



Equipe Ecotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques
UMR0985 INRA-Agrocampus Ouest *Ecologie et Santé des Ecosystèmes*,
65 rue de Saint-Brieuc - 35042 RENNES CEDEX

Evaluation à long terme des effets non intentionnels de la démoustication dans les secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique

**Suivi de l'état des communautés d'invertébrés aquatiques non-cibles
exposées au VectoBac® WG dans les habitats prioritaires des départements
Morbihan, Loire-Atlantique, Vendée, Gironde et Charente-Maritime**

Résultats de l'étude réalisée de 2011 à 2014



Septembre 2014

Etude réalisée par :

Marc Roucaute (coordinateur technique),
Ana Roucaute, Marie-Aude Liger, Yolande Gautier, Maxime Bérot

sous la coordination scientifique de :

Laurent Lagadic

INRA

Equipe Ecotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques
UMR INRA-Agrocampus Ouest 985, Ecologie et Santé des Ecosystèmes,
65 rue de Saint-Brieuc - 35042 RENNES CEDEX

Evaluation à long terme des effets non intentionnels de la démoustication dans les secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique

**Suivi de l'état des communautés d'invertébrés aquatiques non-cibles
exposées au VectoBac[®] WG dans les habitats prioritaires des départements
Morbihan, Loire-Atlantique, Vendée, Gironde et Charente-Maritime**

Résultats de l'étude réalisée de 2011 à 2014

Etude réalisée pour le compte de :

l'EID-Atlantique

Etablissement Interdépartemental de Démoustication du littoral atlantique

Septembre 2014

1. Introduction

1.1. Rappel du contexte réglementaire

La lutte contre les moustiques est une mission de service public strictement encadrée par un arsenal réglementaire complet. Ainsi, la loi n°64-1246 du 16 décembre 1964, modifiée par la loi n° 2004-809 du 13 août 2004 précise notamment que, dans les départements dont les Conseils Généraux le demandent, des zones de lutte contre les moustiques peuvent être créées, à l'intérieur desquelles les services et organismes habilités par arrêté préfectoral sont autorisés à procéder d'office aux prospections, traitements, travaux et contrôles nécessaires à cette action. En complément, les décrets d'application n° 65-1046 du 1^{er} décembre 1965 et n° 2005-1763 du 30 décembre 2005 précisent les conditions d'organisation des opérations de lutte contre les moustiques et la circulaire DPPR/DGS/DGTO du 21 juin 2007 rappelle les méthodes relatives à la lutte contre les moustiques et notamment à l'utilisation de produits insecticides.

Ainsi, dans ce contexte réglementaire, les interventions de l'EID-Atlantique sont encadrées dans chaque département par un arrêté préfectoral annuel qui fixe les zones et les communes concernées, désigne l'EID-Atlantique comme organisme de droit public chargé de la lutte contre les moustiques, et définit les modalités opératoires en tenant compte de leurs effets sur la faune, la flore et les milieux naturels.

Du fait de l'écologie des moustiques ciblés, les secteurs d'intervention sont pour l'essentiel des sites naturels sensibles, souvent inscrits à l'inventaire européen Natura 2000, ponctuellement classés « espaces naturels sensibles » par les Conseils Généraux ou acquis par le Conservatoire du littoral et des rivages lacustres. Or, selon le décret n°2010-368 du 9 avril 2010 relatif à l'évaluation des incidences Natura 2000, publié au Journal Officiel du 11 avril 2010, la lutte contre les moustiques entre dans le cadre des interventions qui, sauf mention contraire, sont soumises à l'obligation d'évaluation des incidences, que le territoire qu'elles couvrent ou que leur localisation géographique soient situés ou non dans le périmètre d'un site Natura 2000. Ce nouvel élément d'ordre réglementaire a conduit l'EID-Atlantique à mettre un place un suivi des effets non intentionnels potentiels des traitements de démoustication dans l'ensemble de ses secteurs d'intervention, en privilégiant les habitats prioritaires potentiellement concernés par l'application du décret.

1.2. Mise en place du suivi des effets non intentionnels potentiels du VectoBac® sur les invertébrés aquatiques

La mise en place du suivi *in situ* des effets non intentionnels du VectoBac® sur les invertébrés aquatiques dans l'ensemble des secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique repose sur le protocole développé et mis en œuvre dans le Morbihan (Station de Locoal-Mendon) depuis 1998. Préalablement au déploiement de ce protocole sur la façade atlantique, une prospection à large échelle a été réalisée afin de caractériser les typologies dominantes des milieux traités et de localiser les stations les plus représentatives. Cette démarche est celle qui a présidé depuis le début de la mise en place du suivi dans la mesure où, aussi bien d'un point de vue financier qu'en termes de délai d'obtention des informations, il n'est pas envisageable de multiplier à souhait les stations d'étude.

La prospection des nouvelles stations, mis à part celle du site d'Ambarès en Gironde, a été réalisée les 22 et 23 février 2011. Elle a mobilisé des intervenants de l'EID-Atlantique, coordinateurs (Laurence Thibaud, Benoît Le Hunsec, Sébastien Chouin) et opérateurs de terrain (chefs de service et agents de terrain), et de l'équipe *Ecotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques* de l'INRA de Rennes (Marc Roucaute, Thierry Caquet, Laurent Lagadic). Lors de cette prospection, un premier prélèvement, correspondant au point "zéro" du suivi (*i.e.*, avant intervention), a été réalisé dans les zones témoin et traitée de chaque nouvelle station. La station d'Ambarès a été prospectée et échantillonnée pour la première fois en mars 2014.

Les stations ont été choisies en fonction de la prédominance, dans chaque département, du type d'habitat prioritaire défini aux termes du décret n°2010-368 relatif à l'évaluation des incidences Natura 2000 (Tableau 1). Le descriptif complet de chacune des stations est fourni en Annexe 1. Dans chaque station, une zone témoin et une zone traitée ont été identifiées (Fig. 1).

Tableau 1. Localisation des stations proposées pour le déploiement du suivi des effets non intentionnels de la démoustication dans les secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique

Habitat prioritaire	Dépt	Site Natura 2000	Commune	Lieu-dit
Lagune côtière	56	FR5300028	Locoal-Mendon	Pen er Pont
	44	FR5200627 ZPS 5210090	Guérande	Saline Grande Brunette
	17	FR5400432	Mornac-sur-Seudre	Grande Prise de la Laide
Marais calcaire à <i>Cladium mariscus</i> et <i>Carex davallianae</i>	85	FR5212010	Olonne-sur-mer	Les Bourbes de l'Allerie
Forêts alluviales à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Fraxinus excelsior</i>	33	FR 7200693	Budos	Pourrière
	33	FR7200686	Ambarès et Lagrave	Ambarès

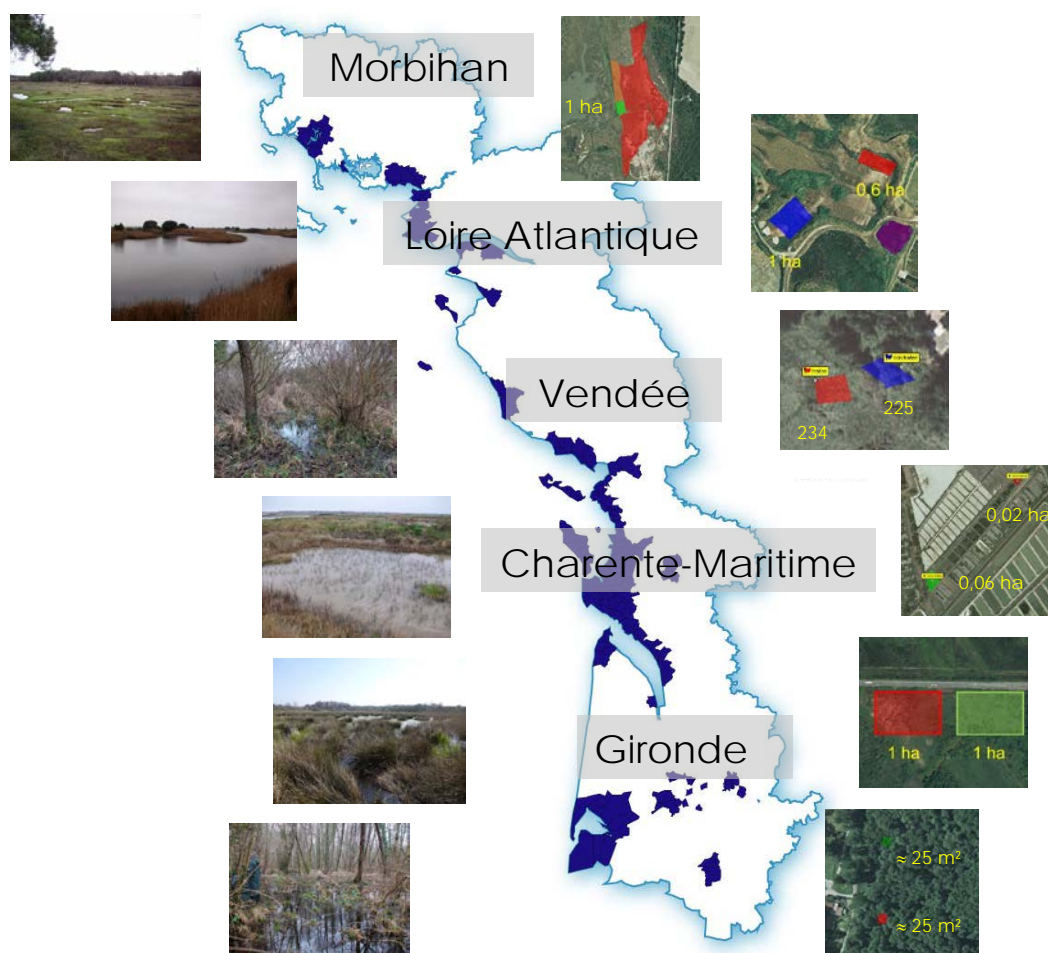


Figure 1. Présentation des stations proposées pour le déploiement du suivi des effets non intentionnels de la démoustication dans les secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique. Les zones témoins et traitées sont respectivement indiquées en vert et en rouge.

Au cours du suivi, des modifications du choix des zones témoin et traitée dans certaines stations sont intervenues lorsque les conditions du milieu rendaient leur comparaison difficile. Ainsi, une nouvelle zone témoin a été choisie dans la station de Mornac-sur-Seudre au printemps 2011 car celle retenue initialement s'asséchait trop vite. La zone témoin de la station de Guérande a été déplacée au cours de l'hiver 2011-2012 en raison de trop grandes différences faunistiques et physico-chimiques constatées au cours de la première année de suivi. Enfin, la zone traitée de la station de Budos a été modifiée durant l'hiver 2012-2013, avant le début du suivi annuel, car la zone initialement choisie avait subi un important débordage ayant profondément perturbé le milieu. Les résultats présentés dans ce rapport ne concernent que le suivi réalisé après ces changements et jusqu'à la fin du printemps 2014.

2. Caractéristiques hydrologiques des stations et stratégie de traitement contre les larves de moustiques

Les stations d'étude se divisent en deux groupes en fonction de leurs modalités de remise en eau : les stations d'eau douce et les stations sous influence marine. Ces deux groupes ont un fonctionnement différent en termes de production de moustiques et conduisent à des stratégies de traitement différentes.

2.1. Les stations d'eau douce

Les stations de Vendée (Olonne-sur-mer) et de Gironde (Budos et Ambarès) sont alimentées en eau durant l'hiver, par accumulation des eaux de pluies mais aussi par le débordement des rivières voisines pour les sites de Gironde. En 2011, 2013 et 2014, ces trois sites se sont asséchés progressivement au printemps. En 2012, le site de Budos a été brièvement remis en eau au printemps tandis que celui de Vendée restait à sec toute l'année. Ces deux sites n'ont été remis en eau qu'à partir de l'hiver 2012. C'est un fonctionnement représentatif de ces milieux : les larves de moustiques s'y développent à la fin de l'hiver et émergent à partir de mars jusqu'à l'assèchement des sites. Au cours de l'étude, chaque année, un traitement larvicide unique a eu lieu dans ces trois sites à la fin de l'hiver (Tableau 2).

2.2. Les stations sous influence marine

Dans le Morbihan (Locoal-Mendon), en Loire-Atlantique (Guérande) et en Charente-Maritime (Mornac-sur-Seudre), les stations sont remises en eau par les pluies mais surtout par les grandes marées. Si celles-ci sont plus importantes autour des équinoxes (mars-avril et septembre-octobre), des coefficients de marée supérieurs à 90, survenant tout au long de l'année, sont suffisants pour remettre en eau les trois sites. Les assèchements printaniers et estivaux, lorsqu'ils surviennent, sont donc plus courts que dans les stations d'eau douce, et souvent entrecoupés par une ou plusieurs phases de remise en eau. Ainsi, 22 événements d'assèchement ont été constatés sur le site de Charente au cours des quatre années de suivi, contre 4 à Locoal-Mendon et un seul, provoqué pour la gestion du marais, au cours de l'été 2013 à Guérande. Dans tous les cas, les apports des marées provoquent des variations du niveau de l'eau et la remise en eau de certaines parties du marais. Ces événements peuvent alors déclencher, tout au long de l'année, le développement et l'émergence des moustiques.

Ces stations sont donc l'objet de prospections fréquentes par les agents de l'EID-Atlantique, principalement autour des périodes de fort coefficient de marée et en cas de fortes pluies. Ils donnent lieu à de nombreuses interventions de traitement, de la fin de l'hiver jusqu'à l'automne suivant. Ainsi, jusqu'à 9 traitements ont eu lieu sur le site de Locoal-Mendon en 2012 et 2013 (Tableau 2).

Tableau 2. Chronologie des interventions de démoustication (*Bti*) et des prélèvements de faune invertébrée (Prél.) dans les stations de suivi de 2011 à mai 2014.

Année	Mois	Locoal Mendon		Guérande		Mornac sur Seudre		Olonne sur mer		Budos		Ambarès	
		<i>Bti</i>	Prél.	<i>Bti</i>	Prél.	<i>Bti</i>	Prél.	<i>Bti</i>	Prél.	<i>Bti</i>	Prél.	<i>Bti</i>	Prél.
2011	Février								22				
	Mars		17					2 ; 3	8 ; 30				
	Avril	24											
	Mai	5	4 ; 26										
	Juin	23				16	17						
	Juillet					4	5						
	Août	8	8			3	4						
	Septembre						9						
	Octobre		17			12	13						
	Novembre						28						
2012	Février		21		7		7						
	Mars	2		26	20	8	13						
	Avril	17	4	16			23						
	Mai	14	16		4								
	Juin	12 ; 25		13	15		5						
	Juillet	12 ; 17	3	12		9	23						
	Août	9 ; 23			3	7 ; 23	31						
	Septembre		14	18	19								
	Octobre		31		25								
	Novembre												
	Décembre								12				
2013	Février		26		20		6		19		6		
	Mars						26	8	12 ; 19	25	25		
	Avril	8 ; 30	17	11 ; 26	15	16			17		2 ; 25		
	Mai						10		6		28		
	Juin	3 ; 28	6		6		24						
	Juillet	1 ; 30	25	1 ; 29	4	28	8						
	Août	29			14	22 ; 27							
	Septembre	12 ; 27	25				23						
	Octobre				8								
	Novembre				21		7				26		
2014	Janvier										14		
	Février		19		26		3	21	21 ; 28				
	Mars			4			18		20	13	17 ; 24	27	12
	Avril				22	10 ; 24	29		17		14		4 ; 25
	Mai	13	22								12		

2.3. Larvicide utilisé

Sur l'ensemble des sites, à l'exception de celui d'Ambarès, l'insecticide utilisé correspond à la formulation en granulés dispersibles (VectoBac® WG) d'une substance active issue d'une bactérie Gram+ appartenant à la famille des Bacillaceae : *Bacillus thuringiensis israelensis* (*Bti*) ser. H14. Le site d'Ambarès est traité à l'aide de la formulation en granulés du même *Bti* (VectoBac® G).

La toxicité du *Bti* pour les larves de moustiques est liée à la formation d'un cristal protéique lors de la sporulation^{1,2}. Son efficacité vis-à-vis des espèces cibles de Culicidae est comparable à celle des

¹Schnepf E., Crickmore N., Van Rie J., Lereclus D., Baum J., Feitelson J., Zeigler D.R., Dean D.H., 1998. *Bacillus thuringiensis* and its pesticidal crystal proteins. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **62**, 775-806.

²Crickmore N., Zeigler D.R., Feitelson J., Schnepf E., Van Rie J., Lereclus D., Baum J., Dean D.H., 1998. Revision of the nomenclature for the *Bacillus thuringiensis* pesticidal crystal proteins. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **62**, 807-813.

insecticides organophosphorés^{3,4}. Cependant, le *Bti* présente, par rapport aux insecticides de synthèse, trois principaux avantages, qui font de lui le larvicide dont le profil écotoxicologique est, de loin, le plus favorable :

(1) Son mode d'action le rend hautement spécifique d'un groupe d'insectes, en l'occurrence les diptères nématocères⁵, et plus particulièrement les Simuliidae, Chironomidae et Culicidae, groupe auquel appartiennent les moustiques. La toxicité du *Bti* s'exprime au travers d'un groupe de 4 protéines toxiques (Cry4A, Cry4B, Cry11A et Cyt1A). Suite à l'ingestion du cristal protéique par les larves de moustiques, ces toxines sont libérées dans le tube digestif et vont se fixer à des récepteurs spécifiques, sur la membrane des cellules de l'épithélium intestinal⁶. S'ensuit alors une modification de la perméabilité de la membrane, entraînant la lyse des cellules de l'intestin, à l'origine de la mort de l'individu^{7,8}. Des récepteurs aux toxines du *Bti* ont également été identifiés sur la membrane de cellules de l'épithélium intestinal d'espèces d'invertébrés autres que les moustiques, plus précisément des chironomes (*Chironomus annularius*), des simules (*Simulium variegatum*) et des crustacés cladocères (*Simocephalus vetulus*)⁹. Cependant, la fixation des toxines du *Bti* sur les récepteurs de crustacés cladocères n'entraîne aucune mortalité, alors qu'elle se traduit par un effet létal chez les diptères nématocères, confirmant ainsi la haute spécificité du larvicide pour ces derniers. Toutefois, bien que relativement proches d'un point de vue phylogénétique, les chironomes sont environ 425 fois moins sensibles que les moustiques.

(2) L'apparition d'une résistance au *Bti* chez les espèces cibles est très peu probable^{10,11}. Il faut toutefois souligner qu'un premier cas de résistance a été signalé en 2003 à Syracuse dans l'Etat de New York (USA) chez *Culex pipiens*, espèce cosmopolite et plurivoltine, suite à des traitements répétés sur une période relativement courte, entre 1998 et 2001¹². Ces résultats n'ont cependant jamais été confirmés. Des travaux récents ont montré qu'il était possible, en laboratoire, de créer artificiellement une résistance à trois des quatre toxines du *Bti* (Cry4A, Cry4B et Cry11A) chez *Aedes aegypti*. La sélection de cette souche résistante a été obtenue au bout de 22 générations continuellement exposées au *Bti*¹³, ce qui ne reflète en aucun cas la situation d'exposition des larves de moustiques dans l'ensemble des secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique. De plus, les travaux les plus récents montrent que la résistance au *Bti* a peu de chance de se développer chez les espèces de moustiques des régions tempérées où la partie du cycle de vie passée à l'état d'œuf est suffisamment longue pour contre-sélectionner d'éventuels allèles de résistance¹⁴.

(3) Le *Bti* est très peu rémanent dans l'eau et les sédiments, et son effet larvicide se dissipe au-delà de 24 à 48 heures après l'application¹⁵. Par comparaison, le temps de demi-vie de l'Abate® (à base de téméphos) dans l'eau est de l'ordre de 15 jours. Des études récentes ont cependant montré que les spores du *Bti* présentaient une viabilité plus importante dans les milieux

³ Sinègre G., Vigo G., Gaven B., Jullien J.L., 1980. Activité larvicide immédiate et action rémanente de l'endotoxine du sérotype H-14 de *Bacillus thuringiensis* dans deux biotopes à moustiques du littoral méditerranéen français. *Parasitologia*, **22**, 213-221.

⁴ Sinègre G., Gaven B., Jullien J.L., Crespo O., 1980. Activité du sérotype H-14 de *Bacillus thuringiensis* vis-à-vis des principales espèces de moustiques anthropophiles du littoral méditerranéen français. *Parasitologia*, **22**, 223-230.

⁵ Boisvert M., Boisvert J., 2000. Effects of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* on target and non target organisms: a review of laboratory and field experiments. *Biocontrol Science and Technology*, **10**, 517-561.

⁶ Bravo A., Gill S.S., Soberon M., 2007. Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins and their potential for insect control. *Toxicon*, **49**, 423-435.

⁷ van Frankenhuyzen K., 1993. The challenge of *Bacillus thuringiensis*. In: Entwistle P.F.J., Cory S., Bailey M.J., Higgs S. (Eds.), *Bacillus thuringiensis*, an Environmental Biopesticide: Theory and Practice. John Wiley & Sons, pp. 1-35.

