

## Techniques de mesure de l'exposition naturelle due au radon : Synthèse bibliographique

M. B. Zinsou<sup>1,2</sup>, F. Idjiwole<sup>1,2</sup>, N. Rabesiranana<sup>3</sup>, J. Dossou<sup>1,2</sup>, G. A. Mensah<sup>4</sup> et D. Medenou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ir Mahougnon Boniface ZINSOU, Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Université d'Abomey-Calavi (UAC) & URGB/EPAC/UAC, 01 BP 2009 Cotonou, E-mail : [mahougnonbonifacezinsou@yahoo.fr](mailto:mahougnonbonifacezinsou@yahoo.fr), Tél. : (+229)97 75 88 01, République du Bénin

Dr (MC) Julien DOSSOU, ED-SDI/EPAC/UAC & URGB/EPAC/UAC, 01 BP 2009 Cotonou, E-mail : [juju\\_dos@yahoo.fr](mailto:juju_dos@yahoo.fr), Tél. : (+229)90031984, République du Bénin

Pr Dr Ir Daton MEDENOU, ED-SDI/EPAC/UAC & URGB/EPAC/UAC, 01 BP 2009 Cotonou, E-mail : [medenou@yahoo.com](mailto:medenou@yahoo.com), Tél. : (+229)97315009, République du Bénin

<sup>2</sup>Dr Ir François IDJIWOLE, EPAC, Unité de Recherche en Génie Biomédicale (URGB), Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (LETIA/EPAC/UAC) & ED-SDI/EPAC/UAC, 01 BP 2009 Cotonou, E-mail : [idjiwolef@gmail.com](mailto:idjiwolef@gmail.com), Tél. : (+229)96450665, République du Bénin

<sup>3</sup>Pr Dr Naivo RABESIRANANA, Parcours de Physique Nucléaire Appliquée et Environnement, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, BP 906-101 Antananarivo, E-mail : [rabesiranana@yahoo.fr](mailto:rabesiranana@yahoo.fr), République de Madagascar.

<sup>4</sup>Pr Dr Ir Guy Apollinaire MENSAH, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, 01 BP 884 Recette Principale Cotonou 01, E-mail : [mensahga@gmail.com](mailto:mensahga@gmail.com), Tél. : (+229)97490188, République du Bénin

\*Auteur de correspondance : Ir Mahougnon Boniface ZINSOU, E-mail : [mahougnonbonifacezinsou@yahoo.fr](mailto:mahougnonbonifacezinsou@yahoo.fr)

### Résumé

L'objectif de l'étude était d'inventorier les méthodes de mesure du radon-222 et du thoron-220 à l'intérieur et à l'extérieur des habitations, et dans les installations ouvertes au public. Une analyse bibliographique des publications scientifiques parues entre 2000 et 2021 a été réalisée. Au total, 370 articles ont été obtenus à l'aide du moteur de recherche [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org). Des critères ont été définis et appliqués afin de ne sélectionner pour la synthèse bibliographique que les articles ayant un rapport avec la thématique. Ainsi, 88,9 % des articles ont été finalement identifiés et retenus. L'analyse a montré que l'eau, le sol, l'air intérieur des chambres à coucher et des bâtiments publics, et l'air extérieur, sont les quatre sources possibles d'exposition naturelle au radon pour l'homme. Les détecteurs de traces nucléaires à l'état solide (DSTN), la spectrométrie gamma et alpha, et la scintillation liquide (LSC) ont été les trois techniques identifiées pour le radon-222 et le thoron-220. Huit détecteurs basés sur ces techniques ont été identifiés et ont une représentativité supérieure ou égale à 4 %. Le Columbia Resin-39 (CR-39) (DSTN) est le plus représentatif (32 %), y compris le contexte africain de la mesure du radon à l'intérieur des bâtiments. Les DSTN sont les plus recommandés pour la mesure continue du radon à l'intérieur des bâtiments. Les LSC sont les plus recommandés pour la mesure active du radon dans l'eau potable. Toutefois, la technique de spectrométrie (HpGe, NaI(Tl) et Alphaguard) est également avérée efficace pour la mesure active du radon dans les compartiments liquides. Pour l'analyse quantitative et qualitative des radionucléides naturels (<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th et <sup>40</sup>K) présents dans un échantillon de sol ou de matériaux de constructions, y compris le radium-226 et ses descendants, la spectrométrie gamma ou alpha reste la technique de choix. Ainsi, la mesure du radon-222 et du thoron-220 nécessite une technique précise et adaptée au compartiment de mesure (intérieur, extérieur, eau, sol et aliments). La présente étude a permis d'identifier les trois techniques représentatives en fonction du compartiment de mesure dans la perspective d'un programme national de surveillance de l'exposition due au radon.

**Mots clés** : radon, détecteurs, spectrométrie gamma et alpha, thoron et radionucléides.

### Techniques for measuring natural exposure to radon: literature review

#### Abstract

The objective of the study was to take stock of methods for measuring radon-222 and thoron-220 inside and outside homes, and in facilities open to the public. A literature review of papers published between 2000 and 2021 was carried out. A total of 370 articles were obtained using the search engine [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org). Criteria were defined and applied to ensure that only articles relevant to the theme were selected for the literature review. Thus, 88.9% of the papers were finally identified and retained. The analysis showed that water, soil, indoor air in bedrooms and public buildings, and outdoor air are the four possible sources of natural radon exposure for humans. Solid-state nuclear trace detectors (SSNTD), gamma and alpha spectrometry, and liquid scintillation (LSC) were the three techniques identified for radon-222 and thoron-220 measuring. Eight detectors based on these techniques were identified, with a representativeness superior or equal to 4%. Columbia Resin-39 (CR-39) SSNTD is the most representative (32%), including in the African context of indoor radon

measurement. SSNTDs are most recommended for the continuous measurement of radon inside buildings. LSCs are recommended for the active measurement of radon in drinking water. However, spectrometry techniques (HpGe, NaI(Tl) and Alphaguard) have also proved effective for active radon measurement in liquid compartments. For the quantitative and qualitative analysis of naturally occurring radionuclides ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) present in a soil or building material sample, including radium-226 and its progeny, gamma or alpha spectrometry remains the best technique. The measurement of radon-222 and thoron-220 therefore requires a technique that is precise and adapted to the measurement compartment (indoor, outdoor, water, soil and food). This study has identified three representative techniques, depending on the measurement compartment, for a national radon exposure monitoring program.

**Keywords:** radon, detectors, gamma and alpha spectrometry, thoron and radionuclides.

## Introduction

Comme le soulignent Ajayi *et al.* (2016), le radon-222 et le thoron-220, avec une demi-vie de 3,82 jours et 55,6 secondes, sont des gaz radioactifs résultant respectivement de la désintégration radioactive de l'uranium-238 et du thorium-232 dans la croûte terrestre. Plus précisément, le radon et le thoron sont des gaz radioactifs inertes qui réagissent peu avec les tissus du corps humain. Ils sont peu solubles dans les tissus humains. Les conséquences radiotoxiques de l'exposition à ces isotopes sont infligées à leurs produits de filiation à courte durée de vie, qui sont des particules solides inhalables (Nikezic *et al.*, 2005). Les études de Takoukam *et al.* (2019) et Nkoulou *et al.* (2019) ont montré qu'après leur inhalation, ils se déposent dans les alvéoles pulmonaires et interagissent avec les tissus d'échange gazeux au cours de leur cycle de vie physique. D'après les études de Akiba *et al.* (2010) et de Robertson *et al.* (2013), l'exposition chronique au radon et à ses produits de filiation représente la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme.

Plus de la moitié de la dose annuelle moyenne due aux rayonnements ionisants naturels est imputable au radon et à ses descendants qui, en raison des forces électrostatiques, peuvent s'attacher aux aérosols et se déposer sur la peau, ce qui augmente considérablement la dose potentielle délivrée à cet organe (Yamada *et al.* 2006). D'après l'UNSCEAR (2000), la dose annuelle moyenne mondiale due à l'exposition aux sources naturelles de rayonnements, y compris le radon, est de 2,4 mSv. Ainsi, à des fins de radioprotection, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), sur la base des publications 103 et 115 de la CIPR, a fixé la limite réglementaire de la concentration atmosphérique de radon dans les habitations à 300 Bq/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une dose annuelle de l'ordre de 10 mSv (ICRP, 2007 ; ICRP, 2010). En effet, le radon-222 est plus facile à mesurer en raison de sa demi-vie. Les premières études scientifiques ainsi que les techniques de mesure se sont concentrées sur le radon-222 (Picolo *et al.*, 2000 ; Ferry *et al.*, 2001 ; Magalhaes *et al.*, 2003 ; AFNOR, 2004 ; Richona *et al.*, 2005). Dans les années 2010, la détermination de la contribution de chaque isotope est devenue une réalité dans le monde scientifique, Akiba *et al.* (2010). Par exemple, l'étude de Yamada *et al.* (2006) a effectué la mesure séparée du radon-222 et du thoron dans la Province de Gansu en Chine en utilisant les détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) de type CR-39. Dans le monde scientifique Africain (Nigeria, Cameroun, Zimbabwe, Madagascar, Ghana, etc.), plusieurs auteurs se sont intéressés à la mesure du radon dans différents compartiments de mesure. Par exemple, l'étude de Ajayi *et al.* (2016) a évalué à l'aide du détecteur CR-39 le niveau de radon-222 dans certaines habitations du Sud-Ouest du Nigeria en 2016. L'exigence n° 50 de la norme de sûreté GSR partie 3 de l'AIEA impose à chaque État d'établir les niveaux de radon dans les locaux ainsi qu'un plan national de remédiation (AIEA, 2016). Ainsi, conformément aux lignes directrices de l'AIEA, la France a établi plusieurs normes sur la métrologie du radon en fonction des compartiments de mesure tels que l'eau, l'air, le sol et les habitations (AFNOR, 2004 ; AFNOR, 2011).

Le Bénin a adopté la loi 2017-29 du 15 mars 2018 relative à la sûreté radiologique et à la sécurité nucléaire qui définit les exigences législatives en matière de radioprotection. Cette loi prescrit en son article n°12 que la radioprotection est un devoir national (PR-Bénin, 2018). Ainsi, l'Autorité nationale de Sûreté radiologique et de Radioprotection (ANSR), à travers sa décision n° 073 du 25 mars 2021 relative à la radioprotection des travailleurs, a fixé une limite de concentration d'activité volumique moyenne annuelle du radon au niveau des lieux de travail qui est de 1000 Bq/m<sup>3</sup> (ANSR, 2021). Ces limites de doses internationales et nationales doivent être respectées. Au regard de tout ceci, des textes législatifs et réglementaires nationaux précités, puis afin de déterminer la technique de mesure la plus adaptée à la dosimétrie du radon au Bénin la présente synthèse bibliographique s'impose sur les méthodes de mesure du radon-222 et du thoron-220.

