 8	67 ± 14	71 ± 10	910 ± 130	0,81
060412B2	C26793	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (plutonique)	49 ± 9	64 ± 13	64 ± 9	1 130 ± 160	0,86
060412B3	C26787	Mélange béton 0-60	Rhône-Alpes	Roche plutonique	75 ± 12	114 ± 20	118 ± 15	1 240 ± 170	1,25
AUTRES									
060412B4	C26778	Sable (curage de torrent)	Rhône-Alpes	Roche plutonique (dépôts torrentiels)	102 ± 14	134 ± 22	146 ± 18	1 120 ± 150	1,44
200712C1	C26837	Pdt réfractaire (additif ciment)	Rhône-Alpes	Roche plutonique	67 ± 12	196 ± 31	208 ± 26	990 ± 150	1,59

* Le Radium 226 est évalué à partir de ses descendants le Plomb 214 et le Bismuth 214.
Afin de respecter le temps de mise à l'équilibre entre le radium 226 et ses descendants,
l'analyse a été effectuée au moins 3 semaines après conditionnement de l'échantillon.

** L'indice I est calculé de la façon suivante :
 $I = \text{Ra}226/300 + \text{Th}232/200 + \text{K}40/1000$

L'activité du thorium 232 utilisée pour le calcul de l'indice I correspond au maximum entre l'activité de ses descendants actinium 228 et plomb 212.
Lorsqu'une valeur est inférieure à la limite de détection, c'est la limite de détection qui est prise en compte pour le calcul.

Tableau 4 : principaux résultats des analyses par spectrométrie gamma de produits de carrière

PRODUITS MANUFACTURES

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Chaîne de l' uranium 238	Chaîne du thorium 232		Potassium 40	Indice I**
					Ra 226*	Ac 228	Pb212	K40	
CIMENTS									
260612A6	C26803	CALCIA Technocem blanc (CEM II / B-LL 42,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	34 ± 7	< 17	15,7 ± 3,5	< 47	< 0,21
210612A1	C26791	LAFARGE Le Classic (CEM II / B-LL 32,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	46 ± 8	< 17	9,0 ± 2,9	< 90	< 0,23
210612A2	C26792	VICAT Ouvrages courants (CEM II / B-LL 32,5 R)	Rhône-Alpes	-	18,7 ± 4,6	16 ± 7	12,1 ± 2,9	< 280	< 0,24
210612A3	C26796	LAFARGE Sensium (CEM II / B-LL 42,5 N)	Rhône-Alpes	-	44 ± 9	< 15	13,6 ± 3,5	< 70	< 0,24
210612A4	C26799	VICAT LE PROMPT (CNP PM)	Rhône-Alpes	-	26 ± 7	23 ± 10	26 ± 5	< 380	< 0,34
210612A5	C26801	KERNEOS Ciment Fondu (CAC)	PACA	-	89 ± 13	144 ± 23	158 ± 19	< 110	1,12
BLOCS BETON									
200712B2	C26876	GGI Bloc béton	Rhône-Alpes	-	19,2 ± 4,5	< 15	7,2 ± 2,2	< 120	< 0,14
200712B1	C26874	COTTIN Bloc béton	Rhône-Alpes	-	17,9 ± 4,0	15 ± 6	14,1 ± 2,6	268 ± 47	0,22
210612A12	C26808	VALENCE AGGLOS Bloc béton à bancher	Rhône-Alpes	-	26 ± 6	17 ± 7	19,0 ± 4,2	350 ± 70	0,30
210612A11	C26813	VALENCE AGGLOS Bloc béton	Rhône-Alpes	-	25,5 ± 4,8	25 ± 7	28,6 ± 4,2	480 ± 70	0,39
BRIQUES									
260612A7	C26834	WIENERBERGER GF R20 Th+ (1,32 m².K/W)	Rhône-Alpes	-	56 ± 9	67 ± 14	65 ± 9	660 ± 100	0,74
260612A8	C26832	WIENERBERGER GF R20 (0,72 m².K/W)	Rhône-Alpes	-	51 ± 10	54 ± 14	67 ± 10	650 ± 110	0,72
060712A1	C26872	WIENERBERGER BIOMUR R37 (2,87 m².K/W)	Rhône-Alpes	-	56 ± 11	77 ± 18	71 ± 11	700 ± 120	0,81
210612A9	C26810	IMERYS OPTIBRIC PV4G (1,32 m².K/W)	Rhône-Alpes	-	66 ± 11	72 ± 16	87 ± 12	920 ± 140	0,96
210612A10	C26828	IMERYS MONOMUR 30 (2,61 m².K/W)	Rhône-Alpes	-	67 ± 9	75 ± 12	85 ± 10	1 050 ± 120	1,00
210612A8	C26816	IMERYS OPTIBRIC PV3+ (1,00 m².K/W)	Rhône-Alpes	-	79 ± 12	106 ± 18	115 ± 14	1 240 ± 160	1,25
PLAQUES DE PLÂTRE									
260612A2	C26826	PLACOPLÂTRE PLACOMARINE	Rhône-Alpes	-	8,5 ± 4,2	< 6	< 6	< 100	< 0,09
260612A5	C26814	RIGIPS RIGIDUR	Allemagne	-	< 7	< 10	< 5	< 120	< 0,11
260612A4	C26817	PLACOPLÂTRE BA13	Rhône-Alpes	-	< 4,3	< 17	< 2,5	< 49	< 0,12
260612A3	C26812	PLACOPLÂTRE PLACOPHONIQUE	Rhône-Alpes	-	14 ± 5	< 11	6,9 ± 2,7	< 170	< 0,14
260612A1	C26835	PLACOPLÂTRE PLACOFLAM	Rhône-Alpes	-	13 ± 6	< 19	10,1 ± 4,0	< 160	< 0,15
AUTRES									
210612A6	C26806	INDIBETON (Mélange béton + ciment prêt à l'emploi)	Rhône-Alpes	-	17,0 ± 4,1	< 9	6,5 ± 2,0	< 120	< 0,13
210612A13	C26804	XELLA Thermopierre	Rhône-Alpes	-	17 ± 7	< 24	10,8 ± 4,5	< 250	< 0,19
210612A7	C26815	Revêtement extérieur (Gneiss)	Italie	-	62 ± 10	126 ± 21	132 ± 17	1 290 ± 180	1,30

* Le Radium 226 est évalué à partir de ses descendants le Plomb 214 et le Bismuth 214.
Afin de respecter le temps de mise à l'équilibre entre le radium 226 et ses descendants,
l'analyse a été effectuée au moins 3 semaines après conditionnement de l'échantillon.

** L'indice I est calculé de la façon suivante :
I = Ra226/300+Th232/200+K40/1000

L'activité du thorium 232 utilisée pour le calcul de l'indice I correspond au maximum entre l'activité de ses descendants actinium 228 et plomb 212.
Lorsqu'une valeur est inférieure à la limite de détection, c'est la limite de détection qui est prise en compte pour le calcul.

Tableau 5 : principaux résultats des analyses par spectrométrie gamma d'échantillons de produits manufacturés

3.3 COMMENTAIRES

Il est important de signaler que l'étude n'avait pas pour but de disposer d'une vision exhaustive de la radioactivité des types de matériaux analysés. Les résultats permettent de disposer d'un premier aperçu qui devrait être approfondi par d'autres études.

Les chaînes de désintégration des trois familles de radionucléides naturels sont présentées en ANNEXE 4 page 69.

L'examen des résultats détaillés reproduits en ANNEXE 5 page 72 montre qu'aux marges d'incertitude près, les chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232 sont à l'équilibre pour toutes les analyses.

Aucun radionucléide artificiel émetteur gamma n'a été détecté dans aucun échantillon. La limite de détection pour le césium 137 est typiquement de l'ordre de 0,5 à 1 Bq/kg.

3.3.1 PRODUITS DE CARRIERE

Les mélanges béton peuvent être classés en deux catégories :

- les 10 matériaux issus de **secteurs sédimentaires d'origine non plutonique** (calcaires, argilo-calcaires ou fluvio-glaciaires) présentent tous des **teneurs faibles** en radium 226 (inférieures à 20 Bq/kg), thorium 232 (inférieures à 25 Bq/kg) et potassium 40 (inférieures à 400 Bq/kg). Pour cette catégorie, **l'indice I est toujours inférieur à 0,3**. Le mélange béton+ciment prêt à l'emploi rentre également dans cette catégorie ;
- les 4 matériaux issus de **régions plutoniques** présentent tous des **teneurs en radionucléides naturels sensiblement plus élevées** (radium 226 : 40 à 80 Bq/kg ; thorium 232 : 40 à 120 Bq/kg ; potassium 40 : 700 à 1 300 Bq/kg). On peut noter que deux des 4 échantillons sont des alluvions d'un cours d'eau dont le bassin versant est granitique. Pour cette catégorie, **l'indice I est compris entre 0,6 et 1,3**.

Les deux autres produits de carrière (**sable de curage de torrent et produit réfractaire**) présentent la radioactivité la plus élevée des 40 échantillons analysés (**indices I de 1,4 et 1,6**). Ces deux produits sont également issus de régions plutoniques.

3.3.2 CIMENTS

Les **5 ciments produits en Rhône-Alpes** présentent un **indice I inférieur à 0,4**.

En revanche, le ciment fondu KERNEOS (**ciment d'aluminate de calcium**) présente une teneur nettement plus élevée en radionucléides naturels, et plus particulièrement en éléments de la chaîne du thorium 232. **L'indice I de ce ciment dépasse 1 (1,1)**. L'utilisation de ce ciment avec un granulat granitique pourrait conduire à la production d'un béton d'indice I supérieur à 1.

3.3.3 BLOCS BETON ET BRIQUES

Les 4 **blocs béton** analysés présentent une teneur relativement faible en radionucléides naturels. Leur **indice I est compris entre 0,1 et 0,4**.

C'est également le cas pour le **bloc de béton cellulaire** (classé dans la catégorie « AUTRES » des produits manufacturés) **dont l'indice I est inférieur à 0,2**.

Les **briques** présentent une teneur en radionucléides naturels sensiblement plus élevée que les blocs béton. **Les indices I sont toujours supérieurs à 0,7, et atteignent ou dépassent 1 dans deux cas**.

Il est toutefois important de noter que l'indice I du projet de directive européenne, calculé à partir d'activités massiques, ne tient pas compte de la densité des matériaux, et de la masse globale de matériaux utilisés pour une habitation type. Ces paramètres doivent être pris en compte pour évaluer plus précisément l'exposition de chaque type de matériau.

A titre d'exemple, des briques présentant un indice I plus élevé que des bétons mais une densité plus faible pourraient entraîner, à volume de matériaux équivalent, une exposition par irradiation externe plus faible.

3.3.4 PLAQUES DE PLATRE

Toutes les **plaques de plâtre** analysées présentent une teneur faible en radionucléides naturels. **L'indice I est toujours inférieur à 0,2.**

3.3.5 REVETEMENT EXTERIEUR

L'échantillon de revêtement extérieur provenant d'Italie présente un indice I supérieur à 1 (1,3), principalement dû à une teneur élevée en radionucléides de la chaîne du thorium 232 (environ 130 Bq/kg).

Selon la logique du projet de directive européenne, ce matériau serait plutôt assimilé à un matériau de surface. La valeur de son indice I devrait donc être comparée à 6 et non à 1.

3.4 CORRELATION ENTRE INDICE I ET RELEVÉS RADIAMÉTRIQUES IN SITU

Les flux de rayonnement gamma mesurés lors des prélèvements de produits de carrière sont reportés dans le tableau ci-dessous.

PRODUITS DE CARRIERE

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Indice I**	Flux de rayonnement gamma in situ (c/s DG5)	
						Contact tas	1 m tas
MELANGES BETON							
280312B1	C26775	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 0,07	30	30-35
120412B3	C26759	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,09	35-45	35-45
030512B1	C26780	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 0,09	35-40	35-40
120412B1	C26771	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,10	35-45	35-45
060412B5	C26761	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,12	40-45	35-40
040512A1	C26773	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,12	35-40	35-40
300412B2	C26795	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (argilo-calcaire)	< 0,13	45-50	45-50
120412B2	C26777	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 0,15	40-50	40-50
270112A1	C26758	Mélange béton 0-15/1	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	0,19	-	-
300412B3	C26760	Mélange béton 0-22,4	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	0,29	70-80	60-70
060412B1	C26767	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche plutonique	0,67	160-170	150
300412B1	C26784	Mélange béton 0-21	Rhône-Alpes	Roche plutonique (éboulis)	0,81	200-210	190-200
060412B2	C26793	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (plutonique)	0,86	220-230	190-200
060412B3	C26787	Mélange béton 0-60	Rhône-Alpes	Roche plutonique	1,25	290-300	270-280
AUTRES							
060412B4	C26778	Sable (curage de torrent)	Rhône-Alpes	Roche plutonique (dépôts torrentiels)	1,44	320-330	280-290
200712C1	C26837	Pdt réfractaire (additif ciment)	Rhône-Alpes	Roche plutonique	1,59	-	-

Tableau 6 : Flux de rayonnement gamma mesurés in situ sur les produits de carrière

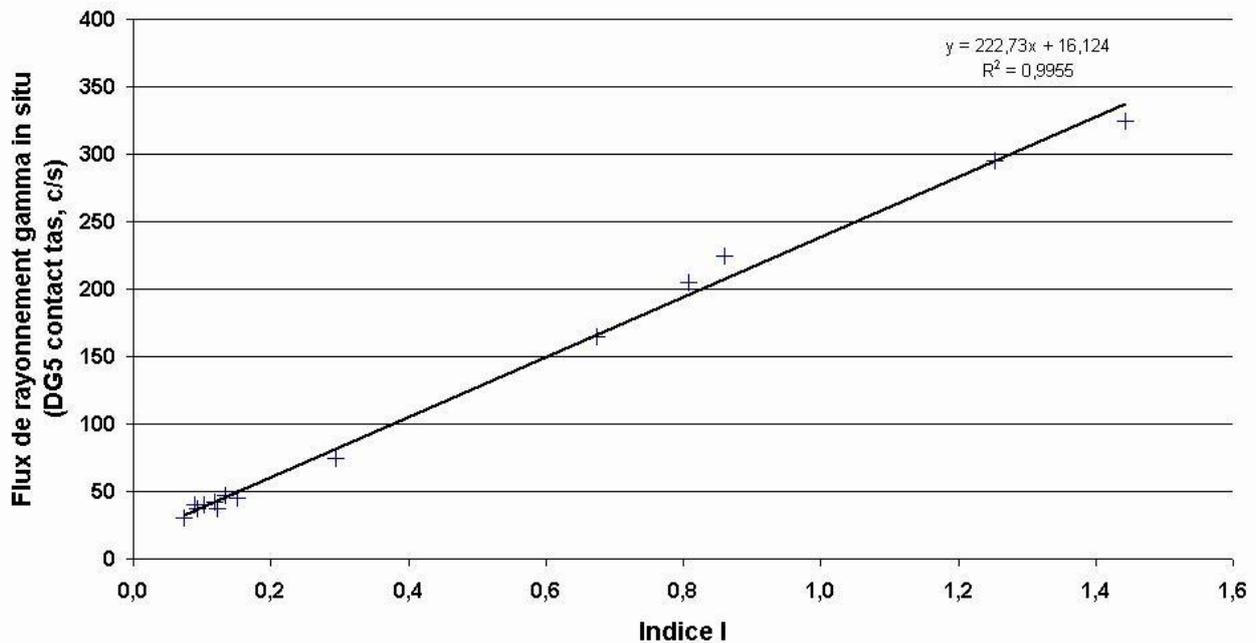
On constate sur le graphe ci-après une corrélation nette entre la valeur de l'indice I et le flux de rayonnement gamma mesuré au contact du tas échantillonné.

Ceci montre que des relevés radiamétriques in situ permettraient d'obtenir une évaluation préliminaire correcte de l'ordre de grandeur de l'indice I des matériaux extraits des carrières.

Un plan compteur des secteurs d'extraction permettrait d'apprécier la variabilité des caractéristiques de ces matériaux.

Il convient toutefois de signaler que la corrélation ci-après n'est valable que pour les matériaux analysés et le radiamètre utilisé dans le cadre de cette étude. Pour appliquer cette méthode avec un autre type de radiamètre, il serait nécessaire de mettre au point et de valider un mode opératoire spécifique.

Produits de carrière
Corrélation entre flux de rayonnement gamma in situ et indice I



3.5 ELEMENTS DE COMPARAISON

Concernant la radioactivité des matériaux de construction de Rhône-Alpes, et plus généralement de France, il existe très peu de données accessibles au public.

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a publié des cartographies du potentiel d'émanation du radon pour plusieurs régions et départements de France. Ces documents contiennent parfois des données relatives à la radioactivité des sols et roches des régions concernées, mais la région Rhône-Alpes ne fait pas partie des régions couvertes par ce type d'étude.

Contacté par le laboratoire CRIIRAD, le BRGM a indiqué que ce type de projet était désormais conduit par l'IRSN. Effectivement, une cartographie du potentiel radon à l'échelle nationale est disponible sur le site de l'IRSN depuis début 2012³¹. Toutefois, cette cartographie n'est pas assortie d'un rapport présentant de façon détaillée les données sur lesquelles elle repose. Le BRGM a également indiqué à la CRIIRAD qu'il existait une base de données relative à la radioactivité des formations rocheuses françaises, mais cette base n'est à ce jour pas accessible au public.

En l'absence de données détaillées relatives à la radioactivité des matériaux de construction produits en Rhône-Alpes, les résultats des analyses effectuées par le laboratoire CRIIRAD peuvent être comparés à ceux de la synthèse des données disponibles au niveau européen publiée fin 2011³². Cette étude italienne a passé en revue les publications scientifiques consacrées au sujet, et a regroupé près de 10 000 résultats d'analyses de matériaux, provenant de 24 pays. On note que seules 44 données sur les 9 922 compilées proviennent de France. Seuls 4 pays ont fourni moins de données que la France (la Bulgarie, l'Irlande, la Lituanie et la Slovénie), alors que pour 7 pays, plus de 500 données sont

³¹ http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/radon/Pages/4-cartographie-potentiel-radon-formations-geologiques.aspx?dId=529becad-ea57-47eb-8387-77de7858fcb&dwId=2fd14a6c-c502-4e16-9f7a-c0e263284fd6

³² R. Trevisi & al., Natural radioactivity in building materials in the European Union : a database and an estimate of radiological significance, Journal of Environmental Radioactivity 105 (2012) 11-20.

disponibles (4 pays ont fourni plus de 1 000 données : la République Tchèque, la Grèce, l'Italie et la Pologne). Les principaux résultats de cette compilation sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Activités massiques en radium 226, thorium 232 et potassium 40 de matériaux de construction utilisés en Europe

Source : R. Trevisi, S. Risica, M. D'Allesandro, D. Paradiso, C. Nuccetelli, "Natural radioactivity in building materials in the European Union :significance", Journal of Environmental a database and an estimate of radiological radioactivity, november 2011

Matériau	Activité massique en Radium 226 (Bq/kg)			Activité massique en Thorium 232 (Bq/kg)			Activité massique en Potassium 40 (Bq/kg)			I moyen (*)	% d'l>0,5	% d'l>1	Nb d'échantillons (**)
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max				
Sol	0	36	1 000	1	34	258	0	483	3 200	0,5	-	-	23 pays
Béton	1	60	1 300	1	35	152	7	392	1 450	0,5	62%	5%	>= 2 727
Ciment	4	45	422	3	31	266	4	216	846	0,4	-	-	>= 2 013
Brique	2	47	148	2	48	164	12	598	1 169	0,6	91%	5%	>= 1 676
Phosphogypse	18	407	1 406	2	21	118	0	78	569	1,5	98%	84%	>= 290
Gypse naturel	1	15	70	1	9	100	5	91	279	0,1	-	-	>= 502
Roches (murs)													
Sédimentaires ⁽¹⁾	1	21	210	1	24	370	3	333	1 700	0,3	-	-	>= 255
Magmatiques ⁽²⁾	47	141	316	99	251	542	720	1 361	2 335	2,2	-	-	>= 48
Roches (revêtements)													
Magm/Plutoniques ⁽³⁾	0,8	78	588	0,3	89	906	24	1 049	2 040	1,1	-	-	>= 387
Magm/Volcaniques ⁽⁴⁾	16	160	709	8	163	750	170	1 295	2 354	1,8	-	-	>= 86
Magm/Métamorphiques ⁽⁵⁾	0,7	27	166	0,0	21	142	0,2	395	1 891	0,3	-	-	>= 148

(*) : I = C(Ra226)/300 + C(Th232)/200 + C(K40)/3000

(**) : la quantité d'échantillons est donnée par défaut (pour certaines références, les valeurs correspondent à des moyennes sans que ne soit précisée la quantité d'échantillons correspondant à cette moyenne)

- (1) : calcaire, grès, sable, gravier
- (2) : tuf volcanique (46 échantillons sur 48)
- (3) : granite, diorite, syénite, porphyre
- (4) : basalte, pépérin, dolérite, phonolite, ...
- (5) : marbre, serpentine, schiste, phyllite

Tableau 7 : radioactivité des matériaux de construction utilisés en Europe

- Bétons

En considérant approximativement des bétons contenant 80% de granulats et 20% de ciment, plusieurs scénarios peuvent être envisagés à partir des échantillons de granulats et de ciment analysés par le laboratoire CRIIRAD. Les résultats de ces calculs sont reportés dans le tableau ci-dessous.

Matériau	Indice I moyen
Granulats non éruptifs (GNE)	0,14
Granulats éruptifs (GE)	0,90
Ciments Rhône-Alpes (CRA)	0,23
Ciment d'aluminate de calcium (CAC)	1,12
Béton (80%GNE+20%CRA)	0,15
Béton (80%GNE+20%CAC)	0,33
Béton (80%GE+20%CRA)	0,76
Béton (80%GE+20%CAC)	0,94

Tableau 8 : indices I de bétons fabriqués à partir des granulats et ciments analysés par le laboratoire CRIIRAD

Les bétons fabriqués à partir des granulats de régions sédimentaires non éruptives présenteraient un indice I nettement inférieur à la valeur moyenne de 0,5 issue des données européennes. C'est également le cas de tous les blocs béton analysés.

En revanche, les bétons fabriqués à partir des granulats (alluviaux ou non) de régions éruptives présentent un indice I nettement supérieur à 0,5. L'indice pourrait approcher voire dépasser 1 avec le ciment d'aluminate de calcium. On note que pour un béton fabriqué avec le sable de curage de torrent analysé par le laboratoire CRIIRAD, l'indice I serait dépassé y compris avec un ciment classique.

- Briques

Les échantillons analysés par le laboratoire CRIIRAD présentent tous un indice I supérieur à la moyenne des données européennes (0,6).

S'agissant des briques, une étude conduite par le Centre Technique des Tuiles et Briques présente les résultats d'analyses par spectrométrie gamma effectuées sur 37 échantillons de matériaux de terre cuite (briques de structure, briques apparentes, tuiles, boisseaux) produits dans différentes régions de France.

Les activités massiques sont :

- pour le radium 226, comprises entre 29 et 108 Bq/kg (et en moyenne de 52 Bq/kg),
- pour le thorium 232, comprises entre 25 et 110 Bq/kg (et en moyenne de 52 Bq/kg),
- pour le potassium 40, comprises entre 326 et 1 324 Bq/kg (et en moyenne de 749 Bq/kg).

