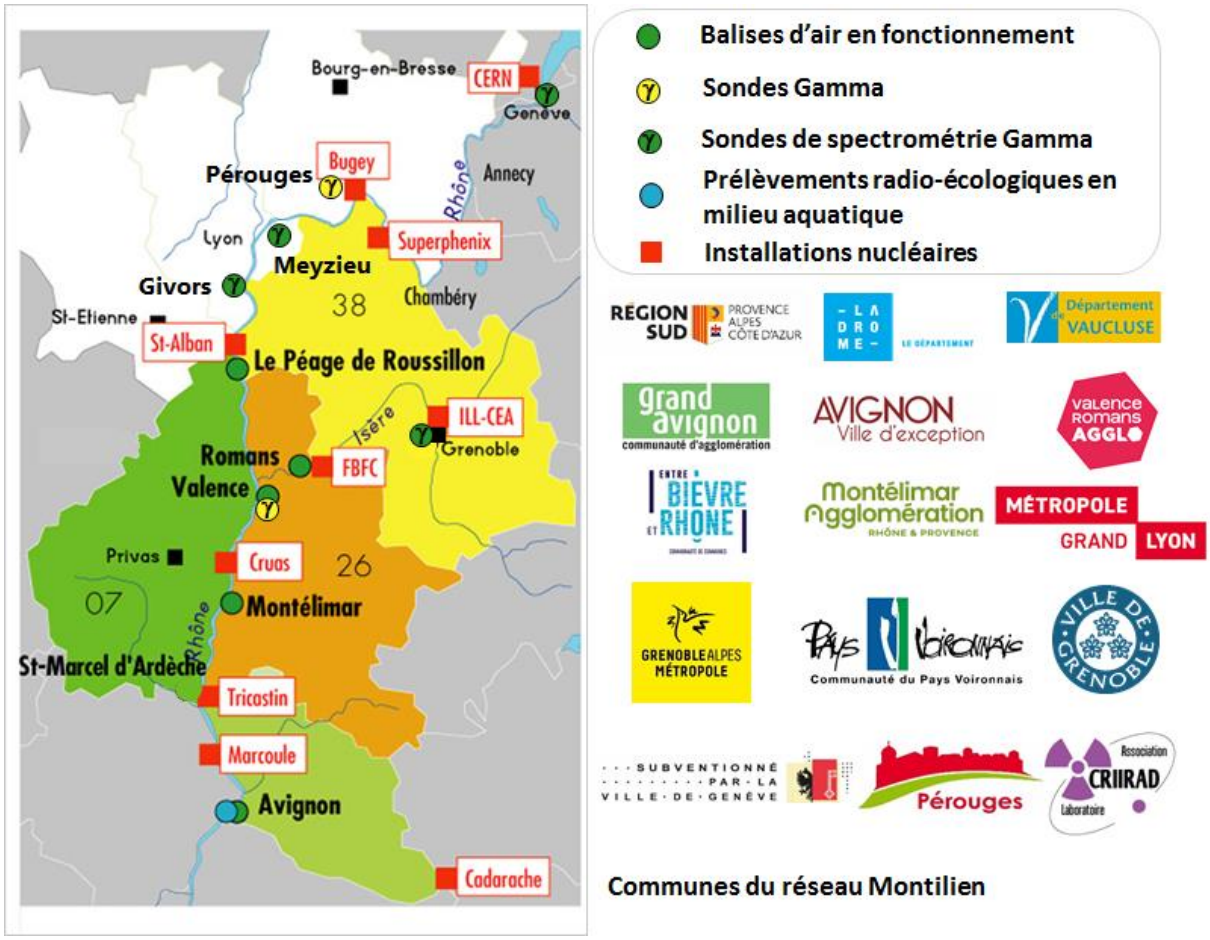
SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITE ATMOSPHERIQUE ET AQUATIQUE - CRIIRAD

RAPPORT TRIMESTRIEL
JANVIER-FEVRIER-MARS 2025



Rédacteur(s) : Jérémie MOTTE
Relecteur(s) : Julien SYREN

Date de publication :
Rapport N° 25-18

Table des matières

SYNTHESE – FONCTIONNEMENT DU RESEAU DE BALISES CRIIRAD 3

I/ Synthèse des résultats / Taux de fonctionnement par système de détection - Premier trimestre 2025 3

II/ A signaler au cours du trimestre 3

RESULTATS DES CONTROLES AUTOMATIQUES EN CONTINU 6

Les codes employés dans les graphiques ci-après sont explicités en annexe. 6

I/ Surveillance en continu du débit de dose gamma ambiant 6

II/ Surveillance en continu de la radioactivité atmosphérique 9

III/ Surveillance en continu de la radioactivité de l'eau du Rhône 12

RESULTATS DES CONTROLES EN DIFFERE AU LABORATOIRE DE LA CRIIRAD 13

I/ Résultats des analyses de filtres par spectrométrie gamma 13

II/ Résultats des analyses de cartouches par spectrométrie gamma 13

III/ Résultats des analyses de prélèvements radio-écologiques dans la matrice aquatique . 14

EN SAVOIR PLUS SUR LES BALISES 15

FOCUS : LE TRANSFERT DE LA CONTAMINATION AUX DENREES ALIMENTAIRES (PARTIE 2) 16

ANNEXE : Interprétation des graphiques présentant les résultats du réseau de balises de la CRIIRAD 20

LABORATOIRE CRIIRAD 22

SYNTHESE – FONCTIONNEMENT DU RESEAU DE BALISES CRIIRAD

I/ Synthèse des résultats / Taux de fonctionnement par système de détection - Premier trimestre 2025

BALISE / DETECTION	Pérouges	Péage-de-Roussillon	Romans-sur-Isère	Valence	Montélimar
Alpha/Bêta (Air)		99,8%	100%	98,7%	99,4%
Iode (Air)			90%	98,7%	99,4%
Gamma (Air)	100%			98,7%	

Légende

90 %	Aucune contamination détectée / Taux de fonctionnement*
90 %	Contamination détectée / Taux de fonctionnement*
	Problème technique ponctuel ou maintenance

BALISE / DETECTION	Genève	Grenoble	Meyzieu	Givors	Avignon Air
Alpha/Bêta (Air)					100%
Iode (Air)					100%
Spectrométrie Gamma (Air)	100%	99,8%	100%	100%	

Légende

90 %	Aucune contamination détectée / Taux de fonctionnement*
90 %	Contamination détectée / Taux de fonctionnement*
	Problème technique ponctuel ou maintenance

* Le taux de fonctionnement trimestriel calculé pour chaque dispositif de mesure correspond au rapport du nombre d'heures de fonctionnement de ce dispositif par le nombre total d'heures écoulées durant le trimestre (si le nombre d'heures de dysfonctionnement ou d'arrêt est inférieur à 2 heures pour la totalité du trimestre, le taux de fonctionnement est pris égal à 100%).

II/ A signaler au cours du trimestre

- Arrêts de l'alimentation électrique aux balises :

- Valence : 12 arrêts (les 7, 16 et 21 janvier, les 10, 13, 18, 25 et 27 février, les 8, 17, 25 et 28 mars).
- Grenoble : 5 arrêts (les 8 et 27 janvier, les 10 et 23 février, le 10 mars).
- Montélimar : 3 arrêts (les 19 et 27 janvier, le 21 mars).
- Meyzieu : 2 arrêts (le 23 janvier, le 1er février).
- Givors : 1 arrêt (le 28 mars).

Aucun de ces arrêts, d'une durée inférieure à 2 heures, n'a nécessité de déplacement d'un technicien sur site.

- **Maintenance des balises (hors sondes de spectrométrie gamma)** : l'intervention (effectuée par la société Berthold à une fréquence annuelle) a été effectuée sur toutes les balises du réseau CRIIRAD à l'exception des sondes de spectrométrie gamma[1] entre les 17 et 21 mars. Le technicien Berthold a été assisté d'un technicien du laboratoire CRIIRAD au cours de cette maintenance. Diverses opérations ont été réalisées :

- pour les balises atmosphériques : un contrôle complet des éléments mécaniques et électriques de la balise, la calibration des détecteurs, le démontage et le nettoyage des éléments sujets à l'empoussièrement du fait du fonctionnement des pompes, le changement des palettes de la pompe 5 m^3/h, le remplacement de voyants de fonctionnement défectueux,…
- pour les sondes gamma : la vérification de l'étalonnage de la sonde ainsi que le paramétrage de l'électronique associée ;
- pour la balise aquatique d'Avignon : la vérification du réglage de la haute tension et de l'efficacité du détecteur ainsi que le fonctionnement des composants électriques et électroniques de la balise. Le technicien CRIIRAD a procédé au nettoyage de la cuve de comptage et à la vérification du fonctionnement des différents composants de la balise (système de nettoyage automatique de la cuve, préleveur automatique de l'eau dans la cuve en cas d'alarme,…).

Des actions spécifiques ont été menées :

- sur la balise de Romans-sur-Isère avec les remplacements du condensateur de démarrage de la pompe de prélèvement d'air spécifique à l'unité de détection des iodes radioactifs (5 m^3/h), qui est tombée en panne la semaine précédente (voir ci-dessous) et du compteur horaire défaillant de la pompe principale d'aspiration de l'air extérieur ;
- sur la balise de Montélimar avec le remplacement du compteur horaire défaillant de la pompe principale d'aspiration de l'air extérieur.

- **Absences de communication entre les balises et la centrale de gestion :**
  - Montélimar : le 28 janvier (communication rétablie le jour même).
  - Péage de Roussillon : le 28 janvier (communication rétablie le jour même).

Ces différentes opérations de réinitialisation ont été suivies d'une absence de données pendant une période inférieure à 2 heures.

