



Faire avancer la sûreté nucléaire

Constat radiologique *Vallée du Rhône*. Rapport final relatif au milieu aquatique

PRP-ENV/SESURE/2013-37

Pôle radioprotection, environnement, déchets et
crise

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

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
Déclinaison locale de la stratégie, recherche de lieux d'échantillonnage, prélèvements : C. Antonelli, L. Pourcelot, L. Saey Participation à la rédaction et relecture : S. Roussel-Debet, L. Pourcelot Prélèvements et traitements d'échantillons : D. Mourier, G. Salaun, L. Saey	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LERCM
Métrologie : Laboratoire de Mesure de la Radioactivité dans l'environnement	IRSN/PRP-ENV/STEME/LMRE

RESUME

L'objectif général du constat radiologique Vallée du Rhône est d'établir un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans l'environnement de ce territoire. Ce rapport, relatif au volet aquatique de l'étude, présente pour chaque grand groupe de radionucléides : une synthèse des études historiques (1979-1989), un bilan des travaux contemporains préexistants (2000-2011) et les compléments spécifiques à la présente étude, à savoir les résultats des mesures réalisées en milieu aquatique, à partir d'une cinquantaine d'échantillons (sédiments, végétaux, poissons, mollusques, eau et matières en suspension) prélevés principalement d'avril 2010 à mai 2012. Ce constat aquatique permet ainsi de rassembler dans un seul document un résumé de l'ensemble des observations faites sur le Rhône, et in fine, de présenter et de mettre en perspective les éléments clés qui définissent aujourd'hui l'état radiologique de ce fleuve.

Trois grands secteurs se distinguent de l'étude des résultats de mesure le long du fleuve. Le premier secteur en amont de Creys-Malville a été principalement soumis aux retombées des tirs atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl en 1986 et au tritium de l'industrie horlogère suisse. Le second, comprenant la zone de Creys-Malville à Marcoule, est, en plus, soumis aux rejets des sites nucléaires. Le dernier secteur est celui en aval de l'usine de Marcoule. S'ajoute ponctuellement l'impact des grandes agglomérations avec les rejets de la médecine nucléaire. Les niveaux mesurés pour les radionucléides d'origine artificielle sont historiquement bas. Les données acquises viennent confirmer les concentrations attendues. Le césium 137 est le radionucléide le plus fréquemment mesuré dans l'ensemble des échantillons collectés. Le tritium et le carbone 14 sont les radionucléides prédominants dans les rejets liquides des quatre CNPE et de l'usine de Marcoule. Leurs niveaux d'activités témoignent de l'influence des installations et présentent une augmentation des concentrations dans les matrices biologiques de l'amont vers l'aval du fleuve.

MOTS-CLES

Surveillance - Vallée du Rhône - milieu aquatique - radionucléides.

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	10
2 RAPPEL DU CADRE GENERAL ET DE LA METHODOLOGIE EN MILIEU AQUATIQUE	11
2.1 EMPRISE DE L'ETUDE, ZONES D'INTERET ET POINTS DE PRELEVEMENT	11
2.2 RADIONUCLEIDES SUSCEPTIBLES D'ETRE PRESENTS DANS LE FLEUVE	13
2.3 LES INDICATEURS ET BIO-INDICATEURS DU MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL	14
2.3.1 LES SEDIMENTS	14
2.3.2 L'EAU ET LES MATIERES EN SUSPENSION	14
2.3.3 LES ECHANTILLONS BIOLOGIQUES	14
2.4 DONNEES DISPONIBLES : SURVEILLANCE REGULIERE ET ETUDES RECURRENTES	15
2.5 PRELEVEMENTS ET ANALYSES REALISES DANS LA PRESENTE ETUDE	17
3 RADIONUCLEIDES MESURES PAR SPECTROMETRIE GAMMA	19
3.1 EAU ET MATIERES EN SUSPENSION DU RHONE	19
3.1.1 DONNEES SUR L'EAU ET LES MES ACQUISES DE 1979 A 1989	19
3.1.2 DONNEES SUR L'EAU ET LES MES ACQUISES DEPUIS 2005	19
3.1.3 RESULTATS DE MESURE DES PRELEVEMENTS D'EAU ET DE MES EFFECTUES DANS LE CADRE DU CONSTAT	23
3.2 SEDIMENTS ET ECHANTILLONS BIOLOGIQUES	24
3.2.1 RADIONUCLEIDES D'ORIGINE NATURELLE	24
3.2.2 RADIONUCLEIDES D'ORIGINE ARTIFICIELLE	26
4 ACTIVITES DES ACTINIDES TRANSURANIENS, TRITIUM, CARBONE 14 ET STRONTIUM 90	33
4.1 PLUTONIUM ET AMERICIUM	33
4.1.1 ACTIVITES MEASUREES ENTRE 1979 ET 1989	33
4.1.2 ACTIVITES MEASUREES ENTRE 2001 ET 2011	33
4.1.3 DONNEES ACQUISES DANS LE CADRE DU CONSTAT	34
4.2 TRITIUM	37
4.2.1 RAPPEL DE QUELQUES CARACTERISTIQUES DU TRITIUM	37
4.2.2 NIVEAUX MESURES EN TRITIUM DANS LE RHONE	37
4.3 CARBONE 14	42
4.3.1 CARACTERISTIQUES DU CARBONE 14 EN MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL	42
4.3.2 NIVEAUX MESURES EN CARBONE 14 DANS LE RHONE	42

4.4 STRONTIUM 90	45
5 ÉTUDES PARTICULIÈRES	47
5.1 ÉTUDE DE L'ENVIRONNEMENT AQUATIQUE DE L'USINE FBFC	47
5.1.1 RAPPEL DU CONTEXTE RELATIF A L'USINE FBFC	47
5.1.2 PRELEVEMENTS ET ANALYSES RÉALISÉS DANS LE CADRE DU CONSTAT	47
5.2 APPORTS DES AFFLUENTS DU RHONE	52
6 CONCLUSIONS	54
7 RÉFÉRENCES ET DOCUMENTS-SUPPORT	56
8 ANNEXES	59

TABLEAUX

<i>Tableau 1. Résultats de mesure par spectrométrie gamma sur les échantillons d'eau ($\cong 100$ L) et de MES (filtration d'environ 3 m^3) prélevés en amont de Creys-Malville le 28/02/2013.</i>	23
<i>Tableau 2. Résultats de mesures significatives des principaux radionucléides d'origine naturelle mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons biologiques spécifiques à la présente étude (Bq/kg sec).</i>	25
<i>Tableau 3. Activités mesurées en ^{137}Cs dans les sédiments et les échantillons biologiques du Rhône dans le cadre du constat (Bq/kg sec).</i>	27
<i>Tableau 4 : Activités mesurées en ^{131}I dans les phanérogames prélevées dans le cadre du constat (Bq/kg sec).</i>	28
<i>Tableau 5. Résultats de mesures significatives des principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons biologiques spécifiques au constat hors ^{137}Cs et ^{131}I en Bq/kg sec.</i>	30
<i>Tableau 6. Résultat de mesure par spectrométrie alpha des échantillons collectés dans le cadre du constat (Bq/kg sec).</i>	35
<i>Tableau 7. Niveaux de tritium dans les végétaux aquatiques d'après la synthèse 1979-1989 (Bq/L d'eau de combustion).</i>	38
<i>Tableau 8. Moyenne des activités en tritium sur l'eau filtrée collectée par les hydrocollecteurs de 2008 à 2012 (Bq/L).</i>	38
<i>Tableau 9. Activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les échantillons collectés dans le cadre du constat.</i>	39
<i>Tableau 10. Résultat de mesure en ^{14}C des prélèvements effectués dans le cadre du constat (en Bq/kg C)</i>	43
<i>Tableau 11. Moyennes des activités en ^{90}Sr mesurées dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011 (Bq/kg sec).</i>	46
<i>Tableau 12. Concentrations en ^{90}Sr des échantillons collectés dans le cadre du constat vallée du Rhône (Bq/kg sec).</i>	46
<i>Tableau 13. Autorisation et évolution des rejets liquides de FBFC Romans en GBq de 2009 à 2011 (AREVA 2012-b)</i>	47
<i>Tableau 14. Plan de prélèvements et d'analyses à l'amont et à l'aval de FBFC Romans-sur-Isère</i>	48
<i>Tableau 15. Résultats de mesure des isotopes de l'uranium des échantillons prélevés à l'amont et à l'aval de FBFC Romans-sur-Isère.</i>	50
<i>Tableau 16. Activité massique des isotopes du plutonium dans les sédiments prélevés dans l'Isère, en amont et à l'aval de l'usine FBFC de Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).</i>	51
<i>Tableau 17. Activité massique en ^{137}Cs dans les échantillons prélevés en amont et aval de FBFC Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).</i>	51
<i>Tableau 18. Plan de prélèvement et de mesures de l'étude des affluents.</i>	52
<i>Tableau 19. Activités du ^{137}Cs dans les échantillons de laisse de crue et de MES prélevés à l'aval des affluents du Rhône (Bq/kg sec).</i>	53
<i>Tableau 20. Résultats de mesure des isotopes de l'uranium des échantillons d'eau prélevés dans le cadre du constat sur le Rhône et ses principaux affluents.</i>	53
<i>Tableau 21. Activités des rejets liquides annuels des principales installations du bassin rhodanien en 2010 et 2011.</i>	59

<i>Tableau 22. Récapitulatif des types de prélèvements et d'analyses réalisés par l'IRSN sur le Rhône dans le cadre de la surveillance et des études dans l'environnement des sites nucléaires.</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 23 : Plan de prélèvement et d'analyses des échantillons prélevés sur le Rhône dans le cadre du constat... ..</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 24 : Concentration moyenne des radionucléides gamma d'origine naturelle présents dans le Rhône entre 1979 et 1989.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 25 : Moyenne des activités des radionucléides d'origine naturelle (a) et artificielle (b) mesurées par spectrométrie gamma sur les MES collectées par les hydrocollecteurs du Rhône entre 2005 et 2013 (Bq/kg sec)....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 26 . Moyenne des activités des radionucléides d'origine naturelle mesurées par spectrométrie gamma sur l'eau filtrée et sur les MES à la station SORA et lors d'autres études (Hors hydrocollecteurs) entre 2005 et 2012..</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 27. Moyenne des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma sur l'eau filtrée (a) et sur les MES (b) à la station SORA et lors d'autres études (Hors hydrocollecteurs) entre 2001 et 2012.</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 28 . Moyenne des activités en ¹³⁷Cs mesurées par spectrométrie gamma dans les échantillons biologiques et les sédiments du Rhône entre 2000 et 2011, hors constat, en Bq/kg sec.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 29 . Moyenne des activités en ¹³¹I mesurées par spectrométrie gamma dans les échantillons biologiques du Rhône entre 2000 et 2011, hors constat, en Bq/kg sec.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 30 . Moyennes des concentrations des principaux radionucléides, d'origine artificielle, détectés par spectrométrie gamma, autres que le ¹³⁷Cs et l'¹³¹I, dans les échantillons du Rhône de 2000 à 2011(en Bq/kg sec) ..</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 31 . Moyennes des activités en américium et plutonium dans le Rhône de 2001 à 2011 en Bq/kg sec.</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 32 . Moyennes des activités en tritium organiquement lié dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011.</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 33 . Moyennes des activités en carbone 14 dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011 (Bq/kg de carbone).....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 34 . Résultat de mesure des radionucléides d'origine naturelle par spectrométrie gamma des échantillons prélevés à l'amont et à l'aval de FBFC Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).....</i>	<i>68</i>

FIGURES

<i>Figure 1. Schéma du linéaire rhodanien et des principales installations.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 2. Répartition des analyses effectuées annuellement sur les échantillons prélevés dans le Rhône.</i>	<i>16</i>
<i>Figure 3. Localisation des zones de prélèvement.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 4. Intervalle de variation et moyennes des activités massiques des radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans les MES collectées par les hydrocollecteurs du Rhône de 2005 à 2012.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 5. Principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau filtrée du Rhône à Vallabrègues de 1978 à 1997.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 6. Activités massiques des principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans les MES du Rhône à Vallabrègues de 1982 à 2011.</i>	<i>22</i>
<i>Figure 7. Intervalle de variation et moyenne des concentrations des principaux radionucléides d'origine naturelle, mesurés dans les échantillons biologiques et les sédiments du Rhône de 2006 à 2011.....</i>	<i>24</i>

<i>Figure 8. Intervalles de variation et moyennes des activités en ¹³⁷Cs dans les sédiments et les échantillons biologiques prélevés dans le Rhône de 2000 à 2011 et à l'occasion du constat (Bq/kg sec).</i>	28
<i>Figure 9. Intervalles de variation et moyennes des activités en ¹³¹I, mesurés dans le Rhône de 2001 à 2011 et dans le cadre du constat.</i>	29
<i>Figure 10. Intervalles de variation et moyennes des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma, hors ¹³⁷Cs et ¹³¹I, dans les sédiments du Rhône de 2000 à 2011 (Bq/kg sec).</i>	31
<i>Figure 11. Intervalles de variation et moyennes des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma, hors ¹³⁷Cs et ¹³¹I, dans les phanérogames immergées du Rhône de 2000 à 2011 (Bq/kg sec).</i>	31
<i>Figure 12. Intervalles de variation et moyennes des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma, hors ¹³⁷Cs et ¹³¹I dans les mousses aquatiques du Rhône de 2000 à 2011(Bq/kg sec).</i>	32
<i>Figure 13. Moyennes des activités des actinides transuraniens mesurées dans les sédiments du Rhône entre 2001 et 2011 et dans le cadre du constat et rapport isotopique ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu.</i>	35
<i>Figure 14. Évolution et intervalles de variation du rapport ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu moyenné de 2011 à 2011 sur les échantillons collectés dans le Rhône et dans le cadre du constat.</i>	36
<i>Figure 15. Intervalle de variation et moyenne des activités en tritium libre, mesurées dans les échantillons du Rhône de 2000 à 2011.</i>	40
<i>Figure 16. Intervalle de variation et moyenne des activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les échantillons du Rhône, hors poissons, de 2000 à 2011.</i>	40
<i>Figure 17. Influence des installations nucléaires et des principaux affluents du Rhône sur les intervalles de variation et moyennes des activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les poissons du Rhône de 2000 à 2011.</i>	41
<i>Figure 18. Moyennes des activités et intervalles de variations du ¹⁴C mesurés dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011.</i>	44
<i>Figure 19. Localisation des prélèvements effectués en amont et en aval de Romans-sur-Isère</i>	48
<i>Figure 20. Evolution de l'activité des principaux radionucléides mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons du sondage réalisé dans les sédiments à l'aval de l'installation de Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).</i> .	49

1 Introduction

Dans le cadre de sa mission de surveillance de la radioactivité dans l'environnement, l'Institut réalise des constats radiologiques régionaux sur des zones étendues incluant des installations nucléaires. 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.

Le constat « Vallée du Rhône » a donné lieu à plusieurs rapports : Objectifs et méthodologie générale (Roussel-Debet et Antonelli, 2010), état d'avancement (Roussel-Debet et al., 2011) et synthèse des résultats relatifs au milieu terrestre (Roussel-Debet, 2012).

Le volet aquatique du constat radiologique « Vallée du Rhône » est présenté dans les chapitres qui suivent. La stratégie d'échantillonnage et la stratégie de mesure ont été décrites en détails dans un rapport intermédiaire présentant également l'état d'avancement de l'étude (Saey et Roussel-Debet, 2011) ; cette stratégie est résumée dans le chapitre 2 du présent rapport. Les chapitres 3 et 4 présentent une synthèse des résultats disponibles (principalement entre 1979 et 1989 ainsi que ces 5 à 10 dernières années) et les résultats acquis au cours de cette étude, à partir d'échantillons prélevés entre 2010 et 2012, ainsi que les résultats de mesures complémentaires effectuées sur des échantillons prélevés depuis 2008. Le chapitre 5 présente succinctement les résultats de deux études particulières menées à l'occasion et en marge de ce constat, la première sur l'Isère, à proximité du site d'AREVA FBFC de Romans-sur-Isère, et la deuxième concernant les apports de radionucléides des principaux affluents du Rhône.

Cette étude s'est déroulée en partie durant la période de passage des masses d'air contaminées issues de l'accident de Fukushima, au Japon. Les prélèvements effectués et mesurés lors de cet épisode ont permis de confirmer que les dépôts de césium 137, césium 134 et d'iode 131 consécutifs à cet accident ont été infimes et n'ont eu aucun impact détectable en milieu aquatique.

2 Rappel du cadre général et de la méthodologie en milieu aquatique

2.1 Emprise de l'étude, zones d'intérêt et points de prélèvement

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. La Figure 1 schématise la succession des installations et des affluents sur le linéaire rhodanien.

Sur ce territoire sont considérées, en tant que sources potentielles de radionucléides, 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 du centre de Marcoule. L'impact éventuel des rejets liquides dans l'Isère et la Durance (usine FBFC de Romans-sur-Isère et centres CEA de Grenoble et de Cadarache) est 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 ne sont pas considérées.

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 donc être considéré comme représentatif d'un long tronçon ou au contraire d'une très petite portion de fleuve. À cette hétérogénéité vient s'ajouter la nature des échantillons : statiques (végétaux, animaux fixés, sédiments s'ils ne sont pas remaniés), plus ou moins mobiles (poissons), ou enfin totalement mobiles (eaux et matières en suspension).

Sur le Rhône, la distinction des zones potentiellement influencées par un rejet (ZI) ou non influencées (ZNI) est délicate : 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 zone située à l'amont du rejet d'une installation est définie comme non influencée par celle-ci, mais elle intègre les rejets situés encore plus à l'amont. C'est pourquoi des échantillons témoins sont prélevés en amont de l'ensemble des installations nucléaires du linéaire rhodanien français. En effet, les rejets éventuels provenant de la Suisse sont considérés comme suffisamment dilués par le Lac Léman pour ne pas impacter le territoire français. Subsiste cependant l'impact du tritium organiquement lié issu des rejets de l'industrie horlogère suisse et présent dans les sédiments rhodaniens.

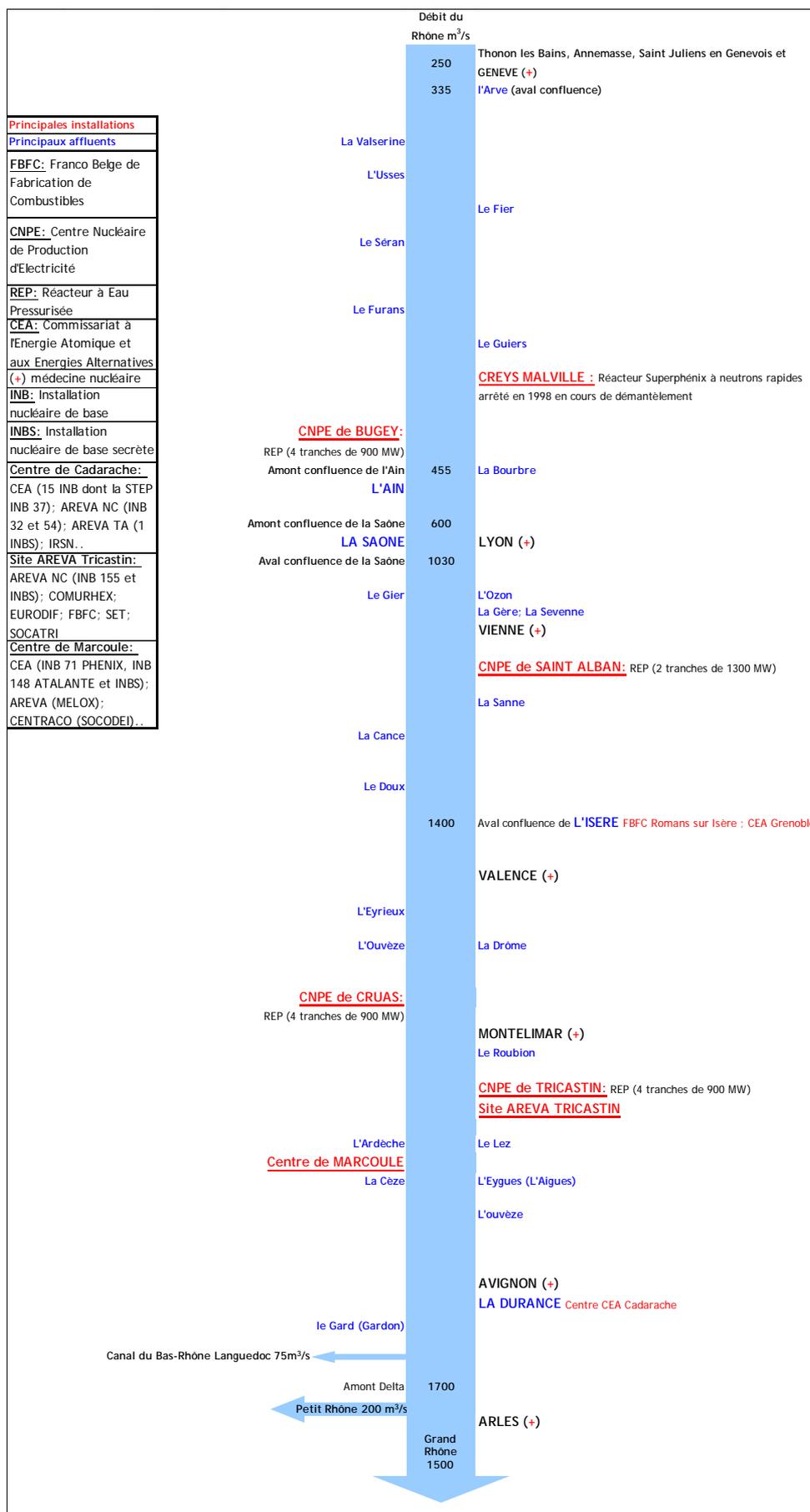


Figure 1. Schéma du linéaire rhodanien et des principales installations.

2.2 Radionucléides susceptibles d'être présents dans le fleuve

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 , du ^{90}Sr et des actinides transuraniens) et aux dépôts consécutifs à l'accident de Tchernobyl (rémanence du ^{137}Cs).

À ce bruit de fond viennent s'ajouter les rejets liquides des installations. Les radionucléides prédominants dans ces rejets sont le tritium et le carbone 14, rejetés majoritairement par les 4 CNPE et le centre de Marcoule (Tableau 21, en annexe). En 2011, environ 230 TBq de tritium ont été rejetés dans le Rhône par les installations nucléaires ; 90 % de ces rejets sont imputables aux CNPE et 10 % à Marcoule. Avec 153 GBq en 2011, le carbone 14 représente 97 % des autres radionucléides rejetés par les CNPE les 3% restant étant des produits d'activation ou de fission : iodes, dont ^{131}I , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{63}Ni ..., représentant une activité totale de l'ordre de 4 GBq. Le centre en déconstruction de Creys-Malville participe à 0,3 % de l'activité totale rejetée dans le Rhône.

Le centre de Marcoule est susceptible de rejeter également de très faibles quantités d'iode 129, de ^{90}Sr , d'autres produits d'activation que ceux précédemment cités, ainsi que des émetteurs alpha. Les isotopes de l'uranium, les actinides et quelques produits de fission sont également rejetés par les centres AREVA de Pierrelatte et de Romans sur Isère. Les rejets des installations présentes sur les affluents ne représentent qu'une partie infime des rejets totaux.

Enfin, les centres hospitaliers pratiquant des activités de médecine nucléaire génèrent irrégulièrement des rejets de radionucléides à courte période, notamment de l'iode 131.

Trois grands secteurs se distinguent, le premier, à l'aval du lac Léman et en amont de Creys-Malville, est principalement impacté par les retombées des tirs atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl en 1986 (radionucléides caractéristiques : ^{137}Cs et ^{134}Cs , ^{103}Ru et ^{106}Ru et $^{110\text{m}}\text{Ag}$) et par le tritium de l'industrie horlogère suisse. Le deuxième, allant de Creys-Malville à Marcoule, est en plus soumis aux rejets des sites nucléaires. Le dernier secteur est celui en aval de l'usine de Marcoule. S'ajoute ponctuellement l'impact des grandes agglomérations à travers les rejets de la médecine nucléaire.

Les radionucléides recherchés sont donc : les émetteurs gamma, le tritium (^3H) et le carbone 14 (^{14}C), le strontium 90 (^{90}Sr) ainsi que certains isotopes particuliers : actinides transuraniens et iode 129 (^{129}I) à l'aval de Marcoule, uranium à l'aval des sites de Pierrelatte et de Romans-sur-Isère.

Au sein des systèmes aquatiques, les radionucléides peuvent être regroupés, de manière générale, en deux grandes catégories qui conditionnent en partie les types de prélèvements pertinents pour leurs détections :

- les éléments présentant une affinité importante avec les supports solides : isotopes du cobalt, de l'argent, du césium, des transuraniens...
- les éléments n'ayant pas ou peu d'affinité avec les matières particulaires qui suivent la dynamique des masses d'eau et sont généralement facilement bio assimilables (tritium par exemple).

2.3 Les indicateurs et bio-indicateurs du milieu aquatique continental

Quatre types de matrices sont habituellement prélevés en milieu aquatique : les sédiments, l'eau et les matières en suspensions (MES) et les échantillons biologiques (végétaux et/ou animaux). 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.

Les prélèvements en milieu aquatique sont soumis à diverses contraintes : l'accès à certaines zones, les conditions hydrologiques (crue ou étiage), la saison pour les végétaux ou animaux et la nécessité d'obtenir des autorisations préfectorales pour les pêches.

2.3.1 Les sédiments

Comme le sol en milieu terrestre, les sédiments constituent un compartiment « puits » dans lequel viennent s'accumuler les radionucléides de période radioactive suffisamment longue pour y persister. Ils sont susceptibles d'être partiellement remobilisés et entraînés avec le flux d'eau lors des opérations d'entretien du fleuve (chasses de barrage, dragages) et des crues.

L'analyse des sédiments de surface peut permettre d'évaluer l'impact contemporain d'une contamination : les dépôts sont généralement 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 une meilleure appréciation de l'évolution historique des dépôts.

Les sédiments les plus fins ont la plus forte capacité de rétention.

2.3.2 L'eau et les matières en suspension

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 les matières en suspension.

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 fraction soluble de nombreux autres radionucléides.

Les matières en suspension 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.

2.3.3 Les échantillons biologiques

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

2.3.3.1 Les végétaux

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

2.3.3.2 Les animaux

Les poissons sont les seuls échantillons du milieu dulçaquicole qui peuvent être aussi considérés comme des denrées. Ils ont une large distribution géographique et 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 et de localisation ; 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.

Les corbicules sont des mollusques bivalves filtreurs qui 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.

2.4 Données disponibles : surveillance régulière et études récurrentes

Dans le cadre de la surveillance régulière, l'IRSN¹ dispose depuis les années 60-70 de sept hydrocollecteurs qui permettent de prélever de manière continue de l'eau du Rhône et de constituer mensuellement un échantillon composite d'eau filtrée et de MES. Le premier hydrocollecteur est à l'amont des installations nucléaires (Génissiat), les autres sont situés à l'aval de chacune d'entre elles. Des analyses mensuelles par spectrométrie gamma sont effectuées sur les MES et l'eau filtrée, le tritium libre est également mesuré sur l'eau filtrée.

Depuis 2005, l'IRSN exploite la Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA), qui permet le prélèvement, a minima mensuel, d'échantillons d'eau et de sédiments, en vue de mesures bas bruit de fond. Les émetteurs gamma, alpha et le ⁹⁰Sr sont recherchés en phases dissoute et particulaire. Le tritium libre est analysé sur des prélèvements ponctuels prélevés bimensuellement. Le tritium organiquement lié et le ¹⁴C sont recherchés dans la phase particulaire, chaque mois. Cette station est également équipée d'un système de détection des crues. Si le débit dépasse un seuil, fixé à 3000 m³/s, les prélèvements sont effectués toutes les 20 minutes durant 8 heures.

Ces mesures sont complétées par les études radioécologiques annuelles ou décennales réalisées par l'IRSN pour le compte d'EDF à proximité des CNPE. Une centaine d'échantillons environ sont collectés chaque année, donnant lieu à plus de 1300 résultats d'analyses répartis comme l'indique la Figure 2 ci-après (cf. Tableau 22 en annexe).

