

4.1.6. Etude rétrospective de la contamination métallique dans les sédiments du Bassin de la Seine au cours des dernières décennies

A. Bernollin¹, Ph. Bonté¹, M.-F. Le Cloarec¹, I. Lefèvre¹, J.-M. Mouchel², L. Tessier¹

¹LSCE, avenue de la Terrasse, 91198 Gif sur Yvette Cedex (bonte@lsce.cnrs-gif.fr)

²CEREVE, ENPC Champs sur Marne

Piren-Rapport-Bonte-416-2003-03-11.doc

4.1.6. Etude rétrospective de la contamination métallique dans les sédiments du Bassin de la Seine au cours des dernières décennies.....	1
1. Introduction.....	1
2. Sites d'Echantillonnage.....	2
2.1. Stratégie.....	2
2.2. Site amont.....	2
2.3. Aval de Troyes.....	2
2.4. Autres carottes.....	3
3. Vitesses de sédimentation.....	3
3.1. Carotte du lac du Temple.....	3
3.2. Carottes du canal aval de Troyes.....	5
3.3. Autres carottes.....	5
3.3.1 Nogent sur Seine.....	5
3.3.2 Station Seine Aval – île d'Herblay.....	6
3.3.3 Aval de Poses : Oissel.....	6
3.4. Zones humides.....	6
4. Contamination métallique et éléments traces.....	6
4.1. Méthodologie.....	6
4.2. Résultats des mesures des teneurs métalliques.....	7
4.2.1 Les argiles.....	7
4.2.2 Les carbonates.....	7
4.2.3 Les métaux.....	8
4.2.4 Discussion.....	10
5. Conclusions et perspectives.....	12
6. Bibliographie.....	13
7. Annexe.....	14

1. Introduction

Le développement des activités humaines au cours des derniers siècles a entraîné une dégradation de la qualité des eaux des rivières. En ce qui concerne les pollutions métalliques, les mesures prises dans les dernières décennies devraient conduire à une amélioration, ce que certains résultats semblent confirmer pour les dix dernières années dans le bassin de la Seine. Afin de vérifier cette évolution, il est nécessaire d'avoir un historique de la contamination des sédiments de la Seine.

C'est dans cette optique que nous avons entrepris d'étudier la contamination en métaux lourds de sédiments accumulés dans le lit de rivières du bassin de la Seine. Nous analysons également une série d'éléments traces associés pour comparer ces sédiments en place aux MES en circulation et rechercher d'éventuelles variations passées. Nous présentons ici les premiers résultats de cette nouvelle action.

Cette étude est une partie de l'action intitulée « approches prospectives et rétrospectives de l'écologie industrielle du bassin de la Seine : exemple de la circulation du plomb mise en regard de celle de l'azote » de l'ACI « écologie quantitative : biosphère continentale ».

2. Sites d'Echantillonnage

2.1. Stratégie

Il s'agit donc, par l'intermédiaire de carottes sédimentaires prélevées dans des zones à sédimentation régulière, de reconstituer le profil de la contamination métallique en rivière sur les dernières décennies.

En raison des différentes perturbations/modifications du lit des rivières dans un bassin versant aussi anthropisé que celui de la Seine (recalibrages, dragages, navigation), les sites de sédimentation régulière sont assez exceptionnels. A ce stade de l'étude, nous n'avons travaillé que sur des carottes prélevées dans le lit mineur.

Des carottes ont été prélevées en mars 2002 à l'aval d'une zone urbanisée (la ville de Troyes). Nous avons également utilisé d'autres carottes prélevées antérieurement : dans le lac réservoir du Temple, aux alentours de la station Seine Aval et à l'aval du barrage de Poses (Oissel). Nous rappellerons par ailleurs les résultats obtenus il y a quelques années sur quatre carottes prélevées dans la zone humide de La Bassée pour expliciter une solution alternative dans la recherche d'enregistrements sédimentaires dans un bassin versant très anthropisé.

2.2. Site amont

Une série de carottes avaient été prélevées le 15 décembre 1995 lors de la dernière vidange décennale des bassins de retenue en amont de l'Aube et de la Seine. Nous avons retenu la plus longue des carottes. Elle provient du lac du Temple, bassin de retenue de l'Aube. Prélevée à pieds « secs » au milieu du lac à l'aide d'un tube PVC de 90 mm de diamètre intérieur, elle mesure 50 cm et a été tronçonnée en sections de 2 cm de hauteur. Le sédiment, grisâtre, est fin.

2.3. Aval de Troyes

Le site d'échantillonnage (Figure 1) choisi spécifiquement pour cette étude de l'évolution de la contamination métallique au cours des dernières décennies se situe sur la commune de Barberey St-Sulpice, à quelques kilomètres à l'aval de la ville de Troyes. Nous avons choisi l'extrême amont de l'ancien Canal de la Haute Seine, construit entre 1806 et 1851 dans le cadre du développement de la navigation fluviale, vers Paris notamment. Le canal a été fermé par une route il y a plus de trente ans et ce « bras mort » n'est plus alimenté que par un très fin filet d'eau provenant de la partie amont du canal. On pouvait donc s'attendre à une sédimentation lente et non perturbée. Trois carottages ont été réalisés le 6 mars 2002 à partir d'une embarcation sur un fond de 50 à 100 cm de profondeur d'eau, avec le carottier mis au point par J.-M. Mouchel (100 mm de section intérieure, sans parties métalliques, qui facilite le découpage sur le terrain de la carotte en tronçons de 2 cm d'épaisseur). Les trois carottes ont pénétré sur près d'un mètre le sédiment mais tout le sédiment de la première carotte a été perdu au retour sur la terre ferme.



Figure 1: Site d'échantillonnage de TR02

2.4. Autres carottes

Les vitesses de sédimentation des plusieurs autres carottes du bassin de la Seine ont déjà été étudiées au laboratoire avec les mêmes méthodes (analyse par spectrométrie gamma). A l'amont de l'agglomération parisienne, une carotte avait été prélevée en 1995 dans le chenal amont de la centrale de Nogent sur Seine (D. Vazelle). A l'aval, sur le tronçon de Seine allant des rejets de la station d'épuration d'Achères jusqu'à l'extrémité aval de l'île d'Herblay, 20 carottes, d'une longueur allant de 8 à 55 cm, ont été prélevées en 1998 et 1999. A l'aval du barrage de Poses, une carotte avait été prélevée par J.-M. Mouchel à Oissel, en septembre 1998.

3. Vitesses de sédimentation

Les mesures de vitesse de sédimentation et de datation sont réalisées au LSCE par l'intermédiaire des radioéléments ^{137}Cs et ^{210}Pb , par spectrométrie gamma, à l'aide de détecteurs en cristal de germanium hyper pur et à très bas bruit de fond. Le ^{137}Cs et le ^{210}Pb sont les marqueurs les plus couramment utilisés pour la datation de sédiments fluviaux ou lacustres (Bonté et al, 2001).

3.1. Carotte du lac du Temple

Les 25 sections de 2 cm d'épaisseur constituant l'intégralité de cette carotte ont tous été analysés par spectrométrie gamma de manière à vérifier la régularité de la sédimentation dans ce domaine particulièrement protégé qu'est un grand bassin de retenue.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 1, donné en annexe.

Afin de corriger des différences de densité au long de la carotte, nous avons représenté les variations d'activité de Cs^{137} et d'excès de Pb^{210} en fonction du poids cumulé depuis la surface,

recalculé par unité de surface (kg/m^2). Nous adopterons cette méthode pour toutes les carottes présentées dans ce rapport.

La Figure 2 montre une stabilité quasi parfaite de l'activité de Cs^{137} sur la partie supérieure de la carotte, jusqu'à un épaisseur de $150 \text{ kg}/\text{m}^2$ (le niveau à 30 cm de profondeur). Ensuite, l'activité de Cs^{137} augmente rapidement, passant de $8,1 \text{ Bq}/\text{kg}$ en moyenne à $18,8 \text{ Bq}/\text{kg}$ à 46 cm de profondeur. Nous avons détecté la présence de Cs^{134} dans le niveau immédiatement au-dessus ($1,01 \text{ Bq}/\text{kg}$ en décembre 1996). Le rapport $\text{Cs}^{137}/\text{Cs}^{134}$ ne peut pas être directement exploité à ce niveau d'activité, mais cette mesure confirme qu'il s'agit de sédiments nettement marqués par les retombées de Tchernobyl. La totalité de la carotte représente alors 9 à 10 ans de sédimentation, puisque le prélèvement a eu lieu en 1995. Ce laps de temps relativement court, ainsi que la qualité moyenne du détecteur utilisé pour ces analyses « exploratoires », expliquent que nous pouvons ne pas tirer facilement d'information à partir de la variation de l'excès de Pb^{210} . Avec une période de 22,3 ans, cet isotope délicat à détecter précisément ne montre pas de décroissance claire dans cette carotte.