- **Balise de Romans – Panne de la pompe de prélèvement de l'unité de détection des iodes gazeux radioactifs :**

Lors du prélèvement hebdomadaire du 10 mars, la pompe de cette unité de détection n'a pas redémarré suite au remplacement de la cartouche à charbon actif. Après diagnostic, une défaillance du condensateur de redémarrage de la pompe a été constatée. Ce composant a été remplacé lors de la maintenance Berthold du 19 mars et la pompe remise en service. Par conséquent, aucune donnée exploitable n'a été mesurée sur la voie « iode » pendant cette période d'arrêt.

- **Balise de Valence – Dysfonctionnement du système d'avancement du filtre aérosols** : des ruptures du filtre aérosols ont été constatées à la balise de Valence à 6 reprises (le 29 janvier, les 5, 20

[1] La maintenance de ce matériel est effectuée par le fabricant (société Bertin). Ce dernier préconise une vérification 5 ans après la mise en fonctionnement, puis tous les 3 ans.

et 27 février ainsi que les 11 et 27 mars). Ces ruptures ont pu être détectées rapidement lors des scrutations journalières, dans les heures qui ont suivi la rupture : la CRIIRAD a constaté une baisse du débit de la pompe à aérosols de la balise de Valence, laissant suggérer un dysfonctionnement. Un technicien du laboratoire CRIIRAD s'est rendu systématiquement sur site pour confirmer la rupture du filtre. Le filtre a été remis en place lors de chacune des interventions techniques puis le bon fonctionnement du système d'avancement du filtre a été testé.

- **Fonctionnement de la balise de Péage-de-Roussillon** : le Département de l'Isère a décidé en 2018 de ne plus contribuer au financement du réseau de balises, ce qui a entraîné une diminution du budget de fonctionnement de la balise de Péage de Roussillon. Ceci a conduit la CRIIRAD à alléger le dispositif de surveillance de la balise à partir de début 2019. L'unité de détection de l'iode radioactif sous forme gazeuse a été arrêtée[2] pour les 2 balises et les analyses mensuelles en différé du filtre à aérosols au laboratoire de la CRIIRAD l'ont été également au cours du premier trimestre. Les filtres sont tout de même conservés au laboratoire de la CRIIRAD et pourraient être analysés ultérieurement si nécessaire[3]. La contribution de la communauté de communes Entre Bièvre et Rhône ainsi que le recours aux fonds propres de la CRIIRAD permettent de poursuivre la surveillance en continu de la radioactivité des aérosols (unité de détection alpha/bêta (air)) pour la balise. Le laboratoire de la CRIIRAD est intervenu :
- **le 28 janvier** pour rétablir la communication interrompue et remplacer le filtre aérosols de la balise,
- **le 19 mars** lors de la maintenance Berthold.

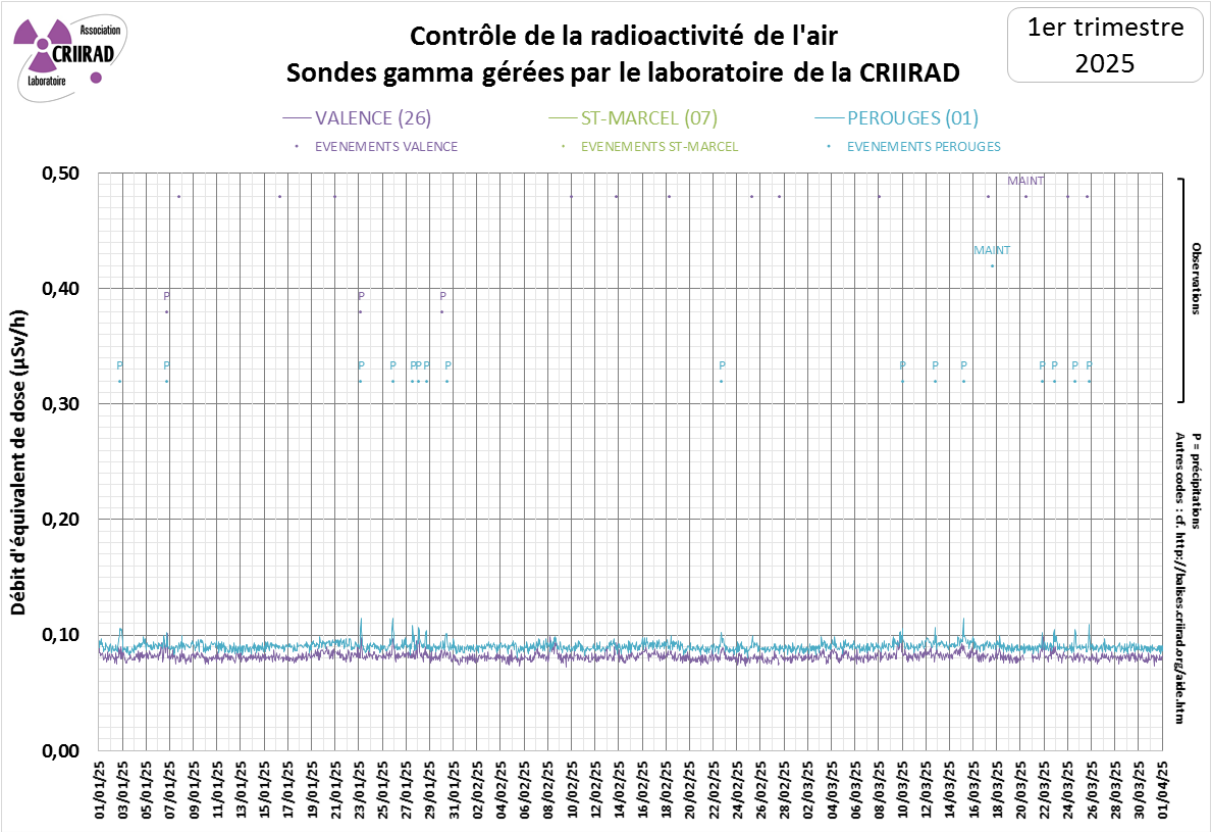
[2] L'arrêt de cette surveillance permet des économies importantes car il n'est plus nécessaire d'intervenir chaque semaine pour remplacer la cartouche à charbon actif. Mais en conséquence, la CRIIRAD ne sera plus en capacité de déterminer l'activité volumique de l'iode 131 gazeux. La fonction d'alerte reste activée en cas d'augmentation de l'activité des aérosols émetteurs bêta et alpha, mais elle est dégradée par rapport au fonctionnement antérieur.

[3] Les filtres seront analysés systématiquement en cas d'alarme sur les mesures directes.

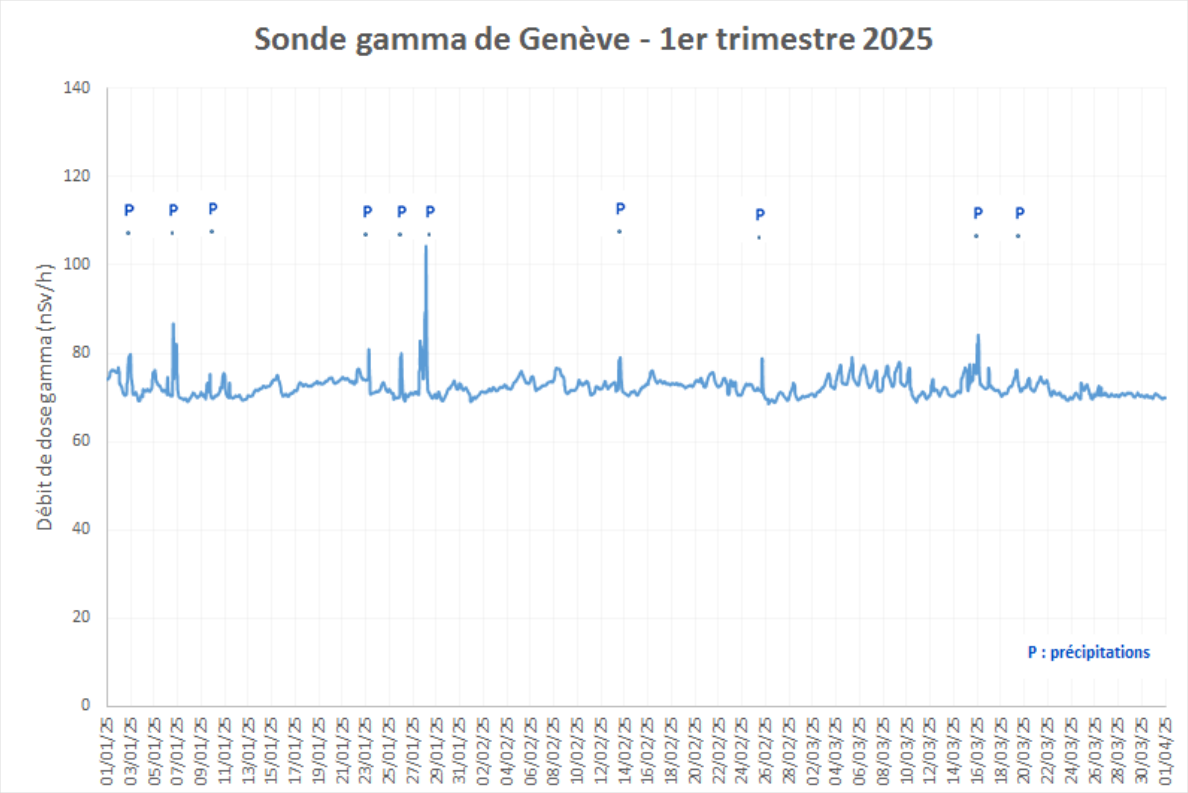
RESULTATS DES CONTROLES AUTOMATIQUES EN CONTINU

Les codes employés dans les graphiques ci-après sont explicités en annexe.

