

# Invasion du bassin de la Vilaine par les corbicules et les moules zébrées

Synthèse des connaissances et bilan des travaux

Cédric Briand  
Benjamin Bottner  
Aurore Lebreton  
Nathalie Pecheux

Avril 2020



## RAPPORT EPTB VILAINE

Ce rapport a été compilé à partir des données de l'ensemble de nos partenaires techniques - DREALs, AELB, FDDPMA, Conseils Départementaux, Bretagne Vivante, Syndicats de bassin et EPCI - que nous remercions pour leur collaboration. Il comporte aussi des éléments compilés à partir de la base de données recueillies à l'usine de production d'eau potable de Vilaine Atlantique. Dessins et illustrations : Cédric Briand, images libres de droits. Sources des images extérieures utilisées dans la partie bibliographie : Hesse 2015, données produites par la Dreal Centre-Val de Loire, et les agences de l'eau Loire-Bretagne et Seine Normandie.

FINANCÉ PAR L'AGENCE DE L'EAU LOIRE BRETAGNE ET LA RÉGION BRETAGNE



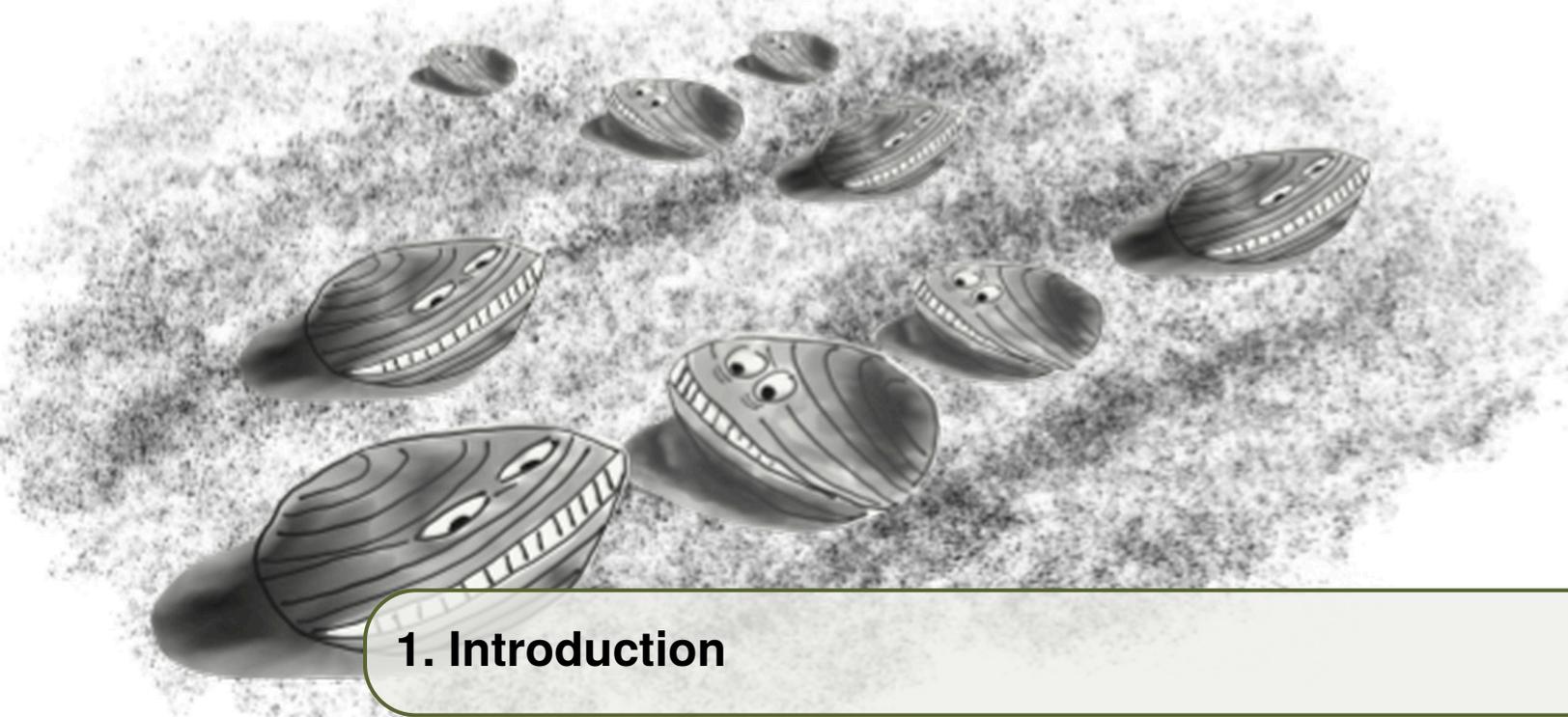


## Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Les corbicules asiatiques en France</b>	<b>7</b>
2.1.1	Les espèces présentes	7
2.1.2	Historique de la colonisation	8
<b>2.2</b>	<b>Biologie</b>	<b>10</b>
2.2.1	Reproduction	10
2.2.2	Alimentation et croissance	14
2.2.3	Déplacement	15
2.2.4	Habitat	16
2.2.5	Conditions physiques et chimiques	17
2.2.6	Densité	18
<b>2.3</b>	<b>Conséquences écologiques</b>	<b>19</b>
2.3.1	Diminution de la production primaire et du zooplancton	19
2.3.2	Couplage entre les compartiments benthiques et pélagiques	23
2.3.3	Conséquence sur les nutriments	25
2.3.4	Conséquence sur l'oxygène dissous	27
2.3.5	Conséquence sur les poissons, les oiseaux et les mammifères	28
2.3.6	Conséquence sur les bivalves natifs	29
2.3.7	Conséquences sur les installations industrielles	29
2.3.8	Stratégie d'expansion et fragilité des corbicules	30

---

<b>3</b>	<b>ÉTAT DES LIEUX SUR LE BASSIN DE LA VILAINE</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Synthèse des données actuelles sur la répartition</b>	<b>33</b>
3.1.1	Méthode	33
3.1.2	Résultats	34
<b>3.2</b>	<b>Recherche par ADN environnemental</b>	<b>36</b>
3.2.1	Méthode	36
3.2.2	Résultats	36
<b>3.3</b>	<b>Discussion sur la répartition de la corbicule</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>PROTOCOLE DE SUIVI 2019 : MÉTHODES ET RÉSULTATS</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Un protocole dédié au suivi de la corbicule</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Morphométrie des corbicules sur le bassin</b>	<b>42</b>
4.2.1	Méthodes de mesure des corbicules	42
4.2.2	Résultats	45
<b>4.3</b>	<b>Abondance et structure en taille sur les stations de suivi</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>Préférences de substrats</b>	<b>52</b>
4.4.1	Méthode	52
4.4.2	Résultats	52
<b>4.5</b>	<b>Discussion sur les résultats du protocole de suivi</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>ANALYSE DES DONNÉES DE QUALITÉ D’EAU EN VILAINE</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>Méthode</b>	<b>57</b>
<b>5.2</b>	<b>Résultats</b>	<b>57</b>
<b>5.3</b>	<b>Discussion</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>SYNTHÈSE ET PERSPECTIVE</b>	<b>63</b>
<b>6.1</b>	<b>Synthèse</b>	<b>63</b>
<b>6.2</b>	<b>Perspectives</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>65</b>
<b>7.1</b>	<b>Annexe 1 : Mesure des corbicules</b>	<b>66</b>
<b>7.2</b>	<b>Annexe 2 : Application dédiée pour l’observation des corbicules</b>	<b>67</b>
<b>7.3</b>	<b>Annexe 3 : Protocole de suivi des corbicules en Vilaine</b>	<b>69</b>
<b>7.4</b>	<b>Annexe 4 : Exemple de fiche station</b>	<b>72</b>
<b>7.5</b>	<b>Annexe 5 : Application de la méthode ADN environnemental - 2019</b>	<b>74</b>



# 1. Introduction

Les eaux de l'Oust et de la Vilaine connaissent depuis plusieurs années une transparence remarquable, qui semble indiquer un changement dans la production d'algues de la rivière. Ces changements sont concomitants avec l'arrivée de deux mollusques introduits en Vilaine, la Drécène (ou moule zébrée) et la Corbicule, qui ont connu un développement important sur les axes des rivières navigables.



*Corbicula fluminea* a été découverte pour la première fois en 1980 dans l'estuaire de la Dordogne. Depuis cette date, ce bivalve a colonisé un grand nombre de cours d'eau appartenant aux quatre grands bassins hydrographiques de la Garonne, du Rhône, de la Loire et de la Seine ainsi que la partie française du bassin Rhénan. Les canaux ont joué un rôle prépondérant dans la propagation des corbicules. (Jacques MOUTHON, 2000).

L'EPTB Vilaine a réuni ses partenaires au sein d'un comité de suivi technique formé des fédérations pour la pêche et la protection du milieu aquatique, pêcheurs professionnels fluviaux, l'agence de l'eau, la Région Bretagne, . . . pour mettre au point une stratégie d'étude concernant la corbicule et son effet possible sur la qualité d'eau et la chaîne trophique.

L'objectif initial a été de réaliser une étude bibliographique de la Corbicule et la Drécène pour comprendre la biologie et les impacts potentiels de ces espèces dans la littérature. Cette analyse est présentée au chapitre 2 de ce rapport. Elle se focalise sur les études effectuées dans la zone géographique proche mais essaie de prendre en compte l'ensemble des aspects publiés pour la corbicule. Elle apporte également des informations sur les Drécènes et d'autres espèces invasives sans toutefois être aussi exhaustive.

En parallèle, plusieurs missions ont été poursuivies pendant les deux années d'études.

En premier lieu, la répartition actuelle et l'historique de colonisation de la corbicule à l'échelle du bassin de la Vilaine ont été étudiés. Ce travail présenté au chapitre 3, repose sur la collecte des données issues des IBGN réalisés sur les cours d'eau et sur un protocole de recherche par ADN Environnemental.

En deuxième lieu, un protocole de suivi spécifique a été rédigé et mis en œuvre sur 4 stations du bassin. Les résultats sont présentés et discutés au chapitre 4. Ils apportent des informations sur la morphologie, l'abondance et les préférences en substrats de la corbicule.

Enfin, le chapitre 5 propose une analyse historique des concentrations en phytoplancton (concentration en Chlorophylle A) sur différentes stations de suivi du bassin de la Vilaine et les met en relation avec l'apparition et le développement des bivalves invasifs.

## 2. Étude bibliographique

### 2.1 Les corbicules asiatiques en France

#### 2.1.1 Les espèces présentes

Les corbicules en France présentent trois morphotypes. Le premier, la forme *R* (Forme arrondie) a été historiquement reliée d'un point de vue morphologique à l'espèce *C. fluminea* (Jacques MOUTHON, 2000) est en fait plus proche de *C. leana* d'après des études récentes portant à la fois sur les traits morphologiques et l'étude de l'ADN mitochondrial (L.-M. PIGNEUR et al., 2011). La forme *R* est celle qui serait retrouvée sur la Loire et en Bretagne (Figure 2.2a). Elle est aussi identifiée dans certains articles comme *forme A* (LEE et al., 2005).

Le deuxième, forme *S* ("Forme en selle") correspond à *Corbicula fluminalis*. Pour certaines études portant sur l'ADN mitochondrial ou nucléaire elle correspond à la *forme C*. Cette souche est présente dans le nord-est de la France (Meuse) et dans le Rhin (LAMAND et PRIÉ, 2017; MARESCAUX, L.-M. PIGNEUR et DONINCK, 2010; Jacques MOUTHON, 2000) (Figure 2.2c).

Une troisième lignée est mise en avant par des études génétiques sous le nom de *forme Rlc* (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012; L.-M. PIGNEUR et al., 2011). Elle est caractérisée par un ratio largeur/longueur inférieur à celui de la *forme R* et les juvéniles présenteraient une tache orangée sur l'umbo (L.-M. PIGNEUR et al., 2011). Le périostracum de la coquille est jaune et sa nacre blanchâtre. Cette forme serait à rapprocher de l'espèce *C. fluminea* (Figure 2.2c<sup>1</sup>). D'après L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al. (2012), elle est également proche de l'espèce *Corbicula subplanata*.

Toutefois, la distance génétique entre la *forme R* (*C. leana*) et la *forme Rlc* (*C. fluminea*) est faible, et GOMES et al. (2016) classent ces deux espèces au sein d'un même cluster de distance génétique. Dès 2000, dans une analyse génétique et morphologique RENARD et al. (2000) avaient mis en évidence des résultats



FIGURE 2.1 – Les corbicules sont originaires d'Asie.

1. Cette espèce était identifiée comme un deuxième morphotype de *C. fluminea* dans l'article de référence de (Jacques MOUTHON, 2000)

similaires avec la distinction de trois populations distinctes en France.

Enfin, en méditerranée, on trouverait, en plus de *C. fluminea*, *C. leana* et *C. fluminalis*, une autre espèce de corbicules: *C. largillierti* trouvée dans le lac Guarda en Italie (LOPEZ-SORIANO et al., 2018).

Il apparaît de plus que les conditions régionales biotiques et abiotiques peuvent influencer la forme des coquilles de *Corbicula fluminea* au Portugal alors qu'il n'existe pas de distance génétique entre les individus de bassins différents (GOMES et al., 2016).

Ainsi, s'il est assez facile de distinguer le genre *Corbicula* des autres bivalves d'eau douce, l'identification des espèces de corbicules n'est pas aisée. On peut se référer au guide de détermination des mollusques bivalves de France édité par l'Agence Française pour la Biodiversité (LAMAND et PRIÉ, 2017) et au guide des Naiades et autres bivalves d'eau douce de France (PRIÉ, 2017). Dans leur publication, LOPEZ-SORIANO et al. (2018) apportent également des critères intéressants de différenciation portant sur différents paramètres morphologiques. La distinction entre *C. fluminalis* (*S*) d'une part, et le complexe *C. leana* (*R*) / *C. fluminea* (*Rlc*) d'autre part, peut se faire au niveau des anneaux qui sont plus resserrés dans le morphotype *S* que dans le morphotype *R*.

La distinction des espèces est aussi supportée par des éléments d'histoire de vie. Chaque espèce possède une stratégie de reproduction différente. *C. fluminalis* est une espèce dioïque avec un faible pourcentage (3%) d'hermaphrodites (RAJAGOPAL, VELDE et VAATE, 2000), alors que *C. fluminea* est une espèce hermaphrodite simultanée, qui incube les œufs fécondés à l'intérieur de ses hémibranches et relargue des juvéniles de 250 µm (McMAHON, 2002). Les morphotypes de corbicules européennes correspondent en fait à des lignées monoclonales de corbicules, sans aucune diversité génétique au sein de chaque lignée (L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014). Par rapport aux lignées estuariennes ou dulcicoles d'origine, les lignées invasives présentent la caractéristique particulière d'avoir un spermatozoïde biflagellé (voir section 2.2.1).



La forme *R* n'a été rattachée que récemment à l'espèce *Corbicula leana*. Dans la bibliographie, elle est généralement identifiée comme *Corbicula fluminea*. Pour le reste de la bibliographie il n'y a pas de distinction entre *Corbicula fluminea* et *Corbicula leana*.

### 2.1.2 Historique de la colonisation

Le genre corbicule est originaire de l'Asie du sud et de l'est (Est de la Russie, Thaïlande, Corée et Japon) ainsi que d'Australie et d'Afrique. Elle a été introduite en 1924 sur la côte Ouest canadienne, sur l'île de Vancouver (GOMES et al., 2016), et aux USA en 1938 dans la rivière Columbia et a ensuite colonisé l'ensemble de l'amérique (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007). Dans les années 1970, elle a colonisé l'Amérique du Sud, d'abord par l'Argentine et le Brésil, et elle s'étend actuellement de l'Uruguay à la Patagonie (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007).

En Europe, elle a été détectée en 1980, en Dordogne, et dans le Tage au Portugal (J. MOUTHON, 1981). Des analyses en Loire (HESSE et al., 2015) ont montré qu'elle y est aussi arrivée dans l'estuaire à la même époque, contrairement à ce qui était rapporté précédemment par (BRANCOTTE et VINCENT, 2002; J. MOUTHON, 1981). En 1992, (CHOUIN, 1997) indique que la corbicule reste cantonnée à la zone en aval d'Ancenis. Mais (HESSE et al., 2015) indique que dès 1976, la corbicule était présente en grand nombre près de Villandry.

De même, l'introduction en Vilaine est plus ancienne<sup>2</sup> que celle de 2009 rapportée par MARESCAUX, L.-M. PIGNEUR et DONINCK (2010) (voir Partie 3). *Corbicula fluminea* a colonisé

2. Observation en 2002 à Arzal, source *PierreyvesPasco, BretagneVivante*



(a) *Corbicula leana* forme R - Saône



(b) *Corbicula fluminea* forme R1c - Haut Rhône



(c) *Corbicula fluminalis* forme S - Canal de Roanne

FIGURE 2.2 – Les trois morphotypes de corbicules en France, adapté d'après (Jacques MOUTHON, 2000) et (L.-M. PIGNEUR et al., 2011).

l'Espagne dans les années 1980-1990. Via les canaux Français et le Rhin elle a colonisé la Belgique, les Pays Bas et l'Allemagne (BRANCOTTE et VINCENT, 2002).

*Corbicula fluminalis* est apparue en 1984 en Allemagne, dans l'estuaire de la Weser (BRANCOTTE et VINCENT, 2002).

Ainsi, bien qu'étant des espèces invasives avérées et présentes depuis près de 40 ans en France, les Corbicules ne sont actuellement pas réglementées, ni au niveau européen<sup>3</sup>, ni au niveau national français<sup>4</sup>.

*Dreissena polymorpha* est native des estuaires et eaux douces de la Caspienne et de la mer noire. De la fin des années 1700 aux années 1800, *Dreissena polymorpha* s'est propagée par les voies d'eaux reliant la mer noire et la Baltique. En 1824, *Dreissena polymorpha* a été identifiée à Londres. Du fait du trafic intense entre les ports européens, elle a été introduite en Hollande (1826), Allemagne (1830), Belgique (1833), France (1838), et au Danemark (1840) (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007).

D'autres espèces de mollusques invasifs sont susceptibles de coloniser le réseau hydrographique Français. La moule quagga *Dreissena rostriformis bugensis* originaire d'un bassin tributaire de la mer noire (Dnieper-Bug Liman un lac côtier). Elle arrive en France par le Rhin et elle est aussi en train de coloniser les cours d'eaux d'Amérique du Nord (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007).

D'autres espèces sont susceptibles d'être introduites en Europe. *Limnosperma fortunei* la moule dorée originaire d'Asie a colonisé le Japon et une partie de l'Amérique du sud.



Trois populations de Corbicules coexistent en France, *Corbicula leana*, *Corbicula fluminea* et *Corbicula fluminalis*. Le genre *Corbicula* est présent dans les horizons fossiles d'Europe et d'Amérique du Nord jusqu'au Pleistocène et a disparu avec les glaciations. Elles ont été introduites en France dans les années 1980. Les deux espèces *Corbicula leana* (historiquement *Corbicula fluminea*) et *Corbicula fluminalis* sont présentes sur la Loire (Jacques MOUTHON, 2000 ; Jacques MOUTHON et PARGHENTANIAN, 2004) et sont susceptibles d'avoir colonisé le réseau hydrographique de la Vilaine. Une analyse morphométrique précise, ainsi que des photographies sont nécessaires pour identifier les différentes espèces possibles car certaines espèces semblent très proches morphologiquement (LOPEZ-SORIANO et al., 2018)



Le genre *Dreissena* est représenté en France par deux espèces invasives. *Dreissena polymorpha* la moule zébrée et *Dreissena rostriformis* (Moule quagga). La moule zébrée a été observée pour la première fois en France en 1838, elle est originaire de la Caspienne. La moule Quagga est originaire d'Ukraine, elle a été introduite en France par le Rhin (LAMAND et PRIÉ, 2017).

## 2.2 Biologie

### 2.2.1 Reproduction

Dans la Loire et dans la Saône, la reproduction de la corbicule *Corbicula fluminea* est continue de mars à octobre avec un pic en juin et le second en août (Jacques MOUTHON, 2001 ; Jacques MOUTHON

3. Règlement UE n°1143/2014 : la liste des espèces exotiques envahissantes préoccupantes pour l'Union Européenne comporte 66 espèces au 15 août 2019.

4. Articles L.411-5 à L.411-10 & articles R.411-37 à R.411-47 du code de l'environnement & arrêtés relatifs à la prévention de l'introduction et de la propagation d'espèces exotiques envahissantes.

et PARGHENTANIAN, 2004). Cette reproduction continue correspond à la majorité des observations nord-américaines où les populations de *C. fluminea* ont deux périodes de reproduction du printemps au début de l'été, et de la fin de l'été à l'automne (McMAHON, 2002).

La reproduction dépend des variations en productivité primaire et des disponibilités de nourriture. De fortes limitations dans la nourriture disponible peuvent conduire à une diminution de la fréquence de la reproduction qui n'interviendra alors qu'au printemps (FRANCO et al., 2012 ; Jacques MOUTHON, 2001). La reproduction dépend aussi de la température avec un arrêt en dessous de 15 °C pour *Corbicula fluminea* (RAJAGOPAL, VELDE et VAATE, 2000), et des températures plus basses 6–15 °C pour *Corbicula fluminalis*.

Une part de 5–15% de l'**assimilation non respirée**<sup>5</sup> de *Corbicula fluminea* est allouée à la reproduction. Cette part est identique à celle des Unionidés (Bivalves autochtones). Cependant, les corbicules ont un taux d'assimilation plus élevé qui leur permet d'allouer plus d'énergie à la reproduction que les autres bivalves d'eau douce (McMAHON, 2002). La fécondité des corbicules est importante, estimée à 68 678 Juvenile Adulte<sup>-1</sup> An<sup>-1</sup> en moyenne (McMAHON, 2002).

Les juvéniles de *C. fluminea* sont de petite taille (longueur de coquille ≈ 250 µm) mais avec des coquilles bivalves complètement développées, les muscles adducteurs, le pied, des statocystes<sup>6</sup> les branchies et un système digestif. Ils s'attachent au sédiment ou aux surfaces dures avec un filament de byssus mucilagineux mais peuvent être mis en suspension dans des conditions de débit turbulent et transportés sur de longues distances (McMAHON, 2002).

La maturité sexuelle des corbicules est atteinte lorsque les coquilles atteignent une taille 6–10 mm soit après 3 à 6 mois de croissance. Ainsi les juvéniles nés au printemps peuvent participer à la reproduction dès l'automne (McMAHON, 2002).

Les corbicules de l'espèce *Corbicula fluminea* sont hermaphrodites, c'est à dire qu'un individu a les deux sexes. A l'inverse, chez *Corbicula fluminalis* on trouve une majorité d'individus dioïques (les deux sexes sont séparés) avec un faible pourcentage d'hermaphrodites (3%) (RAJAGOPAL, VELDE et VAATE, 2000).

Toutes les corbicules invasives se reproduisent par **parthénogénèse**. La parthénogénèse est un type de reproduction **asexuée** dans laquelle un gamète ou un œuf se développe en un individu sans fécondation. Cette reproduction est surtout retrouvée chez les plantes, les insectes (abeilles, guêpes, fourmis...) et quelques reptiles.



FIGURE 2.3 – La corbicule a une reproduction asexuée par androgénèse.

Dans l'immense majorité des cas, cette reproduction se fait à partir du gamète femelle, et la

5. C'est en pratique la différence entre l'ingestion et l'excretion en terme de biomasse ou carbone ou poids sec, dans laquelle on enlève l'énergie dépensée à la maintenance (respiration).

6. Cavités cillieuses dans le pied servant à l'équilibre.

plupart des espèces se reproduisant par parthénogénèse ont également une reproduction sexuée, le mode de reproduction est alors nommé parthénogénèse facultative (écrevisses, serpents, requins, poissons). Le mode de parthénogénèse des corbicules invasives est beaucoup plus rare dans le règne animal. Il est nommé **androgénèse**. Dans ce mode de reproduction, le matériel génétique femelle de la cellule ne participe pas au développement du zygote et les descendants sont des clones du matériel génétique paternel. Ce type de reproduction n'est connu dans le monde que chez le cyprès Tassili *Cupressus dupreziana*, la petite fourmi de feu *Wasmannia auropunctata* et la plupart des espèces de corbicules invasives (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012).

Au sein des Bivalves, *Corbicula* est le seul genre possédant un spermatozoïde biflagellé et diploïde (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012) (Figure 2.4).

On reconnaît les espèces invasives des espèces hermaphrodites asiatiques retrouvées dans l'aire de répartition d'origine, par le fait que les spermatozoïdes ont deux flagelles au lieu d'un seul (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012). Dans les œufs fécondés, tous les chromosomes maternels et les centrosomes<sup>7</sup> sont simultanément extrudés sous la forme de deux corps polaires (HOTTA et KOMARU, 2018). Seul le matériel génétique mâle (2n car le spermatozoïde biflagellé est dioïque) est conservé. Le résultat final de l'expulsion du matériel génétique femelle est la production d'une lignée de clones au patrimoine génétique uniquement paternel.

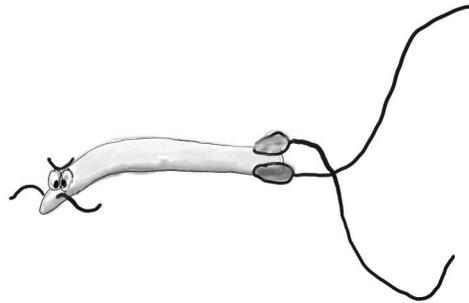


FIGURE 2.4 – Les corbicules invasives possèdent un spermatozoïde biflagellé.

Ainsi d'un continent à l'autre, les lignées de corbicules américaines (*forme A* non présente en Europe) et la *forme R* (*Corbicula fluminea*) apparaissent identiques au plan de l'ADN mitochondrial et nucléaire ce qui indique un superclone avec une vaste aire de répartition (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012).

La plasticité phénotypique<sup>8</sup> des corbicules explique par exemple que des morphologies différentes soient trouvées pour le même génotype (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012). Elle explique aussi leur adaptabilité à des conditions d'environnement variées.

De rares échanges de matériel cellulaire mitochondrial sont intervenus entre lignées à la fois en Europe et aux Etats-Unis. Ces échanges indiquent qu'il a pu exister de rares cas d'hybridation, où le sperme d'une des lignées a pu fertiliser les œufs d'une autre lignée (GOMES et al., 2016). Les

7. Dans les cellules, les centrosomes sont les organisateurs de microtubules, le réseau qui permet de déplacer les chromosomes lors de la division cellulaire.

8. Production de différents phénotypes à partir d'un génotype donné selon des conditions environnementales.



FIGURE 2.5 – Les corbicules invasives sont des lignées monoclonales.

individus issus de cette fécondation gardent le matériel cellulaire maternel (l'ADN mitochondrial) mais le spermatozoïde impose son matériel nucléaire. L'absence de diversité génétique suggère que ces phénomènes sont rares (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012).

La durée de vie des corbicules est de 1 à 4 années, au cours de laquelle une maturité précoce et plusieurs reproductions annuelles permettent aux individus de participer à une à sept reproductions (McMAHON, 2002).



*C. fluminea* se reproduit du printemps à l'automne, elle atteint en quelques mois la maturité sexuelle et peut participer dans l'année de sa naissance à la reproduction. Cette espèce est hermaphrodite (un individu possède à la fois des organes sexuels mâles et femelle), et se reproduit par une forme particulière de **parthénogénèse** (reproduction non sexuée) : l'**androgénèse**.

La monopolisation de la parenté par les mâles est effectuée dans l'œuf par expulsion du matériel génétique femelle de la cellule au seul profit du nucléus spermatique. Le premier spermatozoïde biflagellé a probablement provoqué la monopolisation du matériel génétique par la partie mâle et l'apparition des lignées monoclonales qui ont colonisé une bonne part du monde (L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012).



Contrairement aux corbicules qui sont **hermaphrodites**, les moules zébrées *Dreissena polymorpha* sont **gonochoriques**<sup>a</sup>. Elles se reproduisent 3 à 4 fois dans leur vie, et une fois dans l'année et deviennent matures à la fin de leur première année (McMAHON, 2002). Cette reproduction moins fréquente est compensée par le fait que les drécènes se reproduisent avec un stade larvaire planctonique à nage libre (larve véligère) assez inhabituel chez les mollusques d'eau douce. En fonction de leur taille, les femelles peuvent émettre de 30 000–40 000 à 10<sup>6</sup> œufs par an (McMAHON, 2002). Les œufs et les larves véligères fraîchement écloses sont de petite taille (diamètre = 40–70 µm). Les larves sont capables de coloniser très rapidement un hydrosystème si elles sont introduites en amont de ce dernier car les larves **veligères** peuvent rester dans la colonne d'eau pendant 8 à 10 jours (McMAHON, 2002) voire plusieurs semaines (ROSA et al., 2011) avant de se sédentariser. Les larves véligères sont ainsi capables de parcourir plusieurs centaines de kilomètres vers l'aval avec des flux annuels de l'ordre de 10<sup>14</sup> individus par an (McMAHON, 2002).

*Dreissena polymorpha* alloue une part plus importante de l'assimilation non respirée 74–90% à la reproduction que la corbicule *Corbicula fluminea* 5–15%.

a. Les individus ont un seul sexe et ne changent pas de sexe.

### 2.2.2 Alimentation et croissance

La croissance de la corbicule *Corbicula fluminea* est rapide car cette espèce alloue une large part 85–95% de son assimilation non respirée à la croissance, ce qui permet à des individus d’atteindre une longueur de coquille de 15–30 mm au cours de leur première année de vie et 35–50 mm à la fin de leur troisième ou quatrième année (McMAHON, 2002). Les moules zébrées peuvent également avoir des croissances rapides au cours de leurs deux ou trois années de vie pour atteindre une taille maximale de 35–50 mm.

#### Taux de filtration

Les études sur les taux de filtration des corbicules réalisées principalement en conditions expérimentales, montrent une forte capacité de filtration. Les taux de filtration individuels varient entre 16 et 745 mL Ind.<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (COHEN et al., 1984 ; L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014). De Mai à Août, les taux de filtration mesurés dans le Rhin sont de 364–754 mL Ind.<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> et ces taux diminuent à 94–111 mL Ind.<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> en Septembre et Octobre (VOHMANN et al., 2010)

Les taux de filtration peuvent varier de manière importante avec la température (LAURITSEN, 1986), la composition en phytoplancton (LIU, XIE et WU, 2009), l’histoire d’alimentation (LAURITSEN, 1986 ; VOHMANN et al., 2010) et le cycle de reproduction (VIERGUTZ, LINN et WEITERE, 2012).

Chez *Corbicula*, les taux de filtration varient en fonction du type de particules en suspension, celles-ci favorisent la filtration de particule de petite taille 3 × 5 µm correspondant à la taille naturelle des algues (WAY et al., 1990).

Le taux de filtration des bactéries est 30 à 100 fois plus élevé chez la Drécène que chez la corbicule, car cette dernière possède une plus grande surface de branchies, et des cirri. Ces groupes de cils saillant des cellules des rayons branchiaux sont 100 fois plus nombreux chez la moule zébrée que chez la corbicule (H. SILVERMAN et al., 1995).

Quand on les compare aux *Unionidae* le taux de filtration de l’eau est supérieur chez *Corbicula* et *Dreissena* (Harold SILVERMAN et al., 1997). Le taux métabolique élevé chez les moules zébrées et les corbicules explique leur forte assimilation et leur forte croissance (McMAHON, 2002).

#### Disponibilité en Chlorophylle-a

Il existe une corrélation positive entre la croissance des corbicules et la présence de chlorophylle A dans l’eau (FOE et KNIGHT, 1985). Une limitation de la nourriture disponible semble intervenir lorsque la concentration en Chlorophylle A tombe sous 20 µg L<sup>-1</sup> au printemps et sous 50 µg L<sup>-1</sup> en été (FOE et KNIGHT, 1985). Ces conditions conduisent les corbicules de la Saône à limiter leur reproduction à un épisode par an au lieu des deux épisodes trouvés normalement (Jacques MOUTHON, 2001). Dans le Rhin, des épisodes de mortalités massives de *C. fluminea* sont observés en été (VOHMANN et al., 2010). Dans ce fleuve des concentrations < 10 µg L<sup>-1</sup> sont associées à des épisodes de famine chez les corbicules, avec une diminution de la masse corporelle de chair, alors que la coquille continue à croître. L’année de l’étude, cette famine n’a pas été associée à des épisodes de mortalités massives, et il est probable que les mortalités estivales soient liées à une combinaison de facteurs incluant la fragilisation des corbicules du fait de l’augmentation de la demande en nourriture. Cette augmentation est liée à un accroissement de la demande métabolique à forte température mais aussi à d’autres facteurs<sup>9</sup>. Il apparaît qu’en comparaison à de nombreux autres bivalves, *Corbicula fluminea* est moins capable de diminuer son activité métabolique lors des épisodes de canicule (VOHMANN et al., 2010).

9. les causes possibles de mortalité sont présentées aux paragraphes 2.3.3 et 2.3.8.

### Nourriture à l'aide du pied

Les corbicules et de nombreux bivalves sont également capables de se nourrir par d'autres voies que celles du siphon d'inhalation, par des courants créés dans la cavité du manteau et des entrées notamment par le bord antérieur de la valve et le point ventral central de la coquille (NICHOLS et al., 2005). Ainsi les corbicules ont une capacité à utiliser leur pied pour aspirer une portion de la matière organique interstitielle du sédiment et les microorganismes (flagellés, ciliés et bactéries) du benthos (HAKENKAMP, RIBBLETT et al., 2001 ; MAJDI, BARDON et GILBERT, 2014). Cette activité de fouissage et de bioturbation conduit à une diminution de la présence des ciliés et des bactéries interstitielles. Les corbicules peuvent ainsi contribuer de manière significative au recyclage de la matière carbonée du benthos – jusqu'à 46% pour une densité de 1250 Ind.m<sup>-2</sup> (HAKENKAMP et PALMER, 1999).

Cette stratégie leur permet également de survivre lorsque la nourriture devient rare (MAJDI, BARDON et GILBERT, 2014). Lorsque la nourriture est abondante, les corbicules et les drécènes contribuent au transfert de la matière organique vers le fond par la production de fèces et pseudofèces (HAKENKAMP et PALMER, 1999).

### Métabolisme

*C. fluminea* et *D. polymorpha* ont des taux métaboliques plus élevés que les *Unionoides* indigènes (McMAHON, 2002). Pour maintenir ce taux métabolique élevé, les corbicules doivent ouvrir leurs valves pour capter de la nourriture. Le taux métabolique de *C. fluminea* est dix fois plus important lorsque les valves sont ouvertes que quand les valves sont fermées (ZHANG et al., 2011).

### 2.2.3 Déplacement

Les corbicules lorsqu'elles sont juvéniles (pédiveliger < 2 mm) produisent un long filament de byssus qui facilite leur transport par le courant. Il leur permet aussi de se fixer aux coques des bateaux qui deviennent alors un vecteur de leur propagation.



FIGURE 2.7 – Les canaux et la navigation ont facilité la propagation des corbicules.



FIGURE 2.6 – Les corbicules se nourrissent aussi à l'aide du pied.

