

# **Temps de transit des particules dans le réseau hydrographique: l'apport des traceurs isotopiques "naturels"**

**Philippe Bonté** (LSCE, Gif sur Yvette)

**Alain Thomas** (UMR Sisyphe, Jussieu)

**Jean-Marie Mouchel** (CEREVE, Champs sur Marne)

**Marie-Françoise Le Cloarec** (LSCE, Gif sur Yvette)

**Stéphane Sogon** (LSCE, Gif sur Yvette)

**Laure Tessier** (LSCE, Gif sur Yvette)

Le temps de transit des particules en suspension dans les rivières est plus long que celui de l'eau, tout au moins en période d'étiage. Plusieurs approches l'ont montré, aussi bien par la comparaison des bilans de matériel particulaire amont-aval que par l'interprétation de l'évolution des teneurs en micropolluants chimiques dans les MES (rapport PIREN 1998). Les particules n'ont donc pas un trajet direct, leur transit résulte d'une alternance de sédimentations et de remises en suspension (phénomène amplifié par les turbulences provoquées par la navigation). En fin de crue et en période d'étiage, la sédimentation l'emporte sur les remises en suspension, constituant sur le fond du lit un stock de particules facilement remobilisables qui pourra être repris lors des fortes crues. Tant que ce stock persiste, les particules en suspension tout au long du cours d'eau seront donc un mélange de particules d'âges différents (résultat d'un échange entre particules du stock facilement mobilisable et particules en transit). Les particules prélevées à l'aval d'un tronçon de rivière sans apports collatéraux importants auront ainsi un âge moyen supérieur à celui des particules entrant à l'amont.

Certains isotopes radioactifs environnementaux sont susceptibles de permettre une évaluation directe de ces âges moyens des MES. C'est en particulier le cas du  $^7\text{Be}$ , radio-isotope de 53.3 jours de période, produit dans la haute atmosphère par l'interaction des rayonnements cosmiques avec l'atmosphère, qui, apporté à la surface du sol et des rivières principalement par les précipitations, se fixe rapidement sur les particules les plus fines.

Dans le précédent rapport, nous avons donc analysé l'intérêt potentiel de l'analyse de la radioactivité des MES en Seine. Nous avons, cette année, réalisé une campagne sur un long tronçon à l'aval de Paris, qui se poursuivra jusqu'à l'été prochain et dont nous présentons les résultats ci-dessous.

## **1. Secteur et méthode d'étude**

Le secteur Andrésy-Poses présente de nombreux avantages pour une étude de bilan entrées-sorties de MES basée sur des marqueurs d'origine atmosphérique comme le  $^7\text{Be}$ , avantages déjà exposés dans le rapport précédent dans la section "Transfert des MES à l'aval de Paris" (rapport PIREN 1998) : long tronçon de la Seine à l'aval de l'agglomération parisienne et de sa plus importante station d'épuration (Seine-Aval), sans affluent de grande importance, bien documenté, doté d'une assistance logistique au niveau des barrages.

Un suivi de la radioactivité des MES aux deux extrémités du tronçon a été réalisé depuis le début de la période d'étiage (juillet 1999) et se poursuivra jusqu'à l'été prochain.

### **1.1. Echantillonnage**

La méthode de prélèvement choisie est l'utilisation de pièges à sédiments, placés immédiatement à l'amont des barrages. Les pièges permettent d'intégrer une fraction des MES en transit sur toute la durée de temps écoulé entre deux relèves.

Les pièges sont constitués d'un cylindre en PVC de 20 cm de diamètre et 65 cm de longueur suspendu à 70 cm de la surface de l'eau à un flotteur et maintenu vertical par un contrepoids (figure 1). Les 45 cm supérieurs du piège sont garnis d'une structure en nid d'abeilles en matière synthétique de manière à éviter le relargage de particules. Un évent (10 mm de diamètre) à 15 cm du fond du piège permet une circulation verticale de l'eau et la vidange de l'eau lors de la relève. Aucune pièce métallique n'entre dans la construction de ces pièges, de manière à éviter tout risque de contamination pour les analyses en éléments traces qui sont également pratiquées sur les échantillons recueillis.



**Figure 1 :** Piège à sédiment et récupération d'un échantillon

L'échantillonnage amont est partagé sur deux sites, correspondant aux deux bras de la Seine situés immédiatement (3 km) à l'aval de la confluence Seine-Oise, séparés par l'île de Denouval. Le piège de Denouval est placé le long de la rive droite du bras, à une dizaine de mètres du barrage. Malgré la perte de deux pièges, ce site a été maintenu (figure 2). Le piège d'Andrésy est placé dans la passe n°1, à une cinquantaine de mètres à l'amont du barrage. Aucune perte n'est à déplorer pour ce site. Pour l'échantillonnage aval, le site initialement choisi au niveau du barrage de Poses sur la pointe amont de l'île centrale a été abandonné après la troisième relève, le piège ayant été emporté par un arbre dérivant. Le site de prélèvement a alors été déplacé vers le bord de la passe à poissons, moins exposé.



**Figure 2 :** Piège à sédiment en place au barrage de Denouval

Les pièges ont été mis en place le 13 juillet 1999 et relevés tous les 6 à 8 jours jusqu'à la mi-septembre (prélèvements 1 à 8), ce qui correspond à la période de plein étiage (débit à Austerlitz compris entre 100 et 150 m<sup>3</sup>/s). Avec l'entrée en automne, les relèves se sont espacées (une quinzaine

de jours) alors que les débits moyens augmentaient (généralement supérieurs à 200 m<sup>3</sup>/s). Les prélèvements numéro 4 et 9 correspondent à de nouveaux événements pluvieux succédant à des périodes sèches (tableau 1). Les prélèvements n°3 et 4 à Poses, 1, 13 et 15 à Denouval n'ont pu être analysés (perte des pièges, perte de l'échantillon 13 de Denouval).

n°	début	fin	durée	pluvio. cumulée	pluvio. sur 30 jrs.	débit moyen
			jrs	mm	mm	m3/s
1	13-juil	19-juil	6	0.2	52.0	148
2	19-juil	26-juil	7	0.8	52.8	137
3	26-juil	4-août	9	3.4	17.6	121
4	4-août	11-août	7	50.8	55.2	128
5	11-août	19-août	8	9.4	64.4	132
6	19-août	27-août	8	1.4	65.0	125
7	27-août	2-sept	6	0.0	61.6	118
8	2-sept	10-sept	8	0.4	11.2	110
9	10-sept	21-sept	11	54.4	56.2	134
10	21-sept	8-oct	17	27.2	92.2	227
11	8-oct	27-oct	19	1.4	67.4	250
12	27-oct	10-nov	14	45.8	45.8	228
13	10-nov	29-nov	19	9.2	27.4	167
14	29-nov	14-déc	15	47.0	55.6	248
15	14-déc	12-janv	29	104.8	113.0	1027

**Tableau 1 :** calendrier des prélèvements, pluviométrie et débits moyens

## 1.2. Protocole analytique

Le plus grand soin a été pris afin d'éviter toute contamination métallique et la perte des caractéristiques granulométriques. Le contenu des pièges est transvasé dans des récipients en polyéthylène, ramenés au laboratoire et immédiatement tamisés sur un tamis en nylon de 250 microns. Ils sont ensuite décantés 24 heures, centrifugés puis congelés pour être enfin lyophilisés (plusieurs centaines de grammes de matière sèche sont ainsi récupérés pour chaque prélèvement). Nous avons vérifié plusieurs fois que la fraction supérieure à 250 micron ne contenait pas de marqueurs radioactifs intéressants.

Pour le comptage par spectrométrie gamma, nous utilisons une aliquote de 60 à 80 grammes hermétiquement enfermée dans une boîte cylindrique en plexiglas (70 mm de diamètre, 15 de hauteur, conditions standards de comptage). Les détecteurs utilisés sont des germanium hyper pur de type N, à bas bruit de fond. Les comptages durent de 24 à 48 heures. Un spectre de 8000 canaux est obtenu pour chaque échantillon. Dans la mesure du possible, les comptages sont réalisés dans les 10 jours qui suivent le prélèvement. La calibration des rendements des détecteurs est réalisée à partir de sédiments de référence (standard interne à 8510 Bq/kg en <sup>238</sup>U et 1833 Bq/kg en <sup>232</sup>Th pour les isotopes des familles U et Th, standards de l'AIEA: 135, 375 et SOIL6 pour le <sup>137</sup>Cs, chlorure de potassium Merck pour le potassium). Les rendements pour les autres radioéléments sont extrapolés à partir des autres énergies. Les activités sont recalculées en tenant compte de la décroissance depuis la date du prélèvement et de la durée du prélèvement, en supposant que l'activité des MES arrivant dans le piège n'a pas varié tout au long de la durée du prélèvement.

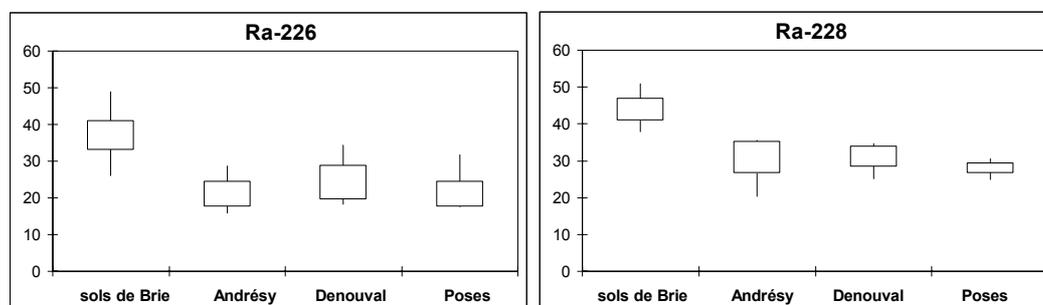
Pour les analyses par spectrométrie alpha (<sup>210</sup>Po), un demi gramme de sédiment environ est dissous par un mélange d'acides concentrés nitrique, fluorhydrique et perchlorique enfermé dans une bombe en téflon maintenue à 200 °C, l'attaque dure au moins une semaine. La silice est ensuite évaporée sous forme de H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> à 105 °C. En milieu HCl 0.5 N, les isotopes de polonium se déposent spontanément sur une plaque d'argent. Le rendement chimique et de comptage est déterminé par une

aliquote connue de  $^{208}\text{Po}$ . Les comptages sont effectués sur des chaînes à semi-conducteur (silicium à barrière de surface), ils durent en moyenne 10 jours.