Ces valeurs sont comparables à celles de l'étude européenne précitée.

Les activités mesurées par le laboratoire CRIIRAD se situent plutôt dans la fourchette haute des résultats de 37 analyses publiés par le Centre Technique Tuiles et Briques³³.

- Plaques de plâtre

L'indice I des plaques de plâtre analysées par le laboratoire CRIIRAD (0,09 à 0,15) est à comparer à celui du gypse naturel (0,1 en moyenne), beaucoup plus faible que celui du phosphogypse (1,5 en moyenne mais jusqu'à plus de 4).

- Autres échantillons

Le revêtement extérieur présente un indice I comparable à celui de la moyenne des roches plutoniques de la base de données européenne.

³³ Valérie BORG, Centre Technique des Tuiles et Briques, NOTE D'INFORMATIONS - Radioactivité naturelle des produits de terre cuite.

4 METHODE D'ESTIMATION DU FLUX DE RADON

Comme indiqué précédemment, l'indice I proposé par le projet de directive européenne renseigne sur l'émission de rayonnements gamma par les matériaux, qui peut être évaluée en analysant les matériaux par spectrométrie gamma, mais pas sur la production de radon par ces matériaux, qui peut être évaluée en mesurant le taux d'émanation³⁴ et le flux d'exhalation³⁵ de radon des matériaux.

4.1 METHODOLOGIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le flux de radon produit par un matériau peut être déterminé en mesurant l'accumulation, dans un conteneur, du radon produit par le matériau.

A ce jour, il n'existe pas de norme internationale pour ce type de mesure³⁶, si bien que chaque laboratoire travaillant sur le sujet a développé sa propre méthodologie.

Les principales techniques de mesure peuvent être classées en deux catégories : mesures en chambre fermée et mesures en chambre ouverte.

4.1.1 MESURES EN CHAMBRE FERMEE

Le conteneur en contact avec l'échantillon est fermé hermétiquement. La concentration en radon dans le conteneur est suivie dans le temps. Le flux de radon dépend de la dynamique d'accumulation de radon dans le conteneur.

L'échantillon peut être placé à l'intérieur du conteneur (par exemple dans le cas d'un matériau en vrac ou d'un bloc de matériau de taille réduite), ou le conteneur peut être scellé à la surface d'un matériau. Dans ce cas, on s'intéresse au flux surfacique d'exhalation de radon. La technique de mesure est alors proche de celle décrite dans la norme AFNOR NF M60-768³⁷.

Le flux de radon peut être évalué par deux méthodes : la valeur limite et la pente initiale.

4.1.1.1 **Valeur limite**

La concentration en radon dans le conteneur augmente progressivement jusqu'à une valeur limite.

Le flux de radon pourrait en théorie être calculé aisément à partir de la concentration mesurée de cette valeur limite. Toutefois, deux phénomènes sont susceptibles d'influencer cette valeur limite : le taux de fuite du conteneur d'accumulation et le taux de rétrodiffusion.

➤ **Taux de fuite**

Dans la pratique, il est quasiment impossible de mettre au point un conteneur d'accumulation dépourvu de fuite.

Or avec une fuite de 1% par heure, la valeur limite est plus de deux fois moins élevée qu'en l'absence de fuite.

³⁴ Le taux d'émanation de radon correspond à la proportion d'atomes de radon, produits par désintégration d'atomes de radium contenus dans les grains de matériau solide, qui quitte ces grains et se trouve dans l'espace libre des pores du matériau.

³⁵ L'exhalation de radon correspond au transfert vers la surface du matériau du radon produit par émanation (et donc initialement situé dans l'espace libre des pores du matériau).

³⁶ Il existe un projet de norme (ISO DIS 11665-9), basé sur une norme néerlandaise (NEN 5699), dont la publication est prévue en décembre 2012. Ce projet est évoqué dans la suite de ce chapitre.

³⁷ Norme AFNOR NF M60-768, octobre 2002 - Le radon 222 : méthodes d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation.

➤ Taux de rétrodiffusion

La diffusion du radon de l'échantillon vers le conteneur d'accumulation est induite par la différence de concentration en radon entre l'air de l'échantillon (concentration initialement élevée) et l'air du conteneur (concentration initialement faible). Lorsque l'écart entre les concentrations en radon des deux milieux se réduit, le phénomène de diffusion est perturbé : une partie des atomes transférés de l'échantillon vers l'air du conteneur sont susceptibles de diffuser de nouveau vers l'échantillon. On parle alors de « rétrodiffusion ».

Les études théoriques et expérimentales³⁸ montrent que lorsque le volume d'accumulation est 10 fois plus important que le volume des pores de l'échantillon, la rétrodiffusion est suffisamment faible pour être négligée.

4.1.1.2 Pente initiale

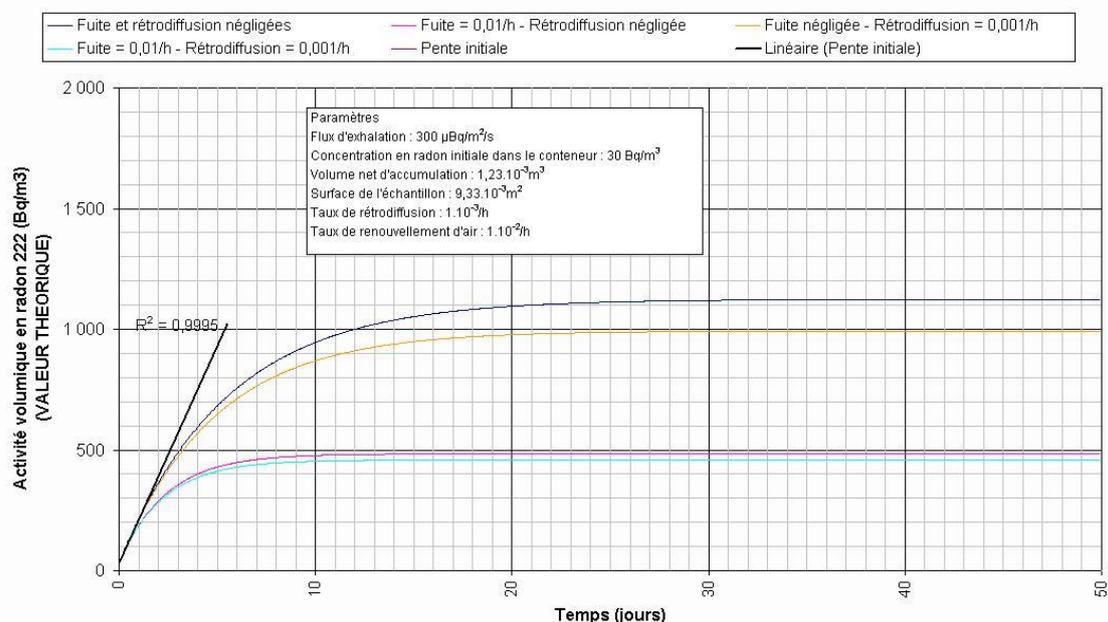
Dans les premières heures de l'accumulation, l'augmentation de la concentration est linéaire. La pente de l'accumulation est comparable dans tous les cas de figure, que l'on néglige ou pas les phénomènes de fuite et de rétrodiffusion.

Il est donc possible de s'affranchir de l'évaluation du taux de fuite et du taux de rétrodiffusion en évaluant le flux d'exhalation de radon à partir de la pente initiale.

Toutefois, la limite de détection de la méthode de la pente initiale est plus élevée que celle de la méthode de la valeur limite, étant donné que les concentrations en radon mesurées après quelques heures sont plus faibles que celles atteignant la valeur limite.

Le graphe ci-dessous illustre l'impact des phénomènes de fuite et de rétrodiffusion sur l'allure de la courbe d'accumulation.

Evolution théorique de la concentration en radon 222 dans un conteneur d'accumulation



Graphe 1 : impact des taux de fuite et de rétrodiffusion sur l'augmentation de la concentration en radon dans un conteneur d'accumulation

³⁸ NP Petropoulos & al., Building materials radon exhalation rate : ERRICCA intercomparison exercise results, The Science of the Total Environment 272 (2001) 109-118.

4.1.2 MESURES EN CHAMBRE OUVERTE

L'air du conteneur en contact avec l'échantillon est renouvelé en permanence par de l'air ne contenant pas de radon ou par un autre gaz (par exemple de l'azote), au moyen d'une pompe à débit constant.

Au bout d'un certain temps, la concentration en radon dans le conteneur atteint un équilibre. Le flux de radon peut être calculé à partir de la concentration en radon à l'équilibre.

Cette méthode permet de s'affranchir des fuites et des phénomènes de rétrodiffusion susceptibles de perturber les mesures ouvertes.

La norme néerlandaise NEN 5699³⁹ décrit une méthode d'évaluation du flux d'exhalation de radon par mesure en chambre ouverte.

Cette norme devrait être transformée en norme internationale (numérotée ISO/DIS 11665-9) en décembre 2012.

Il convient de signaler que cette norme concerne uniquement le radon 222. Le dispositif expérimental décrit par la norme permet de négliger la contribution du thoron⁴⁰

4.1.3 TECHNIQUES DE DETECTION

Pour chaque méthode de mesure, plusieurs techniques de détection du radon peuvent être employées.

Les techniques « actives » emploient des détecteurs effectuant des mesures pendant la phase d'accumulation du radon. Les détecteurs sont généralement des scintillateurs associés à des photomultiplicateurs. Les détecteurs sont placés soit à l'intérieur du conteneur d'accumulation, soit à l'extérieur. Dans ce cas, ils sont reliés au conteneur par un circuit de tubulures. Il est également possible de prélever périodiquement un échantillon d'air du conteneur et de l'analyser par une méthode ponctuelle (fiole scintillante par exemple).

Les techniques « passives » consistent à prélever sur une période donnée un échantillon de l'air du conteneur et à analyser a posteriori le dispositif de collecte. Celui-ci peut correspondre à une cartouche à charbon actif piégeant le radon (la cartouche est ensuite analysée par spectrométrie gamma ; la concentration en radon est évaluée indirectement par la mesure de ses descendants émetteurs gamma plomb 214 et bismuth 214), ou à un détecteur solide de traces nucléaires (le radon placé en contact avec le détecteur y laisse des traces latentes révélées a posteriori).

4.1.4 COMPARAISON DES DEUX METHODES

En 2001, l'université nationale technique d'Athènes a publié les résultats d'une intercomparaison qu'elle a organisée dans le cadre du programme ERRICCA⁴¹ et à laquelle 20 participants de 13 pays européens ont participé⁴².

Les deux méthodes (chambre ouverte, chambre fermée) couplées avec différentes techniques de mesure ont été utilisées.

Trois échantillons ont été fournis par l'organisateur aux participants.

³⁹ NEN 5699 (en) – Radioactivity measurements – Determination method of the rate of the radon exhalation of dense building materials – Augustus 2001

⁴⁰ "The standard only refers to ²²²Rn exhalation. Any contribution made by thoron (²²⁰Rn) in relation to the measurement result can be ignored when the described method is performed". ISO/DIS 11665-9, Décembre 2012, page 1.

⁴¹ European Research into Radon In Construction Concerted Action.

⁴² Référence de l'étude : cf. note 38 page 34.

L'écart entre le résultat individuel et la moyenne des résultats était inférieur à 20% :

- pour 9 des 10 participants ayant analysé l'échantillon n°1,
- pour les 4 participants ayant analysé l'échantillon n°2,
- pour 8 des 12 participants ayant analysé l'échantillon n°3.

On note que les résultats dont l'écart avec la moyenne est trop élevé ne sont pas associés à une méthode de mesure ou une technique de détection particulière.

4.1.5 MAITRISE DES PARAMETRES EXTERIEURS

La mesure peut être influencée par les paramètres extérieurs, et en particulier par le radon ne provenant pas de l'échantillon, le taux d'humidité et la température de la pièce dans laquelle le dispositif de mesure est placé.

4.1.5.1 Radon ne provenant pas de l'échantillon

Il peut s'agir du radon présent dans le volume d'accumulation avant le début du test, ainsi que du radon présent dans la pièce, susceptible de pénétrer dans le conteneur d'accumulation par ses défauts d'étanchéité.

Dans le cas d'une mesure en chambre fermée, le radon « extérieur » peut être minimisé en purgeant le volume d'accumulation, par exemple par un balayage d'air ou d'un autre gaz (azote) dépourvu de radon, ou par filtration de l'air pénétrant dans le conteneur au moyen d'une cartouche à charbon actif.

Pendant la phase de mesure, il convient de placer le dispositif dans une pièce présentant une concentration en radon faible, et de soigner l'étanchéité du dispositif de manière à limiter le taux de fuite.

Dans le cas d'une mesure en chambre ouverte, le balayage permanent au moyen d'un gaz dépourvu de radon permet de quasiment supprimer l'influence du radon « extérieur ».

4.1.5.2 Humidité

L'humidité a un impact élevé sur le taux d'émanation de radon des matériaux. D'après une étude japonaise⁴³, le taux d'émanation de radon de 15 échantillons de granite est en moyenne de 15% lorsque les échantillons sont en conditions « normales » d'humidité, de 10% lorsque les échantillons sont « secs » et de 32% lorsque les échantillons sont « humides »⁴⁴. Cette étude a montré une assez bonne corrélation (coefficient de corrélation : 0,84) entre le taux d'émanation et le flux d'exhalation de radon.

Par conséquent, il est important de maîtriser l'humidité de la chaîne de mesure du flux d'exhalation afin de réaliser des analyses reproductibles.

4.1.5.3 Température

L'impact de la température sur le taux d'émanation de radon est également important.

Dans une autre étude japonaise⁴⁵, le taux d'émanation d'un échantillon de sol présentant une teneur en radium de 180 Bq/kg a été mesuré en plaçant l'échantillon à 7 températures réparties entre -20°C et +45°C. Les résultats montrent que le taux d'émanation de radon augmente linéairement avec la

⁴³ N.M. Hassan & al., The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan, Radiation Measurements 46 (2011) 232-237.

⁴⁴ Les échantillons ont d'abord été séchés à 110°C pendant plus de 24h (condition sèche). Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau pendant plus de 10 jours (condition humide). Enfin, ils ont été retirés de l'eau, entreposés dans une pièce classique et pesés tous les jours. Lorsque le poids a atteint une valeur stable, les échantillons ont été considérés comme étant en condition normale d'humidité.

⁴⁵ D. Iskandar & al., Quantification of the dependency of radon emanation power on soil temperature, Applied Radiation and Isotopes 60 (2004) 971-973.

température (coefficient de corrélation : 0,98). Il est d'environ 10% à -20°C, 20% à 25°C et près de 25% à 45°C. Comme dans le cas de l'humidité, il est donc important de maîtriser la température de la pièce dans laquelle la mesure est effectuée.

4.2 METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE PAR LE LABORATOIRE DE LA CRIIRAD

4.2.1 PRESENTATION GLOBALE DU DISPOSITIF

Les tests effectués dans le cadre de cette étude avaient pour but de vérifier la faisabilité d'une technique de mesure en chambre fermée employant un moniteur Alphaguard PQ2000 PRO de manière à pouvoir examiner les flux d'exhalation de radon de certains des matériaux échantillonnés.

Le moniteur Alphaguard (marque Génitron/Saphymo) est un appareil qui enregistre en continu la concentration de gaz radon. Cet appareil fonctionne par diffusion de l'air dans une chambre d'ionisation. Les descendants du radon sont bloqués par un filtre placé à l'entrée de la chambre de mesure. Seul le radon, et en moindre importance le thoron, sont détectés et mesurés par cet appareil.

Les particules alpha émises par le radon créent une ionisation de l'air sur son parcours. Elles produisent ainsi un courant d'ionisation (très faible) qui pourra être mesuré dans la chambre d'ionisation de l'Alphaguard. Cette chambre est constituée d'une enceinte métallique et de deux électrodes aux potentiels différents.

Le circuit de mesure est présenté ci-dessous.

Le moniteur Alphaguard est placé à l'extérieur du conteneur d'accumulation.

La circulation d'air est assurée par une pompe Alphapump (accessoire de l'Alphaguard) à débit constant. Cette pompe peut fonctionner en régime continu ou en régime périodique. En régime continu, la pompe fonctionne en permanence. Le débit peut être paramétré à 1 l/min, 0,5 l/min ou 0,3 l/min. En régime périodique, la pompe fonctionne pendant 10% du temps (cycles de 2 secondes séparés par des périodes d'arrêt de 18 secondes). Le débit en régime périodique peut être paramétré à 0,1 l/min, 0,05 l/min ou 0,03 l/min.

Un filtre placé en aval du conteneur et en amont de la pompe retient les descendants solides du radon. Seuls le radon et éventuellement le thoron pénètrent dans l'Alphaguard.

Les différentes parties du circuit sont reliées par des tubulures en tygon (diamètre intérieur : 4 mm ; diamètre extérieur : 6 mm).

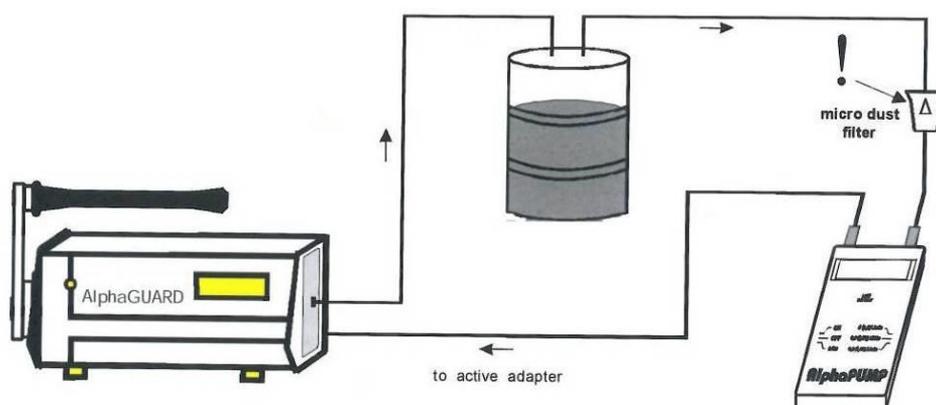


Schéma 1 : circuit de mesure du flux d'exhalation d'un matériau au moyen d'un moniteur Alphaguard (source : Saphymo)

4.2.2 CONTENEUR D'ACCUMULATION ET QUANTITE D'ECHANTILLON ANALYSE

Le conteneur choisi est un pot cylindrique en plastique d'une contenance d'1,1 litre.

Nous avons choisi d'analyser les échantillons de différents matériaux à volume constant (et non à masse constante), de manière à ce que le volume dans lequel le radon est exhalé soit constant.

Le volume d'échantillon analysé est de 0,5 litre. A condition que le débit de la pompe soit suffisamment élevé pour permettre une répartition rapide de l'air à travers l'ensemble du circuit, le volume total d'accumulation peut être considéré comme comprenant le volume libre du conteneur (0,6 l), mais également le volume de la chambre de détection de l'Alphaguard (0,6 l) et le volume des tubulures (ce dernier volume est étudié dans le paragraphe 4.2.4).

Lorsque le volume total d'accumulation est plus de 10 fois supérieur au volume des pores du matériau analysé, l'effet de la rétrodiffusion est suffisamment faible pour être négligé⁴⁶. Dans le cas présent, ce critère est respecté si la porosité du matériau analysé est inférieure à 25%.

La porosité des échantillons n'a pas été évaluée. A titre indicatif, la porosité typique des sables et grès est d'environ 15 à 25%.

4.2.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les échantillons sont dans une configuration similaire à celle des échantillons analysés par spectrométrie gamma, seul le volume est différent⁴⁷.

Chaque échantillon a été conservé pendant plusieurs semaines avant analyse. Son taux d'humidité n'est pas maîtrisé, il est comparable à celui de l'atmosphère ambiante du laboratoire (de l'ordre de 45% RH).

Les analyses ont été effectuées dans une salle climatisée à 20°C.

Au moins 24 heures avant le début de la mesure, chaque échantillon à analyser, stocké dans un pot fermé, a été placé dans la salle de comptage, de manière à ce que lorsque la mesure débute sa température soit à l'équilibre avec celle de la pièce.

4.2.4 INFLUENCE DU DEBIT DE LA POMPE ET DE LA LONGUEUR DE LA TUBULURE

A/ Sur le signal thoron

Le moniteur Alphaguard PQ2000 PRO possède une sensibilité au thoron comparable à celle du radon 222.

Le thoron possède une période physique beaucoup plus courte que celle du radon (55,6 secondes contre 3,8 jours). Toutefois, si le débit de la pompe est élevé, une proportion non négligeable du thoron produit par l'échantillon atteint la chambre de mesure du détecteur avant d'avoir disparu.

L'influence du thoron sur la mesure du radon 222 a été testée en plaçant un lot de manchons de lampe à gaz contenant du thorium 232 dans le conteneur d'accumulation. Le thorium 232 émet en effet du thoron mais pas de radon 222.

Trois tests ont été réalisés.

Dans le premier test, l'apport de thoron dans le détecteur a été maximisé en plaçant la pompe à son débit le plus élevé (1 l/min).

⁴⁶ Cf. 4.1.1.1.

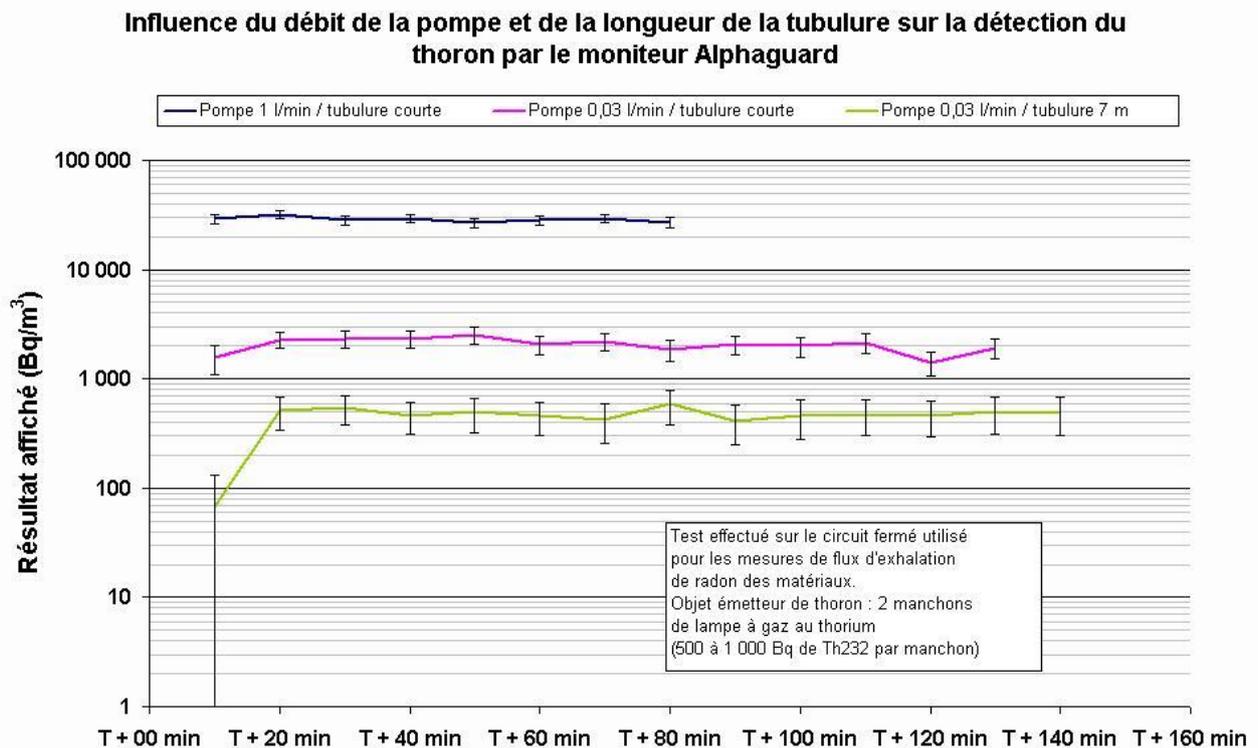
⁴⁷ Cf. 3.1.3.