## Littérature

Une recherche systématique des publications relatives à la mesure du radon a été effectuée entre 2000 et 2021 avec les moteurs de recherche Google Scholar et dans des bases de données scientifiques telles que PubMed, Wiley, NCBI, IEEE Xplore, Scopus, Web of Science et Semantic scholar. Les bases de données ont été consultées en utilisant les mots et groupes de mots clés suivants : "exposition au radon", "mesure du radon à l'air libre", "mesure du radon dans les habitations". Les listes de référence de toutes les études extraites ont également été consultées afin de trouver des études pertinentes qui pouvaient être omises lors de la recherche dans les bases de données. Les ouvrages cités dans les références des études ont été consultés et utilisés.

En examinant les titres et/ou les résumés, la sélection initiale des articles a été effectuée indépendamment par le premier auteur sur la base des critères d'inclusion suivants : dosimétrie du radon ; surveillance du radon ; facteurs influençant la mesure du radon ; sources d'exposition au radon ; méthode de mesure du radon. Outre ces critères, seuls les articles rédigés en anglais et en français ont été sélectionnés pour être inclus dans la revue. Le deuxième auteur et le dernier auteur du présent article ont supervisé le processus de sélection des publications scientifiques et en cas de doute, les données ont été discutées jusqu'à ce que les trois parties parviennent à un accord. Sur la base des critères d'inclusion, après sélection, les publications scientifiques ont été classées par thème.

## Évolution des publications scientifiques en fonction de l'année

Sur un total de 370 publications collectées, 41 articles ont été exclus et finalement 329 articles ont été retenus dans cette synthèse bibliographique. La publication d'articles relatifs à la surveillance de l'exposition due au radon a évolué en dents de scie entre 2000 et 2007 (Figure 1). Une évolution croissante a été observée entre 2008 et 2015. Elle se justifie tant par la disponibilité des appareils de mesure du radon que par les exigences de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) sur la problématique de l'exposition due au radon dans les habitations et les lieux de travail à travers sa publication 103 en 2007 (ICRP, 2007). La diminution observée entre 2015 et 2018 peut être justifiée par une standardisation des méthodes de mesure du radon (Figure 1). Afin de réaliser une analyse approfondie des articles sélectionnés, ceux-ci ont été répartis par pays et par continent.

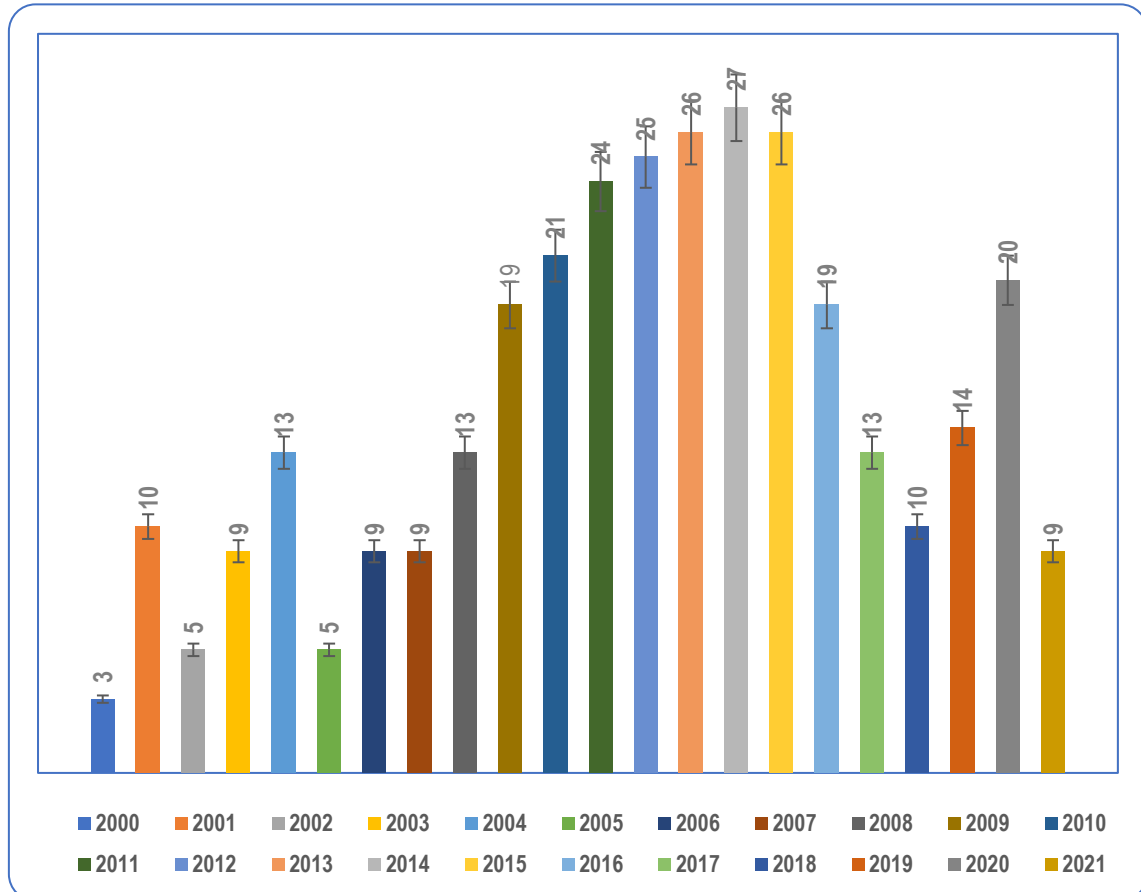


Figure 1. Répartition du nombre d'articles publiés entre 2000 et 2021, et consultés par année

## Répartition des publications par pays et par continent

Afin d'identifier les méthodes de mesure permettant de dépister et de mesurer le radon, nous avons passé en revue la littérature mondiale sur la thématique. Les histogrammes de la Figure 2 ont illustré le nombre d'articles par pays sur chaque continent.

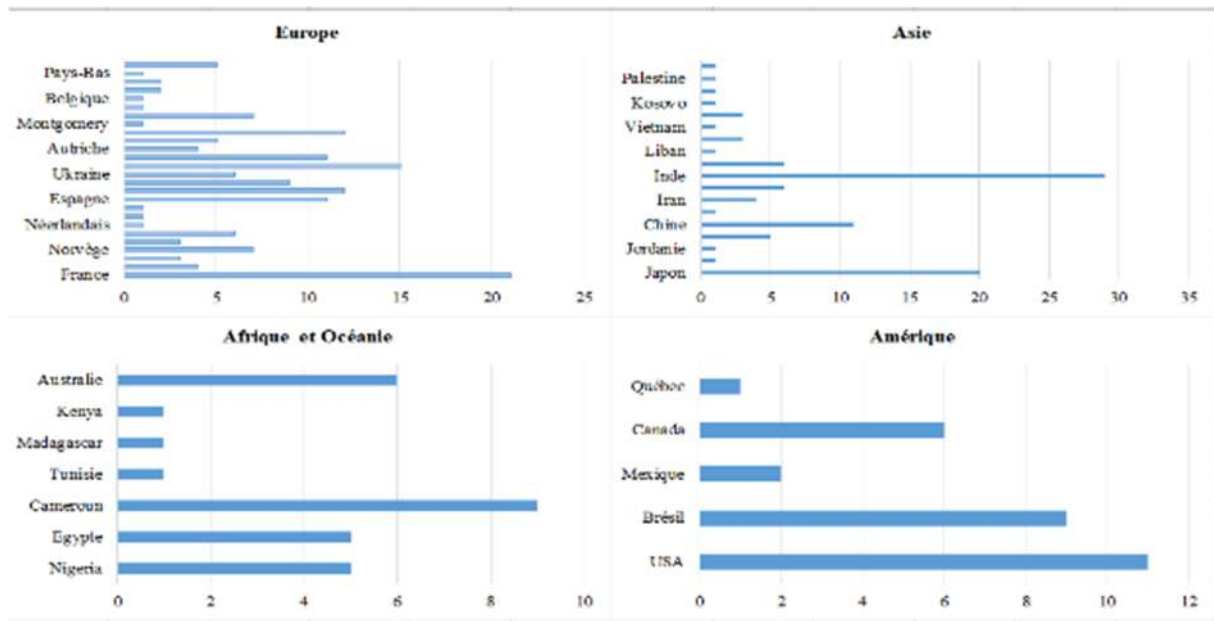


Figure 2. Répartition des articles par continents et par pays

Ces distributions graphiques par continent démontrent que notre thème de recherche a une forte connotation dans la littérature en termes de nombres d'articles publiés dont la plupart sur les continents européen et asiatique (Figure 2). Certes, au niveau de ces continents, l'Inde, la France et le Japon ont publié plus d'articles sur les méthodes de mesure (détecteurs) dans le monde avec respectivement 29, 21 et 20 articles (Figure 2). La France, le Japon, la Turquie, les États-Unis, l'Italie, l'Espagne, la Chine, l'Inde, la Hongrie et la Serbie ont été les 10 pays ayant produit plus de 10 publications entre 2000 et 2021 (Figure 2). Les six pays africains ayant publié sur la problématique ont été le Cameroun (9 articles), l'Égypte et le Nigeria avec 5 articles chacun, puis la Tunisie, le Kenya et Madagascar avec un article chacun, soit 7,07 % de toutes les publications inventoriées dans le cadre de l'étude (Figure 2).

L'analyse des 43 articles présentant des similitudes au niveau des sources d'exposition au radon identifiés et sélectionnés a révélé leur différence sur la scène scientifique mondiale relative à la problématique d'exposition au radon et vont être examinés par la suite. Mieux, au regard des différents sujets abordés dans tous les articles sélectionnés, le reste de l'analyse documentaire est organisé en les trois sous-sessions suivantes : -i- les sources d'exposition au radon ; -ii- les techniques de mesure du radon ; -iii- les facteurs d'influence de la métrologie du radon.

### Sources d'exposition au radon

Le radon étant un gaz radioactif naturel, ses compartiments d'exposition sont divers et variés. En exploitant les cadres d'études des différents articles, les quatre compartiments d'exposition au radon suivants ont été identifiés : l'eau potable ; l'air intérieur des bâtiments ; l'air extérieur ; le sol. Dans le tableau I sont présentés des exemples d'articles sur la mesure du radon dans les différents compartiments d'exposition.