## 2. Résultats

### 2.1. Caractéristiques générales de la radioactivité des MES analysées

L'ensemble des résultats est donné dans le tableau 1 en annexe. Tous les échantillons analysés montrent une radioactivité naturelle intrinsèque homogène entre les échantillons et les sites de prélèvement mais plus faible que celle des particules des sols amont (moyennes de 37 Bq/kg en  $^{226}\text{Ra}$  et de 44 Bq/kg en  $^{228}\text{Ra}$  dans les sols de Brie contre 22 et 30 respectivement dans les pièges, et de 1.35 % de K contre 1.0 %, figure 3). Plusieurs comptages réalisés plus de 100 jours après le conditionnement des échantillons en boîtes hermétiques, qui donnent les mêmes activités de  $^{226}\text{Ra}$ , nous permettent d'affirmer que la relative faible activité de  $^{226}\text{Ra}$  obtenue n'est pas une conséquence d'une perte de radon. En revanche, on peut attribuer cette différence systématique à une dilution par la matière organique et surtout les carbonates érodés sur les affleurements calcaires, pauvres en U, Th et K.



figures tirées de "gamma-results"

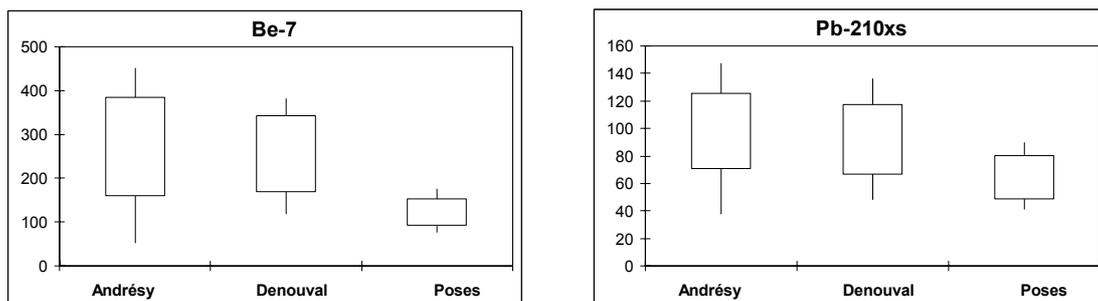
**Figure 3 :** variabilité des activités des MES en  $^{226}\text{Ra}$  et excès de  $^{228}\text{Ra}$   
Valeurs minimale, maximale, moyenne -  $1\sigma$ , moyenne +  $1\sigma$

En revanche, les radio-isotopes adsorbés sur les particules, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, sont en teneurs nettement plus élevées que dans les sols. Il s'agit, par ordre croissant d'activités, de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{131}\text{I}$  et  $^7\text{Be}$ .

Les activités de  $^{137}\text{Cs}$  sont peu dispersées sur les 40 échantillons analysés, avec une valeur moyenne de  $8.6 \pm 1.8$  Bq/kg. Elles sont légèrement plus élevées que celles des particules de sols de Brie ( $6.2 \pm 1.0$  Bq/kg pour 160 horizons labourés).

Les activités de  $^7\text{Be}$  sont beaucoup plus élevées que dans les horizons labourés des sols de Brie ( $218 \pm 108$  Bq/kg contre une dizaine, confinée dans les premiers millimètres superficiels), et elles montrent une très forte variabilité dans les sites amont (de 52 à 450 Bq/kg à Andrésy). Les échantillons aval sont très nettement appauvris par rapport aux deux sites amont (moyenne à Poses :  $122 \pm 31$  contre  $271 \pm 114$  et  $256 \pm 87$  à Andrésy et Denouval).

Les activités de  $^{210}\text{Pb}$  sont toujours nettement supérieures à celle du  $^{226}\text{Ra}$ , ce qui indique un fort excès de  $^{210}\text{Pb}$  d'origine atmosphérique. Rappelons en effet que le  $^{210}\text{Pb}$ , comme le  $^{226}\text{Ra}$ , fait partie de la famille radioactive de l' $^{238}\text{U}$ , dont tous les composants sont normalement à l'équilibre séculaire à l'intérieur des minéraux. L'excès de  $^{210}\text{Pb}$ , surplus d'activité de  $^{210}\text{Pb}$  par rapport à l'activité de  $^{226}\text{Ra}$ , est en moyenne de  $86 \pm 27$  Bq/kg (alors qu'il est de l'ordre de 5 à 10 Bq/kg dans les sols labourés). Comme pour le  $^7\text{Be}$ , on constate une différence nette entre les sites amont et le site aval, mais son amplitude est plus faible ( $98 \pm 28$  et  $92 \pm 26$  Bq/kg à Andrésy et Denouval contre  $64 \pm 16$  à Poses).

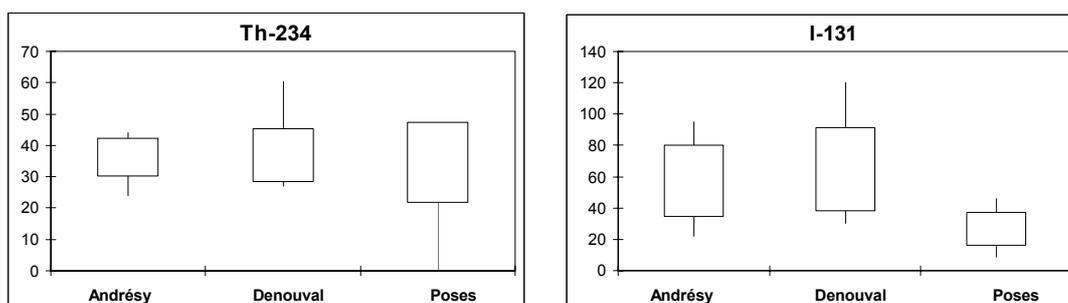


**Figure 4 :** variabilité des activités des MES en  ${}^7\text{Be}$  et excès de  ${}^{210}\text{Pb}$

*Valeurs minimale, maximale, moyenne - 1  $\sigma$ , moyenne + 1  $\sigma$*

Le  ${}^{234}\text{Th}$ , qui, comme le  ${}^{210}\text{Pb}$  et le  ${}^{226}\text{Ra}$ , appartient à la famille de l'  ${}^{238}\text{U}$ , montre également un excès d'activité par rapport à celle de son premier descendant détectable par spectrométrie gamma, le  ${}^{226}\text{Ra}$ . Les activités mesurées sur les trois sites peu de temps après les prélèvements sont en effet toujours supérieures à celles de  ${}^{226}\text{Ra}$  ( $36 \pm 6$ ,  $37 \pm 9$  et  $35 \pm 13$  Bq/kg à Andrésey, Denouval et Poses, à comparer aux activités de  ${}^{226}\text{Ra}$  données plus haut). Cet isotope de 24.1 jours de période est le descendant direct de l'  ${}^{238}\text{U}$ , et un excès d'activité sur les particules ne peut être que la conséquence de comportements géochimiques de ces deux éléments: uranium et thorium. L'uranium est en effet un élément très soluble en milieu aquatique, ce qui n'est pas du tout le cas du thorium. Un excès de  ${}^{234}\text{Th}$  peut donc s'expliquer par un transfert rapide vers la phase particulaire de cet isotope produit par désintégration radioactive de l'uranium dissous dans l'eau.

Le dernier isotope identifiable par spectrométrie gamma sur nos échantillons est l'  ${}^{131}\text{I}$ , un isotope artificiel de 8.04 jours de période. C'est un résultat nouveau pour nous, qui avons par le passé analysé de nombreuses laisses de crue et échantillons de trappes à sédiment de la Seine (rapport PIREN 1998) sans le détecter. Les comptages étaient probablement réalisés trop tardivement. Les activités mesurées ne sont pas négligeables ( $49 \pm 26$  Bq/kg en moyenne de l'ensemble), bien que leur contribution à la radioactivité globale des échantillons ne soit que de l'ordre du pour cent. Si un accident comme celui de Tchernobyl a produit une très forte activité de cet isotope dans l'atmosphère ( $2.6 \cdot 10^{17}$  Bq dégagés dans l'atmosphère, UNSCEAR 1988), la source la plus probable dans le cas présent est à rechercher dans les rejets de patients traités par radiothérapie.



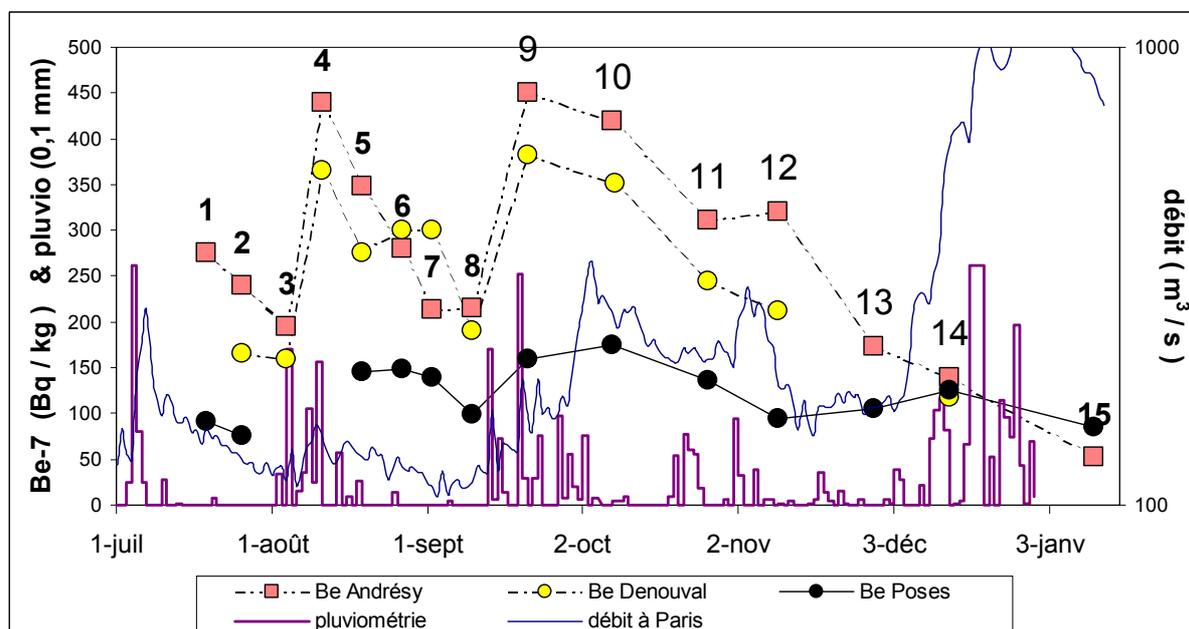
**Figure 5 :** variabilité des activités des MES en  ${}^{234}\text{Th}$  et  ${}^{131}\text{I}$

*Valeurs minimale, maximale, moyenne - 1  $\sigma$ , moyenne + 1  $\sigma$*

## 2.2. Evolution au cours du temps : le ${}^7\text{Be}$

Le marqueur de choix pour cette étude des temps de transit des particules est le  ${}^7\text{Be}$ , en raison de sa période de 53.3 jours, a priori bien adaptée à la question posée puisque nous suspicions un temps de transit de plusieurs semaines, et de son mode d'entrée dans le système hydrographique : un apport atmosphérique largement dominé par les précipitations, régulièrement contrôlé par les organismes nationaux de surveillance radioécologique (OPRI, IPSN, CEA).

