

Évaluation des risques radiologiques liés à l'orpaillage : étude des sols et des denrées alimentaires de Touréla, Commune de Sanankoroba en 2024 au Mali.

Radiological risk assessment related to artisanal gold mining: study of soils and foodstuffs from Touréla, Sanankoroba Commune, Mali, 2024

A. Coulibaly¹, A.A.M. Dicko¹, K. Cissé², A.P. Diarra², O. Camara¹, S. Dembélé³

Auteur correspondant : Adama Coulibaly ; coulibalyadama274@yahoo.fr

1. Agence Malienne de Radioprotection (AMARAP), Bamako, Mali

2. Institut des Sciences Appliquées (ISA), USTTB, Bamako, Mali

3. Institut Géographique du Mali

RÉSUMÉ

introduction : L'orpaillage artisanal au Mali soulève des préoccupations environnementales et sanitaires, notamment liées à la radioactivité naturelle (NORM, Naturally Occurring Radioactive Materials).

Méthodes : Quinze échantillons (10 de sols et 5 de denrées alimentaires) ont été collectés à Touréla en juillet 2024. Après préparation, ils ont été analysés par spectrométrie gamma (NaI) à l'AMARAP. Les concentrations en activité (CA) des radionucléides U238, Th232 et K40 ont été mesurées et comparées aux limites réglementaires nationales et internationales.

Résultats : Aucune radioactivité artificielle n'a été détectée dans les échantillons. Les CA moyennes des NORM dans les sols étaient de 53,9Bq/kg (U238), 47,3 Bq/kg (Th232) et 204,1 Bq/kg (K40). Dans les denrées alimentaires, elles étaient de 16,7 Bq/kg (U238), 3,4 Bq/kg (Th232) et 182,9 Bq/kg (K40). Ces valeurs sont largement inférieures aux limites nationales (1000 Bq/kg pour U238 et Th232 ; 100 000 Bq/kg pour K40). La dose efficace annuelle estimée reste inférieure au seuil de 1 mSv/an, à l'exception du lait consommé par les nourrissons (>1 an), pour lequel la valeur approche la limite réglementaire nationale autorisée pour le public vivant à proximité d'une installation nucléaire ouradiologique.

Conclusions : Les niveaux de NORM observés dans les échantillons ne représentent pas un risque radiologique significatif pour la population de Touréla. Toutefois, une attention particulière doit être portée à la consommation de lait par les enfants, qui sont plus radio sensibles et ont une espérance de vie plus longue pour manifester les effets liés aux faibles doses (effets stochastiques).

Message de santé publique : Une surveillance radiologique régulière est recommandée afin de prévenir les impacts potentiels liés aux activités minières artisanales (orpaillage).

ABSTRACT

Background : Artisanal gold mining in Mali raises environmental and health concerns, particularly regarding natural radioactivity (NORM, Naturally Occurring Radioactive Materials).

Methods : Fifteen samples (10 soil and 5 foodstuffs) were collected in Touréla in July 2024. After preparation, they were analyzed by gamma spectrometry (NaI) at AMARAP. Activity concentrations (AC) of U238, Th232, and K40 radionuclides were measured and compared with national and international regulatory limits.

Results : No artificial radioactivity was detected in the samples. The mean ACs of NORM in soils were 53.9Bq/kg (U238), 47.3 Bq/kg (Th232), and 204.1 Bq/kg (K40). In foodstuffs, they were 16.7 Bq/kg (U238), 3.4 Bq/kg (Th232), and 182.9 Bq/kg (K40). These values are well below the national limits (1000 Bq/kg for U238 and Th232; 100,000 Bq/kg for K40).

The estimated annual effective dose remained below the threshold of 1 mSv/year, except for milk consumed by infants (>1 year), where the value approached the national regulatory limit authorized for the public living near a nuclear or radiological facility.

Conclusions : The levels of NORM measured in the samples do not represent a significant radiological health risk for the population of Touréla. However, special attention should be given to milk consumption by children, who are more radiosensitive and have a longer lifespan to manifest potential lowdose effects (stochastic effects).

Public health message : Regular radiological monitoring is recommended to prevent potential impacts associated with artisanal mining activities (gold panning).

