



## Impact du barrage de l'usine marémotrice sur la sédimentation dans l'estuaire de la Rance

Sabine SCHMIDT <sup>1</sup>, Louise MONNIER <sup>1</sup>, Marie-Claire PERELLO <sup>1</sup>,  
Margaux SAINT-GEORGE <sup>1</sup>, Soraya OUFKIR <sup>1</sup>, Olivier THER <sup>1</sup>,  
Stéphane BUJAN <sup>1</sup>, Eric MANEUX <sup>2</sup>, Marion CHAPALAIN <sup>3</sup>

1. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, UMR 5805, 33600 Pessac, France

*Sabine.schmidt@u-bordeaux.fr*

2. GEO-Transfert, ADERA, 33600 Pessac, France

3. EPTB Rance Frémur baie de Beausais, 5 rue Gambetta, 22100 Dinan, France

### Résumé :

Rejoignant la Manche entre Dinard et Saint-Malo, les caractéristiques naturelles de l'estuaire de la Rance combinées à une amplitude de marée remarquable, jusqu'à 13,6 mètres en vive-eau, ont permis la mise en service en 1967 de la première usine marémotrice au monde. L'exploitation de l'usine induit des modifications du régime hydrologique à même de modifier la dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la Rance. A l'initiative de l'EPTB Rance Frémur Baie de Beausais, une étude a été menée pour déterminer les taux d'accumulation sédimentaire à l'échelle de temps pluri-décennale au moyen du <sup>210</sup>Pb ( $T_{1/2} = 22.3$  ans) et du <sup>137</sup>Cs ( $T_{1/2} = 30.08$  ans). Une campagne de carottage, réalisée en mars 2022, a permis de prélever 19 carottes sédimentaires, réparties entre l'écluse du Chatelier au sud et le barrage au nord. Au laboratoire, toutes les carottes ont été ouvertes longitudinalement, photographiées, radiographiées puis échantillonnées en vue de la détermination de la teneur en eau, de la granulométrie et des radioéléments d'intérêt. Aux sites proches des rives ou dans des anses, les profils de <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> montrent souvent deux pentes dans l'évolution avec la profondeur de cet élément, dont la séparation se situe au niveau des couches où le maximum de <sup>137</sup>Cs, attribué aux retombées des essais nucléaires (1963), est observé. Dans ce cas, les taux de sédimentation des couches les plus récentes sont supérieurs, d'un facteur 2 à 3, à ceux calculés pour les sédiments « pré-barrage ». Les résultats suggèrent qu'il y a eu une augmentation de la sédimentation dans les secteurs central et amont de l'estuaire de la Rance depuis la mise en service du barrage.

**Mots-clés :** Estuaire de la Rance, Usine marémotrice, Sédimentation, <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs.

### 1. Introduction

La Rance est un fleuve côtier qui rejoint la Manche entre Dinard et Saint-Malo, une région soumise à une amplitude de marée, jusqu'à 13,6 mètres en vive-eau, parmi les plus fortes au monde. La forme allongée de l'estuaire de la Rance avec une embouchure étroite d'une largeur de 750 mètres en faisait un site d'implantation idéal pour l'installation d'une usine

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

marémotrice dont le fonctionnement dépend de la différence entre la hauteur d'eau de chaque côté du barrage et du débit. L'usine marémotrice de la Rance, située à l'embouchure de l'estuaire de la Rance, a été mise en service en 1967 (<https://www.edf.fr/usine-maremotrice-rance/presentation>). Sa retenue correspond au bassin maritime de l'estuaire de la Rance qui s'étend sur 20 km entre l'écluse du Chatelier et le barrage de l'usine marémotrice. La retenue de l'usine induit une modification du cycle naturel des marées, avec une réduction de l'amplitude de la marée d'environ 40%, et une augmentation du niveau d'eau moyen, de 6,6 mètres avant la construction à environ 9 mètres, ce qui a réduit la surface du domaine intertidal. Il y a eu aussi un allongement de la durée des étales de marées, jusqu'à près de 2 heures au lieu d'environ 15 minutes à l'extérieur du bassin. Ces modifications du régime hydrologique sont à même de modifier la dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la Rance (RTIMI *et al.*, 2021). Une comparaison de la répartition des sédiments en 1994, soit après presque trente ans de fonctionnement de l'usine marémotrice, avec une carte établie en 1956 avait d'ailleurs mis en évidence des changements avec notamment une augmentation des sédiments fins dans la zone centrale du bassin maritime (BONNOT-COURTOIS *et al.*, 2002). Mais le constat est que la sédimentation dans l'estuaire de la Rance avait besoin d'être mieux quantifiée, notamment pour répondre à des besoins de gestion des sédiments. A l'initiative de l'EPTB Rance Frémur Baie de Beausseis, une étude a été récemment conduite pour déterminer les taux de sédimentation à l'échelle de temps pluri-décennale dans l'estuaire de la Rance au moyen du  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22.3$  ans) et du  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30.08$  ans). L'ensemble de ce jeu de données est discuté pour évaluer si effectivement il y a eu un changement du taux de sédimentation, suite à la mise en service de l'usine marémotrice, et si le barrage a provoqué une aggravation sensible du phénomène naturel de sédimentation.