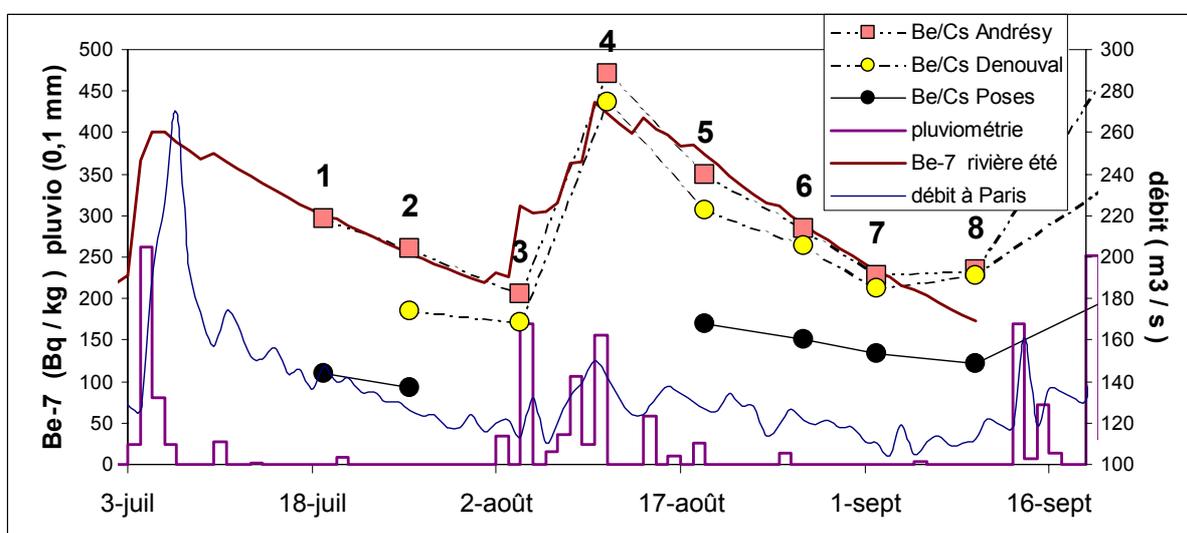
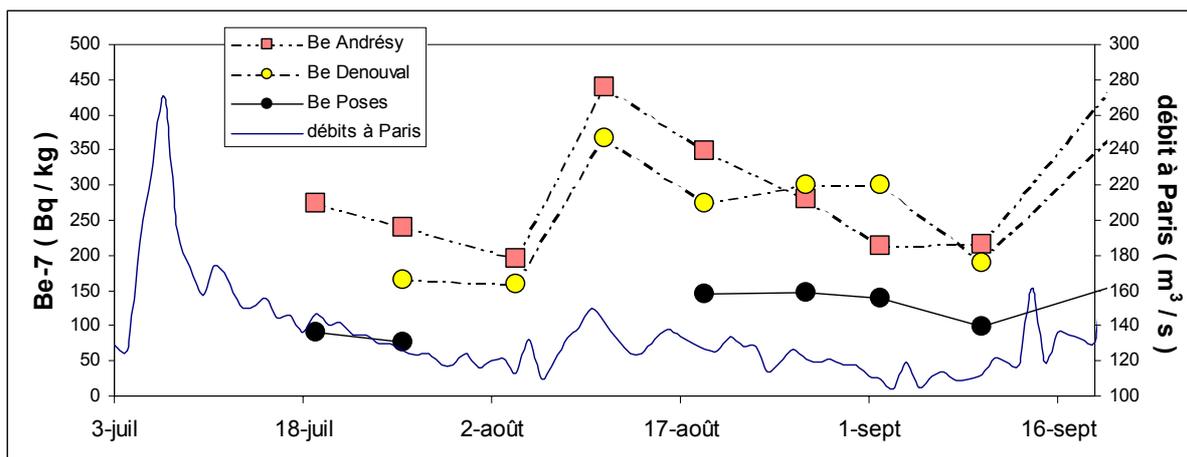
Les résultats obtenus au cours de cette campagne d'échantillonnage et d'analyses montrent une très nette évolution des activités de  $^7\text{Be}$  entre les sites amont et le site aval, qui de plus, surtout en période d'étiage, montre une réponse parfaitement synchrone avec les événements météorologiques (apports par les pluies), illustrée sur la figure 6.



**Figure 6 :** évolution au cours du temps des activités de  $^7\text{Be}$  dans les pièges, des débits (à Austerlitz) et de la pluviométrie (à Montsouris)

Toutefois, la représentativité des prélèvements de MES par pièges à sédiments a plusieurs fois été discutées et critiquée dans le passé (par exemple, thèse de Z. Idlafkih), en particulier à cause d'un fractionnement granulométrique non contrôlé. Il est illusoire de s'imaginer pouvoir prélever toute la "matière particulaire", du fait même de l'imprécision de sa définition (fraction supérieure à  $0.45\ \mu$ , à  $0.2\ \mu$ , colloïdes ?). Nous avons donc pensé que dans le cas présent, qui concerne essentiellement des éléments en ultra traces récemment adsorbés sur les particules, la meilleure manière de nous affranchir de ce problème pouvait être d'utiliser un marqueur ayant un comportement aussi semblable que possible à ces ultra traces, mais adsorbé depuis beaucoup plus longtemps. Le meilleur candidat est alors le  $^{137}\text{Cs}$ , apporté lui aussi par l'atmosphère à la suite des essais de bombes thermonucléaires en atmosphère il y a 40 ans. De plus, par les études précédemment conduites dans le thème "bassin versant ruraux" des exercices antérieurs du PIREN Seine, nous connaissons bien son comportement.

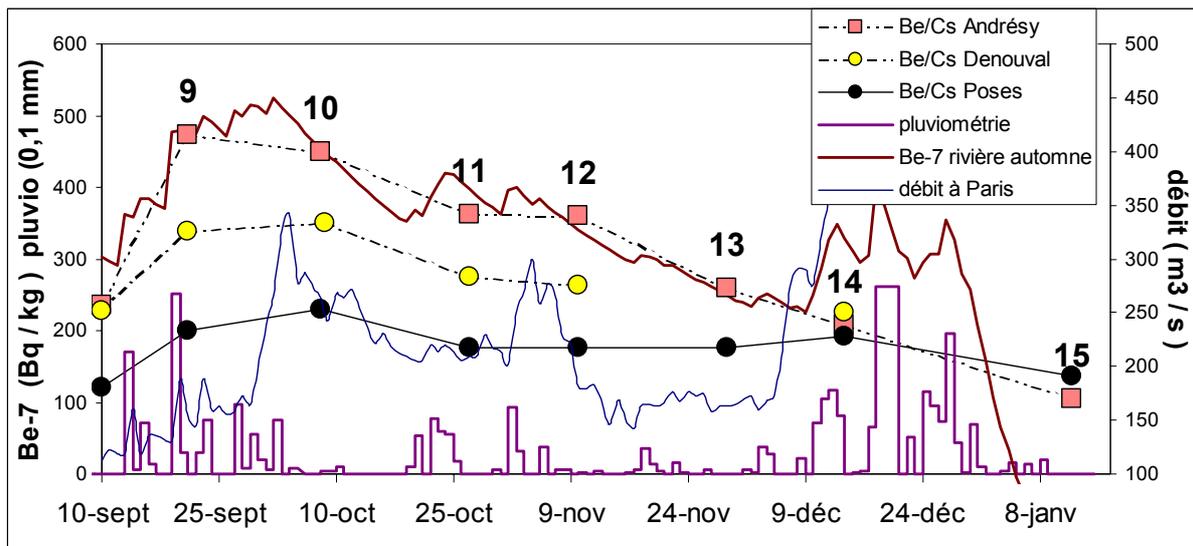
Nous avons donc normalisé nos résultats à ce marqueur et le résultat, illustré dans la figure 7, est particulièrement convaincant : pendant la période d'étiage, les courbes d'évolution des activités de  $^7\text{Be}$  à l'entrée dans le tronçon étudié (Andrésy) normalisées à une activité uniforme de  $10\ \text{Bq/kg}$  de  $^{137}\text{Cs}$  sont beaucoup plus régulières. Ce résultat n'est pas étonnant, il est conforme aux observations préliminaires que nous avons signalées dans le rapport précédent, qui montraient une bonne corrélation entre les activités de  $^{137}\text{Cs}$  et la fraction  $5\text{-}20\ \mu$  des échantillons de la campagne de prélèvements de MES de l'année hydrologique 1994-1995 de Z. Idlafkih et M. Meybeck.



**Figure 7 :** comparaison des données brutes et des données normalisées au  $^{137}\text{Cs}$  et modélisation empirique des activités à Andrésy (pour une activité spécifique uniforme de  $10 \text{ Bq/kg}$  de  $^{137}\text{Cs}$ )

Elles reflètent quasi idéalement le renouvellement par les précipitations très ponctuelles dans le temps du stock de  $^7\text{Be}$  disponible et son épuisement par la combinaison de la décroissance radioactive et d'un effet de dilution par les variations de débit de la Seine, illustré par la courbe "Be-7 rivière été" calculée à partir d'un modèle prenant en compte un apport de  $^7\text{Be}$  proportionnel aux hauteurs de précipitation, une décroissance radioactive de cet apport et une dilution par le débit de la Seine (avec pour l'instant des coefficients empiriques).

En appliquant le même principe à la période automnale, où la pluviométrie est plus largement distribuée dans le temps et les débits plus forts en raison aussi de la diminution de l'évapotranspiration, on obtient encore une bonne modélisation semi-empirique des activités de  $^7\text{Be}$  dans les MES entrant dans le tronçon, moyennant un ajustement des coefficients pluie/ $^7\text{Be}$  et débit/dilution. La situation devient plus complexe en période de très fortes crues, comme celle de la fin de l'année 1999 (figure 8).