INTRODUCTION

La radioactivité est ubiquiste, découverte en 1896 par Henri Becquerel, il est un phénomène physique par lequel les noyaux instables se transforment en noyaux atomiques plus stables [1]. D'origine naturelle, elle est soit tellurique (rayonnement terrestre) ou cosmique (rayonnement cosmique). Toutes les matières minérales contiennent naturellement des radionucléides dont les plus importants reconnus susceptibles de causer des problèmes de radioprotection sont l' ^{238}U , le ^{232}Th ainsi que leur filiation, et du ^{40}K [2]. L'orpaillage est une activité à petite échelle consistant à récupérer l'or contenu dans les gîtes primaires, alluvionnaires et éluvionnaires à l'intérieur d'un couloir d'exploitation artisanale par les procédés manuels ; en 2019, le nombre de sites d'orpaillage répertoriés était d'environ des centaines utilisant des milliers d'orpailleurs, qui font vivre des millions de personnes [3-4]. L'exploitation minière (industrielle ou artisanale) peut entraîner la libération de radionucléides naturels présents dans les formations géologiques souterraines, ce qui contamine le sol, l'eau, l'air et les denrées alimentaires. Cette contamination, peut avoir des conséquences graves si elle n'est pas contrôlée [4-5].

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact radiologique lié aux activités du site d'orpaillage de la localité de Touréla,

Commune de Sanankoroba, cercle de Kati sur la santé de la population de ladite localité. Les données générées dans cette étude permettront non seulement de connaître le niveau actuel de la radioactivité dans la localité (évaluation d'impact sur la population) mais elles pourront être utilisées comme données de référence pour d'autres études.

MÉTHODES

Au total, quinze 15 échantillons dont dix (10) échantillons de sol et cinq (05) de denrées alimentaires ont été collectés dans la localité de Touréla. Il est situé à 17 km du côté Ouest de la commune de Sanankoroba. Les échantillons ont tous été prélevés le 29 juillet 2024 et les lieux publics (CSCoM, école, marché) ont été privilégiés. Ils ont été séchés, broyés, tamisés et soigneusement pesés dans des géométries Marinelli de 250mL pour être analysés par gamma spectrométrie. Après un temps d'acquisition, le spectre de chaque échantillon a été analysé pour déterminer la CA des radionucléides. Les CA de l' ^{238}U et du ^{232}Th ont été évaluées en utilisant la moyenne des CA de leurs descendants (filles radioactives). Les CA obtenues dans les échantillons de sol ont été utilisées pour calculer le débit de dose absorbé \dot{D} ($\mu\text{Gy/h}$) et le débit de dose effective \dot{E} ($\mu\text{Sv/h}$) d'exposition aux rayonnements ionisants (radionucléides).

Les CA obtenues dans les échantillons de denrées alimentaires ont été utilisées pour calculer la dose effective annuelle \dot{E} ($\mu\text{Sv/an}$) dû à l'ingestion desdites denrées par tranche d'âge. Les résultats obtenus dans cette étude ont été comparés aux limites réglementaires nationales et internationales ainsi qu'aux résultats d'autres études similaires.

Considérations éthiques

Cette étude a été conduite dans le strict respect des dispositions éthiques et réglementaires en vigueur au Mali. L'autorisation de collecte et d'analyse des échantillons a été obtenue auprès des services de tutelle compétents. Les procédures d'échantillonnage et d'analyse ont été réalisées de manière à ne porter aucun préjudice à la population ni à l'environnement. Les résultats sont présentés de façon transparente, sans manipulation ni omission, et visent exclusivement à contribuer à l'amélioration de la santé publique et à la prévention des risques liés aux activités minières artisanales.

RÉSULTATS

Résultats de la radioactivité obtenue dans les échantillons de sol et des denrées alimentaires à Touréla

Les analyses ont porté sur dix échantillons de sols et cinq échantillons de denrées alimentaires collectés à Touréla. Trois types de radioactivité naturelle ont été mesurés :

l'uranium (U-238), le thorium (Th-232) et le potassium (K-40).

