








|   |   |  |      |                            |
|---|---|--|------|----------------------------|
|  |  | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |   |  | Page | 1/177                      |

**Étude de connaissance des marées vertes du littoral Atlantique sous influence de la Loire et de la Vilaine**

*Mission B : Calage des outils de modélisation*

|                                 |   |   |   |     |  |           |  |
|---------------------------------|---|---|---|-----|--|-----------|--|
| <b>Objet</b>                    |   |   |   |     |  |           |  |
| <b>Rapport</b>                  |   |   |   |     |  |           |  |
| <b>Rédacteur</b>                |   |   | CEVA/Thierry PERROT   |     |  |           |  |
| <b>Liste de diffusion :</b>     |   |   |   |     |  |           |  |
| Nom                             |   | Structure   |   | Nom |  | Structure |  |
| Pierre TRABUC<br>Hélène LEGRAND |   | DREAL Pays de Loire<br>DREAL Pays de Loire  |   |     |  |           |  |
| <b>Visas</b>                    |   |   |   |     |  |           |  |
| Structure                       | CEVA  | CEVA  | DREAL   |     |  |           |  |
| Nom                             | Sylvain Ballu   | Nadège ROSSI  | Hélène LEGRAND  |     |  |           |  |
| Qualité                         | Chef Projet   | Responsable qualité   | Pilotage Etude  |     |  |           |  |
| Visa                            |  |  |  |     |  |           |  |



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|  <br>PRÉFET<br>DE LA RÉGION<br>PAYS DE LA LOIRE | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 2/177                      |

## SOMMAIRE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCTION.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1. EMPRISE ET DEFINITION DU MODELE GENERAL DE RANG 0 ET DES DEUX MODELES DE RANG 1 « LOIRE-VILAINE » ET « SABLES D'OLONNE-ILE DE RE » .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>2. ETUDE AU MOYEN DU MODELE MARS2D DES TRANSFERTS DE BIOMASSE DEPUIS LES ZONES POTENTIELLES DE CROISSANCE VERS LE HAUT DE PLAGE .....</b>  | <b>15</b> |
| 2.1. ELABORATION DE LA CONDITION INITIALE EN ULVES .....  | 15        |
| 2.2. STRATEGIE DE MODELISATION APPLIQUEE AU TRANSPORT ALGAL .....   | 17        |
| 2.3. CONDITIONS DE SIMULATIONS .....  | 18        |
| 2.4. RESULTATS.....   | 19        |
| 2.4.1. <i>Modèle de rang 1 « Loire-Vilaine »</i> .....  | 19        |
| 2.4.2. <i>Modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré »</i> .....  | 24        |
| 2.4.3. <i>Conclusions</i> .....   | 28        |
| <b>3. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE ECO-MARS3D.....</b>  | <b>33</b> |
| 3.1. PRESENTATION DU MODELE ECO-MARS3D .....  | 33        |
| 3.2. DESCRIPTION DES DONNEES DE FORÇAGE APPLIQUEES AU MODELE DE RANG 0 ET AUX DEUX MODELES DE RANG 1 .....  | 37        |
| 3.2.1. <i>Données de flux</i> .....   | 37        |
| 3.2.2. <i>Séries de forçage en phosphore particulaire, adsorbé et en azote organique</i> .....  | 45        |
| 3.2.2.1. Estuaires de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre-Niortaise et du Lay .....  | 45        |
| 3.2.2.2. Série en phosphore dissous pour l'estuaire de la Loire .....   | 48        |
| 3.2.2.3. Autres exutoires et station d'épuration .....  | 48        |
| 3.2.3. <i>Données satellitaires pour les matières en suspension</i> .....   | 49        |
| 3.2.4. <i>Données aux limites marines</i> .....   | 52        |
| 3.2.5. <i>Valeurs des flux sédimentaires</i> .....  | 53        |
| 3.2.6. <i>Données météorologiques</i> .....   | 54        |
| 3.3. VALIDATION DES MODELES HYDRODYNAMIQUES DE RANG 1 « LOIRE-VILAINE » ET « SABLES D'OLONNE-ILE DE RE » .....  | 55        |
| 3.3.1. <i>Modèle de rang 1 « Loire-Vilaine »</i> .....  | 56        |
| 3.3.2. <i>Modèle de rang 1 « Sables-d'Olonne – Ile de Ré »</i> .....  | 60        |
| <b>4. METHODES UTILISEES POUR LA VALIDATION DES VARIABLES D'ETATS DES DEUX MODELES DE RANG 1 : TEMPERATURE, SALINITE, CHLOROPHYLLE A, MATIERES EN SUSPENSION, SELS NUTRITIFS ET QUOTAS EN AZOTE ET PHOSPHORE DES ULVES.....</b> | <b>64</b> |
| <b>5. CHOIX DES ANNEES SIMULEES.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>6. VALIDATION DU MODELE BIOGEOCHIMIQUE DE RANG 1 « LOIRE-VILAINE » SUR LES ANNEES METEO-CLIMATIQUES 2009 ET 2012 .....</b>   | <b>66</b> |
| 6.1. ANNEE 2009.....  | 66        |
| 6.1.1. <i>Données Quadrige<sup>2</sup></i> .....  | 66        |
| 6.1.2. <i>Données de la bouée MOLIT Vilaine</i> .....   | 81        |
| 6.1.3. <i>Données DDTM 44</i> .....   | 84        |
| 6.1.4. <i>Matières en suspension et chlorophylle a observées par satellite</i> .....  | 86        |
| 6.1.4.1. Taux de matières en suspension.....  | 86        |
| 6.1.4.2. Chlorophylle a .....   | 87        |
| 6.2. ANNEE 2012.....  | 88        |
| 6.2.1. <i>Données Quadrige<sup>2</sup></i> .....  | 88        |
| 6.2.2. <i>Données de la bouée MOLIT Vilaine</i> .....   | 102       |
| 6.2.3. <i>Données du GIP (Groupement d'Intérêt Public) Loire Estuaire</i> .....   | 104       |
| 6.2.4. <i>Données DDTM 56 et 44</i> .....   | 106       |
| 6.2.5. <i>Taux de matières en suspension et chlorophylle a observés par satellite</i> .....   | 112       |
| 6.2.5.1. Taux de matières en suspension.....  | 112       |
| 6.2.5.2. Chlorophylle a .....   | 113       |





# Document de référence (MB2)

|      |                            |
|------|----------------------------|
| Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
| Date | 04/06/14                   |
| Page | 3/177                      |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 6.2.6.    | <i>Quotas en azote et phosphore des ulves.....</i>  | 114        |
| 6.2.7.    | <i>Fraction de l'azote contenu dans les ulves pour le modèle rang 1 « Loire-Vilaine » sur l'année météo-climatiques 2009.....</i>             | 121        |
| <b>7.</b> | <b>VALIDATION DU MODELE BIOGEOCHIMIQUE DE RANG 1 « SABLES D'OLONNE – ILE DE RE » SUR LES ANNEES METEO-CLIMATIQUES 2009 ET 2012 .....</b>      | <b>128</b> |
| 7.1.      | ANNEE 2009 .....  | 128        |
| 7.1.1.    | <i>Données Quadrige<sup>2</sup>.....</i>  | 128        |
| 7.1.2.    | <i>Données DDTM17.....</i>  | 134        |
| 7.1.3.    | <i>Matières en suspension et chlorophylle a observées par satellite .....</i>   | 145        |
| 7.1.3.1.  | Taux de matières en suspension.....   | 145        |
| 7.1.3.2.  | Chlorophylle a .....  | 146        |
| 7.2.      | ANNEE 2012 .....  | 147        |
| 7.2.1.    | <i>Données Quadrige<sup>2</sup>.....</i>  | 147        |
| 7.2.2.    | <i>Données DDTM17.....</i>  | 152        |
| 7.2.3.    | <i>Matières en suspension et chlorophylle a observées par satellite .....</i>   | 163        |
| 7.2.3.1.  | Taux de matières en suspension.....   | 163        |
| 7.2.3.2.  | Chlorophylle a .....  | 164        |
| 7.2.4.    | <i>Quotas en azote et phosphore des ulves.....</i>  | 165        |
| 7.2.5.    | <i>Fraction de l'azote contenu dans les ulves pour le modèle rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » sur l'année météo-climatiques 2009.....</i> | 168        |
| 7.3.      | LIMITE D'UTILISATION DES OUTILS DE MODELISATION AU REGARD DES OBJECTIFS GENERAUX DE L'ETUDE   | 172        |
|           | <b>CONCLUSION .....</b>   | <b>174</b> |
|           | <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>   | <b>177</b> |



## FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Emprise géographique du modèle général de rang 0 et des deux modèles de détails de rang 1 .....  | 11 |
| Figure 2 : Bathymétrie du modèle général de rang 0 (taille de maille : 800 mètres).....   | 12 |
| Figure 3 : Bathymétrie du modèle général de rang 1 « Loire-Vilaine » (taille de maille : 250 mètres).....   | 13 |
| Figure 4 : Bathymétrie du modèle général de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (taille de maille : 250 mètres).....   | 14 |
| Figure 5 : Condition initiale des dépôts en algues vertes sur la zone intertidale et subtidale pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ».....  | 16 |
| Figure 6 : Condition initiale des dépôts en algues vertes sur le zone intertidale et subtidale pour le modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré ».....  | 17 |
| Figure 7 : Condition initiale du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » utilisée pour le transport particulaire.....  | 19 |
| Figure 8 : Evolution le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » du nuage de particules au bout de 3 et 5 jours de simulation par vent nul et dans des conditions de vent constant et modéré (30 km.h <sup>-1</sup> ) de secteur nord-ouest, ouest, sud-ouest, sud, sud-est, est et nord-est .....  | 23 |
| Figure 9 : Condition initiale du modèle de rang 1 «Sables d'Olonne-Ile de Ré» utilisée pour le transport particulaire .....   | 24 |
| Figure 10 : Evolution pour le modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » du nuage de particules au bout de 3 et 5 jours de simulation par vent nul et dans des conditions de vent constant et modéré (30 km.h <sup>-1</sup> ) de secteur nord-ouest, ouest, sud-ouest, sud, sud-est, est et nord-est.....                                   | 28 |
| Figure 11 : Cartes synthétiques maillées avec une maille de 125 m pour le modèle « Loire-Vilaine » (a) et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (b) des positions des particules ulves en superposant les résultats des huit situations de vent à t=2.5 jours de simulation. La légende correspond au nombre de particules dans une maille donnée ..... | 29 |
| Figure 12 : Compilation des dépôts en ulves provenant des données d'archives du Ceva à l'échelle du modèle « Loire-Vilaine » (a) et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (b). Les cercles rouges représentent les zones régulièrement touchées par des échouages d'algues vertes. Aucune information sur la façade ouest de l'île de Ré.....           | 30 |
| Figure 13 : Schéma conceptuel du modèle biogéochimique implanté dans ECO-MARS3D .....   | 34 |
| Figure 14 : Cartographie des huit classes sédimentaires selon la classification EUNIS pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ». ....  | 35 |
| Figure 15 : Cartographie des huit classes sédimentaires selon la classification EUNIS pour le modèle de rang 1 « Sables d'Olonne – Ile de Ré ». ....  | 36 |
| Figure 16 : Schéma de principe de la répartition du phosphore total en phosphore dissous et phosphore particulaire et phosphore adsorbé (les cases en rouge représentent les variables utilisées en entrée du modèle).....  | 45 |
| Figure 17 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire de la Loire)...  | 46 |
| Figure 18 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire de la Vilaine)   | 46 |
| Figure 19 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire de la Sèvre Niortaise).....  | 47 |







|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 5/177                      |

Figure 20 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire du Lay) .....47

Figure 21 : Série de forçage en phosphore dissous pour l'estuaire de la Loire déduite de la régression linéaire entre les mesures disponibles à Montjean et St Nazaire .....48

Figure 22 : Cartographie issue des données satellites du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Loire-Vilaine » .....50

Figure 23 : Evolution du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Loire-Vilaine » issue des données satellites (cf. figure précédente pour la localisation des 4 points fixes) .....50

Figure 24 : Cartographie issue des données satellites du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré-Vilaine » .....51

Figure 25 : Evolution du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré-Vilaine » issue des données satellites (cf. figure précédente pour la localisation des 4 points fixes) .....51

Figure 26 : Evolution en deux points fixes de la limite ouest du modèle général de rang 0 des valeurs des sels nutritifs issues des données d'archives 2009 du modèle Previmer et provenant d'une moyenne de 2000 à 2011 des mesures du réseau SOMLIT à Astan (figure de gauche : point situé au nord de la limite marine ouest du modèle de rang 0 et figure de droite : point situé au sud de la limite marine ouest du modèle de rang 0) .....53

Figure 27 : Zones vaseuses (en vert) où un relargage sédimentaire en N-NH<sub>4</sub> et P-PO<sub>4</sub> est prescrit dans les modèles de rang 1 « Loire-Vilaine » (figure de gauche) et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (figure de droite) .....54

Figure 28 : Localisation des points fixes utilisés pour la validation hydrodynamique des deux modèles de rang 1 « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » .....55

Figure 29 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe MOLIT Vilaine (2.65° W, 47.45° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des mesures de la bouée MOLIT (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009) .....57

Figure 30 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « Ouest-Loire » (2.407° W, 47.143° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009) .....57

Figure 31 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe MOLIT Vilaine (2.65° W, 47.45° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des mesures de la bouée MOLIT (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012) .....58



Figure 32 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « Ouest-Loire » (2.407° W, 47.143° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012) .....58

Figure 33 : Comparaison entre les roses de courants issues du modèle (à gauche) et celles provenant des cartes SHOM (à droite) au point fixe « Pts courant modèle Loire-Vilaine » (2.66° W, 47.11° N) .....59

Figure 34 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au fixe Ouest Bourgenay (1.45° W, 46.39° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009) .....61

Figure 35 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « nord-ouest Ile de Ré » (1.65° W, 46.28° N) entre la



|  |   |      |                            |
|--|---|------|----------------------------|
|  <br><small>LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE</small> | <h2 style="margin: 0;">Document de référence<br/>(MB2)</h2> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|  |   | Date | 04/06/14                   |
|  |   | Page | 6/177                      |

solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009).....61

Figure 36 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « Ouest Bourgenay » (1.45° W, 46.39° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012).....62

Figure 37 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « nord-ouest Ile de Ré » (1.65° W, 46.28° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012).....62

Figure 38 : Comparaison entre les roses de courants issues du modèle et celles provenant des cartes SHOM au point fixe « Pts courant modèle Sables d'Olonne-Ile de Ré » (2.66° W, 47.11° N) .....63

Figure 39 : Exemple de diagramme normalisé de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures .....64

Figure 40 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrige pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).....68

Figure 41 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).....81

Figure 42 : Moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b) .....86

Figure 43 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension (mg.l<sup>-1</sup>) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....86

Figure 44 : Moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b) .....87

Figure 45 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* (µg.l<sup>-1</sup>) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée .....87

Figure 46 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrige pour la température (a) et la salinité (b) pour la couche de surface. Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).....89

Figure 47 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrige pour la température (a) et la salinité (b) pour la couche de fond. Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).....90

Figure 48 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).....102

Figure 49 : Evolution simulée et mesurée à la station de Donges de la température de la salinité en surface.....104

Figure 50 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).....105

Figure 51 : Moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b) .....112

Figure 52 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension (mg.l<sup>-1</sup>) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....112





|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|  <br><small>États &amp; Qualité &amp; Environnement</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE</small> | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 7/177                      |

Figure 53 : Moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b) .....113

Figure 54 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....113

Figure 55 : Condition initiale des dépôts en algues vertes pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » intégrant le plateau du Four, de la Banche et les îlots des Evens et de Baguenaud. ....114

Figure 56 : Secteurs d'échouages retenus dans la mission MB3 .....121

Figure 57 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves à l'échelle du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....123

Figure 58 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 2 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....123

Figure 59 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 3 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....124

Figure 60 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 4 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....124

Figure 61 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 5 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....125

Figure 62 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 6 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....125

Figure 63 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 7 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....126

Figure 64 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 8 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....126

Figure 65 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrigé pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE) .....129

Figure 66 : Moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b) .....145

Figure 67 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....145

Figure 68 : Moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b) .....146

Figure 69 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....146

Figure 70 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrigé pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE). .....147

Figure 71 : Moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b) .....163





|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 8/177                      |

Figure 72 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....163

Figure 73 : Moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b) .....164

Figure 74 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).....164

Figure 75 : Secteurs d'échouages retenus dans la mission MB3 .....168

Figure 76 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves à l'échelle du modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....169

Figure 77 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 9 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....169



Figure 78 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 10 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....170

Figure 79 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 11 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite) .....170

Figure 80 : Evolution de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 12 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite).....171







|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 9/177                      |

## TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1 : Synthèse à t=2.5 jours de la répartition des particules ulves par rapport aux dépôts observés par le Ceva et pour l'ensemble du nuage de particules.....   | 31  |
| Tableau 2 : Description des huit classes sédimentaires EUNIS retenues dans les deux modèles de rang 1.....   | 35  |
| Tableau 3 : Caractéristiques des données de débit pour la Gironde et la Charente.....  | 37  |
| Tableau 4 : Synthèse des exutoires et des séries de substances utilisées pour le forçage du modèle de rang 0 (« Exutoire_10 » correspond à la Vilaine ; « Exutoire_21 » à la Sèvre Nantaise; « Exutoire_84 » au Lay ; « Exutoire_312 » à la Loire et « Exutoire_311 » à la Sèvre Niortaise). Débit et concentration exprimés en valeurs moyennes de 2009 à 2012 inclus .....   | 38  |
| Tableau 5 : Synthèse des exutoires et des séries de substances utilisées pour le forçage du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ». (« Exutoire_10 » correspond à la Vilaine ; « Exutoire_21 » à la Sèvre Nantaise; « Exutoire_84 » au Lay ; « Exutoire_312 » à la Loire et « Exutoire_311 » à la Sèvre Niortaise). Débit et concentration exprimés en valeurs moyennes de 2009 à 2012 inclus...   | 40  |
| Tableau 6 : Synthèse des exutoires et des séries de substances utilisées pour le forçage du modèle de rang 1 «Sables d'Olonne-Ile de Ré». (« Exutoire_84 » correspond au Lay ; « Exutoire_311 » à la Sèvre Niortaise). Débit et concentration exprimés en valeurs moyennes de 2009 à 2012 inclus .....   | 43  |
| Tableau 7 : Synthèse de la valeur K de la loi linéaire permettant de déduire le phosphore dissous à partir des mesures en phosphore total pour les estuaires de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre Niortaise et du Lay (valeurs ajustées sur les années 2009 à 2012 inclus).....   | 46  |
| Tableau 8 : Synthèse de la valeur moyenne estimée de 2009 à 2012 des séries reconstituées en phosphore dissous, phosphore particulaire (inorganique + organique) et phosphore adsorbé sur les estuaires de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre Niortaise et du Lay .....  | 48  |
| Tableau 9 : Décalage temporel moyen (en heure) entre les mesures de la banque de données Quadrigé <sup>2</sup> et les données du modèle « Loire-Vilaine » sur les années 2009 et 2012.....   | 65  |
| Tableau 10 : Localisation des stations Quadrigé <sup>2</sup> disponibles sur l'année 2009 et appartenant an modèle de rang 1 «Loire-Vilaine» (en bleu, les stations retenues pour la comparaison avec le modèle). T : Température, S : Salinité, Chla : Chlorophylle a, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : Nitrate, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : Ammonium, Si(OH) <sub>4</sub> : Silicium dissous, MES : Matières En Suspension.....                             | 67  |
| Tableau 11 : Localisation des stations Quadrigé <sup>2</sup> disponibles sur l'année 2012 et appartenant an modèle de rang 1 «Loire-Vilaine» (en bleu, les stations retenues pour la comparaison avec le modèle). T : Température, S : Salinité, Chla : Chlorophylle a, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : Nitrate, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : Ammonium, Si(OH) <sub>4</sub> : Silicium dissous, MES : Matières En Suspension.....                             | 88  |
| Tableau 12 : Localisation des stations Quadrigé <sup>2</sup> disponibles sur les années 2009 et 2012 et appartenant an modèle de rang 1 « Sables d'Olonne – ile de Ré » (en bleu, les stations retenues pour la comparaison avec le modèle). T : Température, S : Salinité, Chla : Chlorophylle a, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : Nitrate, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : Ammonium, Si(OH) <sub>4</sub> : Silicium dissous, MES : Matières En Suspension ..... | 128 |
| Tableau 13 : Localisation des stations provenant du réseau de surveillance DCE (stations « IM ») et de la DDTM17 (stations « IS ») retenues pour la comparaison entre les mesures et le modèle pour l'année 2009 et pour les variables : température, salinité, matière en suspension, nitrate, ammonium et phosphate .....  | 134 |
| Tableau 14 : Localisation des stations provenant du réseau de surveillance DCE (stations « IM ») et de la DDTM17 (stations « IS ») retenues pour la comparaison entre les mesures et le modèle pour l'année 2012 et pour les variables : température, salinité, matière en suspension, nitrate, ammonium et phosphate .....  | 152 |



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|  <br>PRÉFET<br>DE LA RÉGION<br>PAYS DE LA LOIRE | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 10/177                     |

## INTRODUCTION

La mission MB2 a pour objectif de procéder au calage et à la validation du modèle ECO-MARS3D couplé au modèle Ulves développé par le Ceva depuis 2006 et de permettre son exploitation dans le cadre de scénarii de réduction des flux de nutriments. L'objectif de ces scénarii est de mesurer l'impact de la diminution plus ou moins drastique des flux de nutriments sur la biomasse totale produite en ulves (mission C).

La mission MB2 prévoit d'exposer en particulier :

- Les séries de données utilisées pour le calage des outils de modélisation,
- Les incertitudes et les limites de l'utilisation des outils de modélisation au regard des objectifs généraux de la présente étude,
- Les conditions auxquelles doivent satisfaire les données qui seront utilisées pour les simulations prévues dans le cadre du présent CCTP.



En préambule à la mise en place de l'outil de modélisation, il est important de rappeler que la mission A a mis en évidence la spécificité du type de marée verte qui se développe sur le secteur d'étude. Il s'agit d'une **marée verte dite d'arrachage** dont la phase principale de développement ne se déroule plus sous forme exclusivement dérivante comme les marées vertes classiques des grandes baies bretonnes mais passe par une étape de recolonisation annuelle de la zone estran /petits fonds sous forme de **populations d'algues vertes fixées** en mélange plus ou moins hétérogènes avec les grandes algues de ceinture. Dans ce contexte de type de marées vertes et en l'absence de modèle de transport capable de stabiliser hydrodynamiquement des masses d'algues dérivantes dans les secteurs observés pour leur croissance, le choix a été fait de fixer les ulves au niveau des secteurs potentiels de croissance sur les platiers rocheux. La structure du modèle « Ulves » mis en place dans le cadre de la présente étude tient compte de ces observations et a donc pour principe de fixer les biomasses en croissance sur les platiers rocheux des secteurs d'étude.

Sur le plan des scénarii de réduction des flux de nutriments, la méthodologie retenue induit comme hypothèse que **tout abattement de la production sur les platiers se traduira par une diminution proportionnelle de la pression moyenne dans les échouages de haut de plage** (même en cas de faible reprise de croissance dans l'eau). Notons que pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment (module de transport insuffisant), les précédentes études réalisées par le Ceva sur les grands sites à marées vertes bretons fixaient également les dépôts en ulves non pas sur les platiers rocheux mais sur la zone d'estran. La différence majeure entre les deux approches tient dans la distribution initiale des ulves. Dans les sites bretons, la cartographie repose sur des données pluriannuelles observées (statistique des dépôts fiable) tandis que sur le secteur d'étude, elle mélange à la fois des données observées en 2013 et des données prédictives (cf. description § 2.1).

Afin de répondre au mieux aux exigences du CCTP, un module de transport bidimensionnel permettant de transporter un grand nombre de particules algales a toutefois été utilisé pour relier les zones de production d'algues à leurs secteurs d'échouage et conforter en retour le découpage des sites prévus dans la mission MB3.





|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 11/177                     |

## 1. Emprise et définition du modèle général de rang 0 et des deux modèles de rang 1 « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré »

L'outil de modélisation hydrodynamique utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle MARS3D (3D hydrodynamical Model for Application at Regional Scale) développé par Ifremer (Lazure et Dumas, 2008). Ce dernier utilise le principe des emprises emboîtées sous forme gigogne : un modèle général englobe l'ensemble de la zone d'étude et définit les conditions ambiantes nécessaires au fonctionnement du modèle de détail d'ampleur géographique plus réduite et de précision plus fine et destiné à répondre à la problématique posée. Au vu de l'étendue de la zone géographique à couvrir (des communes de Sarzeau à la Flotte-en-Ré), cette mission a nécessité le développement de deux modèles de détail alimentés pour chacun d'eux par le modèle général de rang 0. Les emprises géographiques des trois modèles hydrodynamiques développés dans le cadre de la mission MB2 sont décrites en Figure 1.

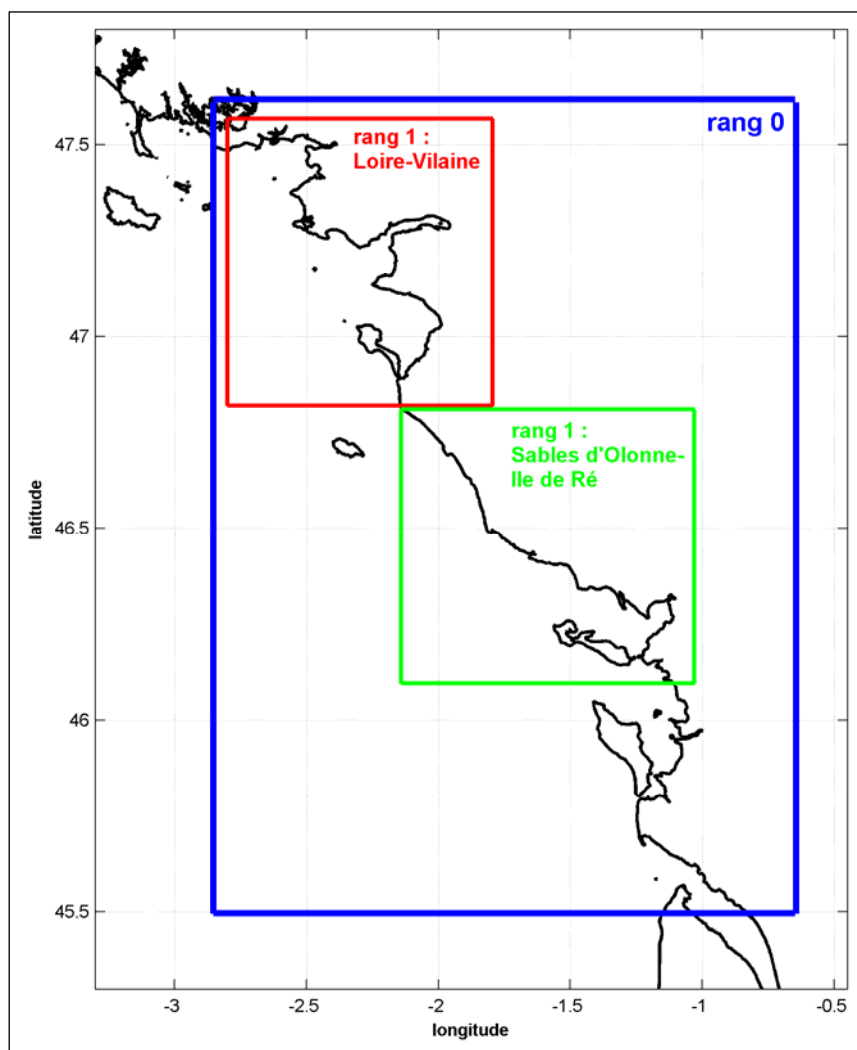


Figure 1 : Emprise géographique du modèle général de rang 0 et des deux modèles de détails de rang 1



L'ensemble des modèles ont été créés au moyen des données issues des catalogues de l'Ifremer et des données à haute résolution fournies par le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Loire Estuaire s'agissant de la bathymétrie de la Loire. Le modèle général de **rang 0** dispose d'une **résolution de 800 m** et s'étend en latitude du nord du Golfe du Morbihan au sud immédiat de la Gironde (Figure 2). Il est forcé aux frontières ouvertes à partir de huit constituants de marée diurnes et semi-diurnes. Le découpage géographique de ce modèle a été contraint pour sa limite sud ouest par la proximité du talus continental au niveau du coin sud-ouest du modèle et par la présence des îles d'Houat et de Hoëdic sur sa frontière ouest. Pour une représentation correcte des phénomènes hydrodynamiques et également pour des questions de stabilité du modèle sur le plan numérique, il est en effet préférable de s'affranchir d'une part, de l'importante rupture bathymétrique liée à la pente du talus continental et d'autre part, de la présence sur une des frontières ouvertes du modèle (limite marine ouest) de mailles à très petits fonds avec présence potentielle de zones découvrantes aux basse mers.

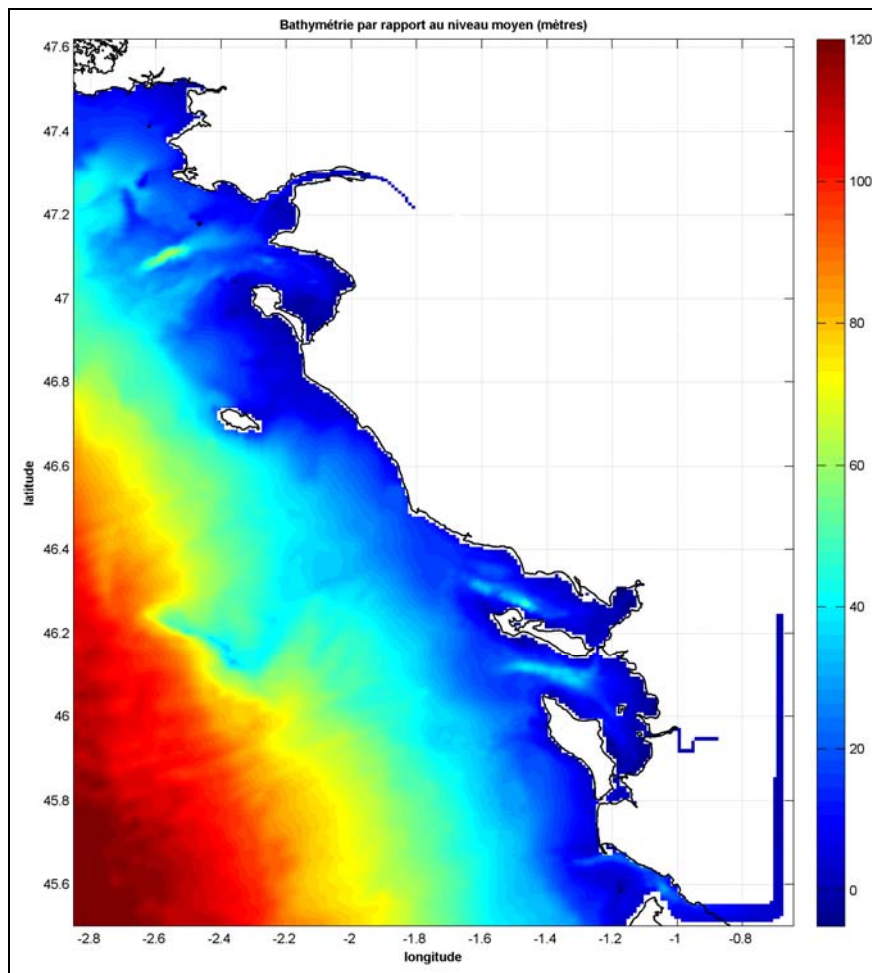


Figure 2 : Bathymétrie du modèle général de rang 0 (taille de maille : 800 mètres)



Le modèle de détail de **rang 1** appelé « **Loire-Vilaine** » s'étend globalement de la commune de Sarzeau jusqu'à Notre-Dame-De-Monts (Figure 3). Ce modèle possède une **résolution de 250 m** et est forcé à ses deux limites marines (ouest et sud) par le modèle de rang 0.

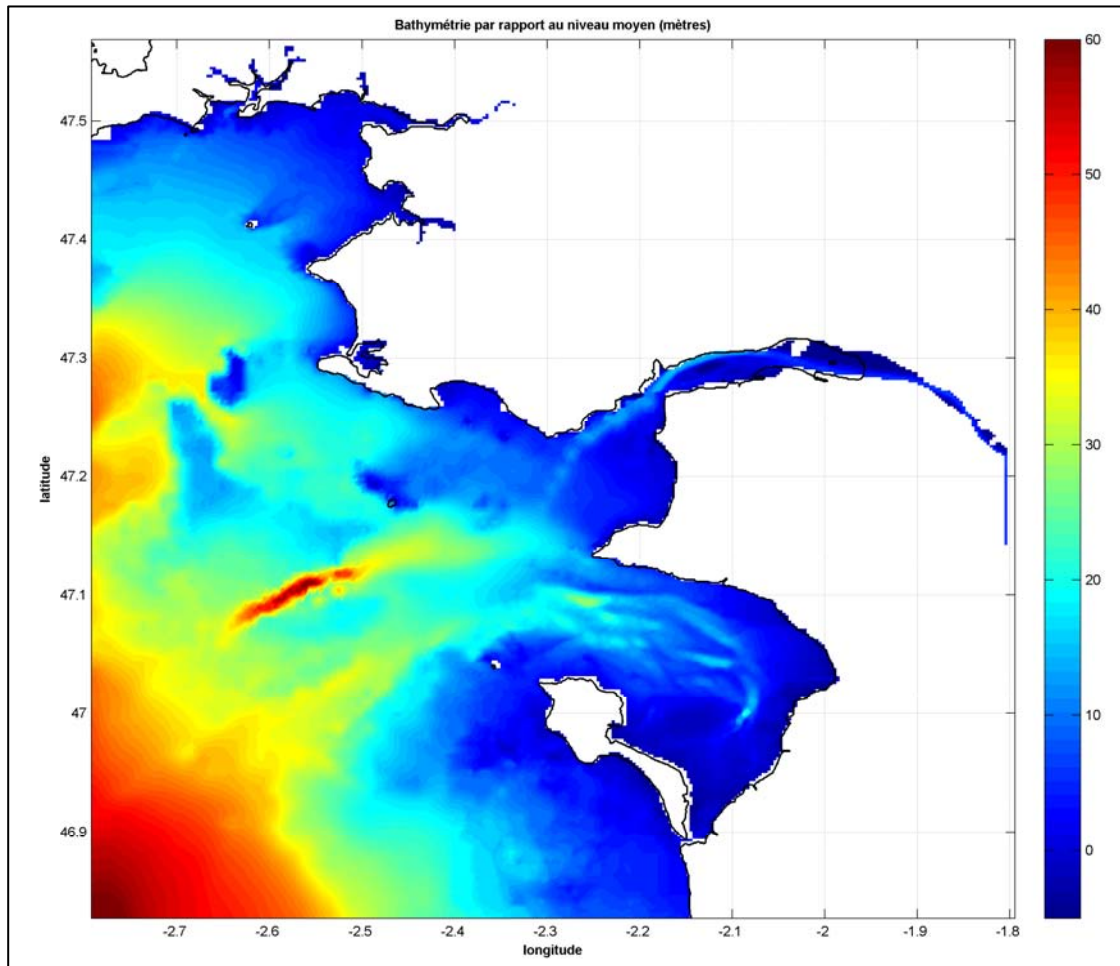


Figure 3 : Bathymétrie du modèle général de rang 1 « Loire-Vilaine » (taille de maille : 250 mètres)



Le second modèle de **rang 1** intitulé «Sables d’Olonne – Ile de Ré» est la continuité du précédent modèle de rang 1 à partir de sa limite sud. L’emprise géographique du modèle «Sables d’Olonne – Ile de Ré» s’étend donc de Notre-Dame-De-Monts jusqu’à Angoulins (au sud de l’île de Ré) (Figure 4). Comme le modèle de rang 1 «Loire-Vilaine», il est doté d’une **résolution de 250 m** et est forcé à ses deux limites marines (ouest et sud) par le modèle de rang 0.

Dans leur version tridimensionnelle, les deux modèles de rang 1 sont discrétisés à hauteur de 10 niveaux sur la verticale et 15 niveaux pour le modèle de rang 0.

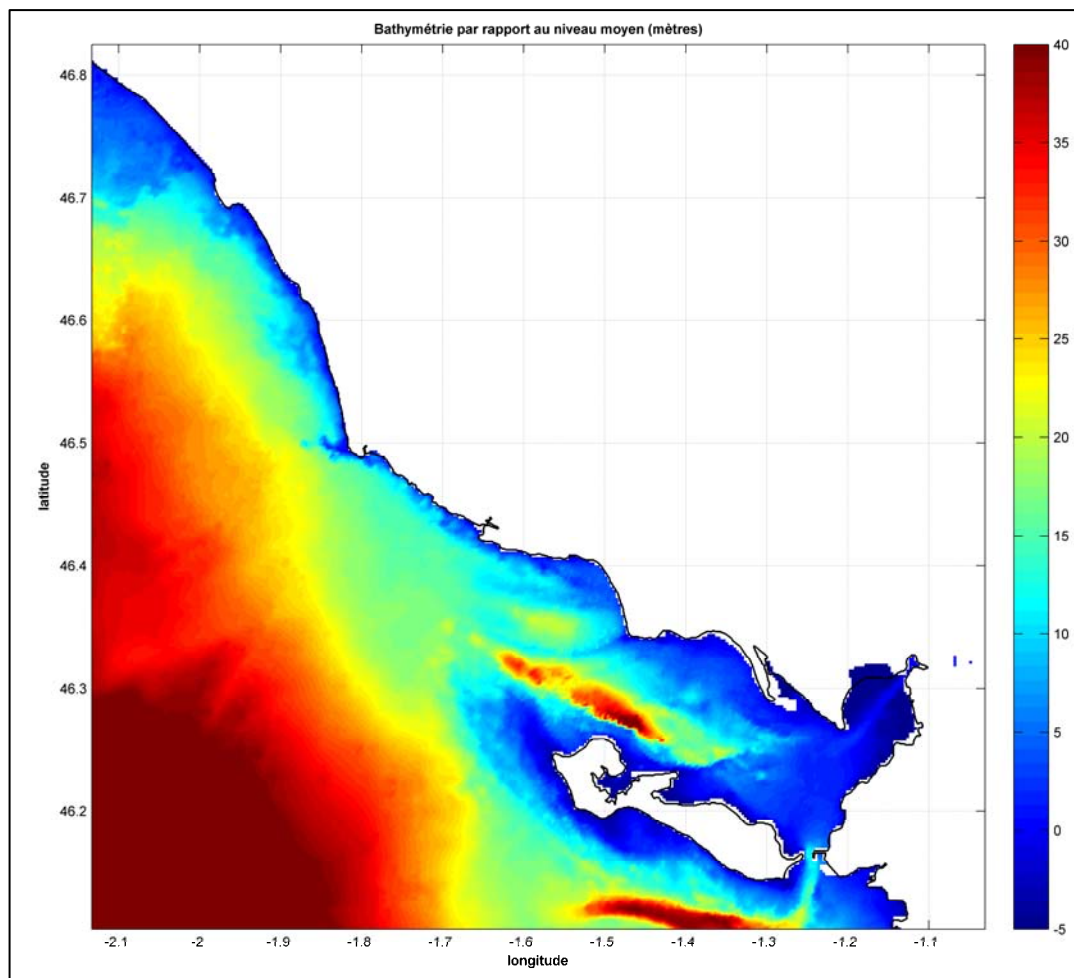




Figure 4 : Bathymétrie du modèle général de rang 1 « Sables d’Olonne-Ile de Ré » (taille de maille : 250 mètres)



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 15/177                     |

## 2. Etude au moyen du modèle MARS2D des transferts de biomasse depuis les zones potentielles de croissance vers le haut de plage

Dans ce volet, l'objectif est de cerner, en fonction de différentes conditions météorologiques et en partant d'une condition initiale du stock d'algues vertes, les zones sensibles aux échouages et de recouper ces zones avec les observations terrains. Pour ces expérimentations numériques, le module biologique de production algale n'est pas activé.

L'étude du transport/échouage des algues à l'échelle du linéaire côtier de l'étude doit également permettre de :

- Réaliser un zonage des secteurs de production et d'échouage et plus précisément relier les zones dites « invisibles » où la phase de croissance se produit (typiquement les plateaux rocheux) avec les zones dites « visibles » constituées par les échouages de haut de plage,
- Mettre en évidence les zones naturellement propices à l'échouage et les comparer avec **les données d'archives du Ceva (cf. description de ces données à la mission MB3 § 2)**
- Valider le processus de développement de la marée verte de type 2 par croissance sur plateaux rocheux suivi d'une phase de transport/échouage en haut de plage.

### 2.1. Elaboration de la condition initiale en ulves

L'élaboration de la cartographie globale de la zone potentielle de croissance représente une tâche importante et a été scindée en deux parties distinctes : la cartographie **intertidale** qui s'appuie principalement sur les observations aériennes du Ceva et la cartographie **subtidale** qui repose fortement sur la couche roche obtenue auprès d'Ifremer.

Pour la cartographie initiale **intertidale**, la méthodologie employée est la suivante :

1. Numérisation (par tracés de polygones) des dépôts d'algues vertes observés lors du vol du 30 mai 2013 au moyen du logiciel Arcgis,
2. Importation sous Arcgis de la grille de points issue des deux modèles de rang 1,
3. Création autour de chaque polygone d'une zone tampon à 125 m correspondant à la taille de la demi-maille des deux modèles de rang 1. Cette opération s'est avérée nécessaire pour permettre un croisement avec la grille à 250 m des modèles de rang 1,
4. Croisement des deux couches élaborées (étapes 2 et 3 décrites ci-dessus)
5. Ajout manuel dans la couche obtenue à l'étape 4 des dépôts caractéristiques de la marée verte de type 1 (marée verte à ulves dérivante) se développant sur le site de Pen-Bé. Utilisation des données d'archives pour allumer ou non les pixels « estran ».
6. Ajout manuel de la vaste zone représentée par l'estran rocheux présent à l'Est immédiat de Noirmoutier.

L'obtention de la cartographie initiale **subtidale** a également été créée sous Arcgis et a nécessité les étapes suivantes :





- Extraction de la couche roche infralittorale déduite de la carte d'habitats physiques des fonds marins en France métropolitaine dont la résolution spatiale à 250 m coïncide avec celle des modèles de rang 1,
- Croisement de cette couche roche avec la grille bathymétrique de point issue des deux modèles de rang 1 en fixant un seuil minimum de hauteur bathymétrique égale à + 2 mètres en deçà du zéro hydrographique. Ce seuil a été directement déduit des observations sous-marines effectuées par le Ceva à la pointe nord-ouest de Noirmoutier dans le cadre du réseau de contrôle opérationnel (RCO Pays de Loire – Ré 2013) de la DCE où il est apparu une raréfaction du tapis d'ulves en deçà de cet horizon bathymétrique.

La dernière étape a consisté à fusionner la couche subtidale et intertidale et à formater la donnée finale au format MARS en vue des expérimentations numériques. Les figures 5 et 6 présentent les cartographies initiales obtenues pour les deux modèles de rang 1 « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré ». Le modèle de rang 1 « **Loire-Vilaine** » comporte au total **882 pixels** dont **522 classés en zone intertidale** (60 % du total des pixels) et **360 au domaine infralittoral** (Figure 5).

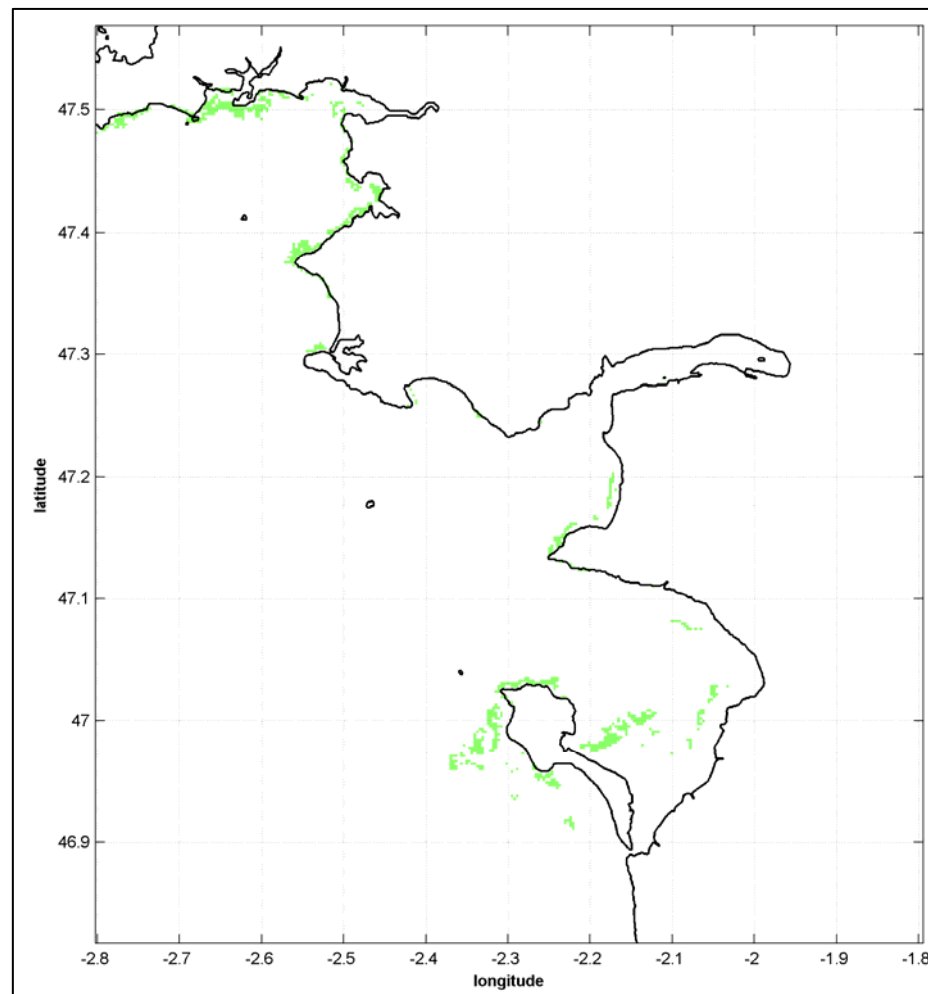




Figure 5 : Condition initiale des dépôts en algues vertes sur la zone intertidale et subtidale pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine »





|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 17/177                     |

Le modèle « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** » est constitué de **681 pixels** dont **280 appartiennent à la zone intertidale** (41 % du total des pixels) et **401 au domaine infralittoral** (Figure 6).

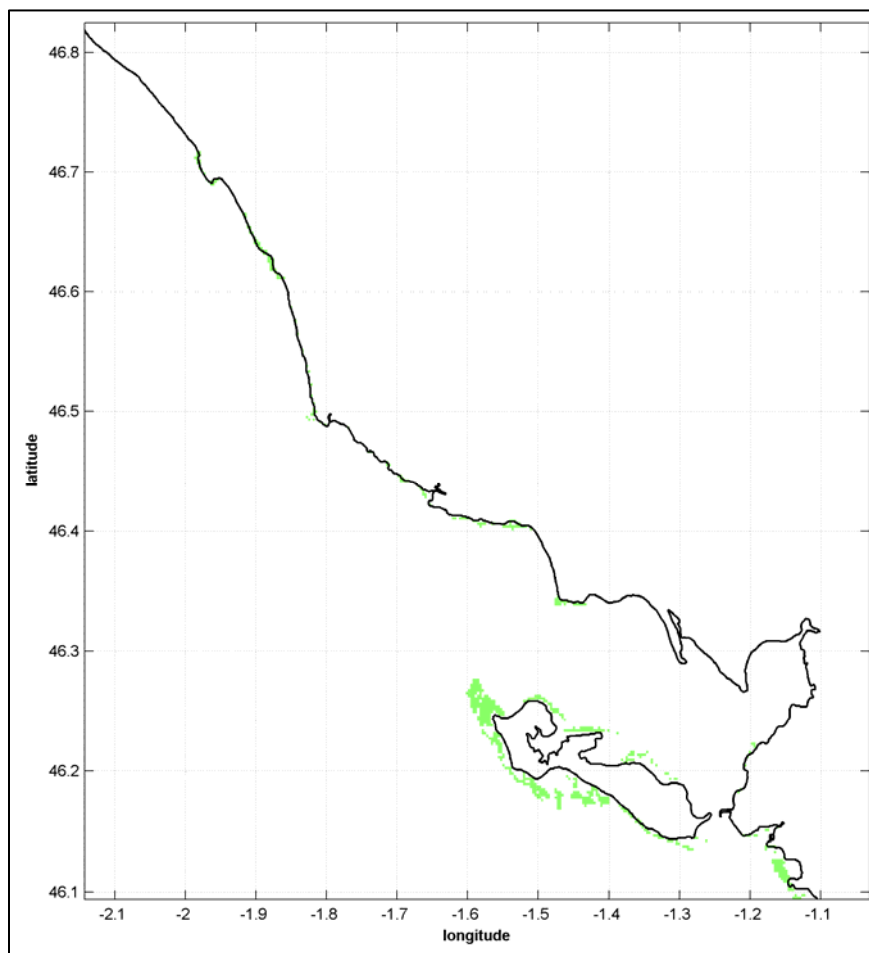




Figure 6 : Condition initiale des dépôts en algues vertes sur le zone intertidale et subtidale pour le modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré »

## 2.2. Stratégie de modélisation appliquée au transport algal

Le Ceva a travaillé activement de 2003 à 2007 sur les aspects particulièrement complexes du transport physique des ulves. Deux grands types de modèles de transport ont été expérimentés en baies de Lannion, de St Briec et de Forêt-Fouesnant. La version développée par le Ceva déplace les ulves en fonction d'une loi déterminée par des séries de mesures acquises dans le canal hydraulique du MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle) de Dinard et dans l'anneau de courant du Cedre (Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux). Le modèle Ifremer, calqué sur les modèles sédimentaires repose quant à lui sur la formulation dite de Krone-Parthéniades qui distingue une phase de dépôt des ulves et une phase dite en suspension dépendante de la vitesse instantanée du courant. Ces deux types de modèles tout en aboutissant à des résultats proches ne parviennent pas, à l'échelle des sites évoqués ci-avant, à représenter de manière réaliste et à des échelles de temps significatives le va et vient des ulves sous l'action de la marée, l'échouage d'une partie du stock en haut de plage, leur dispersion sous l'action des vents ... En effet, les ulves se trouvent rapidement



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 18/177                     |

advectées vers des zones d'échouages (sur l'estran) d'où elles ne bougeront plus avec une partie du stock initial qui sera définitivement dispersé vers le large.

Les difficultés évoquées ci-avant ont conduit le Ceva, dans le cadre du volet transport du présent rapport, à abandonner les deux types de modèles précédemment cités et de faire le choix de transporter non plus les ulves comme des substances dissoutes (cas des modèles de transport Ifremer et Ceva) mais comme des particules. En termes de dynamique des fluides, on opposera la représentation dite Eulérienne du transport (modèles Ifremer et Ceva) à la représentation dite Lagrangienne où les ulves sont assimilées à des particules. **La notion Lagrangienne, plus intuitive que la notion Eulérienne, correspond mieux à la représentation que l'on peut se faire d'une algue dérivante sous l'action des courants marins qui tend à se conduire davantage comme une particule que comme une substance dissoute.**

Le module de **transport Lagrangien particulaire** disponible sous le code de calcul MARS a donc été préféré aux modèles précédemment cités moyennant un certain nombre de modifications apportées au code initial. Les principales modifications ont consisté à transporter les particules non plus à la vitesse instantanée du courant mais à 80 % de sa vitesse moyenne du fait que les ulves se déplacent légèrement moins vite que la vitesse du courant (utilisation des mesures Ceva en canal hydrodynamique). L'autre modification a consisté à permettre au code de travailler avec un très grand nombre de particules pour améliorer la statistique des échouages et des trajectoires moyennes. Les cartographies initiales maillées à 250 mètres obtenues au point précédent (cf. § 2.1) passent ainsi de 882 particules pour le modèle « Loire-Vilaine » à 24696 particules et de 681 particules pour le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré » à 19068 particules. **Autour de chacune des particules initiales appartenant à une maille du modèle a donc été créé un nuage de particules** dont l'extension géographique reste inférieure à la taille de la maille des deux modèles de rang 1 afin de ne pas créer de nouveaux dépôts qui appartiendraient à des mailles voisines.

### 2.3. Conditions de simulations

Les expérimentations numériques opérées dans cette section ont été effectuées avec les deux modèles de rang 1 en utilisant **la version bi-dimensionnelle du modèle Mars**. Outre la réduction significative des temps de calcul par rapport au 3D, le choix du recours à un modèle 2D a été dicté par le fait que les stratifications thermiques et halines influencent peu la courantologie locale et ce d'autant plus que les processus de transport algal se déroulent par très petits fonds. De plus, les biais inhérents aux modèles actuels de transport ne permettent pas d'envisager un gain significatif entre une approche 2D et 3D.

Les conditions de marée correspondent à une marée moyenne de vive-eau de coefficient 80 se reproduisant identiquement à elle-même. En plus de la condition de vent nul, sept autres conditions de vent ont été testées. Chacune d'entre-elles fait l'hypothèse d'un vent modéré et constant de 30 km.h<sup>-1</sup>. Seule la direction varie par l'introduction d'un décalage de 45° entre chaque situation testée ce qui donne les régimes de vent suivant : nord-ouest, ouest, sud-ouest, sud, sud-est, est et nord-est. La durée des simulations a été fixée arbitrairement à 5 jours.



## 2.4. Résultats

### 2.4.1. Modèle de rang 1 « Loire-Vilaine »

Afin de mieux suivre au cours du temps l'évolution du nuage de particules et repérer les secteurs sensibles à l'échouage, la cartographie initiale en ulves obtenue au § 2.1. a été découpée en dix régions et une couleur a été associée à chacune d'entre elles (cf. Figure 7).

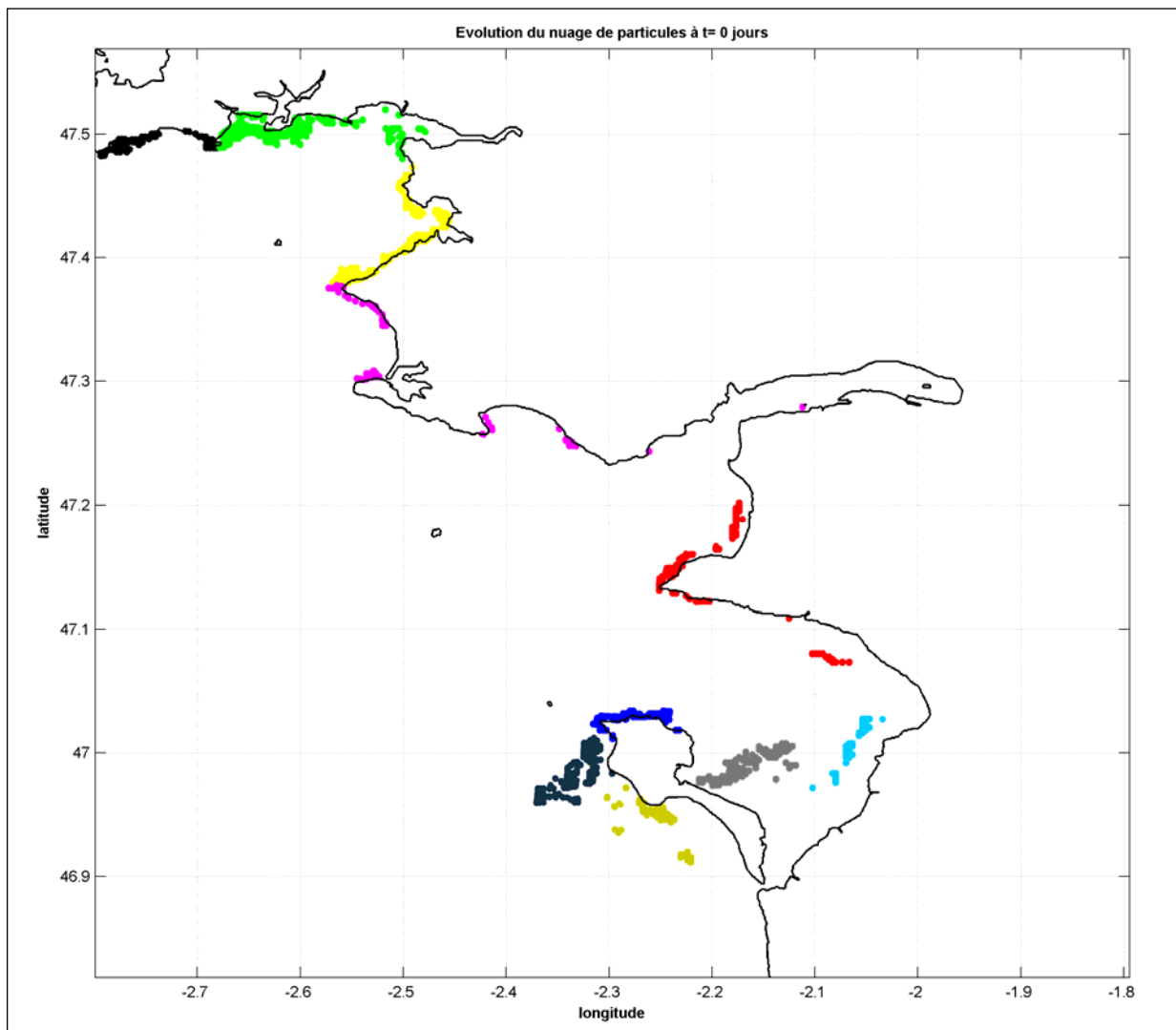




Figure 7 : Condition initiale du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » utilisée pour le transport particulaire

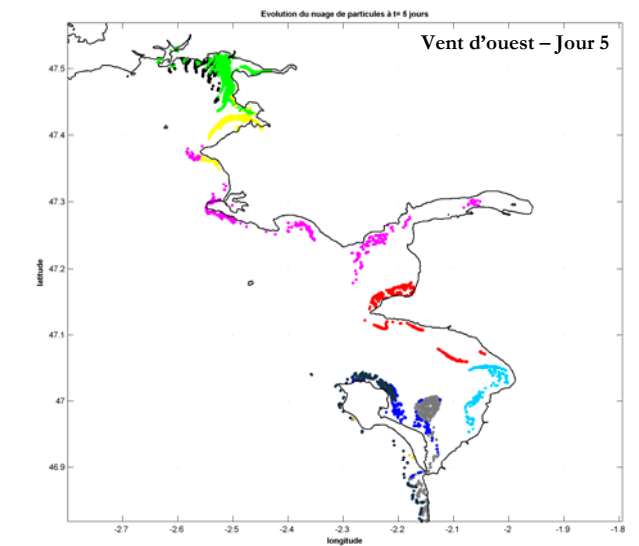
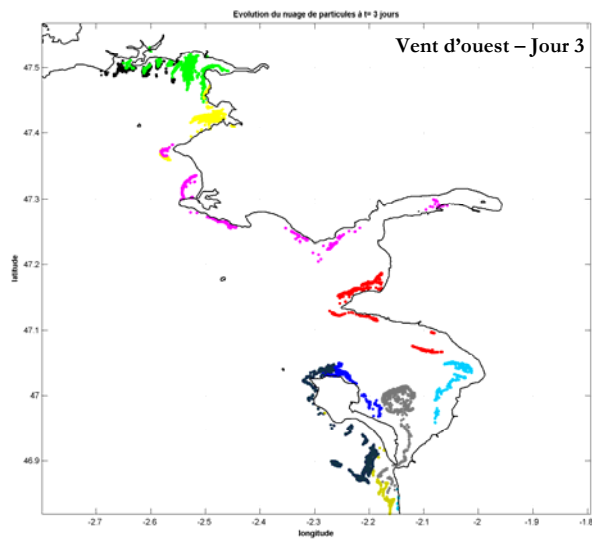
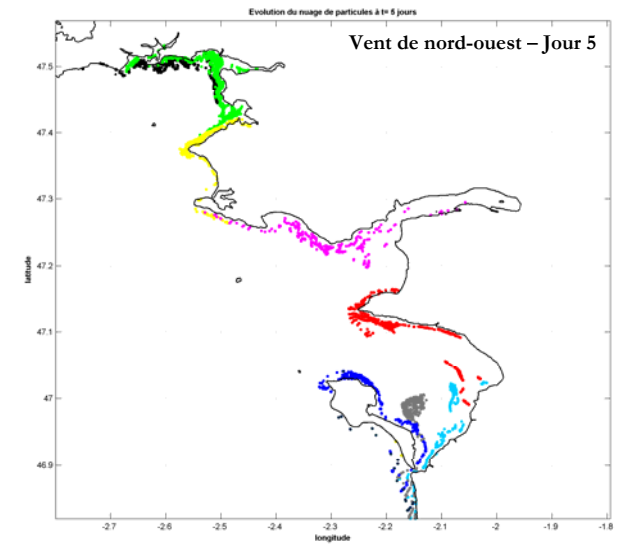
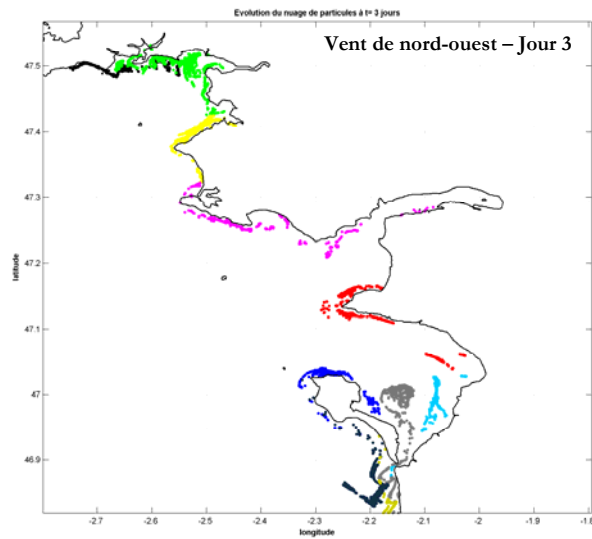
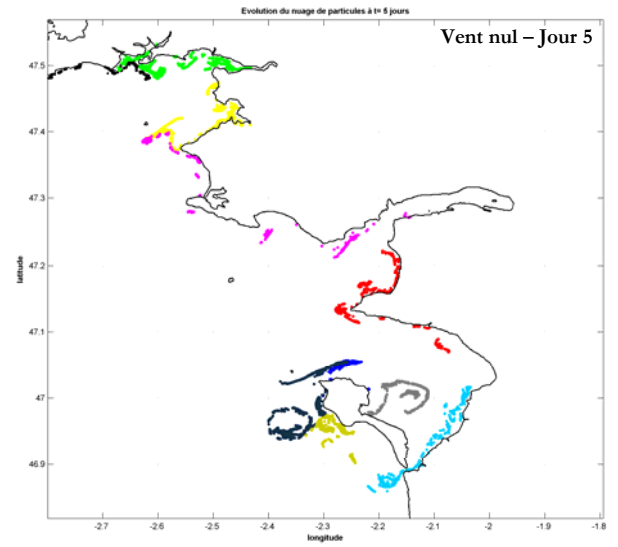
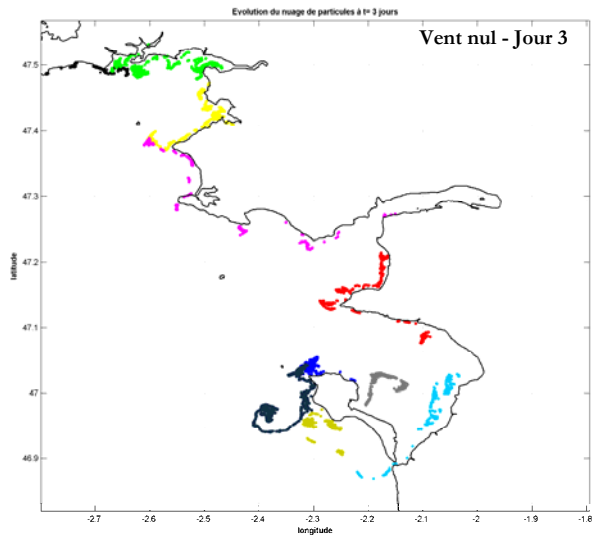


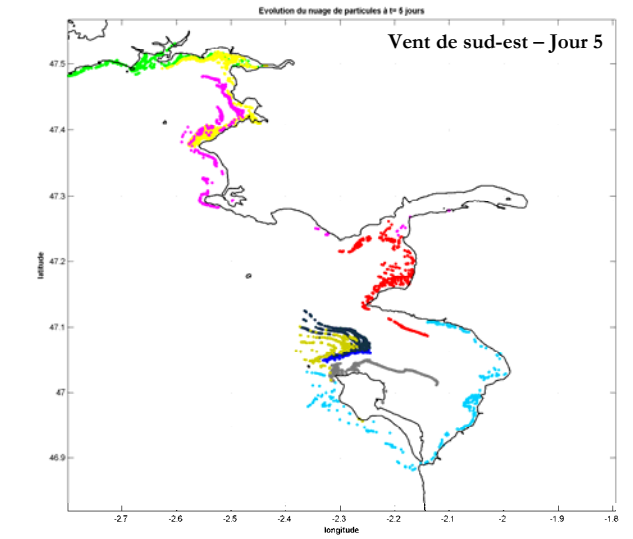
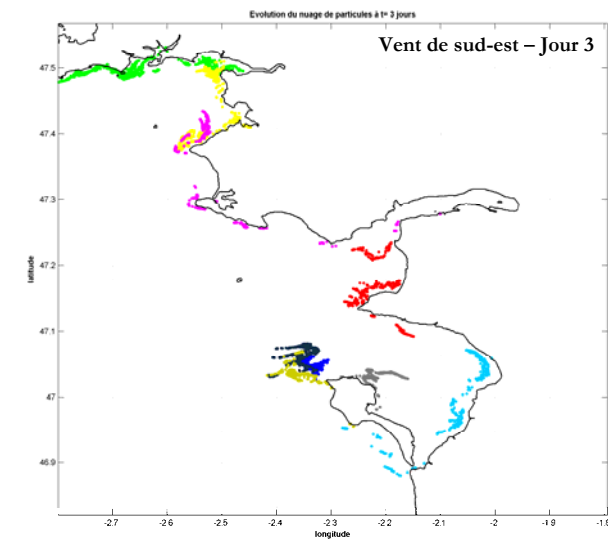
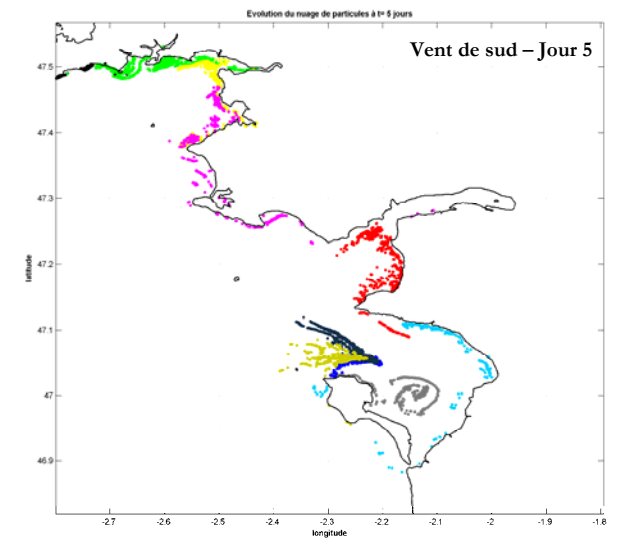
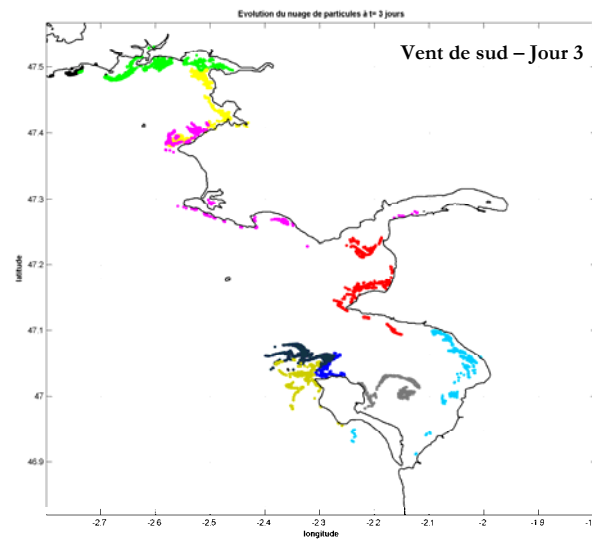
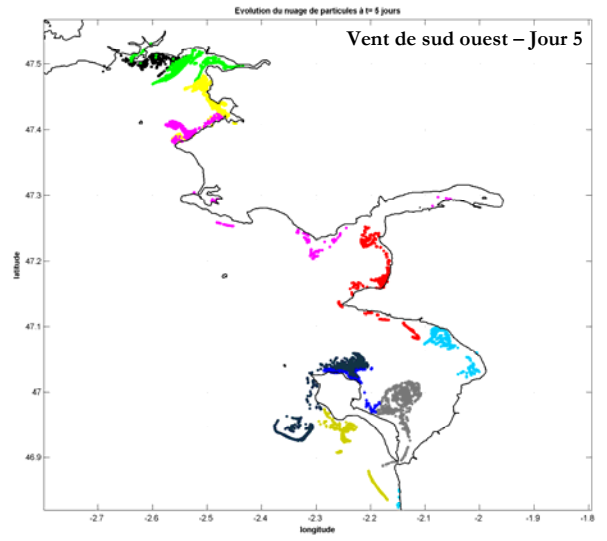
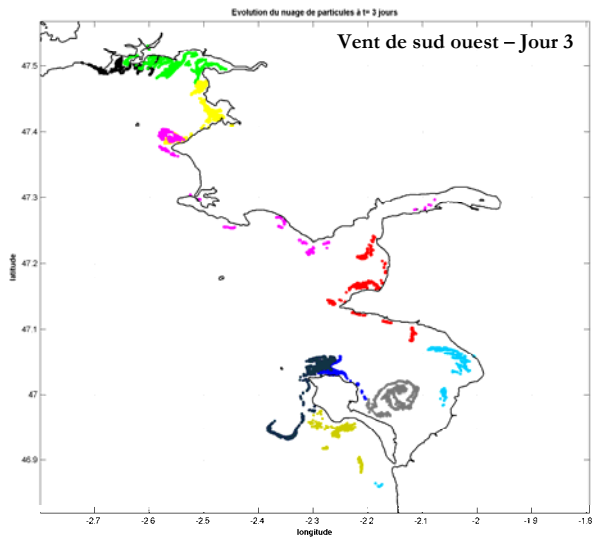
|  |   |      |                            |
|--|---|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br>REPUBLIQUE FRANÇAISE<br>PRÉFET<br>DE LA RÉGION<br>PAYS DE LA LOIRE | <h2 style="margin: 0;">Document de référence<br/>(MB2)</h2> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|  |   | Date | 04/06/14                   |
|  |   | Page | 20/177                     |

Les principaux résultats du transport particulaire par différentes conditions de vent au moyen du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » montrent que (Figure 8) :

- Par situation de **vent nul**, le modèle ne montre pas de possibilités de transferts d'ulves depuis le sud de la Loire vers le nord et inversement. **Les ulves demeurent globalement présentes dans leur secteur de départ à l'exception d'une partie des ulves initialement présentes dans le secteur des roches de Bouin qui chemine en direction de la Pointe de la Fosse (Pointe sud de Noirmoutier) pouvant donner lieu à des échouages sur la façade ouest de Noirmoutier ou sur les secteurs de plage situés au sud immédiat de Fromentine.** On note également la formation de deux gyres anticycloniques dont l'un est situé au sud de la Pointe de l'Herbaudière (façade ouest de Noirmoutier) et l'autre à l'est immédiat de Noirmoutier. De plus, les courants importants rencontrés au niveau de la Pointe de l'Herbaudière dispersent naturellement les ulves initialement présentes dans cette zone,
- Par régime de vent d'**ouest** et de **nord-ouest**, la circulation moyenne se trouve orientée vers le sud ce qui entraîne un déplacement global des ulves du nord vers le sud. Le modèle décrit au bout de 5 jours **une migration importante des ulves situées initialement dans le secteur de la Vilaine en direction de Piriac et de la même façon de Piriac vers le secteur de la Baule.** Sur la zone de Noirmoutier, les ulves présentes initialement sur la façade est (bassin interne de Noirmoutier) cheminent rapidement vers la pointe de Fosse tandis que celles localisées sur la façade Atlantique sont rapidement dispersées vers le sud de Fromentine. Cette situation de vent ne montre pas de transfert d'ulves depuis le nord de la Loire vers le sud,
- Les situations de vent **de sud-ouest, sud et sud-est rendent possible un transfert partiel des ulves situées initialement au sud immédiat de St Nazaire vers le nord de la Loire.** En l'absence de biologie, il convient de rester prudent dans la mesure où les conditions de lumière liée à la forte turbidité de la Loire au débouché de St Nazaire sont clairement défavorables aux ulves. Ces situations de vent renversent logiquement la circulation moyenne résiduelle décrite précédemment en l'orientant globalement du sud du domaine vers le nord. Dans ces conditions, le mouvement moyen des ulves s'établit du sud vers le nord. De petites différences apparaissent entre chacune des trois conditions de vent : **un vent de sud-est favorisera le transport des ulves situées dans le secteur de la Vilaine en direction de la commune de Sarzeau** tandis que sur la zone de Noirmoutier, les vents de sud et de sud-est tendent à « nettoyer » la façade atlantique de Noirmoutier en dispersant efficacement les particules ulves vers le nord immédiat de la Pointe de l'Herbaudière,
- Par situations de vent **d'est et de nord-est**, l'effet sur le transport algal se fait surtout sentir sur les côtes exposées à ces vents à savoir : la façade est de l'île de Noirmoutier où se produit une migration importante des ulves en direction à la fois de la Pointe de la Fosse et de la Pointe de l'Herbaudière ; la Pointe St Gildas avec transfert des dépôts initiaux du nord vers le sud, devant la Vilaine avec migration d'une partie du stock vers le secteur de Pénerf.









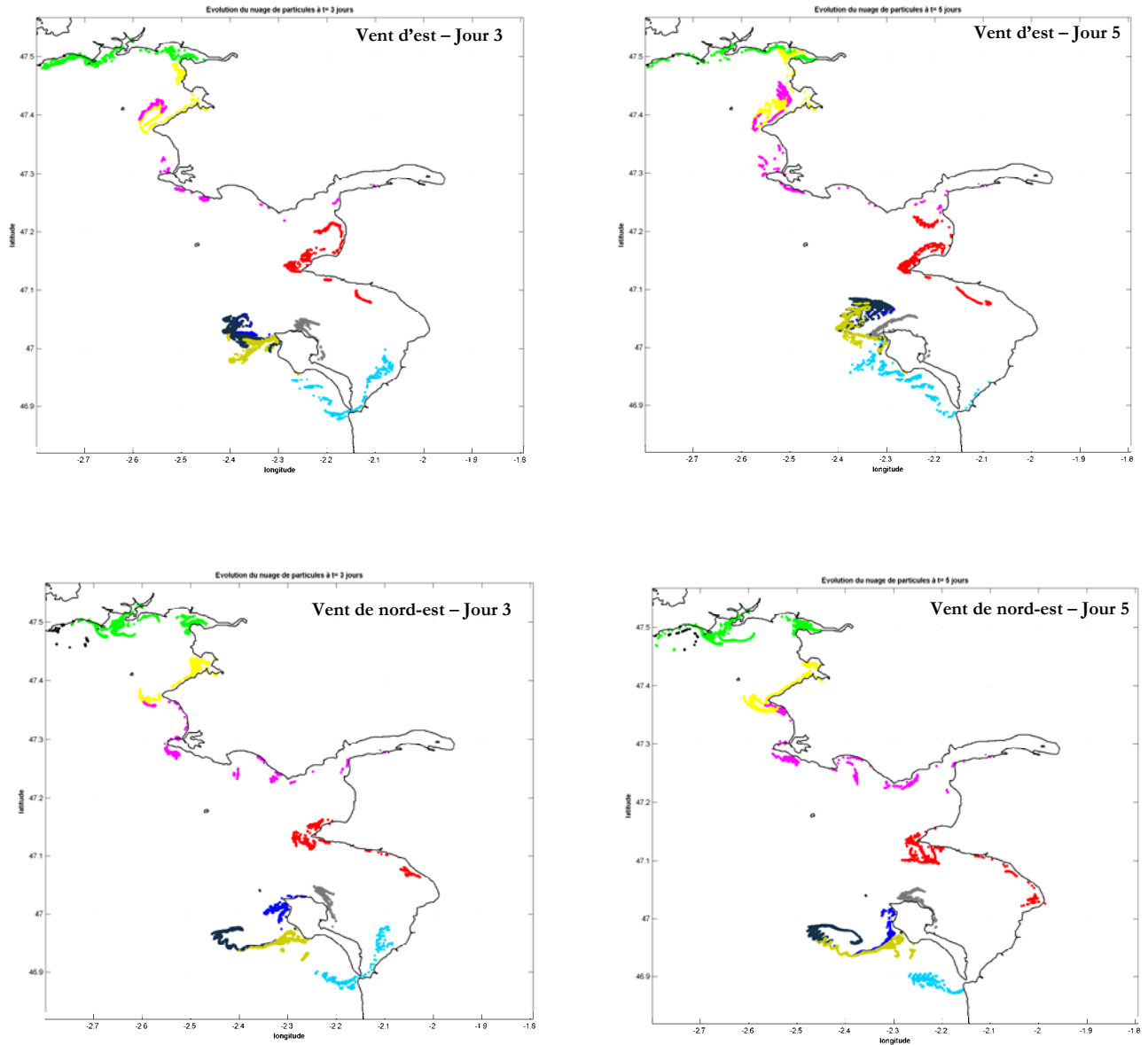


Figure 8 : Evolution le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » du nuage de particules au bout de 3 et 5 jours de simulation par vent nul et dans des conditions de vent constant et modéré (30 km.h<sup>-1</sup>) de secteur nord-ouest, ouest, sud-ouest, sud, sud-est, est et nord-est



### 2.4.2. Modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré »

Comme pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine », la cartographie initiale en ulves obtenue au § 2.1. a été découpée en dix régions et une couleur a été associée à chacune d'entre elles (Figure 9)

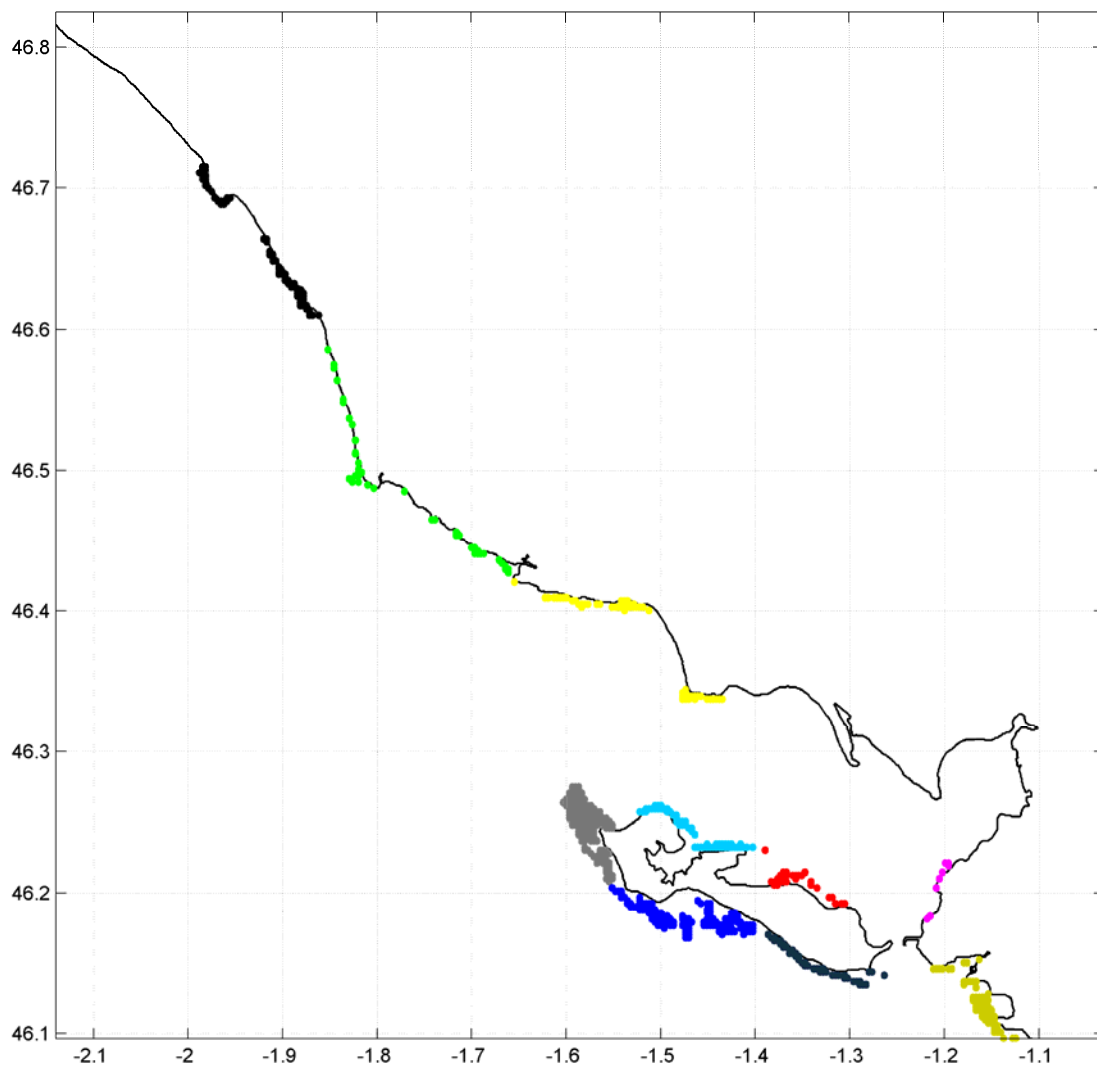




Figure 9 : Condition initiale du modèle de rang 1 «Sables d'Olonne-Ile de Ré» utilisée pour le transport particulaire

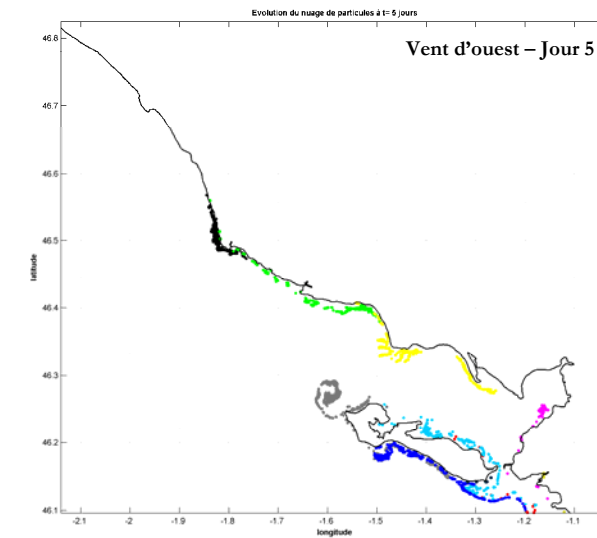
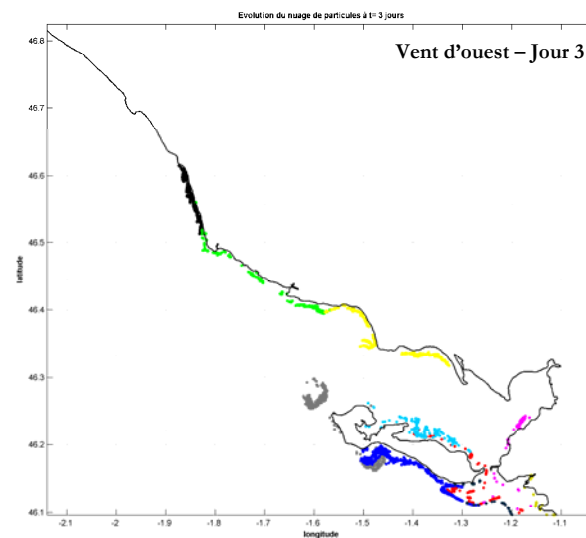
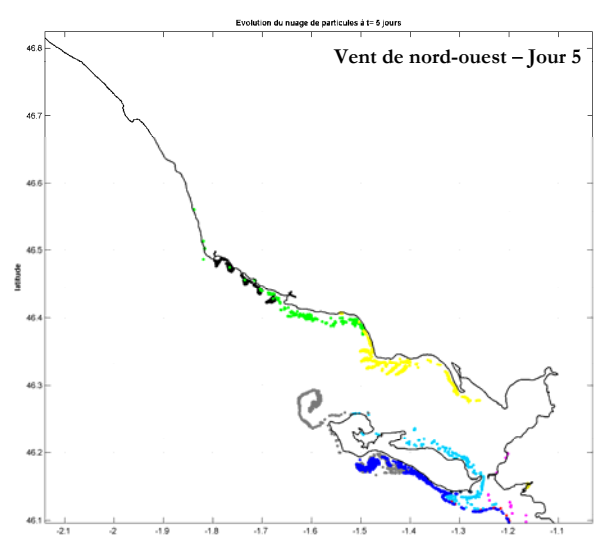
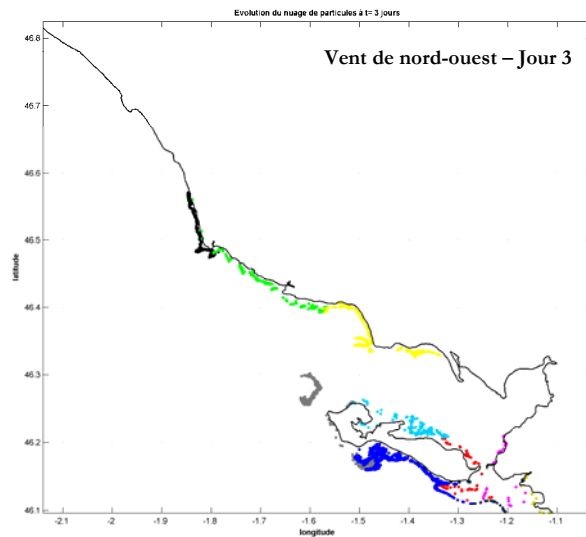
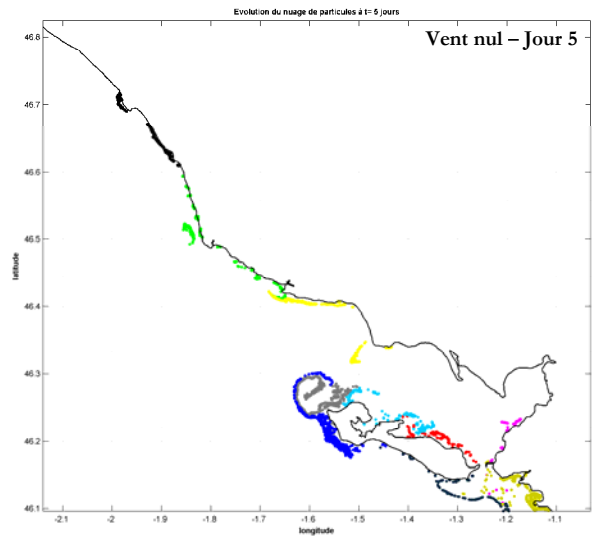
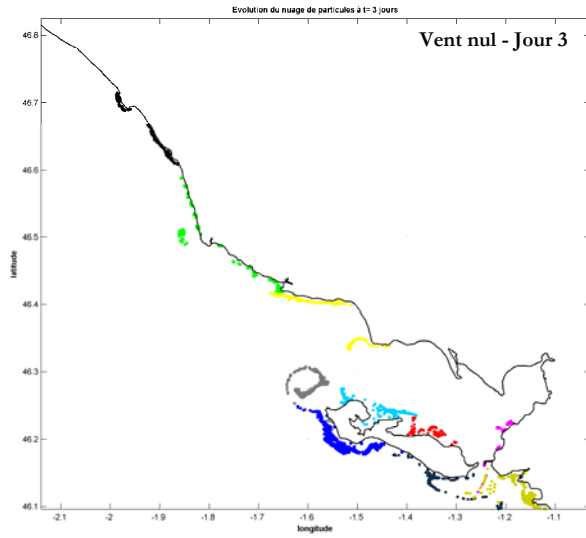


|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET</small><br><small>DE LA RÉGION</small><br><small>PAYS DE LA LOIRE</small> | <h2>Document de référence<br/>(MB2)</h2> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|  |  | Date | 04/06/14                   |
|  |  | Page | 25/177                     |

Les résultats du transport particulaire au moyen du modèle de rang 1 « Sable d'Olonne-Ile de Ré » permettent de dégager les tendances suivantes (Figure 10) :

- Par situation de **vent nul**, le transfert et le mouvement d'algues sont limités : peu ou pas de mouvement sur le linéaire côtier de Notre-Dame-De-Monts jusqu'à Angoulins. Les ulves initialement présentes sur la façade Atlantique de l'île de Ré entre Le Bois-Plage-en-Ré et la pointe de Grignon devant Ars-en-Ré se trouvent rapidement confinées dans une zone comprise entre Ars-en-Ré et la Pointe des Baleines où l'on note la présence d'un gyre anticyclonique. Cette situation de vent ne met pas en évidence d'échanges significatifs de matériel algal entre la zone infralittorale et le continent et réciproquement,
- Par régime de vent **d'ouest, nord-ouest et sud-ouest**, les résultats de simulation sont proches en raison de la circulation moyenne orientée vers le sud et directement induite par ce régime de vent. Une partie des ulves localisée initialement devant la Pointe des Baleines se retrouve piégée dans le gyre anticyclonique mais l'essentiel du stock initial se trouve confiné entre la Pointe du Grouin et la Pointe des Sablanceaux pour la façade nord de l'île et entre la Pointe Chanchardon et la Pointe des Sablanceaux pour la façade sud de l'île,
- Le régime de vent de **sud** est proche sur le plan de la distribution spatiale des particules au régime de vent de sud-ouest. Le vent de sud tend toutefois à confiner davantage les ulves présentes initialement sur les façades nord et sud de l'île de Ré à l'ouest d'une ligne fictive représentée par la Pointe du Grouin et Ars-en-Ré. On note logiquement la remontée des ulves présentes devant la Rochelle dans le bassin interne de l'île de Ré en passant devant la Pointe des Sablanceaux,
- La situation de vent de **sud-est** est très proche de celle décrite par vent de sud tout en accentuant le phénomène de confinement vers le nord de l'île de Ré. Ce régime de vent entraîne également une migration plus efficace des ulves présentes initialement sur le linéaire côtier de Notre-Dame-De-Monts jusqu'à Angoulins vers le nord du domaine,
- Le régime de vent de **nord-est** tend à repousser les ulves en mer et pour le secteur de l'île de Ré à les confiner sur le linéaire côtier s'étendant de la Pointe du Grouin à Ars-en-Ré. Comme pour toutes situations précédemment évoquées, le gyre anticyclonique devant la Pointe des Baleines demeure présente et piège une partie du stock localisé initialement de part et d'autre de la Pointe des Baleines.