Dans le second test, la pompe a été placée à son débit le plus faible (0,03 l/min).

Dans le troisième test, la pompe a été placée à son débit le plus faible, et la tubulure reliant la pompe à l'Alphaguard, dont la longueur habituelle est de 20 cm, a été remplacée par une tubulure de 7 m de façon à ralentir le transfert de thoron du conteneur d'accumulation vers le détecteur.

La réduction du débit de la pompe permet de diviser par 13 le signal « thoron » mesuré par le détecteur. L'ajout d'une tubulure longue permet de diviser encore par plus de 4 le résultat.

Au total, l'utilisation d'une tubulure longue et du débit de pompe le plus faible possible permet de diviser par près de 60 le signal « thoron ».



Graphe 2 : influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur le signal « thoron »

Un second test a été effectué afin de vérifier l'influence du choix d'un débit faible et d'une tubulure longue sur le signal « radon » mesuré par l'Alphaguard.

Pour cela, un ancien réveil dont les aiguilles contiennent du radium 226 a été placé dans le conteneur d'accumulation.

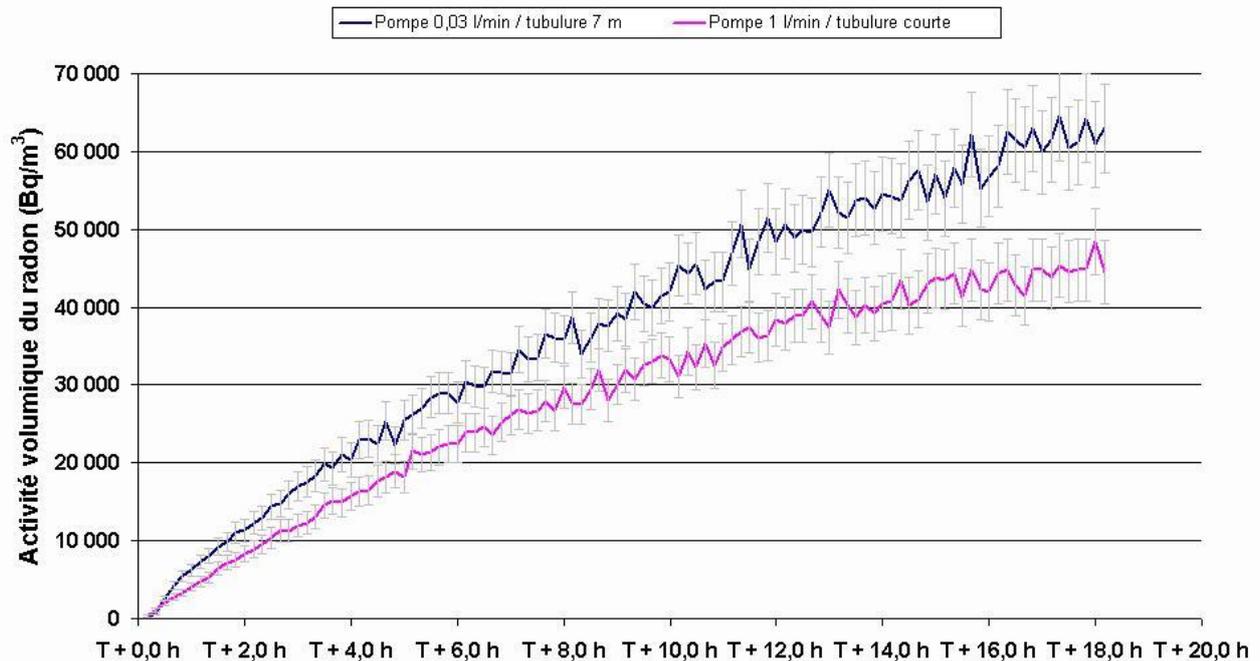
Deux tests ont été réalisés.

Dans le premier test, la pompe a été placée à son débit le plus élevé (1 l/min) et une tubulure courte a été utilisée.

Dans le second test, la pompe a été placée à son débit le plus faible (0,03 l/min) et une tubulure de 7 m a été utilisée.

Les résultats sont du même ordre de grandeur dans les deux cas, mais l'écart entre les deux séries de mesures est supérieur à l'incertitude : lorsque le débit de la pompe est élevé, l'accumulation de radon est environ 30% plus faible que lorsque le débit est bas.

Influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur la détection du radon par le moniteur Alphaguard



Graphe 3 : influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur le signal « radon »

B/ Sur le taux de fuite du circuit

L'écart observé entre les deux précédentes séries de mesure pourrait être dû à la différence du taux de fuite : lorsque le débit de la pompe est élevé, la dépression induite par la pompe au niveau du conteneur d'accumulation est plus importante que lorsque le débit est faible.

Ce phénomène a été étudié en observant la diminution de la concentration en radon, dans chaque configuration, après avoir rapidement enlevé le réveil au radium et refermé le circuit⁴⁸.

En l'absence de fuites dans le circuit, la concentration en radon dans le dispositif diminuerait selon la période physique du radon 222 : la concentration en radon serait divisée par 2 tous les 3,8 jours.

La présence de fuites dans le circuit augmente la vitesse de diminution de la concentration en radon.

Comme le montre le graphe ci-dessous, on constate effectivement que la période « réelle » est de 10 heures avec débit élevé et tubulure courte, et de 15 heures avec débit faible et tubulure longue.

Les résultats de ces tests montrent que l'utilisation d'une tubulure longue et d'un débit de pompe faible permet :

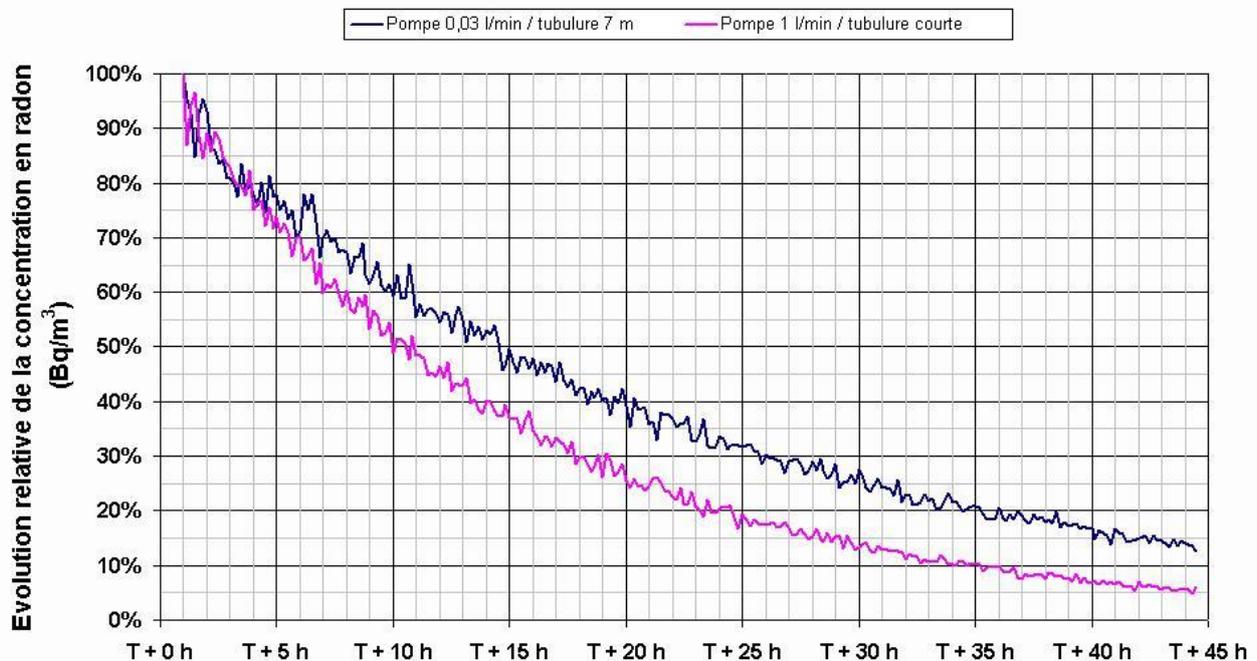
- de réduire fortement la perturbation de la mesure par le signal « thoron »,
- probablement de réduire le taux de fuite du dispositif. Ce résultat doit toutefois être pris avec précaution : l'enlèvement du réveil au radium nécessitant une ouverture puis une fermeture du circuit, les conditions des mesures de diminution des concentrations en radon ne sont pas

⁴⁸ A noter que la valeur absolue de la concentration initiale en radon n'a pas d'importance : c'est la variation relative de la concentration en radon par rapport à cette concentration initiale qui est étudiée.

exactement les mêmes que celles des mesures d'accumulation. Cette constatation préliminaire devrait être vérifiée par des tests plus poussés.

L'utilisation d'une tubulure de 7 m augmente de 8% le volume total du circuit de mesure. Pour les calculs de flux d'exhalation, ce volume supplémentaire, faible mais non négligeable, est pris en compte.

Influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur la détection du radon par le moniteur Alphaguard



Graphe 4 : influence du débit de la pompe et de la longueur de la tubulure sur le taux de fuite

4.2.5 CONCLUSION : PARAMETRES DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Sur la base des résultats des précédents tests, les paramètres choisis pour les mesures de flux d'exhalation de radon sont les suivants :

- conteneur d'accumulation : pot plastique cylindrique de 1,1 l
- température : maîtrisée ($20^{\circ}\text{C}\pm 5\%$)
- humidité : non maîtrisée (moyenne typique : 35% Hr / extrêmes typiques : 25% Hr – 50% Hr)
- débit de pompe : 0,03 l/min
- longueur de tubulures tygon : 7 m (tubulure principale) / 1,15 m (tubulures secondaires)
- volume des échantillons : 0,5 l
- volume total d'accumulation (volume libre conteneur + volume chambre de détection + volume tubulures) : 1,2 l
- activité volumique moyenne en radon dans la salle de comptage : 20 Bq/m^3
- activité volumique moyenne dans le circuit d'accumulation au temps t_0 : 20 Bq/m^3

- période prise en compte pour le calcul de la pente : T_0+2h à T_0+17h^{49} (T_0 correspond au début de la mesure et de l'accumulation. L'échantillon est conditionné dans le conteneur moins de 5 minutes avant T_0)

Ce dispositif pourrait être amélioré par les actions suivantes :

- le circuit pourrait être purgé avec un gaz ne contenant pas de radon avant le début de chaque test. La purge devrait toutefois avoir peu d'influence sur le résultat, compte tenu du faible niveau de radon de la pièce dans laquelle la mesure est effectuée et du taux de fuite incompressible du circuit ;
- la longueur des tubulures pourrait être augmentée afin de minimiser encore l'influence du thoron. Le dispositif actuel semble toutefois suffisant compte tenu de l'activité en thorium 232 relativement faible des matériaux susceptibles d'être analysés ;
- au contraire, le moniteur Alphaguard pourrait être équipé d'un module de détection du thoron, désormais proposé par le fabricant. L'ajout de ce module permettrait d'évaluer par une seule mesure le flux de thoron et le flux de radon.
- il pourrait être envisagé d'augmenter le volume libre du circuit, afin de s'assurer que dans tous les cas, le volume global de détection est bien 10 fois plus important que le volume de pores de l'échantillon. L'augmentation du volume aurait toutefois pour conséquence de diminuer l'activité volumique en radon, et donc de dégrader le signal (la limite de détection serait alors plus élevée).



Photographie 16 : circuit de mesure de flux d'exhalation de radon

⁴⁹ Pendant les deux premières heures, la chambre de détection de l'Alphaguard n'est pas encore à l'équilibre avec le conteneur d'accumulation compte tenu du volume du circuit et du débit de la pompe. La prise en compte d'une période d'accumulation plus courte augmenterait de façon trop importante l'incertitude de la mesure. La prise en compte d'une période d'accumulation plus élevée réduirait de façon trop importante la pente de la courbe d'accumulation, et donc la valeur du résultat.

4.3 RESULTATS

4.3.1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

De nombreuses données relatives aux mesures de flux d'exhalation et de taux d'émanation de radon ont été publiées. Trois d'entre elles sont présentées ci-dessous.

4.3.2 FLUX DE RADON, COMMISSION EUROPEENNE, 1997

En 1997, la publication RP 96 de la Commission européenne a regroupé les données des tests effectués dans les Etats membres de l'Union européenne. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous⁵⁰.

On observe une grande variabilité des résultats, toutefois quelques tendances peuvent être dégagées.

On constate notamment que les flux de radon des bétons sont globalement plus élevés que ceux des briques.

Sur les cinq études ayant analysé du béton ainsi que des briques (Folkerts et al, Louizi et al, Siotis et al, Orlando et al, Van Dijk et al), quatre indiquent un flux de radon significativement plus faible pour les briques que pour le béton. Dans trois études (Louizi et al, Siotis et al, Van Dijk et al), un flux normalisé par l'activité massique en radium 226 du matériau a été calculé. Le flux normalisé est 2 à plus de 100 fois plus faible pour les briques que pour le béton.

⁵⁰ Références des études : cf. Bibliographie page 52.

Mesures de flux d'exhalation de radon de matériaux

Etat membre	Matériau	Flux d'exhalation de radon ($\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)			Flux normalisé d'exhalation de radon [$(\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s})/(\text{Bq}/\text{kg})$]			Référence
		Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	
ALLEMAGNE	Béton		306			6		Keller
ITALIE	Béton		536					Orlando et al
PAYS-BAS	Béton	611		1722	3		65	Van Dijk et al
FINLANDE	Béton (épaisseur 10-20 cm)	4417		8750	75		144	Mustonen
GRECE	Béton bloc	100		681	14		61	Siotis et al
ALLEMAGNE	Béton cellulaire	119	269	483				Folkerts et al
ALLEMAGNE	Béton cellulaire		278			14		Keller
PAYS-BAS	Béton cellulaire	236		333	11		18	Van Dijk et al
GRECE	Béton dalle (26 Bq/kg Ra226)		3000			114		Louizi et al
ALLEMAGNE	Béton de pierre ponce	169	739	1750				Folkerts et al
FINLANDE	Béton de scories (épaisseur 15 cm)	2778		3333	36		44	Mustonen
ALLEMAGNE	Béton dense	50	350	550				Folkerts et al
ROYAUME-UNI	Bloc de construction	44	169	411				Green
BELGIQUE	Bloc de gypse naturel		7					Poffijn et al
BELGIQUE	Brique	6		20	0,08		0,6	Poffijn et al
GRECE	Brique	4		31	0,11		0,7	Siotis et al
ALLEMAGNE	Brique		50					Folkerts et al
PAYS-BAS	Brique		81			2		Van Dijk et al
ITALIE	Brique		481					Orlando et al
GRECE	Brique d'argile (40 Bq/kg Ra226)		2000			50		Louizi et al
ALLEMAGNE	Calcaire	350	1328	3000				Folkerts et al
ALLEMAGNE	Grès		261					Folkerts et al
PAYS-BAS	Gypse naturel	<6		94	<1,4		9	Van Dijk et al
FINLANDE	Gypse sous-produit (épaisseur 2,5-20 cm)	1306		11750	3		25	Mustonen
ITALIE	Marbre, granite	131		239	0,4		4	Carrera et al
PAYS-BAS	Phosphogypse	694		4389	1,1		13	Van Dijk et al
BELGIQUE	Plaque de plâtre (gypse naturel)		7,8					Poffijn et al
BELGIQUE	Plaque de plâtre (phosphogypse)		431					Poffijn et al
ITALIE	Porphyre		325					Orlando et al
ALLEMAGNE	Sous-produit gypseux (épaisseur 2,5-20 cm)	50	789	5083				Folkerts et al
PAYS-BAS	Sous-produit gypseux (mur)		2667			6		Ackers et al
ITALIE	Tuf		2694					Orlando et al

* : moyenne déduite des valeurs min et max

Source : European Commission, Radiation Protection 96, Enhanced radioactivity of building materials, 1997

Tableau 9 : mesures de flux d'exhalation de radon de matériaux (source : RP 96)

4.3.3 FLUX DE RADON ET DE THORON, UJIC & AL., 2010

Une étude serbe⁵¹ publiée en 2010 a montré que pour une activité volumique en radium 226 similaire, le flux de radon normalisé est plus élevé pour des blocs béton que pour des briques.

Dans cette étude, les flux de thoron ont également été mesurés. Les mêmes différences sont observées entre les briques et les blocs béton.

Matériau	RADON			THORON		
	Flux surfacique d'exhalation ($\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)	Ra226 (Bq/kg)	Flux normalisé d'exhalation [$(\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s})/(\text{Bq}/\text{kg})$]	Flux surfacique d'exhalation ($\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)	Th232 (Bq/kg)	Flux normalisé d'exhalation [$(\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s})/(\text{Bq}/\text{kg})$]
Brique 1	340	71	5	101 000	60	1 683
Brique 2	270	55	5	68 000	48	1 423
Bloc béton 1	290	27	11	109 000	22	4 910
Bloc béton 2	180	16	11	60 000	14	4 348
Bloc béton 3	360	9	40	162 000	13	12 558

Tableau 10 : flux d'exhalation de radon et de thoron de matériaux (source : Ujic & al., 2010)

Les auteurs ont effectué un calcul de la dose induite par le radon et le thoron émis par les matériaux analysés.

⁵¹ Ujic & al., Internal exposure from building materials exhaling ²²²Rn and ²²⁰Rn as compared to external exposure due to their naturel radioactivity content, Applied Radiation and Isotopes 68 (2010) 201-206.

La dose due au thoron a été calculée d'après l'exposition reçue dans la chambre à coucher, partant du principe que les organes respiratoires des personnes pendant le sommeil sont situés à environ 40 cm des murs, et que la durée quotidienne de repos est de 8 heures.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Matériau	Exposition interne (µSv/an)		Exposition externe (µSv/an)		
	Radon		Thoron	Ra226	Th232
	Taux de renouvellement d'air : 0,2/h	Taux de renouvellement d'air : 0,63/h			
Brique 1	229	73	66	298	292
Brique 2	182	58	44	229	233
Bloc béton 1	201	64	71	115	108
Bloc béton 2	125	40	36	67	67
Bloc béton 3	246	78	109	37	63

Tableau 11 : doses efficaces annuelles induites par des matériaux de construction (source : Ujic & al., 2010)

Dans ces 5 exemples, on constate que pour un taux de renouvellement d'air faible (0,2/h), la dose induite par le radon est 2 à 4 fois supérieure à celle due au thoron, alors que pour un taux de renouvellement d'air plus élevé (0,63/h), les deux doses sont comparables.

Cette étude montre également une grande variabilité des flux massiques normalisés d'exhalation de radon et de thoron. Ceci confirme qu'il n'est pas possible de se baser uniquement sur les teneurs en radium 226 et thorium 232 des échantillons, et encore moins sur le seul indice I, pour évaluer le risque lié à l'inhalation de radon et de thoron.

Matériau	RADON			THORON		
	Flux massique d'exhalation (µBq/kg/s)	Ra226 (Bq/kg)	Flux normalisé d'exhalation [(µBq/kg/s)/(Bq/kg)]	Flux massique d'exhalation (µBq/kg/s)	Th232 (Bq/kg)	Flux normalisé d'exhalation [(µBq/kg/s)/(Bq/kg)]
Cendres volantes	5	119	0,04	11	92	0,12
Travertin (Niska Banja)	620	550	1,13	-	8	-
"Terra rosa"	18	41	0,44	29	94	0,31
Ciment	6,1	65	0,09	7	16	0,44
Gypse	2,3	10	0,24	2	3	0,80
Béton cellulaire	4,44	8	0,55	5	8	0,62
Brique 1	2,8	71	0,04	6	60	0,10
Brique siliceuse	1,22	24	0,05	1	8	0,15
Brique 2	2,4	55	0,04	9	48	0,19
Brique 3	5,2	59	0,09	1	62	0,01
Pierre (Gornja Stubla)	8,3	33	0,25	36	44	0,83
Marbre 1	0,7	2	0,34	< 0,2	0,2	1,12
Marbre 2	1,03	7	0,15	1	0,4	2,56
Travertin (Milici)	0,86	7	0,12	3	1	3,89
Bloc béton 1	3,3	27	0,12	5	22	0,23
Bloc béton 2	3,1	16	0,19	8	14	0,58
Bloc béton 3	4,4	9	0,49	17	13	1,33

Tableau 12 : corrélation entre flux de radon/thoron et teneurs en Ra226/Th232 (source : Ujic & al., 2010)

4.3.4 TAUX D'ÉMANATION DE RADON, SAKODA & AL., 2011

Concernant le taux d'émanation, une étude japonaise⁵² publiée en 2011 a passé en revue les données disponibles parmi les 47 principales études publiées sur le sujet au cours des 30 dernières années.

Les résultats sont synthétisés dans le graphe ci-après. Chaque étude individuelle est identifiée par un code en abscisse. La surface de chaque point est proportionnelle à la quantité de mesures de l'étude.

Bien que les conditions de mesure et les techniques employées diffèrent, les auteurs considèrent que les résultats moyens constituent une bonne approximation de la tendance générale.

Cette étude :

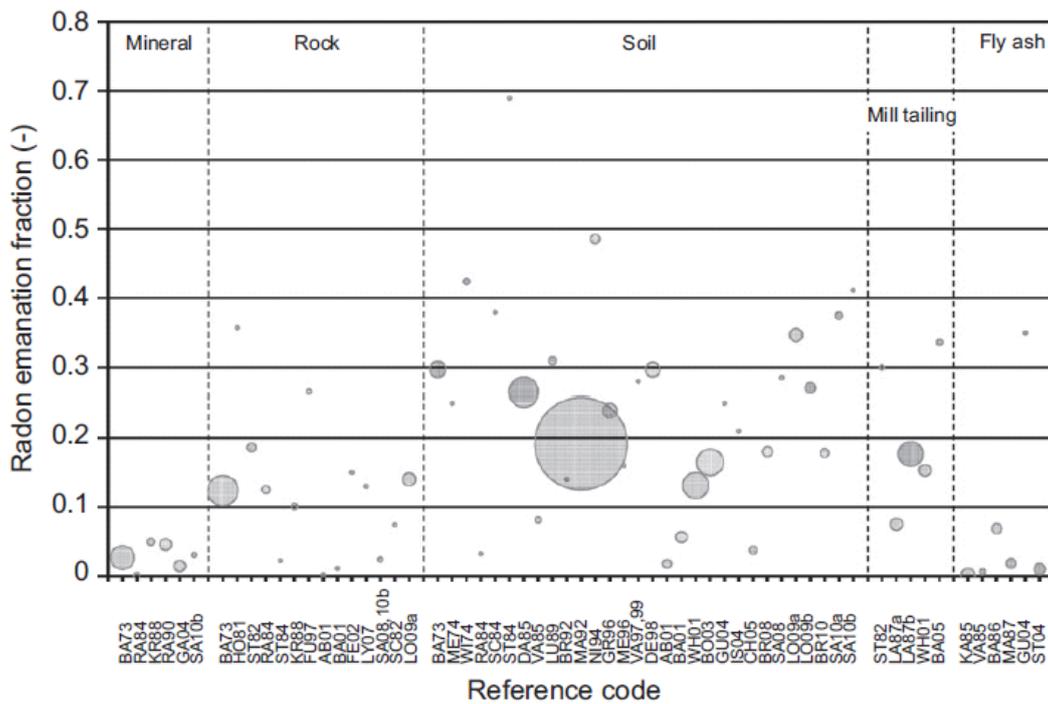
- montre que le taux d'émanation augmente avec le taux d'humidité de l'échantillon,
- permet de constater que les taux d'émanation moyens sont plus élevés pour les roches et les sols que pour les minéraux proprement dits et les cendres volantes. Les résidus d'extraction présentent des taux d'émanation comparables à ceux des roches et sols,
- montre que, contrairement à ce qui est généralement envisagé, la granulométrie de l'échantillon a généralement peu d'influence sur le taux d'émanation.

