

Laboratoire Environnement Ressources Poitou Charentes

Jean-Yves Stanisière  
Franck Dumas  
Martin Plus  
Danielle Maurer  
Stéphane Robert

Décembre 2006 – DOP/LER.LER/PC/06.1059

ifremer

## Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oléron



*Antoine Stanisière 2007. Maline à Trompe-Sot*

PNEC – Chantier Littoral Atlantique :  
Mode de fonctionnement des systèmes semi-fermés du littoral Atlantique.  
Thème 1 : Caractérisation des forçages hydrodynamiques.



# **Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé :**

## **Le Bassin de Marennes-Oléron**

**PNEC – Chantier Littoral Atlantique :**

Mode de fonctionnement des systèmes semi-fermés du Littoral Atlantique.

Thème 1 : Caractérisation des forçages hydrodynamiques.



# sommaire

---

<b>1. Introduction et objectifs de l'étude</b>	<b>11</b>
<b>2. Le modèle MARS-2D</b>	<b>12</b>
2.1. Caractéristiques générales	12
2.2. Emprise et Résolution	15
2.3. Bathymétrie	16
2.4. Calage	20
2.5. Validation	24
<hr/>	
<b>3. Le bassin de Marennes-Oléron</b>	<b>32</b>
<b>4. Les forçages météorologiques et océaniques</b>	<b>33</b>
4.1. Le vent	33
4.2. La houle	33
<hr/>	
<b>5. Caractérisation des composantes hydrodynamiques</b>	<b>35</b>
5.1. Marée, volume oscillant, surcotes et décotes	35
5.1.1. Caractéristiques générales de la marée	35
5.1.2. Volumes oscillants	38
5.1.3. Surcotes et Décotes	40
5.2. Courantologie générale	41
5.2.1. Courants instantanés	41
5.2.2. Courants maximums	44
5.2.3. Débits instantanés et résiduels aux frontières	45
5.2.4. Flux résiduels	47
5.3. Le temps de renouvellement ou « flushing-time »	49
5.3.1. Méthode de calcul	49
5.3.2. Les simulations réalisées	52
5.3.3. Influence du coefficient de marée	53
5.3.4. Influence du vent	54
5.3.5. Influence des débits des rivières	58
5.4. Devenir des apports des fleuves côtiers dans le bassin	59
5.4.1. Méthode de calcul de l'âge des masses d'eau	59
5.4.2. Les simulations réalisées	61
5.4.3. Résultats	61
<hr/>	
<b>6. Synthèse</b>	<b>64</b>
<b>7. Bibliographie</b>	<b>67</b>
<b>8. Annexes</b>	<b>69</b>



## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement,

Stéphane Robert, Christophe Arnaud , Hugues Evano, Florence Cornette et Jean-François Bouget, plongeurs rompus à la pénombre des eaux du Bassin.

Jean-Luc Seugnet, Philippe Geairon et James Grizon, pilotes chevronnés de l'Haslea.

Pascal Schwerdtle secouriste et « gros bras » souvent...

Cette équipe, par son professionnalisme et sa connaissance pointue du Bassin , a permis de mener à bien, et parfois dans des conditions difficiles, les campagnes d'acquisition courantométrique tant précieuses à la validation du modèle et donc à la fiabilité des résultats présentés dans cette étude aujourd'hui.

Un remerciement particulier également à Mr Jacques Fazilleau et son équipe du service hydrographique de la DDE 17 qui, avec le soutien du Conseil Général 17, réalisent année après année l'actualisation de la connaissance bathymétrique des Pertuis Charentais.

Les auteurs remercient enfin,

Guy Bachelet, responsable du Chantier PNEC Littoral Atlantique.

Aldo Sottolichio, coordinateur PNEC du thème Caractérisation des Forçages Hydrodynamiques.

Cédric Bacher, responsable du programme Dynamique et Santé des Ecosystèmes Côtiers Estuariens.

Patrick Gentien et Philippe-Jacques Hatt responsables successifs de l'ORE REPER.

Hélène Perron pour sa relecture éclairée.





## Avant-propos

Le thème 1 du chantier PNEC Littoral Atlantique, dans le cadre duquel a été réalisé ce travail, avait pour objectif principal la compréhension et la comparaison du fonctionnement hydrodynamique de deux lagunes mésotidales : les Bassins de Marennes-Oléron et d’Arcachon. Afin de rendre plus directe la recherche d’information concernant l’un ou l’autre de ces deux systèmes, nous avons choisi de rédiger deux rapports, l’un pour Marennes-Oléron et l’autre pour Arcachon. Les mêmes méthodes ont néanmoins été utilisées sur les deux sites, les chapitres les décrivant sont donc communs aux deux rapports. La comparaison entre les deux systèmes a fait l’objet d’un troisième rapport.

Références des deux autres rapports :

Plus et al., 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d’une lagune mésotidale, le Bassin d’Arcachon. Rapport Ifremer / LER-Arcachon, 50 p. + annexes.

Plus et al., 2006. Etude comparative des composantes hydrodynamiques de deux systèmes mésotidaux, les Bassins d’Arcachon et de Marennes-Oléron. Rapport Ifremer / LER-AR, 21 p.



## 1. Introduction et objectifs de l'étude

La compréhension des modes de fonctionnement des systèmes littoraux passe par l'étude de l'hydrodynamique responsable du transport de l'ensemble des compartiments biogéochimiques les composant. L'idée de maintenir une étroite connexion entre la physique, la biologie, la géologie et la chimie des océans n'est pas nouvelle, et faisait d'ailleurs l'objet d'une note dans le premier rapport du Conseil International pour l'Etude des Océans (ICSS) en 1902 (Sverdrup et al., 1954) :

*... it was seen from the beginning that the study of the physical conditions, of the chemical nature of the ocean waters, of the currents, etc., was of the greatest importance for the investigation of the problems connected with life, that on the other hand, the study of the floating organisms had particular worth for the solution of hydrographic problems, and consequently that sharp line should never be drawn between these two main divisions ...*

Depuis lors, les capacités de calculs n'ont cessé d'augmenter et permettent à l'heure actuelle la simulation de l'hydrodynamique des zones côtières à des échelles spatio-temporelles compatibles avec les processus biogéochimiques. Cependant, le raffinement des modèles modernes engendre, et particulièrement pour des systèmes côtiers lagunaires ou estuariens soumis au balancement des marées, une grande complexité d'analyse qui, bien souvent, rend difficile la perception du système dans sa globalité. En outre, la grande diversité structurelle des modèles développés ne facilite pas les comparaisons inter-systèmes, ces dernières n'étant possibles que par l'utilisation de grandeurs synoptiques communes. Ce sont sans doute quelques unes des raisons pour lesquelles sont apparus dans la littérature, depuis une trentaine d'années, de nouveaux outils et concepts, qui permettent une compréhension plus synthétique de l'hydrodynamique des systèmes côtiers par le calcul de grandeurs, Lagrangiennes ou Eulériennes et dérivés des modèles hydrodynamiques, tels que : temps de renouvellement, temps de transit, temps de résidence, âge des masses d'eau etc. On citera par exemple Zimmerman (1976), Takeoka (1984), Oliviera & Baptista (1997), Brooks et al. (1999), Delhez et al. (1999), Deleersnijder et al. (2001), Delhez & Deleersnijder (2002), Monsen et al. (2002), Delhez et al. (2004), Shen & Haas (2004).

L'objectif final de cette étude est de décrire les composantes hydrodynamiques de deux lagunes mesotidales du littoral atlantique, les Bassins de Marennes-Oléron et d'Arcachon, par le calcul de grandeurs caractéristiques telles que les *flux résiduels*, le *prisme de marée*, le *temps de renouvellement* ou l'âge des masses d'eau, considérées comme des mesures de la rémanence des masses d'eau à l'intérieur des limites spatiales définies. Un même code de calcul, le modèle MARS-2D, développé sur les deux sites, a été exploité pour la caractérisation de l'hydrodynamique et le calcul des grandeurs susmentionnées. Les mêmes méthodes de calcul ont été utilisées de façon à pouvoir comparer les deux sites et à tenter de répondre aux questions suivantes : Quelles sont les circulations des masses d'eau, instantanées et résiduelles ? Quels sont les temps de renouvellement des eaux ? Comment la marée et le vent agissent-ils sur ces variables ?

Quelle est l'influence des rivières et comment se dispersent les panaches issus de ces dernières ?

## 2. Le modèle MARS-2D

### 2.1. Caractéristiques générales

Le modèle MARS-2D est un modèle hydrodynamique à surface libre, résolvant les équations classiques de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) sous les hypothèses de Boussinesq et d'hydrostaticité ainsi que l'équation de dispersion-diffusion d'un élément transporté, dans le plan horizontal. Ces équations sont résolues par une méthode aux différences finies.

Les hypothèses initiales principales sont :

- A. La composante horizontale du courant ne varie pas beaucoup depuis la surface jusqu'à proximité du fond (courant de masse). Le modèle calcule donc des courants moyens sur la verticale et cette valeur moyenne a une forte signification physique.
- B. Les vitesses verticales sont faibles.

Compte tenu de la faible profondeur du Bassin étudié et de l'absence de stratification prolongée, ces deux hypothèses semblent réalistes.

La conservation de la quantité de mouvement et de la masse du système sont décrites dans le modèle par le système d'équations (1) dit de Saint-Venant :

$$(1) \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f\bar{v} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{D}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \left( v_{cisxx} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( v_{cisxy} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)}{\partial y} \\ + \frac{1}{\rho_0 D} (\tau_{xz}(\zeta) - \tau_{xz}(-H_0)) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + f\bar{u} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{D}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \left( v_{cisyx} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( v_{cisyy} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)}{\partial y} \\ + \frac{1}{\rho_0 D} (\tau_{yz}(\zeta) - \tau_{yz}(-H_0)) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$



où :

u	Composante zonale du courant (Ox)	$\zeta$	Côte de la surface libre
t	Temps	D	Hauteur d'eau ( $D = \zeta + H_0$ )
v	Composante méridienne du courant (Oy)	$\rho$	Densité de l'eau
f	Coefficient de Coriolis	$v_{cis}$	Tension de cisaillement horizontale
$\rho_0$	Densité moyenne de l'eau	$\tau$	Tension de Reynolds
$p_{atm}$	Pression atmosphérique	$H_0$	Côte du fond

MARS-2D calcule la courantologie (en intensité et direction de courants moyens sur la verticale), les hauteurs d'eau ainsi que la dispersion-diffusion d'éléments chimiques (ou assimilés) sur le domaine défini (équation 2). Enfin, bien entendu, le modèle traite les zones découvrantes.

$$\frac{\partial(DC)}{\partial t} + \frac{\partial(DuC)}{\partial x} + \frac{\partial(DvC)}{\partial y} - \frac{\partial(DK_x \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(DK_y \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial y} + IDC - S = 0 \quad (2)$$

avec C, la concentration du constituant,  $K_x$  et  $K_y$ , respectivement, les composantes zonales et méridiennes du coefficient de diffusion horizontale, I, le coefficient de décroissance propre et S le terme de production (source).

La discrétisation spatiale du modèle est réalisée selon une grille de type C dans la classification d'Arakawa. Le domaine de calcul est subdivisé en mailles de surfaces horizontales dans lesquelles les inconnues des équations de Saint-Venant sont disposées comme sur la Figure 1.

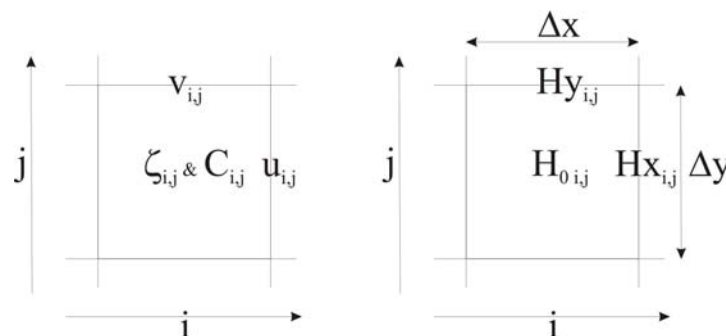


Figure 1. Position des différentes variables sur une maille  $i, j$ . A gauche : composantes zonale et méridienne des courants ( $u$  et  $v$ ), élévation de la surface libre ( $\zeta$ ) et concentration des substances dissoutes ( $C$ ). A droite : positions du fond aux points  $u$  et  $v$  de la maille ( $H_x$  et  $H_y$ ) et position du fond aux points  $\zeta$  ou  $C$  ( $H_0$ ).

La discrétisation temporelle est de type « Alternate Direction Implicit » (ADI). Le pas de temps est divisé en deux demi-pas de temps pendant lesquels, alternativement, sont résolues les équations de conservation de la quantité de mouvement selon l'axe Ox (composante zonale  $u$ ) puis selon l'axe Oy (composante méridienne  $v$ ). L'équation de continuité est, pour sa part, résolue à chaque demi-pas de temps (Figure 2).

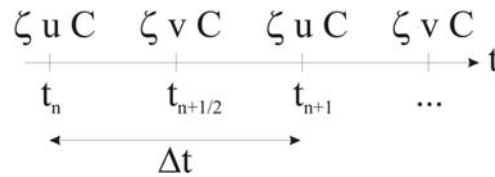


Figure 2. Schéma ADI de discrétisation temporelle utilisé dans MARS-2D.

Le schéma numérique respecte un critère de stabilité, dit CFL (Courant Friedrichs-Levy), qui limite le pas de temps utilisé de façon à ce que la distance parcourue par une particule se déplaçant avec le courant ( $u, v$ ) durant celui-ci soit inférieure à la taille de la maille utilisée. Dans le modèle, le pas de temps  $\Delta t$  est adapté de façon à ce que le nombre de courant ( $u \times \frac{\Delta t}{\Delta x}$ ) soit toujours proche de 0,6. De cette façon, pendant la simulation le pas de temps peut augmenter (de 2% au maximum par pas de temps) lorsque le nombre de courant est inférieur à 0,6. Par exemple, on établira ainsi que pour une maille de 65 m de côté et des vitesses de courant de l'ordre de 1 m/s, le pas de temps du modèle est de 30 secondes environ.

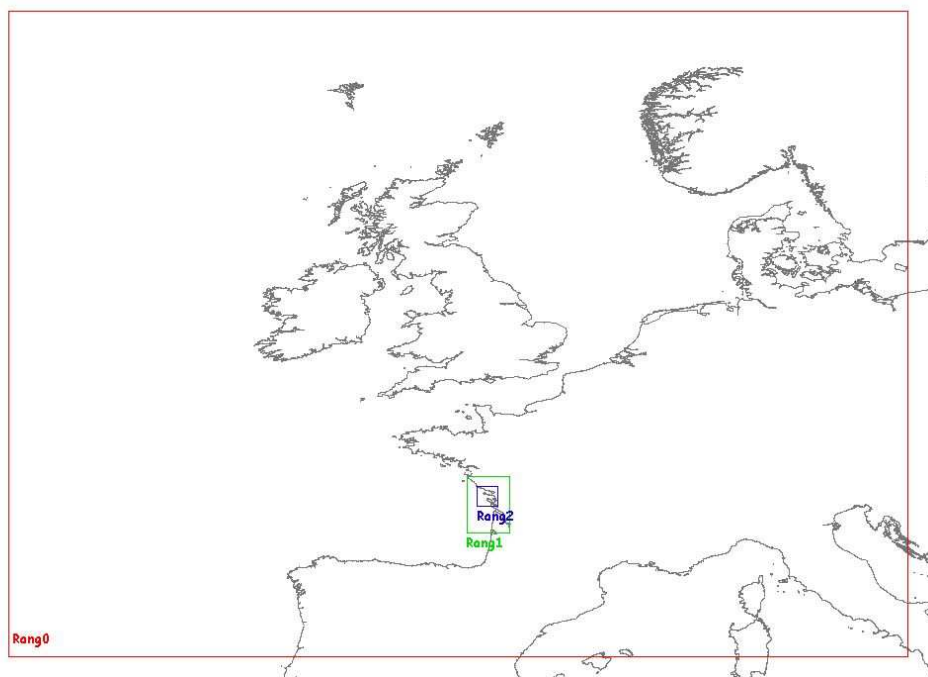
Les conditions aux limites contiennent à chaque pas de temps les effets barotropes de la marée et du vent. Elles sont fournies grâce à un ensemble de 3 modèles gigognes, le modèle le plus vaste fournissant les conditions aux limites du modèle immédiatement inférieur et ainsi de suite jusqu'au modèle de détail. Les conditions initiales du modèle le plus vaste peuvent donc être relativement approximatives, dans la mesure où elles sont assez éloignées de la zone d'étude et que par ailleurs, l'exploitation du modèle ne se fait qu'après la durée nécessaire à la convergence du calcul vers une solution satisfaisante.

Un forçage par la marée réaliste peut être appliqué à la limite ouverte, grâce aux solutions de marée globale du Legos FES 2004. La solution FES fournit 14 composantes harmoniques (K1, K2, M2, M4, mMf, Mm, Msqm, Mtm, N2, O1, P1, Q1 et S2) et permet une reproduction de la marée à la précision centimétrique en plein océan et décimétrique en zones côtières. Une marée à coefficient constant ou une marée simplifiée, ne prenant en compte les seules harmoniques M2 et M4, peut également être appliquée.

L'emploi des champs analysés de vent et de pression à la résolution spatiale de 55 km (grille d'archive à maille régulière) issus du modèle de prévision météorologique Arpège (Météo France) permet la prise en compte des effets météorologiques. Un forçage par le vent homogène stationnaire ou non-stationnaire peut être également appliqué sur tout le domaine de calcul. En outre, le forçage induit par le débit des fleuves peut être intégré en mode stationnaire et non stationnaire.

## 2.2. Emprise et Résolution

Le modèle employé dans l'étude est à la résolution 300m. Il couvre l'ensemble des Pertuis Charentais depuis le Bassin de Marennes-Oléron au sud jusqu'au Pertuis Breton au nord (Figure 3). Les conditions aux limites du modèle sont fournies par l'emboîtement de 2 modèles.

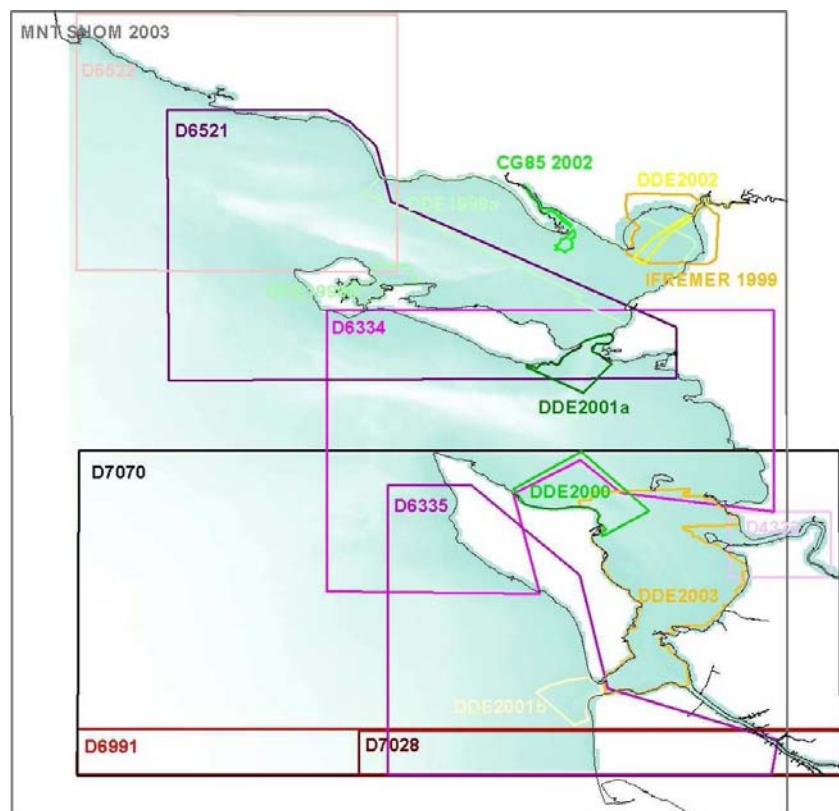


	Coordonnées des grilles (wgs84)				Pas de la grille (m)		Nombre de mailles	
	Y_Nord	Y_Sud	X_Est	X_Ouest	dY	dX	nbY	nbX
Rang0	65	40	15	-20	5637.39	5556.26	421	501
Rang1	46.881279	44.6847267	-0.5283303	-2.1462479	1292.6	1298.36	98	189
Rang2	46.5190811	45.7128983	-0.9786786	-1.7959771	299.8	299.62	211	300

Figure 3. Description l'emboîtement du modèle Mars2D des Pertuis Charentais.

### 2.3. Bathymétrie

Les grilles bathymétriques des différents emboîtements du modèle ont été établies à partir de données de sondes numérisées issues de cartes du SHOM et de campagnes de levées bathymétriques de la DDE 17 et de l'Ifremer (Figure 4). Le calcul des grilles bathymétriques a été réalisé avec le logiciel géostatistique Isatis selon une méthode d'interpolation linéaire standardisée.



	Identifiant	Titre	Date
CARTES SHOM	6334	Pertuis d'Antioche. (Echelle : NC)	
	6335	Ouest Ile d'Oléron. (Echelle : NC)	
	6521	Ile de Ré. (Echelle : NC)	
	6522	De Saint-Jean-de-Monts aux Sables-d'Olonne. (Echelle : NC)	
	6991	De la Gironde à Cabo Peñas. (Echelle : 1 : 368 367)	1984
	7028	De la Pointe de la Coubre à la Pointe de la Négade - Embouchure de La Gironde. (Echelle : NC)	
	7070	De l'île d'Oléron au Bassin d'Arcachon (Echelle : 1 : 167 750)	1985
LEVEES BATHYMETRIQUES	DDE1999a	Levés bathymétriques Nord Pertuis Breton. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	1999
	DDE1999b	Levés bathymétriques Fier d'Ars. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	1999
	IFREMER1999	Levés bathymétriques Laser aéroporté Baie de l'Aiguillon. Source : "IFREMER"	1999
	DDE2000	Levés bathymétriques Longe de Boyard. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	2000
	DDE2001a	Levés bathymétriques Courreau de La Pallice. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	2001
	DDE2001b	Levés bathymétriques Maumusson. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	2001
	DDE2002	Levés bathymétriques Estuaire de la Sèvre Niortaise. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	2002
	CG85 2002	Levés bathymétriques Estuaire du Lay. Source : "Conseil général de Vendée"	2002
	DDE2003	Levés bathymétriques Bassin Marennes Oléron. Source : "DDE et Conseil général de Charente-Maritime"	2003

Figure 4. Sources bathymétriques du modèle Marennes-Oléron.



La représentation bathymétrique des différents fleuves côtiers dans un système contraint par le caractère fixe des mailles a été réalisée selon les deux approches suivantes :

Pour le Lay, la Sèvre Niortaise et la Charente, un MNT à fine résolution (10 mètres), calculé à partir des levées bathymétriques disponibles, a permis de déterminer la fonction polynômiale décrivant l'évolution volume en eau de la rivière depuis la plus basse mer jusqu'à la plus haute mer astronomique. La dérivée de cette fonction permet ensuite de calculer la surface en eau de la rivière selon la cote de surface libre. On peut en déduire alors la cote de chaque maille nouvellement mouillée depuis la plus basse mer jusqu'à la plus haute mer astronomique. Le nombre de mailles décrivant le lit de la rivière dans le modèle est défini par la surface mouillée au moment de la plus basse mer astronomique. La cote de ces mailles est déterminée par le rapport entre le volume en eau de la rivière et la surface mouillée totale à ce même moment. La construction se poursuit section mouillée après section mouillée depuis l'embouchure, en sélectionnant et ajoutant de part et d'autre de la maille centrale, les mailles dont la cote respecte au mieux l'évolution du profil en travers de la section. Avec cette approche le volume oscillant dans les fleuves est respecté et la variation de la section mouillée est bien représentée au voisinage de l'embouchure mais se dégrade vers l'amont.

La Seudre bordée de marais ostréicoles, se caractérise par un fonctionnement hydrodynamique complexe et fortement anthropisé. Le volume oscillant du marais, estimé à 40 millions de m<sup>3</sup> en vives eaux moyennes, génère un forçage hydrodynamique non négligeable dans le Pertuis de Maumusson qu'il faut prendre en compte dans le modèle. L'absence de modèle hydraulique applicable au marais de la Seudre, nous a conduit à développer une méthodologie originale permettant de définir une bathymétrie respectant la variation du volume oscillant de la Seudre et de ses marais selon la marée. Cette approche est basée sur l'estimation de l'évolution du volume passant cumulé selon la cote de la surface libre en régime de flot. L'utilisation à l'embouchure de la Seudre d'un courantomètre acoustique doppler 600 kHz muni d'un capteur de pression, a permis de mesurer le courant et la hauteur de la colonne d'eau pendant deux cycles de ME-VE-ME consécutifs en hiver puis en été. La connaissance du profil bathymétrique du lit de la Seudre au point de mesure a permis d'estimer le débit normal à la section mouillée (Figure 5). Sous les hypothèses, d'un écoulement unidirectionnel en régime établi (pas d'accélération) et d'une surface libre uniforme sur la section (pas de pente transversale ni longitudinale), la variation de l'intensité du courant avec la profondeur le long de la section mouillée est donnée par la relation (3) :

$$U = U_0 (H/H_0)^{(2/3)} \quad (3)$$

U intensité corrigée du courant

H hauteur de la colonne d'eau au point de correction

U<sub>0</sub> intensité mesurée du courant

H<sub>0</sub> hauteur de la colonne d'eau mesurée

Partant du principe que le flot est peu soumis aux pratiques anthropiques liées à la gestion des marais, on calcule le volume cumulé passant, de la basse mer à la pleine mer, aux différentes marées montantes successives (Figure 6). Dans une démarche identique à celle décrite précédemment, on calcule les fonctions polynomiales décrivant le volume et la surface mouillée moyens du système (Figures 7 et 8) selon la cote de la surface libre. La cote des mailles nouvellement mouillées depuis la plus basse mer jusqu'à la plus haute mer mesurée sont ensuite déterminées. La construction de la Seudre est réalisée en ajoutant de part et d'autre et le long d'un lit théorique de la Seudre (déterminé par les quelques levées bathymétriques disponibles), les mailles triées selon leurs cotes croissantes. Avec cette méthode le volume oscillant, le courant de flot et de jusant sont globalement bien reproduits en morte eau et en marée moyenne. Cependant du fait des retenues et des lâchés d'eau liés à la gestion des marais ces mêmes variables sont moins bien représentées avant et après les vives eaux notamment en hiver.

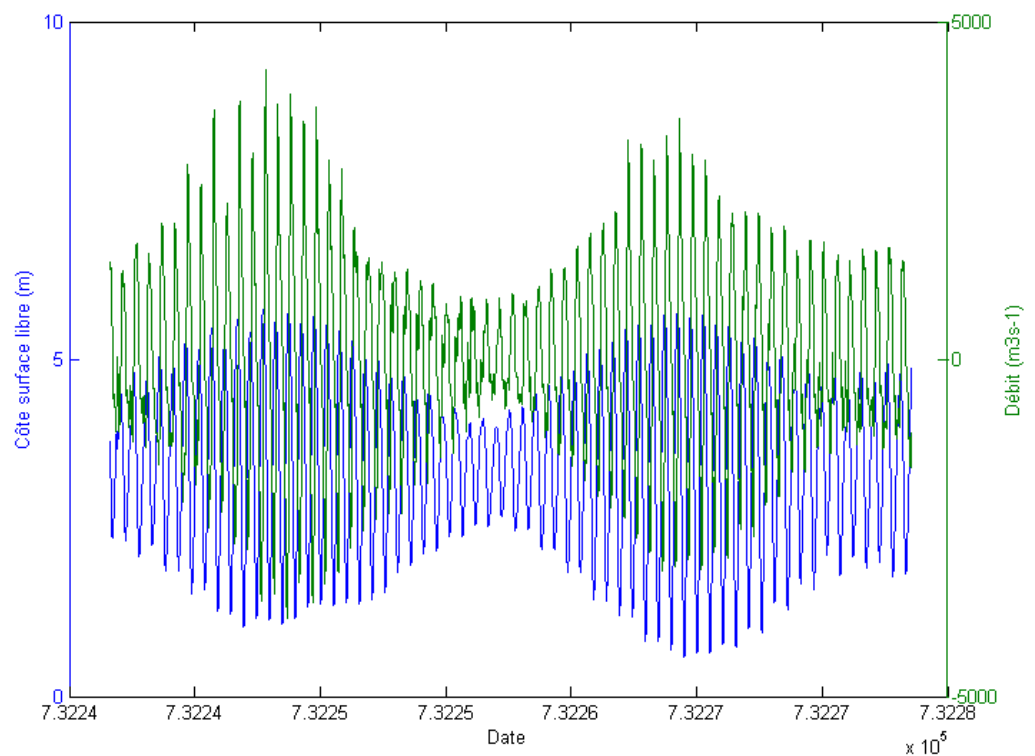


Figure 5. Variation du débit normal à la section (en vert) de la Seudre en fonction de la cote de la surface libre (en bleu).

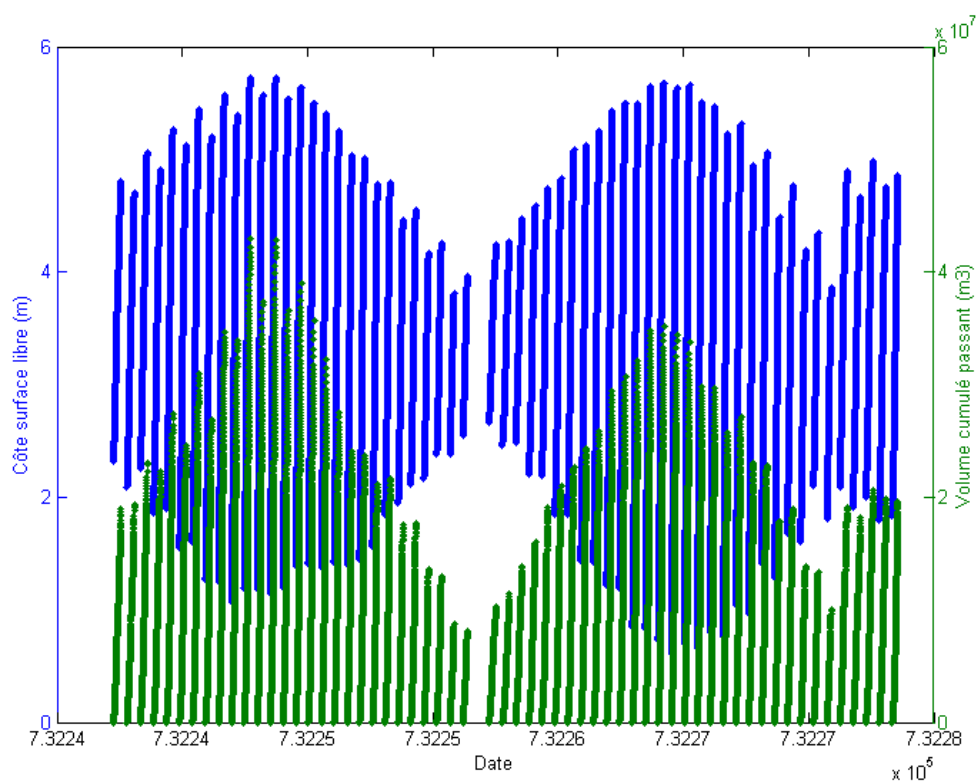


Figure 6. Volumes cumulés passants (en vert) en fonction de la cote de la surface libre (en bleu) en régime de marées montantes.

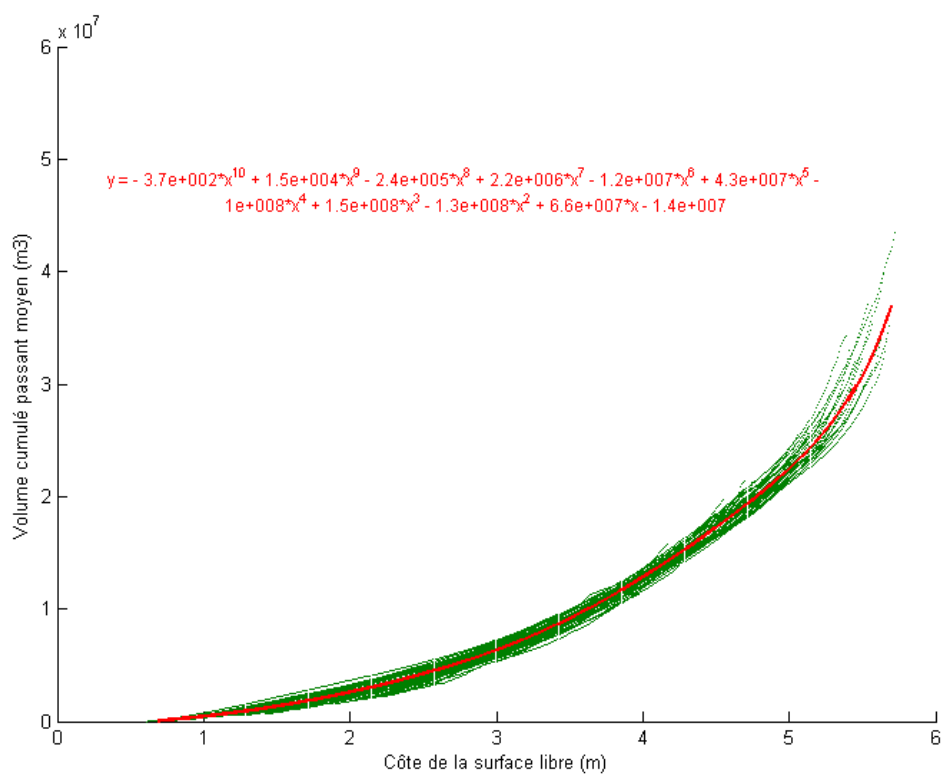


Figure 7. Modélisation du volume cumulé moyen selon la cote de la surface libre

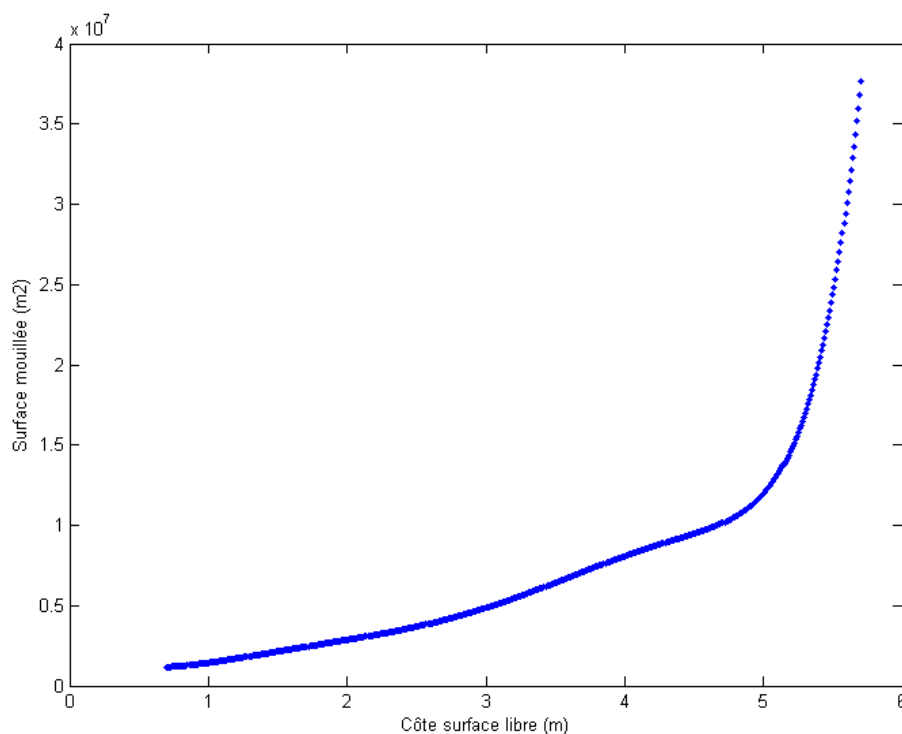


Figure 8. Modélisation de la surface mouillée selon la cote de la surface libre

## 2.4. Calage

A partir des solutions spatialisées de marée de précision centimétrique fournies par le SHOM (R. Le Roy et B. Simon 2003), un calage fin des différents emboîtements du modèle a pu être réalisé.

La méthode employée consiste à déterminer pour chaque emboîtement, le coefficient de frottement de Strickler pour lequel l'écart absolu de phase et de position de la surface libre, fournis à la limite de l'emboîtement sous-jacent, sont minimums et homogènes spatialement.

Pour chaque condition de frottement testée, l'erreur absolue sur la position de la surface libre est tout d'abord calculée en chaque point de référence (Figures 9). Le décalage temporel appliqué entre le signal de marée modélisé et mesuré pour lequel l'écart de position de la surface libre est minimum détermine ensuite l'écart de phase en chaque point au coefficient de frottement testé (Equation 4, Figure 10).

Le Strickler optimum est déterminé selon deux critères. Le critère de minimalisation de l'erreur tout d'abord, il correspond au Strickler pour lequel la moyenne des différences de phase et de position de la surface libre aux différents points de calage est minimum (Equations 5 et 6 et Figure 11). Le critère d'homogénéité spatiale enfin est réalisé par le Strickler où l'écart type des différences de phase et de position de la surface libre aux différents points de calage est minimum (Equations 7 et 8 et Figure 11). Les figures 9 à 12 illustrent le calage de l'emboîtement forçant aux limites le modèle utilisé dans cette étude.