Cependant, notre objectif final est de pouvoir associer un âge à un état de contamination des sédiments d'un site. L'identification du niveau correspondant à l'accident de Tchernobyl nous permet de dater un point précis de la carotte. D'autre part, les activités de Be^7 mesurées en surface confirment l'absence de perte significative de sédiment d'âge 0 (les activités de Be^7 apportées par les pluies observées sur un sol, ou en l'occurrence le fond d'un lac vidangé, sont toujours beaucoup plus faibles car les particules sont évidemment beaucoup plus nombreuses que les MES dans l'eau). En faisant l'hypothèse raisonnable que le flux de Pb^{210} atmosphérique (descendant du radon et responsable de l'excès de Pb^{210}) est constant dans le temps (la majeure partie de l'excès de Pb^{210} adsorbé sur les MES est acquise à partir des précipitations arrivant sur la surface de la rivière), nous avons appliqué le modèle CRS (Constant Rate of Supply, Appleby et Olfield, 1978) en estimant le stock de Pb^{210} en excès enfoui sous la base de la carotte. Dans ce modèle, on compare le stock de Pb^{210} accumulé sous une profondeur donnée (Bq/m^2 à $z \text{ cm}$) au stock total (Bq/m^2 à 0 cm). Si le flux de Pb^{210} est resté constant au cours du temps, la diminution de ce stock à mesure qu'on descend dans le sédiment n'est due qu'à la décroissance radioactive du stock total, même si le taux de sédimentation a varié. On obtient donc ce que nous recherchons : un âge de chacun des horizons de la carotte. La carotte prélevée n'étant pas assez longue pour atteindre une profondeur à laquelle le Pb^{210} en excès a suffisamment décré pour être insignifiant, nous avons calculé le stock manquant de manière à être en cohérence avec les deux niveaux datés : 1995 pour la surface et 1986 à 45 cm . Donc, en ajoutant $14500 \text{ Bq}/\text{m}^2$ à la base de la carotte, nous obtenons un stock d'âge 0 (1996) de $21100 \text{ Bq}/\text{m}^2$ et la datation de chacun des niveaux de la carotte représentée en Figure 2.

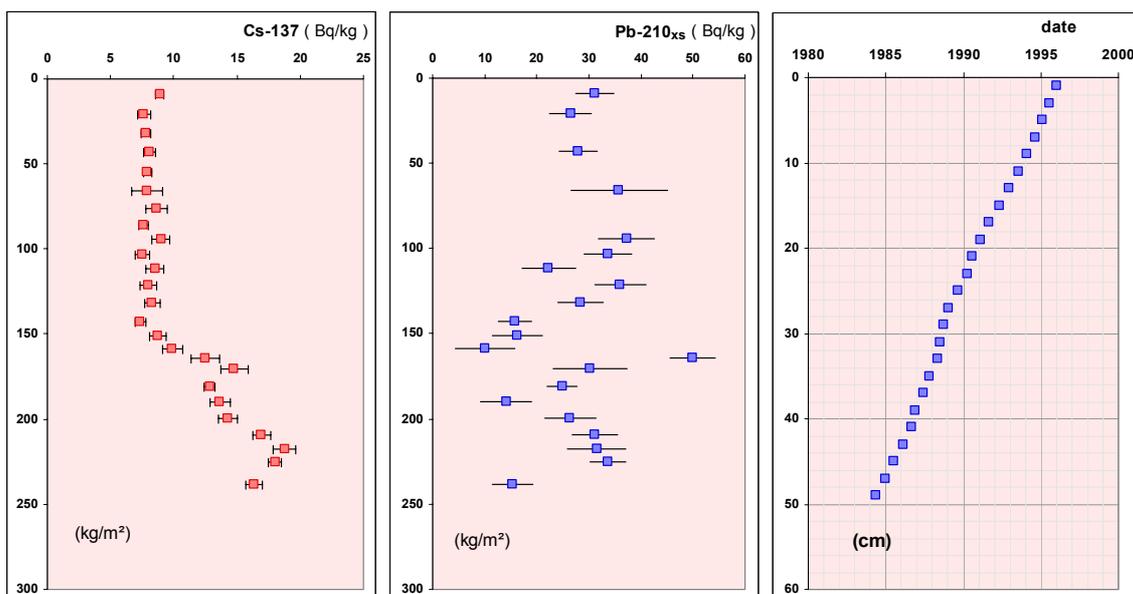


Figure 2 : Variations des activités de Cs^{137} et d'excès de Pb^{210} dans la carotte OR2 et datation des niveaux de la carotte

3.2. Carottes du canal aval de Troyes

Deux carottes ont donc été prélevées avec succès. La carotte TR02 a été analysée en détails (78 cm, 19 niveaux analysés), la carotte TR01 de façon plus lâche, pour vérifier si elle donnait la même information (66 cm, 6 niveaux analysés). Les résultats sont donnés dans le Tableau 2, en annexe.

Comme pour la carotte du lac du Temple, nous avons considéré les variations d'activité de Cs^{137} et de Pb^{210} en excès en fonction du poids cumulé de sédiment.

Sur la Figure 3, on constate que les courbes obtenues ressemblent fortement à celles de la carotte OR2. Les variations de l'excès de Pb^{210} sont plus régulières et la décroissance avec la profondeur est plus nette. Deux raisons à cela : nous avons utilisé un excellent détecteur gamma (bruit de fond, efficacité, résolution) et échantillonné un plus long intervalle de temps. En effet, la remontée d'activité de Cs^{137} en profondeur est très semblable à ce qui a été observé dans la carotte OR2. L'activité de Cs^{137} passe de 8 Bq/kg à plus de 20, soit un facteur 2 d'augmentation, tout à fait comparable au passage du « bruit de fond » actuel (bombes + Tchernobyl) aux particules spécifiquement marquées au moment de l'accident (les 6 ans écoulés entre les deux séries d'analyses correspondent à 13 % de décroissance du Cs^{137}).

Nous pouvons donc considérer que la base de la carotte date de 1986 et que le sommet est bien du sédiment d'âge « 0 » (le comportement du Be^7 est compatible avec cette hypothèse). En appliquant le même raisonnement que pour la carotte OR2, il faut alors ajouter 20000 Bq/m² à la base de la carotte, et nous obtenons au sommet un stock total actuel de 33800 Bq/m². Il est toutefois possible que la base n'ait pas atteint le niveau correspondant à 1986, il faudrait une carotte plus longue pour s'en assurer, mais il ne peut guère manquer plus de deux ans (par comparaison des profils Cs^{137} d'OR2 et de TR02).

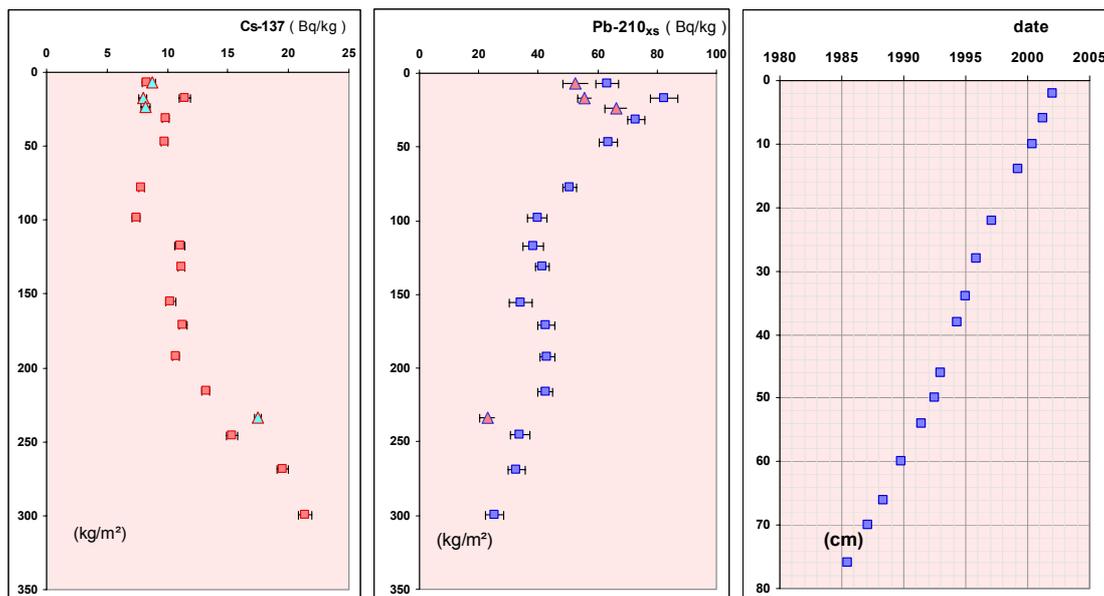


Figure 3 : Variations des activités de Cs-137 et d'excès de Pb-210 dans la carotte TR2 (carrés) et la carotte TR01 (triangles) et datation des niveaux de la carotte TR02

3.3. Autres carottes

3.3.1 Nogent sur Seine

Nous avons analysé une carotte prélevée par l'équipe de la direction des études et recherches d'EDF à l'aide d'un carottier CEMAGREF le 8 novembre 1994 dans la prise d'eau alimentant la centrale de Nogent sur Seine. La présence d'un net enrichissement en Cs^{137} à 40 cm de profondeur, la base de la carotte (45 Bq/kg contre 10 à 20 au-dessus ramené à la date du prélèvement) associé à la

présence de Cs¹³⁴ (environ 1 Bq/kg) a permis d'identifier le niveau marqué par les retombées de Tchernobyl. La vitesse de sédimentation est donc assez élevée en cet endroit, de l'ordre de 4 cm/an.