¹ exploités successivement par le Service central de protection contre les rayonnements ionisants (SCPRI), puis l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI) et maintenant par l'IRSN

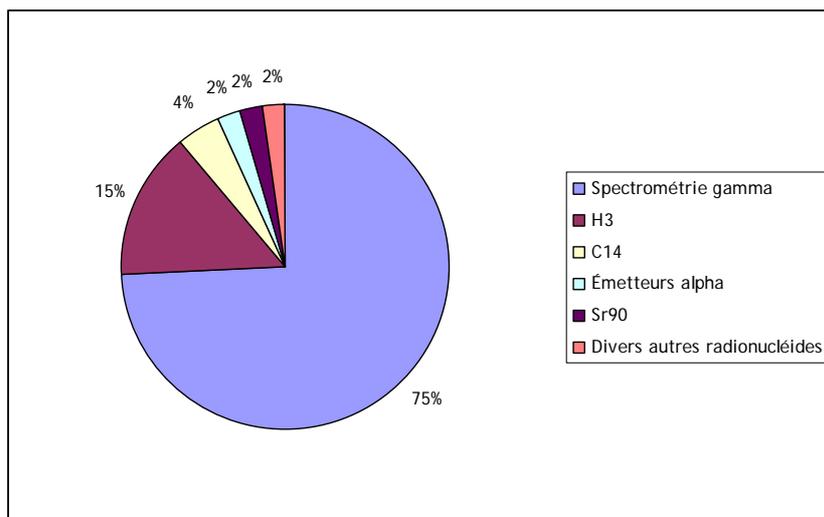


Figure 2. Répartition des analyses effectuées annuellement sur les échantillons prélevés dans le Rhône.

À ces données produites par l'IRSN s'ajoutent les résultats de la surveillance réglementaire effectuée par les différents exploitants, publiés depuis 2009 via le site du Réseau national de mesures (RNM) ².

Outre ces données régulières, de nombreuses connaissances sont (ont été) rassemblées lors d'études particulières. Citons notamment la *Synthèse des connaissances sur la radioécologie du Rhône* (Lambrecht et al., 1992), complétée récemment par la synthèse réalisée par Eyrolle (2009), qui analyse les principales données acquises durant une dizaine d'années jusqu'en 2006 sur les fleuves nucléarisés français. 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.

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, de mettre en perspective les résultats obtenus.

² www.mesure-radioactivite.fr/public/

2.5 Prélèvements et analyses réalisés dans la présente étude

Plusieurs missions sur le terrain ont été nécessaires à la collecte des échantillons entre avril 2010 et mai 2012. Une cinquantaine d'échantillons spécifiques au constat ont été traités et près de 200 analyses ont été effectuées.

La Figure 3 schématise les zones de prélèvements et les indicateurs associés ; les prélèvements effectués sur le Rhône et les analyses réalisées sont reportés au Tableau 23, en annexe.

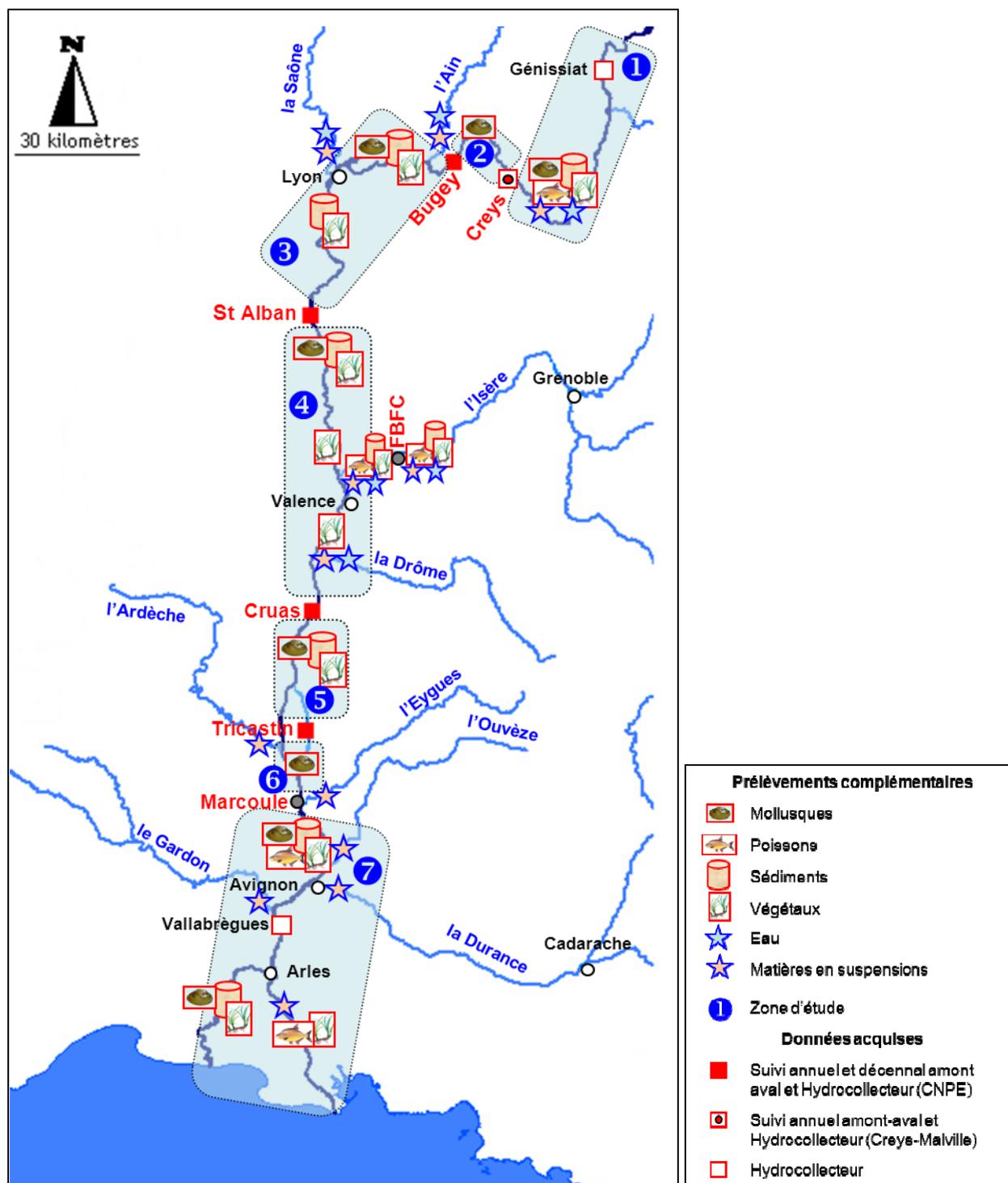


Figure 3. Localisation des zones de prélèvement.

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 potentiellement *la plus influencée*. Les échantillons prélevés dans ces deux zones font l'objet d'analyses très complètes : outre les émetteurs gamma, le ^{90}Sr et les émetteurs alpha sont recherchés dans les sédiments, les végétaux et les poissons afin de s'assurer que leurs concentrations restent cohérentes avec celles mesurées antérieurement ; en complément, une analyse gamma sur l'eau filtrée et les MES est faite en amont de Creys-Malville.

Entre ces points, le Rhône est segmenté en cinq secteurs délimités par l'amont et l'aval des rejets de chacune des installations ; des prélèvements de sédiments, végétaux, poissons et mollusques y sont réalisés et analysés à minima en spectrométrie gamma (selon les cas, d'autres analyses sont faites).

Par ailleurs des analyses particulières sont réalisées comme suit :

- Pour évaluer les apports liés aux sous-bassins versants, des matières en suspension sont prélevées et analysées par spectrométrie gamma à l'aval des principaux affluents, afin de rechercher le ^{137}Cs qui présente une grande affinité pour la fraction particulaire.
- Pour compléter les études radioécologiques annuelles de tous les CNPE et les études décennales des sites de Saint-Alban et de Cruas, des prélèvements de sédiments et de végétaux aquatiques sont réalisés dans les contre-canaux des sites. Ces cours d'eaux récupèrent vraisemblablement une partie des eaux pluviales avant le retour au Rhône. D'autre part, un petit ruisseau (La Varèze) se situe en amont immédiat du CNPE de Saint-Alban, donc théoriquement en zone non influencée par ceui-ci. Pour s'assurer que les écoulements du site ne le rejoignent pas, un sédiment y a été prélevé, puis analysé par spectrométrie gamma.
- Enfin, un prélèvement de sédiments, végétaux aquatiques et bivalves est réalisé à l'aval du Petit Rhône pour mesurer les radionucléides émetteurs gamma et alpha ainsi que pour la détermination des teneurs en ^{14}C et tritium lié, afin de vérifier la cohérence des données avec celles acquises sur le bras principal du fleuve, à Arles.

Le site du Tricastin ayant fait l'objet d'une étude complète en 2009 (Claval, 2011), aucun prélèvement complémentaire n'y est 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 laquelle s'ajoute l'étude détaillée sur l'origine du marquage en uranium de la nappe sous-jacente au site (Bernard et al. 2010).

3 Radionucléides mesurés par spectrométrie gamma

3.1 Eau et matières en suspension du Rhône

3.1.1 Données sur l'eau et les MES acquises de 1979 à 1989

Les concentrations moyennes des radionucléides d'origine naturelle détectés par spectrométrie gamma dans l'eau et les matières en suspension du Rhône entre 1979 et 1989 sont présentées dans le Tableau 24 en annexe. Parmi les quatre radionucléides mesurés, le ^{40}K est l'élément principal avec des concentrations moyennes de l'ordre de 87 ± 14 et 176 ± 65 mBq/L pour les éléments dissous et les MES respectivement ; par ailleurs, l' ^{238}U et le ^{226}Ra (l'un des descendants de l' ^{238}U) sont à l'équilibre.

Dans l'eau, peu de mesures montrent la présence de radioactivité gamma artificielle dans la zone en amont de Creys-Malville ; Le ^{137}Cs (imputable aux retombées des tirs) et les ^{134}Cs et ^{60}Co (imputés aux effluents atmosphériques de Bugey) sont détectés sporadiquement en 1980, 1985 et 1986 respectivement. Dans la deuxième zone entre Creys-Malville et Marcoule les données sont peu nombreuses ; elles font apparaître des radionucléides figurant dans la liste des rejets des CNPE : ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{58}Co et ^{60}Co , mais leurs concentrations restent souvent inférieures aux limites de détection. En 1986, les retombées issues de l'accident de Tchernobyl font augmenter la fréquence de détection du ^{137}Cs et du ^{134}Cs avec des valeurs maximales respectives de 450 et 60 mBq/L dans la fraction dissoute ; d'autres radionucléides caractéristiques de cet accident apparaissent : $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{103}Ru et ^{106}Ru , dont les concentrations décroissent après 1986. En aval de Marcoule sont détectés, en plus de ceux cités précédemment, des radionucléides caractéristiques de l'installation : ^{144}Ce , ^{241}Am , ^{103}Ru et ^{106}Ru , avec une prédominance du ^{106}Ru qui présente près de 73 % de l'activité mesurée.

3.1.2 Données sur l'eau et les MES acquises depuis 2005

Le Tableau 25, en annexe, présente les moyennes des activités des radionucléides d'origine naturelle et artificielle mesurées par spectrométrie gamma des MES prélevées par les hydrocollecteurs de 2005 à 2013. Les Tableaux 26 et 27, en annexe, présentent respectivement les moyennes des activités des radionucléides d'origine naturelle et artificielle mesurées par spectrométrie gamma sur l'eau filtrée et sur les MES à la station SORA et lors d'autres études entre 2005 et 2012. Les hydrocollecteurs et la station SORA fournissent des activités sur des prélèvements intégrés sur une période, les autres études sur des prélèvements ponctuels.

Les données disponibles sur les eaux filtrées sont assez rares car, les niveaux d'activité étant relativement faibles, l'échantillonnage nécessite de très grands volumes d'eau filtrée. La station SORA est le seul dispositif capable de prélever et filtrer, en routine, des volumes d'eau suffisants pour obtenir des valeurs significatives en spectrométrie gamma bas niveau. Les données acquises par cette station sont régulièrement synthétisées dans des rapports qui présentent également les calculs de flux à la Méditerranée, le dernier publié par l'IRSN rassemble les résultats 2010-2011 (Antonelli, 2013).

Dans les MES et dans l'eau filtrée l' ^{228}Ac , le ^{40}K et le ^7Be sont les trois radionucléides d'origine naturelle habituellement mesurés sur les échantillons prélevés par les différents dispositifs. Les activités moyennes dans les MES sont de l'ordre de 40 Bq/kg sec pour l' ^{228}Ac , 500 Bq/kg sec pour le ^{40}K et entre 82 à 272 Bq/kg sec pour le ^7Be . Ces concentrations restent assez constantes de l'amont vers l'aval, avec des variations plus importantes pour le

^7Be , d'origine atmosphérique, qui a une période radioactive assez courte (53 jours). Dans l'eau filtrée comme dans les MES, le ^{137}Cs est le radionucléide d'origine artificielle le plus fréquemment mesuré avec des niveaux de l'ordre de 0,08 à 0,4 mBq/L et de 3,9 à 39,9 Bq/kg sec respectivement.

Les activités massiques mesurées en ^{137}Cs dans les MES sont du même ordre de grandeur dans les échantillons collectés par l'hydrocollecteur de Vallabrègues et à la station SORA. En revanche, les activités des échantillons collectés en amont de ces stations sur un même tronçon du Rhône, dans le cadre d'études ponctuelles, présentent des concentrations plus élevées (11,3 à 21,3 Bq/kg sec) que celles des prélèvements intégrés sur une période plus longue par les hydrocollecteurs (3,9 à 9,6 Bq/kg sec). L'activité moyenne la plus élevée est mesurée en aval de Marcoule ($39,9 \pm 4,7$ Bq/kg sec).

Outre le ^{137}Cs , les autres radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans les MES prélevées par les hydrocollecteurs sont, par ordre de fréquences de mesure : le ^{60}Co , l' $^{110\text{m}}\text{Ag}$, le ^{58}Co , l' ^{131}I et le ^{54}Mn . La Figure 4 schématise l'évolution de l'amont vers l'aval du Rhône des intervalles de variation et des moyennes des activités de ces radionucléides mesurées entre 2005 et 2012.

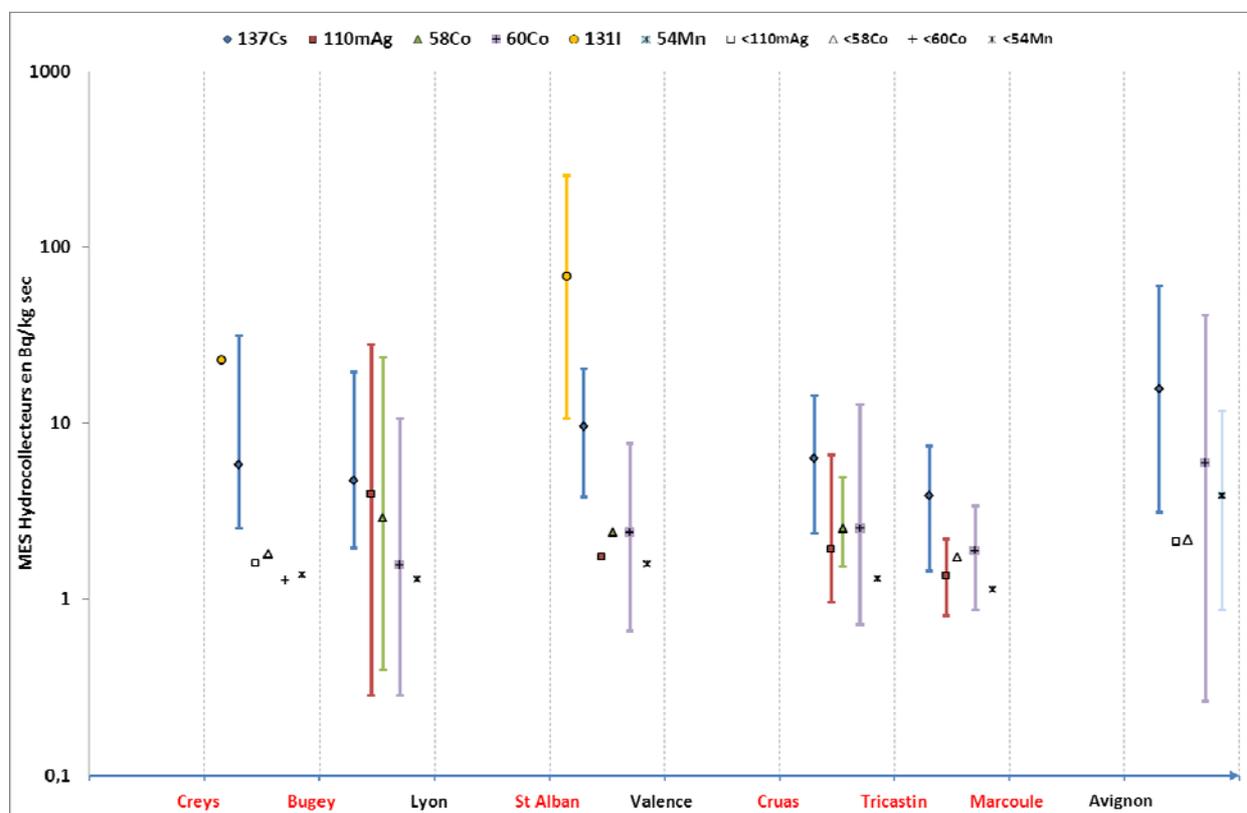


Figure 4. Intervalle de variation et moyennes des activités massiques des radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans les MES collectées par les hydrocollecteurs du Rhône de 2005 à 2012.

A Arles, compte tenu des grands volumes traités et de la métrologie bas niveaux utilisée, les échantillons de MES et d'eau filtrée collectés font apparaître d'autres radionucléides d'origine artificielle. Dans les MES, l' ^{241}Am , le ^{57}Co , le ^{125}Sb , le ^{123}Te et le ^{65}Zn ont été mesurés entre 2001 et 2012. Seul l' ^{131}I , qui est mesuré sur les échantillons de MES de certains hydrocollecteurs, n'a pas été mesuré dans les échantillons de la station SORA.

Dans les échantillons d'eau filtrée, l' ^{131}I , le ^{106}Rh , le ^{124}Sb et le ^{125}Sb sont mesurés entre 2001 et 2012. En revanche le ^{57}Co , le ^{123}Te et le ^{65}Zn n'apparaissent pas (Tableau 27 en annexe).

Le dispositif de surveillance par les hydrocollecteurs, installé depuis plus de trente ans, permet de représenter sur les figures suivantes l'évolution à la station de Vallabrègues, située en aval de l'ensemble des sites nucléaires du Rhône et de ses affluents, les activités des principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau filtrée de 1978 à 1997 (Figure 5) et l'évolution des activités des principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans les MES de 1982 à 2011 (Figure 6).

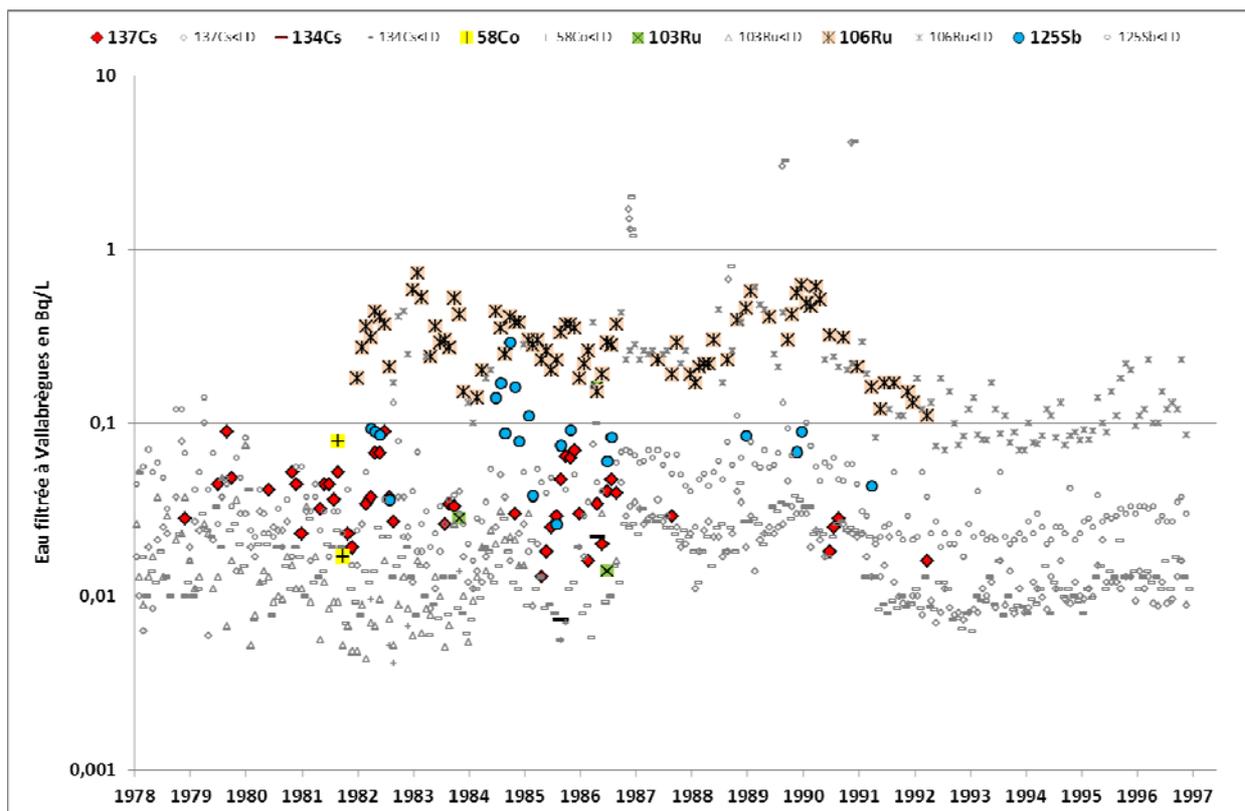


Figure 5. Principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans l'eau filtrée du Rhône à Vallabrègues de 1978 à 1997.

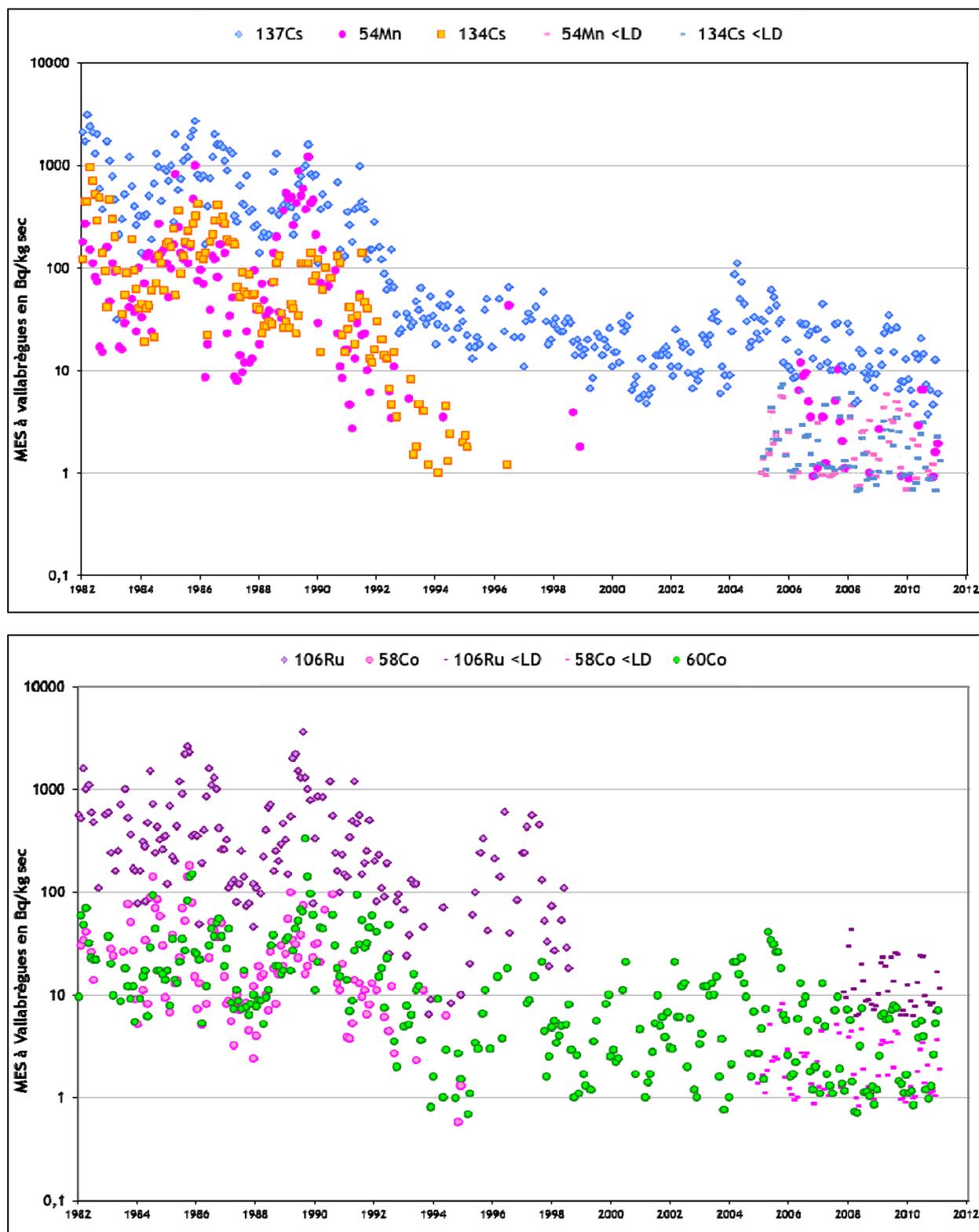


Figure 6. Activités massiques des principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma dans les MES du Rhône à Vallabrègues de 1982 à 2011.

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 : seuls le ^{137}Cs , le ^{60}Co et le ^{54}Mn sont encore régulièrement mesurés à Vallabrègues.

3.1.3 Résultats de mesure des prélèvements d'eau et de MES effectués dans le cadre du constat

Dans le cadre du présent constat, un prélèvement d'une centaine de litres d'eau filtrée et la collecte des matières en suspension issue de la filtration de plus de 3m³ d'eau ont été réalisés en amont de Creys-Malville début 2012.

Les résultats de mesure par spectrométrie gamma sur ces deux échantillons sont présentés dans le Tableau 1.

Pour les radionucléides d'origine naturelle mesurés par spectrométrie gamma, les activités volumiques de l'eau filtrée sont dans la gamme de variation des valeurs habituelles pour l'²²⁸Ac, le ⁷Be, et le ⁴⁰K. Il apparaît également des résultats significatifs en ²¹⁰Pb et ²³⁴Th avec 28,6 ± 2,8 et 13,1 ± 0,3 mBq/L respectivement. Dans les MES, les radionucléides mesurés sont également dans la gamme de variation des valeurs usuelles.

En ce qui concerne les radionucléides d'origine artificielle, malgré le volume exceptionnel des échantillons, seul le ¹³⁷Cs est détecté dans les MES avec une activité de 10,4 ± 1,2 Bq/kg sec, ce qui est comparable à la moyenne des activités mesurées en amont de Creys-Malville entre 2001 et 2012 (14,3 ± 1,9 Bq/kg sec). Le ¹³⁷Cs n'est pas détecté dans l'eau filtrée.

Tableau 1. Résultats de mesure par spectrométrie gamma sur les échantillons d'eau (≈ 100 L) et de MES (filtration d'environ 3 m³) prélevés en amont de Creys-Malville le 28/02/2013.

	⁷ Be	⁴⁰ K	²¹⁰ Pb	²²⁸ Ac	²³⁴ Th	¹³⁷ Cs
MES (Bq/kg sec)	82,3 ± 11,5	495 ± 53	112 ± 12	39,8 ± 6,2	180 ± 19	10,4 ± 1,2
Eau filtrée (mBq/L)	4,9 ± 0,9	57,4 ± 6,2	28,6 ± 2,8	1,3 ± 0,3	13,1 ± 1,5	ND

☞ Les activités des radionucléides d'origine naturelle sont relativement constantes dans le temps et le long du linéaire rhodanien, le ⁴⁰K est le radionucléide prédominant avec des concentrations de l'ordre de 50 mBq/L dans l'eau filtrée et 500 Bq/kg sec dans les matières en suspension.

☞ Les concentrations et la variété des radionucléides artificiels mesurés en spectrométrie gamma dans l'eau et les MES ont diminué de façon drastique ces 30 dernières années.

☞ Parmi les radionucléides d'origine artificielle, seul le ¹³⁷Cs, issu non seulement des rejets mais également du bassin versant, est mesuré dans l'eau filtrée avec une concentration moyenne de 0,09 mBq/L en amont de Creys-Malville et de 0,4 mBq/L à Arles. A la station SORA d'Arles, des concentrations faibles (du dixième au centième de mBq/L) de radionucléides provenant des installations sont également mesurées : ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ^{110m}Ag, ⁵⁴Mn, ¹³¹I, ¹⁰⁶Rh, ¹²⁴Sb, ¹²⁵Sb.

☞ Les activités massiques mesurées en ¹³⁷Cs dans les MES sont du même ordre de grandeur dans les échantillons collectés par l'hydrocollecteur de Vallabrègues et dans ceux de la station SORA de l'ordre de 16 Bq/kg sec en moyenne.

☞ Dans les MES, des radionucléides provenant des installations sont également mesurés : ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ^{110m}Ag, ⁵⁴Mn, ¹³¹I, ¹²⁵Sb, ²⁴¹Am, ¹²³Te, ⁶⁵Zn.