⁸ Knowles B.H., 1994. Mechanism of action of *Bacillus thuringiensis* insecticidal delta-endotoxins. *Advances in Insect Physiology*, **24**, 275-308.

⁹ Rey D., Long A., Pautou M.-P., Meyran J.-C., 1998. Comparative histopathology of some Diptera and Crustacea of aquatic alpine ecosystems, after treatment with *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*. *Entomologia Experimentalis and Applicata*, **88**, 255-263.

¹⁰ Ferré J., Van Rie J. 2002. Biochemistry and genetics of insect resistance to *Bacillus thuringiensis*. *Annual Review of Entomology*, **47**, 501-533.

¹¹ Centre National d'Expertise sur les Vecteurs (CNEV), 2014. *Utilisation des insecticides et gestion de la résistance*. Rapport d'expertise, 69 p.

¹² Ayesa P., Harrington L.C., Zhang L., Scott J.G., 2005. Insecticide resistance in *Culex pipiens* from New York. *Journal of American Mosquito Control Association*, **21**, 305-309.

¹³ Paris M., Tetreau G., Laurent F., Lelu M., Despres L., David J.P., 2011. Persistence of *Bacillus thuringiensis israelensis* (*Bti*) in the environment induces resistance to multiple *Bti* toxins in mosquitoes. *Pest Management Science*, **67**, 122-128.

¹⁴ Paris M., David J.P., Despres L., 2011. Fitness costs of resistance to *Bti* toxins in the dengue vector *Aedes aegypti*. *Ecotoxicology*, **20**, 1184-1194.

¹⁵ Hajaj M., Carron A., Deleuze J., Gaven B., Setier-Rio M.-L., Vigo G., Thiéry I., Nielsen-LeRoux C., Lagneau C., 2005. Low persistence of *Bacillus thuringiensis* serovar *israelensis* spores in four mosquito biotopes of a salt marsh in southern France. *Microbial Ecology*, **50**, 475-487.

aquatiques où s'accumulent les feuilles mortes, même si ces milieux ne sont pas l'objet de traitements de démoustication¹⁶, le *Bti* étant naturellement présent dans les sols et sédiments. L'absence de feuilles mortes en décomposition dans les marais littoraux, les lagunes côtières et les prés salés atlantiques garantit l'absence de rémanence du *Bti* dans ces milieux. En revanche, dans les faciès boisés (e.g., forêt alluviales), il serait souhaitable de mesurer la rémanence du *Bti*.

2.4. Traitements de démoustication

Les traitements ont été réalisés par les agents de l'EID-Atlantique. A l'exception d'Ambarès en Gironde, le larvicide (Vectobac® WG) est appliqué à la surface de l'eau à l'aide d'un pulvérisateur à dos. La dose utilisée était de 300 g de Vectobac® WG par hectare (soit $0,9 \cdot 10^6$ UTI/ha) jusqu'à fin juin 2011; à partir de juillet, sur la base des tests d'efficacité réalisés par l'EID-Atlantique¹⁷, la dose a été réduite à 220 g/ha (soit $0,66 \cdot 10^9$ UTI/ha). Sur le site d'Ambarès, le larvicide (Vectobac® G) est appliqué par hélicoptère à la dose de 10 à 15 Kg/ha (soit 2 à $3 \cdot 10^9$ UTI/ha)

Les dates d'intervention de l'EID-Atlantique, ainsi que celles des campagnes d'échantillonnage de la faune sont présentées dans le tableau 2.

3. Protocole de suivi

Le protocole mis en œuvre dans tous les autres secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique est le même que celui utilisé antérieurement^{2,3} (Fig. 2). Il est basé sur la comparaison de la composition des communautés d'invertébrés aquatiques entre zones traitées et zones témoins des stations étudiées. Simultanément, à chaque date de prélèvement, divers paramètres environnementaux ont été mesurés afin de caractériser les zones traitée et témoin de chaque station, et de comparer l'influence relative de chacun des facteurs naturels du milieu et de la présence de VectoBac® WG.

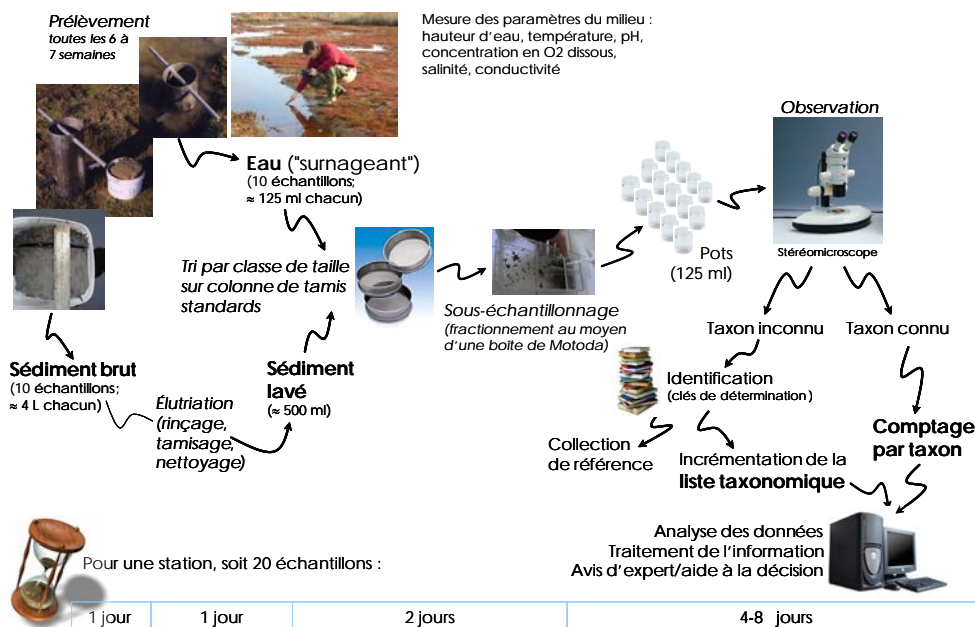


Figure 2. Représentation schématique des différentes étapes du protocole de suivi des communautés d'invertébrés aquatiques dans les secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique.

¹⁶ Tilquin M., Paris M., Reynaud S., Despres L., Ravanel P., Geremia R., 2008. Long lasting persistence of *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* (*Bti*) in mosquito natural habitats. *PLoS ONE* 3:e3432.

¹⁷ Chouin S., Le Hunsec B., Thibaud L., de Maupeou J., Roucaute M., Caquet Th., Lagadic L., 2011. Risk assessment and mitigation of Vectobac® WG used for larval mosquito control in wetlands of the French Atlantic coast. *EMCA 2011 – 6th European Mosquito Control Association Workshop*, 12-14 September 2011, Budapest.

3.1. Synchronisation des campagnes d'échantillonnage des communautés d'invertébrés avec les interventions de l'EID-Atlantique

Dans toutes les stations, au moins une campagne d'échantillonnage a eu lieu avant le début des traitements annuels. Une autre campagne a lieu après la fin des traitements, au printemps pour les sites d'eau douce et en automne pour les sites saumâtres. Entre les deux, la fréquence du suivi des communautés d'invertébrés a été adaptée de manière à couvrir l'ensemble de la période de traitement dans chacune des stations considérées et à faire coïncider au mieux l'échantillonnage avec la présence éventuelle de VectoBac® dans les milieux.

Dans les stations d'eau douce (Tableau 2), le choix a été fait de concentrer l'échantillonnage autour de l'unique traitement annuel. Ainsi, une deuxième campagne de prélèvements a eu lieu une semaine après l'unique traitement de l'année. Une troisième, 3 semaines plus tard, et une quatrième, 6 semaines après le traitement, ont eu lieu lorsque les sites étaient encore en eau. En 2012 et 2013, une campagne a eu lieu en décembre après la remise en eau des sites.

Dans les stations sous influence marine (Tableau 2), compte tenu du caractère régulier des interventions de déoustication tout au long de l'année, les campagnes d'échantillonnages ont été programmées selon un pas de temps fixe de 1 prélèvement toutes les 5 à 8 semaines, hors périodes d'assèchement et hivernales, soit jusqu'à 7 campagnes par an.

3.2. Déroulement du suivi

Les différentes phases du suivi, décrites ci-après, sont représentées sur la figure 2. Chacune des étapes (prélèvement de la faune invertébrée par carottage, sous-échantillonnage, etc.) fait l'objet d'un mode opératoire établi selon les règles d'Assurance-Qualité en Recherche (AQR) en vigueur au sein du laboratoire.

3.2.1. Caractérisation environnementale des milieux

Plusieurs paramètres physico-chimiques ont été mesurés dans les stations lors de chaque campagne d'échantillonnage afin de les caractériser d'un point de vue environnemental.

La hauteur d'eau a été mesurée à l'aide d'un régleur en aluminium (précision 1 mm). La température, le pH, la salinité, la conductivité et la concentration en oxygène dissous ont été mesurés directement sur le terrain avec des appareils de mesure portatifs munis de sondes adaptées. Pour les mesures effectuées par l'INRA (campagne de février 2011), il s'agissait d'un boîtier multiparamètres pH-mètre-conductimètre WTW 340i équipé d'une électrode de pH SenTix 41.3 pour le pH et d'une sonde TetraCon 325 pour la conductivité et d'un boîtier Hach HQ30D équipé d'une sonde LDO pour la concentration en oxygène dissous. Ces appareils étaient également équipés d'une sonde intégrée permettant de mesurer la température de l'eau. La moyenne de 3 mesures a été calculée afin d'obtenir une valeur unique de température. A partir des campagnes suivantes, les mesures ont été réalisées par les agents de l'EID Atlantique à l'aide d'un boîtier multiparamètres ORION 5 Star équipé d'une sonde pH (9107WLMD), d'une cellule de conductivité (013020MD) et d'une sonde optique RDO (87020MD) pour la mesure de la concentration en oxygène dissous. Par ailleurs, en plus des mesures réalisées lors des campagnes d'échantillonnage, les agents de l'EID ont mesuré, lors de leurs prospections dans les stations d'étude, la hauteur et la température de l'eau de chaque zone (témoin et traitée).

3.2.2. Prélèvements de faune invertébrée non-cible

Les prélèvements ont été réalisés par carottage à l'aide d'un carottier en acier inoxydable (diamètre interne : 16,5 cm, hauteur des carottes : environ 10 cm). A chaque date d'échantillonnage, un prélèvement a été réalisé en 5 points différents (réplicats) dans chacune des zones, témoin et traitée, de chaque station. Au total, 10 prélèvements (5 en zone témoin, 5 en zone traitée) ont donc été effectués par station. Les points de prélèvement ont été choisis au hasard dans chaque zone.

Le carottier est lancé dans le milieu, à une certaine distance de l'opérateur, de façon à éviter la fuite des animaux les plus mobiles. Une fois le carottier en place, la faune présente dans la colonne d'eau ("surnageant") est directement collectée sur un tamis de 0,25 mm de vide de maille, puis transférée dans un flacon en polystyrène de 250 mL. La carotte est ensuite placée dans un seau en plastique d'environ 5 L. Dans les milieux saumâtres, la partie la plus profonde de chaque carotte est fragmentée sur le terrain pour en extraire les néréis (seuls organismes présents dans cette strate) et réduire ainsi le volume d'échantillon à rapporter au laboratoire. Les deux fractions sont ensuite formolées (10% ; pH neutre ; additionné de rose bengal à 1 mg/l) afin de fixer les organismes avant le tri des échantillons.

3.2.3. Préparation des échantillons pour la détermination et le dénombrement des taxons présents

3.2.3.1. Pré-traitement des échantillons

Afin de permettre le tri et l'identification des invertébrés, les carottes ont subi un premier nettoyage destiné à éliminer, autant que possible, les sédiments et les débris végétaux. Chaque carotte a ainsi été lavée sur deux tamis successifs de 8 et 0,5 mm de vide de maille pour éliminer les plus gros déchets végétaux et les sédiments. Afin de faciliter la dispersion des argiles compactes qui les constituent, les carottes ont été au préalable fragmentées manuellement et immergées durant une trentaine de minutes dans une solution d'hexaméthaphosphate de sodium ((NaPO₃)_n) à 1 g/L.

Un deuxième traitement, commun à tous les types d'échantillons (surnageants et carottes après prétraitement) a consisté en un passage sur une colonne de tamis :

- vides de maille successifs de 8, 4, 2, 1 et 0,5 mm pour les carottes,
- vides de maille de 8, 4, 2, 1, 0,5 et 0,25 mm pour les surnageants.

L'objectif était de séparer les individus présents dans les échantillons selon leur taille, ce qui facilite le tri et le dénombrement car il est alors possible de régler la loupe binoculaire sur un niveau de grossissement défini et constant en étant sûr de pouvoir observer tous les individus présents dans l'échantillon à la bonne échelle.

3.2.3.2. Sous-échantillonnage

Compte tenu de la densité en invertébrés et/ou de la charge en matières organiques fines dans certains prélèvements, un protocole de sous-échantillonnage permettant de diviser l'échantillon initial en plusieurs fractions de volumes identiques a été mis en œuvre. Le tri a alors été effectué sur une partie seulement des fractions, ce qui le rend plus rapide et plus efficace. Seule la moitié du contenu des tamis de 1 mm a été identifiée et comptée, le quart pour les tamis de 0,5 mm, et un huitième pour les tamis de 0,25 mm.

Le fractionnement des échantillons a été réalisé à l'aide d'une boîte de Motoda. Il s'agit d'une boîte parallélépipédique en plexiglas (24 cm de longueur et 11 cm de largeur) pourvue d'une cloison centrale sur la moitié de sa longueur. Elle permet, par un mouvement de bascule, de diviser un échantillon en deux parts égales. Une bonne homogénéisation préalable de l'échantillon, lequel doit être suffisamment liquide, est essentielle au bon déroulement du sous-échantillonnage.

3.2.4. Tri et détermination des invertébrés

L'identification et le dénombrement des individus ont été effectués au moyen de loupes binoculaires (Leica MZ6 ou M80 ; magnification de $\times 10$ à $\times 80$) disposant d'un éclairage diascopique et épiscopique. La détermination taxonomique a été réalisée en se référant à des ouvrages généraux^{18,19,20}, ainsi qu'à des ouvrages spécialisés pour certains groupes (*Gammaridae*²¹, Crustacés Isopodes²², crevettes²³).

¹⁸ Tachet H., Bournaud M., Richoux Ph. & Usseglio-Polatera Ph. (eds), 2010. *Invertébrés d'eau douce : systématique, biologie, écologie*. CNRS éditions, Paris.

¹⁹ Barnes R.S.K., 1994. *The Brackish-water Fauna of Northwestern Europe*. Cambridge University Press, Cambridge.

3.3. Traitement des données

3.3.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus pour les différents paramètres physico-chimiques ont été regroupés sous la forme de diagrammes de type « radar » dont chaque axe représente un paramètre. La moyenne annuelle figure en vert, les valeurs maximales et minimales observées en rouge et bleu, respectivement. Mis à part pour la station de Loical-Mendon et pour les campagnes réalisées à partir du printemps 2014, au cours desquelles 5 mesures étaient réalisées dans chaque zone, nous ne disposons que d'une valeur de chaque paramètre à chaque date et dans chaque zone sur la plupart des sites. Afin de comparer les paramètres de la zone témoin et de la zone traitée, nous avons effectué des tests statistiques sur les moyennes annuelles de ces paramètres.

3.3.2. Caractérisation de la structure des communautés

A chaque date d'échantillonnage, les données d'abondance pour les 2 fractions de chaque échantillon (surnageant et carotte) ont été regroupées, de manière à disposer d'une seule valeur d'abondance pour chaque groupe à chaque point de prélèvement.

De nombreux taxons identifiés au cours du suivi n'ont été retrouvés que ponctuellement et ne permettent pas une comparaison facile des zones témoins et traitées. Les analyses portent donc sur les taxons trouvés dans au moins 5% des échantillons d'un site. Toutefois, afin de ne pas totalement perdre l'information que les groupes occasionnels pourraient apporter, ils ont été regroupés, dans la mesure du possible, à un niveau taxonomique supérieur (famille ou ordre) si cela permettait d'atteindre au moins 5% d'occurrence dans les échantillons.

Enfin, l'étude porte sur les effets du *Bti* sur les espèces non-cibles et non sur son efficacité contre les moustiques. Les culicidae n'ont donc pas été inclus dans les analyses.

La structure des communautés d'invertébrés dans les zones témoin et traitée de chaque station a été caractérisée par différents indices numériques :

- N , l'abondance totale, soit le nombre total d'invertébrés dénombrés dans un échantillon.
- S , la richesse taxonomique, qui correspond au nombre total de taxons identifiés dans un échantillon.
- H' , l'indice de diversité de Shannon, dont la valeur est d'autant plus élevée que le nombre de taxons présents dans l'échantillon est élevé, et que la répartition des individus entre les différents taxons est équilibrée. Sa formule est la suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\left(\frac{n_i}{N} \right) \times \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \right)$$

où S est la richesse taxonomique, n_i le nombre d'individus du taxon i et N l'abondance totale des invertébrés dans l'échantillon.

- J , l'indice d'équitabilité de Pielou, dont la valeur est d'autant plus élevée et proche de 1 que la répartition des individus entre les différents taxons est équilibrée. Sa formule est la suivante :

$$J = \frac{H'}{\log_2(S)}$$

où H' est l'indice de diversité de Shannon, calculé pour l'échantillon, et S est sa richesse taxonomique.

²⁰ Hayward P.J. & Ryland J.S. (eds), 1995. *Handbook of the Marine Fauna of North-West Europe*. Oxford University Press, Oxford.

²¹ Lincoln R.J., 1979. *British Marine Amphipoda: Gammaridae*. British Museum, London.

²² Naylor E., 1972. *British Marine Isopods. Synopses of the British fauna (New Series) n°3*. Academic Press, London.

²³ Smalldon G., 1979. *British Coastal Shrimps and Prawns. Synopses of the British Fauna (New Series) n°15*. Academic Press, London.

²³ van den Brink P.J., ter Braak C.J.F., 1999. Principal response curves: Analysis of time-dependent multivariate responses of biological community to stress. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **18**, 138-148.

Pour chaque zone (témoin et traitée), les valeurs moyennes des différents indices ont été calculées à partir des valeurs obtenues pour chacun des points de prélèvement à chaque date d'échantillonnage. Dans les figures présentant les résultats, pour toutes les stations, le temps est exprimé en jour depuis le début du suivi (soit depuis le 1^{er} janvier 2011).

3.3.3. Courbe de réponse principale (PRC)

L'évolution de la structure des communautés dans les zones témoin et traitée a été analysée de manière globale à l'aide d'une méthode dérivée de l'analyse de redondance, la PRC (*Principal Response Curve*²⁴). Cette méthode est particulièrement bien adaptée à l'analyse des séries de données décrivant la réponse des communautés à la présence de substances toxiques.

La construction de la première PRC a été réalisée à partir des résultats d'une analyse de redondance partielle, dans laquelle le temps, la zone de prélèvement (témoin ou traitée) et l'interaction temps × zone de prélèvement sont utilisés comme variables explicatives de l'évolution de l'abondance des différents taxons. Le pourcentage de la variance totale expliqué par le temps est représenté par l'axe des abscisses. Comme pour les indices structurels, le temps est exprimé sur la courbe en jour depuis le début du suivi (soit le 1^{er} janvier 2011). Le pourcentage de la variance totale expliqué par la zone de prélèvement est fourni par calcul. L'axe des coefficients canoniques (C_{dt}) permet de représenter le pourcentage de la variance totale expliqué par la première PRC. L'analyse fournit aussi pour chaque taxon un poids (b_k), qui peut être interprété comme la contribution relative de ce taxon dans la réponse de la communauté. Plus sa valeur est élevée et plus le profil de réponse du taxon est proche de celui décrit par la première PRC. Une valeur nulle ou proche de 0 indique une absence de réponse ou une réponse indépendante de la zone de prélèvement. Le sens de l'effet se déduit de la comparaison des signes de C_{dt} et b_k . Si les signes sont opposés, le taxon considéré présente des effectifs plus faibles dans les échantillons provenant de la zone traitée que dans ceux provenant de la zone témoin. Dans le cas contraire, les effectifs sont plus élevés dans les échantillons provenant de la zone traitée que dans ceux provenant de la zone témoin. Avant analyse, les données d'abondance ont été log-transformées en appliquant une transformation du type $x' = \ln(Ax+1)$. Le facteur A permet de distinguer les valeurs nulles et les valeurs faibles d'abondance. L'ajout de la valeur 1 dans la transformation $\ln(Ax+1)$ permet d'éviter les impossibilités de calcul lorsque x vaut 0. Pour cette étude, la valeur de A a été fixée à 2/abondance minimale.

La signification statistique de la réponse pour l'ensemble de la période d'étude a été testée par un test de permutation (analyse de Monte Carlo). A chaque date, l'existence d'une différence significative entre les zones de prélèvement a été testée à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les données d'abondance log-transformées. Une ANOVA appliquée aux coordonnées obtenues pour le premier axe de l'ACP pour les différents échantillons permet de mettre en évidence une éventuelle différence significative entre zones pour la date considérée.

