

Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale, le Bassin d'Arcachon.



© Eric Gire

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'une lagune mésotidale, le Bassin d'Arcachon.

PNEC – Chantier Littoral Atlantique :

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

Thème 1 : Caractérisation des forçages hydrodynamiques.

sommaire

Avant propos	7
1. Introduction et objectifs de l'étude	9
2. Le modèle MARS-2D	11
2.1. Caractéristiques générales	11
2.2. Le modèle de détail	14
<hr/>	
3. caractérisation des composantes hydrodynamiques	17
3.1. Courantologie	17
3.1.1. Courantologie générale du Bassin d'Arcachon	17
3.1.2. Flux résiduels	18
3.2. Prisme de marée, volumes oscillants, débits résiduels	21
3.3. Le renouvellement des eaux	25
3.3.1. Méthodes de calcul	25
3.3.2. Résultats	30
3.4. L'âge des masses d'eau	37
3.4.1. Résultats	39
<hr/>	
4. Conclusions / synthèse	45
5. Bibliographie	47

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 :

Stanisière et al., 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé, le Bassin de Marennes-Oléron. Rapport Ifremer / LER-PC, 52 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 / RST/LER/AR 06.008, 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 éléments chimiques et biologiques 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 calcul 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 possible 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 Lagrangiennes¹ ou Eulériennes², dérivées des modèles hydrodynamiques, telles que : temps de renouvellement, temps de transit, temps de résidence, âge des masses d'eau etc. On citera par exemple Bolin & Rohde (1973), Zimmerman (1976), Dronkers & Zimmerman (1982), 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), Radach & Moll (2006).

L'objectif de cette étude est de décrire les composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale du littoral atlantique, le Bassin d'Arcachon, par le calcul de grandeurs caractéristiques telles que les *flux résiduels*, le *prisme de marée*, le *temps de*

¹ Dans la description Lagrangienne d'un fluide, on découpe ce dernier en éléments de volume mésoscopique physiquement fermés qui se déplacent en même temps que le fluide. Soit M un point du fluide considéré de coordonnées x,y, et z, on a x(t), y(t) et z(t).

² Dans la description Eulérienne d'un fluide, on découpe ce dernier en éléments de volume mésoscopique physiquement ouverts qui sont fixes. Soit M un point du fluide considéré de coordonnées x,y et z, on a x, y, z et t indépendants.

renouvellement ou l'*âge* des masses d'eau, considérées comme des mesures du « temps de séjour » des masses d'eau à l'intérieur des limites spatiales définies. Le code de calcul MARS-2D a été exploité pour la caractérisation de l'hydrodynamique et le calcul des grandeurs sus-mentionnées, de façon à répondre aux questions suivantes : Quels sont les niveaux atteints par la marée selon les vents ? 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 eaux issues 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 en 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)	ζ	Côte de la surface libre
t	Temps	D	Hauteur d'eau ($D = \zeta + H_0$)
v	Composante méridienne du courant (Oy)	ρ	Densité de l'eau
f	Coefficient de Coriolis	v_{cis}	Tension de cisaillement horizontale
ρ_0	Densité moyenne de l'eau	τ	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.

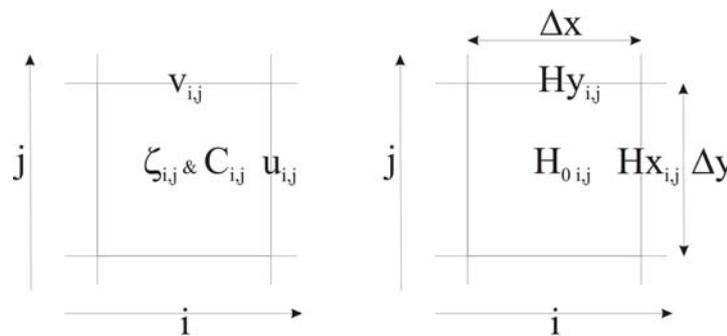


Figure 1. Position des différentes variables sur une maille i, j . A gauche : composantes zonale et méridienne des courants (u et v), élévation de la surface libre (ζ) et concentration des substances dissoutes (C). A droite : positions du fond aux points u et v de la maille (H_x et H_y) et position du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

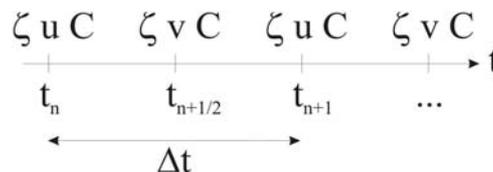


Figure 2. Schéma ADI de discrétisation temporelle utilisé dans MARS-2D.

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 Δt 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 reproduisent à chaque pas de temps les effets barotropes de la marée et du vent. Elles sont fournies grâce à un ensemble de 4 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.

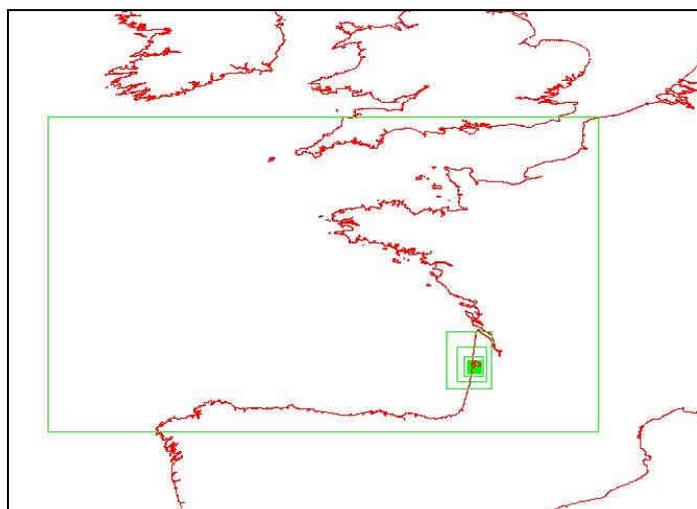


Figure 3. Modèles gigognes utilisés pour le calcul des conditions initiales.

2.2. Le modèle de détail

La position et le nom de l'ensemble des chenaux, lieux-dits, points de mesures, etc., utilisés dans ce rapport est présentée sur la carte du bassin d'arcachon en Annexe A.

Les rangs de détails 3 et 4, comprenant la région du Bassin d'Arcachon ainsi que la bande littorale adjacente ont été utilisés dans cette étude :

- Emprise du Rang 3 : 40,2×61,3 km ; limites 1°27'27'' à l'Ouest, 0°57'9'' à l'Est, 44°53'40'' au Nord et 44°20'40'' au Sud. Réseau régulier de mailles carrées de 235 m de coté (171×261 mailles).
- Emprise du Rang 4 : 30×35 km ; limites 1°21'55'' à l'Ouest, 0°59'48'' à l'Est, 44°27'39'' au Nord et 44°46'34'' au Sud. Réseau régulier de mailles carrées de 65 m de coté, le modèle présente une haute définition spatiale dans le plan horizontal (450×540 mailles).

Par soucis de gain de temps de calcul, le rang le plus détaillé n'a été utilisé que pour les simulations les plus courtes ou pour celles nécessitant une précision plus importante : la courantologie, les flux résiduels, le prisme de marée et les volumes oscillants. Les simulations avec traceurs (temps de renouvellement, âge des masses d'eau) ont été effectuées avec le rang 3.

Plusieurs campagnes de mesures ont été regroupées pour fournir au modèle une bathymétrie sur l'ensemble du domaine (Figure 4). Pour l'intérieur du Bassin, les sondes de L'Yavanc (1995) mesurées en 1992 et 1993, ont été utilisées, pour le secteur des passes celles du Service Maritime de Navigation de la Gironde, relevées entre 1996 et 1998, et enfin celles du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine pour le secteur océanique.

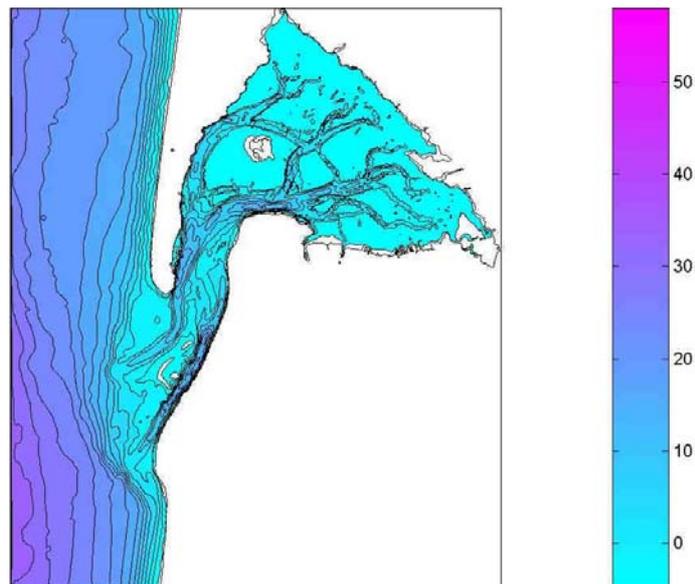


Figure 4. Emprise et bathymétrie du modèle (hauteurs en m rapportées au zéro hydrographique).

La validation du modèle (Plus et Durand, 2004) a été réalisée pour les hauteurs d'eau, sur des données mesurées par des marégraphes en neufs points du bassin (campagne de 1992-1993) et pour les courants, sur des données mesurées à l'aide d'un courantomètre acoustique doppler (ADCP) couplé à un GPS (campagne Ifremer de juin 2002). Les Figure 5 (hauteurs d'eau) et les Figure 6 et Figure 7 (courants moyens sur la verticale) présentent quelques comparaisons effectuées entre simulations et mesures.

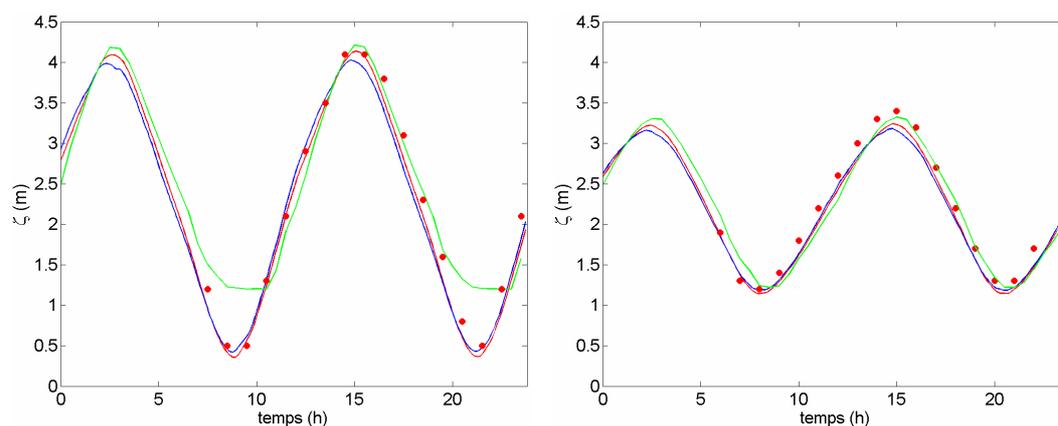


Figure 5. Comparaison simulations-mesures pour deux coefficients de marée (90, à gauche et 45, à droite). Hauteurs d'eau à Eyrac (en rouge), Bélisaire (en bleu) et à la balise D12 (chenal d'Andernos, en vert). Source des données mesurées à la jetée d'Eyrac (points rouges): L'Yavanc (1995).

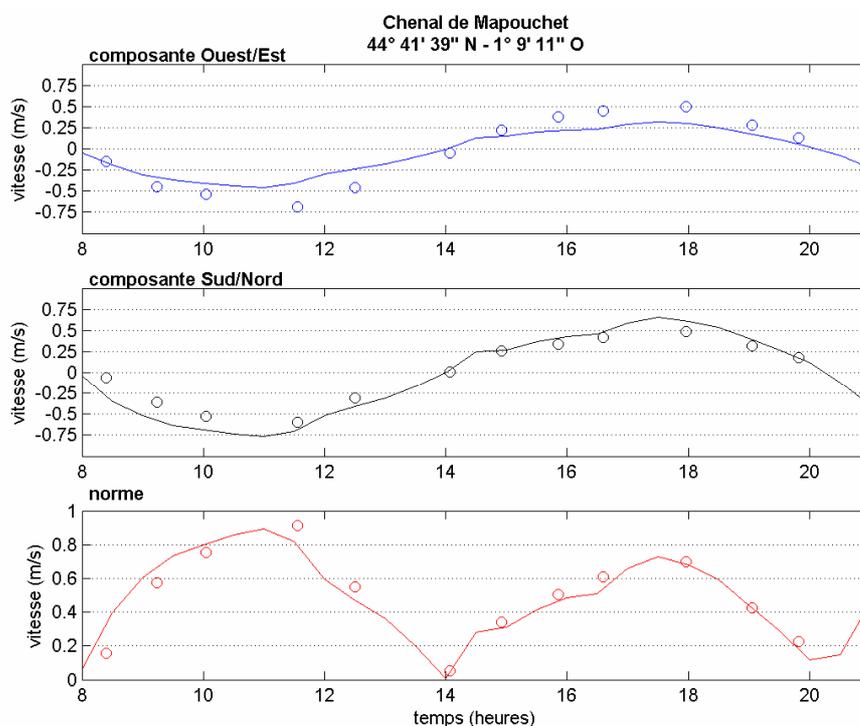


Figure 6. Comparaison ADCP-modèle pour le chenal de Mapouchet.

