



Faire avancer la sûreté nucléaire

Constat radiologique régional « Vallée du Rhône » État d'avancement du volet aquatique

DEI/SESURE-2011-34

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION**

Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans l'environnement

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	6
2 CADRE GENERAL	7
2.1 EMPRISE DE L'ETUDE	7
2.2 CARACTERISTIQUES DU RHONE	8
2.2.1 RESUME DES PRINCIPALES DONNEES HYDROLOGIQUES	8
2.2.2 ZONES D'INTERET ET POINTS DE PRELEVEMENT	11
2.3 RADIONUCLEIDES SUSCEPTIBLES D'ETRE PRESENTS	11
2.4 LES INDICATEURS ET BIO-INDICATEURS DU MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL	14
2.4.1 EAU ET MATIERES EN SUSPENSION	15
2.4.2 BIO-INDICATEURS	16
2.4.3 SEDIMENTS	17
2.4.4 RADIONUCLEIDES POTENTIELLEMENT DETECTES SELON LES INDICATEURS	18
3 STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET ETAT D'AVANCEMENT DES PRELEVEMENTS ET MESURES	19
3.1 DONNEES DISPONIBLES : SURVEILLANCE REGULIERE ET ETUDES RECURRENTES	19
3.2 DONNEES DISPONIBLES : ETUDES PARTICULIERES	22
3.3 PRELEVEMENTS ET ANALYSES PREVUS	24
4 REFERENCES ET DOCUMENTS-SUPPORT	30

TABLEAUX

Tableau 1. Activités des rejets liquides des principales installations du bassin rhodanien en 2010.	12
Tableau 2. Radionucléides habituellement recherchés dans l'environnement.....	14
Tableau 3. Caractéristiques de quelques radionucléides artificiels dans l'environnement aquatique ; (1) : métaux de transition, (2) : autres radionucléides.....	18
Tableau 4. Récapitulatif sommaire des types de prélèvements et d'analyses réalisés dans l'environnement des sites des CNPE en milieu aquatique.	19
Tableau 5. Plan de prélèvement et d'analyses pour les eaux et matières en suspensions des affluents.	25
Tableau 6. Plan de prélèvement et d'analyses (hors affluents).....	28

FIGURES

Figure 1. Localisation des installations nucléaires et médicales situées dans le bassin versant du Rhône.....	7
Figure 2. Schéma du linéaire rhodanien.....	10
Figure 3. Evolution des rejets liquides en tritium (TBq/an) des principales installations depuis 2007 et du ^{14}C (GBq/an) des 4 CNPE depuis 2002.....	12
Figure 4. Evolution des rejets en émetteurs gamma émis par les CNPE et Marcoule dans le Rhône de 1991 à 2003 (Eyrolle, 2009).	13
Figure 5. Illustration des voies d'entrée et de transfert des radionucléides dans une chaîne trophique d'eau douce simplifiée.	15
Figure 6. Activités des principaux radionucléides observés par l'IRSN dans l'eau filtrée du Rhône (fraction dissoute) depuis 1978 à Vallabrègues.....	20
Figure 7. Activités massiques des boues de décantation de l'eau du Rhône prélevées par l'IRSN à la station de Vallabrègues depuis 1982.....	20
Figure 8. Concentrations moyennes sur la période 2000 à 2010 du ^{14}C , ^3H , ^{137}Cs et ^{40}K dans les muscles des poissons du Rhône, de l'amont vers l'aval.....	21
Figure 9. Comparaison des concentrations moyennes (2000-2010) en ^{137}Cs des différents types d'échantillons prélevés le long du Rhône.	22
Figure 10. Ordres de grandeurs des concentrations en ^{137}Cs mesurées dans les poissons, depuis les années 70 jusqu'à la fin des années 80.	23
Figure 11. Localisation des zones de prélèvement.....	24

1 Introduction

Dans le cadre de sa mission de surveillance de la radioactivité dans l'environnement, l'Institut réalise des constats radiologiques régionaux dans des zones étendues incluant des installations nucléaires, dont l'objectif général est de fournir une image de la radioactivité présente dans l'environnement, à l'échelle d'un territoire, compte-tenu d'une part, de la rémanence des retombées anciennes (essais atmosphériques militaires des années 1960 à 1980 et accident de Tchernobyl en 1986) et, d'autre part, des hétérogénéités locales imputables aux rejets actuels ou historiques des installations nucléaires. Cette étude passe par l'examen des données déjà acquises et par des campagnes de prélèvement et de mesures destinées à les compléter.

Ce rapport a pour objectif de rappeler et de préciser la stratégie d'échantillonnage, de présenter le plan de prélèvement et de fournir l'état d'avancement du volet aquatique du constat radiologique « Vallée du Rhône » dont la méthodologie a été décrite et qui a fait l'objet d'un premier état d'avancement relatif au milieu terrestre (Roussel-Debet et Antonelli , 2010 ; Roussel-Debet et al., 2011).

Ce rapport présente dans le cadre de l'étude, d'une part, les principales caractéristiques du Rhône, la position des installations à l'origine de rejets de radionucléides dans le fleuve et les radionucléides attendus et, d'autre part, les principales sources de données acquises par l'IRSN dans le cadre de la surveillance de l'environnement, des études régulièrement effectuées pour le compte d'exploitants ou d'études de recherche plus spécifiques. L'examen de ces données permet de décider quels prélèvements ou analyses viendront compléter ou préciser les connaissances existantes et d'élaborer la stratégie d'échantillonnage ; celle-ci est présentée dans la deuxième partie dans laquelle figurent aussi le plan de prélèvements et d'analyses et son état d'avancement.

2 Cadre général

2.1 Emprise de l'étude

Le volet aquatique concerne le Rhône, restreint au fleuve et, le cas échéant, aux lacs ou aux étangs en connexion avec celui-ci, s'ils présentent un intérêt particulier.

Sur ce territoire sont considérées, en tant que sources potentielles de radionucléides (figure 1), les grandes installations nucléaires situées directement sur la zone d'étude : les 4 CNPE en activité, le réacteur de Creys-Malville (en démantèlement), les autres installations du complexe de Tricastin-Pierrelatte et celles de Marcoule. L'impact éventuel des rejets liquides dans l'Isère et la Durance (usine FBFC de Romans/Isère et centres CEA de Grenoble et de Cadarache) sera pris en compte par un échantillonnage au niveau des confluences avec leurs exutoires. Le cas des rejets hospitaliers (radiothérapie ou radiodiagnostic) atteignant le fleuve fera l'objet d'une étude connexe. Les installations détentrices de sources ou de déchets radioactifs n'émettant pas de rejets et les autres sources potentielles (stockages de cendres de centrales à charbon) ne seront pas considérées.

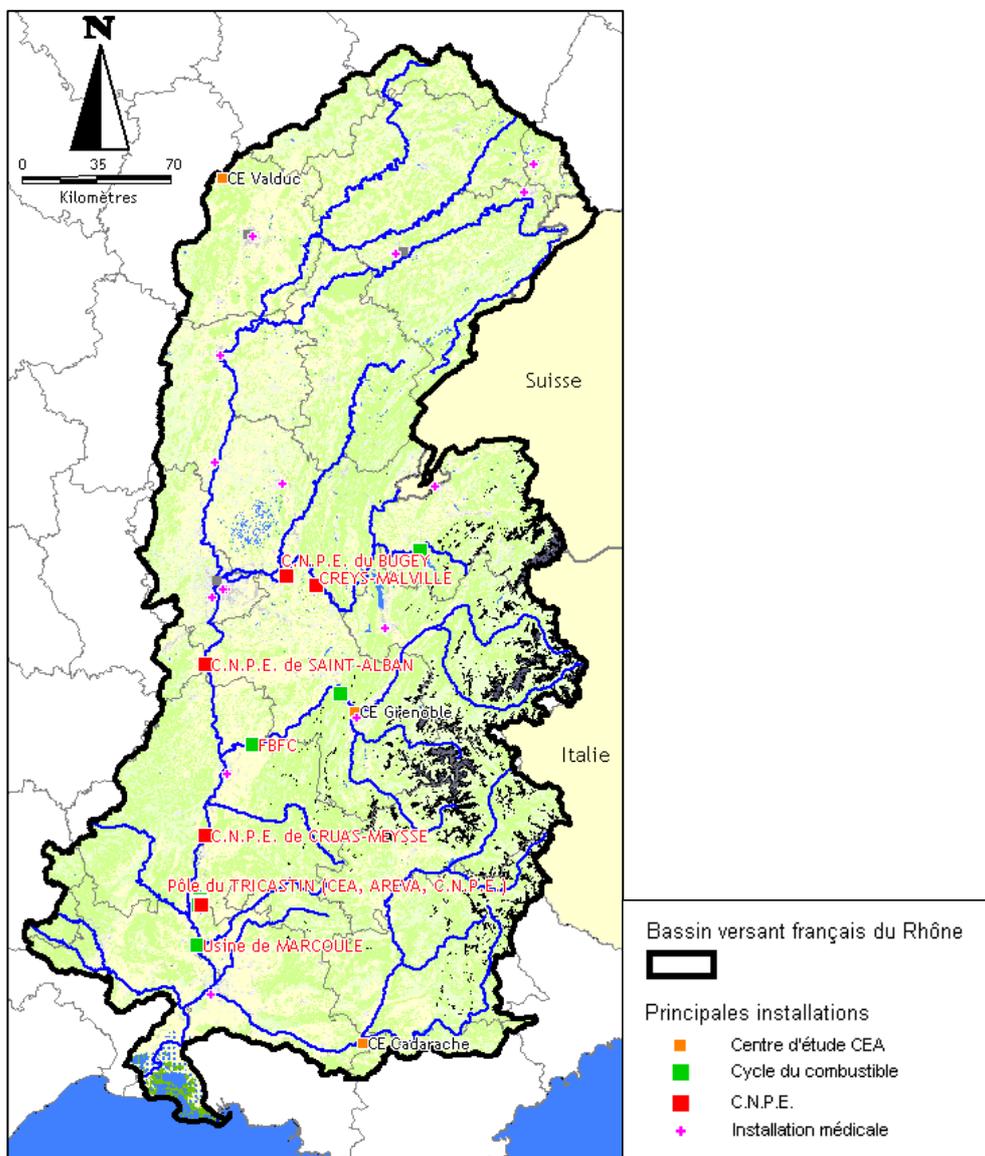


Figure 1. Localisation des installations nucléaires et médicales situées dans le bassin versant du Rhône.