L'eau a été identifiée par la communauté scientifique comme une source d'exposition au radon. Compte tenu de son importance dans l'alimentation de la population, les auteurs se sont intéressés à l'évaluation quantitative de la concentration volumique du radon dans l'eau. L'étude de Yakut *et al.* (2013) a évalué la concentration de radon-222 dans l'eau potable dans la ville de Sakarya en Turquie en 2013. Les différents compartiments de l'eau potable constituent une source d'exposition et qu'il est nécessaire de faire une surveillance du radon afin de déterminer le niveau d'exposition de la population. Les populations des villes du Bénin, en particulier celles vivant dans le Département des collines, utilisent également l'eau de puits, l'eau souterraine et l'eau du robinet pour leurs besoins vitaux. Il est nécessaire d'évaluer la concentration de radon présente dans ces sources d'eau potable.

Tableau I. Point synoptique des sources d'exposition au radon-222 et au thoron-220

Sources d'exposition	Titre des publications scientifiques	Références	NAD	Les types de détecteurs utilisés dans ces publications
Eau : - Eau potable ; - Puits ; - Rivière ; - Plantes médicinales.	1. Radiological risk assessment to the public due to radon in water in Barnala district, Punjab, India.	Rani <i>et al.</i> (2021)	08	RAD7, Smart RnDuo or LSC (Liquid Scintillation Counter) monitor
	2. Assessment of radon and thoron exhalation from soils and dissolved radon in groundwater in the vicinity of a high granite hill, Chikkaballapur district, Karnataka, India.	Poojitha <i>et al.</i> (2020)		
	3. Measurement of radon-222 concentration levels in brands of drinking water sachets produced in dutsin ma local government area (lga) of Katsina state, Nigeria.	Jamilu <i>et al.</i> (2020)		
	4. Absolute Measurement of Thoron in Surface Waters.	Lane-Smith & Schubert (2020)		
	5. Evaluation of different LSC methods for <sup>222</sup> Rn determination in waters.	Nikolov <i>et al.</i> (2018)		
	6. Sample volume optimization for radon-in-water detection by liquid scintillation counting.	Schubert- <i>et al.</i> (2014)		
Locaux : - Logements ; - Écoles primaires ; - Matériaux de construction.	1. Measurement of Indoor Thoron Gas Concentrations Using a Radon-Thoron Discriminative Passive Type Monitor: Nationwide Survey in Japan.	Sanada (2021)	13	CR-39
	2. Simultaneous measurements of indoor radon and thoron and inhalation dose assessment in Douala City, Cameroon.	Takoukam <i>et al.</i> (2019)		
	3. Assessment of external gamma exposure and radon levels in a dwelling constructed with phosphogypsum plates.	Máduar <i>et al.</i> (2011)		
	4. Investigation of indoor radon levels in some dwellings of southwestern Nigeria.	Ajayi & Olubi. 2016)		
	5. Alpha particles emissions in some samples of medical drugs (capsule) derived from medical plants in Iraq.	Ali & Dhuha (2018)		
	6. The screening indoor radon and preliminary study of indoor thoron concentration levels in Kuwait.	Janik <i>et al.</i> (2018)		

Sources d'exposition	Titre des publications scientifiques	Références	NAD	Les types de détecteurs utilisés dans ces publications
	7. Survey of indoor radon levels in some universities in south western Nigeria. doi:10.1093/rpd/ncz134.	Ajayi <i>et al.</i> (2019)		
	8. Radiometric evaluation of indoor radon levels with influence of building characteristics in residential homes from southwestern Nigeria.	Aladeniyi <i>et al.</i> (2020)		
	9. Assessment of environmental health risks due to indoor radon levels inside workplaces in Sudan.	Abd-Elmoniem (2021)		
	10. Assessment of Seasonal Radon Concentration in Dwellings and Soils in Selected Areas in Ga East, Greater Accra Region of Ghana.	Kpordzro <i>et al.</i> (2022)		
	11. Natural Radioactivity Measurements and Radiological Hazards Evaluation for Some Egyptian Granites and Ceramic Tiles.	Sidique <i>et al.</i> (2022)		
	12. Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the european database analysis.	Nuccetelli <i>et al.</i> (2020)		
Sol : - Uranium , - Sites d'extraction de manganèse et de phosphate.	1. Determination of Residential Soil Gas Radon Risk Indices Over the Lithological Units of a Southwestern Nigeria University.	Esan <i>et al.</i> (2020)	14	HpGe or NaI(Tl) detector, CR-39, AlphaGUARD PQ 2000Pro and LR-115 type II.
	2. Measuring radon-222 in soil gas with high spatial and temporal resolution.	Huxtable <i>et al.</i> (2016)		
	3. Soil radon dynamics in the Amer fault zone: An example of very high seasonal variations.	Moreno <i>et al.</i> (2015)		
Air extérieur	1. Measurements of Rn-222, Rn-220 and their decay products in the environmental air of the high background radiation areas in Yangjiang, China.	Yongling <i>et al.</i> (2021)	8	CR-39, LR-115 type II and HpGe or NaI(Tl)-Detector
	2. Outdoor 222Rn-concentrations in Germany : part 2 former mining areas.	Kümmel <i>et al.</i> (2014)		
	3. Outdoor 222Rn-concentrations in Germany e part 1 natural background.	Kümmel <i>et al.</i> (2014)		

**NAD : Nombre de publications scientifiques distinctes référencées sur les 329 publications scientifiques**



Au Bénin, l'étude de Gbohaida *et al.* (2016) réalisée sur la qualité physico-chimique de l'eau de boisson dans la ville de Dassa-Zounmè a montré que l'eau de consommation de cette ville est plus alcaline et plus dure que celle de Cotonou. Le taux d'alcalinité variait respectivement de 390 à 480 mg/l contre 25 à 35 mg/l puis de 232 à 260 mg/l contre de 15 à 27 mg/l. Les auteurs ont attribué ce constat à la nature géologique du sol de Dassa-Zounmè. De même, l'étude de Koungblenou *et al.* (2018) réalisée sur le risque de génotoxicité de l'eau de la rivière d'Okpara à Kika dans la commune de Tchaourou au Bénin a montré des dommages génétiques chez les personnes exposées (PE). Le taux de micronoyaux était significativement ( $p < 0,05$ ) plus élevé ( $62,24 \pm 3,88$ ) chez les PE (Kika) par rapport aux personnes non-exposées (PNE) ( $2,92 \pm 0,39$ ). L'indice de prolifération cellulaire est significativement ( $p < 0,05$ ) plus faible ( $1,50 \pm 0,04$ ) chez les PE (Kika) que chez les PNE ( $2,20 \pm 0,06$ ). Les auteurs n'ont pas pu déterminer dans leur étude les agents génotoxiques présents dans l'eau de la rivière d'Okpara.

Les locaux d'habitation sont des sources d'exposition au radon. Plusieurs auteurs ont axé leurs études sur la métrologie de la concentration de radon atmosphérique dans les habitations. L'analyse des articles a montré que le terme "habitations" est subdivisé en les deux grandes parties suivantes : -i- les chambres à coucher (radon domestique) ; -ii- les logements publics tels que les écoles, les pharmacies, les hôpitaux, les musées, etc. Hadad *et al.* (2007) ont évalué l'activité volumétrique du radon dans les habitations des villes de Lahijan, Ardabil, Sar-Ein et Namin en Iran où ils ont remarqué que les concentrations maximales étaient de 163, 240, 160 et 144 Bq/m<sup>3</sup> avec des médianes de 160, 168, 124 et 133 Bq/m<sup>3</sup>, respectivement. Celik *et al.* (2008) ont mené la même étude dans la ville de Giresun en Turquie et ont montré que l'activité volumique variait de 52 à 360 Bq/m<sup>3</sup>. Au Nigeria, Ajayi *et al.* (2016) ont évalué la concentration volumique du radon-222 dans les habitations du Sud-Ouest du Pays où ils ont enregistré des concentrations variant de 5 à 255 Bq/m<sup>3</sup> avec une moyenne de  $39 \pm 7$  Bq/m<sup>3</sup>. La dose efficace annuelle moyenne était estimée à 1 mSv/an d'où un détrimement radiologique non significatif. La même étude a été menée par Ajayi *et al.* (2019) dans les locaux universitaires du Sud-Ouest du Nigeria où ils ont montré que la concentration d'activité moyenne du radon à l'intérieur des bureaux étudiés dans les trois campus universitaires a été estimée à  $222 \pm 44$  Bq/m<sup>3</sup>, ce qui est inférieur au niveau de référence de 300 Bq/m<sup>3</sup>. D'autres auteurs ont effectué récemment les mêmes évaluations dans les matériaux de constructions au Nigeria par Aladeniyi *et al.* (2020), dans les lieux de travail au Soudan par Abd-Elmoniem *et al.* (2021) et dans les habitations au Ghana par Kpordzro *et al.* (2022). Máduar *et al.* (2011) ont montré au Brésil que les bâtiments construits avec des dalles de phosphogypse provenant de résidus d'extraction de minerais augmentent fortement l'activité volumique du radon dans ces bâtiments. Toutes ces évaluations ont été réalisées avec les détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) de type CR-39 et LR-115 type II. Sur d'autres continents, les auteurs tels que Imani *et al.* (2021) en Iran, Sidique *et al.* (2022) en Egypte, Şeref *et al.* (2021) en Turquie, Nuccetelli *et al.* (2020) en Italie et Oluwasayo *et al.* (2020) au Nigeria ont également montré à l'aide des DSTN de type CR-39 ou de HpGe que les matériaux de construction contribuent à l'augmentation de l'exposition au radon. Mieux, Abd-Elmoniem *et al.* (2014) ont montré le taux d'exhalation du radon dans les matériaux de construction au Soudan.

Le sol est la source d'exposition transversale au radon. Esan *et al.* (2020) ont évalué le niveau de radon dans le sol des unités lithologiques d'une université du Sud-Ouest du Nigeria. Huxtable *et al.* (2016), ont mesuré le radon dans les gaz provenant du sol dans des villes d'Ukraine. Plusieurs sites d'exploitation minière ont également intéressé les auteurs. Il s'agit notamment des sites de manganèse par Moreno *et al.* (2015), d'uranium par Yongling *et al.* (2021), de phosphate par Hilal *et al.* (2015) et d'or par Kümmel *et al.* (2014).