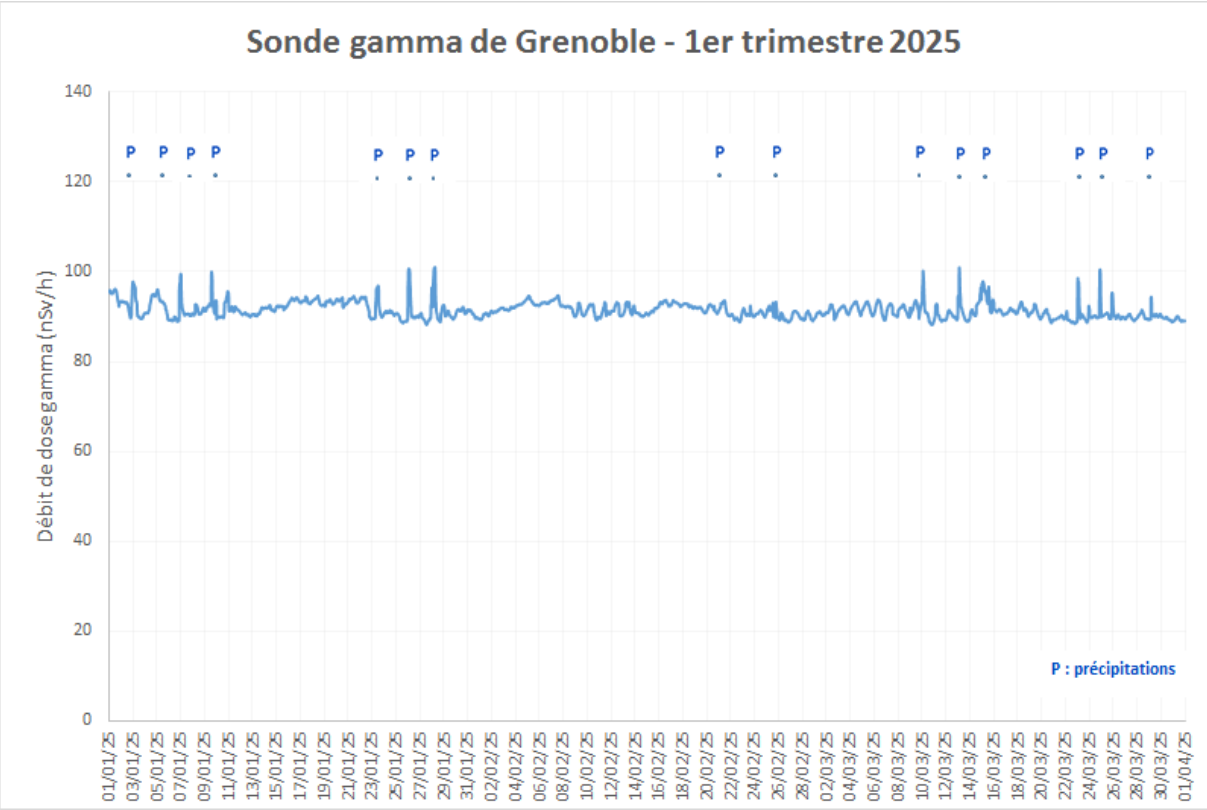
I/ Surveillance en continu du débit de dose gamma ambiant



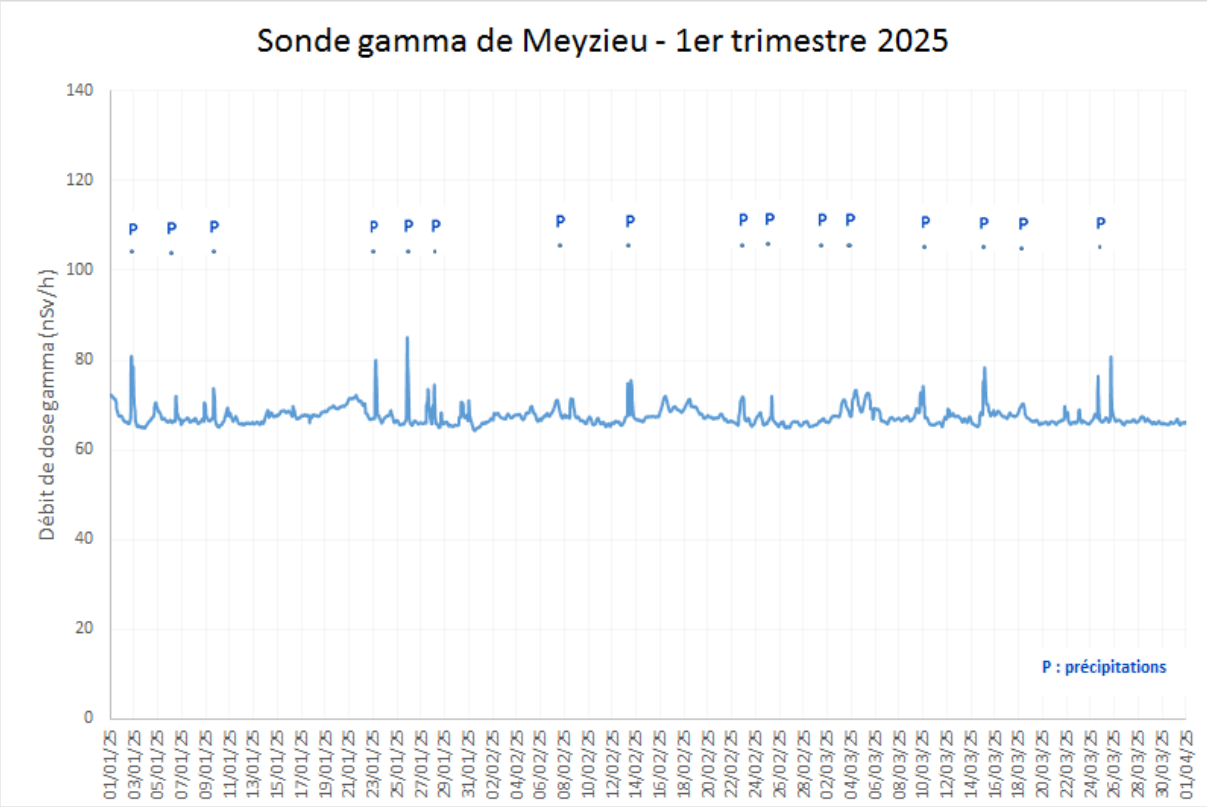
Débit de dose gamma ambiant à Genève



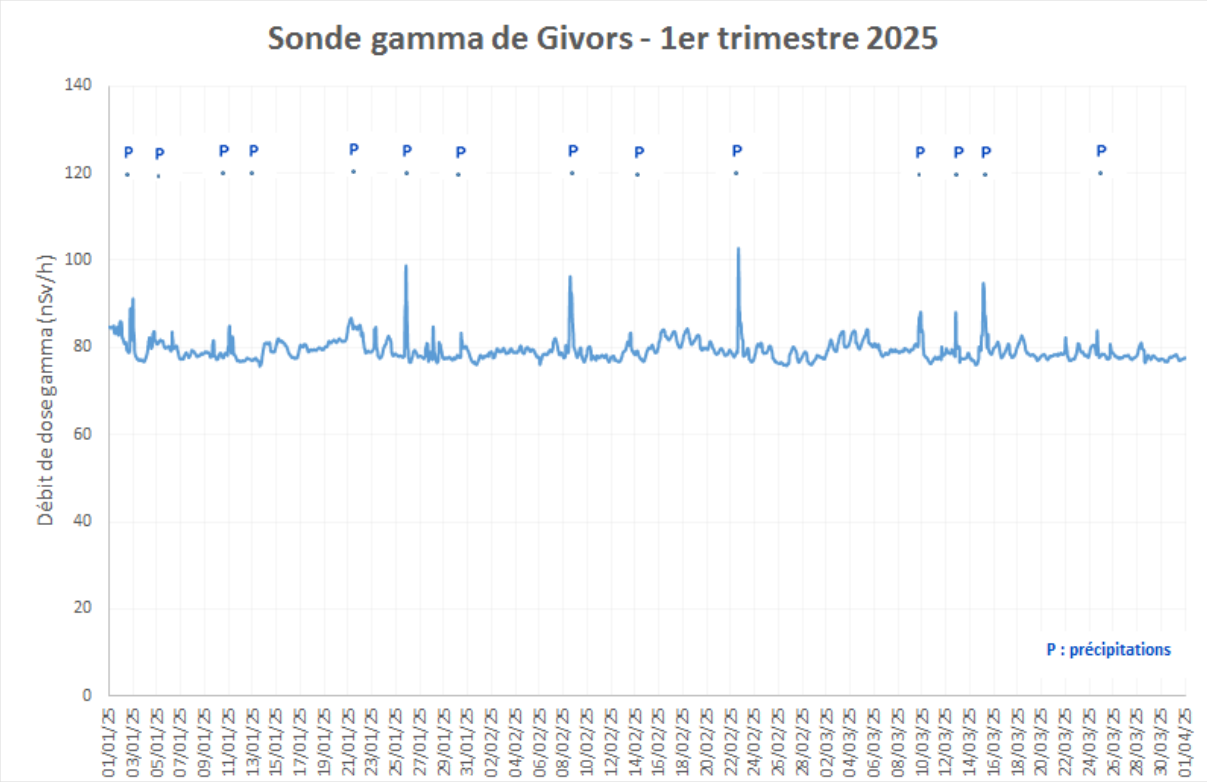
Débit de dose gamma ambiant à Grenoble



Débit de dose gamma ambiant à Meyzieu



Débit de dose gamma ambiant à Givors



Commentaires

Les débits de dose instantanés sont restés dans une gamme de variation normale pour les 5 sondes de mesure. Sur les secteurs de **Valence, Pérouges, Genève, Grenoble et Meyzieu**, le bruit de fond naturel moyen est classiquement de **0,065 à 0,100 µSv/h** (ou de **65 à 100 nSv/h**).

