



HAL
open science

Etude des effets de la pollution métallique (Cd/Zn) sur la densité des communautés de diatomées périphtiques des cours d'eau

Rija Samsara

► **To cite this version:**

Rija Samsara. Etude des effets de la pollution métallique (Cd/Zn) sur la densité des communautés de diatomées périphtiques des cours d'eau. Sciences de l'environnement. 2004. hal-04353347

HAL Id: hal-04353347

<https://hal.inrae.fr/hal-04353347>

Submitted on 19 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mai-Juin 2004

**Etude des effets de la pollution métallique
(Cd/Zn) sur la densité des communautés de
diatomées périphytiques des cours d'eau.**

Rija SAMSERA

**Laboratoire d'Ecophysiologie et d'Ecotoxicologie des Systèmes Aquatiques (LEESA)
UMR 5805 EPOC**

Maître de stage :

Caroline GOLD^a (ATER)
Soizic MORIN^b (Doctorante)

^a Laboratoire d'Ecophysiologie et d'Ecotoxicologie des Systèmes Aquatiques LEESA -UMR 5805 EPOC-
33120 Arcachon.

^b Cemagref. 33610 Cestas.

SOMMAIRE

I)	INTRODUCTION	1
I.1)	Le problème du Cadmium en Gironde	1
I.2)	Classification et caractéristiques des diatomées périphytiques	1
I.3)	Constitution et dynamique du biofilm périphytique	1
I.4)	Cadmium et toxicité algale	2
I.5)	Problématique	2
II)	MATERIELS ET METHODES	3
II.1)	Points de prélèvement	3
II.2)	Stratégie d'échantillonnage	3
II.3)	Critères analysés	3
II.3.1)	Densité cellulaire	3
II.3.1.1)	Préparation de l'échantillon	3
II.3.1.2)	Méthode de comptage	4
II.3.2)	Autres critères (dosage des métaux, composition taxinomique)	4
II.4)	Synthèse analytique des données	4
III)	RESULTATS ET DISCUSSION	5
III.1)	Validation de la méthode d'estimation de la densité	5
III.1.1)	Impact de la durée de sonication	5
III.1.2)	Effet de l'effort de comptage	5
III.2)	Synthèse de l'ensemble des résultats du programme	5
III.2.1)	Physicochimie	5
III.2.2)	Dosage du cadmium dans le biofilm	6
III.2.3)	Analyse du critère densité pour les mois de Mars et Avril 2004	7
III.2.4)	Poids sec de périphyton	7
III.2.5)	Abondances relatives	8
III.2.6)	Comparaison du nombre de cellules vivantes et mortes au sein des communautés (VM)	9
III.2.7)	Synthèse finale	9
IV)	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	10

BIBLIOGRAPHIE.

I) INTRODUCTION

I.1) Le problème du Cadmium en Gironde.

Depuis le début des années 80 et les premiers dosages des métaux lourds dans les bivalves filtreurs par le Réseau National d'Observation de l'IFREMER (RNO), l'estuaire de la Gironde a été déclassé en eaux de mauvaise qualité suite à une forte contamination chronique en cadmium et en zinc. L'origine de cette pollution polymétallique se situe dans le département de l'Aveyron sur le site industriel de « Vieille-Montagne » près de Decazeville. L'activité de traitement du minerai de Zn de l'usine a entraîné, depuis le début du XX^{ème} siècle, le déversement indirect estimé de 10 kt de Cd et 1000 kt de Zn durant sa période d'activité (Jozereau, 1997). L'apparition d'une contamination dans l'estuaire, 450 km en aval de ce site, résulte de la complexité des processus de spéciation chimique lors du transport de ces métaux dans le *continuum* Lot-Garonne-Gironde. La pollution par le Cd est particulièrement préoccupante car c'est un métal « non-essentiel », c'est-à-dire sans fonction biologique, qui exerce une action toxique sur les organismes lorsqu'il dépasse un certain seuil dans le milieu.

Cette situation particulière rencontrée sur l'estuaire girondin a donné lieu à la création d'un programme de recherche intitulé « Impacts des contaminants métalliques » au sein du GIS-ECOBAG¹. Plusieurs organismes sont étudiés, notamment les bivalves et les diatomées.

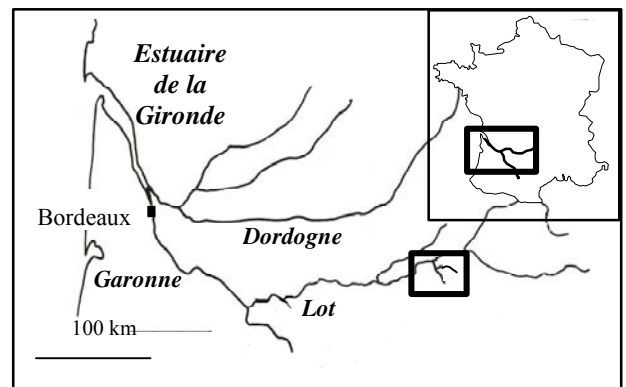


Figure 1 Situation du Lot et de l'estuaire de la Gironde.

I.2) Classification et caractéristiques des diatomées périphytiques.

Les diatomées, ou Bacillariophycées, sont des algues brunes (Chromophytes) unicellulaires. Leur taille varie de moins de 10µm à 500µm ; elles sont de forme très variable et pour la plupart solitaires mais peuvent s'associer en colonies.

Ces microalgues sont caractérisées par la présence d'une paroi siliceuse, le frustule, à l'intérieur duquel la cellule est incluse. Le frustule est formé de valves emboîtées (l'épivalve et l'hypovalve). La cellule contient les mêmes organites que les autres algues eucaryotes.

I.3) Constitution et dynamique du biofilm périphytique.

