

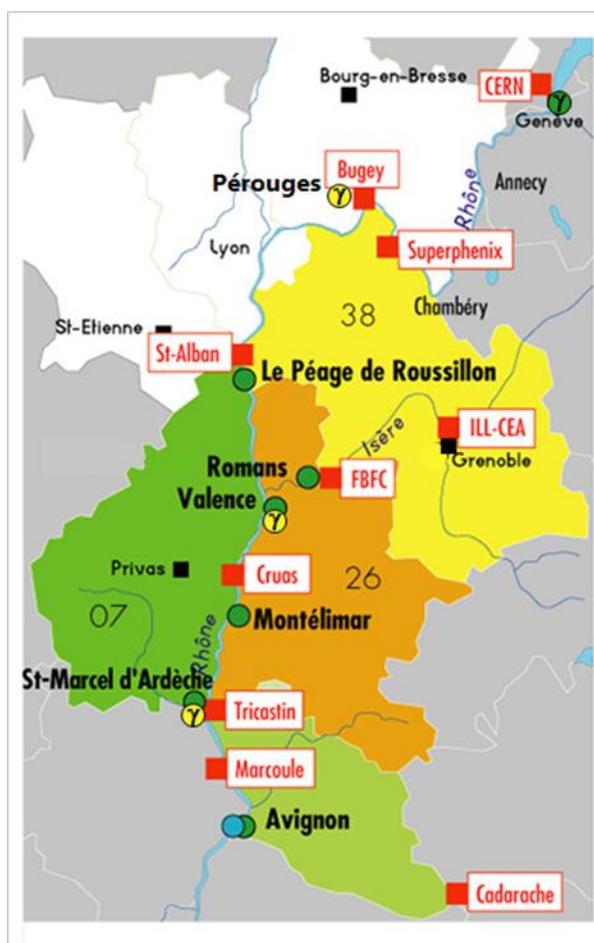
SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITE ATMOSPHERIQUE ET AQUATIQUE

RESEAU DE BALISES CRIIRAD

Rapport N° 21-103

RAPPORT TRIMESTRIEL

AVRIL-MAI-JUIN 2021



- Balises d'air en fonctionnement
- Sondes Gamma
- Sonde de spectrométrie Gamma
- Balise d'eau d'Avignon
- Installations nucléaires



Communes du réseau Montilien

Aleyrac	Cliusclat	Dieulefit
La Bégude de Mazenc	Larnas	Le Poët-Laval
Mazenc	Loriol-sur-Drôme	Rochebaudin
Saint-Bauzile	Saint-Montan	Souspierre

Document réalisé par le **laboratoire de la CRIIRAD**
pour les partenaires du **réseau de balises**

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
SYNTHESE – FONCTIONNEMENT DU RESEAU DE BALISES CRIIRAD	3
I/ Synthèse des résultats / Taux de fonctionnement par système de détection - Deuxième trimestre 2021	3
II/ A signaler au cours du trimestre	3
RESULTATS DES CONTROLES AUTOMATIQUES EN CONTINU	6
I/ Surveillance en continu du débit de dose gamma ambient	6
II/ Surveillance en continu de la radioactivité atmosphérique	8
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	14
III/ Résultats des analyses du prélèvement trimestriel de l'eau du Rhône	14
EN SAVOIR PLUS sur les balises	16
FOCUS : CONTAMINATION DE L'AIR – REJETS RADIOACTIFS DANS L'AIR EN CAS D'ACCIDENT NUCLEAIRE (2)	17
LABORATOIRE CRIIRAD	21

	EMETTEUR	APPROBATION
Nom - Fonction	J. Motte (responsable du service balises)	J. Syren (responsable du service radon)
Date	12/08/2021	12/08/2021
Signature		

SYNTHESE – FONCTIONNEMENT DU RESEAU DE BALISES CRIIRAD

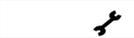
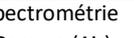
I/ Synthèse des résultats / Taux de fonctionnement par système de détection - Deuxième trimestre 2021

Aucune anomalie radiologique n'a été mise en évidence au cours du deuxième trimestre 2021.

BALISE DETECTION	Pérouges	Péage-de-Roussillon	Romans-sur-Isère	Valence	Montélimar
Alpha/Bêta (Air)		 92,3%	 100,0%	 99,5%	 98,7%
Iode (Air)		 0%	 100,0%	 99,5%	 98,7%
Gamma (Air)	 100,0%			 99,5%	

Légende

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

BALISE DETECTION	Genève	Grenoble	Saint-Marcel d'Ardèche	Avignon Air	Avignon Eau
Alpha/Bêta (Air)			 100%	 100%	
Iode (Air)			 0%	 100%	
Gamma (Air)			 100%		
Spectrométrie Gamma (Air)	 100%	 99,8%			
Gamma (Eau)					 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** : au cours du trimestre, des arrêts de l'alimentation électrique se sont produits à une reprise à la balise de Montélimar le 10 juin et à 4 reprises à la sonde de spectrométrie gamma de Grenoble, le 23 avril, le 3 mai, les 2 et 30 juin (en raison de travaux électriques pour ce dernier site). Aucun de ces arrêts, d'une durée inférieure à 3 heures, n'a nécessité de déplacement d'un technicien sur site.

- **Dysfonctionnement électronique au niveau du détecteur alpha/bêta direct/radon (balise du Péage-de-Roussillon)** : ce dysfonctionnement électronique s'est manifesté par des dépassements de la limite de détection (1 Bq/m^3) sur les voies alpha et bêta direct, et même par le déclenchement d'alarmes intempestives sur la voie bêta direct, le **17 et le 18 mai**. Après s'être assuré dans un premier temps que ces dépassements ne provenaient pas d'un phénomène naturel (excès de radon associé à un mauvais réglage du paramétrage de la voie bêta direct) ou d'une anomalie de contamination (vérification par une analyse en laboratoire du filtre sur lequel les aérosols se sont déposés pendant la période de l'alarme, voir résultat en page 13), le laboratoire de la CRIIRAD a recherché l'origine du dysfonctionnement au niveau technique. Des vérifications du bon fonctionnement du détecteur et de certaines cartes électroniques de l'unité de détection ont été menées le **18 mai** par le laboratoire de la CRIIRAD mais celles-ci n'ont pas permis d'établir la cause du dysfonctionnement. Après des échanges avec le constructeur des balises pour approfondissement du diagnostic, une nouvelle intervention du technicien du laboratoire CRIIRAD a pu être programmée le **24 mai**. Au cours de cette nouvelle intervention, la défectuosité d'une carte électronique, non liée au détecteur concerné par l'anomalie, a été mise en évidence. Le remplacement de cette carte électronique a permis la résolution du dysfonctionnement.

- **Dysfonctionnement électronique (balises de Montélimar et de Valence)** : survenu aux balises de Montélimar et de Valence respectivement les **27 avril et 27 mai**, il s'est caractérisé par une absence de chargement de nouvelles valeurs à la centrale de gestion située dans les locaux de la CRIIRAD. Cette anomalie était liée à un dysfonctionnement de la carte électronique générale de commande (CPU) de la balise. Une réinitialisation du paramétrage à distance de cette carte a permis de résoudre le dysfonctionnement dans les 2 cas.

- **Fonctionnement des balises de Saint Marcel d'Ardèche et de Péage de Roussillon** : Les Départements de l'Ardèche et de l'Isère ont décidé en 2018 de ne plus contribuer au financement du réseau de balises, ce qui a entraîné une diminution des budgets de fonctionnement respectifs de la balise de Saint-Marcel d'Ardèche et de celle du Péage de Roussillon. Ceci a conduit la CRIIRAD à alléger le dispositif de surveillance des 2 balises (dès février 2018 à Saint-Marcel d'Ardèche et à partir de début 2019 au Péage-de-Roussillon). L'unité de détection de l'iode radioactif sous forme gazeuse a été arrêtée¹ 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 nécessaire². Les contributions des communautés de communes DRAGA et Entre Bièvre et Rhône ainsi que le recours aux fonds propres de la CRIIRAD permettent de poursuivre la surveillance en continu du niveau du rayonnement gamma ambiant (balise de Saint Marcel d'Ardèche) et de la radioactivité des aérosols (unité de détection Alpha/bêta (air)) pour les 2 balises. A signaler que le laboratoire de la CRIIRAD est intervenu :

¹ 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 du taux de radiation gamma ambiant (pour la balise de Saint Marcel d'Ardèche) ou de l'activité des aérosols émetteurs bêta et alpha, mais elle est dégradée par rapport au fonctionnement antérieur.

