



HAL
open science

Discrimination entre les particules érodées et resuspendues

Hugo Lepage, Laurent Garcia-Sanchez, David Mourier, Franck Giner, François Guillory

► **To cite this version:**

Hugo Lepage, Laurent Garcia-Sanchez, David Mourier, Franck Giner, François Guillory. Discrimination entre les particules érodées et resuspendues. [Rapport de recherche] IRSN. 2024, pp.1-18. hal-04653008

HAL Id: hal-04653008

<https://hal.science/hal-04653008v1>

Submitted on 26 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Discrimination entre les particules érodées et resuspendues

Discrimination entre les particules érodées et resuspendues

Rapport scientifique final

Version du 16 avril 2024

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe B – Comprendre les sources et la dynamique des MES et des contaminants particulaires dans le bassin du Rhône

Action B1.4 – Discrimination entre les particules érodées et resuspendues

Personnes impliquées

Hugo Lepage (IRSN, LRTA) ; Laurent Garcia Sanchez (IRSN, LT2S) ; David Mourier (IRSN, LRTA) ; Franck Giner (IRSN, LRTA) ; François Guillory (IRSN, LRTA)

Pour citer ce rapport

Lepage, H., Garcia Sanchez, L., Mourier, D., Giner, F., Guillory, F. (2024). Discrimination entre les particules érodées et resuspendues. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. 17 p.

L'OSR est un programme animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter

Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)

Résumé

Etudier l'origine des particules transportées par le Rhône est un des objectifs clefs de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). Dans cette action exploratoire, nous proposons d'appliquer une méthode de traçage pour déterminer si les matières en suspension transportées lors des crues sont issues de sols fraîchement érodés ou de sédiments remis en suspension. Les travaux ont principalement porté sur le bassin versant de l'Ardèche car de taille modeste et à proximité du laboratoire IRSN ; et la méthode a également été appliquée sur quelques échantillons des autres stations de l'OSR. Cette méthode se base sur la mesure de trois radionucléides, le césium-137 (^{137}Cs), le beryllium-7 (^7Be) et le plomb-210 en excès (^{210}Pb), traceurs de l'origine des particules. Si les résultats de cette action ne permettent pas de quantifier l'origine des MES, ils montrent que l'origine de celles-ci est multiple et généralement issues d'un mélange de source : sols fraîchement érodés, sols préalablement érodés et/ou sédiments remis en suspension et sols de sub-surface ou de berges. Les premières mesures de ces radionucléides dans les MES des autres affluents du Rhône confirment cette observation, et il serait intéressant de comparer ces résultats avec l'approche de modélisation développée dans l'axe D (action D3).

Mots-clés

Rhône ; Observatoire ; Sédiments ; OSR ; Stock ; Radionucléide ; Crue ; Erosion

Table des matières

1. Contexte	5
2. Méthodologie	8
2.1 Application à un bassin versant test – l’Ardèche	8
2.2 Application à l’ensemble des stations de l’OSR	10
2.3 Modélisation des concentrations de ^{137}Cs dans les MES de l’Ardèche	10
3. Résultats	11
3.1 Terme source du ^{137}Cs et comparaison avec les MES	11
3.2 Marquage des MES en ^7Be et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	12
3.3 Cas des autres stations de l’OSR	13
4. Modélisation	14
5. Conclusion	15
6. Bibliographie	15

1. Contexte

Les travaux conduits sur les bilans inter-annuels des flux de matières en suspension (MES - (Gruat et al., 2022) - Figure 1) et de contaminants (cf. Action B2 de l'OSR5 - Delile et al., 2021 ; Delile *et al.* (2020)) dans les précédents programmes de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) montrent qu'il n'y a pas systématiquement un équilibre entre ce qui entre dans le système et ce qui en sort. Ce déséquilibre a également été observé dans le Haut Rhône de 2012 à 2016, où même avec l'occurrence des chasses des barrages de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat, la quantité de MES injecté dans le Rhône est supérieure à la quantité mesurée en aval à Jons (Lepage et al., 2020). Les flux de radionucléides associés aux MES mesurés à la station SORA (Arles) montrent également un déficit par rapport aux quantités de radionucléides rejetés par les industries du cycle nucléaire.

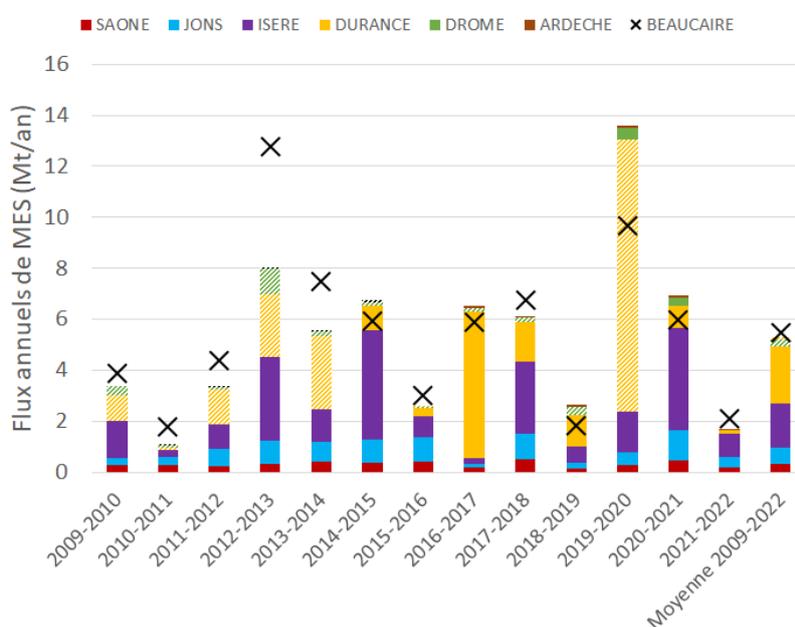


Figure 1 : Flux annuels de MES mesurés sur les stations permanentes de l'OSR, par années hydrologiques débutant au 1^{er} septembre. Les flux majoritairement reconstitués sont représentés en hachuré (Action E1 OSR6).

Si la majorité des flux de MES (et contaminants associés) est transportée lors des crues, la proportion de ces MES qui proviennent d'une remise en suspension de sédiments déposés le long du lit mineur reste peu connue. La confrontation des résultats de traçage géochimique et de modélisation 1D lors de l'OSR5 (Figure 2) a montré qu'une fraction non négligeable de ces sédiments remis en suspension pouvait impacter les flux de MES (Bégorre et al., 2021; Dabrin et al., 2021; Radakovitch et al., 2017).