Le *périphyton* désigne l'ensemble des micro-organismes (algues unicellulaires, bactéries, champignons, etc.) qui se développent à la surface des substrats

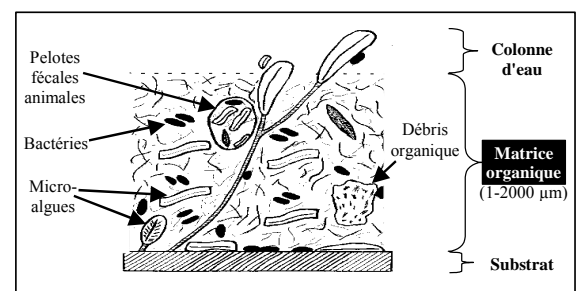


Figure 2 Structure du biofilm (d'après Gold, 2002)

¹ GIS-ECOBAG : Groupement d'Intérêt Scientifique « Environnement, Ecologie et Economie des Bassins de l'Adour et de la Garonne ». Coordination de 11 équipes associées (entre autre : TGM-UMR 5805 EPOC, LEESA-UMR 5805 EPOC, LPTC-UMR 5472, etc.)

immergés, imbriqués dans une matrice de polymères organiques sécrétés par les bactéries et les algues, et de particules inorganiques (Gold, 2002) (figure 2).

Ces formations biologiques périphytiques sont appelées communément des biofilms. Les diatomées périphytiques ont donc la particularité de pouvoir adhérer aux substrats naturels en zone photique (cailloux, macrophytes, sédiment...) et de former des colonies qui en recouvrent la surface. Elles se développent sur les substrats par accumulation de strates d'algues composées de types de croissance différents lors d'un processus progressif.

Le biofilm périphytique se développe en trois dimensions et en complexité jusqu'à atteindre une architecture très épaisse qualifiée de mature (Gold et al., 2002).

I.4) Cadmium et toxicité algale.

Au niveau cellulaire, il est acquis que les diatomées possèdent de fortes capacités d'accumulation des métaux (Reinfelder et al., 2000). A l'intérieur du cytoplasme, le cadmium endommage des enzymes spécifiques contrôlant les fonctions biochimiques et physiologiques de l'algue (Takamura et al., 1989).

Les études de toxicité du cadmium déjà menées à l'égard des diatomées ont soit porté sur les mécanismes cellulaires (Romeo et al., 1989 ; Dickman et al., 1998), soit évalué les effets sur les populations ou les communautés algales (croissance, activité photosynthétique, perturbations de structure...) (Rachlin et al., 1985). Toutefois, le nombre de ces travaux reste limité et concerne principalement les diatomées marines et planctoniques.

I.5) Problématique

Lors des études précédentes concernant le modèle biologique diatomée sur le site-atelier du Lot (Gold, 2002), il a été clairement identifié un effet du cadmium au niveau des communautés que ce soit du point de vue qualitatif (disparition des espèces de diatomées les plus fragiles, remplacées par d'autres semblant se maintenir dans un gradient de contamination au métal), soit du point de vue quantitatif (diminution de la densité cellulaire de diatomée en fonction de l'augmentation de la concentration en cadmium et zinc dans le milieu).

Cependant, après une interruption de deux années, un nouveau programme vient de voir le jour début 2004 sur de nouvelles stations d'étude. Il s'agit d'un suivi mensuel sur 3 ans de communautés biologiques ainsi que de la physicochimie. Deux thèses sont en cours sur les diatomées (S. Morin² et T. Duong³). L'objectif de ce stage de Master 1 est double, il comprend :

- La validation de la méthode d'estimation de la densité des diatomées, ainsi que l'analyse concrète, pour ce critère, d'un temps de prélèvement du programme (mois d'Avril).

² CEMAGREF.

³ Laboratoire d'Ecophysiologie et d'Ecotoxicologie des Systèmes Aquatiques (LEESA).

- Le traitement des premières données obtenues depuis le lancement du programme (réalisation des graphiques et des études statistiques), concernant les densités et les autres analyses récupérées auprès des deux doctorantes (dosage des métaux, composition taxinomique et physicochimie).

Ce stage a également été l'occasion de participer à 2 missions de prélèvement sur le site (Mai et Juin 2004).

II) MATERIELS ET METHODES

II.1) Points de prélèvement.

Les stations de prélèvement ont été choisies de manière à appréhender de façon globale le site pollué. Les stations sont : « Le moulin » (sur le Riou Viou, en amont de l'usine de Vieille Montagne), « l'usine » (sur le Riou Viou, responsable de la contamination), « Decaz » (sur le Riou Mort, en amont de toute pollution métallique), et « Pont cassé » (sur le Riou Mort, en aval de la confluence avec le Riou Viou). (figure 3)

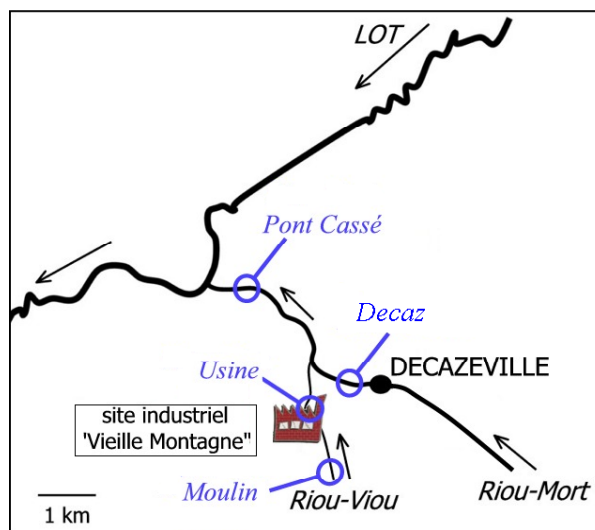


Figure 3 Situation des stations de prélèvement.

II.2) Stratégie d'échantillonnage.