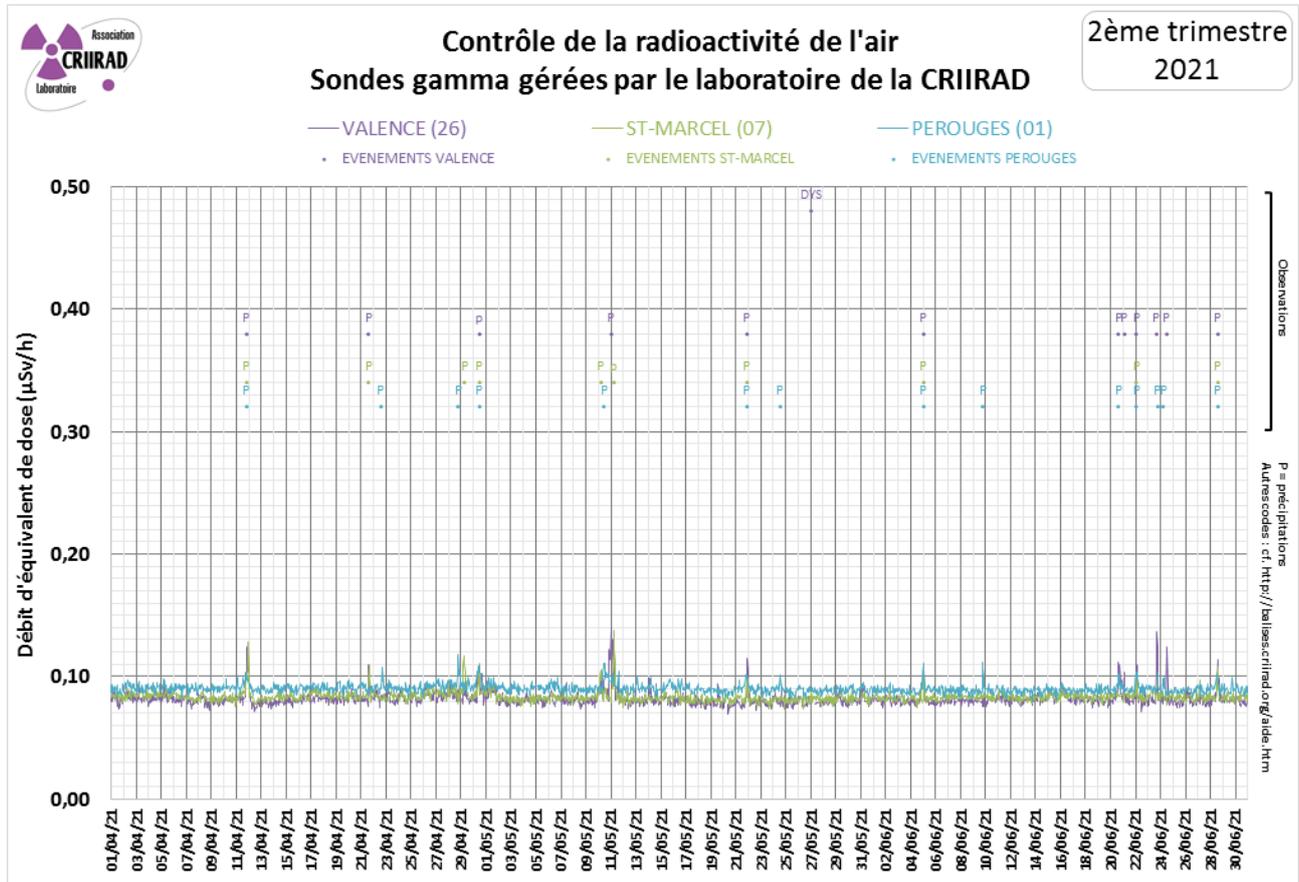
² Les filtres seront analysés systématiquement en cas d'alarme sur les mesures directes.

- **le 18 mai** et **le 20 juin** pour la mise en place d'un nouveau rouleau de filtre aérosols respectivement au niveau des balises du Péage-de-Roussillon et de Saint-Marcel d'Ardèche.
- **les 19 et 24 mai** au Péage-de-Roussillon pour traiter le dysfonctionnement du détecteur alpha-bêta direct-radon (voir ci-dessus).

RESULTATS DES CONTROLES AUTOMATIQUES EN CONTINU

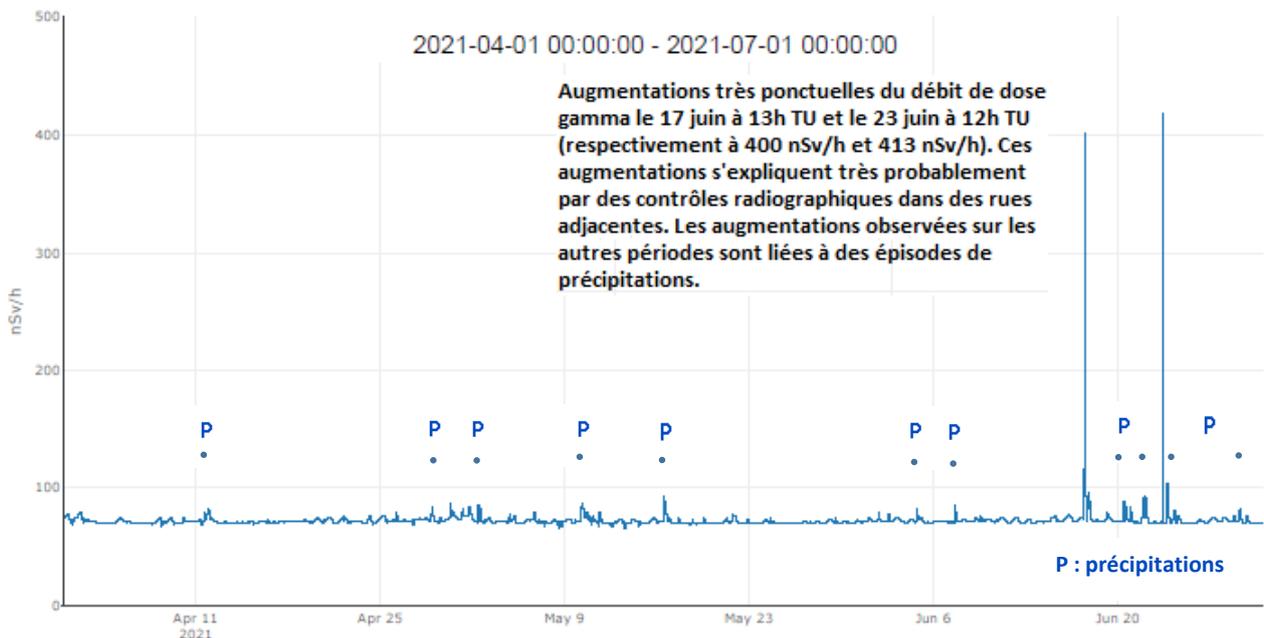
Les codes employés dans les graphiques ci-après sont explicités en annexe.

