CARACTERISATION DES NIVEAUX DE CONTAMINANTS METALLIQUES DE LA HAUTE DRONNE

Étude réalisée avant, pendant et après les travaux d'aménagement

Rapport final – juillet 2021

Pierre-Yves GOURVES, Magalie Baudrimont et Alexia Legeay
UMR CNRS 5805 EPOC – Équipe Écotoxicologie Aquatique- 33120 Arcachon

Table des matières

Introduction 2

Matériel et méthode 4

1. Zone d'étude 4
2. Prélèvements dans le milieu 4
   a. Eau 5
   b. Sédiments 6
   c. Bryophytes 6
3. Quantification des métaux 7
   a. Métaux labiles par la technique des Diffusive Gradient in Thin films (DGT) 7
   b. Sédiments 8
   c. Bryophytes 8
4. Statistiques 9
5. Bilan des prélèvements *in situ* et analyses réalisés 9

Résultats 11

1. État des lieux de la contamination métallique de la rivière Dronne avant les travaux d'aménagement 11
   a. Bryophytes 11
   b. Eau 13
   c. Sédiments : fraction fine (<63 µm) et totale 18
2. Étude de l'impact des travaux sur la contamination métallique de la Dronne et de la Malencourie 20
   a. Bryophytes 20
   b. Eau 21
   c. Sédiments 27

Conclusion 35

Références bibliographiques 36

ANNEXE 1 – Analyse de la granulométrie des sediments prélevés à chaque site 38

Méthode 38

Résultats 38

Introduction

Les mollusques d'eau douce tels que les moules sont une composante importante des écosystèmes aquatiques et leur présence reflète la santé du milieu aquatique (Brim Box *et al.*, 2006). La plupart des bivalves d'eau douce d'Europe sont sur la liste des espèces en danger d'extinction (Bauer et Wächtler, 2001). Parmi eux, la moule perlière *Margaritifera margaritifera* est l'espèce la plus menacée et a subi en Europe un fort déclin de son abondance et de son aire de répartition (Geist, 2010). Les effectifs ont diminué de 90% à l'échelle de notre continent durant le dernier siècle. En France, le déclin a été plus dramatique et dépasse 99%. Il n'y subsiste plus qu'environ 100 000 individus répartis dans environ 80 cours d'eau et la Haute-Dronne abrite la première population de Moule perlière de France. Ce déclin serait d'abord causé par des effets indirects liés à la dégradation, l'altération et la fragmentation des habitats entrainant l'absence et/ou la diminution des poissons hôtes (truite fario ou saumon atlantique), une modification de l'hydrologie et de la géomorphologie des cours d'eau. Des menaces directes sont aussi responsables de ce déclin comme la surpêche pour récupérer les perles, la prédation ou encore la dégradation de la qualité de l'eau.

Sur la Dronne, ces menaces sont bien présentes. Son eau est de bonne qualité, mais elle peut dépasser 7 $mg.L^{-1}$ de nitrates (NO_3^-), valeurs proches de la limite de survie des juvéniles (Moorkens, 2000). La dégradation des habitats par le colmatage est renforcée par la présence d'obstacles et l'absence de continuité écologique. En effet, l'amont des retenues des ouvrages est enfoui sous des sédiments fins. L'aval est colmaté par un important développement algal lié à l'augmentation de la température et à la baisse du potentiel auto-épuratoire de l'eau. Les pressions anthropiques environnantes passées et actuelles sont aussi une source de micropolluants organiques et inorganiques dans la Dronne. La dangerosité de ces contaminants vis-à-vis des organismes aquatiques est largement documentée dans la littérature (Baudrimont et al., 2017 ; Boukadida et al., 2017), et compte tenu de la sensibilité toute particulière de la moule perlière à la qualité de l'eau, il parait pertinent d'évaluer et de suivre leurs niveaux dans la Dronne et d'étudier leurs éventuels impacts sur la Petite Mulette.

L'objectif de cette action était de caractériser les niveaux des contaminants métalliques de la rivière Dronne dans l'eau, les sédiments et les bryophytes avant, pendant et

après les travaux d’aménagement de restauration de la continuité écologique, et ainsi évaluer l’effet potentiel de ces travaux sur le biotope de la moule perlière.

Matériel et méthode

1. Zone d'étude

Les sites ont été étudiés entre fin octobre 2015 et octobre 2020 et se situent le long de la rivière Dronne qui prend sa source dans le Parc Naturel Régional Périgord Limousin (PnrPL) sur la commune de Bussières-Galant, dans le centre ouest de la France. Les 10 sites où ont été réalisés les échantillonnages sont localisés dans le Parc Naturel Régional Périgord Limousin (PNRPL) et sur le site Natura 2000, FR7200809 qui a une surface de 2118 ha, soit 9.9 % du bassin versant de la Haute-Dronne qui couvre 21428 ha (figure 1).

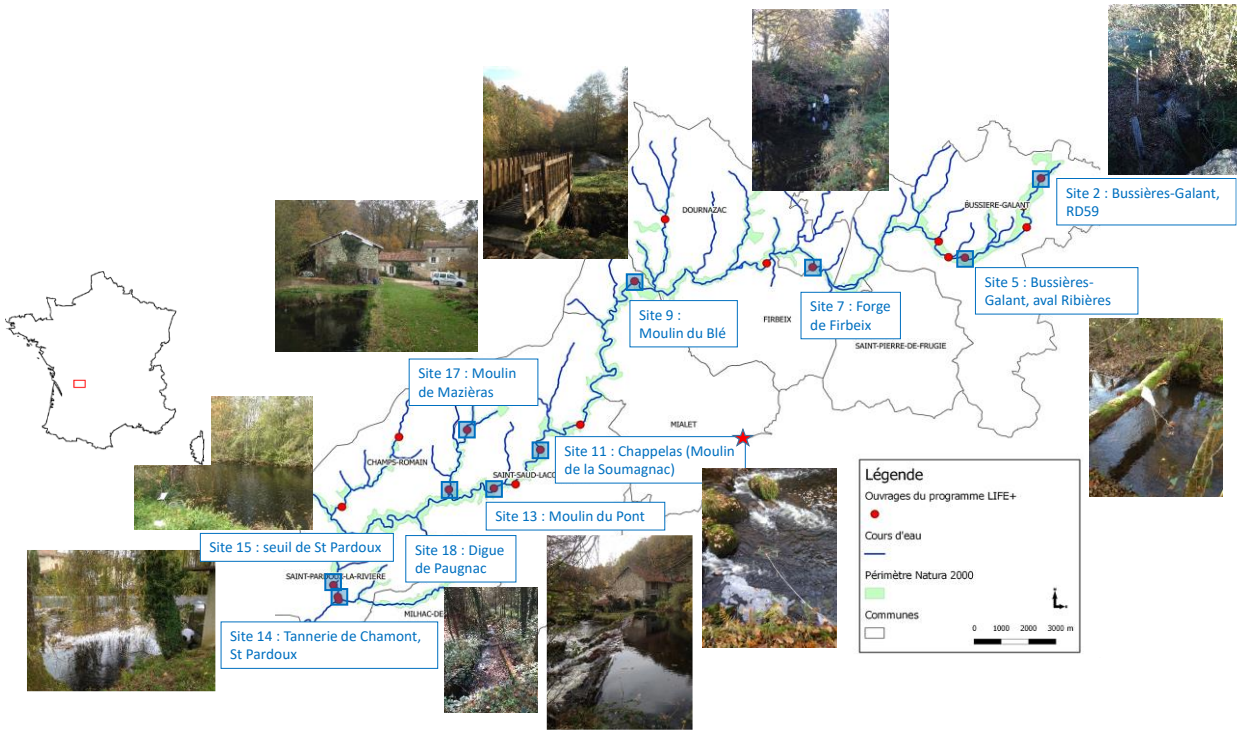


Figure 1- Localisation des sites échantillonnés sur la rivière Dronne et son affluent Malencourie (Dordogne, centre ouest, France)

Parmi les 10 sites suivis, 8 sont situés sur la Dronne le long d'un linéaire amont-aval (Bussières-Galant RD59 et aval Ribières, Forge de Firbeix, Moulin du Blé, Chappelas, Moulin du Pont, Tannerie St Pardoux et seuil de Saint-Pardoux) et 2 sur la Malencourie, un de ses affluents (la Digue de Paugnac et le Moulin de Mazièras).

2. Prélèvements dans le milieu

a. Eau

- **Métaux labiles : immersion de Diffusive Gradient in Thin films (DGT)**

Les Diffusive Gradient in Thin films (DGT) permettent d'extraire et de concentrer *in situ* les éléments métalliques labiles. Ces échantillonneurs ont été développés et fournis par la société DGT Research Ldt (Lancaster, Royaume-Uni). Ils sont équipés d'une résine Chelex pour accumuler les métaux, d'un gel de diffusion (0.75 mm d'épaisseur) et d'une membrane de protection pour filtrer les matières en suspension (0.14 mm d'épaisseur, 2.5 cm de diamètre, diamètre des pores 0.45µm). Les DGT ont été immergés 15 jours à l'amont de chaque ouvrage pour concentrer les métaux labiles contenus dans l'eau de la Dronne et de la Malencourie. Ils ont ensuite été récupérés avec des gants, rincés à l'eau ultra-pure, placés dans des sachets propres et conservés à 4°C jusqu'au laboratoire. Sur le terrain, des DGT ont aussi été exposés à l'air pour estimer la contamination atmosphérique et liée à l'opérateur durant les déploiements des capteurs passifs. Ces derniers ont subi le même traitement en laboratoire de l'extraction de la résine à la quantification des métaux.

- **Métaux dissous et totaux**

De l'eau a été prélevée aux 10 sites à l'aval des ouvrages pour quantifier les métaux dissous et totaux. Les flacons en polypropylène utilisés pour ces prélèvements ont été préalablement nettoyés à l'eau régale 10% pendant 48h, rincés 3 fois à l'eau ultra-pure et séchés sous une hotte à flux laminaire. Ils ont ensuite été stockés fermés dans une poche propre à l'abri de toutes contaminations extérieures jusqu'à leur utilisation.

Avant les prélèvements, l'opérateur muni de gants en nitrile est placé dans l'eau en aval du point afin de ne pas échantillonner le sédiment remobilisé par ses mouvements. Les flacons fermés sont ouverts une fois totalement immergés et rincés 3 fois. Ils sont ensuite remplis sans laisser de bulles d'air et stockés fermés dans une poche propre. Les échantillons sont conservés à 4°C à l'abri de la lumière pour éviter la prolifération d'espèces indésirables bactériennes ou planctoniques, et les réactions chimiques modifiant la composition de l'échantillon. Une partie de l'eau a été filtrée

(filtres avec des pores de diamètre 0,45µm) pour quantifier les métaux dissous, l'autre partie non filtrée servira à déterminer les métaux totaux. Au laboratoire, les échantillons sont acidifiés à 10% avec de l'acide nitrique.

b. Sédiments

Les sédiments sont considérés comme le réceptacle ultime des micropolluants métalliques. Dans la colonne d'eau les polluants ont tendance à s'associer aux particules en suspension qui sédimentent progressivement. Les sédiments fournissent donc une information cumulée de la contamination présente et passée.

Une carotte sédimentaire d'environ vingt centimètres de profondeur a été prélevée à l'amont et à l'aval de chaque seuil à l'aide d'un tube en PVC. Les sédiments ont été stockés dans une poche en plastique propre à 4°C sur le terrain puis à -20°C au laboratoire. Lors des travaux d'aménagement des cours d'eau pour rétablir la continuité écologique, l'ensemble des sédiments sont remobilisés. Il nous paraissait donc pertinent de ne pas étudier que les premiers centimètres. Deux paramètres ont été suivis sur les sédiments : (i) les concentrations métalliques sur la partie tamisée à 63µm (la fraction fine) et la partie non tamisée (total), et (ii) la granulométrie. La fraction fine n'a pas pu être étudiée à l'aval des ouvrages non détruits et sur la commune de Bussière-Galant par manque de sédiments fins. En effet, ces sites ont un faciès d'écoulement lotique à l'aval des ouvrages et s'apparentent à des plats de courant (profondeur faible, courant modéré et substrat de type gravier et sableux). En revanche, l'amont des seuils ont un faciès lentique favorisant les dépôts sédimentaires (sédiment argilo-sableux).

c. Bryophytes

Les bryophytes aquatiques sont couramment utilisées comme outil de surveillance des contaminants dans les écosystèmes aquatiques. En effet, certaines espèces possèdent une large répartition géographique, elles sont faciles à collecter, à manipuler, à transporter et à préparer pour les analyses. Enfin, elles ont une capacité d'élimination plus lente que la prise des métaux. Cette propriété leur confère donc une bonne capacité intégrative du milieu.

Comme les capacités d'accumulation varient en fonction des espèces, il est important de n'utiliser qu'une seule et même espèce de mousse. Nous avons choisi d'étudier le couple recommandé par l'Agence de l'eau (Rapport Agence de l'eau, 1998) à savoir *Fontinalis antipyretica* et *Rhynchostegium riparioides* (aussi appelée *Platyhypnidium riparioides* dans la littérature). Ces espèces n'ont pas toujours été retrouvées sur les 10 sites suivis avant, pendant et après les travaux sur les ouvrages. Bien que la zone étudiée soit un biotope optimal au développement des mousses, il semblerait que les conditions lumineuses, physico-chimiques, sédimentaires et hydrauliques ne soient pas toujours favorables à une échelle locale. De plus, durant les travaux, la forte turbidité de l'eau ne nous a pas permis de repérer et donc de récolter des bryophytes.

3. Quantification des métaux

a. Métaux labiles par la technique des Diffusive Gradient in Thin films (DGT)

Dans des conditions « ultra propres », la résine de chaque DGT a été retirée, placée dans un tube en polyéthylène – préalablement lavé à l'acide nitrique – et éluée pendant minimum 24h avec 5 mL d'acide nitrique suprapur 1M. L'éluât a ensuite été dilué (dilution gravimétrique) avec de l'eau ultra pure avant les analyses. Les extraits de DGT dilués ainsi que l'eau de la Dronne et de la Malencourie ont été analysés avec des spectromètres de masse quadripolaire avec une source de plasma à couplage inductif (ICP-MS, Agilent Technology). La qualité des analyses a été contrôlée soit par l'analyse d'un matériel certifié de référence NIST 1640a (certifié eau naturelle, Sigma-Aldrich) avec des pourcentages de recouvrement situés entre 93% et 114 % selon les éléments, ou soit selon les recommandations de la norme ISO 17294-2.
Les concentrations en métaux labiles C_{DGT} ont été calculées selon la formule suivante (Zhang *et al.*, 1995) :

$$C_{DGT} = \frac{m\Delta_g}{DtA}$$

avec :

m : masse du métal accumulé dans la résine

Δ_g : épaisseur du gel de diffusion

D : coefficient de diffusion du métal dans le gel

t : temps d'exposition du DGT

A : la surface d'exposition

b. Sédiments

Avant l'analyse des métaux dans les sédiments, une étape d'extraction a été réalisée pour les mettre en solution. Pour cela, environ 30 mg de matière sèche et broyée ont été mis au contact de 750 µl d'acide nitrique, 1.5 ml d'acide chlorhydrique et 2.5 ml d'acide fluorhydrique. Une phase de chauffage à reflux à 110°C pendant 2h est nécessaire à la dissolution des métaux (destruction de la maille cristalline), puis une étape d'évaporation à 110°C durant 10h. Les acides sont alors évaporés et une reprise de l'échantillon est faite par ajout de 250 µl d'acide nitrique et de 5 ml d'eau ultra-pure. Les tubes sont ensuite chauffés pendant 15 minutes à 65°C afin d'accélérer la dissolution. Enfin, leur contenu est transvasé dans des tubes de 14 ml qui sont ensuite passés à la centrifugeuse à 4000 tours/min. Un surnageant de 3.5 ml est prélevé auquel est ajouté un volume de 6.5 ml d'eau ultra-pure. Pour chaque série d'attaque, des blancs et le certifié NIST SRM 8704 (certifié sédiment, Sigma-Aldrich) d'attaques sont ajoutés afin de s'assurer du contrôle qualité.

c. Bryophytes

Les échantillons de bryophytes ont été séchés dans une étuve à 50°C durant 48h. Ils ont ensuite été digérés avec de l'acide nitrique pendant 3 heures à 100°C sur une plaque chauffante et enfin dilués avec de l'eau ultra-pure après refroidissement. Les contaminants métalliques ont été quantifiés simultanément avec un spectromètre d'émission optique avec une source de plasma à couplage inductif (ICP-OES, Agilent Technology). La validité de la méthode a été vérifiée avec des échantillons biologiques certifiés Tort-3 et Dolt-5 (respectivement de l'hépatopancréas de homard et du foie de roussette du NRCC-CNRC, Ottawa, Canada). Les pourcentages de recouvrement des certifiés varient entre 91% et 102%. Les contaminations éventuelles de l'acide et des consommables ont quant à elles été suivies avec des blancs qui ont subi le même protocole que les échantillons.

