



# MeHSIP-PPIF

---

CIRCULATION ET TEMPS DE RENOUVELLEMENT DES EAUX  
AVANT ET APRES DRAGAGE D'UNE BANDE LITTORALE  
DU SECTEUR NORD-EST DE LA LAGUNE DE BIZERTE PAR  
MODELISATION ET MESURES COURANTOMETRIQUES

PAR : BECHIR BEJAOUI & CHERIF SAMMARI

DATE : LE 09 FEVRIER 2012

DOCUMENT NR. : 5080309/30/DG/086

---



## Horizon 2020

INVESTMENT COMPONENT | MeHSIP-PPIF

### MeHSIP-PPIF

Mediterranean Hot Spot Investment Programme

Project Preparation and Implementation Facility

A TA operation funded by the European Union – FEMIP Support Fund



## Disclaimer

*Le programme est financé au titre du Fonds d'assistance technique de la FEMIP. Ce Fonds utilise des aides non remboursables accordées par la Commission Européenne pour appuyer l'activité d'investissement que la BEI déploie dans les pays du sud de la Méditerranée, en assistant les promoteurs au cours des différentes étapes du cycle des projets.*

*Les auteurs assument pleinement la responsabilité du contenu du présent rapport. Les opinions exprimées ne reflètent pas nécessairement celles de l'Union Européenne ou de la Banque Européenne d'Investissement.*

**Le présent rapport a été rédigé par Bechir Bejaoui & Cherif Sammari avec la collaboration de l'Institut National de Sciences et Technologies de la Mer (INSTM) dans le contexte du Projet de Dépollution Intégrale du Lac de Bizerte**



Institut National des Sciences  
et Technologies de la Mer

REVISION	DATE	DESCRIPTION	PREPARE PAR	REVISE PAR
0	9/2/2012	Rapport modélisation lac de Bizerte	Bechir Bejaoui & Cherif Sammari	Nick Marchesi

Document nr: 5080309/30/DG/086

# Sommaire

<b>1</b>	<b>PRESENTATION GENERALE.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>MORPHOLOGIE DE LA ZONE D’ETUDE .....</b>	<b>7</b>
2.1	Morphologie des côtes .....	7
2.1.1	Le littoral Nord : Ras Gueblaoui et Menzel Jemil .....	7
2.1.2	littoral Est : Menzel Jemil - Oued Guenniche .....	8
2.1.3	Le littoral Sud : Oued Guenniche-Menzel Bourguiba .....	8
2.1.4	Le littoral Ouest : Menzel Bourguiba–Le goulet.....	9
2.1.5	Le goulet .....	9
2.2	Morphologie des fonds .....	10
2.3	Composition des sédiments superficiels.....	11
<b>3</b>	<b>MESURES DES VARIABLES OCEANIQUES.....</b>	<b>14</b>
3.1	Mesures réalisées en 2000 .....	15
3.1.1	Niveau d’eau .....	15
3.1.2	Courants.....	19
3.2	Mesures réalisées en 2011 .....	21
3.2.1	Série Temporelle : Argonaut .....	21
3.2.2	Série Temporelle : ADCP .....	25
<b>4</b>	<b>VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE .....</b>	<b>35</b>
4.1	Forçage du modèle .....	35
4.2	Comparaison des températures simulées et observées .....	36
4.3	Comparaison des niveaux d’eaux simulé et observé .....	37
4.4	Comparaison des courants simulés et observés .....	39
4.4.1	Au niveau de la station CBiz (sous le pont de Bizerte) .....	39
4.4.2	Au niveau de la station CMJ (Menzel Jemil).....	39
4.4.3	Au niveau de la station CMA (Menzel Abderrahmen).....	42
4.5	Discussion .....	48
<b>5</b>	<b>CIRCULATION DES EAUX.....</b>	<b>49</b>
5.1	Effet d’un vent Nord-Ouest.....	52
5.2	Localisation des zones « mortes » .....	53
<b>6</b>	<b>SIMULATION D’UN SCENARIO DU DRAGAGE.....</b>	<b>55</b>
6.1	Bathymétrie de la lagune avant et après dragage .....	56
6.2	Circulation hivernale avant et après dragage (secteur Nord-Est).....	58
6.3	Circulation estivale avant et après dragage (secteur Nord-Est) .....	59
6.4	Variation temporelle des courant avant et après dragage (secteur Nord-Est).....	61
6.5	Interprétation .....	66
<b>7</b>	<b>TEMPS DE RENOUVELLEMENT DES EAUX .....</b>	<b>68</b>
7.1	Méthode du prisme .....	68
7.2	Méthode Advection-Diffusion .....	74
	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>80</b>

## Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de la lagune de Bizerte (OTC, 1992).....	6
Figure 2. Bathymétrie de la lagune de Bizerte. ....	11
Figure 3. Carte de répartition des sédiments au niveau de la lagune de Bizerte (Frisoni et al., 1986) .....	13
Figure 4. Carte de répartition de la fraction inférieure à 63 µm dans les sédiments superficiels (%) (MAERH, 2004) .....	13
Figure 5. Emplacement des marégraphes et des courantomètres .....	14
Figure 6. Pression atmosphérique (inversée SLP) et niveau de l'eau (SL) (en m d'eau) au niveau du brise-lames (MBiz).....	15
Figure 7. Pression atmosphérique (inversée SLP) et niveau de l'eau (SL) (en m d'eau) au niveau de la passe (MBC).....	16
Figure 8. Evolution temporelle de la composante due à la marée du niveau de l'eau (en m) au niveau du brise-lames (MBiz).....	17
Figure 9. Evolution temporelle de la composante due à la marée du niveau de l'eau (en m) au niveau de la passe (MBC).....	17
Figure 10. Marée observée dans les stations MBiz (rade extérieure) et MBC (goulet) .....	19
Figure 11. Vitesses mesurées sous le pont en Hiver (INSTM, 2002) .....	20
Figure 12. Vitesses mesurées sous le pont en Eté (INSTM, 2002) .....	20
Figure 13. Variation de la température enregistrée pendant la période de l'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012).....	22
Figure 14. Variation temporelle des composantes u et v enregistrée pendant la période de l'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012).....	23
Figure 15. Stick du vecteur vitesse pendant la période d'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012) .....	23
Figure 16. Hodographe intégré .....	24
Figure 17. Analyse EOF de la série temporelle de la vitesse .....	24
Figure 18. Variation de la température enregistrée pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012 .....	25
Figure 19. Variation de la température enregistrée pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012 .....	26
Figure 20. Variation temporelle des composantes u et v du courant pour chacune des cellules C1, C2 et C3 pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012.....	29
Figure 21. Les diagrammes bâton des courants enregistrés au niveau de la station en face de Menzel Abderrahmen à trois niveaux z (-3.5, -5.5 et -7.5 m) .....	30
Figure 22. Profil vertical de la vitesse moyenne .....	30
Figure 23. Hodographes intégrés des trois niveaux.....	31
Figure 24. Analyse EOF de la série temporelle des courants à trois niveaux z.....	32
Figure 25. Ellipse de dispersion des courants au niveau de Menzel Jemil (Argonaut) et au niveau de deux cellules en face de Menzel Abderrahmen (ADCP) .....	33
Figure 26. Hauteur de la houle spécifique au niveau de la station en face de Menzel Abderrahmen (mesures de l'ADCP) .....	34
Figure 27. Rose de la houle au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen (mesures de l'ADCP) .....	34
Figure 28. Rose du vent du mois de Décembre 2011 à la région de Bizerte.....	35
Figure 29. Diagramme bâton et composantes u, v ainsi que l'intensité du vent tri-horaire du mois de Décembre 2011 à la région de Bizerte. ....	36
Figure 30. Variation de la température observée et simulée au niveau de la station CMJ à Menzel Jemil. ....	36
Figure 31. Variation de la température observée et simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.....	37
Figure 32. Séries temporelles de la marée observée (bleue) et calculée (rouge) à l'entrée de la lagune (MBC).....	38

Figure 33. Séries temporelles de la marée observée (bleue) et calculée (rouge) en face de Menzel Abderrahmen au niveau de la station CMA .....	38
Figure 34. Vitesse de déplacement de l'eau simulée (rouge) et observée (bleue) sous le pont de Bizerte.....	39
Figure 35. Vitesses observée (bleue) et simulées (en surface (rouge), milieu (noir), fond (magenta) et intégrée sur la verticale (vert)) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil. ....	40
Figure 36. Vitesses observée (bleue) et simulées (milieu (noir) et moyenne (vert)) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil.....	40
Figure 37. Composantes zonales de la vitesse moyenne mesurée (bleue) et simulée par le modèle (vert) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil .....	41
Figure 38. Composantes méridiennes de la vitesse moyenne mesurée (bleue) et simulée par le modèle (vert) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil.....	41
Figure 39. Diagramme bâton de la marée à la profondeur -7.5m à la station CMA en face de à Menzel Abderrahmen. ....	42
Figure 40. Vitesses observée (bleue) et simulée au fond (z=-7.5m) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.....	43
Figure 41. Composantes zonales de la vitesse mesurée (bleue) et de la vitesse simulée par le modèle (rouge) au fond (z=-7.5m) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.....	43
Figure 42. Composantes méridiennes de la vitesse mesurée (bleue) et de la vitesse simulée par le modèle (rouge) au fond (z=-7.5m) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen. ....	44
Figure 43. Vitesses au fond (z=-5.5m) observée (bleue) et simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.....	45
Figure 44. Composantes zonales de la vitesse mesurée (bleue) et simulée par le modèle (rouge) au fond (z=-5.5m) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.....	45
Figure 45. Composantes méridiennes de la vitesse mesurée (bleue) et de la vitesse simulée par le modèle (rouge) au fond (z=-5.5m) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen. ....	46
Figure 46. Vitesse des eaux de surface simulée (z=-0.3m) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.....	46
Figure 47. Composante zonale (u) de la vitesse des eaux de surface (z=-0.3m) simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen. ....	47
Figure 48. Composante méridienne (v) de la vitesse des eaux de surface (z=-0.3m) simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen. ....	47
Figures 49. Circulation hivernale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus intense en comparaison à la circulation de fond (b). ....	50
Figures 50. Circulation estivale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus importante en comparaison à la circulation de fond (b). ....	51
Figure 51. Circulation des eaux de surface générée par un vent de direction Nord-Ouest. ....	52
Figure 52. Vitesses intégrées sur la hauteur générée par un vent de direction Nord-Ouest. ....	52
Figure 53. Identification des zones de mortes eaux en hiver (a) et en été (b) dans la lagune. ....	54
Figure 54. Bathymétrie de la lagune avant dragage du secteur Nord-Est.....	56
Figure 55. Bathymétrie de la lagune après dragage du secteur Nord-Est. La figure 55b est un zoom du secteur Nord-Est montrant la partie dragée.....	57
Figures 56. Répartition et intensité des courants barotrope moyen avant dragage du secteur Nord-Est (circulation hivernale).....	58
Figures 57. Répartition et intensité des courants barotrope moyen après dragage du secteur Nord-Est (circulation hivernale).....	58
Figures 58. Différence (après – avant) entre les intensités des courants barotrope moyen après et avant dragage du secteur Nord-Est (circulation hivernale). ....	59
Figure 59. Répartition et intensité des courants barotrope moyen avant dragage du secteur Nord-Est (circulation estivale).....	60
Figure 60. Répartition et intensité des courants barotrope moyen après dragage du secteur Nord-Est (circulation estivale).....	60

Figure 61. Différence (après – avant) entre les intensités des courants <i>barotrope</i> moyen après et avant dragage du secteur Nord-Est (circulation estivale).....	61
En conclusion, la variation verticale de l'intensité et la direction des courants reste faible avant et après le dragage du fond au niveau du secteur Nord-Est. ....	62
Figure 62. Variation temporelle de l'intensité des courants à 0.2 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune.....	62
Figure 63. Variation temporelle de l'intensité des courants à 2.7 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune.....	63
Figure 64. Variation temporelle de l'intensité des courants à 5 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune.....	63
Figure 65. Variation temporelle de l'intensité des courants barotrope au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune .....	64
Figure 66. Courants simulés à 0.2 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après).....	64
Figure 67. Courants simulés à 2.7 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après).....	65
Figure 68. Courants simulés à 5 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après).....	65
Figure 69. Courants brotrophe simulés au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après) .....	66
Figure 70. Banc de sable longeant la côte du secteur Est (figure Google Earth).....	67
Figure 71. Variation en fonction du temps du volume total de la lagune – Simulation du modèle de l'INSTM .....	70
Figure 72. Débit d'eau entrant dans la lagune de Bizerte à travers le goulet – Simulation du modèle de l'INSTM.....	71
Figure 73. Variation en fonction du temps du volume d'eau du secteur Nord-Est de la lagune de Bizerte – Simulation du modèle de l'INSTM .....	71
Figure 74. Débit d'eau entrant dans le secteur Nord-Est de lagune de Bizerte – Simulation du modèle de l'INSTM.....	72
Figure 75. Variation en fonction du temps du volume d'eau du secteur Nord-Est de la lagune de Bizerte avant et après dragage – Simulation du modèle de l'INSTM .....	72
Figure 76. Débit d'eau entrant dans le secteur Nord-Est de lagune de Bizerte avant et après dragage–Simulation du modèle de l'INSTM .....	73
Figures 77. Débit d'eau entrant dans le secteur Nord-Est de lagune de Bizerte avant et après dragage–Simulation du modèle de l'INSTM .....	73
Figure 78. Renouvellement des eaux de surface par les eaux marines sous l'effet de la marée et des vents avant dragage du secteur Nord-Est. Les sorties sont au pas de 60 jours.....	75
Figure 79. Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans la lagune de Bizerte par la combinaison des marées et vents avant le scénario de dragage du secteur Nord-Est. Le temps de renouvellement intégral correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées. ....	76
Figure 80. Distribution spatiale du Temps de Renouvellement Local des eaux de surface avant le scénario de dragage du secteur Nord-Est sous l'effet de la marée et des vents. ....	76
Figure 81. Renouvellement des eaux de surface par les eaux de la Méditerranée sous l'effet de la marée et des vents après dragage du secteur Nord-Est. Les sorties sont au pas de 60 jours.....	77
Figure 82. Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans la lagune de Bizerte par la combinaison des marées et vents après (courbe rouge) et avant (courbe bleue) dragage du secteur Nord-Est. Le temps de renouvellement intégral correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées. ....	78
Figure 83. Distribution spatiale du Temps de Renouvellement Local des eaux de surface après le scénario de dragage du secteur Nord-Est sous l'effet de la marée et des vents. ....	78

## Liste des tableaux

Tableau 1. Composantes de la marée à la sortie du canal au niveau du brise-lames (MBiz) .....	18
Tableau 2. Composantes de la marée à la passe (MBC) .....	18
Tableau 3. Retard de la marée dans la passe par rapport à celle à l'extérieur (en heures) .....	18
Tableau 4. Caractéristiques du déploiement des courantomètres.....	21
Tableau 5. Statistiques de l'enregistrement de la température pendant la période de l'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012) .....	22
Tableau 6. Statistiques de base des composantes u et v de la vitesse (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012) .....	23
Tableau 7. Statistiques de base des enregistrements de la température pendant la période du 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012.....	25
Tableau 8. Statistiques de base de la série temporelle du niveau d'eau pendant la période du 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012.....	26
Tableau 9. Résultat de l'analyse harmonique.....	27
Tableau 10. Statistiques de base des composantes u et v de les vitesses enregistrées aux trois niveaux pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012 .....	29
Tableau 11 : Temps de renouvellement des eaux du volume intégral de la lagune et du secteur Nord-Est pour les deux situations avant et après le dragage (Calcul réalisé par la méthode du prisme) .....	69

# 1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La lagune de Bizerte est située au Nord de la Tunisie entre les latitudes 37°8' et 37°14' et entre les longitudes 9°46' et 9°56' (figure 1). Elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 150 km<sup>2</sup>, avec une largeur de 11 km et une longueur maximale de 13 km. Elle communique avec la mer par un chenal de six kilomètres de longueur, celui-ci primitivement sinueux et peu profond, fut transformé à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle en un large canal d'une douzaine de mètres de profondeur. Ce canal se poursuit à travers la lagune jusqu'à la région de l'Arsenal de Menzel Bourguiba.

La lagune est reliée dans sa partie Ouest à un second plan d'eau, le lac Ichkeul (Garaet Ichkeul) par l'oued Tinja d'environ 5 km de long et de quelques mètres de profondeur. L'Est de la lagune est occupé par la plaine d'effondrement de l'oued Guenniche et le Sud par les plaines alluvionnaires des oueds Ben Hassine et Garch.

L'appartenance de cette lagune à une région d'effondrement entouré d'une série de petites montagnes, lui affecte le caractère d'un réceptacle constitué d'un nombre important d'oueds qui prennent naissance dans ces montagnes et se déversent dans la lagune. A cette double influence, marine et continentale s'ajoute une troisième influence d'ordre urbaine portuaire et industrielle (rejets des eaux usées domestiques et industrielles).

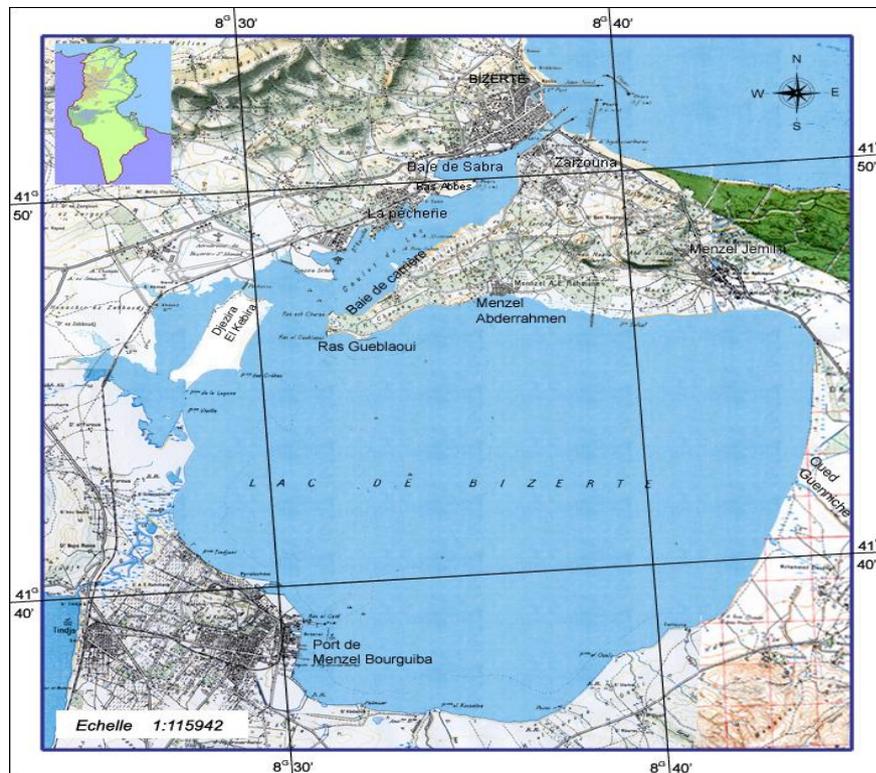


Figure 1. Situation géographique de la lagune de Bizerte (OTC, 1992)

## 2 MORPHOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

### 2.1 Morphologie des côtes

La morphologie côtière de la lagune de Bizerte actuel est la conséquence des différentes phases tectoniques qui se sont succédées depuis le miocène, et les apports alluvionnaires récents assurés par les cours d'eaux (Soussi, 1981).

#### 2.1.1 Le littoral Nord : Ras Gueblaoui et Menzel Jemil

Le littoral Nord (Ras Gueblaoui-Menzel Jemil) (figure 1) est caractérisé par l'apparition de plusieurs faciès. On note la présence des plages sablonneuses, des plages à galets, des plages rocheuses et des paysages marécageux.

Les plages sablonneuses sont localisées au niveau de Ras Gueblaoui (côte Nord-Ouest), entre le port de pêche (Menzel Abderrahmen) et Enjila et au niveau du littoral Nord-Est (entre Menzel Abderrahmen et Menzel Jemil). Les plages de Ras Gueblaoui et du secteur Nord-Est sont caractérisées par une abondance des débris de coquilles. Les travaux de Soussi (1981) permettent de confirmer l'abondance de la fraction de débris coquilliers qui se situe entre 45 et 90 % au niveau de Ras Gueblaoui (Photo 1). Les côtes rocheuses succèdent aux plages sablonneuses de Ras Gueblaoui et se poursuivent jusqu'à Enjila. Des côtes rocheuses s'étendent entre la zone militaire de Menzel Jemil et Shot Sabbar (Menzel Jemil) et quelques tronçons situés entre le port de pêche de Menzel Abderrahmen et la zone militaire de Menzel Jemil. Les plages à galets se localisent particulièrement au niveau du *bloc* (région située à l'Ouest de l'anse d'Enjila). L'environnement marécageux à salicornes est observé au niveau du littoral Nord-Ouest de la lagune. Cet environnement est marqué par deux plans d'eaux El Houssa1 et El Houssa2. La morphologie de cette frange côtière est relativement sinueuse avec alternance entre petits caps et petites baies. Les isobathes sont régulièrement espacées avec une pente douce, sauf face à la zone marécageuse où la bathymétrie est caractérisée par une pente raide, nous trouvons très rapidement les profondeurs importantes de la partie centrale (de l'ordre de 9 m).



*Photo 1 : Plages sablonneuses de la côte Nord-Ouest de la lagune au niveau de Ras Gueblaoui.*

*Cette photographie montre une faible accumulation de cymodocées sur la plage. Le sable au niveau de ce secteur est caractérisé par une fraction importante de débris de coquilles.*

### 2.1.2 littoral Est : Menzel Jemil - Oued Guenniche

Cette partie du littoral, de 7 km de longueur environ, est caractérisée par deux faciès : un premier faciès sableux marqué par la présence de galets et un deuxième faciès marécageux.

Le premier faciès (galets) est observé au niveau du littoral Nord-Est de la lagune. Ce tronçon est bordé par un mur de protection (200 m de long) aménagé pour faire face au recul de la ligne de côte. Le deuxième faciès succède au premier et s'étend jusqu'à l'embouchure de l'oued Guenniche. Les marécages sont bordés par des terrains agricoles. Ce littoral est caractérisé par une bathymétrie régulière à pente transversale très douce. Ainsi, à marée haute, à 150 m environ du rivage, la profondeur est de l'ordre de 1m. A marée basse, cette bande littorale est totalement émergée, on observe l'apparition des petits îlots sableux.



*Photo 2 : Marécages situés au niveau du littoral Est de la lagune.*

*Cette zone marécageuse à salicornes est totalement immergée en période de hautes mers.*

### 2.1.3 Le littoral Sud : Oued Guenniche-Menzel Bourguiba

Les caractéristiques morphologiques de cette bande littorale sont différentes de celles du littoral Nord. En effet, le littoral Sud est caractérisé par le développement de plages sablonneuses relativement larges bordées par des dunes de sables et par un trait de côte relativement linéaire. Outre ces caractéristiques, ce littoral est caractérisé par des plages à galets et des zones marécageuses.

L'étendue des plages sablonneuses est variable d'une région à l'autre. Les plages les plus développées sont situées entre l'oued Guenniche et l'oued Khima (au niveau de shot Boujneh à Magraoua) et à Jouaouda. Elles sont bordées par des dunes de sables bien développées, signe d'une stabilité du littoral. L'environnement marécageux est situé entre l'oued Khima et les ruines romaines à Jouaouda. Les plages de ce tronçon sont relativement larges, bordées en quelques endroits par des falaises argileuses de hauteur variant entre 2 et 3 m.

A partir de Jouaouda et en direction de Menzel Bourguiba, on observe un changement de paysage caractérisé par une alternance entre plages sablonneuses et plages à galets. Les plages à galets sont bordées par des falaises de hauteur variant entre 2 et 3 m (Photo 3).



*Photo 3 : Plage sableuse bordée par des falaises rocheuses au niveau de Jouaouda.*

*Le littoral de Jouaouda est caractérisé par une alternance de petits caps et anses.*

#### **2.1.4 Le littoral Ouest : Menzel Bourguiba–Le goulet**

A l’Ouest, s’étendent les plaines alluvionnaires du canal Tinja et de l’oued Haima où s’individualisent de petites dépressions à sec ou presque pendant l’été. Ce tronçon du littoral est caractérisé par une prédominance sableuse.

#### **2.1.5 Le goulet**

La rive Nord du goulet est marquée par des berges aménagées en quais (discontinues), qui se poursuivent jusqu’à la baie de Kharrouba, et par la baie de Sabra (figure 1). Masri (1996) a signalé un faciès sableux entre le port de commerce et la cimenterie de Bizerte et un faciès silto-sablo-argileux dans la baie de sabra (Photo 4).

La rive Sud est caractérisée par une alternance entre plages sablonneuses chargées par des débris de coquilles bordés par des terrains argileux sur la rive nord (Ain Kebira) et des plages à galets bordées par des falaises rocheuses de hauteur variant entre 2 et 3 m sur l’autre rive (Echaara). Ce secteur est marqué par l’embouchure de l’oued Roumine (Photo 5) qui draine les eaux usées domestiques de la *Cité Ouvrière (Zarzouna)* et celles de son bassin versant.



*Photo 4 : Baie de Sabra située sur la rive Nord du goulet.*

*Dans le cap de la baie de Sabra (Ras Abbès) on trouve l’ancienne décharge publique de la ville de Bizerte*



*Photo 5 : Embouchure de l'oued Roumine au niveau de la rive Sud du goulet.*

*Cet oued draine une partie des eaux pluviales de Zarzouna et de Menzel Abderrahmen ainsi que quelques rejets illicites, tous chargés de déchets.*

## **2.2 Morphologie des fonds**

Les caractères morphologiques des fonds de la lagune de Bizerte sont déterminés à partir des cartes marines à l'échelle 1/25000 dressées en 1954 par le service hydrographique de la Marine Nationale Française. Ces cartes marines sont relativement anciennes et nécessitent par conséquent une actualisation. D'après ces cartes, la profondeur moyenne de la lagune est de l'ordre de 7 m. On distingue (figure 2) :

- Une dépression centrale de 9 à 10 m de profondeur traversée par un chenal artificiel de profondeur 12 m reliant le port de Bizerte et celui de Menzel Bourguiba ;
- Une région Est caractérisée par une pente relativement douce ;
- Une formation des hauts fonds situés au niveau de l'embouchure du canal Tinja ;
- Une région Sud-Ouest caractérisée par une pente relativement raide. La profondeur de l'eau passe rapidement de 3 à 9 m ;
- Une région Nord-Est (entre Menzel Abderrahmen et Menzel Jemil) caractérisée par des isobathes régulièrement espacées et une pente relativement douce ;
- Une région Nord-Ouest située en face du Ras Gueblaoui caractérisée par une pente raide.

