

ACRO

Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest
Laboratoire indépendant d'analyse de la radioactivité

Association loi 1901 SIRET : 950 369 868 00027 APE : 743B
138 rue de l'Eglise – 14200 HEROUVILLE-SAINT-CLAIR

Tél. : (+33) 2.31.94.35.34 Fax : (+33) 2.31.94.85.31

Email : acro-laboratoire@wanadoo.fr

N°TVA : FR 62 950 369 868

www.acro.eu.org

Evaluation radiologique aux abords de trois anciennes mines d'extraction d'uranium du département de la Creuse - année 2007 -



*Action conduite dans le cadre de
l'Observatoire Citoyen de la Radioactivité*

1 Présentation

1.1 Contexte

Ce travail est consécutif à la demande de particuliers, riverains de mines d'extraction d'uranium désaffectées, qui s'interrogent sur les conséquences sur l'environnement de tels sites laissés visiblement à l'abandon.

Ce questionnement est notamment justifié par deux aspects distincts : présence d'un site d'extraction sur lequel des séparations chimiques ont été réalisées, et aménagement de certains sites en zone dédiée aux loisirs.

C'est donc au titre de notre démarche d'investigation citoyenne qu'a été gracieusement entrepris ce travail d'étude. Rappelons que l'une des caractéristiques du programme de surveillance de l'ACRO est l'implication du citoyen aux divers stades de l'évaluation environnementale, le rendant ainsi auteur et acteur de la surveillance et de son information. Aussi les demandeurs ont élaboré leur plan d'action de concert avec le laboratoire de l'ACRO et ont été formés aux techniques de prélèvements.

Cette pré-étude s'est articulée autour de deux campagnes principales de prélèvements, effectués respectivement les 17 avril et 23 juillet 2007. La première collecte d'échantillons a été entièrement assurée par les particuliers locaux ; la suivante a été effectuée en présence d'un *préleveur volontaire* venu de Caen pour l'occasion.

Une campagne complémentaire réalisée le 4 janvier 2008 a permis d'affiner la cartographie autour des sites de prélèvements.

Les sites ayant fait l'objet d'une investigation lors de ces campagnes se situent sur le territoire des communes de Domeyrot et de Gouzou (Creuse) ; l'essentiel des prélèvements a concerné la matrice sédimentaire, à savoir, des sols et/ou des vases.

Description des 3 sites :

- Site de Chaumailat (commune de Domeyrot) : Type d'exploitation : mine à ciel ouvert (1956-1982) exploité par SMJ (Société des Mines de Jouac) [1]. Le site de l'ancienne carrière a été remblayé et nivelé, il est actuellement entouré de parcelles boisées et de pâturages ; son accès est libre. Aucune utilisation particulière n'en est faite et le dispositif de surveillance est arrêté.
- Site de la Ribière (commune de Domeyrot) : Type d'exploitation : mine à ciel ouvert (1954-1984), exploité par SMJ, lixiviation statique en stalles avec fixation de l'uranium sur résines ; stockage de résidus issus du traitement statique [1]. Le site de la carrière possède un dénivelé très important, il se situe entre différentes parcelles boisées et des pâturages. Un terroir marque son point le plus bas qui est situé à moins de 10 mètres de la rivière le Verreau. Une délimitation du site existe mais son accès reste possible. Aucune utilisation particulière n'en est faite et le dispositif de surveillance est régi par l'arrêté préfectoral du 06/07/04 : air et eaux (3 ans).
- Site des Grands Champs (commune de Gouzou) : Type d'exploitation : mine souterraine (1986-1988) exploité par TCM (Total Compagnie Minière) [1]. Autour du terroir principal, sont présentes quelques zones marécageuses. Un plan d'eau a été aménagé pour une future base de loisirs, la pêche à la mouche est également pratiquée. Le dispositif de surveillance est arrêté.

[1] : Inventaire national des sites miniers d'uranium, programme MIMAUSA, IRSN, version 2 – Septembre 2007).

1.2 Localisation des sites étudiés

Figure 1 : Cartographie générale de la région



Figure 2 (carte & photos aériennes IGN) : détail des sites de Chaumailat et de La Ribière et des stations de prélèvements.