3.2 Sédiments et échantillons biologiques

3.2.1 Radionucléides d'origine naturelle

3.2.1.1 Synthèse des résultats de mesure disponibles

Une synthèse des résultats de mesure des radionucléides d'origine naturelle détaillés par Lambrecht (1992) de 1979 à 1989 est présentée en annexe (Tableau 24). Cette étude confirme qu'il y a peu de variation des concentrations de ces radionucléides dans le temps et dans l'espace. Quelle que soit la matrice observée le ^{40}K est l'élément majeur mesuré tant en niveau d'activité qu'en fréquence de détection. Les concentrations en uranium 238 et en radium 226 sont quasiment égales ce qui montre qu'ils sont à l'équilibre radioactif. Néanmoins, une augmentation des valeurs moyennes en uranium et radium des sédiments a été observée dans la zone de Saint-Alban à Cruas, probablement liée à l'influence des affluents venant du Massif Central cristallin, où les roches mères sont plus riches en uranium (Lambrecht 1992).

Les données plus récentes issues de la surveillance et de différentes études permettent de représenter sur la Figure 7 les intervalles de variation et les moyennes des concentrations des principaux radionucléides d'origine naturelle, mesurés dans les matrices biologiques du Rhône de 2006 à 2011. Le nombre de résultats significatifs moyennés pour cette période est noté entre parenthèses (pour chaque moyenne).

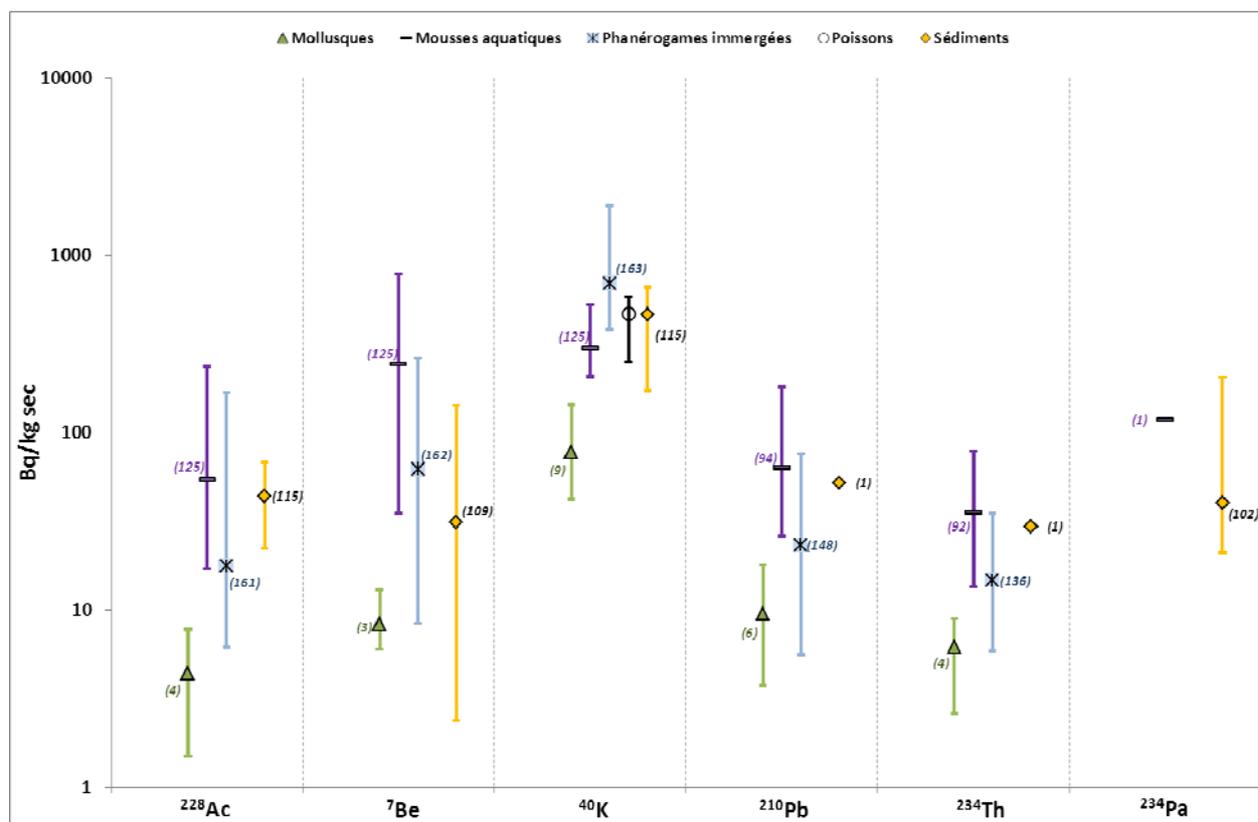


Figure 7. Intervalle de variation et moyenne des concentrations des principaux radionucléides d'origine naturelle, mesurés dans les échantillons biologiques et les sédiments du Rhône de 2006 à 2011.

La comparaison des données acquises sur la période 1979-1989 et de 2006 à 2011 montre, en toute logique, que les concentrations sont similaires pour ces deux périodes. Les concentrations en ^{232}Th et en ^{238}U , de la période 1979-1989, sont comparables avec celles de leurs descendants émetteurs gamma respectifs, l' ^{228}Ac et le ^{234}Th (avec lesquels ils sont toujours à l'équilibre) mesurés de 2006 à 2011. Le ^{40}K demeure le seul radionucléide d'origine naturelle mesuré systématiquement dans toutes les matrices ; on peut noter également la présence de ^7Be dans les sédiments qui témoigne de leur dépôt récent.

3.2.1.2 Résultats des mesures acquis dans le cadre du constat

Le Tableau 2 présente les résultats des mesures significatives des principaux radionucléides d'origine naturelle mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons collectés dans le cadre du constat.

Tableau 2. Résultats de mesures significatives des principaux radionucléides d'origine naturelle mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons biologiques spécifiques à la présente étude (Bq/kg sec).

	Sédiments	fréquence	Végétaux	fréquence	Mollusques	fréquence	Poissons		fréquence
							Bq/kg sec	Bq/kg frais	
^7Be	de $3,4 \pm 1,2$ à 72 ± 7	87,5 %	de 10 ± 3 à 82 ± 11	100 %	de $6 \pm 2,3$ à 13 ± 6	37,5 %	<LD		-
^{40}K	de 171 ± 16 à 530 ± 50	100 %	de 430 ± 50 à 1887 ± 20	100 %	de 51 ± 9 à 145 ± 19	100 %	de 420 ± 50 à 510 ± 49	de 100 ± 12 à 109 ± 11	100 %
^{210}Pb	52 ± 6	12,5 %	de $7,6 \pm 1,3$ à 43 ± 6	100 %	de $3,8 \pm 1,8$ à 18 ± 5	75 %	<LD		-
^{228}Ac	de 30 ± 4 à 47 ± 6	100 %	de $8,5 \pm 2,5$ à 168 ± 21	100 %	de $1,5 \pm 0,7$ à $7,8 \pm 2,2$	50 %	<LD		-
^{234}Th	30 ± 3	12,5 %	de 9 ± 3 à 35 ± 4	91,6 %	de $2,6 \pm 1$ à 9 ± 4	50 %	<LD		-

Ces résultats sont dans la moyenne des résultats présentés Figure 7. On peut noter également que le ^{22}Na , reste toujours inférieur aux limites de détection quelle que soit la matrice prélevée et que d'autre part, dans les sédiments, apparaît le ^{234}Pa avec des concentrations comprises entre 24 ± 12 et 43 ± 13 Bq/kg sec, proches de celle de ^{228}Ac , montrant que ^{238}U et ^{232}Th sont à l'équilibre. L'ensemble de ces résultats ne met en évidence aucune anomalie.

3.2.2 Radionucléides d'origine artificielle

3.2.2.1 Résultats des mesures acquis de 1979 à 1989

➤ Sédiments : en amont de Creys-Malville, avant 1986, on détecte la présence de ^{137}Cs (8 à 18 Bq/kg sec), issu des retombées atmosphériques des essais nucléaires. En 1986, sont mesurés les ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{106}Ru et $^{110\text{m}}\text{Ag}$, caractéristiques des retombées de l'accident de Tchernobyl, avec des valeurs de 300 et 150 Bq/kg sec pour le ^{137}Cs et le ^{134}Cs respectivement. Les activités de ces radionucléides diminuent progressivement les années suivantes.

De Creys-Malville à Marcoule, avant 1986, le ^{137}Cs varie entre 1 à 23 Bq/kg sec. La présence occasionnelle de ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn et $^{110\text{m}}\text{Ag}$ témoigne de l'influence du fonctionnement normal ou des mises en service des réacteurs des CNPE. En 1986, les ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{134}Cs et ^{137}Cs atteignent des valeurs maximales : 510 Bq/kg sec en ^{137}Cs , 260 Bq/kg sec en ^{134}Cs , 830 Bq/kg sec en ^{103}Ru et 480 Bq/kg sec en ^{106}Ru et témoignent de l'impact des retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl.

En aval de Marcoule, dès 1979, la variété de radionucléides détectés est plus élevée qu'en amont : la présence de ^{103}Ru et ^{106}Ru , rejetés par l'usine, rend, en partie, l'impact de l'accident de Tchernobyl moins visible dans cette zone.

➤ Poissons : en amont de Creys-Malville, seul le ^{137}Cs est détecté à une concentration moyenne de 0,15 Bq/kg frais. De Creys-Malville à Marcoule, avant 1986, seul le ^{137}Cs et le ^{60}Co sont régulièrement mesurés ; de Bugey à St Alban trois radionucléides caractéristiques des rejets sont mesurés : dès 1977, le ^{134}Cs (0,1 à 1,5 Bq/kg frais), le ^{137}Cs (0,1 à 11 Bq/kg frais), le ^{65}Zn (0,7 à 20 Bq/kg frais), et à partir de 1978, le ^{54}Mn (0,2 à 17 Bq/kg frais), le ^{58}Co (0,1 à 209 Bq/kg frais) et le ^{60}Co (0,1 à 35 Bq/kg frais). En 1986, on mesure des activités maximales de 11 Bq/kg frais en ^{137}Cs , de 5,13 Bq/kg frais en ^{134}Cs , de 3 Bq/kg frais en $^{110\text{m}}\text{Ag}$ et on note l'apparition du ^{103}Ru avec une concentration de 9 Bq/kg frais.

En aval de Marcoule, l'impact des retombées de l'accident de Tchernobyl est masqué par les rejets chroniques, là où les niveaux étaient déjà élevés pour certains radionucléides (^{134}Cs : 6,6 Bq/kg frais, ^{137}Cs : 32 Bq/kg frais, ^{54}Mn : 21 Bq/kg frais, ^{106}Ru : 26 Bq/kg frais).

➤ Végétaux : en amont de Creys-Malville, avant Tchernobyl, seul le ^{137}Cs (4 à 10 Bq/kg frais) et ponctuellement le ^{58}Co (attribué aux aérosols présents dans les rejets atmosphériques de la centrale de Bugey) sont mesurés. En 1986 les radionucléides caractéristiques des retombées de l'accident de Tchernobyl apparaissent : ^{134}Cs , ^{103}Ru , ^{106}Ru et $^{110\text{m}}\text{Ag}$.

De Creys-Malville à Marcoule, avant 1986, le ^{58}Co , le ^{60}Co et le ^{54}Mn témoignent des rejets des centrales et, localement dans la zone de St Alban, des marqueurs des tirs chinois sont mesurés (^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{95}Zr et ^{95}Nb). Pour les principaux radionucléides caractéristiques des retombées de l'accident de Tchernobyl, les concentrations maximales atteintes en 1986 dans les phanérogames immergées sont de 933 Bq/kg sec en ^{137}Cs , 192 Bq/kg sec en ^{134}Cs , 1610 Bq/kg sec en $^{103+106}\text{Ru}$. Les bryophytes enregistrent des concentrations plus élevées, atteignant 1680 Bq/kg sec en ^{137}Cs et 786 Bq/kg sec en ^{134}Cs .

En aval de l'usine de Marcoule, l'impact de Tchernobyl est masqué par les rejets de l'usine avec des concentrations atteignant, après 1986, respectivement dans les phanérogames immergées et les bryophytes 3630 et 1460 Bq/kg sec en ¹³⁷Cs et 3940 Bq/kg sec pour les deux matrices en ¹⁰⁶Ru + ¹⁰⁶Rh.

3.2.2.2 Résultats des mesures issus de la surveillance, des études contemporaines (2000-2011) et dans le cadre du constat.

3.2.2.2.1 Césium 137

Le Tableau 28, en annexe, présente les moyennes des activités en ¹³⁷Cs mesurées par spectrométrie gamma sur les échantillons biologiques et les sédiments du Rhône entre 2000 et 2011 (en Bq/kg sec). Le césium est détecté dans la plupart des échantillons prélevés en amont et en aval des installations. Pour les poissons, le ¹³⁷Cs est le seul radionucléide d'origine artificielle encore détecté par spectrométrie gamma. Les activités moyennes sont comprises entre 5,1 et 12,7 Bq/kg sec dans les sédiments ; de 0,07 à 0,13 Bq/kg frais dans les poissons ; de 1,2 à 2,8 Bq/kg sec dans les phanérogames et de 3,2 à 7,4 Bq/kg sec dans les mousses.

Dans le cadre du constat des résultats complémentaires ont été acquis, soit sur des matrices rarement étudiées (du fait de la complexité de prélèvement et de traitement) comme les corbicules, soit dans des zones géographiques où les données sont plus rares (Tableau 3 ci-après). Il apparaît que 5 des 8 échantillons de corbicules ont une activité supérieure à la limite de détection, comprise entre 1,2 et 1,8 Bq/kg sec. Contrairement à ce qui était attendu, ces mollusques bivalves s'avèrent ne pas être de bons bio-indicateurs pour le ¹³⁷Cs et pour les autres radionucléides détectés en spectrométrie gamma (cf. § 3.3.2.3 page 29).

L'ensemble des résultats est dans l'intervalle de variation des moyennes des activités mesurées ces dix dernières années.

Tableau 3. Activités mesurées en ¹³⁷Cs dans les sédiments et les échantillons biologiques du Rhône dans le cadre du constat (Bq/kg sec).

	sédiments		végétaux		poissons			mollusques	
					Bq/kg sec	Bq/kg frais			
amont Creys-Malville	08/03/10	5,4 ± 0,5	19/07/10	2,75 ± 0,34	13/04/10	0,27 ± 0,06	0,06 ± 0,01	18/10/11	1,2 ± 0,5
aval Creys-Malville								13/12/10	≤ 0,8
aval Bugey/amont Lyon	24/11/11	5,5 ± 0,5	24/11/11	≤ 5				14/12/10	≤ 1,2
aval Lyon	23/11/11	9,6 ± 0,9	23/11/11	2,3 ± 0,5					
				2,7 ± 0,5					
				2,7 ± 0,6					
amont St Alban (la Varèze)	16/03/11	6,2 ± 0,6							
aval St Alban (contre-canal)	23/11/11	20,8 ± 1,8	20/07/10	2,3 ± 0,4				16/03/11	≤ 0,6
amont Valence			23/11/11	1,1 ± 0,5					
aval Valence			23/11/11	≤ 1,1					
aval Cruas	09/03/11	8,9 ± 0,8	21/07/10	2,9 ± 0,4				09/03/11	≤ 0,7
aval Tricastin								08/09/11	≤ 3
aval Marcoule	21/07/10	5,3 ± 0,6	21/07/10	5,3 ± 0,6	04/10/11	1,46 ± 0,31	0,35 ± 0,07	25/01/11	1,4 ± 0,4
						0,51 ± 0,19	0,12 ± 0,05		
aval Arles			16/07/09	3,2 ± 0,9	06/08/08	0,97 ± 0,32	0,22 ± 0,07		
Petit Rhône	03/02/11	10,4 ± 0,9	30/05/12	1,8 ± 0,6				10/02/11	1,8 ± 0,5

La Figure 8 présente les intervalles de variations et les moyennes des activités en ^{137}Cs dans les sédiments et les échantillons biologiques prélevés dans le Rhône de 2000 à 2011 et à l'occasion du constat.

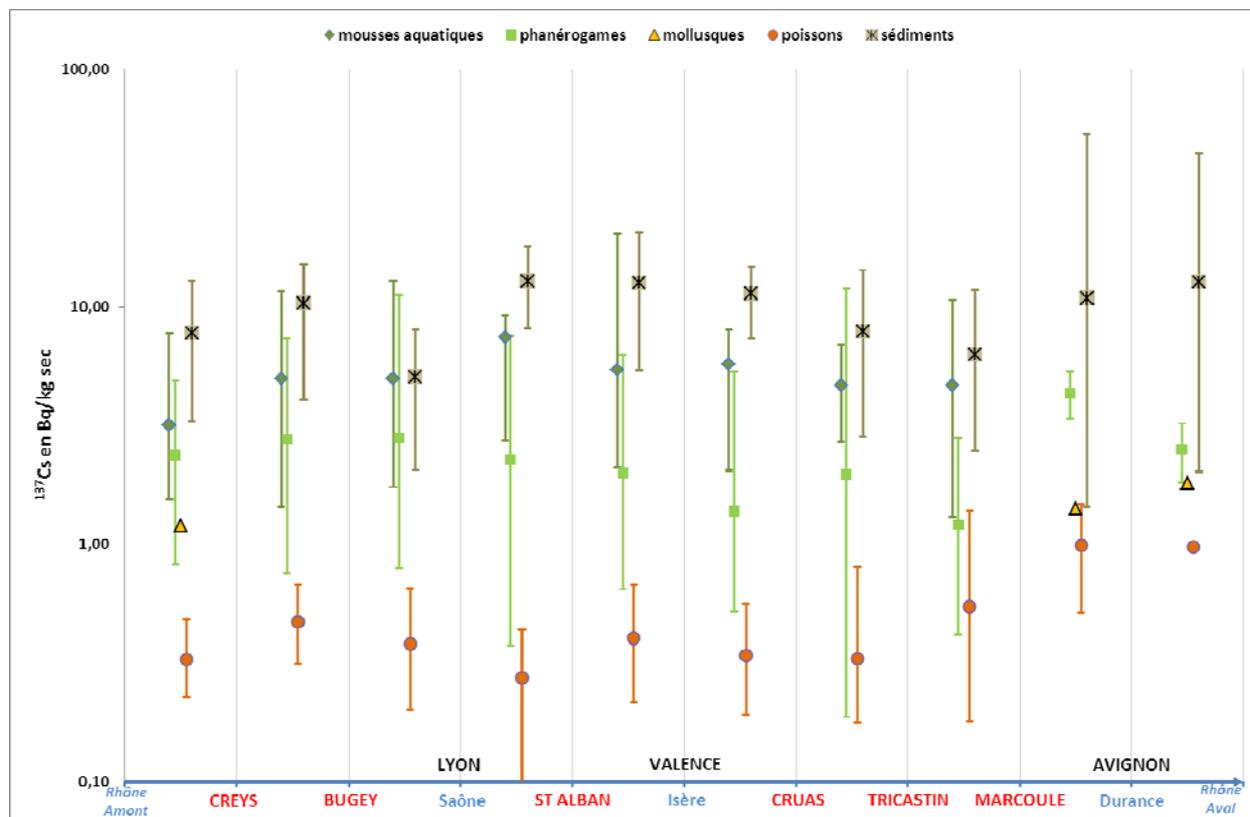


Figure 8. Intervalles de variation et moyennes des activités en ^{137}Cs dans les sédiments et les échantillons biologiques prélevés dans le Rhône de 2000 à 2011 et à l'occasion du constat (Bq/kg sec).

3.2.2.2.2 L'iode131

Le Tableau 29, en annexe, présente les moyennes des activités en ^{131}I mesurées par spectrométrie gamma sur les échantillons biologiques du Rhône entre 2000 et 2011 en Bq/kg sec. Les niveaux d'activités mesurés sont compris entre 1,8 et 69 Bq/kg sec dans les phanérogames et entre 1,2 à 382,3 Bq/kg sec dans les mousses aquatiques. Les niveaux maximum en iode 131 sont mesurés à l'aval de Lyon, témoin principal de l'activité de médecine nucléaire. Le Tableau 4 présente les activités mesurées en ^{131}I dans les phanérogames prélevées dans le cadre du constat.

Tableau 4 : Activités mesurées en ^{131}I dans les phanérogames prélevées dans le cadre du constat (Bq/kg sec).

	Localisation	Date	^{131}I
aval Bugey/amont Lyon	Jons	24/11/2011	$3,9 \pm 0,9$
aval Lyon/amont St Alban	Aval STEP de Pierre Bénite	23/11/2011	$2,1 \pm 0,5$
	Aval STEP de Saint Fons	23/11/2011	36 ± 4
	Amont de Givors	23/11/2011	42 ± 5
aval St Alban / amont Valence	Guilherand-Granges	23/11/2011	$9,5 \pm 1,3$
aval Valence / amont Cruas	Charmes sur Rhône	23/11/2011	$4,3 \pm 0,9$
aval Arles		16/07/2009	46 ± 5
Petit Rhône	Pont D58 La petite Sylve	30/05/2012	$4,1 \pm 0,8$

Les activités mesurées sont dans la gamme des activités précédemment citées, et confirment l'impact des rejets hospitaliers déjà observé sur les zones précédemment étudiées (Figure 9).

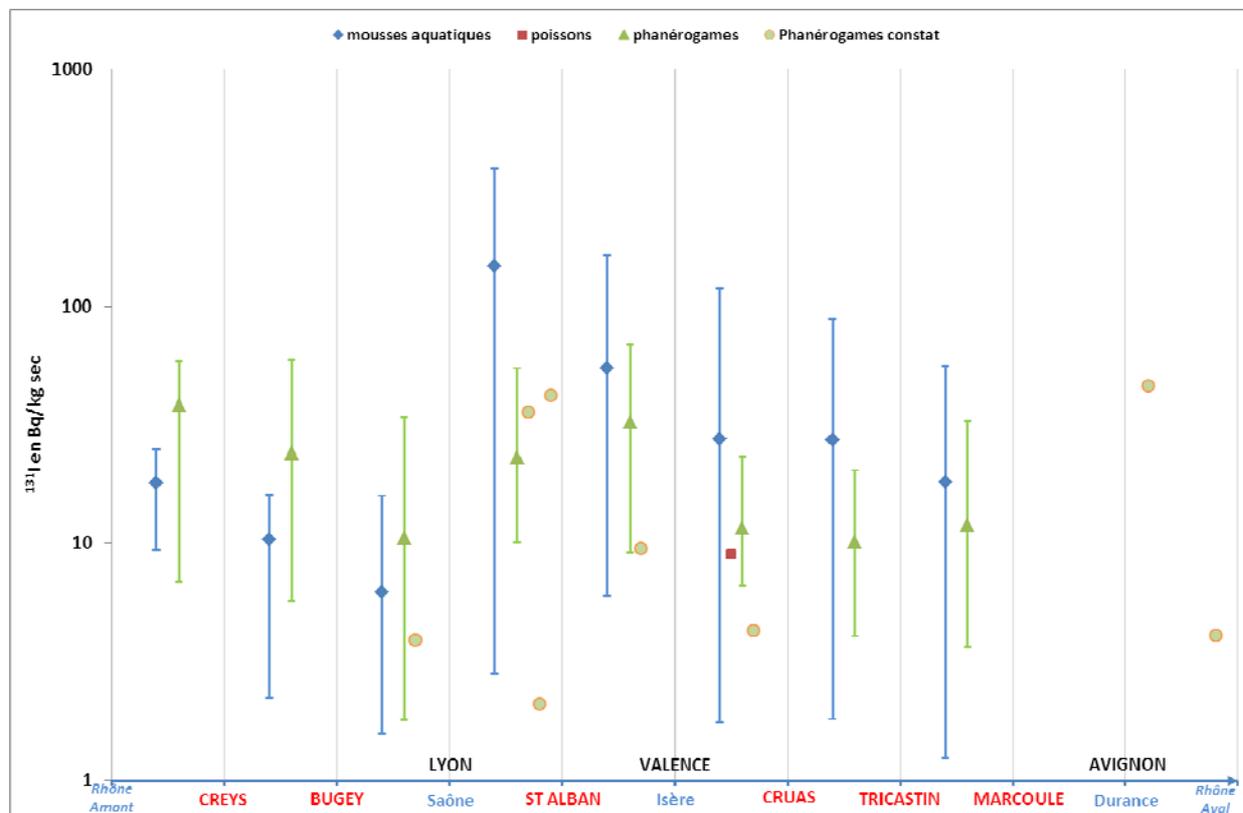


Figure 9. Intervalles de variation et moyennes des activités en ¹³¹I, mesurés dans le Rhône de 2001 à 2011 et dans le cadre du constat.

3.2.2.2.3 Autres radionucléides

Aucune activité significative en iode 129 n'a été mesurée dans les échantillons prévus dans le cadre de cette étude. L'analyse des résultats disponibles montre que les activités en iode 129 dans les échantillons aquatiques prélevés sur le Rhône sont inférieures aux limites de détection sur les 20 dernières années.

Le Tableau 30 en annexe détaille les moyennes des concentrations des principaux radionucléides, d'origine artificielle, détectés par spectrométrie gamma, autres que le ¹³⁷Cs et I¹³¹, dans les échantillons du Rhône de 2000 à 2011. Le ⁶⁰Co, le ⁵⁸Co, I^{110m}Ag et le ⁵⁴Mn sont les radionucléides les plus fréquemment mesurés. Leur présence et sporadiquement celle de I²⁴¹Am, du ¹³⁴Cs, du ¹²³Te et du ¹²⁵Sb témoignent du marquage de l'environnement aquatique par les rejets d'effluents de l'industrie du nucléaire. Sur cette période d'étude, le ⁵⁷Co est également mesuré une fois, en 2000, dans les phanérogames à l'aval de Tricastin, avec une concentration de 0,18 ± 0,07 Bq/kg sec, le ¹²⁵Sb en 2003 dans les sédiments à l'aval de Marcoule avec une concentration de 1,4 ± 0,5 Bq/kg sec. En 2006, le ¹²³Te est quant à lui mesuré à l'aval de Cruas dans les phanérogames et les mousses aquatiques à des concentrations de 0,3 ± 0,06 et 0,3 ± 0,08 Bq/kg sec respectivement.

En amont de Creys-Malville aucune mesure n'est significative, globalement les concentrations augmentent à l'aval des installations et diminuent à l'aval des affluents (dilution).

Entre Creys-Malville et Bugey, seuls les cobalts 60 et 58 sont mesurés dans un échantillon de phanérogames à des concentrations de 0,34 ± 0,11 et 0,48 ± 0,12 Bq/kg sec respectivement.

Dans les végétaux, les moyennes des activités les plus élevées en ^{60}Co , ^{58}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$ sont observées en aval de Bugey. Elles sont de l'ordre de 5,2 Bq/kg sec en ^{60}Co , de 3,4 Bq/kg sec en ^{58}Co et de 1,1 à 1,6 Bq/kg sec pour l' $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Les activités en ^{54}Mn sont de $3,08 \pm 0,71$ Bq/kg sec dans les mousses et entre 0,7 et 1 Bq/kg sec dans les phanérogames.

Le ^{134}Cs qui n'avait plus été mesuré depuis l'année 2000 en aval de Bugey, a été mesuré trois fois en 2011 dans les bryophytes, à un niveau proche des limites de détection (de 0,3 à 0,6 Bq/kg sec).

À l'aval de Marcoule, aucun résultat de mesure significatif n'est disponible dans les mousses aquatiques et les phanérogames entre 2000 et 2011. En revanche, généralement, c'est dans ce secteur que se situent les concentrations les plus élevées dans les sédiments en ^{60}Co , ^{58}Co avec des activités maximales de $14,7 \pm 2,2$ et $0,8 \pm 0,4$ Bq/kg sec respectivement. L'activité maximale de 1,9 Bq/kg sec en $^{110\text{m}}\text{Ag}$ dans les sédiments de ce secteur est également proche de l'activité maximale mesurée en aval de Bugey. L' ^{241}Am est également mesuré avec une concentration moyenne comprise entre 1 et 1,6 Bq/kg sec.

Dans les échantillons prélevés pour cette étude, seuls les ^{60}Co , ^{58}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ et ^{54}Mn sont mesurés significativement avec des fréquences d'apparition et des niveaux d'activité variables selon les matrices (Tableau 5).

Tableau 5. Résultats de mesures significatives³ des principaux radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons biologiques spécifiques au constat hors ^{137}Cs et ^{131}I en Bq/kg sec.