Dans les sols, les concentrations moyennes étaient de 53,9 Bq/kg pour l'uranium, 47,3 Bq/kg pour le thorium et 204,1 Bq/kg pour le potassium. Ces valeurs se situent très en dessous des limites fixées par la réglementation nationale (1000 Bq/kg pour U-238 et Th-232, 100 000 Bq/kg pour K-40). Elles dépassent légèrement certaines références internationales plus strictes (33 Bq/kg pour U-238 et 45 Bq/kg pour Th-232), mais restent dans une fourchette considérée comme faible et non dangereuse pour la santé.

Dans les denrées alimentaires, les niveaux de radioactivité étaient encore plus bas : 20,2 Bq/kg pour l'uranium, 3,9 Bq/kg pour le thorium et 182,9 Bq/kg pour le potassium. Ces résultats sont largement inférieurs aux limites nationales et internationales, ce qui indique que les aliments analysés ne présentent pas de risque radiologique significatif pour la consommation.

Résultats des débits de dose (\dot{D}) et (\dot{E}) obtenu dans les échantillons de sol

Les sols de Touréla ont été analysés pour mesurer la présence de trois types de radioactivité naturelle : l'uranium (U-238), le thorium (Th-232) et le potassium (K-40). Les valeurs obtenues montrent que ces éléments sont bien présents dans les sols, mais à des niveaux très faibles.

En moyenne, les doses de radiation calculées pour la population (0,04 $\mu\text{Sv/h}$) sont inférieures à la limite nationale fixée à 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ (tableau 2).

Risque d'exposition à la radioactivité naturelle dans les denrées alimentaires par tranche d'âge :

Risque d'exposition chez les enfants d'un an et plus à Touréla en 2024

En 2024, le risque d'exposition chez les enfants d'un an et plus à la radioactivité naturelle (en $\mu\text{Sv/an}$) dans l'année se caractérise par :

- le lait frais et l'arachide présentent les niveaux d'exposition les plus élevés, atteignant près de 1200 $\mu\text{Sv/an}$ pour le lait et environ 1000 $\mu\text{Sv/an}$ pour l'arachide ;
- les autres aliments dont le maïs, le mil et le riz donnent des expositions beaucoup plus faibles, donc inférieures à 400 $\mu\text{Sv/an}$.

Risque d'exposition chez les enfants âgés de 7 à 12 ans à Touréla en 2024

Les résultats montrent que :

- l'arachide est la denrée qui contribue le plus à l'exposition, avec une dose avoisinante 700 $\mu\text{Sv/an}$.

- les autres aliments – lait frais, maïs, riz et mil – présentent des expositions nettement plus faibles, comprises entre 200 et 400 $\mu\text{Sv/an}$.

Toutes ces valeurs restent inférieures à la limite nationale de 1000 $\mu\text{Sv/an}$ (1 mSv/an), ce qui indique que les enfants de 7 à 12 ans ne sont pas exposés à un risque radiologique préoccupant à travers leur alimentation.

Risque d'exposition chez la population de plus de 17 ans à Touréla en 2024

Les résultats montrent que chez ses personnes :

