

Une application du modèle SUBIEF 2D aux hauteurs de dépôt testée par les mesures d'isotopes radioactifs in situ

Laurent Martin (CIG, Fontainebleau)
Stéphane Sogon (LSCE, Gif sur Yvette)

Les matières en suspension (MES) transitant dans la Seine en aval de Paris sont marquées par des isotopes radioactifs qui ont permis d'estimer leur temps de transit sur le tronçon Andrésey - Poses. Ce marquage, qui varie avec le temps, peut être aussi utilisé pour évaluer localement les vitesses de sédimentation, rechercher les sites d'accumulation très récentes (quelques jours), récentes (un mois), anciennes (décennies) et/ou les ruptures dans la sédimentation (remise en suspension, érosion).

Nous avons étudié la sédimentation des MES en transit dans le tronçon de Seine allant des rejets de la station d'épuration d'Achères jusqu'à l'extrémité aval de l'île d'Herblay. Un premier échantillonnage avait été effectué (Cf. Rapport PIREN 1999), en septembre 1998, dans ce tronçon, afin d'estimer les vitesses de sédimentation à l'aide d'isotopes radioactifs (Be-7, Pb-210_{xs}, Cs-137).

Cette présente étude est couplée avec le modèle SUBIEF 2D développé au C.I.G. (Ecole des Mines, Fontainebleau) pour modéliser l'impact de la navigation sur le transit des MES. De plus, une campagne de mesure (22 juillet 1999, Mouchel & Martin) a permis d'effectuer le calage d'un état du tronçon qui a débouché sur une estimation des hauteurs de dépôts à l'étiage (après 3 jours de simulation). Cette campagne permet donc d'appréhender les hétérogénéités transversales des dépôts sédimentaires et d'évaluer l'influence de la navigation sur le bief considéré.

L'échantillonnage a été effectué pendant l'étiage d'été (05 juillet 2000), le débit de la Seine était de 150 m³/s à Austerlitz. La dernière crue importante de la Seine a eu lieu le 28 avril (550 m³/s à Austerlitz) et marque le début de la période de sédimentation dans l'axe fluvial.

1. Echantillonnage

Au total, 13 carottes de sédiment, d'une longueur allant de 8 à 55 cm, ont été prélevées à l'aide d'un carottier à piston du C.I.G. (Michel Poulin) de 5 cm de diamètre à partir d'un bac du SIAAP. Le positionnement a été fait à l'aide d'un GPS Garmin (Figure 1).

Immédiatement après leur prélèvement, les carottes sont sectionnées en tronçon de 5 cm, dans la plupart des cas, par extraction à l'aide d'un piston, ce qui permet de ne rien perdre de la couche de sédiment la plus superficielle. Le prélèvement de l'intégralité du sédiment contenu dans chaque tronçon permet d'obtenir le bilan surfacique (Bq/m²) sur l'ensemble de la carotte de chacun des marqueurs étudiés.

Chaque incrément a été emballé dans un sachet plastique. Une fois séché, pesé, broyé et mis en boîte standardisée, l'échantillon est mesuré par spectrométrie gamma au L.S.C.E. (Gif-sur-Yvette). Les comptages de l'horizon superficiel des carottes ont été effectués dans la quinzaine qui a suivi les prélèvements afin de mesurer l'I-131 (période radioactive : 8 jours).

On retrouve les marqueurs radioactifs observés dans les MES prélevés par les trappes à sédiment (Bonté et al., ce volume). Le Cs-137, produit entre 1954 et 1963, provient des particules de sol érodées sur le bassin versant (période radioactive : 30 ans). Le Be-7 provient des retombées atmosphériques en relation avec les pluies. C'est aussi le cas pour l'essentiel du Pb-210_{xs}. Leurs périodes radioactives sont cependant très différentes (53 jours et 22 ans respectivement). L'I-131 est utilisé par les services hospitaliers pour traiter certaines affections de la thyroïde et arrive dans la rivière par les égouts. La période radioactive de l'élément et son mode d'entrée dans l'environnement

nous fournissent des informations sur l'âge du sédiment et donc sur sa dynamique (érosion, accumulation, remise en suspension).