Les principaux résultats de l'étude sont illustrés ci-dessous.

Matériau	Quantité de mesures	Taux d'émanation moyen (%)
Minéraux	75	3%
Roches	113	13%
Sols	1025	20%
Résidus d'extraction (principalement de minerai d'uranium)	77	17%
Cendres volantes	46	3%

Tableau 13 : Taux d'émanation de radon moyens de matériaux divers (source : Sakoda et al, 2011)

⁵² A. Sakoda & al., A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash, Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1422-1435



Graphe 5 : résultats des principales études relatives à la mesure du taux d'émanation de radon des matériaux (source : Sakoda et al, 2011)

4.3.5 TESTS EFFECTUES PAR LE LABORATOIRE CRIIRAD

Le laboratoire CRIIRAD a effectué des mesures de flux d'exhalation de radon selon la méthodologie décrite au paragraphe 4.2.5 page 42.

Compte tenu des moyens humains et techniques disponibles, il était possible d'effectuer 12 mesures dans le cadre de cette étude.

Le laboratoire CRIIRAD a choisi de cibler les mesures de la façon suivante :

- évaluation préliminaire de la reproductibilité des résultats en analysant trois fois deux échantillons,
- comparaison des flux d'exhalation de radon de 6 échantillons (2 granulats, 2 ciments et 2 briques) présentant des teneurs comparables en radium 226.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous⁵³.

⁵³ Les fiches complètes de résultats sont jointes en ANNEXE 6 page 80.

Matériau	RADON			
	Flux massique d'exhalation ($\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$) Critère de publication : incertitude < 50%	Flux massique d'exhalation ($\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$) Critère de publication : incertitude < 75%	Ra226 (Bq/kg)	Flux normalisé d'exhalation [$(\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s})/(\text{Bq}/\text{kg})$]
Sable (curage de torrent) / Mesure 1	383 ± 144	383 ± 144	102 ± 14	3,8 ± 1,5
Sable (curage de torrent) / Mesure 2	585 ± 164	585 ± 164	102 ± 14	5,7 ± 1,8
Sable (curage de torrent) / Mesure 3	518 ± 151	518 ± 151	102 ± 14	5,1 ± 1,6
Mélange béton 0-20 (magmatique) / Mesure 1	422 ± 132	422 ± 132	69 ± 11	6,1 ± 2,1
Mélange béton 0-20 (magmatique) / Mesure 2	537 ± 149	537 ± 149	69 ± 11	7,8 ± 2,5
Mélange béton 0-20 (magmatique) / Mesure 3	499 ± 141	499 ± 141	69 ± 11	7,2 ± 2,3
Mélange béton 0-21 (magmatique/éboulis)	178 ± 65	178 ± 65	45 ± 8	4,0 ± 1,6
Mélange béton 0-20 (magmatique)	< 320	196 ± 124	49 ± 9	< 6,6
Ciment Lafarge Classique (CEM II / B-LL 32,5R CP2)	< 217	139 ± 78	46 ± 8	< 4,8
Ciment Lafarge Sensium (CEM II / B-LL 32,5R CP2)	< 161	92 ± 69	44 ± 9	< 3,7
Brique IMERYS (1,32 m ² .K/W)	< 69	< 69	56 ± 9	< 1,2
Brique WIENERBERGER (1,00 m ² .K/W)	< 115	< 115	79 ± 12	< 1,5

Tableau 14 : flux d'exhalation de radon de matériaux mesurés par le laboratoire CRIIRAD

Les tests de reproductibilité montrent que dans les deux cas, l'écart entre la valeur moyenne des trois mesures et chaque valeur individuelle est inférieur à 25%.

Les résultats sont présentés sur deux colonnes. Dans la première colonne, le résultat n'est publié que lorsque l'incertitude est inférieure à 50% de la valeur mesurée. Parmi les 6 échantillons présentant des teneurs en radium 226 comparables, on constate que seul l'un des deux mélanges béton répond à ce critère. Dans la deuxième colonne, le résultat n'est publié que lorsque l'incertitude est inférieure à 75%.

A partir de ces éléments, les observations suivantes peuvent être formulées :

- ce sont les briques qui présentent les flux d'exhalation de radon les plus faibles. Pour chacun des deux échantillons analysés, l'incertitude est supérieure à 75% de la valeur mesurée ;
- pour des flux inférieurs à 200 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, l'incertitude de la mesure est presque toujours trop élevée. Parmi les 12 mesures effectuées, seuls les résultats dépassant 350 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ sont toujours assortis d'une incertitude inférieure à 50%.

SYNTHESE ET CONCLUSION

Ce projet avait pour objectif de déterminer les caractéristiques radiologiques de 40 échantillons de matériaux de construction produits et/ou utilisés en Rhône-Alpes. Il s'agissait de sélectionner les échantillons, de les analyser par spectrométrie gamma afin d'apprécier le risque d'irradiation externe, d'étudier la faisabilité d'une évaluation du risque de contamination interne par inhalation par la mesure du flux de radon produit par les matériaux, et d'interpréter les résultats à la lumière de la réglementation afférente.

SELECTION DES ECHANTILLONS

A l'issue d'une recherche bibliographique, le laboratoire de la CRIIRAD a orienté l'échantillonnage vers :

- le **béton et ses principaux composants (granulats, ciment)** :
 - o le laboratoire CRIIRAD a prélevé des **granulats** dans 14 carrières de Rhône-Alpes couvrant les 8 départements de la région et les 4 principaux types géologiques de granulats (alluvions de rivière, alluvions fluvio-glaciaires, concassés de roches calcaires, concassés de roches plutoniques) ;
 - o le laboratoire CRIIRAD a acheté 5 types des principaux **ciments** courants produits en Rhône-Alpes par les 3 fabricants implantés dans la région (CALCIA, LAFARGE CEMENTS et VICAT) ainsi que du Ciment Fondu, ciment d'aluminate de calcium produit par KERNEOS à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), qui présentait un flux de rayonnement gamma plus élevé que les autres ciments lors du balayage radiométrique effectué par la CRIIRAD au moment de l'achat ;
 - o le laboratoire CRIIRAD a inclus dans l'étude l'analyse de 4 échantillons de **blocs béton** préfabriqués ainsi qu'un échantillon de **béton cellulaire** produits en Rhône-Alpes.
- les **briques**, qui sont les seconds éléments constitutifs des murs porteurs des habitations françaises (14% des habitations individuelles et 4% des logements collectifs). Le laboratoire CRIIRAD a acheté 3 types de briques alvéolaires de murs porteurs pour chacun des deux fabricants implantés en Rhône-Alpes (IMERYS : OPTIBRIC PV3+, OPTIBRIC PV4G, MONOMUR 30 ; WIENERBERGER : GF R20, GF R20Th+, BIOMUR R37) ;
- les **plaques de plâtre**. En Rhône-Alpes, il existe une usine de production de plaques de plâtre à Chambéry (marque Placoplâtre). Le laboratoire CRIIRAD a acheté les 4 principaux types de plaques Placoplâtre produites à Chambéry : plaque classique BA13, plaque résistante à l'humidité, plaque isolée phoniquement et plaque résistante au feu. Un cinquième échantillon, correspondant à une plaque utilisée pour les parements de cheminée et produite en Allemagne (plaque RIGIDUR, marque RIGIPS), a été acheté.

ANALYSES PAR SPECTROMETRIE GAMMA

Les 40 échantillons ont fait l'objet d'analyses par spectrométrie gamma au laboratoire de la CRIIRAD. Les principaux résultats sont synthétisés ci-dessous.

Il convient de signaler que l'étude n'avait pas pour but de disposer d'une vision exhaustive de la radioactivité des types de matériaux analysés. Les résultats permettent de disposer d'un premier aperçu qui devrait être approfondi par d'autres études.

Parmi les granulats, on constate une nette différence entre les matériaux issus de **secteurs sédimentaires d'origine non plutonique (calcaires, argilo-calcaires ou fluvio-glaciaires)**, qui présentent des teneurs en radionucléides naturels **inférieures à la moyenne de l'écorce terrestre**, et les matériaux issus de **régions plutoniques** qui présentent tous des teneurs en radionucléides naturels **supérieures à la moyenne de l'écorce terrestre**.

Les **ciments courants** produits en Rhône-Alpes présentent des teneurs en radionucléides naturels **globalement inférieures à la moyenne de l'écorce terrestre** ; en revanche, le **ciment d'aluminat de calcium** produit dans les Bouches-du-Rhône (Ciment Fondu de Kernéos) présente une teneur faible en potassium 40, mais des **teneurs élevées en éléments des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232**.

Parmi les échantillons analysés, toutes les **briques** présentent des teneurs en radionucléides naturels nettement **plus élevées** que tous les **blocs béton**.

Toutes les **plaques** de plâtre analysées présentent une **teneur faible en radionucléides naturels**.

ETUDE DE FAISABILITE DE MESURES DE FLUX DE RADON

A ce jour, il n'existe pas de norme internationale pour la mesure de flux de radon de matériaux, si bien que chaque laboratoire travaillant sur le sujet a développé sa propre méthodologie. Après une étude bibliographique, et à partir du matériel de mesure dont il dispose, le laboratoire CRIIRAD a testé une méthodologie de type « chambre fermée », et effectué 12 analyses d'échantillons :

- deux échantillons ont été analysés trois fois, afin de tester la reproductibilité de la mesure. Dans chaque cas, l'écart entre la valeur moyenne des trois mesures et chaque valeur individuelle est inférieur à 25% ;
- 6 échantillons différents présentant des teneurs en radium 226 comparables (2 granulats, 2 ciments et 2 briques). Les granulats et les ciments présentent des flux d'exhalation de radon comparables, alors que les briques présentent des flux nettement plus faibles. Ce constat est compatible avec les résultats rencontrés dans la littérature scientifique.

Les résultats montrent également les limites de cette méthodologie, qui ne permet pas de mesurer avec suffisamment de précision des flux de radon inférieurs à 300 $\mu\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$.

La technique de la « chambre ouverte », dans laquelle le signal « radon » est cumulé sur plusieurs jours, permettrait probablement d'obtenir des limites de détection plus faibles. A ce sujet, une norme internationale décrivant une méthode d'évaluation du flux d'exhalation de radon par mesure en chambre ouverte, basée sur une norme néerlandaise, devrait être publiée en décembre 2012.

Il est nécessaire d'harmoniser les pratiques des laboratoires afin de disposer d'évaluations comparables, d'autant plus que l'étude bibliographique réalisée dans le cadre de cette étude montre que de nombreux paramètres ont une influence sur le flux d'exhalation de radon (température, humidité, ...).

INTERPRETATION DES RESULTATS

En France, il n'existe pas à ce jour de réglementation spécifique relative à la radioactivité des matériaux de construction dans leur ensemble. La situation devrait changer dans les prochaines années avec la publication d'une directive européenne établissant de nouvelles normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants. En effet, certaines dispositions du projet de directive en cours d'examen visent spécifiquement la radioactivité des matériaux de construction.

Ce texte mentionne deux voies d'exposition induites par les matériaux : l'exposition externe au rayonnement et l'émission de radon.

Concernant l'exposition externe, le projet de directive propose d'établir un indice basé sur les concentrations des produits en radium 226, thorium 232 et potassium 40. Les matériaux présentant un indice suffisamment bas ne seraient « soumis à aucune restriction en ce qui concerne leur mise sur le marché de l'Union ». Les matériaux présentant un indice I trop élevé pourraient faire l'objet de restrictions d'usage.

Le laboratoire CRIIRAD a calculé l'indice I des 40 échantillons analysés par spectrométrie gamma dans le cadre de cette étude.

On constate que, sans préjuger de la pertinence du critère proposé par le projet de directive européenne, plusieurs matériaux courants produits en Rhône-Alpes seraient susceptibles de **dépasser les critères** au-delà desquels une évaluation plus précise de l'exposition devrait être conduite, et pourrait mener à la mise en œuvre de restrictions d'usage. Cela pourrait notamment être le cas de bétons produits à partir de **granulats d'origine granitique** directe (granulats de roches granitiques concassées) ou non (granulats alluvionnaires de secteurs dont le bassin versant est granitique). Certaines **briques** pourraient également être concernées.

Concernant le radon, le projet de directive mentionne bien le risque lié à l'émission de radon par les matériaux de construction, mais le texte reste très évasif sur cette question. En particulier, il ne définit pas, comme dans le cas de l'irradiation externe, d'indice relatif au flux d'exhalation de radon.

Cette question est pourtant primordiale, dans la mesure où deux matériaux dont l'indice I est comparable peuvent présenter des taux d'émanation de radon très différents.

Ainsi, plusieurs études montrent que les **briques** présentent des taux d'émanation de radon **plus faibles que les bétons**. Ceci ne serait pas pris en compte avec un classement basé uniquement sur l'indice I.

L'une des pistes pourrait consister à mettre en place un indice global intégrant à la fois les paramètres de l'indice relatif à l'exposition externe au sens du projet de directive, et un paramètre relatif à l'émanation de radon, comme le propose par exemple le standard autrichien ÖNORM S 5200.

Par ailleurs, une étude citée dans ce rapport montre que le risque lié à l'inhalation de **thoron** n'est pas négligeable et peut, dans certains cas, être comparable au risque lié à l'inhalation de radon. Il conviendrait donc d'intégrer ce risque dans les nouveaux dispositifs réglementaires.

BIBLIOGRAPHIE

REGLEMENTATION ET TEXTES ASSOCIES

DIRECTIVE 96/29 EURATOM du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants

PROPOSITION DE DIRECTIVE DU CONSEIL fixant les normes de base relative à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants – COM(2012) 242 final, 30/05/12

RP 112 : European Commission, Radiation protection 112, Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, 1999

SCHLESINGER T. & GROF Y., « Israeli Standard IS 5098 (Setting limits on the concentration of natural radionuclides in building products) », Workshop on environmental & health aspects of coal ash utilization in Israel, Tel Aviv, 23-24 November 2005

STEGER F. & GRÜN K., "Radioactivity in building materials ÖNORM S 5200 : a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials (revised and definite version)", Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece.

GENERALITES SUR LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

GOURLAOUEN Y., « Les matériaux de construction », édition 2007, SESSI, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie

INFOCUMENTS, « La normalisation française des ciments » (www.infociments.fr/telecharger/CT-G56.pdf)

OBSERVATOIRE DES MATERIAUX : <http://materiaux.brgm.fr/>.

SCHEMAS DEPARTEMENTAUX DES CARRIERES

- ARDECHE : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de l'Ardèche », Janvier 2005 / Document consultable à l'unité territoriale Drôme de la DREAL à Valence (26)
- DRÔME : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de l'Ardèche », Mai 1998 / Document consultable à l'unité territoriale Drôme de la DREAL à Valence (26)
- ISERE : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de l'Isère », Février 2004 / Document téléchargeable sur le site internet de la préfecture de l'Isère
- AIN : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de l'Ain », Mai 2004 / Document téléchargeable sur le site internet de la préfecture de l'Ain
- HAUTE-SAVOIE : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de la Haute-Savoie », Septembre 2004 / Document téléchargeable sur le site internet de la préfecture de Haute-Savoie
- SAVOIE : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de la Savoie », Mars 2006 / Document téléchargeable sur le site internet de la préfecture de Savoie
- LOIRE : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières de la Loire », Novembre 2005 / Document téléchargeable sur le site internet de la préfecture de la Loire
- RHÔNE : BRGM/DRIRE Rhône-Alpes, « Schéma départemental des carrières du Rhône », Juin 2001 / Document consultable à l'unité territoriale Rhône de la DREAL à Villeurbanne (69)

SESSI, « La filière béton en France », Le 4 Pages des statistiques industrielles, N°208, juillet 2005.

UNICEM, « Enquête de branche 2009 »

UNPG, « Le marché des granulats en 2009 »

ZEGNOUN A. & al., Estimation du temps passé à l'intérieur du logement de la population française, InVS/CSTB, Novembre 2008

RADIOACTIVITE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION : SPECTROMETRIE GAMMA

BORG Valérie, Centre Technique des Tuiles et Briques, NOTE D'INFORMATIONS - Radioactivité naturelle des produits de terre cuite

TREVISI R. & al., Natural radioactivity in building materials in the European Union : a database and an estimate of radiological significance, Journal of Environmental Radioactivity 105 (2012) 11-20

RADIOACTIVITE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION : RADON

CATELINOIS O. & al., Évaluation de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France, InVS, Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire n°18-19, 15 mai 2007

HASSAN N.M. & al., The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan, Radiation Measurements 46 (2011) 232-237

ISKANDAR D. & al., Quantification of the dependency of radon emanation power on soil temperature, Applied Radiation and Isotopes 60 (2004) 971-973.

ISO/DIS 11665-9 Décembre 2012 - Mesurage de la radioactivité dans l'environnement - Air : radon 222 - Partie 9 : Méthode de détermination du flux d'exhalation des matériaux de construction

NF M60-768, octobre 2002 - Le radon 222 : méthodes d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation

NEN 5699 (en) Radioactivity measurements – Determination method of the rate of the radon exhalation of dense building materials – Augustus 2001

PETROPOULOS NP & al., Building materials radon exhalation rate : ERRICCA intercomparison exercise results, The Science of the Total Environment 272 (2001) 109-118

RP 96 : European Commission, Radiation protection 96, Enhanced radioactivity of building materials, 1997. Données relatives aux flux d'exhalation de radon citées dans ce document :

- Poffijn et al : Laboratory measurements of radon exhalation and diffusion. Radiat. Prot. Dosim., 7:1-4, 77-79, 1984
- Mustonen, : Methods for evaluation of radiation from building materials. Radiat. Prot. Dosim., 7:235-238, 1985
- Keller : Untersuchungen und Messungen zur Bestimmung von Radonexhalationsraten, Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten. Fachverband für Strahlenschutz e.V., FS-91-56-T, 128-130, 1991
- Folkerts et al : An Experimental Study on Diffusion and Exhalation of ²²²Rn and ²²⁰Rn from Building Materials. Radiat. Prot. Dosim., 9:1,27-34, 1984
- Louizi et al : Natural radioactivity content and radon exhalation rates of Greek building materials. In : Morawska, Bofinger & Maroni (eds) : Indoor Air – An Integrated Approach. Elsevier, U.K., 131-135, 1995
- Siotis et al : Radiological consequences of the use of fly ash in building materials in Greece. Radiat. Prot. Dosim., 7:101-105, 1984
- Carrera et al : Natural radioactivity and radon exhalation in stony materials. J. Environ. Radioactivity, 34:2, 149-159, 1997
- Orlando et al : The evaluation of ²²²Rn emanation from building materials. Proceeding of healthy buildings, 677-681, 1995
- Ackers et al : Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in the Netherlands. Sci. Tot. Environment, 45:151-156, 1985
- Van Dijk et al : Determining the ²²²Rn Exhalation Rate of Building Material Using Liquid Scintillation Countoni. Health Phys., 61:4, 501-509, 1991
- Green : Radiological significance of the utilisation and disposal of coal ash from power stations. For : Central Electricity Generating Board, NRPB Contract 7910-1462, January 1986

SAKODA A. & al., A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash, Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1422-1435

UJIC P. & al., Internal exposure from building materials exhaling ²²²Rn and ²²⁰Rn as compared to external exposure due to their naturel radioactivity content, Applied Radiation and Isotopes 68 (2010) 201-206

ANNEXES

ANNEXE 1 CARRIÈRES DE RHONE-ALPES ET GRANULATS : TOUR D'HORIZON

ANNEXE 1.1 VUE D'ENSEMBLE

NB : les données sont issues des schémas départementaux des carrières (SDC) la publication des SDC ayant été étalée au cours des années 1990 et 2000, les données départementales ne correspondent pas toutes à la même année de production.

La région Rhône-Alpes compte environ 400 carrières.

Pour 6 départements, les granulats représentent plus de 90% de la production des carrières : la Haute-Savoie, l'Ain, la Drôme, la Loire, le Rhône et la Savoie.

Pour les 2 autres départements (Ardèche et Isère), les granulats sont minoritaires ou faiblement majoritaires.

Une vue d'ensemble de chaque département est présentée ci-dessous (les départements sont classés par ordre décroissant de la proportion de granulats).

- En Haute-Savoie, plus de 99% des matériaux extraits des carrières sont des granulats.
- Dans l'Ain, plus de 95% des matériaux extraits des carrières sont granulats. Le département comporte également un gisement spécifique d'argile (82 kt produites en 2000).
- Dans la Drôme, les granulats représentent 90 à 95% de la production. La deuxième production du département (5 à 10%) correspond à la silice : avec 300 kt annuelles, la production de la Drôme représente 5% de la production nationale. Le département produit également du kaolin (25 kt, 6% de la production nationale) et du feldspath (55 kt).
- Dans la Loire, les granulats représentent 90 à 95% de la production. La deuxième production du département (5 à 10%) correspond à l'argile utilisée pour la terre cuite (tuiles et briques). Le département possède également un gisement spécifique de bentonite (10 kt annuelles).
- Dans le Rhône, les granulats représentent 90% de la production. Le département produit également du calcaire destiné au ciment (5%) et de l'argile destiné à la terre cuite (5%).
- En Savoie, les granulats représentent 90% de la production. La deuxième production du département correspond à du gypse (10%, 400 kt annuelles), notamment utilisé pour la fabrication du placoplâtre.
- En Isère, les granulats représentent 60% de la production. Les 40% restants correspondent à la fabrication du ciment et de la chaux. L'Isère possède le seul gisement européen de calcaire permettant de produire du ciment prompt d'origine naturelle. Le département possède également des gisements spécifiques de sable pour béton cellulaire et de tourbe pour terreau (70 kt annuelles).
- L'Ardèche est le seul département où la production de granulats est minoritaire (45%). La production majoritaire (55%) correspond au calcaire utilisé pour la production de ciment. Le département possède également des gisements spécifiques variés : pierres ornementales, pouzzolane, tourbe, basalte, diatomite.