Les fluctuations les plus importantes ont été observées lors d'épisodes de précipitations. Les plus notables sont survenues :

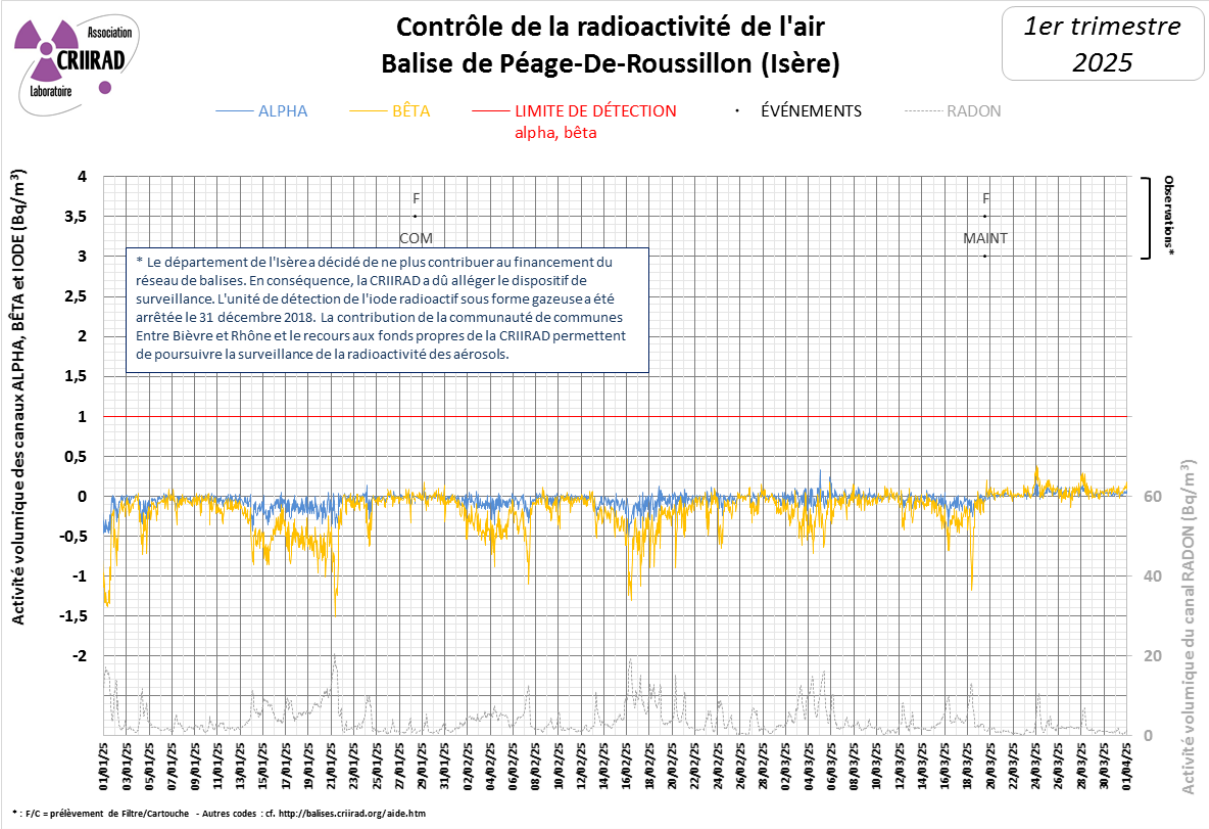
- le 6 janvier (notamment 0,101 µSv/h à Valence) ;
- le 25 janvier (notamment 0,085 µSv/h ou 85 nSv/h à Meyzieu et 0,120 µSv/h à Pérouges) ;
- le 26 janvier (notamment 0,101 µSv/h ou 101 nSv/h à Grenoble) ;
- le 28 janvier (notamment 0,104 µSv/h ou 104 nSv/h à Genève) ;
- le 22 février (notamment 0,103 µSv/h ou 103 nSv/h à Givors) ;
- le 15 mars (notamment 0,120 µSv/h à Pérouges, 0,094 µSv/h ou 94 nSv/h à Givors, 0,078 µSv/h ou 78 nSv/h à Meyzieu).

Lors de ces épisodes, les descendants radioactifs émetteurs gamma[4] du radon 222 naturellement présents dans l'air sont lessivés et rabattus au sol, ce qui entraîne une augmentation de courte durée du débit de dose.

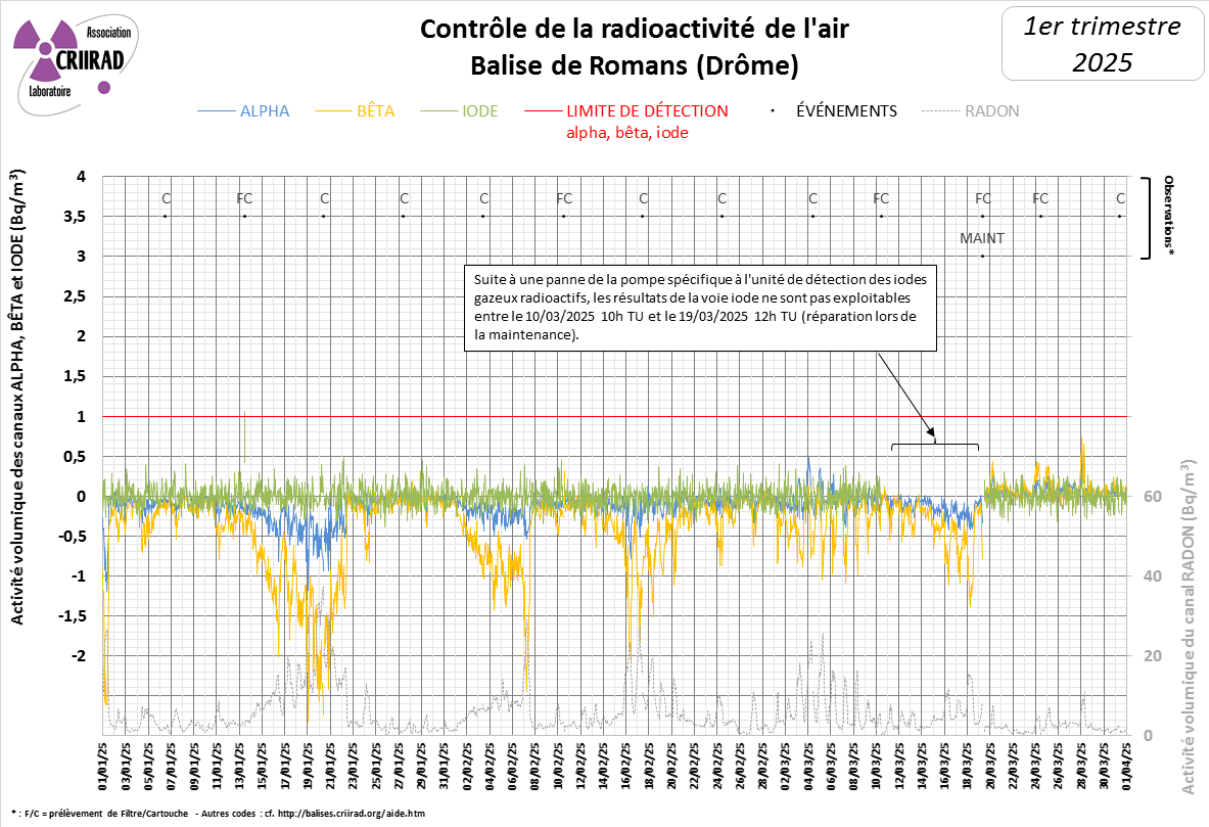
[4] Plomb 214 et Bismuth 214 de périodes physiques égales respectivement à 27 minutes et à 20 minutes.