La paramétrage numérique des différents emboîtements du modèle Mars 2D est décrit plus en détails dans l'Annexe A.

$$EA_{strickler}^i = \frac{\sum_{t=1}^n |\zeta_{modele}^t - \zeta_{mesure}^t|}{n} \quad (4)$$

$$\mu EA_{strickler} = \frac{\sum_{i=1}^k EA_{strickler}^i}{k} \quad (5)$$

$$\mu EP_{strickler} = \frac{\sum_{i=1}^k EP_{strickler}^i}{k} \quad (6)$$

$$\sigma EA_{strickler} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (EA_{strickler}^i - \mu EA_{strickler})^2}{k-1}} \quad (7)$$

$$\sigma EP_{strickler} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (EP_{strickler}^i - \mu EP_{strickler})^2}{k-1}} \quad (8)$$

$\zeta_{mesure}^t$  : Position de la surface libre mesurée au temps t et au point i

$\zeta_{modele}^t$  : Position de la surface libre calculée au temps t et au point i

$EA_{strickler}^i$  : Ecart absolu de la position de la surface libre au point i et au strickler testé

$EP_{strickler}^i$  : Ecart de phase au point i au strickler testé

$\mu EA_{strickler}$  : Moyenne des écarts absolus de la position de la surface libre aux k points et au strickler testé

$\sigma EA_{strickler}$  : Ecart type des écarts absolus de la position de la surface libre aux k points et au strickler testé

$\mu EP_{strickler}$  : Moyenne des écarts de phase aux k points et au strickler testé

$\sigma EP_{strickler}$  : Ecart type des écarts de phase aux k points et au strickler testé

$n$  : Nombre de mesure au point i

$k$  : Nombre de points de calage

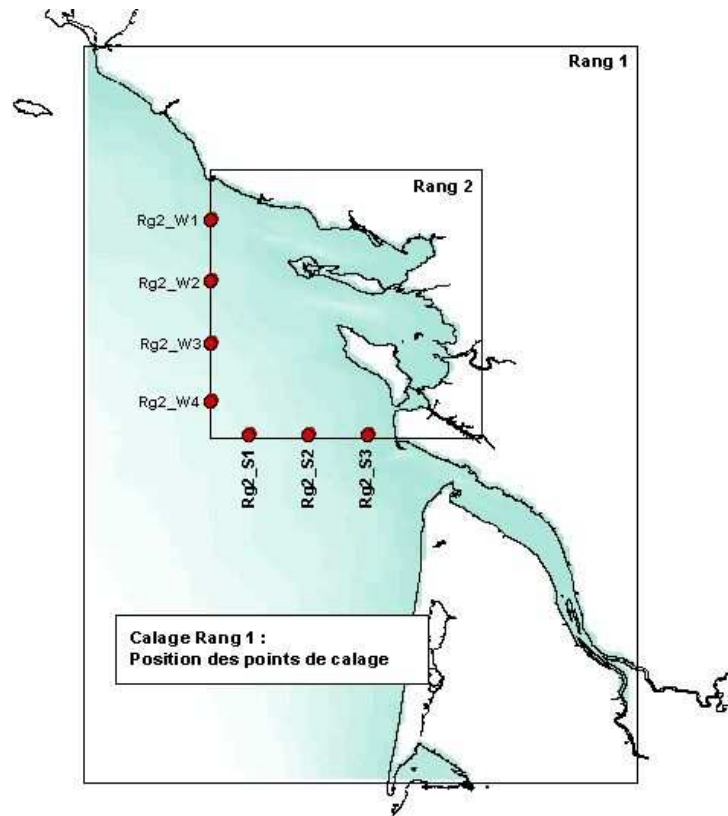


Figure 9. Position des points de calage de l'emboîtement 1 forçant le modèle utilisé dans cette étude

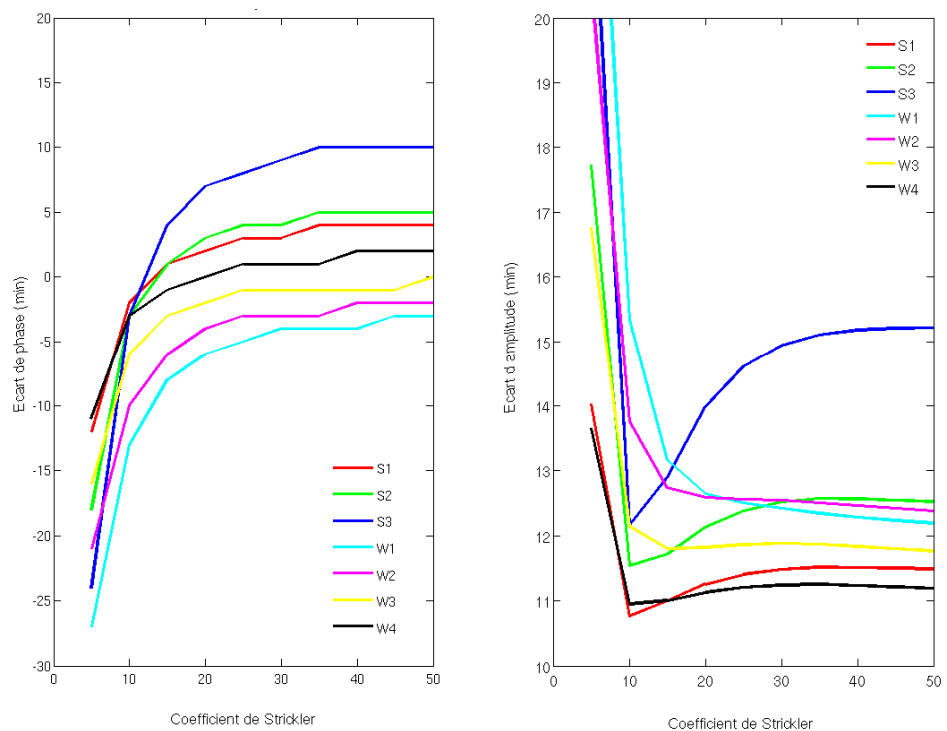


Figure 10. Evolution de l'écart de phase et de l'erreur de position de la surface libre aux différents points de calage selon le coefficient de frottement de Strickler.

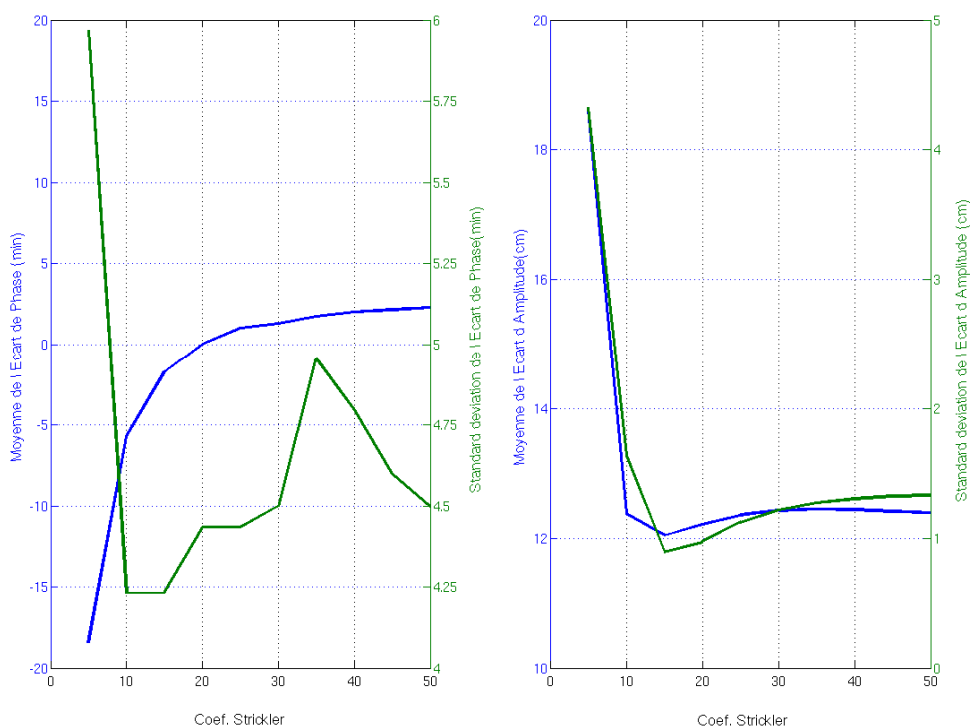


Figure 11. Moyenne et écart type des l'écart de phase et de position de la surface libre. Un coefficient de strickler 15 minimise l'écart d'amplitude et de phase

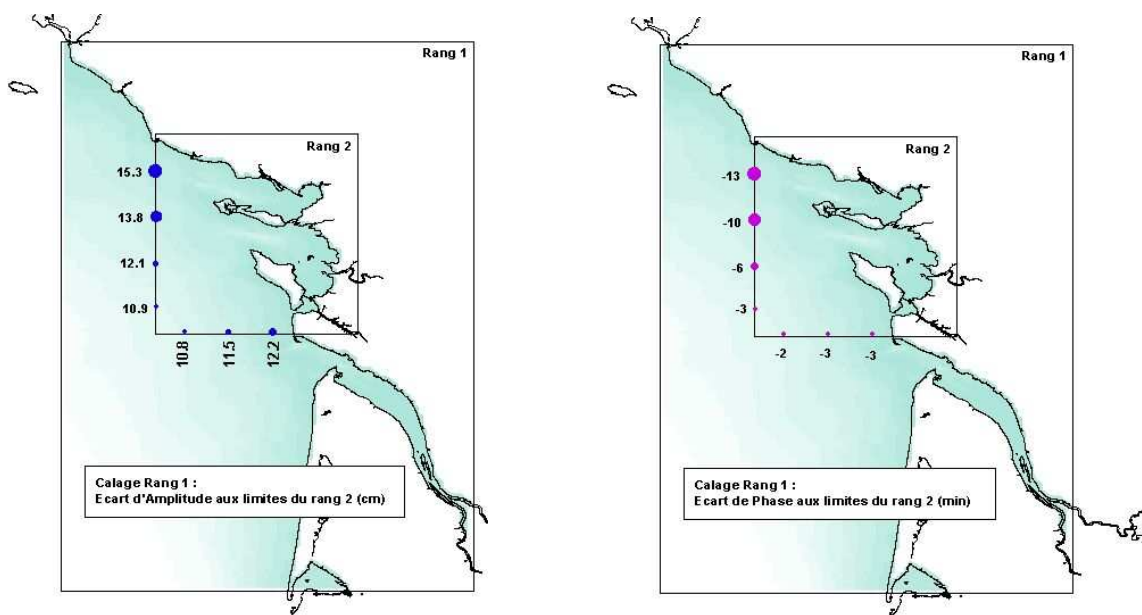
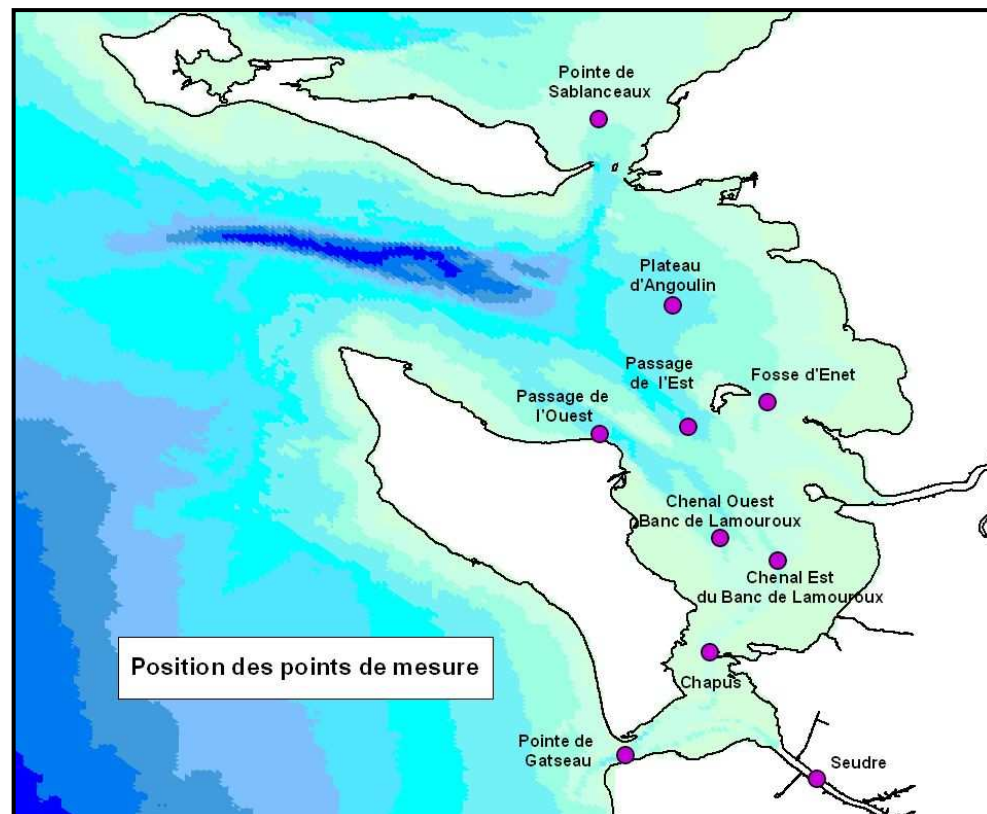


Figure 12. Ecart de phase (minutes) et erreur de la position de la surface libre (centimètres) aux différents points après calage au coefficient de Strickler 15

## 2.5. Validation

La réalisation de campagnes de mesures courantométriques en dix points caractéristiques du bassin de Marennes-Oléron (Figure 13) d'avril à novembre 2004 a permis une validation poussée du modèle sur les hauteurs d'eau et les courants. Les acquisitions ont été réalisées avec un courantomètre acoustique doppler RDI 600 kHz muni d'un capteur de pression. L'appareil positionné au fond durant au moins un cycle de marée ME-VE-ME a permis de mesurer, toutes les 5 minutes et tous les 50 centimètres, la direction et l'intensité du courant et la hauteur de la colonne d'eau.



Point	Date de pose	Date de levée	X EUR50	Y EUR50
Chenal_Ouest_Banc_Lamouroux	13/05/2004 15:06	27/05/2004 11:36	01°10.311' W	45°55.757' N
Passage_de_l_Est	27/05/2004 13:48	06/11/2004 13:48	01°11.527' W	45°59.956' N
Passage_de_l_Ouest	06/11/2004 15:50	30/06/2004 11:20	01°14.870' W	45°59.700' N
Chapús	30/06/2004 15:13	20/07/2004 11:03	01°10.692' W	45°51.466' N
Pointe_Gatseau	20/07/2004 13:43	28/07/2004 13:08	01°13.891' W	45°47.580' N
Fosse_d_Enet	28/07/2004 15:05	10/08/2004 14:50	01°08.538' W	46°00.900' N
Pointe_Sablanceaux	10/08/2004 17:08	07/09/2004 11:08	01°14.899' W	46°11.574' N
Plateau_Angoulin	07/09/2004 15:03	22/09/2004 12:08	01°12.116' W	46°04.539' N
Chenal_Est_Banc_Lamouroux	22/09/2004 16:54	21/10/2004 13:34	01°08.134' W	45°54.907' N
Seudre	21/10/2004 14:55	22/11/2004 14:45	01°06.673' W	45°46.704' N

Figure 13. Localisation et dates des campagnes de mesures doppler



Pour la validation de marée, l'étude des hauteurs d'eau a été privilégiée à celle de la surface libre car elle intègre les imprécisions de la représentation bathymétrique à la résolution du modèle (300 m). La validation de la phase de la marée, a été réalisée en calculant l'écart temporel entre l'onde modélisée et mesurée à la mi-marée (niveau moyen).

La validation des courants, a été menée en calculant l'écart modèle-mesures du courant en intensité et en direction en chaque point.

La capacité du modèle à reproduire le transport a enfin été évaluée sur la base du débit linéaire qui est un estimateur de la quantité d'eau déplacée par unité de temps. Il est calculé par le produit de la vitesse du courant et de la hauteur d'eau (Salomon et Breton, 1995).

L'erreur et l'incertitude du modèle pour chacune des variables hydrodynamiques ont respectivement été estimées par la médiane et la demi-étendue entre le 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartile de la distribution des écarts modèle-mesures (9). Pour évaluer l'importance de l'erreur et de l'incertitude du modèle sur la hauteur, l'intensité et le débit linéaire, ces estimateurs ont également été déterminés sur la distribution des écarts relatifs (10).

$$\Delta X_t^i = X_{\text{modele}}^t - X_{\text{mesure}}^t \quad (9)$$

$$\Phi X_t^i = \frac{(X_{\text{modele}}^t - X_{\text{mesure}}^t)}{X_{\text{mesure}}^t} \quad (10)$$

$\Delta X_t^i$  : Ecart modèle-mesures au temps t et au point i

$\Phi X_t^i$  : Ecart relatif modèle-mesures au temps t et au point i

$X_{\text{modele}}^t$   $X_{\text{mesure}}^t$  : Hauteur de la colonne d'eau, intensité ou direction du courant  
, débit linéaire modélisés ou calculé au temps et au point i

$n$  : Nombre de mesure au point i

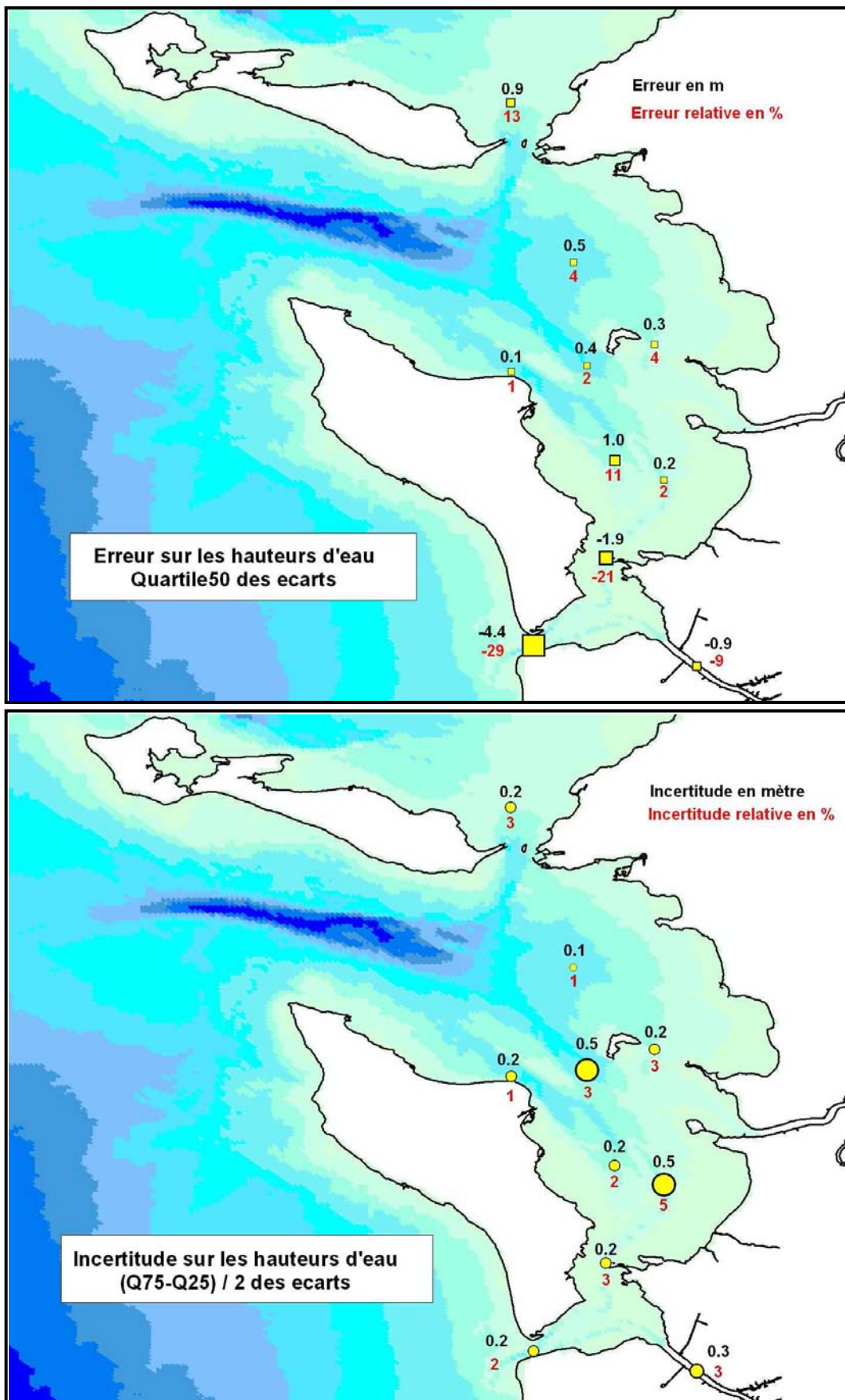


Figure 14. Erreur et Incertitude du modèle sur les hauteurs d'eau.

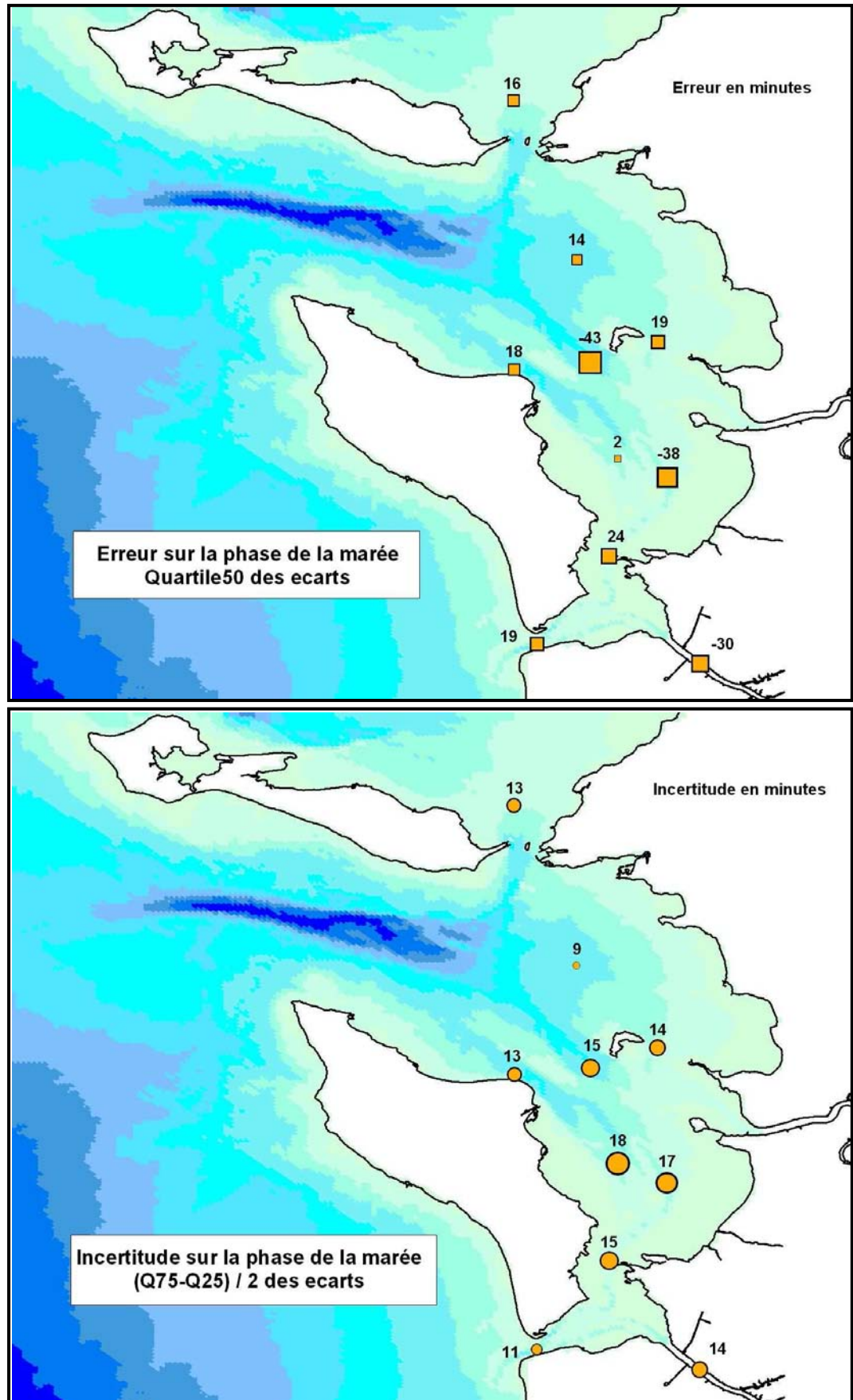


Figure 15. Erreur et Incertitude du modèle sur la phase de la marée.

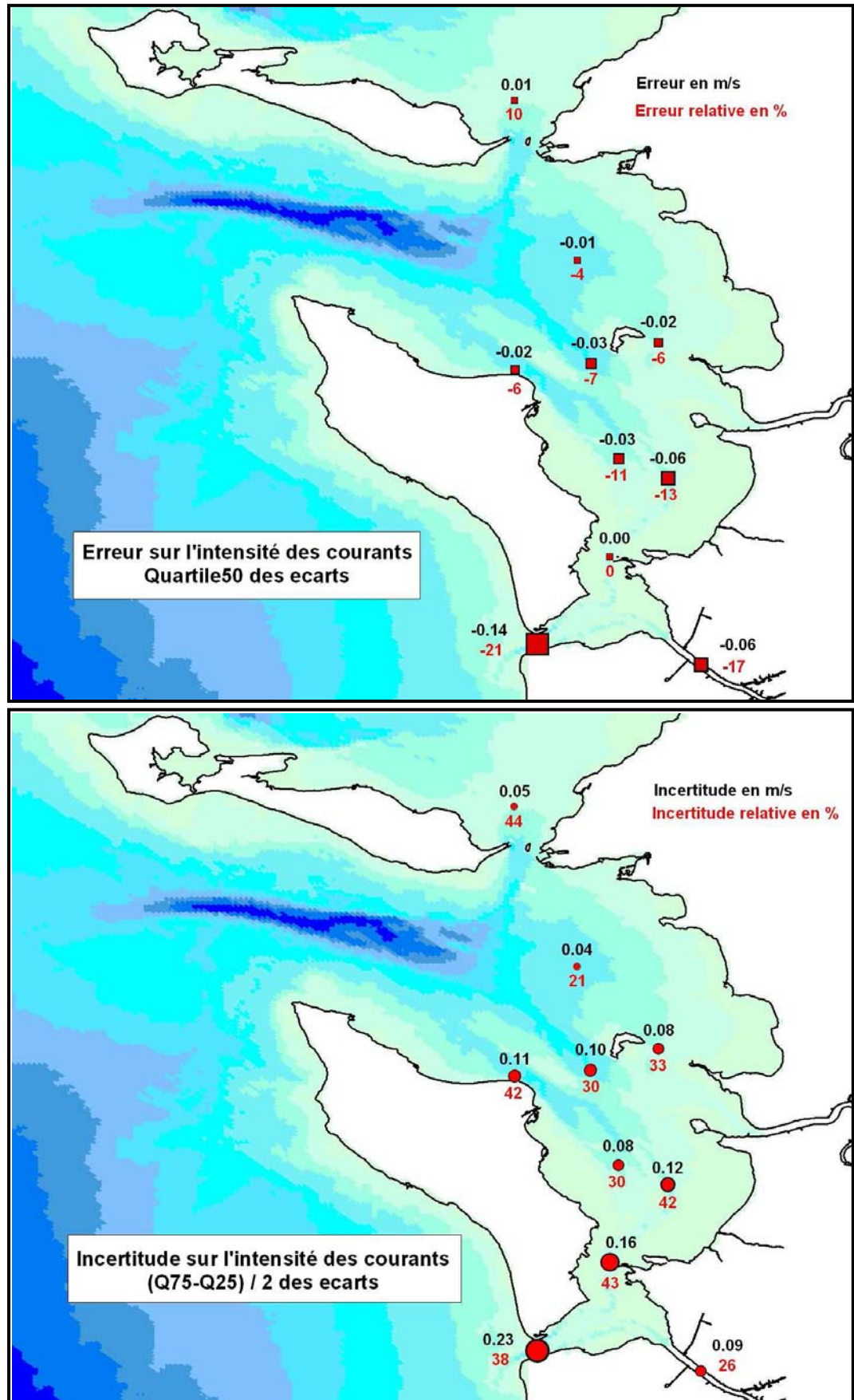


Figure 16. Erreur et Incertitude du modèle sur l'intensité des courants.

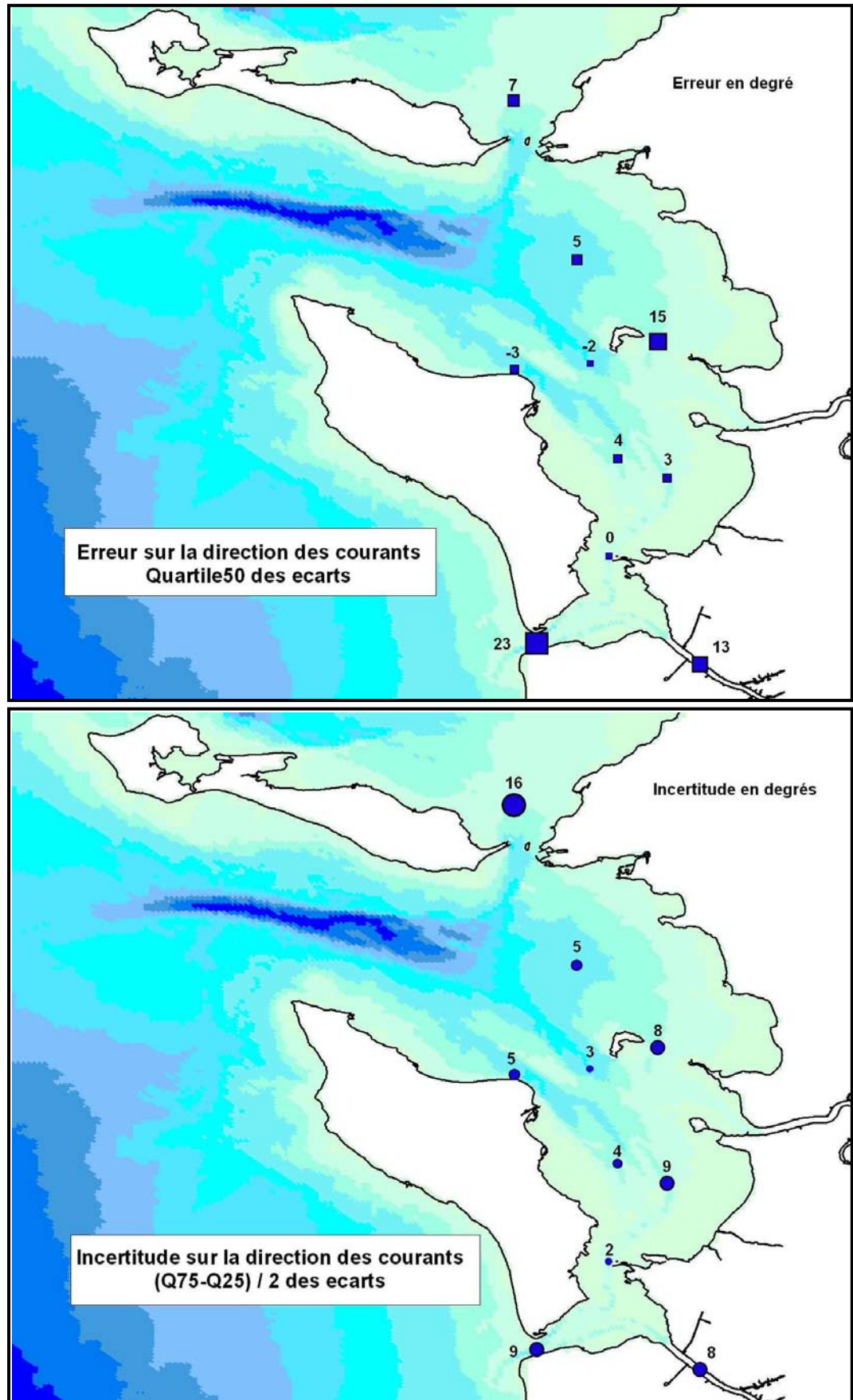


Figure 17. Erreur et Incertitude du modèle sur la direction des courants.

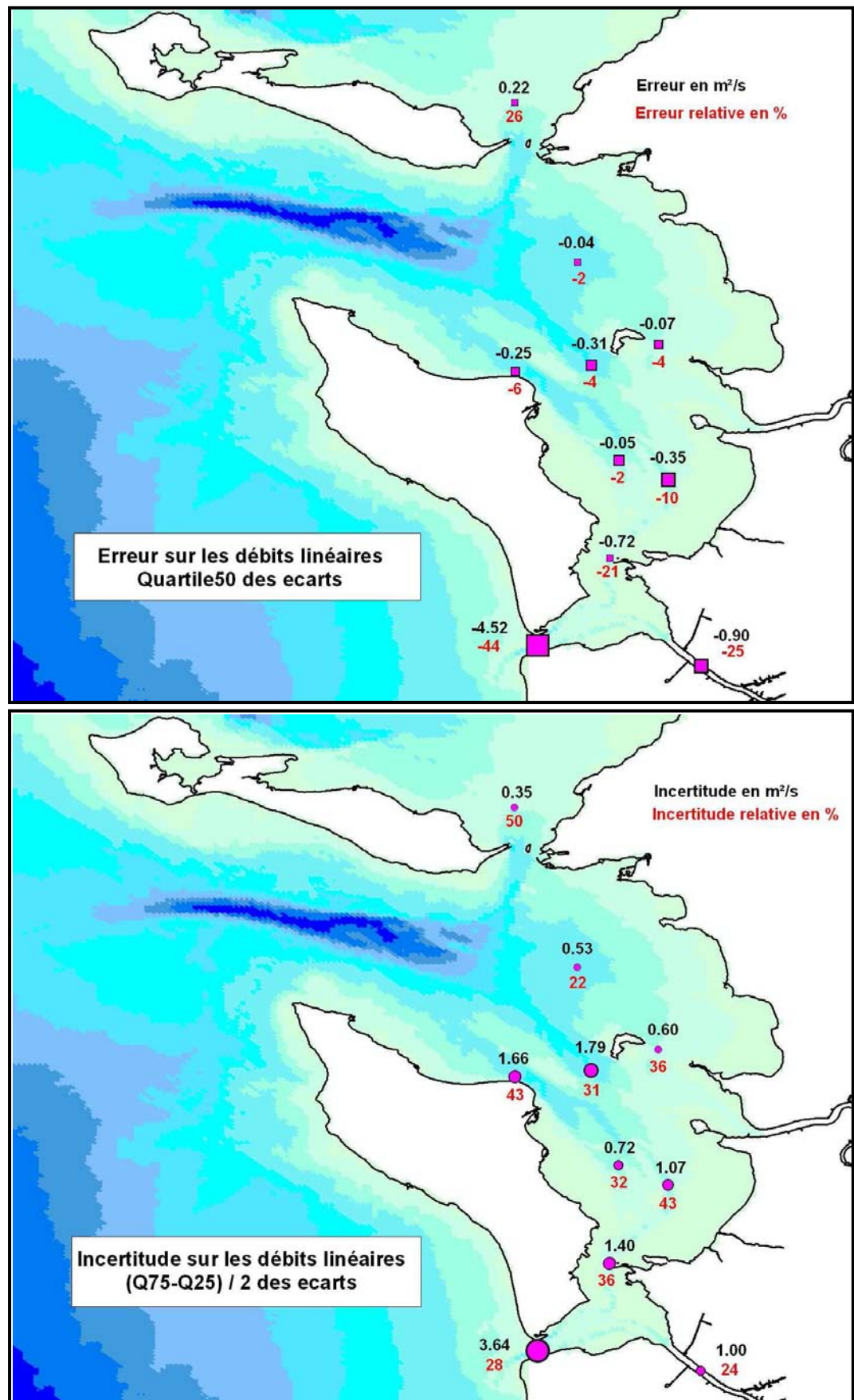


Figure 18. Erreur et Incertitude du modèle sur le transport.

La représentation de la marée par le modèle (Figures 14, 15 et Annexe C) est satisfaisante. L'examen de la médiane de la distribution des écarts modèle-mesures fait cependant apparaître une imprécision non négligeable sur les hauteurs aux points Sablanceau (0.9 m), Chenal Ouest du Banc de Lamouroux (1 m), Chapus (1.9 m) et Gatseau (-4.4 m). L'imprécision des données de sonde de la DDE (la réduction des sondes de l'effet de la marée engendre une imprécision estimée à 1m environ), la représentation bathymétrique assez grossière des chenaux à la résolution du modèle et dans une moindre mesure l'imprécision du modèle sur la représentation de la surface libre expliquent en grande partie ces différences. Pour le point Gatseau où l'erreur culmine à -4.50 m, il est probable qu'une variation rapide et importante des fonds depuis le dernier levé bathymétrique (2001) soit également en cause. Des mouvements importants de sable (dunes hydrauliques) et des mouvements latéraux du chenal ont en effet déjà été mis en évidence dans ce secteur. L'étendue de la distribution des écarts souligne par ailleurs une imprécision de la représentation de la surface libre plus marquée au Passage de l'Est (+/-0.5 m) et dans le Chenal Est du Banc de Lamouroux (+/-0.5 m) notamment en mortes eaux et en vives eaux. La mauvaise reproduction des composantes M4 et M2 à ces points (en phase et en amplitude) semble être à l'origine de cette imprécision. La représentation de la surface libre aux autres points de validation est en revanche très satisfaisante. L'erreur en phase de la marée varie entre -43 et +24 minutes. En liaison avec la mauvaise reproduction des composantes M2 et M4 de la marée, un écart de phase important est noté dans le Passage de l'Est (-43 minutes) et dans le chenal Est du Banc de Lamouroux (-38 minutes). L'incertitude du modèle sur la phase est homogène dans le Bassin, elle est comprise entre 11 et 17 minutes.

Malgré une légère sous estimation de l'intensité dans le bassin, la représentation des courants par le modèle (Figures 16 et 17, Annexe C) est globalement satisfaisante. L'erreur sur l'intensité est comprise entre -0.14 à 0 m/s (erreur relative entre -21% et 0%), l'incertitude varie quant à elle, entre 0.08 et 0.23 m/s (incertitude relative entre 30 % et 43%). Les écarts en intensité les plus importants sont situés au niveau du Chenal Est du Banc de Lamouroux (-0.06+/-0.12 m/s soit -13 +/-43 %), au Chapus (0+/-0.16 ms<sup>-1</sup> soit 0+/-43 %) et à Gatseau (0.14+/-0.23 ms<sup>-1</sup> soit -21+/-38 %). L'imprécision du modèle à ces différents points est en grande partie due à la mauvaise représentation de l'asymétrie des composantes zonales (u) ou méridiennes (v) du courant lors du flot et du jusant en période de mortes eaux. L'erreur et l'incertitude du modèle sur la direction est en revanche très satisfaisante (0+/-2 à 23+/-9 degrés). Un écart légèrement plus important est seulement constaté au niveau de la Fosse d'Enet (+15+/-8 degrés) et à Gatseau (+23+/-9 degrés).

Une sous estimation systématique des débits dans le bassin de Marennes Oléron est constatée mais la représentation des débits linéaires (Figure 18) reste globalement satisfaisante. L'erreur du modèle est comprise entre -4.52 et -0.05 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> (-2 et -44 %). En liaison avec la mauvaise représentation de la bathymétrie, c'est au niveau de Gatseau (-4.52+/-3.64 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) et au Chapus (-0.72+/-1.40 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) que l'erreur est la plus importante. L'incertitude du modèle à l'intérieur du Bassin n'est pas négligeable. Elle est comprise entre 0.60 et 3.64 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> (28 et 43 %).

### 3. Le bassin de Marennes-Oléron

Le bassin de Marennes Oléron tel qu'il est défini dans cette étude (Figure 19) a pour limite nord, le parallèle  $45,990^{\circ}$  N reliant la Pointe des Saumonards à la Pointe de Fouras et pour limite sud le méridien  $1,233^{\circ}$  W reliant la Pointe de Gatseau à la Pointe d'Arvert.

Abrité à l'ouest par l'île d'Oléron, le bassin de Marennes-Oléron (Figure 19) est un système semi-fermé de  $156 \text{ km}^2$  peu profond (8.6 m) soumis à un processus d'envasement important. Son volume moyen en eau est de l'ordre 805 millions de  $\text{m}^3$ . La surface intertidale ( $91 \text{ km}^2$ ) représente près de 58% de sa surface totale et fait du bassin de Marennes un secteur fortement exploité par l'ostréiculture. Un étranglement au niveau du Chapus divise le bassin en deux sous entités de taille inégale, le Pertuis de Maumusson au sud et le Coureau d'Oléron au nord. Les échanges avec l'extérieur du Bassin sont effectués par deux ouvertures inégales. L'ouverture nord est large d'environ 10 km, l'ouverture sud est très étroite (1 km). Les échanges à la limite nord s'opèrent par trois passes : le Passage de l'Est, le Passage de l'Ouest et la Fosse d'Enet. La circulation dans le Coureau d'Oléron s'effectue ensuite principalement par deux chenaux parallèles, le Chenal de l'Ouest et le Chenal de l'Est, qui se rejoignent au Chapus pour alimenter le Pertuis de Maumusson. Le Bassin est directement soumis aux apports des bassins versants de la Charente ( $10\,000 \text{ km}^2$ , débit moyen hivernal  $163 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et de la Seudre ( $780 \text{ km}^2$ , débit moyen hivernal  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Des intrusions périodiques mais fréquentes d'eau Girondine par le nord du bassin sont présentes notamment en hiver et en automne.