4. Statistiques

Une transformation Box-Cox (Peltier *et al.*, 1998) a d'abord été appliquée aux données en raison d'une variance non homogène. Après transformation, une analyse de variance (ANOVA) à un facteur suivie d'un test LSD de Fisher pour étudier la différence entre les moyennes ont été réalisés quand la normalité (approuvée par le test de Shapiro) et l'homogénéité des variances (approuvée par le test de LEVENE) ont été tous les deux respectées. Dans le cas où les hypothèses de base n'ont pas été pas vérifiées, une analyse non paramétrique de Kruskal Wallis et un test-U de Mann et Whitney ont alors été privilégiés. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel STATISTICA 6.1 (Statsoft, 2004) et le seuil de significativité a été fixé à 5% ($\alpha = 0.05$).

5. Bilan des prélèvements *in situ* et analyses réalisés

Le suivi des niveaux métalliques aux 2 sites de Bussières-Galant n'a pu être réalisée qu'après les travaux en octobre 2015. Les ouvrages ont été démolis avant que l'équipe ne puisse intervenir (figure 2).

Parmi les 8 autres sites suivis entre octobre 2015 et octobre 2020, des travaux d'aménagement ont été réalisés sur 6 d'entre eux (Forge de Firbeix, Chappelas, seuil de Saint-Pardoux, Tannerie de Saint-Pardoux, Digue de Paugnac, Moulin de Maziéras). De plus, seulement 4 (Forge de Firbeix, Chappelas, Saint-Pardoux et la Tannerie) ont pu faire l'objet d'un suivi évaluant l'impact des travaux sur le biotope de la moule perlière minimum un an après leur achèvement. Une dernière campagne de prélèvements après les travaux aurait dû être réalisée durant l'été 2021 à la Digue de Paugnac, mais compte-tenu de la date de fin de projet, ces études n'ont pas pu être réalisées. Mis à part les échantillons du Moulin de Maziéras durant la phase des travaux qui sont en cours d'analyses, tous les échantillons ont été traités et les résultats présentés dans ce livrable.

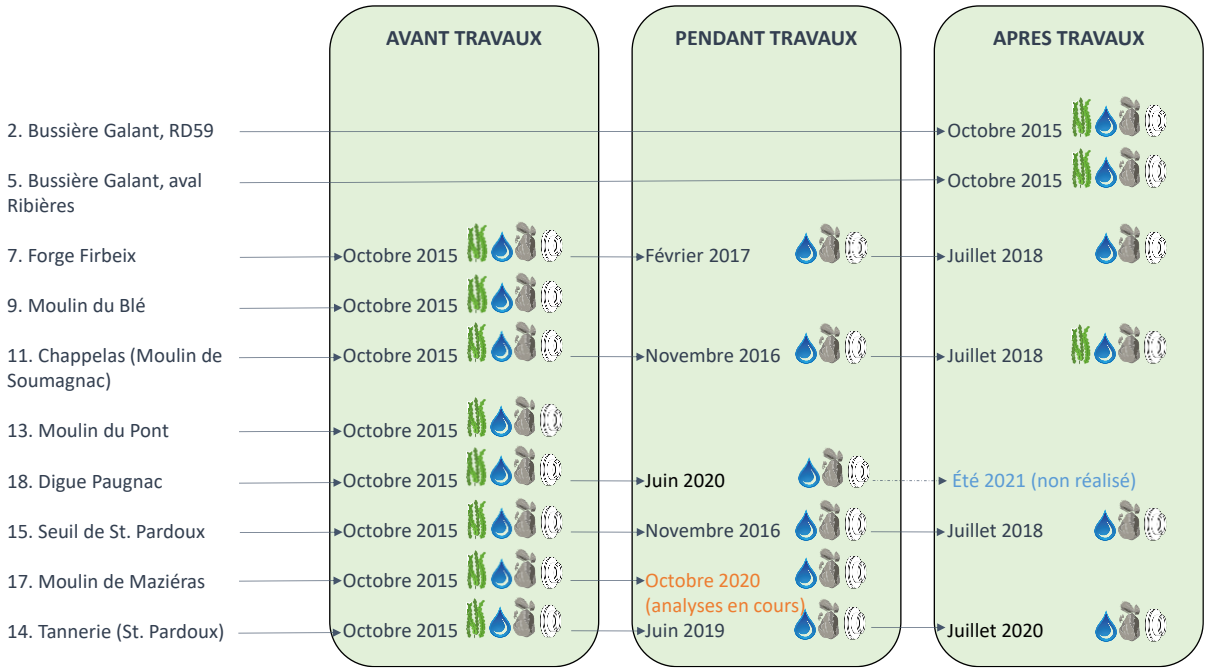


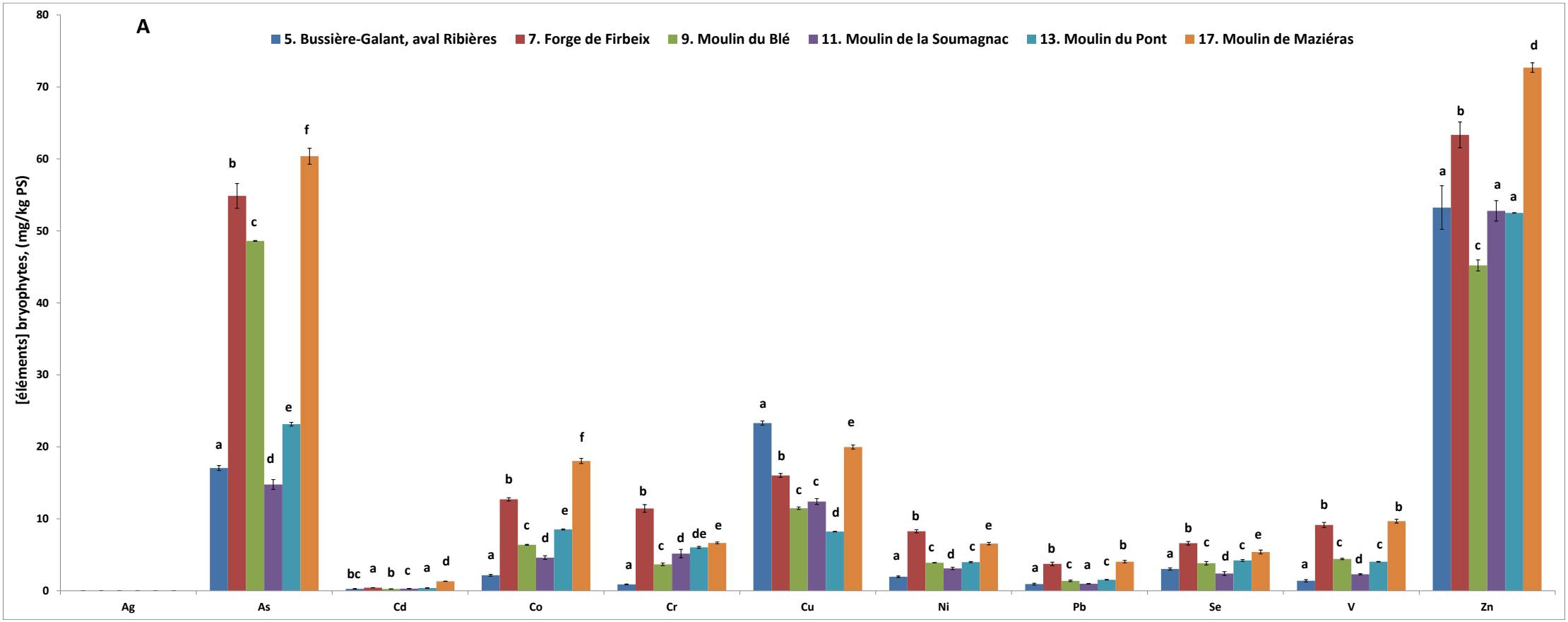
Figure 2- Planning des prélèvements de bryophytes, eau, sédiments et DGT réalisés entre 2015 et 2021 aux 10 sites suivis durant le projet LIFE13 NAT/FR/000506.

Résultats

1. État des lieux de la contamination métallique de la rivière Dronne avant les travaux d'aménagement

a. Bryophytes

Parmi les sites échantillonnés, la bioaccumulation a été la plus faible à Bussières-Galant RD59 (le plus en amont) excepté pour le Cu avec des valeurs jusqu'à 3 fois supérieures aux autres points de prélèvement (figure 3). Nous avons ensuite observé des profils d'accumulation des bryophytes similaires pour Al, As, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, V et Zn avec des concentrations entre 2 et 4 fois plus élevées en moyenne à la Forge de Firbeix et au Moulin de Maziéras qu'au Moulin du Pont, Chappelas (Moulin de Soumagnac), Moulin du Blé, Bussières-Galant (aval Ribière). La teneur en As au Moulin du Blé fait figure d'exception en ayant une concentration aussi importante qu'à la Forge de Firbeix et au Moulin de Maziéras. Nous avons ensuite noté que le site du Moulin de Maziéras est marqué par des concentrations élevées en Cd et en Fe avec des valeurs en moyenne 3 fois supérieures aux autres sites. Enfin, la concentration en Cr est croissante de l'amont à l'aval avec un pic d'accumulation à la Forge de Firbeix.


A
5. Bussière-Galant, aval Ribières
7. Forge de Firbeix
9. Moulin du Blé
11. Moulin de la Soumagnac
13. Moulin du Pont
17. Moulin de Maziéras
[éléments] bryophytes, (mg/kg PS)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Ag
As
Cd
Co
Cr
Cu
Ni
Pb
Se
V
Zn

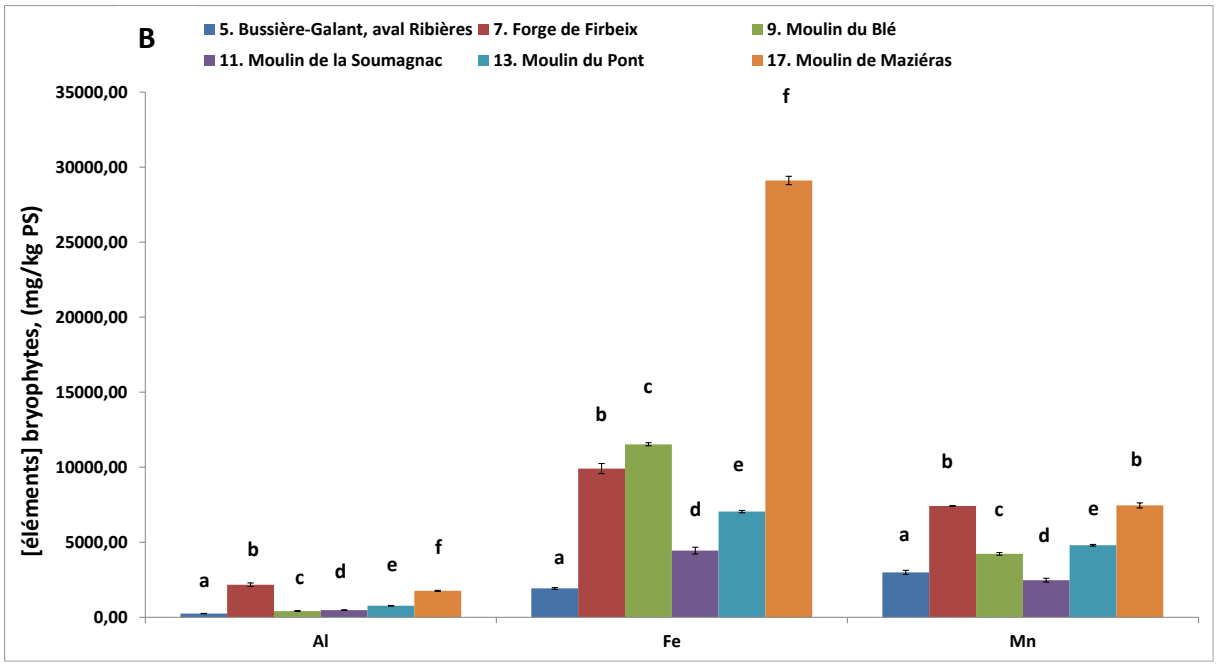


Figure 3- Accumulations de (A) Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, V, Zn et de (B) Al, Fe et Mn dans les bryophytes à l'aval des ouvrages de Bussières-Galant (aval Ribières), à la Forge de Firbeix, au Moulin du Blé, au Moulin de Soumagnac (Chappelas), au Moulin du Pont et au Moulin de Maziéras (moyennes ± SE).

b. Eau

- **Métaux dissous et totaux**

Les concentrations métalliques dans l'eau (tableau 1) sont dans l'ensemble faibles et inférieures aux PNEC (« Predicted No Effect Concentration », plus forte concentration de la substance sans risque pour l'environnement) exceptées pour :

(1) Al et Mn à tous les sites avec des valeurs jusqu'à 15000 fois supérieures pour l'Al et 45 fois pour le Mn à Bussière Galant (RD 59),

(2) As à Bussières-Galant (aval Ribières et RD 59) avec des concentrations à l'aval de Ribières les plus élevées et 8 fois supérieures à la PNEC, à Firbeix, au Moulin du Blé, au Moulin de Soumagnac, au Moulin du Pont, à St Pardoux et à la Tannerie,

(3) Co à Firbeix (au niveau du rejet de la forge) et à Bussières-Galant (RD 59),

(4) Cu à Bussières-Galant (aval Ribières et RD59) et au Moulin de Maziéras,

(5) V à Bussières-Galant (RD59).

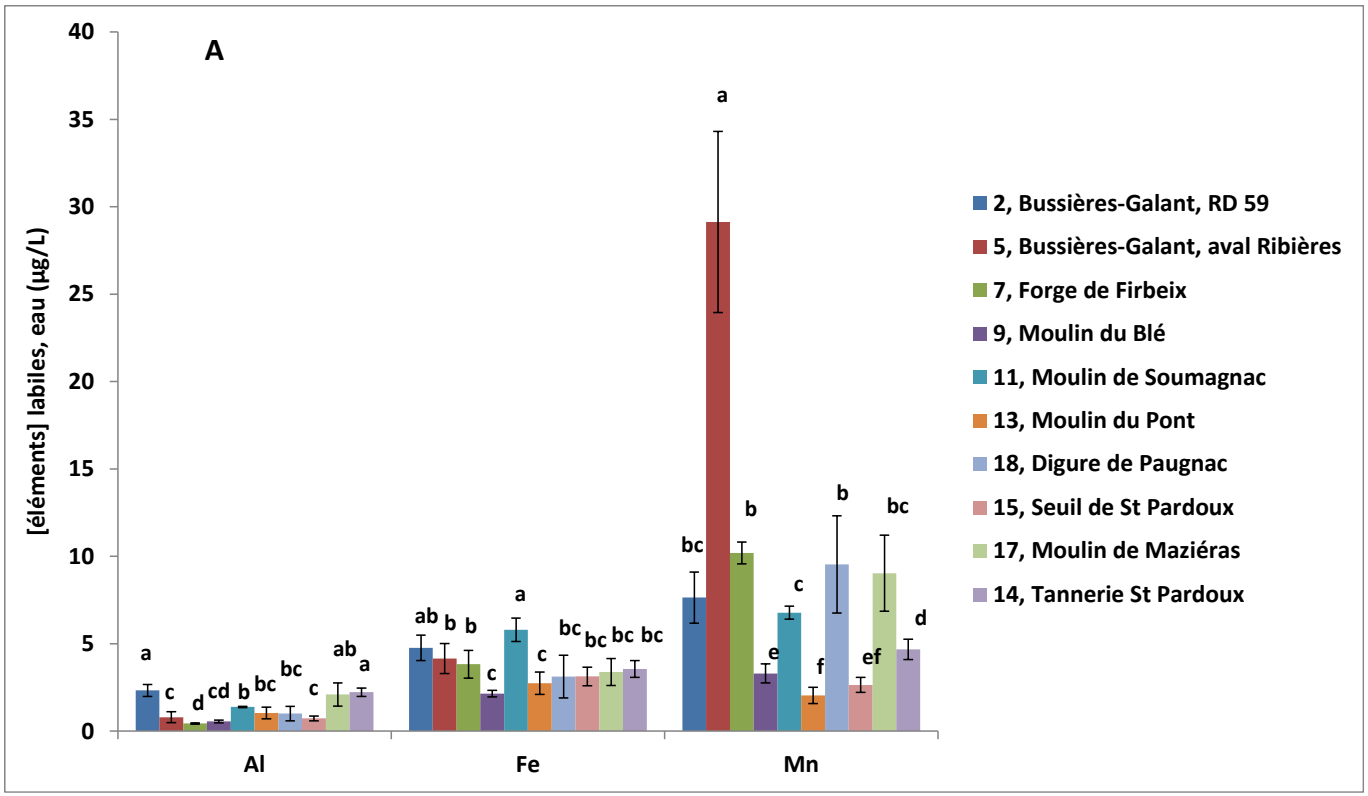
Tableau 1- Concentrations en métaux dissous et totaux (en µg.L^{-1}) de l'eau de la Dronne et de son affluent la Malencourie à l'aval des ouvrages et synthèse des « Predicted No Effect Concentration » (PNEC, en µg.L^{-1}) dans l'eau douce (métaux dissous) d'après les fiches de données toxicologiques environnementales de l'INERIS (Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des RisqueS). Le signe « - » signifie l'absence de PNEC pour le métal.

