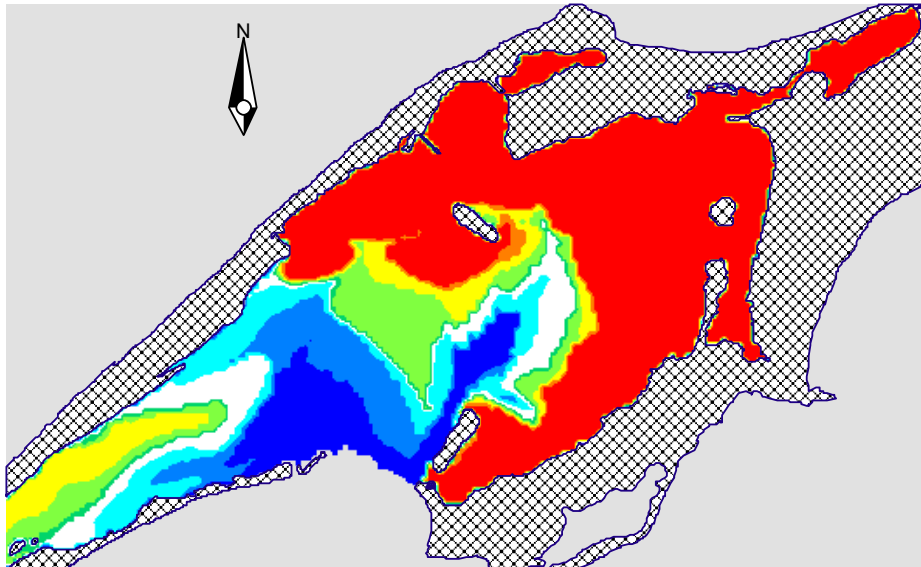


TEMPS DE RENOUVELLEMENT DES EAUX DANS LA LAGUNE DE GRANDE-ENTRÉE AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE



Vladimir G. Koutitonsky, ISMER
Guglielmo Tita, MAPAQ-UQAR

Rapport de recherche LHE-04-1
Laboratoire d'hydraulique environnementale
Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER)
Université du Québec à Rimouski
Rimouski, QC

Pour

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)
Îles-de-la-Madeleine, QC

Juin 2004

Ce rapport de recherche a été produit par le Laboratoire d'hydraulique Environnementale de l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER). Université du Québec à Rimouski.

Des exemplaires de ce rapport peuvent être obtenus à l'adresse suivante :

MAPAQ – DIT
Bureau d'édition
96, montée de Sandy Beach, bureau 205
Gaspé (Québec) G4X 2V6

Votre demande doit être accompagnée d'un chèque fait l'ordre du ministre des Finances

Coût unitaire : 10 \$

Cette publication est également disponible sans frais en format électronique à l'adresse suivante :

<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Peches/md/Publications/>

ISBN (version imprimée) : 2-550-46228-9
ISBN (version pdf) : 2-550-46229-7

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec, 2006
Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Canada, 2006

On doit citer cette publication comme suit :

KOUTITONSKY, V.G. et G. TITA. 2006. Temps de renouvellement des eaux dans la lagune de Grande-Entrée aux Îles-de-la-Madeleine. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Rapport de recherche-développement n° 151. 73 p.

N.B. La série « Rapport de recherche-développement » remplace désormais celle connue sous le nom de « Cahier d'information ». Cependant, la numérotation des documents se poursuit malgré ce changement de nom.

TABLE DES MATIÈRES

	Résumé	iii
	Liste des figures.....	vii
	Liste des tableaux.....	xi
	Remerciements.....	xiii
1.	INTRODUCTION	1
2.	OBJECTIF	4
3.	MÉTHODES.....	4
	3.1 Modèles numériques	5
	3.1.2 Grille de calcul	8
	3.1.3 Scénarios de calcul du temps de renouvellement	9
	3.1.4 Intrants.....	9
	3.1.5 Extrants.....	11
	3.2 Observations et méthodes d'analyse	11
	3.2.1 Niveaux de l'eau	11
	3.2.2 Vents.....	12
4.	RÉSULTATS	13
	4.1 Niveaux et vents observés en 2001	13
	4.2 Validation du modèle hydrodynamique	14
	4.3 Propagation et mélange des eaux du Golfe dans les lagunes	15
	4.4 Temps de renouvellement local.....	16
	4.5 Temps de renouvellement intégral	18
	4.5.1 Région est de la lagune de Grande-Entrée	18
	4.5.2 Sites de culture	19
5.	CONCLUSION.....	19
6.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	219

RÉSUMÉ

La lagune de Grande-Entrée, aux Îles-de-la-Madeleine, offre un bon potentiel pour la mariculture de bivalves. Cependant, un développement intensif de la mariculture dans cette lagune pourrait affecter la pérennité de la production et la viabilité économique de l'industrie maricole. Une bonne connaissance de la capacité de support de la lagune pour la mariculture est donc essentielle au développement l'industrie.

La capacité de support est définie ici comme étant est la quantité maximale de bivalves que l'on peut cultiver dans une lagune sans affecter la pérennité et la productivité de la culture, ainsi que la santé de l'écosystème. Elle dépend, entre autres, du temps de renouvellement des eaux dans la lagune et plus particulièrement aux sites de culture. Un renouvellement efficace contribuera au lessivage des rejets organiques et inorganiques des bivalves et à l'apport d'oxygène et de nourriture sous forme de seston aux sites de mariculture. Une fois connu, le temps de renouvellement peut être exploité dans le cadre d'une recherche écosystémique visant à estimer la capacité de support de la lagune.

L'objectif de cette étude est de calculer le temps de renouvellement des eaux dans la région est de la lagune de Grande-Entrée où se trouvent les sites de mariculture. La méthode utilisée est celle de l'advection-dispersion d'un traceur soluble. Elle fait appel à des modèles numériques d'hydrodynamique et d'advection-dispersion en trois dimensions pour estimer, à chaque maille d'une grille de calcul, le temps nécessaire à la concentration de l'eau locale d'être diluée à 38 % de sa valeur initiale par des eaux en provenance de l'extérieur, du Golfe Saint-Laurent dans ce cas. Ce temps est appelé le temps de renouvellement local (Koutitonsky et al., 2004a) de l'eau à cet endroit précis de la lagune. Le résultat du calcul numérique sera une distribution spatiale du temps de renouvellement local dans la lagune. La moyenne de ces temps locaux prise sur une région d'intérêt (e.g. un site d'une moulière ou l'ensemble de la lagune) permet ensuite d'estimer le temps de renouvellement intégral des eaux dans cette région.

Les simulations numériques ont été effectuées sous deux conditions de forçage hydrodynamique : un forçage par la marée et un forçage par la combinaison des vents

et des marées. Les modèles numériques utilisés sont les modules hydrodynamique (HD) et advection-dispersion (AD) du système de modélisation numérique environnementale en trois dimensions MIKE3, distribué par la Danish Hydraulic Institute (www.dhi.dk). La grille de calcul utilisée comprend des mailles de dimensions horizontales de 90 m x 90 m et huit couches sur l'axe vertical, chacune d'une épaisseur de 1 m. Elle inclut les lagunes de Grande-Entrée (LGE) et de Havre aux Maisons (LHM) et elle est forcée par des niveaux d'eau mesurés à l'extérieur des entrées des lagunes durant 45 jours en 2001. L'analyse des séries de vents durant ces mêmes 45 jours a montré qu'ils ont d'abord soufflé de la LGE vers la LHM durant une dizaine de jours et ensuite majoritairement de la LHM vers la LGE. L'analyse des séries de niveau d'eau a aussi montré un gradient horizontal entre les niveaux aux entrées des deux lagunes.

Lorsque les modèles sont forcés uniquement par la marée, l'excursion tidale des eaux du Golfe dans les lagunes reste confinée à la région sud-ouest du chenal de navigation dans la LGE et dans la partie ouest de la LHM. Il en ressort que les eaux dans les bassins profonds de ces lagunes, où se trouvent les sites de mariculture de bivalves, ne sont pas renouvelées par les marées. Lorsque les vents et les niveaux de basse fréquence mesurés en 2001 sont ajoutés aux marées dans les modèles, les eaux du Golfe envahissent d'abord la LHM et progressent ensuite par l'intérieur à travers le Pont du Détroit vers la LGE où elles contribuent au renouvellement des eaux dans cette lagune.

Dans la partie est de la LGE, le temps de renouvellement local sous l'effet unique de la marée varie de 1 à 10 jours dans la partie sud et à l'ouest du chenal de navigation alors que dans le bassin profond et les moulières, ce temps est de l'ordre de 40 jours et plus. Lorsque les vents sont inclus dans les modèles, les temps de renouvellement locaux baissent à environ 20 – 25 jours pour le centre du bassin profond de la lagune et les moulières. Dans les deux conditions hydrodynamiques (marée et marée + vents) on ne distingue pas de différences significatives entre le mélange dans la couche de surface et près du fond. Dans les deux cas, les temps de renouvellement locaux demeurent élevés dans la baie Clarke.

Le temps de renouvellement intégral calculé ensuite pour l'ensemble de la partie est de la lagune sous l'effet unique des marées est de l'ordre de 40 jours alors qu'avec l'effet

des vents, ce temps baisse à 11 jours pour cette partie de la lagune. Lorsque le calcul du temps intégral est appliqué uniquement à la surface des sites de moules et de pétoncles plus au nord, les résultats indiquent que la marée ne renouvelle pas les eaux au site de pétoncles et qu'elle renouvellerait les eaux au site des moules en environ 60 jours. Finalement, lorsque le vent est considéré dans le calcul du temps de renouvellement intégral à ces deux sites, ces temps sont de l'ordre de 20 jours à chacun des sites.

En conclusion, les temps de renouvellement des eaux aux sites de culture de moules et de pétoncles dans la lagune de Grande-Entrée sous l'effet unique de la marée sont de l'ordre de 60 jours et plus alors qu'avec l'effet des vents, ces temps sont de l'ordre de 20 jours mais pourront varier en fonction des saisons et des années selon les systèmes météorologiques en présence.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Lagunes des Îles-de-la-Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent, avec les isobathes de -5, -10 et -20 m par rapport aux mers les plus basses.....	30
Figure 2 :	Section nord-est de la lagune de Grande-Entrée, avec les sites de mariculture de moules (A, B) et de pétoncles (C), et les isobathes de -2, -5, -10 et -20 m par rapport aux mers les plus basses.....	31
Figure 3 :	Grille de calcul des modèles numériques des lagunes Grande-Entrée et Havre-aux-Maisons, avec les positions des frontières ouvertes (lignes en tirets) et des stations de mesure du niveau de l'eau (cercles). Les mailles sont représentées par intervalles de 5 x 5.....	32
Figure 4 :	Positions des stations de mesure du vent (station M, haut), et du niveau de l'eau à l'extérieur de l'embouchure de la lagune de Havre-aux-Maisons (station 1, haut) et de la lagune de Grande-Entrée (station 9, bas) en 2001.	33
Figure 5 :	Positions des stations de mesure du niveau de l'eau imposé aux frontières ouvertes du modèle (1 et 9) et des niveaux de l'eau utilisés pour la validation du modèle (3, 4, 5, 6, 7).....	34
Figure 6 :	Niveaux d'eau horaires (traits pleins) et filtrés passe-bas (traits pointillés) aux stations 1 et 9, à l'extérieur des embouchures des lagunes de Havre-aux-Maisons (LHM) et Grande-Entrée (LGE), respectivement.....	35
Figure 7 :	Rose des vents mesurés au Cap Alright (figure 3) de mai à juillet 2001.	36
Figure 8 :	Oscillations de basse-fréquence du vent (haut) à Cap Alright et des niveaux d'eau (bas) aux stations 1 et 9 à l'extérieur des lagunes de Havre-aux-Maisons (LHM) et Grande-Entrée (LGE).....	37
Figure 9 :	Concentrations initiales C_0 imposées au modèle d'advection-dispersion au temps T_0 , soit 20 h le 24 mai 2001. Dans les lagunes, ces concentrations sont $C_0 = 1$ (rouge) et dans le Golfe elles sont $C_0 = 0$ (bleu).	38
Figure 10 :	Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 105, soit le 29 mai 2001 ou $T = T_0 + 4,38$ jours.	39
Figure 11 :	Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 228, soit le 3 juin 2001 ou $T = T_0 + 9,50$ jours.....	40

- Figure 12 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 350, soit le 8 juin 2001 ou $T = T_0 + 14,58$ jours.....41
- Figure 13 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 475, soit le 13 juin 2001 ou $T = T_0 + 19,79$ jours.....42
- Figure 14 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 601, soit le 18 juin 2001 ou $T = T_0 + 25,04$ jours.....43
- Figure 15 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 725, soit le 24 juin 2001 ou $T = T_0 + 30,17$ jours.....44
- Figure 16 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 849, soit le 29 juin 2001 ou $T = T_0 + 35,38$ jours.....45
- Figure 17 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 972, soit le 4 juillet 2001 ou $T = T_0 + 40,50$ jours.46
- Figure 18 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 1095, soit le 9 juillet 2001 ou $T = T_0 + 45,63$ jours.47
- Figure 19 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche de surface (0 - 1.5 m) de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).48
- Figure 20 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 1,5 – 2,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).49

Figure 21 :	Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 2,5 – 3,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).	50
Figure 22 :	Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 3,5 - 4,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).	51
Figure 23 :	Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 4,5 - 5,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).	52
Figure 24 :	Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 5,5 - 6,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).	53
Figure 25 :	Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche du fond 6,5 - 7,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).	54
Figure 26 :	Régions incluses dans le calcul du temps de renouvellement intégral : (a) la région à l'est de la lagune de Grande-Entrée, figure du haut, et (b) les sites de culture de pétoncles (A) et de moules (B), figure du bas.	55
Figure 27 :	Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans la région est de la LGE (voir figure 2) par les marées (haut) et par la combinaison des marées et vents (bas), du 24 mai au 7 juillet 2001. Le temps de renouvellement intégral (flèches rouges) correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées.....	56
Figure 28 :	Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans les sites de culture de pétoncles (A) et de moules (B) dans la LGE (voir figure 16b), sous l'effet des marées (haut) et des vents et marées (bas), du 24 mai au 9 juillet 2001. Le temps de renouvellement intégral (flèche) correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées (tirets).	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dimensions des couches dans la grille numérique de calcul de la lagune de Grande-Entrée, du Pont du Déroit au sud-ouest à l'entrée de la lagune (figure 3) . On y retrouve le nombre de mailles mouillées dans chaque couche verticale, ainsi que la superficie et le volume de ces couches, la couche 8 étant en surface et la couche 1 près du fond.	26
Tableau 2 : Amplitude et phase des composantes K1 (marée diurne) et M2 (marée semi-diurne) extraites par l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés du 23 mai au 10 juillet 2001 à l'extérieur des lagunes Havre-aux-Maisons (station 1) et Grande-Entrée (station 9), avec leurs intervalles de confiance à 95 %, d'après Koutitonsky (2004b).	27
Tableau 3 : Comparaison des amplitudes et des phases des constituantes harmoniques K1 et M2 de la marée obtenues par l'analyse harmonique des niveaux observés (<i>OBS</i>) et simulés (<i>MOD</i>) aux stations 3 à 7 (Koutitonsky, 2004b). Les amplitudes et phases des composantes observées aux stations 1 et 9 sont aussi incluses à titre d'information.	28

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec pour avoir bien voulu financer cette étude. Nous remercions aussi monsieur Bruno Myrand, responsable de la station du MAPAQ aux Îles-de-la-Madeleine pour l'accueil et le support logistique qu'il offre aux équipes de l'ISMER depuis plusieurs années.

1. INTRODUCTION

La lagune de Grande-Entrée (LGE) est située au nord-est des Îles-de-la-Madeleine, au centre du Golfe Saint-Laurent (figure 1). En plus d'échanger ses eaux avec celles du Golfe, la lagune communique par une passe étroite sous le Pont du Déroit avec une deuxième lagune située au sud-ouest, la lagune de Havre-aux-Maisons (figure 1).

Compte tenu de son libre échange avec les eaux du Golfe et de la présence d'un bassin relativement profond (6 m) à l'est du chenal de navigation, la lagune de Grande-Entrée offre un potentiel intéressant pour le développement de l'industrie maricole (Poirier, 1977). D'ailleurs, on y retrouve déjà dans sa partie est des activités mytilicoles et pectinicoles. La disposition actuelle (2003) des sites de culture de moules (A, B) et de pétoncles (C) dans le bassin profond de la LGE est illustrée à la figure 2, avec les isobathes de 2, 5, 10 et 20 m exprimés par rapport à la mer la plus basse.

Cependant, le développement d'une mariculture intensive dans cette lagune pourrait modifier le fonctionnement de son écosystème et, par conséquent, affecter la pérennité de la production maricole et sa viabilité économique. Une bonne connaissance du fonctionnement de cet écosystème et de sa capacité de support pour la mariculture est donc essentielle au développement d'une industrie maricole dans la lagune.

La capacité de support d'une lagune pour la mytiliculture peut être définie comme étant la quantité maximale de moules que l'on peut cultiver dans cette lagune sans affecter la pérennité et la productivité de la culture, ainsi que la santé de l'écosystème (Grant, 1999). Elle dépend, entre autres, du temps de renouvellement des eaux aux sites de culture. Un renouvellement efficace contribuera au lessivage des rejets organiques et inorganiques des moules et à l'apport d'oxygène et de nourriture sous forme de seston aux sites de mytiliculture. Une fois connu, le temps de renouvellement pourra être exploité dans le cadre d'une recherche écosystémique visant à estimer de la capacité de support de la lagune (e.g. Koutitonsky et al. 2003).

Le temps de renouvellement (TR) est le temps nécessaire au remplacement des eaux de la lagune par des eaux en provenance de l'extérieur, dans ce cas les eaux du Golfe

Saint-Laurent. Plus précisément, il correspond au temps nécessaire pour que les eaux de la lagune soient diluées à 38% de leur concentration initiale par des eaux en provenance de l'extérieur (Ranasinghe, R. and Pattiaratchi, C. 1998, Koutitonsky et al. 2004a). Ce temps dépendra principalement des processus hydrodynamiques qui animent la circulation et le mélange des eaux dans la lagune. Traditionnellement, le TR des eaux dans une baie ou une lagune est estimé par la méthode du prisme de marée (Dyer, 1989). Selon cette méthode, $TR = (V + P) \cdot T / P$, où P est le prisme de marée, c'est-à-dire le volume d'eau du Golfe entrant dans la lagune au cours d'une période de marée T et V est le volume de l'eau présent dans la lagune à marée basse. En supposant une amplitude moyenne de la marée d'environ 0,55 m (Booth, 1991), une profondeur moyenne de 3 m et un volume de $1,74 \times 10^8 \text{ m}^3$ (section 3.11), le temps de renouvellement des eaux estimé par cette méthode du prisme de marée serait d'environ 12 jours.

Cependant, la méthode du prisme tidal est valide uniquement lorsque les hypothèses suivantes sont vérifiées : (1) le volume d'eau échangé au cours d'une marée P se mélange complètement avec les eaux dans la lagune au cours du même cycle de marée, et (2) les eaux qui sortent de la lagune ne rentrent pas dans la lagune au cours de la marée suivante. Alors que l'hypothèse 2 serait acceptable si l'on considère la présence d'une circulation de basse-fréquence parallèle à la côte soit vers l'est ou l'ouest selon les vents (e.g. Koutitonsky et al. 2002), l'hypothèse du mélange complet des eaux du Golfe qui entrent dans la LGE au cours du même cycle de marée ne semble pas être valide. En effet, Booth (1991) suggère que seule une fraction α des eaux qui entrent dans la lagune à marée montante se mélange avec les eaux de la lagune et il estime que cette fraction varie entre 0,2 (20 %) par temps calme et 1 (100 %) par temps de forts vents. En d'autres termes, le temps de renouvellement de 12 jours serait une limite inférieure du temps de renouvellement des eaux dans la lagune. En effet, Koutitonsky et al. (2002) estiment que le temps de renouvellement des eaux à une station au sud-est du bassin profond de la LGE varie entre 12 et 20 jours. Ces auteurs expliquent que les eaux qui entrent dans la lagune se propagent dans le chenal de navigation et vers l'ouest à marée montante, de sorte que les eaux dans le bassin profond où se situe la moulière ne sont pas renouvelées efficacement par les marées et que ce serait plutôt le vent qui contribuerait à ce renouvellement.

