

# EXpertise sur les stocks SEDimentaires en milieu lagunairE

Projet EXSEDE



Contrat n°208-1766





## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport : Expertise sur les stocks sédimentaires en milieu lagunaire - Projet EXSEDE</b>	
<b>Référence interne :</b> R.ODE/UL/LER/LR20.13  <b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) - date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) - date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	<b>Date de publication :</b> Août 2020  <b>Version :</b> 1.0  <b>Référence de l'illustration de couverture</b>  <b>Langue(s) :</b> Française
<b>Résumé/ Abstract :</b> <p>La dynamique de restauration des les milieux lagunaires vis-à-vis de l'eutrophisation reste lente et souvent limitée par l'azote et le phosphore contenus dans les sédiments qui alimentent la colonne d'eau et supporteraient largement la croissance de macro-algues. Le compartiment sédimentaire doit donc être considéré comme une « pression » dans ce contexte de restauration qu'il faut aujourd'hui quantifier au même titre que les autres pressions. De nouvelles grilles d'évaluation des risques liés aux charges sédimentaires ont ainsi été développées pour l'azote et le phosphore total. Basées sur les seuils définis dans le RSL, elles tiennent compte de la structure des sédiments et sont fondées sur la notion de « stocks mobilisables ». L'analyse temporelle des stocks sédimentaires sur la période 1990 - 2019 met en évidence une diminution générale des stocks de phosphore total dans le sédiment. En revanche, aucune tendance significative n'a pu être mise en évidence pour les stocks d'azote total dans le sédiment. Cette expertise contribue ainsi à l'évaluation des risques indispensable à la prise de décision (risques de non atteinte des objectifs dans le cadre de la DCE en particulier).</p>	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Lagune méditerranéenne - Stock sédimentaire - Eutrophisation Mediterranean lagoon - Internal loads - Eutrophication	
<b>Comment citer ce document :</b> Ouisse V., Fiandrino A., Giraud A. (2020). Expertise sur les stocks sédimentaires en milieu lagunaire. Rapport Final. 33p + Annexes	

<b>Disponibilité des données de la recherche :</b>
--

<b>DOI :</b>
--------------

<b>Commanditaire du rapport</b> : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse	
<b>Nom / référence du contrat</b> :	
<input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne <b>du rapport intermédiaire</b> : R.DEP/UNIT/LABO AN-NUM/ID ARCHIMER)	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit</b> : Accord Cadre Ifremer - AERMC	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
Ouisse Vincent / vincent.ouisse@ifremer.fr	ODE/UL/LERLR
Fiandrino Annie/ annie.fiandrino@ifremer.fr	ODE/UL/LERLR
Giraud Anais / anais.giraud@aermc.fr	
<b>Encadrement(s) :</b>	
<b>Destinataire</b> : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse	
<b>Validé par</b> :	

## Table des matières

<b>1 Contexte général et problématiques.....</b>	<b>6</b>
<b>2 Objectifs de l'étude.....</b>	<b>8</b>
<b>3 Emprise spatiale et données disponibles.....</b>	<b>9</b>
<b>4 Développement des grilles d'évaluation des risques pour les lagunes méditerranéennes.....</b>	<b>12</b>
4.1 Principes retenus.....	12
4.2 Méthodologie proposée.....	12
Estimation des stocks d'azote et de phosphore dans le sédiment.....	12
Construction des grilles d'évaluation des risques.....	13
Agrégation des données pour le calcul du risque sédimentaire.....	14
4.3 Bilan des données utilisées.....	15
4.4 Résultats : Grilles d'évaluation des risques.....	17
Nouvelles grilles d'évaluation des risques liés à la charge sédimentaire.	17
Évaluation du risque lié à la charge en azote et en phosphore à l'échelle de la lagune, de la masse d'eau.....	19
<b>5 Estimation des stocks sédimentaires 1999-2019.....</b>	<b>21</b>
5.1 Méthodologie mise en place.....	21
Ré-estimation des densités entre 1999 et 2019.....	21
Dynamique des stocks d'azote et de phosphore dans le sédiment.....	21
5.2 Données disponibles.....	21
Stocks sédimentaires : azote, phosphore total et matière organique.....	21
Structure du sédiment : granulométrie, teneur en eau et densité.....	24
5.3 Résultats : Dynamique temporelle.....	24
Estimation de la densité des sédiments des lagunes méditerranéennes.	24
Dynamique temporelle des stocks sédimentaires.....	26
<b>6 Conclusions et Recommandations.....</b>	<b>32</b>
<b>7 Références bibliographiques.....</b>	<b>33</b>
<b>8 Annexes.....</b>	<b>34</b>

## 1 Contexte général et problématiques

Le Réseau de Suivi Lagunaire (RSL) a permis d'acquérir entre 1999 et 2014 des données essentielles à la définition d'indicateurs pertinents pour la caractérisation de l'état des lagunes méditerranéennes françaises et de leur dynamique vis-à-vis de l'eutrophisation. Les concentrations en azote et phosphore dans le sédiment mesurées sur une grande partie des lagunes méditerranéennes ont été à la base de travaux récents (Projets RESTOLAG<sup>1</sup> et DEPART<sup>2</sup> en particulier) qui ont permis de préciser le poids de ce compartiment dans le fonctionnement des systèmes lagunaires et en particulier dans le processus de restauration (Ouisse et al., 2014, 2013). En effet, la dynamique de restauration des milieux lagunaires reste lente et souvent contrainte par la quantité d'azote et de phosphore contenus dans les sédiments. Ces « réserves » alimenteraient en effet la colonne d'eau (Ouisse et al., 2013) et supporteraient ainsi largement la croissance de macrophytes (Le Fur, 2018). Bien que l'indicateur « sédiment » n'ait pas été conservé dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) depuis l'arrêt du RSL en 2014, le compartiment reste un élément central dans la compréhension du fonctionnement et du devenir de ces systèmes confinés (Fiandrino et al., 2017). L'estimation des risques liés à ces charges sédimentaires reste donc une problématique actuelle. A ce jour, les stocks sédimentaires d'azote et de phosphore dans les lagunes méditerranéennes continuent à être évalués dans le cadre du Réseau d'Observation de la Contamination Chimiques des Sédiment (ROCCHSED). Ces campagnes sont organisées tous les 6 ans depuis 1993 sur 41 stations réparties sur 21 lagunes du littoral méditerranéen (Grouhel et al., 2018).

L'évaluation de l'état des sédiments lagunaires repose aujourd'hui sur les grilles développées dans le cadre du RSL. Ces grilles sont basées sur le taux de matière organique ainsi que les concentrations en azote total et phosphore total (Tableau 1). L'état du sédiment est ainsi calculé en prenant en compte le paramètre le plus déclassant auquel une ou plusieurs corrections sont appliquées (lagunes profondes ou zone conchylicole). Cette évaluation de l'état ne correspond pas à une évaluation des risques liés à la charge en azote et en phosphore dans les sédiments. En effet, la capacité d'un sédiment à relarguer vers la colonne d'eau ou piéger de l'azote et du phosphore ne se limite pas à la concentration en élément mais également aux organismes présents (Eyre et al., 2011; Le Fur, 2018) et à la structure du sédiment (porosité - teneur en eau - granulométrie), deux composantes relativement variables dans les environnements lagunaires (Menu et al., 2019).

- 
- 1 Restauration des écosystèmes lagunaires : évaluation du rôle du sédiment et des herbiers à phanérogames
  - 2 Devenir du Phosphore et de l'azote dans un contexte de restauration des milieux lagunaires méditerranéens

Tableau 1: Grille d'état des sédiments basée sur les concentrations en azote et en phosphore exprimés en  $g.kg^{-1}$  dans les sédiments lagunaires (Ifremer, 2013)

Seuils	Azote Total (NT)	Azote Total (PT)
<b>Très Bon</b>		
	1,0	0,4
<b>Bon</b>		
	2,0	0,5
<b>Moyen</b>		
	3,0	0,6
<b>Médiocre</b>		
	4,0	0,7
<b>Mauvais</b>		

Les premières études sur l'estimation des stocks sédimentaires au sein des lagunes méditerranéennes menées dans le cadre des projets RESTOLAG (Ouisse et al., 2013) puis DEPART (Ouisse et al., 2014) se sont appuyées sur la notion de « stocks mobilisables ». Ce terme permet d'exprimer le poids de cette interface vis-à-vis de l'eutrophisation en prenant en compte la quantité d'eau interstitielle dans les sédiments et la densité du sédiment. Ces « stocks mobilisables » peuvent ainsi être estimés à l'échelle d'une masse d'eau et ainsi permettre l'évaluation des risques liés à la charge en azote et en phosphore dans les sédiments.



## 2 Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, le projet EXSEDE (Expertise sur les stocks sédimentaires en milieu lagunaire) vise à apporter une expertise scientifique sur les stocks sédimentaires en milieu lagunaire afin de contribuer à l'évaluation des risques liés aux charges sédimentaires (sources de N et P lors de la phase de restauration) et à la prise de décision (risques de non atteinte des objectifs dans le cadre de la DCE en particulier).

Ce projet s'attache plus particulièrement à :

1. Proposer des **grilles généralisées** d'évaluation des risques liés à la charge en azote et en phosphore dans les sédiments
2. Étudier la **dynamique temporelle** des stocks sédimentaires dans les lagunes méditerranéennes françaises entre 1999 et 2019

Cette expertise est basée sur l'analyse des données acquises dans les lagunes méditerranéennes françaises.

### 3 Emprise spatiale et données disponibles

Dans le cadre du projet EXSEDE, 36 entités spatiales réparties le long de la façade méditerranéenne française ont été considérées (Figure 1).

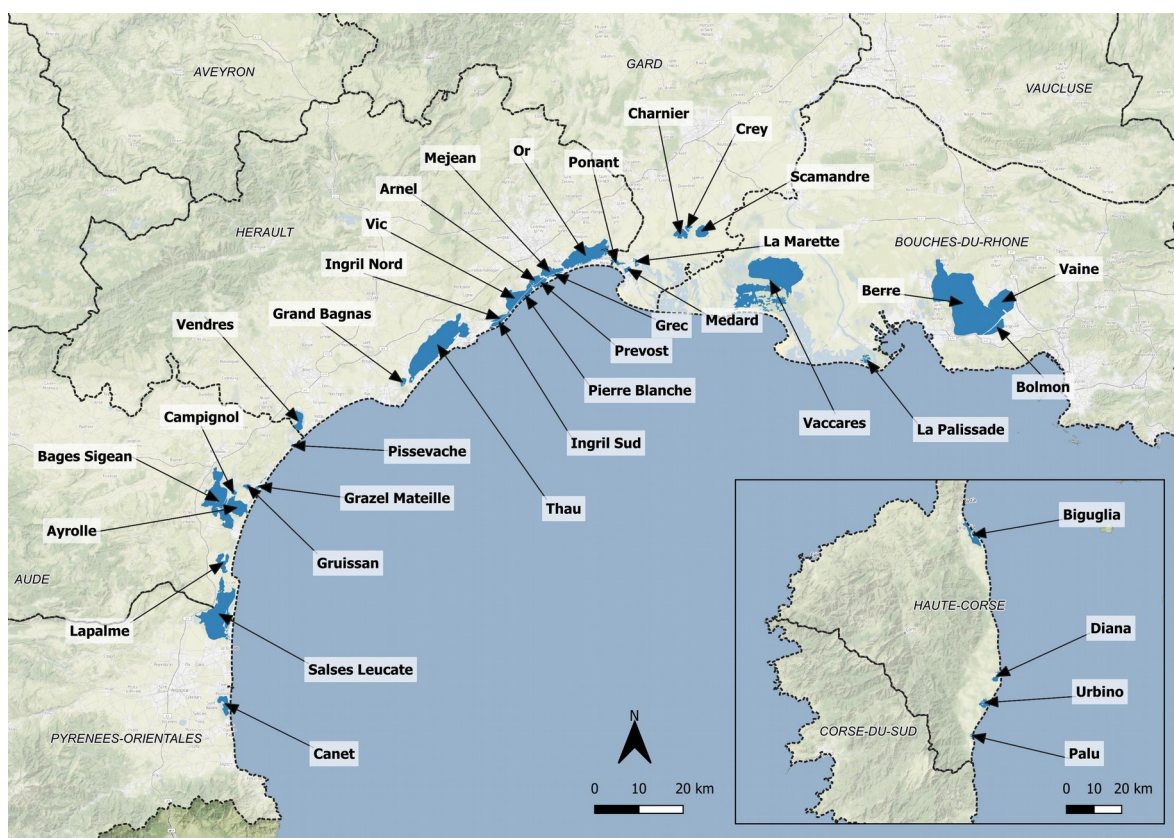


Figure 1: Localisation des 36 lagunes considérées dans le cadre du projet EXSEDE (d'après Menu et al., 2019).

Certains complexes lagunaires définis dans le cadre de la DCE ont été subdivisés (cas du complexe du Narbonnais, des étangs Palavasiens et de la Petite Camargue) ou regroupées (cas de Berre/Vaine) afin de considérer les masses d'eau physiques. Le Tableau 2 reprend la nomenclature des 36 lagunes ainsi que leurs code et libellé utilisés dans le cadre de la DCE.

Tableau 2: Liste des lagunes considérées dans le projet EXSEDE et correspondances avec la typologie DCE (d'après Menu et al., 2019).

Identifiant	Libellé	Code DCE	Libellé DCE	Surface (km <sup>2</sup> )	Type
01CAN	Canet	FRDT01	Canet	6.43	poly/euhaline
02SLE	Salses Leucate	FRDT02	Salses-Leucate	52.88	poly/euhaline
03LPA	La Palme	FRDT03	Etang de La Palme	6.94	poly/euhaline
04BAG	Bages Sigean	FRDT04	Complexe du Narbonnais Bages - Sigean	37.05	poly/euhaline
05AYR	Ayrolle	FRDT05A	Complexe du Narbonnais Ayrolle	13.23	poly/euhaline
06CAM	Campagnol	FRDT05B	Complexe du Narbonnais Campagnol	1	oligo/mésosaline
07GRU	Gruissan	FRDT06A	Complexe du Narbonnais Gruissan	1.31	poly/euhaline
08GRA	Grazel	FRDT06B	Complexe du Narbonnais Grazel/Mateille	1.15	poly/euhaline
09MAT	Mateille	FRDT06B	Complexe du Narbonnais Grazel/Mateille	0.27	poly/euhaline
10PSV	Pissevache	FRDT07	Pissevache	0.12	poly/euhaline
11VDR	Vendres	FRDT08	Vendres	6.6	oligo/mésosaline
12GBA	Grand Bagnas	FRDT09	Grand Bagnas	1.69	oligo/mésosaline
13THA	Thau	FRDT10	Etang de Thau	67.7	poly/euhaline
14INS	Ingril Sud	FRDT11C	Etangs Palavasiens Ouest	3.17	poly/euhaline
15INN	Ingril Nord	FRDT11C	Etangs Palavasiens Ouest	2.28	poly/euhaline
16PBL	Pierre Blanche	FRDT11C	Etangs Palavasiens Ouest	3.14	poly/euhaline
17VIC	Vic	FRDT11C	Etangs Palavasiens Ouest	12.96	poly/euhaline
18PRV	Prevost	FRDT11B	Etangs Palavasiens Est	2.46	poly/euhaline
19ARN	Amel	FRDT11B	Etangs Palavasiens Est	4.42	poly/euhaline
20GRC	Grec	FRDT11B	Etangs Palavasiens Est	1.08	poly/euhaline
21MEJ	Mejean	FRDT11B	Etangs Palavasiens Est	7.12	poly/euhaline
22OR	Or	FRDT11A	Etang de l'Or	31.31	poly/euhaline
23PON	Ponant	FRDT12	Etang du Ponant	1.92	poly/euhaline
24MED	Medard	FRDT13C	Petite Camargue Medart	1.42	poly/euhaline
25MAR	La Marette	FRDT13E	Petite Camargue Marette	1.3	oligo/mésosaline
26CHR	Charnier	FRDT13H	Petite Camargue Scamandre- Charnier	4.87	oligo/mésosaline
27CRE	Crey	FRDT13H	Petite Camargue Scamandre- Charnier	1.42	oligo/mésosaline
28SCM	Scamandre	FRDT13H	Petite Camargue Scamandre- Charnier	5.92	oligo/mésosaline
29VAC	Vaccares	FRDT14A	Camargue Complexe Vaccares	101.22	poly/euhaline
30PAL	La Palissade	FRDT14C	Camargue La Palissade	2.95	oligo/mésosaline
31BER	Berre Vaine	FRDT15	Etang de Berre /Grand Etang Vaine	154.97	poly/euhaline
32BOL	Bolmon	FRDT15C	Etang de Berre Bolmon	6.01	oligo/mésosaline
33BIG	Biguglia	FRET01	Etang de Biguglia	13.75	poly/euhaline
34DIA	Diana	FRET02	Etang de Diana	5.4	poly/euhaline
35URB	Urbino	FRET03	Etang d'Urbino	7.58	poly/euhaline
36PAL	Palu	FRET04	Etang de Palu	1.08	poly/euhaline

Les analyses présentées dans ce projet sont basées sur les données historiques collectées dans les sédiments des lagunes méditerranéennes françaises depuis 1980. **Seuls les relevés intégrant au moins un des paramètres parmi la granulométrie, la teneur en matière organique, la teneur en eau, la densité et les concentrations en azote et en phosphore ont été considérés.**

Ainsi, le nom du projet, la période et la source des données utilisés sont résumés dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3: Projet, période et sources des données utilisées dans le cadre du projet EXSEDE

Projet source	Période	Source des données
RLSSED – Réseau de Suivi Lagunaire compartiment sédiment	1999 – 2019	Quadrige, Ifremer ( <a href="http://quadrige.eaufrance.fr">http://quadrige.eaufrance.fr</a> )
DCE / RSLFAU – Directive Cadre sur l'Eau / Réseau de Suivi Lagunaire	1999 – 2015	Quadrige, Ifremer ( <a href="http://quadrige.eaufrance.fr">http://quadrige.eaufrance.fr</a> )
ROCHSED – Réseau d'observation de la contamination chimique du Sédiment	1993 – 2017	Quadrige, Ifremer ( <a href="http://quadrige.eaufrance.fr">http://quadrige.eaufrance.fr</a> )
MALAG – Effet de l'eutrophisation sur la biodiversité de la macrofaune benthique des lagunes méditerranéennes	2014	Projet en cours
MARES2 – Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires : successions écologiques	2014-2015	Le Fur (2018), Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires : successions écologiques. Thèse de doctorat. Université de Montpellier
CPERTHAU Languedoc Roussillon 1991	1990	Cartographie et caractéristiques des sédiments superficiels du secteur conchylicole de l'étang de Thau, Avril 1991, CPER Languedoc-Roussillon
Rapport CEMAGREF	1990 – 1991	Beisel, J-N (1991). Analyse physico-chimiques des sédiments en milieu lagunaire peu profond (cas des étangs Palavasiens, Languedoc-Roussillon): Distribution spatiale et étude des corrélations. Rapport de maîtrise de la faculté de Metz

Bien que ces données proviennent de projets différents, les méthodes d'acquisition pour ces paramètres sont comparables et chacun de ces relevés sont donc considérés. Les données sont issues de 1784 relevés effectués entre 1980 et 2019 sur 738 stations réparties dans l'ensemble des lagunes méditerranéennes françaises. Parmi ces relevés, 1372 soit 77 % sont issus de prélèvements depuis 2000. Aucun relevé ne contient l'ensemble des informations recherchées.

## 4 Développement des grilles d'évaluation des risques pour les lagunes méditerranéennes

La première partie de cette expertise vise à définir les grilles généralisées permettant **d'évaluer les risques liés à la charge en azote et en phosphore dans les sédiments** des lagunes méditerranéennes françaises. Cette démarche est complémentaire à l'analyse critique réalisée depuis 1999 dans le cadre du RSL et basée sur une grille d'évaluation de l'état des sédiments vis-à-vis de l'eutrophisation. Ces nouvelles grilles **prendront ainsi en compte la structure du sédiment** (densité, teneur en eau) qui entre en jeu dans la **capacité de ce compartiment à relarguer/retenir ces éléments**.

### 4.1 Principes retenus

La définition des nouvelles grilles généralisées est basée sur 4 principes :

1- les concentrations d'azote et de phosphore ont été mesurées dans les **cinq premiers centimètres** du sédiment. Cette couche superficielle du sédiment contient la fraction mobilisable des stocks sédimentaires (remise en suspension, diffusion des nutriments vers la colonne d'eau). Les concentrations sont exprimées en  $\text{g.kg}^{-1}$  de sédiment sec.

2- les concentrations en azote et en phosphore total mesurées correspondent à la **quantité totale de ces éléments dans le volume prélevé**. Autrement dit, la méthode utilisée conduit à sommer la quantité d'azote ou de phosphore adsorbé sur les particules et contenue dans l'eau interstitielle.

3- L'évaluation de l'état des sédiments dans le cadre du RSL est basé sur les seuils rappelés dans le Tableau 1. Ces grilles de qualité du sédiment définies à partir d'un jeu de lagunes variées à sa création demeurent robuste pour l'estimation de l'état vis-à-vis de l'eutrophisation au vu des analyses menées en 2013 (Ifremer, 2013). Les **seuils** de ces nouvelles grilles généralisées d'évaluation des risques liés à la charge en azote et en phosphore dans les sédiments **seront donc calculés à partir des seuils RSL**.

4- L'analyse temporelle de la **teneur en matière organique** sur la période 1999-2013 met en évidence une augmentation progressive de ce paramètre dans les sédiments des lagunes méditerranéennes. Cette tendance ne peut être dissociée de l'enrichissement naturel de ces milieux qui sont, par définition, naturellement riches et confinés. Ce paramètre est donc **exclu de la démarche** proposée ici.

### 4.2 Méthodologie proposée

#### Estimation des stocks d'azote et de phosphore dans le sédiment

Le stock d'azote et de phosphore dans les sédiments ( $\text{g.m}^{-2}$ ) est estimé à partir (1) des concentrations mesurées ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), (2) de la hauteur d'intégration

de la mesure (5 cm) et (3) de la densité réelle ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) du sédiment dans les lagunes méditerranéennes françaises selon l'équation suivant :

$$\text{Stock}_X = (\text{Conc. SED}_X \times \text{Densite}_{SED} \times (1 - T_{eau})) \times \text{Hauteur} + (\text{Conc. EAU}_X \times \text{Densite}_{EAU} \times T_{eau}) \times \text{Hauteur} \quad (1)$$

avec  $X$  correspondant à l'élément calculé (Azote total ou Phosphore total),  $\text{Conc.SED}_X$  à la concentration de élément  $X$  adsorbé aux particules,  $\text{Densite}_{SED}$  à la densité des particules sédimentaires,  $T_{eau}$  à la teneur en eau dans le sédiment,  $\text{Conc.EAU}_X$  à la concentration de élément  $X$  dans l'eau interstitielle,  $\text{Densite}_{EAU}$  à la densité de l'eau interstitielle et  $\text{Hauteur}$  à la hauteur d'intégration.

Sur la base du principe 2 énoncé dans le paragraphe précédant, l'équation (1) se simplifie et le stock sédimentaire peut ainsi s'écrire selon l'équation suivante :

$$\text{Stock}_X = (\text{Conc. SED}_X \times \text{Densite}_{SED} \times (1 - T_{eau})) \times \text{Hauteur} \quad (2)$$

### Construction des grilles d'évaluation des risques

La méthodologie est résumée dans la Figure 2. Les grilles d'évaluation des risques en azote et phosphore total dans les sédiments sont construites à partir de l'équation 2 et des seuils RSL (principe 3 et Tableau 1).

$$\text{Seuil}_{Grille} = (\text{Seuil}_{RSL} \times \text{Densite}_{SED} \times (1 - T_{eau})) \times \text{Hauteur} \quad (3)$$

ou le terme  $\text{Densite}_{SED} \times (1 - T_{eau})$  peut être assimilé à la composante de la densité du sédiment liée aux particules sédimentaires ( $\text{DENS}_{part\_SED}$ ) et est exprimée en  $\text{kg.m}^{-3}$ .

Les seuils sont ensuite représentés en fonction de la densité réelle totale ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) du sédiment calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{Densite}_{TOTALE} = \text{Densite}_{SED} \times (1 - T_{eau}) + \text{Densite}_{EAU} \times T_{eau} \quad (4)$$

Celle-ci correspond à la somme de la composante liée aux particules sédimentaires et de la composante liée à l'eau interstitielle.



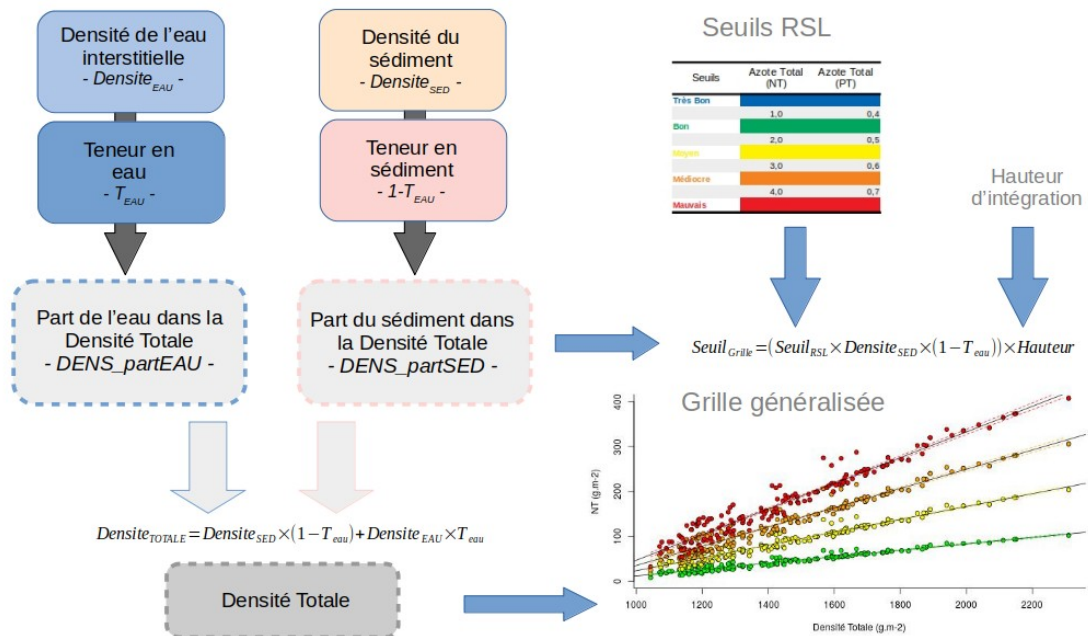


Figure 2: Description schématique de la méthode mise en place pour la construction de la grille généralisée des risques liés aux stocks d'azote total et de phosphore total dans les sédiments lagunaires méditerranéens.