II/ Surveillance en continu de la radioactivité atmosphérique

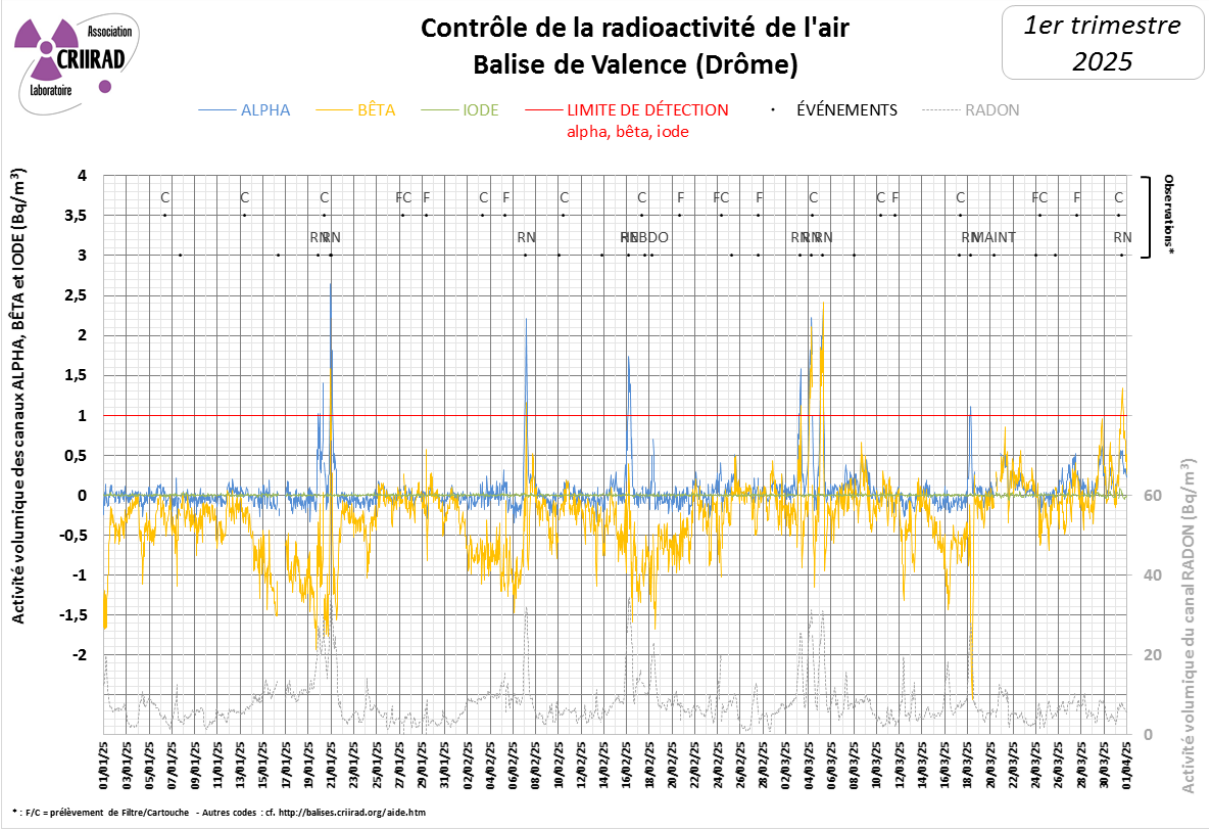
A/ Balise de Péage de Roussillon



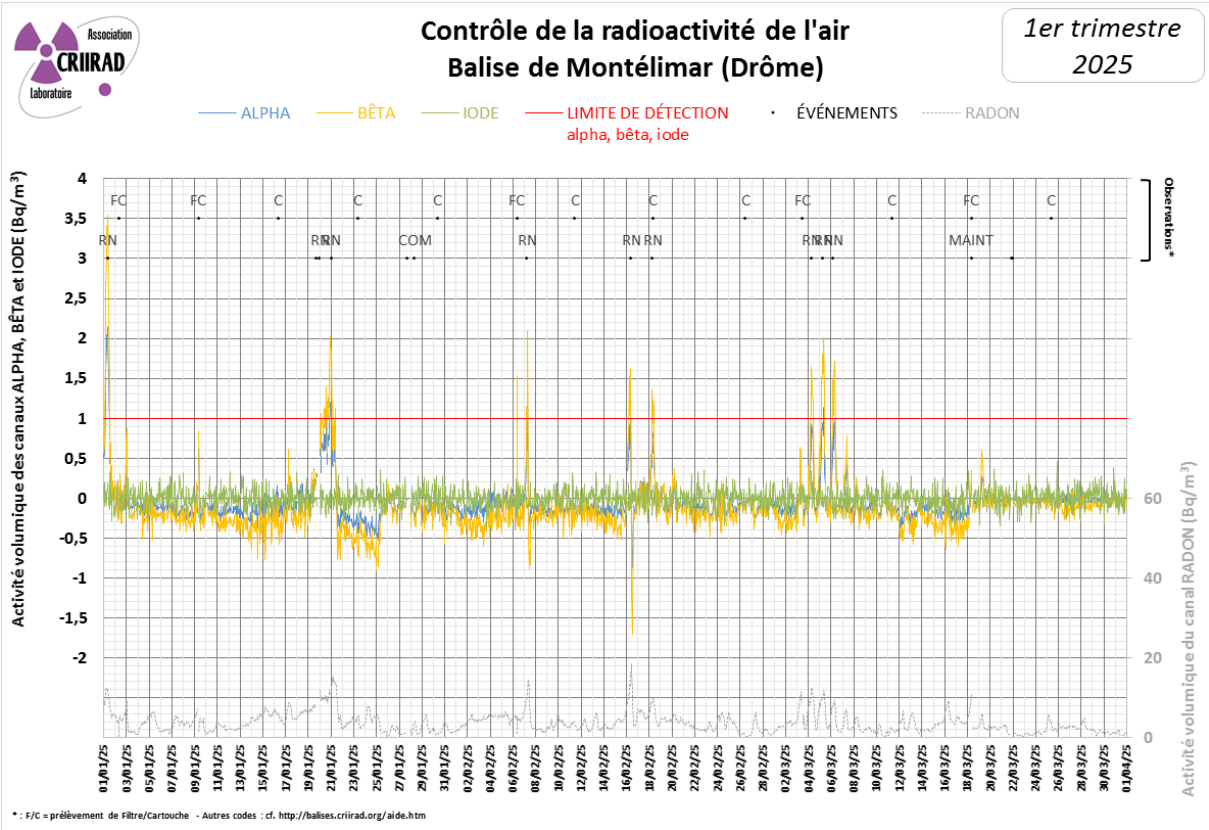
B/ Balise de Romans-sur-Isère



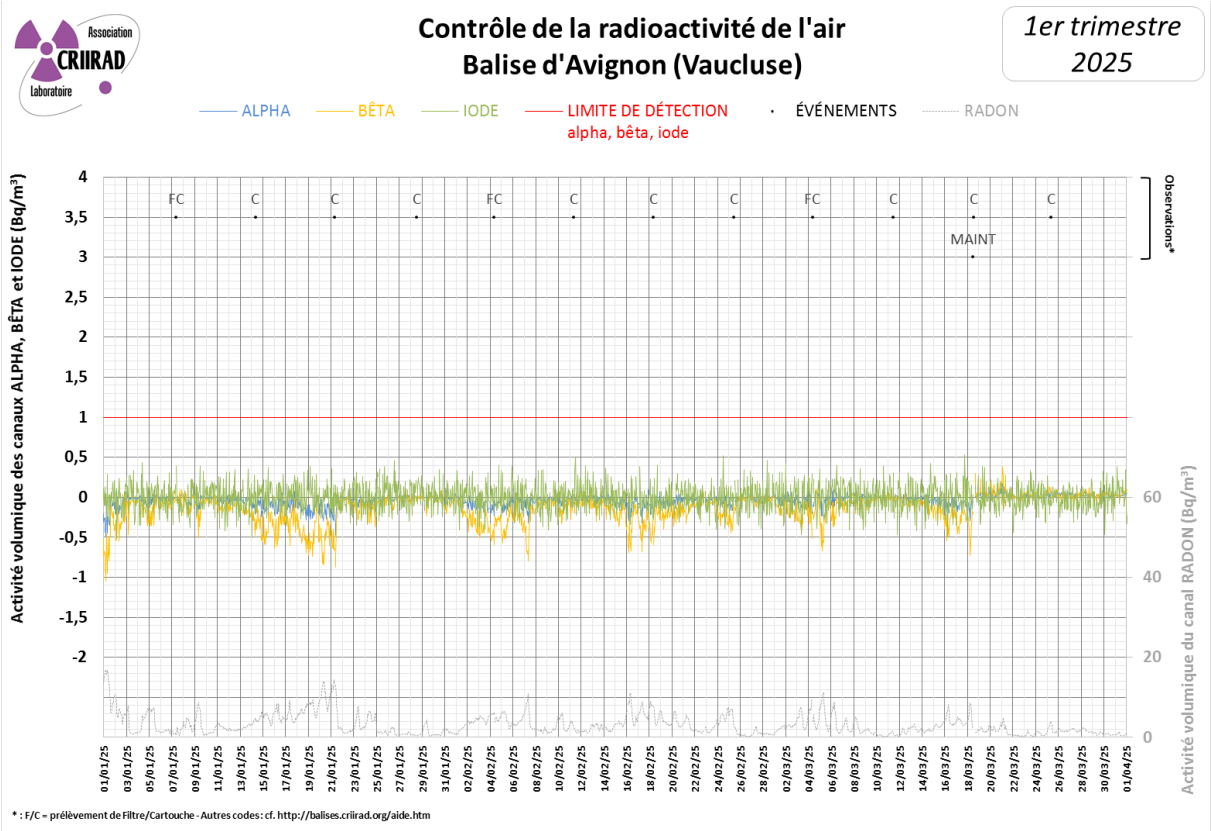
C/ Balise de Valence



D/ Balise de Montélimar



E/ Balise d'Avignon



Commentaires

Aucune anomalie radiologique n'a été enregistrée par les balises de surveillance de la radioactivité atmosphérique.

A noter que la limite de détection (1 Bq/m^3) a été dépassée à plusieurs reprises (voir graphique en page 10) au cours du trimestre sur les voies alpha et/ou bêta direct de la balise atmosphérique de **Valence** (les 20 et 21 janvier, les 7 et 16 février ainsi que les 3, 4, 5, 18 et 31 mars) et de **Montélimar** (les 1er, 20 et 21 janvier, les 7, 16 et 18 février ainsi que les 3, 4 et 5 mars). Le laboratoire de la CRIIRAD a pu vérifier que ces dépassements n'étaient pas liés à une contamination, mais à des pics d'activité volumique en radon[5] (par exemple, des activités volumiques maximales en radon de 34 Bq/m^3 le 21 janvier à la balise de Valence et de 18 Bq/m^3 le 16 février à la balise de Montélimar ont été mesurées).

[5] Il faut savoir que les voies alpha, bêta direct et radon sont mesurées par un seul détecteur. Un paramétrage fin permet de discriminer les impulsions mesurées par ce détecteur et de les imputer aux différentes voies : alpha artificiel, bêta artificiel direct, radon (naturel). Ce paramétrage est réglé de manière optimale pour de faibles concentrations en radon (généralement les concentrations mesurées sont inférieures à 10 Bq/m^3). Mais lors des pics de radon, il peut arriver que la discrimination ne s'effectue plus de manière correcte. La CRIIRAD intervient régulièrement pour optimiser le réglage mais il est difficile d'anticiper les conditions météorologiques à l'origine des fluctuations des concentrations en radon.