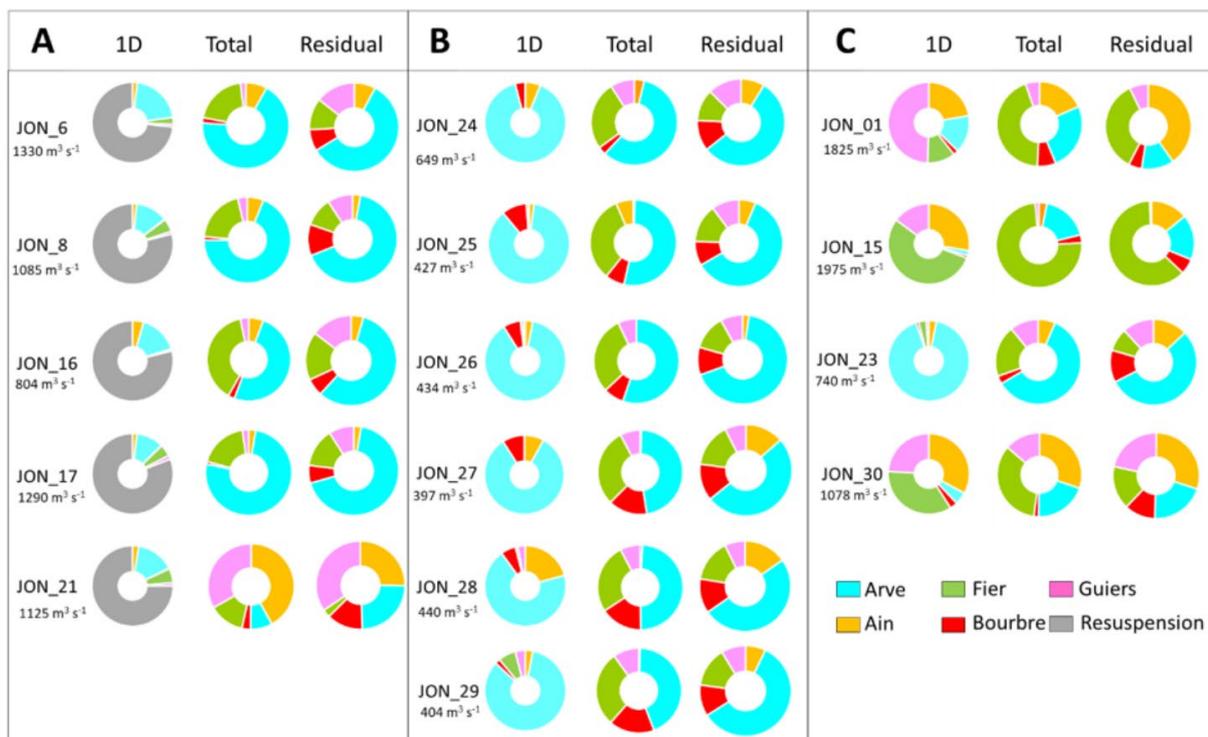


Figure 2. Estimation des contributions relatives (en %) des sources de MES collectées à la station de Jons pendant les opérations de chasse de barrage (A), de régime de base (B) et de crues (C). Les contributions sont estimées à partir du modèle hydro-sédimentaire 1-D et des modèles de mélange à partir des fractions totale et résiduelle (Dabrin et al., 2021).

Nous proposons de nous y intéresser en proposant une approche géochimique basé sur les radionucléides pour apporter des compléments à ces observations. L'objectif de cette action est d'étudier si les MES transportées dans le bassin du Rhône lors des crues sont issues de sols fraîchement érodés ou d'une remise en suspension des sédiments. Pour y parvenir, la méthodologie utilisée se base sur l'utilisation de radionucléides marqueurs des sols et des MES : le beryllium-7 (⁷Be), le plomb-210 en excès (²¹⁰Pb_{xs}) et le césium-137 (¹³⁷Cs). Ces radionucléides permettent en effet de discriminer les sédiments récents des sédiments anciens (Evrard et al., 2016; Olley et al., 1993; Walling, 2013) (Voir Box 1).

Box 1 – Utilisation des radionucléides pour étudier l'origine des sédiments érodés

Le ^7Be et le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ sont tous les deux déposés au sol lors des précipitations et sont rapidement fixés aux particules de sol de manière quasi irréversible (Figure 3). La faible demi-vie radioactive du ^7Be (53 jours) favorise la distinction entre les particules érodées récemment marquées par des pluies et les particules plus anciennes qui s'étaient déposées dans le lit du cours d'eau. Celles-ci sont marquées par le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ dont la plus longue demi-vie (22 ans) permet de distinguer s'il s'agit de sédiments remis en suspension (Figure 4). Le ^{137}Cs provient lui des retombées radioactives, notamment lors de l'accident de Tchernobyl en avril 1986, et sa faible migration en profondeur dans les sols permet de distinguer s'il s'agit de matières provenant de sols de surface ou de subsurface.

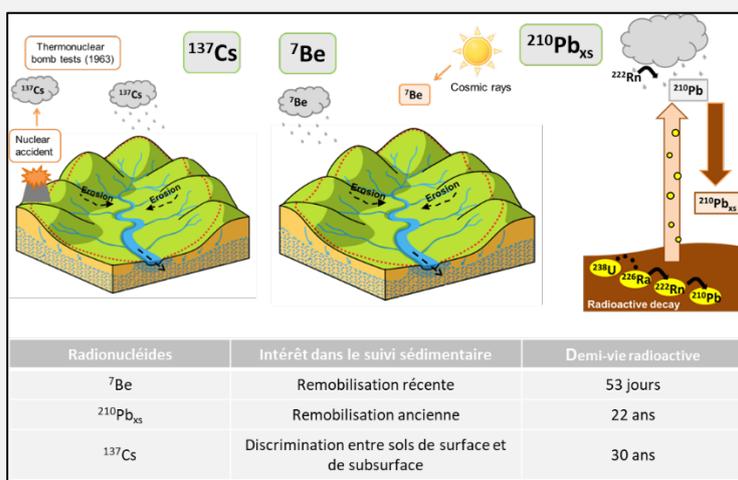


Figure 3. Origine du ^7Be , du $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ et du ^{137}Cs dans les sols et sédiments des bassins versants (adapté de Le Gall (2016)).