Les chapitres suivants détaillent la production de granulats pour chaque département (les départements sont classés par ordre décroissant de la production totale de granulats).

ANNEXE 1.2 GRANULATS / RHONE (8,0 Mt 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1993.

Les granulats **alluvionnaires/fluvio-glaciaires** représentent **76%** du total, contre **24%** pour les **roches massives éruptives**.

Les granulats **fluvio-glaciaires** représentent **43%** du total. Ils sont issus du sud du département.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **33%** du total. Ils sont issus de trois bassins :

- la vallée du Rhône en amont de Lyon et dans le secteur de Lyon (17%),
- la vallée du Rhône en aval de Lyon (5%),
- la vallée de la Saône (11%).

Les **roches éruptives** représentent **24%** du total. Elles sont extraites à l'ouest de l'axe Rhône-Saône, dans les monts du Beaujolais et du Lyonnais.

Le département produit également une quantité marginale de sables divers.

Granulats produits dans le Rhône

Source : SDC Rhône (données 1993)

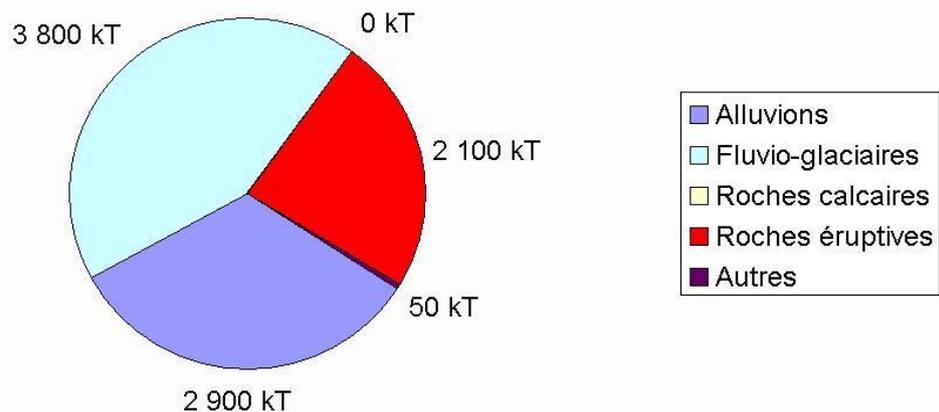


Figure 2 : répartition par type des granulats produits dans le Rhône

ANNEXE 1.3 GRANULATS / ISERE (7,4 MT 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1995.

Les granulats **alluvionnaires/fluvio-glaciaires** représentent **91%** du total contre **9%** pour les **roches massives calcaires**. Les roches éruptives et les autres types de roches représentent une quantité marginale (inférieure à 50 kt).

Les granulats **fluvio-glaciaires** représentent **56%** du total. Ils sont exploités au nord et au centre du département (Bièvre, Vienne et Nord-Isère). Leur répartition par arrondissement est la suivante :

- arrondissement de Grenoble, 30%,
- arrondissement de la Tour du Pin, 15%,
- arrondissement de Vienne, 11%.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **35%** du total. Ils sont issus de 4 bassins :

- la vallée de l'Isère (22% dont 16% amont Grenoble et 6% aval Grenoble),
- la vallée du Rhône (8% dont 7% en amont de Lyon et 1% en aval de Lyon),
- le Valmontais (3%),
- les vallées du Guiers et de la Romanche (2%).

Les granulats **calcaires** représentent **9% du total**. Leur répartition par arrondissement est la suivante :

- arrondissement de Grenoble, 7%,
- arrondissement de la Tour du Pin, 2%.

Les autres matériaux, exploités de façon marginale, sont les matériaux éruptifs issus de l'est (Livet-et-Gavet) et les sablons issus du nord (Vignieu).

Granulats produits en Isère

Source : SDC Isère (données 1995)

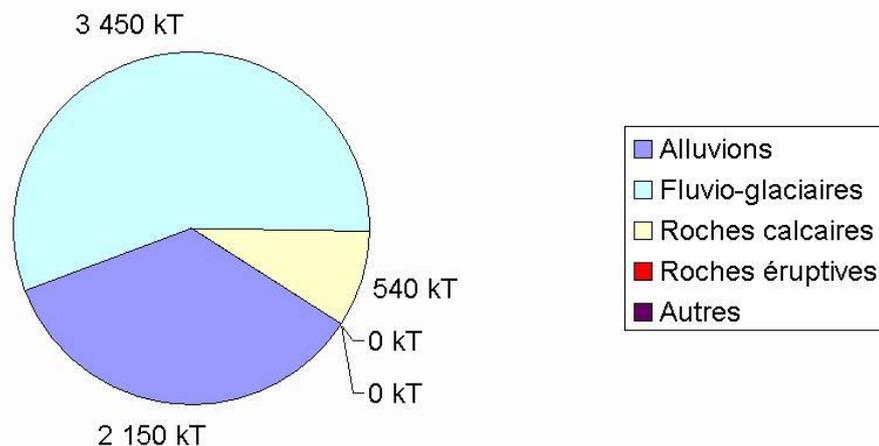


Figure 3 : répartition par type des granulats produits en Isère

ANNEXE 1.4 GRANULATS / AIN (6,3 Mt 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1996.

Les granulats **alluvionnaires/fluvio-glaciaires** représentent **84%** du total, contre **16%** pour les **roches massives calcaires**.

Les granulats **fluvio-glaciaires** représentent **23%** du total. Ils sont issus de trois secteurs :

- Bresse (18%),
- Gex (2%),
- Belley (3%).

Les granulats **alluvionnaires** représentent **61%** du total. Ils sont issus de 4 bassins :

- la vallée de l'Ain (38%),
- la vallée du Rhône (14%),
- la vallée de la Saône (5%),
- la vallée de l'Oignin (4%).

Les granulats **calcaires** représentent **16%** du total. Leur répartition par arrondissement est la suivante :

- arrondissement de Nantua, 4%,
- arrondissement de Gex, 4%,
- arrondissement de Bourg-en-Bresse, 5%,
- arrondissement de Belley, 3%.

Granulats produits dans l'Ain

Source : SDC Ain (données 1996)

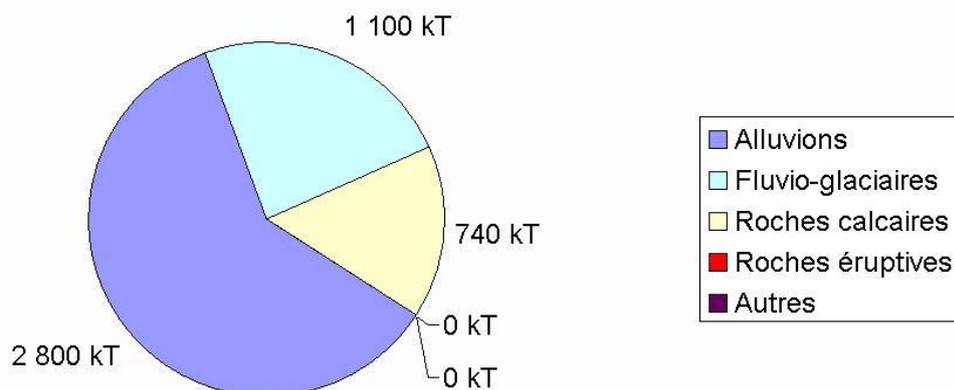


Figure 4 : répartition par type des granulats produits dans l'Ain

ANNEXE 1.5 GRANULATS / DROME (5,7 MT 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1993.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **90%** du total, contre **5%** pour les **roches massives calcaires**. Les **5%** restants correspondent à d'**autres types de sables**.

Les granulats alluvionnaires représentent **90%** du total. Ils sont issus de 4 bassins :

- la vallée du Rhône (78% dont 13% en amont de la Roche-de-Glun, 43% dans le secteur de la Roche-de-Glun/Saulce incluant les deltas de l'Isère et de la Drôme, 11% en aval de Saulce),
- la vallée de l'Isère (7%),
- la vallée de l'Eygues (3%),
- la vallée de la Drôme (2%).

Les granulats **calcaires** représentent 16% du total.

Les **autres sables**, qui représentent 5% du total, correspondent principalement à des colluvions, des sables argileux et des sables miocènes.

Granulats produits dans la Drôme

Source : SDC Drôme (données 1993)

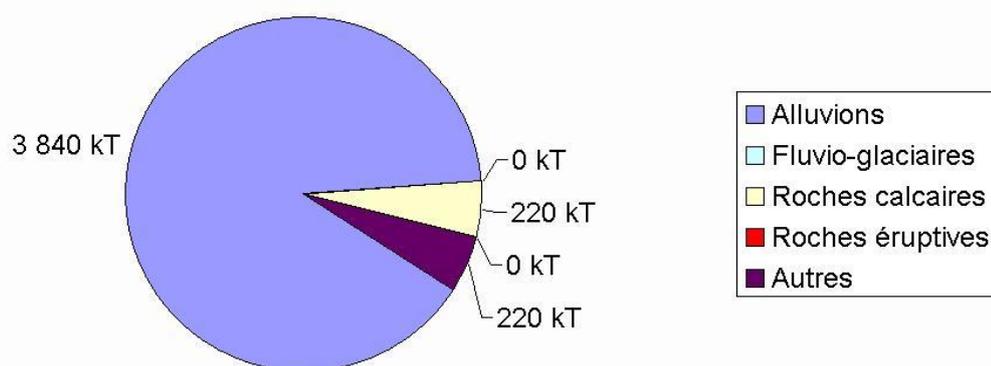


Figure 5 : répartition par type des granulats produits dans la Drôme

ANNEXE 1.6 GRANULATS / HAUTE-SAVOIE (4,6 MT 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1998.

Les granulats **alluvionnaires/fluvio-glaciaires** représentent **52%** du total contre **48%** pour les roches massives calcaires.

Les granulats **fluvio-glaciaires** représentent **33%** du total. Leur répartition par arrondissement est la suivante :

- arrondissement d'Annecy, 16%,
- arrondissement de Thonon-les-Bains, 5%,
- arrondissement de Saint-Julien, 4%,
- arrondissement de Bonneville, 4%.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **19%** du total. Ils sont issus de 4 bassins :

- la vallée de l'Arve (12%),
- la vallée du Giffre et le Lac Léman (7%).

Les granulats **calcaires** représentent **48%** du total. Leur répartition par arrondissement est la suivante :

- arrondissement d'Annecy, 16%,
- arrondissement de Saint-Julien, 13%,
- arrondissement de Bonneville, 13%,
- arrondissement de Thonon-les-Bains, 6%.

Granulats produits en Haute-Savoie

Source : SDC Haute-Savoie (données 1998)

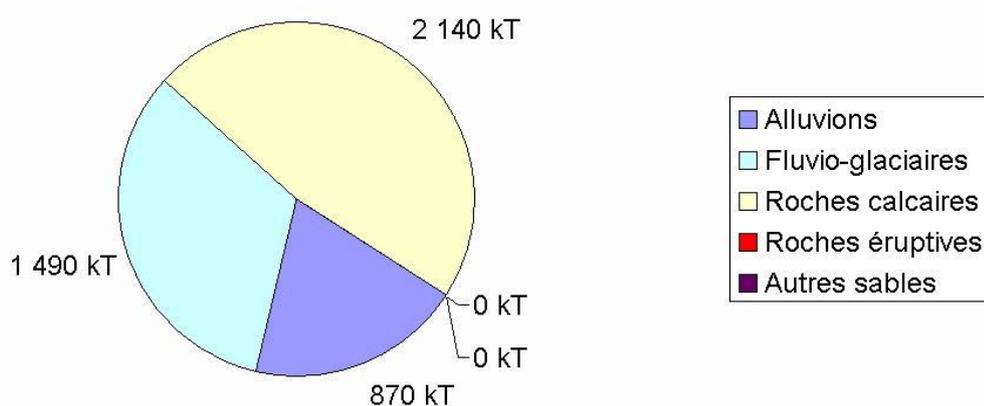


Figure 6 : répartition par type des granulats produits en Haute-Savoie

ANNEXE 1.7 GRANULATS / LOIRE (4,0 MT 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1999.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **37%** du total, contre **56%** pour les **roches éruptives**. Les **7%** restants correspondent à d'**autres granulats**.

Les granulats **alluvionnaires** (**37%**) sont issus de la vallée de la Loire. Leur production est répartie selon deux secteurs :

- le Forez, correspondant à la vallée de la Loire en amont de Neulise (26%),
- le secteur de Roanne, correspondant à la vallée de la Loire en aval de Neulise (10%).

La production de granulats de **roches éruptives** (**56%**) est répartie de la façon suivante :

- Forez, 41%,
- secteur de Roanne, 15%.

Les **autres granulats** (**7%**) correspondent à des **argiles** (**6%**) et des **schistes** dans le secteur de Roche-la-Molière (**1%**)

Granulats produits dans la Loire

Source : SDC Loire (données 1999)

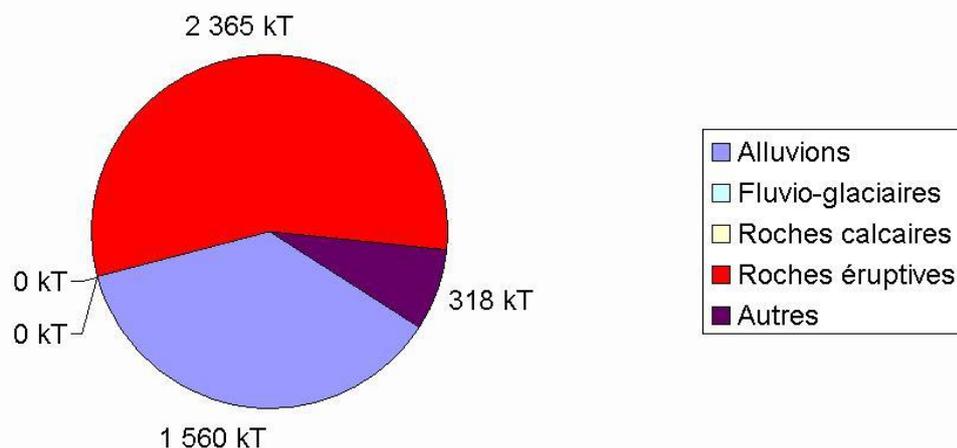


Figure 7 : répartition par type des granulats produits dans la Loire

ANNEXE 1.8 GRANULATS / SAVOIE (2,9 MT 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 2000.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **60%** du total, contre **26%** pour les **roches calcaires** et **9%** pour les **roches éruptives**. Les **5%** restants correspondent à des **granulats de recyclage**.

Les **granulats alluvionnaires (60%)** sont issus de 4 bassins :

- la vallée de l'Isère (35% dont 32% en aval d'Albertville et 3% en amont d'Albertville),
- le Lac du Bourget et la région aixoise (16%),
- la vallée du Rhône et l'avant-pays savoyard (6%),
- la vallée de l'Arc (3%).

Les **roches calcaires (26%)** proviennent de l'est (14%) et de l'ouest (12%) du département.

Les **roches éruptives (9%)** proviennent du sud (7%) et du centre, dans le secteur de Saint-Marcel (2%).

Granulats produits en Savoie

Source : SDC Savoie (données 2000)

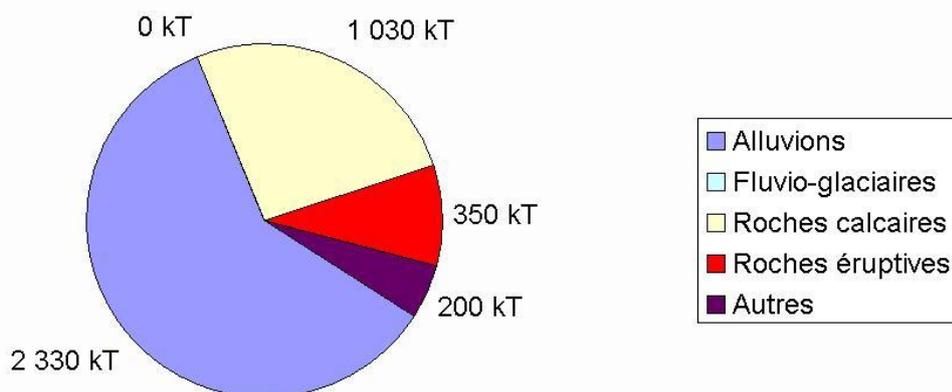


Figure 8 : répartition par type des granulats produits en Savoie

ANNEXE 1.9 GRANULATS / ARDECHE (1,4 MT 2009)

Les données du schéma départemental des carrières datent de 1995.

Les granulats **alluvionnaires** représentent **27%** du total, contre **59%** pour les **roches calcaires** et **13%** pour les **roches éruptives**. Le reliquat correspond à des sablons (**1%**).

Les granulats **alluvionnaires (27%)** sont issus de deux bassins :

- la vallée du Rhône (21%),
- la vallée de l'Ardèche (5%).

Les granulats de **roches calcaires (59%)** sont répartis par arrondissement de la façon suivante :

- arrondissement de Privas, 43%,
- arrondissement de Largentière, 11%,
- arrondissement de Tournon, 5%.

Les granulats de **roches éruptives (13%)** sont issus de l'ouest (en bordure de la Haute-Loire) et de l'est (le long du Rhône). Les pourcentages respectifs des deux secteurs ne sont pas précisés dans le schéma départemental des carrières.

Granulats produits en Ardèche

Source : SDC Ardèche (données 1995)

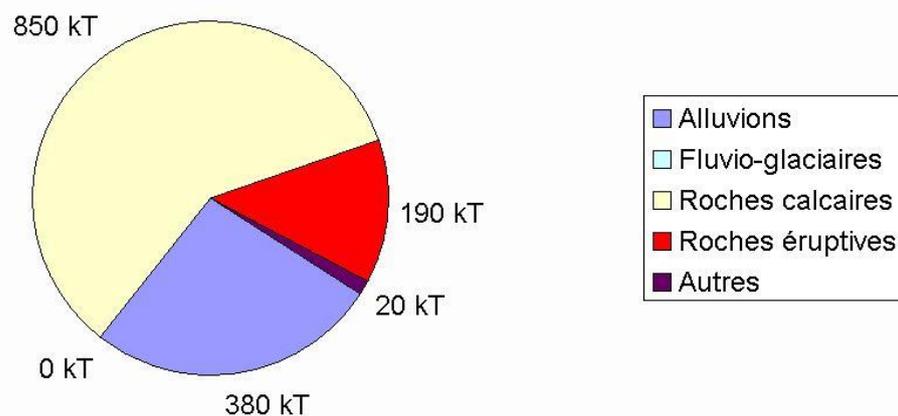


Figure 9 : répartition par type des granulats produits en Ardèche

ANNEXE 2 QUESTIONNAIRE A DESTINATION DES CARRIERES DE RHONE-ALPES

«Raison_sociale_exploitant»
«Adresse_exploitant»
«CP_exploitant» «Commune_exploitant»

Valence, le 21 novembre 2011

Objet : **Etude des caractéristiques radiologiques des produits de carrières en Rhône-Alpes**

Madame, Monsieur,

Comme les matières premières dont ils sont issus, les matériaux de construction contiennent des radionucléides naturels à des teneurs très variables en fonction du contexte géologique.

D'ici quelques années, les producteurs et fabricants devront évaluer la teneur en radionucléides de certains matériaux de construction. En cas de présence de concentrations dépassant un seuil préétabli, les autorités pourront fixer des contraintes de fabrication et imposer une information des consommateurs.

Cette obligation est d'ores et déjà inscrite dans le Code de la santé publique français, à l'article R1333-14¹. La parution des textes d'application de cet article devrait s'accélérer après l'adoption, prévue en 2012, d'une directive européenne mettant à jour les normes de base relatives à la protection contre les rayonnements ionisants².

Depuis plusieurs années, la CRIIRAD est interpellée par les particuliers, les professionnels du bâtiment et les collectivités, demandeurs de données concrètes sur ce sujet.

Afin d'apporter des éléments de réponse établis sur des bases scientifiques, la CRIIRAD conduit actuellement, avec le soutien de la Région Rhône-Alpes, un bilan des connaissances sur la radioactivité naturelle de différents types de matériaux produits et/ou utilisés en Rhône-Alpes.

Dans ce cadre, je vous serais reconnaissant de bien vouloir m'adresser, d'ici la fin de l'année, les éléments d'information regroupés dans le questionnaire ci-joint, adressé à l'ensemble des exploitants de carrières de granulats de la région Rhône-Alpes.

Sur la base des résultats de cette enquête, notre laboratoire collectera, au 1^{er} trimestre 2012, 40 échantillons de matériaux de construction afin de déterminer leurs caractéristiques radiologiques.

Participer à cette enquête vous permettra d'anticiper les nouvelles obligations réglementaires auxquelles vous serez bientôt confrontés.

Nous ne manquerons pas de vous adresser, si vous le souhaitez, une copie du rapport d'étude CRIIRAD prévu pour octobre 2012.

Je reste à votre disposition pour tout renseignement complémentaire et vous prie d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de mes sincères salutations.

Le responsable du service radon
Julien SYREN
Ingénieur géologue



¹ Article R1333-14 : En cas de présence dans les biens de consommation et dans les **produits de construction** de radionucléides naturels non utilisés pour leurs propriétés radioactives, fissiles ou fertiles, les ministres chargés de la santé et de la consommation conjointement, selon le cas, avec les ministres chargés de la construction ou de l'agriculture peuvent, après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire, fixer des contraintes de fabrication, notamment des limites de radioactivité dans les produits commercialisés, et définir les modalités suivant lesquelles il doit être procédé à une information des consommateurs.

² Texte consultable sur

http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/art31/2010_02_24_draft_euratom_basic_safety_standards_directive.pdf

Questionnaire à destination des exploitants des carrières en activité de la région Rhône-Alpes

Etude sur la radioactivité naturelle des matériaux extraits
des carrières de Rhône-Alpes

Etude effectuée par le laboratoire CRIIRAD
avec le soutien financier de la Région Rhône-Alpes

Coordonnées du site (corriger si nécessaire)

Nom : «**Nom_exploitation**» Identification : «**Id_site**»

Commune : «**Commune_exploitation**» Code INSEE : «**INSEE_site**»

Coordonnées de l'exploitant (corriger si nécessaire)

Nom : «**Raison_sociale_exploitant**»

Code postal : «**CP_exploitant**» Commune : «**Commune_exploitant**»

Nom et qualité de la personne

remplissant le questionnaire :

Téléphone :

Adresse mail :

Site en activité : Oui Non

Production 2010 : kt

Production 2009 : kt

USAGE(S)

Bétons hydrauliques

Bétons prêts à l'emploi

Produits en béton

Bétons de chantier

Ciment

Produits hydrocarbonés (enrobés
pour construction routière)

Produits inertes

Routes

Autres (VRD, ...)

.....

Pierres naturelles

Murs en pierre massive

Revêtements de sol

Revêtements muraux

Toiture

Autres (cheminées, plans de
travail, ...) :

.....

Autres :

.....

.....

Avez-vous déjà effectué des analyses radiologiques des produits du site ?

Oui Non

Souhaitez-vous obtenir plus d'informations sur les possibilités de prise en charge gratuite, par le laboratoire CRIIRAD, d'un échantillonnage de matériaux pour analyses radiologiques¹ ?

Oui Non

Observations :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Ce questionnaire a été établi par Julien Syren, ingénieur géologue du laboratoire de la CRIIRAD.