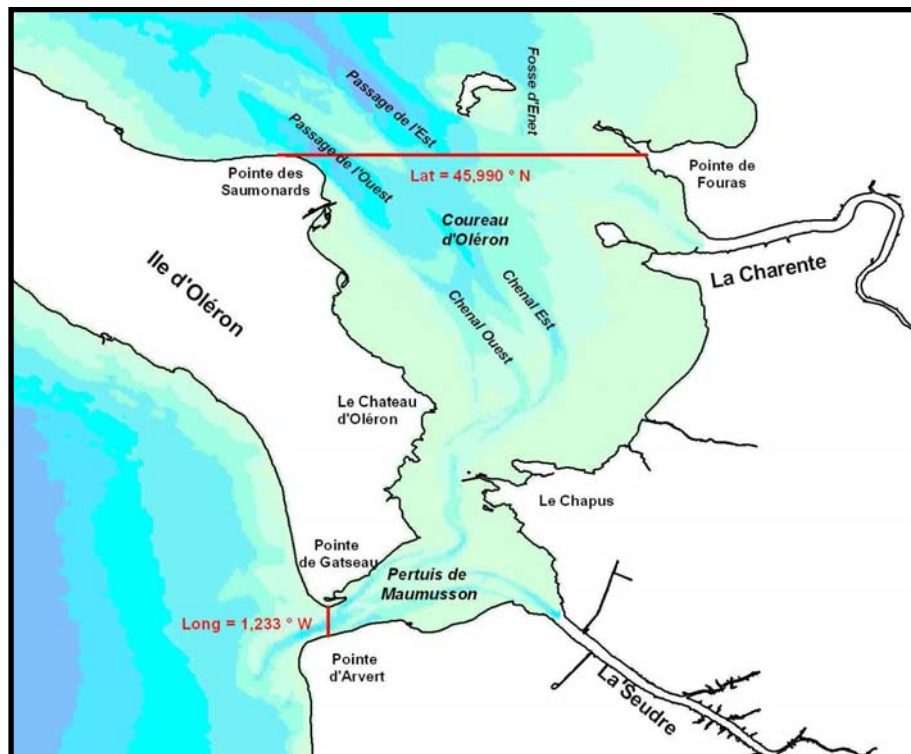


Figure 19. Le bassin de Marennes Oléron.



## 4. Les forçages météorologiques et océaniques

### 4.1. Le vent

L'annexe C présente la distribution saisonnière des vents selon la direction et l'intensité pour la période 1990-2002 à Chassiron (Météo France).

De décembre à février : Les vents sont prédominants dans les secteurs sud-est et nord-est. Les vents de faible intensité ( $0-4.5 \text{ ms}^{-1}$ ) sont peu fréquents (29 %) et sont surtout orientés nord-est à sud-est. Les vents de moyenne intensité ( $4.6 \text{ à } 8.0 \text{ ms}^{-1}$ ) sont bien représentés (41.8%) dans toutes les directions mais ils prédominent dans les secteurs sud et nord-est. Les vents forts ( $>8.0 \text{ ms}^{-1}$ ) sont fréquents (25.7 %) et sont de secteur sud à nord-est avec une prédominance au sud-ouest. Les vents d'est sont rares.

De mars à mai : Les vents dominant du sud-ouest au nord-ouest et au nord-est. Les vents de faible intensité ( $0-4.5 \text{ ms}^{-1}$ ) sont plus fréquents (34.8 %) et sont également répartis dans toutes les directions. Les vents de moyenne intensité ( $4.6 \text{ à } 8.0$ ) sont bien représentés (42.8%) et sont majoritairement de sud-ouest à nord-est. La fréquence des vents forts ( $>8.0 \text{ ms}^{-1}$ ) est de 18.7 %. Ils sont majoritairement répartis du sud-est au nord-est. Les vents de nord-est à sud-est sont rares.

De juin à août : Les vents dominants sont de sud-ouest à nord-ouest, les vents de sud à sud-est sont peu fréquents. Les vents de faible intensité ( $0-4.5 \text{ ms}^{-1}$ ) sont fréquents (42.5 %) sont de sud-ouest à nord-est. Les vents de moyenne intensité ( $4.6 \text{ à } 8.0$ ) sont bien représentés (44.5%) et sont surtout de sud-ouest à nord-ouest. La fréquence des vents forts ( $>8.0 \text{ ms}^{-1}$ ) est comparativement peu importante à cette saison 9.6 % et sont répartis du sud-est au nord-ouest. Les vents de nord-est à sud-est sont inexistant.

De septembre à novembre : A cette saison, les vents sont mieux distribués en direction mais ils dominent dans les secteur sud-ouest à ouest et au nord-est. La fréquence des vents de faible intensité ( $0-4.5 \text{ ms}^{-1}$ ) s'élève 34.1 % et sont de nord-est à sud-est. Les vents de moyenne intensité ( $4.6 \text{ à } 8.0$ ) sont bien représentés (38.7 %) et sont également répartis en direction. La fréquence des vents forts ( $>8.0 \text{ ms}^{-1}$ ) redevient élevée (23.5 %) et sont majoritairement de sud-ouest à nord-ouest. Les vents d'est sont peu fréquents.

### 4.2. La houle

L'ensemble des observations décrites ci-dessous sont tirées de l'étude réalisée par le Conseil Général de la Charente Maritime sur la dynamique sédimentaire dans le bassin de Marennes-Oléron (Conseil Général 17, 2005). L'impact des vents sur la houle selon leur direction a été modélisé (modèle SWAN) avec des intensités comprises entre 40 et 72 km/h.

Quelles que soient les conditions de vent, la houle du large est fortement atténuée durant sa propagation dans le bassin de Marennes-Oléron, et en particulier dans le Pertuis de Maumusson. La houle impactant le Bassin provient surtout du Pertuis d'Antioche, la pénétration de la houle par le Pertuis de Maumusson par la pointe d'Arvert étant

entravée et fortement amortie. L'entrée de la houle dans le Bassin est essentiellement conditionnée par l'orientation et la force des vents. C'est par des vents de sud-ouest à nord-ouest que la houle impactant le Coureau d'Oléron est la plus importante. Dans le Pertuis de Maumusson c'est lors de vents de sud à nord-ouest que la pénétration de la houle est la plus efficace. La côte orientale de l'île d'Oléron est bien abritée pour des vents de secteur sud-ouest à nord-ouest, seuls des vents de nord-est et de sud sont à même d'y générer un clapot supérieur à 50 cm.

Pour des vents de nord, les hauteurs dans le Bassin ne dépassent pas 1 mètre. Dans la zone littorale située entre Port des Barques et la Pointe du Chapus comme dans le Pertuis de Maumusson, le clapot n'excède pas 60 cm. Le long de la côte de l'île d'Oléron où le fetch est plus important, les vagues peuvent atteindre 70 cm pour des vents de 50 km/h.

Pour des vents de sud, la pénétration de la houle par le Pertuis de Maumusson est largement entravée. Dans le Coureau d'Oléron les hauteurs significatives sont également faibles. A la limite nord où le fetch est le plus important la hauteur significative ne dépasse pas 1 mètre.

Avec des vents d'ouest, la houle pénètre par le nord du Bassin sous l'action conjuguée d'une réfraction sur les fonds de la pointe nord de l'île d'Oléron et d'un phénomène de diffraction à la pointe de Chassiron. L'énergie de la houle est largement dissipée par les hauts fonds situés au nord du Bassin, qui par un frottement plus important entraîne une augmentation de la hauteur significative et souvent un déferlement. Les houles impactant la côte continentale sont de l'ordre de 80 cm pour des vent de 60 km/h. La houle sur la zone littorale de l'île d'Oléron est plus atténuée encore et n'excède pas 0.3 mètres. Dans le Pertuis de Maumusson, la houle est largement dissipée mais le vent local permet de conserver une hauteur significative de 1 mètre.



## 5. Caractérisation des composantes hydrodynamiques

### 5.1. Marée, volume oscillant, surcotes et décotes

#### 5.1.1. Caractéristiques générales de la marée

L'étude de la marée à Aix, au Chapus et à Gatseau révèle des différences importantes de l'onde entre le nord et le sud du bassin. Quel que soit le coefficient, une diminution du marnage du nord au sud, pouvant atteindre 1 mètre, est constatée (Tableau 1). On note également une dissymétrie importante de l'onde en mortes eaux sur tout le bassin, mais plus marquée au nord qu'au sud (Figures 20 et 21). Ce phénomène génère un flot plus long que le jusant en période de déchet et inversement plus court en période de revif. La différence entre la durée du flot et du jusant est surtout importante en période de déchet. En marées de vives eaux, l'onde redevient à peu près symétrique, jusant et flot tendent alors à être de durée équivalente. La durée totale du cycle marée diminue enfin avec l'augmentation du coefficient mais de manière équivalente sur tout le bassin.

Tableau 1. Marnage à Aix, Chapus et Gatseau selon le coefficient de marée (Sources Shom).

	Marnage (cm)		
	Ile Aix	Le Chapus	Pointe Gatseau
Vives Eaux Exceptionnelles (120)	660	610	530
Vives Eaux Moyenne (95)	520	480	405
Mortes Eaux Moyenne (45)	250	245	205

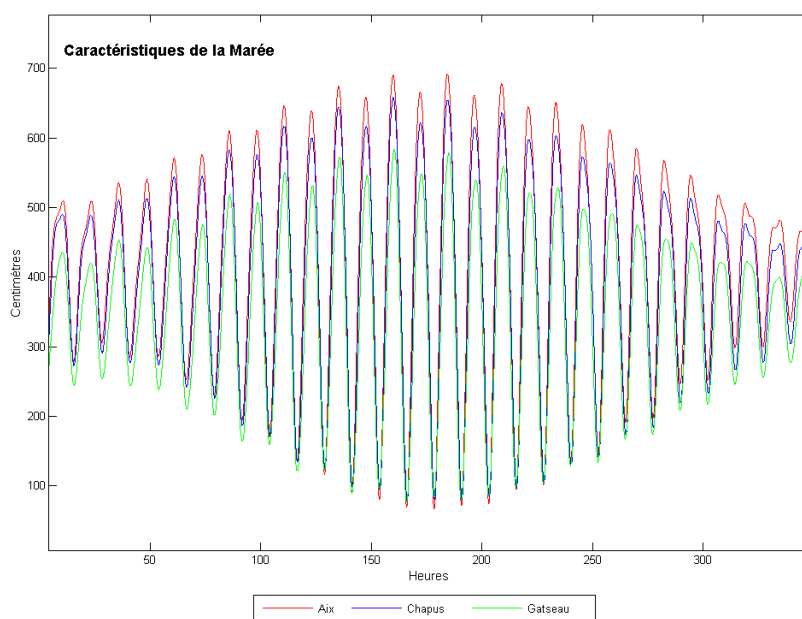


Figure 20. Marée calculée à Aix, Chapus et Gatseau du 12/09 au 27/09/2006 (Sources Shom Prédit).

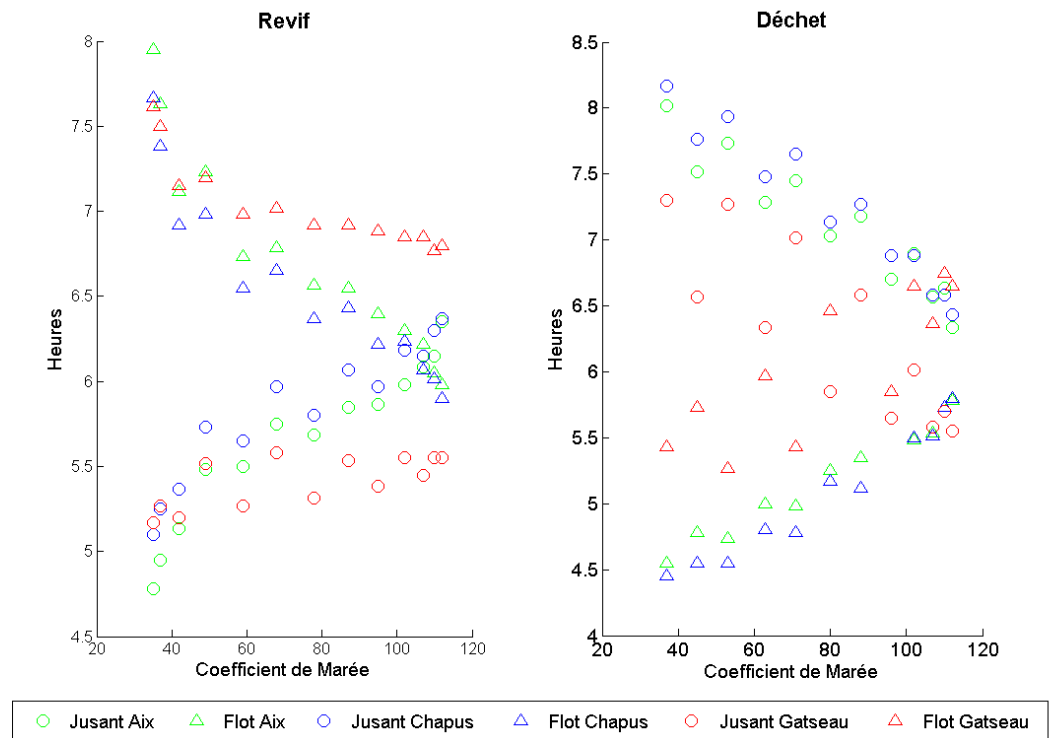


Figure 21. Durée du flot et du jusant selon le coefficient de marée en revif et en déchet à Aix, Chapus et Gatseau du 12 septembre au 27 septembre 2005 (Sources Shom Prédit).

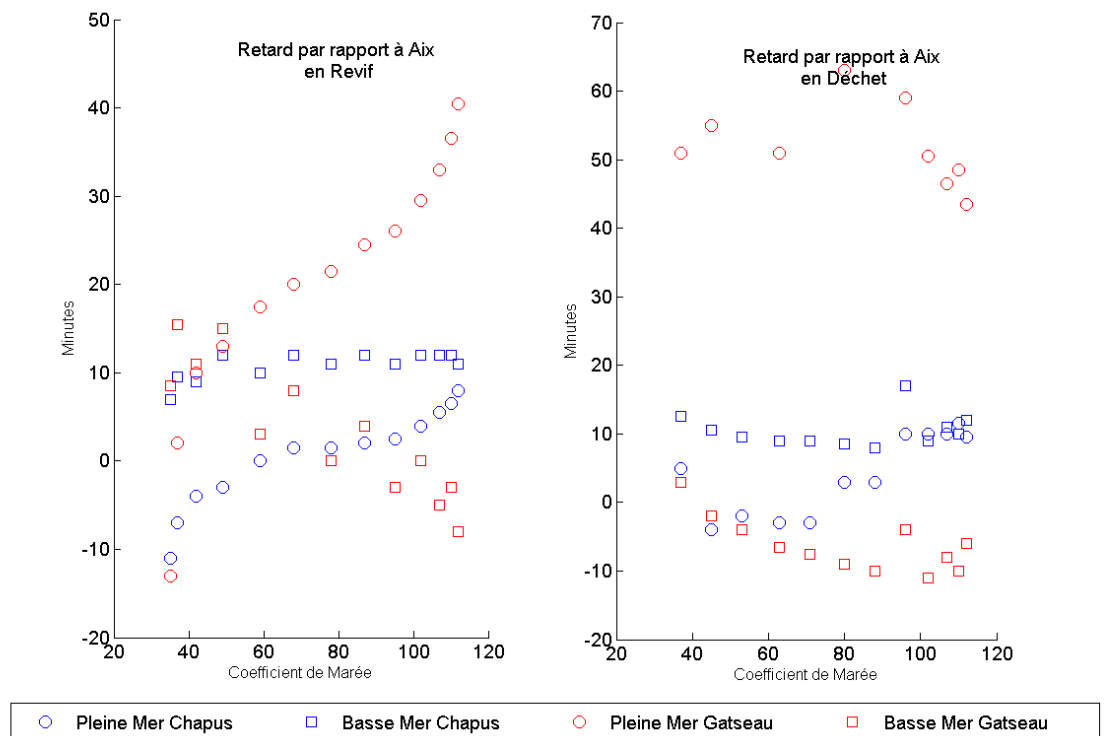


Figure 22. Retard par rapport à Aix de la basse et de la pleine mer au Chapus et au Gatseau en revif et en déchet, et selon le coefficient de marée (Sources Shom Prédit : marée du 12 septembre au 27 septembre 2005).

La variation spatiale de la phase de la marée est par conséquent très importante (Figure 22).

En revif on observe à Gatseau une évolution importante du décalage de la pleine mer par rapport à celle mesurée à Aix. Le retard d'abord nul en mortes eaux augmente fortement avec le coefficient de marée et culmine à 40 minutes pour un coefficient de 110. Une très légère tendance inverse pour la basse mer est observée. Au Chapus, le décalage de la pleine mer est peu important comparativement à Gatseau. Globalement une avance de 10 minutes est mesurée en mortes eaux. L'écart devient ensuite nul en marées moyennes pour accuser un retard pouvant atteindre 10 minutes en vives eaux. Le retard de la basse mer à ce point, voisin de 10 minutes, est relativement constant quel que soit le coefficient.

En déchet, le retard de la pleine mer constaté à Gatseau est toujours important (50 minutes environ) mais est peu dépendant du coefficient de marée. La basse mer, en mortes eaux, présente une avance augmentant légèrement pour atteindre 10 minutes au coefficient 110. Au Chapus la tendance est comparable à celle observée en revif.

Tesson (1973) explique le comportement particulier de la marée par la pénétration par le nord et par le sud du Bassin, de deux ondes de marée différentes par la phase et l'amplitude. Leur propagation par des chenaux de formes très différentes a pour effet d'amplifier leurs particularités originelles. La conjonction de ces deux ondes génère alors une marée très différente selon l'endroit du bassin.

L'étude de l'effet du vent sur la marée a été réalisée non pas à partir des variations des hauteurs en différents points du Bassin mais sur la base de la variation de son volume en eau (Figure 23). Ce paramètre permet en effet d'intégrer la modification importante de l'onde de marée sur tout le Bassin. Les durées du flot et du jusant ont été calculées pour les quatre vents cardinaux établis à  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Les durées du flot et du jusant sont déterminées par les minima et maxima successifs du volume en eau du Bassin durant le cycle de marée. Les calculs ont été opérés sur plusieurs cycles consécutifs de marée ME-VE-ME (du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00).

L'influence du vent sur la durée du flot et du jusant apparaît minimale (variation maximale inférieure à 3% par rapport à une situation sans vent). On note malgré tout un effet plus important des vents de sud et nord par rapport aux vents d'est et d'ouest. Les vents de nord et d'ouest ont tendance à augmenter la durée du flot et diminuer la durée du jusant alors que les vents de sud et d'est ont un effet inverse. Enfin, l'influence du vent apparaît d'autant plus importante que le coefficient de marée est faible.

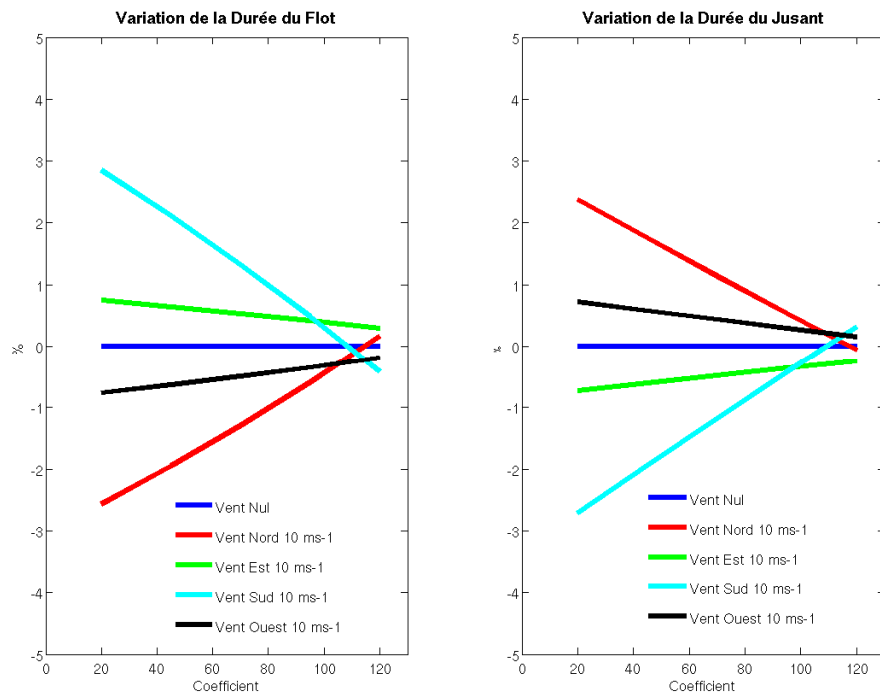


Figure 23. Influence du vent sur la durée du flot et du jusant selon le coefficient de marée.

### 5.1.2. Volumes oscillants

L'influence du cycle de marée et du vent (quatre vents cardinaux établis à  $10 \text{ ms}^{-1}$ ) sur le volume oscillant a été modélisée sur la base des minima et maxima successifs du volume en eau du Bassin sur plusieurs cycles de marée successifs (du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00).

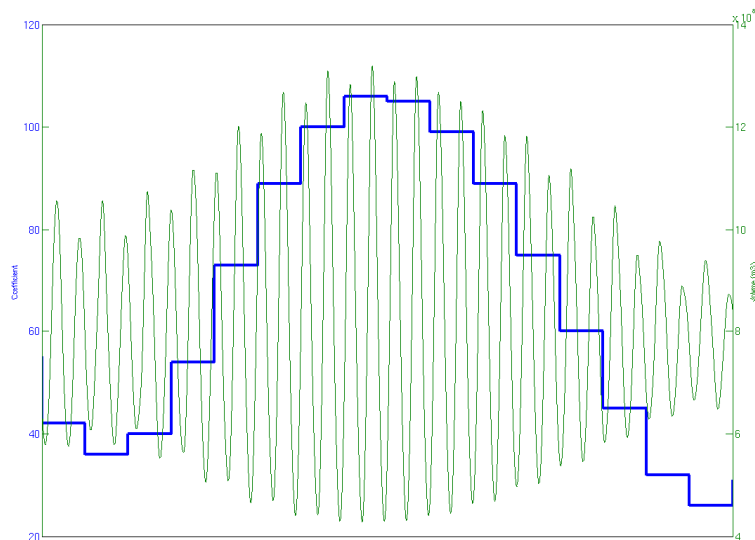


Figure 24. Variation du volume en eau du Bassin selon le coefficient de marée

En l'absence de vent (Figures 24 et 25), le volume intra-bassin varie de 450 à 1250 millions de m<sup>3</sup> de la basse mer à la pleine mer en vives eaux moyennes (Coef.95) et de 580 à 1000 millions de m<sup>3</sup> en mortes eaux moyennes (Coef. 45) ce qui représente respectivement un volume oscillant de 800 millions de m<sup>3</sup> et 420 millions de m<sup>3</sup>. En marées moyennes (Coef. 70), le volume oscillant, voisin de 610 million de m<sup>3</sup> équivaut à 75 % du volume moyen du Bassin (égal à 804 millions de m<sup>3</sup> à mi-marée). Ces résultats traduisent une intensité de mélange induit par la marée élevée.

Le volume oscillant du bassin de Marennes Oléron selon le coefficient de marée obéit à une relation linéaire du première ordre (Figure 25) :

$$[\text{VolOsc}] = 7.6 \cdot 10^6 \cdot [\text{Coef}] + 7.8 \cdot 10^7$$

Comme le montre la Figure 26, l'influence du vent (vents cardinaux établis à 10 ms-1) sur le volume oscillant est négligeable (variations maximales inférieures à 2 %). On note seulement un effet plus important des vents de secteurs sud et nord par rapport à ceux d'est et d'ouest. Les vents de sud et d'ouest ont tendance à augmenter le volume oscillant alors que les vents de nord et d'est ont un effet inverse. Enfin l'influence du vent apparaît d'autant plus sensible que le coefficient de marée est faible.

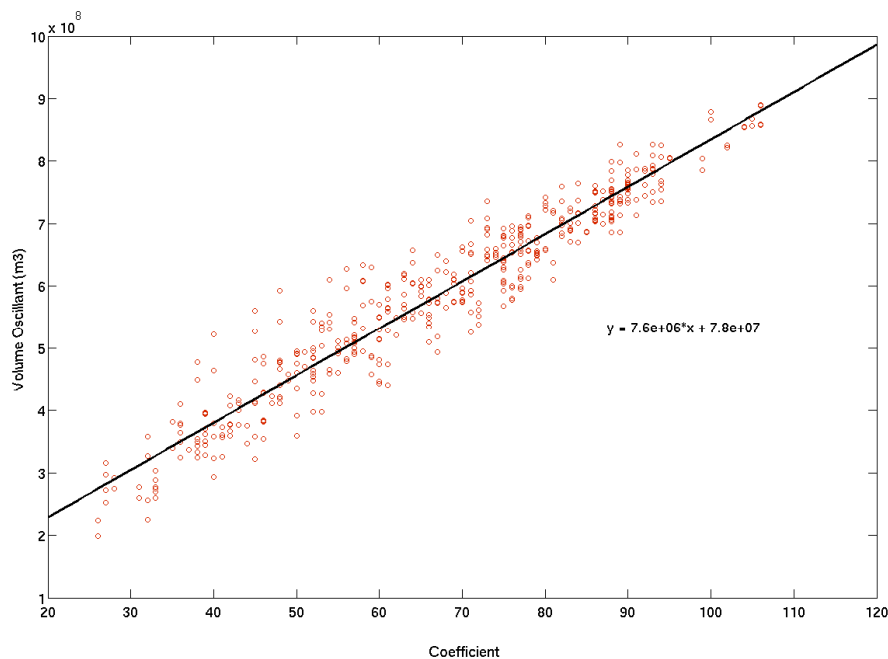


Figure 25. Volume oscillant moyen (en m<sup>3</sup>) selon le coefficient de marée

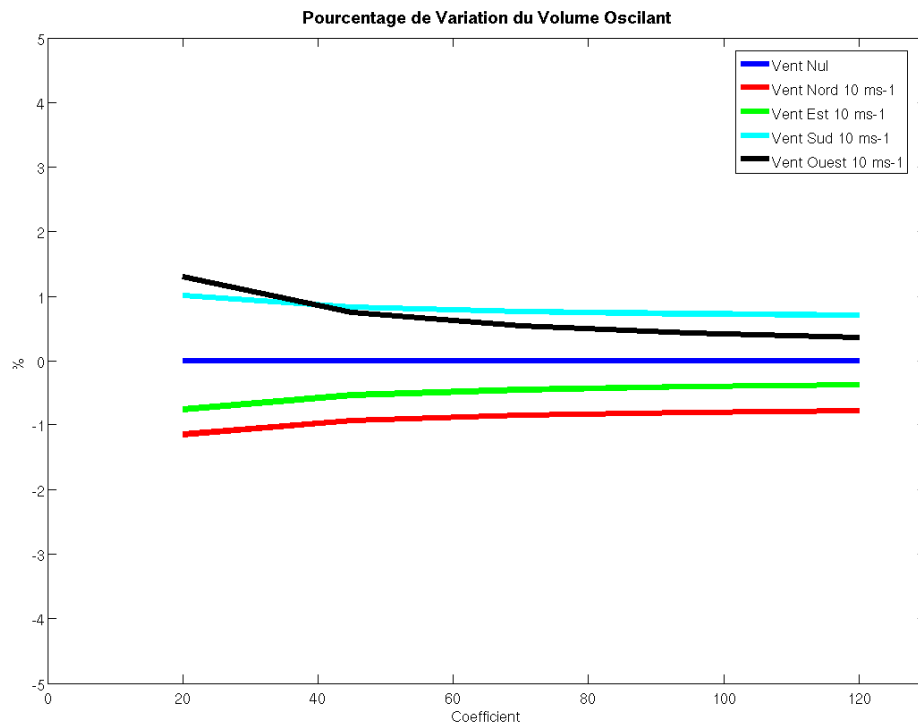


Figure 26. Pourcentage de variation du volume oscillant selon le vent et le coefficient de marée

### 5.1.3. Surcotes et Décotes

L'étude des surcotes et décotes induites par les vents a été modélisée sur plusieurs cycles de marée consécutifs (du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00) en appliquant les quatre vents cardinaux établis à  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Il est important de noter ici que l'on étudie que les effets du vent seul, l'influence de la pression atmosphérique et de la houle n'étant pas ici prises en compte. Pour chaque situation de vent, la hauteur d'eau moyenne calculée en chaque maille est comparée à celle obtenue avec un vent nul. Une surcote se traduit par un écart positif.

Une légère décote (jusqu'à 0.05 m) est constatée pour les vents d'est et de nord (Figure 27). L'amplitude de la variation générée par des vents d'est est comparativement plus importante et s'exerce surtout dans les chenaux et au niveau de la zone intertidale continentale, tandis que celle occasionnée par les vents de nord., affecte essentiellement les chenaux.

Une légère surcote (jusqu'à -0.05 m) est en revanche constatée pour des vents de sud et d'ouest (Figure 27). La variation induite est plus importante pour des vents d'ouest. Pour des vents d'ouest, la surcote est globalement localisée dans les chenaux et au niveau de la zone intertidale continentale tandis que par vent de sud elle s'exerce surtout dans les chenaux.



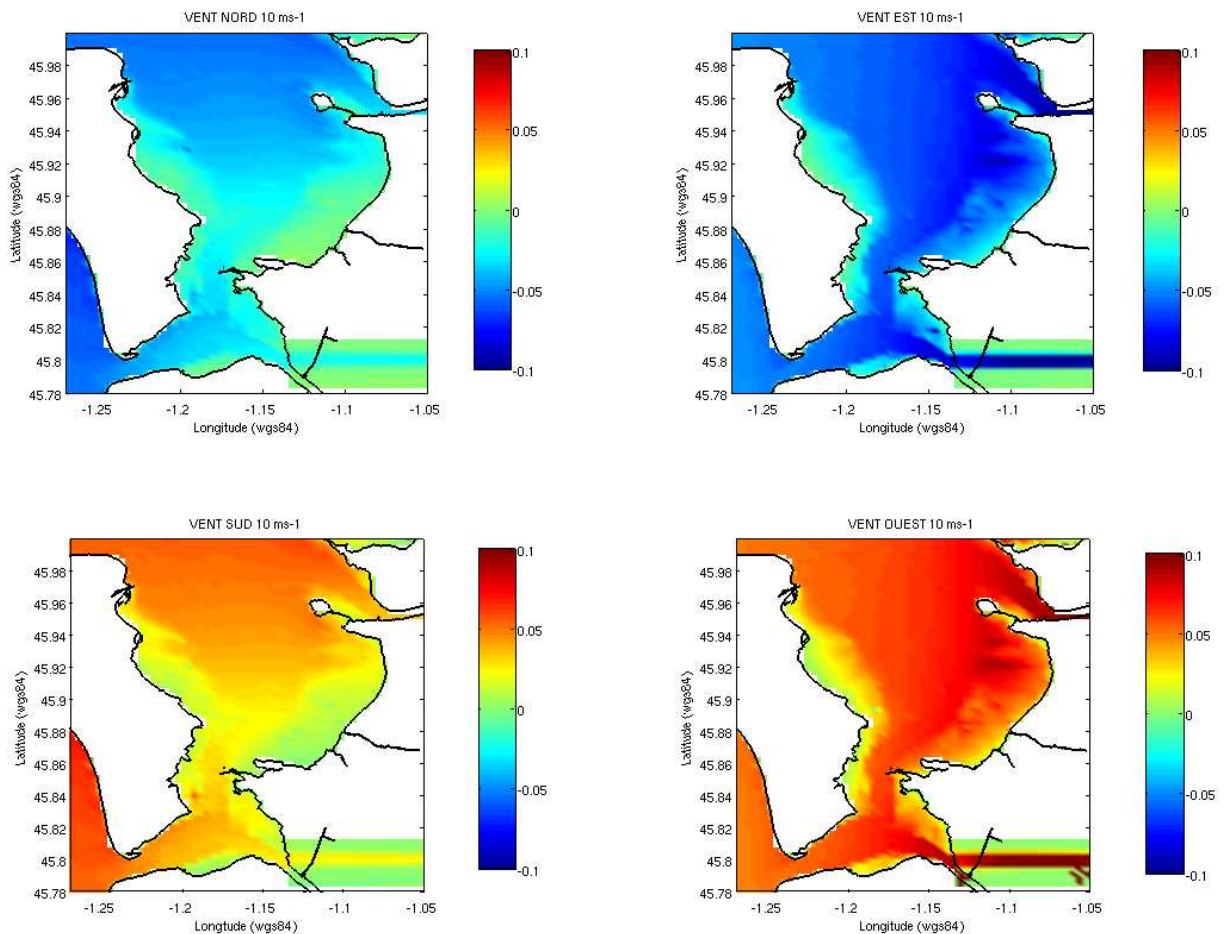


Figure 27. Influence du vent sur les surcotes et décotes.

## 5.2. Courantologie générale

### 5.2.1. Courants instantanés

Les champs de courants (vecteurs) et les flux associés (aplats colorés) ont été tracés heure par heure pour une marée de coefficient moyen (Coef. 70), en absence de vent et pour des débits de rivières nuls. Ils sont fournis en Annexe D.

Ouvert aux échanges avec le large par le nord et le sud et segmenté en deux par le rétrécissement du Chapus, le bassin de Marennes-Oléron est soumis à une hydrodynamique complexe où s'individualisent deux sous bassins au fonctionnement distinct : le Pertuis de Maumusson et le Coureau d'Oléron (Figure 19).

Ces deux sous bassins sont globalement impactés par une onde mixte où se superpose une onde de type stationnaire et une onde de type progressive. Les courants de flot et de jusant portent respectivement dans le même sens que le montant et le perdant. Le flot maximum est observé à BM+4H tandis que le jusant devient maximum entre BM+4H et BM+5H. Dans le Pertuis de Maumusson l'étale de flot et de jusant coïncident avec les

moments de haute et basse mer tandis que dans le Coureau d'Oléron elles sont légèrement décalées. A la jonction des deux sous bassins, au niveau du Chapus, l'onde revête un caractère de type progressif, les courants de flot et de jusant sont maximums au moment des étales de pleine et de basse mer. Dans les deux sous bassins et à l'exception des chenaux, les courants sont majoritairement de type tournant.

A la pleine mer, les courants toujours bien établis au sud-est dans le Coureau d'Oléron réalisent un apport d'eau encore non négligeable par la frontière nord principalement par le Passage de l'Est et le Passage de l'Ouest. La relaxation plus précoce des courants dans le Pertuis de Maumusson permet le Passage des eaux du Coureau d'Oléron vers le Pertuis de Maumusson et la Seudre. Les courants au voisinage du rétrécissement du Chapus sont alors maximums ( $0.5 \text{ ms}^{-1}$ ) et sont orientés sud. L'échange entre les deux sous systèmes se maintient jusqu'à PM+2H. Durant le jusant dès PM+ 3H, les courants établis au nord-ouest dans le Coureau d'Oléron et au sud-est dans le Pertuis de Maumusson alors qu'ils sont nuls au Chapus marquent une interruption des échanges. Les deux sous-systèmes se vidangent alors de manière autonome. Le pertuis de Maumusson par la frontière sud et le Coureau d'Oléron par la frontière nord. Le flux sortant maximum (Figure 28) avoisine les  $35000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à la frontière Nord contre seulement  $5000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à la frontière sud. La vidange du Coureau s'opère principalement par le Passage de l'Ouest et le Passage de l'Est, la Fosse d'Enet ne servant qu'à évacuer des eaux de la Charente. Les courants s'intensifient jusqu'à PM+5 mais s'affaiblissent brutalement ensuite.

A l'étales de basse mer la vidange se poursuit dans les deux bassins. Dès PM+1H les courants s'inversent dans les deux bassins marquant ainsi le début du flot et le remplissage des deux bassins. Les courants orientés sud-est dans le Coureau d'Oléron et nord-est dans le Pertuis de Maumusson s'intensifient progressivement jusqu'à PM+4 et la relaxation s'opère de manière moins brutale que lors du flot. La direction opposée des courants au niveau du rétrécissement du Chapus, limite les échanges entre les deux pertuis. Le remplissage des deux systèmes s'opère encore de manière indépendante. Le Coureau d'Oléron est alimenté en eaux du large par la frontière nord tandis que le Pertuis de Maumusson l'est par la frontière sud. Le flux entrant maximum (Figure 28) avoisine les  $40000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à la frontière nord et les  $8000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à la frontière sud. Le remplissage du Coureau d'Oléron se réalise principalement par le Passage de l'Ouest et le Passage de l'Est. La Fosse d'Enet assure principalement l'alimentation de la Charente.

L'influence du vent sur les courants instantanés est évaluée pour une marée de coefficient de 70 en calculant, aux différents pas de temps de calcul et en chaque maille (i et j) du modèle, l'écart absolu moyen (EAM<sub>ij</sub>) sur les composantes instantanées u et v entre une situation sans vent (U<sub>ij</sub> et V<sub>ij</sub>) et avec vent (U'<sub>ij</sub> et V'<sub>ij</sub>) :

$$EAM_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^n |U_{ij} - U'_{ij}| + \sum_{t=1}^n |V_{ij} - V'_{ij}|}{2n} \quad (9)$$

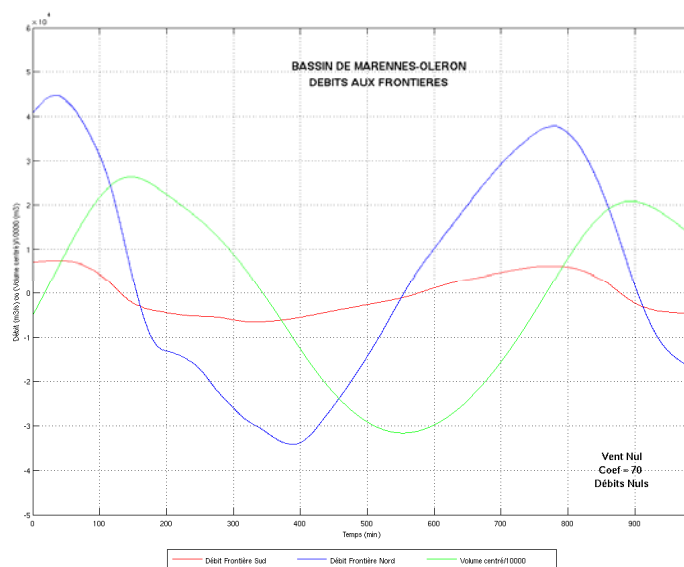


Figure 28. Débits instantanés aux frontières durant le cycle de marée (coef. 70).