Plusieurs études telles que celles de Kranrod *et al.* (2020) au Japon, de Saïdou *et al.* (2019) au Cameroun et de Sidique *et al.* (2022) en Egypte ont montré que le radon est également présent dans l'air extérieur malgré le système de ventilation naturelle. Les zones où le rayonnement de brut de fond est élevé comme les collines d'après Yakut *et al.* (2013), les sites miniers d'après Anjos *et al.* (2009), les carrières de granites d'après Sidique *et al.* (2022), etc. présentent un débit équivalent de dose élevé en raison de la forte contribution du radon et de ses descendants. Kümmel *et al.* (2014) se sont concentrés sur l'évaluation du radon extérieur dans les zones minières. Ce compartiment d'exposition au radon a également été étudié dans le cadre de travaux réalisés au Brésil par Magalhaes *et al.* (2003) et en Norvège par Mrdakovic Popic *et al.* (2011).

## Techniques de mesures du radon

Les techniques de mesure du radon sont multiples et dépendent de la nature du milieu de mesure. Ainsi, chaque technique conduit à l'obtention d'une grandeur dosimétrique sur le terme source (radon). Les trois types de techniques de mesure suivants ont été mis en évidence : la technique par spectrométrie (HPGe) ; la technique par scintillation liquide (LSC) ; la technique par méthode passive basée sur des détecteurs de traces nucléaires solides (DSTN).

### Scintillateur liquide

Le principe du scintillateur liquide est utilisé pour mesurer la concentration de radon dans l'eau. Les échantillons d'eau sont prélevés dans des bouteilles en verre nettoyées et scellées d'une capacité habituelle de 60 ml. Pour la mesure, les échantillons sont placés sous une sonde reliée à une électrode de l'appareil de mesure par exemple le SMART RnDuo (Portable Radon Monitor), dans lequel est installé un scintillateur liquide (figure 3). Le système est connecté à un circuit électronique chargé d'analyser les signaux et d'afficher les résultats en fonction de la base de données incorporée.

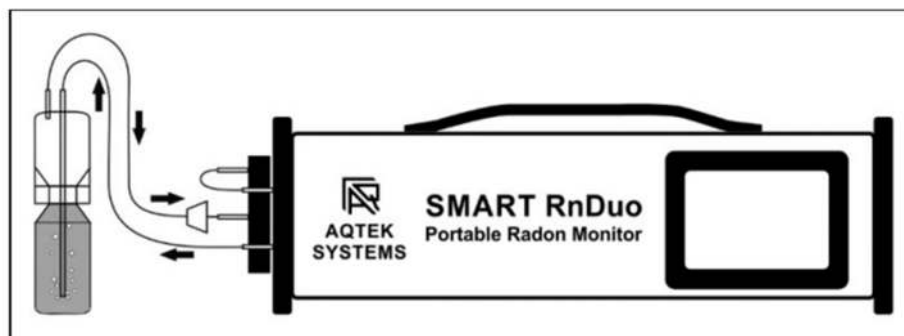


Figure 3. Schéma expérimental d'un détecteur basé sur le principe de scintillateur liquide

Source : Manish Kumar *et al.* (2017).

### Mesure passive

Le principe de la mesure continue (passive) du radon est généralement utilisé pour surveiller l'exposition au radon dans les habitations (chambres à coucher, écoles, bureaux, mosquées, etc.). Ce principe est basé sur l'accumulation des interactions des rayons gamma émis lors de la désintégration du radon ou de ses descendants avec le milieu de détection. Dans la littérature, les détecteurs de traces nucléaires à l'état solide sont les plus utilisés pour contrôler les niveaux de radon dans les locaux. Plus précisément, le détecteur de traces nucléaires solides (DSTN) de type Columbia Resin-39 est le plus utilisé dans la littérature scientifique (Figure 4). Il peut être couplé avec un système de discrimination du Radon-222 et du Thoron-220 appelé le détecteur RADUET.

D'après Sanada *et al.* (2021), le DSTN a été développé par l'Institut national des sciences radiologiques (Chiba, Japon) en tant que moniteur discriminant  $^{222}\text{Rn}$  et  $^{220}\text{Rn}$ . Le moniteur est composé de deux hémisphères électro-conducteurs et de deux films en polycarbonate installés au centre des deux hémisphères. Pour isoler et séparer les espèces descendantes des  $^{222}\text{Rn}$  et  $^{220}\text{Rn}$ , un filtre en fibre de verre est placé dans le premier hémisphère. Ainsi, seuls les gaz  $^{222}\text{Rn}$  et  $^{220}\text{Rn}$  peuvent traverser le filtre et pénétrer dans le premier hémisphère. Ce moniteur comporte deux chambres de diffusion différentes qui ont des taux de ventilation relativement importants et faibles. Ce système a été développé sur la base de la grande différence de demi-vie entre les  $^{222}\text{Rn}$  et les  $^{220}\text{Rn}$ .

Les détecteurs sont placés à une distance de 1 m du sol et de 0,5 m des murs latéraux des pièces, par l'intermédiaire d'un fil, dans les pièces habitées les plus basses situées. La période d'accumulation est généralement de trois mois. D'après Ajayi *et al.* (2019), après exposition, les films sont d'abord soumis à une attaque chimique avec une solution mixte de 8 mol/L KOH et 20%  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  à 30 °C pendant 30 min ou de 6,25 mol d'hydroxide de sodium (NaOH) à 98 °C pendant 1 heure. Ensuite, les films sont gravés électrochimiquement à 800 V et 2000 Hz pendant 2 h à l'aide du système TASL (Track Analysis Systems Limited) (figure 6). La concentration de radon est déterminée par la densité obtenue sur le film. C'est ce qui facilite son utilisation dans les études de surveillance du niveau de radon dans les locaux.



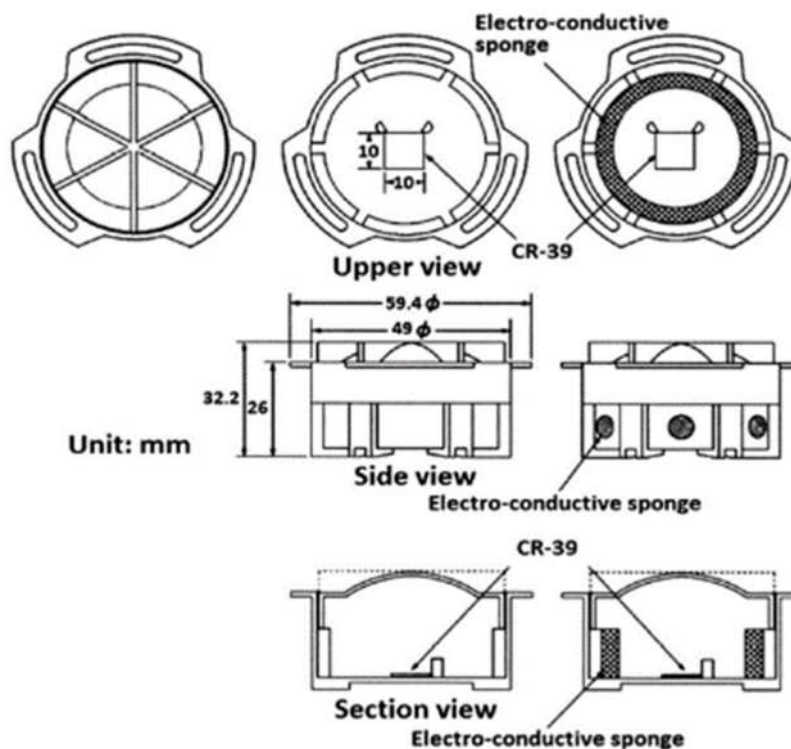


Figure 4. Aperçu du détecteur de discrimination radon-thoron (RADUET)

Source : Takoukam Soh Serge Didier *et al.* (2019).



Figure 5. Coupe de diffusion



Figure 6. Le système de dosimétrie (TASLIMAGE)

### Spectrométrie

Gamma et alpha par Germanium (HpGe) ou par NaI(Tl) sont les deux types de spectrométrie qui existent (Figure 7). Comme l'ont mentionné Kall *et al.* (2014) à Madagascar et Modibo *et al.* (2019) au Cameroun, la spectrométrie gamma et alpha est basée sur le principe de l'interaction des rayonnements gamma et alpha émis lors de la désintégration du radon et de ses descendants avec le milieu de détection qui est généralement l'azote liquide s'il s'agit du HpGe. Le système comprend une partie électronique pour le traitement du signal (nombre de coups/seconde) et l'affichage de la dose mesurée. Ce système de mesure du radon peut être fixé dans un laboratoire. La mesure est alors effectuée sur un échantillon prélevé dans le milieu de mesure (sol et eau). C'est un principe indirect de mesure du radon dans les échantillons à travers la mesure de l'activité massique (Bq/g) de  $^{238}\text{U}$ , de  $^{235}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$ . Kall *et al.* (2014) ont utilisé cette technique à Madagascar pour évaluer la concentration massique de  $^{238}\text{U}$ , de  $^{235}\text{U}$ , du  $^{232}\text{Th}$  et du  $^{40}\text{K}$  dans les sables des plages de Ramena. Onjefu *et al.* (2022), Şeref *et al.* (2021), Imani *et al.* (2021) et Sidique *et al.* (2022) ont utilisé cette technique pour évaluer la concentration massique de  $^{238}\text{U}$  ou  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les granites, matériaux de construction, carreaux céramiques et le mabre respectivement en Namibie, en Turquie, en Iran et en Egypte.

Aujourd'hui des spectromètres portatifs existent et permettent de mesurer le radon dans les différents compartiments décrits ci-dessus. Leur utilisation est limitée dans les études de mesures passives en raison du coût d'achat élevé du nombre de détecteurs nécessaire pour l'étude. Par conséquent, la mesure du radon répond à plusieurs techniques en fonction du compartiment d'exposition étudié. Ainsi, le classement de chaque technique de mesure est évalué en fonction du compartiment d'exposition.