Nature	Zones	Date	^{60}Co	^{58}Co	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	^{54}Mn
Sédiments <2mm	aval Bugey / amont Lyon	24/11/2011			$0,6 \pm 0,13$	
	aval Lyon / amont St Alban	23/11/2011			$0,81 \pm 0,17$	
	aval Marcoule	21/07/2010	$0,35 \pm 0,12$			
	petit Rhône	03/02/2011	$0,96 \pm 0,17$			$0,46 \pm 0,16$
végétaux	aval Bugey / amont Lyon	24/11/2011		$6,0 \pm 1,2$		
	aval Lyon / amont St Alban	23/11/2011		$0,8 \pm 0,4$		
				$0,58 \pm 0,3$		
	aval Marcoule	21/07/2011	$9,1 \pm 1,1$			$6 \pm 0,7$
	aval Arles	16/07/2009	$15,5 \pm 2,6$			$3,8 \pm 1$
petit Rhône	30/05/2012	$11,6 \pm 1,9$	$1,2 \pm 0,5$		$1,9 \pm 0,6$	
mollusques	aval Bugey / amont Lyon	14/12/2010			$6,6 \pm 1,3$	
	aval tricastin	08/09/2011			$1,1 \pm 0,5$	
	aval Marcoule	25/01/2011	$2,8 \pm 0,7$			
	petit Rhône	10/02/2011	$1,8 \pm 0,6$			

Les Figure 10, Figure 11 et Figure 12 présentent respectivement l'évolution des moyennes des activités et des intervalles de variation de ces radionucléides le long du fleuve dans les sédiments, les phanérogames immergées et les mousses aquatiques.

³ Mesures supérieures aux limites de détection

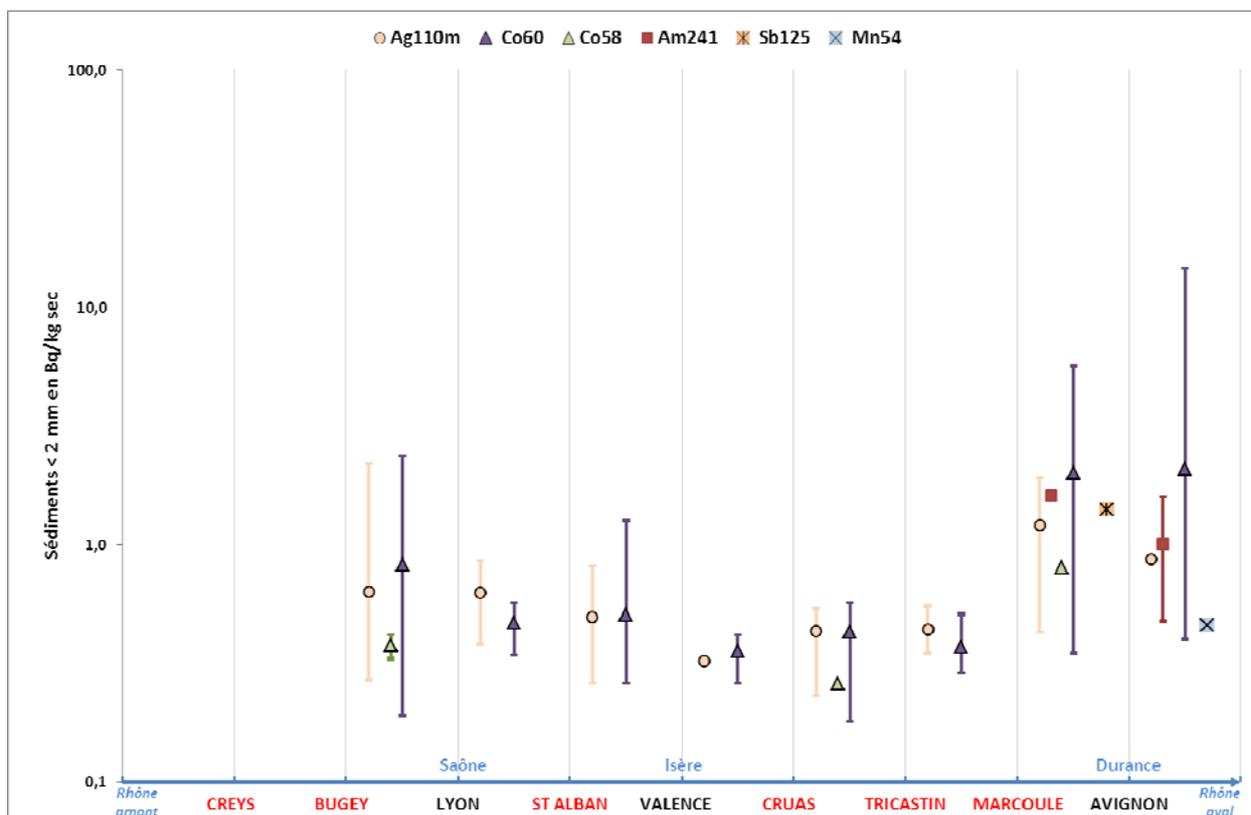


Figure 10. Intervalles de variation et moyennes des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma, hors ^{137}Cs et ^{131}I , dans les sédiments du Rhône de 2000 à 2011 (Bq/kg sec).

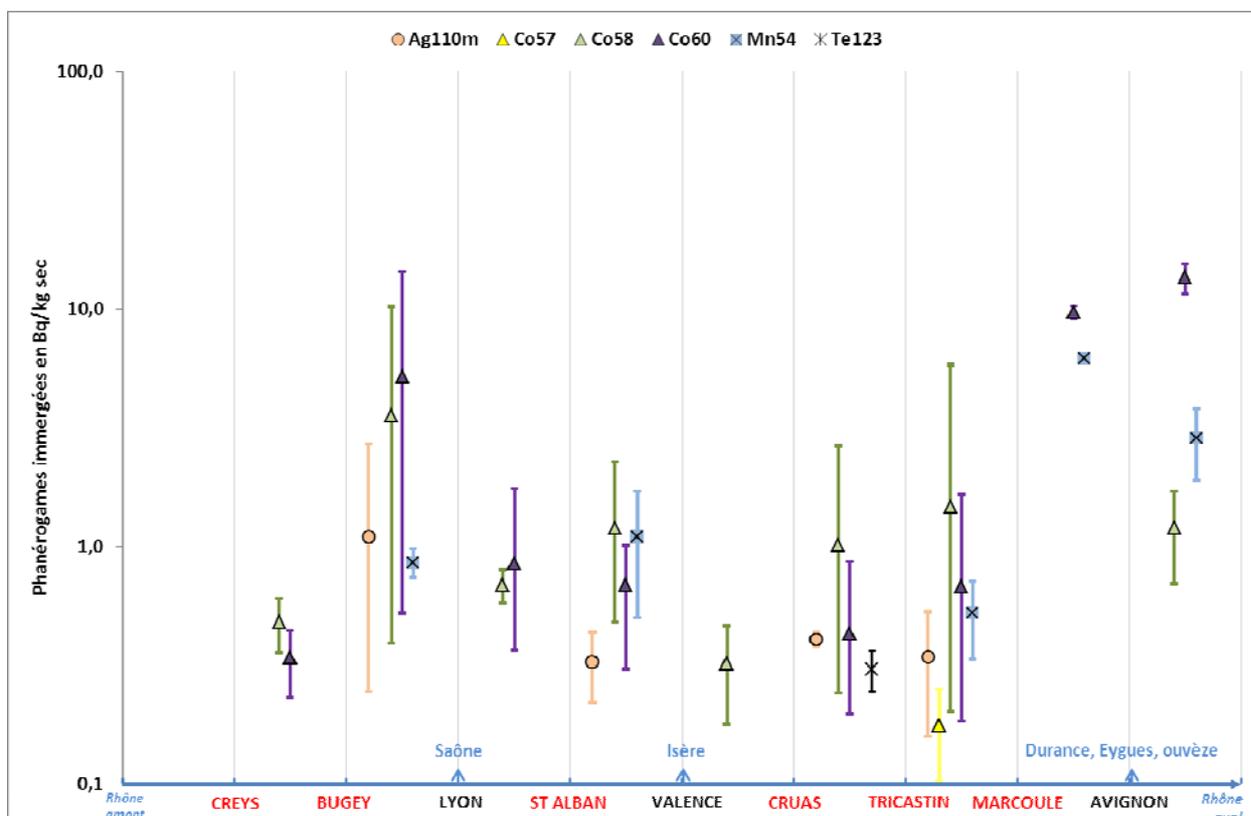


Figure 11. Intervalles de variation et moyennes des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma, hors ^{137}Cs et ^{131}I , dans les phanérogames immergées du Rhône de 2000 à 2011 (Bq/kg sec).

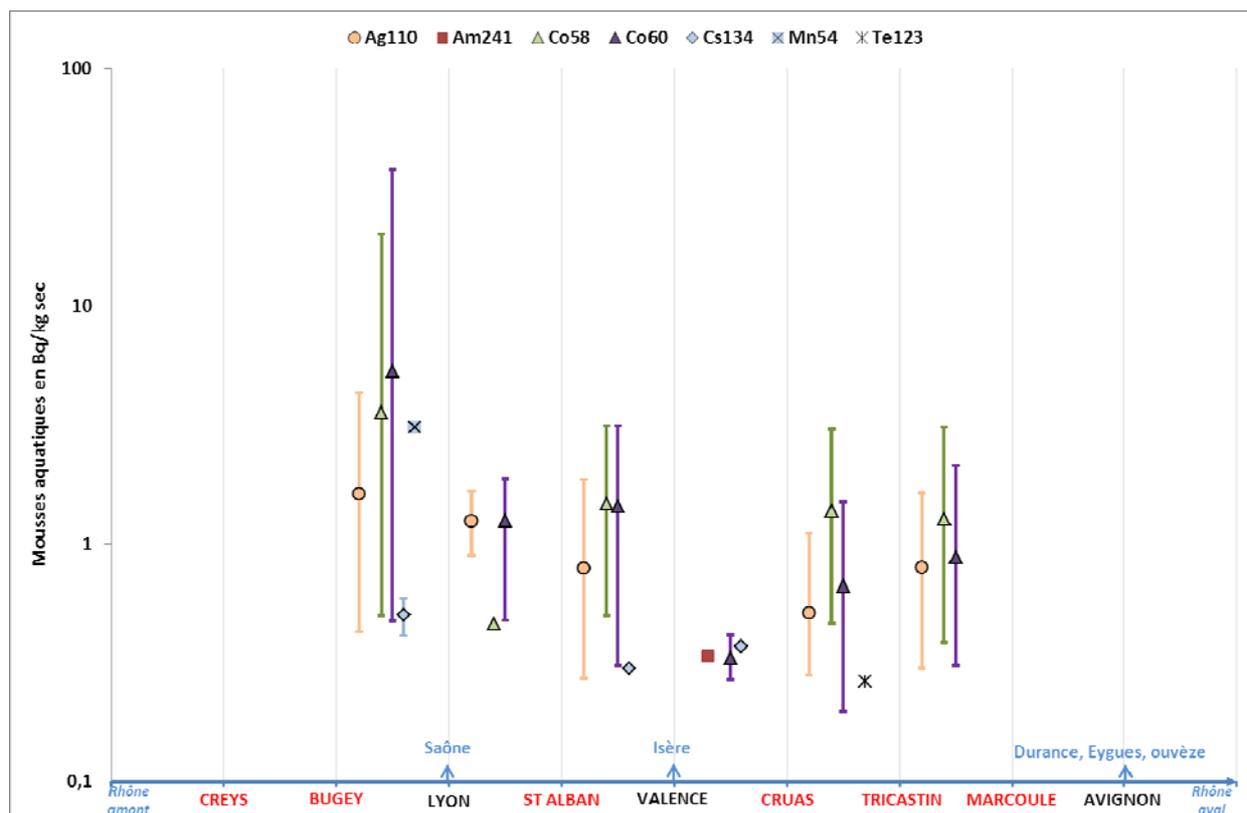


Figure 12. Intervalles de variation et moyennes des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma, hors ^{137}Cs et ^{131}I dans les mousses aquatiques du Rhône de 2000 à 2011 (Bq/kg sec).

☞ Les concentrations des radionucléides d'origine naturelle dans les sédiments et matrices biologiques sont constantes depuis ces 30 dernières années. Le ^{40}K est prédominant quelle que soit la matrice analysée ; par ailleurs, l'uranium et le thorium sont à l'équilibre dans les sédiments.

☞ Les concentrations et la variété des radionucléides artificiels mesurés en spectrométrie gamma dans les échantillons biologiques et les sédiments ont diminué depuis les années 80 et sont relativement stables ces dix dernières années.

☞ Parmi tous les radionucléides mesurés régulièrement depuis le début des rejets des installations riveraines, subsistent de façon régulière :

- le ^{137}Cs avec des concentrations actuellement de l'ordre de la dizaine de Bq/kg sec dans les sédiments et de l'ordre du Bq/kg sec dans les échantillons biologiques.
- les ^{60}Co , ^{58}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{54}Mn avec des concentrations variables le long du linéaire restant assez faibles (sédiments : autour de 0,5 Bq/kg sec) et environ 5 fois plus élevées dans la zone aval (Marcoule), où l'on observe aussi la présence de ^{57}Co et ^{241}Am .

☞ L'impact des rejets issus des activités de la médecine nucléaire est perceptible par l'augmentation des activités en ^{131}I dans les végétaux aquatiques à l'aval des grandes agglomérations.

4 Activités des actinides transuraniens, tritium, carbone 14 et strontium 90

4.1 Plutonium et américium

Les isotopes ^{238}Pu , 239 , 240 du plutonium et ^{241}Am sont des actinides transuraniens, émetteurs alpha de longue période (87,7 ; 24100 ; 6563 et 432,7 ans respectivement). Dans le Rhône, ils ont deux origines possibles : les apports dus à l'érosion des sols du bassin versant marqué majoritairement par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires de 1945 à 1980 et les anciens rejets du centre de Marcoule. Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ permet donc de caractériser l'origine du plutonium mesuré : il est de 0,03 en ce qui concerne les retombées globales, et, pour les rejets des installations COGEMA de Marcoule, mises à l'arrêt définitif en 1997, de 0,05 (production de plutonium de qualité militaire) à 0,3 (retraitement du combustible civil).

4.1.1 Activités mesurées entre 1979 et 1989

Dans la synthèse de Lambrecht (1992), les mesures alpha sur les échantillons d'eau sont rares, celles effectuées sur deux prélèvements lors du point zéro de Creys-Malville restent inférieures aux limites de détection. En 1989, à l'aval de Marcoule (Vallabrègues et Fourques), des traces de ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ sont mesurées, de l'ordre de 0,018 et 0,058 mBq/L respectivement. Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0,31 est caractéristique des rejets liquides de l'ancienne usine de retraitement de Marcoule.

Les sédiments en amont et en aval de Creys-Malville en 1991, présentent respectivement des concentrations de 4,4 et 7,2 mBq/kg sec de ^{238}Pu et 86 et 147 mBq/kg sec de $^{239+240}\text{Pu}$ avec dans les deux cas un rapport d'activité de $0,05 \pm 0,02$ proche de celui des retombées atmosphériques, les différences de concentrations étant attribuables à la granulométrie des échantillons. En aval de Marcoule, du fait des rejets des effluents liquides de l'usine, ^{241}Am le ^{238}Pu et le $^{239+240}\text{Pu}$ sont détectés de manière plus significative avec des concentrations maximales de 0,3 et 0,9 Bq/kg sec pour le ^{238}Pu et le $^{239+240}\text{Pu}$ respectivement (rapport isotopique caractéristique de 0,3).

Dans les poissons, les concentrations en ^{238}Pu et $^{239+240}\text{Pu}$ restent en général inférieures aux limites de détection (<0,01 Bq/kg frais dans les poissons du Rhône). En aval de l'usine de Marcoule, quelques valeurs significatives sont observées entre 1981 et 1984 comprises entre 0,03 et 0,04 Bq/kg frais pour le ^{238}Pu et entre 0,03 et 0,3 Bq/kg frais pour le $^{239+240}\text{Pu}$.

Dans les phanérogames, seul le secteur aval de Marcoule présente des activités significatives comprises entre 0,3 à 1,2 Bq/kg sec en ^{238}Pu et 0,2 à 4,9 Bq/kg sec en $^{239+240}\text{Pu}$, avec un rapport caractéristique des rejets de l'usine de 0,38.

4.1.2 Activités mesurées entre 2001 et 2011

Le Tableau 31 en annexe présente les moyennes des activités mesurées pour ^{241}Am , le ^{238}Pu et le $^{239+240}\text{Pu}$ ainsi que la valeur moyenne du rapport 'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ le long du Rhône entre 2001 et 2011.

Dans les sédiments et les phanérogames, les activités les plus élevées se trouvent dans le secteur aval proche de Marcoule. Dans les sédiments, les activités sont comprises entre 0,015 et 1,842 Bq/kg sec en ^{241}Am , entre $3,8 \times 10^{-3}$ et 1,9 Bq/kg sec en $^{239+240}\text{Pu}$ et entre 0,002 et 0,287 Bq/kg sec en ^{238}Pu . Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ présente des valeurs proches de 0,03 en amont de Tricastin et comprises entre 0,039 et 0,248 en aval.

Dans les phanérogames, les activités sont comprises entre 0,003 et 1,117 Bq/kg sec en ^{241}Am , entre 0,01 et 0,13 Bq/kg sec en $^{239+240}\text{Pu}$ et entre 5×10^{-4} et 0,021 Bq/kg sec en ^{238}Pu . Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ présente des valeurs comprises entre 0,029 et 0,041 en amont de Tricastin et de 0,126 à 0,28 en aval.

Dans les mousses, les activités les plus élevées sont mesurées dans le secteur aval de Tricastin, elles sont comprises entre 0,017 et 0,045 Bq/kg sec en ^{241}Am , entre 0,078 et 0,122 Bq/kg sec en $^{239+240}\text{Pu}$ et entre 0,002 et 0,034 Bq/kg sec en ^{238}Pu . Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ présente des valeurs proches de 0,03 en amont de Tricastin et comprises entre 0,079 et 0,281 en aval.

Dans les muscles des poissons, deux résultats en $^{239+240}\text{Pu}$ sont mesurés à l'aval de Bugey et de Tricastin avec des concentrations de $3,3 \times 10^{-5} \pm 3,3 \times 10^{-5}$ et $4,2 \times 10^{-5} \pm 3,7 \times 10^{-5}$ Bq/kg sec respectivement. Ces concentrations sont très faibles ($7,1 \times 10^{-6}$ et 1×10^{-5} Bq/kg frais) et présentent des incertitudes importantes.

Dans les MES, des résultats de mesure significatifs sont disponibles seulement à partir du secteur aval de Cruas, les données les plus nombreuses étant celles mesurées à la station SORA. Les activités minimales et maximales sont également mesurées à SORA ; elles sont comprises entre 0,03 et 1,19 Bq/kg sec en ^{241}Am , entre $4,7 \times 10^{-3}$ et 1,13 Bq/kg sec en $^{239+240}\text{Pu}$ et entre 0,002 et 0,343 Bq/kg sec en ^{238}Pu . Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ présente des valeurs comprises entre 0,029 et 0,373. Les activités minimales et maximales mesurées dans les MES à SORA sont proches de celles mesurées dans les sédiments du secteur aval de Marcoule.

Les seuls résultats significatifs disponibles dans l'eau filtrée sont ceux mesurés à la station SORA. Les activités sont comprises entre 6×10^{-8} et 8×10^{-6} Bq/L sec en ^{241}Am , entre $1,4 \times 10^{-7}$ et $1,8 \times 10^{-5}$ en $^{239+240}\text{Pu}$ et entre 4×10^{-8} et 7×10^{-6} Bq/L sec en ^{238}Pu . Le rapport d'activité moyen $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ est de 0,32.

Un autre radionucléide transuranien est mesuré à Arles dans l'eau et les matières en suspension : le ^{244}Cm (formé par filiation des isotopes du plutonium). Dans l'eau, la moyenne des concentrations (6 résultats significatifs) est de $2,2 \times 10^{-7} \pm 3,5 \times 10^{-8}$ Bq/L avec un minimum de 10^{-8} et un maximum de 10^{-6} Bq/L. Dans les matières en suspension, la concentration moyenne sur 48 résultats significatifs est de $0,007 \pm 0,002$ Bq/kg sec avec un minimum de 0,001 et un maximum mesuré de 0,042 Bq/kg sec.

4.1.3 Données acquises dans le cadre du constat

Le Tableau 6 présente les résultats de mesure par spectrométrie alpha des échantillons collectés dans le cadre du constat. Deux secteurs ont été explorés pour compléter les mesures disponibles, l'amont de Creys-Malville et l'aval de Marcoule (Rhône et Petit Rhône). Les activités dans les poissons sont restées inférieures aux limites de détection. Les concentrations les plus élevées en $^{239+240}\text{Pu}$ sont mesurées dans les sédiments en amont de Creys-Malville et à l'aval proche de Marcoule à environ 0,1 Bq/kg sec. Les échantillons de mollusque analysés présentent des activités proches de celles des végétaux. L' ^{241}Am est mesuré régulièrement avec des concentrations de l'ordre de $1,9$ à $5,3 \times 10^{-2}$ Bq/kg sec. Le ^{244}Cm est mesuré dans les végétaux en aval de Marcoule ($4,4 \times 10^{-3} \pm 6,9 \times 10^{-4}$ Bq/kg sec) et dans les sédiments prélevés dans le Petit Rhône ($5,5 \times 10^{-4} \pm 2,9 \times 10^{-4}$ Bq/kg sec).

Les analyses effectuées par spectrométrie de masse sur l'échantillon de sédiment prélevé en aval du site de Marcoule permettent de mesurer individuellement les isotopes 239 et 240 du plutonium, soit $0,07 \pm 0,007$ et $0,05 \pm 0,006$ Bq/kg sec respectivement, la somme des activités des deux isotopes correspond bien à l'activité $^{239+240}\text{Pu}$ mesurée par spectrométrie alpha (Tableau 6).

Tableau 6. Résultat de mesure par spectrométrie alpha des échantillons collectés dans le cadre du constat (Bq/kg sec).

Nature	Zones	Date	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²³⁸ Pu	²³⁸ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am	²⁴⁴ Cm
végétaux	amont Creys-Malville	19/07/2010	6,6E-02±3,4E-03	2,0E-03±4,4E-04	0,0297±0,007	2,8E-02±2,5E-03	
	aval Marcoule	21/07/2010	3,9E-02±2,5E-03	1,3E-02±1,3E-03	0,3314±0,04	5,3E-02±4,2E-03	4,4E-03±6,9E-04
sédiments	amont Creys-Malville	08/06/2010	1,1E-01±4,8E-03	3,9E-03±7,7E-04	0,0357±0,007	4,4E-02±5,8E-03	
	aval Marcoule	21/07/2010	1,2E-01±5,8E-03	2,3E-02±1,9E-03	0,1888±0,018		
	petit Rhône	03/02/2011	6,9E-02±3,6E-03	9,5E-03±9,9E-04	0,1368±0,016	5,3E-02±4,4E-03	5,5E-04±2,9E-04
poissons	aval Marcoule	04/10/2011	< 7,0E-05	< 8,0E-05	-	< 6,0E-05	
	aval Marcoule	04/10/2011	< 4,2E-05	< 3,7E-05	-	< 3,3E-05	
	aval Marcoule	07/08/2008	< 1,1E-04	< 2,4E-05	-	< 6,7E-05	
	aval Arles	06/08/2008	< 8,8E-05	< 6,4E-05	-	< 7,0E-05	
mollusques	amont Creys-Malville	18/10/2011	2,3E-02±2,1E-03	1,2E-03±4,1E-04	0,0533±0,018	1,9E-02±1,6E-03	
	aval Marcoule	24/02/2011	3,5E-02±2,9E-03	1,5E-02±1,6E-03	0,4263±0,058	3,9E-02±3,7E-03	

La Figure 13 schématise l'évolution des moyennes des activités des actinides transuraniens mesurées dans les sédiments du Rhône entre 2001 et 2011 et dans le cadre du constat.

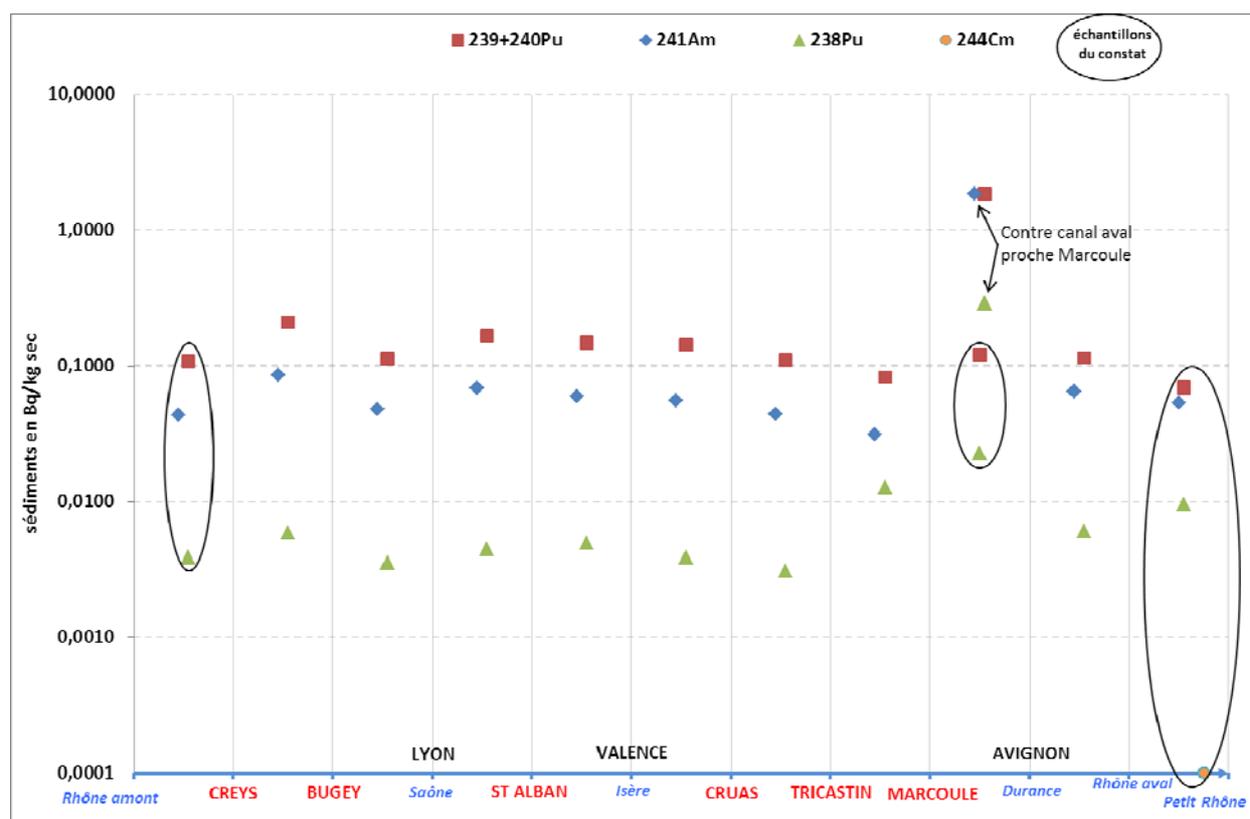


Figure 13. Moyennes des activités des actinides transuraniens mesurées dans les sédiments du Rhône entre 2001 et 2011 et dans le cadre du constat et rapport isotopique ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu.

La Figure 14 schématise les intervalles de variation du rapport ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu moyenné des échantillons collectés dans le Rhône de 2011 à 2011 et dans le cadre du constat.

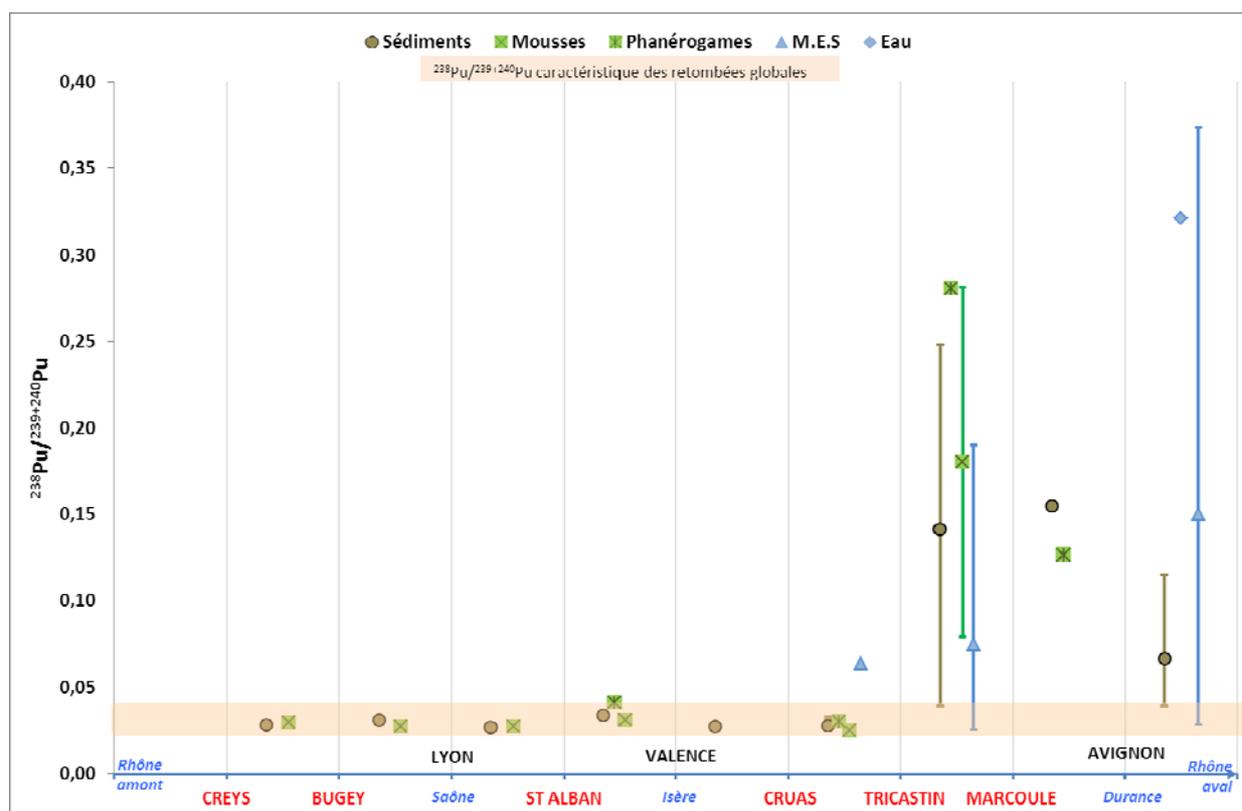


Figure 14. Évolution et intervalles de variation du rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ moyenné de 2011 à 2011 sur les échantillons collectés dans le Rhône et dans le cadre du constat.