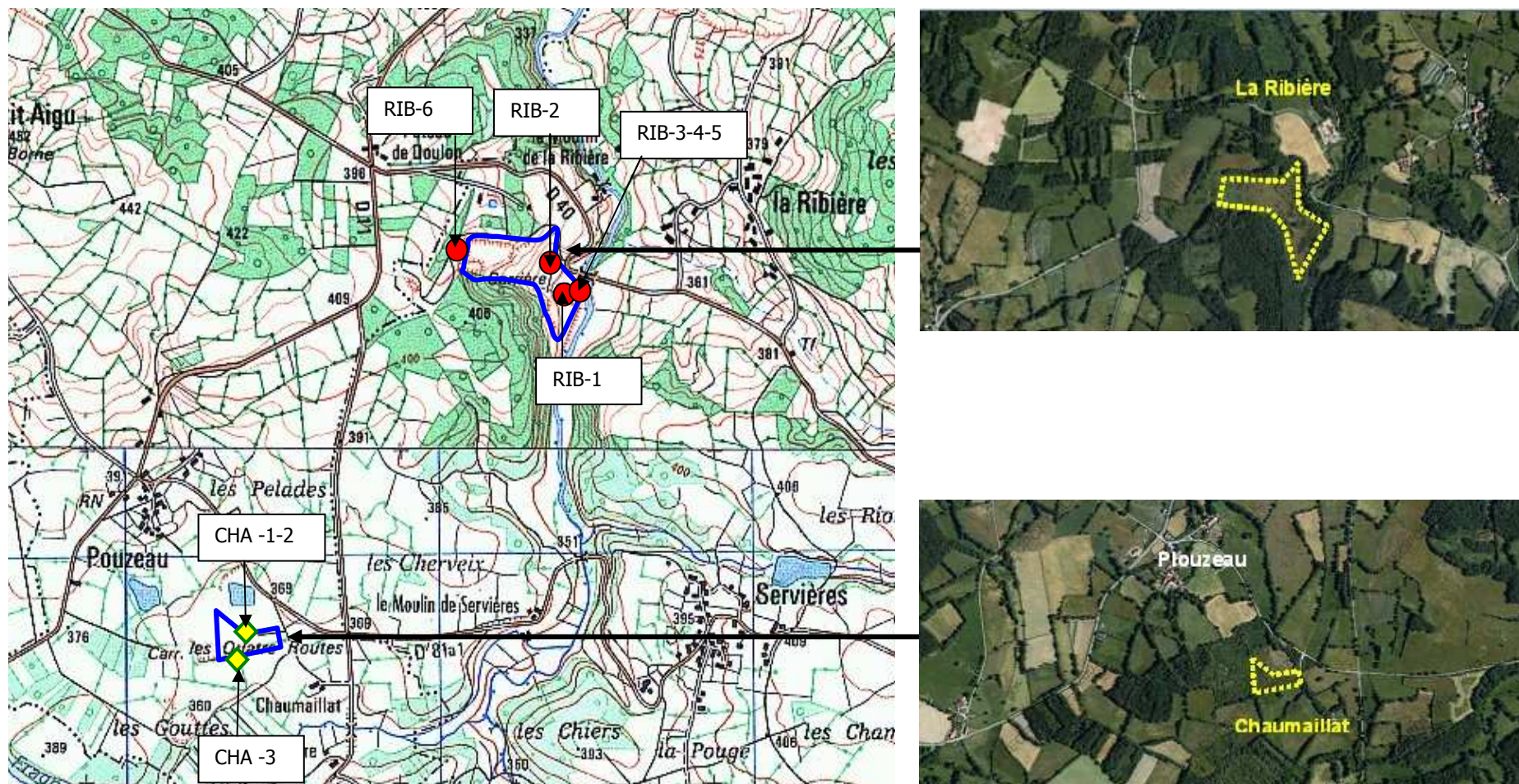
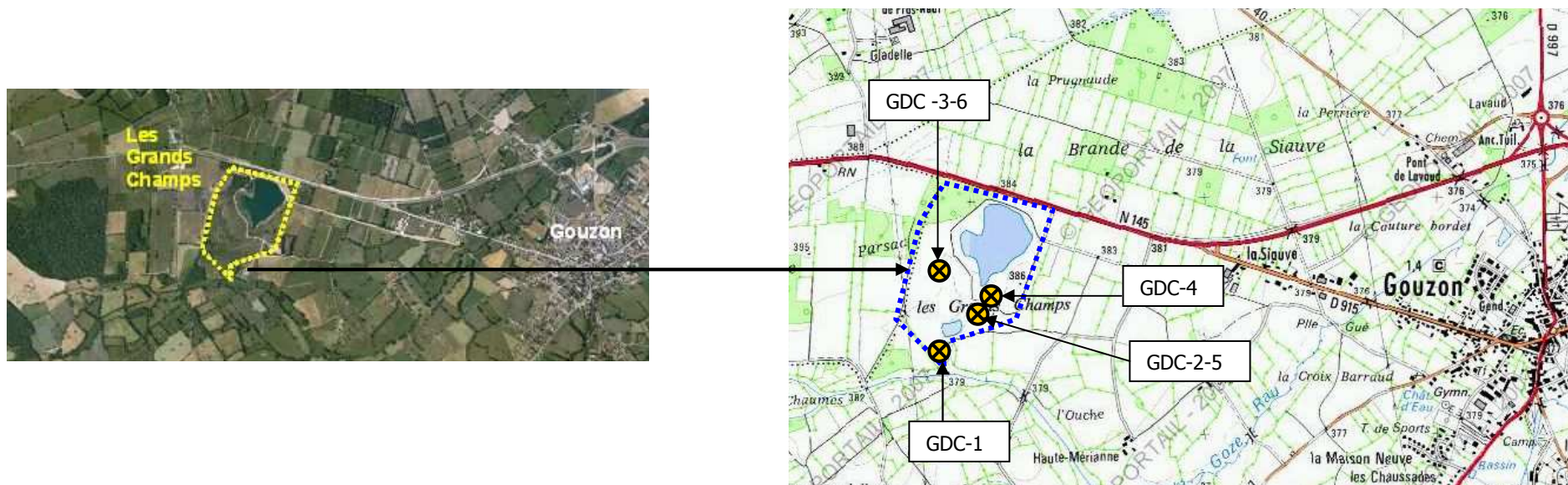