Enfin, les équations permettant de définir les seuils en fonction de la densité réelle du sédiment sont estimées à partir de **modèle mathématique linéaire en minimisant les résidus** (méthode des moindres carrés). Ces nouveaux seuils sont exprimés en (g.m<sup>-2</sup>) intégrés sur les cinq premiers centimètres du sédiment.

### Agrégation des données pour le calcul du risque sédimentaire

Sur les bases des travaux menés en 2013 sur le calcul de l'état des sédiments lagunaires vis-à-vis de l'eutrophisation ,

L'évaluation du risque pour les lagunes méditerranéennes est basé sur l'attribution d'un état à une échelle spatiale définie (secteur de lagune, lagune, masse d'eau DCE par exemple). **Les règles de calcul établies dans le cadre du RSL (percentile 80%)** entre 1999 et 2013 sont **directement transposées aux nouvelles grilles** (Ifremer, 2013). Cette méthode relativement simple, permet ainsi de limiter l'influence de valeurs extrêmes et d'obtenir une seule valeur par entité spatiale pour chacun des éléments pris séparément. En revanche, contrairement à la méthode appliquée dans le cadre du RSL :

- seule la **correction de l'état** en fonction de la profondeur est conservée. L'état est ainsi revu à la hausse (amélioration de la note) à hauteur de 1 unité. En effet, ces zones profondes (profondeur supérieure à 3,5m) sont des zones d'atterrissement de la matière dans les lagunes rarement remise en suspension naturellement. Elles sont donc par définition des zones plus riches,
- **les deux paramètres** (azote total et phosphore total) **ne sont pas agrégés** pour obtenir l'état des sédiments de l'entité considéré.

### 4.3 Bilan des données utilisées

La construction des grilles adaptées au contexte lagunaire méditerranéen est basée sur les seuils RSL (valeurs fixes) et la densité réelle du sédiment, elle-même définie à partir de la teneur en eau ( $T_{eau}$ ) et de la densité des particules ( $Densite_{SED}$ , voir équation 2). Au sein de la base de données, 1057 relevés soit 59,2% des relevés présents dans le jeu de données comportent des informations sur la teneur en eau (Tableau 4). Ces données sont réparties sur 32 des 36 lagunes identifiées dans la DCE. En ce qui concerne la densité des particules seuls 326 relevés (soit 18,2% des relevés présents dans le jeu de données) répartis dans 13 des 36 lagunes contient cette information. Ces deux valeurs ne peuvent être dissociées pour caractériser la structure du sédiment et la densité réelle de celui-ci. Ainsi, malgré une base de données relativement conséquente, seuls 154 relevés (8,6% des relevés présents dans le jeu de données) ont pu être conservés pour la construction des grilles. Ces données sont issues de 8 des 36 lagunes (22,2% des lagunes, Tableau 4).

Tableau 4: Bilan des données de teneur en eau et de densité des particules disponibles à ce jour au sein de chacune des 36 lagunes considérées dans le cadre de la DCE.



Code DCE	Lagune	Nombre de relevé (Teneur en eau)	Nombre de relevé (Densité)	Nombre de relevé (Teneur en eau et Densité)
FRDT01	Canet	31		
FRDT02	Salses Leucate	168	50	50
FRDT03	La Palme	38		
FRDT04	Bages-Sigean	123	72	36
FRDT05A	Ayrolle	32		
FRDT05B	Campagnol	8		
FRDT06A	Gruissan	7		
FRDT06B	Grazel			
FRDT06B	Mateille			
FRDT07	Pissevache			
FRDT08	Vendres	12		
FRDT09	Grand Bagnas	5		
FRDT10	Thau	115	86	
FRDT11C	Ingril Sud	24	8	
FRDT11C	Ingril Nord	12	5	
FRDT11C	Pierre Blanche	23	10	
FRDT11C	Vic	49	13	
FRDT11B	Prevost	40	10	10
FRDT11B	Arnel	21		
FRDT11B	Grec	18		
FRDT11B	Mejean	43	13	6
FRDT11A	Or	76		
FRDT12	Ponant	7	7	
FRDT13C	Medard	4		
FRDT13E	La Marette	12		
FRDT13H	Charnier			
FRDT13H	Crey	1		
FRDT13H	Scamandre	1		
FRDT14A	Vaccares	2		
FRDT14C	La Palissade	1		
FRDT15	Berre Vaine	24		
FRDT15C	Bolmon	1		
FRET01	Biguglia	45	13	13
FRET02	Diana	45	15	15
FRET03	Urbino	55	18	18
FRET04	Palu	14	6	6

Ce jeu de données, bien que restreint par rapport à la base de données complète (164 contre 1067 et 164 contre 326 observations respectivement pour la teneur en eau et la densité des particules), présente une distribution des valeurs comparable à celle basée sur le jeu de données complet (Figure 3). En effet, les gammes de variation sont identiques entre les deux jeux de données pour la teneur en eau qui varie entre 18,6 % (station Salses Leucate-24) et 85,3 % (Salses Leucate-65) et la densité des particules qui varie elle entre 1093 kg.m<sup>-3</sup> (Salses Leucate-65) et 2761 kg.m<sup>-3</sup> (Bages Sigean-19).

Calculée à partir des couples de valeurs de densité des particules et de la teneur en eau, la composante de la densité liée au sédiment varie ainsi entre 1043 kg.m<sup>-3</sup> (Salses Leucate-65) et 2310 kg.m<sup>-3</sup> (Bages Sigean-19).

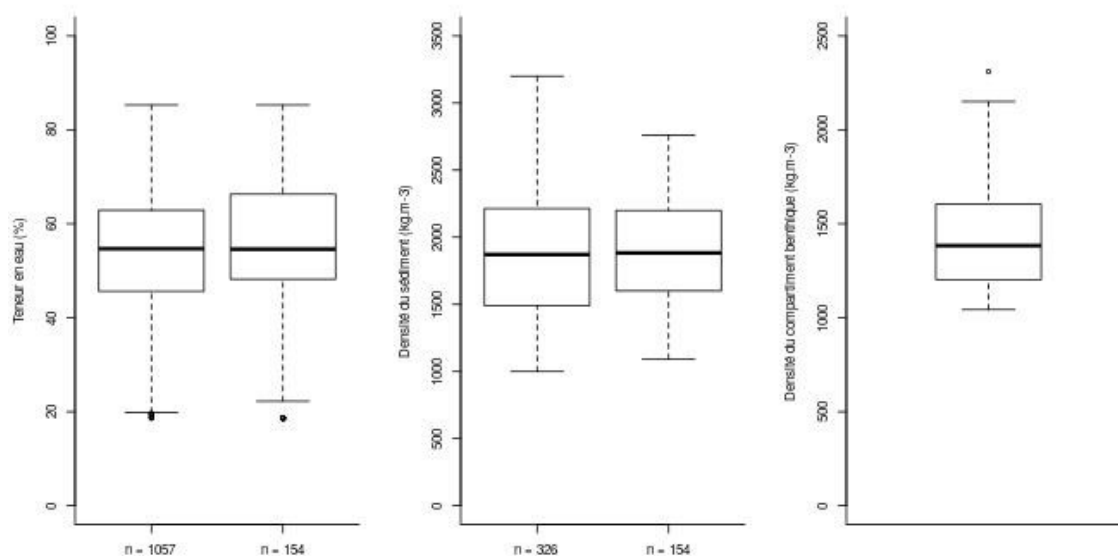


Figure 3: Gamme de variation de la Teneur en eau (% à gauche) et de la densité du sédiment ( $\text{kg.m}^{-3}$  au milieu) et de la composante de la densité liée aux particules sédimentaires ( $\text{kg.m}^{-3}$  à droite) au sein du jeu de données complet et restreint ( $n=164$ ). Le nombre de valeur est indiqué sous chaque représentation. Chaque boîte à moustache représente 5%, 25%, 50%, 75% et 95% pour des données. Les points indiquent les valeurs hors de ces percentiles.

#### 4.4 Résultats : Grilles d'évaluation des risques

##### Nouvelles grilles d'évaluation des risques liés à la charge sédimentaire

Basées sur les équations présentées dans la partie 4.2, les grilles d'évaluation des risques pour l'azote total (Figure 4) et le phosphore total (Figure 5) sont calculées à partir des 164 valeurs sélectionnées pour chacun des 4 seuils définis précédemment dans le RSL. Le risque de remise à disposition de la charge en azote et phosphore présent dans le sédiment est donc maintenant représenté par rapport à la densité réelle (totale) du sédiment (Tableau 5).

Concernant les densités faibles (inférieure à  $1200 \text{ kg.m}^{-3}$ ), les seuils proposés sont relativement proches (amplitude des classes égale à  $22,17 \pm 6,7 \text{ kg.m}^{-3}$  pour l'azote total et  $2,2 \pm 0,7 \text{ kg.m}^{-3}$  pour le phosphore total). En revanche, cette amplitude augmente linéairement pour atteindre pour l'azote total et le phosphore total respectivement  $40,6 \pm 17,5 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $4,1 \pm 1,8 \text{ kg.m}^{-3}$  pour les densités les plus importantes (supérieures à  $2000 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Ceci traduit un risque décroissant de la remise à disposition des charges sédimentaires en lien direct avec la structure du sédiment.

- Pour des densités faibles, le sédiment est majoritairement constitué d'eau et de particules peu denses. La remise en suspension par l'hydrodynamisme y est facilitée et la circulation de l'eau est importante. Cette situation favorise

les échanges du compartiment benthique vers la colonne d'eau, les seuils y sont donc inférieurs.

- Pour des densités fortes, la part du sédiment par rapport à l'eau interstitielle augmente. La densité des particules sédimentaires est plus importante. Dans ce cas, la remise en suspension est plus faible et la circulation de l'eau interstitielle serait également limitée. Les seuils ainsi que l'amplitude des classes y sont ainsi plus élevés. Les risques liés à la charge sédimentaire y seraient moins élevés.

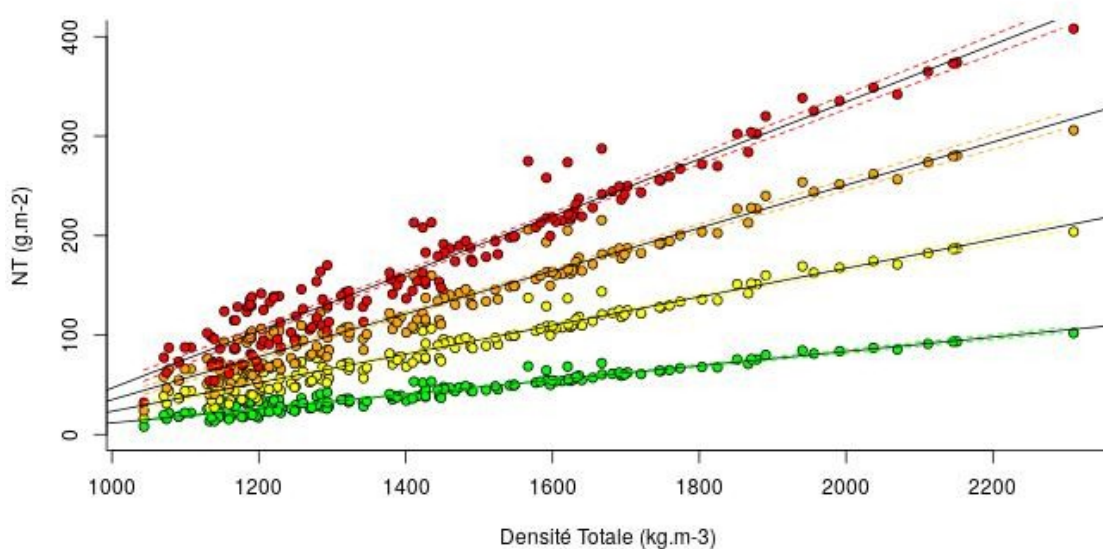


Figure 4: Grille d'analyse des risques sédimentaires pour l'azote total (NT) exprimé en g.m-2 intégré sur 5cm. Les points de construction sont associés au modèle linéaire et son intervalle de confiance (5%). Les lignes correspondent aux seuils "Très Bon" - "Bon" (vert), "Bon" - "Moyen" (jaune), "Moyen" - "Médiocre" (orange) et "Médiocre" - "Mauvais" (rouge).

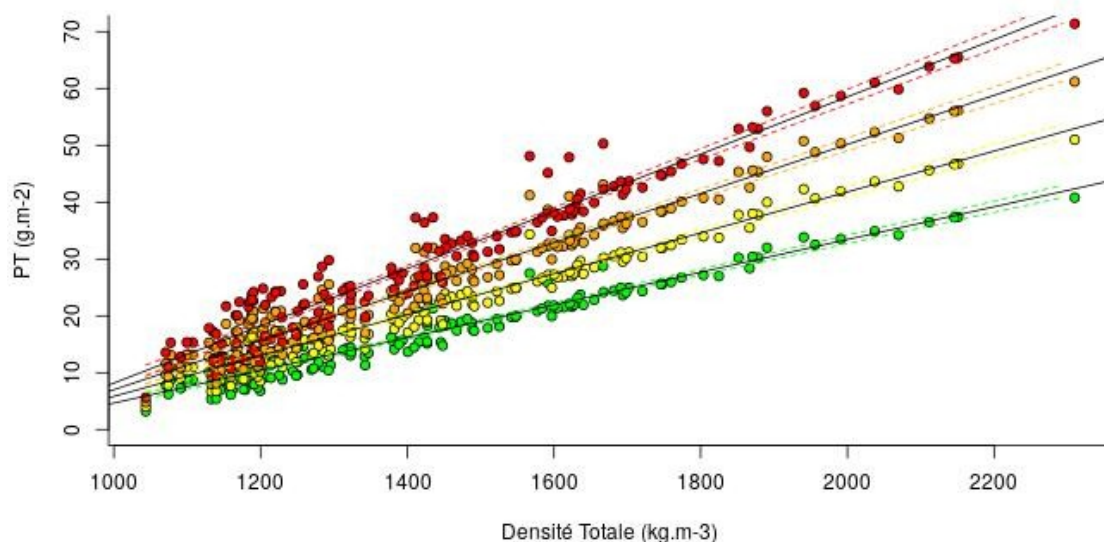


Figure 5: Grille d'analyse des risques sédimentaires pour le phosphore total (PT) exprimé en g.m-2 intégré sur 5cm. Les points de construction sont associés au modèle linéaire et son intervalle de confiance (5%). Les lignes correspondent aux seuils "Très Bon" - "Bon" (vert), "Bon" - "Moyen" (jaune), "Moyen" - "Médiocre" (orange) et "Médiocre" - "Mauvais" (rouge).

Tableau 5: Grille d'évaluation des risques liés aux charges en azote et phosphore dans les sédiments lagunaires exprimés en g.m<sup>-2</sup> intégré sur 5 cm. La densité totale correspond à la somme de la composante liée aux particules sédimentaires et de la composante liée à l'eau interstitielle.

Seuils	Azote Total (NT)	Azote Total (PT)
<b>Très Bon</b>	$0,072 \times \text{Densité Totale} - 59,859$	$0,0286 \times \text{Densité Totale} - 23,9435$
<b>Bon</b>	$0,143 \times \text{Densité Totale} - 119,717$	$0,0358 \times \text{Densité Totale} - 29,9293$
<b>Moyen</b>	$0,215 \times \text{Densité Totale} - 179,576$	$0,0429 \times \text{Densité Totale} - 35,9152$
<b>Médiocre</b>	$0,286 \times \text{Densité Totale} - 239,435$	$0,0501 \times \text{Densité Totale} - 41,9010$
<b>Mauvais</b>		

### Évaluation du risque lié à la charge en azote et en phosphore à l'échelle de la lagune, de la masse d'eau

Sur la base de ces nouvelles grilles d'évaluation du risque, l'état défini selon la méthode développée dans ce projet (voir partie 4.2) est **strictement identique** à celui obtenu à partir des concentrations en azote total et phosphore total et de la grille RSL (Tableau 1). En effet, les modèles utilisées

conduisent à une transformation linéaire de la grille et n'a donc aucun impact sur l'attribution de l'état basé sur la méthode des rangs (percentile 80%).

Pour l'illustrer ce résultat, prenons l'exemple d'un sédiment « vaseux » (densité faible des particules égale à  $1200 \text{ kg.m}^{-3}$  et une teneur en eau importante égale à 0,7) et d'un sédiment « sableux » (densité forte des particules égale à  $2600 \text{ kg.m}^{-3}$  et une teneur en eau faible égale à 0,3). Pour un même stock de NT ( $100 \text{ g.m}^{-2}$ ) dans ces deux sédiments:

- l'état calculé à partir de la nouvelle grille (grille EXSEDE) aboutit à un état « MAUVAIS » (sédiment « vaseux ») et « BON » (sédiment « sableux »).

- l'état calculé à partir de la grille RSL nécessite tout d'abord le (re)calcul de la concentration en NT dans chacun de ces sédiments (à partir de la teneur en eau et de la densité). Nous obtenons ainsi dans notre exemple  $5,56 \text{ g.kg}^{-1}$  de sédiment sec (sédiment « vaseux ») et  $1,10 \text{ g.kg}^{-1}$  de sédiment sec (sédiment « sableux »). Cela correspond respectivement à un état « MAUVAIS » (sédiment « vaseux ») et « BON » (sédiment « sableux »).

En revanche, pour une même concentration de NT ( $3,3 \text{ g.kg}^{-1}$  de sédiment sec) dans ces deux sédiments différents en terme de structure, **les stocks sont différents**. A partir des équations présentées dans la partie 4.2, une concentration de  $3,3 \text{ g.kg}^{-1}$  de sédiment sec équivaut à  $59 \text{ g.m}^{-2}$  pour le sédiment « vaseux » et  $300 \text{ g.m}^{-2}$  pour le sédiment « sableux ». Bien que le stock soit beaucoup plus important dans les sédiments "sableux" (presque 6 fois), le risque n'est pas pour autant augmenté (même état « MEDIOCRE »). En ce sens, ces nouvelles grilles prennent bien en compte le risque de remobilisation associé à la structure du sédiment (plus faible pour des sédiments « sableux » et plus fort pour des sédiments « vaseux »).

### A retenir :

- Développement d'une nouvelle grille intégrant la densité du sédiment
- Risque décroissant de la remise à disposition des charges sédimentaires en lien direct avec la structure du sédiment.
- Pas de changement de l'état défini à partir de la grille RSL (excepté pour les stations ou un facteur de correction était appliqué)

## 5 Estimation des stocks sédimentaires 1999-2019

La deuxième partie du rapport vise à préciser les dynamiques temporelles de des stocks sédimentaires (azote total et phosphore total) au sein des systèmes lagunaires méditerranéens entre 1999 et 2019. Les données disponibles sur la densité du sédiment, paramètre essentiel entrant dans l'estimation des stocks sédimentaires (équations 1 et 2), sont restreintes dans le temps et dans l'espace (voir partie 4.3). L'étude temporelle et spatiale de la dynamique des stocks sédimentaires dans les lagunes méditerranéennes nécessite donc d'estimer ce paramètre à partir d'autres données collectées plus fréquemment. Cette objectif repose donc :

- dans un premier temps sur une analyse des liens statistiques entre la densité et les autres variables décrivant la structure du sédiment (granulométrie, matière organique...).
- dans un deuxième temps sur l'estimation des stocks sédimentaires entre 1999 et 2019

### 5.1 Méthodologie mise en place

#### Ré-estimation des densités entre 1999 et 2019

Les données de densité du sédiment manquantes dans le passé (densité des particules sédimentaire, composante liée aux particules sédimentaires ou densité réelle totale, voir équation 4) sont estimées à partir de relations mathématiques avec une ou plusieurs variables mieux représentées dans le jeu de données (granulométrie, matière organique...).

Concernant les cas pour lesquels cette variable serait elle-même manquante à une période donnée, la valeur de la variable est estimée à partir de la moyenne des valeurs aux autres périodes à cette même station.

#### Dynamique des stocks d'azote et de phosphore dans le sédiment

Les stocks sédimentaires exprimés en  $\text{g.m}^{-2}$  intégré sur 5 cm sont calculés à partir de l'équation 2. La dynamique temporelle est étudiée statistiquement, sur chaque lagune à partir d'ANOVA en mesures répétées (facteur = Temps, individu statistique = Station).

### 5.2 Données disponibles

#### Stocks sédimentaires : azote, phosphore total et matière organique

Entre 1999 et 2019, la concentration en azote total (1289 valeurs), en phosphore total (1392 valeurs) et le teneur en matière organique (1562 valeurs) dans les sédiments lagunaires ont été régulièrement mesurées. Seules les lagunes de Grazel, Mateille, Pissevache et Charnier n'ont été à ce



jour échantillonnées pour au moins l'un de ces paramètres (Tableau 6). Le nombre de valeurs disponibles pour chacune des lagunes est lié à :

- la surface de la lagune (effort d'échantillonnage relativement constant par unité de surface)
- l'appartenance historique au Réseau de Suivi Lagunaire entre 1999 et 2013.

La grande quantité de données permet de couvrir une gamme relativement large que ce soit pour l'azote total, le phosphore total et la teneur en matière organique du sédiment (Figure 6)

Tableau 6: Bilan des données de concentration en azote total (NT), phosphore total (PT) teneur en matière organique (MO) disponibles à ce jour au sein de chacune des 36 lagunes considérées dans le cadre de la DCE.

Code DCE	Lagune	Nombre de relevé (NT)	Nombre de relevé (PT)	Nombre de relevé (MO)
FRDT01	Canet	31	32	31
FRDT02	Salses Leucate	170	172	173
FRDT03	La Palme	40	41	38
FRDT04	Bages-Sigean	154	157	193
FRDT05A	Ayrolle	43	43	46
FRDT05B	Campagnol	13	14	13
FRDT06A	Gruissan	11	12	11
FRDT06B	Grazel			
FRDT06B	Mateille			
FRDT07	Pissevache			
FRDT08	Vendres	10	11	10
FRDT09	Grand Bagnas	5	6	4
FRDT10	Thau	201	202	205
FRDT11C	Ingril Sud	33	35	46
FRDT11C	Ingril Nord	20	22	27
FRDT11C	Pierre Blanche	32	35	46
FRDT11C	Vic	72	80	92
FRDT11B	Prevost	35	39	53
FRDT11B	Arnel	28	31	31
FRDT11B	Grec	30	32	33
FRDT11B	Mejean	44	49	60
FRDT11A	Or	95	107	111
FRDT12	Ponant	7	8	14
FRDT13C	Medard	4	4	4
FRDT13E	La Marette	12	14	12
FRDT13H	Charnier			
FRDT13H	Crey		1	1
FRDT13H	Scamandre		1	1
FRDT14A	Vaccares	28	29	28
FRDT14C	La Palissade		1	1
FRDT15	Berre Vaine	5	47	47
FRDT15C	Bolmon	1	2	2
FRET01	Biguglia	60	60	76
FRET02	Diana	44	44	62
FRET03	Urbino	53	53	75
FRET04	Palu	8	8	16

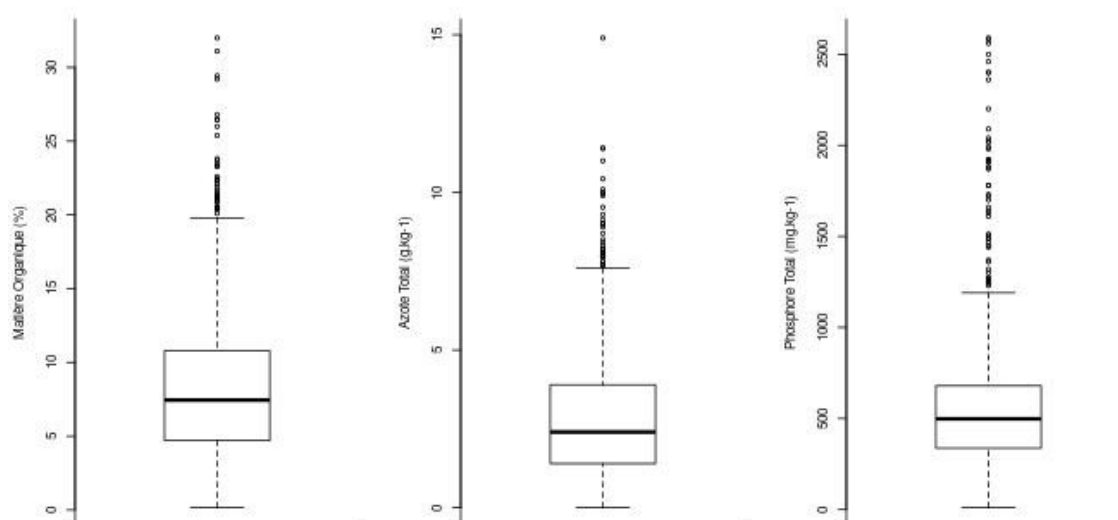


Figure 6: Gamme de variation de la teneur en matière organique (% à gauche), de la concentration en azote total ( $\text{g.kg}^{-1}$  de sédiment sec au milieu) et de la concentration en phosphore total ( $\text{mg.kg}^{-1}$  de sédiment sec à droite) au sein du jeu de données. Chaque boîte à moustache représente 5%, 25%, 50%, 75% et 95% pour des données. Les points indiquent les valeurs hors de ces percentiles

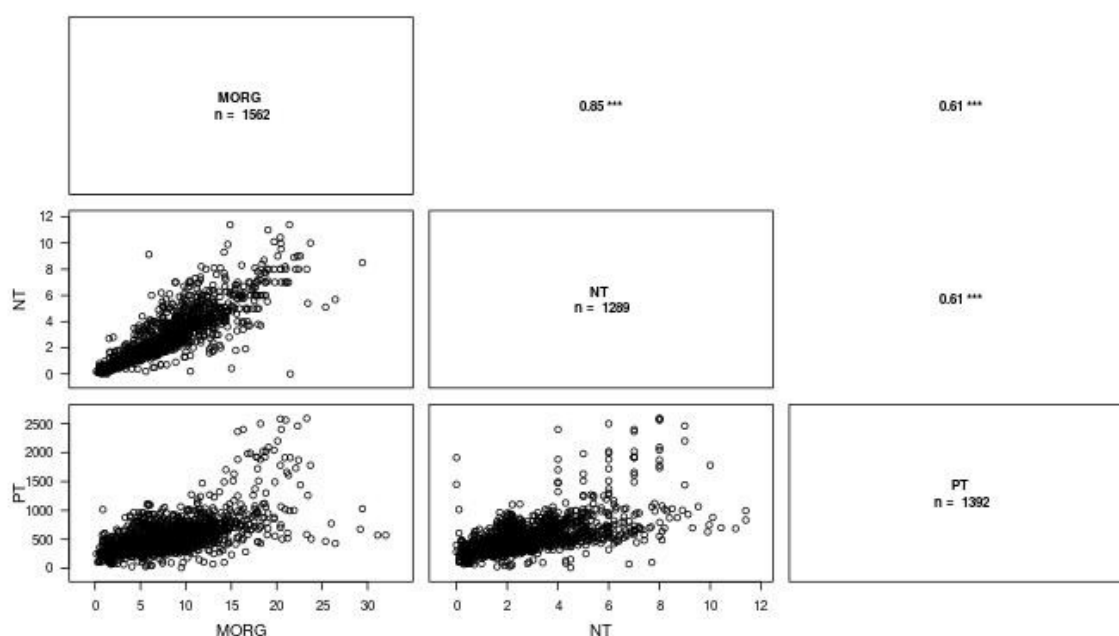


Figure 7: Relation entre la teneur en matière organique (MO, %), la concentration en azote total (NT,  $\text{g.kg}^{-1}$  de sédiment sec) et la concentration en phosphore total (PT,  $\text{mg.kg}^{-1}$  de sédiment sec) au sein du jeu de données. Le coefficient de Spearman entre ces trois variables ainsi que la significativité sont également indiqués avec  $p < 0,0001$  '\*\*\*\*';  $p < 0,001$  '\*\*\*',  $p < 0,01$  '\*\*',  $p < 0,05$  '\*'.