III/ Surveillance en continu de la radioactivité de l'eau du Rhône

La CRIIRAD avait mis en place avec le soutien financier de la Ville d'Avignon le système de surveillance de radioactivité de l'eau du Rhône en 1992 au niveau du site de la capitainerie puis transféré en 2009 au niveau du barrage de Sauveterre, géré par la Compagnie Nationale du Rhône. Ce matériel a atteint son seuil d'obsolescence et nécessite des travaux de maintenance, de mise à niveau et de réparation fréquente, ce qui l'immobilise très régulièrement.

Il a été décidé, en accord avec la Ville d'Avignon, propriétaire du matériel, de ne pas remplacer cette balise, arrêtée début 2025, et de basculer sur un programme de prélèvements programmés et réguliers de l'eau du Rhône, ainsi que des campagnes spécifiques sur la matrice aquatique (sédiments du Rhône, plantes aquatiques,…)

Les résultats de cette « nouvelle surveillance » seront détaillés dans la partie « Résultats des contrôles en différé au laboratoire de la CRIIRAD ».

RESULTATS DES CONTROLES EN DIFFERE AU LABORATOIRE DE LA CRIIRAD

I/ Résultats des analyses de filtres par spectrométrie gamma

Media filtrant	Station	Air échantillonné du	Air échantillonné au	Date de prélèvement	Date d'analyse	Césium 137 (microBq/m^3)	Césium 134 (microBq/m^3)	Autres radionucléides artificiels émetteurs gamma* (microBq/m^3)
Filtre à aérosols (piégeage des poussières atmosphériques)	Romans	09/12/24 10:33	13/01/25 10:47	13/01/2025	14/01/25	< 8,0	< 10,0	< LD
	Romans	13/01/25 11:01	10/02/25 12:55	10/02/2025	10/02/25	< 10,0	< 14,0	< LD
	Romans	10/02/25 13:10	10/03/25 10:21	10/03/2025	10/03/25	< 10,0	< 15,0	< LD
	Valence	23/12/24 09:34	27/01/25 08:22	27/01/2025	28/01/25	< 11,0	< 9,0	< LD
	Valence	27/01/25 08:42	24/02/25 08:10	24/02/2025	24/02/25	< 10,0	< 13,0	< LD
	Valence	24/02/25 08:29	24/03/25 08:10	24/03/2025	24/03/25	< 11,0	< 16,0	< LD
	Montélimar	05/12/24 08:00	02/01/25 07:45	02/01/2025	02/01/25	< 10,0	< 13,0	< LD
	Montélimar	02/01/25 07:55	06/02/25 07:59	06/02/2025	06/02/25	< 8,0	< 11,0	< LD
	Montélimar	06/02/25 08:09	03/03/25 10:51	03/03/2025	03/03/25	< 11,0	< 16,0	< LD
	Avignon	03/12/24 09:07	07/01/25 08:47	07/01/2025	09/01/25	< 7,0	< 11,0	< LD
	Avignon	07/01/25 08:55	04/02/25 09:00	04/02/2025	05/02/25	< 9,0	< 14,0	< LD
	Avignon	04/02/25 09:07	04/03/25 08:57	04/03/2025	05/03/25	< 7,0	< 9,0	< LD

Les résultats sont exprimés en microbecquerels par mètre cube d'air à la date de mesure.

(*) Parmi les autres radionucléides artificiels émetteurs gamma relevés (liste non exhaustive) figurent notamment le manganèse 54, le cobalt 60, le ruthénium-rhodium 106, l'iode 129, l'iode 131, l'américium 241,… les limites de détection typiques sont de l'ordre de 3 à 65 microbecquerels par mètre cube d'air.

Commentaires :

L'activité des radionucléides artificiels émetteurs gamma recherchés est restée inférieure aux limites de détection dans les analyses de filtres aérosols.

II/ Résultats des analyses de cartouches par spectrométrie gamma

Media filtrant	Station	Air échantillonné du	Air échantillonné au	Date de prélèvement	Date d'analyse	Iode 131 (microBq/m^3)	Autres radionucléides artificiels émetteurs gamma* (microBq/m^3)
Cartouche de charbon actif (piégeage spécifique de la forme gazeuse de l'iode 131)	Romans	06/01/25 11:38	13/01/25 10:47	13/01/2025	14/01/25	< 110	< LD
	Romans	03/02/25 10:18	10/02/25 12:55	10/02/2025	11/02/25	< 120	< LD
	Romans	04/03/25 10:02	10/03/25 10:21	10/03/2025	11/03/25	< 140	< LD
	Valence	20/01/25 08:50	27/01/25 08:22	27/01/2025	27/01/25	< 80	< LD
	Valence	17/02/25 08:01	24/02/25 08:14	24/02/2025	24/02/25	< 100	< LD
	Valence	17/03/25 08:45	24/03/25 08:10	24/03/2025	25/03/25	< 120	< LD
	Montélimar	26/12/24 08:03	02/01/25 07:45	02/01/2025	02/01/25	< 100	< LD
	Montélimar	30/01/25 08:12	06/02/25 07:59	06/02/2025	06/02/25	< 120	< LD
	Montélimar	26/02/25 10:42	03/03/25 10:51	03/03/2025	04/03/25	< 170	< LD
	Avignon	25/02/25 11:50	04/03/25 08:57	04/03/2025	06/03/25	< 90	< LD

Les résultats sont exprimés en microbecquerels par mètre cube d'air à la date de mesure. Il convient de préciser que ces résultats représentent une activité moyenne calculée en supposant une contamination homogène sur la période d'exposition de la cartouche (généralement 6 ou 7 jours). En cas de contamination ponctuelle au cours de la période, il peut être nécessaire d'appliquer des facteurs correctifs.

(*) Parmi les autres radionucléides artificiels émetteurs gamma relevés (liste non exhaustive) figurent notamment le manganèse 54, le cobalt 60, le ruthénium 106, l'iode 129, le césium 134, le césium 137, l'américium 241,… les limites de détection typiques sont de l'ordre de 70 à 800 microbecquerels par mètre cube d'air.

Commentaires :

L'activité des radionucléides artificiels émetteurs gamma recherchés est restée inférieure aux limites de détection dans les analyses de cartouches.

III/ Résultats des analyses de prélèvements radio-écologiques dans la matrice aquatique

Comme signalé en page 10, la balise de surveillance de la radioactivité de l'eau du Rhône située à Avignon a été arrêtée début 2025 et a été remplacée par un programme de prélèvements d'échantillons environnementaux dans la matrice aquatique. Ce programme prévoit pour ce trimestre les résultats de suivi du tritium pour des échantillons d'eau prélevés dans le Rhône.

Un échantillon d'eau du Rhône a été prélevé à une fréquence bimensuelle par le service hygiène santé de la mairie d'Avignon en amont du Pont Saint-Bénézet sur l'ancien site de la capitainerie à Avignon et analysé par l'intermédiaire du laboratoire de la CRIIRAD. Le programme a débuté en février pour 4 échantillons d'eau prélevés ce trimestre.

Trimestre	Date de prélèvement	Date de comptage	Traitement	Activité en tritium Bq/l		
1er trimestre	04/02/2025 10:00	05/05/2025	Filtration	7,9	±	2,0
1er trimestre	18/02/2025 09:45	05/05/2025	Filtration	1,8	±	1,5
1er trimestre	04/03/2025 10:07	12/05/2025	Filtration	8,4	±	2,0
1er trimestre	18/03/2025 09:50	12/05/2025	Filtration		<	1,5

Le tritium étant un radionucléide émetteur bêta pur, il est recherché au moyen d'un comptage par scintillation liquide sur eau filtrée (sans distillation).

Commentaires :

Le tritium est détecté sur 3 des 4 échantillons trimestriels. Les activités de tritium, lorsqu'il est détecté, sont de 7,9, 1,8 et 8,4 Bq/l pour les échantillons prélevés respectivement le 4 février, le 18 février et le 4 mars. Ces résultats suggèrent un impact des installations nucléaires situées le long de la Vallée du Rhône, Avignon étant situé en aval de toutes ces installations.

Le tritium (isotope radioactif de l'hydrogène) représente en effet plus de 99,9 % des rejets radioactifs liquides effectués par les centrales électronucléaires. Les rejets annuels de tritium sont de plusieurs dizaines de TBq par centrale (1 TBq = mille milliards de Bq).

L'étude réalisée par le laboratoire de la CRIIRAD en 2007 a montré une contamination chronique des végétaux aquatiques du Rhône par le tritium organiquement lié. Voir http://www.criirad.org/radioactivite-milieu-aquatique/eaux-de-surface/sommaire.html.

Le tritium présent dans l'eau est transféré en partie à la faune et à la flore aquatique ainsi qu'au milieu terrestre, à la chaîne alimentaire (irrigation, boisson) et in fine à l'homme. Les rejets des installations nucléaires de la vallée du Rhône induisent ainsi une contamination chronique de l'environnement.

L'évaluation des conséquences biologiques de cette contamination fait l'objet de vives controverses dans la communauté scientifique.

EN SAVOIR PLUS SUR LES BALISES

Fonctionnement d'une balise atmosphérique, Fonctionnement d'une balise aquatique, consulter notre site internet à l'adresse : http://balises.criirad.org/aide.htm.

FOCUS : LE TRANSFERT DE LA CONTAMINATION AUX DENREES ALIMENTAIRES (PARTIE 2)

***Rédaction : Marion JEAMBRUN, CRIIRAD. Le contenu ci-dessous est extrait d'un document réalisé pour la Ville de Genève et destiné à tout public.**

Le rapport trimestriel précédent précisait les premières étapes du transfert de la contamination de l'air à la chaîne alimentaire par les mécanismes de dépôts directs sur les végétaux et les transferts foliaires. Ce rapport poursuit la description en abordant d'autres modes de transfert de la contamination : le transfert racinaire ainsi que le transfert aux animaux et aux produits d'origine animale.