Figure 3 (carte & photo aérienne IGN) : détail du site des Grands Champs et des stations de prélèvements.



2 Détails des résultats obtenus par spectrométrie gamma

2.1 Campagne d'avril 2007 (tableau 1)

n° d'enregistrement interne	020507-0EV-01	020507-0EV-02	020507-0EV-03	020507-0EV-04	020507-0EV-05	020507-0EV-06	020507-0EV-07	
Catégorie	sols	sols	sols	vases/sol	vases	vases	sols	
Caractéristiques	0-10 cm	0-10 cm	0-10 cm				0-10 cm	
Prélèvement								
Date	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	
Code de station	CHA-1	RIB-1	RIB-2	RIB-3	GDC-1	GDC-2	GDC-3	
Lieu (commune) ou site	Domeyrot (23)	Domeyrot (23)	Domeyrot (23)	Domeyrot (23)	Gouzon (23)	Gouzon (23)	Gouzon (23)	
Localisation	Chaumailat	La Ribière	La Ribière	La Ribière	Grands Champs	Grands Champs	Grands Champs	
Expression des résultats								
Date de référence	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	17/04/2007	
Unité	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	
RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS								
137 Cs	30,0 ans	7,1 ± 1,5	< 6	< 4	8,6 ± 1,4	3,5 ± 1,4	< 4	3,6 ± 0,7
241 Am	437,7 ans	-	-	-	-	-	-	-
RADIONUCLEIDES "NATURELS"								
234 Th 63 kev	Ch. 238U	50 ± 22	1900 ± 700	1330 ± 480	2043 ± 737	4750 ± 1715	263 ± 95	111 ± 42
234 Th 92 kev	Ch. 238U	69 ± 15	1900 ± 400	1166 ± 200	1837 ± 314	4820 ± 825	230 ± 40	115 ± 21
234m Pa	Ch. 238U	< 270	2000 ± 600	1774 ± 317	2270 ± 303	5240 ± 690	323 ± 61	160 ± 60
230 Th	Ch. 238U	-	2200 ± 800	1872 ± 553	2028 ± 540	< 420	-	-
226 Ra max	Ch. 238U	112 ± 21	-	-	-	-	323 ± 38	261 ± 33
226 Ra théorique	Ch. 238U	-	1756 ± 675	1773 ± 599	1669 ± 344	469 ± 122	-	-
214 Pb (= 226Ra min)	Ch. 238U	46 ± 7	1300 ± 200	965 ± 120	1324 ± 164	392 ± 50	69 ± 9	120 ± 15
214 Bi	Ch. 238U	46 ± 8	1300 ± 200	925 ± 112	1240 ± 147	370 ± 47	67 ± 9	118 ± 15
210 Pb	Ch. 238U	44 ± 13	1500 ± 200	973 ± 124	1214 ± 151	409 ± 55	55 ± 8	90 ± 16
228 Ac (= 228Ra)	Ch. 232Th	55,4 ± 9,8	72 ± 23	57 ± 13	71 ± 10	63 ± 12	31 ± 4,5	58,0 ± 8,0
212 Pb (= 228Th)	Ch. 232Th	48,5 ± 6,1	70 ± 10	64 ± 8	67 ± 8	65,0 ± 8,0	27,8 ± 3,3	60,0 ± 7,2
235 U max	Ch. 235U	3,8 ± 0,9	-	-	-	-	-	8,1 ± 1,4
235 U (à 163keV)	Ch. 235U	< 15	96 ± 35	54 ± 17	103 ± 15	213 ± 29	9,9 ± 2,9	< 12
231 Pa	Ch. 235U	< 30	< 160	< 84	107 ± 39	< 64	< 13	< 27
227 Th (= 227Ac)	Ch. 235U	< 7	85 ± 28	77 ± 25	85 ± 25	< 19	< 3	6,6 ± 3,3
223 Ra	Ch. 235U	< 26	106 ± 21	70 ± 26	97 ± 19	< 40	< 8	< 16
219 Rn	Ch. 235U	< 19	93 ± 24	79 ± 25	110 ± 24	< 30	< 6	< 12
40 K	1,3 10 ⁹ ans	1300 ± 200	1200 ± 200	1250 ± 153	1180 ± 140	800 ± 100	1300 ± 153	1205 ± 145
7 Be	53,2 jours	< 27	< 100	nr	nr	60 ± 27	nr	< 20