La teneur en matière organique, la concentration en azote total et la concentration en phosphore total dans le sédiment sont tous les trois fortement corrélées (Figure 7). Cette relation est encore plus forte entre la teneur en matière organique et la concentration en azote total. Pour la suite de ce travail seuls les stocks d'azote total et de phosphore total sont calculées.

### Structure du sédiment : granulométrie, teneur en eau et densité

La densité et la teneur en eau du sédiment sont respectivement présents dans 326 et 1057 relevés (voir partie 4.3). Les fractions granulométriques utilisées dans les différents programmes de suivi et de recherche ne sont pas homogènes limitant ainsi la puissance statistique de ces relations (suppression de nombreuses valeurs). Seules les fractions granulométriques représentant plus de 65 % du jeu de données ont été conservées. Il s'agit des fractions suivantes :

- FRINF002 (Fraction inférieure à 2µm, 1325 valeurs disponibles)
- FR002020 (Fraction comprise entre 2 et 20µm, 1258 valeurs disponibles)
- FR020050 (Fraction comprise entre 20 et 50µm, 1258 valeurs disponibles)
- FRINF050 (Fraction inférieure à 50µm, 1258 valeurs disponibles)
- FR050200 (Fraction comprise entre 50 et 200µm, 1258 valeurs disponibles)
- FR2002MM (Fraction comprise entre 200µm et 2mm, 1233 valeurs disponibles)

## 5.3 Résultats : Dynamique temporelle

### Estimation de la densité des sédiments des lagunes méditerranéennes

Parmi les différentes relations testées, deux relations significatives permettent de calculer ensuite les stocks d'azote total et de phosphore total dans les sédiments :

- la relation entre la composante de la densité liée aux particules sédimentaires (DENS\_partSED) et la fraction inférieure à 2µm (FRINF002, Figure 8) pour laquelle le coefficient de corrélation de Spearman est égal à -0,64 ( $p < 0,001$ ),
- la relation entre la composante de la densité liée aux particules sédimentaires (DENS\_partSED) et la fraction inférieure à 50µm (FRINF050) pour laquelle le coefficient de corrélation de Spearman est égal à -0,70 ( $p < 0,001$ ).

Cette deuxième relation significative a été retenue pour le calcul des stocks d'azote total et de phosphore total dans les sédiments (Equation 5). Elle présente l'avantage de couvrir toute la gamme de valeur possible pour la fraction granulométrique (Figure 9).

$$DENS_{partSED} = -10,90 \times FRINF050 + 1560,77 \quad (5)$$

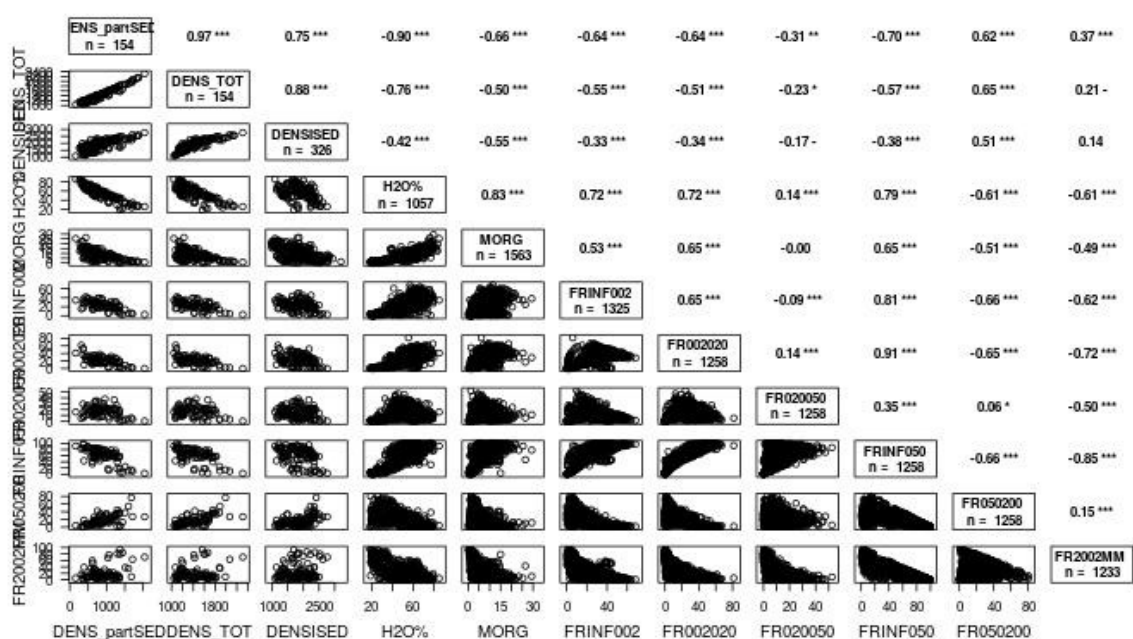


Figure 8: Relation entre la densité (densité des particules sédimentaire, composante liée aux particules sédimentaires ou densité réelle totale), la teneur en eau (%H2O), la teneur en matière organique (MO) et différentes fractions granulométrique au sein du jeu de données. Le coefficient de Spearman entre ces trois variables ainsi que la significativité sont également indiqués avec  $p < 0,0001$  '\*\*\*\*';  $p < 0,001$  '\*\*\*',  $p < 0,01$  '\*\*',  $p < 0,05$  '\*'.

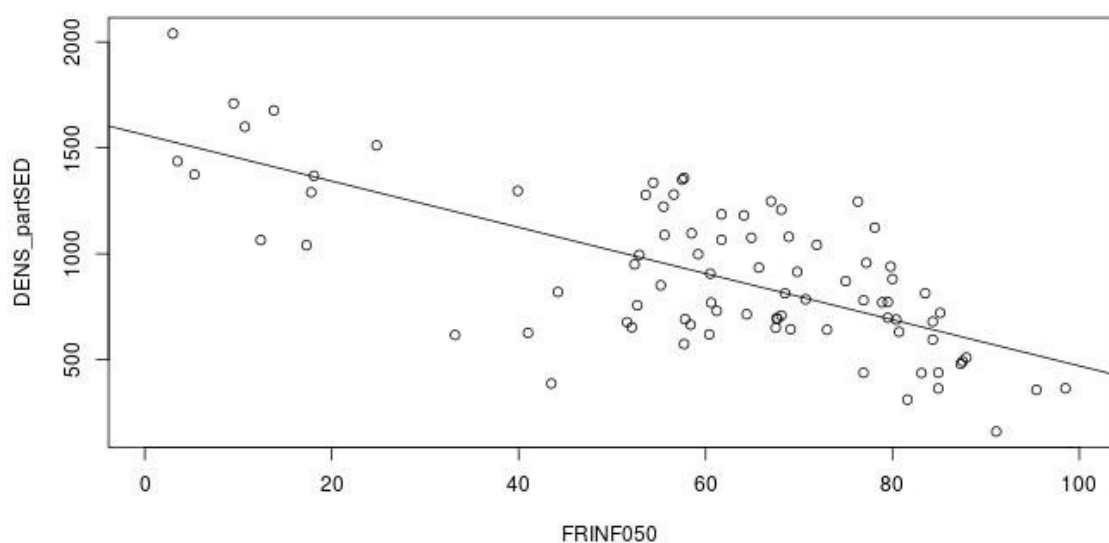


Figure 9: Relation entre la composante de la densité liée aux particules sédimentaires (DENS\_partSED) et la fraction inférieure à 50µm (FRINF050).

Concernant les relevés pour lesquels la fraction granulométrique inférieure à 50µm n'a pas été mesurée, elle a été calculée à partir de la moyenne des

valeurs aux autres périodes à cette même station. Ceci permet d'augmenter de 19 % (1265 valeurs avant remplacement, 1506 valeurs après remplacement) le nombre de valeurs disponibles pour l'estimation des stocks d'azote et de phosphore dans le sédiment.

## Dynamique temporelle des stocks sédimentaires

Les données couvrent la période comprise entre 1990 et 2019. La méthode mise en place a permis de calculer les stocks sédimentaires d'azote total et de phosphore total sur 28 des 36 lagunes (Tableau 7 et Tableau 8). 23 des 36 lagunes pour l'azote total et 24 des 36 stations pour le phosphore total possèdent au moins deux relevés.

Tableau 7: Années et nombre de station pour lesquelles le stock d'azote total (NT, g.m<sup>-2</sup> intégré sur 5cm) sont disponibles pour l'analyse de la dynamique temporelle des stocks sédimentaires au sein de chacune des 36 lagunes considérées dans le cadre de la DCE.

Code DCE	Lagune	Années de mesure NT (Nombre de stations)
FRDT01	Canet	2002 (15) – 2012 (15)
FRDT02	Salses Leucate	1999 (49) - 2004 (74) - 2006 (2) - 2009 (38) - 2015 (1) - 2017 (1)
FRDT03	La Palme	2002 (12) - 2006 (2) - 2007 (12) - 2009 (-) - 2013 (12) - 2015 (1)
FRDT04	Bages-Sigean	1999 (34) - 2005 (36) - 2009 (-) - 2010 (36) - 2015 (44)
FRDT05A	Ayrolle	1999 (15) - 2005 (14) - 2010 (14)
FRDT05B	Campagnol	1999 (5) - 2005 (4) - 2009 (-) - 2010 (4)
FRDT06A	Gruissan	1999 (4) - 2005 (3) - 2009 (-) - 2010 (3)
FRDT06B	Grazel	
FRDT06B	Mateille	
FRDT07	Pissevache	
FRDT08	Vendres	2002 (10)
FRDT09	Grand Bagnas	2002 (4) - 2006 (1) - 2009 (-)
FRDT10	Thau	1999 (2) - 2003 (70) - 2006 (3) - 2008 (36) - 2009 (-) - 2014 (36) - 2015 (2)
FRDT11C	Ingril Sud	1990 (-) - 1999 (5) - 2001 (9) - 2006 (10) - 2011 (9)
FRDT11C	Ingril Nord	1990 (-) - 1999 (4) - 2001 (5) - 2006 (6) - 2011 (5)
FRDT11C	Pierre Blanche	1990 (-) - 2001 (10) - 2006 (12) - 2009 (-) - 2011 (10)
FRDT11C	Vic	1990 (-) - 2001 (29) - 2006 (29) - 2009 (-) - 2011 (13)
FRDT11B	Prevost	1990 (-) - 2001 (9) - 2006 (12) - 2009 (-) - 2012 (10) - 2015 (1)
FRDT11B	Arnel	1990 (0) - 2001 (9) - 2006 (10) - 2012 (9)
FRDT11B	Grec	1990 (-) - 1999 (6) - 2001 (8) - 2006 (8) - 2012 (8)
FRDT11B	Mejean	1990 (-) - 2001 (13) - 2006 (15) - 2009 (-) - 2012 (13) - 2015 (1)
FRDT11A	Or	1990 (-) - 1999 (28) - 2005 (32) - 2009 (-) - 2010 (15) - 2015 (2) - 2019 (15)
FRDT12	Ponant	2002 (7)
FRDT13C	Medard	2002 (4)
FRDT13E	La Marette	2004 (6) - 2007 (6)
FRDT13H	Charnier	
FRDT13H	Crey	
FRDT13H	Scamandre	
FRDT14A	Vaccares	2003 (23) - 2006 (1) - 2009 (-)
FRDT14C	La Palissade	
FRDT15	Berre Vaine	2003 (-) - 2006 (2) - 2009 (-) - 2011 (-)
FRDT15C	Bolmon	
FRET01	Biguglia	1999 (27) - 2003 (15) - 2013 (15)
FRET02	Diana	1999 (13) - 2003 (15) - 2013 (15)
FRET03	Urbino	1999 (17) - 2003 (18) - 2013 (18)
FRET04	Palu	2013 (6)

Tableau 8: Années et nombre de station pour lesquelles le phosphore total (PT, g.m<sup>-2</sup> intégré sur 5cm) sont disponibles pour l'analyse de la dynamique temporelle des stocks sédimentaires au sein de chacune des 36 lagunes considérées dans le cadre de la DCE.

Code DCE	Lagune	Années de mesure PT (Nombre de stations)
FRDT01	Canet	2002 (15) – 2012 (15)
FRDT02	Salses Leucate	1999 (49) - 2004 (74) - 2006 (2) - 2009 (40) - 2015 (1) - 2017 (1)
FRDT03	La Palme	2002 (12) - 2006 (2) - 2007 (12) - 2009 (1) - 2013 (12) - 2015 (1)
FRDT04	Bages-Sigean	1999 (34) - 2005 (36) - 2009 (2) - 2010 (36) - 2015 (44)
FRDT05A	Ayrolle	1999 (15) - 2005 (14) - 2010 (14)
FRDT05B	Campagnol	1999 (5) - 2005 (4) - 2009 (1) - 2010 (4)
FRDT06A	Gruissan	1999 (4) - 2005 (3) - 2009 (1) - 2010 (3)
FRDT06B	Grazel	
FRDT06B	Mateille	
FRDT07	Pissevache	
FRDT08	Vendres	2002 (10)
FRDT09	Grand Bagnas	2002 (4) - 2006 (1) - 2009 (1)
FRDT10	Thau	1999 (2) - 2003 (70) - 2006 (3) - 2008 (36) - 2009 (2) - 2014 (36) - 2015 (2)
FRDT11C	Ingril Sud	1990 (2) - 1999 (5) - 2001 (9) - 2006 (10) - 2011 (9)
FRDT11C	Ingril Nord	1990 (2) - 1999 (4) - 2001 (5) - 2006 (6) - 2011 (5)
FRDT11C	Pierre Blanche	1990 (2) - 2001 (10) - 2006 (12) - 2009 (1) - 2011 (10)
FRDT11C	Vic	1990 (7) - 2001 (29) - 2006 (29) - 2009 (1) - 2011 (13)
FRDT11B	Prevost	1990 (3) - 2001 (9) - 2006 (12) - 2009 (1) - 2012 (10) - 2015 (1)
FRDT11B	Arnel	1990 (3) - 2001 (9) - 2006 (10) - 2012 (9)
FRDT11B	Grec	1990 (2) - 1999 (6) - 2001 (8) - 2006 (8) - 2012 (8)
FRDT11B	Mejean	1990 (4) - 2001 (13) - 2006 (15) - 2009 (1) - 2012 (13) - 2015 (1)
FRDT11A	Or	1990 (8) - 1999 (28) - 2005 (32) - 2009 (2) - 2010 (15) - 2015 (2) - 2019 (15)
FRDT12	Ponant	2002 (7)
FRDT13C	Medard	2002 (4)
FRDT13E	La Marette	2004 (6) - 2007 (6)
FRDT13H	Charnier	
FRDT13H	Crey	
FRDT13H	Scamandre	
FRDT14A	Vaccares	2003 (23) - 2006 (1) - 2009 (1)
FRDT14C	La Palissade	
FRDT15	Berre Vaine	2003 (21) - 2006 (2) - 2009 (2) - 2011 (18)
FRDT15C	Bolmon	
FRET01	Biguglia	1999 (27) - 2003 (15) - 2013 (15)
FRET02	Diana	1999 (13) - 2003 (15) - 2013 (15)
FRET03	Urbino	1999 (17) - 2003 (18) - 2013 (18)
FRET04	Palu	2013 (6)

L'analyse temporelle proposée dans le cadre de ce travail intègre la variabilité spatiale au sein même de chaque lagune. Ainsi, les tendances temporelles pour chaque lagune sont :

- illustrées par la représentation de la distribution des données à chaque date. Cette représentation est associée aux cartographies représentant la répartition spatiale des stations de collecte des données (Figure 10 et Annexes). Le couplage de ces deux représentations permet d'ajuster l'analyse critique des résultats au nombre de données utilisées et leur répartition spatiale,

- testées statistiquement afin de déterminer les tendances significatives (Tableau 9 et Tableau 10).

Pour illustrer les résultats obtenus sur l'ensemble des lagunes méditerranéennes françaises, les stocks d'azote total dans la lagune d'Arnel ont été calculés en 2001, 2006 et 2012 (Tableau 7 et Figure 10). Le nombre de station y est relativement stable (9 stations en 2001 et 2012 et 10 stations en 2006). Sur cette lagune, la réduction des stocks d'azote total est significative (Tableau 9). Concernant le phosphore total, le stock sédimentaire a pu être calculé en 1990, 2001, 2006 et 2012 (Tableau 8). Il n'y a malheureusement pas de renseignement sur la position des stations en 1990. L'analyse temporelle des stocks de phosphore met en évidence une réduction significative entre 2001 et 2006 et entre 2001 et 2012 (Tableau 10).

A l'échelle des lagunes méditerranéennes françaises, seuls les stocks d'azote total dans les lagunes de Salses Leucate et de l'Arnel ont diminué sur la période analysée. A l'opposée, quatre tendances positives significatives (augmentation du stock) ont été mises en évidence pour les lagunes de Bages-Sigean, Thau, Or et Biguglia (Tableau 9). Ainsi, les stocks d'azote total dans les sédiments semblent constants malgré les fortes réductions d'apports d'azote provenant du bassin versant (Annexes), Ces résultats sont en accord avec les estimations réalisées dans le cadre des projets RESTOLAG et DEPART pour lesquels les temps de restauration étaient estimés à plusieurs dizaines d'années (Ouisse et al., 2014, 2013)

En ce qui concerne le phosphore total, seules les lagunes de Bages-Sigean, de l'Or, de La Marette et de Biguglia affiche au moins une période durant laquelle l'augmentation est significative (Tableau 10). 13 des 24 lagunes pour lesquelles l'analyse temporelle est possible affiche une tendance à la diminution sur au moins une période. Ces résultats semblent en accord avec les observations récentes dans les lagunes méditerranéennes en restauration vis-à-vis de l'eutrophisation. En effet, les flux de phosphore mesurés à l'interface entre le sédiment et la colonne d'eau sont majoritairement positifs bien qu'ils peuvent être variable selon la saison (Le Fur, 2018; Ouisse et al., 2014, 2013).



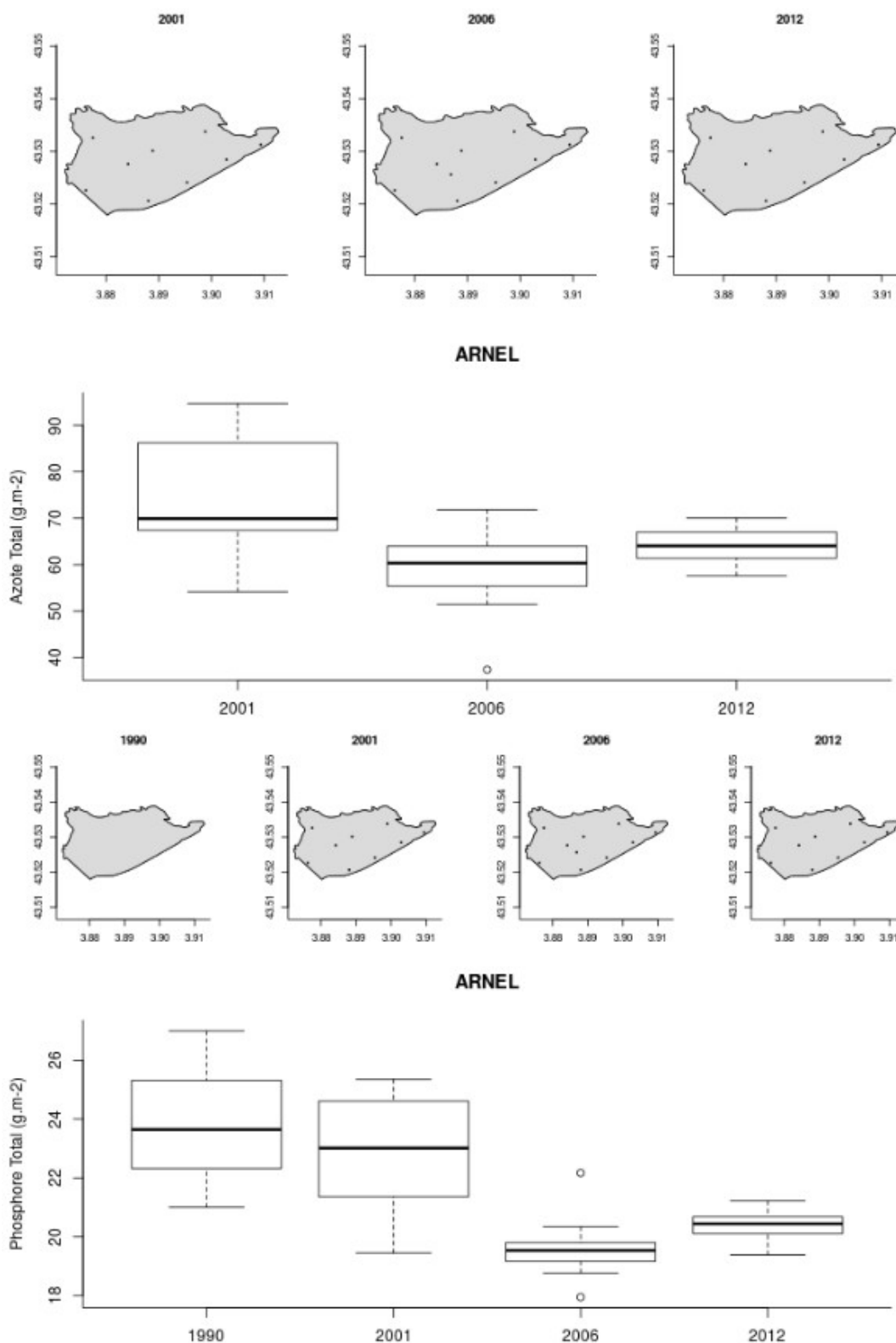


Figure 10: Exemple pour la lagune d'Arnel. Répartition des stations de prélèvement dans la lagune. Gamme de variation du stocks d'azote total et du phosphore total ( $\text{g.m}^{-2}$  intégré sur 5cm) en 2001, 2006 et 2012. Chaque boîte à moustache représente 5%, 25%, 50%, 75% et 95% pour des données. Les points indiqués les valeurs hors de ces percentiles. Le nombre de valeurs pour chacune des années est indiqué dans les Tableau 7 pour l'azote total et Tableau 8 pour le phosphore total.

Tableau 9: Résultats statistiques de la dynamique des stocks d'azote total (NT, g.m<sup>-2</sup> intégré sur 5cm) dans les sédiments lagunaires des 36 lagunes considérées dans le cadre de la DCE.

Code DCE	Lagune	Années de mesure	Statistiques (NT)	Tendance (NT)
FRDT01	Canet	2002 – 2012		
FRDT02	Salses Leucate	1999 – 2004 – 2009	ANOVA (p=0,026)	2004 – 2009
FRDT03	La Palme	2002 – 2007 – 2013		
FRDT04	Bages-Sigean	1999 – 2005 – 2010 – 2015	ANOVA (p=0,003)	2005 – 2015 // 2010 – 2015
FRDT05A	Ayrolle	1999 – 2005 – 2010		
FRDT05B	Campagnol	1999 – 2005 – 2010		
FRDT06A	Gruissan	1999 – 2005 – 2010		
FRDT06B	Grazel			
FRDT06B	Mateille			
FRDT07	Pissevache			
FRDT08	Vendres			
FRDT09	Grand Bagnas	2002 – 2006		
FRDT10	Thau	2003 – 2008 – 2014	ANOVA (p<0,001)	2003 – 2008 // 2003 – 2014 // 2008 – 2014
FRDT11C	Ingril Sud	1999 – 2001 – 2006 – 2011		
FRDT11C	Ingril Nord	1999 – 2001 – 2006 – 2011		
FRDT11C	Pierre Blanche	2001 – 2006 – 2011		
FRDT11C	Vic	2001 – 2006 – 2011		
FRDT11B	Prevost	2001 – 2006 – 2012		
FRDT11B	Arnel	2001 – 2006 – 2012	ANOVA (p=0,002)	2001 – 2006
FRDT11B	Grec	1999 – 2001 – 2006 – 2012		
FRDT11B	Mejean	2001 – 2006 – 2012		
FRDT11A	Or	1999 – 2005 – 2010 – 2019	ANOVA (p=0,021)	1999 – 2010
FRDT12	Ponant			
FRDT13C	Medard			
FRDT13E	La Marette	2004 – 2007		
FRDT13H	Charnier			
FRDT13H	Crey			
FRDT13H	Scamandre			
FRDT14A	Vaccares	2003 – 2006		
FRDT14C	La Palissade			
FRDT15	Berre Vaine			
FRDT15C	Bolmon			
FRET01	Biguglia	1999 – 2003 – 2013	ANOVA (p<0,001)	1999 – 2013 // 2003 – 2013
FRET02	Diana	1999 – 2003 – 2013		
FRET03	Urbino	1999 – 2003 – 2013		
FRET04	Palu			

Tableau 10: Résultats statistiques de la dynamique des stocks de phosphore total (PT, g.m<sup>-2</sup> intégré sur 5cm) dans les sédiments lagunaires des 36 lagunes considérées dans le cadre de la DCE.