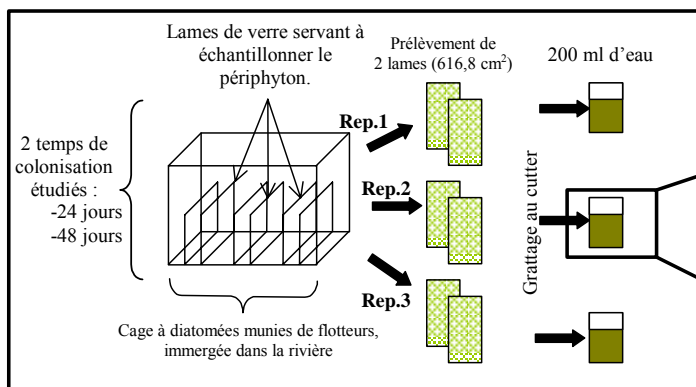


Figure 4 Schéma du protocole expérimental.

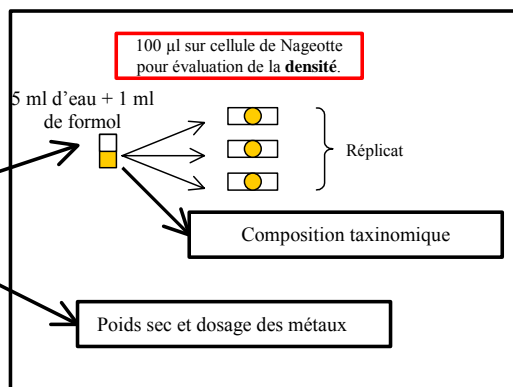


Figure 5 Critères analysés pour chaque réplicat.

Ce protocole (figure 4) est renouvelé pour chaque stations décrites précédemment.

II.3) Critères analysés.

II.3.1) Densité cellulaire.

II.3.1.1) Préparation de l'échantillon.

Les échantillons sont dans des piluliers. Un traitement aux ultrasons leur est appliqué afin de briser les complexes de MES qui emprisonnent un grand nombre de cellules. Plusieurs temps d'ultrasonication sont

testés afin de définir le plus adapté à notre étude (donnant le plus grand nombre de cellules à compter, avec le moins de cellules détruites possible).

Ensuite, 100µl d'échantillon sont prélevés et répartis sur la cellule de comptage. Une première estimation de la densité est effectuée, si celle-ci est trop importante l'échantillon est dilué.

II.3.1.2) Méthode de comptage.

Le dénombrement s'effectue grâce à une cellule de Nageotte® (40 champs ; volume =1,25 µl/champ ; 0,5 mm de profondeur) montée sur un microscope optique (grossissement x40 et x100). Le premier grossissement permet d'apprécier l'homogénéité de la répartition de l'échantillon (pas de gradient de densité), le second permet le comptage des cellules dans un champ.

Dans un souci d'efficacité, seuls 10 champs sur 40 sont comptés (1 tous les 5 champs). Toutefois, certaines lames sont comptées en totalité (40 champs) afin d'estimer le biais qu'entraîne le comptage sur 10 champs. La significativité statistique de cette imprécision a été déterminée grâce à un test « t ».

Le calcul de la densité peut alors être effectué. Un minimum de 200 cellules comptées par lame est requis pour avoir une incertitude inférieure à 20% sachant qu'une précision de 31% suffirait à caractériser l'échantillonnage d'un peuplement naturel (Lund et al, 1958 ; Frontier, 1972).

Un comptage différentiel est effectué sur les cellules vivantes (frustules pleines) et les cellules mortes (frustules vides). Un rapport simple (noté VM) en est ensuite extrait suivant cette formule :

$$VM = \frac{\text{nombre de cellules vivantes}}{\text{nombre de cellules mortes}}$$

II.3.2) Autres critères (dosage des métaux, composition taxinomique).

Ces manipulations n'ayant pas été effectuées dans le cadre de ce travail, leur description sera succincte. Toutefois pour la bonne compréhension générale du rapport, elle demeure nécessaire.

Les dosages de zinc et cadmium dans le biofilm sont effectués par SAA⁴. Tandis que l'étude spécifique (abondance relative, identification d'espèces déformées) est effectuée grâce à un microscope optique à immersion (grossissement x1000).

II.4) Synthèse analytique des données.

Afin de synthétiser les différents résultats qualitatifs et quantitatifs, ceux-ci sont confrontés. Ils sont donc tous exprimés sous forme d'histogrammes aboutis grâce à Excel®. Puis les données physicochimiques sont intégrées à l'aide de Statistica® en faisant une ACP⁵.

⁴ SAA : Spectrométrie d'Absorption Atomique.

⁵ ACP : Analyse en Composantes Principales.

III) RESULTATS et DISCUSSION.

III.1) Validation de la méthode d'estimation de la densité.

III.1.1) Impact de la durée de sonication.

Lors des études précédentes (Gold, 2002), 5 minutes ou plus d'ultrasonication ont été nécessaires pour homogénéiser l'échantillon. Le nombre de cellules comptées augmente avec la durée de sonication (figure 6). Toutefois, une forte abondance de débris de frustules est observée à 10 min. Le temps retenu pour les analyses de densités a donc été de 7 min.

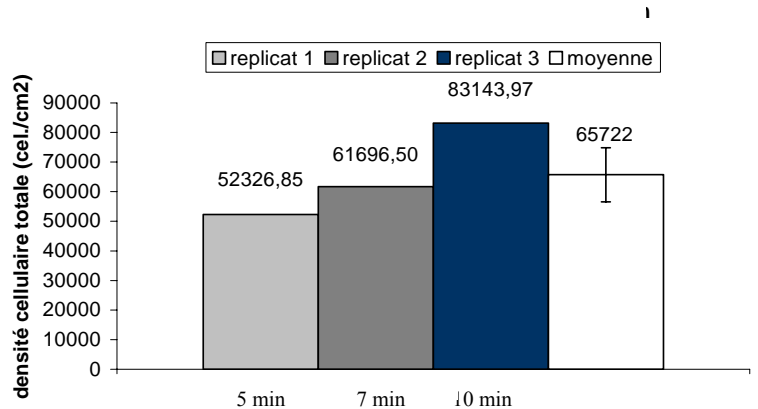


Figure 6 Effet des ultrasons sur les densités cellulaires (moyenne et erreur standard).