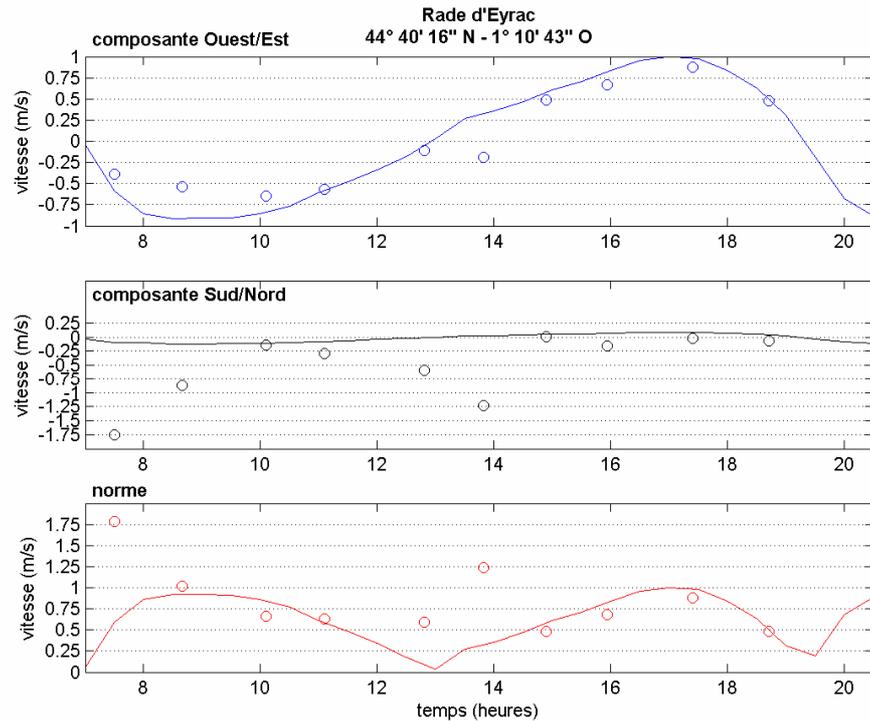


Figure 7. Comparaison ADCP-modèle pour la rade d'Eyrac.

Les nombreuses données disponibles concernant l'hydrodynamique du Bassin d'Arcachon, ont permis de réaliser une validation relativement poussée tant sur les hauteurs d'eaux que sur les courants simulés. Les simulations effectuées ont pu mettre en évidence une bonne adéquation entre les résultats du modèle et les mesures, et permis d'estimer une erreur moyenne de l'ordre de 10% de l'amplitude de marée pour les hauteurs d'eau et de 0,1 m/s pour les courants. Les meilleurs résultats sont obtenus pour les marées de vives-eaux (5 % d'erreur) et les moins bons pour les marées de mortes-eaux (16% d'erreur au maximum).

3. caractérisation des composantes hydrodynamiques

3.1. Courantologie

3.1.1. Courantologie générale du Bassin d'Arcachon

Les champs de courants ont été tracés heure par heure pour une marée de coefficient moyen (70), en absence de vent et avec des débits de rivières printaniers (Leyre 27 m³/s et Canal du Porge 12 m³/s). Les résultats sont présentés en Annexe B.

La propagation de l'onde et le phénomène de remplissage/vidange du bassin impose, autour de la basse mer à Eyrac (entre PM+3 et BM+2), des courants le long du littoral aquitain orientés vers le Nord, et autour de la pleine mer à Eyrac (entre BM+4 et PM+2) des courants orientés vers le Sud. Ces courants, le long de la presqu'île du Cap Ferret par exemple, sont maximums au moment des étales à Eyrac.

A l'intérieur du bassin, les courants sont naturellement plus forts qu'à l'extérieur et présentent les caractéristiques habituelles des marées estuariennes. Lors de la pleine mer à Eyrac, les courants dans les chenaux principaux restent dirigés dans le sens du flot, et forment des tourbillons au niveau des bancs de Bernet, de la Passe Nord, des bancs de Jeanne Blanc ainsi qu'autour de l'île de Mapouchet. A l'inverse, lors de la basse mer à Eyrac, les courants sont dirigés dans le sens du jusant avec des structures tourbillonnaires toujours présentes en sortie des Passes et sur les bancs de Bernet. Ainsi, la pointe du Cap Ferret est balayée par des courants orientés à l'Est alors que le courant dans le chenal d'entrée est toujours sortant.

La renverse de courant devant Eyrac a lieu vingt à trente minutes après la basse mer, et les courants s'orientent alors vers l'Est. Les courants de flot s'intensifient et deviennent de plus en plus uniformes sur l'ensemble des chenaux. On notera toutefois que le débit de l'Eyre est suffisant pour maintenir un courant inverse, perceptible à son embouchure jusqu'à environ cinq heures après la basse mer. Au moment de la pleine mer, les courants sont toujours orientés vers l'Est dans les chenaux principaux mais, déjà, autour de l'île aux Oiseaux et le long du Moulleau, les courants s'orientent au jusant.

La Figure 8 présente une cartographie des courants maximums simulés pour une marée moyenne de coefficient 70.

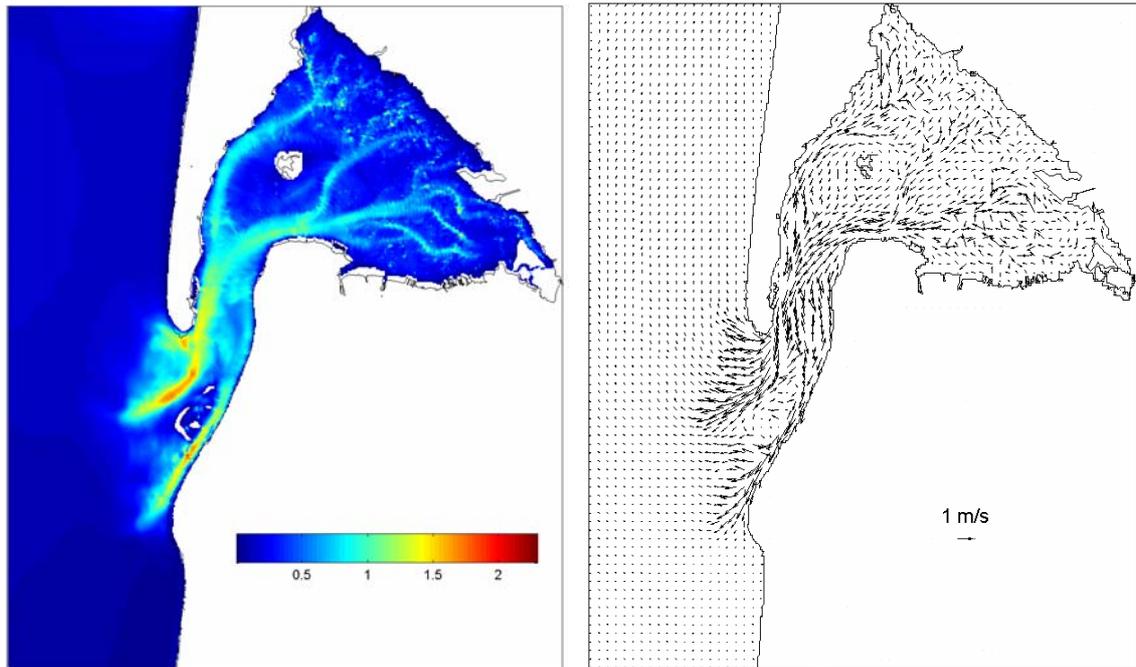


Figure 8. Courants maximums (m/s) simulés (intensité à gauche et direction associées à droite) pour une marée moyenne de coefficient 70.

D'une manière générale, les vitesses des courants les plus importantes sont obtenues dans les chenaux principaux et aux niveaux des Passes. Les courants maximums sont simulés environ 3,5 heures après la pleine mer, ils sont légèrement supérieurs à 2 m/s (soit 3,9 nœuds) au niveau de la Passe Sud. L'influence du vent sur les vitesses maximales de courant est négligeable pour les vitesses de vent simulées (Tableau 1).

Tableau 1. Vitesses maximales des courants dans la Passe Nord ($1^{\circ}15'24''$ O et $44^{\circ}35'27''$ N) par coefficient 70 et pour quatre cas de vent.

	Vitesse maximale (m/s)
Sans vent	1,68
N, 10 m/s	1,69
E, 10 m/s	1,69
S, 10 m/s	1,67
O, 10 m/s	1,68

3.1.2. Flux résiduels

Le flux résiduel est une grandeur eulérienne intégrée sur un cycle de marée (de la pleine mer à la pleine mer suivante par exemple). Il est calculé pour chaque maille comme la somme des produits de la vitesse du courant par la hauteur d'eau à chaque pas de temps. Selon Salomon et Breton (1995), ces flux permettent de représenter, lorsque la profondeur est faible et que l'écoulement se rapproche d'un écoulement unidimensionnel, le sens du mouvement résiduel de l'eau ainsi que la quantité d'eau

déplacée. Nous nous limiterons donc à l'observation des flux résiduels à l'intérieur du Bassin, dans les zones peu profondes et les chenaux .

La Figure 9 présente les flux résiduels calculés pour une marée moyenne de coefficient 70 et en absence de vent.

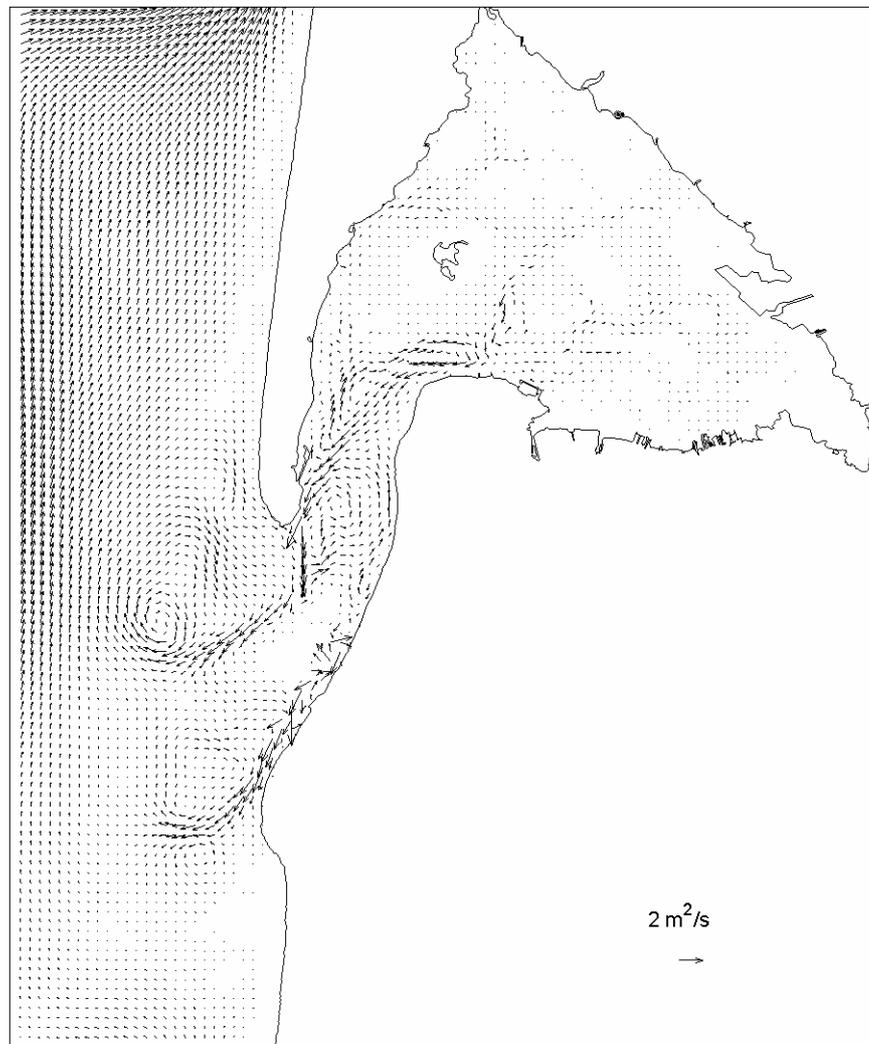


Figure 9. Flux résiduels issus d'une marée moyenne de coefficient 70.

Les flux résiduels sont maximums au voisinage de la pointe du Cap Ferret, dirigés vers le Sud-Sud-Ouest, et indiquent un écoulement résiduel nettement sortant. Les flux résiduels dans les passes Nord et Sud indiquent de la même façon des flux sortants, et décrivent deux tourbillons anticycloniques en sortie des passes. A l'inverse, le long de la côte du Pyla et du Moulleau, on observe des flux résiduels dans le sens du flot, mais dont l'intensité est bien plus faible que celle calculée le long du Mimbeau par exemple. Dans les chenaux du Courbey et du Teychan les flux résiduels sont opposés, décrivant ainsi une circulation anticyclonique autour du Grand Banc. Dans les parties plus internes du Bassin les flux résiduels sont toujours très faibles et ne décrivent pas de tendance directionnelle nette.

S'il est illusoire d'espérer pouvoir conclure sur les mouvements sédimentaires sur la seule base des courants et des flux résiduels, l'analyse des résultats précédents (Figure 8 et Figure 9) permet néanmoins d'avancer quelques idées générales sur les capacités de transport sédimentaire (Salomon et Breton, 1995).

D'une manière générale, les sédiments essentiellement sableux transportés le long de la côte Aquitaine ne peuvent entrer sous la seule action de la marée, les flux résiduels ainsi que les directions des courants maximums calculés pour la partie aval du Bassin (passes Nord et Sud, chenaux d'entrée et du Teychan) montrant en effet une tendance à l'expulsion de ces sédiments vers l'extérieur. En revanche les parties plus internes du Bassin seront probablement plus sujettes à un comblement progressif tant leur capacité au transport sédimentaire semble faible. Les fines apportées par les rivières auront tendance à se déposer sur les crassas.

Ces constatations ne prennent pas en compte l'influence des houles et du vent, mais concordent avec les mesures morphologiques et bathymétriques réalisées par L'Yavanc (1995) en 1992-1993, et les études précédentes (Manaud, 1971 ; Bouchet 1990) à savoir un processus de sédimentation et d'engraissement des crassats dans le Nord du Bassin, une tendance au comblement des chenaux transversaux (Chenal de l'Ile, Chenal du Courant, ...) et une érosion des chenaux et des zones intertidales dans la partie Sud-Ouest du Bassin.

L'influence du vent sur les flux résiduels, testée pour quatre cas de vent, est présentée sur la Figure 10. On notera que les vents ont une influence marquée sur les flux résiduels à l'extérieur du Bassin mais ne modifient que très légèrement la circulation résiduelle à l'intérieur de ce dernier. Les vents de secteur Nord et Sud engendrent des circulations résiduelles dirigées respectivement vers le Sud ou vers le Nord. Un vent de secteur Ouest induit des flux résiduels moins importants le long de la côte girondine et dirigés vers le Sud au nord des Passes et vers l'Ouest au sud des Passes et, à l'inverse, un vent de secteur Est génère des flux résiduels dirigés vers le Nord le long de la côte océanique du Cap Ferret et vers le Sud le long de la côte landaise.