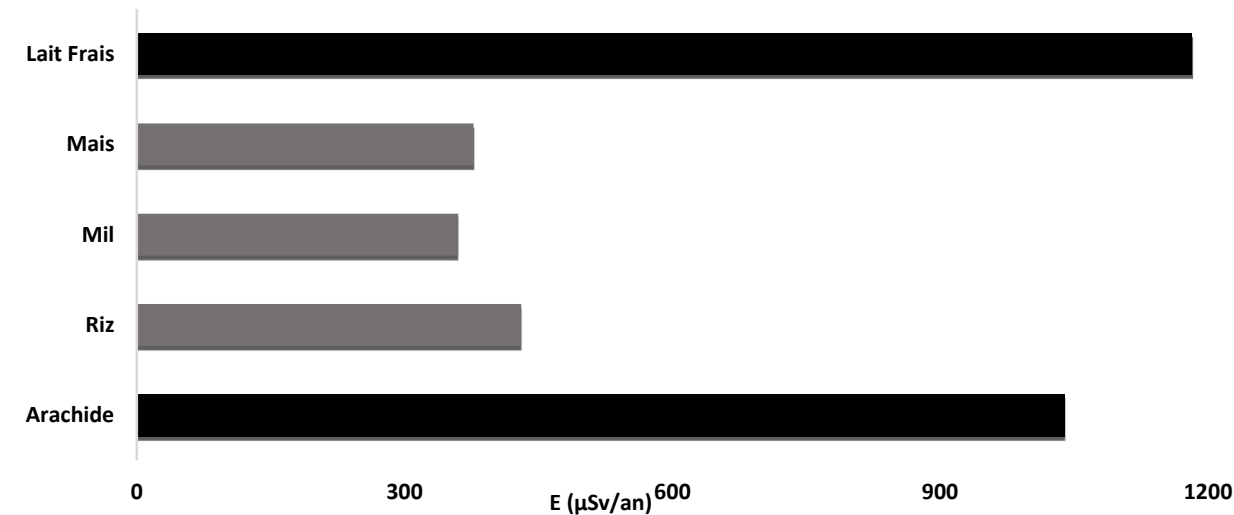
- l'arachide reste la principale source d'exposition, avec une valeur proche de 650 $\mu\text{Sv/an}$;
- les autres denrées comme le riz, le maïs, le lait frais et le mil se situent dans une fourchette plus basse, entre environ 150 et 300 $\mu\text{Sv/an}$;
- toutes les valeurs restent largement en dessous de la limite réglementaire nationale de 1000 $\mu\text{Sv/an}$ (1 mSv/an), ce qui signifie que les adultes de plus de 17 ans ne sont pas exposés à un risque radiologique préoccupant par leur alimentation.

Tableau 1 : CA des NORM dans les échantillons de sol et de denrées alimentaires à Touréla en 2024 au Mali

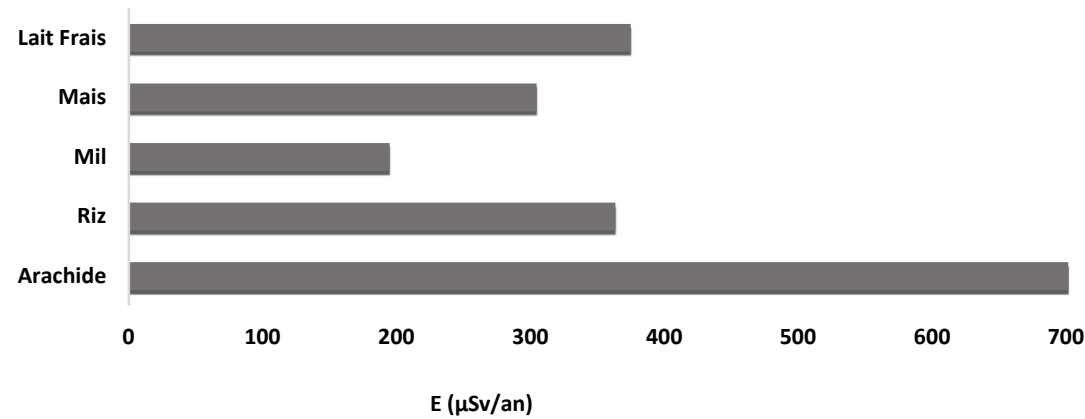
N°	Code des échantillons	CA (Bq/kg) des NORM								
		U-238			Th-232			K-40		
1. Sol										
1	So_Tour_01	43,98	±	0,42	35,62	±	0,57	114,23	±	2,43
2	So_Tour_02	64,97	±	0,54	53,95	±	0,72	191,73	±	3,12
3	So_Tour_03	81,48	±	0,64	71,97	±	0,89	264,37	±	3,83
4	So_Tour_04	54,24	±	0,79	43,85	±	0,64	256,02	±	3,69
5	So_Tour_05	30,17	±	0,69	48,01	±	0,69	275,96	±	4,04
6	So_Tour_06	67,07	±	0,55	54,33	±	0,73	183,80	±	3,08
7	So_Tour_07	56,50	±	0,47	44,17	±	0,62	178,89	±	2,89
8	So_Tour_08	55,25	±	0,46	45,47	±	0,62	132,54	±	2,42
9	So_Tour_09	44,96	±	0,43	40,04	±	0,67	206,45	±	3,27
10	So_Tour_10	39,85	±	0,42	35,82	±	0,66	237,08	±	3,70
	Moyenne sol	53,85	±	0,54	47,32	±	0,68	204,11	±	3,25
2. Denrées alimentaires										
11	DA_Tour_01	18,319	±	0,60	5,29	±	0,22	385,84	±	4,52
12	DA_Tour_02	28,212	±	1,024	2,64	±	0,15	104,03	±	2,14
13	DA_Tour_03	<CMD			<CMD			166,58	±	2,87
14	DA_Tour_04	13,54	±	0,71	3,78	±	0,212	105,22	±	2,19
15	DA_Tour_05	20,89	±	0,91	<CMD			152,90	±	2,75
	Moyenne denrées	20,241	±	0,81	3,90	±	0,19	182,92	±	2,89
	Limites nationales [6]	1 000			1 000			100 000		
	Limites Internationales [7]	33			45			412		