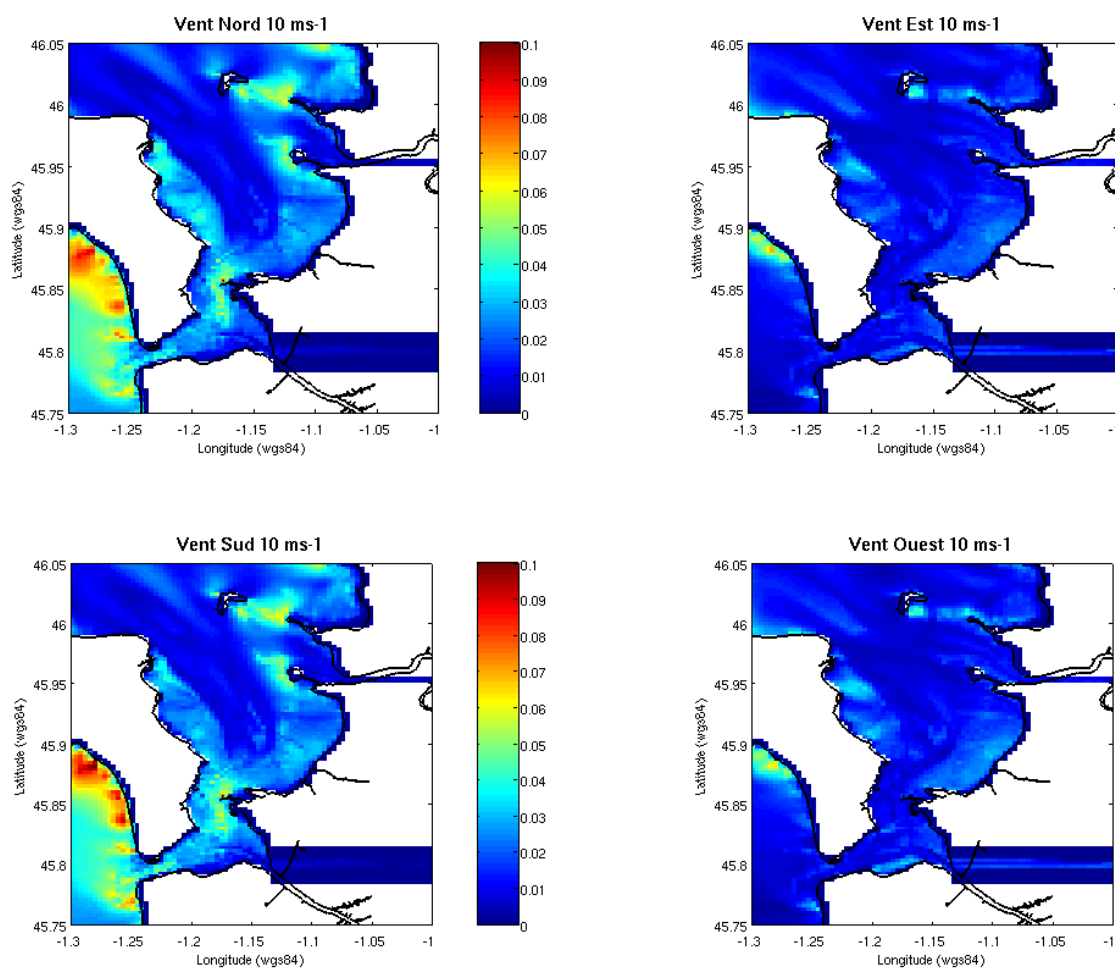


Figure 29. Influence du vent sur les courants instantanés (Coef.70).

L'influence du vent sur les courants n'est pas négligeable (Figure 29). L'effet des vents de nord et de sud est comparativement plus important que celui exercé par des vents d'est ou d'ouest. La modification des courants par les vents de nord et de sud, se fait surtout ressentir au niveau des passes : Fosse d'Enet, Chapus et Maumusson, mais également sur la zone intertidale de l'île d'Oléron et du continent .

### 5.2.2. Courants maximums

L'étude des courants maximums a été réalisée avec l'aide du modèle sur la période allant du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00. Les courants les plus élevés (Figure 30) sont observés dans les chenaux et au niveau des passes et des embouchures. Les courants calculés au Passage de l'Ouest, au Passage de l'Est comme dans le Chenal Est et Ouest du Banc Lamouroux varient entre  $0.2 \text{ ms}^{-1}$  par coefficient 45 à près de  $1 \text{ ms}^{-1}$  par coefficient 115. Les courants les plus importants sont observés à l'embouchure de la Charente ( $0.4$  à  $1.6 \text{ ms}^{-1}$ ) et dans le Pertuis de Maumusson ( $0.5$  à  $1.9 \text{ ms}^{-1}$ ). L'effet du vent sur les vitesses maximales est négligeable sur tout le bassin.

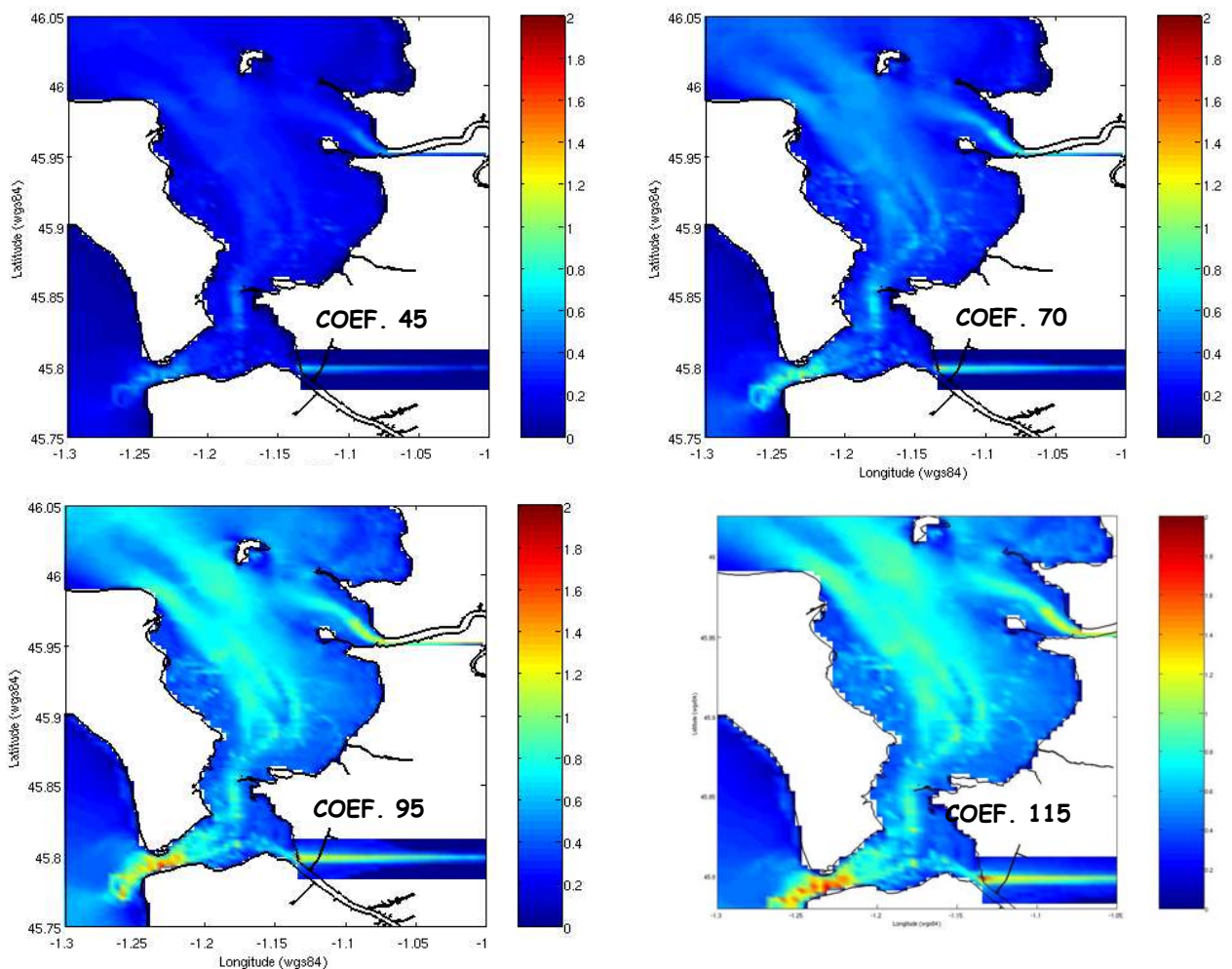


Figure 30. Courants maximums ( $\text{ms}^{-1}$ ) aux marées de coefficients 45, 70, 95 et 115.

### 5.2.3. Débits instantanés et résiduels aux frontières

Les débits instantanés aux frontières du bassin (Figure 19) dépendent logiquement des coefficients de marée (Figure 31). A la limite nord les débits entrants et sortants varient entre 0 et  $55\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en vives eaux moyennes et entre 0 et  $20\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en mortes eaux moyennes. Les débits entrants et sortants calculés à la frontière sud sont cinq fois moins importants. Ils oscillent entre 0 et  $13\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en vives eaux et entre 0 et  $5\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en mortes eaux.

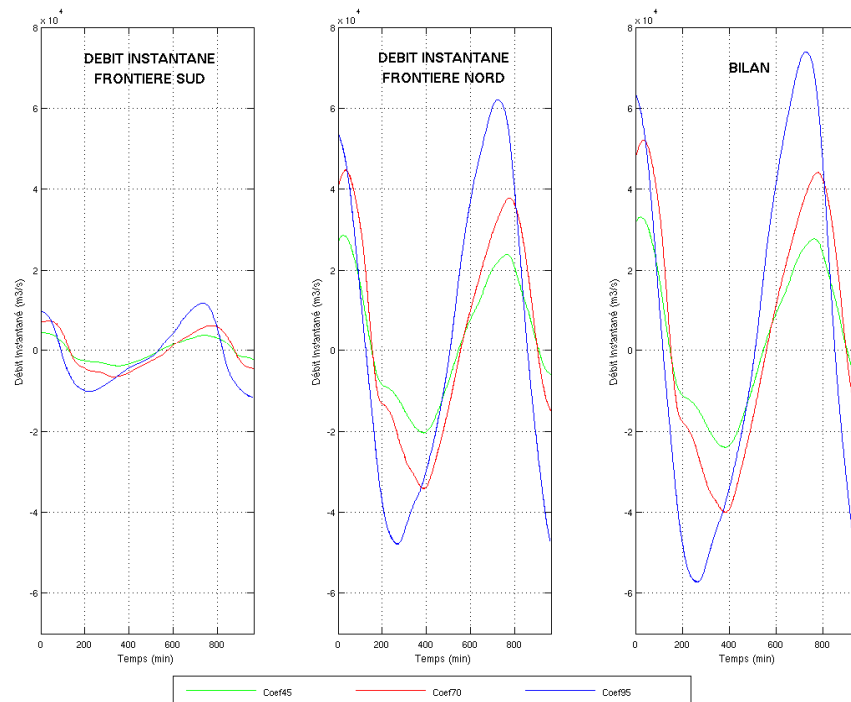


Figure 31. Variation des débits instantanés calculés aux frontières nord et sud du bassin aux coefficients de marée 45, 70 et 95.

L'influence du vent sur les débits instantanés aux frontières est faible comme le montrent les résultats obtenus pour une marée de 70 avec les quatre vents cardinaux établis à  $10\text{ ms}^{-1}$  (Figure 32).

A la frontière sud, les débits ne sont pas modifiés par des vents d'est et d'ouest. Les vents de sud en revanche, favorisent les flux entrants mais diminuent les flux sortants. Pour des vents de nord, l'effet est inverse. A la frontière nord, l'effet du vent est surtout sensible sur les débits sortants qui sont logiquement augmentés par vent de sud et diminués par vent de nord.

Le calcul du débit résiduel aux frontières (Figure 33) sur plusieurs cycles de marée consécutifs (du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00) confirme un débit résiduel toujours positif à la frontière nord (entrée d'eau) et toujours négatif à la frontière sud (sortie d'eau), quelles que soient l'orientation et la force des vents. Ce résultat indique une circulation résiduelle dans le Bassin toujours orientée du nord vers le sud. Cette circulation est stimulée par les vents de nord mais ralentie par les vents de sud. Les vents d'ouest et d'est ont par contre peu d'effet.

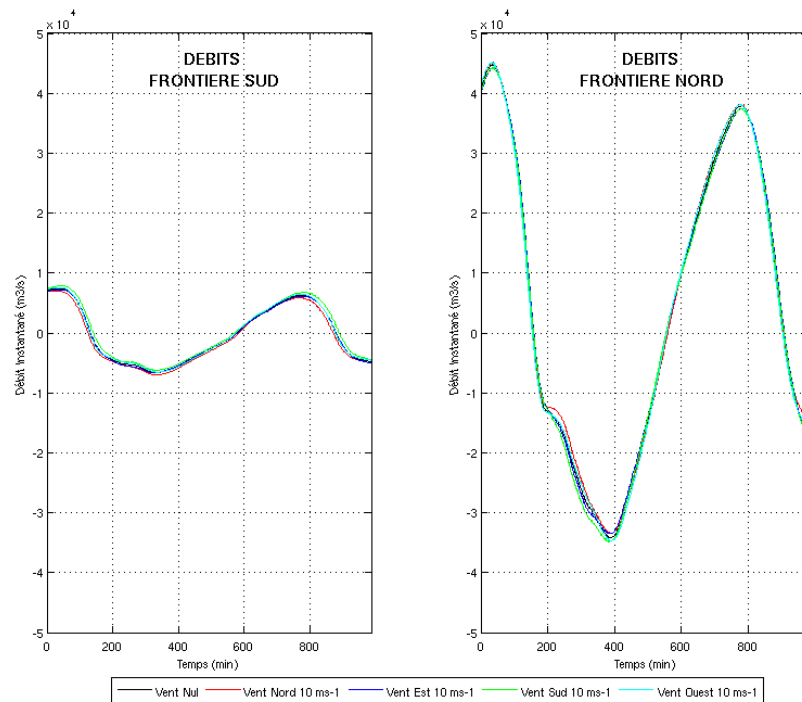


Figure 32. Influence du vent sur débits instantanés aux frontières du Bassin de Marennes-Oléron.

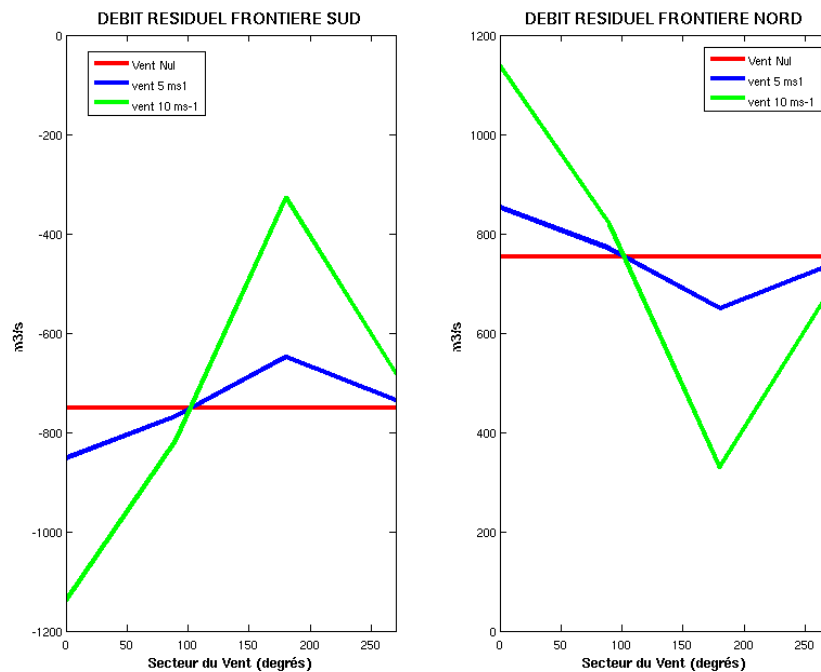


Figure 33. Variation des débits résiduels aux frontières nord et sud du bassin de Marennes-Oléron selon la direction et l'intensité du vent.

### 5.2.4. Flux résiduels

Le flux résiduel est une grandeur eulérienne intégrée sur un ou plusieurs cycles de marée. Il est calculé en chaque maille par la somme des produits des composantes  $u$  et  $v$  du courant par la hauteur d'eau à chaque pas de temps. Selon Salomon et Breton (1995), ces flux permettent de représenter la direction et quantité d'eau déplacée par unité de temps. La Figure 34 présente les flux résiduels en intensité (aplat coloré) et en direction (vecteurs) calculés sur plusieurs cycles de marée consécutifs (allant du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00), en l'absence de vent et avec des débits nuls.

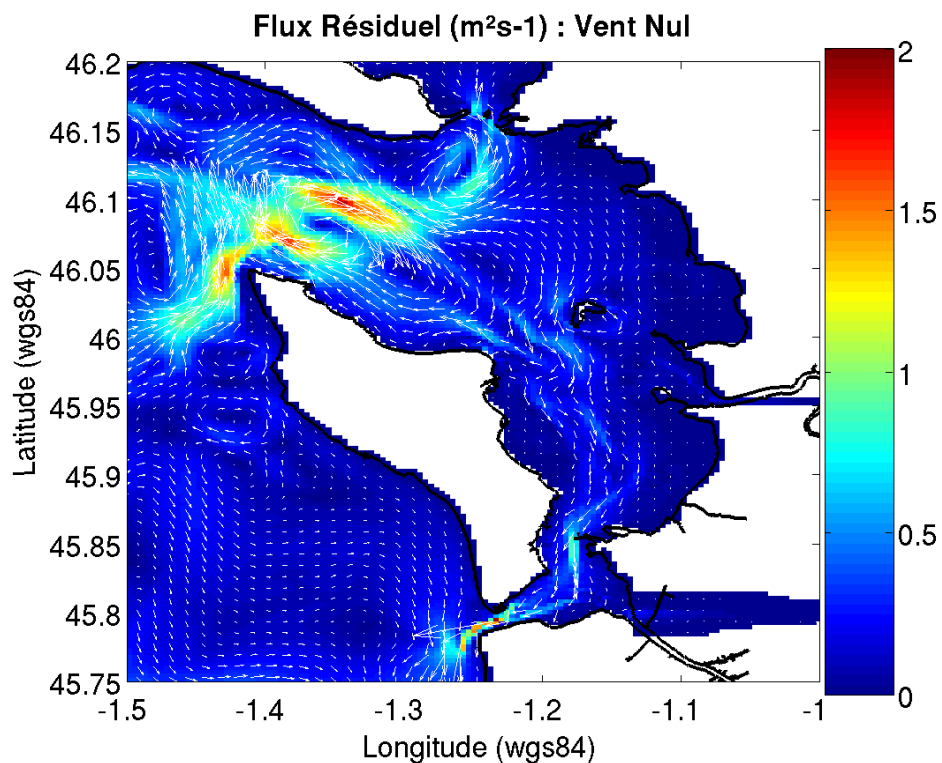


Figure 34. Direction et intensité des flux résiduels dans le bassin de Marennes-Oléron sans vent.

En l'absence de vent la circulation résiduelle dans le Bassin s'opère du nord vers le sud. La présence d'une puissante cellule de circulation tourbillonnaire s'étendant de la Pointe des Saumonards à la Pointe Chassiron, alimente le Bassin en eaux du large par le nord. Les débits résiduels calculés à la frontière nord du bassin (Figure 33) confirment un débit résiduel entrant de l'ordre  $750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , l'alimentation s'effectuant principalement par le Passage de l'Est. Les flux résiduels sont logiquement plus importants à la sortie du Pertuis de Maumusson ( $\sim 1.8 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ), au niveau du rétrécissement du Chapus ( $\sim 1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ) et dans les chenaux principaux ( $\sim 0.3$  à  $0.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ). Dans la zone intertidale où est située la production conchylicole, les flux calculés sont en revanche peu élevés et soulignent un renouvellement des eaux comparativement moins important.

L'influence du vent sur la circulation résiduelle dans le bassin de Marennes Oléron est importante. Les vents déstructurent fortement la cellule tourbillonnaire présente dans le Pertuis d'Antioche ce qui modifie sensiblement la nature des eaux alimentant le Bassin.

Les vents agissent également fortement sur l'intensité des flux résiduels dans le Bassin de Marennes Oléron mais ne modifient pas leur orientation qui reste toujours orientée sud (Figures 35). Les vents ont aussi une influence marquée sur la circulation à l'extérieur des Pertuis mais seulement à partir de  $10 \text{ ms}^{-1}$ . La circulation résiduelle à  $5 \text{ ms}^{-1}$  est en effet peu différente de celle observée en l'absence de vent.

Pour des vents de nord (Figure 35) et par rapport à une situation sans vent, la circulation résiduelle vers le sud est stimulée. La cellule tourbillonnaire est déstructurée et remplacée par deux nouvelles. La première de faible étendue, située à l'entrée du Pertuis d'Antioche, n'impacte pas le Bassin. La seconde située au milieu Pertuis d'Antioche, réalise l'alimentation du Bassin en eaux provenant du Pertuis Breton. L'apport s'opère surtout par la Fosse d'Enet. Le flux sortant au Passage de l'Ouest est également stimulé. Le débit résiduel entrant à la frontière nord passe de  $850 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  avec des vents de  $5 \text{ ms}^{-1}$  à  $1150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  avec des vents de  $10 \text{ ms}^{-1}$  (Figure 33) Les flux résiduels s'intensifient notamment dans la zone d'estran de la côte continentale. La circulation résiduelle en dehors du bassin s'intensifie également fortement vers le sud.

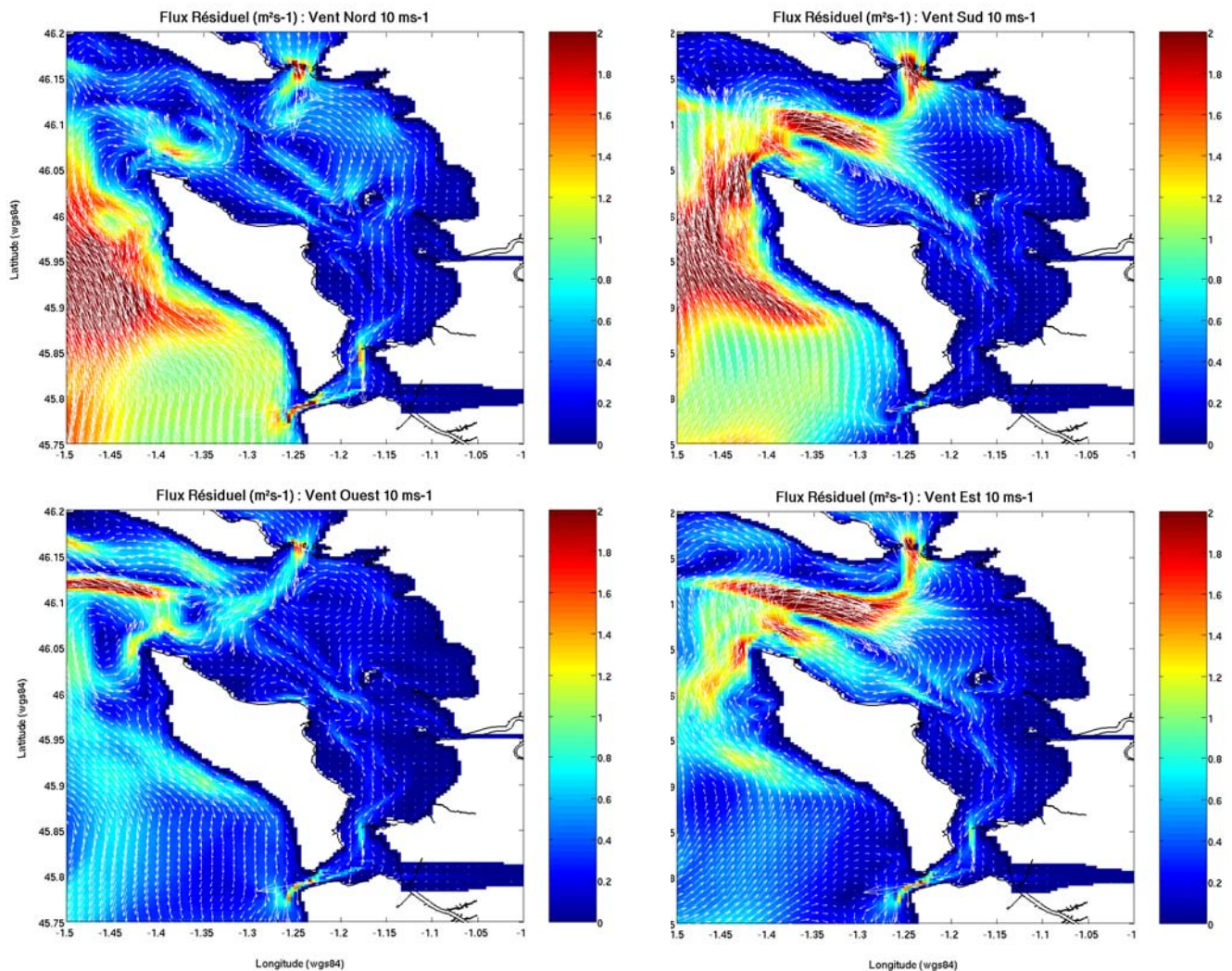


Figure 35. Flux résiduels dans le bassin de Marennes-Oléron pour quatre cas de vent.



Par vent de sud (Figure 35), la circulation résiduelle vers le sud est freinée en particulier dans le Pertuis de Maumusson. La cellule tourbillonnaire dans le Pertuis d'Antioche, peu différente de celle observée en situation de vent nul, est intensifiée et augmente le flux résiduel entrant par le Passage de l'Est. Cet apport est cependant compensé par une augmentation du flux résiduel sortant par la Fosse d'Enet. Le débit résiduel entrant à la frontière nord de  $750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en situation sans vent diminue à  $650 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  et  $350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  avec des vents de  $5$  et  $10 \text{ ms}^{-1}$  (Figure 33). Dans les zone d'estran du Coureau d'Oléron, les flux résiduels s'intensifient et s'orientent partout au nord. La circulation résiduelle en dehors du bassin est également stimulée vers le nord.

Par vent d'est à  $10 \text{ ms}^{-1}$  (Figure 35), la circulation résiduelle vers le sud n'est pas modifiée malgré une intensification très importante de la cellule tourbillonnaire dans le Pertuis d'Antioche. Le débit résiduel entrant à la frontière Nord (Figure 33) reste inchangé et voisin de  $750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  quelle que soit la force du vent. L'augmentation des flux résiduels entrant au Passage de l'Est et à la fosse d'Enet est compensée par une augmentation équivalente du flux sortant d'eau par le Passage de l'Ouest. Les flux résiduels dans les chenaux restent inchangés en force et en direction. Au niveau de la zone d'estran, on note une stimulation des courants qui portent au nord sur la côte oléronnaise et au sud sur la côte continentale. La nature des eaux alimentant le Bassin reste océanique. A l'extérieur du Bassin, les flux orientés nord-est se séparent en deux branches à l'approche de l'île d'Oléron l'une portant vers le sud et l'autre vers le nord.

Par vent d'ouest (Figure 35), la cellule tourbillonnaire anticyclonique est fortement déstructurée et remplacée par plusieurs autres, cycloniques et anticycloniques. A l'intérieur du bassin, la circulation résiduelle vers le sud reste pourtant peu modifiée comme le montrent les débits entrant à la frontière nord (Figure 33). Le flux entrant par le Passage de l'Ouest est stoppé et le flux entrant par le Passage de l'Est est diminué. La nature des eaux alimentant le Bassin semble provenir à la fois du large et du Pertuis Breton ainsi que du Pertuis d'Antioche. L'influence du vent à l'extérieur du Bassin est en revanche importante comme le montre l'intensification des flux vers le sud le long de la côte de l'île d'Oléron.

### 5.3. Le temps de renouvellement ou « flushing-time »

#### 5.3.1. Méthode de calcul

##### 5.3.1.1. Le temps de renouvellement ou « flushing time »

Le temps de renouvellement ou flushing time ( $T_f$ ) est un paramètre intégrateur qui décrit les caractéristiques générales d'échange des masses d'eaux sur l'ensemble d'un bassin.

Monsen *et al.* (2002) proposent d'utiliser la méthode de décroissance exponentielle issue d'expérimentations réalisées en CSTR (« continuously stirred tank reactor »). On suppose (1) l'introduction, au temps  $t=0$ , d'une masse connue d'un élément conservatif de façon homogène sur l'ensemble du bassin (la concentration en ce constituant à la sortie du bassin est donc égale à sa concentration en tout point du bassin). Si l'on suppose maintenant (2) qu'aucune autre introduction de ce constituant n'est réalisée par

la suite, l'évolution de la concentration en traceur à l'intérieur du bassin peut-être assimilée à une loi de décroissance exponentielle comme indiquée sur la Figure 36.

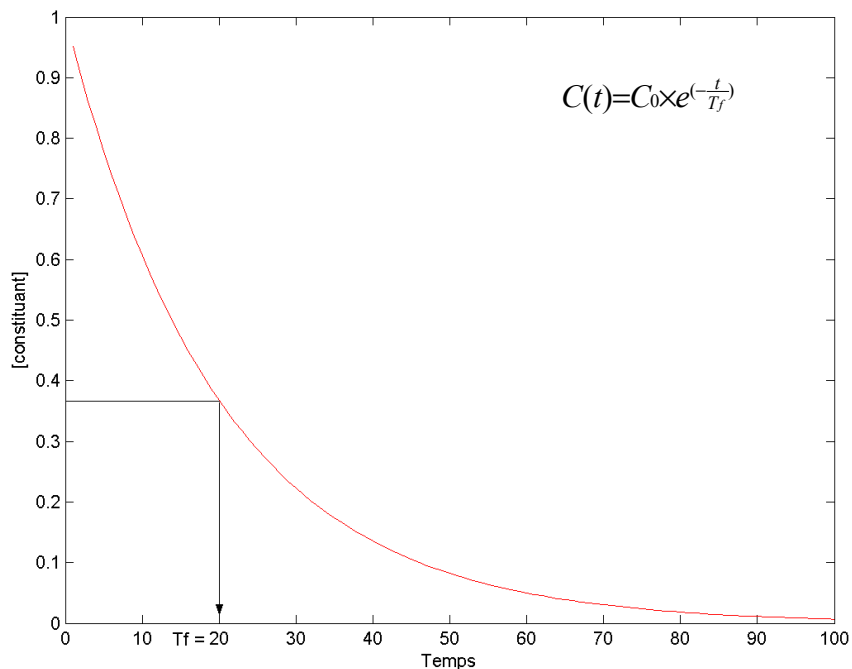
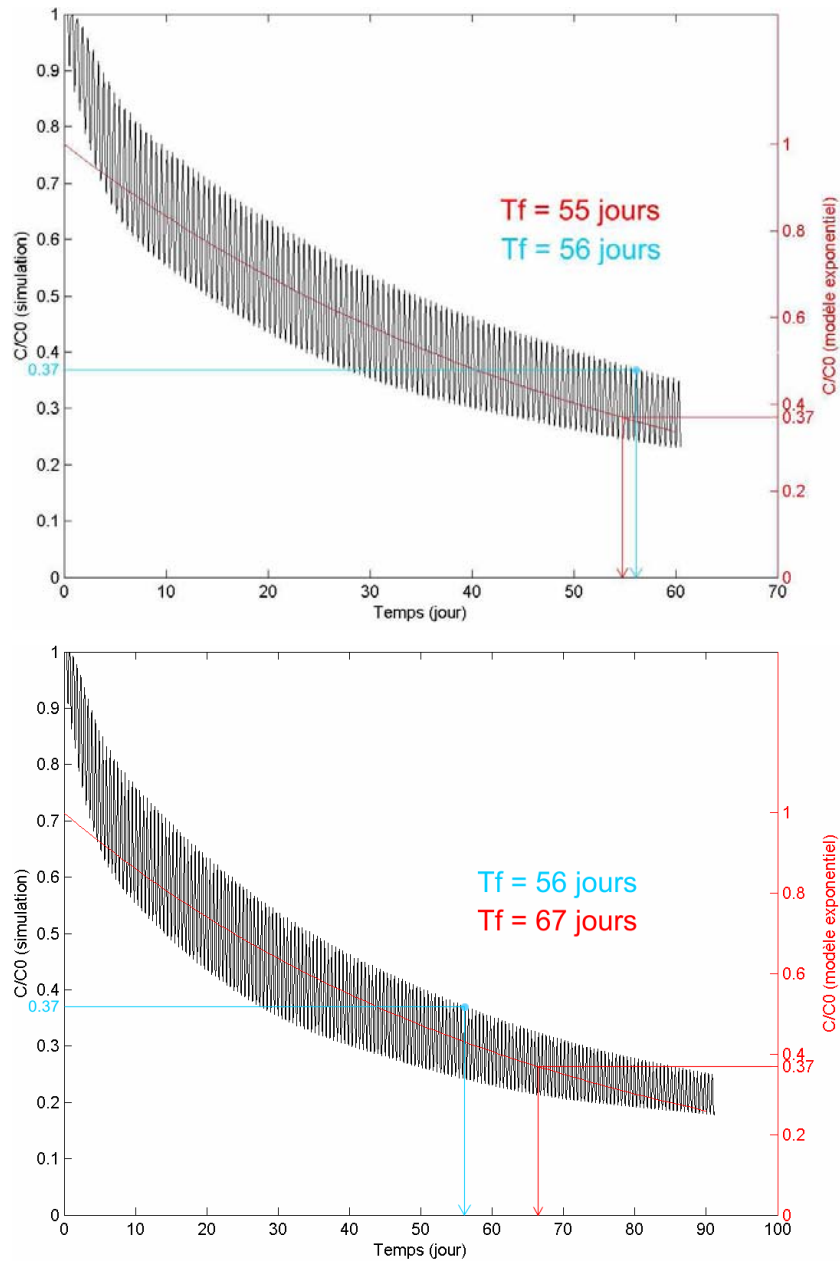


Figure 36. Loi théorique d'évolution de la concentration en un constituant conservatif dans un CSTR.  $C_0$  est la concentration initiale du constituant dans le modèle,  $t$  le temps et  $T_f$  le temps de renouvellement.

On notera que  $T_f$  est le temps mis pour que 37% ( $e^{-1}$ ) de la concentration initiale reste dans le système. Le flushing time reflète le temps moyen passé dans le système par le constituant. Bien que le temps de renouvellement des eaux ait été défini à l'origine pour des lacs, et donc qu'il considère le constituant comme définitivement perdu pour le système dès le premier franchissement, la méthode est applicable à un système tidal, le modèle exponentiel est alors ajusté sur les oscillations de façon à tenir compte du retour du constituant dû à la marée (Monsen et al., 2002).

Il est cependant apparu que le modèle de décroissance exponentielle décrivait assez mal l'évolution des concentrations simulées dans des systèmes côtiers à l'hydrodynamique complexe, fort éloignée de celle d'un CSTR. De ce fait, le flushing time s'est avéré être un paramètre peu robuste, sensible en particulier à la durée de la simulation (plus celle-ci augmente, plus le flushing time augmente). On voit par exemple sur la Figure 37, passé une soixantaine de jours de simulation, les concentrations ne varient pratiquement plus mais influent fortement sur la pente du modèle, ce qui augmente la valeur du temps de renouvellement. C'est pourquoi nous avons choisi de ne considérer que l'enveloppe supérieure des oscillations de concentration, et de retenir le temps nécessaire pour que celle-ci soit égale à 37% de la concentration initiale (point bleu, Figure 37).



Figures 37. Variations des concentrations en traceur en fonction du temps, pour des durées de simulation de 60 (en haut) et de 90 jours (en bas). En rouge, valeur de  $T_f$  obtenue par ajustement au modèle exponentiel de décroissance ; En bleu,  $T_f$  calculé dans cette étude.

En prenant l'enveloppe supérieure des concentrations simulées pour le calcul du flushing time, on s'affranchit de la durée de la simulation et on calcule le temps nécessaire pour que la concentration moyenne en traceur dans le bassin tombe définitivement sous la valeur seuil  $e^{-1}$ .

### 5.3.1.2. Le temps de renouvellement local ou renouvellement spatialisé

Le calcul précédent, réalisé pour l'ensemble du Bassin, a de plus été effectué en chacune des mailles du système de façon à visualiser les variations spatiales du temps de renouvellement. On imagine en effet logiquement que les zones à proximité immédiate des frontières du Bassin vont être renouvelées plus rapidement que les secteurs les plus internes. Le temps de renouvellement local  $T_{\text{L}}$  (*sensus* Zimmerman, 1976) représente donc le temps nécessaire pour qu'une fraction significative de l'eau de la maille considérée soit remplacée par de l'eau provenant de l'extérieur du Bassin. Cette fraction est la même que celle utilisée pour le calcul du temps de renouvellement global, elle est habituellement fixée à  $1-e^{-1}$  soit 63% (Ranasinghe et Pattiaratchi, 1998 ; Arneborg, 2004 ; Koutitonsky *et al.*, 2004). La même simulation que précédemment (calcul du  $T_{\text{F}}$ ) a donc été utilisée, et le temps au bout duquel la concentration en traceur tombe définitivement sous 37% de la concentration initiale est relevé pour chacune des mailles du Bassin. Ce calcul simple permet de visualiser la vitesse de renouvellement par de l'eau extérieure (Océan ou rivières) des divers secteurs géographiques du Bassin.

### 5.3.2. Les simulations réalisées

Plusieurs simulations ont été réalisées pour estimer l'influence du coefficient de marée, du vent et des débits des rivières sur le temps moyen de renouvellement du Bassin.

- L'effet de la marée a été estimé sur le cycle de marée allant du 12/09/2005 23:11:00 au 25/01/2006 00:00:00 en situation sans vent et avec des débits de rivière nuls. Neuf simulations ont permis de tester l'influence du coefficient de marée en revif et en déchet. L'introduction du traceur est effectuée pour chaque coefficient de marée testé à la pleine mer (Tableau 2).
- L'effet du vent a été évalué sur le cycle de marée du 23/09/2005 6:00:00 (initialisation du traceur par Coef. 71 à pleine mer) au 25/01/2006 00:00:00 avec des débits de rivière nuls. Plusieurs cas de vents fictifs constants ont été testés : 10 m/s et 5 m/s et pour les quatre directions cardinales (nord, est, ouest, sud et ouest). Les vents appliqués sont constants et homogènes sur toute la durée de la simulation.
- L'effet des rivières a été étudié sur le cycle de marée du 23/09/2005 6:00:00 (initialisation du traceur par Coef. 71 à pleine mer) au 25/01/2006 00:00:00 en situation de vent nul. Quatre simulations reprenant chacune les débits moyens d'hiver, de printemps, d'été et d'automne des principaux fleuves côtiers ont été testées (Gironde, Lay, Sèvre, Charente et Seudre). Les débits appliqués (Tableau 3) sont constants sur toute la durée de la simulation.

Tableau 2. Date et Heure UTC d'initialisation du traceur dans les simulations dédiées à l'étude de la marée sur le « Flushing Time »

Coefficient	Déchet/Revif	Heure TU
35	Revif	12/08/2005 23 :11 :00
42	Revif	14/08/2005 00 :33 :00
68	Revif	15/08/2005 13 :49 :00
95	Revif	17/08/2005 03 :08 :00
112	Revif+Déchet	19/08/2005 04 :19 :00
96	Déchet	21/08/2005 17 :26 :00
71	Déchet	23/08/2005 06 :00 :00
45	Déchet	24/08/2005 19 :05 :00
25	Déchet	24/08/2005 23 :53 :00

Tableau 3. Débits moyens saisonniers appliqués pour les principales rivières.