Le transfert racinaire

Pour se développer, la plupart des végétaux terrestres puisent dans le sol les minéraux qui sont nécessaires à leur croissance. Après un accident nucléaire conduisant à la contamination des sols, la végétation incorpore via ses racines les radionucléides contenus dans le sol. Dans les premiers temps, les transferts racinaires sont nettement plus faibles que les transferts foliaires, mais avec le temps ils deviennent la voie prédominante de contamination des végétaux.

Le transfert racinaire dépend de 6 principaux facteurs : la forme des radionucléides présents dans le sol (forme particulaire, dissoute) et leurs propriétés physico-chimiques, du temps écoulé depuis le dépôt, du type de sol et de ses caractéristiques physico-chimiques, du type de culture, des pratiques agricoles (apport d'engrais, irrigation, labour, chaulage, etc.) et des conditions climatiques.

Les propriétés du sol

Les transferts racinaires pour une même espèce végétale peuvent différer de 3 ordres de grandeur en fonction de la nature du sol. Cette variation dépend principalement de la composition minéralogique et granulométrique du sol, de sa teneur en matière organique et de son pH. A titre d'exemple, beaucoup de radionucléides présenteront une plus grande biodisponibilité pour les plantes dans des sols sableux contrairement aux sols argileux. Cette disponibilité tend à diminuer avec l'augmentation de la teneur en argile.

Dans les sols riches en matière organique, beaucoup de radionucléides auront tendance à être plus facilement transférés aux plantes.

Propriétés des cultures

Les besoins en nutriments varient d'une plante à l'autre. Certains des principaux radionucléides rejetés lors d'accident nucléaire possèdent des analogues chimiques dont les plantes ont besoin pour leur croissance. Pour le césium il s'agit du potassium, pour le strontium du calcium et du manganèse.

Les plantes peuvent également avoir une distribution racinaire différente, des durées de période végétative variables qui vont influencer leur capacité à absorber les radionucléides contenus dans le sol.

Par ailleurs, les différentes parties d'une plante ne vont pas concentrer de la même manière les radionucléides. En général, le transfert est plus important pour les feuilles et les tiges que pour les autres parties de la plante.

Les pratiques agricoles

Les pratiques agricoles ont une grande influence sur les transferts racinaires aux plantes. D'après un document technique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA)[6], l'irrigation a pour effet d'augmenter l'accumulation des radionucléides dans les plantes d'un facteur 1 à 2. Le labour, tend plutôt à réduire les transferts d'environ un facteur 2. Le chaulage (apport de calcium) réduit également le transfert du césium et du strontium d'un facteur 2 à 3 et l'apport d'engrais potassiques d'un facteur 2 à 5. La quantité de césium 137 absorbé par les plantes est fonction de la quantité de potassium 40 disponible dans le sol. Ainsi, les transferts aux plantes peuvent être limités par des apports réguliers de potassium. Cependant l'utilisation de ces engrais potassiques peut poser des problèmes de radioactivité naturelle car ils contiennent des teneurs élevées en

[6] IAEA, 2010, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series N°472. IAEA, Vienna, Austria.

potassium 40 radioactif.
Bien que ces mesures puissent réduire les transferts racinaires aux plantes, en cas de contamination très élevée, elles resteront insuffisantes, voire dérisoires.

Quelques facteurs de transfert

Le facteur de transfert des sols aux plantes définit la capacité d'une plante à absorber via son système racinaire, les radionucléides présents dans un sol. Sa valeur correspond au rapport entre l'activité d'un radionucléide donné dans la plante et son activité dans le sol. Ainsi, plus les facteurs de transfert sont grands, plus la végétation absorbe de radionucléides. Le tableau suivant présente quelques valeurs de facteurs de transfert pour le césium, le strontium et le plutonium, pour différents végétaux (céréales et légumes feuilles) et différents types de sol (sableux et argileux). Les données sont issues du document technique de l'AIEA[7]. Ces valeurs rendent compte de l'état des connaissances à un certain moment, mais elles ne tiennent pas forcément compte de tous les cas particuliers.

Végétaux	Type de sol	Nombre de valeurs	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
			Césium 137		
Céréales (grains)	Sableux	156	0,039	0,0020	0,66
	Argileux	110	0,011	0,0002	0,09
Légumes feuilles (feuilles)	Sableux	96	0,12	0,0021	0,98
	Argileux	67	0,018	0,0005	0,72
			Strontium 90		
Céréales (grains)	Sableux	123	0,14	0,0036	1
	Argileux	72	0,078	0,0053	0,71
Légumes feuilles (feuilles)	Sableux	72	1,7	0,064	7,8
	Argileux	54	0,15	0,0039	2,2
			Plutonium		
Céréales (grains)	Sableux	76	0,000033	0,0000005	0,00036
	Argileux	16	0,0000074	0,0000002	0,00051

Tableau 1 : Facteurs de transfert des sols aux plantes pour différents types de plantes et de sols.

D'après ces valeurs, pour un sol sableux contenant 1 000 Bq/kg sec de césium, une salade contiendrait en moyenne 120 Bq/kg sec (1 000 Bq/kg x 0,12). Il est important de noter qu'il s'agit d'une valeur moyenne. Dans notre exemple, la fourchette de valeurs s'étendrait de 2,1 Bq/kg sec minimum (1 000 Bq/kg x 0,0021) à 980 Bq/kg sec maximum (1 000 Bq/kg x 0,98). Aux incertitudes sur le calcul de la valeur moyenne s'ajoute l'incertitude sur l'estimation de la masse sèche de notre sol et de notre salade puisque les facteurs sont donnés pour des masses sèches.

Par ailleurs, ces facteurs ne sont valables que pour un sol présentant une contamination homogène sur la profondeur du labour. Ils sont donc utilisés pour déterminer le transfert résiduel des sols aux plantes qui seraient cultivées sur un sol ayant été contaminé il y a plus d'une année.

Pour une situation accidentelle où la contamination ne serait localisée qu'en surface et les plantes en cours de croissance au moment des retombées, d'autres facteurs de transfert doivent être utilisés.

Cas particuliers du transfert racinaire aux champignons

Du fait de leur physiologie particulière, les champignons sont capables d'extraire de manière plus efficace les nutriments présents dans le sol. L'absorption se fait grâce à des récepteurs spécifiques situés sur les membranes du mycélium, la partie souterraine et vivace du champignon. Le champignon a également la particularité d'accumuler les éléments extraits, du fait d'un métabolisme assez lent et d'une certaine longévité : de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années. Alors que par transferts racinaires, les végétaux présentent généralement des activités très inférieures à celles du sol, chez certaines espèces de champignons, le phénomène s'inverse : le mycélium parvient à concentrer les radionucléides. Lorsque ces espèces sont comestibles, leur contamination doit être prise en compte. Certains champignons comme la chanterelle en tube, le pied de mouton ou le bolet bai sont des espèces particulièrement à risque. Dans les années qui ont suivi l'accident de Tchernobyl, le laboratoire de la CRIIRAD avait analysé plusieurs centaines d'échantillons de champignons provenant de

France. Les activités maximales en césium 137 dépassaient 1 000 Bq/kg frais. La CRIIRAD a constaté une décroissance progressive des activités dans les champignons en France, mais les problèmes persistent dans le temps. En 1997, un échantillon de Petit gris (*Tricholoma terreum*) prélevé dans les Alpes Maritimes contenait jusqu'à 3 000 Bq/kg. En 2015, certains champignons cueillis en France dépassaient toujours le seuil d'importation des produits du Japon mis en place après Fukushima (100 Bq/kg frais).

Le transfert aux animaux et aux produits d'origine animale

La contamination de produits alimentaires d'origine animale peut représenter une source importante d'exposition aux rayonnements pour l'Homme. Il existe 3 voies de transfert de la contamination aux animaux : les dépôts directs sur la peau, l'inhalation d'aérosols ou de gaz radioactifs et l'ingestion d'aliments, d'eau ou de particules de sol contaminés.

L'absorption transcutanée et le passage à travers les lésions de la peau constituent une voie de transfert très secondaire.

Le transfert via l'inhalation est plus important. La capacité des radionucléides à traverser les membranes pulmonaires et à passer dans le sang varie considérablement d'un radioélément à l'autre et dépend de leur forme: composés gazeux, aérosols ou particules. Une fois dans le sang ils peuvent atteindre les muscles et les divers organes ou le lait.

L'ingestion représente au final la voie dominante de transfert de la contamination aux animaux. Les apports de radionucléides du fait de l'ingestion de sol peuvent être significatifs, mais ils sont en général présents sous une forme difficilement assimilable par l'organisme. L'ingestion d'eau contaminée peut représenter une voie de contamination non négligeable en fonction des circonstances. Par exemple, pour un troupeau en stabulation qui consomme un fourrage non contaminé mais qui est abreuvé avec de l'eau de pluie contaminée, ce vecteur sera prépondérant. En général cependant, c'est l'ingestion de nourriture contaminée et les processus d'absorption et de rétention par l'organisme qui déterminent la teneur en radionucléides des tissus et organes de l'animal. Le niveau de contamination des animaux, et surtout des ruminants, dépend de la quantité d'aliments contaminés ingérée quotidiennement.

Lors des processus de digestion, les conditions d'acidité peuvent conduire à la modification de la forme des radionucléides qui deviennent plus disponibles pour l'organisme.

L'absorption des radionucléides par l'organisme est fortement dépendante de sa demande en isotopes stables (le manganèse 55 stable pour le manganèse 54 par exemple) ou en éléments essentiels analogues (par exemple le calcium naturel pour le strontium 90).

Les besoins physiologiques sont souvent plus importants chez un jeune animal ce qui conduit à un taux d'absorption plus élevé chez les jeunes individus.