3.3.2 Station Seine Aval – île d'Herblay

A l'aval de l'agglomération parisienne, 7 carottes ont été prélevées en septembre 1998 et 13 autres en juillet 2000 au voisinage de l'usine de retraitement Seine Aval (Bonté et al., 1999, Martin et Sogon, 2000). Parmi toutes ces carottes, réparties entre l'amont du premier rejet et l'extrémité aval de l'île d'Herblay, bras droit (le seul navigué) et bras gauche, quatre carottes seulement dépassent les 30 cm de longueur : les carottes 11 et 12 (35 cm chacune) sont immédiatement sous les rejets de la station, la carotte 3 est à la pointe amont de l'île d'Herblay (47 cm) et la carotte 5 est sur la rive droite du bras gauche de l'île (55 cm). Si toutes les autres carottes sont plus courtes, c'est parce que le sédiment était trop compact ou grossier pour permettre au carottier de pénétrer.

Dans cette partie « fleuve » de la Seine, la sédimentation est particulièrement complexe, même si on sait bien la modéliser. Parmi ces quatre carottes (Tableau 3), par exemple, la carotte Ach11 a une sédimentation relativement « normale » (Be-7 et fort excès de Pb-210 en surface, 30 cm de sédiment marqué au Cs¹³⁷ et porteur de Pb-210 en excès, diminution dans le dernier horizon) alors que la carotte Ach12, située à quelques 10 m de distance, n'a absolument aucun sédiment récent, pas même en surface. Plus loin des rejets, la carotte Ach03 a un sédiment meuble mais ancien (antérieur à 1960) à partir de 5 cm et la carotte Ach05 montre une très forte activité de Cs¹³⁷ (170 Bq/kg en 2000, soit 400 Bq/kg rapporté en 1963). Difficile d'affirmer qu'il s'agit là des retombées des bombes.

3.3.3 Aval de Poses : Oissel

Cette carotte, prélevée dans une vasière à Oissel, a été décrite dans le rapport PIREN de 1998 (Bonté et al., 1999). Les résultats, donnés en Tableau 4, montrent des activités comparables à celles rencontrées à l'amont de Poses. La vitesse de sédimentation est certainement élevée, mais nous n'avons pas de marqueur temporel précis, comme une nette augmentation de Cs¹³⁷ qui serait liée à l'accident de Tchernobyl. Si donc nous appliquons le modèle CRS de la même manière que pour les carottes très amont, il nous faut ajouter environ 20000 Bq/m² de Pb²¹⁰ pour caler l'âge de la base de la carotte vers 1989 (post Tchernobyl), ce qui ne semble pas impossible. On peut donc raisonnablement proposer une vitesse minimum de 4 cm/an.

3.4. Zones humides

Les lits majeurs des rivières, plaines d'inondation, sont l'autre solution pour conserver des sédiments en place sur plusieurs décennies. Dans les zones humides de la confluence Aube-Seine, nous avons déjà clairement pu reconnaître, ponctuellement, des zones d'accrétion de sédiment, à Maizières (Fustec et al., 1997) et d'autres caractérisées par une absence d'accrétion de particules, à Voyons (« La Bassée : Fonctionnement du Territoire 'Bassée' » par E. Fustec et al.). A l'extrémité aval du bassin, nous avons également obtenu une carotte avec une stratification datable des sédiments, sur la Risles (collaboration avec E. Fustec). D'autres auteurs étudient également les sédiments des zones humides, zones de stockage de contaminants (Walling et al., 2003, par exemple).

4. Contamination métallique et éléments traces

4.1. Méthodologie

La plupart des éléments traces ont été déterminés par activation neutronique, mais pour la détermination du plomb et du cadmium, nous avons dû utiliser l'absorption atomique (four).

Pour l'activation neutronique, les échantillons ne nécessitent aucun traitement particulier : 50 mg de sédiment sont emballés dans des sachets en plastique, placés dans une navette en aluminium hermétique et irradiés. Une navette contient entre 15 et 20 échantillons, dont plusieurs roches

standards. L'irradiation a lieu dans le réacteur Orphée du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, pendant 30 mn sous un flux de $0,9 \cdot 10^{13}$ neutrons.cm⁻².s⁻¹ (neutrons thermiques).

Pour les mesures par absorption atomique, la mise en solution des échantillons a été particulièrement soignée, une précédente expérience d'analyse « humide » d'éléments en traces dans des échantillons de MES de la Seine ayant montré qu'il était difficile de parvenir à une dissolution complète.

Nous avons donc entrepris des essais de minéralisation de la matière organique présente dans les échantillons avec différents oxydants, et comparé leur efficacité sur des roches standards de composition connue (SCO-1 et SDC-1 de l'USGS). Des deux oxydations testées (Br₂ + H₂O₂ et acide perchlorique), la deuxième s'est avérée plus efficace.

Le principe général de l'attaque pour un échantillon de 0,5 g de sédiment est le suivant : une première attaque à l'eau régale (HCl/HNO₃ 3/1) au cours de laquelle les carbonates sont dissous, puis une attaque à l'acide perchlorique (HClO₄) pour détruire la matière organique, et enfin un traitement à l'acide fluorhydrique (HF) pour dissoudre et éliminer la silice. Chacune des attaques est réalisée en bombe en téflon, le temps nécessaire au traitement complet d'un échantillon est de deux semaines. Parallèlement, des blancs de réactifs ont été réalisés pour les quatre séries d'attaques.

Le modèle de spectromètre utilisé ici est le ZEEMAN/ 3030 de marque Perkin-Elmer, à four en graphite et possédant une correction de bruit de fond à effet Zeeman (utilisant un puissant champ magnétique). Nous avons utilisé la méthode d'addition qui permet de s'affranchir de l'effet de matrice dû à l'échantillon lui-même en réalisant une gamme d'étalonnage directement dans la solution à doser.

4.2. Résultats des mesures des teneurs métalliques.

Le Tableau 5 regroupe l'ensemble des teneurs mesurées pour les principaux éléments détectés par activation neutronique, le Tableau 6 pour l'absorption atomique, pour les différents niveaux étudiés de chacune des carottes TR02 et OR2, spécifiquement étudiées pour cette première phase du programme, phase de mise au point et d'évaluation des possibilités de mesure et d'interprétation.

Parmi les nombreux éléments remarquables, trois grandes familles peuvent être séparées. Il y a d'abord les éléments représentant la fraction argileuse du sédiment, ceux représentant la fraction carbonatée et enfin ceux que l'on peut considérer comme des polluants : certains métaux.

4.2.1 Les argiles

C'est la fraction la plus fine des sédiments et aussi celle qui abrite la quasi totalité des contaminants du fait de ses propriétés de rétention très fortes (surface spécifique très importante). C'est pourquoi dans l'estimation d'une pollution sur des sédiments, qu'ils soient en suspension ou déposés, on normalise les teneurs en polluants à cette fraction. L'élément détecté par activation qui représente le mieux ces argiles est le scandium (⁴⁶Sc). C'est donc lui qui est utilisé pour corriger les teneurs de polluants des différences de granulométrie qui existent souvent d'un échantillon à l'autre.

Les autres éléments caractéristiques des argiles et détectés par activation neutronique sont le césium, le thorium, le rubidium et le cobalt. Ils sont tous les quatre très bien corrélés au scandium dans les deux carottes analysées et leurs profils en profondeur ne présentent pas d'anomalies laissant penser à une contamination.

4.2.2 Les carbonates

Ils sont représentés par : ⁴⁷Ca, ⁴⁷Sc (fils du ⁴⁷Ca) et généralement associés à de fortes teneurs en strontium (⁸⁵Sr). La teneur en calcium, relativement constante sur toute la hauteur de la carotte, est d'environ 20 %, ce qui correspond à environ 50 % de CaCO₃. Elle est due en partie à la nature sédimentaire du bassin de la Seine.

On observe ainsi une forte anticorrélation ⁴⁷Sc - ⁴⁶Sc, correspondant aux argiles (scandium) et aux carbonates, avec un r²=0.83 dans TR02 (Figure 4).