III.1.2) Effet de l'effort de comptage.

Le comptage de 10 champs sous estime légèrement la valeur réelle de densité (exprimée ici en cel./ml) par rapport à un comptage sur les 40 champs de la cellule (figure 7). Le réplikat 1 sous estime de 9%, le réplikat 2 de 12% et le réplikat 3 de 2%. Cependant, la comparaison des moyennes (test *t*) ne reconnaît pas de différence significative à $\alpha = 0,05$. Ainsi, les analyses ultérieures ont été effectuées sur 10 champs.

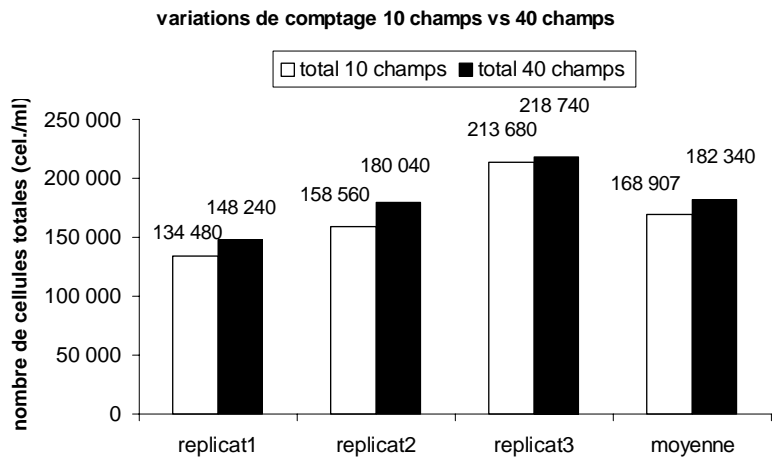
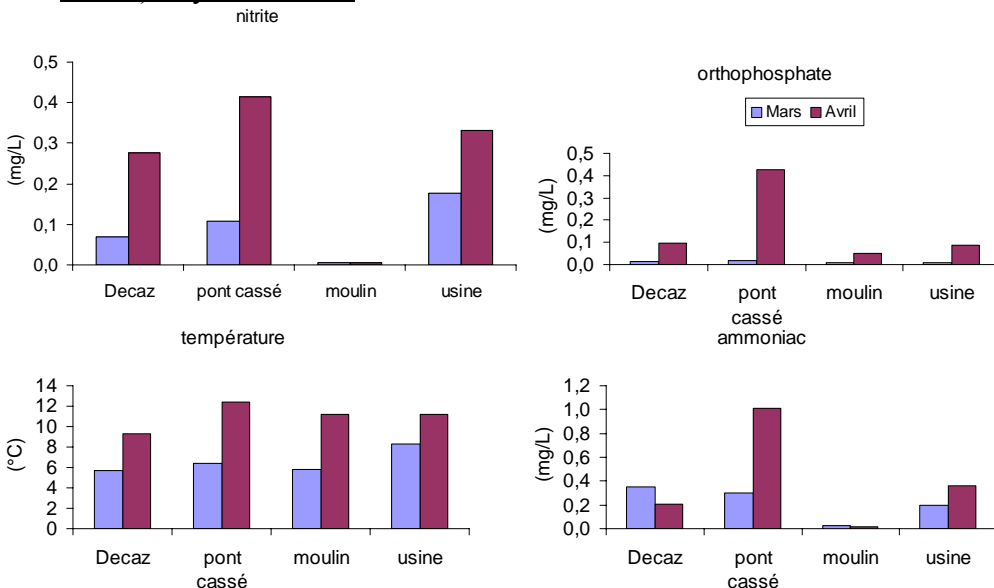


Figure 7 Différences de comptage 10 ou 40 champs.

III.2) Synthèse de l'ensemble des résultats du programme.

III.2.1) Physicochimie.



Figures 8 Données physicochimiques : T°, PO₄, NO₂ et NH₄.

Les données proviennent de *S. Morin*. Une très nette augmentation de température est observée de Mars à Avril sur toutes les stations (6°C en moyenne en Mars contre 11°C en Avril). Les sels nutritifs sont également supérieurs en Avril, et des pics remarquables sont observés à « pont cassé » (fig.8).

Les données de débit proviennent du DGO⁶. 2 pics de crue apparaissent : les 13 et 14 Mars 2004 ainsi que le 30 Avril 2004. Les prélèvements ont été effectués les 24 et 25 Mars, et les 14 et 15 Avril 2004.

Des prélèvements pour le dosage des métaux (Cd, Zn) dans l'eau des stations sont effectués par le DGO, mais les valeurs ne sont pas encore disponibles. Toutefois, les dosages dans le biofilm vont nous permettre d'avoir une idée du niveau d'exposition des différentes stations.

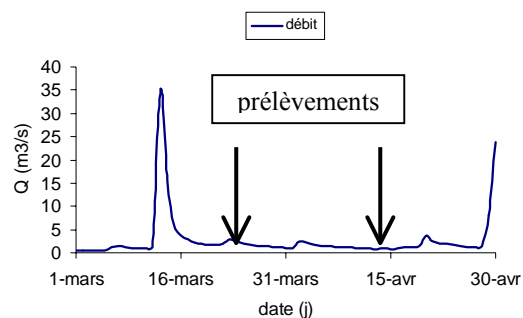


Figure 9 Données de débit fournies par le DGO.

III.2 .2) Dosage du cadmium dans le biofilm.

Les données de dosage proviennent de *T. Duong*.