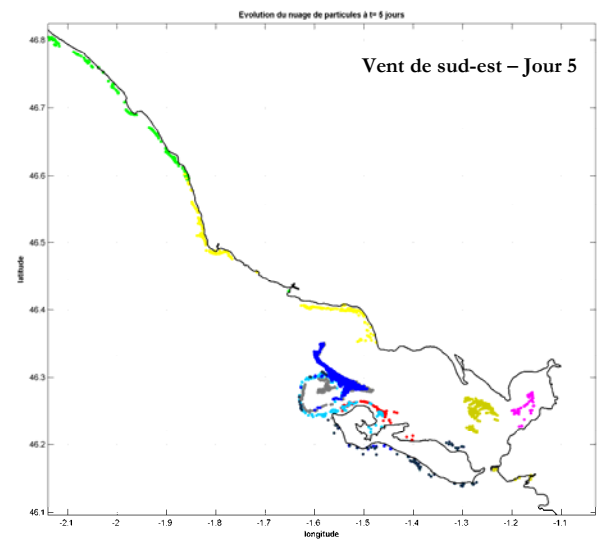
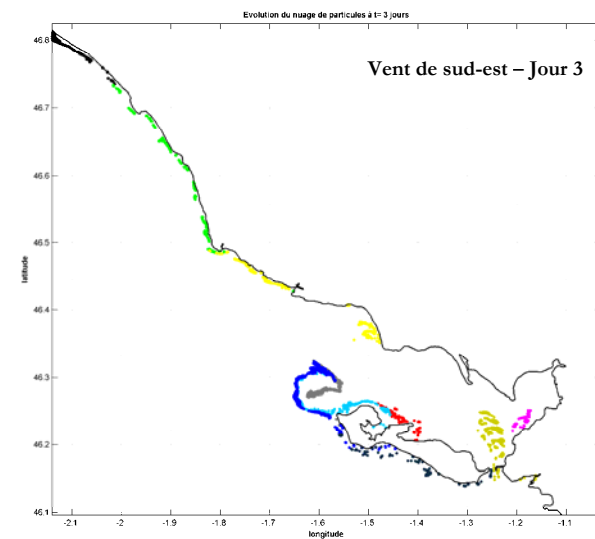
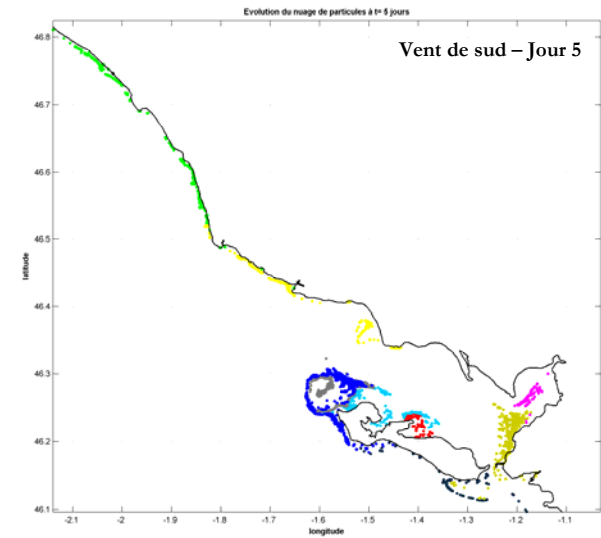
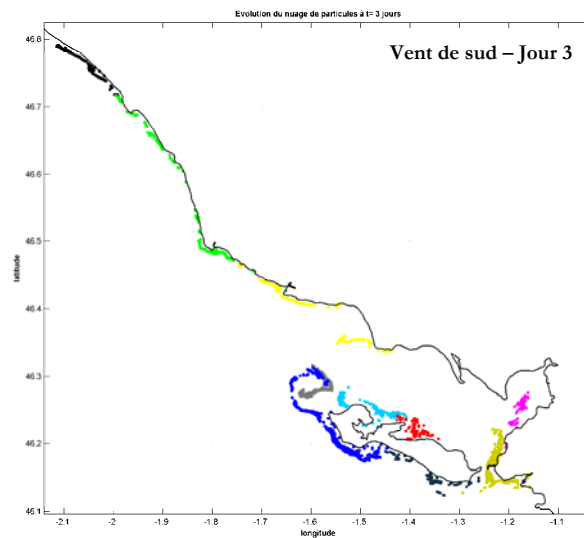
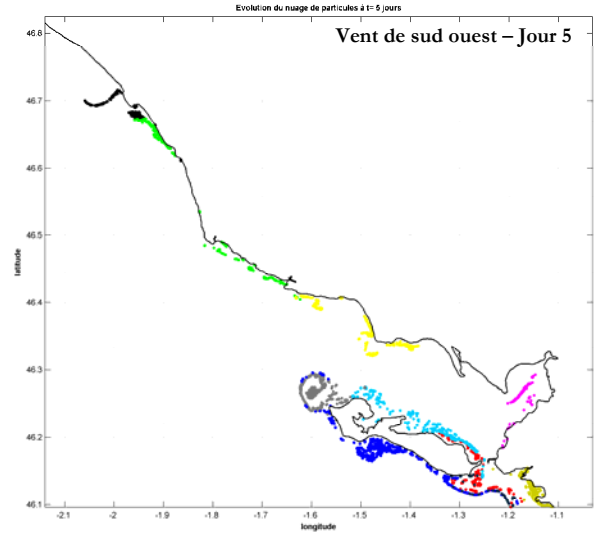
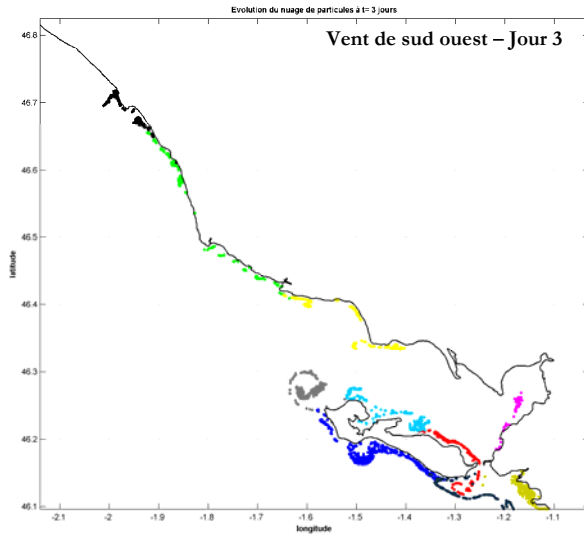


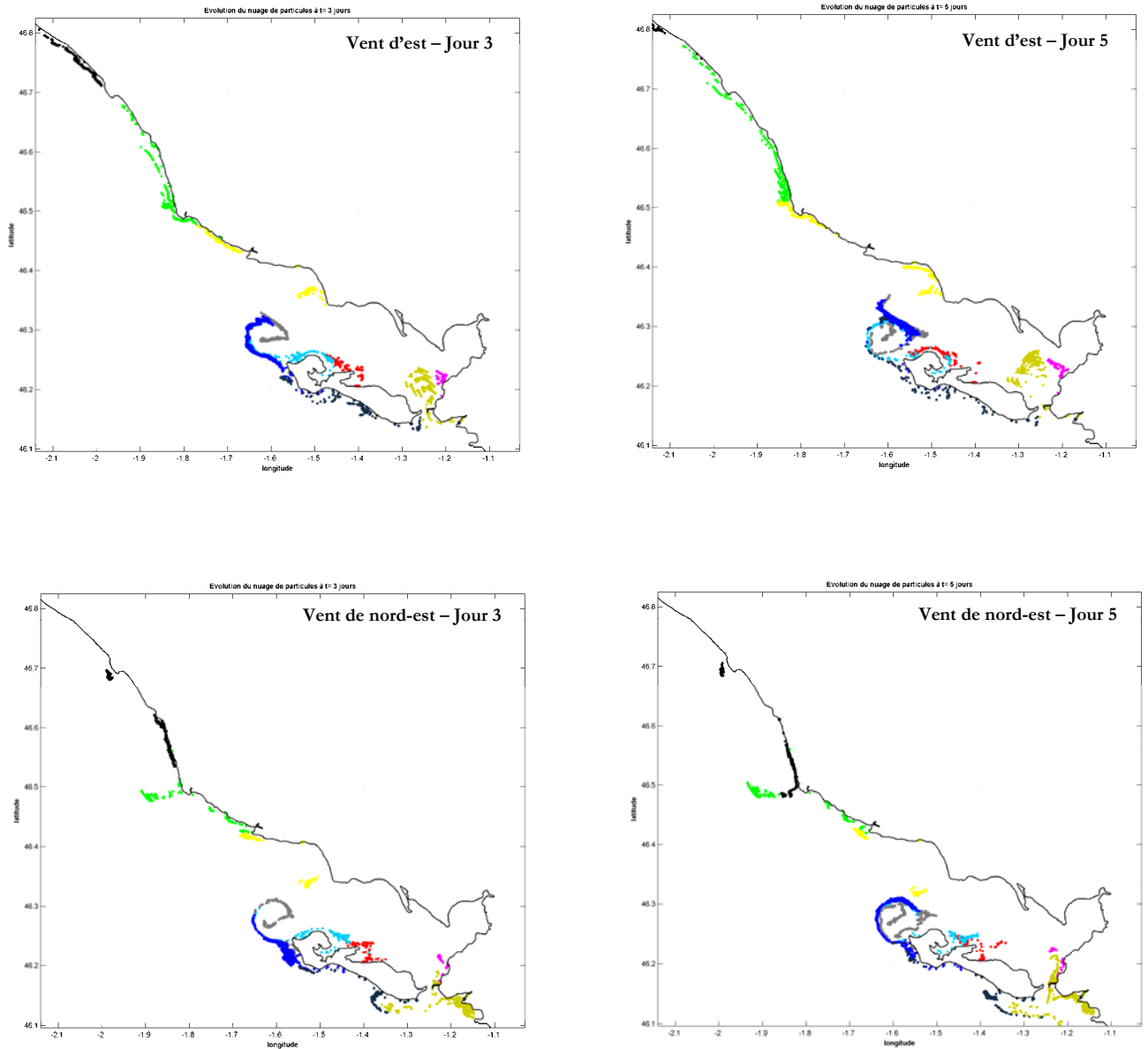
# Document de référence (MB2)

Réf. CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0

Date 04/06/14

Page 27/177





**Figure 10 : Evolution pour le modèle de rang 1 « Sables d’Olonne-Ile de Ré » du nuage de particules au bout de 3 et 5 jours de simulation par vent nul et dans des conditions de vent constant et modéré (30 km.h<sup>-1</sup>) de secteur nord-ouest, ouest, sud-ouest, sud, sud-est, est et nord-est**

### 2.4.3. Conclusions

La comparaison des résultats issus de la simulation du transport d’un grand nombre de particules, dont la condition initiale repose sur un mélange de données de dépôts intertidaux observés en mai 2013 et de données infralittorales prédictives, avec la cartographie du Ceva compilant les dépôts observés de 2002 à 2011 s’avère particulièrement complexe. Le modèle décrit en effet un certain nombre de secteurs de plage qui peuvent être tantôt impactés par des échouages tantôt « nettoyés » selon le régime de vent envisagé.





Afin d'avoir une vision plus synthétique des résultats de transport du modèle, la décision a été prise d'évaluer à l'intérieur de chaque maille des modèles de rang 1 le nombre de particules au bout de 2,5 jours de simulation en sommant les huit situations de vent testées. Préalablement à cette action, la taille de la maille des modèles de rang 1 a été réduite pour obtenir davantage de précision au niveau de l'analyse ce qui conduit à une maille de 125 m. Les cartes « synthétiques » obtenues pour les deux modèles de rang 1 maillées à 125 m et les cartographies du Ceva compilant les dépôts observés de 2002 à 2011 avec une maille de 75 m sont présentées en Figure 11 et Figure 12.

Comme évoqué précédemment, la comparaison des deux figures (Figure 11 et Figure 12) est délicate dans la mesure où la cartographie du Ceva représente essentiellement les dépôts de haut de plage, observés sur la zone intertidale tandis que le modèle tend à représenter davantage le mouvement moyen des particules algales (sous l'effet combiné du courant et du vent) dont un grand nombre provient du domaine infralittoral. De plus, les résultats du modèle sont fortement dépendants du nombre de jours écoulés et de la direction de vent considérée.

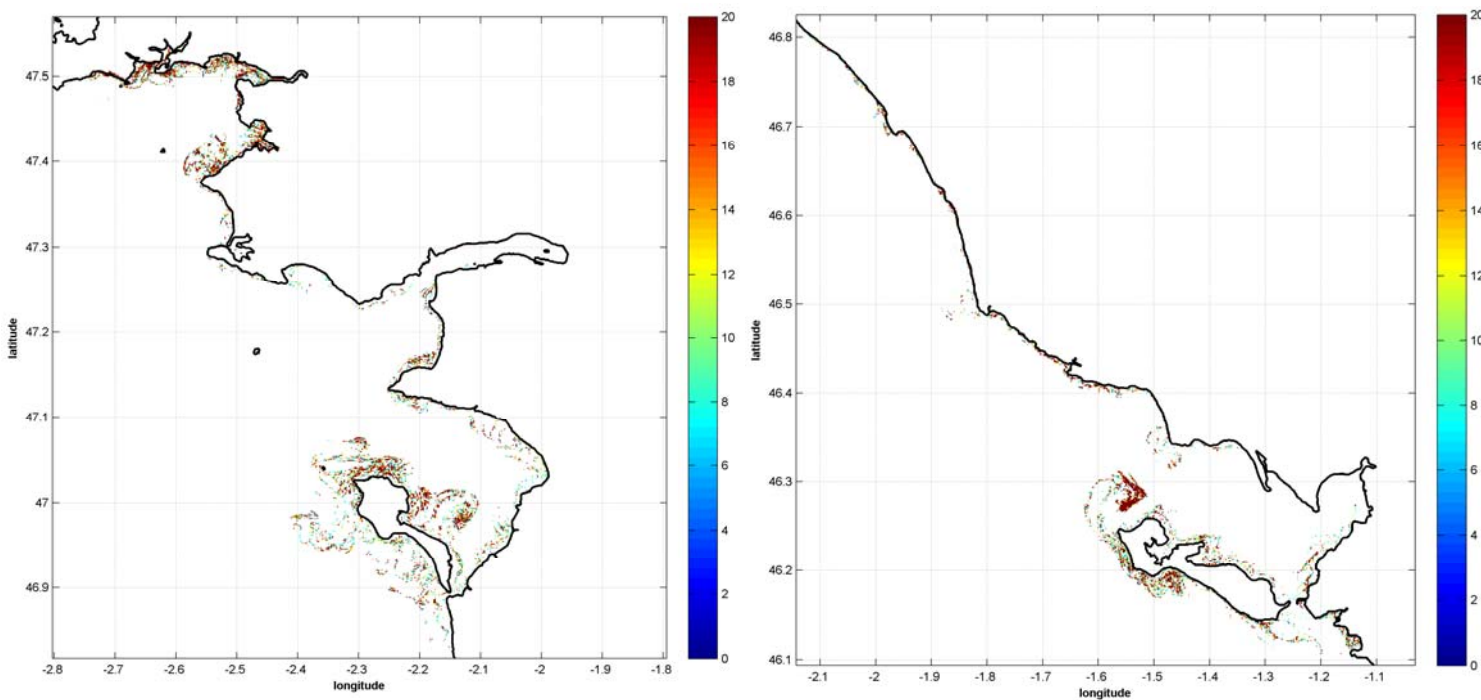
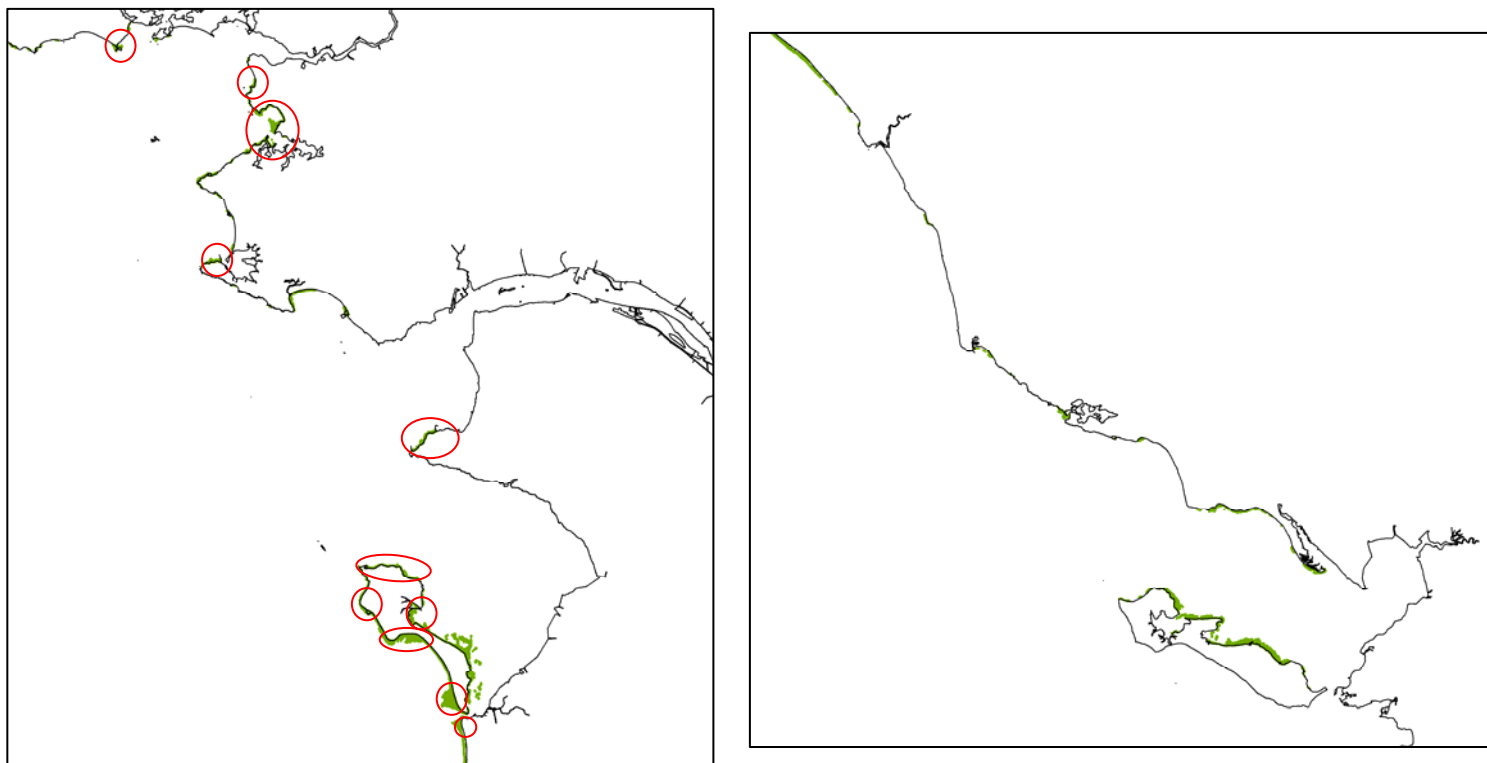


Figure 11 : Cartes synthétiques maillées avec une maille de 125 m pour le modèle « Loire-Vilaine » (a) et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (b) des positions des particules ulves en superposant les résultats des huit situations de vent à t=2.5 jours de simulation. La légende correspond au nombre de particules dans une maille donnée







**Figure 12 : Compilation des dépôts en ulves provenant des données d'archives du Ceva à l'échelle du modèle « Loire-Vilaine » (a) et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (b). Les cercles rouges représentent les zones régulièrement touchées par des échouages d'algues vertes. Aucune information sur la façade ouest de l'île de Ré**

Le Tableau 1 fournit une synthèse à  $t=2.5$  jours des simulations de la répartition des particules ulves pour l'ensemble des situations et pour les deux situations les plus représentatives de la saison : vent nul et vent d'ouest. Ce tableau propose un pourcentage de répartition du nuage de particules entre la zone intertidale et subtidale à la fois pour l'ensemble des particules et pour celles appartenant uniquement aux zones de dépôts observées par le Ceva. Pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine », le pourcentage de particules correctement placé et qui appartient donc aux dépôts observés reste stable (autour de 23 %) entre les trois situations de vent analysées. En revanche, pour le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré », la compilation de l'ensemble des situations de vent amène à de meilleurs résultats (49 % des particules ulves appartiennent aux dépôts observés) par rapport à la situation de vent nul (38 %) ou de secteur ouest qui apparaît la moins représentatives du point de vue des dépôts observés (seulement 14 %). D'une manière générale pour ces deux modèles, le pourcentage de la surface en ulves par rapport à la surface potentielle de l'estran susceptible de recevoir des échouages (surface estimée au moyen de la bathymétrie du modèle) est faible ( $< 5\%$ ) ce qui laisse supposer une consistance entre les secteurs modèle de confinement et d'échouages des particules avec les secteurs observés.



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 31/177                     |

**Tableau 1 : Synthèse à t=2.5 jours de la répartition des particules ulves par rapport aux dépôts observés par le Ceva et pour l'ensemble du nuage de particules**

| Situation de vent             | Modèle de rang 1 « Loire-Vilaine »   |          |  |  | Modèle de rang 1 « Sables d'olonne-Ile de Ré »   |          |  |  |
|-------------------------------|--|----------|--|--|--|----------|--|--|
|                               | Pourcentage de répartition des particules appartenant à la zone intertidale et subtidale |          | Pourcentage de la répartition des particules appartenant aux dépôts observés par le Ceva | Pourcentage de la surface en ulves par rapport à la surface estran du modèle | Pourcentage de répartition des particules appartenant à la zone intertidale et subtidale |          | Pourcentage de la répartition des particules appartenant aux dépôts observés par le Ceva | Pourcentage de la surface en ulves par rapport à la surface estran du modèle |
|                               | intertidal   | subtidal |  |  | intertidal   | subtidal |  |  |
| Avec les 8 situations testées | 38   | 62       | 25   | 5  | 20   | 80       | 49   | 3  |
| Vent nul                      | 51   | 49       | 23   | 1  | 19   | 81       | 38   | <1   |
| Vent d'ouest                  | 53   | 47       | 22   | 2  | 39   | 61       | 14   | < 1  |

A l'issue de ces expérimentations numériques de transport et dans la mesure où les transferts de biomasses algales entre sites voisins apparaissent limités, il paraît envisageable de proposer une délimitation de zones ou plutôt de sous-ensembles homogènes du point de vue de l'origine des algues produites :



- L'ensemble « Penerf-Vilaine »,
- Le site de Pen-Bé,
- Le secteur de Piriac,
- Le secteur du Croisic,
- Le secteur situé au nord immédiat de la Pointe St Gildas,
- L'île de Noirmoutier où les chenaux de la Pierre et du Centre agissent comme des barrières hydrodynamiques efficaces empêchant le transfert de matériel algal depuis Noirmoutier vers le nord de la zone,
- L'île de Ré dont la présence du Pertuis Breton et du Pertuis d'Antioche limite très probablement le transfert d'algues produites sur les nombreux plateaux rocheux de l'île en direction du continent et réciproquement.

De la même façon, sur le plan de la sensibilité à l'échouage, il paraît également envisageable de dégager une liste de sites potentiellement sensibles à l'échouage :

**Secteurs sensibles aux échouages pour le modèle « Loire-vilaine » :**

- Pour l'île de Noirmoutier, les secteurs les plus sensibles à l'échouage sont situés sur sa façade nord, globalement du sud du chenal d'Anjoubert à la pointe de l'Herbaudière. Sur sa façade sud, l'identification des secteurs sensibles s'avère plus complexe car ce linéaire fait intervenir beaucoup de pixels relativement isolés et à forte occurrence. Le secteur délimité entre les Pointes de l'Herbaudière et du Devin apparaît comme une zone de forte concentration en particules ainsi que l'anse de la Guérinière et le linéaire de la commune de Barbâtre plus diffus au niveau du confinement des particules ulves,



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 32/177                     |

- Les secteurs de plage localisés au sud de Fromentine apparaissent potentiellement comme des zones d'échouages en ulves,
- L'ensemble du haut de plage situé devant les polders du Dain dans l'anse de Noirmoutier,
- Linéaire côtier de part et d'autre de la Pointe St Gildas et Fromentine (bassin interne de Noirmoutier),
- Linéaire côtier situé de part et d'autre de la pointe St Gildas,
- Linéaire côtier s'étendant de Piriac-sur-Mer jusqu'à la Pointe de la Croix,
- Le site de Pen-Bé,
- De l'embouchure de la Vilaine jusqu'à la Pointe de Kervoyal,
- La zone de Penerf.



**Secteurs sensibles aux échouages pour le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré » :**

- Portion de littoral localisée entre la Flotte et la Pointe du Lizay pour la façade nord de l'île de Ré et de la Pointe des Baleines jusqu'à l'anse du Martray ainsi qu'au niveau de la commune de Sainte-Marie-de-Ré,
- La plage d'Aytré située au sud immédiat de La Rochelle,
- La commune de l'Houmeau (de la Pointe de Queille à la Pointe du Plomb),
- La commune de la Tranche-sur-Mer,
- Le linéaire côtier allant de Jard-sur-Mer aux Sables d'Olonne,
- La commune de Bretignolle-sur-Mer,
- La commune de Saint-Gilles-Croix-de-Vie.

L'étude du transport de particules fictives algales permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les secteurs sensibles aux échouages décrits par le modèle apparaissent cohérents par rapport à la cartographie pluriannuelle des dépôts observés par le Ceva.
- Les ulves à l'origine des échouages sont *a priori* produites localement sur les principaux plateaux rocheux à proximité des sites impactés sauf pour le site de Pen-Bé.
- Sur la commune de Barbâtre (façade sud-ouest de Noirmoutier) et les secteurs de plage au sud immédiat de Fromentine, il n'est pas exclu que les algues à l'origine des échouages proviennent de dépôts initialement localisés sur les plateaux rocheux de la façade nord-est de Noirmoutier (Roches de Bouin et zones rocheuses du chenal d'Anjoubert).
- Les Roches de la Loire situées dans l'anse de la Guérinière représentent également une zone probable de croissance des ulves qui après arrachage, serait susceptible d'alimenter en algues les dépôts observés sur la façade sud-est de Noirmoutier et au sud de Fromentine.



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 33/177                     |

### 3. Calage et validation du modèle ECO-MARS3D

#### 3.1. Présentation du modèle ECO-MARS3D

Le modèle ECO-MARS3D, développé et maintenu à jour par Ifremer, repose sur le couplage du modèle hydrodynamique MARS évoqué au § 1 avec un modèle biologique simulant la croissance et la production primaire (phytoplancton et ulves pour la présente étude). Ce modèle rentre donc dans la catégorie des modèles d'écosystème couplé physique-biologie. Le module de croissance phytoplanctonique utilisé dans cette étude est celui décrit dans Ménesguen (2006). Ce modèle permet de prendre en compte la compétition entre les ulves et le phytoplancton. Une action spécifique de couplage du module Ulve extrait du modèle MARS3D-Ulves au modèle biochimique ECO-MARS3D a été engagée de façon à fonctionner avec le même module Ulve que dans CEVA (2011). Cette action a notamment concernée l'introduction de modifications dans le code initial (version r1023) de façon à permettre la prise en compte :

- Des processus dégradatifs en phase émergée pour le compartiment « Ulves »,
- L'introduction d'une spatialisation des dépôts en ulves sur la base des données de suivi cartographiques,
- La pondération en fonction de la saison des constantes d'absorption de l'azote et du phosphore pour les ulves,
- La prise en compte d'un relargage sédimentaire décrit ci-après.

D'une manière générale, le modèle ECO-MARS3D appartient à la classe de modèle de type NPZD pour Nutriments, Phytoplancton, Zooplancton, Détritus. Par défaut, trois classes de phytoplancton sont considérées : les diatomées, les dinoflagellés, le pico-nanoplancton et deux classes de zooplancton : le mesozooplancton et le microzooplancton.

Au total, 17 variables d'états reliées entre elles par les processus chimiques et biologiques exprimés sous forme d'équations différentielles ordinaires du temps ont été retenues :

- L'azote minéral dissous sous la forme nitrate ( $N-NO_3^-$ ) et ammonium ( $N-NH_4^+$ ), la forme nitrite étant négligée,
- Le phosphate minéral dissous dans l'eau ( $P-PO_4^{3-}$ ) et le phosphore adsorbé,
- Le silicium dissous dans l'eau ( $Si(OH)_4$ ),
- L'azote, le phosphore et la silice sous leur forme détritique dans l'eau,
- L'azote des diatomées, des dinoflagellés et du nanopicoplancton pour le phytoplancton,
- L'azote du mesozooplancton et du microzooplancton pour le zooplancton,
- L'azote et le phosphore des ulves en dépôt sous leur forme organique (incluse dans la matière vivante),
- La biomasse des ulves en dépôt,
- La matière en suspension (M.E.S).

Sur le schéma conceptuel (cf. Figure 13), les interactions entre ces différentes variables d'états sont détaillées pour le phytoplancton uniquement. Concernant les ulves, le schéma conceptuel est décrit dans Perrot (2014).





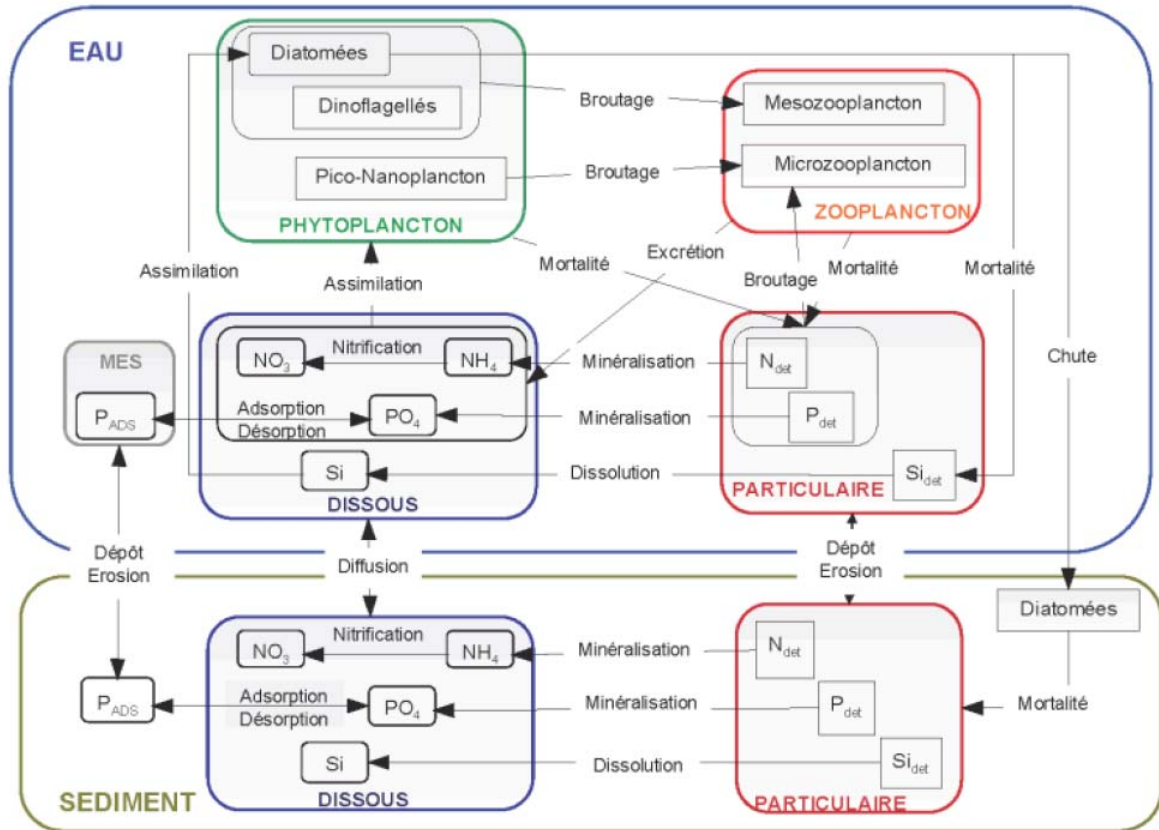


Figure 13 : Schéma conceptuel du modèle biogéochimique implanté dans ECO-MARS3D  
(Extrait de Huret, 2009)

Les équations différentielles du modèle ulves ainsi que le détail des processus modélisés sont décrits dans le rapport CEVA (2011).

Pour cette étude, le modèle sédimentaire disponible sous ECO-MARS3D et tel que décrit sur le schéma conceptuel n'a pas été activé en raison de la méconnaissance et de la complexité des processus sédimentaires à l'échelle de la vaste zone d'étude regroupant un grand nombre de nature de substrats (roches, vases, sables fins, sables grossiers, zones sablo-vaseuses ...). Cependant, la prise en compte d'un relargage sédimentaire au sein du modèle écologique en particulier pour les zones estuariennes de la Loire et de la Vilaine apparaît nécessaire au vu des premiers résultats de comparaison entre les mesures et le modèle et des conclusions de la mission MB4 concernant l'évolution des concentrations en nutriments entre l'amont et l'aval de l'estuaire de la Loire et le rôle probable du sédiment.

Le croisement de la carte Ifremer d'habitats physiques des fonds marins en France métropolitaine utilisant la classification EUNIS avec les grilles des modèles « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » a permis de produire, pour chacun des deux rang 1, une cartographie du sédiment segmentée en huit classes (cf. Tableau 2).



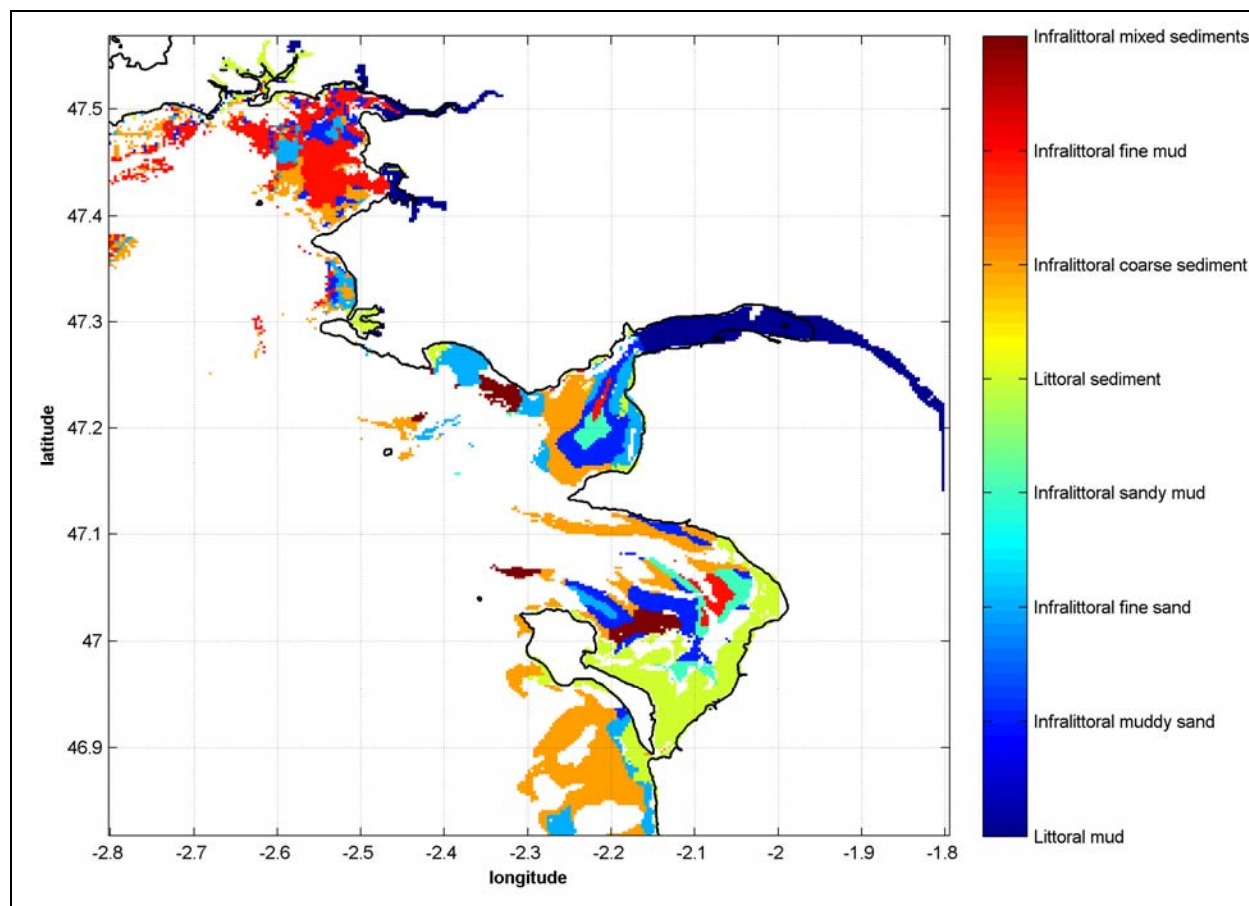


**Tableau 2 : Description des huit classes sédimentaires EUNIS retenues dans les deux modèles de rang 1**

| Classe EUNIS                          | code modèle |
|---------------------------------------|-------------|
| A2.3 : Littoral mud                   | 1           |
| A5.24 : Infralittoral muddy sand      | 2           |
| A5.23 : Infralittoral fine sand       | 3           |
| A5.33 : Infralittoral sandy mud       | 4           |
| A2 : Littoral sediment                | 5           |
| A5.13 : Infralittoral coarse sediment | 6           |
| A5.34 : Infralittoral fine mud        | 7           |
| A5.43 : Infralittoral mixed sediments | 8           |

Les cartographies présentées en Figure 14 et en Figure 15 (taille de maille: 250 m) résultant du croisement de la grille des deux modèles de rang 1 avec la cartographie des fonds marins d'Ifremer décrivent la distribution spatiale des classes sédimentaires retenues dans le cadre de l'étude.

Pour le modèle « Loire-Vilaine » (Figure 14), les principales zones vaseuses estuariennes (classe « Littoral mud ») correspondent aux estuaires de la Loire, de la Vilaine et de Pen-Bé.



**Figure 14 : Cartographie des huit classes sédimentaires selon la classification EUNIS pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ».**



S'agissant du modèle « Sables d'Olonnes-Ile de Ré » (Figure 15), l'anse d'Aiguillon, Fier d'Ars / la Fosse de Loix pour l'île de Ré et l'anse de Godechaud représentent les principales zones de vases estuariennes où la contribution du sédiment à l'enrichissement de la colonne d'eau en sels nutritifs ne peut être négligée. Les classes finales sédimentaires retenues ainsi que les valeurs du flux utilisées pour les deux modèles de rang 1 sont décrits dans le volet validation des deux modèles de rang 1 (cf. § 3.1).

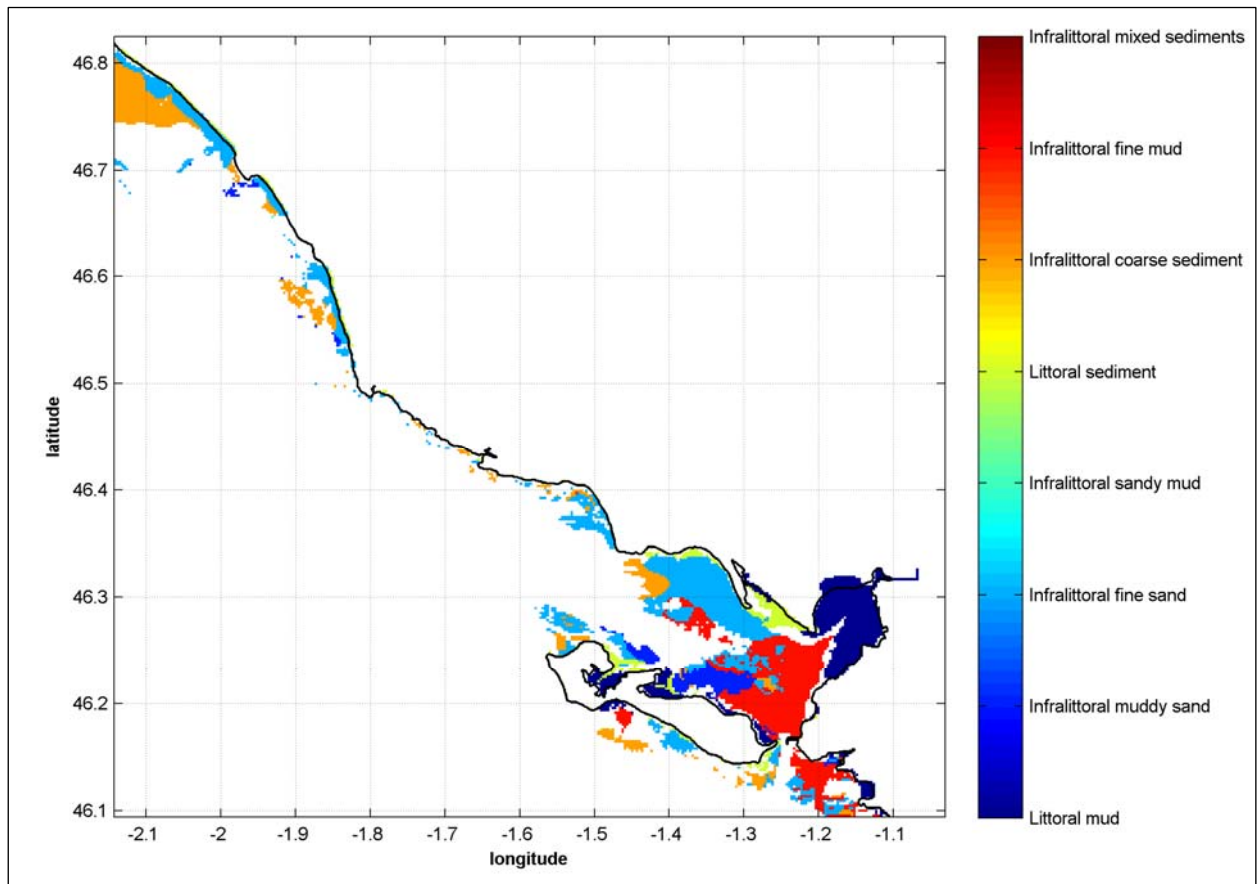


Figure 15 : Cartographie des huit classes sédimentaires selon la classification EUNIS pour le modèle de rang 1 « Sables d'Olonne – Ile de Ré ».



## 3.2. Description des données de forçage appliquées au modèle de rang 0 et aux deux modèles de rang 1

### 3.2.1. Données de flux

#### A - Modèle de rang 0

Pour le modèle de rang 0, un total de 48 exutoires a été pris en compte pour les simulations. Le Tableau 4 synthétise pour chacun des exutoires considérés les valeurs moyennes des séries de forçage utilisées dans le modèle pour le débit, les concentrations en nitrate, ammonium, phosphates dissous, silicate, matière en suspension, phosphore particulaire et azote organique. Les valeurs moyennes (débit et concentrations) ont été calculées avec les données fournies par la mission MB1 et concerne d'une manière générale la période allant de 2009 à 2012 inclus.

En raison de la taille de maille du modèle de rang 0 (800 m) inadaptée pour les petits et moyens cours d'eau, un seuil sur le débit moyen a été appliqué de façon à ne retenir que les apports les plus significatifs à l'échelle du linéaire du modèle de rang 0. Ce seuil a été fixé à  $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour permettre entre autres la prise en compte de la Sèvre Niortaise (« Exutoire\_311 ») ainsi que le regroupement de 41 cours d'eau (« EXUTOIRE\_130 » à « EXUTOIRE\_188 ») constitutifs des différents apports du **Golfe du Morbihan** comprenant également la rivière d'Auray (somme de leur débit moyen :  $8.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Le modèle de rang 0 n'incluant pas la bathymétrie du Golfe du Morbihan, le choix a été fait d'affecter aux 41 exutoires le même point de coordonnées ( $2.841^\circ \text{ W} / 47.488^\circ \text{ N}$ ) situé au sud est immédiat de Port Navalo (limite nord ouest du modèle). Dans ces conditions au vu de la position du point de rejet, la participation du Golfe du Morbihan à l'enrichissement de la colonne d'eau en sels nutritifs est *a priori* surestimée du fait de la non prise en compte à l'intérieur du Golfe du Morbihan des processus de consommation par la production primaire d'une partie des sels nutritifs d'origines terrigènes.

La colonne « nombre de STEP » du Tableau 4 indique si une station d'épuration a été intégrée ou non au calcul du flux de l'exutoire.

S'agissant de la **Gironde** (formée par la Dordogne et la Garonne) et de la **Charente**, les données de concentration en nutriments (nitrate, ammonium, phosphate, silicate, matières en suspension, phosphore particulaire et azote organique) ont été créées à partir des lois de passage détaillées dans Guillaud (2008). Ces lois de passage s'appuient directement sur les valeurs de débit mesurées en continu par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (cf. Tableau 3). Ainsi, pour les années simulées 2009 et 2012, des séries journalières spécifiques ont pu être élaborées pour ces deux cours d'eau.

**Tableau 3 : Caractéristiques des données de débit pour la Gironde et la Charente**

| Bassin   | Organisme de mesure | N° station | Lieu        |
|----------|---------------------|------------|-------------|
| Dordogne | AEAG <sup>(*)</sup> | 05047000   | Gardonne    |
| Garonne  | AEAG                | 05081000   | Couthures   |
| Charente | AEAG                | 05006900   | Taillebourg |

\* AEAG : Agence de l'Eau Adour-Garonne



Tableau 4 : Synthèse des exutoires et des séries de substances utilisées pour le forçage du modèle de rang 0 (« Exutoire\_10 » correspond à la Vilaine ; « Exutoire\_21 » à la Sèvre Nantaise; « Exutoire\_84 » au Lay ; « Exutoire\_312 » à la Loire et « Exutoire\_311 » à la Sèvre Niortaise). Débit et concentration exprimés en valeurs moyennes de 2009 à 2012 inclus

| nom exutoire | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_10  | -2.381                  | 47.495                | 64.938                    | 327.26           | 4.63              | 1.08               | 105.62            | 0.014                       | 1.67                            | 68.12                    |                |
| EXUTOIRE_21  | -1.721                  | 47.199                | 17.584                    | 222.52           | 15.95             | 3.62               | 158.88            | 0.012                       | 3.21                            | 85.18                    |                |
| EXUTOIRE_84  | -1.261                  | 46.276                | 12.485                    | 238.20           | 5.16              | 1.01               | 144.19            | 0.028                       | 2.51                            | 83.58                    |                |
| EXUTOIRE_130 | -2.841                  | 47.488                | 0.286                     | 163.71           | 15.11             | 4.89               | 166.83            | 0.006                       | 3.15                            | 130.16                   |                |
| EXUTOIRE_131 | -2.841                  | 47.488                | 0.035                     | 163.71           | 15.11             | 4.89               | 166.83            | 0.006                       | 3.15                            | 130.16                   |                |
| EXUTOIRE_132 | -2.841                  | 47.488                | 0.014                     | 163.71           | 15.11             | 4.89               | 166.83            | 0.006                       | 3.15                            | 130.16                   |                |
| EXUTOIRE_133 | -2.841                  | 47.488                | 0.017                     | 163.71           | 15.11             | 4.89               | 166.83            | 0.006                       | 3.15                            | 130.16                   |                |
| EXUTOIRE_134 | -2.841                  | 47.488                | 0.138                     | 163.71           | 15.11             | 4.89               | 166.83            | 0.006                       | 3.15                            | 130.16                   |                |
| EXUTOIRE_135 | -2.841                  | 47.488                | 0.014                     | 163.71           | 15.11             | 4.89               | 166.83            | 0.006                       | 3.15                            | 130.16                   |                |
| EXUTOIRE_136 | -2.841                  | 47.488                | 0.020                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_137 | -2.841                  | 47.488                | 0.020                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_139 | -2.841                  | 47.488                | 0.081                     | 420.68           | 2.33              | 0.97               | 230.28            | 0.006                       | 1.08                            | 49.58                    |                |
| EXUTOIRE_140 | -2.841                  | 47.488                | 0.041                     | 420.68           | 2.33              | 0.97               | 230.28            | 0.006                       | 1.08                            | 49.58                    |                |
| EXUTOIRE_141 | -2.841                  | 47.488                | 0.041                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_142 | -2.841                  | 47.488                | 2.512                     | 420.68           | 2.33              | 0.97               | 230.28            | 0.006                       | 1.08                            | 49.58                    |                |
| EXUTOIRE_143 | -2.841                  | 47.488                | 0.142                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_144 | -2.841                  | 47.488                | 0.993                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_145 | -2.841                  | 47.488                | 0.101                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_146 | -2.841                  | 47.488                | 0.081                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_147 | -2.841                  | 47.488                | 0.041                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_148 | -2.841                  | 47.488                | 0.020                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_149 | -2.841                  | 47.488                | 0.020                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_150 | -2.841                  | 47.488                | 0.086                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_151 | -2.841                  | 47.488                | 0.629                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_152 | -2.841                  | 47.488                | 0.372                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_153 | -2.841                  | 47.488                | 0.049                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_154 | -2.841                  | 47.488                | 0.588                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_155 | -2.841                  | 47.488                | 0.012                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_156 | -2.841                  | 47.488                | 0.845                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_157 | -2.841                  | 47.488                | 0.125                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_174 | -2.841                  | 47.488                | 0.052                     | 322.63           | 118.68            | 21.82              | 79.83             | 0.004                       | 7.25                            | 132.94                   | 1              |
| EXUTOIRE_175 | -2.841                  | 47.488                | 0.011                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_176 | -2.841                  | 47.488                | 0.043                     | 545.14           | 706.99            | 128.61             | 230.28            | 0.006                       | 44.15                           | 504.06                   | 1              |
| EXUTOIRE_177 | -2.841                  | 47.488                | 0.063                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_178 | -2.841                  | 47.488                | 0.043                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_179 | -2.841                  | 47.488                | 0.108                     | 310.81           | 18.75             | 3.82               | 120.53            | 0.007                       | 2.46                            | 161.54                   |                |
| EXUTOIRE_180 | -2.841                  | 47.488                | 0.014                     | 420.68           | 2.33              | 0.97               | 230.28            | 0.006                       | 1.08                            | 49.58                    |                |
| EXUTOIRE_182 | -2.841                  | 47.488                | 0.071                     | 420.68           | 2.33              | 0.97               | 230.28            | 0.006                       | 1.08                            | 49.58                    |                |
| EXUTOIRE_183 | -2.841                  | 47.488                | 0.057                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_184 | -2.841                  | 47.488                | 0.061                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_185 | -2.841                  | 47.488                | 0.020                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_186 | -2.841                  | 47.488                | 0.052                     | 259.07           | 6.11              | 1.43               | 115.42            | 0.019                       | 0.92                            | 52.64                    |                |
| EXUTOIRE_187 | -2.841                  | 47.488                | 0.101                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |



| nom exutoire | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_188 | -2.841                  | 47.488                | 0.041                     | 232.69           | 6.24              | 3.17               | 169.18            | 0.014                       | 3.60                            | 68.01                    |                |
| EXUTOIRE_311 | -1.114                  | 46.312                | 17.199                    | 352.61           | 4.40              | 1.10               | 136.59            | 0.024                       | 1.24                            | 50.94                    |                |
| EXUTOIRE_312 | -1.826                  | 47.221                | 623.076                   | 184.67           | 1.72              | 0.90               | 148.39            | 0.018                       | 1.44                            | 51.70                    |                |
| Gironde      | -0.658                  | 46.024                | 642.480                   | 137.68           | 3.93              | 1.25               | 113.37            | 0.0125                      | 1.38                            | 33.80                    |                |
| Charente     | -0.999                  | 45.972                | 63.190                    | 389.48           | 3.84              | 1.30               | 157.39            | 0.008                       | 1.30                            | 33.12                    |                |

### ***B - Modèles de rang 1 « Loire – Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré »***

Le modèle de rang 1 « **Loire-Vilaine** » regroupe un grand nombre des exutoires répertoriés dans la mission MB1. Au total, 156 sources ont été retenues pour cette emprise de modèle (Tableau 5). Les noms d'exutoires intitulés « STEP » (de « STEP\_318 » à « STEP\_351 ») correspondent aux STEPs qui rejettent directement leurs eaux usées en mer et qui ne sont pas raccordées à un cours d'eau. Le nombre total de STEPs raccordées à un cours d'eau et pris en compte dans le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » est de 36 auquel il faut ajouter 18 STEPs qui rejettent directement en mer soit un total de 54 STEPs. **Pour le silicate, seuls 41 sur 138 exutoires (hors Steps) disposaient de données de mesures. Une valeur moyenne basée sur la moyenne de l'ensemble des valeurs disponibles a finalement été affectée aux 97 exutoires sans donnée. Cette valeur moyenne est de 169.18 µmol.l<sup>-1</sup>.**

Le point de rejet de la Loire a été positionné au niveau du Couëron à 40 km en amont de St Nazaire ce qui permet au modèle de simuler la dilution progressive des sels nutritifs issue de l'estuaire de la Loire sous l'action du mouvement de va et vient de la marée. En ce point, la chasse dynamique de marée est importante comme en atteste les mesures de salinité enregistrées par la DDTM de Loire-Atlantique en 2009 (salinité variant entre 0 et 15 PSU). Le positionnement du point de rejet au niveau de Montjean d'où est issue l'essentiel des séries de forçage en débit et concentration (à l'exception des séries en phosphore dissous et en MES) n'a pas été possible en raison de la réduction importante de la largeur de la Loire en amont de Couëron (taille de la maille du modèle bien supérieure à la largeur de la Loire). Le positionnement au niveau de Couëron constitue un bon compromis.

A noter également pour la Loire, l'utilisation de la série haute fréquence de données en matière en suspension mesurées par le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Loire Estuaire à la station Bellevue située en amont immédiat de Nantes. Les mesures ont été acquises au moyen d'un turbidimètre (unité NTU) et transformée en mg.l<sup>-1</sup> au moyen d'une relation spécifique à la station Bellevue liant la concentration de la matière en suspension à la turbidité (loi communiquée au Ceva par le GIP Loire Estuaire).





**Tableau 5 : Synthèse des exutoires et des séries de substances utilisées pour le forçage du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ». (« Exutoire\_10 » correspond à la Vilaine ; « Exutoire\_21 » à la Sèvre Nantaise; « Exutoire\_84 » au Lay ; « Exutoire\_312 » à la Loire et « Exutoire\_311 » à la Sèvre Niortaise). Débit et concentration exprimés en valeurs moyennes de 2009 à 2012 inclus**

| nom exutoire | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_0   | -2.420                  | 47.493                | 0.020                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_1   | -2.404                  | 47.496                | 0.010                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_2   | -2.453                  | 47.493                | 0.031                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_3   | -2.388                  | 47.504                | 0.020                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_4   | -2.423                  | 47.498                | 0.069                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_5   | -2.407                  | 47.493                | 0.015                     | 90.78            | 101.29            | 27.71              | 169.18            | -                           | 13.27                           | 567.69                   | 1              |
| EXUTOIRE_6   | -2.501                  | 47.535                | 1.633                     | 363.73           | 11.79             | 4.37               | 246.26            | 0.025                       | 3.82                            | 89.85                    | 2              |
| EXUTOIRE_7   | -2.472                  | 47.498                | 0.006                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_8   | -2.407                  | 47.498                | 0.020                     | 366.86           | 31.63             | 8.41               | 250.71            | 0.026                       | 5.14                            | 108.18                   | 1              |
| EXUTOIRE_9   | -2.469                  | 47.509                | 0.023                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_10  | -2.384                  | 47.498                | 64.938                    | 327.26           | 4.63              | 1.08               | 105.62            | 0.014                       | 1.67                            | 68.12                    |                |
| EXUTOIRE_11  | -1.821                  | 47.219                | 0.121                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_12  | -1.905                  | 47.281                | 0.053                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_13  | -2.018                  | 47.297                | 1.072                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_14  | -1.843                  | 47.250                | 0.008                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_15  | -1.811                  | 47.215                | 0.113                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_17  | -1.924                  | 47.284                | 0.166                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_18  | -1.811                  | 47.215                | 0.264                     | 377.57           | 55.28             | 7.20               | 165.87            | 0.015                       | 2.93                            | 100.78                   | 2              |
| EXUTOIRE_19  | -2.051                  | 47.303                | 0.951                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_20  | -1.898                  | 47.279                | 0.287                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_21  | -1.811                  | 47.215                | 17.584                    | 222.52           | 15.95             | 3.62               | 158.88            | 0.012                       | 3.21                            | 85.18                    |                |
| EXUTOIRE_22  | -2.177                  | 47.162                | 0.092                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_23  | -1.811                  | 47.215                | 0.842                     | 145.86           | 16.52             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 100.67                   |                |
| EXUTOIRE_24  | -1.811                  | 47.215                | 0.054                     | 145.86           | 16.52             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 100.67                   |                |
| EXUTOIRE_25  | -2.102                  | 47.303                | 1.110                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_26  | -1.811                  | 47.215                | 0.043                     | 400.37           | 5.54              | 1.88               | 185.30            | 0.016                       | 1.36                            | 70.67                    |                |
| EXUTOIRE_27  | -1.811                  | 47.215                | 0.025                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_28  | -1.811                  | 47.215                | 0.013                     | 145.86           | 16.52             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 100.67                   |                |
| EXUTOIRE_29  | -1.811                  | 47.215                | 0.038                     | 264.51           | 8.42              | 2.86               | 169.18            | 0.01                        | 2.64                            | 79.37                    |                |
| EXUTOIRE_30  | -1.811                  | 47.215                | 0.095                     | 264.51           | 8.42              | 2.86               | 169.18            | 0.01                        | 2.64                            | 79.37                    |                |
| EXUTOIRE_31  | -1.811                  | 47.215                | 0.022                     | 264.51           | 8.42              | 2.86               | 169.18            | 0.01                        | 2.64                            | 79.37                    |                |
| EXUTOIRE_32  | -1.811                  | 47.215                | 0.034                     | 145.86           | 16.52             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 100.67                   |                |
| EXUTOIRE_33  | -1.811                  | 47.215                | 0.022                     | 264.51           | 8.42              | 2.86               | 169.18            | 0.01                        | 2.64                            | 79.37                    |                |
| EXUTOIRE_34  | -1.895                  | 47.279                | 0.219                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_35  | -1.821                  | 47.219                | 0.119                     | 400.37           | 5.54              | 1.88               | 185.30            | 0.016                       | 1.36                            | 70.67                    |                |
| EXUTOIRE_36  | -1.821                  | 47.219                | 3.108                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_37  | -2.012                  | 47.286                | 0.198                     | 286.62           | 445.67            | 47.90              | 169.18            | 0.017                       | 14.32                           | 236.24                   | 2              |
| EXUTOIRE_38  | -2.180                  | 47.255                | 0.022                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_39  | -1.811                  | 47.215                | 0.077                     | 226.08           | 204.34            | 23.90              | 169.18            | 0.013                       | 6.53                            | 140.27                   | 1              |
| EXUTOIRE_40  | -1.811                  | 47.215                | 0.030                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_41  | -2.141                  | 47.299                | 0.057                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   | 1              |
| EXUTOIRE_42  | -2.093                  | 47.290                | 0.022                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_43  | -2.151                  | 47.270                | 0.020                     | 112.78           | 51.88             | 7.18               | 169.18            | 0.117                       | 1.55                            | 116.81                   | 1              |
| EXUTOIRE_44  | -2.115                  | 47.279                | 0.053                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |







# Document de référence (MB2)

Réf. CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0

Date 04/06/14

Page 41/177

| nom exutoire | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_45  | -2.083                  | 47.290                | 0.054                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_46  | -2.086                  | 47.303                | 0.048                     | 149.95           | 159.89            | 35.76              | 169.18            | 0.039                       | 12.58                           | 119.18                   | 1              |
| EXUTOIRE_47  | -2.128                  | 47.277                | 0.013                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_48  | -1.811                  | 47.215                | 0.121                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_49  | -2.128                  | 47.301                | 0.022                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_50  | -1.863                  | 47.266                | 0.030                     | 74.83            | 3127.99           | 223.30             | 169.18            | 0.02                        | 58.73                           | 2667.26                  |                |
| EXUTOIRE_51  | -1.992                  | 47.292                | 0.008                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_52  | -1.811                  | 47.215                | 0.015                     | 103.96           | 10.87             | 2.50               | 169.18            | 0.017                       | 2.08                            | 68.61                    |                |
| EXUTOIRE_53  | -2.005                  | 47.295                | 0.008                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_54  | -2.067                  | 47.290                | 0.108                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_55  | -1.915                  | 47.284                | 0.015                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_56  | -1.811                  | 47.215                | 0.076                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_57  | -1.856                  | 47.261                | 0.030                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_58  | -1.811                  | 47.215                | 0.008                     | 103.96           | 10.87             | 2.50               | 169.18            | 0.017                       | 2.08                            | 68.61                    |                |
| EXUTOIRE_59  | -1.859                  | 47.257                | 3.402                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_60  | -1.846                  | 47.253                | 0.008                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_62  | -1.840                  | 47.246                | 0.145                     | 141.26           | 31.33             | 4.97               | 169.18            | 0.01                        | 2.57                            | 104.47                   | 1              |
| EXUTOIRE_63  | -1.983                  | 47.284                | 0.015                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_65  | -1.811                  | 47.215                | 5.463                     | 145.86           | 16.52             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 100.67                   |                |
| EXUTOIRE_66  | -2.177                  | 47.213                | 0.251                     | 227.66           | 76.10             | 10.41              | 169.18            | 0.015                       | 2.84                            | 128.70                   | 1              |
| EXUTOIRE_67  | -2.174                  | 47.173                | 0.176                     | 217.92           | 84.54             | 5.74               | 169.18            | 0.022                       | 2.06                            | 112.15                   | 1              |
| EXUTOIRE_68  | -1.821                  | 47.219                | 1.066                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_69  | -1.811                  | 47.215                | 0.098                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_70  | -1.811                  | 47.215                | 0.744                     | 265.04           | 11.79             | 6.99               | 169.18            | 0.01                        | 2.34                            | 80.85                    | 1              |
| EXUTOIRE_71  | -1.811                  | 47.215                | 0.310                     | 103.96           | 10.87             | 2.50               | 169.18            | 0.017                       | 2.08                            | 68.61                    |                |
| EXUTOIRE_72  | -1.963                  | 47.288                | 0.143                     | 74.83            | 16.71             | 2.63               | 169.18            | 0.02                        | 3.57                            | 121.67                   |                |
| EXUTOIRE_73  | -2.177                  | 47.286                | 2.236                     | 151.78           | 733.38            | 43.24              | 169.18            | 0.011                       | 12.45                           | 532.60                   | 1              |
| EXUTOIRE_74  | -1.811                  | 47.215                | 0.596                     | 142.82           | 16.12             | 3.20               | 169.18            | 0.018                       | 3.69                            | 93.84                    | 2              |
| EXUTOIRE_158 | -2.569                  | 47.551                | 0.020                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_159 | -2.592                  | 47.529                | 0.006                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_160 | -2.657                  | 47.542                | 0.020                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_161 | -2.582                  | 47.557                | 0.020                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_162 | -2.621                  | 47.544                | 0.010                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_163 | -2.618                  | 47.542                | 0.135                     | 352.23           | 28.89             | 7.36               | 221.27            | 0.021                       | 3.52                            | 89.56                    | 2              |
| EXUTOIRE_164 | -2.582                  | 47.533                | 0.017                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_165 | -2.582                  | 47.557                | 0.098                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_166 | -2.589                  | 47.538                | 0.010                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_167 | -2.660                  | 47.544                | 0.059                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_168 | -2.663                  | 47.542                | 0.049                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_169 | -2.582                  | 47.557                | 0.206                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_210 | -2.459                  | 47.416                | 0.069                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_211 | -2.449                  | 47.416                | 0.006                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_212 | -2.663                  | 47.518                | 0.069                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |
| EXUTOIRE_213 | -2.478                  | 47.434                | 0.155                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_214 | -2.433                  | 47.412                | 0.428                     | 42.41            | 158.01            | 31.59              | 169.18            | -                           | 18.43                           | 987.51                   | 1              |
| EXUTOIRE_215 | -2.530                  | 47.390                | 0.006                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_216 | -2.734                  | 47.502                | 0.070                     | 326.48           | 66.42             | 9.27               | 150.96            | 0.012                       | 3.87                            | 98.22                    | 1              |
| EXUTOIRE_217 | -2.728                  | 47.504                | 0.057                     | 366.86           | 9.52              | 4.26               | 250.71            | 0.026                       | 4.10                            | 90.09                    |                |



Centre d'Étude et de Valorisation des Algues

BP 3 – 22610 PLEUBIAN

Téléphone : 02 96 22 93 50 – Télécopie : 02 96 22 84 38 – E.mail : algue@ceva.fr



# Document de référence (MB2)

Réf. CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0

Date 04/06/14

Page 42/177

| nom exutoire | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_218 | -2.504                  | 47.295                | 0.008                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_219 | -2.495                  | 47.308                | 0.003                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_220 | -2.495                  | 47.308                | 0.008                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_221 | -2.527                  | 47.361                | 0.017                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_222 | -2.553                  | 47.367                | 0.006                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_224 | -2.495                  | 47.308                | 0.003                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_225 | -2.504                  | 47.295                | 0.025                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_226 | -2.517                  | 47.348                | 0.049                     | 171.60           | 85.20             | 57.30              | 169.18            | -                           | 23.11                           | 224.26                   | 1              |
| EXUTOIRE_227 | -2.495                  | 47.308                | 0.008                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_228 | -2.420                  | 47.270                | 0.038                     | 31.42            | 111.58            | 27.12              | 169.18            | -                           | 17.46                           | 961.21                   |                |
| EXUTOIRE_229 | -2.051                  | 46.994                | 0.658                     | 193.16           | 14.91             | 7.12               | 118.05            | 0.023                       | 5.97                            | 114.01                   |                |
| EXUTOIRE_230 | -2.109                  | 47.107                | 0.652                     | 141.17           | 56.22             | 7.73               | 169.18            | 0.012                       | 2.73                            | 103.09                   | 1              |
| EXUTOIRE_231 | -2.216                  | 46.987                | 0.078                     | 115.41           | 70.68             | 10.70              | 169.18            | 0.178                       | 4.93                            | 147.54                   | 2              |
| EXUTOIRE_232 | -2.047                  | 47.001                | 0.048                     | 193.16           | 14.91             | 7.12               | 118.05            | 0.023                       | 5.97                            | 114.01                   |                |
| EXUTOIRE_233 | -2.219                  | 46.987                | 0.005                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_234 | -2.219                  | 46.987                | 0.014                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_235 | -2.219                  | 46.987                | 0.005                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_236 | -2.213                  | 46.976                | 0.007                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_237 | -2.242                  | 47.021                | 0.003                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_238 | -2.196                  | 47.120                | 0.053                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_239 | -2.009                  | 47.027                | 0.078                     | 193.16           | 14.91             | 7.12               | 118.05            | 0.023                       | 5.97                            | 114.01                   |                |
| EXUTOIRE_240 | -2.064                  | 46.954                | 0.599                     | 193.16           | 14.91             | 7.12               | 118.05            | 0.023                       | 5.97                            | 114.01                   |                |
| EXUTOIRE_241 | -2.080                  | 46.941                | 0.052                     | 37.71            | 19.96             | 3.59               | 169.18            | 0.216                       | 2.31                            | 171.95                   |                |
| EXUTOIRE_242 | -2.125                  | 46.899                | 1.250                     | 91.58            | 31.30             | 9.30               | 169.18            | 0.054                       | 7.55                            | 163.80                   | 1              |
| EXUTOIRE_243 | -1.989                  | 47.027                | 0.865                     | 217.31           | 48.27             | 8.34               | 90.17             | 0.018                       | 4.86                            | 108.65                   | 1              |
| EXUTOIRE_244 | -2.125                  | 46.899                | 0.694                     | 49.94            | 9.03              | 3.09               | 169.18            | 0.087                       | 8.70                            | 179.61                   |                |
| EXUTOIRE_270 | -1.811                  | 47.215                | 4.880                     | 62.20            | 5.02              | 1.15               | 169.18            | 0.016                       | 2.87                            | 101.85                   | 1              |
| EXUTOIRE_278 | -2.080                  | 46.943                | 0.617                     | 37.71            | 19.96             | 3.59               | 169.18            | 0.216                       | 2.31                            | 171.95                   |                |
| EXUTOIRE_290 | -1.811                  | 47.215                | 0.380                     | 116.14           | 16.25             | 4.20               | 169.18            | 0.007                       | 2.91                            | 85.77                    |                |
| EXUTOIRE_291 | -1.811                  | 47.215                | 0.708                     | 181.41           | 8.57              | 2.35               | 220.57            | 0.012                       | 2.94                            | 68.02                    |                |
| EXUTOIRE_292 | -1.811                  | 47.215                | 0.538                     | 125.73           | 14.87             | 3.48               | 169.18            | 0.021                       | 2.53                            | 76.76                    |                |
| EXUTOIRE_295 | -2.180                  | 47.160                | 0.009                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_296 | -2.138                  | 46.932                | 0.014                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_297 | -2.216                  | 46.987                | 0.036                     | 50.14            | 13.69             | 5.92               | 169.18            | 0.061                       | 8.25                            | 172.25                   |                |
| EXUTOIRE_299 | -1.811                  | 47.215                | 0.619                     | 145.86           | 16.52             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 100.67                   |                |
| EXUTOIRE_300 | -1.811                  | 47.215                | 0.054                     | 145.86           | 75.50             | 3.21               | 169.18            | 0.019                       | 3.99                            | 148.92                   | 1              |
| EXUTOIRE_301 | -1.811                  | 47.215                | 0.136                     | 259.90           | 46.93             | 8.31               | 169.18            | 0.014                       | 2.93                            | 90.44                    | 1              |
| EXUTOIRE_302 | -1.811                  | 47.215                | 0.006                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_303 | -1.811                  | 47.215                | 0.090                     | 221.94           | 511.71            | 52.09              | 96.31             | 0.015                       | 11.48                           | 157.95                   | 1              |
| EXUTOIRE_304 | -1.811                  | 47.215                | 0.087                     | 255.57           | 114.25            | 22.55              | 82.23             | 0.054                       | 7.64                            | 109.86                   | 2              |
| EXUTOIRE_305 | -1.811                  | 47.215                | 0.091                     | 222.52           | 7.33              | 2.86               | 158.88            | 0.012                       | 3.02                            | 78.13                    |                |
| EXUTOIRE_306 | -1.811                  | 47.215                | 0.023                     | 103.96           | 10.87             | 2.50               | 169.18            | 0.017                       | 2.08                            | 68.61                    |                |
| EXUTOIRE_307 | -1.811                  | 47.215                | 0.045                     | 103.96           | 10.87             | 2.50               | 169.18            | 0.017                       | 2.08                            | 68.61                    |                |
| EXUTOIRE_308 | -1.811                  | 47.215                | 0.310                     | 103.96           | 28.20             | 5.34               | 169.18            | 0.017                       | 2.79                            | 82.78                    | 1              |
| EXUTOIRE_309 | -1.950                  | 47.281                | 3.500                     | 138.24           | 16.63             | 2.81               | 169.18            | 0.024                       | 2.09                            | 132.78                   |                |
| EXUTOIRE_312 | -1.821                  | 47.222                | 623.076                   | 184.67           | 1.72              | 0.90               | 148.39            | 0.018                       | 1.44                            | 51.70                    |                |
| STEP_318     | -1.824                  | 47.224                | 0.029                     | 166.88           | 114.19            | 29.10              | -                 | -                           | 7.23                            | 128.08                   | 1              |
| STEP_319     | -2.456                  | 47.261                | 0.169                     | 135.08           | 69.90             | 43.24              | -                 | -                           | 10.81                           | 124.99                   | 1              |



Centre d'Étude et de Valorisation des Algues

BP 3 – 22610 PLEUBIAN

Téléphone : 02 96 22 93 50 – Télécopie : 02 96 22 84 38 – E.mail : algue@ceva.fr

| nom exutoire     | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| STEP_320         | -1.808                  | 47.206                | 1.048                     | 477.27           | 96.48             | 27.85              | -                 | -                           | 8.97                            | 110.66                   | 1              |
| STEP_321         | -1.808                  | 47.211                | 0.283                     | 615.00           | 365.11            | 30.18              | -                 | -                           | 9.49                            | 209.89                   | 1              |
| STEP_322         | -1.808                  | 47.213                | 0.008                     | 272.75           | 146.97            | 50.96              | -                 | -                           | 10.72                           | 33.42                    | 1              |
| STEP_325         | -2.559                  | 47.511                | 0.016                     | 124.33           | 313.08            | 39.05              | -                 | -                           | 6.92                            | 156.96                   | 1              |
| STEP_326         | -2.465                  | 47.493                | 0.010                     | 345.00           | 114.60            | 26.60              | -                 | -                           | 8.27                            | 60.25                    | 1              |
| STEP_328         | -2.699                  | 47.500                | 0.005                     | 98.02            | 399.99            | 93.59              | -                 | -                           | 23.60                           | 298.77                   | 1              |
| STEP_329         | -2.666                  | 47.535                | 0.002                     | 57.01            | 60.46             | 38.60              | -                 | -                           | 5.64                            | 41.54                    | 1              |
| STEP_330         | -2.135                  | 46.919                | 0.009                     | 159.53           | 88.64             | 21.73              | -                 | -                           | 5.30                            | 135.97                   | 1              |
| STEP_331         | -2.161                  | 46.886                | 0.006                     | 145.30           | 152.14            | 26.32              | -                 | -                           | 8.19                            | 152.18                   | 1              |
| STEP_333         | -2.213                  | 46.850                | 0.011                     | 251.82           | 796.15            | 167.06             | -                 | -                           | 22.73                           | 306.80                   | 1              |
| STEP_arcelor_341 | -1.808                  | 47.208                | 0.016                     | -                | 4.42              | 17.92              | -                 | -                           | 4.48                            | 3.61                     | 1              |
| STEP_donges_344  | -2.057                  | 47.303                | 0.088                     | -                | 611.46            | 13.86              | -                 | -                           | 3.47                            | 500.29                   | 1              |
| STEP_348         | -2.219                  | 47.264                | 0.053                     | 585.70           | 1446.59           | 130.28             | -                 | -                           | 39.51                           | 722.86                   | 1              |
| STEP_349         | -2.216                  | 46.987                | 0.231                     | -                | 5.87              | -                  | -                 | -                           | -                               | 5.28                     | 1              |
| STEP_350         | -2.216                  | 46.987                | 0.069                     | -                | 17.60             | 4.71               | -                 | -                           | 3.61                            | 15.84                    | 1              |
| STEP_351         | -2.216                  | 46.987                | 0.231                     | -                | 14.67             | 10.60              | -                 | -                           | 8.12                            | 13.20                    | 1              |

Le modèle « **Sables d'Olonne – Ile de Ré** » comptabilise 53 sources réparties en 43 exutoires et 10 STEP's qui rejettent directement en mer (Tableau 6). Le nombre de STEP's raccordées à un cours d'eau est de 16 ce qui porte à 26 le nombre total de STEP's considérées dans ce modèle de rang 1. On note pour la Step industrielle Rhodia située devant La Rochelle des teneurs moyennes en ammonium (42921.29 µmol.l<sup>-1</sup>) et phosphate (172.60 µmol.l<sup>-1</sup>) extrêmement élevées.

**Tableau 6 : Synthèse des exutoires et des séries de substances utilisées pour le forçage du modèle de rang 1 «Sables d'Olonne-Ile de Ré». (« Exutoire\_84 » correspond au Lay ; « Exutoire\_311 » à la Sèvre Niortaise). Débit et concentration exprimés en valeurs moyennes de 2009 à 2012 inclus**

| nom exutoire | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_75  | -1.933                  | 46.695                | 0.059                     | 245.71           | 21.80             | 13.13              | 169.69            | 0.016                       | 6.21                            | 93.22                    | 2              |
| EXUTOIRE_76  | -1.933                  | 46.695                | 0.083                     | 152.99           | 12.81             | 2.02               | 125.47            | 0.041                       | 5.10                            | 130.21                   |                |
| EXUTOIRE_77  | -1.936                  | 46.695                | 0.230                     | 171.90           | 31.56             | 6.46               | 169.18            | 0.044                       | 4.16                            | 271.89                   |                |
| EXUTOIRE_78  | -1.936                  | 46.695                | 1.796                     | 189.44           | 25.19             | 3.27               | 169.18            | 0.027                       | 1.20                            | 99.73                    | 1              |
| EXUTOIRE_79  | -1.933                  | 46.695                | 3.653                     | 247.82           | 29.53             | 7.62               | 169.69            | 0.016                       | 4.52                            | 99.39                    | 1              |
| EXUTOIRE_80  | -1.273                  | 46.295                | 0.022                     | 238.20           | 5.16              | 1.01               | 144.19            | 0.028                       | 2.51                            | 83.58                    |                |
| EXUTOIRE_81  | -1.280                  | 46.300                | 0.017                     | 238.20           | 5.16              | 1.01               | 144.19            | 0.028                       | 2.51                            | 83.58                    |                |
| EXUTOIRE_83  | -1.296                  | 46.315                | 0.297                     | 238.20           | 5.16              | 1.01               | 144.19            | 0.028                       | 2.51                            | 83.58                    |                |
| EXUTOIRE_84  | -1.296                  | 46.313                | 12.485                    | 238.20           | 5.16              | 1.01               | 144.19            | 0.028                       | 2.51                            | 83.58                    |                |
| EXUTOIRE_88  | -1.157                  | 46.291                | 0.446                     | 399.80           | 16.88             | 4.54               | 169.18            | 0.053                       | 1.42                            | 80.22                    | 1              |
| EXUTOIRE_93  | -1.150                  | 46.295                | 0.732                     | 410.83           | 8.37              | 1.56               | 169.18            | 0.054                       | 1.00                            | 72.06                    |                |
| EXUTOIRE_94  | -1.167                  | 46.264                | 0.748                     | 677.81           | 8.14              | 0.46               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 70.08                    |                |
| EXUTOIRE_101 | -1.183                  | 46.230                | 0.034                     | 603.38           | 88.01             | 18.28              | 169.18            | 0.027                       | 5.96                            | 112.83                   | 1              |
| EXUTOIRE_109 | -1.196                  | 46.280                | 0.412                     | 410.83           | 8.37              | 1.56               | 169.18            | 0.054                       | 1.00                            | 72.06                    |                |
| EXUTOIRE_110 | -1.167                  | 46.266                | 3.134                     | 677.81           | 8.14              | 0.46               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 70.08                    |                |
| EXUTOIRE_245 | -1.862                  | 46.610                | 0.011                     | 60.49            | 2.73              | 2.57               | 169.18            | 0.052                       | 1.65                            | 23.55                    |                |





# Document de référence (MB2)

|      |                            |
|------|----------------------------|
| Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
| Date | 04/06/14                   |
| Page | 44/177                     |

| nom exutoire    | longitude (degré Ouest) | latitude (degré Nord) | débit (m <sup>3</sup> /s) | Nitrate (µmol/l) | Ammonium (µmol/l) | phosphate (µmol/l) | silicate (µmol/l) | matière en suspension (g/l) | Phosphore particulaire (µmol/l) | Azote organique (µmol/l) | nombre de STEP |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| EXUTOIRE_246    | -1.878                  | 46.626                | 0.055                     | 253.42           | 233.18            | 33.15              | 169.18            | 0.257                       | 11.41                           | 71.71                    | 1              |
| EXUTOIRE_247    | -1.852                  | 46.586                | 0.171                     | 308.67           | 23.48             | 9.51               | 169.18            | 0.012                       | 6.12                            | 202.23                   |                |
| EXUTOIRE_248    | -1.739                  | 46.465                | 0.050                     | 187.66           | 2.59              | 1.71               | 169.18            | 0.014                       | 1.10                            | 22.35                    |                |
| EXUTOIRE_249    | -1.794                  | 46.490                | 0.315                     | 148.01           | 85.62             | 33.58              | 169.18            | -                           | 10.18                           | 99.55                    | 1              |
| EXUTOIRE_250    | -1.700                  | 46.445                | 0.009                     | 97.85            | 7.33              | 10.73              | 169.18            | 0.016                       | 6.90                            | 63.16                    |                |
| EXUTOIRE_251    | -1.652                  | 46.425                | 0.225                     | 339.69           | 117.57            | 18.41              | 169.18            | 0.015                       | 4.58                            | 95.51                    | 1              |
| EXUTOIRE_252    | -1.794                  | 46.490                | 0.018                     | 305.27           | 27.61             | 5.49               | 169.18            | -                           | 5.72                            | 92.40                    |                |
| EXUTOIRE_253    | -1.652                  | 46.425                | 0.469                     | 143.46           | 88.79             | 13.19              | 169.18            | 0.051                       | 2.54                            | 102.38                   | 3              |
| EXUTOIRE_254    | -1.542                  | 46.405                | 0.244                     | 450.62           | 53.03             | 7.63               | 169.18            | 0.012                       | 2.07                            | 87.75                    | 1              |
| EXUTOIRE_255    | -1.765                  | 46.481                | 0.052                     | 195.15           | 20.08             | 2.60               | 169.18            | 0.028                       | 1.67                            | 172.98                   |                |
| EXUTOIRE_256    | -1.716                  | 46.456                | 0.074                     | 340.41           | 255.64            | 42.24              | 169.18            | 0.073                       | 13.19                           | 410.53                   | 1              |
| EXUTOIRE_258    | -1.425                  | 46.186                | 0.057                     | 679.33           | 8.43              | 0.47               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 72.61                    |                |
| EXUTOIRE_259    | -1.496                  | 46.221                | 0.011                     | 679.33           | 8.43              | 0.47               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 72.61                    |                |
| EXUTOIRE_260    | -1.493                  | 46.224                | 0.019                     | 679.33           | 8.43              | 0.47               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 72.61                    |                |
| EXUTOIRE_261    | -1.425                  | 46.213                | 0.064                     | 679.33           | 8.43              | 0.47               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 72.61                    |                |
| EXUTOIRE_262    | -1.419                  | 46.213                | 0.011                     | 679.33           | 8.43              | 0.47               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 72.61                    |                |
| EXUTOIRE_263    | -1.490                  | 46.224                | 0.020                     | 280.95           | 332.36            | 51.52              | 169.18            | 0.375                       | 17.92                           | 188.22                   | 1              |
| EXUTOIRE_264    | -1.483                  | 46.226                | 0.015                     | 679.33           | 8.43              | 0.47               | 169.18            | 0.033                       | 0.30                            | 72.61                    |                |
| EXUTOIRE_265    | -1.209                  | 46.201                | 0.130                     | 585.84           | 74.70             | 15.10              | 169.18            | 0.011                       | 5.21                            | 87.30                    | 1              |
| EXUTOIRE_267    | -1.167                  | 46.152                | 0.142                     | 642.91           | 6.35              | 0.60               | 169.18            | 0.013                       | 0.39                            | 54.73                    |                |
| EXUTOIRE_268    | -1.118                  | 46.096                | 0.268                     | 642.91           | 6.35              | 0.60               | 169.18            | 0.013                       | 0.39                            | 54.73                    |                |
| EXUTOIRE_269    | -1.141                  | 46.114                | 0.163                     | 642.91           | 6.35              | 0.60               | 169.18            | 0.013                       | 0.39                            | 54.73                    |                |
| EXUTOIRE_279    | -1.167                  | 46.152                | 0.347                     | 642.91           | 6.35              | 0.60               | 169.18            | 0.013                       | 0.39                            | 54.73                    |                |
| EXUTOIRE_293    | -1.852                  | 46.586                | 2.018                     | 256.05           | 20.09             | 3.56               | 169.18            | 0.013                       | 4.13                            | 81.28                    |                |
| EXUTOIRE_294    | -1.652                  | 46.425                | 0.113                     | 168.72           | 5.22              | 0.61               | 169.18            | 0.042                       | 0.39                            | 44.94                    |                |
| EXUTOIRE_310    | -1.082                  | 46.315                | 2.399                     | 337.03           | 20.46             | 1.08               | 169.18            | 0.048                       | 5.11                            | 88.82                    |                |
| EXUTOIRE_311    | -1.092                  | 46.315                | 17.199                    | 352.61           | 4.40              | 1.10               | 136.59            | 0.024                       | 1.24                            | 50.94                    |                |
| STEP_313        | -1.551                  | 46.213                | 0.017                     | 574.79           | 427.84            | 74.99              | -                 | -                           | 23.69                           | 222.12                   | 1              |
| STEP_314        | -1.422                  | 46.181                | 0.021                     | 194.05           | 120.26            | 39.54              | -                 | -                           | 11.86                           | 124.61                   | 1              |
| STEP_315        | -1.361                  | 46.219                | 0.019                     | 130.00           | 109.22            | 24.51              | -                 | -                           | 7.42                            | 99.32                    | 1              |
| STEP_316        | -1.189                  | 46.148                | 0.251                     | 118.70           | 380.27            | 32.18              | -                 | -                           | 8.05                            | 149.86                   | 1              |
| STEP_317        | -1.331                  | 46.145                | 0.012                     | 200.00           | 372.96            | 77.03              | -                 | -                           | 27.84                           | 181.50                   | 1              |
| STEP_332        | -1.943                  | 46.695                | 0.006                     | 59.65            | 485.72            | 107.27             | -                 | -                           | 32.61                           | 400.92                   | 1              |
| STEP_334        | -1.939                  | 46.695                | 0.067                     | 387.74           | 1373.90           | 69.77              | -                 | -                           | 21.68                           | 534.45                   | 1              |
| STEP_335        | -2.046                  | 46.762                | 0.049                     | 342.24           | 990.99            | 19.91              | -                 | -                           | 6.14                            | 333.72                   | 1              |
| STEP_rhodia_336 | -1.189                  | 46.148                | 0.010                     | -                | 42921.29          | 172.60             | -                 | -                           | 43.15                           | 35117.42                 | 1              |
| STEP_347        | -1.422                  | 46.340                | 0.024                     | 274.83           | 298.32            | 30.57              | -                 | -                           | 10.40                           | 197.36                   | 1              |



### 3.2.2. Séries de forçage en phosphore particulaire, adsorbé et en azote organique

#### 3.2.2.1. Estuaires de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre-Niortaise et du Lay

Pour ces quatre grands estuaires, les formes particulières du phosphore et de l'azote organique peuvent représenter après minéralisation une part importante dans le bilan global des apports en sels nutritifs apportés au milieu. Ces estuaires ont par conséquent fait l'objet d'une attention particulière dans la constitution des séries de forçage. Sur la base du schéma de principe exposé en Figure 16 et à partir des mesures disponibles en phosphore total, des séries en phosphore dissous, phosphore particulaire et phosphore adsorbé ont été créées (cf. valeurs moyennes dans le Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6). Une simple loi linéaire a été utilisée permettant de déduire des mesures en phosphore total, la série en phosphore dissous. La pente de la loi linéaire a été obtenue en ajustant la série en phosphore dissous déduite à partir du phosphore total aux mesures disponibles en phosphore dissous. Le Tableau 7 décrit la valeur « K » de la pente qui varie d'un estuaire à l'autre tout en restant dans des gammes de valeurs proches. S'agissant du phosphore particulaire, il a été déduit en soustrayant au phosphore total la partie dissoute déduite de l'étape précédente. Connaissant ensuite le phosphore particulaire et sur la base des estimations établies par Aminot (1993)<sup>1</sup>, la série de phosphore adsorbé a pu être créée en estimant d'abord la fraction inorganique du phosphore particulaire puis la fraction non apatitique (concerne tous les phosphates autres que ceux de l'apatite issue de roches contenant de la fluoro-apatite) du phosphore particulaire inorganique. La Figure 16 décrit le schéma de principe qui permet de déduire les différentes formes du phosphore à partir du phosphore total. Les règles de calcul utilisées ont été les suivantes : le phosphore inorganique représente 60 % du phosphore particulaire. La fraction non apatitique du phosphore représente 34 % du phosphore particulaire inorganique et dans cette fraction non apatitique, le phosphore adsorbé en représente 20 %.

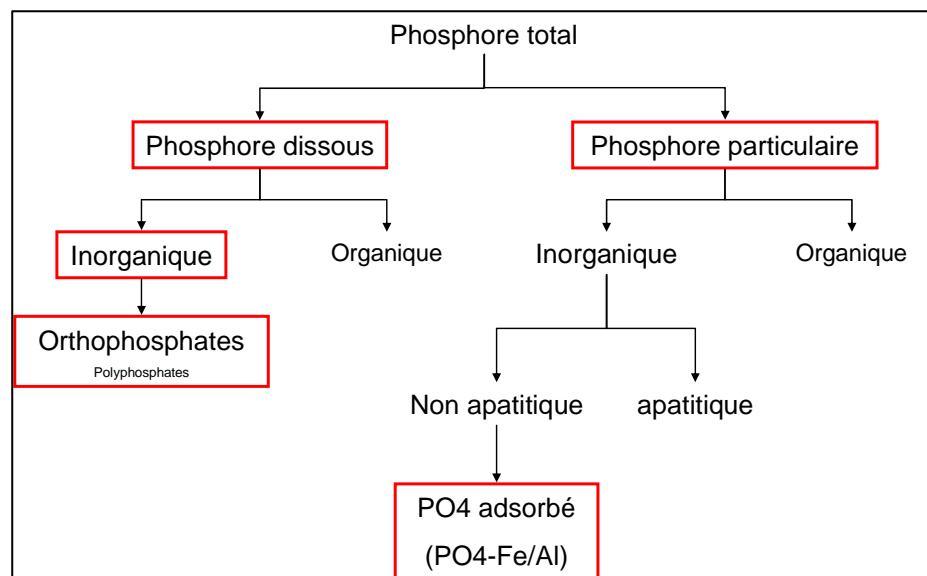


Figure 16 : Schéma de principe de la répartition du phosphore total en phosphore dissous et phosphore particulaire et phosphore adsorbé (les cases en rouge représentent les variables utilisées en entrée du modèle)

<sup>1</sup> Complétées par le dire d'expert de F. Andrieux (Ifremer)





Tableau 7 : Synthèse de la valeur K de la loi linéaire permettant de déduire le phosphore dissous à partir des mesures en phosphore total pour les estuaires de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre Niortaise et du Lay (valeurs ajustées sur les années 2009 à 2012 inclus)

| Estuaire considéré | Valeur de K (adimensionnel):<br>$PO_4(\text{dissous})=K*P_{\text{Total}}$ |
|--------------------|---|
| Loire              | 0.45  |
| Vilaine            | 0.45  |
| Sèvre Niortaise    | 0.5 du 01/01/2009 au 07/12/2011<br>0.1 après                              |
| Lay                | 0.35 du 01/01/2009 au 27/11/2011<br>0.1 ensuite                           |

Les figures 17 à 20 illustrent de 2009 à 2012 la correspondance entre le phosphore dissous déduit du phosphore total au moyen de la loi linéaire avec le phosphore dissous mesuré pour les quatre estuaires concernés. Excepté pour la Loire, les données mesurées en phosphore dissous varient assez peu en comparaison des données reconstituées en raison probablement d'un meilleur échantillonnage temporel des mesures en phosphore total comparée à celles en phosphore dissous. L'utilisation des séries reconstituées permet *a priori* de mieux prendre en compte l'évolution du phosphore dissous sur les estuaires de la Vilaine, de la Sèvre Niortaise et du Lay.

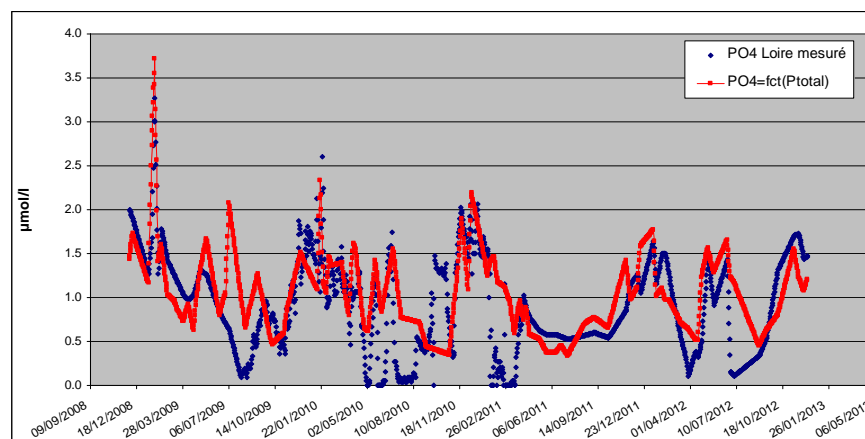


Figure 17 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire de la Loire)

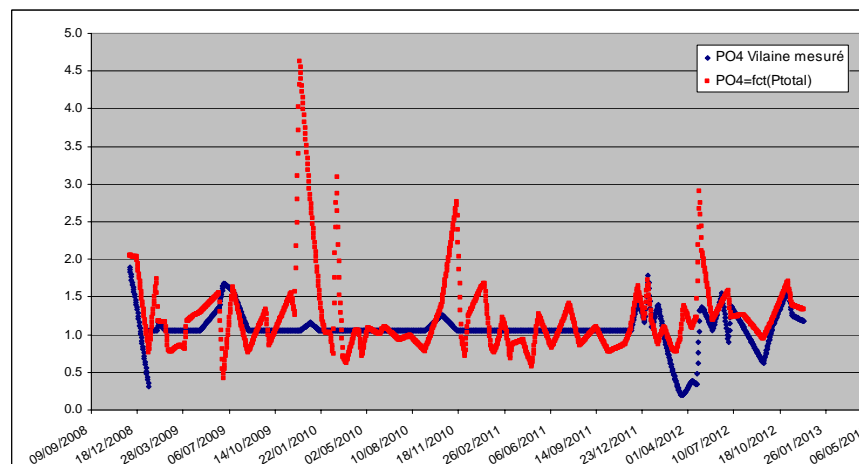


Figure 18 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire de la Vilaine)





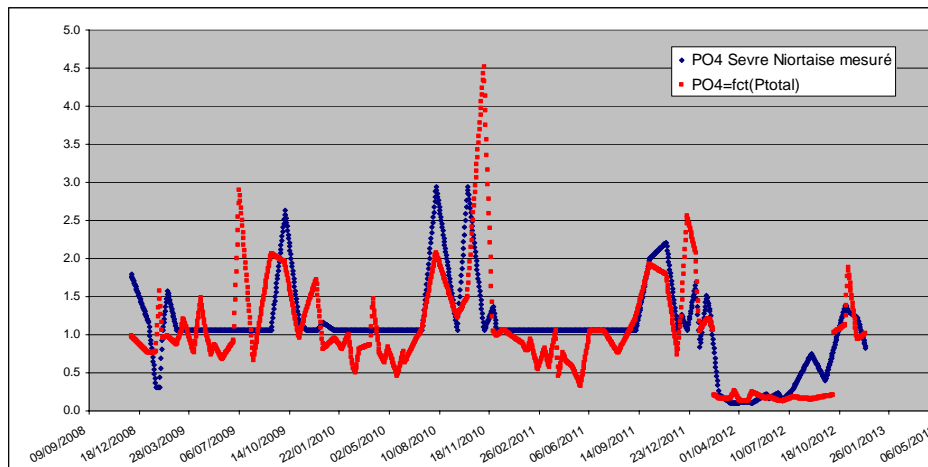


Figure 19 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire de la Sèvre Niortaise)

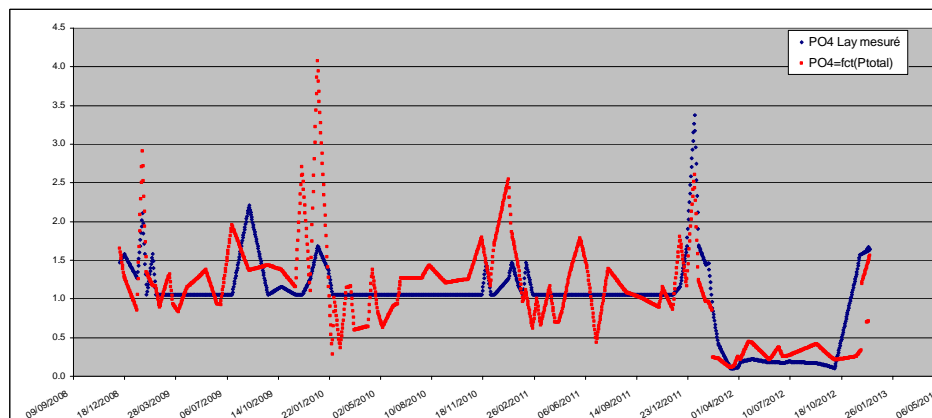


Figure 20 : Phosphore dissous déduit à partir des mesures en phosphore total et comparaison avec les mesures disponibles en phosphore dissous (cas de l'estuaire du Lay)

Le Tableau 8 indique les valeurs moyennes des concentrations en phosphore dissous, particulaire et adsorbé déduites à partir des mesures en phosphore total. L'ensemble des étapes décrites ci-avant permettant de déduire en moyenne pour les estuaires de la Loire, de la Vilaine et de la Sèvre Niortaise que le phosphore dissous représente 45 % du phosphore total, 50 % pour le phosphore particulaire et 5 % pour le phosphore adsorbé (moyenne établie de 2009 à 2012). L'estuaire du Lay diffère quelque peu des trois autres estuaires en suivant une répartition basée sur le phosphore total de 35 % pour le phosphore dissous, 59 % pour phosphore particulaire et 6 % pour le phosphore adsorbé.