**Figure 8 :** évolution de activités de  $^7\text{Be}$  normalisées au  $^{137}\text{Cs}$  dans les MES et modélisation empirique des activités à Andrésey (pour une activité spécifique uniforme de  $10 \text{ Bq/kg}$  de  $^{137}\text{Cs}$ )

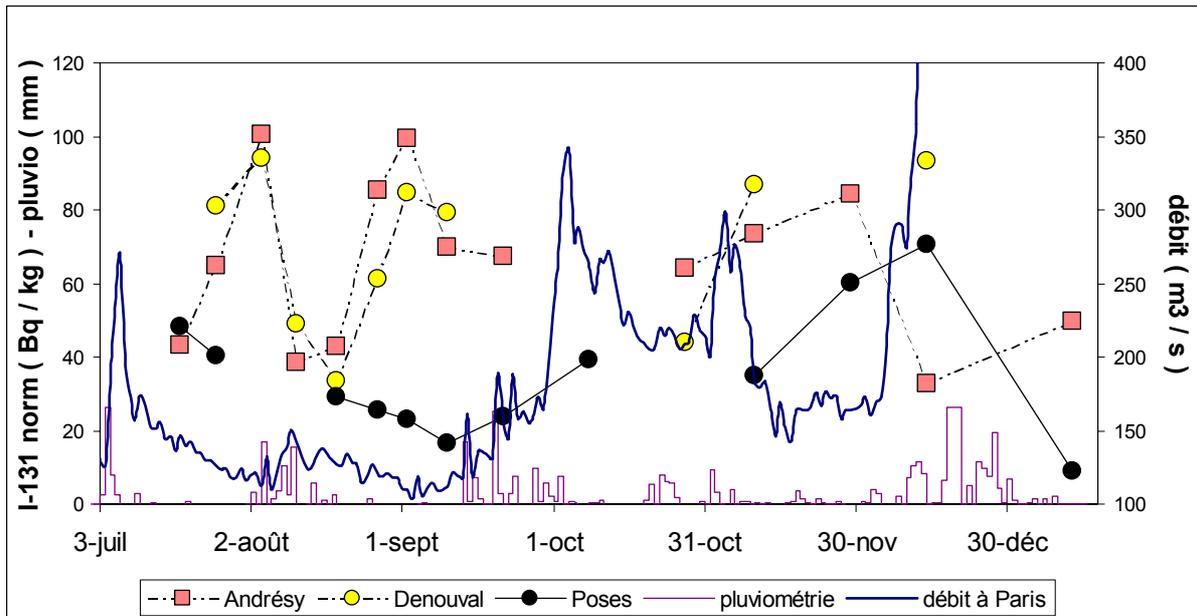
Ces premières réflexions sur des données très récentes apportent deux informations importantes:

1 - les données obtenues confirment un épaissement de l'activité d'un marqueur de période relativement longue (53.3 jours) entre les particules entrantes dans le système considéré et celles qui en ressortent à l'aval. L'hypothèse d'un temps de séjour moyen long, de l'ordre de plusieurs mois, est donc confirmée. Elle est renforcée par la disparition de cette différence d'activité amont-aval en période de forte crue où il semble évident que les particules ont alors un comportement très différent. Ce long temps de résidence moyen en période de faible débit résulte en fait d'un échange continu entre les particules incidentes qui ont le temps de sédimenter et les remises en suspension, dont le moteur principal est probablement les effets turbulents provoqués par la navigation. Un modèle en boîte relativement simple doit pouvoir expliquer ce phénomène et permettre une première estimation du stock de particules facilement mobilisables à l'interface eau-sédiment (cf 3.1).

2 - toute modélisation, la plus simple soit-elle, nécessite une parfaite connaissance des différents paramètres en jeu: pluies et débits, relations  $^7\text{Be}$ /pluies, apports locaux de  $^7\text{Be}$  (retombées directes sur le tronçon par les pluies et les aérosols, ainsi qu'une détermination la plus réaliste possible du coefficient d'échange dissous-particulaire des marqueurs utilisés, celui du  $^7\text{Be}$  dans le cas présent.

### 2.3. Evolution au cours du temps : l' $^{131}\text{I}$

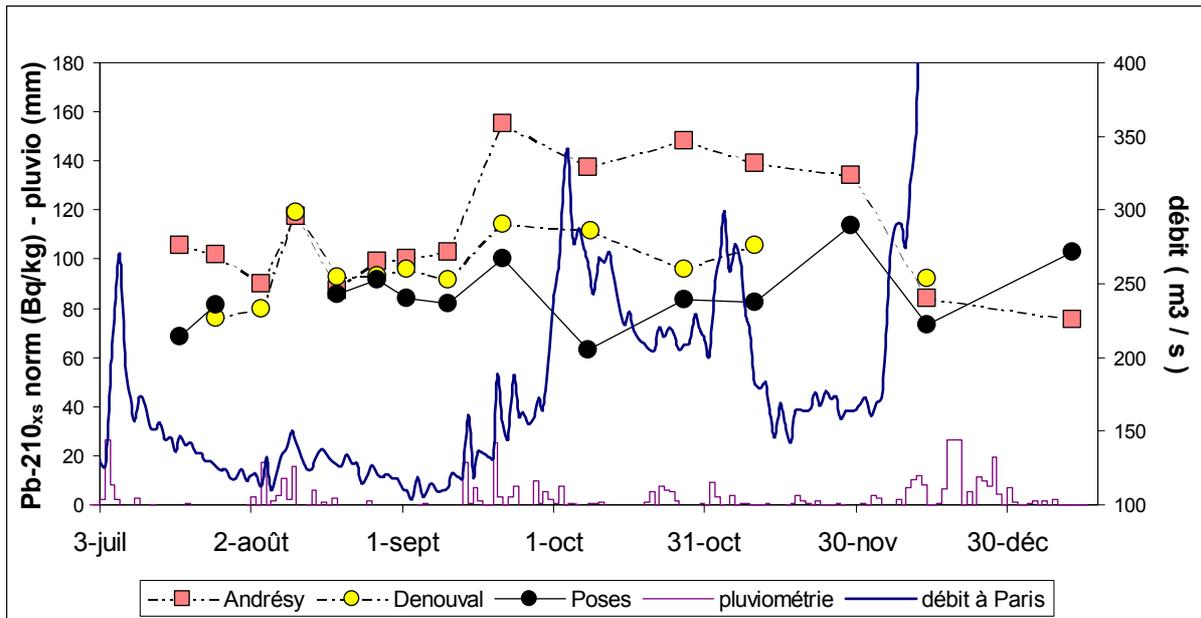
Un deuxième marquage intéressant nous est fourni par l'  $^{131}\text{I}$ , d'une période radioactive nettement plus courte et d'un comportement biogéochimique probablement très différent. Nous observons également des activités fort différentes sur les MES amont et aval (figure 9). En revanche, le comportement en fonction du débit de la rivière est inversé par rapport à celui du  $^7\text{Be}$ : les plus fortes activités sont observées pour les plus faibles débits. Ceci s'explique par l'origine totalement différente de ce marqueur, totalement indépendante de la pluviométrie elle-même, et probablement assez bien répartie dans le temps. L'effet "dilution par le débit" est alors majeur. Les activités mesurées à l'aval peuvent être très affaiblies par rapport aux activités amont en période de très faible débit (jusqu'à un facteur 5). L'iode est, au contraire du  $^7\text{Be}$ , un élément chimique dont le  $K_D$  doit être faible. Il est toutefois nécessaire pour aller plus loin dans les interprétations de rechercher la périodicité et l'intensité des apports à la rivière, de préciser le  $K_D$  de l'iode sous cette forme chimique, de mesurer l'activité dans l'eau à l'amont et à l'aval.



**Figure 9** : évolution de activités d'  $^{131}\text{I}$  normalisées au  $^{137}\text{Cs}$  dans les MES  
(pour une activité spécifique uniforme de 10 Bq/kg de  $^{137}\text{Cs}$ )

#### 2.4. Evolution au cours du temps : l'excès $^{210}\text{Pb}$

Le comportement de l'excès de  $^{210}\text{Pb}$  au cours du cycle hydrologique est plus complexe que celui du  $^7\text{Be}$ . En période d'étiage, les différences amont-aval sont souvent très faibles alors qu'elles sont très nettes en période de crue (figure 10). Si, comme le  $^7\text{Be}$ , le  $^{210}\text{Pb}$  est essentiellement apporté par le lessivage de l'atmosphère par les précipitations, sa période radioactive de 22.3 ans est beaucoup plus longue, à tel point qu'on ne devrait pas s'attendre à observer un vieillissement des particules avec ce marqueur, en faisant l'hypothèse que la très grande majorité du stock de particules facilement mobilisables tout au long du tronçon étudié est "vidangée" lors des fortes crues d'hiver. Les particules minérales érodées, qui représentent au moins les deux tiers des MES analysées, n'ont qu'un faible excès de  $^{210}\text{Pb}$  avant leur arrivée dans le réseau hydrologique (cf 2.1). Nous avons vu dans de précédentes études de la radioactivité des MES (thème "bassins versants ruraux" du PIREN Seine) que les MES acquièrent très rapidement une forte activité de  $^{210}\text{Pb}$  en excès (et de  $^7\text{Be}$ ) à partir de l'eau des précipitations responsable de leur transfert à la rivière. Les variations observées à l'amont pourraient s'expliquer comme une réponse aux apports par les pluies. En raison de la longue période de cet isotope, on n'observe pas de diminution d'activité après l'événement pluvieux mais un certain effet cumulatif, les MES prélevées à l'automne sont nettement plus riches que celles de l'été. L'interprétation des ces données n'est donc pas simple, il pourrait être intéressant de la rapprocher de l'évolution des adsorptions de micropolluants.



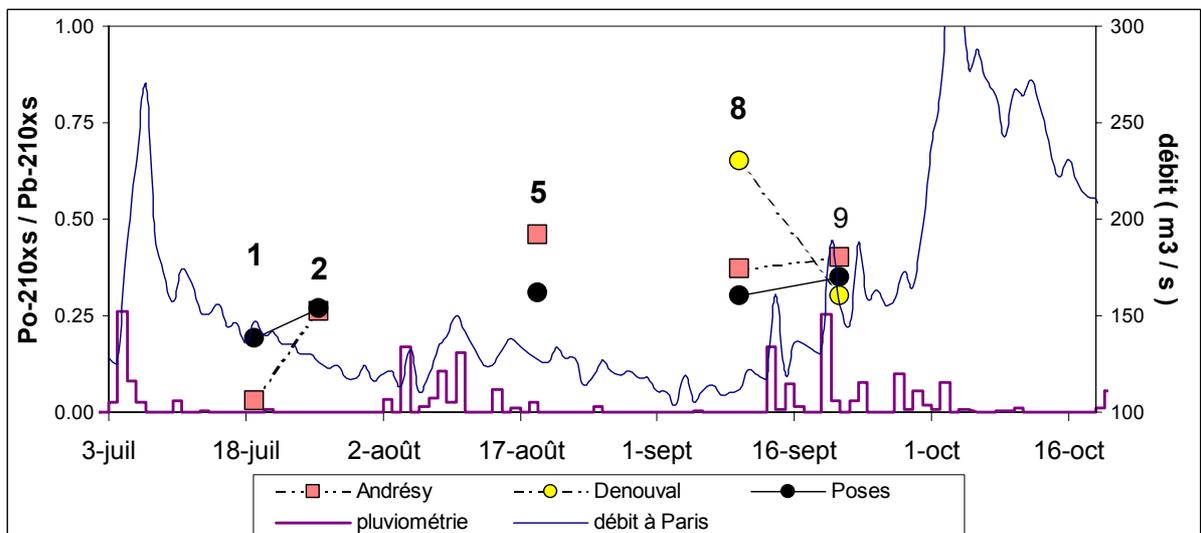
**Figure 10 :** évolution de activités de  $^{210}\text{Pb}$  en excès normalisées au  $^{137}\text{Cs}$  dans les MES  
(pour une activité spécifique uniforme de 10 Bq/kg de  $^{137}\text{Cs}$ )

### 2.5. Premiers résultats concernant le $^{210}\text{Po}$

La sensibilité des teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  des particules aux précipitations qui semble ressortir de cette étude conforte notre idée d'essayer de "dater" ce  $^{210}\text{Pb}$  très récemment adsorbé par son descendant de période adaptée à la question: le  $^{210}\text{Po}$  (T= 138 jours).