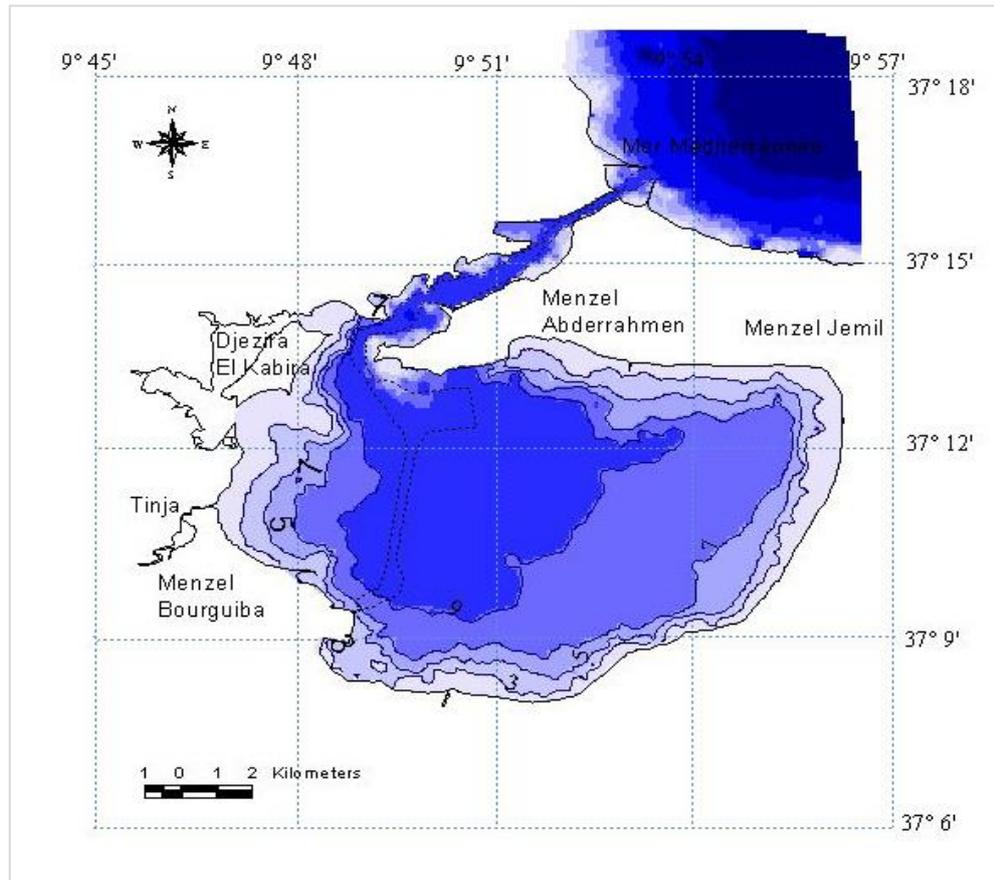


Figure 2. Bathymétrie de la lagune de Bizerte.

### 2.3 Composition des sédiments superficiels

L'analyse granulométrique effectuée par Soussi et al. (1983) a permis de définir trois faciès. Néanmoins, des faciès mixtes marquent parfois le passage d'un secteur à l'autre tels que les faciès sablo-argileux et argilo-silto-sableux.

- Faciès sableux : la fraction  $\geq 63 \mu\text{m}$  représente plus de 50 % du sédiment. Ce faciès caractérise la zone littorale ;
- Faciès silteux à silto-argileux : la fraction comprise entre 2 et  $63 \mu\text{m}$  constitue 20 à 50 % de dépôt. Ce faciès caractérise la zone orientale de la lagune ;
- Faciès argileux : la fraction  $\leq 2 \mu\text{m}$  représente plus de 50 % du dépôt. Ce faciès couvre toute la zone centrale et occidentale de la lagune.

La partie Nord-orientale de la lagune est occupée par des épitements rocheux *tyrrhéniens* et un matériel grossier constitué essentiellement par des débris coquillés (45 à 90 %), les sables quartzeux sont fins et bien classés. A partir de 3 m de profondeur, au matériau grossier de bordure se mêle une fraction argileuse dont la teneur augmente progressivement donnant lieu à l'établissement d'un faciès sablo-argileux. Face à Menzel Abderrahmen, les sédiments passent sans transition d'un faciès sableux à un faciès argileux. Le matériau détritique de la partie Nord-Ouest de la lagune montre approximativement les mêmes caractères que celui de la partie Nord-Est.

Dans la bande littorale orientale, jusqu'à 6 m de profondeur, les dépôts sont essentiellement sableux. Par des fonds plus importants, la fraction sableuse diminue progressivement à la faveur de l'accumulation d'un matériau silteux à argilo-silteux. L'étude lithosismique de Soussi (1981) a mis en évidence la présence d'un épandage de matériau grossier provenant de l'oued Garch.

Toute la partie centrale de la lagune et le large de l'embouchure de l'oued Tinja sont caractérisés par un faciès argileux. La fraction fine, inférieure à 2  $\mu\text{m}$ , représente 80 à 90 % du dépôt. Au Sud de l'embouchure de l'oued Tinja, une bande sableuse étroite apparaît marquée par l'accumulation de phanérogames mortes et de débris organiques provenant de l'intérieur de la lagune.

La partie méridionale de la lagune est occupée par un dépôt sableux formant une étroite bande littorale. A partir de 5 m de profondeur environ, la fraction argileuse augmente progressivement jusqu'à devenir exclusive dans la dépression centrale.

Le fond de la lagune est essentiellement vaseux à sablo-vaseux (figure 3) avec une homogénéité, notamment concernant la fraction de la matière organique qui représente environ 10 % du sédiment, en moyenne, sur l'ensemble du bassin. La valeur la plus importante du taux de la matière organique a été enregistrée au débouché de l'Oued Tinja et au niveau de l'ombilic hydraulique avec 15 % environ (Frisoni et al., 1986).

*L'étude MAERH (2004) (figure 4) a révélé deux faciès :*

- Le premier est marqué par la dominance d'une vase beige à noirâtre, qui présente des signes d'oxydation du soufre une fois exposé à la lumière (sédiments qui caractérisent les milieux calmes). Ce faciès est observé au niveau de la zone centrale de la lagune où la fraction fine (<63  $\mu\text{m}$ ) peut atteindre 100 % de la fraction totale.
- Le deuxième faciès est plutôt détritique avec la présence de plusieurs débris de coquilles de tailles millimétriques. Ce faciès caractérise la frange Ouest à Nord-Ouest qui est largement influencée par les apports issus du canal de Tinja et oued Haima.

En outre, dans les sédiments superficiels de la lagune, les carbonates représentent une fraction relativement importante dépassant parfois 80 %. Les teneurs les plus élevées ont été enregistrées au Nord-Est et au Nord-Ouest de la lagune alors que les teneurs faibles ont été enregistrées particulièrement au centre, à l'Est et au Sud de la lagune (20-50 %). Les carbonates dans les dépôts superficiels sont représentés essentiellement par des éléments biogènes (coquilles de mollusques).

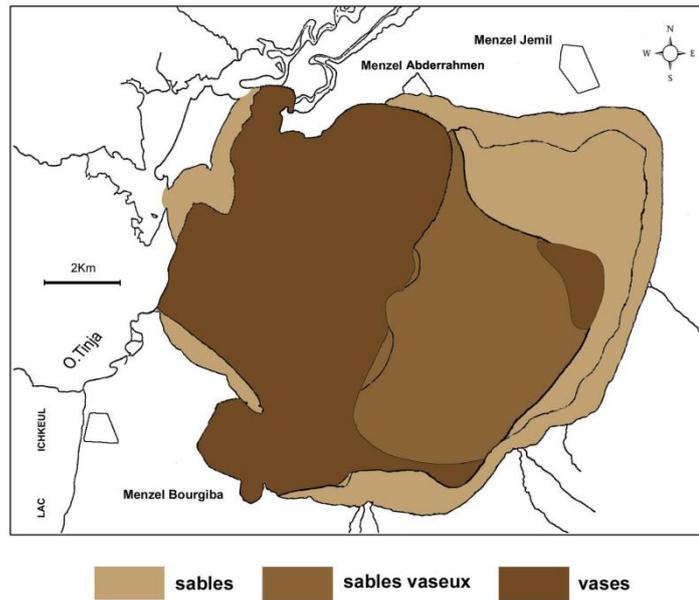


Figure 3. Carte de répartition des sédiments au niveau de la lagune de Bizerte (Frisoni et al., 1986)

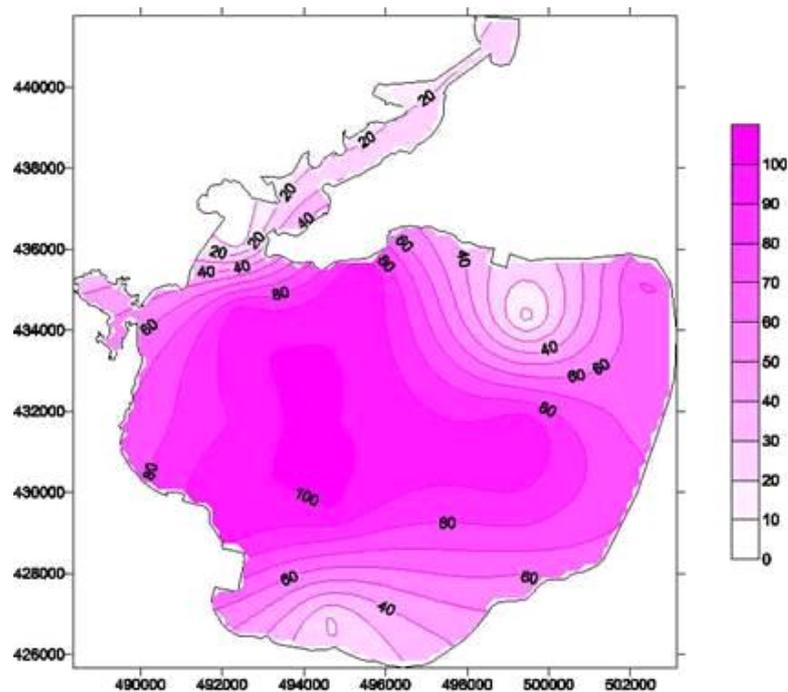


Figure 4. Carte de répartition de la fraction inférieure à  $63 \mu m$  dans les sédiments superficiels (%) (MAERH, 2004)

En résumé, les fonds de la lagune sont subdivisés en deux régions qui se distinguent nettement, la région centrale où la fraction fine prédomine et les régions côtières caractérisées par la prédominance de la fraction sableuse. La répartition de sédiments dans la lagune est liée essentiellement à l'hydrodynamisme et aux apports sédimentaires des cours d'eaux.

### 3 MESURES DES VARIABLES OCEANIQUES

L'élaboration de cette section a été établie principalement en se basant sur l'étude de l'INSTM réalisée dans le cadre du contrat programme du SERTST pour la période 1998-2001.

La présente section (§ III.) est consacrée à l'analyse des mesures des variables hydrodynamiques réalisées dans la lagune de Bizerte dans le cadre de l'étude de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer (INSTM, 2002) et la présente étude de la dépollution intégrale du lac de Bizerte (MeHSIP-PIIF, 2011).

Sur la figure 5 sont représentées les localisations géographiques des appareillages de mesure. Les marégraphes (MBiz & MBC) et les courantomètres (CBiz) qui ont été mouillés dans le cadre du projet de recherche de l'INSTM (INSTM, 2002) ainsi que les deux courantomètres CMA (ADCP) et CMJ (Argonaut) dans le cadre de la présente étude.

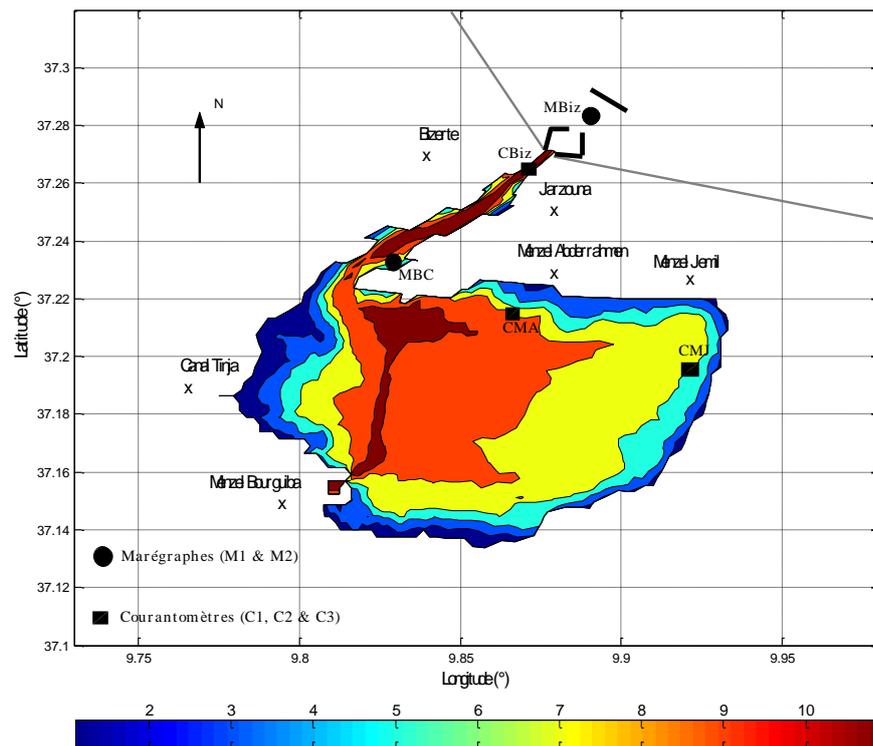


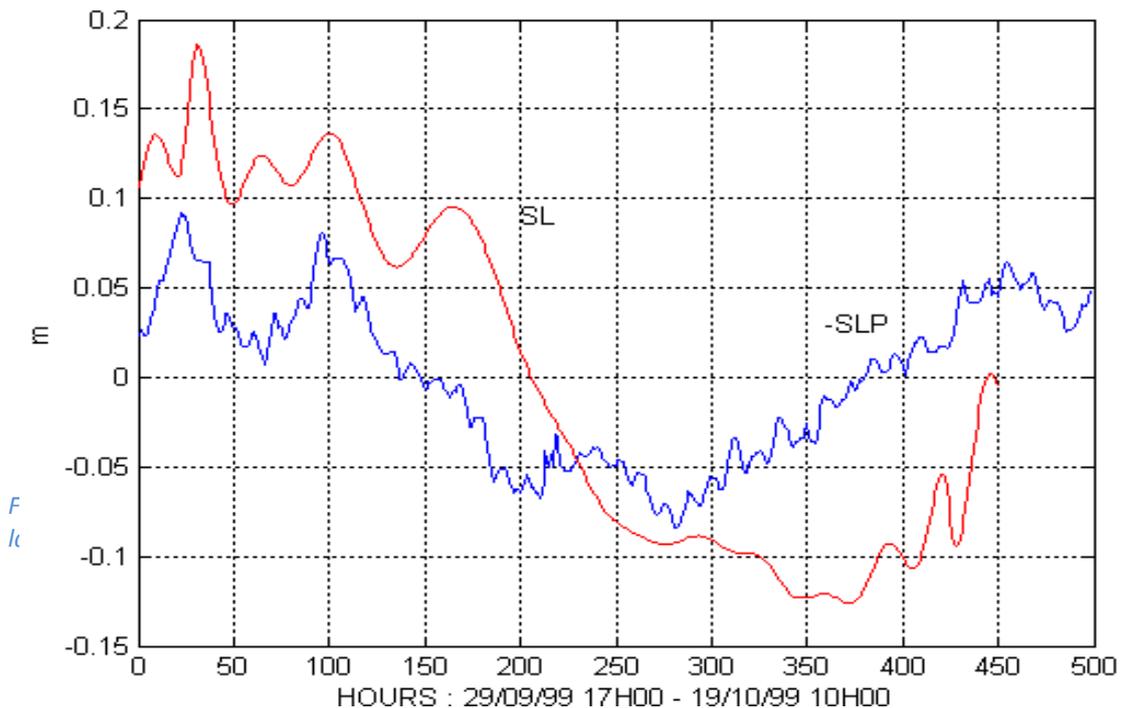
Figure 5. Emplacement des marégraphes et des courantomètres

### 3.1 Mesures réalisées en 2000

#### 3.1.1 Niveau d'eau

Les mesures de la marée dans la lagune de Bizerte sont celles de l'INSTM (2002). Un premier marégraphe (MBiz) a été placé à la sortie du canal au niveau du brise-lames (du côté intérieur), un second marégraphe (MBC) au niveau du goulet sur son bord Est. Les deux marégraphe ont mesuré la hauteur de l'eau à un intervalle de 10 mn pendant la période du 28 septembre 1999 au 19 octobre 1999. Les données issues des deux marégraphe ont été ramenées à des valeurs horaires pour plus de facilité de traitement et la pression atmosphérique a été retranchée pour obtenir des valeurs du niveau de l'eau. Un filtre permettant d'enlever les variations lentes est appliqué aux séries temporelles. Ces variations lentes pour les deux emplacements (MBiz et MBC) sont représentées en figure 6 et 7.

La marée au nord de la Tunisie quoique d'amplitude relativement modérée comparée à celle d'autres régions de la Tunisie et en particulier celle au golfe de Gabès, peut jouer un rôle important dans les échanges effectués entre la lagune de Bizerte et la mer. En effet la simple observation du déplacement des eaux lors de la marée entrante ou sortante dans le canal reliant la lagune à la mer montre que les courants sont très forts et atteignent des vitesses de 1 m/s. Les vitesses sont beaucoup plus faibles du côté de la mer et à la sortie du goulet du fait de l'élargissement de la section traversée par l'eau.



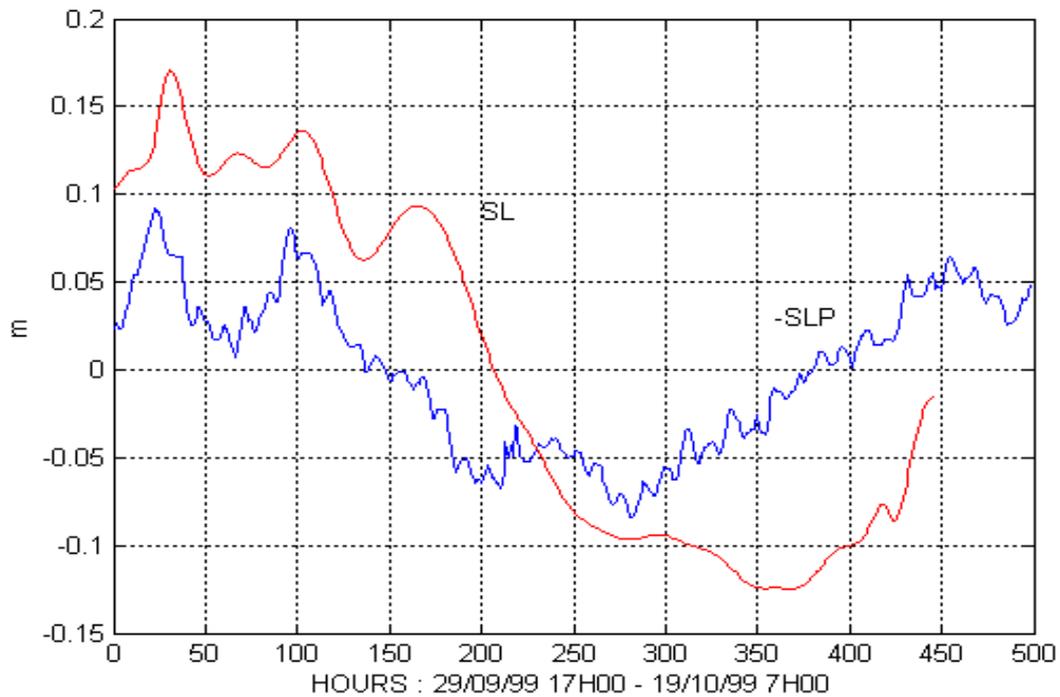


Figure 7. Pression atmosphérique (inversée SLP) et niveau de l'eau (SL) (en m d'eau) au niveau de la passe (MBC).

Les variations lentes du niveau de l'eau suivent de près celles de l'inverse de la pression atmosphérique suggérant que dans la mer aussi bien qu'à l'intérieur de la lagune, le niveau de l'eau agit comme un baromètre inversé. Les hautes pressions atmosphériques font donc baisser le niveau de l'eau de la lagune par sortie d'eau vers la mer. A l'inverse, lors des basses pressions le niveau de l'eau monte par entrée d'eau marine. L'amplitude des variations est relativement importante et atteint 5 cm. On remarque que les variations du niveau de l'eau sont retardées par rapport à celles de la pression atmosphérique. Ce retard dépend de la fréquence des variations de la pression. Pour des périodes de l'ordre d'une journée, le retard est seulement de quelques heures. Il est de quelques jours pour des périodes supérieures à une décade.

Un tel comportement n'est pas intrinsèque à la lagune mais traduit la réponse de la mer Méditerranée à la pression atmosphérique. Les variations du niveau de l'eau sont importantes pour la compréhension de la dynamique de la lagune puisqu'elles induisent d'importantes quantités d'eau échangées avec la mer. Les enregistrements du niveau de l'eau après avoir filtré les variations de hautes fréquences représente les variations dues à la marée (figures 8 et 9).

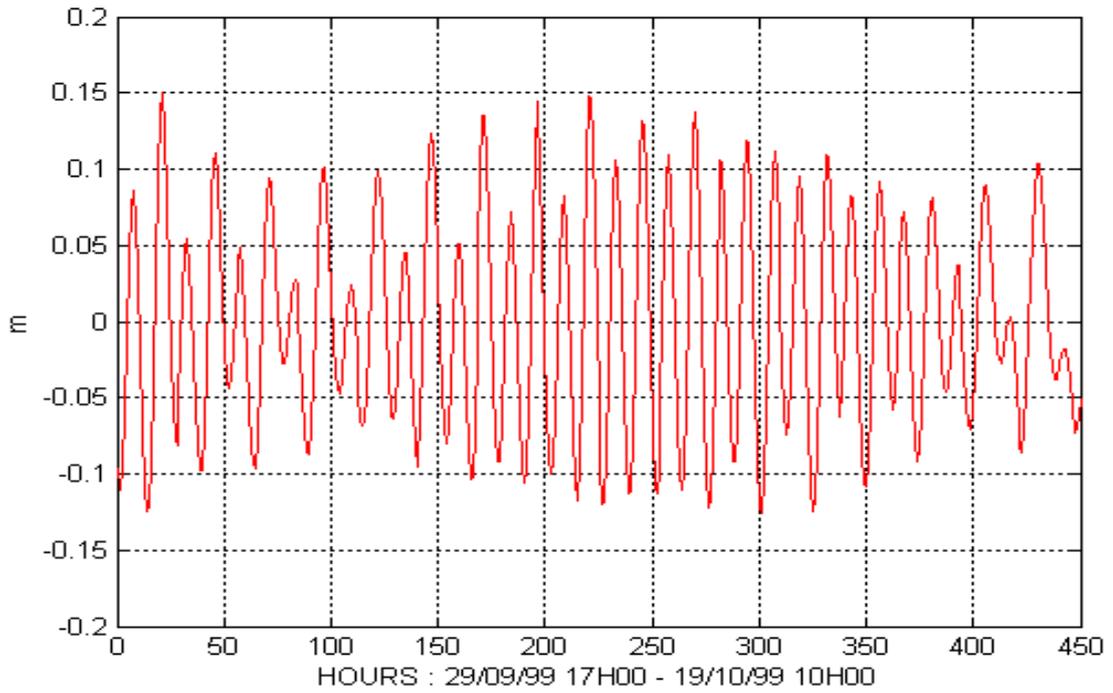


Figure 8. Evolution temporelle de la composante due à la marée du niveau de l'eau (en m) au niveau du brise-lames (MBiz)

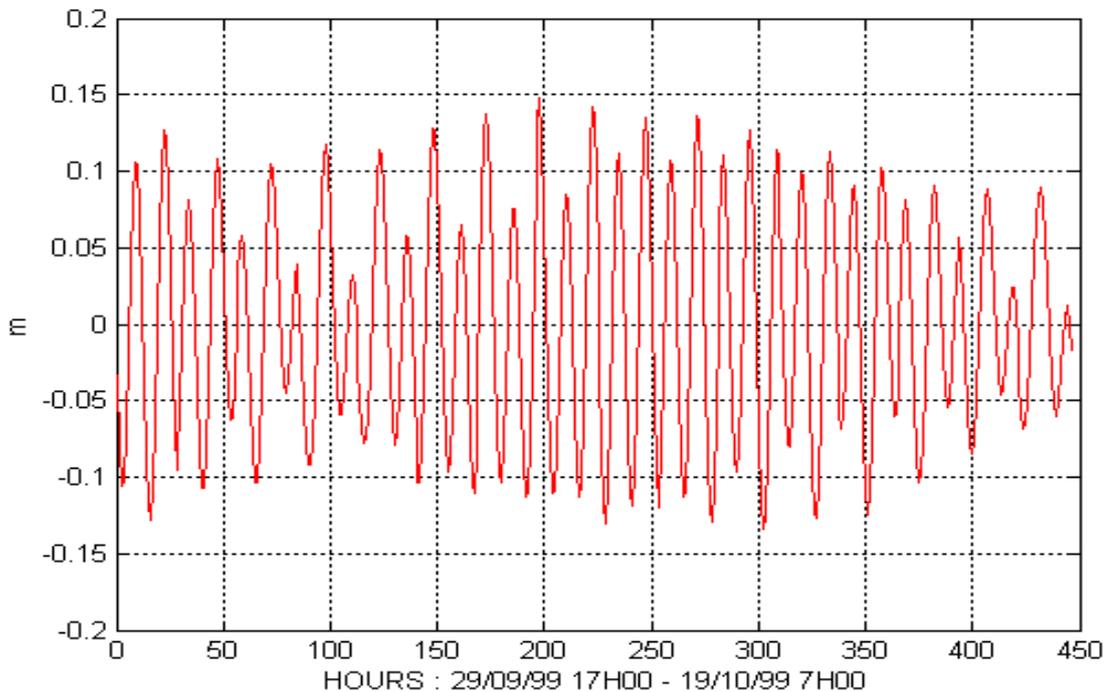


Figure 9. Evolution temporelle de la composante due à la marée du niveau de l'eau (en m) au niveau de la passe (MBC)

La marée est dominée par la composante semi-diurne. Les battements observés suggèrent que cette période principale est modulée par d'autres modes secondaires. L'amplitude de la marée

varie d'environ 13 cm en vive-eau à 2 cm en morte eau. Une analyse fine des composantes de cette marée a été faite. Les tableaux 1 et 2 montrent les modes obtenus.