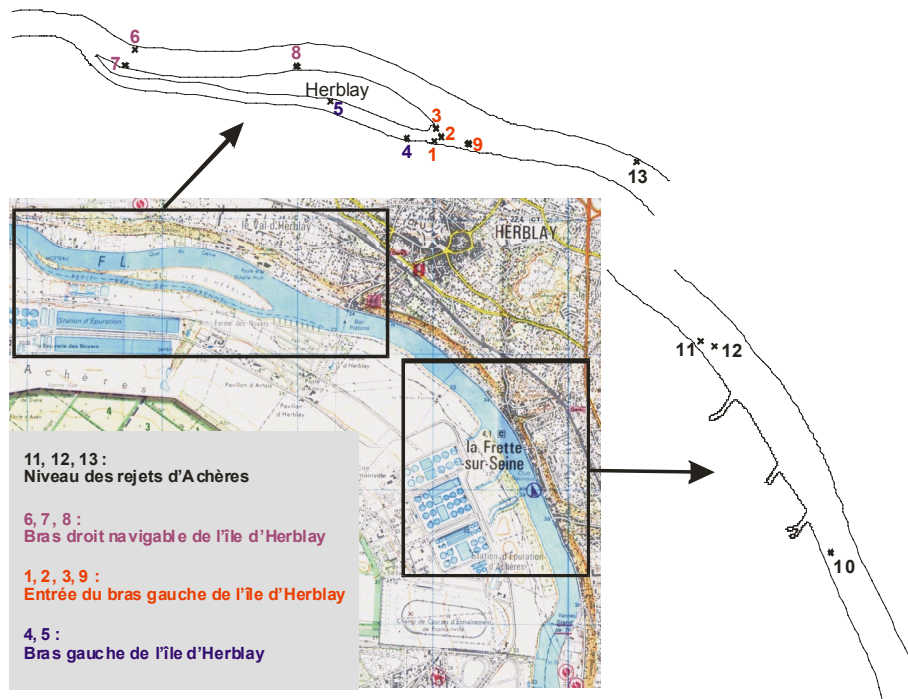


Figure 1. Localisation et échantillonnage (05/07/2000) du bief Achères-Andrésy

Les carottes peuvent être réunies suivant 4 zones (Figure 1) afin de faciliter les interprétations transversales en plusieurs points du tronçon :

- Au niveau des rejets de la station d'Achères (n° 11, 12, 13) ou juste à l'amont (n° 10)
- Dans le bras droit navigable de l'île d'Herblay (n° 6, 7, 8)
- A l'entrée du bras gauche de l'île d'Herblay (n° 1, 2, 3, 9)
- Dans le bras gauche de l'île d'Herblay (n° 4, 5)

2. L'entrée du système (amont)

Les particules fraîchement sédimentées au point de la carotte n°10 sont représentatives de celles entrant dans le bief. Nous avons donc des informations sur les teneurs isotopiques présentes à l'amont du système étudié.

Le Be-7 est présent en grande quantité mais le fait le plus important est la présence d'I-131 qui va à l'encontre de l'idée d'une source unique d'I-131, à savoir les rejets d'Achères. Cela a compliqué fortement nos interprétations.

La carotte n°10 en rive gauche, près du bord, est faiblement influencée par la navigation. Le modèle de transport sédimentaire calé à partir des mesures de MES du 22 juillet 1999 montre une sédimentation quasi linéaire avec une épaisseur de 2 mm en trois jours (Figure 2). Cette vitesse de sédimentation est en accord avec l'échantillonnage qui nous indique une épaisseur déposée récente (depuis la dernière crue d'avril) d'au maximum 5 cm correspondant au premier incrément riche en Be-7 et I-131 de courtes périodes radioactives. En effet, en dessous de ce niveau, les activités sont nulles même pour les isotopes de plus longues périodes radioactives comme le Cs-137 et le Pb-210_{xs}. Or, si

l'on considère une période d'étiage de deux mois (dernière crue du 28 avril) pendant laquelle les particules fines sédimentent régulièrement, on obtient à partir des résultats du modèle une épaisseur déposée de 4 cm en 2 mois.