L'origine des particules est ainsi étudiée à partir du déséquilibre du rapport $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ et des niveaux de ^{137}Cs . En mesurant les signatures (les concentrations) du ^7Be et du $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ dans les eaux de pluies (Ribolzi et al., 2016), et la signature du ^{137}Cs dans les sols (Evrard et al., 2016), il est possible de quantifier la proportion de MES qui provient des différentes sources présentées ci-dessus.

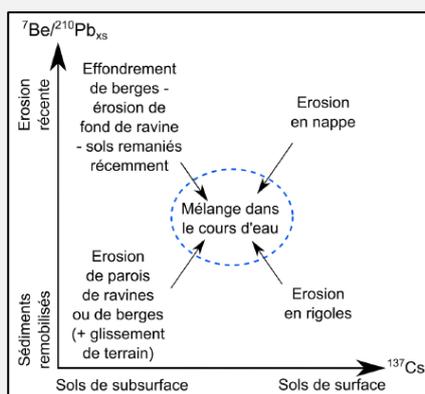


Figure 4. Signatures $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ et ^{137}Cs théoriques des sédiments issus de différents processus d'érosion hydrique (Gourdin, 2014).

2. Méthodologie

Pour étudier si les MES du réseau OSR (Gruat et al., 2022) sont issues de sols érodés récemment ou d'une remise en suspension des sédiments stockés dans le lit des cours d'eau, nous avons souhaité appliquer la méthodologie présentée au chapitre 1 :

- Mesures des concentrations de ^7Be , de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ et de ^{137}Cs dans les MES du réseau OSR,
- Caractérisation du terme source du ^7Be et du $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ en les mesurant dans de l'eau de pluie,
- Caractérisation du terme source du ^{137}Cs en utilisant une carte des inventaires de sols (mise à jour à partir des travaux de Roussel-Debel et al., 2007),

Les échantillons ciblés sont ceux collectés après un épisode de crue générés par la pluie. L'analyse de ces radionucléides se fait par spectrométrie gamma, la méthode usuelle utilisée dans l'OSR par l'IRSN (Lepage et al., 2022). La contrainte principale étant liée à la demi-vie du ^7Be qui impose que la mesure soit réalisée le plus rapidement possible après l'épisode de pluie (a minima dans le semestre suivant la pluie).

Pour valider la méthode, nous avons fait le choix de l'appliquer dans un premier temps à un bassin versant test, avant sa généralisation à l'ensemble des stations OSR. Le bassin test ciblé est celui de l'Ardèche :

- Car il fait partie du réseau de suivi des MES de l'OSR,
- Car il est de taille modeste et donc plus facile à instrumenter,
- Car il est à proximité du laboratoire de l'IRSN et permet de simplifier la logistique.

2.1 Application à un bassin versant test – l'Ardèche

L'idée initiale, en plus de mesurer les trois radionucléides cités précédemment dans les MES prélevées par le réseau de l'OSR à l'exutoire de l'Ardèche et dans les termes sources, était de les mesurer dans des MES collectées à d'autres points du bassin versant pour analyser la distribution spatiale de l'origine des MES. Pour prélever ces MES, des pièges à particules similaires aux pièges de type Phillips (Phillips et al., 2000) ont, dans un premier temps, été installés en 5 points du bassin versant sur les tronçons principaux du cours d'eau (Figure 5). Malheureusement, du fait de l'hydrologie particulière en 2021-2022 (peu de crues), ces pièges n'ont pas permis de récolter suffisamment de matière pour les analyses ; c'est pourquoi, des laisses de crue ont aussi été prélevées à proximité des sites choisis pour collecter suffisamment de matières. Trois campagnes de prélèvements ont ainsi eu lieu en 2021 et 2022.

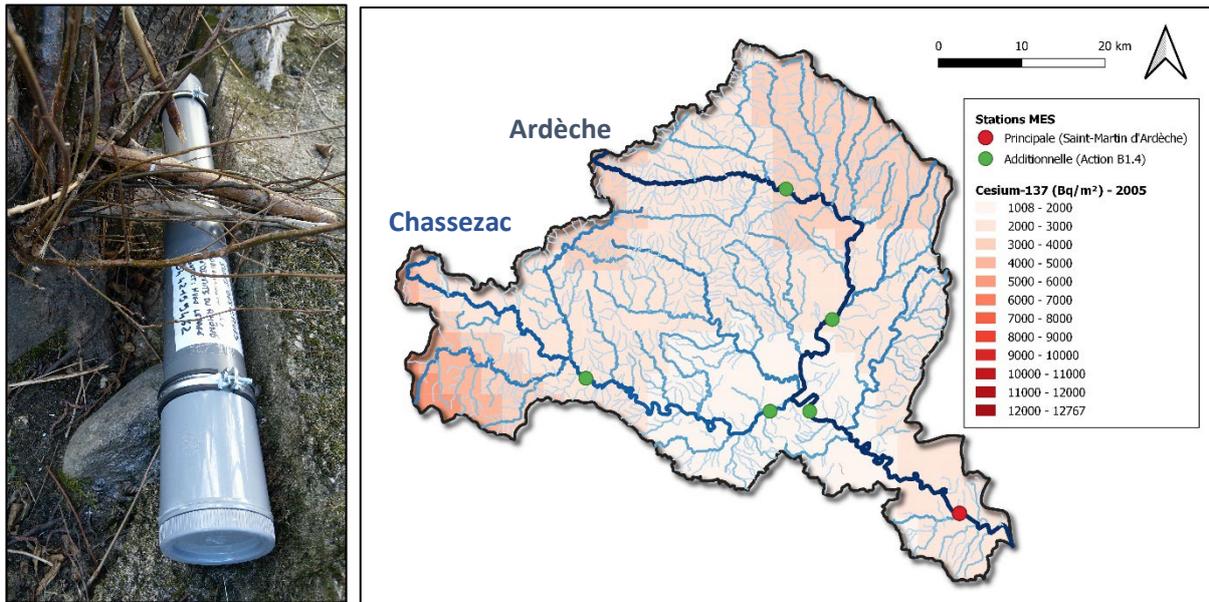


Figure 5. Piège à particules installés sur l’Ardèche et carte de l’emplacement de la station principale de l’OSR (en rouge) et des prélèvements de laisses de crues (en vert).