	Débits moyen ( $m^3 s^{-1}$ )			
	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Lay	36	12	1	17
Sèvre Niortaise	98	47	16	41
Charente	163	84	14	74
Seudre	6	4	1	2
Gironde	1458	1068	352	920

### 5.3.3. Influence du coefficient de marée

Le temps de renouvellement moyen du bassin est de 11 jours (Tableau 4 et Figure 38). Les résultats obtenus indiquent cependant que le temps de renouvellement varie de manière importante avec la marée (variation comprise entre -7 et 43% par rapport au Tf obtenu en coef. 71).

Tableau 4. Temps renouvellement selon le coefficient de marée et le cycle revif-déchet.

Coefficient	Revif/Déchet	Temps de renouvellement (Tf en jours)	Variation (%) par rapport au Tf à Coef. 71
35	Revif	8	43
42	Revif	8	41
68	Revif	10	29
95	Revif	11	23
112	Revif+Déchet	14	0
96	Déchet	15	-7
71	Déchet	14	0
45	Déchet	12	14
25	Déchet	10	29

Voisin de 8 jours en mortes eaux (Coef. 42 en revif) il culmine à 14 jours en vives eaux (Coef. 96 en déchet), le renouvellement du Bassin est plus rapide en mortes eaux qu'en vives eaux. Il est également toujours plus long en déchet qu'en revif (+2 jours en moyenne à coefficient identique). Ce comportement demeure inexpliqué.

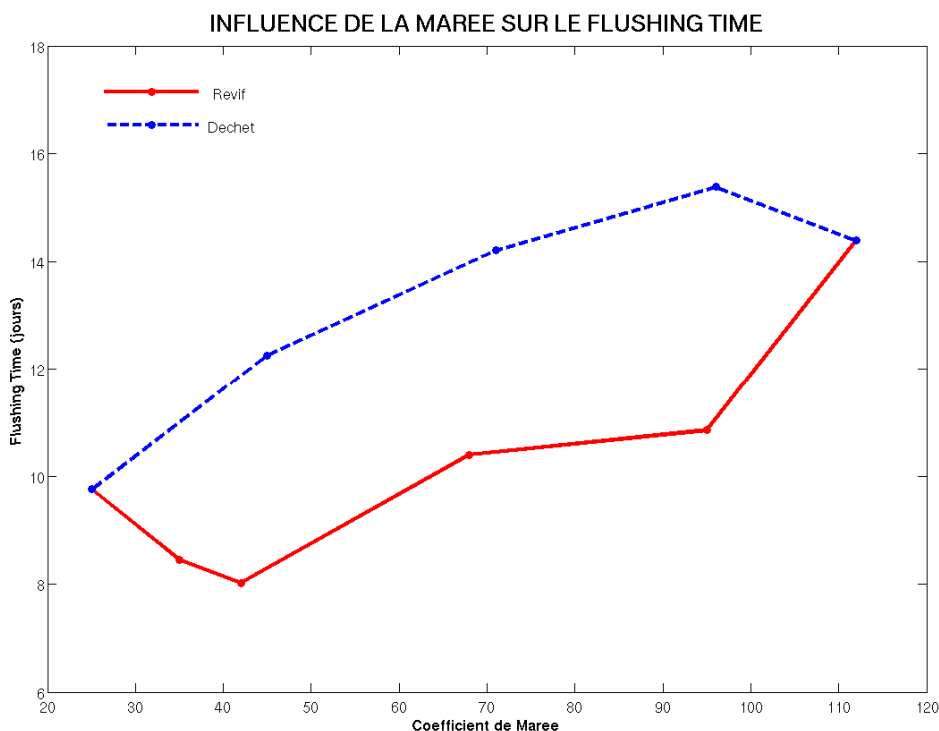


Figure 38. Evolution du temps de renouvellement du bassin selon le coefficient de marée et cycle revif-déchet.

#### 5.3.4. Influence du vent

Globalement le vent favorise le renouvellement du bassin mais de façon plus ou moins importante selon sa direction et son intensité (Tableau 5 et Figure 39).

En situation sans vent (Figure 40 et Tableau 5), le renouvellement moyen du Bassin est de 14 jours. L'analyse spatiale (Figure 40) révèle un renouvellement comparativement plus lent dans le Pertuis de Maumusson que dans le Coureau d'Oléron, ce qui confirme le transport résiduel des eaux du bassin vers le sud. Le renouvellement dans la zone d'estran située le long de la côte continentale est par ailleurs beaucoup moins rapide (entre 20 et 35 jours) que celui observé sur la côte oléronnaise (entre 15 et 20 jours). Ces résultats confirment un confinement important des eaux dans ce secteur en l'absence de vent.

Par vent de nord (Figure 41 et Tableau 5), le renouvellement du bassin est fortement stimulé. Il diminue de 14 jours en situation de vent nul à 11 jours (-21%) et 6 jours (-57%) avec des vents respectivement établis à 5 et 10  $\text{ms}^{-1}$ . Pour des vent à 5  $\text{ms}^{-1}$

l'intensification des flux résiduels entrant à la Passe d'Enet (Figure 35) semble expliquer le déconfinement (1 à 15 jours) des eaux situées le long de la côte continentale. Le renouvellement de la côte oléronnaise reste par contre inchangé (15 à 20 jours). Avec des vents à  $10 \text{ ms}^{-1}$  on observe une intensification encore plus importante du renouvellement. Cette intensification est surtout sensible dans le Pertuis de Maumusson (5 jours contre 20-25 sans vent). Le renouvellement de la côte nord de l'île d'Oléron est comparativement moins stimulé.

Par vent de sud (Figure 41 et Tableau 5), le renouvellement du bassin est moyennement stimulé. Il s'élève respectivement à 15 jours (+7%) et 10 jours (-36%) avec des vents établis à 5 et  $10 \text{ ms}^{-1}$ . A  $5 \text{ ms}^{-1}$ , malgré une légère augmentation du temps de renouvellement à l'embouchure de la Charente, la situation est peu différente de celle observée par vent nul. Seul un vent de  $10 \text{ ms}^{-1}$  accélère de manière significative le renouvellement moyen qui s'opère alors sur l'ensemble des estrans est et ouest du Bassin. Le secteur proche de l'embouchure de la Charente reste en revanche toujours confiné.

Par vent d'est (Figure 41 et Tableau 5), le renouvellement moyen s'élève respectivement à 14 jours (+7%) et 9 jours (-36%) avec des vents établis à 5 et  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Pour des vents à  $5 \text{ ms}^{-1}$  le renouvellement est activé sur la côte continentale mais ralentie au niveau la côte oléronnaise. A  $10 \text{ ms}^{-1}$  la circulation est activée partout mais la côte continentale reste toujours moins bien renouvelée.

L'effet du vent d'ouest (Figure 41 et Tableau 5) sur le renouvellement est comparativement moins importante que celui observé avec les autres vents. Il s'élève respectivement à 14 jours (0%) et 12 jours (-14%) avec des vents établis à 5 et  $10 \text{ ms}^{-1}$ . A l'intensité  $5 \text{ ms}^{-1}$ , le renouvellement est spatialement peu différent de celui observé par vent nul. A l'intensité  $10 \text{ ms}^{-1}$ , le renouvellement à l'échelle du Bassin est intensifié en particulier sur la côte oléronnaise. La côte continentale et l'embouchure de la Charente et de la Seudre sont comparativement moins bien renouvelées.

Tableau 5. Temps renouvellement selon la direction et la force du vent et pourcentage de variation du  $T_f$  par rapport à une situation sans vent.

Vent		Tf (jours)	Variation (%)
Secteur	Intensité		
Vent nul		14	0
0	5	11	-21
	10	6	-57
90	5	14	0
	10	9	-36
180	5	15	7
	10	10	-29
270	5	14	0
	10	12	-14

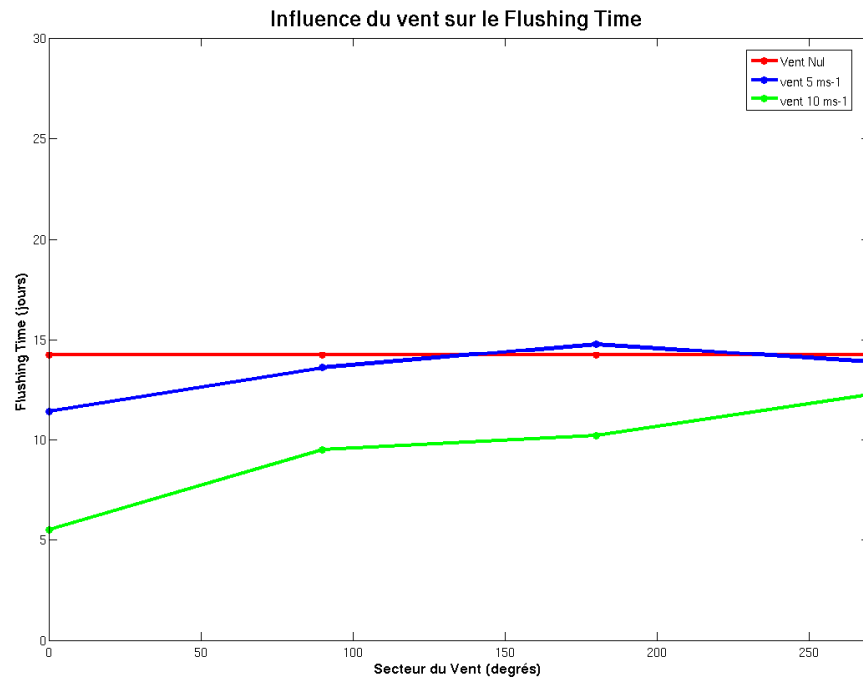


Figure 39. Influence du vent sur le temps renouvellement selon sa direction et son intensité

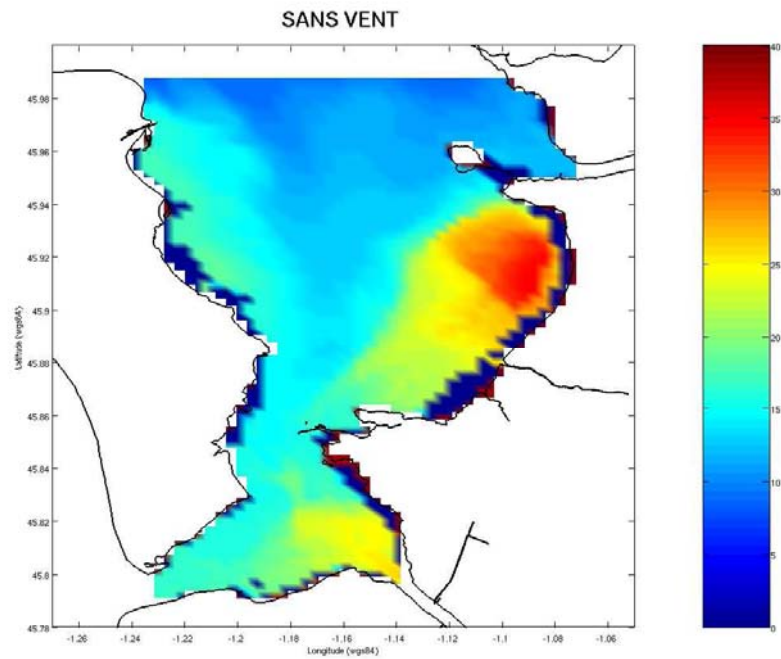


Figure 40. Renouvellement spatialisé (en jours) en situation de vent nul.



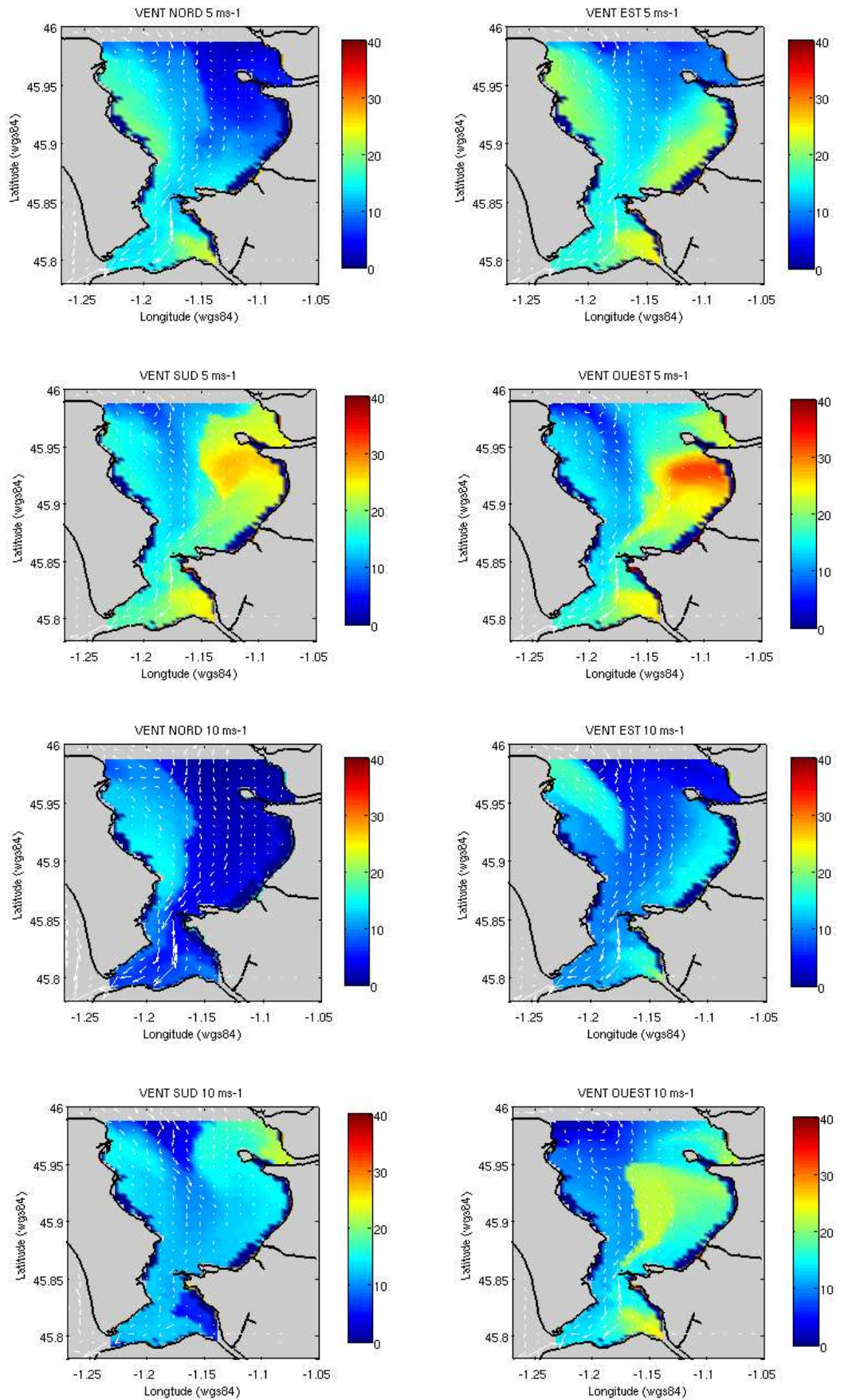


Figure 41. Renouvellement spatialisé (en jours) en fonction des vents à 5 ms-1 et 10 ms-1

### 5.3.5. Influence des débits des rivières

Paradoxalement l'influence des débits des rivières sur le temps de renouvellement moyen du bassin est négligeable (Tableau 6). Quels que soient les débits appliqués, le « flushing time » calculé reste voisin de 14 jours donc proche d'une situation avec débits nuls.

L'examen des renouvellements spatialisés (Figure 42) confirme un faible impact de ce paramètre quel que soit le secteur du bassin. L'augmentation des débits de la Charente provoque cependant un léger déconfinement des eaux situées sur la côte est du bassin.

Débit	Tf (jours)	Variation (%)
Débits nuls	14	
Hiver	14	0
Printemps	14	0
Ete	14	0
Automne	14	0

Tableau 6 : Influence des débits sur le temps de renouvellement.

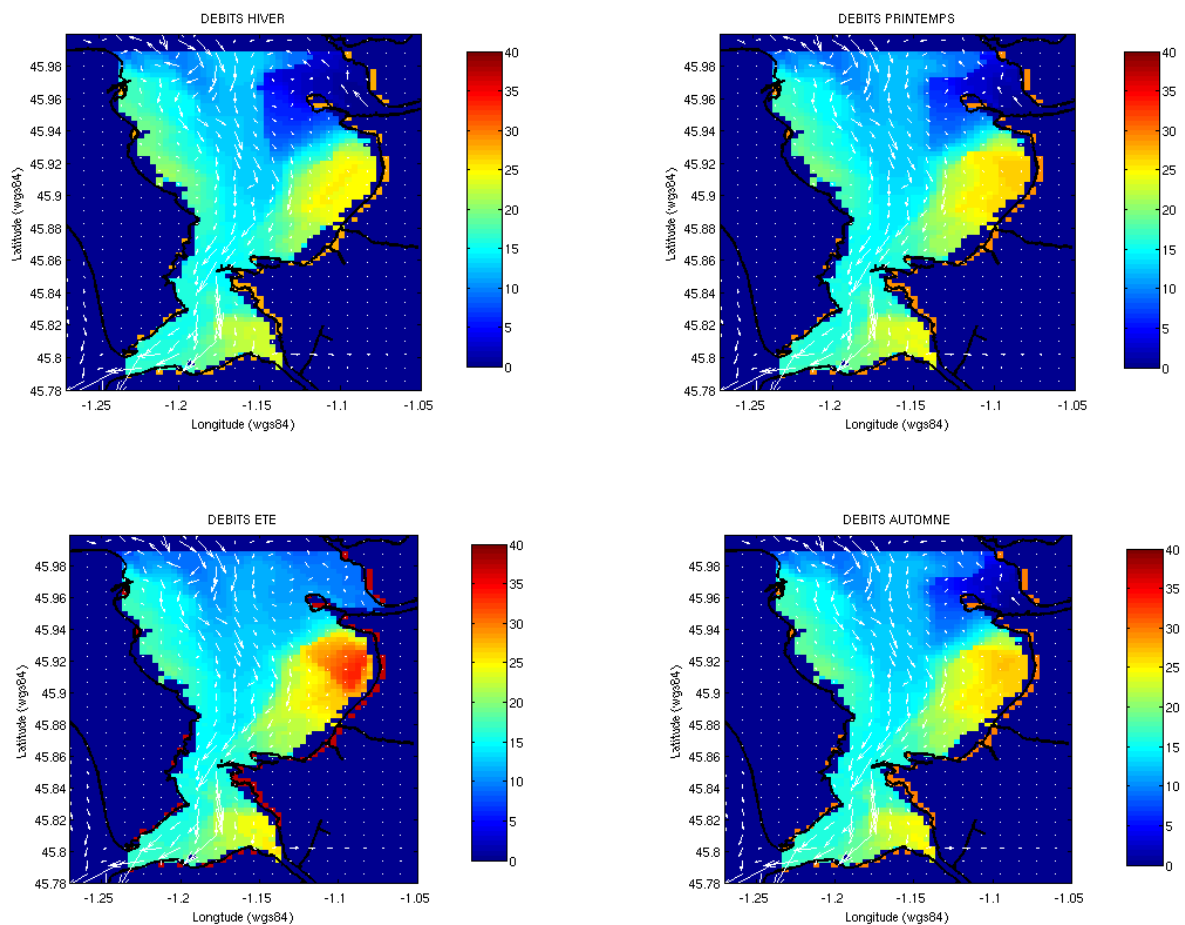


Figure 42. Renouvellement spatialisé (en jours) en fonction des débits de rivières

## 5.4. Devenir des apports des fleuves côtiers dans le bassin

### 5.4.1. Méthode de calcul de l'âge des masses d'eau

Il s'agit ici de déterminer le temps moyen mis par de l'eau douce en provenance d'une rivière donnée pour atteindre tel ou tel point du bassin étudié. De nombreux auteurs se sont intéressés au calcul de l'âge de parcelles d'eau ou de traceurs (Bolin & Rohde, 1973 ; Zimmerman, 1976 ; Takeoka, 1984 ; Delhez et al., 1999 ; Delhez & Deleersnijder, 2002 ; Monsen et al., 2002). Ainsi, Zimmermann (1976) propose de symboliser le trajet d'une parcelle d'eau à l'intérieur d'un bassin bidimensionnel comme sur la Figure 3 : à l'instant  $t$ , la parcelle se trouve à une position donnée  $\bar{X}$  et son âge représente le temps écoulé depuis sa pénétration dans le système à  $t_0$  en  $\bar{X}_0$ , position de la source d'eau douce.

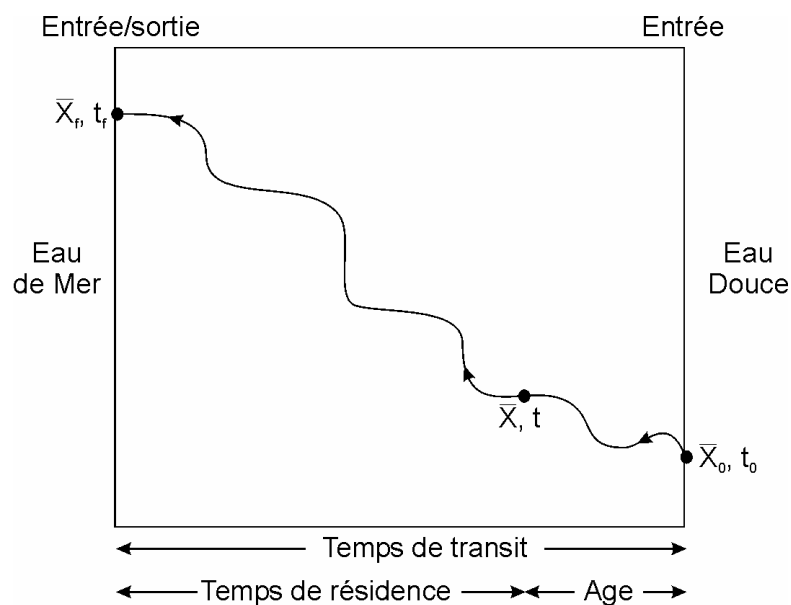


Figure 3. Trajet d'une parcelle d'eau à l'intérieur d'un bassin (tiré de Zimmermann, 1976).

Le schéma précédent pourrait toutefois laisser imaginer que le mouvement de la parcelle n'est dû qu'à la seule advection et néglige les processus de mélange et de diffusion. Ce serait considérer que les constituants contenus dans cette parcelle (sel, nutriments, etc.) sont isolés de l'extérieur, et donc que leurs concentrations restent constantes pendant tout le trajet de cette dernière. Il n'en est évidemment rien dans la réalité et l'importance des phénomènes de diffusion dans l'océan est depuis bien longtemps clairement établie. Delhez *et al.* (1999) puis Deleersnijder *et al.* (2001) proposent donc une théorie générale de l'âge des masses d'eau, prenant en compte à la fois les phénomènes advectifs, ceux de mélange/diffusion et les processus de production/destruction. Considérant maintenant que chaque parcelle d'eau peut contenir des éléments ayant des histoires différentes,

donc des âges différents, cette théorie s'attache à calculer la distribution des âges dans chacune des parcelles composant un système défini. Ces auteurs définissent par l'équation suivante l'évolution au cours du temps ( $t$ ) de la concentration  $c_i$  du  $i^{\text{ème}}$  constituant.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = p_i - d_i - \nabla \cdot (uc_i - K \cdot \nabla c_i) - \frac{\partial c_i}{\partial \tau} \quad (11)$$

avec  $p_i$  et  $d_i$ , les termes de production et destruction,  $u$  le terme d'advection,  $K$  le terme de diffusion et  $\tau$ , l'âge.

On notera que l'équation (11) est très proche de l'équation d'advection-dispersion d'un élément dissout résolue par le modèle MARS (ainsi d'ailleurs que par la majorité des modèles hydrodynamiques eulériens), et définit simplement une dimension supplémentaire à l'espace cartésien, la dimension de l'âge  $\tau$ . Par la suite on définit l'âge moyen  $a_i$  du traceur  $i$ , au point  $\bar{X}$  et à l'instant  $t$ , de la façon suivante (12) :

$$a_i(t, \bar{X}) = \frac{\alpha_i(t, \bar{X})}{C_i(t, \bar{X})} \quad (12)$$

où  $\alpha_i$  est la *concentration en âge* et  $C_i$  est la somme des concentrations des classes d'âges du constituant  $i$ .

Deux approches peuvent être utilisées pour le calcul de l'âge dans le modèle MARS, selon que l'on veuille garder comme résultat la fonction de distribution des âges composant la parcelle d'eau ou non.

- Si tel est le cas, plusieurs de traceurs (ayant tous les mêmes caractéristiques que le constituant) égal au nombre de classes d'âge désirées sont lâchés et leur dispersion dans le bassin est calculée simultanément par le modèle. A tout point  $\bar{X}$  et instant  $t$ , l'âge moyen est calculé selon les équations 13 et 14, connaissant la concentration de chaque traceur et son âge.

$$\alpha_i = \int_0^{+\infty} \pi_i(t, \bar{X}, \tau) d\tau \quad \text{et} \quad C_i(t, \bar{X}) = \int_0^{+\infty} c_i(t, \bar{X}, \tau) d\tau \quad (13) \text{ et } (14)$$

Il est alors possible de connaître, outre l'âge moyen, des histogrammes de répartition des différentes classes d'âge.

- Si tel n'est pas le cas, deux traceurs sont lâchés par les rivières. L'un est un traceur conservatif tout à fait classique (son équation d'advection-dispersion est l'équation 15) et l'autre représente  $\alpha_i$  la concentration en âge, son équation d'advection-dispersion est l'équation suivante (16).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = P_i - D_i - \nabla \cdot (uC_i - K \cdot \nabla C_i) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = C_i + \pi_i - \delta_i - \nabla \cdot (u\alpha_i - K \cdot \nabla \alpha_i) \quad (16)$$



Avec des termes de source et de perte nuls, pour un traceur conservatif :

$$(P_i, D_i, \pi_i, \delta_i) = \int_0^{\infty} (p_i, d_i, \varpi_i, \varpi d_i) = 0 \quad (17)$$

A tout point  $\bar{X}$  et instant  $t$ , l'âge moyen est calculé selon l'équation 12, soit le rapport des concentrations des deux traceurs. C'est cette méthode qui a été choisie pour cette étude a été complétée par un calcul de dilution.

#### 5.4.2. Les simulations réalisées

L'étude du devenir des apports des principaux fleuves (Gironde, Charente, Sèvre Niortaise, Lay et Seudre) dans le bassin de Marennes-Oléron a été réalisée sur la base des débits moyens saisonniers (Tableau 6) sous différentes conditions de vent (quatre vents cardinaux établis à 5 ou 10 m/s). Les débits de chaque fleuve sont simultanément appliqués, un traceur spécifique permet de suivre le devenir de l'apport de chaque rivière dans le bassin, en âge et en dilution. Ce suivi a pu être mené pour tous les fleuves à l'exception de la Gironde, le raffinement trop grossier du rang où elle est représentée (1300 m) et surtout le caractère 2D du modèle ne permettent pas son suivi réaliste dans le Bassin. Les débits et vents appliqués étant constants, la structure du panache d'apport a été caractérisée par la dilution minimale du traceur calculée en chaque maille durant toute la période de simulation (exprimée en  $-\log$  de la dilution) et par son âge moyen au temps correspondant (exprimé en jours).

Pour la Charente, l'étude théorique des effets du vent et des débits sur la structure des panaches d'apport a été complétée par une simulation réaliste sur la période 2003 à 2004, la modélisation de la variation temporelle du panache d'apport prenant dans ce cas en compte les variations mesurées des débits, des vents, de la pression atmosphérique et de la marée. Les débits fournis au modèle sont les débits mesurés à l'écluse de Carillon pour l'affluent de la Boutonne et à St Savinien pour la Charente (DIREN 17). Le forçage en marée du modèle a été réalisé grâce aux solutions globales FES 2004 (14 composantes harmoniques : K1, K2, M2, M4, mMf, Mm, Msqm, Mtm, N2, O1, P1, Q1 et S2). La prise en compte des effets météorologiques a été effectuée avec l'application des champs analysés de vent et de pression (grille d'archive à maille régulière de résolution spatiale 55 km) du modèle de prévision Météo France Arpège.

#### 5.4.3. Résultats

Les résultats de l'étude théorique montrent que seule la Charente impacte de manière significative le Bassin de Marennes-Oléron. Les apports du Lay et de la Sèvre Niortaise (non représentés) restent cantonnés dans le Pertuis Breton, seules quelques incursions très diluées de la Sèvre dans le Pertuis d'Antioche peuvent parfois être constatées sous certaines conditions de vent (vents de nord et d'ouest). La dilution à la sortie de la Seudre, proche de 0.01 en hiver, confirme également son impact minime dans le Bassin quelle que soit la saison (résultats non représentés). La structure du panache d'apport de la Charente dans le bassin de Marennes-Oléron dépend logiquement de son débit mais

aussi des vents (Annexes E et F). La partie côtière de l'île d'Oléron située entre la Pointe des Saumonards et le Château d'Oléron n'est cependant que très peu exposée aux apports de la Charente quels que soient le vent et le débit. Seuls les vents d'ouest permettent l'extension du panache vers Oléron. Ce cloisonnement semble être lié à un placage dynamique du panache sur la côte continentale par les courants circulant dans le chenal central du Bassin.

Sous des débits hivernaux (Annexe E) et en l'absence de vent, le panache de faible dilution (dilution supérieure à 0.2) est cantonné sur la partie continentale du Coureau d'Oléron et s'étend de l'île d'Aix jusqu'au Chapus. L'âge moyen de cette masse d'eau est de 2 jours au voisinage de l'embouchure et de l'ordre 15 jours au niveau du Chapus. La dilution du panache atteint 0.1 pour un âge de 23 jours dans le Pertuis de Maumusson. Le panache remonte enfin sous une forme très diluée ( $\leq 0.02$ ), le long de la côte ouest de l'île d'Oléron.

La structure du panache est assez semblable, au printemps et en automne (Annexe E) du fait de la similitude des débits moyens à ces deux saisons. Le panache de faible dilution ( $>0.2$ ), vieux de 4 à 8 jours, reste cantonné auprès de l'embouchure et est moins étendu qu'en hiver. Le Coureau d'Oléron est soumis à un panache dilué entre 0.2 et 0.1 et vieux de 10 à 20 jours. Le Pertuis de Maumusson est peu impacté comme le montre la forte dilution (0.02 à 0.01) et l'âge élevé (20 et 30 jours) du panache dans ce secteur. En été (Annexe D) l'apport reste cantonné auprès l'embouchure proche. Au-delà de l'île Madame la dilution est en effet de 0.1 et l'âge voisin de 20 jours.

A l'intensité 5 m/s, les vents ont peu d'influence sur la dilution du panache hivernal qui reste très voisin de celui observé avec un vent nul (Annexe F). Seul un vent de sud a un effet notable sur la structure du panache qui est alors soumis à une dilution plus importante. Une extension vers le Pertuis d'Antioche est dans ce cas également observée. La composition d'âge varie par contre de manière plus importante avec l'orientation du vent. En accord avec l'intensification de la circulation résiduelle nord-sud, avec un vent de nord et dans une moindre mesure par vent d'ouest et d'est on note un rajeunissement sensible du panache sur tout le Bassin. L'âge du panache dans le Pertuis de Maumusson qui est de 23 jours sans vent rajeuni à 12 jours avec un vent de nord et à 17 jours avec un vent d'ouest. Avec des vents de sud, le transit du panache vers le sud du Bassin est en revanche ralenti (âge  $\geq 25$  jours dans Maumusson).

L'influence des vents établis à 10 m/s est plus marquée (Annexe F) à la fois sur la dilution et sur la structure d'âge du panache. Par vent de sud, on observe une déstructuration complète du panache qui est alors totalement repoussé vers le Pertuis d'Antioche. Par vent de nord, le panache reste cantonné sur la partie continentale du Coureau d'Oléron mais est plus dilué. Son temps de transit vers le sud est également fortement accéléré comme le montre l'âge moyen de l'apport dans le Pertuis de Maumusson qui est n'est plus que de 5 à 10 jours. Par vent d'est ou d'ouest, la structure du panache est par contre voisine de celle observée en l'absence de vent. Seuls une légère dilution et un rajeunissement du panache sont observés en particulier au sud du Coureau d'Oléron. A l'extérieur du bassin, la côte ouest de l'île d'Oléron n'est plus soumise aux apports par la Charente sauf par vent d'Est.

Les résultats simulés avec des forçages réalistes (Figure 43) confirment en 2003 comme en 2004, le cantonnement du panache d'apport la Charente sur la côte orientale du Coureau d'Oléron. La fréquence des dessalures inférieures à 25 ( $\leq 5\%$ ) et la salinité moyenne voisine de 34 confirment également que la côte de l'île d'Oléron comme le Pertuis d'Antioche ne sont pas ou très peu impactés par la Charente.

Le Pertuis de Maumusson est également peu soumis aux apports de la Charente comme le montrent la fréquence peu importante des dessalures inférieure à 25 ( $\leq 10\%$ ) et la salinité moyenne entre 33 et 34.

Le panache de faible dilution est cantonné à l'entrée de l'estuaire (salinité moyenne  $\leq 15$  et 80% du temps elle est inférieure à 25). Le panache de moyenne dilution est localisé dans la zone littorale située entre la pointe de Fouras et la pointe du Chapus.

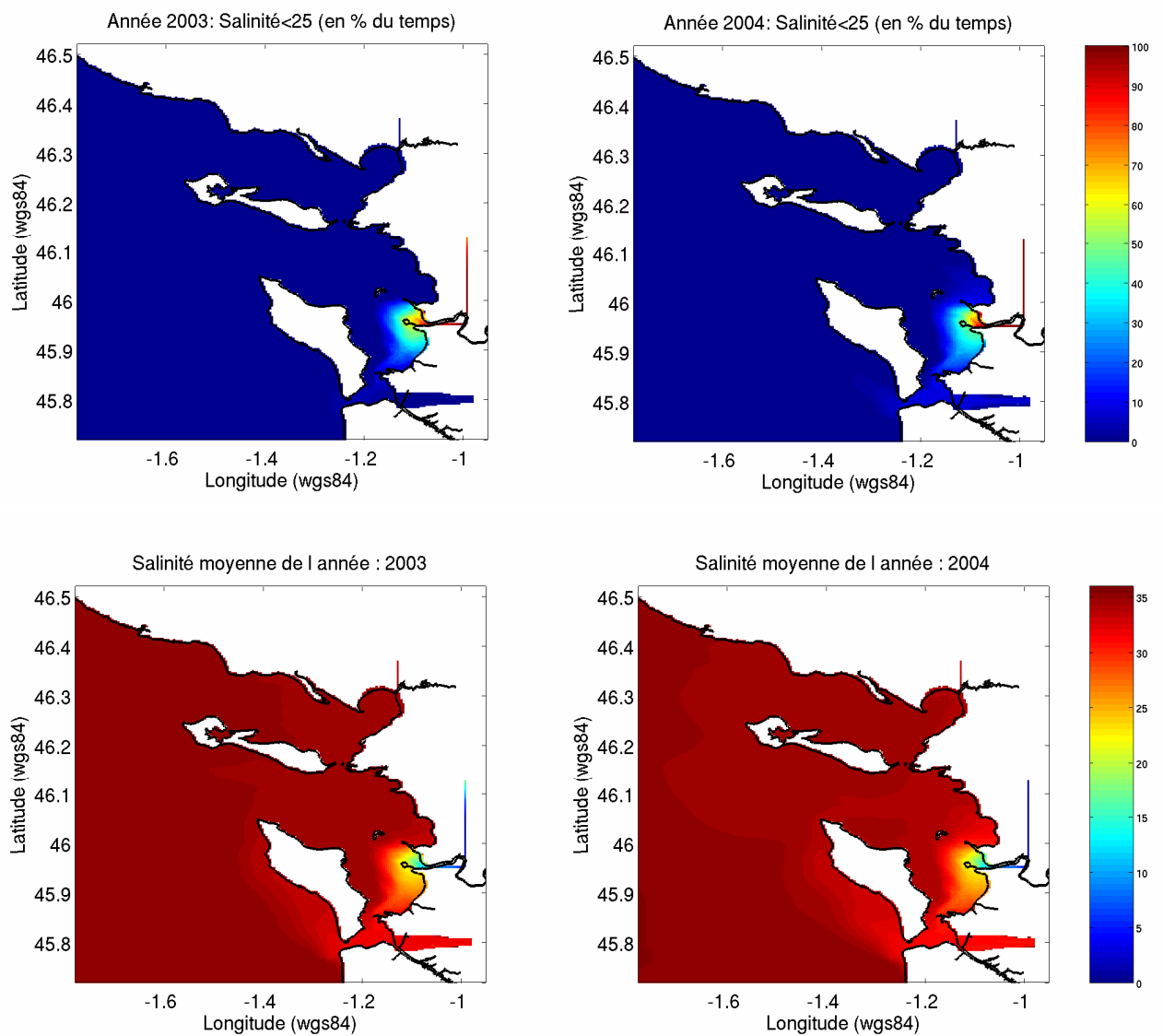


Figure 43. Salinité moyenne et fréquence des salinités inférieures à 25 sur l'année 2003 et 2004

## 6. Synthèse

Le bassin de Marennes-Oléron est un système semi-fermé de 156 km<sup>2</sup> peu profond (8.6 m). Le volume en eau du bassin est de l'ordre 805 millions de m<sup>3</sup>. La surface intertidale avoisine les 91 km<sup>2</sup> ce qui représente près de 58% de sa surface totale. Le volume oscillant moyen, proche de 610 millions de m<sup>3</sup> (75 % du volume moyen du bassin) confirme l'influence prédominante de la marée dans le fonctionnement hydrodynamique du Bassin. Les courants les plus importants sont localisés dans les secteurs les plus profonds du Bassin (passes, chenaux et estuaires), ils sont compris entre 1 et 2 ms<sup>-1</sup> en vives eaux moyennes. Sur les zones d'estran le courant ne dépasse pas 0.5 ms<sup>-1</sup>.

L'étranglement du Chapus divise le bassin en deux sous entités de taille inégale au fonctionnement hydrodynamique différent, le Pertuis de Maumusson au sud et Coureau d'Oléron au nord. Ces deux sous systèmes se différencient tout d'abord par une onde de marée très différente. Le Pertuis de Maumusson est soumis à une marée de type océanique, symétrique et de faible amplitude, tandis que le Coureau d'Oléron est soumis à une marée de type côtière fortement dissymétrique et de grande amplitude.

L'examen des courants et des débits instantanés aux frontières sur un cycle de marée montre également que les deux sous bassins se remplissent et se vident de manière autonome, le Coureau d'Oléron par sa limite nord, le Pertuis de Maumusson par la passe d'Arvert. Les seules incursions d'eau s'opèrent aux renverses de marée toujours du Coureau d'Oléron vers le Pertuis de Maumusson. Ce phénomène, confirmé par les débits résiduels aux frontières, traduit une circulation résiduelle dans le Bassin toujours orientée du nord vers le sud.