Code DCE	Lagune	Années de mesure	Statistiques (PT)	Tendance (PT)
FRDT01	Canet	2002 – 2012	ANOVA (p=0,02)	2002 – 2012
FRDT02	Salses Leucate	1999 – 2004 – 2009	ANOVA (p<0,001)	1999 – 2004 // 1999 – 2009
FRDT03	La Palme	2002 – 2007 – 2013		
FRDT04	Bages-Sigean	1999 – 2005 – 2010 – 2015	ANOVA (p<0,001)	1999 – 2005 // 1999 – 2010 // 2005 – 2010 // 2005 – 2015 // 2010 – 2015
FRDT05A	Ayrolle	1999 – 2005 – 2010	ANOVA (p<0,001)	1999 – 2005 // 1999 – 2010
FRDT05B	Campagnol	1999 – 2005 – 2010		
FRDT06A	Gruissan	1999 – 2005 – 2010		
FRDT06B	Grazel			
FRDT06B	Mateille			
FRDT07	Pissevache			
FRDT08	Vendres			
FRDT09	Grand Bagnas	2002 – 2006		
FRDT10	Thau	2003 – 2008 – 2014	ANOVA (p<0,001)	2003 – 2014
FRDT11C	Ingril Sud	1999 – 2001 – 2006 – 2011		
FRDT11C	Ingril Nord	1999 – 2001 – 2006 – 2011		
FRDT11C	Pierre Blanche	2001 – 2006 – 2011	ANOVA (p=0,01)	2001 – 2011
FRDT11C	Vic	2001 – 2006 – 2011	ANOVA (p=0,011)	2001 – 2011
FRDT11B	Prevost	2001 – 2006 – 2012	ANOVA (p=0,02)	2001 – 2006
FRDT11B	Arnel	2001 – 2006 – 2012	ANOVA (p<0,001)	2001 – 2006 // 2001 – 2012
FRDT11B	Grec	1999 – 2001 – 2006 – 2012	ANOVA (p=0,042)	1999 – 2012
FRDT11B	Mejean	2001 – 2006 – 2012		
FRDT11A	Or	1999 – 2005 – 2010 – 2019	ANOVA (p<0,001)	1999 – 2005 // 2005 – 2010
FRDT12	Ponant			
FRDT13C	Medard			
FRDT13E	La Marette	2004 – 2007	ANOVA (p=0,033)	2004 – 2007
FRDT13H	Charnier			
FRDT13H	Crey			
FRDT13H	Scamandre			
FRDT14A	Vaccares	2003 – 2006		
FRDT14C	La Palissade			
FRDT15	Berre Vaine	2003 – 2011	ANOVA (p<0,001)	2003 – 2011
FRDT15C	Bolmon			
FRET01	Biguglia	1999 – 2003 – 2013	ANOVA (p<0,001)	1999 – 2003 // 2003 – 2013
FRET02	Diana	1999 – 2003 – 2013	ANOVA (p=0,047)	
FRET03	Urbino	1999 – 2003 – 2013	ANOVA (p=0,012)	
FRET04	Palu			

### A retenir :

Bien qu'il existe des exceptions, l'analyse temporelle des stocks sédimentaires d'azote total et de phosphore total sur la période 1990 – 2019 met en évidence :

- une absence de dynamique des stocks d'azote total dans le sédiment
- une diminution générale des stocks de phosphore total dans le sédiment



## 6 Conclusions et Recommandations

L'expertise menée dans le cadre du projet EXSEDE a permis de développer une nouvelle grille d'évaluation des risques liés à la charge sédimentaire en azote et en phosphore total. Cette nouvelle grille permet maintenant de **prendre en compte la structure du sédiment** et ainsi de mieux représenter la disponibilité en azote total et phosphore total du sédiment. Seule la **correction de l'état** en fonction de la profondeur est conservée car les zones profondes représentent des zones d'atterrissement de la matière dans les lagunes. La correction pour la prise en compte des zones conchylicoles est quant à elle supprimée. L'état vis-à-vis de l'eutrophisation calculé dans le cadre du RSL reste enfin inchangé avec cette nouvelle grille.

L'analyse temporelle des stocks sédimentaires sur la période 1990 - 2019 met en évidence une **diminution générale des stocks de phosphore total** dans le sédiment. En revanche, **aucune tendance significative** n'a pu être mise en évidence pour les **stocks d'azote total** dans le sédiment.

Dans le futur, l'analyse des dynamiques temporelles des stocks sédimentaires nécessitera un maintien des suivis de ce compartiment. Au delà de l'échelle temporelle à laquelle les prélèvements devront être fait (6 ans), il semble indispensable de conserver (remettre en place) une **stratégie spatiale d'acquisition de la données adaptée à la variabilité spatiale** au sein même de chaque lagune.

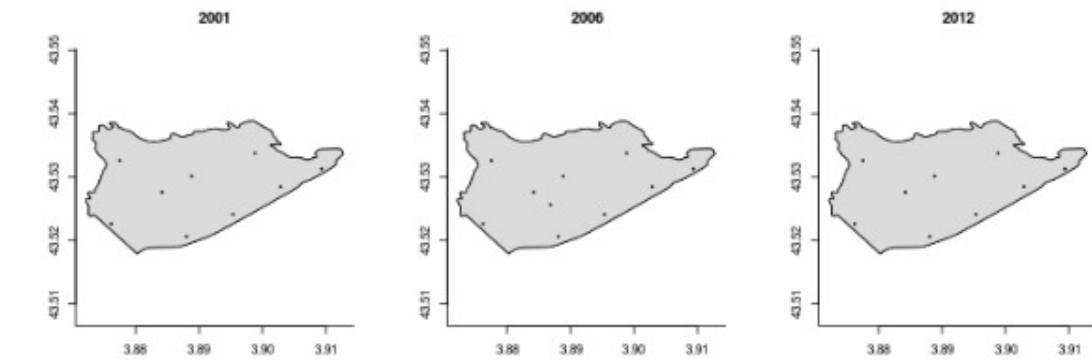
Concernant les paramètres suivis, la **densité des sédiments doit être ajoutée** aux variables couramment listées (granulométrie, teneur en eau, matière organique, azote total et phosphore total). Une **réflexion sur les classes granulométriques** doit également être menée afin d'harmoniser les protocoles et ainsi rendre utilisable l'ensemble des données collectées dans le cadre des réseau de suivis et d'observation et des projets de recherche.

Enfin, le relargage et le piégeage de l'azote total et du phosphore total dans le sédiment dépend en plus de la structure du sédiment de la couverture végétale qui peut contribuer à la régulation des échanges entre le sédiment et la colonne d'eau. Ainsi, une réflexion future sur l'intégration des connaissances acquises dans le cadre des projets RESTOLAG, DEPART, MARES2 et CHAMILA doit être menée afin d'aboutir à une meilleure compréhension du risque lié aux charges sédimentaires.

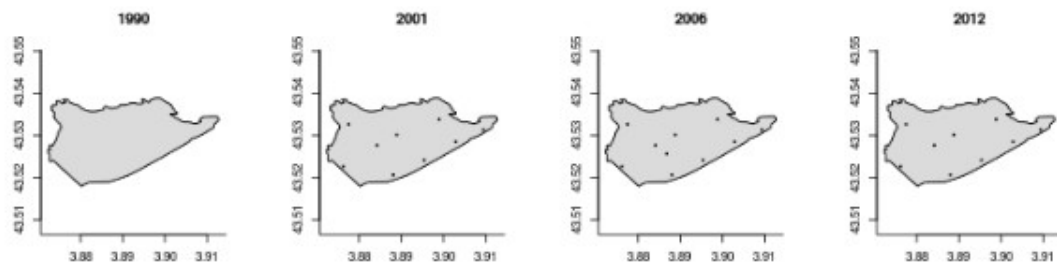
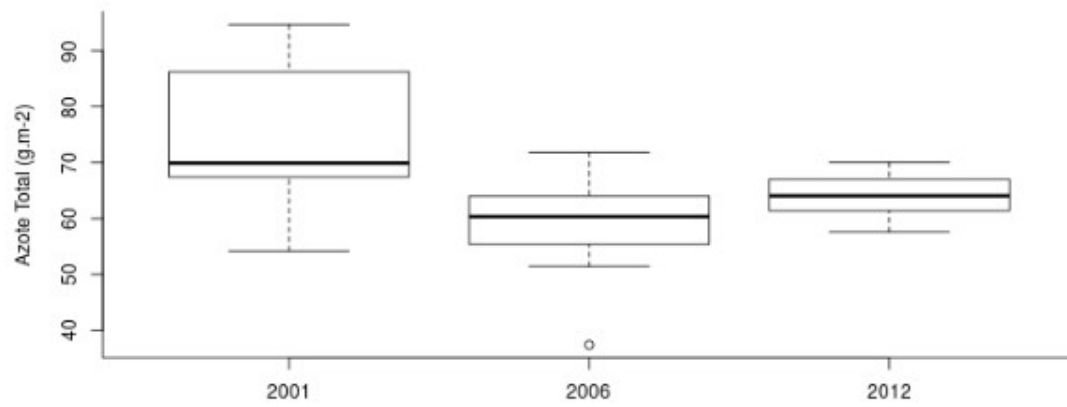
## 7 Références bibliographiques

- Eyre, B., Ferguson, A., Webb, A., Maher, D., Oakes, J., 2011. Denitrification, N-fixation and nitrogen and phosphorus fluxes in different benthic habitats and their contribution to the nitrogen and phosphorus budgets of a shallow oligotrophic sub-tropical coastal system (southern Moreton Bay, Australia). *Biogeochemistry* 102, 111-133. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9425-6>
- Fiandrino, A., Ouisse, V., Dumas, F., Lagarde, F., Pete, R., Malet, N., Le Noc, S., de Wit, R., 2017. Spatial patterns in coastal lagoons related to the hydrodynamics of seawater intrusion. *Marine Pollution Bulletin* 119, 132-144.
- Grouhel, A., Chiffolleau, J.-F., Crochet, S., Ouisse, V., Galgani, F., Munaron, D., 2018. Contamination chimique des sédiments des lagunes méditerranéennes françaises - Bilan de la Campagne ROCCHSED 2017.
- Ifremer, 2013. Bilan méthodologique de l'outil de diagnostic de l'eutrophisation du RSL. Quatorze années de résultats en Région Languedoc-Roussillon.
- Le Fur, I., 2018. Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires : successions écologiques (These de doctorat). Montpellier.
- Menu, M., Vaz, S., Bajjouk, T., Derolez, V., Fiandrino, A., Giraud, A., Grillas, P., Ouisse, V., 2019. Rapport final du projet CHAMILA (Cartographie des habitats en milieu lagunaire méditerranéen).
- Ouisse, V., Fiandrino, A., de Wit, R., Giraud, A., Malet, N., 2014. Devenir du Phosphore et de l'azote dans un contexte de restauration des milieux lagunaires méditerranéens 47.
- Ouisse, V., Fiandrino, A., de Wit, R., Malet, N., 2013. Restauration des écosystèmes lagunaires : évaluation du rôle du sédiment et des herbiers à phanérogames 38.

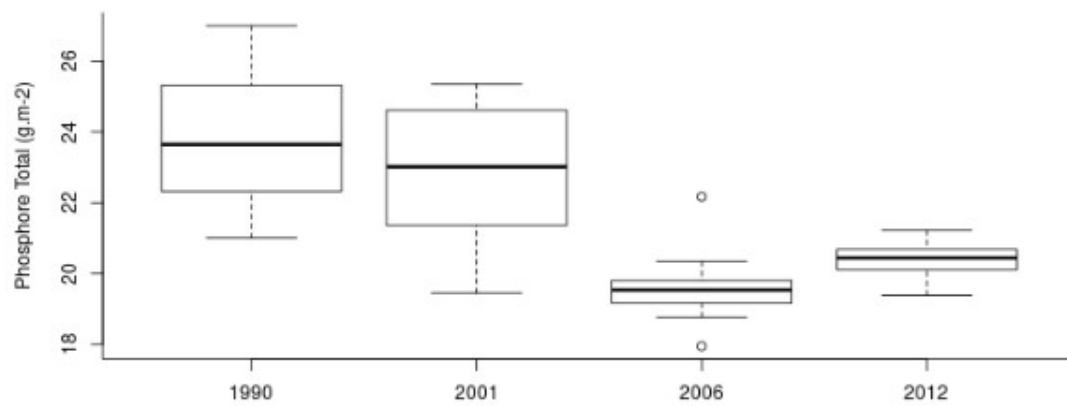
## 8 Annexes

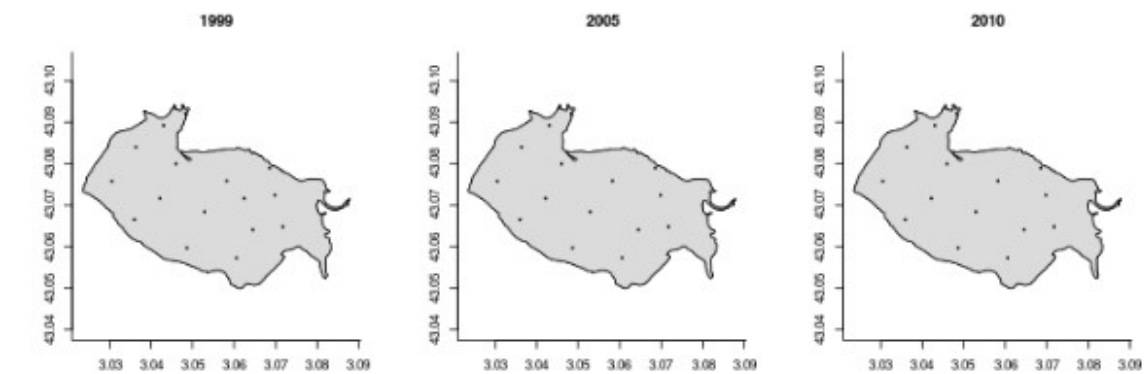


ARNEL

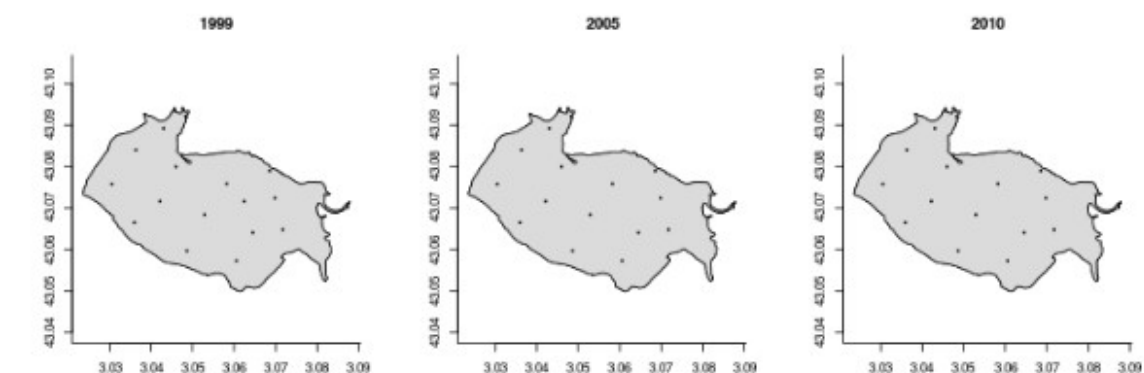
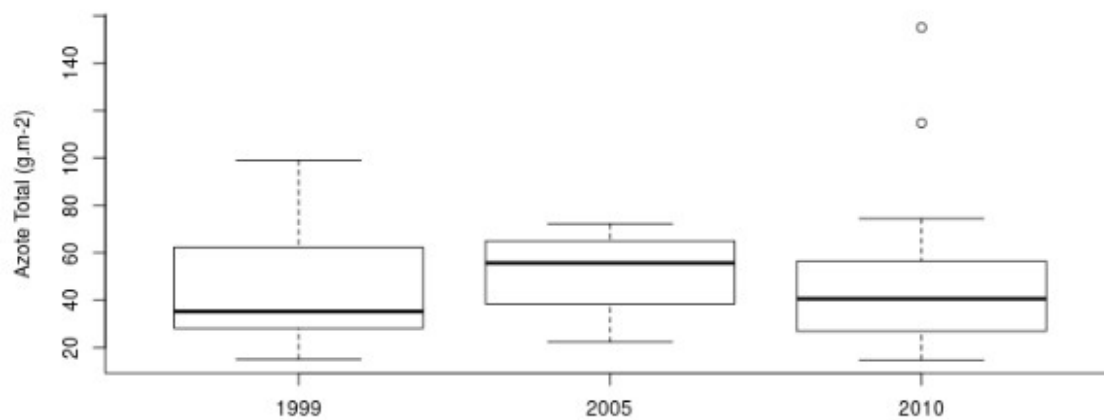


ARNEL

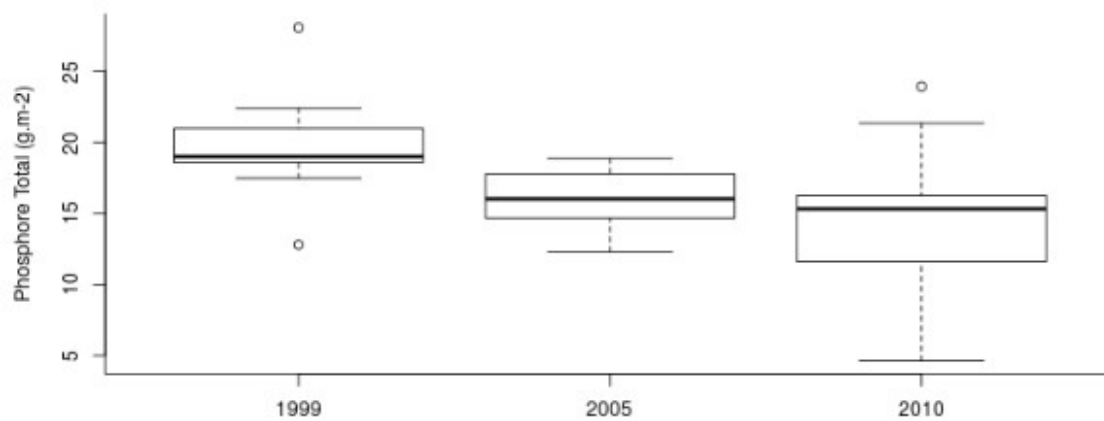


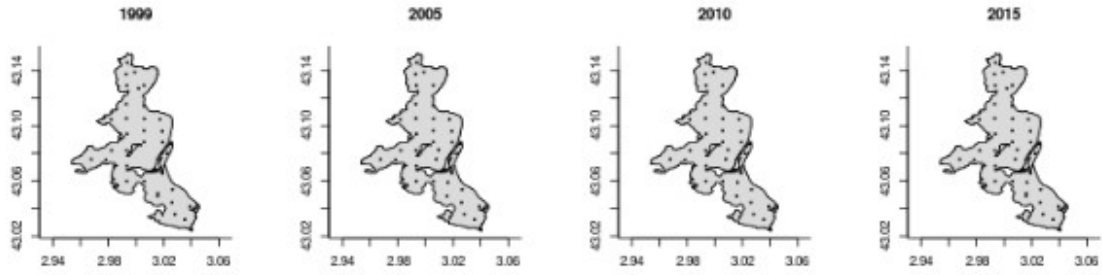


**AYROLLE**

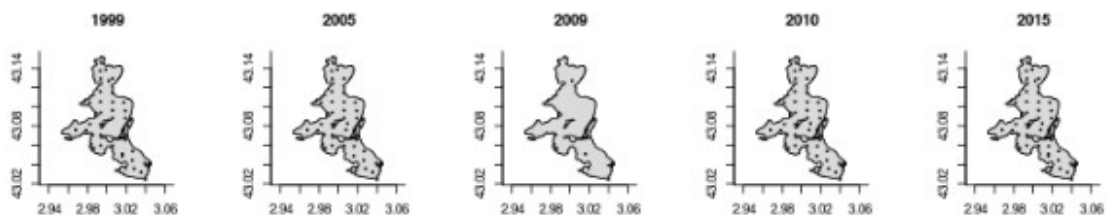
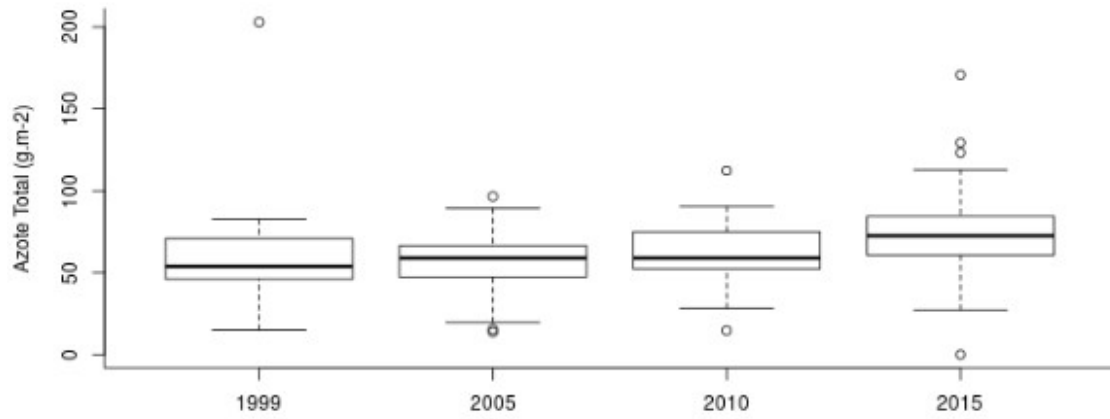


**AYROLLE**

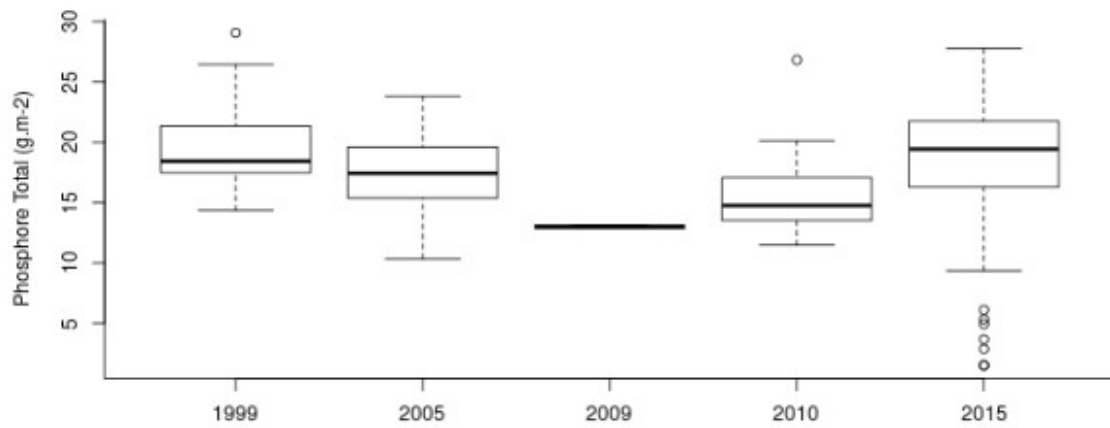




### BAGES

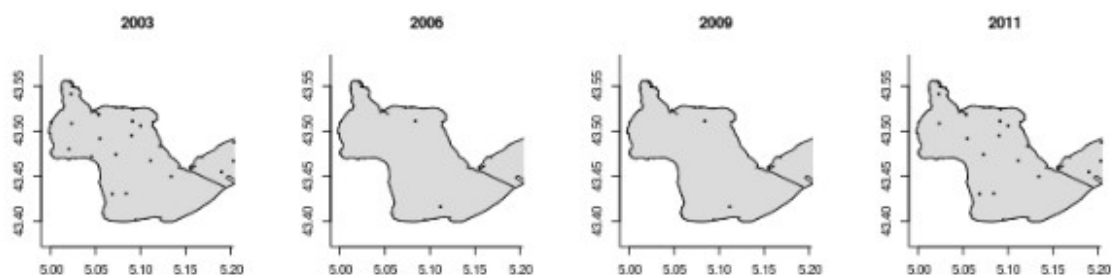
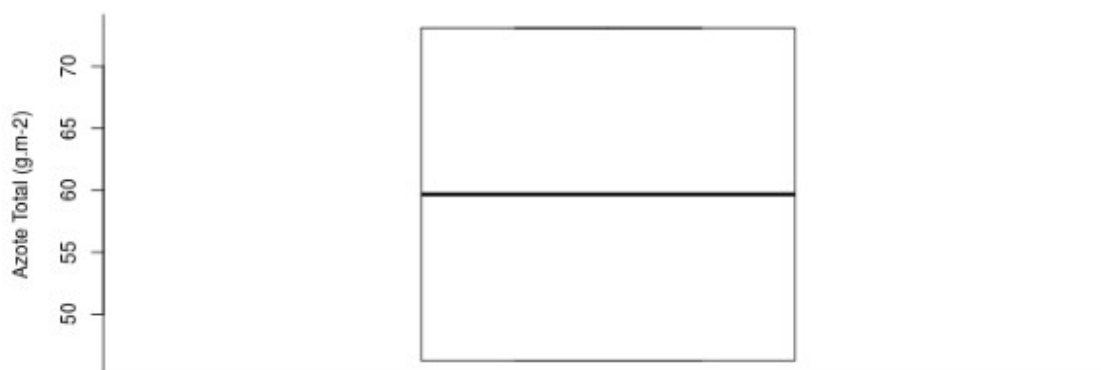