2.2 Campagne de juillet 2007 (tableau 2)

n° d'enregistrement interne	230707-0EV-01	230707-0EV-02	230707-0EV-03	230707-0EV-04	230707-0EV-05	230707-0EV-06
Catégorie	sol	vase	vase	sol d'un fossé	vase	vase
Caractéristique	superficiel		marais	superficiel		
Prélèvement						
Date	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007
Code de station	CHA-2	RIB-4	RIB-5	GDC-4	GDC-5	GDC-6
Lieu (commune) ou site	Domeyrot (23)	Domeyrot (23)	Domeyrot (23)	Gouzon (23)	Gouzon (23)	Gouzon (23)
Localisation	Chaumailat	La Ribière	La Ribière	Grands Champs	Grands Champs	Grands Champs
Expression des résultats						
Date de référence	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007	23/07/2007
Unité	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec	Bq/kg sec
RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS						
137 Cs	30,0 ans	6,1 ± 0,8	5,7 ± 1,0	6,7 ± 3,3	< 2	1,1 ± 0,5
241 Am	437,7 ans	< 1	< 1	< 10	< 2	< 3
RADIONUCLEIDES "NATURELS"						
234 Th 63 keV	Ch. 238U	37 ± 14	2340 ± 850	2890 ± 1045	273 ± 100	680 ± 240
234 Th 92 keV	Ch. 238U	-	2460 ± 420	2700 ± 465	310 ± 55	640 ± 110
234m Pa	Ch. 238U	< 56	2930 ± 370	2900 ± 470	320 ± 62	720 ± 120
230 Th	Ch. 238U	-	2740 ± 730	940 ± 380	550 ± 170	-
226 Ra max	Ch. 238U	75 ± 10	-	-	-	-
226 Ra théorique	Ch. 238U	-	2278 ± 424	887 ± 195	468 ± 171	118 ± 29
214 Pb (= 226Ramin)	Ch. 238U	30,6 ± 3,9	1440 ± 180	700 ± 87	375 ± 50	114 ± 14
214 Bi	Ch. 238U	30,0 ± 3,9	1440 ± 170	590 ± 74	370 ± 50	108 ± 14
210 Pb	Ch. 238U	35,0 ± 7,0	1550 ± 190	1020 ± 130	410 ± 50	67 ± 15
228 Ac (= 228Ra)	Ch. 232Th	52,4 ± 6,6	68 ± 10	54 ± 14	43,0 ± 6,0	34,0 ± 5,0
212 Pb (= 228Th)	Ch. 232Th	51,9 ± 6,1	69,0 ± 8,0	44,7 ± 6,1	45,0 ± 5,0	29,0 ± 4,0
235 U max	Ch. 235U	2,6 ± 0,5	-	-	-	-
235 U à 163 keV	Ch. 235U	< 5	132 ± 19	136 ± 25	15,9 ± 5,5	36,5 ± 7,8
231 Pa	Ch. 235U	< 11	125 ± 44	< 90	< 14	< 28
227 Th (= 227Ac)	Ch. 235U	< 2	123 ± 36	318 ± 92	19,6 ± 6,0	< 6
223 Ra	Ch. 235U	< 6	130 ± 17	337 ± 54	25,4 ± 3,9	< 16
219 Rn	Ch. 235U	< 4	123 ± 22	365 ± 76	23,3 ± 4,7	< 11
40 K	1,3 10 ⁹ ans	1280 ± 150	1045 ± 125	237 ± 45	1140 ± 140	1040 ± 130
7 Be	53,2 jours	< 5	< 16	nr	10 ± 5	33 ± 8