		Ag	Al	As	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Se	V	Zn
2. Bussières-Galant, RD 59	**Total**	<LD	892,9	6,79	<LD	1,83	0,68	1,66	974,3	66,7	1,01	0,030	<LD	3,14	5,4
	Dissous	<LD	18,08	1,65	<LD	<LD	<LD	<LD	38,9	14,65	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
5. Bussières-Galant, aval Ribières	**Total**	<LD	101,3	34,52	<LD	<LD	<LD	1,82	640,3	57,68	<LD	<LD	<LD	0,84	<LD
	Dissous	<LD	53,72	37,93	<LD	<LD	<LD	1,76	669,9	59,52	<LD	<LD	<LD	0,721	<LD
7. Forge de Firbeix	**Total**	<LD	45,34	9,61	<LD	<LD	<LD	<LD	268,5	38,65	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	Dissous	<LD	<LD	4,09	<LD	<LD	<LD	<LD	83,7	22,95	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	Reject	<LD	35,76	95,24	<LD	<LD	2,32	<LD	6515,7	1117	<LD	<LD	<LD	1,02	2,2
9. Moulin du Blé	**Total**	<LD	36,09	8,87	<LD	<LD	<LD	<LD	405,4	27,46	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	Dissous	<LD	6,607	5,15	<LD	<LD	<LD	<LD	210,6	12,5	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
11. Moulin de Soumagnac (Chappelas)	**Total**	<LD	34,82	5,71	<LD	<LD	<LD	1,11	268,7	13,6	<LD	<LD	<LD	<LD	1,3
	Dissous	<LD	5,08	3,72	<LD	<LD	<LD	<LD	152,1	7,53	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
13. Moulin du Pont	**Total**	<LD	27,16	4,96	<LD	<LD	<LD	0,96	235,7	10,97	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	Dissous	<LD	4,86	3,77	<LD	<LD	<LD	<LD	146,0	5,95	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
18. Digue de Paugnac	**Total**	<LD	89,9	2,73	<LD	<LD	<LD	<LD	440,6	57,29	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	Dissous	<LD	16,33	1,42	<LD	<LD	<LD	<LD	195,5	28,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
15. Seuil de St Pardoux	**Total**	<LD	51,59	4,95	<LD	<LD	<LD	1,03	271,8	18,03	<LD	<LD	<LD	<LD	1,1
	Dissous	<LD	5,53	3,49	<LD	<LD	<LD	<LD	154,6	7,95	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
17. Moulin de Maziéras	**Total**	<LD	83,81	3,23	<LD	<LD	<LD	1,87	398,7	31,63	<LD	<LD	<LD	0,8	1,3
	Dissous	<LD	26,57	2,48	<LD	<LD	<LD	1,22	261,4	16,31	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
14. Tannerie, St Pardoux	**Total**	<LD	56,69	4,63	<LD	<LD	<LD	1,52	262,8	16,15	<LD	<LD	<LD	<LD	0,8
	Dissous	<LD	7,09	3,68	<LD	<LD	<LD	0,99	167,0	11,89	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
PNEC	**Dissous**	**-**	**0,06**	**4,4**	**0,19**	**4,1**	**0,3**	**1,6**	**-**	**1,5**	**1,7**	**0,4**	**-**	**2,5**	**7,8**

- **<u>Métaux labiles : Diffusive Gradient in Thin films (DGT)</u>**

Les niveaux de contamination métallique dans la Dronne ont enfin été étudiés à travers l'immersion de capteurs passifs DGT (figure 4). Ces dispositifs permettent d'accumuler sur une période donnée les métaux dissous « labiles » (forme ionique libre, organique ou inorganique) considérés comme les plus biodisponibles.

Nous remarquons d'abord que l'Ag, Cd, Co, Cr, Cu et Se sont trop peu concentrés dans l'eau pour être quantifiés par les appareils. De plus, parmi les substances classées comme prioritaires dans la DCE, la concentration en Ni est deux fois plus élevée à Bussières-Galant et à la Forge de Firbeix qu'aux autres sites et le Pb présente un gradient décroissant d'accumulation de l'amont vers l'aval dans les DGT. En effet, trois groupes se distinguent **(1)** *« Bussièrse Galant et Forge de Firbeix »*, **(2)** *« Moulin du Blé, Moulin de Soumagnac et Moulin du Pont »* et **(3)** *« Digue de Paugnac et St Pardoux ».* Le groupe 1 a des concentrations en Pb 2 fois supérieures aux groupes 2 qui a lui-même des concentrations 7 fois supérieures au groupe 3. Les teneurs en Zn, classé comme substance pertinente dans la DCE, sont très variables et présentent peu de différences significatives entre les sites. Nous constatons néanmoins que le Zn est 5 fois moins concentré dans les DGT au Moulin de Soumagnac (0.15 µg/L) qu'au Moulin de Maziéras (0.81 µg/L). Les profils d'accumulation de l'Al et du Fe labiles sont très similaires avec les concentrations plus fortes à Bussières-Galant qui décroissent jusqu'au Moulin du Blé. Elles sont ensuite multipliées par 2,5 au Moulin de Soumagnac pour enfin décroitre en aval de la Dronne. Contrairement au Fe, l'Al augmente à nouveau au Moulin de Maziéras situé sur un affluent de la Dronne et à la Tannerie. Les concentrations en Mn très variables le long du linéaire permettent de regrouper les sites selon des niveaux croissants d'accumulation : le **premier** *«Moulin du Blé, Moulin du Pont, St Pardoux et la Tannerie »* ($[Mn]_{moyenne}$ = 3,1 µg/L), le **deuxième** *« Bussièrse-Galant (RD59), Forge de Firbeix, Moulin de Soumagnac et de Maziéras, la digue de Paugnac »* ($[Mn]_{moyenne}$ = 8,6 µg/L) et le **troisième** *« Bussières-Galant (aval Ribièrse)»* ($[Mn]_{moyenne}$ = 29,1 µg/L). De plus, les sites de Bussières-Galant sont caractérisés par des niveaux en As et V potentiellement biodisponibles supérieurs et confirment nos observations dans l'eau.


A
[éléments] labiles, eau (µg/L)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
a
c
d
cd
b
bc
bc
c
ab
a
ab
b
b
c
a
c
bc
bc
bc
bc
bc
a
b
c
e
f
b
ef
bc
d
Al
Fe
Mn
2, Bussières-Galant, RD 59
5, Bussières-Galant, aval Ribières
7, Forge de Firbeix
9, Moulin du Blé
11, Moulin de Soumagnac
13, Moulin du Pont
18, Digure de Paugnac
15, Seuil de St Pardoux
17, Moulin de Maziéras
14, Tannerie St Pardoux

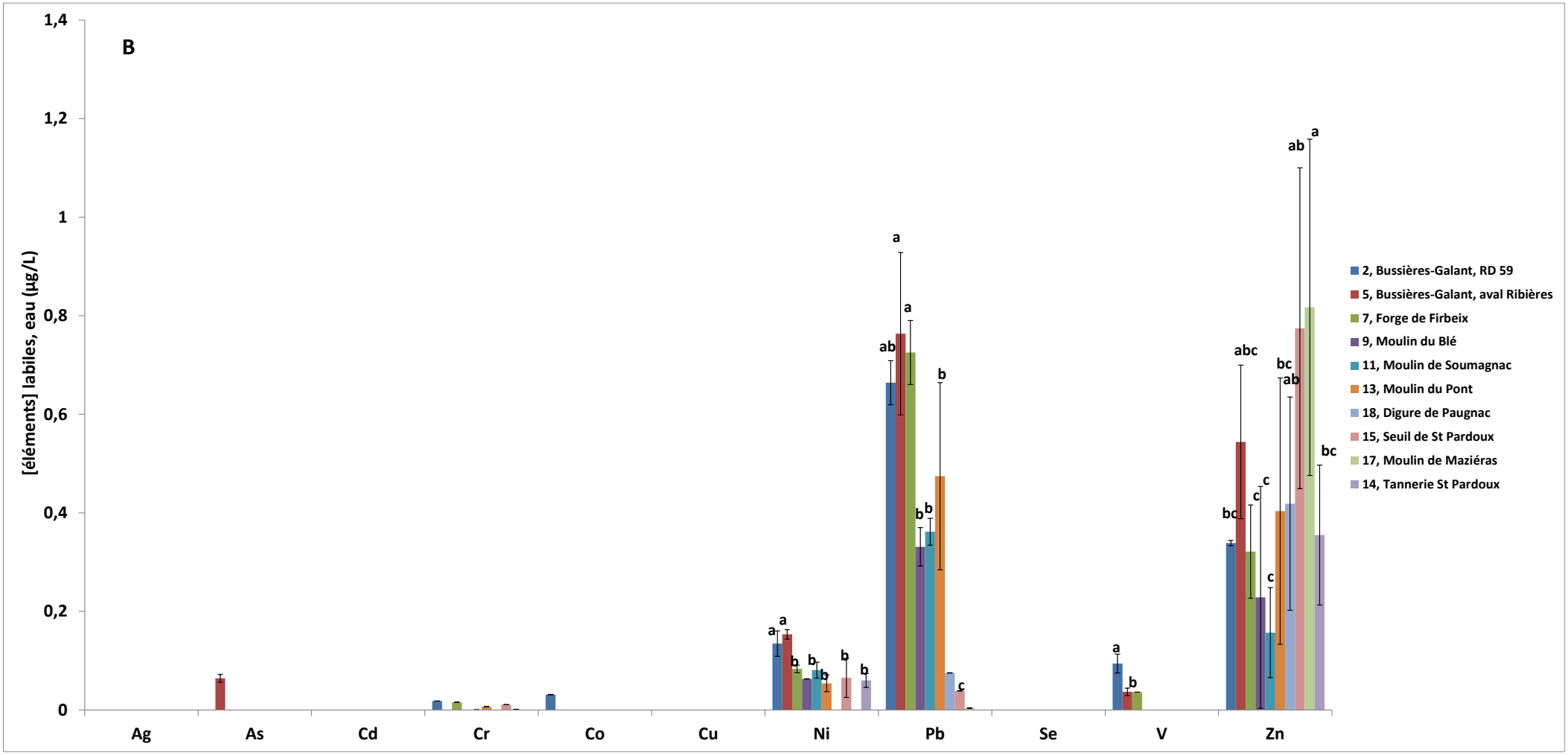


Figure 4- Concentrations de (A) Al, Fe, Mn et de (B) Ag, As, Cd, Cr, Co, Cu, Ni, Pb, Se, V, Zn dans les DGT exposés 15 jours aux eaux de la Dronne et de la Malencourie (moyennes ± SE). L'absence de données pour certains éléments signifient que les concentrations sont inférieures aux limites de détection de l'appareil. L'étude statistique n'a été réalisée que si le nombre de réplicas par site et par métal était supérieur à 2.

c. Sédiments : fraction fine (<63 µm) et totale

Les analyses montrent des concentrations métalliques supérieures dans l'ensemble des sédiments situés à l'amont des ouvrages de la Tannerie, de la Forge de Firbeix, du Moulin de Maziéras, Moulin du Blé – et dans une moindre mesure au Moulin du Pont et la Digue de Paugnac – avec des niveaux pouvant atteindre respectivement 5 fois ceux de l'aval pour le Cd, 2.5 fois pour le Pb, 3 fois pour le Mo ou encore 3 fois pour le Ni (tableau 2). Le Moulin de Soumagnac et St Pardoux font figures d'exception avec des concentrations majoritairement plus élevées à l'aval des seuils avec par exemple un rapport de 5 pour Cr et V pour le premier et un rapport de 2 pour As et Sn pour le second.

Dans la fraction fine (< 63 µm) qui concentre les métaux, les concentrations en Mo, V, Cr, Ni, Co, Cd, Cu, Th, Ag, U, Zn et As sont plus importantes à Firbeix, à St Pardoux, à la Tannerie, au Moulin du Pont, de Soumagnac et du Blé. De plus, les niveaux de Sb sont en moyenne 4 fois plus élevés à Firbeix et ceux de Sn de 2 fois à la Digue de Paugnac, Moulin de Maziéras, St Pardoux. Enfin, le site de Paugnac est marqué par des concentrations 3 fois plus élevées en Pb.
Lorsqu'on compare ces données avec les seuils réglementaires, les concentrations en As à l'amont des ouvrages à la Forge de Firbeix, au Moulin du Blé, Moulin de Soumagnac et en Pb à la Digue de Paugnac dépassent respectivement les 30 mg/kg et les 100 mg/kg fixés par la référence S1 de l'arrêté interministériel qui permet d'apprécier la qualité des sédiments extraits des cours d'eau. À noter que ces seuils peuvent être révisés et actualisés, et que de nouvelles substances pourront être couvertes dans le futur. Il est donc nécessaire de se référer aux derniers arrêtés en vigueur pour connaître les substances à prendre en compte et les concentrations associées.

Tableau 2- Concentrations métalliques dans l'ensemble du sédiment et dans la fraction fine (<63 µm) aux 10 sites suivis et situés sur la Dronne et la Malencourie, en mg.kg^{-1} PS.