Tableau 2 : Débits de dose (Đ) et Ė dans les échantillons de sol à Touréla en 2024 au Mali

Code Echantillon	Activité spécifique (Bq/kg)			Calcul des doses			
	U-238	Th-232	K-40	Đ (μGy/h)	Ė _{in} (μSv/h)	Ė _{ex} (μSv/h)	Σ des Ė
So_Tour_01	43,98	35,62	114,23	0,05	0,03	0,01	0,03
So_Tour_02	64,97	53,95	191,73	0,07	0,04	0,01	0,05
So_Tour_03	81,48	71,97	264,37	0,09	0,05	0,01	0,06
So_Tour_04	54,24	43,85	256,02	0,06	0,03	0,01	0,04
So_Tour_05	30,17	48,01	275,96	0,05	0,03	0,01	0,04
So_Tour_06	67,07	54,33	183,80	0,07	0,04	0,01	0,05
So_Tour_07	56,50	44,17	178,89	0,06	0,03	0,01	0,04
So_Tour_08	55,25	45,47	132,54	0,06	0,03	0,01	0,04
So_Tour_09	44,96	40,04	206,45	0,05	0,03	0,01	0,04
So_Tour_10	39,85	35,82	237,08	0,05	0,03	0,01	0,03
Valeur Moyenne				0,06	0,03	0,01	0,04
Limite réglementaire nationale (μSv/h)						0,5	



Graphique 1 : Exposition annuelle à la radioactivité naturelle (en μSv/an) dans les échantillons de denrée alimentaire à Touréla en 2024



Graphique 2 : Exposition annuelle à la radioactivité naturelle (μSv/an) chez les enfants âgés de 7 à 12 ans à Touréla en 2024