La faisabilité de cette méthode a été évaluée, comme prévu dans le précédent rapport. Douze échantillons ont été analysés par radiochimie alpha. Cette méthode nécessite la dissolution totale de l'échantillon, suivie d'un dépôt spontané de l'élément polonium sur plaque d'argent qui permet d'obtenir un spectre d'émission alpha par comptage dans une chambre à semi conducteur (durée du comptage: une semaine minimum). Le rendement total est déterminé à partir d'une solution de  $^{208}\text{Po}$ , ajoutée en tout début d'attaque chimique.

Les résultats sont présentés dans le tableau 1 en annexe et illustrés sur la figure 11.



**Figure 11 :** évolution du rapport  $^{210}\text{Po}_{xs}/^{210}\text{Pb}_{xs}$  (le  $^{210}\text{Pb}$  est d'autant plus récent que le rapport  $^{210}\text{Po}_{xs}/^{210}\text{Pb}_{xs}$  est faible)

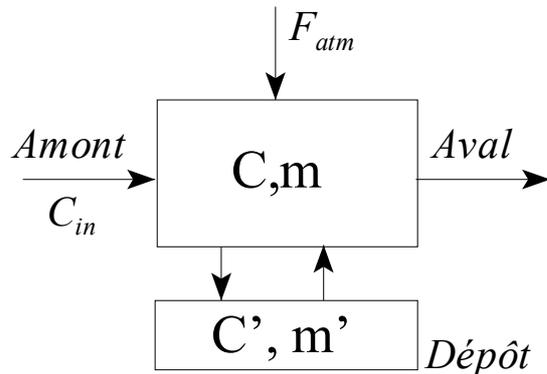
Ces résultats confirment l'origine récente du  $^{210}\text{Pb}$  en excès, avec un rapport d'activités entre les deux fractions en excès très loin de l'équilibre. Cependant, leur utilisation pour l'étude de la dynamique du transfert des particules nécessitera une analyse plus approfondie. En effet, l'évolution du rapport  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  tant en fonction du temps qu'entre les différents sites ne montre pas de tendance claire.

### 3. Estimation du stock de particules facilement mobilisables

L'approche présentée ici est volontairement simple. Elle sera complexifiée au fur et à mesure que les modèles les plus simples auront été explorés, et que des données complémentaires permettront d'étayer les résultats. Elle sera également étendue vers l'amont au cours de l'année 2000.

#### 3.1. Un modèle très simple en fonctionnement permanent

Le schéma de fonctionnement de la rivière est illustré sur la figure 12. L'isotope considéré arrive de l'amont avec une concentration dissoute  $C_{in}$ . On fait l'hypothèse d'une équilibration très rapide des teneurs dissoutes et des teneurs particulières, caractérisée par un coefficient constant, le  $K_D$ , qui représente le rapport des teneurs particulières sur les teneurs dissoutes. Le flux amont est donc donné par  $Q \times C_{in} \times (1 + K_D \cdot m_{in})$ , où  $m_{in}$  est la teneur en MES de l'eau qui arrive par l'amont. Un autre terme important pour certains isotopes (le  $^7\text{Be}$  notamment) est la retombée atmosphérique directe sur le cours d'eau ( $F_{atm}$ ).



**Figure 12 :** Schéma conceptuel simple du fonctionnement d'une bief de Seine

Les termes de perte sont au nombre de deux. La sortie de l'isotope à l'aval selon une formulation proche de celle de l'entrée ; le débit est sensiblement le même mais les teneurs en isotope dissous et en MES à prendre en compte sont celles de la sortie, supposées égales à celle de l'intérieur de la boîte. Le deuxième terme de perte est la décroissance radioactive dans le système. Elle est égale au stock total de l'isotope multiplié par une constante de dégradation du premier ordre, soit :

$$V \times \lambda \times [C(1 + K_D \cdot m) + C' \cdot K_D \cdot m'] ; \lambda = \ln(2)/T \text{ où } T \text{ est la période de l'élément.}$$

où  $m'$  est la teneur en MES dans les dépôts exprimée en teneur dans la colonne d'eau en cas de resuspension totale des dépôts.

Dans la cas d'un système permanent, on aboutit finalement aux deux équations suivantes :

$$F_{atm} + Q \cdot C_{in} (1 + K_D \cdot m_{in}) = Q \cdot C (1 + K_D \cdot m) + V \times \lambda \times [C(1 + K_D \cdot m) + C' \cdot K_D \cdot m'] \quad (1)$$

$$K_D \cdot C \cdot F_{ech} = K_D \cdot C' \cdot F_{ech} + \lambda \cdot V \cdot K_D \cdot C' \cdot m' \quad (2)$$

où  $F_{ech}$  est le flux d'échange de particules entre le stock en suspension et le stock déposé.

L'équation (1) traduit l'équilibre global du stock total de l'isotope dans le bief, l'équation (2) traduit l'équilibre dans le stock.

On fera l'hypothèse supplémentaire que l'échange  $F_{ech}$  est très rapide. Les éléments nous disposons sur les vitesses de chute des particules (de l'ordre de 1 m.h<sup>-1</sup> en moyenne) le justifient. Sous cette hypothèse  $C$  est pratiquement égale à  $C'$ . Le bilan global du <sup>7</sup>Be calculé à partir de l'équation (1) permet alors d'écrire que :

$$\frac{C}{C_{in}} = \frac{1 + K_D \cdot m + Q_{atm} / Q}{1 + K_D \cdot m + \lambda \cdot \tau \cdot (1 + K_D \cdot (m + m'))}$$

où  $Q_{atm}$  représente les apports atmosphériques, sous forme du débit supplémentaire de Seine qu'il faudrait à l'amont pour apporter un flux d'isotope équivalent aux apports atmosphériques, où  $\tau$  est le temps de séjour de l'eau, soit  $V/Q$ .

Cette équation montre que plus le stock de dépôt  $m'$  est grand plus le rapport  $C/C_{in}$  sera petit. Elle montre également sous quelles conditions il est a priori possible d'utiliser un isotope radioactif pour calculer un stock de dépôt. D'abord, les apports supplémentaires ( $Q_{atm}$ ) doivent être connus ; et plus que la valeur absolue des apports, c'est son rapport aux apports amont qui est important. Ensuite, pour pouvoir accéder à une information significative sur  $m'$ , il faut que le terme  $\lambda \cdot \tau \cdot K_D \cdot m'$  soit plus grand que tous les autres termes au dénominateur, voire éventuellement du même ordre. Soit donc :

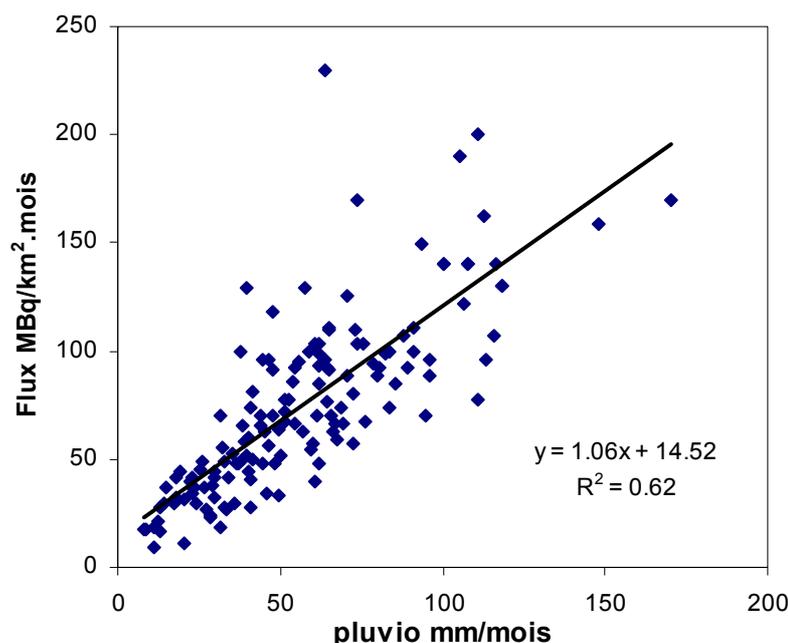
- que  $m'$  soit plus grand que  $m$ , c'est à dire qu'il y ait plus de particules déposées que de particules en suspension. De toute évidence si  $m'$  est petit devant  $m$ , il ne pourra guère être détecté.
- que  $K_D \cdot m'$  soit plus grand que 1, soit qu'il y ait plus d'isotope fixé sur les dépôts que d'isotope dissous dans une section de rivière. Que  $\lambda \cdot \tau \cdot K_D \cdot m'$  soit également plus grand que 1, c'est à dire que la décroissance ( $\lambda$ ) soit suffisamment rapide vis à vis du temps de séjour de l'eau ( $\tau$ ), ce qui exclue les isotopes de trop longue période. Les isotopes de période trop courte doivent également être exclus car le rapport  $C/C_{in}$  pourrait devenir tellement petit que  $C$  ne serait plus guère mesurable.
- Que  $\lambda \cdot \tau \cdot m'$  soit plus grand que  $m$ , cette condition est respectée si les précédentes le sont aussi.

### 3.2. Le même modèle en fonctionnement transitoire

On dispose de tous les éléments nécessaires, avec une précision plus ou moins grande pour chacun d'eux, pour tenter d'appliquer ce modèle simple au bief Andrésy-Poses. On présentera ici le cas du <sup>7</sup>Be. Il s'agit de faire fonctionner le même modèle jour après jour, en tenant compte des variations de débit, de teneurs en MES et en isotope à l'amont, et de pluviosité car elle contrôle les flux atmosphériques de <sup>7</sup>Be.

#### 3.2.1. Apports atmosphériques

La figure 13 représente la relation qui existe entre les flux mensuels de retombée et la pluviosité. Il s'agit de données collectées par l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants, elles couvrent plus d'une dizaine d'années de mesures. Pour faire fonctionner le modèle, nous avons reconstitué des flux journaliers de <sup>7</sup>Be en fonction de la pluviométrie journalière (moyenne de 5 stations gérées par Météo-France entre Paris et Rouen). Le relation linéaire présentée sur la figure 13 peut être interprétée comme la somme d'un flux de retombée sèche constant (indépendant de la pluviosité mensuelle) et un flux proportionnel à la pluviosité. Pour construire des retombées journalières, nous avons divisé le flux de retombée sèche par le nombre de jours d'un mois, et gardé la même relation à la pluviosité (concentration dans la pluie). D'autres méthodes auraient pu être utilisées, elles n'auraient probablement pas conduit à des résultats très différents.