Le tableau suivant présente quelques coefficients[7] d'absorption des radionucléides par voie intestinale chez des ruminants. L'absorption est quasiment totale pour l'iode et plus forte pour le césium que pour le strontium. Pour le plutonium, comme pour d'autres éléments de masses atomiques importantes et qui ne sont pas essentiels pour l'organisme ou ne possèdent pas d'analogue chimique, l'absorption est très faible. Ces radionucléides sont très radiotoxiques et malgré de très faibles taux d'absorption, leur ingestion n'est jamais sans risque.

Radionucléides	Nombre de valeurs	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
Cs	14	0,8	0,67	0,93
I	13	0,98	0,7	1,1
Sr	21	0,11	0,055	0,27
Pu	3	0,000085	0,000065	0,00012

Tableau 2 : Coefficients d'absorption des radionucléides par voie intestinale chez les ruminants.

[7] Les valeurs sont issues du document technique de l'Agence International de l'Energie Atomique : IAEA, 2010, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series N°472. IAEA, Vienna, Austria.

Une fois absorbés, les radionucléides passent dans le système sanguin et sont redistribués aux différents organes. La forme des radionucléides peut alors être modifiée. Certains radionucléides peuvent ainsi se retrouver fixés à des molécules organiques. L'iode peut par exemple être incorporé à certaines hormones de la thyroïde.

En fonction de leur nature, les radionucléides se retrouvent accumulés dans différents tissus. L'organe de stockage de l'iode est la thyroïde mais on en retrouve également dans les glandes mammaires ce qui conduit à son transfert dans le lait. Il suffit de quelques heures après l'ingestion pour que l'iode contamine le lait.

L'analyse de 3 échantillons de lait prélevés entre le 16 et le 18 mars 2011 dans la circonscription de Fukushima révélait des teneurs en iode 131 de 1 190 Bq/kg, 1 510 Bq/kg et 932 Bq/kg, ce qui est bien au-delà du niveau maximal admissible fixé pour les pays de l'Union Européenne pour l'iode dans le lait (500 Bq/l)[8].

Le strontium ayant un comportement analogue au calcium, il est principalement accumulé dans les os mais est également transféré au lait. Le césium se comportant comme le potassium, il se retrouve dans tous les tissus et plus particulièrement dans les muscles (donc dans la viande). Le foie et les reins sont des organes qui accumulent particulièrement toute sorte de polluants dont les radionucléides tels que les actinides (uranium, plutonium, américium, etc.).

En ce qui concerne les produits laitiers dérivés, les transferts des radionucléides montrent une assez grande variabilité, du fait de la grande diversité de méthodes de production fromagère. Le césium se retrouve principalement dans la phase aqueuse du lait. On en retrouvera donc beaucoup moins dans la crème et le beurre. Le coefficient de transfert du strontium aux fromages varie d'un type de fromage à un autre, en fonction de la concentration en calcium dans le fromage. Dans les fromages à pâte dure qui sont enrichis en calcium on retrouve ainsi plus de strontium 90.

Quels sont les aliments à risques ?

Compte tenu des différents processus décrits ci-dessus il est possible de cibler un certain nombre d'aliments qui vont présenter un risque accru de contamination.

A court terme, **les végétaux à larges feuilles** font partie des aliments les plus à risque. Ainsi, on trouve classiquement parmi les légumes les plus contaminés les blettes, les épinards, les salades, les poireaux et certaines variétés de choux... Ils sont impactés dès le passage des masses d'air par les dépôts directs. Plus le temps écoulé entre les retombées et la récolte est court, plus la contamination est importante. En fonction des niveaux de contamination, ces aliments doivent impérativement être proscrits de l'alimentation. Dans des secteurs moins touchés par les retombées et faute d'approvisionnement en aliments sains, un rinçage soigneux des légumes permet de réduire la contamination surfacique qui n'a pas encore été incorporée dans les feuilles. Le retrait des feuilles externes les plus développées réduira encore la quantité ingérée.

En l'absence de mesures prises pour éviter la contamination du bétail, **le lait** présente d'importants risques, notamment s'il est consommé par de jeunes enfants, et ce, dès les premiers jours qui suivent les retombées. Parmi les différents laits, celui de chèvre et de brebis concentre plus l'iode radioactif que celui de vache. **Les fromages frais** lorsqu'ils sont fabriqués avec du lait contaminé sont également à risque. En Corse, des niveaux de contamination très élevés avaient été mesurés dans le bruccio suite aux retombées de Tchernobyl.

La viande est également un aliment à risque. Sa contamination intervient plus lentement que pour le lait mais plus durablement si l'animal continue de pâturer de l'herbe contaminée. La viande de gibier peut présenter une contamination plus importante du fait notamment de la consommation pas les animaux de végétaux bioaccumulateurs (qui accumulent les radionucléides) tels que les champignons pour le sanglier et les lichens pour les cervidés.

Les champignons sont des aliments qui présentent un risque sur un très long terme puisque nous avons vu précédemment qu'ils sont capables de concentrer les radionucléides. Pour de très grands consommateurs de champignons, les doses reçues peuvent être très importantes. Il est donc important de veiller à leur provenance.

[8] Cette limite est fixée par le règlement (Euratom) 2016/52 du 15 janvier 2016

ANNEXE : Interprétation des graphiques présentant les résultats du réseau de balises de la CRIIRAD

Une codification a été mise en place sur les graphiques mis en ligne, au niveau de l'encart « Observations », pour renseigner des événements particuliers. Cette codification est explicitée ci-dessous.

A/ Les balises sont des outils de surveillance de la radioactivité fonctionnant 24h/24 toute l'année. Ce fonctionnement en continu est nécessairement rythmé par la survenue d'événements programmés tout au long de l'année (prélèvements hebdomadaires aux balises atmosphériques, interventions de maintenance), voir tableau A.

B/ Il peut se produire également des événements non programmés (dysfonctionnements mécaniques ou électroniques, pannes,…), voir tableau B.

C/ Lorsque des résultats de mesure sont atypiques, ils font l'objet d'une codification explicitée dans le tableau C.

CODIFICATION DES EVENEMENTS SURVENANT AUX BALISES	
Tableau A / Evénements techniques programmés (prélèvement hebdomadaire aux balises atmosphériques, maintenance,…)	
C	Prélèvement de la cartouche à charbon actif (balise atmosphérique) : la fréquence de prélèvement est hebdomadaire. Des prélèvements en urgence sont effectués si nécessaire.
F	Prélèvement du filtre aérosols (balise atmosphérique) : la fréquence de prélèvement est mensuelle, sauf s'il est nécessaire de remplacer le rouleau de filtre ou en cas d'anomalie nécessitant une intervention en urgence.
F/C	Prélèvement simultané du filtre aérosols et de la cartouche à charbon actif (balise atmosphérique)
MAINT	Intervention de maintenance du laboratoire CRIIRAD et/ou d'un prestataire

CODIFICATION DES EVENEMENTS SURVENANT AUX BALISES	
Tableau B / Evénements techniques non programmés (dysfonctionnements techniques, pannes, arrêt balise…)	
COM	Problème de communication pour la transmission des données entre la balise et la centrale de gestion nécessitant ou ayant nécessité une (des) intervention(s) à la balise
DYS	Dysfonctionnement technique (rupture de filtre aérosols, arrêt d'une pompe, panne électronique, panne de compresseur, …)
.	Arrêt ponctuel de la balise, pour une durée inférieure à 6 heures (typiquement : coupure de l'alimentation électrique ponctuelle)
[	Début de période d'arrêt de la balise (dans le cas d'un arrêt d'une durée supérieure à 6 heures)
]	Fin de période d'arrêt de la balise (dans le cas d'un arrêt d'une durée supérieure à 6 heures)
AUTRE	Evénement ne rentrant pas dans une des catégories précédemment citées

CODIFICATION DES EVENEMENTS SURVENANT AUX BALISES	
Tableau C/ Résultats de mesure sortant de l'ordinaire	
RN	Dépassement(s) alpha et (ou) bêta direct (balises atmosphériques) lié(s) à un pic d'activité volumique en radon
P	Pic d'activité volumique (balise aquatique d'Avignon) ou pic de débit de dose gamma ambiant (sondes gamma) en lien avec des épisodes de précipitations ou des crues (lessivage des descendants émetteurs gamma du radon)
CONT-S	Contamination suspectée, analyses complémentaires en cours
CONT-A	Contamination avérée, voir document spécifique

Auteur : Jérémie Motte, Ingénieur environnement, Responsable du service balises au laboratoire de la CRIIRAD

Approbation : Bruno Chareyron, Ingénieur en physique nucléaire, Directeur du laboratoire CRIIRAD.

LABORATOIRE CRIIRAD

Le laboratoire de la CRIIRAD est un laboratoire d'analyse spécialisé dans les mesures de radioactivité et agréé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) pour les mesures de radioactivité de l'environnement et les contrôles radon (voir portée de l'agrément sur le site http://www.criirad.org/laboratoire/agrements.html . Le laboratoire comprend notamment un service dédié à la gestion des réseaux de balises de contrôle en continu de la radioactivité dans l'environnement. Six scientifiques et techniciens assurent le fonctionnement de ce service.

CONSEILLER SCIENTIFIQUE
Bruno CHAREYRON

RESPONSABLE DU SERVICE DE GESTION DES BALISES
Jérémie MOTTE

CO-DIRECTEUR
Julien SYREN

CO-DIRECTRICE
Marion JEAMBRUN

TECHNICIENNE ENVIRONNEMENT
Colette BEY

SCRUTATION DES DONNEES
Stéphane MONCHÂTRE

EQUIPE D'ASTREINTE
Colette BEY, Bruno CHAREYRON, Marion JEAMBRUN, Jérémie MOTTE, Julien SYREN.