Sites			Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	Sb	Sn	Th	U	V	Zn
2. Bussières-Galant, RD 59			0,18	6,44	465,63	0,14	1,00	6,05	3,23	0,05	4,76	29,50	90,55	2,20	0,83	3,46	2,04	7,91	16,04
5. Bussières-Galant, aval Ribières			0,23	45,43	699,91	0,18	2,35	11,77	8,08	0,16	4,74	34,39	141,85	5,58	1,33	4,10	2,50	19,54	33,55
7. Forge de Firbeix	**Amont**	**Total**	0,58	79,00	564,12	0,86	14,82	61,54	26,52	0,75	24,02	45,22	96,08	4,50	5,80	8,11	8,24	77,70	134,12
		63 µm	0,53	82,90	648,48	0,82	12,41	56,38	20,37	0,65	20,80	41,84	120,07	3,82	4,89	8,52	8,50	72,08	120,59
	Aval	**Total**	0,23	39,13	503,28	0,30	3,72	25,42	7,25	0,48	9,06	22,64	73,76	1,13	2,10	7,99	4,07	42,59	53,66
9. Moulin du Blé	**Amont**	**Total**	0,27	18,84	592,18	0,27	4,06	12,88	4,90	0,22	6,10	32,81	86,11	0,57	3,34	5,12	2,58	19,47	48,83
		63 µm	0,62	37,91	544,20	0,97	8,38	27,84	10,29	0,48	10,94	33,85	85,85	1,21	7,27	12,88	8,89	44,65	89,84
	Aval	**Total**	0,14	15,26	627,96	0,11	3,10	4,05	2,68	0,18	1,91	31,36	62,34	0,30	1,65	5,35	1,28	9,64	18,61
11. Moulin de Soumagnac (Chappelas)	**Amont**	**Total**	0,13	7,68	346,99	0,07	2,09	7,23	23,78	0,12	3,61	17,29	48,88	0,76	3,87	3,37	1,07	10,59	19,04
		63 µm	0,44	46,07	625,98	0,62	9,00	36,42	12,70	0,46	13,63	34,16	83,83	0,98	13,88	9,97	5,72	52,28	98,76
	Aval	**Total**	0,20	9,58	348,47	0,11	2,65	45,15	8,93	0,33	4,49	19,30	42,83	0,35	6,62	3,43	1,39	65,93	97,87
13. Moulin du Pont	**Amont**	**Total**	0,14	3,71	734,24	0,08	1,85	10,72	2,42	0,13	4,52	31,22	91,68	0,41	2,28	2,00	1,13	13,19	20,19
		63 µm	0,55	22,39	622,29	0,93	8,62	33,42	15,62	0,44	12,33	40,40	99,22	0,95	8,37	11,94	8,42	60,71	95,27
	Aval	**Total**	0,13	12,91	599,38	0,06	1,73	9,17	2,53	0,11	2,75	27,30	78,77	0,37	3,77	3,09	1,05	15,77	55,36
18. Digue de Paugnac	**Amont**	**Total**	0,39	3,48	312,47	0,17	4,36	19,00	9,70	0,13	7,90	58,29	52,99	0,44	13,98	4,65	3,84	24,34	97,97
		63 µm	0,65	9,77	405,15	0,74	8,66	26,24	18,09	0,37	12,13	121,24	83,49	1,02	15,31	8,24	12,24	38,46	213,83
	Aval	**Total**	0,22	6,64	411,02	0,16	2,85	8,28	4,81	0,15	2,79	56,76	78,83	5,11	5,96	3,87	2,02	10,83	39,29
15. Seuil de St Pardoux	**Amont**	**Total**	0,15	3,99	354,91	0,12	1,89	10,17	2,85	0,07	4,22	25,99	63,69	0,41	2,01	3,97	1,39	11,67	21,28
		63 µm	0,56	25,03	729,45	0,93	10,03	37,00	16,64	0,48	15,71	57,87	97,61	1,07	7,68	12,37	8,23	56,18	126,33
	Aval	**Total**	0,50	7,93	490,15	0,09	2,43	12,89	4,02	0,15	4,83	24,79	71,85	0,35	4,46	3,78	1,36	18,92	28,55
17. Moulin de Maziéras	**Amont**	**Total**	0,20	2,35	266,00	0,12	1,41	4,16	2,64	0,06	1,99	50,95	60,02	0,10	10,90	2,42	2,29	5,46	28,03
		63 µm	0,51	10,27	331,83	0,48	5,49	17,58	10,03	0,22	8,55	55,67	68,56	0,37	20,97	7,52	8,95	22,68	89,10
	Aval	**Total**	0,12	1,61	221,32	0,06	0,47	2,32	1,23	0,02	1,01	31,02	47,72	0,06	5,88	1,90	0,98	3,80	15,55
14. Tannerie, St Pardoux	**Amont**	**Total**	0,30	10,44	628,60	0,35	5,97	19,25	7,67	0,26	8,00	36,59	100,40	0,48	5,10	5,95	2,88	28,08	63,30
		63 µm	0,54	21,17	647,66	0,77	10,60	37,39	16,24	0,56	15,37	48,13	85,33	1,09	10,24	8,67	7,23	57,38	115,81
	Aval	**Total**	0,13	16,42	562,88	0,07	1,53	4,39	1,72	0,15	3,45	38,41	83,23	0,24	6,73	3,08	1,20	6,48	17,73

2. Étude de l'impact des travaux sur la contamination métallique de la Dronne et de la Malencourie

a. Bryophytes

L'absence de bryophytes vivantes durant et après les travaux sur les sites initialement prélevés, hormis au Moulin de Soumagnac (après les travaux), démontre un changement de la qualité physico-chimique du biotope dans la Dronne depuis les travaux. En effet, leur disparition pourrait d'une part s'expliquer par une augmentation de la concentration en matières en suspension diminuant la quantité de lumière et donc la production de photosynthèse, et d'autre part par une augmentation aiguë ou chronique des polluants métalliques dans l'eau depuis les travaux.

Les concentrations en métaux dans les bryophytes retrouvées au Moulin de Soumagnac ont augmenté avec les travaux de 33% pour Cu, 46 % pour V, 68 % pour Zn, 102 % pour Se, 115 % pour Mn, 120 % pour Al, 130 % pour Co, 167 % pour Pb, 198 % Ni et 283 % pour Cd (tableau 3). En revanche, nous observons des baisses significatives pour As (- 25 %), Fe (- 38 %) et Cr (- 74%). Le remaniement sédimentaire a remis en suspension les particules fines et les métaux associés. Les conditions physico-chimiques du milieu ont modifié la spéciation chimique des métaux entrainant une augmentation de leur biodisponibilité, et donc de leur accumulation par les bryophytes.

Tableau 3- Concentrations métalliques dans les bryophytes (moyennes ± SE) et pourcentages des variations des accumulations en métaux entre avant et après les travaux d'aménagement au site du Moulin de Soumagnac (ou Chappelas). Un signe « + » signifie une concentration supérieure après les travaux, inversement pour le signe « - »

	[Métaux] $_{\text{avant travaux}}$ mg/kg	**[Métaux] $_{\text{après travaux}}$** mg/kg	**Variations** %	**Différence Significative** p_value
Cd	0,29 ± 0,01	1,1 ± 0,04	+ 282,8	*< 0,05*
Ni	3,1 ± 0,16	9,2 ± 0,1	+ 197,9	*< 0,05*
Pb	0,98 ± 0,04	2,6 ± 0,2	+ 167,3	*< 0,05*
Co	4,6 ± 0,25	10,5 ± 0,06	+ 128,7	*< 0,05*
Al	472,8 ± 26,0	1038,4 ± 18,5	+ 119,6	*< 0,05*
Mn	2471,6 ± 127,3	5306,2 ± 127,2	+ 114,7	*< 0,05*
Se	2,4 ± 0,2	4,8 ± 0,05	+ 101,7	*< 0,05*
Zn	52,7 ± 1,4	88,7 ± 0,3	+ 68,1	*< 0,05*
V	2,3 ± 0,08	3,3 ± 0,04	+ 45,8	*< 0,05*
Cu	12,4 ± 0,4	16,5 ± 0,1	+ 33,4	*< 0,05*
As	14,7 ± 0,7	11,01 ± 0,1	- 25,4	*< 0,05*
Fe	4442,7 ± 230,2	2772,6 ± 80	- 37,6	*< 0,05*
Cr	5,2 ± 1,6	1,3 ± 0,1	- 73,7	*< 0,05*

b. Eau

Suite à un changement de prestataire pour les dosages des métaux dans l'eau, certains éléments majeurs (Al, Fe et Mn) n'ont pu être quantifiés par ICP-MS durant et après les travaux. Le suivi de ces 3 éléments ne sera donc pas abordé dans cette partie.

- **Métaux dissous**

Nous observons d'abord une forte augmentation des concentrations en métaux dissous dans l'eau à tous les sites durant les travaux (figure 5). Bien que les teneurs baissent un an après l'achèvement des aménagements, elles restent quasi systématiquement supérieures aux niveaux initiaux. Parmi ces niveaux élevés, certains sont très proches voire dépassent très largement les PNEC (Predicted No Effect Concentration, c'est à dire les plus fortes concentrations des substances sans risque pour l'environnement) notamment pour l'As (pratiquement à tous les sites), Co (Tannerie), Cu (Tannerie), Ni (Tannerie), Pb (tous les sites) et Zn (Tannerie).

- **Métaux totaux**

Les cinétiques des concentrations totales en métaux dans la Dronne et la Malencourie (figure 6) ont des profils similaires aux concentrations métalliques dissoutes. On observe des augmentations des teneurs durant les périodes de travaux puis une baisse voire un maintien de ces niveaux après leurs achèvements tout en restant supérieures aux concentrations mesurées avant les travaux. Cependant, nous remarquons que les plus fortes concentrations métalliques durant les travaux sont retrouvées à la Digue de Paugnac. Bien que nous n'ayons pas de données (perte de l'échantillon), on peut imaginer que les concentrations en métaux dans la phase dissoute ont pu être très élevées à Paugnac, dépassant probablement les PNEC.

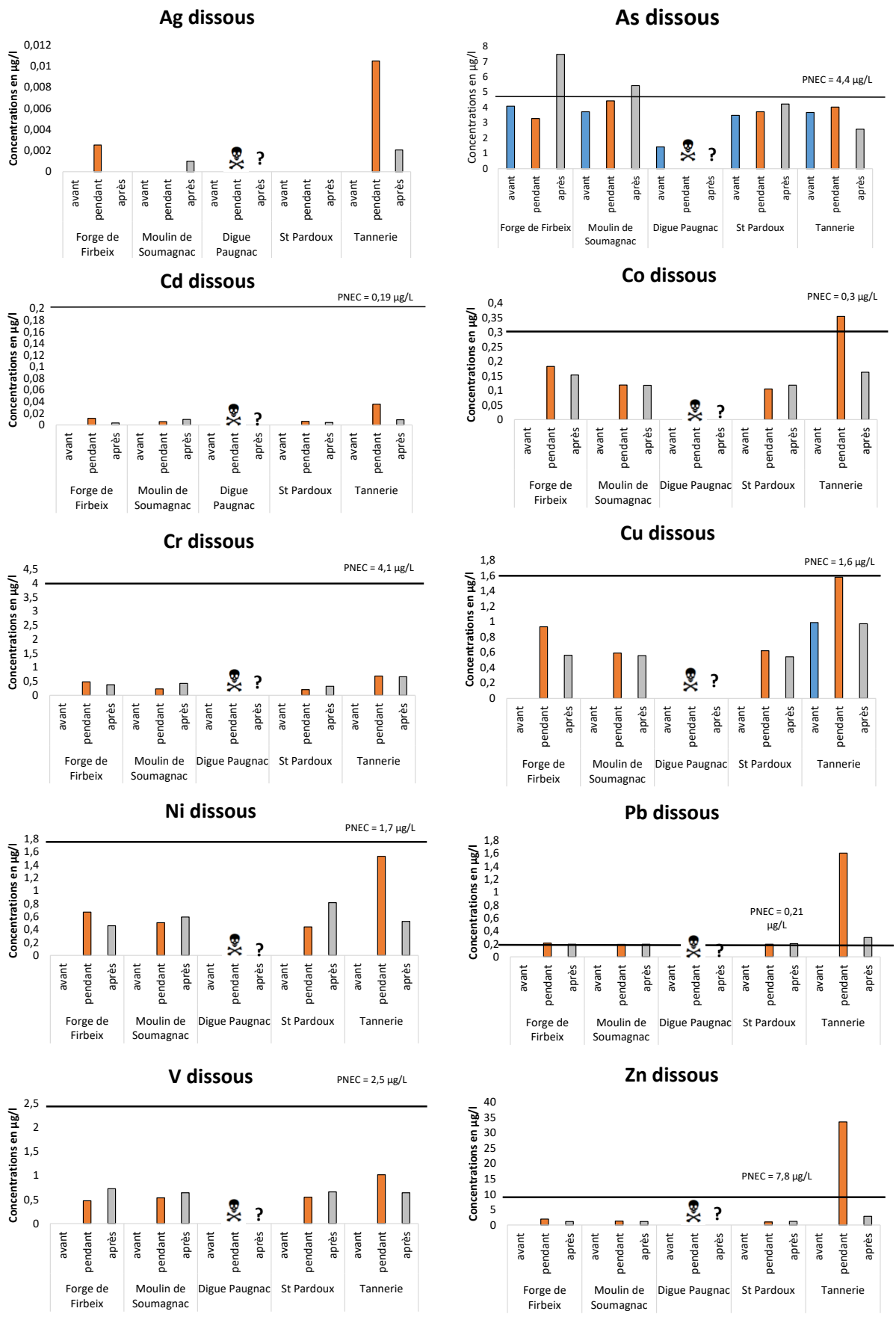


Figure 5- Cinétiques des concentrations en métaux dissous dans l'eau de la Dronne et la Malencourie (µg.L^{-1}) de la période avant les travaux d'aménagement jusqu'à minimum un an après leurs achèvements à la Forge de Firbeix, au Moulin de Soumagnac (ou Chappelas), à la Digue de Paugnac, à Saint-Pardoux centre et à la Tannerie de Saint-Pardoux

'L'absence de barres sur les histogrammes signifie que les concentrations sont inférieures aux limites de détection de l'appareil

PNEC : Predicted No Effect Concentration » (en µg.L-1) dans l'eau douce (métaux dissous)

☠ *: échantillon perdu* **?** *: prélèvement à programmer éventuellement*

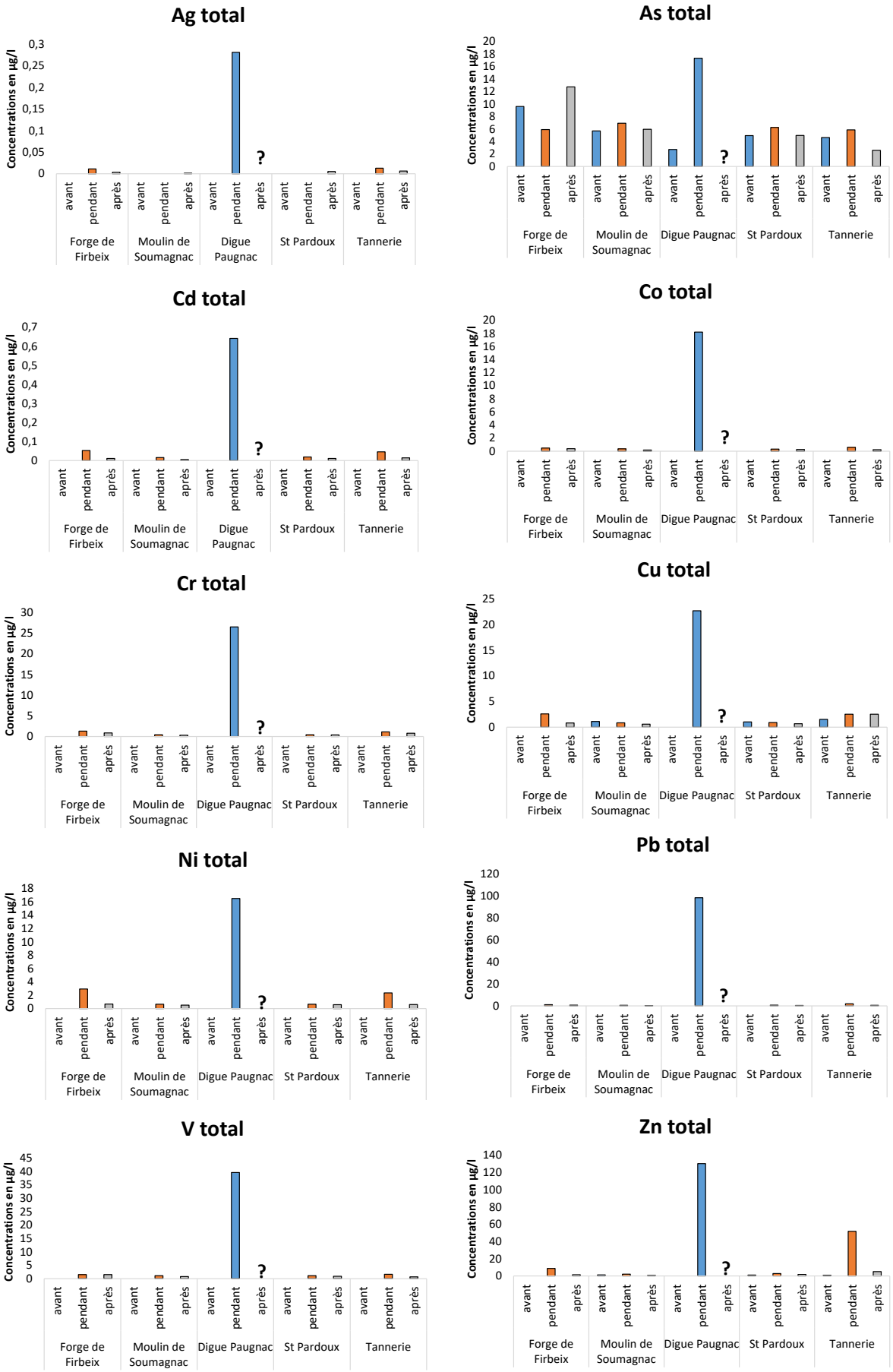


Figure 6- Cinétiques des concentrations en métaux totaux dans l'eau de la Dronne et la Malencourie (µg.L-1) de la période avant les travaux d'aménagement jusqu'à minimum un an après leurs achèvements à la Forge de Firbeix, au Moulin de la Maque (ou Chappelas), à la Digue de Paugnac, à Saint-Pardoux centre et à la Tannerie de Saint-Pardoux