Pour cette raison l'ensemble du réseau de canaux français a été très rapidement colonisé (J. MOUTHON, 1981). Des vitesses de propagation de 22 km An<sup>-1</sup>, 15 km An<sup>-1</sup> et 22 km An<sup>-1</sup> ont été observées sur la Loire, l'Indre et la Creuse<sup>10</sup>. Des vitesses d'expansion plus faibles ont été observées sur des cours d'eaux ayant un rang de strahler plus faible : l'Anglin et la Rère 3 km An<sup>-1</sup> et 2 km An<sup>-1</sup> (HESSE et al., 2015). On retrouve dans plusieurs publications cette idée que le mollusque puisse se fixer aux ouïes et nageoires des poissons voire aux pattes des oiseaux (McMAHON, 2002). Or les corbicules n'ont pas, comme les Unionidés, de larve de type **glochidie** qui utilise cette stratégie pour ses déplacements. De manière autonome, dans un environnement où l'accès humain est restreint, leur déplacement

10. L'Indre et la Creuse ne sont pas navigables

est assez lent, c'est ainsi qu'elles n'ont progressé qu'à une vitesse de  $1.2 \text{ km An}^{-1}$  dans la rivière Savanna (USA) (VOELZ, McARTHUR et RADER, 1998). Ce transport lent écarte la possibilité d'un transport par les oiseaux d'eau (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012). Par contre, la pratique du kayak, le transport d'eau et matériel contaminé par des juvéniles peuvent être à l'origine de la translocation involontaire des corbicules (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012).

D'autres observations viennent appuyer le lent déplacement des corbicules en situation naturelle lorsqu'il n'y a pas de courant pour les disperser. Dans le lac de Constance, la recolonisation des moules zébrées après par exemple des épisodes de prédation sévères par des oiseaux d'eau est très rapide, du fait du transport sur de longues distances de larves véligères. Mais par comparaison, la propagation des corbicules à partir de la zone d'introduction ou leur recolonisation après des épisodes de mortalité est plus lente. En l'absence de transport par le courant les corbicules ne se dispersent pas lors de la reproduction car elles sont libérées par les adultes dans un stade rampant (WERNER, 2008).

La présence de lits de gravier, habitat moins favorable, dans un cours d'eau semble pouvoir ralentir la propagation des corbicules (LEFF, BURCH et McARTHUR, 1990). L'enfouissement des corbicules est une stratégie leur permettant d'éviter d'être emportées vers l'aval lors des crues (ROBINSON et WELLBORN, 1988).

#### 2.2.4 Habitat

Les corbicules ont un caractère ubiquiste, elles sont capables de coloniser aussi bien des milieux lenticques que lotiques, les fleuves, les rivières les lacs, et même les habitats temporaires et les petits cours d'eau (HESSE et al., 2015; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012). Elles peuvent être trouvées en très forte densité dans les canaux (DAME et OLENIN, 2005; Jacques MOUTHON et PARGHENTANIAN, 2004).

Les substrats lisses comme le sable, parfois en mélange avec de la vase ou de l'argile sont les substrats préférés pour *Corbicula fluminea* car ils sont favorables à son comportement fouisseur (DAME et OLENIN, 2005; HESSE et al., 2015; WERNER, 2008). Ces substrats doivent être bien oxygénés (HESSE et al., 2015). Les corbicules sont bien moins abondantes sur les substrats caillouteux ou la vase (LEFF, BURCH et McARTHUR, 1990), en particulier lorsque la concentration en oxygène est faible (LEFF, BURCH et McARTHUR, 1990; WERNER, 2008). *Corbicula fluminea* est rarement trouvée dans les sédiments sous les macrophytes immergées (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012; WERNER, 2008).

Sur un substrat purement sableux, la présence de corbicules favorise la diversification des substrats. Les coquilles favorisent l'installation de *Dreissena polymorpha* et d'une faune accompagnante d'invertébrés benthiques. Dans les habitats de structure plus complexe du fait de la présence de macrophytes, la densité de *Corbicula fluminea* n'a pas d'effet sur la faune accompagnante (WERNER, 2008). Les corbicules vivent entre la surface et jusqu'à une profondeur de 2 cm sous la surface (DAME et OLENIN, 2005).

Les moules zébrées vont utiliser majoritairement les substrats rocheux et parfois le sable pour leur accrochage. En grand milieu (grands lacs ou réservoirs), les mouvements d'eau dans les parties peu profondes peuvent limiter leur présence. Elles peuvent être très abondantes sur les macrophytes immergées. Le plus mauvais substrat pour la moule zébrée est la vase. En rivière, la présence d'un courant unidirectionnel, l'absence de substrat d'accrochage, les turbulences peuvent limiter l'extension des moules zébrées. La présence de crues avec une forte charge sédimentaire, et un débit constant peuvent limiter l'accrochage des larves. Contrairement aux corbicules, les moules zébrées

ne colonisent que rarement l'amont des cours d'eau et n'y sont jamais retrouvées en forte densité (DAME et OLENIN, 2005). Par contre, les moules zébrées peuvent être retrouvées à très forte densité dans les lacs et les réservoirs (A. Y. KARATAYEV, L. E. BURLAKOVA et PADILLA, 2005).



Les corbicules préfèrent les substrats sableux ou sablo-limoneux mais peuvent être trouvées dans tous les environnements.



Les moules zébrées vivent sur des substrats rocheux et plutôt dans les parties aval des bassins.

### 2.2.5 Conditions physiques et chimiques

Globalement les moules zébrées et les corbicules sont assez peu tolérantes aux conditions environnementales extrêmes. Ainsi les deux espèces seront plus sensibles aux températures extrêmes, à l'hypoxie, l'émersion, les faibles *Ph*, le manque de calcium que les Unionidés d'Amérique du Nord (McMAHON, 2002).



*Corbicula fluminalis* (LOPEZ et al., 2006)

#### Température

La température joue un rôle important dans de nombreux processus physiologiques (VOHMANN et al., 2010). Les faibles températures (2 °C pendant deux mois) peuvent être létales (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012; WELTER-SCHULTES, AUDIBERT et BERTRAND, 2011). Des températures supérieures à 15 °C sont nécessaires pour le relargage de larves. Les températures maximales supportées par *C. fluminea* sont de 35 à 37 °C (GAMA et al., 2016; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012). Dans les régions les plus nordiques, les corbicules peuvent survivre grâce aux rejets d'eaux chaude (BESPALAYA et al., 2018; SMITH et al., 2018).

*C. fluminalis* supporte des températures plus basses, y compris en dessous de 0 °C (BESPALAYA et al., 2018; A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007). Sa reproduction s'effectue également à des températures plus faibles 6 à 15 °C (RAJAGOPAL, VELDE et VAATE, 2000).

Les corbicules, comme tous les ectothermes <sup>11</sup>, voient leur demande d'énergie augmenter avec la température. La demande en nourriture et en énergie va doubler lorsque la température s'élève de 5 °C (VOHMANN et al., 2010). Cette augmentation des températures, couplée à une diminution de l'alimentation et à la demande d'énergie liée à la reproduction peut conduire à une forte baisse de la masse corporelle et pourrait favoriser les mortalités estivales (VOHMANN et al., 2010). Les mortalités massives de corbicules lors des canicules, affectent également les mollusques natifs, et peuvent favoriser les populations de drécènes (Jacques MOUTHON et DAUFRESNE, 2006).

Les moules zébrées *Dreissena polymorpha* tolèrent des températures de 0 à 33 °C, mais le seuil pour la croissance ou la reproduction est de 10 à 11 °C (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007).

#### Oxygène

Les *Corbicula fluminea* comme les moules zébrées *Dreissena polymorpha* sont intolérantes à l'hypoxie même modérée. Dans les lacs, si elles peuvent parfois coloniser les zones profondes des lacs, elles limitent leurs habitats aux zones littorales et sublittorales (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007). La limite en  $O_2$  à 25–30 °C est de 1–3 mg L<sup>-1</sup> (BELANGER, 1991). Dans la rivière Vermillon

11. Les mollusques sont ectothermes, ils ne régulent pas leur température

(US) les densités et les croissances des corbicules sont sévèrement affectées dans les zones en aval des stations d'épurations où les conditions d'oxygène dissous sont limitées à l'interface eau sédiment (BELANGER, 1991). La régulation du taux d'oxygène chez les corbicules est effectuée uniquement en adaptant le taux de filtration à la teneur en oxygène de l'eau (TRAN, BOUDOU et MASSABUAU, 2000).

### Pollution

Les corbicules sont de manière générale tolérantes à l'exposition à des pollutions (DOHERTY, 1990 in Jacques MOUTHON, 2001). Au contraire, les drécènes sont considérées comme plus sensibles, et le retour des drécènes dans plusieurs rivières d'Europe est considéré comme une conséquence des lois visant à améliorer la qualité de l'eau des rivières (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007).

### Salinité

*C. fluminea* supporte des salinités de 17 ‰ (DAME et OLENIN, 2005). *C. fluminalis* est plus tolérante à la salinité que *C. fluminea*, elle peut tolérer des salinités de 25 ‰ (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007). Certaines sous-espèces de drécènes sont aussi capables de coloniser les parties oligohalines des estuaires, mais celle qui a colonisé l'Amérique du nord et l'Europe survit dans des salinités inférieures à 6.2 ‰ (DAME et OLENIN, 2005).

### pH

La distribution de *D. polymorpha* est limitée aux eaux neutres ou alcalines  $pH < 7.3$  (A. Y. KARATAYEV, L. E. BURLAKOVA et PADILLA, 2005). La limite de  $pH$  pour les corbicules est de 5.6 (DAME et OLENIN, 2005 ; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012).

### Calcium

La limite pour le calcium est de  $3 \text{ mgL}^{-1}$  pour la corbicule (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012). Elle est plus importante pour la moule zébrée qui ne se développe pas pour des concentrations inférieures à  $28.3 \text{ mgL}^{-1}$  dans les lacs (RAMCHARAN, PADILLA et DODSON, 1992).

### Turbidité

Les moules zébrées *Dreissena polymorpha* et corbicules *Corbicula fluminea* tolèrent bien la turbidité, souvent au-delà des valeurs supportées par les Unionidés (McMAHON, 2002).

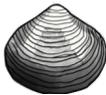
### Emersion

Les corbicules et les moules zébrées sont intolérantes à l'émersion (McMAHON, 2002 ; WERNER, 2008). Une émersion de 4 jours est accompagnée par une mortalité de 50 % des corbicules (WHITE, 1977 in WERNER, 2008).

## 2.2.6 Densité

Les densités de corbicules *Corbicula fluminea* varient en fonction du substrat (Paragraphe 2.2.5) et des conditions d'alimentation, de température et d'oxygène. Les valeurs minimum et maximum des densités de corbicules et moules zébrées sont rapportées au Tableau 2.1. Les productions de *Corbicula fluminea* peuvent atteindre  $1000$  à  $4500 \text{ gC m}^{-2} \text{ An}^{-1}$  dans les populations denses d'Amérique du Nord. Les productions de *Dreissena polymorpha* sont estimées à  $0.05$  à  $75 \text{ gC m}^{-2} \text{ An}^{-1}$  (McMAHON, 2002).

TABLE 2.1 – Densité de corbicules par type de milieu et substrat, modifié d’après A. Y. KARATAYEV, L. E. BURLAKOVA et PADILLA (2005), LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA (2012) et WERNER (2008).

	<i>Corbicula fluminea</i> Ind. m <sup>-2</sup>		<i>Dreissena polymorpha</i> Ind. m <sup>-2</sup>	
				
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
<b>Milieu</b>				
Lacs	39	25 000	6	3453
Réservoirs	30	796	838	3150
Fleuves	315	3206	7	138
Rivières	54	974	<i>généralement absente</i>	
Canaux	2255	16 688	40 000	61 000
<b>Substrat</b>				
Rocheux	0	377	1580	5540
Sableux - vaso-sableux	54	1215	211	3930
Coquilles		43		1081

## 2.3 Conséquences écologiques

### 2.3.1 Diminution de la production primaire et du zooplancton

Les corbicules provoquent une diminution de la production primaire (COHEN et al., 1984; DESCY et al., 2012; VOHMANN et al., 2010). Dans la Meuse, une modélisation de la production primaire par le modèle PEGASE<sup>12</sup> permet de modéliser les conséquences de l’introduction des corbicules. D’après ce modèle, la biomasse de phytoplancton aurait chuté de 70%, la production primaire aurait baissé de 61%, la biomasse de zooplancton aurait diminué de 75% et la concentration moyenne de chlorophylle-a diminuerait à des valeurs proches de 7 mg L<sup>-1</sup> (L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014). Les concentrations observées de Chlorophylle-a sont en effet passées de valeurs de 17.5 à 164.2 µg L<sup>-1</sup> à 0.5 à 4.34 µg L<sup>-1</sup> dans la Meuse après l’arrivée de la corbicule.

#### Un exemple sur la Loire

Sur la Loire et ses affluents, la concentration moyenne en chlorophylle-a s’est également effondrée après l’arrivée des corbicules (Figures 2.8 et 2.9). Comme sur la Meuse, les concentrations moyennes ont chuté (baisse de 10 à 20 µg L<sup>-1</sup>) mais c’est particulièrement sur les blooms algaux estivaux que la chute a été la plus remarquable. Les valeurs maximales très élevées de la concentration en chlorophylle-a -jusqu’à 80 µg L<sup>-1</sup> sur le Beuvron, 275 µg L<sup>-1</sup> sur l’Indre, 70 µg L<sup>-1</sup> sur la Vienne, 300 µg L<sup>-1</sup> sur le Cher et 275 µg L<sup>-1</sup> sur la Loire- n’ont jamais été retrouvées après l’introduction des corbicules. La production en phytoplancton a chuté à moins de 10 µg L<sup>-1</sup>.

La production phytoplanctonique évolue également du fait d’autres changements majeurs intervenus dans les hydrosystèmes français depuis les années 1980. Ainsi une modélisation sur la

12. Le modèle PEGASE modélise la qualité de l’eau des rivières à l’échelle de bassins versant

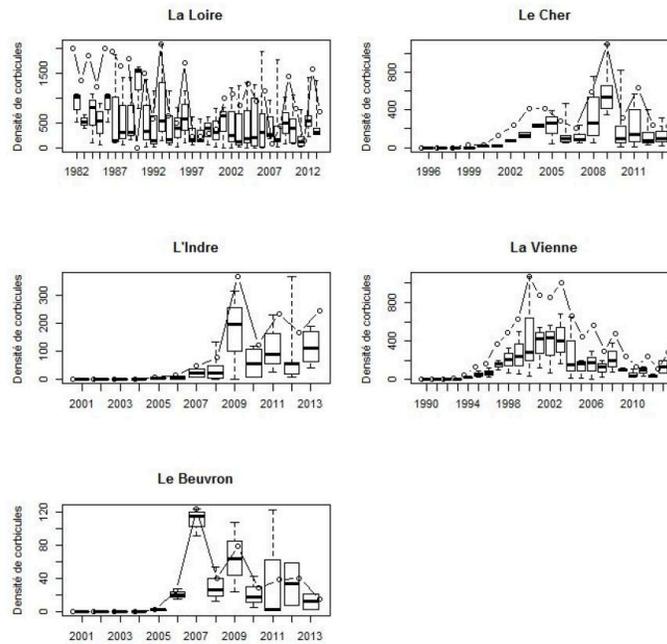


FIGURE 2.8 – Evolution temporelle des densités de corbicules sur la Loire. Variations interstationnelles sous forme de boxplots et valeurs annuelles moyennes de la densité toutes stations confondues sous forme de courbe reproduit d'après HESSE et al. (2015). Source : Dreal Centre-Val de Loire, agences de l'eau Loire-Bretagne et Seine Normandie.

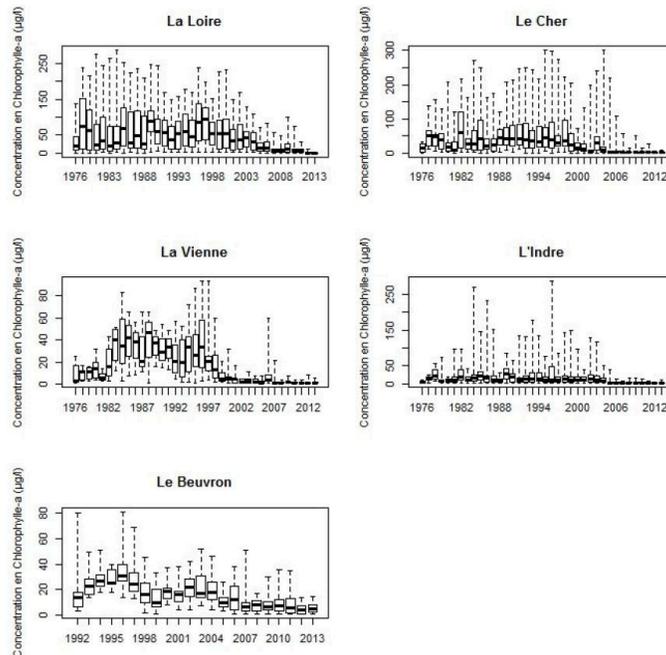


FIGURE 2.9 – Boîtes à moustaches montrant l'évolution temporelle de la concentration en Chlorophylle-a sur la Loire et ses principaux affluents, reproduit d'après HESSE et al. (2015). Source : Dreal Centre-Val de Loire, agences de l'eau Loire-Bretagne et Seine Normandie.

Loire parvient à simuler l'évolution longitudinale et saisonnière des concentrations en nitrates, sans faire intervenir la filtration de l'eau par les corbicules. Une partie des processus saisonniers est modélisée par la dénitrification de l'eau par l'activité riparienne<sup>13</sup> de la rivière. Ce modèle met en avant l'effet du **traitement des effluents par déphosphatation**. L'augmentation des températures conduit également à des modifications majeures dans les débits et les températures de l'eau (FLOURY et al., 2012). La chute des concentrations en chlorophylle-a mise en avant au niveau de Dampierre (Loiret) par FLOURY et al. (2012) est également interprétée comme la conséquence, à la fois de l'introduction des corbicules, mais aussi le passage des concentrations en phosphore  $P - PO_4$  sous le seuil de  $30 \mu\text{g L}^{-1}$ . Il faut quand même noter que la période correspondant à la chute marquée des abondances de chlorophylle-a est concomitante avec l'arrivée des corbicules dans le secteur (HESSE et al., 2015).

#### Conséquences sur les flux de carbones

La modélisation de l'impact des corbicules sur les flux de carbones, nitrate et phosphore dans les affluents de la baie de la Chesapeake montre que dans les zones où ces dernières sont les plus abondantes, une part importante de la production phytoplanctonique peut être filtrée et que cette dernière dépend **du temps de résidence** de l'eau dans le système. Dans les zones d'abondance maximales, les bivalves sont capables de retirer 14 à 40 % de la charge en carbone, 11 à 23 % de la charge en nitrate, et 37% à 84% de la charge en phosphore (CERCO et NOEL, 2010).

#### Limitations de l'effet des corbicules

La stratification de l'eau peut conduire à une limitation de la consommation du phytoplancton par les bivalves benthiques, à l'opposé, le mélange des eaux dans une rivière courante expose toute la colonne d'eau à la pression de filtration (N. F. CARACO, J. J. COLE et D. L. STRAYER, 2006).

Dans certains cas, lorsque les densités de corbicules restent faibles dans le milieu colonisé<sup>14</sup>, il peut arriver que ces dernières n'affectent pas de manière significative la production phytoplanctonique (e.g. (CAHOON et OWEN, 1996)).

#### Le cas des moules zébrées

Les moules zébrées sont également capables d'exercer une pression de filtration élevée. Par exemple dans la baie de Hudson, il a été estimé que cette pression avait augmenté d'un facteur 10 après leur introduction (Nina F. CARACO, Jonathan J. COLE, RAYMOND et al., 1997).

De manière générale, dans les eaux eutrophisées, le taux d'épuration augmente de manière linéaire avec la concentration en chlorophylle-a mais tend vers un plateau pour les eaux très eutrophes (DAME et OLENIN, 2005). La corbicule comme la moule zébrée sont capables d'exercer une pression d'épuration suffisante pour éclaircir le système car elles peuvent atteindre de très fortes densités.

Dans la baie de Hudson, les variations interannuelles d'abondance de Chlorophylle-a sont expliquées dans leur majorité par les variations liées à la filtration des moules zébrées, cependant les pics de concentration annuels de chlorophylle-a ne sont pas liés au taux de filtration. Même dans les zones où le taux de filtration est important, il peut survenir des blooms de phytoplancton contenant de fortes proportions de cyanobactéries toxiques (N. F. CARACO, J. J. COLE et D. L. STRAYER, 2006). Les raisons de l'occurrence de ces blooms de cyanobactéries ne sont pas claires.

13. La zone riparienne est la zone en bordure de cours d'eau recouverte de végétation

14. L'étude de CAHOON et OWEN (1996) rapporte des densités de 0.2 à 55 Ind.  $\text{m}^{-2}$ , avec des densités de 55 uniquement sur la frange littorale du lac Waccamaw.



FIGURE 2.10 – Installation des corbicules dans le milieu récepteur, si la nourriture est abondante on constate une forte augmentation de la population qui peut atteindre des densités très élevées (paragraphe 2.2.6).

### Cyanobactéries

Les drécènes et les corbicules se nourrissent des blooms de cyanobactéries (Nina F. CARACO, Jonathan J. COLE, RAYMOND et al., 1997 ; DIONISIO PIRES et al., 2005 ; LIU, XIE et WU, 2009) (VANDERPLOEG et al., 2001). Toutefois, une diminution de la filtration est observée lorsque les corbicules sont nourries avec une souche toxique de *Microcystis aeruginosa*. L'invasion par les drécènes dans le lac Huron, s'est soldée par l'apparition de blooms de cyanobactéries *Microcystis aeruginosa*. Les drécènes favoriseraient ces blooms par une filtration sélective conduisant à relâcher plus de cyanobactéries toxiques dans les pseudofèces, et en diminuant leur taux de filtration<sup>15</sup>. Des résultats contraires ont été obtenus par DIONISIO PIRES et al. (2005) qui n'ont pas trouvé de différences dans les taux d'assimilation des souches toxiques et non toxiques. Il semble donc que les résultats puissent être dépendant de la souche de cyanobactérie utilisée pour tester la filtration différentielle de la moule zébrée.



Dans les deux espèces, une favorisation de blooms de cyanobactéries toxiques est possible du fait d'une filtration différentielle ou d'une diminution de la filtration sur les blooms d'algues toxiques.

### Conséquences sur le zooplancton

Dans les milieux fermés (lacs) l'introduction des corbicules ou des moules zébrées conduit à remplacer le rôle de filtration des invertébrés planctoniques par celui des filtreurs benthiques (DAME et OLENIN, 2005). Cette compétition se fait au détriment du zooplancton (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007) et conduit à accélérer le processus de filtration des eaux et le transfert du carbone vers le compartiment benthique. Dans la Meuse, après l'introduction de la corbicule, l'abondance du zooplancton a chuté avec et le nombre de rotifères est passé d'une valeur de l'ordre de 1000 Ind. L<sup>-1</sup> à 100 Ind. L<sup>-1</sup> (L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014).

15. Les résultats sont différents en fonction de l'utilisation d'une souche toxique provenant de laboratoire ou d'une souche provenant du lac Erié, les auteurs émettent l'hypothèse que la souche naturelle puisse avoir mauvais goût !



*C. fluminea* et *D. polymorpha* dominent la communauté benthique en termes de biomasse lorsqu'elles s'établissent dans des conditions qui leurs sont favorables. Elles sont alors capables d'exercer un contrôle sur la structure de l'écosystème (WERNER, 2008), abattre la production primaire, et faire une forte concurrence au zooplancton.

#### La transparence de l'eau favorise le développement des macrophytes

La production phytoplanctonique du milieu colonisé devient limitée par la présence des corbicules (BEAVER, CRISMAN et BROCK, 1991 ; COHEN RONALD R. H. et al., 2003 ; COHEN et al., 1984 ; HWANG et al., 2010 ; LOPEZ et al., 2006 ; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012 ; David L. STRAYER, 2010 ; VOHMANN et al., 2010), qui sont généralement capables de consommer l'essentiel du phytoplancton présent, et de filtrer l'eau de la zone en un temps allant de quelques heures à quelques jours (COHEN RONALD R. H. et al., 2003 ; COHEN et al., 1984 ; LAURITSEN, 1986 ; LEFF, BURCH et MCARTHUR, 1990 ; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012).

Ainsi par exemple, l'introduction de la Corbicule dans l'estuaire de la Potomac en 1977 s'est traduite à partir de 1981 par un triplement de la clarté de l'eau dans les zones où s'étaient établis des lits de corbicules. A partir de 1983, le développement de plantes aquatiques a été observé alors que ces dernières avaient été absentes pendant 50 ans. A partir de 1986, les suivis de poissons ont montré une augmentation d'un facteur 7 dans les lits de végétation aquatique. Plusieurs populations d'oiseaux migrateurs et sédentaires se sont développées. La population a été évaluée à  $8.7 \times 10^6$  kg de corbicules. Cette population a été estimée comme étant capable de filtrer le tiers du volume de la zone par jour (PHELPS, 1994).



La transparence de l'eau conduit à augmenter la lumière dans la colonne d'eau et cette limpidité favorise le développement des macrophytes (N. F. CARACO, J. J. COLE et D. L. STRAYER, 2006 ; COHEN et al., 1984 ; HESSE et al., 2015 ; PHELPS, 1994).

#### 2.3.2 Couplage entre les compartiments benthiques et pélagiques

Les corbicules lorsqu'elles sont abondantes, jouent un rôle majeur au niveau de l'écosystème, car elles filtrent l'eau des rivières à un taux élevé, et de ce fait, elles consomment le phytoplancton, mais en filtrant, elles transfèrent également le carbone organique particulaire et les bactéries (WERNER, 2008) depuis la colonne d'eau vers le lit de la rivière (BACHMANN, 2000 ; N. F. CARACO, J. J. COLE et D. L. STRAYER, 2006 ; HWANG et al., 2010 ; A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007 ; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012 ; L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014). Ce couplage des processus pélagiques et benthiques, est accru par le dépôt de fèces et pseudofèces<sup>16</sup> (Ronaldo SOUSA, RUFINO et al., 2008). Les corbicules contribuent de manière significative à la respiration benthique totale (et donc à la production de  $CO_2$ ) (HAKENKAMP et PALMER, 1999). Comme elles sont capables de se nourrir par le pied dans le sédiment, elles sont à même d'utiliser à la fois la matière organique

16. Les pseudofèces ressemblent aux fèces (excréments) stockés dans le fond de la cavité du bivalve, également agglomérées par un mucus sécrété par la moule, mais seules les pseudofèces seront expulsées sous une forme floconneuse dans le milieu extérieur (sans avoir à passer par le tube digestif ; cet excrétat n'est donc pas un véritable excrément, d'où le nom « pseudofèces », qui signifie « faux excréments »). La production de pseudofèces contribue au bon tri des particules se présentant dans la « cavité du manteau ». Elle correspond à l'élimination - avant ingestion par la bouche - de la fraction minérale de la matière en suspension (seston), puis au rejet différentiel des particules non-alimentaires) (source : wikipédia).



FIGURE 2.11 – Les corbicules sont en densité suffisante pour consommer tout le phytoplancton (paragraphe 2.3.1) et produire des anoxies partielles à l’interface eau sédiment.

contenue dans les sédiments et la colonne d’eau. De cette manière elles participent pour une bonne part au couplage entre les compartiments benthiques et pélagiques des cours d’eaux.

Les Drécènes sont elles aussi capables de doubler le taux de transfert du seston<sup>17</sup> vers le compartiment benthique. Dans les grands lacs russes, le transfert vers le fond de la matière organique se chiffre en centaine de milliers de tonnes par an (DAME et OLENIN, 2005).

Les corbicules laissent des coquilles vides en grande quantité dans le lit des rivières et ces dernières procurent un habitat pour d’autres organismes. On trouve parmi ces dernières des algues, des éponges, des gastéropodes, et des invertébrés benthiques attirés par la complexité accrue de l’habitat (CROOKS, 2002 ; ILARRI, FREITAS et al., 2012 ; ILARRI, SOUZA et al., 2014 ; A. Y. KARATAYEV, L. E. BURLAKOVA et PADILLA, 2005 ; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012 ; Ronaldo SOUSA, RUFINO et al., 2008). Les coquilles peuvent également former un substrat pour l’accrochage des moules zébrées. Par leur activité de fouissage, les corbicules détruisent la surface initiale du sédiment. Elles arrivent à descendre un peu plus en profondeur la zone anoxique du sédiment par l’apport d’oxygène, elles augmentent la teneur en eau et l’activité microbienne au sein du compartiment oxygéné (ZHANG et al., 2011). Si on l’examine à taille de coquille égale, cette activité de travail du sédiment (**bioturbation**) est moins importante que celle des palourdes *Venerupis aurea* mais supérieure à celle des anodontes *Anodonta grandis* (MAJDI, BARDON et GILBERT, 2014). Mais les corbicules de petite taille ont une activité de bioturbation plus importante, et surtout, comparées aux autres bivalves, les corbicules peuvent vivre en très forte densité, et agir ainsi de manière très importante sur le compartiment benthique. Par leur alimentation par le pied (Paragraphe 2.2.2), elles diminuent l’abondance de bactéries et des microorganismes dans les sédiments (VAUGHN et HAKENKAMP, 2001).

17. Le seston, désigne l’ensemble des particules, de toute nature, minérales, mortes ou vives, d’origine organique ou inorganique en suspension dans l’eau



Les corbicules et les moules zébrées transfèrent la matière organique vers le compartiment benthique par leur activité de filtration du seston (phytoplancton et matières en suspension). Les corbicules remuent le sédiment, et sont capables de consommer les micro-organismes dans ce dernier.

### 2.3.3 Conséquence sur les nutriments

En estuaire, par leur consommation du phytoplancton, les peuplements de bivalves abondants sont susceptibles de relarguer une partie de l'azote et phosphore dans la colonne via les excreta et du fait de la décomposition microbienne des déchets organiques (NEWELL et al., 2005). Cependant les dépôts biologiques favorisent la perte nette à l'échelle de l'écosystème de N et P par enfouissement dans le sédiment et par des processus couplés de nitrification-dénitrification par les bactéries. L'augmentation de la transparence de l'eau peut également favoriser le développement du microphytobenthos. Ce dernier peut entrer en compétition pour l'azote avec les bactéries nitrificatrices, et potentiellement réduire les processus de nitrification-dénitrification, mais il tend à piéger N et P dans les sédiments limitant leur régénération vers la colonne d'eau (NEWELL et al., 2005).



*Dreissena polymorpha*

Dans les situations dans lesquelles les bivalves sont en très forte densité, ou dans les zones où le brassage de l'eau est peu important, les dépôts biologiques sont susceptibles de stimuler le métabolisme microbien à un niveau conduisant à développer des conditions anaérobies. Dans ces situations, les nutriments sont alors régénérés principalement sous forme d'ammonium  $NH_4^+$  et phosphate  $PO_4^{3-}$  avec peu ou pas de pertes liées à l'enfouissement ou la dénitrification (NEWELL et al., 2005).

Par contre, tant que les conditions restent aérobies, il est estimé que ~20% de l'azote est dénitrifié. De plus, du fait de la transparence accrue de l'eau, une partie de l'azote inorganique relargué par les dépôts est susceptible d'être absorbé par le microphytobenthos (NEWELL et al., 2005).

En conditions expérimentales, le relargage d'orthophosphate par la consommation accrue de la matière organique liée à l'activité de bioturbation est compensé par les processus d'oxydation lié à la pénétration d'oxygène dans le sédiment. Donc l'activité de fouissage des corbicules est neutre en termes de flux de phosphore à l'interface eau sédiment, par contre les corbicules relarguent du phosphore directement dans la colonne d'eau (ZHANG et al., 2011).

L'introduction de corbicules tend aussi à augmenter le relargage d'azote organique dissous (ammonium, nitrates et nitrites) dans la colonne d'eau. D'une part parce que l'activité de bioturbation augmente des processus d'advection-diffusion entre l'eau interstitielle des sédiments et la colonne d'eau et d'autre part du fait de l'excrétion d'azote par les bivalves (COELHO et al., 2018 ; ZHANG et al., 2011).

Toutefois, à l'échelle du bassin, malgré ce relargage d'une partie des nutriments vers la colonne d'eau, les corbicules par leur pression de filtration conduisent à transférer une part importante de N et P vers le fond du cours d'eau (DAME et OLENIN, 2005 ; YAMAMURO et KOIKE, 1994). La modélisation montre que la charge en carbone organique transférée vers l'estuaire peut être diminuée de 14% à 40%, par rapport à des conditions sans bivalves. Les bivalves favorisent l'enlèvement de 11% à 23% de la charge d'azote de leurs cours d'eaux (CERCO et NOEL, 2010).



*C. fluminea* augmente le relargage d'orthophosphate, d'ammonium et de nitrate depuis le sédiment vers

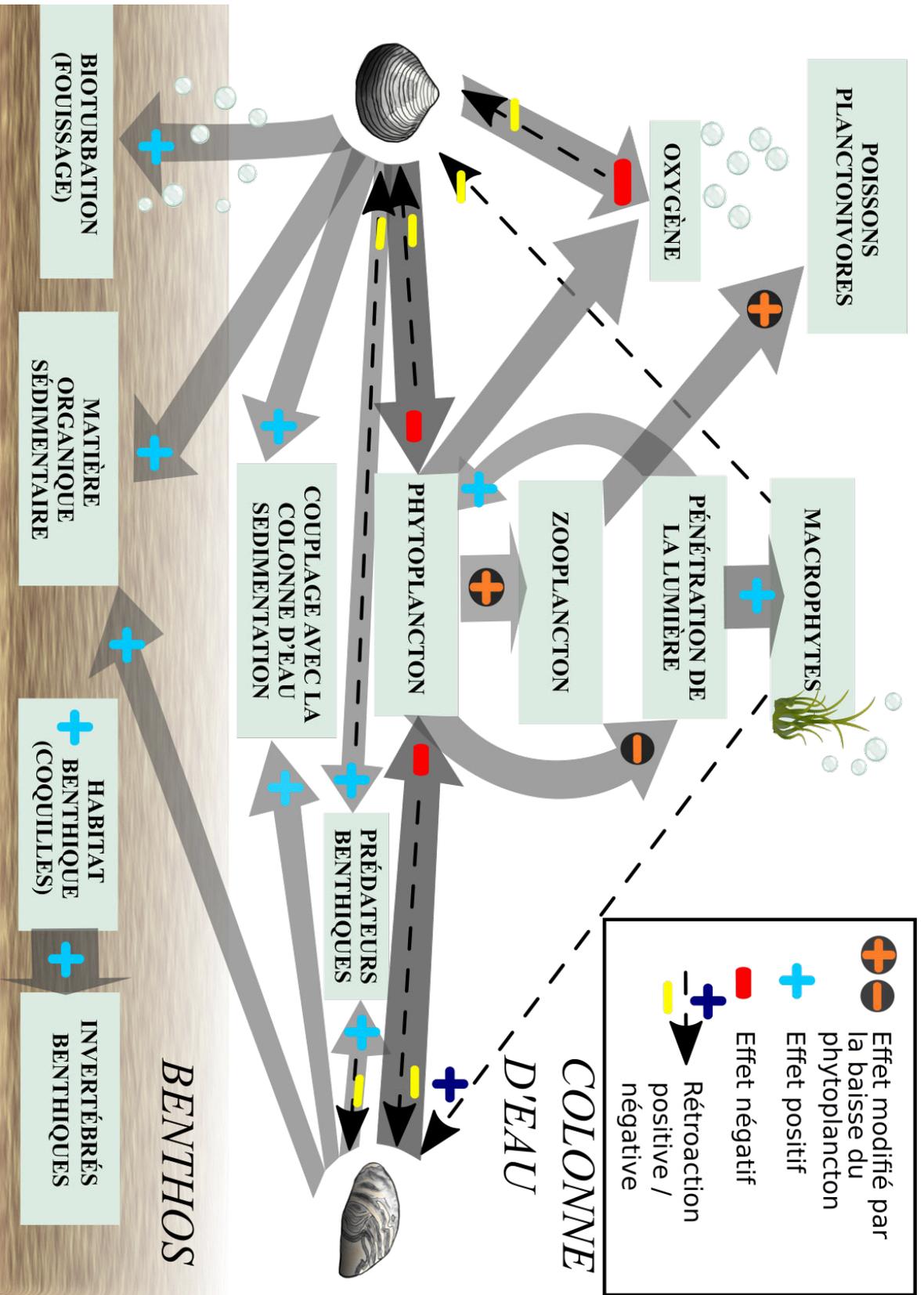


FIGURE 2.12 – Impact sur l'écosystème de la corbicule *Corbicula fluminea* et de la moule zébrée *Dreissena polymorpha*, modifié d'après A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al. (2007).

la colonne d'eau. Toutefois, à l'échelle du cours d'eau, le phytoplancton consommé est transféré vers le compartiment benthique, et ce processus tendrait à diminuer le transfert de N et P vers l'estuaire.

