



**Transferts de contaminants
hydrophobes du sédiment au
biote : construction de modèles
dans une perspective de
gestion**

Rapport final 2008-2009



ZABR

Titre

Transferts de contaminants hydrophobes du sédiment au biote : construction de modèles dans une perspective de gestion

Coordinateur :

Marc BABUT (Cemagref, UR MALY)

Equipe de projet :

Cécile MIEGE, Annie ROY, Christelle LOPES, Marina COQUERY, Marie-Claude ROGER, Bernard MOTTE (Cemagref, UR MALY)

Marc DESMET, Gwenaëlle ROUX (ENTPE, Laboratoire des Sciences de l'Environnement),

Henri PERSAT (CNRS-UCBL, LEHF, UMR 5023),

Irène LEFEVRE, Philippe BONTE (LSCE, CNRS-CEA),

Barbara MAHLER & Peter van METRE (USGS),

Résumé :

Ce projet a été élaboré à la suite du constat de contamination des poissons du Rhône par les polychlorobiphényles (PCB) pour tenter de modéliser le transfert trophique de ces contaminants depuis le sédiment jusqu'à plusieurs espèces représentant des expositions a priori différentes (barbeau, brème commune et chevaine). Des prélèvements de sédiments (carottages), d'invertébrés, et de poissons, ont été mis en œuvre ; suite à différents aléas, il doivent être complétés en deuxième année par un nombre plus réduit d'analyses. L'interprétation des résultats progresse, sur la compréhension de la dynamique de la contamination des sédiments dans le secteur d'étude, des types de sources, et de la composition des chaînes trophiques. Un premier séminaire a été organisé autour des données relatives aux sédiments.

Mots-clés :

PCB ; sédiments ; carottes ; bioaccumulation ; chaîne trophique ; invertébrés ; poissons ; modèle

Abstract:

This project was designed after the discovery of PCB contaminated fish in the Rhone river. This study aims at modelling the trophic transfer of PCBs from sediment to several fish species. These species are supposed to represent various exposure conditions and pathways. Different kinds of samples have been collected and analyzed: sediment cores, invertebrates, fishes. This set must nevertheless be completed with a limited number of complementary analyses. Data processing is advancing on several tracks: understanding the dynamics of sediment contamination, source apportionment, trophic webs analysis. A first workshop focussing on sediment data was organised in February, 2009.

Keywords:

PCB; sediment; core; bioaccumulation; food web; invertebrates; fish ; model

SOMMAIRE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 4 |
| 2 | Actions réalisées (avril 2008 – Juillet 2009) | 4 |
| 2.1 | Acquisition de données | 4 |
| 2.1.1 | Carottages de sédiments | 5 |
| 2.1.2 | Prélèvements d'invertébrés | 5 |
| 2.1.3 | Capture de poissons..... | 5 |
| 2.1.4 | Analyses : datation, PCB, isotopes C et N | 6 |
| 2.1.5 | Bilan des données disponibles au 31 juillet 2009..... | 6 |
| 2.1.6 | Evaluation de la qualité des données..... | 6 |
| 2.2 | Développement des modèles d'âge pour les carottes de sédiment – dynamique de la contamination | 7 |
| 2.3 | Description des chaînes trophiques | 11 |
| 2.3.1 | Inventaires de la faune benthique | 11 |
| 2.3.2 | Analyse des contenus stomacaux..... | 11 |
| 2.3.3 | Analyses isotopiques et description des chaînes trophiques..... | 12 |
| 2.4 | Résultats d'analyse des PCB dans les poissons | 14 |
| 2.4.1 | Résumé des analyses de PCB | 14 |
| 2.4.2 | Calcul des facteurs d'accumulation dans les organismes collectés dans le Grand Large | 15 |
| 3 | Valorisation et communication | 17 |
| 3.1 | Communication, diffusion des informations | 17 |
| 3.2 | Communication scientifique | 17 |
| 4 | Synthèse et perspectives | 18 |
| Annexe 1 | Vue aérienne de la zone d'étude | 19 |
| Annexe 2 | Prélèvements de sédiments superficiels dans le Grand Large | 20 |
| Annexe 3 | Présentation du séminaire tenu le 12 février 2009 | 21 |
| Annexe 4 | Références..... | 22 |

Index des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 – Bilan des prélèvements d'invertébrés. | 5 |
| Tableau 2 - Bilan des captures de poissons..... | 6 |
| Tableau 3 - Disponibilité des résultats des analyses sous-traitées | 6 |
| Tableau 4 - Contenus stomacaux étudiés répartis par site et par espèce | 11 |
| Tableau 5 - Résumé de la contamination des poissons collectés sur les sites d'étude | 15 |

Index des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 - Distribution des PCB (et du plomb) dans les carottes MTE, CPX et BRE..... | 9 |
| Figure 2 - Carte de la contamination des sédiments en surface du Grand Large | 10 |
| Figure 3 – Régimes alimentaires des 3 espèces étudiées en fonction des sites..... | 12 |
| Figure 4 – Positions trophiques des sources de nourriture du barbeau (MTE) | 14 |
| Figure 5 – BSAF dans les poissons et invertébrés du Grand Large | 16 |

Transferts de contaminants hydrophobes du sédiment au biote: construction de modèles dans une perspective de gestion

1 INTRODUCTION

A la suite du constat de contamination des poissons du Rhône par les PCB, qui a induit des interdictions de consommation sur un secteur allant de l'amont de Lyon jusqu'à la mer Méditerranée, et à la mise en évidence du lien entre cette contamination et celle des sédiments (Babut et al. 2007), un projet de recherche a été élaboré pour tenter de modéliser cette relation. Ce projet a été élaboré par un groupe associant le Cemagref (...), l'ENTPE (Laboratoire des Sciences de l'Environnement), le laboratoire « Ecologie des Hydrosystèmes fluviaux » (LEHF, UMR 5023 CNRS-Université de Lyon 1), le laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, CEA-CNRS Gif sur Yvette), avec la collaboration de l'IFREMER (centre de la Seyne sur Mer). Il a été successivement labellisé par la ZABR, puis présenté aux partenaires du Plan Rhône, au titre de son volet « recherches ». L'ONEMA a également apporté un concours au plan de financement. La phase de planification des activités a démarré concrètement en avril 2008.

Ce rapport présente les résultats acquis en un an, l'ensemble du projet étant envisagé sur deux années.

Les objectifs principaux de cette première année peuvent être exposés ainsi :

- Acquisition de données sur la contamination des sédiments, de 3 espèces de poissons et de leur nourriture supposée (invertébrés) : PCB, isotopes ^{15}N et ^{13}C notamment.
- Evaluation de la qualité des données recueillies
- Développement des modèles d'âge sur les carottes de sédiment, et utilisation de ces modèles d'âge pour esquisser la description de la dynamique de la contamination par les PCB
- Description des chaînes trophiques des espèces de poissons sélectionnées

2 ACTIONS REALISEES (AVRIL 2008 - JUILLET 2009)

2.1 Acquisition de données

Quatre sites ont été sélectionnés pour le projet de modélisation (Annexe 1):

- a. Lône de la Morte, site amont du secteur d'interdiction de consommation des poissons le plus amont (Sault-Brénaz – aval de Lyon), constituant une référence relative. La sédimentation sur ce site est influencée par le barrage de Brégnier-Cordon.
- b. Grand Large, plan d'eau en annexe du canal de Jonage où ont été capturés les premiers poissons contaminés en 2005.

- c. « darse » de Crépieux ; il s'agit d'une enclave créée artificiellement en 1980 en annexe du bras reliant les canaux de Miribel et Jonage ; les sédiments accumulés dans cette darse doivent permettre de préciser l'historique de la contamination due aux sources amont, dont TREDI.
- d. Lône de l'Ile du Beurre, à l'aval de Lyon, site protégé des érosions en période de rue grâce à l'effet du barrage de Vaugris.