L'absence de barres sur les histogrammes signifie que les concentrations sont inférieures aux limites de détection de l'appareil

? *: prélèvement à programmer éventuellement*

- **Métaux labiles : Diffusive Gradient in Thin films (DGT)**

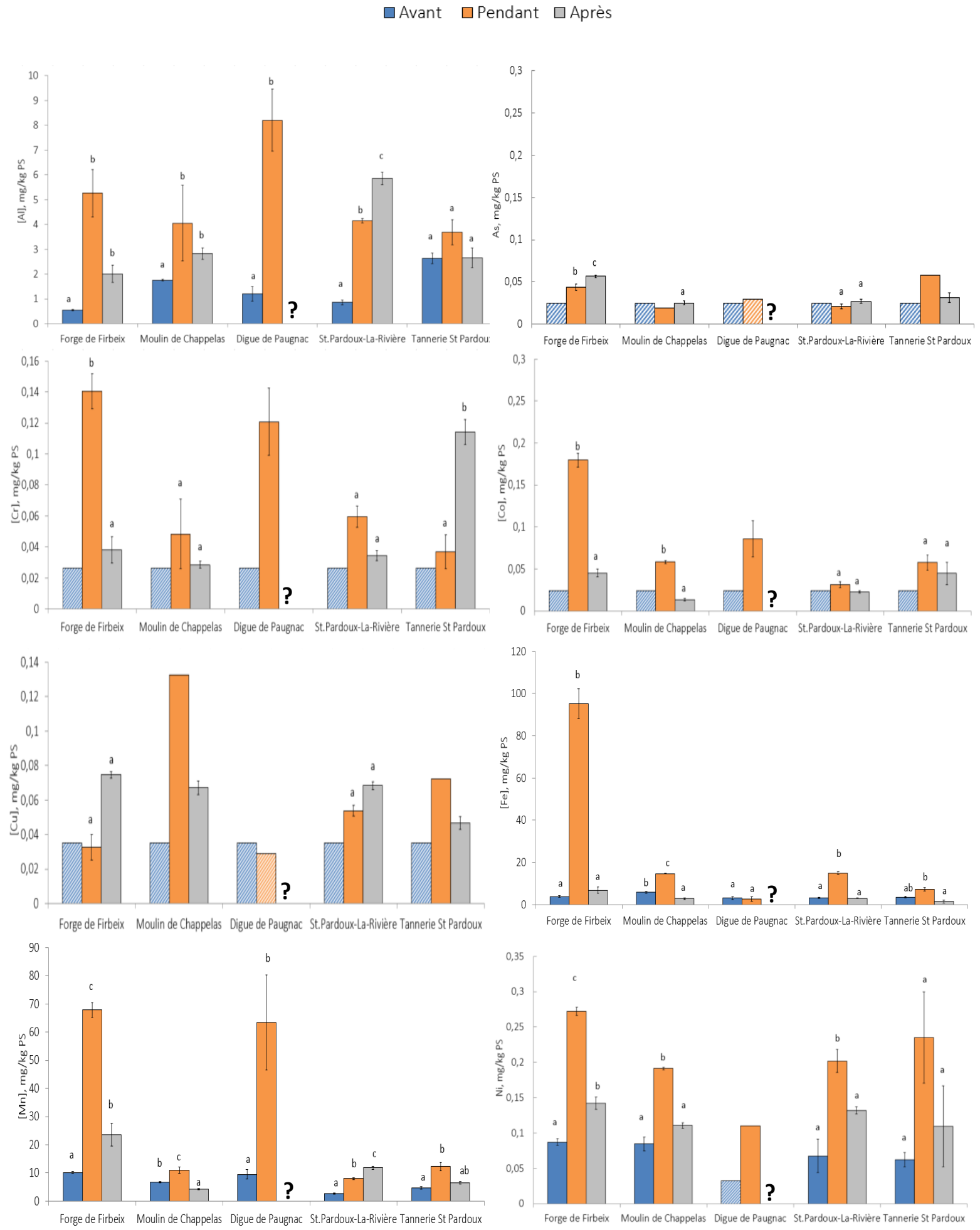
Les travaux de démantèlement des ouvrages ont eu un effet sur les conditions hydrologiques pouvant influencer les variations des concentrations en métaux labiles.

En effet, les concentrations en Al, Cr, Co, Fe, Mn et Ni ont dans l'ensemble un profil en cloche (figure 7) sur les sites étudiés. Leurs valeurs ont en effet tendance à d'abord fortement augmenter durant les travaux surtout à La Forge de Firbeix avec des concentrations en Ni multipliées par 3, en Mn par 6.5, en Al par 9.5 et en Fe par 25. Minimum un an après, les teneurs baissent pour tendre vers des niveaux proches de ceux observés avant les aménagements. Ces résultats montreraient alors des transferts de ces métaux du sédiment remobilisé vers l'eau qui baisseraient avec la sédimentation des matières en suspension. On remarque cependant quelques exceptions avec les concentrations en Al et Mn à Saint-Pardoux et le Cr à la Tannerie qui continuent de croitre plusieurs mois après la fin des travaux.

Les concentrations en V croissent tout au long du suivi avec des valeurs dépassant 6 (Saint-Pardoux) à 15 fois (Forge de Firbeix) celles avant les travaux sauf pour la Tannerie où elles baissent de moitié un an après la fin des travaux.

À contrario, les teneurs en Pb baissent fortement à la Forge de Firbeix, au Moulin de Soumagnac et à la Digue de Paugnac à partir des aménagements.

Contrairement aux autres métaux, les concentrations en As, Cu et Zn sont restées stables dans le temps sauf à la Forge de Firbeix où la teneur en As augmente après les travaux.


Avant
Pendant
Après
[Al], mg/kg PS
As, mg/kg PS
[Cr], mg/kg PS
[Co], mg/kg PS
[Cu], mg/kg PS
[Fe], mg/kg PS
[Mn], mg/kg PS
Ni, mg/kg PS
Forge de Firbeix
Moulin de Chappelas
Digue de Paugnac
St.Pardoux-La-Rivière
Tannerie St Pardoux

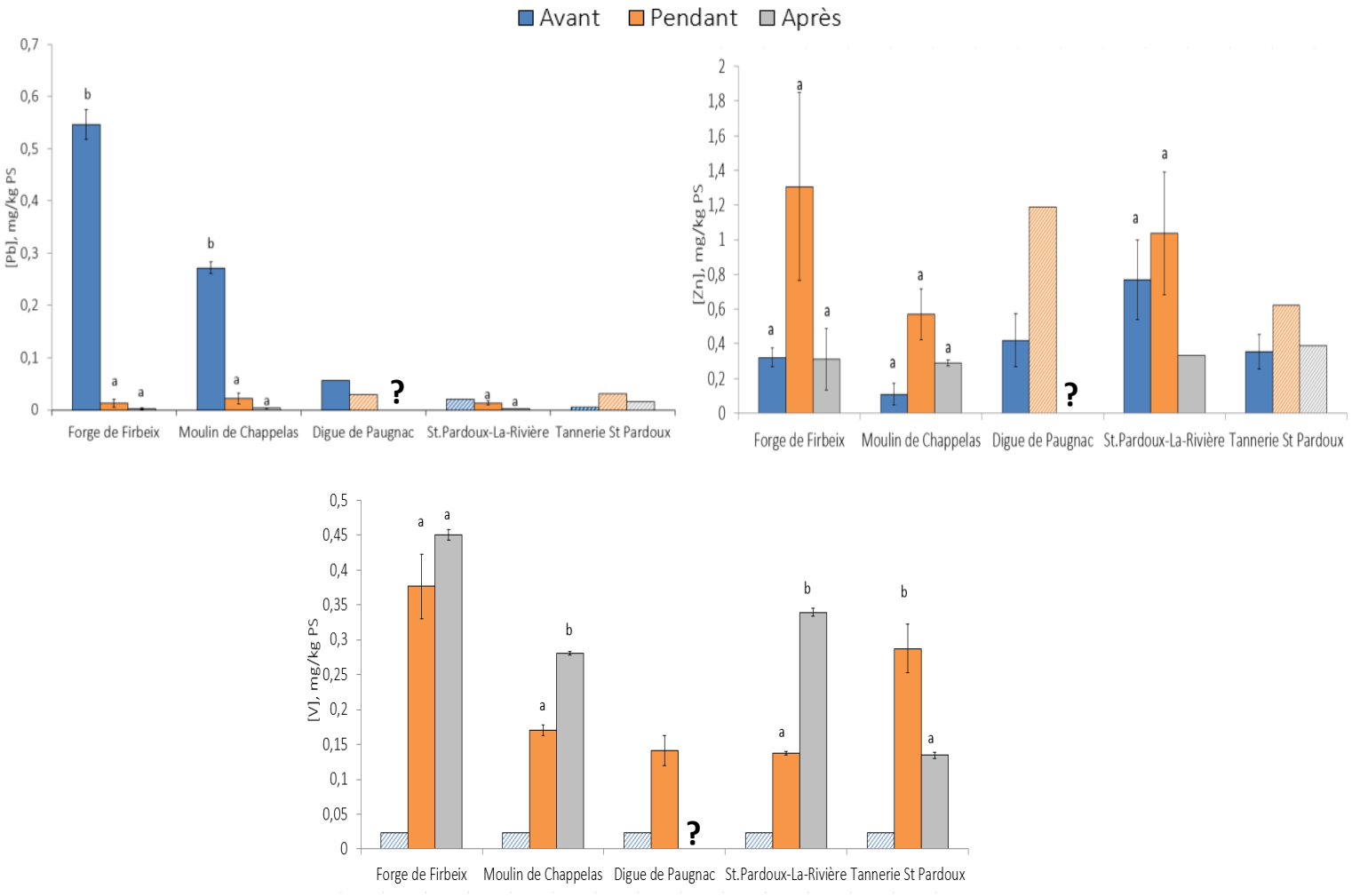


Figure 7- Cinétiques des concentrations en métaux labiles dans l'eau de la Dronne et la Malencourie (moyennes ± SE, mg.kg^{-1}) de la période avant les travaux d'aménagement jusqu'à minimum un an après leurs achèvements à la Forge de Firbeix, au Moulin de Soumagnac (ou Chappelas), à la Digue de Paugnac, à Saint-Pardoux centre et à la Tannerie de Saint-Pardoux

? *: prélèvement à programmer éventuellement*

Une barre d'histogramme striée signifie que la masse « m » utilisée dans la formule a été la limite de détection de l'appareil

L'étude statistique a comparé les concentrations métalliques avant, pendant et après les travaux par site. Une différence significative est indiquée par des lettres différentes

c. Sédiments

- **Concentrations métalliques totales**

Il existe différents indices généralement utilisés pour identifier les concentrations en métaux préoccupantes pour l'environnement, tels que le facteur d'enrichissement des métaux (FE) (Barbieri, 2016). Cet indice a été utilisé pour suivre et évaluer la présence et l'intensité des dépôts sédimentaires liés aux travaux. Le FE est calculé selon la formule suivante :

$$F.E. = \frac{[Métal]_{site\ a} / [Th]_{site\ a}}{[Métal]_{B.Galant} / [Th]_{B.Galant}}$$

Cet indice de contamination potentielle est normalisé par la concentration d'un métal « X » dans la couche arable par rapport à la concentration d'un élément de référence. L'élément de référence est un élément avec des concentrations stables dans le sol sur les sites étudiés. Nous avons choisi le Thorium (Th). Le site de référence sélectionné est le site le plus amont.

Les résultats du FE indiquent des niveaux de pollution différents (Tableau 4). Les valeurs entre 0.5 à 1.5 suggèrent que les concentrations en métaux traces peuvent entièrement provenir du bruit de fond géochimique. Cependant, un FE supérieur à 1.5 indique qu'une partie plus ou moins importante des métaux traces provient d'autres sources, comme une pollution ponctuelle et diffuse.

Tableau 4- Classement des Facteurs d'Enrichissement (FE)

Valeur	**Intensité de l'enrichissement sédimentaire**
0.5 < FE < 1.5	Enrichissement nul
1.5 < FE < 2	Enrichissement faible
2 < FE < 5	Enrichissement modéré
5 < FE < 20	Enrichissement significatif
20 < FE < 40	Enrichissement très élevé
40 > FE	Enrichissement extrêmement élevé

Les résultats obtenus dans notre étude montrent d'abord que les travaux n'ont eu qu'une faible influence sur les variations des enrichissements en Ag, Cd, Ni, Sb, Sr et U avec des valeurs proches et inférieures à 2. Les bruits de fond géochimique de ces éléments semblent donc prédominants.

Durant les travaux, nous observons d'abord des FE modérés pour Ba, Co, Cr, Mo et V, un FE significatif pour As à la Forge de Firbeix, et des FE modérés pour Ba, Cr, Cu, Pb, Sn, V, Zn et significatifs pour As, Co et Mo à Saint-Pardoux. Les charges polluantes métalliques générées par les aménagements ont été plus élevées à ces deux sites, mais surtout à la Forge de Firbeix liées probablement à son activité historique. Ensuite, nous remarquons des enrichissements qui augmentent de +36% pour le Pb, +80 % pour le Co et +102% pour le Zn à Paugnac par rapport à ceux avant la destruction des seuils.

Plusieurs mois après la fin des travaux, les FE à la Forge sont classés de « modérés » à « significatifs ». Leurs valeurs sont stables pour le Ba et Sn et en augmentation pour le Co (+14%), V (+17%), As (+21%), Cr (+21%) et Mo (+41%). A Saint-Pardoux, les FE sont similaires à ceux observés durant la période des travaux, mais toujours considérés comme modérés pour le Ba, Cr, Sn, V, et comme significatifs pour le Co et le Mo. Nous observons aussi à ce site que les sédiments sont moins riches en As, Cu et Zn que durant la démolition de l'ouvrage avec des baisses respectives de leurs FE de -48%, -24% et -12%, mais toujours plus concentrés qu'avant les travaux. A la Tannerie, les travaux ont eu quant à eux, un impact plus tardif sur les niveaux d'enrichissement en Mo et V. Les FE durant le réaménagement étaient en effet très proches de ceux quantifiés au début du projet, et ils ont ensuite fortement augmenté après les travaux.