2.3 Campagne de février 2008 (tableau 3)

n° d'enregistrement interne		040208-RIV-01	040208-RIV-02
Catégorie		sol	mousses
Caractéristique		superficiel	terrestres
Prélèvement			
Date		04/02/2008	04/02/2008
Code de station		CHA-3	RIB-6
Lieu (commune) ou site		Domeyrot (23)	Domeyrot (23)
Localisation		Chaumailat	La Ribière
Expression des résultats			
Date de référence		04/02/2008	04/02/2008
Unité		Bq/kg sec	Bq/kg sec
RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS			
137 Cs	30,0 ans	< 2	< 3
241 Am	437,7 ans	< 6	< 3
RADIONUCLEIDES "NATURELS"			
234 Th 63 kev	Ch. 238U	2235 ± 810	-
234 Th 92 kev	Ch. 238U	2360 ± 405	-
234m Pa	Ch. 238U	2575 ± 340	-
230 Th	Ch. 238U	3780 ± 1000	-
226 Ra max	Ch. 238U	-	253 ± 43
226 Ra théorique	Ch. 238U	5216 ± 1083	-
214 Pb (= 226Ramin)	Ch. 238U	2320 ± 286	25 ± 5,3
214 Bi	Ch. 238U	2305 ± 274	27 ± 7
210 Pb	Ch. 238U	3210 ± 396	248 ± 38
228 Ac (= 228Ra)	Ch. 232Th	43,5 ± 8,2	11,8 ± 6,7
212 Pb (= 228Th)	Ch. 232Th	41,2 ± 5,2	8,2 ± 2,5
235 U max	Ch. 235U	-	
235 U à 163 keV	Ch. 235U	124 ± 21	< 36
231 Pa	Ch. 235U	160 ± 58	< 68
227 Th (= 227Ac)	Ch. 235U	150 ± 44	< 12
223 Ra	Ch. 235U	183 ± 30	< 40
219 Rn	Ch. 235U	153 ± 33	< 28
40 K	1,3 10 ⁹ ans	1000 ± 121	244 ± 45
7 Be	53,2 jours	< 13	96 ± 16

3 Commentaires de résultats

Remarque :

Du fait du contexte particulier lié à la proximité d'anciennes mines d'Uranium, nous nous sommes principalement intéressés aux éléments radioactifs des familles de l'uranium-238 et de l'uranium-235 (cf. *Filiations présentées en Annexe 2*). Les deux principaux radioéléments de la famille du thorium-232 (actinium-228 et plomb-212) sont toutefois rapportés dans les tableaux de résultats.

Les commentaires de résultats présentés ci-dessous s'intéressent simultanément aux trois campagnes de prélèvements d'avril et juillet 2007, et de février 2008.

Site de chaumailat :

Les échantillons de terre prélevés en avril comme en juillet 2007 ne présentent pas d'anomalie radiologique particulière. Les teneurs auxquelles les éléments ont été détectés, sont du même ordre de grandeur que la plupart des échantillons de l'environnement non influencé par des activités anthropiques. La teneur en uranium-238 est de l'ordre d'une trentaine de becquerels par kilogramme (Bq.kg-1), soit voisine de celle des sols de Normandie. Le rapport isotopique (*voir définition en Annexe 2*) est respecté entre les deux familles (proportions massiques naturelles 238U (99,3%) et 235U (0,7%)).

En revanche, l'échantillon de terre prélevé en février 2008 (station CHA-3) est très riche à la fois en uranium-235, en uranium-238 et en radium-226, avec des activités mesurées respectivement supérieures à 150, 2000 et 4000 Bq.kg-1 sec, soit 40 fois les niveaux précédemment mesurés. Le rapport isotopique est néanmoins respecté.

Cette seconde observation met en avant une situation radiologique hétérogène à l'échelle du site de Chaumailat, celui-ci ayant pourtant une superficie relativement restreinte.

Note : à la différence des deux premières campagnes, le prélèvement de février 2008 a été effectué suite à une évaluation globale du rayonnement gamma ambiant du site, ce qui a permis de repérer certaines zones où la sur-exposition était significative. Le matériel utilisé était un détecteur gamma portable (DG5-Novelec).