I/ Surveillance en continu du débit de dose gamma ambiant



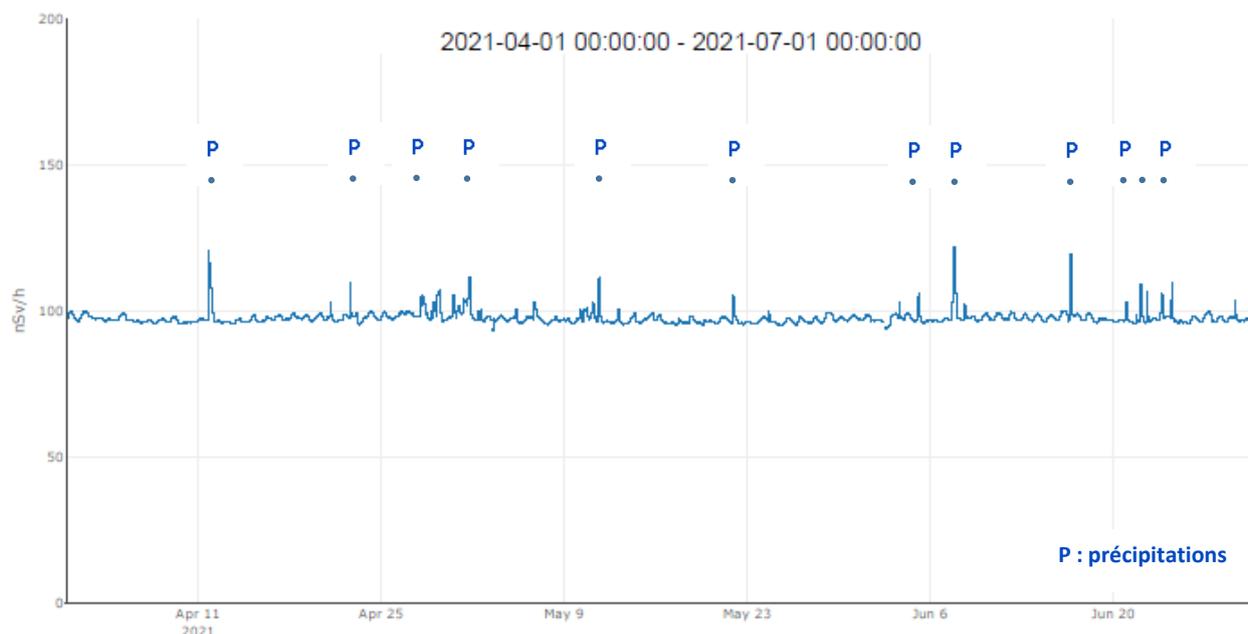
Débit de dose gamma ambiant à Genève

[[Débit de dose Gamma (nSv/h)]] SONDE GAMMA DE GENEVE



Débit de dose gamma ambiant à Grenoble

[[Débit de dose Gamma (nSv/h)]] **SONDE GAMMA DE GRENOBLE**



Commentaires

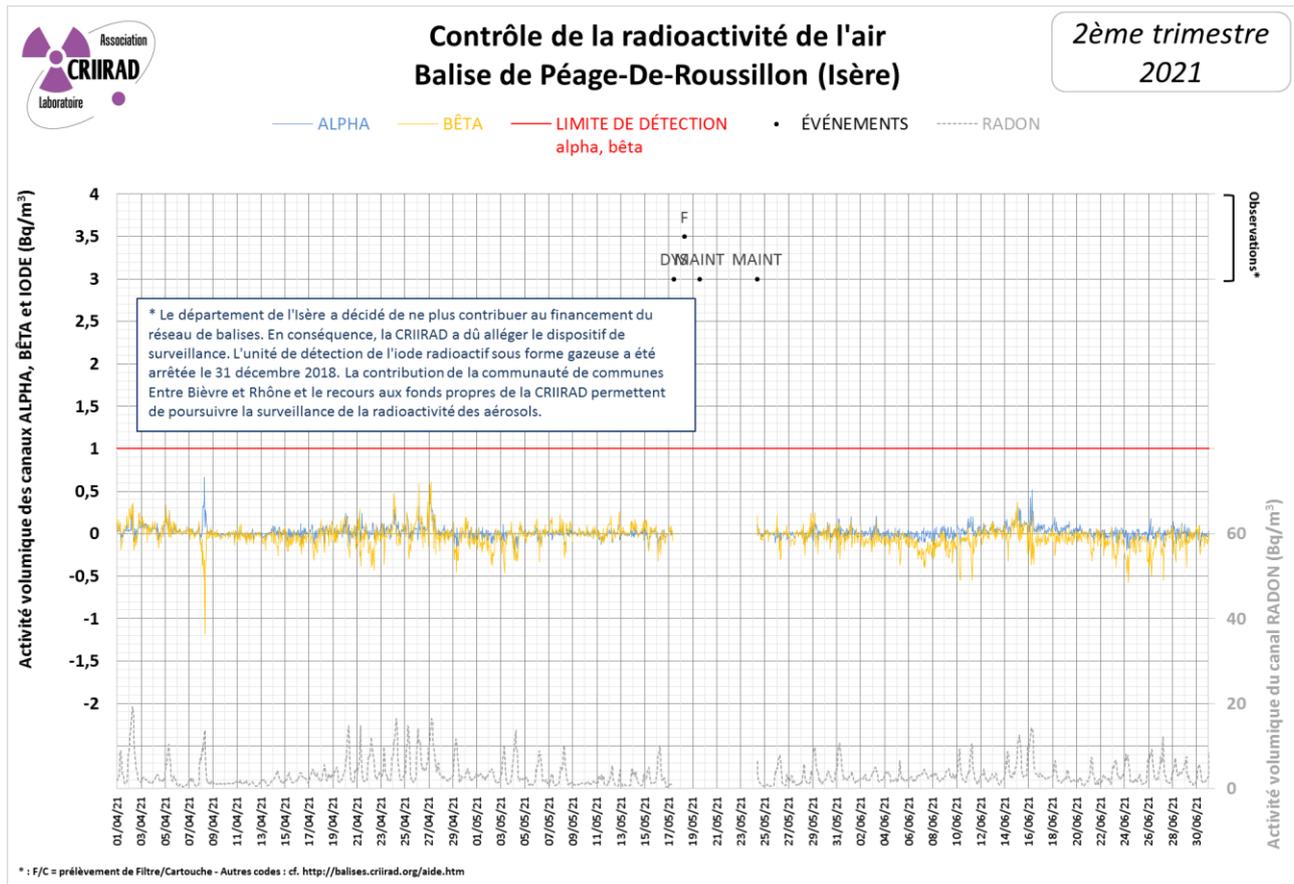
Les augmentations ponctuelles les plus importantes observées à Genève le 17 et le 23 juin s'expliquent par des contrôles radiographiques liés à des travaux dans les rues adjacentes.

A l'exception de ces 2 augmentations survenues à Genève, les fluctuations les plus importantes ont été observées lors d'épisodes de précipitations. Les plus notables sont survenues le 11 avril, le 28 avril (notamment 0,12 $\mu\text{Sv/h}$ à Pérourges), le 11 mai (0,14 $\mu\text{Sv/h}$ à Valence et Saint-Marcel d'Ardèche), le 7 juin (notamment 0,12 $\mu\text{Sv/h}$ ou 120 nSv/h à Grenoble) ainsi que le 23 juin (notamment 0,10 $\mu\text{Sv/h}$ ou 100 nSv/h à Genève). Lors de ces épisodes, les descendants radioactifs émetteurs gamma³ 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.