3.3.4. Evolution des principaux groupes taxonomiques

Outre les différences globales entre les communautés des zones témoin et traitée, l'évolution au cours du suivi de certains taxons clefs a été étudiée.

La tribu des Chironomini est représentée dans chaque station. Il s'agit de l'un des groupes taxonomiques les plus proches des moustiques qui, de ce fait, présente, parmi les groupes d'invertébrés non-cibles, la plus forte sensibilité au *Bti* (toutefois 425 fois plus faible que celle des moustiques) dans les tests de laboratoire. Par ailleurs, dans chaque station, les 3 taxons représentant la plus forte biomasse, ainsi que les deux taxons « pesant » le plus significativement dans la PRC ont été analysés.

²⁴ van den Brink PJ, Ter Braak CJF. 1999. Principal response curves: analysis of time-dependent multivariate responses of a biological community to stress. *Environmental Toxicology and Chemistry* 18, 138–148.

3.3.5. Analyses statistiques

Pour tous les paramètres physico-chimiques, la comparaison des moyennes annuelles calculées pour les différentes zones a été réalisée à l'aide d'une analyse de variance à un facteur (ANOVA), afin de savoir s'il existait ou non une différence significative entre zone témoin et zone traitée d'une même station.

Des modèles linéaires généralisés mixtes (*Global Linear Mixed Models : GLMM*) ont été utilisés pour tester la différence entre zone témoin et zone traitée sur l'ensemble de la période de suivi pour la richesse taxonomique (S), l'abondance totale des invertébrés (N), l'indice de diversité de Shannon (H') et pour l'indice de Pielou (J). Ces modèles permettent de tester l'interaction temps \times zone de prélèvement, l'effet zone de prélèvement, et l'effet du temps. La loi de distribution de Poisson a été retenue dans les modèles pour la richesse taxonomique et l'abondance. Pour les deux autres métriques, la normalité de la distribution des valeurs a d'abord été vérifiée par un test de Shapiro. Lorsque la distribution des valeurs ne suivait pas une loi normale, elles ont subi une transformation de type *box-cox*. Dans un second temps, les différences date par date des paramètres ont été testées à l'aide d'ANOVA.

Les abondances des principaux groupes taxonomiques ont été comparées date par date à l'aide d'ANOVA sur les données d'abondance transformées comme pour la PRC.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *R* version 3.1.1 (R foundation for Statistical Computing). Pour tous les tests, le niveau de significativité a été fixé à 0,05.

3.4. Etat d'avancement du suivi

A ce jour, il ne reste plus qu'une seule campagne de prélèvement à réaliser dans les stations sous influence marine (programmée pour fin septembre-début octobre). L'ensemble des autres échantillons prélevés à ce jour a déjà été trié et identifié. Toutefois, dans le présent rapport, les résultats des campagnes de l'été 2014 n'ont pu être inclus faute de temps pour parfaire les analyses statistiques.

4. Résultats

4.1. Analyses station par station

4.1.1. Station d'Olonne-sur-mer (Vendée)

4.1.1.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus pour les différents paramètres physico-chimiques sont présentés sur la figure 3. La seule différence significative entre les zones témoin et traitée vient de la hauteur d'eau. Celle-ci a été très significativement ($p < 0,001$) plus élevée dans la zone traitée que dans la zone témoin tout au long du suivi avec, par exemple, 34 cm de hauteur d'eau moyenne dans la zone traitée en 2014 contre 14 cm pour la zone témoin. La station d'Olonne-sur-mer est située dans une cuvette et la zone témoin est plus périphérique que la zone traitée. Au cours du suivi, la zone témoin s'est d'ailleurs toujours asséchée avant la zone traitée. En 2014, la zone témoin était en effet à sec dès le 18 avril tandis qu'au 28 août, la zone traitée était encore en eau.

Les autres paramètres fluctuent dans les mêmes ordres de grandeur dans les deux zones. La température fluctue de 1 à presque 20°C selon la date d'échantillonnage dans les deux zones avec une valeur moyenne autour de 9°C. En effet, depuis 2011, les campagnes d'échantillonnage se concentrent entre la fin de l'hiver et le début du printemps. La conductivité de l'eau est relativement élevée (environ 1500-1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en moyenne), ce qui indique l'existence d'une influence maritime

de faible intensité et/ou une forte minéralisation consécutive à la décomposition de la matière organique. La valeur moyenne du pourcentage de saturation en O₂ dissous située autour de 50%, suggère une importante décomposition de la matière organique conduisant à une consommation d'oxygène par les bactéries aérobies. Le pH est légèrement basique.

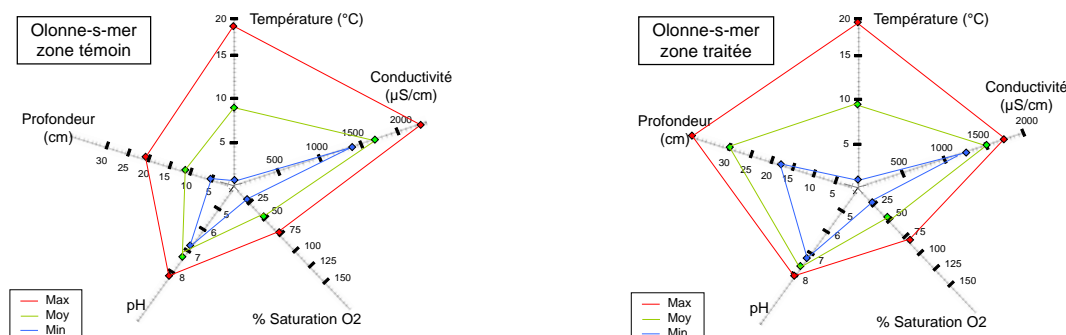


Figure 3. Représentation des valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station d'Olonne-sur-mer.
(Max : valeur maximale annuelle ; Min : valeur minimale annuelle ; Moy : moyenne annuelle).

4.1.1.2. Caractérisation de la structure des communautés

4.1.1.2.1. Abondance totale

La figure 4 présente l'évolution de l'abondance totale des communautés au cours du suivi. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps × zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$) qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

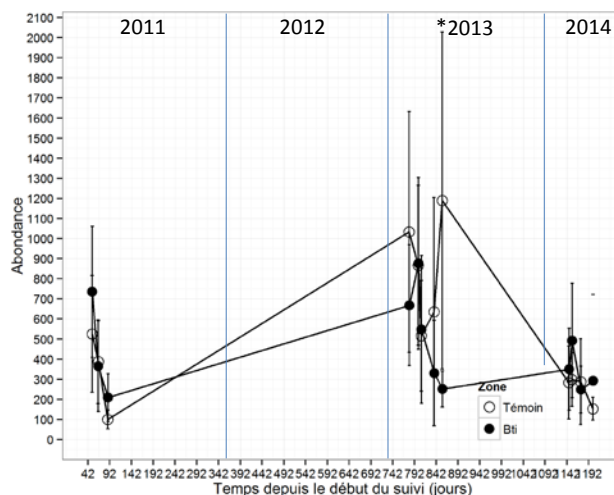


Figure 4. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'abondance totale des invertébrés présents dans les prélèvements (carotte + surnageant) effectués dans les zones témoin et traitée de la station d'Olonne-sur-mer.

4.1.1.2.2. Richesse taxonomique

La figure 5 présente l'évolution des valeurs moyennes de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station d'Olonne-sur-mer au cours du suivi. Comme pour l'abondance totale, une forte interaction temps × zone de prélèvement a été mise en évidence par l'analyse des GLMM ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure globalement quant à l'effet du traitement.

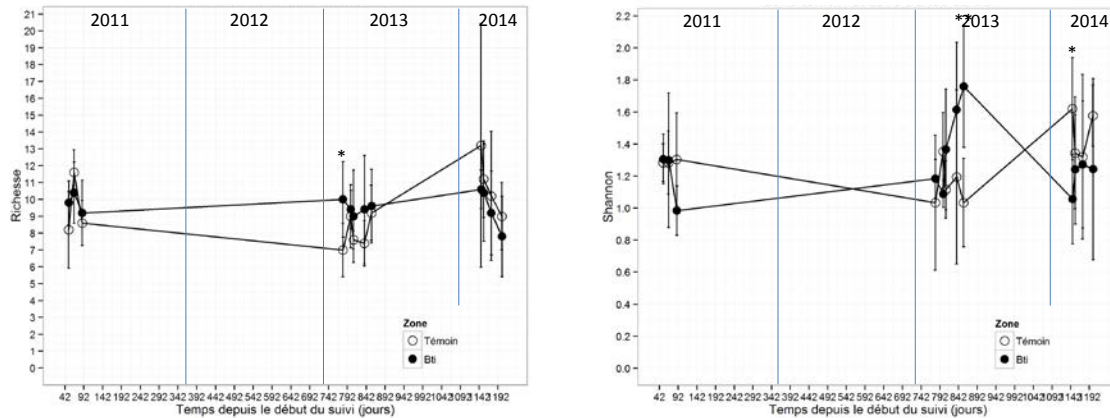


Figure 5. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de la richesse taxonomique (à gauche) et de la diversité taxonomique (indice de Shannon, à droite) des communautés d'invertébrés dans les zones témoin et traitée de la station d'Olonne-sur-mer (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$).

4.1.1.2.3. Indice de Shannon

En ce qui concerne l'évolution des valeurs moyennes de l'indice de diversité de Shannon des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station d'Olonne-sur-mer (Fig. 5), l'analyse des GLMM ne met en évidence aucune interaction temps \times zone de prélèvement, ni aucun effet du temps mais, en revanche, montre un effet significatif ($p < 0,05$) de la zone de prélèvement. L'analyse date par date met en évidence une différence très significative ($p < 0,01$) en faveur de la zone traitée à la fin du suivi de l'année 2013 et une différence significative ($p < 0,05$) en faveur de la zone témoin au début du suivi de l'année 2014.

4.1.1.2.4. Indice de Pielou

La figure 6 présente l'évolution des valeurs moyennes de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station d'Olonne-sur-mer. L'analyse des GLMM ne met en évidence aucun effet sur l'ensemble de la période de suivi.

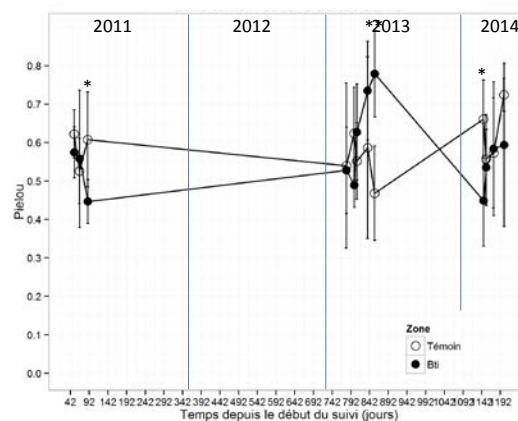


Figure 6. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station d'Olonne-sur-mer

4.1.1.3. Courbe de réponse principale

L'analyse de redondance (RDA) montre que le temps et la zone de prélèvement expliquent respectivement 30,7% et 16,4% de la variance totale. Le premier axe de la RDA présenté dans la figure 7, représente 15,7% de la variabilité totale de la communauté. Le test de permutation de Monte Carlo y montre un effet très significatif de la zone (témoin ou traitée) sur l'ensemble de la période d'étude ($p < 0,01$). L'analyse date par date montre une différence significative en tout début

de suivi (2011), avant le premier traitement, suivi par une convergence avant l'assèchement estival. En 2013, les communautés étaient significativement différentes entre les deux zones dès la remise en eau et le sont restées jusqu'à l'assèchement. En 2014, les communautés, similaires avant le traitement, ont successivement divergées puis convergées jusqu'à la fin du suivi où elles demeuraient significativement différentes. Les principaux groupes contribuant à ces différences sont visibles sur l'axe des b_k (valeur absolue de b_k supérieure à 0,5). Sept groupes étaient moins abondants dans la zone traitée (groupes de signe positif sur la figure 7) que dans la zone témoin et six y étaient plus abondants (groupes de signe négatif sur la figure 7).

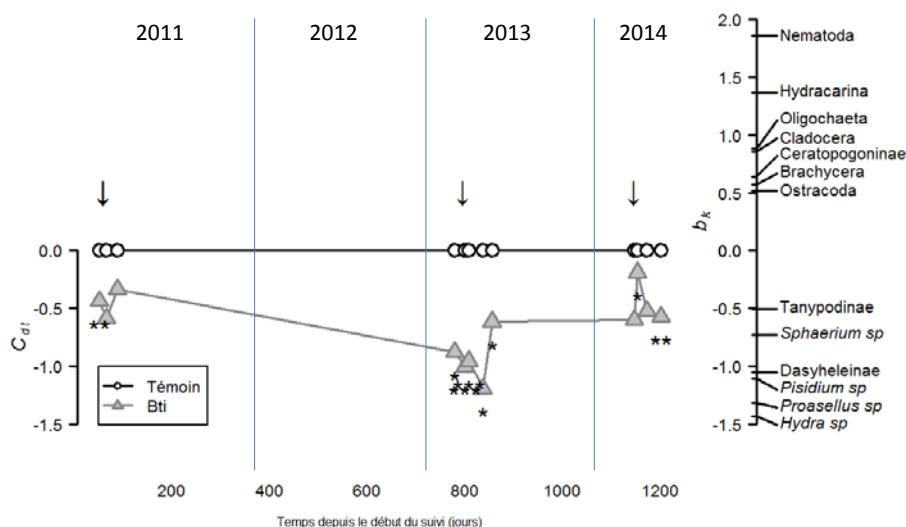


Figure 7. Première courbe de réponse principale des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station d'Olonne-sur-mer (les flèches représentent les dates de traitement).

4.1.2. Station de Budos (Gironde)

4.1.2.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus pour les différents paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station de Budos sont présentés sur la figure 8.

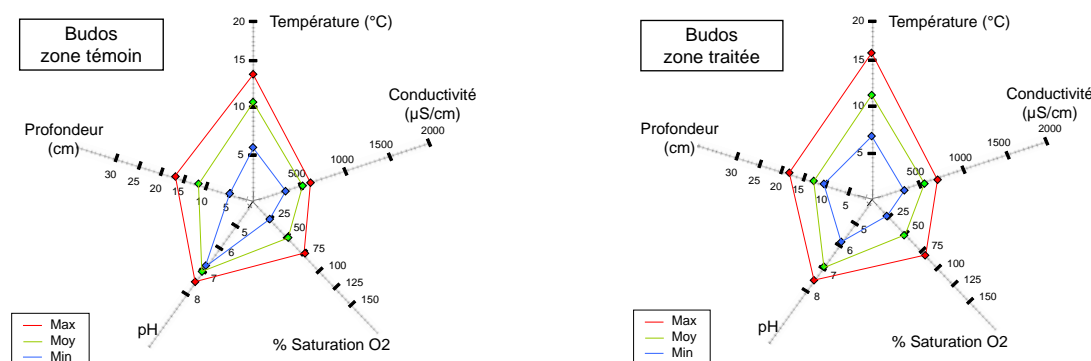


Figure 8. Représentation des valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station de Budos (Max : valeur maximale annuelle ; Min : valeur minimale annuelle ; Moy : moyenne annuelle).

Ce site est caractérisé par une hauteur d'eau peu importante (au maximum, 17 cm en zone témoin et 18 cm en zone traitée). L'amplitude de variation des paramètres est assez réduite. L'analyse des valeurs annuelles moyennes des différents paramètres, tant en 2013, qu'en 2014, ne montre aucune différence significative entre les zones témoin et traitée.

4.1.2.2. Caractérisation de la structure des communautés

4.1.2.2.1. Abondance totale

La figure 9 présente l'évolution de l'abondance totale des communautés au cours du suivi. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montre une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

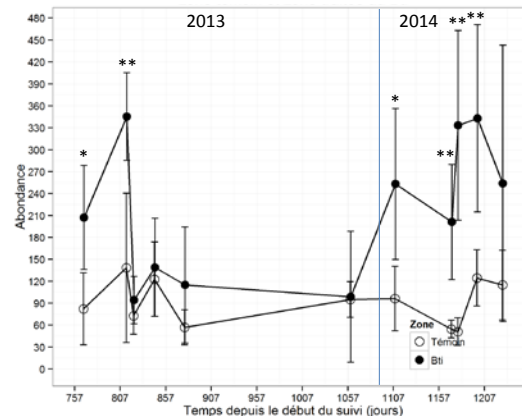


Figure 9. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'abondance totale des invertébrés présents dans les prélèvements (carotte + surnageant) des zones témoin et traitée de la station de Budos.

4.1.2.2.2. Richesse taxonomique

La figure 10 présente l'évolution des valeurs moyennes de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Budos au cours du suivi. Le test des GLMM ne met pas en évidence d'interaction temps \times zone de prélèvement, ni d'effet temps, mais un effet significatif de la zone de prélèvement ($p = 0,025$). L'analyse date par date montre que la richesse était significativement plus élevée dans la zone traitée avant le début du suivi en 2013, ainsi que tout au long du suivi 2014, à l'exception des première et dernière dates d'échantillonnage.

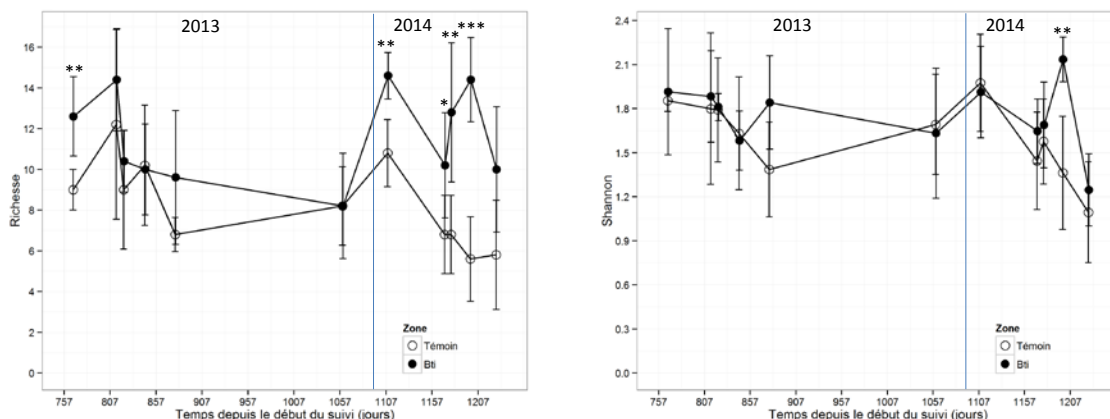


Figure 10. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de la richesse taxonomique (à gauche) et de la diversité taxonomique (indice de Shannon, à droite) des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Budos (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$, *** : $p < 0,001$).

4.1.2.2.3. Indice de Shannon

Pour ce qui est de l'évolution des valeurs moyennes de l'indice de diversité de Shannon des communautés d'invertébrés dans les zones témoin et traitée de la station de Budos, l'analyse des

GLMM ne met en évidence aucune interaction temps \times zone de prélèvement, ni aucun effet de la zone de prélèvement, mais montre un effet très significatif du temps ($p = 0,004$). L'analyse date par date ne met en évidence qu'une différence très significative ponctuelle lors de l'avant dernier prélèvement de 2014 ($p = 0,003$) où l'indice était plus élevé pour la zone traitée que pour la zone témoin.

4.1.2.2.3. Indice de Pielou

La figure 11 présente l'évolution des valeurs moyennes de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Budos. L'analyse des GLMM ne montre aucune interaction temps \times zone de prélèvement, ni aucun effet significatif global du temps ou de la zone de prélèvement sur ce paramètre.

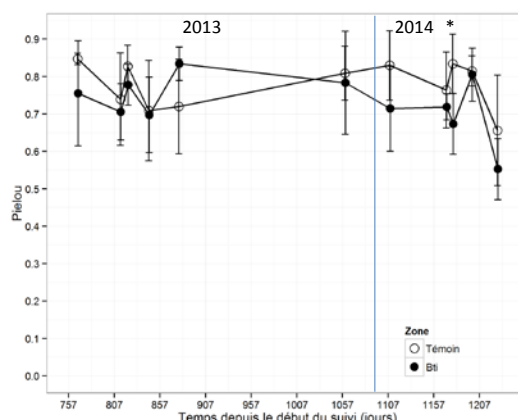


Figure 11. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Budos.

4.1.2.3. Courbe de réponse principale

L'analyse de redondance (RDA) montre que le temps et la zone de prélèvement expliquent respectivement 24,2% et 18,6% de la variance des communautés. Le premier axe de la RDA présenté dans la figure 12, représente 14% de la variabilité totale de la communauté.