Le rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ proche de 0,03 caractérise la rémanence des retombées globales jusqu'à Tricastin, les CNPE n'ayant pas d'autorisation de rejet pour ces radionucléides. En aval des pôles du Tricastin et de Marcoule, qui détiennent une autorisation de rejet en actinides transuraniens dans le Rhône, ce rapport d'activité augmente, comme attendu.

- ☞ Les concentrations observées dans les années 80 en ^{238}Pu et $^{239+240}\text{Pu}$ dans les sédiments sont relativement comparables aux concentrations actuelles, contrairement à celles des végétaux, qui ont fortement diminué.
- ☞ Les concentrations restent inférieures aux limites de détection dans les poissons, seul le $^{239+240}\text{Pu}$ est mesuré sporadiquement à l'état de trace.
- ☞ Les concentrations moyennes, sur ces dix dernières années en $^{239+240}\text{Pu}$, hors influence directe du site de Marcoule, sont comprises entre de 0,03 Bq/kg sec dans les phanérogames et 0,16 Bq/kg sec dans les sédiments. Elles sont de l'ordre de 0,001 à 0,006 Bq/kg sec dans les phanérogames, les sédiments et les mousses pour le ^{238}Pu . Les concentrations moyennes en ^{241}Am sont dix fois supérieures à celles du ^{238}Pu . Les sédiments prélevés à l'aval proche de Marcoule présentent les activités maximales mesurées environ 2 Bq/kg sec pour l' ^{241}Am et le $^{239+240}\text{Pu}$ et 0,3 Bq/kg sec en ^{238}Pu .
- ☞ Le rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ reste caractéristique des retombées globales (0,03) jusqu'à Tricastin.

4.2 Tritium

4.2.1 Rappel de quelques caractéristiques du tritium

Le tritium d'origine artificielle provient : des essais nucléaires aériens, des rejets de l'industrie nucléaire et, pour une moindre part, d'autres activités industrielles (peintures luminescentes, recherche...). Il est très labile et s'échange rapidement avec l'hydrogène stable. Il peut se trouver sous forme :

- d'eau tritiée ou « *tritium libre* » (HTO), exprimé en Bq/L d'eau de dessiccation qui représente le tritium de la fraction extraite par dessiccation (en général lyophilisation) ; *le HTO donne une image de l'activité volumique dans l'échantillon, eau notamment, au moment du prélèvement.*
- de tritium organiquement lié (TOL), exprimé en Bq/L d'eau de combustion, mesuré à partir de l'eau issue de l'incinération de la matière sèche de l'échantillon ; *le TOL fournit une information rétrospective sur le niveau moyen du tritium ambiant (vapeur d'eau, eau, molécules organiques entrant dans la chaîne trophique) sur toute la période de formation de la matière organique.*

Dans les hydrostèmes, le tritium présent sous forme HTO est incorporé à la matière organique par photosynthèse. Il peut être incorporé dans la microfaune, la faune invertébrée et les poissons par la respiration. Chez les invertébrés et les poissons, s'y ajoute un transfert direct (pénétration d'eau par les branchies et hydratation de la peau) ou trophique (incorporation du tritium libre tissulaire et du tritium incorporé aux molécules organiques de la proie). Chez les poissons, ces processus conduisent à une mise en équilibre rapide de l'eau environnante avec l'eau libre tissulaire. Les sédiments regroupent toutes les sources de matière organique du bassin versant (terrestre et aquatique, naturelle et anthropique).

4.2.2 Niveaux mesurés en tritium dans le Rhône

4.2.2.1 Données acquises jusqu'en 1989.

Selon Lambrecht (1992), les niveaux en tritium de l'eau sont légèrement supérieurs à 10 Bq/L en amont de Creys-Malville pour progressivement atteindre entre 30 et 40 Bq/L au niveau de Marcoule et redescendre entre 10 et 25 Bq/L au niveau du canal de Fourques. Dans les sédiments en amont de Creys-Malville, les activités mesurées sont de l'ordre de 6000 à 12400 Bq/L d'eau de combustion, de Creys-Malville à Marcoule de 163 à 16400 Bq/L d'eau de combustion les valeurs maximales sont mesurées aux alentours des centrales de Bugey et St Alban, la minimale en amont du centre de Marcoule. En aval de Marcoule les activités dans les sédiments vont de 61 à 13400 Bq/L d'eau de combustion (2539 en moyenne).

Le Tableau 7 présente les activités mesurées en tritium dans les végétaux aquatiques entre 1979 et 1989. Peu de valeurs sont disponibles pour les mousses aquatiques, néanmoins les activités observées, très supérieures à celles mesurées dans les phanérogames principalement dans les secteurs amont du Rhône, sont probablement dues à la présence de matières en suspension dans les mousses.

Tableau 7. Niveaux de tritium dans les végétaux aquatiques d'après la synthèse 1979-1989 (Bq/L d'eau de combustion).

	Amont	Creys-Marcoule			Aval
	Creys-Malville	Creys-Malville -Bugey	Aval Bugey	Aval Tricastin	Marcoule
Bryophytes	13100	3640 à 1280	1690 et 1920	141	186 et 122
Phanérogames	83 (1)	107 ± 43 (13)			116 ± 30 (17)

Les moyennes des concentrations mesurées en tritium organiquement lié dans les poissons du Rhône durant la période de 1979 à 1989 sont comprises entre 40 à 95 Bq/L d'eau de combustion. L'évolution constante des techniques de préparation et de mesure des échantillons jusque dans les années 2000 rend difficile la comparaison de ces résultats avec les niveaux actuellement mesurés.

4.2.2.2 Niveaux mesurés en tritium dans le Rhône de 2000 à 2012

Les moyennes des activités mesurées de 2008 à 2012 sur les échantillons d'eau filtrée collectés par les hydrocollecteurs sont présentées dans le Tableau 8. Elles sont en moyenne d'environ une dizaine de Bq/L avec un maximum et un minimum mesuré en aval de Creys-Malville de 26 Bq/L en 2008 et 2 Bq/L en 2012 respectivement.

Tableau 8. Moyenne des activités en tritium sur l'eau filtrée collectée par les hydrocollecteurs de 2008 à 2012 (Bq/L).

	aval Creys-Malville	aval Bugey	aval St Alban	aval Cruas	aval Tricastin	Vallabrègues
2008	26 ± 3,6	11,6 ± 2,5 de 4 à 26 (12)	6,4 ± 2,1 de 5,6 à 6,9 (3)	8,9 ± 2,5 de 3,7 à 14 (10)	6,2 ± 2,1 de 4,8 à 7,6 (2)	6,6 ± 2,6 de 5,5 à 8,9 (3)
2009	<LD	12,7 ± 2,4 de 6,4 à 20 (11)	7 ± 2,1 de 5,1 à 11 (8)	11,4 ± 2,4 de 6,5 à 19 (12)	7,6 ± 2,1 de 5,1 à 11 (10)	7,9 ± 2,8 de 4,4 à 13 (8)
2010	<LD	15 ± 2,5 de 3,2 à 39 (12)	7,6 ± 2,2 de 4,1 à 12 (8)	10,3 ± 2,4 de 5,7 à 16 (12)	7,4 ± 2,1 de 4,7 à 12 (11)	6,8 ± 2,5 de 4,3 à 9,2 (9)
2011	4,6 ± 2,9 de 3,7 à 5,5 (3)	9,1 ± 2,2 de 6,1 à 12,7 (12)	8,7 ± 2,3 de 2,9 à 17,5 (11)	12,8 ± 2,4 de 6,7 à 25,4 (12)	8,6 ± 2,3 de 3,1 à 13,3 (12)	7,9 ± 2,4 de 3,7 à 13,5 (12)
2012	1,7 ± 1,5 de 0,8 à 3,8 (5)	9,4 ± 1,9 de 2,5 à 18,1 (19)	4,9 ± 1,6 de 0,9 à 9,2 (18)	7,5 ± 1,9 de 1,5 à 15,4 (17)	4,7 ± 1,8 de 1,2 à 11,7 (19)	14,5 ± 2,4 de 2,2 à 43,8 (29)

()=nombre de valeurs significatives moyennées

Le Tableau 32, en annexe, présente les moyennes des activités disponibles en tritium organiquement lié dans les échantillons prélevés dans le Rhône entre 2001 et 2011. Les activités les plus élevées sont mesurées en amont de Creys-Malville dans les sédiments et les MES, marqués d'une part, par les retombées des essais nucléaires atmosphériques et, d'autre part, par l'impact des rejets de l'industrie horlogère. Ces activités atteignent 226 000 Bq/L d'eau de combustion dans les sédiments.

Les moyennes des activités en tritium lié des végétaux⁴ sont comprises entre 16,9 et 54,7 Bq/L d'eau de combustion dans les mousses et entre 7,7 et 31,5 Bq/L d'eau de combustion dans les phanérogames. Dans les poissons, les activités moyennes sont comprises entre 4,6 et 29,8 7 Bq/L d'eau de combustion, avec un gradient croissant des activités moyennées, de l'amont vers l'aval du fleuve.

⁴ Les mesures de TOL réalisées dans les végétaux, mousses et phanérogames, ne représentent pas seulement le TOL incorporé dans les cellules végétales mais aussi le TOL des sédiments retenus sur les surfaces végétales.

Le Tableau 9 présente les activités en tritium organiquement lié mesurées dans les échantillons collectés dans le cadre du constat. Ces mesures sont dans la gamme des activités acquises précédemment et viennent confirmer les tendances observées. Les activités maximales sont mesurées dans les sédiments dans le secteur amont du fleuve, avec 521 ± 27 Bq/L d'eau de combustion et diminuent à 79 ± 4 Bq/L d'eau de combustion en aval d'Avignon. L'activité dans les poissons en amont de Creys-Malville est de $2 \pm 0,8$ Bq/L d'eau de combustion et atteint $22,6 \pm 1,4$ Bq/L d'eau de combustion en aval de Marcoule. Les activités mesurées dans les mollusques sont comprises entre $6,7 \pm 0,8$ en Bq/L d'eau de combustion à l'aval de Creys-Malville et 49 ± 3 en Bq/L d'eau de combustion, en aval de Marcoule.

Tableau 9. Activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les échantillons collectés dans le cadre du constat.

Nature	Zones	Date de prélèvement	TOL en Bq/L d'eau de combustion	TOL en Bq/Kg sec	TOL en Bq/Kg frais
Sédiment < 2mm	amont Creys-Malville	08/03/2010	521 ± 27	$12,9 \pm 0,7$	$7,7 \pm 0,4$
	aval Marcoule	21/07/2010	226 ± 12	$3,3 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,1$
	aval Avignon	03/02/2011	79 ± 4	$3,1 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,1$
Poissons (muscles)	amont Creys-Malville Chevenne	13/04/2010	$2 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,1$
	aval Marcoule Brème	07/08/2008	$22,6 \pm 1,4$	$16,6 \pm 1$	$4 \pm 0,2$
	aval Marcoule Barbeaux	04/10/2011	$18,3 \pm 1,2$	$12,3 \pm 0,8$	$2,9 \pm 0,2$
	aval Marcoule Brème	04/10/2011	$15,7 \pm 1,1$	$10,9 \pm 0,8$	$2,6 \pm 0,2$
	aval Avignon Brème	06/08/2008	$17,6 \pm 1,2$	$11,8 \pm 0,9$	$2,7 \pm 0,2$
Phanérogames	amont Creys-Malville	19/07/2010	$7,7 \pm 1,3$	$2,9 \pm 0,5$	$0,28 \pm 0,05$
	aval Marcoule	21/07/2010	$8,1 \pm 0,6$	$3,3 \pm 0,3$	$0,27 \pm 0,02$
	aval Avignon	16/07/2009	$9,5 \pm 0,7$	$4,3 \pm 0,3$	$0,57 \pm 0,04$
	aval Avignon	30/05/2012	$4,4 \pm 0,7$	$1,7 \pm 0,3$	$0,14 \pm 0,02$
Mollusques	amont Creys-Malville	18/10/2011	$11,6 \pm 2,4$	$7,2 \pm 1,5$	$0,8 \pm 0,2$
	aval Creys-Malville	13/12/2010	$6,7 \pm 0,8$	$4,3 \pm 0,5$	$0,6 \pm 0,1$
	aval Bugey	14/12/2010	$24,2 \pm 1,4$	$15,4 \pm 0,9$	$1,1 \pm 0,1$
	aval St Alban	16/03/2011	$16,3 \pm 1,2$	$10,2 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,1$
	aval Cruas	09/03/2011	$13,7 \pm 0,9$	$8,4 \pm 0,5$	$0,9 \pm 0,1$
	aval Tricastin	08/09/2011	$15,2 \pm 0,9$	$9,8 \pm 0,6$	$1,3 \pm 0,1$
	aval Marcoule	25/01/2011	49 ± 3	29 ± 2	$2,8 \pm 0,2$

Les Figure 15, 16 et 17 représentent respectivement les intervalles de variation et des moyennes des activités en tritium libre et en tritium organiquement lié, mesurées dans les échantillons prélevés dans le Rhône de 2000 à 2011 et dans le cadre du constat. Les moyennes des concentrations en tritium libre, qui permettent d'avoir une image de l'activité volumique dans l'eau au moment du prélèvement font apparaître un gradient croissant de ces résultats de l'amont vers l'aval du fleuve, témoignant de l'impact successif des rejets des installations nucléaires. Les résultats de mesure en tritium lié, qui permettent d'avoir une information rétrospective de l'activité moyenne sur toute la période de formation de la matière organique, font apparaître des tendances différentes selon la matrice analysée. Les concentrations dans les poissons et les mollusques témoignent de l'impact des installations et de l'effet de dilution par les principaux affluents. Néanmoins, les mollusques vivant au fond du fleuve peuvent contenir des matières en suspension ou du sédiment, sont fortement marqués dans la zone amont du Rhône.

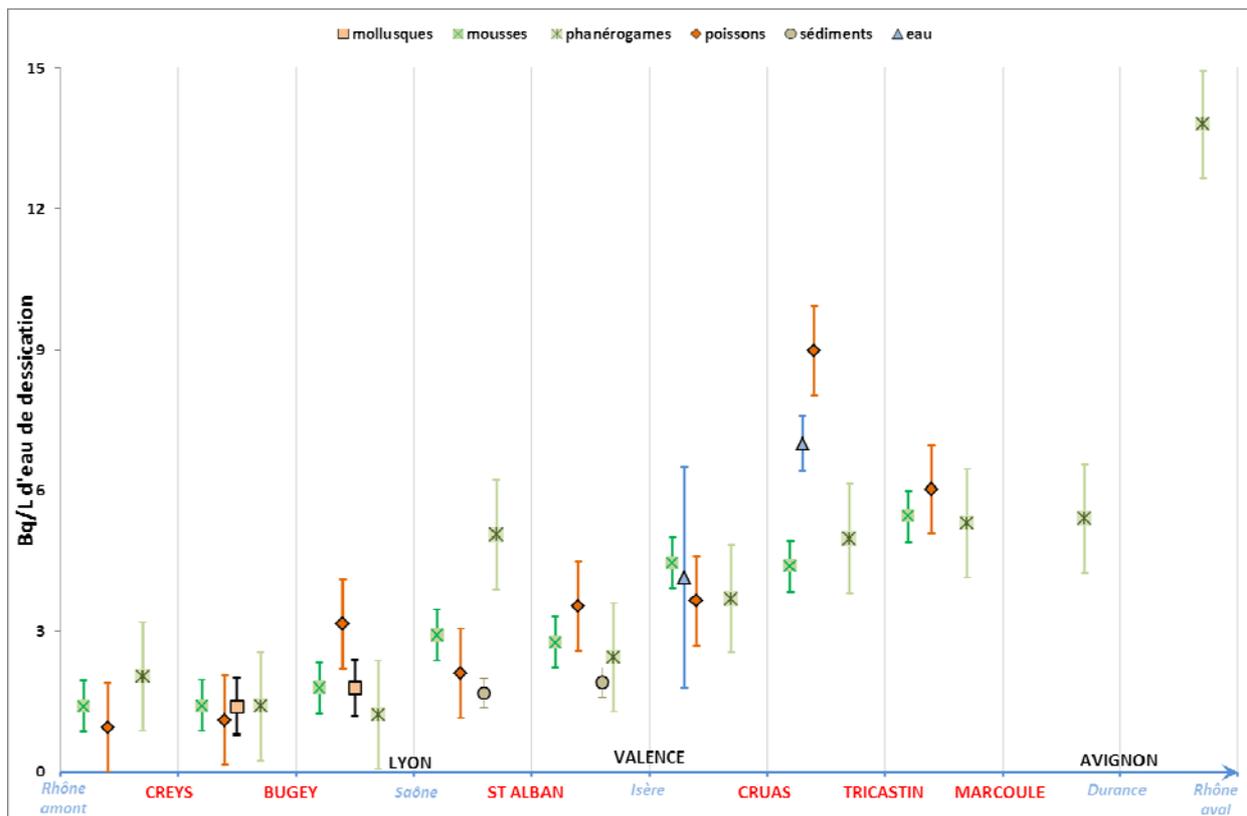


Figure 15. Intervalle de variation et moyenne des activités en tritium libre, mesurées dans les échantillons du Rhône de 2000 à 2011.

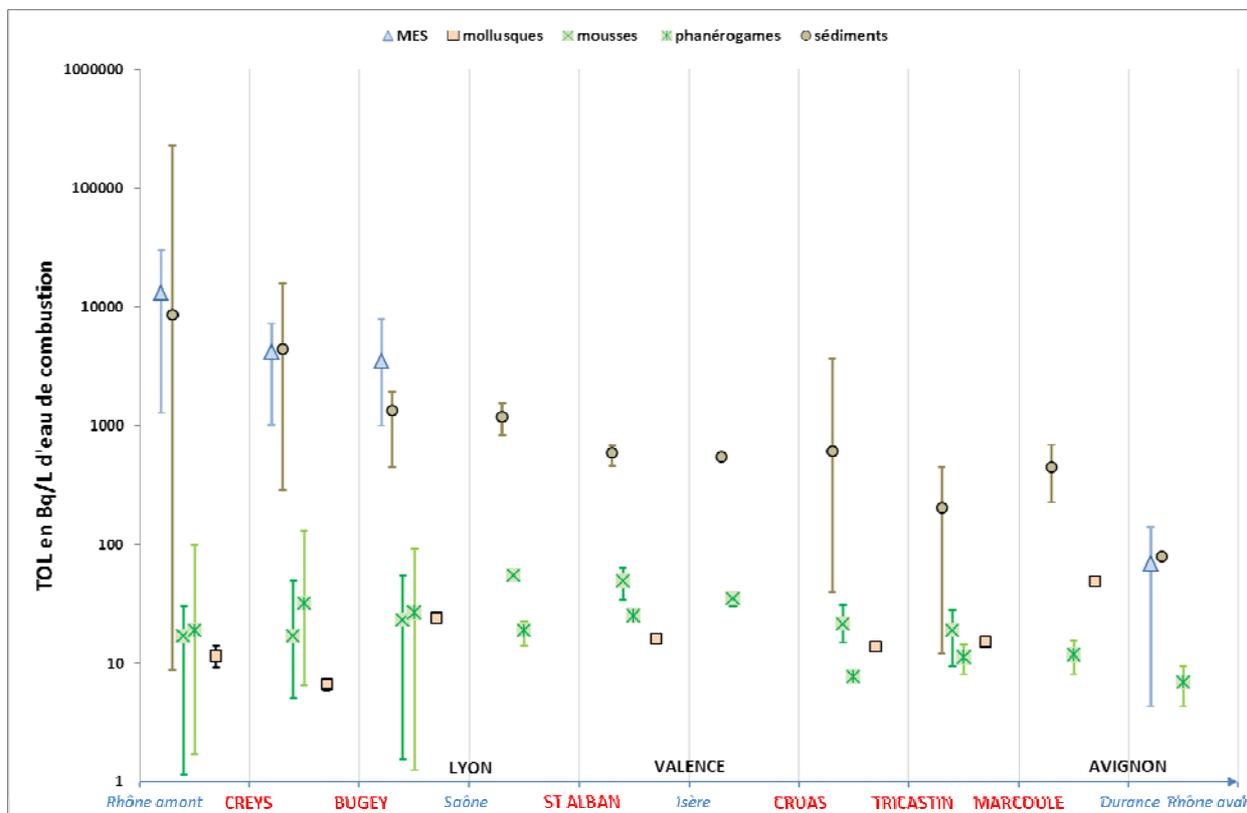


Figure 16. Intervalle de variation et moyenne des activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les échantillons du Rhône, hors poissons, de 2000 à 2011.

La Figure 17 représente les intervalles de variation et les moyennes des activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les poissons du Rhône de 2000 à 2011.

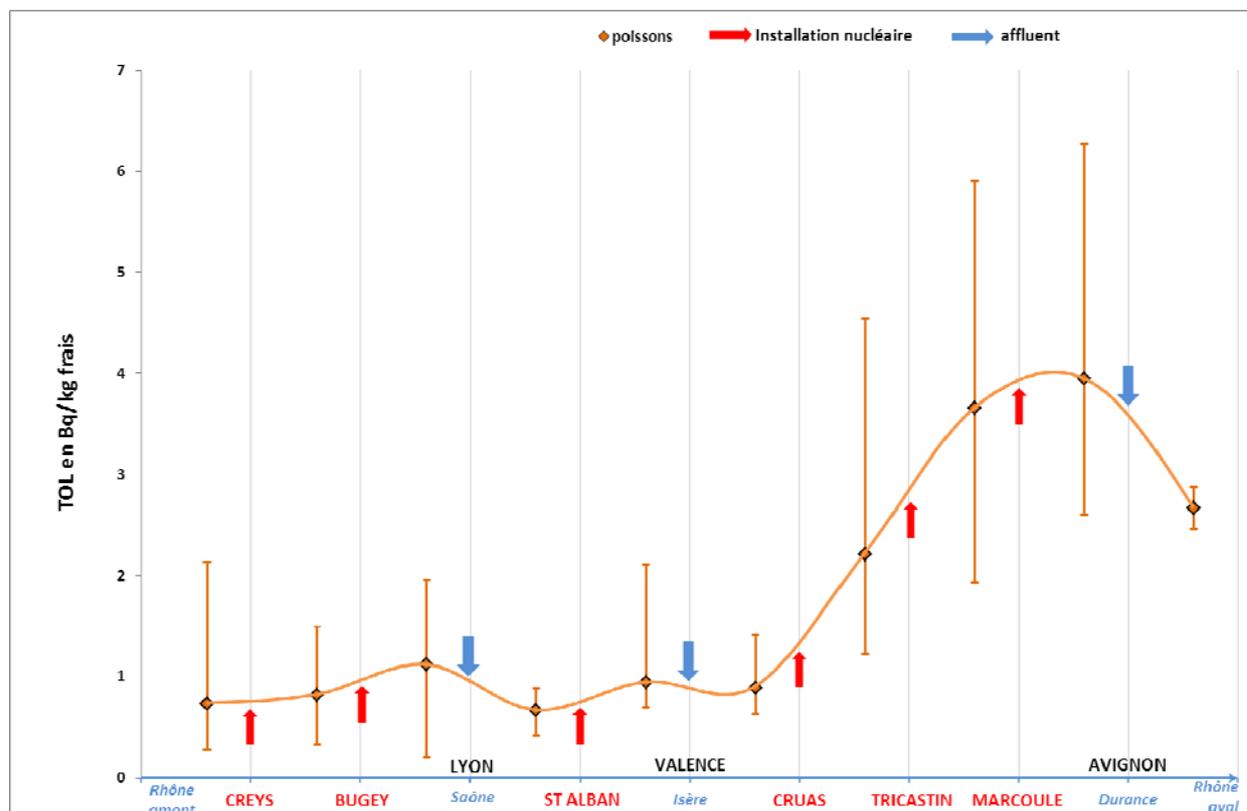


Figure 17. Influence des installations nucléaires et des principaux affluents du Rhône sur les intervalles de variation et moyennes des activités en tritium organiquement lié, mesurées dans les poissons du Rhône de 2000 à 2011.

☞ Depuis trente ans les niveaux d'activité du tritium ont diminué dans les échantillons du Rhône.

☞ La moyenne des activités en TOL des sédiments sont plus élevées en amont du fleuve qu'à l'aval (de 9000 à l'amont à 500 Bq/L d'eau de combustion à l'aval) en raison de l'impact des rejets de l'industrie horlogère suisse. À l'inverse, dans les poissons, la moyenne des concentrations qui augmentent de l'amont vers l'aval (de 5 à 30 Bq/L d'eau de combustion) témoignent de l'influence des installations nucléaires. Les moyennes des activités dans les phanérogame sont relativement constantes de l'amont vers l'aval et sont comprises entre 10 et 30 Bq/L d'eau de combustion.

4.3 Carbone 14

4.3.1 Caractéristiques du carbone 14 en milieu aquatique continental

Le carbone 14 peut être d'origine naturelle (cosmogénique) ou d'origine artificielle (retombées des explosions nucléaires atmosphériques, rejets des réacteurs nucléaires, rejets des usines de retraitement des combustibles irradiés et quelques autres sources industrielles, médicales et de recherches). Le carbone 14 est intégré dans le cycle du carbone des hydrosystèmes continentaux, où le carbone se trouve sous forme organique et minérale. Il se transfère aux végétaux par photosynthèse et aux animaux par ingestion de matière organique. Il se mesure au-dessus des limites de détection dans la plupart des échantillons biologiques (poissons en particulier) et son activité s'exprime en activité spécifique (Bq de ^{14}C / kg de C organique).

L'activité spécifique du carbone 14 de l'eau est notamment influencée par les concentrations du carbone stable dissous (majoritairement carbone inorganique). Ainsi, le ^{14}C minéral des écosystèmes d'eau douce n'est pas en équilibre avec le CO_2 atmosphérique. De plus, la teneur en carbone inorganique dissous de l'eau des fleuves varie d'un fleuve à l'autre, ainsi qu'au sein d'un même bassin versant, de la source jusqu'à l'embouchure, et selon les affluents et la saison (température) : par exemple le Rhône présente une teneur en carbonates variant d'un facteur 2 à 3 entre l'amont et l'aval, selon la saison et les débits des affluents (Roussel-Debet, 2012).

4.3.2 Niveaux mesurés en carbone 14 dans le Rhône

La synthèse des connaissances sur la radioécologie du Rhône de 1979 à 1989 ne comportait pas de résultats de mesure en ^{14}C .

Le Tableau 33, en annexe présente les moyennes des activités en carbone 14 dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011.

En amont de Creys la moyenne des activités mesurées sur les dix dernières années présente les niveaux d'activités les plus faibles, environ 200 Bq/kg de carbone, quelle que soit la nature de l'échantillon.

Les résultats de mesures en ^{14}C de l'eau sont assez rares. Les prélèvements sont effectués par précipitation de carbonates, cette mesure correspond au carbone minéral. Les résultats les plus élevés sont mesurés à l'aval du CNPE de Cruas avec 1250 ± 7 et 695 ± 42 Bq/kg C. Hormis ces deux résultats et une mesure à 324 ± 3 Bq/kg C en amont de Cruas, les activités de l'eau sont comprises entre 193 et 240 Bq/kg C.

Les résultats de mesures dans les sédiments présentent une variation moins importante (facteur 3) avec un nombre de données plus important sur la période d'étude (42 résultats). La concentration moyenne dans le Rhône est de 202 ± 2 Bq/kg C, avec un minimum de 106 ± 3 Bq/kg C en amont de Creys-Malville et deux valeurs maximales de 314 ± 3 et 312 ± 3 Bq/kg C en aval de Cruas et de Tricastin respectivement.

Les échantillons de matières en suspension prélevés sont moins représentatifs du linéaire rhodanien avec seulement 4 zones étudiées. Les secteurs amont de Creys-Malville et de Bugey ont des concentrations moyennes de l'ordre de 180 à 190 Bq/kg C. À l'aval de Bugey, cette moyenne est de l'ordre de 320 Bq/kg C avec un maximum d'environ 600 et un minimum d'environ 207 Bq/kg C. Elle atteint à la station SORA environ 245 Bq/kg C avec un maximum à 317 et un minimum à 144 Bq/kg C.