Tableau 1. *Activités surfaciques en Pb-210xs, Cs-137, Be-7, I-131 (Bq/m²) dans les carottes de sédiment du bief Achères-Andrézy*

Zones	Carottes	Epaisseur	Pb-210xs	Cs-137	Be-7	I-131
Entrée du bras gauche						
	1	29	1238	808	287	27
	2	8	388	199	350	39
	3	47	0	124	282	0
	9	26	785	236	582	43
Bras gauche						
	4	28	769	667	414	0
	5	55	4920	9729	577	0
Bras droit						
	6	9	221	20	218	73
	7	25	253	35	534	116
	8	14	0	19	274	16
Rejets d'Achères						
	10	22	944	77	2854	66
	11	34	2996	486	1206	144
	12	35	174	14	0	0
	13	28	483	85	113	0

Tableau 2. *Activités spécifiques en Pb-210xs, Cs-137, Be-7, I-131 (Bq/kg) et teneurs en Potassium (% calculé à partir du K-40), Uranium et Thorium (ppm) dans les carottes de sédiment du bief Achères-Andrézy*

Zones	Carottes	Niveau	Pb-210xs	Cs-137	Be-7	I-131	K	U	Th
Entrée du bras gauche									
	1	0-4	15	1,4	12	1,2	0,53	0,9	2,3
	2	0-3	16	1,1	15	1,7	0,76	1,1	2,8
	3	0-5	0	2,4	6	0,0	0,63	0,8	1,6
	9	0-5	9	1,1	15	1,1	0,59	0,8	1,9
Bras gauche									
	4	0-8	24	2,7	13	0,0	0,59	1,2	3,2
	5	0-5	29	18,9	27	0,0	0,84	2,9	6,4
Bras droit									
	6	0-5	7	0,6	7	2,3	0,58	1,5	4,9
	7	0-5	5	0,7	11	2,3	0,62	0,9	1,8
	8	0-5	0	0,3	4	0,3	1,36	0,8	1,9
Rejets d'Achères									
	10	0-5	63	5,2	176	4,4	0,68	1,4	4,1
	11	0-10	31	3,6	25	4,5	0,71	1,2	4,2
	12	0-5	0	0,3	0	0,0	0,66	0,8	2,0
	13	0-6	20	1,0	5	0,0	0,26	0,7	2,3