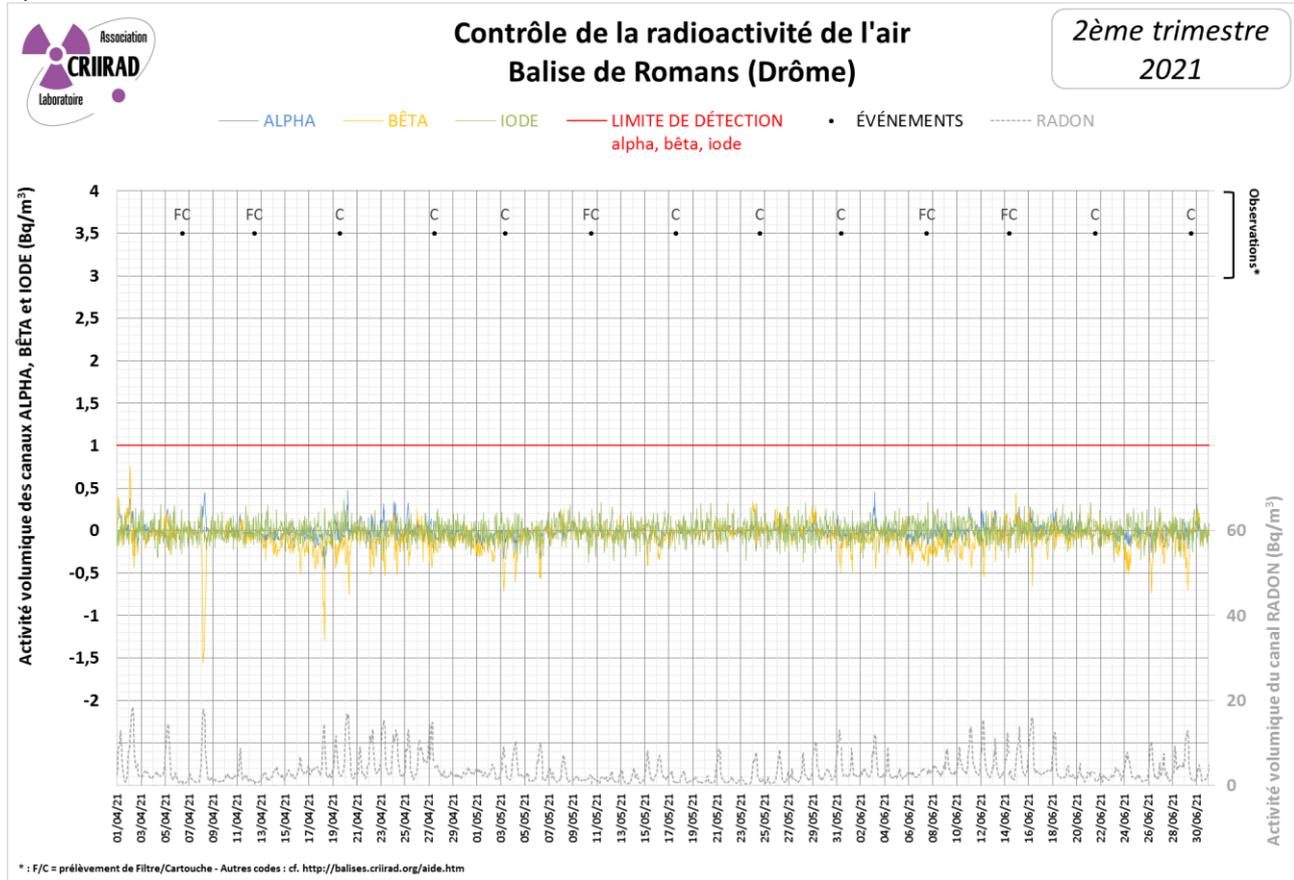
³ Plomb 214 et Bismuth 214 de périodes physiques égales respectivement à 27 minutes et à 20 minutes.