### 2.3.4 Conséquence sur l'oxygène dissous

Les corbicules sont susceptibles de causer une diminution de l'oxygène dans l'eau d'une part en réduisant la photosynthèse et en augmentant la consommation de l'oxygène benthique L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014. Une modélisation des conséquences de la présence des corbicules dans la Meuse, montre que la concentration en oxygène dissous diminue lorsque les corbicules sont suffisamment abondantes pour clarifier l'eau. Globalement, lorsqu'on modélise les processus en conditions estivales, la consommation en oxygène dissous de la colonne d'eau et du compartiment benthique a diminué dans le scénario avec corbicules, du fait de la diminution de la consommation par la respiration par les bactéries benthiques, qui est bien plus importante que la respiration des corbicules. Mais cette diminution de la consommation est accompagnée d'une forte diminution de la production d'oxygène par la photosynthèse du fait d'une disparition du phytoplancton (L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014).



*Corbicula fluminea* (LOPEZ et al., 2006).

Globalement, les études montrent bien une situation dégradée pour la demande en oxygène dans les rivières du fait de la diminution de la photosynthèse et l'augmentation de la consommation en oxygène dissous pour la corbicule (GARNIER, BILLEN et PALFNER, 1999 ; HAKENKAMP et PALMER, 1999) et les moules zébrées (Nina F. CARACO, Jonathan J. COLE, FINDLAY et al., 2000). L'augmentation de la consommation en oxygène n'est que partiellement compensée par le développement des macrophytes du fait d'une transparence accrue de l'eau (Nina F. CARACO, Jonathan J. COLE, FINDLAY et al., 2000). Le processus de consommation de l'oxygène par les corbicules benthiques est en fait composé de



FIGURE 2.13 – Des mortalités massives de corbicules peuvent intervenir en été, lorsque la demande métabolique est forte et que les corbicules sont affaiblies par manque de nourriture, ou que se développent des conditions anoxiques sur le fond de la rivière qui conduisent à l'augmentation de la concentration en ammonium  $NH_4^+$ .

trois phénomènes : la respiration, l'augmentation de la consommation de l'oxygène par les bactéries, et l'oxydation des sédiments du fait du travail de bioturbation (paragraphe 2.3.2) et d'irrigation du sédiment (ZHANG et al., 2011).



*C. fluminea* augmente la consommation d' $O_2$  au niveau des sédiments. Les moules zébrées et les corbicules tendent à dégrader les conditions du milieu en termes d'oxygène dissous.

### 2.3.5 Conséquence sur les poissons, les oiseaux et les mammifères

Les corbicules par leur biomasse importante peuvent favoriser le développement des espèces benthivores (CANTANHÊDE et al., 2008 ; LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012 ; PHELPS, 1994) ou celles qui peuvent bénéficier d'un développement de la végétation aquatique. Une augmentation de la productivité de ces espèces peut résulter en une rétroaction négative (PHELPS, 1994) conduisant à une diminution des densités (ROBINSON et WELLBORN, 1988) et certaines études ont permis de mettre en évidence des baisses, parfois fortes, des densités de corbicules, du fait de cette prédation (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012). Le comportement fouisseur des corbicules permet toutefois de limiter l'impact de la prédation (ROBINSON et WELLBORN, 1988).

Parmi les prédateurs de la corbicule, on peut citer :

- Le Rat musqué *Ondrata zibethicus* (NAUDON, 2014). Ce dernier laisse de gros tas de coquilles vides près de ses terriers, et facilite le repérage spatial de la présence de corbicules (CHEVALIER, 2014).
- Le canard colvert *Anas platyrhynchos* (NAUDON, 2014).
- Les canards plongeurs *Aythya sp.* (NAUDON, 2014 ; PHELPS, 1994).
- Les aloses américaines *Alosa sapidissima* (ROBINSON et WELLBORN, 1988).
- Le Silure glane *Silurus glanis* (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012).
- Les Carpes *Cyprinus* (ROBINSON et WELLBORN, 1988).
- La perche soleil *Lepomis gibbosus* (LUCY, A. KARATAYEV et L. BURLAKOVA, 2012).
- Les écrevisses (PATRICK, WATERS et GOLLADAY, 2017).

En estuaire on trouve aussi :

- Le flet *Platichthys flesus* (GAMA et al., 2016).
- La sole *Solea solea* (GAMA et al., 2016).

Certaines espèces sont associées  $\oplus$  aux fortes densités de corbicules en estuaire, probablement parce que les coquilles fournissent un habitat favorable pour les macroinvertébrés, tandis que d'autres sont négativement affectées  $\ominus$ .

- $\oplus$  L'anguille européenne *Anguilla anguilla* (ILARRI, SOUZA et al., 2014).
- $\oplus$  La truite *Salmo trutta fario* (ILARRI, SOUZA et al., 2014).
- $\oplus$  La crevette grise *Crangon crangon* (ILARRI, SOUZA et al., 2014).
- $\oplus$  Le Gobie tâcheté *Pomatoschistus microps*. (ILARRI, SOUZA et al., 2014)
- $\oplus$  Le Syngnathe *Syngnathus acus* (ILARRI, SOUZA et al., 2014).
- $\ominus$  Le crabe vert *Carcinus maenas* (ILARRI, SOUZA et al., 2014).

La moule zébrée lorsqu'elle est abondante peut également constituer un met de choix pour les populations d'oiseaux. L'introduction de la moule zébrée dans le lac de Constance a ainsi conduit à multiplier par trois les populations d'oiseaux (WERNER, 2008). Les moules zébrées ont aussi un impact direct sur les poissons (A. Y. KARATAYEV, PADILLA et al., 2007). Il existe enfin un impact indirect des moules zébrées car les coquilles procurent un habitat important pour les invertébrés.

Globalement, les espèces planctonivores sont affectées négativement. D'abord car le phytoplancton et donc le zooplancton diminuent. Ensuite, par compétition avec les espèces benthiques. Enfin, car la prédation des poissons sur les larves augmente du fait d'une eau plus transparente (DAME et OLENIN, 2005).

### 2.3.6 Conséquence sur les bivalves natifs

Avant leur invasion par les corbicules et les drécènes, la biomasse de bivalves des cours d'eaux européens était dominée par des espèces des familles *Unionidae*, *Margaritiferidae* et les petits coquillages de la famille des *Sphaeridae*. Plusieurs espèces de moules ont maintenant un statut de danger critique d'extinction sur la liste rouge de l'IUCN et en Amérique du Nord ces espèces sont également en forte réduction (Ronaldo SOUSA, RUFINO et al., 2008). Bien que la baisse des bivalves autochtones soit due à des modifications écosystémiques de source anthropique, il apparaît que l'invasion par la corbicule a elle aussi eu un impact négatif sur l'abondance et la diversité des bivalves d'Amérique du Nord et d'Europe (Ronaldo SOUSA, RUFINO et al., 2008 ; David L. STRAYER, 1999 ; VAUGHN et HAKENKAMP, 2001). Lorsqu'elles sont en forte densité, les corbicules par leur activité fouisseuse sont susceptibles de réduire l'habitat disponible pour les Unionidés et Sphaeridés (VAUGHN et HAKENKAMP, 2001). La nourriture dans le substrat et la filtration dans la colonne d'eau sont susceptibles d'affecter le recrutement des Unionidés (FERREIRA-RODRÍGUEZ, FANDIÑO et al., 2018 ; FERREIRA-RODRÍGUEZ, Ronaldo SOUSA et PARDO, 2018 ; HAKENKAMP et PALMER, 1999 ; Ronaldo SOUSA, RUFINO et al., 2008 ; WERNER, 2008)<sup>18</sup>.

Les bivalves natifs ont évolué pour s'adapter à des écosystèmes stables dans lesquels ils tendaient à atteindre des densités proches de la capacité d'accueil des écosystèmes (stratégies K). La mise en place d'une compétition forte, intra et interspécifique pour les ressources se traduit par des maturités tardives, une durée de vie longue. Pour les *Unionidae* et *Margaritiferidae* une stratégie de reproduction pouvant inclure des larves de type **glochidie** qui se fixent sur les branchies du poisson avec un succès faible, mais la possibilité de se déplacer, et d'être relâchées comme juvéniles de grande taille (McMAHON, 2002).

Au contraire, les corbicules sont adaptées à des milieux instables desquelles elles sont susceptibles de disparaître (stratégies R) et qu'elles doivent pouvoir recoloniser rapidement. Elles grandissent vite, présentent une mortalité importante ce qui conduit à des populations dominées par des juvéniles. Si elles allouent une faible part de leur énergie à la reproduction (voir paragraphe 2.2.1) leur taux d'assimilation élevé, la production de juvéniles formés à l'intérieur de leurs branchies, la possibilité d'avoir plusieurs reproductions par an, leur donne un potentiel expansif important (McMAHON, 2002).

Les drécènes ont également une croissance rapide, plusieurs reproductions, et ont surtout des larves qu'elles relarguent en vaste quantité et qui sont susceptibles d'être transportées très rapidement vers l'aval des rivières.



Les stratégies de vie à colonisation rapide adaptées aux milieux instables font des drécènes et corbicules des espèces invasives à succès, et des compétiteurs importants pour la faune de bivalves autochtones.

### 2.3.7 Conséquences sur les installations industrielles

L'impact des bivalves invasifs sur les installations industrielles est principalement lié à leur capacité à établir des populations denses sur des structures immergées et dans les conduites de pompage d'eau dans les rivières. A ce titre, l'impact est très différent entre les moules zébrées et les corbicules. Les moules zébrées s'attachent par un filament de byssus aux surfaces dures. Une moule adulte, dont la coquille est longue de 25 mm est capable de produire près de 500 filaments

18. Il existe des cas où il n'a pas été observé d'impact négatif sur les bivalves natifs (LEFF, BURCH et McARTHUR, 1990).

(ROSA et al., 2011). Par ce biais, les drécènes s'attachent aux grilles de prises d'eau, dans les tuyaux dans les pompes et autres équipements et elles sont difficiles à déloger. Les filaments restent sur le tuyau même quand les moules ont été arrachées. Elles sont aussi capables de s'attacher les unes aux autres et de former des masses qui augmentent la probabilité de colmater les filtres en aval (ROSA et al., 2011). La stratégie de reproduction des moules zébrées avec les larves véligères qui se sédentarisent après trois à cinq semaines leur permet de s'immiscer dans les interstices et les conduites. Par comparaison, les capacités de colmatage et les impacts industriels des corbicules sont beaucoup plus réduites, car ces dernières ne s'accrochent pas aux surfaces (ROSA et al., 2011).

### 2.3.8 Stratégie d'expansion et fragilité des corbicules

Lorsque des conditions adverses apparaissent, i.e. augmentation des températures, conditions de débit faibles, diminution de l'oxygène dissous, relargage d'ammonium  $NH_4^+$ , épisode de famine (paragraphe 2.2.2) des épisodes de mortalité massive peuvent survenir (COHEN et al., 1984; HWANG et al., 2010; ILARRI, CARLOS ANTUNES et al., 2011; W. G. MCDOWELL, W. H. MCDOWELL et BYERS, 2017; RONALDO SOUSA, CARLOS ANTUNES et LÚCIA GUILHERMINO, 2007; RONALDO SOUSA, RUFINO et al., 2008; DAVID L. STRAYER, 1999; VOHMANN et al., 2010).

L'introduction des corbicules dans un milieu conduit à diminuer les abondances de chlorophylle-a particulièrement en été lorsque le débit diminue et que la filtration par les corbicules conduit à diminuer les concentrations sous le seuil de  $10 \mu\text{gL}^{-1}$ . Ces niveaux de concentration sont trop faibles pour répondre à la demande en nourriture des corbicules lorsqu'elles sont en forte densité (FOE et KNIGHT, 1985; JACQUES MOUTHON et PARGHENTANIAN, 2004; RAJAGOPAL, VELDE et VAATE, 2000; VOHMANN et al., 2010). Par ailleurs, les corbicules ont tendance à diminuer la concentration en oxygène de l'eau (paragraphe 2.3.4) et augmenter la teneur en ammonium  $NH_4^+$  (paragraphe 2.3.3). Lorsque les températures augmentent, et que le milieu devient anoxique, l'arrêt des processus de dénitrification peut conduire à des conditions létales pour les corbicules (Figure 2.13). De tels épisodes de mortalité massives ont été observés par l'éclusier de Malon en Vilaine (Florian Guérineau, Fédération de pêche 35, com. pers.). Elles sont une conséquence des effets de rétroaction provoqués par la corbicule elle-même (Figure 2.12).

De fait, les corbicules sont moins tolérantes aux fluctuations environnementales (températures élevées, émergences, PH et Calcium faibles (paragraphe 2.2.5)) (RONALDO SOUSA, RUFINO et al., 2008) que les mollusques autochtones. Mais elles compensent cette faiblesse par une stratégie de développement extrêmement efficace, adaptée à la vie dans des milieux instables, dans lesquels des événements catastrophiques interviennent, qui provoquent dans tous les cas des mortalités massives quelles que soient les capacités des mollusques résidents à résister aux conditions de stress environnemental. Ainsi, elles ont développé des stratégies pour atteindre très rapidement des densités approchant la capacité d'accueil du système. Elles sont aussi capables de retrouver rapidement une population importante malgré la baisse (MCMAHON, 2002).

Le succès invasif des corbicules peut être aussi lié à leur mode de reproduction asexuée (GOMES et al., 2016; L. M. PIGNEUR, HEDTKE et al., 2012) (Paragraphe 2.2.1). Ce dernier se traduit par une très faible diversité génétique qui n'est pas forcément un frein dans la stratégie de vie de la corbicule, mais va accentuer l'effet massif des mortalités lorsqu'elles surviennent, car tous les individus ont la même sensibilité aux conditions défavorables. Cependant, un seul individu transporté dans un nouveau milieu a le potentiel pour fonder une nouvelle population.



Les moules zébrées sont présentes dans certains cours d'eau français depuis plus d'un siècle, dans certains milieux elles peuvent passer inaperçues et ne pas modifier l'écosystème. Par leur capacité de filtration, elles jouent un rôle important dans le couplage entre la colonne d'eau et le compartiment benthique.



En règle générale, les corbicules, après leur introduction sont capables d'apporter un changement majeur à l'écosystème (FRANCO et al., 2012; PHELPS, 1994; L. M. PIGNEUR, FALISSE et al., 2014; Ronaldo SOUSA, RUFINO et al., 2008) en impactant des compartiments variés incluant la végétation aquatique, le phytoplancton, le zooplancton et les niveaux trophiques supérieurs (poissons, mammifères, oiseaux). Elles sont capables d'altérer les processus de recyclage de la matière organique dans les sédiments (HAKENKAMP et PALMER, 1999).





## 3. État des lieux sur le bassin de la Vilaine

### 3.1 Synthèse des données actuelles sur la répartition

#### 3.1.1 Méthode

Les données ont été collectées à partir de quatre sources d'information : (1) les listes taxonomiques des IBGN<sup>1</sup>, ont été collectées auprès des DREAL (Bretagne et Pays de la Loire), des Conseils Départementaux (Ille et Vilaine et de Loire Atlantique), des Fédérations de Pêche et de Protection des milieux Aquatiques (Loire Atlantique et Morbihan) et des opérateurs de bassin versant du bassin de la Vilaine (16 structures ont participé) ; (2) l'EPTB Vilaine a mis en place, en 2019, un site internet et une application smartphone dédiés, permettant de renseigner les observations de Corbicule (voir annexe 7.2) ; (3) quelques données complémentaires ont été acquises sur les stations ayant fait l'objet du protocole de suivi EPTB (voir chapitre 4) ; enfin (4) un protocole de recherche d'ADN environnemental a été appliqué (voir section 3.2).

Bien que le protocole IBGN ne soit pas spécifique aux bivalves, leur présence est notée au minimum au rang du genre, ce qui permet de détecter la présence de la Corbicule. Très souvent on retrouve également des *Pisidium* et des *Sphaerium* dans les échantillons IBGN. Dans de très rares cas, des unionidés (mulette ou anodonte) sont trouvés. Si de nombreuses données ont ainsi pu être rassemblées grâce aux IBGN, l'application dédiée n'a pas pour l'instant permis de recueillir de nombreuses informations.

Les données transmises par les différents partenaires n'étaient évidemment pas structurées de la même manière. Un travail sur les bases de données a donc été nécessaire pour les rendre homogènes et pouvoir les compiler au sein de 2 bases de données SIG :

- Une base « Opérateurs », avec les données de corbicules et d'autres bivalves, issues des IBGN ponctuels ou de suivi, et des protocoles spécifiques (EPTB, FDPPMA, ADNe), auxquelles s'ajoutent des données ponctuelles d'observation (application dédiée, Figure 7.1).
- Une base « Réseaux de suivi », avec uniquement des données annuelles sur les Corbicules. Cette base est constituée à partir des données IBGN des stations de suivi RCO, RCS, et des réseaux départementaux. Ces données sont pour la majorité disponibles à partir de 2007.

1. Indice Biologique Global Normalisé

### 3.1.2 Résultats

Les données recueillies ne permettent pas de définir la date d'apparition exacte de la Corbicule sur le bassin de la Vilaine. En effet (i) un grand nombre de données sont très récentes (entre 2016 et 2019), (ii) les données anciennes du suivi (RCO-RCS) recueillies datent de 2007 et les stations ne sont pas étudiées de manière systématique tous les ans. Cependant, certaines données complémentaires d'observation nous apportent des informations ponctuelles d'importance.

Ainsi la présence de la Corbicule au niveau du barrage d'Arzal est avérée depuis au moins 2002. C'est à notre connaissance la plus ancienne date connue de présence à l'échelle du bassin de la Vilaine. La corbicule est aussi présente depuis au moins 2007 (plus anciennes données IBGN recueillies) sur les stations de Vilaine (Rieux, Sainte Marie et Guichen). Sur l'Oust, sa présence est avérée depuis 2008 (début du suivi IBGN), sur les stations de Saint Martin et Pleugriffet. Détectée entre 2007 et 2013 sur l'Isac à Guenrouet, la Corbicule n'y est étrangement plus mentionnée par la suite ; ceci est confirmé par l'absence de l'espèce lors des prélèvements de 2019. On notera que l'ADNe (3.2) révèle sa présence en amont de Blain.

Sur le Meu, une première apparition de la Corbicule est remarquée à Chavagne en 2012; elle y est observée depuis 2017 sur la station de Mordelles un peu plus en amont.

Sur le secteur Rennes, une observation ponctuelle rapporte la présence de corbicules en 2010 au niveau de la Plaine de Baud. Elle est ensuite relevée à Cesson et à Acigné (respectivement depuis 2015 et 2016) dans le cadre des suivis pluriannuels. Elle est aussi retrouvée sur l'Ille à Saint Grégoire depuis 2013.

On notera l'observation de Corbicules à l'étang de Chatillon en Vendelais en 2008 lors de sa vidange. Il est fort probable que son introduction dans le milieu soit bien antérieure et, en raison de sa position très amont, plutôt liée à la pratique de la pêche (introduction involontaire lors d'empoissonnement) qu'à une colonisation "naturelle".

On notera par ailleurs, la présence de la Corbicule sur le bassin du Blavet depuis au moins 2008, et sur le canal d'Ille et Rance depuis au moins 2004. Aussi des phénomènes de colonisation par l'amont du bassin ne sont pas à exclure par les connexions entre les voies navigables de l'Oust et du Blavet d'une part, et de la Vilaine avec la Rance d'autre part. Concernant le lien avec l'Erdre, nous ne disposons pas de données suffisantes pour l'évaluer.

Sans avoir la prétention d'être très précise, la carte présentée en figure 3.1 permet de donner un aperçu grossier de sa progression à partir de notre jeu de données.

Ces données montrent aussi que la Corbicule reste pour le moment cantonnée aux grands cours d'eau (Figure 3.2). Certains affluents semblent indemnes : le Ninian et l'Yvel, l'Aff en amont de la Gacilly, la Seiche, la Flume et le Chevré. Le rôle de barrière infranchissable des ouvrages hydrauliques (seuils de moulin, barrages et retenues d'eau) semble permettre un ralentissement ou un arrêt de la progression de la Corbicule sur certains secteurs.

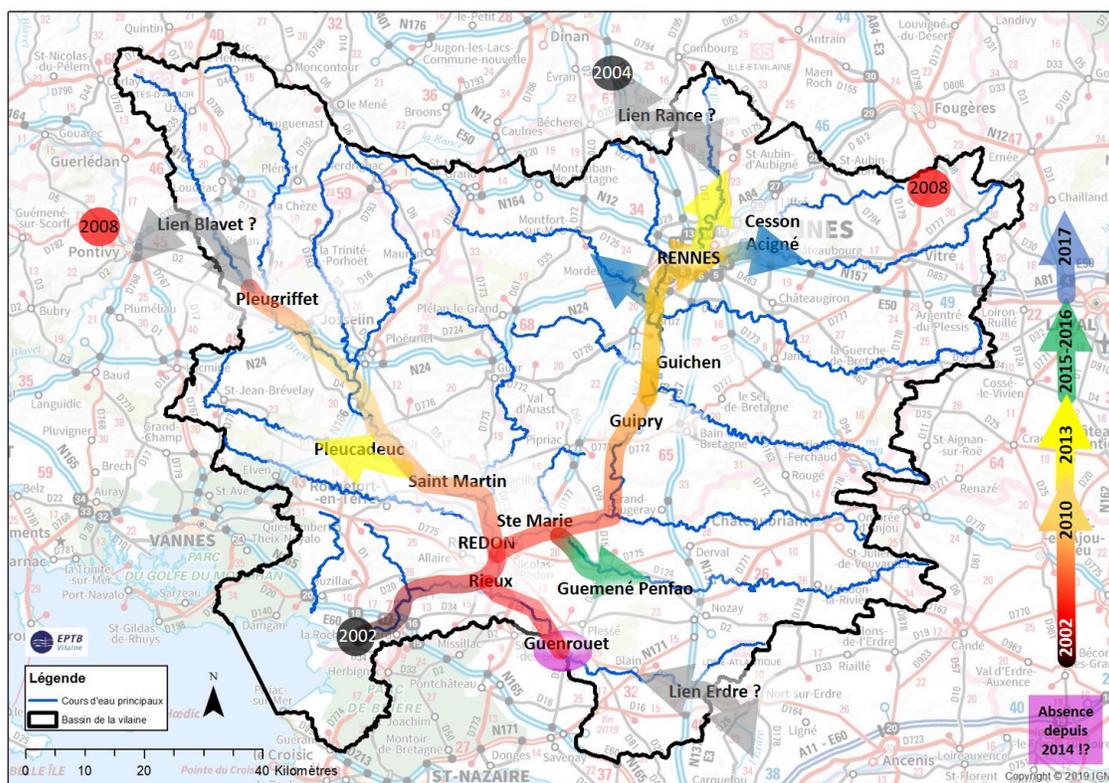


FIGURE 3.1 – Carte de progression de la Corbicule issue des données collectées.

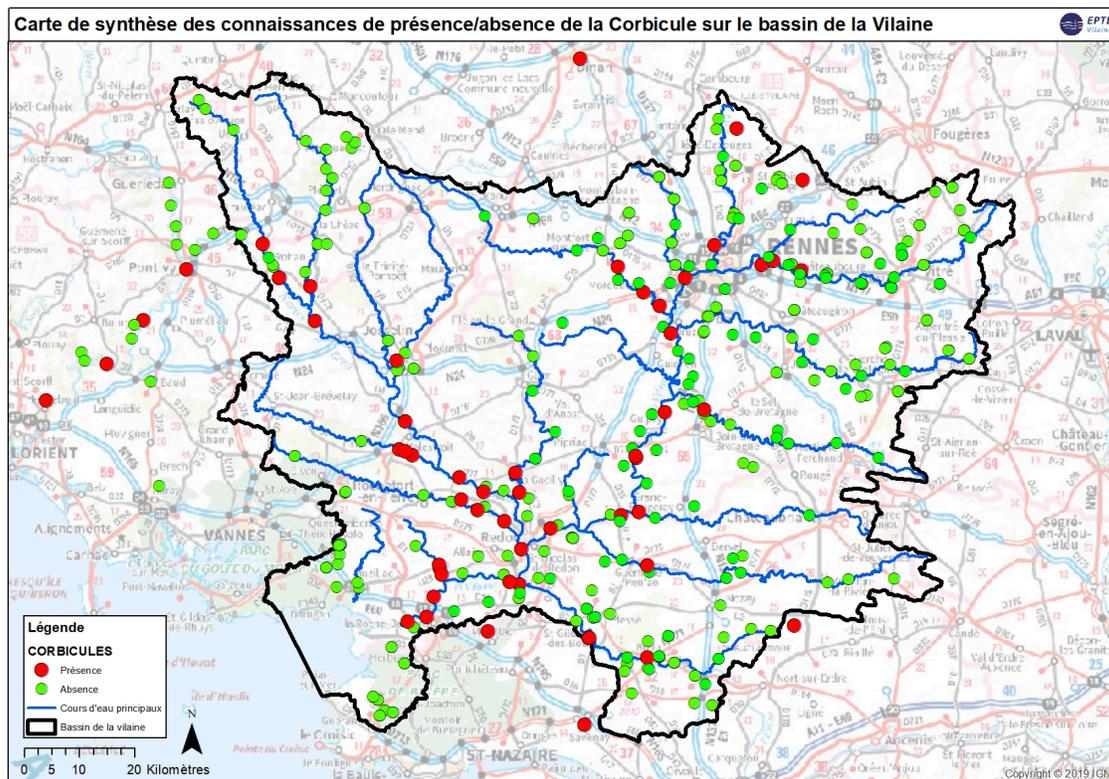


FIGURE 3.2 – Carte des données de présence de la Corbicule, données 2002 à 2019.

## 3.2 Recherche par ADN environnemental

### 3.2.1 Méthode

En complément des données d'observation de terrain (IBGN, observation spécifique), il a été décidé de réaliser une campagne d'échantillonnage par la méthode de l'ADN environnemental sur 8 stations (Figure 3.3). Cette méthode permet de déceler, dans des échantillons d'eau, les fragments d'ADN d'espèces cibles. Pour notre étude, nous avons choisi de rechercher l'ensemble des espèces de bivalves d'eau douce (dont les espèces invasives *Corbicula sp.* et *Dreissena polymorpha*), ainsi que l'Ecrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*), une autre espèce invasive du bassin de la Vilaine.

### 3.2.2 Résultats

L'analyse des données ADNe montre une présence de la Corbicule sur toutes les stations hormis Ploërmel et Muzillac (Figure 3.4). Pour ces deux stations, le nombre de lecture ADNe étant faible, l'information d'absence est jugée peu fiable. Concernant Muzillac, l'absence est possible car le bassin versant du Saint-Eloi est isolé du bassin de la Vilaine. Pour Ploërmel, il y a plus de doute, notamment parce que la Corbicule a été observée sur l'Yvel (observation 2019), en aval du Moulin de Roncin, soit à un peu plus de 2km en aval du point de mesure ADNe. Une prospection spécifique pourrait permettre de lever les doutes pour ces deux stations.

Par ailleurs, cette méthode apporte des informations complémentaires aux observations de terrain récoltées. Ainsi, bien que l'étude porte sur la Corbicule, nous disposons d'une information sur l'ensemble des bivalves présents qui sont des espèces difficiles à échantillonner et à identifier. Les résultats mettent en avant la richesse insoupçonnée des cours d'eau du bassin de la Vilaine en termes de bivalves indigènes, avec un total de 20 espèces et de belles surprises sur les espèces contactées (Tableau 3.1). On notera notamment que parmi ces espèces, trois sont nouvelles pour la Bretagne (PASCO, 2013). L'Anodonte comprimée *Pseudanodonta complanata*, la Mulette des peintres *Unio pictorum* et la Pisidie des marais *Euglesa pseudosphaerium*. La Pisidie des rivières *Odhneripisidium moitessierianum* n'était quant à elle connue qu'en Loire Atlantique.

La totalité du rapport de Vincent Prié sur l'application de la méthode ADNe sur le bassin de la Vilaine en 2019 est disponible en annexe 7.2.

## 3.3 Discussion sur la répartition de la corbicule

La corbicule est présente sur le bassin versant de la Vilaine depuis le début des années 2000 (observation ponctuelle en 2002 au barrage d'Arzal) et plus largement retrouvée à partir de 2007/2008 sur la Vilaine, le canal de Nantes à Brest (Oust et Isac) (SPITZ et CAUDAL, 2016). Si les données recueillies au niveau des réseaux de suivi RCO et RCS ne permettent pas de préciser la période exacte d'arrivée de la corbicule, leur analyse a tout de même permis de reconstituer grossièrement les étapes de la colonisation du bassin, avec une colonisation semble-t-il d'aval vers l'amont.

Son arrivée dans le secteur de Rennes apparaît être récente (2016) avec une observation ponctuelle à la Plaine de Baud. La colonisation de la corbicule sur le bassin de la Vilaine s'est peut-être effectuée via le canal de Nantes à Brest, en provenance de la Loire où elle est présente depuis les années 1980 (HESSE et al., 2015). On sait que cette dernière est présente sur la partie aval de l'Erdre. Les données collectées ont également montré sa présence à Guenrouet de 2007 à 2013, donc de l'autre côté du canal de Nantes à Redon, sur le versant Vilaine. Son absence actuelle sur le secteur reste inexpiquée alors qu'elle est présente en amont de Blain et sur Redon.

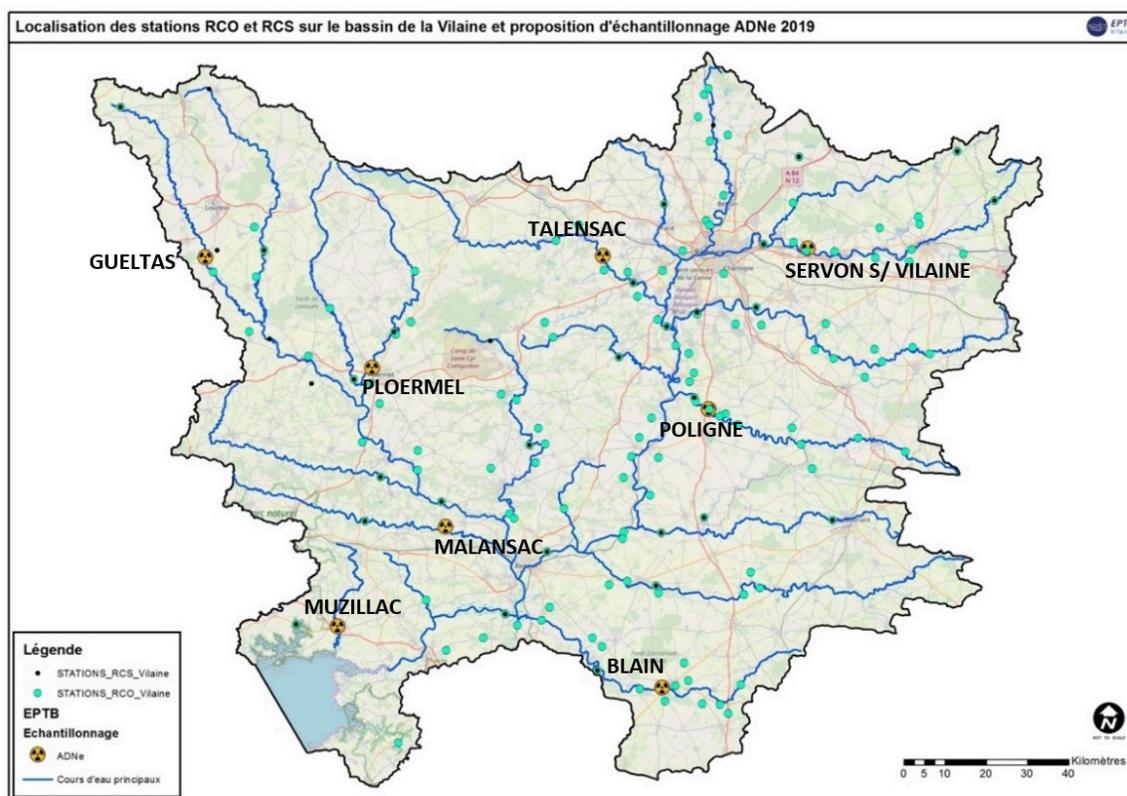


FIGURE 3.3 – Localisation des stations d'échantillonnage par ADNe



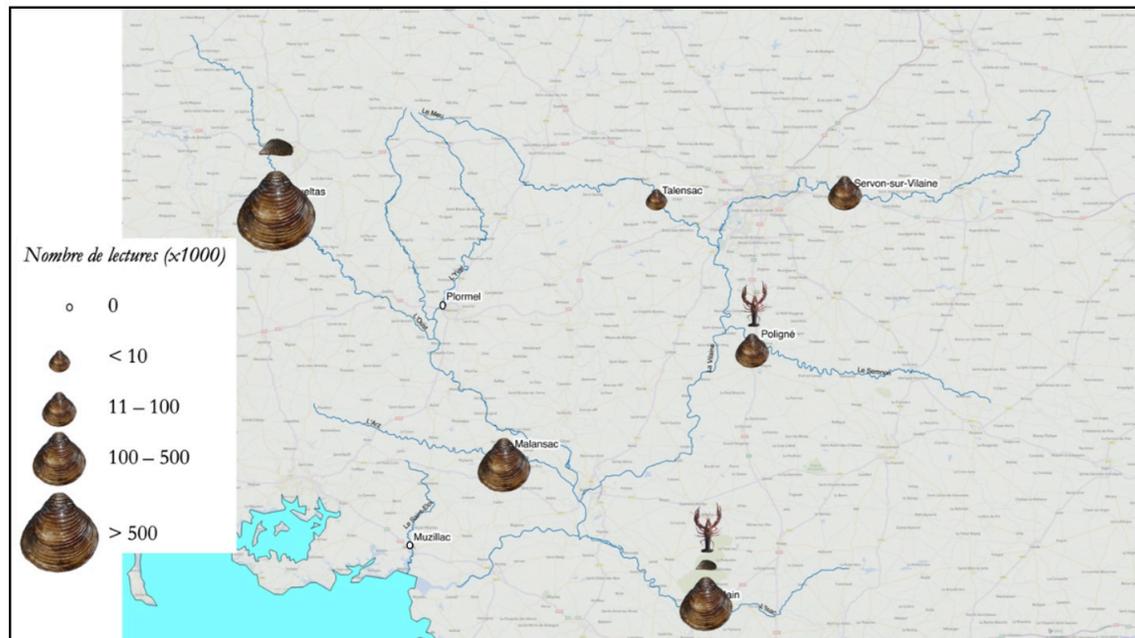


FIGURE 3.4 – Site de localisation des 3 espèces invasives recherchées. La taille des icônes indique l'abondance inférée à partir du nombre de lectures, sauf pour l'écrevisse de Louisiane pour laquelle les analyses ne donnent que la présence/absence

Le sablier "Saint-Germain", construit en 2001, a navigué sur la Loire en amont de Nantes et la Vilaine jusqu'à Redon, jusqu'en 2013. Ces transferts de sable pourraient aussi avoir apporté la Corbicule via le barrage d'Arzal.