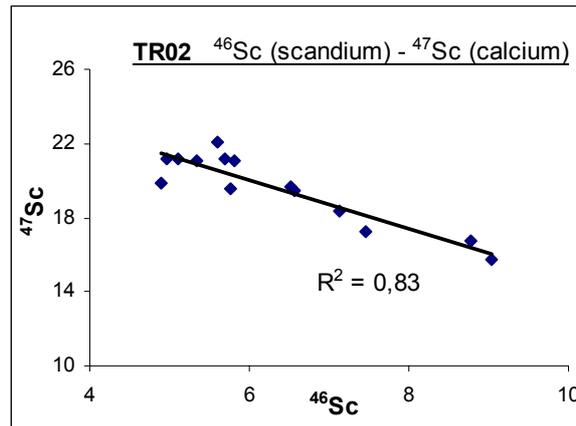


Figure 4 : Anti-corrélation scandium - calcium dans TR02

4.2.3 Les métaux

Parmi les métaux identifiés en activation, on distingue ceux présents naturellement dans la roche mère, comme le fer, et ceux qui sont essentiellement apportés par les activités humaines : ce sont entre autres le zinc, le chrome, l'argent, l'arsenic, le plomb et le cadmium. Ils sont respectivement analysés par leurs isotopes suivants : ^{59}Fe , ^{65}Zn , ^{51}Cr , ^{110}Ag et ^{76}As , sauf pour Pb et Cd qui ont été mesurés par absorption atomique.

Site de Troyes

Les résultats des mesures de plomb et de cadmium et leurs incertitudes associées sont présentés sous forme de profils à la Figure 5. L'allure générale semble indiquer une augmentation des concentrations des deux métaux avec la profondeur, la tendance étant cependant plus marquée pour le plomb que pour le cadmium. En effet, la courbe du cadmium présente plus d'irrégularités que celle du plomb et est affectée d'incertitudes plus importantes.

Malgré l'allure en dents de scie du graphe du cadmium, on peut remarquer un niveau contaminé à la fois en Cd et en Pb qui se dégage de la tendance générale : il s'agit du niveau TR02 R situé de 34 à 36 cm de profondeur. Il en est de même pour la base de la carotte qui affiche les deux plus fortes teneurs pour les deux métaux.

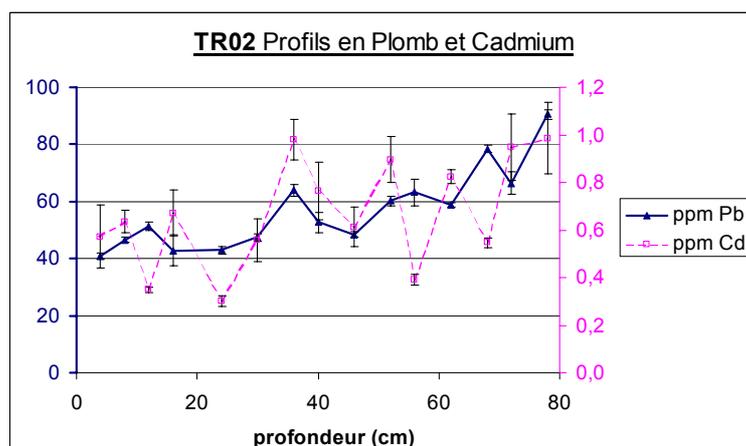


Figure 5 : Profils en Plomb et Cadmium de TR02

La Figure 6, qui représente l'évolution de la charge polluante avec la profondeur sur TR02, ne montre pas de tendance très nette à l'augmentation, mais plutôt la présence de niveaux plus contaminés que d'autres. On observe par exemple aux niveaux à 30 et 62 cm de profondeur, des points des concentrations à la fois d'argent, de zinc et en moindre mesure, de chrome.

L'arsenic présente quant à lui une constance remarquable. Sa bonne corrélation avec le ⁴⁶Sc en fait ainsi un bon marqueur de la fraction fine des sédiments.

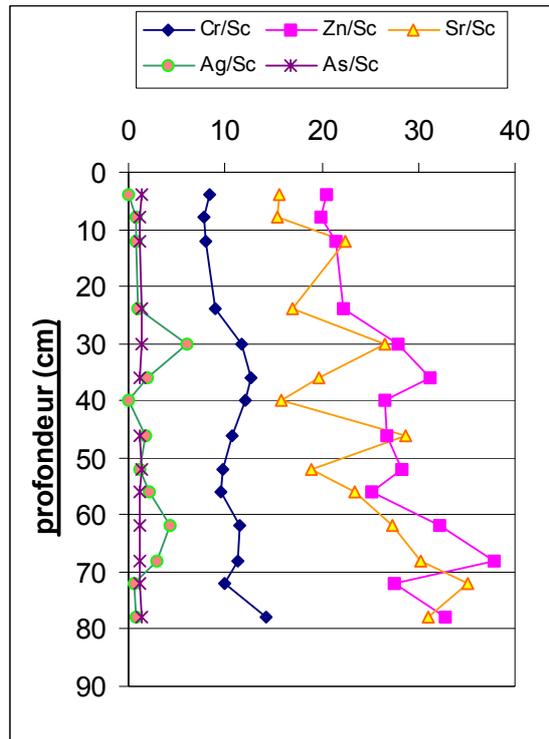


Figure 6 : Profils sur TR02 des éléments Cr, Zn, Sr, Ag, As normalisés au Sc

Site d'Orient

En ce qui concerne ce site, la tendance à l'accumulation du plomb au bas de la carotte, observée sur TR02, semble se confirmer (Figure 7). Pour le cadmium, la tendance qui se dégage du graphique laisse plutôt penser à une diminution de la charge métallique vers les niveaux profonds de la carotte. Mais, le faible nombre de niveaux échantillonnés et l'incertitude relativement importante associée aux mesures des deux niveaux inférieurs (17.1 % pour 40-42 cm et 10 % pour 48-50 cm) nous obligent à émettre une réserve quant à une tendance réelle.

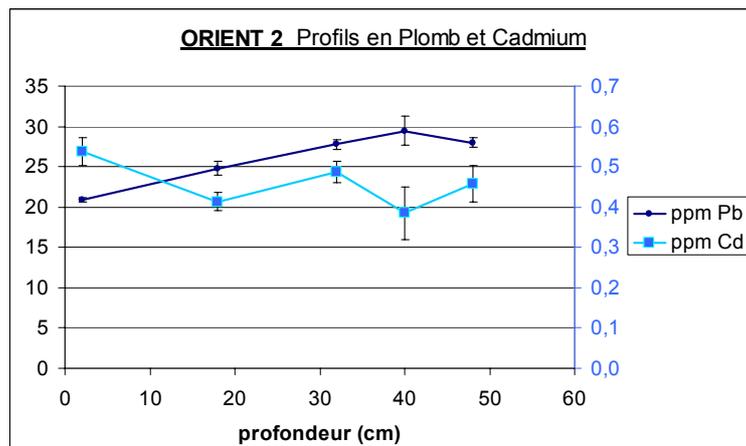


Figure 7 : Profils en Plomb et Cadmium d'Orient 2.

Pour les autres métaux, on ne distingue pas de nette accumulation au bas de la carotte sauf dans le cas du chrome qui semble présenter une concentration plus importante à partir du niveau situé à 30 cm de profondeur (Figure 8).

L'arsenic, toujours aussi bien corrélé aux argiles, a un profil aussi régulier que celui du site de Troyes.

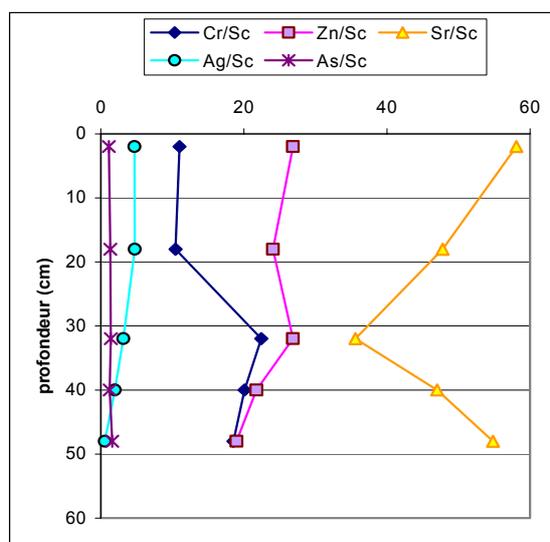


Figure 8 : Profil sur Orient 2 des éléments Cr, Zn, Sr, Ag, As normalisés au Sc

Comparaison des deux sites :

La carotte Orient 2 ayant été prélevée dans le lac du Temple (réservoir en dérivation sur l'Aube), elle ne constitue pas un point amont qui aurait permis la comparaison de deux sites de part et d'autre de Troyes. Néanmoins, ce lac étant d'une part très proche du lac d'Orient (en dérivation sur la Seine), d'autre part dans la partie la plus amont du bassin versant de la Seine, on peut supposer que les pressions anthropiques subies par ces deux lacs sont comparables et qu'ils représentent tous deux une des zones du bassin les moins affectées par la pollution, industrielle tout au moins. Ainsi la comparaison de TR02 avec Orient 2 conserve un caractère de comparaison amont-aval.