Merci de bien vouloir nous le **retourner avant le 31 décembre 2011** :

- par fax au **04 75 81 26 48**,
- par courrier à l'adresse suivante :

CRIIRAD
471 AVENUE VICTOR HUGO
26000 VALENCE

- par mail à julien.syren@criirad.org (un formulaire informatique peut vous être transmis sur demande)

¹ Dans le cadre du présent projet, seront analysés une quarantaine d'échantillons à l'échelle régionale. La CRIIRAD choisira la liste des matériaux analysés en fonction des caractéristiques géologiques et de l'usage fait. Le laboratoire CRIIRAD est agréé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire pour le contrôle de la radioactivité de l'environnement. Liste détaillée des agréments : <http://www.criirad.org/laboratoire/agrementslabo/agrementslabo.html>

ANNEXE 3 SPECTROMETRIE GAMMA : AGREMENTS DU LABORATOIRE CRIIRAD

Le laboratoire de la CRIIRAD participe régulièrement à des exercices d'intercomparaison nationaux ou internationaux (AIEA).

En France, les agréments des laboratoires de mesures de la radioactivité de l'environnement sont désormais délivrés par décision de l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

Le laboratoire de la CRIIRAD dispose de tous les agréments qu'il a demandés dans le domaine de la mesure de la radioactivité dans l'environnement :

Une liste actualisée au 1^{er} juillet 2012 est présentée ci-dessous :

1 / Matrice **eaux** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV (agrément valable jusqu'au 30/06/2015) et tritium (agrément valable jusqu'au 30/06/2014).

2 / Matrice **sols** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV (agrément valable jusqu'au 30/6/2016), uranium et descendants, thorium et descendants, Ra 226 et descendants, Ra 228 et descendants (agrément valable jusqu'au 30/06/2015).

3 / Matrices **biologiques** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV (agrément valable jusqu'au 30/06/2014).

4 / Matrices **gaz** : émetteurs gamma d'énergie inférieure à 100 keV et d'énergie supérieure à 100 keV et gaz halogénés (agrément valable jusqu'au 30/06/2017).

ANNEXE 4 CHAINES DE DESINTEGRATION RADIOACTIVE DES TROIS FAMILLES DE RADIONUCLEIDES NATURELS

**CHAINE RADIOACTIVE
Famille de l'Uranium 238**

Radionucléide	Mode de désintégration	Période physique
Uranium 238	α	4,5 10^9 ans
Thorium 234	β	24 jours
Protactinium 234^m	β	1,2 minutes
Uranium 234	α	2,5 10^5 ans
Thorium 230	α	7,5 10^4 ans
Radium 226	α	1,6 10^3ans
Radon 222	α	3,8 jours
Polonium 218	α	3 minutes
Plomb 214	β	27 minutes
Bismuth 214	β	20 minutes
Polonium 214	α	1,6 10^{-4} secondes
Plomb 210	β	22,3 ans
Bismuth 210	β	5 jours
Polonium 210	α	138,5 jours
Plomb 206		Stable

Les radionucléides en **gras** dans le tableau, sont **déTECTABLES**
par **spectrométrie gamma** directement

CHAINE RADIOACTIVE

Famille de l'Uranium 235

Radionucléide	Mode de désintégration	Période physique
Uranium 235	α	7 10⁸ ans
Thorium 231	β	25,6 heures
Protactinium 231	α	3,3 10⁴ ans
Actinium 227	β	21,8 ans
Thorium 227	α	18,7 jours
Radium 223	α	11,4 jours
Radon 219	α	3,9 secondes
Polonium 215	α	1,8 10 ⁻³ secondes
Plomb 211	β	36 minutes
Bismuth 211	α	2,2 minutes
Thallium 207	β	4,8 minutes
Plomb 207		Stable

Les radionucléides en **gras** dans le tableau, sont **déTECTABLES**
par spectrométrie gamma directement

CHAINE RADIOACTIVE

Famille du Thorium 232

Radionucléide	Mode de désintégration	Période physique
Thorium 232	α	1,4 10^{10} ans
Radium 228	β	5,8 ans
Actinium 228	β	6,1 heures
Thorium 228	α	1,9 an
Radium 224	α	3,7 jours
Radon 220	α	55,6 secondes
Polonium 216	α	0,15 secondes
Plomb 212	β	10,6 heures
Bismuth 212	$\alpha \beta$	1 heure
Thallium 208	β	3 minutes
Polonium 212	α	3 10^{-7} secondes
Plomb 208		Stable

Les radionucléides en **gras** dans le tableau, sont **déTECTABLES**
par spectrométrie gamma directement

ANNEXE 5 RESULTATS DETAILLES DES ANALYSES PAR SPECTROMETRIE GAMMA

PRODUITS DE CARRIERE

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Chaîne de l'uranium 238					Uranium 235
					Th234	Ra 226*	Pb 214	Bi 214	Pb 210**	U 235
MELANGES BETON										
280312B1	C26775	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 26	8,8 ± 2,9	8,2 ± 2,7	9,5 ± 3,0	< 6	< 6
120412B3	C26759	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 32	13,2 ± 3,8	14,3 ± 3,7	12,1 ± 3,8	< 19	< 7
030512B1	C26780	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 16	7,9 ± 2,6	8,1 ± 2,6	7,8 ± 2,7	< 8	< 6
120412B1	C26771	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 23	16,5 ± 4,3	16,7 ± 4,1	16,4 ± 4,4	< 37	< 7
060412B5	C26761	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 47	12,1 ± 3,7	11,9 ± 3,5	12,2 ± 4,0	< 18	< 7
040512A1	C26773	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 31	13,5 ± 4,1	12,3 ± 3,7	14,6 ± 4,4	< 17	< 8
300412B2	C26795	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (argilo-calcaire)	< 30	15,4 ± 3,5	16,2 ± 3,5	14,6 ± 3,5	< 19	< 7
120412B2	C26777	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 23	14,6 ± 3,5	13,7 ± 3,3	15,6 ± 3,8	< 22	< 8
270112A1	C26758	Mélange béton 0-15/1	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 27	14,2 ± 3,3	13,4 ± 3,1	15,1 ± 3,6	< 20	< 6
300412B3	C26760	Mélange béton 0-22,4	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 43	18,8 ± 4,0	18,3 ± 3,9	19,4 ± 4,2	< 28	< 6
060412B1	C26767	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche éruptive	68 ± 25	69 ± 11	72 ± 11	66 ± 11	53 ± 17	< 8
300412B1	C26784	Mélange béton 0-21	Rhône-Alpes	Roche éruptive (éboulis)	< 60	45 ± 8	45 ± 8	44 ± 8	48 ± 18	< 8
060412B2	C26793	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (éruptif)	< 80	49 ± 9	52 ± 9	45 ± 8	37 ± 17	< 22
060412B3	C26787	Mélange béton 0-60	Rhône-Alpes	Alluvions (éruptif)	87 ± 30	75 ± 12	77 ± 12	72 ± 12	61 ± 20	< 9
AUTRES										
060412B4	C26778	Sable (curage de torrent)	Rhône-Alpes	Roche éruptive (dépôts torrentiels)	95 ± 30	102 ± 14	107 ± 15	96 ± 14	83 ± 22	< 9
200712C1	C26837	Pdt réfractaire (additif ciment)	Rhône-Alpes	Roche éruptive	99 ± 37	67 ± 12	65 ± 11	69 ± 12	78 ± 26	< 12

PRODUITS MANUFACTURES

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Chaîne de l'uranium 238					Uranium 235
					Th234	Ra 226*	Pb 214	Bi 214	Pb 210**	U 235
CIMENTS										
260612A6	C26803	Portland (CEM II / B-LL 42,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	< 60	34 ± 7	40 ± 7	28 ± 6	38 ± 15	< 10
210612A1	C26791	Portland (CEM II / B-LL 32,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	< 60	46 ± 8	50 ± 9	41 ± 8	33 ± 15	< 8
210612A2	C26792	Portland (CEM II / B-LL 32,5 R)	Rhône-Alpes	-	< 42	18,7 ± 4,6	21,6 ± 4,7	15,8 ± 4,4	< 21	< 8
210612A3	C26796	Portland (CEM II / B-LL 42,5 N)	Rhône-Alpes	-	< 70	44 ± 9	44 ± 8	45 ± 9	< 41	< 9
210612A4	C26799	Ciment Naturel Prompt (CNP PM)	Rhône-Alpes	-	< 60	26 ± 7	27 ± 7	25 ± 7	< 38	< 11
210612A5	C26801	Ciment d'Aluminate de Calcium (CAC)	PACA	-	96 ± 30	89 ± 13	91 ± 13	86 ± 13	< 50	< 9
BLOCS BETON										
200712B2	C26876	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 38	19,2 ± 4,5	20,6 ± 4,5	17,7 ± 4,5	< 27	< 7
200712B1	C26874	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 28	17,9 ± 4,0	16,5 ± 3,7	19,4 ± 4,3	< 22	< 6
210612A12	C26808	Bloc béton à bancher	Rhône-Alpes	-	< 48	26 ± 6	28 ± 6	25 ± 6	< 32	< 8
210612A11	C26813	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 44	25,5 ± 4,8	25,7 ± 4,6	25,4 ± 4,9	< 24	< 6
BRIQUES										
260612A7	C26834	Brique de mur "roulé" 1,32 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	< 80	56 ± 9	59 ± 9	53 ± 9	< 44	< 10
260612A8	C26832	Brique de mur "roulé" 0,72 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	< 60	51 ± 10	54 ± 9	49 ± 10	36 ± 17	< 11
060712A1	C26872	Brique de mur "roulé" 2,87 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	< 110	56 ± 11	52 ± 11	59 ± 12	61 ± 27	< 13
210612A9	C26810	Brique de mur "roulé" 1,32 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	< 80	66 ± 11	66 ± 11	65 ± 11	69 ± 24	< 10
210612A10	C26828	Brique de mur "roulé" 2,61 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	< 80	67 ± 9	69 ± 9	64 ± 9	58 ± 13	< 7
210612A8	C26816	Brique de mur "roulé" 1,00 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	81 ± 27	79 ± 12	81 ± 12	76 ± 11	70 ± 20	< 9
PLAQUES DE PLÂTRE										
260612A2	C26826	Plaque de plâtre "humidité"	Rhône-Alpes	-	< 50	8,5 ± 4,2	8,5 ± 4,2	< 10	< 14	< 13
260612A5	C26814	Plaque de plâtre parement cheminée	Allemagne	-	< 18	< 7	< 8	< 7	< 19	< 10
260612A4	C26817	Plaque de plâtre BA13	Rhône-Alpes	-	< 60	< 4,3	< 4,3	< 8	< 39	< 16
260612A3	C26812	Plaque de plâtre "son"	Rhône-Alpes	-	< 47	14 ± 5	15 ± 5	12,4 ± 4,9	< 19	< 11
260612A1	C26835	Plaque de plâtre "feu"	Rhône-Alpes	-	< 41	13 ± 6	12 ± 5	15 ± 7	< 25	< 13
AUTRES										
210612A6	C26806	Mélange béton + ciment prêt à l'emploi	Rhône-Alpes	-	< 31	17,0 ± 4,1	16,2 ± 3,8	17,8 ± 4,5	< 27	< 6
210612A13	C26804	Bloc de béton cellulaire	Rhône-Alpes	-	< 60	17 ± 7	17 ± 7	< 19	< 24	< 16
210612A7	C26815	Revêtement extérieur (Gneiss)	Italie	-	78 ± 29	62 ± 10	62 ± 10	61 ± 10	73 ± 20	< 8

* Le Radium 226 est évalué à partir de ses descendants le Plomb 214 et le Bismuth 214.
Afin de respecter le temps de mise à l'équilibre entre le radium 226 et ses descendants plomb 214 et bismuth 214, l'analyse a été effectuée au moins 3 semaines après conditionnement de l'échantillon.

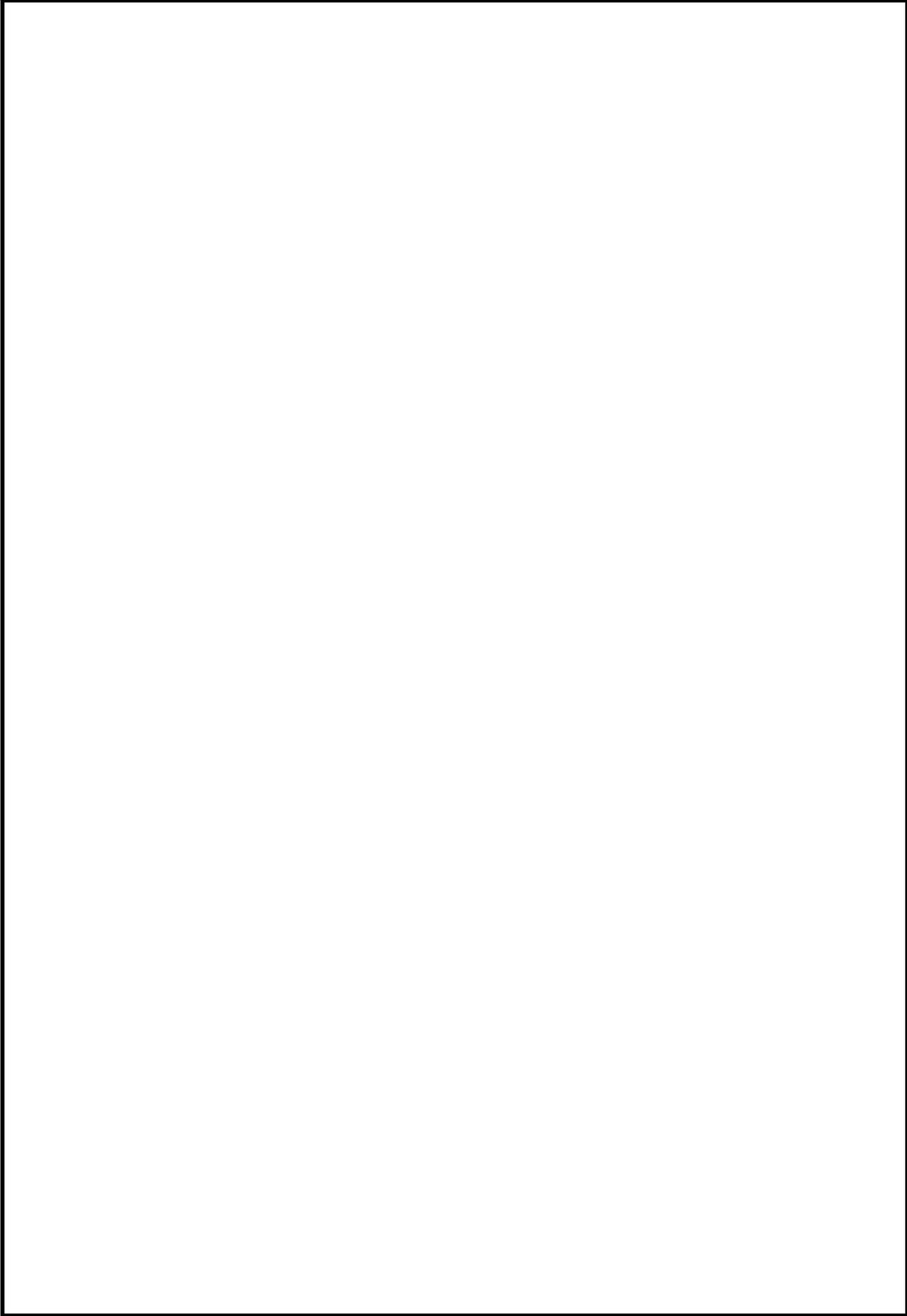
PRODUITS DE CARRIERE

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Chaîne du thorium 232			Potassium 40
					Ac 228	Pb212	Tl208	K40
MELANGES BETON								
280312B1	C26775	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 10	3,7 ± 1,4	< 3,1	< 80
120412B3	C26759	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 11	5,2 ± 2,0	< 2,7	< 60
030512B1	C26780	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 7	5,9 ± 1,6	< 2,5	< 110
120412B1	C26771	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 7	5,4 ± 1,9	< 3,2	< 60
060412B5	C26761	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 7	6,3 ± 2,2	< 4,0	< 140
040512A1	C26773	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 10	< 5	< 3,9	< 80
300412B2	C26795	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (argilo-calcaire)	< 8	7,0 ± 1,7	2,9 ± 1,3	< 140
120412B2	C26777	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 11	9,0 ± 2,1	3,5 ± 1,3	< 170
270112A1	C26758	Mélange béton 0-15/1	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	13 ± 5	12,6 ± 2,5	3,6 ± 1,3	226 ± 41
300412B3	C26760	Mélange béton 0-22,4	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	21 ± 7	22,3 ± 3,6	8,3 ± 2,0	360 ± 60
060412B1	C26767	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche éruptive	40 ± 10	40 ± 6	14,2 ± 3,1	730 ± 110
300412B1	C26784	Mélange béton 0-21	Rhône-Alpes	Roche éruptive (éboulis)	67 ± 14	71 ± 10	22,4 ± 4,4	910 ± 130
060412B2	C26793	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (éruptif)	64 ± 13	64 ± 9	19,4 ± 3,8	1 130 ± 160
060412B3	C26787	Mélange béton 0-60	Rhône-Alpes	Alluvions (éruptif)	114 ± 20	118 ± 15	40 ± 6	1 240 ± 170
AUTRES								
060412B4	C26778	Sable (curage de torrent)	Rhône-Alpes	Roche éruptive (déposés torrentiels)	134 ± 22	146 ± 18	48 ± 7	1 120 ± 150
200712C1	C26837	Pdt réfractaire (additif ciment)	Rhône-Alpes	Roche éruptive	196 ± 31	208 ± 26	67 ± 10	990 ± 150

PRODUITS MANUFACTURES

N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Chaîne du thorium 232			Potassium 40
					Ac 228	Pb212	Tl208	K40
CIMENTS								
260612A6	C26803	Portland (CEM II / B-LL 42,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	< 17	15,7 ± 3,5	5,3 ± 2,2	< 47
210612A1	C26791	Portland (CEM II / B-LL 32,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	< 17	9,0 ± 2,9	< 5	< 90
210612A2	C26792	Portland (CEM II / B-LL 32,5 R)	Rhône-Alpes	-	16 ± 7	12,1 ± 2,9	4,5 ± 1,7	< 280
210612A3	C26796	Portland (CEM II / B-LL 42,5 N)	Rhône-Alpes	-	< 15	13,6 ± 3,5	4,6 ± 2,0	< 70
210612A4	C26799	Ciment Naturel Prompt (CNP PM)	Rhône-Alpes	-	23 ± 10	26 ± 5	9,2 ± 3,1	< 380
210612A5	C26801	Ciment d'Aluminate de Calcium (CAC)	PACA	-	144 ± 23	158 ± 19	51 ± 7	< 110
BLOCS BETON								
200712B2	C26876	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 15	7,2 ± 2,2	3,0 ± 1,4	< 120
200712B1	C26874	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	15 ± 6	14,1 ± 2,6	6,2 ± 1,7	268 ± 47
210612A12	C26808	Bloc béton à bancher	Rhône-Alpes	-	17 ± 7	19,0 ± 4,2	6,1 ± 2,2	350 ± 70
210612A11	C26813	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	25 ± 7	28,6 ± 4,2	10,6 ± 2,2	480 ± 70
BRIQUES								
260612A7	C26834	Brique de mur "roulé" 1,32 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	67 ± 14	65 ± 9	20,8 ± 4,0	660 ± 100
260612A8	C26832	Brique de mur "roulé" 0,72 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	54 ± 14	67 ± 10	21,6 ± 4,6	650 ± 110
060712A1	C26872	Brique de mur "roulé" 2,87 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	77 ± 18	71 ± 11	26 ± 5	700 ± 120
210612A9	C26810	Brique de mur "roulé" 1,32 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	72 ± 16	87 ± 12	26,6 ± 4,9	920 ± 140
210612A10	C26828	Brique de mur "roulé" 2,61 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	75 ± 12	85 ± 10	27,0 ± 3,8	1 050 ± 120
210612A8	C26816	Brique de mur "roulé" 1,00 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	106 ± 18	115 ± 14	37 ± 6	1 240 ± 160
PLAQUES DE PLÂTRE								
260612A2	C26826	Plaque de plâtre "humidité"	Rhône-Alpes	-	< 6	< 6	< 2,3	< 100
260612A5	C26814	Plaque de plâtre parement cheminée	Allemagne	-	< 10	< 5	< 2,2	< 120
260612A4	C26817	Plaque de plâtre BA13	Rhône-Alpes	-	< 17	< 2,5	< 2,7	< 49
260612A3	C26812	Plaque de plâtre "son"	Rhône-Alpes	-	< 11	6,9 ± 2,7	< 5	< 170
260612A1	C26835	Plaque de plâtre "feu"	Rhône-Alpes	-	< 19	10,1 ± 4,0	< 3,6	< 160
AUTRES								
210612A6	C26806	Mélange béton + ciment prêt à l'emploi	Rhône-Alpes	-	< 9	6,5 ± 2,0	< 3,9	< 120
210612A13	C26804	Bloc de béton cellulaire	Rhône-Alpes	-	< 24	10,8 ± 4,5	< 7	< 250
210612A7	C26815	Revêtement extérieur (Gneiss)	Italie	-	126 ± 21	132 ± 17	42 ± 7	1 290 ± 180