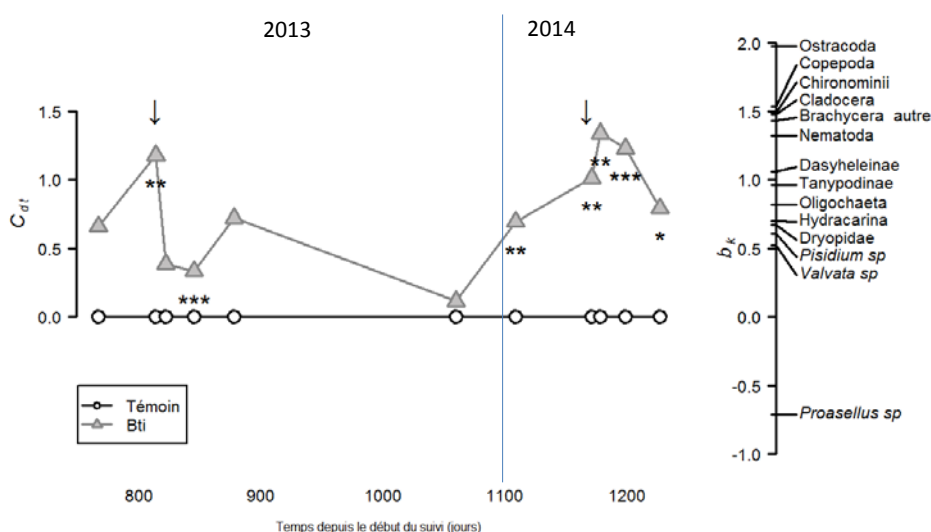


Figure 12. Première courbe de réponse principale des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Budos (les flèches représentent les dates de traitement).

Le test de permutation de Monte Carlo montre un effet très significatif de la zone de prélèvement sur l'ensemble de la période d'étude ($p = 0,005$). L'analyse date par date montre une différence très significative ($p = 0,004$) le jour du traitement de 2013 (le prélèvement a été réalisé juste avant le traitement), mais pas une semaine plus tard. Les communautés présentent une différence très significative ($p < 0,001$) trois semaines après ce même traitement, mais aucune différence n'a été mise en évidence à la fin du suivi de 2013 avant l'assèchement du milieu. En 2014, mise à part à la première date de prélèvement avant traitement, les communautés des deux zones ont présenté systématiquement des différences significatives à très significatives.

Les principaux groupes contribuant à ces différences sont visibles sur l'axe des b_k (valeur absolue de b_k supérieure à 0,5). Un seul groupe était moins abondant dans la zone traitée que dans la zone témoin (groupe de signe négatif sur la figure 12) alors que 13 y étaient plus abondants (groupes de signe positif sur la figure 12).

4.1.3. Station d'Ambarès (Gironde)

4.1.3.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus pour les différents paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station d'Ambarès sont présentés sur la figure 13.

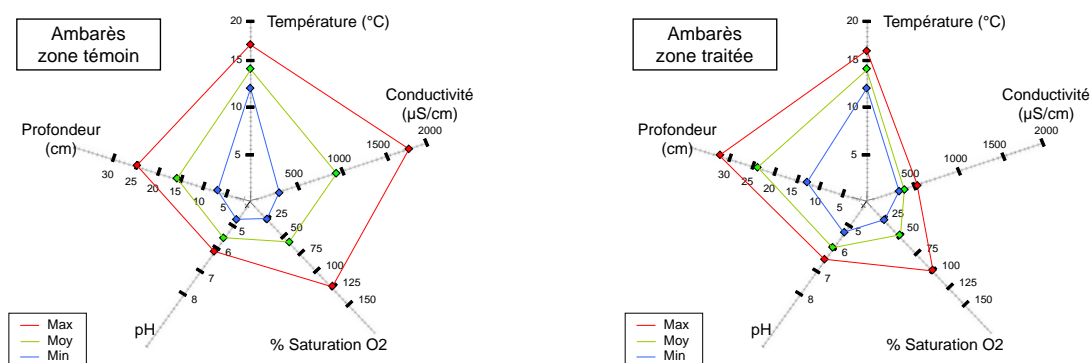


Figure 13. Représentation des valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station d'Ambarès
(Max : valeur maximale annuelle ; Min : valeur minimale annuelle ; Moy : moyenne annuelle).

L'analyse des valeurs annuelles moyennes montre des différences significatives pour trois des paramètres. La conductivité est très significativement ($p < 0,001$) plus élevée dans la zone témoin que dans la zone traitée avec 964 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivement. Le pH est très significativement plus faible dans la zone témoin que dans la zone traitée ($p < 0,001$) avec des valeurs moyennes de 5,48 et 6,07, respectivement. Enfin, la hauteur d'eau est très significativement plus faible en zone témoin qu'en zone traitée ($p = 0,002$) avec une profondeur moyenne de 16 cm contre 24,1 cm, respectivement. Au cours du suivi, la zone témoin s'est asséchée beaucoup plus vite que la zone traitée du fait de sa plus faible profondeur.

4.1.3.2. Caractérisation de la structure des communautés

4.1.3.2.1. Abondance totale

La figure 14 présente l'évolution de l'abondance totale des communautés au cours de l'année 2014 dans la station d'Ambarès. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

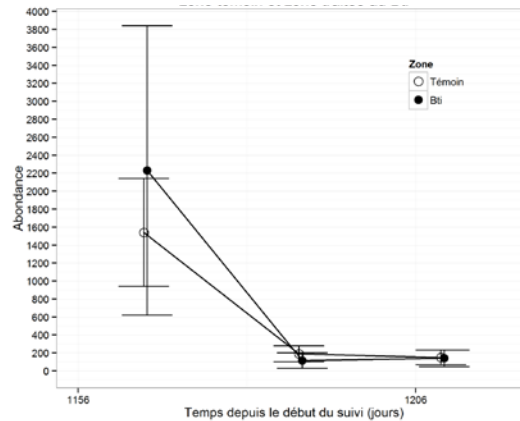


Figure 14. Evolution au cours de l'année 2014 des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'abondance totale des invertébrés dans les prélèvements (carotte + surnageant) des zones témoin et traitée de la station d'Ambarès.

4.1.3.2.2. Richesse taxonomique

La figure 15 présente l'évolution des valeurs moyennes de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station d'Ambarès en 2014. Le test des GLMM ne met pas en évidence d'interaction temps \times zone de prélèvement, ni d'effet zone, mais un effet significatif du temps ($p = 0,028$).

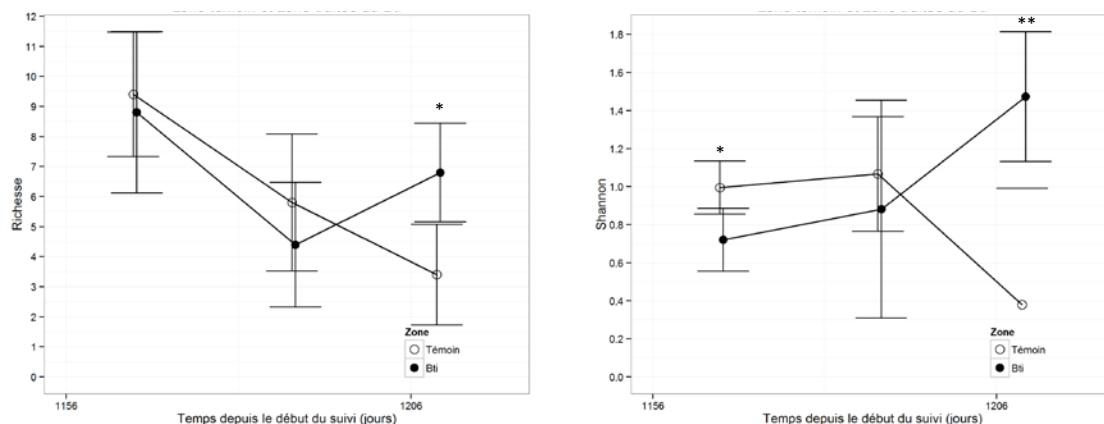


Figure 15. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de la richesse taxonomique (à gauche) et de la diversité taxonomique (indice de Shannon, à droite) des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station d'Ambarès (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$).

4.1.3.2.3. Indice de Shannon

En ce qui concerne l'évolution des valeurs moyennes de l'indice de diversité de Shannon des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station (Fig. 15), l'analyse des GLMM ne met en évidence aucune interaction temps \times zone de prélèvement, ni aucun effet de la zone de prélèvement ou du temps.

4.1.3.2.4. Indice de Pielou

La figure 16 présente l'évolution des valeurs moyennes de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station d'Ambarès. L'analyse des GLMM ne montre aucune interaction temps \times zone de prélèvement, ni aucun effet significatif global du temps ou de la zone de prélèvement.

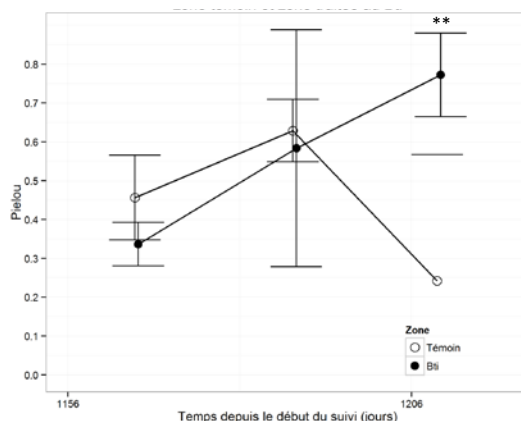


Figure 16. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station d'Ambarès.

4.1.3.3. Courbe de réponse principale

Compte tenu du très faible nombre de date d'échantillonnage, il ne nous a pas paru pertinent de réaliser la PRC sur un si petit jeu de données.

4.1.4. Station de Locoal-Mendon (Morbihan)

4.1.4.1. Paramètres physico-chimiques

Cette station est caractérisée par d'importantes fluctuations annuelles de l'ensemble des paramètres (Fig. 17). La salinité y connaît d'importantes variations (de 16 à 43,7 g/L pour la zone témoin et de 15,4 à 47,4 g/L pour la zone traitée). Le taux de saturation de l'eau en oxygène dissous fluctue entre hypoxie (26% de saturation en O_2) et hypersaturation (jusqu'à 126% en zone témoin). Enfin, la température varie de moins de 5°C l'hiver à plus de 28°C l'été.

Les zones témoin et traitée sont très comparables du point de vue physico-chimique (Fig. 17). Seuls deux paramètres montrent ponctuellement des différences significatives entre moyennes annuelles : le pH, en 2011, avec des valeurs moyennes de 7,43 et 7,28 respectivement pour les zones témoins et traitées ($p = 0,035$), et la hauteur d'eau, en 2013 et 2014, avec une profondeur très significativement plus élevée en zone témoin qu'en zone traitée ($p = 0,008$ en 2013 et $p = 0,002$ en 2014), avec respectivement 19,6 cm contre 13 cm en 2013 et 22,9 cm et 15,7 cm en 2014.

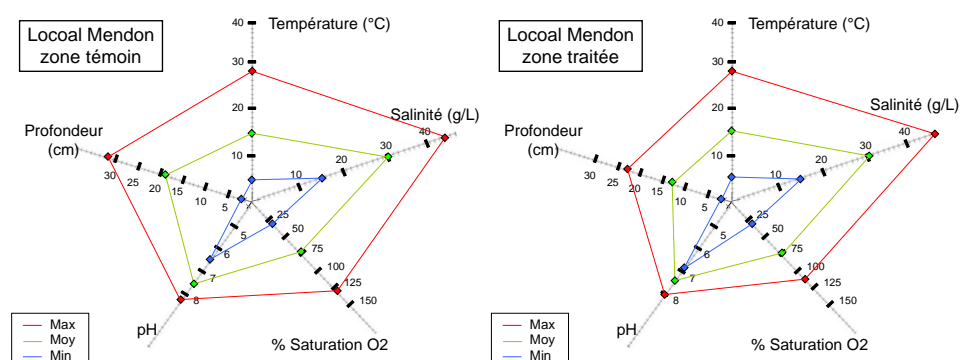


Figure 17. Représentation des valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station de Locoal-Mendon (Max : valeur maximale annuelle ; Min : valeur minimale annuelle ; Moy : moyenne annuelle).

4.1.4.2. Communautés d'invertébrés aquatiques non-cibles

4.1.4.2.1. Abondance totale

La figure 18 présente l'évolution de l'abondance totale des communautés dans les zones témoin et traitée de la station de Locoal-Mendon au cours du suivi. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

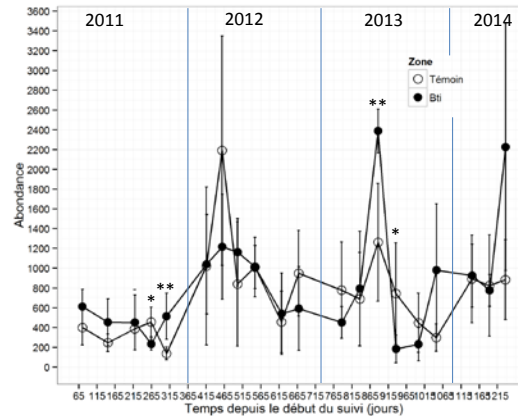


Figure 18. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'abondance totale des invertébrés présents dans les prélèvements (carotte + surnageant) des zones témoin et traitée de la station Locoal-Mendon.

4.1.4.2.2. Richesse taxonomique

La figure 19 présente l'évolution des valeurs moyennes de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés dans les zones témoin et traitée de la station de Locoal-. Le test des GLMM ne met pas en évidence d'interaction temps \times zone de prélèvement, ni d'effet temps, mais un effet significatif de la zone de prélèvement ($p = 0,018$). L'analyse date par date montre que la richesse était, significativement à très significativement, plus élevée dans la zone témoin que dans la zone traitée à 5 reprises au cours du suivi entre l'été 2011 et l'été 2013.

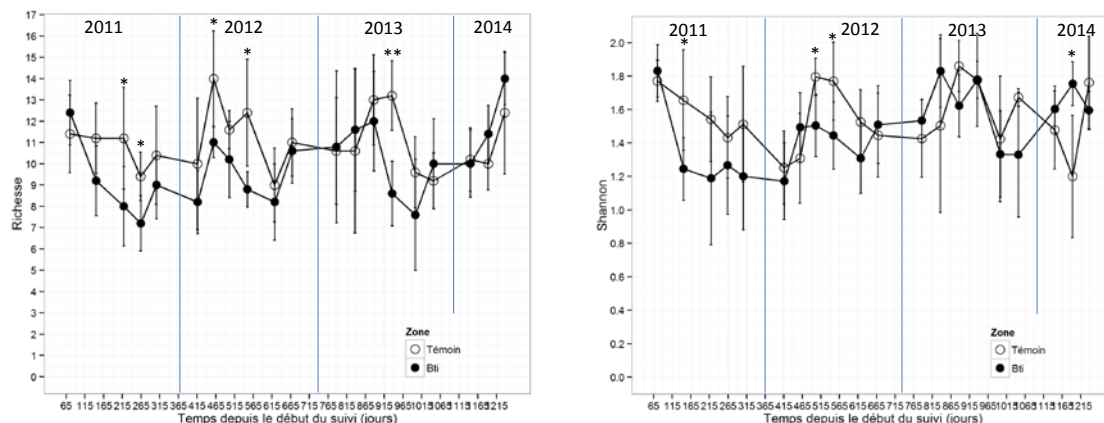


Figure 19. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de la richesse taxonomique (à gauche) et de la diversité taxonomique (indice de Shannon, à droite) des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Locoal-Mendon (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$).

4.1.4.2.3. Indice de Shannon

En ce qui concerne l'évolution des valeurs moyennes de l'indice de diversité de Shannon des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Locoal-Mendon (Fig. 19), le test des GLMM ne met pas en évidence d'interaction temps \times zone de prélèvement, ni

d'effet temps, mais un effet très significatif de la zone de prélèvement ($p = 0,008$). L'analyse date par date montre que, sur la période 2011-2012, l'indice de Shannon est significativement plus élevé dans la zone témoin que dans la zone traitée à 3 reprises ($p = 0,031$, $p = 0,017$, $p = 0,045$, respectivement). L'indice de la zone traitée était quant à lui significativement plus élevé que celui de la zone témoin lors de la deuxième campagne de 2014 ($p = 0,013$), après le premier traitement de l'année.

4.1.4.2.3. Indice de Pielou

La figure 20 présente l'évolution des valeurs moyennes de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Locoal-Mendon. Le test des GLMM ne met pas en évidence d'interaction temps \times zone de prélèvement, ni d'effet temps, mais un effet zone significatif ($p = 0,039$). L'analyse date par date met en évidence deux différences significatives en faveur de la zone traitée, l'une en 2013 ($p = 0,04$) et l'autre 2014 ($p = 0,034$), et une en faveur de la zone témoin en 2014 ($p = 0,039$).

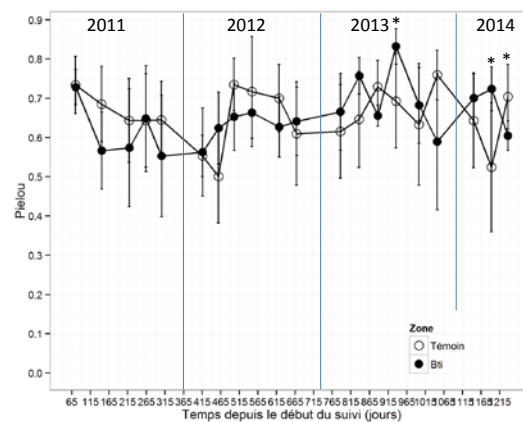


Figure 20. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Locoal-Mendon.

4.1.4.3. Courbe de réponse principale

L'analyse de redondance (RDA) montre que le facteur temps explique 34,8% de la variance totale et le facteur zone de prélèvement 19,6%. Le premier axe de la RDA présenté dans la figure 21, représente 21,1% de la variabilité totale de la communauté.

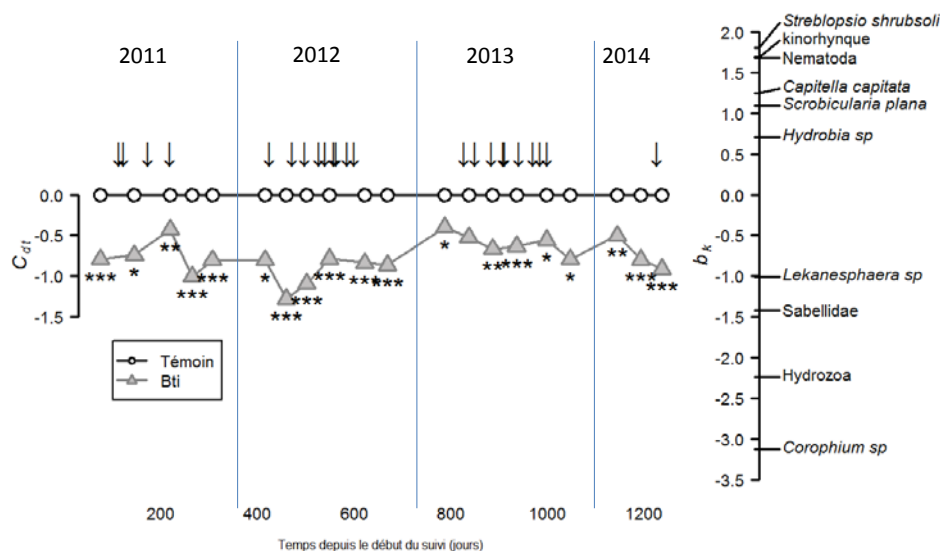


Figure 21. Première courbe de réponse principale des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Locoal-Mendon (les flèches représentent les dates de traitement).

Le test de permutation de Monte Carlo y montre un effet zone très significatif sur l'ensemble de la période d'étude ($p = 0,005$). L'analyse date par date montre qu'à l'exception de la deuxième campagne de prélèvements de 2013, les communautés des zones témoin et traitée étaient systématiquement, significativement à très significativement, différentes.

Les principaux groupes contribuant à ces différences sont visibles sur l'axe des b_k (valeur absolue de b_k supérieure à 0,5). Six groupes étaient moins abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin (groupes de signe positif sur la figure 21) et 4 y étaient plus abondants (groupes de signe négatif sur la figure 21).

4.1.5. Site de Guérande (Loire-Atlantique)

4.1.5.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus pour les paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station de Guérande sont présentés sur la figure 22. Le site est caractérisé, comme à Locol-Mendon, par de très fortes variations de salinité, notamment en zone traitée (minimum de 3,9 g/L et maximum de 57,2 g/L). Le pourcentage de saturation en O₂ dissous est également très variable dans les deux zones (de 30% à 220% dans la zone traitée), ce qui indique l'existence de fortes contraintes environnementales pour la faune aquatique. La température maximale de l'eau est inférieure à celle de Locol-Mendon (20°C au maximum dans la zone témoin), mais le pH est plus variable (de 5,5 à 9,2 dans la zone témoin).

Aucune des moyennes annuelles des différents paramètres n'était significativement différente entre les deux zones.