**Figure 13 :** Relation entre la pluviosité mensuelle et les flux de retombée de  $^7\text{Be}$  au Vésinet, données OPRI.

### 3.2.2. Hydrologie de la rivière

Les débits à Austerlitz, dans l'Oise et à Poses sont connus. Pour tenir compte d'une légère évolution du volume d'eau contenu dans les biefs en fonction du débit, nous avons calé une relation simple entre le volume d'eau (calculé grâce à ProSe) et le débit. Cette relation  $Q=f(V)$  permet de faire fonctionner la partie hydrologique du modèle selon l'équation :  $dV/dt = Q_{in} - Q$

Les teneurs en MES à l'entrée du système, ainsi qu'à la sortie du système, sont également connues, à partir d'échantillons collectés au moment de chaque relevé de trappe. Comme nous l'avons déjà mentionné dans le rapport de 1998, les teneurs en MES à Poses en étiage sont toujours supérieures aux teneurs en MES à Andrésy (ou Denouval). Il y a très probablement une resuspension progressive de dépôts dans les biefs situés à l'aval de Paris en période d'étiage. Nous avons traité les MES d'un façon similaire aux débits. Les données de MES à Poses, auxquelles s'ajoutent les nombreuses données compilées par Meybeck et al. (1998) permettent d'établir une relation entre concentration et débit à l'étiage, et donc de calculer un flux de sortie des MES. Les données journalières à l'amont sont interpolées à partir de nos mesures.

Les teneurs en  $^7\text{Be}$  ont également été interpolées, mais sous forme de paliers durant la période de pose de chaque trappe. En cas de données manquantes, une interpolation linéaire a été pratiquée entre la fin de la trappe précédente et le début de la suivante. Nous avons émis l'hypothèse que le  $K_D$  du  $^7\text{Be}$  dans la Seine était d'environ 50000, à partir d'une ensemble de valeurs de  $K_D$  en milieu fluvial (figure 14). Cette estimation est en bonne cohérence avec une synthèse plus ancienne principalement basée sur des données lacustres avec des teneurs en MES plus faibles (Hawley et al., 1986).

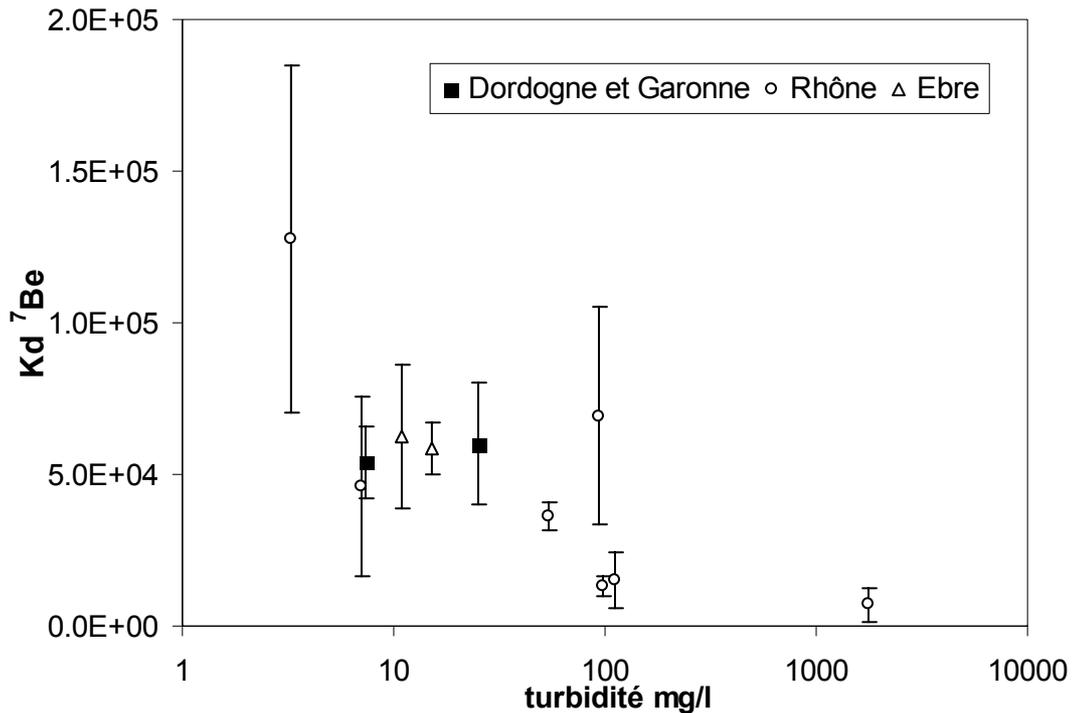


Figure 14 :  $K_D$  du  $^7\text{Be}$  dans différents cours d'eau européens

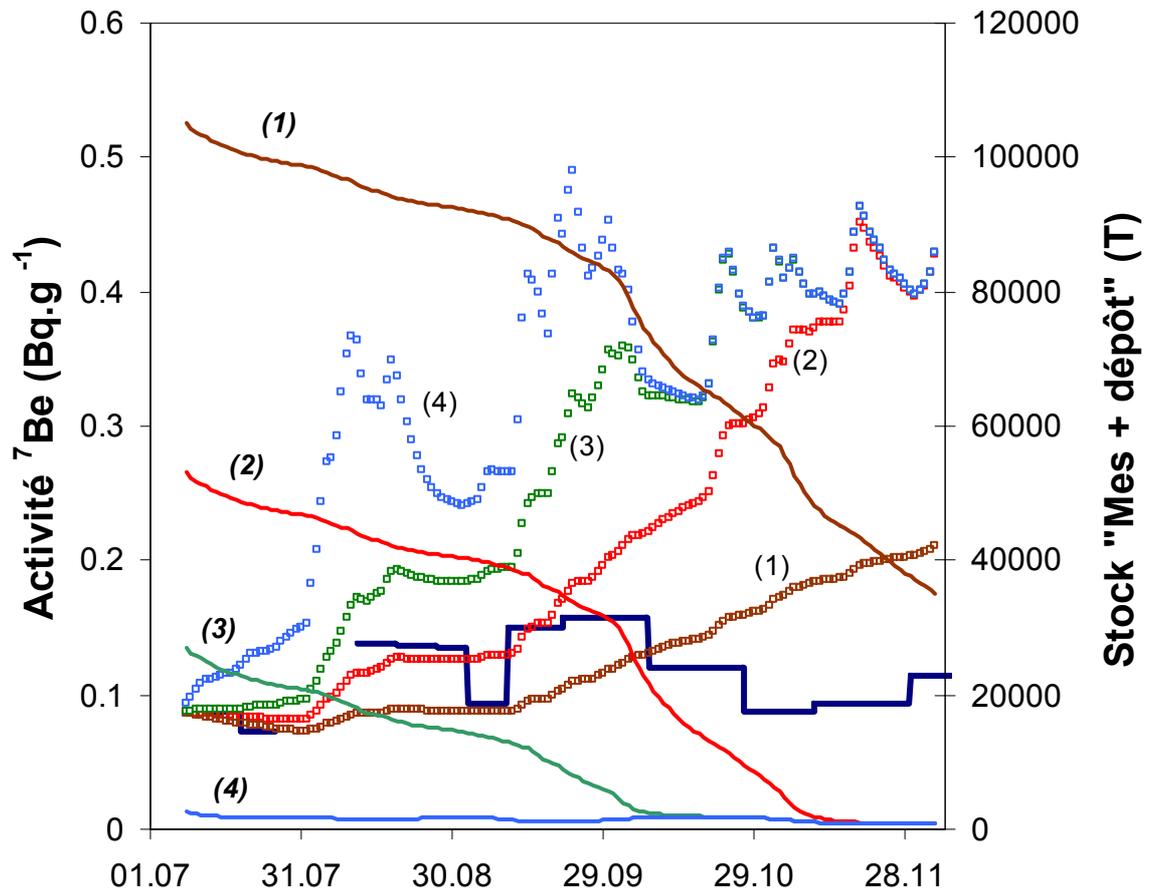
### 3.2.3. Résultats

Ces équations ont très simplement été programmées sous Scilab (INRIA, 1998). Pour plus de limpidité, les sources sont donnés en annexe. Les termes de resuspension sont programmés selon la technique adaptée du principe de Vélikanov, et utilisée dans ProSe (Even et al., soumis). Le flux de resuspension est calculé comme le flux qui compense la sédimentation, définie par une vitesse de chute, lorsque la concentration d'équilibre est atteinte. Pour une raison numérique, nous avons lissé la fonction de resuspension lorsque le stock approchait de zéro, pour éviter l'apparition de stocks négatifs. Une formulation de Michaelis a été ajoutée, son paramètre est "kdep", il est suffisamment petit pour que son influence soit négligeable lorsque le stock est supérieur à  $2 \text{ mg.l}^{-1}$ , après resuspension.

La figure 15 illustre les résultats obtenus pour quatre valeurs initiales du stock en place. On note une diminution progressive du stock, elle est due au flux plus important de suspensions à Poses par rapport à Andrésy ou Denouval. Selon la valeur du stock initial, le stock de dépôt est vidé au bout de temps différents. La courbe des teneurs en  $^7\text{Be}$  montre que le système répond très rapidement au volume du stock, puisque les courbes se chevauchent dès lors que le stock est nul. Les teneurs en suspension simulées à Poses répondent à deux forçages principaux : (i) la pluie, qui est également couplée aux apports amont (voir figure 7) et (ii) le stock de dépôts.

Les apports par les pluies (ou par l'amont) provoquent des augmentations très marquées des teneurs en  $^7\text{Be}$ , elles sont bien synchrones avec les augmentations de teneurs mesurées à Poses (trait bleu continu sur la figure 15). Lorsque le stock est faible (ou presque nul), les pluies provoquent des augmentations de teneur en  $^7\text{Be}$  beaucoup trop fortes ( $+ 0.2 \text{ Bq.g}^{-1}$  au lieu de  $+0.05 \text{ Bq.g}^{-1}$  mesurés). Il est donc évident qu'un stock de dépôts significatif doit exister pour expliquer le peu d'augmentation observé à Poses après les pluies. L'examen des résultats des simulations indique qu'un stock de l'ordre de 30000 à 40000 tonnes serait un bon ordre de grandeur (simulation 2). Par contre, un tel stock n'est pas capable de tenir jusqu'à la fin de la simulation, la différence de flux de MES entre Andrésy et Poses le vide progressivement et une trop forte augmentation des teneurs dans les MES se produit dès la fin du mois d'août. Il y a donc une certaine contradiction entre la nécessité d'avoir un stock suffisamment petit (30000 à 40000 tonnes) pour que les pics suivant les pluies soient bien rendus, et

un stock suffisant pour qu'il ne soit pas totalement vidé avant la fin de l'étiage. On notera également que lorsque le stock est trop élevé (et c'est en fait le cas dès 40000 tonnes), il devient impossible de redescendre après les pluies ; le creux du début de septembre n'est pas rendu dans les simulations, sauf pour celle qui a un stock presque nul. Ces difficultés suggèrent que le modèle simple en un seul stock n'est pas satisfaisant, même s'il permet de donner un ordre de grandeur des stocks à prévoir pour répondre à différentes caractéristiques du signal à reproduire (intensité des augmentations en période de pluie, retour au niveau de bases après les pluies ou niveau moyen à reproduire tout au long de l'étiage).