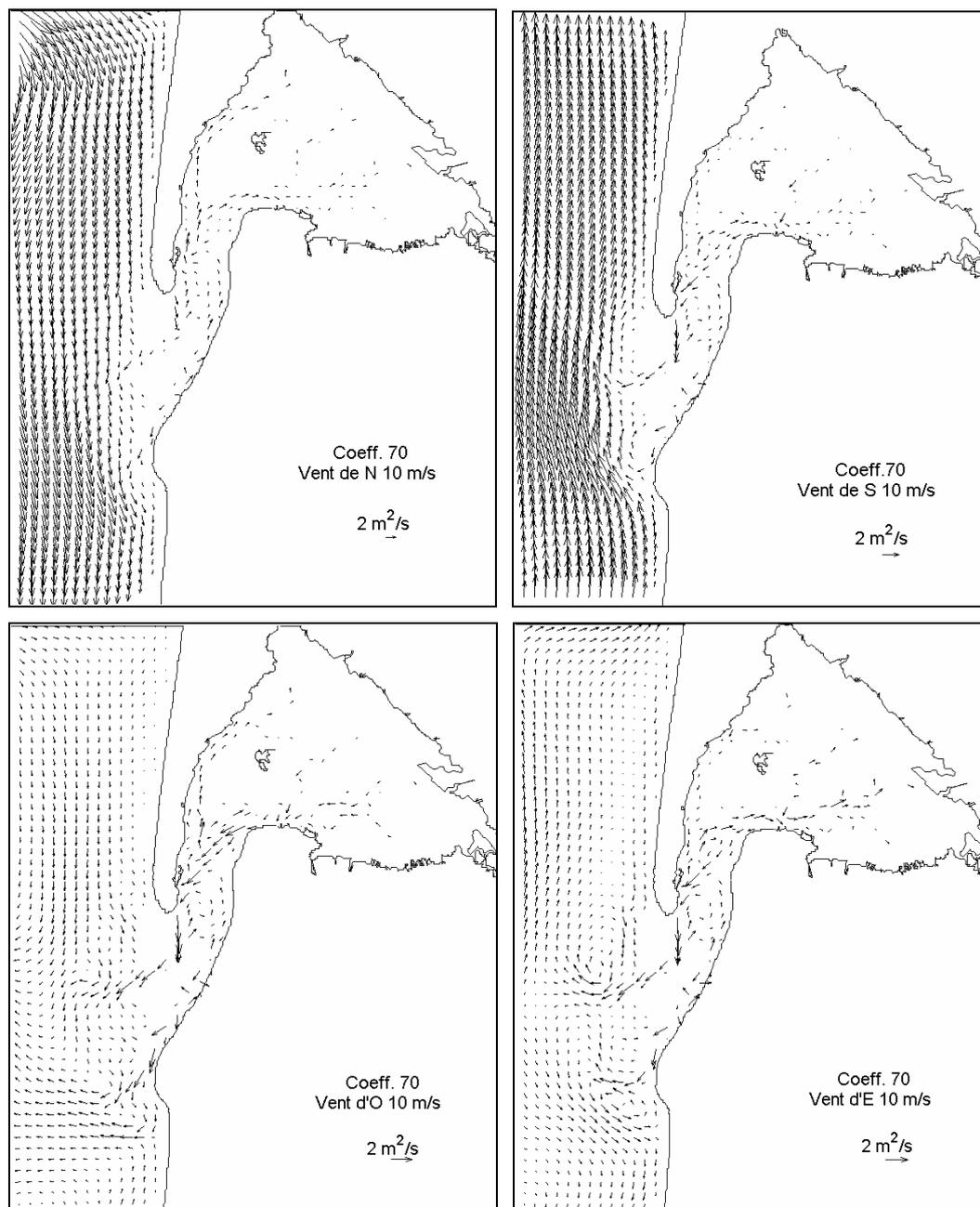


Figure 10. Flux résiduels dans le bassin d'Arcachon pour quatre cas de vent.

3.2. Prisme de marée, volumes oscillants, débits résiduels

Le Tableau 2 présente les caractéristiques des marées simulées et observées en trois points du Bassin et pour deux coefficients (45 et 90).

Tableau 2. Caractéristique de la marée dans le Bassin d'Arcachon.

			Dur. flot	Dur. jusant	Amplit. (m)	Retard / Bélisaire		
							PM	BM
Vives-eaux (90)	Mars 2D	Bélisaire	6h08'	6h16'	3,60	-	-	
		Eyrac	6h 16'	6h 08'	3,80	12'	10'	
		Piquey	6h 12'	6h 14'	3,80	16'	15'	
	SHOM	Bélisaire	-	-	3,85	-	-	
		Eyrac	6h 17'	6h 03'	3,50	20'	5'	
	L'Yavanc (1995)	Bélisaire			3,46	-	-	
		Eyrac	6h 20',**	6h 00',**	3,68	8'	≈ 0'	
		Piquey			3,82	8'	12'	
	Mortes-eaux (45)	Mars 2D	Bélisaire	6h 39'	5h47'	2,00	-	-
Eyrac			6h 50'	5h44'	2,10	9'	4'	
Piquey			6h 56'	5h 24'	2,10	15'	8'	
SHOM		Bélisaire	-	-	2,10	-	-	
		Eyrac	6h 45',*	5h 58',*	2,25	25'	5'	
L'Yavanc (1995)		Bélisaire			-	-	-	
		Eyrac	7h 00',**	5h 25',**	2,11	15'	≈ 0'	
		Piquey			-	-	-	

* Durées moyennées sur l'année 2003 ; ** Durées moyennes pour l'ensemble du Bassin.

L'onde de marée dans le Bassin d'Arcachon est sensiblement différente selon que l'on se trouve en vives ou en mortes-eaux. On observe en effet une dissymétrie de l'onde en mortes-eaux, avec des durées de jusant plus courtes que les durées de flot, et à l'inverse une symétrie quasi-parfaite en vives-eaux. Cette déformation, déjà mentionnée par L'Yavanc (1995), est connue depuis bien longtemps sur l'ensemble de la côte landaise (Fichot, 1912).

La variation de volume total du Bassin au cours d'une marée a été étudiée à l'aide du modèle pour trois coefficients différents (Figure 11). La limite du Bassin considérée se situe au niveau du méridien du Cap Ferret, à 1° 15' O et les simulations ont été réalisées en absence de vent.

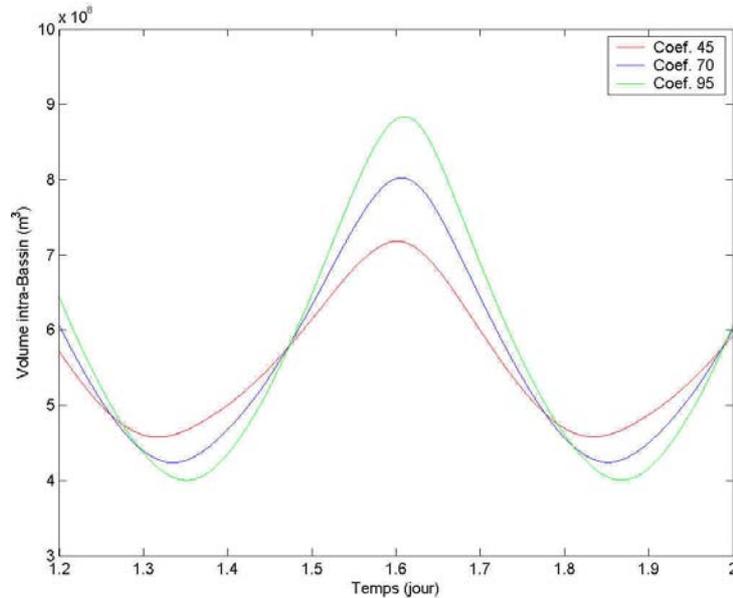


Figure 11. Variation du volume intra-Bassin pour trois coefficients de marée.

Les volumes oscillants calculés par le modèle sont de respectivement 492, 384 et 264 millions de m^3 pour des coefficients de 95, 70 et 45. Ces chiffres sont proches de ceux calculés Salomon et Breton (1995), 337 millions de m^3 pour une marée moyenne, et par le LCHF (1969), 300 millions de m^3 pour une marée moyenne. On notera que le volume oscillant donné par Cayocca (1996), 347 millions de m^3 pour une marée de coefficient 95, est calculé à partir de la bathymétrie de L'Yavanc (1995) et ne prend en compte que le volume situé au Nord de la jetée de Bélisaire. Ceci explique pourquoi il reste inférieur au volume calculé dans cette étude.

Le modèle a ensuite été utilisé sur une période plus longue de façon à simuler les débits à la frontière du Bassin durant un cycle complet mortes-eaux – vives-eaux – mortes-eaux (45-95-45). La Figure 12 présente la variation du débit frontalier en fonction du temps et des coefficients de marée imposés. Les débits totaux varient entre 15 400 (coefficient 45) et 30 680 m^3/s (coefficient 95).

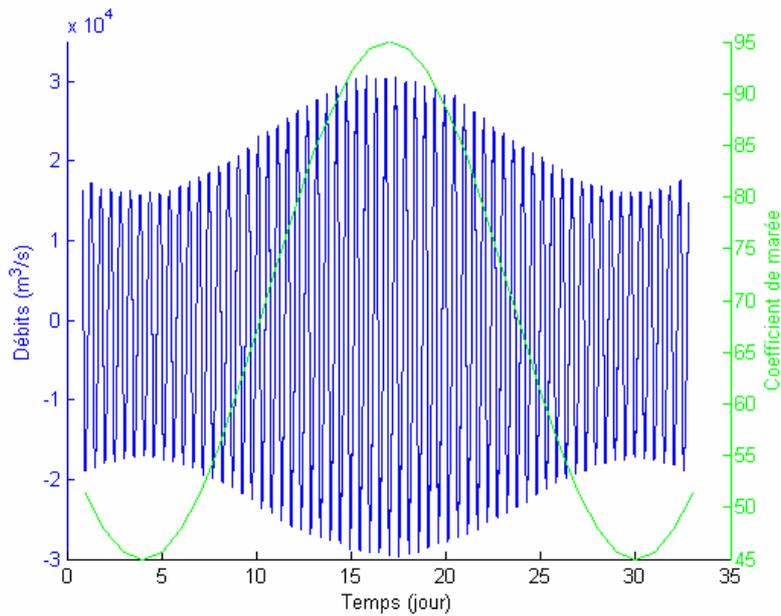


Figure 12. Oscillations des débits à la frontière du Bassin (positifs au flot et négatifs au jusant). Les coefficients de marée correspondants sont portés sur l'axe de droite.

Nous avons vu qu'il existe un décalage d'environ 30 minutes entre les étales et les renverses de courant et que la durée du flot est en général plus longue que celle du jusant. Ceci conduit à une rétention d'eau dans le Bassin lors des phases de revif et au contraire une évacuation lors des phases de déchet (Figure 13). Ce phénomène d'hystérésis est bien connu et a déjà été mentionné pour le Bassin d'Arcachon par Salomon et Breton (1995).

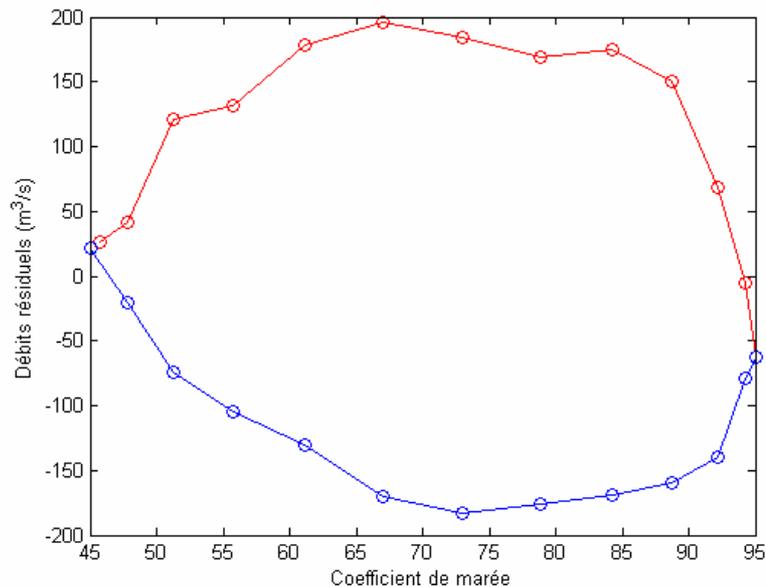


Figure 13. Débits résiduels calculés pour la séquence mortes-eaux – vives-eaux – mortes-eaux (sens horaire). En rouge, coefficients croissants (revif) et en bleu, les coefficients décroissants (déchet).

Les débits résiduels entrant et sortant du bassin, intégrés sur un cycle de marée, oscillent entre 195 et $-184 \text{ m}^3/\text{s}$. Ils sont globalement positifs en période de revif et négatifs en déchet et contribuent à ce qui avait été nommé la « respiration du Bassin » dans le tome 1 de l'Etude Intégrée du Bassin d'Arcachon (Manaud et al., 1997).

L'impact du vent sur les volumes oscillants et les hauteurs d'eau à Eyrac a été testé à l'aide de quatre simulations supplémentaires (Tableau 3)

Les résultats obtenus montrent que les vents n'ont qu'une influence limitée sur le volume oscillant, avec des variations induites inférieures à 3%. Les vents de secteurs Nord et Est ont cependant tendance à diminuer les volumes à pleine et basse mer (diminution du volume oscillant de 10 millions de m^3) tandis qu'au contraire les vents de secteur Sud ou d'Ouest les augmentent (augmentation de respectivement de 8 et 11 millions de m^3). La variation de hauteur d'eau à Eyrac induite par le vent entre les deux situations les plus contrastées (vents d'Est et d'Ouest) est d'environ de 25 cm.

Tableau 3. Volumes intra-Bassin (en millions de m^3) par coefficient 70 et pour quatre cas de vent constants. Les différences de volume avec la situation sans vent sont indiquées pour la pleine mer et la basse mer (respectivement ΔPM et ΔBM).