**Tableau 8 : Synthèse de la valeur moyenne estimée de 2009 à 2012 des séries reconstituées en phosphore dissous, phosphore particulaire (inorganique + organique) et phosphore adsorbé sur les estuaires de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre Niortaise et du Lay**

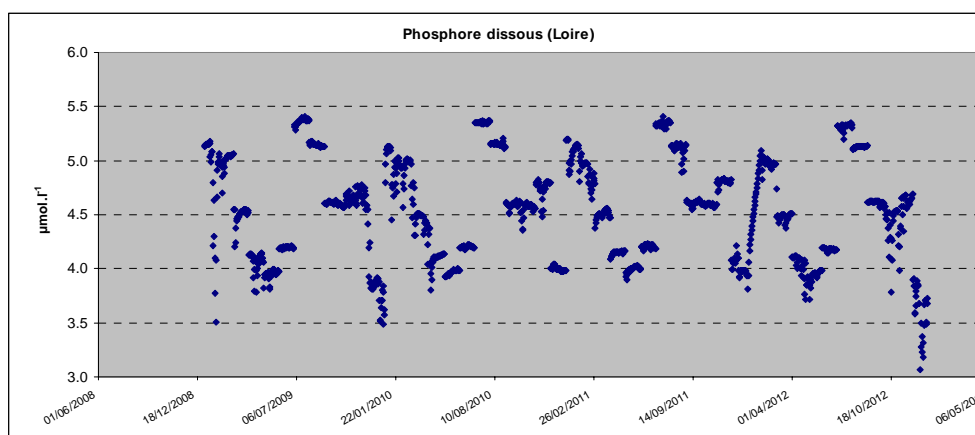
| Estuaire considéré | Moyenne 2009-2012 ( $\mu\text{mol.l}^{-1}$ ) |                |           |
|--------------------|--|----------------|-----------|
|                    | PO <sub>4</sub> dissous                      | P particulaire | P adsorbé |
| Loire*             | 1.03   | 1.15           | 0.115     |
| Vilaine            | 1.24   | 1.38           | 0.138     |
| Sèvre Niortaise    | 1.04   | 1.05           | 0.105     |
| Lay                | 1.08   | 2.06           | 0.206     |

\* Série constituée en phosphore dissous non retenue après calibration et utilisation de la série déduite de la corrélation entre les données de mesures à Montjean et St Nazaire (cf. détails dans la mission MB 4)

Pour ces quatre cours d'eau, les séries en azote organique proviennent directement de la mission MB1.

### 3.2.2.2. Série en phosphore dissous pour l'estuaire de la Loire

L'étape de calibration/validation a montré que la série en phosphore dissous constituée pour la Loire sur la base des mesures à Montjean (cf. § 3.2.2.1) amenait à une nette sous-estimation des teneurs simulées avec celles mesurées aux stations de Cordemais et Paimboeuf positionnées en aval de l'estuaire de la Loire. La série en phosphore dissous (cf. Figure 21), finalement utilisée dans cette étude, repose sur la loi de régression linéaire entre les données mesurées à Montjean et celles mesurées à St Nazaire telle que décrite dans la mission MB4.





**Figure 21 : Série de forçage en phosphore dissous pour l'estuaire de la Loire déduite de la régression linéaire entre les mesures disponibles à Montjean et St Nazaire**

### 3.2.2.3. Autres exutoires et station d'épuration

La création des séries de forçage phosphore particulaire, adsorbé et en azote organique des cours d'eau autres que ceux de la Loire, de la Vilaine, de la Sèvre Niortaise et du Lay sont décrits dans le cadre de la mission MB1. Il en va de même pour les stations d'épuration.

Comme évoqué précédemment pour la Gironde et la Charente, les lois dégagées par Ifremer sur la base de l'étude Guillaud (2008) ont été utilisées pour la constitution des séries en nitrate, ammonium, phosphore dissous, silicate, matière en suspension, phosphore particulaire, phosphore adsorbé et azote organique.



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 49/177                     |

### 3.2.3. Données satellitaires pour les matières en suspension

En plus des apports locaux en MES par les cours d'eau, un forçage journalier en MES issue des données des satellites MERIS et MODIS a été considéré. Le traitement de la donnée satellite en vue d'obtenir la concentration en MES repose sur la procédure décrite dans Gohin *et al.* (2005). Les fichiers traités et récupérés auprès d'Ifremer proposent sur l'ensemble de la zone englobant la Manche et le Golfe de Gascogne une donnée journalière pour les années 2009 et 2012 retenues dans le cadre des simulations. L'obtention d'une donnée journalière sur cette vaste zone a nécessité, afin de boucher au maximum les trous liés à la présence de nuages le jour de l'observation, la mise en œuvre d'une procédure d'interpolation par krigeage sur les cinq jours situés immédiatement avant et après la donnée observée. La méthode est décrite dans Saulquin *et al.* (2011). L'utilisation de données journalières pour le forçage en MES au sein du modèle ECO-MARS3D (utilisation jusqu'à lors de climatologies à raison de deux données par mois) représente une avancée pour une meilleure représentation du développement de la production primaire d'autant plus à proximité des zones estuariennes fortement turbides telles que la Loire, la Vilaine, la Gironde et la Sèvre-Niortaise à l'échelle de la zone d'étude. Le taux de matière en suspension régit en effet fortement la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et donc le développement de la production primaire (phytoplancton et ulves dans notre cas).

Un programme spécifique a permis ensuite d'extraire et d'échantillonner pour ces deux années la grille des données satellites aux grilles des modèles de rang 0 et des deux modèles de rang 1. Bien que les données satellitaires aient fait l'objet d'un premier traitement par krigeage afin d'éliminer les trous, un second traitement a été rendu nécessaire du fait de la persistance de valeurs manquantes sur les zones les plus côtières. Chaque pixel où un trou (ou une valeur manquante) est détecté, une moyenne sur les valeurs temporelles encadrant la valeur manquante a été appliquée.

La Figure 22 propose à titre d'exemple et à l'échelle du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine », la cartographie au 11 avril 2012 de la MES issue du traitement des données satellites. L'influence du panache de la Loire et dans une moindre mesure de la Vilaine dans la fourniture de matière en suspension au domaine est nettement visible. Deux autres zones apparaissent également fortement turbides. La première située au sud de Noirmoutier au niveau du Goulet de Fromentine constitue *a priori* une zone de forte remise en suspension des sédiments tandis que le secteur littoral situé entre les communes de Les Moutiers-en-Retz et de Bourgneuf-en-Retz apparaît davantage comme une zone naturelle de confinement hydrodynamique des apports issus du panache de la Loire. L'évolution sur l'année 2012 de la MES en 4 points fixes (cf. Figure 23) se trouve logiquement corrélée pour les points fixes 1, 2 et 3 les plus côtiers avec l'évolution saisonnière des débits des grands cours d'eau (Loire et Vilaine). Pour ces trois points, le maximum observé est de 8.6 g.l<sup>-1</sup> l'hiver pour un minimum l'été de 0.20 g.l<sup>-1</sup>.



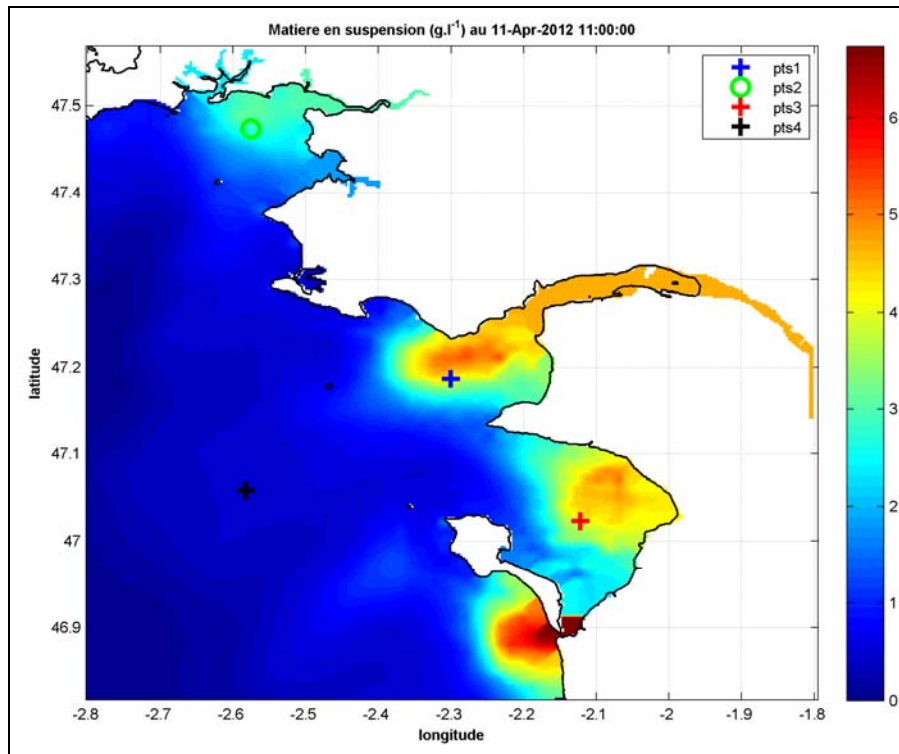


Figure 22 : Cartographie issue des données satellites du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Loire-Vilaine »

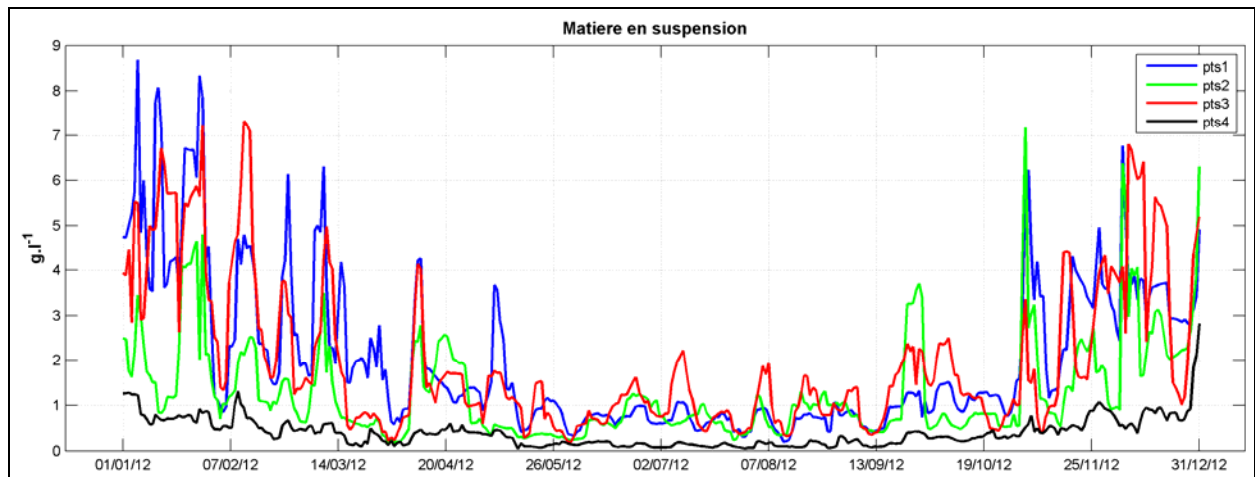


Figure 23 : Evolution du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Loire-Vilaine » issue des données satellites (cf. figure précédente pour la localisation des 4 points fixes)



Pour le modèle de rang 1 « Sables d’Olonne-Ile de Ré », les Figure 24 et Figure 25 montrent que la zone de forte turbidité est située au niveau de l’estuaire de la Sèvre Niortaise avec des teneurs au point 1 moins fortes en hiver et inversement en été par rapport à celles relevées avec le modèle « Loire-vilaine » : de 6 g.l<sup>-1</sup> en début d’année à environ 0.42 g.l<sup>-1</sup> au plus bas de la période estivale. Au large, les teneurs sont nettement plus basses qu’à proximité des côtes et oscillent de 1 g.l<sup>-1</sup> l’hiver à moins de 0.015 g.l<sup>-1</sup> l’été.

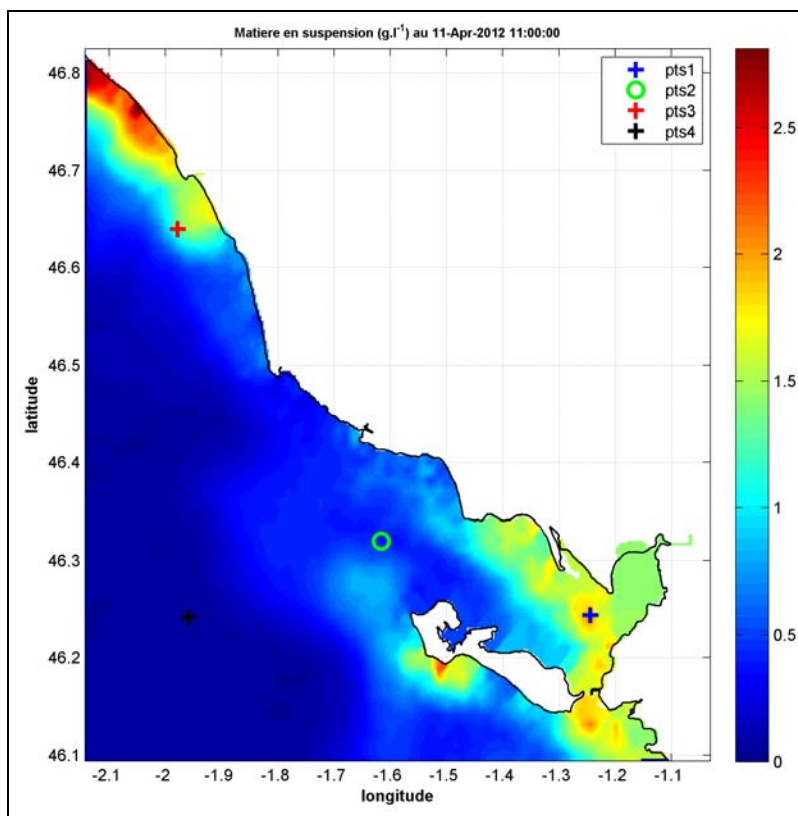


Figure 24 : Cartographie issue des données satellites du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Sables d’Olonne-Ile de Ré-Vilaine »

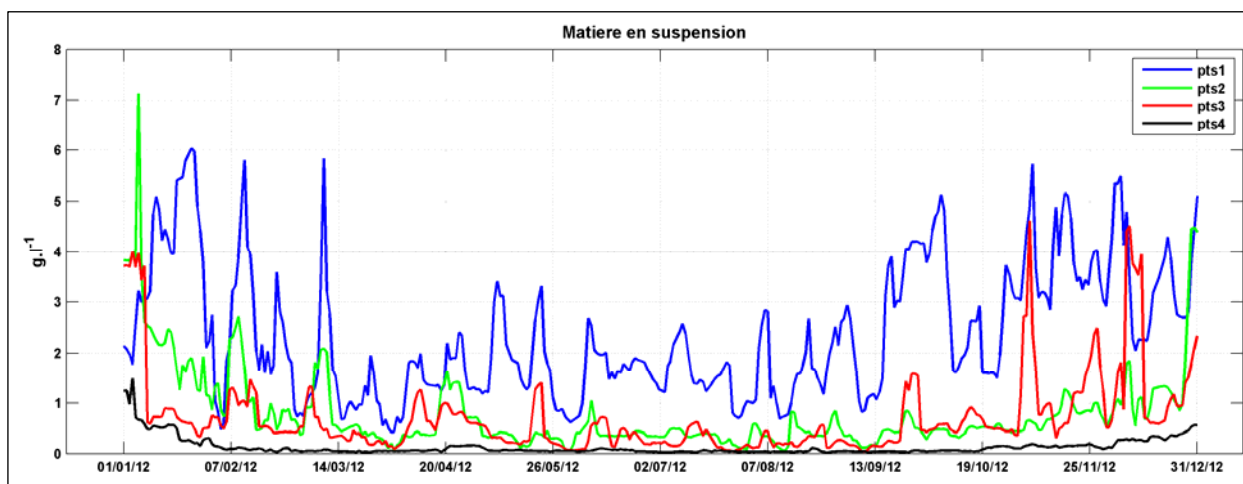




Figure 25 : Evolution du forçage de la matière en suspension au 11 avril 2012 pour le modèle « Sables d’Olonne-Ile de Ré-Vilaine » issue des données satellites (cf. figure précédente pour la localisation des 4 points fixes)





|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 52/177                     |

### 3.2.4. Données aux limites marines

Une attention particulière a été accordée aux valeurs de forçage appliquées aux limites marines ouest et sud du modèle général de rang 0. Dans un contexte d'étude à eutrophisation dont l'objectif est de tester des scénarii de réduction des flux de nutriments, les gammes de valeurs en sels nutritifs prescrites au bord du domaine de modélisation ont un impact important dans la qualité des résultats. Par exemple, l'application de teneurs trop fortes et irréalistes en nitrate aux limites marines débouchera logiquement sur une contribution dominante de l'azote dissous provenant du large dans le contenu moyen en azote des ulves. Dans ces conditions, il sera logique de constater que la simulation de la réduction des flux de nutriments d'origines terrigènes débouchera sur de faibles pourcentages d'abattement de la biomasse totale en algues vertes même à des niveaux de réductions importants des flux de nutriments.

Afin d'opter pour la limite marine la plus représentative possible du point de vue de l'évolution des sels nutritifs, une comparaison a été engagée entre les données d'archives issues du modèle PREVIMER qui a tourné dans une version ancienne avec les données de mesures du réseau SOMLIT (*Service d'Observation en Milieu Littoral, INSU-CNRS, Roscoff*) à la bouée marine Astan. Cette station est suivie de manière régulière depuis 1998 et peut être considérée comme caractéristique des eaux du système homogène de Manche occidentale. Afin d'obtenir un signal hauturier le plus caractéristique possible, une moyenne des mesures relevées en surface et au fond a été effectuée sur la période allant de 2000 à 2011.

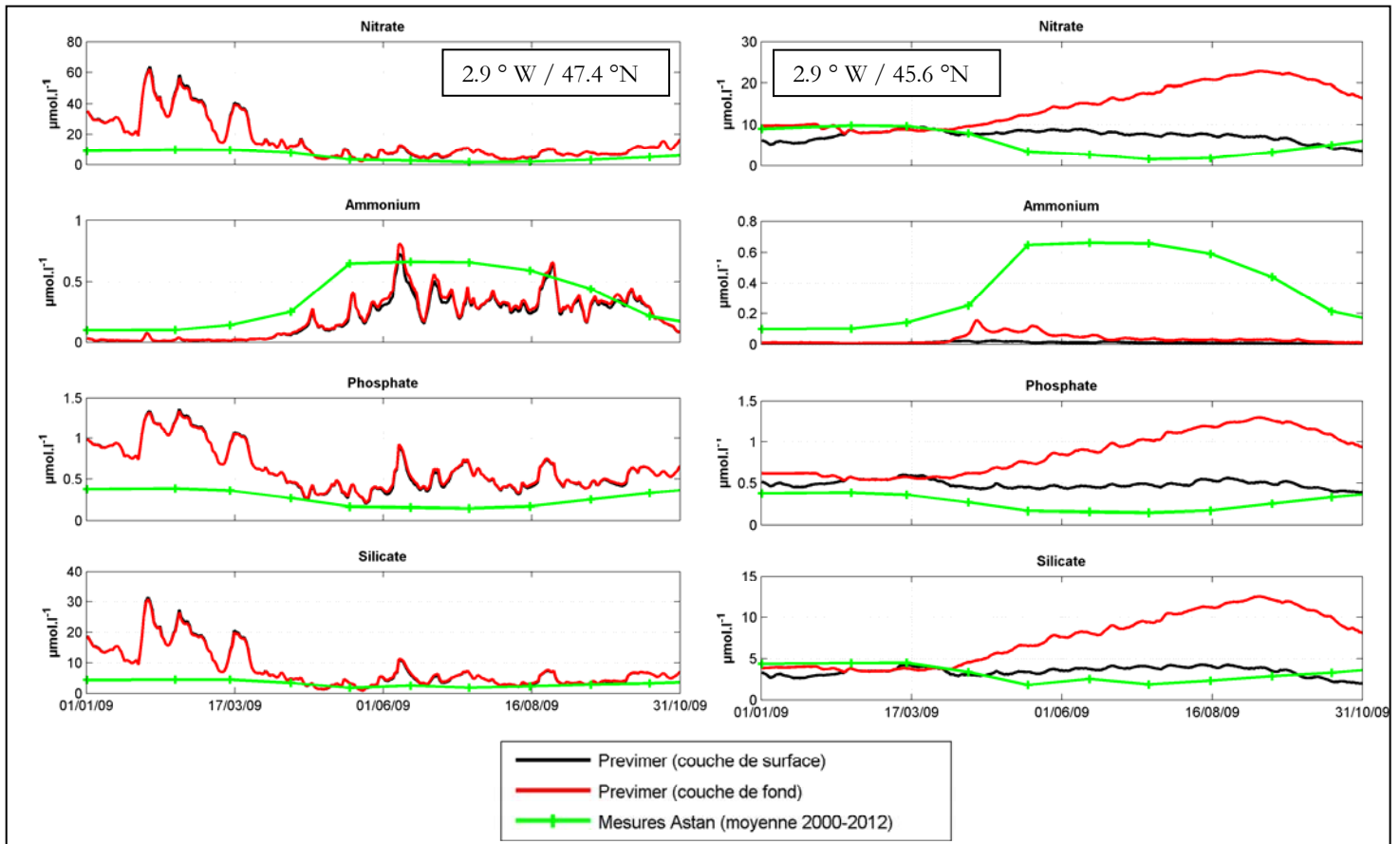
La Figure 26 présente l'évolution saisonnière des teneurs en nitrate, ammonium, phosphate et silicate en 2 points fixes appartenant à la frontière ouverte ouest du modèle de rang 0. Les deux points sont situés à la limite sud et nord de la limite marine du modèle de rang 0.

Il en ressort que les teneurs en nitrate extraites des données d'archives du modèle Previmer dominant nettement le signal moyen fournit par les données de mesures SOMLIT à Astan. Sur la période de mars à octobre qui englobe la période productive des ulves, l'écart moyen entre les données Previmer et SOMLIT aux deux points fixes est important : + 7  $\mu\text{mol.l}^{-1}$ . **Concernant les sels nutritifs, ce constat a conduit à ne pas utiliser pour cette étude la limite marine extraite du modèle Previmer et à utiliser celle constituée au moyen des données de mesures Astan (choix validé en comité de pilotage de l'étude).** De plus, l'analyse de l'évolution mensuelle des cartographies élaborées par Ifremer (Sourisseau, 2011) sur l'ensemble de la zone Manche-Golfe de Gascogne (cartographies obtenues par interpolation de données de mesures) ne montrent pas de différences significatives du point de vue de l'évolution des teneurs en nitrate et phosphate dissous mesurées en Manche (et à proximité de la bouée Astan) avec celles issues de la zone du Golfe de Gascogne comprise dans l'aire l'étude.

**Concernant les variables physiques température et salinité, les séries constituées reposent directement sur les données d'archive du modèle Previmer.**







**Figure 26 : Evolution en deux points fixes de la limite ouest du modèle général de rang 0 des valeurs des sels nutritifs issues des données d'archives 2009 du modèle Previmer et provenant d'une moyenne de 2000 à 2011 des mesures du réseau SOMLIT à Astan (figure de gauche : point situé au nord de la limite marine ouest du modèle de rang 0 et figure de droite : point situé au sud de la limite marine ouest du modèle de rang 0)**

Pour les deux modèles de rang 1, les séries de forçage aux frontières ouvertes ouest et sud des modèles de rang 1 ont été constituées au moyen des résultats du modèle de rang 0 par application d'un programme spécifique d'interpolation des résultats de la grille du modèle de rang 0 aux grilles des modèles de rang 1.

### 3.2.5. Valeurs des flux sédimentaires

Un apport en sels nutritifs par le sédiment en N-NH<sub>4</sub> et P-PO<sub>4</sub> dissous a été introduit au niveau des modèles de rang 1 sur les zones vaseuses reconnues comme des secteurs où la contribution du sédiment à l'enrichissement en sels nutritifs de la colonne d'eau peut s'avérer significative. Les cinq classes sédimentaires retenues décrites dans § 3.1 appartiennent toutes aux classes de type vaseuses selon la classification EUNIS : « Littoral mud », « Infralittoral muddy sand », « Infralittoral sandy mud » et « Infralittoral fine mud ». Les valeurs de relargage sédimentaire affectées à ces classes proviennent de mesures de flux sédimentaires opérées par le Ceva sur la vasière du Quelisoy en rade de Lorient. Les valeurs du flux sédimentaire sont identiques à celles utilisées dans CEVA (2011) en



Ria d'Étel. La Figure 27 illustre pour les deux modèles de rang 1 la zone finale de relargage associant les 5 classes sédimentaires retenues.

Pour l'ammonium, le flux sédimentaire est dirigé systématiquement vers la colonne d'eau et prend les valeurs suivantes en fonction de la saison :

$$\begin{cases} \text{Flux NH}_4 (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}) = 219 & \text{de début janvier à fin juillet} \\ \text{Flux NH}_4 (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}) = 975 & \text{de début août à fin septembre} \end{cases}$$

Le mois d'août permet l'augmentation progressive du flux de 219 à 975  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . En comparaison des mesures de flux sédimentaire mentionnées dans la littérature, les valeurs de flux utilisées dans cette étude peuvent être qualifiées de valeurs hautes et tendront *a priori* à maximiser l'importance du sédiment du point de vue de ses apports en azote dissous d'origine ammoniacal.

Le flux sédimentaire en phosphore dissous varie en fonction de la concentration du milieu en P-PO<sub>4</sub> : Flux PO<sub>4</sub> ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) = -146,01 x<sub>2</sub> + 76,433 avec x<sub>2</sub> : [PO<sub>4</sub>] dissous dans la colonne d'eau

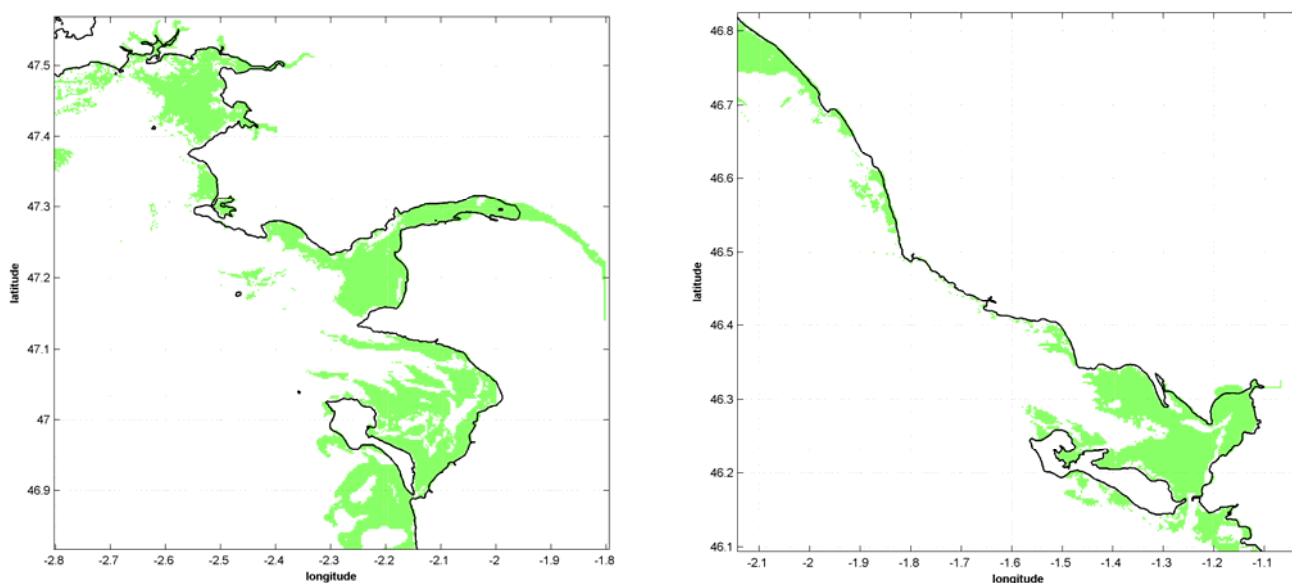




Figure 27 : Zones vaseuses (en vert) où un relargage sédimentaire en N-NH<sub>4</sub> et P-PO<sub>4</sub> est prescrit dans les modèles de rang 1 « Loire-Vilaine » (figure de gauche) et « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (figure de droite)

### 3.2.6. Données météorologiques

Les données météorologiques de vent, de couverture nuageuse et d'humidité sont issues du modèle de Météo France ARPEGE à raison d'une donnée toutes les 6 heures.



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 55/177                     |

### 3.3. Validation des modèles hydrodynamiques de rang 1 « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré »

L'évaluation de la qualité des modèles hydrodynamiques de rang 1 « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne – Ile de Ré » a consisté à comparer les hauteurs d'eau calculées par le modèle avec celles prédites par les données de mesures disponibles et/ou par le fichier CST\_FRANCE du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) qui fournit les amplitudes et les phases des 115 premières harmoniques de marée. Les résultats ont été obtenus sans vent et sans variation de la pression atmosphérique.

L'évaluation a porté sur l'ensemble des cycles de marée des mois d'août 2009 et d'août 2012 en deux points fixes intitulés « MOLIT Vilaine » et « Ouest Loire » pour le modèle de rang 1 « Loire – Vilaine » et aux points fixes « Ouest Bourgenay » et « Nord-ouest Ile de Ré » pour le modèle « Sables d'Olonne – Ile de Ré ». Pour chaque cycle de marée, un décalage temporel et une différence de marnage entre le signal de marée fournit par le fichier SHOM et celui fournit par le modèle a été calculé et moyenné sur l'ensemble du mois d'août afin de proposer un écart moyen.

Pour les courants de marée et en l'absence de données de mesures, la validation a consisté à comparer des roses de courants issues du modèle avec les cartes marines du SHOM.

La Figure 28 illustre pour les deux modèles de rang 1 la localisation des points fixes utilisés pour la validation des hauteurs d'eau et des courants.

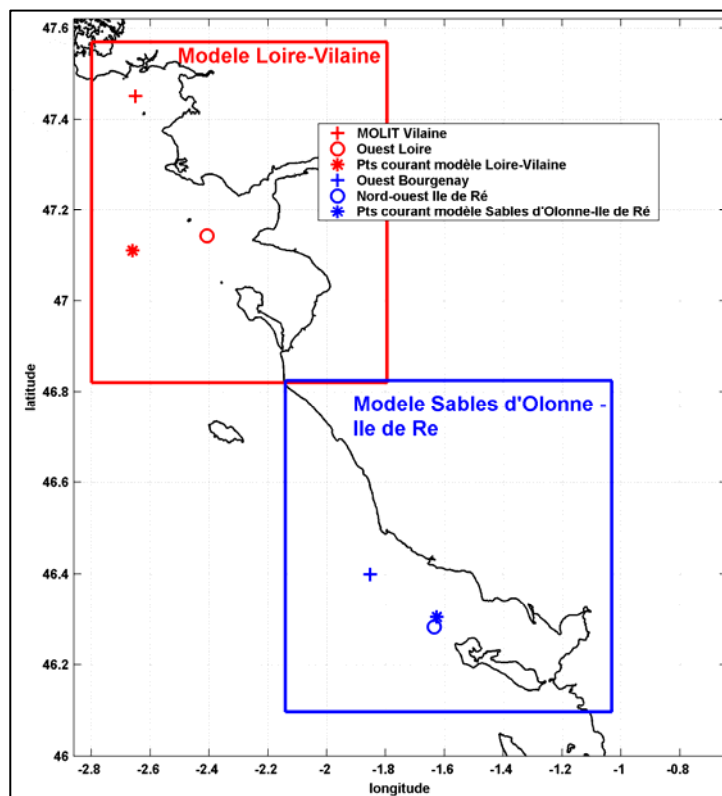




Figure 28 : Localisation des points fixes utilisés pour la validation hydrodynamique des deux modèles de rang 1 « Loire-Vilaine » et « Sables d'Olonne-Ile de Ré »



|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET</small><br><small>DE LA RÉGION</small><br><small>PAYS DE LA LOIRE</small> | <h2>Document de référence<br/>(MB2)</h2> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|  |  | Date | 04/06/14                   |
|  |  | Page | 56/177                     |

### 3.3.1. Modèle de rang 1 « Loire-Vilaine »

Les résultats présentés en Figure 29 montrent sur le mois d'août **2009** un déphasage moyen de 10.5 minutes et un écart de marnage de 9.5 % entre les mesures à haute fréquence de la bouée MOLIT Vilaine et le modèle. Au point fixe « Ouest Loire », un déphasage moyen de 11 minutes pour un écart moyen sur le marnage inférieur à 4 % est estimé entre les données du fichier SHOM et celles prédites par le modèle (Figure 30).

En **2012** (Figure 31), pour le mois d'août, le déphasage moyen est de l'ordre de 11 minutes et l'écart sur le marnage de 4 % entre les mesures issues de la bouée MOLIT Vilaine et le modèle. Au point fixe « Ouest Loire » qui utilise pour la comparaison les données du fichier SHOM, le déphasage moyen est de l'ordre de 10 minutes et l'écart sur le marnage de 3 % (Figure 32).

Pour ces deux années et à l'échelle du mois d'août, le déphasage maximum est de l'ordre de 30 minutes et l'écart maximum sur le marnage d'environ à 20 %



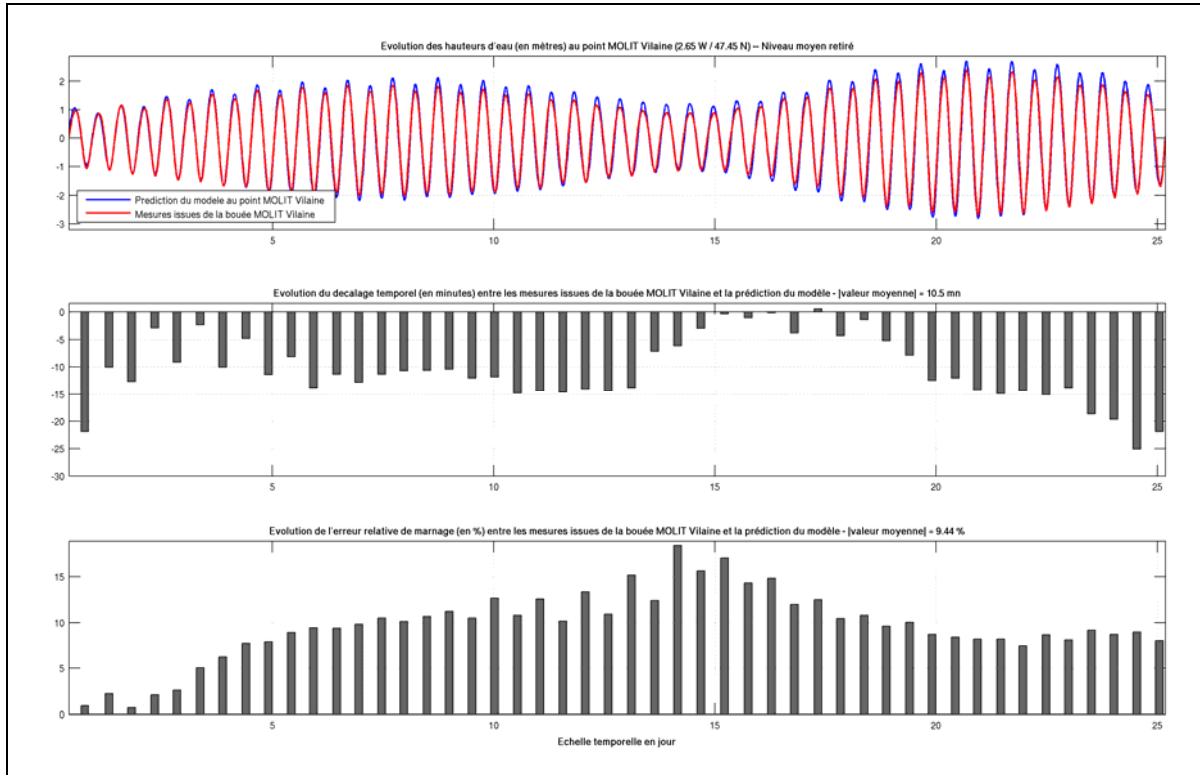


Figure 29 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe MOLIT Vilaine (2.65° W, 47.45° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des mesures de la bouée MOLIT (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009)

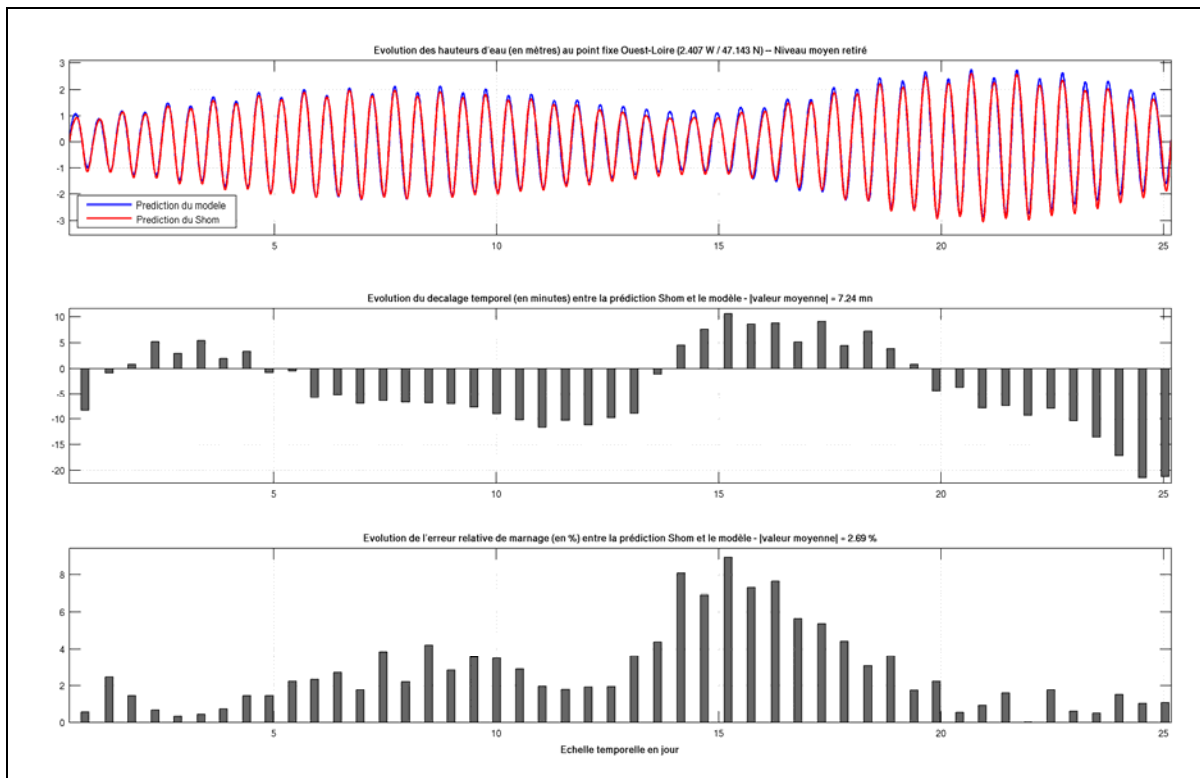


Figure 30 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « Ouest-Loire » (2.407° W, 47.143° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009)





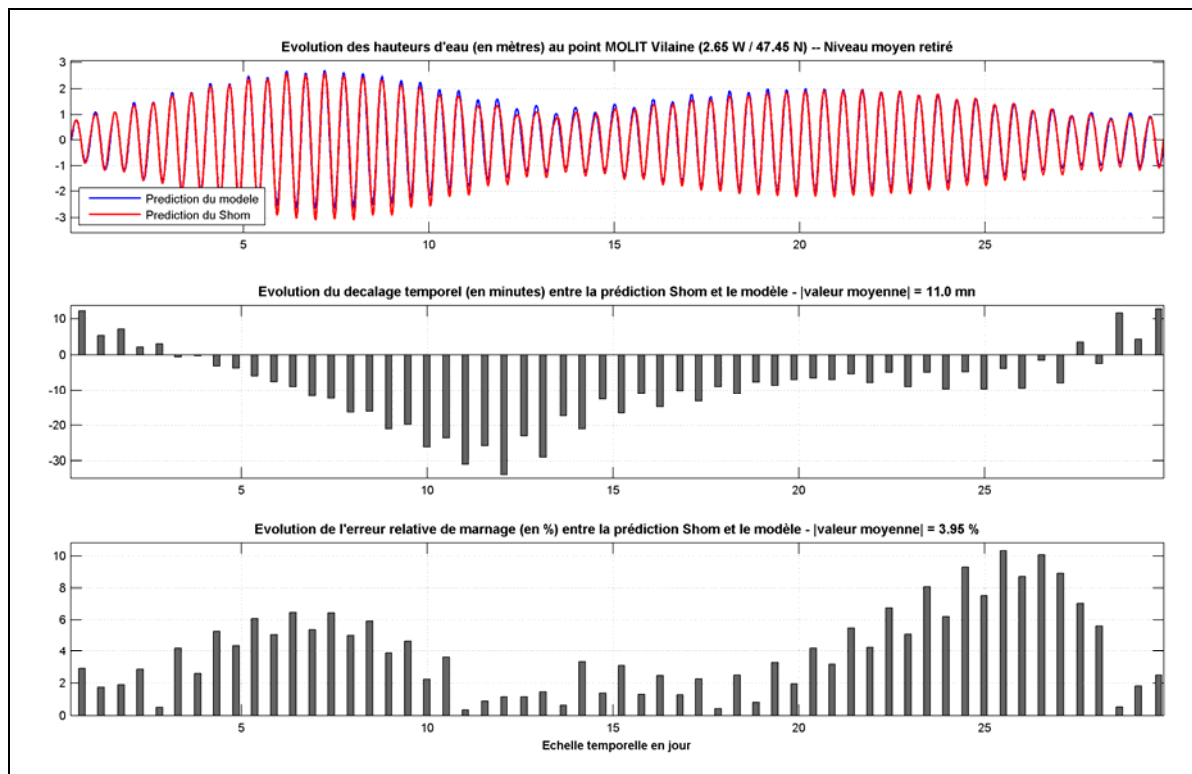


Figure 31 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe MOLIT Vilaine (2.65° W, 47.45° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des mesures de la bouée MOLIT (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012)

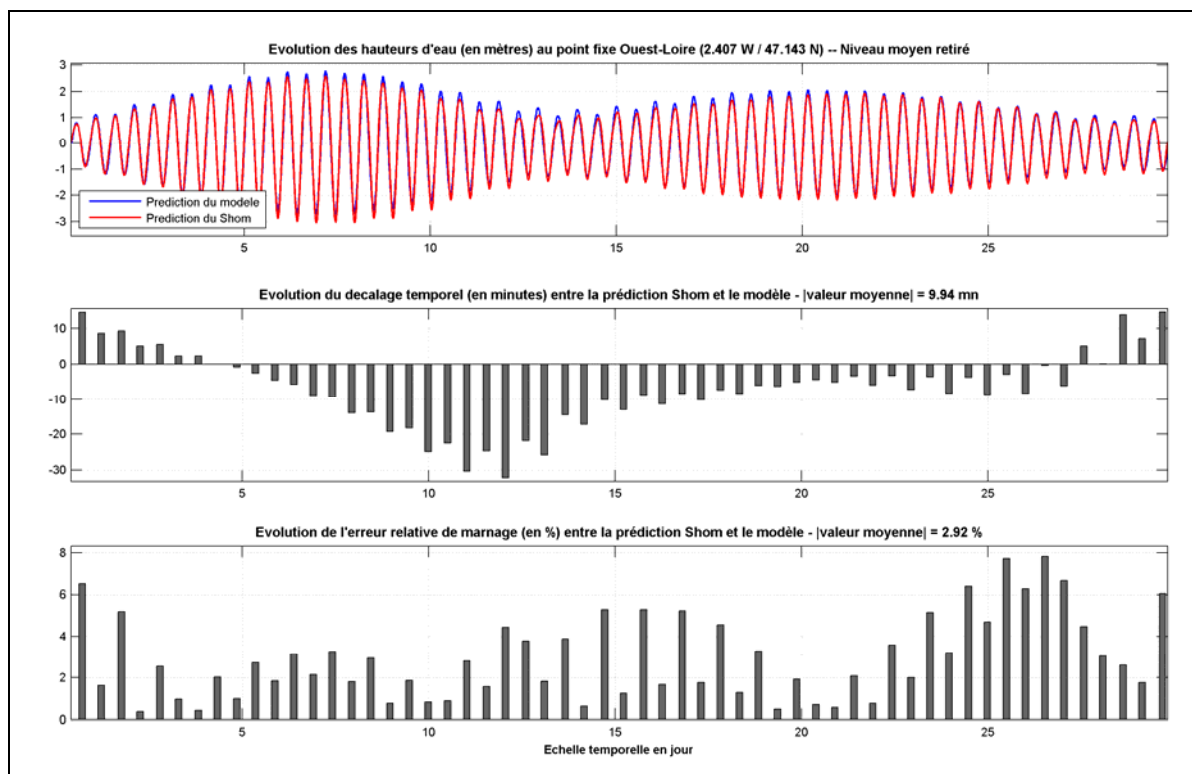


Figure 32 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « Ouest-Loire » (2.407° W, 47.143° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012)



Les roses des courants obtenues pour un coefficient de marée de 95 et 45 sans vent au point fixe « Pts courant modèle Loire-Vilaine » (Figure 33) montrent une bonne adéquation entre le modèle et les cartes du SHOM. Toutefois, la donnée SHOM utilisée pour valider les courants de marée manque de précision (difficulté à géo-localiser précisément le point fixe SHOM pour le comparer avec le modèle; donnée SHOM fournie en nœud avec une faible précision à  $10^{-1}$  près) et ne peut se substituer à une véritable campagne de mesures au moyen par exemple d'une sonde ADCP. Toutefois, au vu des objectifs de cette étude orientée vers la modélisation de la production primaire et des coûts d'acquisition et de post-traitement de données ADCP, les résultats de comparaison entre les données SHOM et la bouée MOLIT Vilaine avec le modèle permettent de conclure sur un fonctionnement correct du modèle sur le plan de l'hydrodynamisme.

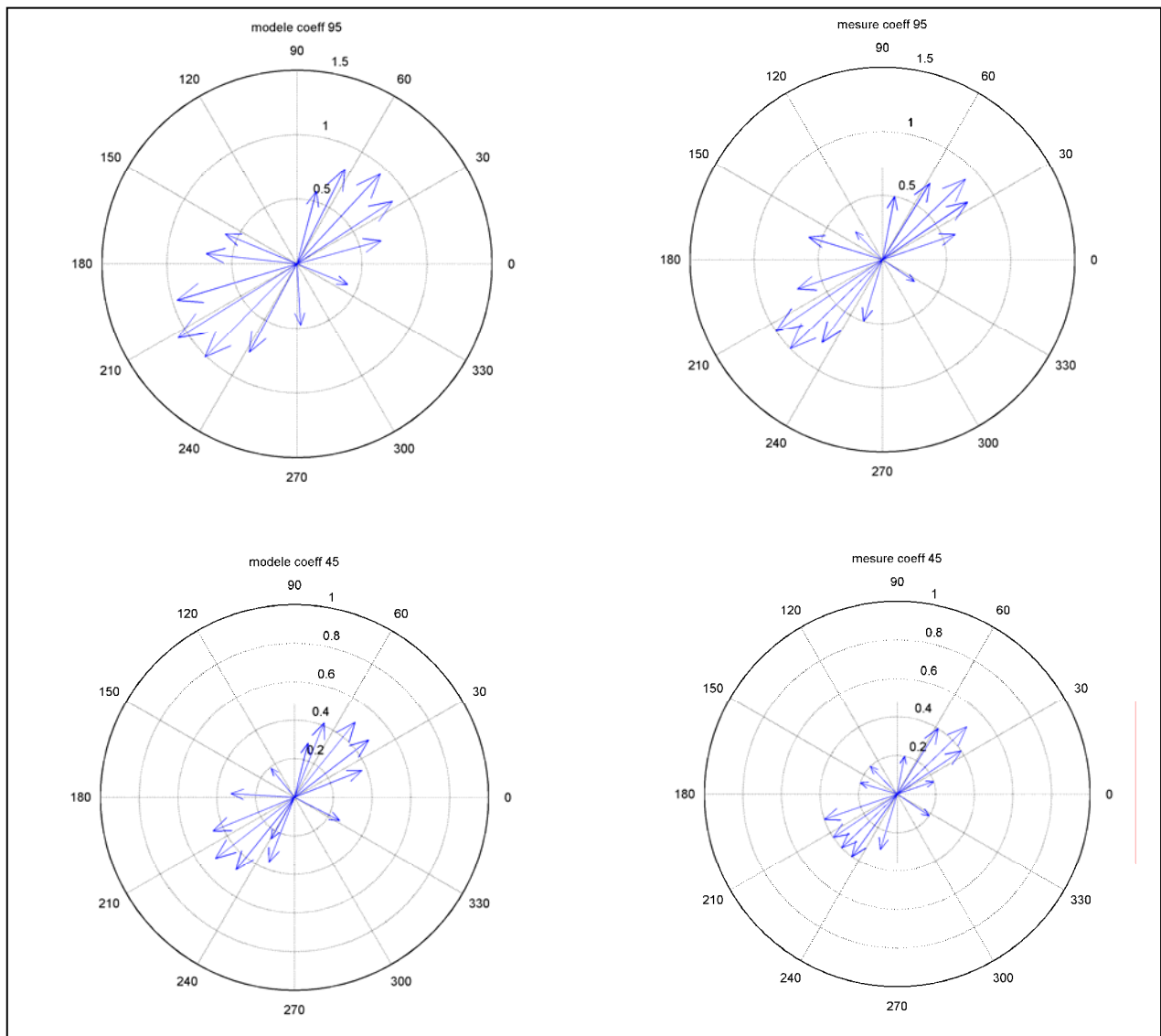




Figure 33 : Comparaison entre les roses de courants issues du modèle (à gauche) et celles provenant des cartes SHOM (à droite) au point fixe « Pts courant modèle Loire-Vilaine » (2.66° W, 47.11° N)



|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET</small><br><small>DE LA RÉGION</small><br><small>PAYS DE LA LOIRE</small> | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|  |  | Date | 04/06/14                   |
|  |  | Page | 60/177                     |

### 3.3.2. Modèle de rang 1 « Sables-d'Olonne – Ile de Ré »

La Figure 34 montre sur l'ensemble du mois d'août **2009** au point fixe « Ouest Bourgenay » un déphasage moyen de 10.5 minutes et un écart moyen sur le marnage de 3.5 % entre les données du fichier SHOM et le modèle. Toujours avec les données du fichier SHOM au point fixe « Nord-ouest Ile de Ré » (Figure 35), le déphasage moyen est de l'ordre de 12 minutes et l'écart de marnage d'environ 4 %.

Sur le mois d'août **2012** au point fixe « Ouest Bourgenay » (Figure 36), le déphasage atteint en moyenne 11.5 minutes et environ 3 % pour l'écart moyen sur le marnage entre la donnée SHOM et le modèle. Au point fixe « Nord-ouest Ile de Ré » (Figure 37), le déphasage moyen est de l'ordre de 10 minutes et l'écart sur le marnage de 3 % par rapport à la donnée prédite par le SHOM.

Pour ces deux années et à l'échelle du mois d'août, on relève un déphasage maximum durant la phase de morte-eau de l'ordre de 40 minutes associé à un écart maximum sur le marnage inférieur à 15 %.



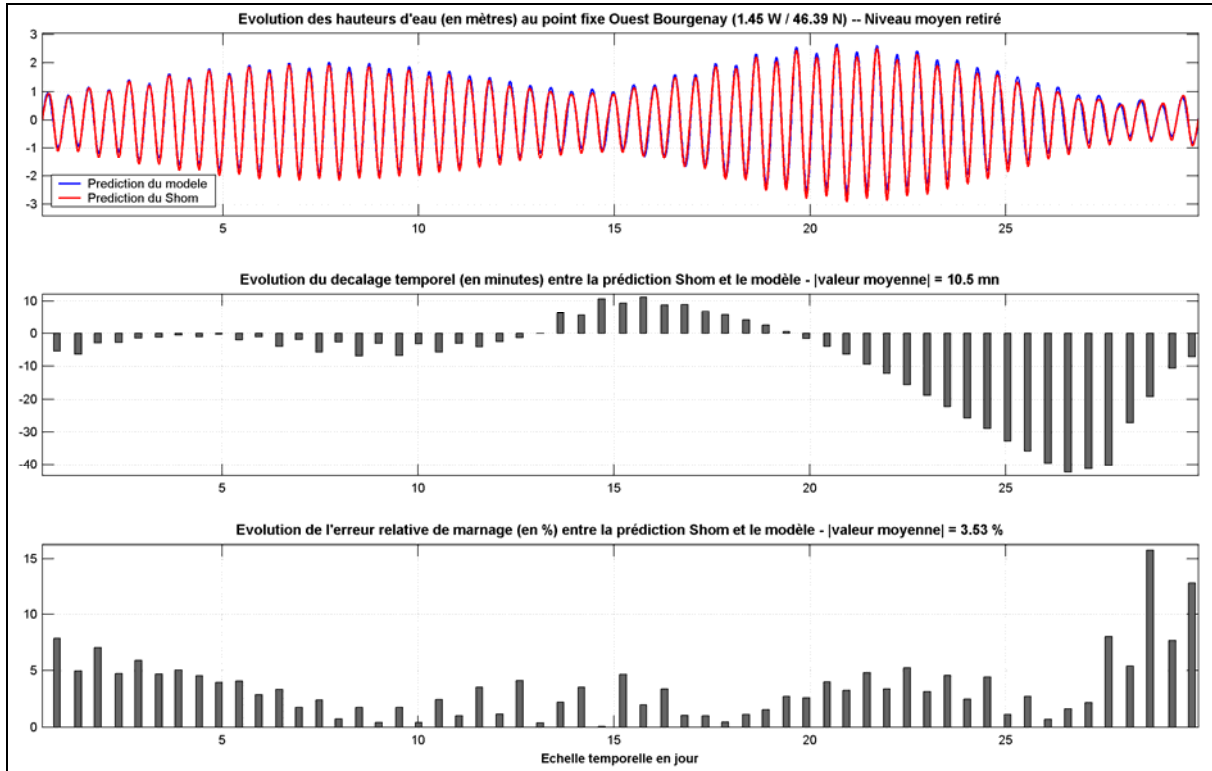


Figure 34 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au fixe Ouest Bourgenay (1.45° W, 46.39° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009)

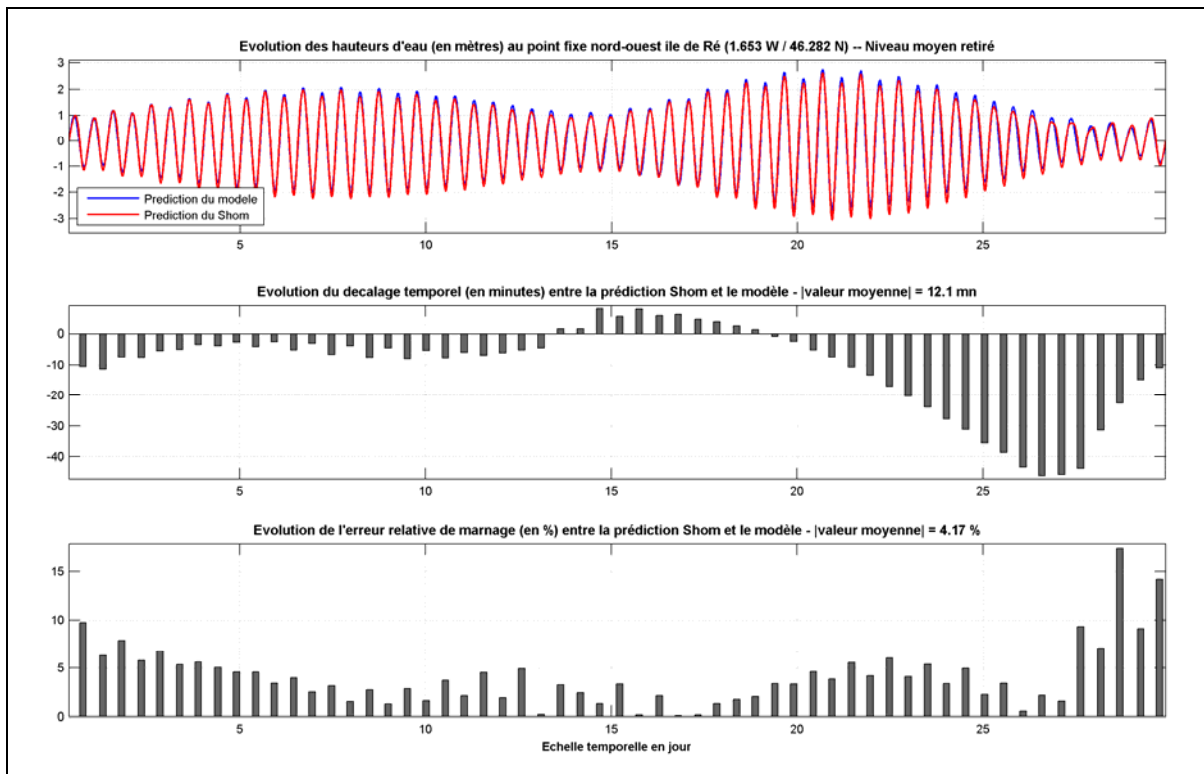


Figure 35 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « nord-ouest Ile de Ré » (1.65° W, 46.28° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2009)



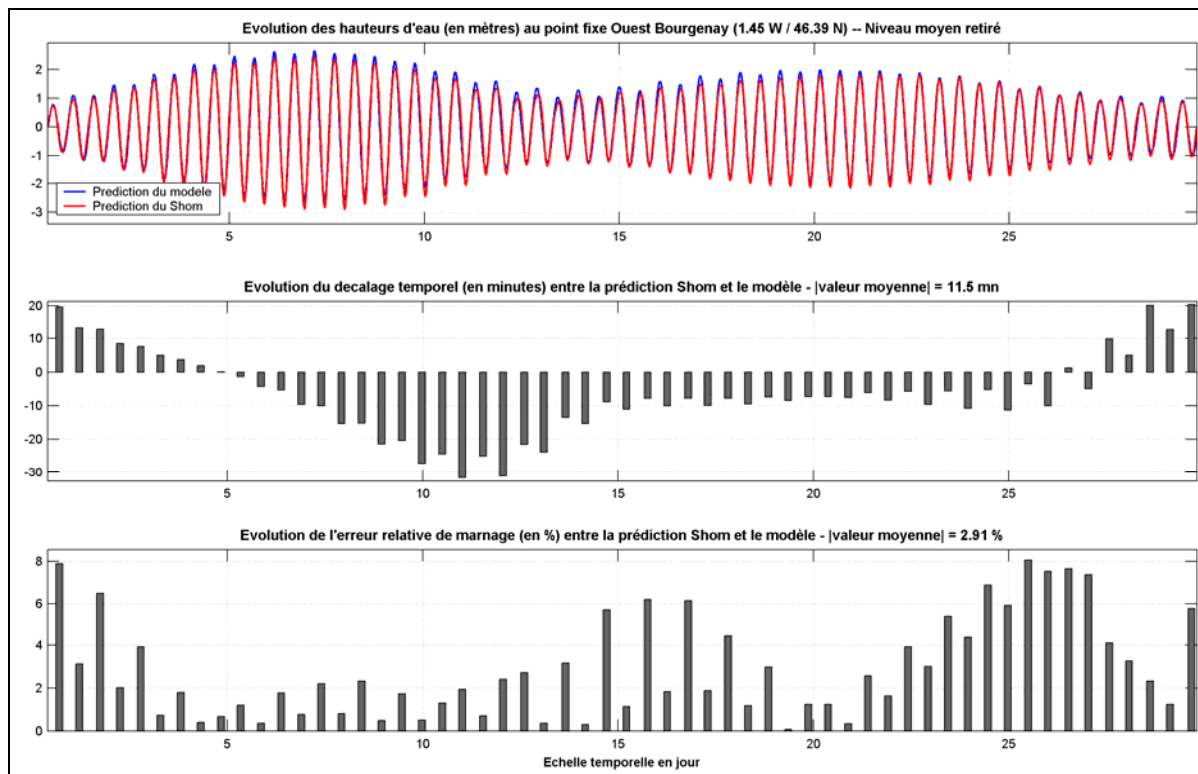


Figure 36 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « Ouest Bourgenay » (1.45° W, 46.39° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012)

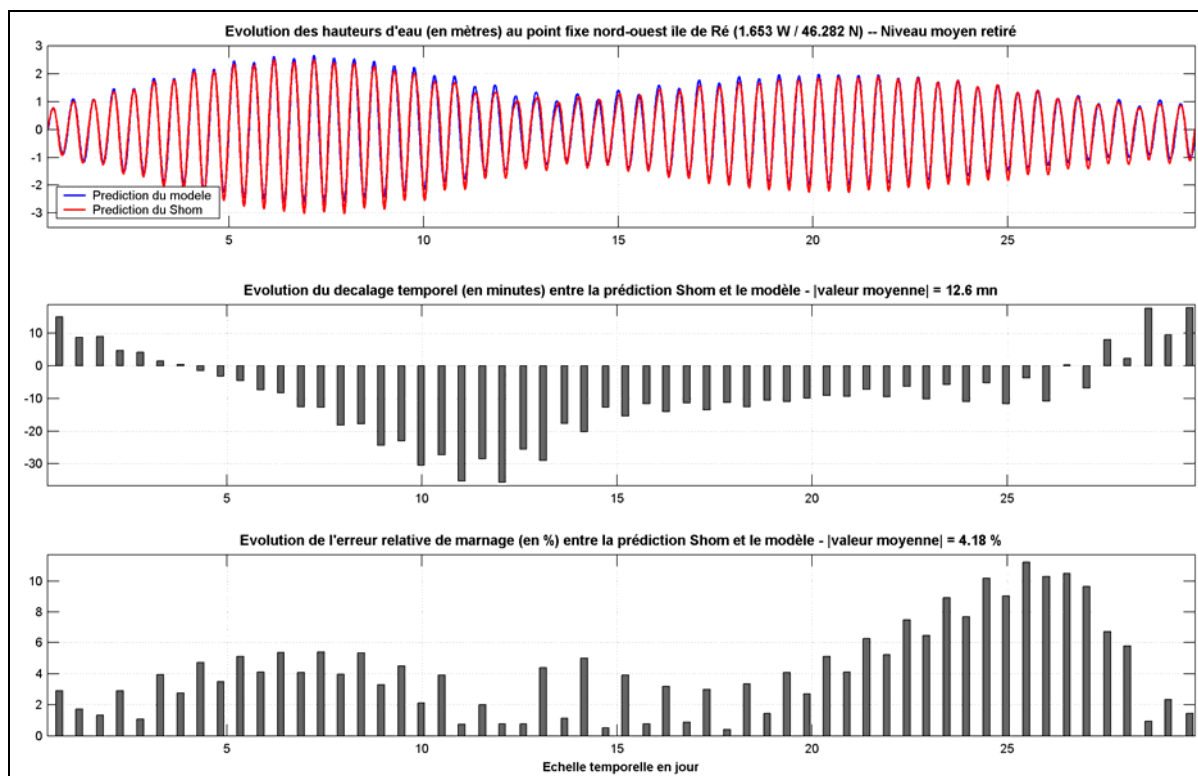


Figure 37 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenue au point fixe « nord-ouest Ile de Ré » (1.65° W, 46.28° N) entre la solution du modèle et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST\_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois d'août 2012)





Comme pour le modèle « Loire-Vilaine », les roses des courants présentées en Figure 38 et obtenues pour un coefficient de marée de 95 et de 45 en l'absence de vent au point fixe « Pts courant modèle Sables d'Olonne-Ile de Ré » affichent une bonne cohérence entre le modèle et les données fournies par les cartes du SHOM. Cependant, la même remarque que celle formulée précédemment pour le modèle « Loire – Vilaine » doit être appliquée quant aux résultats de validation courantologique obtenus dans cette section.

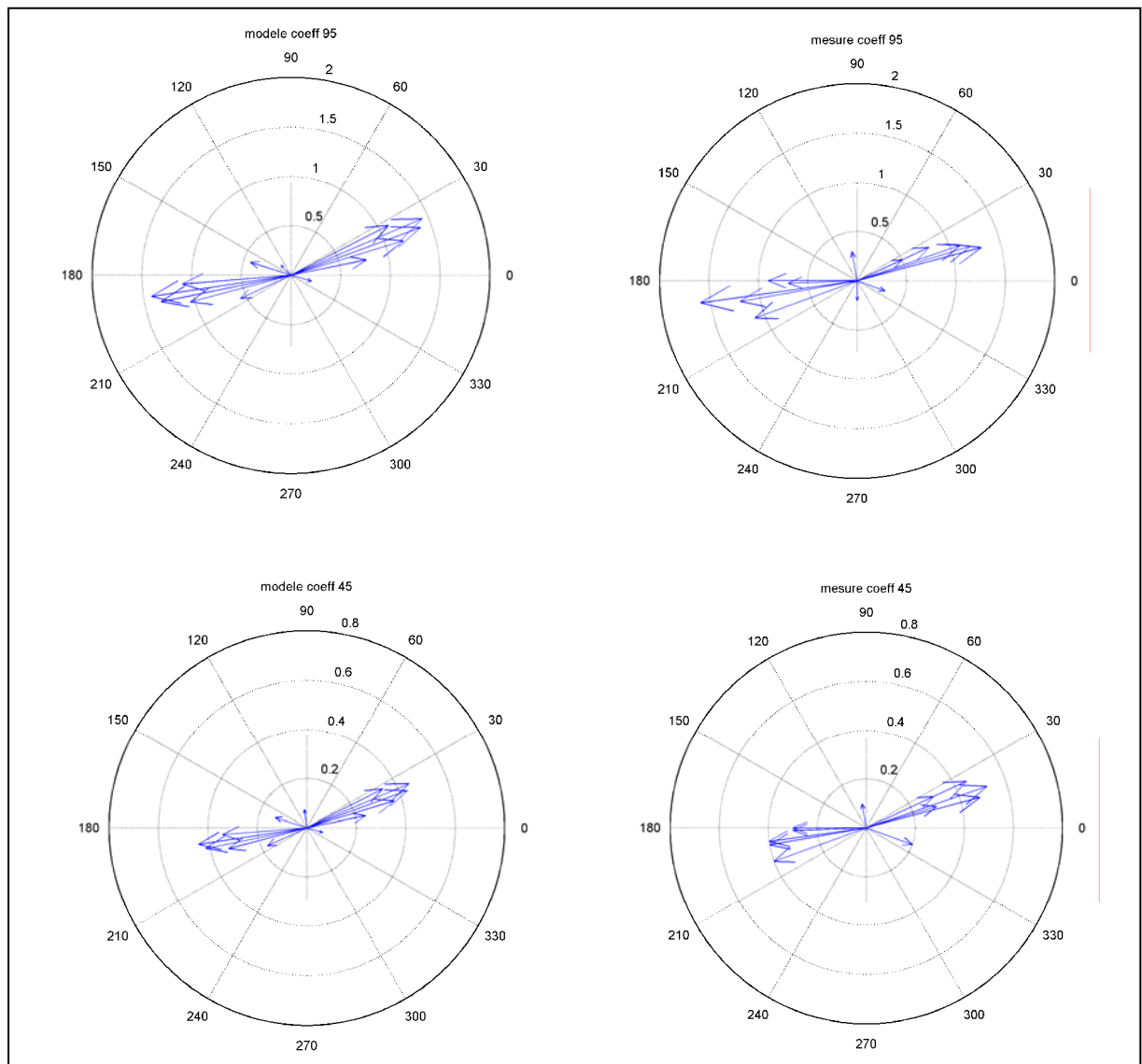




Figure 38 : Comparaison entre les roses de courants issues du modèle et celles provenant des cartes SHOM au point fixe « Pts courant modèle Sables d'Olonne-Ile de Ré » (2.66° W, 47.11° N)



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 64/177                     |

#### 4. Méthodes utilisées pour la validation des variables d'états des deux modèles de rang 1 : température, salinité, chlorophylle *a*, matières en suspension, sels nutritifs et quotas en azote et phosphore des ulves

Pour les variables physiques **température** et **salinité**, la validation des modèles de rang 1 a consisté à quantifier statistiquement l'ajustement des données simulées par rapport aux données observées en utilisant la méthode proposée par Taylor (Taylor, 2001). Cette méthode regroupe trois informations statistiques synthétisées sur un diagramme (Raybaud, 2008) :

1. la variabilité des écarts-types des données ( $\sigma_D$ ) et du modèle ( $\sigma_M$ )
2. l'amplitude des différences (erreur quadratique centrée, RMSE)
3. la similarité entre le modèle et les mesures (coefficient de corrélation, R). Il exprime le degré d'ajustement entre les données et le modèle. Le coefficient de corrélation est parfois élevé au carré afin d'exprimer le pourcentage de la variabilité des données qui peut être expliqué par le modèle.

Un exemple de diagramme de Taylor normalisé est présenté à la Figure 39. Ce diagramme indique que la station 1 a un coefficient de corrélation de 0.8 et de 0.95 pour la station 2. L'erreur quadratique centrée (RMSE) est indiquée par les iso-courbes vertes. La station 1 a une erreur quadratique centrée de l'ordre de 0.4 et 0.6 pour la station 2. La variation de l'écart type du modèle par rapport à celui des mesures est donnée par la différence entre l'écart type normalisé des mesures représenté par l'isoligne à la valeur 1 reliant l'axe des abscisses à l'axe des ordonnées et la valeur de l'écart type normalisé de la station considérée. Ainsi, pour la station 1, la variation de l'écart type du modèle par rapport aux mesures est :  $1,2-1 = + 0.2$  et  $0,8-1=-0.2$  pour la station 2.

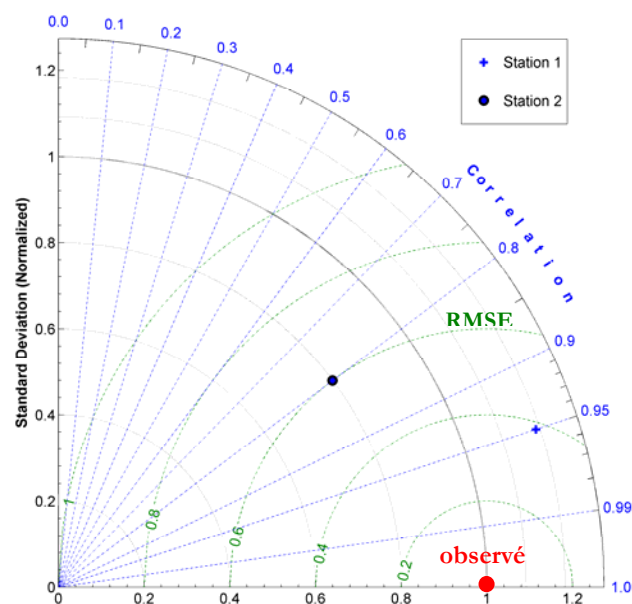




Figure 39 : Exemple de diagramme normalisé de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|   |  | Date | 04/06/14                   |
|   |  | Page | 65/177                     |

Les diagrammes de Taylor présentés dans cette étude ont été normalisés en divisant chaque valeur par l'écart type des mesures de sorte que le point représentant les observations se situe donc sur l'axe des abscisses, à la valeur 1. La normalisation, en rendant les valeurs sans dimensions, permet de placer sur le même diagramme des points représentant différentes variables mesurées, aux unités différentes (Salihoglu et al., 2008).

On associe en général au diagramme de Taylor un diagramme cible présentant entre autres le biais normalisé (Bias) qui est égal à la différence entre les données mesurées et le modèle divisé par l'écart type des mesures. Dans cette étude, le résultat de ce calcul sera exprimé sous forme alphanumérique afin de proposer un ordre de grandeur dans l'estimation du biais entre mesures et modèle.

Concernant les variables **chlorophylle a** et **matières en suspension** (MES), la validation a consisté à représenter sous la forme de scatterplots, les données observées par satellite avec les résultats du modèle en moyennant les résultats sur la période productive des ulves de mai à septembre.



Pour les variables liées aux **sels nutritifs** (nitrate, ammonium, phosphore dissous, silicate) et les **quotas en azote et phosphore des ulves**, la faible fréquence d'échantillonnage des données de mesures disponibles n'a pas permis d'évaluer d'un point de vue statistique les écarts entre modèle et mesures. L'évaluation de la qualité de l'ajustement entre modèle et mesures repose par conséquent sur une comparaison visuelle des graphiques superposant les données simulées avec celles mesurées. On précise que seule l'année 2012 a permis la comparaison des mesures de quotas en azote et phosphore acquis par le Ceva avec les données simulées. La biomasse totale produite par le modèle n'a pu faire l'objet d'une validation étant donné l'absence de données mesurées.

Une remarque importante concernant les données simulées est que leur fréquence d'échantillonnage est d'une donnée par jour à 12h00 UT de début mars à fin septembre. Cette considération n'est pas sans incidence sur les résultats présentés ci-après. En effet, la date et l'heure des mesures étant ce qu'elles sont, il aurait été préférable d'établir des sorties très haute fréquence des variables simulées afin de minimiser au maximum les écarts temporels entre les données mesurées et simulées utilisées pour les comparaisons. En effet, les variables d'état variant rapidement dans l'espace et le temps comme la salinité peuvent être affectées par ce décalage temporel. Cependant, en raison de l'énorme volume de données simulées à sauvegarder, il n'a pas été possible d'ajuster les sorties du modèle aux heures des mesures (autour de 25 Go par simulation pour une sortie journalière de début mars à fin septembre). Le Tableau 9 propose une évaluation du décalage temporel moyen entre les données des mesures Quadrigé<sup>2</sup> et le modèle « Loire-Vilaine » sur les années 2009 et 2012. Le décalage moyen temporel pour la couche de surface de l'année 2012 est assez important (environ 1.3 h soit 78 mn). Ce décalage est nettement renforcé pour la couche de fond (moyenne 2009 et 2012 : 1.52 h soit 91 mn).

**Tableau 9 : Décalage temporel moyen (en heure) entre les mesures de la banque de données Quadrigé<sup>2</sup> et les données du modèle « Loire-Vilaine » sur les années 2009 et 2012**

| Année | Couche de surface | Couche de fond |
|-------|-------------------|----------------|
| 2009  | 0.56              | 1.43           |
| 2012  | 1.30              | 1.62           |



|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET</small><br><small>DE LA RÉGION</small><br><small>PAYS DE LA LOIRE</small> | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V3.0 |
|  |  | Date | 04/06/14                   |
|  |  | Page | 66/177                     |

## 5. Choix des années simulées

Le choix des années simulées 2009 et 2012 repose sur plusieurs facteurs. **L'année 2009 retenue pour la calibration/validation et les scénarii de réduction des flux de nutriment** présente les avantages suivants :

- Année assez récente
- Hydraulicité moyenne de mai à septembre : Vilaine  $\approx 0.95$  ; Loire  $\approx 0.68$  ; Charente  $\approx 0.60$
- Trois stations extraites de la base Quadrige<sup>2</sup> pour la comparaison mesures/modèle des sels nutritifs
- Données de forçage disponibles (météorologique, flux des rivières, données satellites ...)

L'année 2012 choisie pour la calibration/validation a été retenue pour permettre la validation du modèle Ulves car il s'agit de la seule année où des données de quotas en azote et phosphore ont été mesurées. Son hydraulicité moyenne de mai à septembre est la suivante : Vilaine  $\approx 1.23$  ; Loire  $\approx 0.92$  ; Charente  $\approx 1.13$ . Il est intéressant d'observer qu'à l'échelle de la zone d'étude, le choix de l'année simulée sur la seule base du régime hydraulique est délicat du fait de différences marquées entre les grands apports. L'année 2009 peut être qualifiée de moyenne pour la Vilaine et sèche pour la Loire tandis que 2012 apparaît pour la Vilaine comme une année humide et moyenne pour la Loire. Toutefois, l'analyse de l'hydraulicité fournit des enseignements pertinents permettant de caractériser de manière globale le régime hydraulique des années retenues.

## 6. Validation du modèle biogéochimique de rang 1 « Loire-Vilaine » sur les années météo-climatiques 2009 et 2012

### 6.1. Année 2009

En raison de la forte hétérogénéité dans le type de variable mesurée et leur fréquence d'échantillonnage, la présentation des résultats est déclinée en fonction de la provenance de la donnée de mesure. Pour l'année 2009, les données de mesures utilisées sont les suivantes :

1. Données extraites de la base Quadrige<sup>2</sup>
2. Données issues des suivis réalisés par la Direction Départementales des Territoires et de la Mer (DDTM 44)
3. Données provenant de la station de mesure MOLIT (Mer Ouverte Littorale) située en baie de Vilaine
4. Données d'observation satellites Ifremer.

#### 6.1.1. Données Quadrige<sup>2</sup>

A l'échelle de la zone modélisée, la banque de données Quadrige<sup>2</sup> regroupe principalement les mesures issues des réseaux REPHY (réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines) géré par Ifremer et REPOM (réseau national de suivi des ports maritimes) géré par les DDTM pour le compte du ministère de l'écologie. Le Tableau 10 liste pour l'année 2009 l'ensemble des stations appartenant à l'emprise géographique du modèle de rang 1 et celles finalement retenues pour la comparaison (signalées en bleu) qui forment un total de 14 stations exploitables. L'ensemble des stations appartenant au réseau de suivi REPOM ont dû être rejetées en raison de leur position géographique très côtière et non compatible avec la taille de maille du modèle à 250 mètres. Plus précisément, ces stations étaient situées soit sur le premier pixel en eau du modèle soit sur un pixel appartenant au masque terre du modèle.



**Tableau 10 : Localisation des stations Quadrige<sup>2</sup> disponibles sur l'année 2009 et appartenant au modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » (en bleu, les stations retenues pour la comparaison avec le modèle). T : Température, S : Salinité, Chla : Chlorophylle *a*, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : Nitrate, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : Ammonium, Si(OH)<sub>4</sub> : Silicium dissous, MES : Matières En Suspension**

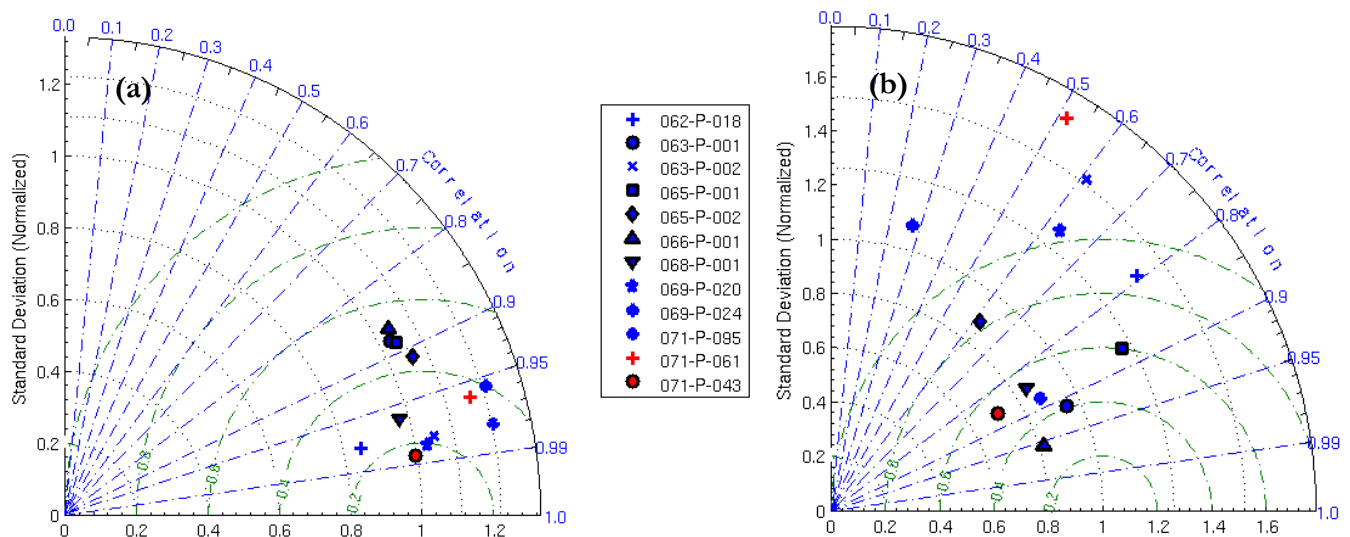
| Station   | Lieu (numéro de planche)                 | longitude | latitude | Réseau | T | S | Chla | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | Si(OH) <sub>4</sub> | MES |
|-----------|--|-----------|----------|--------|---|---|------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----|
| 062-P-046 | Bonen_du_Four (planche 2)                | -2.655    | 47.309   | REPHY  |   |   | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 062-P-018 | Nord_Dumet (planches 1 et 2)             | -2.657    | 47.460   | REPHY  | * | * | *    | *                            | *                            | *                             | *                   |     |
| 063-P-001 | Le_Marescle (planche 3)                  | -2.497    | 47.463   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 063-P-002 | Ouest_Loscolo (planches 4 et 5)          | -2.538    | 47.458   | REPHY  | * | * | *    | *                            | *                            | *                             | *                   |     |
| 065-P-001 | Kervoyal (planche 6)                     | -2.532    | 47.520   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 065-P-002 | Le_Halguen (planche 7)                   | -2.492    | 47.502   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 066-P-001 | Pont-Mahé (planche 8)                    | -2.473    | 47.432   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 068-P-014 | 44049aP2e1-Le_Croisic_Eau_1_jonchère     | -2.508    | 47.293   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 068-P-015 | LE_CROISIC_Port_de_Plaisance             | -2.504    | 47.295   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 068-P-001 | Le_Croisic_(a) (planche 9)               | -2.514    | 47.300   | REPHY  | * | * | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 069-P-020 | Pornichet (planche 9)                    | -2.345    | 47.259   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 069-P-040 | 44132aV1e1-Pornichet_Eau_1_marée         | -2.349    | 47.257   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 069-P-044 | 44132aV1e2-Pornichet_Eau_2_marée         | -2.347    | 47.258   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 069-P-024 | Pointe_St_Gildas_large (planche 10)      | -2.268    | 47.135   | REPHY  | * | * | *    | *                            | *                            | *                             | *                   |     |
| 070-P-054 | 44184aC1e1-Nantes_Saint_Nazaire_Eau_1_pe | -2.200    | 47.283   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 070-P-055 | 44184aC1e2-Nantes_Saint_Nazaire_Eau_2_sa | -2.202    | 47.274   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 070-P-060 | LA_PLAINE_La_Gravette                    | -2.213    | 47.157   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 070-P-061 | PREFAILLES_Port_de_Plaisance             | -2.247    | 47.142   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-080 | 44131bV1e1-Pornic_Noëveillard_Eau_1_noëv | -2.115    | 47.109   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-085 | 44131bV1e2-Pornic_Noëveillard_Eau_2_noëv | -2.112    | 47.109   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-086 | PORNIC_Anse_aux_Lapins                   | -2.107    | 47.110   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-095 | Coupelasse_large (Planche 11)            | -2.061    | 47.042   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 071-P-061 | Bois_de_la_Chaise_large (planche 11)     | -2.199    | 47.019   | REPHY  | * | * | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 071-P-081 | 85163aV1e2-Noimoutier_Herbaudière_Eau_2  | -2.298    | 47.025   | REPOM  | * | * |      | *                            | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-082 | 85163aP1e1-Noimoutier_Herbaudière_Eau_1  | -2.299    | 47.026   | REPOM  | * | * |      | *                            | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-083 | 85029aP1e1-Bouin_Eau_1_epoids            | -2.073    | 46.937   | REPOM  | * | * |      | *                            | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-084 | 85012aC1e1-La_Barre_de_Monts_Eau_1_frome | -2.140    | 46.893   | REPOM  | * | * |      | *                            | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-043 | Fromentine (planche 12)                  | -2.141    | 46.892   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 070-P-001 | Estuaire_(b) (planche 12)                | -2.228    | 47.218   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |





Le diagramme de Taylor normalisé de la Figure 40 (a) montre que la température est bien représentée avec un coefficient de corrélation ( $R$ ) pour l'ensemble des stations variant entre 0.88 et 0.98 et en moyenne égal à 0.94. L'erreur quadratique centrée (RMSE) est inférieure à 0.5 et l'écart type est relativement proche de celui des mesures. La salinité est moins bien reproduite Figure 40 (b) avec toutefois un coefficient de corrélation moyen  $R_m$  égale à 0.73. Aux stations {071-P-061 ; 062-P-018 ; 062-P-018 ; 069-P-024 ; 069-P-020 ; 062-P-018}, l'erreur quadratique centrée (RMSE) est supérieure à 1 et l'écart type du modèle est supérieur de 50 % à celui des mesures. Pour les autres stations, l'erreur quadratique centrée est inférieure à 0.9 et l'écart type du modèle varie dans une fourchette égale à  $\pm 20$  % par rapport à celui des mesures.

Le biais normalisé pour la température est en moyenne égal à 0.34 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 27 % de l'écart type des mesures soit 0.5 °C. Pour la salinité, le biais normalisé est en moyenne égal à 0.33 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale en moyenne à 33 % de l'écart type des mesures soit 0.4 PSU. Notons que la station « 070-P-001 » en raison d'un nombre de points de mesure trop faible a été rejetée de l'analyse statistique.



**Figure 40 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrigé pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation ( $R$ ), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).**

L'évolution entre les données simulées et mesurées est présentée sur les Planches 1 à 12. Concernant les sels nutritifs, les trois stations {063-P-002 ; 062-P-018 ; 069-P-024} présentant des mesures montrent une adéquation satisfaisante pour le nitrate entre les données simulées et les données mesurées. La décroissance rapide des teneurs entre début mars et fin mai est reproduite par le modèle suivie de teneurs basses jusque fin septembre. Globalement, le modèle tend à surestimer légèrement les teneurs en ammonium en particulier à la station {063-P-002}. Mis à part le tout début de saison, les teneurs en phosphore dissous sont cohérentes avec les données mesurées. S'agissant des silicates, les ordres de grandeurs des teneurs simulées sont comparables avec ceux mesurés.

Concernant la chlorophylle  $a$ , le modèle reproduit globalement les teneurs mesurées aux 6 stations Quadrigé<sup>2</sup> en 2009. Le bloom de début mars en baie de Vilaine n'est en revanche pas reproduit par le modèle.