2.2 Caractéristiques du Rhône

2.2.1 Résumé des principales données hydrologiques

Les données qui figurent ci-après sont issues de diverses références, principalement de l'ouvrage « Le Rhône en 100 Questions » (2008) et du site internet de la Compagnie Nationale du Rhône¹.

Le Rhône est la plus importante source d'eau et de matériel particulaire qui transite vers la Méditerranée Nord Occidentale. Avec un bassin versant d'environ 96 500 km² et 800 km de long, il est remarquable par sa diversité climatique et géologique ; il prend sa source en Suisse à 1 753 m d'altitude dans un glacier du massif alpin, traverse le sud de la France avant de se jeter dans la mer Méditerranée par le delta de Camargue, à l'aval de la ville d'Arles. Son débit augmente de 250 m³/s à Genève à 1700 m³/s à son embouchure.

Le Rhône comporte cinq entités hydrographiques aux reliefs et aux climats distincts, alimentés par quatre affluents majeurs qui drainent à eux seuls 60 % du bassin rhodanien².

- Le Rhône alpestre : de sa source au lac Léman, il s'étend sur 165 km avec un bassin versant de 5 220 km² auquel s'ajoutent les 8 000 km² du Lac Léman.
- Le haut Rhône français : du lac Léman à la Saône, il s'étend sur 210 km avec un bassin versant de 12 300 km² ; il englobe le lac du Bourget qui est le plus grand lac naturel français et qui draine 560 km². Son affluent majeur est l'Ain (195 km, BV 3750 km²), la confluence étant située en amont proche de Lyon. À ce niveau le débit moyen du Rhône augmente de 104 m³/s. Les affluents secondaires sont l'Arve (alpestre), la Valserine, l'Usses et le Séran (jurassiens, en rive droite), le Fier et le Guiers (préalpins, en rive gauche).
- Le moyen Rhône : de la Saône à l'Isère, il s'étend sur 110 km avec un bassin versant de 46 150 km². Son affluent majeur est la Saône (480 km, BV 30 000 km²). À sa confluence à Lyon, le débit moyen du Rhône augmente de 423 m³/s. L'apport d'eau des affluents secondaires est négligeable, excepté en crue.
- Le Rhône inférieur : de l'Isère à l'amont du delta, il s'étend sur 160 km avec un bassin versant de 29 150 km². Il comprend deux affluents majeurs :
 - l'Isère (290 km, BV 11 800 km²) ; à sa confluence au nord de Valence, le débit moyen du Rhône augmente de 323 m³/s ;
 - la Durance (305 km, 14 300 km²) ; à sa confluence au sud d'Avignon, le débit moyen du Rhône augmente de 50 m³/s ;Cette entité reçoit aussi des affluents secondaires, cévenols : l'Eyrieux, l'Ardèche, la Cèze et le Gard (à l'origine des crues cévenoles) et préalpins méridionaux : la Drôme, l'Aigues et l'Ouvèze.
- Le delta va de la ville d'Arles, où le fleuve se sépare en deux bras qui enserrant la Camargue sur 500 km², jusqu'à la mer.

¹ <http://www.cnr.tm.fr/fr/> (site consulté en septembre 2011) .

² Les surfaces des bassins versants (BV) sont des indicateurs utiles en cas d'accident majeur atmosphérique d'une installation car, dans ce cas, le drainage superficiel et de sub-surface des sols serait une source importante d'apport au Rhône, comme cela a pu être constaté après l'accident de Tchernobyl (Foulquier et al., 1992).

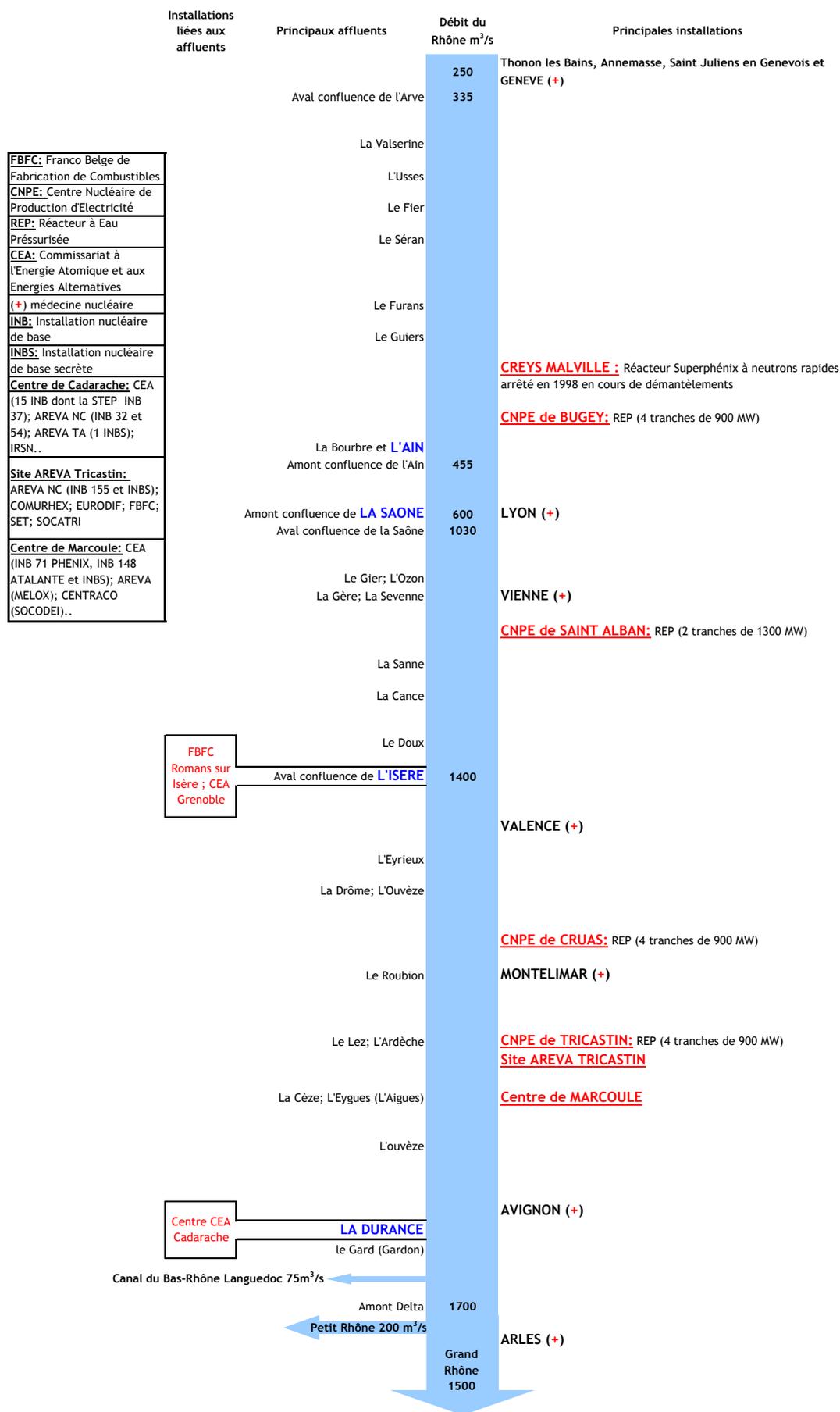
Les données hydrologiques caractéristiques, au niveau de Beaucaire, situé à une vingtaine de km au nord du delta, en amont de la confluence entre le Grand Rhône et le petit Rhône sont les suivantes, sur la période 1920-2002 :

- Débit moyen annuel (DMA) : 1 714 m³/s ce qui correspond à un apport moyen annuel à la mer Méditerranée de $5,4 \times 10^{10}$ m³ d'eau.
- Débit caractéristique d'étiage (DCE) qui correspond au débit seuil en dessous duquel le Rhône est dit en étiage : 520 à 580 m³/s.
- Les débits de crues³ (DC) sont de 8390 m³/s (crue décennale), 11300 m³/s (crue centennale) et 14 160 m³/s (crue millénaire).

Le Rhône est le fleuve français le plus aménagé avec une vingtaine de barrages associés à des usines hydro-électriques dont la puissance est de l'ordre de 3 000 MW.

La figure 2 schématise la succession des affluents, aménagements et installations sur le linéaire rhodanien.

³ Une crue décennale correspond à un débit dont la probabilité d'apparition sur une année est de 1/10. Cette probabilité est de 1/100 pour une crue centennale et 1/1000 pour une crue millénaire.



FBFC : Franco Belge de Fabrication de Combustibles
CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Electricité
REP : Réacteur à Eau Pressurisée
CEA : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
(+) médecine nucléaire
INB : Installation nucléaire de base
INBS : Installation nucléaire de base secrète
Centre de Cadarache : CEA (15 INB dont la STEP INB 37); AREVA NC (INB 32 et 54); AREVA TA (1 INBS); IRSN..
Site AREVA Tricastin : AREVA NC (INB 155 et INBS); COMURHEX; EURODIF; FBFC; SET; SOCATRI
Centre de Marcoule : CEA (INB 71 PHENIX, INB 148 ATALANTE et INBS); AREVA (MELOX); CENTRACO (SOCODEI)..

FBFC
Romans sur
Isère ; CEA
Grenoble

Centre CEA
Cadarache

Figure 2. Schéma du linéaire rhodanien.