	Vol. PM	ΔPM	Vol. BM	ΔBM	Vol. oscillant
Sans vent	807	-	423	-	384
N, 10 m/s	791	- 16	417	- 6	374
E, 10 m/s	789	- 18	416	- 7	373
S, 10 m/s	821	+ 14	428	+ 5	393
O, 10 m/s	827	+ 20	431	+ 8	396

3.3. Le renouvellement des eaux

3.3.1. Méthodes de calcul

3.3.1.1. 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 14.

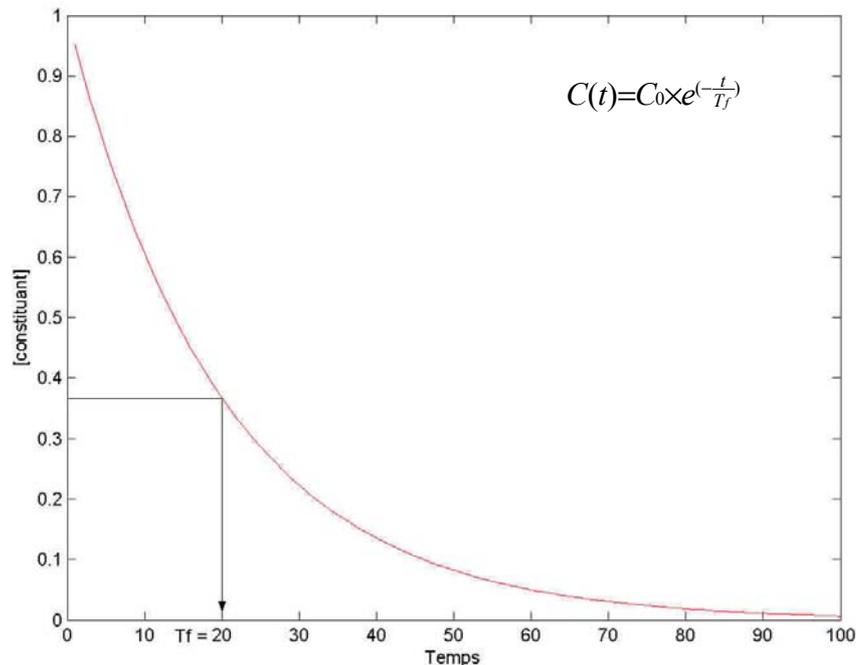


Figure 14. Loi théorique d'évolution de la concentration en un constituant conservatif dans un CSTR. C_0 est la concentration initiale du constituant dans le modèle, t le temps et T_f le temps de renouvellement.

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 (Annexe C). 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 15 que pour un Bassin fictif, 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 15).

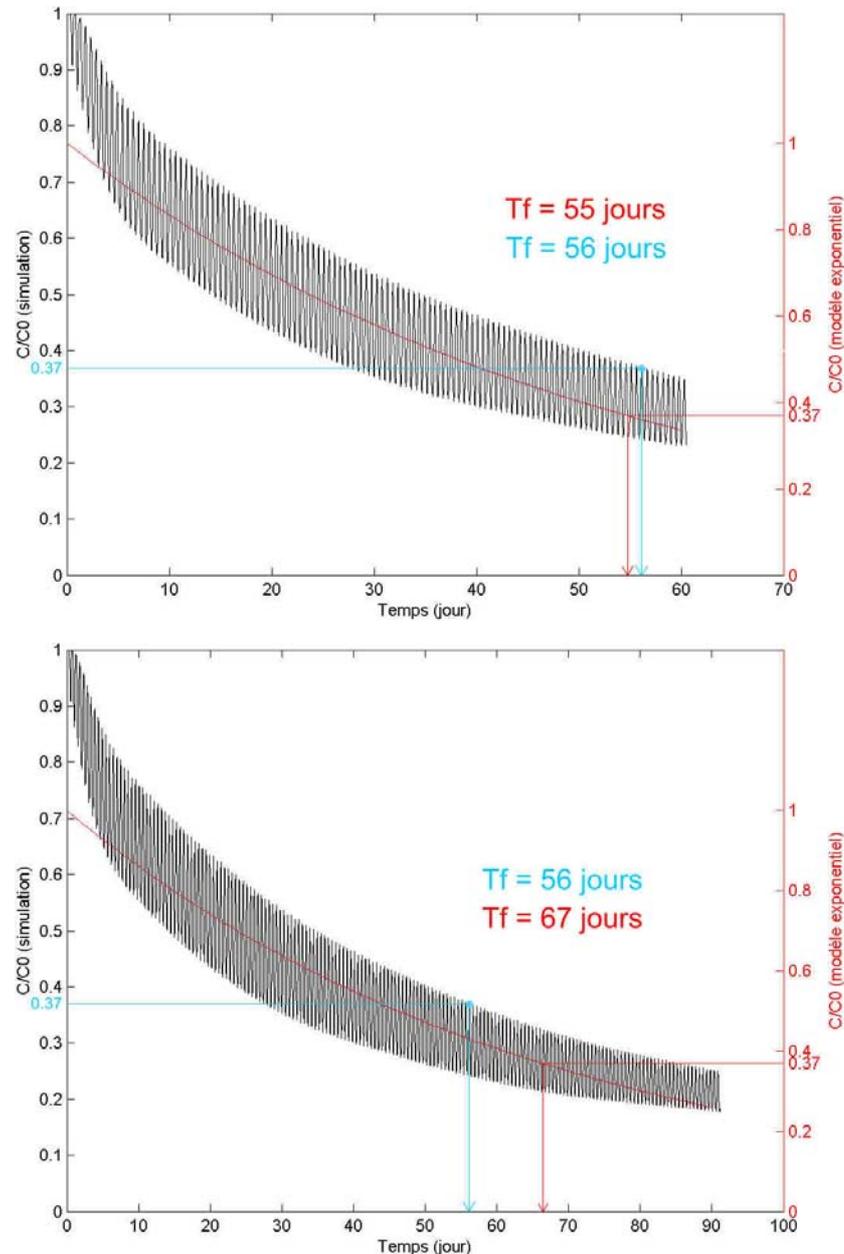


Figure 15. Variations des concentrations en traceur présent dans un Bassin fictif en fonction du temps, pour des durées de simulations de 60 (en haut) et de 90 jours (en bas). En rouge, valeur de T_f obtenue par ajustement au modèle exponentiel de décroissance ; En bleu, T_f calculé dans cette étude. Coefficient de marée constant 70, sans vent et sans rivières.

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} .

3.3.1.2. Le temps de renouvellement local

Le calcul précédent, réalisé pour l'ensemble du Bassin, a de plus été effectué pour 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_{rl} (*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_r) 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.

3.3.1.3. Les différentes simulations réalisées

Plusieurs simulations ont été réalisées pour estimer le renouvellement des eaux du Bassin en fonction des facteurs coefficient de marée, vent et débits des rivières.

- L'effet du coefficient de marée a été estimé par trois simulations, la première à un coefficient constant moyen (70), les deux autres avec des séquences de coefficients réels démarrant soit en période de revif, soit en période de déchet (Figure 16).

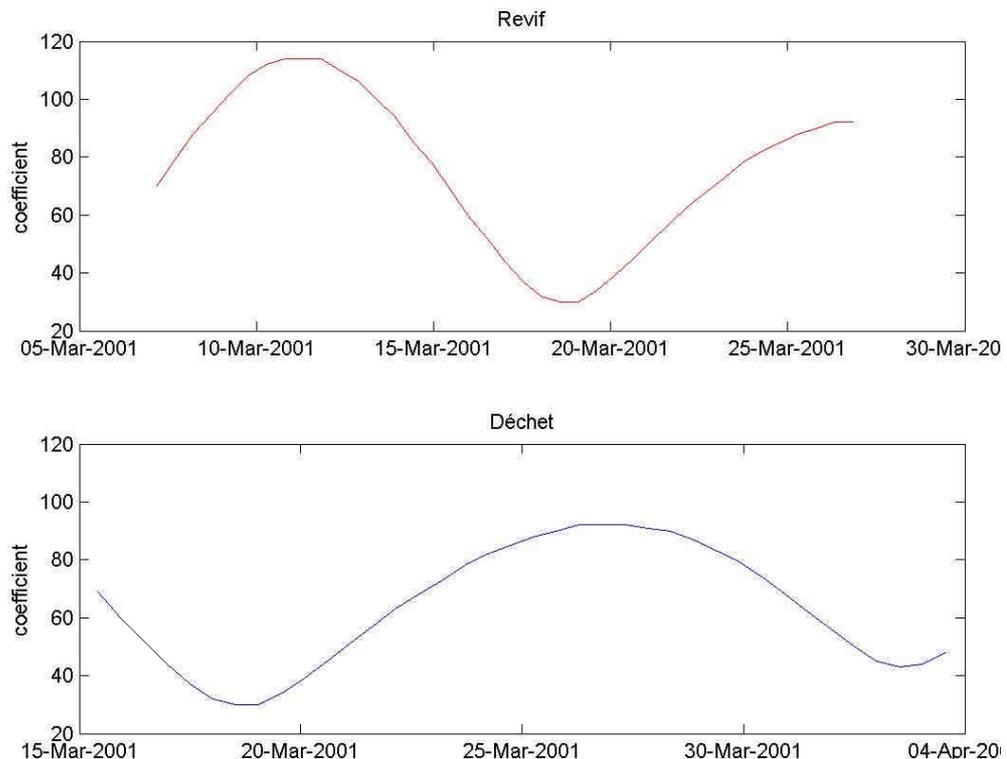


Figure 16. Evolution des coefficients de marée lors des deux simulations avec coefficients réels.

- L'effet du vent a été estimé par plusieurs cas de vents fictifs constants : 10 m/s et 5 m/s pour les 4 directions cardinales.

- L'effet des rivières a été estimé par deux simulations, l'une avec des débits d'étiage et l'autre avec des débits hivernaux constants sur toute la durée de la simulation. Le Tableau 4 présente les débits utilisés.

Tableau 4. Débits moyens hivernaux et estivaux des principales rivières (m^3/s). Données DIREN (Eyre et Porge) et Ifremer-SIBA (autres rivières).

	Débit moyen estival ¹	Débit moyen hivernal ¹
Eyre ²	7,8	29,3
Canal du Porge ³	2,2	11,0
Cirès ⁴	0,4	0,7
Lanton ⁴	0,2	0,3
Ponteils ⁴	0,1	0,2
Canal des Landes ⁴	0,2	0,5

¹ Janvier-février-mars ou juillet-août-septembre ; ² 1967-2003 ; ³ 1969-1979 ; ⁴ 1989-1993

- Enfin, des situations réalistes ont été étudiées avec des séquences de vent réelles (hivernales ou estivales) (Figure 17), combinées aux séquences de débits réels de la Leyre (aux mêmes dates) (Figure 18) et aux débits moyens des autres rivières (Tableau 4). On notera la dominance des vents forts de suroît en hiver et des vents plus modérés de noroît en été, ainsi que l'existence d'un facteur dix environ entre les débits de l'Eyre mesurés en étiage et en période de crue.

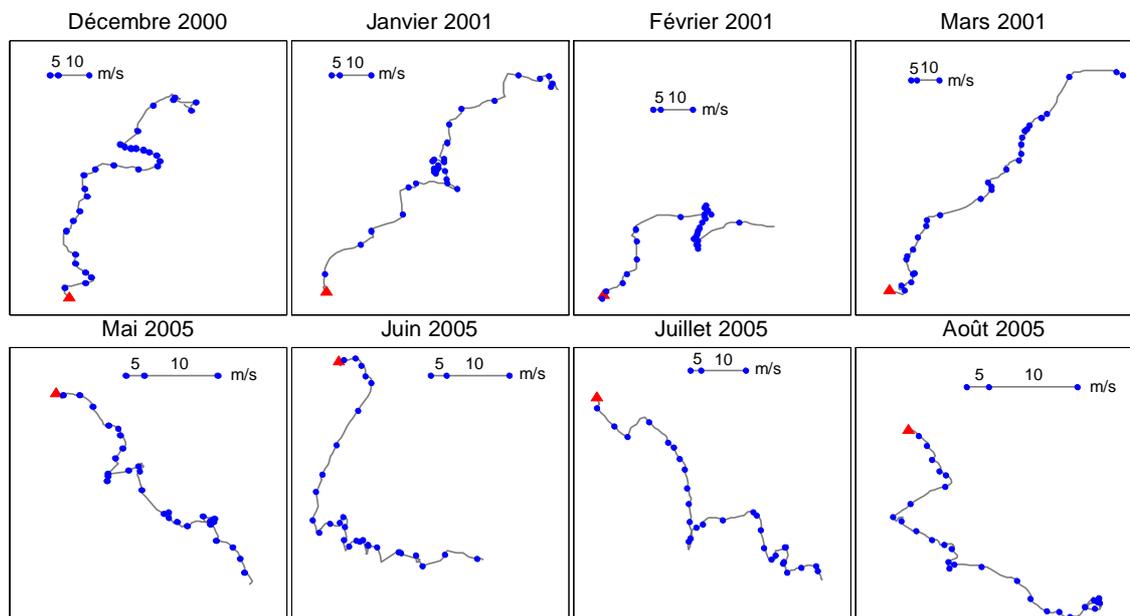


Figure 17. Hodographes des vents utilisés pour les simulations avec séquences de vent réels hivernaux (haut) et estivaux (bas). Début du mois représenté par un triangle rouge.

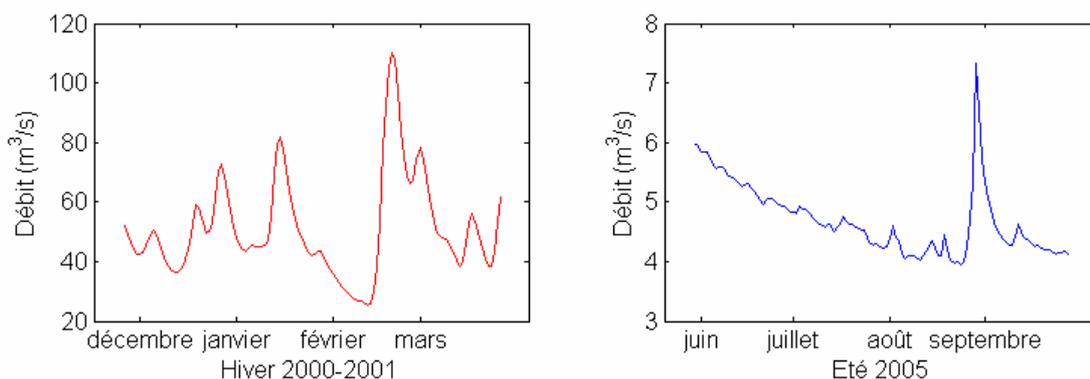


Figure 18. Evolution du débit de l'Eyre au cours d'une période de crue hivernale et au cours de l'étiage estival.