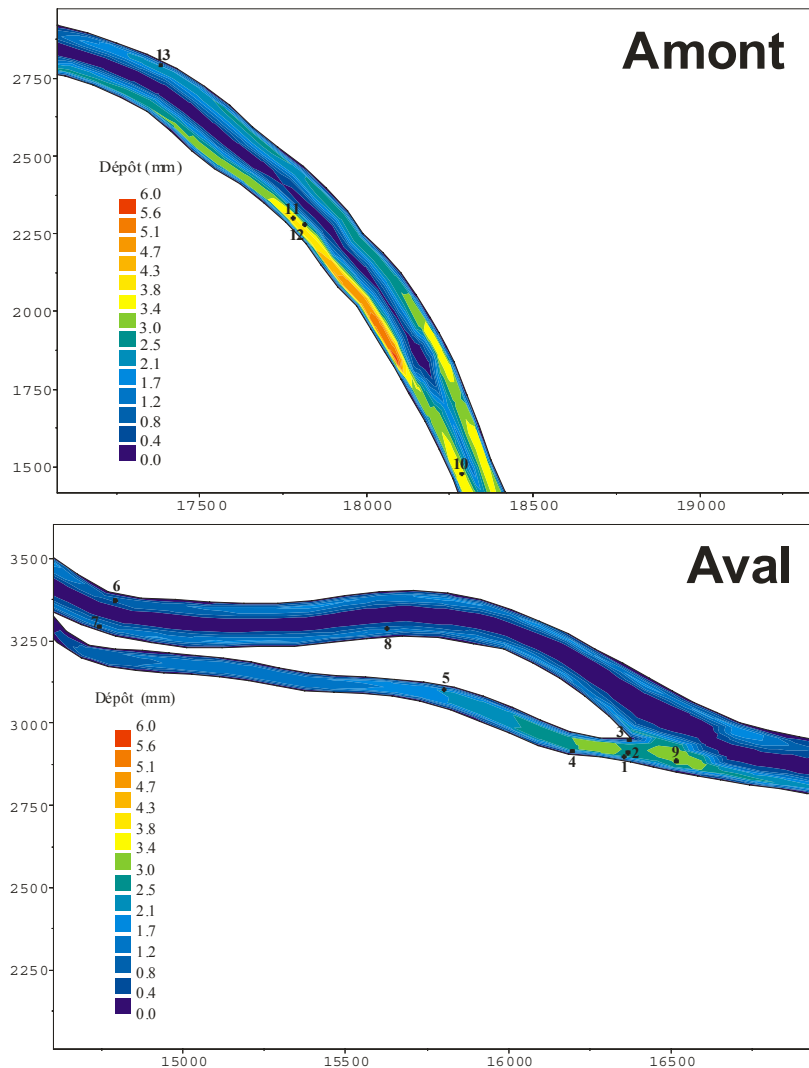


Figure 2. Simulation des hauteurs de dépôt (mm) par le modèle SUBIEF 2D dans le bief Achères-Andrésey

Les mesures de Potassium (en % vu par le K-40), d'Uranium et de Thorium (en ppm) (respectivement 0,7 % ; 1,4 et 4,1 ppm) confirment la présence d'une fine couche de sédiment (récente au vu des activités en I-131 et Be-7) posé sur un sédiment ancien (absence de Cs-137), homogène sur toute la profondeur et de composition sensiblement différente (respectivement 0,2 % ; 0,4 et 1,3 ppm).

3. L'aval immédiat des rejets de la station d'Achères

En aval immédiat des rejets, nous avons prélevé 3 carottes de sédiment réparties sur un profil transversal (n° 11 en rive gauche, 12 plus proche du chenal de navigation et 13 un peu plus à l'aval en rive droite).

La position des carottes n°10 et n°11 est sensiblement la même vis à vis du chenal de navigation et la hauteur d'eau à ces deux endroits est identique. En revanche, la hauteur de dépôt simulée pour la carotte n°10 est moins importante que celle de la carotte n°11 en raison de la localisation de cette dernière dans le panache des effluents d'Achères (Figure 2) à l'origine d'un flux de dépôt plus intense (concentration en MES plus grande grâce aux rejets : 30 contre 10 mg.l⁻¹).

L'horizon superficiel de la carotte n°11 (exceptionnellement de 10 cm) présente des teneurs élevées en Be-7 et en I-131 (respectivement 25 et 4,5 Bq/kg), indiquant un dépôt frais de particules de