On notera aussi la présence de la corbicule sur la Rance, au moins depuis 2004 à Saint-Domineuc et Tréverien, et en 2012 à Lehon / Dinan. La Rance est reliée au bassin de la Vilaine par le canal d'Ille et Rance. La corbicule est également observée en 2018 sur l'étang du Boulet (réserve d'eau pour le canal d'Ille et Rance) et l'étang d'Ouée (bassin de l'Illet). Une colonisation de l'amont du bassin de la Vilaine à partir du bassin de la Rance est donc possible.

Le bassin du Blavet, lui aussi colonisé, est relié hydrauliquement à l'Oust par le canal de Nantes à Brest. Nous ne savons pas si les populations de corbicule présentes sur le Blavet sont parvenues par l'Oust ou par Lorient à l'aval.

Les données montrent aussi que la corbicule est encore absente de nombreux affluents : le Ninian et l'Yvel, l'Aff en amont de la Gacilly, la Seiche, la Flume et le Chevré semblent épargnés. Les rivières concernées constitueraient pourtant des habitats propices à la corbicule, et leur colonisation n'est probablement qu'une question de temps.

Les données collectées par la méthode de l'ADN environnemental ont révélé l'existence d'une belle diversité des espèces de bivalves indigènes sur certains secteurs. Sur le terrain, il semble que les zones où est rapportée la présence d'Unionidés sont celles où la corbicule est en densité moindre, voire absente. c'est le cas par exemple du secteur de Guenrouet sur l'Isac (la corbicule semble y avoir disparu) ou de la Seiche, sur lesquels des anodontes ont été retrouvées en grand nombre. L'influence négative des corbicules sur le genre *Unio*, démontrée en laboratoire (FERREIRA-RODRÍGUEZ, FANDIÑO et al., 2018) et sur le terrain (KREBS, BARKETT et BEGLEY, 2014), est une préoccupation majeure

pour la biodiversité en Vilaine. Les suivis de secteurs en cours de colonisation et où les espèces locales sont présentes sont importants pour la compréhension des enjeux de préservation des secteurs indemnes.

Il est également important de protéger les rivières côtières sur lesquelles la corbicule n'est pas encore présente (SPITZ et CAUDAL, 2016). Ainsi, le cours d'eau du Saint-Eloi, isolé hydrographiquement du bassin de la Vilaine par l'estuaire de la Vilaine, semble indemne de corbicules. Une des recommandations est de prévenir son introduction par les pêcheurs transportant de l'eau depuis le bassin de la Vilaine : des actions de sensibilisations seraient à mener afin de minimiser les risques de propagation de la corbicule et donc limiter les processus de compétition alimentaire et d'habitats avec les espèces locales. En parallèle, il est également fort possible que certains ouvrages ralentissent la progression de l'espèce (ouvrage du Lac au Duc à Ploermel, ouvrages de moulin sur l'Arz, l'Aff, la Seiche, etc.). En certains secteurs, les réflexions portant sur la restauration de la continuité écologique devront donc prendre en compte la problématique de la corbicule et de manière générale des espèces invasives.



La corbicule est présente sur le bassin de la Vilaine depuis 2002 au moins. Elle a pu être introduite à partir du bassin de la Loire par le trafic fluvio-maritime. Soit depuis l'Erdre par le canal de Nantes à Brest, soit par le barrage d'Arzal à l'aval de la Vilaine, voire par ces deux voies simultanément. Le transport de vifs par les pêcheurs est également une des sources de propagation possible. En 2019, elle reste absente de nombreux affluents et des bassins côtiers **qui doivent être préservés des introductions accidentelles.**

## 4. Protocole de suivi 2019 : méthodes et résultats

### 4.1 Un protocole dédié au suivi de la corbicule

Un protocole de prélèvement reproductible a été rédigé et mis en oeuvre sur 4 stations du bassin (Annexe 7.2). Les stations ont été choisies sur l'axe Vilaine, en aval et en amont de Redon, et sur le canal de Nantes à Brest, sur l'Oust et l'Isac chenalisés (Figure 4.1).

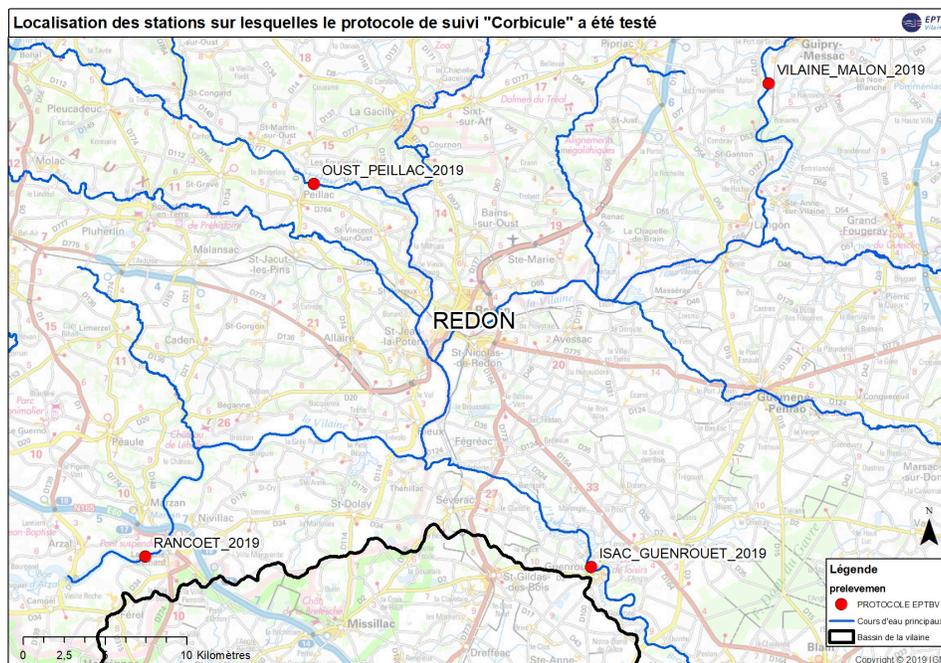


FIGURE 4.1 – Localisation des stations ayant fait l'objet du Protocole de suivi Corbicule

Le protocole Corbicule est inspiré du protocole de prélèvement des macro-invertébrés dans

les cours d'eau profonds et les canaux (prochainement normalisé AFNOR). Il est simplifié car les prélèvements ne visent que les bivalves:

- Seul le substrat de fond est échantillonné.
- Trois zones sont échantillonnées : zone de berge ( $Z_b$ ), zone intermédiaire ( $Z_i$ ) et zone profonde ( $Z_p$ ).
- La méthode de prélèvement se limite à un seul outil : une benne à sédiment. Cette benne correspond à une surface de prélèvement de  $0.04 \text{ m}^2$  et doit pouvoir permettre une comparaison inter-annuelle et inter-station.
- Un minimum de 20 à 25 échantillons par zone est demandé, selon la taille de la surface unitaire d'échantillonnage et pour disposer de données représentatives de l'ensemble de la station.

Une version complète du protocole de suivi est donnée en annexe 7.2, une fiche station remplie sur l'Oust est également disponible à titre d'exemple en annexe 7.2. La mise en œuvre sur le terrain du protocole a permis d'affiner la méthode. La distinction des trois zones de prélèvements est délicate sur les cours d'eau qui ont été recalibrés ou chenalisés. La zone de berge est souvent très réduite (< 5 m) en raison de la forte pente des berges et les confortements de berge (empierrement, palplanches) ne permettent pas de réaliser un échantillonnage correct dans cette zone. Lorsque les 25 échantillons qui devaient être réalisés dans cette zone de berge n'ont pas pu être effectués, ils ont été redistribués autant que possible dans la zone profonde (12 points) et dans la zone intermédiaire (13 points). La zone intermédiaire est alors renommée zone intermédiaire - zone de berge ( $Z_{ib}$ ), avec une moitié des échantillon en rive droite et l'autre moitié en rive gauche.

Certaines informations qui devaient être prises par point sont finalement remplies au niveau de la zone ( $Z_B$ ,  $Z_I$  ou  $Z_P$ ), cela pour des raisons de commodité. Ainsi, le dénombrement des corbicules par point est délicat lors de la manipulation. En effet, afin de gagner en efficacité, une personne prépare la prise de l'échantillon suivant pendant que l'autre personne sépare les corbicules des sédiments de l'échantillon. Le tri entre individus vivants et morts est parfois laborieux, cela en raison du nombre d'individus qui peut être très important, mais aussi car certaines coquilles peuvent être « collées » par la vase. Aussi, un premier tri grossier est réalisé directement, puis un second tri plus poussé est effectué à terre pour parfaire la séparation entre individus morts et vivants au sein d'une zone.

Lors de la mise en œuvre du protocole, en plus de la présence de corbicules, est enregistrée la présence de moule zébrée et des espèces indigènes (notamment anodontes et mulettes). Pour chaque prélèvement le substrat est également qualifié et la présence de végétation notée. A la fin de la manipulation, les corbicules ont été mesurées manuellement (voir 4.2.1).

## 4.2 Morphométrie des corbicules sur le bassin

### 4.2.1 Méthodes de mesure des corbicules

#### Les mesures manuelles

Les corbicules prélevées lors des campagnes d'échantillonnage ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse, avec une précision au dixième de millimètre. Trois mesures ont été effectuées, la longueur ( $L_o$  = la distance antéro postérieure), la largeur ( $L_a$  = la distance depuis le Umbo jusqu'à la bordure ventrale) et l'épaisseur ( $E_p$  = la distance maximale entre les faces dorsales et ventrales).

#### Les mesures automatiques

Dans l'objectif de mettre au point une méthode d'analyse photographique pour déterminer la taille des corbicules sans mesure de terrain, un plateau a été fabriqué, comportant une règle graduée

sur lequel les corbicules ont été disposées en rang après leur mesure. Après un premier essai sur fond blanc, le fond du plateau a été coloré en rouge à l'aide de feuilles plastiques pour faciliter le détournement des corbicules lors de l'analyse d'images.

Les images ont été traitées à l'aide du logiciel **imageJ** qui est un logiciel libre.

### Etape1

Les images sont importées dans le logiciel. Une échelle est rajoutée à l'image en sectionnant l'outil trait (Straight) puis en traçant un segment sur la règle, pour mesurer 10 cm. Dans le menu, **analyse > set scale** permet de fixer l'échelle (Figure 4.2).

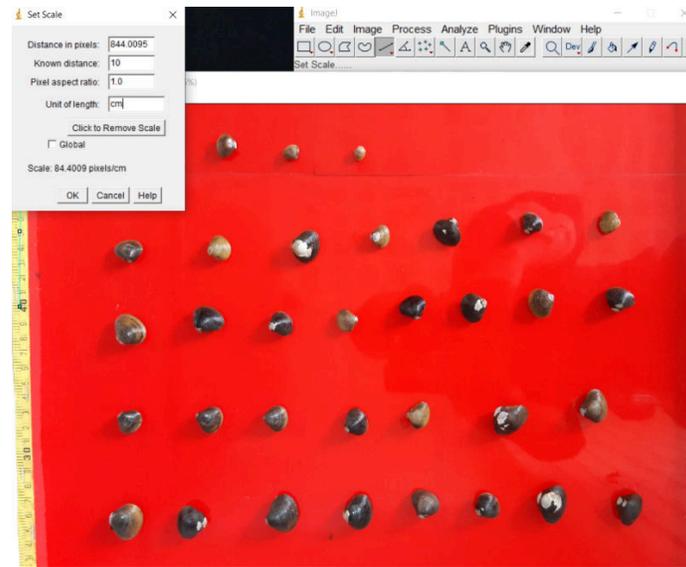


FIGURE 4.2 – Mise à l'échelle de la photographie.

L'image est ensuite détournée à l'aide du placement d'un rectangle d'emprise et de la commande **Edit > Clear Outside** ; une sauvegarde au format .tiff (**File > Save As > Tiff . . .**) permet de revenir facilement à la fin de cette étape en gardant en mémoire l'échelle de l'image.

### Etape2

La deuxième étape du traitement consiste à détourner les corbicules en enlevant le fond. L'utilisation d'un fond blanc est déconseillée car les corbicules ont souvent des tâches blanches (zones d'usures) qui se confondent avec le fond lorsque celui-ci est clair. La transformation de l'image en image noir et blanc est réalisée avec l'outil **Image > Color Threshold**. Les sliders doivent être initialement positionnés près des barres verticales pour  $a^*$  et  $b^*$  ; il faut alors ajuster l'image jusqu'à ce que les corbicules soient parfaitement détournées. En appuyant alternativement sur les boutons **original** et **filtered** on peut vérifier que l'image détournée correspond à la corbicule mais n'inclue pas son ombre (Figure 4.2). Il est préférable de réaliser les photos sans soleil et sans flash. La présence d'ombres sur une seule partie de l'image est à proscrire, mais il n'est pas nécessaire de prendre la photo à l'aide d'un pied.

### Etape3

En troisième étape du traitement, la mesure des particules nécessite une image à fond blanc, sans cadre noir, ce qui est obtenu à l'aide de **Edit > Invert** le placement d'un cadre puis **Edit > Clear**

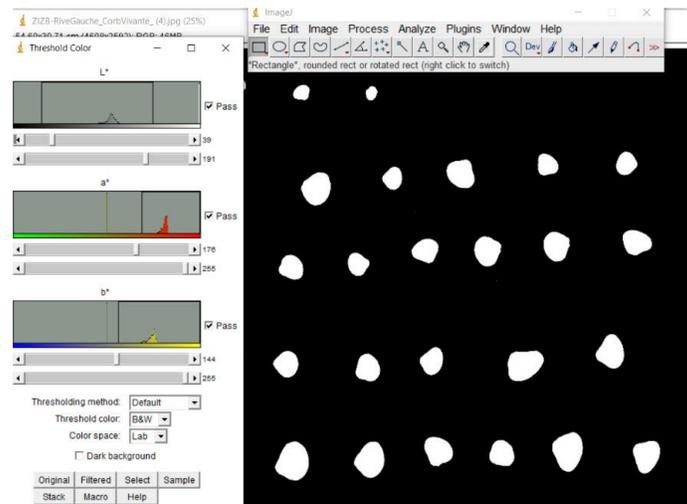


FIGURE 4.3 – Détourage.

Outside.

Lors d'une première analyse il est nécessaire de définir les paramètres qui seront exportés par l'analyse des particules. Nous avons sélectionné *Analyse > Set Measurement > Area, centroid, perimeter, fit ellipse, shape descriptors, stack position*. Une fois cette sélection faite, le traitement est effectué à l'aide de la commande *Analyse > Analyze Particles* et des paramètres montrés en Figure 4.4. Il faut vérifier que l'échelle des mesures est bien en cm et ajuster les paramètres de taille et circularité pour exclure les débris ou autre éléments non désirés. Au besoin, il est parfois nécessaire d'éditer l'image pour « refermer » les corbicules lorsque la tâche blanche sur l'apex de la coquille est incluse dans l'image. Une fois les mesures effectuées, il faut sauvegarder le .csv des résultats. Ces calculs automatiques sont ensuite reliés manuellement aux mesures prises sur le terrain ; l'ordre des corbicules sur l'image est donné à partir du haut de l'image.

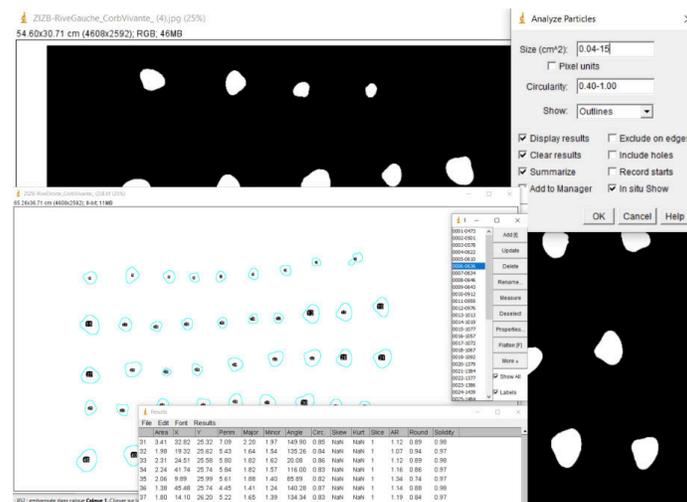


FIGURE 4.4 – Analyse de particules.

Les données de longueur, largeur et épaisseur et les mesures provenant de l'analyse d'image ont d'abord été analysées par des régressions linéaires simples et Analyse en Composantes Principales (ACP) pour rechercher les mesures aberrantes et les corriger. Les données d'analyse d'image correspondent aux variables de description de forme :

- **Circ.** (circularité): Rapport entre l'aire  $A$  fois  $\pi$  et le carré du périmètre  $P$ . Une valeur de 1 indique un cercle parfait. Une valeur s'approchant de zéro correspondra à une forme allongée.

$$\frac{4\pi A}{P^2}$$

- **AR** (aspect ratio): Rapport entre les axes majeur  $l_{ma}$  et mineur  $l_{mi}$  de l'ellipse ajustée au contour.

$$\frac{l_{ma}}{l_{mi}}$$

- **Round** (roundness). Rapport entre l'aire et le diamètre

$$\frac{4A}{\pi l_{ma}^2}$$

- **Solidity**: Rapport entre l'aire  $A$  et l'aire convexe  $CA$ . Il faut utiliser la commande `Edit>Selection>Convex Hull` pour faire une sélection convexe.

$$\frac{A}{CA}$$

Enfin les données de taille sont construites à partir d'un modèle utilisant les données de l'analyse d'image pour tenter de prédire la taille des corbicules à partir des observations photographiques.

Les analyses, figures et tableaux ont été réalisées avec le logiciel R, et notamment les packages `stargazer`, `xtable`, `rgl`, `MASS`, `lme` et `corrplot`. (ADLER, MURDOCH et al., 2019; BATES et al., 2015; DAHL et al., 2019; HLAVAC, 2018; VENABLES et RIPLEY, 2002; WEI et SIMKO, 2017).

#### 4.2.2 Résultats

Quatre stations ont été échantillonnées. La station de Malon sur la Vilaine correspond au secteur à 36 km en amont de Redon, situé sous la première écluse ; la station de Rancoët correspond quant à elle à la Vilaine aval, à 33 km de Redon. L'Isac a été échantillonné dans la partie canalisée à Guenrouet (21 km de Redon), et l'Oust à Peillac (17 km de Redon). Les caractéristiques des stations sont résumées au Tableau 4.1, du point de vue du milieu. Les 4 stations correspondent à des secteurs de rivière canalisés.

La taille (longueur  $Lo$ ) des corbicules mesurées varie entre 4.5 et 42.2 mm. Les plus petites corbicules ont été retrouvées en juin à Malon, les tailles minimales des corbicules retrouvées en septembre sont au moins de 8 mm (Tableau en annexe 7.1). Le rapport largeur/longueur ( $La/Lo$ ) est de 0.89(0.03). Notons que les spécimens de très grande taille ont été trouvés entre la Roche Bernard et Arzal (partie aval de la Vilaine) (Figure 4.5)<sup>1</sup>.

Les régressions calées sur les données morphométriques donnent deux modèles (Equation 4.1, Table 4.2). Dans un plan à trois dimensions, les données sont presque parfaitement alignées sur une droite (Figure 4.6).

1. Individu1 Longueur 59 Largeur 52.9 Epaisseur 35.3 - individu2 Longueur 53.2, Largeur 48.3, Epaisseur 31.3

$$longueur = -0.013 + 0.919 largeur + 0.284 épaisseur (R^2 = 0.99) \quad (4.1)$$

$$largeur = -0.427 + 0.499 épaisseur + 0.593 longueur (R^2 = 0.99) \quad (4.2)$$



FIGURE 4.5 – Corbicules de 59 et 53 mm trouvées sur l’aval de la Vilaine en janvier 2020

TABLE 4.1 – Caractéristiques des stations échantillonnées pour la corbicules sur le bassin de la Vilaine, L longueur, l largeur, S surface,  $Z_p$  zone profonde,  $Z_{ib}$  zone intermédiaire et zones de berge (confondues lorsque les pentes sont trop importantes pour un échantillonnage à pied) en rive gauche et en rive droite.

Station	Rivière	L	l (m)	S (m <sup>2</sup> )	Nombre de prélèvements			
					$Z_{ib-rg}$	$Z_{ib-rd}$	$Z_p$	Total
Malon	Vilaine	300	46.5	13950	18	17	37	72
Rancoet	Vilaine aval	320	190	60800	18	19	25	62
Guenrouët	Isac	300	57	17100	10	25	25	60
Pont d’Oust	Oust	315	37	11655	17	18	40	75

Les mesures effectuées manuellement et automatiquement sur les corbicules sont très corrélées entre la longueur, la largeur, l’épaisseur, les axes de l’ellipse ajustée sur le contour, l’aire et le périmètre. La circularité et la solidité donnent une mesure de l’aspect "plein" des images de corbicules, cette aspect est lié à qualité de l’image, les images noir et blanc n’ont parfois pas permis d’obtenir un contour entièrement convexe. Ar et Round font apparaître l’aspect plus ou moins allongé de la corbicule qui dépend aussi de la position dans laquelle était la coquille au moment de la photographie (Figure 4.7).

Le modèle prenant seulement comme variable explicative, l’axe majeur de l’ellipsoïde de la

TABLE 4.2 – Régression entre largeur, longueur et épaisseur. Valeurs des coefficients et écarts types, \* $p < 0.1$ , \*\* $p < 0.05$ , \*\*\* $p < 0.01$ .

	Variables dépendantes:	
	longueur	largeur
largeur	0.919*** (0.044)	
longueur		0.593*** (0.023)
épaisseur	0.284*** (0.065)	0.499*** (0.038)
Constante	-0.013 (0.147)	-0.427*** (0.095)
Observations	377	374
$R^2$	0.986	0.992
Erreur standard résiduelle	0.73 (df = 374)	0.48 (df = 371)
F	12712*** (df = 2; 374)	23947*** (df = 2; 371)

corbicule, explique la longueur avec un  $R^2$  de 0.97 (Tableau 4.3, Equation 4.3).

$$\text{longueur}(mm) = 1.03 l_{ma} + 0.19 \quad (4.3)$$

Le modèle intégrant le secteur, et l'axe mineur de l'ellipse explique la longueur avec un  $R^2$  de 0.99, ce qui signifie que le modèle explique 99% de la variabilité observée.

En utilisant les valeurs ajustées sur les données de Pont d'Oust, – ces dernières sont basées sur des images de bonne qualité sur fond rouge, sans ombre, – on peut déterminer l'équation de la droite de prédiction à partir des données de l'ellipse (Equation 4.4)

$$\text{longueur}(mm) = 0.81 l_{ma} + 0.19 l_{mi} + 1 \quad (4.4)$$

L'erreur standard des résidus du modèle 4.4 est de 0.6 ce qui signifie que l'erreur moyenne de prédiction est de l'ordre de 0.6 mm. Le modèle à un  $R^2$  de 0.99 ce qui signifie que moins de 1% de la variance du modèle reste inexpliqué. L'ajout du secteur permet de prendre en compte la prise d'image, certaines images comportent un décalage par rapport aux autres, ce qui signifie que la mise à l'échelle a moins bien fonctionné sur certaines images (Figure 4.8).

### 4.3 Abondance et structure en taille sur les stations de suivi

Les corbicules vivantes ont été retrouvées avec des densités relativement importantes sur la Vilaine à Malon, 138 Ind.  $m^{-2}$  et plus faibles sur l'Oust 79 Ind.  $m^{-2}$ . Sur la partie aval, il y a peu de corbicules et les densités tombent à 9 Ind.  $m^{-2}$ . Enfin sur l'Isac à Guenrouet, il n'a pas été trouvé de corbicules (Tableau 4.4).

Les nombres de corbicules recueillies par station en 2019 ne sont pas suffisants pour réaliser avec fiabilité des analyses de structure de population par décomposition polymodale. Pour autant l'analyse visuelle des histogrammes collectés sur les stations (Figure 4.9) montre bien des différences intéressantes entre les sites de prélèvement avec une composition plus unimodale sur l'Oust, une

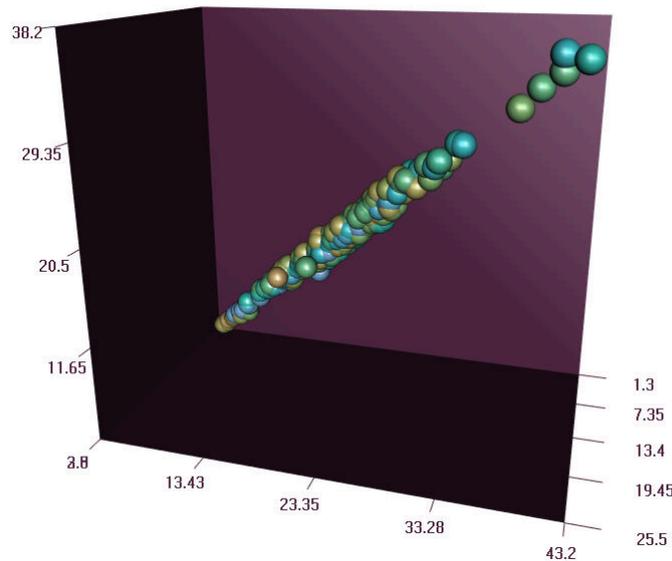


FIGURE 4.6 – Relations entre la longueur (axe X), la largeur (axe Z) et l'épaisseur (axe Y) dans la population de Vilaine. On notera que les corbicules s'alignent sur une droite, les dimensions sont parfaitement corrélées. La couleur correspond aux résidus du modèle longueur 4.1

TABLE 4.3 – Modélisation de la longueur à partir des données d'analyse de forme.

	<i>Variable dépendante:</i>	
	longueur	
	(modèle 4.3)	(modèle 4.4)
Major	1.027*** (0.011)	0.812*** (0.036)
Minor		0.190*** (0.043)
Malon ZI-RG		-1.634*** (0.317)
Pont d'Oust ZI-RD lot1		0.788*** (0.283)
Pont d'Oust ZI-RG lot2		1.371*** (0.287)
Pont d'Oust ZP-01		0.908*** (0.279)
Pont d'Oust ZP-02		1.632*** (0.279)
Rancoet ZI-RD		0.748 (0.502)
Rancoet ZI-RG		2.253*** (0.320)
Constante	0.187 (0.225)	0.099 (0.310)
Observations	271	271
R <sup>2</sup>	0.970	0.988
R <sup>2</sup> ajusté	0.970	0.988
SD Résidus	0.945 (df = 269)	0.599 (df = 261)
Statistique F	8 773*** (df = 1; 269)	2477*** (df = 9; 261)

Note:

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

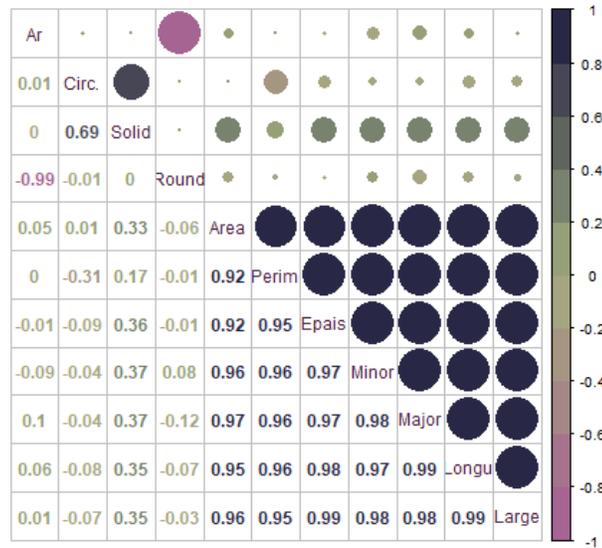


FIGURE 4.7 – Corrélations entre les mesures effectuées sur les coquilles (Large =largeur, Longu= longueur, Epais=épaisseur), et les mesures issues de l’analyse d’image, Ar= Aspect ratio, Circ.= circularité, Solid= solidité, Round=Roundness, Area=surface, Perim=périmètre, Minor, Major axes de l’ellipse. A droite taille du cercle et couleur en fonction de l’importance de la corrélation, à gauche valeurs de la corrélation.

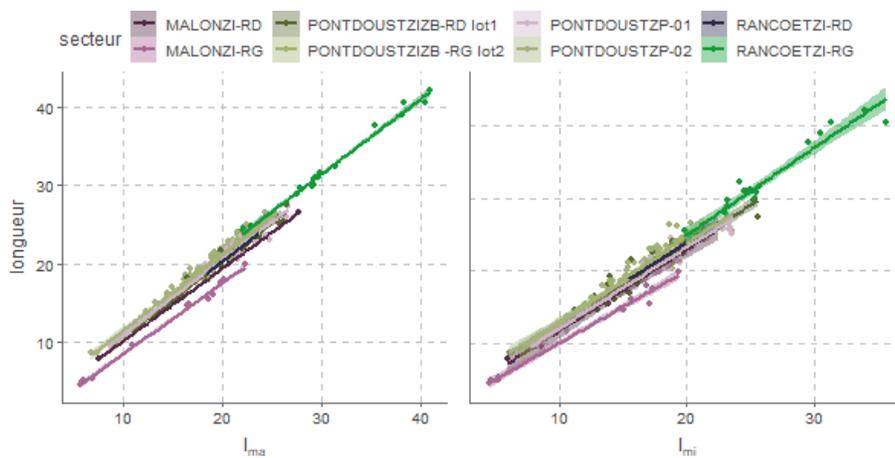


FIGURE 4.8 – Représentation graphique des composantes du modèle 4.4,  $l_{ma}$  et  $l_{mi}$  respectivement les axes majeurs et mineurs de l’ellipse ajustée sur les corbicules.

TABLE 4.4 – Nombre de corbicules vivantes par station, en fonction de la zone d'échantillonnage,  $Z_p$  zone profonde,  $Z_{ib}$  zone intermédiaire et zone de berge, surface correspondant à la surface d'échantillonnage estimée pour la benne (pour une surface de prélèvement unitaire de  $0.04 \text{ m}^2$ ), et densité de corbicules en surface en  $\text{Ind. m}^{-2}$ .

Station	Nombre Ind.				Surface échant. ( $\text{m}^2$ )	Densité ( $\text{Ind. m}^{-2}$ )
	$Z_{ib}$ -rg	$Z_{ib}$ -rd	$Z_p$	Total		
Malon	13	5	380	398	2.88	138.2
Rancoet	21	2	0	23	2.48	9.3
Guenrouët	0	0	0	0	2.4	0.0
Pont d'Oust	46	34	158	238	3	79.3

distribution plus plate pouvant montrer deux ou trois cohortes sur Malon, et enfin, une distribution des tailles beaucoup plus large sur l'aval.

Sur l'ensemble des trois sites, nous savons que l'Oust présente une concentration en chlorophylle A beaucoup plus faible que les autres, et qu'à contrario, l'aval de la Vilaine montre une concentration plus élevée. Ces éléments sont à mettre en relation avec les densités qui sont bien plus faibles sur la Vilaine aval. Il semble que le milieu plus profond (plus de 8 m), et le sédiment vaseux en profondeur ou rocheux en berge de la Vilaine aval soit moins propice aux corbicules. Ces dernières sont par ailleurs en compétition avec les moules zébrées plus abondantes dans cet environnement rocheux. Au contraire, à Malon, où les moules zébrées tapissaient le fond avant l'arrivée des corbicules, les moules zébrées sont devenues assez rares, à peine quelques moules sur les blocs prélevés au fond de la rivière en aval de l'ouvrage.

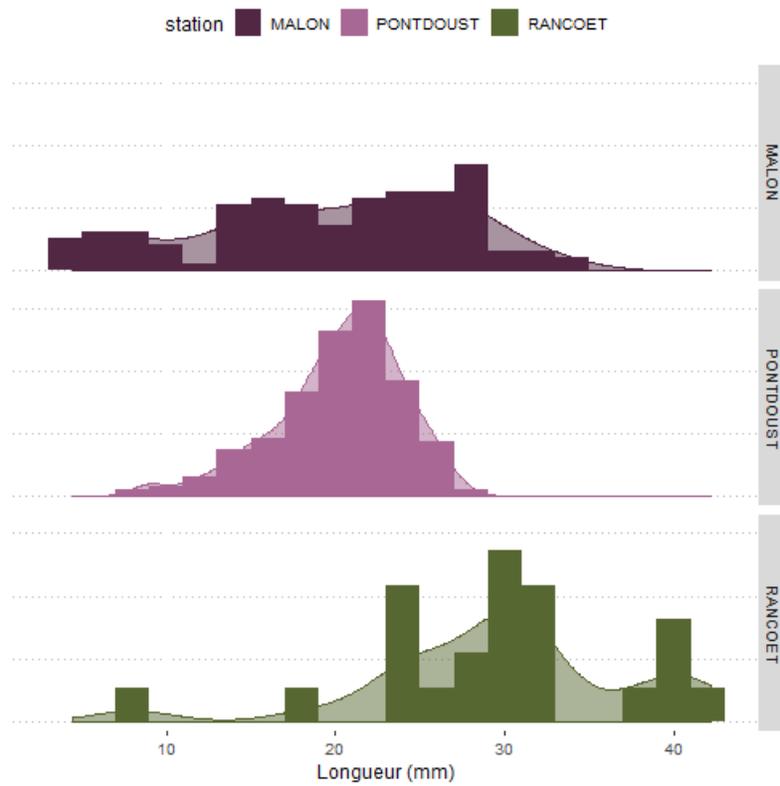


FIGURE 4.9 – Structure en taille des corbicules sur trois stations (la station Isac n’apparaît pas car aucune corbicule n’y a été retrouvée), en transparence, ajustement par transformations de Fourier pour obtenir des courbes de densités qui correspondent à la fréquence moyenne des tailles.