2.2.2 Zones d'intérêt et points de prélèvement

De façon générale, la distribution spatiale des prélèvements d'échantillons destinés à appréhender l'état radiologique d'un fleuve n'est pas uniforme mais adaptée aux discontinuités inhérentes soit au milieu (confluences) soit aux points de rejets : un seul point peut être représentatif d'un long tronçon ou au contraire d'une très petite portion de fleuve. Un prélèvement situé, par exemple entre l'exutoire du CNPE du Bugey et Lyon, avant la confluence avec la Saône sera représentatif, en moyenne, des 35 km de ce tronçon, car aucune discontinuité majeure ne se situe sur cette partie ; inversement, la succession proche (20 km) de 2 sites importants à Pierrelatte et Marcoule doit être prise en compte par des points de prélèvement plus rapprochés. À cette hétérogénéité vient s'ajouter la nature des échantillons : statiques, tels que les végétaux aquatiques ou les animaux fixés, les sédiments s'ils ne sont pas remaniés par les chasses des barrages notamment, plus ou moins mobiles (poissons), ou enfin totalement mobiles (eaux et matières en suspension). Les éléments géographiques permettent donc de positionner au mieux les points de prélèvement, en fonction des discontinuités susceptibles de modifier la répartition des radionucléides le long du fleuve, par exemple, point de rejet direct ou par l'intermédiaire d'un affluent, l'augmentation de débit après une confluence permet une dilution des radionucléides.

En milieu aquatique, la distinction des zones non influencées est plus délicate qu'en milieu terrestre et particulièrement sur un fleuve nucléarisé tel que le Rhône : les ZI sont naturellement celles situées en aval de chacune des installations, en soulignant toutefois qu'il s'agit de zones potentiellement influencées, non seulement par l'installation en question mais aussi, par celles éventuelles situées en amont. En ce qui concerne les ZNI, la succession d'installations le long du Rhône rend encore plus difficile leur délimitation : la zone située à l'amont du rejet d'une installation est définie comme non influencée par celle-ci, mais, en toute rigueur elle intègre les rejets situés encore plus à l'amont. C'est pourquoi sont prélevés des échantillons témoins en amont de l'ensemble des installations nucléaires du linéaire rhodanien. Les rejets éventuels provenant de la Suisse sont suffisamment dilués par la présence du Lac Léman pour ne pas impacter le territoire français. Subsiste l'impact du tritium lié dans les sédiments rhodaniens, issu des rejets de l'industrie horlogère suisse et sur lequel une étude particulière, dans un autre contexte, est en cours de réalisation.

2.3 Radionucléides susceptibles d'être présents

Outre la radioactivité naturelle, des contaminations chroniques ou accidentelles d'origine industrielle ou militaire ont atteint le Rhône ces soixante dernières années. Son bassin versant a été soumis aux retombées globales des essais d'armes nucléaires atmosphériques (rémanence du ^{137}Cs , ^{90}Sr et des actinides transuraniens), aux dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl (rémanence du ^{137}Cs) et, plus récemment, mais avec un impact infime, aux dépôts de l'accident de Fukushima au Japon⁴.

À ce bruit de fond viennent s'ajouter les rejets liquides des installations. Les radionucléides prédominants dans les rejets liquides sont actuellement le tritium et le carbone 14, qui sont rejetés par les 4 CNPE du Rhône à hauteurs

⁴ Les périodes de prélèvements d'échantillons effectués dans le cadre de ce constat recouvrent des périodes antérieures et postérieures à celle pendant laquelle ont eu lieu les dépôts liés à l'accident de Fukushima.

respectives d'environ 207 TBq/an (^3H) et 150 GBq/an (^{14}C)⁵ ; le centre de Marcoule rejette quant à lui environ 80 TBq/an de tritium (tableau 1 et figure 3).

Tableau 1. Activités des rejets liquides des principales installations du bassin rhodanien en 2010.

sources : AREVA (2011-a et -b); CEA (2011a ; -b et -c) ; EDF (2011) ; Pourcelot, 2011.

		^3H (TBq)	Autres radionucléides, incluant le ^{14}C (GBq)	^{14}C (GBq)
Rhône	EDF (4 CNPE)	206,60	154,3	149,2
	Marcoule	80,40	138,01	n.c
	AREVA Tricastin	1,80E-03	14,3	1
	Creys	2,66E-03	9,42E-03	n.c
	Total Rhône	287	306,62	-
Affluents	Cadarache	2,37E-02	1,94E-01	0,008
	FBFC Romans	0	0,2505	n.c
	CEA Grenoble	0	0	n.c
	Total affluents	2,37E-02	4,44E-01	-
TOTAL		287	307,1	-

n.c : non rejeté ou valeur du rejet non détaillée ;

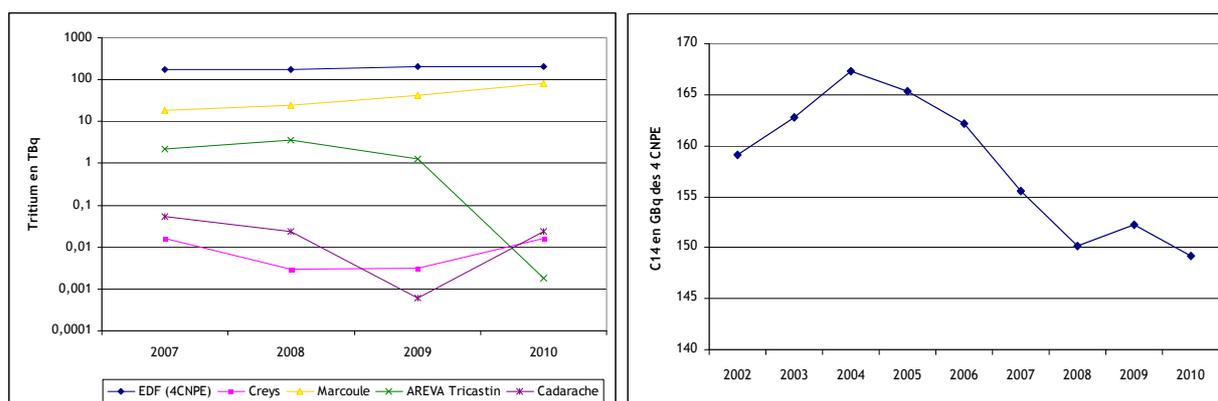


Figure 3. Evolution des rejets liquides en tritium (TBq/an) des principales installations depuis 2007 et du ^{14}C (GBq/an) des 4 CNPE depuis 2002.

En ce qui concerne les radionucléides émetteurs gamma, les rejets des CNPE ont fortement diminué, cf. figure 4 (Eyrolle, 2009) ; ils se situent maintenant entre 0,01 et 1 GBq/an pour l'ensemble des réacteurs situés sur le Rhône ; le centre de Marcoule rejette également des émetteurs gamma ($\approx 0,1$ à 40 GBq/an), ainsi que du ^{90}Sr (≈ 40 GBq/an), divers autres émetteurs bêta dont ^{129}I et des émetteurs alpha (≈ 1 GBq/an).

⁵ 1 GBq (giga becquerel) = 1×10^9 Bq ; 1 TBq (tétra becquerel) = 1×10^{12} Bq.

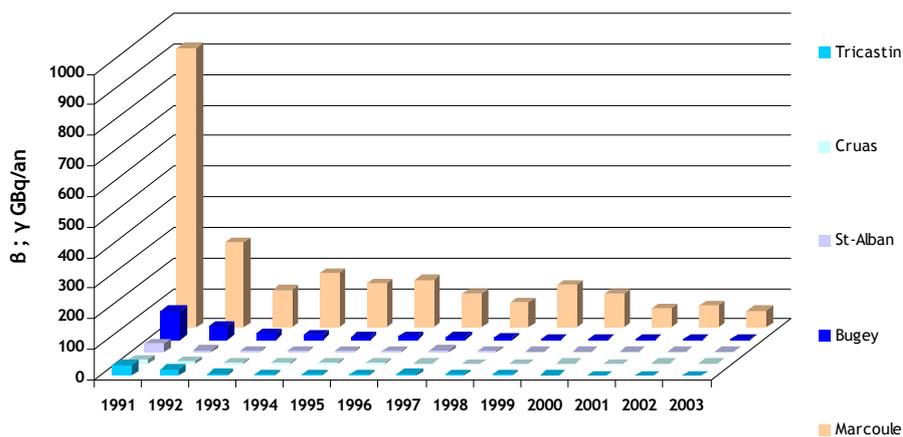


Figure 4. Evolution des rejets en émetteurs gamma émis par les CNPE et Marcoule dans le Rhône de 1991 à 2003 (Eyrolle, 2009).

Les radionucléides qui seront recherchés sont donc : les émetteurs gamma, le tritium et le carbone 14, le strontium 90 ainsi que certains isotopes particuliers : actinides transuraniens et iode 129 à l'aval de Marcoule, uranium à l'aval des sites de Pierrelatte et de Romans/Isère (tableau 2).

Tableau 2. Radionucléides habituellement recherchés dans l'environnement.

a) émetteurs gamma.

Isotope	période radioactive (valeur arrondie)	origine
Ag110m	250 j	artificielle : présence dans les rejets liquides des CNPE
Co58	71 j	artificielle : présence dans les rejets liquides et gazeux des CNPE
Co60	5,3 ans	
Cs134	2,2 ans	artificielle : retombées de Tchernobyl + présence dans les rejets liquides et gazeux des CNPE
Cs137	30 ans	artificielle : retombées des tirs et de Tchernobyl + présence dans les rejets liquides et gazeux des CNPE
Mn54	313 j	artificielle : présence dans les rejets liquides des CNPE
Rh106	30 s	
Sb124	60 j	
Sb125	2,7 ans	artificielle : présence dans les rejets liquides et gazeux des CNPE
Na22	2,6 ans	naturelle cosmogénique
Be7	53 jours	
K40	1,3 milliards d'années	naturelle tellurique
Pb210	22 ans	naturelle tellurique (ou naturelle renforcée à proximité des installations du cycle du combustible)
Pa234	7 h	
Th234	24 j	
Ac228	6 h	

b) autres radionucléides.