la colonne d'eau provenant des effluents rejetés en Seine. Néanmoins, les niveaux de Be-7 et d'I-131 mesurés dans l'horizon superficiel de la carotte n°11 (outre les problèmes d'incrément) sont très différents de celles mesurées dans la carotte n°10. Converti en activité par unité de surface (bilan), le Be-7 présente une activité 2,4 fois moins importante en aval des rejets qu'en amont (1206 contre 2854 Bq/m²) alors que l'I-131 a une activité 2,2 fois supérieure (144 contre 66 Bq/m²). Ces changements interviennent sur une courte distance (1 km). Le doublement de l'activité d'I-131 s'explique par la forte activité en iode dissous des rejets de la station d'épuration d'Achères (mesures OPRI : 1Bq/l dans les eaux traitées d'Achères contre 0,2 Bq/l à l'amont). La différence entre cette forte activité d'I-131 dissous dans les rejets et dans le sédiment déposé au fond de la Seine à l'aval des rejets (4,4 Bq/kg) s'explique par le très faible Kd de l'iode (estimé à 700 l/kg pour cette période, Cf Bonté et al. (ce volume) qui se fixe difficilement sur les particules. Enfin, l'apport par les rejets d'une importante masse de particules semble régulière dans le temps, comme l'indique la présence de Cs-137 sur les 34 cm du profil et la décroissance du Be-7 sur les 20 premiers centimètres.

La carotte n°12, localisée au voisinage du centre du chenal de navigation, présente une épaisseur de 35 cm. Pourtant, que ce soit dans les 5 premiers centimètres ou, a fortiori dans le reste de la carotte il n'y a d'activités significatives ni en I-131, ni en Be-7. L'action érosive de la navigation semble donc avoir une influence primordiale dans le transit des particules, ce qui est validé par la modélisation des dépôts par SUBIEF 2D (Figure 2). Les MES fraîchement déposées sont constamment remises en suspension au gré de la circulation fluviale. L'absence de Cs-137 et Pb-210_{xs} le long du profil sédimentaire permet d'avancer que l'âge du sédiment prélevé est très ancien (supérieur à 50 ans) (Figure 3). Ce sédiment aurait donc résisté depuis des années à l'érosion fluviale d'une part par les crues et d'autre part par la navigation en période d'étiage. Cette conclusion confirme les résultats de l'étude réalisée à l'échosondeur latéral (CETE de Blois) qui montre à cet endroit des zones d'atterrissements de sédiments fins fréquemment draguées.

La carotte n°13, d'une épaisseur de 28 cm, est située en rive droite à 1 km en aval des rejets d'Achères. Les simulations de la dispersion du panache réalisées par SUBIEF 2D et la campagne de mesure sur la conductivité effectuée le 22 juillet 1999 (Martin et al., ce volume) ont montré que cette zone n'est pas soumise à l'influence du panache en étiage. L'horizon superficiel de la carotte (6 premiers centimètres) contient de très faibles activités en Cs-137 et Be-7 (respectivement 1 et 5 Bq/kg). Si à cela, on ajoute l'absence d'I-131, il semblerait que localement (site de la carotte) la navigation remette en suspension le matériel sédimentaire récemment déposé, même si, globalement (à l'échelle de la maille du modèle : 100 m de long sur 20 m de large), les simulations réalisées proposent une langue de quelques centaines de mètres de légère sédimentation nette (1 mm en 3 jours d'étiage soit 2 cm depuis la dernière crue d'avril).