*Tableau 1. Composantes de la marée à la sortie du canal au niveau du brise-lames (MBiz)*

Composantes	Période (H)	Amplitude (m)	Phase (°)
<b>M2</b>	12.42	0.083	276.490
<b>S2</b>	12.00	0.042	298.270
<b>K1</b>	23.92	0.029	189.840
<b>O1</b>	25.83	0.019	134.860

*Tableau 2. Composantes de la marée à la passe (MBC)*

Composantes	Période (H)	Amplitude (m)	Phase (°)
<b>M2</b>	12.42	0.088	316.180
<b>S2</b>	12.00	0.043	343.690
<b>K1</b>	23.92	0.027	212.000
<b>O1</b>	25.83	0.014	149.240

*Tableau 3. Retard de la marée dans la passe par rapport à celle à l'extérieur (en heures)*

Composantes	Retard de la MBC/MBiz (H)
<b>M2</b>	01H41
<b>S2</b>	01H31
<b>K1</b>	01H28
<b>O1</b>	01H06

La marée à la sortie du canal est composée de quatre modes principaux. Le mode M2 (marée semi-diurne) est dominant avec une amplitude de 8.3 cm environ. Ces résultats sont en bon accord avec les études de la marée effectuées près des côtes tunisiennes. L'étude de Molines (1991) a montré une amplitude de 8 cm et une phase de 278° pour la composante M2 de la marée à La Goulette. Le tableau 3 montre l'écart de phase de la marée de part et d'autre de la passe. Il varie légèrement d'une mode à l'autre en représentant en moyenne un retard de 1h 27mn de la marée au niveau de la passe par rapport à celle à l'extérieur.

Ce retard s'explique par le fait que la section du canal entre le goulet et la mer est relativement étroite (environ 250 m); elle l'est encore davantage sous le pont de Bizerte où elle n'est plus que de 190 m. Cette faible section fait que l'eau entrante ou sortante induite par la marée n'arrive pas à traverser le canal au même moment; elle engendre un retard d'autant plus grand que la section est étroite. La figure 10 montre un détail des marées observées dans les deux stations MBiz et MBC.

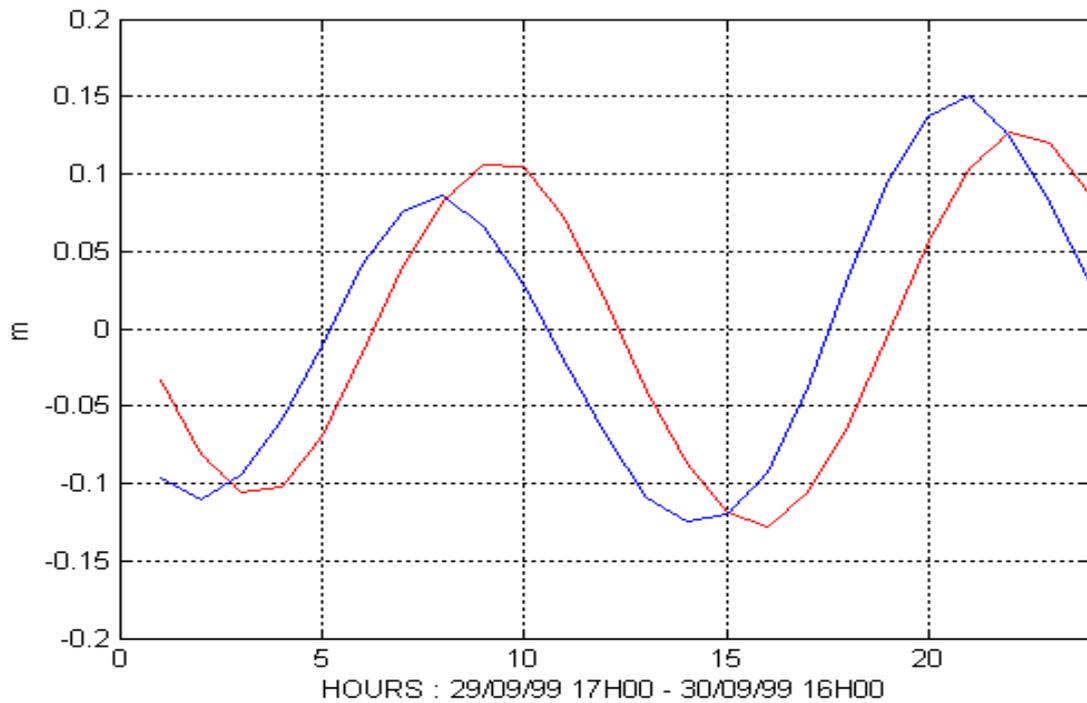


Figure 10. Marée observée dans les stations MBiz (rade extérieure) et MBC (goulet)

### 3.1.2 Courants

Les mesures des courants dans la lagune de Bizerte sont celles réalisées par l'INSTM en 1999/2000 dans le cadre du contrat programme du SERTST pour la période 1998-2001 (INSTM, 2002) et celles réalisées dans le cadre de la présente étude de la dépollution intégrale du lac de Bizerte en Décembre 2011 (MeHSIP-PPIF, 2011).

Un courantomètre a été placé à 10 m de profondeur sous le pont de Bizerte, pendant les périodes du 09/12/1999 au 20/01/2000 (en hiver) et du 28/8/2000 au 01/09/2000 (en été). La mesure du courant en hiver a été faite à l'aide d'un courantomètre de type AANDERA RCM7 placé à environ 10 m de profondeur sous le Pont de Bizerte alors que la mesure du courant en été a été faite par un Argonaut XR qui intègre les mesures sur la verticale en tenant compte de la hauteur de l'eau.

Les résultats des mesures effectuées en hiver de l'an 2000 (figure 11) montrent que la vitesse du courant peu atteindre 1 m/s en vive-eau et 0.5 m/s en morte-eau. Ces vitesses sont fortement corrélées à la marée (même période, avec entrée des eaux de mer en marée ascendante et sortie des eaux de la lagune en marée descendante).

De même en été, les mesures (figure 12) montrent que la vitesse du courant est aussi très forte et que les entrées et les sorties des eaux sont dues principalement à la marée. Les vitesses du courant varient de 0.8 m/s à 1.2 m/s. Cette figure montre bien que la période de variation des vitesses est la même que celle du mode semi-diurne (M2) de la marée.

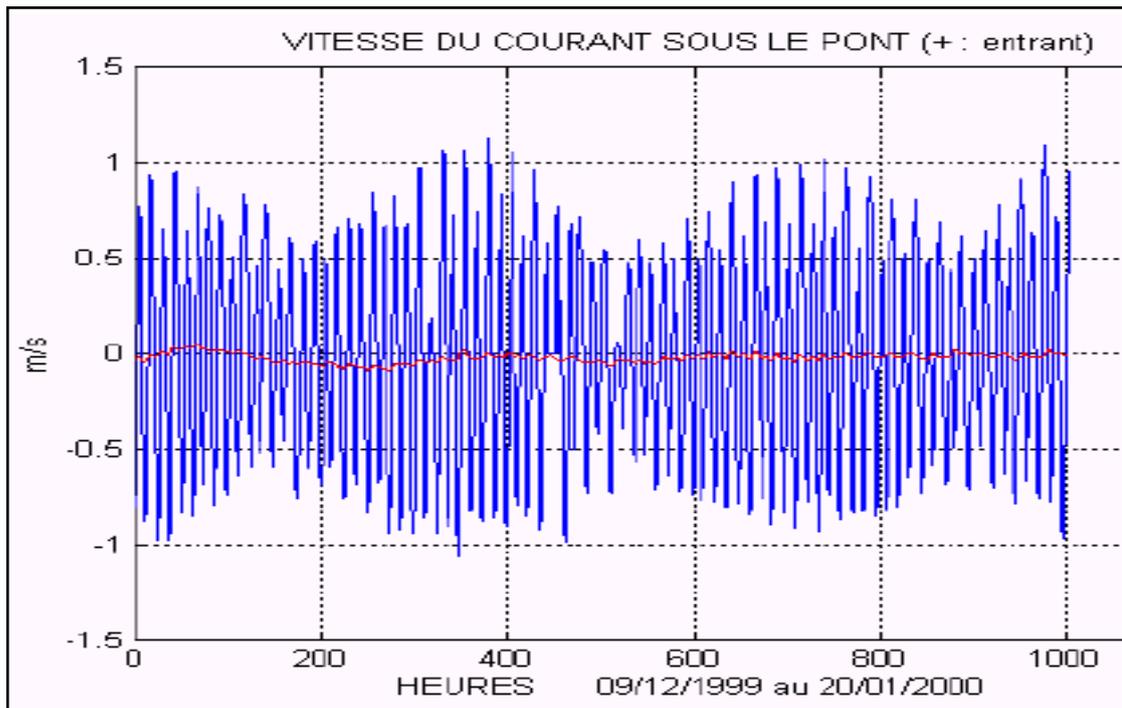


Figure 11. Vitesses mesurées sous le pont en Hiver (INSTM, 2002)

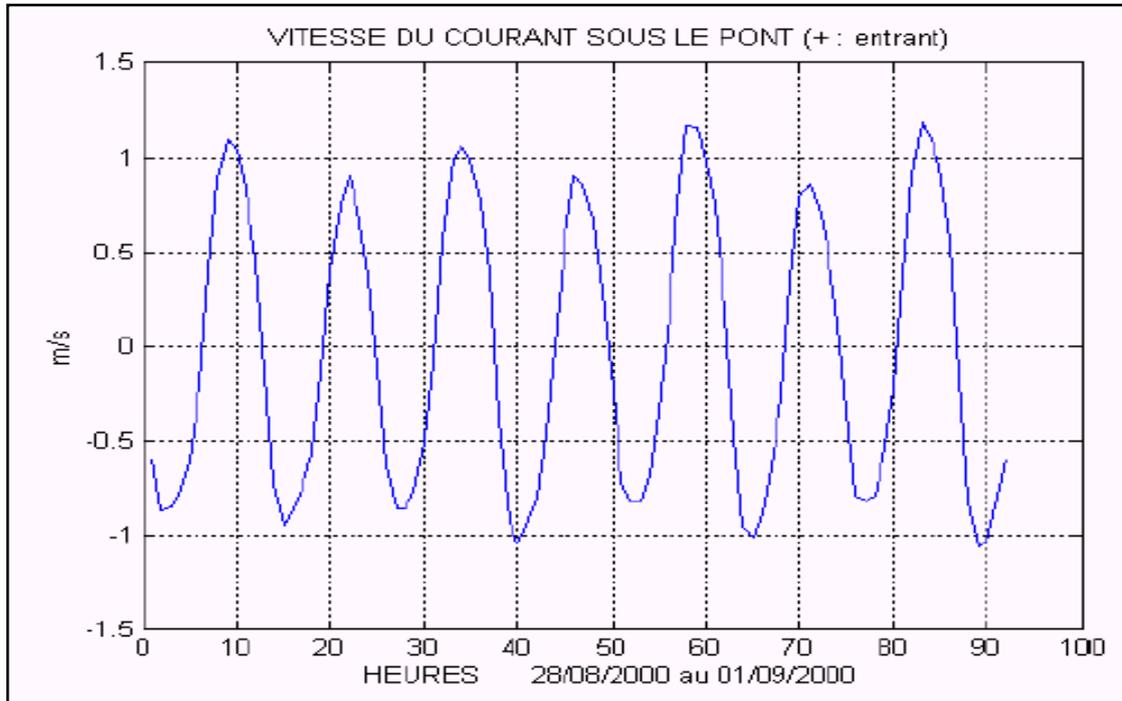


Figure 12. Vitesses mesurées sous le pont en Été (INSTM, 2002)

### 3.2 Mesures réalisées en 2011

Deux courantomètres ont été déployés dans la lagune de Bizerte. Il s'agit d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler à 500 Khz) et d'un Argonaut MD-1500 Khz. Les spécifications techniques de ces deux instruments sont disponibles sur le site Web du constructeur américain SonTek ([www.sontek.com](http://www.sontek.com)). Les caractéristiques du déploiement sont récapitulées dans le tableau 4 et leur position nominale est schématisée sur la figure 5.

Tableau 4. Caractéristiques du déploiement des courantomètres

Désignation	Jour & Heure mise à l'eau	Profondeur (m)	Coordonnées	$\Delta t$ (mn)	Début de la série	Fin de la série
Argonaut	11h.20	4.9	37°11,512'N 09°55,713'E	20	07/12/2011 18:20:00	10/01/2012 08:20:00
ADCP	12h.30	10.5	37°12,479'N 09°51,844'E	30	07/12/2011 18:23:34	10/01/2012 08:23:34

L'ADCP étant équipé d'un module de houle directionnelle, il a été effectué 2048 mesures avec une cadence de 2Hz (soit environ 17 minutes) et cela toutes les 60 minutes. La longueur des séries temporelles ainsi obtenue est de trente trois (33) jours et cinq (5) heures. Nous présentons dans ce qui suit les analyses préliminaires ainsi que les conclusions quant aux particularités hydrodynamiques qui prévalent dans la région.

#### 3.2.1 Série Temporelle : Argonaut

L'argonaut a été déployé à une profondeur de 4 mètres, il mesure donc le courant moyen dans la couche 0-2 mètres. En effet à la zone blanche près du capteur (blank distance) qui est égale à 1 mètre, il faut ajouter la hauteur du socle ( $\approx 1$  mètre).

##### 1. Température de l'eau

La figure 13 représente l'évolution de la température pendant la période de l'enregistrement. Celle-ci diminue d'une façon significative entre le début et la fin de la série et est certainement directement lié à la variation de la température de l'air. Les valeurs du minimum et du maximum sont respectivement 11.83°C et 16.35°C (voir tableau 5).

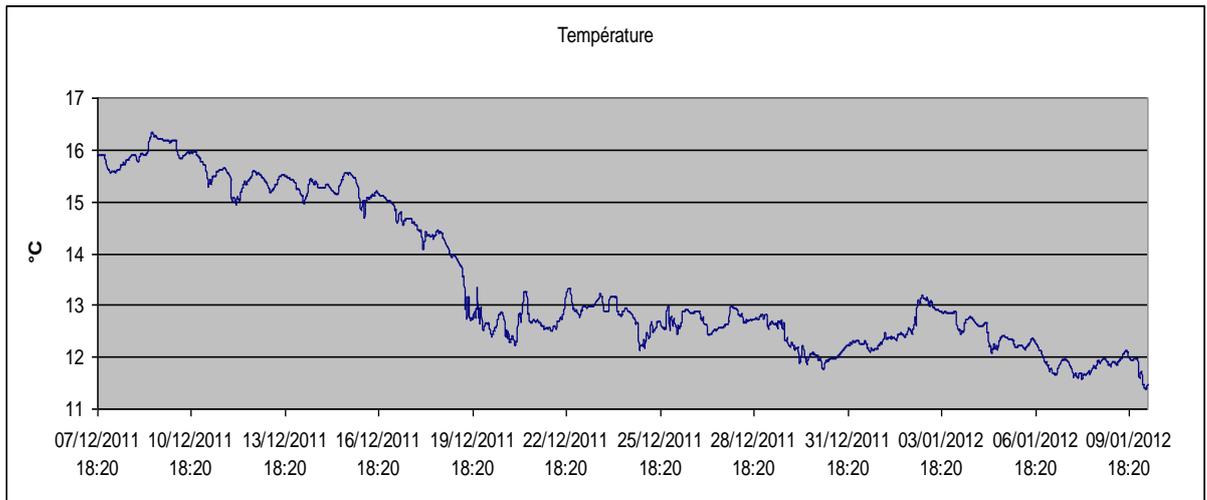


Figure 13. Variation de la température enregistrée pendant la période de l'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012)

Tableau 5. Statistiques de l'enregistrement de la température pendant la période de l'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012)

Température de l'eau	
Nbr. de valeurs utilisées	2418
Nbr. de valeurs ignorées	0
Nbr. de val. min.	1
% de val. min.	0.041
Minimum	11.380
Maximum	16.350
Moyenne	13.457
Moyenne harmonique	13.313
Ecart-type	1.433

## 2. Courant

L'évolution temporelle des composantes u et v du vecteur-vitesse est donnée sur la figure 14. Exceptées quelques fluctuations (20/12, 30/12 et 05/01) qui sont corrélées à des coups de vent, les vitesses sont relativement faibles ( $< 5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Les statistiques de base pour les composantes u et v sont récapitulées dans le tableau 6.

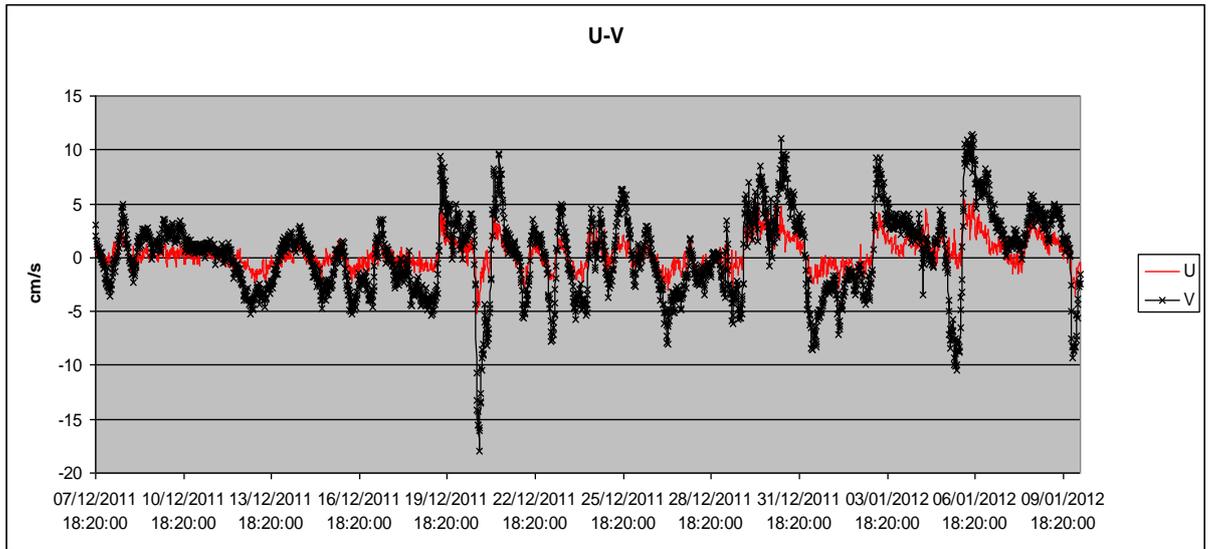


Figure 14. Variation temporelle des composantes u et v enregistrée pendant la période de l'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012)

Tableau 6. Statistiques de base des composantes u et v de la vitesse (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012)

Courant	U	V
Nbr. de valeurs utilisées	2418	2418
Nbr. de valeurs ignorées	0	0
Minimum	-5.210	-17.999
Maximum	5.807	11.401
Moyenne	0.364	0.195
Ecart-type	1.422	3.749

### 3. Diagramme bâton

L'évolution dans le temps de l'extrémité du vecteur-vitesse (en anglais, stick plot, figure 15) montre une assez forte variabilité avec une nette prédominance de la direction Sud-ouest. Cette observation est encore plus nette sur la figure 16 (hodographe intégré).

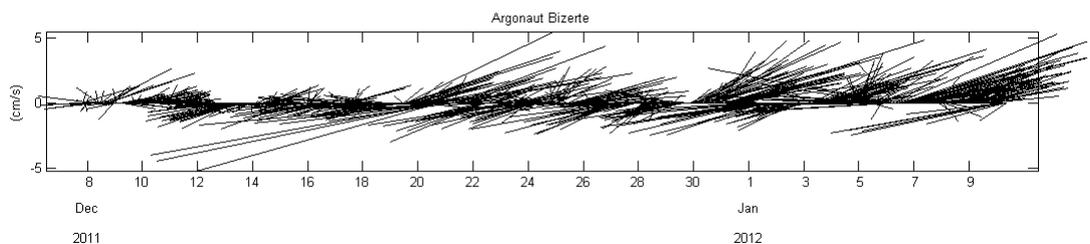


Figure 15. Stick du vecteur vitesse pendant la période d'enregistrement (7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012)

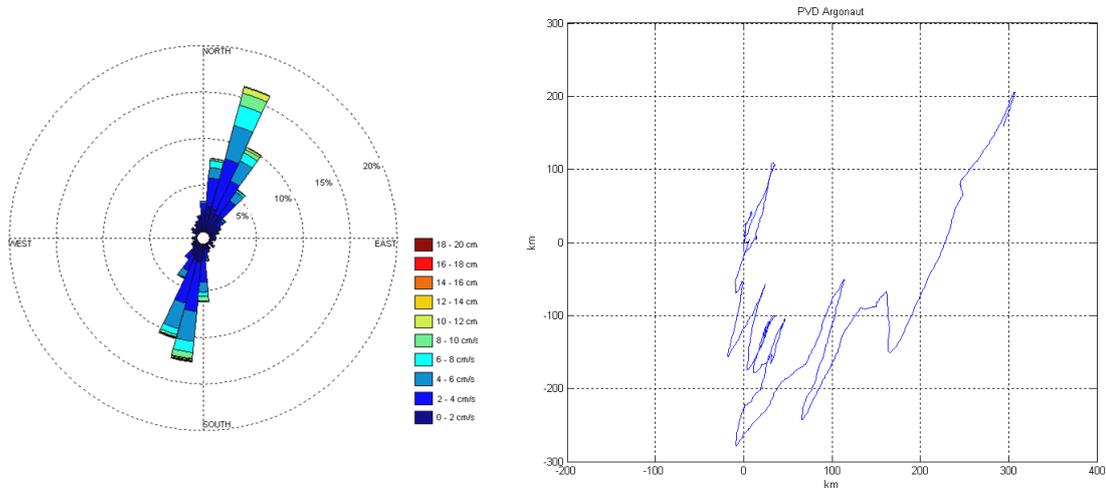


Figure 16. Hodographe intégré

#### 4. Fonctions Empiriques Orthogonales

Afin de mieux illustrer ce que nous avons rapporté plus haut, nous avons appliqué à la série temporelle l'analyse par la méthode des Fonctions Empiriques Orthogonales (EOF, en anglais) qui est l'une des meilleures solutions pour trouver les axes principaux d'une ellipse lorsque l'on a plusieurs vecteurs vitesses partant d'un centre de l'ellipse recherchée (figure 17).

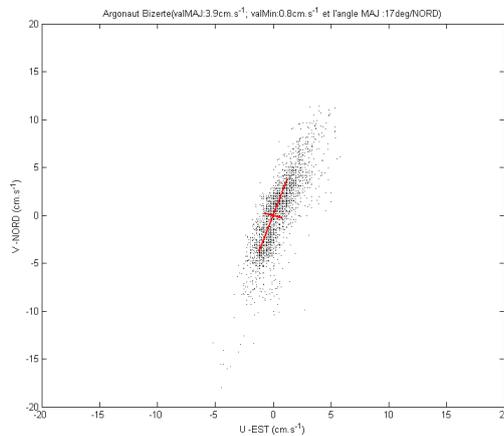


Figure 17. Analyse EOF de la série temporelle de la vitesse

La figure 17 met bien en évidence la polarisation du courant (SW/NE). Cette polarisation n'est pas, en fait, induite par la ligne de côte mais plutôt par un chenal de marée.

### 3.2.2 Série Temporelle : ADCP

L'ADCP a été déployé à une profondeur de 10 mètres environ. Les mesures ont été effectuées dans quatre cellules de deux mètres de hauteur chacune. Compte tenu de la zone blanche près du capteur (1 mètre) et de la hauteur du socle (1.4 mètre), les mesures sont significatives dans les cellules suivantes :

C1 = [-8 -6] ; C2 = [-6 -4] et C3 = [-4 -2]

La quatrième cellule ([-2 0]) a été éliminée car bruitée par des mesures en dehors de la colonne d'eau. Nous reproduisons ci-après les analyses réalisées sur les diverses séries temporelles.

#### 1. Température

Comme pour la série enregistrée par l'argonaut, la température décroît entre le début et la fin de l'enregistrement. Les statistiques de base sont récapitulées dans le tableau 7. Il est à noter une légère différence positive par rapport au minimum enregistré par l'Argonaut. Cette différence s'explique par l'effet du fond (hauteur plus importante et réagi donc relativement moins vite avec l'atmosphère).