A l'exception de la darse de Crépieux (c), les sites ont faits l'objet de carottages de sédiments, et de prélèvements de poissons et d'invertébrés. Le détail des prélèvements de chaque catégorie est présenté dans les § 2.1.1 à 2.1.3.

2.1.1 Carottages de sédiments

Cinq carottes ont été prélevées sur chaque site, et analysées respectivement pour la datation, le Pb, la granulométrie, et les PCB (Clerc 2008). 20 échantillons de surface ont été collectés dans le Grand Large, en janvier 2009, selon une grille régulière (Annexe 2).

2.1.2 Prélèvements d'invertébrés

Les espèces privilégiées ont été choisies sur la base des connaissances disponibles sur la diète du barbeau et de la brème dans le secteur étudié (Vieille-Blanchard 2007).

| sites | Chironomes | Gammarés | Ephémères | Corbicules (3cm) | Corbicules (1cm) & Pisidiums | dates des prélèvements |
|---------------|------------|-------------|------------|------------------|------------------------------|------------------------|
| la Morte | 1 (150) | 2 (60,200) | 2 (34, 60) | 1 (15) | | juin-juil-08 |
| | 2 (25,360) | | | | 1 (15) + 1(140) | mars-avril 09 |
| Grand Large | 1 (200) | 2 (53, 120) | 1 (21) | 1 (13) | | juil-août-08 |
| | | | | | 1 (50) + 1 (160) | mars-avril 09 |
| île du Beurre | 1 (400) | 1 (130) | - | 3 (18, 18, 24) | | juin-oct-08 |
| | | | | | 1 (85) + 1 (130) | mars-avril 09 |

Tableau 1 – Bilan des prélèvements d'invertébrés.

Entre parenthèses : nombre d'individus collectés.

Les corbicules ont été collectées uniquement en tant qu'organismes intégrateurs de la ligne de base isotopique des sites. Elles servent donc de référence, de point de repère afin de positionner les autres invertébrés et les poissons le long de la chaîne trophique. De fait, les analyses PCB n'ont pas été effectuées sur ces invertébrés.

En plus des pools d'invertébrés collectés aux fins d'analyse, des substrats artificiels ont été installés pendant trois semaines sur chacun des sites de prélèvement, afin d'effectuer un inventaire de la faune d'invertébrés en place.

2.1.3 Capture de poissons

Trois espèces (barbeau (BAF), brème (BRE) et chevaine (CHE)) ont été recherchées de façon à (i) représenter différentes chaînes trophiques, et (ii) pouvoir comparer aux données déjà disponibles, notamment dans la perspective des simulations. De fait, deux espèces de brème (commune et bordelière) ont été collectées, et il a paru intéressant de les conserver pour vérifier si leurs positions trophiques sont similaires ou pas.

| <i>sites</i> | <i>brème commune</i> | <i>barbeau fluviale</i> | <i>brème bordelière</i> | <i>chevaine</i> | <i>dates des pêches</i> |
|---------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| la Morte | 7 | 11 | - | 20 | août-oct-dec-08 |
| Grand Large | 15 | 15 | 15 | 15 | août-nov-08 |
| île du Beurre | 17 | 5 | 15 | 17 | oct-nov-08, jan-09 |

Tableau 2 - Bilan des captures de poissons

Outre les prélèvements de filets aux fins d'analyse de polychlorobiphényles (PCB) et d'isotopes, chaque poisson a été pesé et mesuré, son contenu stomacal examiné, son sexe déterminé et des écailles ont été prélevées pour évaluer son âge.

2.1.4 Analyses : datation, PCB, isotopes C et N

a. Analyses de sédiments :

- Granulométrie : L.S.E. (ENTPE)
- Isotopes Cs, Pb etc. , aux fins de datation : LSCE (CNRS-CEA)
- PCB indicateurs (PCBi), PCB « dioxin-like » (PCB-DL), polychlorodibenzo-dioxines et polychlorodibenzofurannes (PCDDet PCDF), COT : sous-traitées à Eurofins (Orléans)

b. Analyses d'invertébrés et de poissons

- PCBi, PCB-DL, taux de lipides : sous-traitées à CARSO (Lyon)
- Isotopes ($\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{14}\text{C}$) : sous-traitées à CNRS-SCA (Solaize)

2.1.5 Bilan des données disponibles au 31 juillet 2009

| | <i>PCB</i> | | <i>isotopes</i> | |
|-------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| | <i>nombre d'échantillons</i> | <i>résultats reçus</i> | <i>nombre d'échantillons</i> | <i>résultats reçus</i> |
| Sédiments | 128 | 123 | - | - |
| Invertébrés | 10 | 10 | 16 | 16 |
| Poissons | 116 | 116 | 136 | 136 |

Tableau 3 - Disponibilité des résultats des analyses sous-traitées

L'ensemble des échantillons de poissons, d'invertébrés et de sédiments, est décrit dans différents tableaux (format tableur) regroupant les informations relatives aux prélèvements (lieu, date ...), la description de chaque échantillon (espèce, poids ...) ainsi que les résultats d'analyses (PCB, isotopes, Pb ...).

Ces données, sont accessibles sur le site collaboratif (cf. 3.1) en accès restreint aux membres du groupe de projet.

A terme, après publication, elles pourront être reversées dans les bases de données poissons ou sédiments au niveau du bassin ou nationales.

2.1.6 Evaluation de la qualité des données

Les analyses de PCBs, PCDD/Fs dans les sédiments ont toutes été effectuées par le laboratoire EUROFINS¹. L'incertitude sur les résultats de mesures est de 20 à 45% selon les congénères, sauf pour le PCB 28 où elle peut atteindre 60%. Les limites de quantification (LQ) annoncées variaient entre 0.32 et 1.90 ng.kg⁻¹ ms pour les PCDD/F, 0.097 et 11.8 ng.kg⁻¹ ms (matières sèches) pour les PCB-DL et entre 48 et 146 ng.kg⁻¹ ms pour les PCBi. A cause d'effets de matrices, les limites de

¹ EUROFINS environnement, 15 r Fonderie 45100 ORLÉANS

quantification finalement atteintes varient pour un même composé dans des échantillons différents. Ceci a été observé pour 8 molécules sur les 36 analysées (i.e. 123789-HexaCDF, 1234789-HeptaCDF, 2378-TetraCDD, 12378-PentaCDD, 123478-HexaCDD, PCB81, PCB114, PCB126 et PCB169). Par exemple, la LQ du PCB 126 passe de 1.71 ng.kg⁻¹ ms à 9.68 ng.kg⁻¹ ms selon l'échantillon de sédiment.

Dans les analyses statistiques, les LQ seront prises en compte soit dans l'esprit de la directive sur 2009/90 sur la surveillance de l'état des eaux (CE 2009), soit avec des approches moins biaisées (Helsel 2005), selon l'objectif des traitements.

Enfin, la qualité des résultats a également été passée en revue du point de vue de la distribution des congénères. Un échantillon de la carotte BRE présentait une proportion (et une concentration) exceptionnelle de congénère #52. Cela dit, la datation indique que cet échantillon correspond à une crue majeure, ce qui est corroboré par la granulométrie. Il a donc été considéré comme valide dans le tableau des résultats, mais traité comme « outlier » dans certaines analyses statistiques.

Les PCB_i et PCB-DL chez les poissons et les invertébrés ont tous été dosés par le laboratoire CARSO², avec une incertitude maximale sur les résultats de 15%. Les limites de quantification sont de 6 mg.kg⁻¹ ps (poids sec) pour les PCB_i et varient entre 0.03 et 0.3 mg/kg ps pour les PCB-DL.

Les isotopes des poissons et des invertébrés ont été analysés par le laboratoire CNRS-SCA³, avec une incertitude de 0.3‰.

Des échanges entre le Cemagref et les laboratoires d'analyse ont permis d'améliorer l'homogénéité des données et des unités. Par ailleurs, un certain nombre de contrôles qualité ont été exigés, comme par exemple d'avoir éprouvé les performances des protocoles analytiques avec des matrices certifiées ou (à défaut) des matrices dopées.