### 2. Matériel et méthode

#### 2.1 La campagne de carottage

A l'initiative de l'EPTB Rance Frémur baie de Beausseis, une campagne de carottages a été réalisée du 15 au 17 mars 2022. L'identification des sites de prélèvement pour les carottes sédimentaires a été réalisée par le Conseil scientifique de l'EPTB à partir de l'examen des profils sismiques acquis en octobre 2021. La plupart de carottes ont été échantillonnées depuis un bateau affrété muni d'une grue au moyen d'un carottier UWITEC; deux sites ont été prélevés à basse mer au moyen d'une tarière à lame pivotante. Il y a eu des tentatives de carottage sur 20 sites répartis sur le bassin maritime entre l'écluse du Chatelier au sud et le barrage au nord. Au total, la campagne a permis de prélever 19 carottes sédimentaires de 0,35 à 2,5 mètres (Figure 1) dont les coordonnées sont enregistrées dans la base de la cybercarothèque nationale (<https://cybercarotheque.fr/>).

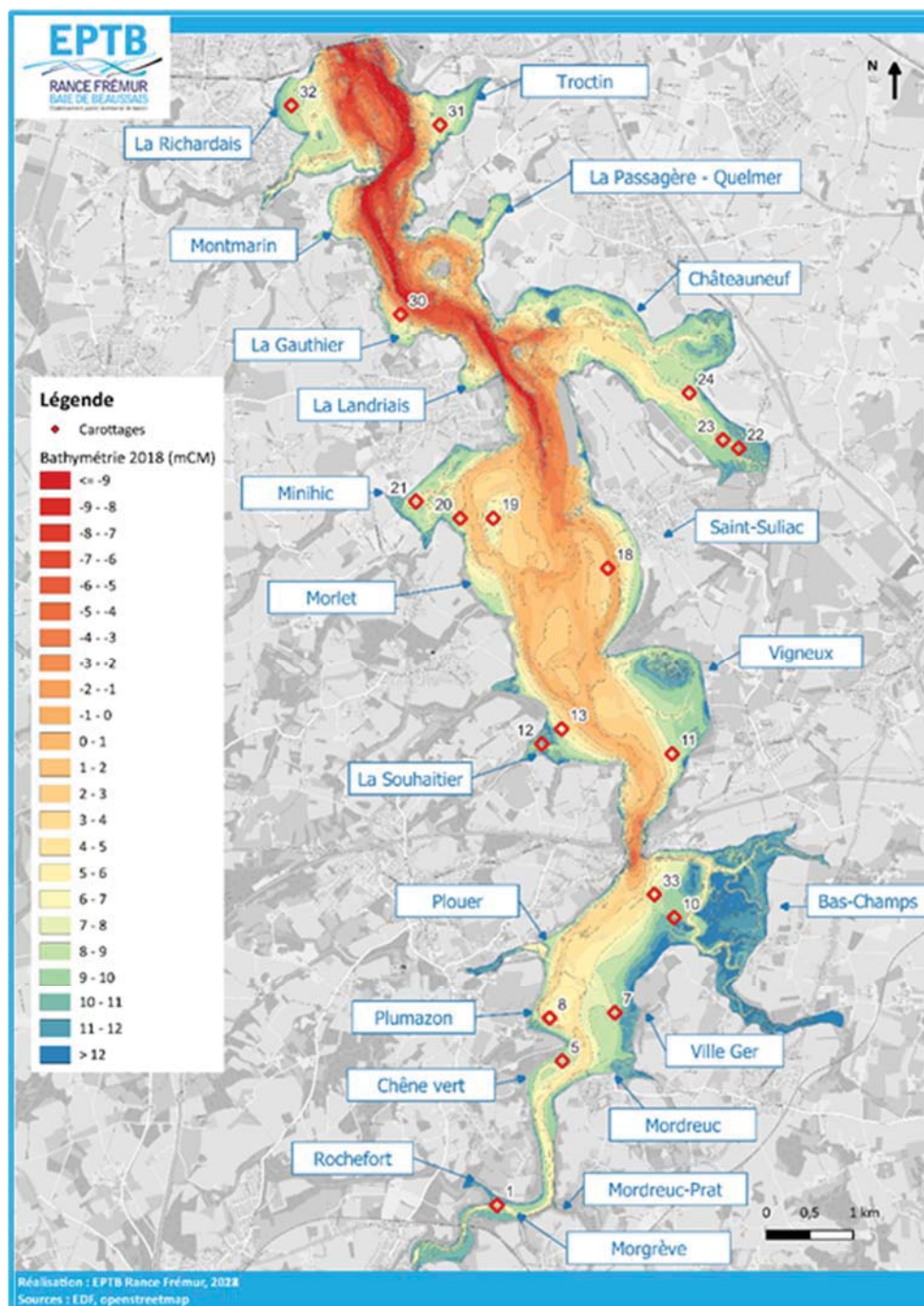


Figure 1. Position des sites où les carottages ont été effectuées en mars 2022 (Source : M. CHAPALAIN, EPTB Rance Frémur).

## 2.2 Les analyses conduites sur les carottes sédimentaires

De retour au laboratoire, toutes les carottes ont été ouvertes longitudinalement, photographiées, radiographiées (SCOPIX), et pour certaines analysées par XRF. Ensuite, l'échantillonnage des sédiments a permis la détermination de la granulométrie (D50) et des radioéléments d'intérêt. En préalable à ces analyses, chaque échantillon a été pesé

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

humide et sec, après passage à l'étuve à 60°C, pour calculer la masse volumique sèche du sédiment (DBD). Ces analyses ont été menées par la plate-forme d'analyse des carottes sédimentaires (PAACS) et les plateaux analytiques GRAL (granulométrie) et RadOc (spectrométrie gamma) d'EPOC.