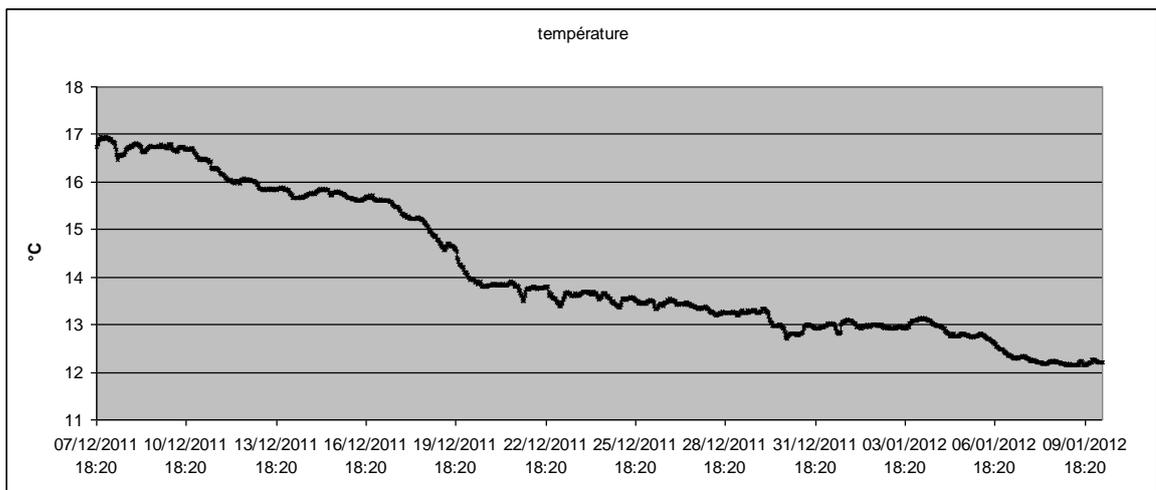


Figure 18. Variation de la température enregistrée pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012

Tableau 7. Statistiques de base des enregistrements de la température pendant la période du 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012

	Température
Nbr. de valeurs utilisées	1613
Nbr. de valeurs ignorées	0
Minimum	12.140
Maximum	16.950
Moyenne	14.140
Moyenne harmonique	13.994
Ecart-type	1.471

## 2. Niveau d'eau

L'ADCP étant équipé d'un capteur de pression, nous avons donc reproduit les variations du niveau de la mer pendant la période d'enregistrement (figure 19). Nous notons une faible amplitude de marnage (à peine 20 centimètres). Les statistiques de base de la série temporelle du niveau de l'eau sont récapitulées dans le tableau 8.

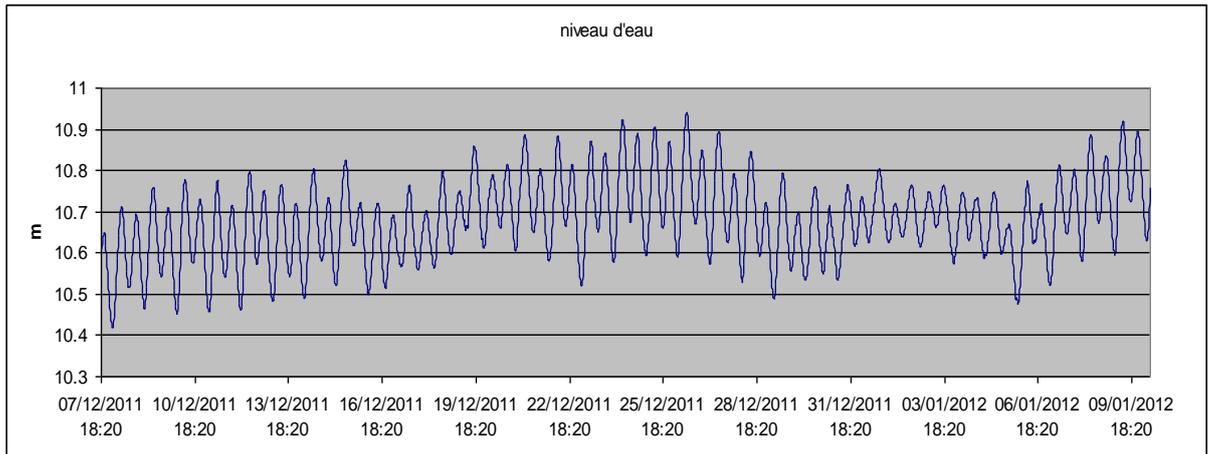


Figure 19. Variation de la température enregistrée pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012

Tableau 8. Statistiques de base de la série temporelle du niveau d'eau pendant la période du 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012

	niveau d'eau
Nbr. de valeurs utilisées	1613
Nbr. de valeurs ignorées	0
Minimum	10.418
Maximum	10.941
Moyenne	10.680
Moyenne harmonique	10.679
Ecart-type	0.097

L'analyse harmonique permet d'estimer l'énergie associée à des bandes fréquentielles de longueur définie par l'étendue totale du signal donc de sa période principale (T). Ce traitement paraît l'outil le plus adéquat pour le traitement des séries chronologiques de la marée dont l'ensemble des composantes harmoniques est bien connu.

Le tableau 9 récapitule les résultats de l'analyse harmonique. Dans cette analyse, la phase est calculée relativement à Greenwich. Le ratio [variance prédite/variance originale] est égal à 72.5% et les amplitudes et les phases des marées sont estimées avec un Intervalle de Confiance de 95%.

Tableau 9. Résultat de l'analyse harmonique

Harmonique	Fréquence	Amplitude	Erreur amplitude	Phase	Erreur phase	snr
*MM	0.0015122	0.0408	0.017	43.87	25.05	5.9
MSF	0.0028219	0.0223	0.017	334.33	43.66	1.7
ALP1	0.0343966	0.0017	0.007	318.56	178.9	0.056
2Q1	0.0357064	0.0073	0.01	154.67	77.13	0.55
Q1	0.0372185	0.0016	0.006	343.53	202.2	0.069
<b>*O1</b>	<b>0.0387307</b>	<b>0.0183</b>	<b>0.01</b>	<b>174.94</b>	<b>30.05</b>	<b>3.5</b>
NO1	0.0402686	0.0053	0.008	133.08	90.12	0.44
P1	0.0415526	0.0114	0.009	219.81	47.46	1.6
<b>*K1</b>	<b>0.0417807</b>	<b>0.0345</b>	<b>0.009</b>	<b>212.74</b>	<b>15.63</b>	<b>14</b>
J1	0.0432929	0.0012	0.007	63.22	215.61	0.032
OO1	0.0448308	0.0055	0.01	260.78	103.25	0.32
UPS1	0.046343	0.0019	0.007	241.23	206.21	0.084
EPS2	0.0761773	0.0014	0.002	10.08	87.41	0.45
*MU2	0.0776895	0.0077	0.002	5.83	14.93	15
<b>*N2</b>	<b>0.0789992</b>	<b>0.0154</b>	<b>0.002</b>	<b>260.39</b>	<b>8.67</b>	<b>43</b>
<b>*M2</b>	<b>0.0805114</b>	<b>0.0932</b>	<b>0.002</b>	<b>262.87</b>	<b>1.44</b>	<b>2.10E+03</b>
*L2	0.0820236	0.0041	0.002	268.75	34.51	3.4
<b>*S2</b>	<b>0.0833333</b>	<b>0.0407</b>	<b>0.002</b>	<b>321.38</b>	<b>3.58</b>	<b>2.70E+02</b>
<b>*K2</b>	<b>0.0835615</b>	<b>0.0111</b>	<b>0.002</b>	<b>343.78</b>	<b>11.13</b>	<b>32</b>
ETA2	0.0850736	0.0029	0.002	0.11	57.29	1.5
MO3	0.1192421	0.0028	0.003	173.66	42.78	1.2
*M3	0.1207671	0.0036	0.002	48.98	34.74	2.4
MK3	0.1222921	0.0028	0.002	210.9	55.25	1.6
SK3	0.1251141	0.0029	0.002	23.3	50.25	1.6
*MN4	0.1595106	0.0013	0.001	133.13	37.23	2.5
M4	0.1610228	0.0007	0.001	163.47	74.62	0.75
SN4	0.1623326	0.0004	0.001	134.06	113.52	0.37
*MS4	0.1638447	0.0011	0.001	253.7	39.26	2.3
*S4	0.1666667	0.0015	0.001	194.86	32.25	2.9
*2MK5	0.2028035	0.0018	0.001	116.91	29.98	2.8
2SK5	0.2084474	0.0007	0.001	95.29	80.92	0.57
2MN6	0.2400221	0.0006	0.001	168.64	77.19	0.69
*M6	0.2415342	0.0016	0.001	190.48	31.24	3.9
*2MS6	0.2443561	0.0013	0.001	213.42	33.82	3
2SM6	0.2471781	0.0003	0.001	213.46	147.14	0.2
3MK7	0.2833149	0.0003	0	102.97	99.68	0.43
M8	0.3220456	0.0003	0	61.86	78.95	0.81

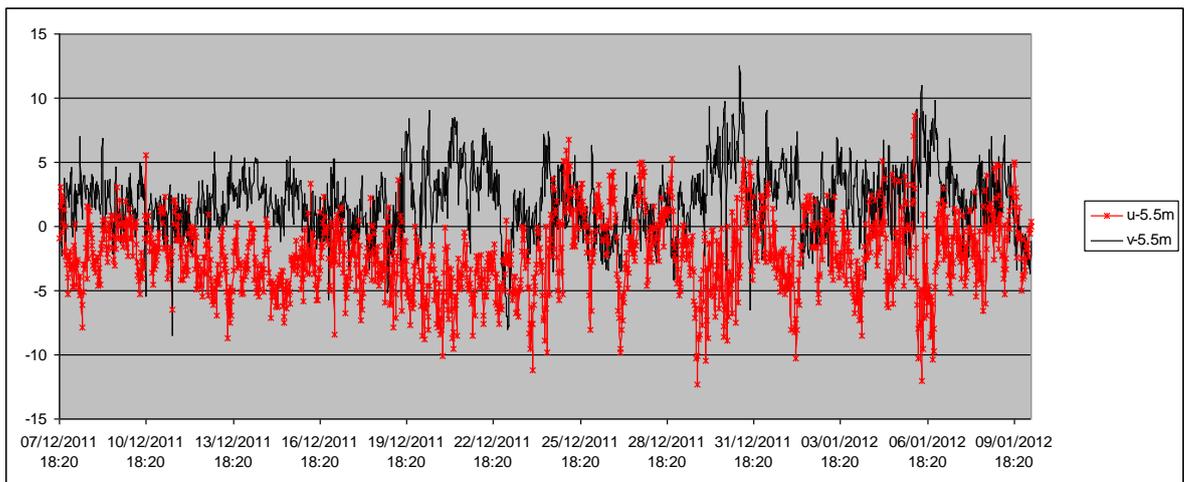
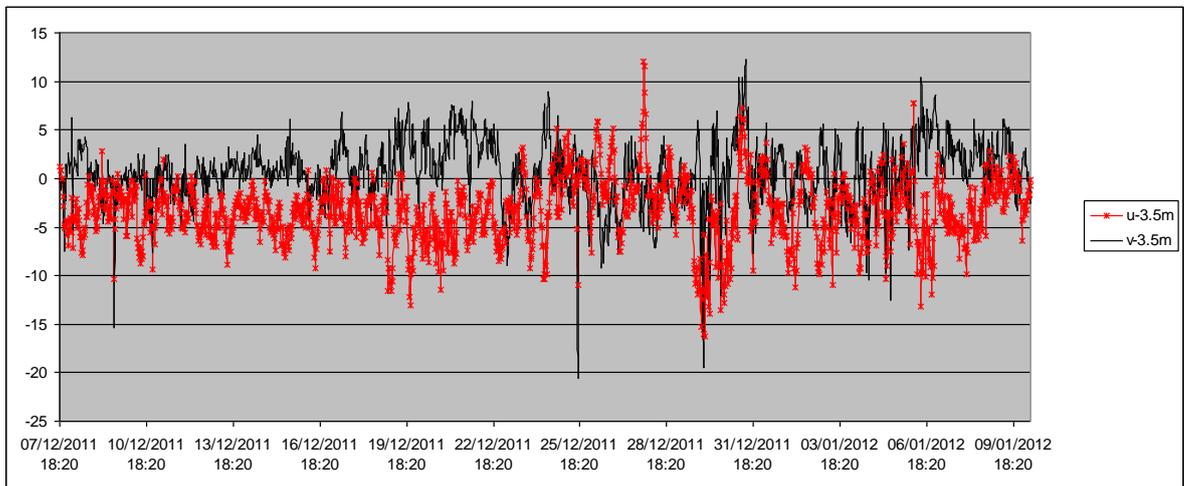
L'amplitude de la composante la plus significative M2 (12.42h) est de l'ordre de 9 centimètres. Et même, en additionnant les amplitudes des composantes les plus significatives, l'amplitude maximale atteint à peine 21 centimètres.

### 3. Vitesse

#### 3.1 Evolution temporelle

Pour chacune des cellules et donc pour chaque niveau, nous avons superposé l'évolution dans le temps des composantes u et v (figure 20). La principale remarque concerne la relative faible valeur des vitesses moyennes. En surface, des pics à  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  sont enregistrés à deux reprises en dehors de ces maxima le courant est plutôt *barotrope*.

Les statistiques de base pour les composantes u et v sont récapitulées dans le tableau 10 et confirment l'aspect barotrope et surtout la prédominance du vent sur la circulation.



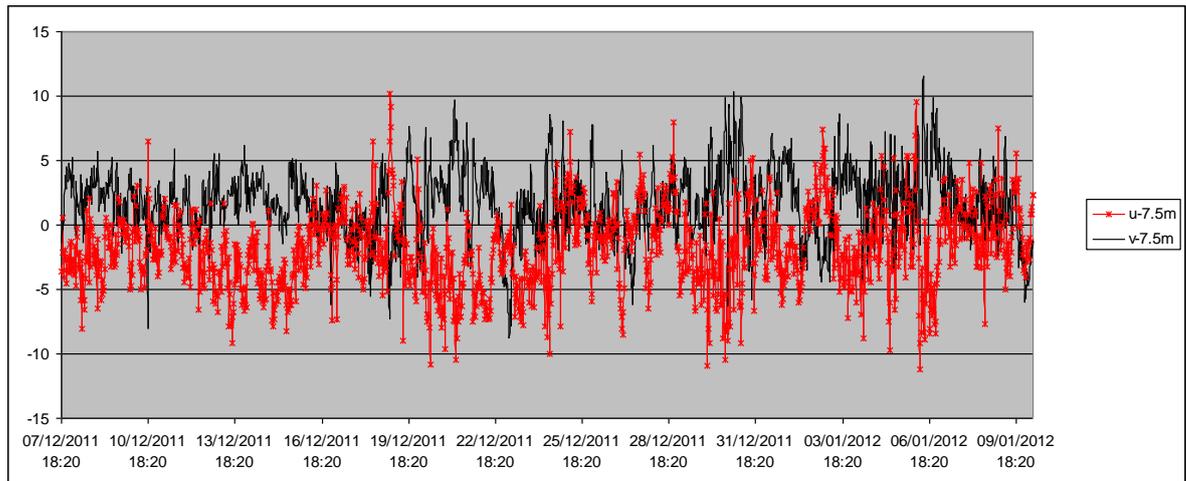


Figure 20. Variation temporelle des composantes u et v du courant pour chacune des cellules C1, C2 et C3 pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012

Tableau 10. Statistiques de base des composantes u et v de les vitesses enregistrées aux trois niveaux pendant la période 7 Décembre 2011 – 13 Janvier 2012

	U-3.5m	V-3.5m	U-5.5m	V-5.5m	U-7.5m	V-7.5m
<b>Nbr. De valeurs utilisées</b>	1613	1613	1613	1613	1613	1613
<b>Nbr. de valeurs ignorées</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Minimum</b>	-16.2	-20.5	-12.3	-8.5	-11.2	-8.8
<b>Maximum</b>	12.1	12.3	8.6	12.4	10.2	11.6
<b>Moyenne</b>	-3.368	0.623	-2.225	2.015	-1.848	1.689
<b>Ecart-type</b>	3.316	3.213	2.918	2.633	3.036	2.709

### 3.2 Diagramme bâton

Les diagrammes bâton (stick diagram, en anglais) sont marqués par moins d'alternance dans la direction que la série enregistrée par l'argonaut (figure 21). En effet, les directions dominantes sont respectivement Est/Sud-Est à -3 mètres et Sud-Est à -5 et 8 mètres.

Le profil vertical de la vitesse moyenne (figure 22) illustre parfaitement les directions moyennes. Cette déviation à droite au fur et à mesure que la profondeur augmente est en relation avec la spirale d'Ekman (circulation générée par le vent).

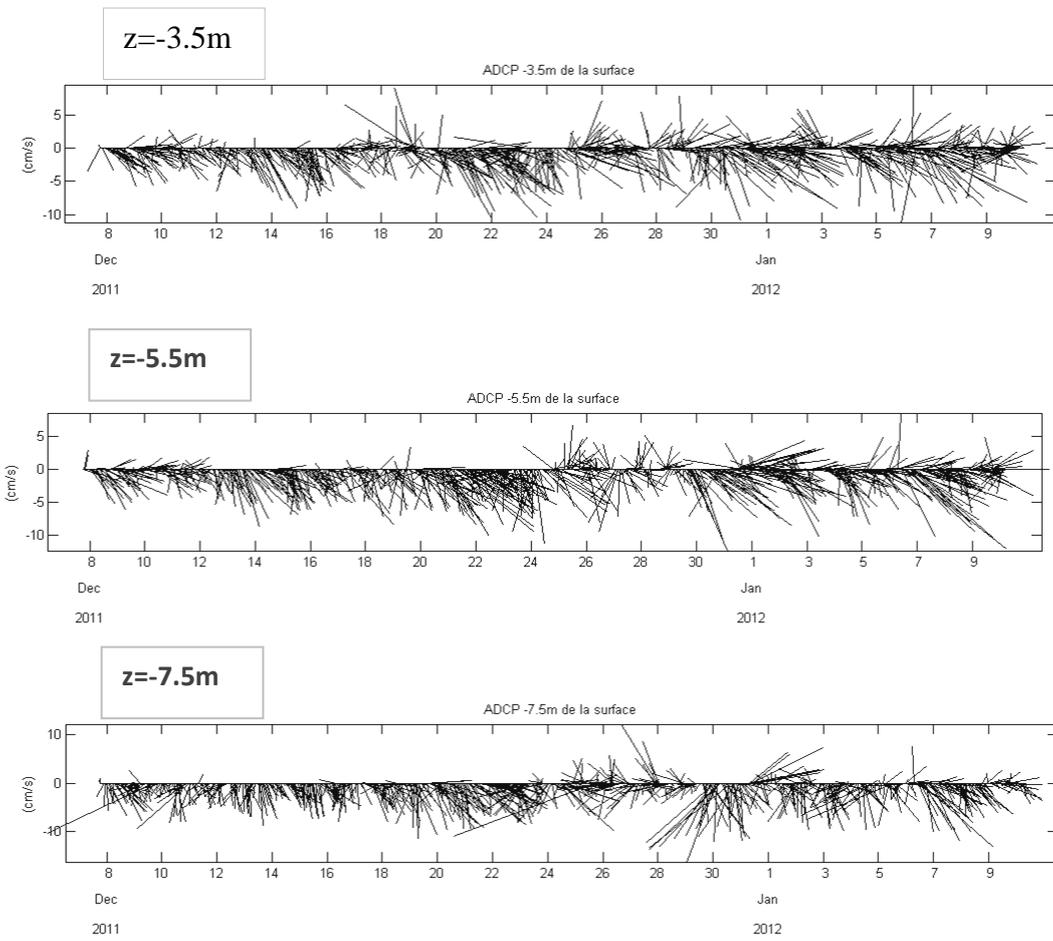


Figure 21. Les diagrammes bâton des courants enregistrés au niveau de la station en face de Menzel Abderrahmen à trois niveaux  $z$  (-3.5, -5.5 et -7.5 m)

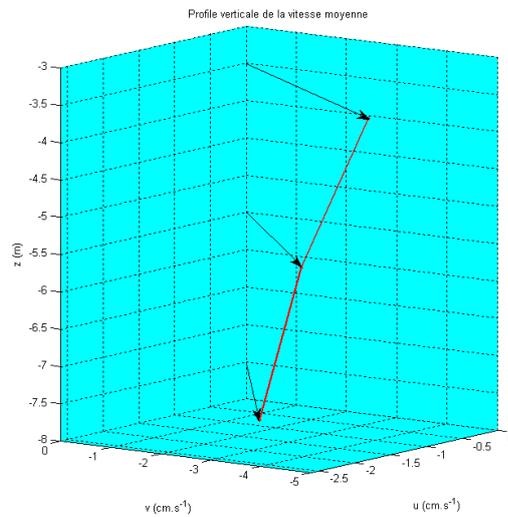


Figure 22. Profil vertical de la vitesse moyenne

### 3.3 Hodographe intégré

Les hodographes intégrés (Progressive Vector Diagram, en anglais) pour les trois niveaux (figure 23) confirment les directions moyennes ci-dessus évoquées. Il convient quand-même de noter un courant dirigé vers l'Est vers la fin de l'enregistrement et qui est assez nette sur l'hodographe de la vitesse moyenne. Ceci est dû aux effets du vent d'autant plus que la première semaine de janvier a été marquée par des vents très forts.

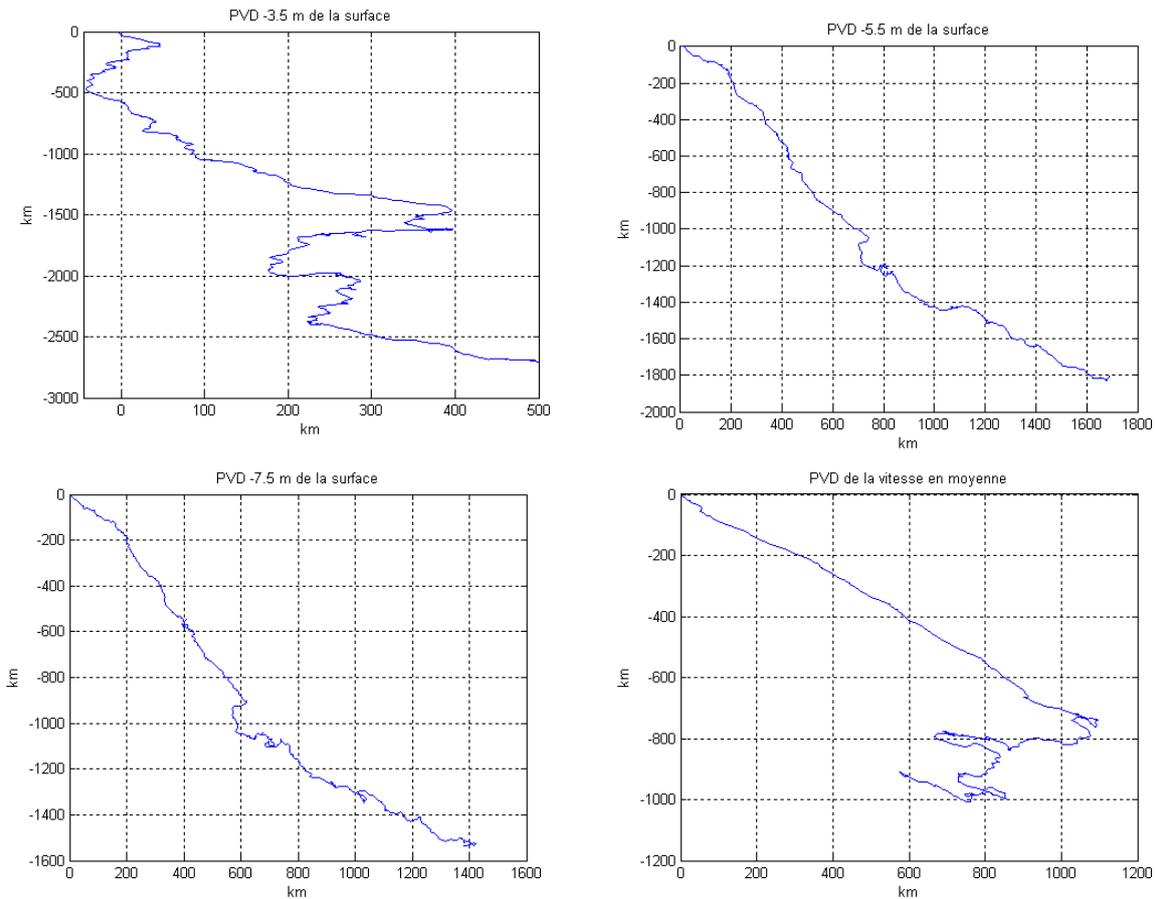


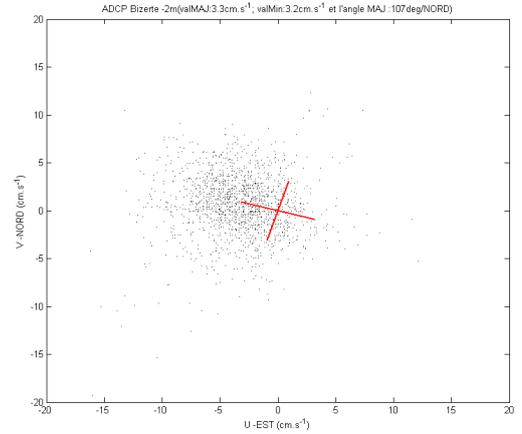
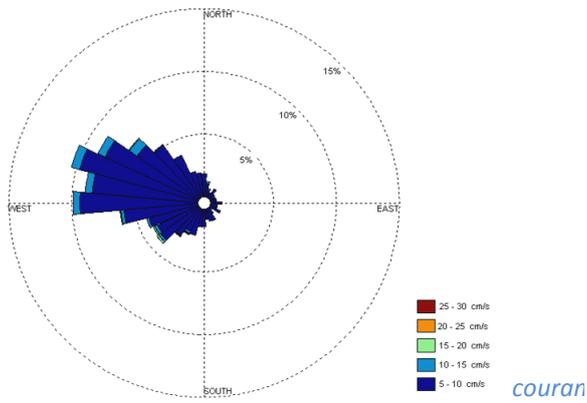
Figure 23. Hodographes intégrés des trois niveaux

### 3.4 Fonctions Empiriques Orthogonales

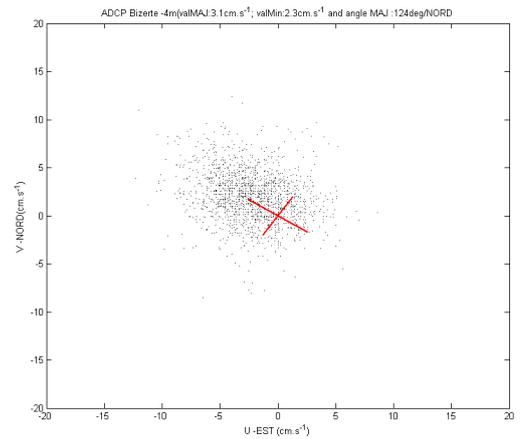
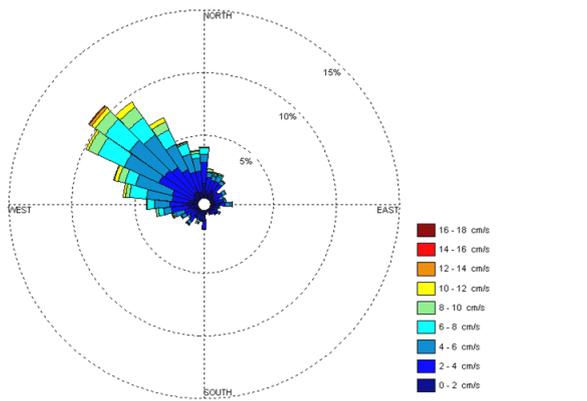
Comme pour la série temporelle de l'Argonaut, nous avons appliqué aux trois séries de l'ADCP l'analyse par la méthode des fonctions empiriques orthogonales. Les résultats sont donnés sur la figure 24.