Les activités moyennes dans les phanérogames et les mousses sont comprises entre 201 et 315 Bq/kg C et entre 205 et 380 Bq/kg C respectivement.

Dans les poissons, les activités sont comprises entre 202 Bq/kg C en amont de Creys-Malville et 1530 Bq/kg C à l'aval de Tricastin avec un gradient positif de l'amont vers l'aval du fleuve, témoin de l'influence des CNPE.

Le Tableau 10 présente les résultats de mesures des échantillons prélevés dans le cadre de cette étude. Ces activités sont dans la gamme des activités acquises précédemment et viennent confirmer les tendances observées. Les activités maximales sont mesurées dans les poissons et les mollusques dans le secteur aval du fleuve. Elles sont comprises entre environ 200 Bq/kg C en amont du fleuve pour atteindre plus de 1000 Bq/kg C en aval.

Tableau 10. Résultat de mesure en ^{14}C des prélèvements effectués dans le cadre du constat (en Bq/kg C)

Nature	Zones	Date de prélèvement	^{14}C
Sédiment < 2mm	amont Creys-Malville	08/03/2010	194 ± 1,7
	aval Marcoule	21/07/2010	266 ± 1
	aval Avignon Petit Rhône	03/02/2011	212 ± 2
Poissons	amont Creys-Malville chevesne	13/04/2010	217 ± 14
	aval Marcoule Brème	04/10/2011	1170 ± 63
	aval Marcoule Barbeau	04/10/2011	1356 ± 72
	aval Marcoule Brème	07/08/2008	1375 ± 4
	aval Avignon Brème	06/08/2008	604 ± 2
Phanérogames	amont Creys-Malville	19/07/2010	203 ± 14
	aval Marcoule	16/07/2009	310 ± 19
	aval Avignon grand Rhône	21/07/2010	347 ± 21
	aval Avignon petit Rhône	30/05/2012	264 ± 1,4
Mollusques	amont Creys-Malville	18/10/2011	205 ± 14
	aval Creys-Malville	13/12/2010	204 ± 14
	aval Bugey	14/12/2010	312 ± 19
	aval St Alban	16/03/2011	468 ± 3
	aval Cruas	09/03/2011	1213 ± 6
	aval Tricastin	08/09/2011	1011 ± 5
	aval Marcoule	25/01/2011	1291 ± 5

Les moyennes des activités et les intervalles de variations du ^{14}C mesurés dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011 et dans le cadre du constat, sont représentés sur la Figure 18.

☞ À l'amont, dans toutes les matrices minérales ou biologiques (eaux, MES, sédiments, mousses, phanérogames mollusques et poissons), l'activité spécifique du ^{14}C est au niveau du bruit de fond, autour de 200 Bq/kg C. L'activité spécifique des végétaux est peu variable en allant vers l'aval. En revanche, les animaux (mollusques et poissons) témoignent d'une augmentation progressive de leurs concentrations de l'amont vers l'aval : des valeurs maximales de l'ordre de 1300 Bq/kg C sont atteintes dans le secteur aval (Tricastin puis Marcoule).

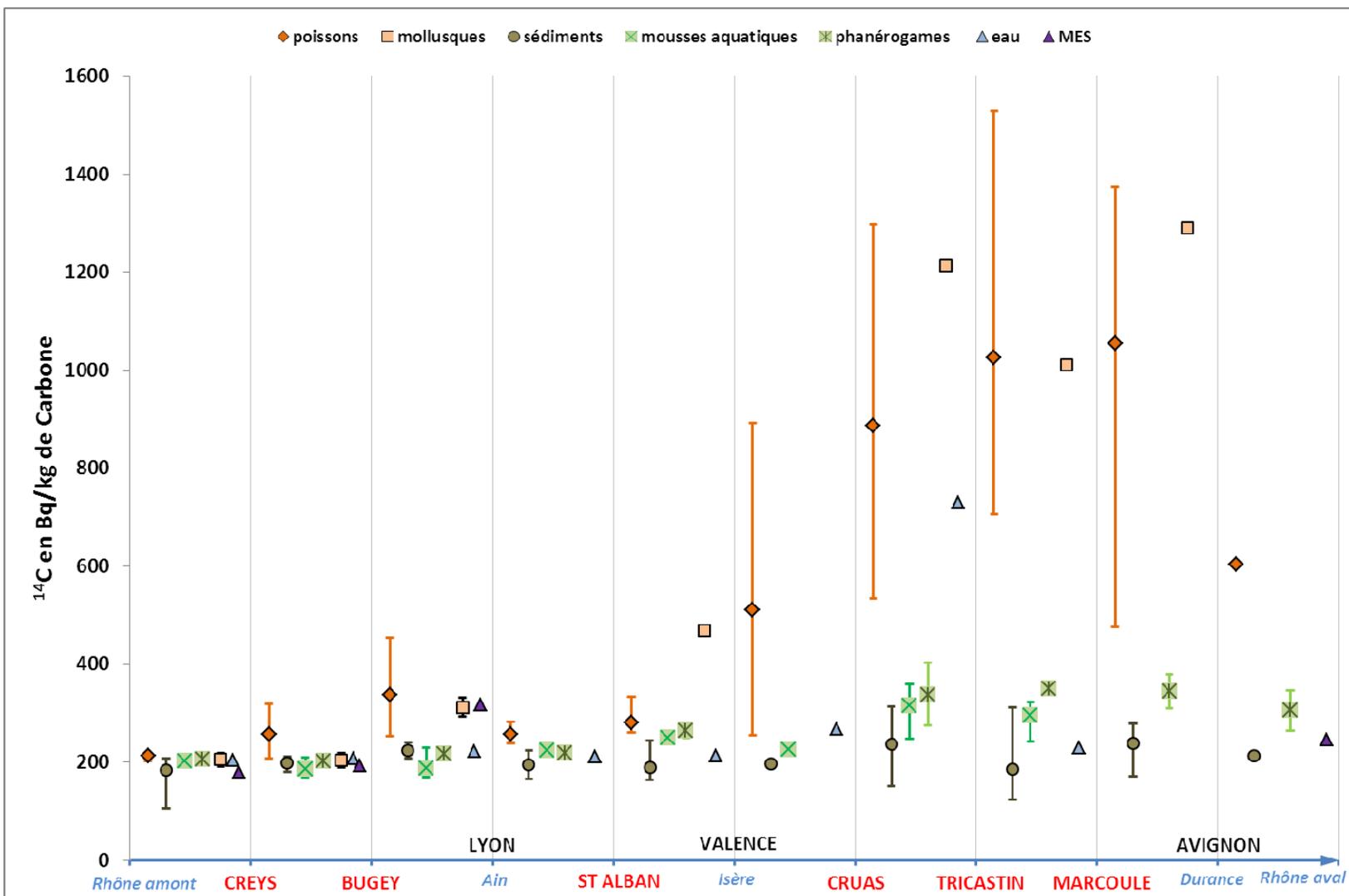


Figure 18. Moyennes des activités et intervalles de variations du ^{14}C mesurés dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011.

4.4 Strontium 90

Le strontium 90 est en quasi-totalité d'origine artificielle. C'est l'un des principaux radionucléides issus des retombées des essais nucléaires militaires atmosphériques. Il entre, pour une faible part, dans les rejets d'effluents des centrales nucléaires et, en proportion plus grande, dans les effluents liquides des usines de retraitement.

Les données issues de la synthèse des connaissances de la radioécologie du Rhône de 1979 à 1989 font apparaître que les concentrations dans l'eau restent inférieures aux limites de détection dans le haut du Rhône pour atteindre des valeurs comprises entre 10 et 30 mBq/L entre Creys-Malville et Marcoule. Ce radionucléide étant également présent dans les rejets de l'usine de Marcoule, en aval de cette installation il est régulièrement mesuré à des niveaux compris entre 10 et 50 mBq/L.

Dans les sédiments, il reste souvent inférieur aux limites de détections ($< 3,7$ Bq/kg sec) et il atteint des concentrations de 10 à 30 Bq/kg sec en aval de Marcoule, au niveau de Fourques.

Sur l'ensemble du Rhône les concentrations dans les poissons sont assez constantes, avec une valeur moyenne de l'ordre de 1,2 Bq/kg frais ; on note, à l'aval de Bugey, une concentration supérieure de l'ordre de 2 Bq/kg frais.

Les activités dans les phanérogames sont de 3 Bq/kg sec en amont de Creys-Malville, 2 à 9 Bq/kg sec de Creys-Malville à Marcoule et de 3 à 45 Bq/kg sec en aval de l'usine de Marcoule.

Depuis ces dix dernières années, en dehors des données sur l'eau acquises à la station SORA, peu de valeurs sont disponibles pour les autres matrices. Les concentrations moyennes à la station SORA sont de :

- $0,9 \pm 0,5$ Bq/kg sec (de 0,44 à 1,15) sur les MES prélevées par filtration de l'eau, sur 83 valeurs significatives depuis 10 ans,
- $1,6 \cdot 10^{-3} \pm 2,9 \cdot 10^{-4}$ Bq/L (de $5 \cdot 10^{-4}$ à $4,2 \cdot 10^{-3}$) sur l'eau filtrée sur 68 valeurs significatives.

Deux autres valeurs sont disponibles : $4,4 \cdot 10^{-3} \pm 6,9 \cdot 10^{-4}$ Bq/L à l'aval de Cruas et $5,7 \cdot 10^{-3} \pm 9,3 \cdot 10^{-4}$ Bq/L à l'aval de Tricastin.

Le Tableau 11 présente les moyennes des activités en ^{90}Sr mesurées dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011 en Bq/kg sec.

Les activités mesurées sont relativement constantes de l'amont vers l'aval et de l'ordre de 1 Bq/kg sec dans les végétaux et les sédiments. Dans les poissons, elles sont comprises entre 0,04 et 0,8 Bq/kg sec (0,01 et 0,34 Bq/kg frais) avec des activités plus élevées à l'aval de Valence qu'en amont de Lyon.

Tableau 11. Moyennes des activités en ⁹⁰Sr mesurées dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011 (Bq/kg sec).

	Poissons	Mousses	Phanérogames	Sédiments
amont Creys-Malville				
aval Creys-Malville	0,09 ± 0,025	0,91 ± 0,28		1,03 ± 0,47
aval Bugey	0,047 ± 0,025	0,64 ± 0,21		1,05 ± 0,52
aval Lyon		1,08 ± 0,35	0,9 ± 0,2	
aval St Alban		0,83 ± 0,24	1,3 ± 0,3	
aval Valence	0,57 ± 0,07		1,6 ± 0,2	
aval Cruas	0,76 ± 0,09 (2) (min 0,756 - max 0,762)	0,84 ± 0,23 (3) (min 0,72 - max 1)	1,0 ± 0,2 (3) (min 0,9 - max 1,2)	1,12 ± 0,43
aval Tricastin	0,32 ± 0,05 (3) (min 0,042 - max 0,845)	0,48 ± 0,15 (3) (min 0,3 - max 0,83)	1,0 ± 0,2	
aval Marcoule				
aval Avignon				1,53 ± 0,26 (8) (min 0,57 - max 2,8)

() : Nombre de valeurs significatives moyennées

Le Tableau 12 présente les activités mesurées en ⁹⁰Sr des échantillons collectés dans le cadre du constat. Ces résultats viennent compléter les données existantes dans les zones manquantes, ils sont cohérents avec ceux du Tableau 11. Les niveaux dans les végétaux, les sédiments et les mollusques varient très peu de l'amont vers l'aval, seuls les poissons présentent des concentrations qui varient d'un facteur 4 entre la concentration mesurée en amont de Creys-Malville et celle mesurée en aval d'Arles.

Tableau 12. Concentrations en ⁹⁰Sr des échantillons collectés dans le cadre du constat vallée du Rhône (Bq/kg sec).

	Date	Sédiments	Date	Poissons	Date	Mollusques	Date	Végétaux
amont Creys-Malville	08/03/10	0,735 ± 0,445	13/04/10	0,033 ± 0,026	18/10/11	0,185 ± 0,175	19/07/10	1,53 ± 0,34
aval Marcoule	21/07/10	0,627 ± 0,386	07/08/08	0,074 ± 0,03	25/01/11	0,25 ± 0,1	21/07/10	1,52 ± 0,27
			04/10/11	0,027 ± 0,017				
			04/10/11	0,042 ± 0,014				
aval Arles			06/08/08	0,123 ± 0,055				

☞ Les niveaux de ⁹⁰Sr ont fortement baissé depuis ces trente dernières années, ils sont relativement faibles et peu différents entre l'amont et l'aval, de l'ordre du Bq/kg sec dans les végétaux et les sédiments et compris entre 0,03 et 0,84 Bq/kg sec (de 0,01 à 0,34 Bq/kg frais) dans les poissons.

5 Études particulières

5.1 Étude de l'environnement aquatique de l'usine FBFC

5.1.1 Rappel du contexte relatif à l'usine FBFC

L'activité première de l'établissement AREVA FBFC (Franco-Belge de Fabrication de Combustibles) de Romans-sur-Isère est la fabrication de combustibles pour les réacteurs de production nucléaire d'électricité et de combustibles pour les réacteurs de recherche à base d'uranium enrichi. Le Tableau 13 présente l'évolution des rejets liquides du site de 2009 à 2011 et les limites fixées par l'arrêté d'autorisation pour chaque famille de radionucléides.

Tableau 13. Autorisation et évolution des rejets liquides de FBFC Romans en GBq de 2009 à 2011 (AREVA 2012-b)

	Autorisation*	2009	2010	2011
Activité des isotopes de l'uranium	7	0,41	0,23	0,17
Activité des transuraniens	0,1	0,0007	0,0005	0,0004
Activité des produits de fission	3	0,03	0,02	0,02

* arrêté du 22 juin 2000

Les eaux contenant potentiellement de l'uranium et des substances chimiques sont traitées par la station « Neptune ». Des prélèvements sont réalisés en continu sur les effluents épurés avant rejet dans l'Isère via l'émissaire. Les eaux pluviales et domestiques sont collectées et évacuées vers le réseau de la ville de Romans et font également l'objet d'une surveillance chimique et radiologique. L'impact des rejets liquides sur le milieu naturel aquatique est surveillé par l'exploitant au moyen de prélèvements et de mesures réguliers d'eau de l'Isère, d'eau de la Joyeuse, de poissons, de mousses, de végétaux aquatiques et de sédiments de l'Isère et d'eau de la nappe phréatique. Les résultats de cette surveillance sont consultables sur le site internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement⁵.

En 2002, la municipalité de Romans-sur-Isère a demandé à la CRIIRAD⁶ une « évaluation de la radioactivité dans l'environnement de la ville » dont les résultats ont été publiés en 2007 dans un rapport (CRIIRAD 2007).

5.1.2 Prélèvements et analyses réalisés dans le cadre du constat

Dans le cadre du constat, des échantillons qui pourraient présenter des anomalies des isotopes de l'uranium, ont été prélevés sur l'Isère en amont et en aval de l'émissaire de rejet de FBFC, avec l'objectif de rester proche des sites échantillonnés par la CRIIRAD. Le Tableau 14 présente le plan de prélèvements et d'analyses des échantillons. Des analyses par spectrométrie gamma et des isotopes de l'uranium (ICP-MS) ont été réalisées sur des eaux filtrées, des poissons, des plantes aquatiques et des sédiments fins. La carte permet de localiser les différents points de prélèvement (Figure 19).

⁵ <http://www.mesure-radioactivite.fr/public/s-carte.html>

⁶ Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité

Tableau 14. Plan de prélèvements et d'analyses à l'amont et à l'aval de FBFC Romans-sur-Isère

Zone	Nature		Date	Spectrométrie gamma	Spectrométrie alpha	³ H Libre	Isotopes de l'uranium	alpha isotopique
Amont FBFC	Sédiments<2mm	N°09	25/05/2010	x	x		x	x
		aval la Joyeuse N°13	26/05/2010	x			x	
	Végétaux aquatiques	Roseau	25/05/2010	x				
		Mousse	26/05/2010	x			x	
	Poissons (muscles)		22/07/2010	x			x	
	Eau de cours d'eau		26/03/2012			x	x	
	Matières en suspension		26/03/2012	x				
Aval FBFC	Sédiments<2mm		25/05/2010	x	x		x	x
			23/05/2010	x				
	Végétaux aquatiques	Roseau	25/05/2010	x				
		Mousse	26/05/2010	x			x	
	Poissons (muscles)		20/07/2010	x			x	
	Eau de cours d'eau		26/03/2012			x	x	
	Matières en suspension		26/03/2012	x				

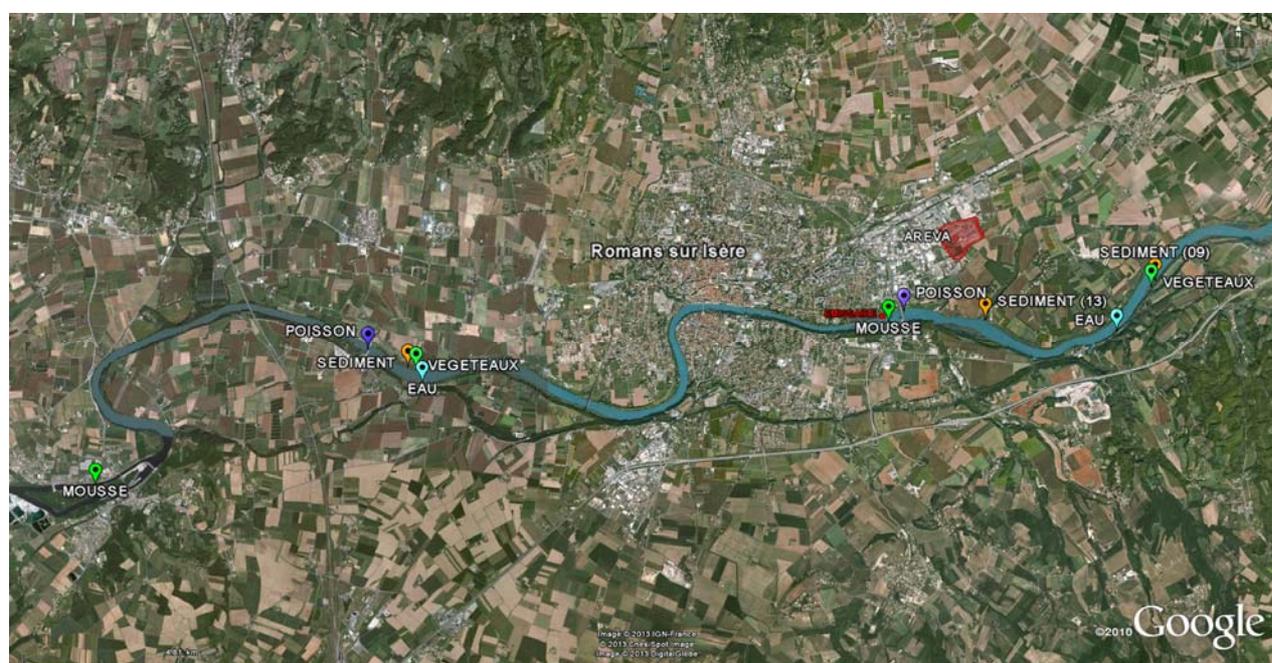


Figure 19. Localisation des prélèvements effectués en amont et en aval de Romans-sur-Isère

Les résultats de mesure par spectrométrie gamma des radionucléides d'origine naturelle sont détaillés dans le Tableau 34 de l'annexe. Les résultats sont cohérents avec ceux mesurés par la CRIIRAD et ne présentent pas de différence d'activité dans les différentes matrices entre l'amont et l'aval du point de rejet. Ainsi, les activités dans les sédiments sont comprises entre 36 ± 5 et 40 ± 5 Bq/kg sec en ²²⁸Ac et entre 27 ± 3 et 34 ± 4 Bq/kg sec en ²³⁴Th. Les concentrations en ⁴⁰K sont dans les gammes des valeurs mesurées dans l'environnement. La présence de ⁷Be (isotope de courte période) dans le sédiment prélevé dans la Joyeuse témoigne d'un sédiment superficiel récent.

Les activités de l' ²²⁸Ac dans les mousses sont comprises entre 46 ± 5 Bq/kg sec à l'amont et 74 ± 8 Bq/kg sec à l'aval. Celles du ²³⁴Th, varient entre 22 ± 2 Bq/kg sec Bq/kg sec à l'amont et 29 ± 4 à l'aval.

Les activités en ^{234}Th et en ^{228}Ac restent inférieures aux limites de détection dans les poissons. Dans les roseaux, l'activité en ^{234}Th reste également inférieure aux limites de détection. Les activités en ^{228}Ac sont faibles, de $0,9 \pm 0,2$ Bq/kg sec à l'amont et de $0,4 \pm 0,2$ Bq/kg sec à l'aval.

Les résultats d'analyses des isotopes de l'uranium sont présentés dans le Tableau 15. Les activités restent relativement constantes de l'amont vers l'aval. Dans les mousses et les sédiments, elles sont de l'ordre de 20 Bq/kg sec en ^{238}U et en ^{234}U et de 0,9 Bq/kg sec en ^{235}U . L' ^{236}U , isotope artificiel de l'uranium, est mesuré dans un des échantillons de sédiments prélevé à l'aval de l'installation, à une concentration proche de la limite de détection. Dans les poissons, les activités des isotopes de l'uranium sont de l'ordre de 0,001 Bq/kg frais en ^{238}U et en ^{234}U et de 6×10^{-5} Bq/kg frais en ^{235}U .

Dans l'eau filtrée, les activités sont de l'ordre de 0,02 Bq/L en ^{238}U et en ^{234}U et de 8×10^{-4} Bq/L en ^{235}U .

Les données ne font apparaître aucune anomalie du rapport de masse $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$ qui reste proche de 0,72 % (rapport mesuré dans la nature, en dehors de l'influence des rejets de l'industrie nucléaire) en amont et en aval de l'installation et quelle que soit la matrice. Le rapport d'activité $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ est proche de 1 (équilibre séculaire).

La Figure 20 représente l'évolution de l'activité des principaux radionucléides mesurés par spectrométrie gamma dans un sondage réalisé dans des sédiments prélevés en aval du point de rejet sur 30 cm d'épaisseur. Les variations des radionucléides sont relativement faibles. En particulier, l'activité en ^{234}Th (descendants de l' ^{238}U) est faible et homogène, entre 31 ± 4 et 50 ± 6 Bq/kg sec. Ainsi, les données ne mettent en évidence aucune accumulation de radionucléide présent dans les rejets au sein du sondage étudié.

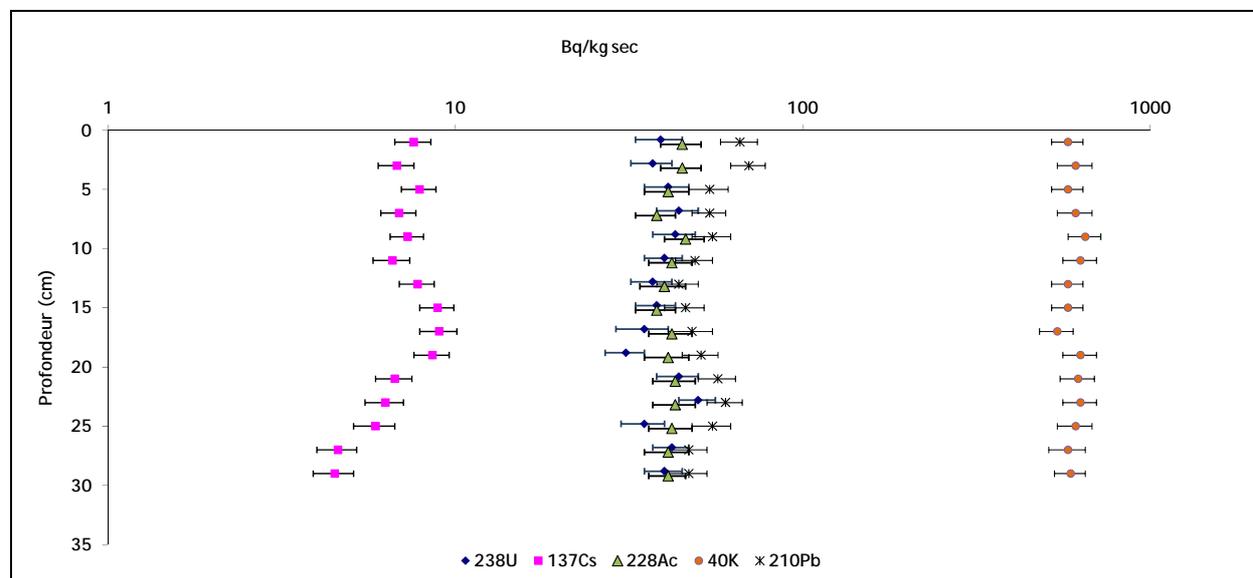


Figure 20. Evolution de l'activité des principaux radionucléides mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons du sondage réalisé dans les sédiments à l'aval de l'installation de Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).

Tableau 15. Résultats de mesure des isotopes de l'uranium des échantillons prélevés à l'amont et à l'aval de FBFC Romans-sur-Isère.

	Sédiment (Bq/kg sec)			Mousse (Bq/kg sec)		Poisson				Eau filtrée (Bq/L)	
	Amont N° 09	La Joyeuse N° 13	Aval	Amont	Aval	Amont		Aval		Amont	Aval
						(Bq/kg sec)	(Bq/kg frais)	(Bq/kg sec)	(Bq/kg frais)		
^{238}U	19,2 ± 2,2	15,5 ± 1,8	17,7 ± 2,1	18,1 ± 2,1	20,3 ± 2,2	4,4E-03 ± 4,7E-04	1,2E-03 ± 1,3E-04	4,8E-03 ± 5,5E-04	1,3E-03 ± 1,4E-04	1,7E-02 ± 2E-03	1,9E-02 ± 2,2E-03
^{236}U	<1,5E-02	<1,2E-02	1,7E-02 ± 9,0E-03	<1,4E-02	<1,5E-02	<1,2E-05	<3,3E-06	<1,1E-06	<2,9E-06	<3,0E-05	<2,7E-05
^{235}U	0,89 ± 0,1	0,72 ± 0,1	0,89 ± 0,1	0,8 ± 0,1	0,9 ± 0,1	2,1E-04 ± 2,3E-05	5,7E-05 ± 6,4E-06	2,2E-04 ± 2,5E-05	5,8E-05 ± 6,6E-06	8,0E-04 ± 9,9E-05	8,6E-04 ± 1,1E-04
^{234}U	20,5 ± 3,2	16,3 ± 2,8	21,7 ± 3,5	18,7 ± 2,7	21,7 ± 3,2	4,5E-03 ± 8,8E-04	1,2E-03 ± 2,4E-04	5E-03 ± 1,5E-03	1,3E-03 ± 4E-04	1,9E-02 ± 4E-03	1,9E-02 ± 3,2E-03
$^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$ (% masse)	0,721 ± 0,022	0,716 ± 0,022	0,717 ± 0,021	0,721 ± 0,022	0,717 ± 0,021	0,722 ± 0,028		0,716 ± 0,022		0,725 ± 0,031	0,721 ± 0,032
$^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ (activité)	1,1 ± 0,21	1 ± 0,22	1,2 ± 0,25	1 ± 0,19	1,1 ± 0,19	1 ± 0,23		1,3 ± 0,23		1,1 ± 0,26	1,1 ± 0,21
U pondéral (µg/L)										1,4 ± 0,17	1,5 ± 0,18

Des analyses de l'activité des isotopes du plutonium dans les sédiments ont été réalisées sur les échantillons prélevés dans l'Isère, en amont et en aval du point de rejet (Tableau 16). Les activités sont sensiblement identiques sur les deux sites de prélèvement et présentent un rapport d'activité $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0,03 caractéristique des retombées atmosphériques globales.

Tableau 16. Activité massique des isotopes du plutonium dans les sédiments prélevés dans l'Isère, en amont et à l'aval de l'usine FBFC de Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).

	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	$^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$
FBFC amont (N°09)	0,0047 ± 0,0009	0,0913 ± 0,0123	0,0618 ± 0,0082	0,1536 ± 0,0066	0,031 ± 0,006
FBFC aval	0,0043 ± 0,0008	0,0832 ± 0,0122	0,0554 ± 0,0085	0,1370 ± 0,0056	0,032 ± 0,006

Le ^{137}Cs est le seul radionucléide d'origine artificielle mesuré par spectrométrie gamma dans les échantillons prélevés à l'amont et à l'aval du site étudié (Tableau 17). Ces activités sont comparables à celles observées dans les échantillons aquatiques du Rhône (§3.1.2 et §3.3.2.1 du présent rapport), elles sont également équivalentes aux activités mesurées par la CRIIRAD⁷.

Tableau 17. Activité massique en ^{137}Cs dans les échantillons prélevés en amont et aval de FBFC Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec).