La circulation tridimensionnelle induite par les vents qui soufflent le long de l'axe longitudinal dans la lagune de Grande-Entrée a été étudiée par Koutitonsky (2004b). Par exemple, lorsque des vents soufflent du sud-ouest (prédominants durant la période estivale), ils génèrent en quelques heures deux « courants de dérive » près des côtes, dans les parties peu profondes de la lagune et, par continuité, un courant de retour quelque part entre ces courants côtiers. Les courants de dérive sont orientés dans la direction du vent et contribuent à l'accumulation des eaux vers l'extrémité de la lagune dans la direction du vent. Cette accumulation produit une élévation du niveau ainsi qu'un gradient de pression horizontal. Les eaux accumulées en hauteur plongent et alimentent le courant de retour, appelé aussi « courant de pente ». Ce courant de pente se manifeste dans une direction opposée au vent et plutôt près du fond, loin de la friction du vent en surface.

Il en ressort que les variations spatiales des courants de marée et de vent contribueront à faire varier le temps de renouvellement des eaux dans l'étendue de la lagune de Grande-Entrée. Par conséquent, une distinction doit être faite entre deux échelles temporelle de renouvellement (Koutitonsky et al. 2004a) :

- (1) un temps de renouvellement intégral TRI, qui caractérise l'ensemble de la lagune;
- (2) un temps de renouvellement local TRL, qui caractérise chaque endroit x, y, z de la lagune.

Conceptuellement, le TRI de la lagune est la moyenne spatiale des TRL sur l'ensemble de la lagune. Alors que le TRI sert à distinguer le renouvellement des eaux dans une lagune par rapport à une autre pour des fins de gestion environnementale de la mariculture, la distribution spatiale du TRL sert à déterminer l'emplacement optimal d'un site de mariculture à l'intérieur d'une même lagune.

2. OBJECTIF

L'objectif de cette étude est d'estimer le temps de renouvellement intégral (TRI) et la distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux (TRL) dans la lagune de Grande-Entrée sous l'effet des marées et des vents et en période sans couverture glacière.

3. MÉTHODES

La méthode proposée pour estimer la distribution spatiale du temps de renouvellement des eaux a été décrite par Koutitonsky et al. (2004a). Elle est basée sur l'utilisation de modèles numériques couplés de circulation et d'advection-dispersion d'un traceur conservateur en trois dimensions (3D). Elle permet d'estimer le temps de renouvellement des eaux en chaque point de la grille de calcul et le résultat est la carte de distribution spatiale du temps de renouvellement local ou TRL. Ce temps sera défini comme étant le temps nécessaire pour qu'une fraction significative du volume initial de l'eau en un point de la lagune soit dilué par des eaux en provenance du Golfe. Normalement, la fraction significative du volume d'eau renouvelé a été adoptée comme étant égale à $(1 - 1/e)$, ou bien 62 % (e.g. Ranasinghe and Pattiaratchi, 1998; Abdelrhmanm, 2002; Arneborg, 2004). Les résultats de la modélisation numérique de la dilution des eaux dans la lagune par des eaux en provenance de l'extérieur permettent d'identifier et d'enregistrer à chaque maille de la grille de calcul le temps auquel l'eau atteint cette dilution. Le résultat est une carte de distribution spatiale du TRL. Enfin, la moyenne des TRL dans la lagune, ou dans une région d'intérêt, sera le TRI dans cette lagune ou dans cette région.

L'utilisation des modèles numériques pour l'estimation des TRL et TRI nécessite des mesures simultanées de niveau d'eau et de vent afin de les imposer respectivement en surface et aux extrémités latérales ouvertes de la grille de calcul. Les modèles numériques et les mesures utilisées aux frontières sont décrits respectivement aux sections 3.1 et 3.2 ci-dessous.

3.1 MODÈLES NUMÉRIQUES

Le circulation tridimensionnelle des eaux dans le système lagunaire LGE - LHM a été étudiée à l'aide du module hydrodynamique (HD) du système intégré de modélisation hydraulique environnementale MIKE3 conçu et distribué par l'Institut hydraulique danois (DHI, 2000).

Le modèle MIKE3-HD résout les équations tridimensionnelles de la conservation de la masse, du mouvement, de la salinité et de la température en tenant compte des variations de la densité, de la bathymétrie et des forces externes telles que les rivières, les marées, et les effets du vent et de la pression atmosphérique en surface et aux frontières ouvertes. Le modèle permet aussi aux zones intertidales peu profondes de se découvrir à marée basse ou lors de tempêtes de vent. Ces équations dans un système de coordonnées de main droite sont (Rasmussen, 1993) :

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = SS \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right\} + u_i SS \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (S u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + SS \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + SS \quad (4)$$

où ρ est la densité locale, c_s est la vitesse du son dans l'eau de mer, u_i et u_j sont les composantes de la vitesse dans les directions x_i et x_j , Ω_{ij} est le tenseur de Coriolis, P est la pression du fluide, g_i est le vecteur d'accélération de gravité, ν_T est le coefficient de viscosité turbulente, δ_{ij} est le Kronecker's delta, k est l'énergie turbulente cinétique, S et T sont les salinité et température locales, D_s and D_T sont les coefficients de dispersion associés, et t dénote le temps. Les termes SS sont des termes de source (apparition) et de puits (disparition) qui sont différents selon les équations. La salinité, la

température et la pression sont liées à la densité par les définitions de l'UNESCO (1981). Ces équations sont appropriées aux mouvements tridimensionnels où les vitesses verticales peuvent à l'occasion adopter des valeurs du même ordre de grandeur que les vitesses horizontales. Il est à noter que MIKE3-HD offre aussi l'option hydrostatique pour l'équilibre du mouvement vertical.

Les équations 1 à 4 sont résolues à l'aide de schémas numériques en différence finie sur une grille du type Arakawa-C en imposant des conditions de niveau ou de courant, de salinité et de température aux frontières ouvertes. Dans l'axe vertical, les mailles de calcul ont des épaisseurs Δz égales à l'exception de la couche de surface où l'épaisseur est de $1,5 \Delta z$ et au fond où l'épaisseur est déterminée par la distance séparant le bas de l'avant-dernière couche et le fond. Les algorithmes d'intégration utilisés dans MIKE3-HD permettent d'obtenir des solutions stables au système d'équations 1–4, en autant que le nombre de Courant demeure inférieur à 5. Plusieurs options sont offertes dans le modèle pour le calcul du coefficient de viscosité turbulente ν_T : (i) un coefficient constant, (ii) un coefficient variant dans le temps en fonction des gradients locaux de vitesse selon la formulation de Smagorinsky (1963), (iii) à partir d'un modèle de fermeture turbulente du type k (Rodi, 1980), (iv) à partir d'un modèle de fermeture turbulente du type k- ε (Rodi, 1980) et (v) à partir d'un modèle de fermeture turbulente mixte avec un modèle 1D de type vertical et d'un modèle k- ε de type horizontal. La formulation choisie ici est celle de Smagorinsky :

$$\nu_T = l^2 \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ji}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

où l est une échelle de longueur remplacée dans le modèle MIKE3-HD par le produit $C_{Sm} \cdot \Delta s$. Ici, Δs est la dimension de la maille et C_{Sm} est une constante assignée à chaque direction x_i . Les valeurs de C_{Sm} utilisées ici sont de 0,088 pour les dimensions horizontales et de 0,176 pour la dimension verticale. Une description détaillée des autres options de calcul de ν_T est présentée par DHI (2000).

En surface, le cisaillement du vent est calculé selon :

$$\bar{\tau}_w = \rho_a C_w \bar{W} |\bar{W}| \quad (7)$$

où \bar{W} est le vecteur de vitesse du vent à 10 m au-dessus du niveau de l'eau, ρ_a est la densité de l'air, et C_w est un coefficient de traînée du vent qui peut être constant (0,0026) ou varier en fonction de la vitesse du vent. Au fond, la résistance offerte à l'eau est aussi exprimée en terme d'un coefficient de traînée selon :

$$\bar{\tau}_b = \rho C_b \bar{u}^* |\bar{u}^*| \quad (8)$$

où u^* est la vitesse locale calculée dans la couche au dessus du fond. Lorsque la formulation de Smagorinsky est utilisée pour ν_T , ce coefficient est estimé selon :

$$C_b = \left\{ \frac{2H\sqrt{2}}{3l} \left[\left(1 - \frac{z_m}{H}\right)^{3/2} - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{3/2} \right] + \frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{z_m}{k_s/30}\right) \right\}^{-2} \quad (9)$$

où z_m est la distance au-dessus du fond où le profil de Smagorinsky rejoint le profil logarithmique, H est la profondeur actuelle de l'eau, κ est la constante de von Karman, k_s est l'échelle de distance de la rugosité du fond, et z est la distance entre le fond et le premier nœud de calcul au-dessus du fond.

La dispersion des eaux du Golfe Saint-Laurent dans la lagune de Grande-Entrée a été étudiée à l'aide du module d'advection-dispersion MIKE3-AD. Ce module résout par la méthode des différences finies l'équation différentielle partielle décrivant l'advection-dispersion d'une substance dissoute dans un fluide incompressible qui satisfait la relation de continuité (1). Cette équation est :

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ D_j \frac{\partial c}{\partial x_j} \right\} + SS \quad (10)$$

où l'opérateur $\frac{D}{Dt}$ est la dérivée totale, c'est la concentration de la substance dissoute, SS sont des termes de source et de puits et D_j sont les coefficients de dispersion proportionnels aux composantes de la vitesse locale u_j . L'algorithme numérique utilisé pour résoudre l'équation (10) est un schéma en différence finie d'une précision de troisième ordre du type QUICKEST 3D (Vested et al., 1992). Dans ce schéma, les coefficients de dispersion sans dimension δ_j dans les directions $j = 1, 2, 3$ sont contraints par les dimensions Δs_j de la maille de calcul et par le pas temporel Δt selon le critère :

$$\sum_{j=1}^3 \delta_j = \frac{D_j \Delta t}{(\Delta s_j)^2} < 0.5 \quad (11)$$

Le module AD effectue ses calculs d'advection-dispersion en même temps, et aux mêmes pas temporels de calcul, que le module hydrodynamique HD.

3.1.2 Grille de calcul

La grille de calcul conçue pour le système lagunaire étudié est présentée à la figure 3. Elle comprend 360 mailles en X (+ vers l'est) et 298 mailles en Y (+ vers le nord). L'inclusion de la LHM dans la grille du modèle a été jugée indispensable car la LGE reçoit dans certaines conditions de vent des eaux de la LHM qui, à son tour, voit aussi ses eaux renouvelées par celles du Golfe. En somme, les eaux du Golfe vont renouveler les eaux de la LGE par la passe de Grande-Entrée et par le biais de la LHM.

L'origine est centrée à la latitude $47^{\circ} 39' 09''$ nord et la longitude $61^{\circ} 87' 30''$ ouest et les mailles ont des dimensions horizontales de 90 m x 90 m. Sur le plan vertical, la grille est divisée en 8 couches d'une épaisseur de 1 m chacune, excepté près de la surface où l'épaisseur est de 1,5 m et près du fond où l'épaisseur varie entre 0 et 1 m en fonction de la profondeur maximale. Lorsque la surface instantanée de l'eau baisse (e.g. marée basse), le modèle MIKE3-HD permet aux mailles de faible profondeur en surface de se découvrir jusqu'au moment où le niveau de l'eau remonte. La profondeur assignée à

chaque maille est obtenue par interpolation des données des cartes bathymétriques du service hydrographique canadien portant les numéros 4951, 4952, 4954, 4955 et 4956 et d'autres cartes bathymétriques de l'intérieur des lagunes (e.g. Tiphane, M. 1976). Compte tenu de l'absence de données bathymétriques à certains endroits, notamment dans la LHM près de son embouchure, les profondeurs assignées à ces endroits sont approximatives.

La grille de calcul comprend deux frontières ouvertes (figure 3). La première est à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune de LHM ($x = 20$ à $x = 56$ et $y = 0,0$) et la deuxième est à l'extérieur de la passe de la LGE ($x = 243$ à 263 et $y = 195,195$). Quelques statistiques sur les surfaces et volumes des couches de la grille dans la LGE, c'est-à-dire du Pont du Détroit jusqu'à son embouchure à la passe de Grande-Entrée, sont présentés au tableau 1. La superficie de la lagune est de $73,86 \text{ km}^2$, son volume est de $204\,955\,590 \text{ m}^3$ (ou $0,2 \text{ km}^3$), sa profondeur moyenne est de $2,77 \text{ m}$ et sa profondeur maximale est de $7,8 \text{ m}$.

3.1.3 Scénarios de calcul du temps de renouvellement

Les temps de renouvellement intégral et local dans la LGE seront calculés pour les deux scénarios hydrodynamiques suivants :

1. Renouvellement par les marées sans vents;
2. Renouvellement par les marées et les vents.

Les simulations numériques des deux scénarios sont effectuées à l'aide des données de vent et de niveaux d'eau mesurées par l'ISMER en 2001 (Koutitonsky, 2004c). Ces données et les méthodes d'analyse utilisées sont décrites à la section 3.2.

3.1.4 Intrants

Les intrants au module HD sont :

- Choix de la version non hydrostatique du modèle HD afin de bien représenter les mouvements verticaux aux côtés du chenal de navigation;
- La grille de calcul avec des profondeurs (négatives) interpolées à chacune des $107\,280$ mailles de calcul. Une hauteur de 10 m est assignée aux mailles représentant la terre;

- La durée de la simulation débute à 20 h, le 24 mai 2001 et se termine à 16 h, le 9 juillet 2001;
- Le pas temporel de calcul est de 6 secondes, ce qui donne 660 000 pas de calcul et un nombre de Courant de 0,59 pour les profondeurs assignées. Le nombre de Courant est le rapport entre la longueur d'un côté de la maille et la distance parcourue par une onde de faible amplitude au cours d'un pas temporel de calcul.
- L'élévation initiale est fixée à $z = 0$ m;
- La formulation du mélange turbulent des eaux, ici la formulation de Smagorinski, avec un coefficient constant de 0,088 en horizontal et de 0,176 en vertical;
- Les limites de variation du coefficient de viscosité turbulente de $0 - 2\,700\text{ m}^2/\text{s}$ en X et Y et de 0 à $0,33\text{ m}^2/\text{s}$ en Z;
- Les conditions aux frontières ouvertes de la grille sont les niveaux d'eau mesurés aux stations 1 et 9 et lissés (voir section 3.2);
- Les conditions initiales de température T et salinité S, et maintenues constantes durant la simulation, sont $T = 10^\circ\text{C}$ et $S = 30$. Ceci suppose dans un premier temps que la densité de l'eau est homogène dans la lagune, ce qui semble être le cas la plupart du temps (Booth, 1991; Koutitonsky et al., 2002);
- Lorsque requis (simulations avec vents), le vent horaire en surface mesuré à Cap Alright en 2001 (Koutitonsky et al. 2004c) est appliqué en surface. Le coefficient de cisaillement du vent utilisé est constant et égal à 0,002;
- Aucun apport d'eau de rivière avoisinante ou d'eau souterraine;
- Évaporation et précipitation sont nulles.

Les intrants au module AD sont :

- Une concentration initiale d'un traceur conservateur $C = 1$ dans la lagune et 0 à l'extérieur;
- Une condition de concentration $C = 0$ à la frontière ouverte durant la simulation;
- Une dispersion proportionnelle à la viscosité turbulente dans les trois directions, avec des limites supérieures imposées sur les coefficients de mélange de $50\text{ m}^2/\text{s}$ au niveau horizontal et de $0,0033$ au niveau vertical;
- Pas de source externes ou de perte (puits) de concentration durant la simulation.

3.1.5 Extrants

Les sorties ou les extrants des modules HD sont (i) les vitesses u , v et w à chacune des mailles mouillées des huit couches et (ii) le niveau de l'eau, à une fréquence d'une sortie par heure. Une option du module HD a aussi permis de retenir en sortie le flux de volume à travers l'entrée de la lagune à chaque heure durant la simulation. La sortie du module AD est la concentration du traceur dans chacune des mailles mouillées, à la même fréquence d'une sortie par heure. Finalement, le module de post-traitement MIKE3 - PP permet aussi d'animer en fichier *.avi (vidéo) l'évolution temporelle des variables calculées par les modules HD et AD. Ces animations sont disponibles sous forme de disque compact (CD).

3.2 OBSERVATIONS ET MÉTHODES D'ANALYSE

3.2.1 Niveaux de l'eau

Les niveaux d'eau imposés aux frontières ouvertes du modèle hydrodynamique sont des séries de niveaux enregistrées aux stations 1 et 9, respectivement à l'extérieur des embouchures des lagunes HAM et LGE (figures 3 et 4). Par ailleurs, les résultats du modèle hydrodynamique ont été validés à l'aide des mesures de niveau enregistrées simultanément aux stations 3 à 7 à l'intérieur des lagunes (figures 5). Les marégraphes utilisés à toutes ces stations sont des marégraphes submersibles de l'ISMER du type Coastal Leasing MicroTide ou Aanderaa WLR7. La période de mesure des marégraphes était du 23 mai au 10 juillet 2001 et le pas temporel d'enregistrement était de 20 minutes. Ces mesures de niveau ont été effectuées dans le cadre d'une de la propagation de la marée dans les lagunes (Koutitonsky, 2004b).

Les séries de niveaux d'eau ont ensuite été traités par les méthodes suivantes. D'abord, la série horaire de pression atmosphérique, mesurée en même temps à la station M (figure 4), est dépourvue de sa moyenne afin d'obtenir les fluctuations de la pression atmosphérique. Ces fluctuations sont ensuite interpolées aux 20 minutes et soustraites des séries de pression hydrostatique enregistrée par les marégraphes submersibles. Les séries résultantes de pression hydrostatique ainsi « ajustées » sont alors converties en séries de niveau d'eau en assumant que dans des eaux peu profondes et bien mélangées, une fluctuation de 1 mb de pression hydrostatique équivaut à une fluctuation

de -1 cm du niveau de l'eau. Ces séries de niveau d'eau ajusté sont ensuite soumises à un opérateur de lissage du type $\{A_{n+1}^2 \cdot A_n / [(n+1) \cdot n]\}$ décrit par Godin (1972). Ceci permet d'extraire des séries les fluctuations dont les périodes sont d'une heure ou moins et ainsi éviter le phénomène de « aliasing » lors d'une décimation ultérieure des séries à un pas temporel horaire. Ce sont ces séries lissées et décimées qui sont imposées aux frontières ouvertes du modèle hydrodynamique MIKE3-HD au cours des scénarios de simulation 1 et 2 (section 3.1.3).

La validation du modèle hydrodynamique MIKE3-HD a consisté à comparer les résultats d'une analyse harmonique des séries de niveau d'eau observé (Koutitonsky, 2004b) et simulé par le modèle à six endroits (stations 2 à 7, figure 5) à l'intérieur des deux lagunes. L'analyse harmonique (Foreman, 1977) permet de décomposer la variance totale des fluctuations du niveau de l'eau en une série de variances associées à des harmoniques connues de la marée et un signal résiduel à la somme de ces composantes. Les résultats de l'analyse sont les amplitudes et phases relatives des composantes harmoniques de la marée.

Finalement, les séries horaires peuvent être filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas (Walters and Heston, 1982) pour en éliminer les fluctuations de la marée et « passer » uniquement les fluctuations de basses fréquences ou de longues périodes. Ces fluctuations de basse fréquence sont généralement attribuées aux forces météorologiques tel que le cisaillement du vent local, l'effet inverse de la pression atmosphérique et les forces non locales au large qui se manifestent par les fluctuations de basse fréquence à l'entrée de la lagune (Koutitonsky et al. 2002). La longueur des séries de niveau disponibles pour les simulation s'étend de 20 h le 24 mai 2001 à 15 h le 9 juillet 2001, soit environ 45 jours.

3.2.2 Vents

Les vents imposés lors des simulations hydrodynamiques du scénario 2 ont été enregistrés avec la pression atmosphérique de mai à octobre 2001, aux 20 minutes, au Cap Alright, Havre-aux-Maisons (station M, figure 5). La station météorologique utilisée est une station de l'ISMER à enregistrement autonome du type Aanderaa AWS.

4. RÉSULTATS

4.1 NIVEAUX ET VENTS OBSERVÉS EN 2001

Les séries temporelles de niveaux d'eau imposés aux frontières ouvertes du modèle hydrodynamique MIKE3-HD sont présentées à la figure 6, avec leurs composantes de basse-fréquence en traits pointillés. On constate que les amplitudes des marées sont bien plus importantes que celles des fluctuations de basse-fréquence causées par les vents et la pression atmosphérique agissant sur l'ensemble du Golfe Saint-Laurent. Ainsi, les marées seront la principale source de variation du niveau dans les lagunes.