Pour les trois niveaux la direction prédominante est WNW/ESE. En ce qui concerne l'ellipse du fond (-7.5m), la variabilité est presque isotrope et tout se passe comme si l'effet du fond atténue le courant sur le grand axe alors que l'onde M2 le renforce selon le petit axe.

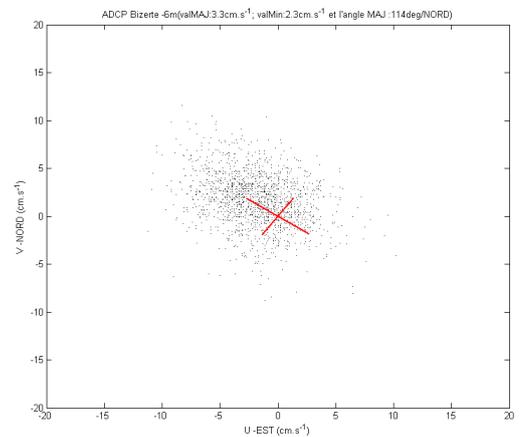
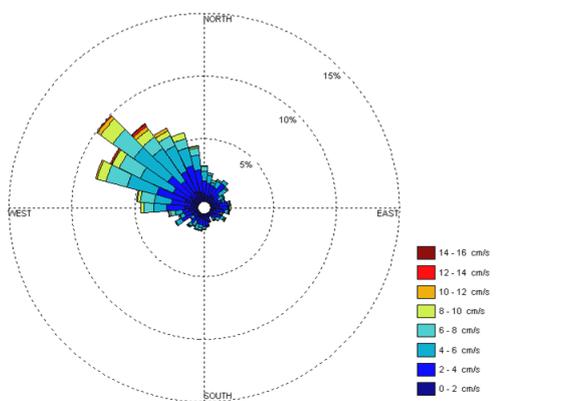
**z= -7.5m**



**z= -5.5m**



**z= -3.5m**



### 3.5 Ellipse de dispersion : Argonaut & ADCP [-3.5 et -5.5]

La figure 25 montre trois ellipses de dispersion pour le courant moyen c'est-à-dire celui enregistré par l'Argonaut et au niveau de deux cellules de l'ADCP. Si pour l'Argonaut la direction est clairement dans le sens Nord/Sud, pour l'ADCP les directions Est/Ouest et Nord/Sud caractérisent la dynamique et confirment en fait la prédominance de deux moteurs principaux de la circulation en l'occurrence la marée et le vent.

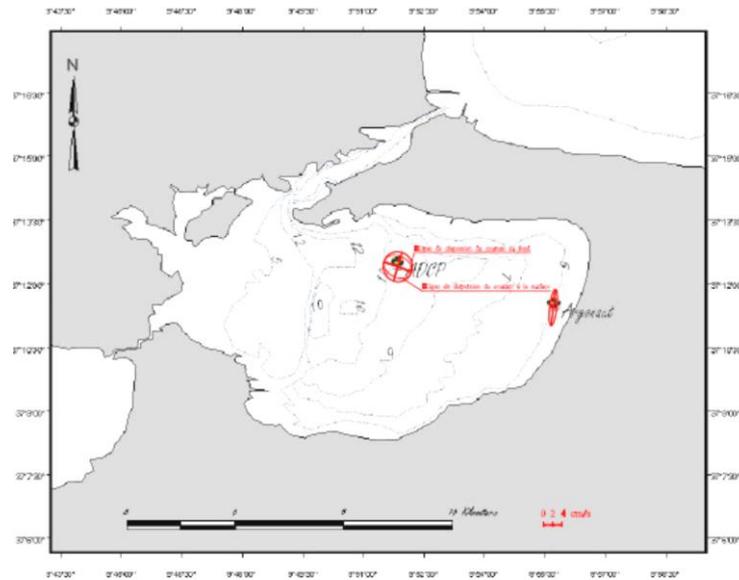


Figure 25. Ellipse de dispersion des courants au niveau de Menzel Jemil (Argonaut) et au niveau de deux cellules en face de Menzel Abderrahmen (ADCP)

## 4. Houle

Il est évident que l'on ne s'attend pas à une houle trop importante compte tenu du *fetch*. Cependant et puisque l'ADCP est équipé d'un module de houle directionnel, nous avons enregistré la houle en effectuant 2048 mesures avec une cadence de 2Hz (soit environ 17 minutes) et ce toutes les 60 minutes.

L'évolution de la hauteur spécifique et la rose de la houle sont illustrées respectivement par les figures 26 et 27.

Nous avons principalement noté une période de **4 secondes** pour toutes les vagues de la lagune, durant la période d'enregistrement, et une amplitude maximale de **44 centimètres**. Les houles les plus fortes sont de **direction ouest**.

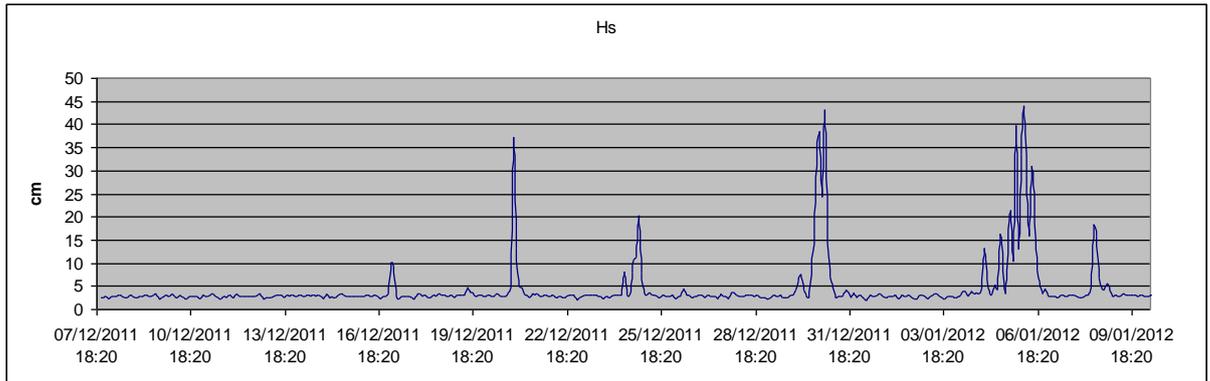


Figure 26. Hauteur de la houle spécifique au niveau de la station en face de Menzel Abderrahmen (mesures de l'ADCP)

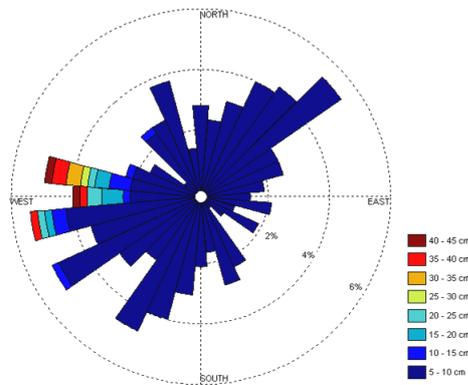


Figure 27. Rose de la houle au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen (mesures de l'ADCP)

## 5. Conclusion

Les séries temporelles de courants, enregistrées dans la lagune de Bizerte pendant plus de trente trois jours et avec un pas d'échantillonnage égal à 20 minutes, ont mis en évidence le relatif faible marnage et l'influence du vent. Les effets de la bathymétrie et des chenaux de marée semblent générer des courants de retour qui nécessitent plus d'investigations.

Enfin, dans l'ensemble la dynamique est faible et le courant moyen est de l'ordre de  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ .

En annexe I, nous avons représenté les ellipses de courant des harmoniques les plus significatives soit M2, S2, O1 et K1. L'annexe II récapitule l'analyse harmonique sur les séries réalisées sur les séries de courants et de niveau enregistrés par l'ADCP.

## 4 VALIDATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

La présente section (§ IV) concerne la validation du modèle hydrodynamique de la lagune de Bizerte. La validation du fonctionnement du modèle a été faite en comparant le niveau d'eau et la vitesse de déplacement de l'eau simulés à ceux observés dans la lagune. Deux sets de données ont été utilisés, les mesures réalisées par l'INSTM en 1999/2000 (INSTM, 2002) et celles réalisées dans le cadre de la présente étude (MeHSIP-PPIF, 2011).

### 4.1 Forçage du modèle

Dans l'objectif de comparer l'intensité et la direction des courants simulés par le modèle à ceux mesurés, le modèle a été forcé par les vents tri-horaires de la région de Bizerte du mois de Décembre 2011 (1<sup>er</sup> – 31 DEC 2011).

La région de Bizerte est caractérisée par des vents qui soufflent généralement du secteur Nord-Ouest. La rose du vent du mois de Décembre 2011 (figure 28) montre que pendant le mois de Décembre 2011 les vents dominants soufflent du secteur Nord alors que les vents les plus forts soufflent du secteur Nord-Est.

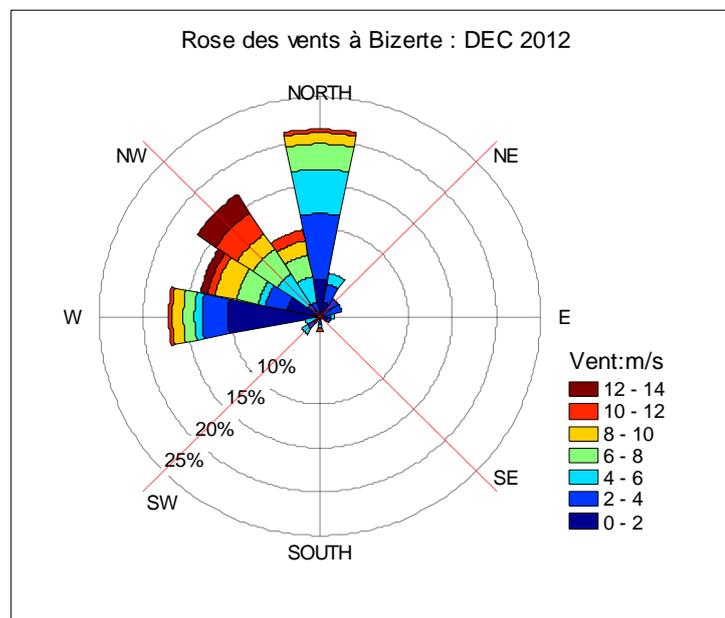


Figure 28. Rose du vent du mois de Décembre 2011 à la région de Bizerte.

Les sticks, les composantes u, v ainsi que le module de la vitesse du vent sont représentés sur la figure 29. L'intensité du vent est généralement inférieure à 15 m/s. Les deux premières semaines de décembre sont caractérisées par des vents relativement faibles mais qui augmentent pendant les deux dernières semaines du mois de décembre 2011 avec une direction Nord-Est qui se caractérise par des fréquences de l'ordre de 20 %.

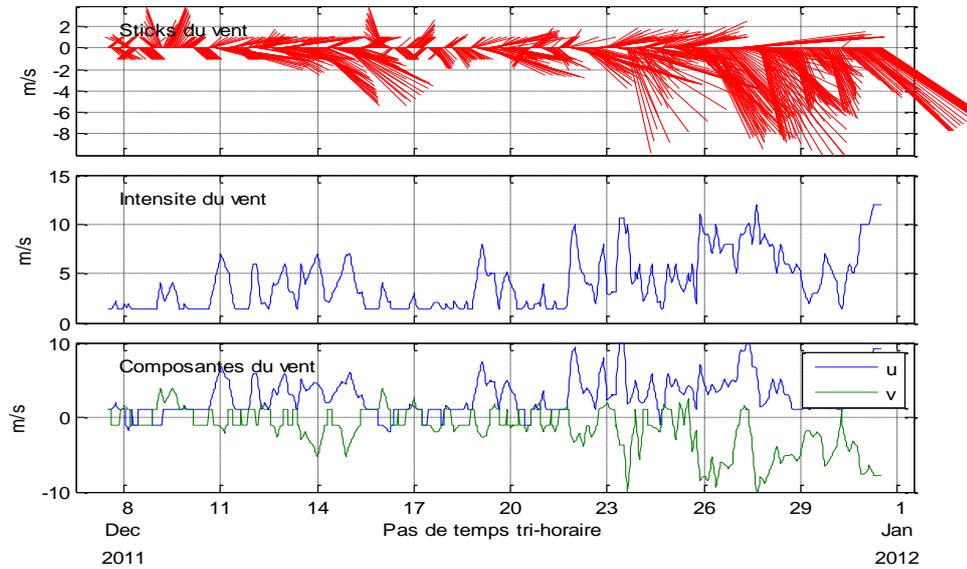


Figure 29. Diagramme bâton et composantes  $u$ ,  $v$  ainsi que l'intensité du vent tri-horaire du mois de Décembre 2011 à la région de Bizerte.

## 4.2 Comparaison des températures simulées et observées

Les variations temporelles de la température observée et simulée durant la période d'enregistrement au niveau des deux stations CMA à Menzel Jemil et CMJ à Menzel Jemil sont représentées respectivement sur les figures 30 et 31. Ces figures montrent que le modèle a reproduit avec une forte concordance les mesures de température au niveau de station de Menzel Jemil (Station CMJ) et au niveau de la station de Menzel Abderrahmen (Station CMA). L'écart entre les températures observées et simulées est toujours inférieur à  $1.5^{\circ}\text{C}$  ce qui confirme une robustesse du module thermique du modèle qui à son tour agit sur les autres variables du modèle.

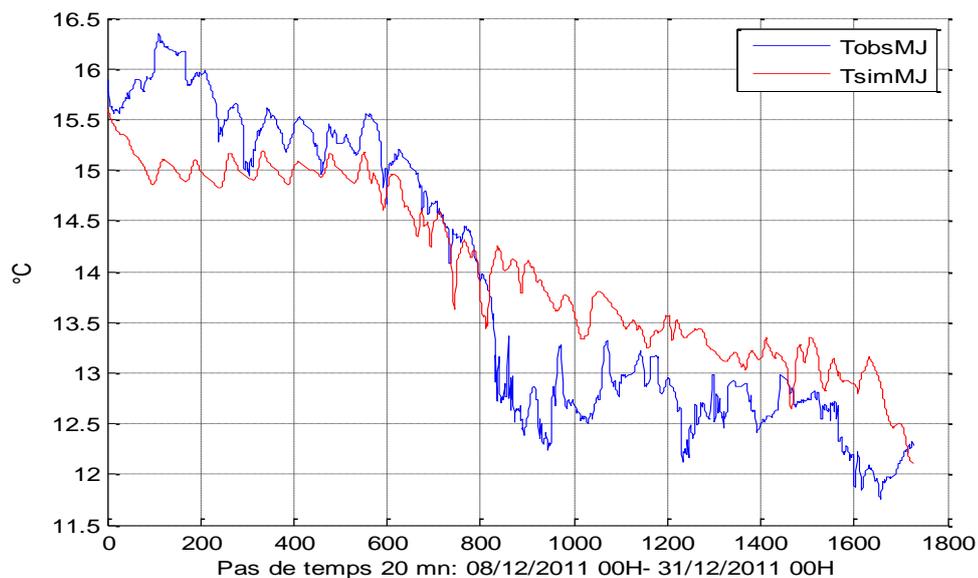


Figure 30. Variation de la température observée et simulée au niveau de la station CMJ à Menzel Jemil.

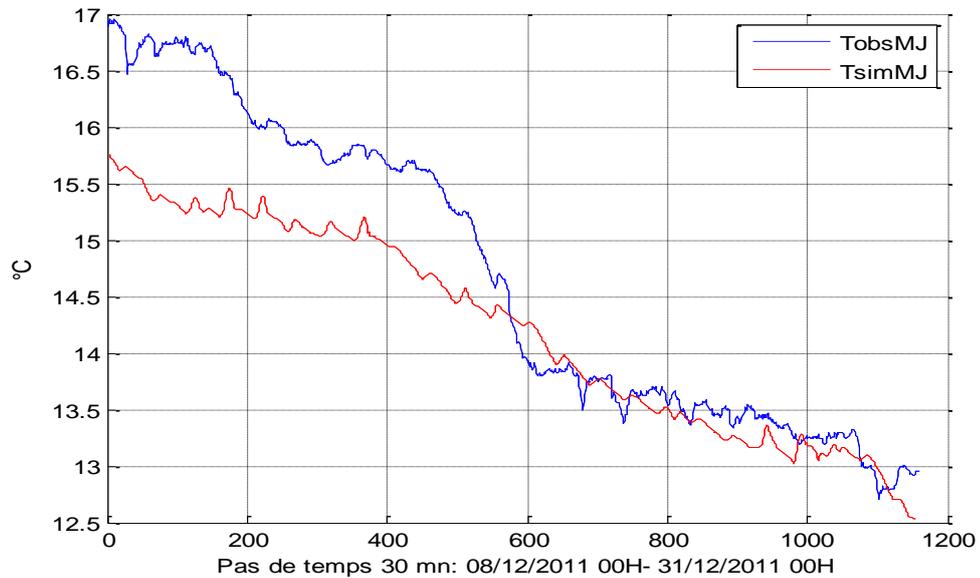


Figure 31. Variation de la température observée et simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

### 4.3 Comparaison des niveaux d'eaux simulé et observé

Les enregistrements du niveau d'eau en 1999/2000 ont été effectués au niveau de la station MBiz alors que celles de la présente étude au niveau de la station CMA à l'aide d'un ADCP placé en face de Menzel Abderrahmen (figure 38). Le niveau d'eau simulé par le modèle a été comparé aux enregistrements réalisés par l'INSTM en 1999/2000 (INSTM, 2000) et celles réalisées dans le cadre de cette étude (MeHSIP-PPIF, 2011).

Les figures 32 et 33 montrent une comparaison de la marée observée et prédite par le modèle. Notons que les harmoniques (amplitude et phase) de la marée imposée à la frontière ouverte du modèle sont calculées en se basant sur les enregistrements effectués en 1999/2000 au niveau de la station MBiz.

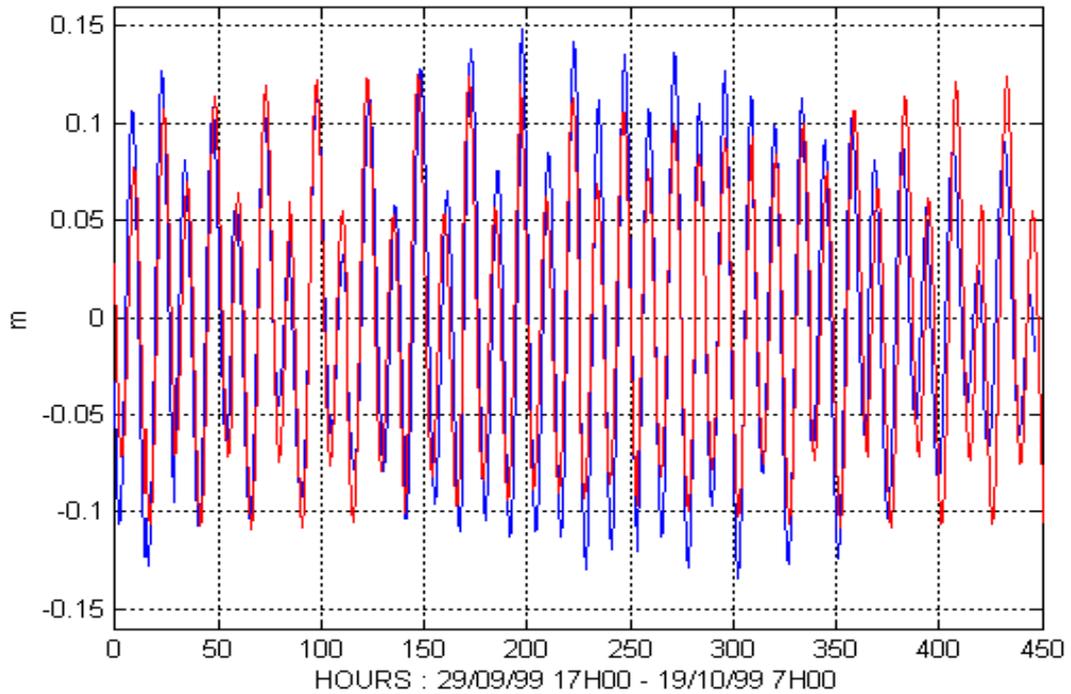


Figure 32. Séries temporelles de la marée observée (bleue) et calculée (rouge) à l'entrée de la lagune (MBC)

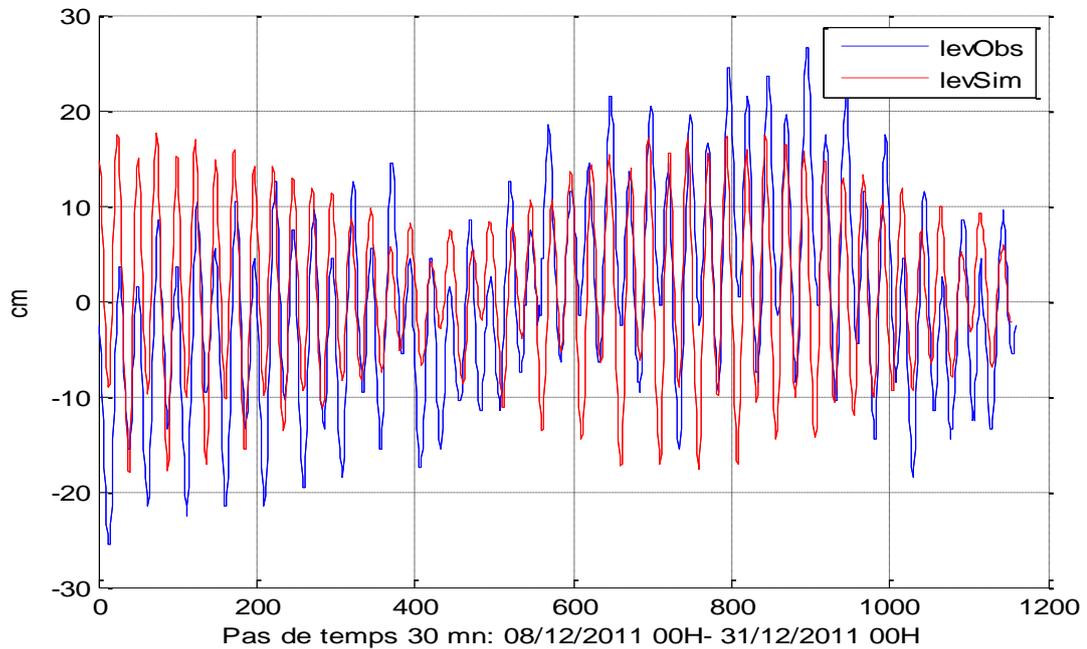


Figure 33. Séries temporelles de la marée observée (bleue) et calculée (rouge) en face de Menzel Abderrahmen au niveau de la station CMA

La marée prédite par le modèle se concorde bien avec la marée observée en 1999/2000 et 2011 et ceci pour la majeure partie des périodes d'observations. Notons que le modèle hydrodynamique est forcé par la marée au niveau de la frontière ouverte (sous le pont de Bizerte).

## 4.4 Comparaison des courants simulés et observés

### 4.4.1 Au niveau de la station CBiz (sous le pont de Bizerte)

La figure 34 montre la vitesse simulée et observée sous le pont de Bizerte (Station CBiz) en été (28/08/2008). Le modèle reproduit bien les courants mesurés pendant la période d'enregistrement. Il n'y a quasiment pas de décalage de phase entre la vitesse observée et simulée alors que l'amplitude est légèrement sous estimée. Notons que le courant sous le pont de Bizerte est *barotrope* généré par l'onde de marée imposé à la frontière ouverte.

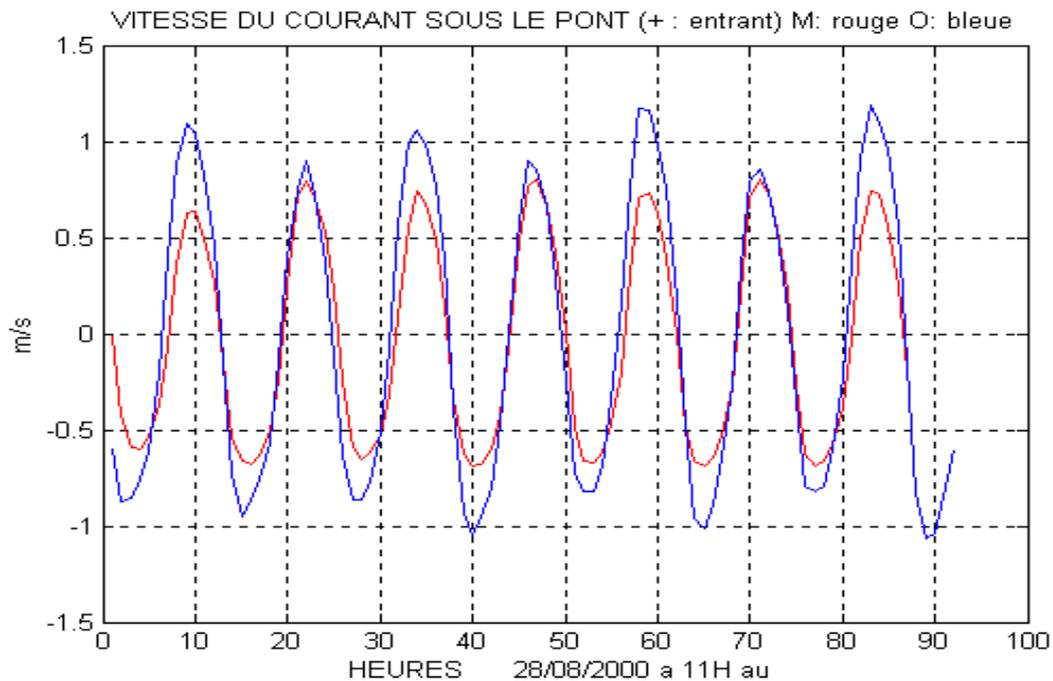


Figure 34. Vitesse de déplacement de l'eau simulée (rouge) et observée (bleue) sous le pont de Bizerte

### 4.4.2 Au niveau de la station CMJ (Menzel Jemil)

Sur les figures 35 et 36 sont superposées la vitesse mesurée à la station CMJ à Menzel Jemil et les modules des vitesses simulées à plusieurs niveaux  $z$  à la même station (CMJ). Sur les figures 37 et 38 sont superposées les composantes  $u$  et  $v$  de la vitesse observée et simulées par le modèle.