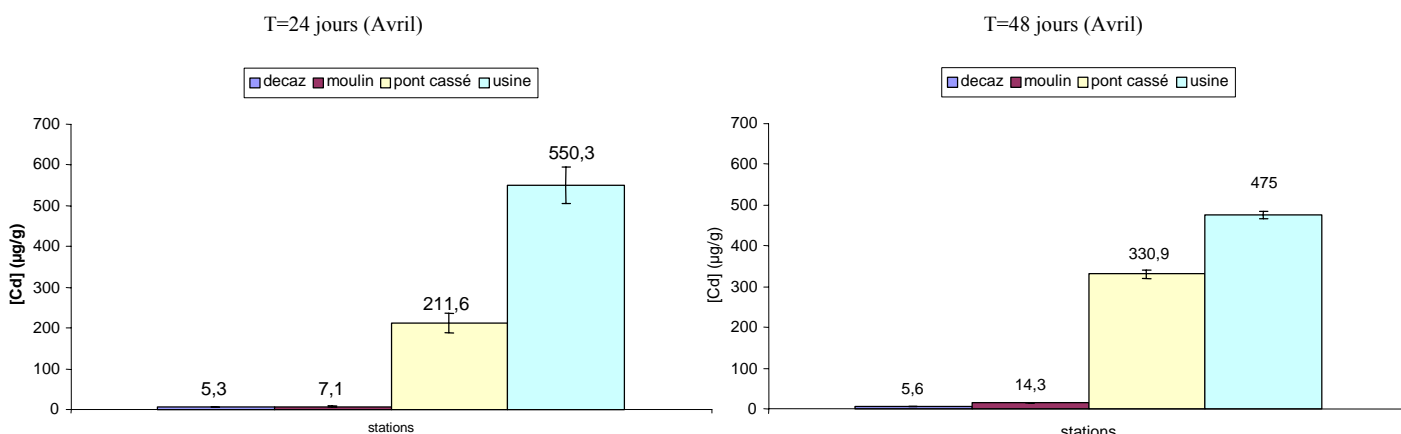


Figure 10 Concentration de cadmium dans le biofilm aux stations à t=24j et t=48j.

Les tendances sont les mêmes aux deux pas de temps. Le maximum de Cd est décelé à la station « usine » située à la source de la pollution. Au « Moulin » et à « Decaz » les concentrations sont faibles. Rappelons que ces 2 stations sont positionnées en amont de la source principale de pollution (« l'usine »). Toutefois, la concentration en Cd au « moulin » à 48 jours est 3 fois supérieure à celle de « Decaz ». Il semblerait donc qu'il existe une source de pollution résiduelle au « moulin » liée au ruissellement des eaux de pluie sur les terrils contaminés en cadmium. A « pont cassé » des valeurs très étonnantes ont été mesurées. Effectivement, le Riou Mort et le Riou Viou ayant sensiblement le même débit, cette station placée en aval de la confluence devrait présenter une concentration en cadmium 2 fois inférieure à celle de l'usine. Or, la concentration est bien supérieure à cela, surtout à 48 jours. Le système n'est donc pas conservatif, il doit exister une source de pollution annexe entre « l'usine » et « pont cassé ».

⁶ Département de Géologie et d'Océanographie.

III.2.3) Analyse du critère densité pour les mois de Mars et Avril 2004.

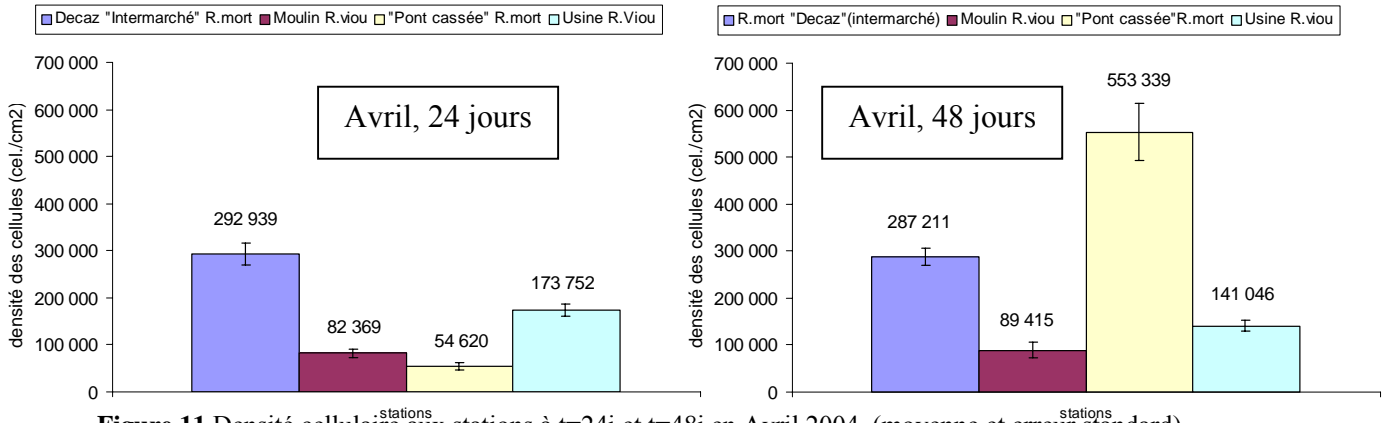


Figure 11 Densité cellulaire aux stations à t=24j et t=48j en Avril 2004. (moyenne et erreur standard)

Pour Avril 2004 (figure 11), sur les trois stations « Decaz », « Moulin » et « Usine », les densités sont comparables entre 24j et 48j. La plus forte colonisation est observée à « Decaz » (>285 000 cel./cm²). Ceci peut s'expliquer par la situation de cette station, sur le Riou Mort, en amont de la pollution métallique. La station « pont cassé » présente une tendance très différente : la densité est très faible à 24j (<55 000cel./cm²) et est multipliée par 10 après 48j (>550 000cel./cm²). L'explication réside peut-être dans l'explosion des sels nutritifs à cette station (PO₄, NO₂, et NH₄)(fig. 8). Cet apport a pu être bénéfique à des communautés déjà en place 24j auparavant (pas de temps : 48j), la structure communautaire étant déjà formée. Ce même apport n'aurait pas pu profiter aux communautés nouvellement installées (pas de temps : 24j), leur évolution n'étant encore qu'à un stade pionnier.