Isotope	période radioactive (valeur arrondie)	origine
H3	12 ans	naturelle cosmogénique + artificielle : tous les sites
C14	5 730 ans	
Sr90	28,5 ans	artificielle : retombées des tirs + rejets de Marcoule
Émetteurs alpha : Am241: 432 ans ; Pu238: 87,7 ans ; Pu239: 24390 ans ; Pu 240: 6570 ans ; Pu241: 13,2 ans		artificielle : retombées des tirs + rejets de Marcoule
Uranium (et transuraniens, cf. ci-dessus) U238: $4,47 \cdot 10^9$ ans ; U234: $2,4 \cdot 10^5$ ans U235: $7,13 \cdot 10^8$ ans ; U236: $2,34 \cdot 10^7$ ans		naturelle tellurique + naturelle renforcée à proximité des installations du cycle du combustible (Socatri à Pierrelatte et FBFC à Romans /Isère)

2.4 Les indicateurs et bio-indicateurs du milieu aquatique continental

Rappelons que les prélèvements en milieu aquatique sont soumis à diverses contraintes : l'accès à certaines zones et la période de prélèvement pour les sédiments ou les bio-indicateurs sont assujettis aux conditions hydrologiques (crue ou étiage) et à la saison pour les végétaux ou animaux ; les pêches nécessitent également d'obtenir des autorisations préfectorales.

Trois types de matrices sont ou peuvent être habituellement prélevés en milieu aquatique : les sédiments, les végétaux et/ou animaux et l'eau. Chacune de ces matrices présente un intérêt particulier selon le comportement physico-chimique et la spécificité (période, durée des rejets...) du radionucléide recherché, qui vont déterminer

son aptitude à être transporté avec l'eau ou les matières en suspension, fixé et déposé sur les fonds ou intégré à la chaîne trophique (figure 5).

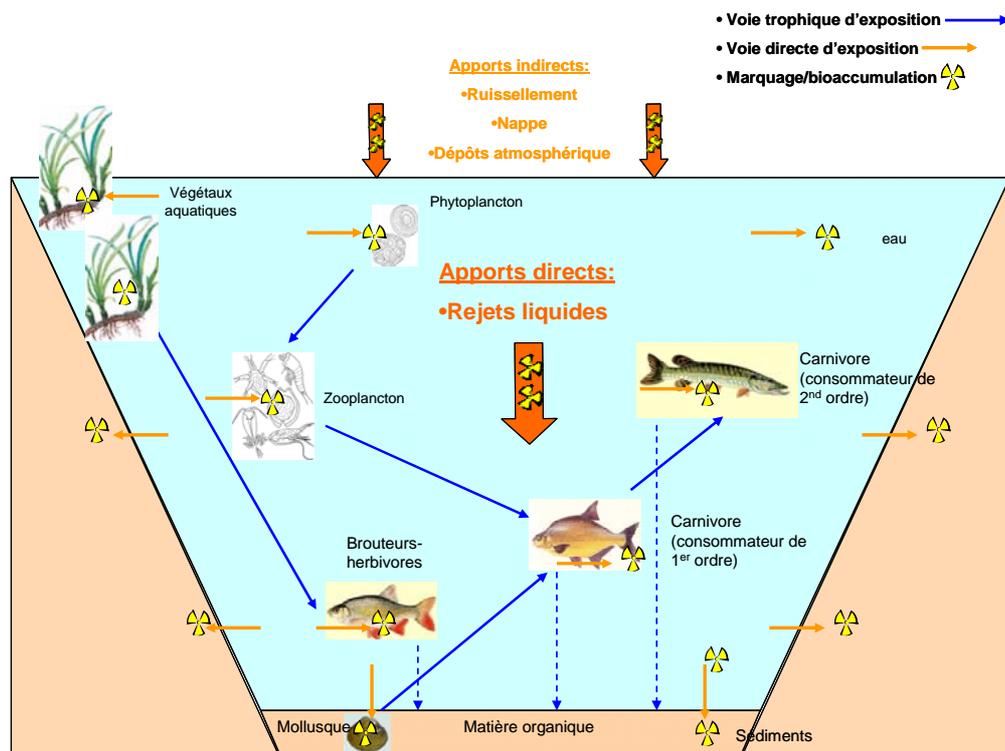


Figure 5. Illustration des voies d'entrée et de transfert des radionucléides dans une chaîne trophique d'eau douce simplifiée.

2.4.1 Eau et matières en suspension

Dans le milieu aquatique, l'eau est un vecteur qui se renouvelle sans cesse et au sein duquel des échanges très rapides ont lieu entre la fraction dissoute et la fraction particulaire. Le prélèvement d'eau distingue deux sous-échantillons, l'eau filtrée et le résidu de filtration (MES) ou les « boues de décantation ».

Les prélèvements d'eau filtrée fournissent, à un instant donné, la photographie du flux de radionucléides qui ne présentent pas (ou peu) d'affinité avec les matières particulaires. C'est le cas du tritium en particulier qui se trouve principalement sous forme d'eau tritiée HTO et de la partie soluble d'autres radionucléides. Par ailleurs, l'eau filtrée est représentative de l'eau de boisson. Les matières en suspension (ou boues de décantation fournissent) les concentrations dans la fraction particulaire.

Le prélèvement d'eau est par conséquent un indicateur peu sensible (surtout pour un prélèvement unique) car l'échantillon n'intègre ni l'accumulation de rejets chroniques ni, en général, les rejets événementiels.

2.4.2 Bio-indicateurs

Les animaux et végétaux sont généralement de bons indicateurs des niveaux contemporains de radioactivité, et ce d'autant plus qu'ils possèdent à divers degrés l'aptitude à concentrer et retenir les radionucléides.

2.4.2.1 Les végétaux

Ils sont ubiquistes⁶, leur répartition géographique est large et leur biomasse relativement importante permet d'en récolter de grandes quantités.

Principalement, trois types de végétaux aquatiques sont prélevés : les phanérogames immergées (voir photos), les phanérogames semi-aquatiques (ex : roseaux) et les bryophytes (mousses). Leur abondance fluctue en fonction de la saison mais également des différents travaux et aménagements effectués sur les berges et les ouvrages. Les végétaux sont prélevés à partir des berges à l'aide de râteau ou de grappin. Ils doivent être soigneusement lavés avant d'être analysés pour les débarrasser des particules sédimentaires qui pourraient fausser l'interprétation des résultats de mesure.



Potamogeton pectinatus



Myriophyllum

2.4.2.2 Les animaux

- Les Corbicules (voir photo). Espèce invasive détectée pour la première fois en France en 1980, ils se nourrissent de matière organique en suspension, ils s'enterrent généralement dans le sédiment, mais peuvent également coloniser les plages de graviers ou les substrats rocheux. Ils sont rarement analysés en raison des contraintes de prélèvement et de traitement. Mollusques bivalves filtreurs, d'une durée de vie de une à plusieurs années (4 à 7 ans), ces animaux sont de bons « accumulateurs ».



Corbicules

⁶ Ubiquiste : qui peut vivre partout, qui s'adapte facilement aux milieux les plus divers.

- Les poissons (voir photos d'espèces fréquemment prélevées). Ce sont les seuls bio-indicateurs qui peuvent être considérés comme des denrées en milieu aquatique continental. Ils ont une large distribution géographique ; ils constituent de bons « intégrateurs » d'éléments transférés directement par l'eau ou par la nourriture.

Leur échantillonnage reste délicat en raison de contraintes de prélèvements (nécessite des autorisations) et de localisation (ils se déplacent...) ; la représentativité de l'espèce échantillonnée dépend de sa place dans la chaîne alimentaire et l'homogénéité des lots est fonction de la distribution des âges des individus prélevés.



Barbeau



Brème



Chevesne

Signalons que la pêche professionnelle a été brusquement interrompue à partir de septembre 2005 au niveau de Lyon, puis au niveau de St Brénaz en 2006.

Cette interruption s'est étendue progressivement à l'aval jusqu'à l'embouchure (07/2007) par arrêtés préfectoraux interdisant la consommation de poissons pêchés dans le Rhône en raison de la contamination par les PCB. Cette situation reste évolutive.

2.4.3 Sédiments

Comme le sol en milieu terrestre, les sédiments constituent un compartiment « puits » dans lequel peuvent venir s'accumuler les radionucléides de période radioactive suffisamment longue pour y persister.

L'analyse des sédiments de surface peut permettre d'évaluer l'impact contemporain d'une contamination : les dépôts sont généralement les plus récents et ainsi représentatifs des niveaux de pollution actuels. Néanmoins, leur représentativité vis-à-vis des chroniques de rejets est variable d'un site à l'autre. L'étude d'enregistrements sédimentaires (ou « carottes ») permet en général une meilleure appréciation de l'évolution historique des dépôts.

2.4.4 Radionucléides potentiellement détectés selon les indicateurs

De manière générale, les radionucléides peuvent être regroupés en deux grandes catégories au sein des systèmes aquatiques : les éléments présentant une affinité importante avec les supports solides, c'est-à-dire les matières en suspension (MES) et les sédiments, et les éléments ne présentant pas ou peu d'affinité avec les matières particulaires qui sont rapidement exportés du milieu aquatique continental en suivant la dynamique des masses d'eau (tableau 3). Les éléments de la deuxième catégorie sont néanmoins plus facilement bio assimilables en intégrant généralement plus facilement le milieu biologique que les espèces sous forme particulaire. Parmi ces éléments on peut citer notamment le tritium libre.

Outre ces deux grandes catégories, certains éléments sont indispensables aux organismes vivants et intègrent ainsi facilement et rapidement la chaîne alimentaire. L'on peut citer ici à titre d'exemple l'iode ou bien encore le sélénium, dont un analogue chimique est le tellure.

Tableau 3. Caractéristiques de quelques radionucléides artificiels dans l'environnement aquatique ; (1) : métaux de transition, (2) : autres radionucléides.

		T _{1/2} (an)
Affinité supports solides (MES) ⁽¹⁾	⁵⁸ Co	0,19
	^{110m} Ag	0,68
	⁵⁴ Mn	0,85
	⁶⁰ Co	5,3
	⁶³ Ni	100
Affinité supports solides (MES) ⁽²⁾	¹³⁴ Cs	2,1
	¹³⁷ Cs	30,1
	²³⁸ Pu	87,7
	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	>5000
Pas ou peu d'affinité supports solides (MES) ⁽²⁾	¹²⁴ Sb	0,16
	¹²⁵ Sb	2,8
	³ H	12,3
Affinité organismes biologiques ⁽²⁾	¹³¹ I	0,02
	^{123m} Te	0,33

(Source : Eyrolle 2009).