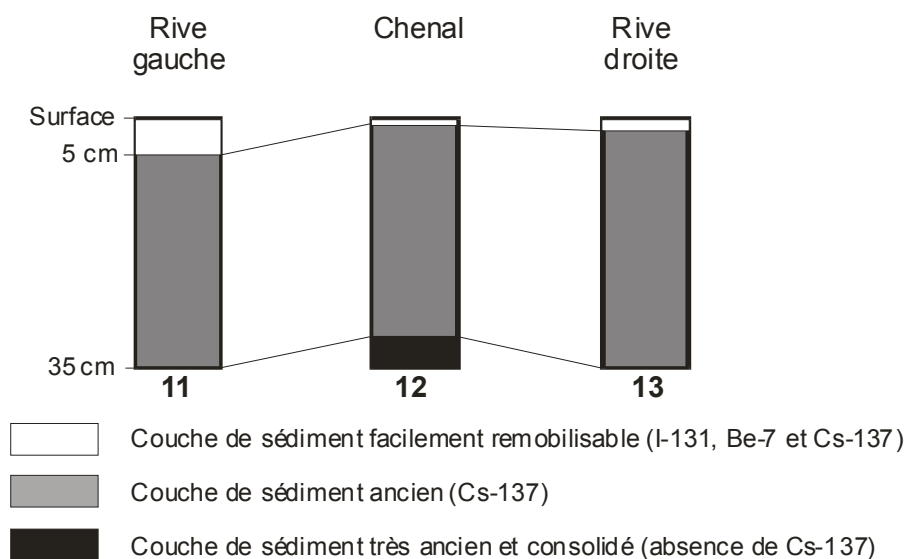


Figure 3. *Schéma de l'interprétation des activités radioactives de sédiment de fond dans le secteur des rejets de la station d'Achères*

Les informations tirées de l'analyse des activités isotopiques dans les sédiments fraîchement déposés par la Seine au niveau des rejets de la station d'épuration d'Achères montrent que les processus de sédimentation sont complexes avec notamment une double hétérogénéité transversale :

- d'une part de la composition physico-chimique des particules transportées (apport des rejets d'Achères en rive gauche). Cette variabilité induit un comportement sédimentaire certainement différent entre les particules provenant de la station d'épuration et celles du chenal en provenance de l'amont ;
- d'autre part de la remise en suspension par la navigation qui apparaît totale dans le chenal de navigation (pour les particules non tassées) alors que ses effets sont atténués aux abords des rives (carotte n°11, 10 et 13 qui possèdent de l'I-131 et du Be-7).

4. L'aval du bras droit de l'île d'Herblay

Trois carottes (n°8, 7 et 6) ont été échantillonnées dans le bras droit navigable de l'île d'Herblay en aval de la station d'épuration d'Achères.

La carotte n°8 (14 cm de long) se localise en rive gauche au niveau du milieu de l'île et en amont d'une fine langue de dépôt modélisé. Les profils d'isotopes radioactifs montrent une très faible activité en Cs-137, Be-7 et I-131 (respectivement 0,3, 4 et 0,3 Bq/kg) dans le premier incrément (0-5 cm). Ce résultat confirme celui de la simulation des épaisseurs de sédimentation à l'étiage qui indique une grande influence de la navigation empêchant un dépôt de sédiment consistant. Le comportement sédimentaire de ce secteur est donc à rapprocher avec celui amont représenté par la carotte n°12 (chenal). Les niveaux inférieurs du profil de la carotte (5-14 cm) sont dépourvus d'isotopes radioactifs ce qui signifie un âge ancien (> 50 ans).

Deux carottes, la n°6 en rive droite et la n°7 en rive gauche, se localisent à l'extrême aval du bras droit de l'île d'Herblay. Dans ce secteur, la simulation des épaisseurs de sédiment indique une très forte influence de la navigation empêchant un important dépôt de particules. Ceci est confirmé surtout en rive droite par la faible épaisseur de sédiment prélevée au niveau de la carotte n°6 (9 cm contre 25 cm pour la carotte n°7).

Les deux carottes présentent les mêmes caractéristiques isotopiques avec une activité significative de Be-7 et d'I-131 dans le premier incrément (7 et 11 Bq/kg respectivement pour les carottes 6 et 7 et 2,3 Bq/kg pour l'I-131) couplée à une très faible activité de Cs-137 (< 1 Bq/kg). On est donc en présence d'une fine couche de sédiment fraîchement déposée en provenance de la colonne d'eau et facilement remobilisable lors d'une montée d'eau ou du passage d'une péniche à forte propulsion. Dans la partie inférieure du profil des deux carottes, il n'y a plus de traces d'isotopes radioactifs aussi bien de courtes (Be-7) que de longues périodes (Cs-137 et Pb-210_{xs}) ce qui témoigne d'un âge ancien de ce sédiment (Cf. carottes n°8 et 12).