	MES	Poissons	Poissons en Bq/kg frais	Sédiments	Roseaux	Mousses
FBFC amont	4,86 ± 0,73	0,38 ± 0,06	0,096 ± 0,015	N°9: 6,1 ± 0,7 N°13: 12,7 ± 1,2 (la Joyeuse)	3,4 ± 0,4	4,7 ± 0,5
FBFC aval	4,77 ± 0,73	0,31 ± 0,05	0,079 ± 0,013	7,4 ± 0,8	0,5 ± 0,06	1,8 ± 0,2

Les mesures en tritium libre réalisées sur les échantillons d'eau de cours d'eau restent inférieures à 1,2 Bq/L à l'amont comme à l'aval, proches du bruit de fond de ce radionucléide.

☞ Le plan de prélèvement, les méthodes de mesure employées et les données obtenues ne mettent pas en évidence de marquage à l'aval hydraulique des rejets provenant du site FBFC de Romans-sur-Isère. En particulier, aucune accumulation des isotopes de l'uranium ou de radionucléides artificiels n'a été relevée.

⁷ Rapport CRIIRAD 07-114: activités mesurées dans les sédiments 9,6±1,3 et 12±1,6 Bq/kg sec à l'amont et de 3,7±0,6 à 19,7±3,8 Bq/kg sec à l'aval, 13,8±2,5 Bq/kg sec dans les mousses en aval et inférieures aux limites de détection dans les roseaux à l'amont et à l'aval.

5.2 Apports des affluents du Rhône

Pour évaluer les apports liés aux sous bassins versants, des matières en suspension ont été prélevées et analysées par spectrométrie gamma à l'aval des principaux 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). L'OSR est un programme de recherche regroupant scientifiques (CNRS, IRSTEA, ENTPE, IRSN, IFREMER) et les principaux gestionnaires du fleuve (DREAL, Agence de l'Eau, la CNR, les régions Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon et EDF). Il constitue l'un des observatoires de la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR).

Cet observatoire a pour mission de produire, rassembler et gérer des données visant à caractériser les stocks et les flux sédimentaires, ainsi que les pollutions associées à ces sédiments. Les résultats des travaux engagés dans le cadre de l'OSR sont consultables sur le site internet de l'observatoire : <http://www.graie.org/osr/>

Le tableau 8 présente le plan de prélèvement et d'analyses effectués dans le cadre du constat (MES et Eau) et quelques échantillons collectés dans le cadre de l'OSR (Laisse de crue).

Tableau 18. Plan de prélèvement et de mesures de l'étude des affluents

Zones	Nature	Date	Sp. gamma	³ H Libre	U isotop.
Aval Ain	Laisse de crue	10/01/2012	x		
	Eau	29/02/2012		x	x
	MES		x		
Aval Saône	Eau	29/02/2012		x	x
	MES		x		
	Laisse de crue	17/01/2012	x		
Aval Isère	Eau	26/03/2012		x	x
	MES		x		
Aval Drôme	Eau	27/03/2012		x	x
	MES		x		
Aval Ardèche	Laisse de crue	18/11/2011	x		
Aval Eygues	Laisse de crue	09/12/2011	x		
Aval Ouvèze	Laisse de crue	09/12/2011	x		
Aval Cèze	Laisse de crue	18/11/2011	x		
Aval Durance	Laisse de crue	18/11/2011	x		
	Eau	18/04/2012		x	x
	MES		x		
Aval Gardon	Laisse de crue	18/11/2011	x		

Les niveaux d'activités des radionucléides d'origine naturelle sont compris entre 11 ± 3 et 58 ± 8 Bq/kg sec pour l'²²⁸Ac, entre 2 ± 1 et 271 ± 36 Bq/kg sec pour le ⁷Be, entre 186 ± 20 et 760 ± 80 Bq/kg sec pour le ⁴⁰K, entre 22 ± 3 et 206 ± 23 Bq/kg sec pour le ²¹⁰Pb et entre 12 ± 3 et 68 ± 8 Bq/kg sec pour le ²³⁴Th.

Le seul radionucléide d'origine artificielle mesuré par spectrométrie gamma est le ¹³⁷Cs dont les activités mesurées sont présentées dans le Tableau 19.

L'activité moyenne en ¹³⁷Cs est d'environ 7 Bq/kg sec avec un minimum de $1,6 \pm 0,3$ Bq/kg sec sur l'Eygues et un maximum de $18,8 \pm 1,9$ Bq/kg sec sur l'Ardèche. Les stations regroupant les deux types de prélèvements, par filtration et par prélèvement des laisses de crue, présentent des activités similaires.

Ces activités sont comparables à celle mesurée dans les MES en amont de Creys-Malville ($10,4 \pm 1,2$ Bq/kg sec).

Tableau 19. Activités du ^{137}Cs dans les échantillons de laisse de crue et de MES prélevés à l'aval des affluents du Rhône (Bq/kg sec).

Affluents	Stations	date	^{137}Cs (Bq/kg sec)	technique de prélèvements	Etudes
Ain	Saint Jean de Niost	10/01/2012	$8,9 \pm 0,9$	laisse de crue	OSR
	Port Galland	29/02/2012	$11,2 \pm 1,7$	MES par filtration	Constat
Saône	aval du pont Général Koenig	17/01/2012	$6,9 \pm 0,7$	laisse de crue	OSR
	Caluire et Cuire	29/02/2012	$9,9 \pm 1,4$	MES par filtration	Constat
Isère	Barrage de la Vanelle	26/03/2010	$4,8 \pm 0,7$	MES par filtration	Constat
Drôme	Livron sur Drôme	27/03/2012	$3,7 \pm 0,7$	MES par filtration	Constat
Eygues	pont NO Orange	09/12/2011	$1,6 \pm 0,3$	laisse de crue	OSR
Ouvèze	Bédarrides	09/12/2011	$1,9 \pm 0,3$	laisse de crue	OSR
Ardèche	Pont RN 86	18/11/2011	$18,8 \pm 1,9$	laisse de crue	OSR
Cèze	Pont de Chusclan	18/11/2011	$9,8 \pm 1,1$	laisse de crue	OSR
Durance	Cheval-Blanc	18/11/2011	$3,1 \pm 0,4$	laisse de crue	OSR
	Chateaurenard	18/04/2012	$4,9 \pm 0,7$	MES par filtration	Constat
Gardon	Remoulins	18/11/2011	$3,5 \pm 0,5$	laisse de crue	OSR

Les activités mesurées en tritium libre sur les échantillons d'eau filtrée sont de $1 \pm 0,6$ Bq/L en aval de l'Ain, $1,3 \pm 0,6$ Bq/L à l'aval de la Saône et inférieures à 1,2 Bq/L à l'aval de la Drôme, de l'Isère et de la Durance. Ces activités sont comparables à l'activité de $1 \pm 0,6$ Bq/L mesurée en amont de Creys-Malville.

Le Tableau 20 présente les résultats de mesure des isotopes de l'uranium des échantillons d'eaux filtrées prélevées dans le cadre du constat sur les principaux affluents du Rhône, en amont de Creys et à Arles. Les activités les plus élevées sont mesurées en amont de Creys-Malville avec $19,3 \pm 2,1$ mBq/L en ^{238}U et $1,56 \pm 0,17$ µg/L d'uranium total. Le rapport de masse $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$ reste proche de 0,72 %, rapport mesuré dans la nature, en dehors de l'influence des rejets de l'industrie nucléaire.

Tableau 20. Résultats de mesure des isotopes de l'uranium des échantillons d'eau prélevés dans le cadre du constat sur le Rhône et ses principaux affluents.

	Date	^{234}U mBq/L	^{235}U mBq/L	^{236}U mBq/L	^{238}U mBq/L	$^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$ (%)	U total µg/L
Rhône amont Creys-Malville	28/02/2012	$20,2 \pm 3,6$	$0,88 \pm 0,11$	<0,014	$19,3 \pm 2,1$	$0,709 \pm 0,029$	$1,56 \pm 0,17$
aval de l'Ain	29/02/2012	$5 \pm 2,2$	$0,202 \pm 0,024$	<0,014	$4,36 \pm 0,49$	$0,721 \pm 0,029$	$0,353 \pm 0,039$
aval Saône	29/02/2012	$6,8 \pm 1,8$	$0,258 \pm 0,031$	<0,014	$5,58 \pm 0,6$	$0,720 \pm 0,04$	$0,452 \pm 0,048$
aval Isère	26/03/2012	$19,4 \pm 3,2$	$0,86 \pm 0,4$	<0,03	$18,5 \pm 2,2$	$0,721 \pm 0,032$	$1,5 \pm 0,18$
aval Drôme	27/03/2012	$6,1 \pm 1,5$	$0,194 \pm 0,025$	<0,026	$4,23 \pm 0,50$	$0,714 \pm 0,034$	$0,343 \pm 0,04$
aval Durance	18/04/2012	$15,3 \pm 2,6$	$0,558 \pm 0,059$	<0,027	$12,1 \pm 1,5$	$0,717 \pm 0,028$	$0,98 \pm 0,12$
Rhône en Arles	01/03/2012	$15 \pm 2,6$	$0,614 \pm 0,068$	<0,014	$13,3 \pm 1,5$	$0,717 \pm 0,024$	$1,08 \pm 0,12$

☞ Le seul radionucléide d'origine artificielle détecté par spectrométrie gamma sur les MES prélevées dans les principaux affluents du Rhône est le ^{137}Cs ($7 \pm 0,9$ Bq/kg sec en moyenne).

6 Conclusions

Le volet aquatique du constat radiologique « Vallée du Rhône » a permis de fournir une image de la radioactivité présente dans l'environnement du fleuve, par l'examen des très nombreuses données déjà acquises et des résultats de mesure des prélèvements destinés à les compléter (sédiments, végétaux, poissons, mollusques, eau et matières en suspension).

Trois grands secteurs se distinguent le long du fleuve. Le premier secteur en amont de Creys-Malville a été principalement soumis aux retombées des tirs atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl et au tritium de l'industrie horlogère suisse. Le deuxième, de Creys-Malville à Marcoule est, en plus, soumis aux rejets historiques et actuels d'effluents liquides des sites nucléaires. Le dernier secteur est situé à l'aval de l'usine de Marcoule est soumis, en plus, aux rejets anciens et actuels de ce site.

L'examen des résultats de mesures disponibles révèle que les activités des radionucléides d'origine naturelle sont relativement constantes dans le temps et le long du linéaire rhodanien, le ^{40}K est le radionucléide prédominant quelle que soit la matrice analysée.

Globalement les niveaux et la variété des radionucléides d'origine artificielle ont diminué durant ces trente dernières années. Des radionucléides émetteurs gamma, qui étaient autrefois régulièrement mesurés ne sont plus actuellement détectés que sporadiquement, voire jamais, malgré l'amélioration des techniques de prélèvements et d'analyses permettant d'abaisser les limites de détection. Cette diminution des niveaux est liée à la décroissance des radionucléides qui avaient été disséminés lors des tirs atmosphériques et après l'accident de Tchernobyl, ainsi qu'à la réduction très importante des activités rejetées par les installations nucléaires.

Parmi les radionucléides d'origine artificielle mesurés par spectrométrie gamma, seul le ^{137}Cs est mesuré dans l'eau filtrée avec une concentration moyenne de 0,09 mBq/L en amont de Creys-Malville et de 0,4 mBq/L à Arles (station SORA). A Arles, des concentrations faibles (du dixième au centième de mBq/L) de radionucléides provenant des installations sont également mesurées. Les activités massiques mesurées en ^{137}Cs dans les matières en suspension sont du même ordre de grandeur dans les échantillons collectés par l'hydrocollecteur de Vallabrègues et dans ceux de la station SORA, de l'ordre de 16 Bq/kg sec en moyenne. C'est également le seul radionucléide d'origine artificielle détecté par spectrométrie gamma sur les matières en suspension prélevées sur les principaux affluents du Rhône ($7 \pm 0,9$ Bq/kg sec en moyenne).

Parmi tous les radionucléides mesurés régulièrement depuis le début des rejets des installations riveraines, subsiste de façon régulière, dans les matrices biologiques et les sédiments, le ^{137}Cs , avec des concentrations actuellement de l'ordre de la dizaine de Bq/kg sec dans les sédiments et de l'ordre du Bq/kg sec dans les échantillons biologiques. Les concentrations en ^{60}Co , ^{58}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ et ^{54}Mn , variables le long du linéaire, restent assez faibles et environ 5 fois plus élevées dans la zone aval (Marcoule), où l'on observe aussi la présence de ^{57}Co et ^{241}Am .

Les concentrations en ^{238}Pu et $^{239+240}\text{Pu}$ observées dans les années 80 dans les sédiments sont relativement comparables aux concentrations actuelles, contrairement à celles des végétaux, qui ont fortement diminué. Dans les poissons, seul le $^{239+240}\text{Pu}$ est mesuré sporadiquement à des niveaux de l'ordre de 1.10^{-5} Bq/kg frais. Les concentrations moyennes, sur ces dix dernières années, hors influence directe du site de Marcoule, sont de 0,03 Bq/kg sec dans les phanérogames ; 0,16 Bq/kg sec dans les sédiments et 0,1 Bq/kg sec dans les mousses pour le

$^{239+240}\text{Pu}$. Elles sont de l'ordre de 0,001 Bq/kg sec dans les phanérogame, 0,006 Bq/kg sec dans les sédiments et 0,003 Bq/kg sec dans les mousses pour le ^{238}Pu . Les concentrations moyennes en ^{241}Am sont dix fois supérieures à celles du ^{238}Pu . Les sédiments prélevés à l'aval proche de Marcoule présentent les activités maximales mesurées, d'environ 2 Bq/kg sec pour l' ^{241}Am et le $^{239+240}\text{Pu}$ et 0,3 Bq/kg sec en ^{238}Pu . Le rapport isotopique $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ reste caractéristique de celui des retombées des tirs atmosphériques anciens (0,03) jusqu'à Tricastin, puis augmente à l'aval de Marcoule, caractérisant les rejets historiques des installations de ce site.

Les niveaux de ^{90}Sr ont fortement baissé depuis ces trente dernières années ; ils sont relativement faibles et peu différents entre l'amont et l'aval, de l'ordre du Bq/kg sec dans les végétaux et les sédiments et entre 0,01 à 0,34 Bq/kg frais dans les poissons.

Par ailleurs, notons que l'impact des rejets de la médecine nucléaire se traduit par la présence de ^{131}I (jusqu'à 70 Bq/kg sec) dans les phanérogame, à l'aval des grandes agglomérations ; d'autre part, aucune accumulation de l'uranium et de ses isotopes ou de radionucléides artificiels n'a été relevée à l'aval hydraulique des rejets provenant du site FBFC de Romans-sur-Isère.

Le tritium est le radionucléide le plus abondant dans l'eau filtrée du Rhône. Il est issu principalement des rejets des CNPE et dans une moindre mesure par le site de Marcoule. Les activités en tritium organiquement lié des sédiments sont plus élevées en amont du fleuve qu'à l'aval (de 500 à 9000 Bq/L d'eau de combustion) en raison de la rémanence des rejets de l'industrie horlogère suisse. À l'inverse, dans les poissons, les concentrations augmentent de l'amont vers l'aval (de 5 à 30 Bq/L d'eau de combustion) témoignant de l'influence des installations nucléaires. Les activités dans les phanérogame sont relativement constantes (respectivement 10 et 30 Bq/L d'eau de combustion à l'amont et à l'aval).

Le carbone 14 mesuré dans les mollusques et les poissons témoigne également d'une augmentation progressive de sa concentration de l'amont vers l'aval : des valeurs maximales de l'ordre de 1300 Bq/kg C sont atteintes dans le secteur aval (Tricastin puis Marcoule) ; l'activité des végétaux est, quant à elle, peu variable. À l'amont du fleuve, dans toutes les matrices minérales ou biologiques, l'activité spécifique du ^{14}C est au niveau du bruit de fond, autour de 200 Bq/kg C.

Il est, de plus, intéressant de souligner que l'ensemble des données, dont le bilan est résumé dans cette étude et qui découlent de modes de prélèvements et d'analyses très divers (fréquences, durées, limites de détection) selon l'objectif particulier des études qui les ont occasionnées, fournissent des indications convergentes sur l'état radiologique du milieu aquatique rhodanien.

7 Références et documents-support

- Antonelli C (2008). *Niveau d'activité du tritium dans l'environnement*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/ 2008-34.
- 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 (2013). *Flux de radioactivité exportés par le Rhône en Méditerranée en 2010 et 2011 - Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA)*. Rapport IRSN/PRP-ENV/SESURE/2013-03.
- 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*.
- AREVA (2012-a). *Rapport public annuel 2011 AREVA Tricastin*.
- AREVA (2012-b). *Rapport d'information sur la sûreté nucléaire et la radioprotection du site de Romans-Edition 2011*.
- 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 Marcoule*.
- CEA (2011-c). *Rapport transparence et sécurité nucléaire 2010 CEA Grenoble*.
- CEA (2012-a). *Rapport transparence et sécurité nucléaire du centre CEA Cadarache 2011 - Tomes 1-2 et 3*
- CEA (2012-b). *Rapport transparence et sécurité nucléaire 2011 Marcoule*.
- CEA (2012-c). *Rapport transparence et sécurité nucléaire 2011 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*.
- EDF (2012-a). *Nucléaire et environnement - Bilan 2011 des CNPE en exploitation - Rejets radioactifs et chimiques - Déchets radioactifs*.
- EDF (2012-b). *Rapport sur la sûreté nucléaire et la radioprotection des installations nucléaires de Creys-Malville 2011*.
- 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.
- Gontier G, Siclet F (2011). *Le tritium organique dans les écosystèmes d'eau douce : évolution à long terme dans l'environnement des centres nucléaires de production d'électricité français*. Radioprotection, volume 46, n°4, pages 457 à 491.
- 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.
- IRSN (2011). *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2009*.
- 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.
- 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.
- Le Guen B, Siclet F (2009). *Impact du carbone-14 autour des centrales nucléaires EDF*. Radioprotection, volume 44, n°4, pages 495 à 504.
- 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 2010*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-18.
- Pourcelot L (2012). *Suivi radioécologique de l'environnement terrestre et aquatique continental du site de Creys-Malville - Année 2011*. Rapport IRSN/PRP-ENV/SESURE/2012-08

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, Saey L, Mourier D (2011). *Constat radiologique régional « Vallée du Rhône » - Etat d'avancement et résultats acquis fin 2010*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-02.

Roussel-Debet S (2012). *Constat radiologique régional « Vallée du Rhône » - Rapport final relatif au milieu terrestre*. Rapport PRP-ENV/SESURE/2012-06.

Roussel-Debet S (2012). Comportement du carbone 14 en milieu continental et niveaux d'activité hors de l'influence d'une installation nucléaire. Rapport PRP-ENV/SESURE/2012-25.

Saey L, Roussel-Debet S (2011). Constat radiologique régional « Vallée du Rhône » - État d'avancement du volet aquatique. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2011-34.

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 :

Compagnie Nationale du Rhône : <http://www.cnr.tm.fr/fr/>

Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement : <http://www.mesure-radioactivite.fr/public/>

L'Observatoire des Sédiments du Rhône : <http://www.graie.org/osr/>

8 Annexes

Tableau 21. Activités des rejets liquides annuels des principales installations du bassin rhodanien en 2010 et 2011.

Sources : AREVA (2011-a et -b; 2012-a et -b); CEA (2011-a, -b et -c ; 2011-a, -b et -c) ; EDF (2011 et 2012-a et -b) ; Pourcelot (2011 et 2012).

		³ H (TBq)		Autres radionucléides, incluant le ¹⁴ C (GBq)		¹⁴ C (GBq)	
		2010	2011	2010	2011	2010	2011
Rhône	EDF (4 CNPE)	206,6	206,8	154,3	157,01	149,2	153
	Marcoule	80,40	21,6	138,01	126,76	n. c.	n. c.
	AREVA Tricastin	1,8E-03	6,2E-04	14,3	10,23	1	0,66
	Creys-Malville	2,66E-03	7,15E-03	9,42E-03	7,7E-03	n. c.	n. c.
Total Rhône		287	228,41	306,62	294,01	-	-
Affluents	Cadarache	2,37E-02	1,64E-02	1,80E-01	2,01E-01	8E-03	1,03E-02
	FBFC Romans	n. c.	n. c.	2,51E-01	1,9E-01	n. c.	n. c.
	CEA Grenoble	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.
	Total affluents	2,37E-02	1,64E-02	4,31E-01	3,91E-01	-	-
TOTAL		287,03	228,42	307,05	294,39	-	-

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

Tableau 22. Récapitulatif des types de prélèvements et d'analyses réalisés par l'IRSN sur le Rhône dans le cadre de la surveillance et des études dans l'environnement des sites nucléaires.

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

	Surveillance France	Suivi annuel	Bilan décennal
Génissiat	³ H : eau de surface filtrée		
Creys-Malville	Spectrométrie γ : MES ³ H : eau de surface filtrée	Spectrométrie γ : sédiments ; bryophytes ; végétaux aquatiques ; poissons. sur une partie des échantillons : ³ H, ¹⁴ C, ⁶³ Ni	
Bugey St Alban Tricastin Cruas	Spectrométrie γ : MES ³ H : eau de surface filtrée	Spectrométrie γ : Sédiments ; Bryophytes ; Végétaux aquatiques ; Poissons ³ H et ¹⁴ C : sur les poissons (depuis 2009)	Spectrométrie γ : sédiments ; bryophytes ; végétaux aquatiques ; poissons ; eaux du fleuve Sur une partie des échantillons : ¹³¹ I + ¹²⁹ I + ¹⁴ C + ³ H + ⁹⁰ Sr + spectrométrie α
Vallabrègues	Spectrométrie γ : MES ; ³ H : eau de surface filtrée		
Arles (SORA)	Spectrométrie γ : eau et MES ; Depuis 2008 : ³ H, ⁹⁰ Sr, ²³⁸ Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu et ²⁴¹ Am		

Tableau 23 : Plan de prélèvement et d'analyses des échantillons prélevés sur le Rhône dans le cadre du constat

Zones		Nature	Sp. gamma	Sp. alpha	⁹⁰ Sr	³ H Lié	³ H Libre	¹⁴ C	I-129	I-127	U isotop.	alpha isotop.	Granulo	
1	Amont Creys-Malville	Sédiments	X	x	x	x		x					x	
		Végétaux aquatiques	X	x	x	x		x						
		Poissons	X		x	x			x					
		Mollusques	X											
			X	x	x	x			x	x	x			
		Eau de cours d'eau	X					x				x		
Matières en suspension	X													
2	Aval Creys-Malville	Mollusques	X											
3	Amont Lyon	Sédiments	X										x	
		Végétaux aquatiques	X							x				
	Aval Bugey	Mollusques	X			x		x						
	Aval Lyon	Sédiments	X										x	
	Aval Lyon	Végétaux aquatiques	Aval proche	X							x			
			Aval lointain	X							x			
Amont St Alban	Sédiments (La Varèze)	X											x	
4	Aval St Alban	Sédiments	X										x	
		Végétaux aquatiques	X											
		Mollusques	X			x		x						
	Amont Valence	Végétaux aquatiques	X							x				
	Aval Valence		X						x					
5	Aval Cruas	Sédiments	X										x	
		Végétaux aquatiques	X											
		Mollusques	X			x		x						
6	Aval Tricastin	Mollusques	X			x		x						
7	Aval Marcoule	Sédiments	X	x	x	x		x		x	x	x		
		Végétaux aquatiques	X	x	x	x		x	x	x				
		Poissons	X	x	x	x		x	x	x				
			X	x	x	x		x	x	x				
	Mollusques	X		x	x		x	x	x					
			x											
	Arles	Eau de cours d'eau									x			
	Aval Petit Rhône	Sédiments	X	x			x		x				x	
		Végétaux aquatiques	X				x		x					
		Mollusques	X											
Aval Arles	Végétaux aquatiques	X				x		x						
	Poissons	X	x	x	x		x	x	x					

Tableau 24 : Concentration moyenne des radionucléides gamma d'origine naturelle présents dans le Rhône entre 1979 et 1989.

Source : Lambrecht, 1992

		⁴⁰ K	²³² Th	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	⁷ Be	
Sédiments* (Bq/kg sec)		558 ± 14	46 ± 2	57 ± 5	51 ± 4	86 ± 17	57 ± 25	
Poissons (Bq/kg frais)		90 ± 4	0,6 ± 0,06	1 ± 0,2	1 ± 0,2	2,8 ± 1,5	2,8 ± 2,8	
Végétaux (Bq/kg sec)	Phanérogames	Immergées	826 ± 55	19 ± 3	38 ± 7	38 ± 7	55 ± 13	56 ± 21
		Semi-immersées Parties aériennes	644 à 1467	2 à 12	2 à 9	2 à 9	2 à 11	23 à 60
		Semi-immersées Parties souterraines	364 à 568	10 à 21	8 à 19	8 à 19	19	9 à 34
	Bryophytes	356 ± 50	42 ± 10	70 ± 20	70 ± 20	152 ± 45	379 ± 159	
Eau du Rhône (mBq/L)	Eléments dissous	87 ± 14	17 ± 5	36 ± 9	33 ± 8	-	-	
	M E S	176 ± 65	11 ± 7	9 ± 3	8 ± 3	-	-	

*hors zone de St Alban à Cruas

Tableau 25 : Moyenne des activités des radionucléides d'origine naturelle (a) et artificielle (b) mesurées par spectrométrie gamma sur les MES collectées par les hydrocollecteurs du Rhône entre 2005 et 2013 (Bq/kg sec).

(a)

	²²⁸ Ac	⁴⁰ K	⁷ Be
Génissiat	Pas de MES		
Aval Creys-Malville	38,6 ± 0,1 (1)	467,5 ± 43,1 (63) de 302,2 à 1361	85,1 ± 14,3 (62) de 10,8 à 520,3
Aval Bugey	38 ± 6,6 (3) de 32,3 à 42,2	437,1 ± 51,7 (66) de 280,2 à 1091,6	80,8 ± 16,2 (64) de 16,9 à 416,7
Aval St Alban	55,6 ± 8,9 (2) de 54,7 à 56,5	499,7 ± 63,2 (72) de 199,9 à 707,2	157,7 ± 27,7 (72) de 31,8 à 380,7
Aval Cruas	42,9 ± 6,4 (2) de 38,1 à 47,8	536,7 ± 62,6 (72) de 637,7 à 1004,1	71,2 ± 15,5 (70) de 13,3 à 216,1
Aval Tricastin	40,3 ± 0,1 (3) de 38,8 à 42,8	449,4 ± 40,6 (70) de 264 à 618,2	37,6 ± 7,7 (56) de 11,8 à 105
Vallabrègues	40,9 ± 0,1 (2) de 40,1 à 41,6	519 ± 53,6 (96) de 351,3 à 1066,3	87,2 ± 15,8 (95) de 9,7 à 269,5

() = Nombre de mesures significatives moyennées

(b)

	¹³¹ I	¹³⁷ Cs	^{110m} Ag	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn
Génissiat	Pas de MES					
Aval Creys-Malville	22,8 ± 9,4 (1)	5,8 ± 1,1 (63) de 2,5 à 31,5	<LD			
Aval Bugey	<LD	4,7 ± 1 (66) de 2 à 19,5	4 ± 1 (46) de 0,3 à 28	2,9 ± 1,1 (21) de 0,4 à 23,7	1,6 ± 0,4 (31) de 0,3 à 10,6	<LD
Aval St Alban	68,7 ± 24,7 (15) de 10,6 à 254,7	9,6 ± 1,9 (72) de 3,9 à 20,5	1,8 ± 0,8 (1)	2,4 ± 1,2 (1)	2,4 ± 0,7 (13) de 0,7 à 7,7	<LD
Aval Cruas	<LD	6,3 ± 1,1 (72) de 2,3 à 14,5	1,9 ± 0,8 (20) de 0,9 à 6,7	2,5 ± 0,9 (10) de 1,6 à 4,5	2,5 ± 0,7 (27) de 0,7 à 12,8	<LD
Aval Tricastin	<LD	3,9 ± 0,8 (70) de 1,5 à 7,5	1,4 ± 0,7 (3) de 0,8 à 2,2	<LD	1,9 ± 0,5 (4) de 0,9 à 3,4	<LD
Vallabrègues	<LD	15,7 ± 2,3 (96) de 3,1 à 60,7	<LD		5,9 ± 1,1 (84) de 0,3 à 40,1	3,9 ± 1,2 (27) de 0,9 à 11,9

() = Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 26 . Moyenne des activités des radionucléides d'origine naturelle mesurées par spectrométrie gamma sur l'eau filtrée et sur les MES à la station SORA et lors d'autres études (Hors hydrocollecteurs) entre 2005 et 2012.