Par ailleurs, le carbone 14 est intégré dans le cycle du carbone des hydrosystèmes continentaux. Il se transfère aux végétaux par photosynthèse et aux animaux par ingestion de matière organique enrichie en ¹⁴C. Il se mesure très aisément dans les poissons. En ce qui concerne le tritium qui suit le cycle de l'eau, il se retrouve dans les végétaux et les animaux sous forme d'eau tritiée (HTO) ou de tritium organiquement lié (TOL).

3 Stratégie d'échantillonnage et état d'avancement des prélèvements et mesures

La stratégie d'échantillonnage est destinée à compléter les mesures déjà acquises dont les grandes lignes sont détaillées ci-après.

3.1 Données disponibles : surveillance régulière et études récurrentes

Le milieu aquatique rhodanien fait l'objet d'une surveillance et d'études régulières par l'IRSN (tableau 4).

Sur le Rhône, l'IRSN dispose de 7 hydrocollecteurs, situés à Génissiat en amont des installations puis à Creys-Malville, Le Bugey, Saint-Alban, Cruas, Tricastin et Vallabrègues en aval des installations. Ces équipements effectuent des prélèvements semi-automatisés d'eau pompée qui alimente un bac de décantation. Les boues sont collectées pour analyses mensuelle par spectrométrie gamma et le tritium libre (HTO) est mesuré sur l'eau filtrée. Les figures 6 et 7 présentent les chroniques des activités des principaux radionucléides présents dans l'eau filtrée et les MES du Rhône à la station de Vallabrègues.

Depuis 2005, la Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA) implantée en Arles permet le prélèvement mensuel d'échantillons d'eau et de sédiments. Les émetteurs gamma, alpha et le ^{90}Sr y sont recherchés en phases dissoute et particulaire. Le tritium libre est également analysé sur des prélèvements ponctuels prélevés bimensuellement. Le tritium organiquement lié (TOL) et le ^{14}C sont recherchés dans la phase particulaire, chaque mois. Cette station est également équipée d'un système de détection des crues. Si le débit dépasse le seuil fixé à $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, les prélèvements sont effectués toutes les 20 minutes durant huit heures.

Ces mesures sont complétées par les études radioécologiques annuelles ou décennales faites pour le compte d'EDF à proximité des CNPE. À cela s'ajoute la surveillance réglementaire effectuée par les différents exploitants.

Tableau 4. Récapitulatif sommaire des types de prélèvements et d'analyses réalisés dans l'environnement des sites des CNPE en milieu aquatique.

sources : Antonelli C 2010 ; IRSN 2011 ; Claval et al. 2010

	Surveillance France	Suivi annuel	Bilan décennal
Génissiat	^3H : eau de surface (filtrée)		
Creys	Spectrométrie γ : MES ^3H : eau de surface (filtrée)	Spectrométrie γ : sédiments ; bryophytes ; végétaux aquatiques ; poissons. sur une partie des échantillons : ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni	
Bugey St Alban Tricastin Cruas	Spectrométrie γ : MES ^3H : eau de surface (filtrée)	Spectrométrie γ : Sédiments ; Bryophytes ; Végétaux aquatiques ; Poissons	Spectrométrie γ : sédiments ; bryophytes ; végétaux aquatiques ; poissons ; eaux du fleuve Sur une partie des échantillons : ^{131}I + ^{129}I + ^{14}C + ^3H + ^{90}Sr + spectrométrie α
Vallabrègues	Spectrométrie γ : MES ^3H : eau de surface (filtrée)		
Arles (station SORA)	Spectrométrie γ : eau et MES. Depuis 2008 : ^3H , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am		

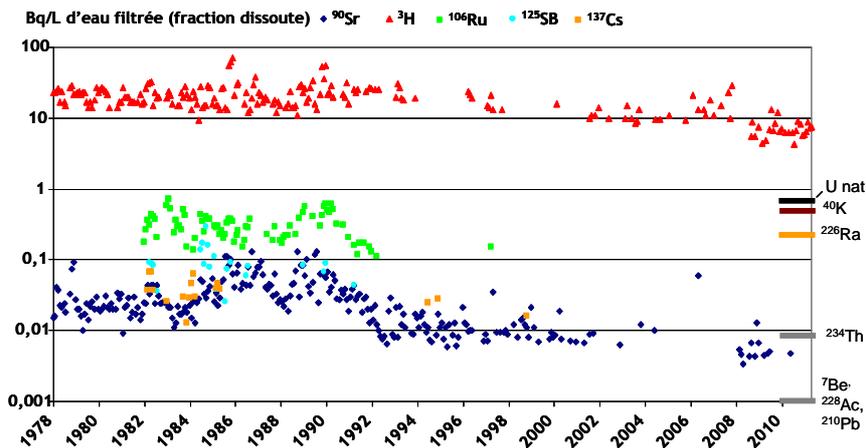


Figure 6. Activités des principaux radionucléides observés par l'IRSN dans l'eau filtrée du Rhône (fraction dissoute) depuis 1978 à Vallabrègues

La diminution observée de l'activité du tritium et des principaux radionucléides artificiels dans l'eau au cours du temps est liée principalement à la baisse des rejets de Marcoule. Outre le tritium, seul le strontium 90, très soluble, provenant d'une part de la rémanence des essais d'armes nucléaires sur le bassin versant du Rhône et d'autre part de la reprise de stocks sédimentaires contaminés par les rejets de Marcoule, a pu être mesuré jusqu'à aujourd'hui dans l'eau filtrée.

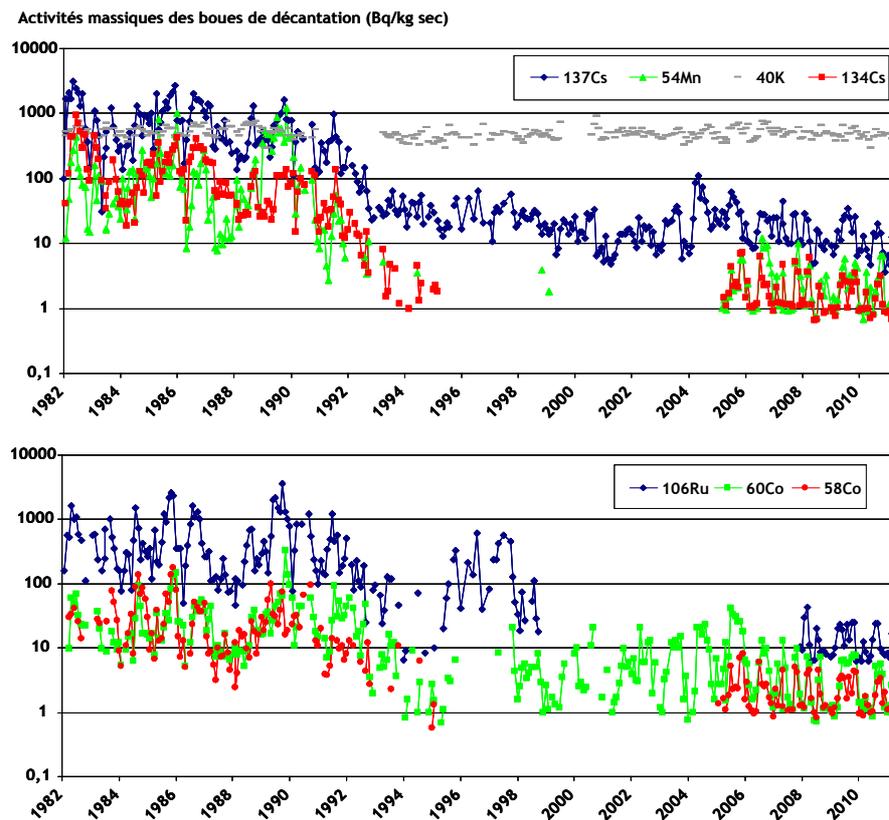


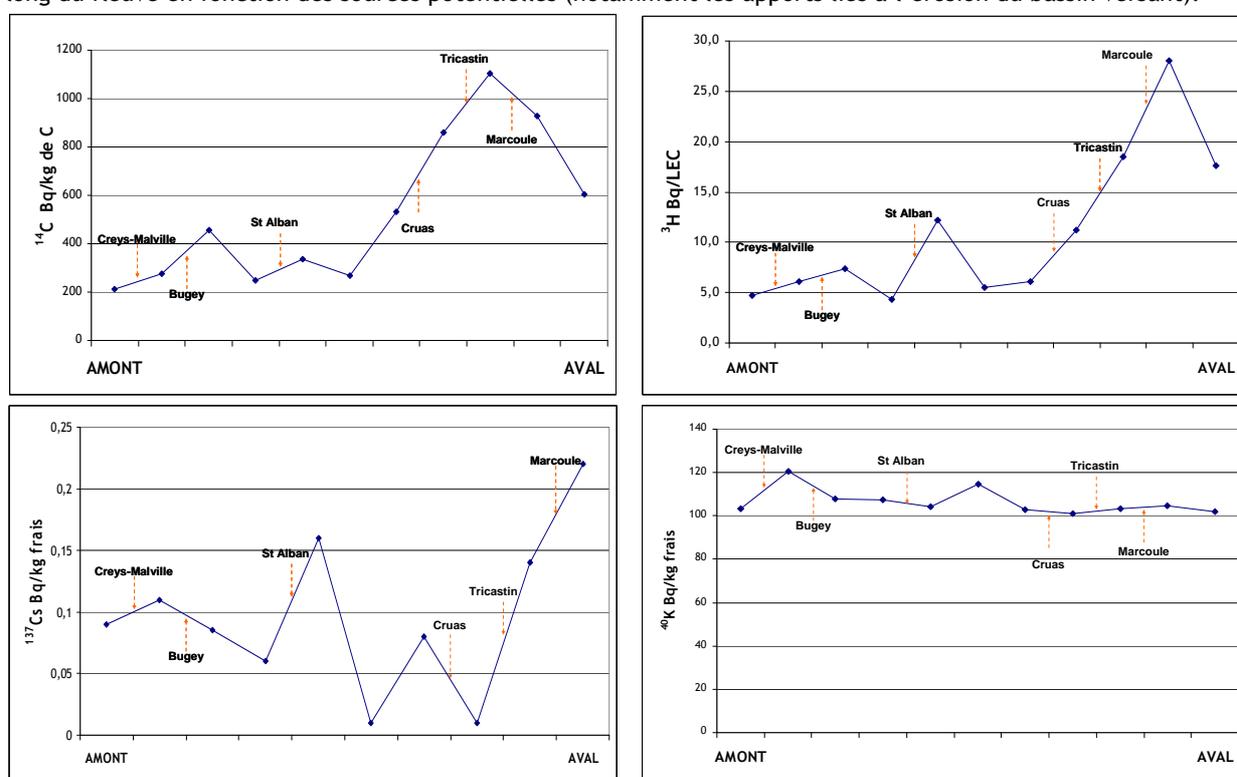
Figure 7. Activités massiques des boues de décantation de l'eau du Rhône prélevées par l'IRSN à la station de Vallabrègues depuis 1982

Comme la fraction dissoute, la fraction particulaire a vu diminuer fortement sa contamination en radionucléides artificiels au début des années 90, en raison de la baisse des rejets de l'installation de Marcoule.