Les analyses harmoniques de ces séries (Koutitonsky, 2004b) et de celles qui ont été mesurées en 1989 à l'extérieur des lagunes (Koutitonsky et al. 2002) ont suggéré la présence d'une légère avance de la phase des principales composantes de la marée diurne (K1) et semi-diurne (M 2) à la station 9 (extérieur de LGE) par rapport aux phases correspondantes à la station 1 (extérieur de LHM). Cette différence de phase serait à l'origine d'une intensification de la circulation tidale des lagunes, et particulièrement dans la région qui sépare les passes d'entrée des deux lagunes. Pour la LGE, cette région se trouve à l'ouest du chenal de navigation et exclut le bassin profond à l'est du chenal de navigation où se trouvent les sites maricoles. En effet, les courants de marée dans ce bassin sont presque nuls ($\sim 0,02$ m/s) alors qu'ils sont de l'ordre de 0,20 à 0,50 m/s à l'ouest du chenal (Koutitonsky et al. 2002 ; Koutitonsky et Booth, 1996). La circulation et le mélange des eaux dans le bassin profond seraient donc régis par les vents locaux.

Les séries temporelles des vents imposés au modèle numérique du 24 mai au 7 juillet 2001 sont les séries lissées et les horaires des vents mesurés à la station M (figures 4 et 5). À titre d'information, ces mesures sont presque identiques à celles qui sont mesurées par le Service météorologique d'Environnement Canada à Cap-aux-Meules. La rose des vents correspondante à la période de mesure des niveaux est présentée à la figure 7. On constate que les vents durant cette période ont soufflé majoritairement du sud et du sud-est. À quelques reprises, surtout au début de l'enregistrement, ils ont aussi soufflé de l'est. Des vents soufflant du cadran sud auront tendance à déplacer les eaux de la lagune de Havre-aux-Maisons vers la lagune de

Grande-Entrée et inversement pour des vents qui soufflent du cadran est ou nord-est. Un examen des séries temporelles des oscillations de basse-fréquence des vents et niveaux d'eaux aux entrées des lagunes (figure 8) révèle que du 24 mai au 5 juin, le niveau de l'eau dans la baie de Plaisance (station 1) était légèrement inférieur au niveau de l'eau à l'extérieur de Grande-Entrée (station 9) alors que du 5 juin jusqu'à la fin juin, la situation inverse se manifeste, c'est-à-dire que les niveaux dans la baie de Plaisance sont légèrement supérieurs à ceux de la station 9.

Cette différence de niveau entre les deux entrées des lagunes va produire un gradient de pression horizontal entre les lagunes, et ainsi contribuer à un transport des eaux de la LGE vers la LHM en début des simulations (24 mai au 5 juin) et un transport des eaux de la LHM vers la LGE le reste du temps. Il est à noter que cette situation s'applique uniquement à la période du 25 mai au début juillet 2001 et ne doit pas être généralisée à d'autres périodes de l'année ou à d'autres années. En plus, cette différence de niveau dépend non seulement des vents locaux mais d'un ajustement des eaux du Golfe Saint-Laurent aux larges champs de pression et de vent qui progressent au dessus du Golfe (Koutitonsky et Bugden, 1991).

4.2 VALIDATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

Les amplitudes et phases des composantes harmoniques K1 et M2 des niveaux simulés par le modèle hydrodynamique aux mêmes endroits que les niveaux mesurés aux stations 3 à 7 (figure 5) ont été extraites par analyse harmonique et comparées à celles des niveaux observés. Cette comparaison est présentée au tableau 3 (Koutitonsky, 2004b). À titre d'information, les amplitudes et phases des séries observées aux stations 1 et 9 (tableau 2) sont aussi incluses.

On constate que les amplitudes et phases des séries simulées sont très proches de celles des séries observées. Ceci indique que le modèle MIKE3-HD reproduit avec beaucoup d'exactitude la propagation de la marée dans les deux lagunes. Tel que discuté par Koutitonsky (2004b), on constate aussi que la marée met environ 3 heures à se propager de l'extérieur des lagunes vers la station 5 sous le Pont du Déroit, à l'intersection des deux lagunes et que son amplitude est réduite.

4.3 PROPAGATION ET MÉLANGE DES EAUX DU GOLFE DANS LES LAGUNES

La propagation et le mélange des eaux du Golfe dans les lagunes peuvent être suivis dans le temps en examinant l'évolution temporelle des concentrations des eaux dans les lagunes. En débutant les simulations avec des concentrations initiales de $C = 1$ dans les lagunes et $C = 0$ dans le Golfe (figure 9), une diminution des concentrations indiquera une augmentation de la proportion des eaux du Golfe dans les lagunes. Des résultats du modèle d'advection-dispersion à tous les 5 cycles de marée diurne sont présentés, à la même phase de la marée (e.g. marée haute), aux figures 10 à 18. Chaque figure comprend les concentrations des eaux dans les couches de surface et à 4 m sous la surface sous l'effet unique de la marée (haut de la figure) et les concentrations des eaux dans ces mêmes couches sous l'effet combiné des vents et marées (centre de la figure). La date des résultats est indiquée par une flèche pointant sur la série des niveaux observés à la station 9 (bas de la figure).

De façon générale, on constate que dans la LGE, l'intrusion des eaux du Golfe sous l'effet unique des marées se fait progressivement de la Grande-Entrée vers le pont du Détroit à l'intersection des deux lagunes et qu'il ne semble pas y avoir un renouvellement des eaux par la marée dans le bassin profond à l'est du chenal de navigation. Dans la lagune de HAM, en l'absence de vents, les eaux du Golfe demeurent confinées à l'ouest de la lagune et ne semblent pas se propager vers la partie centrale de cette lagune. Il est intéressant de constater que les eaux dans les bassins profonds des deux lagunes où se trouvent les sites de mariculture ne sont pas renouvelées efficacement par les marées. C'est donc le vent qui doit assurer le renouvellement des eaux dans les bassins relativement profonds.

Un examen de l'évolution des concentrations sous l'effet des marées et des vents, dans la couche de surface et près du fond, confirme que le renouvellement est bien plus efficace en présence du vent puisque la presque totalité des eaux dans les deux lagunes sont renouvelées après les 45 jours de simulation (e.g. figure 18). Deux facteurs météorologiques semblent contribuer à ce renouvellement : (i) la composante du vent parallèle à l'axe longitudinal des lagunes et (ii) la différence des niveaux de basse-fréquence entre les entrées des deux lagunes. Par exemple, en début de la période d'étude, du 24 mai au 5 juin, les vents soufflaient avec une légère tendance vers le

cadran ouest (figure 9), ce qui a contribué à un transport des eaux de la LGE vers la LHM, alors qu'après le 6 juin, les vents ont plutôt adopté une direction vers le cadran est et ainsi ont contribué au transport des eaux de la LHM à la LGE. Parallèlement, on note un changement du gradient horizontal des niveaux de basse fréquence aux entrées des lagunes (figure 9). Du 24 mai au 5 juin, le niveau à l'extérieur de Grande-Entrée est légèrement plus élevé que celui à Havre-aux-Maisons, alors qu'après le 6 juin c'est l'inverse. Le résultat à long terme est que les eaux du Golfe ont d'abord pénétré dans la LGE et ensuite, à partir du 6 juin, elles ont pénétré dans la LHM et ont progressé vers la LGE, renouvelant du même coup les eaux dans cette dernière aussi. Alors que le déplacement des eaux par le vent est un effet local, le transport des eaux par le gradient horizontal du niveau est un effet non local agissant à l'échelle du Golfe (Koutitonsky and Bugden, 1991).

On constate aussi que, tout comme pour le cas du forçage par la marée uniquement, il n'y a pas de différences significatives entre les concentrations en surface et près du fond. Dans le cas du forçage par la marée, c'est la colonne d'eau entière qui se déplace au cours de l'excursion tidale (mouvement de va-et-vient) et le mélange se fait par diffusion turbulente au contact avec les eaux de la lagune, alors que dans le cas du vent, ce dernier assure, avec la marée, un mélange diffusif dans la colonne d'eau et une advection (transport) des eaux vers d'autres régions des lagunes.

Finalement, il est important de noter que le renouvellement des eaux dans les lagunes par la marée sera constant dans le temps alors que le renouvellement par les facteurs météorologiques pourra varier en fonction des saisons et d'une année à une autre selon la prédominance et la durée des vents au dessus du Golfe Saint-Laurent.

4.4 TEMPS DE RENOUVELLEMENT LOCAL

Le calcul de l'advection et la dispersion des eaux du Golfe dans les lagunes discuté ci-haut permet enfin de calculer le temps de renouvellement des eaux à chaque maille de la grille de calcul. Le temps nécessaire à la concentration des eaux de la lagune à chaque maille de chuter sous le seuil de 38%, et de ne plus remonter au-dessus de ce seuil, sera le temps de renouvellement local des eaux à cette maille. Les figures 19 à 25 présentent les distributions spatiales de ce temps de renouvellement local dans la région

est de la lagune de Grande-Entrée, dans chacune des couches de la grille de calcul, en débutant par la couche de surface (figure 19).

On constate d'abord que, pour un même type de forçage et pour les raisons expliquées à la section 4.3, il n'y a pas de différences significatives entre les temps de renouvellement locaux dans la couche de surface et dans les couches intermédiaires. Donc, la description de la couche de surface s'applique aussi bien aux couches intermédiaires.

En l'absence de vent, le temps de renouvellement des eaux dans la lagune reflète la direction prédominante des courants de marée. Les eaux du Golfe entrent dans le canal de navigation et bifurquent rapidement vers l'ouest, en direction du Pont du Déroit. Les courants de marée sont forts à ces endroits, avec des vitesses d'environ 0,5 à 1,0 m/s (Koutitonsky et al. 2002). Ces régions ont donc un temps de renouvellement faible, se situant entre 1 et 10 jours. Par contre, à l'est du chenal de navigation, les courants de marées sont presque inexistantes (0,01 m/s), de sorte les temps de renouvellement locaux sont supérieurs à la période de simulation de 45 jours. Le site de culture des moules se situe dans cette région.

En présence de vents, la distribution spatiale du temps de renouvellement local devient plus homogène, avec malgré tout des temps relativement plus courts près de la Grande-Entrée (5 – 10 jours) et augmentant jusqu'à 30 jours ailleurs dans la lagune. Au centre du bassin profond, le temps de renouvellement local augmente quelque peu à 35 jours alors que la baie de Clarke, ce temps dépasse les 40 jours. Tel que noté à la section 4.3, les eaux du Golfe ont envahi la lagune de Grande-Entrée en 2001 en passant par la lagune de Havre-aux-Maisons. Ceci a pu aussi contribuer à augmenter quelque peu le temps de renouvellement local dans le bassin profond. Dans la région des moulières, on peut donc s'attendre à un temps de renouvellement probable de l'ordre de 15 à 20 jours.

4.5 TEMPS DE RENOUVELLEMENT INTÉGRAL

Le temps de renouvellement intégral se calcule en prenant la moyenne des temps de renouvellement locaux de toutes les mailles contenues dans un espace défini. Dans cette étude, le calcul du temps de renouvellement intégral a été effectué pour les régions suivantes (figure 26) :

- la région est de la lagune de Grande-Entrée;
- les régions des sites de cultures de pétoncles (région A) et de moules (région B).

4.5.1 Région est de la lagune de Grande-Entrée

L'évolution temporelle du renouvellement des eaux par les marées dans cette région est présentée au haut de la figure 27 alors que celle du renouvellement par la combinaison des vents et des marées est présentée au bas de la figure 27. Ces évolutions sont exprimées en pourcentage des eaux initialement présentes dans la région considérée en fonction du temps. La ligne horizontale en traits discontinus représente la fraction restante de 38 % (ou $1/e$) des eaux initialement présentes dans la région étudiée. Le temps en abscisse qui correspond à l'intersection de la ligne de 38 % avec celle de l'évolution temporelle du renouvellement des eaux sera le temps de renouvellement intégral (TRI) des eaux de la région étudiée car à cet instant, 62 % des eaux initialement présentes auront été renouvelées par des eaux en provenance du Golfe Saint-Laurent.

On constate que lorsque le renouvellement est uniquement causé par la marée (figure 16 haut), le temps de renouvellement intégral est d'environ 42 jours pour l'est de la LGE. Par contre, lorsque le renouvellement est causé par l'effet combiné des vents et marées, le temps de renouvellement intégral baisse à 11 jours pour la même région. Dans les deux cas, on note l'effet de l'intrusion tidale des eaux du Golfe tout comme celui de l'alternance des marées de vive-eau et de morte-eau sur le mélange intérieur et donc la fraction restante des eaux lagunaires.

4.5.2 Sites de culture

Le temps de renouvellement des eaux de 11 jours sous l'effet des vents et marées, calculé pour l'ensemble de la partie est de la lagune, ne s'applique pas nécessairement aux régions des sites d'aquaculture puisque ce temps de renouvellement est la moyenne régionale du temps de renouvellement local sur l'ensemble de la région considérée. On peut donc raffiner le calcul en l'appliquant uniquement aux sites de mariculture de pétoncles et de moules (régions A et B, figure 26).

Les résultats de ces calculs sont présentés dans la partie supérieure de la figure 28 pour le forçage par les marées et dans la partie inférieure de la figure 28 pour le forçage par les marées et les vents. Dans chaque cas, la courbe en bleu représente le renouvellement des eaux au site de culture de pétoncles (A) dans le nord-est de la LGE et la courbe en rouge représente le renouvellement des eaux au site des moulières (B).

Les résultats indiquent qu'en l'absence de vent, les eaux du site de pétoncles (A) ne se renouvelleront pas avec des eaux du Golfe alors que celles du site de moules mettront plus de 45 jours à se renouveler. Une extrapolation linéaire de la tendance de la courbe (B) indiquerait un temps de renouvellement d'environ 60 jours pour le site des moules.

En présence de vent, la combinaison vents et marées contribuera au renouvellement des eaux dans les deux sites sur une période d'environ 20 jours. Encore une fois, ceci met en évidence le fait que les eaux du bassin profond de la LGE sont pas renouvelées par la marée mais plutôt par les vents.

5. CONCLUSION

Le temps de renouvellement des eaux dans la région est de la lagune de Grande-Entrée (LGE) a été étudié dans le contexte d'un développement ultérieur de la mariculture de bivalves dans cette région. La méthode utilisée est celle de l'advection-dispersion d'un traceur soluble. Elle fait appel à des modèles numériques d'hydrodynamique et d'advection-dispersion en trois dimensions. La méthode estime, à chaque maille d'une

grille de calcul, le temps nécessaire à une concentration initiale de l'eau de la lagune d'être diluée à 38 % de sa valeur initiale par des eaux en provenance de l'extérieur, en l'occurrence du Golfe Saint-Laurent. Le résultat est une distribution spatiale du temps de renouvellement *local*. Une moyenne de ces temps locaux sur une région d'intérêt (e.g. site de moulières) permet ensuite le calcul d'un temps de renouvellement *intégral* pour cette région.

Les simulations numériques ont été effectuées sous deux conditions de forçage hydrodynamique : un forçage par la marée et un forçage par la combinaison des vents et marées. Les modèles numériques utilisés sont les modules hydrodynamique (HD) et advection-dispersion (AD) du système de modélisation numérique environnementale en trois dimensions MIKE3. La grille de calcul utilisée comprend des mailles de dimensions horizontales de 90 m x 90 m et huit couches en verticale de 1 m d'épaisseur chacune. Elle comprend les lagunes de Grande-Entrée (LGE) et de Havre-aux-Maisons (LHM) et elle est forcée par des niveaux d'eau mesurés à l'extérieur des entrées des lagunes durant 45 jours en 2001. L'analyse des séries de vents durant ces mêmes 45 jours ont montré qu'ils ont d'abord soufflé de la LGE vers la LHM durant une dizaine de jours et ensuite majoritairement de la LHM vers la LGE. L'analyse des séries de niveau d'eau a aussi montré un gradient horizontal entre les niveaux aux entrées des deux lagunes.

Lorsque les modèles sont forcés uniquement par la marée, l'excursion tidale des eaux du Golfe dans les lagunes reste confinée à la région sud-ouest du chenal de navigation dans la LGE et dans la partie ouest de la LHM. Il en ressort que les eaux dans les bassins profonds de ces lagunes, où se trouvent les sites de mariculture de bivalves, ne sont pas renouvelées par les courants de marée. Lorsque les vents et les niveaux de basse fréquence mesurés en 2001 sont ajoutés aux marées dans les modèles, les eaux du Golfe envahissent d'abord la LHM et progressent ensuite par l'intérieur à travers le Pont du Déroit vers la LGE où elles contribuent au renouvellement des eaux dans cette lagune.

Dans la partie est de la LGE, le temps de renouvellement local sous l'effet unique de la marée varie de 1 à 10 jours dans la partie sud et à l'ouest du chenal de navigation alors que dans le bassin profond et les moulières, ce temps est de l'ordre de 40 jours et plus. Lorsque les vents sont inclus dans les modèles, les temps de renouvellement locaux

baissent à environ 20 – 25 jours pour le centre du bassin profond de la lagune et les moulières. Dans les deux conditions hydrodynamiques (marée et marée+vents) on ne distingue pas de différences significatives entre le mélange dans la couche de surface et près du fond. Dans les deux cas, les temps de renouvellement locaux demeurent élevés dans la baie Clarke.

Le temps de renouvellement intégral calculé ensuite pour l'ensemble de la partie Est de la lagune sous l'effet unique des marées est de l'ordre de 40 jours alors qu'avec l'effet des vents, ce temps baisse à 11 jours pour cette partie de la lagune. Lorsque le calcul du temps intégral est appliqué uniquement à la surface des sites de moules et de pétoncles plus au nord, les résultats indiquent que la marée ne renouvelle pas les eaux au site de pétoncles et qu'elle renouvellerait les eaux au site des moules en environ 60 jours. Finalement, lorsque le vent est considéré dans le calcul du temps de renouvellement intégral à ces deux sites, ces temps sont de l'ordre de 20 jours à chacun des sites.

En résumé, les temps de renouvellement des eaux aux sites de culture de moules et de pétoncles dans la lagune de Grande-Entrée sous l'effet unique de la marée sont de l'ordre de 60 jours et plus alors qu'avec l'effet des vents, ces temps sont de l'ordre de 20 jours mais peuvent varier en fonction des saisons et des années selon les systèmes météorologiques en présence.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelrhman, M. (2002). Modeling how a hurricane barrier in New Bedford Harbor, Massachusetts, affects the hydrodynamics and residence times. *Estuaries*, 25(2) : 177-196
- Arneborg, L. 2004. Turnover times for the water above sill level in Gullmar Fjord. *Cont. Shelf Res.*, 24 : 443-460.
- DHI, 2002. MIKE 3 Hydrodynamic module. Scientific Documentation. DHI Software, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark. 133 p.
- Foreman, M. G. 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, 101 p.

- Godin, G. 1972. *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto, 264 p.
- Grant J. (1999). Ecological constraints on the sustainability of bivalve aquaculture. *In Sustainable Aquaculture : Food for the future?* N. Svennevig, H Reinertsen & M. New (Eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 85-96
- Kjerfve, B. and K. E. Magill. 1989. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology* 88, 187-199.
- Koutitonsky, V. G. and G. L. Bugden. 1991. The physical oceanography of the Gulf of St. Lawrence : A review with emphasis on the synoptic variability of the motion, p. 57-90. *In* J.-C. Therriault [ed.] *The Gulf of St. Lawrence : small ocean or big estuary?* Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 113
- Koutitonsky V. et D. Booth (1996). Modélisation numérique des courants de marée dans les lagunes Le Bassin, Hâvre aux Maisons et Grande-Entrée aux Îles-de-la-Madeleine, Golfe du Saint-Laurent. Rapport de Recherche INRS-Océanologie, pour le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 17 p. + Annexes.
- Koutitonsky, V.G. N. Navarro and D. Booth. 2002. Description of the physical oceanography of Great Entry lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 54 (5) : 833-847.
- Koutitonsky, V. G., J. Grant, S. Roy, G. Tita et M. Fréchette. 2003. Capacité de support d'un écosystème côtier pour la mytiliculture. Subvention 95521 accordée par le Fond de Recherche sur la Nature et les Technologies – Québec, Programme Action concertée en sciences et techniques de la mer (2004-2006).
- Koutitonsky, V. G. K. T. Guyondet, A. St. Hillaire, S. Courtenay and A. Bohgen. 2004a. Water renewal estimates for aquaculture developments in the Richibucto estuary, Canada. *Estuaries*, 27(5) : 839-850.
- Koutitonsky, V. G. 2004b. Three-dimensional structure of wind-driven currents in coastal lagoons. Chapter 9.2 : Case studies, in (Eds. E. Gonenc and J. Woflin) *Coastal Lagoons : Ecosystem Processes and Sustainable Management*. Book *accepted for publication* CRC Press.
- Koutitonsky, V. G. 2004 c. Modélisation numérique intégrée des courants, des vagues et du transport des sédiments à l'entrée de la lagune du Hâvre aux Maisons. Rapport de recherche LHE-04-01. Laboratoire d'hydraulique environnementale, ISMER, UQAR, Rimouski, (étude en cours).
- Ranasinghe, R. and Pattiaratchi, C. 1998. Flushing characteristics of a seasonally-open tidal inlet : A numerical study. *Journal of Coastal Research*, 14 (4) : 1405-1421.
- Rasmussen, E. B. 1993. Three-dimensional hydrodynamic models. In (eds. M. B. Abbott and N. A. Price) *Coastal, Estuarine and Harbour Engineer's reference book*. Chapman and Hall, London.