Pour l’analyse dans les eaux de pluie, nous avons été confrontés à des problèmes de vandalisme sur les préleveurs (pluviomètre et entonnoir avec bidon d’eau) et nous n’avons pu récolter suffisamment d’eau pour réaliser ces analyses. De plus, s’il s’agissait en effet d’une méthode utilisée pendant de nombreuses années (Riboldi et al., 2016), la variabilité spatiale de la concentration du ^7Be dans les eaux de pluie a récemment été critiquée (Collins et al., 2020). Une solution alternative consisterait à mesurer ces radionucléides dans (1) des sols déjà érodés et récemment affectés par les pluies, (2) dans les berges érodables et (3) dans des sédiments déposés lors des événements de crues précédents. Cette méthodologie alternative n’a pas pu être mise en place lors de cette étude car non prévue et logistiquement difficile à déployer (nombreux prélèvements et analyses à réaliser). En l’absence de caractérisation des termes sources, les résultats ne seront donc que qualitatifs et ne permettront pas de quantifier la proportion de MES issue de remise en suspension ou de sols fraîchement érodés. Toutefois, des travaux complémentaires hors OSR (dans le cadre de la thèse de F. Guillory) sont en cours et permettraient d’apporter des éléments complémentaires sur l’origine des MES dans l’Ardèche.

Pour les sols, si l’idée est d’utiliser une carte de l’inventaire de ^{137}Cs dans les sols produite par l’IRSN, nous avons eu l’opportunité de réaliser une campagne de prélèvements de sols dans le bassin de l’Ardèche dans le cadre d’un autre projet (NEEDS – Models-137 - 2022). Les prélèvements ont été réalisés avec une tarière selon trois profils de profondeur (0-5 cm, 5 – 15 cm et 15 – 30 cm), et un tripliquât a été collecté sur chaque zone dans une surface d’environ 10m² pour s’affranchir des biais d’hétérogénéité. Les trois prélèvements par zone ont été mélangés pour chaque profil avant analyse par spectrométrie gamma. Le choix des zones s’est fait en fonction de l’occupation des sols pour caractériser les principales occupations (forêt, landes/terres non agricoles et terres agricoles) (Figure 6). Ces travaux avaient pour but de confronter la carte des sols IRSN produites par modélisation à des mesures.

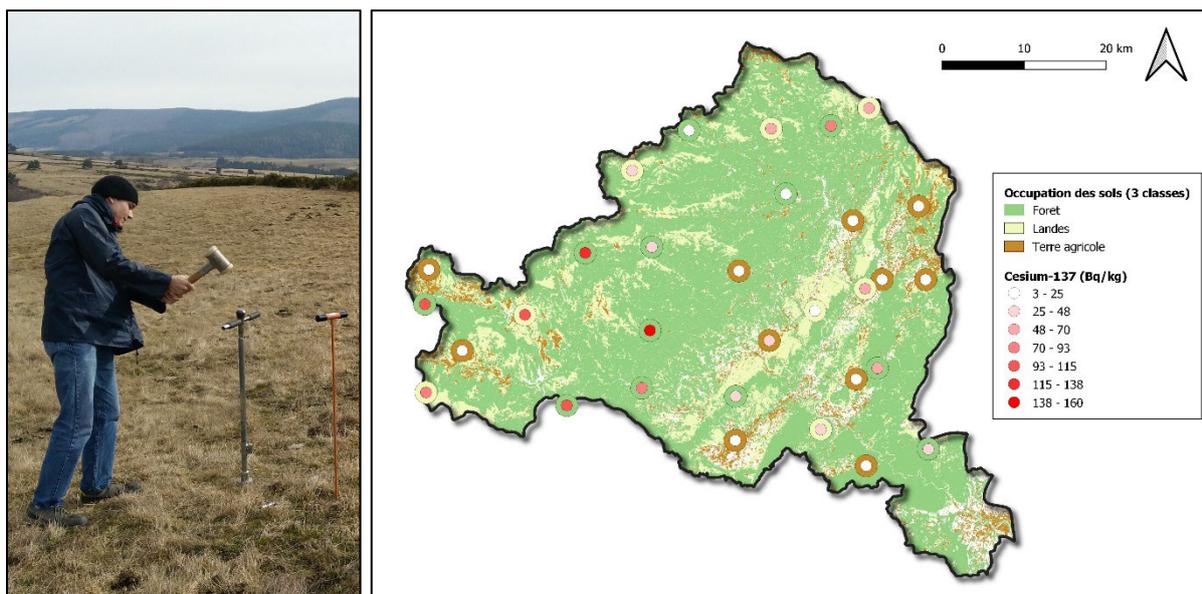


Figure 6. Prélèvement d'un sol de prairie à l'aide d'une tarière et carte de l'emplacement des prélèvements de sols en fonction de l'occupation principale des sols et de la teneur en ^{137}Cs de la couche supérieur (0-5 cm).

2.2 Application à l'ensemble des stations de l'OSR

Comme expliqué dans la partie précédente, l'hydrologie du Rhône en 2021 et 2022, ainsi que la méthodologie initialement ciblée (prélèvements MES et eaux de pluies), ont rendu difficile l'application de cette approche à l'échelle du Rhône entier (stations OSR). Cependant, la mesure des trois radionucléides a pu être réalisée sur certains prélèvements de MES collectés par le réseau qui respectaient les contraintes de mesures du ^7Be (mesure à réaliser rapidement après le prélèvement). Il est donc possible, de la même manière que pour l'Ardèche, d'évaluer qualitativement l'origine des MES selon s'il s'agit d'une remise en suspension ou d'un apport de sols récemment érodés.

2.3 Modélisation des concentrations de ^{137}Cs dans les MES de l'Ardèche

Des travaux de modélisation des concentrations de ^{137}Cs ont également été conduits. Le modèle opérationnel de transfert de radionucléides par lessivage (wash-off) utilisé dans ce travail est de type fonction de transfert. Les fonctions de transfert modélisent la quantité de radionucléides qui transite après une contamination ponctuelle dans les bassins versants à différentes échelles temporelles. Le flux donné par la fonction de transfert représente une proportion de la contamination initiale. La contamination initiale est représentée par un dépôt atmosphérique uniforme sur l'ensemble du bassin versant, la réponse est exprimée à l'exutoire. L'essence même d'une fonction de transfert considère que la réponse par lessivage d'un bassin versant est linéaire dans le temps et fonction du dépôt initial atmosphérique. La fonction de transfert de base ne demande que peu de données en entrée ce qui lui permet d'être facilement déployable : débit, charge en suspension et concentration en Césium-137 dans les sols (Delmas et al., 2016).