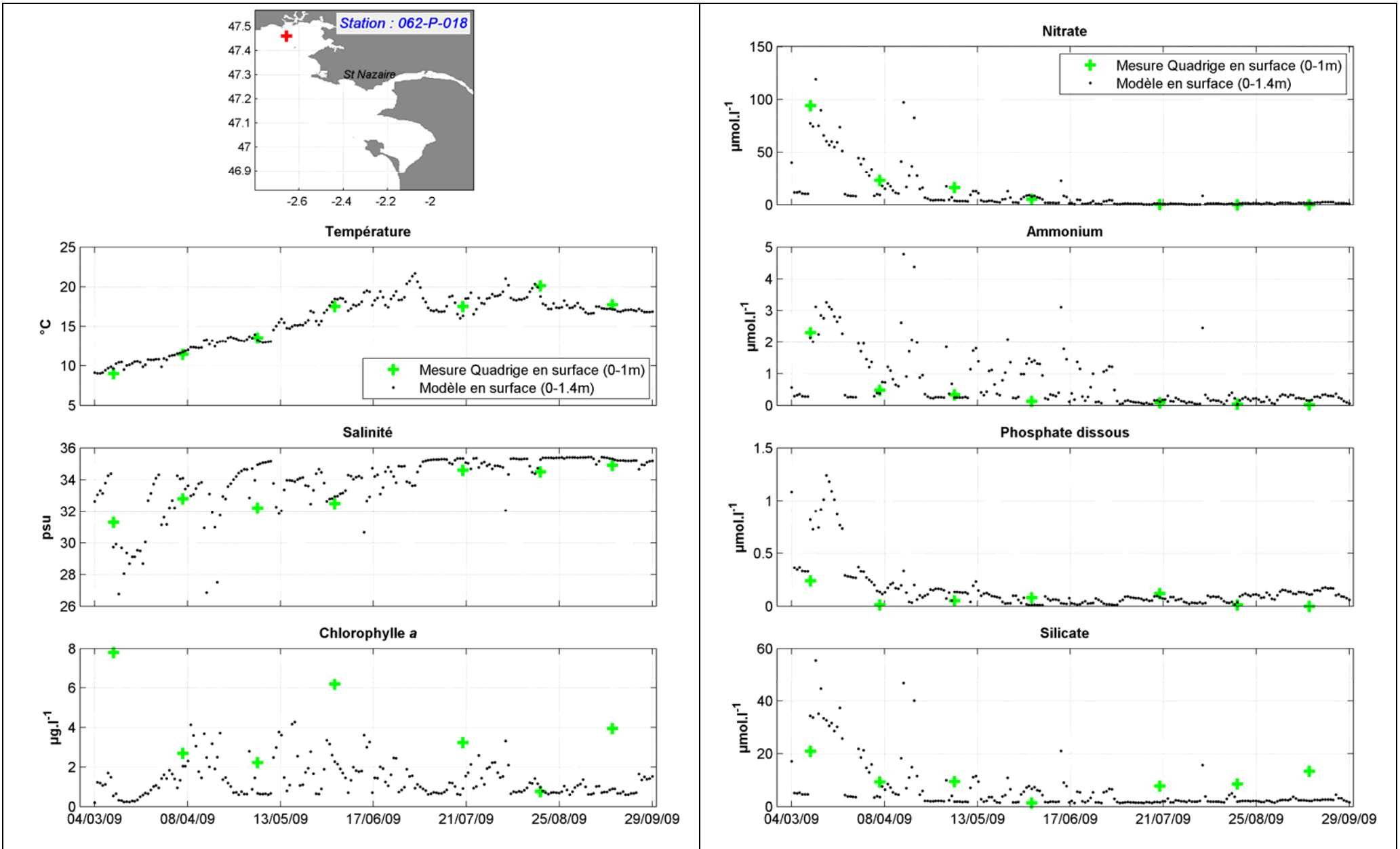


Planche 1 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrige<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

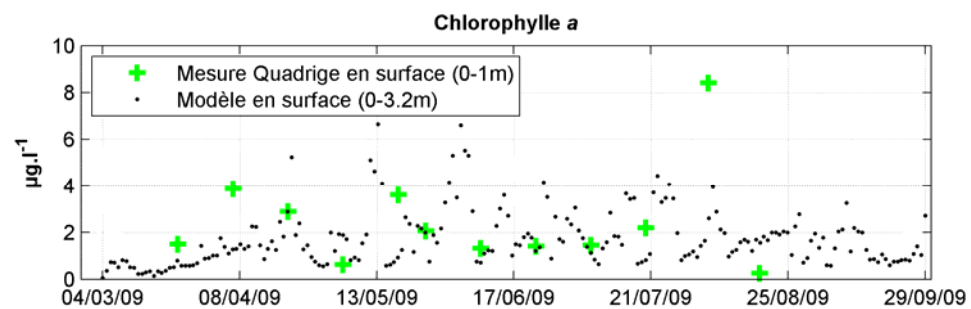
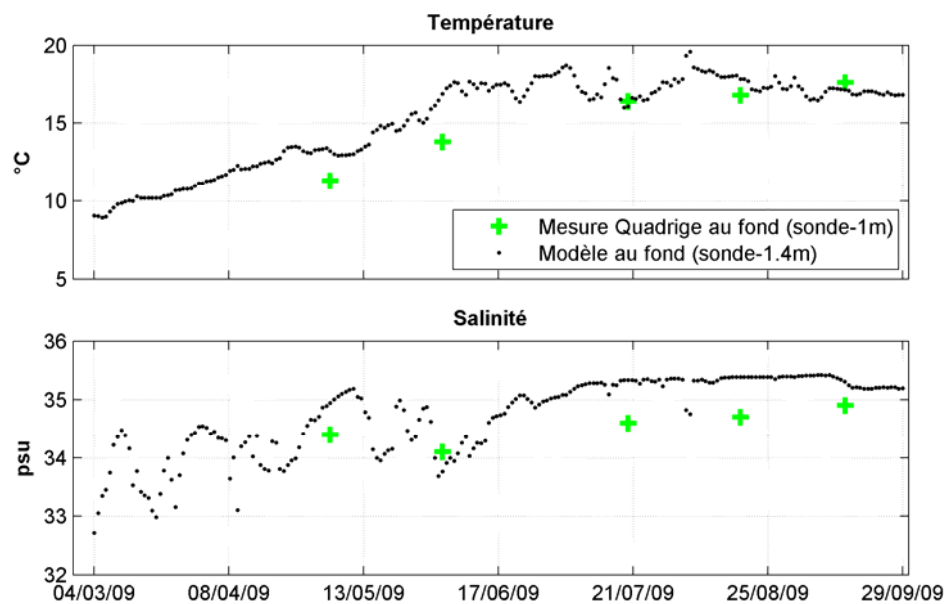
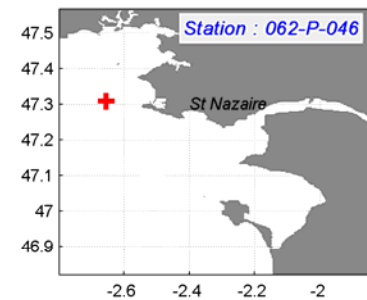
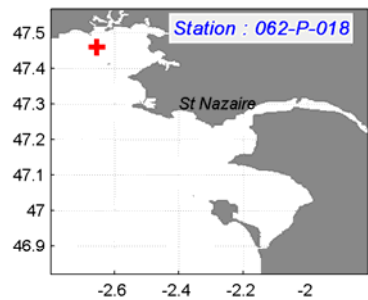
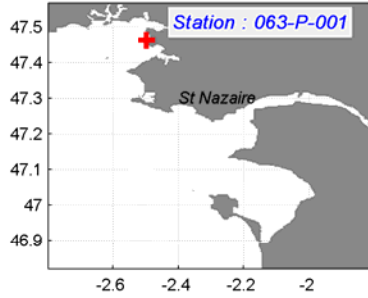
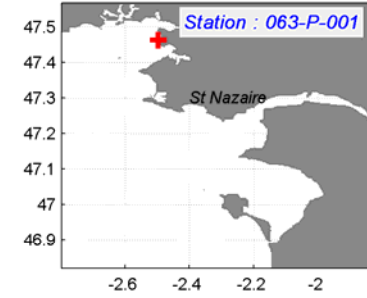
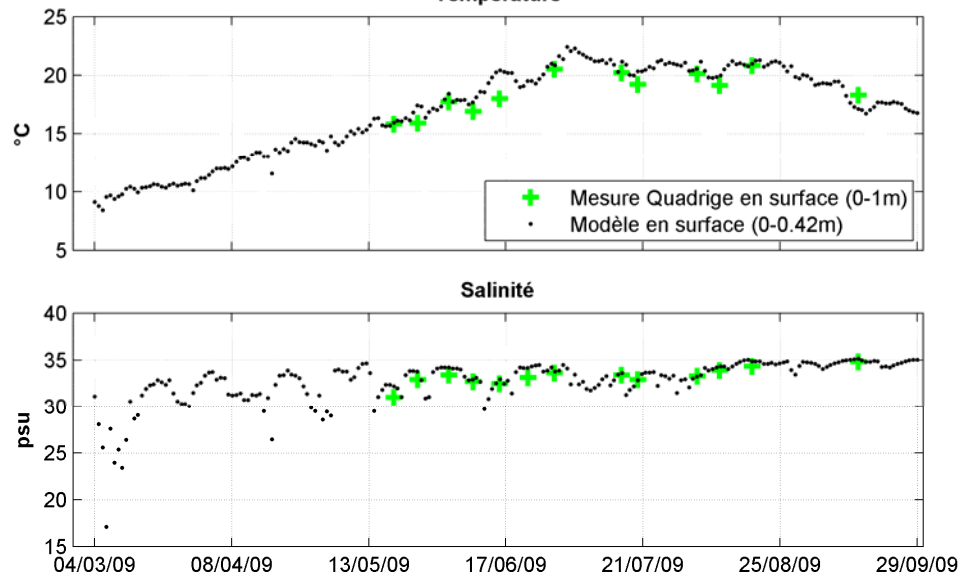


Planche 2 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



Température



Température

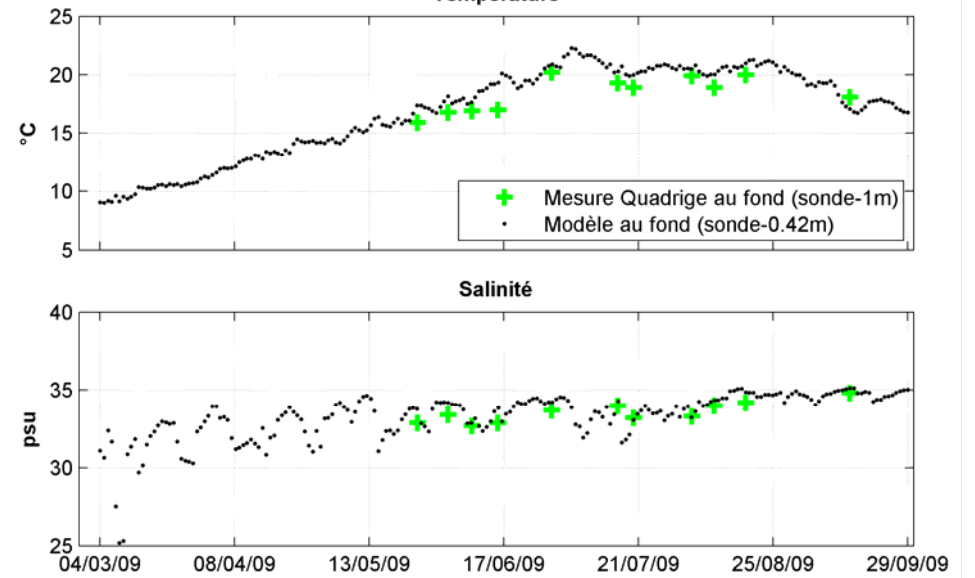


Planche 3 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

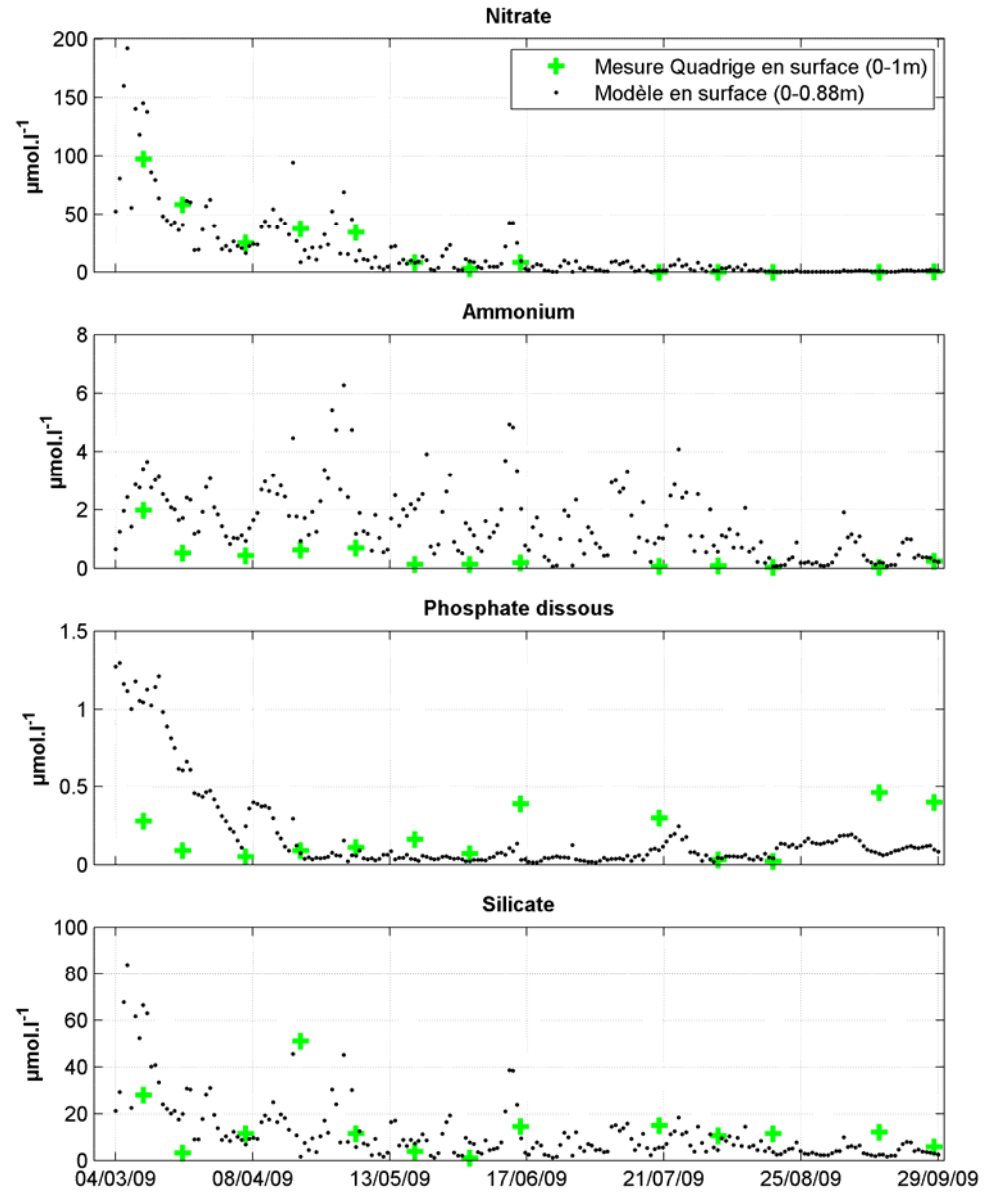
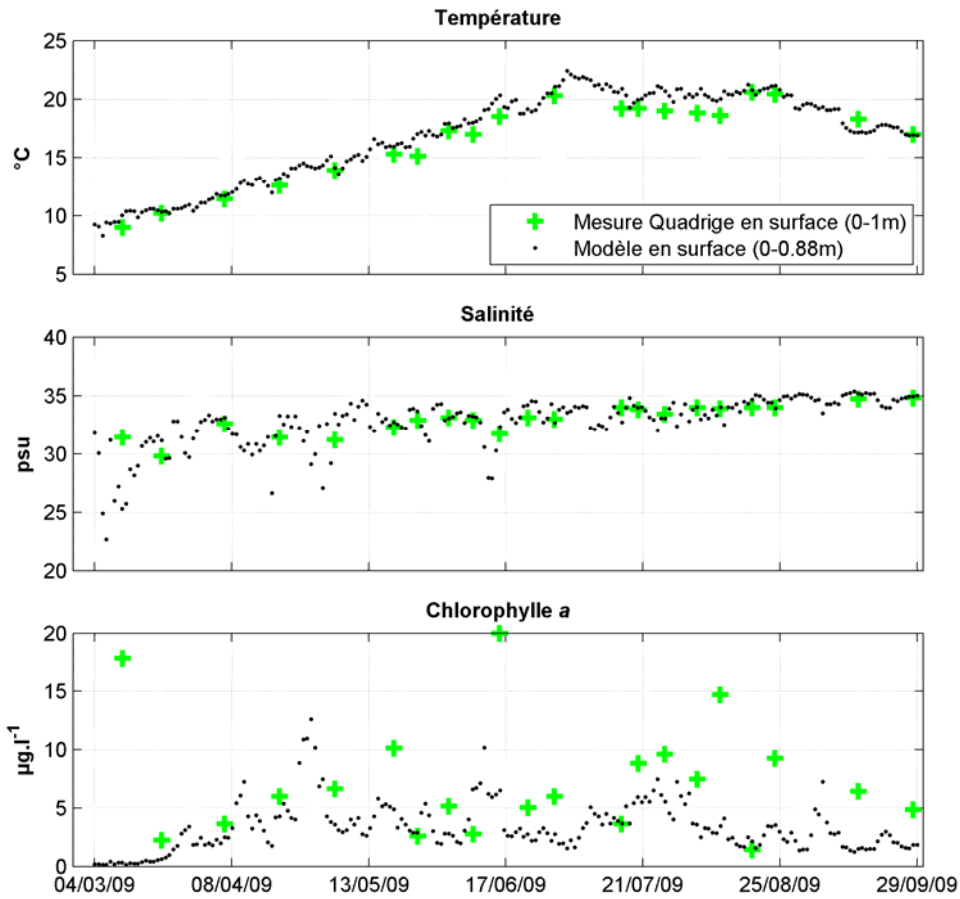
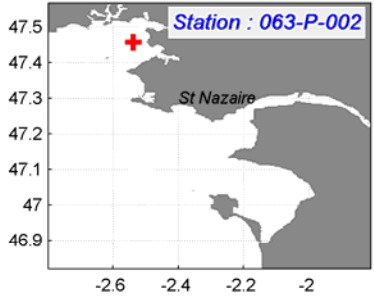


Planche 4 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadriga<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



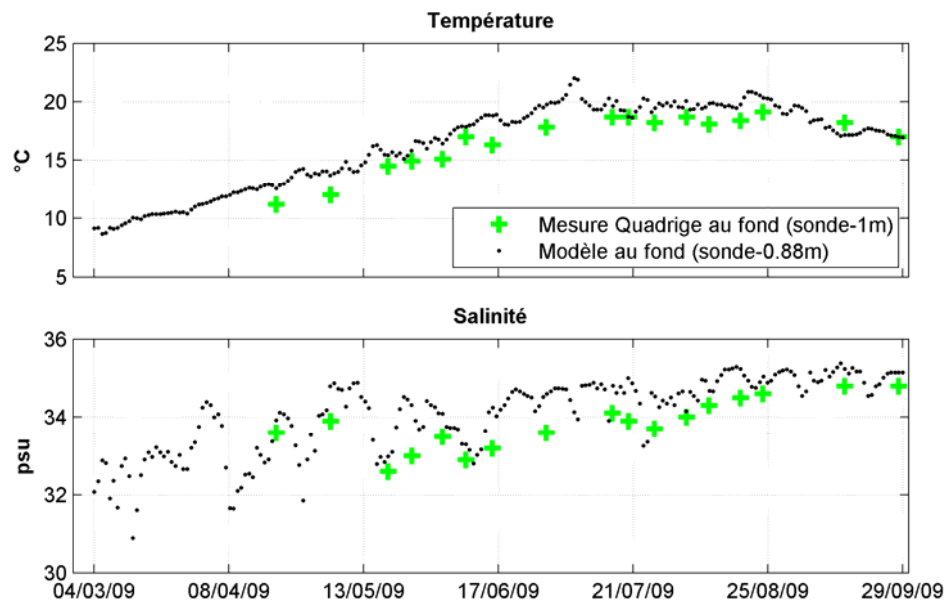
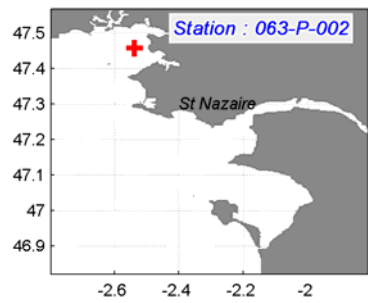
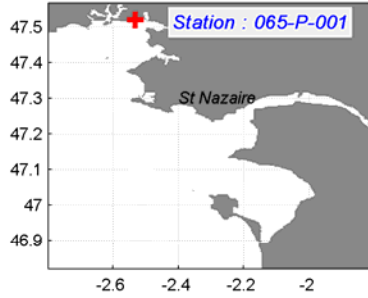
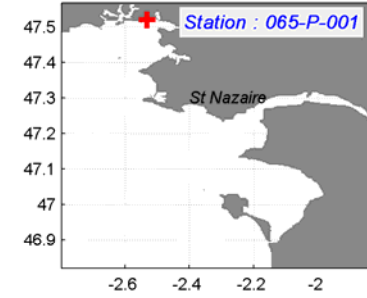
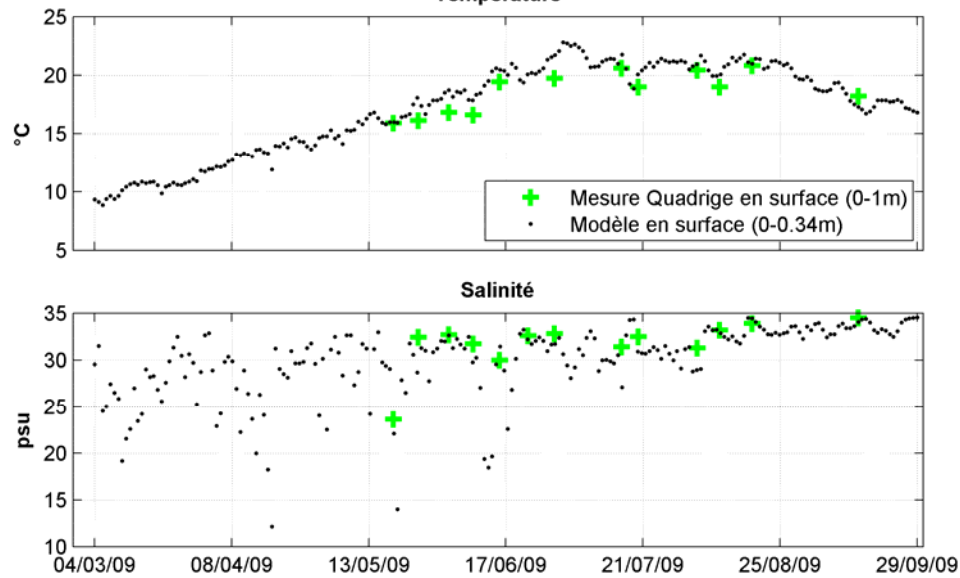


Planche 5 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



Température



Température

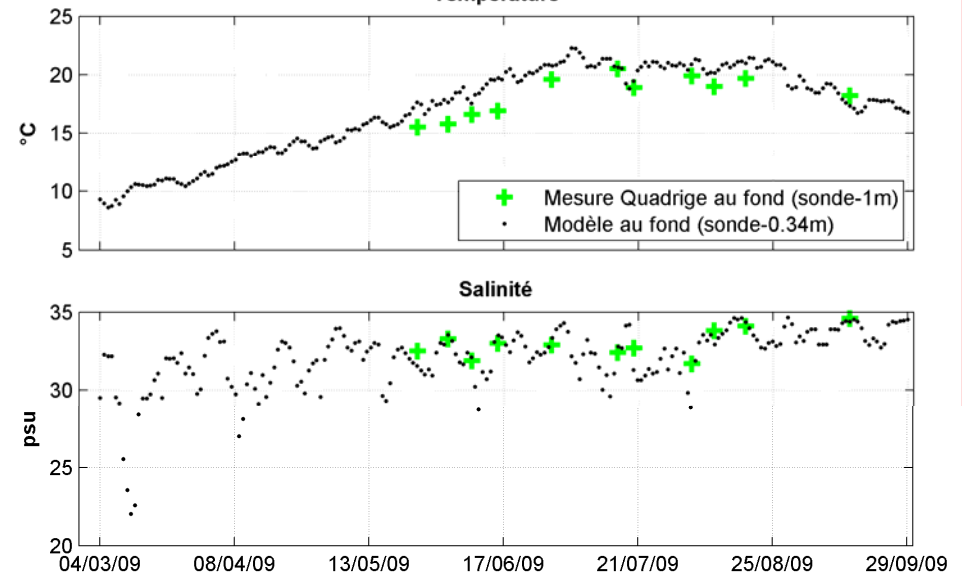
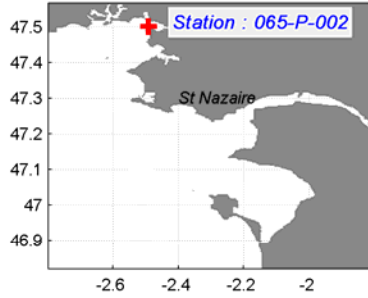
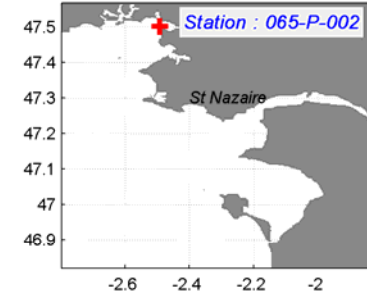
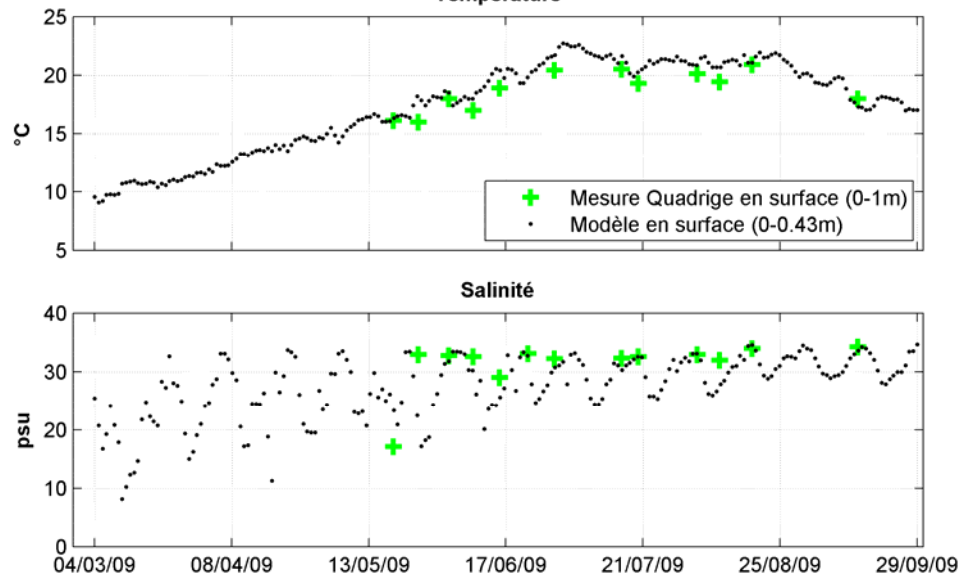


Planche 6 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



Température



Température

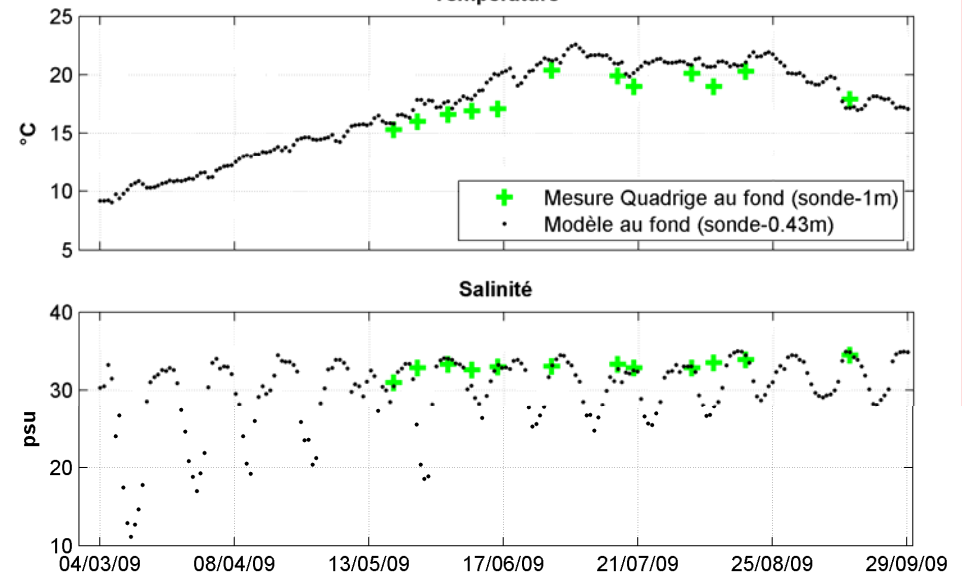
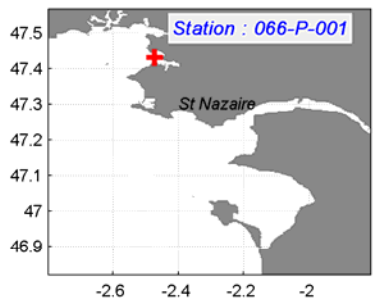
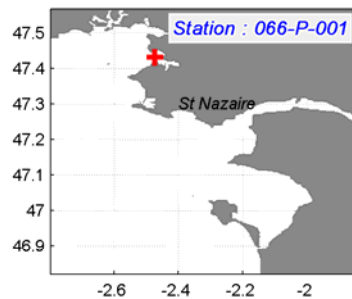
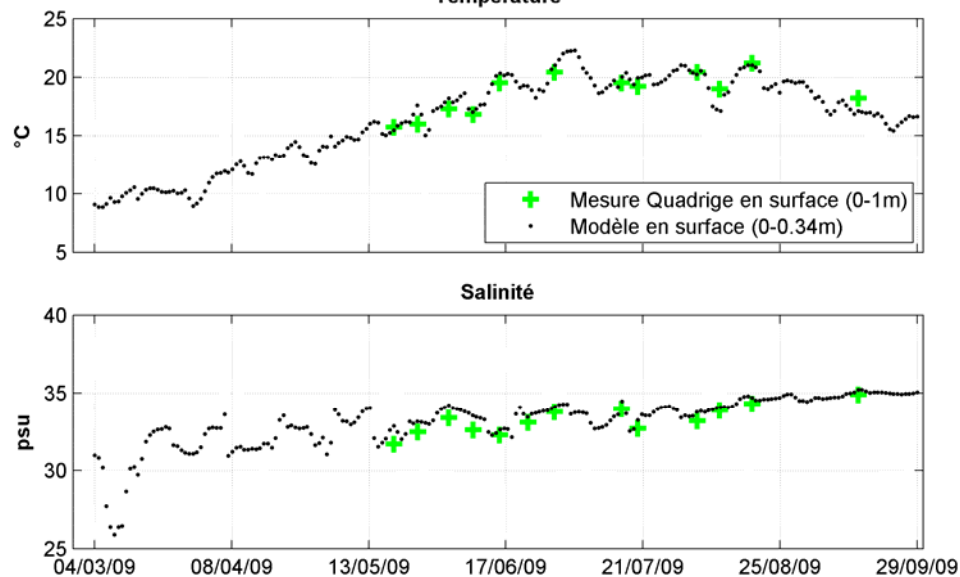


Planche 7 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



Température



Température

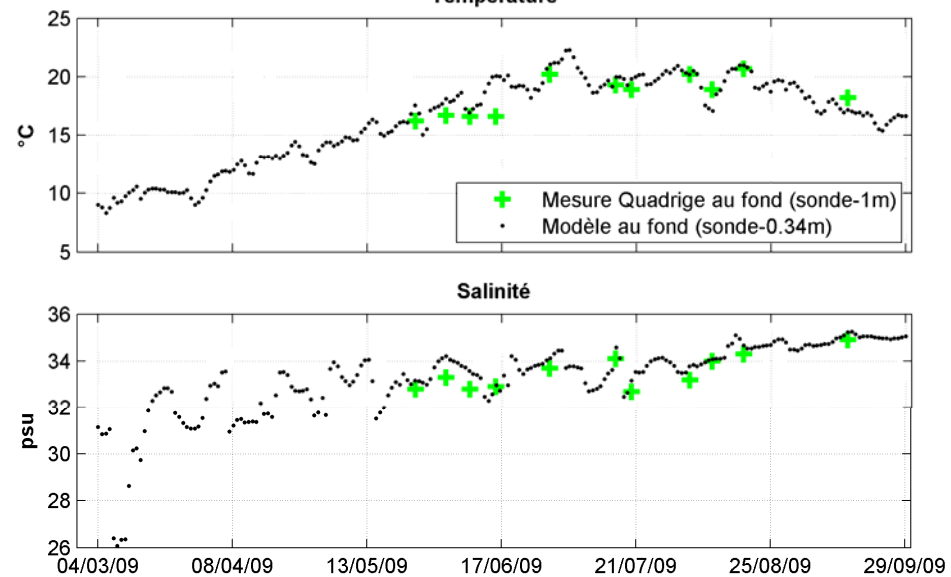


Planche 8 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

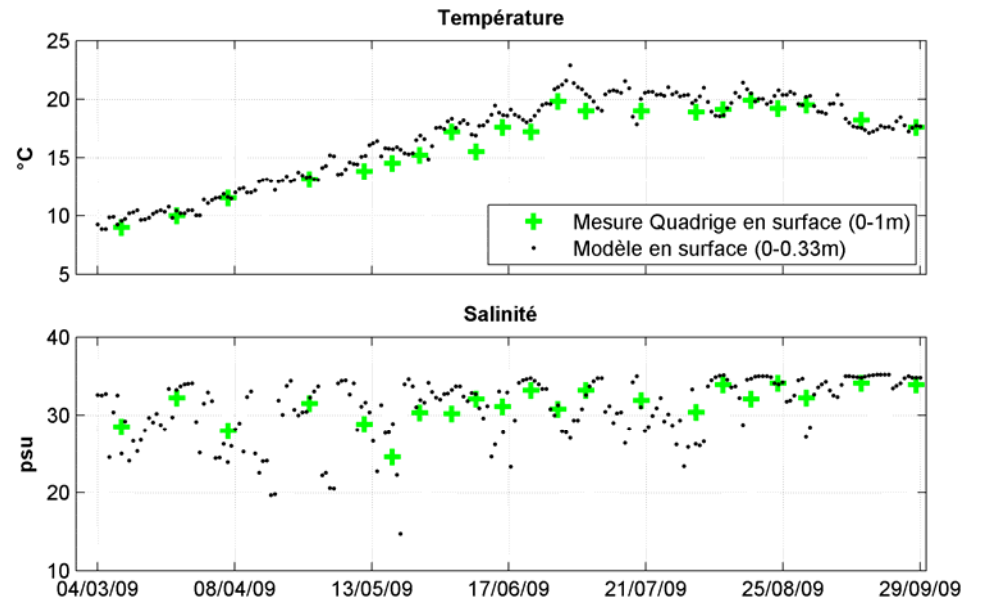
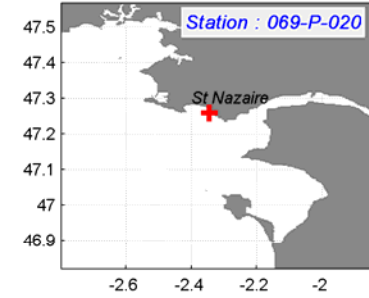
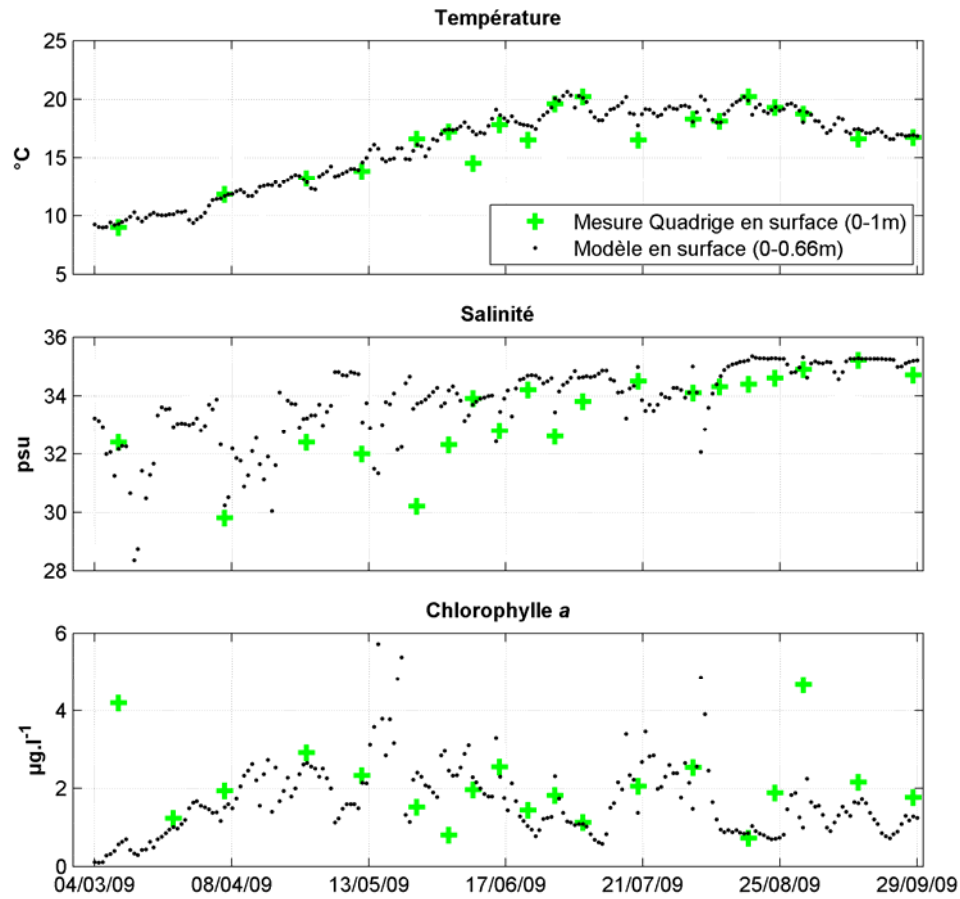
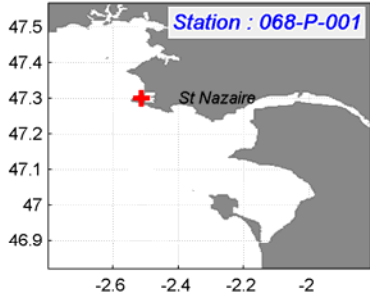


Planche 9 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



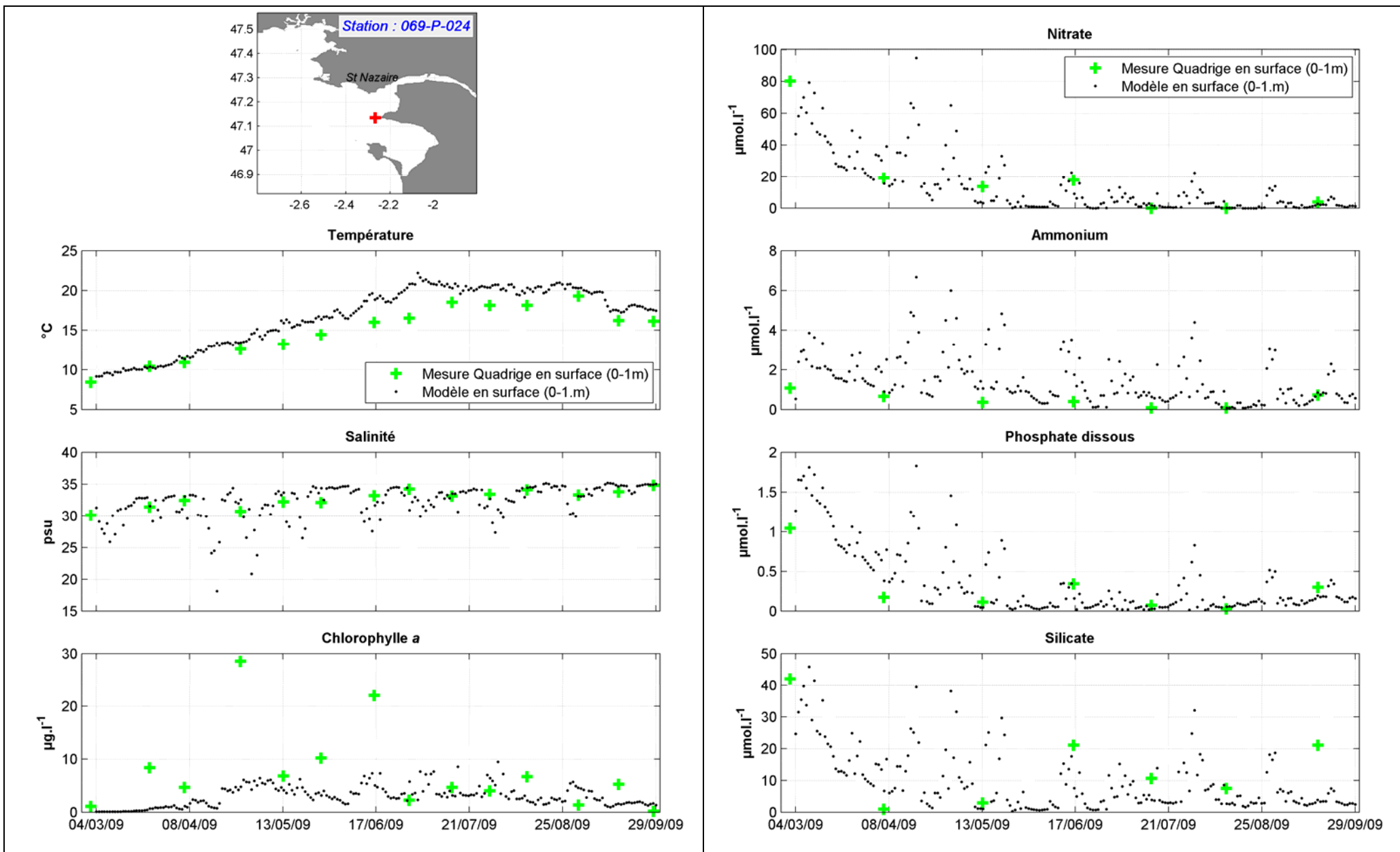
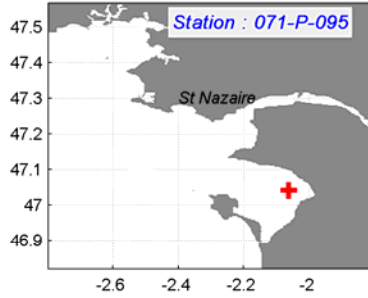
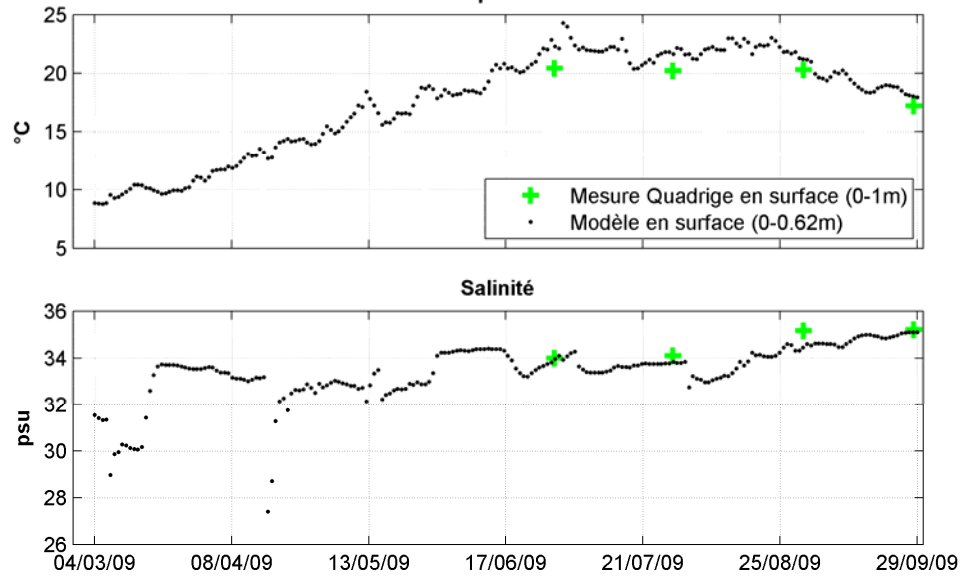


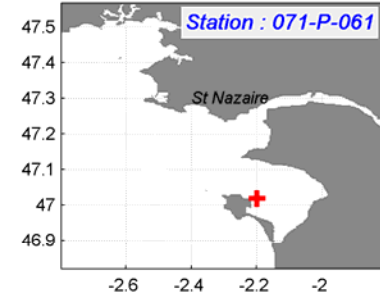
Planche 10 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009



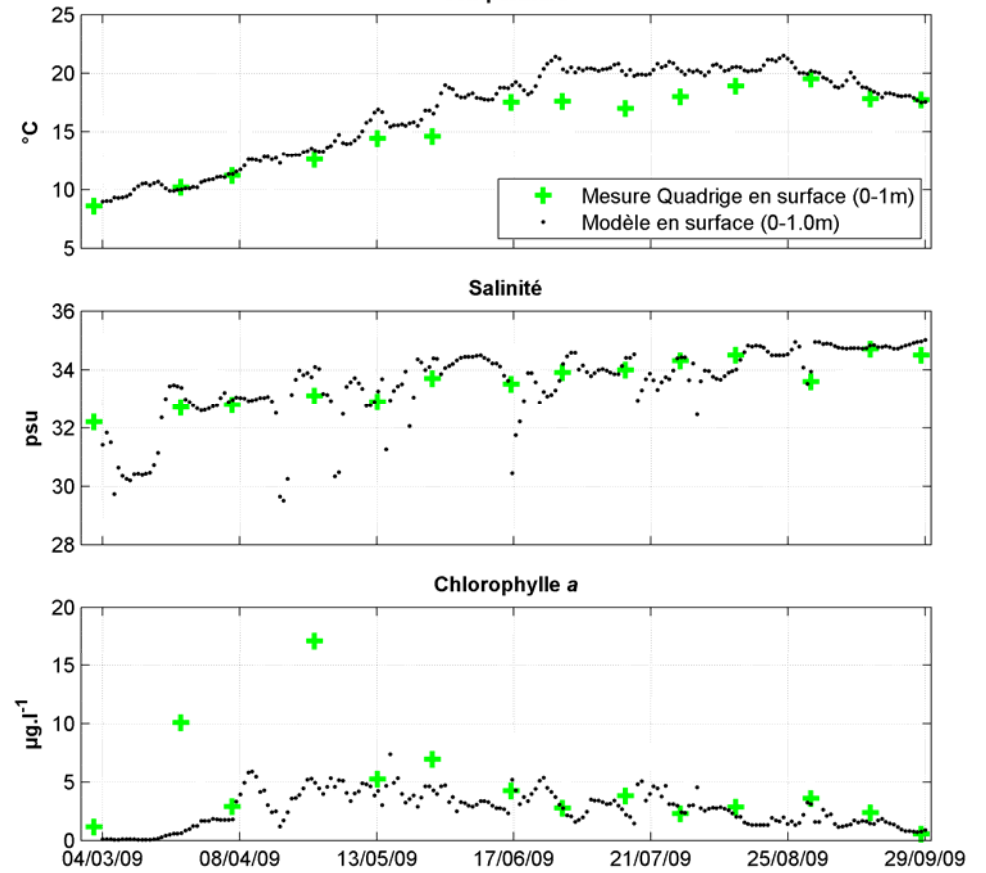
Température



Salinité



Température



Salinité

Chlorophylle a

Planche 11 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

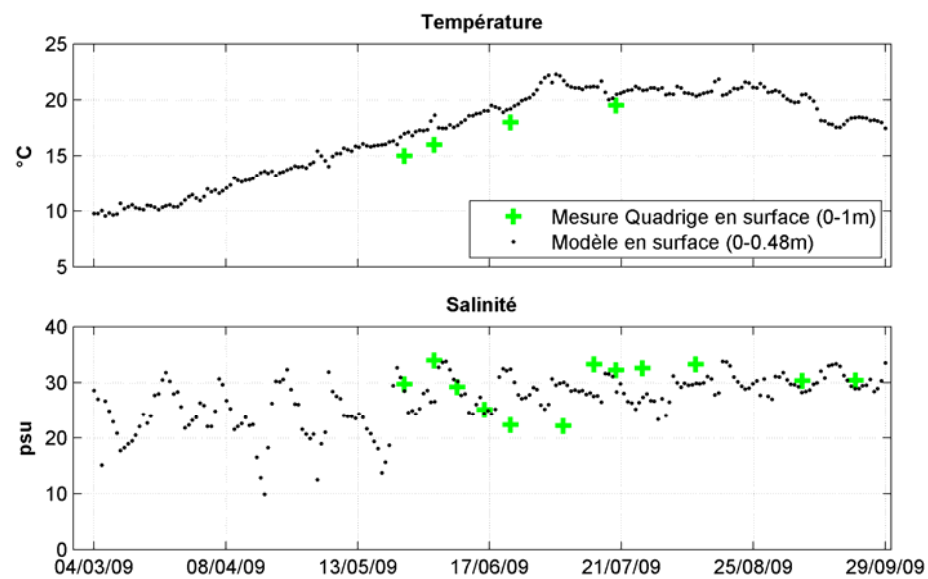
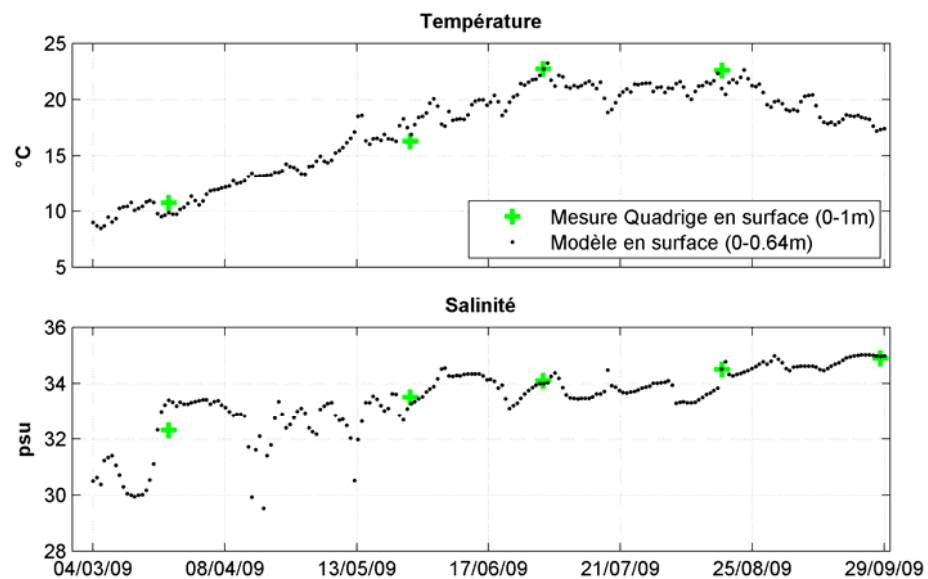
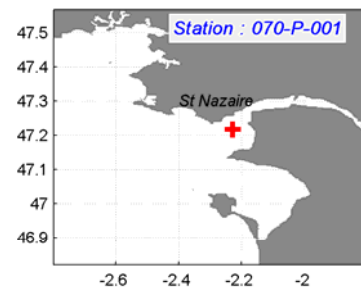
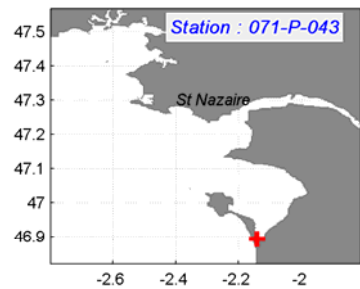


Planche 12 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

### 6.1.2. Données de la bouée MOLIT Vilaine

Le diagramme de Taylor normalisé de la Figure 41 montre que la température de fond et de surface est correctement reproduite par le modèle ( $R \approx 0.94$  et  $RMSE < 0.4$ ) avec un écart type du modèle légèrement inférieur à celui des mesures. La salinité est un peu moins bien reproduite par le modèle ( $R \approx 0.8$  et  $RMSE < 0.7$ ) et l'écart type du modèle varie dans une fourchette égale à  $\pm 20\%$  par rapport à celui des mesures.

Le biais normalisé pour la température est égal à 0.14 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 14 % de l'écart type des mesures soit 0.23 °C. Pour la salinité, le biais normalisé est en moyenne égal à 0.8 ce qui correspond à un biais entre les mesures et le modèle de l'ordre de 0.7 PSU. Les résultats présentés reposent sur une moyenne entre la couche de surface et celle de fond.

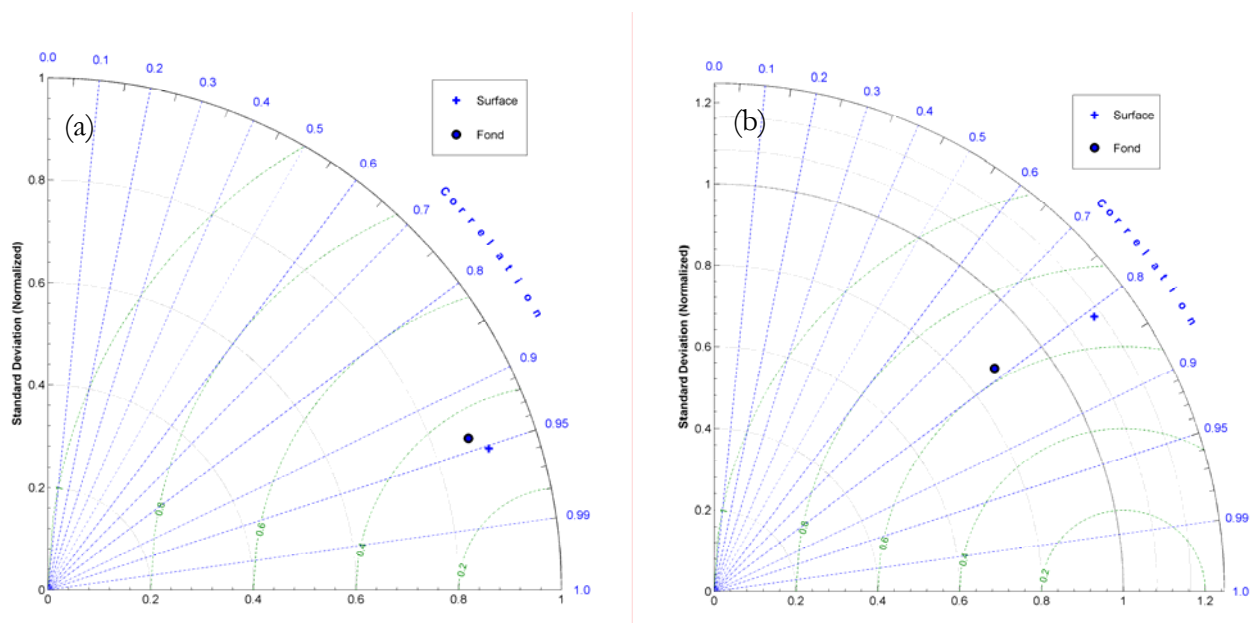


Figure 41 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).

La planche 13 et la planche 14 illustrent, pour les couches de fond et de surface et pour les variables température, salinité, nitrate et silicates, l'évolution des données simulées auxquelles ont été superposées les données de mesures.

Les teneurs simulées en nitrate et en silicate apparaissent globalement sous-estimées par rapport aux mesures. Il n'est pas exclu que les mesures de sels nutritifs effectuées à la bouée MOLIT Vilaine selon une procédure automatisée contiennent un biais important.



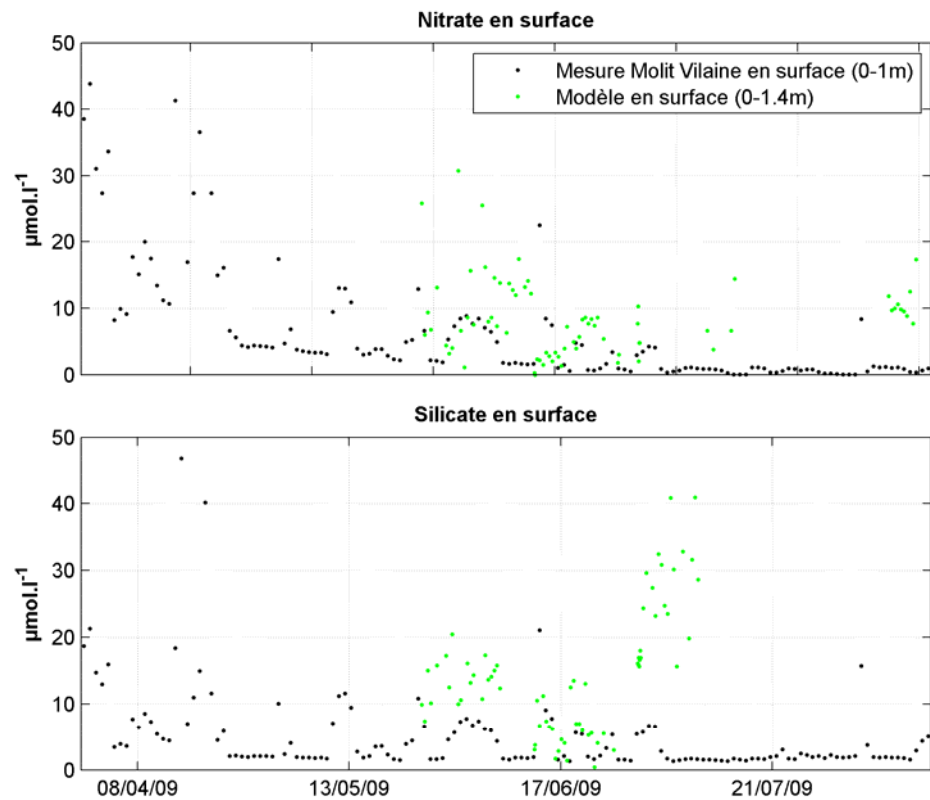
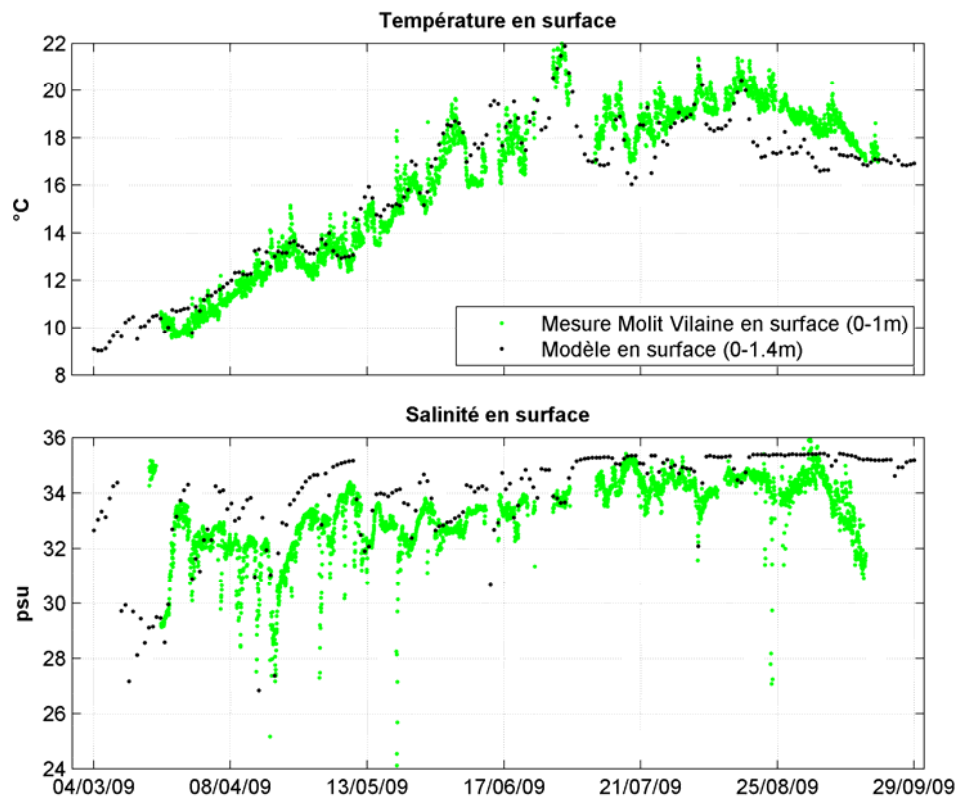
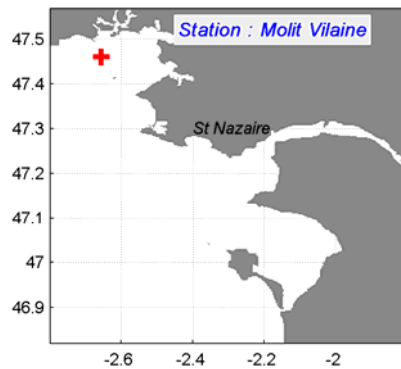


Planche 13 : Comparaison des mesures issues de la bouée MOLIT Vilaine avec le modèle pour l'année 2009



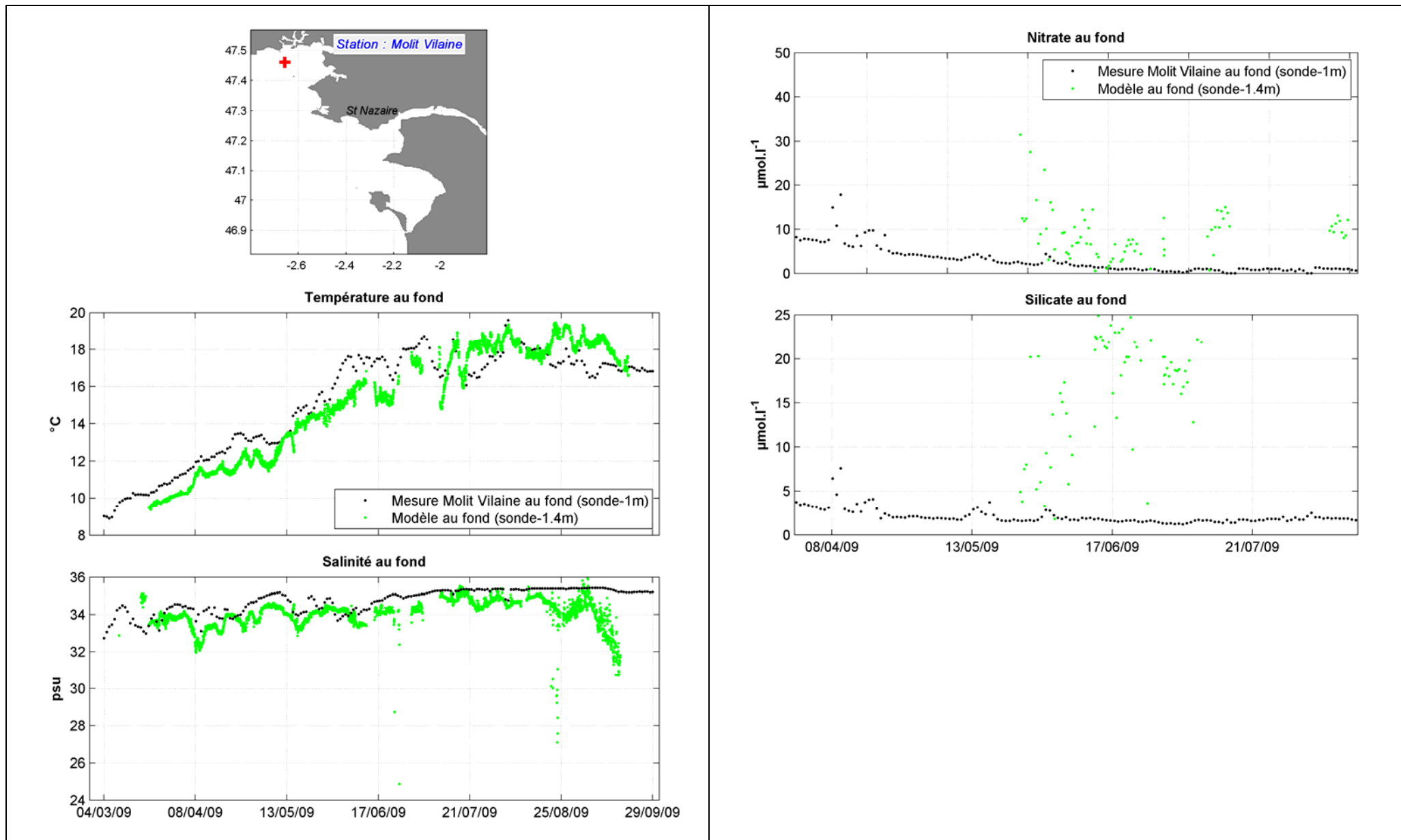


Planche 14 : Comparaison des mesures issues de la bouée MOLIT Vilaine avec le modèle pour l'année 2009

### 6.1.3. Données DDTM 44

La Planche 15 compare les données simulées avec celles mesurées en condition de basse mer à la station « Cordemais » située sur la Loire. Cette station représente le point de comparaison le plus amont du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ». En ce point la dessalure est donc importante avec des salinités mesurées proches de 0 et au maximum de l'ordre de 6 PSU.

Pour cette station, en raison du faible nombre de campagnes de mesures sur la période étudiée (mars à septembre 2009), soit 7 au total, il n'a pas été possible de quantifier statistiquement l'ajustement du modèle par rapport aux mesures. Toutefois, le modèle reproduit correctement les fortes dessalures ainsi que l'évolution saisonnière de la température.

Les fortes teneurs en nitrate sont bien représentées par le modèle. Le modèle sous-estime en revanche les teneurs mesurées lors des campagnes de juillet et août 2009. Une dénitrification importante non représentée par le modèle au sein de l'estuaire de la Loire peut expliquer cet écart. Une sous-estimation en début de saison de la teneur simulée en ammonium est relevée en début de saison (mois de mars et d'avril) et inversement en fin de saison sur août et septembre. Le phosphate est également surestimé par le modèle en début de saison et respecte ensuite les gammes de valeurs mesurées.

La chlorophylle *a* simulée se trouve très largement sous-estimée par rapport aux mesures. Etant données les salinités très faibles (simulées et mesurées), ce résultat est logique dans la mesure où le modèle ECO-MARS3D ne simule pas le fonctionnement du compartiment phytoplanctonique en eau douce.

Pour les matières en suspension (MES), un écart important en cette station est observé entre le modèle et les mesures du fait que le modèle ne simule pas l'évolution de la MES liée à la présence du bouchon vaseux au sein de l'estuaire. Ce dernier est à l'origine des très fortes variations temporelles de la MES sous l'action conjuguée de la marée (échelle horaire) et de l'évolution du débit de la Loire (échelle saisonnière). La prise en compte d'une modélisation fine de la MES au sein de l'estuaire de la Loire nécessiteraient le couplage au modèle ECO-MARS3D d'un modèle hydro-sédimentaire complet.

Dans la mesure où le modèle reproduit dans l'ensemble correctement les mesures des stations situées en mer (cf. § 6.1.1 et § 6.1.2), la non prise en compte dans le modèle des processus complexes se déroulant au sein de l'estuaire de la Loire (bouchon vaseux, phytoplancton d'eau douce produit en amont de la Loire, mortalité du phytoplancton au niveau de la zone de mélange eaux douces/eaux salées) ne sont pas de nature à remettre en question la qualité générale du modèle mis en place et sa capacité à répondre aux objectifs fixés dans le CCTP.



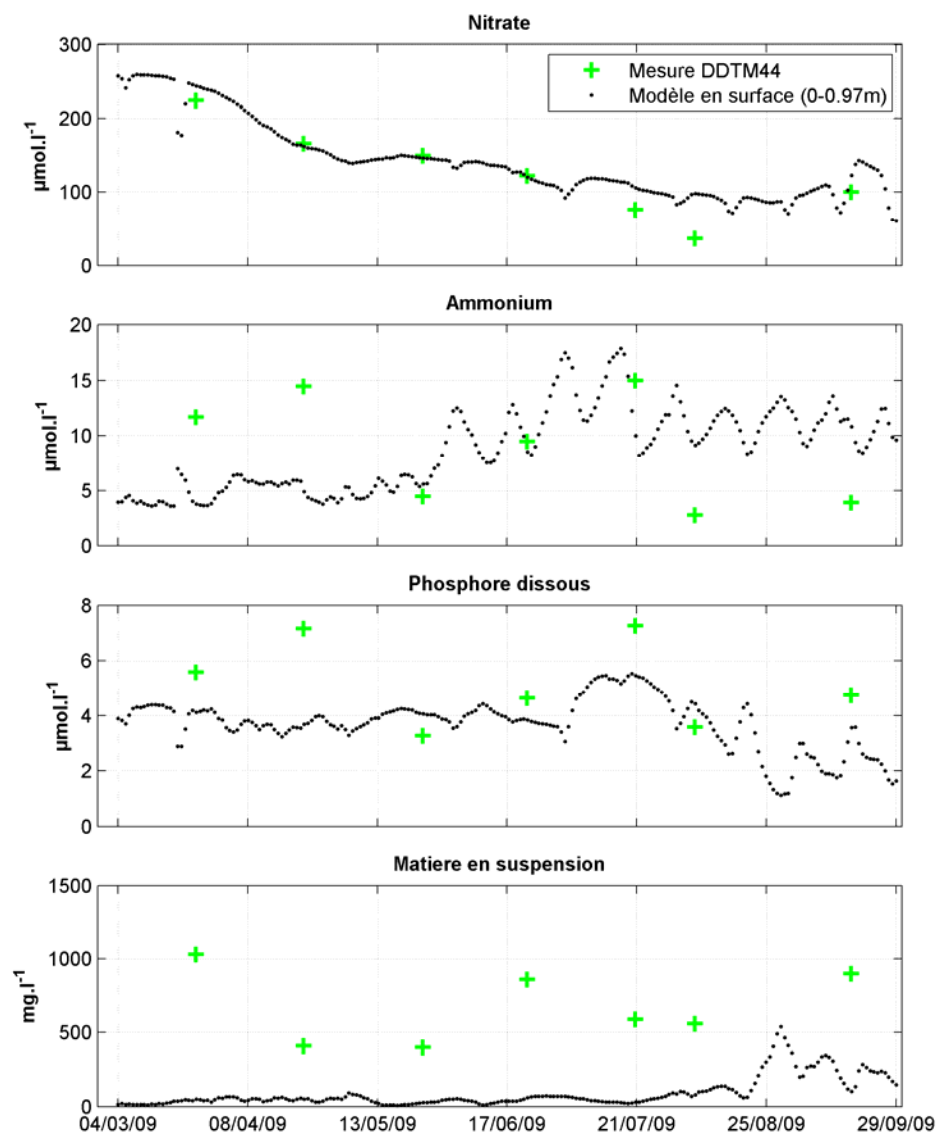
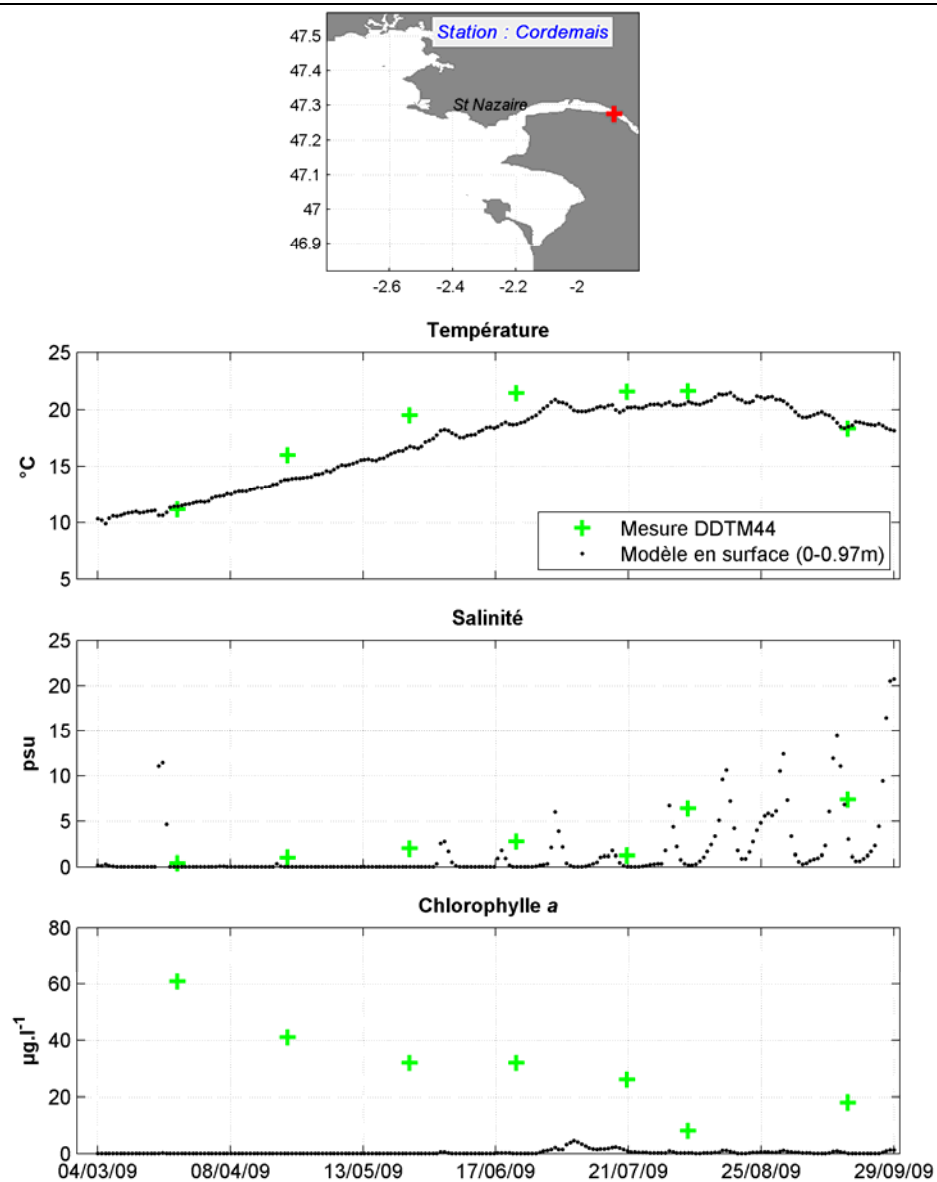


Planche 15 : Comparaison des mesures DDTM 44 avec le modèle pour l'année 2009

#### 6.1.4. Matières en suspension et chlorophylle *a* observées par satellite

##### 6.1.4.1. Taux de matières en suspension

La Figure 42 présente sur la période de production des ulves de mai à septembre la comparaison entre la moyenne des matières en suspension de surface observées par satellite avec celles simulées par le modèle ECO-MARS3D. La cartographie de la MES moyenne simulée (cf. Figure 42 b) a été obtenue en prenant la valeur de la MES retenue dans le calcul de l'extinction lumineuse qui correspond au maximum entre la valeur fournie par la MES issue directement du forçage satellitaire avec celle provenant des rivières. Dans ces conditions il est logique d'obtenir une bonne adéquation entre les mesures et le modèle.

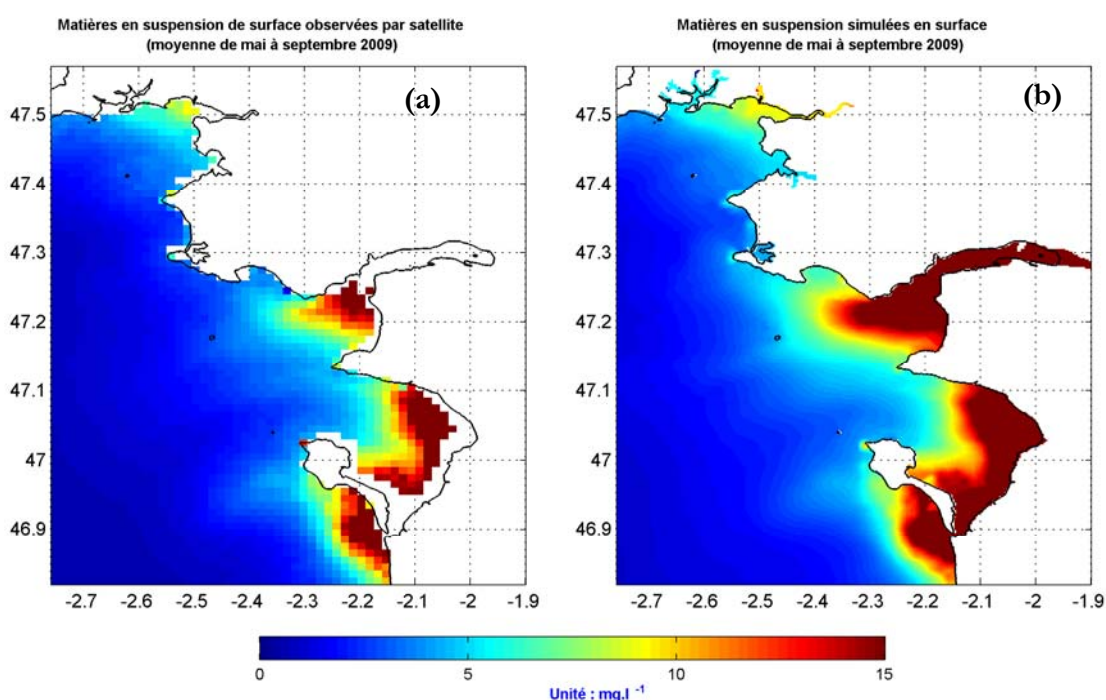


Figure 42 : Moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b)

Compte tenu de la remarque précédente, une très bonne corrélation ( $R^2=0.91$ ) entre la donnée observée et simulée a été obtenue (Figure 43). Les principaux écarts se situent au niveau du panache distal de la Loire où la MES issue de la rivière domine la donnée de forçage satellitaire.

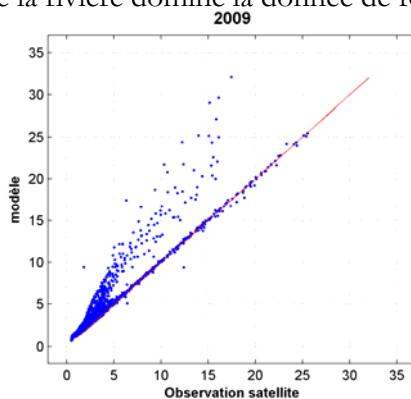


Figure 43 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée)



### 6.1.4.2. Chlorophylle *a*

La Figure 44 propose une comparaison de la moyenne de mai à septembre de la chlorophylle *a* observée par satellite avec celle simulée par le modèle en surface. Si le modèle parvient à reproduire les deux principales zones de production (baie de Vilaine et aval de l'estuaire de la Loire), il sous-estime la zone de production en baie de Vilaine et sur le linéaire côtier allant jusqu'au Croisic. La zone de production phytoplanctonique située en aval de l'estuaire de la Loire est correctement représentée par le modèle. Les données simulées montrent la présence dans l'anse de Noirmoutier d'une troisième zone de production non présente sur les données satellitaires (zone dont l'intensité est toutefois assez proche de celle des mesures et inférieure aux deux principales zones productives).

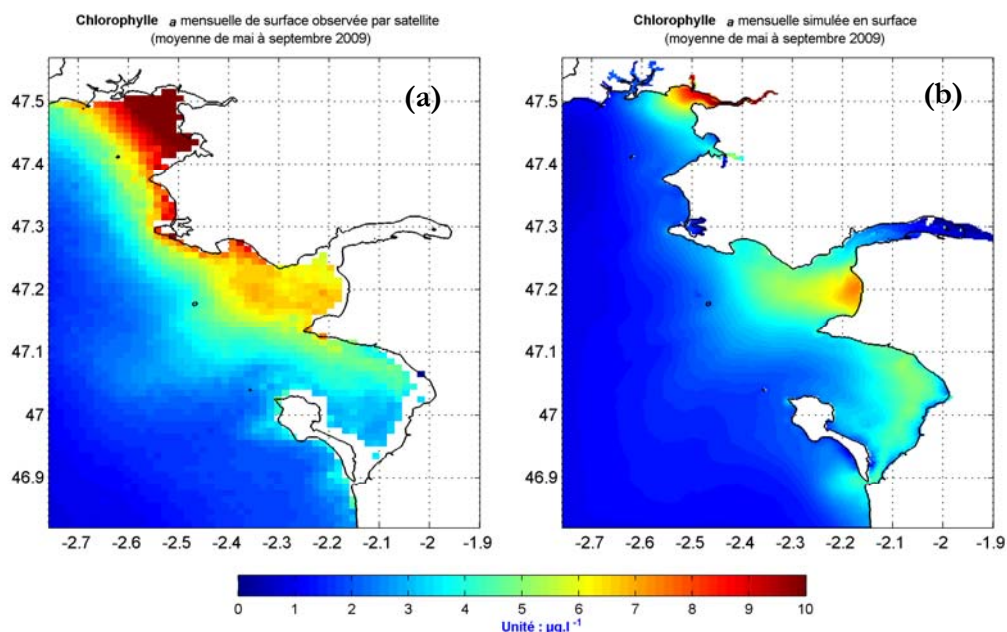


Figure 44 : Moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b)

La position moyenne du nuage de points présenté en Figure 45 indique que le modèle tend à sous-estimer la teneur globale en chlorophylle *a* par rapport aux données observées par satellite au sein de l'emprise du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ». Le coefficient de corrélation obtenu entre les mesures et le modèle est de 0.42.

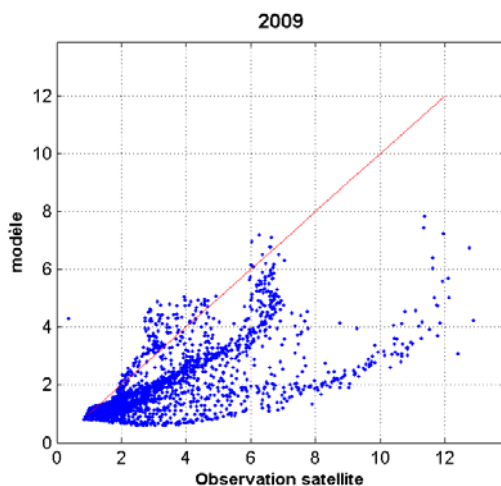


Figure 45 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée)





## 6.2. Année 2012

Pour l'année 2012, les données de mesures utilisées sont les suivantes :

1. Données extraites de la base Quadrige<sup>2</sup>
2. Données issues des suivis réalisés par la Direction Départementales des Territoires et de la Mer (DDTM 44 et 56)
3. Données provenant de la station de mesure MOLIT (Mer Ouverte Littorale) située en baie de Vilaine
4. Données issues du Groupement d'Intérêt Public (GIP) Loire Estuaire
5. Données d'observation satellites Ifremer
6. Mesures Ceva sur les quotas en azote et phosphore des ulves

### 6.2.1. Données Quadrige<sup>2</sup>

Le Tableau 11 regroupe pour l'année 2012 l'ensemble des stations appartenant à l'emprise géographique du modèle de rang 1 avec celles finalement retenues pour la comparaison symbolisées par la couleur bleue et qui forment un total de 13 stations exploitables. Comme pour l'année 2009, la banque de données Quadrige<sup>2</sup> regroupe principalement les mesures issues des réseaux REPHY et REPOM. L'ensemble des stations de ce dernier a dû être rejeté en raison de leur position géographique non compatible avec la taille de la maille (250 mètres). En effet, la localisation de ces stations très côtières correspondait soit au premier pixel en eau du modèle soit à un pixel appartenant au masque terre du modèle.

**Tableau 11 : Localisation des stations Quadrige<sup>2</sup> disponibles sur l'année 2012 et appartenant an modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » (en bleu, les stations retenues pour la comparaison avec le modèle). T : Température, S : Salinité, Chla : Chlorophylle *a*, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : Nitrate, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : Ammonium, Si(OH)<sub>4</sub> : Silicium dissous, MES : Matières En Suspension**

| Station   | Lieu (numéro de planche)                 | longitude | latitude | Réseau | T | S | Chla | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | Si(OH) <sub>4</sub> | MES |
|-----------|--|-----------|----------|--------|---|---|------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----|
| 062-P-018 | Nord_Dumet (planche 16)                  | -2.657    | 47.46    | REPHY  | * | * | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 063-P-001 | Le_Marescle (planche 17)                 | -2.497    | 47.463   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 063-P-002 | Ouest_Loscolo (planche 18)               | -2.538    | 47.458   | REPHY  | * | * | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 065-P-001 | Kervoyal (planche 19)                    | -2.532    | 47.52    | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 065-P-002 | Le_Halguen (planche 20)                  | -2.492    | 47.502   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 066-P-001 | Pont-Mahé (planche 21)                   | -2.473    | 47.432   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 068-P-015 | LE_CROISIC_Port_de_Plaisance             | -2.504    | 47.295   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 068-P-001 | Le_Croisic_(a) (planche 22)              | -2.514    | 47.3     | REPHY  | * | * | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 069-P-020 | Pornichet (planche 23)                   | -2.345    | 47.259   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 069-P-040 | 44132aV1e1-Pornichet_Eau_1_marée         | -2.349    | 47.257   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 069-P-044 | 44132aV1e2-Pornichet_Eau_2_marée         | -2.347    | 47.258   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 069-P-024 | Pointe_St_Gildas_large (planche 24)      | -2.268    | 47.135   | REPHY  | * | * | *    | *                            | *                            | *                             | *                   |     |
| 070-P-054 | 44184aC1e1-Nantes_Saint_Nazaire_Eau_1_pe | -2.2      | 47.283   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 070-P-055 | 44184aC1e2-Nantes_Saint_Nazaire_Eau_2_sa | -2.202    | 47.274   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 070-P-060 | LA_PLAINE_La_Gravette                    | -2.213    | 47.157   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 070-P-061 | PREFAILLES_Port_de_Plaisance             | -2.247    | 47.142   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |



| Station   | Lieu (numéro de planche)                 | longitude | latitude | Réseau | T | S | Chla | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | Si(OH) <sub>4</sub> | MES |
|-----------|--|-----------|----------|--------|---|---|------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----|
| 071-P-080 | 44131bV1e1-Pornic_Noëveillard_Eau_1_noëv | -2.115    | 47.109   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-085 | 44131bV1e2-Pornic_Noëveillard_Eau_2_noëv | -2.112    | 47.109   | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-086 | PORNIC_Anse_aux_Lapins                   | -2.107    | 47.11    | REPOM  | * | * |      |                              | *                            | *                             |                     | *   |
| 071-P-095 | Couplasse_large (planche 25)             | -2.061    | 47.042   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 071-P-061 | Bois_de_la_Chaise_large (planche 26)     | -2.199    | 47.019   | REPHY  | * | * | *    |                              |                              |                               |                     |     |
| 071-P-043 | Fromentine (planche 27)                  | -2.141    | 46.892   | REPHY  | * | * |      |                              |                              |                               |                     |     |
| 070-P-001 | Estuaire_(b) (planche 28)                | -2.228    | 47.218   | REPHY  |   | * |      |                              |                              |                               |                     |     |

Le diagramme de Taylor normalisé de la Figure 46 montre que la température de surface est bien reproduite par le modèle avec un coefficient de corrélation (R) pour l'ensemble des stations variant entre 0.89 et 0.99 et en moyenne égal à 0.97. A l'exception de la station {066-P-001}, l'erreur quadratique centrée (RMSE) est inférieure à 0.4 et l'écart type est supérieur au maximum de 20 % par rapport à celui des mesures. La salinité de surface est moins bien représentée par le modèle avec un coefficient de corrélation moyen R égal à 0.64 qui peut varier fortement selon la station considérée (0.25 < R < 0.94). A l'exception des stations {063-P-001 ; 066-P-001 ; 068-P-001}, l'erreur quadratique centrée (RMSE) est supérieure à 0.8 et l'écart type associé est nettement supérieur à celui des mesures.

Le biais normalisé pour la température de surface est en moyenne égal à 0.2 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 20 % de l'écart type des mesures soit 0.37 °C. Pour la salinité de surface, le biais normalisé est en moyenne égal à 0.58 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égal en moyenne à 58 % de l'écart type des mesures soit 0.66 PSU.

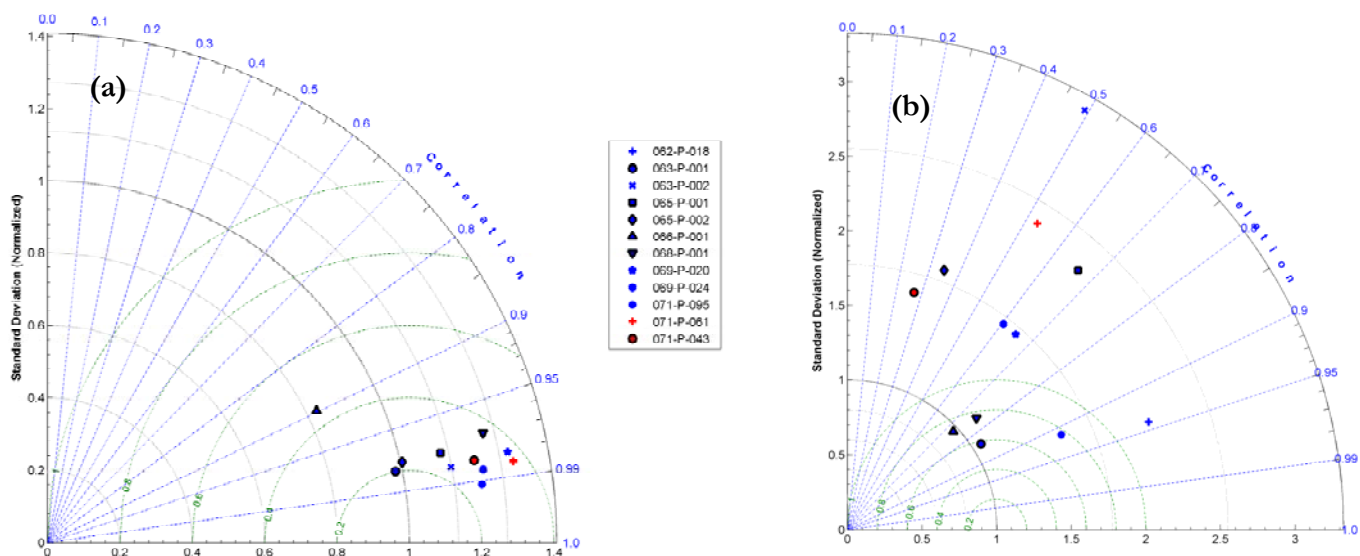
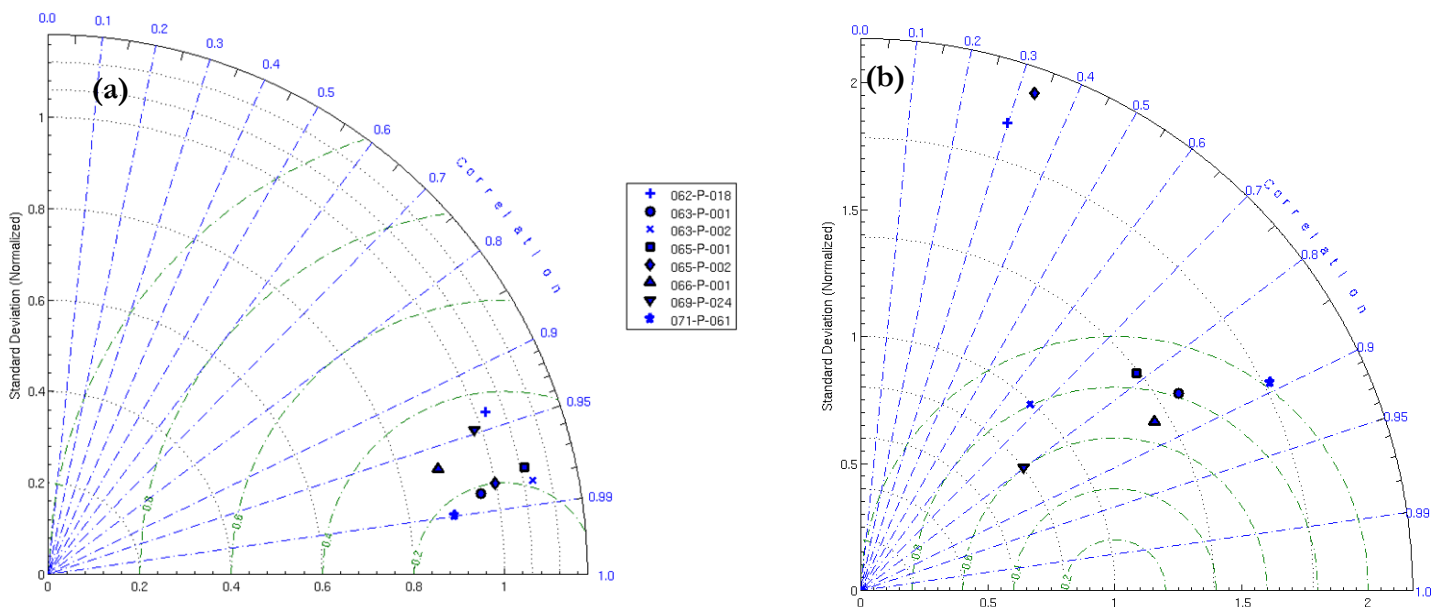


Figure 46 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadrigé pour la température (a) et la salinité (b) pour la couche de surface. Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).



Pour la couche de fond (cf. Figure 47), la température est correctement reproduite par le modèle ( $R \approx 0.97$ ,  $RMSE < 0.4$ ). Comme pour la couche de surface, la salinité de fond est moins bien représentée ( $R \approx 0.68$ ) et l'erreur quadratique centrée est supérieure à 1 pour les stations {062-P-018 ; 0.65-P-002}. Le biais normalisé pour la température est en moyenne égal à 0.51 ce qui induit un biais entre les mesures et le modèle en moyenne de 50 % de l'écart type des mesures soit 0.75 °C. Le biais normalisé de la salinité est de 0.57 soit un biais entre mesure et modèle de 57 % de l'écart type de la mesure soit 0.55 PSU.



**Figure 47 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadriga pour la température (a) et la salinité (b) pour la couche de fond. Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).**

L'évolution entre les données simulées et mesurées est présentée sur les Planches 16 à 26. Concernant les sels nutritifs, seule la station {069-P-024} située à la Pointe St Gildas dispose de mesures en nitrate, ammonium, phosphore dissous et silicate. L'évolution du nitrate et des silicates est correctement reproduite par le modèle. Comme pour l'année 2009, le phosphore dissous est surestimé en début de saison sur le mois de mars. Modèle et mesures montrent pour les trois précédentes substances une élévation significative des teneurs moyennes sur les mois de mai et de juin. Sur cette période, le modèle indique également une élévation de la teneur moyenne pour l'ammonium tandis que les mesures ne montrent pas d'élévation particulière. Il se peut qu'une consommation rapide de l'ammonium provenant de la Loire par le phytoplancton soit à l'origine de ce phénomène que le modèle ne parvient pas à représenter.

A l'exception du bloom phytoplanctonique mesuré en baie de Vilaine début mars 2012 que le modèle ne parvient pas à reproduire, les ordres de grandeur et l'évolution globale de la chlorophylle *a* simulée est en accord avec les mesures.