### BAGES

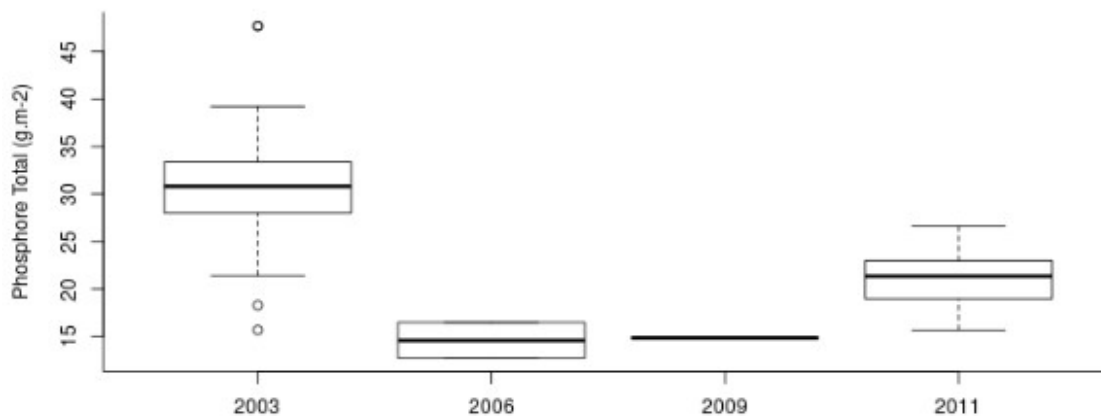


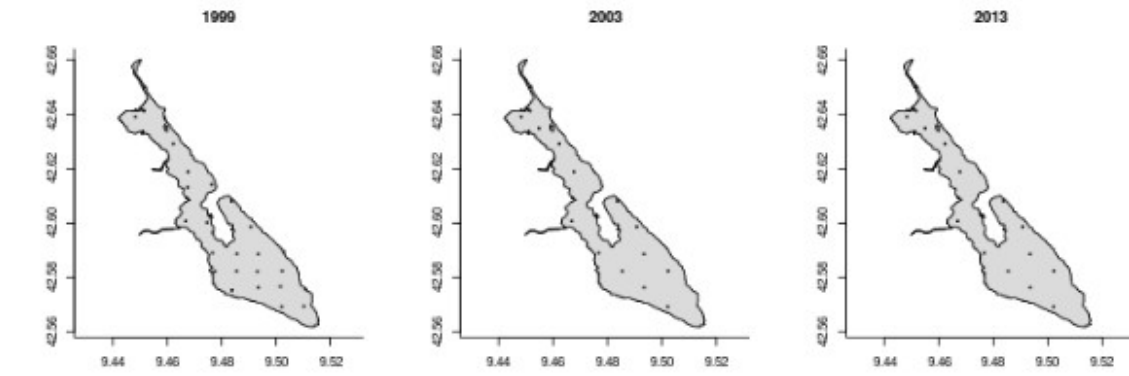


**BERRE-VAINE**

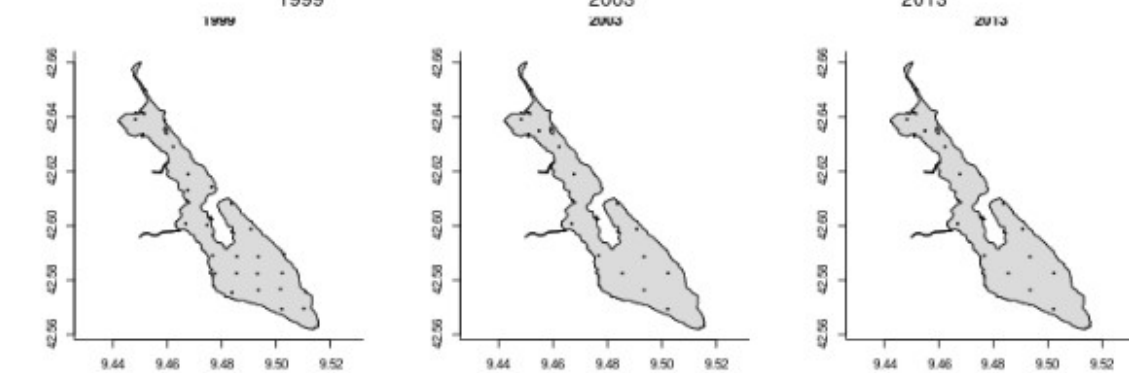
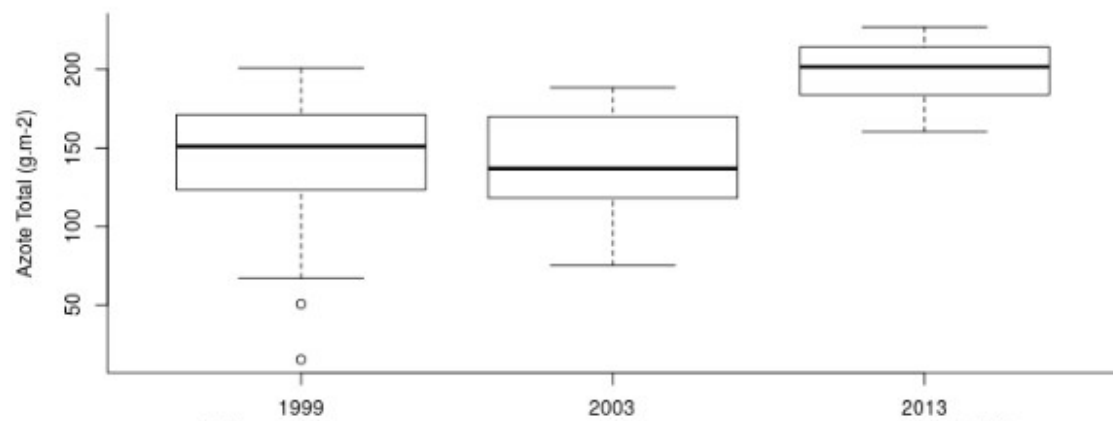


**BERRE-VAINE**

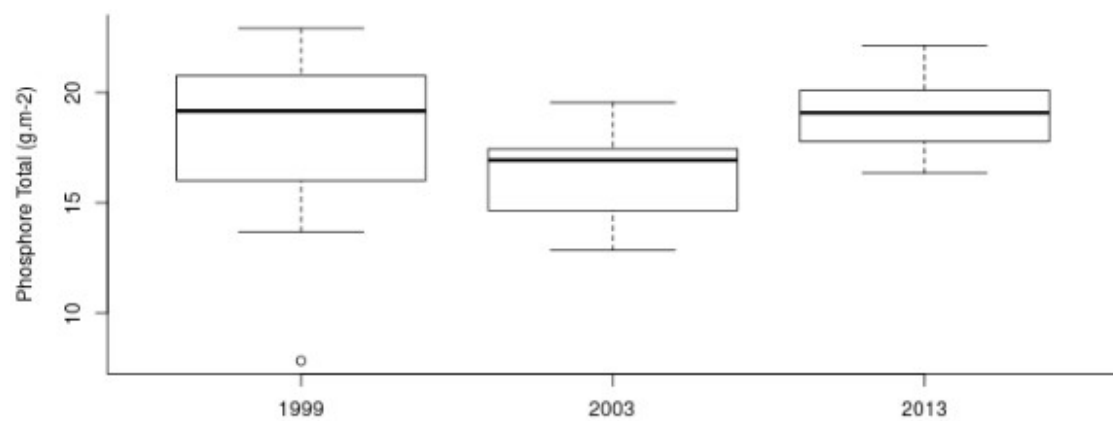


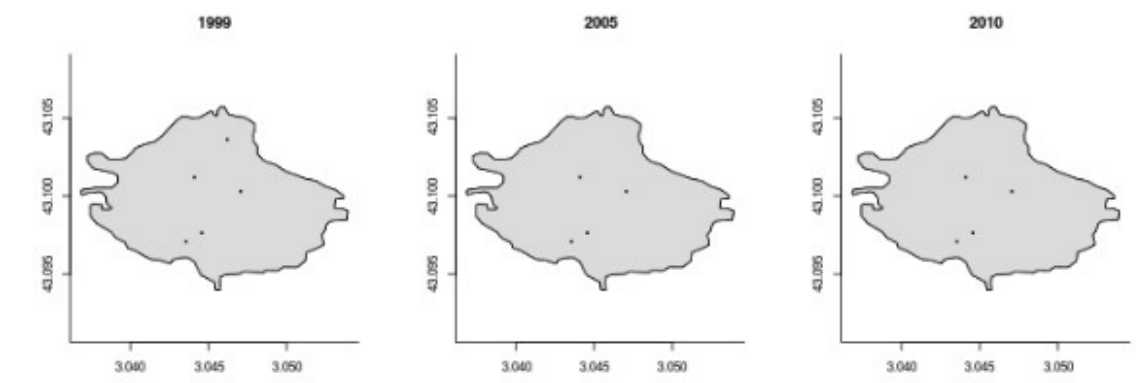


### BIGUGLIA

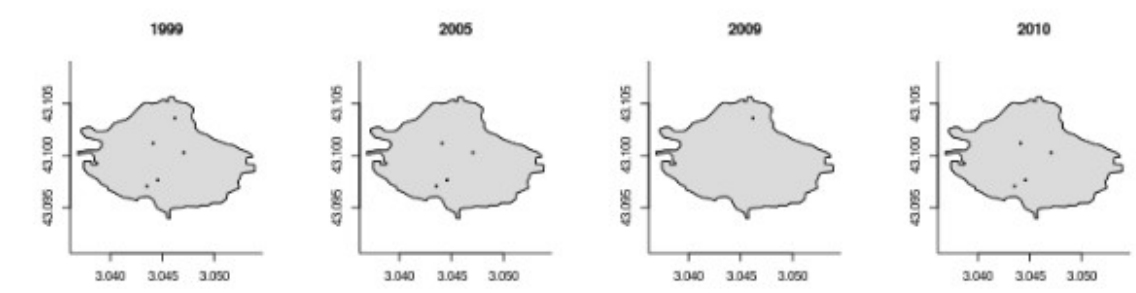
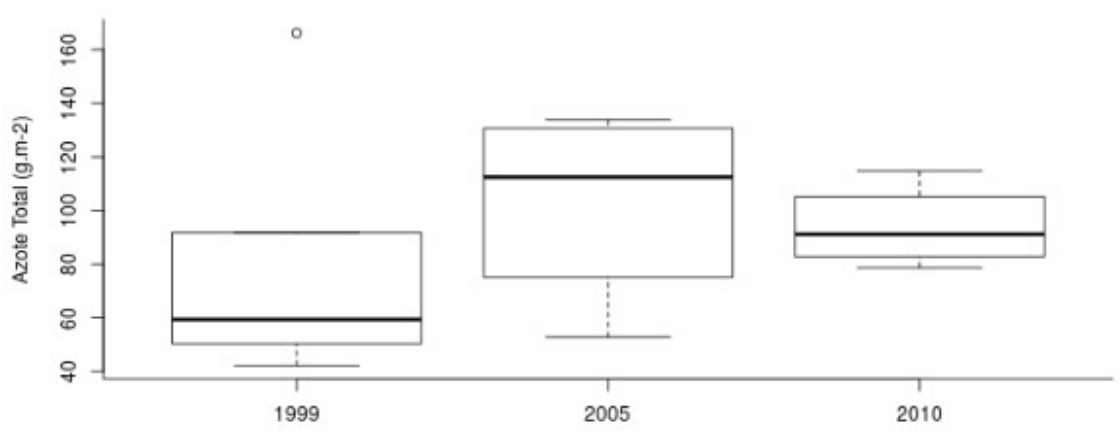


### BIGUGLIA

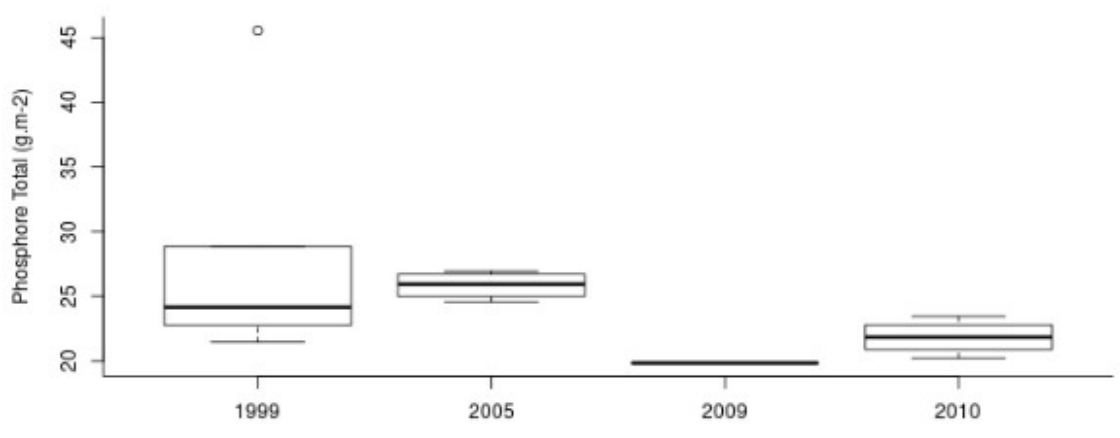




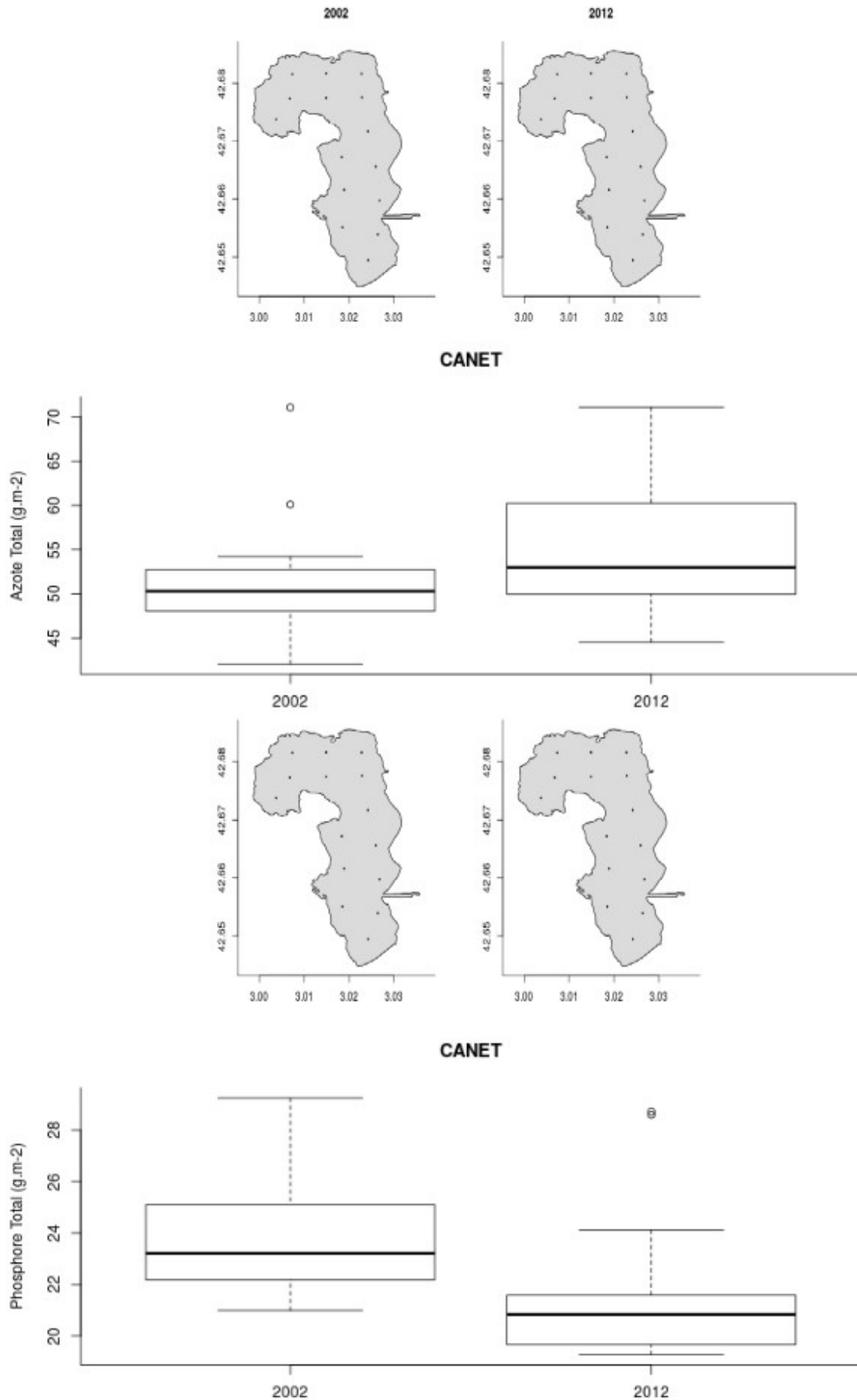
**CAMIGNOL**

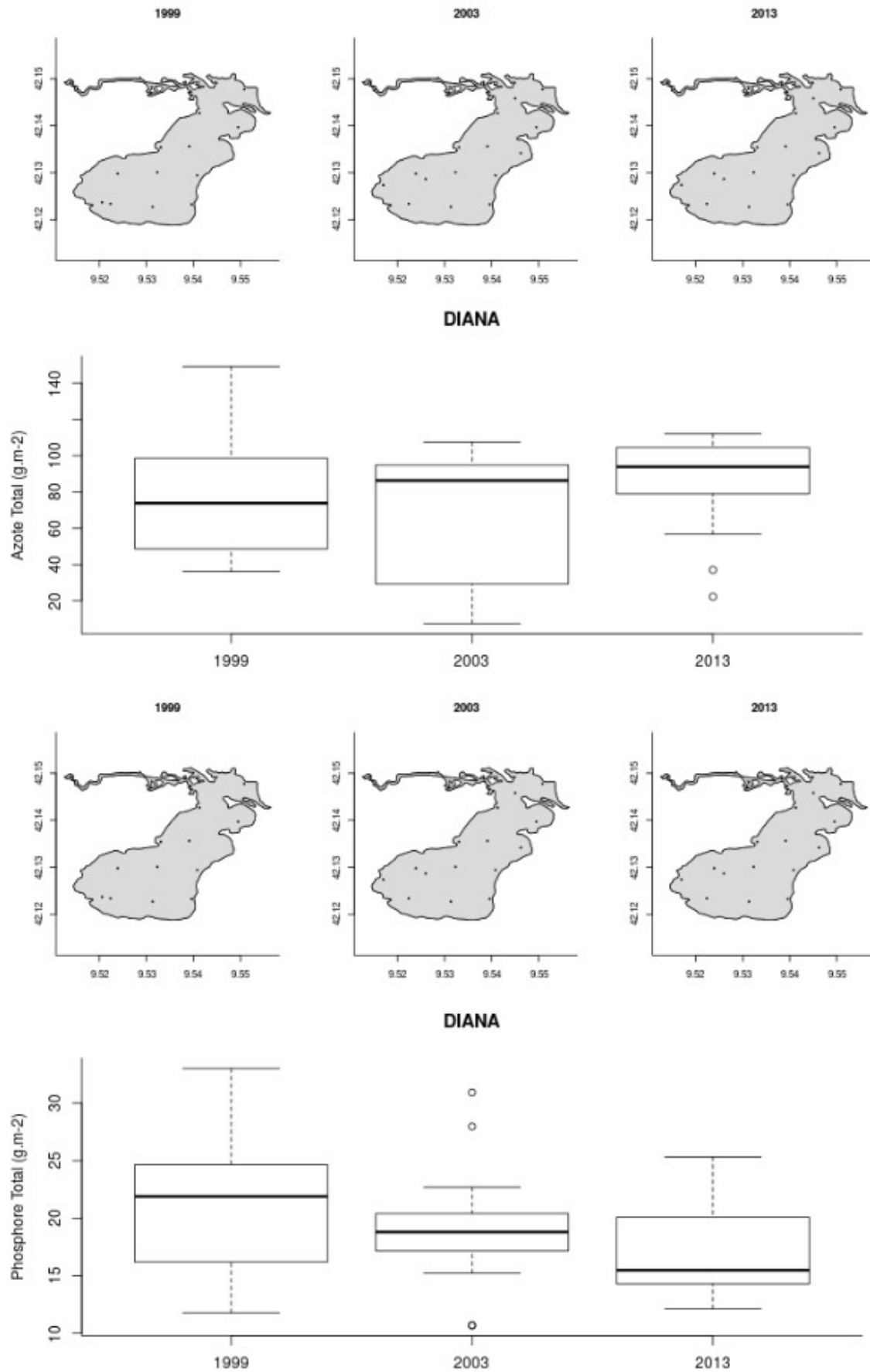


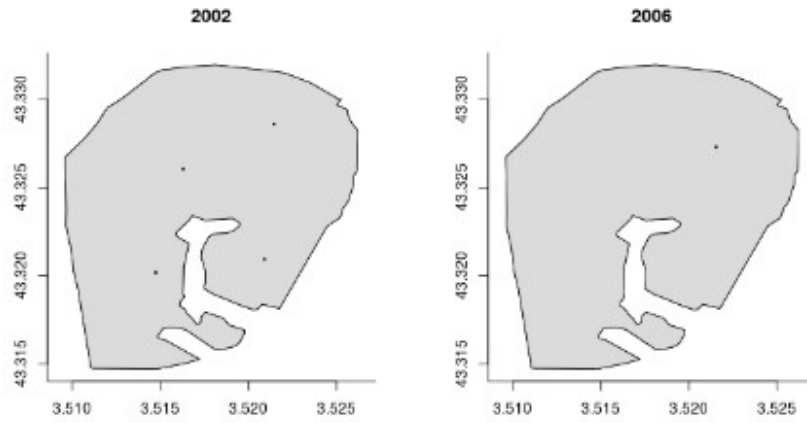
**CAMIGNOL**



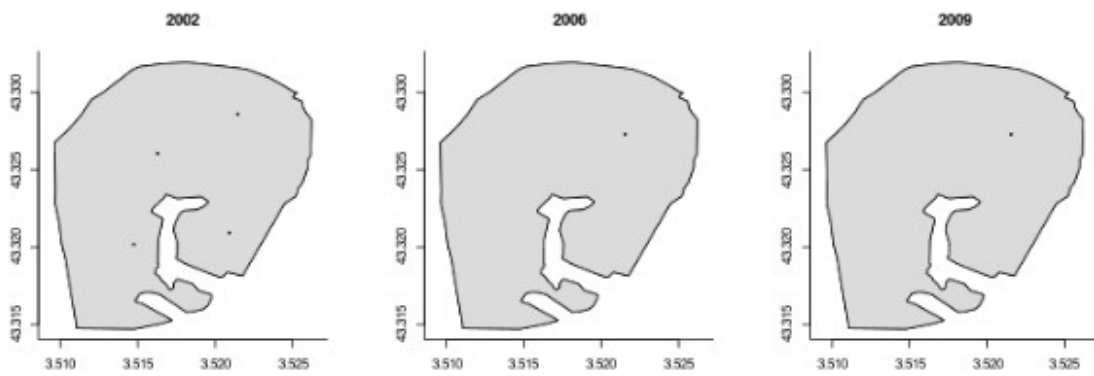
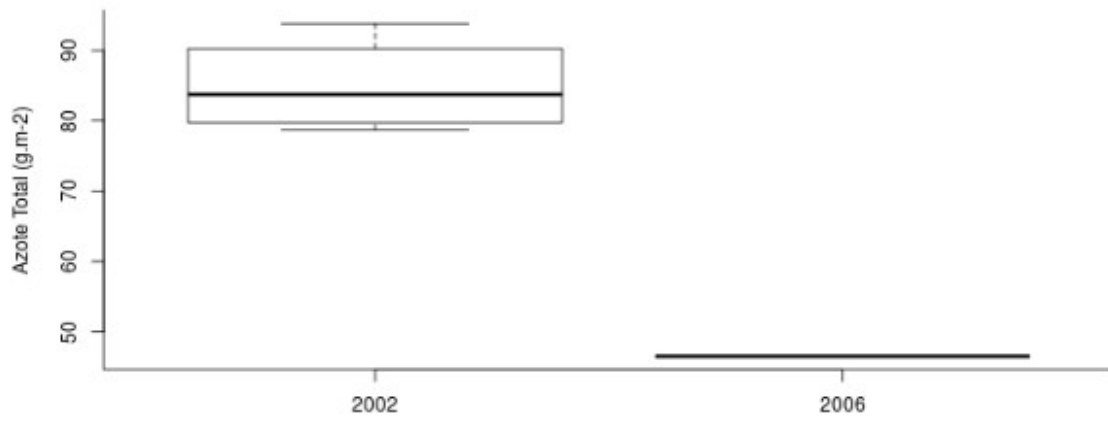




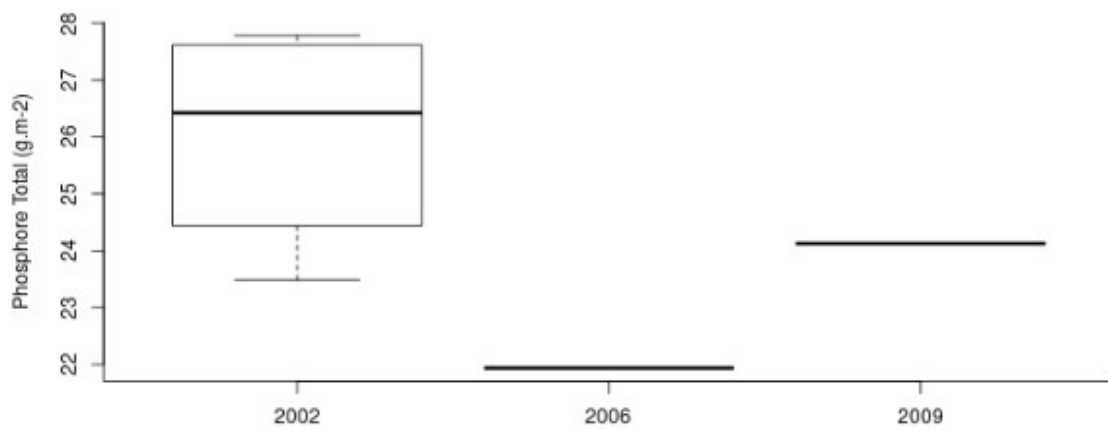


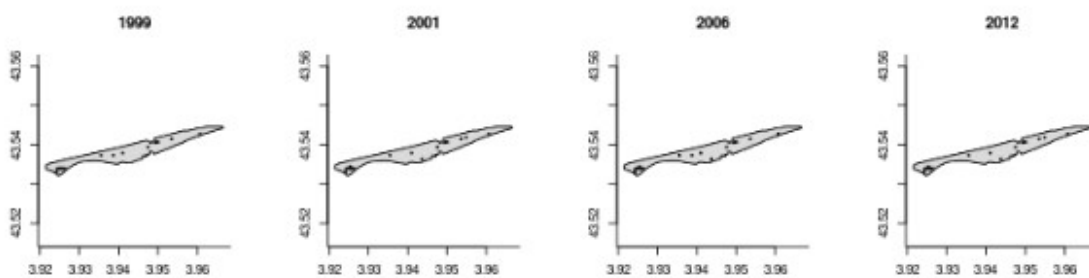


GRAND BAGNAS

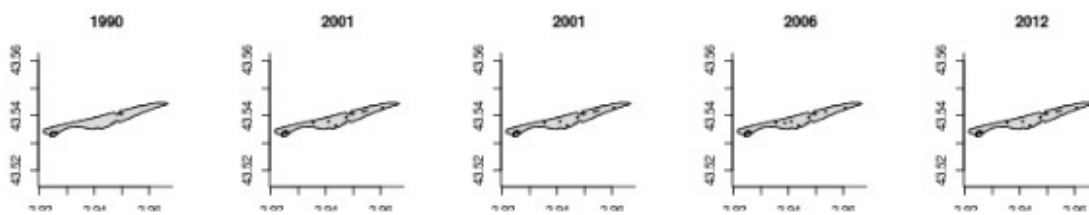
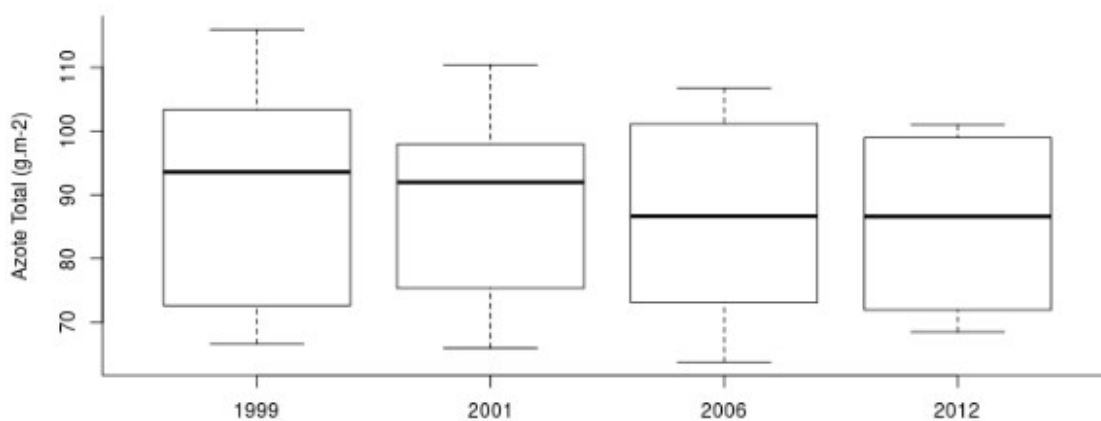