- Rodi, W. 1987. Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids. *Journal of Geophysical Research*, 92 (C5) : 5305-5328.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*.
- Pugh, D. T. 1987. *Tides, surges and mean sea-level*. John Wiley & Sons, NY, 472 pp.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiment with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91 (3) : 99-164.
- Tiphane, M. 1976. *Les Îles-de-la-Madeleine : Bathymétrie et sédiments des dunes et des lagunes*. Direction des études biophysiques, Office de planification et développement du Québec, Gouvernement du Québec, 25 p.
- UNESCO. 1981. The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980. *Unesco technical papers in marine science*, 36.
- Vested, H. J., P. Justesen and L Ekebjærg. 1992. Advection-dispersion modelling in three dimensions. *Applied mathematical modelling*, 16 : 506-519.
- Walters, R. A. and C. Heston. 1982. Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters. *Journal of Physical Oceanography*, 12 : 112 – 115.

TABLEAUX

Tableau 1 : Dimensions des couches dans la grille numérique de calcul de la lagune de Grande-Entrée, du Pont du Déroit au sud-ouest à l'entrée de la lagune (figure 3). On y retrouve le nombre de mailles mouillées dans chaque couche verticale, ainsi que la superficie et le volume de ces couches, la couche 8 étant en surface et la couche 1 près du fond.

Couche	Mailles mouillées	Superficie (m ²)	Volume (m ³)
8	9 118	73 855 800	92 448 152
7	6 174	50 009 400	44 463 076
6	4 816	39 009 600	28 759 792
5	2 758	22 339 800	18 484 856
4	1 909	15 462 900	13 452 139
3	1 332	10 789 200	5 576 414
2	274	2 219 400	1 400 259
1	132	1 069 200	370 902
Total			204 955 590

Tableau 2 : Amplitude et phase des composantes K1 (marée diurne) et M2 (marée semi-diurne) extraites par l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés du 23 mai au 10 juillet 2001 à l'extérieur des lagunes Havre-aux-Maisons (station 1) et Grande-Entrée (station 9), avec leurs intervalles de confiance à 95 %, d'après Koutitonsky (2004b).

Station	Marée diurne K1		Marée semi-diurne M2	
	Amplitude (m)	Phase (deg)	Amplitude (m)	Phase (deg)
1	$0,19 \pm 0,07$	266 ± 23	$0,20 \pm 0,07$	294 ± 22
9	$0,16 \pm 0,01$	245 ± 2	$0,19 \pm 0,01$	283 ± 2

Tableau 3 : Comparaison des amplitudes et des phases des constituantes harmoniques K1 et M2 de la marée obtenues par l'analyse harmonique des niveaux observés (*OBS*) et simulés (*MOD*) aux stations 3 à 7 (Koutitonsky, 2004b). Les amplitudes et phases des composantes observées aux stations 1 et 9 sont aussi incluses à titre d'information.

Station	K 1				M 2			
	Amplitude		Phase		Amplitude		Phase	
	<i>OBS</i>	<i>MOD</i>	<i>OBS</i>	<i>MOD</i>	<i>OBS</i>	<i>MOD</i>	<i>OBS</i>	<i>MOD</i>
1	0,19		266		0,20		294	
3	0,11	0,10	286	292	0,09	0,09	347	352
4	0,11	0,11	288	293	0,10	0,09	350	353
5	0,13	0,11	294	291	0,12	0,10	361	353
6	0,13	0,13	273	279	0,13	0,13	327	333
7	0,13	0,14	275	272	0,12	0,13	320	319
9	0,16		245		0,19		283	

FIGURES

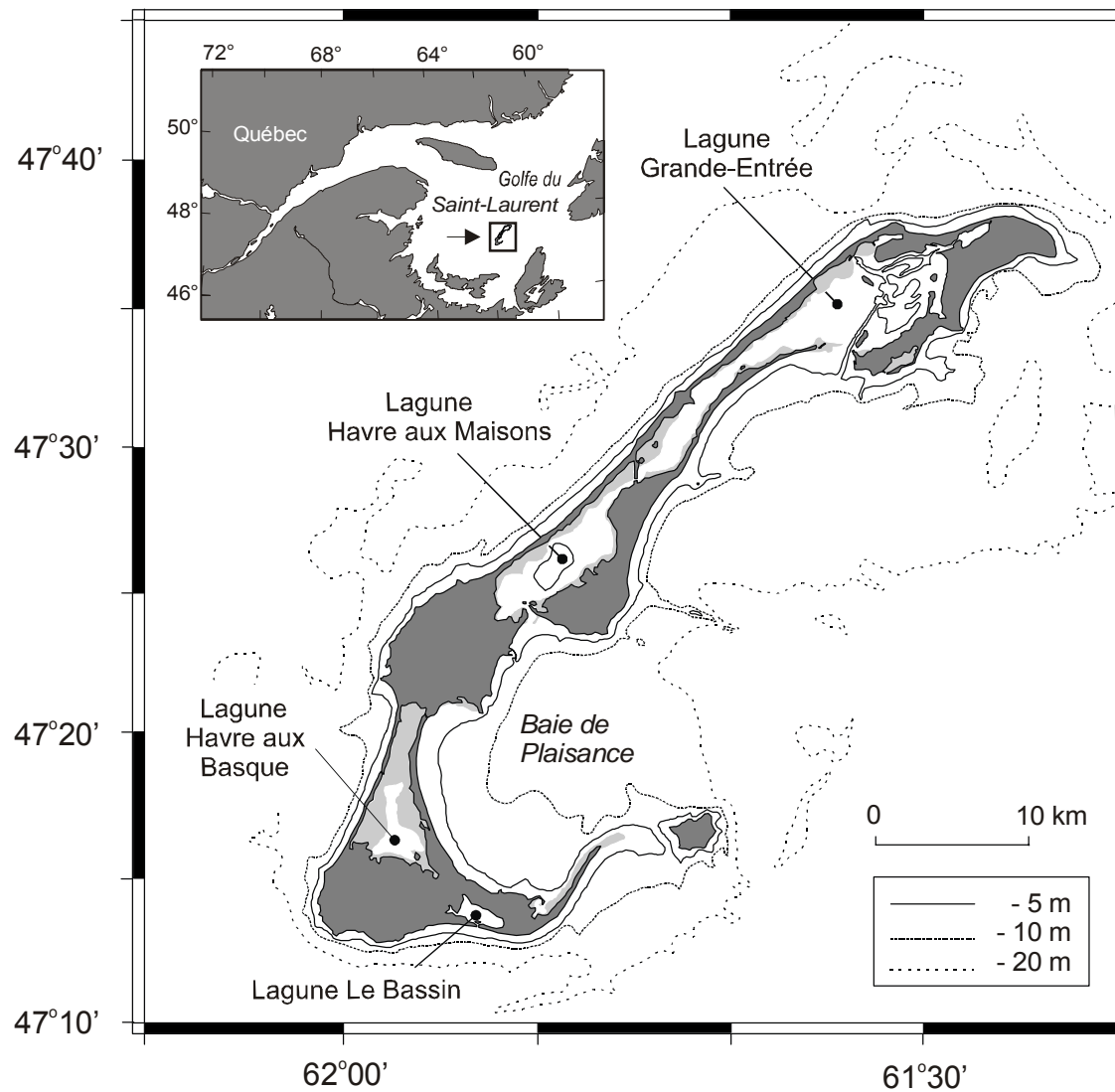


Figure 1 : Lagunes des Îles-de-la-Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent, avec les isobathes de -5, -10 et -20 m par rapport aux mers les plus basses.

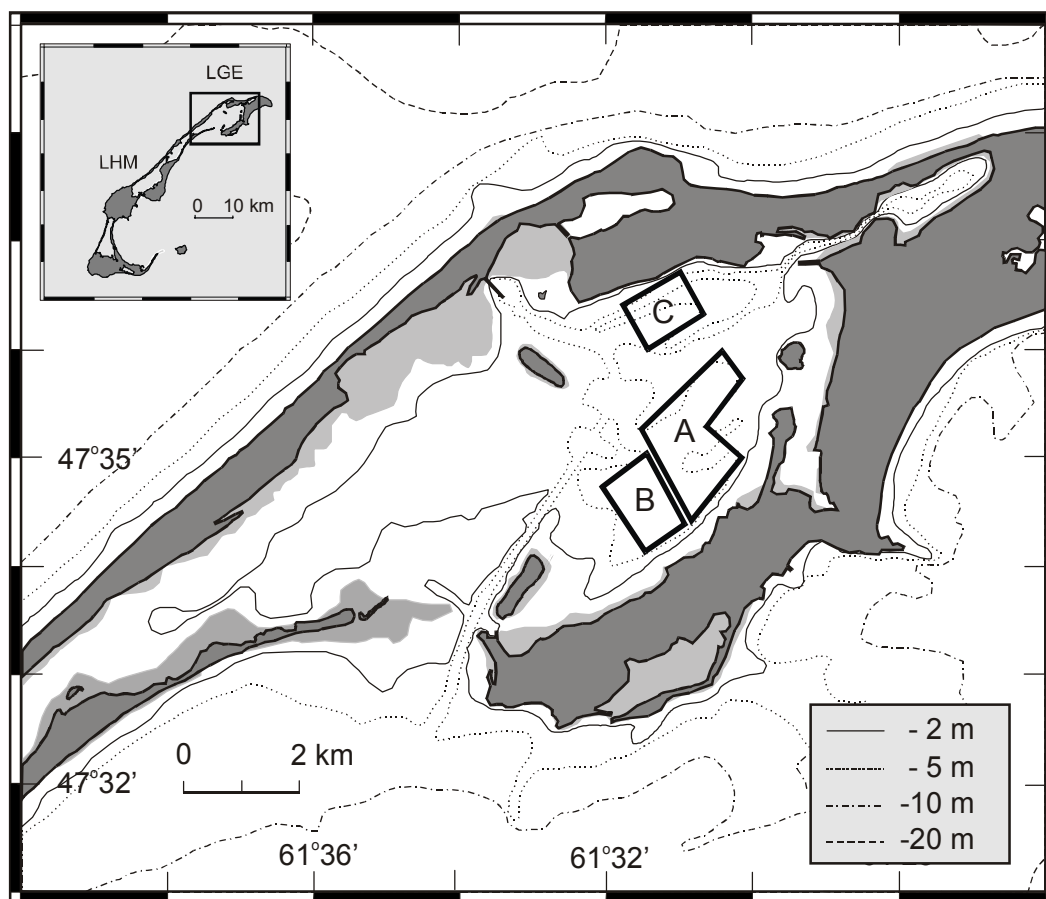


Figure 2 : Section nord-est de la lagune de Grande-Entrée, avec les sites de mariculture de moules (A, B) et de pétoncles (C), et les isobathes de -2, -5, -10 et -20 m par rapport aux mers les plus basses

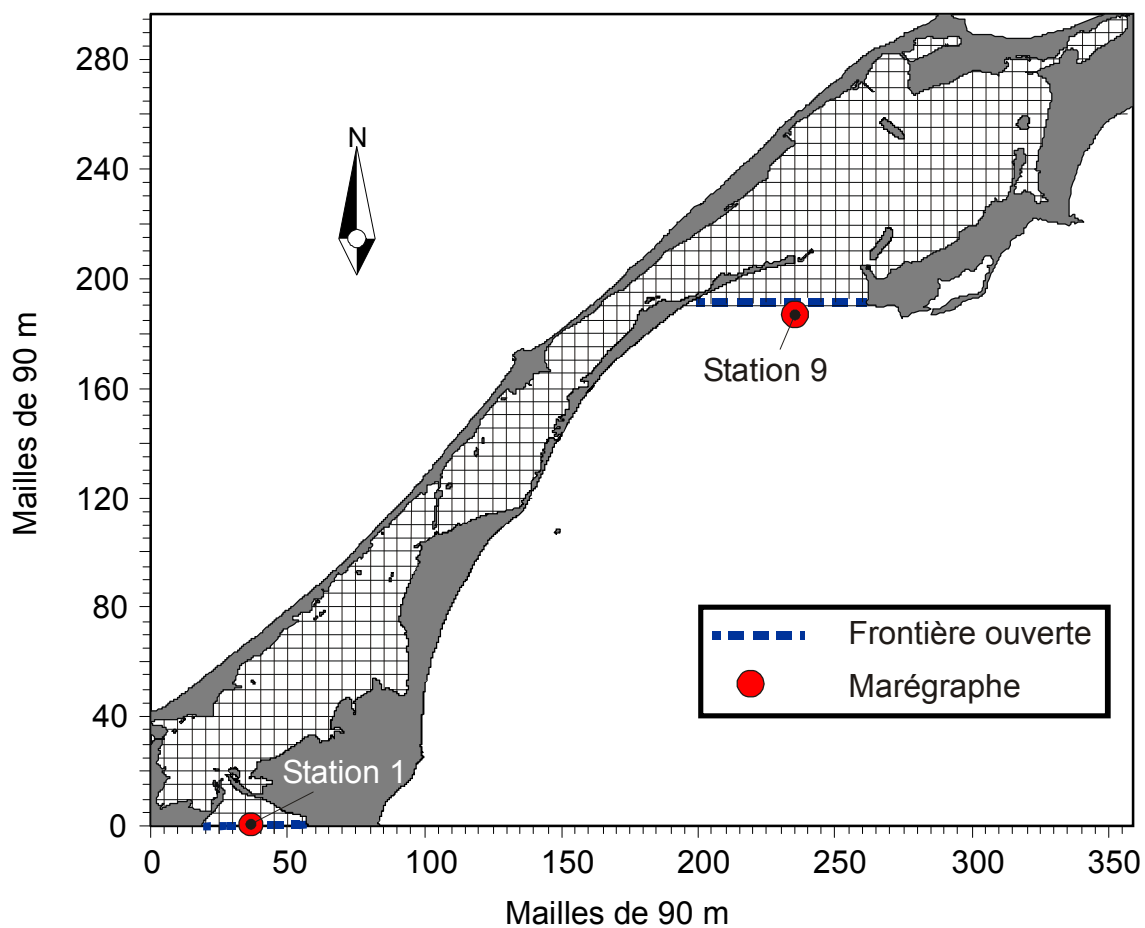


Figure 3 : Grille de calcul des modèles numériques des lagunes Grande-Entrée et Havre-aux-Maisons, avec les positions des frontières ouvertes (lignes en tirets) et des stations de mesure du niveau de l'eau (cercles). Les mailles sont représentées par intervalles de 5 x 5.

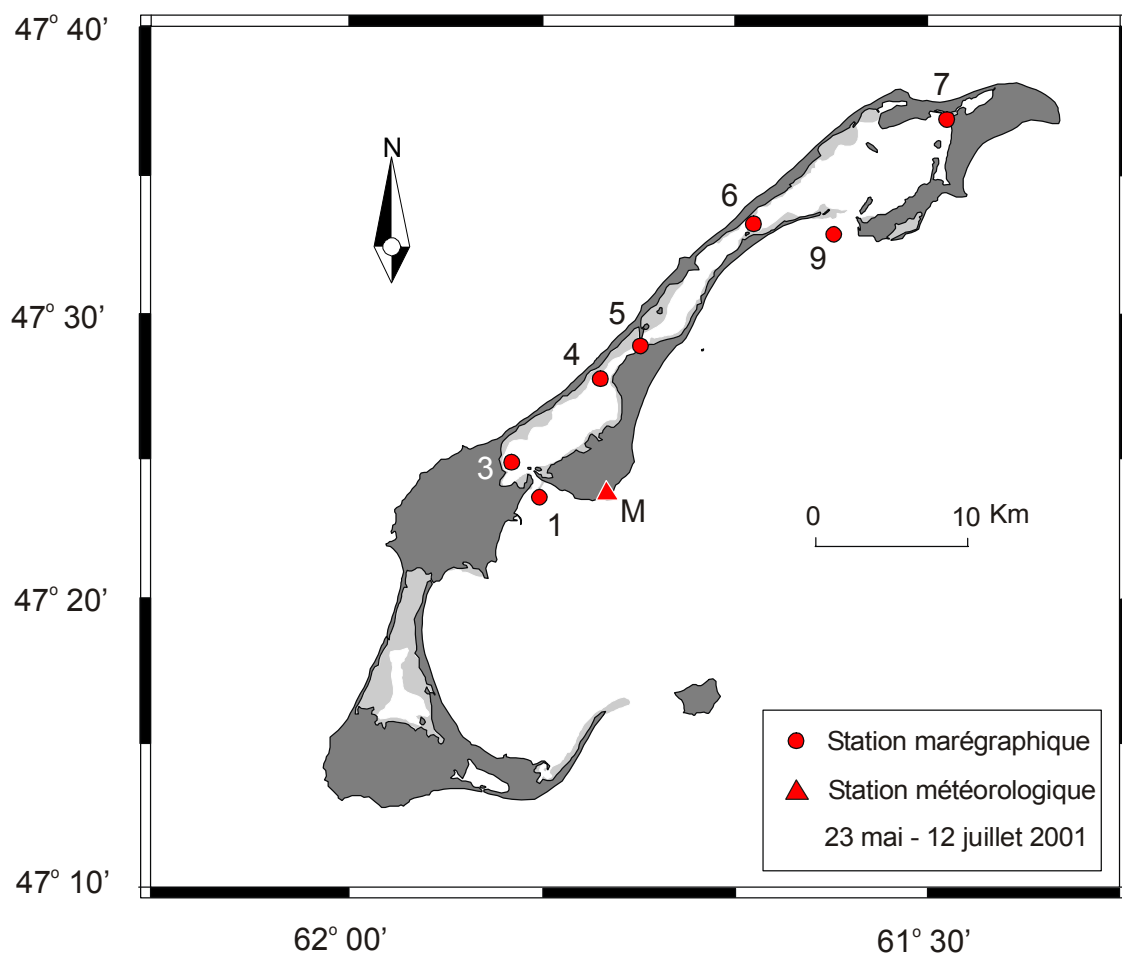


Figure 5 : Positions des stations de mesure du niveau de l'eau imposé aux frontières ouvertes du modèle (1 et 9) et des niveaux de l'eau utilisés pour la validation du modèle (3, 4, 5, 6, 7).

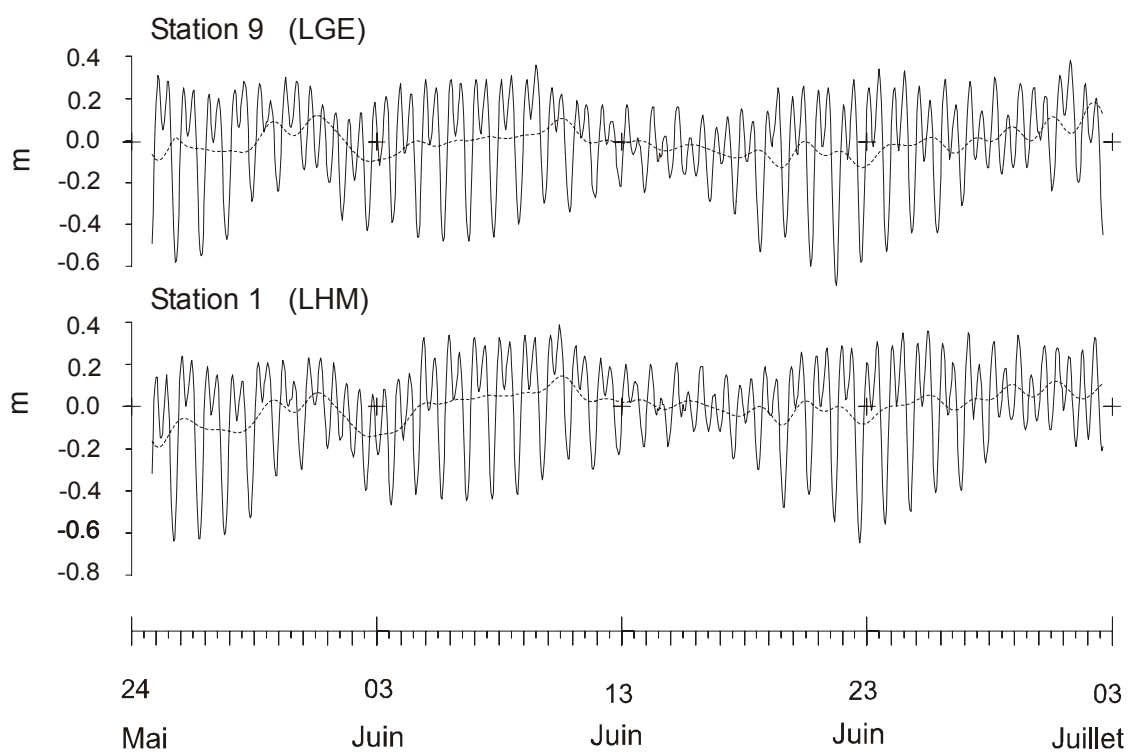


Figure 6 : Niveaux d'eau horaires (traits pleins) et filtrés passe-bas (traits pointillés) aux stations 1 et 9, à l'extérieur des embouchures des lagunes de Havre-aux-Maisons (LHM) et Grande-Entrée (LGE), respectivement.