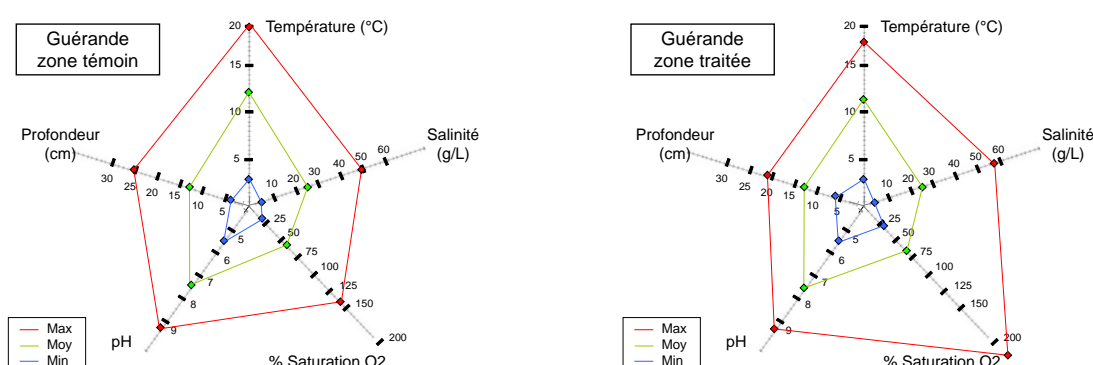


Figure 22. Représentation des valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station de Guérande
(Max : valeur maximale annuelle ; Min : valeur minimale annuelle ; Moy : moyenne annuelle).

4.1.5.2. Communautés d'invertébrés aquatiques non-cibles

4.1.5.2.1. Abondance totale

La figure 23 présente l'évolution de l'abondance totale des communautés au cours du suivi. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

4.1.5.2.2. Richesse taxonomique

La figure 24 présente l'évolution des valeurs moyennes de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Guérande au cours du suivi. Le test des GLMM ne met pas en évidence d'interaction temps \times zone de

prélèvement, ni d'effet temps, mais un effet zone significatif ($p = 0,018$). L'analyse date par date montre que la richesse était significativement plus élevée dans la zone témoin que dans la zone traitée à 3 reprises au cours du suivi, durant les étés 2012 ($p = 0,031$) et 2013 ($p < 0,001$ et $p = 0,023$).

4.1.5.2.3. Indice de Shannon

Pour ce qui est de l'évolution des valeurs moyennes de l'indice de diversité de Shannon des communautés d'invertébrés dans la station de Guérande (Fig. 24), l'analyse des GLMM ne met en évidence aucune interaction temps \times zone de prélèvement, ni aucun effet de la zone de prélèvement ou du temps au cours du suivi.

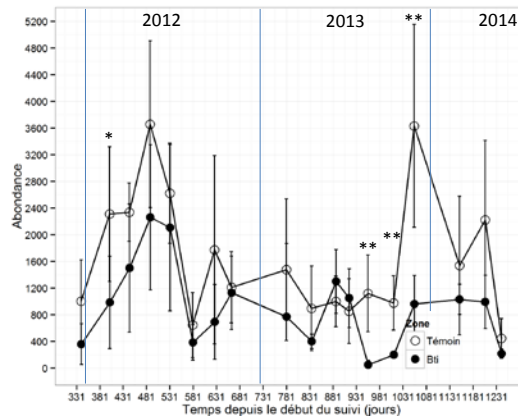


Figure 23. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'abondance totale des invertébrés des prélèvements (carotte + surnageant) des zones témoin et traitée de la station Guérande (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$).

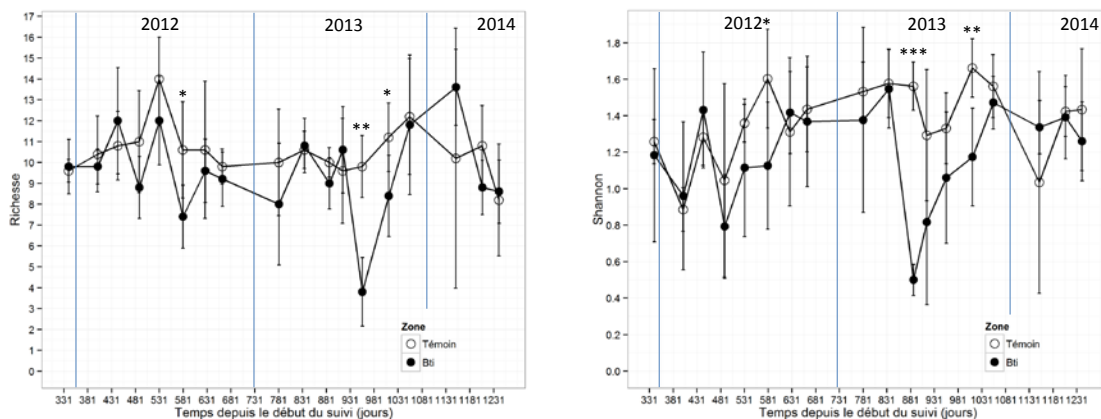


Figure 24. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de la richesse taxonomique (à gauche) et de la diversité taxonomique (indice de Shannon, à droite) des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Guérande (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$, *** : $p < 0,001$).

4.1.5.2.3. Indice de Pielou

La figure 25 présente l'évolution des valeurs moyennes de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Guérande. L'analyse des GLMM montre une interaction temps \times zone de prélèvement significative ($p = 0,04$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

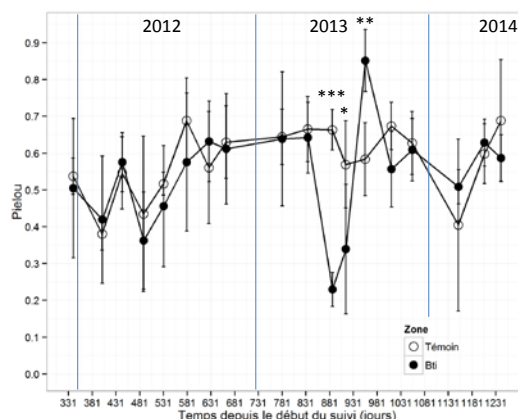


Figure 25. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Guérande.

4.1.5.3. Courbe de réponse principale

L'analyse de redondance montre que le temps et la zone de prélèvement expliquent respectivement 46,5% et 19,8% de la variance des communautés. Le premier axe de la RDA (Fig. 26) représente 21,6% de la variabilité totale de la communauté. Le test de permutation de Monte Carlo montre un effet zone très significatif sur l'ensemble de la période d'étude ($p = 0,005$). L'analyse date par date montre des différences significatives entre les deux zones pour la plupart des dates d'échantillonnage.

Les principaux groupes contribuant à ces différences sont visibles sur l'axe des b_k (valeur absolue de b_k supérieure à 0,5). Huit groupes étaient moins abondants dans la zone traitée (groupes de signe positif sur la figure 26) et deux y étaient plus abondants (groupes de signe négatif sur la figure 26).

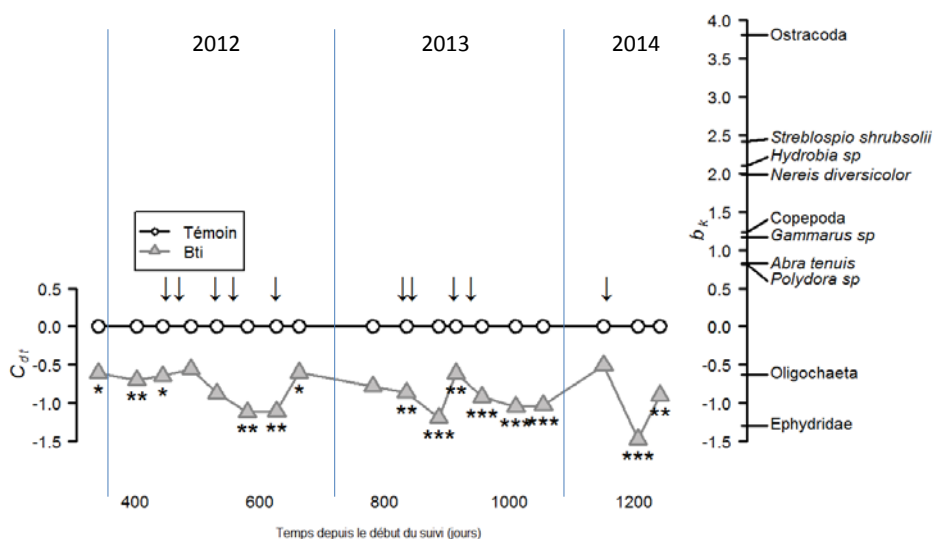


Figure 26. Première courbe de réponse principale des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Guérande (les flèches représentent les dates de traitement).

4.1.6. Site de Mornac-sur-Seudre (Charente Maritime)

4.1.6.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus pour les paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitées de la station de Mornac-sur-Seudre sont présentés sur la figure 27. Les conditions qui règnent dans les deux zones sont comparables, sauf pour l' O_2 dissous, dont la concentration était très significativement plus faible dans la zone témoin en 2011 (mais pas le % de saturation).

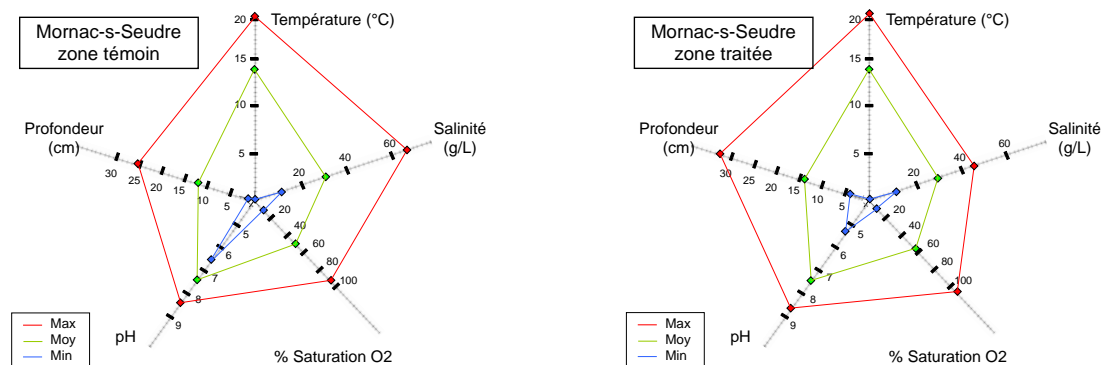


Figure 27. Représentation des valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques mesurés dans les zones témoin et traitée de la station de Mornac-sur-Seudre (Max : valeur maximale annuelle ; Min : valeur minimale annuelle ; Moy : moyenne annuelle).

4.1.6.2. Communautés d'invertébrés aquatiques non-cibles

4.1.6.2.1. Abondance totale

La figure 28 présente l'évolution de l'abondance totale des communautés au cours du suivi. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

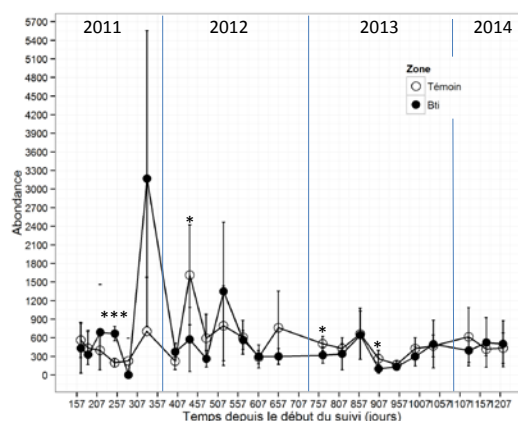


Figure 28. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'abondance totale des invertébrés dans les prélèvements (carotte + surnageant) des zones témoin et traitée de la station Mornac-sur-Seudre.

4.1.6.2.2. Richesse taxonomique

La figure 29 présente l'évolution des valeurs moyennes de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Mornac-sur-Seudre au cours du suivi. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps \times zone de prélèvement significative ($p < 0,025$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

4.1.6.2.3. Indice de Shannon

En ce qui concerne l'évolution des valeurs moyennes de l'indice de diversité de Shannon des communautés d'invertébrés de la station de Mornac-sur-Seudre (Fig. 29), le test des GLMM montre une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

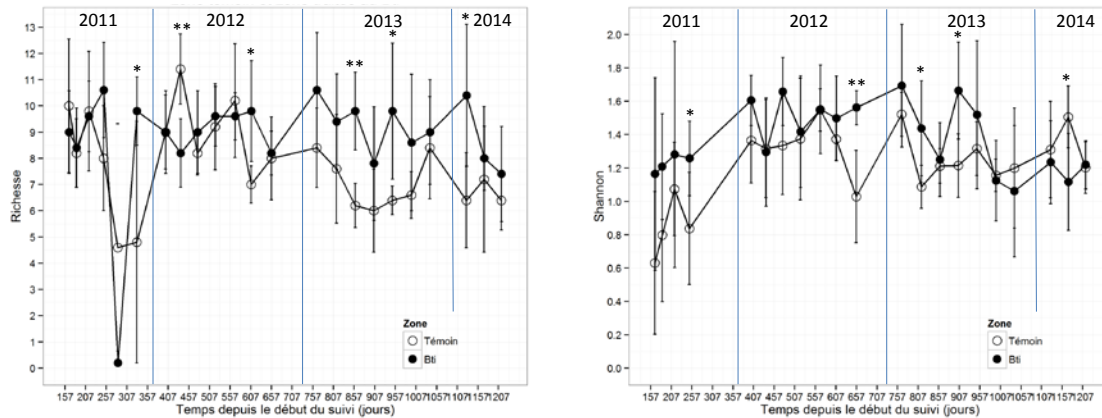


Figure 29. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de la richesse taxonomique (à gauche) et de la diversité taxonomique (indice de Shannon, à droite) des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Mornac-sur-Seudre (différence significative, *: $0,01 < p < 0,05$, **: $0,001 < p < 0,01$).

4.1.6.2.3. Indice de Pielou

La figure 30 présente l'évolution des valeurs moyennes de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés dans les deux zones (témoin et traitée) de la station de Mornac-sur-Seudre. Sur l'ensemble de la période, le test des GLMM montrent une interaction temps \times zone de prélèvement très significative ($p < 0,001$), qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement sur la période.

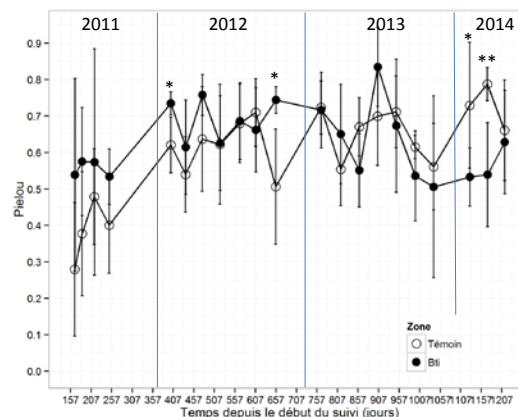


Figure 30. Evolution dans le temps des valeurs moyennes (\pm écart type) de l'indice d'équitabilité de Pielou des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Mornac-sur-Seudre.

4.1.6.3. Courbe de réponse principale

L'analyse de redondance (RDA) montre que le temps et la zone de prélèvement expliquent respectivement 35,6% et 22,8% de la variance totale des communautés. Le premier axe de la RDA (Fig. 31) représente 20,65% de la variabilité totale de la communauté. Le test de permutation de Monte Carlo montre un effet très significatif du traitement sur l'ensemble de la période d'étude ($p = 0,005$). L'analyse date par date montre qu'une première différence très significative ($p < 0,001$) apparaît lors de la quatrième campagne de prélèvements en 2011. A partir de ce moment, à l'exception de la cinquième campagne de 2011 et de la quatrième de 2012, les communautés des deux zones sont systématiquement significativement différentes jusqu'à l'avant dernière campagne de 2013 incluse. Depuis, aucune différence significative n'a été mise en évidence.

Les principaux groupes contribuant à ces différences sont visibles sur l'axe des b_k (valeur absolue de b_k supérieure à 0,5). Cinq groupes étaient moins abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin (groupes de signe négatif sur la figure 31) et cinq étaient plus abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin (groupes de signe positif sur la figure 31).

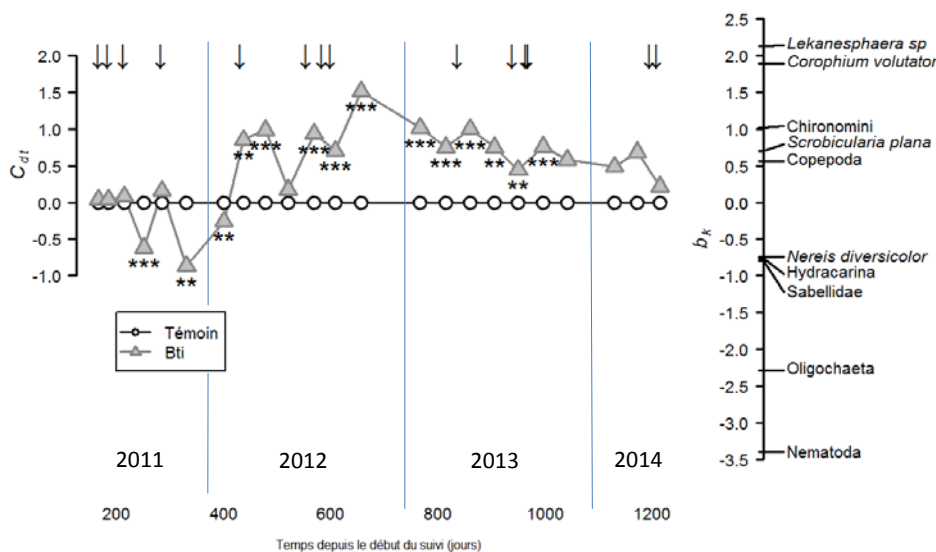


Figure 31. Première courbe de réponse principale des communautés d'invertébrés des zones témoin et traitée de la station de Mornac-sur-Seudre (les flèches représentent les dates des traitements).

4.2. Analyses sur les groupes d'invertébrés d'intérêt particulier

4.2.1. Chironomes

Phylogénétiquement relativement proches des moustiques, les chironomes présentent, dans les tests de laboratoire, une certaine sensibilité au *Bti*, ce qui justifie de s'intéresser d'un peu plus près à ce groupe d'insectes. L'analyse de résultats de tests de toxicité montre toutefois que les larves de la plupart des espèces de chironomes sont beaucoup moins sensibles (d'un facteur 425 environ) au *Bti* que les larves de moustiques (Tableau 3).

Tableau 3. Sensibilité comparée au *Bti* pour les chironomidae et les culicidae
(données de tests de toxicité aiguë en laboratoire, publiées dans la littérature)

CL₅₀ : concentration létale pour 50% des individus exposés au *Bti* ; UTI : Unité Toxique Internationale

Famille	Taxon	CL ₅₀ (UTI)
Chironomidae	<i>Chironomus salinarius</i>	16118
	<i>Chironomus spp.</i>	12200
	Chironominae other	10359
	<i>Cryptotopus</i>	10359
	<i>Dicrotendipes</i>	10359
	<i>Orthocladus</i>	9000
	Orthocladinae other	31500
	<i>Psectrotanypus</i>	6215
	<i>Smittia</i>	54000
	Tanypodinae other	7143
Culicidae	Culicidae all	37

Parmi les diptères nématocères, à l'exception des culicidae, seuls les chironomidae font partie de la faune présente dans toutes les stations. Sur les cinq PRC réalisées, les Chironomini à Olonne-sur-Mer, les Tanypodinae à Mornac-sur-Seudre et ces deux taxons à Budos étaient plus abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin (Fig. 7, 12 et 31). Pour les stations de Locoal-Mendon et de Guérande, les PRC montrent que l'abondance des Chironomini n'est pas significativement différente entre zone témoin et zone traitée (valeur absolue de b_k inférieure à 0,5 ; Fig. 21 et 26).

L'examen des données d'abondance des chironomini dans l'ensemble des stations (Fig. 32) montre que les variations entre zone témoin et zone traitée sont synchrones, et qu'il n'y a pas de tendance à l'appauvrissement en larves de chironomes dans les zones traitées. Dans certains cas,

comme par exemple à Mornac-sur-Seudre ou à Budos, ce taxon est même plus abondant dans la zone traitée, confirmant les résultats des PRC évoqués précédemment.