Le temps de renouvellement moyen du Bassin en l'absence de vent a été estimé à 14 jours. L'étude spatialisée met en évidence un temps de renouvellement beaucoup plus long (35 jours) dans la partie est du Coureau d'Oléron du fait d'un confinement par les courants intenses circulant dans la passe centrale du Bassin. En liaison avec l'orientation de la circulation résiduelle toujours orientée sud, on observe également un renouvellement plus lent dans le Pertuis de Maumusson.

Les résultats de cette étude ont permis de montrer que seule la Charente influence de manière significative le Bassin de Marennes-Oléron mais son panache reste cantonné sur le flanc est de Coureau d'Oléron (entre l'île d'Aix et le Chapus) et n'impacte donc pas l'île d'Oléron. La dilution importante des apports de la Seudre à son embouchure avec un débit hivernal ( $\geq 0.01$ ) confirme également l'influence négligeable de cette rivière sur le Bassin. Les apports du Lay et de la Sèvre Niortaise enfin, restent cantonnés dans le Pertuis Breton, seules quelques incursions très diluées de la Sèvre dans le Pertuis d'Antioche peuvent parfois être constatées sous certaines conditions de vent (vents de nord et d'ouest).

Le vent influence de manière importante le fonctionnement hydrodynamique du bassin de Marennes-Oléron. L'action du vent est surtout sensible sur la circulation résiduelle et le renouvellement mais il conditionne aussi la nature des eaux alimentant le Bassin et la structure du panache d'apport de la Charente.



Par vent de nord, la circulation résiduelle vers le sud du Bassin est fortement stimulée. En liaison avec la déstructuration des cellules tourbillonnaires présentes dans le Pertuis d'Antioche, les eaux alimentant le Bassin sont surtout de nature côtière. Le renouvellement du Bassin est également fortement stimulé. Il n'est plus que de 11 jours et 6 jours pour des vents de  $5 \text{ ms}^{-1}$  et  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Le confinement des eaux observé sur la partie est du Coureau d'Oléron disparaît. Les eaux de la Charente sont enfin plus diluées et leur transport vers le sud est fortement accéléré.

A l'inverse, par vent de sud, la circulation résiduelle est ralentie. Les eaux alimentant le Bassin ont une forte teinte océanique. Un vent de  $10 \text{ m/s}$  est nécessaire pour modifier sensiblement le temps renouvellement du bassin qui diminue alors à 10 jours. L'effet observé du vent de sud sur le panache d'apport de la Charente est à l'inverse important dès  $5 \text{ m/s}$ . Il se traduit dans le bassin par une dilution plus importante et un ralentissement de son transit vers le sud. Sous des vents de  $10 \text{ m/s}$  le panache est même totalement repoussé dans le Pertuis d'Antioche.

Les vents d'est ne modifient pas de manière importante la circulation résiduelle à l'intérieur du bassin. Les eaux alimentant le bassin sont principalement côtières. Comme avec le vent de sud, un vent de  $10 \text{ ms}^{-1}$  est au minimum nécessaire pour modifier sensiblement le temps de renouvellement qui tombe dans ce cas à 10 jours. Mis à part une légère dilution et une accélération du temps de transit vers le sud du Bassin, la structure spatiale du panache d'apport de la Charente est proche de celle observée en l'absence de vent.

L'influence des vents d'ouest sur la circulation résiduelle dans le Bassin n'est pas très différente de celle constatée avec des vents d'est et en l'absence de vent. Les masses d'eau alimentant le bassin ont une origine mixte, à la fois océanique et côtière. Les débits aux frontières du bassin sont également peu différents de ceux mesurés sans vent. Une diminution sensible du temps renouvellement (9 jours) n'est observée qu'avec des vents d'au moins  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

L'utilisation du modèle hydrodynamique bidimensionnel MARS-2D a permis d'avancer significativement dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du bassin de Marennes-Oléron. L'observation de grandeurs synthétiques dérivées des simulations (flux résiduels, volumes oscillants, temps de renouvellement) autorise une vision globale complémentaire des résultats calculés directement par le modèle (hauteurs d'eau, intensité et direction des courants, dispersion des traceurs).

Il serait maintenant intéressant d'étudier plus finement, sur la base de simulations annuelles jouant les vents et les débits des fleuves, la contribution du facteur hydrodynamique à la productivité des secteurs de production conchylicole mais aussi à leur niveau d'exposition au risque sanitaire.

Cette approche devrait également permettre de mieux cerner l'influence de l'hydrodynamisme sur les processus gouvernant le recrutement, notamment en étudiant plus finement l'origine et le devenir des larves et de leur exposition aux chocs halins et aux polluants chimiques.

La meilleure connaissance de l'hydrodynamisme et du devenir des apports côtiers permettra probablement de mieux comprendre la structure et la répartition spatiale des écosystèmes benthiques du bassin de Marennes-Oléron.



## 7. Bibliographie

- Arneborg L., 2004. turnover times for the waters above sill level in Gullmar Fjord. *Continental Sea Research* 24, 443-460.
- Bolin B., Rohde H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58-62.
- Brooks D.A., Baca M.W., Lo Y.-T., 1999. Tidal circulation and residence time in a Macrotidal Estuary: Cobscook Bay, Maine. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 647-665.
- Deleersnijder E., Campin J.-M., Delhez E.J.M., 2001. The concept of age in marine modelling. I. Theory and preliminary results. *Journal of Marine Systems* 28, 229-267.
- Delhez E.J.M., Campin J.-M., Hirst A.C., Deleersnijder E., 1999. Toward a general theory of the age in ocean modelling. *Ocean Modelling* 1, 17-27.
- Delhez E.J.M., Deleersnijder E., 2002. The concept of age in marine modelling. II. Concentration distribution function in the English Channel and the North Sea. *Journal of Marine Systems* 31, 279-297.
- Delhez E.J.M., Heemink A.W., Deleersnijder E., 2004. Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 691-702.
- Conseil Général Charente Maritime., 2005. Etude pour une gestion dynamique des sédiments sur les côtes du Bassin de Marennes-Oléron et le Pertuis de Maumusson. Lot 1 : Mesures et analyses – Mer de vents. Ifremer-Creocéan-CLDG. *Rapport d'étude*.
- Koutitonsky V. G., Guyondet T., St-Hilaire A., Courtenay S. C., Bohgen A., 2004. Water renewal estimates for aquaculture developments in the Richibucto Estuary, Canada. *Estuaries* 27 (5), 839-850.
- Monsen N.E., Cloern J.E., Lucas L.V., Monismith S.G., 2002. A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales. *Limnol. Oceanogr.* 47, 1545-1553.
- Oliveira A., Baptista A.M., 1997. Diagnostic modelling of residence times in estuaries. *Water Resources Research* 33, 1935-1946.
- Ranasinghe R., Pattiaratchi C., 1998. Flushing characteristics of a seasonally-open tidal system: a numerical study. *Journal of Coastal Research* 14, 1405-1421.
- Salomon J.-C., Breton M., 1995. Arcachon. L'hydrodynamique par la modélisation mathématique. Rapport Ifremer DEL/HS 12-96, 22 p. 54 figures.

Shen J., Haas L., 2004. Calculating age and residence time in the tidal York river using three-dimensional model experiments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 449-461.

Sverdrup H. U., Johnson M. W., Fleming R. H., 1954. The oceans. Their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, Inc. (Ed.), New-York ©1942, 1087 p.

Takeoka H., 1984. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research* 3, 322-326.

Tesson M., 1973. Aspects dynamiques de la sédimentation dans la Baie de Marennes Oléron (France). Thèse de doctorat en sciences de la terre, mention géologie de l'environnement. Université de Bordeaux I. 128 p.

Zimmerman J.T.F., 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, Part I: distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Netherlands Journal of Sea Research* 10, 149-191.



# **Annexe A**

## **Paramétrage du Modèle MARS 2D**



		RANG 0	RANG1	RANG2	RANG3
<b>parametres de bathymetrie</b>	<i>nivmoy</i>	T	T	T	T
	<i>lissage</i>	F	F	F	F
	<i>peigne</i>	F	F	F	F
	<i>cuvette</i>	F	F	F	F
	<i>redefhxhy</i>	F	F	F	F
	<i>xemoy</i>	0	0	0	0
	<i>hrdef</i>	5	5	5	5
	<i>hminim</i>	-6.9999	-6.999	-6.9999	-6.9999
	<i>h0fond</i>	0.1	0.1	0.1	0.1
	<i>dhj</i>	0.2	0.2	0.2	0.2
	<i>hminfrot</i>	0.5	0.5	0.5	0.5
	<i>hminkxky</i>	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>cartesien</i>	F	F	F	F	
<b>parametres de viscosité</b>	<i>fvisc</i>	5	5	5	5
	<i>leponge</i>	5	5	5	5
	<i>epongs</i>	F	F	F	F
	<i>epongn</i>	F	F	F	F
	<i>eponge</i>	F	F	F	F
	<i>epongw</i>	F	F	F	F
	<i>smagor</i>	F	F	F	F
	<i>vismul</i>	1	1	1	1
	<i>vismin</i>	0.1	0.1	0.1	0.1
	<i>vismax</i>	700	700	700	700
	<i>cosmag</i>	0.27	0.27	0.27	0.27
<b>parametres de turbulence</b>	<i>strikhom</i>	T	T	T	T
	<i>strikler</i>	15	10	35	40
	<i>augmfrot</i>	T	T	T	T
	<i>vmxfrot</i>	5	5	5	5
<b>parametres numériques</b>	<i>dtini</i>	300.d0	120.d0	25.d0	25.d0
	<i>dtmin</i>	3.d0	3.d0	3.d0	3.d0
	<i>dtmax</i>	300.d0	200.d0	120.d0	120.d0
	<i>modele2d</i>	T	T	T	T
	<i>cfrcr</i>	0.6	0.6	0.6	0.6
	<i>filtrage</i>	F	F	F	T/F
	<i>asselin</i>	0.9	0.6	0.6	0.6
	<i>predicor</i>	T	T	T	T
	<i>qmax</i>	8	8	8	8
	<i>kx</i>	1	1	1	1
	<i>ky</i>	1	1	1	1
<i>fluxraf</i>	F	F	F	F	
<b>parametres thermodynamiques</b>	<i>equetalin</i>	T	T	T	T
	<i>rhoref</i>	1027.34	1027.34	1027.34	1027.34
	<i>saliref</i>	35.5	35.5	35.5	35.5
	<i>tetaref</i>	10	10	10	10
	<i>rhoair</i>	1.25	1.25	1.25	1.25
	<i>chp</i>	3986	3986	3986	3986
	<i>coext</i>	0.1	0.1	0.1	0.1
	<i>pertefond</i>	F	F	F	F
	<i>chaleurcte</i>	T	T	T	T
<i>radcte</i>	0	0	0	0	
<b>parametres de rejets</b>	<i>icon</i>	1	0	0	0

## paramètres de bathymetrie

**nivmoy** : logique positionne a .true. si la bathymetrie est referencee par rapport au zero hydrographique et pour activer la lecture de correction afin de ramener les sondes au niveau moyen.

**lissage** : logique positionne a .true. pour effectuer un lissage de la bathymetrie aux endroits de forts gradients de pente.

**peigne** : logique positionne a .true. pour eliminer les peignes de bathymetrie.

**cuvette** : logique positionne a .true. pour eliminer les cuvettes dans la bathymetrie.

**redefhxhy** : logique positionne a .true. pour redefinir les hx et hy comme tous les modeles en grille C (1/2 somme des h0). Cela limite les problemes de consistence sur les grandes pentes de fond hydrostatique.

**xemoy** : cote du niveau moyen (i.e. du niveau autour duquel oscille la mer).

**hrdef** : profondeur en metre a partir de laquelle on redefinit les hx et hy a partir des h0 selon ce qui est decrit ci-dessus dans redefhxhy.

**hminim** : hauteur en metre en deca de laquelle on considere que l on est sur une maille de terre donc jamais recouverte.

**h0fond** : fond de maille en metre.

**dhj** : hauteur minimale d'ecoulement sur les bords des mailles exprimee m. Ce parametre est destine a controler les trop fortes accelerations liees a la reduction (pratiquement a zero) de la section d'ecoulement lors du decouvrement.

**hminfrot** : hauteur minimale de la colonne d'eau utilisee pour l'evaluation des termes contenant les tensions de surface et de fond en 2D.

**hminkxky** : hauteur minimale de la colonne d'eau en deca de laquelle on annule la diffusion des traceurs.

## paramètres de viscosité

**fvisc** : coefficient dans la formulation de la viscosite turbulente horizontale nu =  $\text{fvisc}(i) \cdot 0.001 \cdot (\text{dx}^{**1.15})$ . La plage de variation de fvisc est :  $1 < \text{fvisc} < 17$ .

**leponge** : longueur en nombre de mailles de la couche eponge.

**epongs** : logique positionne a .true. pour mettre une couche eponge au sud.

**epongn** : logique positionne a .true. pour mettre une couche eponge au nord.

**eponge** : logique positionne a .true. pour mettre une couche eponge a l'est.

**epongw** : logique positionne a .true. pour mettre une couche eponge a l'ouest.

**smagor** : logique positionne a .true. pour evaluer le coefficient de viscosite laterale par une procedure de type Samgorinsky. Positionne a .false. pour avoir une viscosite. constante et homogene

**vismul** : coefficient multiplicateur de la viscosite a l'interieur de la couche eponge

**vismin** : viscosite minimale  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . En général ce coefficient est choisi superieur ou egal a 0.01.

**vismax** : viscosite maximale  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ce coefficient depend de la taille de maille. Un ordre de grandeur est donne par la formule :  $0.015 \cdot \text{dx}^{**1.15}$  ou dx est la taille de maille du modele.

**cosmag** : coefficient de controle de smagorinsky (sans unite). la plage de variation est :  $0.05 < \text{cosmag} < 0.3$ .

## paramètres de turbulence

**strikhom** : caractere homogene du coefficient de Strikler ou non

**strikler** : coefficient de Strickler intervenant dans la parametrisation du frottement de fond a partir du courant moyen.

**augmfrot** : logique positionne a .true. pour augmenter le frottement au lancement du modele.

**vmxfrot** : vitesse critique exprimee en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  au-dela de laquelle on augmente, aux points ou cette limite est depassee, artificiellement le coefficient de frottement.

## paramètres numériques

**dtini** : pas de temps initial (dans le cas de regulation du pas de temps) sinon pas de temps du modele (pas de temps fixe) en seconde. Il est raisonnable que ce pas de temps soit tel que :  $u \cdot \text{dtini} / \text{dx} \sim 0.2$  avec u le courant max rencontre sur la zone et dx la taille de maille.

**dtmin** : pas de temps minimal en-dessous duquel on ne descendra pas dans la procedure de regulation du pas de temps en seconde.

**dtmax** : pas de temps maximal autorise dans la procedure de regulation du pas de temps en seconde. Ce pas de temps doit etre tel que :  $u \cdot \text{dtmax} / \text{dx} < 1$  avec u le courant max rencontre sur la zone et dx la taille de maille

**cflcrt** : nombre de courant maximum autorise dans la procedure de pas de temps adaptatif. En theorie ce nombre vaut 1 en pratique le modele est destabilise dès que  $\text{cflcrt} > 0.7$ . Si ce seuil est franchit le pas de temps est reduit.

**filtrage** : logique positionne a .true. pour utiliser la procedure de filtrage d asselin de la surface libre dans le calcul de l hydrodynamique du 2D.

**asselin** : poids fort du filtre d'asselin utilise dans la procedure de filtrage du gradient barotrope de pression. Ce poids est tel que  $0 < \text{asselin} < 1$ .

**predicor** : logique positionne a .true. pour utiliser la procedure de prediction-correction dans le calcul de l'hydrodynamique du 2D



### paramètres thermodynamiques

**equetalin** : logique positionne a .true. pour avoir une equation d'état linéarisée autour du point (Pression=1bar,salinite=saliref,temperature=tetaref).

**rhoref** : masse volumique de l'eau de mer de référence (en kg/m<sup>3</sup>)

**saliref** : salinité correspondant à la masse volumique rhoref (en psu)

**tetaref** : température potentielle correspondant à la masse volumique rhoref (en °C)

**rhoair** : masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>)

**chp** : capacité calorifique (en J/m<sup>3</sup>)

**coext** : coefficient d'extinction ou inverse de la longueur caractéristique de pénétration dans l'océan (en m<sup>-1</sup>).

**radcte** : flux de chaleur échangé à l'interface air-mer en cas d'échanges schématisés constants (en W/m<sup>2</sup>).

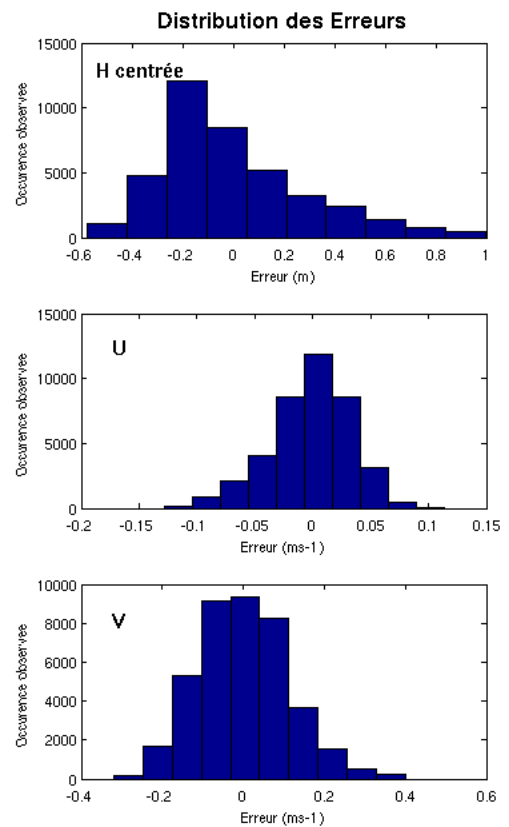
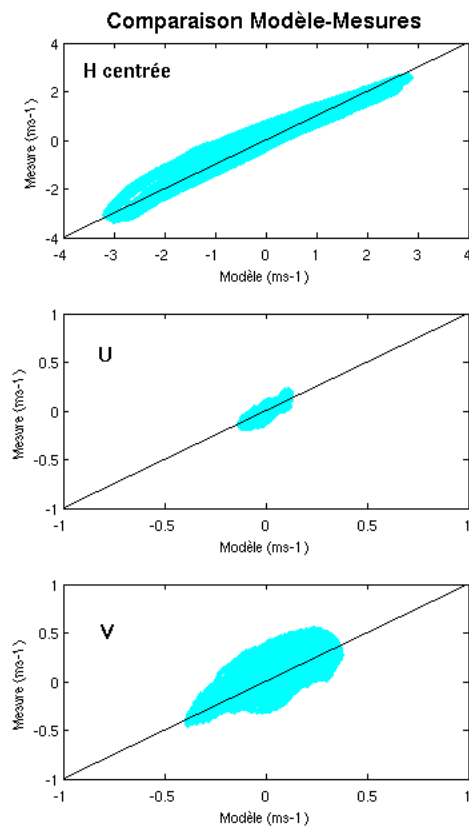
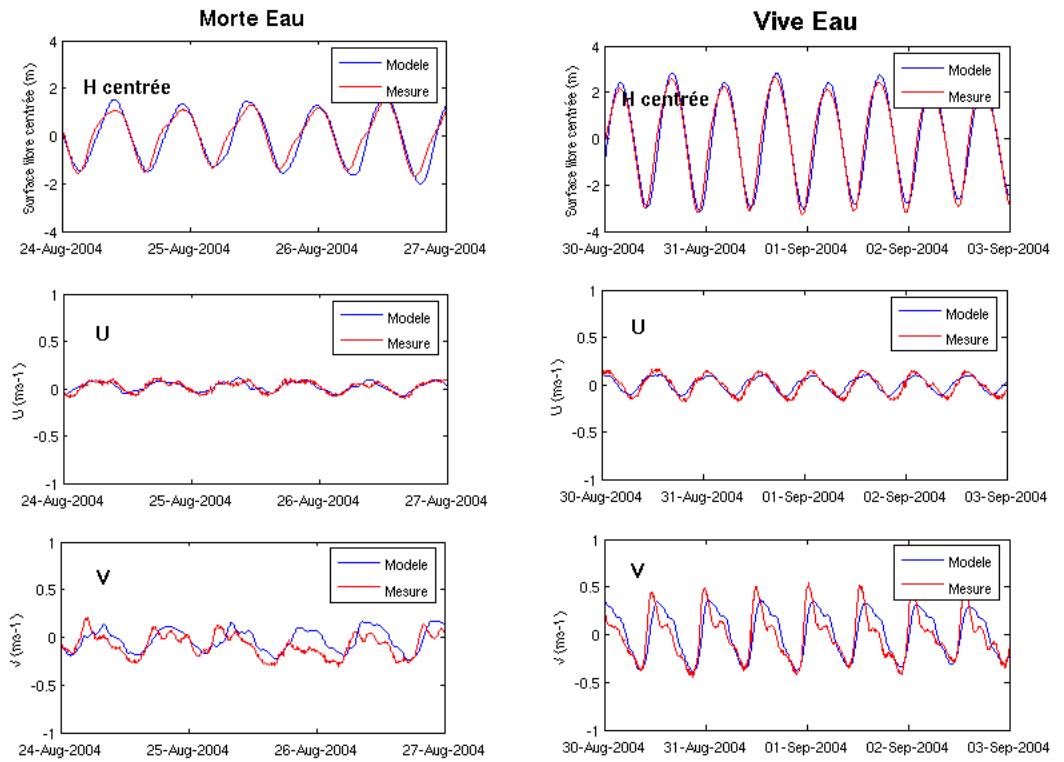


# **Annexe B**

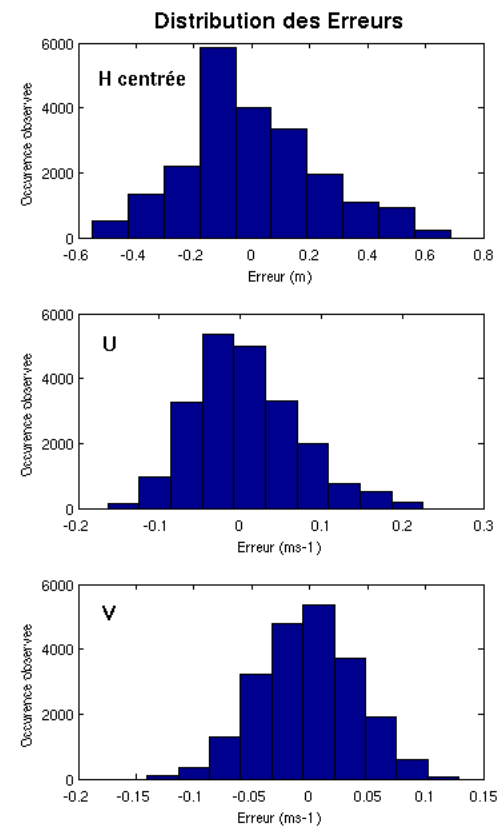
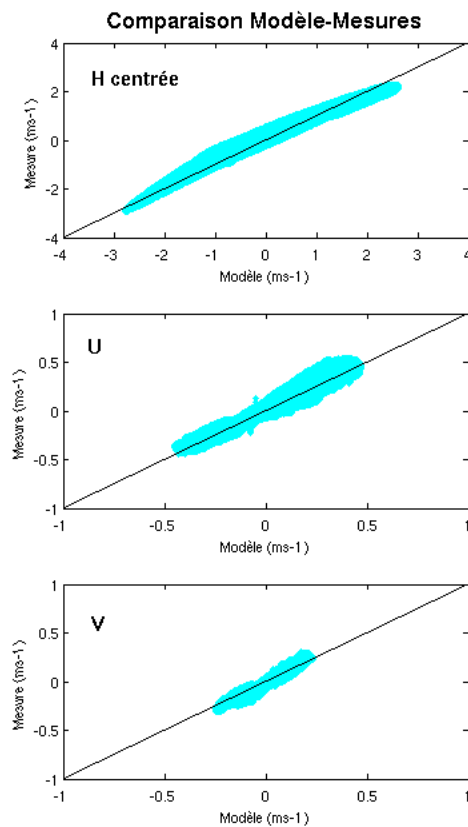
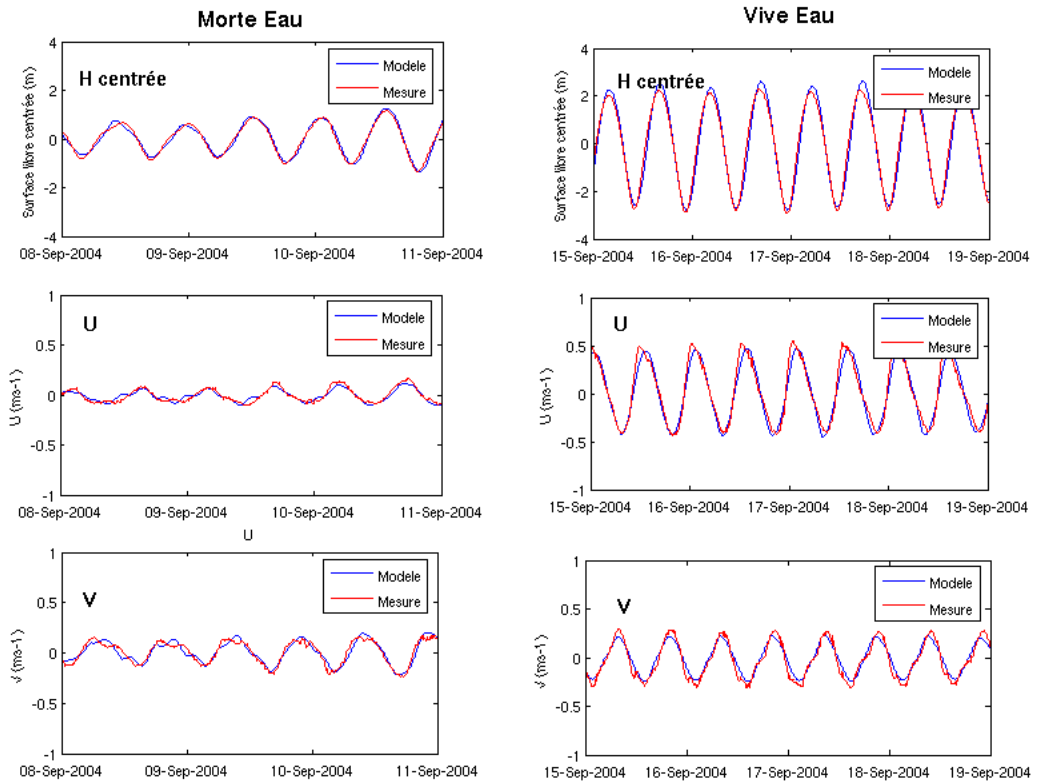
## **Comparaisons modèle-mesures**



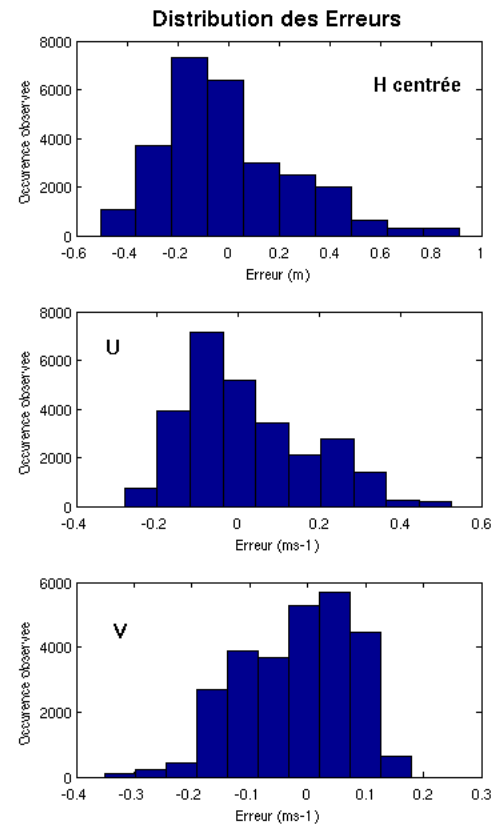
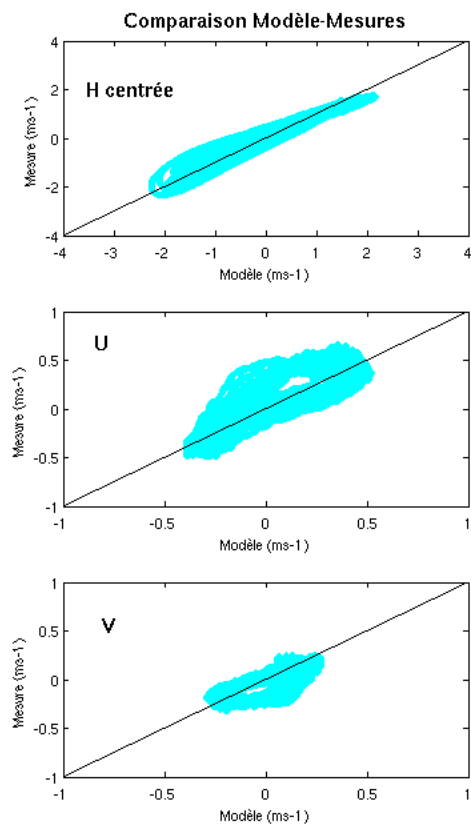
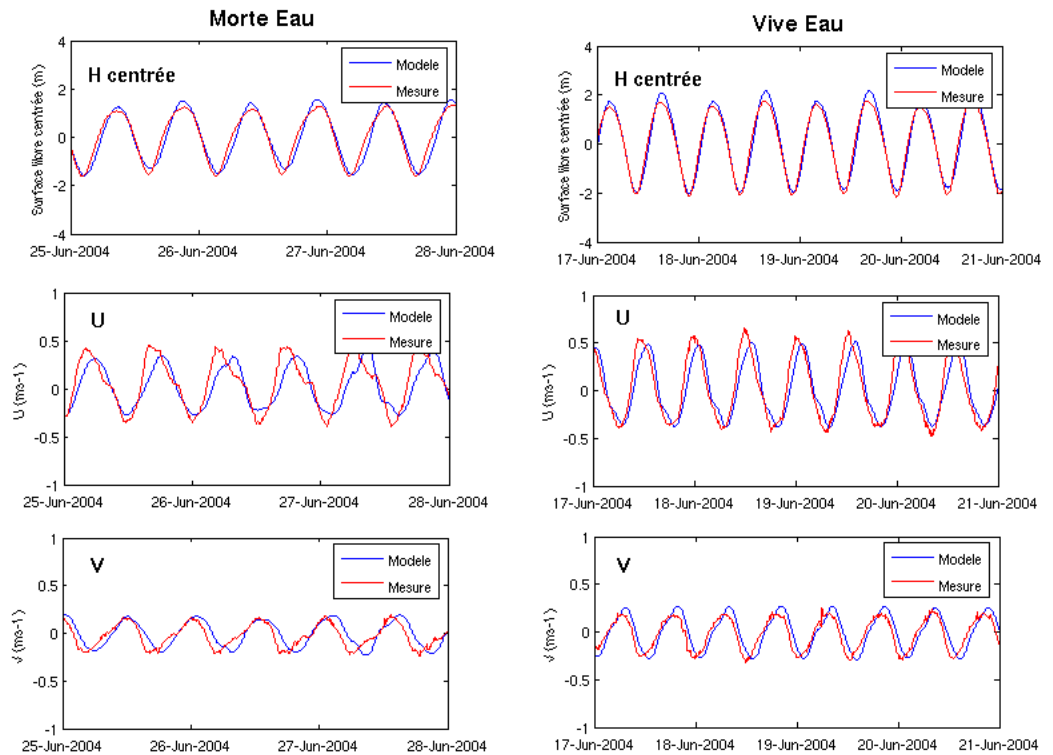
Pointe des Sablanceaux



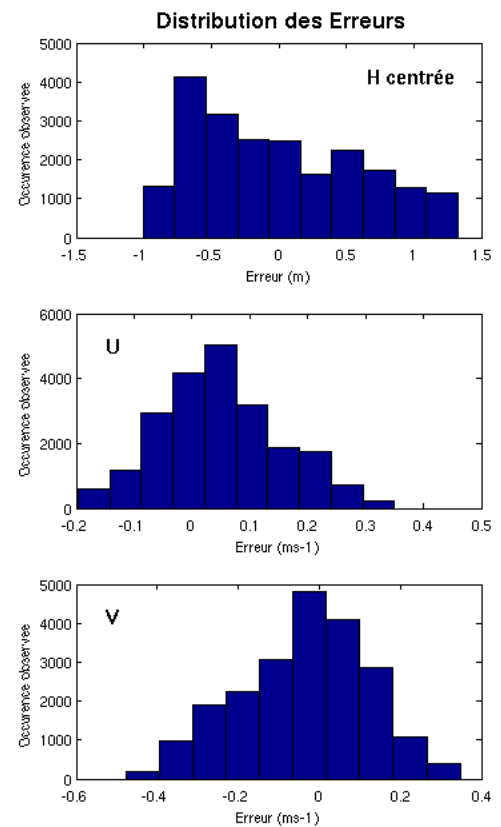
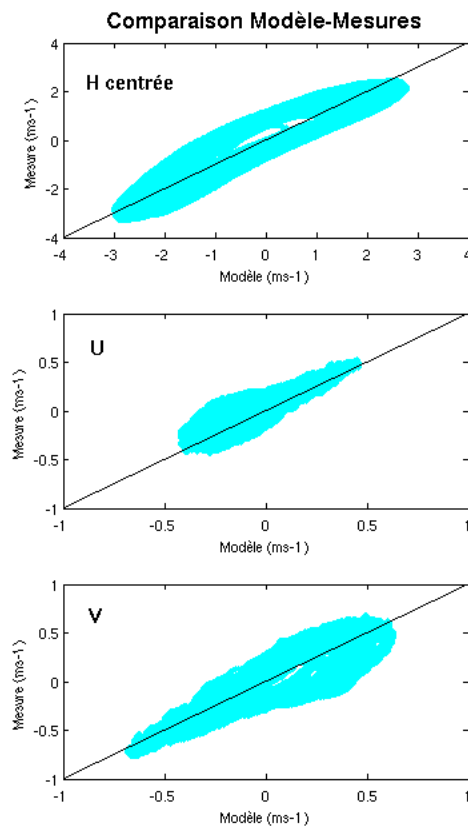
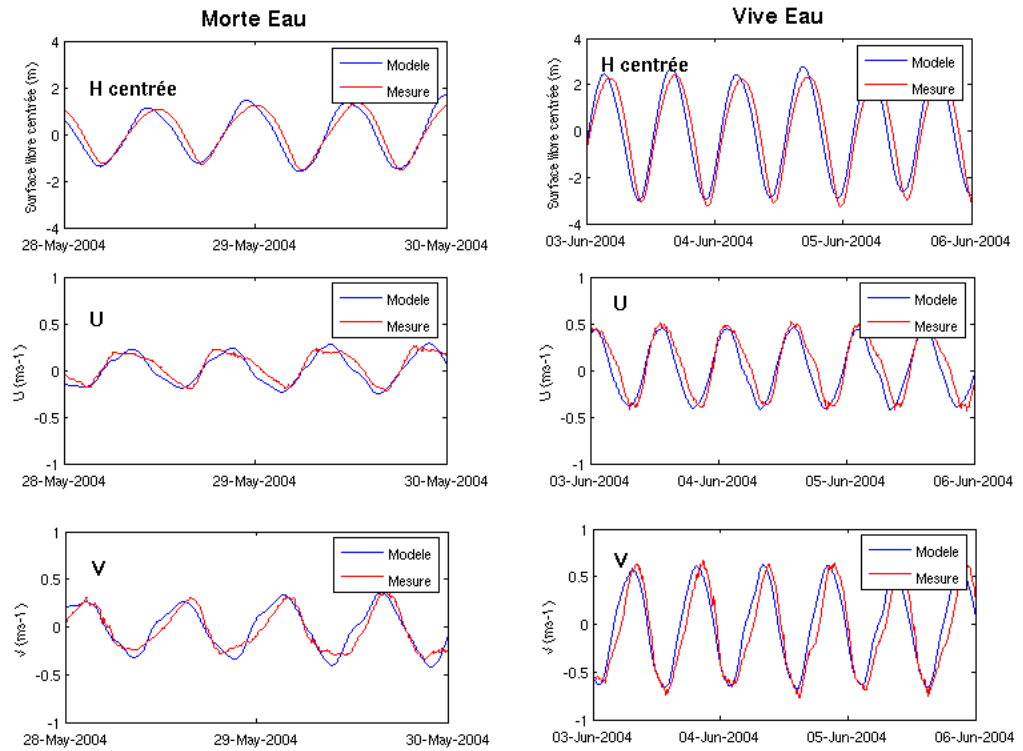
## Plateau d'Angoulins



## Passage de l'Ouest

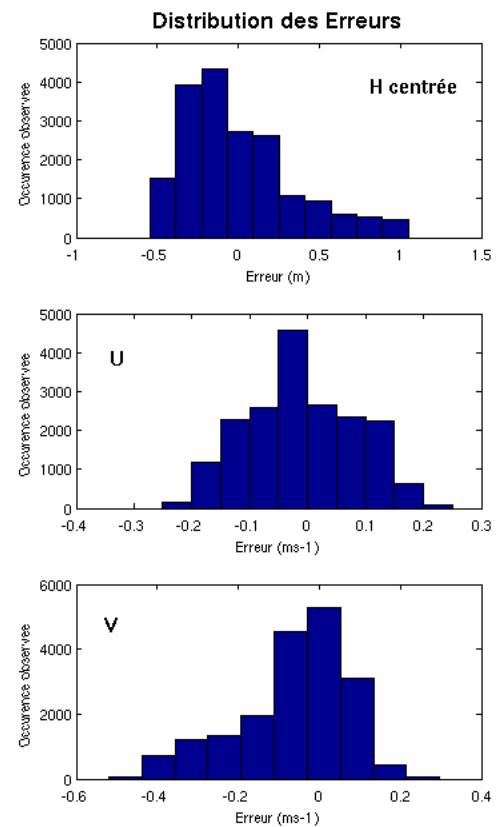
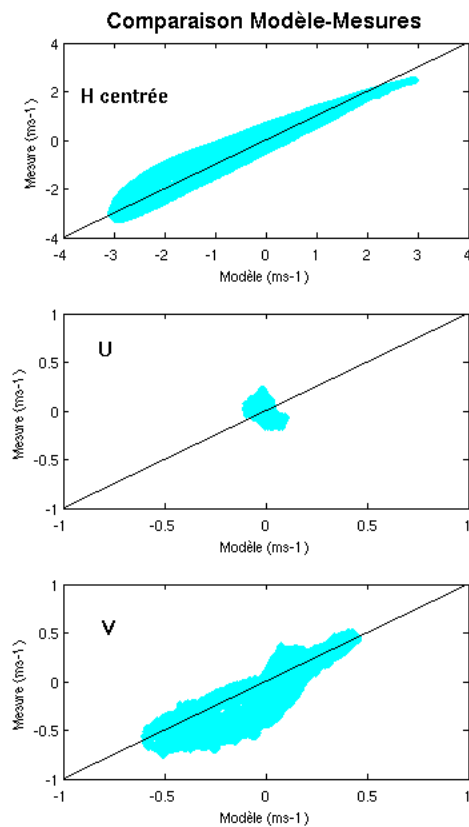
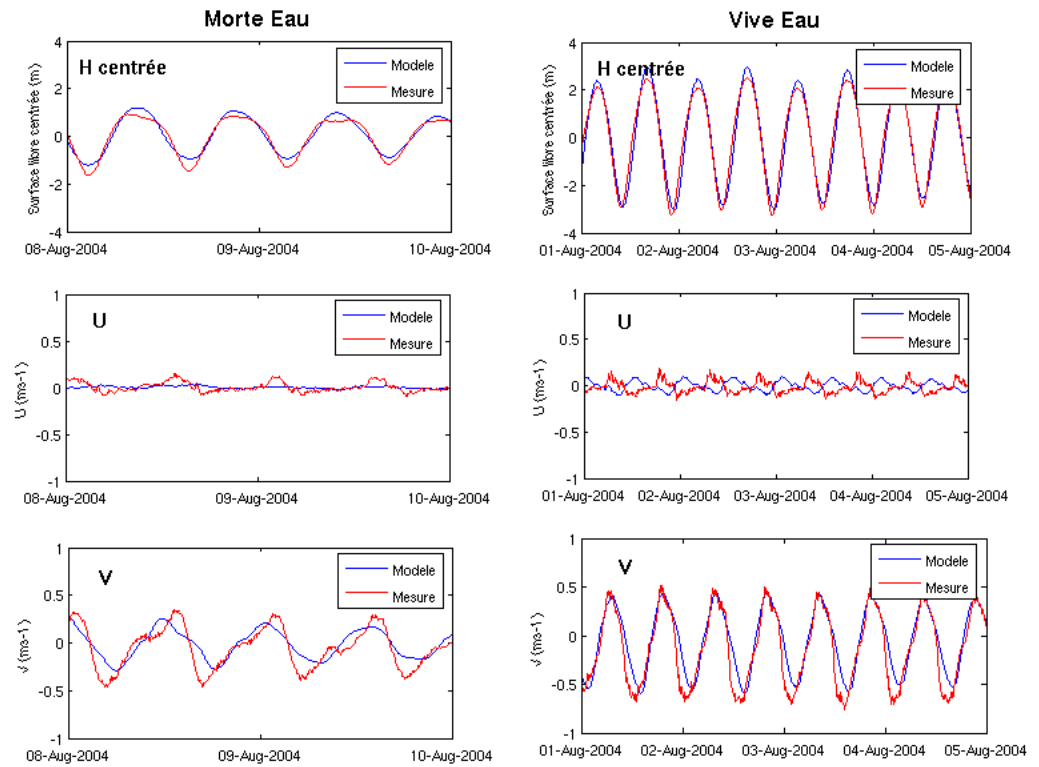