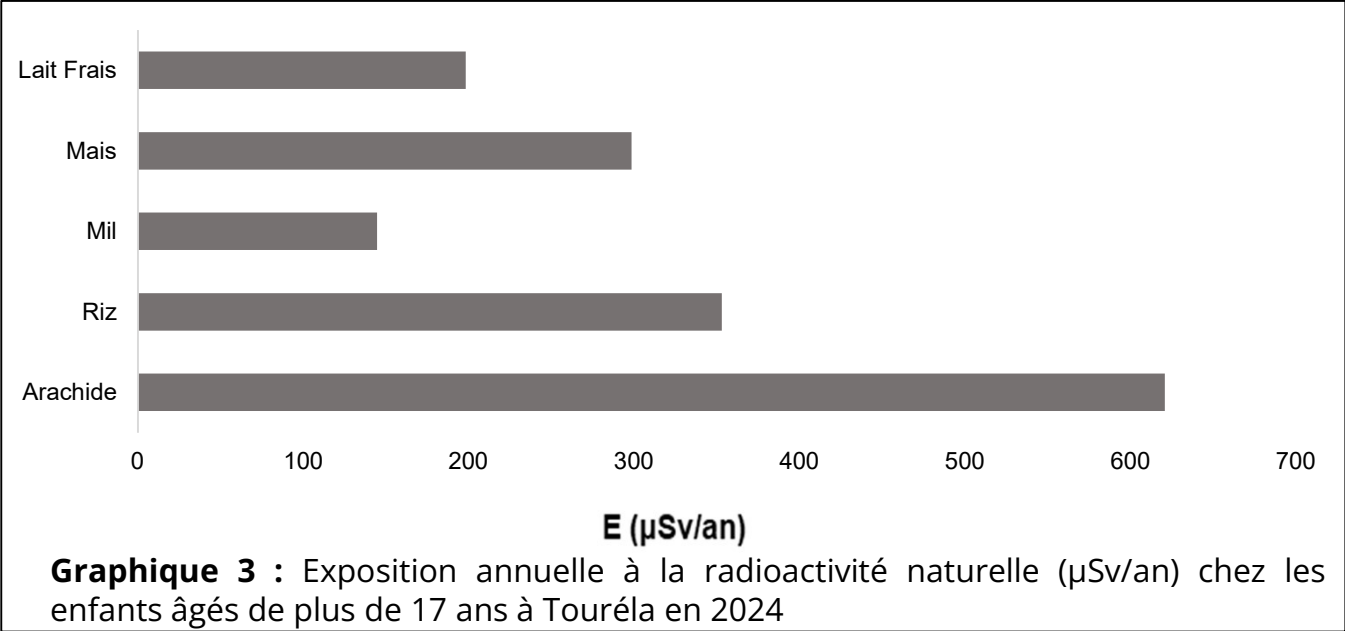


Tableau 4 : Comparaison des résultats obtenus à Touréla à ceux retrouvés au Mali et en Afrique

Continent	Pays/Localité	CA(Bq/kg) des NORM			Références
		U-238	Th-232	K-40	
Afrique	Egypte	37	18	320	[7]
	Mauritanie	8	12	28	[7]
	Kabala	27	37	179	[8]
	Ouenzzindougou	157	57	179	[9]
	Sabalibougou	68	57	259	[10]
	Sanankoroba	96	69	146	[11]
	Mountougoula	51	49	217	[12]
	Touréla	54	47	204	

DISCUSSION

La radioactivité naturelle fait partie de notre environnement depuis toujours. Les éléments comme l’uranium-238 (U-238), le thorium-232 (Th-232) et le potassium-40 (K-40) sont naturellement présents dans le sol, les roches et certains matériaux de construction. Leur concentration varie d’un pays à l’autre, reflétant la géologie locale.

Les doses d’exposition (sol) et d’ingestion (denrées alimentaires) obtenues dans cette étude sont inférieures à la limite

réglementaire nationale qui est de 1mSv/an ou 1000µSv/an ou 0,5µSv/heure exceptée pour le lait pour la tranche d’âge >1an (nourrissons) qui est légèrement supérieure à 1000µSv/an.

Les résultats montrent que le niveau de radioactivité naturelle (NORM) à Touréla sont comparables aux résultats obtenus à Kabala, Ouenzzindougou, Sabalibougou, Mountougoula et Sanankoroba au Mali.

Cependant ces résultats dépassent largement les moyennes de la Mauritanie et de l’Egypte (tableau 4).

Cette limite de 1mSv/an est la dose effective annuelle autorisée pour les membres du public vivant à proximité d'une installation nucléaire et radiologique. La Commission Internationale de Radioprotection (CIPR) dans sa publication 60 [13] a estimé que le risque de cancer pour une dose de 1mSv/an est de 10^{-5} soit 1 personne sur 100000. En majorité dans le cadre de cette étude, le risque de cancer est inférieur à cette valeur (1 personne sur 100000).

Limites de l'étude

Les conditions suivantes peuvent avoir des influences sur cette étude, notamment :

- la taille des échantillons (10 sols, 5 denrées alimentaires), ne permettent pas de couvrir tous les paramètres spatiotemporelle.
- l'analyse ponctuelle (un seul prélèvement en juillet 2024) ne reflète pas les variations saisonnières ou les évolutions futures liées aux activités minières.