2.2 Développement des modèles d'âge pour les carottes de sédiment - dynamique de la contamination

La mise au point des modèles d'âge s'appuie sur les mesures de l'activité de radio-isotopes, complétée par la granulométrie. Un certain nombre d'itérations ont été nécessaires pour caler correctement ces modèles, dans la mesure où toutes les couches ne sont pas analysées systématiquement au départ.

Pour la carotte prélevée dans le Grand Large, cette démarche s'est cependant révélée infructueuse, en raison des remaniements du sédiment, notamment le dragage de 2005, et de l'imprécision de la carte des travaux réalisés à ce moment. Par conséquent les PCB n'ont été analysés que dans les carottes amont (MTE), darse de Crépieux (CPX) et aval (BRE). Les résultats bruts (non encore publiés) sont résumés Figure 1. Nous avons à ce moment là décidé de cartographier la contamination des sédiments en surface du Grand Large, espérant ainsi disposer de données plus complètes pour la modélisation du transfert jusqu'au poisson. Après différentes démarches visant à identifier des zones non perturbées dans le secteur du Grand Large, une carotte supplémentaire a été prélevée à l'entrée du plan d'eau et mise de côté. Elle sera analysée durant la deuxième année du projet. La cartographie de la contamination est en surface du plan d'eau, établie par krigeage (extrapolation) à partir des concentrations en chaque point de mesure est reportée Figure 2 (B).

Les concentrations en PCB sont en diminution depuis la fin des années 1970 à l'amont (MTE), 1993-95 à Crépieux (CPX), sites où elles avaient atteint des niveaux comparables. Des variations sont encore observables en 1999 et 2005 dans la carotte CPX. Les concentrations observables à l'île du Beurre (BRE) sont généralement plus élevées qu'à l'amont, varient fortement dans le temps, et marquent une augmentation récente, en relation avec l'envasement de la lône (accroissement des particules fines).

² Carso Laboratoire Santé Environnement Hygiène - 161 av Tony Garnier 69007 LYON

³ CNRS, chem Canal 69360 SOLAIZE

Une analyse statistique factorielle est en cours sur la base des concentrations des congénères, pour affiner la compréhension de la dynamique de la contamination. Les premiers résultats de cette interprétation tendent à conclure à l'ancienneté de la contamination, plutôt qu'à des apports récents, avec redistribution des sédiments « anciens » sous l'effet des variations de débit.

La Figure 2 (A) représente les concentrations en PCB_i dans les sédiments de surface du Grand Large aux points de prélèvements. Les valeurs ont été réparties en quatre classes arbitraires basées sur les concentrations minimum et maximum observées dans le plan d'eau. Le choix des couleurs reflète donc le gradient local de contamination dans cette série, et ne donne aucune indication de sa gravité. On passe à la représentation donnée Figure 2 (B) par krigeage, approche géostatistique qui permet de prendre en compte le comportement spatial spécifique du polluant grâce à une fonction de corrélation spatiale calculée à partir des concentrations observées. Dans le cas présent, l'analyse variographique a été effectuée à l'aide du logiciel SURFER ®. Cette représentation est toutefois à prendre avec prudence, en raison du faible nombre de points échantillonnés au regard de la surface du Grand Large.

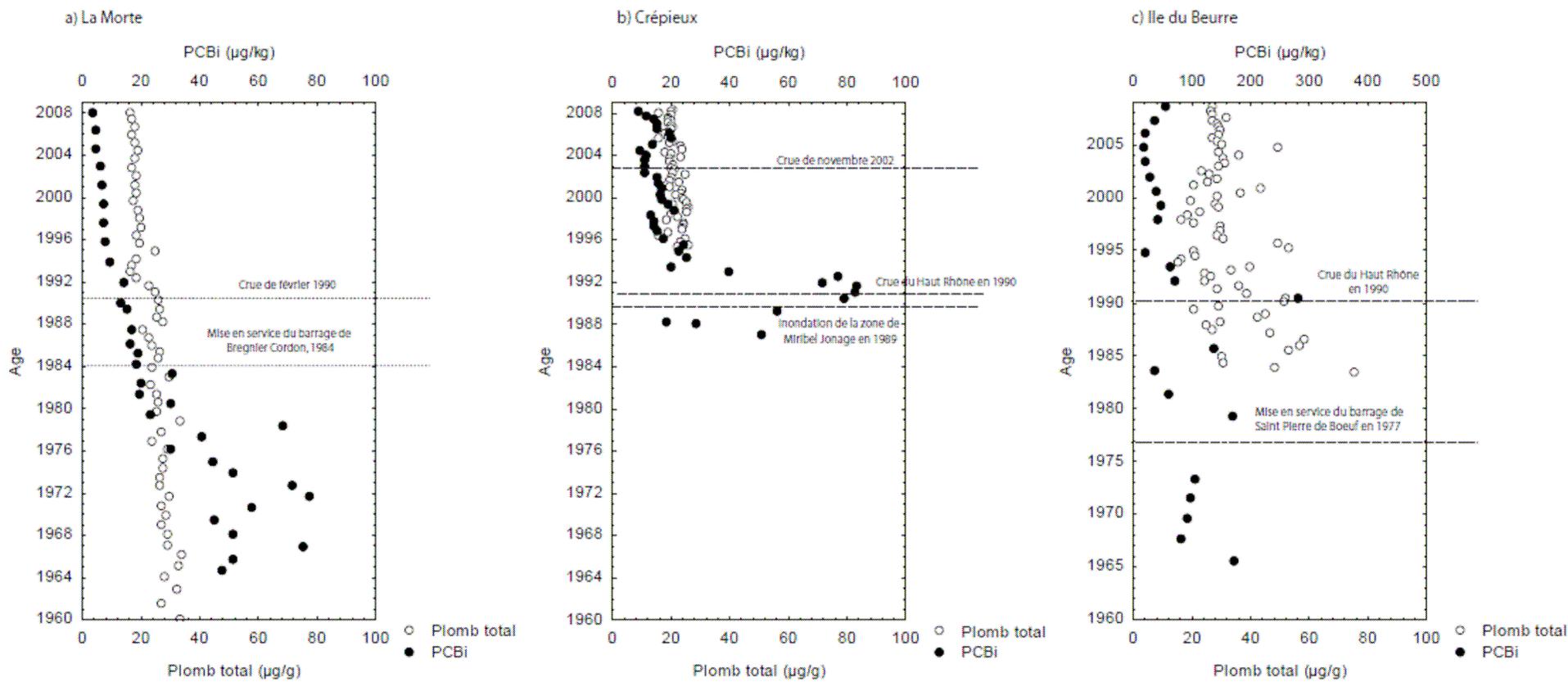
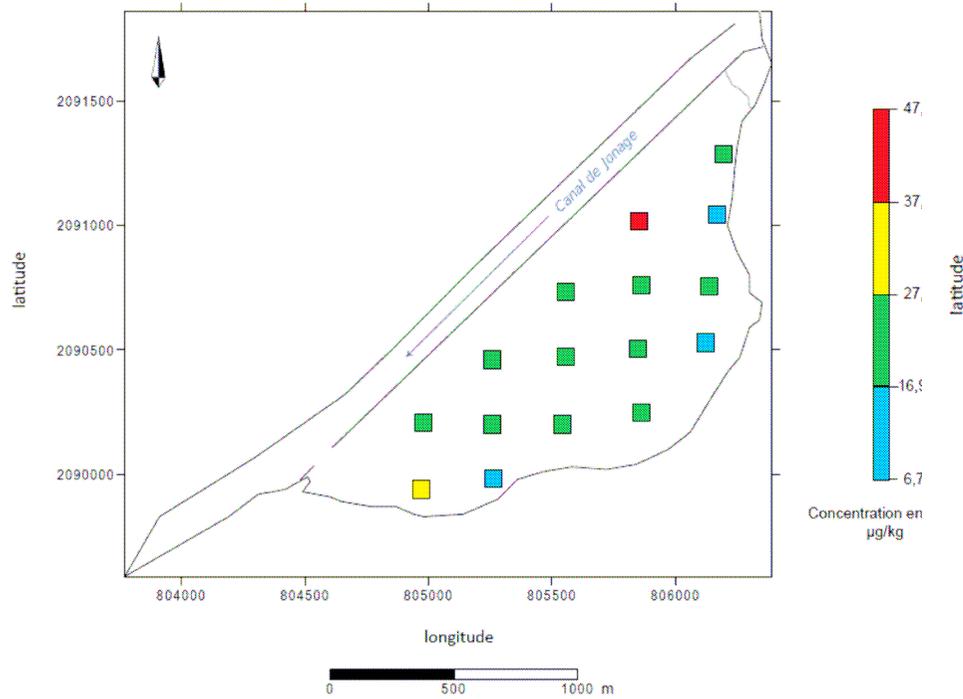
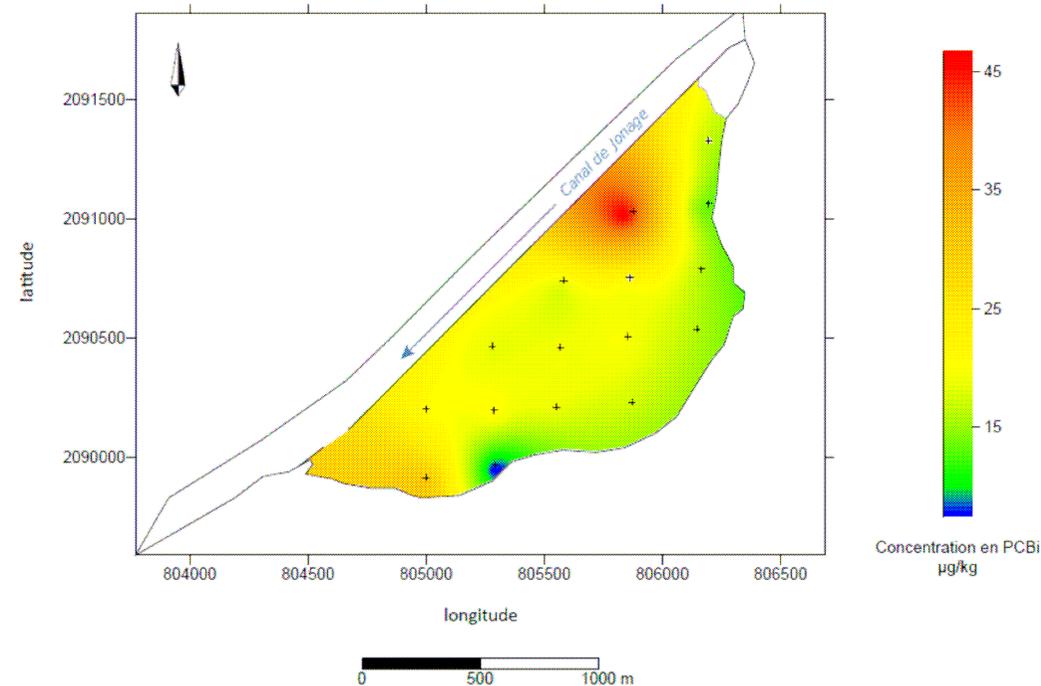