3.3.2. Résultats

3.3.2.1. L'influence des coefficients de marée

Temps de renouvellement (T_f)

La simulation à coefficient constant 70, sans vent et sans rivières, conduit à un temps de renouvellement des eaux de 18,9 jours. Les simulations avec séquences de coefficients réels de marée conduisent à des temps légèrement inférieurs (17,5 et 18,2 jours) mais qui restent du même ordre de grandeur (Tableau 5). C'est pourquoi, par souci de simplification et afin de limiter le nombre de simulations, le coefficient constant de 70 sera considéré comme référence, et l'impact du vent et des débits fluviaux, estimé pour cette situation seulement.

Tableau 5. Temps de renouvellement (T_f) calculés pour différentes situations de coefficients de marée.

Coefficient de marée	Vent	Débits rivières	T_f (jours)
70 constant	Sans vent	Sans rivières	18,9
Réels départ vives eaux	Sans vent	Sans rivières	17,5
Réels départ mortes eaux	Sans vent	Sans rivières	18,2

Dynamique des masses d'eau

La dynamique des masses d'eau peut être abordée en examinant les cartes de concentration du traceur des eaux du Bassin à différents moments de la simulation.

La pénétration des eaux océaniques, responsable du renouvellement des eaux du Bassin, s'effectue principalement par la Passe Nord puis le long du Cap Ferret. La progression des eaux s'effectue ensuite par les deux chenaux principaux de Piquey et du Teychan, puis par les chenaux secondaires d'Arès et de l'Ile d'une part, et de Mouchtalette, Gujan et prolongation du Teychan d'autre part (Figure 19, a et b). Comme l'ont montré Salomon et Breton (1995), on note qu'il n'y a pas de déplacement transversal des eaux depuis le groupe de chenaux du Sud vers celui du Nord (ou réciproquement) mais

seulement une bonne dispersion dans la même unité morphologique (le confinement s'expliquant par la séparation des deux groupes de chenaux par l'Ile aux Oiseaux et par la faiblesse des flux dans le chenal transversal de l'Ile, qui les relie). Après 3 jours, le chenal de Mouchtalette, devient le troisième axe principal de pénétration des eaux océaniques (Figure 19, b et c).

Un gradient transversal de concentration s'observe entre le Moulleau et le Cap Ferret (Figure 19, a et b), s'expliquant par le contre courant de fin de jusant sur le Banc de Bernet qui a tendance à recycler les eaux du Bassin tandis que le flot renouvelle davantage les eaux du chenal du Ferret (Salomon et Breton, 1995).

Après 5 jours, le traceur des eaux du Bassin présente des valeurs très hétérogènes, les hauts du Bassin³ ayant été renouvelés à moins de 20 % tandis que le secteur des Passes l'a été à plus de 80 % (Figure 19, c).

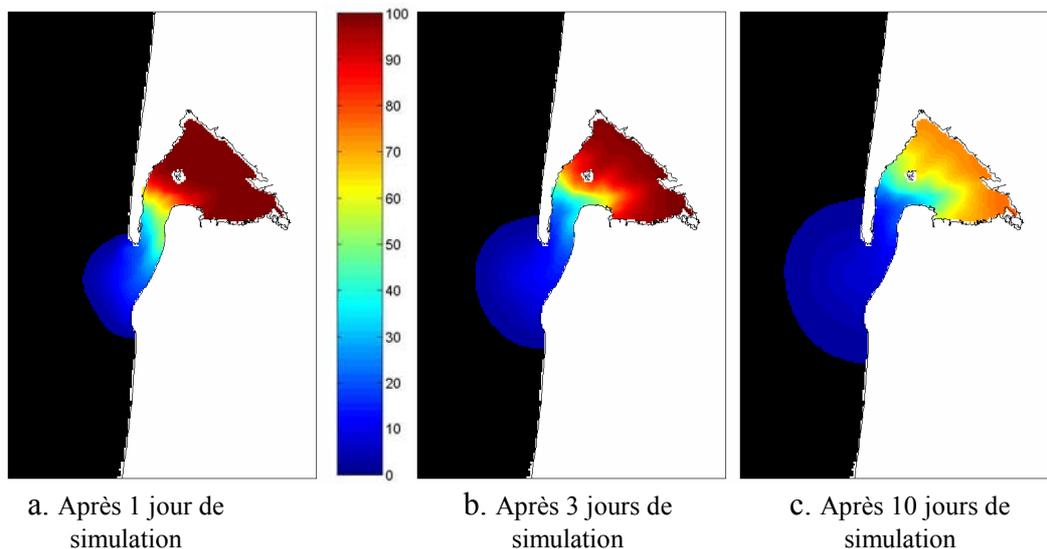


Figure 19. Pourcentage du constituant restant dans le Bassin après différentes durée de simulation (marée de coefficient 70, sans vents et sans rivières).

Lors de cette simulation, le panache des eaux du Bassin s'écoule devant les Passes au cours du jusant, avant d'être repris, pour une grande part, au flot suivant. A l'extérieur du Bassin, une lente dérive de ce panache vers le Nord s'observe (Figure 19, a,b et c).

Temps de renouvellement local (TfL)

Les cartes du nombre de jours nécessaires pour atteindre 37 % de la concentration initiale du traceur des eaux du Bassin montrent, pour les différents coefficients de marée testés, une complète analogie des valeurs et de leur répartition (Figure 20).

³ On désigne par hauts du Bassin, les zones les plus internes sans référence à leur niveau hypsométrique.

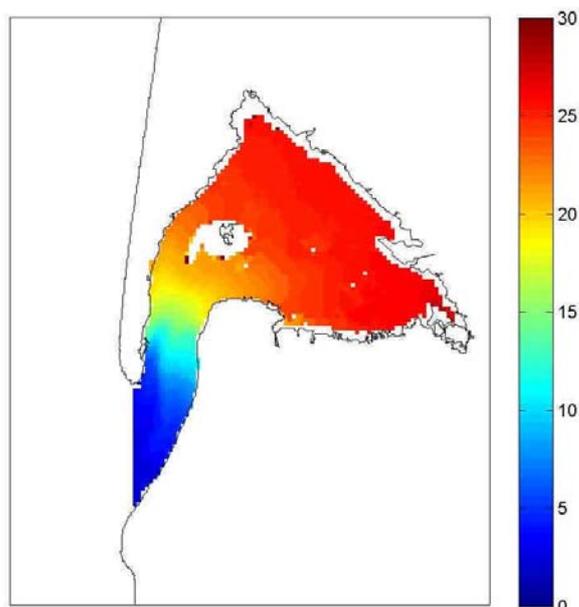


Figure 20. Temps de renouvellement local des eaux du Bassin d'Arcachon pour une marée moyenne de coefficient 70 (sans vent et sans rivières). Le T_f est de 18,9 jour.

D'un point de vue spatial, ce paramètre est caractérisé par une très grande hétérogénéité, avec des valeurs comprises entre 20 et 30 jours dans les zones les plus internes du Bassin et inférieures à 10 jours dans le secteur des Passes. En zone intermédiaire, le nombre de jours nécessaires s'échelonne entre 10 et 20 jours. Il est notable que les lieux-dits du Tès et des Jacquets (situés à une distance équivalente de l'entrée du Bassin) présentent une valeur comparable de ce paramètre (respectivement 23,4 et 24,5 jours), ce qui illustre la progression parallèle des eaux océaniques dans les chenaux du Piquey et du Teychan.

3.3.2.2. L'influence du vent

Temps de renouvellement (T_f)

Le vent a un effet notable sur le temps de renouvellement des eaux du Bassin qui, selon la direction dans laquelle il souffle, peut s'exercer de manière opposée (Tableau 6). Ainsi, les vents de secteur Nord et Ouest diminuent le temps de renouvellement, d'autant plus que leur intensité est forte. A l'inverse, ceux de secteur Est et Sud augmentent le temps de renouvellement mais de façon moindre lorsqu'ils sont forts.

Ces effets se retrouvent dans le cas des séquences de vent réalistes, où il apparaît que la composante majoritaire Sud Sud-Ouest des vents hivernaux conduit à un renouvellement des eaux plus lent que celui observé durant l'été, lorsque les vents sont orientés au Nord-Ouest.

Tableau 6. Temps de renouvellement (T_f) calculés pour différents cas de vent (constants sur toute la période) (coefficient de marée constant 70).

Direction du vent	Vitesse du vent (m/s)	T_f (jours)
Sans vent	-	18,9
Nord	10	13,3
	5	15,3
Est	10	16,9
	5	17,9
Sud	10	16,4
	5	17,4
Ouest	10	15,9
	5	17,4
Hivernal réel (cf. Figure 17)		16,9
Estival réel (cf. Figure 17)		17,4

Dynamique des masses d'eau

Pour comprendre comment le vent agit, il est intéressant d'examiner les cartes de concentration du traceur de l'eau du Bassin pour les différentes situations et à plusieurs dates de simulations.

Le meilleur renouvellement des eaux s'observe par vent de Nord, il est dû au fait que les eaux du Bassin sorties au cours du jusant sont chassées par le vent vers le Sud et ne sont que peu reprises au flot suivant, tandis que des eaux purement océaniques entrent par la passe Nord (Figure 21, a). A l'intérieur du Bassin, le vent favorise la pénétration rapide, par le chenal de Piquey, des eaux océaniques vers le Nord (Figure 21, b), qui progressent ensuite vers le Sud-est (Figure 21, c), conduisant à un renouvellement du bassin interne assez rapide. Notons le front marqué entre eaux du Bassin et eaux océaniques dans le chenal du Teychan (Figure 21, b) qui ne s'observe pas dans la situation sans vent. Par vent d'Ouest, un schéma très similaire à celui-ci se déroule.

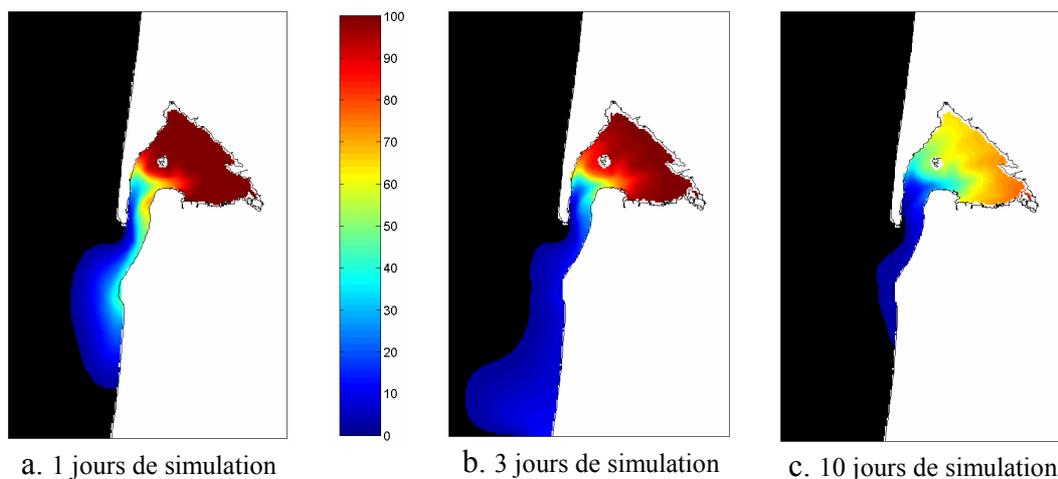


Figure 21. Pourcentage du traceur de l'eau du Bassin restant dans le Bassin après différentes durée de simulation (coefficient de marée constant 70, vent de Nord 10 m/s, sans rivières).

Par vent de Sud, la dynamique des masses d'eau est très différente. Si le vent de Sud induit des courants océaniques qui chassent une partie de l'eau s'écoulant hors du Bassin vers le Nord (Figure 22, a), son effet principal est de contrarier la sortie des eaux du Bassin (Figure 22, b). Les entrées d'eaux océaniques sont très limitées, un peu plus importantes le long du chenal du Teychan que de celui du Piquey. Toutefois, le vent mélange les eaux confinées à l'intérieur du Bassin et conduisent à des valeurs de concentration plus homogènes (Figure 22 c) que dans la situation sans vent (Figure 19 c).

Le vent d'Est induit une dynamique des masses d'eaux assez similaire bien que moins marquée en ce qui concerne le confinement des eaux.

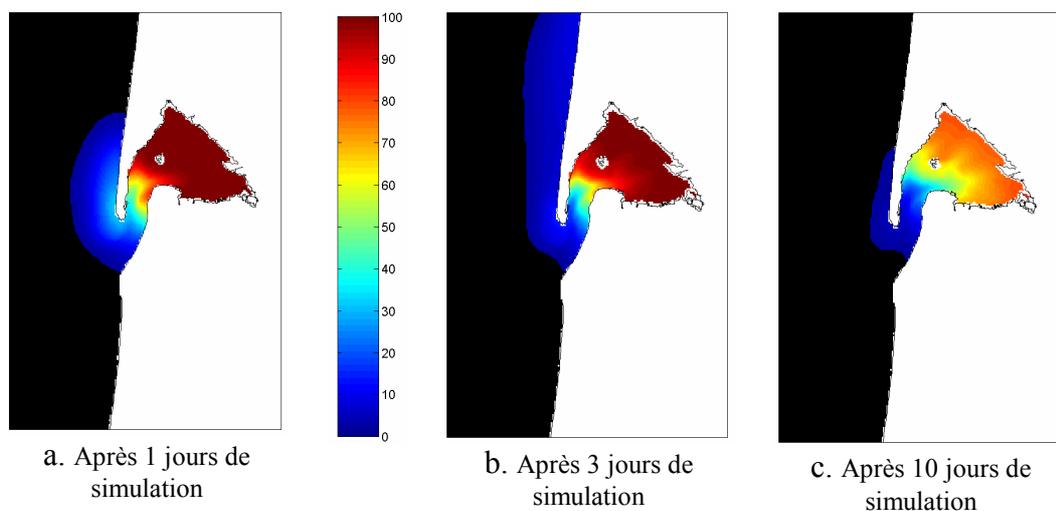


Figure 22. Pourcentage du traceur de l'eau du Bassin restant dans le Bassin après différentes durée de simulation (coefficient de marée constant 70, vent de Sud 10 m/s, sans rivières).