PRODUITS DE CARRIERE						
N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Radionucléides artificiels	
					Cs137	Cs134
MELANGES BETON						
280312B1	C26775	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 0,38	< 0,35
120412B3	C26759	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,5	< 0,43
030512B1	C26780	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche calcaire	< 0,35	< 0,31
120412B1	C26771	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,48	< 0,46
060412B5	C26761	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,5	< 0,41
040512A1	C26773	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (calcaire)	< 0,5	< 0,48
300412B2	C26795	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (argilo-calcaire)	< 0,32	< 0,30
120412B2	C26777	Mélange béton 0-22	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 0,37	< 0,30
270112A1	C26758	Mélange béton 0-15/1	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 0,33	< 0,33
300412B3	C26760	Mélange béton 0-22,4	Rhône-Alpes	Alluvions (fluvio-glaciaire)	< 0,36	< 0,34
060412B1	C26767	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Roche éruptive	< 0,7	< 0,6
300412B1	C26784	Mélange béton 0-21	Rhône-Alpes	Roche éruptive (éboulis)	< 0,7	< 0,49
060412B2	C26793	Mélange béton 0-20	Rhône-Alpes	Alluvions (éruptif)	< 0,6	< 0,5
060412B3	C26787	Mélange béton 0-60	Rhône-Alpes	Alluvions (éruptif)	< 0,7	< 0,6
AUTRES						
060412B4	C26778	Sable (curage de torrent)	Rhône-Alpes	Roche éruptive (dépôts torrentiels)	< 0,6	< 0,5
200712C1	C26837	Pdt réfractaire (additif ciment)	Rhône-Alpes	Roche éruptive	< 0,9	< 0,7
PRODUITS MANUFACTURES						
N° enregistrement	N° analyse	Catégorie	Région de production	Contexte géologique	Radionucléides artificiels	
					Cs137	Cs134
CIMENTS						
260612A6	C26803	Portland (CEM II / B-L.L. 42,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	< 0,6	< 0,49
210612A1	C26791	Portland (CEM II / B-L.L. 32,5 R CP2)	Rhône-Alpes	-	< 0,6	< 0,5
210612A2	C26792	Portland (CEM II / B-L.L. 32,5 R)	Rhône-Alpes	-	< 0,49	< 0,42
210612A3	C26796	Portland (CEM II / B-L.L. 42,5 N)	Rhône-Alpes	-	< 0,6	< 0,5
210612A4	C26799	Ciment Naturel Prompt (CNP PM)	Rhône-Alpes	-	< 0,8	< 0,6
210612A5	C26801	Ciment d'Aluminate de Calcium (CAC)	PACA	-	< 0,6	< 0,5
BLOCS BETON						
200712B2	C26876	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 0,5	< 0,41
200712B1	C26874	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 0,35	< 0,29
210612A12	C26808	Bloc béton à bancher	Rhône-Alpes	-	< 0,6	< 0,50
210612A11	C26813	Bloc béton	Rhône-Alpes	-	< 0,33	< 0,29
BRIQUES						
260612A7	C26834	Brique de mur "roulé" 1,32 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	< 0,37	< 0,38
260612A8	C26832	Brique de mur "roulé" 0,72 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	< 0,8	< 0,6
060712A1	C26872	Brique de mur "roulé" 2,87 m².K/W (Prod. A)	Rhône-Alpes	-	< 0,9	< 0,8
210612A9	C26810	Brique de mur "roulé" 1,32 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	< 0,7	< 0,6
210612A10	C26828	Brique de mur "roulé" 2,61 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	< 0,26	< 0,22
210612A8	C26816	Brique de mur "roulé" 1,00 m².K/W (Prod. B)	Rhône-Alpes	-	< 0,5	< 0,49
PLAQUES DE PLÂTRE						
260612A2	C26826	Plaque de plâtre "humidité"	Rhône-Alpes	-	< 0,8	< 0,9
260612A5	C26814	Plaque de plâtre parement cheminée	Allemagne	-	< 0,5	< 0,5
260612A4	C26817	Plaque de plâtre BA13	Rhône-Alpes	-	< 1,3	< 0,9
260612A3	C26812	Plaque de plâtre "son"	Rhône-Alpes	-	< 0,8	< 0,7
260612A1	C26835	Plaque de plâtre "feu"	Rhône-Alpes	-	< 0,8	< 0,9
AUTRES						
210612A6	C26806	Mélange béton + ciment prêt à l'emploi	Rhône-Alpes	-	< 0,37	< 0,34
210612A13	C26804	Bloc de béton cellulaire	Rhône-Alpes	-	< 1,1	< 0,9
210612A7	C26815	Revêtement extérieur (Gneiss)	Italie	-	< 0,7	< 0,6



ANNEXE 6 RESULTATS DETAILLES DES MESURES DE FLUX DE RADON

SABLE (CURAGE D'UN TORRENT) – MESURE N°1**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-044
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	02/10/2012 17:20
	- fin de l'accumulation	03/10/2012 07:20
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : sable (curage de torrent) / Mesure n°1
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	20 (19,6-20,8)
	Pression (mbar)	1003 (1002-1004)
Humidité (%Hr)	41 (29,5-53,5)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
02/10/2012 17:20	234 ±	44
02/10/2012 18:20	221 ±	44
02/10/2012 19:20	276 ±	49
02/10/2012 20:20	278 ±	50
02/10/2012 21:20	271 ±	49
02/10/2012 22:20	284 ±	50
02/10/2012 23:20	270 ±	50
03/10/2012 00:20	328 ±	53
03/10/2012 01:20	295 ±	51
03/10/2012 02:20	327 ±	55
03/10/2012 03:20	314 ±	53
03/10/2012 04:20	344 ±	54
03/10/2012 05:20	370 ±	59
03/10/2012 06:20	399 ±	60
03/10/2012 07:20	357 ±	57

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

383 ± 144 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

SABLE (CURAGE D'UN TORRENT) – MESURE N°2**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-045
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	03/10/2012 15:20
	- fin de l'accumulation	04/10/2012 05:20
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : sable (curage de torrent) / Mesure n°2
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	20 (19,5-20,8)
	Pression (mbar)	1002 (1001-1002)
Humidité (%Hr)	41 (29,0-52,3)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
03/10/2012 15:20	116 ±	32
03/10/2012 16:20	120 ±	32
03/10/2012 17:20	146 ±	36
03/10/2012 18:20	163 ±	38
03/10/2012 19:20	178 ±	40
03/10/2012 20:20	203 ±	42
03/10/2012 21:20	194 ±	41
03/10/2012 22:20	233 ±	45
03/10/2012 23:20	245 ±	45
04/10/2012 00:20	287 ±	51
04/10/2012 01:20	275 ±	49
04/10/2012 02:20	294 ±	51
04/10/2012 03:20	293 ±	51
04/10/2012 04:20	306 ±	53
04/10/2012 05:20	336 ±	55

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

585 ± 164 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A1-12-045

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX	±	INCERTITUDE
585		164

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Sable (curage de torrent)
Mesure n°2

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]$ 1,79E+12

$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]$ 2,5344E+14

Donc

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{7,07E-03}$$

Variance relative sur le volume

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{1,00E-02}$$

Variance relative sur la surface

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc

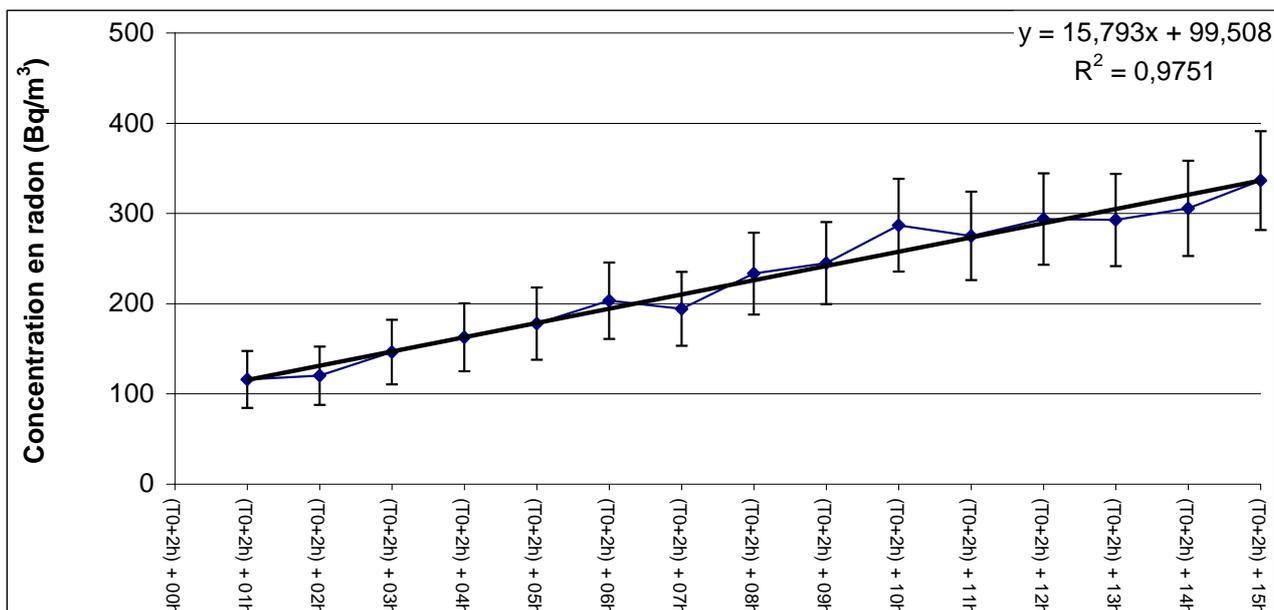
$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{2,50E-03}$$

Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi = \dots$ **81,8**

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$$U_\phi = k * u_\phi = \dots$$
 164


F:\julien\Etudes hors radon\CRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A1-12-045 F 060412B4 0.03L 2.xls\RB1 CALCUL

SABLE (CURAGE D'UN TORRENT) – MESURE N°3**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-046
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	04/10/2012 13:20
	- fin de l'accumulation	05/10/2012 03:20
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : sable (curage de torrent) / Mesure n°3
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	20 (19,4-20,5)
	Pression (mbar)	1002 (1001-1003)
Humidité (%Hr)	40 (29,5-53,0)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
04/10/2012 13:20	110 ±	30
04/10/2012 14:20	115 ±	32
04/10/2012 15:20	162 ±	37
04/10/2012 16:20	178 ±	39
04/10/2012 17:20	202 ±	42
04/10/2012 18:20	178 ±	40
04/10/2012 19:20	207 ±	44
04/10/2012 20:20	239 ±	46
04/10/2012 21:20	267 ±	47
04/10/2012 22:20	252 ±	48
04/10/2012 23:20	269 ±	49
05/10/2012 00:20	252 ±	49
05/10/2012 01:20	300 ±	53
05/10/2012 02:20	310 ±	53
05/10/2012 03:20	304 ±	52

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

518 ± 151 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A1-12-046

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX	±	INCERTITUDE
518		151

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Sable (curage de torrent)
Mesure n°3

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]$ 1,73E+12

$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]$ 1,99356E+14

Donc

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{8,68E-03}$$

Variance relative sur le volume

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{1,00E-02}$$

Variance relative sur la surface

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc

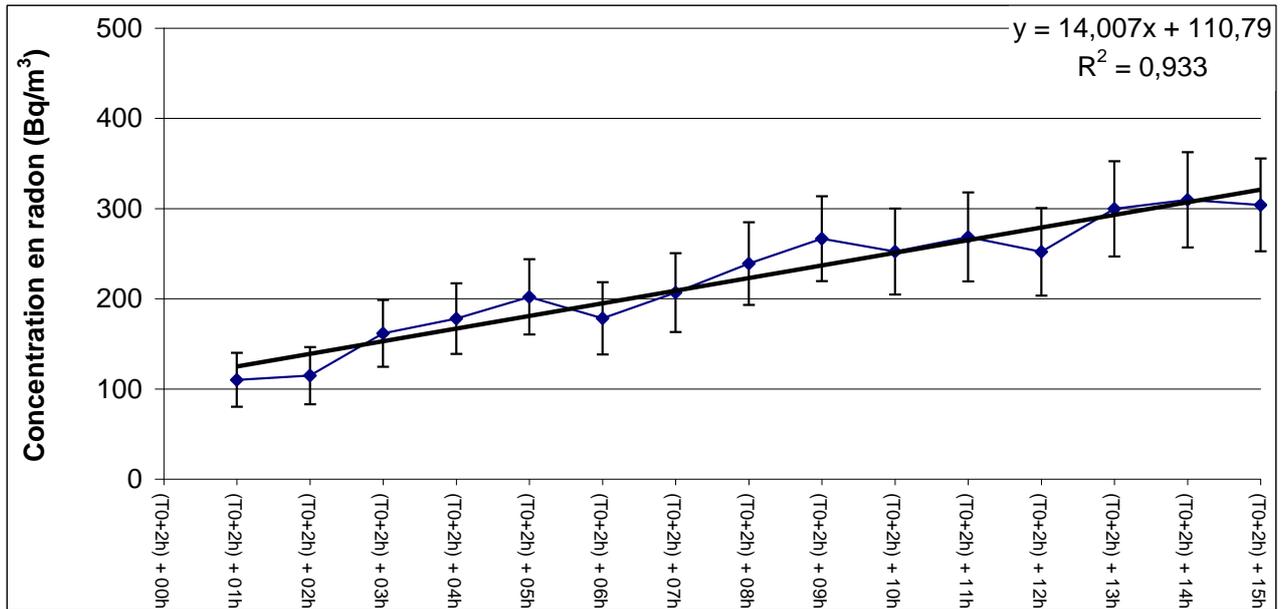
$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{2,50E-03}$$

Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi = \dots$ **75,5**

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$$U_\phi = k * u_\phi = \dots$$
 151


F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A1-12-046 F 060412B4 0.03L 3.xls\RB1 CALCUL

MELANGE BETON 0-20 (MAGMATIQUE) – MESURE N°1**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A2-12-011
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	04/10/2012 13:10
	- fin de l'accumulation	05/10/2012 03:10
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : mélange béton 0-20 (magmatique) / Mesure n°1
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	19 (18,3-19,6)
	Pression (mbar)	1001 (1000-1003)
Humidité (%Hr)	49 (37,3-62,3)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
04/10/2012 13:10	151 ±	33
04/10/2012 14:10	161 ±	35
04/10/2012 15:10	169 ±	36
04/10/2012 16:10	164 ±	36
04/10/2012 17:10	202 ±	38
04/10/2012 18:10	207 ±	40
04/10/2012 19:10	213 ±	41
04/10/2012 20:10	220 ±	41
04/10/2012 21:10	250 ±	44
04/10/2012 22:10	262 ±	45
04/10/2012 23:10	277 ±	47
05/10/2012 00:10	268 ±	47
05/10/2012 01:10	297 ±	49
05/10/2012 02:10	312 ±	50
05/10/2012 03:10	274 ±	47

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

422 ± 132 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A2-12-011

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX		INCERTITUDE
422	±	132

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Mélange béton 0-20 (magmatique)
Mesure n°1

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]$ 1,59E+12

$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]$ 1,31903E+14

Donc $\frac{\text{var}(p)}{p^2} =$ (à k=1) **1,21E-02**

Variance relative sur le volume

$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$ Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc $\frac{\text{var}(V)}{V^2} =$ (à k=1) **1,00E-02**

Variance relative sur la surface

$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$ Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc $\frac{\text{var}(S)}{S^2} =$ (à k=1) **2,50E-03**

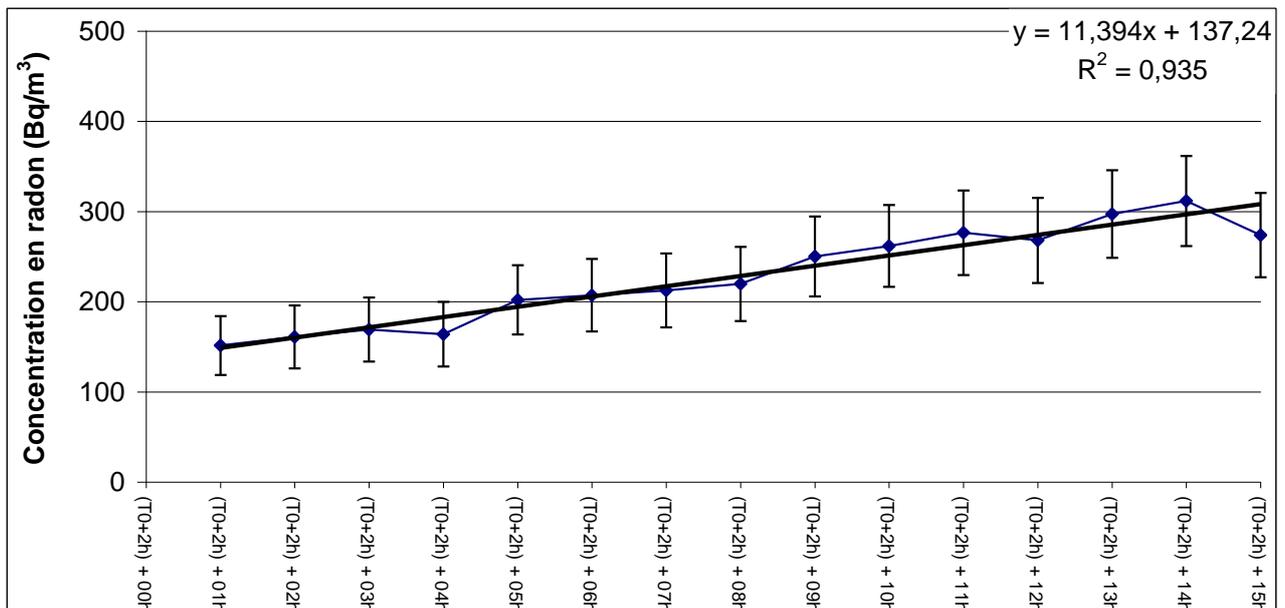
Incetitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi =$ **66,1**

Incetitude élargie (mBq/m²/s)

$U_\phi = k * u_\phi =$ **132**



F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A2-12-011 F 060412B1 0.03L 1.xls\RB1 CALCUL

MELANGE BETON 0-20 (MAGMATIQUE) – MESURE N°2**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A2-12-012
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	05/10/2012 14:50
	- fin de l'accumulation	06/10/2012 04:50
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : mélange béton 0-20 (magmatique) / Mesure n°2
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	19 (18,1-19,8)
	Pression (mbar)	1002 (1001-1004)
Humidité (%Hr)	49 (35,8-62,3)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
05/10/2012 14:50	104 ±	26
05/10/2012 15:50	100 ±	26
05/10/2012 16:50	139 ±	31
05/10/2012 17:50	169 ±	35
05/10/2012 18:50	155 ±	34
05/10/2012 19:50	172 ±	36
05/10/2012 20:50	199 ±	38
05/10/2012 21:50	204 ±	40
05/10/2012 22:50	214 ±	41
05/10/2012 23:50	227 ±	41
06/10/2012 00:50	273 ±	47
06/10/2012 01:50	264 ±	46
06/10/2012 02:50	292 ±	48
06/10/2012 03:50	275 ±	48
06/10/2012 04:50	302 ±	49

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

537 ± 149 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A2-12-012

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m²/s)		
FLUX		INCERTITUDE
537	±	149

CONTAINER : P2000	
Volume (m³)	1,24E-03
Surface (m²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Mélange béton 0-20 (magmatique)
Mesure n°2

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]$ 1,42E+12

$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]$ 2,14224E+14

Donc

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{6,62E-03}$$

Variance relative sur le volume

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{1,00E-02}$$

Variance relative sur la surface

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc

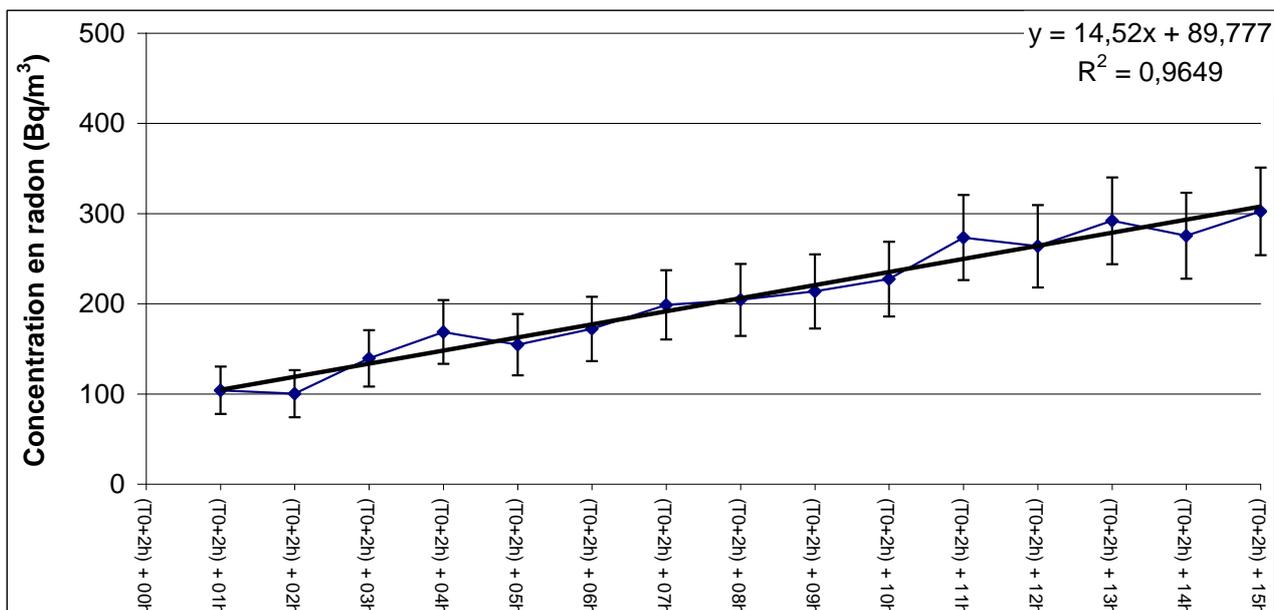
$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{2,50E-03}$$

Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi = \dots \quad \mathbf{74,3}$

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$$U_\phi = k * u_\phi = \dots \quad \mathbf{149}$$


F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A2-12-012 F 060412B1 0.03L 2.xls\RB1 CALCUL

MELANGE BETON 0-20 (MAGMATIQUE) – MESURE N°3**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A2-12-014
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	07/10/2012 16:00
	- fin de l'accumulation	08/10/2012 06:00
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : mélange béton 0-20 (magmatique) / Mesure n°3
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	21 (20,3-21,4)
	Pression (mbar)	1003 (1001-1004)
Humidité (%Hr)	44 (33,0-55,8)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
07/10/2012 16:00	95 ±	24
07/10/2012 17:00	110 ±	28
07/10/2012 18:00	126 ±	31
07/10/2012 19:00	140 ±	33
07/10/2012 20:00	167 ±	36
07/10/2012 21:00	168 ±	35
07/10/2012 22:00	208 ±	40
07/10/2012 23:00	222 ±	42
08/10/2012 00:00	237 ±	43
08/10/2012 01:00	242 ±	44
08/10/2012 02:00	233 ±	43
08/10/2012 03:00	275 ±	46
08/10/2012 04:00	246 ±	46
08/10/2012 05:00	261 ±	45
08/10/2012 06:00	289 ±	51

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

499 ± 141 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A2-12-014

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX		INCERTITUDE
499	±	141

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Mélange béton 0-20 (magmatique)
Mesure n°3

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right] = 1,38E+12$$

$$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right] = 1,84908E+14$$

Donc

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{7,47E-03}$$

Variance relative sur le volume

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{1,00E-02}$$

Variance relative sur la surface

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{2,50E-03}$$

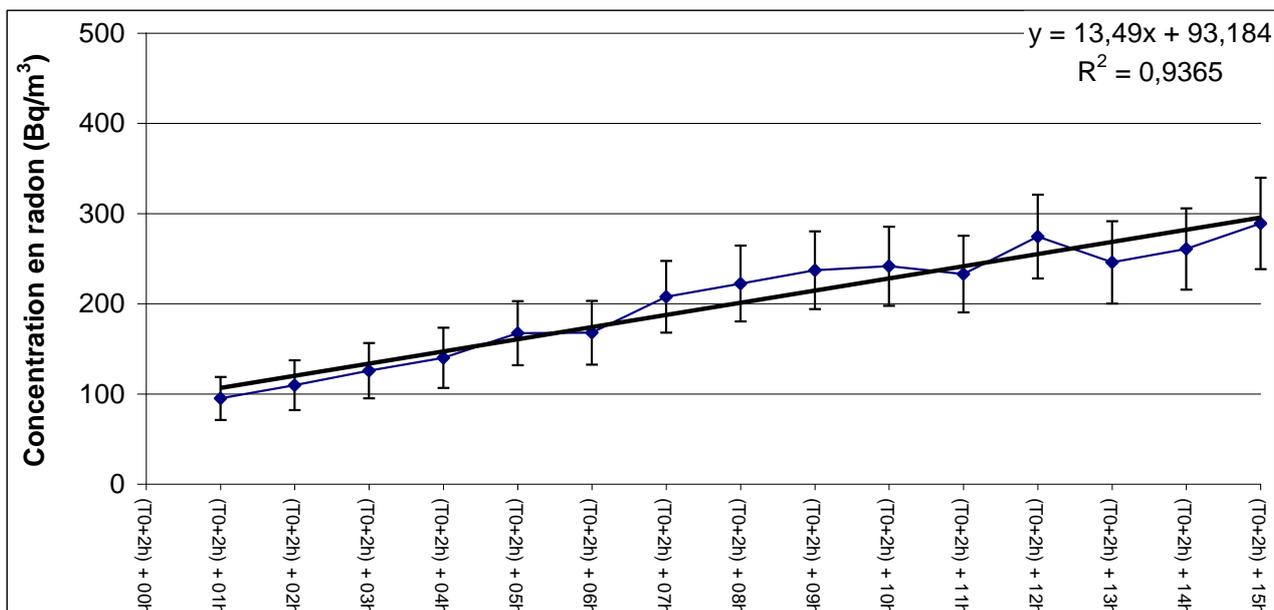
Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p^2} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi = \mathbf{70,6}$