3. Résultats

3.1 Terme source du ^{137}Cs et comparaison avec les MES

Dans le bassin versant de l'Ardèche, le ^{137}Cs est présent dans les sols à la suite des retombées des essais atmosphériques (pic en 1963) et de l'accident de Tchernobyl (1986). Les résultats de mesure de ^{137}Cs réalisée dans les différents échantillons prélevés montrent que les concentrations observées dans les 27 MES (et les 15 laisses de crue – entre 1 et 21 Bq/kg) sont proches de celles observées dans les 6 sols de culture (3 – 31 Bq/kg) et les 5 sols de pâturage (4 – 22 Bq/kg) (Figure 7). Les concentrations les plus élevées en ^{137}Cs sont observées dans les sols qui ont été le moins remaniés ou érodés depuis les retombées atmosphériques : les 12 sols forestier (37 – 160 Bq/kg) et les 8 sols de friche (19 – 107 Bq/kg). Toutefois, cette différence de concentration de ^{137}Cs entre les occupations de sols montre qu'il est difficile de qualifier un terme source de ^{137}Cs entre les sols de surface et de subsurface à l'échelle d'un bassin versant. Cette méthodologie est généralement appliquée à l'échelle d'une parcelle agricole où l'hétérogénéité du ^{137}Cs est moins marquée.

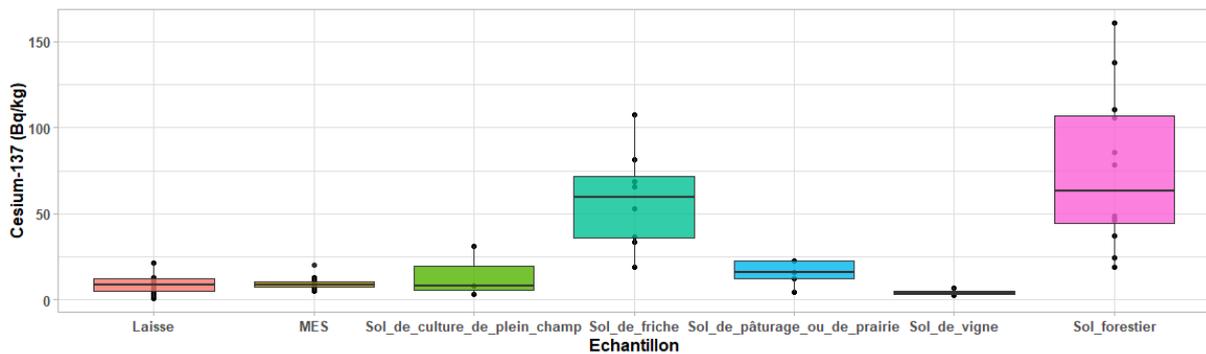


Figure 7. Etendue des concentrations de ^{137}Cs dans les laisses de crues, les matières en suspension du réseau OSR (MES) et les sols du bassin versant de l'Ardèche.

Concernant les laisses de crues, les concentrations de ^{137}Cs ne montrent pas de tendance spatiale entre les 5 points de prélèvement ; les concentrations sont similaires (Figure 8). Toutefois, les concentrations varient dans le temps quel que soit le site étudié. L'absence de mesure de la taille des particules (pour problème logistique lié à l'appareil et au manque de matière) ne permet pas de conclure s'il s'agit d'un biais granulométrique ou d'une différence liée à l'origine des laisses déposées. L'hypothèse la plus pertinente serait celle de l'origine des laisses (et donc des sols) car les prélèvements des laisses de crues sont réalisés de sorte à ne prélever que la matière la plus fine des dépôts en bord du cours d'eau. Pour information, il n'y a aucune relation entre la taille des particules et la concentration des radionucléides pour les prélèvements des MES du réseau OSR en Ardèche, la granulométrie des MES est relativement constante (d50 compris entre 17 μm et 40 μm).

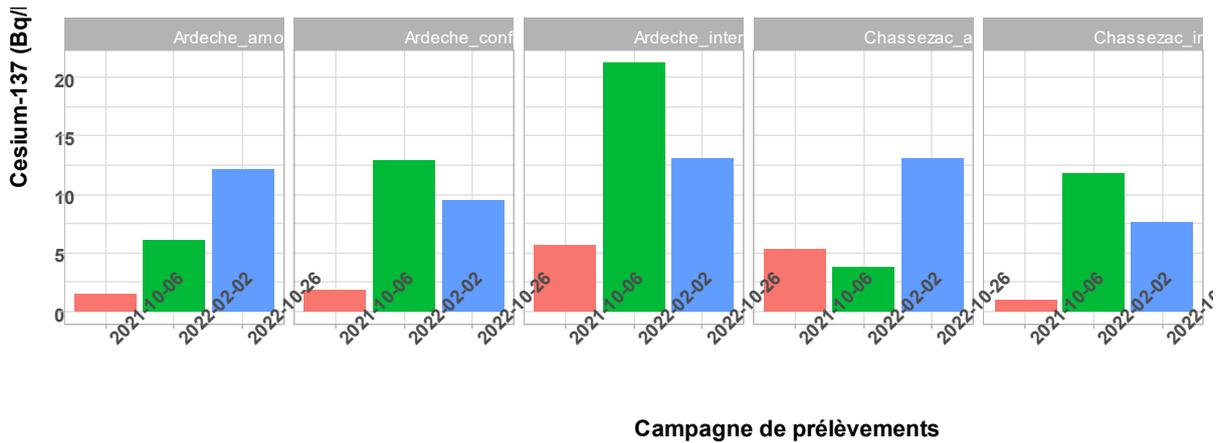


Figure 8. Concentrations de ^{137}Cs dans les laisses de crue prélevées dans le bassin versant de l’Ardèche.