Les baisses de FE observées après l'achèvement des aménagements restent quasi systématiquement supérieures à leurs niveaux d'avant-projet. Les travaux semblent donc avoir eu un impact fort à court et moyen terme sur le biotope. Ils ont en effet modifié la topographie et la courantologie à l'échelle locale qui ont d'une part accentué l'érosion des sédiments remaniés au niveau des aménagements et d'autre part entrainé des dépôts sédimentaires en aval.

avant
pendant
après
Ag
As
Ba
Cd
Co
Cr
Cu
Mo
Ni
F.E.
Forge Firbeix
Chappelas
Digue Paugnac
Saint-Pardoux Tannerie

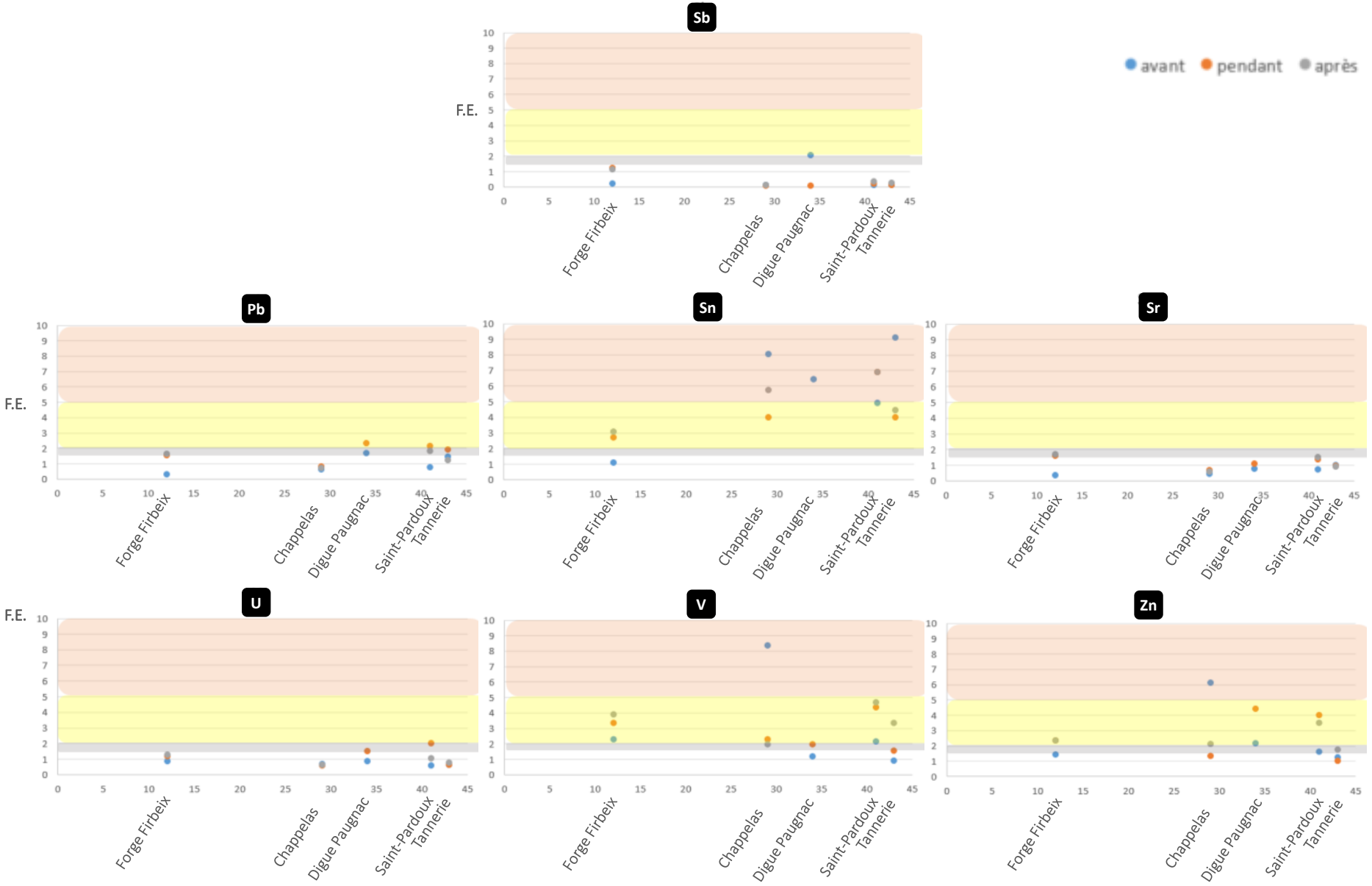


Figure 8- Variations des facteurs d'enrichissements métalliques (couleur blanche : enrichissement nul ; couleur grise : enrichissement faible ; couleur jaune ; enrichissement modéré ; couleur rouge : enrichissement significatif) avant, pendant et après les travaux à l'aval des ouvrages aux sites de la Forge de Firbeix, au Moulin de Soumagnac (Chappelas), à la Digue de Paugnac, à Saint–Pardoux centre et à la Tannerie de Saint-Pardoux. Les sites sont représentés sur l'axe des abscisses en fonction de leurs éloignements (en kilomètres) du site le plus amont Bussières-Galant (km 0)

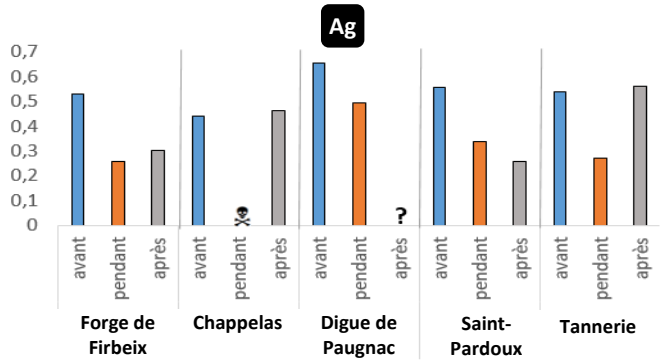
- **<u>Concentrations métalliques dans la fraction fine (<63 µm)</u>**

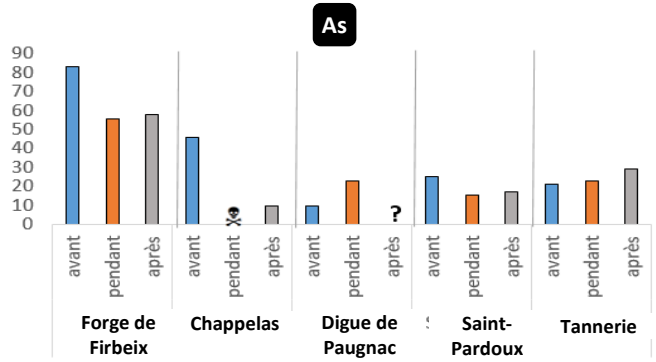
Avant la destruction des seuils, la fraction fine n'a pu être suivie qu'à l'amont des ouvrages de la Forge de Firbeix, du Moulin de Soumagnac, de la Digue de Paugnac, de Saint–Pardoux et de la Tannerie (figure 9). Ces sites avaient un faciès d'écoulement lentique au niveau des ouvrages favorisant les dépôts sédimentaires fins (sédiment argilo-sableux). En revanche, l'aval des seuils avaient un faciès lotique s'apparentant à des plats de courant, c'est-à-dire une faible profondeur, un courant modéré et un substrat de type gravier et sableux.

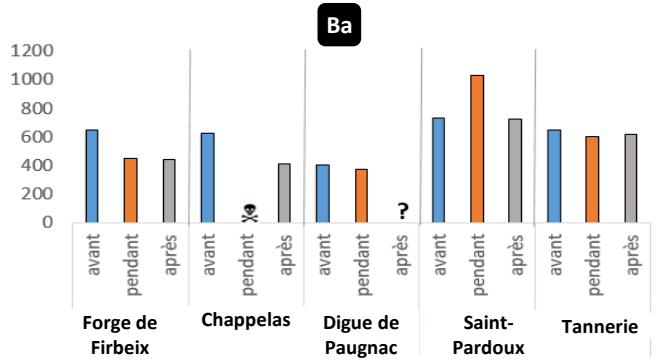
L'effacement de ces seuils par les engins de chantier a entrainé la dispersion des sédiments fins avec les métaux associés, malgré l'installation de chicanes en toile de jute. La granulométrie a été modifiée à l'aval avec une augmentation de la part de la fraction fine, et donc la possibilité de suivre les teneurs en métaux les plus biodisponibles (Cf annexe 1).

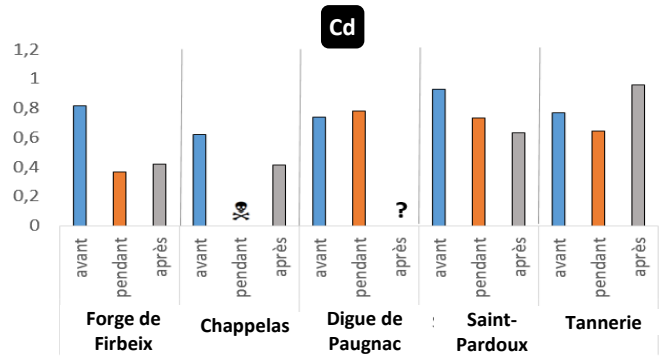
Les concentrations des éléments traces dans les sédiments fins de La Forge de Firbeix, du Moulin de Soumagnac et de Saint-Pardoux ont majoritairement baissé à partir du début des travaux, exceptés pour l'U au Moulin de Soumagnac, et le Sn à Saint-Pardoux-La-Rivière. Malgré tout, les concentrations en As à la Forge de Firbeix et en Pb à Saint-Pardoux sont les plus élevées parmi les sites suivis, et restent respectivement supérieures aux normes de 30 mg/kg et 100 mg/kg fixées par la référence S1 de l'arrêté interministériel.

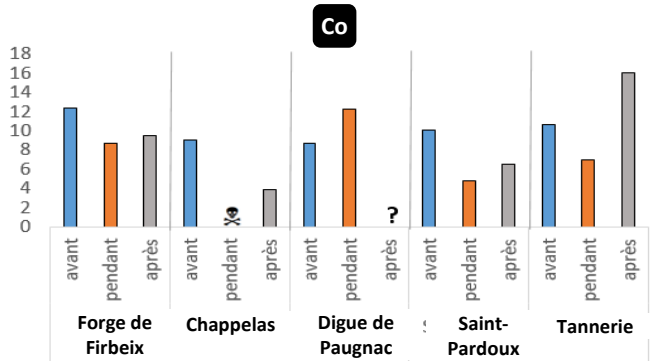
Sur le site de l'ancien barrage hydroélectrique de Paugnac et à la Tannerie, les teneurs baissent aussi, voire se stabilisent à partir du début des effacements des digues. Mais, contrairement aux précédents sites, nous observons des augmentations de la concentration en Co (x1.4), Mo (x1.2), As (x2.3) et Ni (x3.5) à Paugnac, et en As (x1.4), Ni (x2.5) à la Tannerie. L'utilisation du Ni comme colorant dans les tanneries (Commission Européenne, 2003) et entrant dans la composition des alliages dans les turbines hydroélectriques (Mann, 1996 ; Leibing et *al*, 2021) pourraient expliquer que les concentrations dans les sédiments accumulés et dispersés à l'aval soient plus élevées.

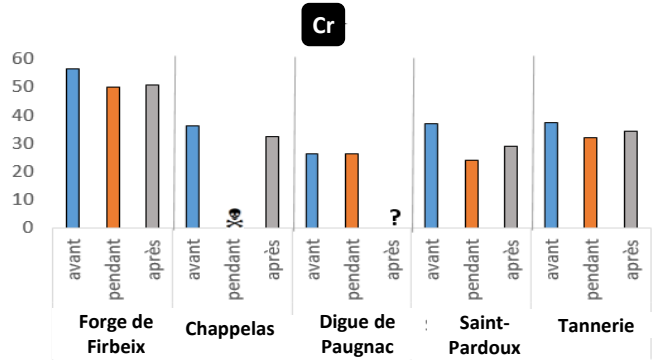

Ag
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie

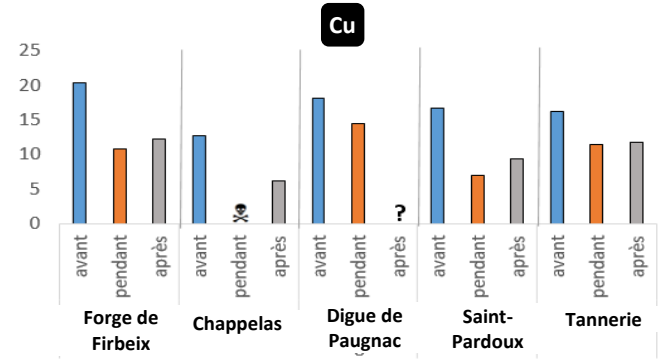

As
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie

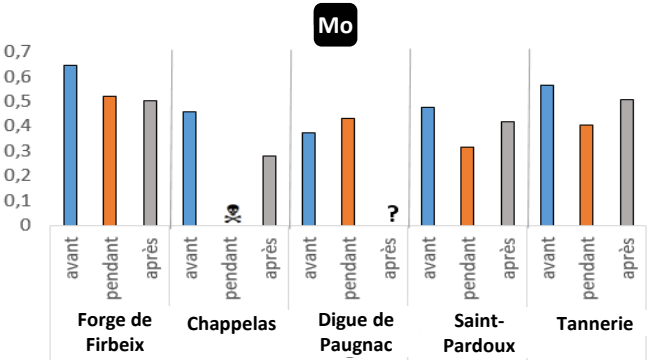

Ba
1200
1000
800
600
400
200
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie

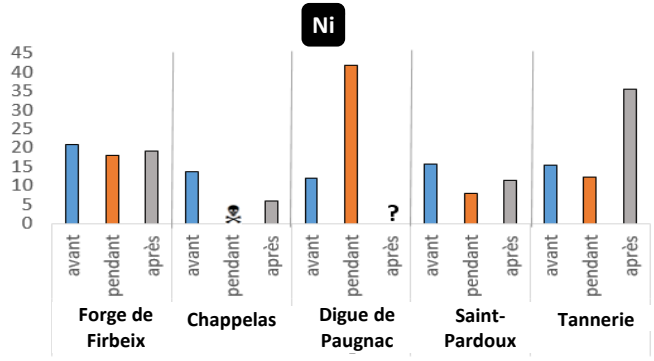

Cd
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie


Co
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie


Cr
60
50
40
30
20
10
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie


Cu
25
20
15
10
5
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie


Mo
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie


Ni
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
avant
pendant
après
?
Forge de Firbeix
Chappelas
Digue de Paugnac
Saint-Pardoux
Tannerie

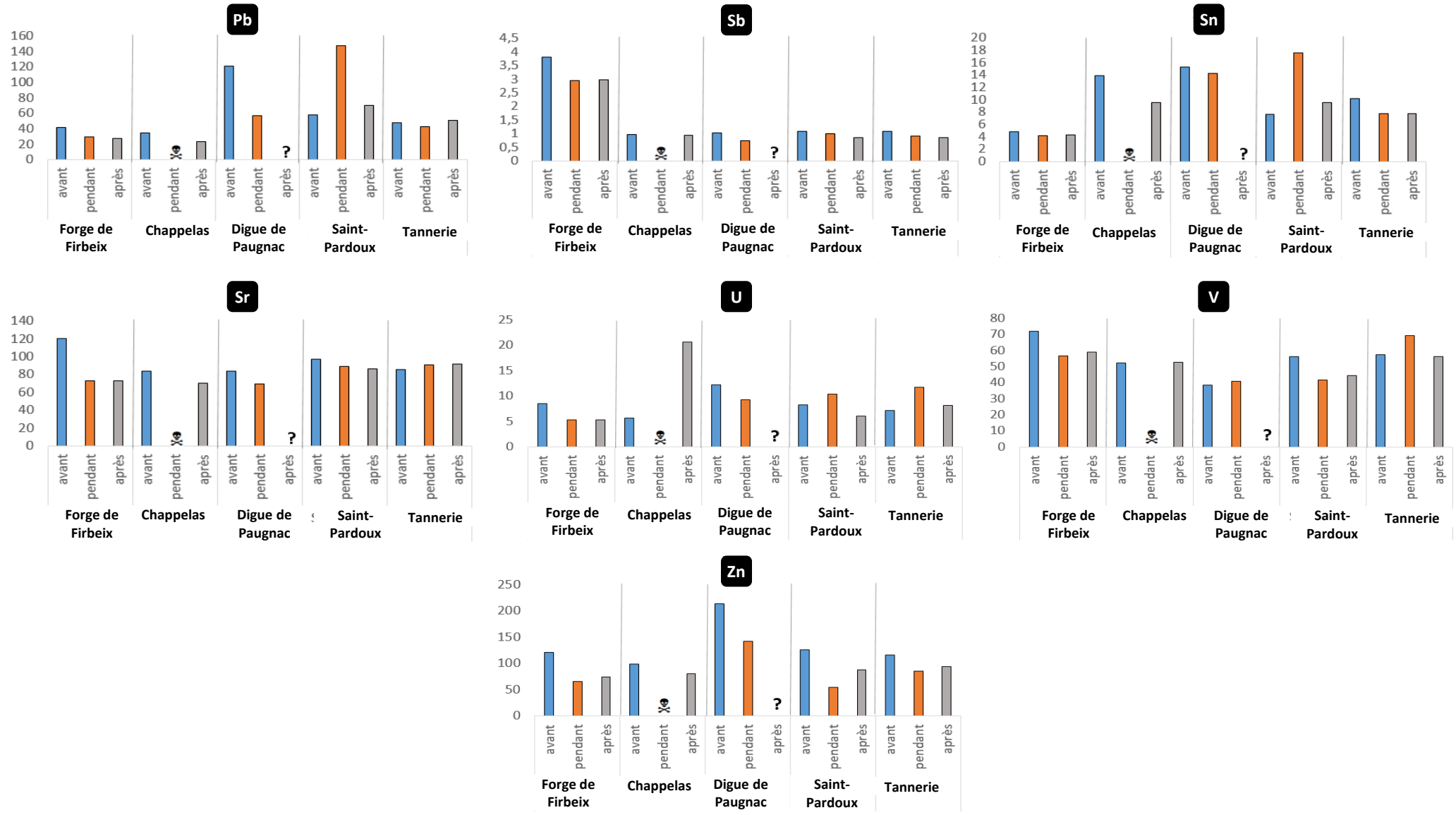


Figure 9- Variations des concentrations métalliques dans la fraction fine du sédiment (<63 µm) avant (amont des ouvrages), pendant (aval des aménagements) et après (aval des aménagements) les travaux à la Forge de Firbeix, au Moulin de la Maque, à la Digue de Paugnac, à Saint–Pardoux centre et à la Tannerie de Saint-Pardoux.