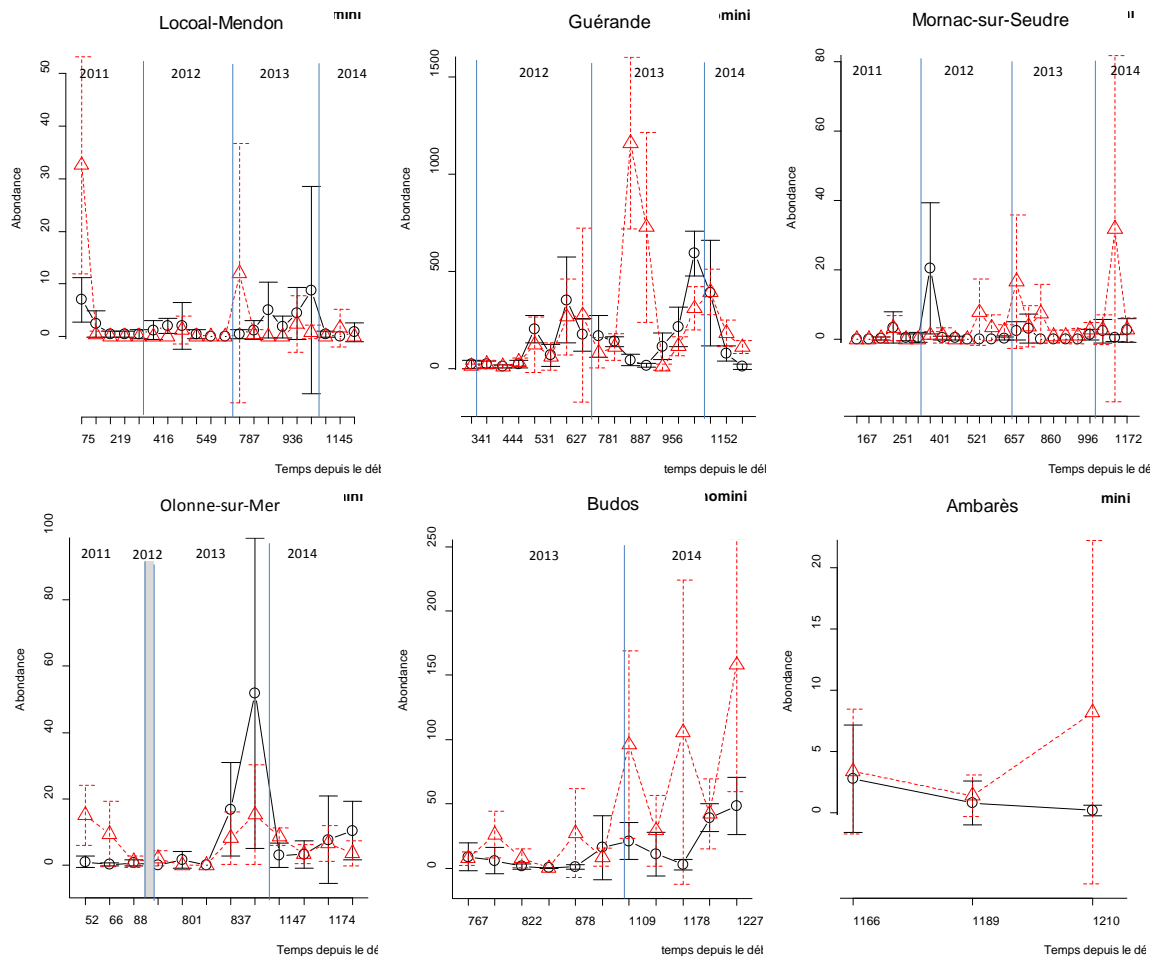


Figure 32. Variations de l'abondance moyenne des chironomini dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de chacune des stations.

4.2.2. Groupes dominants

Ont été considérés comme dominants les groupes taxonomiques dont l'abondance dans les prélèvements est supérieure à 5% de l'abondance totale des taxons. En général, quelle que soit la station considérée, ces taxons représentent plus de 80% de l'abondance taxonomique totale. Ces groupes dominants sont ceux qui, potentiellement, représentent la ressource alimentaire majeure au sein d'une zone, qu'elle soit traitée ou témoin. Les chironomes, dont l'abondance dans chaque station a été présentée et discutée ci-dessus, n'ont pas été pris en compte dans ce qui suit. Dans toutes les stations, à l'exception d'Ambarès, leur abondance dépasse 5% de l'abondance taxonomique totale ; ils représentent donc un taxon dominant.

Dans toutes les stations, certaines espèces d'invertébrés non-cibles peuvent constituer, de par leur abondance ou biomasse, une ressource alimentaire pour les vertébrés, comme par exemple les poissons et les oiseaux. C'est le cas des ostracodes et des nématodes dans les stations d'eau douce (Olonne-sur-Mer et Budos). A ces groupes communs aux deux stations viennent s'ajouter les copépodes et cladocères dans la station d'Olonne-sur-Mer ainsi que les oligochètes et les larves de *Dasyheleinae* et de *Chironomini* dans la station de Budos. Dans les stations sous influence marine (Locoal-Mendon, Guérande et Mornac-sur-Seudre), *Nereis diversicolor*, *Hydrobia* sp., les ostracodes et, dans une moindre mesure, les larves de *Chironomini* représentent invariablement les taxons

pouvant entrer dans le régime alimentaire de poissons et invertébrés. D'autres taxons, comme les nématodes, les oligochètes, les larves de *Capitellidae* et *Corophium* sp., peuvent également constituer, dans certaines de ces stations, une ressource alimentaire pour les poissons et les oiseaux.

De la même manière que pour les chironomes, l'examen des variations au cours du temps de l'abondance des taxons dominants ne montre pas d'appauvrissement dans les zones traitées (Fig. 33 à 38). Dans la très grande majorité des cas, les variations sont synchrones entre zones témoin et zone traitée. Dans certains cas, pour un même taxon, l'abondance est plus élevée dans la zone témoin au cours d'une année, puis dans la zone traitée au cours de l'année suivante, sans que se dégage de tendance particulière sur l'ensemble de la période de suivi. Les variations sont donc aléatoires, et indépendantes de la présence de *Bti*.

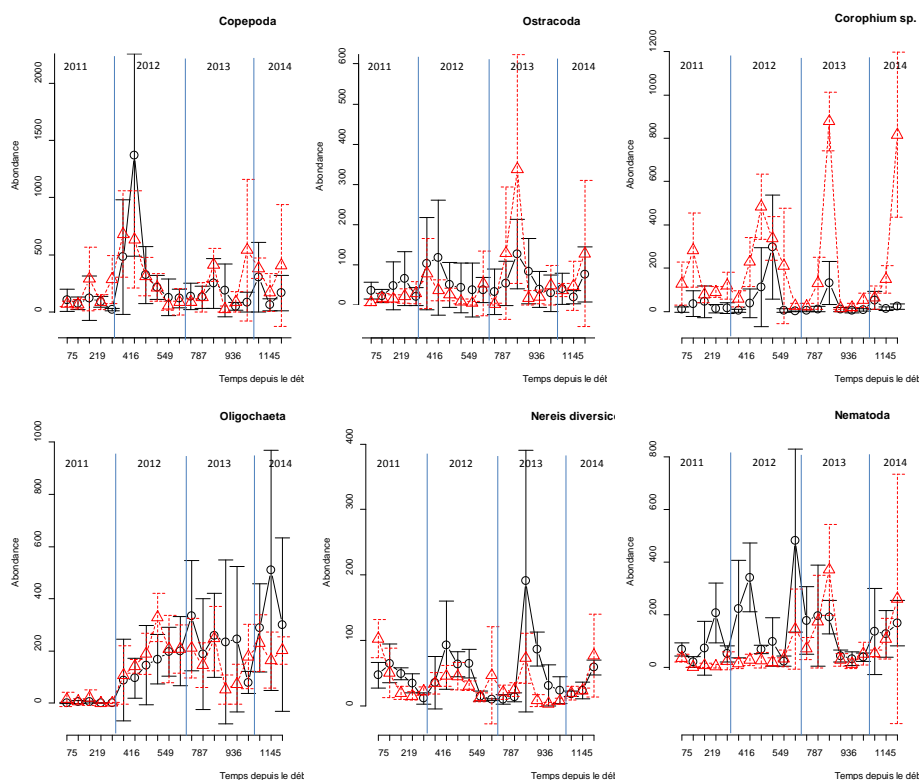


Figure 33. Variation de l'abondance moyenne des taxons dominants (abondance > 5% de l'abondance taxonomique totale) dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de la station de Locol-Mendon.

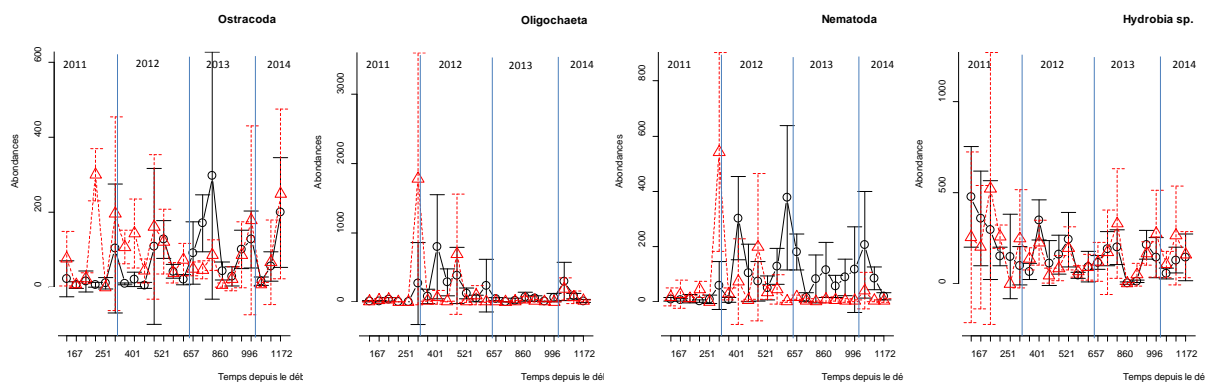


Figure 34. Variation de l'abondance moyenne des taxons dominants (abondance > 5% de l'abondance taxonomique totale) dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de la station de Mornac-sur-Seudre.

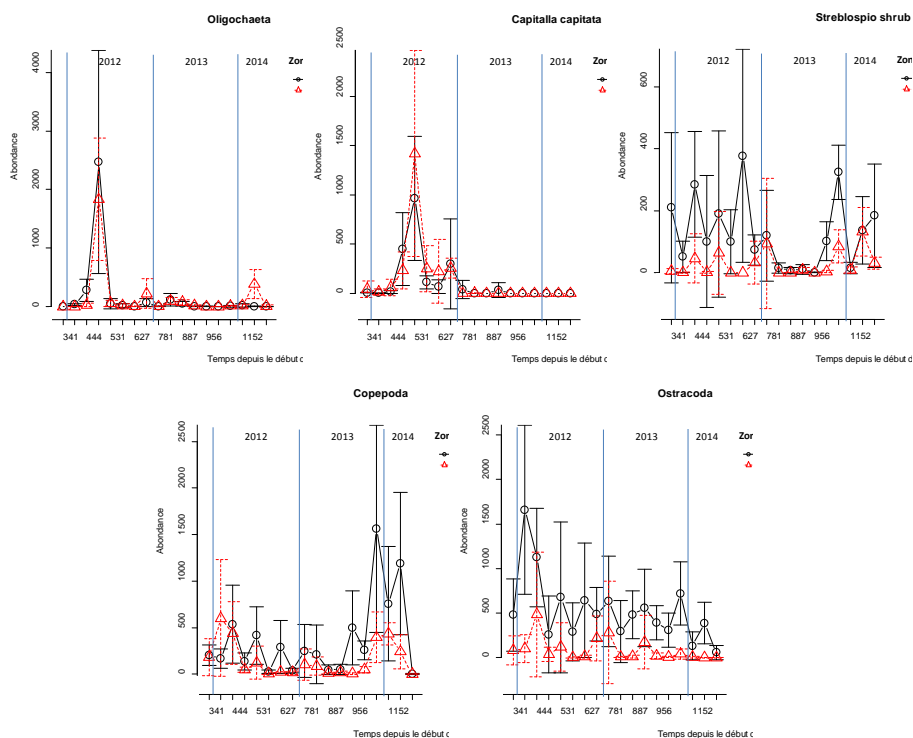


Figure 35. Variation de l'abondance moyenne des taxons dominants (abondance > 5% de l'abondance taxonomique totale) dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de la station de Guérande.

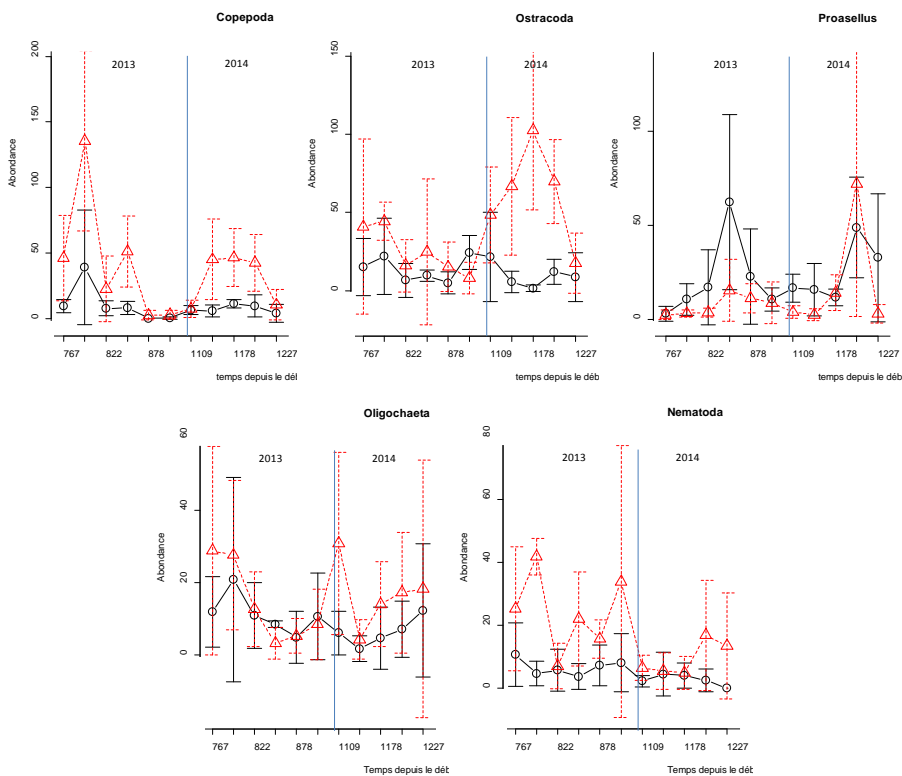


Figure 36. Variation de l'abondance moyenne des taxons dominants (abondance > 5% de l'abondance taxonomique totale) dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de la station de Budos.

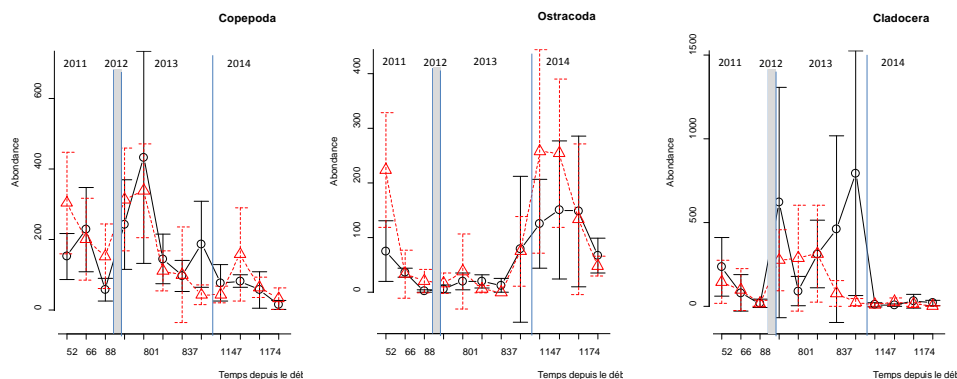


Figure 37. Variation de l'abondance moyenne des taxons dominants (abondance > 5% de l'abondance taxonomique totale) dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de la station d'Olonne-sur-Mer.

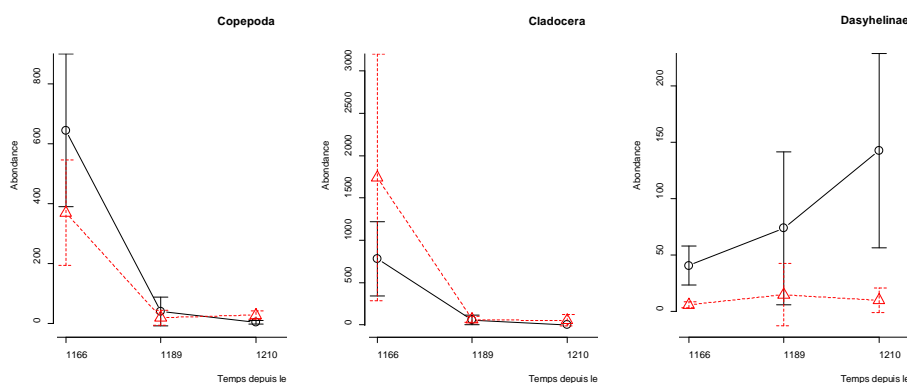


Figure 38. Variation de l'abondance moyenne des taxons dominants (abondance > 5% de l'abondance taxonomique totale) dans les prélèvements d'invertébrés réalisés dans les zones témoin (○) et traitée (△) de la station d'Ambarès.

5. Synthèse des résultats et conclusions préliminaires

5.1. Synthèse des résultats

Les données recueillies sur la période 2011-2014 dans les stations d'études réparties sur l'ensemble des secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique ne montrent pas d'effets du VectoBac® sur les communautés d'invertébrés aquatiques non cibles (Tableau 4). Dans aucune des stations, l'abondance globale n'a permis de mettre en évidence un effet du traitement, du fait d'interactions temps × zone de prélèvement trop importantes. Dans toutes les stations, les effectifs connaissent en effet d'importantes fluctuations dans le temps et ce, d'une manière complètement aléatoire selon la zone (témoin ou traitée) considérée. Les événements de recrutement, qu'il s'agisse d'animaux immigrants à la faveur d'une grande marée ou du débordement d'une rivière, de pontes par des insectes allochtones, ou du succès reproducteur des animaux en place, peuvent expliquer ces grandes variations.

L'effet de la zone de prélèvement sur la richesse taxonomique a pu être testé avec succès sur quatre des six stations. A Locoal-Mendon et à Guérande, la zone témoin était significativement plus riche que la zone traitée pour un 1/4 des dates d'échantillonnage pour la première station et dans 1/6^{ème} des dates d'échantillonnage pour la seconde. Dans le cas de Guérande, deux des trois dates en question correspondent à la période qui a suivi l'assèchement déclenché au cours de l'été 2013. Pour la station de Budos, en revanche, c'est la zone traitée qui était plus riche que la zone témoin pour un

tiers des dates d'échantillonnage. Toutefois, cette différence était visible dès le début du suivi. Enfin, aucune différence entre les deux zones n'a été visible à Ambarès.

L'effet de la zone de prélèvement sur les indices de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou a pu être testé avec succès dans cinq des six stations. Pour chaque indice, dans 3 stations, aucune différence significative entre zone témoin et zone traitée n'a pu être mise en évidence. Dans les deux stations où des différences significatives ont pu être mises en évidence, il ne s'agissait que de dates isolées et/ou d'un signal difficile à interpréter. Ainsi, à Locol Mendon, la zone témoin a une valeur d'indice plus élevée que la zone traitée 3 fois au cours du suivi contre une date où la zone traitée a obtenu un meilleur score. Inversement, l'indice de Pielou a mis en évidence deux dates où la zone traitée avait une communauté plus équilibrée que la zone témoin contre une seule date où les résultats étaient inversés. A Guérande, l'indice de Pielou a été à deux reprises supérieur dans la zone témoin par rapport à la zone traitée et une fois l'inverse. Dans le même temps, l'indice de Shannon ne montrait pas de différence significative sur la diversité de ce même site. Enfin, à Olonne-sur-mer, bien que l'indice de Shannon ait présenté une différence significative sur la période de suivi, seules deux dates montraient une différence significative entre les zones, une fois en faveur de la zone témoin et l'autre en faveur de la zone traitée.

Tableau 4. Synthèse des résultats des analyses statistiques sur les métriques caractérisant les communautés d'invertébrés non-cibles dans les stations d'étude sur la période 2011-2014.

S, richesse taxonomique ; H', indice de diversité de Shannon ; J, indice d'équitabilité de Pielou ; PRC, Courbe de Réponse Principale.

Pour chaque site, la première ligne donne le résultat du test global : « p » probabilité que la différence observée soit due au hasard (uniquement quand $p < 0,05$) ; « N.S. » test non significatif ($p > 0,05$) ; « N.A. » test non approprié ; « - » test montrant une interaction significative temps \times zone de prélèvement qui ne permet pas de conclure quant à l'effet du traitement. La seconde ligne donne, pour S, H' et J, le nombre de dates où la valeur de l'indice est plus élevée (valeur de gauche) ou moins élevée (valeur de droite) dans la zone témoin que dans la zone traitée. Pour la PRC, il s'agit du nombre de taxons dont la valeur absolue de b_k est supérieure à 0,5 et pour lesquels l'abondance est plus élevée (valeur de gauche) ou moins élevée (valeur de droite) dans la zone témoin que dans la zone traitée.