Site de la Ribière :

Les cinq échantillons prélevés sur ce site sont très riches à la fois en uranium-235 et en uranium-238, avec des activités mesurées autour de 2000 Bq.kg-1 sec, soit du même ordre de grandeur que le dernier échantillon de Chaumailat.

Concernant les échantillons de sols (RIB-1, RIB-2 et RIB-3), le rapport isotopique est respecté, et l'ensemble des éléments des deux chaînes radioactives est présent en situation d'équilibre séculaire (égalité des activités entre tous les éléments d'une même famille, ou chaîne, radioactive), *voir définition en Annexe 2*, malgré les faibles écarts observés entre le Ra226 et ses descendants, dus au dégazage du radon-222.

Concernant l'échantillon de vase de marais (RIB-5), on observe un net déséquilibre dans les familles naturelles, qui se caractérise par la présence d'uranium-238 en excès par rapport à ses descendants, et a contrario, d'uranium-235 en moindre quantité par rapport à ses descendants.

Site des Grands Champs :

De la même manière que sur le site de la Ribière, on ne note aucune anomalie radiologique dans les échantillons de sols (GDC-3 et GDC-4), ni de niveau d'activité particulièrement élevé.

En revanche, un échantillon de vases (GDC-1) présente non seulement un fort niveau d'activité, mais également de très forts déséquilibres au sein des deux familles d'uranium. Pour illustration, ces vases prélevées le 17/04/07 à Gouzou dans la « queue » du plan d'eau témoignent :

- de 4 à 5000 Bq/kg d'238U contre moins de 800 pour le 230Th et ses descendants
- d'environ 200 Bq/kg d'235U contre moins de 20 pour l'227Ac et ses descendants.

Les teneurs mesurées dans cet échantillon 020507-0EV-05 (ou GDC-1) sont les plus importantes identifiées parmi l'ensemble des échantillons analysés. Les déséquilibres témoignent de la présence d'uranium quasiment pur dans cet environnement, c'est-à-dire, de la présence des éléments dits « tête de chaîne » ou éléments « pères », que sont l'uranium-238 et l'uranium-235, en excès par rapport à leur descendants (thorium-230, plomb-214 pour la famille de l'U-238 ; thorium-227, radium-223 pour la famille de l'U-235), voir définition en Annexe 2.

Ce même déséquilibre est observé dans l'échantillon de vases identifié GDC-5, mais avec des niveaux d'activité moindres par rapport à GDC-1 ; de 650 à 750 Bq/kg d'238U et environ 36 Bq/kg d'235U.

4 Conclusion

Les constatations effectuées à ce jour pour ces trois sites de Chaumailat, La Ribière et Les Grands Champs, démontrent l'existence d'une situation radiologique atypique qui semble marquée par les activités passées de l'exploitation minière.

Si le contexte géochimique peut parfois être à l'origine de déséquilibres dans les sédiments et les vases, le contexte industriel régional, conjugué aux fortes valeurs d'uranium mesurées, nous incite à privilégier une origine humaine pour expliquer ces anomalies.

La présence d'uraniums quasi « purs » est le résultat supposé des activités passées de traitement du minerai sur site (lixiviation) afin d'en extraire la matière première (yellow cake¹) utilisée pour la fabrication du combustible nucléaire. Toutefois, cette observation sur le site des Grands Champs est surprenante compte tenu de l'absence d'activité de traitement in situ déclarée par l'exploitant et de l'absence de stockage de résidus (cf. inventaire national des sites miniers d'uranium, programme MIMAUSA, IRSN, version 2 – Septembre 2007).

Etant donné l'accessibilité de ses sites au public et compte tenu de l'arrêt de tout dispositif de surveillance, une étude complémentaire nous semble nécessaire à ce stade afin d'évaluer l'étendue des anomalies radiologiques et leur impact rémanent sur l'environnement.

¹ Le yellowcake est un concentré d'uranium. Il représente une étape intermédiaire dans le procédé d'obtention de combustible nucléaire à partir du minerai d'uranium.

Annexe 1

Matériel, méthodes et expression

ANALYSE des radionucléides artificiels et naturels émetteurs gamma

TRAITEMENT : Terres : séchage à l'air libre, émottage, élimination fraction grossière (>2mm) puis séchage complet à 60°C en étuve ventilée et broyage. Sédiments : séchage à 60°C en étuve ventilée, tamisage à 2mm, broyage.