CONCLUSION

L'analyse par spectrométrie gamma des échantillons dans cette étude n'a révélé aucune présence de la radioactivité artificielle. En revanche, les radionucléides naturels (NORM) à des concentrations largement inférieures aux limites réglementaires nationales ont été détectés dans presque tous les échantillons. Sur la base des résultats obtenus, les niveaux de la radioactivité naturelle (émetteur gamma) ne présentent pas de risque significatif pour la santé de la population de Touréla mais

plus d'attention doit être portée pour la consommation du lait par les nourrissons (âge >1an) qui sont les plus radiosensibles.

RECOMMANDATIONS

La Direction de l'AMARAP énumère les recommandations suivantes à l'endroit des autorités pertinentes et du grand public :

- mettre en œuvre un programme national régulier de surveillance radiologique de l'environnement autour des sites d'orpaillage ;
- créer un moyen de sensibilisation de la population sur les risques (effets) radiologiques sur la santé de la population suite à une exposition ou contamination liée à la radioactivité ;
- renforcer les capacités opérationnelles des laboratoires en charge de la surveillance de l'environnement.

Encadré résumé

Que sait-on déjà ?

L'orpaillage artisanal au Mali soulève des inquiétudes environnementales et sanitaires, notamment liées à l'exposition aux matériaux radioactifs naturels (NORM).

Qu'apporte cet article ?

Elle montre que la plupart des valeurs mesurées sont inférieures aux limites nationales, bien que certaines approchent ou dépassent les seuils internationaux de référence.

L'exposition alimentaire varie selon l'âge : les nourrissons sont les plus vulnérables, en particulier via la consommation de lait, alors que les adultes présentent une exposition beaucoup plus faible.

Implications pour la santé publique

Les niveaux actuels de radioactivité naturelle à Touréla ne représentent pas un risque radiologique majeur pour la population.

Toutefois, une vigilance particulière s'impose concernant la consommation de lait chez les nourrissons et l'arachide dans toutes les tranches d'âge.

Conflits d'intérêts :

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt financier, institutionnel ou personnel en lien avec le contenu de cet article.

REMERCIEMENTS :

Les auteurs remercient les directions de l'AMARAP, de l'ISA/USTTB et de l'IGM, ainsi que la population de Touréla pour leur collaboration lors des prélèvements.

RÉFÉRENCES :

- 1.ZAABAT. N. Chapitre II la radioactivité, page 2, 2023-2024 ;
- 2.KABORE O. Rapport de Projet de Fin de Formation page 6, 2016 ;
- 3.Nouveau code minier malien. TITRE I, CHAPITRE I, Article 1er, numéro 47 loi n°2023-040, 2023 ;
- 4.Alain F. Industrie extractives au MALI : une filière en or, publié sur jeuneAfrique.com, 2019 ;
- 5.Politique nationale du développement du

secteur minier et pétrolier, page 6 ;

- 6.Décret N°2014 0931 /P-RM du 31 Décembre 2014 fixant les règles relatives à la protection contre les rayonnements ionisants à la sûreté et à la sécurité des sources de rayonnements ionisants ;
- 7.UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation, volume I Sources report to the general Assembly Scientific Annexes A and B, report 2008
8. MAÏGA HS. Etude de la radioactivité ambiante dans la localité de Kabala, commune de Kalanban-coro. Institut des Sciences Appliquées (ISA). USTTB. Mali, page 41, 2022 ;
9. OUOLOGEM K. Radioactivité ambiante dans la localité de Ouezzindougou, commune de Mandé, cercle de Kati. Institut des Sciences Appliquées (ISA). USTTB. Mali, page 39, 2023 ;
10. KONE M. Radioactivité ambiante dans le quartier de Sabalibougou, commune V du district de Bamako. Institut des Sciences Appliquées (ISA). USTTB. Mali, page 38, 2024 ;
11. KEÏTA T. Evaluation de la radioactivité ambiante dans quelques sols autour des installations industrielles dans la ville de Sanankoroba, cercle de Kati, Institut des Sciences Appliquées (ISA). USTTB. Mali, page 35, 2024 ;
12. GUINDO B. Etude de la radioactivité du sol de la carrière « SOCARCO », commune de Mountougoula, cercle de Kati. Institut des Sciences Appliquées (ISA). USTTB. Mali, page 26, 2024 ;
13. ICRP 60, International Commission on Radiological Protection, publication 60, 1990.