## 4.4 Préférences de substrats

### 4.4.1 Méthode

La granulométrie et la présence de végétation aquatique dans les échantillons collectés sur les stations à l'aide de la benne à sédiments ont été analysées pour confirmer les préférences d'habitats observés dans la littérature (voir section 2.2.4). Lors des relevés de benne, le substrat a été qualifié en fonction de la présence de matière organique, vase, terre, sable, gravier, cailloux, blocs et végétation aquatique. Sur toutes les stations, seule la station de Malon n'a pas fait l'objet d'une mesure de la présence de corbicules sur l'ensemble des zones (première station qui a permis d'ajuster le protocole) : ainsi, la zone Rive droite de Malon n'est pas intégrée dans le tableau des résultats.

La présence de corbicules et de moules zébrées sur les différents secteurs a été analysée à partir d'un modèle binomial qui prédit la probabilité d'observer les corbicules en fonction de la composition du substrat. Les termes ont été rentrés séquentiellement dans les modèles et analysés pour leur significativité. Une structure de modèle mixte binomial (avec un effet aléatoire station) a été testée. La station et la zone sont intégrées parmi les effets aléatoires du modèle pour prendre en compte la structure de l'échantillonnage (les prélèvements ne sont pas indépendants des zones et des stations).

### 4.4.2 Résultats

Le meilleur modèle est un modèle mixte avec un effet aléatoire pour les stations et les zones des stations (zones intermédiaires et zones profondes) et les substrats blocs, sable, et cailloux comme effets fixes. Le tableau 4.5 montre la comparaison des modèles en terme d'AIC, avec les modèles rangés du meilleur au moins bon en terme d'AIC. Ce tableau montre que les meilleurs ajustements des données sont réalisés par les modèles mixtes (lmer), les modèles GLM sans effet mixtes ont un AIC beaucoup plus grand que les modèles mixtes et ne sont donc pas montrés. La comparaison des modèles donne dans l'ordre **blocs, sable, cailloux, terre, végétation aquatique, matière organique** dans la hiérarchie des modèles, et seuls les substrats blocs, sable, cailloux et terre sont sélectionnés dans les modèles à plus de 0.1 du meilleur modèle. La présence de blocs *B* a un effet négatif sur la probabilité de capture de corbicules vivantes, le sable *S*, les cailloux *C* et la terre *T* ont un effet positif.

TABLE 4.5 – Résumé des modèles lmer utilisés en utilisant le critère d'Akaike (AIC) pour la présence de corbicules vivantes sur le site. Les modèles correspondent à la prédiction d'observer des corbicules vivantes sur une station et sont basés sur 253 prélèvements par benne. *k* correspond au nombre de paramètres estimés,  $D_i$  est le delta des poids (différence entre l'AIC d'un modèle donné et celui donnant le meilleur ajustement), et  $\omega_i$  le poids du modèle (Pondération Akaike). Les modèles dont la pondération est inférieure à 0.1 du modèle optimal sont rejetés car non pertinents. *T*=terre, *Mo*=matière organique, *S*=sable, *G*=gravier, *C*=cailloux, *B*=bloc, *V*=végétation aquatique.

Rang	Variable dépendante : Présence corbicules $P_c$				
	Effets fixes	Aléatoire	<i>k</i>	$D_i$	$\omega_i$
1	<i>S+C+B</i>	<i>station+zone</i>	7	0	0.59
2	<i>S+C+B+T</i>	<i>station+zone</i>	8	1.7	0.25
3	<i>S+C+B+T+V</i>	<i>station+zone</i>	9	3.7	<0.1
4	<i>S+C+B+T+V+Mo</i>	<i>station+zone</i>	10	5.8	<0.1
5		<i>station+zone</i>	3	12.4	<0.1
6		<i>station</i>	2	18.1	<0.1



Le meilleur modèle pour expliquer la présence de corbicules vivantes est un modèle mixte intégrant la station et la zone (profonde ou intermédiaire et berge) dans la partie mixte du modèle, et comme effets fixes les substrats sable 1.24 (0.55)  $p < 0.05$ , caillou 0.94 (0.49)  $p < 0.1$  et bloc -2.25 (0.8)  $p < 0.01$ . La terre a un effet non significatif positif dans le second meilleur modèle. Les autres substrats (terre, vase, matière organique et végétation aquatique) ne sont pas sélectionnés dans les meilleurs modèles.

TABLE 4.6 – Résumé des modèles utilisés en utilisant le critère d’Akaike (AIC) pour la présence de moules zébrées vivantes sur le site. Les modèles correspondent à la prédiction d’observer des moules zébrées vivantes sur une station et sont basés sur 253 prélèvements par benne.  $k$  correspond au nombre de paramètres estimés,  $D_i$  est le delta des poids (différence entre l’AIC d’un modèle donné et celui donnant le meilleur ajustement), et  $\omega_i$  le poids du modèle (Pondération Akaike). Les modèles dont la pondération est inférieure à 0.1 du modèle optimal sont rejetés car non pertinents.  $T$ =terre,  $Mo$ =matière organique,  $S$ =sable,  $G$ =gravier,  $C$ =cailloux,  $B$ =bloc,  $V$ =végétation aquatique.

Variable dépendante : Présence de Moules Zébrées $Pmz$					
Rang	Effets fixes	Aléatoire	$k$	$D_i$	$\omega_i$
1	$C$	$station + zone$	4	0	0.42
2	$C + V$	$station + zone$	5	0.7	0.30
3	$C + V + B$	$station + zone$	6	2.1	0.14
4	$C + V + B + S$	$station + zone$	7	4.2	<0.1
5		$( station) + ( zone)$	3	4.9	<0.1
6		$( station)$	2	16.2	<0.1

Pour les moules zébrées le meilleur modèle est celui intégrant la station et la zone dans les effets aléatoires et les cailloux dans les effets fixes (Tableau 4.6). L’effet des cailloux est positif 3.9 (2.5) NS mais il n’est pas significatif dans le modèle. Les deux autres modèles candidats (supérieurs à 0.1 en terme de pondération Akaike) sont ceux intégrant la végétation aquatique et les blocs qui ont également un effet positif sur la présence des moules zébrées.



Le meilleur modèle pour la moule zébrée est un modèle mixte intégrant la zone et la station comme effet aléatoire et le substrat cailloux comme effet fixe.

#### 4.5 Discussion sur les résultats du protocole de suivi

Le rapport  $La/Lo$  ou largeur/longueur est de 0.89 (0.03) sur nos échantillons de corbicules vivantes (374 individus). L’étude récente de LOPEZ-SORIANO et al. (2018) indique des rapports de 0.95 (0.04) sur le Ter et dans l’Ebro en Espagne et 0.87 (0.03) en Italie. Les espèces *C. fluminea* et *C. leana* possèdent donc des rapports inférieurs à 1 alors que *C. fluminalis* a un rapport supérieur à 1. Les données morphologiques orientent donc vers la présence de l’espèce *C. fluminea* ou *C. leana* sur le bassin de la Vilaine. Le rapport Longueur/poids semble permettre de discriminer ces deux espèces selon Lopez-Soriano (LOPEZ-SORIANO et al., 2018). Dans l’avenir, le paramètre poids serait donc intéressants à mesurer afin d’aider à l’identification exacte de l’espèce présente en Vilaine.

Les analyses morphologiques montrent que les données de largeur, longueur et épaisseur des coquilles de corbicules sont très corrélées entre elles. L’absence de variabilité dans les mesures des

coquilles collectées et le fait que l'ensemble des mesures s'alignent sur une droite sont cohérents avec l'existence d'une lignée monoclonale sans variabilité génétique qui correspond à l'espèce trouvée sur la Loire *C. leana forme R*.



Les données morphométriques et l'absence de variabilité morphologique des coquilles concourent à confirmer que nous sommes en présence d'une seule espèce sur la Vilaine *Corbicula leana (forme R)*

La méthode d'analyse photographique des corbicules semble adaptée pour le suivi des corbicules sur le bassin versant. Les données issues des détourages des corbicules suffisent pour prédire avec une précision inférieure au millimètre la longueur des corbicules. Comme nous avons terminé les analyses concernant la détermination spécifique de *Corbicula leana*, il est possible d'utiliser les photographies pour collecter un grand nombre de données de taille et travailler sur la structure en taille à l'avenir. Cette donnée pourrait ensuite être utilisée pour déterminer la présence ou non de reproduction continue dans les sites prospectés. Il pourrait être intéressant d'avoir plusieurs prélèvements au long de l'année sur un seul site pour confirmer la présence ou l'absence d'une reproduction estivale de la corbicule.

Les corbicules retrouvées à Malon en juin ont une taille inférieure à celles collectées en septembre, mais globalement il y a peu de corbicules de petite taille. Les corbicules les plus grandes sont retrouvées sur l'aval de la Vilaine et l'absence de grandes corbicules sur la Vilaine médiane ou sur l'Oust pourrait être la conséquence des épisodes de mortalités massives rapportées dans ces rivières. Le faible nombre de corbicules de petite taille pourrait également indiquer que le mode de prélèvement par une benne n'est pas adaptée pour la collecte des individus de petite taille, mais nos observations sur le terrain vont à l'encontre de cette hypothèse. L'explication la plus probable est donc que les corbicules sont dans un environnement physique limitant leur expansion, ou que leur capacité de filtration a déjà fait chûter les productions de phytoplanctons sous le seuil de  $50 \mu\text{g l}^{-1}$  limitant la croissance et la reproduction (FOE et KNIGHT, 1985 ; Jacques MOUTHON, 2001).

Les densités de corbicules vivantes retrouvées sur la Vilaine sont faibles (de  $138 \text{ Ind. m}^{-2}$  à Malon sur la Vilaine à  $9 \text{ Ind. m}^{-2}$  en aval), par rapport aux densités maximales connues pour les corbicules dans les rivières, fleuves et canaux (voir section 2.2.4). Mais sur la Vilaine par exemple, la benne à sédiments ne prélève que les corbicules qui sont en surface (maximum 10 cm de profondeur) et la densité était probablement bien plus forte, notamment en zone profonde sur les stations de Malon et de l'Oust. L'avantage de la méthode de prélèvements à la benne à sédiments est que cette dernière permet de collecter les corbicules dans les zones profondes de l'aval des grandes rivières. Mais il faudrait tester ce protocole de prélèvement lors de prospections sur les affluents, notamment en ce qui concerne les zones de berge. Il serait intéressant de prospecter à pied les zones de bordure peu profondes, notamment pour (i) connaître l'efficacité de l'utilisation de la benne à sédiment sur le prélèvement en zone de berge (difficilement réalisable sur les grands cours d'eau chenalés ayant des berges abruptes) et (ii) valider l'influence de ce mode de prélèvement sur les tailles de corbicules échantillonnées.

L'analyse du substrat présent lors des prélèvements par la benne montre que l'effet station est prépondérant pour expliquer la présence de corbicules ou de moules car une structure de modèle mixte intégrant l'effet station est toujours intégrée dans les meilleurs modèles. Ainsi la différence liée à des effets spatiaux de large échelle est plus importante que la variabilité au sein d'une station. Pour autant, certains substrats sont favorables à la présence de moules zébrées : cailloux et dans une moindre mesure végétation aquatique et blocs. Ces derniers correspondent bien aux substrats

d'accrochage des moules rapportés dans la littérature. La présence des corbicules est quant à elle expliquée principalement par la présence de sable et de cailloux qui ont un effet positif, et des blocs qui ont un effet négatif. La terre a également un effet positif sur la probabilité de présence des corbicules. Ces résultats sont basés sur des analyses de présence-absence de corbicules et non de densité. Si les substrats sableux et sablo vaseux sont rapportés comme étant des substrats préférentiels pour les corbicules (DAME et OLENIN, 2005 ; HESSE et al., 2015 ; WERNER, 2008), les cailloux eux ne sont pas rapportés comme moins favorables (LEFF, BURCH et MCARTHUR, 1990). La présence des corbicules dépend aussi de la présence en oxygène qui pourrait être plus réduite dans les zones profondes (supérieure à 8 m) de l'aval de la Vilaine.





## 5. Analyse des données de qualité d'eau en Vilaine

### 5.1 Méthode

Les données de qualité d'eau portant sur la concentration en Chlorophylle A ont été recueillies à partir de la base de données Naïades des Agences de l'Eau, et des analyses d'eau de l'Usine d'Eau Potable Interdépartementale de Vilaine Atlantique (Férel). Les données sur la Vilaine aval (Arzal et Férel) ont été combinées en une seule série. Il en a été de même pour la Vilaine médiane à Guipry et à Guichen afin de disposer d'une série temporelle continue. Ces données de concentration en Chlorophylle A ont été étudiées au regard des dates de colonisation des corbicules (données IBGN), et d'arrivée probable des moules zébrées sur le bassin de la Vilaine.

### 5.2 Résultats

Sur la Vilaine (Figure 5.1), les deux stations de mesures de Rieux et de Guipry-Guichen disposent des chroniques les plus longues (depuis 1978-1980) et sont toujours en actualisation (comparativement à la série sur Rennes qui s'arrête en 2006 et ne permet aucune interprétation). Sur ces deux stations, on peut observer une baisse effective des concentrations en Chlorophylle A sur la période d'étude. Le phénomène est plus marqué sur la station de la Vilaine médiane de Guipry-Guichen, avec un passage de  $70 \mu\text{gL}^{-1}$  en moyenne pour les années 80 à des valeurs proches des  $10 \mu\text{gL}^{-1}$  depuis 2015. Cette baisse des concentrations en Chlorophylle A semble s'effectuer en deux temps. Après les deux décades des années 1980 et 1990 avec des teneurs supérieures, on note une première diminution dans les années 2000, puis une deuxième baisse intervient à partir de 2006-2007. Les mesures effectuées en aval à Férel-Arzal sont toutes très faibles (en moyenne  $<10 \mu\text{gL}^{-1}$ ) et bien inférieures aux données de 1981. L'absence de données intermédiaires ne permet pas d'interprétation.

Sur l'Oust (Figure 5.2), les tendances sont similaires à celle de la Vilaine à Guipry-Guichen. A Saint Martin sur Oust, les valeurs moyennes de  $55 \mu\text{gL}^{-1}$  ( $37-131$  pour les quantiles 5 - 95) observées durant la décade 1990 ont chuté à  $21 \mu\text{gL}^{-1}$  ( $16-55$ ) dans les années 2000 puis  $7.2 \mu\text{gL}^{-1}$  ( $3.8-15.2$ ) dans les années 2010 soit une division par 8. A Rohan, la baisse est effective à partir de 1998, les concentrations étant faibles à l'origine, il est plus difficile de déceler un second palier à partir de 2006.

Sur l'Isac (Figure 5.3), une baisse des concentrations en Chlorophylle A est visible sur la station de Guenrouet. Depuis 2007, les valeurs de cette station sont inférieures à  $25 \mu\text{g L}^{-1}$ , et en moyenne proches de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ . Sur la station de Blain, les concentrations ne semblent pas évoluer significativement.

Sur les autres affluents de la Vilaine (Figure 5.4), seul le Meu à Mordelles montre une baisse des concentrations en Chlorophylle A. C'est aussi le seul cours d'eau qui présente avec certitude une colonisation par les corbicules depuis au moins 2017. Il n'y a cependant pas assez d'années de recul sur cette station pour conclure de manière certaine sur des effets liés à la présence de corbicule. Sur la Seiche à Bruz, les concentrations présentent bien des évolutions inter-annuelles, mais pas de tendance spécifique à la baisse ; les valeurs sont relativement élevées et dépassent régulièrement les  $100 \mu\text{g L}^{-1}$ . Sur le Semnon à Pléchâtel et sur la Chère, aucune évolution n'est observée, mais les valeurs en Chlorophylle A sont plus faibles (majoritairement inférieures à  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ ). A notre connaissance, ces cours d'eau ne sont pas colonisés par les corbicules.

A travers la modélisation issues des données de mesures, la figure 5.5 montre à la fois l'existence d'une tendance saisonnière, avec des hausses des concentrations en Chlorophylle A en été et début d'automne, et confirme la tendance à la baisse des concentrations sur le long terme, avec une diminution nette depuis la fin des années 2000.

### 5.3 Discussion

L'état des lieux sur le bassin (voir partie 3) indique qu'il reste une incertitude sur la date d'arrivée des corbicules en Vilaine. Les données IBGN disponibles indiquent une présence depuis 2007 sur la Vilaine et l'Isac (SPITZ et CAUDAL, 2016), mais il existe une donnée ponctuelle d'observation (Pierre Yves Pasco obs. pers.) en Septembre 2002 au barrage d'Arzal. La moule zébrée quant à elle aurait été introduite en Vilaine autour des années 1998 à 2000 (com. pers.). Ces deux espèces de bivalves ont la capacité de coloniser rapidement les milieux. La corbicule peut se reproduire en continue de mars à octobre (partie 2.2.1) et sa vitesse de propagation est élevée (partie 2.2.3). Elle peut ainsi établir des populations importantes, supérieures à  $10000 \text{ Ind. m}^{-2}$  (partie 2.2.6). De par leur large répartition, leur nombre et leurs facultés importantes de filtration (partie 2.2.1), elles peuvent contribuer efficacement à réduire la teneur en phytoplancton dans la colonne d'eau et augmenter sa transparence.

Concernant la qualité d'eau, sur les axes principaux Vilaine et Oust, après une décennie des années 1990 avec des teneurs en Chlorophylle A importantes, la diminution constatée dans les années 2000 pourrait donc être reliée à l'arrivée de la moule zébrée. La deuxième phase de diminution qui s'opère à partir de 2006-2007, pourrait être mise en relation avec l'arrivée de la corbicule. Sur la partie aval de la Vilaine, le substrat rocheux est plus favorable à l'installation des moules zébrées qui depuis les années 2000 contribuent, avec les processus naturels, à abattre la teneur en phytoplancton des eaux de la Vilaine. Ainsi de l'amont vers l'aval on observe une gradation des teneurs en Chlorophylle A qui traduit une consommation sur l'ensemble de l'axe. Sur la partie médiane de la Vilaine et sur l'Oust, les teneurs actuelles en Chlorophylle A sont globalement inférieures à  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ , voir inférieures à  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ . Ces faibles teneurs sont donc maintenant limitantes pour la reproduction et le développement des corbicules (partie 2.2.1).

Les teneurs en Chlorophylle A des affluents sont souvent plus réduites que celles de l'axe Vilaine (Figure 5.3 et 5.4). Sur l'Isac, les explications concernant les faibles teneurs en Chlorophylle A mesurées depuis 2007 et l'absence de corbicule depuis 2014 sur la station de Guenrouet ne sont pas connues et demanderaient des investigations complémentaires. Il est possible que les

concentrations estivales systématiquement inférieures à  $20 \mu\text{gL}^{-1}$  autour de Guenrouët puissent expliquer la diminution des corbicules et la difficulté de trouver même des individus morts sur la station échantillonnée en 2019. Le substrat de cette station pourrait également jouer un rôle. Sur les autres affluents (Seiche, Semnon, Chère), les teneurs en Chlorophylle A ne semblent pas changer et démontreraient l'absence de colonisation par les bivalves invasifs. Il serait intéressant de confirmer l'absence ou la limite d'expansion de la corbicule sur ces rivières.

Comme le montrent les modélisations en figure 5.5, les variations saisonnières en Chlorophylle A ont nettement diminué entre les années 1990 et 2010. Si les teneurs hivernales sont du même ordre, les teneurs estivales et automnales ont fortement chuté. Par ailleurs, les pics de concentrations sont plus faibles et moins fréquents. La station de Saint Martin sur l'Oust en est un exemple particulièrement saisissant.

La construction d'usines de traitements des eaux permettant une déphosphatation partielle des effluents a également conduit à une diminution de la teneur en Chlorophylle A dans les cours d'eau du bassin, par exemple la mise en service de l'usine d'épuration de l'eau de Beaurade à Rennes en 1997 pourrait avoir eu une influence.

Pour conclure, la correspondance entre l'introduction des moules zébrées puis le développement des corbicules et la baisse de production primaire des eaux du bassin de la Vilaine apparaît relativement forte, même si des phénomènes complémentaires ne sont pas à exclure.

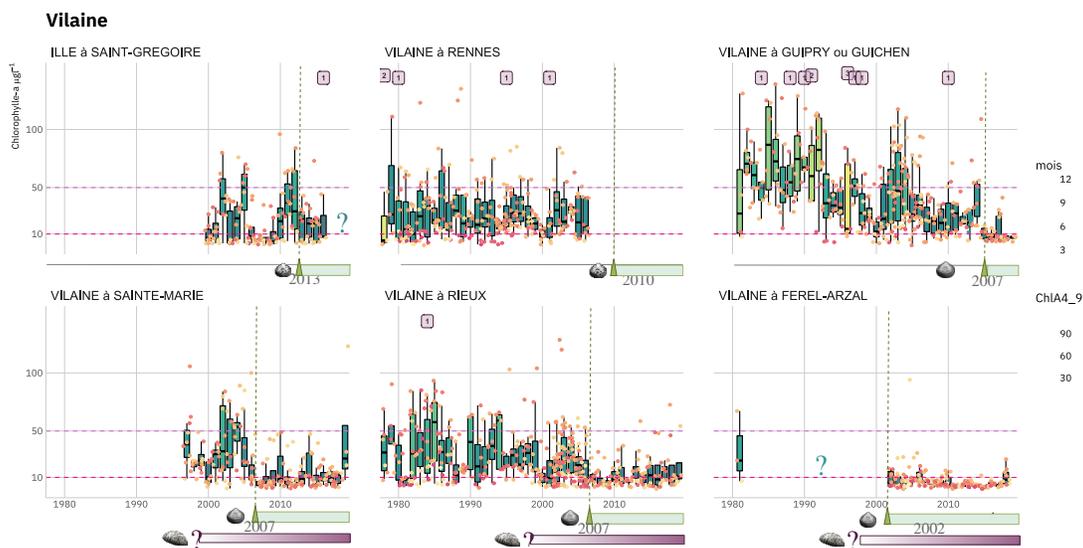


FIGURE 5.1 – Tendance des abondances en chlorophylle-A sur plusieurs stations de l'axe Vilaine, depuis l'Ille jusqu'à la Vilaine à Férel. Les chiffres encadrés en haut correspondent aux nombres de données dépassant l'échelle de l'axe des ordonnées du graphique. En bas, les rectangles de couleur indiquent les arrivées probables des corbicules, compte tenu des données IBGN et des données ponctuelles collectées sur le territoire. Les données proviennent de la base de données nationale Nâïades mais aussi d'extractions des fichiers provenant de l'usine des eaux de la Vilaine Atlantique.

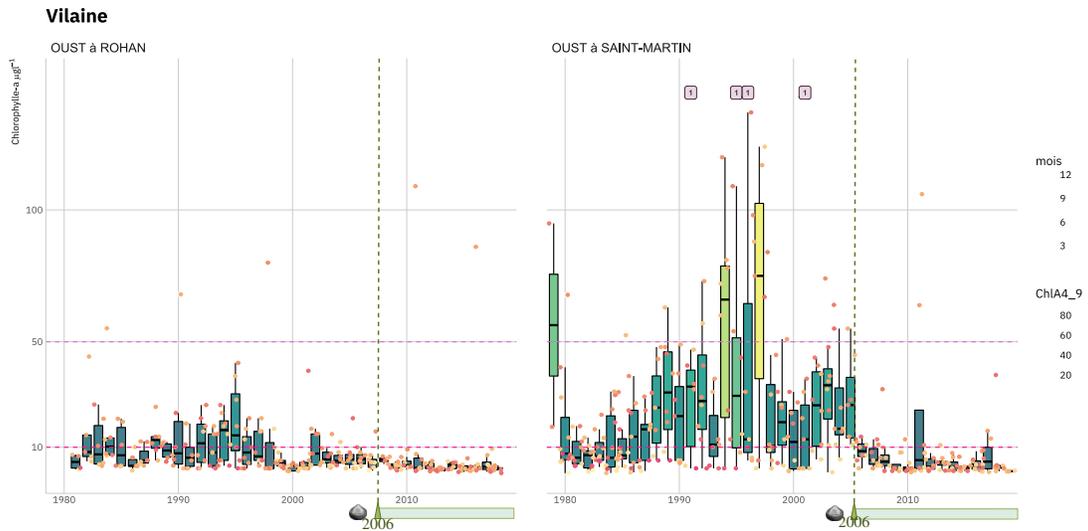


FIGURE 5.2 – Tendence des abondances en chlorophylle-a sur l'Oust, données source Nâïades.

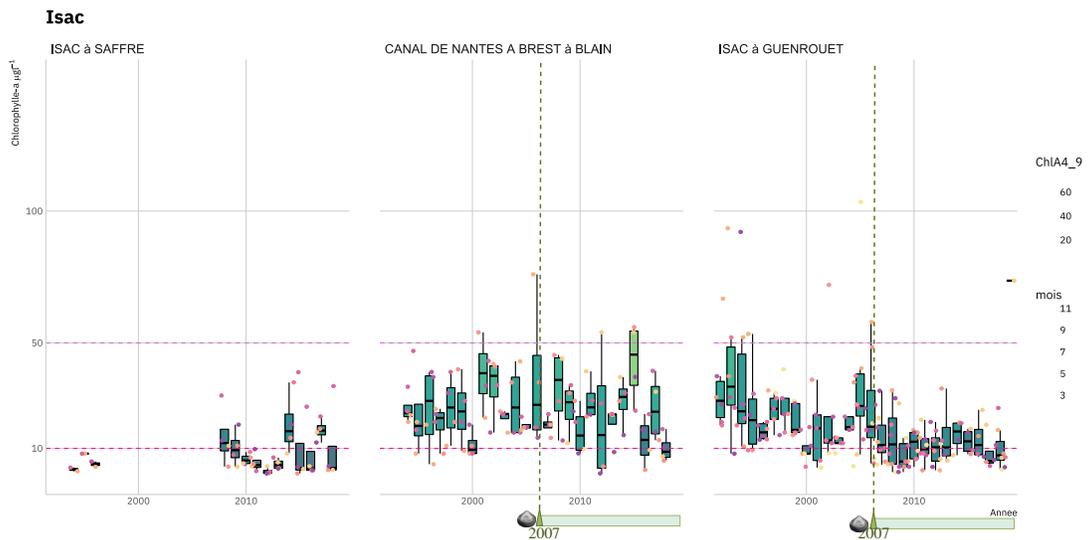


FIGURE 5.3 – Tendence des abondances en chlorophylle-a sur l'Isac depuis l'amont jusqu'à Guenrouët, données source Nâïades.

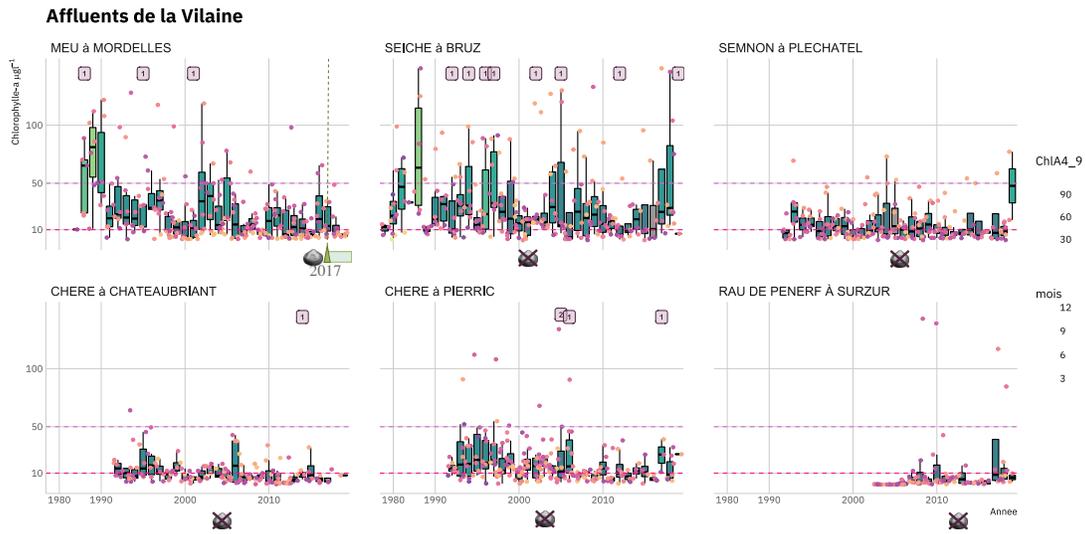


FIGURE 5.4 – Tendence des abondances en chlorophylle-a sur les affluents de la Vilaine, données source Naiades.

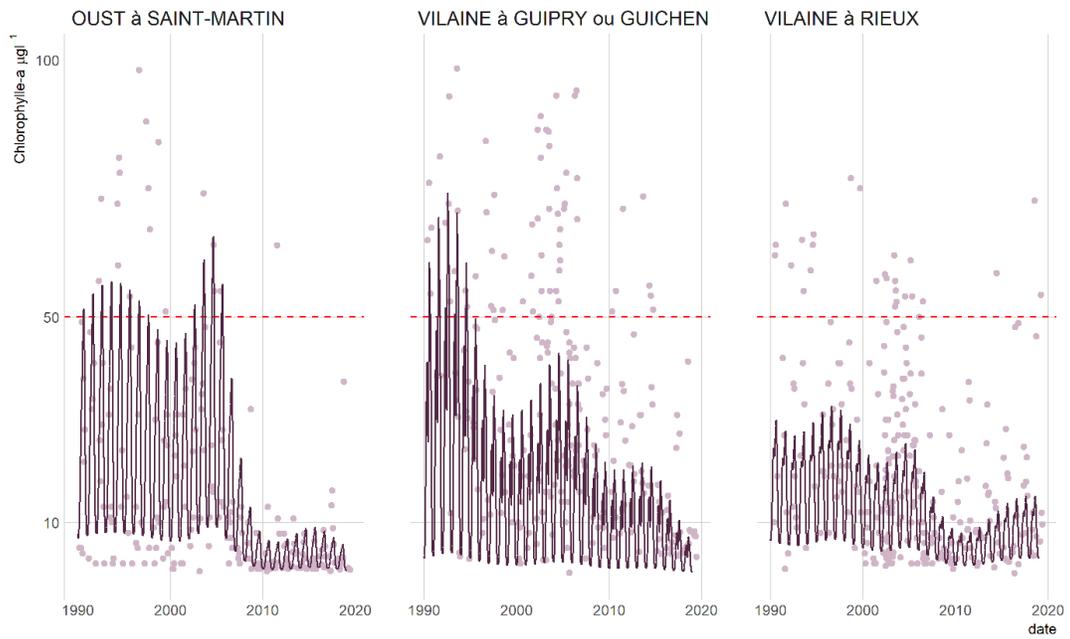
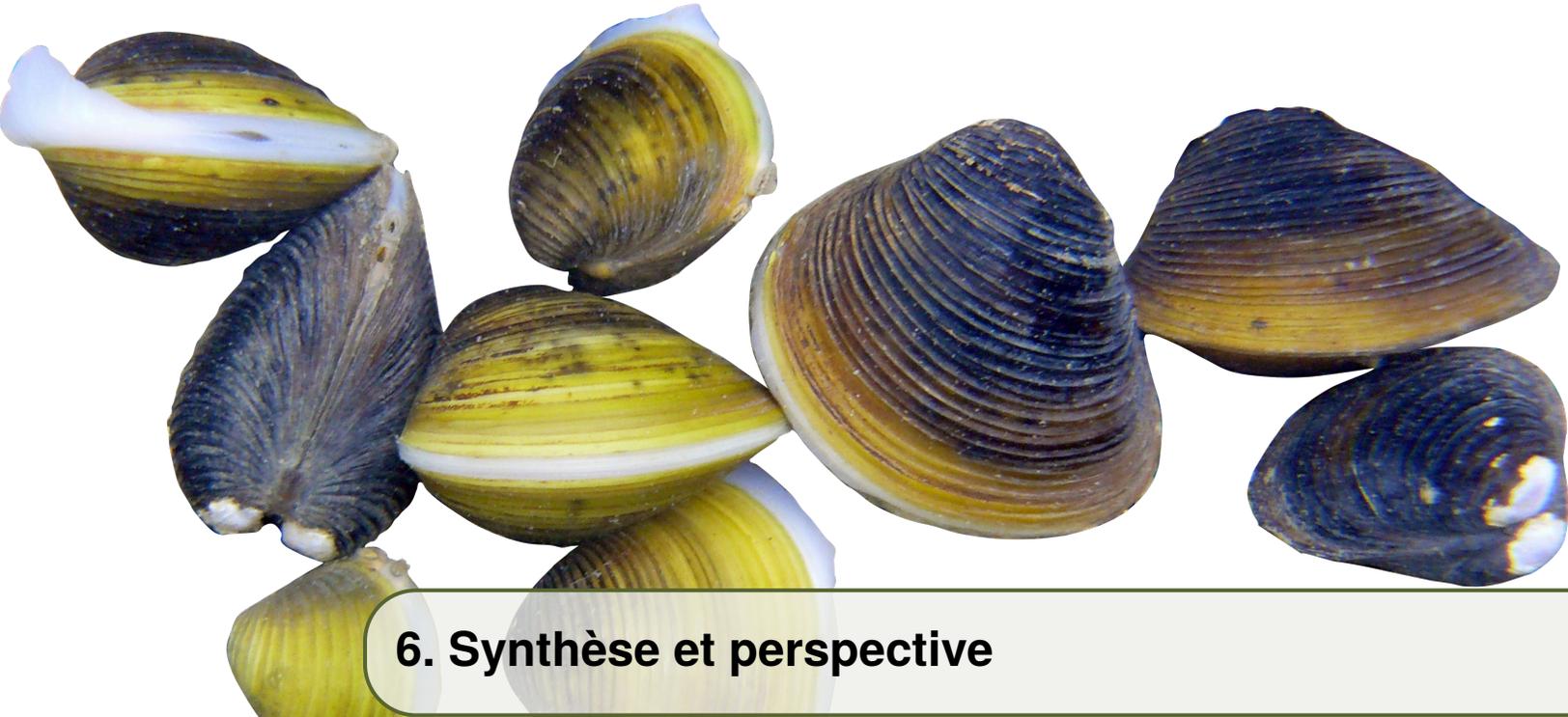


FIGURE 5.5 – Modélisation des tendances saisonnières et de long terme sur trois sites du bassin de la Vilaine, données source Naiades.





## 6. Synthèse et perspective

### 6.1 Synthèse

La bibliographie met en évidence la présence de 3 «formes» de Corbicules en France, toutes originaires du sud-est de l'Asie: une *forme R* qui se rapproche de l'espèce *C. leana* (et de la *forme A* américaine), une *forme S* qui correspondrait à *C. fluminalis* (et à la *forme B* américaine), et une *forme Rlc* qui correspondrait à *C. fluminea* (et proche de *C. subplanata*). Dans l'Ouest de la France et donc sur le bassin de la Vilaine, la forme R est enregistrée, soit *Corbicula leana*. Les corbicules asiatiques auraient été introduites en France entre la fin des années 70 et le début des années 80. La moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) est quant à elle connue en France depuis 1838.