Figure 1 - Distribution des PCB (et du plomb) dans les carottes MTE, CPX et BRE



A-



B-

Figure 2 - Carte de la contamination des sédiments en surface du Grand Large

2.3 Description des chaînes trophiques

2.3.1 Inventaires de la faune benthique

Des substrats artificiels ont été déposés sur les 3 sites de manière à faire l'inventaire de la faune en place. A l'île du Beurre (BRE), les substrats n'ont collecté que des gammares, ce qui ne rend pas compte de la faune réellement en place.

Globalement, la faune est plus diversifiée au Grand-Large (GDL) qu'à La Morte (MTE). La comparaison des distributions montre que la disponibilité des espèces est également différente entre MTE et GDL. Les données obtenues en nombre d'individus sont transformées en poids grâce aux données moyennes de poids dont on dispose sur les Chironomes (Diptères), les Ephéméroptères (Insectes Aquatiques autres), les Gammares (Crustacés), les Corbicules et les *Pisidium* (Mollusques). A MTE, la faune semble principalement composée de Crustacés (gammares) (60%), de mollusques bivalves (du genre *Pisidium*) (20%) et de diptères (chironomes) (15%). A GDL, on a des crustacés (gammares et aselles) (60%), des diptères (chironomes) (12%), des mollusques bivalves (du genre *Dreissena* et *Pisidium*) (9%), des insectes aquatiques autres que les diptères (trichoptères et Ephémères) (8%) et des mollusques gastéropodes (5%).

2.3.2 Analyse des contenus stomacaux

122 contenus stomacaux ont été examinés (Tableau 4). Les espèces ingérées ont été recensées, puis regroupées en fonction de leur classement taxonomique (8 groupes, 16 catégories) : insectes aquatiques, insectes terrestres ou aériens, crustacés, mollusques, vers, poissons, végétaux, détritux. On détermine ensuite les pourcentages d'occurrence de chaque catégorie de proie pour chaque espèce de poisson en chaque site, la variabilité individuelle du pourcentage de chaque catégorie de proie, les pourcentages moyens de chaque catégorie de proie, enfin le poids estimé.

| Site | BAF | BRE | CHE |
|------|-----|-----|-----|
| MTE | 11 | 7 | 20 |
| GDL | 15 | 15 | 15 |
| BRE | 5 | 17 | 17 |

Tableau 4 - Contenus stomacaux étudiés répartis par site et par espèce⁴

Quelle que soit l'espèce de poissons, l'occurrence de chaque catégorie de proies changent avec le lieu, reflétant ainsi la variabilité spatiale de disponibilité des proies. Les profils d'occurrence divergent également entre les espèces de poissons, reflétant des préférences alimentaires différentes. Pour la brème, on peut noter une préférence générale pour les chironomes, les mollusques et les détritux. Pour le chevaine, le régime alimentaire semble plus varié que pour les autres espèces et on observe une forte variabilité entre site. Ces résultats sont en accord avec le caractère opportuniste de cette espèce. On peut cependant noter une préférence générale pour les chironomes, les végétaux, les insectes terrestres, les écrevisses et les mollusques gastéropodes. Pour le barbeau, le régime alimentaire est beaucoup plus varié en amont (MTE et GDL) qu'en aval (BRE).

Le régime alimentaire varie non seulement entre espèces, mais également entre sites pour une même espèce (Figure 3).

Nous ne trouvons pas de relation particulière entre la disponibilité de nourriture et le régime alimentaire. Si on exprime la nourriture disponible en poids et non plus en nombre d'individus, il semblerait également qu'aucune relation n'existe entre la

⁴ 30 contenus stomacaux de brèmes bordelières ont également été recensés ; ils ne sont pas présentés ici, mais seront rattachés à l'année 2 de ce projet.

disponibilité et le régime alimentaire sauf pour le barbeau : plus une catégorie de proie est présente (plus sa masse est importante), et plus elle est consommée.