II/ Surveillance en continu de la radioactivité atmosphérique

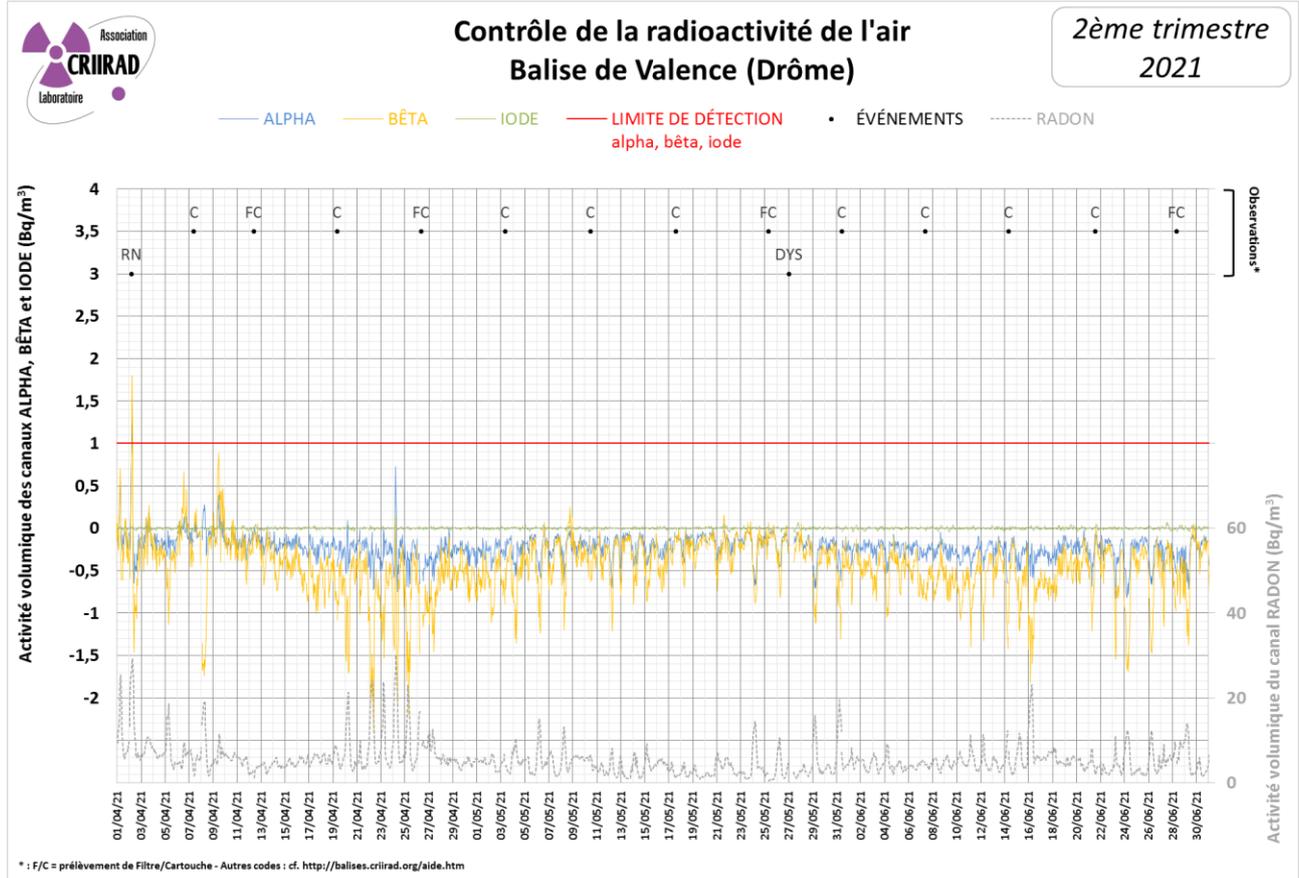
A/ Balise de Péage de Roussillon



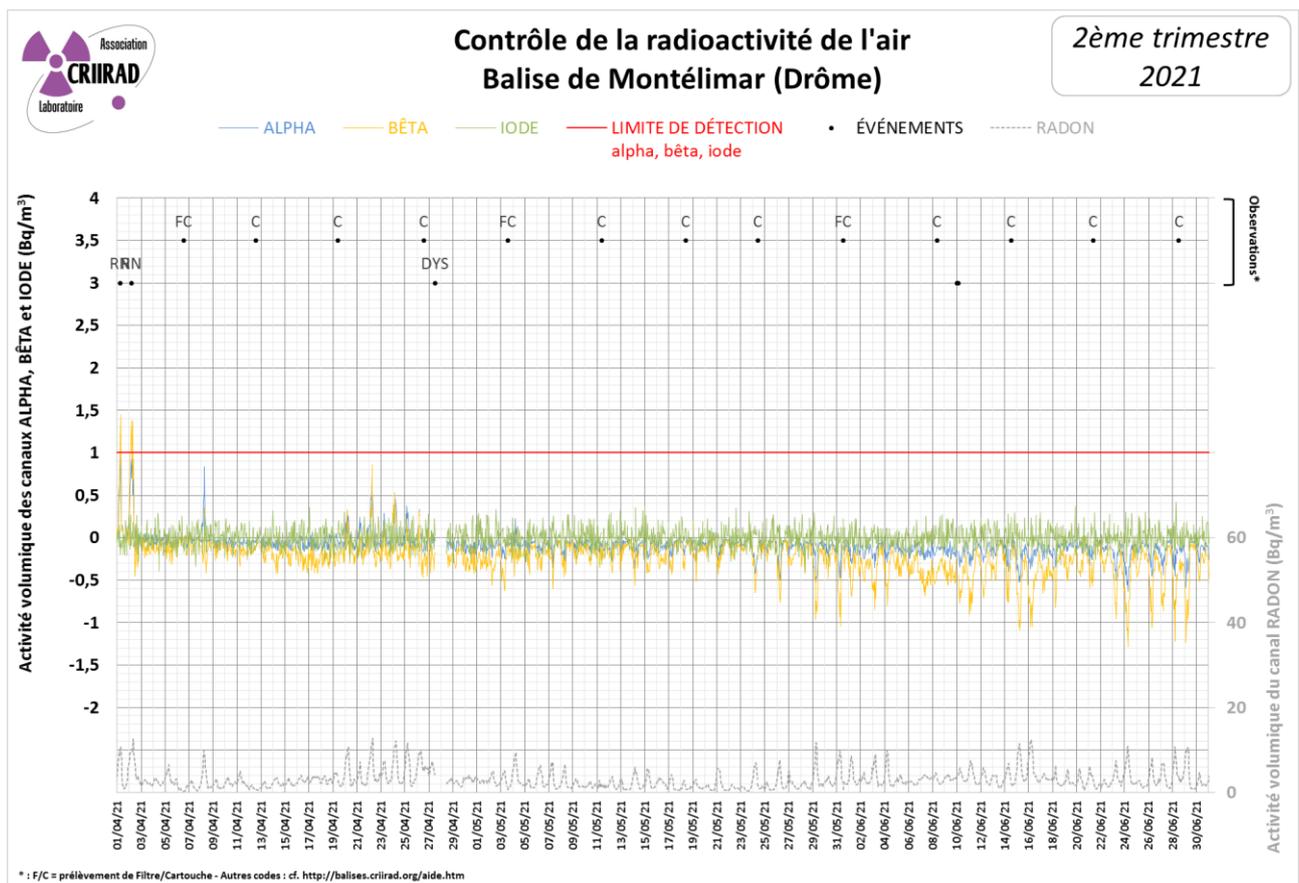
B/ Balise de Romans-sur-Isère



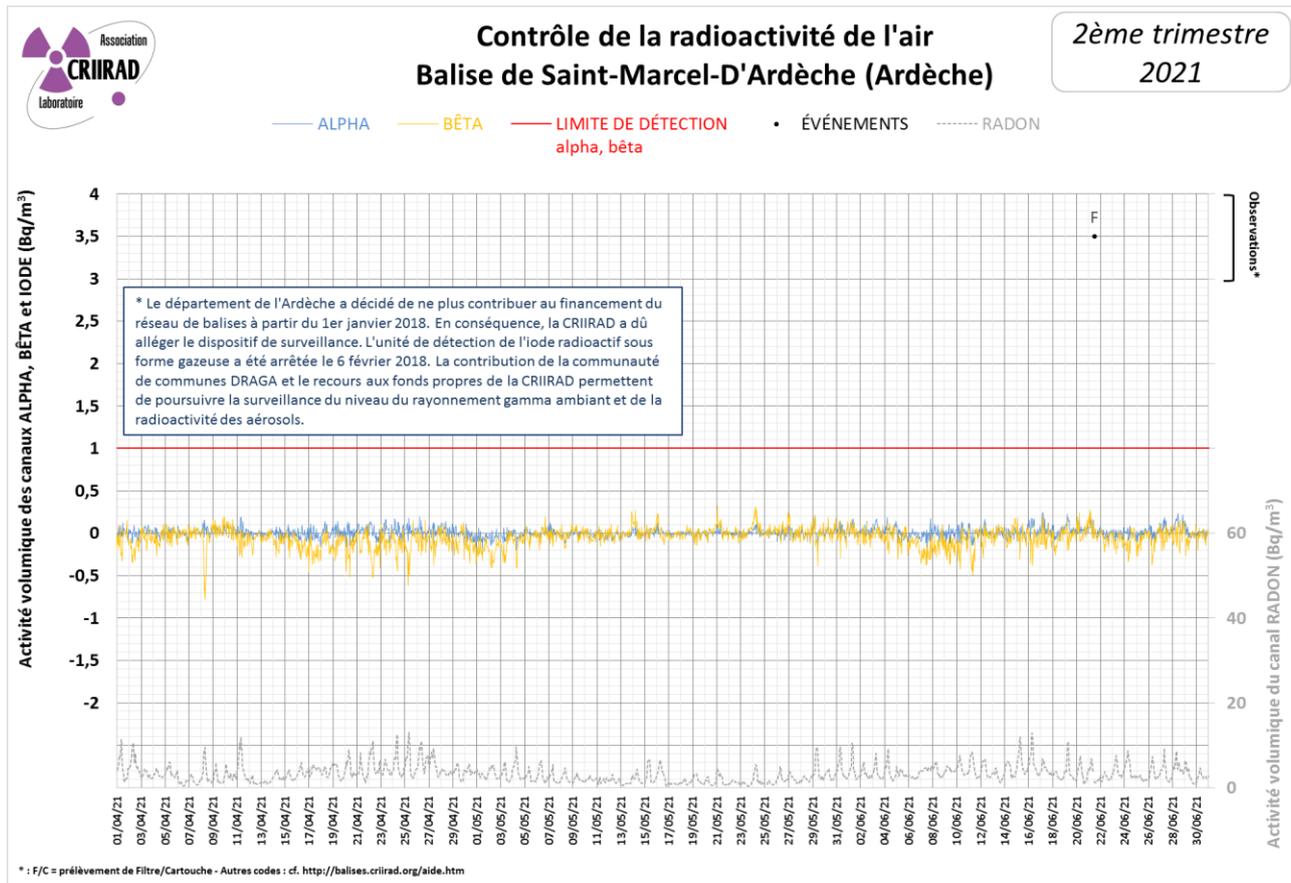
C/ Balise de Valence



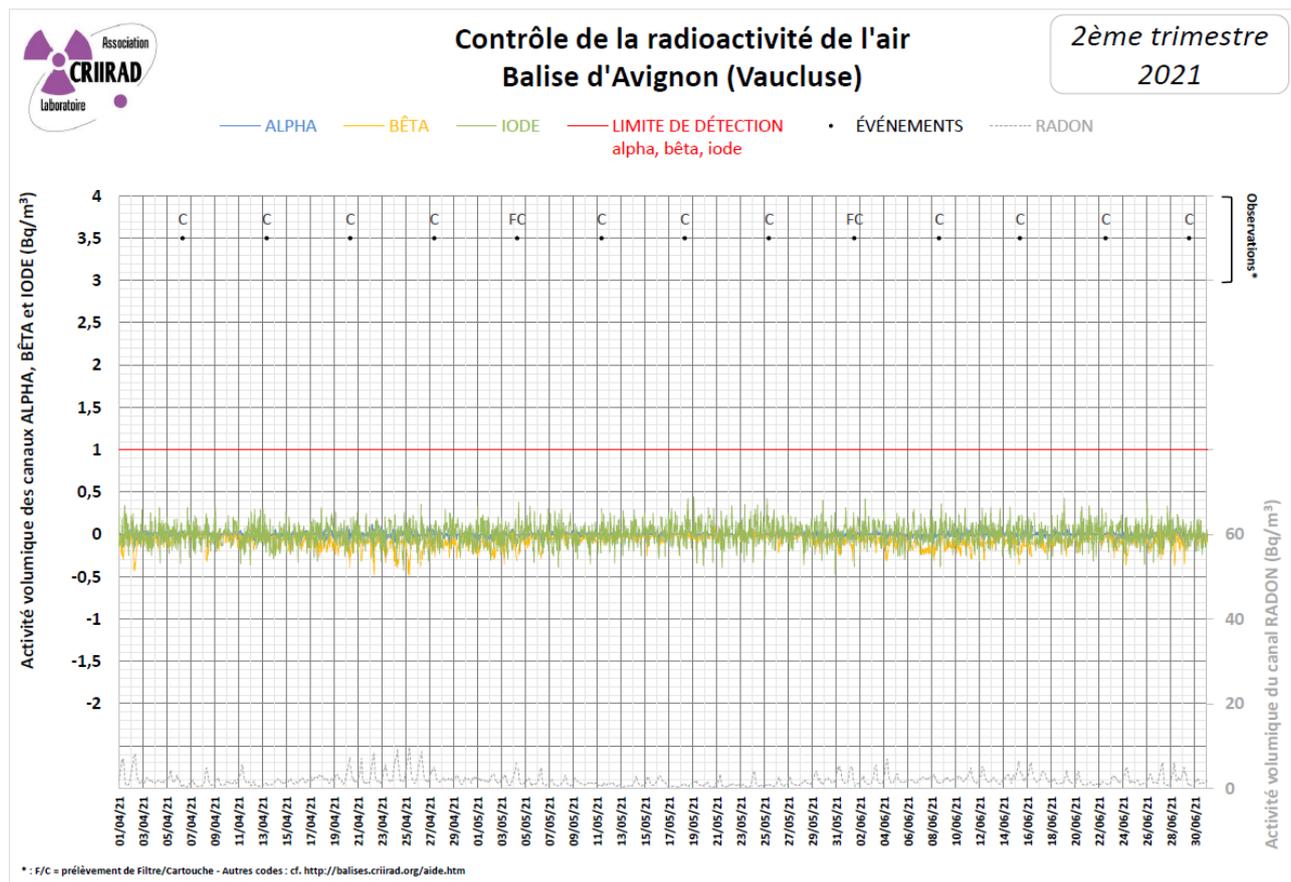
D/ Balise de Montélimar



E/ Balise de Saint-Marcel d'Ardèche



F/ Balise d'Avignon



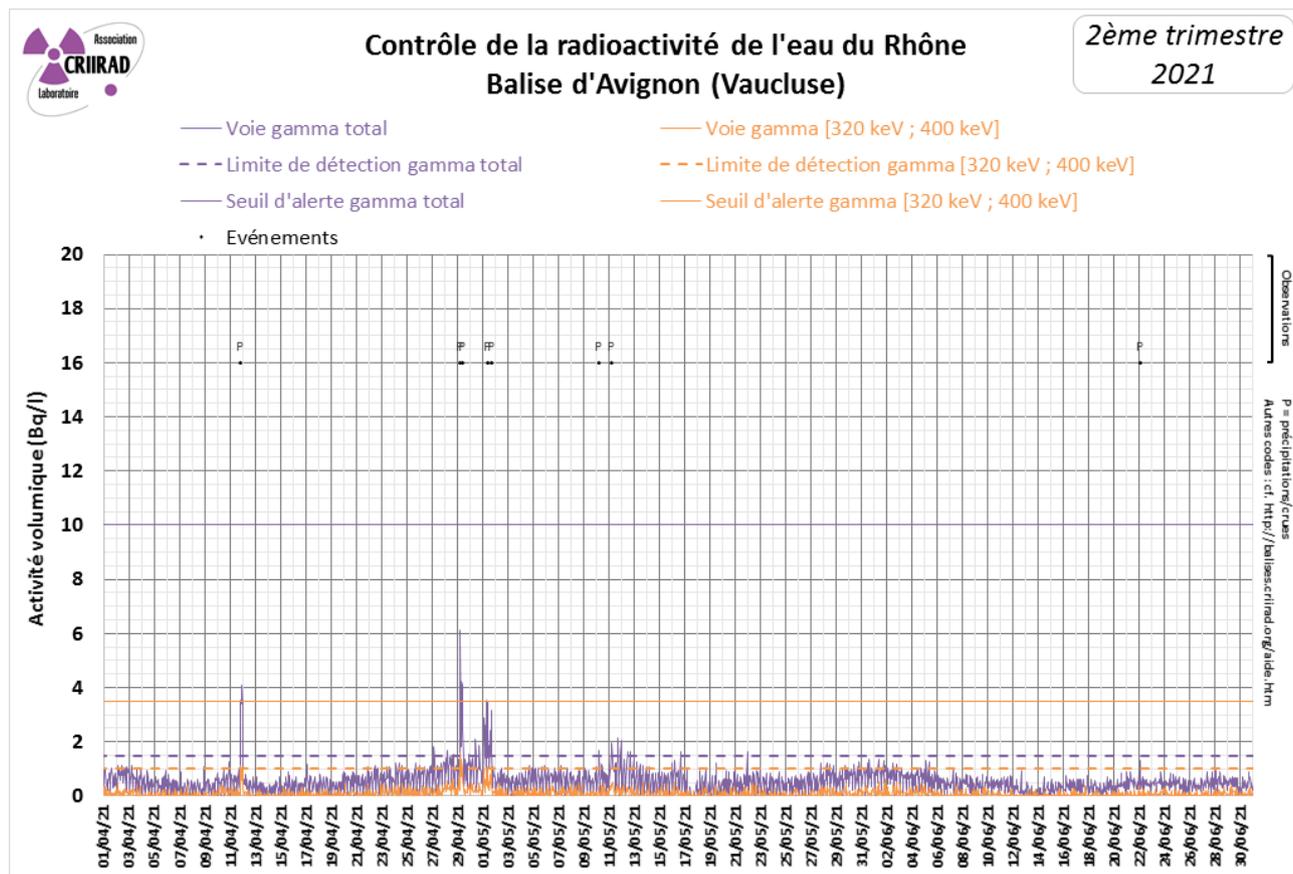
Commentaires

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 graphiques en page 9) au cours du trimestre sur les voies alpha et/ou bêta direct des balises atmosphériques de **Valence** (le 2 avril) et de **Montélimar** (le 1^{er} et le 2 avril). Le laboratoire de la CRIIRAD a pu vérifier que ces épisodes de dépassements n'étaient pas liés à une contamination, mais à des pics d'activité volumique en radon⁴ (par exemple lors des dépassements alpha et/ou bêta direct du 2 avril sur les 2 balises, des activités volumiques maximales en radon de 13 et 30 Bq/m^3 ont été respectivement mesurées à Montélimar et à Valence).

⁴ 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



Commentaires

Le graphique présente l'activité volumique (Bq/l), de l'eau du Rhône passant dans la cuve de la balise : pour la voie « gamma total » (de 100 à 2 000 keV) et la région « 320-400 keV » centrée autour de l'énergie gamma de l'iode 131 (364,5 keV). Cette région inclut également l'énergie gamma du plomb 214 (352 keV) descendant du radon 222 naturel, d'où les interférences possibles.

Des dépassements de la limite de détection (1,5 Bq/l) ont été observés ponctuellement sur la voie gamma total, les 11 et 29 avril ainsi que les 1^{er}, 10, 11, 12, 16 et 22 mai (activité maximale : 6 Bq/l le 29 avril). Des dépassements de la limite de détection (1 Bq/l) ont également été observés de façon ponctuelle sur la voie de mesure gamma centrée sur la fenêtre d'énergie [320keV ; 400keV] les 11 et 29 avril ainsi que le 1^{er} mai (activité maximale : 1,6 Bq/l mesurée le 29 avril).