Les corbicules présentes dans l'Ouest ont une reproduction étalée entre mai et octobre, avec deux pics de reproduction en début et fin d'été (juin et août). La reproduction dépend des facteurs environnementaux, notamment la température de l'eau et la disponibilité de la ressource alimentaire. Les individus sont hermaphrodites (à la fois mâle et femelle) et se reproduisent par parthénogénèse. La spécificité des corbicules relève dans le clonage du matériel génétique paternel, soit une reproduction par androgénèse ce qui est peu courant dans le règne animal.

La croissance des corbicules est extrêmement rapide. Dans l'année de sa naissance, elle est capable d'atteindre la taille de 15 à 30 mm et de se reproduire. En tant qu'organismes filtreurs, leur alimentation est basée principalement sur le phytoplancton. Si les concentrations en Chlorophylle A diminuent sous les  $20 \mu\text{g L}^{-1}$ , leur croissance et leur reproduction sont altérées.

La vitesse de propagation est élevée dans les grands cours d'eau (jusqu'à  $15\text{--}20 \text{ km An}^{-1}$ ) où les activités humaines (navigation, transport d'eau) et les modifications hydrauliques la favorisent. La colonisation est plus faible dans les plus petits cours d'eau ( $1\text{--}3 \text{ km An}^{-1}$ ), en lien avec les débits et substrats souvent plus défavorables et la moindre présence de l'homme. La corbicule préfère les substrats lisses de sable et vase, plus favorables à son comportement fouisseur. En canaux et lacs, les densités maximales peuvent atteindre jusqu'à  $20\,000\text{--}25\,000 \text{ Ind. m}^{-2}$ .

La colonisation des milieux par la corbicule a entraîné une diminution des concentrations en chlorophylle A (cas d'étude sur la Meuse et la Loire). Elle a également un impact sur les concentrations en carbone dissous, en nitrate, en phosphore. Elle entre en concurrence alimentaire avec le zooplancton

qui diminue en conséquence. Par la filtration, elle participe activement à augmenter la transparence de l'eau et au développement des macrophytes. Elle conduit à une baisse du taux d'oxygène dissous dans l'eau par une consommation directe et des effets en chaîne indirects (respiration bactérienne augmentée, baisse de la photosynthèse).

Sur le bassin de la Vilaine, la présence de la Corbicule sur les axes principaux Vilaine et Oust est connue depuis au moins 2006-2007 à partir des données IBGN, et 2002 par une observation ponctuelle au barrage d'Arzal. Sur les affluents, la colonisation est plus récente. Il est à noter que certains affluents semblent encore indemnes. La recherche de présence par la méthode de l'ADN environnemental confirme les données issues des IBGN et apporte des éléments de connaissance sur les espèces de bivalves indigènes. Ainsi, il est enregistré une richesse spécifique totale importante (20 espèces), avec des espèces nouvelles pour la Bretagne: Anodonte comprimée, Mulette des peintres, Pisidie des marais et Pisidie des rivières.

En 2019, la mise en œuvre d'un protocole reproductible spécifique à l'étude de la Corbicule a été testé sur quatre stations du bassin. Les prélèvements réalisés ont permis de valider une méthode semi-automatique de mesures des coquilles. Les données montrent une très bonne corrélation entre la longueur, la largeur et l'épaisseur des coquilles. Les données morphométriques confirment la forme R des Corbicules présentes en Vilaine, soit l'espèce *Corbicula leana*. Concernant les substrats, la corbicule montre une préférence pour les sables et les cailloux, toujours accompagnés de vases. Les blocs ont par contre un effet négatif sur la présence de corbicules. Il est noté moins de corbicules dans les secteurs les plus profonds (supérieur à 8 m).

La baisse de la concentration en Chlorophylle A, sur la Vilaine et sur l'Oust, semble s'être effectuée en deux temps: une première baisse dans la décade 2000 et une deuxième baisse dans la décade 2010. Ces baisses peuvent être mises en relation avec l'apparition et le développement de la moule zébrée dans un premier temps, puis de la Corbicule à partir de 2006-2007 environ.

## 6.2 Perspectives

L'objectif principal en Bretagne est maintenant de protéger les cours d'eau indemnes notamment les cours d'eau côtiers hydrologiquement indépendants. Par ailleurs sur le bassin de la Vilaine, il sera intéressant de surveiller les affluents qui ne sont pas actuellement colonisés (afin de suivre la date d'arrivée de la corbicule et sa progression).

L'étude ADN environnemental ayant mis en évidence une diversité de bivalves indigènes, il sera intéressant de confirmer sur le terrain, leur présence, leur localisation et leur abondance, afin de pouvoir suivre l'impact de la corbicule.

Pour distinguer de manière certaine les espèces *C. Leana* et *C. fluminea* il faudra poursuivre le suivi par le protocole corbicule et d'y adjoindre des mesures de poids.

Le suivi de l'abondance de la corbicule et de la Chlorophylle A sur les différentes stations étudiées permettra de continuer à observer l'effet de la filtration sur le statut trophique des rivières du bassin et la modification de l'écosystème. De manière plus large les interactions avec les milieux et les prédateurs potentiels (Silure, Rat Musqué, Loutre ...) serait intéressante à étudier.



## 7. Annexes

### 7.1 Annexe 1 : Mesure des corbicules

TABLE 7.1 – Mesures des corbicules par secteurs et zones en mm. N nombre d'individus, Moy = moyenne, SD = écart type, Q1, médiane, Q3 = quantiles de la distribution, Min =minimum, Max maximum. Trois secteurs ont été prospectés avec des corbicules, l'Oust (station de Pont d'Oust), la Vilaine en aval du barrage de Malon, et la Vilaine dans sa partie aval à Rancoët. Les zones prospectées correspondent à la zone profonde (ZP) et la zone intermédiaire et de berges (ZI), voir protocole.

Secteur	N	Moy	SD	Min	Q1	Médiane	Q3	Max
Longueur								
Malon-ZI	19	12.92	6.42	4.50	6.55	14.80	16.85	26.50
Malon-ZP	100	20.90	7.33	4.70	15.60	22.65	26.70	33.80
Oust-ZIZB	77	19.48	4.09	9.30	16.20	19.20	22.70	27.50
Oust-ZP	155	20.57	3.54	8.60	19.30	21.10	22.80	27.40
Rancoet-ZI	22	30.74	6.18	18.80	25.55	30.45	32.40	42.20
Rancoet-ZP	1	8.00		8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Largeur								
Malon-ZI	19	11.98	6.30	3.80	5.60	14.00	16.00	25.00
Malon-ZP	100	18.95	6.67	4.00	14.45	20.65	24.15	30.30
Oust-ZIZB	77	17.10	3.47	7.40	14.50	17.20	19.90	23.70
Oust-ZP	155	18.23	3.04	7.50	16.95	18.40	20.05	24.20
Rancoet-ZI	22	27.47	5.47	16.80	22.60	27.30	28.60	37.20
Rancoet-ZP	1	6.50		6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
Epaisseur								
Malon-ZI	19	8.72	4.69	2.30	3.80	10.80	11.75	17.40
Malon-ZP	100	13.67	4.74	2.40	10.65	15.10	17.20	21.70
Oust-ZIZB	77	12.35	2.31	5.70	10.80	12.50	14.00	17.50
Oust-ZP	155	13.23	2.08	5.70	12.35	13.40	14.50	17.70
Rancoet-ZI	22	18.41	3.19	12.25	16.16	18.35	19.20	24.50
Rancoet-ZP	1	5.00		5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

## 7.2 Annexe 2 : Application dédiée pour l'observation des corbicules



UNE APPLICATION DÉDIÉE A L'OBSERVATION DES CORBICULES SUR LE BASSIN DE LA VILAINE :

- Application WEB : <https://arcg.is/01HufT> (voir capture d'écran (Figure 7.1))
- Application smartphone (sous Google Play ou Apple store) : télécharger l'application « Collector for ArcGIS ». S'identifier comme : « utilisateur\_1 » avec le mot de passe « Azerty123 ». Vous avez accès à la carte « Observation des corbicules » et pouvez y saisir des observations.



**C. fluminea** ©EPTB Vilaine    **C. fluminalis** ©Lopez et al.

## Observation des corbicules et des moules zébrées

L'application suivi des corbicules et des moules zébrées a pour vocation de rapporter des informations sur l'extension géographique et la propagation des deux espèces dans le bassin versant de la Vilaine (et au-delà). Le fait que une ou plusieurs espèces de corbicules soient présentes sur la Vilaine n'est pas encore clarifié. Les espèces susceptibles d'être présentes sont C. fluminea et C. fluminalis, n'hésitez pas à nous envoyer des photos des spécimens collectés. L'objectif est de suivre la progression vers l'amont de l'extension des corbicules.

### 1. Saisir des informations

Date

Observateur

Présence moule zébrée

Présence corbicule

Vivante (corbicule)

Quantité (corbicule)

Substrat

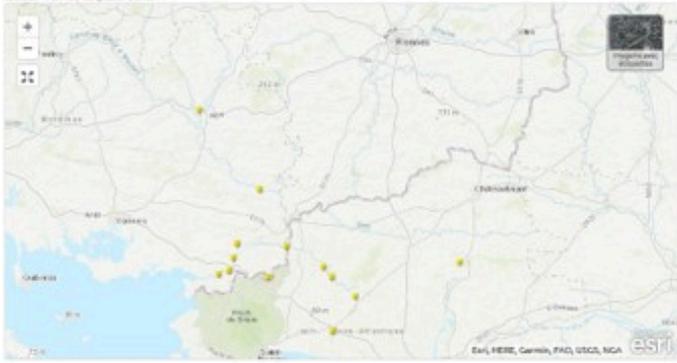
Commentaires

Vous pouvez ajouter une photo à votre observation

### 2. Sélectionner un emplacement

Spécifiez l'emplacement de votre entrée en cliquant, touchant la carte ou en utilisant l'une des options suivantes.

Latitude: 47.21483, Longitude: -6.67094



### 3. Remplir le formulaire

Ajoutez ces informations à la carte.

FIGURE 7.1 – Capture d'écran de l'application internet de saisie d'observation de la Corbicule mise en place par l'EPTB Vilaine.

# Méthode d'échantillonnage de la Corbicule en Vilaine – Grand Cours d'Eau

Adapté par l'EPTB Vilaine d'après le projet de norme de prélèvement des macro-invertébrés dans les cours d'eau profonds et les canaux (Norme MGCE 201804).

## 1. Définition du site de prélèvement

Il s'agit du point de prélèvement qui est en fait une portion de cours d'eau.

La longueur doit correspondre à environ 6 fois sa largeur ( $L_t = 6 \times L_{pb}$ ), avec un maximum fixé de 300 m. Ainsi, si le cours d'eau fait plus de 50 m de large, le site fera au maximum 300 m de long.

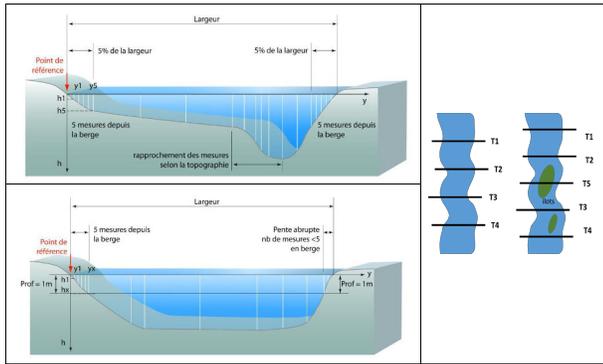
On identifie le début et la fin du site par des piquets (prendre les points GPS). Si possible, il faudra trouver un repère visible (facile à retrouver) pour le début ou la fin de station ; cela facilite la recherche de la station les années suivantes.

## 2. Réalisation de profils en travers

Sur 4 transects, effectuer un profil en travers (profil « profondeur-distance »). Il permet de déterminer les 3 zones à échantillonner (ZB-ZI-ZP). Il faut déterminer la  $P_{max}$  (profondeur maximale) et la  $L_{moy}$  (Largeur moyenne).

Concrètement pour effectuer le transect sur cours d'eau très large, on pose un piquet en berge avec une cible à viser (suffisamment grande pour être visée avec le télémètre laser). Dans l'embarcation, une personne mesure la distance avec le télémètre laser (précision métrique) et note les informations, l'autre personne procède aux mesures de profondeur. Une troisième personne manœuvre l'embarcation.

A proximité des berges, le travail peut être réalisé plus finement, avec un décimètre et une toise.



possible 25) par zone, répartis de manière aléatoire sur l'ensemble des zones, soit un total de 60/75 points par site.

Dans le cadre de la norme MGCE, le choix des points d'échantillonnage doit prendre en compte la diversité des habitats pour l'IBGN. Ceci ne paraît pas nécessaire pour le suivi Corbicule car elles sont uniquement présentes dans le substrat de fond.

Pour la réalisation des 20/25 points par zone, l'échantillonnage sera réalisé au hasard dans chacune des 3 zones (c'est déjà le cas pour ZP et ZI en raison de la visibilité nulle). Pour la zone de berge, les points d'échantillonnage peuvent être « choisis » en lançant au hasard, un poids relié à un fil (nylon) équipé d'un flotteur (pour retrouver l'emplacement du poids dans l'eau). Le prélèvement se fera à cet emplacement.

Si la ZB est constituée uniquement d'une berge verticale, les points d'échantillonnage sont répartis sur la ZI et la ZP (voir selon la réalité de terrain, 1/2 ou 1/3 pour ZI).

## 5. Surface et technique d'échantillonnage :

Pour la zone ZB, la norme MGCE prévoit l'utilisation du filet Surber (1/20 m<sup>2</sup>). Dans un souci d'homogénéité des prélèvements, l'utilisation de la benne sera privilégiée en ZB également pour le protocole Corbicule. Elle sera placée au point d'échantillonnage et enfoncée dans le substrat avec le pied si nécessaire. L'intérêt est d'avoir le même outil de prélèvement pour toutes les zones.

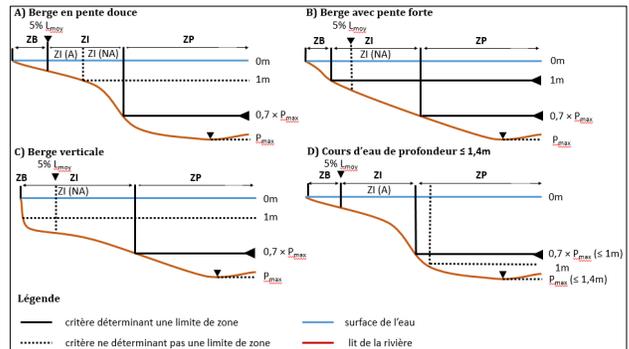
Pour la ZP et la ZI, l'utilisation de la benne est à privilégier ; elle permet de rapporter la densité de corbicule (quantité au m<sup>2</sup>).

## 6. Matériel nécessaire :

- X 2 grands piquets pour identifier le début et la fin de la station en berge
- X 1 Piquet avec cible pour télémètre, pour réaliser les profils en travers du cours d'eau
- X 8 grands piquets pour identifier les zones de prélèvement (ZB, ZI et ZP), si la profondeur le permet
- **Télémètre laser obligatoire pour les cours d'eau très larges**
- Une longue corde à accrocher de part et d'autre du cours d'eau pour faciliter la réalisation des transects
- Décimètres (dont au moins un avec un poids pour définir la hauteur de la colonne d'eau = réalisation des transects, ou toise graduée suffisamment longue)
- Une orange + Chronomètre pour mesurer la vitesse d'écoulement
- Epuisette (pour récupérer l'orange ! ou d'autres choses tombées à l'eau !)
- Disque de Secchi, si possible
- Gants pour chaque manipulateur
- Bottes et/ou cuissardes pour chaque manipulateur
- Gilet de sauvetage si manipulation embarquée
- Lunette polarisante si possible
- Appareil photo et GPS ou à défaut téléphone portable
- Fiche station et fiches terrain à remplir
- Embarcation adaptée et outillée
- Benne type Van Veen + corde suffisamment longue
- Poids avec flotteur pour échantillonnage aléatoire en ZB
- Seaux (2 ou 3 minimum) pour nettoyage des échantillons
- Poubelles 80 l (x2 ou plus)
- Tamis de 4 mm environ
- Bocaux + étiquettes pour stockage des Corbicules (dans l'attente des mesures précises par échantillonnage). Au moins 10 (2 x ZB-RD + 2 x ZI-RD + 2 x ZP + 2 x ZI-RG + 2 x ZB-RG).
- Règle / pied à coulisse pour mesurer les Corbicules
- Guide de détermination des bivalves ou à défaut une clé de détermination

## 3. Détermination de la largeur des 3 zones de prélèvement

A partir des transects, on détermine les zones de prélèvement : Zone de berge (ZB = 5% de  $L_{moy}$  ou 1m de prof), zone intermédiaire (ZI) et zone profonde (ZP).



### Schéma A, berge en pente douce :

La limite ZB - ZI est définie par la distance à la berge (5% de la largeur au miroir moyenne). Le trait vertical en pointillé (profondeur de 1 m) n'est pas pris en compte.

### Schéma B, berge avec pente forte :

Cette limite est définie par la profondeur de 1 m. Le trait vertical en pointillé (5% de la largeur au miroir moyenne) n'est pas pris en compte. Il n'y a pas de ZI(A).

### Schéma C, berge verticale :

Si profondeur est tout de suite >1m, la ZB est limitée à cette berge verticale. La ZI(A) est inexistante.

### Schéma D, cours d'eau de $P_{max}$ inférieure à 1,4 m :

→ Pas le cas de la Vilaine pour laquelle  $P_{max} >> 1m$  ! La profondeur de '0,7  $P_{max}$ ' est donc inférieure à 1 m : il n'y a pas de ZI(NA) et une partie de la zone profonde est à une profondeur inférieure à 1 m.

## 4. Déterminer les points d'échantillonnage élémentaires

Pour chaque zone, il faut déterminer des points d'échantillonnage. Si possible sur les 2 rives du cours d'eau. La norme MGCE (prélèvement des macro-invertébrés en grand cours d'eau) précise 4 points par zone, prenant en compte l'hétérogénéité des habitats le cas échéant (ZB essentiellement : différents substrats, végétation aquatique...).

Dans notre cas, les 4 points d'échantillonnage ne sont pas adaptés à notre objectif d'étude des seuls bivalves. Il faut prendre en compte beaucoup plus de points par zone pour avoir un échantillonnage représentatif du site. Cela permet de donner une estimation de la densité/unité de surface ou densité/unité d'effort.

Si la benne à sédiment est utilisée, il faudrait 25 points pour avoir 1m<sup>2</sup> (25 x 1/25 m<sup>2</sup>). Pour le filet Surber en ZB, il faudrait 20 points pour avoir 1m<sup>2</sup> (20 x 1/20 m<sup>2</sup>). **Aussi, on réalisera un minimum de 20 points (si**

## 7. Données à acquérir

### Données à acquérir sur la station :

- ✓ Date et heure de prélèvement
- ✓ Transparence grâce au disque de Secchi
- ✓ Espèces végétales aquatiques et recouvrement par zone
- ✓ Longueur et largeur
- ✓ (Conditions météo, débit...)
- ✓ Commentaires

### Données à acquérir par point :

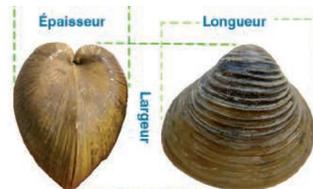
- ✓ Type de substrat
- ✓ Distance à la rive (pour éviter d'échantillonner toujours à la même distance)
- ✓ Hauteur d'eau
- ✓ Présence de plantes aquatiques
- ✓ Présence/absence pour les espèces de bivalve invasives (Dresseine, Corbicule) : distinction entre individus vivants et coquilles vides
- ✓ Pour les espèces locales (souvent peu nombreuses) :
  - Identification et dénombrement (Photographie si difficultés)
  - Longueur/largeur/épaisseur pour tous les individus (sauf sphaerium/pisidium). Minimum 30 si nombreux
  - Remise à l'eau directe obligatoire

### Données post-prélèvement par zone :

Pour les Corbicules :

Les individus prélevés sont rincés sur le tamis puis placés dans des bocaux (par zone). Les mesures suivantes seront réalisées sur les individus vivants qui seront ensuite remis sur la berge. Si doutes sur l'espèce, prélèvement de coquilles / individus en bon état.

- ✓ Détermination de l'espèce (analyse photos et analyses morphométriques ci-dessous).
- ✓ Longueur/largeur/épaisseur pour, au minimum, 30 individus (petits 10-20 mm) et 30 gros (> 20 mm).
- ✓ Longueur sur un échantillon aléatoire de 100 individus (s'ils sont trouvés, sinon totalité de l'échantillon). L'objectif est de réaliser une décomposition polymodale pour avoir l'âge.
- ✓ Nombre des individus vivants
- ✓ Poids total pour les coquilles vides.



Extrait du guide de détermination des mollusques bivalves de France, AFB

Les données seront compilées dans une fiche "station" avec une photo et une localisation GPS (avec téléphone portable ou GPS).

### 8. Bonne pratique de protection des milieux :

Les agents de terrain doivent prendre des mesures (voir ci-dessous) pour éviter d'introduire des espèces (dites exotiques envahissantes) ou des maladies présentant un danger pour l'environnement (santé humaine, mortalité d'espèces, déséquilibre écologique, impact économique ...).

Les préconisations émises par les organismes compétents sur les mesures de protection des milieux sont à prendre en compte.

En l'état des connaissances actuelles, les mesures minimales suivantes sont conseillées, dans la mesure du possible dans les conditions de terrain (eau accessible, etc.), particulièrement dans les zones à risque (grands cours d'eau, canaux, zones polluées, aval des piscicultures, aval de certains plans d'eau, etc) :

- utiliser un équipement individuel (bottes, cuissardes ...) et du matériel (Surber, benne...) propre, c'est-à-dire soigneusement lavé à l'eau puis brossé pour enlever la boue, les feuilles, etc ;
- utiliser le matériel le plus sec possible (l'élimination des pathogènes au bout de 48h de séchage est jugée satisfaisante) ;
- utiliser un désinfectant adapté (eau de javel, biocides, etc.). Mais l'efficacité de ces produits est difficile à évaluer sur le terrain. De plus, la toxicité de ces produits pour le milieu et les opérateurs de terrain, ainsi que leur élimination, est à prendre en compte.

### 9. Exemple de fiches terrain

- Fiche terrain « station »
- Fiche terrain « Profils »
- Fiche terrain « données des points de prélèvement »
- Fiche terrain « Biométrie »

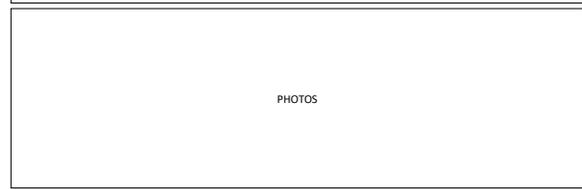
### FICHE TERRAIN CORBICULE

CODE STATION	
COURS D'EAU	
SITE	
DATE	
X AMONT	
Y AMONT	
X AVAL	
Y AVAL	
Lpb	
Lt	
Lm	
Sm	0
TRANSP	
VIT MOY	

### DONNEES STATION

ESPECES VEGETALES AQUATIQUES*	ZB_RD	ZI_RD	ZP	ZI_RG	ZB_RG
E1					
E2					
E3					
E4					
E5					
E6					
E7					
E8					
E9					
E10					
E11					

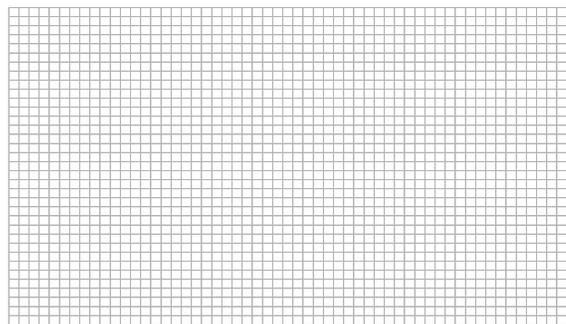
\* Indiquer le pourcentage de recouvrement pour chaque espèce, dans chaque zone



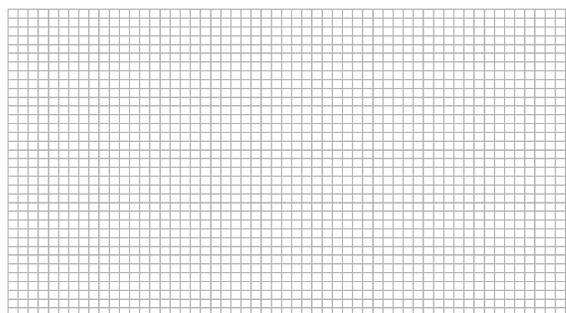
LEGENDE FICHE STATION	DETAIL
CODE STATION	Au format RNB si possible et précédé du code Bassin
COURS D'EAU	Nom de la rivière
SITE	Nom du site de prélèvement Corbicule
DATE	Jour de l'échantillonnage (JJmm/aaaa)
X AMONT	Latitude de la limite amont du site de prélèvement (en mètres et en Lambert 93)
Y AMONT	Longitude de la limite amont du site de prélèvement (en mètres et en Lambert 93)
X AVAL	Latitude de la limite aval du site de prélèvement (en mètres et en Lambert 93)
Y AVAL	Longitude de la limite aval du site de prélèvement (en mètres et en Lambert 93)
Lpb	Largeur au débit de Plein Bord (en m)
Lt	Longueur totale de la station (en m)
Lm	Largeur mouillée moyenne au moment du prélèvement (en m avec 1 décimale)
Sm	Superficie mouillée de la station (m²)
TRANSP	transparence en cm mesurée avec un disque de secchi
VIT MOY	Vitesse moyenne d'écoulement
ZB_RD & ZB_RG	Zone de Berge Rive Droite & Zone de Berge Rive Gauche
ZI_RD & ZI_RG	Zone Intermédiaire Rive Droite & Zone Intermédiaire Rive Gauche
ZP	Zone Profonde
LEGENDE FICHE PRELEVEMENT	DETAIL
POINT P	Numéro du point de prélèvement
RIVE	D = Droite / G = Gauche bélalement autant de point sur chaque rive, dans la mesure d'accessibilité des rives
MATERIEL	Matériel de prélèvement utilisé : Filet Surber (FS) - Benne Van Veen (BVV) - Drague (D) - Autre (à préciser)
SURF ECH	Surface de prélèvement en m²
SUBSTRAT	Pour chaque prélèvement, utiliser les codes SANDRE
DISTANCE RIVE	Distance à la rive la plus proche en mètre
HAUTEUR D'EAU	Pour chaque prélèvement, la hauteur d'eau en mètre avec 1 décimale
PRESENCE VEGAQA	Pour chaque prélèvement, indiquer la présence de végétation aquatique (espèce si possible)
ESP BV X	Nom de l'espèce de bivalve (indigène ou invasive)
NB MORTE	Nombre d'individus morts prélevés pour l'espèce ESP BV X (Nombre de double-coquilles vides) + (nombre de coquilles isolées vides / 2)
NB VIVANTE	Nombre d'individus vivants prélevés pour l'espèce ESP BV X

### PROFILS EN TRAVERS

#### PROFIL 1



#### PROFIL 2







FICHE TERRAIN CORBUCCLE										DONNEES DES POINTS DE PRELEVEMENT				STATION: CUST_FELIAC_2019				ZONE: ZP-Lo2	
POINT	RIVE	MATERIEL	SURF ECH	SUBSTRAT	DISTANCE RIVE	HAUTEUR D'EAU	PRESENCE VEGAOQA	ESP-BIV 1	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 2	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 3	NB MORTE	NB VIVANTE			
P1	x	Benne	1/25	G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P2	x	Benne	1/25	C	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P3	x	Benne	1/25	C	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P4	x	Benne	1/25	C+B	x	x	NON	Corbacle	NON	NON									
P5	x	Benne	1/25	T	x	x	Eg	Corbacle	OUI	OUI									
P6	x	Benne	1/25	C+T	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P7	x	Benne	1/25	G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P8	x	Benne	1/25	C+B	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P9	x	Benne	1/25	V+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P10	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P11	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P12	x	Benne	1/25	C	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P13	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P14	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P15	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P16																			
P17																			
P18																			
P19																			
P20																			
P21																			
P22																			
P23																			
P24																			
P25																			

FICHE TERRAIN CORBUCCLE										DONNEES DES POINTS DE PRELEVEMENT				STATION: CUST_FELIAC_2019				ZONE: Z2B-RG	
POINT	RIVE	MATERIEL	SURF ECH	SUBSTRAT	DISTANCE RIVE	HAUTEUR D'EAU	PRESENCE VEGAOQA	ESP-BIV 1	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 2	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 3	NB MORTE	NB VIVANTE			
P1	G	Benne	1/25	V+D	x	x	Eg++	Corbacle	OUI	OUI									
P2	G	Benne	1/25	V+D	x	x	Eg++	Corbacle	OUI	OUI									
P3	G	Benne	1/25	T+S+G	x	x	Eg	Corbacle	NON	NON									
P4	G	Benne	1/25	V+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P5	G	Benne	1/25	T+S+G	x	x	NON	Corbacle	NON	OUI									
P6	G	Benne	1/25	T+S+G	x	x	Eg++	Corbacle	NON	NON									
P7	G	Benne	1/25	T+S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P8	G	Benne	1/25	T	x	x	Eg+	Corbacle	OUI	OUI									
P9	G	Benne	1/25	V+D	x	x	Eg++	Corbacle	OUI	OUI									
P10	G	Benne	1/25	T+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P11	G	Benne	1/25	V	x	x	Eg	Corbacle	OUI	OUI									
P12	G	Benne	1/25	T	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P13	G	Benne	1/25	V	x	x	Eg++	Corbacle	OUI	OUI									
P14	G	Benne	1/25	T+D	x	x	Eg++	Corbacle	OUI	OUI									
P15	G	Benne	1/25	T	x	x	Eg++	Corbacle	NON	NON									
P16	G	Benne	1/25	T	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P17	G	Benne	1/25	V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P18	G	Benne	1/25	T+D	x	x	Eg	Corbacle	NON	NON									
P19																			
P20																			
P21																			
P22																			
P23																			
P24																			
P25																			

FICHE TERRAIN CORBUCCLE										DONNEES DES POINTS DE PRELEVEMENT				STATION: CUST_FELIAC_2019				ZONE: ZP-Lo1	
POINT	RIVE	MATERIEL	SURF ECH	SUBSTRAT	DISTANCE RIVE	HAUTEUR D'EAU	PRESENCE VEGAOQA	ESP-BIV 1	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 2	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 3	NB MORTE	NB VIVANTE			
P1	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P2	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P3	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P4	x	Benne	1/25	C+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P5	x	Benne	1/25	C+G	x	x	Eg	Corbacle	OUI	OUI									
P6	x	Benne	1/25	VEB	x	x	Eg	Corbacle	NON	OUI									
P7	x	Benne	1/25	C+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P8	x	Benne	1/25	C	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P9	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P10	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P11	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P12	x	Benne	1/25	V+S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P13	x	Benne	1/25	S+G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P14	x	Benne	1/25	S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P15	x	Benne	1/25	S+G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P16	x	Benne	1/25	V+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P17	x	Benne	1/25	S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P18	x	Benne	1/25	V+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P19	x	Benne	1/25	V	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P20	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P21	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P22	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P23	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P24	x	Benne	1/25	D+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P25	x	Benne	1/25	V+S+G	x	x	Eg	Corbacle	OUI	OUI									

FICHE TERRAIN CORBUCCLE										DONNEES DES POINTS DE PRELEVEMENT				STATION: CUST_FELIAC_2019				ZONE: ZP-Lo1	
POINT	RIVE	MATERIEL	SURF ECH	SUBSTRAT	DISTANCE RIVE	HAUTEUR D'EAU	PRESENCE VEGAOQA	ESP-BIV 1	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 2	NB MORTE	NB VIVANTE	ESP-BIV 3	NB MORTE	NB VIVANTE			
P1	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P2	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P3	x	Benne	1/25	G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P4	x	Benne	1/25	C+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P5	x	Benne	1/25	C+G	x	x	Eg	Corbacle	OUI	OUI									
P6	x	Benne	1/25	VEB	x	x	Eg	Corbacle	NON	OUI									
P7	x	Benne	1/25	C+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P8	x	Benne	1/25	C	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P9	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P10	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P11	x	Benne	1/25	G+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P12	x	Benne	1/25	V+S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P13	x	Benne	1/25	S+G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P14	x	Benne	1/25	S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P15	x	Benne	1/25	S+G+V	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P16	x	Benne	1/25	V+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P17	x	Benne	1/25	S+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P18	x	Benne	1/25	V+D	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P19	x	Benne	1/25	V	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P20	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P21	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	OUI									
P22	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P23	x	Benne	1/25	V+G	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P24	x	Benne	1/25	D+S	x	x	NON	Corbacle	OUI	NON									
P25	x	Benne	1/25	V+S+G	x	x	Eg	Corbacle	OUI	OUI									

# Corbicules et autres espèces envahissantes du bassin versant de la Vilaine

*Recherche par analyse de l'ADN environnemental*



VINCENT PRIE – EXPERTISES BIODIVERSITE

24 octobre 2019

*Photo de couverture :*  
*Le Men à Talensac*

## Résumé administratif

<b>Citation recommandée.</b>	Prié, V. 2019.- Corbicules et autres espèces exotiques envahissantes du bassin versant de la Vilaine – Recherche par analyse de l'ADN environnemental. EPTB de la Vilaine, XX pp	
Date	Mercredi 30 Octobre 2019	
Nom de fichier	PRIE_2019_ADNeVilaine.PDF	
N° de contrat	PRI-19-0012	
Maître d'ouvrage	EPTB Vilaine Boulevard de Bretagne - BP 11 56130 LA ROCHE-BERNARD	
Interlocuteur	Benjamin Bottner Chargé de mission « Milieux naturels et biodiversité »	Contact : Mail : Benjamin.Bottner@eptb-vilaine.fr Téléphone : 06 76 54 27 30
Vincent Prié – Expertises Biodiversité	Vincent Prié 84 chemin du Castellas 34700 Lodève	Contact : <a href="mailto:prie.vincent@gmail.com">prie.vincent@gmail.com</a> Tél : (+33) 7 71 08 93 46

## SOMMAIRE

<b>CONTEXTE</b> .....	<b>1</b>
<b>METHODES</b> .....	<b>2</b>
ÉCHANTILLONNAGE.....	2
Dates et lieux.....	2
Méthodes d'échantillonnage.....	3
TRAITEMENT DES ECHANTILLONS.....	4
Bivalves.....	4
Écrevisse de Louisiane.....	4
<b>RESULTATS</b> .....	<b>6</b>
ÉCHANTILLONNAGE ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS.....	6
RICHESSE SPECIFIQUE EN BIVALVES, SITES ET ESPECES REMARQUABLES.....	7
ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES.....	11
Écrevisse de Louisiane <i>Procambarus clarkii</i> .....	12
Corbicule <i>Corbicula fluminea / leana</i> .....	12
Moule zébrée <i>Dreissena polymorpha</i> .....	12
Anodonte chinoise <i>Sinanodonta woodiana</i> .....	12
<b>DISCUSSION-CONCLUSION</b> .....	<b>12</b>
ÉCHANTILLONNAGE.....	12
BIVALVES PATRIMONIAUX.....	13
ESPECES INTRODUITES.....	13
PERSPECTIVES.....	14
<b>REFERENCES</b> .....	<b>15</b>
<b>ANNEXE : FICHES STATIONS</b> .....	<b>16</b>
GUELTAS (CANAL DE NANTES A BREST).....	17
PLOËRMEL (YVEL).....	18
MUZILLAC (ST-ELOI).....	19
GUE DE L'EPINE (ARZ).....	20
TALENSAC – CINTRE (MEU).....	21
SERNON S/ VILAINE (VILAINE).....	22
BLAIN (ISAC).....	23
POLIGNE (SEMNON).....	24

## Contexte

Les eaux de l'Oust et de la Vilaine connaissent depuis plusieurs années une transparence remarquable, qui semble indiquer un changement dans la production d'algues de la rivière. Ces changements sont concomitants avec l'arrivée de deux mollusques introduits en Vilaine, la Moule zébrée *Dreissena polymorpha* et la Corbicule asiatique *Corbicula fluminea* / *C. leana*, qui ont connu un développement important sur les axes des rivières navigables.

