

Évaluation du risque radiologique environnemental associé aux rejets solides industriels contenant des radionucléides naturels (NORMs): Application de l'approche graduée au cas de la carrière de l'UCK

[Environmental radiological risk assessment associated with industrial solid releases containing naturally occurring radionuclides (NORMs): Application of the graded approach to the case of the UCK quarry]

Kayembe Kitenge Sylva, Faila Lutina Inès, Mpiana Kasela Olivier, Mutomb Kapend Habacuc, Katubilwa Katele Christian, and Malala Kitenge Pascal

Université de Lubumbashi, RD Congo

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Environmental radiological assessment is an essential process for characterizing human exposure levels in order to limit or reduce the risks associated with exposure to ionizing radiation. The approach involves identifying the transfer pathways of radionuclides and assessing the potential risks to ecosystems and nearby populations. To optimize the use of resources and adapt the level of analysis to the degree of radiological risk, international radiation protection organizations recommend the application of the graded approach in radiological impact studies. This approach consists of adjusting the depth and complexity of the assessment according to the potential significance of the radiological impacts associated with a given activity.

Indeed, after energy and efficiency calibration, the peaks identified and corrected for background radiation show that the calculated mass activities obtained after peak integration do not indicate any abnormal levels.

Thus, the results of this study will contribute to establishing a database for environmental radiological monitoring.

KEYWORDS: environment, artisanal activity, mass activity, risk index, radium equivalent.

RESUME: L'évaluation radiologique environnementale constitue un processus essentiel pour caractériser les niveaux d'exposition de l'homme afin de limiter ou réduire les dangers liés à l'exposition aux rayonnements ionisants. Cette démarche implique d'identifier les voies de transfert des radionucléides et évaluer les risques potentiels pour les écosystèmes et les populations riveraines. Afin d'optimiser l'utilisation des ressources et d'adapter le niveau d'analyse au degré de risque radiologique, les organismes internationaux de radioprotection recommandent l'application de l'approche graduée dans les études d'impact radiologique. Cette approche consiste à ajuster la profondeur et la complexité de l'évaluation en fonction de l'importance potentielle des impacts radiologiques associés à une activité quelconque.

En effet, après un étalonnage en énergie et en efficacité, les pics trouvés soustraits du bruit de fond, les activités massiques calculées après intégration des pics ne démontrent pas un niveau anormal.

Ainsi, les résultats de cette étude permettront de constituer une base des données pour la surveillance radiologique environnementale.

MOTS-CLEFS: environnement, activité artisanale, activité massique, indice de risque, radium équivalent.

1 INTRODUCTION

Les activités minières industrielles, notamment celles liées au traitement des minerais, peuvent entraîner la mobilisation et la concentration de radionucléides naturellement présents dans la croûte terrestre (NORMS). Ces radionucléides naturels, comprennent

essentiellement des isotopes appartenant aux séries de l'uranium-238, du Thorium -232 et du Potassium-40. Lorsque ces derniers sont concentrés ou redistribués par des procédés industriels, ils peuvent devenir une source potentielle d'exposition radiologique pour l'homme et pour l'environnement.

Les activités liées à l'extraction, au concassage et au traitement des minerais peuvent favoriser une accumulation des fortes concentrations en radionucléides naturels dans une zone donnée. Cependant, la dispersion de ces substances dans le sol, les eaux de surface et les sédiments peuvent entraîner un accroissement du niveau de radioactivité dans l'environnement, soulevant ainsi des préoccupations liées à la radioprotection et la gestion durable des ressources naturelles.

Dans ce contexte, la présente étude vise à réaliser une évaluation radiologique sur des rejets miniers pouvant contenir des radionucléides naturels en appliquant le principe de l'approche graduée. L'étude prend comme cas d'application la carrière de l'UCK, où les activités d'exploitation artisanale peuvent contribuer à la mobilisation de radionucléides naturels dans l'environnement. L'objectif est de caractériser le niveau de radioactivité associée aux rejets et d'évaluer les implications en matière de radioprotection environnementale.

Les résultats de cette étude devraient contribuer à une meilleure compréhension de l'impact radiologique potentiel des activités minières antérieures associées aux NORMs et fournir des éléments scientifiques utiles pour la gestion et la surveillance radiologique des sites industriels.