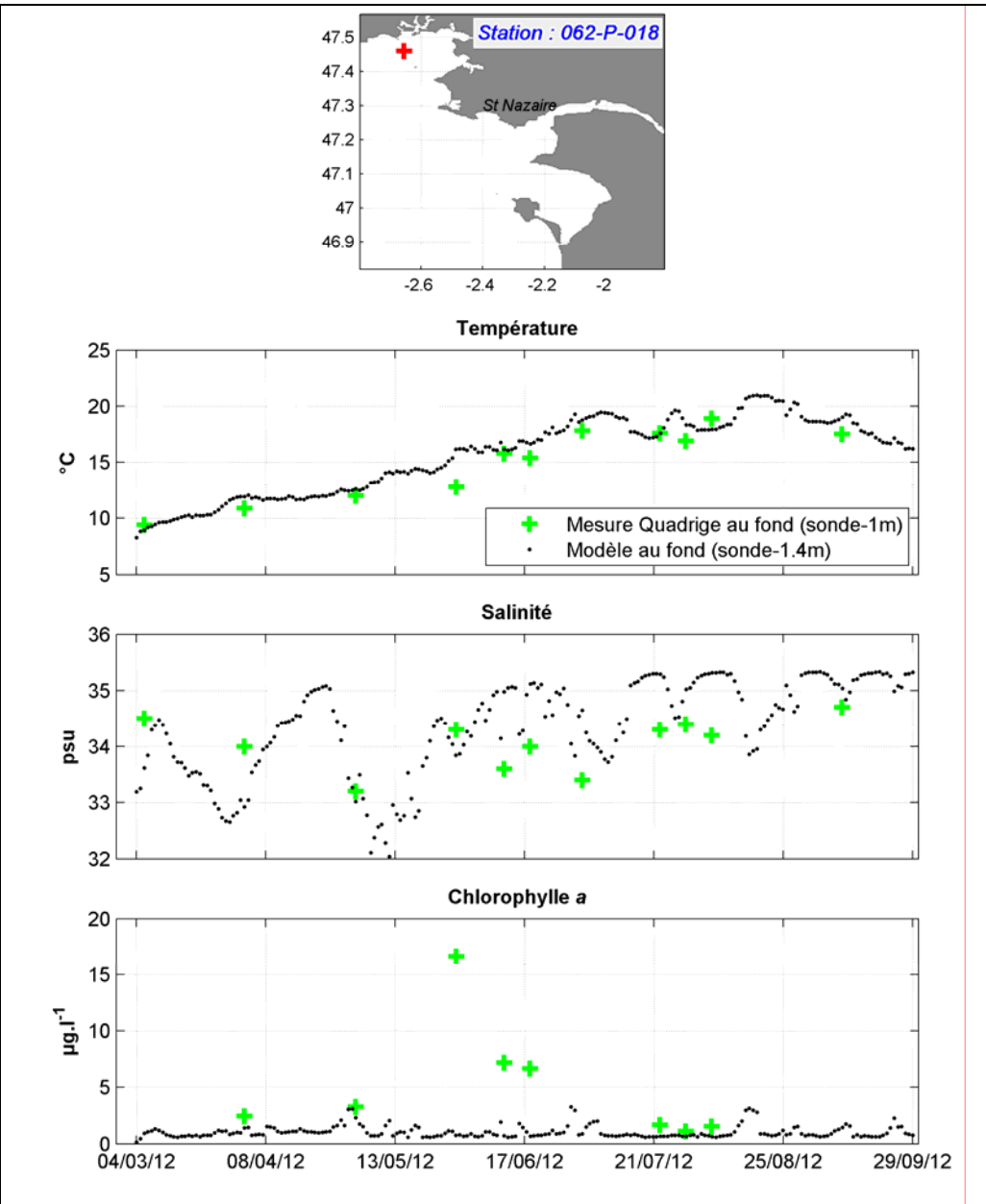
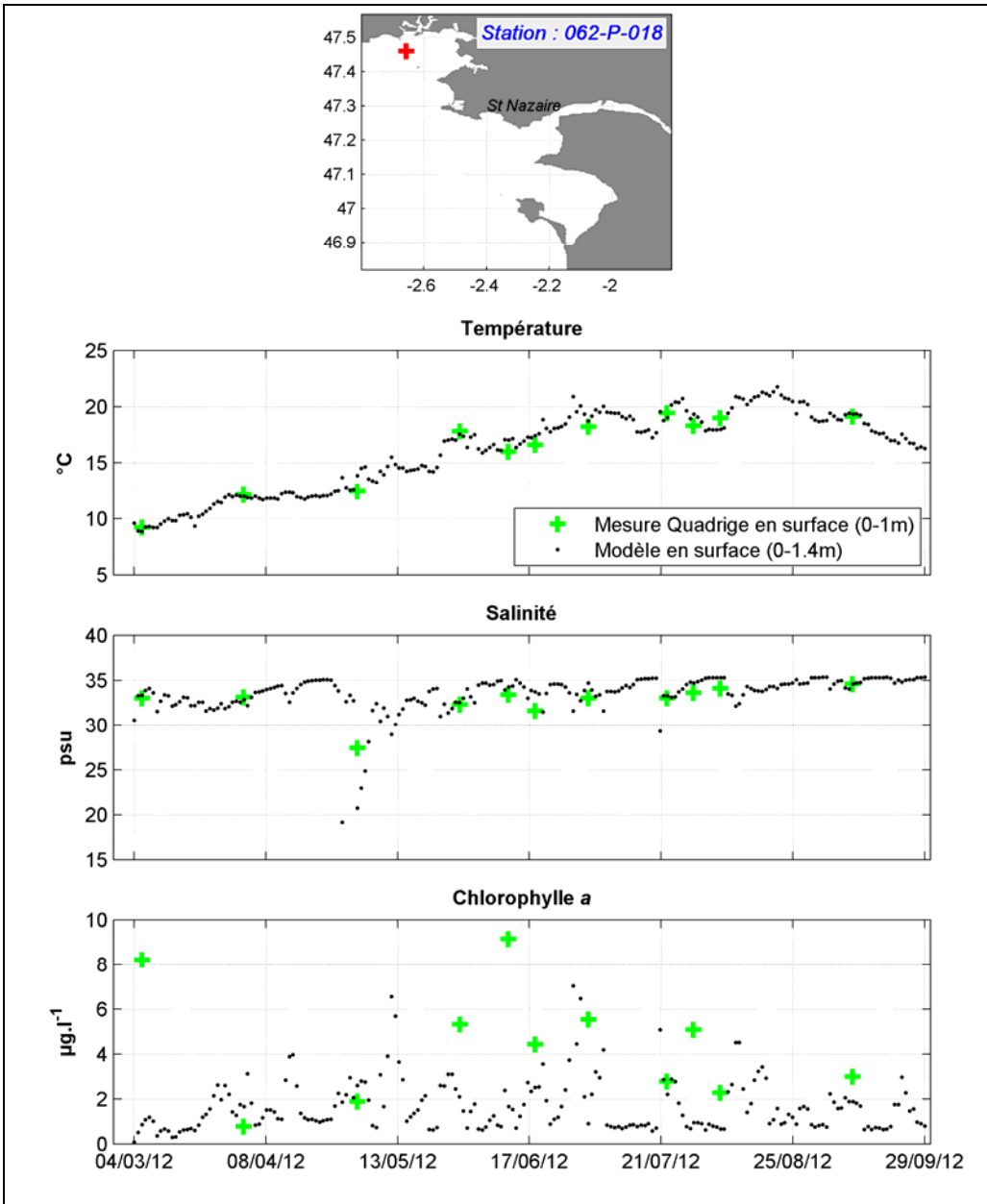


Planche 16 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrige<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

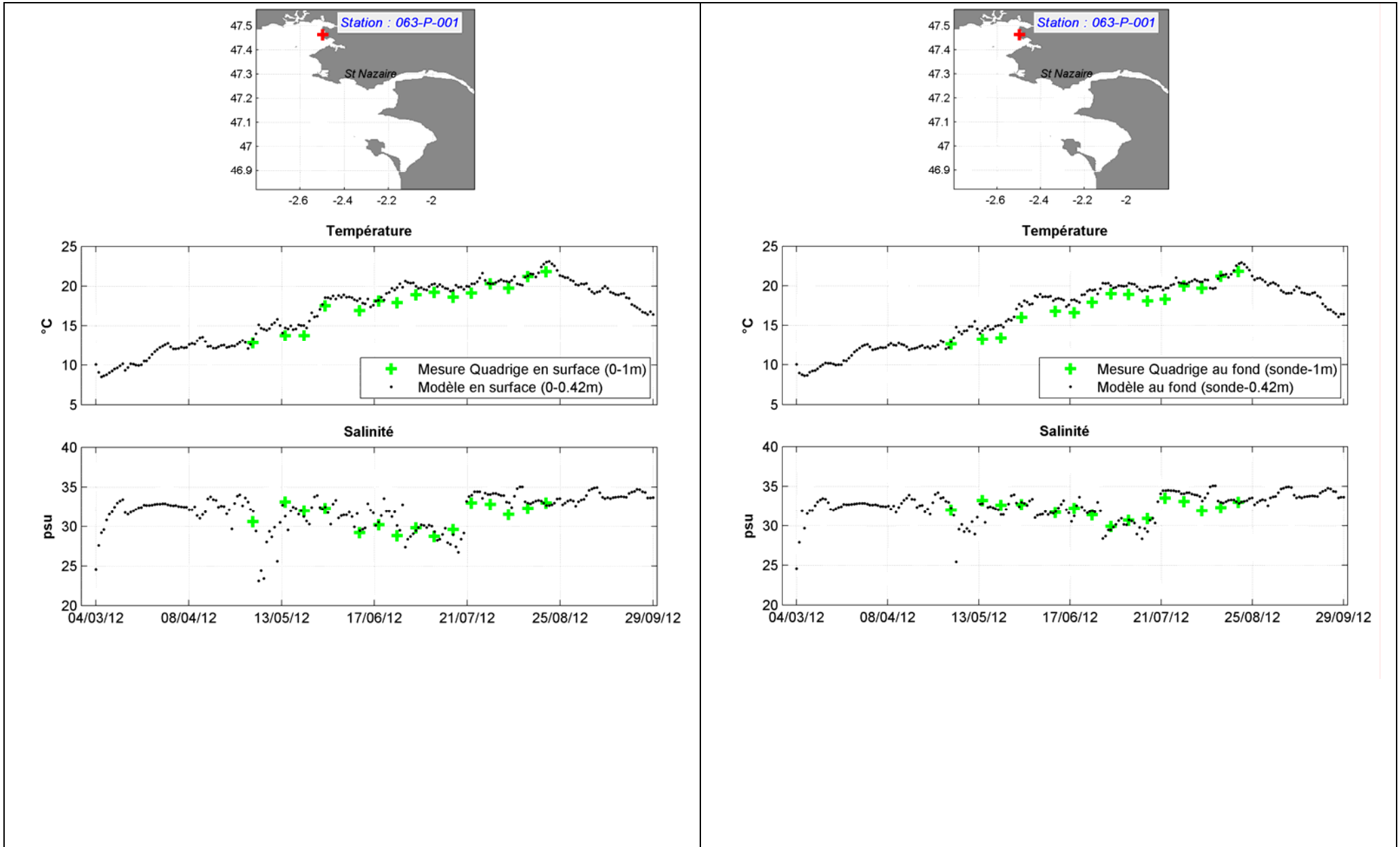


Planche 17 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

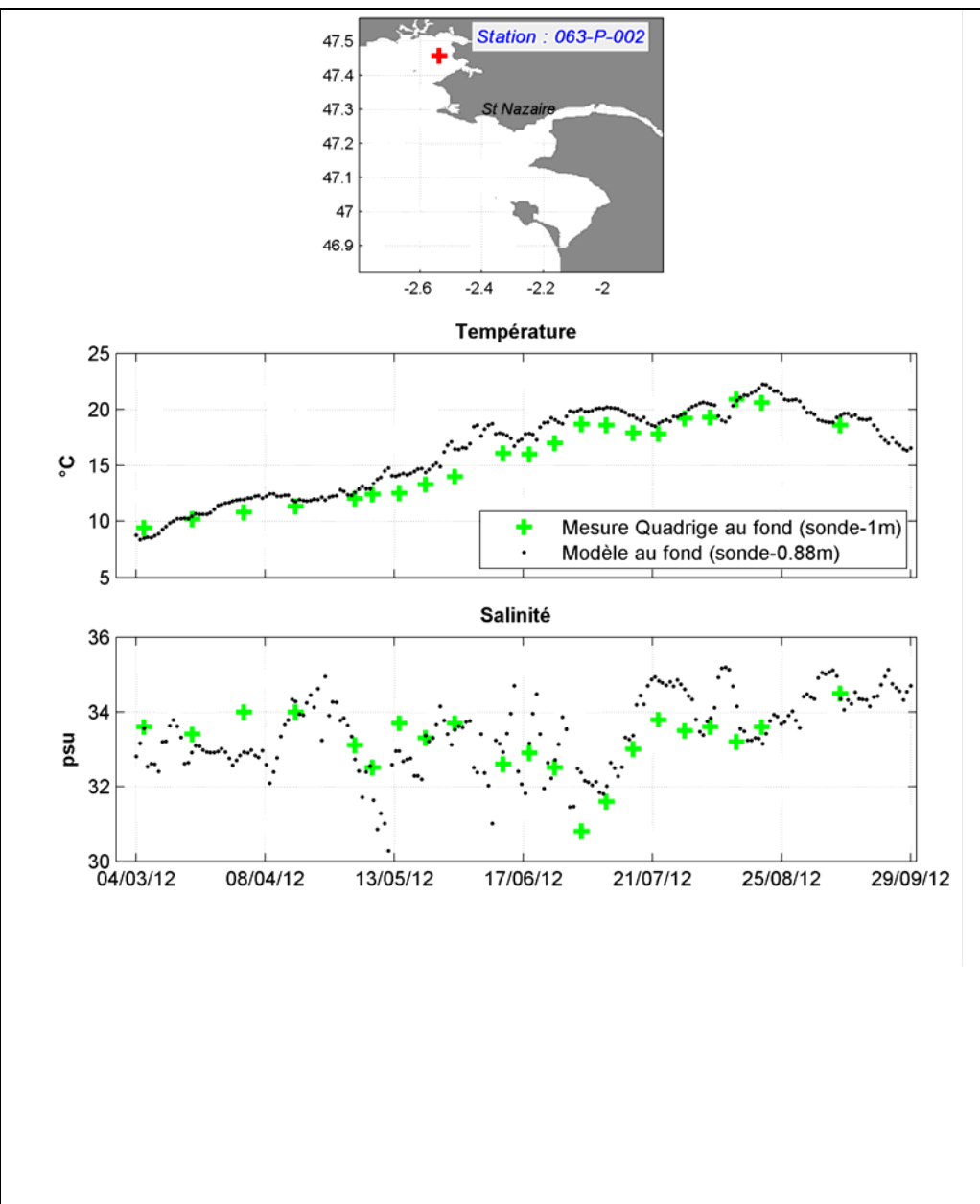
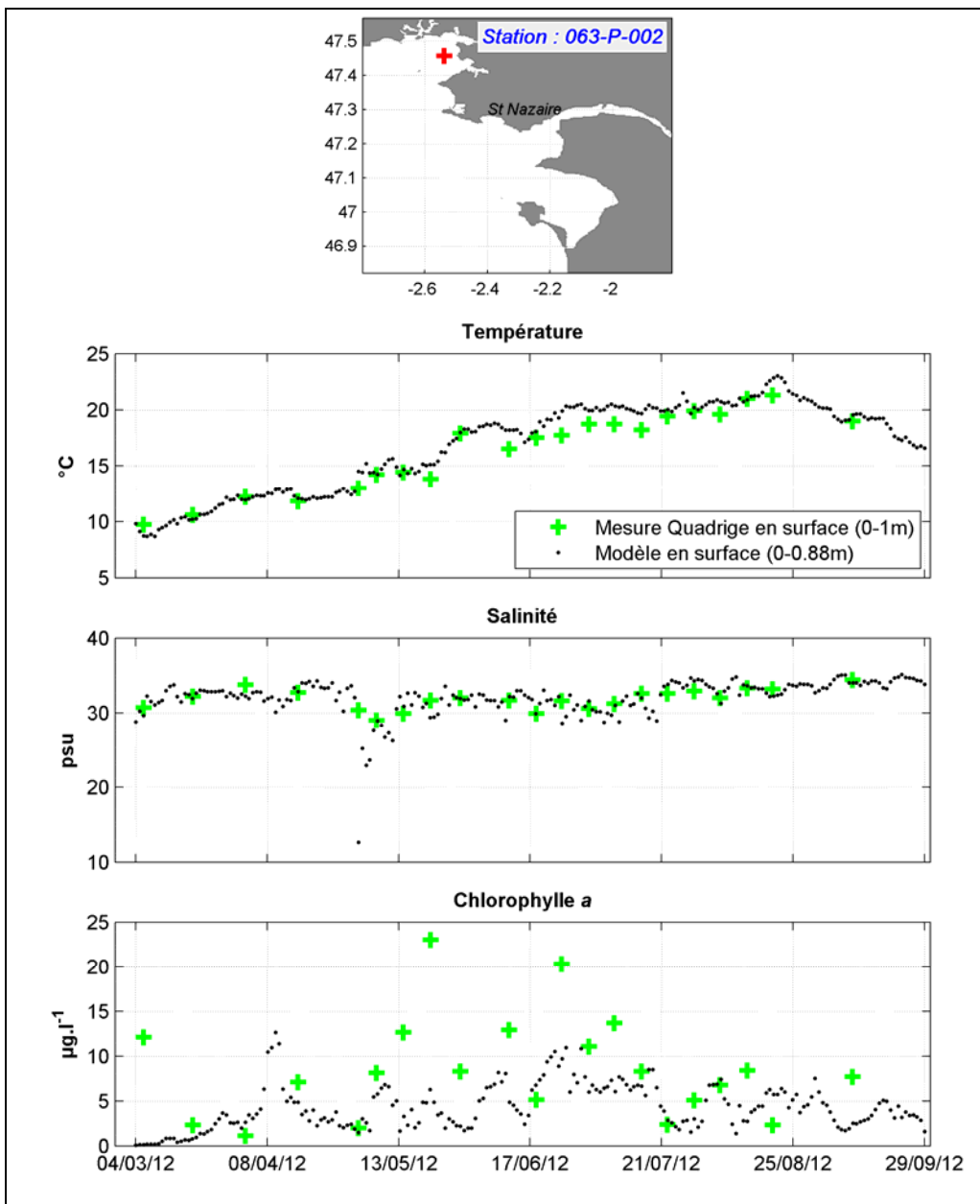
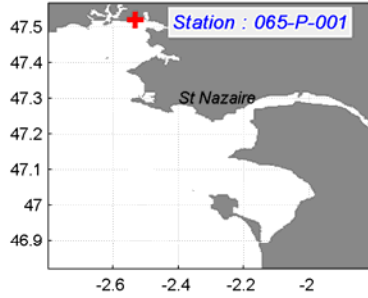
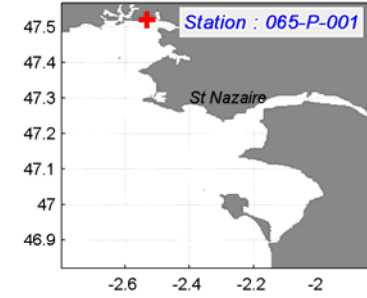
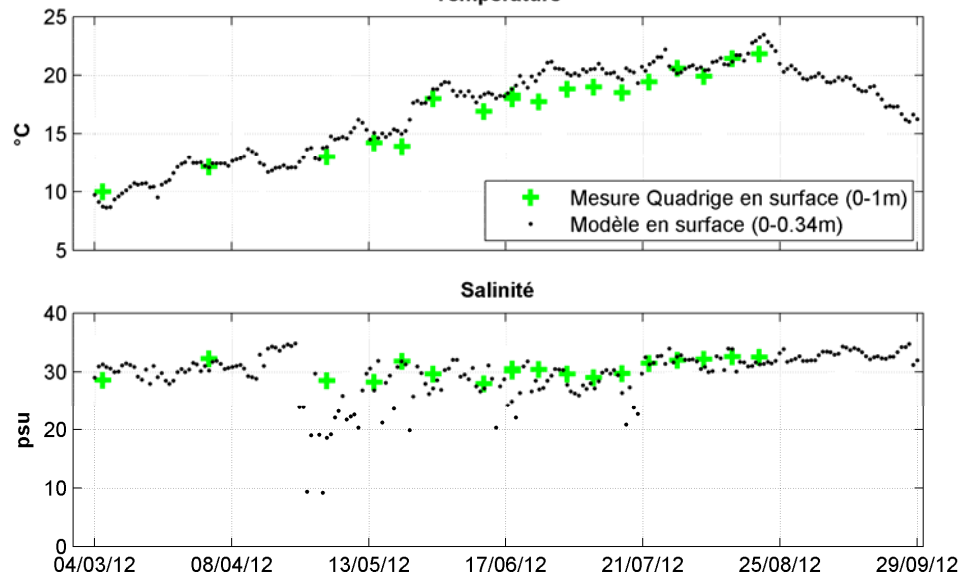


Planche 18 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012





Température



Température

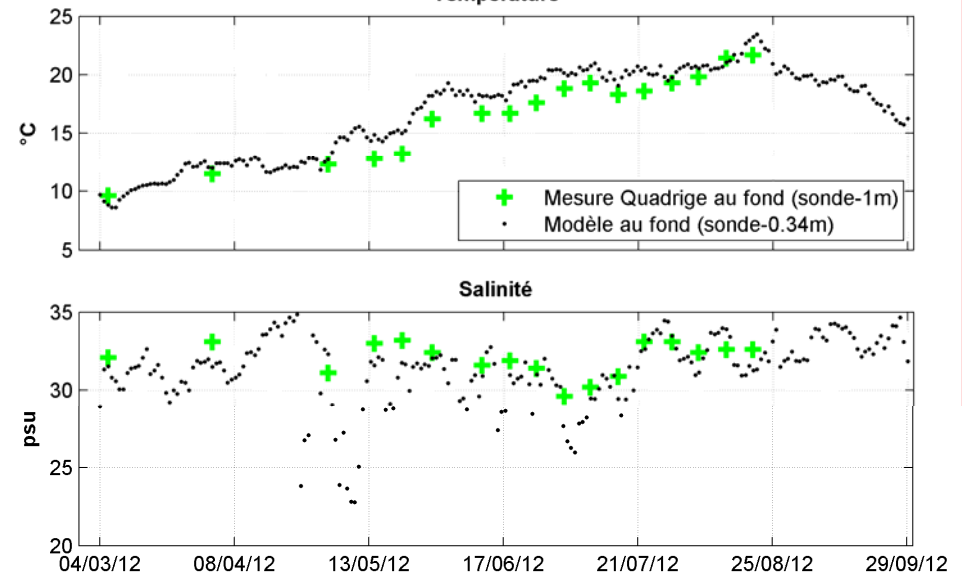
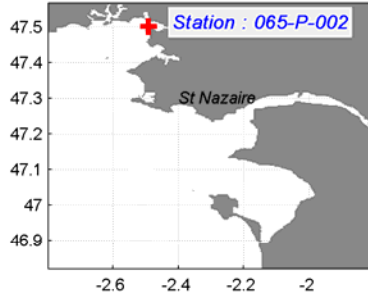
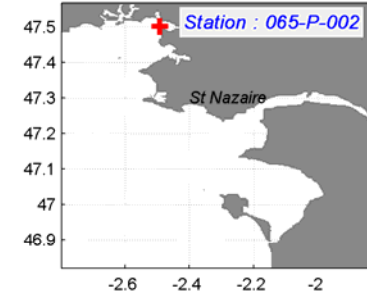
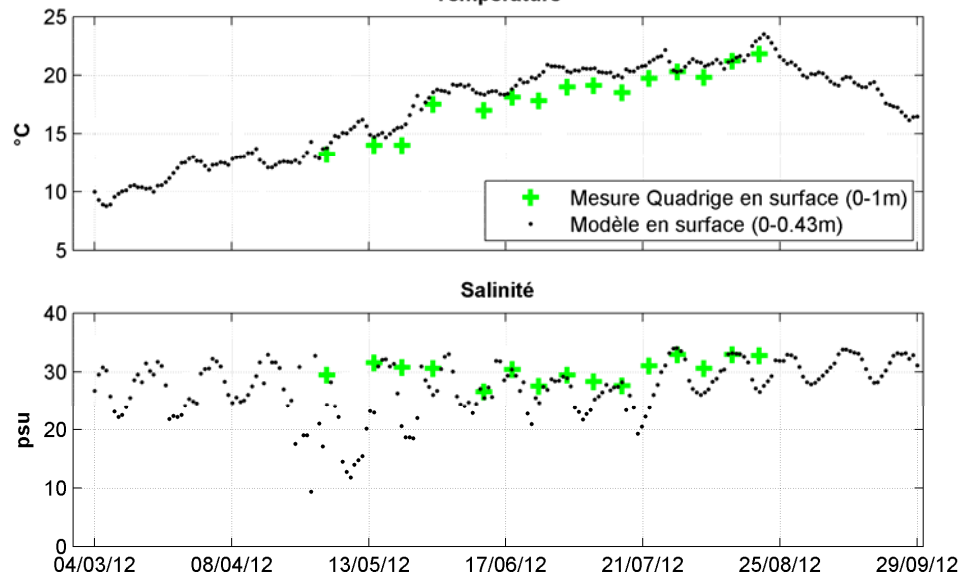


Planche 19 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012



Température



Température

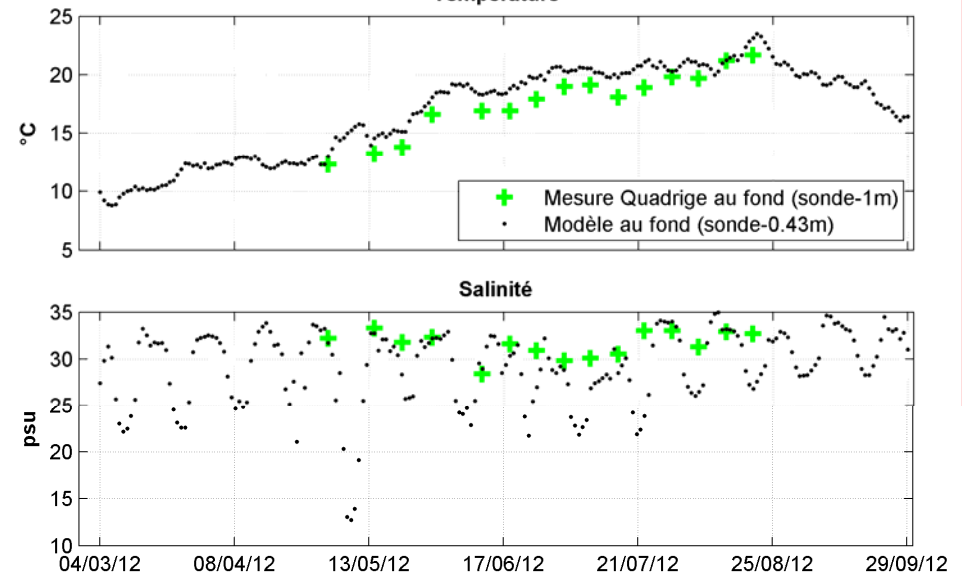
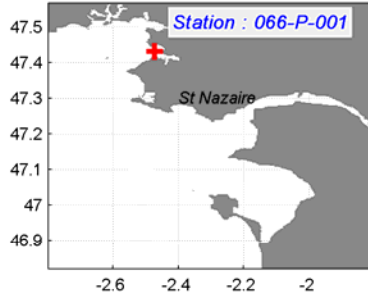
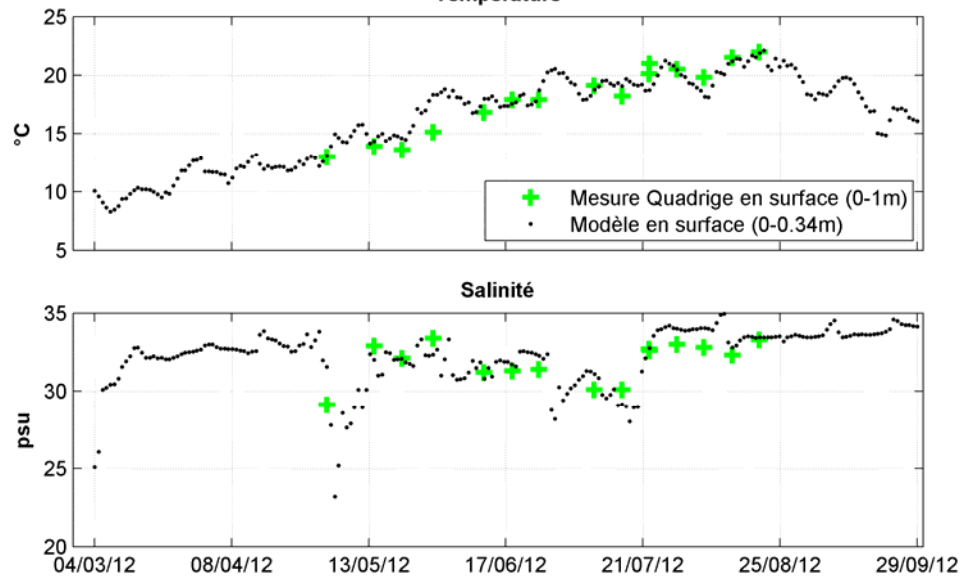


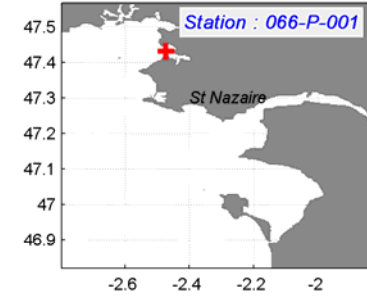
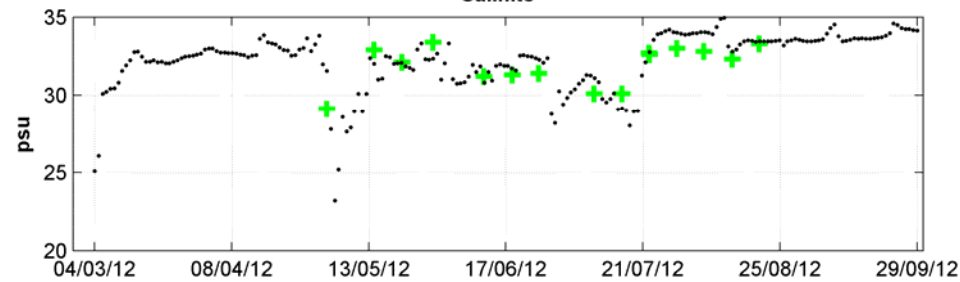
Planche 20 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012



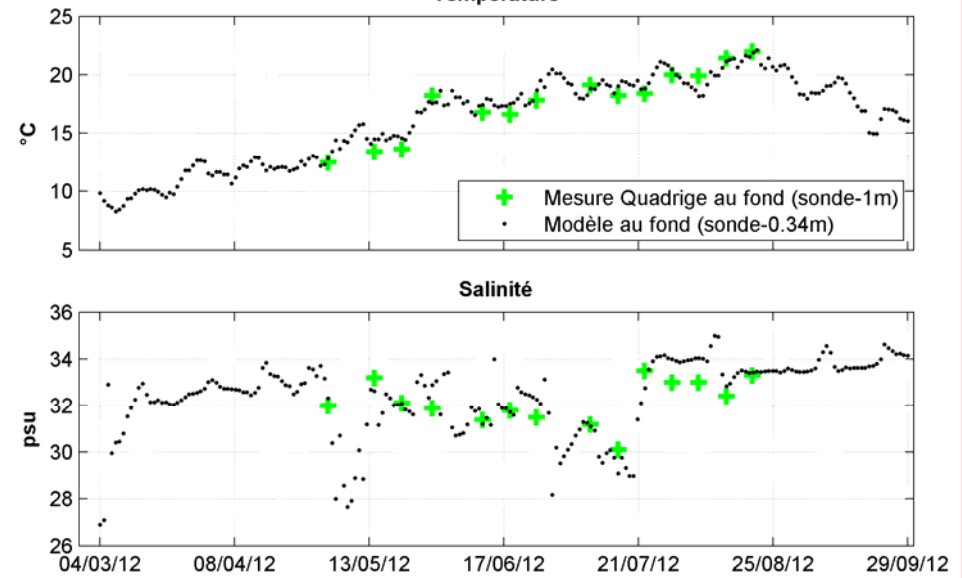
Température



Salinité



Température



Salinité

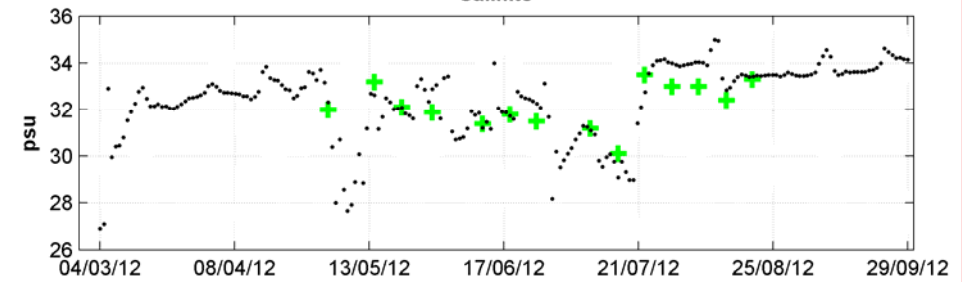
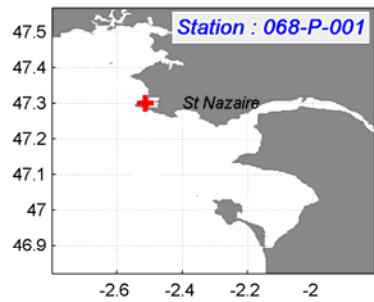
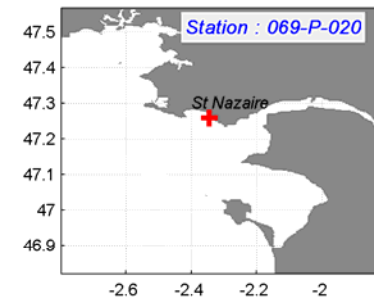
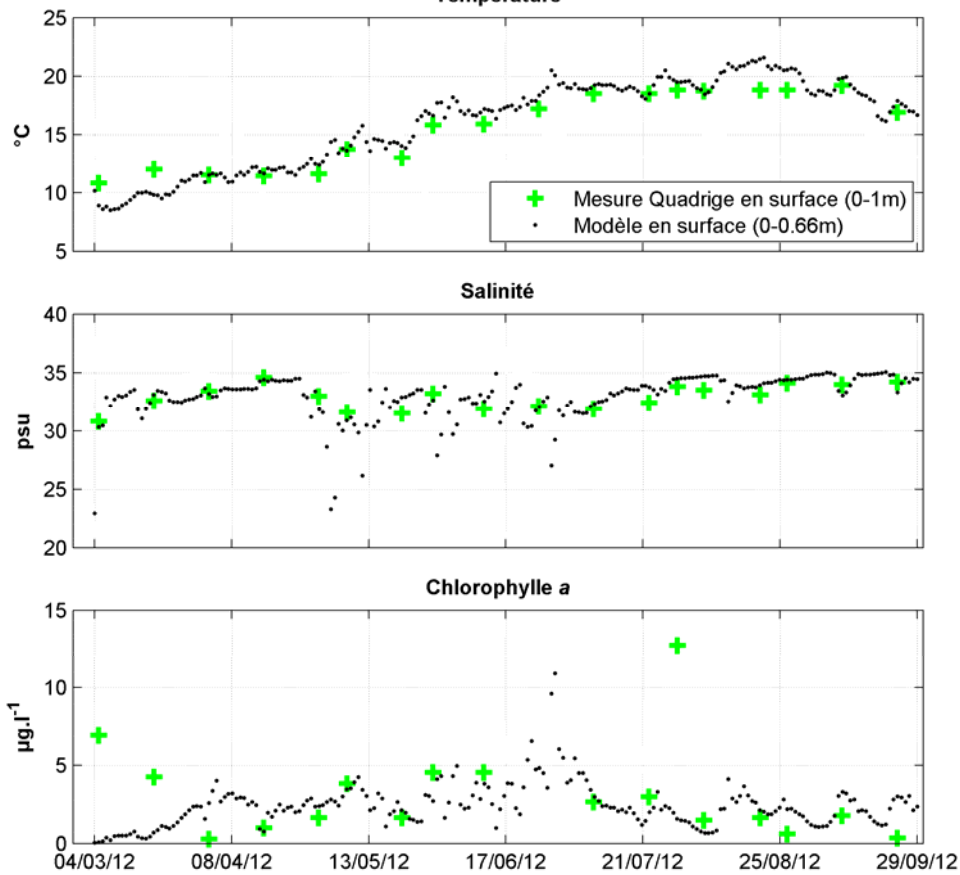


Planche 21 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012



Température



Température

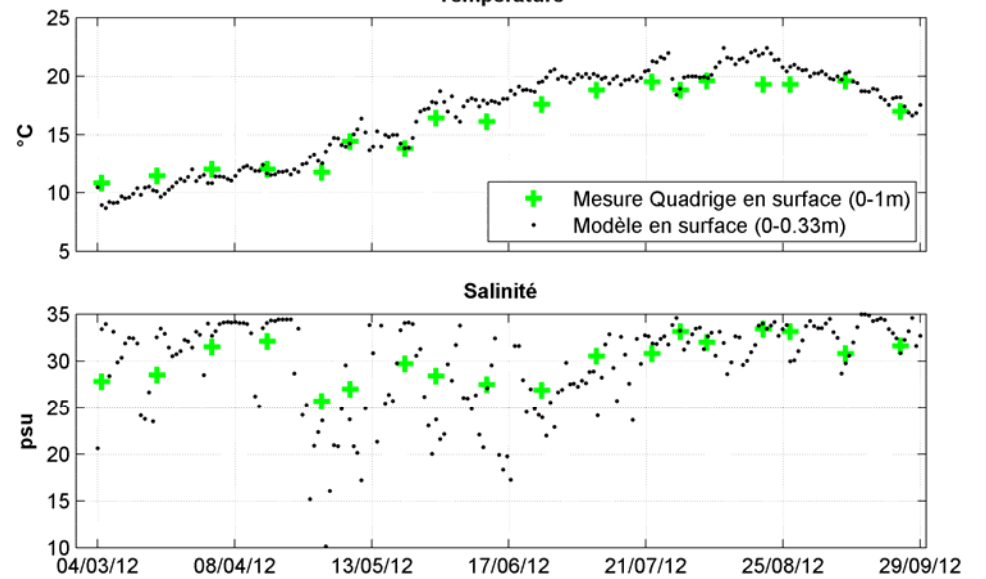


Planche 22 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

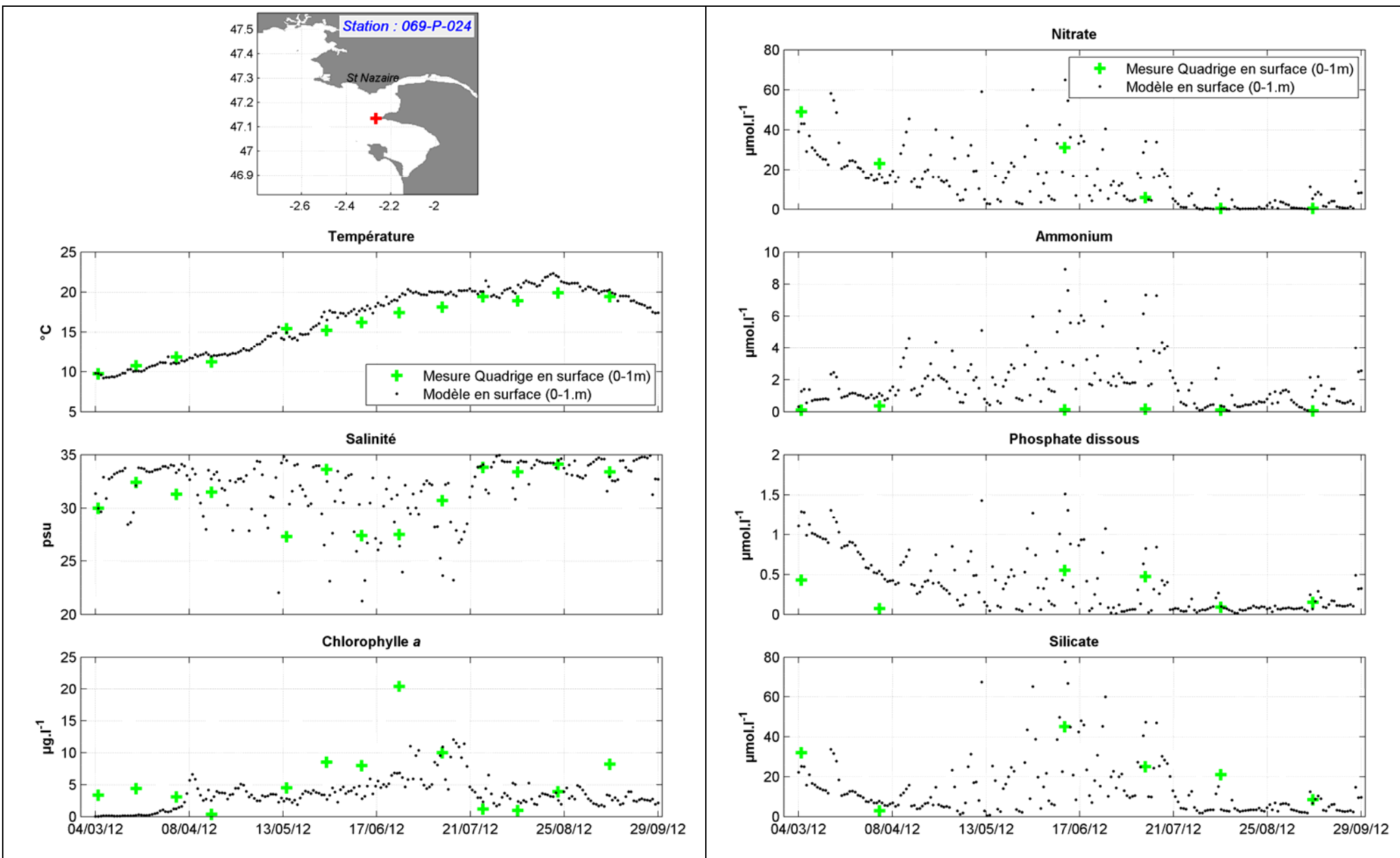
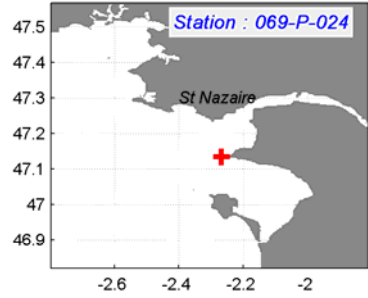
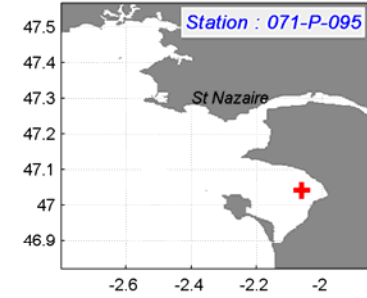
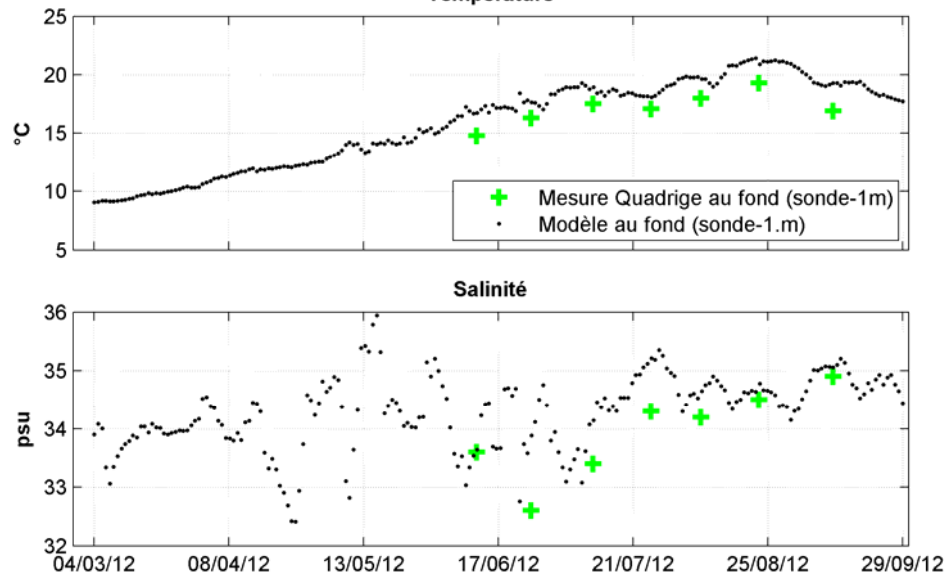


Planche 23 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012



Température



Température

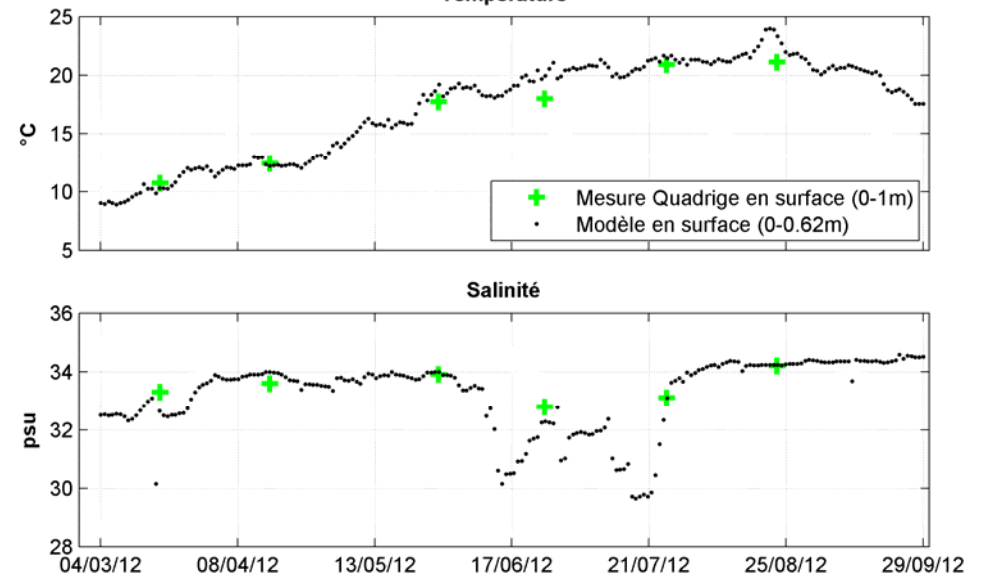


Planche 24 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012



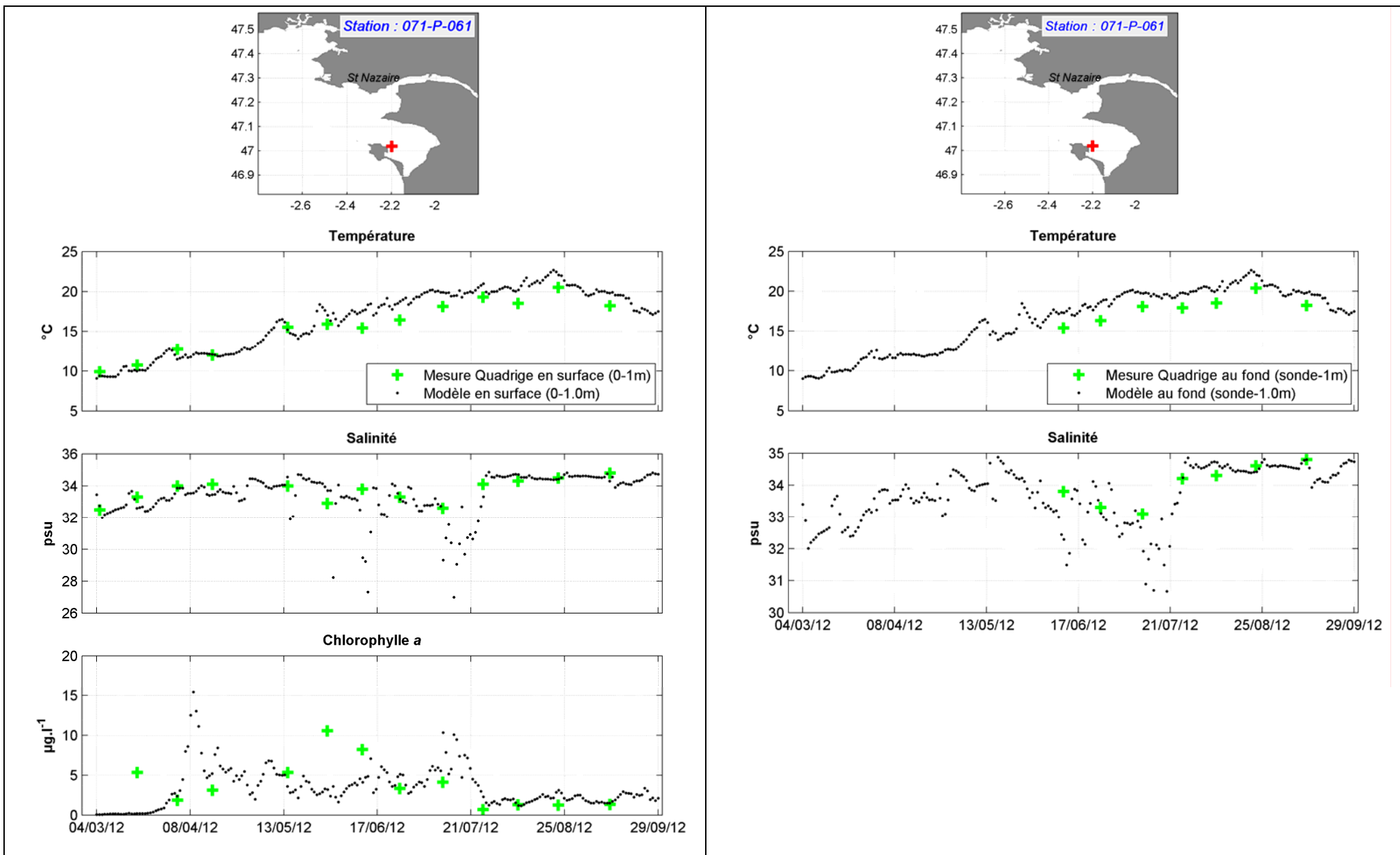
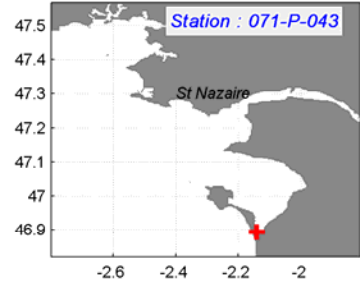
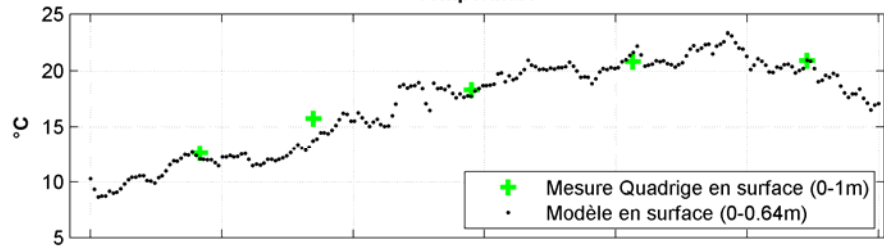


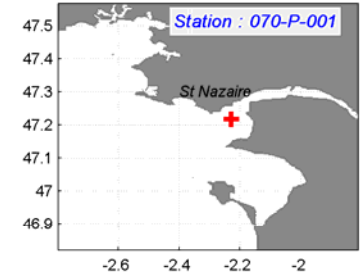
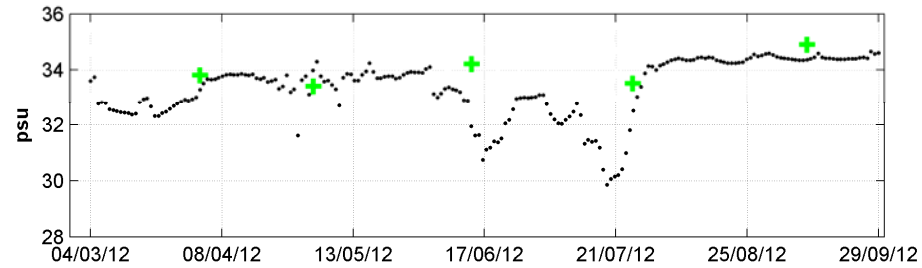
Planche 25 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrige<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012



Température



Salinité



Salinité

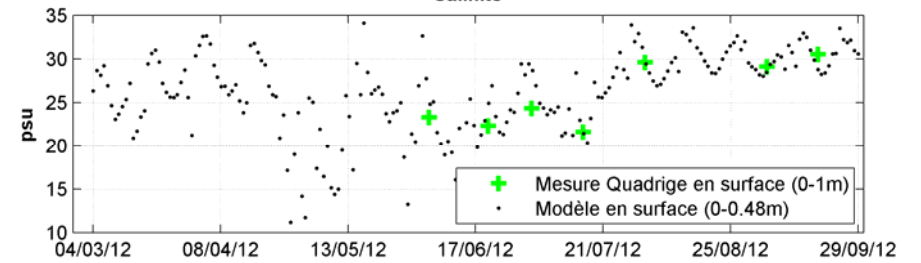


Planche 26 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

### 6.2.2. Données de la bouée MOLIT Vilaine

Le diagramme de Taylor normalisé de la Figure 48 montre que la température de fond et de surface ont les mêmes statistiques ( $R \approx 0.97$  et  $RMSE \approx 0.25$ ) et un écart type du modèle très proche de celui des mesures. Le biais normalisé pour la température est égal à 0.06 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 6 % de l'écart type des mesures soit  $0.12 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

La salinité est un peu moins bien reproduite par le modèle (couche de surface :  $R \approx 0.67$  couche de fond :  $R \approx 0.6$ ). L'écart quadratique centré pour la couche de fond et de surface est supérieur à 1 et l'écart type du modèle varie dans une fourchette inférieure à  $\pm 20 \%$  par rapport à celui des mesures. Le biais normalisé est en moyenne égal à 0.5 ce qui correspond à un biais entre les mesures et le modèle de l'ordre de 0.4 PSU.

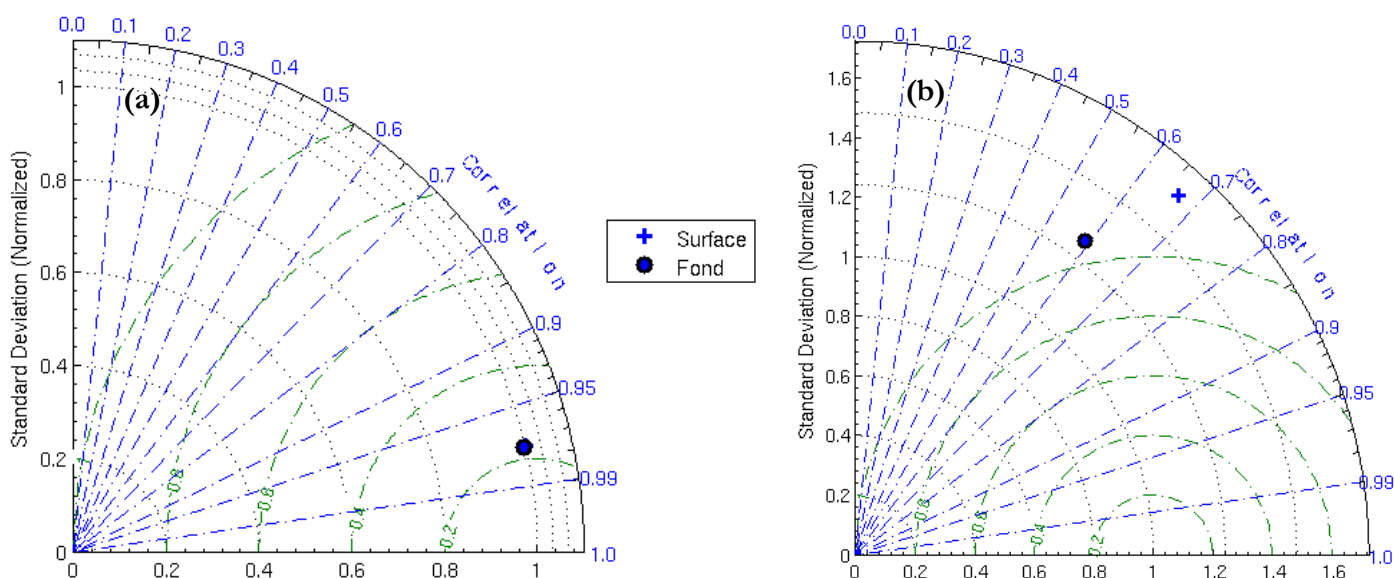


Figure 48 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).

La Planche 27 présente la comparaison, pour les couches de fond et de surface, de l'évolution des données simulées avec les données mesurées pour la température et la salinité.



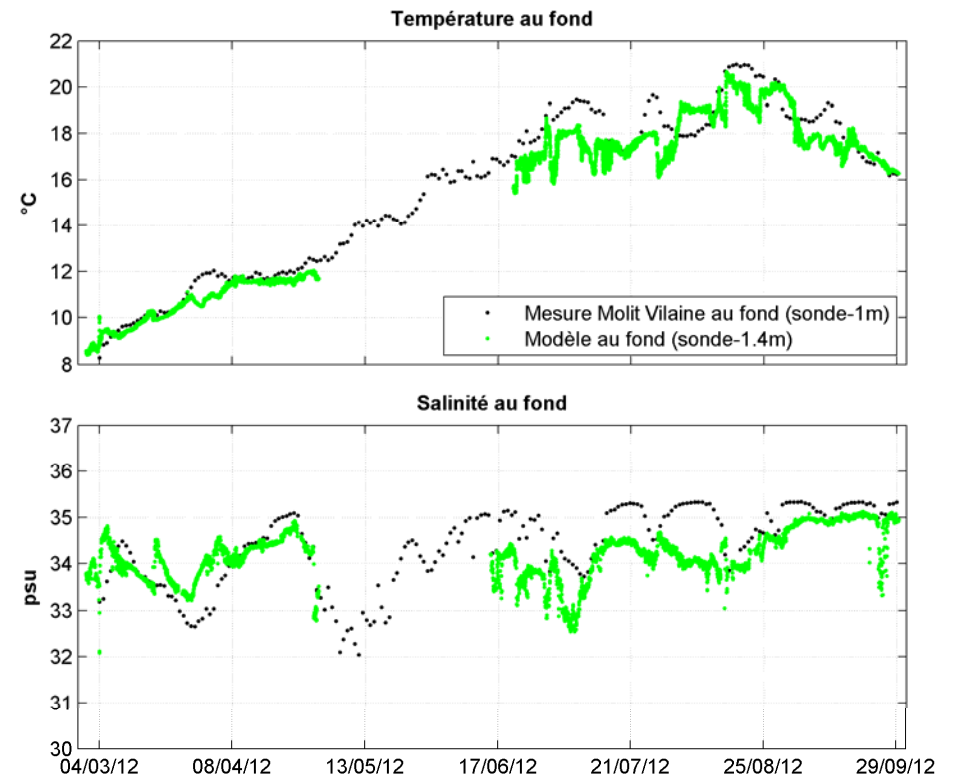
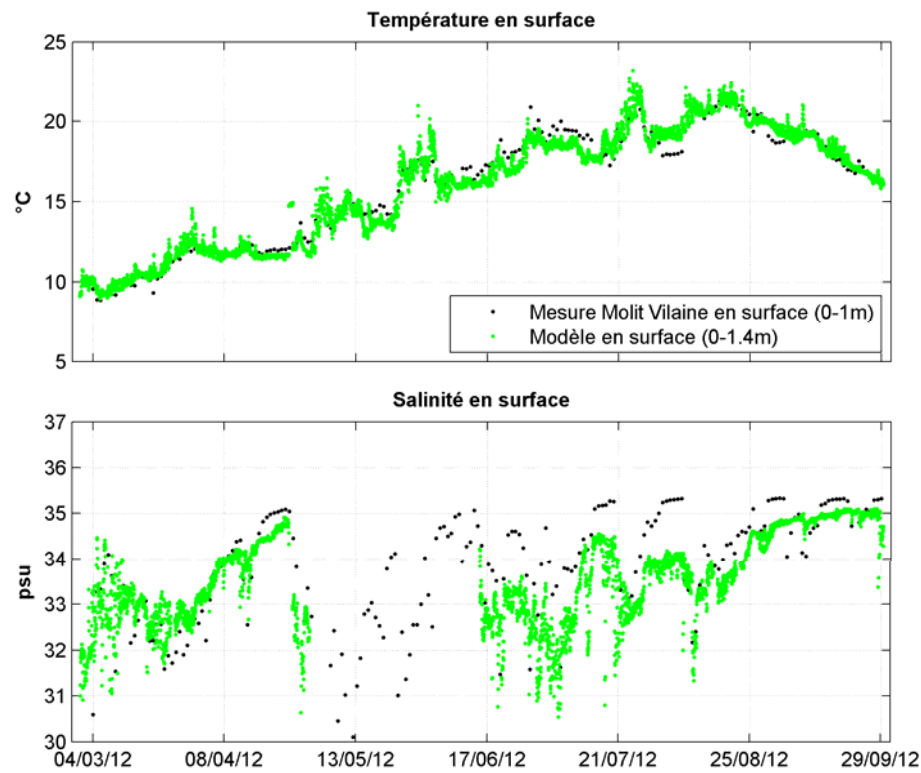
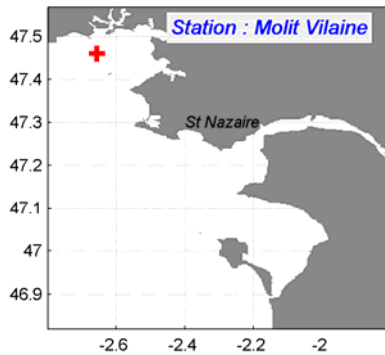


Planche 27 : Comparaison des mesures issues de la bouée MOLIT Vilaine avec le modèle pour l'année 2012

### 6.2.3. Données du GIP (Groupement d'Intérêt Public) Loire Estuaire

Pour cette station, les données haute fréquence de l'année 2012 de la station de mesure en continue de Donges gérée par le GIP Loire estuaire ont pu être exploitées. Afin de pouvoir quantifier plus finement sur un grand nombre d'échantillons (22649 points) les écarts statistiques entre le modèle et les mesures, des sorties à haute fréquence pour le modèle ont été spécifiquement générées. L'évolution temporelle des séries mesurées et simulées est fournie en Figure 49 où un écart assez important dans les niveaux simulés de la salinité apparaît. Outre les imperfections du modèle physique, l'écart entre mesures et modèle est lié à la taille de la maille du modèle. Ce dernier calcule l'évolution de la température et la salinité sur une cellule de 250 m de côté tandis que la bouée mesure très ponctuellement ces variables (sur moins d'un mètre carré) dans un contexte de rapides variations bathymétriques que le modèle ne peut intégrer. Une autre possibilité pour expliquer cet écart est que le modèle fournit un résultat sur la tranche d'eau comprise entre la surface et -1.6 mètres alors que les mesures se situent entre 0 et -1 m en dessous de la surface. Dans cette zone particulière de l'estuaire de la Loire où la salinité mesurée varie fortement entre 5 et 35 PSU (moyenne : 19 PSU), une nette diminution de la taille de maille du modèle associée à un renforcement du nombre de couche sur la verticale permettrait probablement d'améliorer la qualité des résultats simulés en ce point mais en contrepartie alourdirait sensiblement les temps de calcul.

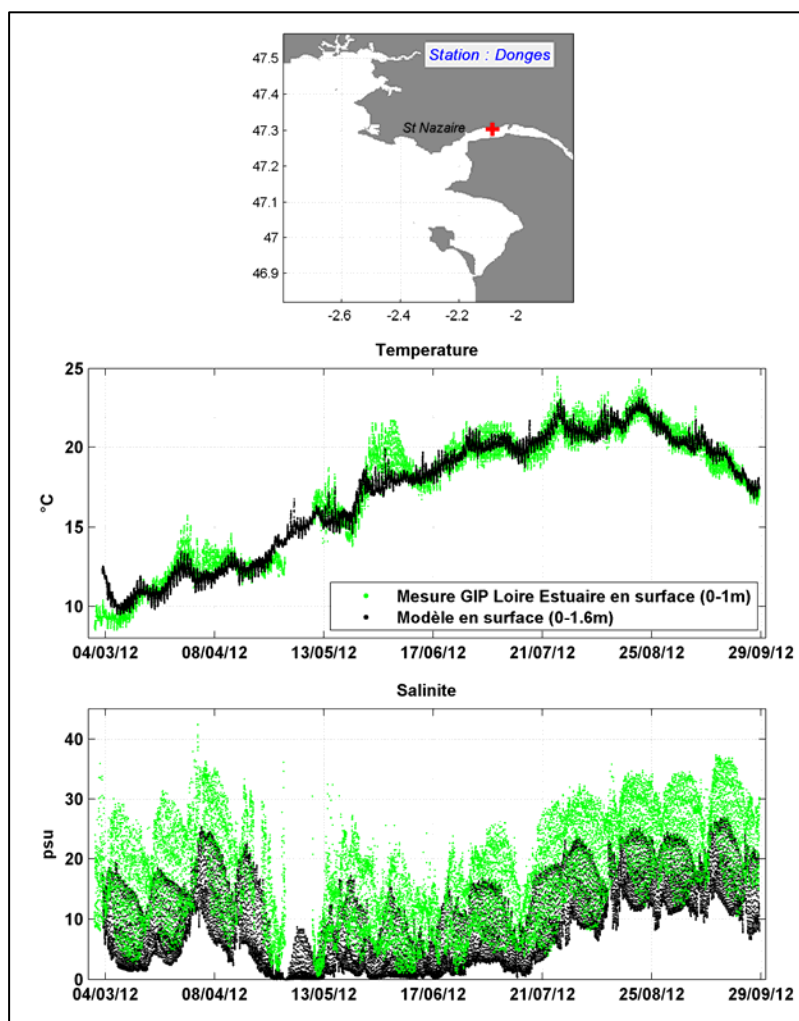


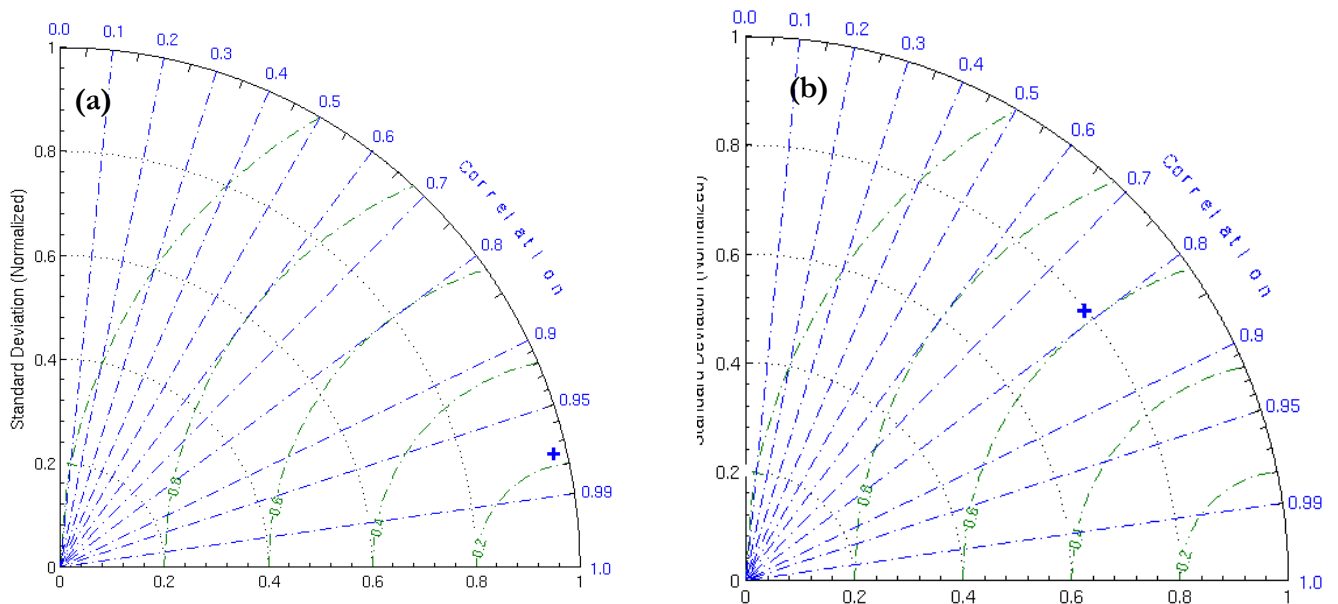
Figure 49 : Evolution simulée et mesurée à la station de Donges de la température et de la salinité en surface



La Figure 50 présente sur un diagramme de Taylor les écarts statistiques entre mesure et modèle pour la température et la salinité de surface.

Le coefficient de corrélation pour la température est de 0.97, l'erreur quadratique centrée de l'ordre de 0.2 et l'écart type du modèle est très proche de celui des mesures. Le biais normalisé s'avère très faible (0.01) ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 1 % de l'écart type des mesures soit 0.02 °C.



Concernant la salinité, les statistiques sont un peu moins satisfaisantes que la température ( $R \approx 0.78$  ;  $RMSE \approx 0.6$ ) avec un écart type du modèle étant inférieur de 20 % à celui des mesures. En revanche, le biais normalisé est important compte tenu des résultats obtenus en Figure 49. Ce dernier est de l'ordre de 1 ce qui conduit à un biais entre les mesures et le modèle de 2.88 PSU.



**Figure 50 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation (R), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).**





|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br>REPUBLIQUE FRANÇAISE<br>PRÉFET<br>DE LA RÉGION<br>PAYS DE LA LOIRE | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|  |  | Date | 21/02/14                   |
|  |  | Page | 106/177                    |

#### 6.2.4. Données DDTM 56 et 44

Que ce soit avec les données DDTM 56 ou 44, le faible nombre de campagnes de mesures sur la période de mars à septembre 2012 n'a pas permis de quantifier statistiquement l'ajustement du modèle par rapport aux mesures pour les différentes variables mesurées.

L'évolution entre les données simulées et mesurées est présentée sur les Planches 28 à 32. S'agissant des données DDTM 56 aux 4 stations {56V090 ; 6V0100 ; 6V0120 ; 6V240}, le modèle reproduit la forte dessalure liée à la Vilaine durant la crue qui s'est déroulée fin avril 2012. Concernant les sels nutritifs (nitrate, ammonium, phosphore dissous, silicate), les ordres de grandeurs et l'évolution simulée par le modèle sont cohérents avec les données de mesures.

A la station Paimboeuf située en aval de la Loire (données DDTM 44), les très importantes variations de salinité entre 0 et 30 PSU sont reproduites par le modèle. Les très fortes teneurs mesurées en nitrate, ammonium, phosphore dissous et silicate sont correctement représentées par le modèle.

De la même façon que pour la station Cordemais située sur la Loire et exploitée sur l'année 2009 (cf. 5.1.3), la chlorophylle *a* simulée est très nettement sous-estimée par rapport aux mesures. Ce résultat est attendu dans la mesure où le modèle ECO-MARS3D ne simule pas le fonctionnement du compartiment phytoplanctonique en eau douce. La station de Paimboeuf est située sur la zone de mélange eaux douces/eaux salées reconnue comme la zone de mortalité du phytoplancton d'eau douce produit en amont de l'estuaire de la Loire. Pour ces raisons, la non prise en considération du phytoplancton d'eau douce perturbe finalement très peu les résultats obtenus sur les stations situées en aval de l'estuaire de la Loire.

Pour les matières en suspension (MES) et de la même façon que pour la station Cordemais, le modèle ne parvient pas à reproduire les énormes teneurs mesurées pour les matières en suspension. Pour les mêmes raisons que celle décrites précédemment (cf. §6.1.3), ce résultat ne remet pas en question la qualité globale des résultats de calibration obtenus dans cette étude



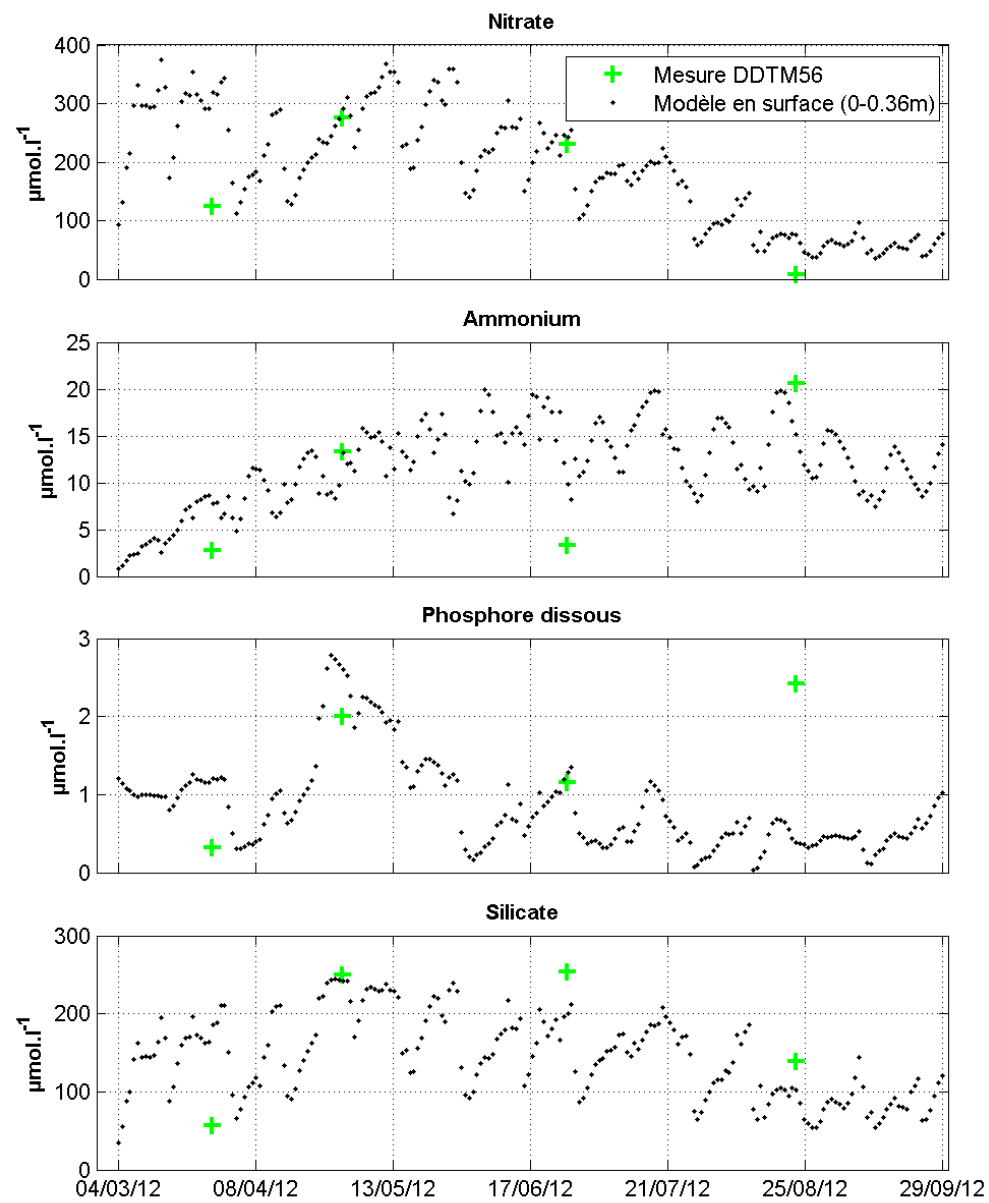
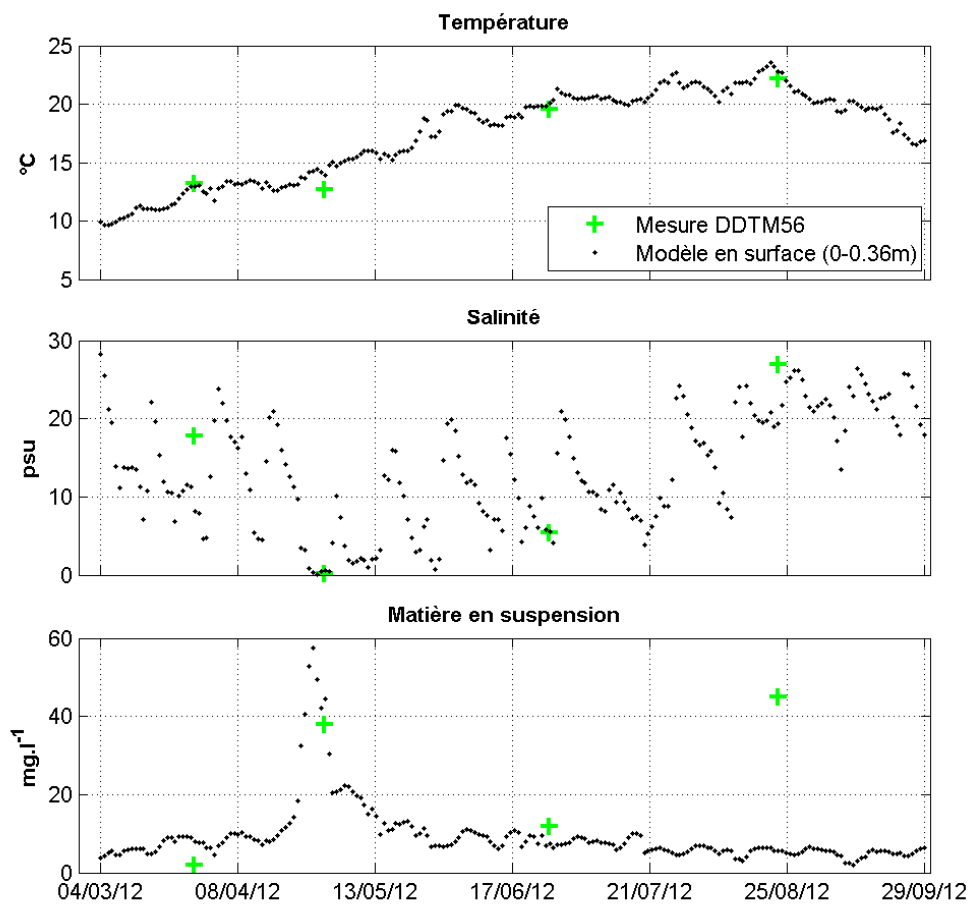
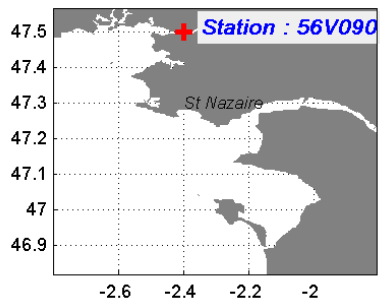


Planche 28 : Comparaison des mesures issues des mesures DDTM56 avec le modèle pour l'année 2012

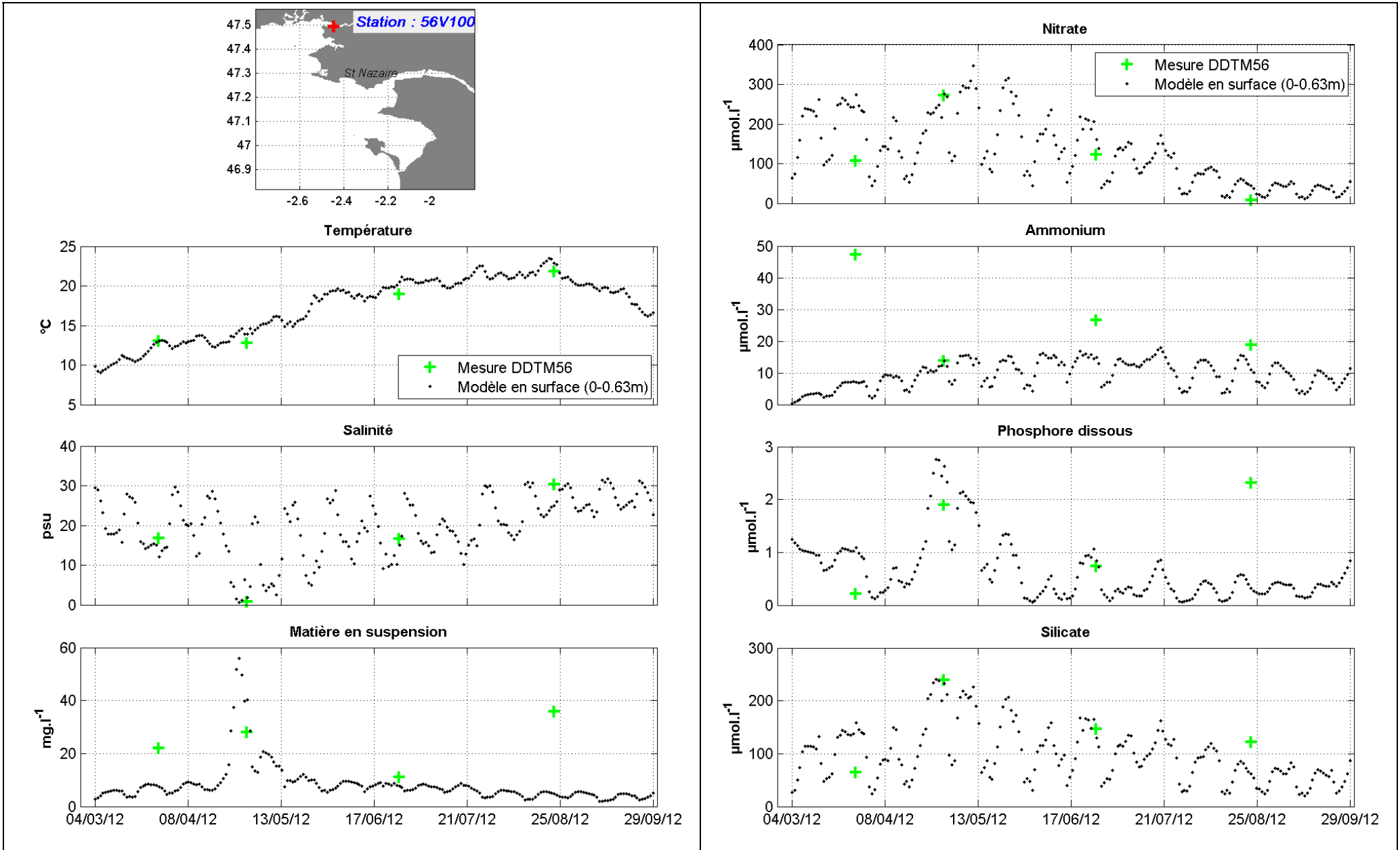


Planche 29 : Comparaison des mesures issues des mesures DDTM56 avec le modèle pour l'année 2012

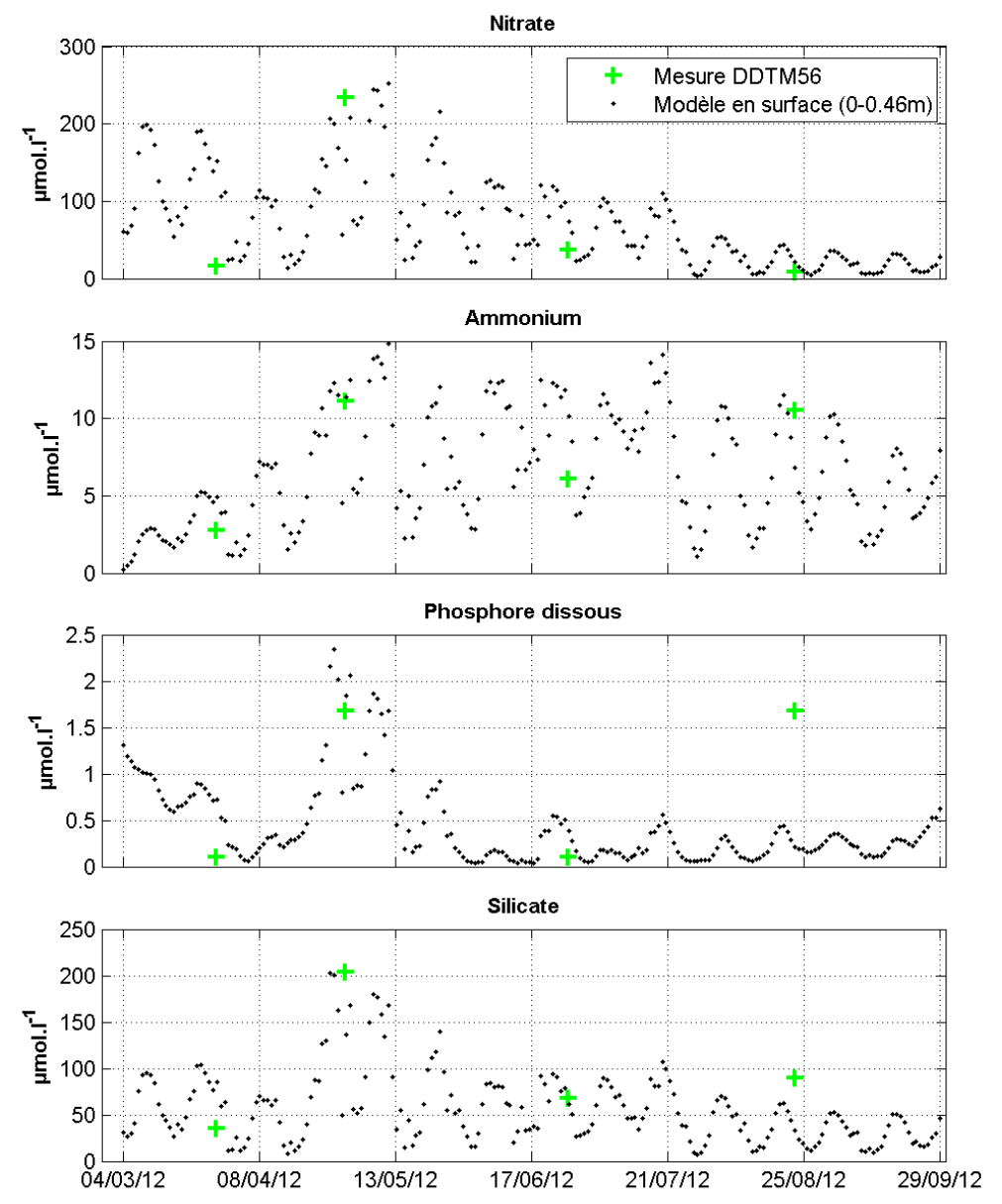
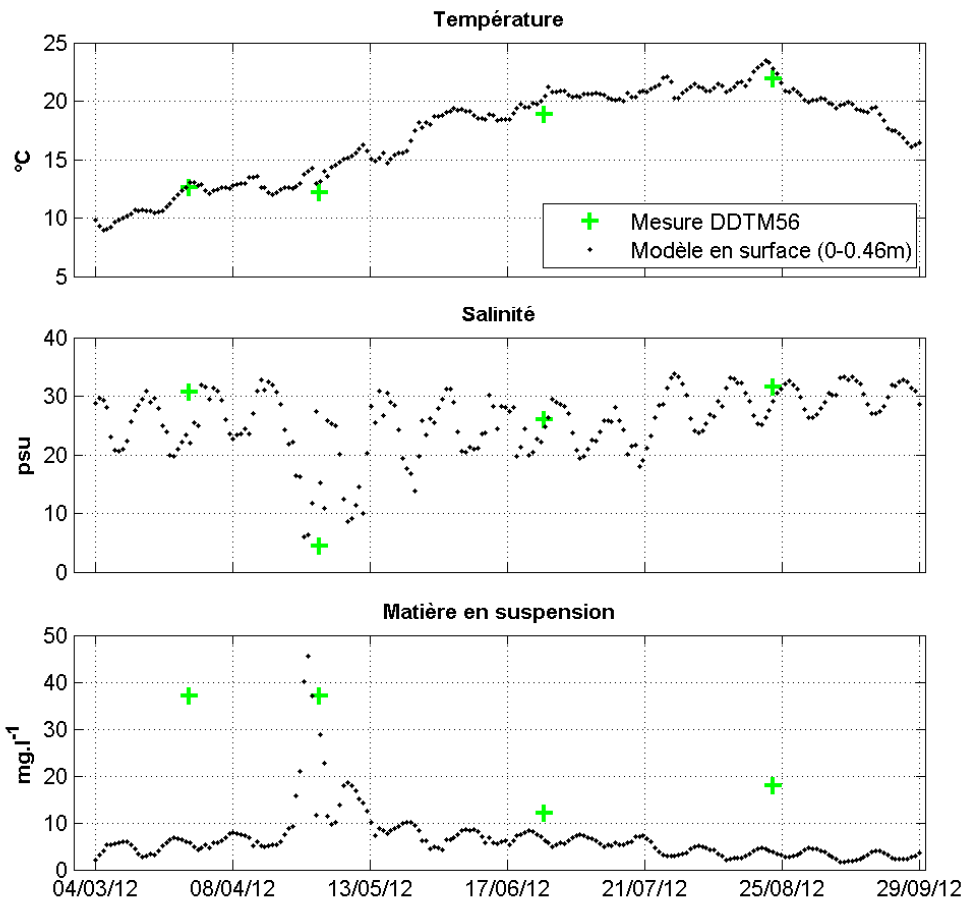
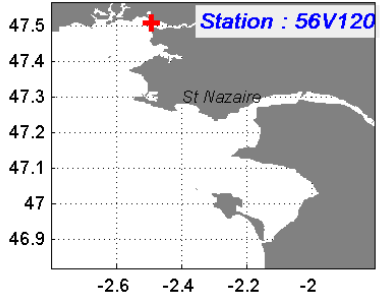


Planche 30 : Comparaison des mesures issues des mesures DDTM56 avec le modèle pour l'année 2012

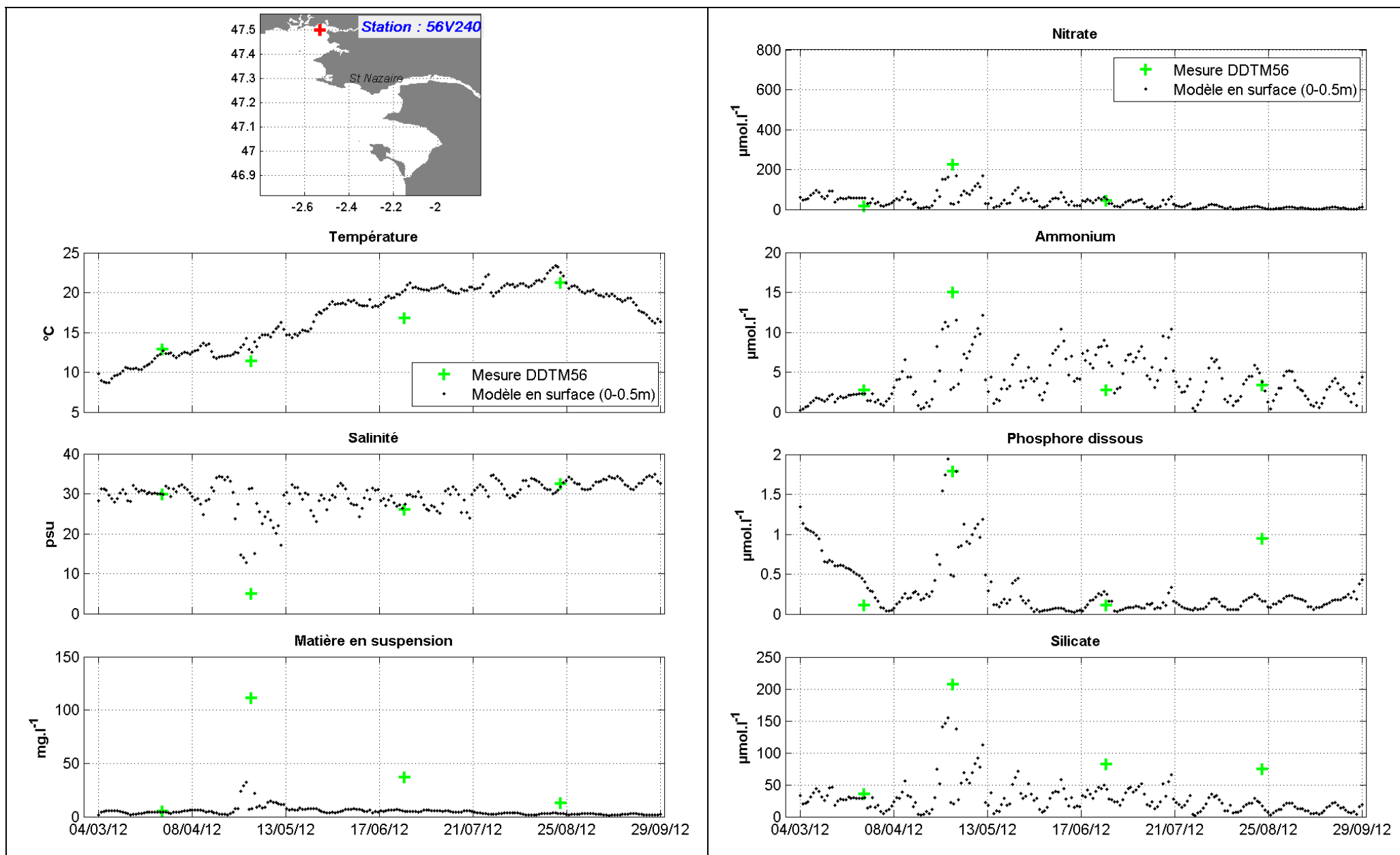


Planche 31 : Comparaison des mesures issues des mesures DDTM56 avec le modèle pour l'année 2012

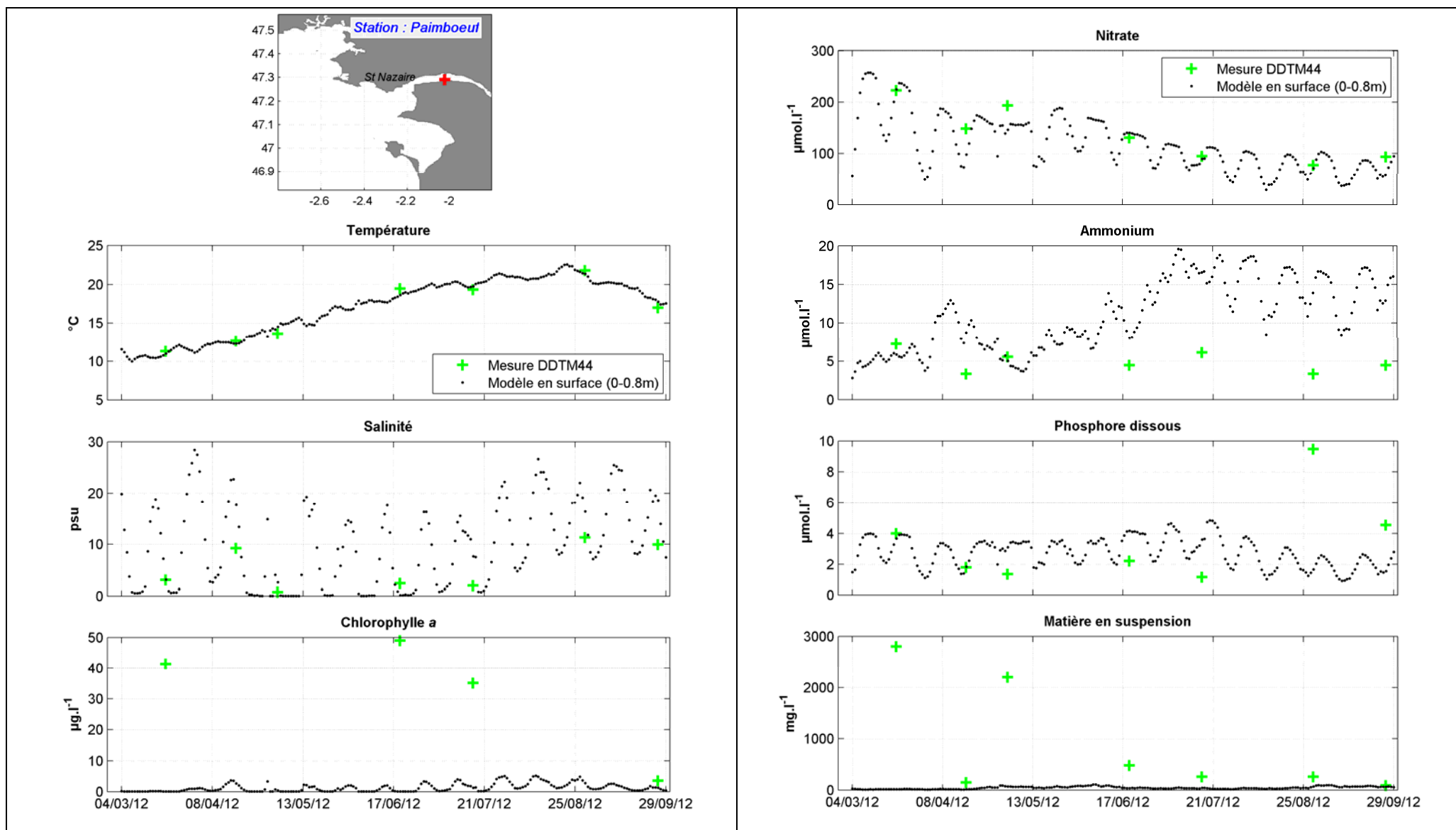


Planche 32 : Comparaison des mesures issues des mesures DDTM44 avec le modèle pour l'année 2012



## 6.2.5. Taux de matières en suspension et chlorophylle *a* observés par satellite

### 6.2.5.1. Taux de matières en suspension

La Figure 51 présente sur la période de mai à septembre 2012 la comparaison entre la moyenne des matières en suspension de surface observée par satellite avec celle simulée par le modèle. Les teneurs moyennes observées sur les trois principaux secteurs (baie de Vilaine, aval estuaire de la Loire et anse de Noirmoutier) ainsi que sur l'ensemble du domaine sont bien reproduites par le modèle. La raison de la très bonne corrélation ( $R^2=0.9$ ) obtenue entre les mesures satellitaires et le modèle (cf. Figure 52) a été précédemment décrite (cf. § 6.1.4.1).