MATERIEL : Spectrométrie gamma Ortec de type N équipée d'un château de plomb d'épaisseur 10 cm. La chaîne d'analyse comprend un analyseur « DSPEC », système d'acquisition numérique (Ortec), associé à un détecteur au germanium hyperpur coaxial de type N (Ortec), d'efficacité 32%, monté dans un cryostat vertical. La plage d'énergie prise en référence s'étend de 27 à 2000 keV.

Les flacons utilisés pour la spectrométrie gamma sont des boîtes rondes transparentes en polystyrène cristal d'un volume utile de 61 ml (référéncées 7215).

REGLAGES : L'efficacité de référence du détecteur pour la plage d'énergie prise en référence est déterminée à l'aide d'une source liquide multi-radionucléide et d'une source liquide de ¹³³Ba en tenant compte des phénomènes de sommation de coïncidences qui existent avec ce radionucléide. Les sources employées sont des solutions étalons certifiées.

MODALITES : L'autoabsorption en rapport avec la densité de l'échantillon est prise en compte pour des énergies supérieures à 59 keV (²⁴¹Am) selon la méthode semi-empirique basée sur l'assimilation du détecteur à un point. Néanmoins, pour des énergies inférieures à 100 keV, l'autoatténuation dépend de la composition de l'échantillon et les résultats sont donc à considérer à titre indicatif, particulièrement pour des énergies inférieures à 59 keV du fait de l'absence de correction.

RESULTAT : La grandeur déterminée est l'activité en becquerel (Bq) par kilogramme **sec** (kg sec). Elle est suivie de son incertitude absolue calculée pour un intervalle de confiance de 95%. Toute activité exprimée, y compris la limite de détection, est rapportée à la date de référence indiquée dans les tableaux de résultats.

Détermination du 226Ra et de l'235U par spectrométrie gamma

Le radium 226 (226Ra) appartient à la famille de l'uranium 238 (238U) et donne naissance, par filiation, à un grand nombre de descendants (huit radioactifs en plus du plomb 206 stable), notamment au radon-222, un gaz souvent à l'origine d'un déséquilibre dans la filiation.

Si le 226Ra est présent dans une matrice non poreuse (roche dure par exemple), le système est généralement à l'équilibre et l'activité du 226Ra correspond à celle du plomb-214 ou du bismuth-214, deux radionucléides aisément quantifiables à la différence du 226Ra.

Toutefois, dans le cas des matières naturelles comme les sols, les produits de filiation sont rarement à l'équilibre avec le 226Ra, voire pas du tout pour l'eau et les végétaux aquatiques. L'émanation du radon explique cet état de fait. Toute correction est impossible, le facteur de déséquilibre ne peut être déterminé précisément. La nature, l'état et la granulométrie de l'échantillon, mais également le laps de temps entre son conditionnement et sa mesure sont autant de facteurs influents.

Quant au calcul de l'activité massique du 226Ra à partir de son unique raie de taux d'émission faible (3,29%) et située à 186 keV, il dépend de la possibilité déterminer précisément la contribution de l'235U, lequel interfère à cette même énergie.

C'est pourquoi différentes expressions sont employées :

- **Expression 214Pb = 226Ra min :**
Elle indique l'activité massique dite minimale du 226Ra. En d'autres termes, il ne peut y avoir dans l'échantillon une activité massique en radium-226 inférieure à la valeur indiquée, aux incertitudes près. Elle est déduite de l'activité massique du plomb-214. Plus « l'âge du conditionnement » est faible (inférieur à 20 jours) plus le caractère minorant est accentué.
- **Expression 226Ra max :**
Déterminée à partir de la raie à 186 keV, c'est une grandeur subjective qui indique l'activité massique qui pourrait être imputée au radium-226 si l'échantillon ne contenait pas d'uranium. En d'autres termes, il ne peut y avoir dans l'échantillon une activité massique en radium-226 supérieure à la valeur indiquée.

Cette grandeur est déterminée selon le calcul suivant :

$${}^{226}\text{Ra}_{\text{max}} = F_{(MD186\text{keV})} \frac{N_{(186\text{keV})}}{t \cdot E_{ff(186\text{keV})} \cdot E_{m226\text{Ra à }186\text{keV}}}$$

Considérant un rapport des activités ${}^{238}\text{U}/{}^{235}\text{U}$ normal [observé dans la nature], il est possible pour les échantillons dont les ascendants du ${}^{222}\text{Rn}$ sont en équilibre de déterminer de façon théorique l'activité massique du :

$$\begin{aligned} \text{Radium-226} & \Rightarrow {}^{226}\text{Ra} = 0,556 \times {}^{226}\text{Ra}_{\text{max}} \\ \text{Uranium-235} & \Rightarrow {}^{235}\text{U} = 0,025 \times {}^{226}\text{Ra}_{\text{max}} \end{aligned}$$