**Figure 15 :** Simulation réalisées avec le modèle en une boîte de MES. Quatre stocks initiaux de dépôts ont été testés : 104000 tonnes (brun-1), 52000 tonnes (rouge-2), 26000 tonnes (vert-3) et 1300 tonnes (bleu-4). Ils correspondent à des teneurs équivalentes après resuspension du dépôt de 800, 400, 200 et 10 mg.l<sup>-1</sup>. Les ronds représentent les teneurs de <sup>7</sup>Be dans les suspensions, les traits continus représentent l'évolution des stocks de dépôt et de suspensions confondus.

Ces premiers résultats permettent donc d'orienter les recherches en matière de modélisation. D'autres hypothèses vont être testées, typiquement avec deux stocks, qu'il faudra positionner dans le système (un stock de suspensions sans vitesse de chute, ou un stock de dépôts en échange rapide et un autre en échange lent...). Il est également indispensable d'acquiescer quelques données de  $K_D$  en Seine, car ce paramètre contrôle la distribution des apports par la pluie et donc l'intensité des pics post-pluie. Enfin, il conviendra de chercher à prendre en compte les apports dus aux bassins versants locaux. Nous avons choisi les biefs d'étude parce que les bassins versants locaux étaient très limités, mais peut-être ne sont-ils pas totalement négligeables. L'étude des bassins versants plus petits, à l'intérieur de la représentation en ordre de Strahler adoptée dans le PIREN-Seine sera au cœur de nos travaux de l'année 2000.

## 4. Conclusions

Les isotopes radioactifs environnementaux ( $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{131}\text{I}$  ...), ont été mesurés régulièrement dans les suspensions de la Seine à l'aval de Paris, d'Andrésy à Poses. L' $^{131}\text{I}$ , très probablement d'origine hospitalière, en grande partie sous forme dissoute et d'une demi-vie de 8 jours, subit une décroissance qui résulte du temps de transit des eaux. L'activité du  $^7\text{Be}$  décroît fortement entre Andrésy et Poses en période de faibles débits, ce qui confirme un vieillissement important des particules en transit, résultat d'un échange permanent entre les particules en suspension et celles facilement mobilisables sur le fond du lit. Un modèle simple de bilan des entrées sorties de  $^7\text{Be}$ , prenant en compte les retombées directes sur la rivière, permet une première évaluation du stock de particules mobilisables dans ces biefs.

Au cours de l'année 2000, nous devons à la fois préciser les entrées de  $^7\text{Be}$  (à l'amont et les retombées directes), alimenter la base de données pour les périodes de crue et de fin de crue (reconstitution du stock de particules mobilisables), préciser le coefficient de partage dissous-particulaire de cet élément par des expérimentations *in situ* et affiner la modélisation.

Nous étendrons l'étude aux ordres inférieurs, en remontant vers la Marne, le Grand Morin et l'Orgeval, profitant ainsi des acquis des précédents programmes et de la logistique en place dans ce secteur.

Parallèlement, nous chercherons à exploiter le comportement des autres marqueurs dont l'interprétation, plus délicate, pourrait donner des informations complémentaires intéressantes: cinétique d'adsorption des micropolluants ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ), échanges dissous-particulaire et marqueurs de périodes différentes ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ).

Nous tenterons une évaluation directe de l'importance locale du stock de particules mobilisables par des mesures du bilan surfacique de  $^7\text{Be}$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^2$ ) similaires à ce qui est utilisé, pour une période de temps beaucoup plus longue, dans les études de redistribution de sol avec le  $^{137}\text{Cs}$  (Meybeck et al. 1999, Sogon, 1999).

## 5. Références

Even S., Mouchel J.M., Servais P., Seidl M. et Poulin M. (soumis). Oxygen deficits in the Seine river downstream of combined sewer overflows : importance of the suspended solids transport.

Hawley N., Robbins J.A., Eadie B.J., 1986. The partitioning of  $^7\text{Be}$  in fresh water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50:1127-1131.

INRIA Meta2 Project et ENPC/CERGRENE, 1998. Introduction to Scilab. <http://www-rocq.inria.fr/scilab/scilab.html>

Meybeck M., Mouchel J.M., Idlafkih Z., Andreassian V. et Thibert S., 1998. Transferts d'eau, de matières dissoutes et de particules. In "La Seine en son Bassin", Meybeck, De Marsily et Fustec Eds, Elsevier, pp 345-389.

Mouchel J.M. et Bonté P., 1999. Transfert des MES à l'aval de Paris. Rapports PIREN-Seine 1998, pp17.

## 6. Remerciements

Nous remercions Monsieur F. Raout, de la DIREN Ile de France, pour la fourniture des données sur les débits quotidiens de la Seine, et Monsieur Moulard, de la centrale hydroélectrique de Poses. Nous remercions également le SNS à Poses pour le travail accompli au cours des premières tentatives de mise en place d'une trappe à Poses.

	Pb-210 Bq/kg	Th-234 Bq/kg	Ra-226 Bq/kg	Ra-228 Bq/kg	Th-228 Bq/kg	K %	Cs-137 Bq/kg	Be-7 Bq/kg	Pb-210xs Bq/kg	I-131 Bq/kg
Andrésy 1	124 +- 4	41 +- 3	26 +- 0.5	30 +- 1.1	29 +- 0.5	1.00 +- 0.02	9.3 +- 0.5	275 +- 5	98 +- 4	40 +- 1
Andrésy 2	118 +- 4	41 +- 2	23 +- 0.6	33 +- 1.0	29 +- 0.5	1.00 +- 0.03	9.3 +- 0.6	240 +- 7	94 +- 4	60 +- 1
Andrésy 3	108 +- 3	44 +- 2	23 +- 0.4	35 +- 0.8	30 +- 0.4	1.06 +- 0.03	9.5 +- 0.4	195 +- 4	85 +- 3	95 +- 1
Andrésy 4	132 +- 4	32 +- 2	22 +- 0.4	32 +- 0.9	27 +- 0.4	0.97 +- 0.02	9.3 +- 0.4	440 +- 7	110 +- 4	36 +- 2
Andrésy 5	108 +- 7	37 +- 5	21 +- 0.6	35 +- 1.2	26 +- 0.6	0.99 +- 0.03	10.0 +- 0.5	348 +- 7	87 +- 7	43 +- 1
Andrésy 6	119 +- 5	42 +- 4	22 +- 0.4	35 +- 0.9	29 +- 0.5	1.03 +- 0.02	9.8 +- 0.4	280 +- 5	97 +- 5	84 +- 1
Andrésy 7	114 +- 5	43 +- 3	20 +- 0.4	34 +- 0.8	28 +- 0.4	0.98 +- 0.02	9.4 +- 0.3	213 +- 4	94 +- 5	93 +- 1
Andrésy 8	115 +- 3	42 +- 2	20 +- 0.4	33 +- 0.8	26 +- 0.4	0.99 +- 0.02	9.1 +- 0.3	215 +- 4	94 +- 3	64 +- 1
Andrésy 9	167 +- 4	33 +- 3	19 +- 0.5	31 +- 1.1	26 +- 0.5	0.91 +- 0.03	9.5 +- 0.5	450 +- 7	147 +- 4	64 +- 1
Andrésy 10	157 +- 2		29 +- 0.3	34 +- 0.6	28 +- 0.3	0.94 +- 0.02	9.4 +- 0.3	420 +- 5	129 +- 4	<
Andrésy 11	146 +- 8		19 +- 0.6	31 +- 1.2	26 +- 0.7	0.91 +- 0.03	8.6 +- 0.5	311 +- 9	127 +- 4	55 +- 12
Andrésy 12	144 +- 5	35 +- 3	20 +- 0.3	30 +- 0.7	27 +- 0.4	0.89 +- 0.02	8.9 +- 0.3	320 +- 5	123 +- 4	65 +- 4
Andrésy 13	105 +- 3	34 +- 3	16 +- 0.4	27 +- 0.7	19 +- 0.4	0.70 +- 0.02	6.6 +- 0.3	173 +- 3	89 +- 4	56 +- 1
Andrésy 14	75 +- 2	24 +- 1	18 +- 0.2	23 +- 0.3	19 +- 0.2	0.75 +- 0.01	6.7 +- 0.2	140 +- 1	57 +- 4	22 +- 0
Andrésy 15	54 +- 4	27 +- 3	17 +- 0.4	20 +- 0.8	19 +- 0.4	0.76 +- 0.02	5.0 +- 0.3	52 +- 3	38 +- 4	25 +- 1
Denouval 2	92 +- 3	36 +- 3	23 +- 0.5	33 +- 1.0	28 +- 0.5	1.03 +- 0.03	9.0 +- 0.4	166 +- 4	68 +- 3	73 +- 1
Denouval 3	94 +- 2	42 +- 4	19 +- 0.8	31 +- 0.5	27 +- 0.2	0.96 +- 0.05	9.4 +- 0.2	160 +- 2	75 +- 3	88 +- 1
Denouval 4	124 +- 4	32 +- 3	24 +- 0.6	32 +- 1.3	31 +- 0.6	1.07 +- 0.04	8.4 +- 0.5	366 +- 8	100 +- 5	41 +- 3
Denouval 5	104 +- 3	35 +- 2	21 +- 0.5	30 +- 1.0	28 +- 0.5	0.98 +- 0.03	9.0 +- 0.2	275 +- 3	83 +- 4	30 +- 1
Denouval 6	130 +- 5	42 +- 4	24 +- 0.7	34 +- 1.4	31 +- 0.8	1.05 +- 0.04	11.4 +- 0.6	300 +- 7	106 +- 5	70 +- 2
Denouval 7	159 +- 9	60 +- 6	23 +- 0.7	35 +- 1.6	31 +- 0.7	1.09 +- 0.04	14.2 +- 0.8	300 +- 7	136 +- 9	120 +- 2
Denouval 8	100 +- 4	36 +- 3	24 +- 0.6	30 +- 1.3	28 +- 0.6	0.97 +- 0.04	8.3 +- 0.5	190 +- 6	76 +- 4	66 +- 1
Denouval 9	157 +- 3		27 +- 0.4	35 +- 0.9	29 +- 0.4	1.02 +- 0.03	11.3 +- 0.4	382 +- 9	129 +- 4	
Denouval 10	146 +- 4		34 +- 0.5	31 +- 1.0	29 +- 0.5	1.04 +- 0.03	10.0 +- 0.4	352 +- 8	112 +- 4	
Denouval 11	117 +- 6		31 +- 0.6	30 +- 1.0	29 +- 0.6	1.00 +- 0.03	8.9 +- 0.4	245 +- 6	86 +- 4	39 +- 5
Denouval 12	108 +- 3	34 +- 2	23 +- 0.4	28 +- 0.7	24 +- 0.3	0.96 +- 0.02	8.1 +- 0.3	212 +- 4	85 +- 4	70 +- 2
Denouval 14	67 +- 4	30 +- 3	18 +- 0	25 +- 0.7	22 +- 0.4	0.93 +- 0.02	5.2 +- 0.3	118 +- 3	48 +- 4	49 +- 1
Poses 1	80 +- 3	42 +- 2	23 +- 0.3	30 +- 0.7	28 +- 0.3	1.01 +- 0.02	8.3 +- 0.3	91 +- 3	57 +- 3	40 +- 1
Poses 2	88 +- 4	45 +- 3	22 +- 1.0	28 +- 1.3	29 +- 0.6	0.96 +- 0.03	8.2 +- 0.4	76 +- 5	67 +- 5	33 +- 3
Poses 5	92 +- 4	35 +- 3	19 +- 0.4	27 +- 0.7	25 +- 0.4	0.97 +- 0.02	8.6 +- 0.3	145 +- 3	73 +- 5	25 +- 1
Poses 6	110 +- 6	45 +- 4	21 +- 0.5	28 +- 0.9	28 +- 0.5	1.04 +- 0.02	9.8 +- 0.4	148 +- 4	89 +- 4	25 +- 1
Poses 7	106 +- 5	45 +- 4	18 +- 0.7	30 +- 1.5	26 +- 0.7	1.11 +- 0.04	10.5 +- 0.7	140 +- 6	88 +- 5	24 +- 1
Poses 8	88 +- 3	42 +- 2	21 +- 0.4	29 +- 0.9	27 +- 0.4	1.10 +- 0.03	8.2 +- 0.4	99 +- 3	67 +- 3	14 +- 1
Poses 9	99 +- 5	39 +- 3	19 +- 0.4	27 +- 0.7	25 +- 0.4	0.99 +- 0.02	8.0 +- 0.3	160 +- 3	80 +- 5	19 +- 1
Poses 10	80 +- 2		32 +- 0.4	27 +- 0.7	27 +- 0.3	0.96 +- 0.02	7.6 +- 0.3	175 +- 5	48 +- 4	30 +- 7
Poses 11	86 +- 5		21 +- 0.5	29 +- 0.9	26 +- 0.5	0.97 +- 0.02	7.7 +- 0.4	136 +- 6	65 +- 4	< 51
Poses 12	64 +- 3	23 +- 2	19 +- 0.3	25 +- 0.5	23 +- 0.3	0.78 +- 0.01	5.4 +- 0.2	95 +- 2	45 +- 4	19 +- 1
Poses 13	89 +- 6	43 +- 4	21 +- 0.5	29 +- 1.0	25 +- 0.5	0.88 +- 0.02	6.0 +- 0.4	106 +- 4	68 +- 4	36 +- 1
Poses 14	68 +- 2	36 +- 2	21 +- 0.2	28 +- 0.4	23 +- 0.2	0.86 +- 0.01	6.5 +- 0.2	126 +- 2	48 +- 4	46 +- 0
Poses 15	84 +- 4	25 +- 3	19 +- 0.3	27 +- 0.6	25 +- 0.3	0.89 +- 0.02	6.3 +- 0.2	86 +- 2	65 +- 4	6 +- 1