Toutes les carottes, à l'exception de celles prélevées aux sites 10 et 22, ont fait l'objet d'une étude radiochronologique pour estimer, le cas échéant, le taux de sédimentation. La détermination des activités des radioéléments d'intérêt ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) repose sur la mesure non-destructive par spectrométrie  $\gamma$ , directe ou après tamisage (300  $\mu\text{m}$ ) en cas de présence de petits graviers ou débris de coquille, d'environ 10 à 15 g de sédiments secs. Le détecteur utilisé est un spectromètre gamma à très bas bruit de fond et très grande efficacité de type BeGe<sup>TM</sup> équipé d'un Cryo-Cycle II (Mirion Technology) (DUBOSQ *et al.*, 2021). Un comptage dure 24 heures par échantillon, et jusqu'à 48 heures pour les sédiments les plus anciens ou dilués par du sable. La calibration du détecteur est effectuée au moyen de sédiments certifiés de l'IAEA (IAEA-RGU, -RGTh, -314). Les activités de chaque radioisotope sont exprimées en  $\text{mBq g}^{-1}$ .

### 2.3 Détermination du taux de sédimentation

Le  $^{210}\text{Pb}$  est un radionucléide d'origine naturelle délivré de façon continue à la surface de la Terre par les retombées atmosphériques et produit dans la colonne d'eau par  $^{226}\text{Ra}$ . En milieu aquatique, il est rapidement adsorbé sur les particules. Une fois déposé à l'interface eau-sédiment, ce  $^{210}\text{Pb}$ , dit en excès ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) puisqu'il ne résulte pas d'une production *in situ* dans le sédiment, décroît avec la profondeur dans le sédiment en fonction de sa période radioactive et de l'intensité de la sédimentation. Le Plomb-210 en excès ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) est calculé comme la différence des activités mesurées de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^{226}\text{Ra}$ . Les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  avec la profondeur dans les sédiments permettent d'estimer les taux de sédimentation selon différents modèles (SCHMIDT *et al.*, 2010). Dans ce travail, nous avons retenu le modèle CF:CS (flux constant : sédimentation constante) selon l'équation (1):

$$A^t = A^0 e^{-\lambda(z/s)} \quad (1)$$

où  $\lambda$  est la constante de décroissance radioactive du  $^{210}\text{Pb}$  ( $0.031 \text{ an}^{-1}$ ),  $z$  est la profondeur dans le sédiment (cm) et  $S$  le taux de sédimentation ( $\text{cm an}^{-1}$ ).