Lorsque les vents sont plus faibles (5 m/s), les mêmes dynamiques sont observées pour les vents de secteur Nord et Ouest mais avec une intensité moindre. Ainsi, la diminution du temps de renouvellement des eaux est moins forte pour les vents de 5 m/s que pour ceux de 10 m/s.

L'effet des vents de sud et d'Est, supérieur lorsque les vents sont plus faibles, pourrait s'expliquer par une moindre chasse vers le Nord des eaux parvenant à sortir de la Baie, qui seraient donc reprises au flot suivant, limitant ainsi le renouvellement des eaux par rapport à celui obtenu pour des vents plus forts.

Temps de renouvellement local (TfL)

Par rapport aux résultats obtenus en absence de vent, l'effet du vent se manifeste par un gradient important Nord-Ouest Sud-Est quand les vents sont de Nord ou d'Ouest et, au contraire, par des valeurs homogènes dans toutes les zones internes de la Baie par vents de Sud et d'Est (Figure 23). Ces résultats découlent de la dynamique des masses d'eau décrite précédemment.

Ainsi, par vents de Nord et d'Ouest, les Passes, le Nord et l'Ouest du Bassin sont des zones de renouvellement privilégiées (TfL faibles inférieurs à 20 jours par vents de

10 m/s), à l'inverse de la zone Sud-est qui apparaît la plus confinée (TfL supérieurs à 20 jours par vents de 10 m/s).

Par vents de secteur Sud et Est, seul le secteur des Passes demeure une zone de bon renouvellement des eaux (TfL inférieurs à 15 jours) contrairement au reste de la Baie (TfL de 15 à plus de 25 jours).

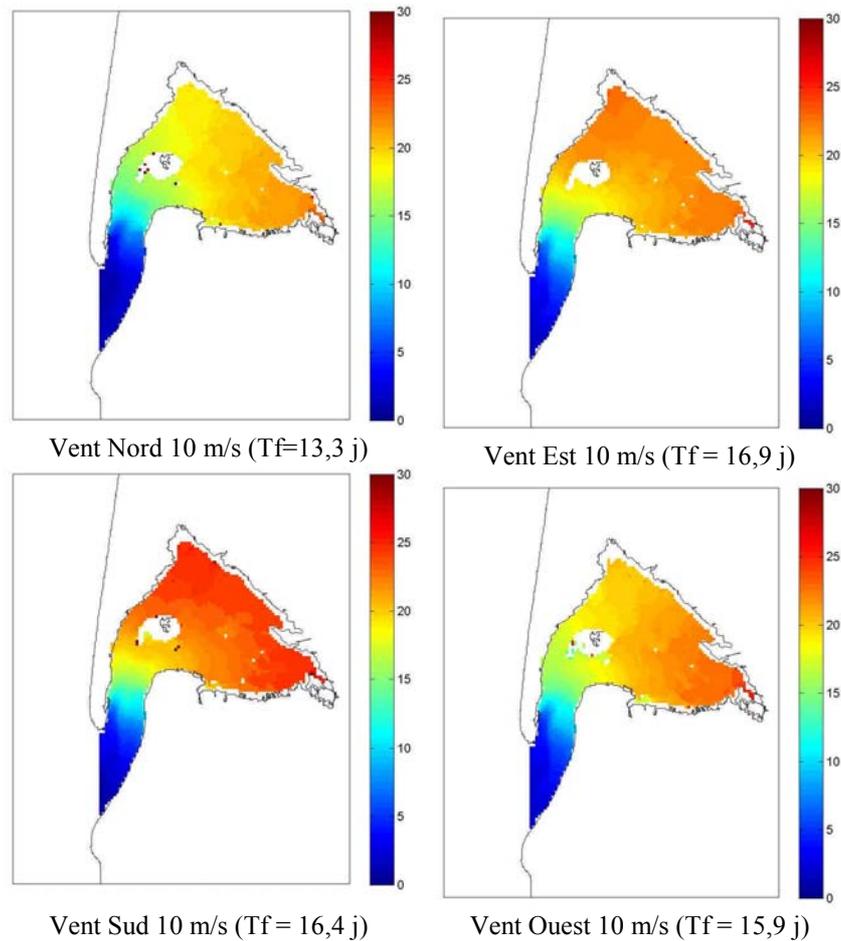


Figure 23. Temps de renouvellement local des eaux du Bassin d'Arcachon pour différentes orientations de vent constant de 10 m/s (coefficient constant 70 et sans rivières).

3.3.2.3. L'influence des rivières

Temps de renouvellement (Tf)

La seconde arrivée possible d'eau extérieure au Bassin est celle provenant des rivières. Ces entrées favorisent le renouvellement des eaux du Bassin proportionnellement à leurs débits (on rappellera que l'on ne tient en aucun cas compte de la qualité des eaux apportées par les rivières). Ainsi, les simulations réalisées avec différents régimes fluviaux conduisent à des temps de renouvellement de 17,4 jours pour des débits d'été et de 14,8 jours pour des débits hivernaux (en absence de vent et pour une marée constante de coefficient 70, Tableau 7).

Tableau 7. Temps de renouvellement (T_f) calculés pour différents débits de rivières constants (coefficient de marée constant 70).

Vent	Débits rivières	T_f (jours)
Sans vent	Hivernaux constants	14,8
Sans vent	Estivaux constants	17,4

Temps de renouvellement local (T_{fL})

Les temps de renouvellement locaux (Figure 24) sont, dans tous les cas, améliorés par rapport à la situation sans rivières. Les zones d'écoulement des eaux douces situées à l'intérieur du Bassin, d'autant plus étendues que les débits sont élevés, présentent un renouvellement voisin de celui du secteur des Passes (T_{fL} inférieur à 10 jours) tandis que les secteurs intermédiaires voient leur temps de renouvellement local passer de 20 jours à des valeurs comprises entre 15 et 20 jours pour les débits hivernaux.

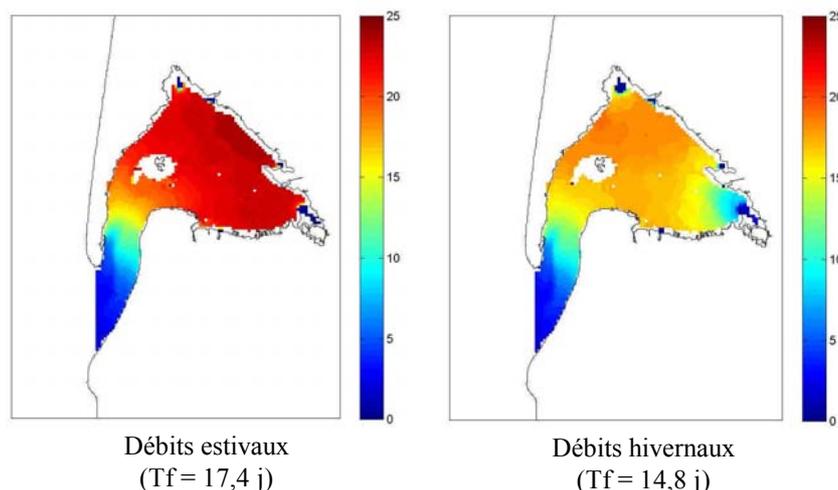


Figure 24. Temps de renouvellement local des eaux du Bassin d'Arcachon pour des débits de rivières hivernaux et estivaux constants (coefficient constant 70 et sans vent) (attention aux échelles différentes).

3.3.2.4. Situations réelles de vent et de débit des rivières

Si les simulations précédentes ont permis de comprendre l'impact de tel ou tel paramètre sur le flushing time, les simulations effectuées pour des séquences de vent et de débits fluviaux véritables, permettent d'aborder la réalité du renouvellement des eaux du Bassin d'Arcachon.

La séquence de vent hivernale (vents forts de sud-ouest) couplée aux débits importants de la Leyre en hiver renforce sensiblement le renouvellement des eaux et abaisse le temps de renouvellement à 12,8 jours (Tableau 8). La situation estivale est en revanche plus proche d'une situation de vent de faibles vents de Nord ou Nord-Ouest, les débits des rivières sont par ailleurs plus faibles, ce qui freine le renouvellement. Le renouvellement en période estivale est estimé à 15,9 jours (Tableau 8).

Tableau 8. Temps de renouvellement (T_f) calculés pour deux situations réelles de vents et de débits de la Leyre et (coefficient de marée constant 70).

Vent	Débits rivières	T_f (jours)
Sans vent	Sans rivières	18,9
Hivernal réel	Hivernaux réels	12,8
Estival réel	Estivaux réels	15,9

De la même façon, les temps de renouvellement locaux présentent des valeurs et une répartition proches des situations théoriques décrites auparavant (Figure 25).

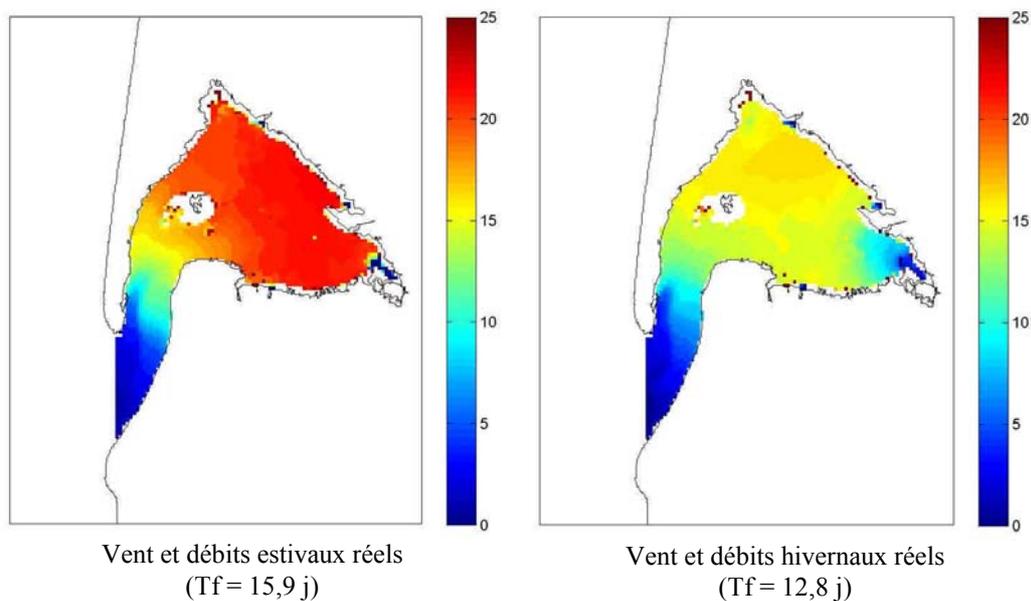


Figure 25. Temps de renouvellement local des eaux du Bassin d'Arcachon pour des situations hivernales et estivales de vent et de débits des rivières réels.

3.4. 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 26 : 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.

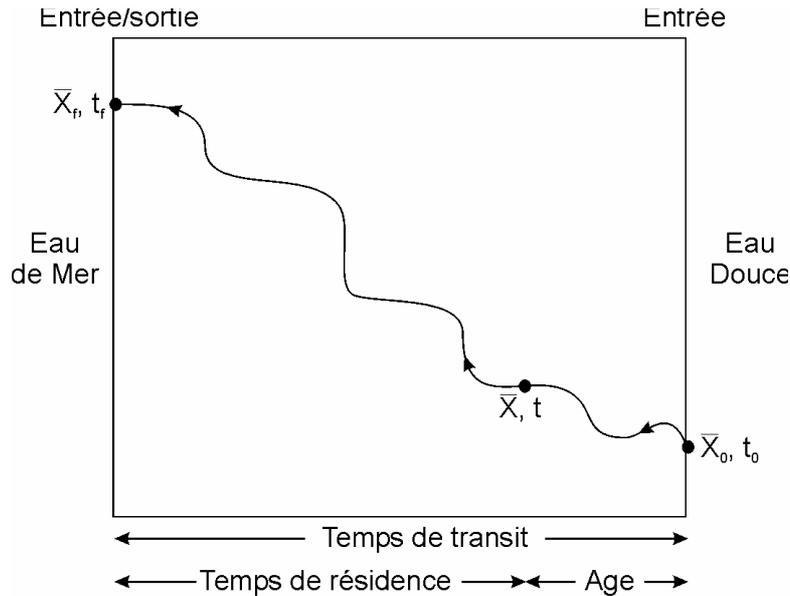


Figure 26. Trajet d'une parcelle d'eau à l'intérieur d'un bassin (tiré de Zimmermann, 1976).

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.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = p_i - d_i - \nabla \cdot (uc_i - K \cdot \nabla c_i) - \frac{\partial c_i}{\partial \tau} \quad (4)$$

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

On notera que l'équation (4) est très proche de l'équation d'advection-dispersion d'un élément dissous (voir équation 2) 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 τ . 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 :

$$a_i(t, \bar{X}) = \frac{\alpha_i(t, \bar{X})}{C_i(t, \bar{X})} \quad (5)$$

où α_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, un nombre 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 6 et 7, connaissant la concentration de chaque traceur et son âge.

$$\alpha_i = \int_0^{+\infty} \pi_i(t, \bar{X}, \tau) d\tau \quad \text{et} \quad C_i(t, \bar{X}) = \int_0^{+\infty} c_i(t, \bar{X}, \tau) d\tau \quad (6) \text{ et } (7)$$

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 8) et l'autre représente α_i la concentration en âge, son équation d'advection-dispersion est l'équation suivante (9).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = P_i - D_i - \nabla \cdot (u C_i - K \cdot \nabla C_i) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = C_i + \pi_i - \delta_i - \nabla \cdot (u \alpha_i - K \cdot \nabla \alpha_i) \quad (9)$$

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

$$(P_i, D_i, \pi_i, \delta_i) = \int_0^{\infty} (p_i, d_i, \varpi_i, \varpi_i) = 0 \quad (10)$$

A tout point \bar{X} et instant t , l'âge moyen est calculé selon l'équation 5, soit le rapport des concentrations des deux traceurs.