Ainsi, un ensemble de 3 échantillons pris aléatoirement ont été prélevés dans la carrière, ils ont été concassés, broyés et pulvérisés puis conditionner dans une géométrie adaptée et analysés au spectromètre gamma.

L'analyse des résultats obtenus révèle une activité typique pour un sol minier, qui est légèrement supérieure à la moyenne mondiale mais n'est pas anormal dans un contexte géologique à tendance uranifère.

2 APERÇU SUR LES ACTIVITÉS MINIÈRES ARTISANALES

L'exploitation minière artisanale et à petite échelle est un secteur complexe et diversifié dans une grande partie du monde en développement. C'est une activité qui fait vivre des milliers de personnes en République Démocratique du Congo notamment dans la région du Katanga. Ce secteur aide donc à réduire la pauvreté par la création d'emplois pour une nombreuse main d'œuvre inemployée ou sous employée, par l'effet multiplicateur de sa croissance, par la stabilité économique et sociale qui résulte de l'accès à l'infrastructure et par les avantages résultant de l'emploi des femmes. A Kolwezi, capitale mondiale du cobalt, les creuseurs artisanaux extraient les minerais de cobalt et cuivre dans des conditions difficiles, souvent au péril de leur vie. Ces activités faites à base des moyens rudimentaires et en utilisant des méthodes et procédés traditionnels, présentent néanmoins des risques sanitaires importants notamment des risques d'accidents graves dus aux affaissements de sol. Ces creuseurs font face à une situation due au manque de ZEA ce qui les oblige de se recoquiller sur les sites d'exploitations des rejets industriels d'autre entreprise. Il est indiqué que la plupart des sites d'extraction en RDC ne disposent pas des équipements de protection individuelle, de l'expertise technique et des systèmes de gestion adéquats pour garantir la santé et la sécurité physique et le bien-être mental des travailleurs. D'où les conditions de travail sont mauvaises et souvent très dangereuses. Dans certaines mines la présence des minerais radioactifs augmente les risques pour la santé des travailleurs, ainsi que de l'environnement.



Fig. 1. Activité minière artisanale

3 RADIOACTIVITÉ NATURELLE

L'environnement contient un certain nombre d'éléments naturellement radioactifs, appelés radionucléides.

Certains de ces radionucléides, dits « primordiaux » sont présents dans le sol depuis la formation de la terre. Les principaux sont l'uranium-238, l'uranium-235, le thorium-232 et le potassium-40. On les retrouve dans le sol et dans les matériaux de construction, en proportion variables selon la composition géologique de chaque région.

L'uranium-238, l'uranium-235 et le thorium-232 se transforment progressivement en donnant naissance à d'autres radionucléides, appelés produits de filiation ou descendants. Ces transformations successives sont appelées « désintégrations » et l'ensemble de transformation successives constitue une « chaîne de désintégration ».

Au cours de leur désintégration, ces radionucléides naturels émettent des particules alpha ou bêta, et dans certains cas des rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements correspondent à l'énergie libérée par les atomes sous forme d'ondes électromagnétiques (rayonnement gamma ou X) ou de particules (neutron, particules alpha ou bêta). Les êtres humains sont aussi exposés en permanence à des sources naturelles de rayonnements ionisants provenant notamment du sol, de l'eau, des aliments et du tabac, des rayons cosmiques etc. une part importante de cette exposition est liée aux nombreuses substances radioactives présentes dans le sol.

4 RISQUES LIÉS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Les rayonnements ionisants interagissent avec les constituants fondamentaux de la matière vivante en provoquant des transformations chimiques.

Lorsqu'ils traversent les tissus biologiques, ils peuvent ioniser les atomes et les molécules, c'est-à-dire arracher les électrons, ce qui perturbe le fonctionnement normal des cellules.

A faibles doses, les rayonnements ionisants peuvent déjà accroître le risque d'effets sanitaires. A des doses plus élevées, des effets sanitaires aigus tel que des brûlures cutanées, des lésions tissulaires ou des syndromes d'irradiation aiguë peuvent se produire lorsque les doses de rayonnements dépassent un certain seuil. Ces effets dits déterministes surviennent généralement au de-là d'un certain niveau de dose spécifique et leur gravité augmente avec la dose reçue.