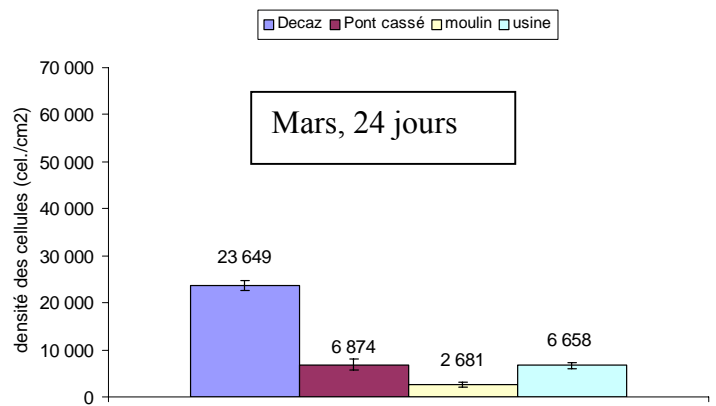


Figure 12 densité cellulaire à t=24j en Mars (moyenne et erreur standard).

Les données de Mars 2004 (figure 12) proviennent de *S. Morin*. La tendance générale est identique à celle d'Avril (figure 11, t=24j). Toutefois, les ordres de grandeur sont beaucoup moins importants, les densités étant plus de 10 fois plus faibles en Mars. La hausse de température entre Mars et Avril (figure 8) explique certainement en partie ce phénomène. L'autre facteur important peut-être le débit (figure 9) : les prélèvements de Mars se situent 11 jours après une crue, qui a certainement arraché une grande partie des communautés en place. *A contrario*, les prélèvements d'Avril font suite à 21 jours de calme : une eau calme ajoutée à une température plus favorable donnent une explosion de production primaire reflétée par la densité.

III.2.4) Poids sec de périphyton.

Les résultats de poids sec d'Avril 2004 ont été réalisées par *T. Duong*.

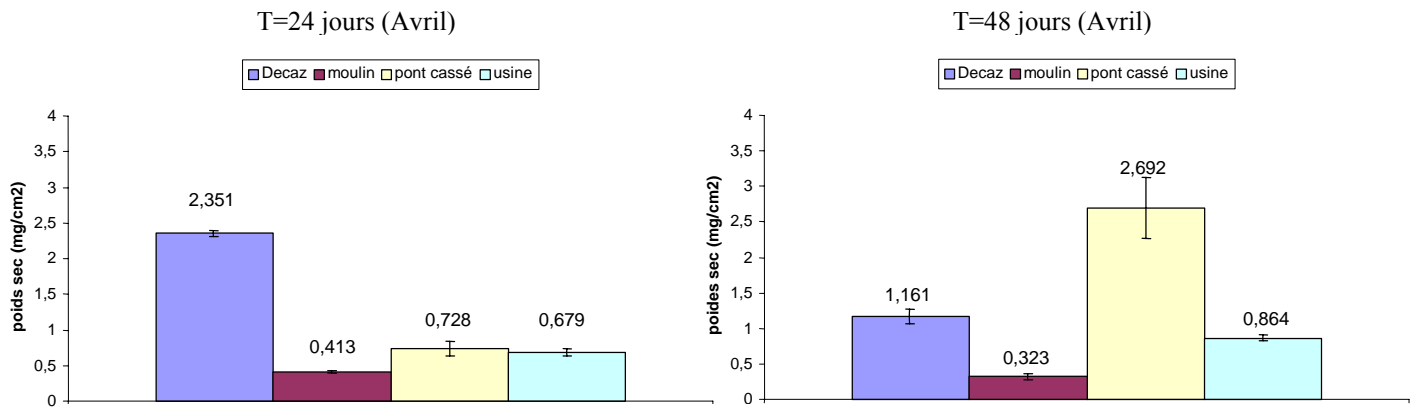


Figure 13 Poids sec de périphyton aux stations à t= 24 jours et t= 48 jours en Avril 2004 (moyenne et erreur standard).

A t=24j, le poids sec le plus important est observé à « Decaz ». La station « Moulin » possède le plus faible poids sec, tandis que valeurs aux stations « pont cassé » et « usine » ne sont pas significativement différents à $\alpha=0,05$ (test *t*). A t= 48j, les tendances sont les mêmes à l'exception du « pont cassé » où la valeur de poids sec est 3,7 fois plus importante qu'à t=24j. Ces résultats de poids sec sont très semblables aux résultats de densité (figure 11). Cela montre la bonne correspondance entre la densité de diatomées et le poids sec global du biofilm, qui est constitué : de diatomées, mais aussi de MES, de matières minérales, de bactéries, de champignons ainsi que d'autres algues. Ce résultat est étonnant puisque la quantité de diatomée, sur le substrat, dépend : de processus de type « dépôt/érosion » (comme les particules abiotiques : sédiments minéraux etc.), mais également de processus de multiplication active (parthénogénèse ou mélange du matériel génétique). 2 hypothèses peuvent expliquer ce phénomène : soit la biomasse de diatomées est majoritaire et toutes variations de sa part influencent le biofilm, soit la densité des diatomées est principalement influencée par les facteurs tels que le courant par exemple.

III.2.5) Abondances relatives.

Les données d'abondances relatives proviennent de *S. Morin* et *M. Coste*⁷.