Figure 7. Image d'un appareil de spectromètre fixe (gamma et alpha) par NaI(Tl). Laboratoire de l'INSTN-Madagascar

### Evaluation des techniques de mesure pour $^{222}\text{RN}$ et $^{220}\text{RN}$ dans différents compartiments d'exposition naturelle

Les sept critères suivants sont identifiés afin de réaliser l'évaluation des techniques de mesure pour  $^{222}\text{RN}$  et  $^{220}\text{RN}$  dans différents compartiments d'exposition naturelle : -i- la faisabilité de la technique ; -ii- la mobilité du détecteur ; -iii- l'autonomie électrique du détecteur et du coût ; -iv- l'utilisation à grande échelle du détecteur ; -v- la disponibilité du détecteur ; -vi- la nature de l'environnement de mesure ; -vii- du type de métrologie (active ou passive). Chaque critère a un score de 1. Une réponse positive à une question d'évaluation vaut un score de 1. Une réponse négative vaut un score de 0. Dans le tableau II sont présentés les résultats de cette évaluation. Les détecteurs basés sur le principe de la scintillation liquide (LSC) ne sont utilisés que pour les mesures de radon dans l'eau. Les détecteurs basés sur le principe de la spectrométrie (HpGe, RAD7 H<sub>2</sub>O et AlphaGUARD PQ 2000Pro) sont également utilisés mais en second choix en raison de la méthode d'échantillonnage. De même, les détecteurs de traces nucléaires solides (DSTN), principalement de type CR-39, LR-115 type II ou RADUET, sont utilisés pour la mesure en continu et en différé (dosimétrie passive) de l'activité du radon à l'intérieur des locaux (chambres, écoles, églises, mosquées, bureaux, etc.). Ils peuvent être utilisés pour la mesure du radon à l'extérieur mais avec une contrainte de protection contre les intempéries.

Les techniques basées sur la spectrométrie ou le scintillateur plastique sont très peu utilisées pour la mesure active du radon à l'intérieur des bâtiments. Ceci est justifié par le fait que ce sont les endroits où l'objectif de la surveillance de l'exposition est orienté vers l'impact sanitaire du radon sur l'être humain qui y séjourne. En outre, plusieurs facteurs liés à l'interaction entre la matière et le rayonnement influencent cette mesure et il est nécessaire de les prendre en compte afin d'obtenir une mesure représentative de la situation d'exposition réelle. Ils sont prioritairement pris en compte dans l'évaluation de la concentration massique des radionucléides naturels ( $^{238}\text{U}$  ou  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ) dans les prélèvements d'échantillons. Dans le tableau II ont été présentés les résultats de cette analyse.

Tableau II. Évaluation des techniques de mesure du radon en fonction du compartiment d'exposition au radon

The Technique	Evaluation criteria								Decimetric size	Total score out of 7
	Feasibility of the technique	Mobility of the detector	Electrical autonomy of the detector	Cost and large-scale use	Availability of the detector	Nature of the measurement environment	Type of metrology			
							Passive	Active		
Solid State Nuclear Trace Detectors	0	1	1	1	1	Water	0	0	BqL	4
Liquid Scintillator	1	0	0	0	1		0	1	BqL	3
Spectrometry (gamma & alpha)	1	1	0	0	1		0	1	BqL	4
Solid State Nuclear Trace Detectors	1	1	1	1	1	Dwellings	1	0	Bqm <sup>3</sup>	5
Liquid Scintillator	0	0	0	0	1		0	0	BqL	1
Spectrometry (gamma & alpha)	1	1	0	0	1		0	1	Bqm <sup>3</sup>	4
Solid State Nuclear Trace Detectors	0	1	1	1	1	Soil	0	0	Bqm <sup>3</sup>	4
Liquid Scintillator	0	0	0	0	1		0	0	BqL	1
Spectrometry (gamma & alpha)	1	1	0	0	1		0	1	Bqg	4
Solid State Nuclear Trace Detectors	1	1	1	0	1	Outside air	1	0	Bqm <sup>3</sup>	5
Liquid Scintillator	0	0	0	0	1		0	0	BqL	1
Spectrometry (gamma & alpha)	1	1	0	0	1		0	1	Bqm <sup>3</sup>	4

### Facteurs influençant la mesure du radon

Le radon étant un gaz, sa mesure dans les différents compartiments d'exposition est influencée par plusieurs facteurs tels que la ventilation naturelle et les facteurs influençant le transport du radon (humidité, porosité, coefficient de diffusion, facteur d'émanation). Cozmuta *et al.* (2003) aux Pays-Bas, ont démontré que pour des niveaux d'humidité supérieurs à 80 %, le taux de libération du radon diminue très fortement, tandis que pour des niveaux d'humidité inférieurs, le taux de libération du radon augmente linéairement. Nguyen *et al.* (2005) en Pologne, ont montré que la masse de l'échantillon, la granulométrie et la teneur en eau influencent le taux d'exhalation de la masse de radon. Cameron *et al.* (2009) en Australie, ont montré que la concentration d'activité <sup>226</sup>Ra, la granulométrie et la porosité du sol ont un effet marqué sur les densités de flux <sup>222</sup>Rn. Cette étude a montré que les surfaces végétalisées ont une densité de flux d'exhalation de radon plus élevée que les surfaces stériles.

En Inde, Sulekha *et al.* (2010) ont montré que la concentration de radon et de thoron dans les habitations varie en fonction de la saison. Des valeurs élevées d'activité volumique du radon et du thoron ont été trouvées en hiver, tandis qu'elles sont faibles en été et pendant la saison des pluies. Kozak *et al.* (2011) ont calculé en Pologne les facteurs de correction saisonnière pour chaque mois de l'année pour la concentration de l'activité volumique du radon dans les habitations.

### Répartition des détecteurs utilisés dans la littérature

A partir des grandeurs mesurées aux types de détecteurs, sont analysées les proportions d'utilisation de chaque type de détecteurs dans toutes les recherches et sur toutes les régions étudiées puis sont faits les deux constats principaux suivants (figure 8) : -i- une multitude de types de détecteurs de radon sont utilisés dans le monde scientifique (21 au total) ; -ii- les détecteurs DSTN de type CR-39 et RAD Aqua system-7 sont les plus utilisés et apparaissent dans la littérature au niveau mondial avec des proportions respectives de 32 % et 13 %. Les techniques sont principalement axées sur la mesure en continu à l'aide de détecteurs passifs. Dans l'option de réaliser notre étude et pour être plus objectif, nous avons choisi les huit détecteurs passifs de radon-222 et 220 ayant au moins un taux de 4 % d'apparitions dans la littérature mondiale pour poursuivre notre étude.

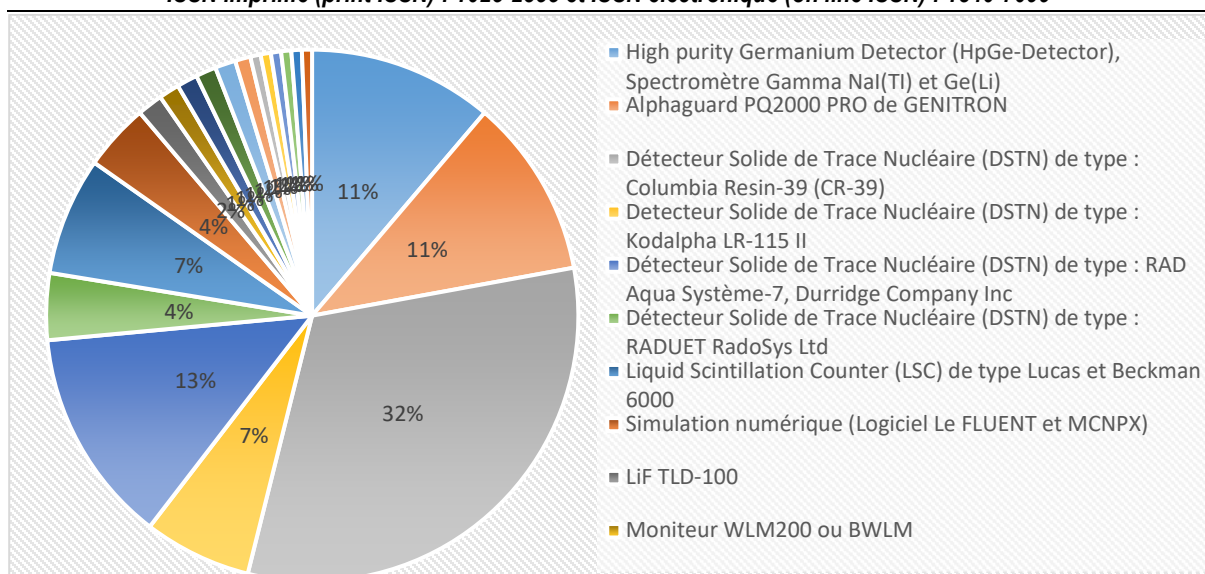


Figure 8. Répartition des détecteurs utilisés dans la littérature pour la mesure du radon 222 et 220

### Analyse sous-régionale des détecteurs de radon utilisés sur le Continent Africain

Afin d'identifier le détecteur approprié pour la mesure du radon-222 et du thoron-220 au Bénin, huit détecteurs ont été étudiés dans la littérature africaine et les histogrammes de la figure 9 ont illustré les résultats obtenus de cette étude.

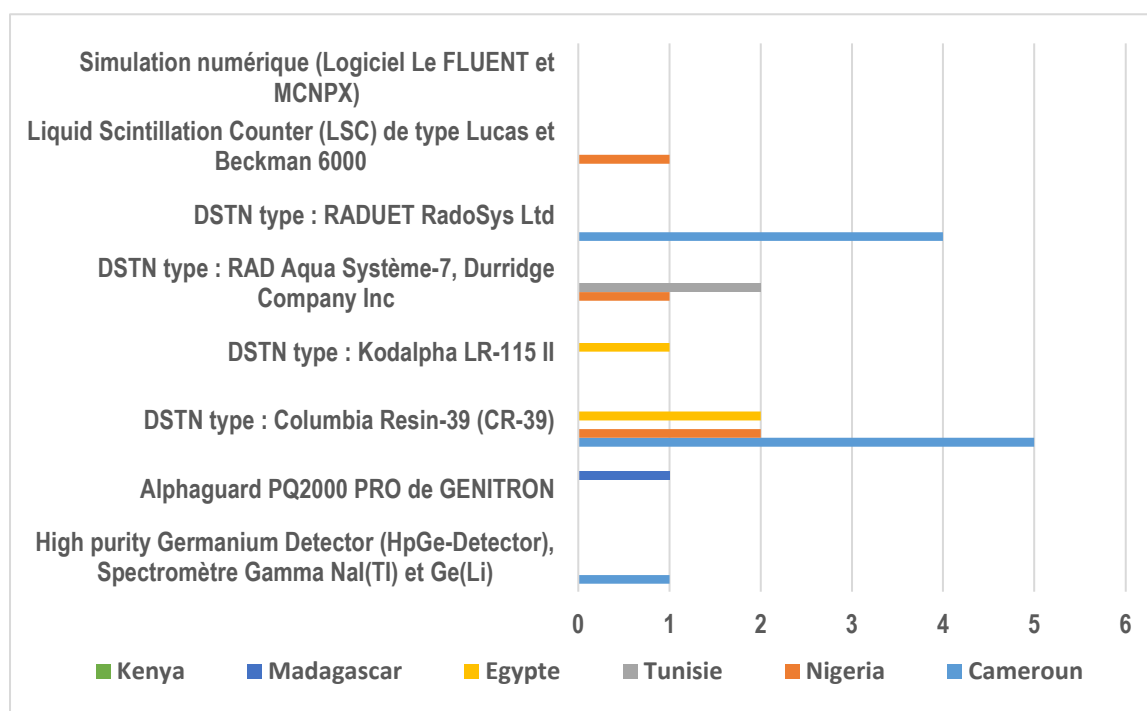


Figure 9. Distribution de l'utilisation des huit détecteurs de radon sur le continent africain

Sept détecteurs de radon sur huit sont présents. Une forte présence, en général, de détecteurs de traces nucléaires solides (soit 85 %) et plus particulièrement du type CR-39 représentant près de la moitié des détecteurs de radon utilisés dans la littérature africaine. Le Cameroun et le Nigeria sont les deux pays africains les plus représentatifs avec trois détecteurs de radon différents. L'Egypte suit avec trois détecteurs de radon dont deux (2) DSTN de type CR-39 et 01 DSTN de type Kodalpha LR-115 de type II.