$N(E)$ = nombre de coups (aire nette) à l'énergie E.

t = durée (en seconde) de l'acquisition

$E_{ff(E)}$ = efficacité du détecteur à l'énergie E

$E_{m226\text{Ra}}$ = taux d'émission du radionucléide à l'énergie E

$F_{(MDE)}$ = facteur de correction de l'autoabsorption pour la matrice M, de densité D à l'énergie E

➤ **Expression ${}^{226}\text{Ra}$ théorique :**

Elle indique l'activité massique qui peut être raisonnablement attribuée au radium-226 dès lors qu'il est possible de quantifier l'uranium-235 à l'aide de sa raie à 163 keV. Elle est déduite selon la formule suivante :

$${}^{226}\text{Ra}_{\text{théorique}} = \left(\left[F_{(MD186\text{keV})} \frac{N_{(186\text{keV})}}{t \cdot E_{ff(186\text{keV})} \cdot E_{m235\text{U à }186\text{keV}}} \right] - \left[F_{(MD163\text{keV})} \frac{N_{(163\text{keV})}}{t \cdot E_{ff(163\text{keV})} \cdot E_{m235\text{U à }163\text{keV}}} \right] \right) * \left(\frac{E_{m235\text{U à }186\text{keV}}}{E_{m226\text{Ra à }186\text{keV}}} \right)$$

➤ **Expression ${}^{235}\text{U}$ max :**

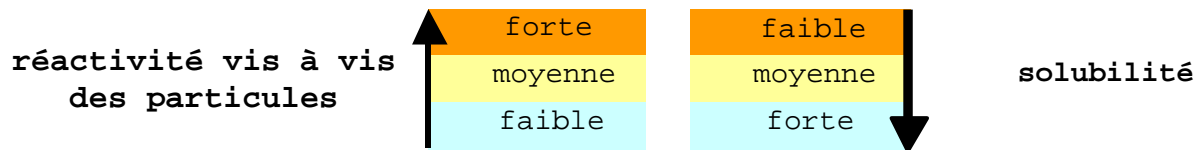
Elle indique l'activité massique dite maximale de l'uranium-235. En d'autres termes, il ne peut y avoir dans l'échantillon une activité massique en uranium-235 supérieure à la valeur indiquée, aux incertitudes près. Elle est déduite selon la formule ci-dessous. Plus « l'âge du conditionnement » est faible (inférieur à 20 jours) plus le caractère majorant est accentué.

$${}^{235}\text{U}_{\text{max}} = \left({}^{226}\text{Ra}_{\text{max}} - {}^{214}\text{Pb} \right) * \left(\frac{E_{m226\text{Ra à }186\text{keV}}}{E_{m235\text{U à }186\text{keV}}} \right)$$

Annexe 2

Filiation des uranium 235 & 238 (figure 3)

Elément	Famille de l'235U	Famille de l'238U
Uranium	U-235 7,0E8 a	U-238 4,5E9 a U-234 2,4E5 a
Protactinium	Pa-231 3,3E4 a	Pa-234m 1,2 min
Thorium	Th-231 25,5 h Th-227 18,7 j	Th-234 24,1 j Th-230 75400 a
Actinium	Ac-227 21,8 a	
Radium	Ra-223 11,4 j	Ra-226 1600 a
Francium		
Radon	Rn-219 3,96 s	Rn-222 3,8 j
Astate		
Polonium	Po-215 1,8 ms	Po-218 3,1 min Po-214 164 µs Po-210 138 j
Bismuth	Bi-211 2,1 min	Bi-214 19,9 min Bi-210 5,0 j
Plomb	Pb-211 36,1 min Pb-207 stable	Pb-214 26,8 min Pb-210 22,3 a Pb-206 stable
Thallium	Tl-207 4,8 min	



DEFINITIONS :

Rapport isotopique : c'est le rapport des activités de deux isotopes radioactifs d'un même élément chimique mais appartenant à deux familles différentes. On considère généralement le rapport des éléments dits « pères » que sont l'uranium-238 et l'uranium-235.

Dans des conditions naturelles non modifiées, les proportions massiques sont : U-238 (99,3%) et U-235 (0,7%).

Equilibre séculaire : dans des conditions naturelles non modifiées, tous les éléments radioactifs d'une même famille présentent la même activité.