3.4.1. Résultats

L'âge des masses d'eau issues de deux rivières a été calculé pour le bassin d'Arcachon : l'Eyre et le Canal des Etangs. Pour chaque rivière, un débit hivernal, constant durant toute la simulation a été simulé : respectivement 29,3 et 11 m³/s pour l'Eyre et le Canal des Etangs.

3.4.1.1. La rivière Eyre

La Figure 27 présente les résultats simulés sans vent et par un coefficient constant de 70. Cette simulation a été réalisée avec un traceur par classe d'âge afin de permettre le traçage des histogrammes. Des classes d'âge de 3 heures ont été choisies, les plus petites

possibles, en fonction des capacités de calcul. Une simulation de vingt jours a donc nécessité le suivi de 160 traceurs.

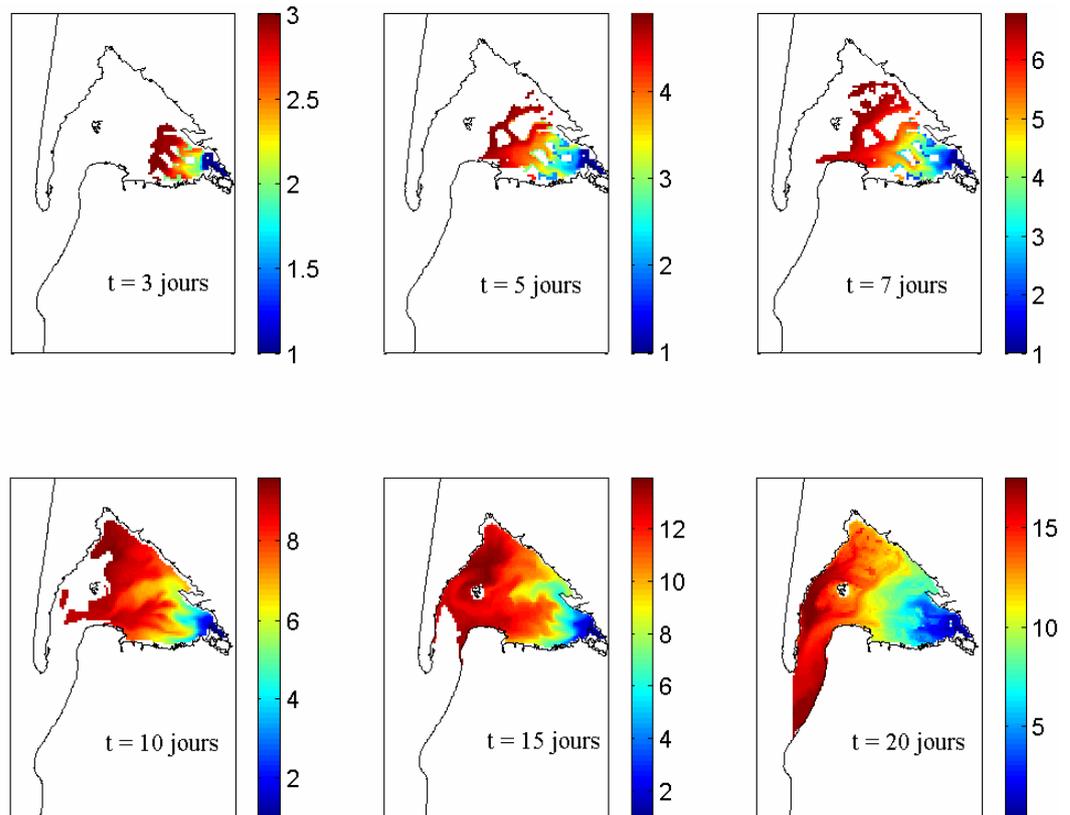


Figure 27. Age moyen (en jour) des masses d'eau issues de l'Eyre (simulation sans vent, coefficient 70).

L'observation des fronts du panache de l'Eyre permet d'estimer le temps moyen mis par les eaux de l'Eyre pour atteindre certains points du bassin. Ainsi, selon ces résultats, les eaux mettent environ 5 jours pour atteindre la jetée d'Eyrac ou les chenaux de Girouasse et du Courant. Il faudra environ 15 jours pour que les eaux de l'Eyre atteignent les Passes.

La distribution des classes d'âge est présentée sous forme d'histogrammes pour cinq points du bassin (Figure 28).

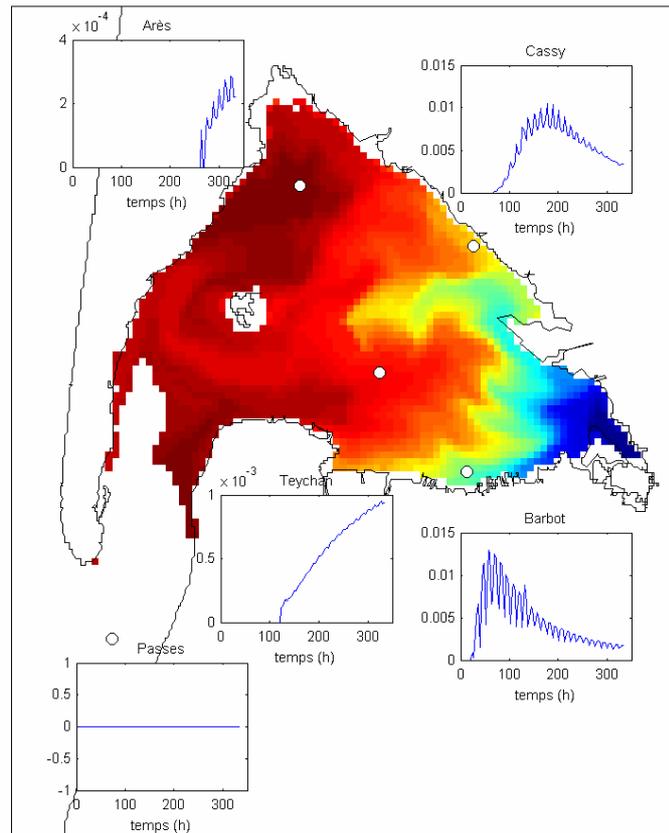


Figure 28. Carte des âges moyens (exprimés en jour) des masses d'eaux issues de la rivière Eyre à $t=15$ jours et histogrammes de distribution des différentes classes d'âge (simulation sans vent, coefficient 70).

La distribution des classes d'âge varie en fonction de la localisation dans le Bassin. Les courbes de distribution permettent d'observer plus précisément le moment d'arrivée des eaux de l'Eyre. Les eaux se trouvant au points Barbot et Cassy sont caractérisées par une eau plus jeune que les points Teychan et Arès (les eaux de l'Eyre n'ayant pas encore atteint les Passes au bout de 15 jours). Les eaux de cette rivière parviennent par exemple au point Barbot en environ 20 heures, alors qu'il faut presque 260 heures pour qu'elles atteignent le point Arès, pour les conditions de vent et de marée de cette simulation. Le type unimodal des histogrammes est dû au caractère constant du débit des rivières. Mais la même méthode, appliquée à des débits variables ferait probablement ressortir plusieurs maximums, et permettrait par exemple de séparer les eaux issues des différentes périodes de crue ou d'étiage.

Plusieurs simulations ont été lancées pour estimer l'effet du vent sur la progression du panache de l'Eyre dans le Bassin d'Arcachon. Le Tableau 9 présente les résultats obtenus pour quelques points du Bassin.

Tableau 9. Age moyen des eaux (jour) de l'Eyre atteignant différents points du Bassin d'Arcachon, en fonction des conditions de vent.

	Sans vent	Nord 10 m/s	Sud 10 m/s	Est 10 m/s	Ouest 10 m/s
Teychan	5,0	3,8	3,6	3,7	3,8
Arès	10,8	11,0	4,9	4,8	11,4
Eyrac	5,2	4,7	12,8	3,9	4,8
Passe N	>15	>15	>15	13,2	>15
Passe S	>15	13,1	>15	13,4	>15

Une simulation plus réaliste avec une marée variable et une série de vents variables de secteur Ouest a été lancée (Figure 29). Le débit moyen de l'Eyre en hiver (cf. Tableau 4) a été choisi pour cette simulation. La Figure 30 présente les résultats obtenus.

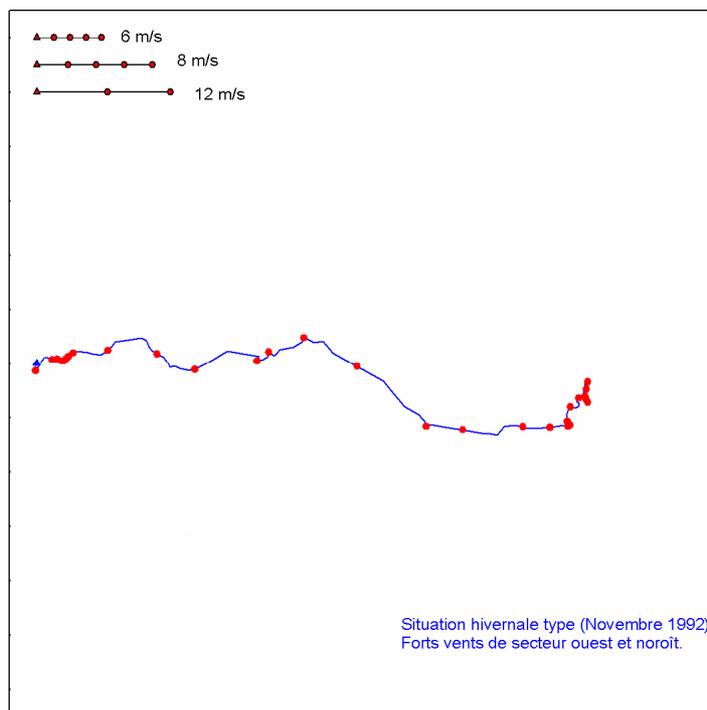


Figure 29. Hodographes des vents simulés (le triangle bleu matérialise le départ de la série temporelle).

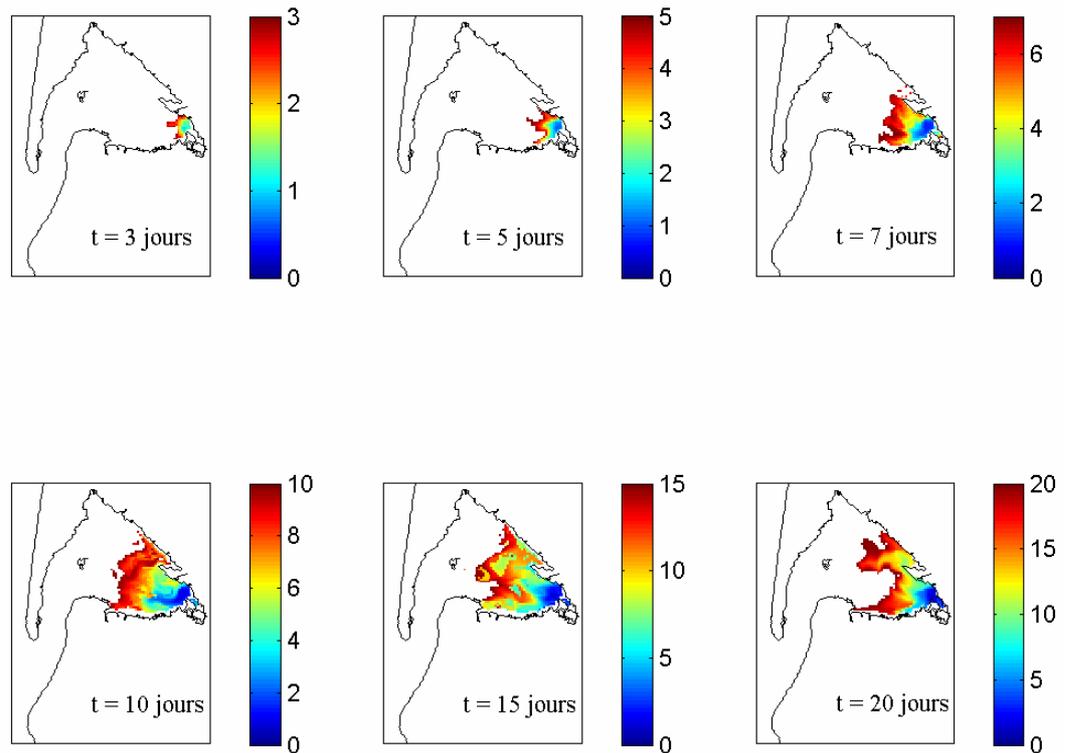


Figure 30. Age moyen des masses d'eau issues de l'Eyre pour la simulation de marée réaliste avec débits et vents hivernaux.

Les forts vents de secteur Ouest restreignent la progression du panache de l'Eyre, et confinent ce dernier dans la partie Sud-est du Bassin. Les eaux de l'Eyre ont alors environ 15 jours lorsqu'elles atteignent l'Ile-aux-oiseaux ou la jetée d'Eyrac. Ces simulations soulignent l'importance de la direction du vent dans la progression du panache de cette rivière.

3.4.1.2. Le Canal des Etangs

Comme pour l'Eyre un premier cas théorique sans vent avec un coefficient de marée constant (70) a été lancé. La Figure 31 présente les résultats obtenus.