Depuis 2009 ces résultats sont maintenant librement consultables sur le site internet⁷ du réseau national de mesure (RNM). Les données sont en outre présentées et commentées dans divers rapports annuels de l'IRSN :

- bilan de l'état radiologique de l'environnement français ;
- suivi radiologique de l'environnement terrestre, aquatique continental et marin des centres nucléaires de production d'électricité français ;
- suivi radiologique de l'environnement terrestre, aquatique continental du site de Creys-Malville ;
- rapport relatif à la Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA).

L'ensemble de ces études régulières permet de disposer de chroniques de concentrations ou d'afficher des tendances de comportement des radionucléides. Par exemple, la figure 8 schématise le long du Rhône, les concentrations moyennes sur la période 2000 à 2010⁸, dans les muscles des poissons, de quelques radionucléides présentant un comportement différent. Le ⁴⁰K, élément d'origine naturelle, ne varie quasiment pas ce qui est normal ; le ¹⁴C et le ³H augmentent de l'amont vers l'aval ; le ¹³⁷Cs a un comportement plus compliqué et varie le long du fleuve en fonction des sources potentielles (notamment les apports liés à l'érosion du bassin versant).



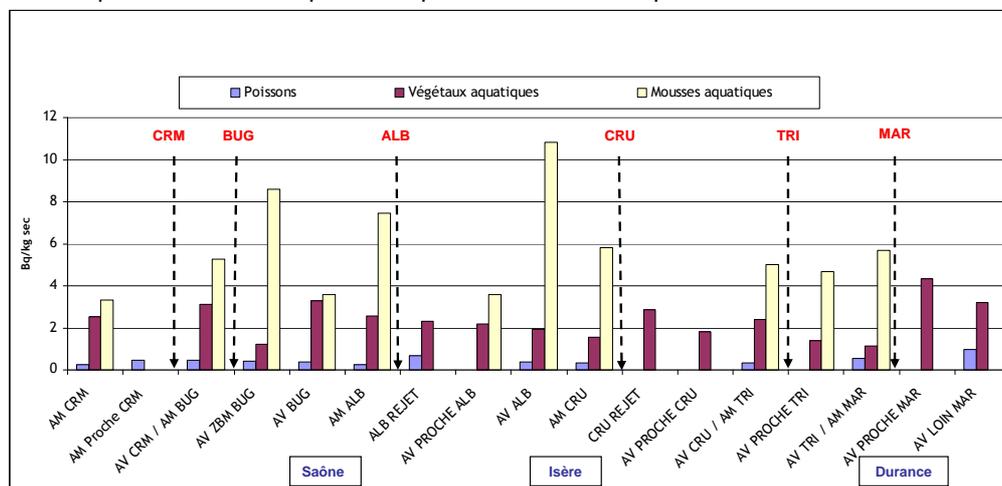
(Note : les distances entre sites ne sont pas à l'échelle).

Figure 8. Concentrations moyennes sur la période 2000 à 2010 du ¹⁴C, ³H, ¹³⁷Cs et ⁴⁰K dans les muscles des poissons du Rhône, de l'amont vers l'aval.

⁷ www.mesure-radioactivite.fr/public/

⁸ Les résultats des mesures du tritium et du carbone 14 dans les poissons sont relativement peu nombreux car jusqu'en 2009 ces analyses n'étaient effectuées que lors des bilans décennaux ; depuis 2009, ces mesures sont faites chaque année.

Ces données acquises régulièrement permettent aussi de comparer les concentrations moyennes d'un radionucléide dans différents indicateurs : par exemple, les concentrations moyennes en ^{137}Cs , mesurées le long du Rhône de 2000 à 2010, dans les muscles des poissons, les végétaux aquatiques autres que les mousses et les mousses aquatiques sont présentées figure 9. Si, globalement, les concentrations varient de la même façon dans les 3 types d'échantillons, les végétaux (dont les mousses) présentent des concentrations beaucoup plus élevées que les muscles de poissons et en font par conséquent des indicateurs plus sensibles.



(Note : les distances entre sites ne sont pas à l'échelle).

Figure 9. Comparaison des concentrations moyennes (2000-2010) en ^{137}Cs des différents types d'échantillons prélevés le long du Rhône.

3.2 Données disponibles : études particulières

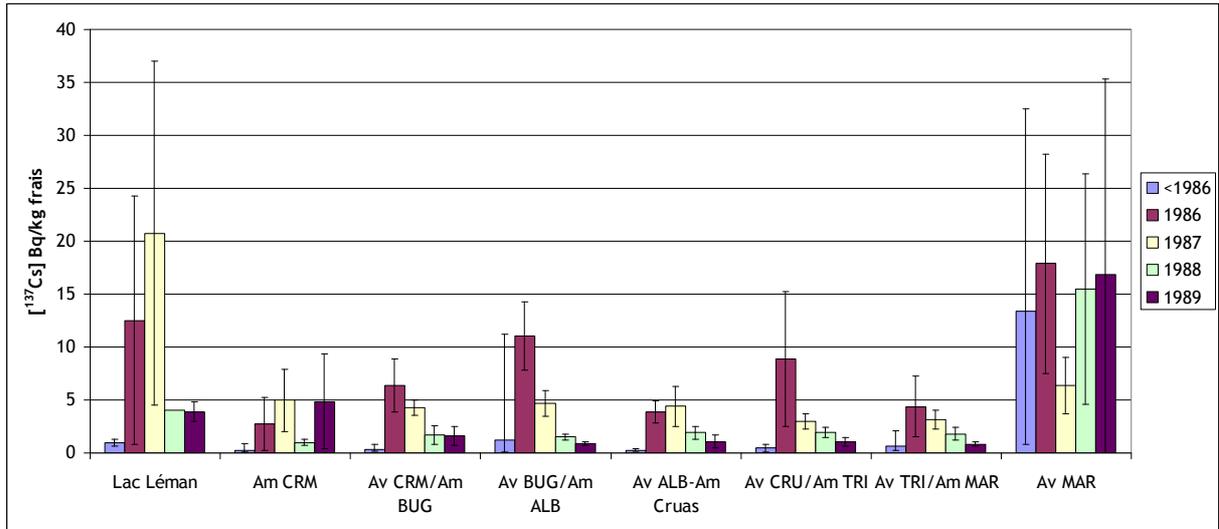
Par ailleurs des données sont acquises dans le cas d'études particulières. L'étude *Synthèse des connaissances sur la radioécologie du Rhône* de Lambrecht et al. (1992) a été publiée par l'IPSN à la demande de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse dans le but de présenter l'état de la radioactivité des compartiments de l'écosystème aquatique rhodanien d'après les données acquises par EDF, COGEMA, le SCPRI et l'IPSN/CEA.

Le choix pour cette synthèse avait été de diviser le Rhône en 9 secteurs :

Secteur 1 (S1) : le lac Léman ; S2 : du Lac Léman à la centrale de Creys-Malville ; S3 : de la centrale de Creys à celle de Bugey ; S4 : de Bugey à St Alban ; S5 de St Alban à Cruas ; S6 : de Cruas à Tricastin ; S7 : de Tricastin à Marcoule ; S8 : aval Marcoule et enfin S9 le Delta de Camargue.

Cette synthèse distinguait 3 périodes : une première qui intègre les années précédant l'accident de Tchernobyl, une deuxième pour l'année de l'accident (1986) et une troisième qui intègre les années suivantes (exemple figure 10 pour les poissons) et montrait que :

- l'impact des retombées des essais militaires de 1955 à 1965 restait encore visible dans le haut Rhône, hors influence des installations nucléaires (traces de ^{137}Cs , ^{90}Sr et émetteurs α comme les $^{239,240}\text{Pu}$) ;
- les centrales avaient un impact visible sur les compartiments du fleuve avec des variations suivant les zones et, globalement, la concentration des émetteurs γ artificiels semblait augmenter dans le fleuve de l'amont vers l'aval, allant par exemple dans les poissons, de 0,9 Bq/kg en aval du Bugey à 2 Bq/kg en aval du Tricastin ;
- l'usine de Marcoule avait l'impact le plus important : les niveaux de radioactivité mesurés en aval étaient les plus importants de tout le fleuve.



Am : Amont ; Av : Aval ; CRM : Creys-Malville ; BUG : Bugey ; ALB : St Alban ; CRU : Cruas ; TRI : Tricastin ; MAR : Marcoule

(selon Lambrecht et al., 1992)

Figure 10. Ordres de grandeurs des concentrations en ^{137}Cs mesurées dans les poissons, depuis les années 70 jusqu'à la fin des années 80.