Le profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  en fonction de la profondeur est une exponentielle dont la pente ( $b$ ) permet de calculer la vitesse de sédimentation selon  $S = \lambda/b$  sous la couche de mélange. Le  $^{137}\text{Cs}$ , un radioélément artificiel, a été utilisé comme un marqueur temporel indépendant pour tester la robustesse des taux de sédimentation estimés à partir du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Le  $^{137}\text{Cs}$  présente des retombées liées aux essais nucléaires atmosphériques, dont les plus importantes correspondent aux deux grandes périodes d'explosions : 1954-1958 et surtout 1961-1962, avec un maximum en 1963, période qui coïncide avec la construction du barrage. Ainsi, la comparaison des taux de sédimentation avant et après le pic de  $^{137}\text{Cs}$  devait permettre d'évaluer d'éventuels changements. Plus récemment, l'accident de



Tchernobyl a conduit à des retombées de  $^{137}\text{Cs}$  dont l'enregistrement dans les sédiments n'est pas systématique. Le  $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 14,05$  milliards d'année) dont la teneur des sédiments est supposée être purement détritique apporte des contraintes supplémentaires sur de potentiels changements de sédiment.

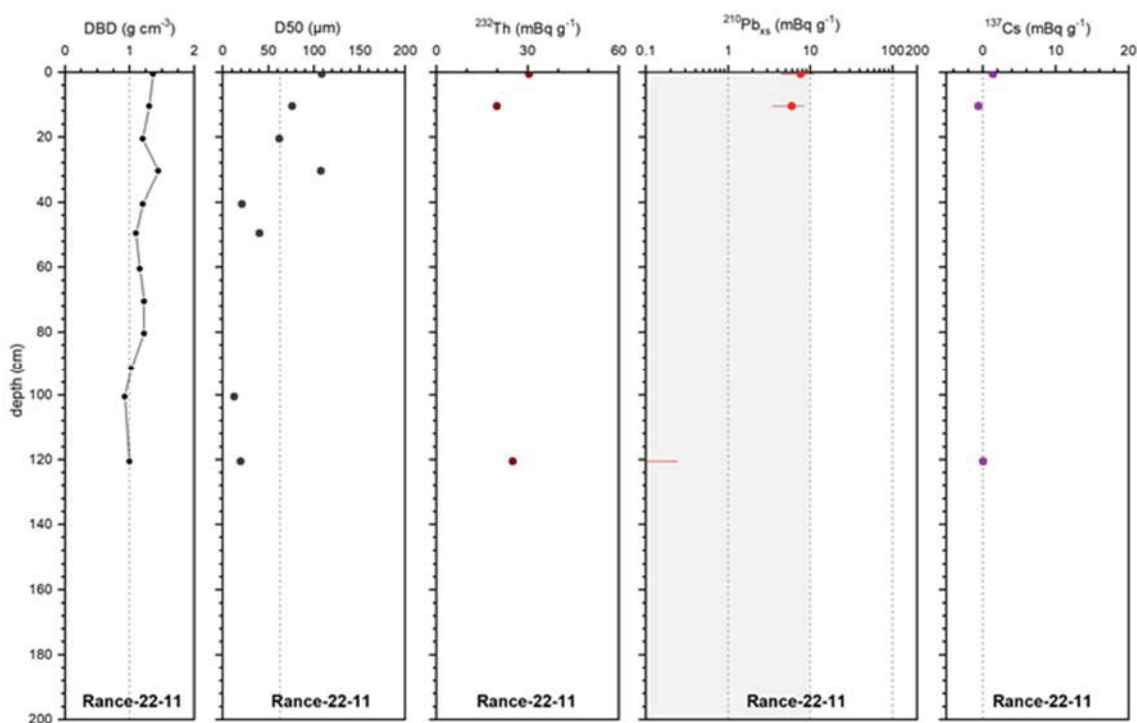


Figure 2. Carotte Rance 22-11: profils avec la profondeur dans le sédiment de la masse volumique sèche (DBD), de la granulométrie médiane (D50) et des activités de  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , et de  $^{137}\text{Cs}$ .