Station	S	H'	J	PRC
Locol-Mendon	p = 0,018	p = 0,008	p = 0,039	p = 0,005
	5/0	3/1	1/2	6/4
Guérande	p = 0,018	N.S.	p = 0,04	p = 0,005
	3/0	-	2/1	8/2
Mornac-sur-Seudre	-	-	-	p = 0,005
	-	-	-	5/5
Olonne-sur-Mer	-	p = 0,01	N.S.	p = 0,005
	-	1/1	-	7/6
Budos	p = 0,025	N.S.	N.S.	p = 0,005
	0/4	-	-	1/13
Ambarès	N.S.	N.S.	N.S.	-
	-	-	-	-

Les indices de structure des communautés ne mettent donc pas clairement en évidence d'effet du traitement, mais seulement des différences ponctuelles entre les deux zones. Ces différences ne surviennent d'ailleurs pas toujours durant les périodes de traitement des stations, mais souvent en période estivale, pour les stations d'eau saumâtre, quand le niveau de l'eau baisse et que la salinité augmente. Dans la station de Locol-Mendon, l'évolution temporelle des communautés en 2012, 2013 et 2014 est la même les deux zones : la richesse et l'abondance augmentent au printemps, puis déclinent durant l'été. C'est souvent à cette période que la zone traitée enregistre les principaux écarts avec la zone témoin car, dans cette station, la hauteur d'eau est plus faible dans la zone traitée

que dans la zone témoin. En période estivale, la zone traitée est donc davantage sujette aux assèchements. Ces résultats confirment ce qui avait déjà été constaté lors des premières années du suivi dans cette station²⁵.

L'examen global de la composition des communautés fait, en revanche, ressortir d'importantes différences entre les zones témoin et traitées, tout au long du suivi et sur l'ensemble des stations.

Pour les stations de Locoal-Mendon, de Guérande et de Budos, la différence entre les communautés des zones témoin et traitées semble principalement s'expliquer par des taxons en plus grand nombre dans l'une des deux zones (témoin pour Locoal-Mendon et Guérande et traitée pour Budos). Ces stations sont aussi celles où l'on observe une plus grande richesse taxonomique dans la même zone. Les taxons présents uniquement dans ces zones sont donc forcément plus abondants que dans la zone où on ne les trouve presque pas, même si leur effectif peut parfois être faible. A Locoal-Mendon, les groupes qui "pèsent" le plus dans l'analyse, en étant plus fréquemment retrouvés et/ou en plus grand nombre dans la zone témoin, représentent tous moins de 5% des animaux échantillonnés au cours du suivi, à l'exception des nématodes qui représentent 13,4% des captures. En revanche, les *Corophium*, dont l'évolution s'approche le plus de celle décrite sur la PRC (plus haut score absolu de b_k), représentent l'un des taxons largement plus abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin. Il s'agit du troisième taxon le plus fréquemment trouvé dans cette station (15,9% des effectifs comptés). A Guérande, en revanche, quatre des taxons les plus abondants (Ostracodes 24,3%, copépodes 20,4%, oligochètes 12,8% et *Streblospio shrubsoli* 6,1%) comptent parmi ceux ayant le plus d'influence sur la PRC, dont trois en étant plus rares dans la zone traitée que dans la zone témoin. De même, à Budos, les trois taxons qui pèsent le plus dans l'analyse de redondance sont aussi les trois taxons dominants. Il s'agit des Chironomini (19,6%), des ostracodes (17,6%) et des copépodes (15,1%), mais ils sont ici plus abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin. Le seul taxon dont le score absolu de b_k est supérieur à 0,5 et qui a davantage été retrouvé dans la zone témoin fait aussi partie des taxons les plus abondants de cette station où les *Proasellus* représentent en effet 11,5% des captures.

A Mornac-sur-Seudre et à Olonne-sur-Mer, le nombre de taxons dont le score de b_k dépasse 0,5 est plus équilibré de part et d'autre du zéro. Toutefois, à Mornac-sur-Seudre, deux des taxons moins abondants dans la zone traitée que dans la zone témoin comptent parmi les taxons dominants (Oligochètes 24,6% et Nématodes 13,1%) tandis que ceux plus abondants dans la zone traitée sont plus marginaux (< 5%). On observe la même tendance à Olonne-sur-Mer où deux des taxons plus abondants dans la zone témoin que dans la zone traitée comptent parmi les taxons dominants de la station (Cladocères 33,8% et Ostracodes 15,9%) tandis qu'on n'en compte aucun parmi ceux plus abondants dans la zone traitée.

5.2. Conclusions préliminaires

Cette étude à large échelle, réalisée dans les habitats prioritaires (*sensu* Natura 2000) dominants dans l'ensemble des secteurs d'intervention de l'EID-Atlantique, montre des variations de la composition des communautés d'invertébrés aquatiques, ainsi que de leur richesse et leur diversité, entre les zones de prélèvement (zone témoin *versus* zone traitée) d'une même station. Ces variations sont cependant indépendantes de la présence de *Bti*, confirmant les résultats des études réalisées précédemment dans les zones humides atlantiques²⁵, ou dans les secteurs d'interventions d'autres opérateurs publics de démoustication²⁶.

Les différences de faune invertébrée observées entre zones témoins et traitées au cours du suivi peuvent généralement s'expliquer par certains événements naturels comme les assèchements ou les

²⁵Lagadic L, Roucaute M, Caquet Th. 2014. *Bti* sprays do not adversely affect non-target aquatic invertebrates in French Atlantic coastal wetlands. *Journal of Applied Ecology* 51, 102-113.

²⁶Roucaute M, Harnois S, Louis-Jean L, Bertrand C, Fayolle S, Garnier R, Daubercies A, Simonnet I, Lagadic L, Franquet E, Caquet Th. 2013. Etude d'indices biocénétiques et de biodiversité sur les communautés d'invertébrés aquatiques. Programme IMCM LIFE 08 ENV/F/000488, Tâche 5.1, Rapport Final, 62 p.

remises en eau. En effet, ceux-ci se produisent parfois de manière sensiblement différente entre la zone témoin et la zone traitée au sein d'une même station. Ainsi, dans la station de Mornac-sur-Seudre, qui est la plus sujette aux assèchements, la zone traitée était plus souvent à sec que la zone témoin en 2011. En 2012 et 2013, en revanche, c'est la zone témoin qui s'est asséchée le plus souvent, expliquant qu'entre 2011 et la période 2012-2014, la PRC ait changé de signe (Fig. 31).

D'une manière générale, les résultats exposés dans le présent rapport montrent que la plupart des espèces dont l'abondance est plus faible dans la zone traitée ne sont pas sensibles au *Bti* (cf. PRC, Fig. 7, 12, 21, 26 et 31). C'est le cas, par exemple, des ostracodes qui sont parmi les groupes moins abondants en zone traitée qu'en zone témoin à Olonne-sur-mer. Des tests de toxicité avec le *Bti* ont été conduits sur ce groupe de crustacés. Ils ont mis en évidence des seuils de toxicité aiguë 20 fois supérieurs à ceux des chironomes et près de 10000 supérieurs à ceux des Culicidae²⁷. Cette observation, et le fait que les ostracodes soient parmi les groupes les plus abondants dans la zone traitée à Budos, montrent que les traitements au *Bti* ne sont vraisemblablement pas la cause des différences observées entre zone témoin et zone traitée.

Il en est de même pour les chironomes qui, malgré leur relative proximité phylogénétique avec les moustiques, sont environ 425 fois moins sensibles que ces derniers au *Bti*. La présente étude montre, une fois de plus, que l'abondance des chironomes n'est pas affectée par la présence de *Bti*. Dans certains cas, les larves de chironomes sont même sensiblement plus abondantes dans la zone traitée (cf. stations de Mornac-sur-Seudre et Budos ; Fig. 32). Cette observation, déjà réalisée au cours d'études antérieures dans le Morbihan²⁵ ou dans les Bouches-du-Rhône²⁶ (études réalisées par des scientifiques d'instituts différents), n'est vraisemblablement pas le fruit du hasard. En effet, les larves de chironomes ont des relations "mangeurs-mangés" comparables à celles des larves de moustiques. Lorsque les larves de moustiques sont éliminées suite aux traitements au VectoBac, leur niche écologique laissée vacante peut potentiellement être occupée par les larves de chironomes. De ce fait, la biomasse de nourriture disponible pour les prédateurs varierait peu²⁸. L'absence d'effet toxique direct chez des taxons potentiellement sensibles au *Bti*, rend donc peu probable l'hypothèse d'effets indirects en cascade dans les chaînes alimentaires.

²⁷ Aguilar-Alberola JA & Mesquita-Joanes F. 2012. Acute Toxicity Tests with Cadmium, Lead, Sodium Dodecyl Sulfate, and *Bacillus thuringiensis* on a Temporary Pond Ostracod. *International Review of Hydrobiology*, 97, 375-388.

²⁸ Heurteaux P. 1999. À propos des moustiques de Camargue... et de la démoustication. *Le Courrier de la Nature* 177, 17-21.

Annexe 1

Fiches descriptives des stations



Descriptif de la station de Locoal-Mendon

Morbihan

Suivi de l'habitat « Prés salés atlantiques »

Référent : Benoît Le Hunsec (06.71.65.97.78)

Département : Loire-Atlantique

N° du site Natura 2000 : FR 5300028

Commune : Locoal-Mendon

Lieux Dit : Pen er Pont

Cadastre : Non cadastré

Propriétaire : Domaine public maritime

N° du vecteur @tlantis : Lock1g3

Données techniques :

Année d'intervention sur le site : 1998. Site de référence pour le Morbihan.

Surface d'intervention (surface du vecteur): 2Ha 31

Surface de la zone traitée : 0ha28

Surface de la zone témoin : 0ha1

Nature de la mise en eau : Pluviale ou marine

Espèces présentes : *Aedes detritus* et *Aedes caspius*

Nombre de traitement par an sur les dernières années : entre 6 et 9

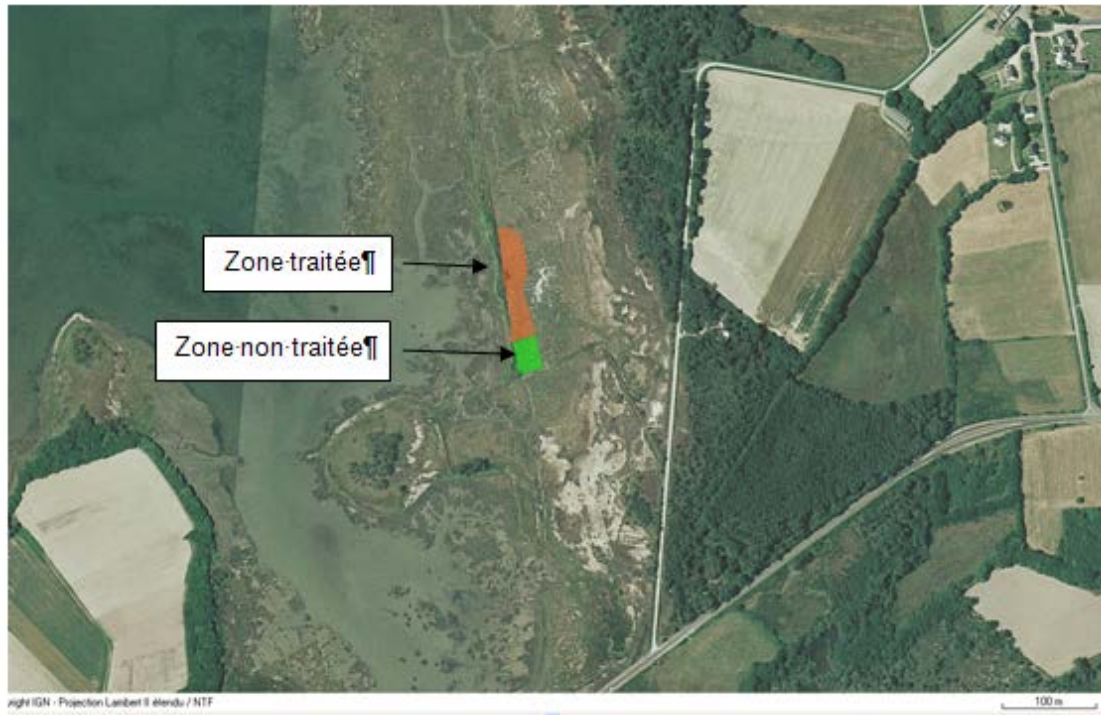
Produits utilisés précédemment sur le site : 1997 à 2005 Vectobac 12 AS, de 2004 à 2011 du Vectobac WG.

Localisation du site :





Localisation des zones témoin et traitée :



Visuel :

Zone témoin :



Zone traitée :





Descriptif de la station de Guérande

Loire-Atlantique

Suivi de l'habitat « Lagunes côtières »

Référent : Marc Rozec (06.83.84.99.17)

Département : Loire-Atlantique

N° du site Natura 2000 : SIC fr 5200627 –ZPS 5210090

Commune : Guérande

Lieux Dit : Saline Grande Brunette

Cadastre : Section Q2 N°507 et 509

Propriétaire : Mr Loliero Jean Paul et Mme Rousseau (données cadastrales 2003)

Autorisation : Accord verbal des propriétaires

N° du vecteur @tlantis : gueB4g18 – gueB4g25

Données techniques :

Année d'intervention sur le site : 1990

Surface d'intervention (surface du vecteur):2ha30

Surface de la zone traitée : 0ha60

Surface de la zone témoin : 0h80

Distance entre les deux parcelles : 50m

Nature de la mise en eau : Pluviale ou marine

Espèces présentes : *A caspius*, *A detritus*

Nombre de traitement par an sur les dernières années : 6 à 9

Produits utilisés précédemment sur le site : 1990 à 2006 avec du Téméphos.

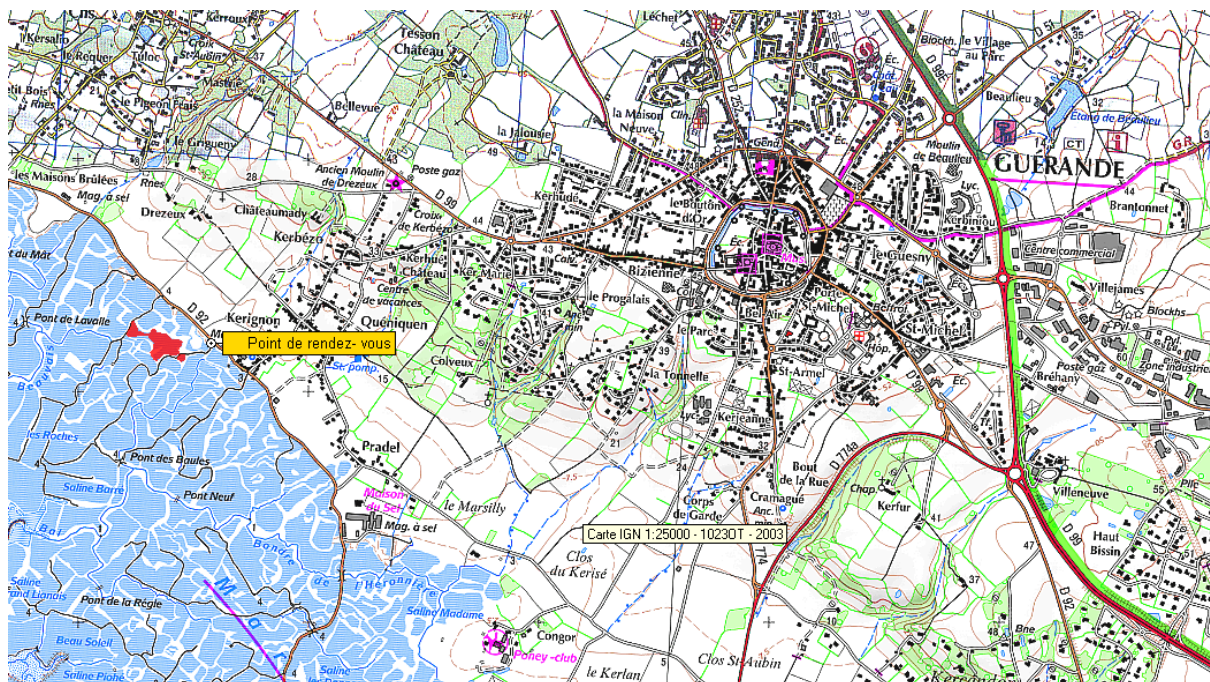
WG depuis cette date

Points particuliers :

Ex : piquetage réalisé (piquets avec tête verte pour la zone témoin et rouge pour la zone traité).

Points GPS: N 47°19'22, 6°W 002°47'46, 5' (LAT -LONG WGS84)

Localisation du site :





Localisation des zones témoin et traitée :



Visuel :

Zone témoin : le cobier Grande Brunette



Zone traitée : la saline Grande Brunette





Descriptif de la station d'Olonne-sur-Mer

Vendée

Suivi de l'habitat « Marais calcaire à *Cladium mariscus* et *Carex davallianae* »

Référent : Stéphane Averty (06.71.65.97.88)

Département : Vendée

N° du site Natura 2000 : FR5212010

Commune : Olonne sur mer

Lieux Dit : les Bourbes de l'Allerie

Cadastre : Parcelle 669-670 - Feuille 000 M 03

Propriétaire : M. Mornet 38 rue des vigneron 85340 Olonne sur Mer

Autorisation : Accord verbal du propriétaire

N° du vecteur @tlantys : OloC2g01

Données techniques :

Année d'intervention sur le site : Depuis 1974

Surface d'intervention (surface du vecteur): 13ha61

Surface de la zone traitée : 2a34

Surface de la zone témoin : 2a25

Distance entre les deux parcelles : 10 m

Nature de la mise en eau : Par les pluies

Espèces présentes : *Aedes rusticus*, *Culiseta subochrea*, *C. Annulata*, *C. litorea*, *A. cantans*

Nombre de traitement par an sur les dernières années : 1 à 2

Produits utilisés précédemment sur le site : Piridur, Abate 500°, Vectobac 12 AS, Vectobac WG

Points particuliers :

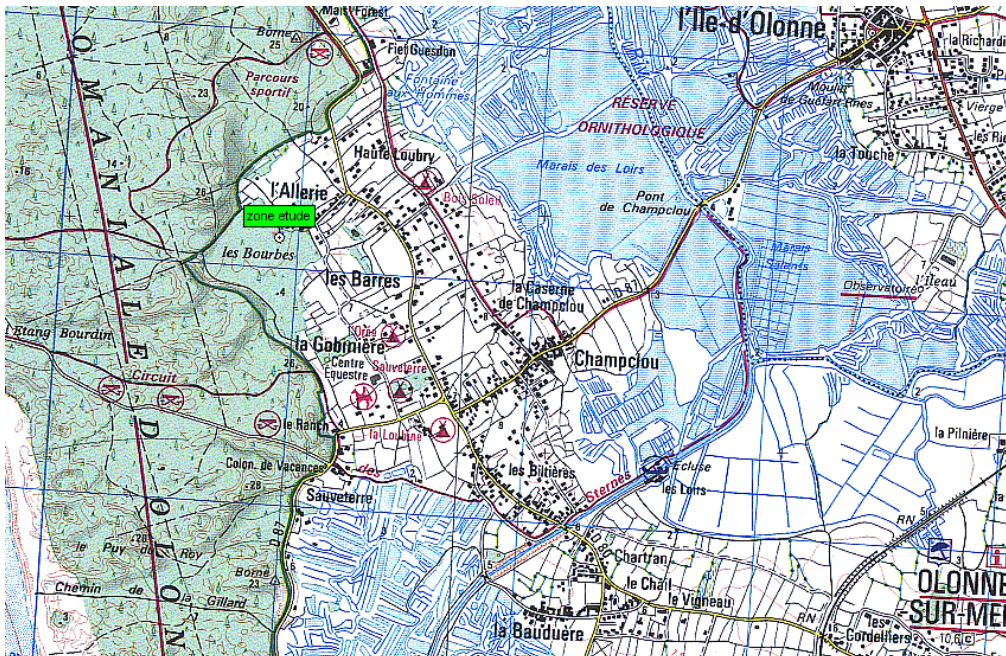
Ex : piquetage réalisé (piquets avec tête rouge pour la zone témoin et vert pour la zone traité).