Certains éléments comme le zinc ont des teneurs similaires d'une carotte à l'autre, tandis que d'autres montrent des variations. Pour le plomb comme pour le cadmium, les teneurs moyennes mesurées à Troyes sont globalement doubles de celles mesurées dans le lac du Temple, ce qui tendrait à confirmer l'hypothèse émise quant à la différence de pollution des deux sites.

Par contre dans le cas du chrome et de l'argent, les plus fortes concentrations s'observent dans la carotte Orient 2. Le rapport Cr/Sc varie entre 8 et 12 dans TR02 et entre 10 et 22 dans Orient 2, celui d'Ag/Sc étant proche de 0.1 dans TR02, hormis le pic à 6.05, et variant entre 0.5 et 4.6 dans Orient 2. Cette différence entre les deux sites semble a priori originale car le site le plus contaminé en chrome est le site le plus en amont sur le bassin. Ceci est peut-être l'indication d'une contamination passée en chrome dans la région de ce lac du Temple.

4.2.4 Discussion

Analyse des variations des teneurs en métaux (Pb, Cd, Zn, Cr) sur les sites de Troyes et du Temple.

L'évolution des teneurs en plomb en cadmium en zinc et en chrome (normalisés au scandium, Figure 9) dans la carotte de Troyes indique une pollution nettement plus marquée en dessous de 30 cm de profondeur, c'est à dire concernant les horizons de plus de dix ans.

Une des raisons qui peut expliquer cette amélioration du niveau de contamination des sédiments est la réduction notable des émissions atmosphériques causées par les transports routiers. Les quantités émises par la circulation automobile dans le bassin de la Seine pour les années 1990, 1994 et 1999 sont respectivement de 780, 260 et 100 t/an. L'utilisation de plomb comme additif de

l'essence a été définitivement interdite le 1^{er} janvier 2000. On peut également citer le remplacement progressif du plomb, pendant tout le XX^e siècle, par d'autres métaux non ferreux ou par les matières plastiques, dans l'industrie de la câblerie par exemple (Thévenot et al., 2002).

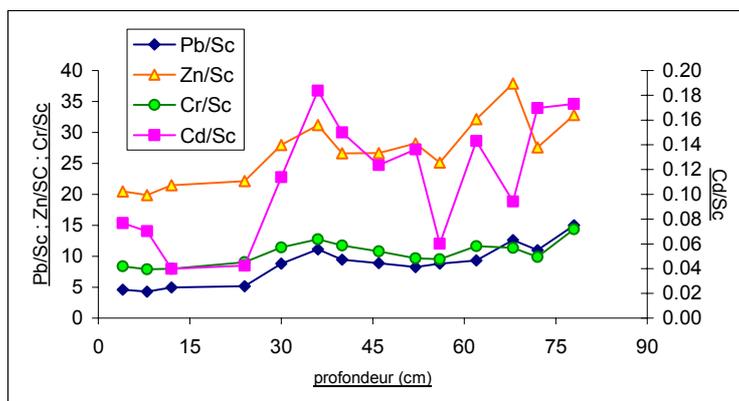


Figure 9 : Profils de Pb/Sc, Cd/Sc, Zn/Sc, Cr/Sc dans TR02

Si l'on compare l'évolution des teneurs de plomb et de cadmium à celle d'autres métaux, on peut mettre en évidence une corrélation positive entre le plomb, le zinc et le chrome, mais aucune liée au cadmium. Les éléments représentatifs de la fraction argileuse (Sc et As), de la fraction naturelle (Fe) ou de la fraction carbonatée (CaCO_3) ne sont pas non plus liés aux métaux étudiés ici. Il est alors difficile dans notre cas d'associer plomb et cadmium à une fraction particulière des sédiments.

Comparaison avec d'autres sites du bassin

Le rapport de synthèse 1998-2001 du PIREN-Seine fait état du niveau de fond général du bassin de la Seine, pour de nombreux éléments, dont les métaux, mesuré dans des MES. Pour les trois principaux métaux mesurés ici par les différentes techniques, les gammes de variations sont les suivantes : Cd : 0,10 - 0,5 ppm, Pb : 10,8 - 22 ppm, Zn : 25,5 - 69,2 ppm.

Les valeurs mesurées dans nos échantillons (Tr02 et OR2) sont comparativement plus élevées. Nous mettons en évidence des teneurs 3 à 4 fois supérieures en cadmium et zinc, tandis que pour le plomb, seul le site de Troyes est au-dessus des valeurs « naturelles », celui du Temple différant peu. Ainsi on est en mesure de dire que l'origine du plomb est liée à l'agglomération troyenne. Les sources sont certainement multiples et on peut citer les principales comme le plomb automobile ou les canalisations et penser à différentes sources plus locales liées directement à la vieille ville de Troyes (présence de nombreuses églises, vitraux, vieux monuments). Dans le cas du cadmium et du zinc l'origine est différente et serait plus liée à l'agriculture.

D'autres mesures effectuées par le Piren sur la Seine à Bar-sur-Seine (amont de Troyes) et sur l'Aube à Dienville, à proximité du lac du Temple, font état de teneurs relativement élevées en cadmium : 1 ppm à Bar et 0,7 ppm à Dienville. Ces deux points se situent au niveau de bassins agricoles et ruraux (faible densité de population) et pour lesquels les contaminations sont essentiellement d'origine domestique. Dans le cas du cadmium, on considère que les excès mesurés sont surtout dus à l'érosion des surfaces agricoles traitées par des engrais phosphatés : cette source représenterait 73 % de la pollution mesurée. L'augmentation du rapport Cd / niveau naturel dans les zones de densité de population faible confirme cette origine à dominante agricole (Thévenot et al, 2002).

D'autre part, nos résultats peuvent être confrontés à ceux de l'étude d'une carotte prélevée en zone inondable (Khebibeche, 1997), sur le site de Maizières (amont de la confluence Aube-Seine), essentiellement constituée par les apports de matériel sédimentaire lors des crues de la Seine. D'une manière générale, cette carotte pourtant en aval du site de Troyes, est moins polluée en plomb et zinc que TR02. La valeur maximale mesurée à Maizières est de 37 ppm de Pb, elle est de 90 ppm à Troyes.

Pour expliquer cette différence, on peut émettre l'hypothèse d'une répartition de la charge polluante au cours de son transport dans le cours d'eau, due à une sédimentation progressive

Mais de façon globale, nos sites restent des sites peu pollués, en comparaison avec les concentrations rencontrées au niveau de l'agglomération parisienne ainsi qu'à son aval. L'exemple le plus flagrant est celui d'une carotte de sédiment prélevée à Chatou (aval proche de Paris) en 1992 et dont l'horizon situé à 23 cm de profondeur présente des teneurs très fortes en plomb et zinc, 510 ppm et 1500 ppm respectivement, et anormalement élevée en cadmium : 84 ppm (Estèbe, 1996). L'origine de cette pollution n'est à l'heure actuelle toujours pas déterminée.

Enfin on peut citer des valeurs mesurées à Poses (amont de Rouen) en 98-99 sur des MES : Cd : 2 ppm, Pb : 100 ppm, Zn : 384 ppm. Ces valeurs, bien que relativement fortes, laissent apparaître l'influence de la station d'épuration d'Achères, qui traite les eaux usées de la ville de Paris et de sa banlieue (soit 6 millions d'habitants) et qui limite les teneurs rejetées en aval.

5. Conclusions et perspectives

En premier lieu, l'originalité de cette étude réside dans l'analyse de sédiments carottés dans un cours d'eau et non la récolte de matières en suspension ou de sédiments de fond. C'est le point principal de l'étude puisqu'il s'agissait d'apporter une information historique sur la pollution de la Seine par le plomb, disponible uniquement par l'intermédiaire d'une carotte. Les résultats tels que les teneurs en métaux ou leurs tendances le long de la carotte sont parmi les premiers de ce style. Les techniques utilisées se sont révélées efficaces même si elles ont demandé parfois un long investissement. Pour la partie chimie de l'analyse, le protocole de mise en solution, bien qu'un peu long, donne des résultats satisfaisants. Il l'est d'autant plus que les sols font partie des matériels présentant le plus de résistance à la dissolution.

Les données temporelles obtenues par notre carotte de Troyes nous permettent de retracer le profil de la charge métallique sur plus de 20 ans en arrière. Nous déterminerons très prochainement les teneurs en cuivre, en particulier pour répondre aux questions posées par des études antérieures (Thévenot et al., 1998).