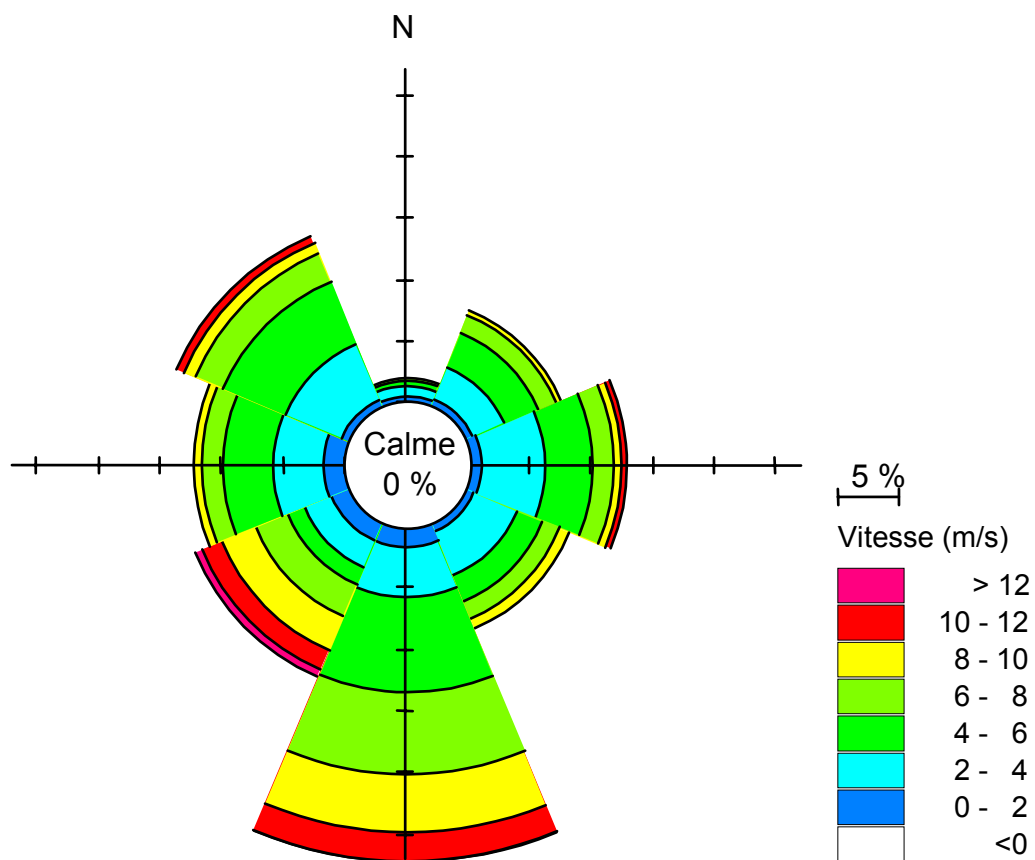


Figure 7 : Rose des vents mesurés au Cap Alright (figure 3) de mai à juillet 2001.

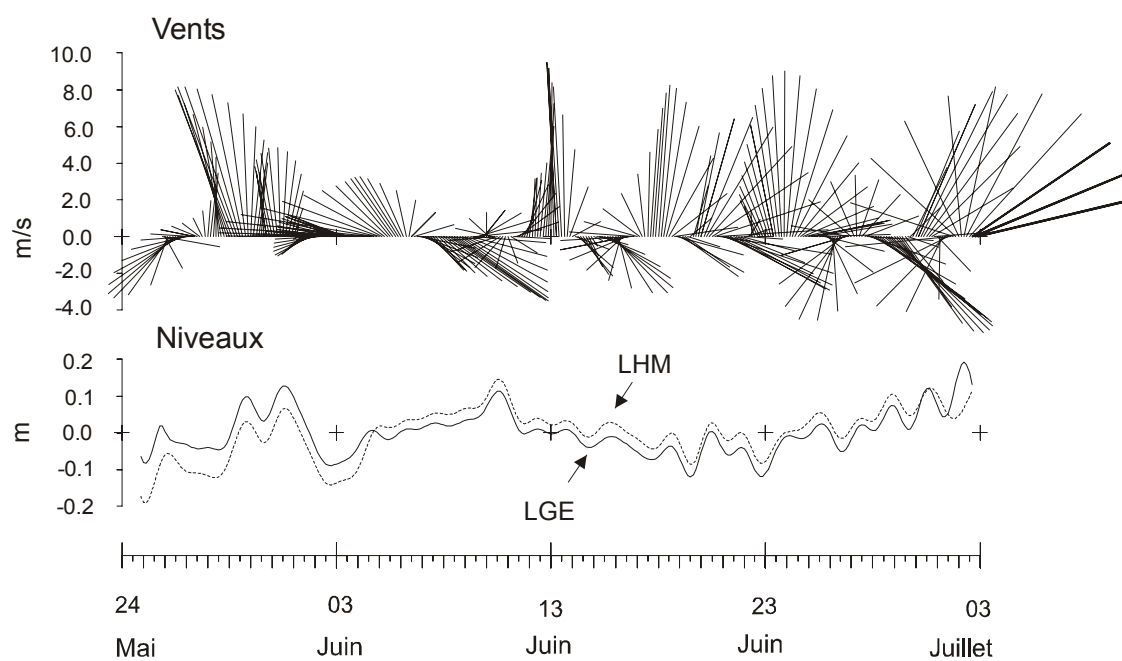
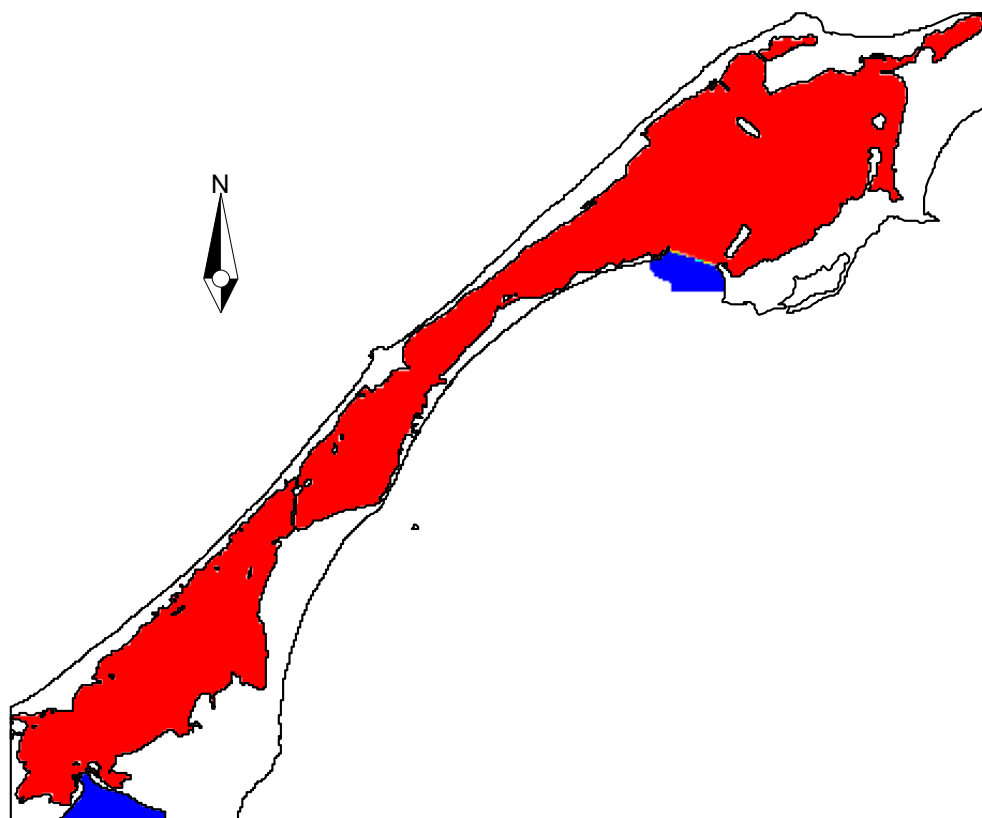


Figure 8 : Oscillations de basse-fréquence du vent (haut) à Cap Alright et des niveaux d'eau (bas) aux stations 1 et 9 à l'extérieur des lagunes de Havre-aux-Maisons (LHM) et Grande-Entrée (LGE).



05/24/01 20:00:00

Figure 9 : Concentrations initiales C_0 imposées au modèle d'advection-dispersion au temps T_0 , soit 20 h le 24 mai 2001. Dans les lagunes, ces concentrations sont $C_0 = 1$ (rouge) et dans le Golfe elles sont $C_0 = 0$ (bleu).

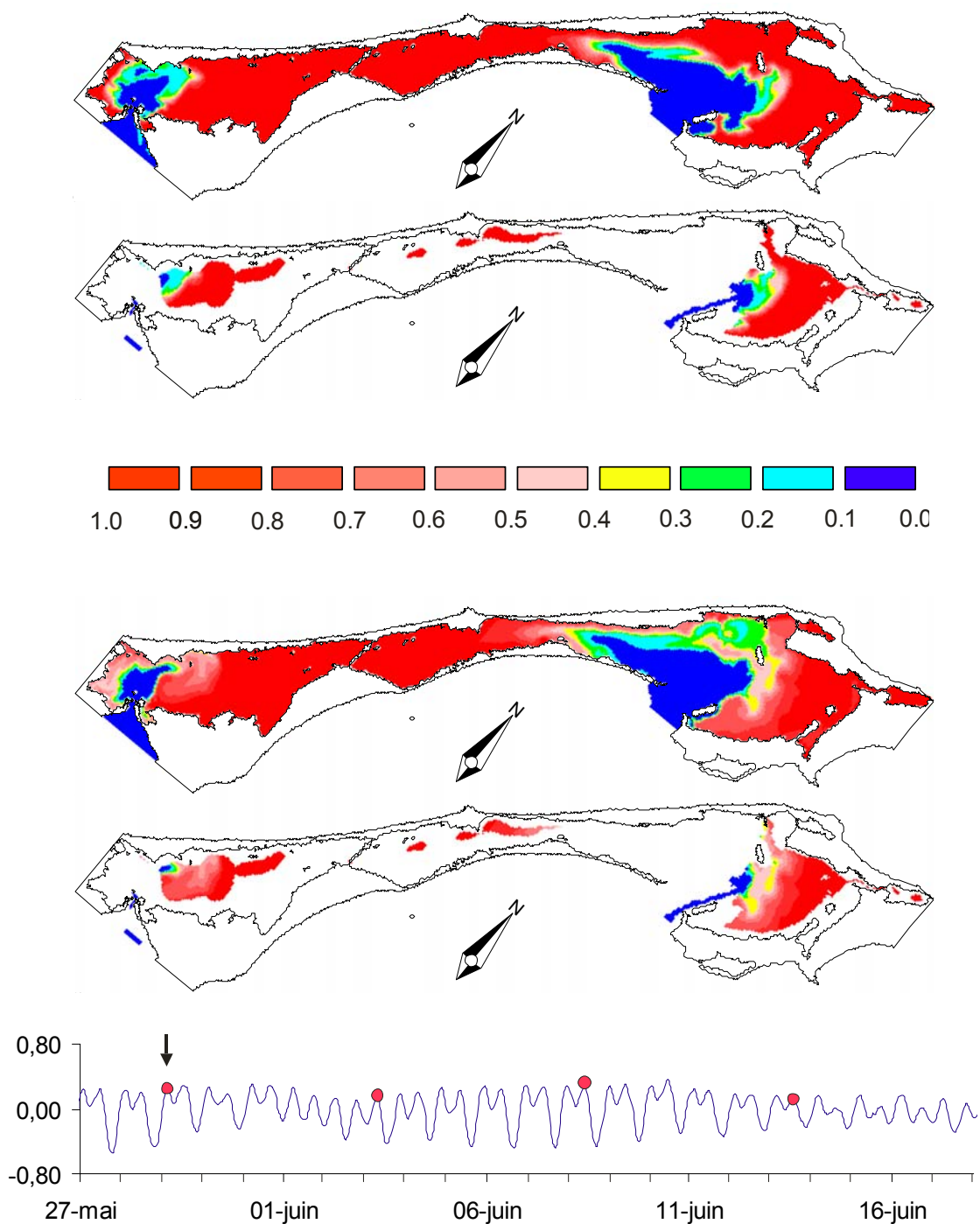


Figure 10 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 105, soit le 29 mai 2001 ou $T = T_0 + 4,38$ jours.

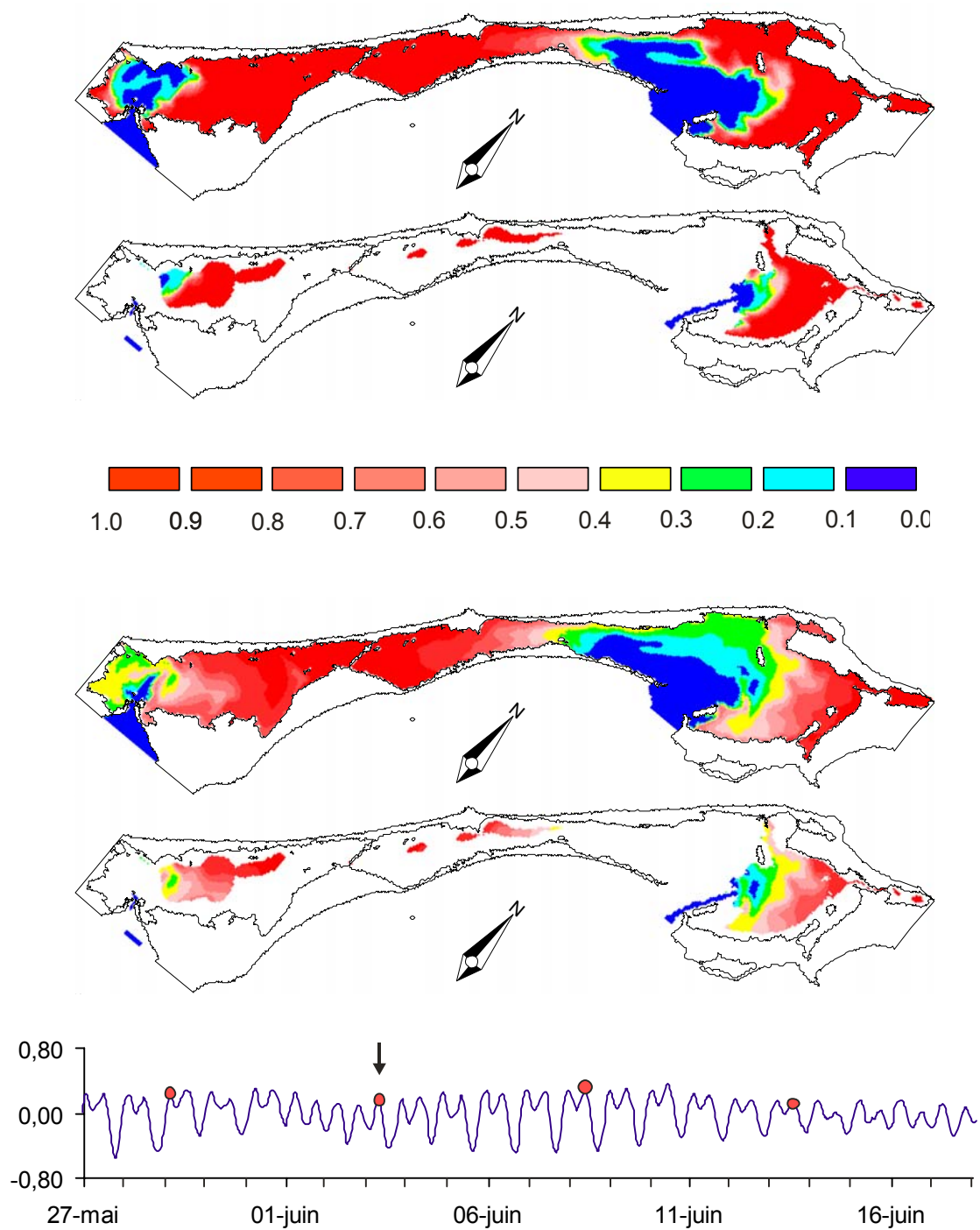


Figure 11 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 228, soit le 3 juin 2001 ou $T = T_0 + 9,50$ jours

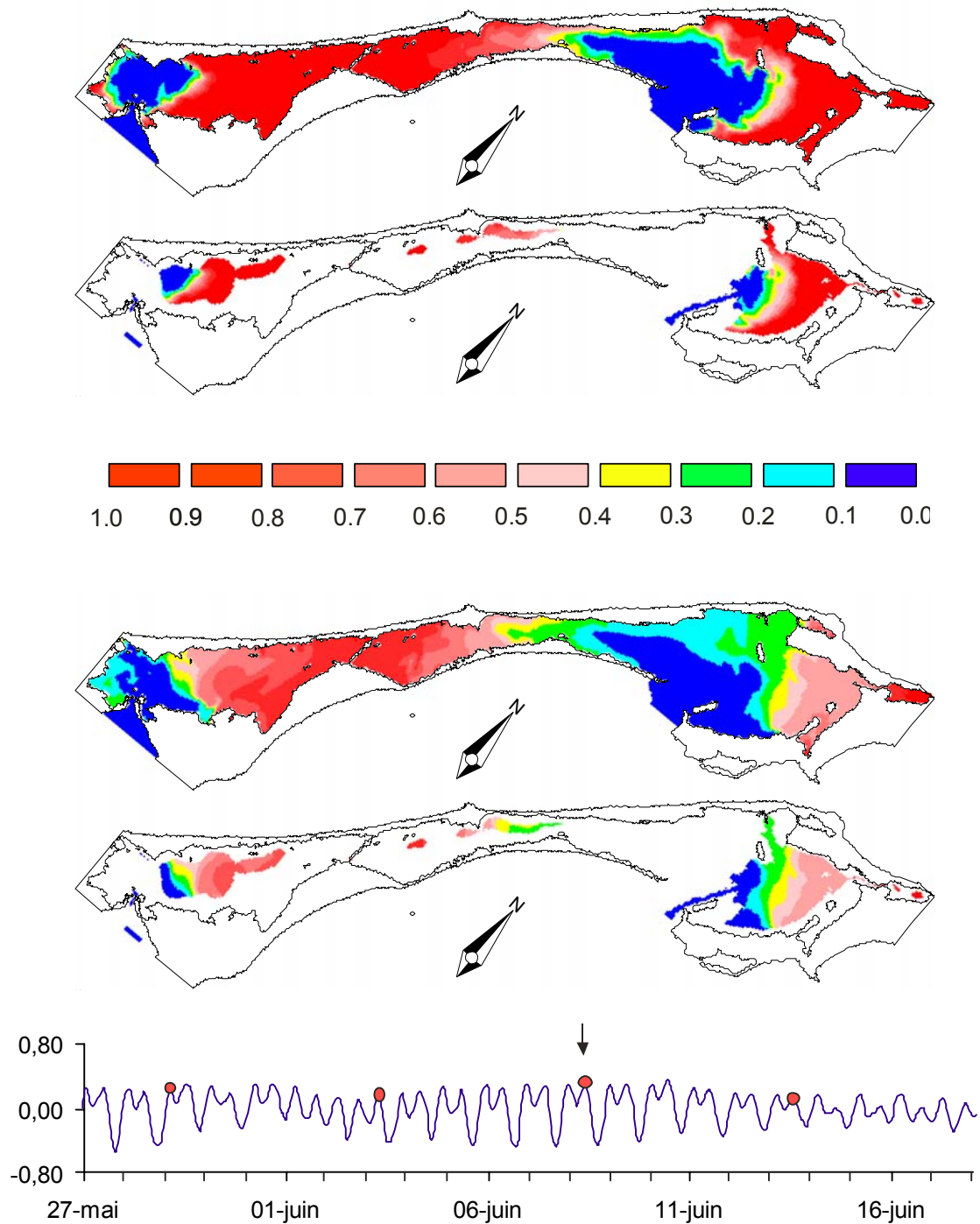


Figure 12 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 350, soit le 8 juin 2001 ou $T = T_0 + 14,58$ jours