3.2 Marquage des MES en ^7Be et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$

Les résultats montrent qu’il n’y a pas de relation entre les concentrations de ^{137}Cs et le rapport $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (Figure 9), ce qui indique que l’origine des MES n’est pas unique et combine un apport des différentes sources. La variation du rapport $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ entre 1 et 3,5 montre qu’il n’y a pas que les sols fraîchement érodés qui contribuent aux MES, mais également des particules qui ont été affectées par une érosion précédente et se sont soit déposées dans le cours d’eau (= remise en suspension) soit ne l’ont pas atteint. L’absence d’information sur le terme source (pluie) ne permet malheureusement pas de quantifier la proportion des différentes sources. Les concentrations de ^7Be varient de 2 Bq/kg à plus de 900 Bq/kg (Figure 9) et la relation positive avec le ^{137}Cs semble indiquer qu’une partie des MES provient de l’érosion des berges et/ou de sols de sub-surface (faibles concentrations de ^7Be et de ^{137}Cs) et qu’une autre partie provient de l’érosion des sols de surface. L’absence de concentration de ^{137}Cs supérieure à 25 Bq/kg semble indiquer un faible apport de sols issus de forêt et de terres non agricoles.

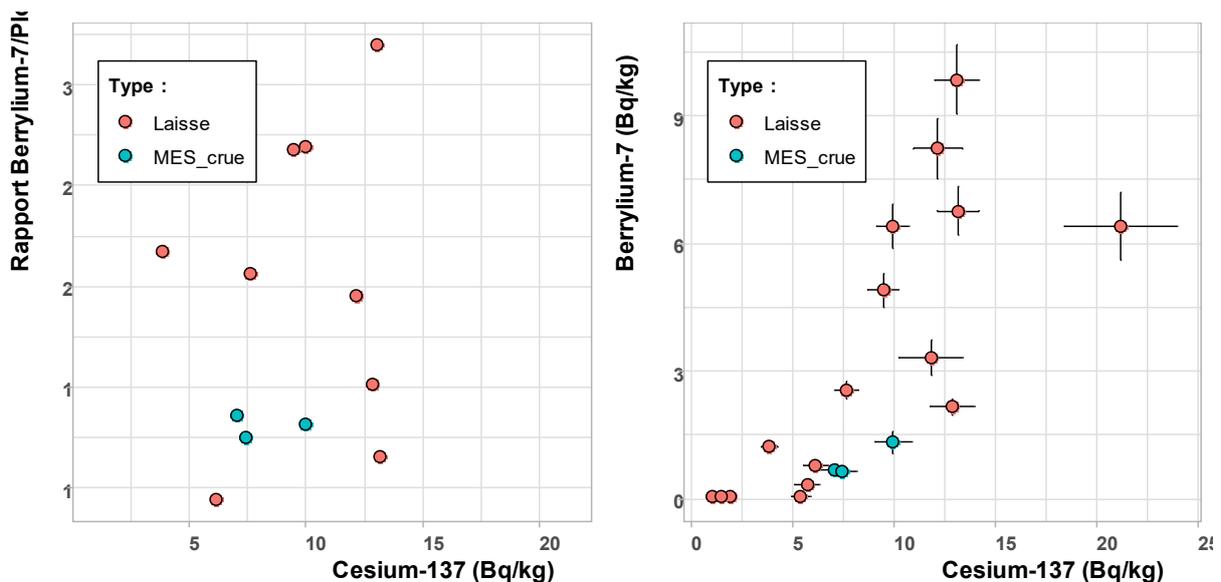


Figure 9. Variation de la concentration de ^{137}Cs et du rapport entre le ^7Be et le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (à gauche) ou du ^7Be (à droite) dans les laisses de crue et les matières en suspension prélevées lors des crues du bassin versant de l’Ardèche.

3.3 Cas des autres stations de l'OSR

On observe des relations similaires entre les concentrations particulières de ^7Be , de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ et de ^{137}Cs pour d'autres stations de l'OSR (Figure 10 - Figure 11.), indiquant qu'une partie des MES qui transitent dans le cours d'eau est bien issue de l'érosion récente des sols des bassins versants mais également des particules déjà érodées. La taille des particules affecte uniquement les mesures à la station de Jons sur le Rhône, où l'on observe une augmentation des concentrations des radionucléides lorsque la taille des particules diminue.

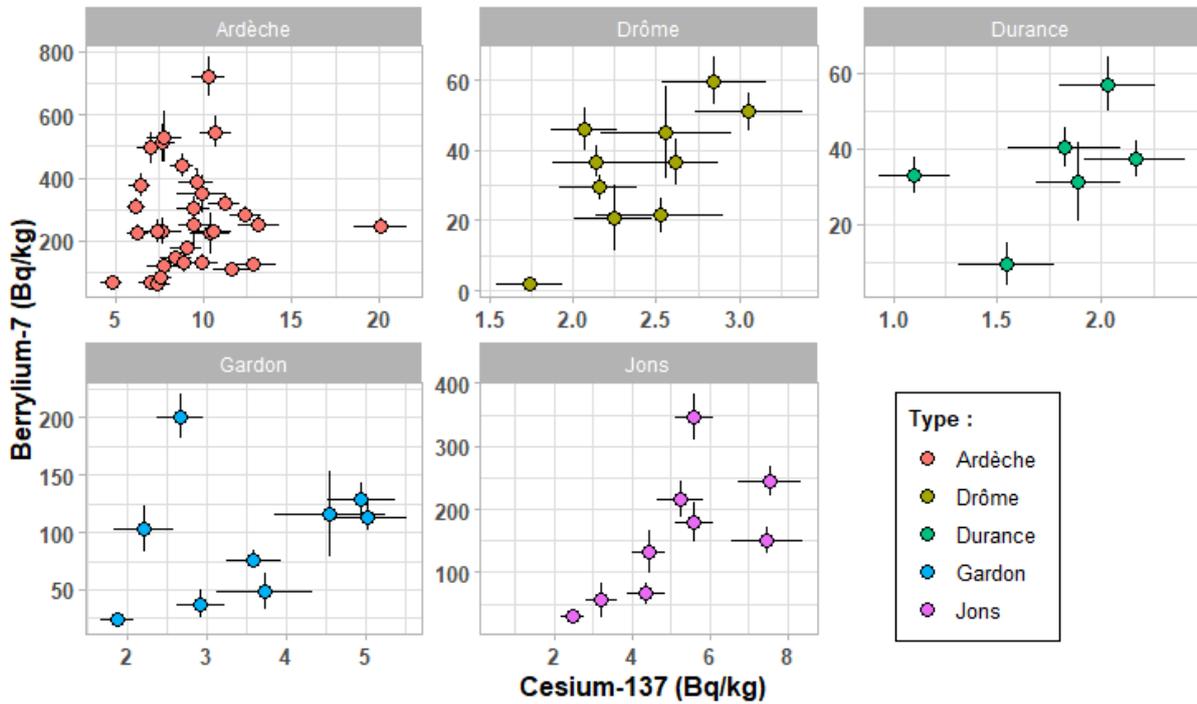


Figure 10. Variation de la concentration de ^{137}Cs et du ^7Be dans les matières en suspension des différentes stations de l'OSR (affluents du Rhône au sud du BV et Haut Rhône à Jons).