Pour la suite de cette action, nous rechercherons de nouvelles carottes à différents niveaux de pression anthropique : échantillonnage du lac du Der qui sera en vidange décennale en 2003, essais de carotte plus longue en aval de Troyes, amont-aval de la centrale de Nogent sur Seine (incidence du changement du système de refroidissement en janvier et avril 1999), amont-aval de l'usine du Bouchet (faible mais très nette contamination en thorium détectées dans les MES), moulin de Muids (bras mort de la Seine très en aval de l'agglomération parisienne). Nous fondons par ailleurs beaucoup d'espoirs sur l'analyse systématique des taux d'accumulation en zone humide. En effet, nous sommes équipés pour prélever dans de bonnes conditions des carottes de sol en zone humide et il est possible, en deux mesures gamma par carotte, de savoir s'il s'agit de site d'accumulation de particules de rivière ou pas. Nous envisageons donc, guidés par les géomorphologues du PIREN qui établissent une typologie des zones humides du bassin de la Seine, d'échantillonner assez largement quelques sites a priori favorable. A côté de La Bassée, site amont, nous envisageons d'explorer des zones humides ou plaines d'inondations à l'aval de l'agglomération parisienne : à Moisson, la Roche Guyon ou Vétheuil.

Une des originalités de notre étude sera de poursuivre dans les sédiments anciens le travail entrepris sur les MES par Laure Tessier : l'exploitation des différentes corrélations et signatures spécifiques des différentes sources naturelles ou de contamination des particules à partir des contaminants métalliques et du cortège d'éléments traces associés.

Le PIREN-Seine en a fait un des objectifs de la prochaine phase du programme (2002-2005) du fait de l'originalité des informations apportées par ce type d'échantillons : mémoire de la sédimentation et des tendances des contaminations éventuelles. Une des applications supplémentaires envisageable dans l'analyse de ces carottes à plus long terme est l'étude des échanges eau-sédiment, c'est à dire l'évaluation des modalités du transfert des polluants entre ces deux phases et éventuellement de leur transfert au sein même des sédiments.

6. Bibliographie

- Appleby, P.G., Oldfield, F., (1978). The calculation of Lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported Pb-210 to the sediment. *Catena* (5), 1-8.
- Bonté Ph., Ballais J. L., Masson M., Ben Kehia H., Eyraud C., Garry G., Ghram A. (2001). Datations au ^{137}Cs , ^{134}Cs et ^{210}Pb de dépôts de crues du XXe siècle., *Datation*: 141-157.
- Bonté Ph., Sogon S., Meybeck M. (1999) Marqueurs radioactifs et matières en suspension, *rapport annuel PIREN Seine 1998*, pp 15
- Estèbe A. (1996) Impact de l'agglomération parisienne et de ses rejets de temps de pluie sur les concentrations en métaux des matières en suspension et des sédiments en Seine en période estivale, Thèse, Université Paris XII-Val de Marne, pp 244
- Fustec E., Bonté Ph., Fardeau J.-C., Khebibèche L., Chesterikoff A., Carru A.M.(1997) La rétention des MES et des polluants associés dans les zones inondables, in. "*L'intervention des zones humides riveraines sur les flux de matière*", G.D.R. Analyse et Modélisation des Systèmes Fluviaux Anthropisés, Thème "Corridor Fluvial", Rapport 1996/II, 3-3 à -3-16.
- Khebibèche (1997). Sédimentation et rétention des micropolluants métalliques en zones inondables. *Rapport de DEA*, Paris XII.
- Martin L., Sogon S. (2000). Une application du modèle SUBIEF 2D aux hauteurs de dépôt testée par les mesures d'isotopes radioactifs in situ, , *rapport annuel PIREN Seine 1999*, pp 8
- Thévenot, D. R., Meybeck M., Lestel L. (2002). Métaux lourds : des bilans en mutation. *Rapport de synthèse 1998-2001.*, PIREN-Seine.
- Thévenot D. R., Meybeck M., Chesterikov A., Chevreuril M. (1998) Chap. 9. Métaux : sources multiples et accumulation. in "*La Seine en son Bassin : Fonctionnement écologique et activités humaines*", M. Meybeck, de Marsily G et Fustec E. éditeurs, Elsevier, Paris, 391-437
- Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L. , Lewis S. ,Meharg A.A. , Wright J. (2003) Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems, *Applied Geochemistry* (18), 195-220

7. Annexe

Tableau 1 Analyses gamma de la carotte OR2, lac du Temple (année de référence : 1996)

niveau	poids total sec (g)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)	Th-228 (Bq/kg)	K (%)	Cs-137 (Bq/kg)	Be7 (Bq/kg)	Cs134 (Bq/kg)
carotte OR02									
0-2 cm	57,1	45 +- 4	13 +- 0,3	12 +- 0,6	12 +- 0,3	0,44 +- 0,02	8,9 +- 0,4	76 +- 17	< 0,3
2-4 cm	73,3	42 +- 4	15 +- 0,5	12 +- 1,2	11 +- 0,5	0,37 +- 0,02	7,6 +- 0,5	43 +- 25	< 0,5
4-6 cm	71,1		13 +- 0,4	11 +- 0,7	9 +- 0,4	0,37 +- 0,02	7,8 +- 0,4	< 23	
6-8 cm	70,4	43 +- 4	14 +- 0,5	15 +- 1,1	13 +- 0,5	0,40 +- 0,02	8,1 +- 0,5	< 29	< 0,5
8-10 cm	77,3		12 +- 0,3	10 +- 0,6	10 +- 0,3	0,39 +- 0,01	7,9 +- 0,3	< 20	
10-12 cm	70,0	52 +- 9	15 +- 1,1	13 +- 2,7	13 +- 1,2	0,39 +- 0,05	7,9 +- 1,2	< 78	< 1,2
12-14 cm	64,8		14 +- 0,9	8 +- 1,4	9 +- 0,8	0,46 +- 0,04	8,7 +- 0,9	< 47	
14-16 cm	63,6		9 +- 0,3	8 +- 0,6	8 +- 0,3	0,33 +- 0,01	7,6 +- 0,3	< 18	
16-18 cm	52,7	47 +- 6	9 +- 0,6	10 +- 1,5	11 +- 0,7	0,35 +- 0,03	9,0 +- 0,7	< 37	< 0,8
18-20 cm	57,8	43 +- 5	9 +- 0,5	11 +- 1,3	11 +- 0,6	0,34 +- 0,02	7,5 +- 0,6	< 31	< 0,6
20-22 cm	53,5	31 +- 5	9 +- 0,6	10 +- 1,4	10 +- 0,6	0,40 +- 0,03	8,5 +- 0,7		< 1,0
22-24 cm	58,5	46 +- 5	10 +- 0,6	10 +- 1,4	9 +- 0,6	0,32 +- 0,03	8,0 +- 0,7		< 0,9
24-26 cm	65,3	39 +- 4	10 +- 0,5	11 +- 1,2	10 +- 0,5	0,30 +- 0,02	8,3 +- 0,6		< 0,6
26-28 cm	74,0	24 +- 3	8 +- 0,4	8 +- 0,9	7 +- 0,4	0,26 +- 0,02	7,4 +- 0,4		< 0,5
28-30 cm	50,0	23 +- 5	7 +- 0,5	5 +- 1,3	6 +- 0,6	0,22 +- 0,02	8,8 +- 0,7		< 0,8
30-32 cm	50,0	21 +- 6	12 +- 0,7	12 +- 1,6	9 +- 0,7	0,42 +- 0,03	9,9 +- 0,8		< 0,9
32-34 cm	35,0	55 +- 4	10 +- 0,9	12 +- 2,3	12 +- 0,9	0,54 +- 0,04	12,5 +- 1,1		< 1,5
34-36 cm	42,0	40 +- 7	11 +- 0,8	12 +- 1,9	9 +- 0,8	0,43 +- 0,04	14,8 +- 1,0		< 1,2
36-38 cm	63,0	36 +- 3	11 +- 0,3	11 +- 0,8	11 +- 0,4	0,39 +- 0,02	12,8 +- 0,4		< 0,5
38-40 cm	60,0	24 +- 5	10 +- 0,6	13 +- 1,4	10 +- 0,6	0,42 +- 0,03	13,7 +- 0,8		< 0,9
40-42 cm	58,0	41 +- 5	15 +- 0,6	14 +- 1,4	11 +- 0,6	0,41 +- 0,03	14,3 +- 0,8		< 0,9
42-44 cm	62,8	42 +- 4	11 +- 0,5	14 +- 1,3	12 +- 0,5	0,50 +- 0,03	16,9 +- 0,7		1,01 +- 0,5
44-46 cm	52,0	44 +- 6	13 +- 0,7	14 +- 1,6	12 +- 0,7	0,47 +- 0,03	18,8 +- 0,9		< 1,0
46-48 cm	49,0	45 +- 3	11 +- 0,4	14 +- 1,0	12 +- 0,4	0,46 +- 0,02	18,0 +- 0,5		< 0,6
48-50 cm	86,0	28 +- 4	13 +- 0,5	14 +- 1,2	11 +- 0,5	0,42 +- 0,02	16,3 +- 0,7		< 0,7