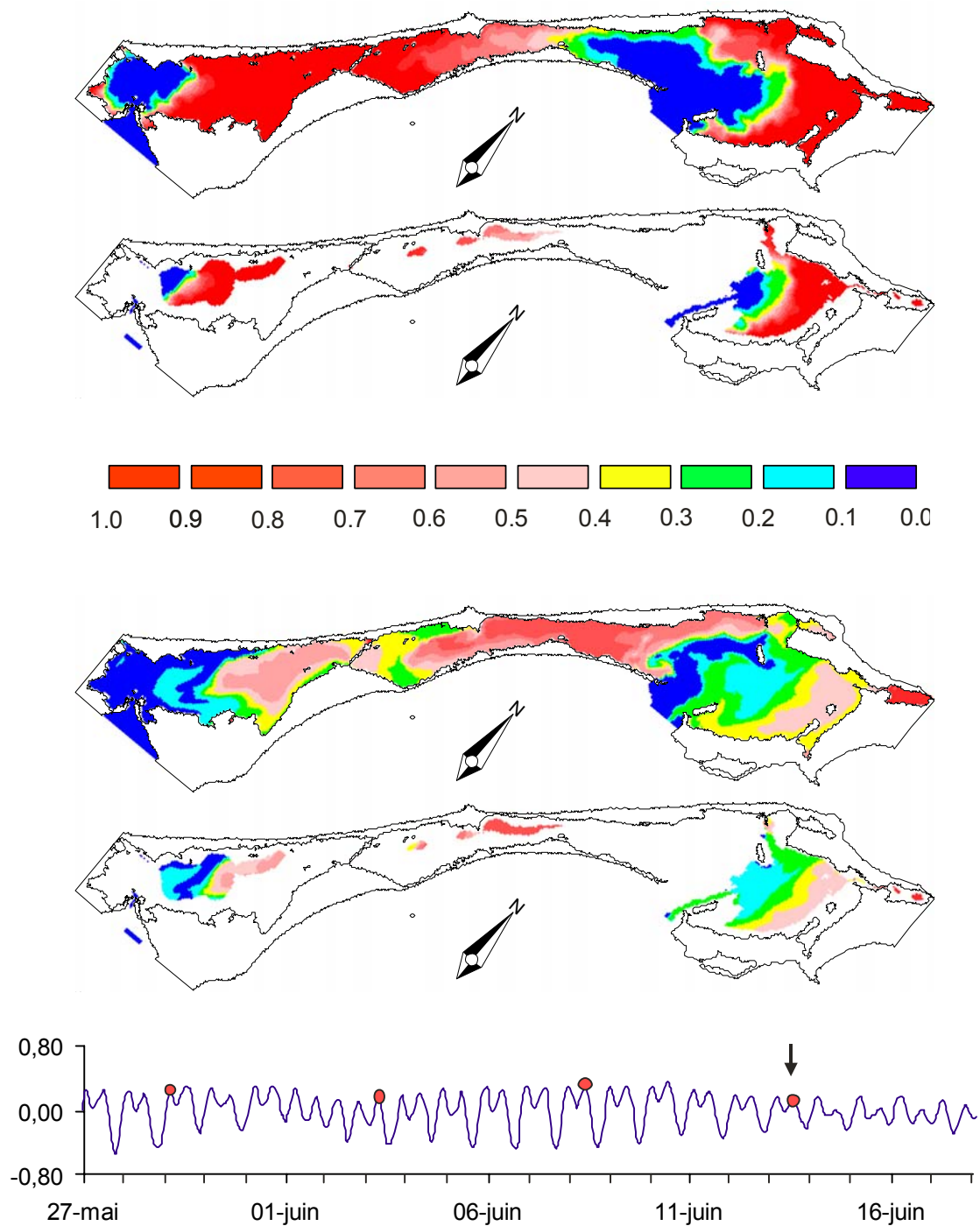


Figure 13 : Renouvellement des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 475, soit le 13 juin 2001 ou $T = T_0 + 19,79$ jours.

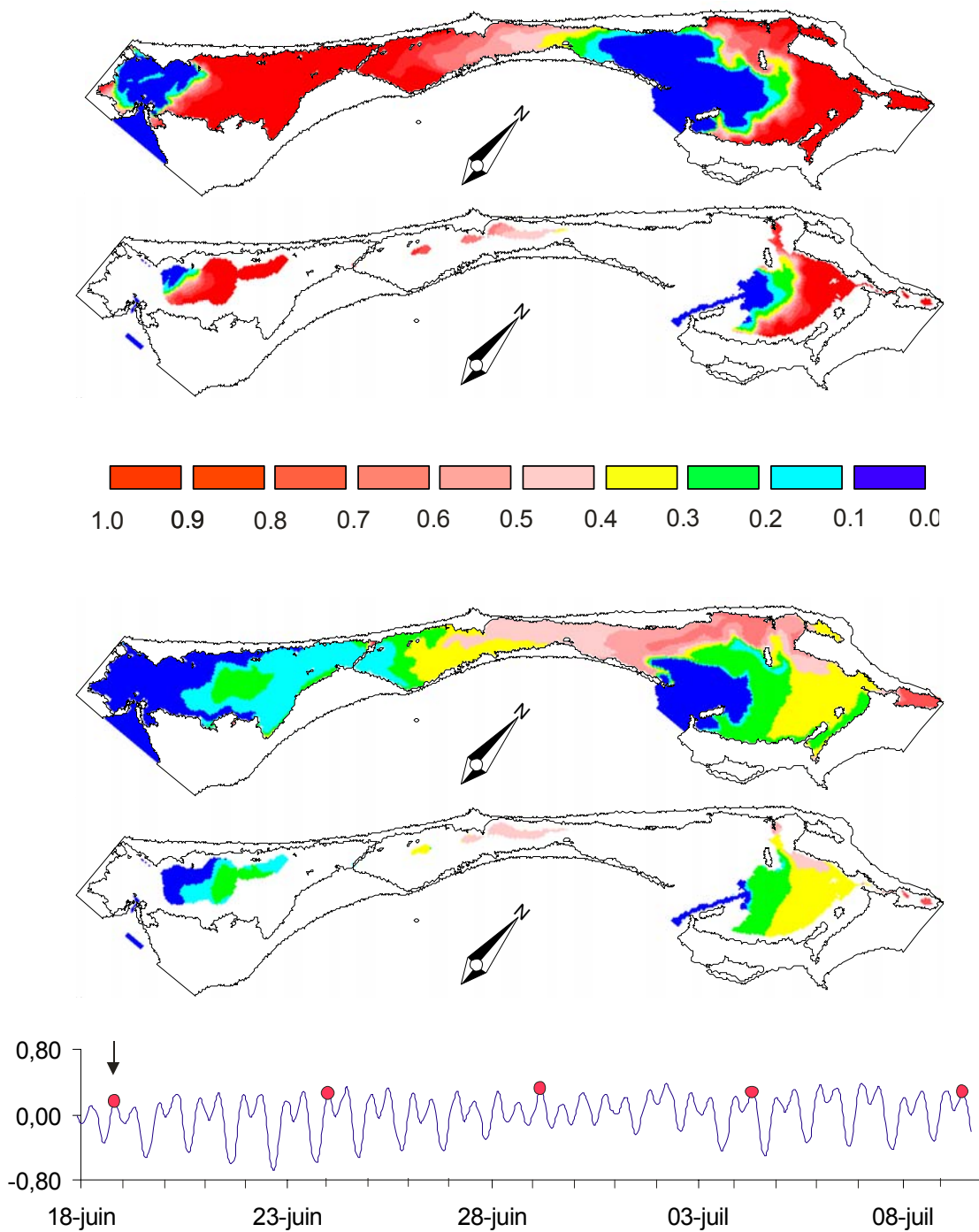


Figure 14: Renouveau des eaux lagunaires (C=1) par les eaux du Golfe (C=0) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 601, soit le 18 juin 2001 ou $T = T_0 + 25,04$ jours.

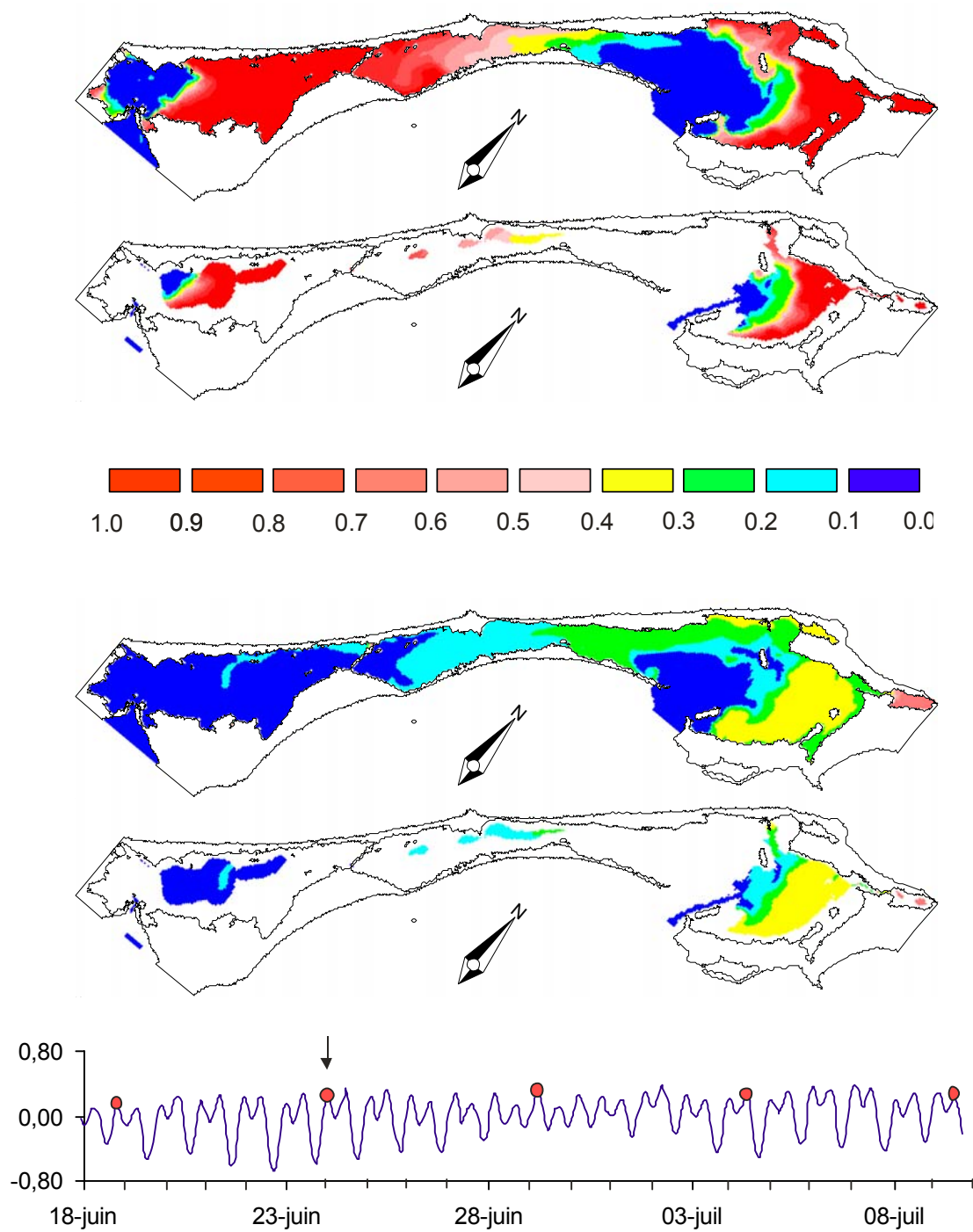


Figure 15 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 725, soit le 24 juin 2001 ou $T = T_0 + 30,17$ jours.

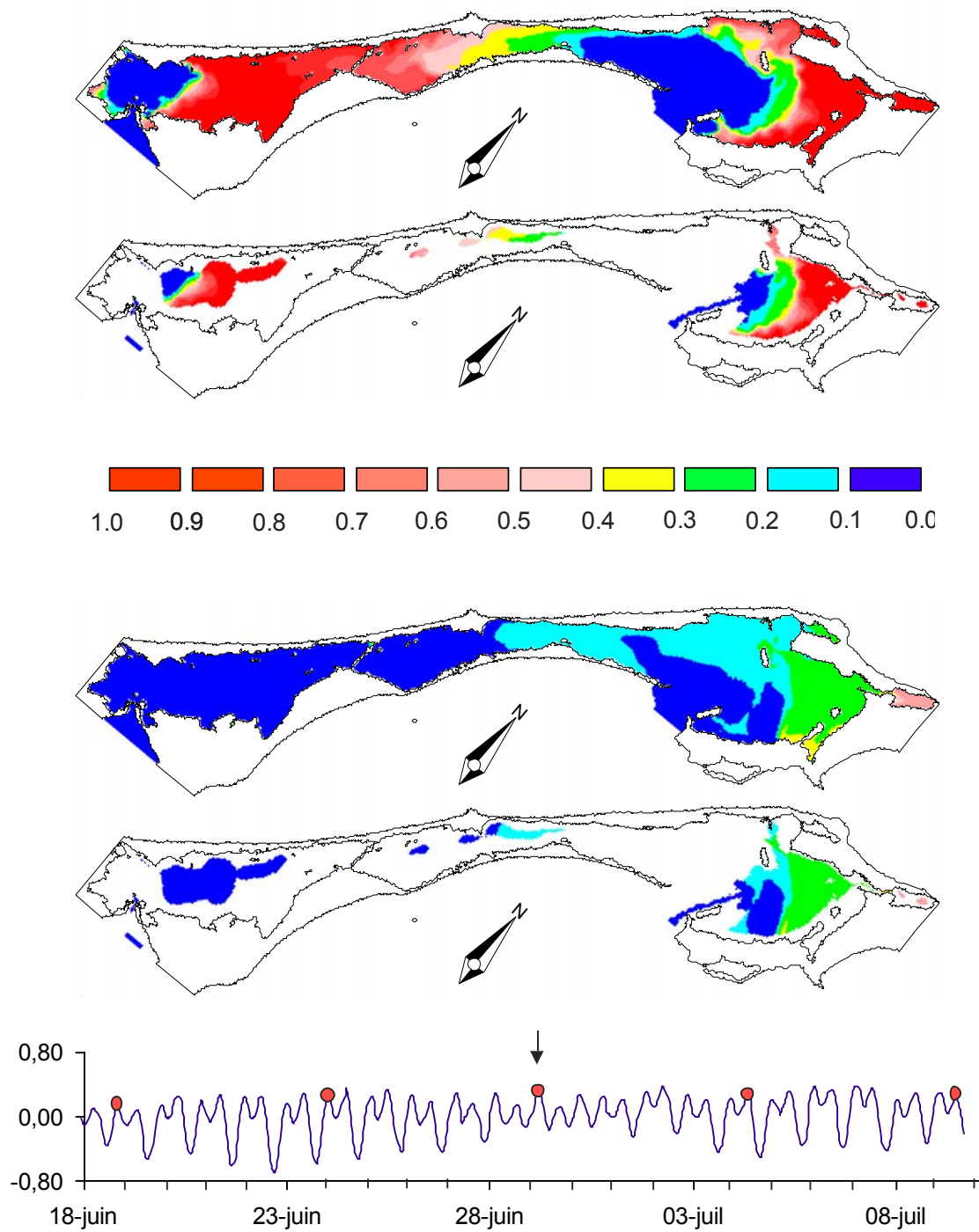


Figure 16 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 849, soit le 29 juin 2001 ou $T = T_0 + 35,38$ jours.

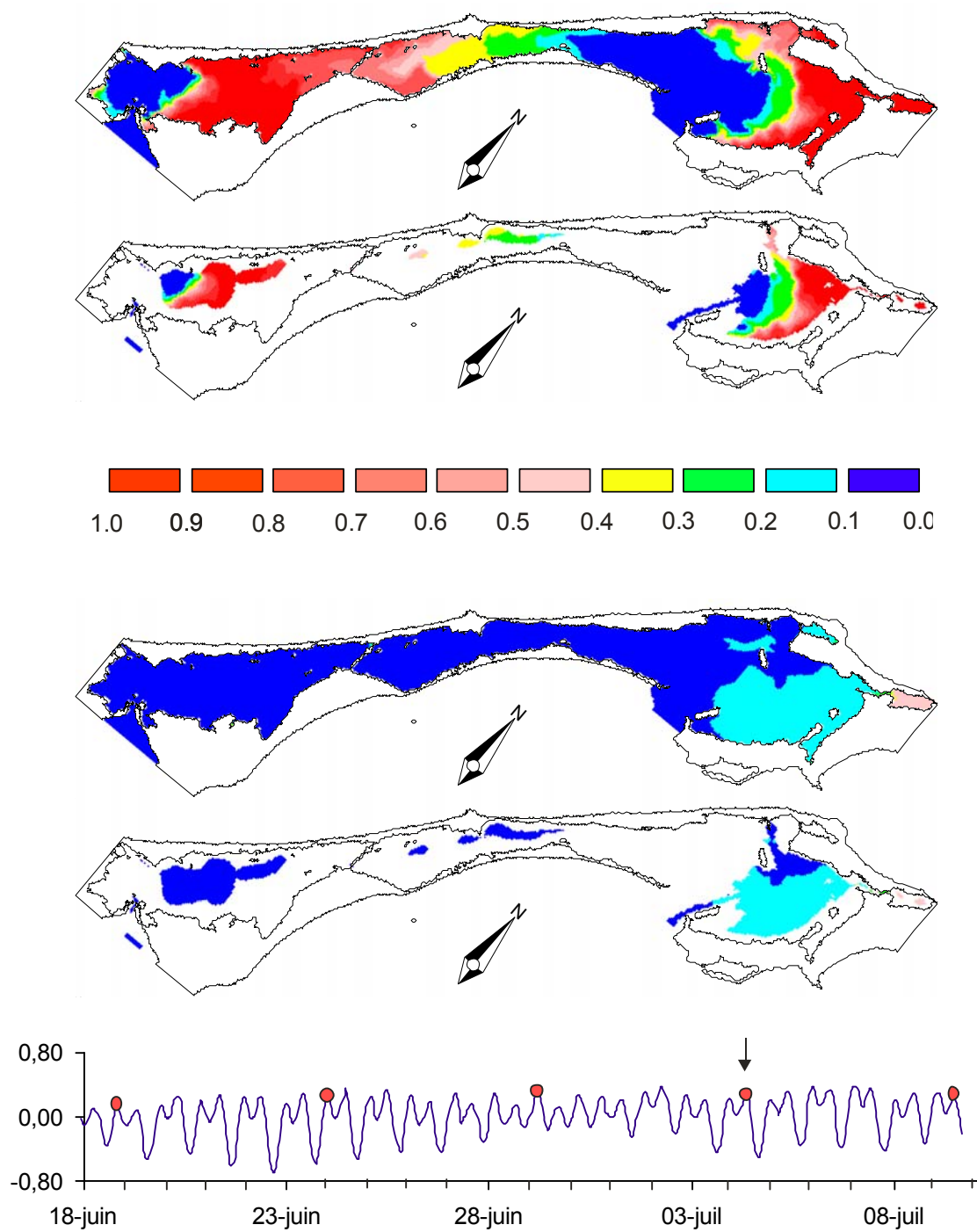


Figure 17 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 972, soit le 4 juillet 2001 ou $T = T_0 + 40,50$ jours.