GRAND BAGNAS

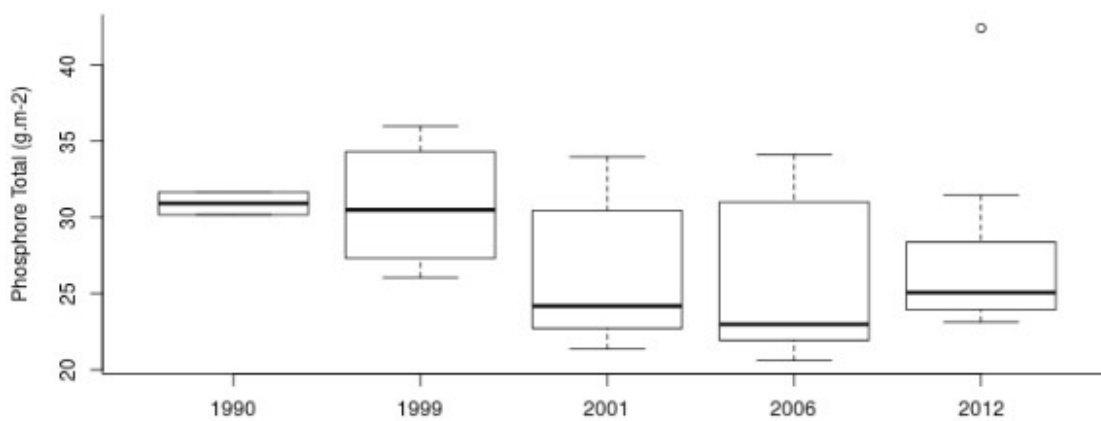


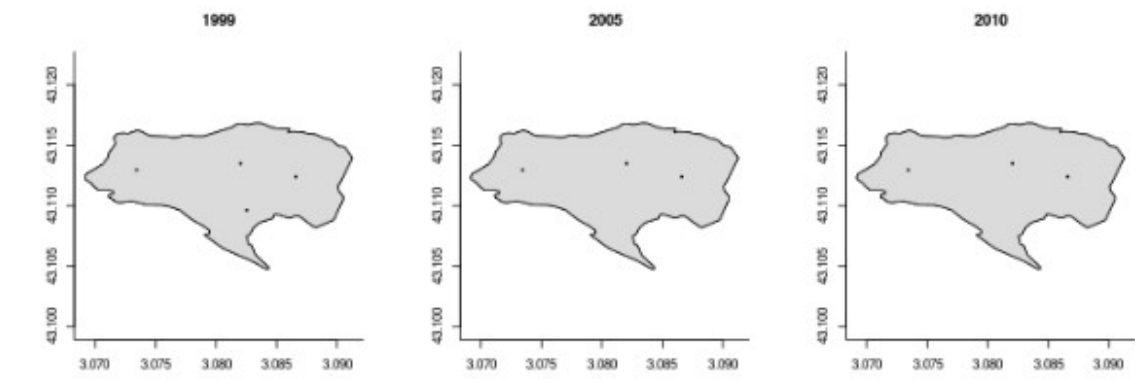


**GREC**

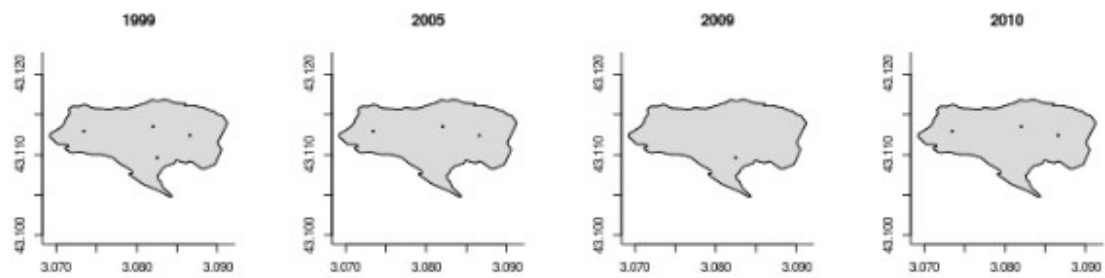
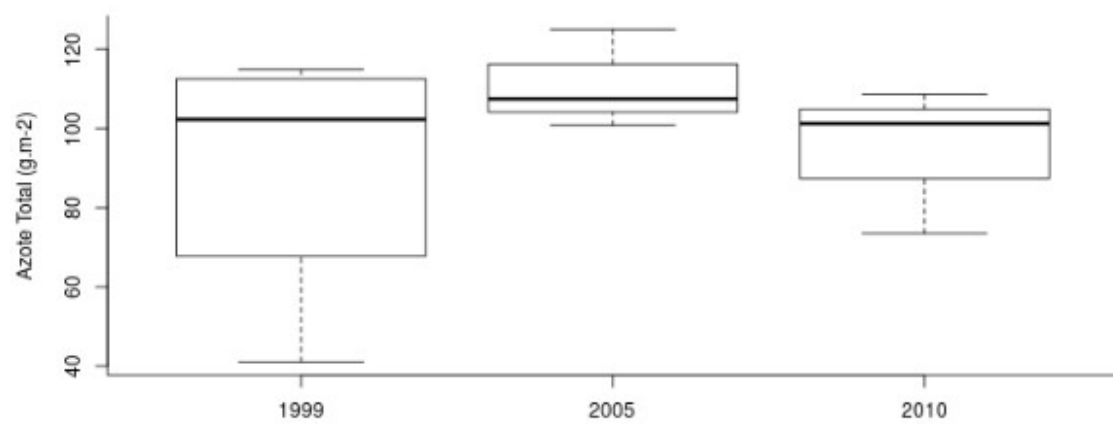


**GREC**

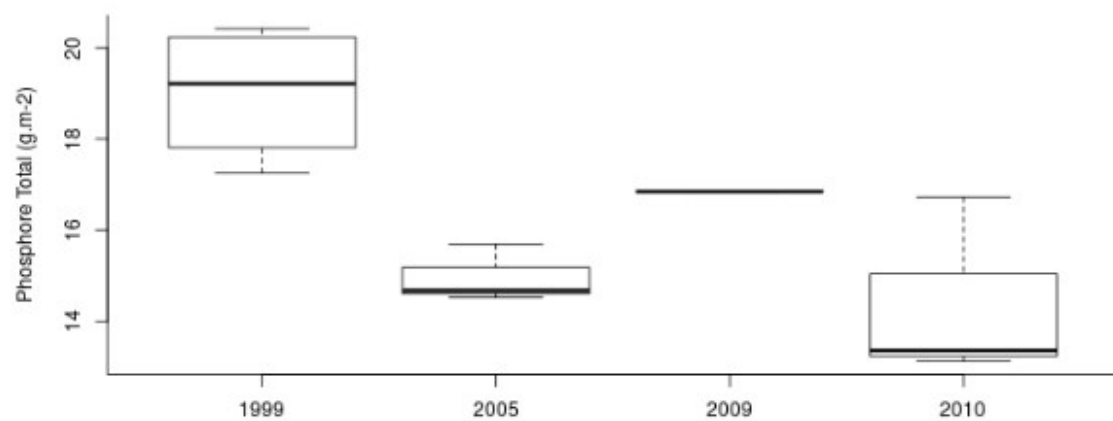


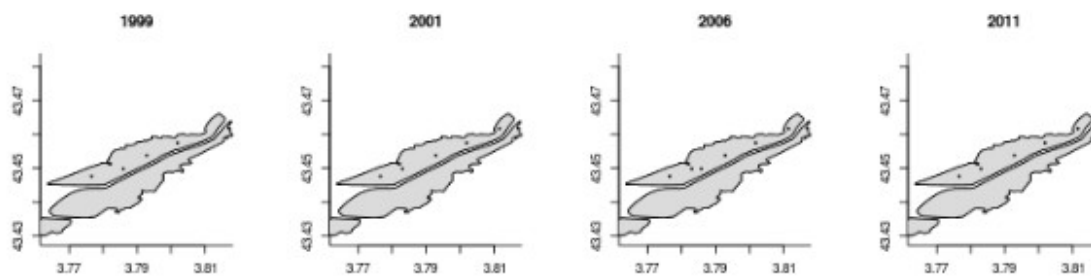


**GRUISSAN**

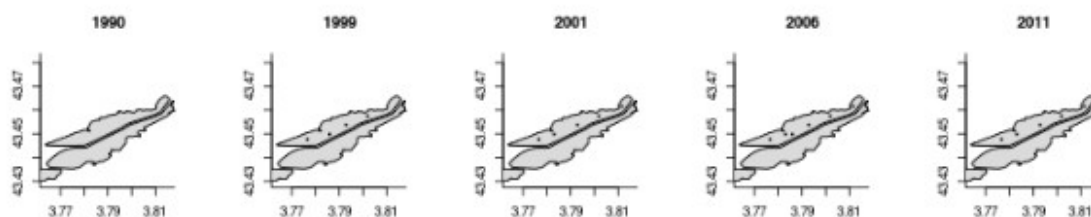
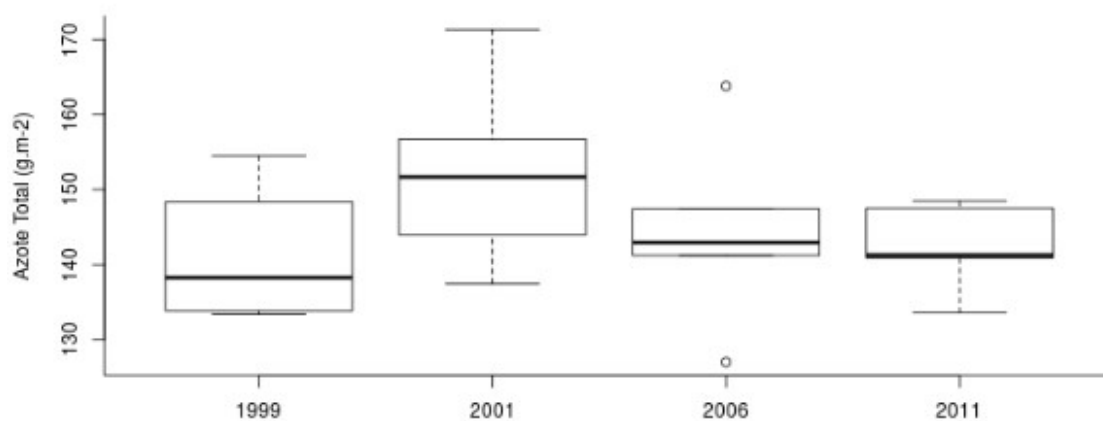


**GRUISSAN**

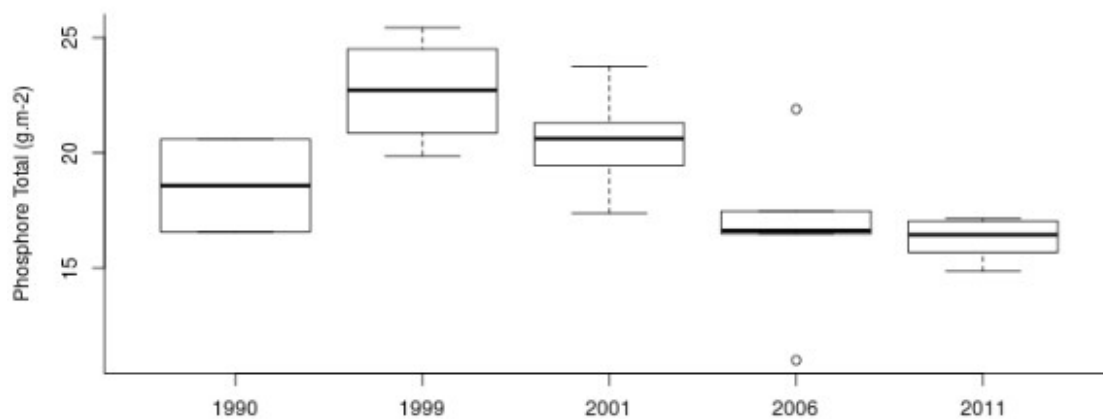


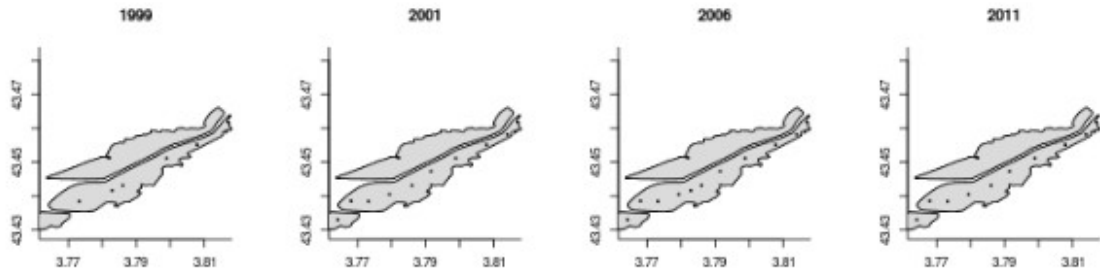


**INGRIL NORD**

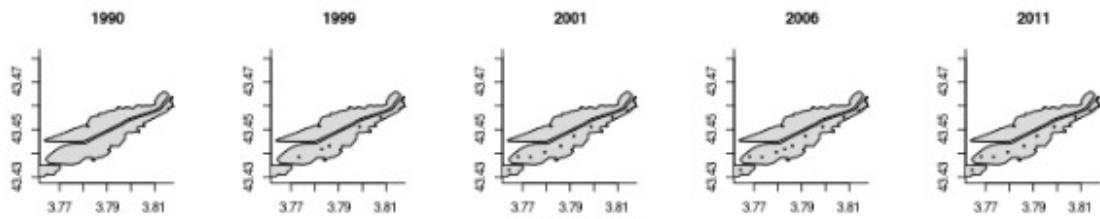
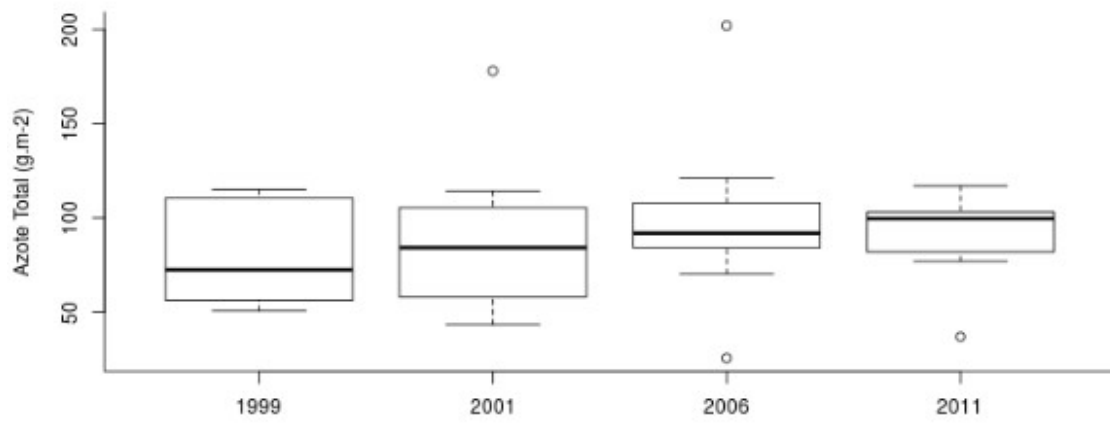


**INGRIL NORD**

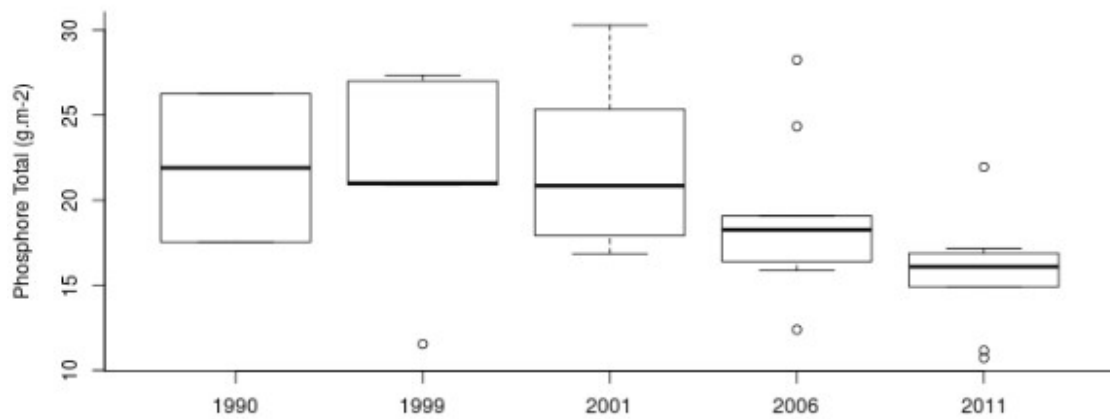




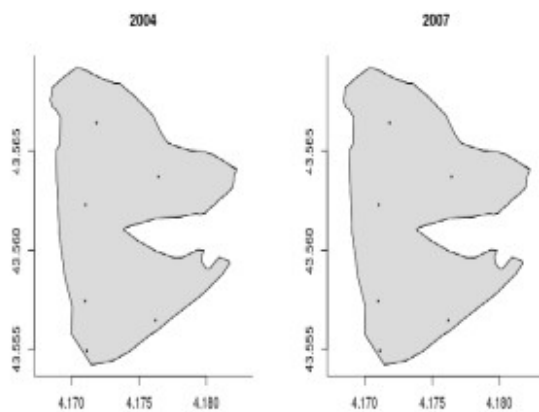
**INGRIL SUD**



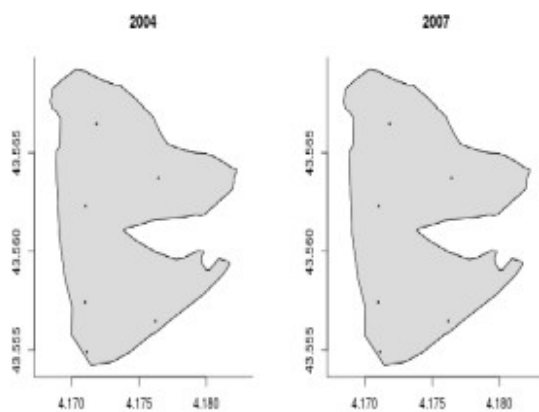
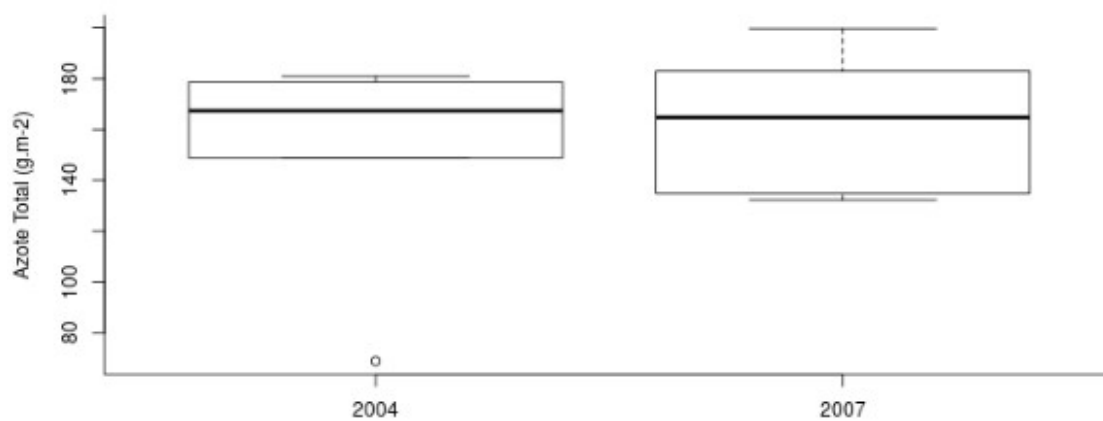
**INGRIL SUD**



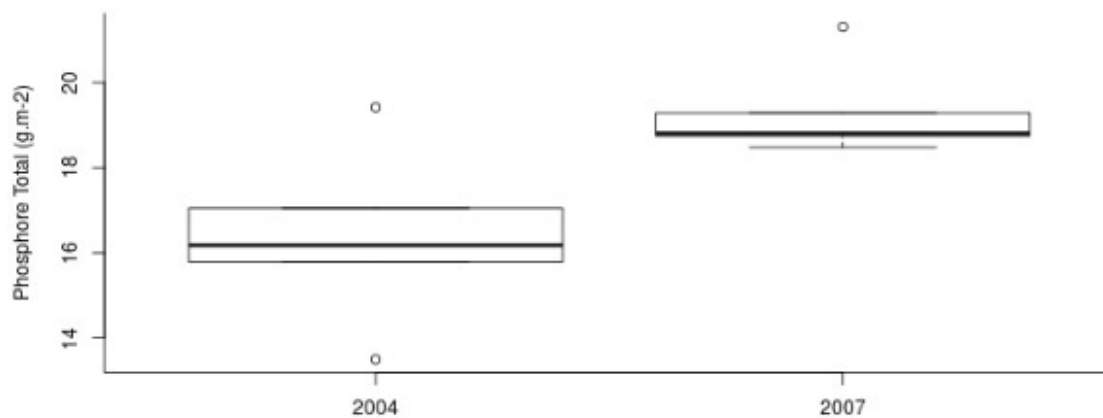


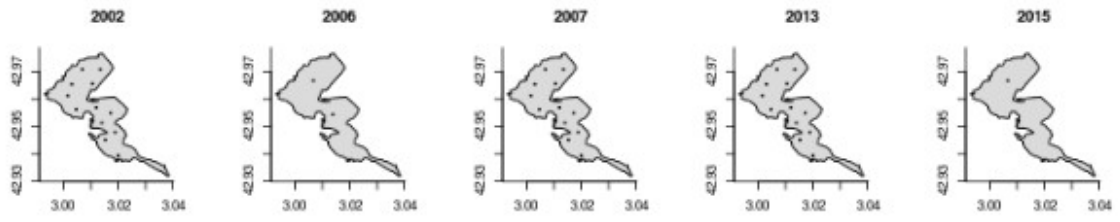


**LA MARETTE**

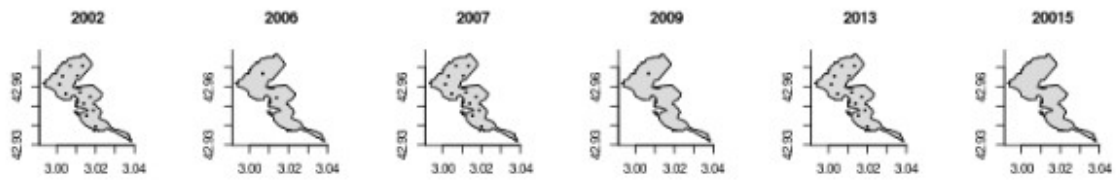
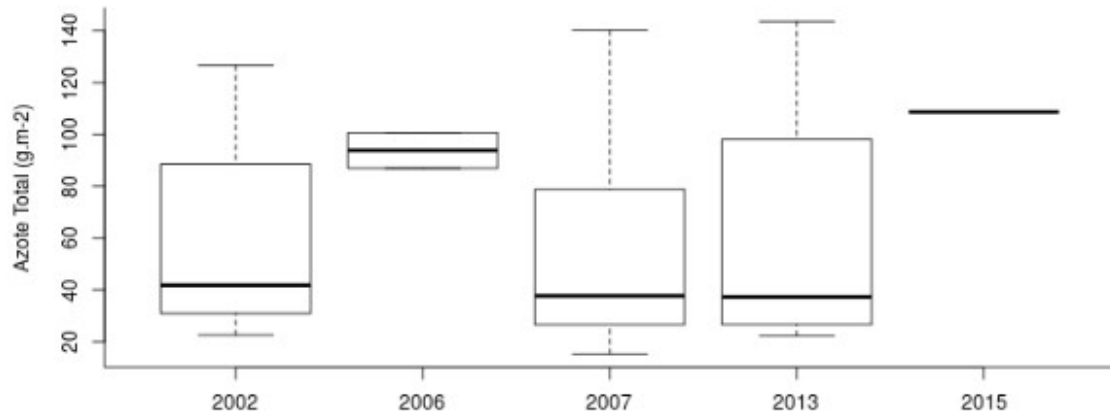