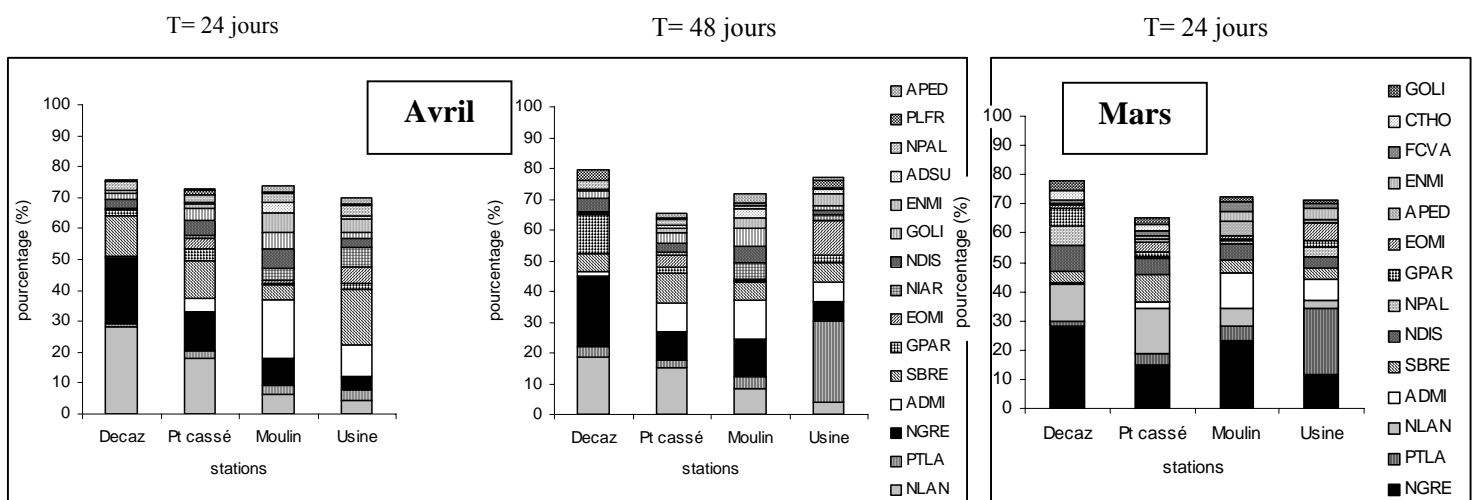


Figure 14 Composition taxinomique des communautés de diatomées aux 4 stations aux temps t= 24j en Mars et Avril et t= 48j en Avril.

Seules les espèces ayant les plus fortes abondances relatives (>4% dans au moins un échantillon) sont représentées. Les communautés de diatomées prélevées aux 4 stations sont globalement composées des mêmes espèces majoritaires, mais les abondances relatives de celles-ci sont différentes. 14 espèces sont majoritaires en Mars et 15 en Avril. 5 espèces dominent particulièrement la composition spécifique des stations : NLAN , PTLA, NGRE, ADMI et SBRE⁸ avec des abondances maximum supérieures à 20%. NLAN et NGRE présentent leur maximum d'abondance à «Decaz» et leur minimum à la station « Usine ». Il est notable que ce sont deux espèces typiquement hivernales et qu'elles disparaissent après cette saison (*Morin, comm. Pers.*). Il en va inversement pour ADMI et PTLA, ADMI étant reconnue pour sa résistance aux pollutions métalliques (*Gold, 2002 ; Nakanishi et al., 2004*). SBRE est une espèce cosmopolite (*KRAMMER, K. and H. LANGE-BERTALOT, 1986 – 1991*) ce qui explique son abondance non différenciée quelque soit la station. Les autres espèces paraissent moins significatives.

III .2.6) Comparaison du nombre de cellules vivantes et mortes au sein des communautés.

Une très grande récurrence dans le taux de « cellules vivantes/cellules mortes » (VM) est observée lors des comptages avec 70 ± 5 % de cellules mortes dans tous les échantillons. L'explication de ce phénomène réside dans la matrice du biofilm qui emprisonne les cellules mortes (figure 2). Une ANOVA⁹ suivi d'un test LSD¹⁰ démontre cependant un effet significatif à 5%, de l'état de pollution de la station sur VM : discrimination de la station « Decaz » par rapport aux 3 autres stations, avec un pourcentage de cellules mortes moins important sur «Decaz » (60% au lieu de 70%).

III.2.7) Synthèse finale.

L'ACP est représentée selon le facteur 1 et le facteur 3. Dans cette ACP, plusieurs variables particulières sont représentées en plus de celles déjà traitées (ex. pourcentage d'espèces déformées « **esp_def** », la conductivité « **conduct.** », l'oxygène dissout « **O2_dis** » et **pH**). Suivant le facteur 3 (figure 15), des corrélations positives sont

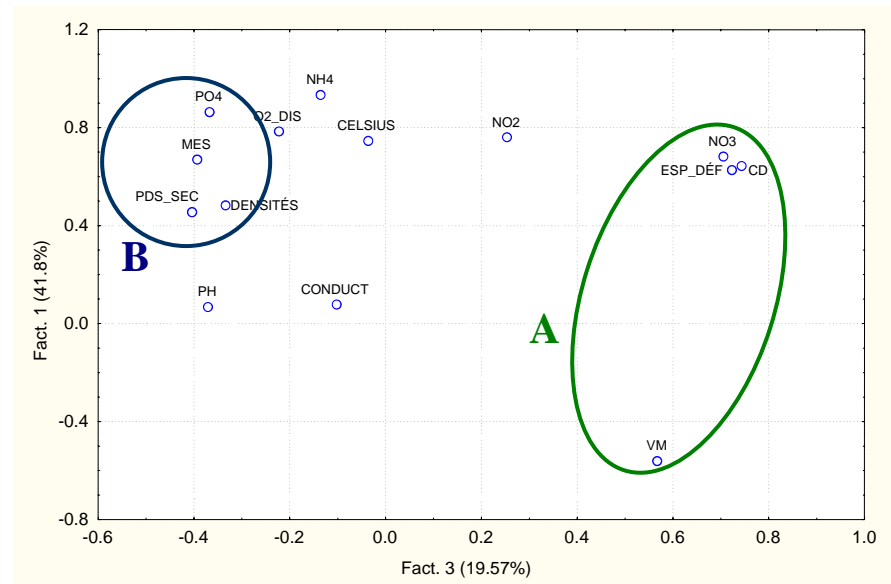


Figure 15 Extraction en composante principale.