Par contre, en terme d'activité surfacique (Bq/m²), le bilan en I-131, comme ceux en Be-7 et Cs-137, est supérieur d'un facteur 1,5 entre la carotte n°7 et la 6 certainement en relation avec le déplacement du chenal de navigation vers la rive droite à cet endroit (Carte guide de la navigation fluviale).

Dans ce secteur, la navigation joue encore un rôle primordial dans le transit des particules qui sédimentent faiblement et temporairement. Pendant cette période d'étiage, la diminution de l'activité d'I-131 (période radioactive : 8 jours) entre l'aval immédiat des rejets (4,3 Bq/kg) et l'aval de l'île d'Herblay (2,3 Bq/kg) témoigne d'une part du transfert non linéaire des particules dans le lit mineur (les processus de dépôt-remise en suspension contribuent au vieillissement des particules et donc à la

décroissance radioactive) et d'autre part du mélange de ces particules arrivées dans le secteur récemment (fortement marquées par l'I-131) avec celles déjà présentes dans le lit mineur c'est à dire sédimentées et remises en suspension plusieurs fois (dépourvues d'I-131).

5. L'entrée du bras gauche de l'île d'Herblay

Ce secteur, où quatre carottes ont été prélevées (n° 1, 2, 3 et 9), se localise à 2 km en aval des rejets de la station d'Achères, en rive gauche à l'entrée du bras gauche de l'île d'Herblay. La simulation des épaisseurs de sédimentation montre que ce secteur subit peu l'influence de la navigation dans le chenal principal avec un dépôt plus ou moins continu de particules en transit sur la durée de la simulation (3 jours).

La carotte n°9 (26 cm d'épaisseur), 300 mètres en amont de l'entrée du bras en rive gauche, ainsi que la carotte n°2 (8 cm d'épaisseur), juste à l'entrée du bras, contiennent des activités d'I-131 et de Be-7 proches en surface. On retrouve là les caractéristiques de particules très jeunes et facilement remobilisables déposées sur un sédiment plus ancien et stabilisé (absence d'I-131 et de Be-7 couplée à la présence de Cs-137 et de Pb-210_{xs}).

Les processus de dépôt/remise en suspension en période d'étiage semblent être bien cernés dans ce secteur. Une sédimentation nette est favorisée par des vitesses d'écoulement très faibles (0,08 à 0,1 m/s contre 0,2 m/s dans le chenal principal) et par l'action atténuée de la navigation (chenal en rive droite et élargissement de la section transversale).

Par contre, les résultats tirés de la carotte n°3, située à la pointe de l'île d'Herblay, indiquent que ce site subit des conditions hydrodynamiques particulières. En effet, la carotte présente une épaisseur très importante (47 cm) alors que son horizon de surface ne possède pas d'I-131 et très peu de Be-7 (6 Bq/kg). En revanche, en profondeur, au vu des profils isotopiques, on retrouve le schéma de sédimentation des carottes n°1, 2 et 9. Les sédiments n'ont donc pas été déposés dans les jours précédents l'échantillonnage (absence d'I-131). Il n'y a eu aucun dépôt dans ce secteur depuis au moins un mois (décroissance totale de l'I-131 accompagnant le dépôt de Be-7). Etant à une quinzaine de mètres de la pointe de l'île, en période de hautes eaux, le secteur se trouve dans un champ de vitesse normal, ce qui lui permet de recevoir un flux sédimentaire identique aux points voisins (apport d'I-131 et de Be-7). En revanche à l'étiage, cette zone est soumise à un courant quasi nul et la charge particulaire provenant de l'amont a sédimenté avant d'atteindre ce point (décroissance d'I-131 et de Be-7 sans nouveaux apports).

6. Le bras gauche de l'île d'Herblay

Deux carottes ont été prélevées dans le bras gauche de l'île d'Herblay. La carotte n°4 (28 cm de long) se localise à l'entrée du bras en rive gauche alors que la carotte n°5 (55 cm de long) se localise au milieu de l'île en rive droite.