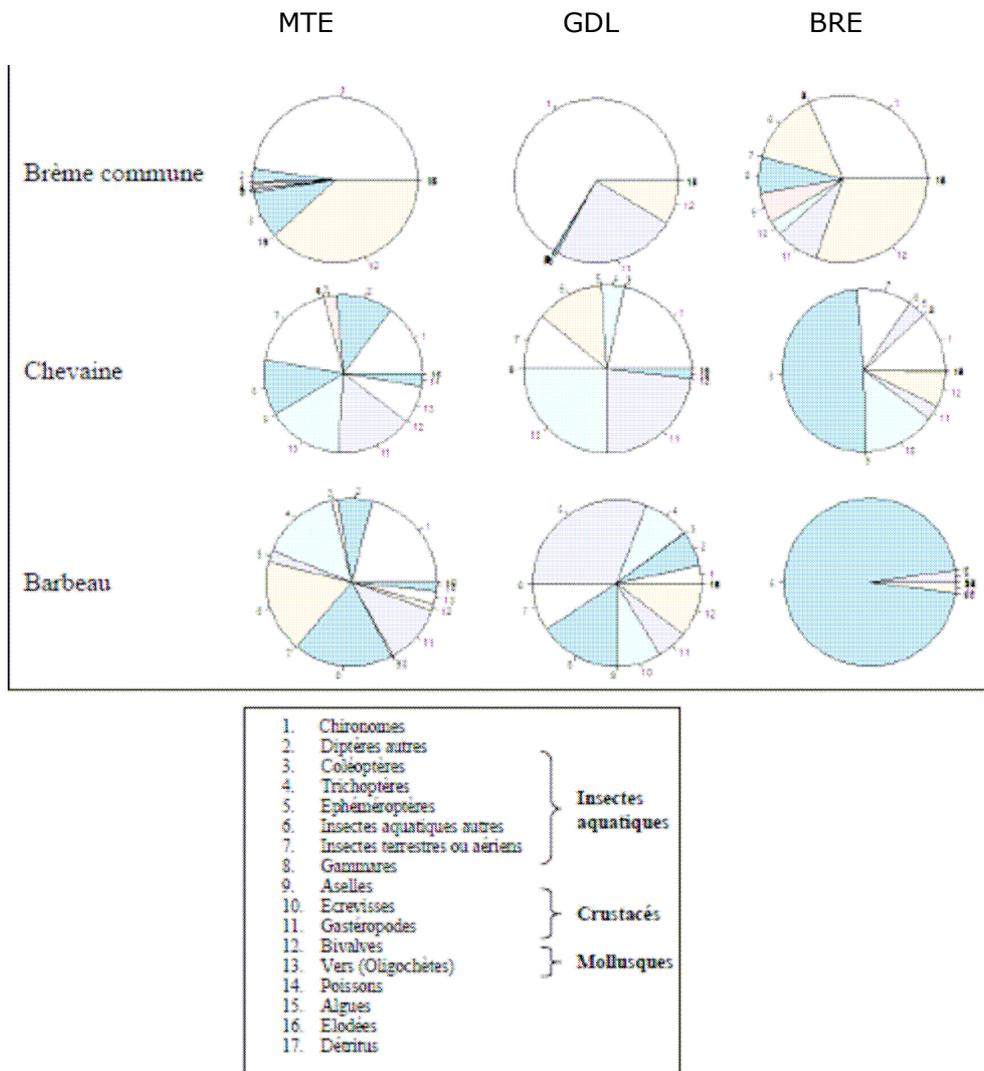


Figure 3 – Régimes alimentaires des 3 espèces étudiées en fonction des sites

2.3.3 Analyses isotopiques et description des chaînes trophiques

Les atomes constitutifs des êtres vivants proviennent des atomes de leur nourriture : il existe par conséquent une relation entre la composition isotopique de la nourriture et celle du consommateur. Lors de l'incorporation de ces éléments dans les tissus, il se produit un enrichissement en isotopes lourds par rapport à la nourriture (= enrichissement trophique), qui est compensé par l'excrétion préférentielle des isotopes légers.

Les études montrent un enrichissement moyen en $\delta^{13}\text{C}$ de $\sim 1\text{‰}$ et en $\delta^{15}\text{N}$ de $\sim 3,4\text{‰} \pm 1,1\text{‰}$ à chaque niveau trophique. Les rapports isotopiques stables du carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $\delta^{15}\text{N}$) reflètent donc la composition isotopique alimentaire (Dufour et al. 2001). Cependant, selon (Post 2002), l'enrichissement de $3,4\text{‰}$ pour l'azote est une approximation valide quand elle est utilisée comme une moyenne, pour plusieurs niveaux trophiques. Pour un transfert trophique simple, cette valeur varie entre $\sim 2\text{‰}$ et 5‰ . $\delta^{15}\text{N}$ permet de suivre

uniquement le devenir des protéines (contrairement au $\delta^{13}\text{C}$) de la proie au prédateur, puisqu'il s'agit des seuls constituants biochimiques comportant de l'azote.

A l'échelle d'un organisme dans un écosystème, l'analyse isotopique fournit une estimation de l'origine (benthique, pélagique, terrestre) du carbone qui parvient jusqu'à cet organisme et de la distance de cet organisme aux bases du réseau trophique. Cette estimation est intégrée dans le temps et dans l'espace. L'analyse des isotopes stables donne une image de la nourriture non pas ingérée mais réellement assimilée. L'analyse isotopique informe sur les flux de matière (C et N) mais ses capacités sont limitées en ce qui concerne l'étude du régime alimentaire et la reconstitution des réseaux trophiques. Elle ne fournit pas, à elle seule, des informations relative aux relations prédateurs-proies.

Le modèle le plus simple pour estimer la position trophique d'un consommateur secondaire est :

$$P_{troph} = \lambda + \frac{\delta^{15}N_{SC} - \delta^{15}N_{Base}}{\Delta n}$$

Équation 1

Avec P_{troph} la position trophique ; λ est la position de la ligne de base (1 pour producteur primaire, 2 pour consommateur primaire), $\delta^{15}N_{SC}$ est la valeur du $\delta^{15}N$ mesurée pour l'espèce considérée, $\delta^{15}N_{BASE}$ est la valeur du $\delta^{15}N$ de la ligne de base et Δn est enrichissement en azote par niveau trophique (environ 3.4 ‰).

Pour la ligne de base, on a choisi la corbicule (Mollusque bivalve) qui est un consommateur primaire ($\lambda = 2$). La ligne de base est déterminée pour chaque site. Les positions trophiques des 3 espèces de poissons ont été comparées par ANOVA puis tests post-hoc. L'enrichissement en azote ($\delta^{15}N$) est différente entre sites pour le chevaine et la brème, avec une accumulation plus forte à GDL, pouvant être expliquée par la meilleure disponibilité des proies observée lors de l'inventaire faunistique. Il est difficile de comparer directement les positions trophiques entre sites car les lignes de bases sont différentes suivant les sites.

La même approche permet de comparer les positions respectives des espèces. En amont (MTE), le barbeau a une position trophique significativement supérieure à celle du chevaine. A GDL, la brème commune a une position trophique significativement supérieure à celle du barbeau. En aval (BRE), le barbeau et le chevaine ont une position trophique significativement supérieure à celle de la brème commune.

Un graphique 2D $\delta^{13}C / \delta^{15}N$ permet de déterminer i) si 2 espèces appartiennent au même réseau trophique (par rapport à l'alignement sur l'axe du carbone), et ii) la position trophique relative des espèces les unes par rapport aux autres. Ce genre de graphe ne permet pas de déterminer qui mange quoi. Ce n'est pas parce qu'une espèce a une position trophique supérieure à une autre qu'elle la mange forcément. Il faut coupler ce genre d'analyse à l'étude des contenus stomacaux pour reconstruire la chaîne trophique (Figure 4).