⁷ CEMAGREF.

⁸ NLAN : *Navicula lanceolata*, PTLA : *Planothidium lanceolatum*, NGRE : *Navicula gregaria*, ADMI : *Achnantheidium minutissimum* et SBRE : *Surirella brebissonii*.

⁹ ANOVA : Analysis Of Variance.

¹⁰ LSD : Least significant Deviation.

observées entre le pourcentage d'espèces déformées, la concentration en Cd dans le biofilm(Cd) et le rapport VM (coordonnées >0 sur l'axe du facteur 3 : groupement A). De même, la densité, le poids sec, les MES et les orthophosphates présentent des coordonnées inférieures à 0 sur ce même axe (groupement B). Des corrélations négatives sont *a contrario* observées entre le groupement A, d'une part, et le groupement B, d'autre part. Il est donc possible de conjecturer que le facteur 3 serait la pollution métallique. Cette analyse résume bien l'ensemble des résultats précédents puisque, sur les sites de forte exposition au Cd la densité et les poids secs de biofilm sont plus faibles. Enfin la densité à « pont cassé » semblait fortement influencée par la concentration en PO₄ dans le milieu.

IV) CONCLUSIONS et PERSPECTIVES.

Pour conclure, suivant les résultats de mesure du cadmium dans le biofilm (*Cf.* III .2.2), le critère densité (*Cf.* III .2.3), ainsi que le poids sec (*Cf.* III .2.4), des niveaux d'exposition au cadmium inattendu sont observés sur certaines stations : le « moulin » en amont de « l'usine » sur le Riou Viou et « pont cassé » en aval de la confluence avec le Riou Mort.

Ces mêmes résultats mettent en évidence une nette diminution de la densité, du poids sec et du nombre de cellules vivantes (VM) sur les stations polluées.

Un bémol important est tout de même à apporter, puisque ce sont des données de terrains qui sont régis par des facteurs totalement incontrôlables. La preuve, si besoin en est, est fournie par l'ACP (figure 15), puisque le facteur « pollution métallique » n'a que le troisième poids factoriel.

Cette incertitude devra donc être écartée par des analyses en laboratoire (contrôle de tous les facteurs : biotiques et abiotiques).

De plus, les résultats exposés ci-avant mettent en exergue la redondance du pas « t=48 jours », puisqu'il semblerait que les communautés de diatomées soient matures dès 24 jours, et l'existence de différences (« pont cassé » figure 11) compliquent considérablement l'interprétation des résultats. Peut-être serait-il donc intéressant de ne pas renouveler ce pas de temps.

Enfin, peut-être serait-il intéressant de pousser l'étude de VM. Ce rapport montre que VM est sensible à la moindre pollution métallique (le « moulin » et « Decaz » n'ayant pas des taux de pollution très différents, ils sont tout de même discriminés par VM). Son intérêt (étude de VM) serait de l'utiliser, après de nombreux affinements, comme indicateur de niveau de pollution. Il serait moins contraignant que l'analyse taxinomique. Toutefois, cette étude semble irréalisable tant l'œuvre paraît colossale.

Références Bibliographiques

- Dickman M.D.** (1998). Benthic marine diatoms deformities associated with contaminated sediment in Hong Kong. *Environ. Inter.*, 24(7) : 749-759.
- Frontier S.** (1972). Calcul de l'erreur sur un comptage de zooplancton. *J. exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol.8, pp. 121-132.
- Gold C.** (2002). Etude des effets de la pollution métallique (Cd et Zn) sur la structure des communautés de Diatomées périphtiques des cours d'eau : approches expérimentales *in situ* et en laboratoire, *Thèse de doctorat, Université Bordeaux I*, 175 p.
- Jozereau C.** (1997). La production de zinc dans la vallée du Lot depuis le XIX^{ème} siècle. Conséquences sur l'environnement. *Rapport de stage de Maîtrise de Science de l'Environnement, option Océanologie, Université Bordeaux I*.
- Krammer K. and Lange-Bertalot H.**, Eds. (1986 - 1991). Bacillariophyceae
Teil 1: *Naviculaceae*. 876 p. ;
Teil 2 : *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*, 596 p. ;
Teil 3 : *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*, 576 p. ;
Teil 4 : *Achnantheaceae. Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema*, 437 p. Süßwasserflora von Mitteleuropa, G. Fischer Verlag, Stuttgart.
- Lund J.W.G., Kipling C., Le Cren E.D.** (1958). The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiol.* 11, pp. 143-178.
- Nakanishi Y., Sumita M., Yumita K., Yamada T., Honjo T.** (2004). Heavy-metal pollution and its state in algae in Kakehashi River and Godani River at the foot of Ogoya mine, Ishikawa Prefecture. *Analytical sciences*, Vol. 20, pp. 73-78.
- Rachlin J.W., Thomas J.E. and Warkentine B.** (1983). The growth response of the diatom *Navicula incerta* to selected concentrations of the metals: Cd, Cu, Pb and Zn. *Bull. Torrey Bot. Club* 110(2), pp. 217-223.
- Reinfelder J. R., Jablonka R.E. and Cheney M.** (2000). Metabolic responses to subacute toxicity of trace metals in a marine microalga (*Thalassiosira weissflogii*) measured by calorimetry. *Environ. Toxicol. Chem.* 19(2), pp. 448-453.
- Romeo M., Gnassia-Barelli M., Karez C.S. and Puisieux-Dao S.** (1989). Cadmium uptake by a phytoplankton species in the presence of different inhibitors. *Toxicol. Environ. Chem.* 22, pp. 97-100.
- Takamura N., Kasai F. and Watanabe M.M.** (1989). Effects of Cu, Cd and Zn on photosynthesis of freshwater benthic algae. *J. Appl. Phycol.* 1, pp. 39-52.