La présence accrue de radionucléides naturels lors des épisodes pluvieux ou crues du Rhône engendre des augmentations de la charge en émetteurs gamma.

RESULTATS DES CONTROLES EN DIFFERE AU LABORATOIRE DE LA CRIIRAD

I/ Résultats des analyses de filtres par spectrométrie gamma

Media filtrant	Station	Air échantillonné		Date de prélèvement	Date d'analyse	Césium 137 (microBq/m ³)	Césium 134 (microBq/m ³)	Autres radionucléides artificiels émetteurs gamma* (microBq/m ³)
		du	au					
Filtre à aérosols (piégeage des poussières atmosphériques)	Péage de R.**	17/05/21 18:24	18/05/21 06:24	18/05/2021	18/05/21	< 180,0	< 170,0	< LD
	Romans	08/03/21 13:36	12/04/21 10:04	12/04/2021	14/04/21	< 6,0	< 9,0	< LD
	Romans	12/04/21 10:09	10/05/21 12:13	10/05/2021	10/05/21	< 7,0	< 7,0	< LD
	Romans	10/05/21 12:25	07/06/21 11:40	07/06/2021	08/06/21	< 10,0	< 15,0	< LD
	Valence	22/03/21 09:57	26/04/21 07:47	26/04/2021	26/04/21	< 5,0	< 7,0	< LD
	Valence	26/04/21 08:01	25/05/21 07:10	25/05/2021	25/05/21	< 3,0	< 5,0	< LD
	Valence	25/05/21 07:17	28/06/21 07:52	28/06/2021	28/06/21	< 8,0	< 11,0	< LD
	Montélimar	02/03/21 09:28	06/04/21 12:34	06/04/2021	07/04/21	< 6,0	< 10,0	< LD
	Montélimar	06/04/21 12:42	03/05/21 12:49	03/05/2021	04/05/21	< 9,0	< 8,0	< LD
	Montélimar	03/05/21 12:55	31/05/21 12:48	31/05/2021	31/05/21	< 10,0	< 18,0	< LD
	Avignon	02/03/21 08:23	30/03/21 08:41	30/03/2021	07/04/21	< 10,0	< 16,0	< LD
	Avignon	30/03/21 10:30	04/05/21 07:09	04/05/2021	06/05/21	< 9,0	< 15,0	< LD
Avignon	04/05/21 07:23	01/06/21 12:08	01/06/2021	03/06/21	< 17,0	< 18,0	< 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.