**LA MARETTE**

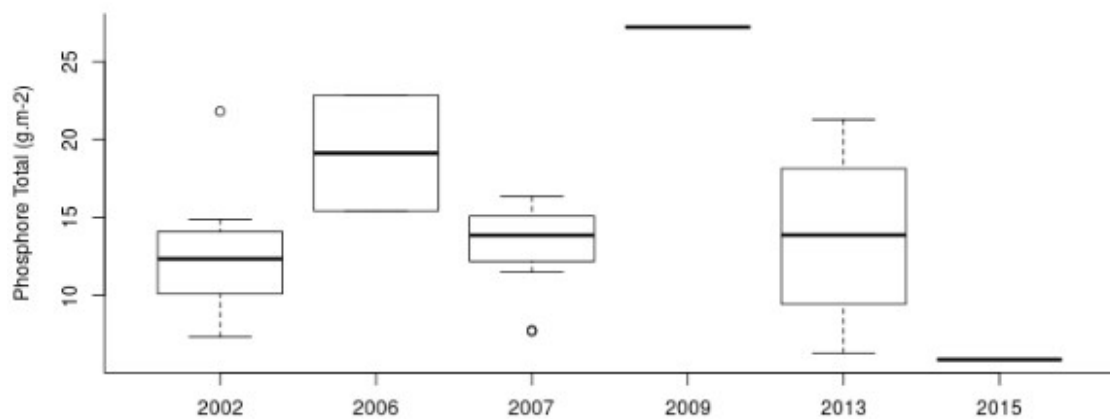


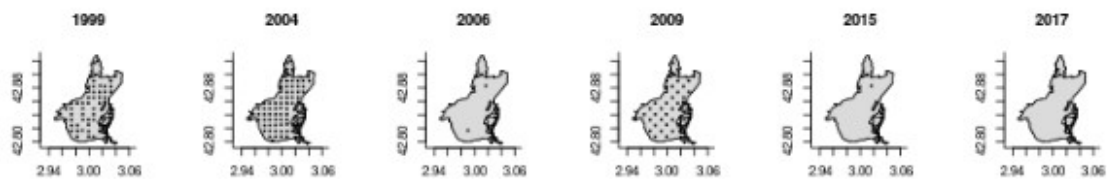


### LA PALME

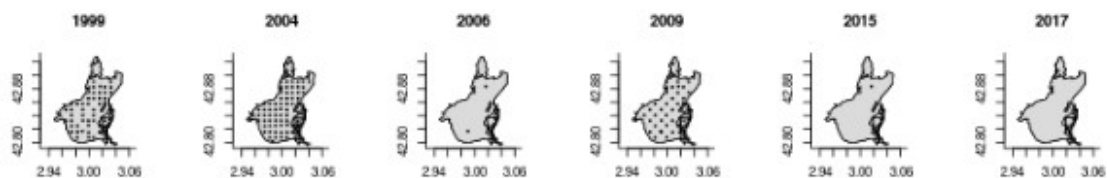
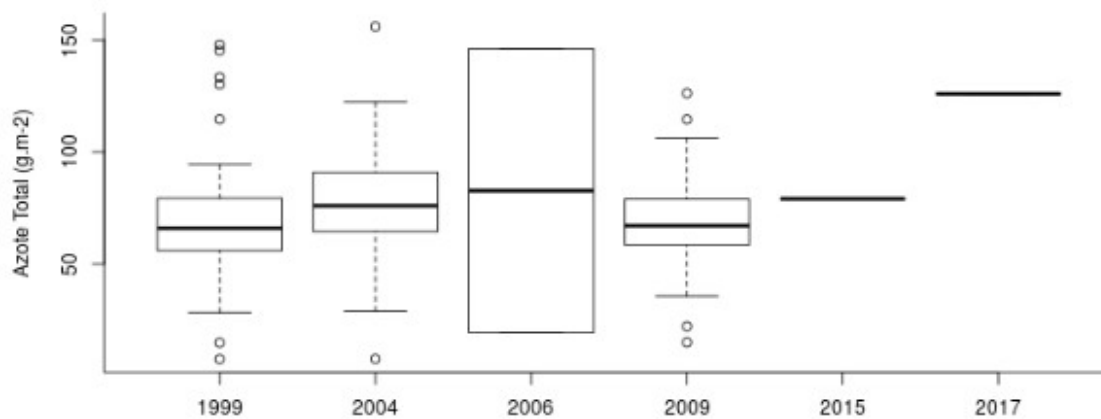


### LA PALME

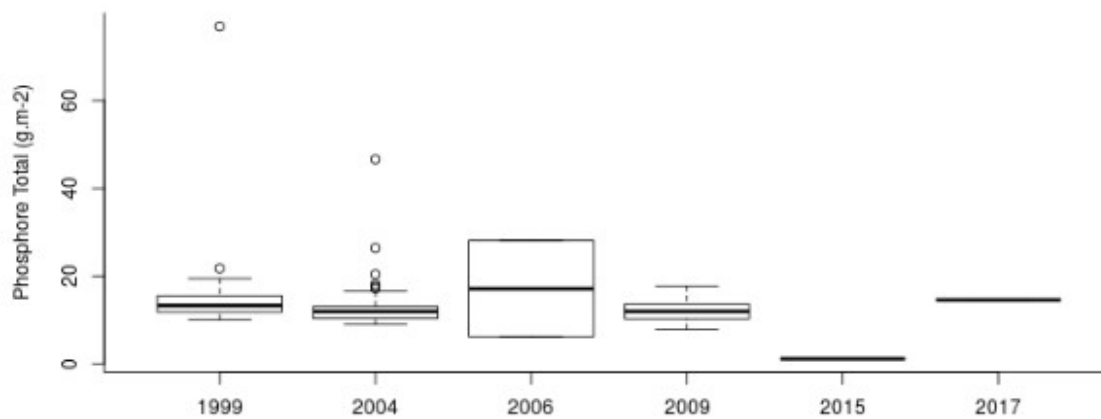




### LEUCATE

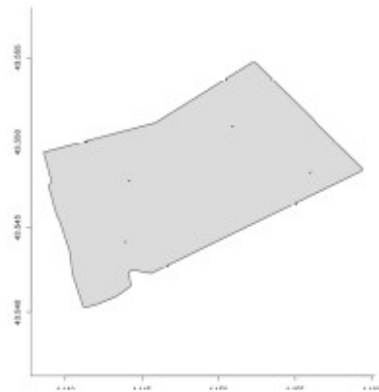
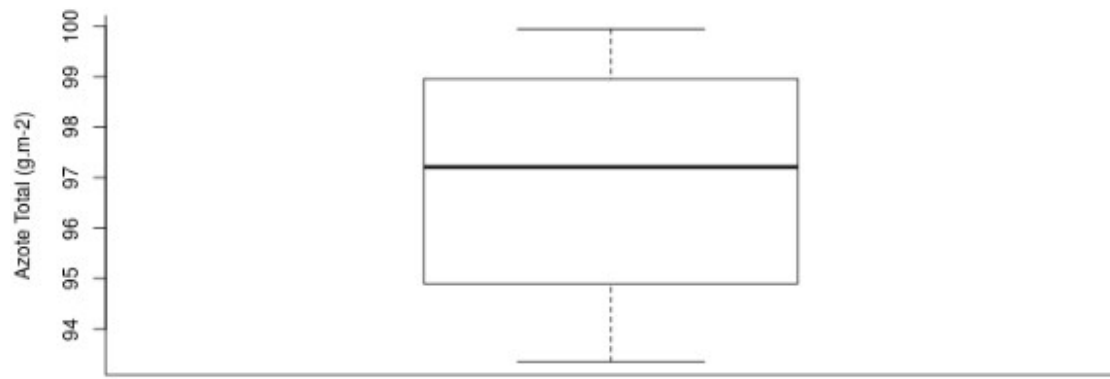


### LEUCATE

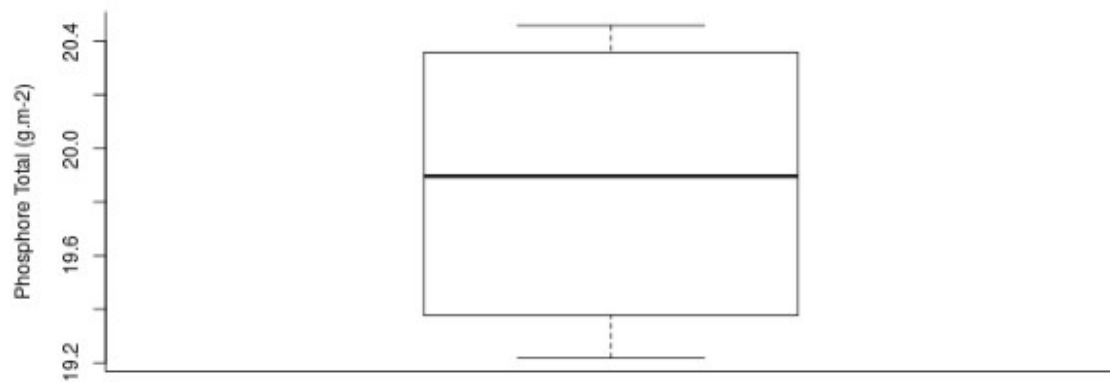


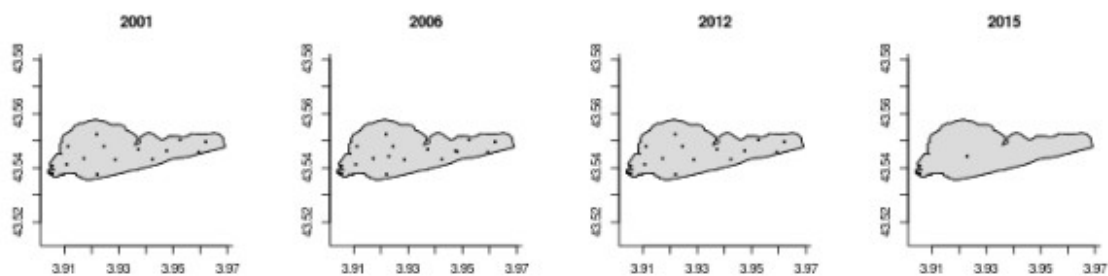


**MEDARD**

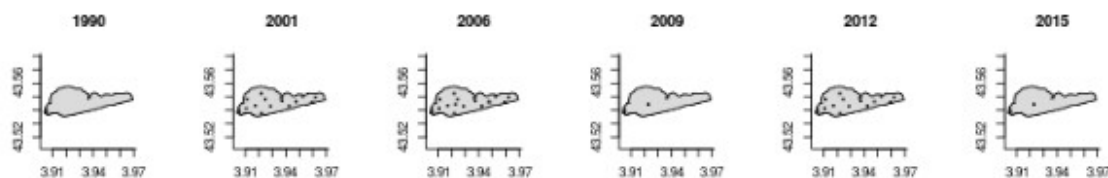
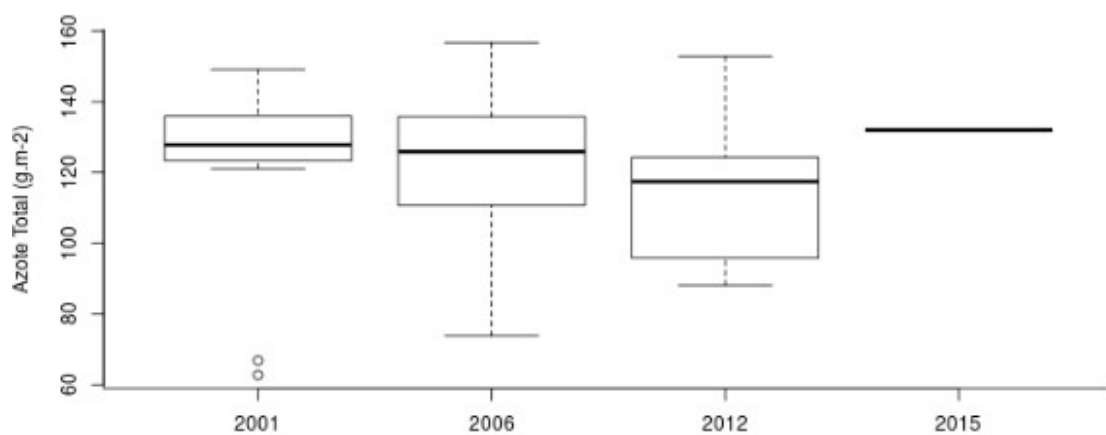


**MEDARD**

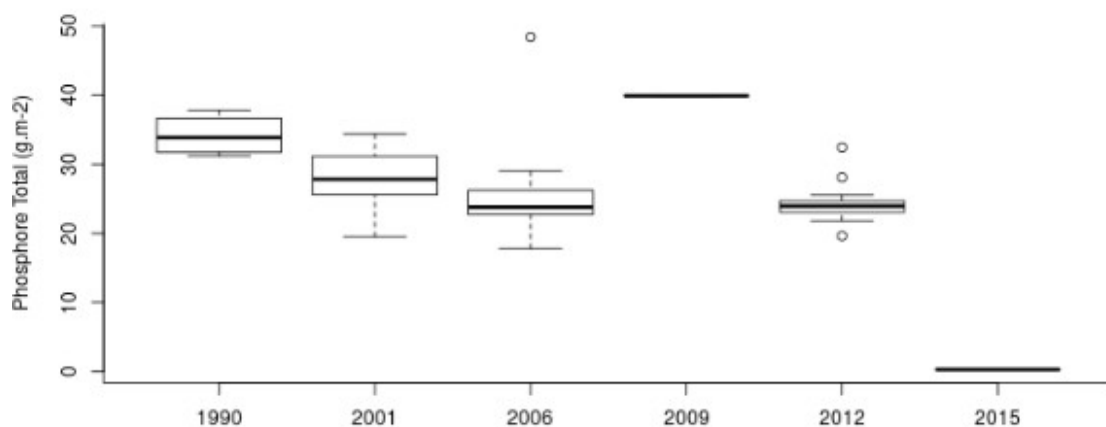


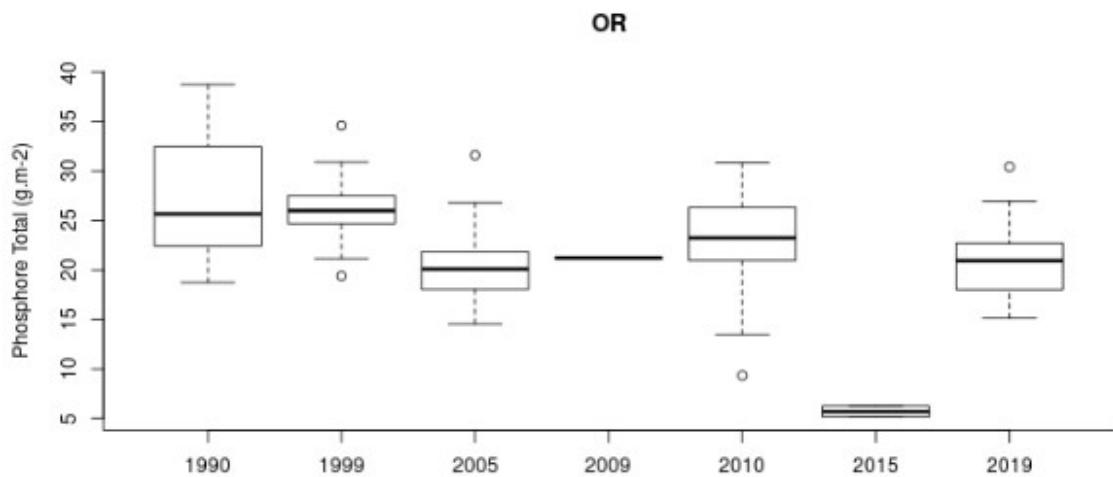
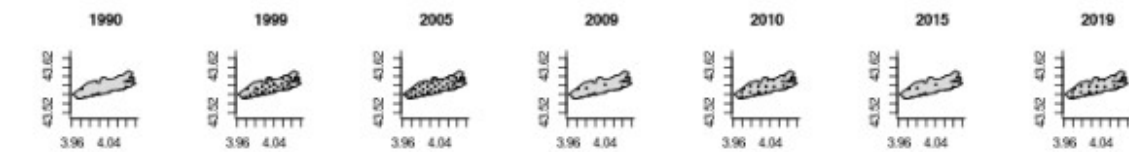
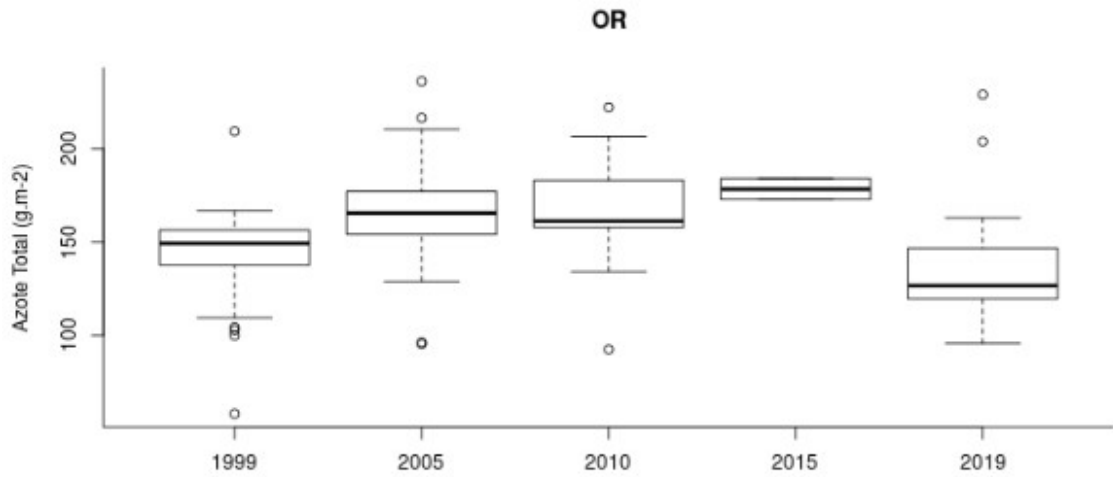
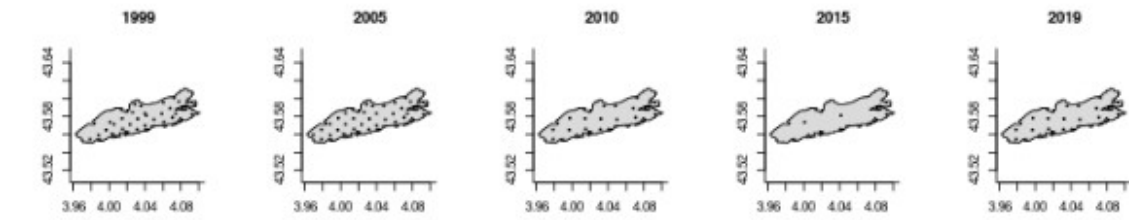


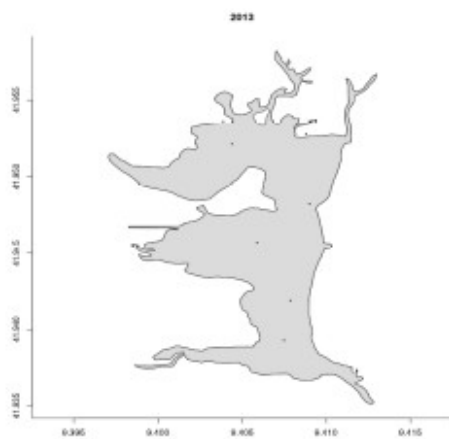
**MEJEAN**



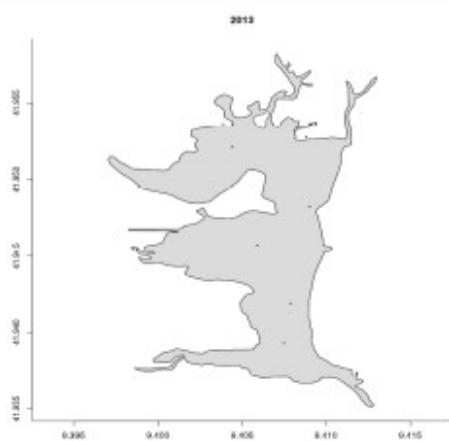
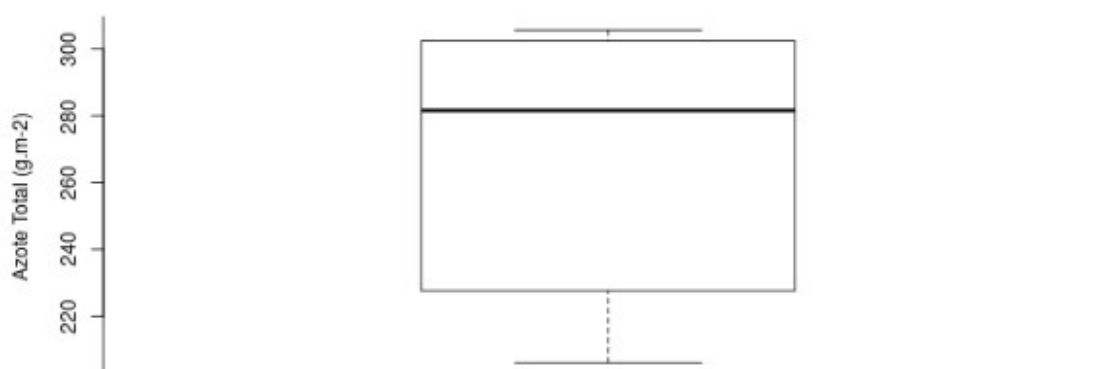
**MEJEAN**



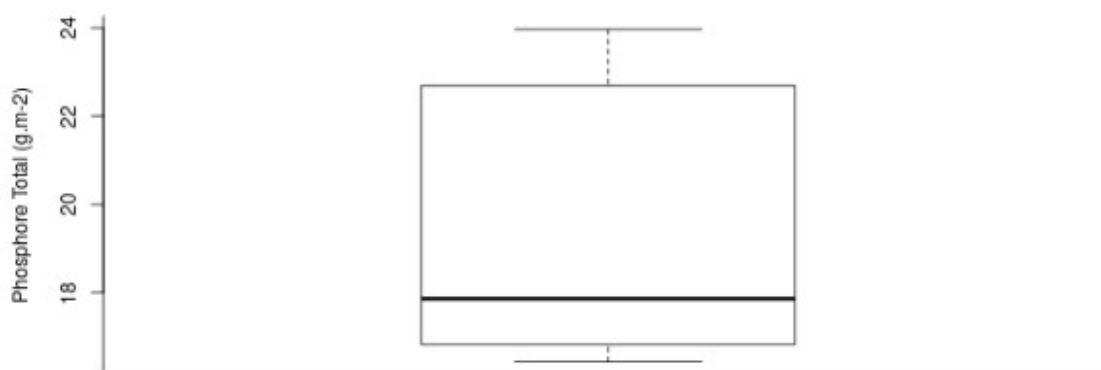




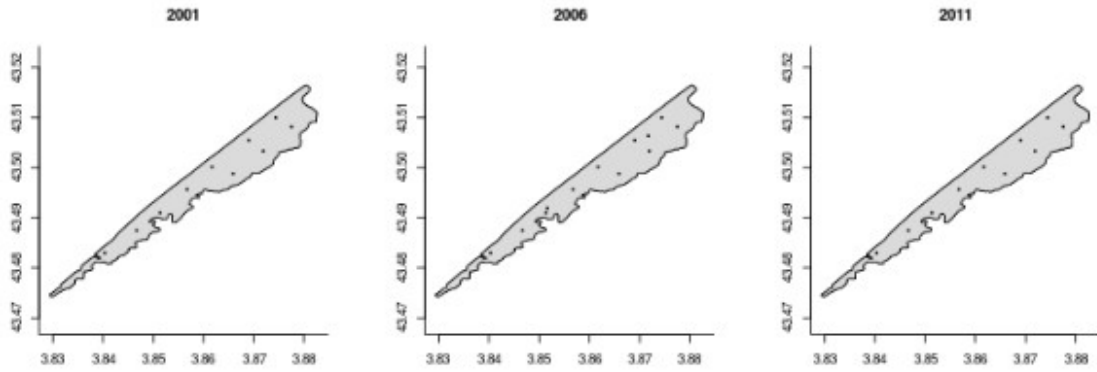
**PALO**



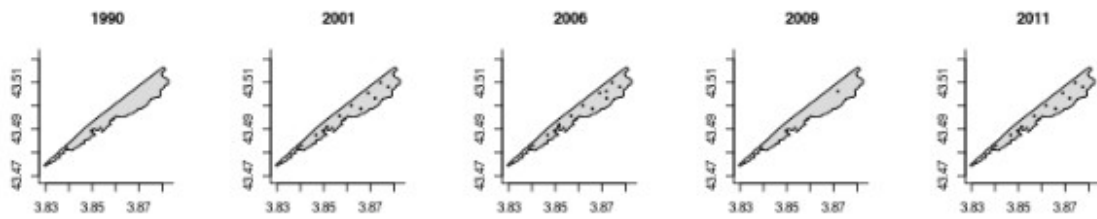
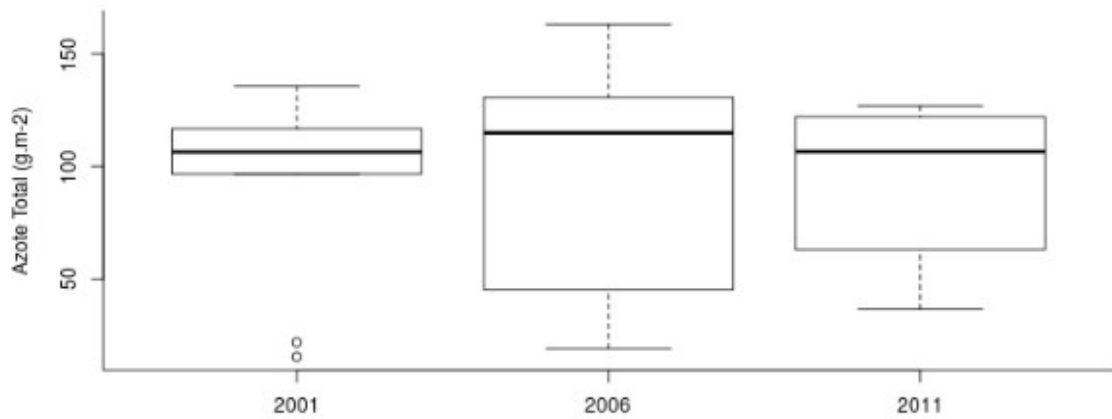
**PALO**