## Passage de l'Est

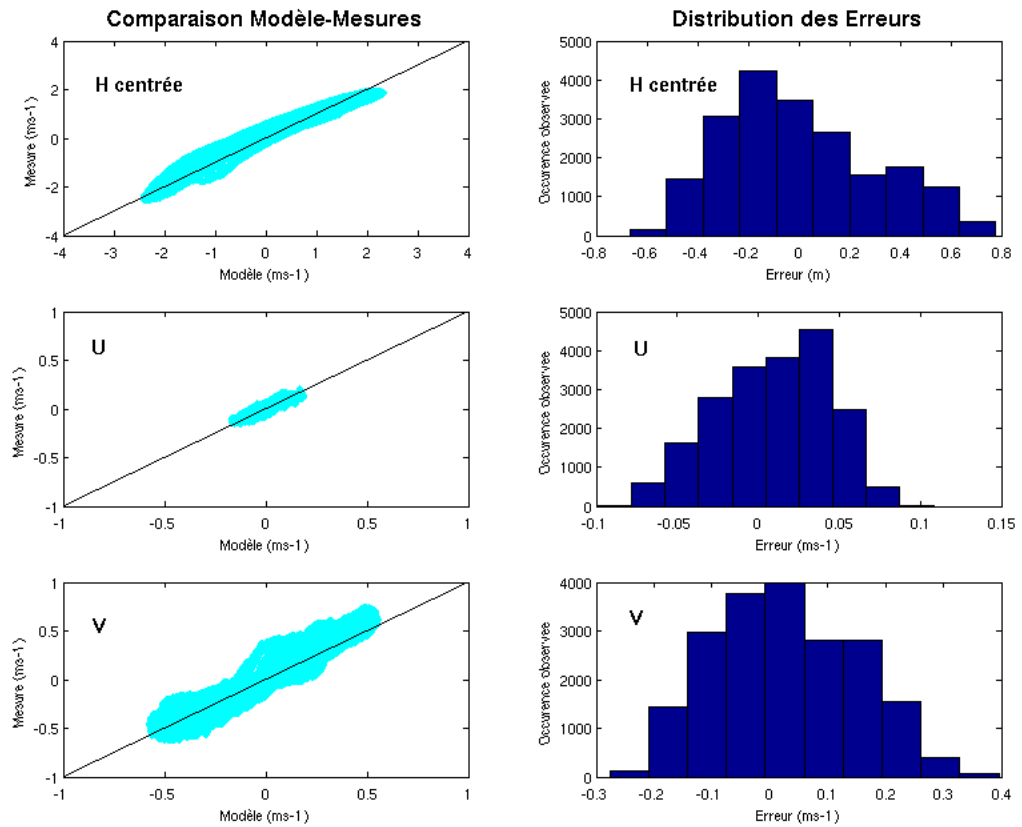
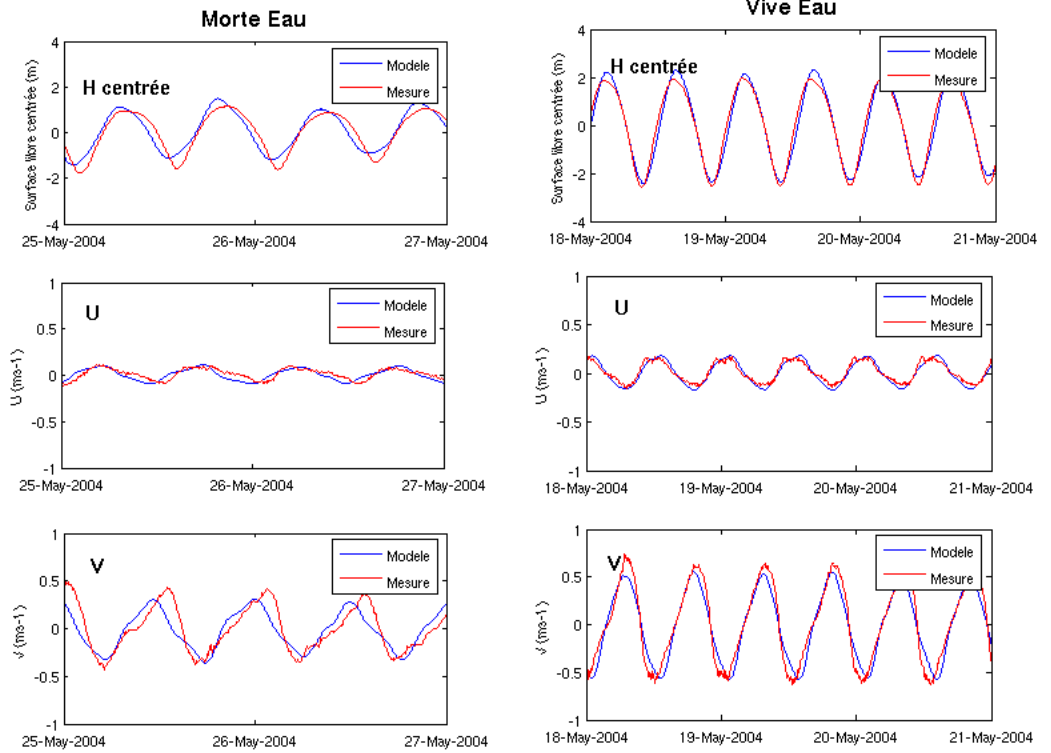




Fosse d'Enet

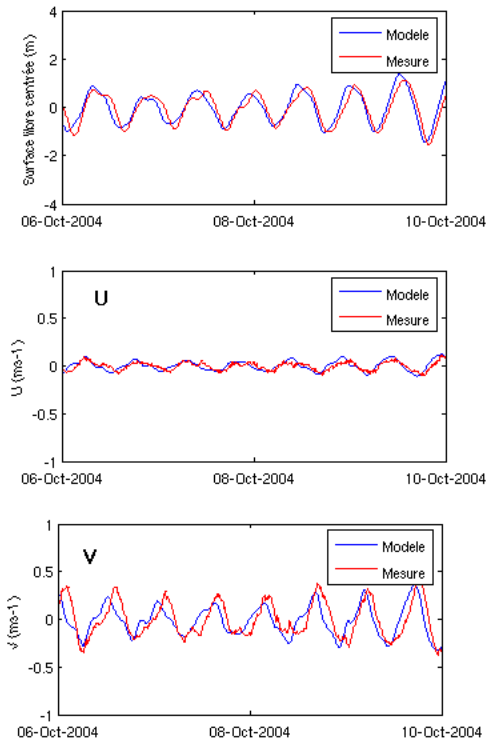


## Chenal Ouest Banc de Lamouroux

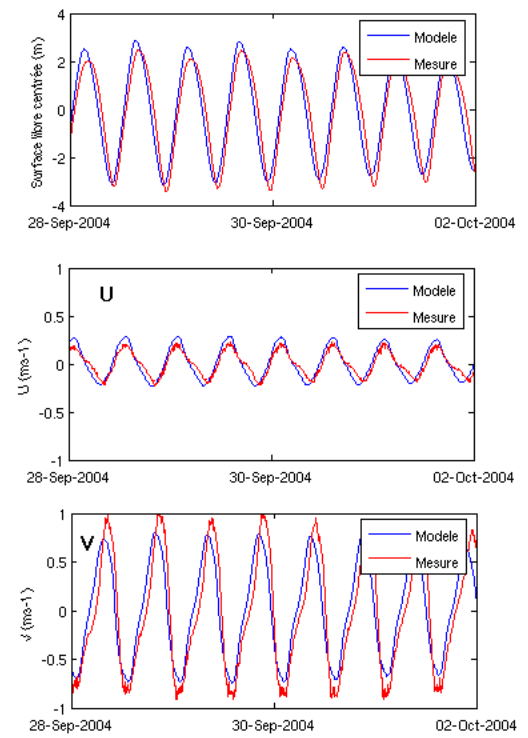


### Passage Est du Banc de Lamouroux

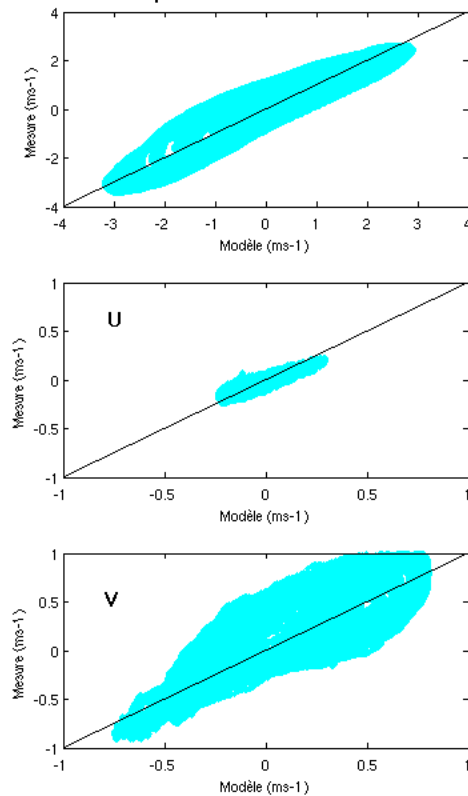
#### Morte Eau



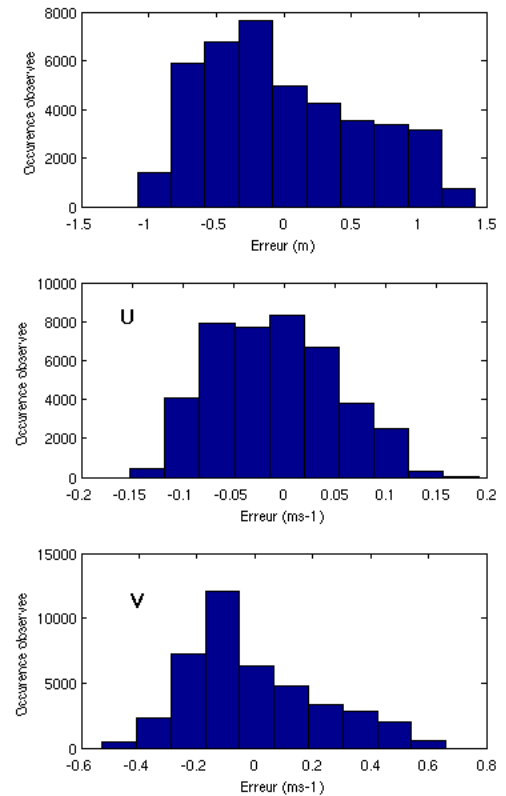
#### Vive Eau



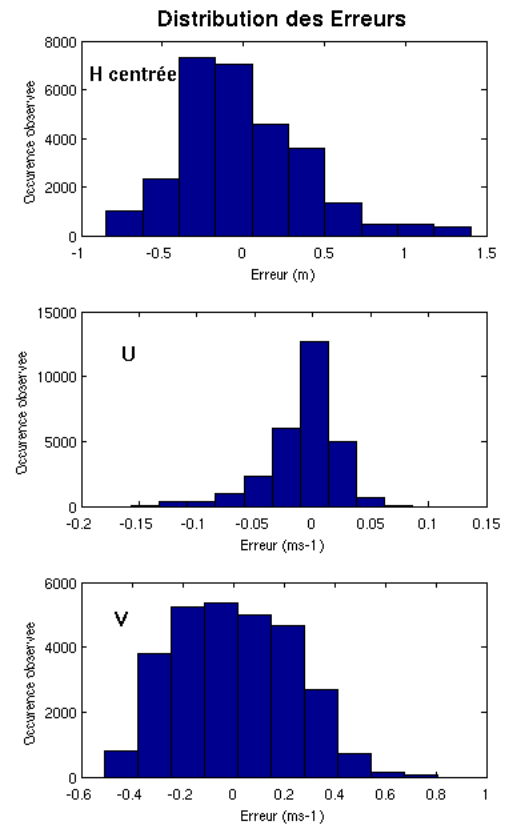
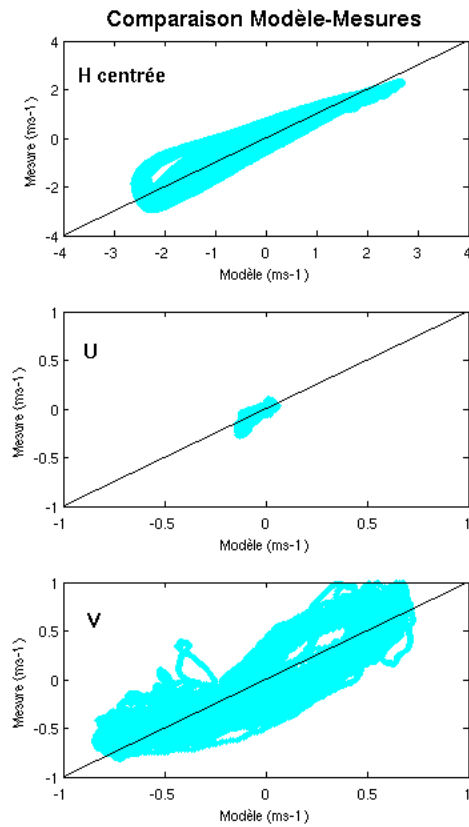
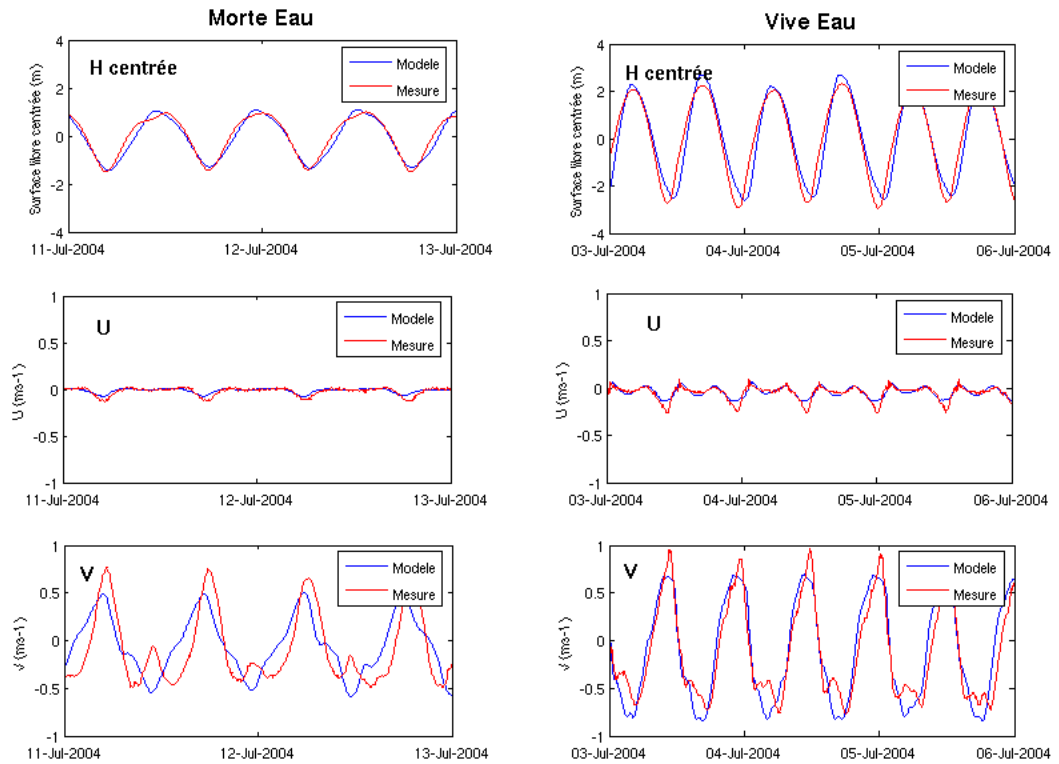
#### Comparaison Modèle-Mesures



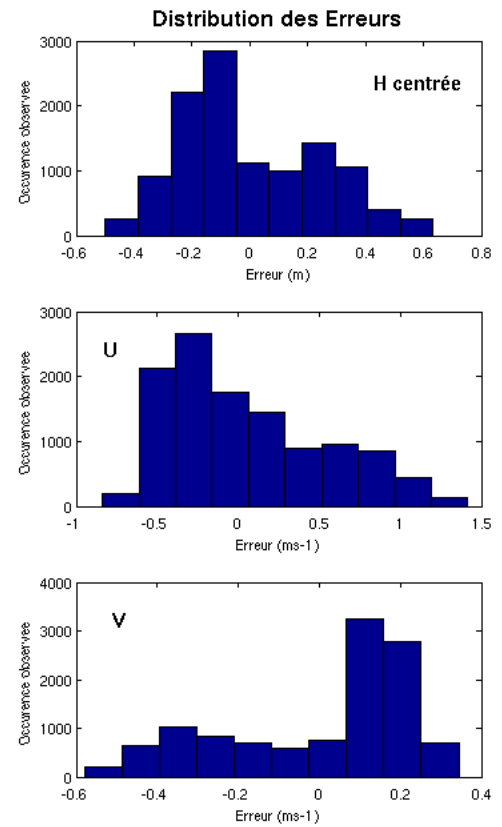
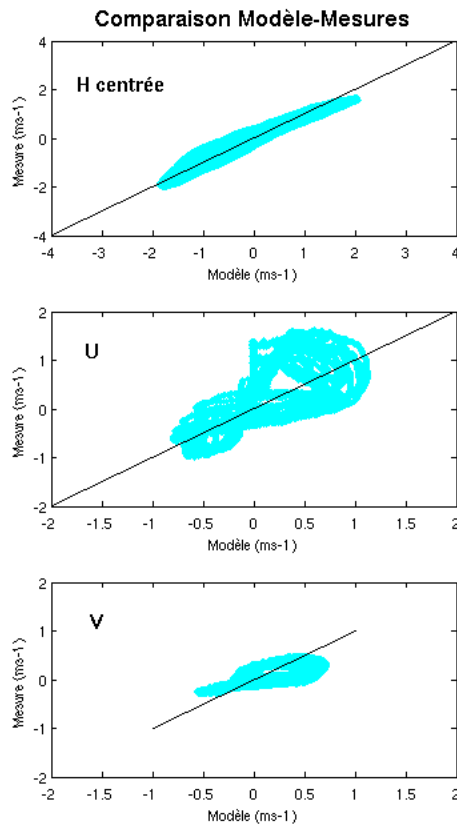
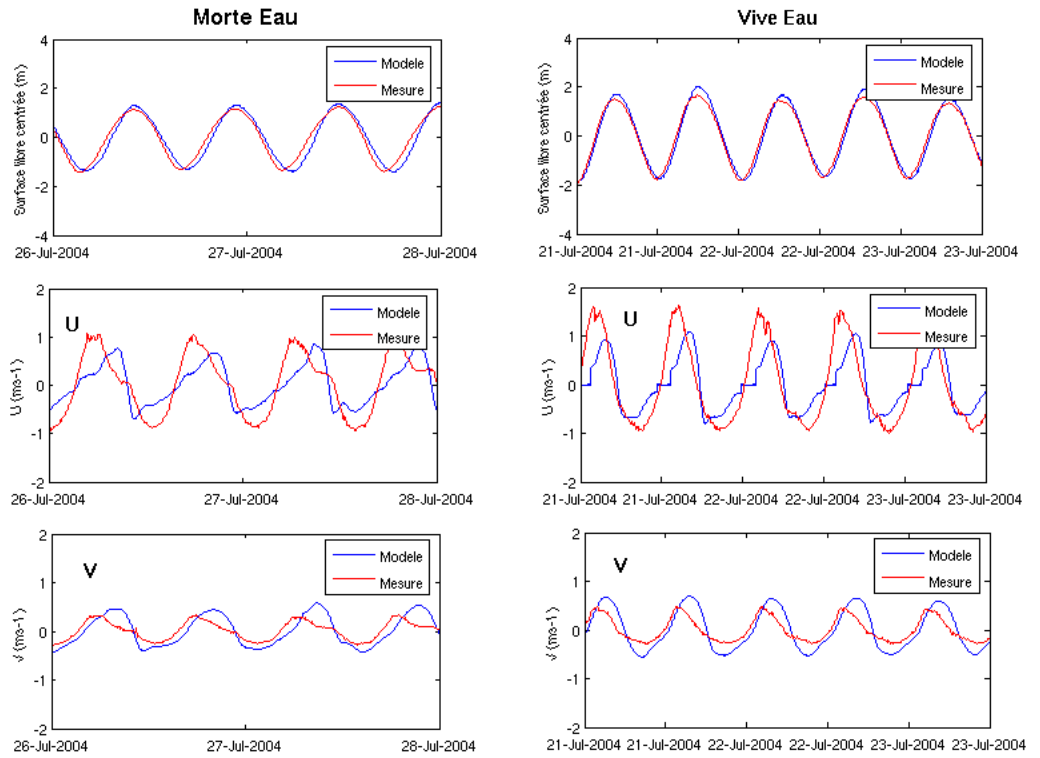
#### Distribution des Erreurs



LE CHAPUS



**Gatseau**





## **Annexe C**

# **Distribution saisonnière des vents à Chassiron**







## ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Période 1990-2002 – de DÉCEMBRE à FÉVRIER

### PTE DE CHASSIRON (17)

Indicatif : 17323001, alt : 11 m., lat : 46°02'48"N, lon : 01°24'36"W

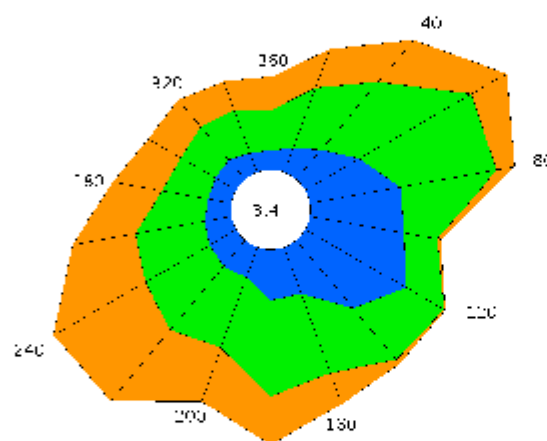
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

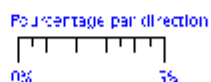
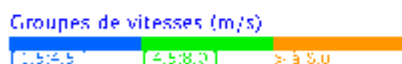
Tableau de répartition

Nombre de cas étudiés : 8623

Manquants : 69



Dir.	[ 0;4.5 [	[ 4.5;8.0 [	> 8.0 m/s	Total
20	0.9	2.2	1.4	4.5
40	1.3	3.0	1.9	6.2
60	2.1	4.4	1.4	7.9
80	3.1	3.3	0.6	7.1
100	3.2	1.2	0.1	4.5
120	4.0	1.5	+	5.5
140	3.0	2.3	0.2	5.5
160	1.7	2.9	1.1	5.7
180	1.7	3.3	1.7	6.7
200	1.1	2.6	1.9	5.6
220	1.1	2.8	3.2	7.1
240	1.1	2.5	3.6	7.2
260	0.9	2.4	2.2	5.5
280	0.8	1.6	1.7	4.1
300	0.8	1.4	1.3	3.5
320	0.9	1.5	1.2	3.5
340	0.7	1.6	1.0	3.3
360	0.6	1.4	1.1	3.2
Total	29.1	41.8	25.7	96.6
[ 0;1.5 [				3.4



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord

Page 1/1

Édité le : 26/01/2007 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Centre départemental de Charente Maritime  
2, allée des tamaris 17000 LA ROCHELLE  
Tél. : 05 46 50 86 00 – Fax : 05 46 50 86 05



## ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Période 1990-2002 - de MARS à MAI

### PTE DE CHASSIRON (17)

Indicatif : 17323001, alt : 11 m., lat : 46°02'48"N, lon : 01°24'36"W

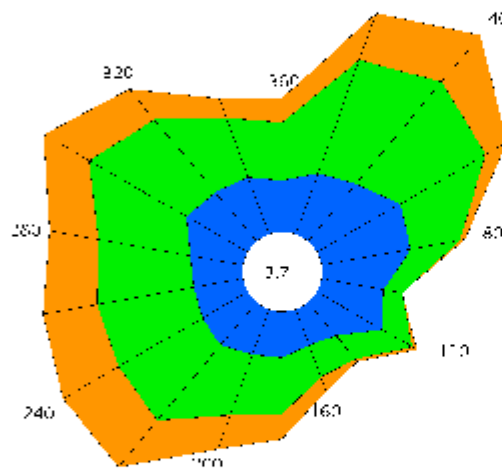
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

Tableau de répartition

Nombre de cas étudiés : 8823

Manquants : 9

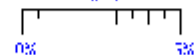


Dir.	[1.5;4.5]	[4.5;8.0]	>= 8.0 m/s	Total
20	2.1	3.8	1.6	7.4
40	2.4	4.2	1.9	8.5
60	3.0	3.1	0.8	6.9
80	2.9	1.6	0.2	4.6
100	2.0	0.6	+	2.6
120	2.4	1.1	0.2	3.6
140	1.4	1.0	+	2.4
160	1.2	1.1	0.5	2.8
180	1.5	1.8	0.8	4.0
200	1.5	2.0	1.1	4.7
220	1.8	3.1	1.9	6.8
240	1.7	3.1	2.0	6.7
260	1.6	3.1	1.7	6.4
280	1.7	2.9	1.6	6.2
300	2.2	3.5	1.7	7.4
320	2.0	3.0	1.2	6.3
340	1.9	2.0	0.7	4.6
360	1.6	1.8	0.8	4.2
Total	34.8	42.8	18.7	96.3
[0;1.5]				3.7

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord

Page 1/1

Edité le : 26/01/2007 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Centre départemental de Charente Maritime  
2, allée des tamaris 17000 LA ROCHELLE  
Tél. : 05 46 50 86 00 - Fax : 05 46 50 86 05



## ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Période 1990-2002 - de JUIN à AOÛT

### PTE DE CHASSIRON (17)

Indicatif : 17323001, alt : 11 m., lat : 46°02'48"N, lon : 01°24'36"W

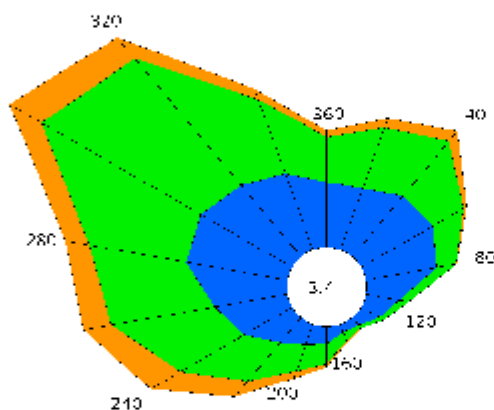
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

Tableau de répartition

Nombre de cas étudiés : 8767

Manquants : 65



Dir.	[1.5;4.5 [	[4.5;8.0 [	> 8.0 m/s	Total
20	2.7	2.7	0.4	5.8
40	3.3	3.0	0.5	6.8
60	3.4	1.5	0.1	5.1
80	3.0	0.8	+	3.9
100	1.4	0.4	0.0	1.8
120	0.9	0.2	0.0	1.1
140	0.4	0.2	0.0	0.6
160	0.3	0.4	+	0.8
180	0.7	0.8	0.1	1.7
200	0.9	1.2	0.3	2.4
220	1.4	2.1	0.9	4.3
240	2.3	3.1	1.4	6.8
260	3.1	4.4	1.2	8.6
280	4.3	4.1	1.0	9.4
300	4.4	7.7	1.5	13.6
320	3.9	6.9	1.1	11.9
340	3.4	3.3	0.5	7.1
360	2.7	1.9	0.3	4.9
Total	42.5	44.5	9.5	96.5
[0;1.5 [				3.4

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord

Page 1/1

Edité le : 26/01/2007 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Centre départemental de Charente Maritime  
2, allée des tamaris 17000 LA ROCHELLE  
Tél. : 05 46 50 86 00 - Fax : 05 46 50 86 05



## ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Période 1990-2002 - de SEPTEMBRE à NOVEMBRE

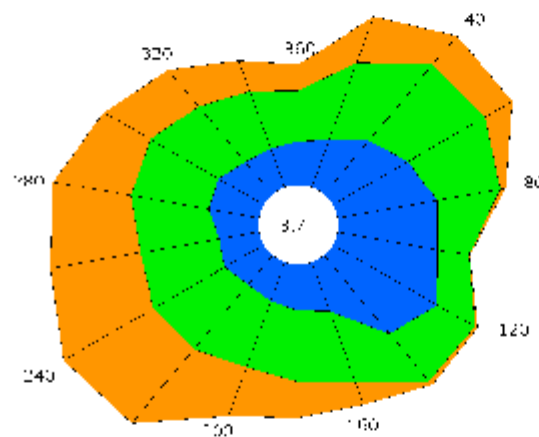
### PTE DE CHASSIRON (17)

Indicatif : 17323001, alt : 11 m., lat : 46°02'48"N, lon : 01°24'36"W

Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

Tableau de répartition  
Nombre de cas étudiés : 8699  
Manquants : 37

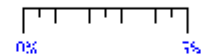


Dir.	[0,1.5[	[1.5,4.5[	[4.5,8.0]	> 8.0 m/s	Total
20	1.5	2.5	1.5		5.5
40	2.1	3.0	1.2		6.3
60	2.6	2.7	0.9		6.3
80	3.1	1.9	0.2		5.2
100	3.1	0.9	+		4.1
120	3.6	1.3	+		5.1
140	3.1	1.9	0.2		5.1
160	1.6	2.3	0.7		4.6
180	1.4	2.2	1.1		4.6
200	1.2	2.1	1.6		5.0
220	1.2	2.5	2.9		6.6
240	1.4	2.5	3.1		7.0
260	1.2	2.4	2.8		6.4
280	1.6	2.4	2.4		6.3
300	1.6	2.4	1.6		5.6
320	1.3	2.2	1.4		4.9
340	1.2	1.9	1.0		4.1
360	1.3	1.5	0.8		3.6
Total	34.1	38.7	23.5		96.3
[0,1.5[					3.7

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord  
le signe + indique une fréquence non nulle mais inférieure à 0.1%

Page 1/1

Édité le : 26/01/2007 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Centre départemental de Charente Maritime  
2, allée des tamaris 17000 LA ROCHELLE  
Tél. : 05 46 50 86 00 - Fax : 05 46 50 86 05

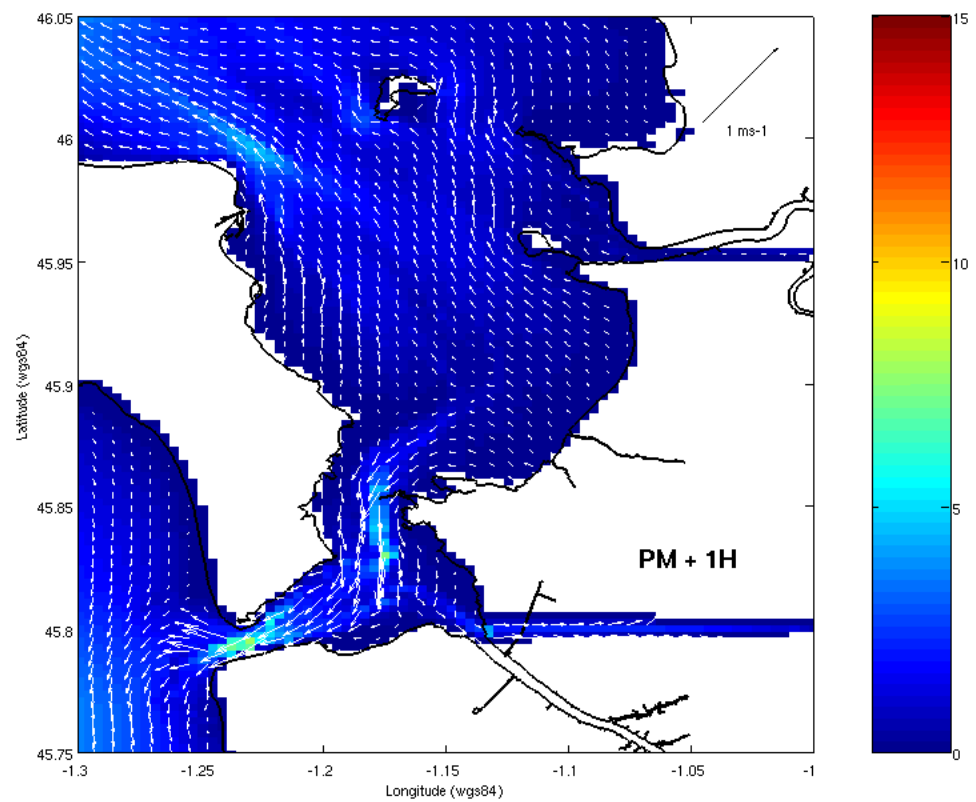
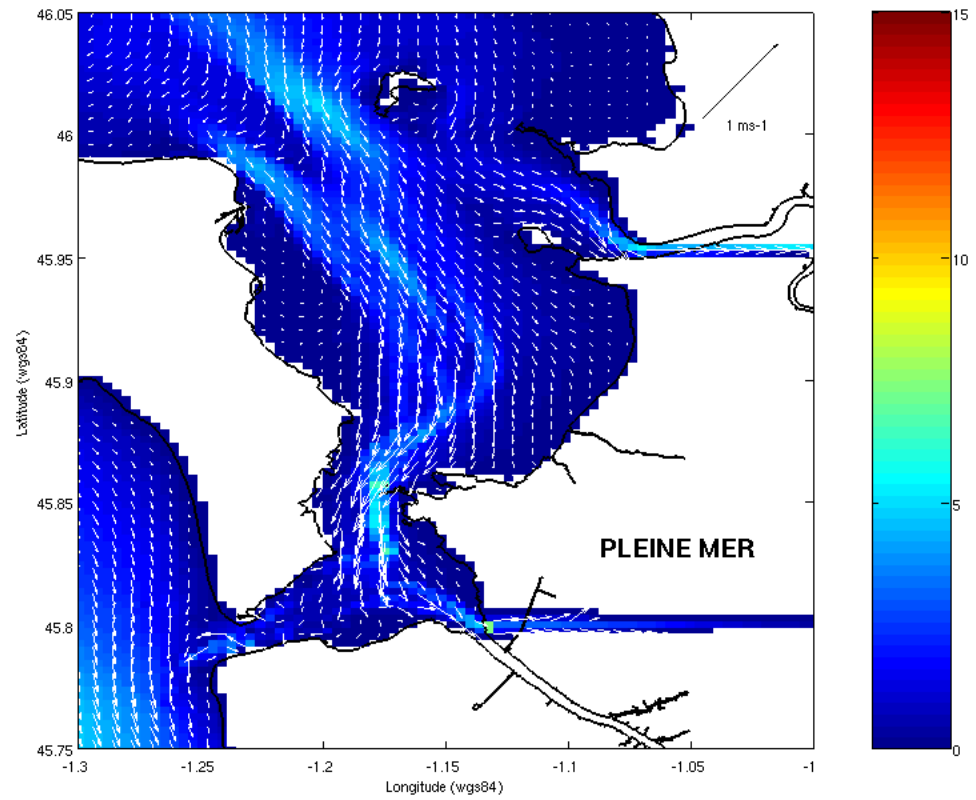
## Annexe D