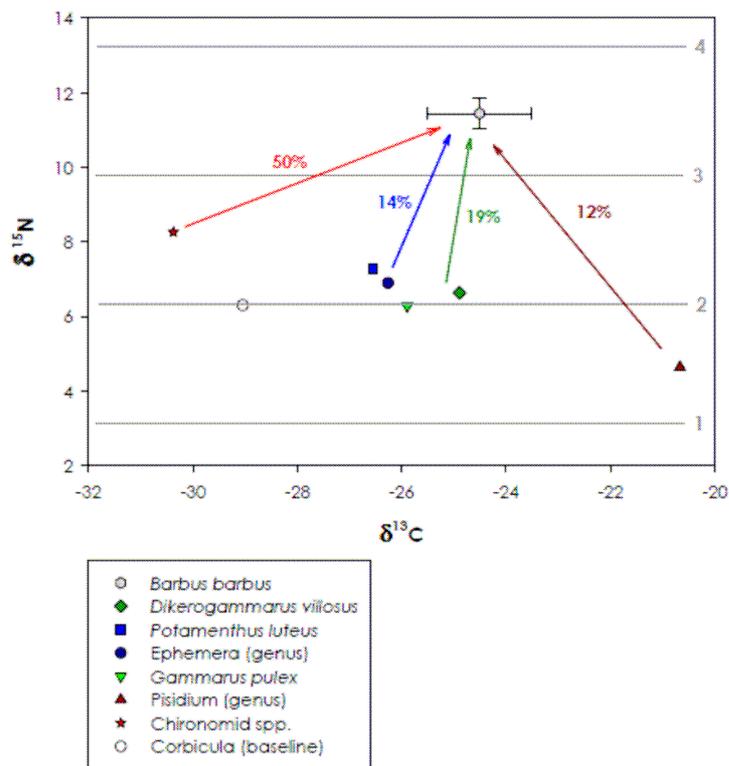


Figure 4 – Positions trophiques des sources de nourriture du barbeau (MTE)

Comme précédemment, l'ANOVA suivie de test post-hoc permet de comparer les sources de carbone pour les espèces de poissons. En amont (MTE), les 3 espèces de poissons ont la même source de carbone, donc les mêmes composants dans la chaîne alimentaire. A GDL, le chevaine se distingue des autres espèces. En aval, toutes les espèces ont la même source de carbone sauf le chevaine.

2.4 Résultats d'analyse des PCB dans les poissons

2.4.1 Résumé des analyses de PCB

Les 116 poissons collectés et analysés se répartissent entre les 3 sites et les 3 espèces comme résumé au Tableau 5.

| | BAF | BRE | CHE |
|---|---------------------|-------|-------|
| Site | MTE (La Morte) | | |
| Effectif | 11 | 7 | 15 |
| Médiane taille (cm) | 52.5 | 55 | 39.5 |
| Médiane poids (g) | 1227 | 1560 | 627 |
| Médiane lipides (%) | 4.82 | 8.61 | 3.27 |
| Médiane Σ PCBi (ng.g ⁻¹) | 507 | 317 | 76 |
| Site | GDL (Grand Large) | | |
| Effectif | 15 | 15 | 15 |
| Médiane taille (cm) | 56.0 | 55.6 | 45.0 |
| Médiane poids (g) | 1700 | 1963 | 2127 |
| Médiane lipides (%) | 14.59 | 18.46 | 8.26 |
| Médiane Σ PCBi (ng.g ⁻¹) | 2127 | 1251 | 800 |
| Site | BRE (île du Beurre) | | |
| Effectif | 5 | 17 | 16 |
| Médiane taille (cm) | 58.0 | 51.5 | 46.6 |
| Médiane poids (g) | 1974 | 1750 | 1253 |
| Médiane lipides (%) | 16.63 | 27.75 | 7.89 |
| Médiane Σ PCBi (ng.g ⁻¹) | 3357 | 1755 | 880.5 |

Tableau 5 - Résumé de la contamination des poissons collectés sur les sites d'étude

En se basant sur les relations statistiques entre PCB indicateurs et PCB de type dioxine (PCB-DL) (Babut et al. in press), on peut s'attendre à des dépassements de la valeur limite de consommation des poissons systématiques dans le Grand Large et l'île du Beurre, ainsi que pour le barbeau et la brème à La Morte.

L'ANOVA suivie de tests post-hoc montre une différence de contamination entre sites et entre espèces. La contamination augmente d'amont en aval (MTE < GDL < BRE) et le barbeau est plus contaminé que la brème et le chevaîne.

2.4.2 Calcul des facteurs d'accumulation dans les organismes collectés dans le Grand Large

Le facteur d'accumulation sédiment – biote (BSAF) est un paramètre résumant l'accumulation de composés organiques ou de métaux dans les tissus d'organismes, sur la base de concentrations normalisées dans le sédiment et dans un organisme tel que le poisson. Dans le sédiment, la normalisation est faite par rapport au carbone organique, et dans les organismes par rapport au taux de lipides. Le BSAF permet d'estimer un potentiel d'accumulation (Burkhard et al. 2005). Il est donc à ce titre plus informatif que les concentrations dans chacun des compartiments, et permet des comparaisons inter-sites (inter-écosystème). Il s'agit en revanche d'une évaluation plus grossière que celle qu'on obtiendra avec la modélisation du transfert trophique.

Le secteur du Grand Large, où l'on a collecté du sédiment, des invertébrés et des poissons, se prête bien à cet exercice.

Le BSAF est calculé selon l'Équation 2 (Ankley 1992).

$$BSAF = \frac{C_{org}/f_l}{C_{sed}/f_{soc}}$$

Équation 2

Avec C_{org} concentration dans l'organisme ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ poids frais), C_{sed} concentration dans le sédiment ($\mu\text{g.kg}^{-1}$ poids sec), f_l la fraction lipidique (g lipides / g poids frais), f_{soc} la fraction organique du sédiment (g carbone organique / g poids sec).

Les BSAF déterminés pour les 3 espèces de poissons et les invertébrés du Grand Large sont reportés Figure 5.

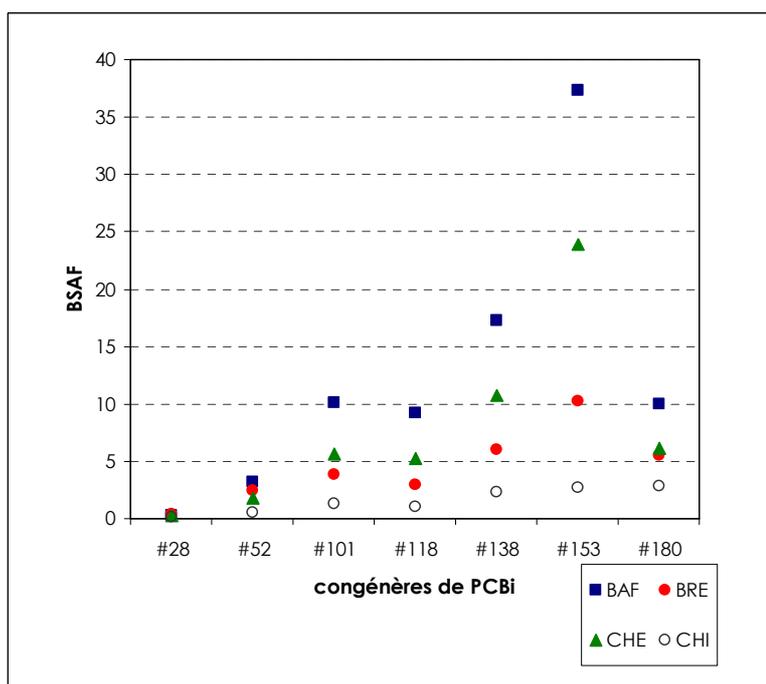


Figure 5 – BSAF dans les poissons et invertébrés du Grand Large

BAF : barbeau fluviatile ; BRE : brème commune ; CHE : chevaine ; CHI : chironomes. Les BSAF des autres invertébrés ne figurent pas sur le graphique et sont inférieures à ceux des chironomes.

Le barbeau a un potentiel d'accumulation plus important que le chevaine et la brème ; par contre on ne retrouve pas la hiérarchie des concentrations, puisque la brème présente des BSAF plus faibles que le chevaine. En d'autres termes, le chevaine présente un potentiel d'accumulation supérieur à la brème, mais celle-ci atteint des niveaux de concentration plus élevés parce qu'elle est plus grasse.

Par la suite, ces valeurs de BSAF seront comparées à celles de la littérature, et interprétées en termes de risque de contamination.