### 3. Evolution du taux de sédimentation

Le nombre de carottes étudiées ne permet pas de présenter l'ensemble des résultats, aussi le choix a été de sélectionner des exemples de profils. Plusieurs carottes avaient été prélevées dans des secteurs qui présentaient peu de différences entre les bathymétries de 1957 et de 2018 (RITMI *et al.*, 2021). C'est le cas de la carotte Rance-22-11, située dans la zone centrale de l'estuaire, à proximité de Vigneux, dont les sédiments sont plutôt sablo-vaseux. Dès le sommet de la carotte, les activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sont très faibles (Figure 2). Comme les mesures de granulométrie et de DBD semblaient suggérer des sédiments plus fins à des profondeurs supérieures à 90 cm, ce qui aurait pu signifier un changement de la sédimentation, un niveau (120-121 cm) a été mesuré pour tester la présence éventuelle d'excès de  $^{210}\text{Pb}$ . Là encore il n'y a pas de niveau significatif de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . De même, le  $^{137}\text{Cs}$  n'est pas détectable. Les carottes 19, 30 et 32 présentent des résultats similaires. Ces carottes correspondent à des sites dont la bathymétrie est plus importante

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

ou situés à l'aval du bassin et présentent des sédiments plus grossiers, indiquant des conditions actuelles de courant peu favorables au dépôt de matériel fin.

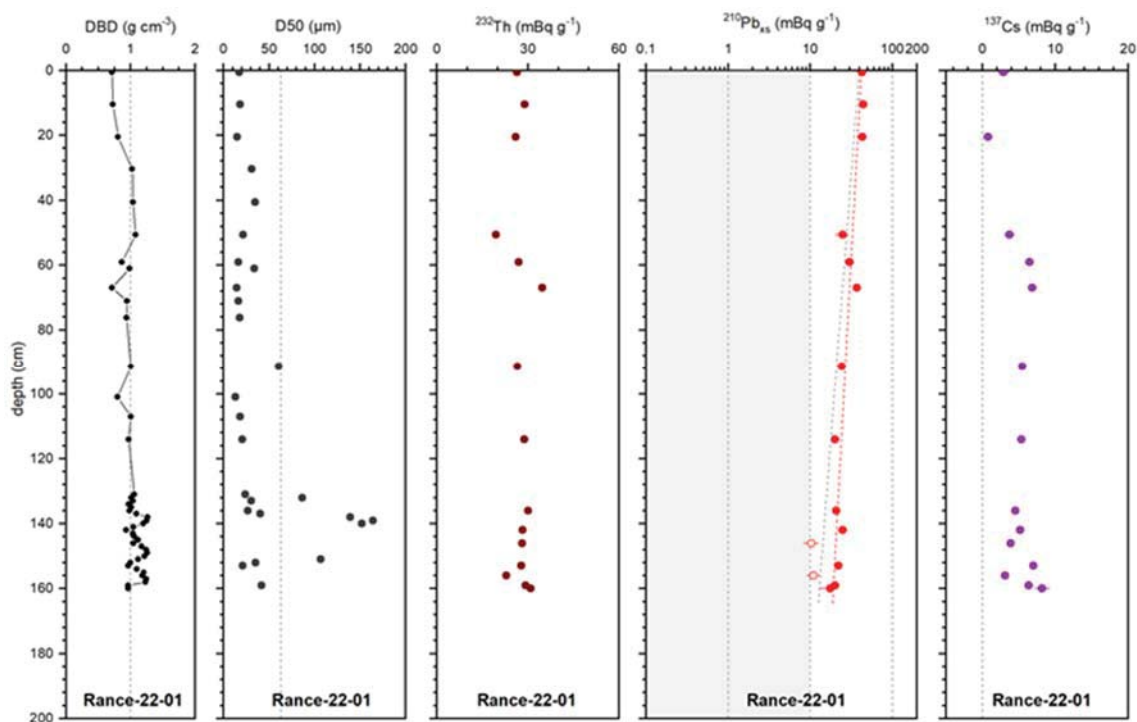


Figure 3. Carotte Rance 22-01: profils avec la profondeur dans le sédiment de la masse volumique sèche (DBD), de la granulométrie médiane (D50) et des activités de  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , et de  $^{137}\text{Cs}$ .