Ce bras n'est pas navigable, seules quelques canots à moteur fréquentent ce chenal. Ainsi, la simulation des épaisseurs de sédimentation à l'étiage montre que ce bras est le siège d'une accumulation de particules (entre 2 et 3 mm en 3 jours de simulation). Il n'est donc pas étonnant d'avoir échantillonné des carottes d'une longueur importante. Par contre, l'absence d'I-131 dans le premier incrément des carottes indique qu'il n'y a pas d'accumulation de particules pendant l'étiage (depuis la dernière crue) (Cf. carotte n°3). L'ensemble des M.E.S. entrant dans le bras semble sédimenter quelques dizaines de mètres après. Ce résultat est en accord avec la modélisation du transport des MES qui montre une concentration particulaire très faible (entre 5 et 8 mg.l⁻¹) dans le bras gauche.

La carotte n°5 est particulièrement intéressante en raison de sa longueur et de la présence de Cs-137 sur l'ensemble du profil. Les activités de Cs-137 sont élevées (autour de 20 Bq/kg) dans les

niveaux supérieurs (jusqu'à 25cm) mais le pic d'activité se situe à 35 cm de profondeur (170 Bq/kg). Cela indique que l'on a un dépôt de sédiment récent continu qui n'a pas subi de remise en suspension importante même en période de crue. Le pic d'activité de Cs-137 localisé à 35 cm de profondeur peut être interprété soit comme étant des MES d'un épisode de crue (sélectivité granulométrique particulièrement forte), soit comme le pic de retombées du Cs-137 (1963-64). Le profil de Pb-210_{xs} nous oriente plutôt vers la première hypothèse.

Le bras gauche de l'île d'Herblay est donc un secteur d'accumulation important du bief étudié surtout en période de décrues. A l'étiage, la faiblesse du courant ne permet pas l'arrivée d'une charge sédimentaire conséquente

7. Conclusion

L'étude des carottes de sédiments prélevées dans le chenal entre la station d'épuration d'Achères et l'aval de l'île d'Herblay couplée à la simulation des épaisseurs de sédimentation permet, dans un premier temps, d'avancer une typologie de la dynamique sédimentaire durant l'étiage :

- Le chenal de navigation (carottes n°12, 6 et 8) caractérisé par une absence de sédimentation en relation avec le trafic fluvial. Le fond est soit constitué d'un sédiment ancien consolidé, soit d'enrochements ou de sédiments grossiers ;
- Les bordures du chenal (carottes n°13, 11, 10 et 7) caractérisées par le dépôt d'une fine couche de particules provenant de la colonne d'eau qui demeure en transit de manière non linéaire en fonction du passage des péniches ;
- L'entrée du bras de l'île (carottes n°9, 1 et 2) caractérisée par la sédimentation continue d'une couche fine de particules (identique à celles des bords) mais qui n'est pas en transit ;
- Le bras de l'île d'Herblay (carottes n°4 et 5) caractérisé par une importante sédimentation importante en période de décrue et plus modéré en étiage.

L'ensemble de cette couche fine déposée à la surface du fond (en transit ou non à l'étiage) est remis en suspension rapidement en période de crue laissant affleurer un sédiment plus ancien mais compact et résistant à des forces érosives plus importantes.

Dans le courant de l'année 2001, nous allons intégrer dans le modèle SUBIEF 2D un module de transport des isotopes radioactifs de courtes périodes (I-131 et Be-7) permettant d'étudier le comportement du modèle vis à vis du transfert isotopique entre Achères et Andrésy. La robustesse du calage des paramètres d'érosion, effectués à partir des mesures de MES de juillet 1999 (Cf Martin et al., ce volume), sera alors testé par la confrontation entre les résultats des simulations des traceurs radioactifs (module de SUBIEF 2D) avec les résultats issus des carottes de sédiment présentés dans ce rapport.