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$$U_\phi = k * u_\phi = \mathbf{141}$$



F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A2-12-014 F 060412B1 0.03L 3.xls\RB1 CALCUL

MELANGE BETON 0-21 (MAGMATIQUE-ÉBOULIS)**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-013
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	06/10/2012 15:20
	- fin de l'accumulation	07/10/2012 05:20
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : mélange béton 0-21 (magmatique-éboulis)
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	21 (20,0-21,5)
	Pression (mbar)	1002 (1001-1003)
Humidité (%Hr)	44 (33,8-56)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
06/10/2012 15:20	51 ±	15
06/10/2012 16:20	53 ±	16
06/10/2012 17:20	59 ±	16
06/10/2012 18:20	64 ±	17
06/10/2012 19:20	70 ±	19
06/10/2012 20:20	77 ±	20
06/10/2012 21:20	78 ±	21
06/10/2012 22:20	90 ±	24
06/10/2012 23:20	92 ±	24
07/10/2012 00:20	85 ±	23
07/10/2012 01:20	101 ±	26
07/10/2012 02:20	119 ±	29
07/10/2012 03:20	98 ±	29
07/10/2012 04:20	113 ±	28
07/10/2012 05:20	114 ±	29

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

178 ± 65 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A1-12-013

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX	±	INCERTITUDE
178		65

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Mélange béton 0-21
(magmatique-éboulis)

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]$ 4,86E+11

$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]$ 2,34397E+13

Donc $\frac{\text{var}(p)}{p^2} =$ (à k=1) **2,07E-02**

Variance relative sur le volume

$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$ Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc $\frac{\text{var}(V)}{V^2} =$ (à k=1) **1,00E-02**

Variance relative sur la surface

$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$ Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc $\frac{\text{var}(S)}{S^2} =$ (à k=1) **2,50E-03**

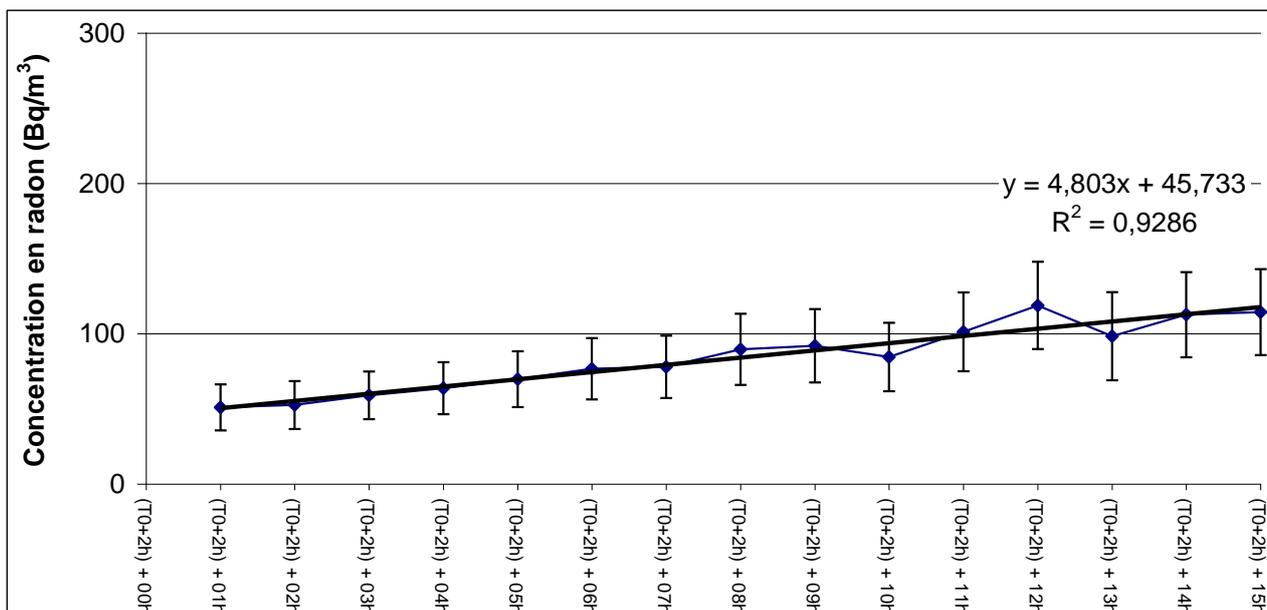
Incetitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi =$ **32,4**

Incetitude élargie (mBq/m²/s)

$U_\phi = k * u_\phi =$ **65**



F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A2-12-013 F 300412B1 0.03L.xls\RB1 CALCUL

MELANGE BETON 0-20 (MAGMATIQUE)**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-049
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	07/10/2012 15:50
	- fin de l'accumulation	08/10/2012 05:50
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : mélange béton 0-20 (magmatique)
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	18 (17,8-18,9)
	Pression (mbar)	1003 (1001-1004)
Humidité (%Hr)	48 (35,0-60,5)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
07/10/2012 15:50	270 ±	49
07/10/2012 16:50	286 ±	51
07/10/2012 17:50	276 ±	49
07/10/2012 18:50	260 ±	49
07/10/2012 19:50	288 ±	51
07/10/2012 20:50	293 ±	52
07/10/2012 21:50	269 ±	49
07/10/2012 22:50	293 ±	52
07/10/2012 23:50	317 ±	52
08/10/2012 00:50	302 ±	52
08/10/2012 01:50	320 ±	55
08/10/2012 02:50	308 ±	53
08/10/2012 03:50	326 ±	54
08/10/2012 04:50	347 ±	57
08/10/2012 05:50	343 ±	56

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

< 320 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

CIMENT LAFARGE CLASSIQUE (CEM II / B-LL 32,5R CP2)

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-047
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	05/10/2012 14:40
	- fin de l'accumulation	06/10/2012 04:40
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : ciment Lafarge classique (CEM II / B-LL 32,5R CP2)
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	20 (19,4-20,4)
	Pression (mbar)	1003 (1001-1004)
Humidité (%Hr)	40 (28,5-53)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
05/10/2012 14:40	69 ±	25
05/10/2012 15:40	111 ±	31
05/10/2012 16:40	109 ±	31
05/10/2012 17:40	106 ±	31
05/10/2012 18:40	105 ±	31
05/10/2012 19:40	137 ±	35
05/10/2012 20:40	113 ±	32
05/10/2012 21:40	130 ±	34
05/10/2012 22:40	130 ±	34
05/10/2012 23:40	120 ±	33
06/10/2012 00:40	124 ±	33
06/10/2012 01:40	111 ±	32
06/10/2012 02:40	149 ±	35
06/10/2012 03:40	147 ±	36
06/10/2012 04:40	151 ±	37

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

< 217 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la première valeur après le début de la mesure.

Flux A1-12-047

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX		INCERTITUDE
139	±	78

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Ciment Lafarge classique
(CEM II / B-LL 32,5R CP2)

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right] = 9,49E+11$$

$$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right] = 1,43258E+13$$

Donc

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{6,63E-02}$$

Variance relative sur le volume

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{1,00E-02}$$

Variance relative sur la surface

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \dots \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{2,50E-03}$$

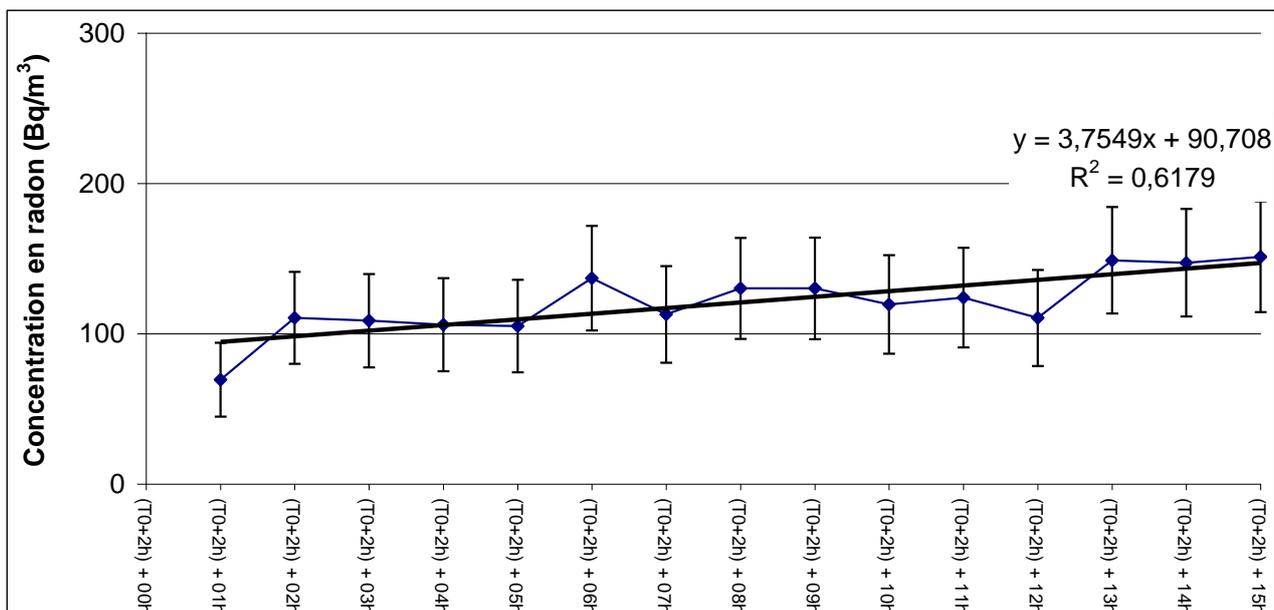
Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi = \mathbf{39,0}$

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$$U_\phi = k * u_\phi = \mathbf{78}$$



F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A1-12-047 F 210612A1 0.03L.xls\RB1 CALCUL

CIMENT LAFARGE SENSIMUM (CEM II / B-LL 42,5 N)**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-048
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	06/10/2012 15:10
	- fin de l'accumulation	07/10/2012 05:10
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : ciment Lafarge Sensium (CEM II / B-LL 42,5 N)
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	18 (17,8-18,9)
	Pression (mbar)	1002 (1001-1003)
Humidité (%Hr)	47 (35,0-60,5)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
06/10/2012 15:10	67 ±	24
06/10/2012 16:10	102 ±	30
06/10/2012 17:10	81 ±	27
06/10/2012 18:10	96 ±	30
06/10/2012 19:10	91 ±	29
06/10/2012 20:10	83 ±	28
06/10/2012 21:10	111 ±	31
06/10/2012 22:10	107 ±	31
06/10/2012 23:10	97 ±	31
07/10/2012 00:10	97 ±	30
07/10/2012 01:10	124 ±	33
07/10/2012 02:10	112 ±	32
07/10/2012 03:10	124 ±	34
07/10/2012 04:10	113 ±	33
07/10/2012 05:10	101 ±	31

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

< 162 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A1-12-048

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX		INCERTITUDE
92	±	69

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Ciment Lafarge Sensium
(CEM II / B-LL 42,5 N)

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]$ 8,09E+11

$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]$ 6,32774E+12

Donc $\frac{\text{var}(p)}{p^2} =$ (à k=1) **1,28E-01**

Variance relative sur le volume

$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$ Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc $\frac{\text{var}(V)}{V^2} =$ (à k=1) **1,00E-02**

Variance relative sur la surface

$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$ Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc $\frac{\text{var}(S)}{S^2} =$ (à k=1) **2,50E-03**

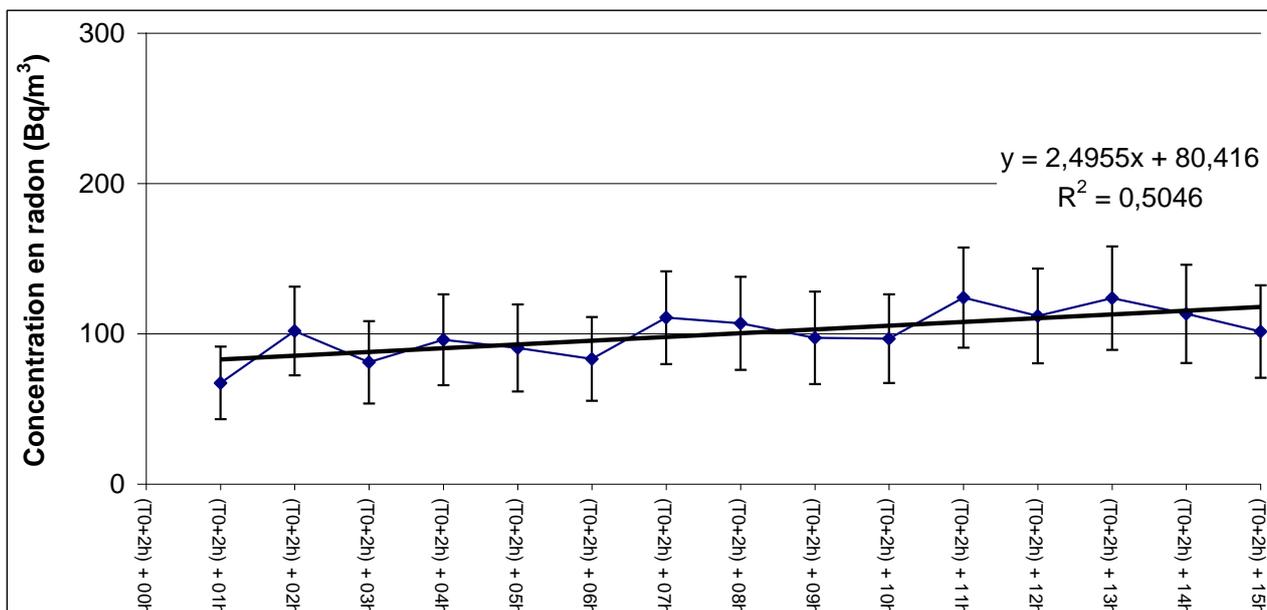
Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi =$ **34,6**

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$U_\phi = k * u_\phi =$ **69**



F:\julien\Etudes hors radon\CRRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A1-12-048 F 210612A3 0.03L.xls\RB1 CALCUL

BRIQUE IMERYS (1,32 m².K/W)**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-042
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	27/09/2012 18:50
	- fin de l'accumulation	28/09/2012 08:50
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : brique IMERYS (1,32 m ² .K/W)
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	20 (19,4-20,6)
	Pression (mbar)	1002 (999-1003)
Humidité (%Hr)	36 (24,6-48,5)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
27/09/2012 18:50	43 ±	18
27/09/2012 19:50	38 ±	17
27/09/2012 20:50	34 ±	16
27/09/2012 21:50	43 ±	19
27/09/2012 22:50	34 ±	16
27/09/2012 23:50	26 ±	14
28/09/2012 00:50	33 ±	15
28/09/2012 01:50	41 ±	17
28/09/2012 02:50	51 ±	21
28/09/2012 03:50	42 ±	18
28/09/2012 04:50	40 ±	17
28/09/2012 05:50	41 ±	17
28/09/2012 06:50	46 ±	19
28/09/2012 07:50	51 ±	20
28/09/2012 08:50	46 ±	19

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

< 69 µBq/m²/s

NB : le résultat publié est inférieur à une limite de détection lorsque la marge d'erreur est supérieure à 50% de la valeur mesurée.
Le résultat brut figure en page suivante.

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

BRIQUE WIENERBERGER (1,00 m².K/W)**ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION DE RADON
D'UN MATERIAU**

Identification de la mesure	N° de mesure	Flux A1-12-043
	Opérateur mesure	JR
	Opérateur calcul	JS
Identification et caractéristiques du conteneur d'accumulation	Nom	B1000
	Hauteur (m)	-
	Largeur (m)	-
	Longueur (m)	-
	Surface utile (m ²)	9,33E-03
	Volume utile (m ³)	1,24E-03
Identification du détecteur	Nom	Alphaguard PQ2000 PRO
	Mode de mesure	Flux 10 minutes / Alphapump 0,03 l/min / Tubulure 7m
Conditions d'implantation	Date	
	- début de l'accumulation	01/10/2012 15:00
	- fin de l'accumulation	02/10/2012 05:00
	Lieu	
	- département	26
	- commune	Valence
	- emplacement précis	CRIIRAD - Salle de comptage Matériau : Brique WIENERBERGER (1,00 m ² .K/W)
	Intérieur / extérieur	intérieur
	Echantillon	matériau volumique
	- nature de l'interface	Echantillon broyé - Tamisé à 2mm - Aplani
	Conditions météo	Local climatisé en permanence
	Température (°C)	20 (19,5-20,6)
	Pression (mbar)	1003 (1002-1004)
Humidité (%Hr)	41 (30,1-50,6)	

RESULTATS DU MESURAGE DE L'ACTIVITE VOLUMIQUE DE RADON

Durée d'accumulation (h)	17,0
--------------------------	------

Date	Activité volumique en Bq/m ³ (incertitude élargie à k=2)	
01/10/2012 15:00	73 ±	25
01/10/2012 16:00	81 ±	27
01/10/2012 17:00	68 ±	26
01/10/2012 18:00	93 ±	29
01/10/2012 19:00	69 ±	25
01/10/2012 20:00	76 ±	26
01/10/2012 21:00	99 ±	30
01/10/2012 22:00	80 ±	28
01/10/2012 23:00	83 ±	27
02/10/2012 00:00	88 ±	28
02/10/2012 01:00	89 ±	29
02/10/2012 02:00	83 ±	27
02/10/2012 03:00	83 ±	28
02/10/2012 04:00	104 ±	30
02/10/2012 05:00	95 ±	31

ESTIMATION DU FLUX SURFACIQUE D'EXHALATION

(incertitude élargie à k = 2)

< 115 µBq/m²/s

A titre de comparaison, le flux surfacique d'exhalation moyen à la surface du globe est estimé à **20 mBq/m²/s** par l'UNSCEAR

Précisions :

- en mode flux, les données prises en compte débutent à la **première valeur après le début** de la mesure.

Flux A1-12-043

ANNEXE

Fact. d'élarg ^t k (Alphaguard)	2
Fact. d'élarg ^t k (final)	2

RESULTAT GLOBAL (µBq/m ² /s)		
FLUX	±	INCERTITUDE
52		63

CONTAINER : P2000	
Volume (m ³)	1,24E-03
Surface (m ²)	9,33E-03

Durée de mesure : 15 h

Matériau :
Brique WIENERBERGER
(1,00 m².K/W)

INCERTITUDE
CALCULEE SELON LA NORME NF M60-768 (B.1.5.)

Variance relative sur la pente

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \frac{\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right]}{\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right]}$$

$$\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right)^2 \text{var}(A_i) \right] = 7,12E+11$$

$$\left[\sum \left[\left(t_i - \bar{t} \right) A_i \right]^2 \right] = 1,97585E+12$$

Donc

$$\frac{\text{var}(p)}{p^2} = \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{3,60E-01}$$

Variance relative sur le volume

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \left(\frac{U_v}{k} \right)^2 * \frac{1}{V^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur le volume est prise égale à 20% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(V)}{V^2} = \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{1,00E-02}$$

Variance relative sur la surface

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \left(\frac{U_s}{k} \right)^2 * \frac{1}{S^2}$$

Conformément à la norme NF M60-768, l'incertitude sur la surface est prise égale à 10% avec k=2.

Donc

$$\frac{\text{var}(S)}{S^2} = \quad (\text{à } k=1) \quad \mathbf{2,50E-03}$$

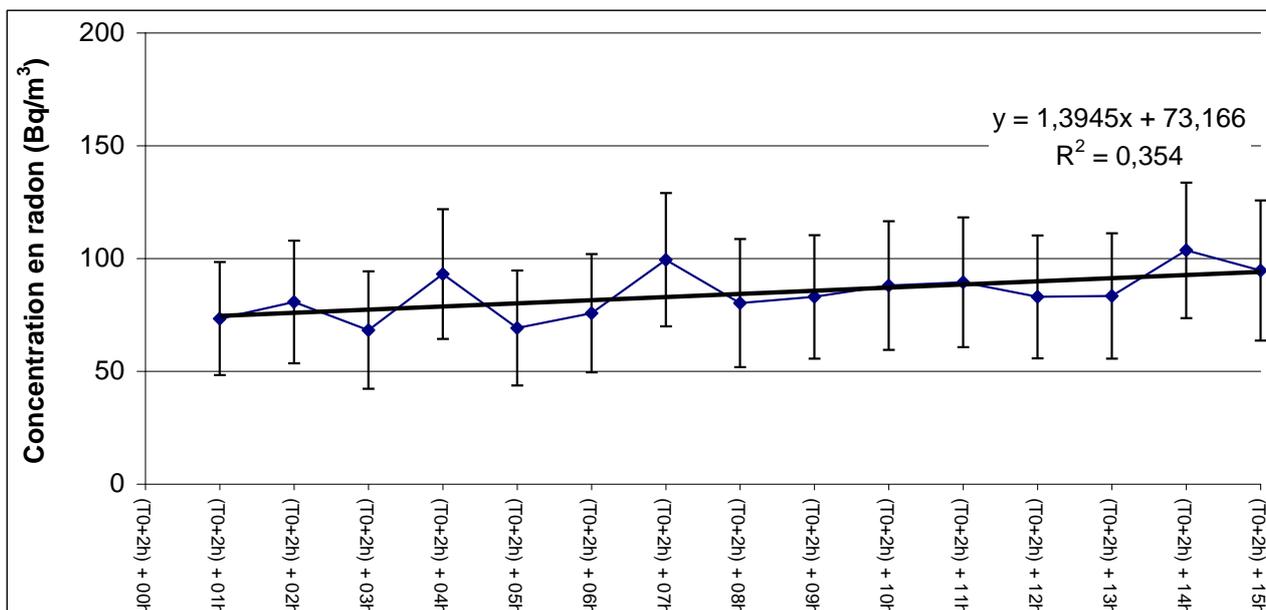
Incrtitude type (mBq/m²/s)

$$u_\phi = \phi * \sqrt{\frac{\text{var}(p)}{p} + \frac{\text{var}(V)}{V^2} + \frac{\text{var}(S)}{S^2}}$$

Donc $u_\phi = \mathbf{31,5}$

Incrtitude élargie (mBq/m²/s)

$$U_\phi = k * u_\phi = \mathbf{63}$$



F:\julien\Etudes hors radon\CRRA 2009 - C3 - Etude matériaux\Flux radon\Mesures CRIIRAD\Résultats\A1-12-043 F 210612A8 0.03L.xls\RB1 CALCUL