## Analyse

Dans la présente étude sont inventoriés des détecteurs et des méthodes utilisés dans la littérature pour la surveillance de l'exposition au radon-222 et au thoron-220. Elle se concentre sur les techniques de mesure du radon-222 et sur la dissociation de sa contribution à l'exposition externe et interne de celle du radon 220. L'analyse de la littérature montre que les méthodes et les matériaux dépendent de l'objectif de la mesure. En effet, les méthodes de mesure du radon ont beaucoup évolué. Plusieurs incertitudes ont été éliminées afin d'accroître la précision des mesures. Allodji *et al.* (2012), ont identifié six incertitudes dans les systèmes de mesure qui ont été réduites d'environ 47 % dans la période 1956-1974 à 10 % après 1982.

Les détecteurs de traces nucléaires solides sont de plus en plus utilisés depuis 2010. Ceci est justifié par les recommandations de la CIPR dans sa publication 103 et les exigences faites aux Etats membres de l'AIEA concernant la surveillance de l'exposition au radon-222 et au thoron-220. Pour preuve, le monde scientifique africain en l'occurrence le Cameroun, le Nigeria et l'Egypte s'est intéressé à l'exposition au radon-222 à travers plus de cinq à neuf publications chacun. Saïdou *et al.* (2015) ont utilisé le détecteur de traces nucléaires solides de type CR-39 pour effectuer une mesure discriminante du radon-222 et du thoron-220. En juillet 2019, Saïdou *et al.* (2019) ont montré que l'activité massique de  $^{238}\text{U}$  était de 13-52 Bq/Kg et la concentration volumique du radon dans les habitations de la région de Poli au Cameroun en utilisant respectivement la technique de spectrométrie gamma (HpGe) et les détecteurs DSTN de type CR-39. Toutefois, auparavant, Saïdou *et al.* (2014) se sont intéressés à la concentration volumique du radon-222 dans les régions de Poli et de Lolodorf au Cameroun en utilisant le système E-PERM Electret Ion Chambers (EICs). Il est possible que cette technique ait présenté des incertitudes dans les mesures effectuées. Cela aurait justifié un retour à la technique basée sur le détecteur DSTN de type CR-39. Par ailleurs, en août 2019, Takoukam *et al.* (2019) ont montré que la concentration du radon-222 est comprise entre  $31 \pm 1$  et  $436 \pm 12$  Bq/m<sup>3</sup> dans la ville de Douala au Cameroun en utilisant le détecteur RADUET de type CR-39. Ces différents résultats et plusieurs autres séries d'études scientifiques menées sur le radon-222 et ses pairs ont permis aux autorités camerounaises de mettre en place une équipe scientifique avec un laboratoire de renom ainsi qu'un programme national de surveillance du radon-222 dans les villes sélectionnées comme ayant potentiellement une radioactivité naturelle élevée.

Dans le contexte de l'évaluation de l'exposition au radon, la technique de mesure est une question très importante. D'après les résultats du tableau II, les détecteurs de traces nucléaires à l'état solide (DSTN) sont les plus adaptées dans la littérature mondiale pour la surveillance dans les habitations. Röttger *et al.* (2010) ont utilisé un système de spectrométrie par HpGe et NaI(Tl) pour développer une référence de 150 Bq/m<sup>3</sup> à 2000 Bq/m<sup>3</sup> basée sur l'émanation précisément connue de  $^{222}\text{Rn}$  à partir d'un étalon d'activité  $^{226}\text{Ra}$ . Cette configuration a permis de réduire les incertitudes et d'augmenter la plage de traçabilité des compteurs commerciaux de radon. Il en a de même pour la recherche d'Allodji *et al.* (2012) qui ont identifié six incertitudes dans la mesure du radon. Cette étude a montré que la taille totale de l'incertitude a diminué d'environ 47 % au cours de la période 1956-1974 à 10 % après 1982, ce qui illustre l'amélioration du système de surveillance radiologique au fil du temps. Enfin, les techniques de mesure sont spécifiques à chaque contexte de mesure et à la nature de la métrologie. Ceci justifie la nécessité d'une évaluation des techniques avant de procéder à la mise en œuvre d'un protocole de mesure du radon.

## Conclusion

La synthèse bibliographique permet de découvrir voire de comprendre que différents pays en Afrique et dans le monde étudient la problématique de l'exposition naturelle due au radon. Les trois techniques spécifiques de mesure du radon identifiées dépendent de l'objectif de la mesure et de la nature du site. La mise en œuvre de ces techniques nécessite l'utilisation de détecteurs spécifiques tels que DSTN (CR-39, LR-115, RADUET), LSC, HpGe, NaI(Tl) et Alphaguard.

Pour la mesure de la concentration volumique de radon dans les habitations, le DSTN de type CR-39 est le plus utilisé même dans le contexte africain. Pour la quantification des radionucléides naturels ( $^{238}\text{U}$  ou  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ) présents dans le sol (granites ou sables), dans les matériaux de construction, aliments, y compris le radon et ses descendants, la technique de mesure active basée sur le détecteur à germanium de haute pureté (HpGe-Detector) ou du détecteur NaI(Tl) est la plus utilisée. Pour la mesure de la concentration de radon dans l'eau, les détecteurs RAD Aqua System-7, Durrige Company Inc. et Liquid Scintillation Counter (LSC) sont les plus utilisés. La technique de mesure basée sur le détecteur de traces nucléaires à l'état solide de type CR-39, le détecteur au germanium de haute



pureté (HpGe-Detector) et le compteur à scintillation liquide (LSC) sont sélectionnés afin d'évaluer l'exposition au radon-222 et au thoron-220 ainsi que des radionucléides naturels respectivement dans les habitations, le sol et l'eau potable dans les zones montagneuses du Bénin, en l'occurrence les villes de Glazoué et de Dassa-Zounmè.

## Références bibliographiques

- Abd-Elmoniem, A. E., 2014: Radon exhalation rates from some building materials used in Sudan. Sage Journals, Volume 24, Issue 6. <https://doi.org/10.1177/1420326X14537285>. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1420326X14537285>.
- Abd-Elmoniem, A. E., 2021: Assessment of environmental health risks due to indoor radon levels inside workplaces in Sudan. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, Volume 103, 2023 - Issue 6, pp. 1394-1410. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1873317>. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03067319.2021.1873317>.
- AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique), 2016. Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté, collection Normes de sûreté n° GSR Part 3. AIEA. Vienne.
- AFNOR (Association Française de Normalisation), 2004 : Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement - Air - Le radon-222 : Méthodes de mesure intégrée de l'activité volumique moyenne du radon, dans l'environnement atmosphérique, avec un prélèvement passif et une analyse en différé. NF-M60-766. France.
- AFNOR (Association Française de Normalisation), 2011 : Énergie nucléaire - Mesure de la radioactivité dans l'environnement-Air - Le radon-222 dans les bâtiments : Méthodologies appliquées au dépistage et aux investigations complémentaires. NF-M60-771. France.
- Akiba, S., S. Tokonami, F. Bochicchio, J. McLaughlin, L. Tommasino, N. Harley, 2010: Thoron: its metrology, health effects and implications for radon epidemiology: a summary of roundtable discussions. Radiation Protection Dosimetry, Volume 141, Issue 4, October 2010, pp. 477-481, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq240>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/141/4/477/1674699>.
- Ajayi, O. S., Olubi O. E., 2016: Investigation of indoor radon levels in some dwellings of southwestern Nigeria. Environmental Forensics 2016, Vol. 17, N° 4, 275-281. <http://dx.doi.org/10.1080/15275922.2016.1230909>. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15275922.2016.1230909>.
- Ajayi, O. S., E. O. Owoola, O. E. Olubi, C. Goodluck Dike, 2019: Survey of indoor radon levels in some universities in south western Nigeria. Radiation Protection Dosimetry, Volume 187, Issue 1, December 2019, pp. 34-41, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz134>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/187/1/34/5492612>.
- Aladeniyi, K., A. M. Arogunjo, A. J. S. C. Pereira, O. S. Ajayi, I. A. Fuwape, 2020: Radiometric evaluation of indoor radon levels with influence of building characteristics in residential homes from southwestern Nigeria. Environmental Monitoring and Assessment, volume 192, Article number: 764 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08734-z>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08734-z>.
- Ali, A. A., Dhuha, J. L., 2018: Alpha particles emissions in some samples of medical drugs (capsule) derived from medical plants in Iraq. Plant Archives Vol. 18 No. 1, 2018, pp. 1137-1143. ISSN: 0972-5210. <http://www.plantarchives.org/PDF%2018...> <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183312460>.
- Allodji, R. S., K. Leuraud, S. Bernhard, S. Henry, J. Benichou, D. Laurier, 2012: Assessment of uncertainty associated with measuring exposure to radon and decay products in the French uranium miner's cohort. Journal of Radiological Protection, Volume 32, Number 1. stacks.iop.org/JRP/32/85. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0952-4746/32/1/85/meta>. DOI: 10.1088/0952-4746/32/1/85.
- Anjos, R.M., N. Umisedo, A.A.R. da Silva, L. Estellita, M. Rizzotto, E.M. Yoshimura, H. Velasco, A.M.A. Santos, 2009: Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 101, Issue 2, February 2010, pp. 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.010>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X0900232X>.
- ANSR (Autorité Nationale de Sûreté radiologique et de Radioprotection), 2021. Décision **Année** 2021, N°073-2021/PR/P-CS/SP-ANSR/SA, Portant radioprotection des travailleurs dans les installations et activités utilisatrices des rayonnements ionisants du 25 mars 2021. 18 p. Conseil de Surveillance (CS)-Autorité nationale de Sûreté radiologique et de Radioprotection (ANSR). <https://ansr.gouv.bj/wp-content/uploads/2021/04/ANSR073-radioprotection-des-travailleurs.pdf>
- Cameron, E. L., R. A. Akber, A. Bollhöfer, P. Martin, 2009: Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 100, Issue 1, January 2009, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.09.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X08001513>.
- Celik, N., U. Cevik, A. Celik, B. Kucukomeroglu, 2008: Determination of indoor radon and soil radioactivity levels in Giresun, Turkey. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 99, Issue 8, August 2008, pp. 1349-1354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.04.010>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X08000684>.