La sensibilité aux rayonnements ionisants varie selon plusieurs facteurs notamment aussi de l'âge, l'état physiologique et la radiosensibilité des tissus. Plus un individu est jeune, plus il est sensible, en raison de la forte activité de division cellulaire. Le fœtus constitue un groupe particulièrement sensible, ce qui justifie des mesures de protection spécifiques pour les femmes enceintes. Certains organes et tissus, comme la moelle osseuse, les gonades ou la thyroïde, présentent également une radiosensibilité accrue.

Le risque lié aux rayonnements dépend non seulement de la dose reçue, mais de la durée et de la fréquence d'exposition. L'effet peut être cumulatif: une exposition répétée, même à des faibles doses, peut augmenter la probabilité d'apparition d'effets à long terme. Ces effets dits « stochastiques », tels que les cancers ou certaines anomalies génétiques, peuvent se manifester plusieurs années après l'exposition et ne présentent pas de seuil clairement établi: leur probabilité augmente avec la dose.

Sur le plan biologique l'ionisation de l'eau « principale composante des cellules » conduit à la formation des radicaux libres très réactifs. Ces espèces chimiques peuvent endommager des macromolécules essentielles, notamment l'ADN, les protéines et les membranes cellulaires. Les altérations de l'ADN peuvent entraîner des mutations si les mécanismes de réparation cellulaire ne corrigent pas correctement les lésions. Ces mutations peuvent être à l'origine de cancers ou, lorsqu'elles affectent les cellules germinales, être transmises à la descendance.

L'ensemble de ces risques justifie la mise en œuvre des principes fondamentaux de radioprotection, notamment la justification des pratiques, l'optimisation des expositions (principe ALARA: maintenir les doses aussi faibles que raisonnablement possible) et le respect des limites réglementaires de dose afin de protéger les travailleurs, les patients et le public.

5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 PARAMÈTRES D'ANALYSE DU SPECTROMÈTRE GAMMA

- La mesure de l'échantillon de rejet minier a été effectuée par spectrométrie gamma à l'aide d'une chaîne de détection Germanium de haute pureté caractérisé par son efficacité de 30% et sa meilleure résolution en énergie: 1.8 keV à une énergie de 1332.5 keV.
- Les résultats d'analyse des principaux émetteurs des familles ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , et ^{40}K pour les échantillons sous analyse, sont rapportés dans les tableaux suivant. Les activités des radioéléments sont ramenées au jour de l'analyse.

5.2 RÉSULTATS D'ANALYSE

Note importante: l'activité massique de certains radionucléides des chaînes de désintégration naturelle ne peuvent pas être directement mesurés par spectrométrie gamma, mais seulement par le mesurage de leurs descendants. A l'instar l'activité massique du radium-226 qui a été déterminée après un scellage de l'échantillon pendant 21 jours, afin de piéger le radon-222 qui produit le déséquilibre de la chaîne U-238.

Temps de comptage:

- UCK1.CNF: 92923.97 (s)
- UCK2.CNF: 92722.46 (s)
- UCK3.CNF: 93345.58 (s)

Masse moyenne d'échantillon: 120g

Tableau 1. Activités massiques des radionucléides dans différents les échantillons analysés

Radioélément	Activité massique (Bq/kg)		
	UCK1.CNF	UCK2.CNF	UCK3.CNF
<u>CHAÎNE U-238</u>			
Th-234	175,1 ± 10,9	175,1 ± 10,9	163,3 ± 9,7
Ra-226	99,4 ± 13,6	99,4 ± 13,6	100,1 ± 14,7
Pb-214	87,5 ± 2,3	87,5 ± 2,3	76,4 ± 1,7
Bi-214	90,2 ± 8,1	90,2 ± 8,1	97,5 ± 9,3
Pa-234m	237,8 ± 27,0	237,8 ± 27,0	245,6 ± 31,1
<u>CHAÎNE U-235</u>			
U-235	5,76 ± 1,45	5,76 ± 1,45	9,54 ± 1,7
<u>CHAÎNE Th-232</u>			
Ac-228	18,6 ± 1,9	18,6 ± 1,9	21,2 ± 2,1
Pb-212	24,5 ± 1,2	24,5 ± 1,2	36,1 ± 1,5
Bi-212	24,5 ± 1,2	24,5 ± 1,2	36,1 ± 1,5
Tl-208	20,55 ± 2,32	20,55 ± 2,32	18,3 ± 1,9
<u>POTASSIUM</u>			
K-40	257,33 ± 24,5	257,33 ± 24,5	227,45 ± 19,8