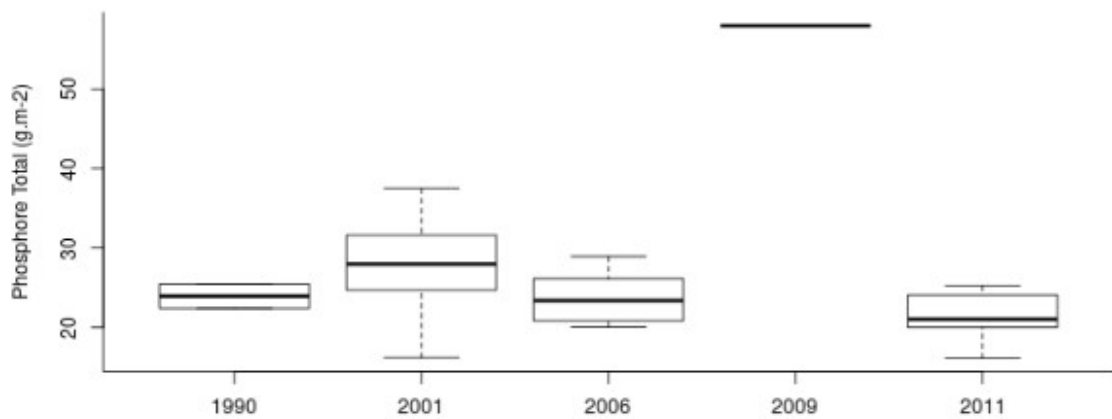


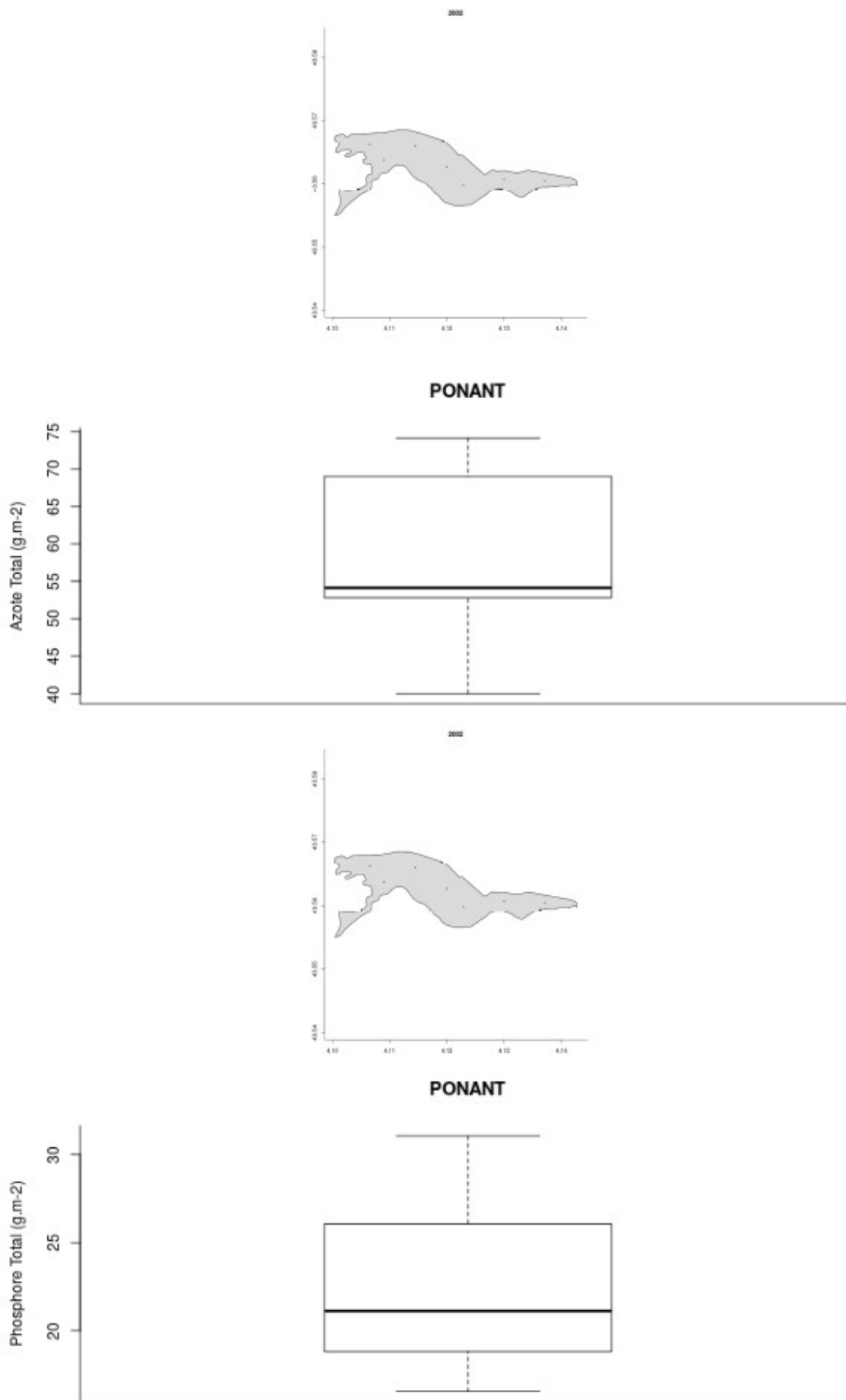


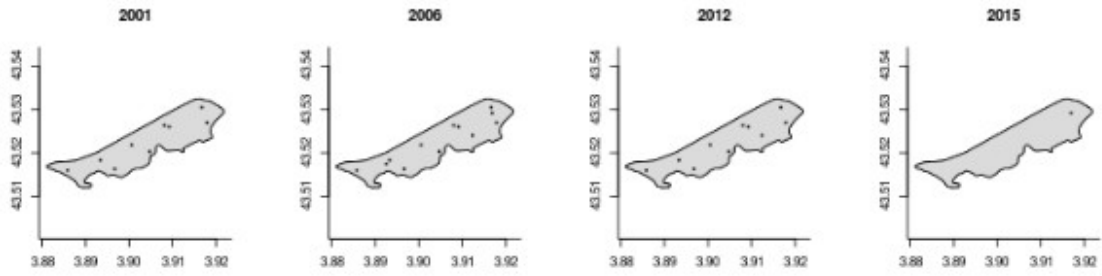
**PIERRE BLANCHE**



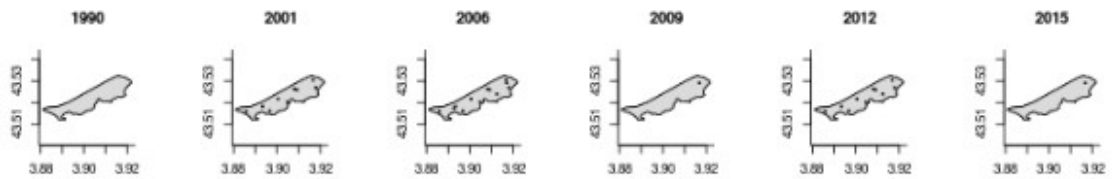
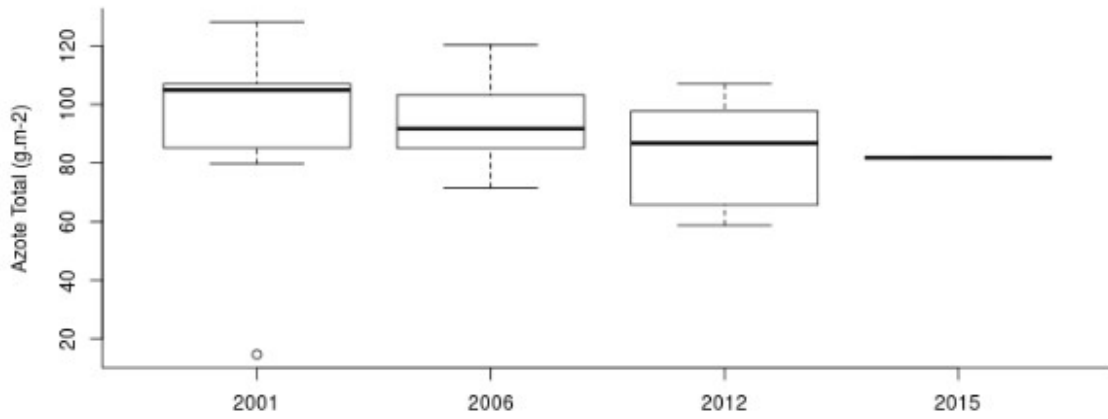
**PIERRE BLANCHE**



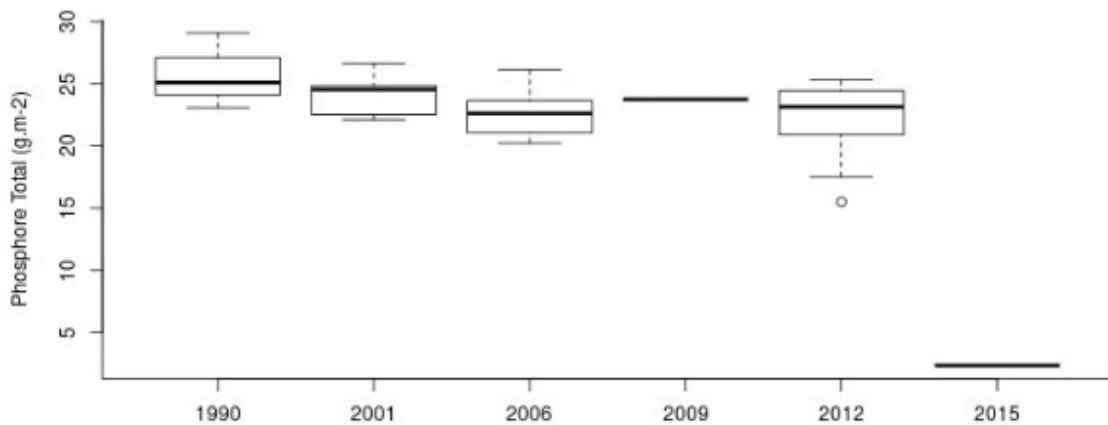


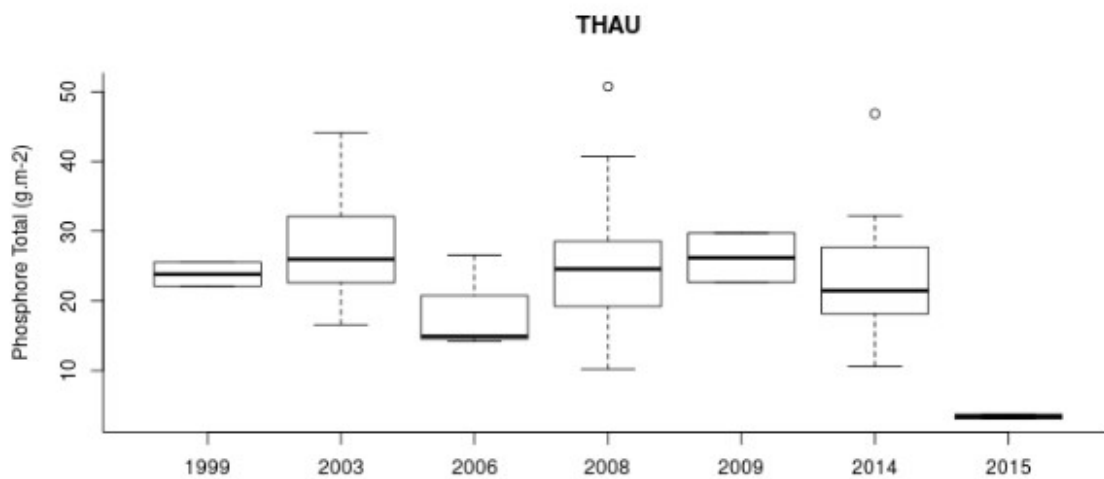
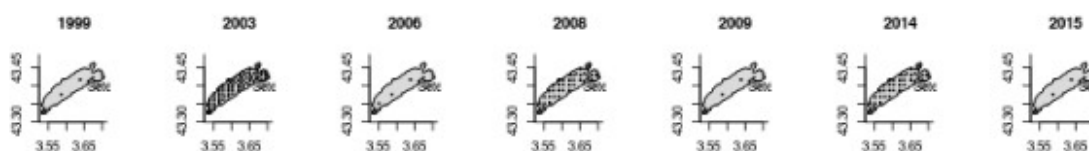
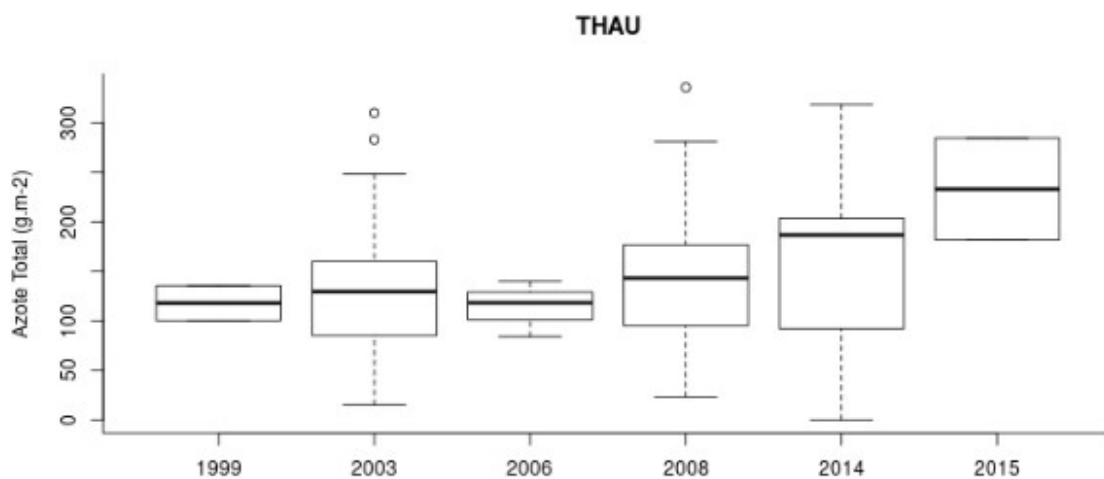
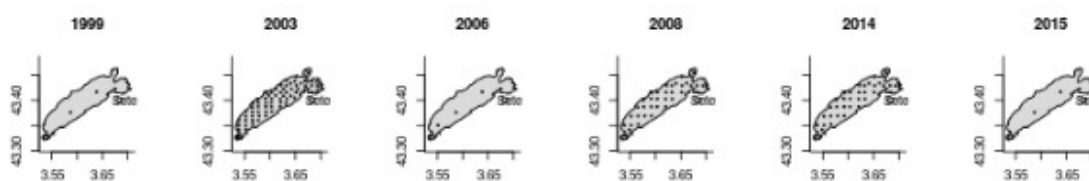


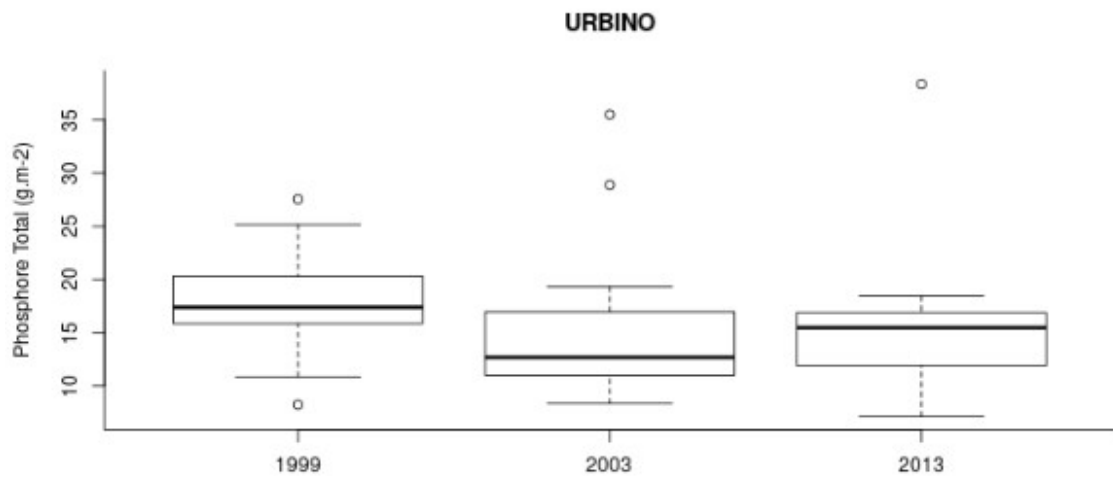
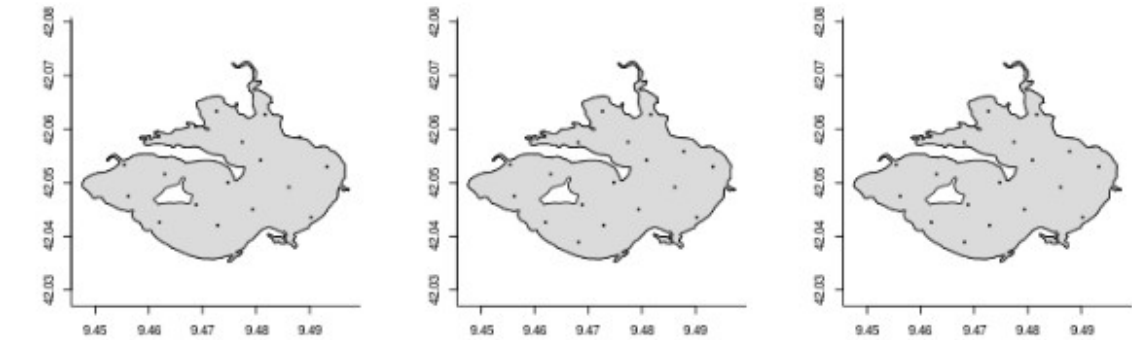
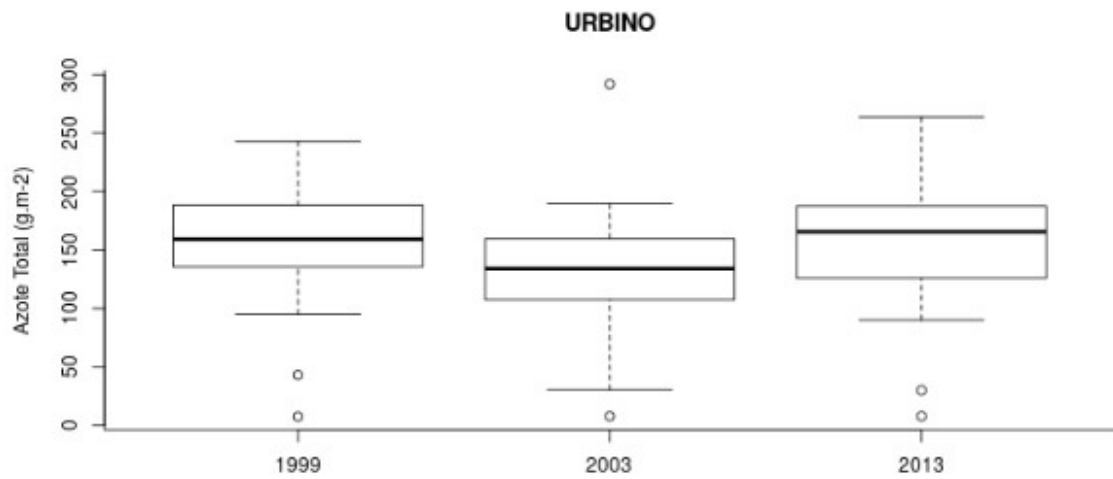
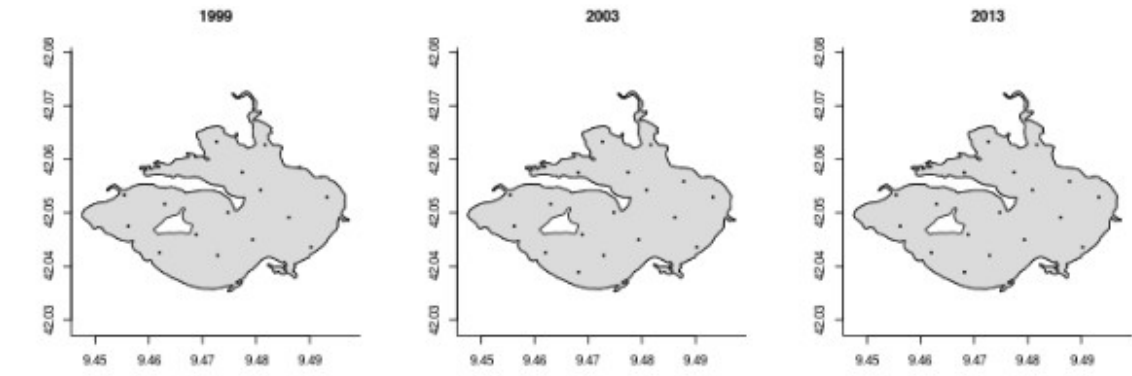
**PREVOST**

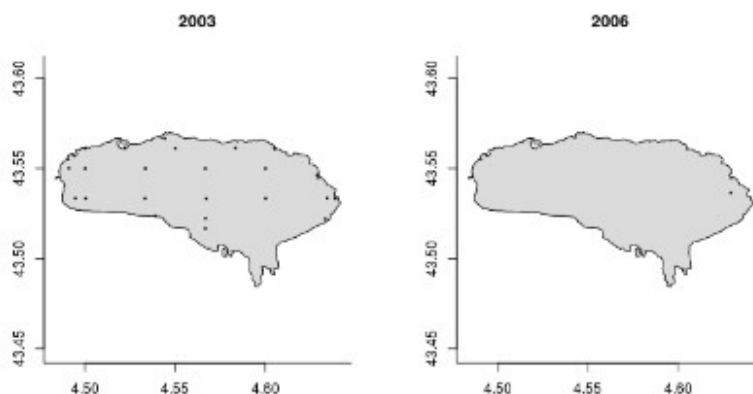


**PREVOST**

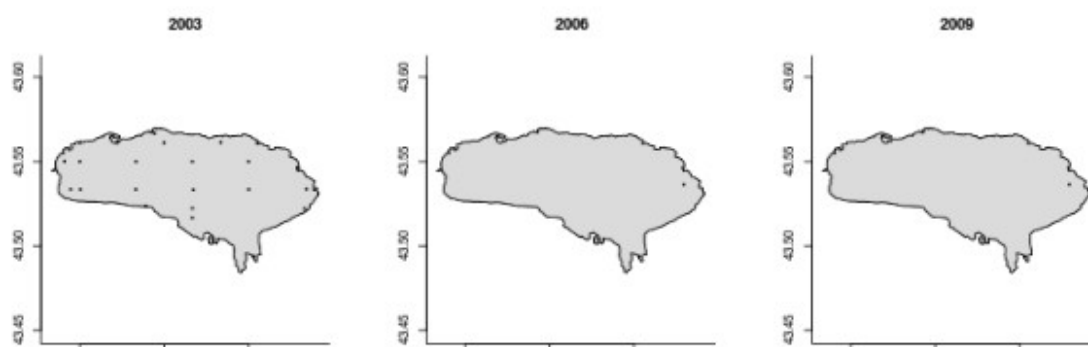
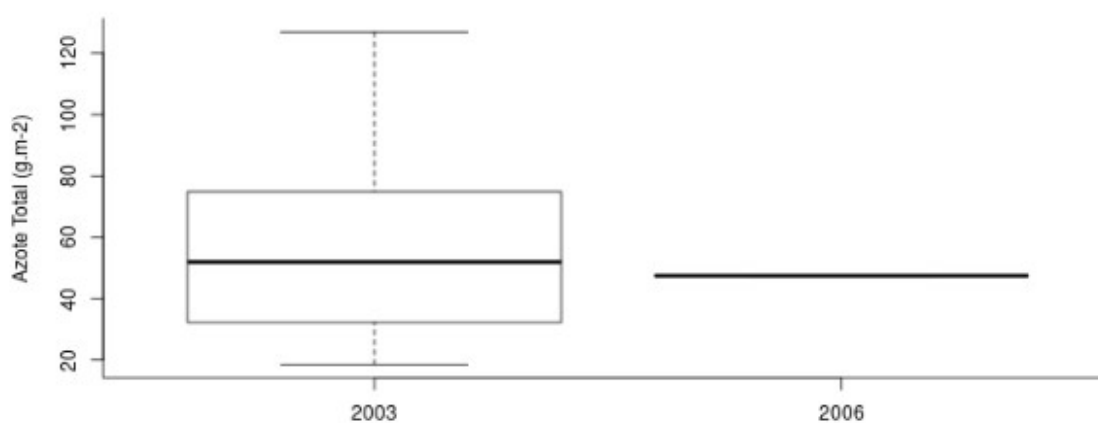




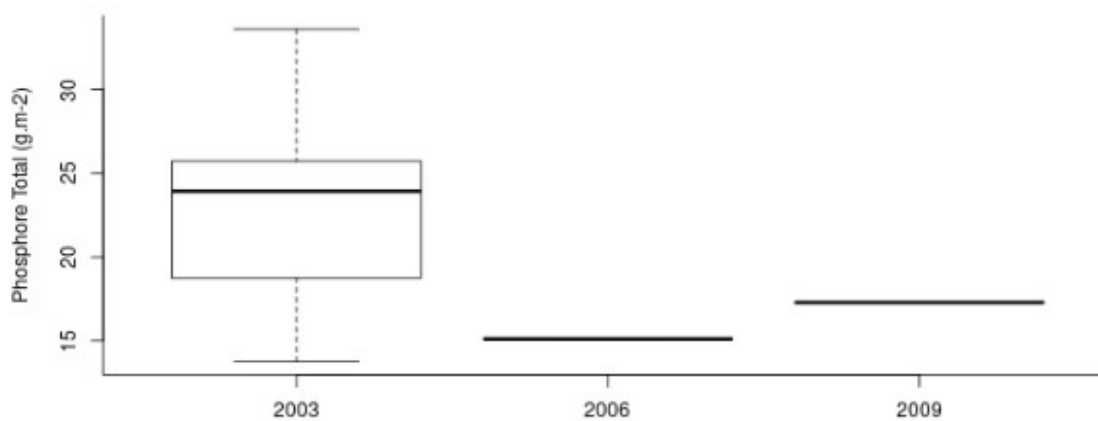


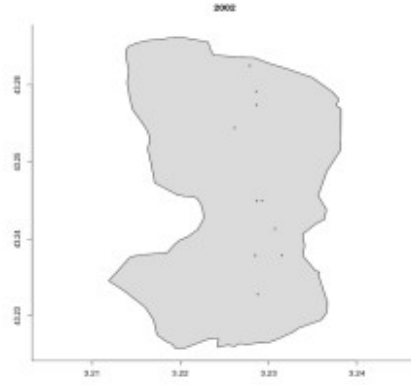


### VACCARES

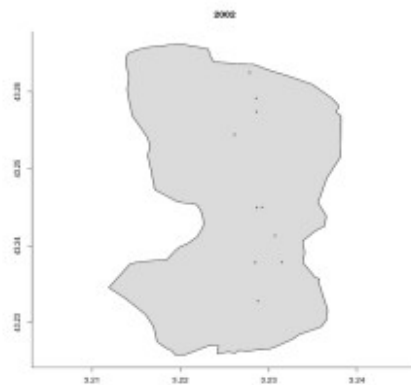
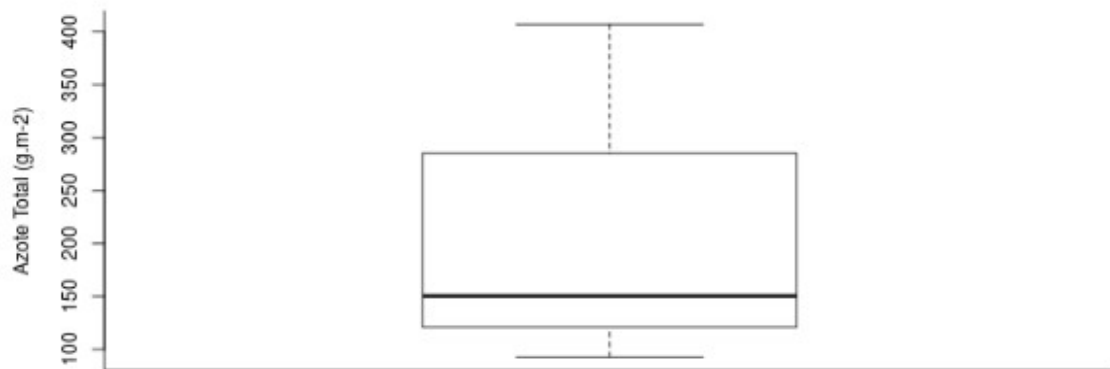


### VACCARES





**VENDRES**



**VENDRES**