(**) Le filtre de Péage de Roussillon a été analysé pour la période du 17/05 18:24 au 18/05 06:24 pour vérifier l'absence de contamination radiologique lors de la période de dépassements mesurés en direct par le détecteur alpha-bêta direct-radon (voir page 4 pour les détails). Les limites de détection pour cette analyse (180 microbecquerels par mètre cube pour le césium 137 et 170 microbecquerels par mètre cube pour le césium 134) sont plus élevées que pour les mesures mensuelles du fait d'un volume d'air prélevé en 12 heures dans l'échantillon beaucoup plus faible (60 fois) que dans un filtre mensuel.

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		Date de prélèvement	Date d'analyse	Iode 131 (microBq/m ³)	Autres radionucléides artificiels émetteurs gamma* (microBq/m ³)
		du	au				
Cartouche de charbon actif (piégeage spécifique de la forme gazeuse de l'iode 131)	Romans	06/04/21 10:16	12/04/21 10:04	12/04/2021	14/04/21	< 110	< LD
	Romans	03/05/21 08:06	10/05/21 12:13	10/05/2021	11/05/21	< 100	< LD
	Romans	31/05/21 08:47	07/06/21 11:40	07/06/2021	08/06/21	< 100	< LD
	Valence	19/04/21 08:19	26/04/21 07:47	26/04/2021	28/04/21	< 130	< LD
	Valence	17/05/21 13:50	25/05/21 07:10	25/05/2021	25/05/21	< 120	< LD
	Valence	21/06/21 13:11	28/06/21 07:52	28/06/2021	29/06/21	< 200	< LD
	Montélimar	30/03/21 08:23	06/04/21 12:34	06/04/2021	07/04/21	< 120	< LD
	Montélimar	26/04/21 13:13	03/05/21 12:49	03/05/2021	04/05/21	< 120	< LD
	Montélimar	24/05/21 09:51	31/05/21 12:48	31/05/2021	01/06/21	< 120	< LD
Avignon	25/05/21 08:46	01/06/21 12:08	25/05/2021	02/06/21	< 100	< 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 du prélèvement trimestriel de l'eau du Rhône

Les contrôles effectués en continu par la balise ont pour objet de lancer une alerte en cas de forte élévation de la radioactivité des eaux du Rhône pouvant résulter d'un accident grave. Mais ils ne permettent pas de déceler la présence de radionucléides imputables aux rejets autorisés des installations nucléaires en fonctionnement normal. Il faut pour cela procéder à des analyses beaucoup plus fines en laboratoire. Le budget disponible permet de réaliser deux contrôles ponctuels par trimestre : recherche des radionucléides émetteurs gamma et du tritium.

En situation courante, un échantillon d'eau du Rhône est prélevé une fois par trimestre 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 le laboratoire CRIIRAD. Ce type de contrôle peut également être réalisé sans délai en cas de détection de contamination par la balise, grâce au service d'astreinte permanent du service hygiène santé de la mairie d'Avignon et du laboratoire CRIIRAD. Un échantillon d'eau du Rhône a été prélevé à proximité du Pont Saint-Bénézet par un technicien de la Ville le 01/06/2021.

A/ Résultat de l'analyse par spectrométrie gamma

Eau du Rhône	Date de prélèvement	Date d'analyse	N° d'analyse	I 131 (Bq/l)	Cs 137 (Bq/l)	K 40 (Bq/l)
2è trimestre	01/06/21 12:00	08/06/21	31 344	< 0,27	< 0,11	< 5,5

Légende ± : indique la marge d'incertitude associée à la mesure.
< : signifie que le radionucléide n'a pas été détecté. Cela ne signifie pas qu'il est absent, mais la méthode de mesure permet de garantir à une forte probabilité que s'il était présent, son activité ne dépasserait pas la limite de détection.

Les résultats sont exprimés en becquerels par litre à la date de mesure.

Commentaires :

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

B/ Recherche du tritium

Trimestre	Date de prélèvement	Période de comptage		Activité en tritium Bq/l
		Début	Fin	
2è trimestre	01/06/2021 12:00	07/07/2021	15/07/2021	3,0 ± 1,0

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

Commentaires :

Du tritium est détecté avec une activité de **3 Bq/l**.

L'activité mesurée est inférieure à la valeur paramétrique de 100 Bq/l fixée par le code de la santé publique comme référence de qualité pour les eaux potables mais elle est nettement supérieure au bruit de fond naturel.

Ce résultat indique un impact anthropique très probablement lié aux rejets des installations nucléaires situées le long de la Vallée du Rhône en amont d'Avignon.

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 : CONTAMINATION DE L'AIR – REJETS RADIOACTIFS

DANS L'AIR EN CAS D'ACCIDENT NUCLEAIRE (2)

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

Le premier volet, développé dans le bulletin trimestriel précédent, abordait la nature et les propriétés des radionucléides produits dans le cœur du réacteur nucléaire. Dans ce second volet, sont présentés les rejets de substances radioactives dans l'atmosphère en situation accidentelle.

Rejets de radionucléides dans l'atmosphère en situation accidentelle

Pour déterminer le potentiel de risque lié à un rejet accidentel, il est essentiel de connaître le **terme-source**, c'est-à-dire la nature et la quantité des radionucléides présents dans les rejets atmosphériques.

L'évaluation du terme-source est difficile : les premières estimations sont en effet très imprécises, compte tenu du manque de données pendant (et même juste après) l'accident. Cette question du terme-source entraîne des débats pendant des années et fait l'objet de nombreux travaux scientifiques.

L'estimation du terme-source repose sur les 3 éléments suivants :

1) la détermination de l'**inventaire du cœur** au moment de l'accident. Il dépend du type de réacteur, de sa puissance, de la nature du combustible, du temps de séjour du combustible dans le cœur (taux de combustion),...

2) **les mesures dans l'environnement**. Tout le contenu du cœur n'est pas rejeté dans l'air : pour estimer la fraction rejetée dans l'environnement, les scientifiques vont s'appuyer sur les mesures effectuées dans le panache (nuage) radioactif ainsi qu'au niveau des dépôts.

3) **la modélisation**. A partir des données recueillies lors des 2 étapes précédentes, il s'agira d'affiner, par calcul, le terme-source au moyen de modèles mathématiques.

Il convient également de tenir compte du **scénario de l'accident** (les rejets ne vont pas évoluer de la même façon selon qu'il s'agisse d'un incendie, d'une explosion,...), de la **durée et de la cinétique des rejets** (sont-ils continus comme à Tchernobyl ou discontinus comme à Fukushima).

Les évaluations du terme-source peuvent donc être très variables selon les hypothèses prises en compte et les modèles utilisés. Cependant, un schéma général logique se dégage : les rejets les plus importants vont concerner les radionucléides les plus mobiles. Ceci a été

confirmé lors des accidents de Tchernobyl et Fukushima.

Sous quelles formes physico-chimiques peuvent être rejetés les radionucléides ?

Parmi les formes les plus mobiles, on retrouve d'abord les **gaz**. Certains gaz appelés « **gaz rares** » sont chimiquement inertes : ils ne peuvent pas s'associer à d'autres molécules présentes dans leur environnement. C'est ce qui les rend très difficile à piéger par des dispositifs classiques de filtration. Comme ils sont inertes, on ne les retrouvera pas dans la chaîne alimentaire. En revanche, ils présenteront un risque d'irradiation en cas d'exposition directe au panache. On peut citer les isotopes du **xénon** (xénon 133, xénon 135) et du **krypton** (krypton 85, krypton 88).

D'autres substances gazeuses présentent une grande réactivité chimique, qui leur permet de s'associer à d'autres molécules. C'est le cas des halogènes gazeux, comme l'iode (iode 129, iode 131) qui a la particularité de se fixer à la glande thyroïde. Les iodures présentent également une mobilité importante dans l'air et sont solubles dans l'eau.

Pour pouvoir mesurer l'iode 131 sous forme gazeuse, il est nécessaire de le piéger au préalable avec un dispositif de filtre spécifique à charbon actif.

D'autres substances radioactives sont rejetées dans l'air sous forme d'**aérosols**, c'est-à-dire de fines particules en suspension dans l'air. En fonction de leur taille, de leur masse, de leurs propriétés chimiques et de leur période physique, elles se disperseront à plus ou moins grande distance. Leur transfert au niveau du sol et dans la chaîne alimentaire sera également variable (voir fiches S1 et AL1).