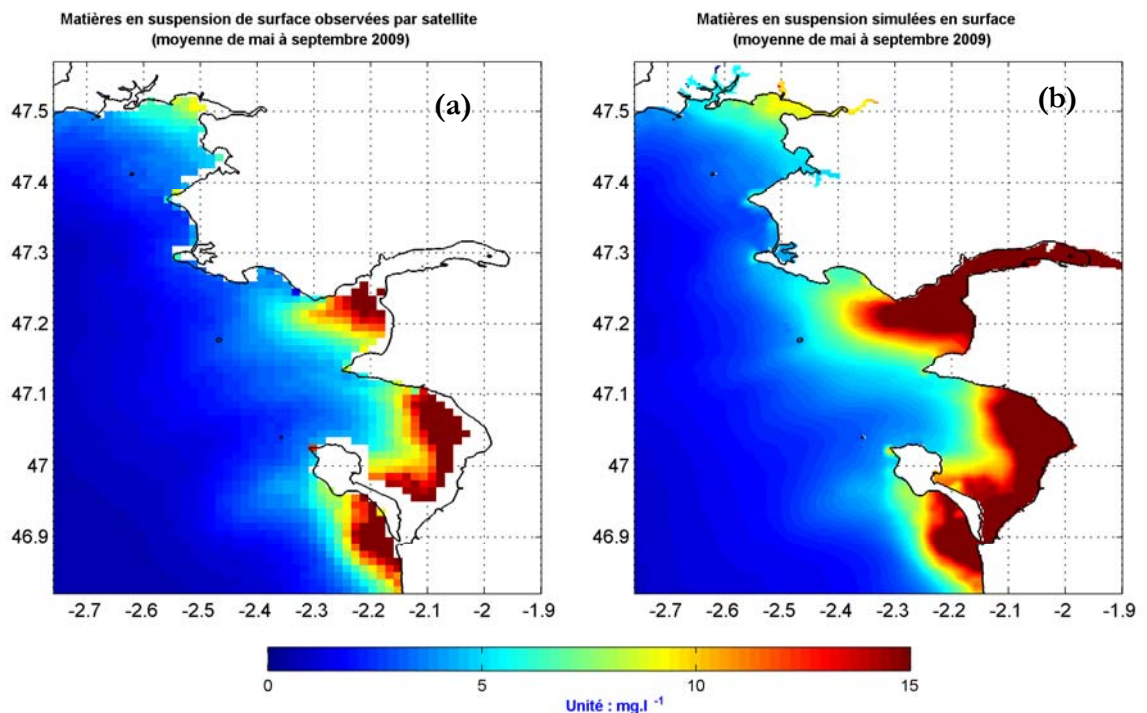


Figure 51 : Moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b)

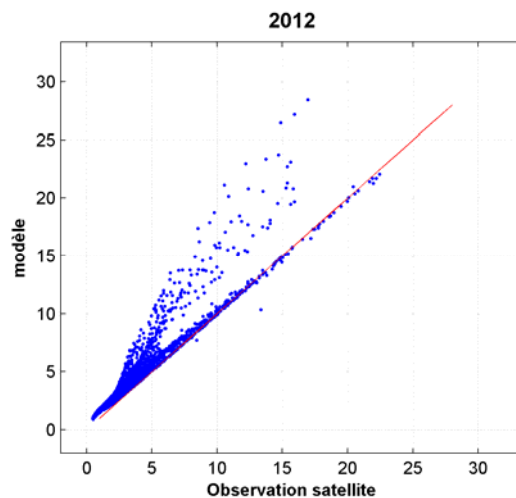


Figure 52 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).



### 6.2.5.2. Chlorophylle *a*

La comparaison de la moyenne établie sur la période allant de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* observée par satellite avec celle simulée par le modèle en surface (cf. Figure 53) montre que le modèle :

- surestime l'intensité du bloom en baie de Vilaine tout en sous-estimant son ampleur spatiale
- surestime l'intensité du bloom présent devant l'estuaire de la Loire
- crée un bloom dans le très proche littoral de l'anse de Noirmoutier qui n'existe pas sur les données satellitaires

Le graphique présenté sous forme d'un scatterplot des données observées avec celles simulées (cf. Figure 54) débouche sur un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 0.42.

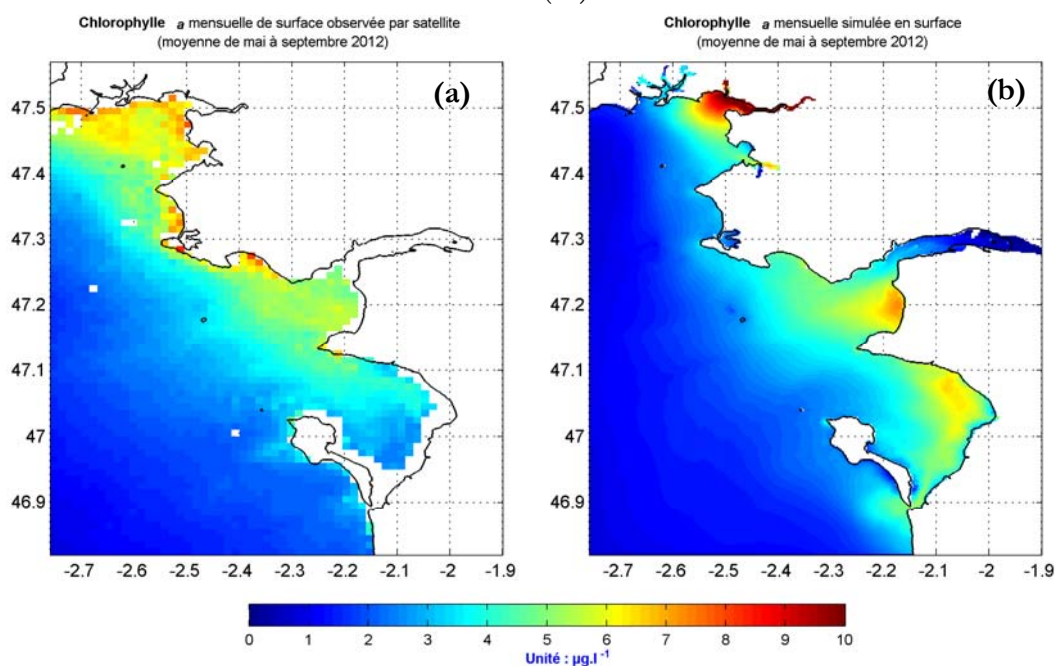


Figure 53 : Moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b)

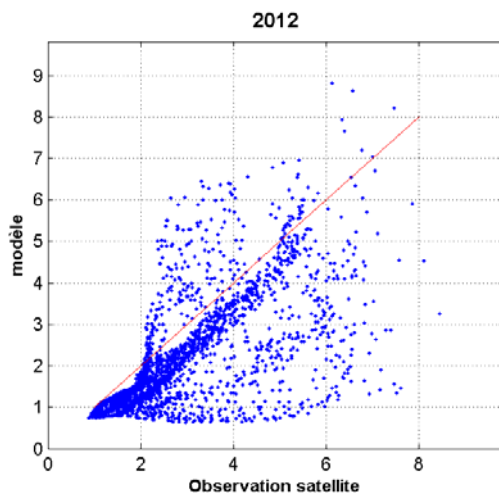
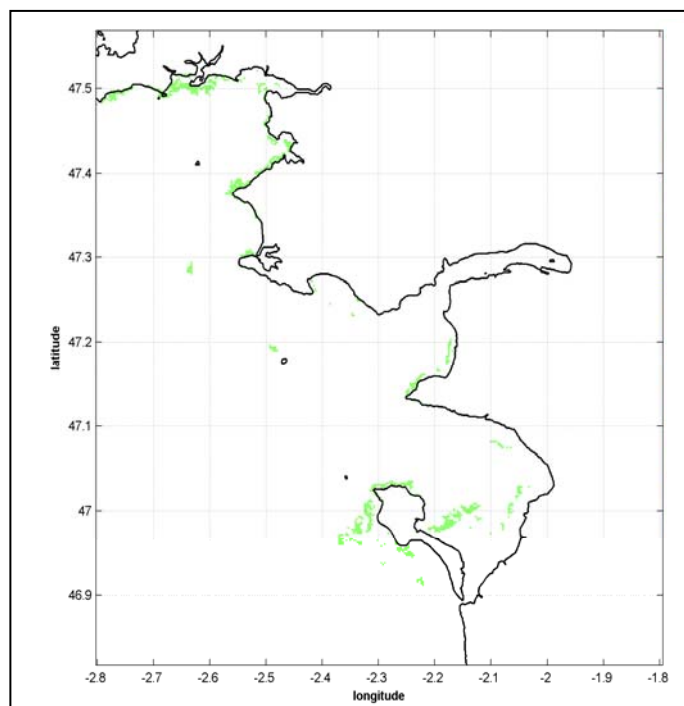


Figure 54 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée).



### 6.2.6. Quotas en azote et phosphore des ulves

Pour le modèle « Loire-Vilaine », la condition initiale en ulves (cf. Figure 55) a été légèrement retravaillée de façon à intégrer les ulves appartenant au plateau du four situé à environ 7 km à l'ouest de la pointe du Croisic (ajout de 14 pixels), le plateau de la Banche localisé à environ 10 km au sud du Croisic (ajout de 11 pixels) et les îlots des Evens et de Baguenaud localisés devant la baie du Pouliguen (ajout de 3 pixels).



**Figure 55 : Condition initiale des dépôts en algues vertes pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » intégrant le plateau du Four, de la Banche et les îlots des Evens et de Baguenaud.**

Les données de mesures portant sur le contenu interne des ulves en azote et phosphore proviennent des mesures Ceva effectuées en 2012 sur les sites de : Penvins, Mine d'Or, Le Croisic, La Baule, Pen Bé, Piriac-sur-Mer, Mesquer, Prefailles-sur-Mer, Noirmoutier-Epine, Noirmoutier-Vieil et Noirmoutier-Guérynière. Le site de Noirmoutier-la-Fosse n'a pu être retenu car le modèle ne fournissait aucun dépôt d'algues vertes sur ce site.

La Planche 33 à la Planche 38 présente les résultats de la comparaison des quotas en azote et phosphore des ulves mesurés par le Ceva en 2012 et simulés par le modèle. Pour l'ensemble des sites, l'allure générale et les niveaux des quotas en azote et phosphore sont globalement bien reproduits par le modèle.

Pour le site de Mesquer, le modèle parvient assez bien à reproduire la déplétion importante mesurée en juillet 2012 et plus précocement celle mesurée en mai 2012 sur le site de Noirmoutier-Epine. En revanche, pour le site de Penvins très proche de la limite marine, le quota simulé en azote est bas comparé aux mesures à partir de début juin 2012.



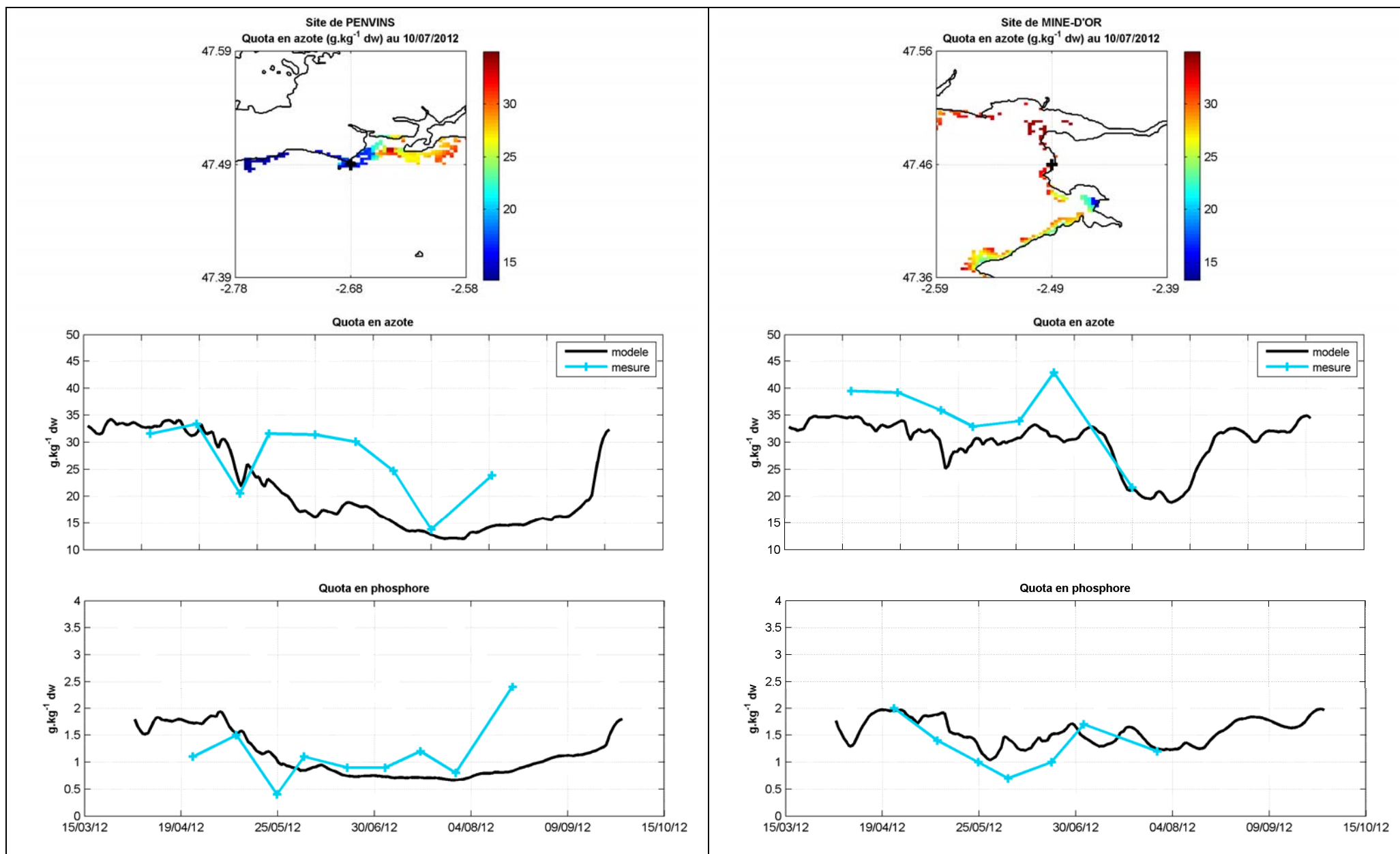


Planche 33 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle

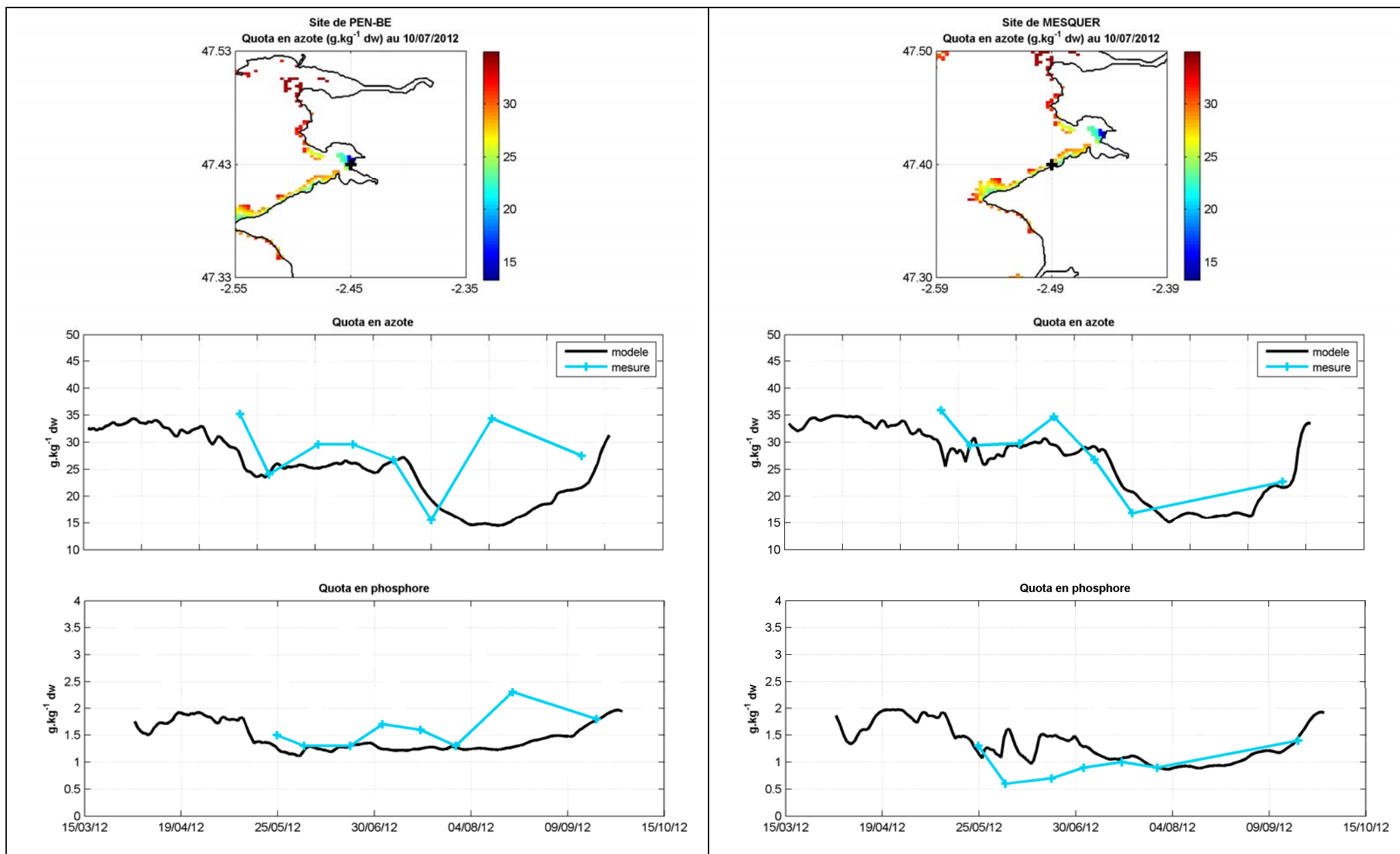


Planche 34 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle

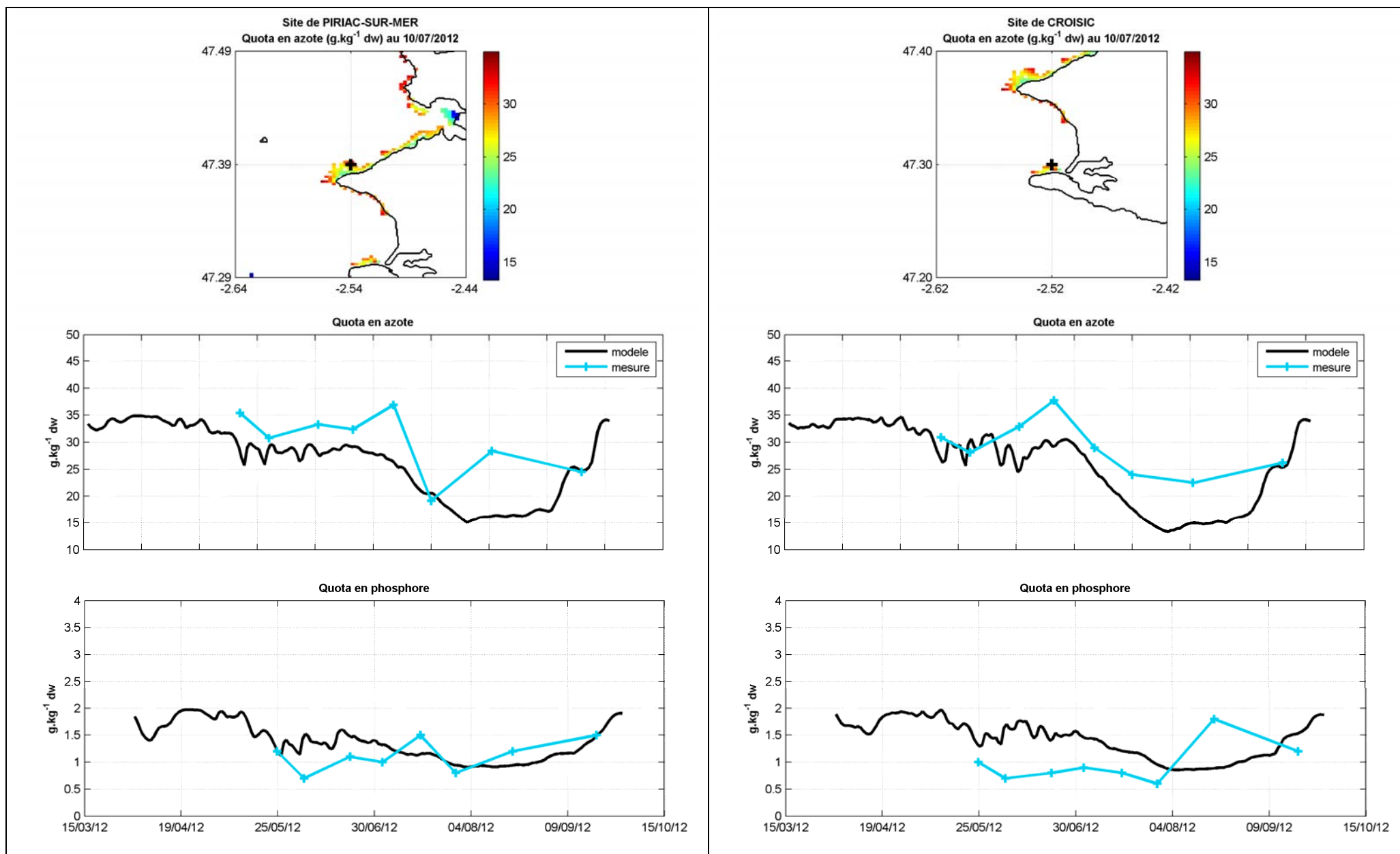


Planche 35 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle



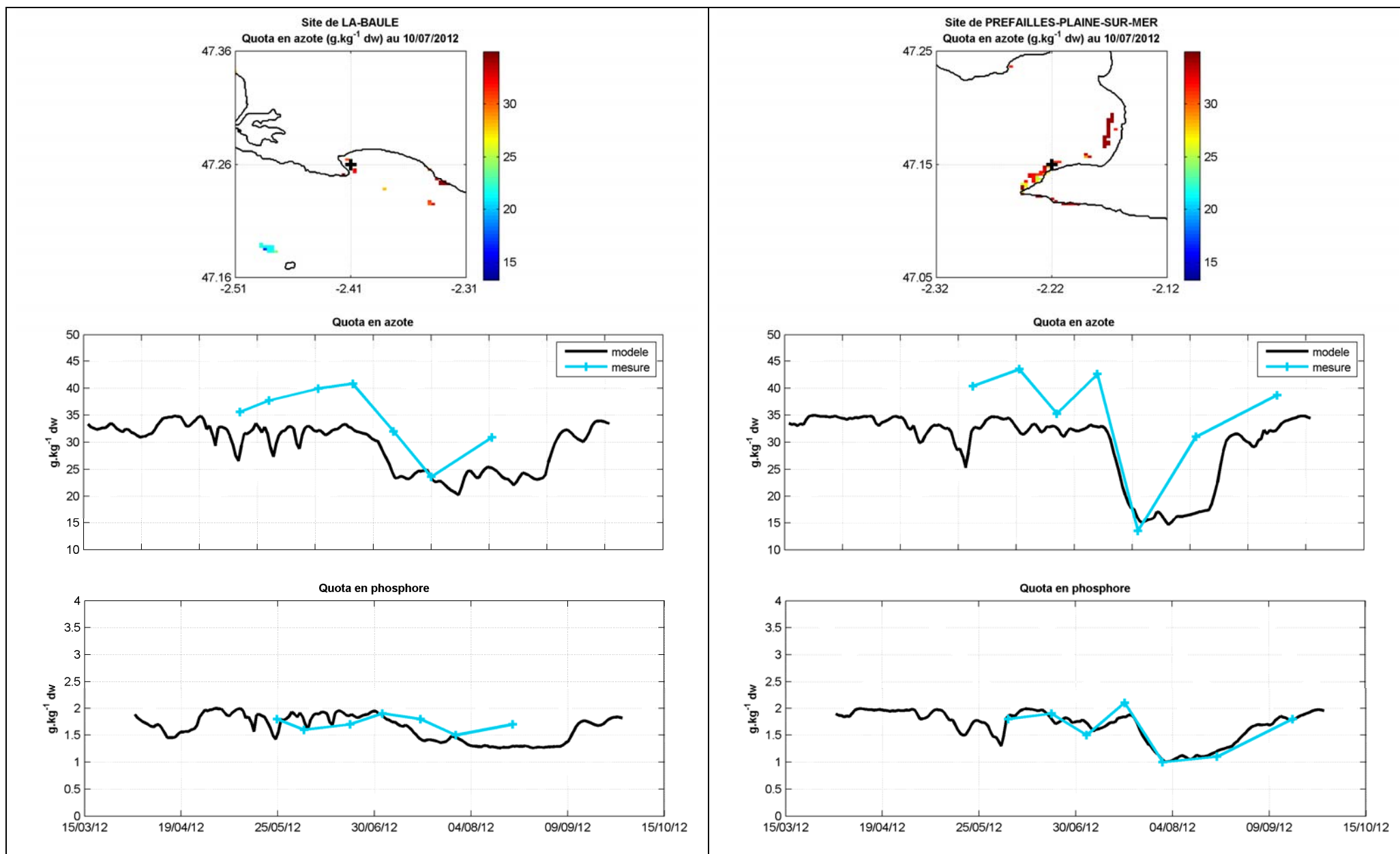


Planche 36 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle

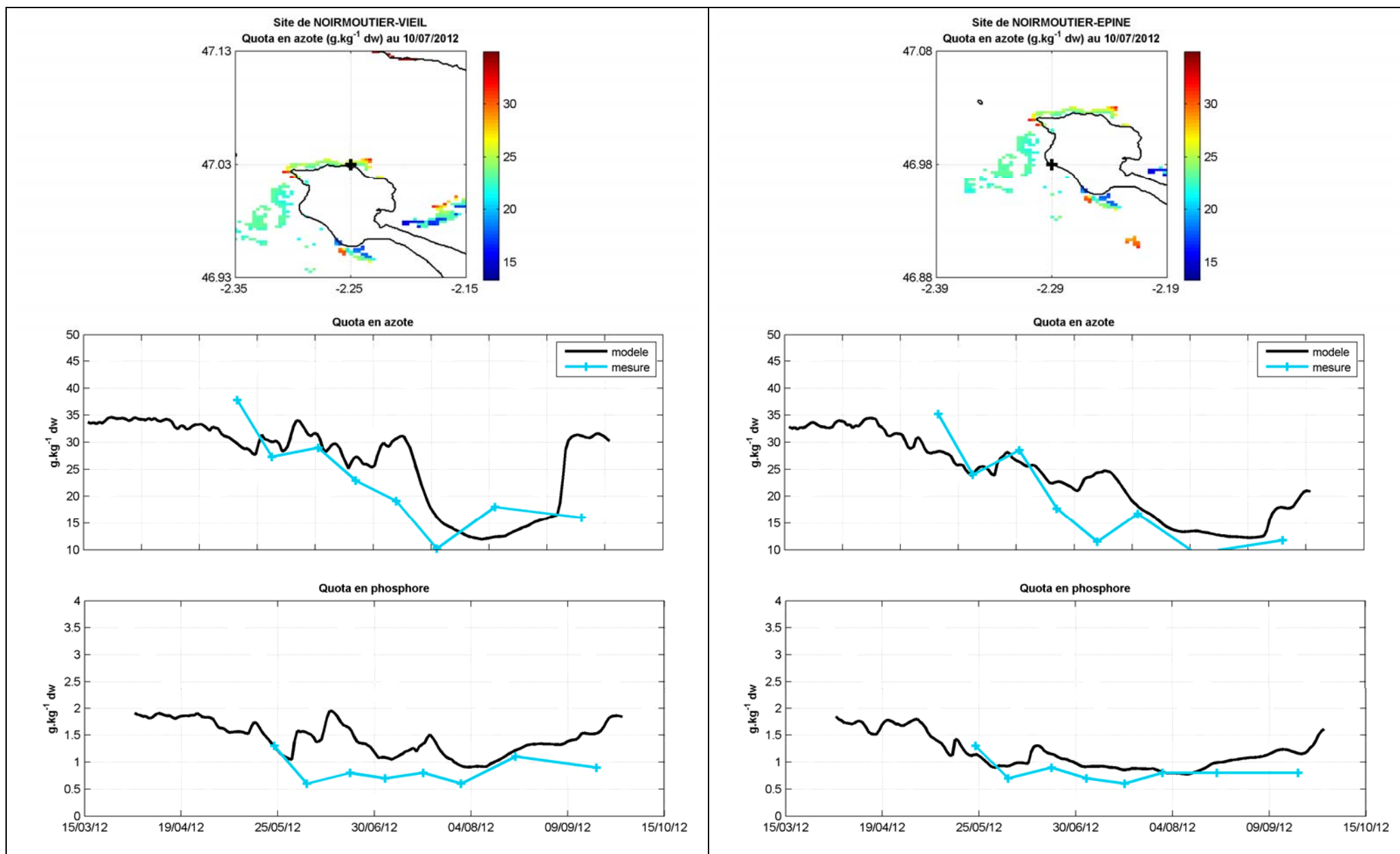


Planche 37 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle

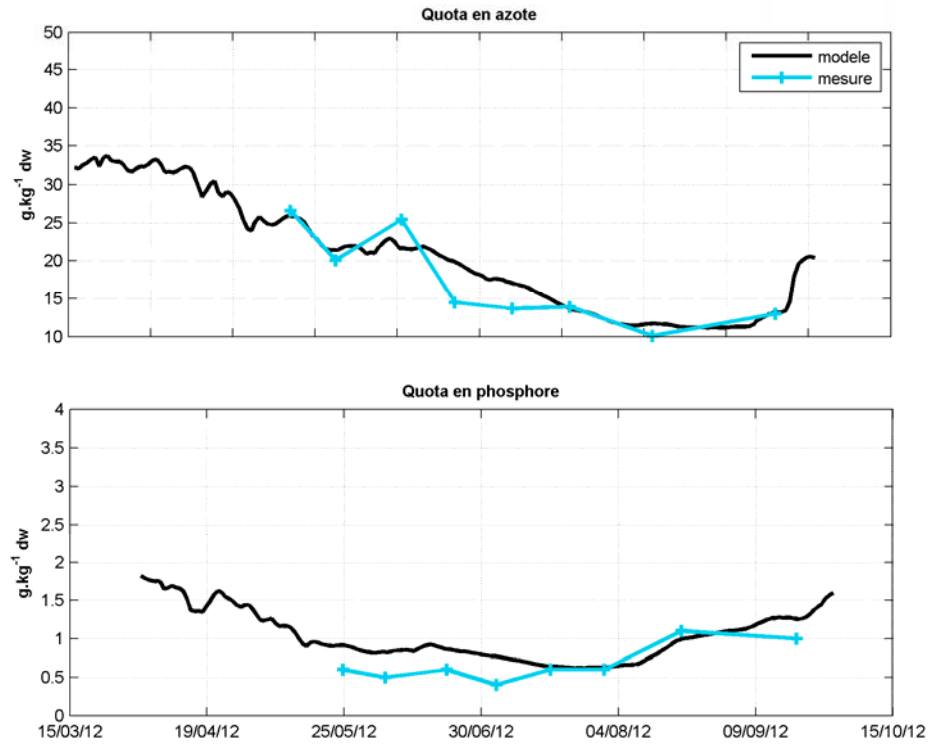
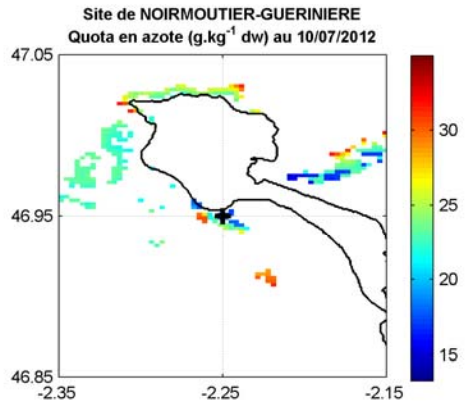


Planche 38 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle

### 6.2.7. Fraction de l'azote contenu dans les ulves pour le modèle rang 1 « Loire-Vilaine » sur l'année météo-climatiques 2009

L'étude des traceurs est effectuée pour suivre l'origine de l'azote dans les ulves en un secteur donné sur une période donnée. Cette évolution est présentée dans les graphiques suivants sous forme saisonnière à l'échelle globale du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » et pour chacun des secteurs 2 à 8 retenus dans la mission MB3 (cf. Figure 56). Ces graphiques permettent de suivre au cours du temps la variabilité de l'importance de chaque contributeur. La compilation de cette donnée saisonnière est également présentée sous forme de camembert de façon à voir la hiérarchisation, en moyenne, de chacun des contributeurs, pour l'ensemble de la période étudiée.

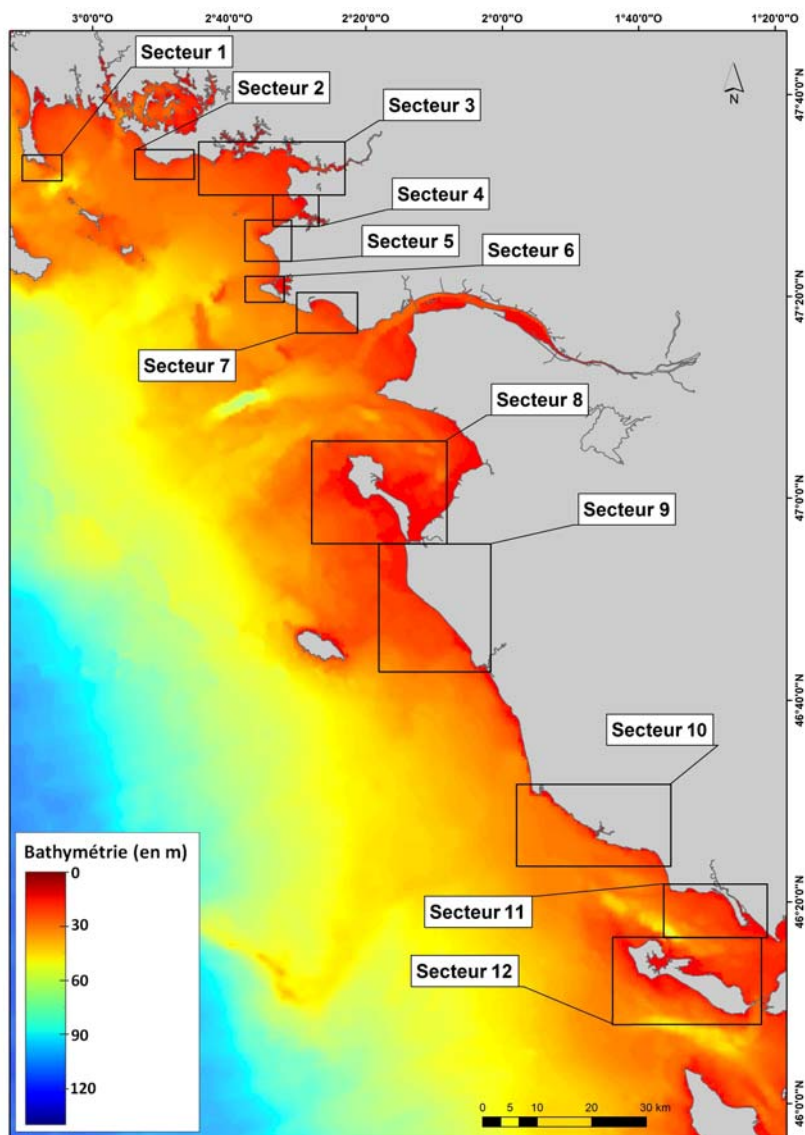




Figure 56 : Secteurs d'échouages retenus dans la mission MB3



|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br>REPUBLIQUE FRANÇAISE<br>PRÉFET<br>DE LA RÉGION<br>PAYS DE LA LOIRE | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|  |  | Date | 21/02/14                   |
|  |  | Page | 122/177                    |

### **Méthode d'estimation du contenu en azote dissous provenant du modèle de rang 0 :**

Un point méthodologique important et relativement délicat dans le traçage de l'azote dissous du modèle de rang 1 est de définir le plus précisément possible le contenu en azote dissous provenant du modèle de rang 0. Autrement dit, il faut être capable d'évaluer la part d'azote dissous provenant purement de la limite marine constituée au moyen de la donnée de forçage avec celle des grands fleuves.

Pour ce faire, une simulation des apports en azote provenant des grands fleuves (Loire, Vilaine, Golfe du Morbihan, Gironde et Charente) incluant la limite marine Astan a été opérée avec le modèle général de rang 0. L'objectif de cette simulation est de parvenir à décrire dans le contenu de la limite marine qui sera injectée au modèle de rang 1 la part relative des principales sources d'azote. La méthodologie retenue est la suivante :

- Simulation de mars à septembre 2009 au moyen du modèle de rang 0 de la dispersion de l'azote dissous provenant des grands fleuves (Loire, Vilaine, Golfe du Morbihan, Gironde et Charente) incluant la limite marine constituée sur la base des données de mesures à Astan. Dans cette simulation, l'azote dissous est considéré en tant que traceur conservatif et passif (pas de consommation possible par la production primaire),
- Post-traitement des résultats du rang 0 acquis au point précédent pour évaluer sur l'ensemble des pixels ulves appartenant au modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » la contribution moyenne d'avril à septembre de chacune des sources tracées avec le modèle général (limite marine, Loire, Vilaine, Golfe du Morbihan, Gironde et Charente). Ces estimations ont nécessité un rééchantillonnage de la grille du modèle de rang 1 à la grille du modèle de rang 0 pour géolocaliser dans le modèle de rang 0 les pixels ulves du modèle de rang 1,
- Simulations classique du traçage de l'origine de l'azote dissous contenu dans les ulves au moyen du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine ». Ces simulations de traçage de l'azote des ulves intègrent également le traçage de l'ensemble de variables d'états du compartiment phytoplanctonique,
- Estimation, sur l'ensemble des pixels ulves du modèle « Loire-Vilaine » et à l'échelle des différents sites d'échouages définis à la mission MB3, de l'origine de l'azote dissous. Redistribution de la part moyenne obtenue pour la limite marine au prorata des résultats du traçage de l'azote dissous obtenus avec le modèle de rang 0.



***Evolution moyenne des traceurs à l'échelle du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » :***

A l'échelle du modèle « Loire-Vilaine », la Loire (44 %) apparaît comme le contributeur dominant dans l'alimentation en azote dissous des ulves (cf. Figure 57). La Vilaine joue également un rôle important en contribuant en moyenne à hauteur de 32 % de mai à septembre dans la fourniture en azote dissous des ulves. La limite marine ainsi que le traceur « Autres Sources » avec 10 % se classent en troisième position. Le sédiment (2 %) joue un rôle négligeable à l'échelle de l'emprise du modèle de rang 1.

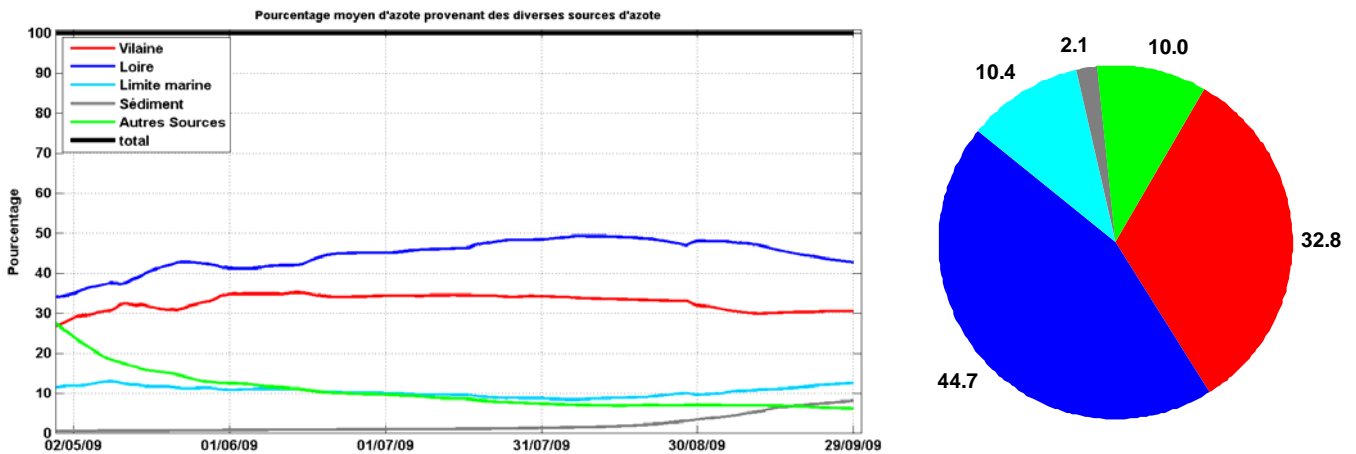


Figure 57 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves à l'échelle du modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

***Evolution des traceurs sur le secteur 2***

Situé à l'ouest de la baie de Vilaine, le secteur 2 voit un renforcement de la participation de la Vilaine qui devient le fournisseur dominant dans l'alimentation en azote dissous des ulves apportant plus de 43 % de l'azote total sur ce secteur (cf. Figure 58). La Loire, bien que plus éloignée, participe également de manière importante (33 %). Cela s'explique par les flux très importants d'azote dissous issus de la Loire qui rayonnent de façon très étendue dans le milieu. La limite marine intervient en troisième position dans la fourniture en azote dissous des ulves (19 %). En revanche, le traceur « Autres Sources » participe peu sur ce secteur (autour de 3 à 4 %). La contribution sédimentaire est négligeable (0,2 %).

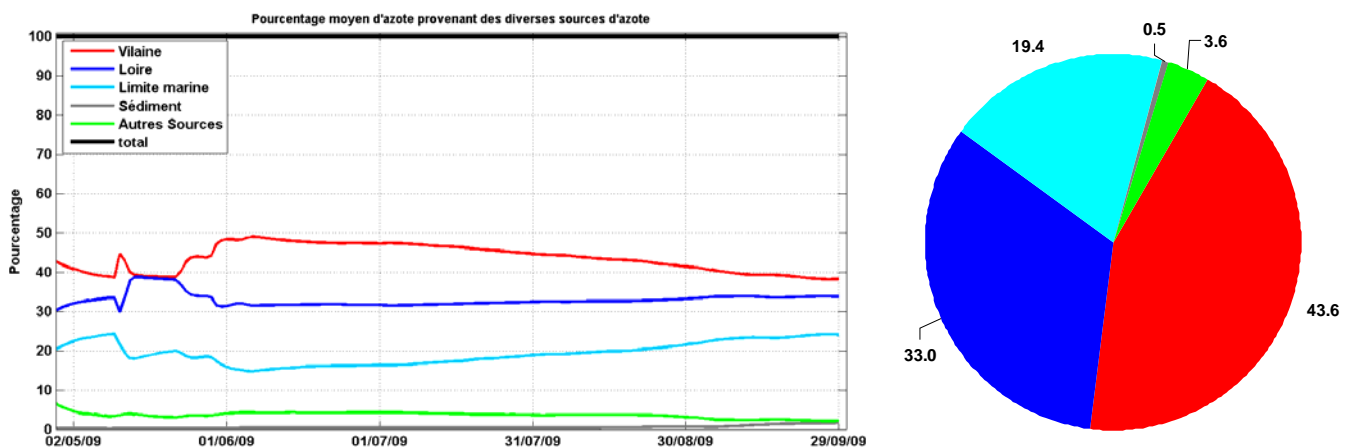


Figure 58 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 2 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)





### Evolution des traceurs sur le secteur 3

Ce secteur étant situé à l'embouchure de la Vilaine, la contribution de celle-ci dans l'alimentation en azote dissous des ulves devient largement dominante (62 % de mai à septembre) (cf. Figure 59). La Loire fournit en moyenne 17 % de l'azote dissous contenu dans les ulves et 10 % pour la limite marine. Le traceur « Autres Sources » contribuent davantage que sur le secteur 2 (8 %). Le sédiment, bien que représentant une part faible de l'apport en azote, est beaucoup plus présent que dans le secteur 2 du fait de la présence de large zones sablo-vaseuses et on note un renforcement de sa participation en fin de saison.

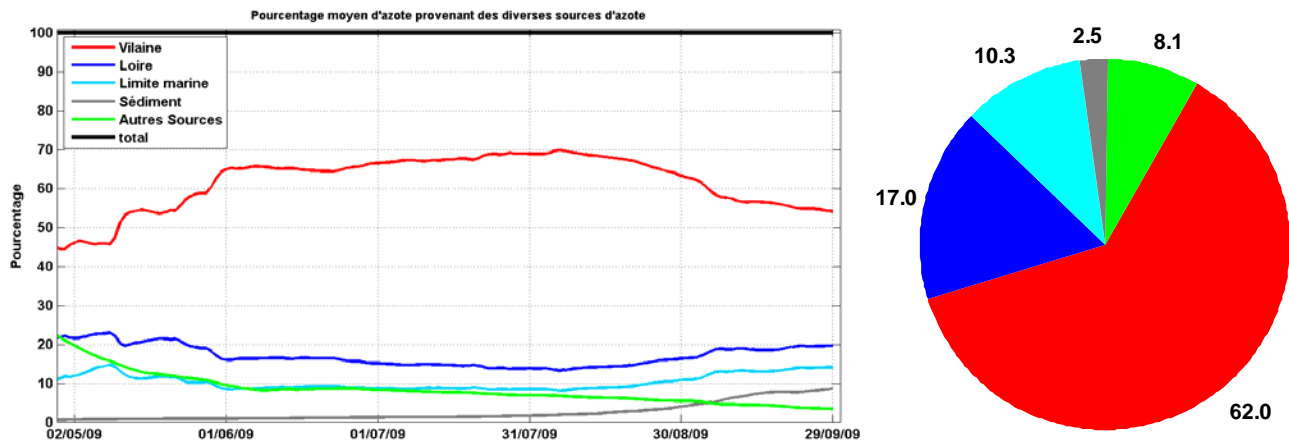


Figure 59 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 3 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

### Evolution des traceurs sur le secteur 4

Le secteur 4, de faible superficie, se trouve en majeure partie situé en milieu enclavé. Le signal azoté du traceur « Autres Sources » se trouve de ce fait renforcé et représente 22 % des apports azotés mais la Vilaine (52 %) demeure la source dominante sur ce secteur (cf. Figure 60). La Loire (16 %) occupe la troisième position et la limite marine se trouve relativement faible sur l'ensemble de la saison (autour de 5 %). Les zones sédimentaires étant principalement sablo-vaseuses dans ce secteur, l'apport d'azote par le sédiment s'élève à 5 % avec un renforcement sensible en fin de saison (autour de 10-20 %).

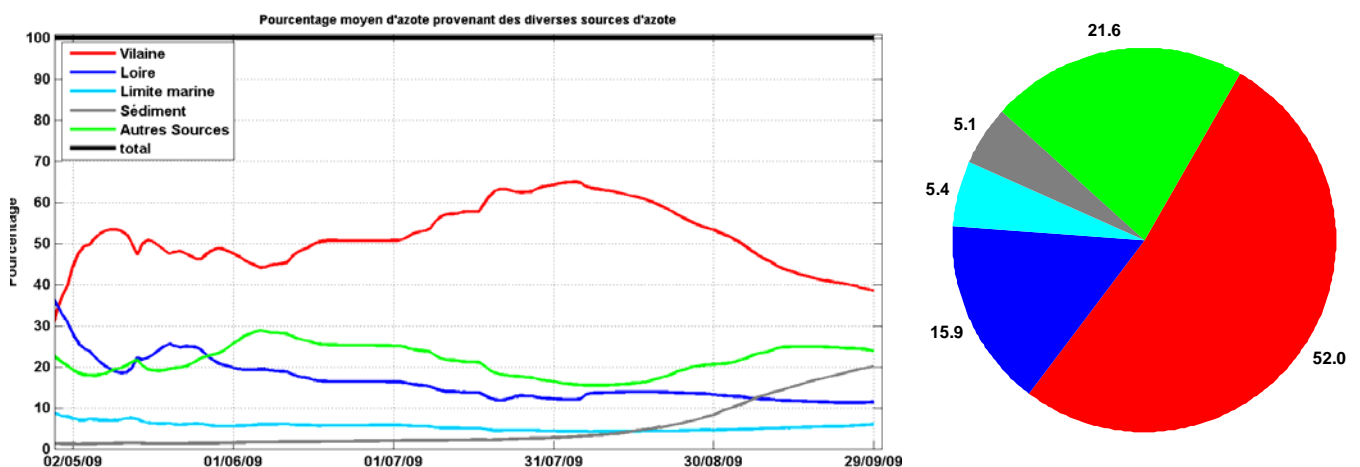


Figure 60 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 4 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)



### Evolution des traceurs sur le secteur 5

Sur le secteur 5 situé à mi-distance de l'embouchure de la Vilaine et de la Loire, la contribution de ces deux apports (cf. Figure 61) est pratiquement équivalente avec en moyenne 40 % sur l'ensemble de la saison. La contribution issue de la limite marine est de l'ordre de 11 % et les autres sources s'élèvent en moyenne à 7 %. Dans ce secteur, l'apport sédimentaire est faible quelle que soit la période, la contribution moyenne étant de 1,9 %.

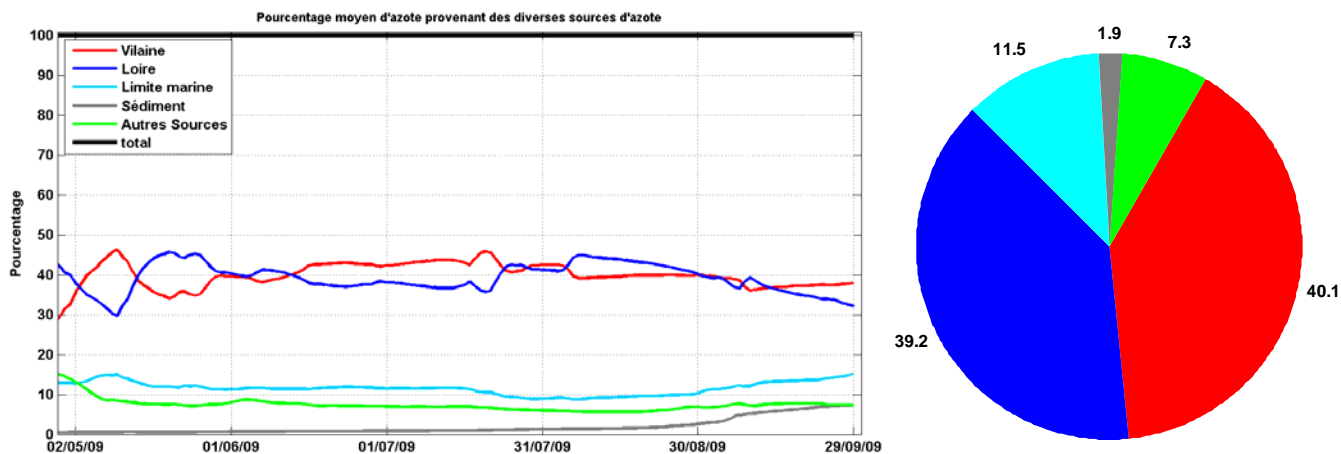


Figure 61 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 5 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

### Evolution des traceurs sur le secteur 6

Pour le secteur 6 plus proche du débouché de la Loire que le secteur 5, on assiste à un renforcement de la Loire avec une contribution moyenne de l'ordre de 55 % (cf. Figure 62). Il est intéressant d'observer malgré son éloignement géographique que la Vilaine apparaît comme le second contributeur (25 %). La limite marine intervient en moyenne à hauteur de 14 % dans le contenu en azote dissous des ulves. Le traceur « Autres Sources » participe peu (4 %) et la contribution du sédiment (1 %) peut être qualifiée de négligeable sur ce secteur.

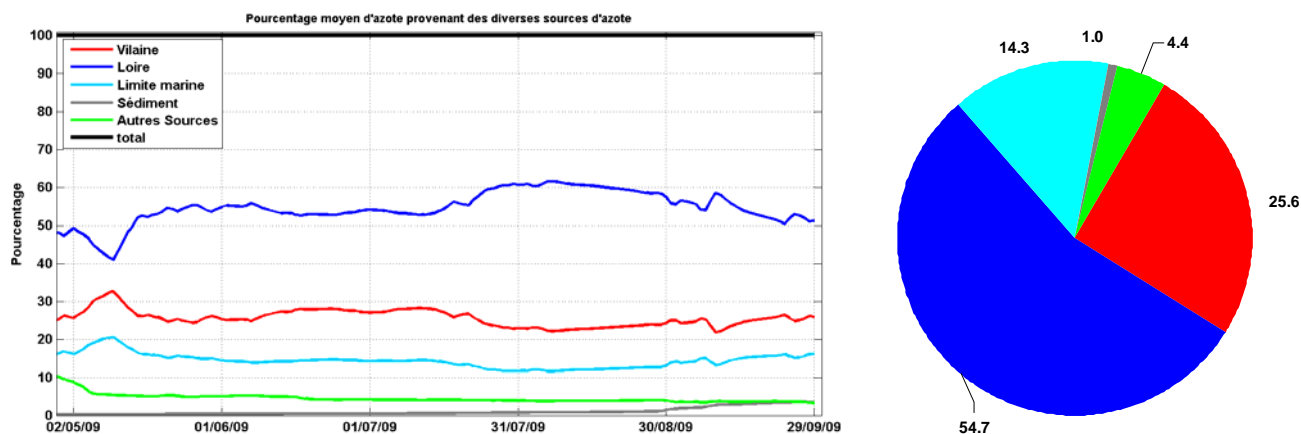


Figure 62 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 6 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)



### Evolution des traceurs sur le secteur 7

Le secteur 7 se trouvant en aval immédiat de St Nazaire, la contribution de la Loire devient très largement dominante (69 % en moyenne) (Figure 63). Le traceur « Autres Sources » se place en seconde position avec une contribution non négligeable de 12 % en moyenne suivi de la Vilaine (10.9 %). La limite marine intervient peu (7 %) tandis que la contribution du sédiment est faible à négligeable pour ce secteur (autour de 1 %).

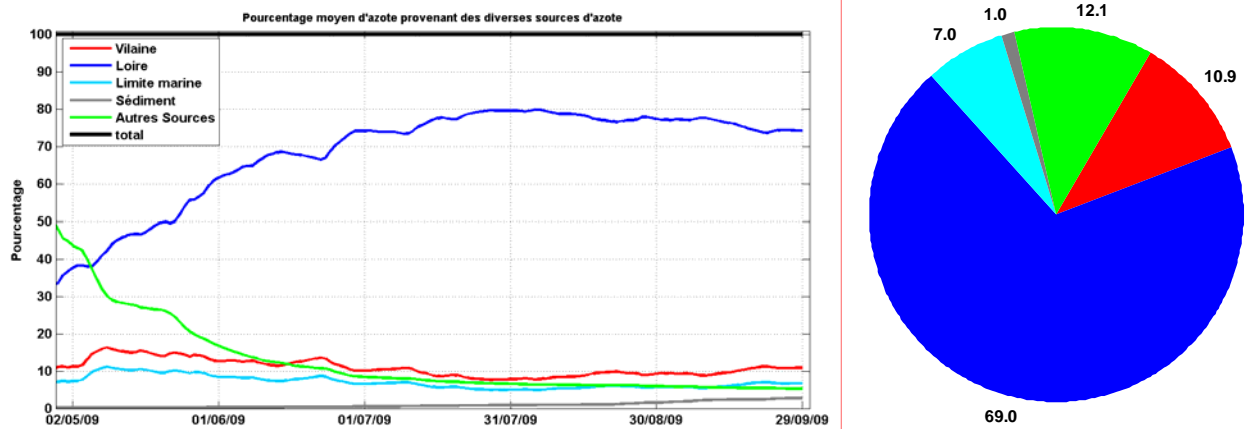


Figure 63 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 7 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

### Evolution des traceurs sur le secteur 8

Le secteur 8 correspond à l'île de Noirmoutier. Outre le fait de sa relative proximité géographique avec la Loire, l'année 2009 est caractérisée par des vents dominants de secteur ouest qui tendent à disperser favorablement l'azote dissous du panache de la Loire en direction de l'île de Noirmoutier. Dans ces conditions, la Loire apparaît comme le principal contributeur (63 %) tandis que la Vilaine occupe la seconde place (16 %). La limite marine fournit 16 % de l'azote contenu dans les ulves. Le traceur « Autres Sources » (environ 8 %) représente un pourcentage modeste de l'azote dissous contenu dans les ulves. Le sédiment contribue faiblement (1.7 %).

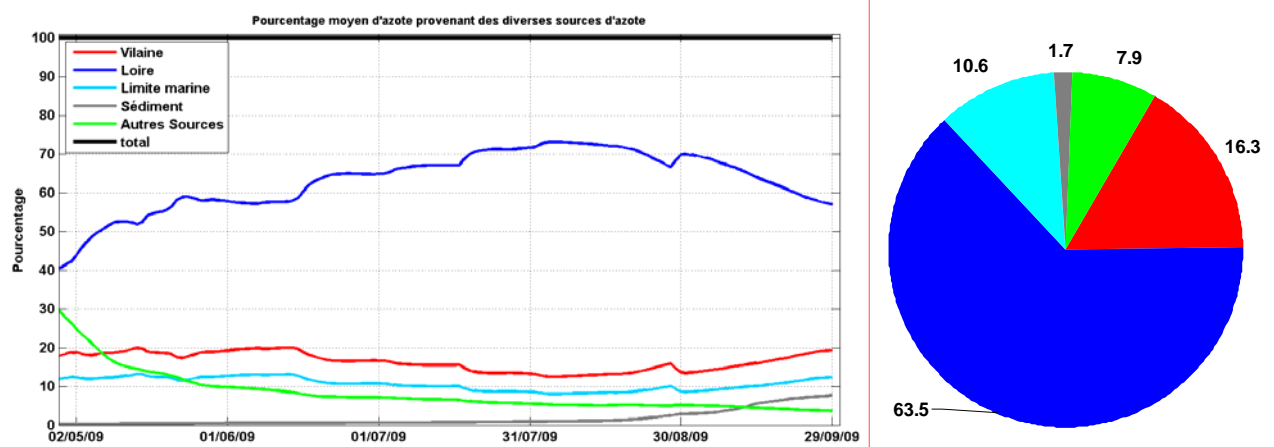




Figure 64 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 8 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)



|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>Liberté • Égalité • Fraternité</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET</small><br><small>DE LA RÉGION</small><br><small>PAYS DE LA LOIRE</small> | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|  |  | Date | 21/02/14                   |
|  |  | Page | 127/177                    |

### APPORTS DE L'ETUDE DES TRACEURS

- ⇒ La Loire (44 %) est la première source dans l'alimentation en azote dissous des ulves sur la période productive de mai à septembre. Elle domine largement les autres apports sur les secteurs 6, 7 et 8 (partie sud du modèle « Loire-Vilaine »)
- ⇒ La Vilaine (32 %) se place en seconde position et devient la source dominante sur les secteurs 2, 3 et 4 (partie nord du modèle « Loire-Vilaine »)
- ⇒ Le traceur « Autres Sources » regroupant les 154 autres sources terrigènes locales contribuent de manière équivalente à la limite marine (autour de 10 %)
- ⇒ Le sédiment joue un rôle négligeable dans l'alimentation en azote dissous des ulves



## 7. Validation du modèle biogéochimique de rang 1 « Sables d'Olonne – Ile de Ré » sur les années météo-climatiques 2009 et 2012

### 7.1. Année 2009

Sur le secteur s'étendant du nord des Sables d'Olonne au sud immédiat de l'île de Ré, les données de mesures utilisées pour l'année 2009 sont les suivantes :

1. Données extraites de la base Quadrigé<sup>2</sup>
2. Données issues des réseaux de mesures gérés par la Direction Départementales des Territoires et de la Mer (DDTM 17)

#### 7.1.1. Données Quadrigé<sup>2</sup>

A l'échelle du modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré », seules quatre mesures disponibles dans la banque de données Quadrigé<sup>2</sup> ont pu être utilisées (stations identiques pour les années 2009 et 2012). Le Tableau 12 liste l'ensemble des stations disponibles sur l'aire d'étude et celles qui ont été retenues pour les comparaisons mesures/modèles (en bleu). De la même façon que pour le modèle « Loire-Vilaine », toutes les stations appartenant au réseau de suivi REPOM ont dû être écartées en raison de leur position géographique très côtière et non compatibles avec la taille de maille du modèle à 250 mètres.

**Tableau 12 : Localisation des stations Quadrigé<sup>2</sup> disponibles sur les années 2009 et 2012 et appartenant au modèle de rang 1 « Sables d'Olonne – ile de Ré » (en bleu, les stations retenues pour la comparaison avec le modèle). T : Température, S : Salinité, Chla : Chlorophylle a, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : Nitrate, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : Ammonium, Si(OH)<sub>4</sub> : Silicium dissous, MES : Matières En Suspension**

| Station   | Lieu   | longitude | latitude | Reseau | T | S | Chla | NO3 | NH4 | PO4 | SiOH | MES |
|-----------|--|-----------|----------|--------|---|---|------|-----|-----|-----|------|-----|
| 074-P-016 | Large pointe_grosse_terre<br>(planche 39 sur 2009 / planche 53 sur 2012) | -2.041    | 46.633   | REPHY  | * | * | *    |     |     |     |      |     |
| 074-P-018 | 85222aV1e3-Saint_Gilles_Croix_de_Vie_Eau                                 | -1.94     | 46.694   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-020 | 85222aP1e2-Saint_Gilles_Croix_de_Vie_Eau                                 | -1.944    | 46.697   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-021 | 85222aV1e4-Saint_Gilles_Croix_de_Vie_Eau                                 | -1.938    | 46.693   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-022 | 85222aV1e5-Saint_Gilles_Croix_de_Vie_Eau                                 | -1.939    | 46.693   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-043 | 85194aP1e3-Les_Sables_dOlonne_Eau_3_pêch                                 | -1.792    | 46.497   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-045 | 85194aC1e1-Les_Sables_dOlonne_Eau_1_flot                                 | -1.79     | 46.498   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-051 | 85194aV1e4-Les_Sables_d_Olonne_Eau_4_olo                                 | -1.795    | 46.502   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-046 | 85288aV1e2-Talmont_Saint_Hilaire_Eau_2_b                                 | -1.679    | 46.44    | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| 074-P-025 | Anse_du_Piquet   | -1.65     | 46.434   | REPHY  | * | * | *    |     |     |     |      |     |
| 074-P-050 | 85114aV1e1-Jard_sur_Mer_Eau_1_port                                       | -1.583    | 46.409   | REPOM  | * | * |      | *   | *   | *   |      | *   |
| Station   | Lieu   | longitude | latitude | Reseau | T | S | Chla | NO3 | NH4 | PO4 | SiOH | MES |



|           |   |        |        |       |   |   |   |   |   |   |  |   |
|-----------|---|--------|--------|-------|---|---|---|---|---|---|--|---|
| 074-P-052 | 85288aV1e1-Talmon_Saint_Hilaire_Eau_1_b                         | -1.677 | 46.439 | REPOM | * | * |   | * | * | * |  | * |
| 076-P-016 | Filière_w<br>(planche 40 sur 2009 / planche 54 sur 2012)        | -1.377 | 46.278 | REPHY | * | * | * |   |   |   |  |   |
| 076-P-002 | L'Eperon_(terre)<br>(planche 41 sur 2009 / planche 55 sur 2012) | -1.234 | 46.273 | REPHY | * | * | * |   |   |   |  |   |
| 077-P-002 | La_Carrelère<br>(planche 42 sur 2009 / planche 56 sur 2012)     | -1.200 | 46.23  | REPHY | * | * | * |   |   |   |  |   |

Le diagramme de Taylor normalisé de la Figure 65 (a) montre que la température est correctement représentée avec un coefficient de corrélation moyen ( $R$ ) pour l'ensemble des stations de 0.98. L'erreur quadratique centrée (RMSE) est de l'ordre de 0.2 et l'écart type est relativement proche de celui des mesures. En termes de précision, le biais normalisé pour la température est en moyenne égal à 0.34 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 20 % de l'écart type des mesures soit 0.4 °C.

La salinité est un peu moins bien représentée (cf. Figure 65 (b)) avec un coefficient de corrélation moyen  $R_m$  égal à 0.79. La station {077-P-002} intitulée « La Carrelère » située sur une zone découvrante de la vasière de l'anse d'Aiguillon est la station la moins bien reproduite par le modèle. Hormis cette station, l'erreur quadratique centrée (RMSE) est inférieure à 0.5 et l'écart type du modèle est inférieur de 40 % à celui des mesures. Sur l'ensemble des stations, le biais normalisé pour la salinité est en moyenne égal à 0.41 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égal à 41 % de l'écart type des mesures soit 0.48 °C.

On note par ailleurs un décalage horaire moyen, susceptible d'altérer la qualité des comparaisons (cf. § 4), entre les heures de prélèvement des mesures et les sorties du modèle de 1.6 heures.

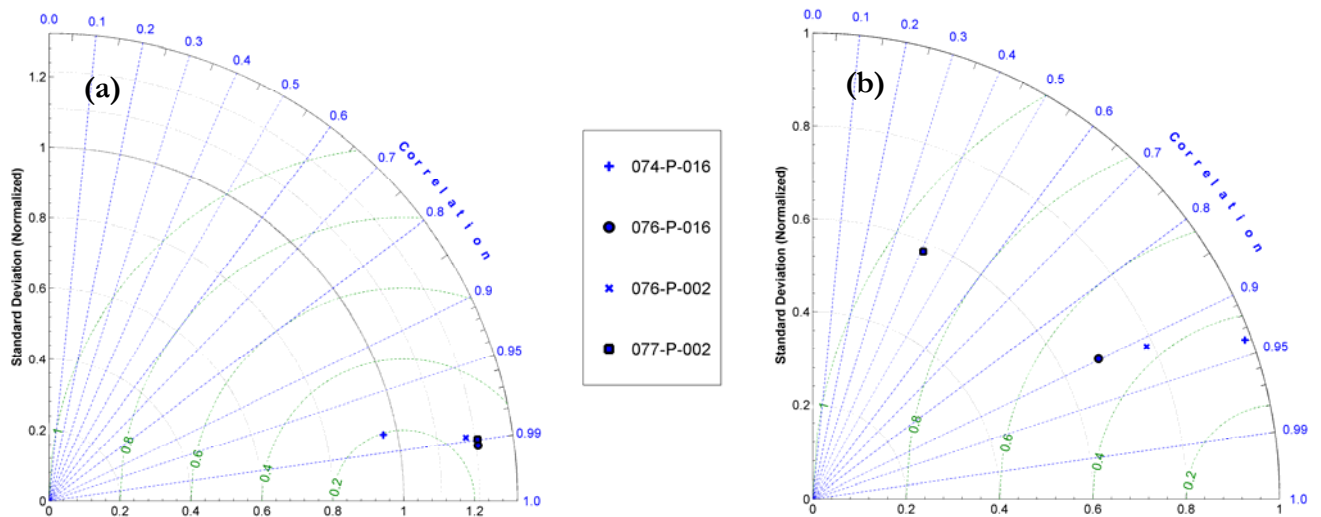


Figure 65 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadriga pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation ( $R$ ), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE)





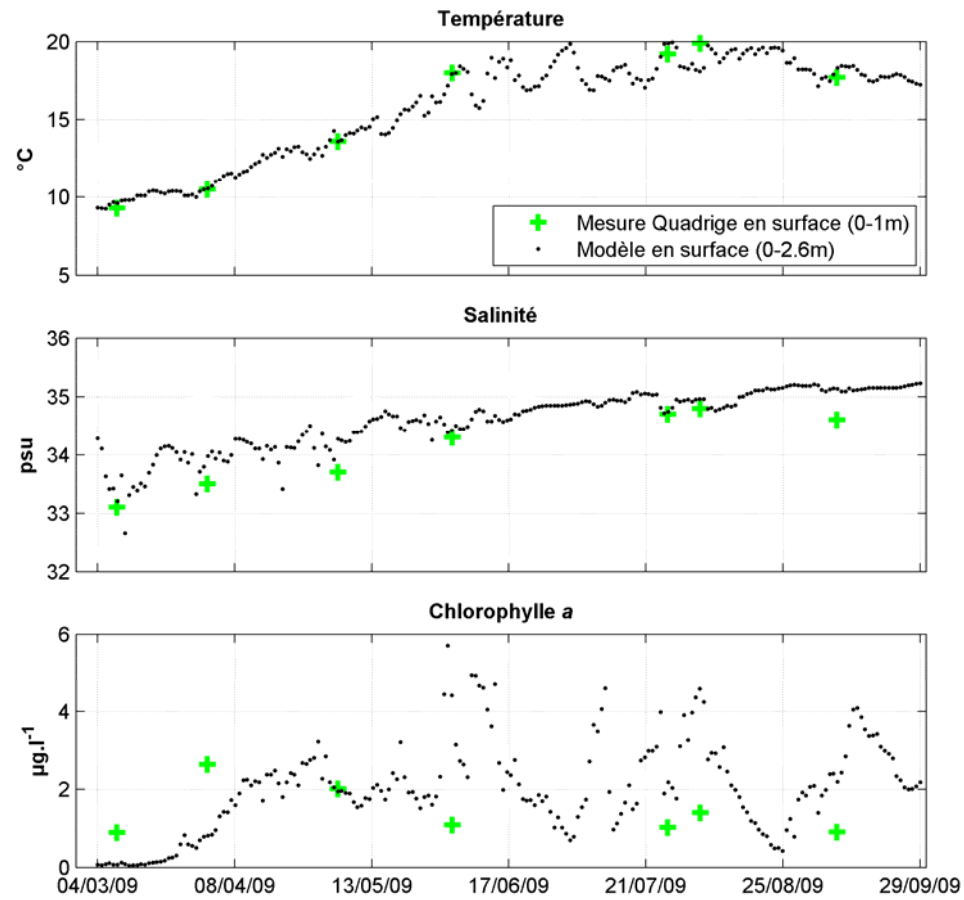
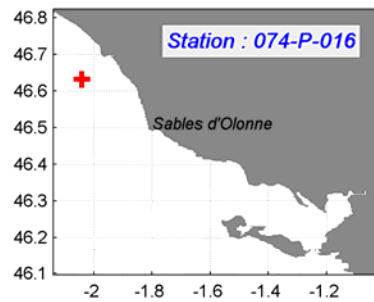


Planche 39 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

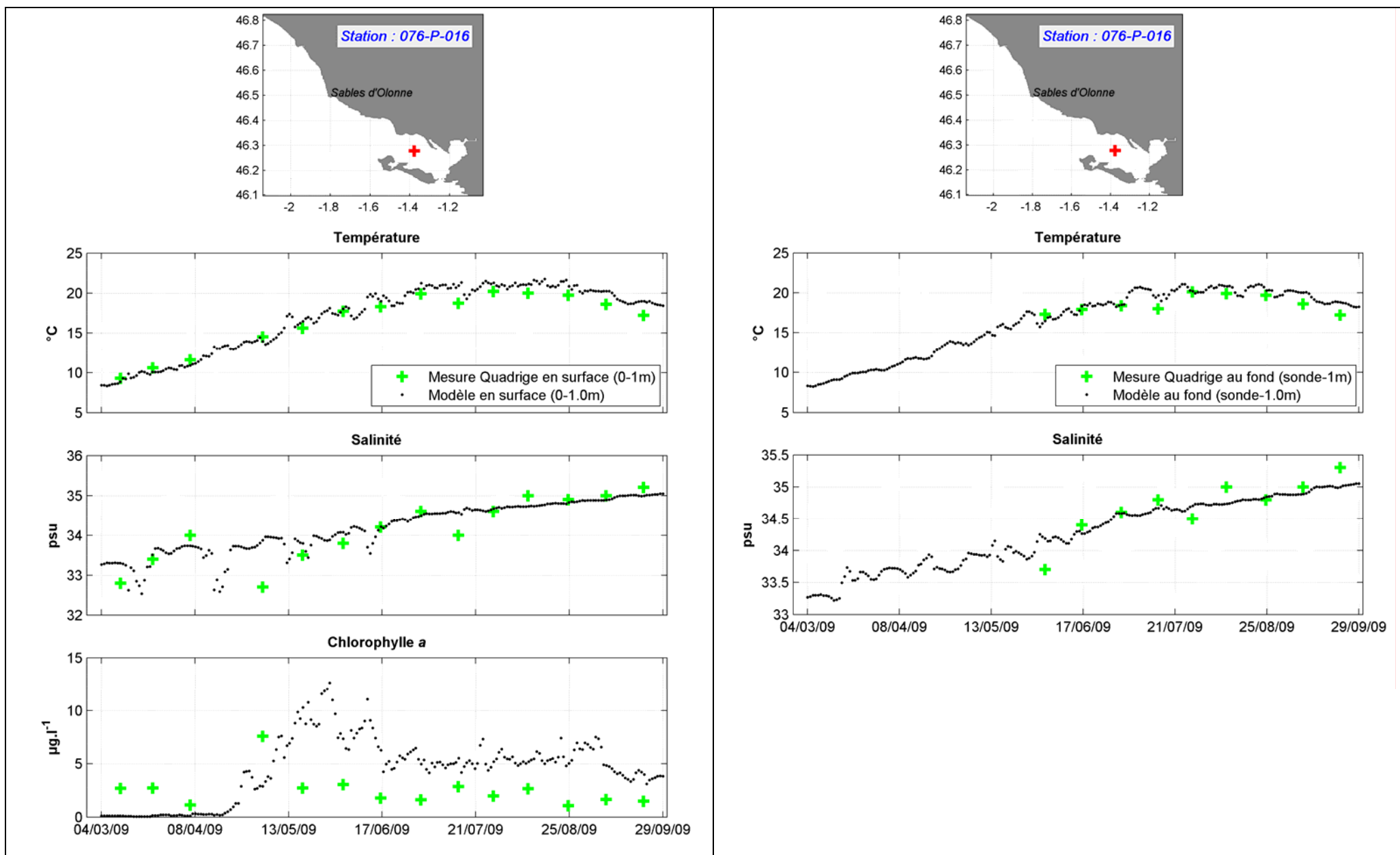


Planche 40 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

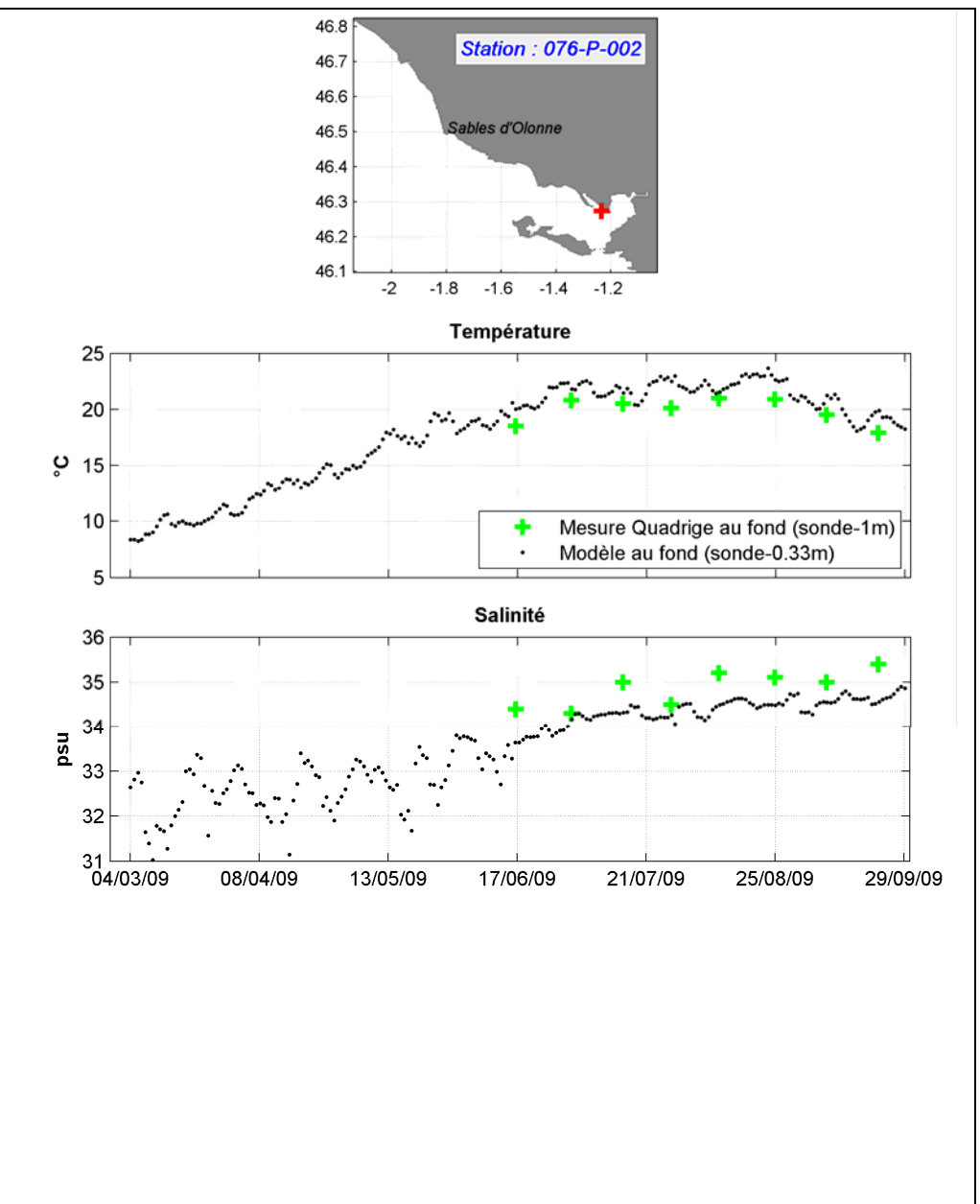
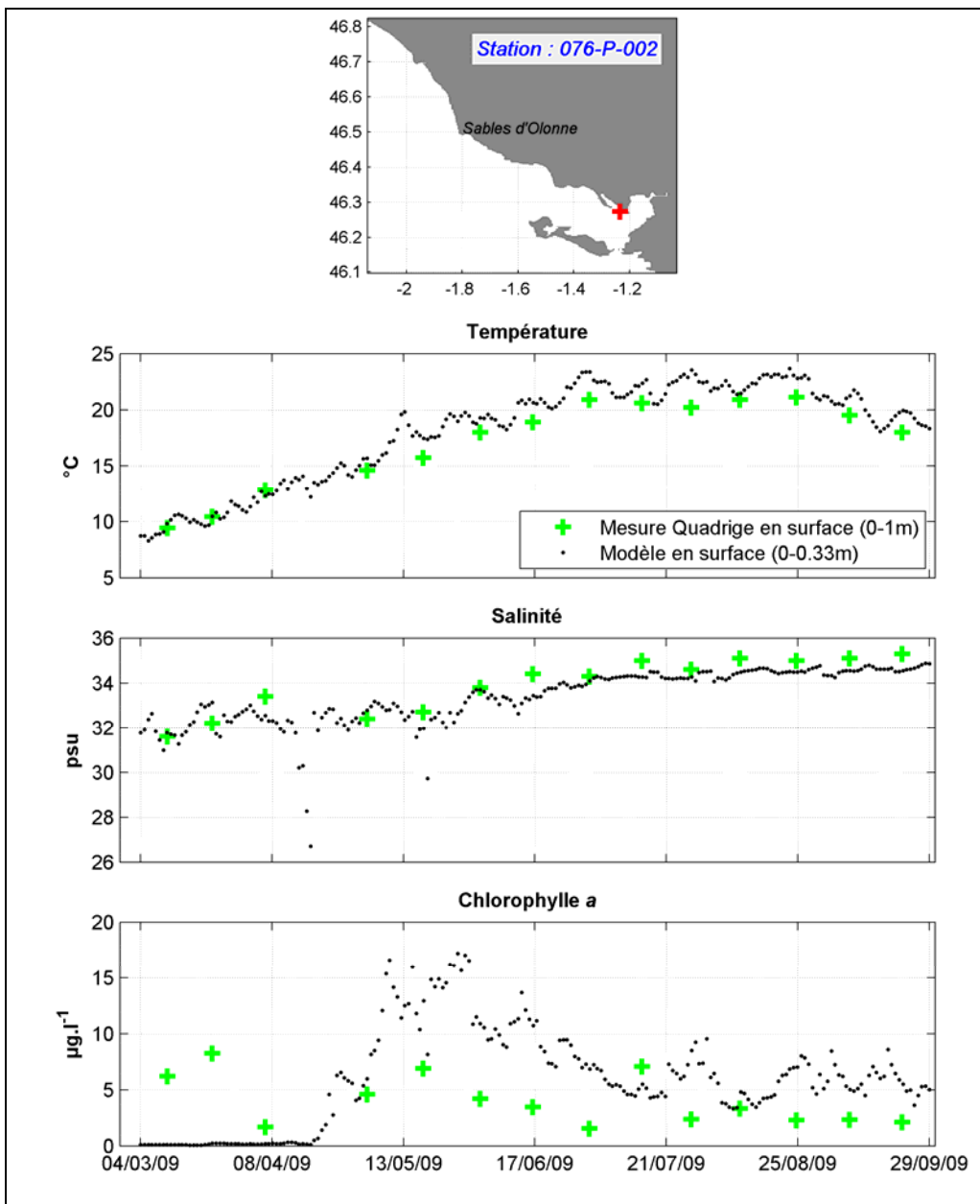


Planche 41 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

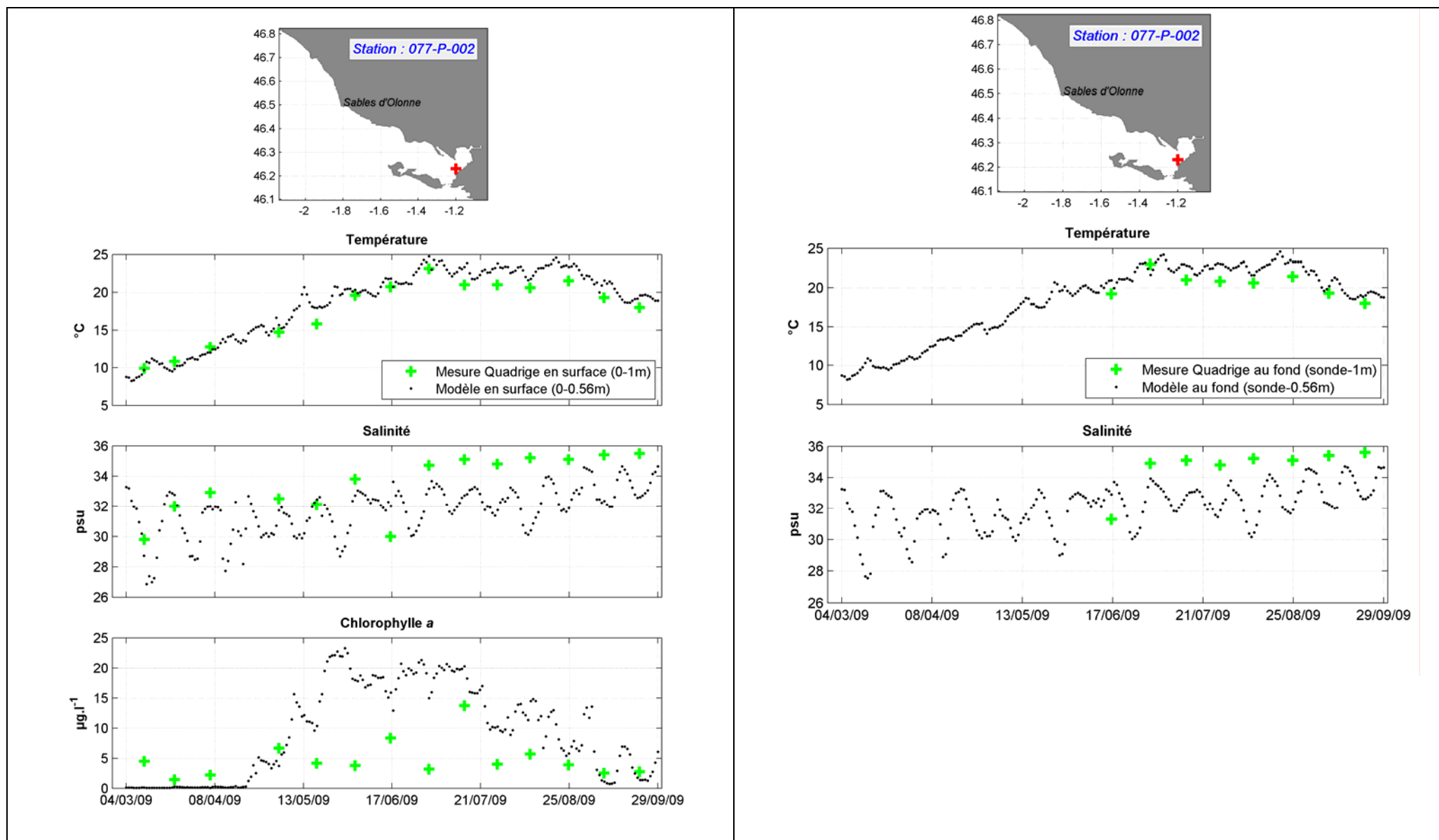


Planche 42 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2009

### 7.1.2. Données DDTM17

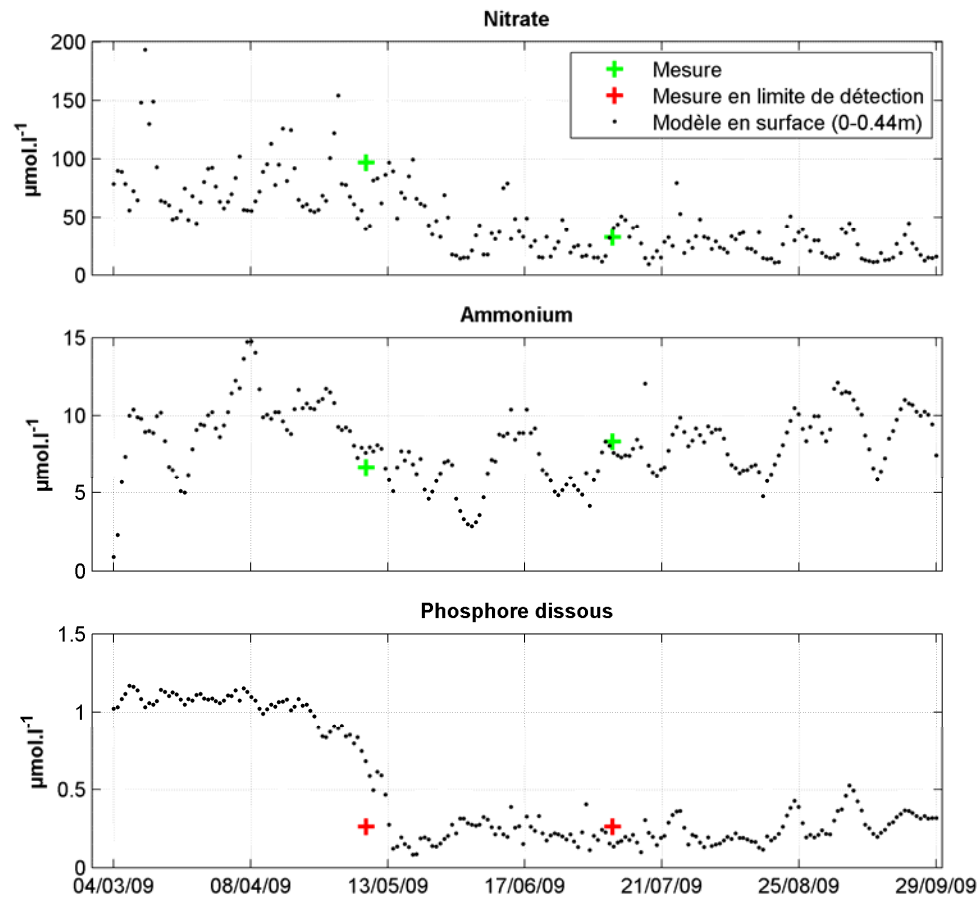
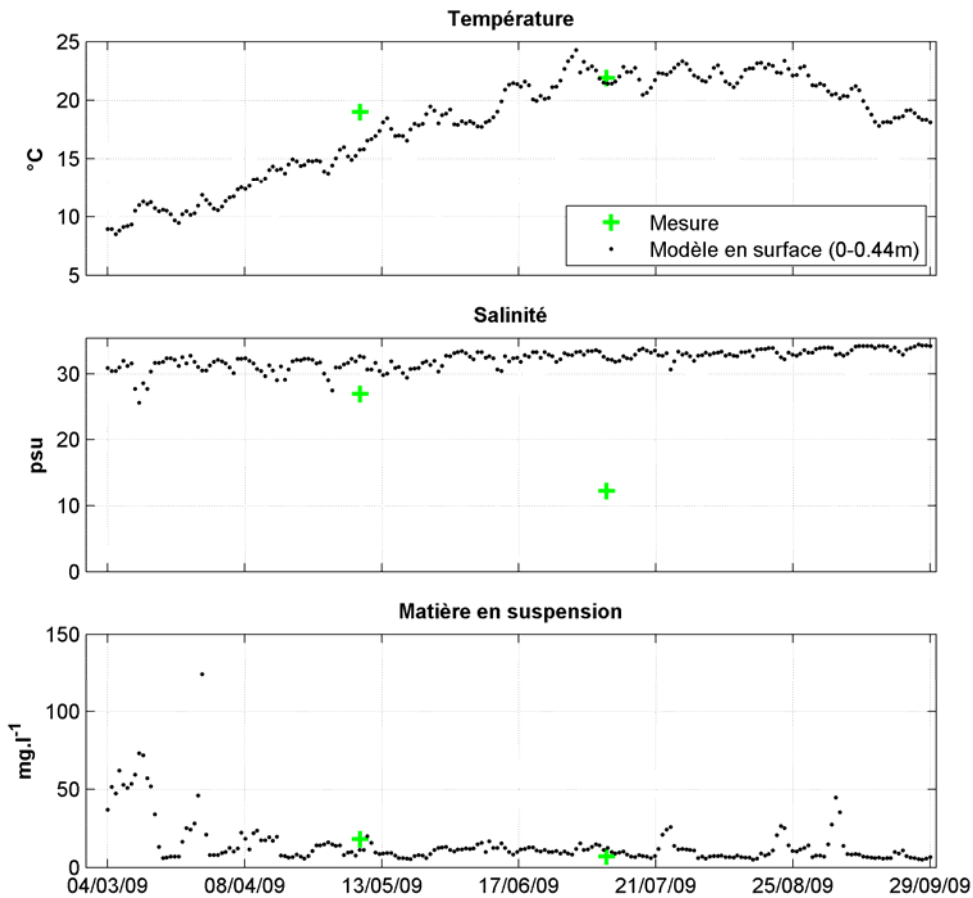
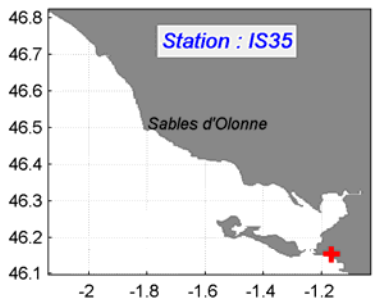
Le Tableau 13 liste le domaine modélisé les 10 stations provenant des réseaux de la DDTM17 utilisées pour les comparaisons entre les mesures et le modèle.