		⁴⁰ K	²²⁸ Ac	⁷ Be	²¹⁰ Pb	²³⁴ Th	²³⁴ Pa	²² Na
Eau filtrée en mBq/L	SORA	48 ± 4,5 (108) de 12 à 95,1	1,3 ± 0,2 (108) de 0,2 à 4,5	2,5 ± 0,5 (95) de 0,1 à 16	2,3 ± 0,8 (13) de 0,4 à 5,4	8,7 ± 1,4 (40) de 5,5 à 13,3	5,9 ± 1,3 (66) de 2,7 à 10	0,044 ± 0,014 (57) de 0,012 à 0,1
	Autres études en amont de SORA	55,1 ± 5,8 (8) de 42,4 à 79,6	3,5 ± 1,1 (5) de 2,1 à 7,2	52,9 ± 3,9 (8) de 3,6 à 193,1				
MES en Bq/Kg sec	SORA	511 ± 55 (262) de 335 à 800	38,8 ± 5,5 (263) de 24,8 à 71,1	82,3 ± 11,1 (257) de 11,2 à 262,2	75,4 ± 9,7 (233) de 27 à 159,7	33,1 ± 6,1 (223) de 19 à 62	31,3 ± 9,1 (26) de 23,2 à 46,8	
	Autres études en amont de SORA	523,4 ± 59,2 (13) de 261,7 à 653,8	42,7 ± 7,3 (13) de 16,2 à 67,2	272,3 ± 31,1 (13) de 82,3 à 547,8	149,6 ± 19,5 (12) de 96,6 à 260	76,8 ± 14,3 (10) de 38,5 à 179,6		

()= Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 27. Moyenne des activités des radionucléides d'origine artificielle mesurées par spectrométrie gamma sur l'eau filtrée (a) et sur les MES (b) à la station SORA et lors d'autres études (Hors hydrocollecteurs) entre 2001 et 2012.

a)

Eau filtrée en mBq/L	¹³⁷ Cs	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	⁵⁴ Mn	¹³¹ I	¹⁰⁶ Rh	¹²⁴ Sb	¹²⁵ Sb
Amont Creys- Malville	0,09 ± 0,03 (21) de 0,02 à 0,49								
Aval Creys- Malville	0,25 ± 0,12								
Aval Tricastin	0,08 ± 0,02 (25) de 0,03 à 0,27	0,06 ± 0,02							
SORA	0,4 ± 0,05 (171) de 0,02 à 2,33	0,07 ± 0,2 (3) de 0,02 à 0,13	0,13 ± 0,03 (124) 0,01 à 0,6	0,017 ± 0,008	0,32 ± 0,05	0,35 ± 0,11 (5) de 0,2 à 0,6	0,31 ± 0,1 (2) de 0,3 à 0,3	0,13 ± 0,02 (12) de 0,02 à 0,33	0,25 ± 0,05 (45) de 0,02 à 1,1

()= Nombre de mesures significatives moyennées

b)

MES en Bq/kg Sec	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am	^{110m} Ag	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁵⁷ Co	¹²⁵ Sb	¹²³ Te	⁶⁵ Zn
Amont Creys-Malville	14,3 ± 1,9 (24) 9,4 à 29,3									
Aval Creys-Malville	13,2 ± 1,8 (3) 11,8 à 15,4									
Aval Bugey	11,3 ± 1,5 (2) 11,2 à 11,4									
Aval Cruas	21,3 ± 1,8									
Aval Tricastin	14,1 ± 1,7 (38) de 4,9 à 24,7	1,5 ± 0,5 (12) de 0,5 à 4,3	0,49 ± 0,21	2,8 ± 0,8 (9) de 0,7 à 7	0,8 ± 0,4					
Aval Marcoule	39,9 ± 4,7 (5) de 12 à 105	13 ± 2 (4) de 2 à 38	1,8 ± 0,4 (3) de 0,8 à 3,8			8,2 ± 1,9				
SORA	17,2 ± 1,8 (399) de 3 à 141	6,3 ± 1,1 (280) de 0,2 à 62	1 ± 0,4 (55) de 0,2 à 3,4	0,7 ± 0,3 (30) de 0,2 à 2,6	19,6 ± 3,6 (3) de 1 à 55	2,7 ± 0,5 (108) de 0,2 à 14,2	0,27 ± 0,16	0,32 ± 0,17	0,33 ± 0,17	1,4 ± 0,6 (2) de 0,8 à 2,1

()= Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 28 . Moyenne des activités en ¹³⁷Cs mesurées par spectrométrie gamma dans les échantillons biologiques et les sédiments du Rhône entre 2000 et 2011, hors constat, en Bq/kg sec.

	Sédiments	Poissons		Phanérogames	Mousses
		en Bq/kg sec	en Bq/kg frais		
Amont Creys-Malville	7,7 ± 0,7 (11) de 3,3 à 12,8	0,33 ± 0,06 (8) de 0,23 à 0,48	0,07 ± 0,01	2,36 ± 0,37 (19) de 0,8 à 4,8	3,15 ± 0,39 (17) de 1,5 à 7,7
Aval Creys-Malville	10,3 ± 0,9 (15) de 4,1 à 15,1	0,47 ± 0,07 (13) de 0,31 à 0,66	0,11 ± 0,02	2,77 ± 0,52 (17) de 0,8 à 7,3	4,96 ± 0,61 (19) de 1,4 à 11,6
Aval Bugey	5,1 ± 0,5 (27) de 2,1 à 8	0,38 ± 0,06 (14) de 0,2 à 0,65	0,08 ± 0,01	2,78 ± 0,42 (24) de 0,8 à 11,2	4,95 ± 0,6 (22) de 1,7 à 12,9
Aval Lyon	12,8 ± 1 (14) de 8,1 à 17,9	0,27 ± 0,06 (13) de 0,1 à 0,44	0,06 ± 0,01	2,25 ± 0,41 (19) de 0,4 à 7,5	7,4 ± 0,86 (16) de 2,7 à 9,1
Aval St Alban	12,5 ± 1 (25) de 5,7 à 20	0,4 ± 0,08 (13) de 0,22 à 0,67	0,09 ± 0,02	1,98 ± 0,34 (35) de 0,6 à 6,2	5,39 ± 0,66 (19) de 2,1 à 20,2
Aval Valence	11,3 ± 0,9 (13) de 7,3 à 14,7	0,34 ± 0,06 (13) de 0,19 à 0,56	0,08 ± 0,01	1,37 ± 0,22 (16) de 0,5 à 5,3	5,7 ± 0,67 (17) de 2 à 8
Aval Cruas	7,81 ± 0,7 (45) de 2,8 à 14,3	0,33 ± 0,06 (15) de 0,18 à 0,8	0,09 ± 0,02	1,97 ± 0,31 (48) de 0,2 à 11,9	4,7 ± 0,61 (35) de 2,7 à 6,9
Aval Tricastin	6,3 ± 0,6 (31) de 2,5 à 11,7	0,55 ± 0,08 (14) de 0,18 à 1,39	0,13 ± 0,02	1,21 ± 0,22 (31) de 0,4 à 2,8	4,64 ± 0,63 (20) de 1,3 à 10,6
Aval Marcoule	10,8 ± 1 (12) de 1,4 à 53	<LD	<LD		
Aval Avignon	12,67 ± 1,2 (24) de 2 à 44				

Tableau 29 . Moyenne des activités en ¹³¹I mesurées par spectrométrie gamma dans les échantillons biologiques du Rhône entre 2000 et 2011, hors constat, en Bq/kg sec.

	Phanérogames	Mousses aquatiques	Poissons
Amont Creys-Malville	38,2 ± 5,6 (4) de 6,9 à 58,8	17,9 ± 2 (4) de 9,4 à 24,9	<LD
Aval Creys-Malville	24 ± 3,1 (7) de 5,7 à 59,6	10,4 ± 1,5 (7) de 2,2 à 15,9	<LD
Aval Bugey	10,5 ± 1,7 (6) de 1,8 à 33,9	6,2 ± 1,2 (7) de 1,6 à 15,8	<LD
Aval Lyon	22,9 ± 2,8 (5) de 10,1 à 55	147,4 ± 12,1 (9) de 2,8 à 382,3	<LD
Aval St Alban	32,4 ± 3,7 (4) de 9,1 à 69	54,7 ± 4,7 (9) de 6 à 164,4	<LD
Aval Valence	11,9 ± 1,5 (5) de 6,6 à 23,2	27,4 ± 2,7 (8) de 1,7 à 118,6	9 ± 3,7 (3,6±1,5 Bq/kg frais)
Aval Cruas	10,1 ± 1,5 (13) de 4,1 à 20,4	27,1 ± 3,1 (16) de 1,8 à 87,7	<LD
Aval Tricastin	11,9 ± 2 (10) de 3,7 à 33	18,1 ± 2,8 (9) de 1,2 à 55,6	<LD

Tableau 30 . Moyennes des concentrations des principaux radionucléides, d'origine artificielle, détectés par spectrométrie gamma, autres que le ^{137}Cs et ^{131}I , dans les échantillons du Rhône de 2000 à 2011(en Bq/kg sec)

		^{60}Co	^{58}Co	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	^{54}Mn	^{241}Am	^{134}Cs
Sédiments	aval Bugey / amont Lyon	0,82 ± 0,15 (5) de 0,2 à 2,4	0,38 ± 0,14 (2) de 0,3 à 0,4	0,63 ± 0,16 (17) de 0,3 à 2,2			
	aval Lyon / amont St Alban	0,47 ± 0,16 (3) de 0,3 à 0,6		0,59 ± 0,18 (6) de 0,4 à 0,9			
	aval St Alban / amont valence	0,51 ± 0,16 (14) de 0,3 à 1,3		0,5 ± 0,16 (9) de 0,3 à 0,8			
	aval valence / amont Cruas	0,36 ± 0,15 (4) de 0,3 à 0,4		0,33 ± 0,17 (2) de 0,32 à 0,33			
	aval Cruas	0,43 ± 0,14 (11) de 0,2 à 0,6	0,26 ± 0,12	0,43 ± 0,15 (5) de 0,2 à 0,5			
	aval Tricastin	0,37 ± 0,13 (8) de 0,3 à 0,5		0,44 ± 0,15 (5) de 0,35 à 0,55			
	aval Marcoule / amont Avignon	2,3 ± 0,41 (5) de 0,4 à 5,7	0,8 ± 0,4	1,21 ± 0,31 (3) de 0,4 à 1,9		1,62 ± 0,28	
aval Avignon	2,13 ± 0,4 (18) de 0,4 à 14,7		0,87 ± 0,24		1,01 ± 0,37 (4) de 0,5 à 1,6		
Phanérogames	aval Creys-Malville	0,34 ± 0,11	0,48 ± 0,12				
	aval Bugey / amont Lyon	5,2 ± 0,8 (8) de 0,5 à 14,3	3,36 ± 0,59 (12) de 0,4 à 10,2	1,10 ± 0,36 (12) de 0,2 à 2,7	0,86 ± 0,3 (2) de 0,74 à 0,97		
	aval Lyon / amont St Alban	0,85 ± 0,24 (3) de 0,4 à 1,7					
	aval St Alban / amont valence	0,69 ± 0,21 (7) de 0,3 à 1	1,19 ± 0,27 (10) de 0,5 à 2,3	0,33 ± 0,14 (2) de 0,22 à 0,43	1,1 ± 0,6		
	aval valence / amont Cruas		0,32 ± 0,14				
	aval Cruas	0,43 ± 0,15 (14) de 0,2 à 0,9	1,02 ± 0,26 (25) de 0,2 à 2,7	0,41 ± 0,13 (2) de 0,38 à 0,43			
aval Tricastin	0,68 ± 0,18 (9) de 0,2 à 1,6	1,47 ± 0,30 (16) de 0,2 à 5,8	0,34 ± 0,13 (4) de 0,2 à 0,5	0,53 ± 0,19			
Mousses aquatiques	aval Bugey / amont Lyon	5,29 ± 0,78 (14) de 0,5 à 37,5	3,55 ± 0,54 (16) de 0,5 à 20	1,63 ± 0,34 (10) de 0,4 à 4,3	3,08 ± 0,71		0,5 ± 0,22 (2) de 0,4 à 0,6
	aval Lyon / amont St Alban	1,24 ± 0,36 (5) de 0,5 à 1,9	0,46 ± 0,14	1,24 ± 0,38 (3) de 0,9 à 1,7			
	aval St Alban / amont valence	1,44 ± 0,37 (15) de 0,3 à 3,1	1,47 ± 0,37 (11) de 0,5 à 3,1	0,79 ± 0,26 (7) de 0,3 à 1,9			0,3 ± 0,17
	aval valence / amont Cruas	0,33 ± 0,15 (3) de 0,3 à 0,4				0,34 ± 0,18	0,37 ± 0,13
	aval Cruas	0,67 ± 0,24 (14) de 0,2 à 1,5	1,36 ± 0,38 (15) de 0,5 à 3	0,51 ± 0,20 (6) de 0,3 à 1,1			
	aval Tricastin	0,87 ± 0,26 (9) de 0,3 à 2,1	1,26 ± 0,33 (9) de 0,4 à 3,1	0,79 ± 0,22 (5) de 0,3 à 1,6			

()= Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 31 . Moyennes des activités en américium et plutonium dans le Rhône de 2001 à 2011 en Bq/kg sec.

Nature	Zones	²⁴¹ Am	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²³⁸ Pu	²³⁸ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
Sédiments	aval Creys -Malville	0,086 ± 0,007	0,208 ± 0,008	0,006 ± 0,001	0,028 ± 0,005
	aval Bugey / amont Lyon	0,048 ± 0,004	0,113 ± 0,006	0,004 ± 0,001	0,031 ± 0,007
	aval Lyon / amont St Alban	0,069 ± 0,013	0,166 ± 0,008	0,004 ± 0,001	0,027 ± 0,007
	aval St Alban/ amont Valence (2)	0,06 ± 0,009 <i>min 0,055-max 0,065</i>	0,148 ± 0,007 <i>min 0,131-max 0,164</i>	0,005 ± 0,001	0,034 ± 0,007 <i>min 0,032 - max 0,035</i>
	aval Valence / amont Cruas	0,056 ± 0,006	0,142 ± 0,008	0,004 ± 0,001	0,027 ± 0,006
	aval Cruas (5)	0,044 ± 0,006 <i>min 0,029-max 0,063</i>	0,110 ± 0,005 <i>min 0,078-max 0,152</i>	0,003 ± 0,001 <i>min 0,002 - max 0,004</i>	0,028 ± 0,006 <i>min 0,025 - max 0,033</i>
	aval Tricastin (4)	0,031 ± 0,003 <i>min 0,027-max 0,033</i>	0,082 ± 0,004 <i>min 0,064 -max 0,122</i>	0,013 ± 0,001 <i>min 0,003 - max 0,030</i>	0,142 ± 0,016 <i>min 0,039 - max 0,248</i>
	aval Marcoule / amont Avignon	1,842 ± 0,126	1,851 ± 0,054	0,287 ± 0,011	0,155 ± 0,007
	aval Avignon	0,065 ± 0,007 (2) <i>min 0,015-max 0,114</i>	0,114 ± 0,007 (3) <i>min 0,038 -max 0,244</i>	0,006 ± 0,002 (3) <i>min 0,002 - max 0,010</i>	0,066 ± 0,025 (3) <i>min 0,039 - max 0,115</i>
Mousses	Aval Creys -Malville	0,034 ± 0,003	0,094 ± 0,005	0,003 ± 0,001	0,029 ± 0,007
	Aval Bugey / amont Lyon	0,017 ± 0,002	0,101 ± 0,005	0,003 ± 0,001	0,027 ± 0,006
	aval Lyon / amont St Alban	0,038 ± 0,005	0,109 ± 0,006	0,003 ± 0,001	0,027 ± 0,009
	aval St Alban/ amont Valence	0,031 ± 0,004	0,103 ± 0,005	0,003 ± 0,001	0,031 ± 0,007
	aval Cruas (2)	0,024 ± 0,003 <i>min 0,020-max 0,029</i>	0,093 ± 0,005 <i>min 0,088 -max 0,098</i>	0,002 ± 0,001 <i>min 0,002 - max 0,003</i>	0,025 ± 0,007 <i>min 0,024 - max 0,026</i>
	aval Tricastin (2)	0,035 ± 0,003 <i>min 0,025-max 0,045</i>	0,100 ± 0,004 <i>min 0,078 -max 0,122</i>	0,020 ± 0,001 <i>min 0,006 - max 0,034</i>	0,180 ± 0,016 <i>min 0,079 - max 0,281</i>
Phanérogames	aval Lyon / amont St Alban	0,006 ± 0,001	0,010 ± 0,001		
	aval St Alban/ amont Valence	0,012 ± 0,002	0,023 ± 0,002	0,001 ± 0,0003	0,041 ± 0,015
	aval Valence / amont Cruas	0,007 ± 0,001	0,017 ± 0,002		
	aval Cruas (2)	0,008 ± 0,001 <i>min 0,003-max 0,013</i>	0,024 ± 0,002 <i>min 0,017 -max 0,032</i>	0,001 ± 0,0007 <i>min 0,0005 - max 0,001</i>	0,030 ± 0,014 <i>min 0,029 - max 0,030</i>
	aval Tricastin	0,028 ± 0,003	0,076 ± 0,004	0,021 ± 0,002	0,280 ± 0,025
	aval Marcoule / amont Avignon	0,117 ± 0,009	0,131 ± 0,005	0,017 ± 0,001	0,126 ± 0,01
MES	aval Cruas	0,079 ± 0,009	0,173 ± 0,017	0,011 ± 0,005	0,063 ± 0,027
	aval Tricastin	0,093 ± 0,010	0,200 ± 0,015 (11) <i>min 0,099 -max 0,390</i>	0,019 ± 0,004 (11) <i>min 0,003 - max 0,055</i>	0,075 ± 0,021 (11) <i>min 0,025 - max 0,190</i>
	aval Avignon	0,155 ± 0,015 (138) <i>min 0,032-max 1,189</i>	0,225 ± 0,014 (171) <i>min 0,047 -max 1,125</i>	0,044 ± 0,005 (163) <i>min 0,002 - max 0,343</i>	0,150 ± 0,023 <i>min 0,029 - max 0,373</i>
Eau filtrée Bq/L	aval Avignon	1,1E-06 ± 2,0E-07 (65) <i>min 6,0E-08-max 8,0E-06</i>	1,7E-06 ± 2,7E-07 (69) <i>min 1,4E-07 -max 1,8E-05</i>	5,5E-07 ± 1,2E-07 (63) <i>min 4,0E-08 - max 7,0E-06</i>	0,32 ± 0,08 (63)
Poissons	Aval Bugey / amont Lyon		3,3E-05 ± 3,3E-05		
	aval Tricastin		4,2E-05 ± 3,7E-05		

()= Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 32 . Moyennes des activités en tritium organiquement lié dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011.

a) TOL en Bq/L d'eau de combustion

Zones	Phanérogames	MES	Mousses aquatiques	Poissons	Sédiments < 2mm
amont Creys-Malville	19,6 ± 1,2 (14) de 1,7 à 99,9	13113,2 ± 691 (6) de 1289 à 30200	16,9 ± 0,9 (3) de 1,2 à 29,6	4,6 ± 0,9 (11) de 1,7 à 10,4	8951,6 ± 441,8 (28) de 8,7 à 226000
aval Creys-Malville	31,5 ± 2,1 (8) de 6,6 à 130	4146 ± 217 (3) de 1008 à 7210	17 ± 3,6 (7) de 5,1 à 49,6	5,4 ± 1,2 (8) de 1,8 à 9,6	4452,9 ± 227 (9) de 286 à 15800
aval Bugey	26,9 ± 1,5 (4) de 1,3 à 92	3506,7 ± 180,2 (6) de 990 à 7960	23,1 ± 2,7 (9) de 1,6 à 55,1	7,9 ± 0,8 (6) de 1,4 à 13,9	1337,6 ± 68 (3) de 446 à 1917,3
aval Lyon	18,8 ± 6,7 (3) de 14,1 à 22,8		54,7 ± 29,3 (2) de 53,8 à 55,6	4,6 ± 0,6 (7) de 2,7 à 5,5	1190,3 ± 61 (2) de 841 à 1539,6
aval St Alban	25 ± 2,2		49,1 ± 26,9 (2) de 34,1 à 64,1	6,4 ± 0,6 (8) de 4,9 à 12,2	589,7 ± 30 (4) de 451 à 678,3
aval Valence			34,8 ± 4,6	5,8 ± 0,7 (5) de 4,5 à 8,7	549,7 ± 28
aval Cruas	7,7 ± 1 (3) de 7,2 à 8,5		21,6 ± 4,6 (4) de 15 à 30,8	11,8 ± 0,6 (6) de 8,3 à 14,7	606,8 ± 32 (10) de 39,3 à 3700
aval Tricastin	11,2 ± 3,1		18,9 ± 4,1 (3) de 9,6 à 28	18,7 ± 1 (6) de 13,3 à 23	202,8 ± 16 (7) de 11,9 à 446,3
aval Marcoule	15,3 ± 2			29,8 ± 5 (3) de 25 à 39	515,4 ± 35 (3) de 355,2 à 689
aval Avignon		68,4 ± 3,5 (6) de 4,4 à 141			

() = Nombre de mesures significatives moyennées

b) TOL en Bq/kg sec

Zones	Phanérogames	MES	Mousses aquatiques	Poissons		Sédiments < 2mm
				Bq/kg sec	Bq/kg frais	
amont Creys-Malville	8,1 ± 0,7 (14) de 0,6 à 42,8	451,7 ± 22,6 (5) de 84,7 à 1304	9 ± 0,6 (3) de 0,6 à 15,7	3,2 ± 0,5 (11) de 1,2 à 7,5	0,8 ± 0,1 (11) de 0,4 à 2,1	210,5 ± 12,7 (28) de 0,03 à 5290
aval Creys-Malville	11,9 ± 1 (8) de 2,7 à 46,8	224,9 ± 11,2 (3) de 68 à 344	8,9 ± 2,3 (7) de 2,5 à 26,8	3,6 ± 0,8 (8) de 1,3 à 6,2	0,8 ± 0,2 (8) de 0,3 à 1,5	187,5 ± 9,4 (9) de 19 à 625
aval Bugey	10,8 ± 0,6 (4) de 0,4 à 38,1	172 ± 8,7 (6) de 54,4 à 351	10 ± 1,5 (9) de 0,4 à 22,3	5,2 ± 0,5 (6) de 0,9 à 9,3	1,1 ± 0,1 (6) de 0,2 à 2	29 ± 1,4 (3) de 14,2 à 38
aval Lyon	9,3 ± 3,4 (3) de 6,9 à 11,9		24,9 ± 13,1 (2) de 24,5 à 25,2	3,1 ± 0,4 (7) de 1,8 à 3,7	0,7 ± 0,1 (7) de 0,4 à 0,9	63,8 ± 3,2 (2) de 57,6 à 70
aval St Alban	10,8 ± 1		20,2 ± 11,8 (2) de 16,6 à 23,7	4,4 ± 0,4 (8) de 3,3 à 9,1	0,9 ± 0,1 (8) de 0,7 à 2,1	32,6 ± 1,6 (4) de 24,5 à 44,9
aval Valence			14,1 ± 1,9	3,9 ± 0,5 (5) de 3 à 5,9	0,9 ± 0,1 (5) de 0,6 à 1,4	31,7 ± 1,6
aval Cruas	3,3 ± 0,5 (3) de 3 à 3,5		8,7 ± 2 (4) de 6 à 12,2	8,1 ± 0,4 (6) de 5,5 à 10,1	2,2 ± 0,1 (6) de 1,2 à 4,5	23,4 ± 2,1 (10) de 1 à 138
aval Tricastin	4,8 ± 1,3		8,1 ± 2,2 (3) de 4,2 à 13,3	13,3 ± 0,7 (6) de 9 à 16,6	3,7 ± 0,2 (6) de 1,9 à 5,9	5,7 ± 2,8 (7) de 0,4 à 12,5
aval Marcoule	7,1 ± 1			20,3 ± 3,5 (3) de 17 à 27	4,7 ± 0,8 (3) de 3,7 à 6,3	25,5 ± 1,6 (3) de 12,1 à 49,6
aval Avignon		1,6 ± 0,1 (6) de 0,1 à 2,9				

() = Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 33 . Moyennes des activités en carbone 14 dans les échantillons du Rhône de 2001 à 2011 (Bq/kg de carbone).

Zones	Poissons	Sédiments < 2mm	Mousses aquatiques	Phanérogames	MES	Eau
amont Creys-Malville	211,4 ± 9,6 (5) de 202,3 à 219	183,6 ± 2 (11) de 105,7 à 207,8	201,3 ± 5,2	205,3 ± 8,9 (7) de 200,7 à 209	180,5 ± 2,3 (5) de 156 à 200	204,7 ± 2
aval Creys-Malville	255,9 ± 12,5 (6) de 208,3 à 319	198,1 ± 1,6 (8) de 180,8 à 211,3	184,8 ± 6 (7) de 169,7 à 210,2	202,4 ± 9,8 (7) de 198 à 207	193,2 ± 2,1 (3) de 188 à 200	208,2 ± 7,5 (3) de 199 à 220
aval Bugey	337,1 ± 6,7 (3) de 253 à 454,8	223,9 ± 2,1 (3) de 207,5 à 239,8	187,4 ± 6,4 (7) de 169,01 à 229,2	215,9 ± 5,6 (2) de 213,1 à 218,7	316,4 ± 3,4 (6) de 207 à 599	223 ± 15
aval Lyon	256,9 ± 4,4 (4) de 239 à 282,5	195,1 ± 2,4 (2) de 166,3 à 223,9	223,4 ± 8,9 (2) de 223 à 23,8	218,1 ± 7,7 (3)		212 ± 11
aval St Alban	279,9 ± 5,4 (5) de 259,8 à 334,1	188,7 ± 2,4 (4) de 164,3 à 243,6	249,7 ± 9,7 (2) de 245 à 254,5	264 ± 14		213 ± 11
aval Valence	509,7 ± 3,5 (4) de 255,2 à 892,7	197 ± 2	226,3 ± 5,7	337,4 ± 16,8 (3) de 275 à 403		268,6 ± 2,8 (2) de 213 à 324
aval Cruas	887,2 ± 23,5 (7) de 534,14 à 1296,8	237,3 ± 2,1 (6) de 150,3 à 314,3	314,5 ± 11,2 (4) de 248,3 à 359	350 ± 21		729,2 ± 22,6 (3) de 242 à 1250,7
aval Tricastin	1024,9 ± 28,2 (7) de 705,5 à 1530	185,6 ± 1,8 (5) de 124,2 à 312,2	295,7 ± 11,56 (3) de 241,6 à 323	379,8 ± 9,9		230 ± 15
aval Marcoule	808 ± 41,7 (3) de 476 à 1017	225,4 ± 1,9 (2) de 171,4 à 279,5		347 ± 21		
aval Avignon					245,3 ± 1,7 (11) de 144,5 à 317	

()= Nombre de mesures significatives moyennées

Tableau 34 . Résultat de mesure des radionucléides d'origine naturelle par spectrométrie gamma des échantillons prélevés à l'amont et à l'aval de FBFC Romans-sur-Isère (en Bq/kg sec)

		famille du ^{232}Th					famille de ^{235}U		famille de ^{238}U							autres			
		^{228}Ac	^{224}Ra	^{212}Pb	^{212}Bi	^{208}Tl	^{235}U	^{227}Th	^{234}Th	^{234}Pa	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{214}Pb	^{214}Bi	^{210}Pb	^7Be	^{40}K	^{22}Na
Sédiments	La Joyeuse N°13 (26/05/2010)	36 ± 5	37 ± 5	37 ± 4	35 ± 5	13 ± 2	1,8 ± 0,8	1,7 ± 0,5	27 ± 3	<31	<186	31 ± 12	25 ± 13	32 ± 3	29 ± 4	53 ± 6	1,7 ± 0,7	493 ± 56	<0,5
	Amont N°09 (25/05/2010)	40 ± 5	41 ± 5	41 ± 4	38 ± 6	14 ± 1,6	N.D	1,4 ± 0,6	31 ± 3	38 ± 13	<290	<40	48 ± 12	39 ± 4	38 ± 5	63 ± 7	<2,2	540 ± 60	<0,5
	Aval (25/05/2010)	39 ± 5	41 ± 5	40 ± 4	43 ± 6	14 ± 2	1,7 ± 0,6	1,4 ± 0,6	34 ± 4	<120	<300	52 ± 14	39 ± 10	40 ± 4	38 ± 5	67 ± 7	<2	580 ± 60	<1
Mousses	Amont (26/05/2010)	46 ± 5	N.D			N.D		22 ± 2	N.D							108 ± 12	238 ± 23	232 ± 23	<0,3
	Aval (26/05/2010)	74 ± 8	N.D			N.D		29 ± 4	N.D							39 ± 4	109 ± 10	380 ± 37	<0,7
Roseaux	Amont (25/05/2010)	0,9 ± 0,2	N.D			N.D		<2	N.D							1,9 ± 0,4	7,3 ± 0,8	486 ± 53	<0,2
	Aval (25/05/2010)	0,4 ± 0,2	N.D			N.D		<3,8	N.D							1,1 ± 0,5	7,6 ± 0,9	651 ± 69	<0,2
Poissons	Amont (22/07/2010)	<0,5	N.D			N.D		<0,9	N.D							<1	<2,9	482 ± 49	<0,3
	Aval (20/07/2010)	<0,5	N.D			N.D		<0,7	N.D							<0,8	<3,2	441 ± 46	<0,3

N.D: activité ou limite de détection non déterminée