Les césiums 134 et 137 sont principalement rejetés sous forme d'aérosols. L'iode 131 sous forme gazeuse et sous forme d'aérosols. On peut également retrouver dans les rejets atmosphériques des **particules chaudes** qui sont des condensats d'agglomérats métalliques (familles du ruthénium et du baryum notamment)

et/ou des micro-fragments de combustibles. Ce sont des particules de très petite masse, dont la taille varie de quelques microns à une dizaine de microns, et qui concentrent une très forte activité. Ces particules peuvent présenter un risque très élevé en cas d'inhalation.

Quels sont les radionucléides principaux rejetés en cas d'accident ?

Qu'il s'agisse des catastrophes de Tchernobyl ou de Fukushima, les radionucléides rejetés dans l'atmosphère en plus grande quantité ont été ceux qui présentent la plus grande « mobilité » :

- les gaz rares, en particulier le xénon 133
- les iodes et les tellures radioactifs
- les césiums radioactifs

Ceci est illustré par exemple par le tableau⁵ ci-après à propos de l'accident de Tchernobyl.

On distingue⁶ :

1/ **les gaz rares** (xénon 133, krypton 85,...). Compte tenu de leur très grande volatilité, la quasi-totalité des gaz présents dans le cœur peuvent être rejetés en cas d'exposition directe du cœur à l'atmosphère (cas de Tchernobyl où, suite à l'explosion du réacteur N°4, 100 % du xénon 133 a été rejeté ce qui représente une quantité colossale de radioactivité : 6 500 PBq (soit 6 500 millions de milliards de Bq). Le scénario ayant été différent à Fukushima (pas d'explosion des cœurs mais une fusion avec explosion d'hydrogène), la proportion de rejets de xénon 133 était plutôt de l'ordre de 60 % avec une activité estimée de l'ordre de 7 320 PBq⁷ (cumul sur les 3 réacteurs accidentés).

2/ **les isotopes de l'iode** (iode 129, iode 131) et du **tellure** (tellure 132) très mobiles et volatiles. Dans le cas de Tchernobyl, l'estimation du rejet d'iode 131 à l'atmosphère est de l'ordre de 1 760 PBq (environ 50 à 60 % de l'inventaire du cœur) et de 1 150 PBq pour le tellure 132 (25 à 60 % de l'inventaire du cœur). Plus faibles à Fukushima, les quantités estimées restent néanmoins très élevées : de l'ordre de 124 PBq pour l'iode 131 (environ 2% de l'inventaire des cœurs des 3 réacteurs) et 29 PBq pour le tellure 132 (0,3% de l'inventaire). Les rejets d'iode ont été préférentiellement sous forme gazeuse⁸.

3/ **les isotopes du césium** qui sont rejetés sous forme d'aérosols. Dans le cas de Tchernobyl, les rejets de

césium 134 et 137, représenteraient 20 à 40 % de l'inventaire du cœur du réacteur, soit une activité de l'ordre de 85 PBq pour le césium 137 et de 54 PBq pour le césium 134. A Fukushima, les rejets auraient concerné environ 1,3 % de l'inventaire du cœur des 3 réacteurs accidentés (de l'ordre de 9 PBq pour le césium 134 et une valeur identique pour le césium 137). 4/ les intermédiaires, qui sont moins mobiles : ce sont par exemple les isotopes du **strontium** (strontium 89 et 90), du **ruthénium** (ruthénium 103 et 106) ou encore le **baryum 140**. Pour Tchernobyl, les rejets estimés varient de 10 PBq pour le **strontium 90** à 240 PBq pour le baryum 140, ce qui représente environ 3,5 à 6 % de l'inventaire du cœur.

5/ les produits réfractaires (non volatiles) : comme le **zirconium 95**, ou les **cériums 141 et 144**. Pour Tchernobyl, les rejets estimés sont de l'ordre de 196 PBq pour le zirconium 95 et une valeur identique pour le cérium 141 (environ 3,5 % de l'inventaire du cœur).

Dans le cas de Tchernobyl, du fait de la mise à l'air libre du combustible nucléaire et de l'explosion, il y a également eu dispersion d'isotopes de l'**uranium** et des **transuraniens** (isotopes du neptunium, du plutonium et du curium notamment). Les rejets estimés en plutonium 239 et 241 ont été respectivement de 0,03 PBq et environ 6 PBq, soit 3,5% de l'inventaire du cœur.

Estimation des rejets de radionucléides lors de l'accident de Tchernobyl (liste non exhaustive)

Inventaire du cœur le 26 avril 1986			Rejet total durant l'accident	
Radionucléide	Période radioactive	Activité (1 PBq = 1 million de milliards de Bq)	Part de l'inventaire du cœur (%)	Activité en PBq (1 PBq = 1 million de milliards de Bq)
Xe 133	5,3 jours	6 500	100	6500
I 131	8 jours	3 200	50 - 60	~1760
Te 132	78 heures	2 700	25 - 60	~1150
Cs 134	2 ans	180	20 - 40	~54
Cs 137	30 ans	280	20 - 40	~85
Sr 89	52 jours	2 300	4 - 6	~115
Sr 90	28 ans	200	4 - 6	~10
Ba 140	12,8 jours	4 800	4 - 6	~240
Mo 99	67 h	4 800	>3.5	>168
Ru 103	39,6 jours	4 800	>3.5	>168
Ru 106	1 an	2 100	>3.5	>73
Zr 95	1,4 heure	5 600	3.5	196
Ce 141	33 jours	5 600	3.5	196
Ce 144	285 jours	3 300	3.5	~116
Np 239	2,4 jours	27 000	3.5	~95
Pu 238	86 ans	1	3.5	0.035
Pu 239	24 400 ans	0.85	3.5	0.03
Pu 240	6 580 ans	1.2	3.5	0.042
Pu 241	13,2 ans	170	3.5	~6

Source : <https://www.oecd-nea.org/rp/chernobyl/c02.html>

Table 1. Current estimate of radionuclide releases during the Chernobyl accident (modif. from 95De)

⁵ Extrait du tableau concernant l'estimation du terme-source de l'accident de Tchernobyl :

<https://www.oecd-nea.org/rp/chernobyl/c02.html>. Ce tableau n'est pas exhaustif mais tient compte des principaux radionucléides.

⁶ Les estimations de rejets doivent être considérées comme des ordres de grandeur et sont données ici à titre indicatif. Il y a en effet de fortes disparités selon les sources bibliographiques.

⁷ Terada, H., G. Katata, M. Chino et al. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. J Environ Radioact 112 :141-154 (2012).

⁸ De l'ordre de 80 % par exemple pour ce qui concerne les retombées de Fukushima mesurées par la CRIIRAD en Vallée du Rhône.

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	
<i>Tableau A / Evénements techniques programmés (prélèvement hebdomadaire aux balises atmosphériques, maintenance,...)</i>	
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	
<i>Tableau B / Evénements techniques non programmés (dysfonctionnements techniques, pannes, arrêt balise...)</i>	
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	
<i>Tableau C/ Résultats de mesure sortant de l'ordinaire</i>	
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 ambient (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> . Il est placé sous la responsabilité de M. Bruno CHAREYRON, ingénieur en physique nucléaire.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Bruno CHAREYRON



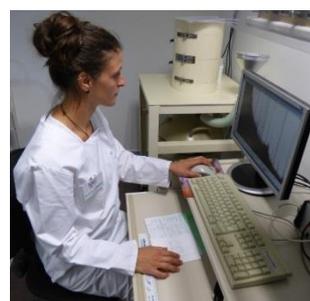
RESPONSABLE DU SERVICE DE GESTION DES BALISES

Jérémy MOTTE



RESPONSABLE SERVICE RADON

Julien SYREN



RESPONSABLE QUALITE

Marion JEAMBRUN



INTERVENTIONS HEBDOMADAIRES, ANALYSES

Stéphane PATRIGEON



SCRUTATION DES DONNEES

Stéphane MONCHÂTRE



PREPARATION DES ECHANTILLONS

Sara ORTUNO

EQUIPE D'ASTREINTE

Bruno CHAREYRON, Marion JEAMBRUN, Jérémy MOTTE, Stéphane PATRIGEON, Julien SYREN.