L'EPTB Vilaine a réuni ses partenaires au sein d'un comité de suivi technique formé des fédérations pour la pêche et la protection du milieu aquatique, pêcheurs professionnels fluviaux, l'agence de l'eau, la région Bretagne, pour mettre au point une stratégie d'étude concernant la Corbicule et son effet possible en termes de qualité d'eau et sur la chaîne trophique.

L'objectif initial a été de réaliser une étude bibliographique de la Corbicule asiatique et la Moule zébrée pour comprendre la biologie et les impacts potentiels de ces espèces dans la littérature.

Suite à cette étude, une collecte d'information notamment auprès de la DREAL a permis d'établir une base de données reflétant la présence de la Corbicule sur l'ensemble du bassin versant de la Vilaine.

De manière à compléter cette base de données et à collecter d'autres données sur les bivalves dulçaquicoles, l'EPTB Vilaine a commandé une étude complémentaire basée sur l'analyse de l'ADN environnemental (ADNe).

Le développement de la méthode pour les bivalves a été initié en 2015 par Vincent Prié (Biotope / Caracol) et la société SpyGen. Plusieurs années de tests ont été nécessaires pour s'assurer de l'efficacité de la méthode, en comparant notamment les résultats d'inventaires par analyse de l'ADNe à ceux d'inventaires menés de manière traditionnelle (voir Prié et al. 2017 ; Prié et al. *in prep.*). Aujourd'hui, la méthode est parfaitement au point et proposée en routine dans un but commercial à l'attention des gestionnaires, bureaux d'études et scientifiques.

Dans le cadre de cette étude, en plus de l'analyse des bivalves par métabarcoding, une analyse ciblée sur l'Écrevisse de Louisiane *Procambarus clarkii* a été réalisée sur les mêmes échantillons.

## Méthodes

### Échantillonnage

#### Dates et lieux

La phase d'échantillonnage s'est déroulée du vendredi 26 juillet 2019 au mardi 30 juillet 2019. Les conditions d'échantillonnage étaient favorables, avec une météo clémente et des conditions d'étiage normales pour la saison. Huit sites ont été échantillonnés conformément au cahier des charges (Fig. 1).

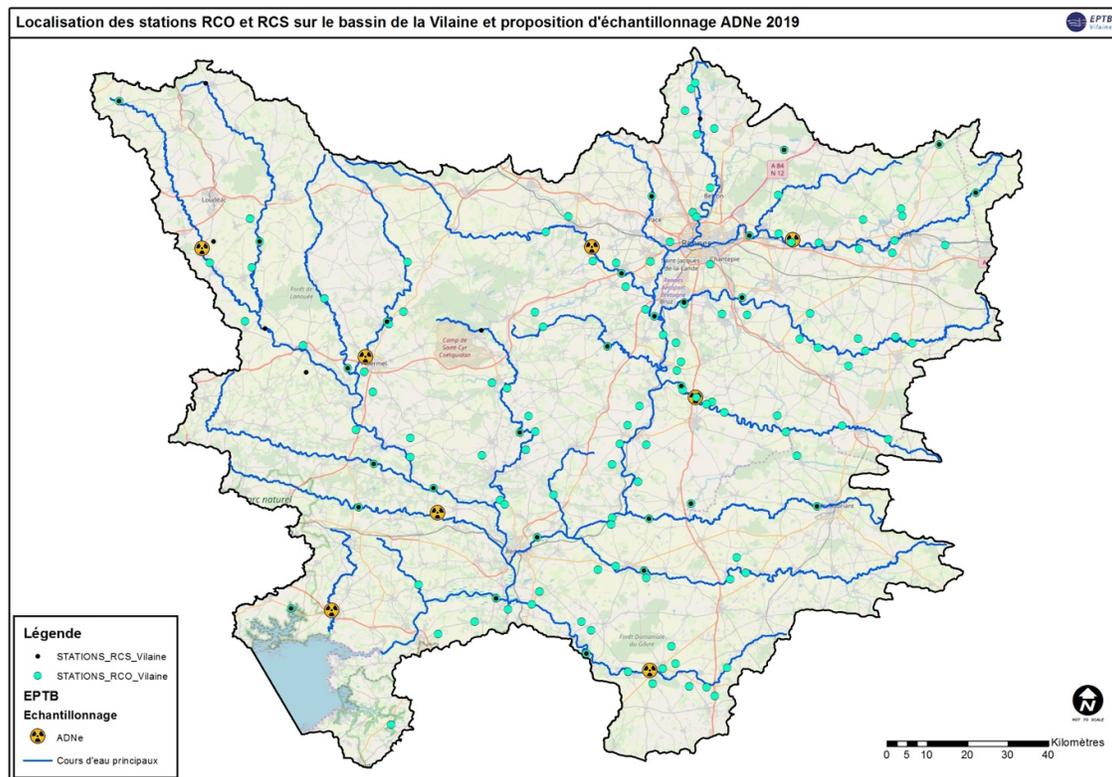


Figure 1 : plan d'échantillonnage fourni par le maître d'ouvrage.

## Méthodes d'échantillonnage

La méthode standard d'échantillonnage mise au point pour les bivalves en milieu courant consiste pour chaque site à réaliser deux prélèvements de 25 l. d'eau chacun. Les prélèvements sont réalisés par pompage direct dans le cours d'eau à l'aide d'une pompe péristaltique de marque Vampire ® (Fig. 2). L'eau prélevée est filtrée immédiatement dans une capsule dédiée. A l'issue du protocole de filtration, une solution tampon est ajoutée dans la capsule de manière à garantir une bonne préservation de l'ADN et la capsule est envoyée au laboratoire pour analyse. Tout le matériel utilisé est stérile et garanti *DNA-free*.

Les temps de prélèvement et donc les volumes d'eau analysés ont varié en fonction de la turbidité plus ou moins importante selon les sites (Tableau 1).



**Figure 2 :** exemple d'échantillonnage par pompage dans le cours d'eau et filtration à l'aide de la capsule dédiée.

Tableau 1 : détail des conditions de prélèvement pour chaque site.

N° échantillon	Réplikat	Site	X	Y	Date	Durée filtration
SPY192495	1	Gueltas	-2,780454	48,103882	25/07/2019	30 mn
SPY192496	2					30 mn
SPY192497	1	Ploermel (Yvel)	-2,416638	47,940037	26/07/2019	10 mn
SPY192498	2					12 mn
SPY192499	1	Muzillac (Saint-Eloi)	-2,492607	47,562595	26/07/2019	15 mn
SPY192500	2					18 mn
SPY192501	1	Malansac (Arz)	-2,256668	47,709106	26/07/2019	25 mn
SPY192502	2					25 mn
SPY192503	1	Talensac (Meu)	-1,912931	48,105621	26/07/2019	30 mn
SPY192504	2					30 mn
SPY192505	1	Sernon s/ Vilaine	-1,465073	48,116711	27/07/2019	25 mn
SPY192506	2					25 mn
SPY192507	1	Blain	-1,784734	47,471703	28/07/2019	12 mn
SPY192508	2					15 mn
SPY192509	1	Poligné	-1,682164	47,881382	29/07/2019	20 mn
SPY192510	2					25 mn

## Traitement des échantillons

### Bivalves

Les extractions d'ADN ont été réalisées dans une salle dédiée à l'ADN rare ou dégradé. Une amplification de l'ADN a ensuite été effectuée avec un couple d'amorces universelles pour les Unionidés et un couple d'amorces universelles pour les Vénéridés (12 réplikat par échantillon et par couple d'amorces) puis les échantillons amplifiés ont été séquencés à l'aide d'un séquenceur nouvelle génération (MiSeq - Illumina). À chaque étape du protocole des témoins négatifs ont été analysés en parallèle aux échantillons, afin de contrôler la pureté des consommables utilisés et de détecter d'éventuelles contaminations croisées au cours de la manipulation.

Les séquences obtenues ont été analysées avec des outils bio-informatiques permettant d'éliminer les erreurs dues à l'amplification ou au séquençage (à l'aide de différents filtres) et de comparer chaque séquence avec les bases de référence Bivalves (Prié et al. in prep.). Une liste d'espèces a ensuite été établie pour chaque échantillon avec la base de référence utilisée ainsi que le nombre de séquences ADN attribuées à chaque espèce.

### Écrevisse de Louisiane

Pour détecter la présence de l'Écrevisse de Louisiane *Procambarus clarkii* les extractions d'ADN ont été réalisées dans une salle dédiée à l'étude de l'ADN rare ou dégradé. Une amplification de l'ADN, par quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR), a été effectuée avec un couple d'amorces

spécifique à la Cistude d'Europe (12 réplicats par échantillon). Des contrôles positifs (tissus provenant de l'espèce cible) ont été analysés au cours de cette étape afin de contrôler les conditions d'amplification (*cf. PCR (+) dans Contrôles qualité*).

À chaque étape du protocole des témoins négatifs ont été analysés en parallèle aux échantillons, afin de contrôler la pureté des consommables utilisés et de détecter d'éventuelles contaminations croisées au cours de la manipulation (*cf. Extraction (-) & PCR (-) dans Contrôles qualité*).

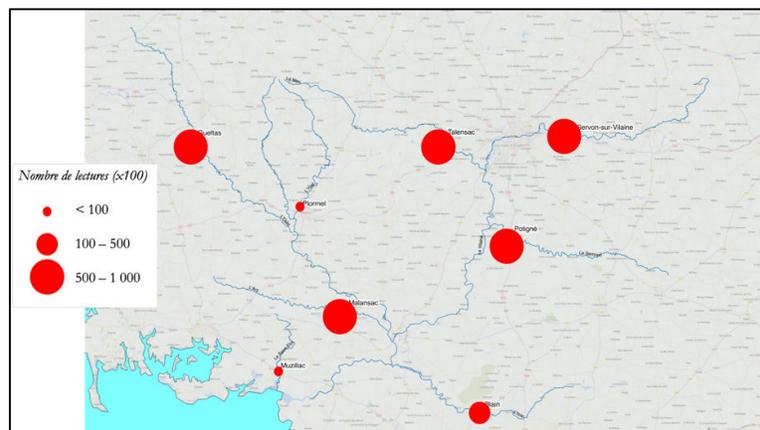
## Résultats

### Échantillonnage et traitement des échantillons

Tous les points d'échantillonnage planifiés initialement ont pu être échantillonnés et ont donné des résultats satisfaisants après analyse à l'exception d'un seul réplicat, le n° SPY192498, qui n'a fourni aucune amplification (Tableau 2). Ce résultat est discuté ci-après.

Tableau 2 : détail du nombre de lectures de fragments d'ADNe par réplicat.

Commune	N° réplicat	Nb lectures ADNe
Gueulas	SPY192495	461 183
	SPY192496	356 431
Ploërmel	SPY192497	63 134
	SPY192498	0
Muzillac	SPY192499	48 901
	SPY192500	25 740
Malansac	SPY192501	617 146
	SPY192502	368 725
Talensac	SPY192503	532 016
	SPY192504	247 645
Sernon s/ Vilaine	SPY192505	344 717
	SPY192506	212 406
Blain	SPY192507	278 351
	SPY192508	109 381
Poligné	SPY192509	290 221
	SPY192510	358 790



**Figure 3 :** localisation des points d'échantillonnage. La taille des points figure l'ordre d'importance du nombre total de lectures de fragments d'ADNe de bivalves.

## Richesse spécifique en bivalves, sites et espèces remarquables

Au total, 22 espèces de bivalves dulçaquicoles ont été détectés par les échantillonnages sur le bassin versant de la Vilaine, soit environ la moitié des espèces de la faune de France (Tableau 3). Cinq de ces espèces appartiennent à l'ordre des Unionida (grandes espèces appelées Naiades), famille des Unionidae. Au sein de l'ordre des Venerida figurent quinze espèces de la famille des Sphaeriidae (petites espèces de moins de 5 mm), les deux autres sont des espèces introduites (Corbiculidae et Dreissenidae).

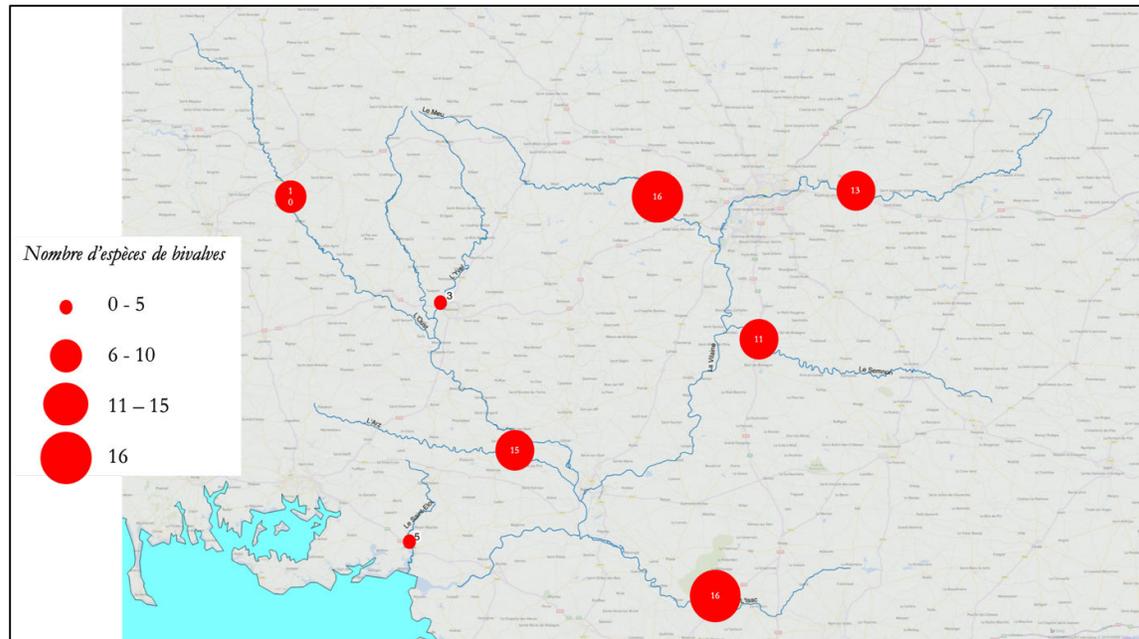
Tableau 3 : résultats par espèce.

	Gueltas	Ploërmel	Muzillac	Malansac	Talensac	Sernon s/ Vilaine	Blain	Poligné
<i>Anodonta anatina</i>				2	2	2	2	2
<i>Anodonta cygnea</i>	2	1	2	1	2	2	2	1
<i>Pseudanodonta complanata</i>					1			
<i>Unio mancus</i>				2			2	
<i>Unio pictorum</i>				1			1	
<i>Corbicula sp.</i>	2			2	1	2	2	1
<i>Dreissena polymorpha</i>	2						1	
<i>Pisidium amnicum</i>				2				
<i>Sphaerium corneum</i>	2		2	2	2	2	2	2
<i>Sphaerium lacustre</i>			1	1	2	2		2
<i>Sphaerium ovale</i>							2	
<i>Englesa casertana</i>	2	1		2	2	2	1	1
<i>Englesa henslowana</i>	2			2	2	2	2	
<i>Englesa hibernica</i>	2		1	2	2	2	1	1
<i>Englesa milium</i>				2				
<i>Englesa nitida</i>			2		2	2	1	2
<i>Englesa obtusalis</i>	2				1			
<i>Englesa personata</i>		1		2	2	1		1
<i>Englesa pseudosphaerium</i>	2							
<i>Englesa subtruncata</i>	2			1	2	2	2	2
<i>Englesa supina</i>					2	2	1	
<i>Odbneripisidium moitessierianum</i>				2	2		1	
Richesse spécifique en bivalves	10	3	5	15	16	13	16	11
<i>Procambarus clarkii</i>							2	2

Le nombre (1 ou 2) dans les colonnes indique les résultats par réplicat. Rien = pas détecté du tout ; 1 = détecté par un seul des deux réplicats ; 2 = détecté par les deux réplicats.

Parmi ces espèces, trois sont nouvelles pour la Bretagne (Pasco 2013) : l'Anodonte comprimée *Pseudanodonta complanata*, la Mulette des peintres *Unio pictorum*, la Pisidie des marais *Englesa pseudosphaerium*. La Pisidie des rivières *Odbneripisidium moitessierianum* n'était connue que de Loire Atlantique.

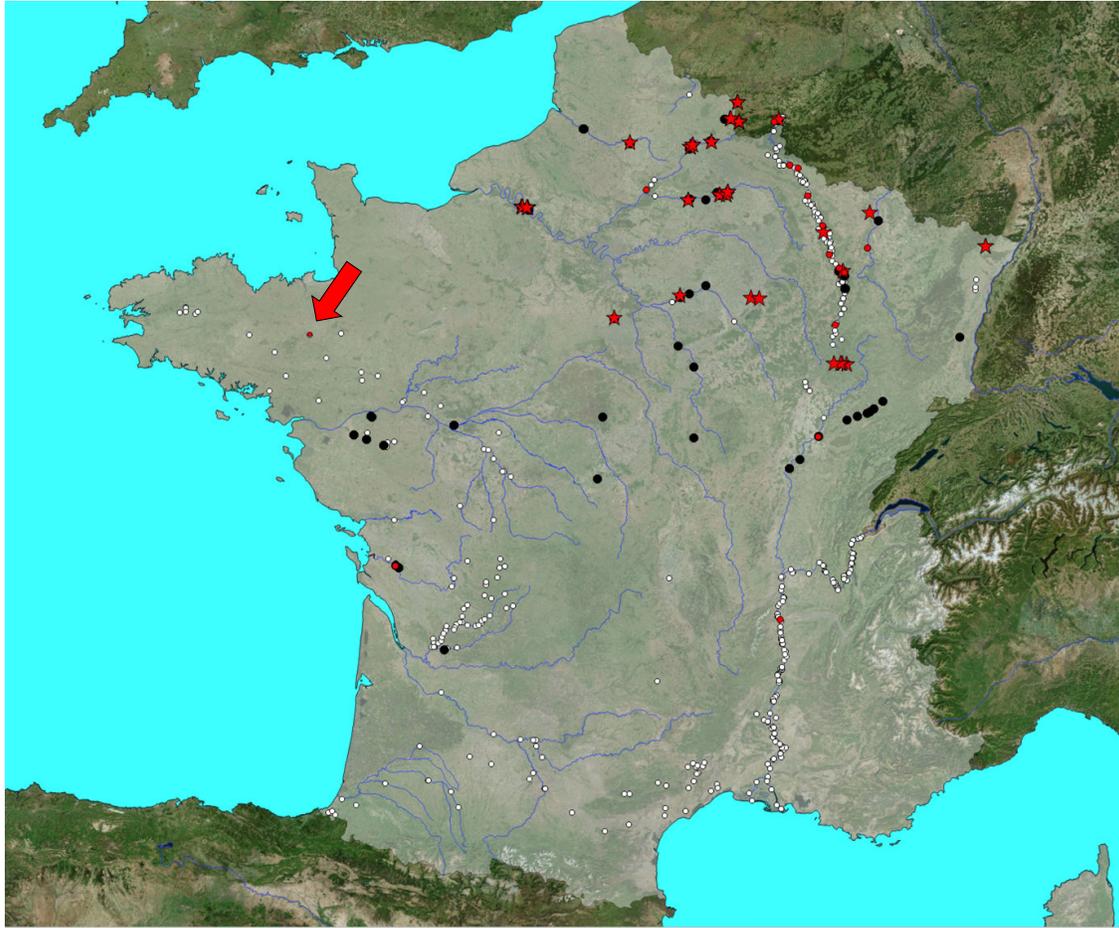
Les sites les plus riches sont sur **le Meu, l'Isaac, l'Arz et l'amont de la Vilaine** (Fig. 4).



**Figure 4 :** répartition de la richesse spécifique par point d'échantillonnage.

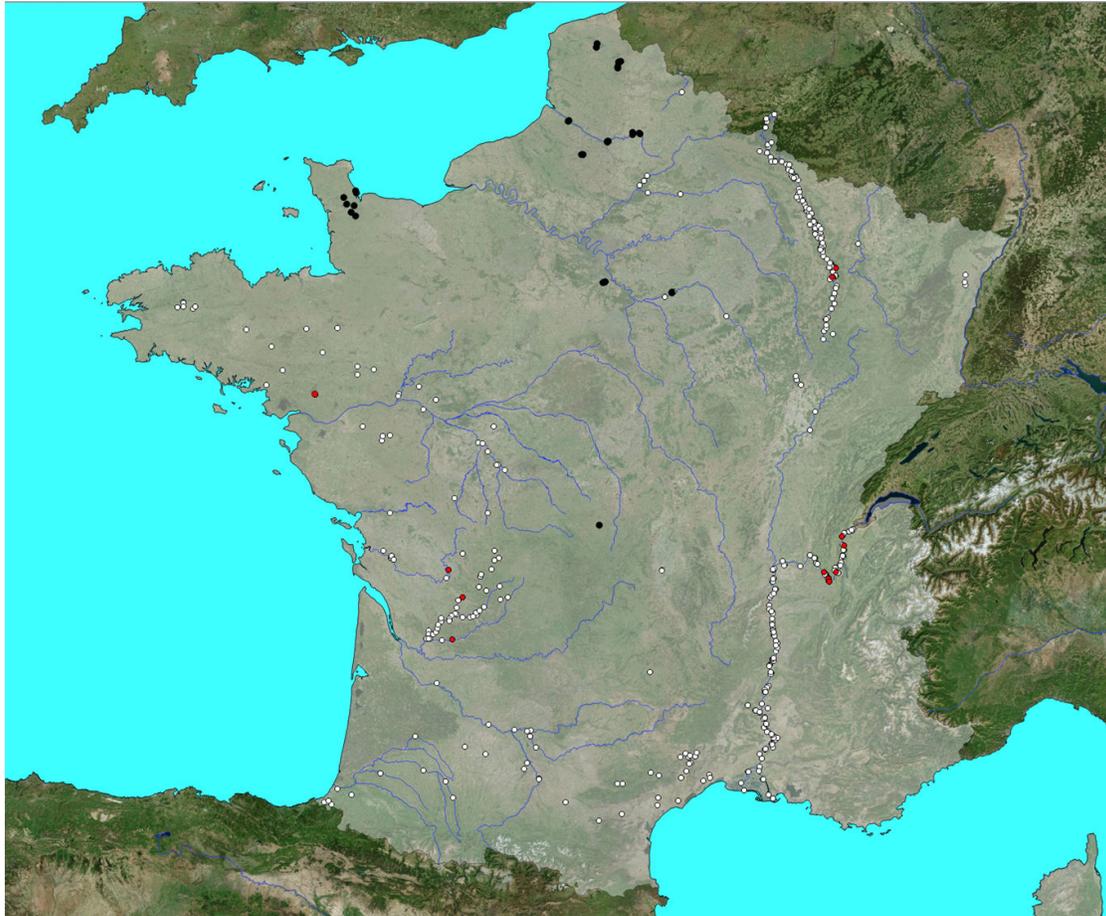
Le **Meu** en particulier est remarquable pour la présence de l'**Anodonte comprimée** *Pseudanodonta complanata*, espèce devenue très rare en France (Prié et al. *in press.*, Fig. 5). Comme bien souvent dans les processus d'extinction, la raréfaction s'accompagne d'une contraction de l'aire de répartition. C'est précisément le cas pour cette espèce, autrefois présente sur toute la façade atlantique d'où elle n'est plus connue que d'une seule station sur la Charente et désormais sur le Meu.

Bien que moins riche en espèces, surtout si l'on soustrait les espèces introduites envahissantes, le site de **Gueltas** est remarquable pour une espèce de Sphaeriidae très rare en France, la **Pisidie des marais** *Englesa pseudosphaerium*. La Pisidie des marais est une espèce de plaine inféodée aux zones marécageuses stables, connectées au réseau hydrographique, dans des eaux claires et propres, généralement sur substrat calcaire. Elle est intolérante à la pollution. Welter-Schultes (2012) lui donne une large aire de répartition dans les trois quarts nord de la France, bien qu'elle soit rare et localisée partout. Mouthon & Kuiper (1987) ne la documentent que de quatre sites de la vallée du Rhône et d'une donnée historique (coll. Moquin-Tandon) près de Toulouse. Malgré un échantillonnage important par ADN sur l'ensemble du territoire français, elle n'a été détectée qu'une fois dans le Son, affluent de la Charente. Cette espèce aux exigences écologiques particulières, puisqu'elle requière des eaux propres, non polluées et stables, conditions de plus en plus rares en plaine compte-tenu des usages agricoles et de la pression sur la ressource en eau, en particulier en été, est considérée comme « En danger critique d'extinction » en Allemagne et en Autriche, « En danger » en Suisse.



**Figure 5 :** répartition en France de l'*Anodonte comprimée* en France. Points blancs : sites d'échantillonnage ADNe en 2019 ; points noirs : données disponibles pour la *Anodonte comprimée* (INPN) ; étoiles rouges : données d'*Anodonte comprimée* observée vivante depuis 2006 ; points rouges : données issues de l'analyse de l'ADNe.

Enfin, notons la présence de la Cyclade ovale *Sphaerium ovale*, espèce mal connue dont les caractéristiques morphologiques sont intermédiaires entre la Cyclade cerise et la Cyclade commune, ce qui rend sa détermination difficile. Bien qu'elle semble répandue dans toute la France, cette espèce est rarement détectée. Les stations les plus proches sont dans le Cotentin et dans la Charente (Fig. 6).



**Figure 6 :** répartition en France de la Cyclade ovale *S. ovale* (d'après Prié et al. in press.). Points blancs : sites d'échantillonnage ADNe ; points noirs : données disponibles pour la Cyclade ovale ; points rouges : données issues de l'analyse de l'ADNe.

## Espèces exotiques envahissantes

Trois espèces exotiques envahissantes (EEE) ont été détectées par analyse de l'ADNe sur les échantillons collectés sur le bassin de la Vilaine : l'Écrevisse de Louisiane, la Corbicule et la Moule zébrée (Fig. 7).

Les EEE aquatiques profitent en particulier des canaux qui sont d'une part des milieux dégradés, souvent favorables aux EEE, et qui d'autre part connectent entre eux des bassins versants auparavant isolés. Il n'est donc pas étonnant de retrouver les plus fortes abondances de Corbicules et les stations de moules zébrées sur le trajet du canal de Nantes à Brest. Néanmoins, une fois colonisé, les EEE se répandent dans tout le bassin versant et les Corbicules sont retrouvées sur presque toutes les stations d'échantillonnage. Ce n'est pas le cas de la Moule zébrée, sans doute parce qu'elle a besoin de milieux plus stables (enrochements, berges canalisées...), ou alors parce que sa colonisation est plus lente, peut-être en raison de l'effet péninsule.

L'absence d'EEE à Muzillac peut s'expliquer par l'isolement géographique de ce petit fleuve côtier. En revanche, à Ploërmel comme à Muzillac, elle peut également s'expliquer par une mauvaise détection puisque les rendements en ADNe étaient très faibles sur ces deux sites.



**Figure 7 :** site de localisation des trois EEE ciblées par cette étude. La taille des icônes figure l'abondance inférée à partir du nombre de lectures, sauf pour l'écrevisse de Louisiane pour laquelle les analyses ne donne que la présence / absence.

### Écrevisse de Louisiane *Procambarus clarkii*

L'écrevisse de Louisiane est une espèce plutôt d'eaux stagnantes, marécages, étangs... mais qui possède une grande plasticité écologique. Elle n'a été détectée que sur deux sites, à Blain et Poligné. Notons toutefois que les analyses ADNe pour les crustacés sont moins performantes que pour les bivalves (risques de faux négatifs plus élevés) et il est possible que l'espèce soit plus largement répandue que les résultats ne semblent l'indiquer.

### Corbicule *Corbicula fluminea* / *leana*

La Corbicule est une espèce introduite de divers endroits d'Asie du Sud-Est où plusieurs espèces sont décrites (*Corbicula fluminea*, *Corbicula leana* et *C. fluminalis* pour les souches présentes en France). Il semble que ces différentes espèces se soient largement hybridées dans leurs zones d'introduction. La forme présente dans la Vilaine devrait s'appeler *C. leana* (Pigneur et al. 2011). Toutefois, le nom *C. fluminea* lui est appliqué depuis longtemps par les naturalistes, et il n'est pas sûr aujourd'hui que l'on puisse toujours distinguer ces deux taxons sur le terrain. Les fragments d'ADNe qui sont utilisés ici ne permettent en tous cas pas de distinguer ces deux taxons si tant est qu'ils puissent toujours l'être dans leurs aires d'introduction.

### Moule zébrée *Dreissena polymorpha*

La Moule zébrée est introduite en France depuis 1852. Sa présence en Bretagne est attestée par Pasco (2013) en Ille-et-Vilaine, Morbihan et Loire Atlantique. Dans le cadre de cette étude, elle n'a été détectée qu'à Blain (de manière anecdotique) et à Gueltas (ou beaucoup de lectures ont été produites).

### Anodonte chinoise *Sinanodonta woodiana*

L'Anodonte chinoise est une très grande espèce, particulièrement envahissante au moins depuis une dizaine d'années et qui menace les Anodontes autochtones par compétition pour la reproduction. Longtemps cantonnée à l'aval du bassin du Rhône, elle semble aujourd'hui en pleine expansion en France, ayant colonisé tout le bassin de la Loire. Son arrivée sur le bassin de la Vilaine semble inéluctable, notamment en raison du canal de Nantes à Brest. Il est toutefois intéressant de noter qu'elle ne semble pas encore présente

## Discussion-conclusion

### Échantillonnage

Pour chaque réplicat, les amplifications ont fourni quelques centaines de milliers de séquences (entre 100 000 et 600 000, 350 000 en moyenne) si l'on excepte les deux échantillonnages de Ploërmel et de Muzillac.

Dans ces deux cas, les temps de filtration étaient assez courts en raison du colmatage rapide des capsules, et l'échantillonnage a été réalisé à l'aval immédiat d'un plan d'eau, au niveau de l'exutoire. Bien que ce type d'échantillonnage ait donné des résultats satisfaisants par le passé (selon des tests réalisés dans des étangs de la région centre en 2016 et Pays de Loire en 2019), il semble qu'ici les résultats soient nettement moins satisfaisants que pour les échantillonnages réalisés directement dans les cours d'eau. Deux raisons peuvent expliquer ces résultats : d'une part les bivalves vivent dans le fond des cours d'eau (benthos) et leur présence dans une eau quasi stagnante peut passer inaperçue en raison de l'absence de brassage, l'ADNe restant au niveau du fond ; d'autre part les conditions de sédimentation dans le fond des plans d'eau artificiels peuvent

ne pas être favorables aux bivalves et donc la faible quantité d'ADNe détecté correspondrait à une faible densité de bivalves dans le plan d'eau. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de trancher entre ces deux hypothèses puisque d'autres expériences d'échantillonnage au niveau de l'exutoire de plans d'eau ont donné ailleurs des résultats satisfaisants, tant pour l'ordre des Unionida que pour celui des Venerida.

### Bivalves patrimoniaux

L'inventaire des bivalves par ADNe a permis de mettre en évidence une richesse spécifique importante au niveau du bassin-versant de la Vilaine, ainsi que deux espèces patrimoniales l'**Anodonte comprimée** *Pseudanodonta complanata*, espèce devenue très rare en France, et la **Pisidie des marais** *Englesa pseudosphaerium* connue de trois sites en France selon Mouthon & Kuiper 1987 et de deux sites seulement par la campagne de prélèvement d'ADNe de 2015 – 20189 (Prié et al. in press).

### Espèces introduites

Les espèces introduites et envahissantes qui étaient la cible de cette étude ont bien été détectées. L'**Écrevisse de Louisiane** n'a été détectée qu'à Blain et Poligné. Toutefois, les taux de détection de crustacées par ADNe ne sont pas toujours très bons et il est possible que l'espèce soit présente ailleurs.

La **Corbicule** est présente sur tous les sites à l'exception de Ploërmel et Muzillac, mais sur ces deux sites se pose la question de l'efficacité de la détection par ADNe. Il est très probable que la Corbicule soit présente sur tout le réseau hydrographique du bassin de la Vilaine. En revanche, il est possible que le Saint-Eloi soit épargné en raison de son isolement géographique.

La **Moule zébrée** a été détectée à Balin et Ploërmel, soit sur le trajet du canal de Nantes à Brest, qui constitue certainement une voie de colonisation très efficace pour les EEE aquatiques. Les trois autres espèces de bivalves exotiques envahissantes présents en France, l'**Anodonte chinoise** *Sinanodonta woodiana*, la **Moule quagga** *Dreissena rostriformis bugensis* et la **Pisidie d'Amérique** *Englesa compressa* n'ont pas -encore- été détectées sur le bassin de la Vilaine.

## Perspectives

L'inventaire par analyse de l'ADNe a une fois de plus montré son efficacité pour les bivalves en mettant en évidence une faune riche et diversifiée, sauf pour les sites de Ploërmel et de Muzillac où un doute subsiste quant à la bonne conduite de l'échantillonnage (exutoire de grands plans d'eau). Il serait intéressant de refaire ces échantillonnage dans la rivière, par exemple à l'amont et à l'aval du plan d'eau pour vérifier les résultats obtenus.

D'une manière générale l'intensification de l'échantillonnage de l'ADNe sur d'autres sites serait intéressante pour préciser les aires de répartition des espèces recherchées (introduites et patrimoniales) et potentiellement pour trouver d'autres espèces.

Un suivi régulier et plus intensif sur le canal de Nantes à Brest, véritable porte d'entrée sur la Bretagne, pourrait être envisagé comme observatoire de la propagation des EEE, notamment de celles qui n'ont pas encore été détectées mais qui sont en cours de colonisation rapide de la France, en particulier l'Anodonte chinoise, déjà présente dans la Loire.