3 VALORISATION ET COMMUNICATION

3.1 Communication, diffusion des informations

- Mise en place d'un site Web⁵, comportant deux parties : une partie publique et une partie à accès protégé pour les membres de l'équipe de projet. Dans le futur, cette deuxième partie pourrait être ouverte partiellement aux partenaires institutionnels. Ce site collaboratif permet d'une part l'échange d'informations et le partage des données entre membres de l'équipe, et contribue d'autre part à la diffusion des acquis.
- Un séminaire a été organisé à Lyon le 12/02/09 et a permis un premier échange autour des données recueillies sur les sédiments. (Cf. la fiche de présentation en Annexe 3). Les invitations ont été adressées aux partenaires institutionnels du projet de modélisation, ainsi qu'à des représentants de « parties intéressées » : TREDI, organisation de protection de la nature, collectivités riveraines. La liste des participants et les présentations figurent sur la partie publique du site web précité.
- Co-organisation avec l'INRA (Thonon les Bains) d'un séminaire sur les PCBs dans les lacs alpins : historique, données générales sur la contamination biologique, les sédiments et perspectives⁶.

3.2 Communication scientifique

- Un article sous presse : "Correlations between dioxin-like and indicators PCBs: potential consequences for environmental studies involving fish or sediment." (Babut et al. in press)
- Un poster présenté à la 5^{ème} conférence internationale sur la remédiation des sédiments contaminés (Battelle, Jacksonville, FL, USA – 02-05 février 2009) : PCB congeners pattern analysis in sediment : attempting to link sources to observations (Babut M., Villeneuve B., Miège C.)
- Un poster présenté à la 14^{ème} conférence ISTA (International Symposium on Toxicity Assessment, Metz, septembre 2009) : Identification of food webs for freshwater river fishes for food-web modelling purposes (Lopes C., Roy A., Roger M.-C., Babut M., Persat H.)
- Une communication orale au 36^{ème} Aquatic Toxicity Workshop (La Malbaie, Québec, septembre 2009) : Temporal and spatial variations in PCB contamination of sediments and source apportionment in a section of the Rhone River, France (G. Roux, C. Miège, A. Roy, B. Mahler, I. Lefèvre, P. Bonte, M. Desmet, H. Persat, P. van Metre, M. Babut)
- Une communication orale au colloque de l'Association des Sédimentologues de France (Rennes, 27-29 octobre 2009) : Dynamique fluviale, flux sédimentaires et impact anthropique sur le Rhône : histoire des aménagements et des contaminants métalliques/organiques (M. Desmet, G. Roux, H. Persat, I. Lefèvre, P. Bonte, J-P. Bravard, P. van Metre, B. Mahler, A. Roy, M. Babut)

Les posters sont publiés sur le site du projet après l'événement au cours duquel ils ont été présentés.

⁵ <https://tsip-pcb.cemagref.fr/>

⁶ La problématique n'est pas fondamentalement différente du Rhône, et l'avancement du présent projet y a été présenté

4 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Le programme d'acquisition de données a donc été réalisé en quasi totalité ; toutefois, sur plusieurs points des difficultés ou des impasses sont apparus :

- a. sédiments : une carotte n'a pas été exploitée.
- b. invertébrés : sur un point, l'analyse des PCB a été faite sur des chironomes occupant une position trophique différente de ceux effectivement consommés par les poissons sur ce site⁷. De même, il restait un échantillon de gammarens en souffrance pour les PCB, ainsi que les mollusques rajoutés au programme de prélèvements en cours de route, soit une dizaine d'échantillons au total.
- c. La lecture des écailles des poissons, permettant de déterminer leur âge, est encore en cours.

En revanche, des poissons d'une quatrième espèce (brème bordelière) ont été collectés sur les 3 sites et partiellement caractérisés (analyse des contenus stomacaux, analyses isotopiques).

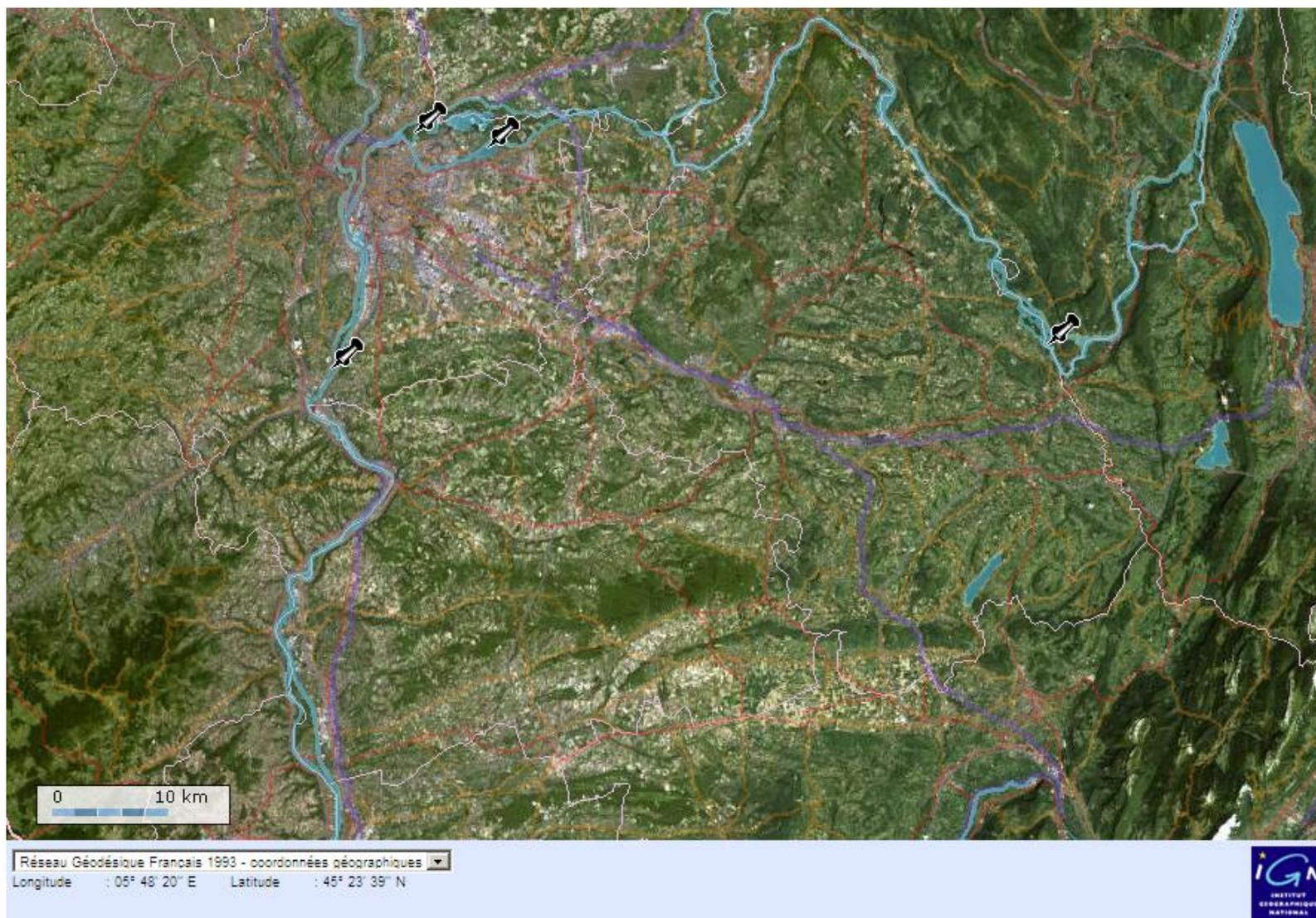
Le développement du modèle de chaîne trophique pour les poissons en est encore à un stade préliminaire : les chaînes trophiques sont caractérisées, mais la construction du modèle débute seulement. Deux raisons expliquent ce retard relatif : le recrutement du chercheur post-doctorat en charge de cette partie du projet a pris plus de temps qu'escompté, puis un congé maternité est intervenu. Les conséquences de cette situation ont cependant été limitées, puisque l'identification des chaînes trophiques a été poursuivie.