- Cozmuta, I., E.R. van der Graaf, R.J. de Meijer, 2003: Moisture dependence of radon transport in concrete: measurements and modeling. *Health Physics* 85(4):p 438-456, October 2003. [https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2003/10000/MOISTURE\\_DEPENDENCE\\_OF\\_RADON\\_TRANSPORT\\_IN.8.aspx](https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2003/10000/MOISTURE_DEPENDENCE_OF_RADON_TRANSPORT_IN.8.aspx).
- Esan, D. T., M. K. C. Sridhar, R. Obed, Y. Ajiboye, O. Afolabi, B. Olubodun, O. M. Oni, 2020: Determination of Residential Soil Gas Radon Risk Indices Over the Lithological Units of a Southwestern Nigeria University. *Scientific Reports* (2020), 10:7368, pp. 1-10. [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64217-8>. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-64217-8>.
- Ferry, C., A. Beneito, P. Richon, M.-C. Robe, 2001: An automatic device for measuring the effect of meteorological factors on radon-222 flux from soils in the long term. *France. Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 93, Issue 3, 1 February, pp. 271–274, <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006439>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/93/3/271/1618267>.
- Gbohaida, V., D. C. P. Agbangnan, M. B. Ngossanga, S. E. Medoatinsa, L. F. C. Dovonon, D. V. Wotto, F. Avlessi, D. C. K. Sohounhloue, 2016 : Etude de la qualité physico-chimique de l'eau de boisson dans deux localités du Bénin : Cotonou et Dassa-Zoumè. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 10(1): 422-434, February 2016. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>, <http://indexmedicus.afro.who.int>.
- Hadad, K., R. Doulatdar, S. Mehdizadeh, 2007: Indoor radon monitoring in Northern Iran using passive and active measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 95, Issue 1, June 2007, pp. 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.01.013>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X07000379>.
- Hilal, M.A., E.M. El Afifi, A.A. Nayl, 2015: Investigation of some factors affecting on release of radon-222 from phosphogypsum waste associated with phosphate ore processing. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 145, July 2015, pp. 40-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.03.030>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X15001010>.
- Huxtable, D., D. Read, G. Shaw, 2016: Measuring radon-222 in soil gas with high spatial and temporal resolution. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 167, February 2017, pp. 36-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X16305434>.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 2007. *Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique*. 417 p. Publication 103, 3, de la CIPR, IRSN (2009), Elsevier, 2007. ISBN : 978-2-7430-1120-8. [https://www.icrp.org/docs/P103\\_French.pdf](https://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf).
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 2010. *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*, ICRP Publication 115, Elsevier (2010). *Ann ICRP*. 2010 Feb;40(1):1-64. PMID: 22108246. doi: 10.1016/j.icrp.2011.08.011.
- Imani, M., M. Adelikhah, A. Shahrokhi, G. Azimpour, A. Yadollahi, E. Kocsis, E. Toth-Bodrogi, T. Kovács, 2021: Natural radioactivity and radiological risks of common building materials used in Semnan Province dwellings, Iran. *Environmental Science and Pollution Research* volume 28, pp. 41492–41503 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13469-6>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13469-6>.
- Jamilu, T. B., M. H. Sani, J. Joshua, 2020: Measurement of radon-222 concentration levels in brands of sachet drinking-water produce in dutsin-ma local government area (lga) of Katsina State, Nigeria. *Journal of Asian Scientific Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 33-42. ISSN(e): 2223-1331. ISSN(p): 2226-5724. DOI: 10.18488/journal.2.2020.101.33.42. URL: [www.aessweb.com](http://www.aessweb.com). DOI: 10.18488/journal.2.2020.101.33.42. [https://www.researchgate.net/profile/Jamilu-Baraya/publication/338576924\\_Measurement\\_of\\_Radon-222\\_Concentration\\_Levels\\_in\\_Brands\\_of\\_Sachet\\_Drinking-Water\\_Produce\\_in\\_Dutsin-Ma\\_Local\\_Government\\_Area\\_LGA\\_of\\_Katsina\\_State\\_Nigeria/links/5ea2b0c492851c87d1b103c4/Measurement-of-Radon-222-Concentration-Levels-in-Brands-of-Sachet-Drinking-Water-Produce-in-Dutsin-Ma-Local-Government-Area-LGA-of-Katsina-State-Nigeria.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jamilu-Baraya/publication/338576924_Measurement_of_Radon-222_Concentration_Levels_in_Brands_of_Sachet_Drinking-Water_Produce_in_Dutsin-Ma_Local_Government_Area_LGA_of_Katsina_State_Nigeria/links/5ea2b0c492851c87d1b103c4/Measurement-of-Radon-222-Concentration-Levels-in-Brands-of-Sachet-Drinking-Water-Produce-in-Dutsin-Ma-Local-Government-Area-LGA-of-Katsina-State-Nigeria.pdf).
- Janik M., D. Al-Azmi, S. K. Sahoo, 2018: The screening indoor radon and preliminary study of indoor thoron concentration levels in Kuwait. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 181, Issue 3, October 2018, pp. 246–254, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy020>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/181/3/246/4846334>.
- Kall, B., Z. Donne, M. Rasolonirina, N. Rabesiranana, G. Rambolamanana, 2014 : Contribution à l'étude de la radioactivité gamma du sable des plages de Ramena et d'Orangea, Antsiranana, Madagascar. *Afrique Science*, Vol.10, N°4 (2014), 1, pp. 23-35 novembre 2014, <http://www.afriquescience.info/document.php?id=3961>. ISSN : 1813-548X. <http://www.afriquescience.info>.
- Kavasi, N., T. Vigh, A. Sorimach, T. Ishikawa, S. Tokonami, M. Hosoda, 2010: Effective dose of miners due to natural radioactivity in a manganese mine in Hungary. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 141, Issue 4, October 2010, pp. 432–435, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq253>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/141/4/432/1675514>.

- Kozak, K., J. Mazur, B. Kozowska, M. Karpinska, T.A. Przylibski, K. Mamont-Ciesla, D. Grzadziel, O. Stawarz, M. Wysocka, J. Dorda, A. Z'ebrowski, J. Olszewski, H. Hovhannisyann, M. Dohojda, J. Kapala, I. Chmielewska, B. Klos, J. Jankowski, S. Mnich, R. Kolodziej, 2011: Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 69, Issue 10, October 2011, pp. 1459-1465. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.05.018>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969804311003034>.
- Kougblenou, C., S. Azonbakin, M. Accrombessi, B. Aguemon, M. Adjagba, B. Awede, M.P. Aina, R.B. Darboux, A. Laleye, 2018 : Evaluation du risque de génotoxicité de l'eau de la rivière Okpara à Kika au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 12(3) : 1298-1308, June 2018. ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print). <http://ajol.info/index.php/ijbcs>, <http://indexmedicus.afro.who.int>.
- Kpordzro R., J. K. Gbadago, A. B. Andam, O. K. Adukpo, F. Otoo, I. Opoku-Ntim, M. Abubakar, E. Amoatey, 2022: Assessment of Seasonal Radon Concentration in Dwellings and Soils in Selected Areas in Ga East, Greater Accra Region of Ghana. *Hindawi, Journal of Environmental and Public Health*, Volume 2022, 9 pages. Article ID: 6600919. <https://doi.org/10.1155/2022/6600919>. <https://www.hindawi.com/journals/jep/2022/6600919/>.
- Kranrod, C., Y. Tamakuma, M. Hosoda, S. Tokonami, 2020: Importance of Discriminative Measurement for Radon Isotopes and Its Utilization in the Environment and Lessons Learned from Using the RADUET Monitor. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17(11), 4141, pp. 1-15. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114141>. <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/11/4141>.
- Kümmel, M., C. Dushe, S. Müller, K. Gehrcke, 2014: Outdoor <sup>222</sup>Rn-concentrations in Germany: Part 1. Natural background. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 132, June 2014, pp. 123-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.012>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X14000150>.
- Kümmel, M., C. Dushe, S. Müller, K. Gehrcke 2014: Outdoor <sup>222</sup>Rn-concentrations in Germany: Part 2. Former mining areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 132, June 2014, pp. 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.011>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X14000149>.
- Lane-Smith, D., Schubert, M., 2020: Absolute Measurement of Thoron in Surface Waters. *Water* 2020, 12(11), 3083; <https://doi.org/10.3390/w12113083>. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/3083>.
- Máduar, M.F., M.P. Campos, B.P. Mazzilli, F.L. Villaverde, 2011: Assessment of external gamma exposure and radon levels in a dwelling constructed with phosphogypsum plates. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 190, Issues 1–3, 15 June, pp. 1063-1067. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.019>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389411003220>.
- Magalhaes, M.H., E.C.S. Amaral, I. Sachett, E.R.R. Rochedo, 2003: Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 67, Issue 2, pp. 131-143. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00175-3](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00175-3). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X02001753>.
- Manish, K., A. Kaushal, B. K. Sahoo, A. Sarin, R. Mehra, R. Jakhu, A. Bhalla, N. Sharma, 2017: Measurement of uranium and radon concentration in drinking water samples and assessment of ingestion dose to local population in Jalandhar district of Punjab, India. *Sage Journals*, Volume 28, Issue 5, pp. 611-618. <https://doi.org/10.1177/1420326X17703773>. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1420326X17703773>.
- Modibo O. B., Saïdou, J. E. N. Nkoulou, T. Suzuki, H. Kudo, M. Hosoda, L. C. O. Owono, S. Tokonami, 2019: Occupational Natural Radiation Exposure at the Uranium Deposit of Kitongo, Cameroon. *RADIOISOTOPES*, Volume 68, Issue 9, pp. 621-630. Online ISSN: 1884-4111. Print ISSN: 0033-8303. ISSN-L: 0033-8303. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.68.621>. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/68/9/68\\_680904/article-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/68/9/68_680904/article-char/ja/).
- Moreno, V., J. Bach, Ll. Font, C. Baixeras, M. Zarroca, R. Linares, C. Roque, 2015: Soil radon dynamics in the Amer fault zone: An example of very high seasonal variations. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 151, Part 1, January 2016, pp. 293-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.018>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X1530134X>.
- Mrdakovic Popic, J., C. R. Bhatt, B. Salbu, L. Skipperud, 2011: Outdoor <sup>220</sup>Rn, <sup>222</sup>Rn and terrestrial gamma radiation levels: investigation study in the thorium rich Fen Complex, Norway. *J. Environ. Monit.*, 2012, 14, pp. 193-201. DOI: 10.1039/C1EM10726G (Paper). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2012/em/c1em10726g>.
- Nguyen, D. C., E. Chrusciel, Q. Prokolski, 2005: Factors controlling measurements of radon mass exhalation rate. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 82, Issue 3, 2005, pp. 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.02.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X05000597>.
- Nikezic, D., Yu, K. N., 2005: Are radon gas measurements adequate for epidemiological studies and case control studies of radon-induced lung cancer? *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 113, Issue 2, 18 April 2005, pp. 233–235, <https://doi.org/10.1093/rpd/nch451>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/113/2/233/1597331>.
- Nikolov, J., I. Stojković, N. Todorović, B. Tenjović, S. Vuković, J. Knežević, 2018: Evaluation of different LSC methods for <sup>222</sup>Rn determination in waters. *Applied Radiation and Isotopes* 142, pp. 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.09.013>.