A l'opposé, la carotte Rance-22-01, d'une longueur de 1,6 mètres et prélevée le plus en amont du bassin maritime, est constituée de sédiments plutôt vaseux (Figure 3). Le  $^{210}\text{Pb}$  présente des excès significatifs en surface (40-45  $\text{mBq g}^{-1}$ ) qui diminuent modérément avec la profondeur (18  $\text{mBq g}^{-1}$  à la base de la carotte). Deux niveaux présentent des activités bien plus basses que la tendance générale, sans doute en raison de sédiments plus grossiers (ronds blancs, Figure 3). Le taux de sédimentation estimé est de 4,85  $\text{cm an}^{-1}$ , voire de 6,19  $\text{cm an}^{-1}$  si ces deux points sont exclus du calcul. Ces taux de sédimentation permettent de calculer la date de 1996 ou 1989 pour la base de la carotte. Le  $^{137}\text{Cs}$  présente des niveaux détectables sur l'ensemble de la carotte sédimentaire, avec toutefois des valeurs plus fluctuantes, sans doute en lien avec une fraction de sable variable (dilution) et une augmentation à la base de la carotte. Toutefois, la carotte n'est pas assez longue pour valider les estimations de taux de sédimentation qui conduiraient à une position d'un éventuel pic lié à Tchernobyl (1986) vers 220 ou 170 cm. L'absence de pic de  $^{137}\text{Cs}$  valide par défaut ce fort taux de sédimentation, la carotte étant trop courte pour accéder à un taux de sédimentation "pré-barrage". Les carottes voisines (5, 7, 8) présentent aussi de forts taux de sédimentation (entre 1,1 et 4,67  $\text{cm an}^{-1}$ ).

Le site 24 est représentatif d'un autre type de profil. Il est situé dans une anse à proximité de Châteauneuf. Le sédiment est plutôt vaseux au sommet et évolue à partir de 25-30 cm en vase silto-sableuse, associé à une augmentation de la DBD et du D50. Le profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  présente une rupture de pente dans la diminution des activités avec la profondeur aussi vers 25-30 cm (Figure 4). Un pic de  $^{137}\text{Cs}$  est observé également à 28 cm, ce qui conforte l'hypothèse d'un changement en lien avec la mise en place du barrage. Les taux de sédimentation, calculés en considérant les pentes indiquées dans la Figure 4, sont de  $0,22 \text{ cm an}^{-1}$  dans les couches les plus anciennes, au-delà de 28 cm, et de  $0,52 \text{ cm an}^{-1}$  pour les sédiments plus récents.

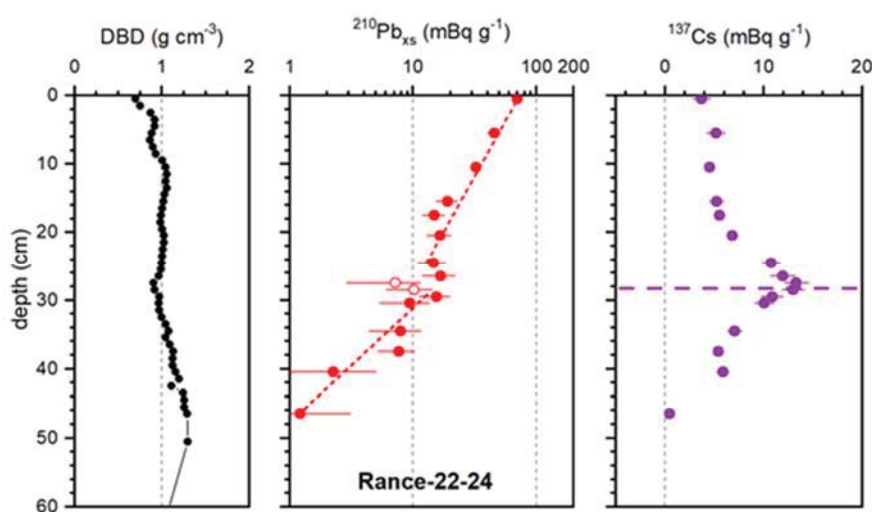


Figure 4. Carotte Rance 22-24: profils avec la profondeur dans le sédiment de la masse volumique sèche (DBD), et des activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , et de  $^{137}\text{Cs}$ . Les lignes rouges en pointillées dans la figure du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  indiquent les régressions utilisées pour déterminer les taux de sédimentation ; la ligne horizontale violette dans la figure du  $^{137}\text{Cs}$  souligne la profondeur correspondant à 1963 (datation basée sur  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) respectivement.