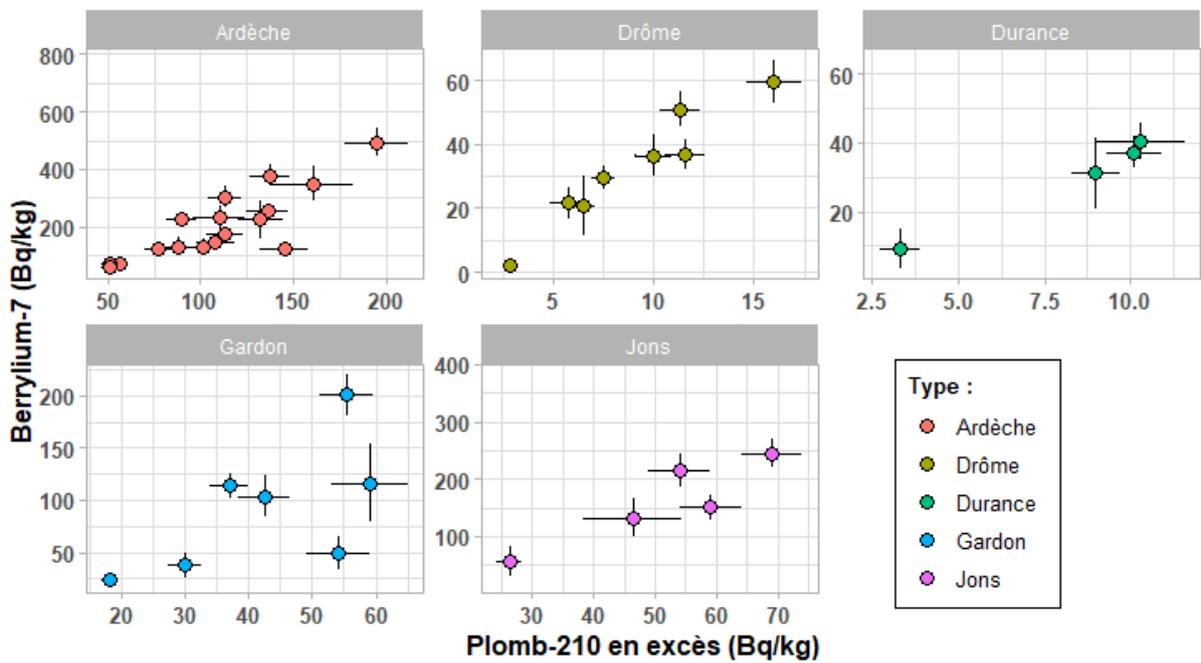


Figure 11. Variation de la concentration de ^{210}Pb et du ^7Be dans les matières en suspension des différentes stations de l'OSR.

4. Modélisation

Les travaux de modélisation montrent que cette approche est efficace pour modéliser les concentrations et les flux de ^{137}Cs quelques 35 ans après les derniers dépôts dans le bassin versant de l'Ardèche (Figure 12). Les concentrations et les flux modélisés sont dans l'intervalle de confiance des valeurs mesurées. Des travaux sont en cours à l'IRSN (thèse F. Guillory citée plus haut) pour déployer un modèle plus précis spatialement afin de prendre en compte ces variations.

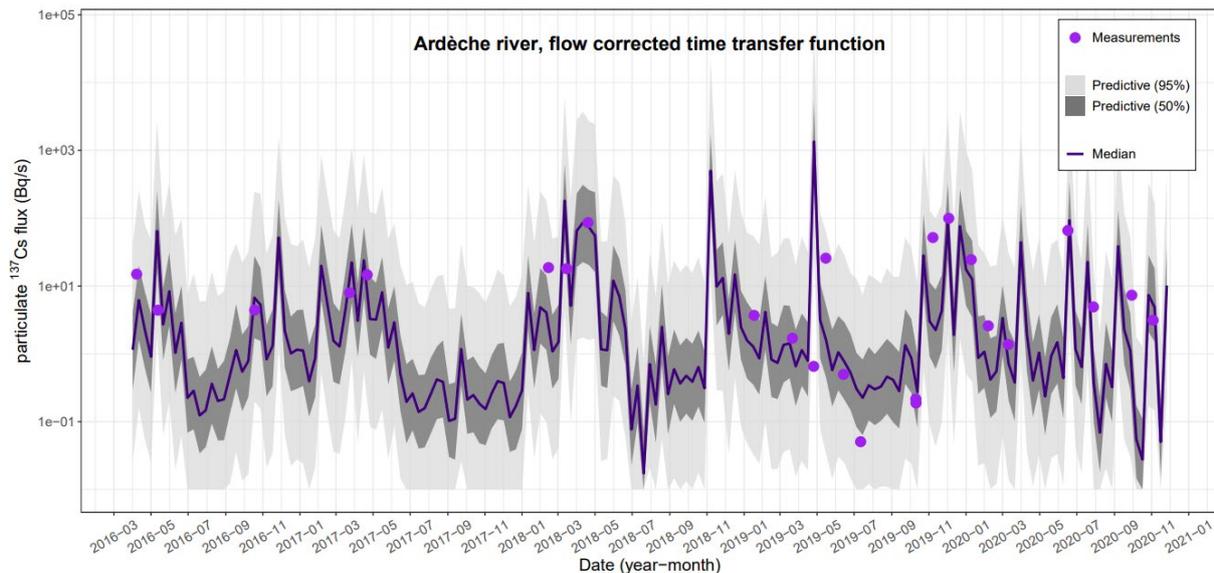


Figure 12. Modélisation des flux de césium-137 particulaire dans les matières en suspension de l'Ardèche par fonction de transfert.

5. Conclusion

Cette action exploratoire proposait d'appliquer une méthode de traçage sédimentaire pour étudier l'origine des MES et savoir si elles provenaient de sols fraîchement érodés ou d'une remise en suspension. Malgré les contraintes climatiques et logistiques qui n'ont pas permis de réaliser cette étude comme initialement prévu (= termes sources non définis), les résultats montrent que l'origine des MES est un mélange des différentes sources :

- sols de sub-surface ou de berges (absence de radionucléides),
- sols fraîchement érodés (fortes concentrations de ^7Be),
- sols préalablement érodés et/ou sédiments remis en suspension (rapport $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ non constant).