☠ *: pas ou trop peu de fraction fine dans le sédiment pour réaliser des analyses* ? *: prélèvement à programmer éventuellement*

Conclusion

Cette étude a permis de suivre les concentrations de 19 métaux dans des compartiments biotiques et abiotiques de la Dronne et de la Malencourie avant, pendant et après les actions d'aménagement à la Forge de Firbeix, au Moulin de Soumagnac (Chappelas), à la Digue de Paugnac, à Saint–Pardoux centre et à la Tannerie de Saint-Pardoux pour évaluer l'impact des travaux sur le biotope de la moule perlière.

La destruction des ouvrages a fortement remobilisé les sédiments dans la colonne d'eau. Ces travaux et/ou les conditions hydrologiques ont entrainé une libération des polluants métalliques associés notamment aux particules fines du sédiment dispersé. Nous avons en effet observé des augmentations des facteurs d'enrichissement des sédiments et des concentrations dans l'eau à l'aval, pour la plupart des métaux. La biodisponibilité des éléments a probablement été accrue durant cette période impliquant de fortes bioaccumulations métalliques observées dans les bryophytes.

Plus d'un après la fin des travaux, on observe dans l'eau et les sédiments une tendance à la résilience du milieu avec des niveaux métalliques certes en baisse, mais dans l'ensemble toujours supérieurs à ceux avant les travaux.

Au vu de nos résultats, il se pourrait qu'il y ait eu une atteinte de la qualité chimique de la Dronne au niveau des zones à *Margaritifera margaritifera*. Un suivi à moyen et/ou à long terme de l'état de contamination du milieu serait nécessaire pour évaluer la cinétique de résilience du milieu.

Références bibliographiques

Agence de l'eau (1998). Les bryophytes aquatiques comme outil de surveillance de la contamination des eaux courantes par les micropolluants métalliques.

Barbieri M. (2016) The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. J Geol Geophys 5: 237. doi:10.4172/2381-8719.1000237

Baudrimont M., Andrei J., Mornet S., Gonzalez P., Mesmer-Dudons N., Gourves P.Y., Dedourge-Geffard O., Geffard A., Geffard O., Garric J., Feurtet-Mazel A. (2017) Trophic transfer and effects of gold nanoparticles (AuNPs) in Gammarus fossarum from contaminated periphytic biofilm, Environmental Science and Pollution Research, doi: 10.1007/s11356-017-8400-3.

Boukadida K., Cachot J., Clerandeau C., Gourves P.Y., Banni M. (2017) Early and efficient induction of antioxidant defense system in Mytilus galloprovincialis embryos exposed to metals and heat stress, Ecotoxicology and Environmental Safety, 138, 105-112, doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.12.021.

Bauer G., Wächtler K. (2001). Ecology and Evolution of the Freshwater Mussels Unionoida. Springer-Verlag: Heidelberg.

Brim Box J., Howard J., Wolf D., O'Brien C., Nez D., Close D. (2006). Freshwater mussels Bivalvia: Unionoida) of the Umatilla and Middle Fork John Day Rivers in Eastern Oregon. Northwest Science 80: 95–107.

Commission Européenne (2003) BREF sur le tannage des cuirs et peaux, Rapport de la Commission Européenne.

Geist J. (2010). Strategies for the conservation of endangered freshwater pearl mussels (*Margaritifera margaritifera*): A synthesis of Conservation Genetics and Ecology. Hydrobiologia, 644, 69–88.

Leibing B., Locquenghien F von, Rückle D., Schellenberg G. (2021) Investigations on fatigue curves in dependency of water quality for nickel-martensitic steels, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 774

Mann B.S. (1996) Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behavior, Wear, 208, 125 – 131.

Moorkens E.A. (2010). Addressing the conservation and rehabilitation of Margaritifera margaritifera populations in the republic of Ireland within the framework of the habitats and species directive. Journal of Conchology 40: 339–350.

Peltier M. R., Wilcox C. J., Sharp D.C. (1998). Technical note: Application of the box-cox data transformation to animal science experiments. Journal of Animal Science, 76, 847-849.

Zhang H., Davison W., Grime G.W. (1995). New In-Situ Procedures for Measuring Trace Metals in Pore Waters, ASTM STP 1293, 170-181.

ANNEXE 1 – Analyse de la granulométrie des sediments prélevés à chaque site

Méthode

La granulométrie a été réalisée par tamisage à sec (tamiseuse Retsch AS200) des sédiments séchés au minimum 48h à 60°C, à l'aide de tamis de maille (µm) 1000, 500, 250, 125, 63 et < 63. Le refus de chaque tamis est pesé et rapporté à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse afin de connaitre la répartition (en % d'occurrence) de chaque classe de taille.

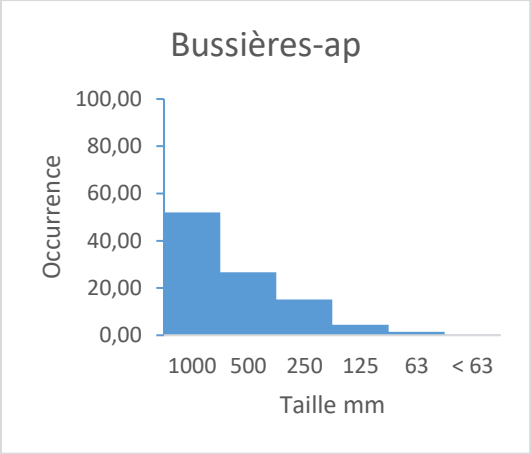
Résultats

Date des prélèvements effectués

	Avant travaux	Pendant travaux	Après travaux
Bussières-Galant, RD59			22 - 23 octobre 2015
Bussières-Galant, aval Ribières			22 - 23 octobre 2015
Forge de Firbeix	22 - 23 octobre 2015	Février 2017	Juillet 2018
Moulin du Blé			
Moulin de Soumagnac		Novembre 2016	Juillet 2018
Moulin du Pont			
Digue de Paugnac		Juillet 2020	
Saint-Pardoux		Novembre 2016	Juillet 2018
Moulin Maziéras			
Tannerie (Saint-Pardoux)			Juillet 2020

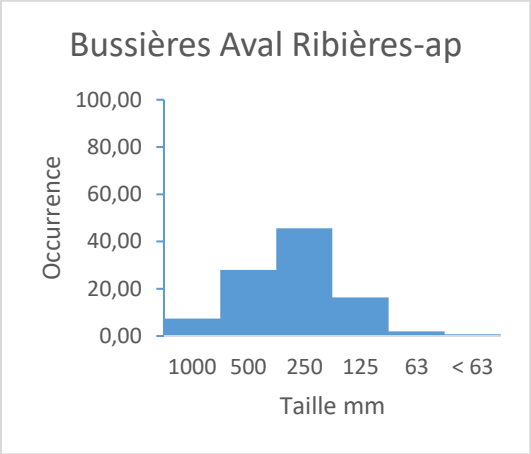
1. Bussières Galant, RD 59

Tamis (µm)	Après travaux %
1000	52,07
500	26,73
250	15,10
125	4,40
63	1,40
< 63	0,30



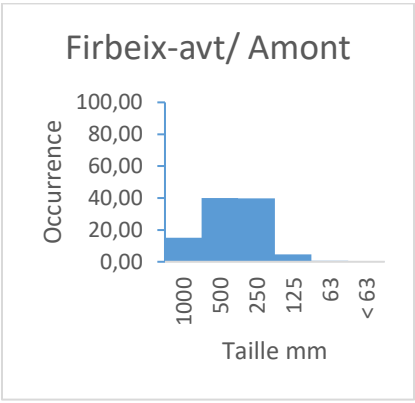
2. Bussières Galant, aval Ribières

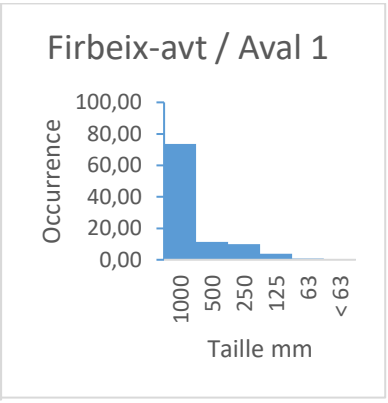
Tamis (µm)	Après travaux %
1000	7,37
500	28,01
250	45,61
125	16,35
63	1,94
< 63	0,72

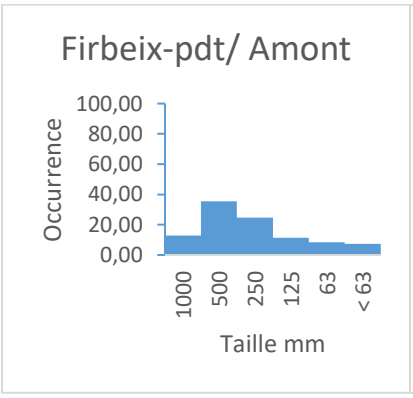


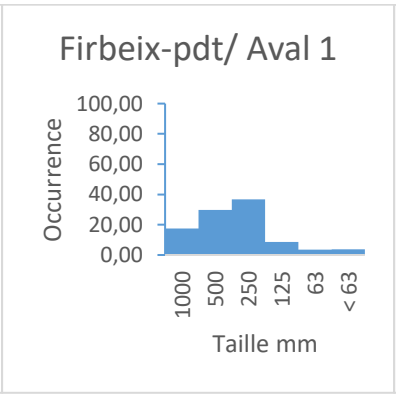
3. Forge de Firbeix

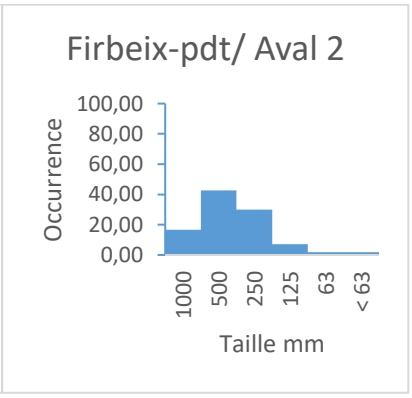
	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	15,01	73,65		12,88	17,48	16,72	41,18	27,91	15,34
500	39,95	11,37		35,37	29,81	42,58	36,54	40,64	39,41
250	39,69	9,88		24,66	36,67	30,01	20,67	27,04	38,62
125	4,73	3,79		11,45	8,67	7,05	1,36	2,95	5,29
63	0,58	0,88		8,30	3,54	1,80	0,12	0,79	0,73
< 63	0,04	0,44		7,35	3,84	1,84	0,12	0,68	0,62

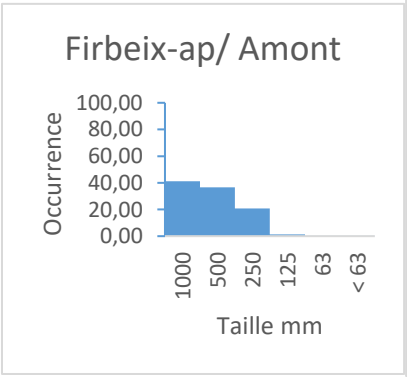


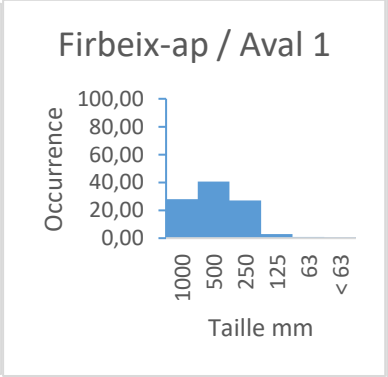


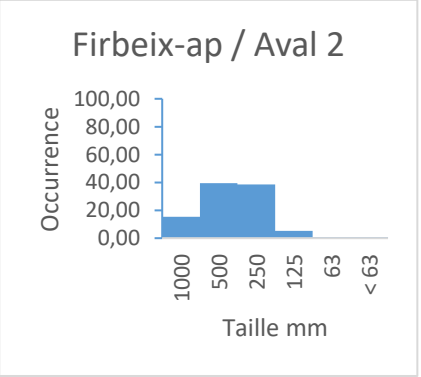






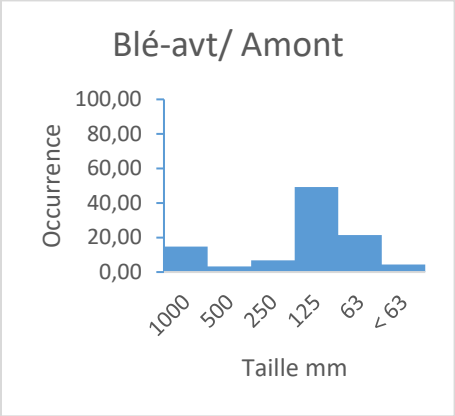


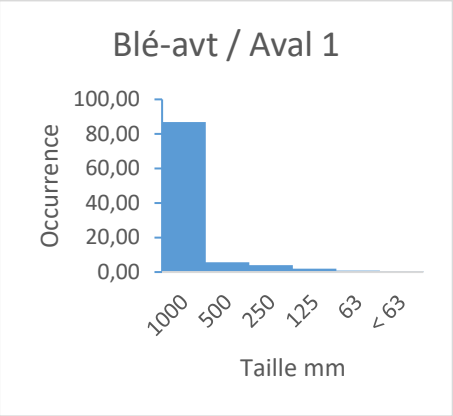




4. Moulin du Blé

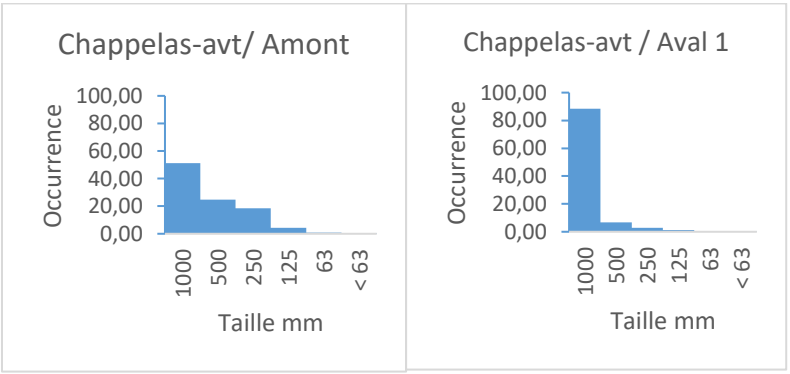
	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	14,74	86,89							
500	3,27	5,64							
250	6,74	4,05							
125	49,30	1,98							
63	21,52	0,94							
< 63	4,44	0,51							

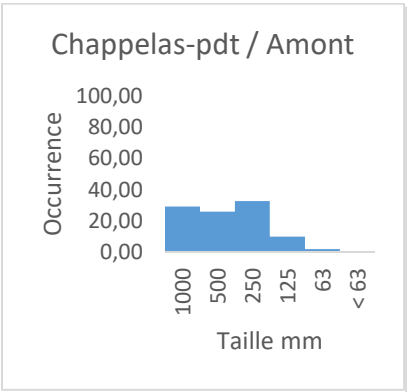


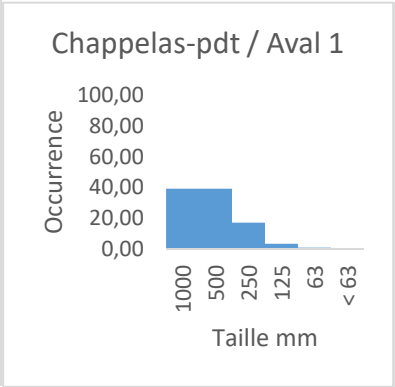


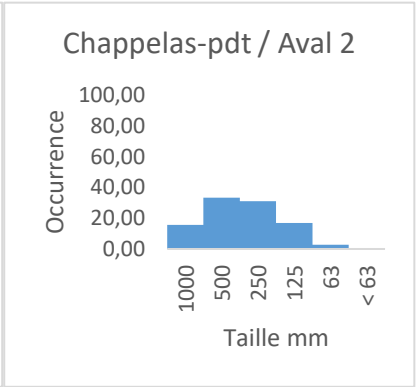
5. Moulin de Soumagnac (Chappelas)