- Nkoulou, J. E. Ndjana., L. N. Engola, Saïdou, H. Masahiro, D. Bongue, S. Takahito, K. Hiromi, M. G. K. Njock, S. Tokonami, 2019: Simultaneous indoor radon, thoron and thoron progeny measurements in betare-oya gold mining areas, eastern Cameroon. Radiation Protection Dosimetry, Volume 185, Issue 3, December 2019, pp. 391–401, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz026>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/185/3/391/5420714>.
- Nuccetelli, G., F. Leonardi b, R. Trevisi, 2020: Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the european database analysis. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 225, December 2020, 106438. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106438>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X20303696>.
- Oluwasayo, P. A., Margaret K. A., 2020: Determination of radon exhalation rates from soil around buildings in Lagos environments using passive measurement technique. Journal of Environmental Health Science and Engineering volume 18, pp. 129–135 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00446-3>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40201-020-00446-3>.
- Onjefu, S.A., N.N. Johannes, J. Abah, L.A. Onjefu, S. Mwiya, 2022: Natural radioactivity levels and evaluation of radiological hazards in Usakos marble, Erongo region, Namibia. Volume 20, No 2 International Journal of Radiation Research, April 2022; 20(2): pp. 403-409. DOI: 10.52547/ijrr.20.2.2. [https://www.researchgate.net/profile/Leonard-Onjefu/publication/361565274\\_Natural\\_radioactivity\\_levels\\_and\\_evaluation\\_of\\_radiological\\_hazards\\_in\\_Usakos\\_marble\\_Erongo\\_region\\_Namibia/links/62cc81a2cab7ba7426e4cf3c/Natural-radioactivity-levels-and-evaluation-of-radiological-hazards-in-Usakos-marble-Erongo-region-Namibia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Leonard-Onjefu/publication/361565274_Natural_radioactivity_levels_and_evaluation_of_radiological_hazards_in_Usakos_marble_Erongo_region_Namibia/links/62cc81a2cab7ba7426e4cf3c/Natural-radioactivity-levels-and-evaluation-of-radiological-hazards-in-Usakos-marble-Erongo-region-Namibia.pdf).
- Piccolo, J.L., D. Pressyanov, P. Blanchis, M. Barbier, N. Michielsen, D. Grassin, V. Voisin, K. Turek, 2000: A radon-222 traceability chain from primary standard to field detectors. Applied Radiation and Isotopes, Volume 52, Issue 3, March 2000, pp. 427-434. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00190-6](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00190-6). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969804399001906>.
- Poojitha, C. G., B. K. Sahoo, K. E. Ganesh, T.S. Pranasha, B. K. Sapra, 2020: Assessment of radon and thoron exhalation from soils and dissolved radon in ground water in the vicinity of elevated granitic hill, Chikkaballapur District, Karnataka, India. Radiation Protection Dosimetry, Volume 190, Issue 2, June 2020, pp. 185–192, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa099>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/190/2/185/5871198>.
- PR-Bénin (Présidence de la République du Bénin), 2018. Loi n°2017-29 portant sûreté radiologique et sécurité nucléaire en République du Bénin du 15 mars 2018. Assemblée Nationale du Bénin, 20 p. <https://sgg.gouv.bj/doc/loi-2017-29>. <https://ansr.gouv.bj/wp-content/uploads/2021/04/Loi-nucleaire.pdf>.
- Rani, S., S. Kansal, A. K. Singla, R. Mehra, 2021: Radiological risk assessment to the public due to radon in water in Barnala District, Punjab, India. Environmental Geochemistry and Health volume 43, pp. 5011–5024 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01012-y>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-021-01012-y>.
- Richona, P., F. Perrier, J-C. Sabroux, M. Triquea, C. Ferry, V. Voisin, E. Pili, 2005: Spatial and time variations of radon-222 concentration in the atmosphere of a dead-end horizontal tunnel. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 78, Issue 2, 2005, pp. 179-198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.05.001>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X04001675>.
- Robertson, A., J. Allen, R. Laney, A. Curnow, 2013: The Cellular and Molecular Carcinogenic Effects of Radon Exposure: A Review. Int. J. Mol. Sci. 2013, 14(7), 14024-14063; <https://doi.org/10.3390/ijms140714024>. <https://www.mdpi.com/1422-0067/14/7/14024>.
- Rottger, A., A. Honig, R. Dersch, O. Ott, D. Arnold, 2010: A primary standard for activity concentration of <sup>220</sup>Rn (thoron) in air. Applied Radiation and Isotopes, Volume 68, Issues 7–8, July–August 2010, pp. 1292-1296. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.01.004>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969804310000205>.
- Saïdou, Y.F. Abdourahimi, T. Siaka, O. Bouba, 2014: Indoor radon measurements in the uranium regions of Poli and Lolodorf, Cameroon. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 136, October 2014, pp. 36-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.001>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X14001325>.
- Saïdou., S. Tokonami, M. Janik, B. G. Samuel, Abdourahimi, N. Nkoulou, J. Emmanuel, 2015: Radon-thoron discriminative measurements in the high natural radiation areas of southwestern Cameroon. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 150, December 2015, pp. 242-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X15301016>.
- Saïdou., S. Tokonami, M Hosodad, Y. F. T. Siaka, N. Nkoulou, J. Emmanuel, N. Akata, O. B. B. Modibo, J. Penaye, 2019: Natural radiation exposure to the public in the uranium bearing region of Poli, Cameroon: From radioactivity measurements to external and inhalation dose assessment. Journal of Geochemical Exploration, Volume 205, October 2019, 106350. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106350>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674218305296>.
- Sanada, T., 2021: Measurement of Indoor Thoron Gas Concentrations Using a Radon-Thoron Discriminative Passive Type Monitor: Nationwide Survey in Japan. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18(3), 1299; <https://doi.org/10.3390/ijerph18031299>. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/3/1299>.



- Schubert, M., J. Kopitz, S. Chalupnik, 2014: Sample volume optimization for radon-in-water detection by liquid scintillation counting. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 134, August 2014, pp. 109-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.005>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X14000848>.
- Sidique, E., S. H. A. Hassan, M. M. Dawoud, 2022: Natural Radioactivity Measurements and Radiological Hazards Evaluation for Some Egyptian Granites and Ceramic Tiles. *Sustainability* 2022, 14(21), 14611. <https://doi.org/10.3390/su142114611>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14611>.
- Sulekha Rao, N., Sengupta, D., 2010: Seasonal levels of radon and thoron in the dwellings along southern coastal Orissa, Eastern India. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 68, Issue 1, January 2010, pp. 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.09.026>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969804309005636>.
- Takoukam, S. S. D., Saïdou., S. Tokonami, H. Masahiro, S. Takahito, K. Hiromi, B. Oumarou, 2019: Simultaneous measurements of indoor radon and thoron and inhalation dose assessment in Douala City, Cameroon. *Isotopes in Environmental and Health Studies* Volume 55, 2019 - Issue 5, pp. 499-510. <https://doi.org/10.1080/10256016.2019.1649258>. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10256016.2019.1649258>.
- Turhan, Ş., A. Kurnaz, M. Karataşlı, 2021: Evaluation of Natural Radioactivity Levels and Potential Radiological Hazards of Common Building Materials Utilized in Mediterranean Region, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research* volume 29, pp. 10575–10584 (2022) <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-500215/v1>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16505-7>.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR. Volume I: Sources, 659 p. United Nations Publication, Sales No. E.00.IX.3. ISBN: 92-1-142238-8. United Nations. New York. [https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf).
- Yakut, H., E. Tabar, Z. Zenginler, N. Demirci, F. Ertugral, 2013: Measurement of <sup>222</sup>Rn concentration in drinking water in sakarya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 157, Issue 3, December 2013, pp. 397–406, <https://doi.org/10.1093/rpd/nct157>. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/157/3/397/1603250>.
- Yamada, Y., Q. Sun, S. Tokonami, S. Akiba, W. Zhuo, C. Hou, S. Zhang, T. Ishikawa, M. Furukawa, K. Fukutsu, H. Yonehara, 2006: Radon–thoron discriminative measurements in Gansu Province, China, and their implication for dose estimates. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A - Current Issues - Volume 69*, 2006 - Issue 7-8, pp. 723-734. ISSN: 1528–7394 print / 1087–2620 online. <https://doi.org/10.1080/15287390500261265>. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15287390500261265>.
- Yongling, Y., H. Morishima, T. Shen, T. Koga, L. Wei, T. Sugahara, 2021: Measurements of Rn-222, Rn-220 and Their Decay Products in the Environmental Air of the High Background Radiation Areas in Yangjiang, China. *Journal of Radiation Research*, Volume: 41, Issue: Suppl. March 2000, pp. 25-30. DOI: 10.1269/jrr.41.S25. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8163701>.