5.3 PARAMÈTRES DE RISQUE RADIOLOGIQUES

Tableau 2. Présentation des paramètres calculés à partir des différentes activités

ECHANTILLON	Indice de risque externe en Bq/kg	Indice de risque interne en Bq/kg	Radium équivalent en Bq/kg
UCK1.CNF	0.43	0.71	159.85
UCK2.CNF	0.40	0.67	150.67
UCK3.CNF	0.43	0.70	157.52

5.4 INTERPRÉTATIONS

Nous constatons des différents résultats présentés dans les tableaux ci-dessus:

- Il y'a équilibre séculaire, le Bismuth-214 et le Plomb-214 étant des descendants de l'Uranium-238 ont des activités massiques proches: par exemple 91,6Bq/kg pour le Plomb-214 et 93,3Bq/kg pour le Bismuth-214 pour UCK1.CNF;
- Les indices de risque externe et interne restent inférieurs à 1 qui est la limite réglementaire, d'où il n'y a pas de risque significatif c'est-à-dire que le risque interne au radon reste faible;
- L'indice équivalent radium (Radium Equivalent) est inférieur par rapport à la limite réglementaire de 370 Bq/Kg et ne représente aucun risque significatif d'irradiation externe, l'exposition est donc inférieure au seuil du public;
- L'activité massique de l'Uranium trouvée à partir de celle du radium-226 est supérieur à la moyenne mondiale de 35Bq/g selon UNESCAR;

- Cette activité est typique pour un sol minier mais n'est pas anormal dans un contexte géologique à tendance uranifère;
- L'activité massique du Thorium est conforme aux normes alors que celle du Potassium reste inférieure à la moyenne mondiale;

6 CONCLUSION

Cette étude a porté sur l'évaluation radiologique environnementale des rejets miniers. Un ensemble de 3 échantillons analysés par spectrométrie gamma et le laboratoire du CNESTEIN nous a servi de cadre pour réaliser cette étude. En analyse de ces résultats, nous constatons que ce sol présente une radioactivité naturelle légèrement supérieure à la moyenne mondiale en uranium, compatible avec un environnement minier, mais ne dépasse pas les limites internationales de radioprotection pour les matériaux naturels. Nous notons un enrichissement modéré en uranium et du potassium faible à modéré, cependant les indices radiologiques restent inférieurs aux seuils réglementaires.

Au long terme afin d'avoir une base des données beaucoup plus complète, nous suggérons une étude approfondie sur un vaste ensemble d'échantillons pouvant être beaucoup plus représentative du site d'étude en y associant des échantillons des sédiments du cours d'eau et de l'eau.

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). Radiation Protection and safety of radiation sources: international basic safety standards (BSS). IAEA safety standards series No. GSR part 3. Vienne: AIEA.
- [2] International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). The 2007 Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Annals of the ICRP, 37 (2-4).
- [3] Quantification des risques radiologiques associés aux radionucléides naturels dans les sols, le granite et les roches charnockitiques de certains champs de l'Ekiti, au Nigéria-PMC.
- [4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNESCAR). (2008). Sources and Effects of ionizing Radiation. Report to the General Assembly with scientific Annexes. New York: United Nations.
- [5] World Health Organization (WHO). (2016). Ionizing radiation, health effects and protective measures. Genève: OMS.
- [6] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). (2009). Ionizing radiation exposure of the population of the United States. NCRP report No. 160. Bethesda, MD.
- [7] Hall, E. J., & Giaccia, A.J. (2019). Radiobiologie for the radiologist (8th ed). Philadelphia: Wolters Kluwer.
- [8] Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). (2018). La radioactivité naturelle et ses effets sur la santé. Fontenay-aux-Roses: IRSN.
- [9] Cember, H., & Johnson, T.E. (2009). Introduction to health physics (4th ed.) New York: McGraw-Hill.
- [10] Fair Cobalt Alliance, la professionnalisation des sites miniers artisanaux. (2026).