Il est clair que le modèle reproduit avec une bonne cohérence les mesures de la vitesse à la station CMJ ; les mesures se coïncident plutôt avec la vitesse moyenne verticale simulée par le modèle (figures 35 et 36). Les valeurs relativement élevées de la vitesse des eaux de surface simulée par le modèle sont le résultat de l'effet direct de la tension des vents qui soufflent à la surface de l'eau (vent intense). Ces valeurs relativement fortes des courants de surface sont intégrées dans les enregistrements du courantomètre (Argonaut) à la station CMJ qui présente des valeurs moyennes sur la couche de surface d'épaisseur 2m.

En ce qui concerne la direction de la vitesse moyenne à la station CMJ ; il est clair, en se référant aux figures 37 et 38, que la composante  $u$  est assez faible ce qui est expliqué par la proximité de cette station des côtes alors que la composante  $v$  de la vitesse est relativement

importante. Ainsi, la direction de la circulation est la plupart du temps parallèle à la côte ce qui se coïncide avec les mesures réalisées et l'analyse des ellipses de dispersion à cette station (figure 25).

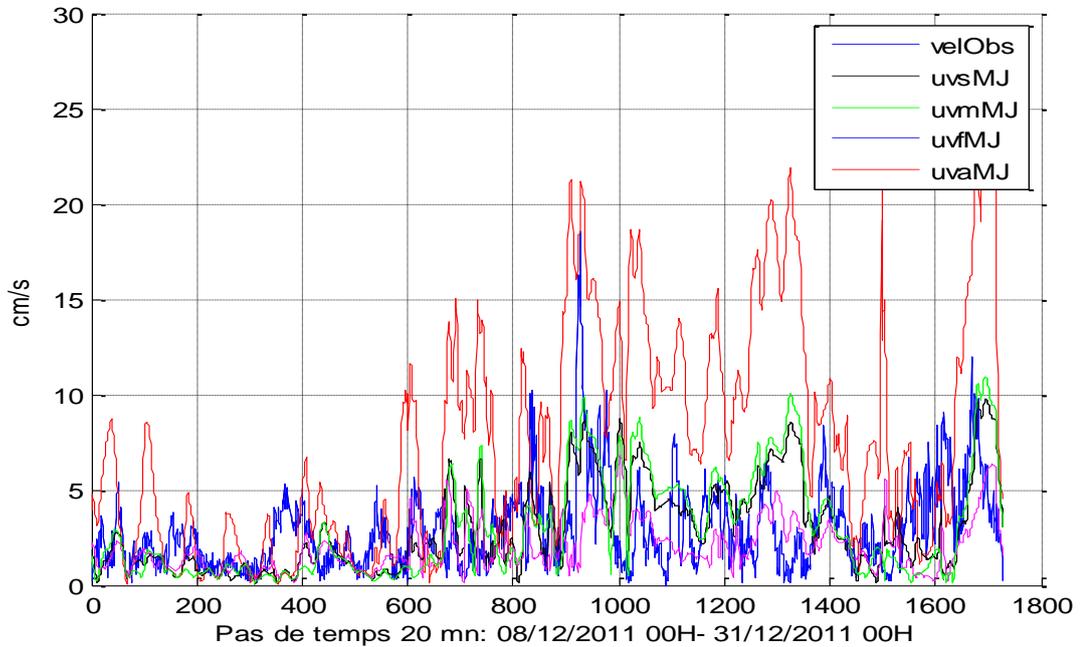


Figure 35. Vitesses observée (bleue) et simulées (en surface (rouge), milieu (noir), fond (magenta) et intégrée sur la verticale (vert)) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil.

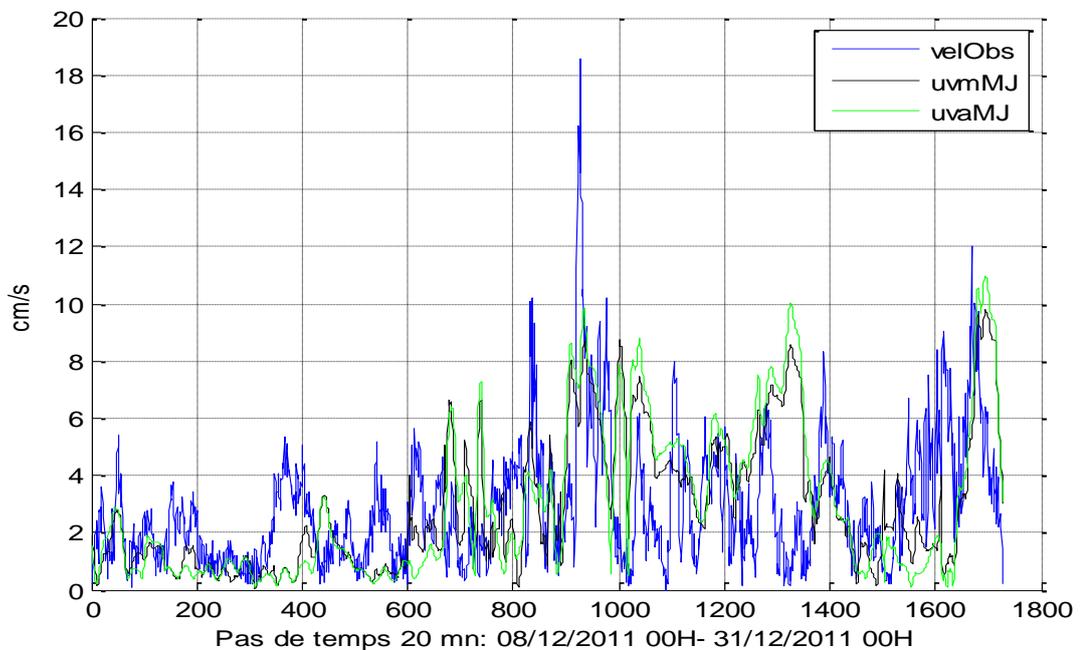


Figure 36. Vitesses observée (bleue) et simulées (milieu (noir) et moyenne (vert)) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil.

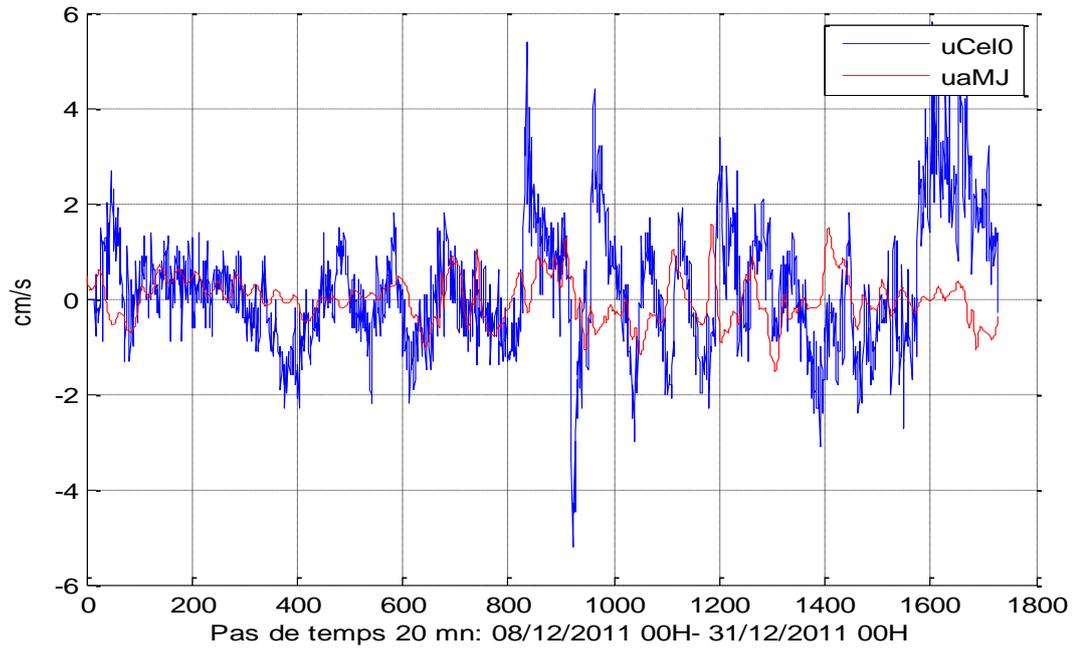


Figure 37. Composantes zonales de la vitesse moyenne mesurée (bleue) et simulée par le modèle (vert) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil

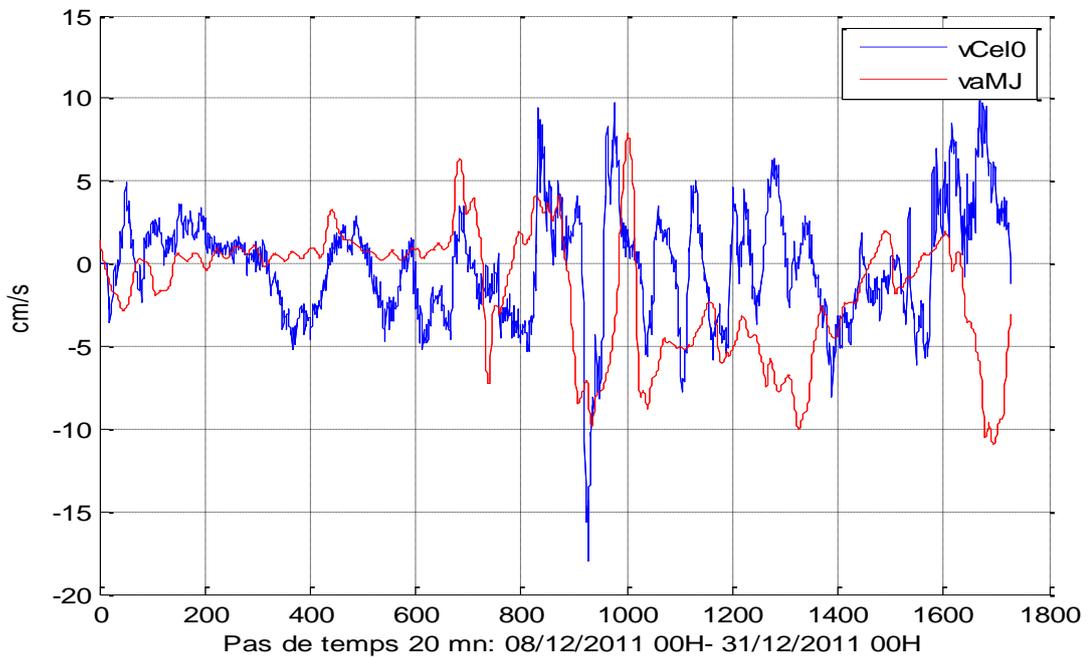


Figure 38. Composantes méridiennes de la vitesse moyenne mesurée (bleue) et simulée par le modèle (vert) au niveau de la station CMJ en face de Menzel Jemil

#### 4.4.3 Au niveau de la station CMA (Menzel Abderrahmen)

Sur les figures 40 à 45 on superpose les vitesses mesurées et simulées ainsi que les composantes zonales et méridiennes à différents niveaux  $z$  à la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

##### 1. Niveau $z=-7.5\text{m}$

L'analyse des différentes cartes stipule que le modèle reproduit avec une grande similitude les courants mesurés à la profondeur  $-7.5\text{m}$  (figures 40 à 42). Mis à part le premier tronçon de la série où le modèle sous estime les observations, le reste des observations (deuxième tronçon de la série) ont été convenablement reproduites de point de vue variabilité temporelle et intensité. L'intensité de la vitesse simulée est inférieure à  $10\text{ cm/s}$  alors que la vitesse mesurée peut atteindre la valeur  $13\text{ cm/s}$ . Le modèle a également pu reproduire la variation de basses fréquences des courants (cycle de longue période). Une constatation visuelle montre que cette variation sinusoïdale des courants est liée à la marée (figure 39).

Rappelons par ailleurs que des études ultérieures en se basant sur des simulations numériques (INSTM, 2002, Béjaoui et al., 2008, Béjaoui, 2009) ont montré que l'effet de la marée se manifeste particulièrement au niveau du goulet et les parties ouest et centrale de la lagune où se trouve la station CMA.

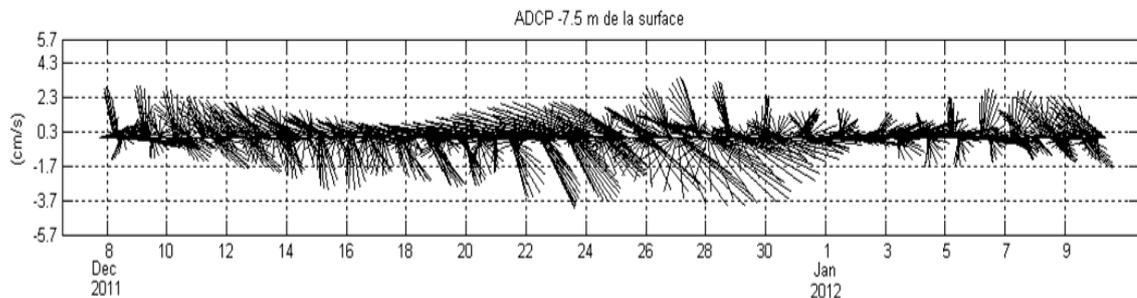


Figure 39. Diagramme bâton de la marée à la profondeur  $-7.5\text{m}$  à la station CMA en face de à Menzel Abderrahmen.

Analysons maintenant les composantes zonales et méridiennes de la vitesse afin d'en tirer des conclusions relative au sens de déplacement des eaux (figures 41 et 42). En se référant au deuxième tronçon, nous remarquons que la valeur algébrique de la vitesse zonale est bien reproduite alors que certaines fluctuations ne sont pas correctement reproduites par le modèle. Ainsi, les eaux du fond se balancent essentiellement dans la direction de propagation de la marée puisque la composante méridienne est relativement faible par rapport à la composante zonale.

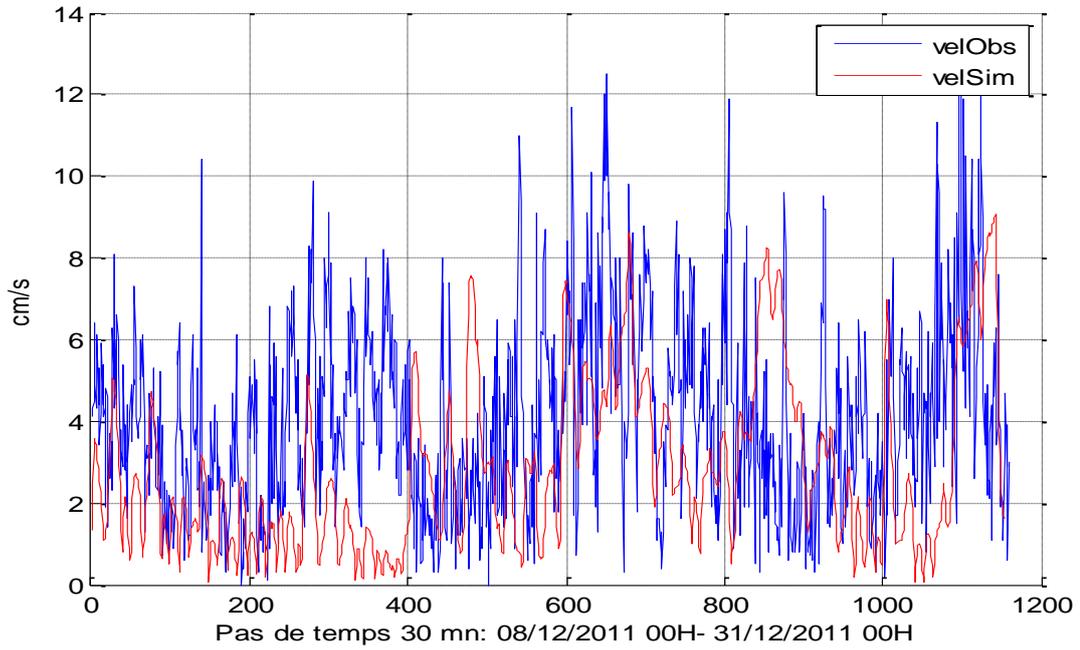


Figure 40. Vitesses observée (bleue) et simulée au fond ( $z=-7.5m$ ) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

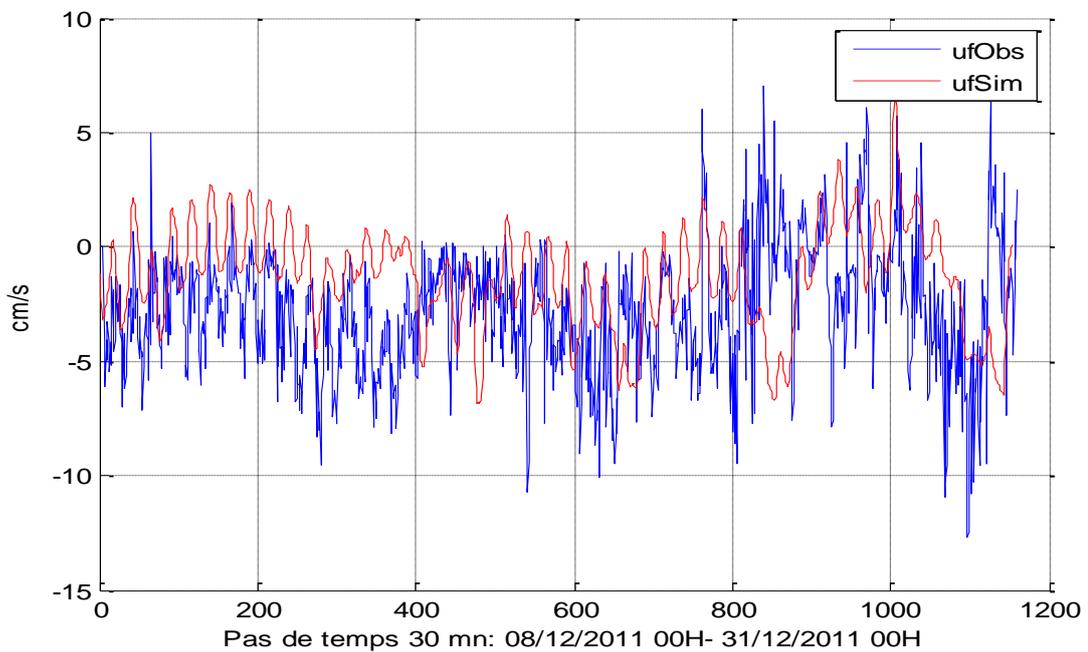


Figure 41. Composantes zonales de la vitesse mesurée (bleue) et de la vitesse simulée par le modèle (rouge) au fond ( $z=-7.5m$ ) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

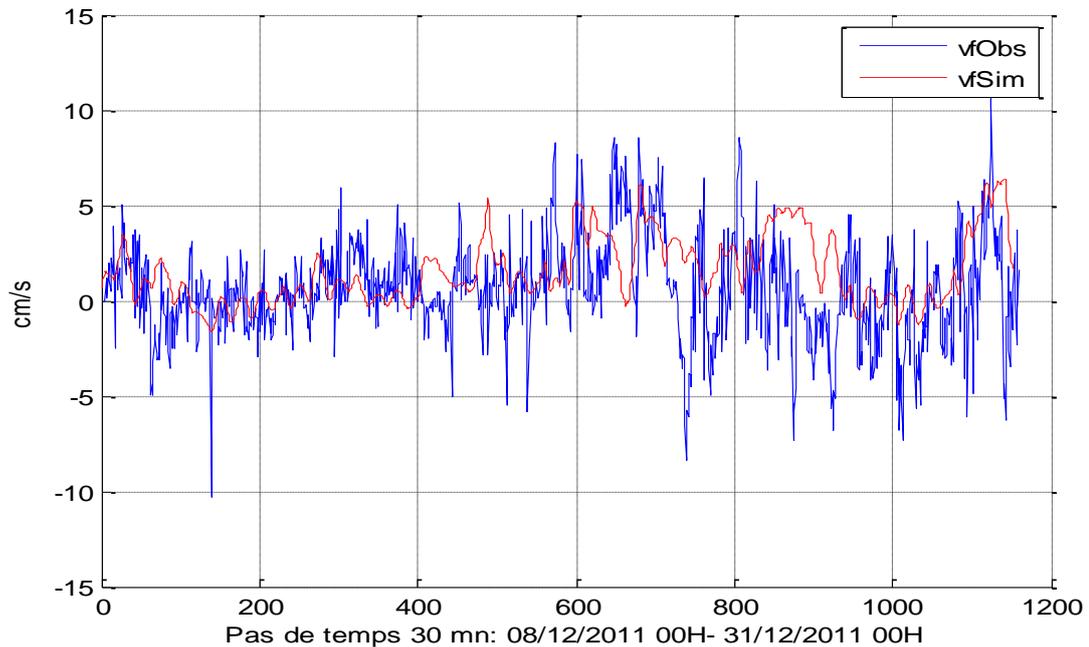


Figure 42. Composantes méridiennes de la vitesse mesurée (bleue) et de la vitesse simulée par le modèle (rouge) au fond ( $z=-7.5m$ ) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

## 2. Niveau $z=-5.5$ & $-3.5$ m

Les graphiques 43, 44 et 45 présentent les vitesses simulées et observées pendant le mois de décembre 2011. Ils montrent que le modèle simule les variations de basses fréquences des courants liés au cycle de la marée alors que les fluctuations (à  $-5.5m$  de profondeur) sont moyennement reproduites.

Les mêmes constatations sont encore valables pour les courants simulés à  $-3.5$  m de profondeur. Le modèle reproduit les oscillations de basses fréquences alors que les perturbations liées aux variations météorologiques n'est pas correctement simulé, faute de mesures in-situ du forçage à la surface de l'eau. Notons aussi que le modèle simule le sens de déplacement des eaux qui suit celle de la propagation de l'onde de marée.

Les figures 46 à 48 présentent la vitesse (figure 46) ainsi que les composantes zonale (figure 47) et méridienne (figure 48) des eaux de surface simulées par le modèle. Malheureusement, nous n'avons pas pu comparer ces vitesses simulées aux mesures de la vitesse dans la couche de surface (quatrième cellule de l'ADCP) car les enregistrements ont été bruités par des mesures en dehors de la colonne d'eau. La première quinzaine du mois de décembre est marquée par des vitesses inférieures à  $8$  cm/s alors que les vitesses pendant la deuxième quinzaine sont plus importantes et peuvent atteindre  $15$  cm/s. Notons que la vitesse zonale est en majorité du temps positive et plus élevée que la composante méridienne (figures 47 et 48) ce qui indique que le déplacement des eaux est de direction (sens) Sud-Est en corrélation avec les conditions météorologiques (voir figures 28 et 29).