**Tableau 13 : Localisation des stations provenant du réseau de surveillance DCE (stations « IM ») et de la DDTM17 (stations « IS ») retenues pour la comparaison entre les mesures et le modèle pour l'année 2009 et pour les variables : température, salinité, matière en suspension, nitrate, ammonium et phosphate**

| Station | Type_suivi   | Lieu (numéro de planche)                           | longitude | latitude |
|---------|--------------|--|-----------|----------|
| IS_35   | Estuaires    | La Rochelle – Canal Maubec Vieux Port (planche 43) | -1.146    | 46.159   |
| IM_01   | Eaux marines | La Flotte en Ré - Baie de La Flotte (planche 44)   | -1.298    | 46.206   |
| IM_03   | Eaux marines | Les Portes en Ré - Trousse Chemise (planche 45)    | -1.480    | 46.228   |
| IM_05   | Eaux marines | Esnandes - Passe d'Esnandes (planche 46)           | -1.191    | 46.252   |
| IM_06   | Eaux marines | L'Houmeau - Port du Plomb (planche 47)             | -1.206    | 46.201   |
| IM_07   | Eaux marines | La Rochelle - Môle d'escale (planche 48)           | -1.241    | 46.159   |
| IM_08   | Eaux marines | La Rochelle - Tour Richelieu (planche 49)          | -1.167    | 46.149   |
| IM_20   | Eaux marines | Aytré - Bouée Ouest Champ de Tir (planche 50)      | -1.197    | 46.131   |
| IM_21   | Eaux marines | Aytré - Large du Platin (planche 51)               | -1.148    | 46.116   |
| IM_30   | Eaux marines | La Rochelle - Pointe Chef de Baie (planche 52)     | -1.213    | 46.143   |

La Planche 43 à la Planche 52 illustre les données simulées pour la couche de surface avec les données de mesure. Les comparaisons sont rendues délicates dans la mesure où il existe au maximum deux points de mesures pour chacune des stations. De plus, s'agissant des sels nutritifs, la précision des mesures ne permet pas de les comparer finement avec le modèle en raison de limites de détection élevées :  $16.12 \mu\text{mol.l}^{-1}$  pour le nitrate,  $2.77 \mu\text{mol.l}^{-1}$  pour l'ammonium et  $0.52 \mu\text{mol.l}^{-1}$  pour le phosphate.

Néanmoins, ces comparaisons visuelles montrent que le modèle reproduit les ordres de grandeurs mesurés pour les stations marines. La station estuarienne située au débouché du Canal de Maubec devant La Rochelle affiche pour le nitrate, l'ammonium et le phosphate une bonne correspondance avec les données mesurées.



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

Planche 43 : Comparaison des mesures DDTM17 avec le modèle pour l'année 2009



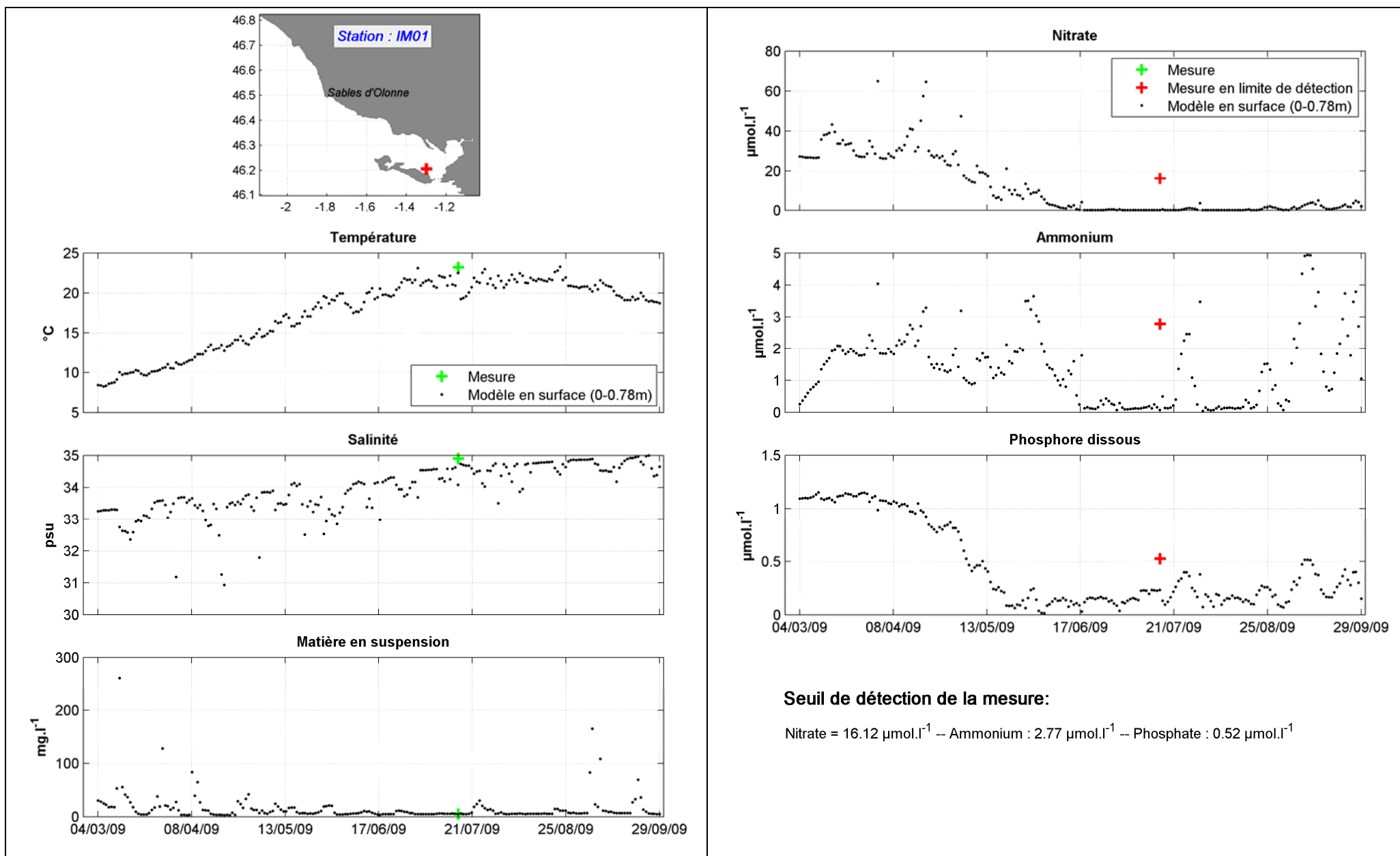
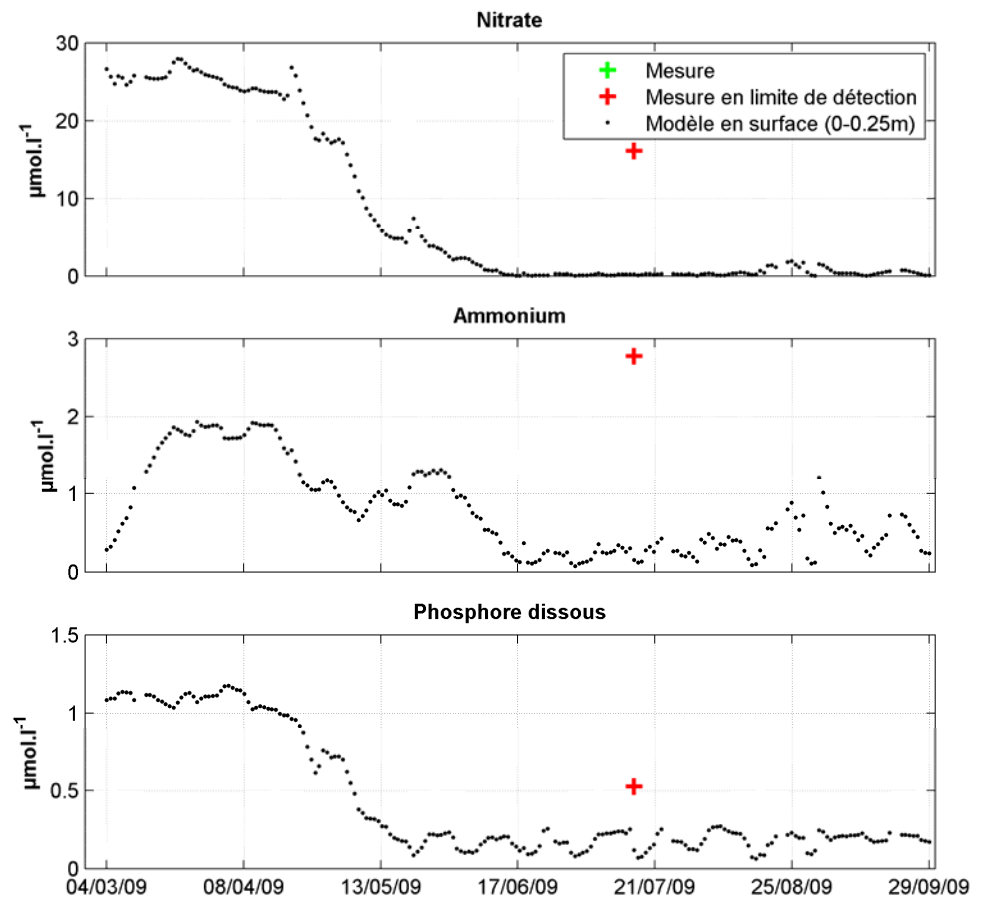
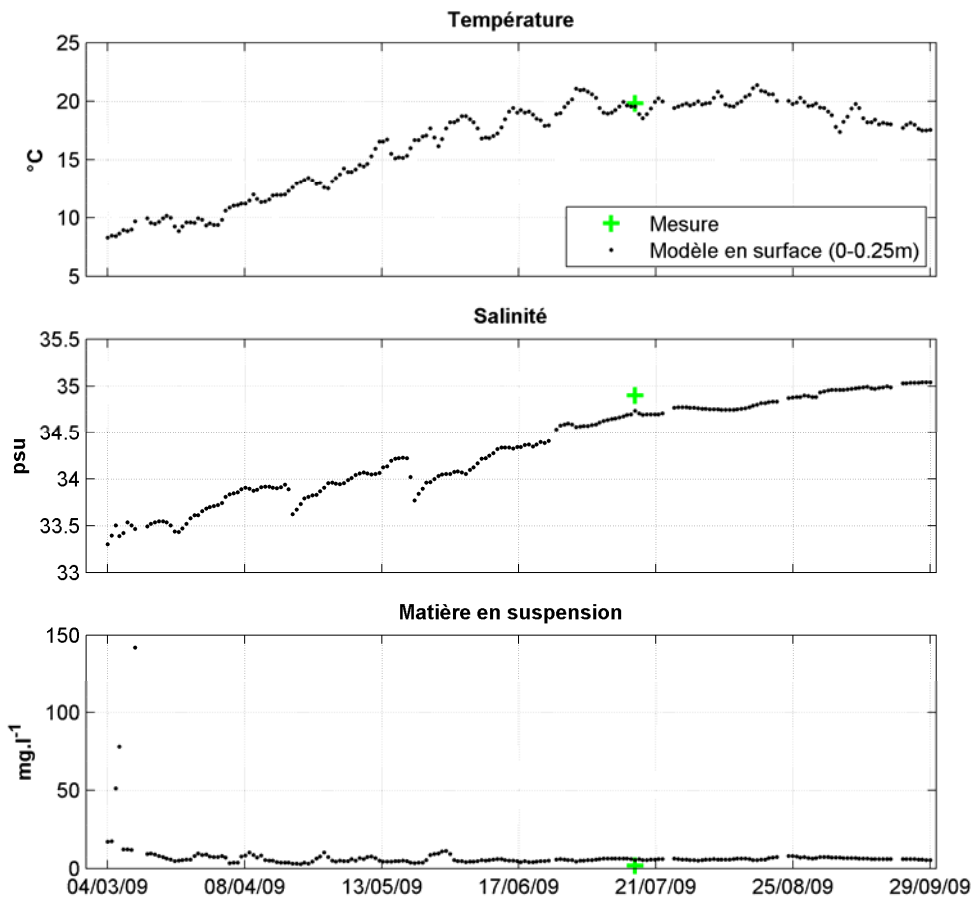
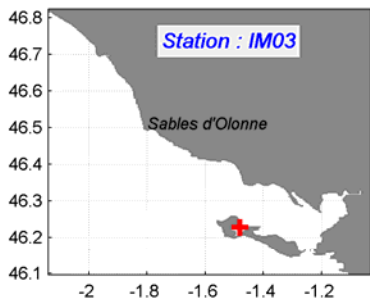


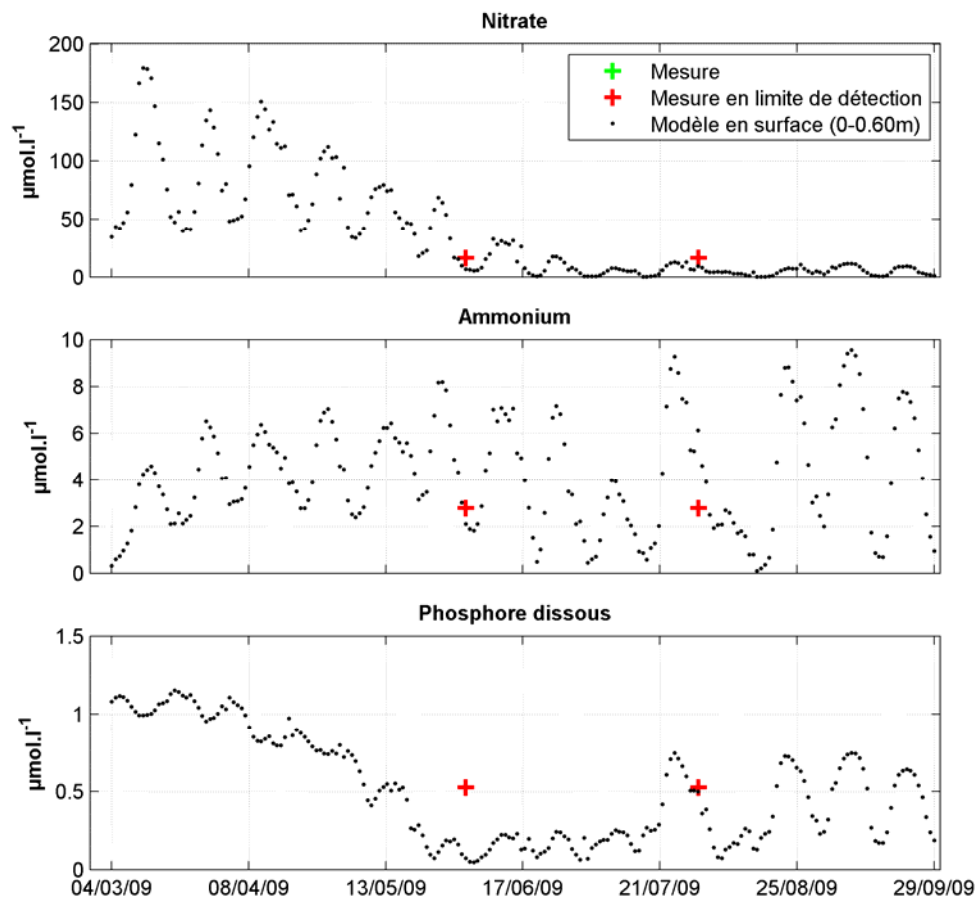
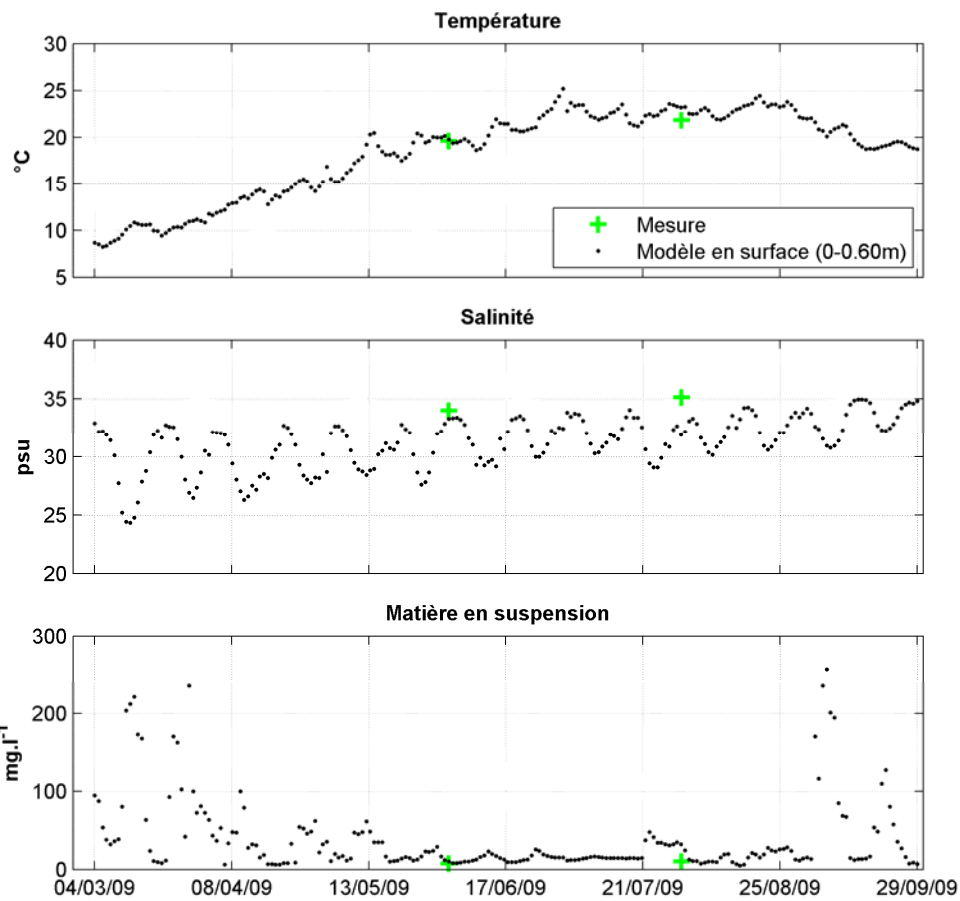
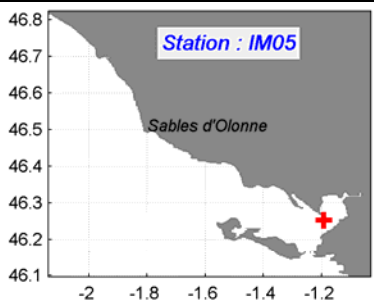
Planche 44 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009



**Seuil de détection de la mesure:**

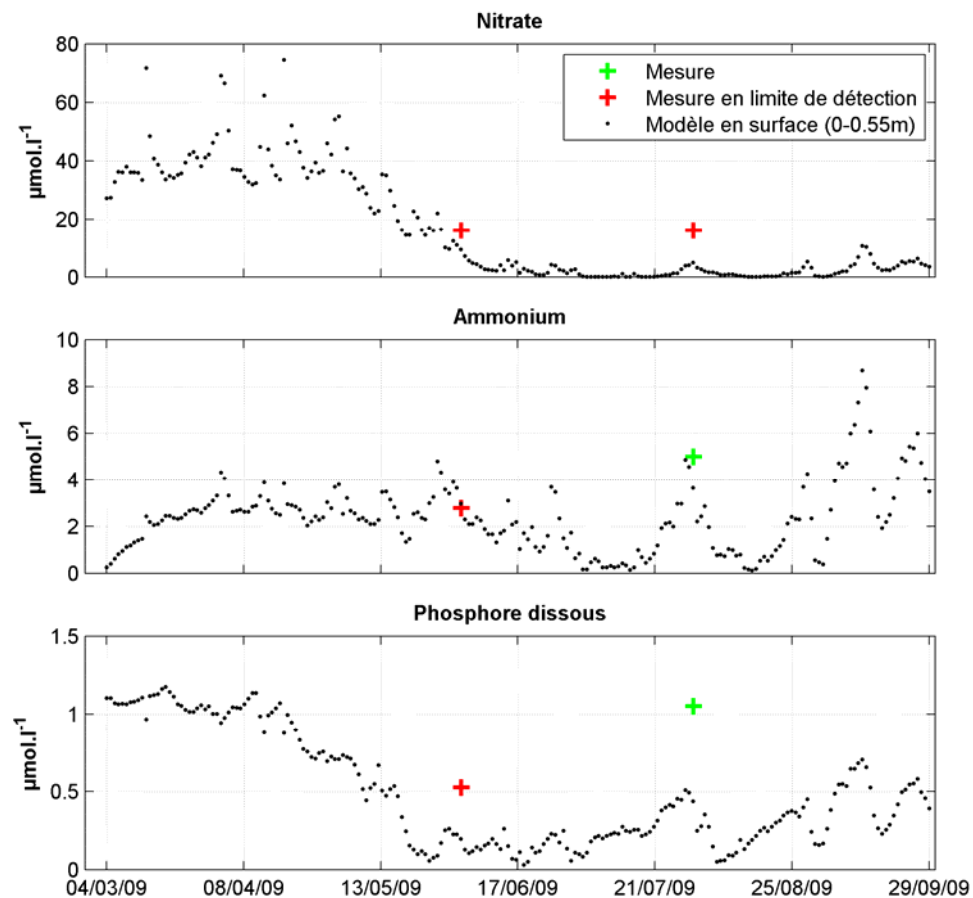
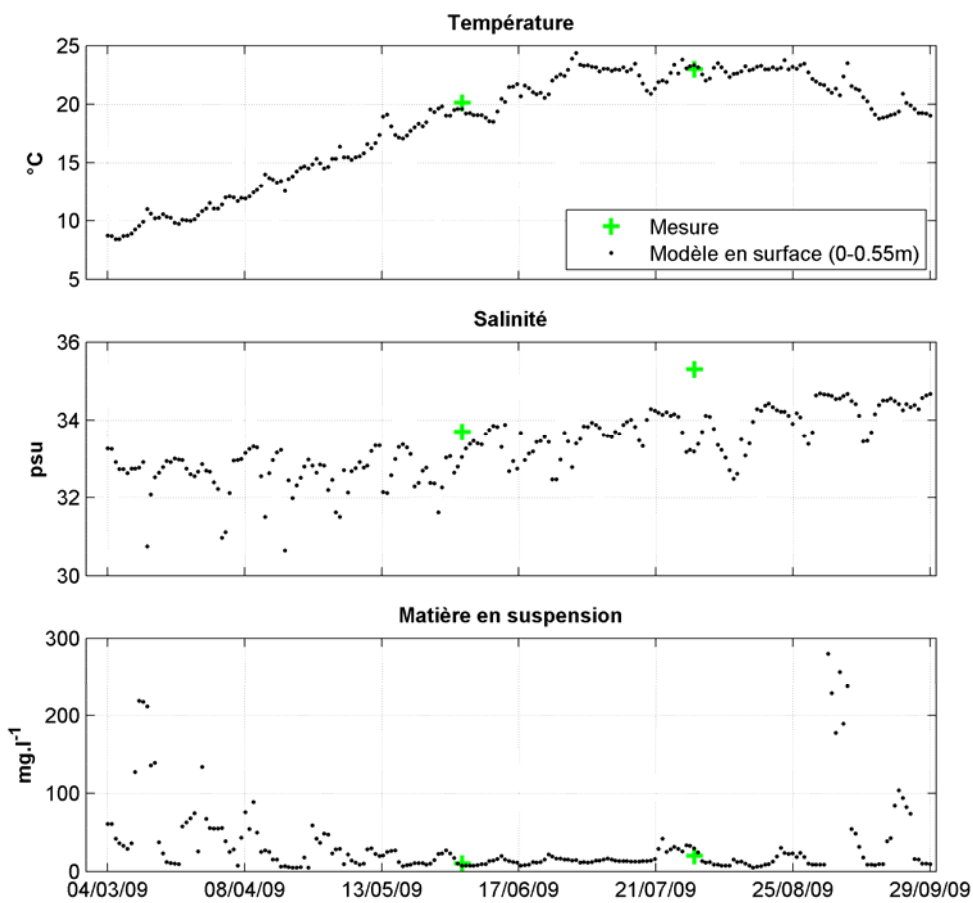
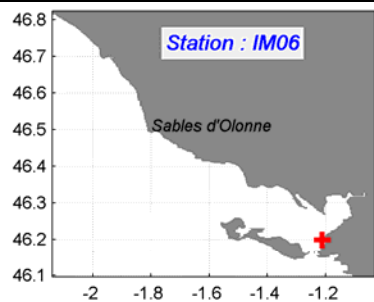
Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

Planche 45 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009



**Seuil de détection de la mesure:**

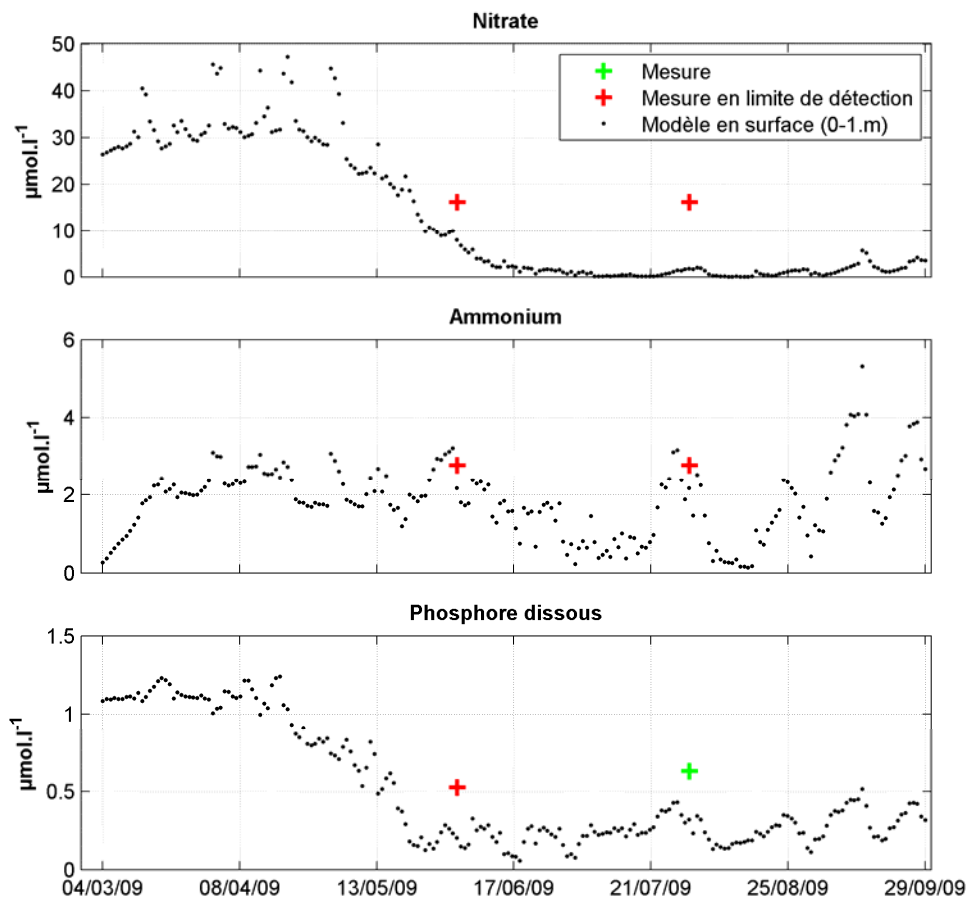
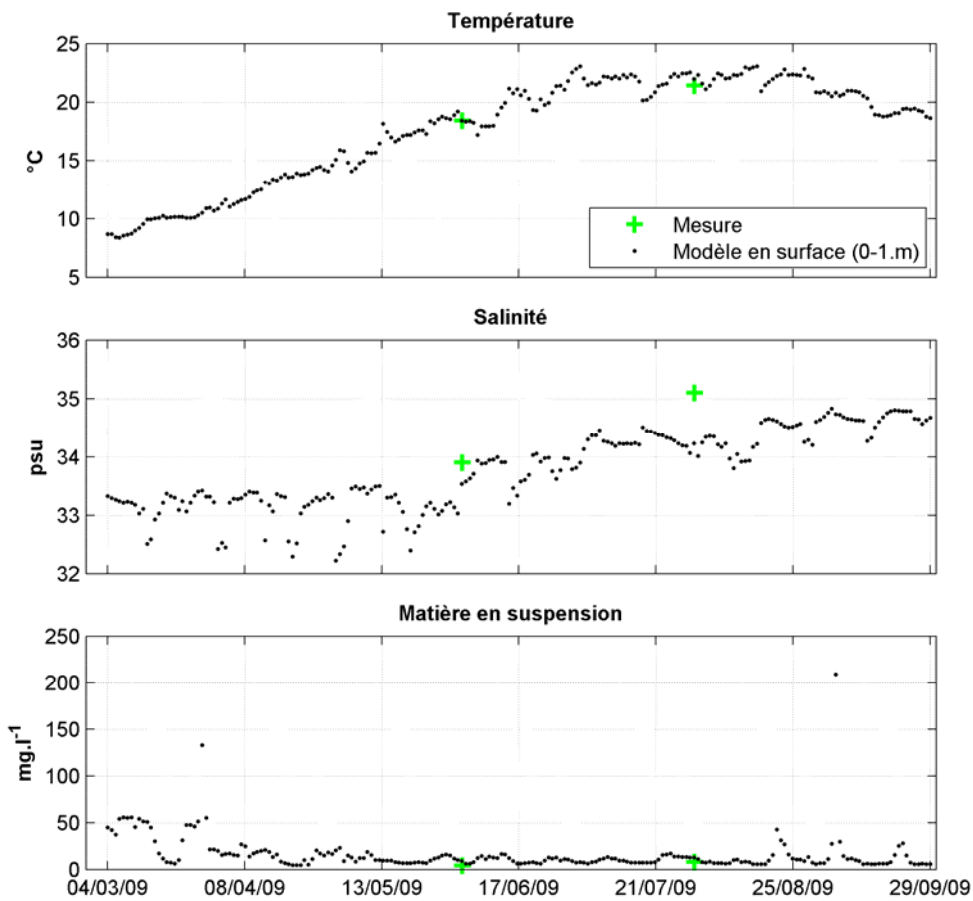
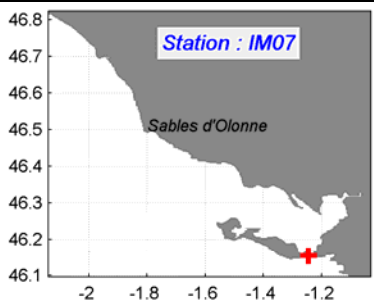
Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

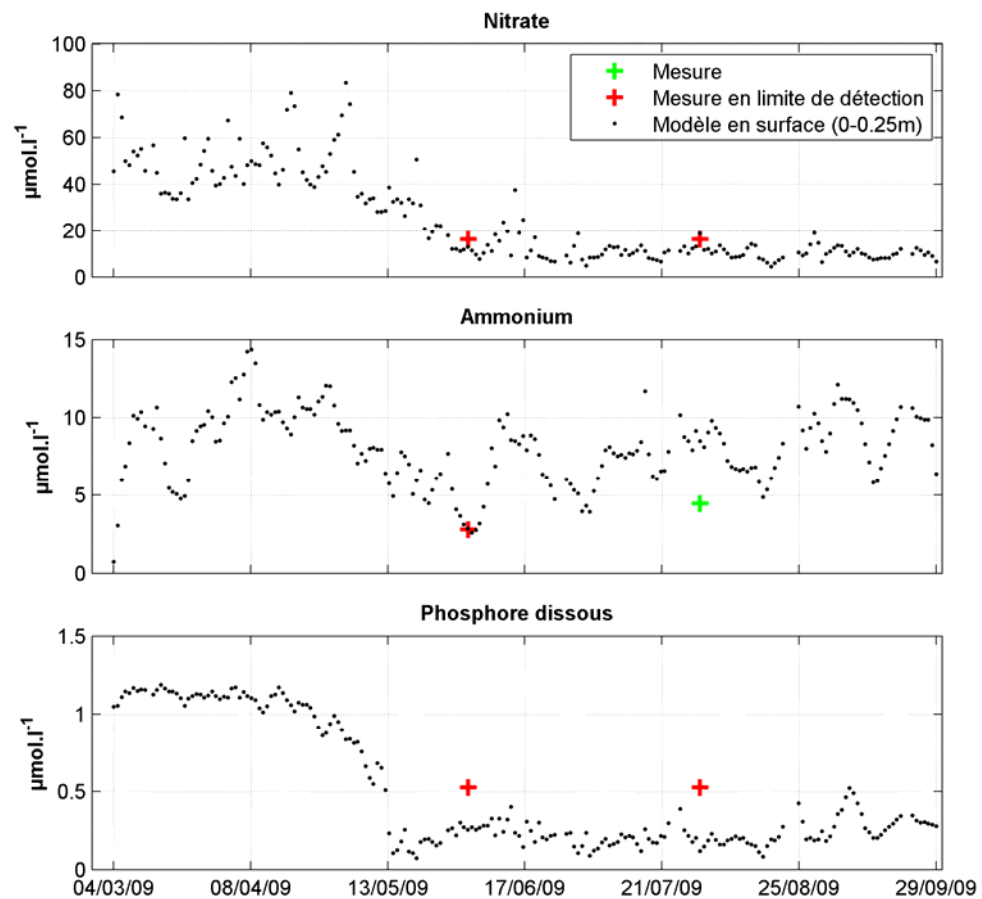
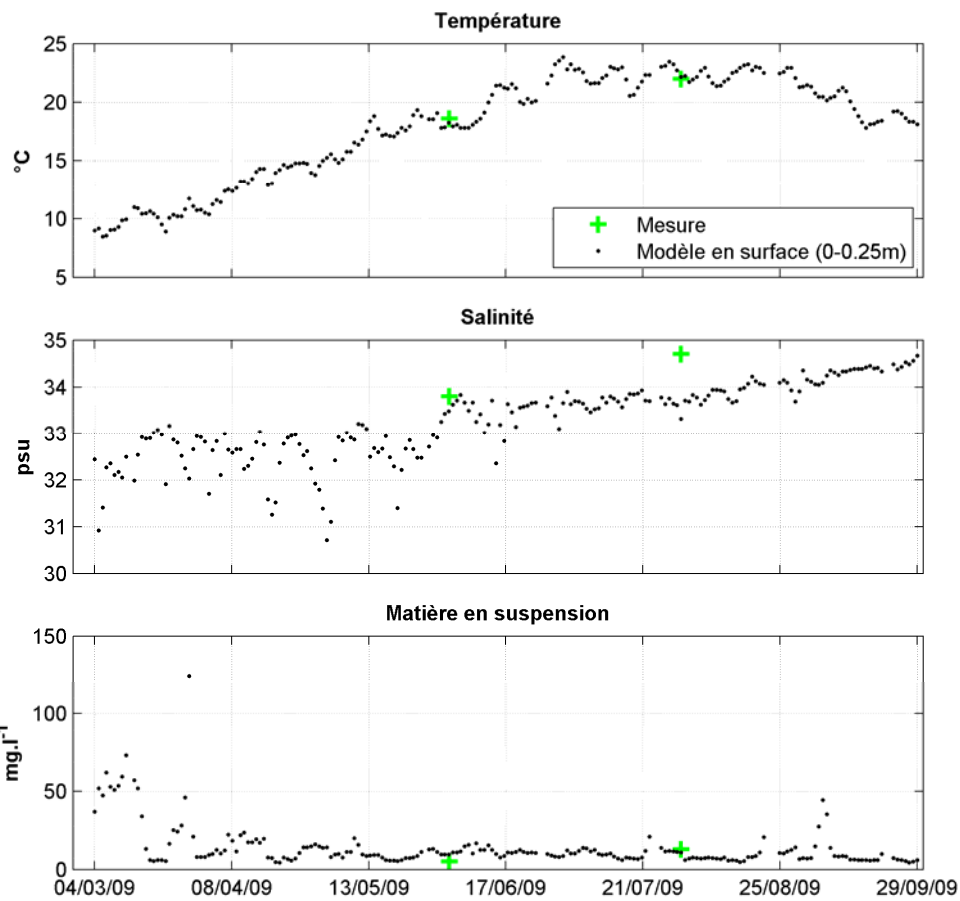
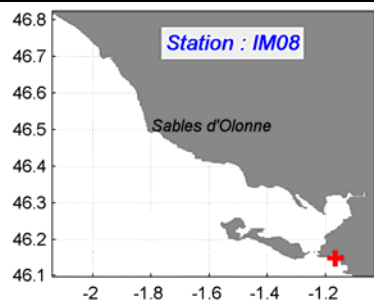
Planche 47 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 µmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 µmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 µmol.l<sup>-1</sup>

Planche 48 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

Planche 49 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009



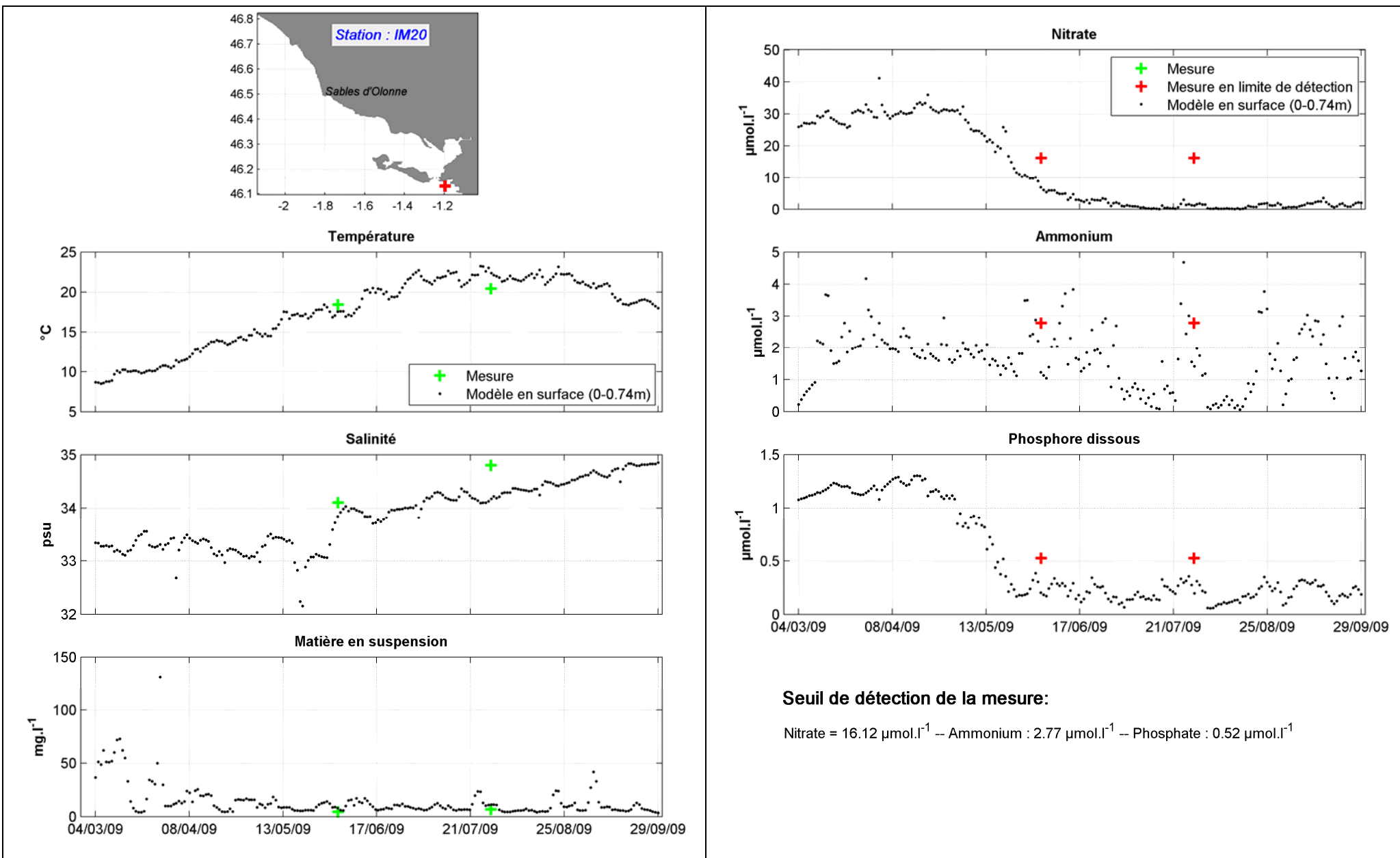


Planche 50 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009

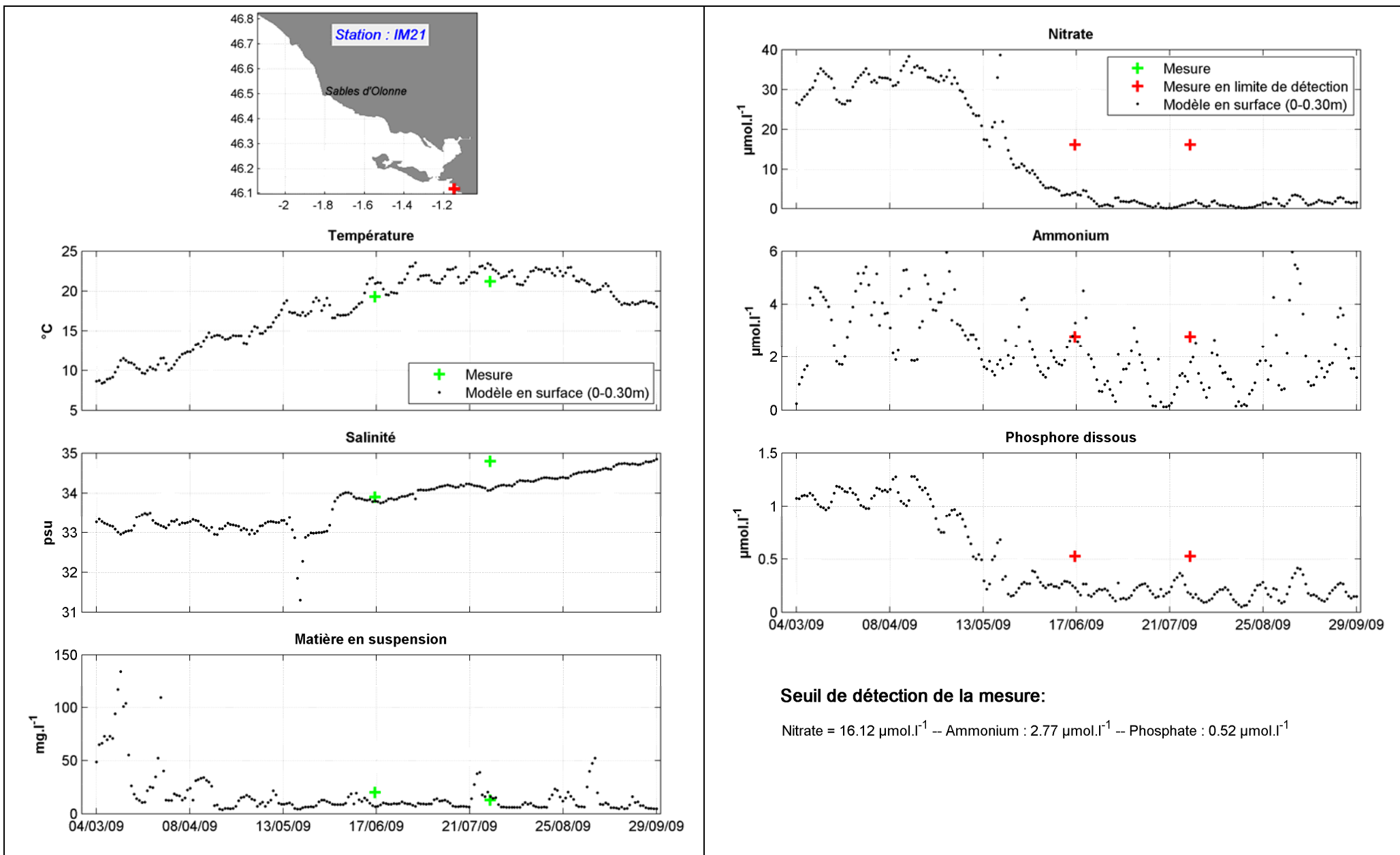
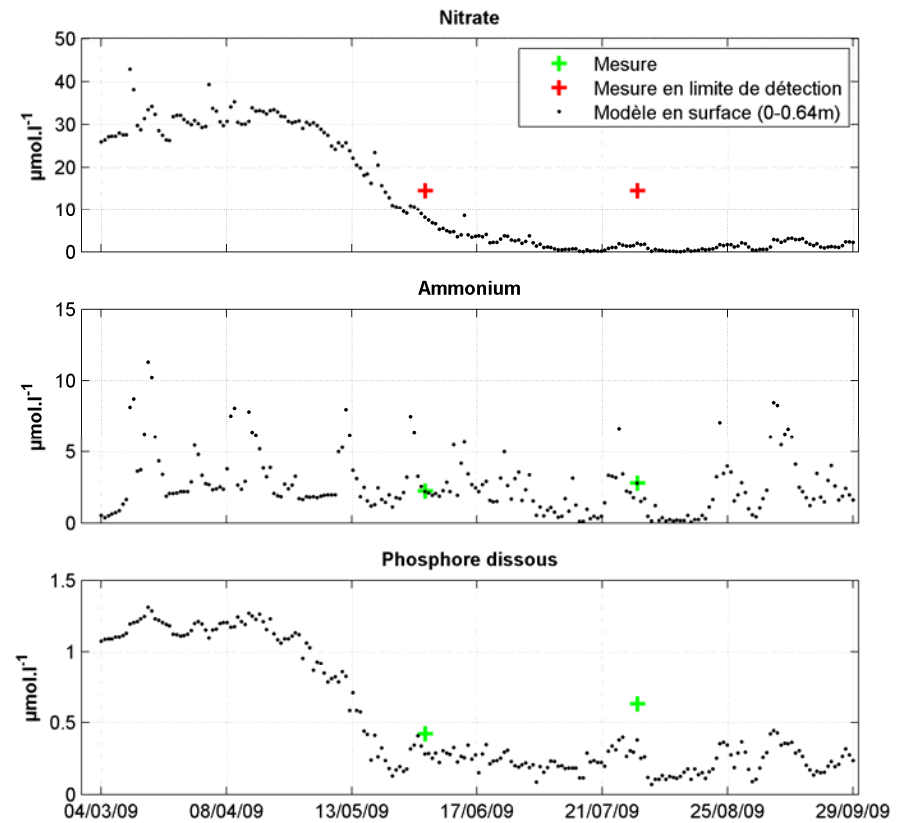
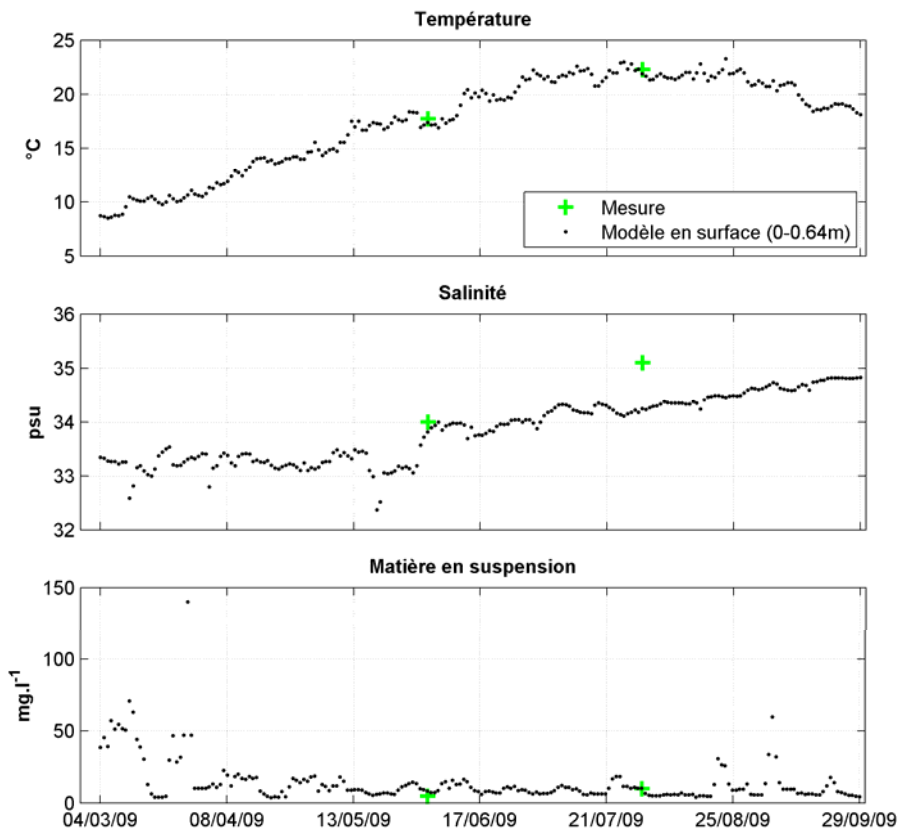
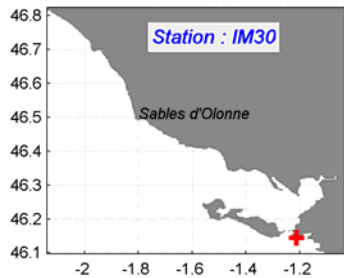


Planche 51 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

Planche 52 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2009

### 7.1.3. Matières en suspension et chlorophylle *a* observées par satellite

#### 7.1.3.1. Taux de matières en suspension

La Figure 66 présente sur la période de mai à septembre 2009 la comparaison entre la moyenne des matières en suspension de surface observées par satellite avec celles simulées par le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré ». Comme la cartographie de la MES moyenne simulée a été obtenue en prenant la valeur de la MES retenue dans le calcul de l'extinction lumineuse, c'est-à-dire celle qui correspond au maximum entre la valeur fournie par la MES issue directement du forçage satellitaire avec celle provenant des rivières, il est logique d'obtenir une bonne adéquation entre les mesures et le modèle.

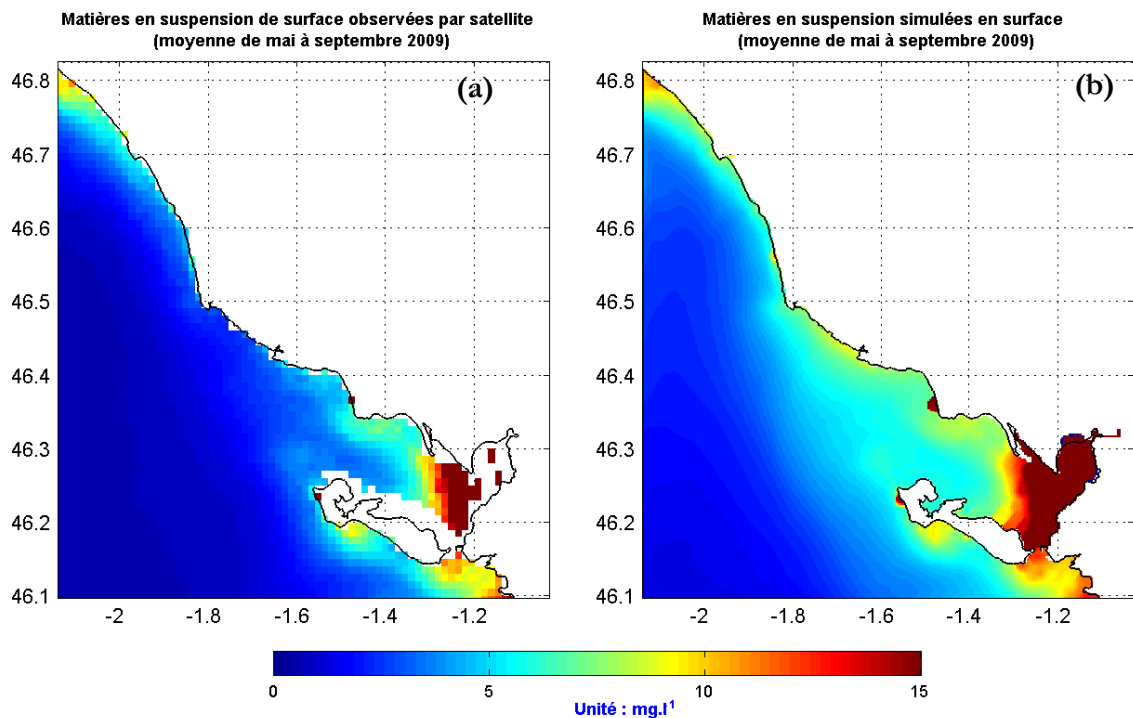


Figure 66 : Moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b)

La Figure 67 montre donc une bonne corrélation ( $R^2=0.93$ ) entre la donnée observée et simulée. Les principaux écarts se situent au niveau du panache de l'anse d'Aiguillon où la MES issue des rivières du Lay et de la Sèvre Niortaise domine la donnée satellitaire.

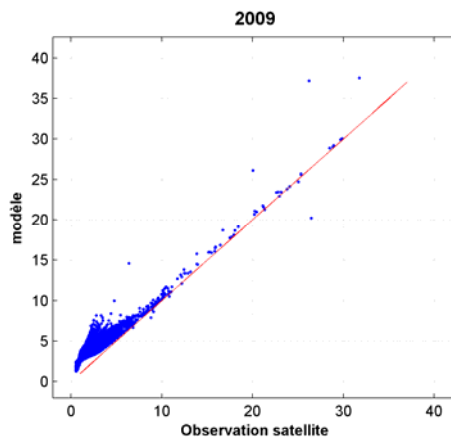


Figure 67 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 des matières en suspension (mg.l<sup>-1</sup>) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée)

### 7.1.3.2. Chlorophylle *a*

La Figure 68 propose une comparaison de la moyenne établie sur la période de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* observée par satellite avec celle simulée par le modèle en surface. Le modèle surestime largement la production phytoplanctonique au sein de l'anse d'Aiguillon. Plus au large (zone allant des Sables d'Olonne au sud de l'île de Ré), la surestimation de la production en phytoplancton est directement liée aux processus d'advection/dispersion de la matière initialement produite dans l'anse d'Aiguillon.

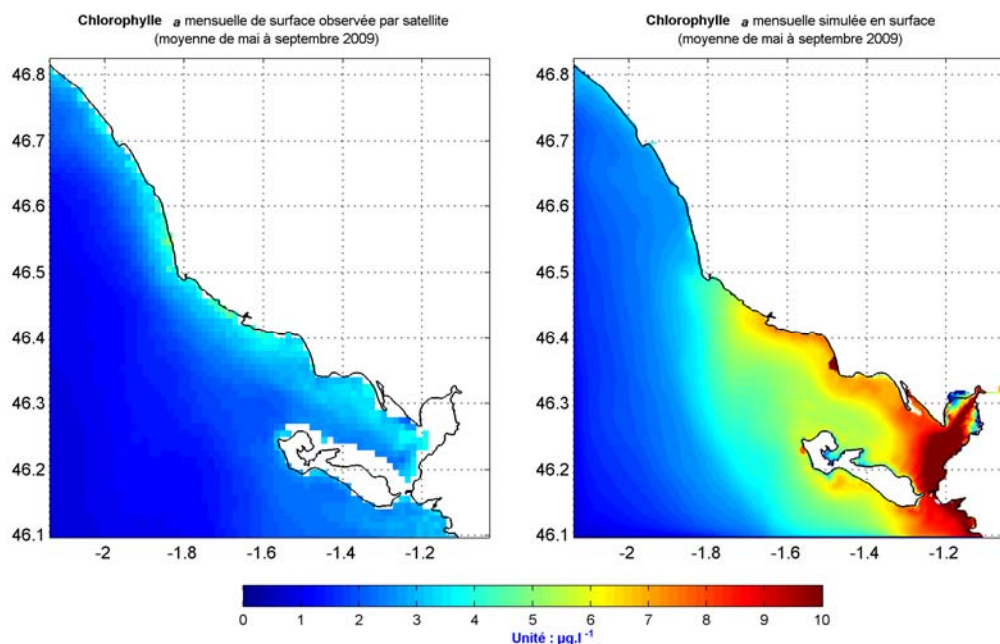


Figure 68 : Moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b)

La Figure 69 confirme que le modèle surestime la teneur moyenne en chlorophylle *a* par rapport aux données observées par satellite au sein de l'emprise du modèle de rang 1 « Sables d'Olonne – Ile de Ré ». Le coefficient de corrélation obtenu entre les mesures et modèle est de 0.56

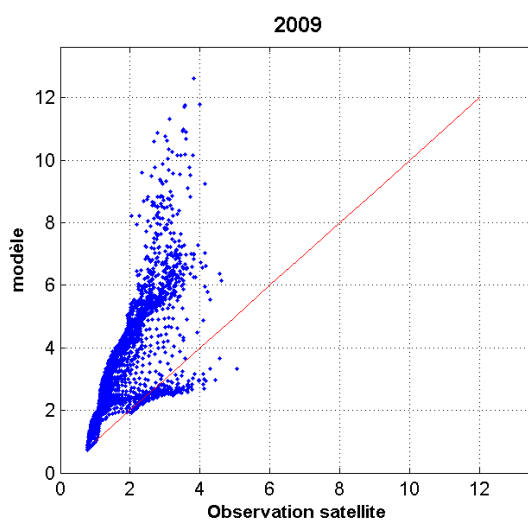


Figure 69 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2009 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée)

## 7.2. Année 2012

### 7.2.1. Données Quadriges<sup>2</sup>

Le diagramme de Taylor normalisé de la Figure 70 montre que la température de surface est bien reproduite par le modèle avec un coefficient de corrélation moyen ( $R$ ) pour l'ensemble des stations variant entre 0.97 et 0.99 et en moyenne égal à 0.97. L'erreur quadratique centrée (RMSE) est inférieure à 0.3 et l'écart type est inférieur à 20 % par rapport à celui des mesures. La salinité de surface est moins bien représentée par le modèle avec un coefficient de corrélation moyen  $R$  égal à 0.57 qui peut varier fortement selon la station considérée ( $0.20 < R < 0.94$ ). A l'exception de la station {074-P-016} pour laquelle on dispose de peu de points de mesures, l'erreur quadratique centrée (RMSE) est inférieure à 0.6.

Le biais normalisé pour la température de surface est en moyenne égal à 0.25 ce qui signifie que le biais entre les mesures et le modèle est égale à 25 % de l'écart type des mesures soit 0.45 °C. Pour la salinité de surface, le biais normalisé est supérieur à 1 ce qui induit un biais entre les mesures et le modèle supérieur à 100 % de l'écart type des mesures soit 1.17 PSU. Ce mauvais résultat est en très grande partie lié à la station {077-P-002} située sur une zone découvrante de la grande vasière de l'anse d'Aiguillon. A cela est associé aussi un décalage horaire important (2.91 heures) entre les heures de prélèvement et les heures de sortie du modèle.

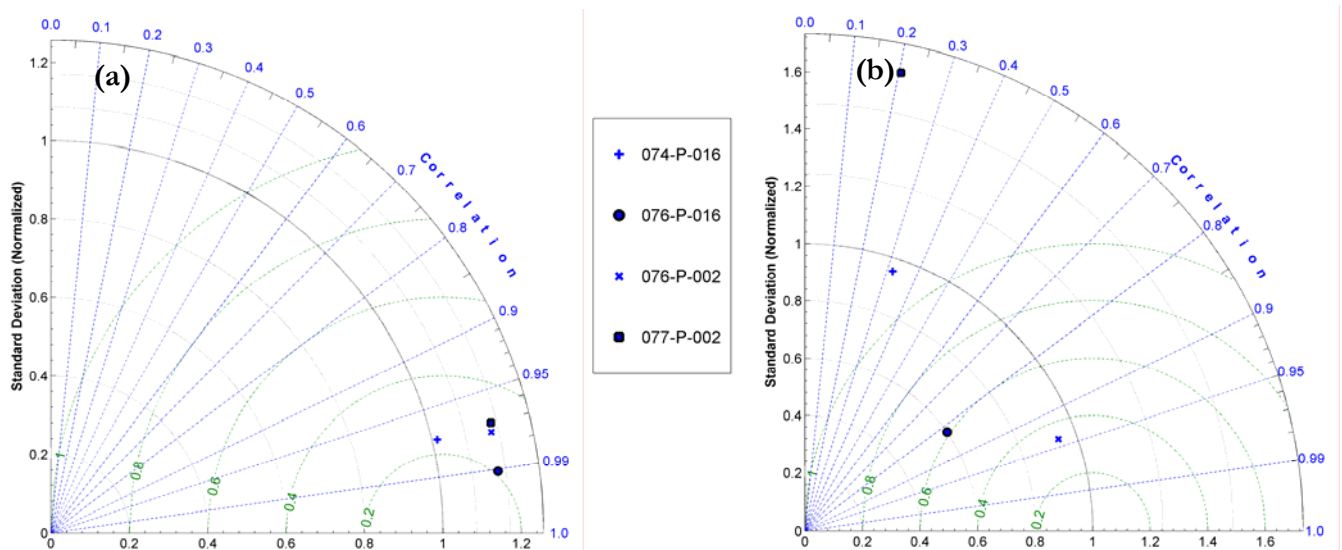


Figure 70 : Diagramme de Taylor associé à la comparaison modèle/mesures Quadriges pour la température (a) et la salinité (b). Les valeurs en bleu correspondent au coefficient de corrélation ( $R$ ), les valeurs en vert correspondent à l'erreur quadratique centrée (RMSE).



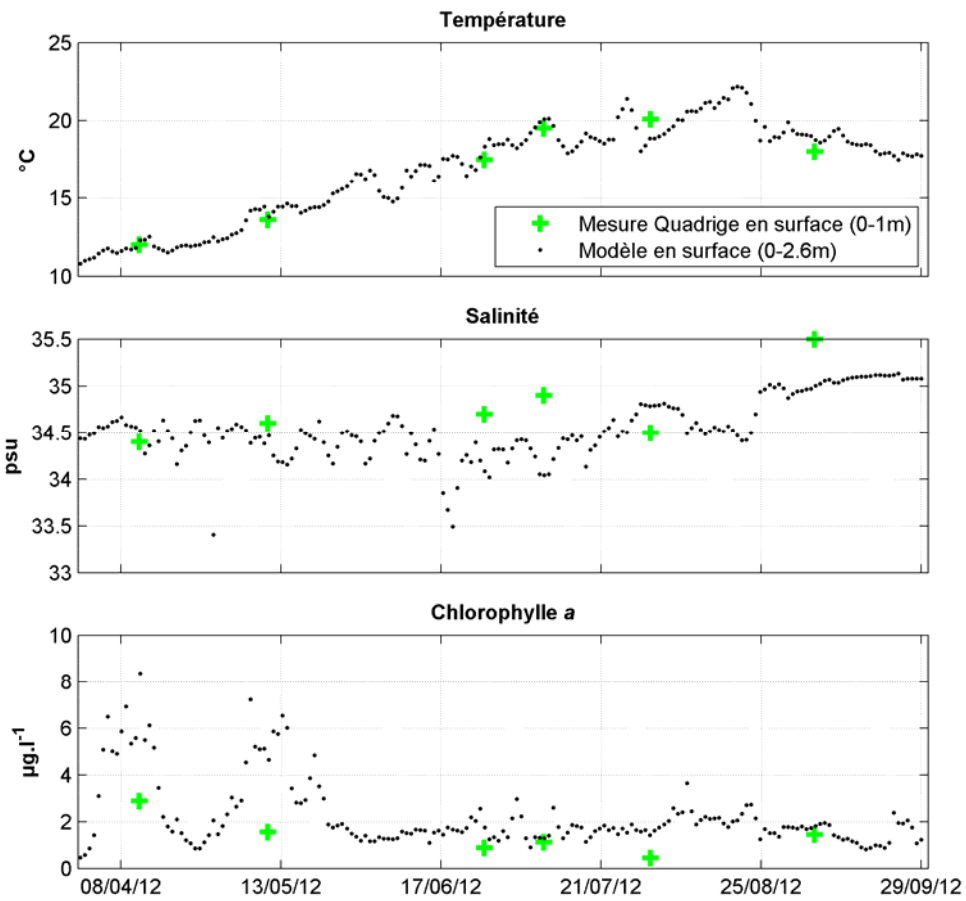
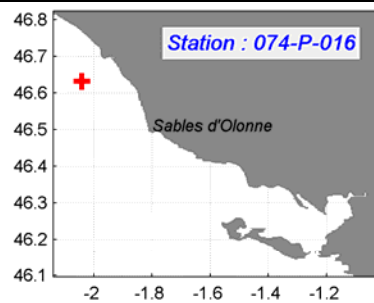


Planche 53 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

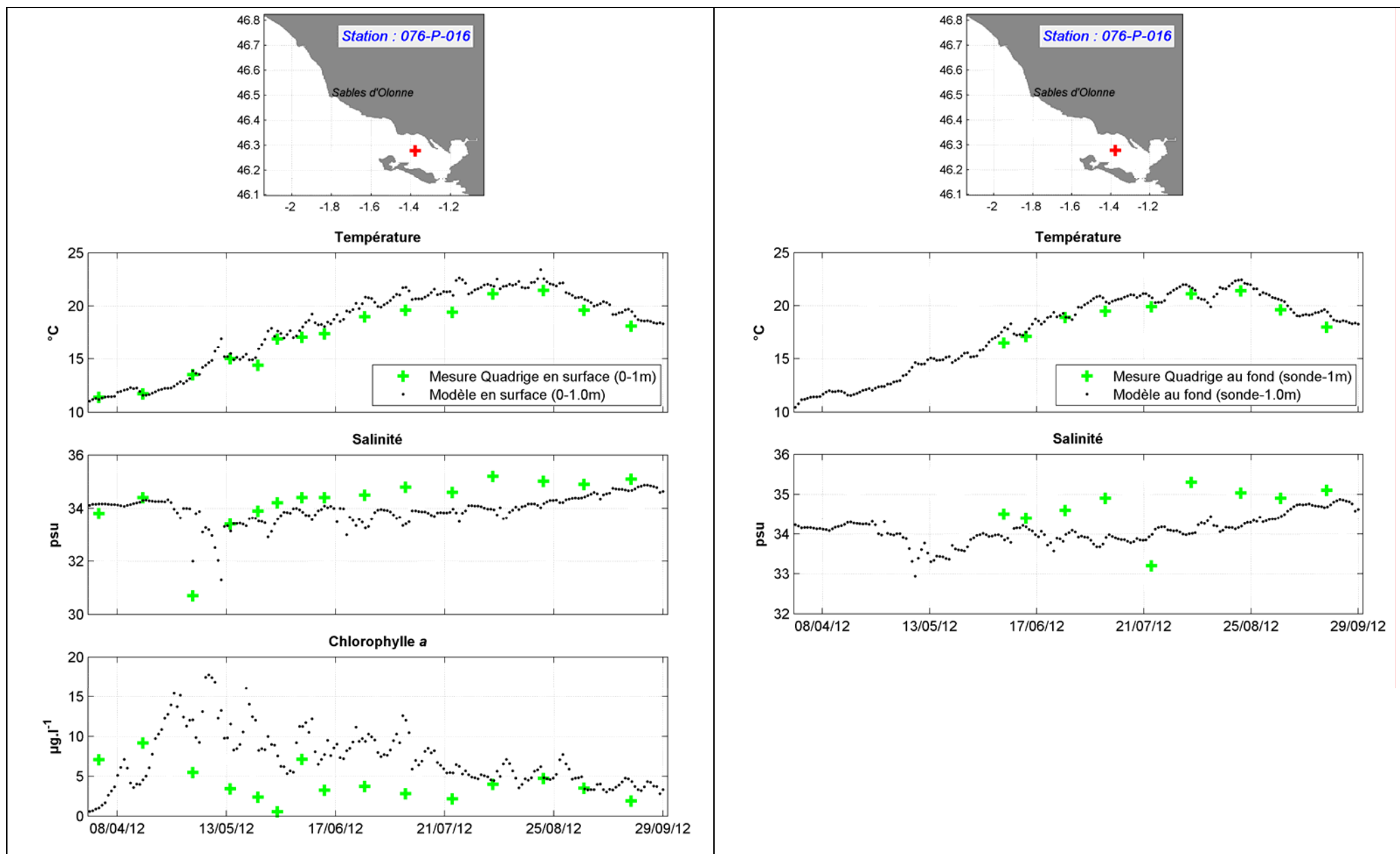


Planche 54 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

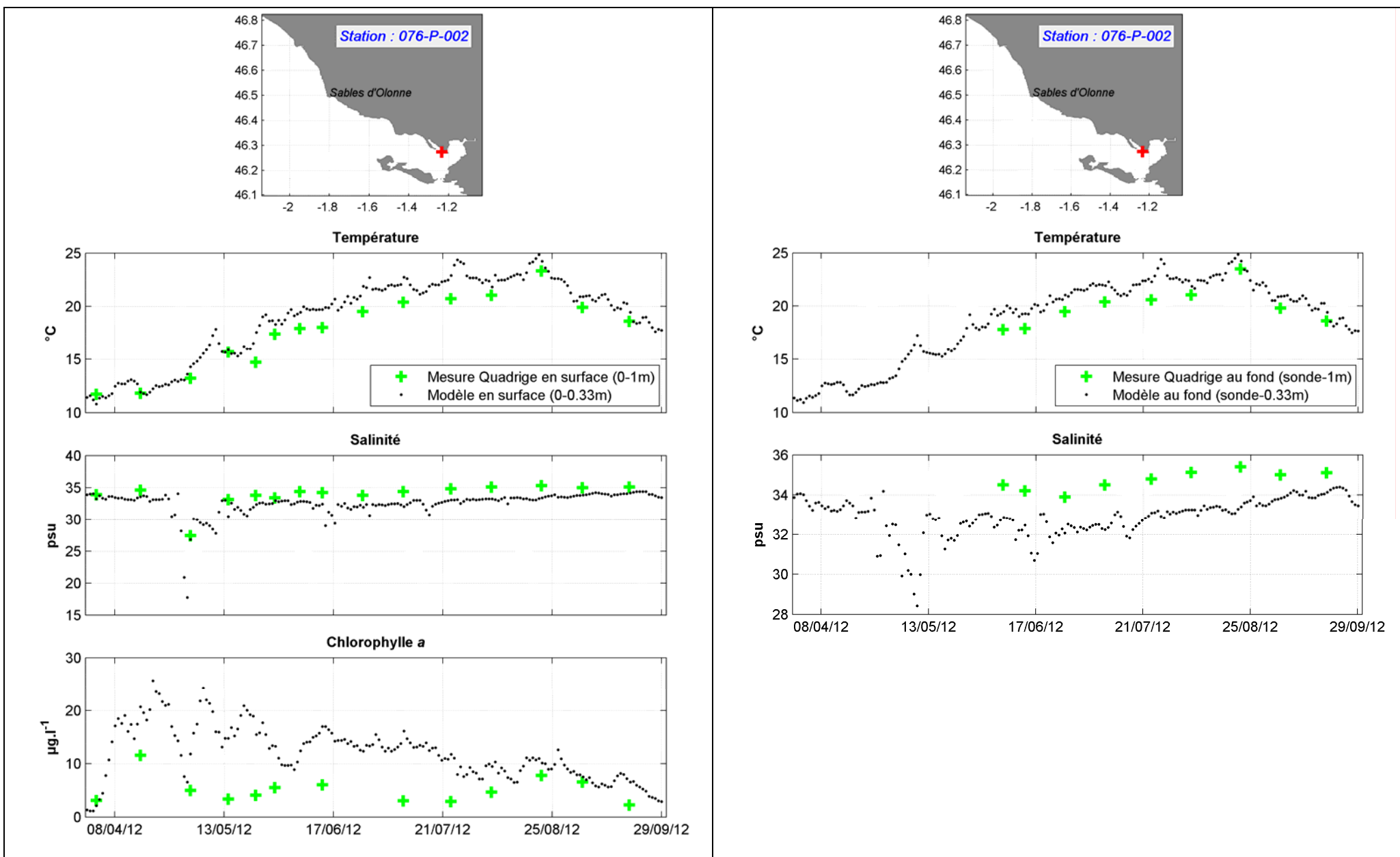


Planche 55 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

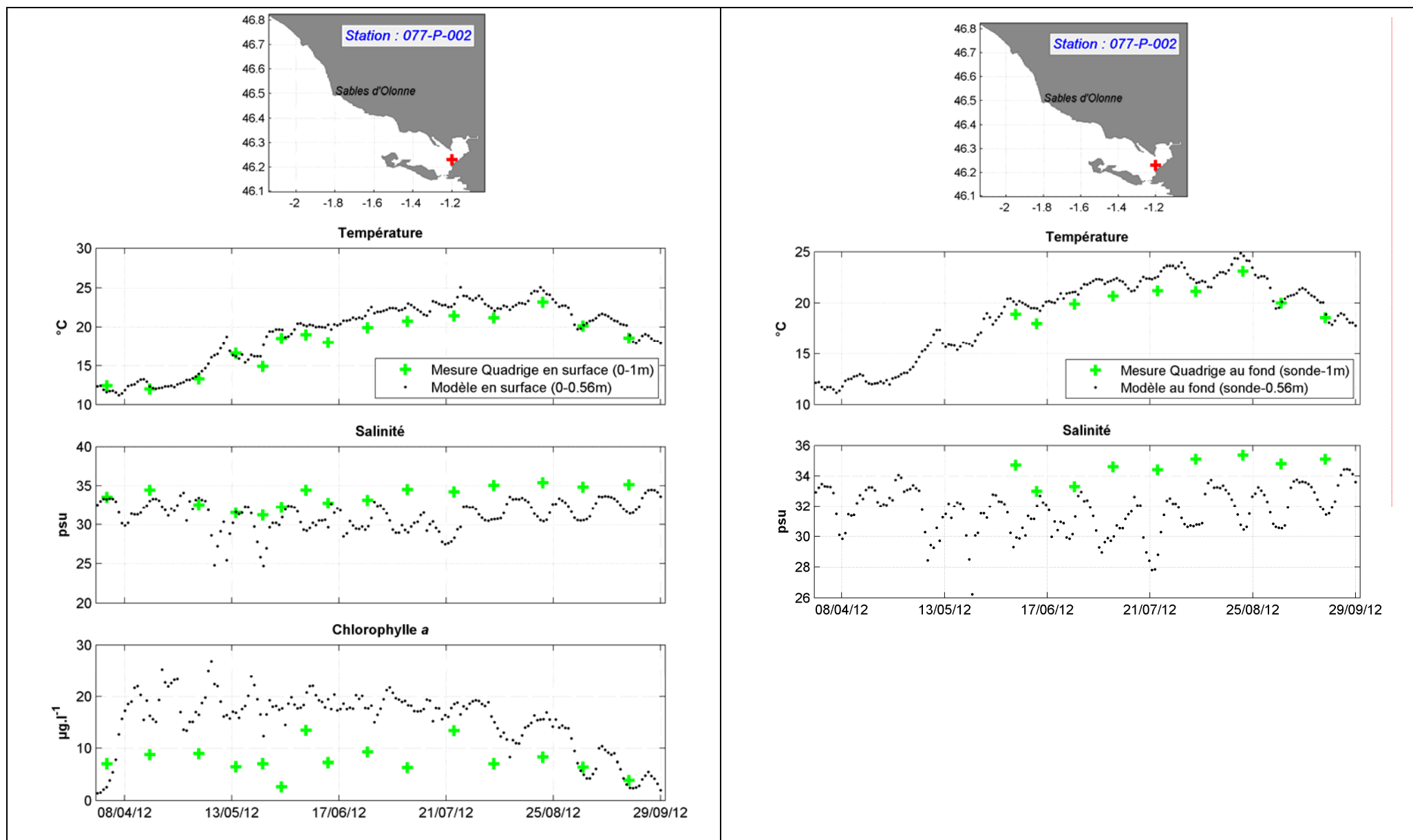


Planche 56 : Comparaison des mesures issues de la banque Quadrigé<sup>2</sup> avec le modèle pour l'année 2012

## 7.2.2. Données DDTM17

Le Tableau 13 liste, sur le domaine modélisé, les 10 stations provenant des réseaux de la DDTM17 utilisées pour les comparaisons entre les mesures et le modèle.

**Tableau 14 : Localisation des stations provenant du réseau de surveillance DCE (stations « IM ») et de la DDTM17 (stations « IS ») retenues pour la comparaison entre les mesures et le modèle pour l'année 2012 et pour les variables : température, salinité, matière en suspension, nitrate, ammonium et phosphate**

| Station | Type_suivi   | Lieu (numéro de planche)                                   | longitude | latitude |
|---------|--------------|--|-----------|----------|
| IS_86   | Estuaires    | Sèvre Niortaise Marans– Ecluse des Entreneaux (planche 57) | -1.146    | 46.159   |
| IM_01   | Eaux marines | La Flotte en Ré - Baie de La Flotte (planche 58)           | -1.298    | 46.206   |
| IM_03   | Eaux marines | Les Portes en Ré - Trousse Chemise (planche 59)            | -1.480    | 46.228   |
| IM_05   | Eaux marines | Esnandes - Passe d'Esnandes (planche 60)                   | -1.191    | 46.252   |
| IM_06   | Eaux marines | L'Houmeau - Port du Plomb (planche 61)                     | -1.206    | 46.201   |
| IM_07   | Eaux marines | La Rochelle - Môle d'escale (planche 62)                   | -1.241    | 46.159   |
| IM_08   | Eaux marines | La Rochelle - Tour Richelieu (planche 63)                  | -1.167    | 46.149   |
| IM_20   | Eaux marines | Aytré - Bouée Ouest Champ de Tir (planche 64)              | -1.197    | 46.131   |
| IM_21   | Eaux marines | Aytré - Large du Platin (planche 65)                       | -1.148    | 46.116   |
| IM_30   | Eaux marines | La Rochelle - Pointe Chef de Baie (planche 66)             | -1.213    | 46.143   |

La Planche 53 à la Planche 66 présente les données simulées pour la couche de surface avec les données de mesure pour l'année 2012. Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'année 2009 (cf. 7.1.2), l'évaluation de la qualité de l'ajustement entre les mesures et le modèle est rendue délicate en raison du faible nombre de points de mesures pour chacune des stations et de la précision des mesures s'agissant des sels nutritifs (limites de détection élevées : 16.12  $\mu\text{mol.l}^{-1}$  pour le nitrate, 2.77  $\mu\text{mol.l}^{-1}$  pour l'ammonium et 0.52  $\mu\text{mol.l}^{-1}$  pour le phosphate).

La station estuarienne « IS85 » est intéressante du point de vue de l'évolution des sels nutritifs car elle se situe au débouché de la Sèvre Niortaise (station à très forte dessalure). En ce point, le modèle reproduit correctement les données mesurées ce qui permet entre autres de conclure que les données de forçage (débit et concentrations) utilisées pour la Sèvre Niortaise sont représentatives.

Concernant les stations marines, si les ordres de grandeurs mesurés pour le nitrate, l'ammonium et le phosphate paraissent cohérents par rapport aux données simulées, le faible nombre de points échantillonnés ainsi que leur précision de mesure ne permet pas de conclure davantage.