Cette synthèse a été complétée par celle réalisée par Eyrolle (2009) qui analyse les principales données acquises durant une dizaine d'années jusqu'en 2006 sur les fleuves nucléarisés français ; les chroniques de résultats permettent de connaître les concentrations observées en émetteurs gamma, ^{90}Sr et isotopes du plutonium, en amont et en aval des installations nucléaires (CNPE essentiellement) et montrent également quels sont encore, en 2006, les radionucléides mesurés régulièrement dans le milieu aquatique.

Au niveau du territoire, rappelons également le bilan effectué à la demande du Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (IRSN, 2008) relatif à l'état des nappes phréatiques et des cours d'eau autour des sites nucléaires et des entreposages anciens de déchets radioactifs.

D'autres travaux viennent compléter ces documents, comme par exemple, la thèse présentée par Rolland (2006). Celle-ci s'inscrit dans la recherche d'une meilleure compréhension du devenir des contaminants à l'état de traces en milieu fluvial suite à un rejet chronique ; elle porte plus particulièrement sur les conséquences de la diminution des rejets du centre de Marcoule sur les flux de radioactivité artificielle du Rhône vers la Méditerranée principalement pour le ^{137}Cs , le $^{239+240}\text{Pu}$ et le ^{238}Pu . La reprise sédimentaire, lors des crues, représente, en effet, un terme source différé non négligeable, avec des temps de résidence du ^{137}Cs , du ^{238}Pu et du $^{239+240}\text{Pu}$ originaire de Marcoule et accumulés depuis plusieurs décennies qui sont estimés à 200, 100 et 900 ans respectivement.

L'ensemble de ces données et études permet d'une part de déterminer le plan d'échantillonnage le plus pertinent pour compléter les connaissances déjà établies et d'autre part, une fois les mesures terminées, de pouvoir mettre en perspective les résultats obtenus.

3.3 Prélèvements et analyses prévus

La figure 11 représente l'articulation des zones de prélèvements et les bio indicateurs associés par rapport à la surveillance et aux études effectuées habituellement, à cela viennent se rajouter les études particulières non schématisées.

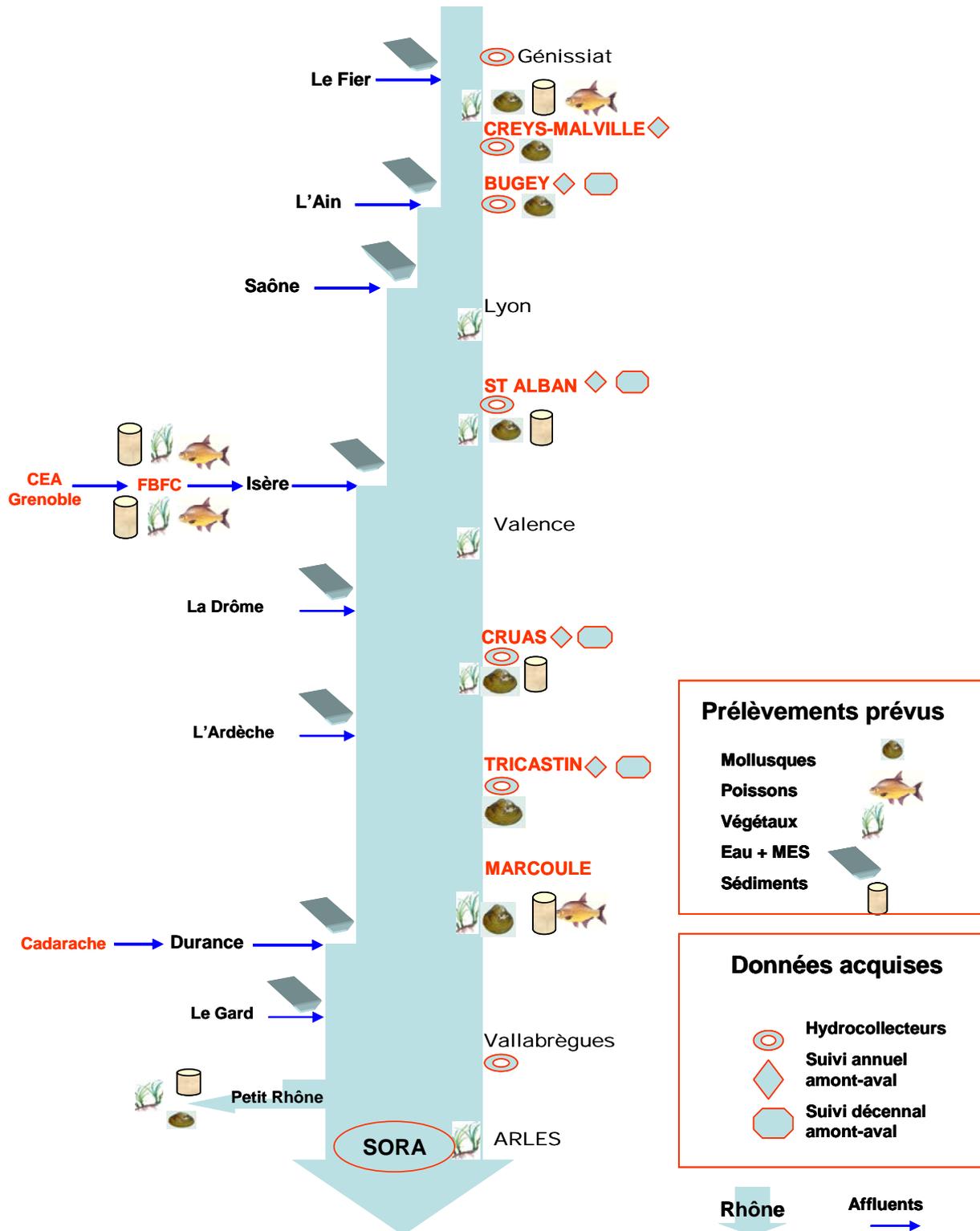


Figure 11. Localisation des zones de prélèvement.

On considère la zone amont de l'installation de Creys-Malville comme zone de référence, *non influencée* par l'industrie du nucléaire et la zone aval proche de Marcoule comme *la plus influencée*. Concernant l'amont de Creys, les rejets éventuels de l'industrie provenant de la Suisse sont considérés comme suffisamment dilués (hors impact du tritium de l'industrie de l'horlogerie) par la présence du Lac Léman pour ne pas impacter le territoire français.

Les bioindicateurs et les sédiments prélevés dans ces deux zones feront l'objet d'analyses très complètes afin de les comparer. Outre les émetteurs gamma, le ^{90}Sr et les émetteurs alpha seront recherchés dans les sédiments, les végétaux et les poissons afin de s'assurer que leurs concentrations restent cohérentes avec celles mesurées dans le passé (en relation avec les retombées atmosphériques globales anciennes).

Il est d'usage dans les études réalisées pour la surveillance de l'environnement des sites de définir les zones situées à l'amont des rejets des installations comme « zones non influencées » et celles à l'aval comme « zone influencées », pour identifier un éventuel marquage lié aux activités de l'installation. Pour ce constat intégrant le Rhône dans son ensemble, compte-tenu de la succession des installations, l'amont de l'une est, excepté Creys-Malville, l'aval de celle qui la précède. Il convient alors d'étudier le Rhône par secteurs délimités par l'amont et l'aval des rejets de chacune d'entre elles (à l'image de l'étude effectuée en 1992). Il a été décidé de prélever des Corbicules pour compléter la gamme relativement limitée des bioindicateurs, en amont de Creys et en aval de toutes les installations.

Pour évaluer les apports liés aux sous-bassins versants, des matières en suspensions seront prélevées et analysées par spectrométrie gamma à l'aval des principaux affluents (cf. tableau 5). Le ^{137}Cs issu des retombées (essais d'armes nucléaires et Tchernobyl) et présentant une grande affinité pour la fraction particulaire sera recherché. En complément, une analyse gamma sur l'eau filtrée et les MES est programmée en amont de Creys pour comparaison avec l'aval des installations et une analyse d'uranium isotopique est prévue sur les eaux filtrées en amont et en aval de l'installation FBFC Romans sur Isère.

Tableau 5. Plan de prélèvement et d'analyses pour les eaux et matières en suspensions des affluents.

		Spectrométrie Gamma	U Isotopique
EAUCO	AMONT Creys	x	
MES		x	
MES	AVAL AIN	x	
MES	AVAL SAÔNE	x	
EAULA	AMONT LYON	x	
EAUCO	AMONT FBFC Romans sur Isère		x
MES		x	
EAUCO	AVAL FBFC Romans sur Isère		x
MES		x	
MES	AVAL DROME	x	
MES	AVAL ARDECHE	x	
MES	AVAL DURANCE	x	
MES	AVAL GARD	x	

EAUCO : Eau de cours d'eau ; MES : matières en suspensions ; EAULA : Eau de lac

Les campagnes de prélèvement des eaux et MES sont programmées pour début 2012.

En fonction des résultats obtenus, l'étude des apports liés à la fraction dissoute pourrait être envisagée ultérieurement sur certains de ces affluents. Une étude plus complète des MES s'inscrit également dans le programme d'action 2010-2013 de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR) dans le cadre duquel un post-doctorat débute fin 2011 sur la « caractérisation bio-physico-chimique et traçage des sédiments et des polluants associés ».

En ce qui concerne l'installation FBFC (Franco Belge de Fabrication de Combustibles), en raison de la fabrication de combustible, des analyses gamma et d'uranium isotopique sont programmées sur des poissons, des plantes aquatiques et sur des sédiments fins. Les prélèvements sont prévus en amont du point de rejet dans le ruisseau Joyeuse et à l'aval des rejets du site qui sont évacués via la station d'épuration (STEP) de Romans-sur-Isère, sur les stations déjà échantillonnées par la CRIIRAD (2007).

Pour compléter les études radioécologiques annuelles de tous les CNPE et décennales des sites de Saint-Alban et de Cruas, des prélèvements de sédiments et de végétaux aquatiques sont programmés dans deux contre-canaux. Ces cours d'eaux récupèrent vraisemblablement une partie des eaux pluviales avant le retour au Rhône via La Lône en amont de Serrières pour le site de Saint-Alban et au niveau du barrage de Rochemaure pour le site de Cruas. D'autre part, un petit ruisseau (La Vareze) se situe en amont immédiat du CNPE de Saint-Alban, donc théoriquement en zone non influencée par ce CNPE. Pour s'assurer que les écoulements du site ne le rejoignent pas, un sédiment y sera prélevé, puis analysé par spectrométrie gamma.