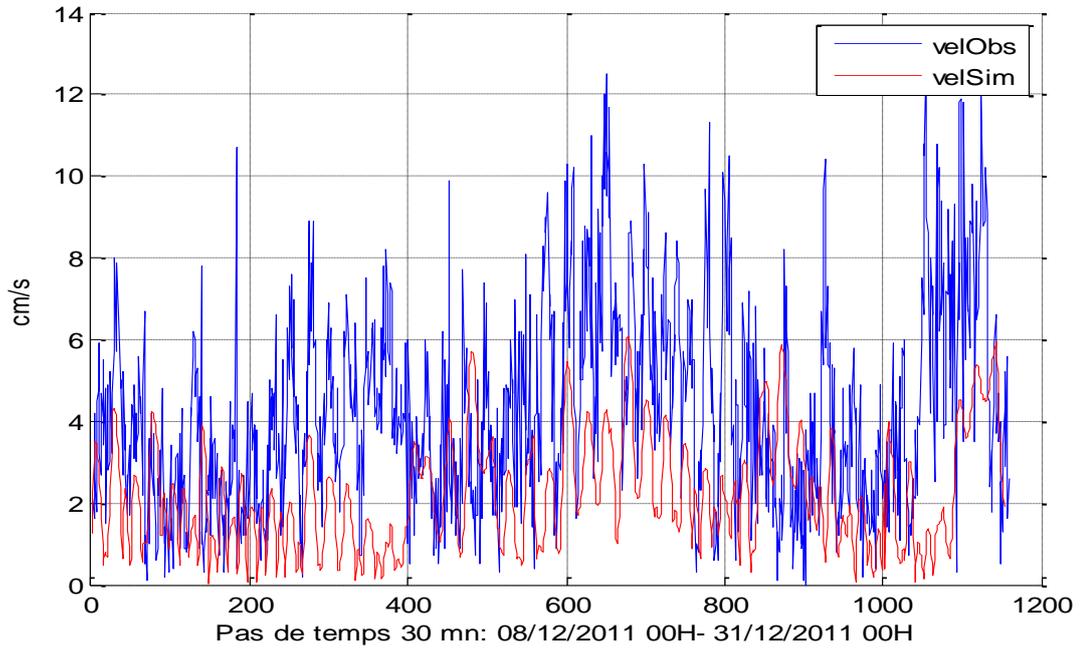


Figure 43. Vitesses au fond ( $z=-5.5m$ ) observée (bleue) et simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

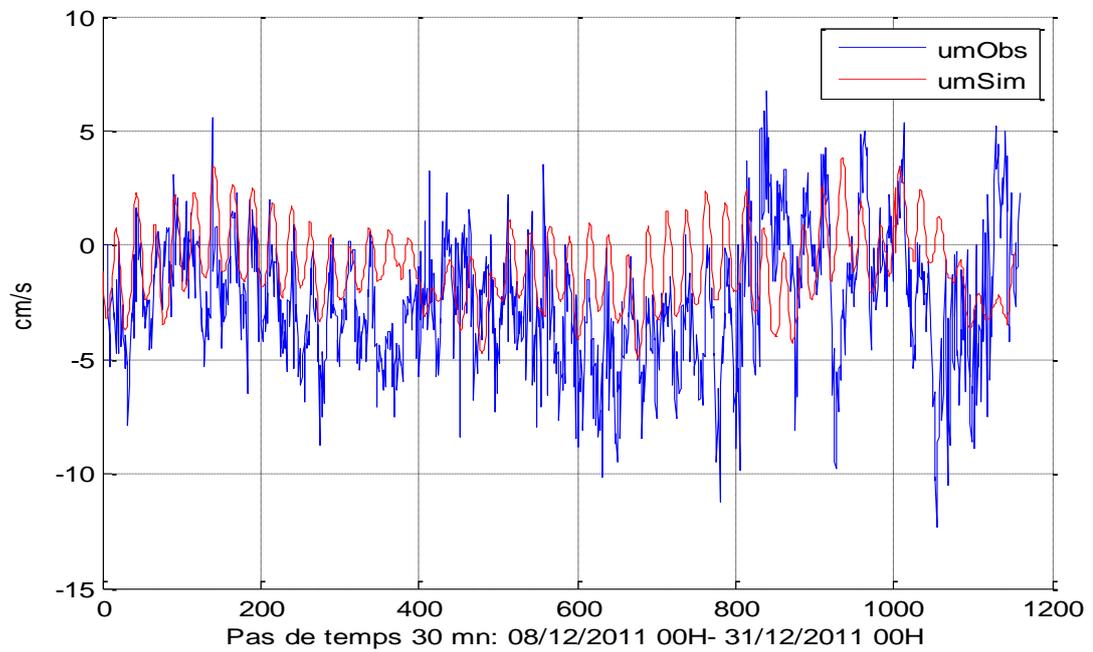


Figure 44. Composantes zonales de la vitesse mesurée (bleue) et simulée par le modèle (rouge) au fond ( $z=-5.5m$ ) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

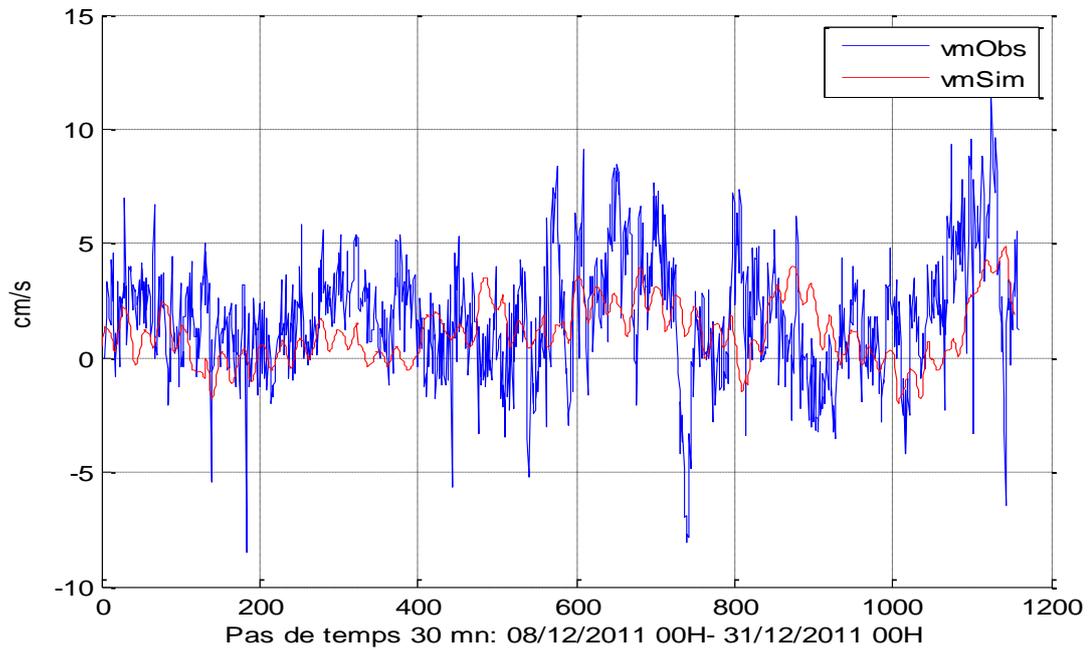


Figure 45. Composantes méridiennes de la vitesse mesurée (bleue) et de la vitesse simulée par le modèle (rouge) au fond ( $z=-5.5m$ ) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

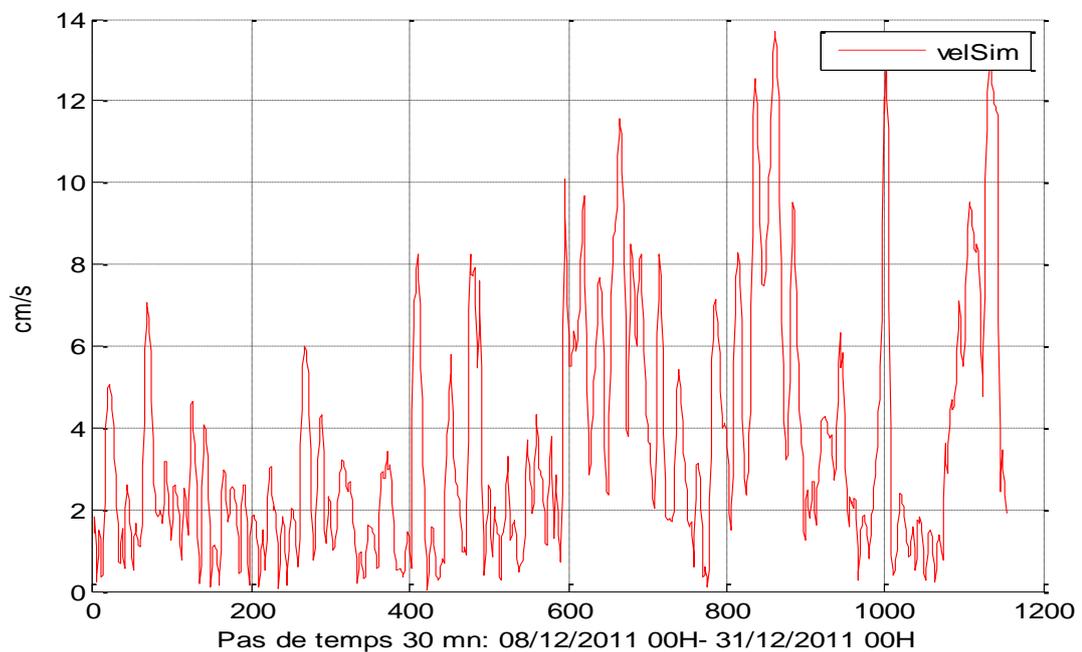


Figure 46. Vitesse des eaux de surface simulée ( $z=-0.3m$ ) au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

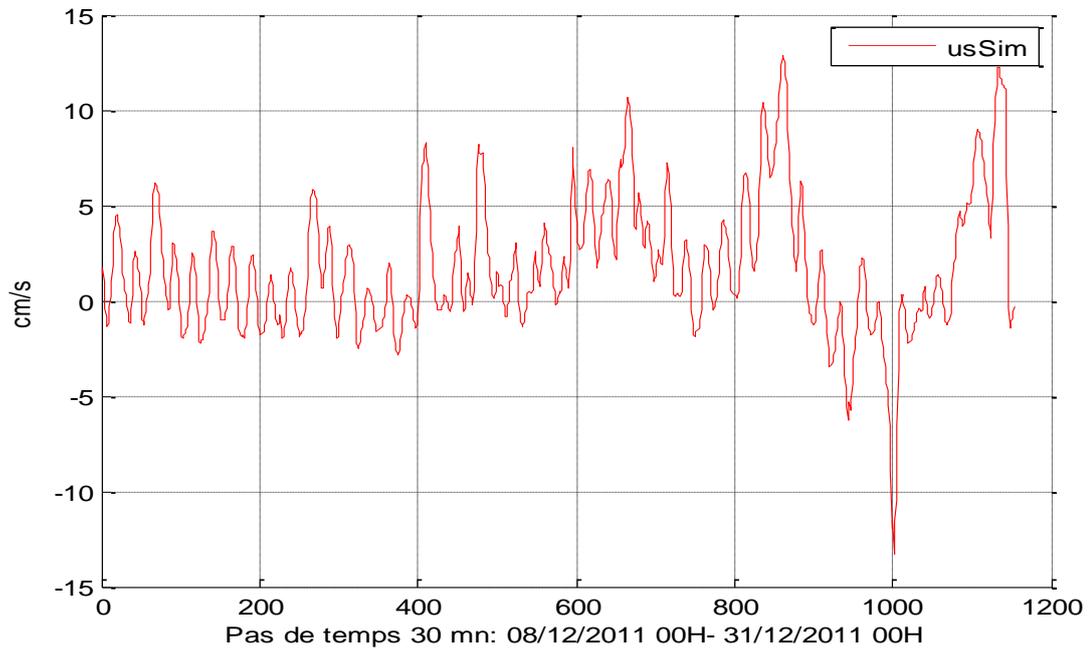


Figure 47. Composante zonale (u) de la vitesse des eaux de surface ( $z=-0.3m$ ) simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

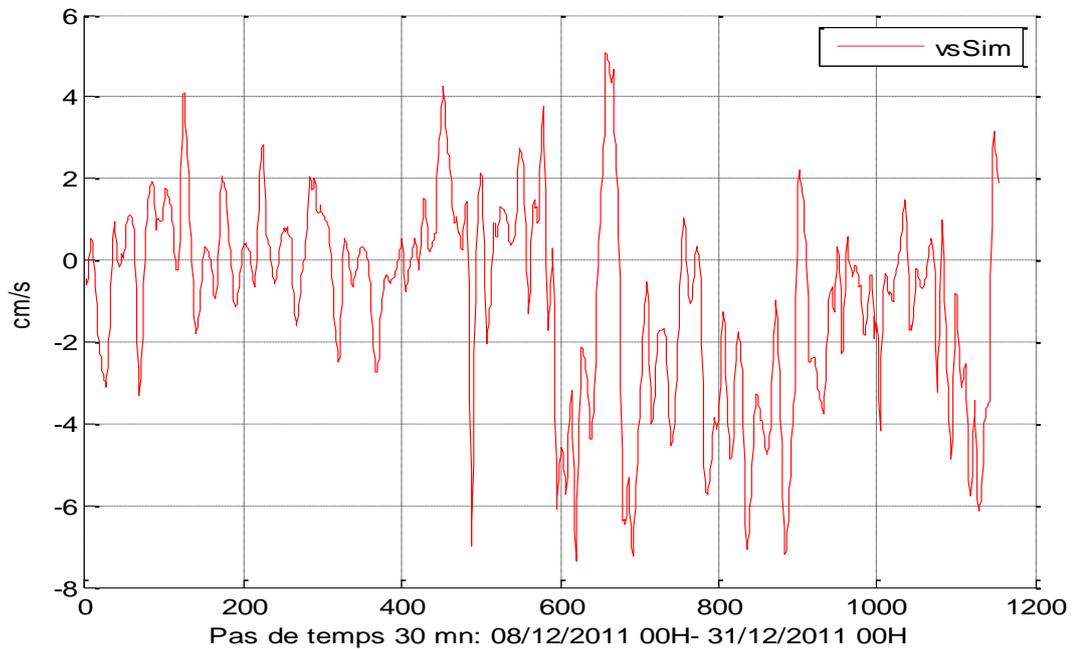


Figure 48. Composante méridienne (v) de la vitesse des eaux de surface ( $z=-0.3m$ ) simulée au niveau de la station CMA en face de Menzel Abderrahmen.

#### 4.5 Discussion

L'analyse qui vient d'être présentée plus haut montre clairement que le modèle a bien reproduit la température simulée au niveau des deux stations CMA et CMJ. Ceci confirme que la structure du module thermique intégré dans le modèle qui résout l'équation de la température est robuste. L'écart entre les températures simulées et mesurées est souvent inférieur à 1°C, confirme cette constatation.

La comparaison des niveaux d'eaux simulé et mesuré à la station CMA montre que le modèle a pu reproduire le niveau d'eau mesuré (amplitude et phase) avec un bon réalisme. Le faible écart observé entre les deux séries mesurée et simulée est du soit à la bathymétrie utilisée dans le modèle ou aux harmoniques de la marée calculées à l'entrée du goulet (sous le pont mobile) qui sont utilisées pour forcer le modèle au niveau de sa limite ouverte.

En ce qui concerne les vitesses de déplacements des eaux simulées les résultats de comparaisons entre les simulations et les observations des vitesses mesurées montrent que les courants mesurés à la station CMJ (à Menzel Jemil) ainsi que les courants de fond (niveaux  $z=-5.5$  et  $-7.5m$ ) sont bien reproduites par le modèle alors que les courants mesurés à la profondeur  $-3.5m$  sont sous estimés par le modèle. Cet écart peut être lié en plus des causes possibles énumérées dans le paragraphe précédent, au forçage atmosphérique tri-horaire utilisé pour forcer le modèle.

Rappelons par ailleurs, que les deux moteurs principaux de la circulation dans la lagune sont la marée et le vent ; en conséquence la qualité de données météorologiques ainsi que l'analyse harmonique de la marée pourraient influencer les résultats du modèle.

Enfin, rappelons que la circulation ainsi que la température au niveau du secteur Nord-Est où l'effet de la marée est négligeable sont bien reproduite par le modèle. Ainsi, le modèle peut être utilisé pour mieux évaluer l'effet du dragage sur la circulation des eaux et le calcul du temps de renouvellement du secteur Nord-Est.

## 5 CIRCULATION DES EAUX

Dans présente section (§ V) nous tentons de simuler la structure spatio-temporelle de la circulation des eaux et d'identifier les zones de « *mortes eaux* ».

Les *schémas* de circulations proposés par Frisoni et al. (1986) ont été basés sur des considérations géomorphologiques, sédimentologiques et physico-chimiques. Ces informations bien qu'elles sont très utiles à cette époque, ne permettent pas cependant de déduire une relation cause-effet de la répartition des courants dans la lagune. Les travaux qui viennent donner d'autres informations supplémentaires d'ordre quantitatives sont récemment évoqués par l'INSTM (2002), Harzallah (2003), Béjaoui et al. (2008) et Béjaoui (2009) et qui sont basés sur la modélisation tridimensionnelle de la circulation sous l'effet de la marée et du vent.

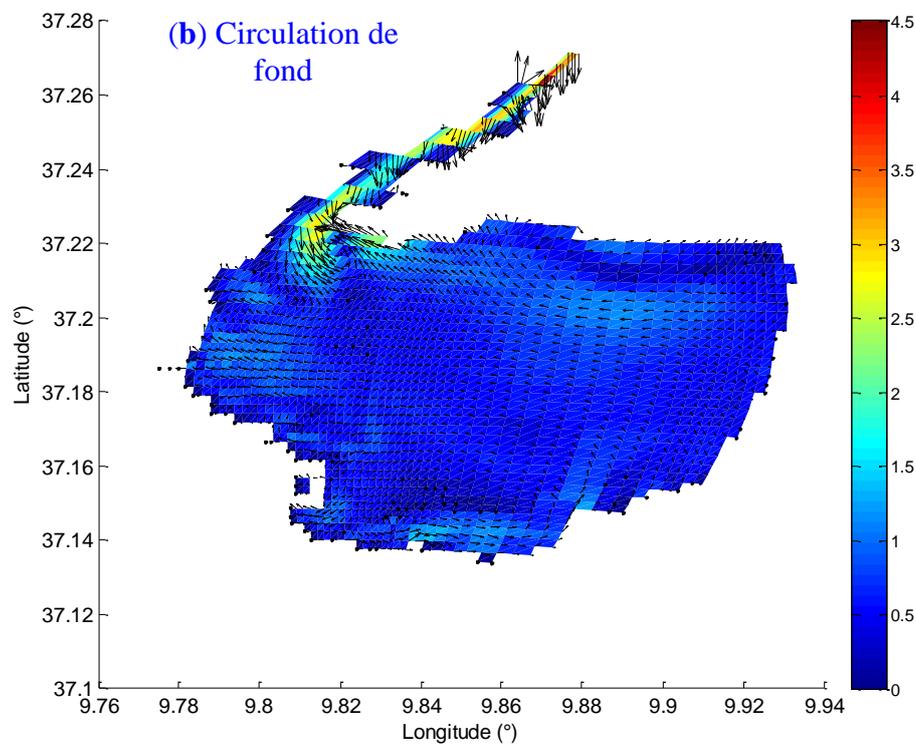
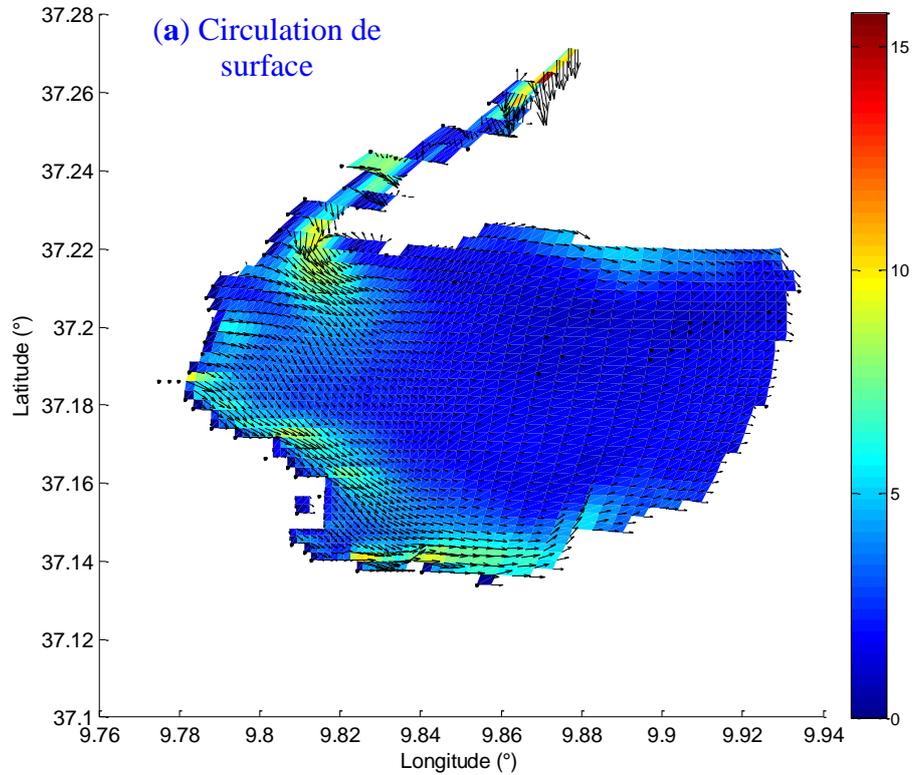
Sur les figures 49 sont présentés les courants de surface, les courants de fond et la composante *barotrope* en hiver (moyenne des mois de décembre, janvier et février). Les eaux de surface (figure 49a), soumises à des tensions du vent du secteur Nord-Ouest (situation dominante dans la région de Bizerte), se déplacent vers le Sud-Est pour toutes les régions de la lagune. Les courants les plus forts se trouvent au niveau des bords nord, ouest et sud. Au centre de la lagune, les courants sont relativement faibles. Au fond (figure 49b), l'effet du vent diminue et le sens de la circulation s'inverse vers la direction Nord-Ouest. L'eau ramenée vers la direction Sud-Est, par cisaillement du vent, retourne vers le Nord-Ouest en traversant le centre de la lagune (figure 49b).

Sur les figures 50 sont présentés les courants de surface, les courants de fond et la composante *barotrope* du courant en été (moyenne des mois de juin, juillet et août). La circulation moyenne des eaux est similaire à celle de la circulation hivernale. Néanmoins, l'intensité des courants est moins importante en conséquence de la diminution de l'intensité du vent. Notons que le vent moyen pendant la période estivale est aussi du secteur Nord-Ouest ce qui justifie la similarité de la structure des courants pendant les deux périodes estivale et hivernale.

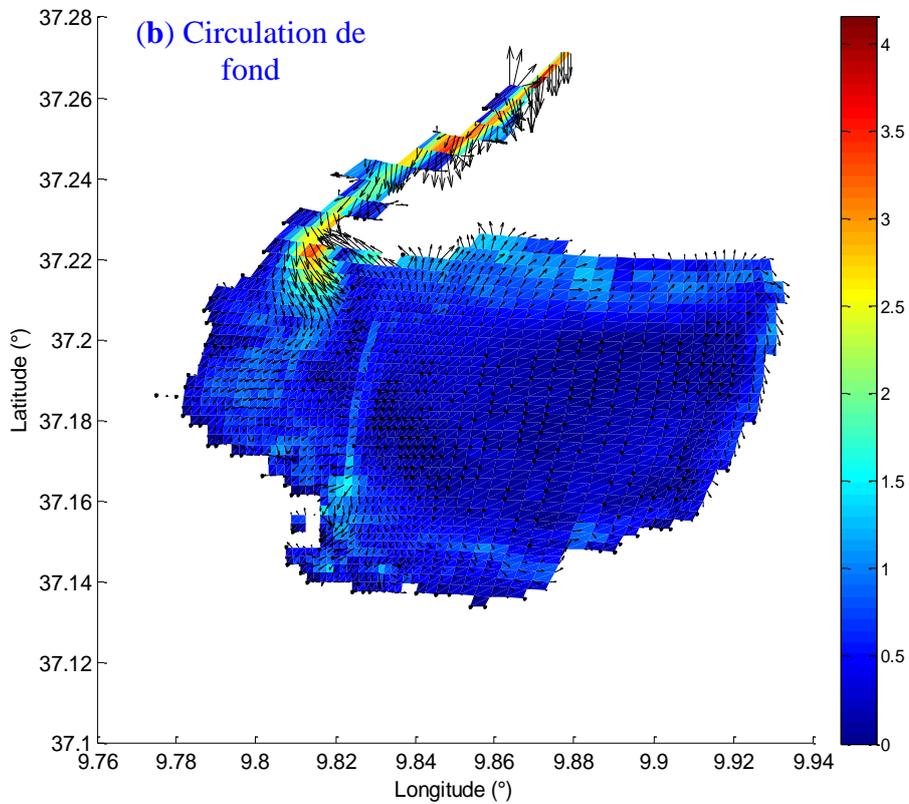
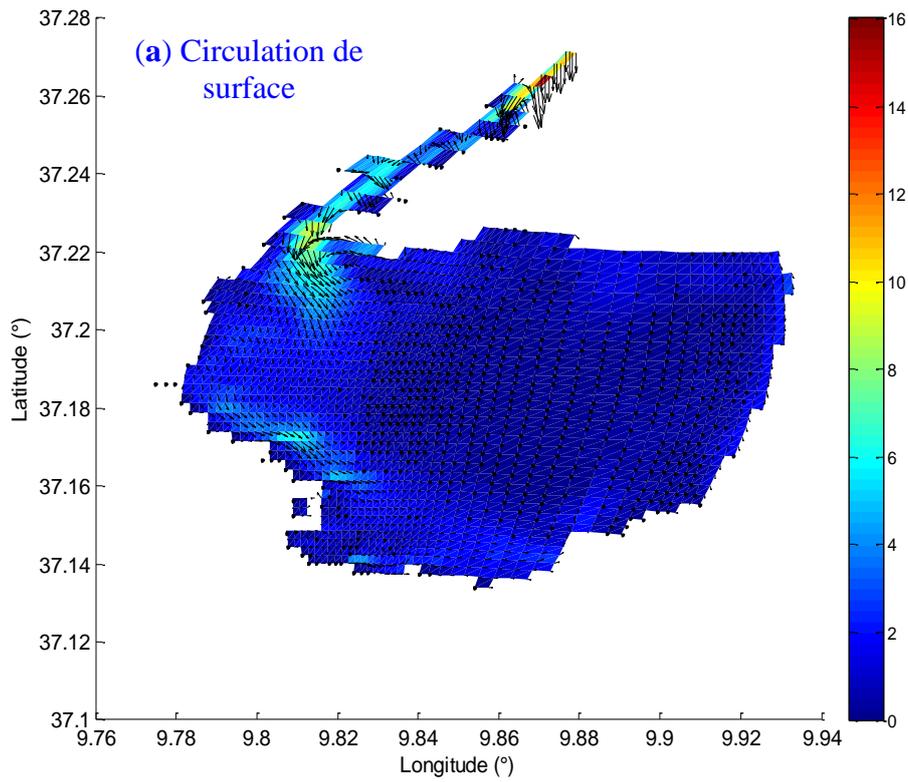
En résumé, la circulation des eaux de la lagune peut être schématisée comme suit : les eaux de surface se déplacent, sous l'effet du vent, vers le secteur Sud-Est en longeant principalement les côtes Nord et Sud. Une fois qu'elles atteignent le secteur Sud-Est, les eaux se plongent vers le fond et se redirigent vers le secteur Nord-Ouest pour se diriger finalement vers l'extérieur de la lagune. Une particularité importante de la circulation des eaux dans la lagune est l'apparition de trois cellules de circulation giratoire (Béjaoui, 2009). Une située au Nord, une seconde située au Sud et une troisième moins importante située à l'Ouest. Le sens et l'intensité de l'écoulement dans chaque cellule sont fonction de l'intensité et le sens de l'écoulement moyen.

L'effet de la marée sur la structure des courants à l'intérieur de la lagune est négligeable. La marée intervient particulièrement sur l'échange des masses d'eaux entre la mer et la lagune à travers le goulet (Harzallah, 2003). A cause du mouvement oscillatoire de la marée, ce sont sensiblement les mêmes masses d'eau qui font l'aller et le retour entre la mer et la lagune. Ce mouvement oscillatoire a un effet important sur le temps de résidence d'une pollution dans la lagune. Rappelons, que l'échange entre la lagune et la Méditerranée dépend, entre autre, des

apports en eaux douces dans la lagune. Dans le cas où la précipitation n'arrive pas à équilibrer l'évaporation, l'écoulement dans le goulet est dirigé vers la lagune.