Tableau 2 Analyses gamma des carottes TR02 et TR01, aval de Troyes (année de référence : 2002)

niveau	poids total sec (g)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)	Th-228 (Bq/kg)	K (%)	Cs-137 (Bq/kg)	Be7 (Bq/kg)
carotte TR02								
2-4 cm	53,0	82 +- 4	19 +- 0,4	26 +- 0,8	25 +- 0,5	0,94 +- 0,02	8,3 +- 0,4	31 +- 2
6-8 cm	36,9	103 +- 5	21 +- 0,5	28 +- 1,0	27 +- 0,5	1,18 +- 0,03	11,4 +- 0,5	30 +- 3
10-12 cm	61,6	90 +- 3	17 +- 0,3	25 +- 0,6	25 +- 0,4	1,05 +- 0,02	9,8 +- 0,3	17 +- 1
14-16 cm	61,0	83 +- 3	20 +- 0,3	24 +- 0,6	24 +- 0,4	1,02 +- 0,02	9,8 +- 0,3	8 +- 2
22-24 cm	60,4	69 +- 2	19 +- 0,3	24 +- 0,5	23 +- 0,3	0,89 +- 0,01	7,8 +- 0,2	< 2
28-30 cm	49,5	55 +- 3	15 +- 0,4	18 +- 0,7	17 +- 0,4	0,67 +- 0,02	7,4 +- 0,3	< 3
34-36 cm	50,0	54 +- 3	16 +- 0,4	20 +- 0,8	20 +- 0,4	0,71 +- 0,02	11,0 +- 0,4	< 3
38-40 cm	57,6	57 +- 2	16 +- 0,3	19 +- 0,5	19 +- 0,3	0,69 +- 0,01	11,1 +- 0,3	< 2
46-48 cm	40,7	48 +- 4	14 +- 0,5	19 +- 0,9	18 +- 0,5	0,70 +- 0,02	10,3 +- 0,5	< 3
50-52 cm	68,3	60 +- 3	17 +- 0,3	21 +- 0,6	21 +- 0,4	0,81 +- 0,02	11,3 +- 0,3	< 2
54-56 cm	87,8	60 +- 3	17 +- 0,3	20 +- 0,6	20 +- 0,3	0,76 +- 0,02	10,7 +- 0,3	< 2
60-62 cm	49,5	58 +- 2	16 +- 0,3	19 +- 0,5	18 +- 0,3	0,74 +- 0,01	13,2 +- 0,3	< 2
66-68 cm	91,4	47 +- 3	13 +- 0,4	18 +- 0,8	18 +- 0,4	0,71 +- 0,02	15,3 +- 0,5	< 3
70-72 cm	91,6	49 +- 3	17 +- 0,4	19 +- 0,6	20 +- 0,4	0,74 +- 0,02	19,6 +- 0,5	< 3
76-78 cm	74,8	39 +- 3	14 +- 0,4	18 +- 0,8	18 +- 0,4	0,71 +- 0,02	21,4 +- 0,6	< 3
carotte TR01								
2-4 cm	41,1	72 +- 4	20 +- 0,4	27 +- 0,7	25 +- 0,4	0,95 +- 0,02	8,7 +- 0,3	34 +- 2
6-8 cm	52,2	74 +- 2	18 +- 0,3	25 +- 0,7	23 +- 0,3	0,91 +- 0,02	8,0 +- 0,3	19 +- 2
8-10 cm	47,0	83 +- 4	17 +- 0,4	23 +- 0,8	22 +- 0,4	0,87 +- 0,02	8,2 +- 0,4	14 +- 2
64-66 cm	63,0	37 +- 3	14 +- 0,2	18 +- 0,5	19 +- 0,3	0,69 +- 0,01	17,5 +- 0,3	< 2

Tableau 3 Analyses gamma des carottes Ach03, Ach05, Ach11 et ACH12 à Achères-Herblay
(année de référence : 2000)

niveau	poids total sec (g)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)	Th-228 (Bq/kg)	K (%)	Cs-137 (Bq/kg)	Be7 (Bq/kg)
carotte Ach03								
0-5 cm	77,9	14 +- 1	10 +- 0,3	7 +- 0,5	7 +- 0,2	0,63 +- 0,02	2,4 +- 0,2	6 +- 1
5-10 cm	62,2	15 +- 1	12 +- 0,2	11 +- 0,4	10 +- 0,2	1,03 +- 0,02	0,5 +- 0,1	< 3
10-15 cm	90,5	13 +- 2	10 +- 0,2	8 +- 0,4	8 +- 0,2	0,98 +- 0,02	< 0,3	< 3
15-20 cm	108,0	10 +- 1	10 +- 0,2	9 +- 0,4	9 +- 0,2	0,97 +- 0,02	< 0,3	< 3
20-26 cm	110,7	15 +- 2	13 +- 0,3	12 +- 0,6	11 +- 0,3	0,88 +- 0,02	< 0,5	< 5
26-31 cm	67,1	19 +- 2	15 +- 0,3	12 +- 0,6	14 +- 0,3	0,68 +- 0,02	< 0,5	< 7
31-36 cm	44,5	23 +- 2	20 +- 0,3	24 +- 0,7	25 +- 0,3	0,63 +- 0,02	< 0,5	< 7
36-42 cm	145,9	8 +- 1	8 +- 0,2	8 +- 0,4	8 +- 0,2	0,70 +- 0,02	< 0,4	< 5
42-47 cm	135,7	8 +- 1	7 +- 0,1	5 +- 0,2	5 +- 0,1	0,69 +- 0,01	< 0,2	< 3
carotte Ach05								
0-5 cm	37,6	65 +- 4	36 +- 0,4	26 +- 0,6	27 +- 0,3	0,84 +- 0,02	18,9 +- 0,4	27 +- 3
5-10 cm	38,8	77 +- 5	40 +- 0,5	28 +- 0,8	29 +- 0,5	0,87 +- 0,02	25,0 +- 0,5	< 6
10-15 cm	37,8	68 +- 3	47 +- 0,7	32 +- 1,2	32 +- 0,6	0,90 +- 0,03	27,8 +- 0,7	< 9
15-20 cm	28,3	85 +- 4	45 +- 0,8	32 +- 1,4	33 +- 0,7	0,87 +- 0,04	37,8 +- 1,0	< 12
20-25 cm	44,1	40 +- 2	28 +- 0,2	25 +- 0,4	23 +- 0,2	0,80 +- 0,01	18,9 +- 0,3	< 4
25-30 cm	71,9	24 +- 2	23 +- 0,4	15 +- 0,7	16 +- 0,3	0,62 +- 0,02	10,5 +- 0,4	< 7
30-35 cm	39,1	61 +- 3	47 +- 0,4	27 +- 0,6	26 +- 0,4	0,85 +- 0,02	93,5 +- 0,8	< 9
35-40 cm	35,2	90 +- 3	59 +- 0,4	38 +- 0,6	36 +- 0,4	0,93 +- 0,01	169,6 +- 0,9	< 9
40-45 cm	41,3	60 +- 3	37 +- 0,4	31 +- 0,6	30 +- 0,4	0,97 +- 0,02	43,9 +- 0,5	< 8
45-50 cm	80,6	25 +- 2	17 +- 0,3	17 +- 0,5	18 +- 0,3	0,65 +- 0,01	0,6 +- 0,1	< 6
50-55 cm	44,7	39 +- 2	31 +- 0,3	38 +- 0,5	35 +- 0,3	1,07 +- 0,01	< 0,4	< 5
carotte Ach11								
0-10 cm	54,8	46 +- 3	15 +- 0,3	18 +- 0,5	17 +- 0,3	0,71 +- 0,01	3,6 +- 0,2	25 +- 1
10-15 cm	67,2	36 +- 2	17 +- 0,2	14 +- 0,4	13 +- 0,2	0,63 +- 0,01	3,1 +- 0,1	7 +- 1
15-20 cm	65,7	24 +- 2	14 +- 0,2	11 +- 0,4	11 +- 0,2	0,57 +- 0,01	1,9 +- 0,1	4 +- 1
20-25 cm	44,0	30 +- 3	19 +- 0,5	14 +- 1,0	14 +- 0,5	0,59 +- 0,03	2,7 +- 0,3	< 9
25-30 cm	56,1	32 +- 2	14 +- 0,3	11 +- 0,5	11 +- 0,3	0,62 +- 0,01	2,6 +- 0,2	< 5
30-34 cm	60,8	15 +- 2	14 +- 0,3	13 +- 0,6	13 +- 0,3	0,68 +- 0,02	0,8 +- 0,2	< 6
carotte Ach12								
0-5 cm	85,8	15 +- 2	10 +- 0,2	9 +- 0,3	8 +- 0,2	0,66 +- 0,01	0,3 +- 0,1	< 2
5-10 cm	116,9	19 +- 2	15 +- 0,4	13 +- 0,6	12 +- 0,3	0,67 +- 0,02	< 0,5	< 4
10-15 cm	56,3	24 +- 1	19 +- 0,2	15 +- 0,3	14 +- 0,2	0,71 +- 0,01	< 0,2	< 2
15-20 cm	90,4	10 +- 1	13 +- 0,2	11 +- 0,5	11 +- 0,2	0,72 +- 0,02	< 0,4	< 4
20-25 cm	101,0	12 +- 2	14 +- 0,4	13 +- 0,7	13 +- 0,3	0,76 +- 0,03	< 0,6	< 7
25-30 cm	75,1	15 +- 2	16 +- 0,3	14 +- 0,6	15 +- 0,3	0,71 +- 0,02	< 0,4	< 6
30-35 cm	46,7	32 +- 2	27 +- 0,5	24 +- 0,9	24 +- 0,4	0,93 +- 0,03	< 0,7	< 10