Pour le site du Tricastin ayant fait l'objet d'une étude complète en 2009 (Claval, 2011), aucun prélèvement complémentaire n'y sera réalisé. En effet, les cours d'eau (Gaffière et Lauzon) et le lac Trop Long ont été investigués dans le cadre de cette étude. À cela se rajoute l'étude détaillée sur l'origine du marquage de la nappe en uranium (Bernard et al. 2010)

L'aval du site de Marcoule fera l'objet d'un suivi particulier. Des analyses d'iode 129, tritium, ^{14}C et uranium est des spectrométries alpha seront réalisées sur des poissons, des bivalves, des phanérogames immergées et sur des sédiments fins pour compléter les mesures effectuées sur les matières en suspension et la phase dissoute au niveau de la station SORA en Arles.

La détection, dans le cadre des suivis radioécologiques des CNPE du Rhône, d'éléments à vie courte (^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$) et justifiée en règle générale par les rejets des activités médicales. Des végétaux aquatiques, bio-indicateurs de choix pour enregistrer des marquages chroniques de faible activité seront prélevées en aval de Lyon, en aval de Valence et en Arles. Pour compléter ces données, une expérimentation particulière – faisant éventuellement l'objet d'un stage universitaire ultérieur – est envisagée pour déterminer les niveaux et suivre les fluctuations des concentrations en ^{131}I dans les eaux du fleuve.

Un prélèvement de sédiments, végétaux aquatiques et bivalves sera réalisé à l'aval du Petit Rhône pour mesurer des radionucléides émetteurs gamma et alpha ainsi que pour la détermination des teneurs en ^{14}C et tritium lié. Cela permettra de vérifier la cohérence des données avec celles acquises sur le bras principal du fleuve, en Arles.

Le plan d'échantillonnage et de mesures est rappelé dans le tableau 6 qui détaille également l'état d'avancement de ce volet aquatique.

Au total, une cinquantaine de prélèvements complémentaires aux études réalisées par ailleurs sont programmés dont environ 60 % ont été effectués ; l'étude des eaux qui représente à elle seule un quart des prélèvements, n'a pas encore débuté au 30/10/2011.

Sur les 30 prélèvements déjà faits, 141 mesures ont été programmées dont environ 80 % sont terminées.

La fin de l'acquisition de données aura lieu mi 2012 pour un achèvement de l'étude prévu fin 2012 avec la remise du rapport et une présentation aux Cli en 2013.

Tableau 6. Plan de prélèvement et d'analyses (hors affluents).

Échantillon	ZONES	Prélèvement	Spectrométrie gamma	Spectrométrie alpha	⁹⁰ Sr	Tritium TOL	¹⁴ C	¹²⁹ I et iode stable	Uranium isotopique
Sédiments	AMONT CRM	P	X	X	X				
	AMONT LYON		X						
	AVAL LYON		X						
	AVAL ALB		X						
	AMONT ALB	P	X						
	AMONT FBFC	P	X	X					X
	AVAL FBFC	P	X	X					X
	AMONT FBFC	P	X						X
	AVAL CRUAS	P	X						
	AVAL MARCOULE	P	X	X	X	X	X	X	X
	AVAL PETIT RHÔNE	P	X	X		X	X		
Végétaux aquatiques	AMONT CRM	P	X	X	X	X	X	X	
	AMONT IMMÉDIAT LYON / AVAL BUGEY		X						
	AVAL LYON AVAL STEP		X						
	AVAL LOINTAIN LYON		X						
	AVAL ALB	P	X						
	AMONT FBFC	P	X						X
	AMONT FBFC	P	X						X
	AVAL FBFC	P	X						X
	AVAL FBFC	P	X						X
	AMONT VALENCE		X						
	AVAL VALENCE		X						
	AVAL CRUAS	P	X						
	AVAL MARCOULE	P	X	X	X	X	X	X	
	AVAL ARLES	P	X			X	X		
AVAL PETIT RHÔNE		X							

Échantillon	ZONES	Prélèvement	Spectrométrie gamma	Spectrométrie alpha	⁹⁰ Sr	Tritium TOL	¹⁴ C	¹²⁹ I et iode stable	Uranium isotopique
Poissons	AMONT CRM	P	X	X	X	X	X		
	AMONT FBFC	P	X						X
	AVAL FBFC	P	X						X
	AVAL MARCOULE	P	X	X	X	X	X	X	
	AVAL ARLES	P	X	X	X	X	X	X	
Mollusques (Corbicules)	AMONT CRM	P	X	X	X	X	X	X	
	AVAL BUGEY	P	X			X	X		
	AVAL ALB	P	X						
	AVAL CRUAS	P	X						
	AVAL TRICASTIN	P	X						
	AVAL MARCOULE	P	X	X	X	X	X	X	
	AVAL PETIT RHÔNE	P	X			X	X		

X mesure prévue	X mesure terminée	X mesure en cours	P : prélèvement effectué
-----------------	-------------------	-------------------	--------------------------

CRM : Creys-Malville ; FBFC : Franco-Belge de Fabrication de Combustibles (Romans sur Isère) ; ALB : St Alban ;
STEP : Station d'EPuration

4 Références et documents-support

- Antonelli C (2010). *Flux de radioactivité exportés par le Rhône en Méditerranée en 2008 - Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA)*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2010-04.
- Antonelli C (2008). *Niveau d'activité du tritium dans l'environnement*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/ 2008-34.
- AREVA (2011-a). *Rapport public annuel 2010 AREVA Tricastin*.
- AREVA (2011-b). *Rapport d'information sur la sûreté nucléaire et la radioprotection du site de Romans-Edition 2010*.
- Bernard S et al. (2010). *Etude sur l'origine du marquage par l'uranium dans la nappe alluviale de la plaine du Tricastin*. Rapport IRSN/DEI/ 2010-04.
- CEA (2011-a). *Rapport transparence et sécurité nucléaire du centre CEA Cadarache 2010 - Tomes 1-2 et 3*
- CEA (2011-b). *Rapport transparence et sécurité nucléaire 2010 Les INB du centre de Marcoule*.
- CEA (2011-c). *Rapport transparence et sécurité nucléaire 2010 CEA Grenoble*.
- Claval D, Antonelli C, Pommier J, Masson M, Gontier G, Theureau L (2010). *Suivi radioécologique de l'environnement terrestre, aquatique continental et marin des centres nucléaires de production d'électricité français - Année 2009*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/10-09.
- Claval (2011). *Etat radiologique de référence du site de Pierrelatte dans le cadre du projet d'implantation d'une centrale GDF SUEZ*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-15.
- CRIIRAD (2007). *Evaluation de la radioactivité dans l'environnement de la ville de Romans-sur-Isère*. Rapport N° 07-114 Etude radioécologique 2003-2007/Romans
- Eyrolle F (2004). *Conséquences radiologiques des inondations de décembre 2003 en petite Camargue-Résultats de l'expertise réalisée à la demande de la CLI du Gard*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-14.
- Eyrolle F (2004). *Radioactivité artificielle dans les eaux du Rhône aval - Conséquences des crues sur les niveaux d'activité des eaux et sur les flux à la mer*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-16.
- Eyrolle F (2009). *Chroniques des niveaux d'activité au sein des systèmes aquatiques fluviaux français, radionucléides émetteurs gamma, ⁹⁰Sr et isotopes du plutonium*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2009-29.
- EDF (2011). *Nucléaire et environnement - Bilan 2010 des CNPE en exploitation - Rejets radioactifs et chimiques - Déchets radioactifs*.
- Foulquier L, Lambrecht A (1997). *Données concernant l'impact radioécologique de Marcoule sur l'écosystème Rhodanien*. Colloque CECAM-Nîmes. 9-10 octobre 1997.
- Gontier G et al. (2006). *Étude radioécologique de l'environnement proche du Centre Nucléaire de Production d'Électricité de Tricastin : deuxième bilan décennal (2001)*. Rapport IRSN/DEI/SESURE 06-05.
- IRSN (2011). *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2009*.

IRSN (2008). *Etat de la surveillance environnementale et bilan du marquage des nappes phréatiques et des cours d'eau autour des sites nucléaires et des entreposages anciens de déchets radioactifs*. Rapport pour le HTCISN - 15 septembre 2008 - Mise à jour du 13 novembre 2008.

Lambrecht A, Levy F, Foulquier L, Montreuil F, Marchant S (1994). *Suivi radioécologique du Rhône, de l'amont du site de Marcoule à l'embouchure (1992-1993)*. Rapport IPSN/DPEI/SERE/94-08.

Lambrecht A, Foulquier L, Pally M (1992). *Synthèse des connaissances sur la radioécologie du Rhône*. Comité de bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport IPSN/DPEI-SERE/92-64.

Peres J-M (2009). *Surveillance de la radioactivité de l'environnement par l'IRSN - Situation actuelle et orientations*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/09-14.

Pierrard O (2008). *Les rejets en tritium par les installations nucléaires françaises*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/08-49.

Pourcelot L (2011). *Suivi radioécologique de l'environnement terrestre et aquatique continental du site de Creys-Malville - Année 10* Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-18.

Rolland B (2006). *Transferts des radionucléides artificiels par voie fluviale. Conséquences sur les stocks sédimentaires rhodaniens et les exports vers la Méditerranée*. Thèse ISRN-IRSN-2006-66- Université P. Cézanne. Géosciences de l'environnement.

Roussel-Debet S, Antonelli C (2010). *Constat radiologique régional, objectifs et méthode - Application à la « Vallée du Rhône »*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2010-01

Roussel-Debet S (2011). *Constat radiologique régional « Vallée du Rhône » - Etat d'avancement et résultats acquis fin 2010*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-02

Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) (2008). *Le Rhône en 100 questions*. Ouvrage collectif édité par le Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE).

Sites Internet :

<http://www.cnr.tm.fr/fr/>

<http://www.mesure-radioactivite.fr/public/>

<http://www.graie.org/osr/>