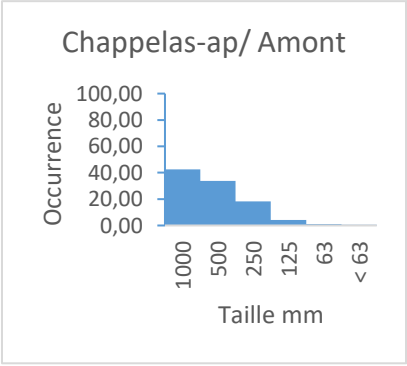
	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	51,29	88,44		29,14	39,25	15,70	42,46	71,56	58,01
500	24,66	6,67		25,82	39,15	33,24	33,79	14,37	16,95
250	18,47	2,94		32,59	17,06	30,94	18,26	11,61	20,01
125	4,43	1,28		9,94	3,32	16,92	4,09	2,06	4,28
63	0,81	0,49		1,81	0,97	2,83	0,92	0,26	0,63
< 63	0,35	0,19		0,71	0,26	0,37	0,46	0,14	0,12

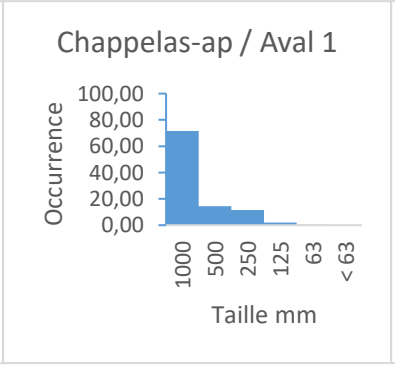


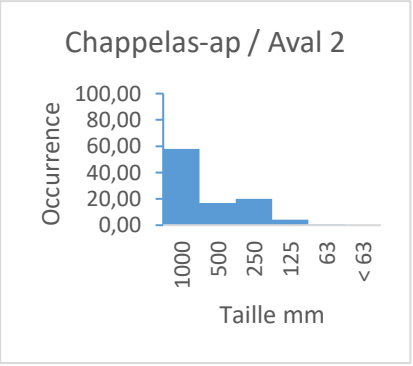






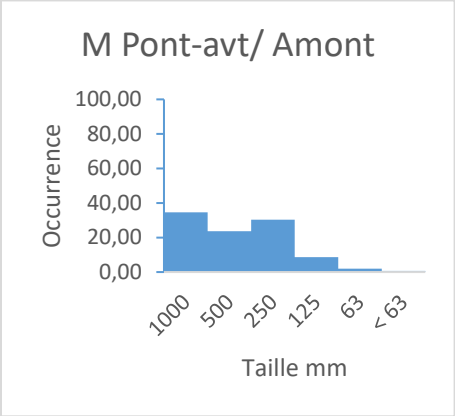


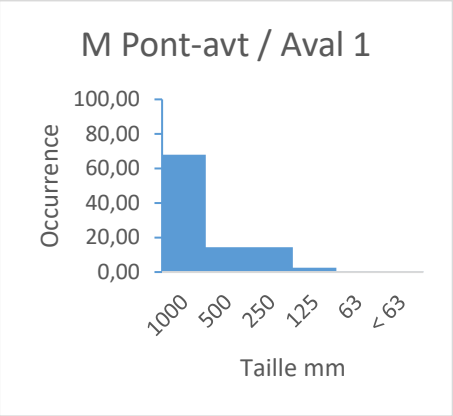




6. Moulin du Pont

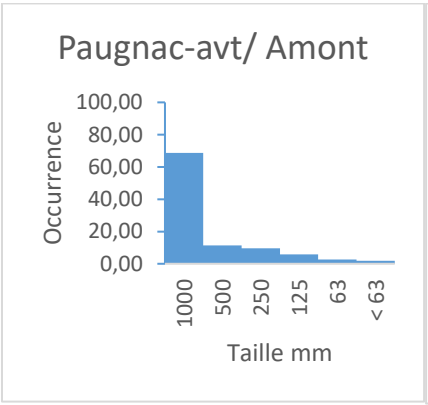
	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	34,57	67,98							
500	23,68	14,40							
250	30,39	14,38							
125	8,71	2,55							
63	1,89	0,48							
< 63	0,75	0,21							

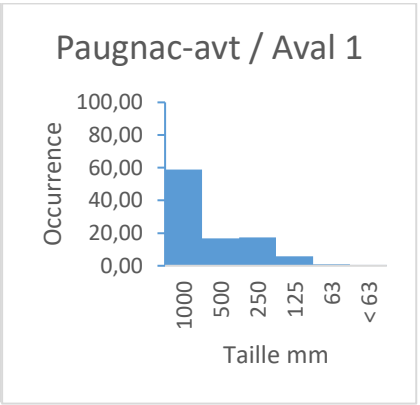


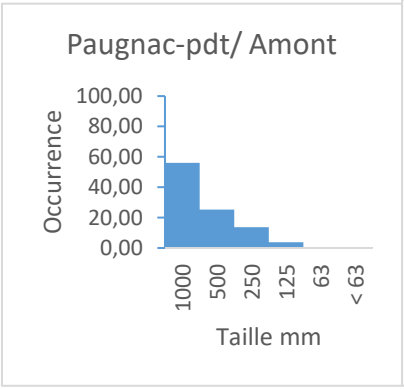


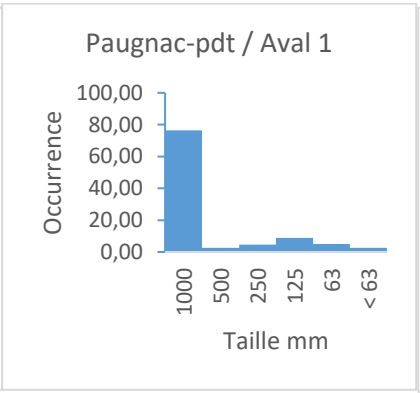
7. Digue de Paugnac

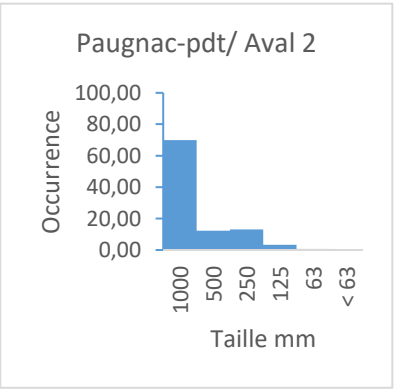
	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	68,76	58,86		56,10	76,40	69,99			
500	11,35	16,72		25,34	2,54	12,34			
250	9,66	17,27		13,73	4,66	13,17			
125	5,76	5,74		3,78	8,81	3,35			
63	2,57	0,99		0,57	5,06	0,61			
< 63	1,90	0,42		0,48	2,52	0,54			





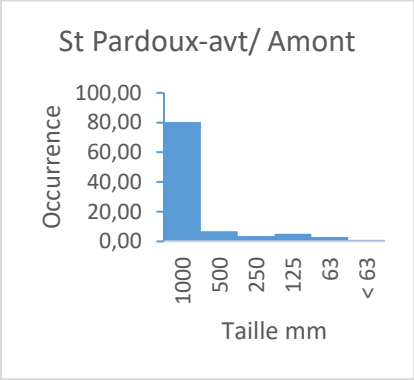


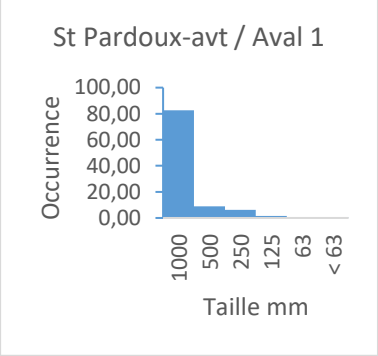


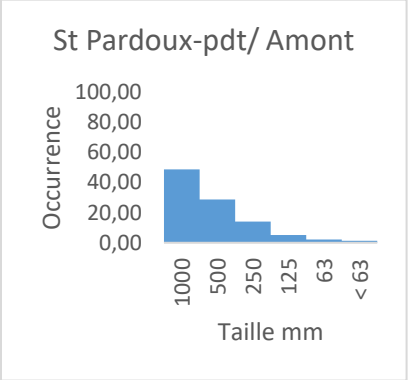


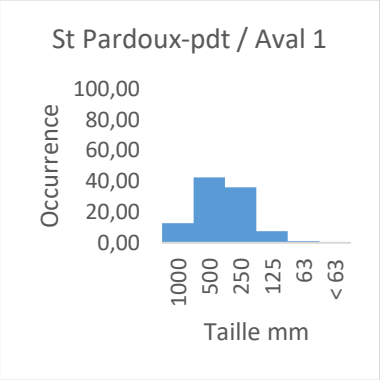
8. Saint-Pardoux

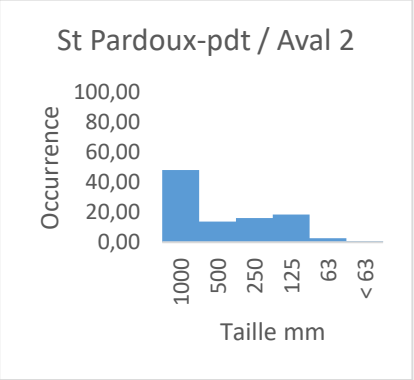
	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	80,26	82,49		48,70	12,74	48,11	69,76	81,14	74,96
500	6,78	8,97		28,63	42,44	13,69	18,14	15,69	17,36
250	3,64	6,30		14,09	36,01	16,21	8,96	2,54	4,98
125	5,26	1,56		5,08	7,58	18,50	2,24	0,48	1,60
63	3,02	0,44		2,22	0,99	2,78	0,59	0,11	0,55
< 63	1,03	0,23		1,27	0,24	0,72	0,31	0,04	0,53

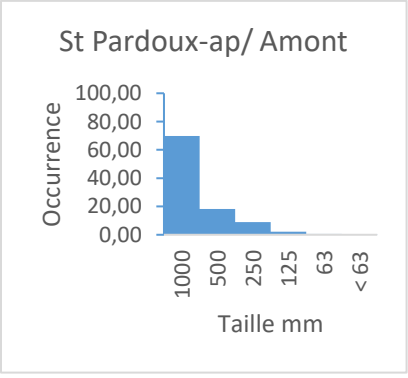


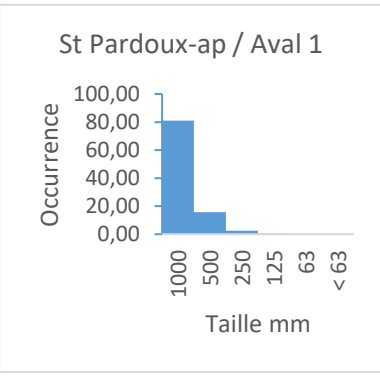


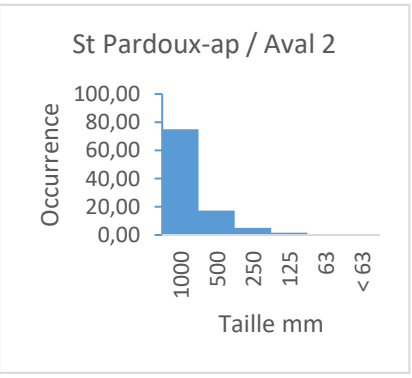






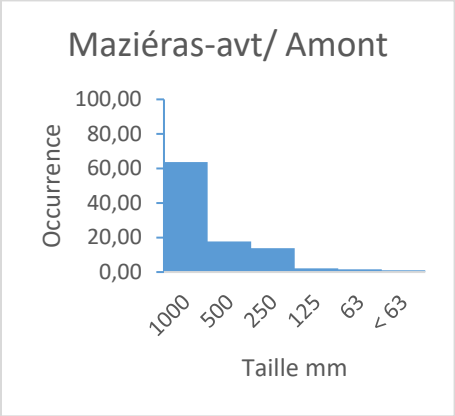


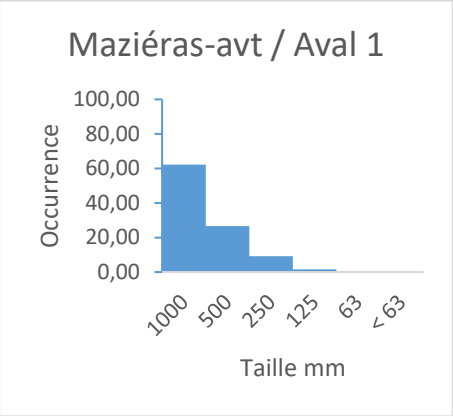


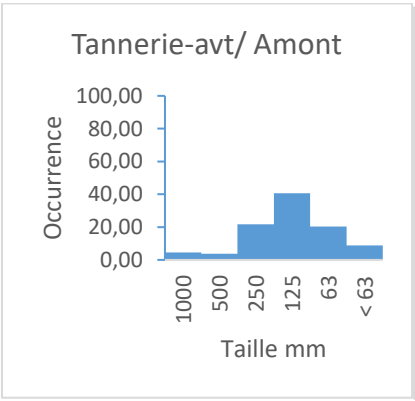
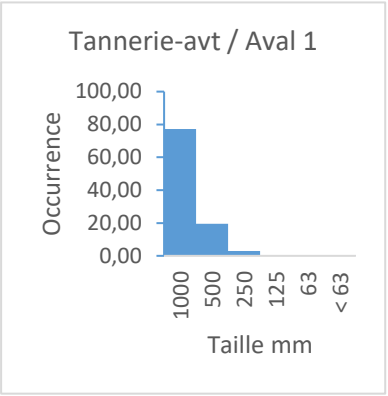
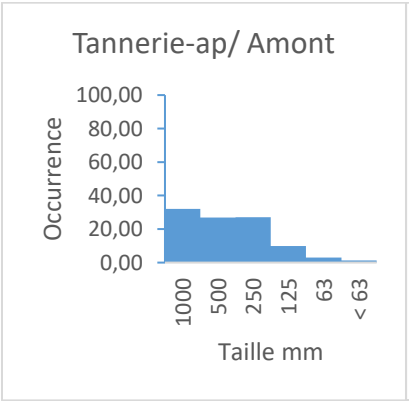
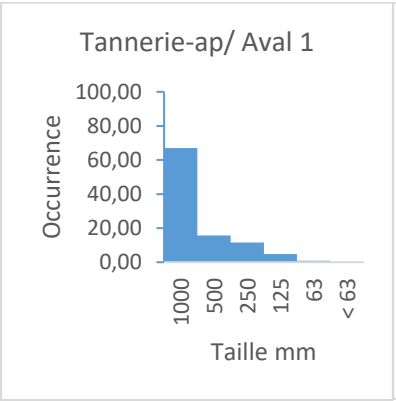
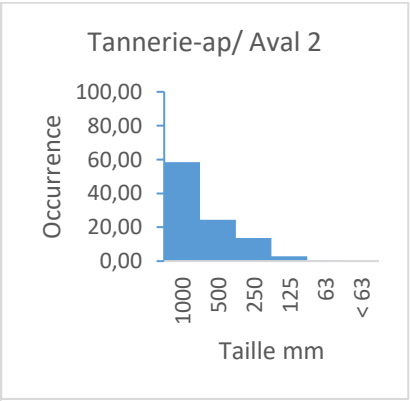


9. Moulin Maziéras

	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	63,69	62,22							
500	17,67	26,65							
250	13,76	9,13							
125	2,24	1,64							
63	1,65	0,28							
< 63	0,99	0,07							





10. Tannerie (Saint-Pardoux)

	Avant travaux %			Pendant travaux			Après travaux		
Tamis (µm)	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2	Amont	Aval 1	Aval 2
1000	4,59	77,29					32,02	67,01	58,47
500	3,77	19,48					26,84	15,77	24,37
250	21,65	2,93					27,13	11,60	13,60
125	40,65	0,14					9,85	4,70	2,90
63	20,41	0,06					2,93	0,75	0,48
< 63	8,93	0,10					1,23	0,17	0,17