Points GPS :

Zone sans traitement : N 46°33'10.1" W 001°48'50.4"

Zone traitée : N 46°33'09.7" W 001°48'51.6"

Localisation du site :





Localisation des zones témoin et traitée :



Visuel :

Zone témoin :



Zone traitée :





Descriptif de la station de Mornac-sur-Seudre

Charente-Maritime

Suivi de l'habitat « Lagunes côtières »

Référent : Bruno Boulétreau (06.83.84.99.24)

Département : Charente-Maritime

N° du site Natura 2000 : FR5400432 – MARAIS DE LA SEUDRE

Commune : Mornac-sur-Seudre

Lieux Dit : Grande Prise de la Laide

Cadastre : Feuille A2 - Parcelles n°696 et 697

Propriétaire : Conseil Général de la Charente-Maritime (Personne ressource : Estelle KERBIRIOU)

Autorisation : accord oral de Melle KERBIRIOU

N° des vecteurs @tlantis :

- zone témoin : mornAg0137
- zone traitée : mornAg0449

Données techniques :

Année d'intervention sur le site : 1991

Surface d'intervention (ensemble de gîtes larvaires à proximité) : 0,67 ha

Surface de la zone traitée : 0,018 ha

Surface de la zone témoin : 0,012 ha

Distance entre les deux parcelles : 45 m

Nature de la mise en eau : marine, arrivée directe par PVC ø315

Espèces présentes : *Aedes Oc. caspius*

Nombre de traitement par an sur les dernières années : en moyenne 8 fois/an

Produits utilisés précédemment sur le site : *Bti* (Bactimos®/Vectobac®TP de 1991 à 2006 et Vectobac®WG depuis 2006)

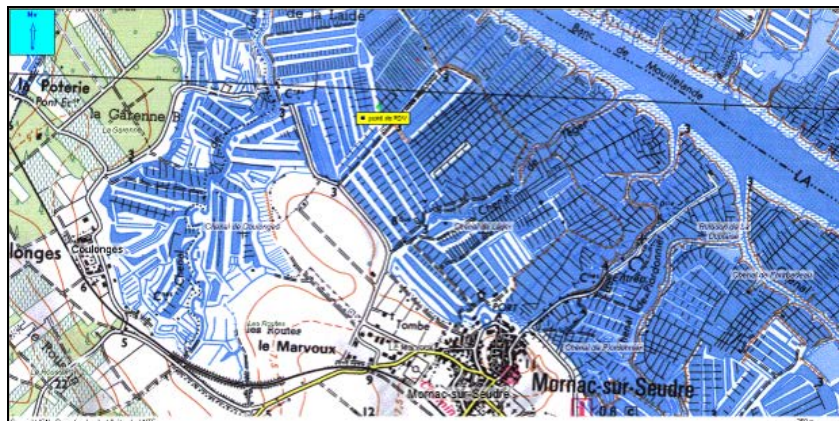
Points particuliers :

Ex : piquetage réalisé (piquets avec tête rouge pour la zone témoin et vert pour la zone traitée).

Points GPS :

- zone témoin = N 45°43'15.9" W 001°01'59.2" (LAT-LONG WGS84)
- zone traitée = N 45°43'14.8" W 001°02'00.5" (LAT-LONG WGS84)

Localisation du site :





Localisation des zones témoin et traitée :



Visuel :

Zone témoin :



Zone traitée :





Descriptif de la station de Budos

Gironde

Suivi de l'habitat « Boisement à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior* »

Référent : Courtin Christophe (06.83.84.99.13)

Département : Gironde

N° du site Natura 2000 : FR 720 06 93

Commune : Budos

Lieux Dit : Pourriere

Cadastre : B 1 568 ; B1 572 ; B1 571

Propriétaire :

M CARRERE 11, Mouliey 33 730 BALIZAC (572)

M D'AULAN, 19 Boutoc 33 210 PREIGNAC (568)

M PERIN, 34 route de Budos 33210 Pujols sur Ciron (571)

Autorisation : Accord verbal des propriétaires

N° du vecteur @tlantys : pour le gîte traité : bud B1g01

Données techniques :

Année d'intervention sur le site : 2009 (sécheresse en 2010).

Surface d'intervention (surface du vecteur): 11 969 m²

Surface de la zone traitée : 25 mètres carrés

Surface de la zone témoin : 25 mètres carrés

Distance entre les deux parcelles : 50 à 100 mètres

Nature de la mise en eau : Précipitations et débordement de fossés

Espèces présentes : *Culiseta sp*, *Aedes cantans*, *Aedes sticticus*

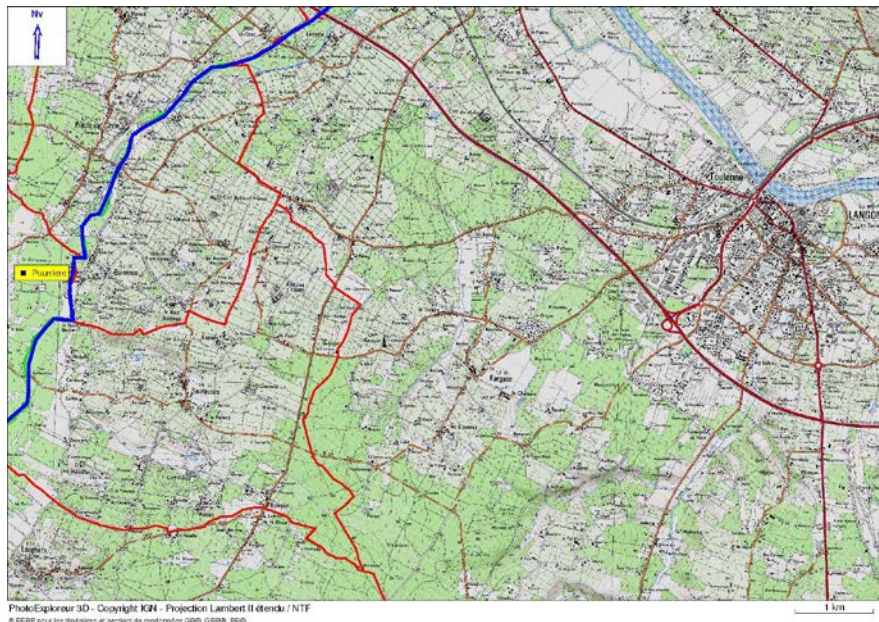
Nombre de traitement par an sur les dernières années : 1 à 2

Produits utilisés précédemment sur le site : Temephos, *Bti*

Points particuliers :

Ex : piquetage réalisé (piquets avec tête rouge pour la zone témoin et vert pour la zone traité).

Localisation du site :



Localisation des zones témoin et traitée :



Visuel :

Zone témoin :



Zone traitée :



Annexe 2

Listes faunistiques

Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés dans la station d'Olonne-sur-Mer (Vendée)

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille/sous-famille	Taxon	Densité moyenne sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Cladocera		Cladocera	9566	4581
Copepoda		Copepoda	6393	6711
Ostracoda		Ostracoda	2674	3987
Nematoda		Nematoda	1065	299
Annelida		Oligochaeta	884	140
Arachnida		Hydracarina	810	389
Diptera	Culicidae	Culicinae	559	325
Diptera	Chironomidae	Chironomini	346	263
Diptera		Brachycera	267	135
Isopoda	Asellidae	<i>Proasellus sp.</i>	124	347
Diptera	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae	108	4
Coleoptera	Dytiscidae	Hydroporinae	41	14
Trichoptera	Limnephilidae	Limnephilinae	37	51
Coleoptera	Scirtidae	Scirtidae	35	9
Diptera	Chironomidae	Tanypodinae	32	95
Diptera	Chironomidae	Orthocladiinae	29	26
Cnidaria	Hydrozoa	<i>Hydra sp.</i>	26	381
Diptera	Psychodidae	Psychodidae	17	9
Bivalvia	Sphaeridae	<i>Pisidium sp.</i>	15	138
Annelida	Erpobdellidae	<i>Erpobdella sp.</i>	14	1
Coleoptera	Dytiscidae	Colymbetinae	12	15
Coleoptera	Hydrophilidae	Hydrophilidae	12	9
Gastropoda	Physidae	<i>Aplexa hypnorum</i>	12	4
Plathelminthe	Plathelminthe	Plathelminthe	12	27
Trichoptera	Phryganeidae	<i>Trichostegia minor</i>	9	17
Gastropoda	Planorbiidae	Planorbidae autre	9	9
Diptera	Limoniidae	Limoniidae	6	12
Bivalvia	Sphaeridae	<i>Sphaerium sp.</i>	6	76
Gastropoda		Pulmonata autre	6	6
Odonata		Anisoptera	4	4
Gastropoda	Planorbiidae	<i>Planorbarius sp.</i>	3	9
Gastropoda	Physidae	<i>Physa sp.</i>	2	4
Gastropoda	Planorbiidae	<i>Bathyomphalus sp.</i>	1	56
Diptera	Ceratopogonidae	Dasyheleinae	0	1457
Gastropoda		Prosobrancha	0	13

Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés dans la station de Budos (Gironde)

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille/sous-famille	Taxon	Densité moyenne sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Isopodes	Asellidae	<i>Proasellus sp.</i>	1071	595
Diptera	Chironomidae	Chironomini	663	2161
Ostracoda		Ostracoda	563	1932
Copepoda		Copepoda	430	1752
Annelida		Oligochaeta	419	724
Bilvalvia	Sphaeriidae	<i>Pisidium sp.</i>	239	431
Nematoda		Nematoda	224	817
Arachnida		Hydracarina	135	254
Diptera	Ceratopogonidae	Dasyheleinae	97	249
Diptera		Brachycera autre	64	248
Diptera	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae	54	60
Trichoptera	Phryganeidae	<i>Trichostegia minor</i>	48	35
Amphipoda	Niphargidae	Niphargidae	44	27
Diptera	Chironomidae	Orthocladinae	38	70
Cnidaria	Hydrozoa	<i>Hydra sp.</i>	36	21
Bilvalvia	Sphaeriidae	<i>Sphaerium sp.</i>	36	61
Trichoptera	Limnephilidae	Limnephilini	25	9
Plecoptera	Nemouridae	<i>Nemoura sp.</i>	22	0
Diptera	Chironomidae	Chironomidae autre	16	7
Annelida	Erpobdellidae	<i>Erpobdella sp.</i>	15	14
Diptera	Chironomidae	Tanypodinae	13	129
Diptera		Nematocera autre	10	18
Coleoptera	Dytiscidae	Dytiscidae	7	17
Coleoptera	Dryopidae	<i>Dryops sp.</i>	6	70
Diptera		Brachycera autre	5	27
Gastropoda	Lymnaeidae	Lymnaeidae	5	20
Coleoptera	Scirtidae	<i>Microcara sp.</i>	4	29
Gastropoda	Planorbidae	Planorbidae autre	1	9
Coleoptera		Coleoptera autre	1	15
Gastropoda	Planorbidae	<i>Gyraulus sp.</i>	0	27
Gastropoda	Valvatidae	<i>Valvata sp.</i>	0	30
Cladocera		Cladocera	0	252
Coleoptera	Scirtidae	Scirtidae autre	0	20

Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés dans la station d'Ambarès (Gironde)

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille/sous-famille	Taxon	Densité moyenne sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Cladocera		Cladocera	13082	28952
Copepoda		Copepoda	10732	6510
Diptera	Ceratopogonidae	Dasyheleinae	3997	465
Diptera	Dolichopodidae	Dolichopodidae	493	0
Annelida		Oligochaeta	268	399
Arachnida		Hydracarina	249	75
Coleoptera	Dytiscidae	Colymbetinae	72	0
Diptera	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae	69	0
Diptera		Brachycera autre	62	12
Diptera	Chironomidae	Chironomini	59	203
Coleoptera	Dytiscidae	Hydroporinae	53	50
Diptera	Chironomidae	Orthocladiinae	37	87
Diptera	Muscidae	Muscidae	25	0
Coleoptera	Hydrophilidae	Hydrophilinae	22	0
Diptera	Chironomidae	Chironomidae autre	19	12
Odonata	Libellulidae	Libellulidae	12	0
Nemertea		Nemertea	12	0
Coleoptera	Scirtidae	<i>Cyphon sp.</i>	12	0
Lepidoptera	Crambiidae	<i>Elophila sp.</i>	6	0
Coleoptera	Scirtidae	<i>Microcara sp.</i>	6	0
Isopoda	Asellidae	<i>Proasellus sp.</i>	3	1609
Diptera	Stratiomyidae	Stratiomyidae	3	0
Ostracoda		Ostracoda	0	50
Nematoda		Nematoda	0	31
Diptera	Chironomidae	Tanypodinae	0	56
Amphipoda	Gammaridae	<i>Gammarus sp.</i>	0	3
Decapoda	Cambaridae	<i>Procambarus clarkii</i>	0	6
Coleoptera	Dryopidae	<i>Dryops sp.</i>	0	3
Lepidoptera	Crambiidae	<i>Nymphula sp.</i>	0	6
Cladocera		<i>Gerris sp.</i>	0	50
Coleoptera	Scirtidae	<i>Radix sp.</i>	0	6
Coleoptera	Hydrophilidae	<i>Laccobius sp.</i>	0	19
Diptera	Chironomidae	<i>Coryneurinae</i>	0	6
Platyleminthe		<i>Platyleminthe</i>	0	25
Coleoptera	Dytiscidae	<i>Dytiscinae</i>	0	78

Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés dans la station de Locoal-Mendon (Morbihan)

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille/sous- famille	Taxon	Densité moyenne sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Copepoda		Copepoda	10316	11735
Annelida		Oligochaeta	7815	6383
Nematoda		Nematoda	6474	3459
Ostracoda		Ostracoda	2509	2468
Annelida	Nereididae	<i>Nereis diversicolor</i>	2214	1604
Amphipoda	Corophiidae	<i>Corophium sp.</i>	1952	9818
Polychaeta	Spionidae	<i>Streblopsio shrubsoli</i>	776	310
kinorhynque		kinorhynque	684	41
Annelida	Capitellidae	<i>Capitella capitata</i>	666	398
Plathelminthe		Plathelminthe	353	98
Cnidaria		Hydrozoa	236	1701
Annelida	Spionidae	Spionidae autre	164	93
Urochordés		<i>Scrobicularia plana</i>	126	16
Kinorhynches		Sabellidae	116	589
Gastropoda	Hydrobiidae	<i>Hydrobia sp.</i>	106	43
Decapoda	Palaemonidae	<i>Palaemonetes varians</i>	95	58
Diptera	Chironomidae	Chironomini	91	120
Arachnida		Hydracarina	57	62
Annelida	Spionidae	<i>Polydora sp.</i>	49	21
Diptera	Chironomidae	Orthoclaadiinae	35	20
Asciacea		Asciacea	21	5
Amphipoda		Amphipoda autre	12	9
Mysida		Mysidae	10	24
Isopoda	Sphaeromatidae	<i>Lekanesphaera sp.</i>	9	142
Amphipoda	Talitridae	<i>Orchestia gammarellus</i>	9	4
Diptera	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae	3	12

Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés dans la station de Guérande (Loire-Atlantique)

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille/sous- famille	Taxon	Densité moyenne sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Ostracoda		Ostracoda	24933	4237
Copepoda		Copepoda	17240	7234
Annelida		Oligochaeta	8160	7235
Diptera	Chironomidae	Chironomini	6790	10315
Polychaeta	Spionidae	<i>Streblospio shrubsolii</i>	5980	1334
Polychaeta	Capitellidae	<i>Capitella capitata</i>	5164	6495
Nematoda		Nematoda	1956	2955
Gastropoda	Hydrobiidae	<i>Hydrobia sp.</i>	1663	296
Amphipoda	Gammaridae	<i>Gammarus sp.</i>	1486	403
Polychaeta	Spionidae	Spionidae autre	1417	473
Polychaeta	Nereididae	<i>Nereis diversicolor</i>	948	70
Diptera	Chironomidae	Orthocladiinae	486	363
Plathelminthe		Plathelminthe	386	310
Diptera	Ephydriidae	Ephydriidae	151	430
Polychaeta	Spionidae	<i>Polydora sp.</i>	118	15
Decapoda	Palaemonidae	<i>Palaemonetes varians</i>	101	68
Diptera		Brachycera autre	71	86
Bivalvia	Scrobiculariidae	<i>Scrobicularia plana</i>	65	4
Diptera		Nematocera nymphe	31	14
Diptera	Chironomidae	Chironomidae nymphe	30	83
Bivalvia	Cardiidae	<i>Cerastoderma sp.</i>	19	2
Crustacea		Crustacea autre	14	5
Coleoptera	Hydrophilidae	<i>Berosus sp.</i>	7	25
Diptera	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae	6	50
Hemiptera	Corixidae	Corixinae	5	44
Coleoptera		Coleoptera autre	4	27

**Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés
dans la station de Mornac-sur-Seudre (Charente-Maritime)**

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille	Taxon	Densité moyenne sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Gastropoda	Hydrobiidae	<i>Hydrobia sp.</i>	7826	8146
Polychaeta		Oligochaeta	5984	6293
Nematoda		Nematoda	4285	2278
Ostracoda		Ostracoda	3301	4243
Polychaeta	Nereididae	<i>Nereis diversicolor</i>	724	765
Polychaeta		Sabellidae	510	895
Polychètes	Capitellidae	<i>Capitella capitata</i>	414	20
Copepoda		Copepoda	318	1066
Isopoda	Sphaeromatidae	<i>Lekanesphaera sp.</i>	252	882
Diptera	Chironomidae	Chironomini	78	183
Arachnida		Hydracarina	68	116
Bivalvia	Scrobiculariidae	<i>Abra tenuis</i>	58	152
Decapoda	Palaemonidae	Palaemonidae	56	5
Plathelminthe		Plathelminthe	28	29
Diptera	Chironomidae	Orthocladiinae	20	4
Coleoptera	Hydrophilidae	Hydrophilidae autre	13	7
Gastropoda	Opisthobranchia	Limapontidae	12	53
Diptera		Brachycera autre	11	11
Diptera	Dolichopodidae	Dolichopodidae	9	22
Diptera	Rhagionidae	Rhagionidae	9	12
Coleoptera	Hydrophilidae	<i>Berosus sp.</i>	8	20
Diptera	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae	6	13
Coleoptera		Coleoptera autre	5	4
Decapoda	Palaemonidae	<i>Palaemonetes varians</i>	5	25
Polychaeta	Spionidae	Spionidae	4	18
Diptera	Ephydriidae	Ephydriidae	3	26
Amphipoda	Corophiidae	<i>Corophium sp.</i>	2	630
Polychaeta	Spionidae	<i>Streblospio shrubsoli</i>	2	14

**Liste des taxons identifiés et dénombrés dans les prélèvements réalisés
dans la station de Mornac-sur-Seudre (Charente-Maritime)**

Embranchement/ Classe/Ordre	Famille	Taxon	Densité moyenne annuelle sur la période de suivi (ind/m ²)	
			Zone témoin	Zone traitée
Gastéropodes	<i>Hydrobiidae</i>	<i>Hydrobia</i>	18660	13490
Polychètes	<i>Capitellidae</i>	<i>Capitella capitata</i>	6512	17739
Isopodes	<i>Sphaeromatidae</i>	<i>Lekanesphaera</i>	1022	875
Oligochètes		Oligochètes	861	765
Nématodes		Nématodes	858	4001
Polychètes	<i>Nereididae</i>	<i>Nereis diversicolor</i>	704	426
Lépidoptères		Lépidoptères	568	461
Ostracodes		Ostracodes	528	1272
Urochordés		<i>Asciadiacea</i>	206	77
Diptères		<i>Ceratopogonidae</i>	87	213
Diptères	<i>Brachycère</i>	<i>Rhagionidae</i>	84	40
Plathelminthes	<i>Monocelididae</i>	<i>Monocelis</i> sp.	56	12
Bivalves	<i>Scrobiculariidae</i>	<i>Scrobicularia plana</i>	54	84
Polychètes		<i>Sabellidae</i>	54	82
Crustacés	Maxillopode	Copépodes	49	438
Arachnides		Hydracariens	48	12
Diptères	<i>Brachycère</i>	<i>Stratiomyidae</i>	40	7
Plathelminthes		Plathelminthes autres	37	2
Polychètes		Polychètes nd	35	0
Diptères		Brachycères autres	23	0
Diptères	<i>Tabanidae</i>	<i>Tabanidae</i>	21	2
Diptères	<i>Ephydriidae</i>	<i>Ephydriidae</i>	19	35
Coléoptères	<i>Hydrophilidae</i>	<i>Hydrophilidae</i>	14	7
Coléoptères	<i>Hydrophilidae</i>	<i>Anacaena</i> sp.	9	7
Diptères	<i>Chironomidae</i>	<i>Orthocladiinae</i>	9	168
Décapodes	<i>Palaemonidae</i>	<i>Palaemonidae</i>	9	1
Gastéropodes	<i>Ellobiidae</i>	<i>Leucophytia bidentata</i>	7	7
Polychètes	<i>Spionidae</i>	<i>Spionidae</i>	7	0
Coléoptères	<i>Helophoridae</i>	<i>Helophoridae</i>	5	2
Gastéropodes	<i>Limapontiidae</i>	<i>Limapontiidae</i>	5	2
Diptères	<i>Culicidae</i>	<i>Aedes</i> sp.	3	34
Coléoptères	<i>Hydrophilidae</i>	<i>Enochrus</i> sp.	2	0
Coléoptères	<i>Hydraenidae</i>	<i>Ochthebius marinus</i>	2	2
Amphipodes	<i>Talitridae</i>	<i>Talitridae</i>	2	0
Diptères	<i>Chironomidae</i>	<i>Chironomini</i>	2	168
Lépidoptères	<i>Pyalidae</i>	<i>Pyalidae</i>	2	5
Diptères		Diptères nymphes	2	0
Coléoptères	<i>Hydrophilidae</i>	<i>Laccobius</i> sp.	0	0
Crustacés	<i>Corophiidae</i>	<i>Corophium</i> sp.	0	103
Crustacés	<i>Gammaridae</i>	<i>Gammaridae</i>	0	2
Crustacés	<i>Palaemonidae</i>	<i>Palaemonetes varians</i>	0	1
Diptères	<i>Chironomidae</i>	<i>Chironomidae</i> nymphes	0	4
Némertiens		Némertiens	0	26