Les prochaines étapes du projet s'articulent autour de quatre orientations

- acquisition de données complémentaires : datation et analyse de la carotte reprise au Grand Large, carottage et analyses à l'étang de la Bricotte (Gier), analyses de PCB sur invertébrés et brèmes bordelières, intégration de l'âge des poissons et effet sur la composition des chaînes trophiques et la contamination.
- analyse des données des sédiments : dynamique de la contamination, tendances, typologie des sources
- analyse des données relatives au biote (invertébrés et poissons), construction du modèle et simulations
- valorisation : un double séminaire est en cours d'organisation pour les 14 et 15 décembre ; la première partie vise un public assez large (administrations, collectivités, usagers du fleuve au sens large ...), et consistera à présenter les résultats acquis depuis février. La deuxième partie vise un public plus restreint, en particulier scientifique, et visera à approfondir les discussions autour de l'interprétation des résultats. Un autre séminaire est envisagé fin 2010. Plusieurs articles scientifiques sont également en préparation, et cet effort sera poursuivi au fur et à mesure de l'avancement du projet.

⁷ Ces chironomes, prélevés dans du sédiment anaérobie, avaient une position trophique particulièrement basse ; les prélèvements ont été refaits, et la position trophique re-déterminée

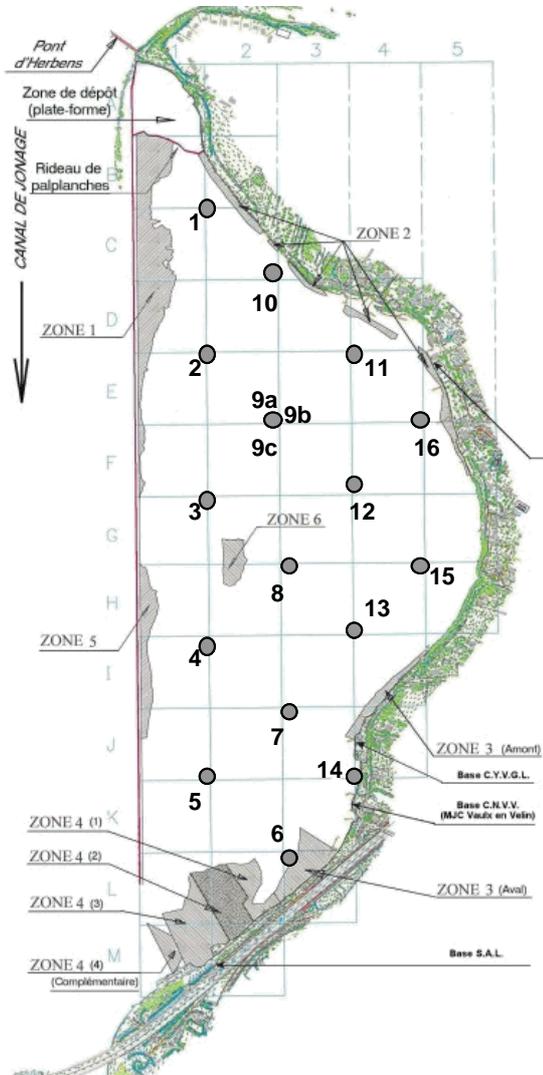
Annexe 1 Vue aérienne de la zone d'étude



(de l'amont vers l'aval : MTE, GDL, CPX, BRE)

Annexe 2 Prélèvements de sédiments superficiels dans le Grand Large

Fond de carte : EDF, positionnement des zones dragées en 2005. Les points de prélèvements de 2008 sont numérotés de 1 à 16.



**POLYCHLOROBIPHENYLES DANS LES SEDIMENTS DU RHONE :
HISTORIQUE, AVANCEES RECENTES, PERSPECTIVES**

Contexte & objectifs

Le projet mentionné ci-dessus ambitionne de développer une modélisation du transfert des polychlorobiphényles (PCB) du sédiment, identifié comme source primaire de la contamination du biote, aux poissons. Dans ce cadre, des carottes de sédiments ont été collectées sur un tronçon du Rhône allant de Brégner-Cordon à Vaugris. Les analyses de PCB sur ces carottes sont en cours. Ces analyses doivent permettre de reconstituer l'histoire de la contamination sur ce tronçon, et contribuer à renseigner sur les sources, leur composition, ainsi que l'évolution de cette contamination au cours du temps.

L'équipe de projet, constituée de chercheurs du Cemagref, du CNRS, du CEA, et de l'ENTPE, accueillera deux chercheurs en sédimentologie de l'USGS entre janvier et février 2009 grâce à un soutien du cluster environnement.

Les objectifs du séminaire sont les suivants :

- Présenter les méthodes d'interprétation des données relatives à la datation des couches et à l'estimation des flux
- Présenter les premiers résultats d'analyse des carottes conjointement aux institutions qui soutiennent ce projet, et à des représentants de la communauté scientifique, principalement régionale
- Discuter des interprétations relatives aux PCB, et le cas échéant des implications en termes de gestion

Organisation

- Date : 12 février 2009
- Lieu : Lyon, INRP
- Pour faciliter la discussion entre les participants, le principe retenu est celui d'un séminaire sur invitation, ciblant une trentaine de personnes

Programme

Programme détaillé

09h30 - Accueil participants (café-croissants) ENS lettres
10h00 - M. BabutPrésentation du projet et des partenaires scientifiques
10h20 - P. Van MetreEvolution récente des contaminants aux Etats-Unis
11h00 - B. MahlerChimie des PCB et étude de cas
11h40 - M. DesmetPolluants organiques et métalliques dans les Alpes Nord-Occidentales
12h20 - M. DesmetComment dater les sédiments : application aux lacs alpins
13h00 .. Repas au restaurant de l'école
14h00 - H. Persat.....Contexte géographique et historique des PCB dans le Rhône
14h40 - G. RouxEvolution des PCB et des métaux lourds dans les sédiments du Rhône
15h40 .. Pause café
16h00 - M. BabutProfils de contamination et distribution des congénères de PCB
16h40Discussion générale et perspectives
17h00 .. Fin

Annexe 4 Références

- Ankley, G. T. (1992). "Bioaccumulation of PCBs from sediments by oligochaetes and fishes: comparison of laboratory and field studies." Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences **49**(10): 2080.
- Babut, M. and C. Miège (2007). Contamination des poissons et des sédiments du Rhône par les polychlorobiphényles - Synthèse des données disponibles. Lyon, Cemagref.
- Babut, M., C. Miegé, et al. (in press). "Correlations between dioxin-like and indicators PCBs: potential consequences for environmental studies involving fish or sediment." Environmental Pollution
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.016>.
- Burkhard, L. P., P. M. Cook, et al. (2005). "Comparison of biota-sediment accumulation factors across ecosystems." Environmental Science and Technology **39**(15): 5716-5721.
- CE (2009). Directive établissant, conformément à la directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil, des spécifications techniques pour l'analyse chimique et la surveillance de l'état des eaux, Journal officiel de l'Union européenne. **2009/90/CE**: 201/36 - 201/38.
- Clerc, E. (2008). Caractérisation sédimentologique et géochimique des sédiments du Rhône - Etude de quatre sites sur le Rhône : la lône de La Morte, la retenue du Grand Large, la darse de Crépieux et la lône de l'Ile-du-Beurre. Villeurbanne, Université Claude Bernard Lyon1/INSA/ENTPE - Master 2 Sciences de l'Environnement Industriel & Urbain (SEIU): 80.
- Dufour, E. and D. Gerdeaux (2001). "Apports des isotopes stables (¹³C/¹²C, ¹⁵N/¹⁴N, ¹⁸O/¹⁶O, ³⁶S/³⁴S, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) aux études écologiques sur les poissons." Cybium **25**(4): 369-382.
- Helsel, D. R. (2005). Non-detects and data analysis - Statistics for censored environmental data. Hoboken (NJ), John Wiley & sons.
- Post, D. M. (2002). "Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions." Ecology **83**(3): 703.
- Vieille-Blanchard, M. (2007). Ressources trophiques utilisées par deux espèces de poissons du Rhône. Lyon, Université de Lille 2 - Master2 Toxicologie environnementale et Industrielle: 27.