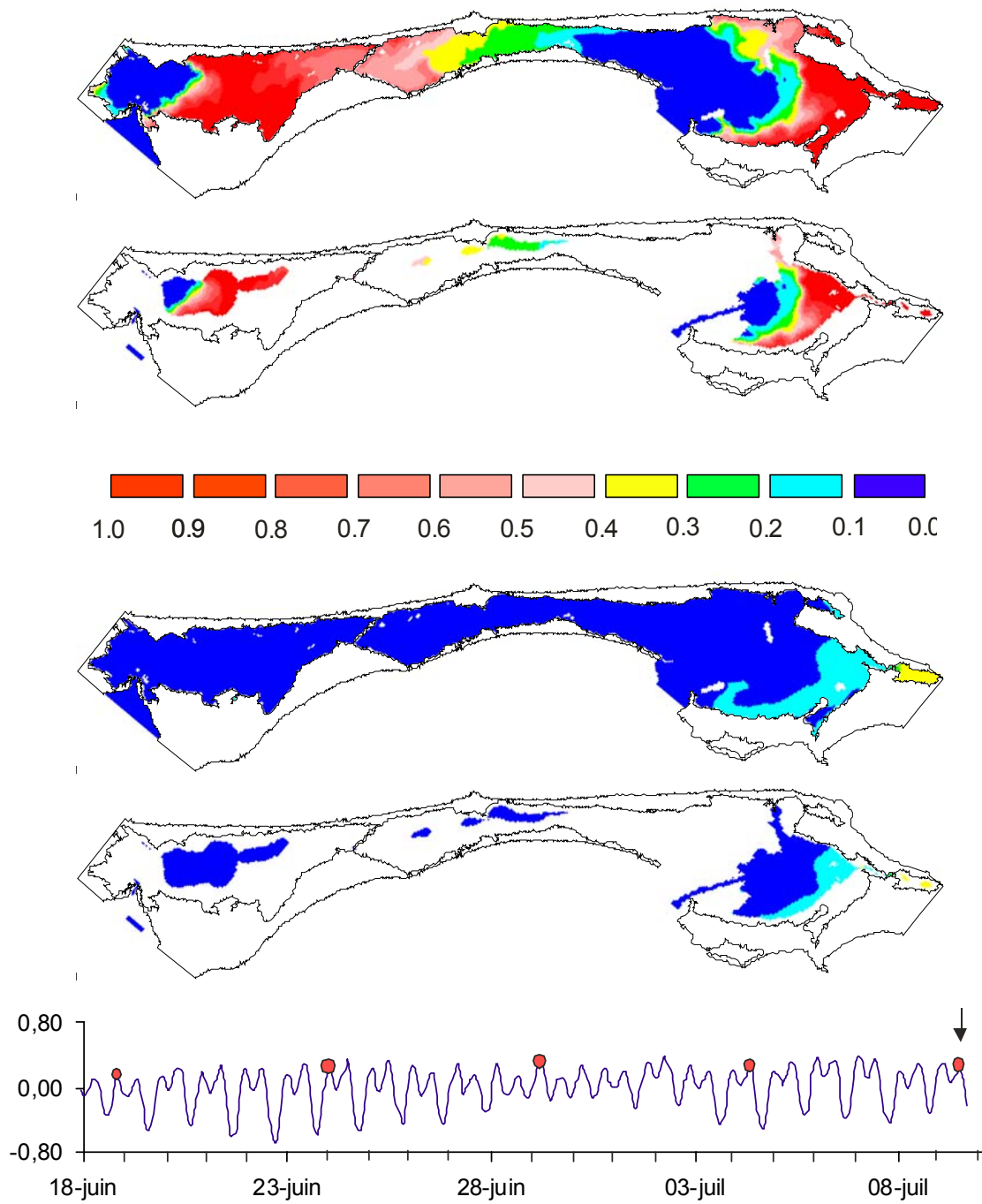


Figure 18 : Renouvellement des eaux lagunaires ($C=1$) par les eaux du Golfe ($C=0$) sous l'effet des marées (ensemble du haut), et des vents et marées (ensemble du bas) dans les couches de surface (haut d'un ensemble) et à 4 m sous la surface (bas d'un ensemble), au pas de sortie horaire 1095, soit le 9 juillet 2001 ou $T = T_0 + 45,63$ jours.

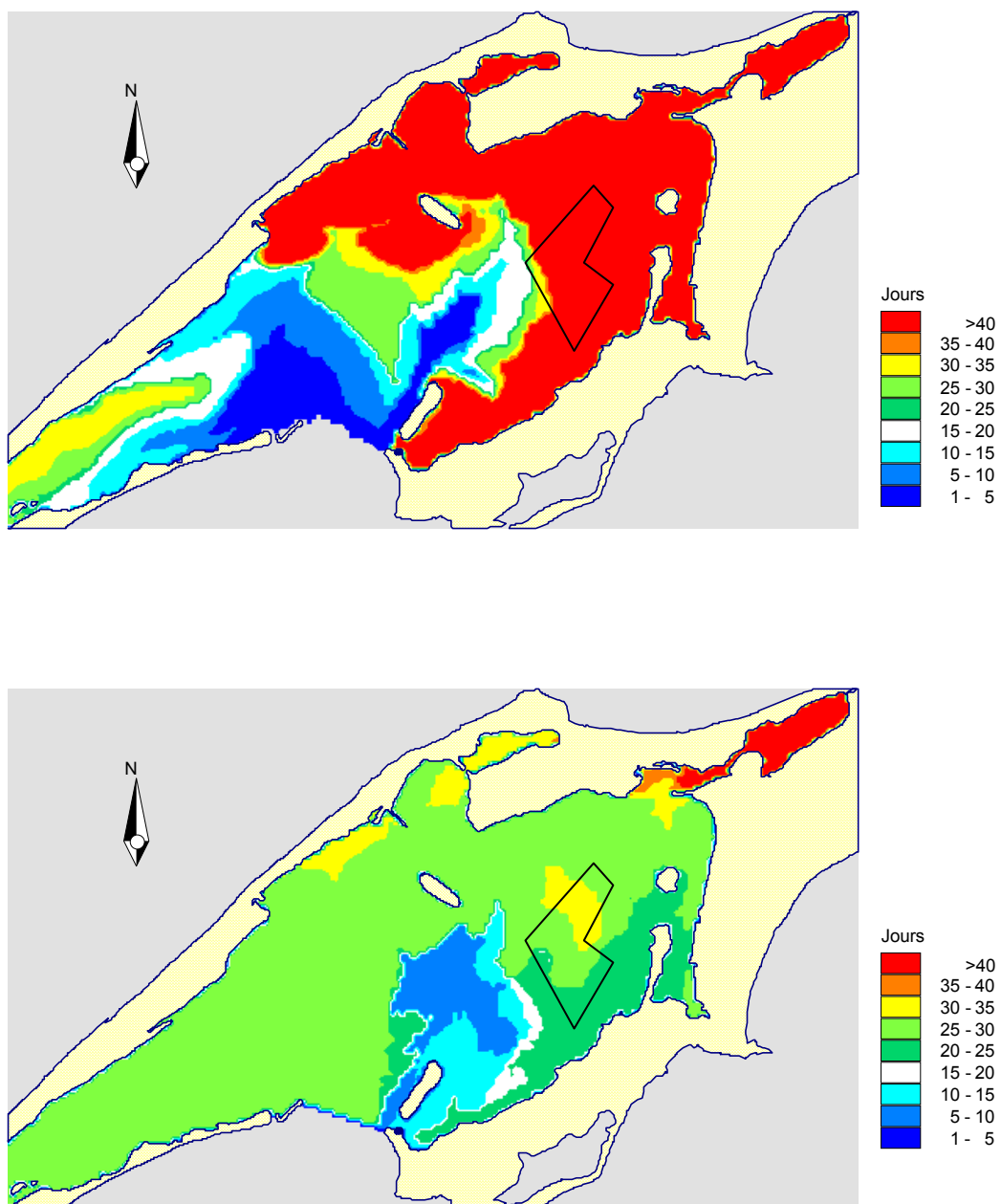


Figure 19 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche de surface (0 - 1.5 m) de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

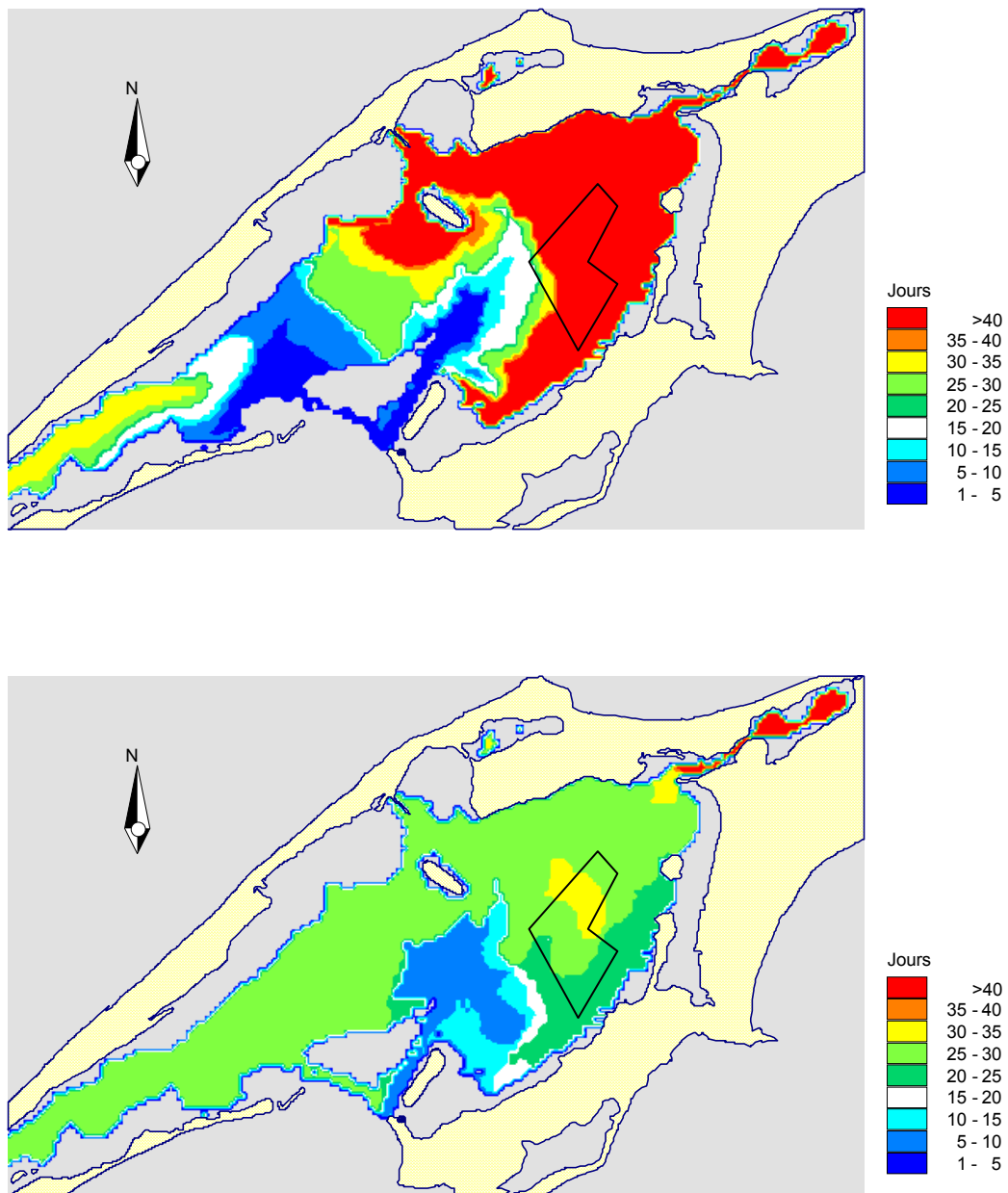


Figure 20 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 1,5 – 2,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

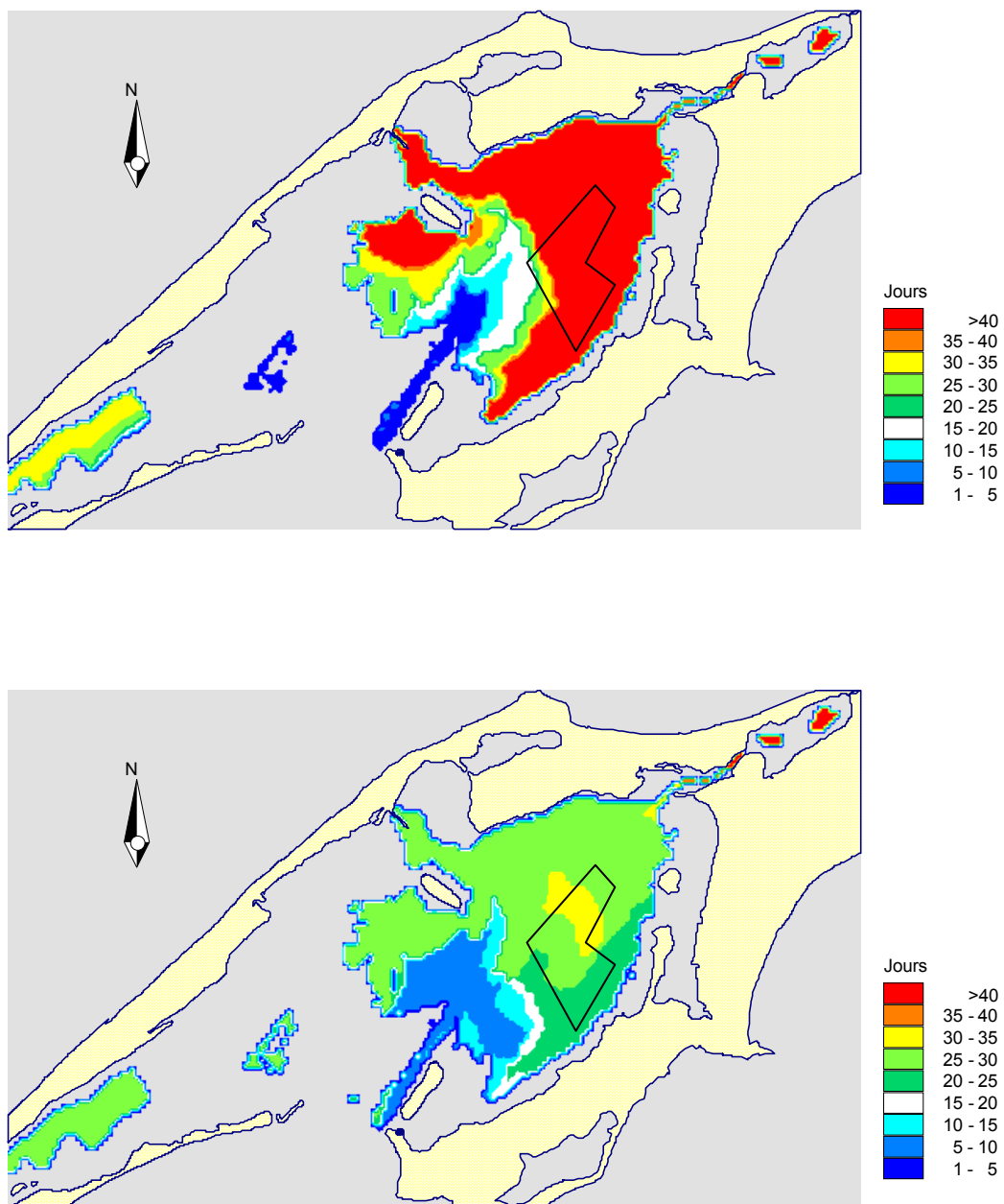


Figure 21 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 2,5 – 3,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

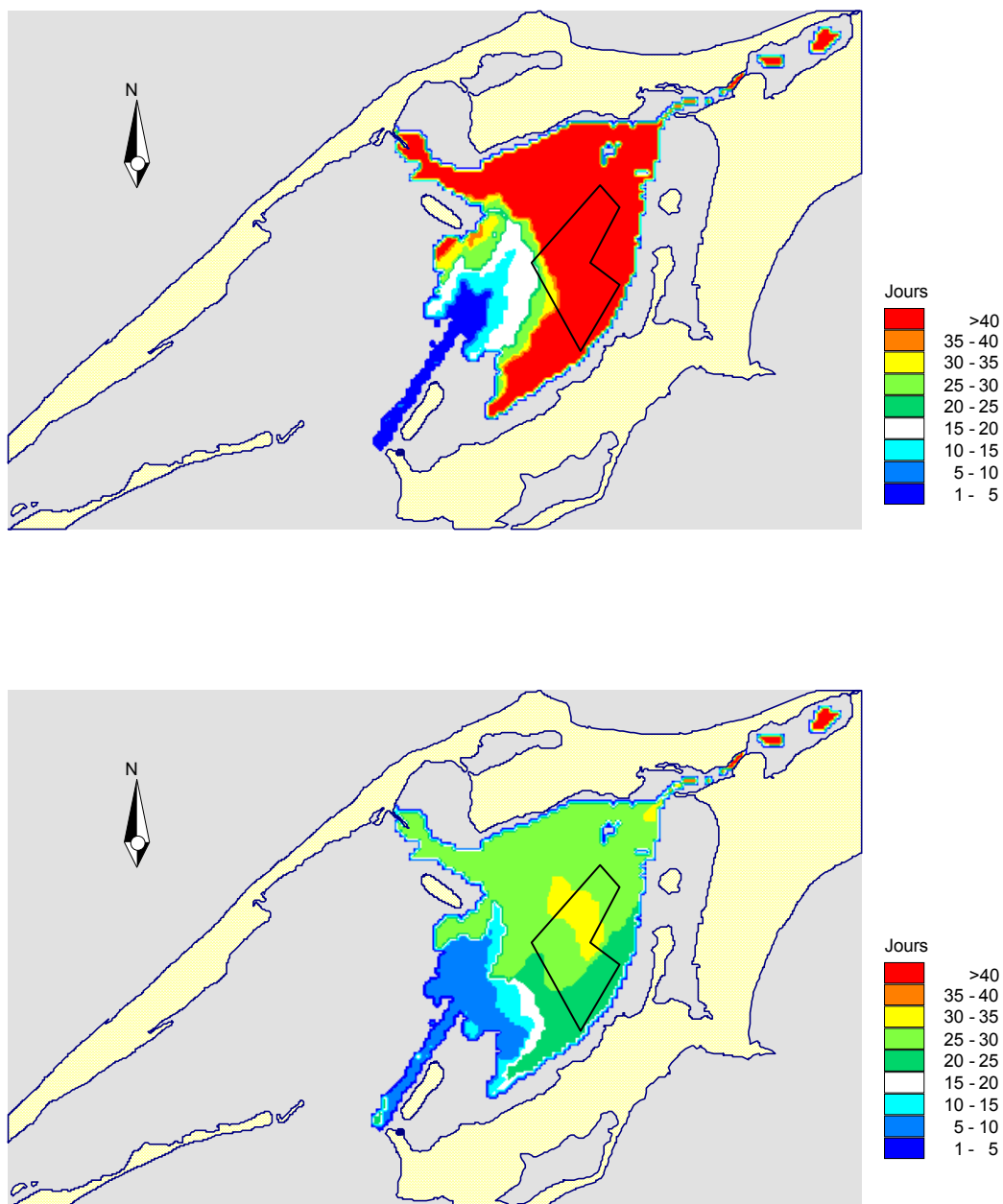


Figure 22 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 3,5 - 4,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

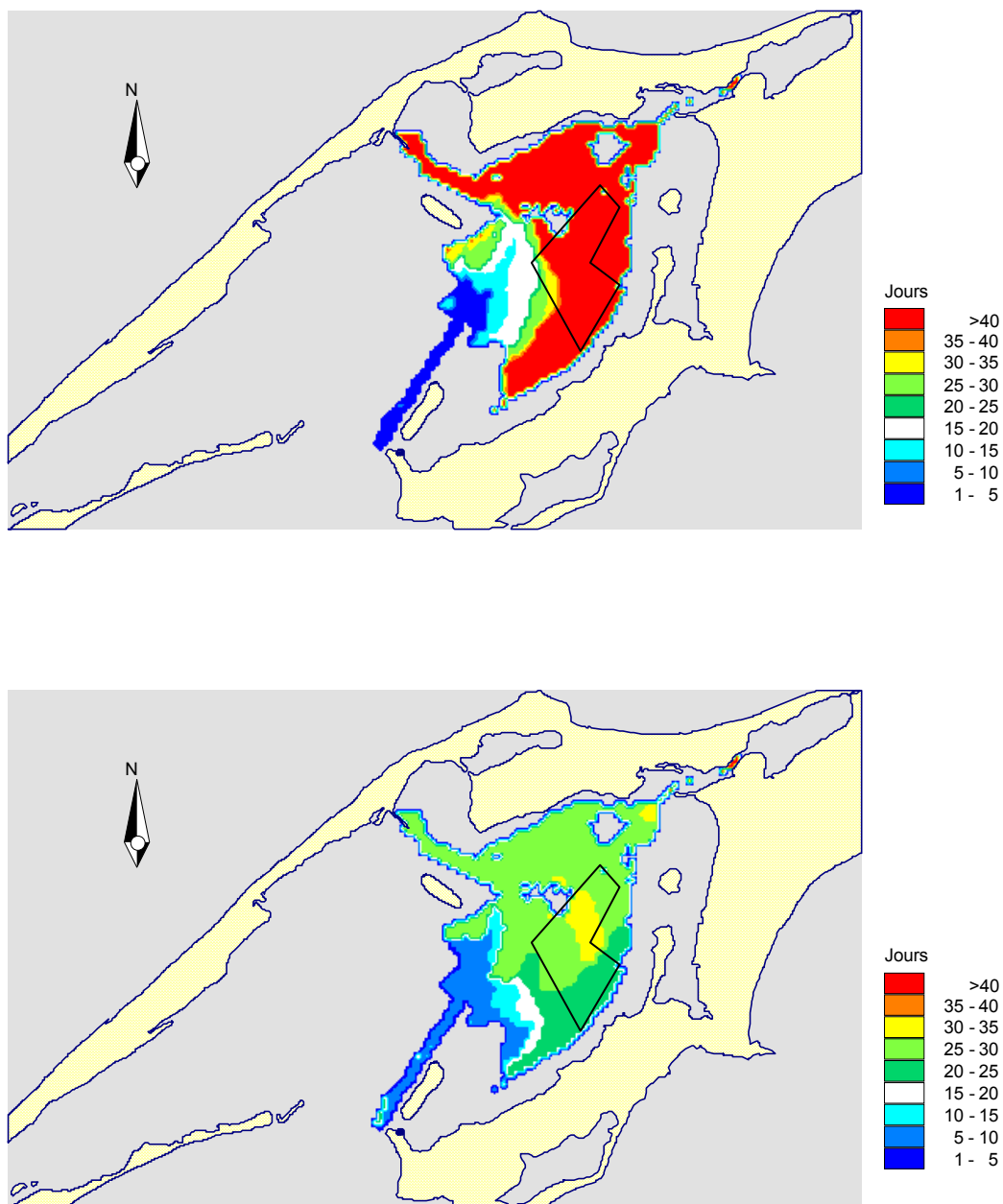


Figure 23 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 4,5 - 5,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