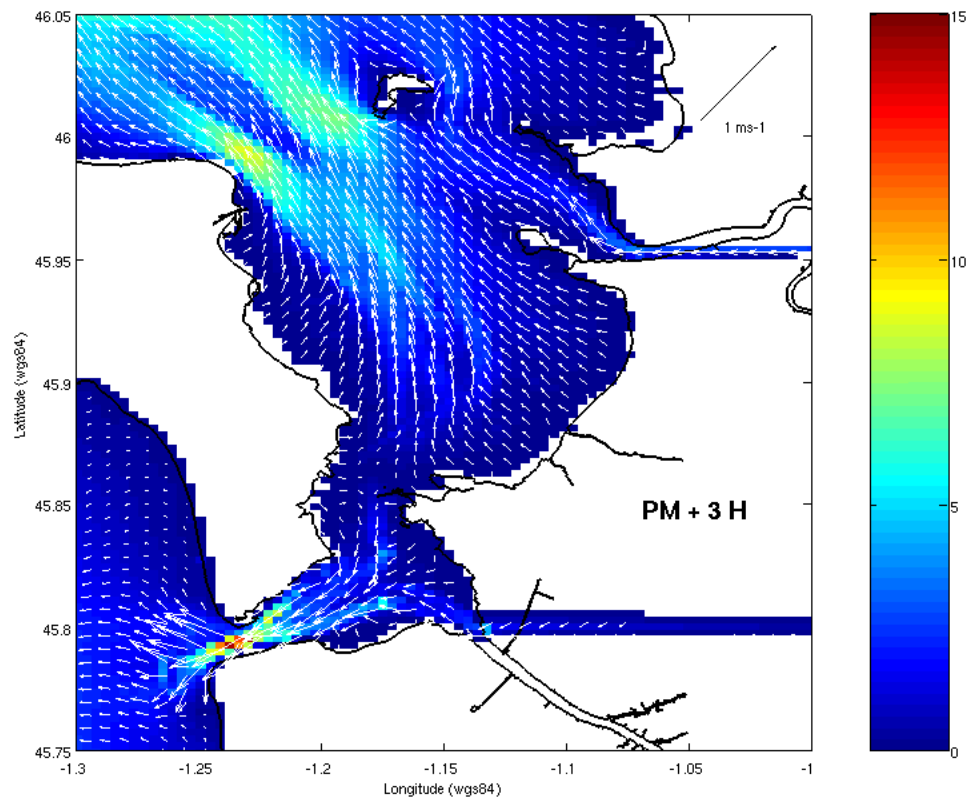
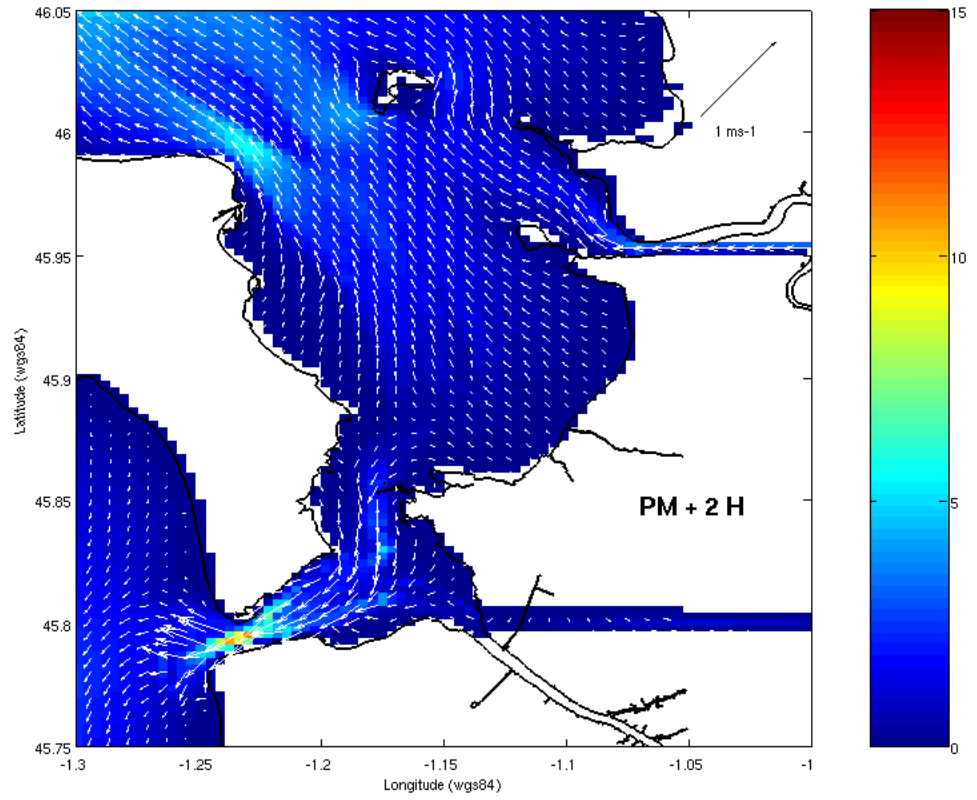
# Courants instantanés calculés dans le Bassin Marennes-Oléron pour le coefficient 70

*Vecteurs : intensité et direction du courant en  $ms^{-1}$  ;*

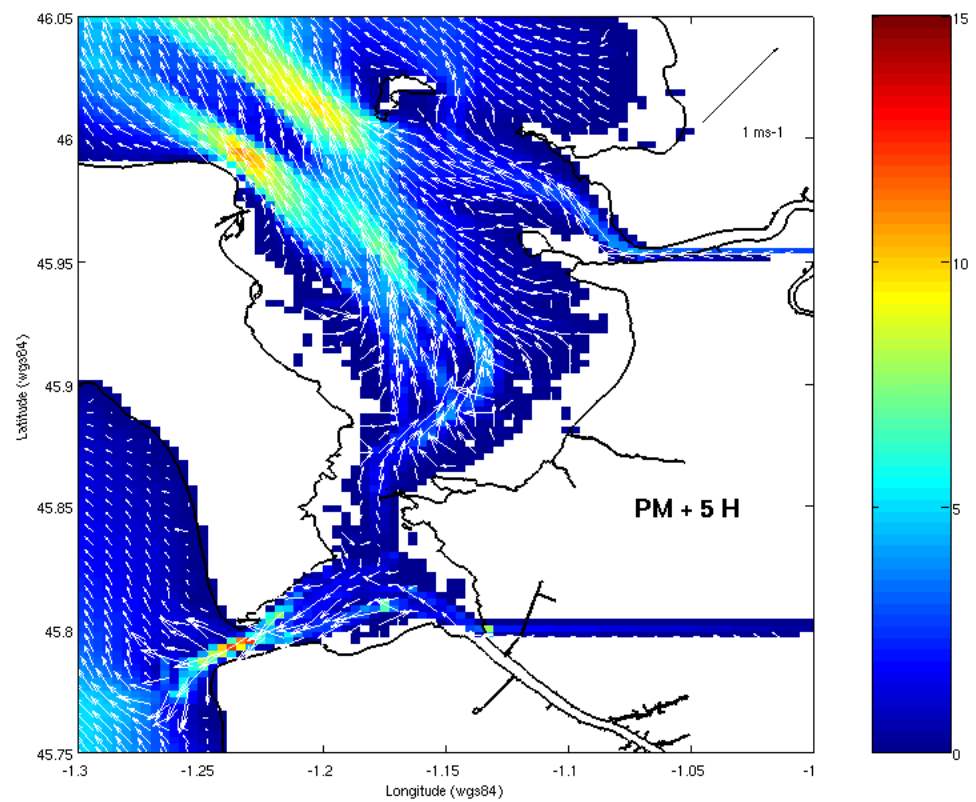
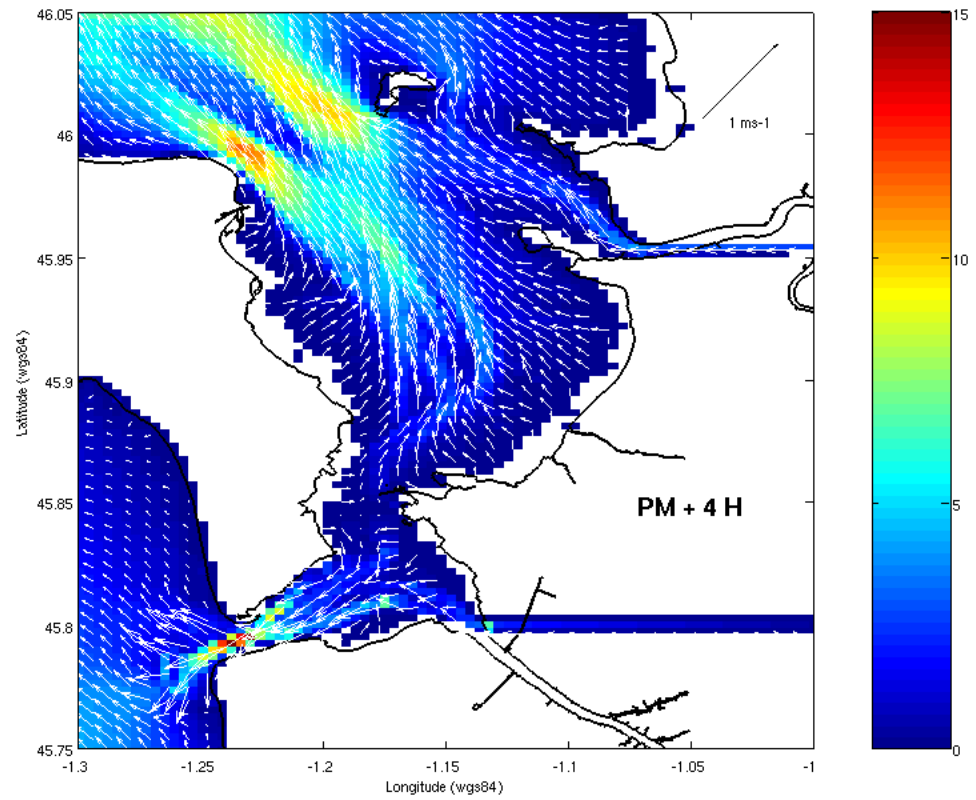
*Aplats colorés : flux instantané en  $m^2s^{-1}$*

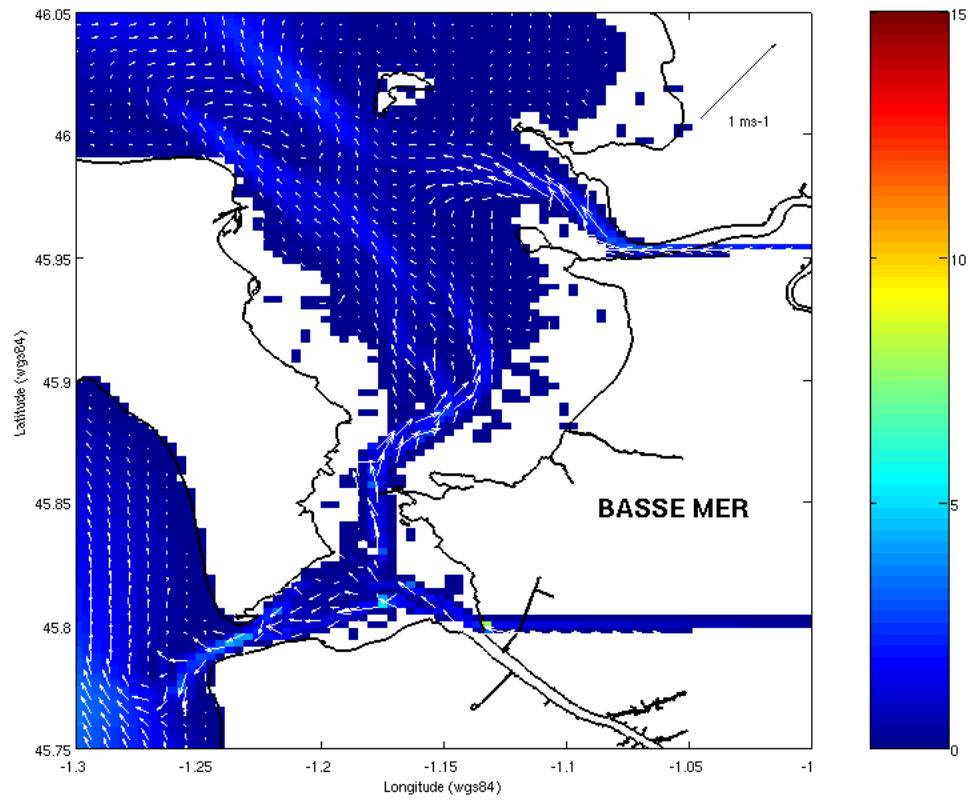
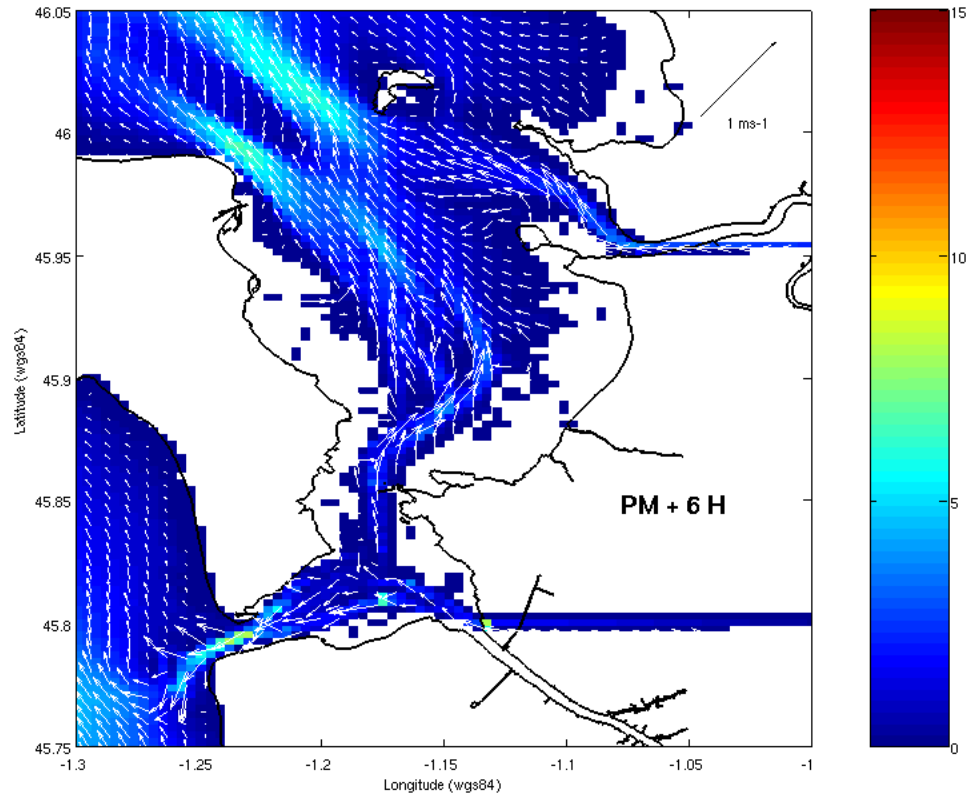


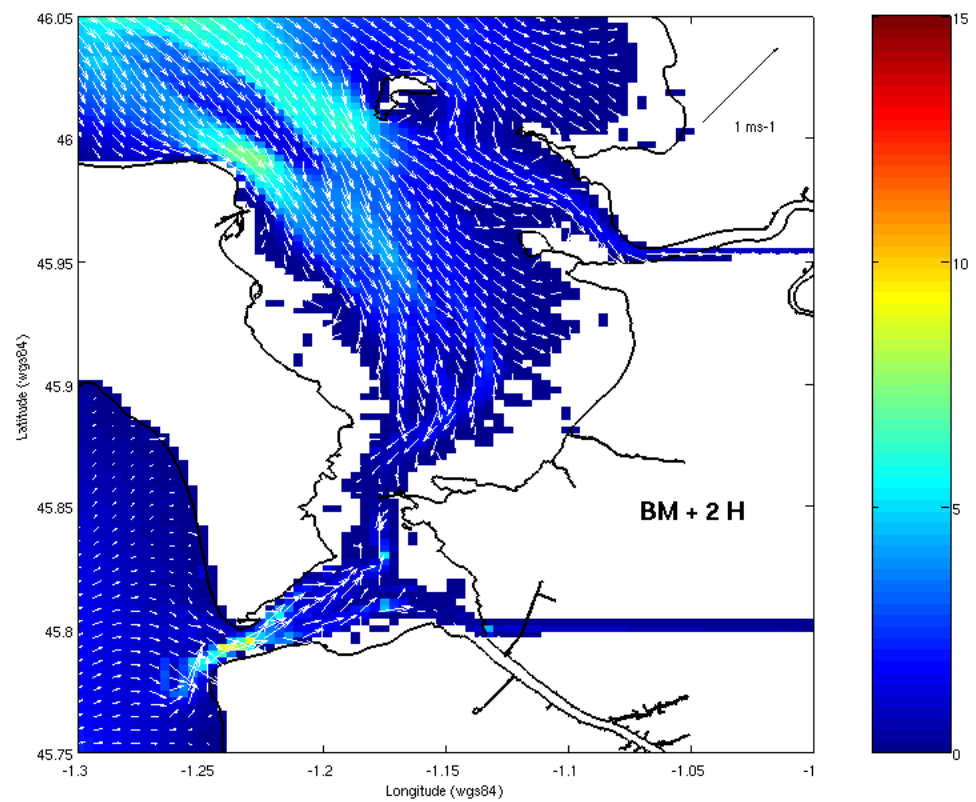
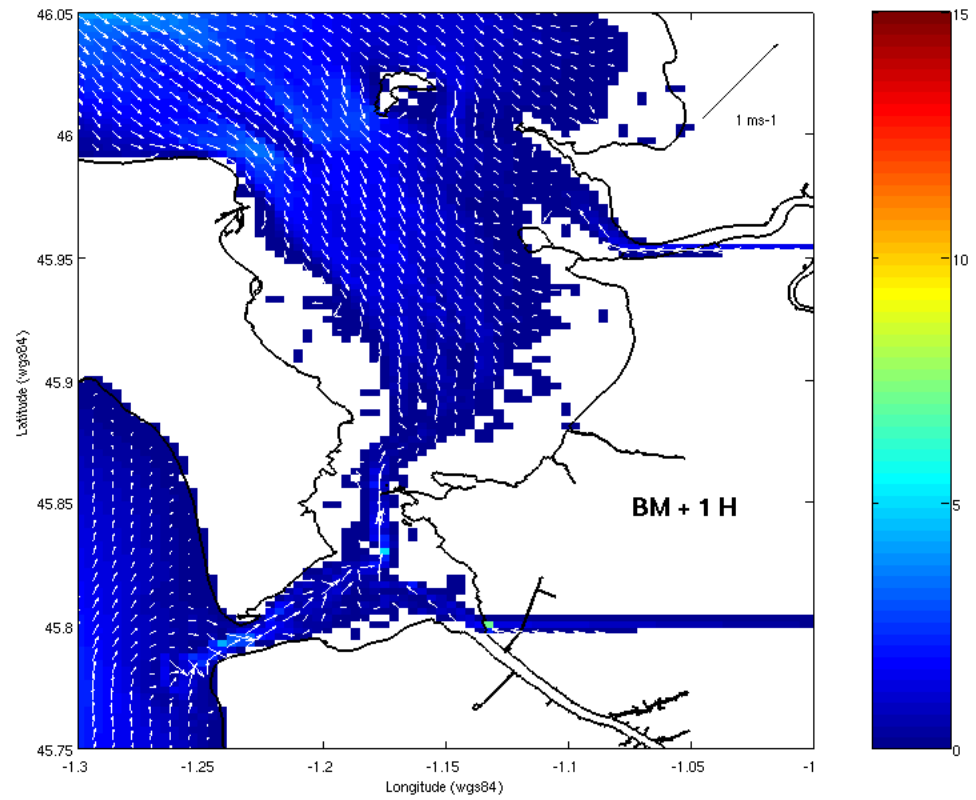


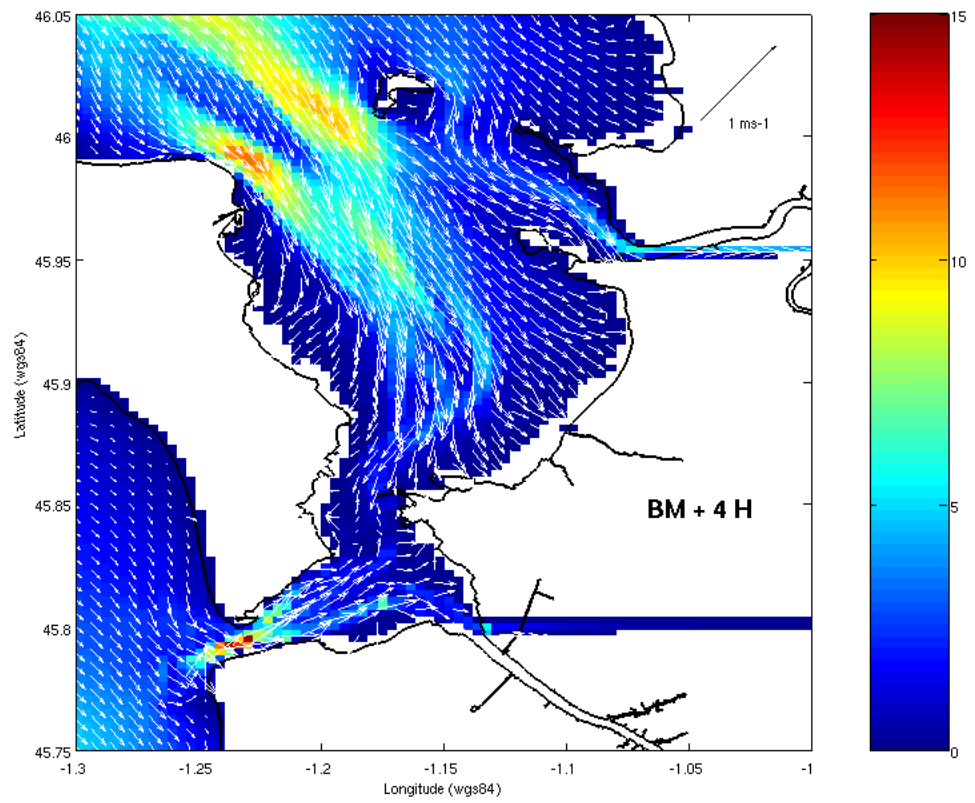
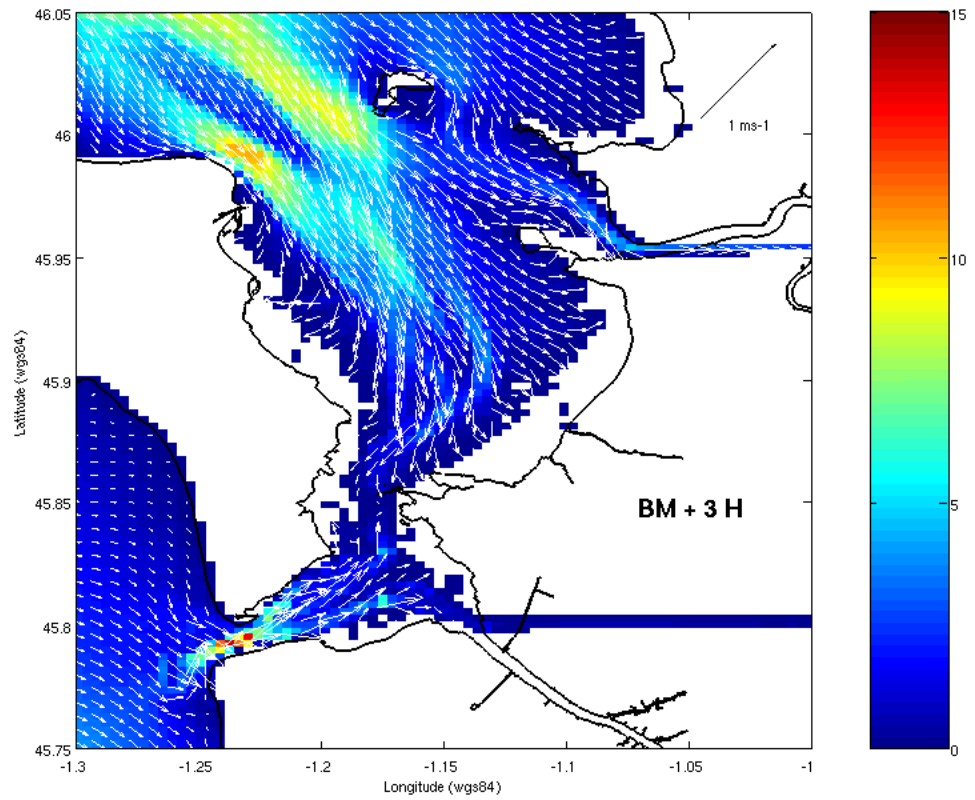


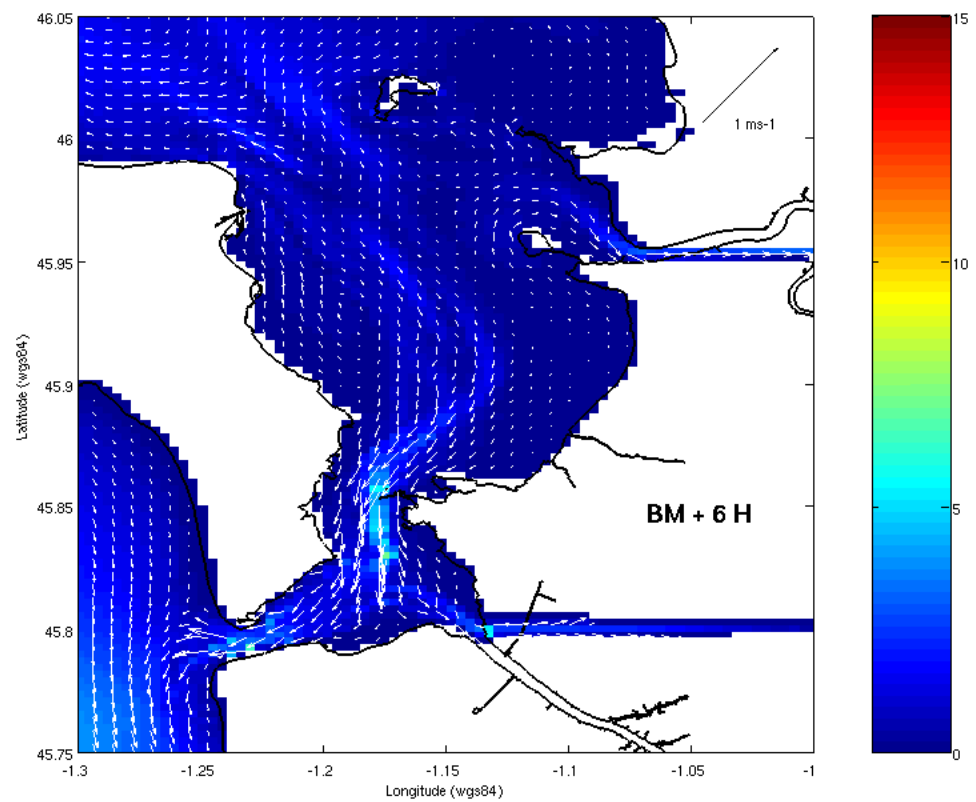
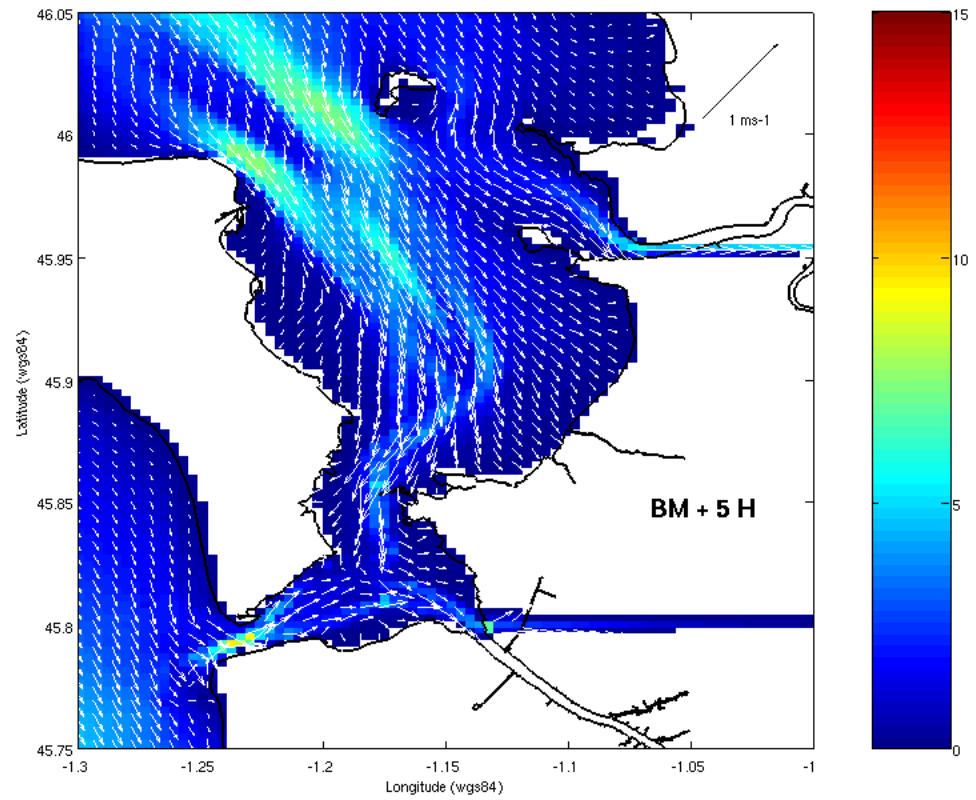














## **Annexe E**

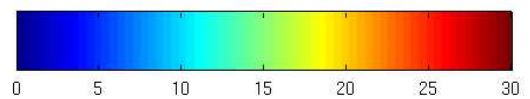
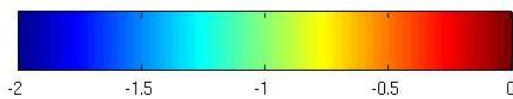
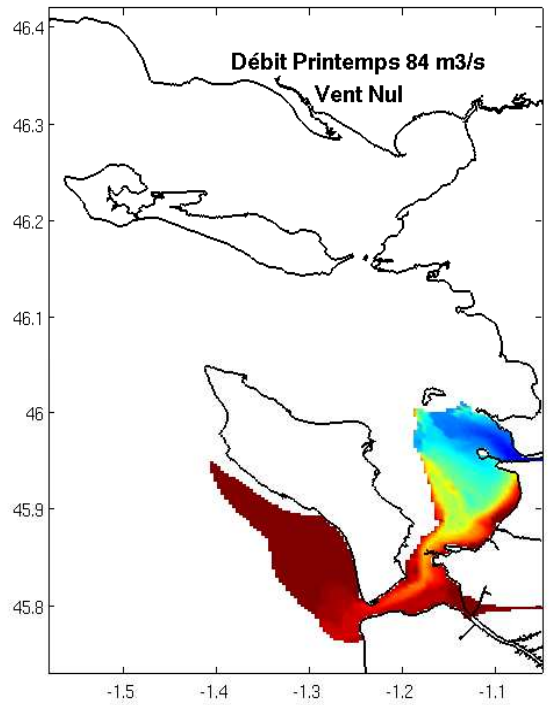
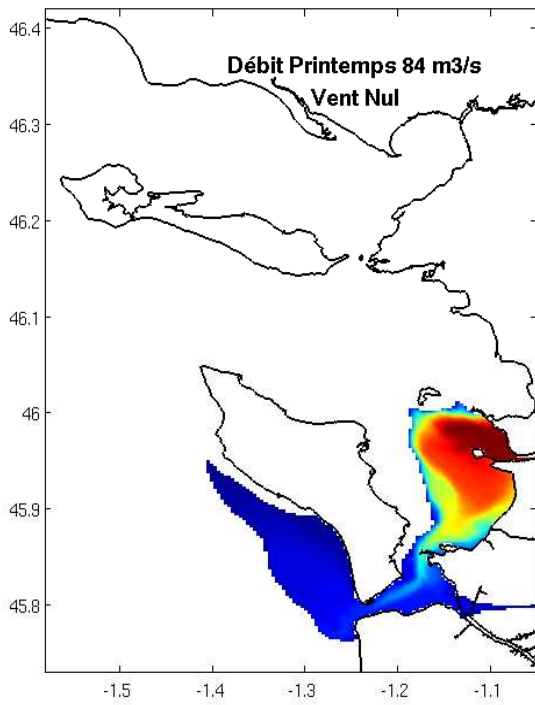
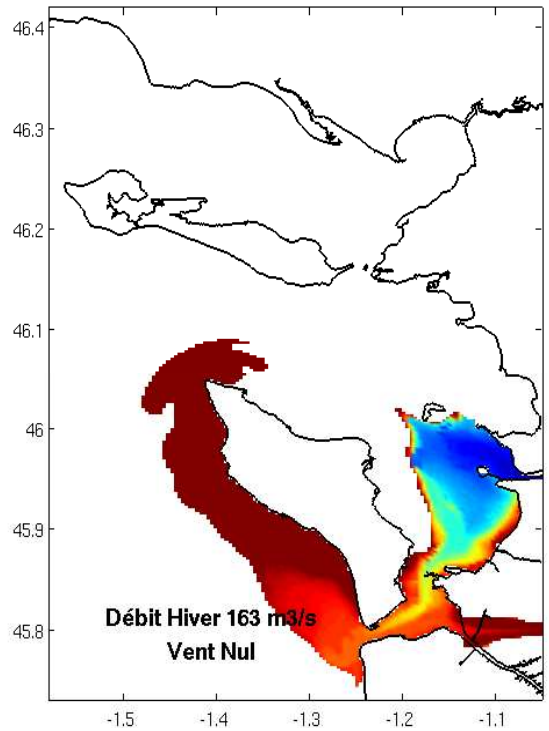
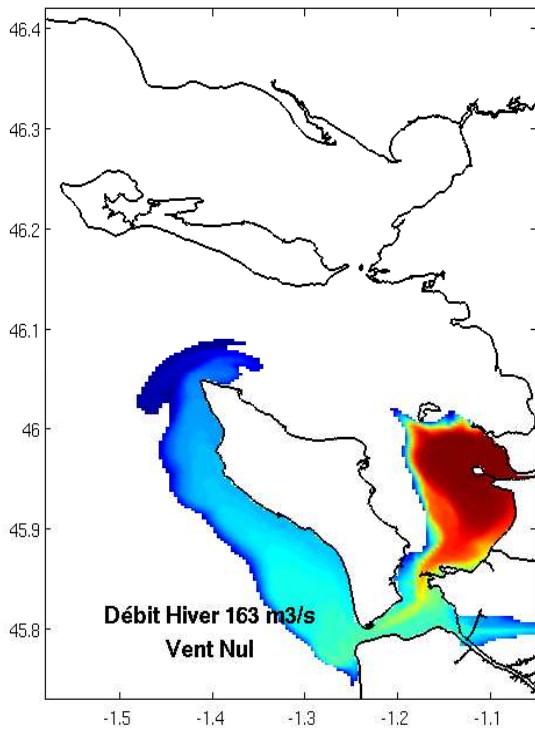
# **Panache d'apport de la Charente sous différents débits saisonniers et en l'absence de vent**

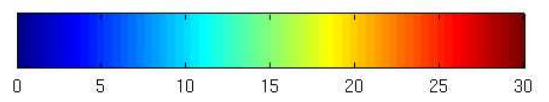
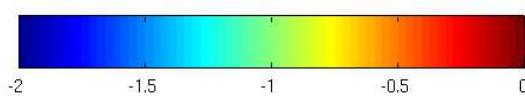
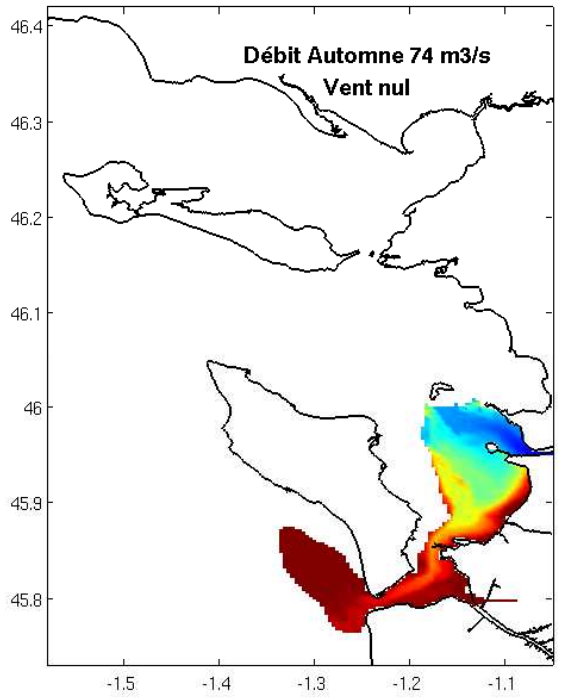
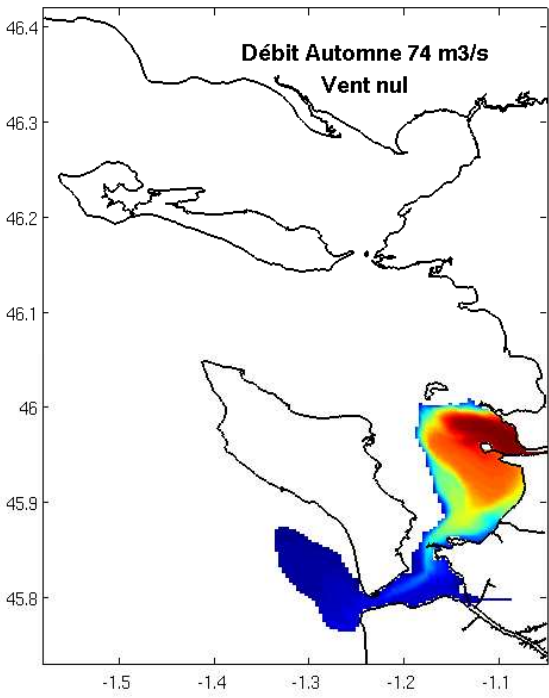
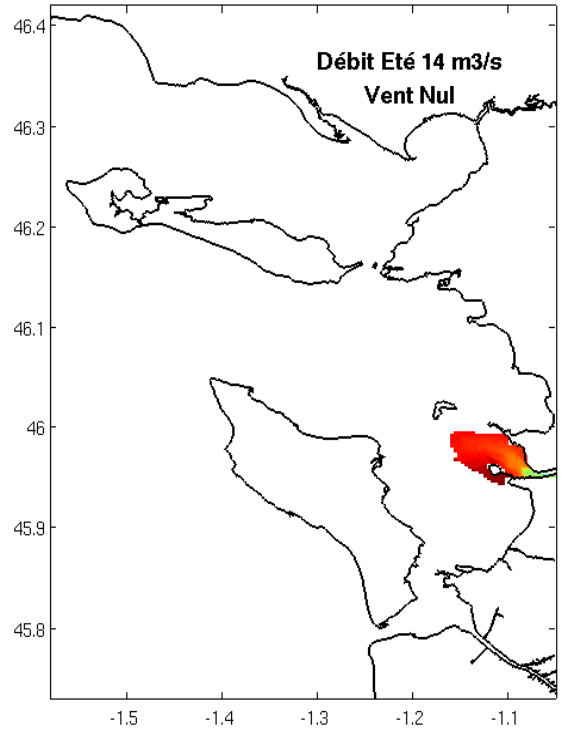
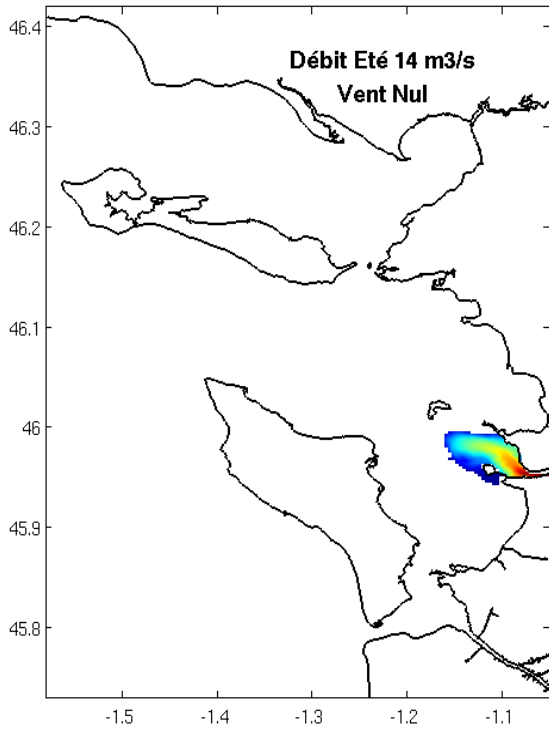
**Les figures à gauche représentent la dilution (-log)**

**Les figures à droite représentent l'âge ( en jours)**









## **Annexe F**

### **Panache d'apport hivernal de la Charente selon la direction du vent**

**(Intensité du vent : 5 m/s et 10m/s)**

**Les figures à gauche représentent la dilution (-log)**

**Les figures à droite représentent l'âge (en jours)**