**Tableau 2 : résultats des analyses par spectrométrie gamma (erreurs à 1  $\sigma$ )**

	Date	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	$^{210}\text{Po}$ (dépôt)	date dépôt	delta t	$^{210}\text{Po}_{\text{xs}}$ (dépôt)	$^{210}\text{Po}_{\text{xs}}$ à t=0	$^{210}\text{Po}_{\text{xs}}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$
	Prélèvement	Bq/Kg	Bq/Kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg		Bq/kg	Bq/kg	
Andrésey 1	19/07/99	26	124	98	58	30/09/99	73	32	3	0.03
Poses 1	19/07/99	23	80	67	48	30/09/99	73	25	11	0.19
Andrésey 2	26/07/99	23	118	95	66	24/09/99	60	43	25	0.26
Poses 2	26/07/99	22	88	66	52.5	24/09/99	60	30.5	18	0.27
Andrésey 5	19/08/99	21	108	87	70	30/09/99	42	49	40	0.46
Poses 5	19/08/99	19	92	73	51	30/09/99	42	32	22	0.31
Andrésey 8	10/09/99	20	115	95	76	01/12/99	82	56	35	0.37
Denouval 8	10/09/99	25	100	75	83	03/12/99	84	58	49	0.65
Poses 8	10/09/99	20	88	68	58	07/12/99	88	38	21	0.30
Andrésey 9	21/09/99	20	170	150	108	01/12/99	71	88	60	0.40
Denouval 9	21/09/99	27	157	130	95	03/12/99	73	68	39	0.30
Poses 9	21/09/99	20	100	80	65	07/12/99	77	45	28	0.35

**Tableau 3 : résultats des analyses de  $^{210}\text{Po}$  et calcul du rapport  $^{210}\text{Po}_{\text{xs}}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$**

## Fonctions

```
// Cette fonction donne le débit en fonction du volume (donc de
// la hauteur d'eau).
// Estimée à partir des volumes entre Choisy et Poses transmis par
// Michel Poulin (et calculés avec ProSe). Elle n'est pas valide
pour
// les trop petits débits (qu'on ne devrait jamais atteindre)
// Les débits sont en m3/j, et les volumes en m3. J'ai supposé que
// le volume entre Andrésy et Poses représentait 60% du volume entre
// Choisy et Poses
function [Q]=Qout(V)
Q = (-205045.5046 + 0.004698995*V -3.58895E-11 *V*V + 9.14314E-20
*v*v*v)*86400

// Cette fonction donne le flux journalier en Be-7 (Bq/m2/j) en
fonction
// de la pluviosité du jour (mm/j). Il est extrapolé à partir d'une
// relation établie au Vesinet à l'échelle mensuelle. Données
// rassemblées par A.J.Thomas.
function [X] = Plbe7(pl)
X = 14.52/30.5 + 1.065*pl

// Cette fonction donne la "masse d'équilibre"
// estimée à partir des éléments donnés par Michel Meybeck
// dans le livre « La Seine en son Bassin ».
// Le débit est en m3/j, le volume en m3 et la
// concentration de MES en g/m3
function [X] = Mequil(deb,V)
deb = deb / 86400
X = 10 + 0.0002130*deb*deb
X = X * V

// Cette fonction donne le moteur interne utilisé dans chaque boîte
// V est le volume
// Q est le débit de sortie
// M est la quantité totale de MES
// DEP est la quantité totale de dépôts
function [Xdot]=moteur(t,X)
V = X(1)
M = X(2)
DEP = X(3)
QRAD = X(4)
H = V/Surface
Q = Qout(V)
tau = V/Q
dVdt = inter(debitm3j,t) - Q
dMdt = inter(fmin,t) -M/tau - vc/H * (M -
Mequil(Q,V)*DEP/(DEP+kdep))
dDEPdt = vc/H * (M - Mequil(Q,V)*DEP/(DEP+kdep))
dQRADdt = inter(fradin,t) - QRAD/tau*(V+kd*M)/(V+kd*M+kd*DEP) -
lambda * QRAD + inter(fluxbe7pluie,t)
Xdot = [dVdt,dMdt,dDEPdt,dQRADdt]

// La fonction make_steps lit des fichiers de données au format :
// debut fin valeur (typiquement des intégrations "trappes")
// Elle recalcule un fichier à deux colonnes (temps, valeur) qui
// simule des escaliers. Le delta-t entre deux marches est de
```

```

// un jour.

function [H]=make_steps(fifi)
lul = fscanfMat(fifi)
deltat = 1
uu = [lul(:,1);lul(:,2)-deltat]
vv = [lul(:,3);lul(:,3)]
hop = [uu,vv]
H = sortup(hop,'r')

// Cette fonction recoit une matrice de deux colonnes (temps et
valeurs)
// et donne en sortie la valeur interpolee au temps t (ou au vecteur
t si
// plusieurs points demandes
function [X] = inter(M,t)
M = M'
X = interpLn([M(1,:);M(2,:)],t)

```

## Programme principal

```
// Modele simple de transport du Be-7

chdir('h:\piren\modele_be7');
debit = fscanfMat('debit_poses.txt');
and_cs137 = make_steps('andresy_cs137.txt');
and_i131 = make_steps('andresy_i131.txt');
and_pb210 = make_steps('andresy_pb210.txt');
and_be7 = make_steps('andresy_be7.txt');
den_cs137 = make_steps('denouval_cs137.txt');
den_i131 = make_steps('denouval_i131.txt');
den_pb210 = make_steps('denouval_pb210.txt');
den_be7 = make_steps('denouval_be7.txt');
pos_cs137 = make_steps('poses_cs137.txt');
pos_i131 = make_steps('poses_i131.txt');
pos_pb210 = make_steps('poses_pb210.txt');
pos_be7 = make_steps('poses_be7.txt');
pluvio = fscanfMat('pluvio.txt');
and_mes = fscanfMat('andresy_mes.txt');
den_mes = fscanfMat('denouval_mes.txt');
pos_mes = fscanfMat('poses_mes.txt');

kdep = 130e6; // correspond sensiblement a une teneur en MES de 1
g/m3
// Flux de MES calcules d'apres les debits et les MES a andresy et
denouval (moyenne des deux)
// on multiplie par 86400 pour avoir des g par jour
fmin = [debit(:,1), ((inter(and_mes,debit(:,1)) +
inter(den_mes,debit(:,1)))/2 .* debit(:,2))' * 86400];
debitm3j = [debit(:,1),debit(:,2)*86400];

// transforme un Kd en l/kg en m3/g
kd = 5e4/1000/1000;

// les activites en Bq/g
activ = ((inter(and_be7,debit(:,1)) +
inter(den_be7,debit(:,1)))/2)/1000;
// les MES en g/m3
mes = (inter(and_mes,debit(:,1)) + inter(den_mes,debit(:,1)))/2;
fradin = [debit(:,1),debit(:,2).*activ'.*(1/kd + mes)*86400];

Surface = 120000*200;
fluxbe7pluie = [pluvio(:,1),Plbe7(pluvio(:,2))*Surface];

Posesini = 0.088; // (Bq/g)
Vini = 130e6
Mini = 1300e6 // 10 g/m3
DEPini = 1300e6 // 10 g/m3
Qbe7ini = Vini * Posesini / kd + (Mini+DEPini)* Posesini

vc = 24; // Vitesse de chute en m/j
X0 = [Vini,Mini,DEPini,Qbe7ini];
t0 = 36348;
ndays = 150; // Duree de la simulation (en jours)
t = 36348 + (1:ndays);
lambda = log(2)/53.3;

result = ode("adams",X0,t0,t,moteur);
```

```
final = matrix(result,4,ndays)';  
fprintfMat('results.txt',final);
```