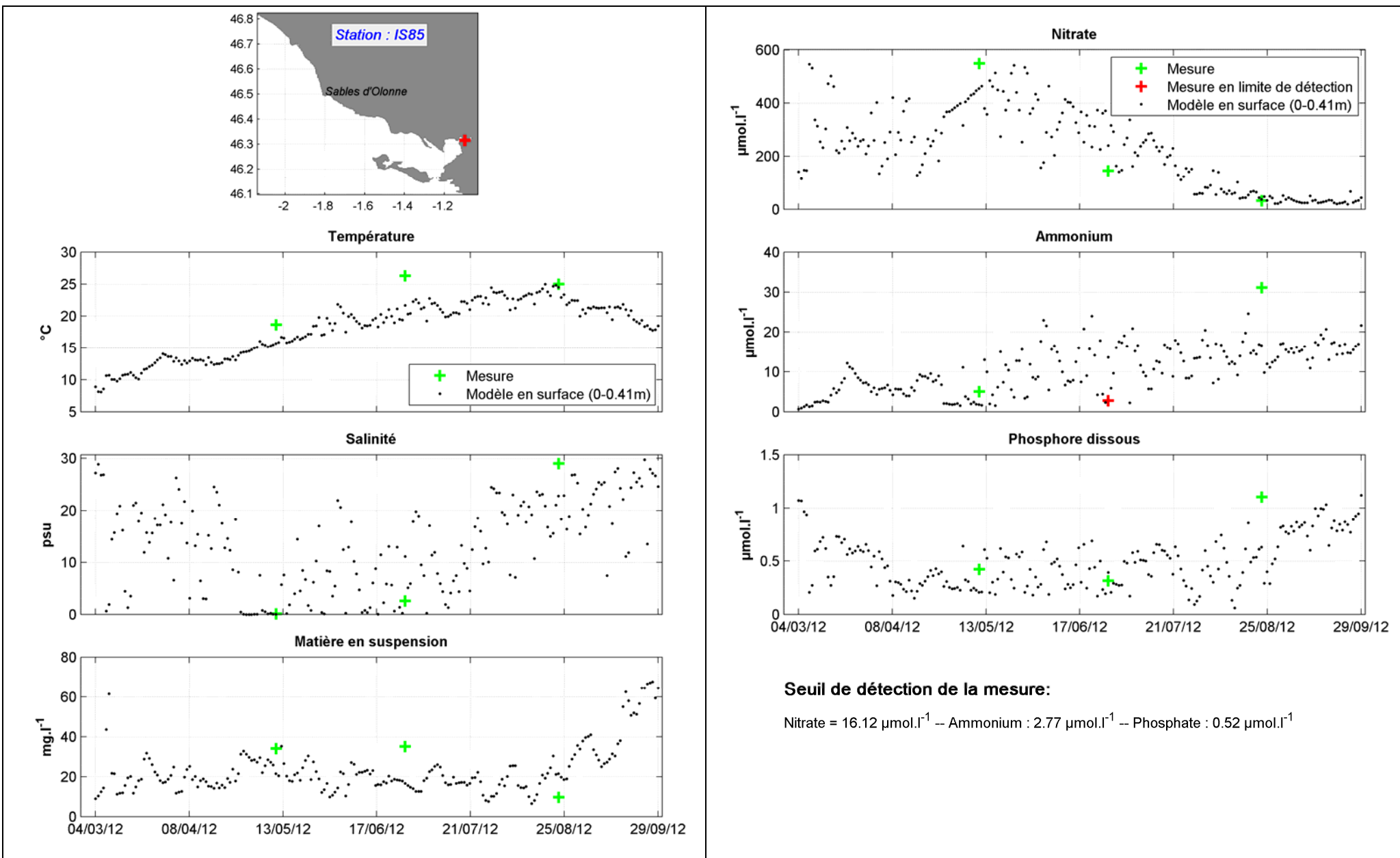


Planche 57 : Comparaison des mesures DDTM17 avec le modèle pour l'année 2012



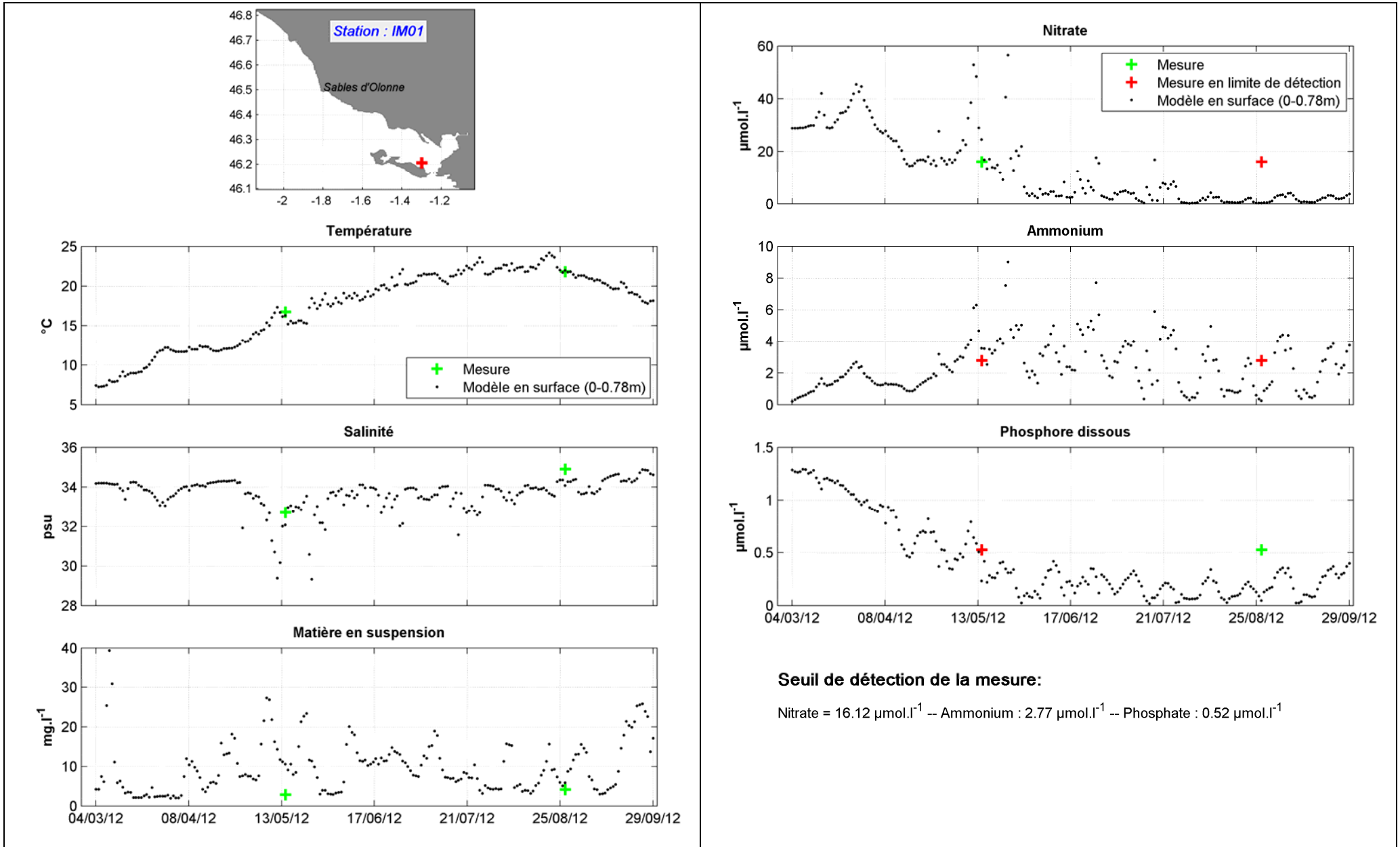
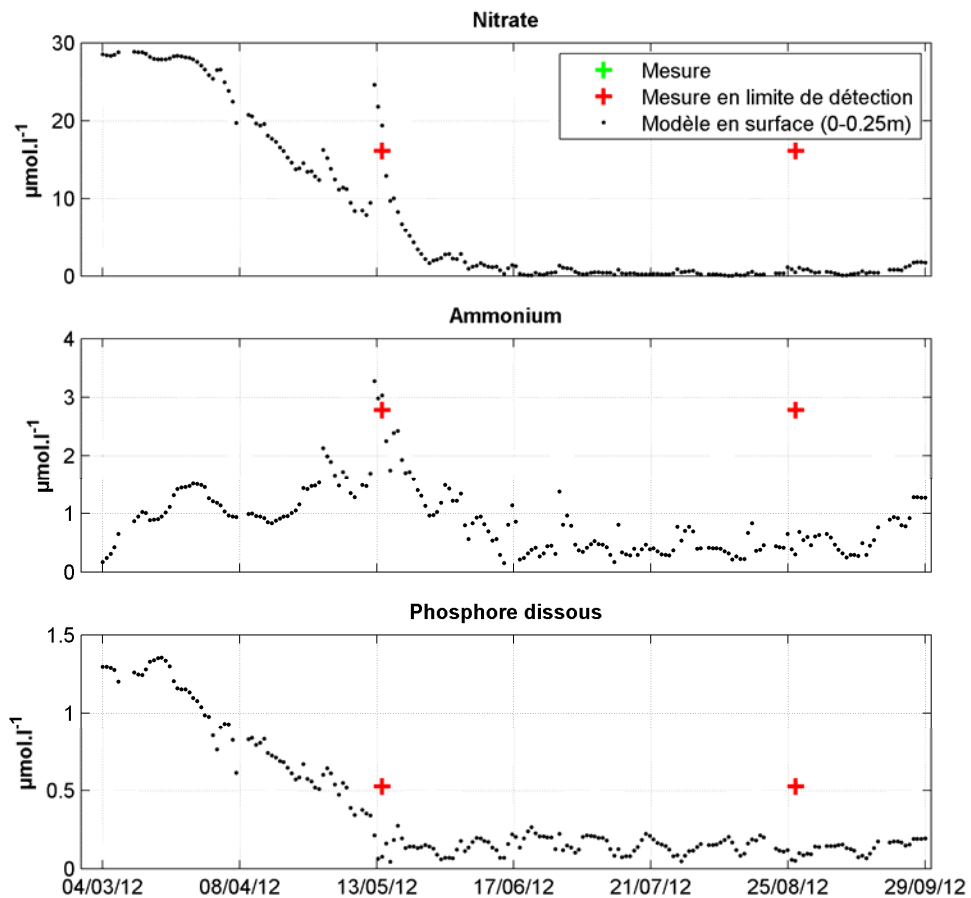
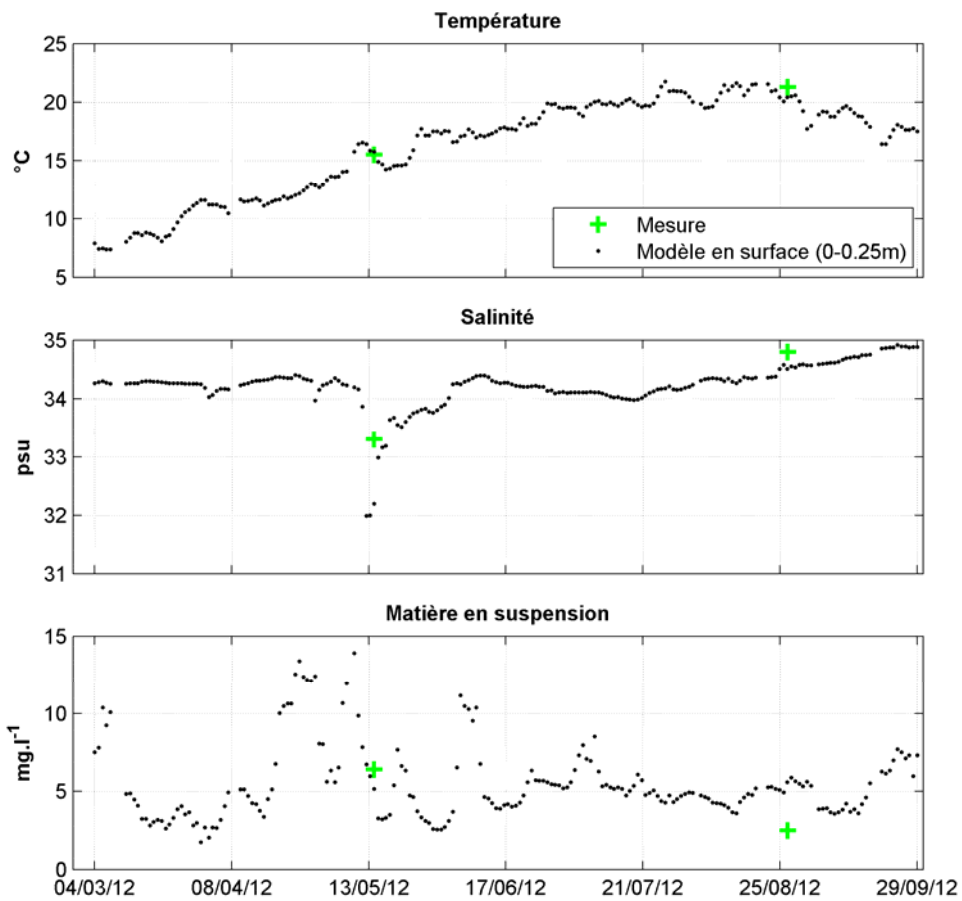
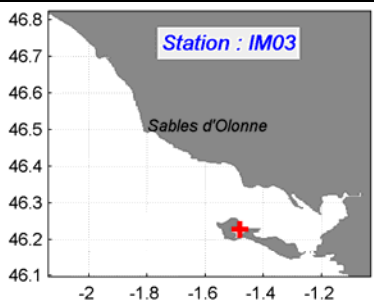


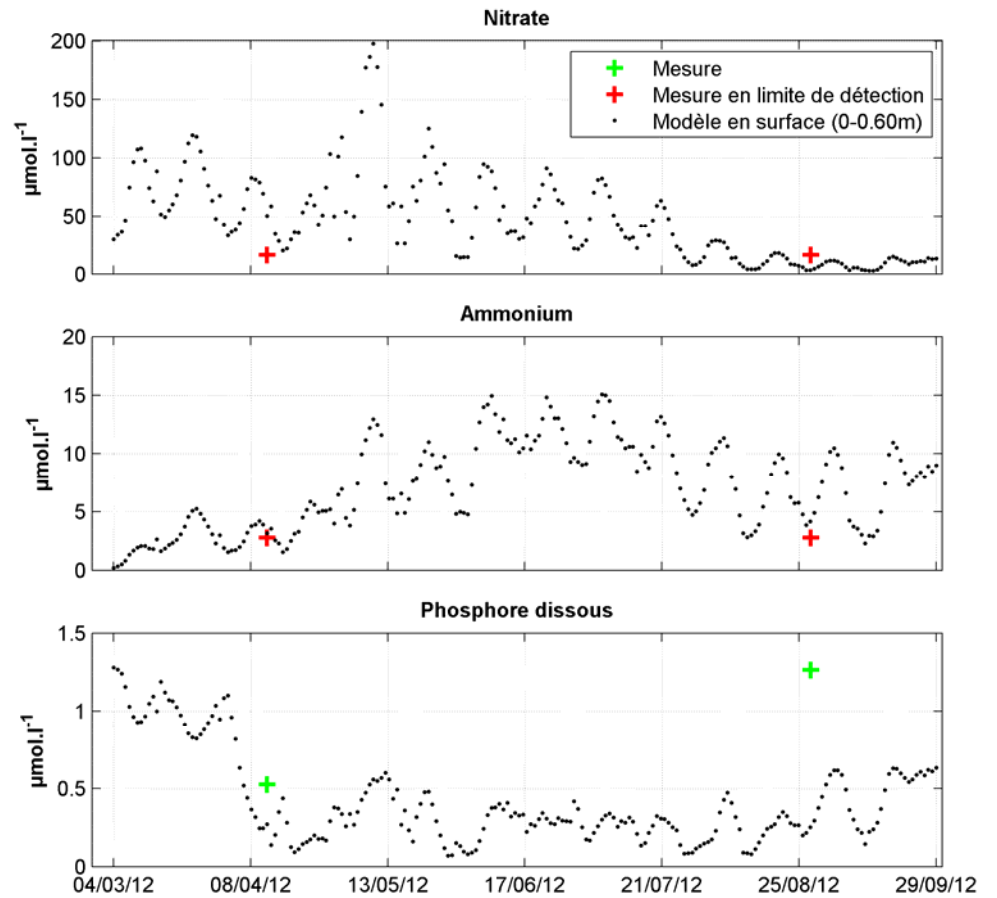
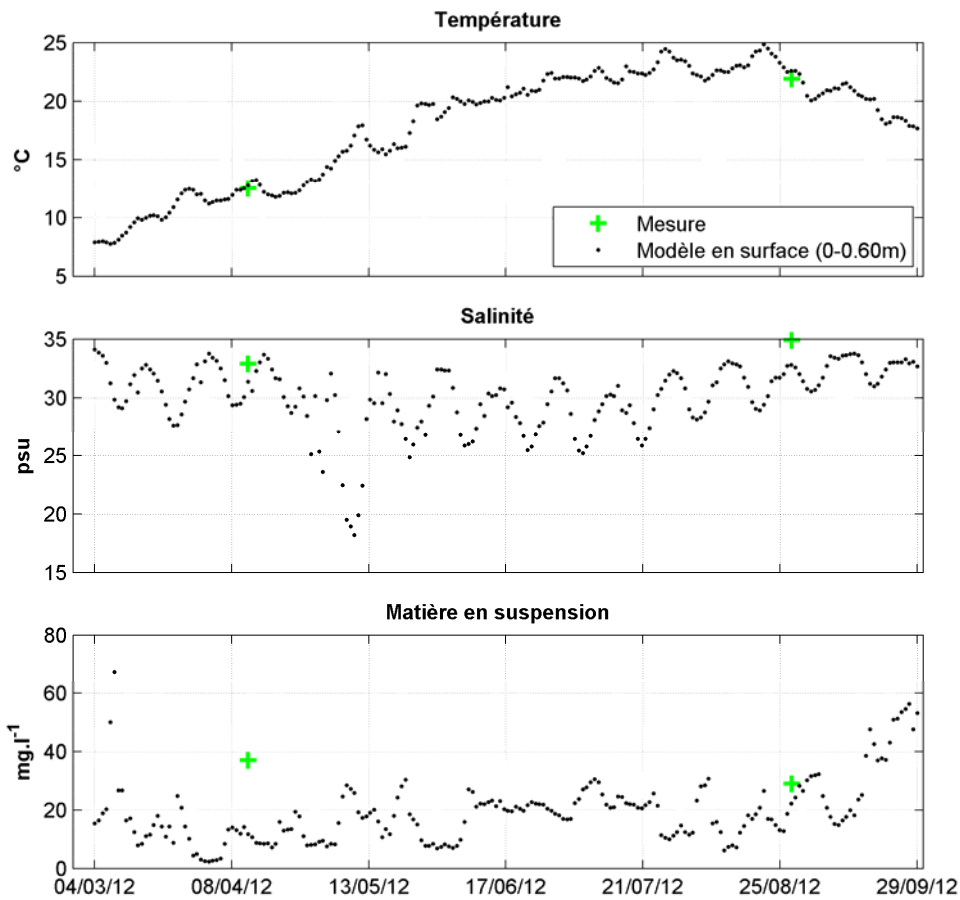
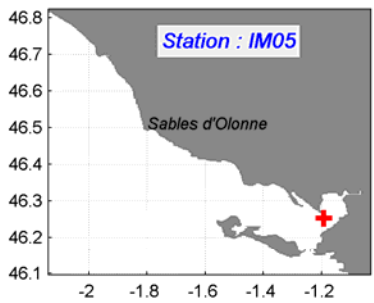
Planche 58 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

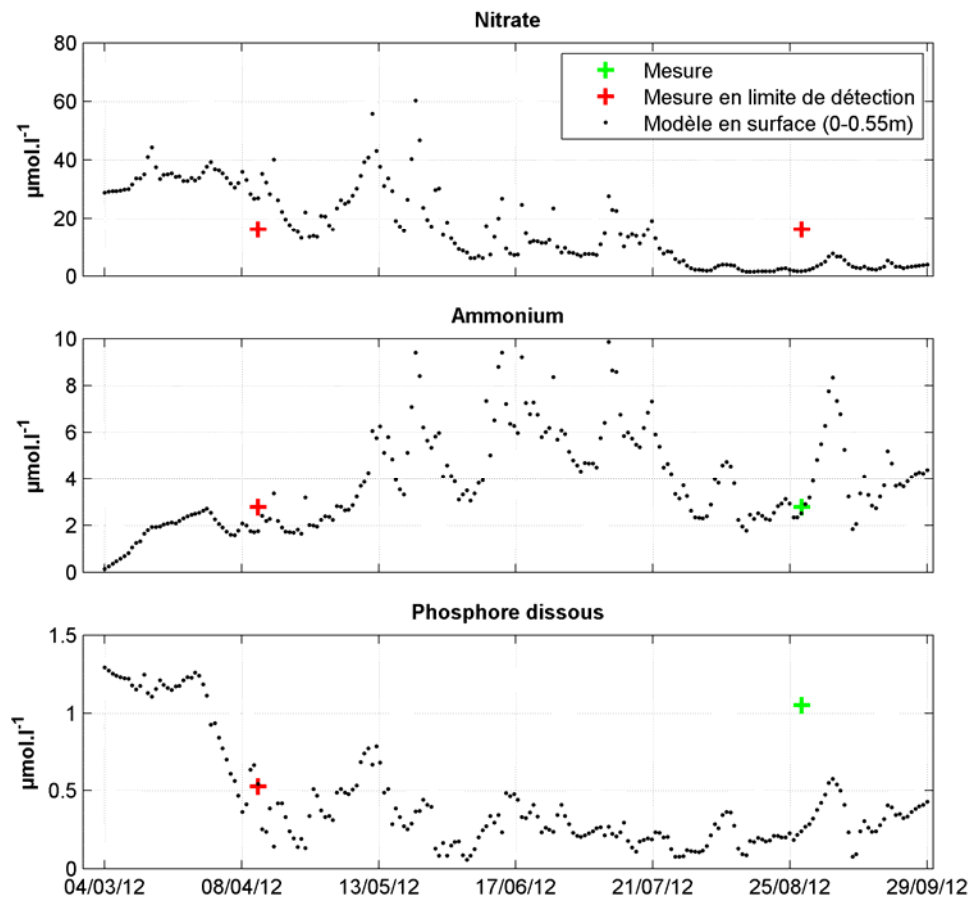
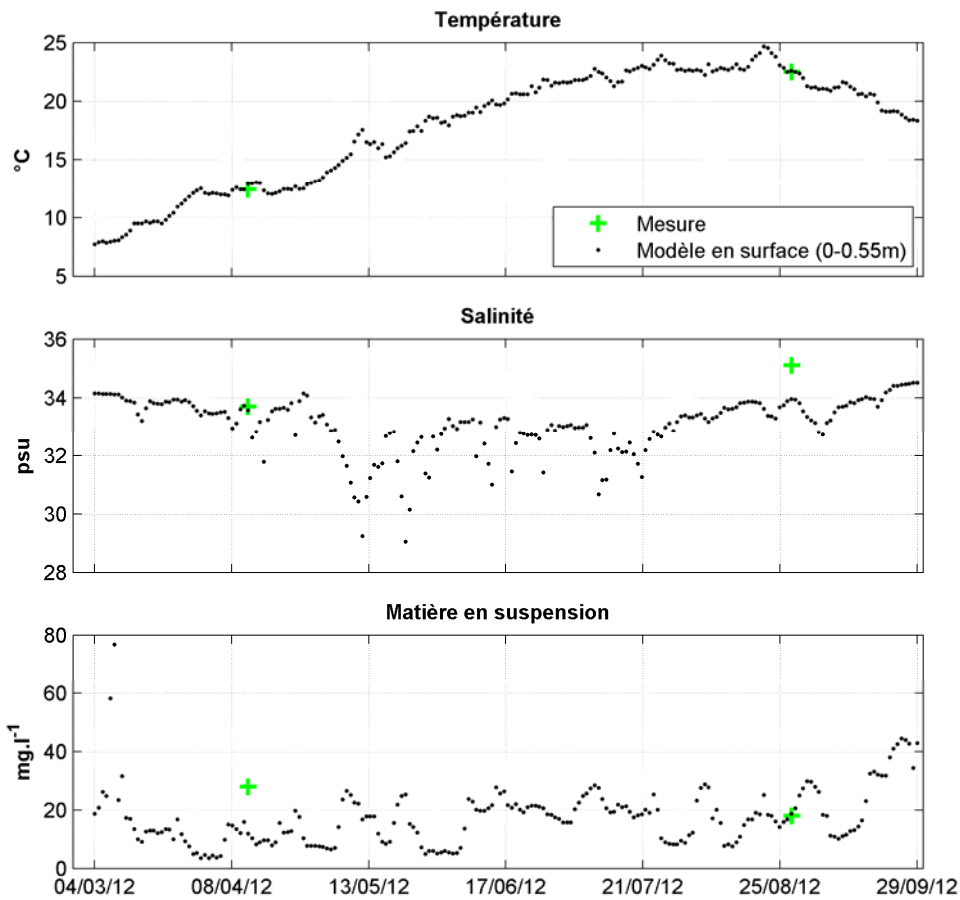
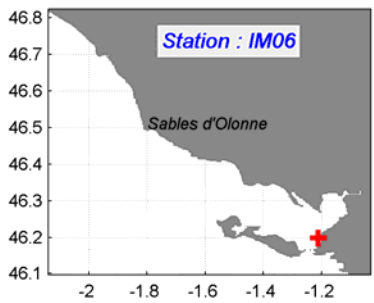
Planche 59 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

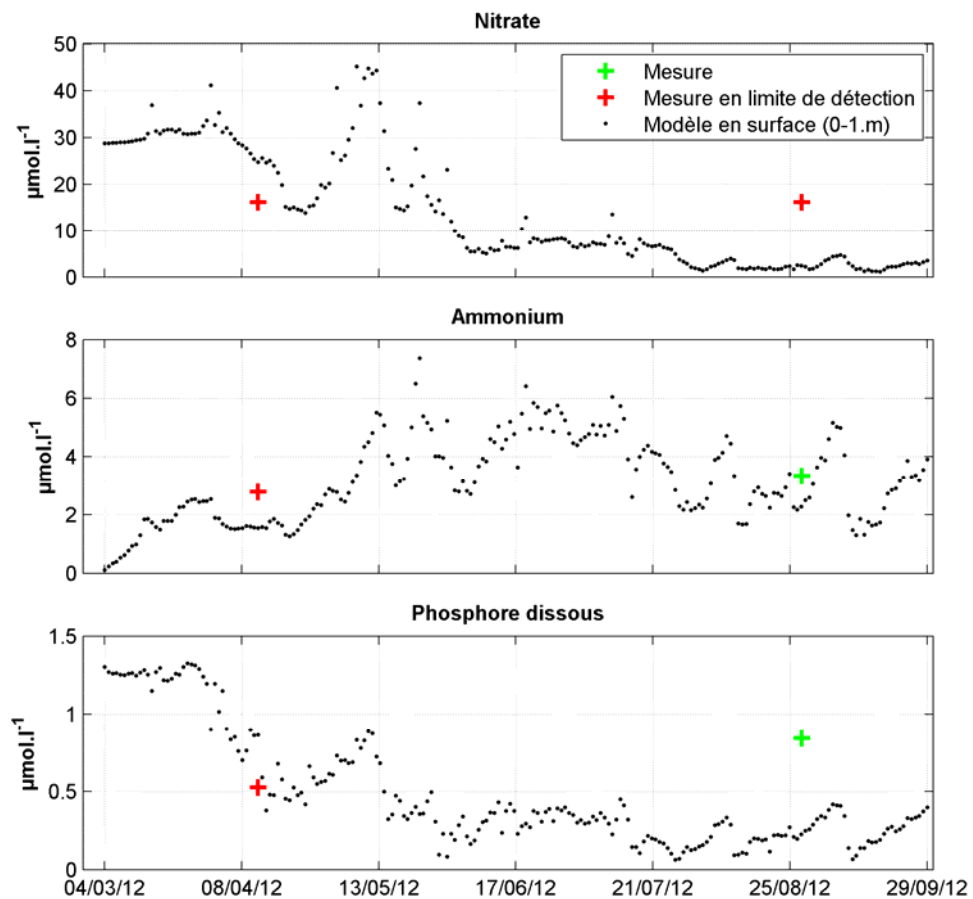
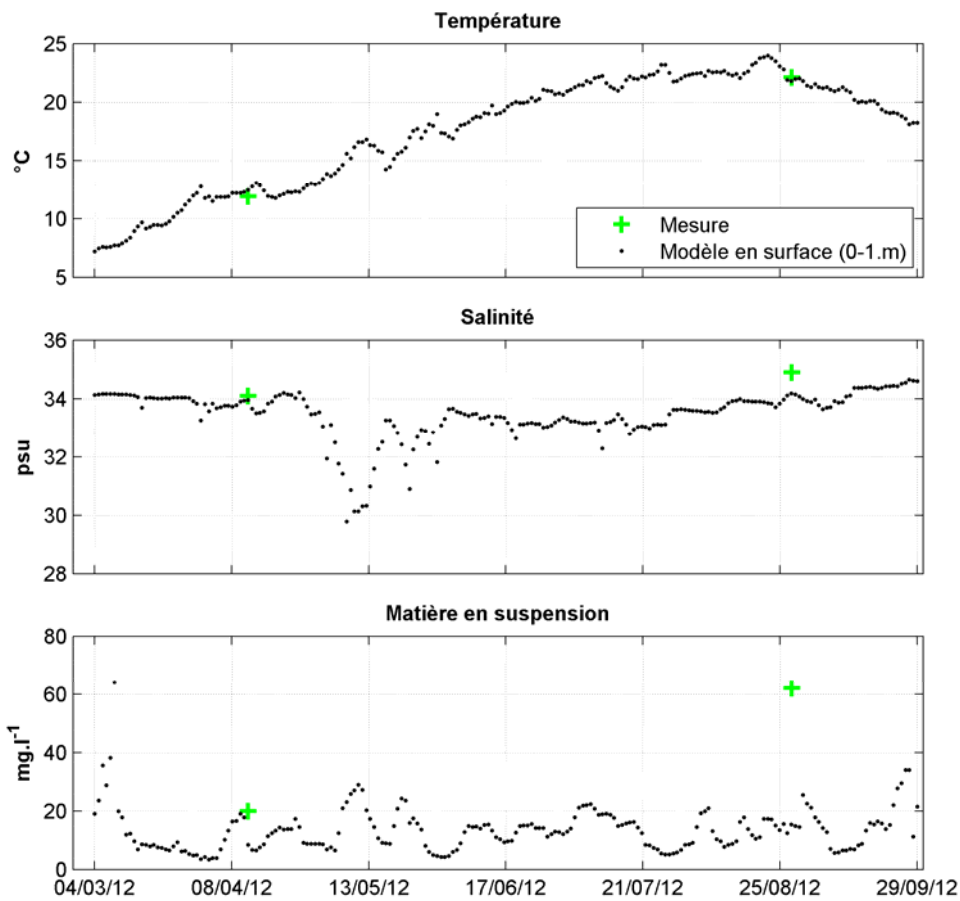
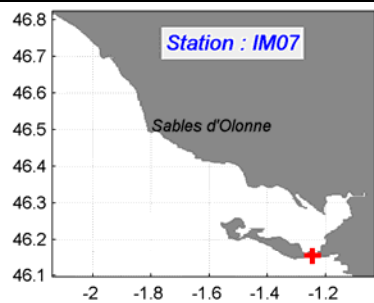
Planche 60 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 µmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 µmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 µmol.l<sup>-1</sup>

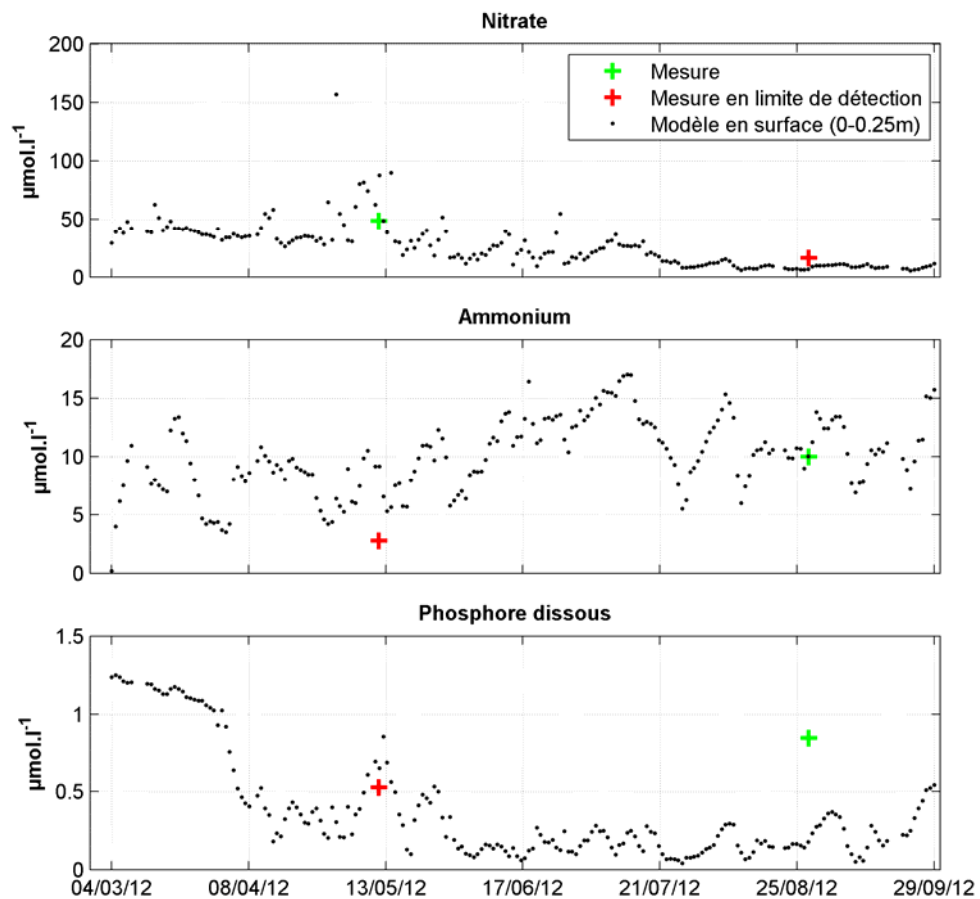
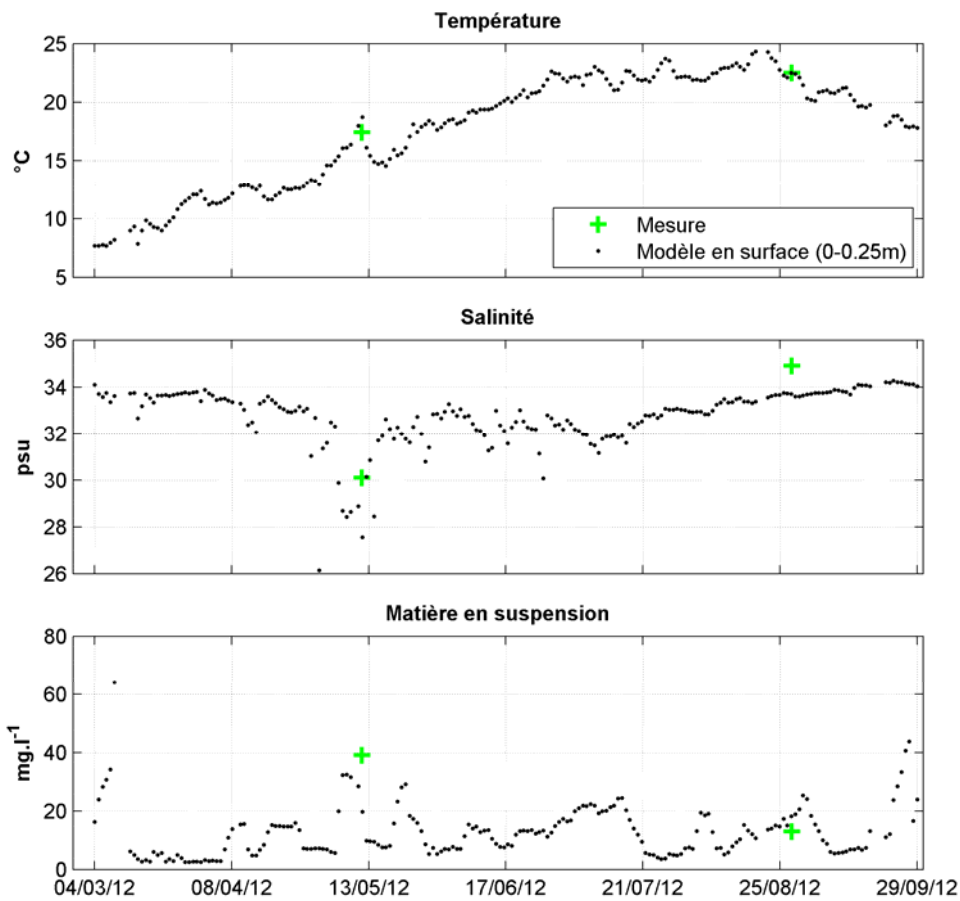
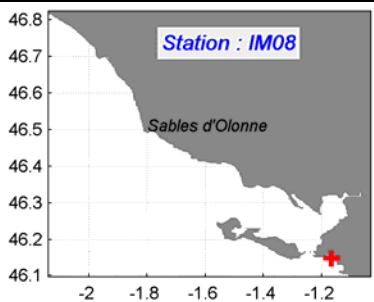
Planche 61 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 µmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 µmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 µmol.l<sup>-1</sup>

Planche 62 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012



**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

Planche 63 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012

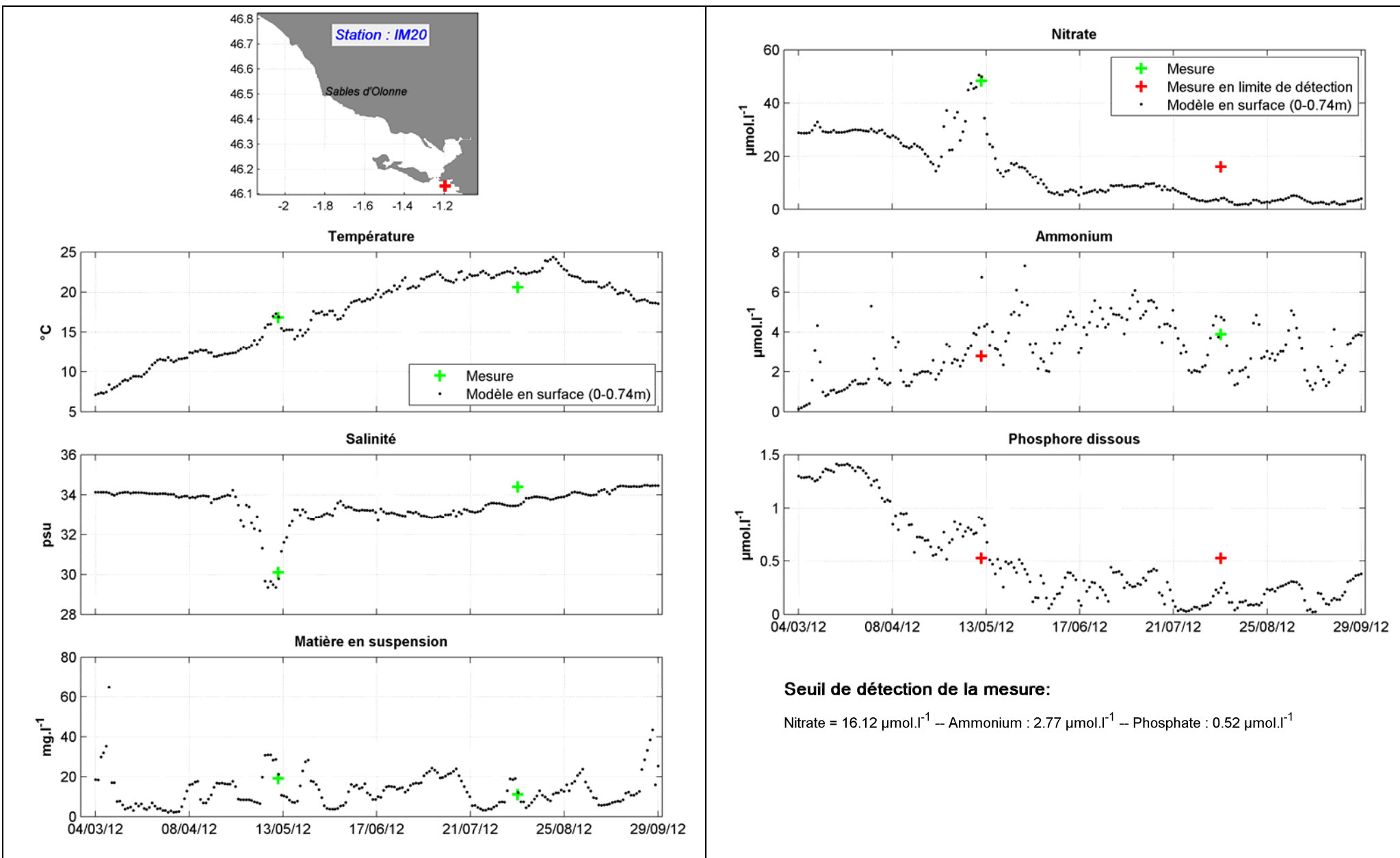
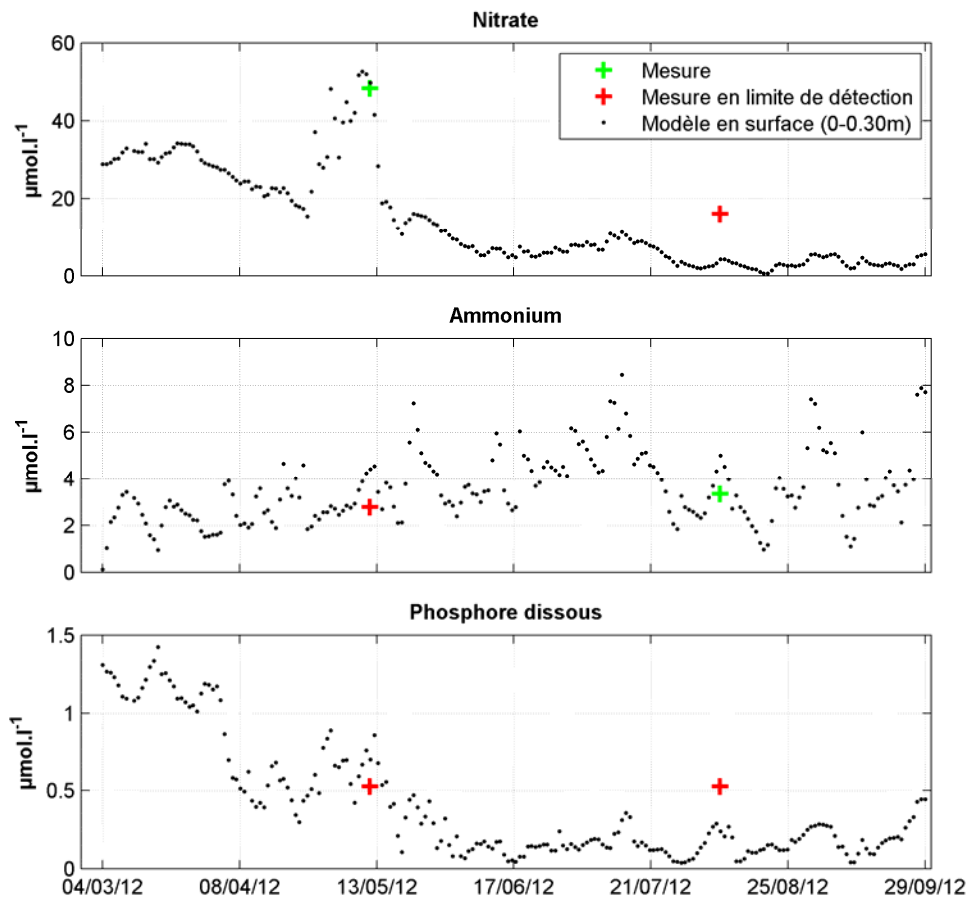
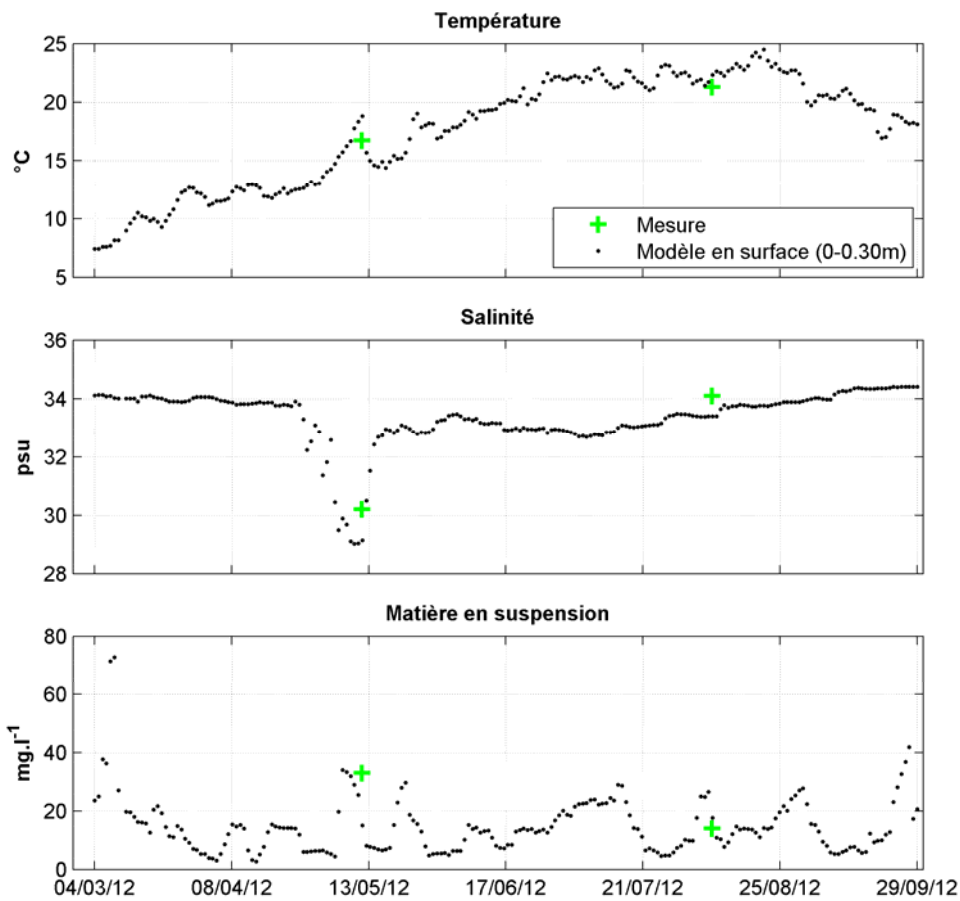
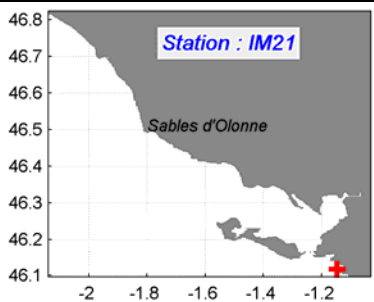


Planche 64 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012





**Seuil de détection de la mesure:**

Nitrate = 16.12 μmol.l<sup>-1</sup> -- Ammonium : 2.77 μmol.l<sup>-1</sup> -- Phosphate : 0.52 μmol.l<sup>-1</sup>

Planche 65 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012

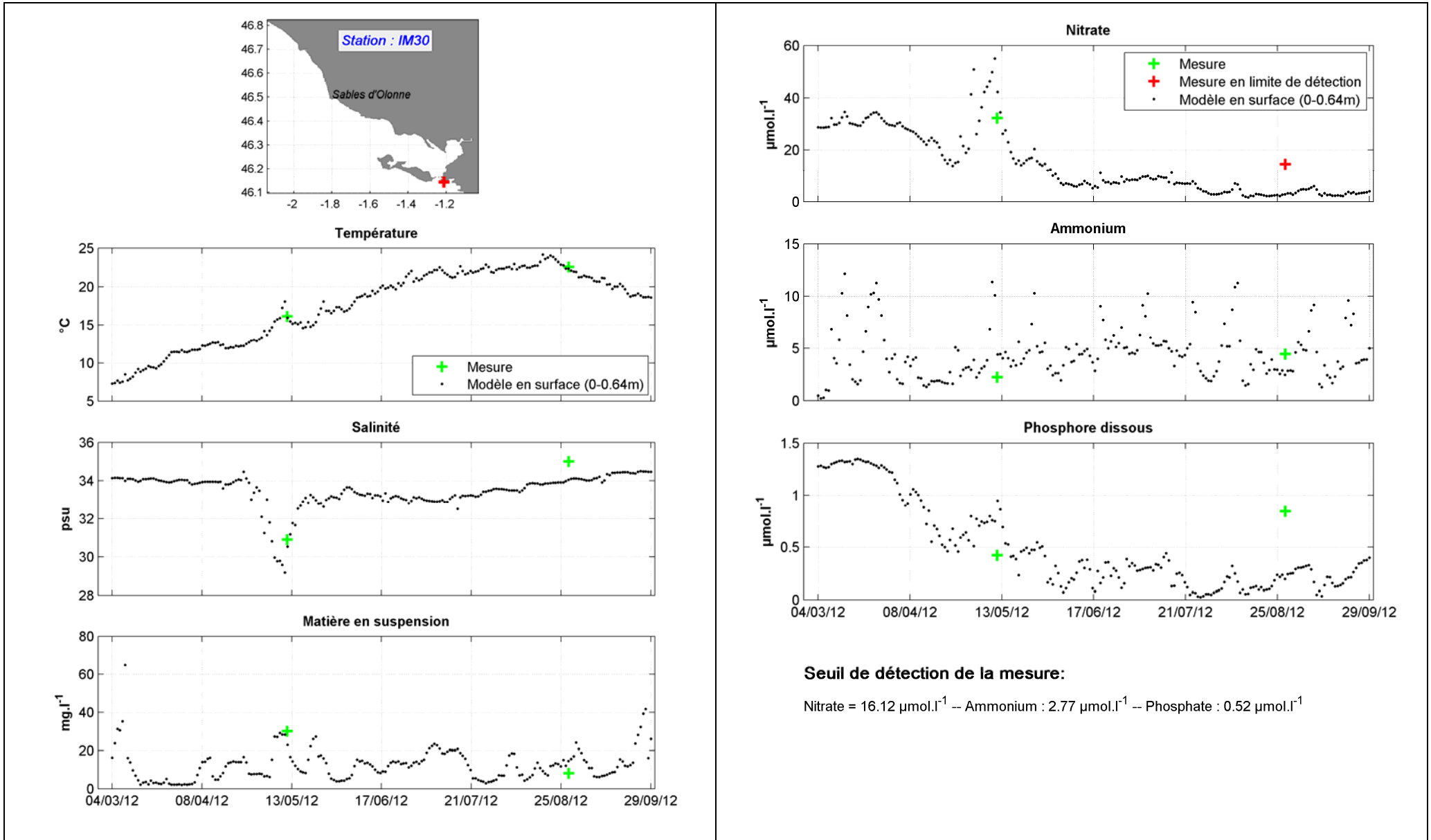


Planche 66 : Comparaison des mesures issues du réseau de surveillance DCE avec le modèle pour l'année 2012

### 7.2.3. Matières en suspension et chlorophylle *a* observées par satellite

#### 7.2.3.1. Taux de matières en suspension

La Figure 71 présente sur la période de mai à septembre 2012 la comparaison entre la moyenne des matières en suspension de surface observée par satellite avec celle simulée par le modèle. Les teneurs moyennes observées sur l'ensemble du domaine sont bien reproduites par le modèle. La Figure 72 montre une très bonne corrélation entre les mesures et le modèle ( $R^2=0.99$ ).

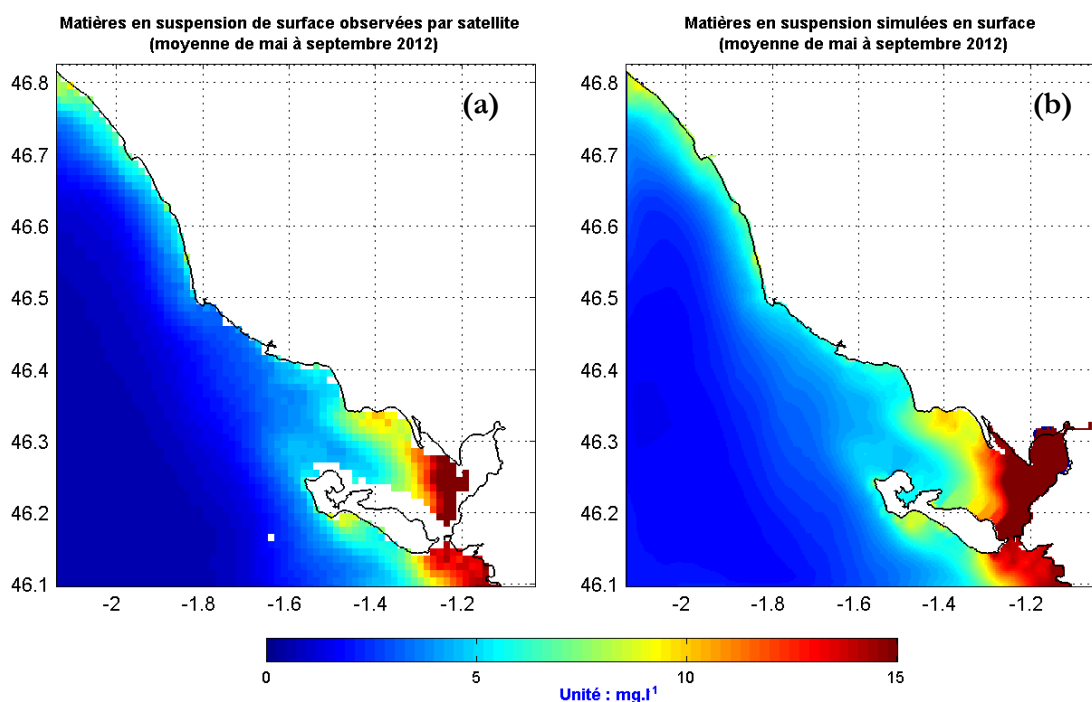


Figure 71 : Moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension de surface observées par satellite (a) et simulées par le modèle (b)

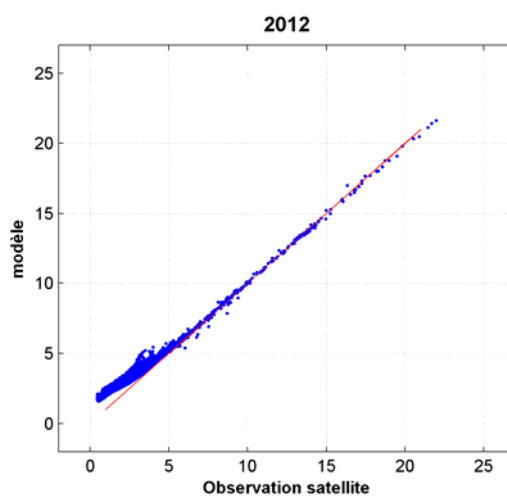


Figure 72 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 des matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée)



### 7.2.3.2. Chlorophylle *a*

Comme pour l'année 2009, la comparaison de la moyenne établie sur la période allant de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* observée par satellite avec celle simulée par le modèle en surface (cf. Figure 73) montre que le modèle surestime largement la chlorophylle *a* dans l'anse d'Aiguillon et plus au large en raison des processus d'advection/dispersion de la matière phytoplanktonique initialement produite dans l'anse d'Aiguillon.

Le graphique de la Figure 74 présenté sous forme d'un scatterplot entre les données observées et simulées montre clairement une surestimation des teneurs moyennes simulées en chlorophylle *a* avec un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 0.47.

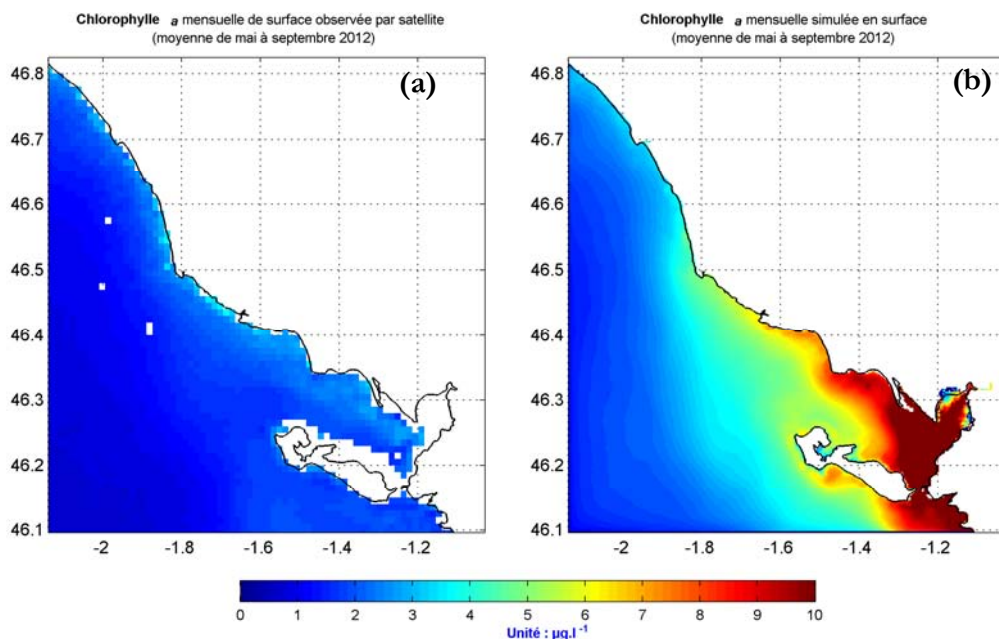


Figure 73 : Moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* observée par satellite (a) et simulée par le modèle (b) 2012

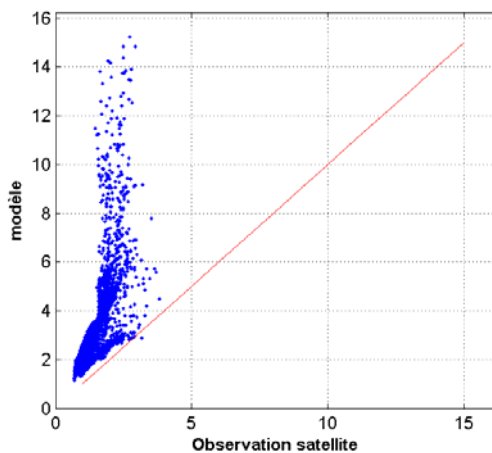




Figure 74 : Scatterplot de la moyenne de mai à septembre 2012 de la chlorophylle *a* ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) en surface (abscisse : donnée satellite ; ordonnée : donnée simulée)



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|   |  | Date | 21/02/14                   |
|   |  | Page | 165/177                    |

#### 7.2.4. Quotas en azote et phosphore des ulves

Les données de mesures portant sur le contenu interne des ulves en azote et phosphore proviennent des mesures Ceva effectuées en 2012 sur les 4 sites suivants : La Tranche-Sur-Mer, Les-Portes-en-Ré, Saint-Martin-de-Ré et La-Flotte-en-Ré. Pour le site de La-Flotte-en-Ré, un décalage important a dû être opéré entre le point de mesure et le point du modèle car il n'existait pas au niveau du point de mesure de pixels en ulves au sein du modèle.

La Planche 67 et la Planche 68 présentent les résultats de la comparaison des quotas en azote et phosphore des ulves mesurés par le Ceva en 2012 avec ceux simulés par le modèle. Sur les 4 sites, l'évolution générale et les niveaux de quota en azote et phosphore sont globalement en accord avec les mesures.

On note toutefois une surestimation par le modèle du quota en phosphore sur les sites des Portes-en-Ré et de La-Flotte-en-Ré. Etant donné les décalages géographiques entre les mesures (basées sur des ulves d'échouages) et les dépôts en ulves issus des simulations, la proposition de pistes explicatives de ces différences de niveau entre les mesures et le modèle s'avère délicate.



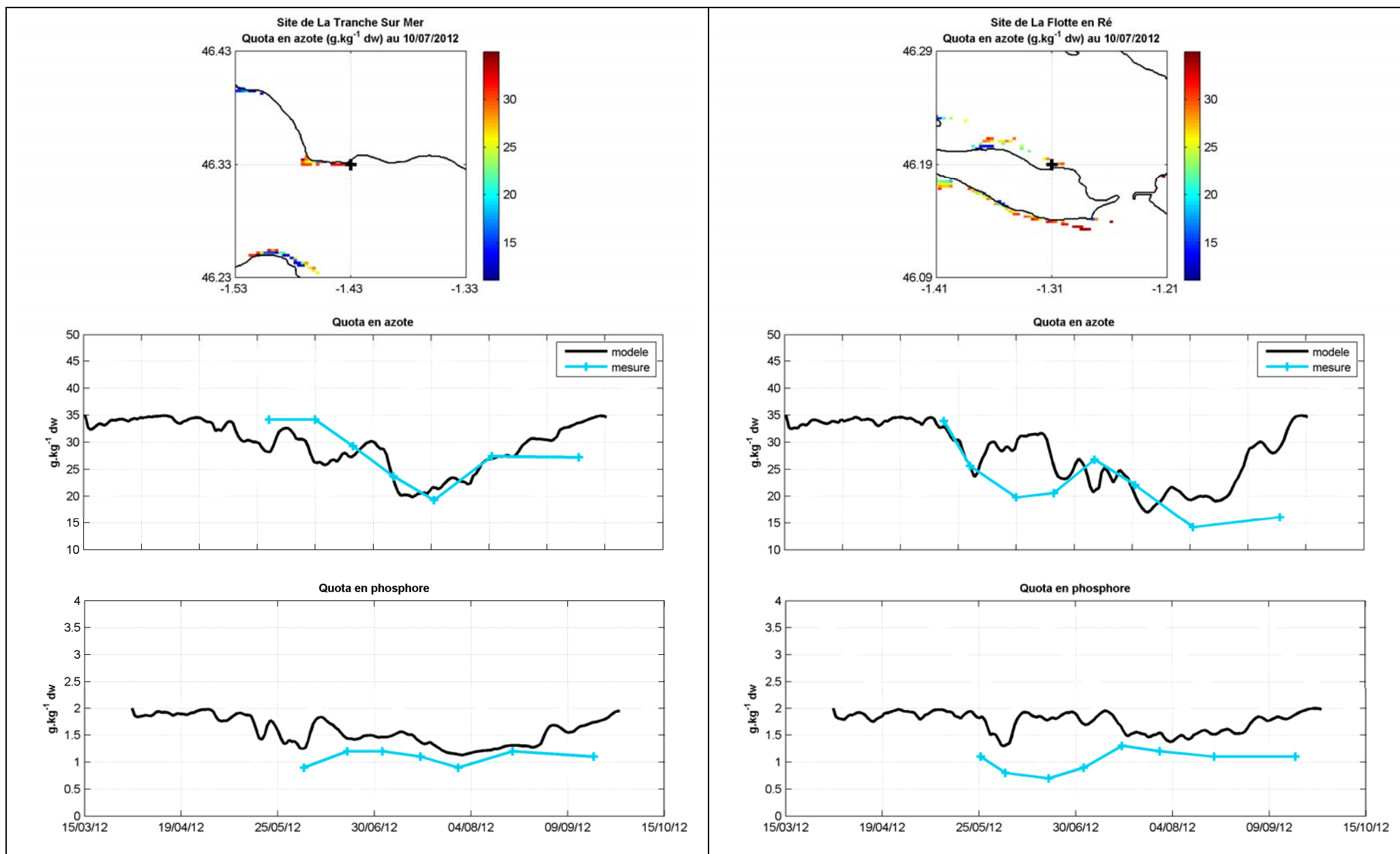


Planche 67 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle

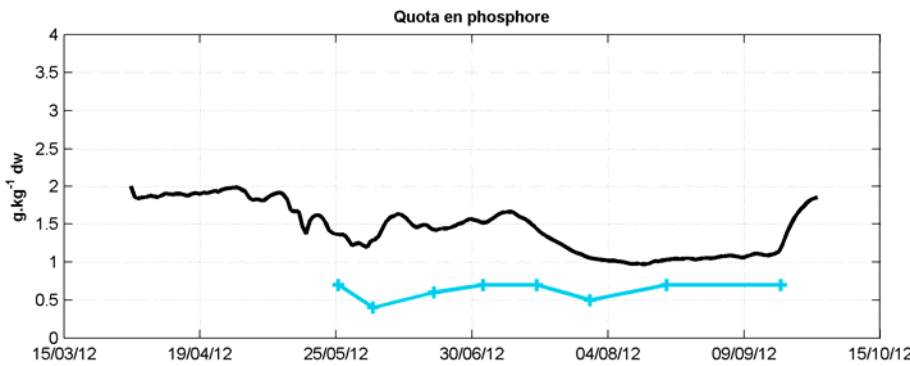
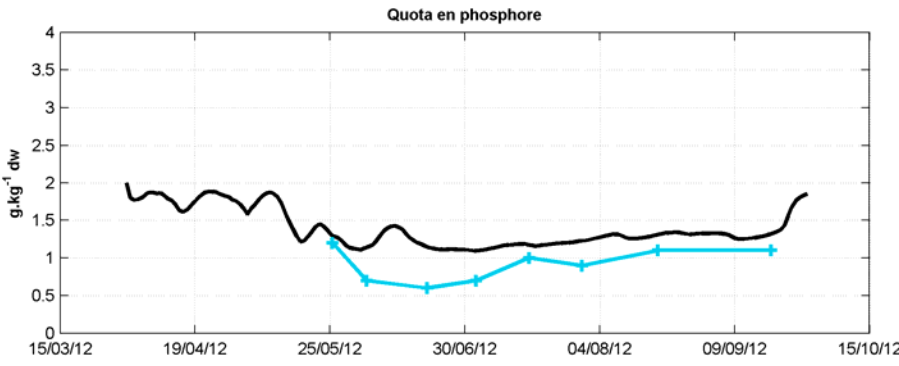
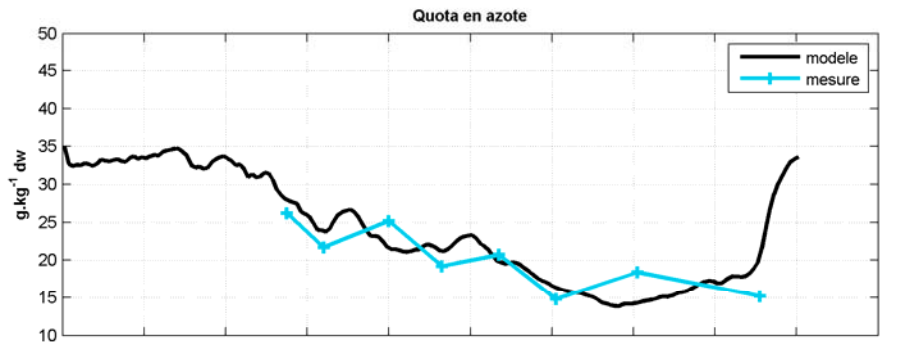
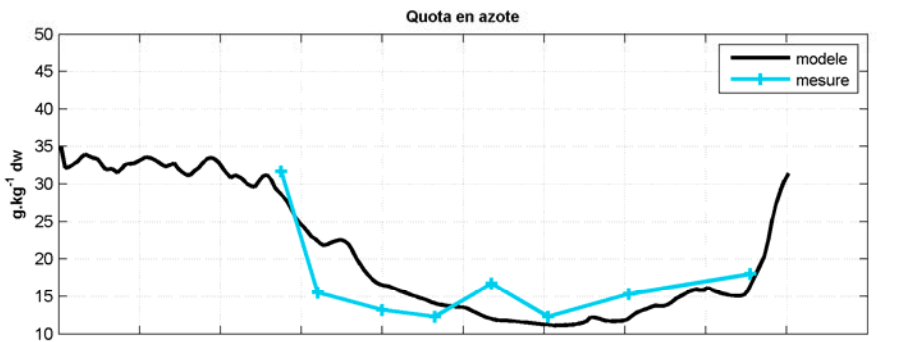
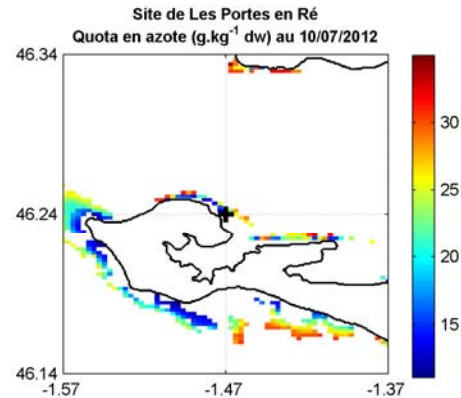
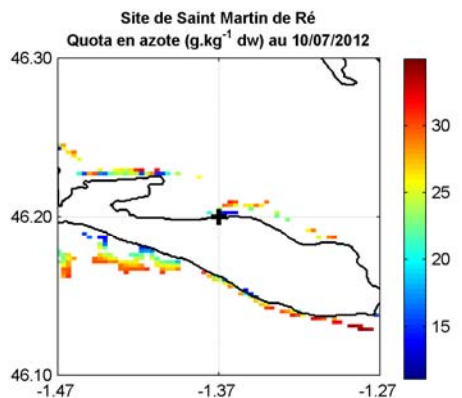


Planche 68 : Comparaison des quotas en azote et phosphore mesurés par le Ceva et simulés par le modèle



### 7.2.5. Fraction de l'azote contenu dans les ulves pour le modèle rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » sur l'année météo-climatiques 2009

La méthodologie générale utilisée pour tracer le contenu en azote des ulves appartenant au modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » est identique à celle utilisée pour le modèle de rang 1 « Loire-Vilaine » (cf. § 6.2.7).

Sur certains secteurs, il est apparu que la montée progressive à 100 % de la somme des traceurs s'avérait lente du fait de la présence de teneurs faibles en azote dissous dans le milieu et pouvait prendre jusqu'à plusieurs mois. Aussi, l'analyse effectuée de mai à septembre de la contribution de chacun des traceurs pouvait prendre en compte une situation non stabilisée (100 % de la somme des traceurs non atteinte). Or, le traceur intitulé « Autre Sources » qui regroupe 44 sources locales est obtenu en post-traitement selon le calcul suivant :  $\text{Pourcentage\_traceur\_Autres\_sources} = 100 - \text{somme des traceurs}$  où la somme des traceurs désigne uniquement les 5 sources tracées au moyen du modèle de rang 1 « Sables d'Olonne » (Lay, Sèvre Niortaise, Limite marine et Sédiment, STEP Rhodia). Il n'est en effet pas possible de tracer l'intégralité des 53 sources présentes dans le modèle de rang 1 auxquelles il faut ajouter la Vilaine, la Loire, la Gironde et la Charente situées en dehors de l'emprise de ce modèle. Dans ces conditions, les résultats obtenus pour le traceur « Autres Sources » doivent être pris avec précaution en particulier sur les premiers mois de simulation lorsque la somme totale des traceurs n'est pas encore égale à 100 %

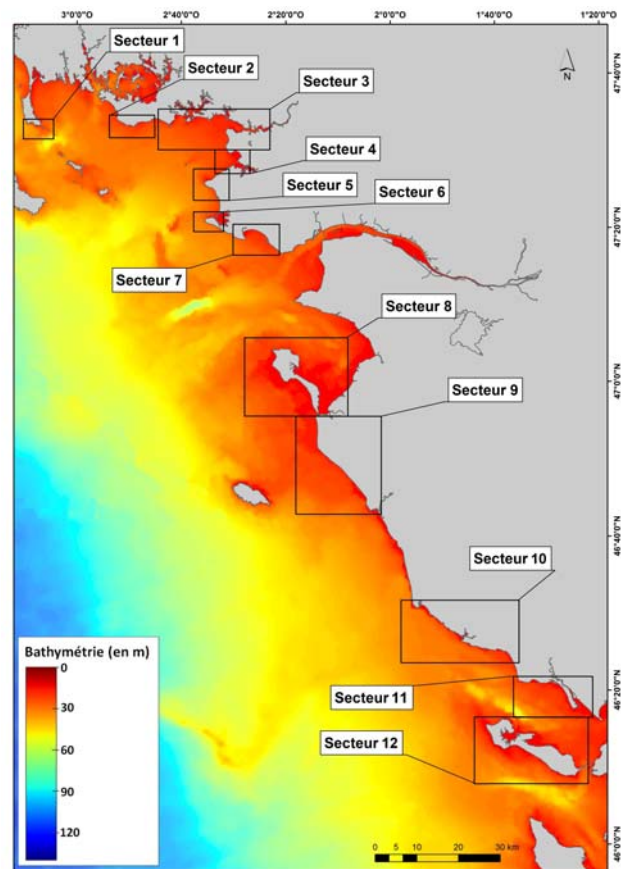


Figure 75 : Secteurs d'échouages retenus dans la mission MB3



**Evolution moyenne des traceurs à l'échelle du modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » :**

Le modèle « Sables d'Olonne-Ile de Ré » est largement ouvert sur le large et à la différence du modèle « Loire-Vilaine », il n'existe pas d'apports terrigènes importants à proximité des zones de production en ulves. De plus, la dilution importante des panaches d'azote dissous provenant des principaux apports du secteur d'étude (Gironde, Charente, Lay et Sèvre Niortaise, Loire) ne permet pas aux ulves de profiter significativement de ces apports du point de vue de leur nutrition azoté. Dans ces conditions, la limite marine (59 %) constitue sur l'année météo-climatique 2009 le principal contributeur dans la fourniture en azote dissous des ulves. La Charente (14 %) se place en seconde position suivi par la Gironde (11 %). Le traceur « Autres Sources » regroupant 44 sources locales contribue à hauteur de 7 %. Malgré son éloignement géographique, la Loire contribue à hauteur de 3 %. Le sédiment et l'apport intitulé « Step Rhodia » contribuent très peu (autour de 1 %). Le reste des sources (Lay, Sèvre Niortaise, Vilaine) peut être qualifié de négligeable dans l'enrichissement en azote dissous des ulves.

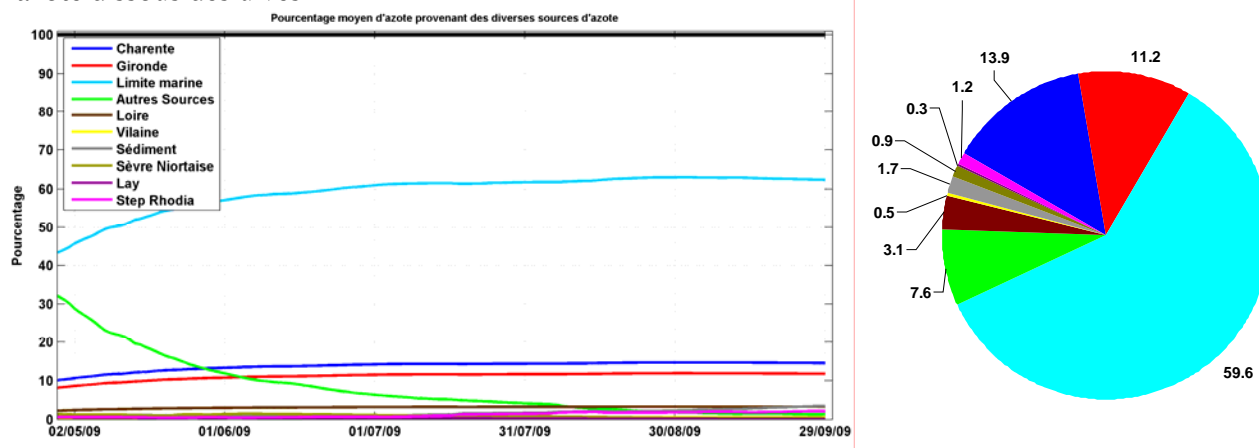


Figure 76 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves à l'échelle du modèle de rang 1 « Sables d'Olonne-Ile de Ré » (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

**Evolution des traceurs sur le secteur 9**

Le secteur 9 est très largement dominé par les apports provenant de la limite marine (62 %). La Charente (14.5 %) et la Gironde (11.8 %) apparaissent comme les deux autres principaux contributeurs. Le traceur « Autres Sources » (5.4 %) et la Loire (3.3 %) interviennent peu dans le contenu en azote dissous des ulves. Le reste des sources dont le sédiment (1.9 %) joue un rôle négligeable.

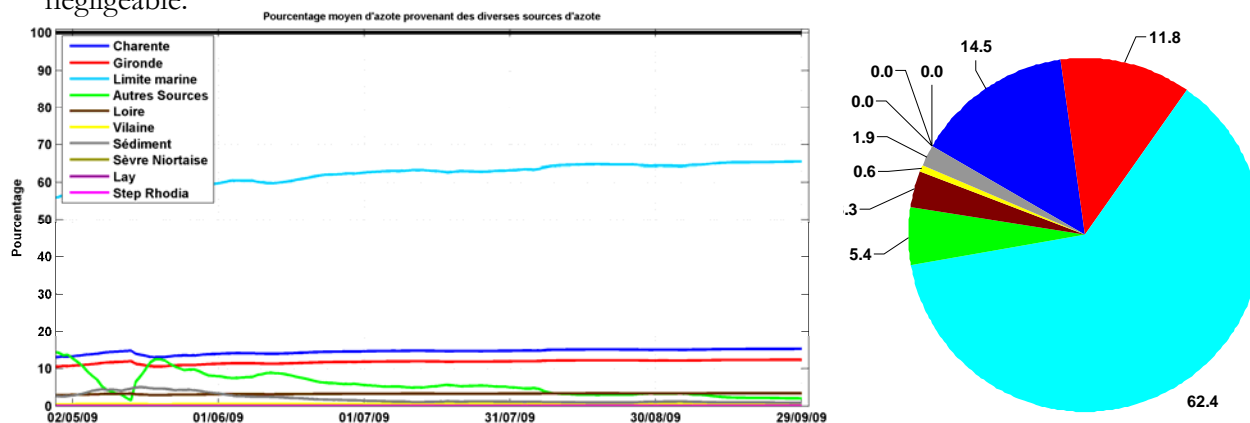


Figure 77 : Evolution saisonnière de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 9 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)



**Evolution des traceurs sur le secteur 10**

Le secteur englobant la zone comprise entre les sites des Sables d’Olonne et de Jard-sur-Mer confirme la nette domination de la limite marine (57.6 %) dans la fourniture en azote dissous des ulves. Comme pour le secteur 9, la Charente (13.4 %) et la Gironde (10.9 %) représentent les deux autres principales sources d’azote. Le traceur « Autres Sources » se trouve en nette augmentation et fournit en moyenne 13.6 % de l’azote contenu dans les tissus des ulves mais ce résultat doit être pris avec précaution au vu des explications fournies en début de paragraphe. Hormis la Loire (3%), le reste des sources joue un rôle négligeable.

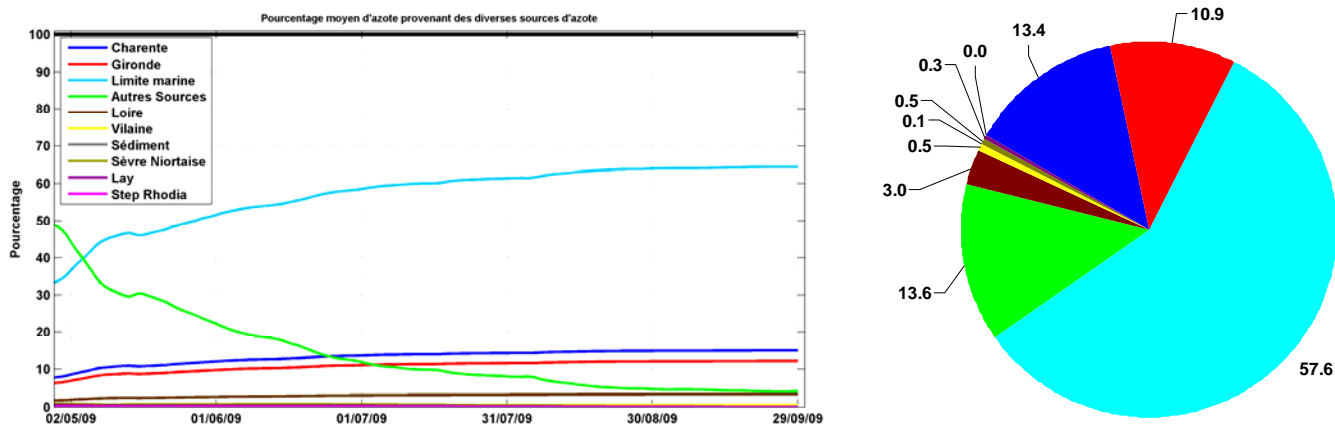


Figure 78 : Evolution saisonnière de l’origine de l’azote contenu dans les ulves pour le secteur 10 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

**Evolution des traceurs sur le secteur 11**

Le secteur 11 est dominé par les apports de la limite marine (52.4%) (cf. Figure 79). Le traceur intitulé « Autres sources » se renforce nettement et apparaît potentiellement comme le second contributeur (19.3 %) mais ce résultats doit être à nouveau pris avec précaution pour les raisons évoquées précédemment (100 % de la sommes de traceurs non atteint). La Charente (12.2 %) et la Gironde (9.9 %) ainsi que la Loire (2.8 %) sont proches des contributions obtenues sur les autres secteurs. Le reste des sources peut être considéré comme négligeable.

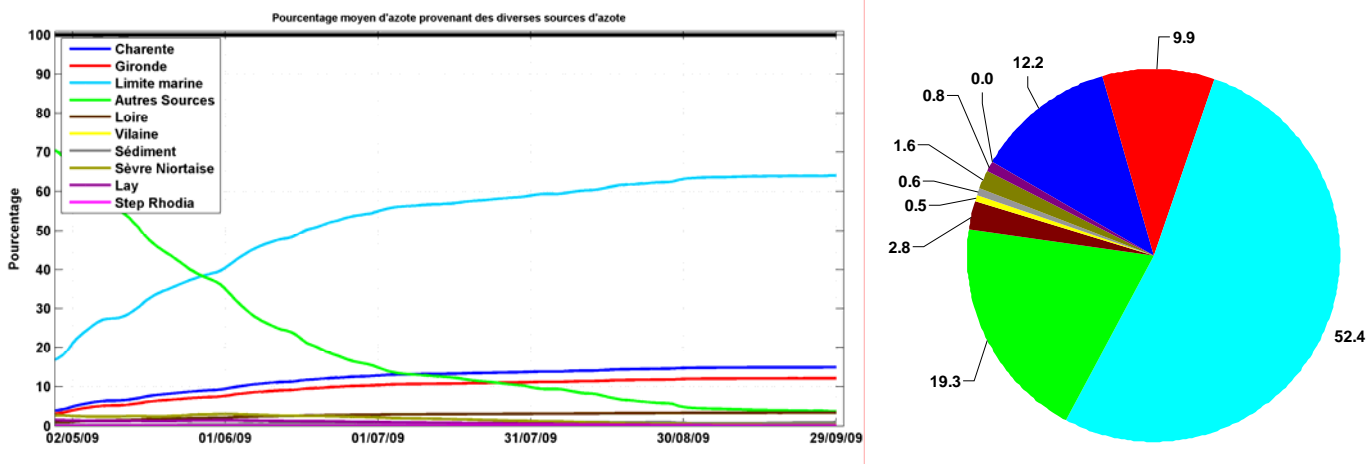


Figure 79 : Evolution saisonnière de l’origine de l’azote contenu dans les ulves pour le secteur 11 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)



### Evolution des traceurs sur le secteur 12

Le secteur 12 englobe l'île de Ré et les résultats sont proches de ceux obtenus sur l'ensemble du domaine. On note également la présence possible de l'artéfact de début de saison pour le traceur intitulé « Autres Sources ». La limite marine (61.8 %) domine largement les apports en azote dissous des ulves (cf. Figure 80). La Charente (14.4 %) et la Gironde (11.7 %) ainsi que la Loire (3.2 %) évoluent dans les mêmes gammes de valeurs que celles obtenues sur les autres secteurs. La contribution du traceur intitulé « Autres Sources » est estimée à 6.6 %. Le reste des sources joue un rôle négligeable.

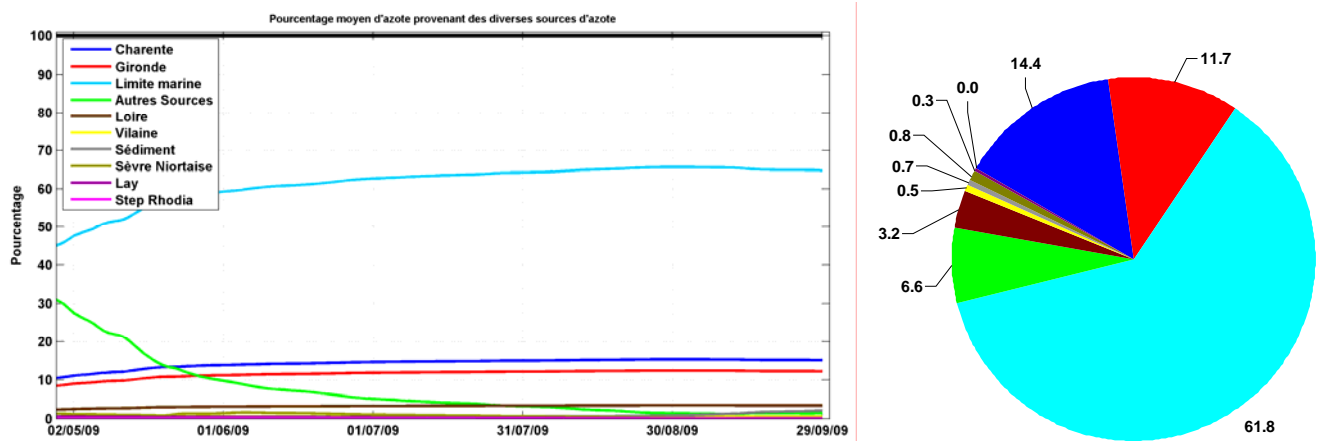




Figure 80 : Evolution de l'origine de l'azote contenu dans les ulves pour le secteur 12 (à gauche) et évaluation de la contribution (%) de chacune des sources sur la période mai-septembre (à droite)

### APPORTS DE L'ETUDE DES TRACEURS

- ⇒ La limite marine (autour de 60 %) apparaît comme la première source dans l'alimentation en azote dissous des ulves sur la période productive de mai à septembre
- ⇒ La Charente (13.9%) et la Gironde (11.2 %) contribuent de manière significative à l'enrichissement en azote dissous sur l'ensemble du secteur d'étude
- ⇒ Malgré son éloignement géographique, la Loire contribue à hauteur de 3.1 % en moyenne
- ⇒ Le traceur intitulé « Autres sources » regroupant les 44 autres sources terrigènes a une contribution moyenne faible de mai à septembre (7.6 %) mais participe de manière importante en début de saison à l'échelle du mois de mai. Pour les raisons décrites en début de paragraphe, ce résultat doit être pris avec précaution s'agissant du début de saison
- ⇒ Le sédiment joue un rôle négligeable dans la fourniture en azote dissous des ulves (< 2%)



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|   |  | Date | 21/02/14                   |
|   |  | Page | 172/177                    |



### 7.3. Limite d'utilisation des outils de modélisation au regard des objectifs généraux de l'étude

L'objectif général de l'étude de modélisation est de tester des scénarii de réduction des marées vertes par différentes simulations de réductions de flux de nutriments et de dégager *in fine* des objectifs de qualité en nutriments pour diminuer/limiter l'ampleur des marées vertes se développant actuellement à l'échelle du secteur d'étude. A l'issue de l'étape de calage et de validation du modèle biologique, un certain nombre de biais susceptibles d'altérer la fiabilité des résultats en regard des objectifs généraux de l'étude peut être dégagé :

- Qualité de la **spatialisation du stock initial d'ulves** sur les platiers rocheux. Malgré la procédure utilisée pour élaborer la condition initiale en ulves (cf. § 2.1) qui mélange données d'observation et approche prédictive, la condition initiale en ulves constitue un biais. Ce dernier reste cependant limité dans la mesure où les échouages d'algues vertes sur les différents secteurs décrits dans la mission MB3 sont issus de production locale (peu de transfert de biomasse d'un site à l'autre),
- Dans le cas de secteurs à estran courts (platiers rocheux, estran sableux), la **taille de maille** définie dans l'étude est supérieure à la taille des objets à représenter ce qui introduit également un biais au niveau de la mise en œuvre de la cartographie initiale des ulves. D'une manière générale, cela se traduit par l'incapacité du modèle à représenter des processus physiques d'échelles inférieures à la taille de la maille. S'agissant de la condition initiale en ulves, les observations aériennes réalisées par le Ceva depuis 2007 amènent à penser que seule une taille de maille de quelques dizaines de mètres (voire de l'ordre 10 à 20 mètres) permettrait de prendre en compte précisément la morphologie des dépôts en algues vertes. Cette taille de maille s'avère d'une part clairement incompatible avec l'ampleur de la zone à étudier (temps de calcul prohibitifs) et d'autre part, cette démarche supposerait de disposer de données bathymétriques à très haute résolution ainsi que des données fines des platiers rocheux pour permettre d'élaborer la condition initiale en ulves (données inexistantes à l'échelle du linéaire côtier à considérer dans l'étude),
- Les données de **flux des rivières**. Le biais lié aux données de flux des rivières a fait l'objet d'une évaluation dans le cadre de la mission MB1 (cf. § 5. Analyse de la précision de la méthode de calcul des flux),
- Le manque de données de **mesures *in situ* pour caler et valider** le compartiment « Ulves » du modèle biologique. Les résultats de la comparaison des mesures de quotas en azote et phosphore des ulves sur l'année 2012 montrent que le modèle reproduit dans l'ensemble les tendances et les niveaux observés. Dans cette étape de validation, il aurait également fallu s'assurer de la bonne reproduction par le modèle de l'évolution de la biomasse en ulves à l'échelle de quelques secteurs clés. En l'absence de données de mesures de la biomasse produite *in situ*, il n'a donc pas été possible de valider les niveaux de biomasses en algues vertes produits par le modèle. L'absence de données de mesures est en très grande partie liée au fait qu'il est particulièrement difficile de mesurer l'évolution de la biomasse algale produite à l'échelle de platiers rocheux le plus souvent recouverts par la marée,
- Le modèle utilisé ne simule pas les **processus biogéochimiques complexes se déroulant au sein de l'estuaire de la Loire** et décrit dans le cadre de la mission MB4. La non prise en







|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|  |  | Date | 21/02/14                   |
|  |  | Page | 173/177                    |

compte dans le modèle des processus hydro-sédimentaires liés au bouchon vaseux et du phytoplancton d'eau douce (modèle adapté qu'au phytoplancton marin) peut représenter un biais à la qualité générale de l'étude. Cependant, dans la mesure où la comparaison mesures/modèle sur les stations en mer et situées en aval de l'estuaire de la Loire ne montre pas d'écarts significatifs sur le plan de l'évolution des sels nutritifs, ce biais est *a priori* faible,

- Les flux de **relargage sédimentaire et le module de relargage** simplifiés par rapport aux phénomènes complexes et mal connus se déroulant *in situ*. En l'absence de données de mesures actualisées à l'échelle de la zone d'étude et en particulier sur les zones vaseuses, des valeurs issues de campagnes de mesures Ceva en rade de Lorient ont été utilisées pour fixer des valeurs *a priori* fortes du flux sédimentaire sur les principales zones vaseuses du secteur d'étude. Au vu des résultats obtenus sur le traçage de l'azote dissous contenu dans les ulves, la source sédimentaire apparaît négligeable pour les deux modèles de rang 1 et on peut donc considérer que le biais lié à la qualité du module sédimentaire reste limité.



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|   |  | Date | 21/02/14                   |
|   |  | Page | 174/177                    |

## CONCLUSION

L'étude au moyen du modèle MARS2D pour différentes situations de vent du transport d'un grand nombre de particules algales positionnées initialement sur les zones potentielles de croissance montre que les ulves à l'origine des échouages sont *a priori* produites localement sur les principaux plateaux rocheux à proximité des sites impactés. Si les transferts de matériel algal entre sites adjacents paraissent donc limités, il n'est pas exclu pour l'île de Noirmoutier (sauf pour Pen-Bé) que les ulves à l'origine des échouages observés sur la commune de Barbâtre (façade sud-ouest de Noirmoutier) et les secteurs de plage au sud immédiat de Fromentine proviennent des zones de production situées sur les plateaux rocheux de la façade nord-est de Noirmoutier (Roches de Bouin et zones rocheuses du chenal d'Anjoubert).

La validation des modèles de rang 1 « **Loire-Vilaine** » et « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** » met en évidence un bon ajustement de la température par rapport aux mesures. Le biais moyen estimé par rapport à l'écart type des mesures entre les données simulées et observées est de 0.24 °C pour le modèle « **Loire-Vilaine** » et autour de 0.5 °C pour le modèle « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** ». Concernant la salinité pour le modèle « **Loire-Vilaine** », les statistiques sont moins bonnes que pour la température en particulier à la station de Donges située sur la Loire et soumise à de forts régimes de dessalure. Sur l'ensemble des évaluations, le coefficient de corrélation moyen (R) est de 0.72 pour un biais normalisé de l'ordre de 1 PSU (0.54 PSU sans la station de Donges). De même pour le modèle « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** », les statistiques obtenues, tout en étant moins bonnes que pour la température, sont correctes en regard des objectifs visés dans cette étude.



Pour les deux modèles de rang 1, la validation au moyen de méthodes statistiques pour les **sels nutritifs** (nitrate, ammonium, phosphore et silicates) n'a pu être opérée en raison du trop faible nombre d'échantillons mesurés pour une station donnée.

Toutefois, pour le modèle de rang 1 « **Loire-Vilaine** » pour les années simulées 2009 et 2012, les ordres de grandeur et l'évolution saisonnière des teneurs simulées s'avèrent cohérents par rapport aux données mesurées au niveau des différentes stations marines et estuariennes. S'agissant des deux principales sources de nutriments, les évolutions simulées des teneurs en sels nutritifs sur la Vilaine à la station DDTM 56 « 56V090 » et sur la Loire aux stations DDTM 44 de Paimboeuf et de Cordemais sont globalement conformes aux données mesurées. Le modèle surestime toutefois les teneurs observées en ammonium sur la Loire. Cet écart est peut être lié à une intense reminéralisation au sein du bouchon vaseux et à une consommation d'une partie de l'ammonium par le phytoplancton d'eau douce.

Concernant le modèle « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** », aucune donnée de mesure en sels nutritifs au sein de la banque de donnée Quadrige<sup>2</sup> n'a pu être utilisée pour les années 2009 et 2012. Seules des données de mesure issues des réseaux de surveillance de la DDTM 17 ont pu être exploitées mais les comparaisons ont été délicates dans la mesure où il existait deux points de mesures pour chacune des stations (deux point en général) associés à une faible précision de mesures pour les sels nutritifs. Cependant, ces comparaisons ont permis de s'assurer que le modèle reproduit correctement les ordres de grandeurs mesurés en particulier pour les stations estuariennes proches du point de forçage de la Sèvre Niortaise et du canal de Maubec au niveau de la Rochelle.





|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>LIBERTÉ ÉGALITÉ FRATERNITÉ</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE</small> | <h2>Document de référence<br/>(MB2)</h2> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|  |  | Date | 21/02/14                   |
|  |  | Page | 175/177                    |

Pour la **chlorophylle a**, l'analyse des teneurs simulées avec les mesures Quadrigé<sup>2</sup> sur l'année 2009 (6 stations) et 2012 (5 stations) montre que le modèle de rang 1 « **Loire-Vilaine** » reproduit les évolutions saisonnières en sous-estimant néanmoins les niveaux de bloom en particulier en baie de Vilaine. De plus, le modèle ne parvient pas à reproduire le bloom précoce de début mars ce qui toutefois impacte peu la qualité générale des résultats obtenus au vu des teneurs importantes en sels nutritifs présentes à cette saison dans la colonne d'eau. L'analyse comparée pour la couche de surface de la moyenne de mai à septembre des données simulées et observées par satellite pour la chlorophylle a montre selon les secteurs des écarts plus ou moins importants dans la spatialisation du bloom et son intensité moyenne. A l'échelle de la zone d'étude, le coefficient de corrélation entre les données observées sur la période de mai à septembre est de 0.42 sur 2009 et 0.40 en 2012. Pour le modèle de rang 1 « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** », le modèle surestime assez nettement par rapport aux données issues des observations satellites la production phytoplanctonique au sein de l'anse d'Aiguillon. A l'échelle de la zone d'étude, le coefficient de corrélation entre les données observées sur la période de mai à septembre est de 0.56 sur 2009 et 0.47 en 2012.



Concernant les **matières en suspension** (M.E.S), un bon accord entre les mesures satellites et le modèle pour la couche de surface est observé pour les deux modèles de rang 1 sur la base de la moyenne établie de mai à septembre 2009 et 2012.

La **validation du modèle Ulves** a consisté à comparer les mesures de quotas en azote et phosphore effectuées en 2012 avec les données simulées. Le modèle de rang 1 « **Loire-Vilaine** » reproduit correctement l'allure générale et les niveaux des quotas sur les 11 sites retenus (Penvins, Mine d'Or, Le Croisic, La Baule, Pen Bé, Piriatic-sur-Mer, Mesquer, Prefailles-sur-Mer, Noirmoutier-Epine, Noirmoutier-Vieil et Noirmoutier-Guérinière). La qualité des ajustements entre les mesures et le modèle varie toutefois d'un site à l'autre. Concernant le modèle « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** », sur les 4 sites disposant de mesures en 2012 (La Tranche-Sur-Mer, Les-Portes-en-Ré, Saint-Martin-de-Ré et La-Flotte-en-Ré), l'amplitude et l'évolution saisonnière des quotas simulés en azote et phosphore sont cohérentes par rapport aux mesures. On note toutefois une surestimation par le modèle du quota en phosphore sur les sites des Portes-en-Ré et de La-Flotte-en-Ré. Le décalage géographique entre les mesures basées sur des ulves d'échouages et les pixels en ulves du modèle retenus pour les besoins de comparaison peut être à l'origine de l'écart entre mesures et modèle.

A l'échelle du modèle « **Loire-Vilaine** », le traçage de l'origine de l'azote contenu dans les ulves montre que la Loire (44 %) est la première source dans l'alimentation en azote dissous des ulves sur la période productive de mai à septembre suivi de la Vilaine (32 %). Le traceur « Autres Sources » regroupant les 154 autres sources terrigènes locales (rejets de stations d'épuration et apports de petits cours d'eau côtiers) contribuent de manière équivalente à la limite marine (autour de 10 %). Des différences marquées apparaissent en fonction du secteur d'échouage considéré. Ainsi, la contribution de la Loire domine largement sur les secteurs 6 (centré sur Croisic), 7 (baie de Pouliguen incluant La Baule) et 8 (île de Noirmoutier) tandis que la Vilaine apparaît comme la première source sur le secteur 2 (centré sur Sarzeau), 3 (de Penvins à Loscolo) et 4 (centré sur Pen-Bé).

A l'échelle du modèle « **Sables d'Olonne-Ile de Ré** », la limite marine (60 %) apparaît comme la première source dans l'alimentation en azote dissous des ulves sur la période productive de mai à septembre. Avec 13.9 %, la Charente est la seconde source d'azote suivie de la Gironde (11.2 %). La Loire, malgré son éloignement géographique, contribue à hauteur de 3.1 % en moyenne. Le traceur intitulé « Autres sources » regroupant les 44 autres sources terrigènes contribue assez faiblement de mai à septembre (7.6 %) mais contribue significativement en début de saison à l'échelle du mois de mai. Ce résultat doit être pris avec précaution s'agissant du début de saison en raison de la montée



|   |  |      |                            |
|---|--|------|----------------------------|
|   | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/011-V1.0 |
|   |  | Date | 21/02/14                   |
|   |  | Page | 176/177                    |

lente de la somme des traceurs à 100 % qui ne semble *a priori* pas atteint avant le mois de juin. De la même façon que pour le modèle « Loire-Vilaine », le sédiment joue un rôle négligeable dans la fourniture en azote dissous des ulves (< 2%).



Les trois principaux facteurs permettant d'expliquer la participation importante de la limite marine au contenu en azote des ulves par rapport aux principaux apports du secteur d'étude (Gironde, Charente, Lay et Sèvre Niortaise) sont :

1. Une dilution importante des panaches d'azote dissous provenant de ces principaux cours d'eau,
2. Des régimes de vent à l'échelle de la saison 2009 de développement des ulves orientés de manière prédominante entre le secteur nord et ouest ce qui favorise la dispersion de leurs eaux fluviales en direction du sud du domaine, soit en dehors des zones de dépôts en ulves,
3. La présence des pertuis Breton et d'Antioche encadrant l'île de Ré et qui tend à diluer fortement et à expulser vers le large les eaux fluviales provenant des grands cours d'eau.

L'association des ces trois facteurs ne permet pas *a priori* aux ulves de profiter majoritairement de ces grands apports pour couvrir majoritairement leur besoin nutritionnel. L'analyse de l'origine de l'azote contenu dans les ulves souligne également l'insuffisance des seuls apports locaux pour développer et soutenir la marée verte à l'échelle des secteurs étudiés.

En dépit des différentes sources d'erreurs identifiées dans le cadre du présent volet de la mission MB2 concernant le calage et la validation des deux modèles de rang 1, les résultats obtenus peuvent être qualifiés de satisfaisants et permettent d'envisager l'application des scénarii de réduction des flux de nutriments tels que décrits dans la mission MC du CCTP.



|  |  |      |                            |
|--|--|------|----------------------------|
|  <br><small>LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ</small><br><small>REPUBLIQUE FRANÇAISE</small><br><small>PRÉFET</small><br><small>DE LA RÉGION</small><br><small>PAYS DE LA LOIRE</small> | <b>Document de référence<br/>(MB2)</b> | Réf. | CEVA/AQM13001/RAP/006-V1.0 |
|  |  | Date | 10/06/13                   |
|  |  | Page | 177/177                    |

## Bibliographie

Aminot A., Guillaud J.-F., Andrieux F. *Spéciation du phosphore et apports en baie de seine orientale*. Oceanologica Acta, 16, 617-623, 1993

CEVA. *Application du modèle écologique tri-dimensionnel MARS-Ulves à la détermination des objectifs de qualité nitrates/ulves en milieu vaseux (site de la Ria d'Étel)*. Rapport pour l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, la Région Bretagne, les Conseils Régionaux des Côtes d'Armor, du Finistère, du Morbihan et d'Ile et Vilaine. 31 p., 2011

Guillaud J.-F. *Calcul en temps réel des concentrations fluviales en nutriments, en fonction des débits, sur la façade Atlantique, la Manche et le sud de la Mer du Nord*. Rapport Ifremer, 24p., 2008

Gohin F. *Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters*, Ocean Science, 7, 705-732, doi:10.5194/os-7-705-2011, 2011

Huret M., Struski C., Leger Fabien, Petitgas P., Lazure P., Sourisseau M. *Modélisation couplée physique-biogéochimie du golfe de Gascogne sur la période 1971-2007*. Rapport Ifremer, 26 p., 2009

Lazure P., Dumas F. *An external-internal mode coupling for 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)*. Advances in Water Resources 31: 233-250, 2008

Ménesguen A., Cugier P., Leblond I. *A new numerical technique for tracking chemical species in a multisource, coastal ecosystem applied to nitrogen causing Ulva blooms in the Bay of Brest (France)*. Limnology and Oceanography, 51, 591-601, 2006

Perrot T., Rossi N., Ménesguen A., Dumas F. *Modelling green macroalgae blooms on the coasts of Brittany, France to enhance water quality management*. Journal of Marine Systems, 132, 38-53, 2014

Raybaud V. *Modélisation de l'écosystème pélagique en mer Ligure. Application à la campagne DYNAPROC 2 (Septembre-Octobre 2004)*. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 371p. Décembre 2008.

Salihoglu B., Garçon V., Oschlies A., Lomas M. W. *Influence of nutrient utilization and remineralization stoichiometry on phytoplankton species and carbon export: A modelling study at BATS*. Deep-Sea Research I, 55, 73-107, 2008.

Saulquin B., Gohin F., Garrello R. *Regional objective analysis for merging high-resolution meris, modis/aqua, and seawifs chlorophyll-a data from 1998 to 2008 on the european atlantic shelf*. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49, 143-154, 2011. doi: 10.1109/tgrs.2010.2052813.

Sourisseau M., Roge M. *Variation spatio-temporelle des nutriments de la sous-région marine des Mers Celtiques DCSMM/EI/MC*. Ministère de l'Écologie du Développement Durable des Transports et du Logement, Ref. DCSSM/EI/EE/MC/1.2.3/2011, 19p.

Taylor K. E. *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*, Journal of Geophysical Research, 106, 7183-7192, 2001.