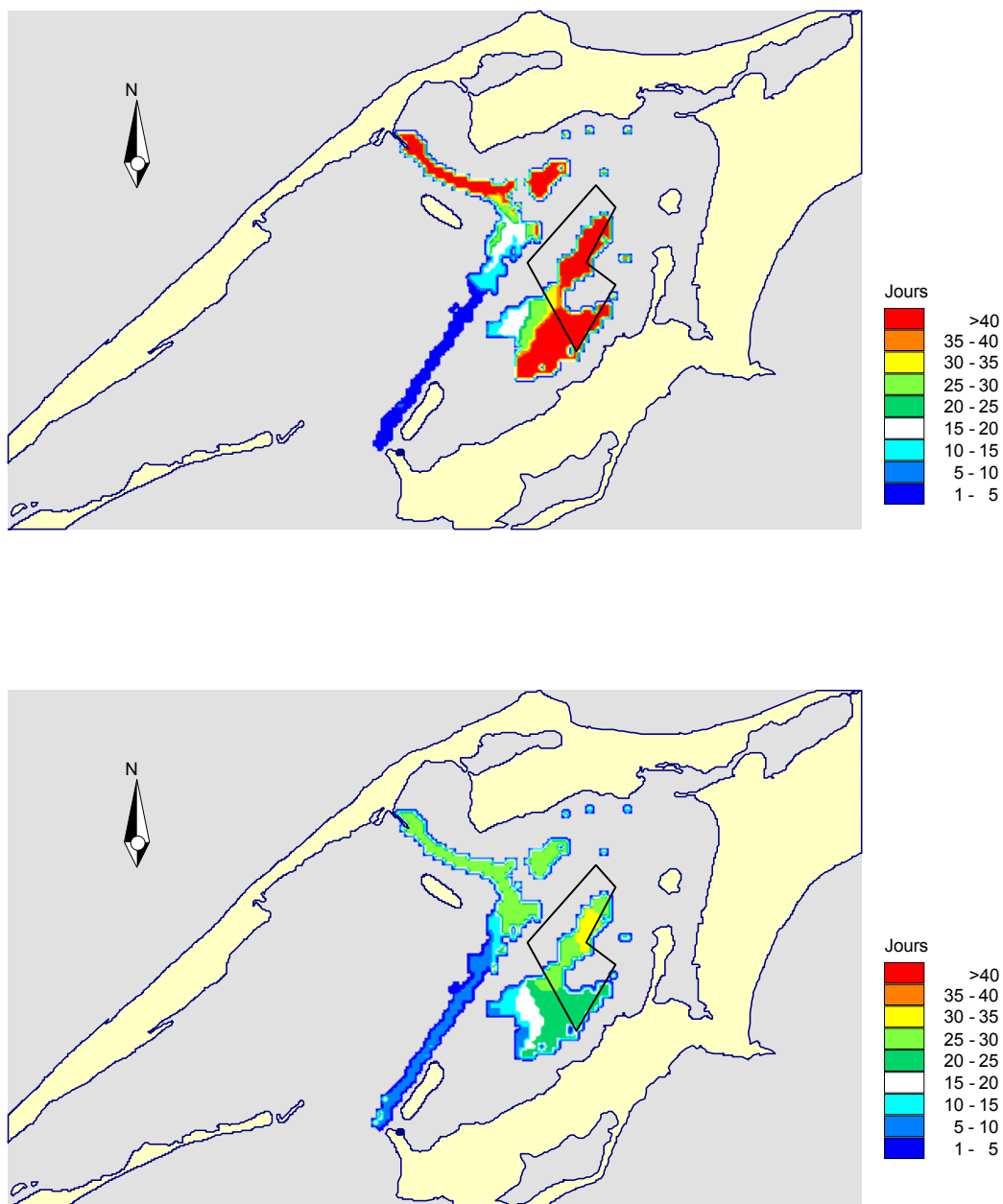


Figure 24 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche intermédiaire 5,5 - 6,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

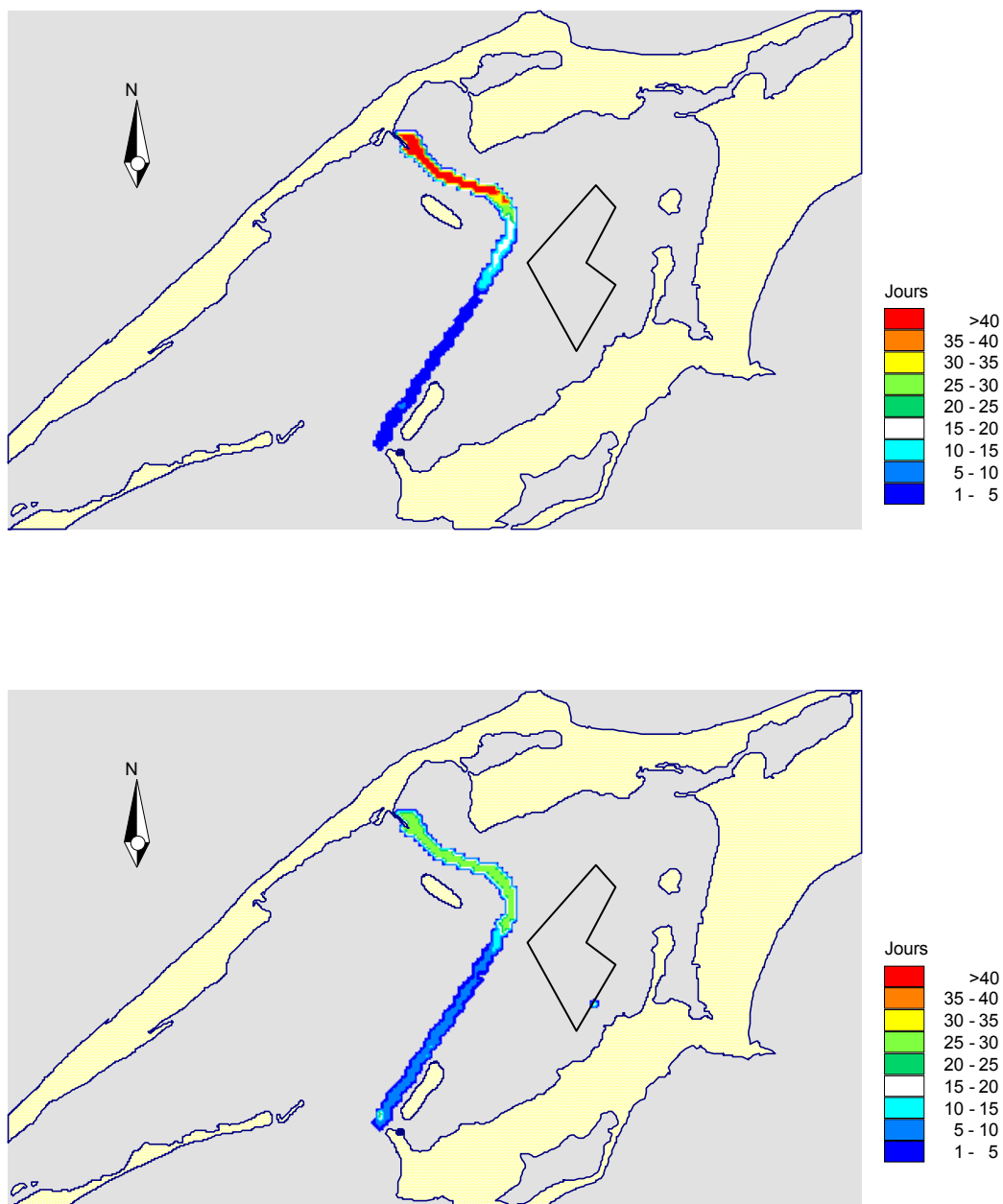


Figure 25 : Distribution spatiale du temps de renouvellement local des eaux dans la couche du fond 6,5 - 7,5 m de la lagune de Grande-Entrée pour la période du 24 mai 2001 au 9 juillet 2001, sous l'effet de : (1) les marées observées (haut) et (2) les marées et les vents observés (bas).

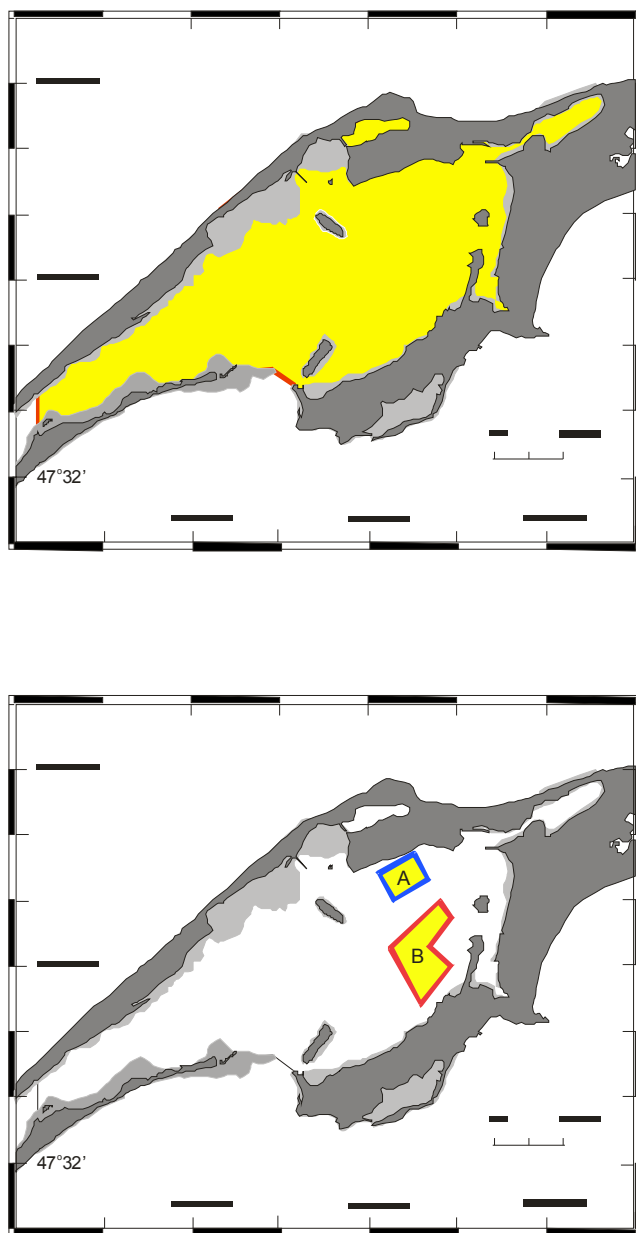


Figure 26 : Régions incluses dans le calcul du temps de renouvellement intégral : (a) la région à l'est de la lagune de Grande-Entrée, figure du haut, et (b) les sites de culture de pétoncles (A) et de moules (B), figure du bas.

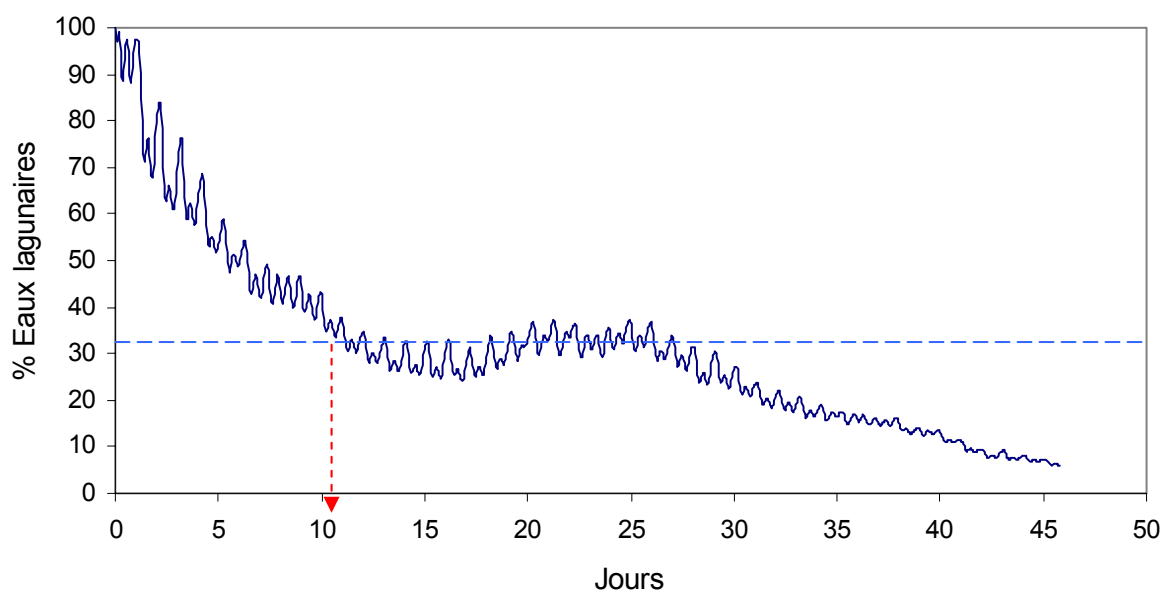
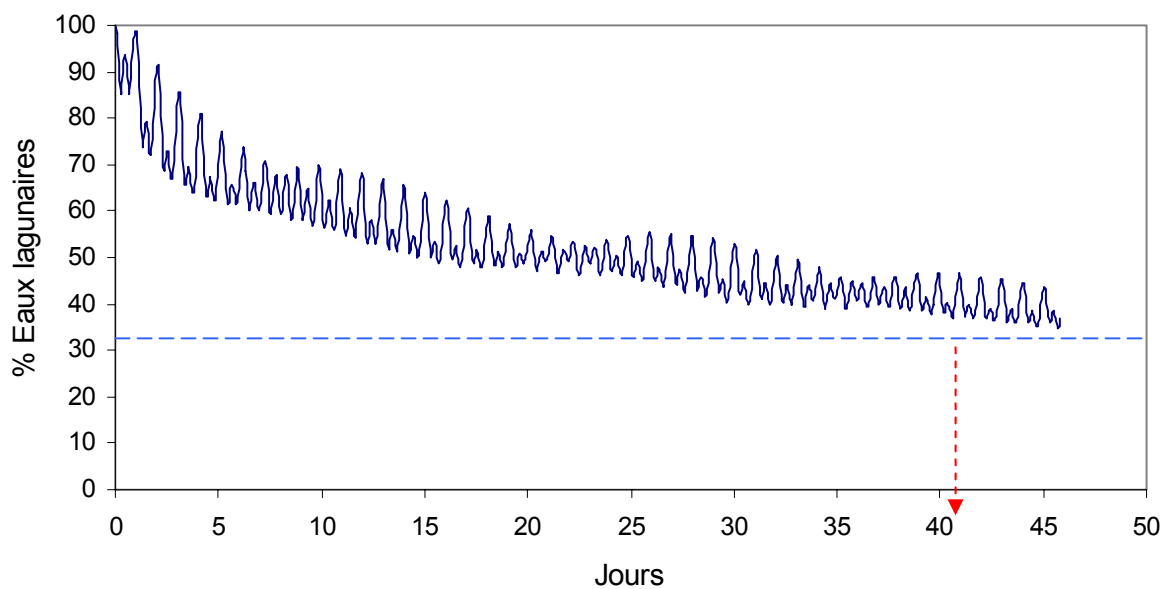


Figure 27 : Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans la région est de la LGE (voir figure 2) par les marées (haut) et par la combinaison des marées et vents (bas), du 24 mai au 7 juillet 2001. Le temps de renouvellement intégral (flèches rouges) correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées.

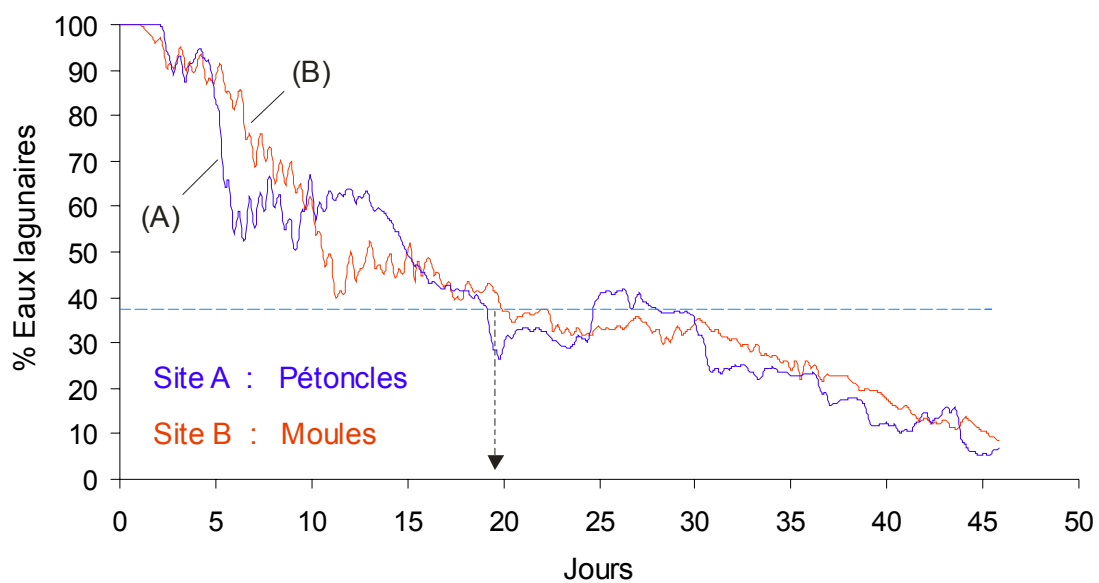
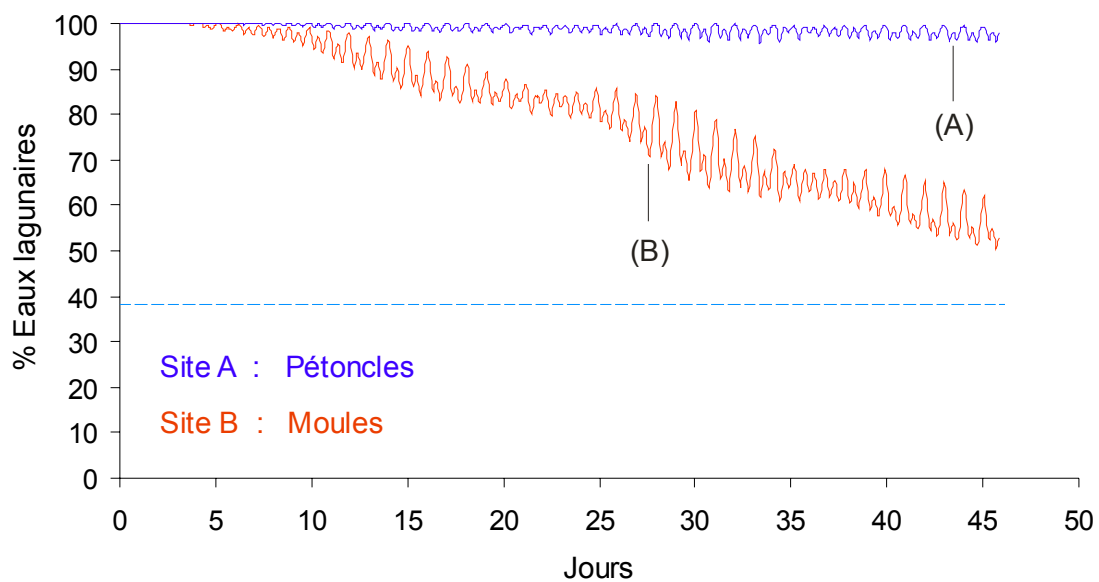


Figure 28 : Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans les sites de culture de pétoncles (A) et de moules (B) dans la LGE (voir figure 16b), sous l'effet des marées (haut) et des vents et marées (bas), du 24 mai au 9 juillet 2001. Le temps de renouvellement intégral (flèche) correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées (tirets).