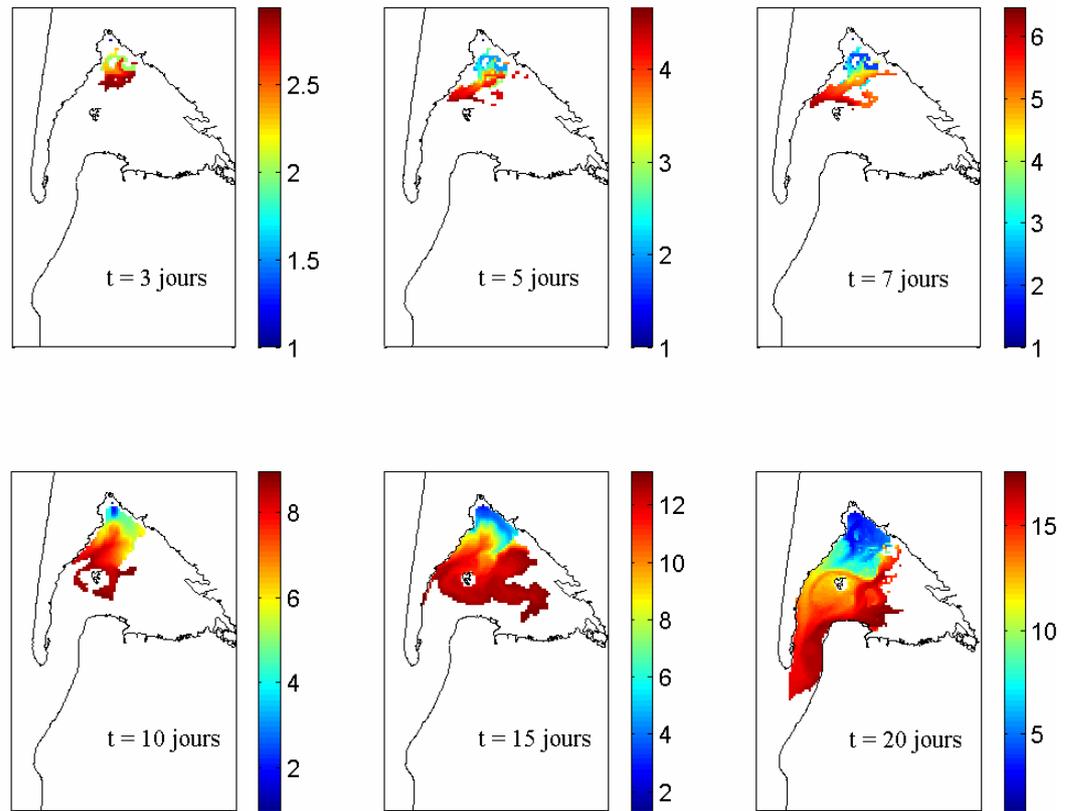


Figure 31. Age moyen (en jour) des masses d'eau issues du Canal des Etangs (simulation sans vent, coefficient 70).

Les eaux issues du Canal des Etangs se répartissent seulement dans la partie Ouest du bassin. Logiquement les chenaux du Nord du Bassin sont atteints rapidement par les eaux de cette rivière (5 jours pour les chenaux de l'Île et de Piquey). Les eaux de la jetée d'Eyrac ou celles au niveau des Passes sont en moyenne plus âgées (environ 15 jours).

La simulation réalisée avec des conditions de marée, de vents et de débit réalistes (novembre 1992, séquence de vent hivernale, débit moyen hivernal), souligne encore une fois l'importance du vent dans la progression du panache des rivières (Figure 32). Les vents de secteur Ouest confinent le panache du Canal des Etangs dans le Nord-Ouest du Bassin, situation tout à fait contrastée par rapport à la simulation en absence de vent.

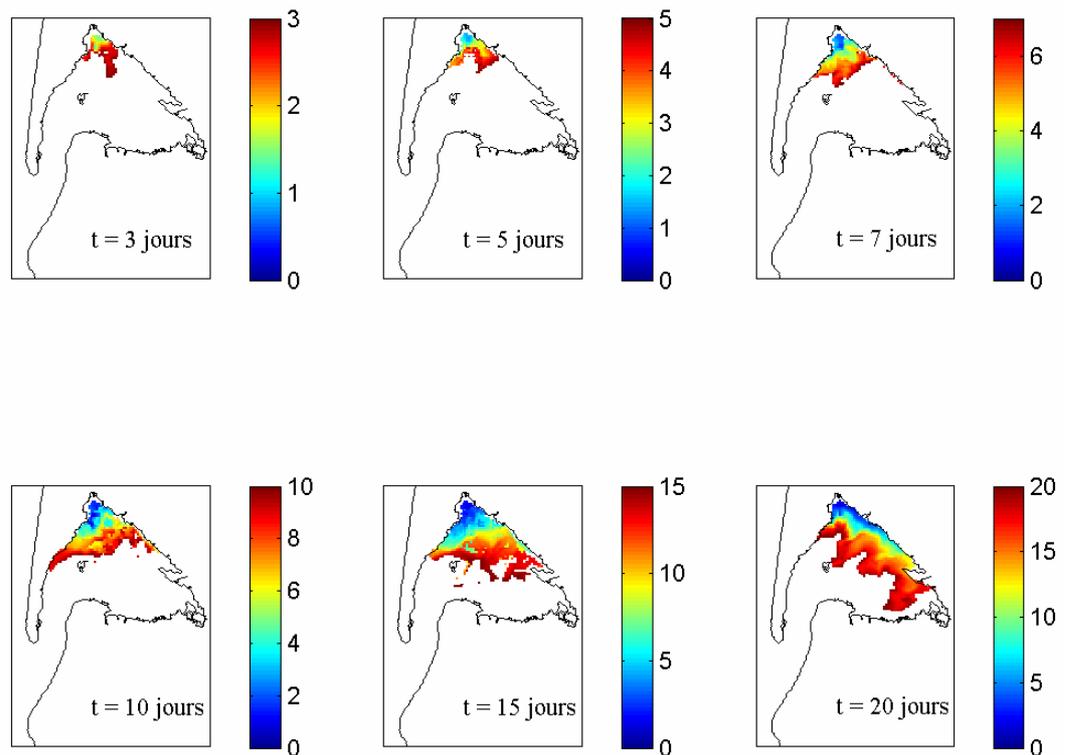


Figure 32. Age moyen des masses d'eau issues du Canal des Etangs pour la simulation d'une séquence de type hivernale (novembre 1992).

4. Conclusions / synthèse

L'utilisation du modèle hydrodynamique bidimensionnel MARS-2D a permis d'avancer significativement dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du Bassin d'Arcachon à différentes échelles. 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).

Le Bassin d'Arcachon ne possède qu'une ouverture sur l'Océan, la marée y joue un rôle de « piston » poussant ou aspirant tour à tour l'eau depuis le large vers le fond du Bassin. Le volume oscillant moyen a été estimé à 384 millions de m³. La progression de l'onde de marée au flot, de la même façon que sa régression au jusant, se fait de façon homogène sur tout le front de marée et met environ une heure pour se propager depuis la Passe Nord jusqu'aux zones les plus internes. L'onde est quasi-symétrique en vives-eaux et dissymétrique en mortes-eaux, avec des durées de jusant bien inférieure aux durées de flot. L'observation des circulations résiduelles ainsi que des maximales de courant montre une tendance à l'expulsion vers l'Océan dans toute la partie avale du Bassin, alors que les zones plus internes et les chenaux transversaux seront probablement plus sujets au comblement compte tenu de courants plus faibles et de résiduelles dirigées vers l'intérieur.

Le temps de renouvellement du Bassin d'Arcachon a été estimé entre 12,8 et 15,9 jours respectivement pour les saisons hivernale et estivale. Les facteurs vent et débits des rivières ont une influence marquée sur ce paramètre. En effet si l'influence de ces facteurs sur les courants intra Bassin ou sur les volumes oscillants reste limitée, la dispersion d'un traceur se trouve largement modifiée selon la direction et la force des vents et les apports fluviaux. D'une manière schématique, les simulations réalisées ont montré que les vents de secteur Nord et Ouest favorisent le renouvellement, alors que des vents de secteur Sud et Est ont plutôt tendance à augmenter le confinement du Bassin.

Le calcul de l'âge des panaches issus de l'Eyre et du Canal des Etangs, a permis de quantifier le temps mis par les eaux de ces deux rivières pour atteindre différents points du Bassin. Les simulations effectuées ont montré des résultats contrastés qui soulignent l'importance de la direction du vent sur le cheminement des eaux douces à l'intérieur du Bassin d'Arcachon. Les eaux de la principale rivière, l'Eyre mettront par exemple respectivement 5 ou 13 jours pour atteindre le point Eyrac par vent de Nord ou de Sud.

L'intense productivité des systèmes lagunaires leur confèrent une importance à la fois économique et écologique capitale. Cette productivité dépend pour une part importante de la manière dont se comportent les masses d'eau à l'intérieur de cette lagune, du renouvellement de ses eaux et des apports continentaux. Les rendements aquacoles par exemple, seront directement liés au renouvellement de l'eau contrôlant la balance entre l'apport de nourriture et l'export des déchets induits (Koutitonsky et al., 2004). Au cours de cette étude, l'utilisation du modèle MARS-2D a permis de dresser un portrait général de l'hydrodynamique du Bassin d'Arcachon et de proposer des grandeurs caractéristiques de cette dernière qui permettront des études comparatives inter site et pourront éventuellement être utilisées dans la gestion intégrée de ce système (gestion de pollutions, sélection de sites appropriés à telle ou telle activité humaine, etc.). La prochaine étape devra s'intéresser à la mise au point d'un modèle biologique couplé, de façon à progresser dans le développement d'un outil de simulation utile à la compréhension et à la gestion raisonnée de cet écosystème lagunaire.

5. Bibliographie

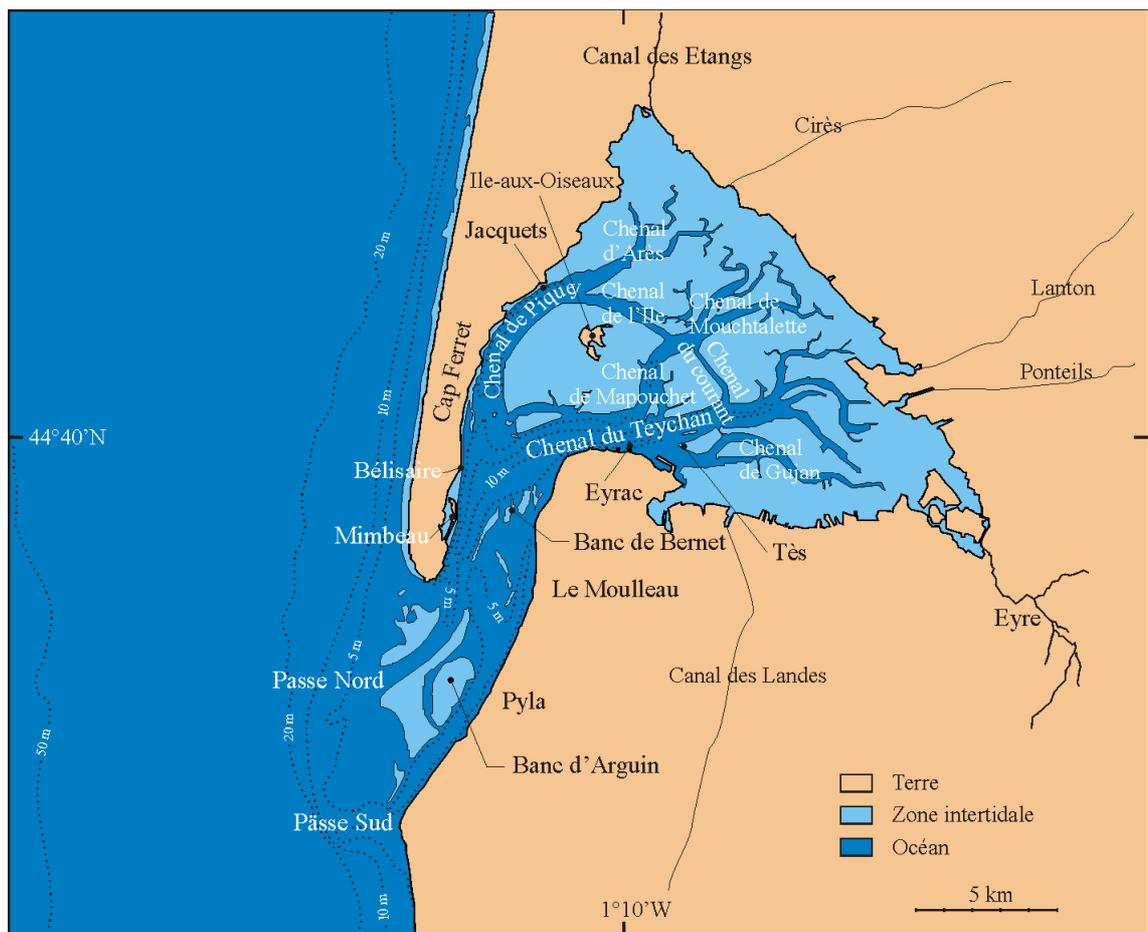
- Arneborg L., 2004. turnover times for the waters above sill level in Gullmar Fjord. *Continental Sea Research* 24, 443-460.
- Bolin B., Rohde H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58-62.
- Brooks D.A., Baca M.W., Lo Y.-T., 1999. Tidal circulation and residence time in a Macrotidal Estuary: Cobscook Bay, Maine. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 647-665.
- Cayocca F., 1996. Modélisation morphodynamique d'une embouchure tidale: application aux passes d'entrée du Bassin d'Arcachon. Thèse de l'Université de Bordeaux 1, 419 p.
- 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.
- Dronkers J., Zimmerman J. T. F., 1982. Some principles of mixing in tidal lagoons. *Oceanologica Acta*, Proceedings International Symposium on coastal lagoons, SCOR/IABO/UNESCO, Bordeaux, France, 8-14 September 1981, 107-117.
- Fichot E., 1912. Rapport sur la reconnaissance hydrographique de l'embouchure de la Gironde. Recherches hydrographiques sur le régime des côtes, dix-neuvième cahier (1911-1914), p. 12-82.
- 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.
- L'Yavanc, 1995. Evolution bathymétrique et morphologique du Bassin d'Arcachon. Rapport Ifremer DEL 12-95, 82 p. + annexes.
- Manaud F., Bouchet J.M., Deltreil J.P., Maurer D., Trut G., Auby I., Dreno J.P., L'Yavanc J., Masson N., Pellier C., 1997. Etude intégrée du Bassin d'Arcachon. Tome 1 : Physique ; Tome 2 : Qualité de l'eau et des sédiments ; Tome 3 : Biologie ; Tome 4 : Activités ; Tome 5 : Activités ressources vivantes. Rapport Interne DEL/Arcachon.

- 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.
- Plus M., Durand N., 2004. Le modèle hydrodynamique du Bassin d'Arcachon, description générale et validation. Rapport interne Ifremer DEL/AR 04-04, 29 p.
- Radach G., Moll A., 2006. Review of three-dimensional ecological modelling related to the North Sea shelf system. Part II: Model validation and data needs. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 44, 1-60.
- 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.
- 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.

ANNEXES

A. Carte du Bassin d'Arcachon

Position des lieux-dits, rivières, chenaux mentionnés dans le rapport.



B. Courants simulés à Arcachon (coefficient 70).