Il serait nécessaire de rechercher les espèces rares (Pisidie des marais et Anodonte comprimée) avec des méthodes traditionnelles (respectivement tamisage de sédiment et dragage du lit de la rivière) pour connaître leur répartition exacte. Est-ce le lit du canal pour l'une et de la rivière Meu pour l'autre ? Sur quelle distance ? Est-ce dans des pièces d'eau adjacentes ?

Réaliser quelques autres points d'échantillonnage ADNe en amont de ces sites permettrait de mieux cerner le linéaire de cours d'eau concerné.

On pourrait ainsi envisager des mesure de gestion / protection des milieux concernés. En effet, les distances de détection par ADNe sont mal connues et varient beaucoup selon les conditions (courant, turbidité, abondance de la population amont...) mais sont de l'ordre de quelques kilomètres.

## Références

- Pasco P.Y., 2013. Liste préliminaire des bivalves d'eau douce de Bretagne. *Penn ar Bed - revue naturaliste de Bretagne Vivante*, 215 : 50-53
- Pigneur L.M., Marescaux J., Roland K., Etoundi E., Descy J.-P. & Van Doninck K. 2011. — Phylogeny and androgenesis in the invasive *Corbicula* clams (Bivalvia, Corbiculidae) in Western Europe. *BMC Evolutionary Biology* 11: 1471-2148. DOI: 10.1186/1471-2148-11-147
- Prié, V. 2017.-Naiades et autres bivalves d'eau douce de France. Biotope éditions, Mèze ; Publications scientifiques du Muséum, Paris (collection Inventaires et Biodiversité), 336 pp.
- Prié V., A. Valentini, T. Dejean & N. Poulet 2017.- L'analyse de l'ADNe pour les bivalves. Séminaire AFB - L'ADN environnemental : une révolution pour la gestion de la biodiversité aquatique ? 18/10/2017 – compte-rendu du séminaire, 18 pp.
- Prié V., A. Valentini, P. Jean, M. Rocle, X. Cucherat, T. Dejean & P. Taberlet *in press*. Quatre ans d'échantillonnage d'ADN environnemental pour les bivalves de France : quelles conclusions, quelles perspectives ? Actes du colloque de Nantes, Naturae
- Taberlet, P., Coissac, E., Hajibabaei, M., Rieseberg, L.H., 2012. Environmental DNA. *Molecular Ecology* 21: 1789–1793
- Valentini A., P. Taberlet, C. Miaud, R. Civade, J. Herder, P.F. Thomsen, E. Bellemain, A. Besnard, E. Coissac, F. Boyer, C. Gaboriaud, P. Jean, N. Poulet, N. Roset, G.H. Copp, P. Geniez, D. Pont, C. Argillier, J.-M. Baudoin, T. Peroux, A.-J. Crivelli, A. Olivier, M. Acqueberge, M. Le Brun, P. R. Møller, E. Willerslev & T. Dejean 2016.- Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using environmental DNA metabarcoding. *Molecular Ecology* 25(4): 929-42.

## Annexe : fiches stations

Gueltas (Canal de Nantes à Brest)

-2,780454/48,103882

Date d'échantillonnage : 25/07/2019



Commentaire :

Sur ce site a été détecté la *Pisidie des marais*, espèce très rare en France. Elle pourrait être présente dans la végétation des berges du canal, ou dans des zones marécageuses adjacentes. Le site exact serait à rechercher.

Ploërmel (Yvel)

-2,416638/47,940037

Date d'échantillonnage : 26/07/2019



Commentaire :

Prélèvement au niveau de la sortie de l'usine d'adduction en eau potable. Eau relativement chargée, temps de filtration très courts. Rendement en ADNe très faible. Pas de Corbicules observées au niveau du cours d'eau.

Muzillac (St-Eloi)

-2,492607/47,562595

Date d'échantillonnage : 26/07/2019



Commentaire :

Prélèvement au niveau de l'exutoire du plan d'eau. Eau très chargée en phytoplancton (très verte comme on le voit sur la photo), temps de filtration assez courts. Rendement en ADNe très faible. Pas de Corbicules observées au niveau du cours d'eau.

Gué de l'Épine (Arz)

-2,256668/47,709106

Date d'échantillonnage : 26/07/2019



Commentaire :  
Rien à signaler.

Talensac – Cintré (Meu)

-1,912931/48,105621

Date d'échantillonnage : 26/07/2019



Commentaire :

Rien à signaler. Pas de bivalves observés lors des prospections à pieds réalisées pendant le pompage.  
Détection de l'Anodonte comprimée, qui serait à rechercher quelque part à l'amont du pont.

Sernon s/ Vilaine (Vilaine)

-1,465073/48,116711

Date d'échantillonnage : 27/07/2019



Commentaire :  
Rien à signaler.

Blain (Isac)

-1,784734/47,471703

Date d'échantillonnage : 28/07/2019



*(pas de photo de terrain)*

Commentaire :

Temps de pompage assez courts en raison de la turbidité de l'eau (boues en suspension plutôt que phytoplancton).  
Eau bien brassée pendant le pompage par le passage de péniches.

Poligné (Semnon)

-1,682164/47,881382

Date d'échantillonnage : 29/07/2019



*(pas de photo de terrain)*

Commentaire :

Rien à signaler. Bons temps de filtration, eaux brassées par le seuil du moulin à l'amont.





## Bibliographie

- ADLER, Daniel, Duncan MURDOCH et al. (2019). *rgl: 3D Visualization Using OpenGL*. R package version 0.100.26.
- ANDERSON, Lucy G. et al. (2014). « Biosecurity and Vector Behaviour: Evaluating the Potential Threat Posed by Anglers and Canoeists as Pathways for the Spread of Invasive Non-Native Species and Pathogens ». In : *PLoS One* 9.4, e92788.
- ARAÚJO, Rafael, D. MORENO et M. RAMOS (1993). « The Asiatic Clam *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774)(*Bivalvia: Corbiculidae*) in Europe ». In :
- BACHMANN, Vincent (2000). « Dynamique Spatio-Temporelle d'espèces Invasives, Particulièrement *Corbicula Spp.* et *Dreissena Polymorpha* (Mollusca: *Bivalvia*) En Hydrosystème Fluvial: Évolution Des Populations et Effets de l'artificialisation Sur Les Peuplements Macro-benthiques ». PhD Thesis. Metz.
- BATES, Douglas et al. (2015). « Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4 ». In : *Journal of Statistical Software* 67.1, p. 1–48.
- BEAVER, John R., Thomas L. CRISMAN et Robert J. BROCK (1991). « Grazing Effects of an Exotic Bivalve (*Corbicula Fluminea*) on Hypereutrophic Lake Water ». In : *Lake and Reservoir Management* 7.1, p. 45–51.
- BELANGER, Scott E. (1991). « The Effect of Dissolved Oxygen, Sediment, and Sewage Treatment Plant Discharges upon Growth, Survival and Density of Asiatic Clams ». In : *Hydrobiologia* 218.2, p. 113–126.
- BELLINGER, Edward G. et David C. SIGEE (2015). *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. John Wiley & Sons.
- BESPALAYA, Yulia V. et al. (2018). « Aliens Are Moving to the Arctic Frontiers: An Integrative Approach Reveals Selective Expansion of Androgenic Hybrid *Corbicula* Lineages towards the North of Russia ». In : *Biological Invasions* 20.8, p. 2227–2243.
- BRANCOTTE, V. et T. VINCENT (2002). « L'invasion Du Réseau Hydrographique Français Par Les Mollusques *Corbicula Spp.* Modalité de Colonisation et Rôle Prépondérant Des Canaux de Navigation. » In : *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 365-366, p. 325–337. ISSN : 0767-2861.

- CAHOON, Lawrence B. et D. A. OWEN (1996). « Can Suspension Feeding by Bivalves Regulate Phytoplankton Biomass in Lake Waccamaw, North Carolina? » In : *Hydrobiologia* 325.3, p. 193–200.
- CANTANHÊDE, G. et al. (2008). « Invasive Molluscs in the Diet of *Pterodoras Granulosus* (Valenciennes, 1821)(Pisces, Doradidae) in the Upper Paraná River Floodplain, Brazil ». In : *Ecology of Freshwater Fish* 17.1, p. 47–53.
- CARACO, N. F., J. J. COLE et D. L. STRAYER (2006). « Top down Control from the Bottom: Regulation of Eutrophication in a Large River by Benthic Grazing ». In : *Limnology and Oceanography* 51 (1part2), p. 664–670.
- CARACO, Nina F., Jonathan J. COLE, Stuart EG FINDLAY et al. (2000). « Dissolved Oxygen Declines in the Hudson River Associated with the Invasion of the Zebra Mussel (*Dreissena Polymorpha*) ». In : *Environmental science & technology* 34.7, p. 1204–1210.
- CARACO, Nina F., Jonathan J. COLE, Peter A. RAYMOND et al. (1997). « Zebra Mussel Invasion in a Large, Turbid River: Phytoplankton Response to Increased Grazing ». In : *Ecology* 78.2, p. 588–602.
- CAZZANIGA, Néstor J. et Cristian PÉREZ (1999). « Asiatic Clam, *Corbicula Fluminea*, in Northwestern Patagonia (Argentina) ». In :
- CERCO, Carl F. et Mark R. NOEL (2010). « Monitoring, Modeling, and Management Impacts of Bivalve Filter Feeders in the Oligohaline and Tidal Fresh Regions of the Chesapeake Bay System ». In : *Ecological Modelling* 221.7, p. 1054–1064.
- CHEVALIER (2014). *Etat Des Lieux de La Corbicule, Bassin Versant Du Couesnon*. Fédération de pêche d'Ille et Vilaine.
- CHOUIN, S. (1997). « Données Nouvelles Sur La Distribution d'une Espèce de Mollusque (*Corbicula Fluminea*) Introduite En Basse Loire (Loire-Atlantique) ». In : *Bulletin de la Société Naturaliste de l'Ouest de la France* 19.1.
- COELHO, J. P. et al. (2018). « Effect of the Alien Invasive Bivalve *Corbicula Fluminea* on the Nutrient Dynamics under Climate Change Scenarios ». In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 204, p. 273–282.
- COHEN RONALD R. H. et al. (2003). « The Effect of the Asiatic Clam, *Corbicula Fluminea*, on Phytoplankton of the Potomac River, Maryland ». In : *Limnology and Oceanography* 29.1, p. 170–180. ISSN : 0024-3590.
- COHEN, Ronald RH et al. (1984). « The Effect of the Asiatic Clam, *Corbicula Fluminea*, on Phytoplankton of the Potomac River, Maryland ». In : *Limnology and Oceanography* 29.1, p. 170–180.
- CRESPO, Daniel de Jesus Andrade (2017). « Interactive Effects of Global Ecological Changes in the Ecosystem Functioning of Estuarine Systems: Invasive Species and Climate Change ». PhD Thesis. Universidade de Coimbra.
- CRESPO, Daniel, Marina DOLBETH et al. (2015). « Distribution of *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774) in the Invaded Range: A Geographic Approach with Notes on Species Traits Variability ». In : *Biological Invasions* 17.7, p. 2087–2101.
- CRESPO, Daniel, Martin SOLAN et al. (2017). « Ecological Consequences of Invasion across the Freshwater–Marine Transition in a Warming World ». In : *Ecology and Evolution*.
- CROOKS, Jeffrey A. (2002). « Characterizing Ecosystem-Level Consequences of Biological Invasions: The Role of Ecosystem Engineers ». In : *Oikos* 97.2, p. 153–166.
- DAHL, David B. et al. (2019). *xtable: Export Tables to LaTeX or HTML*. R package version 1.8-4.

- DAME, Richard F. et Sergej OLENIN (2005). *The Comparative Roles of Suspension-Feeders in Ecosystems: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on The Comparative Roles of Suspension-Feeders in Ecosystems, Nida, Lithuania, 4-9 October 2003*. T. 47. Springer Science & Business Media.
- DARRIGRAN, Gustavo (2002). « Potential Impact of Filter-Feeding Invaders on Temperate Inland Freshwater Environments ». In : *Biological invasions* 4.1-2, p. 145–156.
- DEN HARTOG, C., F. W. B. VAN DEN BRINK et G. VAN DER VELDE (1992). « Why Was the Invasion of the River Rhine by *Corophium Curvispinum* and *Corbicula* Species so Successful? » In : *Journal of Natural History* 26.6, p. 1121–1129.
- DESCY, Jean-Pierre et al. (2012). « Phytoplankton of the River Loire, France: A Biodiversity and Modelling Study ». In : *Journal of Plankton Research* 34.2, p. 120–135. ISSN : 0142-7873.
- DIONISIO PIRES, L. M. et al. (2005). « Grazing on Colonial and Filamentous, Toxic and Non-Toxic Cyanobacteria by the Zebra Mussel *Dreissena Polymorpha* ». In : *Journal of Plankton Research* 27.4, p. 331–339.
- ELLIOTT, Paul, David C. ALDRIDGE et Geoff D. MOGGRIDGE (2008). « Zebra Mussel Filtration and Its Potential Uses in Industrial Water Treatment ». In : *Water research* 42.6-7, p. 1664–1674.
- FERREIRA-RODRÍGUEZ, Noé, Laura FANDIÑO et al. (2018). « First Evidence of Asymmetric Competition between the Non-Native Clam *Corbicula Fluminea* and the Native Freshwater Mussel *Unio Delphinus* during a Summer Heat Wave ». In : *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 28.5, p. 1105–1113.
- FERREIRA-RODRÍGUEZ, Noé, Ronaldo SOUSA et Isabel PARDO (2018). « Negative Effects of *Corbicula Fluminea* over Native Freshwater Mussels ». In : *Hydrobiologia* 810.1, p. 85–95.
- FLOURY, M. et al. (2012). « Global versus Local Change Effects on a Large European River ». In : *Science of The Total Environment* 441, p. 220–229. ISSN : 0048-9697.
- FOE, Christopher et Allen KNIGHT (1985). « The Effect of Phytoplankton and Suspended Sediment on the Growth of *Corbicula Fluminea* (Bivalvia) ». In : *Hydrobiologia* 127.2, p. 105–115. ISSN : 0018-8158, 1573-5117.
- FRANCO, J. N. et al. (2012). « Population Dynamics of *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774) in Mesohaline and Oligohaline Habitats: Invasion Success in a Southern Europe Estuary ». In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 112, p. 31–39.
- GAMA, M. et al. (2016). « Predicting Global Habitat Suitability for *Corbicula Fluminea* Using Species Distribution Models: The Importance of Different Environmental Datasets ». In : *Ecological modelling* 319, p. 163–169.
- GARNIER, Josette, Gilles BILLEN et Laurent PALFNER (1999). « Understanding the Oxygen Budget and Related Ecological Processes in the River Mosel: The RIVERSTRAHLER Approach ». In : *Man and River Systems*. Springer, p. 151–166.
- GARNIER, Josette, Antsiva RAMARSON et al. (2018). « Nutrient Inputs and Hydrology Together Determine Biogeochemical Status of the Loire River (France): Current Situation and Possible Future Scenarios ». In : *Science of the Total Environment* 637, p. 609–624.
- GOMES, Cidália et al. (2016). « Low Genetic Diversity and High Invasion Success of *Corbicula Fluminea* (Bivalvia, Corbiculidae) (Müller, 1774) in Portugal ». In : *PLoS ONE* 11.7. ISSN : 1932-6203.
- GOZLAN, Rodolphe E. et al. (2013). « Understanding the Threats Posed by Non-Native Species: Public vs. Conservation Managers ». In : *PLoS One* 8.1, e53200.

- HAKENKAMP, Christine C. et Margaret A. PALMER (1999). « Introduced Bivalves in Freshwater Ecosystems: The Impact of Corbicula on Organic Matter Dynamics in a Sandy Stream ». In : *Oecologia* 119.3, p. 445–451.
- HAKENKAMP, Christine C., Suzanna G. RIBBLETT et al. (2001). « The Impact of an Introduced Bivalve (Corbicula Fluminea) on the Benthos of a Sandy Stream ». In : *Freshwater Biology* 46.4, p. 491–501.
- HESSE, Anne S. et al. (2015). « Historique de Propagation de La Corbicule, Corbicula Fluminea (Bivalvia: Corbiculidae), En Région Centre ». In : *MalaCo* 11, p. 6–13.
- HĽAVAC, Marek (2018). *stargazer: Well-Formatted Regression and Summary Statistics Tables*. R package version 5.2.2. Central European Labour Studies Institute (CELSI). Bratislava, Slovakia.
- HOTTA, Masaru et Akira KOMARU (2018). « The Process of First Polar Body Formation in Eggs of the Androgenetic Clam Corbicula Fluminea ». In : *Journal of Shellfish Research* 37.1, p. 131–137.
- HUBENOV, Zdravko et al. (2013). « Distribution of Corbicula Fluminea (Mollusca: Corbiculidae) over an Eleven-Year Period of Its Invasion in Bulgaria ». In : *Acta zoologica bulgarica* 65.3, p. 315–326.
- HWANG, Soon-Jin et al. (2010). « Effects of Cyanobacterium Microcystis Aeruginosa on the Filtration Rate and Mortality of the Freshwater Bivalve Corbicula Leana. » In : *Journal of environmental biology* 31.4.
- ILARRI, Martina I., Carlos ANTUNES et al. (2011). « Massive Mortality of the Asian Clam Corbicula Fluminea in a Highly Invaded Area ». In : *Biological Invasions* 13.2, p. 277–280.
- ILARRI, Martina I., Fabiana FREITAS et al. (2012). « Associated Macrozoobenthos with the Invasive Asian Clam Corbicula Fluminea ». In : *Journal of Sea Research* 72, p. 113–120.
- ILARRI, Martina I., A. T. SOUZA et al. (2014). « Influence of the Invasive Asian Clam Corbicula Fluminea (Bivalvia: Corbiculidae) on Estuarine Epibenthic Assemblages ». In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 143, p. 12–19.
- JOHNSON, Paul D. et Robert F. McMAHON (1998). « Effects of Temperature and Chronic Hypoxia on Survivorship of the Zebra Mussel (Dreissena Polymorpha) and Asian Clam (Corbicula Fluminea) ». In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55.7, p. 1564–1572.
- KARATAYEV, Alexander Y., Lyubov E. BURLAKOVA et Dianna K. PADILLA (2005). « Contrasting Distribution and Impacts of Two Freshwater Exotic Suspension Feeders, Dreissena Polymorpha and Corbicula Fluminea ». In : p. 239–262.
- KARATAYEV, Alexander Y., Dianna K. PADILLA et al. (2007). « Changes in Global Economies and Trade: The Potential Spread of Exotic Freshwater Bivalves ». In : *Biological Invasions* 9.2, p. 161–180.
- KREBS, Robert A., Elizabeth M. BARKETT et Matthew T. BEGLEY (2014). « The Impact of Dreissenid Mussels on Growth of the Fragile Papershell (Leptodea Fragilis), the Most Abundant Unionid Species in Lake Erie ». In : *Canadian Journal of Zoology* 93.2, p. 143–148.
- LAMAND, F. et V. PRIÉ (2017). *Détermination Des Bivalves de France*. AFB.
- LAURITSEN, Diane D. (1986). « Filter-Feeding in Corbicula Fluminea and Its Effect on Seston Removal ». In : *Journal of the North American Benthological Society* 5.3, p. 165–172.
- LEE, Taehwan et al. (2005). « Invasion of the Clonal Clams: Corbicula Lineages in the New World ». In : *American Malacological Bulletin* 20.1/2, p. 113.
- LEFF, Laura G., Jarrett L. BURCH et J. Vaun McARTHUR (1990). « Spatial Distribution, Seston Removal, and Potential Competitive Interactions of the Bivalves Corbicula Fluminea and Elliptio Complanata, in a Coastal Plain Stream ». In : *Freshwater Biology* 24.2, p. 409–416. ISSN : 1365-2427.

- LIU, Ying, Ping XIE et Xiao-Ping WU (2009). « Grazing on Toxic and Non-Toxic *Microcystis Aeruginosa* PCC7820 by *Unio Douglasiae* and *Corbicula Fluminea* ». In : *Limnology* 10.1, p. 1–5.
- LOPEZ, Cary B. et al. (2006). « Ecological Values of Shallow-Water Habitats: Implications for the Restoration of Disturbed Ecosystems ». In : *Ecosystems* 9.3, p. 422–440.
- LOPEZ-SORIANO, Joaquin et al. (2018). « Unraveling the Complexity of *Corbicula* Clams Invasion in Lake Garda (Italy) ». In : *Advances in Oceanography and Limnology*. ISSN : 1947-573X.
- LUCY, Frances, Alexander KARATAYEV et Lyubov BURLAKOVA (2012). « Predictions for the Spread, Population Density and Impacts of *Corbicula Fluminea* in Ireland ». In : *Aquatic Invasions*.
- MAJDI, Nabil, Léa BARDON et Franck GILBERT (2014). « Quantification of Sediment Reworking by the Asiatic Clam *Corbicula Fluminea* Müller, 1774 ». In : *Hydrobiologia* 732.1, p. 85–92.
- MARESCAUX, Jonathan, Lise-Marie PIGNEUR et Karine Van DONINCK (2010). « New Records of *Corbicula* Clams in French Rivers ». In : *Aquatic Invasions* 5 (Suppl. 1), S35–S39.
- MCDOWELL, W. G., W. H. MCDOWELL et J. E. BYERS (2017). « Mass Mortality of a Dominant Invasive Species in Response to an Extreme Climate Event: Implications for Ecosystem Function ». In : *Limnology and Oceanography* 62.1, p. 177–188.
- MCMAHON, Robert F. (2002). « Evolutionary and Physiological Adaptations of Aquatic Invasive Animals: R Selection versus Resistance ». In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59.7, p. 1235–1244.
- MODESTO, Vanessa et al. (2013). « Spatial and Temporal Dynamics of *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774) in Relation to Environmental Variables in the Mondego Estuary (Portugal) ». In : *Journal of Molluscan Studies* 79.4, p. 302–309.
- MOUTHON, J. (1981). « Sur La Présence En France et Au Portugal de *Corbicula* (*Bivalvia*, *Corbiculidae*) Originaire d'Asie ». In : *Basteria* 45.4/5, p. 109–116.
- MOUTHON, Jacques (2000). « Répartition du genre *Corbicula* Megerle von Mühlfeld (*Bivalvia* : *Corbiculidae*) en France à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle ». In : *Hydroécologie Appliquée* 12, p. 135–146. ISSN : 1147-9213, 1958-556X.
- (2001). « Life Cycle and Population Dynamics of the Asian Clam *Corbicula Fluminea* (*Bivalvia*: *Corbiculidae*) in the Saone River at Lyon (France) ». In : *Hydrobiologia* 452.1-3, p. 109–119.
- MOUTHON, Jacques et Martin DAUFRESNE (2006). « Effects of the 2003 Heatwave and Climatic Warming on Mollusc Communities of the Saône: A Large Lowland River and of Its Two Main Tributaries (France) ». In : *Global Change Biology* 12.3, p. 441–449. ISSN : 1365-2486.
- MOUTHON, Jacques et Tatiana PARGHENTANIAN (2004). « Comparison of the Life Cycle and Population Dynamics of Two *Corbicula* Species, *C. Fluminea* and *C. Fluminalis* (*Bivalvia*: *Corbiculidae*) in Two French Canals ». In : *Archiv für Hydrobiologie* 161.2, p. 267–287.
- NAKANO, Daisuke et David L. STRAYER (2014). « Biofouling Animals in Fresh Water: Biology, Impacts, and Ecosystem Engineering ». In : *Frontiers in Ecology and the Environment* 12.3, p. 167–175.
- NAUDON (2014). « La corbicule dans le limousin, synthèse des connaissances ».
- NEWELL, Roger IE et al. (2005). « Influence of Eastern Oysters on Nitrogen and Phosphorus Regeneration in Chesapeake Bay, USA ». In : *The Comparative Roles of Suspension-Feeders in Ecosystems*. Springer, p. 93–120.
- NICHOLS, S. Jerrine et al. (2005). « Pathways of Food Uptake in Native (*Unionidae*) and Introduced (*Corbiculidae* and *Dreissenidae*) Freshwater Bivalves ». en. In : *Journal of Great Lakes Research* 31.1, p. 87–96. ISSN : 0380-1330.
- PASCO, Pierre-Yves (2013). « Liste Préliminaire Des Bivalves d'eau Douce de Bretagne. » In : *Penn ar Bed - revue naturaliste de Bretagne Vivante* 215, p. 50–53.

- PATRICK, Chase H., Matthew N. WATERS et Stephen W. GOLLADAY (2017). « The Distribution and Ecological Role of *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774) in a Large and Shallow Reservoir. » In : *BioInvasions Record* 6.1.
- PHELPS, Harriette L. (1994). « The Asiatic Clam (*Corbicula Fluminea*) Invasion and System-Level Ecological Change in the Potomac River Estuary near Washington, D.C. » In : *Estuaries* 17.3, p. 614–621. ISSN : 0160-8347.
- PIEL, Stéphanie (2013). « La Qualité de l'eau de La Ressource Au Robinet: Proposition d'une Méthodologie Pour l'identification de Situations à Risque à l'échelle Du Bassin Versant ». PhD Thesis. Rennes 1.
- PIEL, Stéphanie, Estelle BAURÈS et Olivier THOMAS (2012). « Contribution to Surface Water Contamination Understanding by Pesticides and Pharmaceuticals, at a Watershed Scale ». In : *International journal of environmental research and public health* 9.12, p. 4433–4451.
- PIGNEUR, L. M., Elodie FALISSE et al. (2014). « Impact of Invasive Asian Clams, *Corbicula* Spp., on a Large River Ecosystem ». In : *Freshwater Biology* 59.3, p. 573–583.
- PIGNEUR, L. M., S. M. HEDTKE et al. (2012). « Androgenesis: A Review through the Study of the Selfish Shellfish *Corbicula* Spp. » In : *Heredity* 108.6, p. 581.
- PIGNEUR, Lise-Marie et al. (2011). « Phylogeny and Androgenesis in the Invasive *Corbicula* Clams (*Bivalvia*, *Corbiculidae*) in Western Europe ». In : *BMC Evolutionary Biology* 11.1. ISSN : 1471-2148.
- PRIÉ, V. (2017). « Naïades et Autres Bivalves d'eau Douce de France ». In : *Book in French]. Muséum National d'Histoire Naturelle, Biotope, Mèze.*
- RAJAGOPAL, S., G. VELDE et A. VAATE (2000). « Reproductive Biology of the Asiatic Clams *Corbicula Fluminalis* and *Corbicula Fluminea* in the River Rhine. » In : *Archiv für Hydrobiologie* 149.3, p. 403–420.
- RAMCHARAN, Charles W., Dianna K. PADILLA et Stanley I. DODSON (1992). « Models to Predict Potential Occurrence and Density of the Zebra Mussel, *Dreissena Polymorpha* ». In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49.12, p. 2611–2620.
- RENARD, E. et al. (2000). « Morphological and Molecular Differentiation of Invasive Freshwater Species of the Genus *Corbicula* (*Bivalvia*, *Corbiculidea*) Suggest the Presence of Three Taxa in French Rivers ». In : *Molecular Ecology* 9.12, p. 2009–2016. ISSN : 1365-294X.
- ROBINSON, James V. et Gary A. WELLBORN (1988). « Ecological Resistance to the Invasion of a Freshwater Clam, *Corbicula Fluminea*: Fish Predation Effects ». In : *Oecologia* 77.4, p. 445–452.
- ROSA, Inês C. et al. (2011). « The Asian Clam *Corbicula Fluminea* in the European Freshwater-Dependent Industry: A Latent Threat or a Friendly Enemy? » In : *Ecological Economics* 70.10, p. 1805–1813.
- SILVERMAN, Harold et al. (1997). « Clearance of Laboratory-Cultured Bacteria by Freshwater Bivalves: Differences between Lentic and Lotic Unionids ». In : *Canadian Journal of Zoology* 75.11, p. 1857–1866.
- SILVERMAN, H. et al. (1995). « Filtration and Utilization of Laboratory-Cultured Bacteria by *Dreissena Polymorpha*, *Corbicula Fluminea*, and *Carunculina Texasensis* ». In : *The Biological Bulletin* 189.3, p. 308–319.
- SMITH, Bradley J. et al. (2018). « Status and Trends of the Asian Clam (*Corbicula Fluminea*) in the Lower Fox River and Green Bay ». In : *Journal of Great Lakes Research*.
- SOUSA, R., C. ANTUNES et L. GUILHERMINO (2008). « Ecology of the Invasive Asian Clam *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774) in Aquatic Ecosystems: An Overview ». In : *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*. T. 44. EDP Sciences, p. 85–94.

- SOUSA, Ronaldo, Carlos ANTUNES et Lúcia GUILHERMINO (2007). « Species Composition and Monthly Variation of the Molluscan Fauna in the Freshwater Subtidal Area of the River Minho Estuary ». In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75.1-2, p. 90–100.
- SOUSA, Ronaldo, Antonio JA NOGUEIRA et al. (2008). « Growth and Extremely High Production of the Non-Indigenous Invasive Species *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774): Possible Implications for Ecosystem Functioning ». In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80.2, p. 289–295.
- SOUSA, Ronaldo, Marta RUFINO et al. (2008). « Abiotic Impacts on Spatial and Temporal Distribution of *Corbicula Fluminea* (Müller, 1774) in the River Minho Estuary, Portugal ». In : *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18.1, p. 98–110.
- SPITZ, B. et Anne Laure CAUDAL (2016). *Colonisation Des Cours d'eau u Morbihan Par La Corbicule Aquatique*. fédération de pêche du Morbihan, p. 56.
- STITES, David L., Arthur C. BENKE et David M. GILLESPIE (1995). « Population Dynamics, Growth, and Production of the Asiatic Clam, *Corbicula Fluminea*, in a Blackwater River ». In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52.2, p. 425–437.
- STRAYER, David L. (1999). « Effects of Alien Species on Freshwater Mollusks in North America ». In : *Journal of the North American Benthological Society* 18.1, p. 74–98.
- (2010). « Alien Species in Fresh Waters: Ecological Effects, Interactions with Other Stressors, and Prospects for the Future ». In : *Freshwater biology* 55.s1, p. 152–174.
- TRAN, Damien, Alain BOUDOU et Jean-Charles MASSABUAU (2000). « Mechanism for Maintaining Oxygen Consumption under Varying Oxygenation Levels in the Freshwater Clam *Corbicula Fluminea* ». In : *Canadian Journal of Zoology* 78.11, p. 2027–2036.
- VANDERPLOEG, Henry A. et al. (2001). « Zebra Mussel (*Dreissena Polymorpha*) Selective Filtration Promoted Toxic *Microcystis* Blooms in Saginaw Bay (Lake Huron) and Lake Erie ». In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58.6, p. 1208–1221.
- VAUGHN, Caryn C. et Christine C. HAKENKAMP (2001). « The Functional Role of Burrowing Bivalves in Freshwater Ecosystems ». en. In : *Freshwater Biology* 46.11, p. 1431–1446. ISSN : 0046-5070, 1365-2427.
- VENABLES, W. N. et B. D. RIPLEY (2002). *Modern Applied Statistics with S*. Fourth. ISBN 0-387-95457-0. New York : Springer.
- VIERGUTZ, Carsten, Catherine LINN et Markus WEITERE (2012). « Intra-and Interannual Variability Surpasses Direct Temperature Effects on the Clearance Rates of the Invasive Clam *Corbicula Fluminea* ». In : *Marine biology* 159.11, p. 2379–2387.
- VOELZ, Neal J., J. Vaun McARTHUR et Russell B. RADER (1998). « Upstream Mobility of the Asiatic Clam *Corbicula Fluminea*: Identifying Potential Dispersal AgentsaDOI [https://doi.org/10.1007/1-4020-3030-4\\_14](https://doi.org/10.1007/1-4020-3030-4_14) ». In : *Journal of Freshwater Ecology* 13.1, p. 39–45.
- VOHMANN, Andreas et al. (2010). « Strong Body Mass Decrease of the Invasive Clam *Corbicula Fluminea* during Summer ». In : *Biological Invasions* 12.1, p. 53–64.
- WAY, Carl M. et al. (1990). « Dynamics of Filter Feeding in *Corbicula Fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae) ». In : *Canadian Journal of Zoology* 68.1, p. 115–120.
- WEI, Taiyun et Viliam SIMKO (2017). *R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix*. (Version 0.84).
- WELTER-SCHULTES, F. W., C. AUDIBERT et A. BERTRAND (2011). « Liste Des Mollusques Terrestres et Dulcicoles de France Continentale (Excl. Hydrobioïdes) ». In : *Folia Conchyologica* 12, p. 4–44.
- WERNER, Stefan (2008). « Effects of the Invasive Asian Clam *Corbicula Fluminea* on the Littoral Communities of Lake Constance ». PhD Thesis.

- WICKEL, Courtney (2011). « Corbicula Fluminea Production in Three Major Habitats, Including One Dominated by the Non-Native Aquatic Plant, Hydrilla Verticillata, in the Tidal Freshwater Mattaponi River Estuary ». In :
- YAMAMURO, Masumi et Isao KOIKE (1994). « Diel Changes of Nitrogen Species in Surface and Overlying Water of an Estuarine Lake in Summer: Evidence for Benthic-Pelagic Coupling ». In : *Limnology and oceanography* 39.7, p. 1726–1733.
- ZHANG, Lei et al. (2011). « Impacts of Corbicula Fluminea on Oxygen Uptake and Nutrient Fluxes across the Sediment–Water Interface ». In : *Water, Air, & Soil Pollution* 220.1-4, p. 399–411.



## Remerciements

Anne Sophie Hesse (division des indicateurs de développement durable) et Christian Feuillet, DREAL Centre-Val de Loire pour l'autorisation d'utilisation des figures de la publication (Hesse 2015).

DREAL Bretagne (Yves-Marie Héno), DREAL Pays de la Loire, les départements d'Ille et Vilaine et de Loire Atlantique pour les données d'abondance de corbicules et de drécènes dans les suivis des réseaux RCO, RCS et départementaux.

Les agences de l'eau et Yves-Marie Héno - DREAL Bretagne pour la fourniture des données sur les abondances de chlorophylle-A.

Les fédérations de pêche et de Protection des Milieux Aquatiques, et notamment Anne Laure Caudal (FDPPMA 56) et Florian Guérineau (FDPPMA 35), pour la fourniture de bibliographie, de rapports, de données, et la participation actives aux réunions du comité technique.

L'ensemble des opérateurs de bassin versant pour la fourniture de données IBGN.

Thibault Vigneron, pour les échanges et les conseils.

Pierre Yves Pasco, pour la fourniture de bibliographie, les données de terrain, l'appui pour l'expertise et la relecture du rapport.

Vincent Prié pour ses conseils, sa prestation d'échantillonnage par l'ADN environnemental et sa relecture du rapport.

Didier Macé, pêcheurs professionnel sur la Vilaine, pour son travail de sentinelle.

Les collègues de l'EPTB qui ont participé aux échantillonnages et aux mesures des corbicules.

Cette étude a fait l'objet d'une participation financière de l'Agence de l'eau et de la Région Bretagne, que nous remercions également pour leur participation aux réunions de lancement et intermédiaires du projet.