Les mesures de ^{137}Cs semblent indiquer que la contribution des sols issus de forêt ou de terre non agricole reste très limitée. Ces résultats pourraient être mis en parallèle des travaux de modélisation (action D3) et de traçage sédimentaire (action B1.1) pour apporter des informations supplémentaires quant à l'origine des MES.

6. Bibliographie

- Bégorre, C., Dabrin, A., Grisot, G., Dherret, L., Masson, M., Coquery, M., 2021. Traçage des MES - Estimation des contributions relatives des affluents aux flux de MES sur le Rhône amont, intermédiaire et aval (report). INRAE. <https://hal.science/OSR/hal-03292653v1>
- Collins, A.L., Blackwell, M., Boeckx, P., Chivers, C.A., Emelko, M., Evrard, O., Foster, I., Gellis, A., Gholami, H., Granger, S., Harris, P., Horowitz, A.J., Laceby, J.P., Martinez-Carreras, N., Minella,

- J., Mol, L., Nosrati, K., Pulley, S., Silins, U., da Silva, Y.J., Stone, M., Tiecher, T., Upadhayay, H.R., Zhang, Y., 2020. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes, *Journal of Soils and Sediments*. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4>
- Dabrin, A., Bégorre, C., Bretier, M., Dugué, V., Masson, M., Le Bescond, C., Le Coz, J., Coquery, M., 2021. Reactivity of particulate element concentrations: apportionment assessment of suspended particulate matter sources in the Upper Rhône River, France. *J Soils Sediments* 21, 1256–1274. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02856-0>
<https://hal.science/OSR/hal-03487104v1>
- Delile, H., Gruat, A., Coquery, M., Masson, M., Dabrin, A., Coz, J.L., Miege, C., Lagouy, M., Radakovitch, O., 2021. Evaluation multi-échelle des flux de MES et de contaminants associés dans le bassin du Rhône (report). INRAE ; IRSN. <https://hal.science/OSR/hal-03291035v1>
- Delmas, M., Garcia-Sanchez, L., Nicoulaud-Gouin, V., Onda, Y., 2016. Improving transfer functions to describe radiocesium wash-off fluxes for the Niida River by a Bayesian approach. *Journal of Environmental Radioactivity*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.002>
- Evrard, O., Lacey, J.P., Huon, S., Lefèvre, I., Sengtaheuanghoung, O., Ribolzi, O., 2016. Combining multiple fallout radionuclides (^{137}Cs , ^7Be , ^{210}Pb s) to investigate temporal sediment source dynamics in tropical, ephemeral riverine systems. *Journal of Soils and Sediments* 16, 1130–1144. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1316-y>
- Gourdin, E., 2014. Traçage des sources et quantification de la dynamique des sédiments en crue : application au bassin tropical montagneux de la Houay Xon au Laos.
- Gruat, A., Coquery, M., Coz, J.L., Thollet, F., Lagouy, M., Dabrin, A., Masson, M., Grisot, G., Richard, L., Bonnefoy, A., Dur, G., Ambrosi, J.P., Labille, J., Borschneck, D., Vidal, V., Lepage, H., Giner, F., Mourier, D., Raimbault, P., Fournier, M., Pairaud, I., Ravel, C., Répécaud, M., Herlory, O., 2022. Fonctionnement du réseau d'observation des flux de matières en suspension et de contaminants particulaires (OSR 6 – année 2022). OSR6 | Axe E - Action E1 | Rapport scientifique final. <https://hal.science/OSR/hal-04228357v1>
- Le Gall, M., 2016. Traçage des sources de sédiments à l'amont des hydrosystèmes agricoles : apport de la géochimie élémentaire, du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et des radionucléides (phdthesis). Université Paris Saclay (COMUE).
- Lepage, H., Gruat, A., Thollet, F., Le Coz, J., Coquery, M., Masson, M., Dabrin, A., Radakovitch, O., Labille, J., Ambrosi, J.-P., Delanghe, D., Raimbault, P., 2022. Concentrations and fluxes of suspended particulate matter and associated contaminants in the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. *Earth Syst. Sci. Data* 14, 2369–2384. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2369-2022> <https://hal.science/OSR/insu-03690609v1>
- Lepage, H., Launay, M., Le Coz, J., Angot, H., Miège, C., Gairoard, S., Radakovitch, O., Coquery, M., 2020. Impact of dam flushing operations on sediment dynamics and quality in the upper Rhône River, France. *Journal of Environmental Management* 255, 109886. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109886> <https://hal.science/OSR/hal-02454925v1>
- Olley, J.M., Murray, A.S., Wallbrink, P.J., 1993. Identifying sediment sources in a partially logged catchment using natural and anthropogenic radioactivity. *Water Resources Research* 29, 1037–1043.
- Phillips, J.M., Russell, M.A., Walling, D.E., 2000. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: A simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes* 14, 2589–2602. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
- Radakovitch, O., Gairoard, S., Gattacecca, J., Delanghe, D., Ambrosi, J.P., Angeletti, B., Dabrin, A., Masson, M., Coquery, M., Grisot, G., Panay, J., Bescond, C.L., Bretier, M., Nicoulaud-Gouin, V., 2017. Utilisation des traceurs géochimiques pour déterminer les sources de contaminants particulaires. OSR4 | Action IV.1 (report). Cerege ; Irstea ; IRSN. <https://hal.science/OSR/hal-03749307v1>

- Ribolzi, O., Evrard, O., Huon, S., Rochelle-Newall, E., Henri-des-Tureaux, T., Silvera, N., Thammahacksac, C., Sengtaheuanghoung, O., 2016. Use of fallout radionuclides (^7Be , ^{210}Pb) to estimate resuspension of *Escherichia coli* from streambed sediments during floods in a tropical montane catchment. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 3427–3435. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5595-z>
- Roussel-Debel, S., Renaud, P., Métivier, J.-M., 2007. ^{137}Cs in French soils: Deposition patterns and 15-year evolution. *Science of The Total Environment* 374, 388–398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.037>
- Walling, D.E., 2013. Beryllium-7: The Cinderella of fallout radionuclide sediment tracers? *Hydrological Processes* 27, 830–844. <https://doi.org/10.1002/hyp.9546>



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