A titre de comparaison, le site 23 est aussi situé dans une anse à proximité de Châteauneuf, légèrement en amont de la carotte Rance 22-24 (Figure 1). Comme pour la carotte 24, le sédiment est plutôt vaseux au sommet, et sur plusieurs dizaines de centimètres en profondeur, puis, vers 90 cm, il évolue en une vase silto-sableuse, associée à une augmentation de la DBD et du D50. Le profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  suit cette même tendance avec une rupture de pente dans la diminution des activités avec la profondeur vers 80 cm. Le profil de  $^{137}\text{Cs}$  présente un pic vers 84-85 cm, qui est attribuable à 1963 d'après la datation basée sur le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . La carotte 22-23 a ainsi enregistré un changement de taux de sédimentation en lien avec la mise en service du barrage. Les taux de sédimentation calculés sont de  $0,48 \text{ cm an}^{-1}$  pour les sédiments déposés avant la construction du barrage, au-delà de 80 cm, et de  $1,48 \text{ cm an}^{-1}$  dans les couches les plus récents.

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

### 4. Conclusions

En mars 2022, une campagne de carottage a permis de prélever 19 carottes sédimentaires, réparties sur l'ensemble du bassin maritime de l'estuaire de la Rance entre l'écluse du Chatelier au sud et le barrage au nord. Une étude radiochronologique a été conduite en vue de déterminer des taux de sédimentation. Plusieurs carottes (11, 19, 30, et 32), prélevées dans des secteurs de l'estuaire aval et central qui présentaient peu de différences entre les bathymétries de 1957 et de 2018, ont confirmé l'absence de sédimentation ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $^{137}\text{Cs}$  négligeables). Aux sites plus proches des rives ou dans des anses et dans l'estuaire amont, il y a indéniablement une augmentation de la sédimentation.

Ces résultats suggèrent qu'il y a eu une augmentation de la sédimentation dans l'estuaire central et amont depuis la mise en service du barrage. Il y a néanmoins une différenciation de la dynamique sédimentaire en fonction de la zone étudiée. Cet effet est très marqué à l'amont du bassin maritime de l'estuaire de la Rance avec des taux pluri centimétriques, qui donnent l'impression que ce secteur « se remplit ».

### 5. Remerciements

La campagne de terrain et les analyses ont été réalisées dans le cadre du plan expérimental de gestion des sédiments de l'estuaire de la Rance. Cette étude portée par l'EPTB Rance Frémur baie de Beausais a été spécifiquement financée par la Région Bretagne, l'Etat, Dinan Agglomération, Saint-Malo Agglomération, la Communauté de communes Côte d'Emeraude et EDF. Baptiste Campion de la société Tanet Services Maritimes est vivement remercié pour sa connaissance de l'estuaire et son efficacité qui ont grandement contribué au succès de la campagne de prélèvement.

### 6. Références bibliographiques

- BONNOT-COURTOIS C., CALINE B., L'HOMER A. and LE VOT M. (2002). *The Bay of Mont-Saint-Michel and the Rance Estuary. Recent Development and Evolution of Depositional Environments*. Editions Technip, Paris.
- DUBOSQ N., SCHMIDT S., WALSH J.P., GRÉMARE A., GILLET H., LEBLEU P., POIRIER D., PERELLO M.-C., LAMARQUE B., DEFLANDRE B. (2021) *A first assessment of organic carbon burial in the West Gironde Mud Patch (Bay of Biscay)*. Continental Shelf Research Vol. 221. 104419. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104419>
- SCHMIDT S., MANEUX E., DABRIN A., OGGIAN G., DERRIENNIC H., BLANC G. (2010). *Impact d'un barrage intra-estuarien sur la dynamique sédimentaire: la retenue de Saint-Savinien*. Revue Paralia, 405-414. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2010.048-S>
- RTIMI R., SOTTOLICHIO A., TASSI P. (2021). *Hydrodynamics of a hyper-tidal estuary influenced by the world's second largest tidal power station (Rance estuary, France)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science Vol. 250, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107143>