Tableau 4 Analyses gamma de la carotte OH à Oissel (année de référence : 1998)

niveau	poids total sec (g)	Pb-210 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)	Th-228 (Bq/kg)	K (%)	Cs-137 (Bq/kg)	Be7 (Bq/kg)
carotte OH								
0-1 cm	167,7	17 +- 1	10 +- 0,2	9 +- 0,4	9 +- 0,2	0,35 +- 0,01	1,8 +- 0,1	5 +- 2
1-3 cm	148,1	28 +- 2	14 +- 0,3	15 +- 0,6	16 +- 0,3	0,53 +- 0,02	2,7 +- 0,2	< 3
3-5 cm	134,7	29 +- 2	15 +- 0,3	18 +- 0,6	16 +- 0,3	0,61 +- 0,02	4,0 +- 0,2	< 3
5-6.5 cm	94,9	51 +- 4	23 +- 0,4	24 +- 0,7	24 +- 0,4	0,84 +- 0,02	6,3 +- 0,3	< 8
6.5-8.5 cm	107,4	38 +- 2	20 +- 0,2	20 +- 0,4	21 +- 0,3	0,75 +- 0,01	5,3 +- 0,2	< 4
8.5-10 cm	90,2	62 +- 3	21 +- 0,3	28 +- 0,5	27 +- 0,3	0,98 +- 0,01	8,4 +- 0,2	< 3
10-12 cm	80,0							
12-14 cm	138,2	35 +- 2	19 +- 0,3	19 +- 0,5	18 +- 0,3	0,70 +- 0,01	4,8 +- 0,2	< 4
14-16 cm	120,4	35 +- 1	18 +- 0,2	18 +- 0,3	18 +- 0,2	0,68 +- 0,01	6,2 +- 0,2	< 3
16-17.5 cm	102,0	44 +- 2	24 +- 0,2	24 +- 0,4	25 +- 0,3	0,88 +- 0,01	8,5 +- 0,2	< 4
17.5-19 cm	99,9	43 +- 2	22 +- 0,3	23 +- 0,6	23 +- 0,4	0,86 +- 0,02	7,2 +- 0,3	< 5
19-21 cm	123,3	24 +- 1	13 +- 0,2	15 +- 0,3	15 +- 0,2	0,59 +- 0,01	4,2 +- 0,1	< 1
21-23 cm	119,2	38 +- 3	15 +- 0,3	18 +- 0,6	18 +- 0,3	0,71 +- 0,02	5,7 +- 0,2	< 3
23-25 cm	88,5	58 +- 4	27 +- 0,4	28 +- 0,8	28 +- 0,5	1,01 +- 0,02	9,3 +- 0,4	< 7
25-27 cm	114,2	43 +- 1	20 +- 0,3	24 +- 0,5	23 +- 0,2	0,82 +- 0,02	6,7 +- 0,2	< 3
27-28.5 cm	131,9	35 +- 4	21 +- 0,4	19 +- 0,7	20 +- 0,4	0,65 +- 0,02	4,7 +- 0,3	< 7
28.5-30 cm	104,0	37 +- 2	20 +- 0,3	19 +- 0,5	21 +- 0,3	0,77 +- 0,02	7,0 +- 0,3	< 4
30-32 cm	101,2	51 +- 3	22 +- 0,4	24 +- 0,9	23 +- 0,4	0,90 +- 0,03	8,8 +- 0,4	< 5
32-34 cm	100,6	50 +- 4	25 +- 0,4	24 +- 0,8	25 +- 0,4	0,88 +- 0,02	9,2 +- 0,4	< 7
34-36 cm	96,5	52 +- 4	21 +- 0,4	26 +- 0,8	25 +- 0,4	0,97 +- 0,02	10,3 +- 0,4	< 4
36-37.5 cm	119,9	32 +- 1	19 +- 0,2	20 +- 0,4	19 +- 0,2	0,70 +- 0,01	7,5 +- 0,2	< 3
37.5-39.5 cm	123,3	43 +- 4	24 +- 0,4	24 +- 0,7	25 +- 0,4	0,83 +- 0,02	9,4 +- 0,3	< 8
39.5-41 cm	142,3	28 +- 2	13 +- 0,2	18 +- 0,5	16 +- 0,3	0,63 +- 0,01	6,8 +- 0,2	< 2
41-43 cm	175,8	47 +- 3	23 +- 0,3	22 +- 0,6	23 +- 0,3	0,82 +- 0,02	9,3 +- 0,3	< 7

Tableau 5: Teneurs mesurées en activation neutronique

prof. (cm)	Sc µg/g	argiles %	Ca(Sc-47) %	Ca(Ca-47) %	CaCO ₃ %	Sr µg/g	Th µg/g	Rb µg/g	Cs µg/g	Co µg/g	Cr µg/g	As µg/g	Zn µg/g	Fe %
carotte TR02														
3	7,5	57	17,2	17,1	43	117	7,5	68	5,5	7,1	62	10,1	153	2,2
7	9,0	61	15,8	16,3	39	140	8,1	86	7,0	8,8	71	11,3	180	2,7
11	8,8	58	16,8	15,2	42	196	7,8	81	7,0	8,1	70	10,8	189	2,6
15	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
23	7,1	54	18,3	16,2	46	121	6,7	66	5,4	6,5	65	9,5	158	2,1
29	4,9	50	19,9	23,5	50	227	5,8	46	3,6	5,5	56	6,3	134	1,4
35	5,3	47	21,1	17,1	53	105	5,4	46	4,0	5,7	68	6,6	166	1,5
39	5,1	47	21,1	23,7	53	171	5,6	44	3,8	5,9	60	nd	141	1,5
45	5,0	47	21,2	19,8	53	142	5,2	44	3,7	4,8	53	5,5	129	1,4
51	6,6	51	19,4	20,2	49	124	6,3	55	5,0	6,7	64	8,8	185	1,7
55	6,5	51	19,6	18,1	49	153	6,4	58	4,9	6,7	62	7,5	164	1,8
61	5,8	51	19,5	18,6	49	158	5,6	50	4,5	6,1	67	6,4	185	1,6
67	5,8	47	21,1	19,8	53	176	5,8	54	4,1	6,6	66	6,9	220	1,6
71	5,6	45	22,1	19,4	55	196	5,8	52	3,8	6,1	55	6,1	154	1,4
77	5,7	47	21,1	21,4	53	177	5,3	53	4,1	6,7	82	8,1	187	1,6
carotte OR02														
3	3,10	25	29,91	33,62	75	231	2,89	31	2,61	2,84	33	3,381	72	1,1
19	3,06	31	27,69	31,34	69	227	2,78	30	2,74	2,90	32	3,946	88	1,1
33	5,10	15	34,04	39,1	85	318	4,4	52	4,59	5,50	114	7,064	135	1,7
41	3,40	33	26,94	30,23	67	164	2,95	35	3,14	3,70	70	4,375	75	1,2
49	3,60	34	26,34	29,12	66	197	3,13	38	2,85	3,99	67	5,675	68	1,2

Tableau 6 : Teneurs mesurées par absorption atomique

prof. (cm)	Pb μg/g	% incert.	Cd μg/g	% incert.
carotte TR02				
3	41	2,5	0,57	23,2
7	47	2,1	0,63	7,4
11	51	3,2	0,35	3,2
15	43	12,5	0,67	14,4
23	43	2,9	0,30	7,1
29	47	2,5	0,56	16,1
35	64	3,3	0,98	8,8
39	53	6,7	0,76	15,7
45	48	2,2	0,61	13,7
51	60	2,6	0,90	10,8
55	63	7,3	0,39	5,4
61	59	1,2	0,82	3,7
67	78	1,5	0,55	3,8
71	66	5,9	0,95	14,8
77	90	1,7	0,99	15,0
carotte OR02				
3	21	1,1	0,54	6,5
19	25	3,5	0,41	5,5
33	28	2,4	0,49	5,5
41	29	6,1	0,39	17,1
49	28	2,3	0,46	10,0