Figures 49. Circulation hivernale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus intense en comparaison à la circulation de fond (b).



Figures 50. Circulation estivale (Direction & Intensité) des eaux dans la lagune de Bizerte. La circulation de surface (a) est plus importante en comparaison à la circulation de fond (b).

## 5.1 Effet d'un vent Nord-Ouest

Un vent de direction Nord-Ouest génère des courants de direction Sud-Est (même direction que le vent) dans toutes les régions de la lagune. L'intensité des courants est plus importante dans les bords Ouest, Sud et Nord de la lagune. Ceci montre que le renouvellement des eaux au niveau de ces régions est plus important que celui des eaux de la partie centrale et l'Est de la lagune (figure 51). Un vent de direction Sud-Est génère des courants de surface de même sens que le vent soufflant. La circulation des eaux au fond est différente de celle à la surface. La figure 52, montre que la répartition des vitesses intégrées sur la hauteur générées par un vent Nord-Ouest.

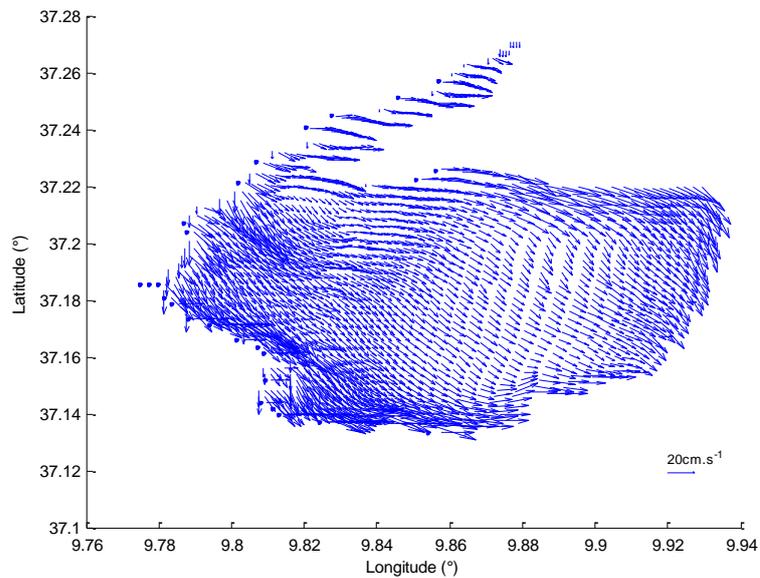


Figure 51. Circulation des eaux de surface générée par un vent de direction Nord-Ouest.

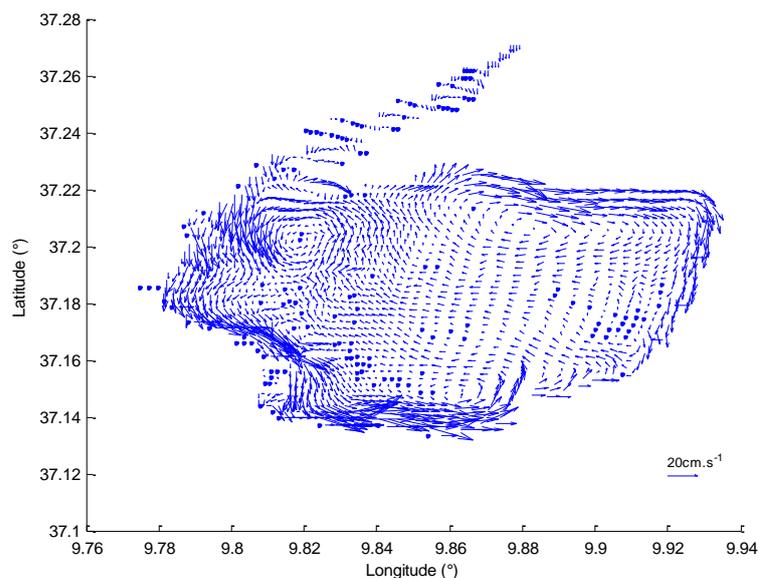


Figure 52. Vitesses intégrées sur la hauteur générée par un vent de direction Nord-Ouest.

## 5.2 Localisation des zones « mortes »

Les zones mortes se forment dans les océans et dans les lacs lorsque les planctons associés aux fleurs d'eau meurent et se déposent sur le fond marin, arrivées au fond, des microbes décomposent ces organismes en consommant de l'oxygène. Ce phénomène entraîne une augmentation radicale des populations microbiennes et une raréfaction de l'oxygène près des fonds marins. De point de vue hydrodynamique les zones « mortes » peuvent être déterminées à partir des champs de la distribution spatiale de la vitesse. Nous considérons une zone morte, la région de la lagune où l'intensité des courants est inférieure à 0.5 cm/s.

La figure 53 montre la région de « mortes-eaux » dans les situations estivale et hivernale. Les deux distributions spatiales montrent que les courants sont plus intenses au niveau du goulet (sous l'effet de la marée) et sur les rives nord, sud et sud-ouest de la lagune.

Ainsi, les zones de « mortes eaux » (figure 53) en période estivale sont plus étendues et occupent la partie centrale de la lagune. Cette zone est la plus touchée par le problème de stagnation des eaux. La distribution de la fraction fine des sédiments de fond (figure 3) affirme que le secteur central de la lagune est caractérisé par un faible hydrodynamisme.

Notons que les zones de « mortes-eaux » sont variables en fonction des saisons. En hiver ces régions sont pratiquement absentes grâce au brassage des eaux causées essentiellement par le vent. En été, ces régions apparaissent lorsque l'intensité des vents qui soufflent à la surface devient modérée. Néanmoins, l'étendue de ces régions change en fonction des conditions climatiques en particulier lorsque des vents exceptionnels soufflent à la surface de l'eau.

Remarquons aussi que les rives Nord et Sud de la lagune globalement ne présentent pas des problèmes de circulation des eaux. Ces régions, en particulier celle du nord de la lagune (frange entre Menzel Abderrahmen - Menzel Jemil), souffre des problèmes des rejets de déchets solides par les riverains.

Bien que l'intensité des courants dans la lagune soit relativement faible, cependant nous n'avons pas remarqué la présence des secteurs de « mortes-eaux » conformément à la définition biologique du terme. Cependant la conjugaison de la faible circulation des eaux et les apports en continu des rivières dans la lagune, en particulier l'oued Tinja favorise l'accumulation des sédiments fins et de la matière détritique dans les régions de faibles circulations en particulier la zone centrale et dans le Nord-Est de la lagune. En conséquence, un dragage hebdomadaire curatif pourrait améliorer l'état de la lagune.

Les études antérieures ont essayé de délimiter les secteurs des zones « mortes » ainsi que la profondeur des niveaux confinés ont été déterminés par des analyses géochimiques. Des solutions ont été déjà présentées dans l'étude de 2004 du Ministère de l'Environnement mais qui n'ont pas été étudiées d'une manière approfondie. En effet, d'autres études en cours se basant sur des paramètres bio-géochimiques (potentiel d'oxydo-réduction, biotest et AVS) montrent que la zone affectée par ce confinement et par ce sédiment vaseux et toxique est plus importante que celle proposée en 2004 dans l'étude du Ministère de l'Environnement.

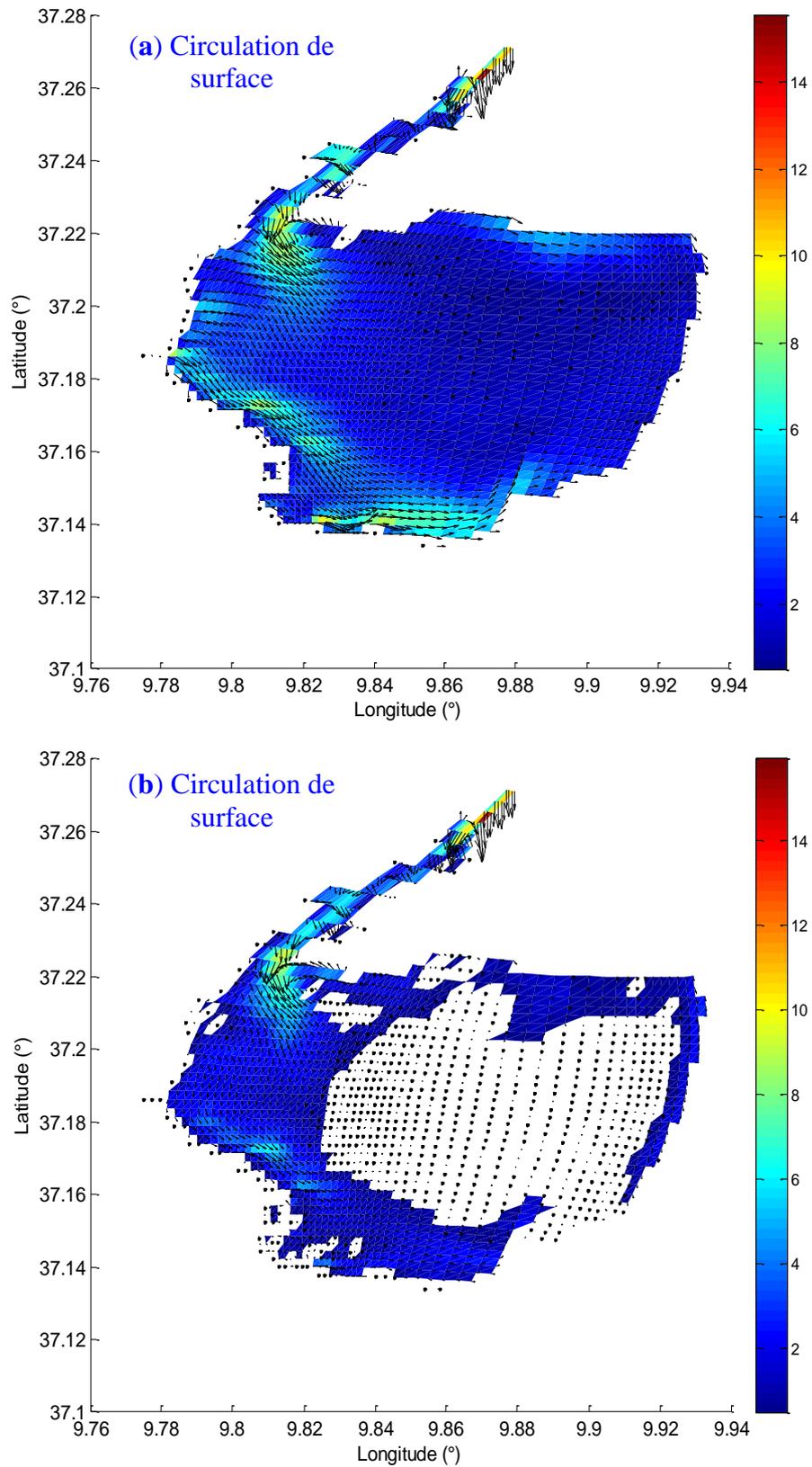


Figure 53. Identification des zones de mortes eaux en hiver (a) et en été (b) dans la lagune.

## 6 SIMULATION D'UN SCÉNARIO DU DRAGAGE

L'objet de cette section est de réaliser des simulations avec le modèle de la lagune de Bizerte de l'INSTM pour appréhender l'effet du dragage sur l'intensité et la distribution des courants dans le secteur Nord-Est.

Les conclusions relatives à l'effet du dragage sur la circulation au niveau du secteur Nord-Est seront basées sur une comparaison des simulations de distribution et intensité des courants avant et après dragage.

Quatre simulations ont été réalisées, deux simulations avant dragage et deux autres simulations après dragage. Les simulations ont été scindées en fonction des saisons. Ainsi, deux simulations (avant et après dragage) ont concerné la circulation hivernale et deux simulations ont concerné la circulation estivale.

La délimitation de région à draguer dans le secteur Nord-Est a été basée sur l'étude du ministère de l'environnement réalisée en 2004 et qui a concerné la caractérisation et le diagnostic de la lagune de Bizerte ainsi que d'autres résultats de recherches (Zayani, 2010 ; Garali, 2010). La superficie de la zone à draguer est de l'ordre de 5 km<sup>2</sup> ce qui représente 5 % de la superficie totale du plan d'eau.

Les figures 54 et 55 représentent la bathymétrie de la région Nord-Est avant et après dragage. La profondeur de la région à draguer est rendue à 6m pour toute la région Nord-Est (figure 5). Bien que cette profondeur est relativement importante, cependant elle n'est qu'une profondeur pour tester l'effet du dragage sur la circulation dans ce secteur. Dans le cas où la circulation des eaux s'améliore nous cherchons par la suite, par simulation, la profondeur optimale en tenant compte en plus des paramètres hydrodynamiques (intensité des courants) des paramètres pollution au niveau de cette région.

L'analyse de la structure des courants ainsi que leurs intensités dans les situations avant et après dragage du secteur Nord-Est sera faite sur les sorties du modèle relatives aux circulations barotrope des eaux. En effet, la circulation des eaux de surface est influencée par les conditions météorologiques qui règnent dans la région.

Ainsi, des cartes de circulations hivernale et estivale superposées à celles des intensités de courants avant et après dragage ainsi que des cartes de la différence de l'intensité des courants seront présentées. Pour comprendre l'effet du dragage sur l'intensité des courants selon la profondeur, des graphiques de la variation temporelle de l'intensité des courants à plusieurs niveaux z au niveau d'une station du secteur Nord-Est ainsi que des graphiques présentant à la fois l'intensité et la direction des vitesses seront aussi présentées.

## 6.1 Bathymétrie de la lagune avant et après dragage

La figure xx1 représente la bathymétrie de la lagune de Bizerte utilisée dans le modèle hydrodynamique. Ainsi, l'enceinte de la lagune se caractérise par une dépression centrale de 9 à 10 m de profondeur et une formation de haut fonds au niveau de l'embouchure du canal Tinja. La profondeur de l'eau peut atteindre 12 m au niveau du canal de navigation. La région Nord-Est de la lagune (entre Menzel Abderrahmen et Menzel Jemil) est caractérisée par des isobathes régulièrement espacées et une pente relativement douce.

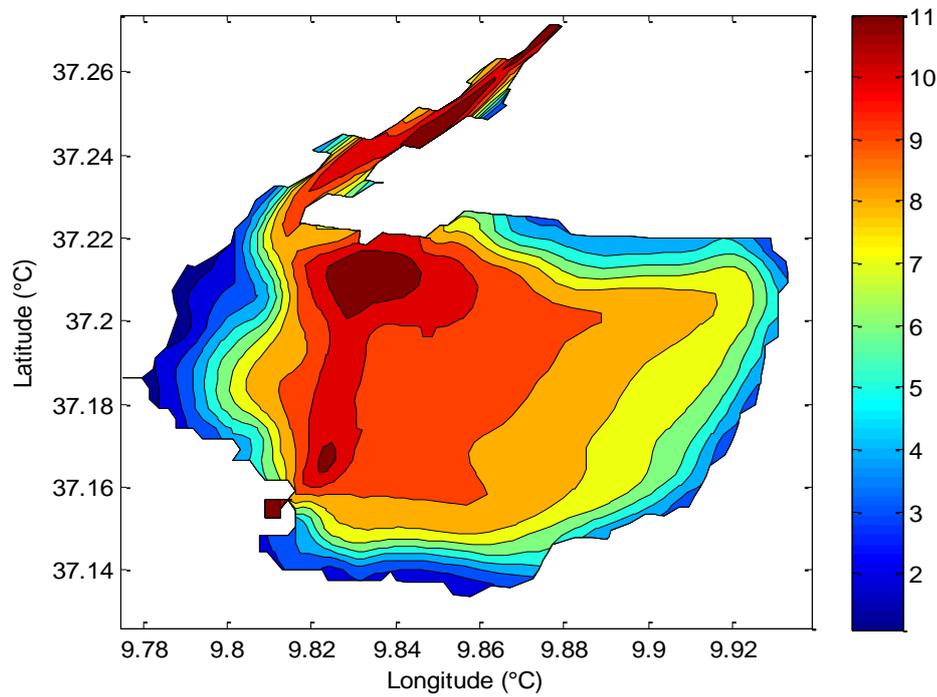


Figure 54. Bathymétrie de la lagune avant dragage du secteur Nord-Est

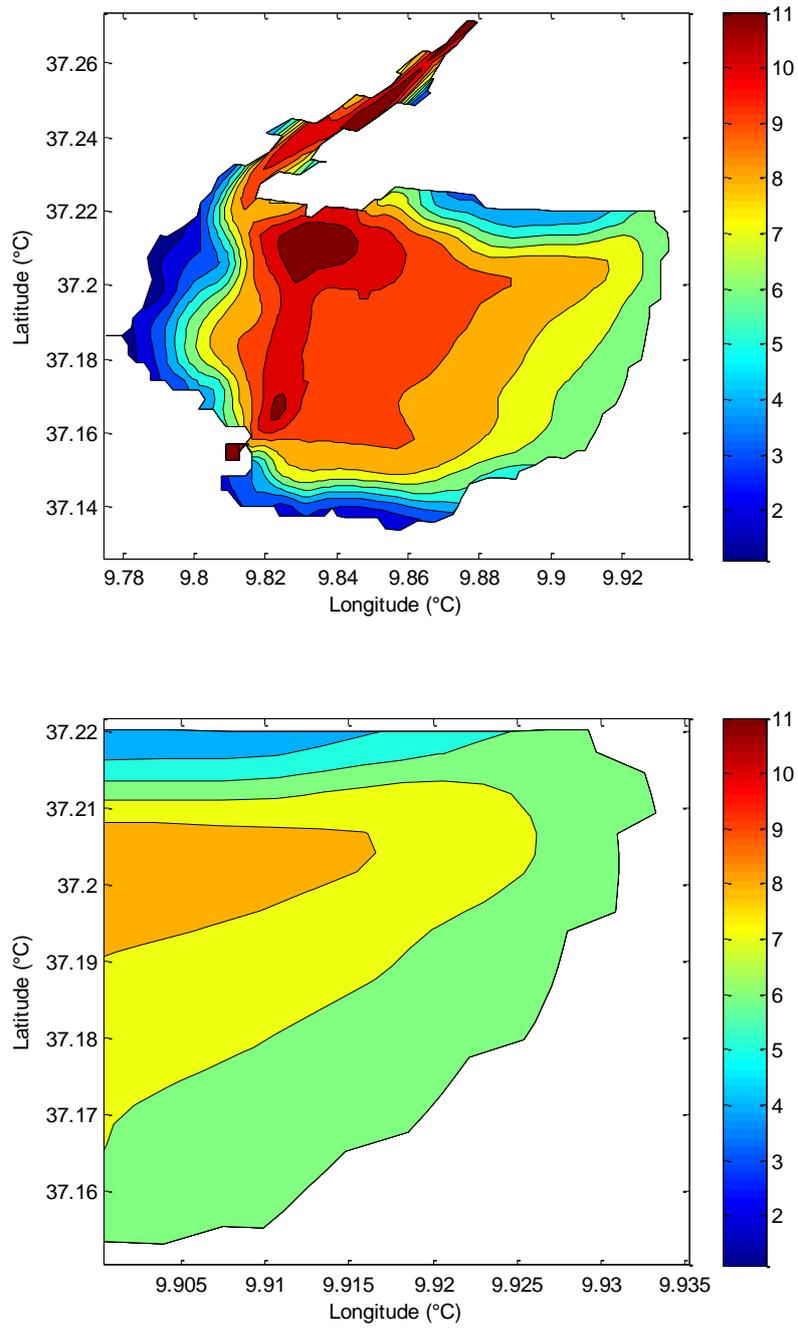


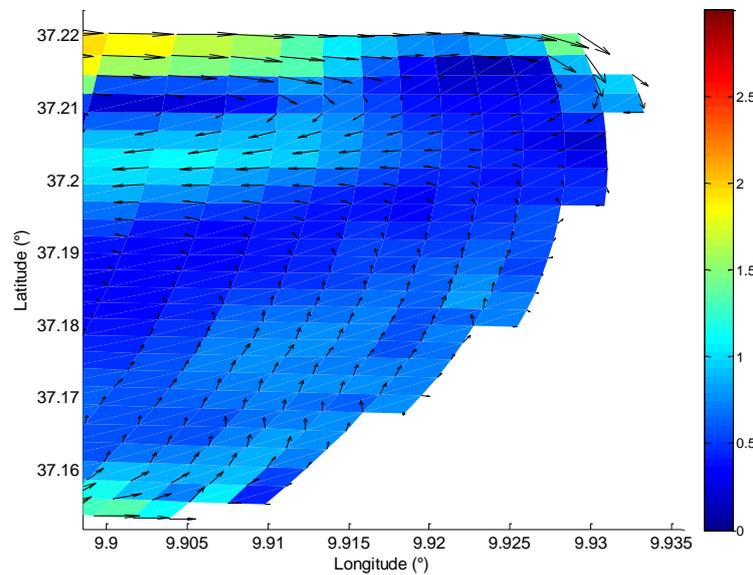
Figure 55. Bathymétrie de la lagune après dragage du secteur Nord-Est. La figure 55b est un zoom du secteur Nord-Est montrant la partie dragée.

## 6.2 Circulation hivernale avant et après dragage (secteur Nord-Est)

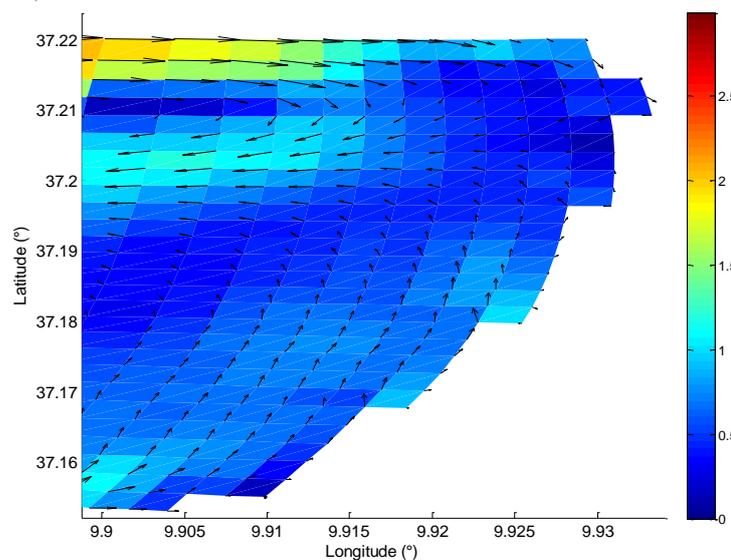
Les figures 56 et 57 présentent les courants *barotrope* hivernale (moyenne des mois de décembre, janvier et février) avant et après dragage respectivement. La figure 58 représente la différence des intensités des courants *barotrope* des deux situations.

Les simulations du modèle montrent que les structures des courants avant et après dragage sont similaires (figures 56 et 57).

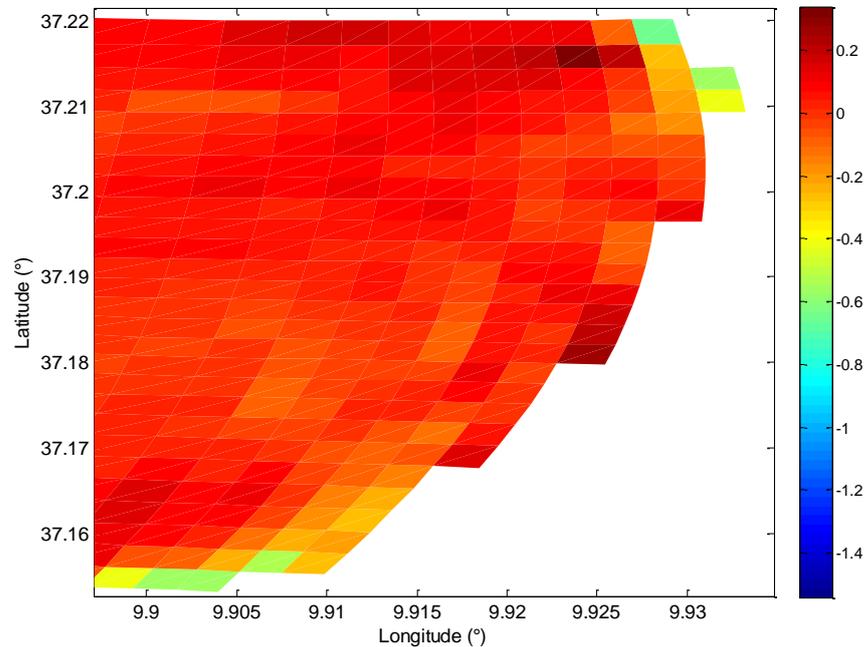
En ce qui concerne l'intensité des courants, nous remarquons que les vitesses les plus fortes se trouvent au niveau des bords Nord et Sud, alors qu'au centre et à l'Est de cette région les courants sont relativement faibles (figure 56). Nous constatons aussi qu'après dragage (figure 57) l'intensité des courants est réduite presque partout dans toute la région (figure 57), cependant cette réduction reste inférieure à 1 cm/s.



Figures 56. Répartition et intensité des courants barotrope moyen avant dragage du secteur Nord-Est (circulation hivernale).



Figures 57. Répartition et intensité des courants barotrope moyen après dragage du secteur Nord-Est (circulation hivernale).



Figures 58. Différence (après – avant) entre les intensités des courants barotrope moyen après et avant dragage du secteur Nord-Est (circulation hivernale).

### 6.3 Circulation estivale avant et après dragage (secteur Nord-Est)

Sur les figures 59 et 60 sont présentés les courants *barotrope* estivale (moyenne des mois de juin, juillet et août) avant et après dragage respectivement. La figure 61 représente la différence des intensités des courants *barotrope* des deux situations.

De même pour la structure des courants estivale, les simulations montrent une similitude dans la structure des courants dans les deux situations avant et après dragage (figures 59 et 60).

En ce qui concerne l'intensité des courants, d'après les simulations, nous constatons que les courants les plus forts sont simulés à l'Est de la région, alors qu'au centre de la région Nord-Est la circulation est relativement faible et ce pour les deux situations avant et après dragage (figures 59 et 60).

Après dragage, l'intensité des courants est réduite presque partout (figure 61) en particulier à l'Est de la région. Notons que l'écart de l'intensité des vitesses en période estivale est plus important qu'en période hivernale. Cette réduction est essentiellement due aux conditions météorologiques qui sont moins accentuées.

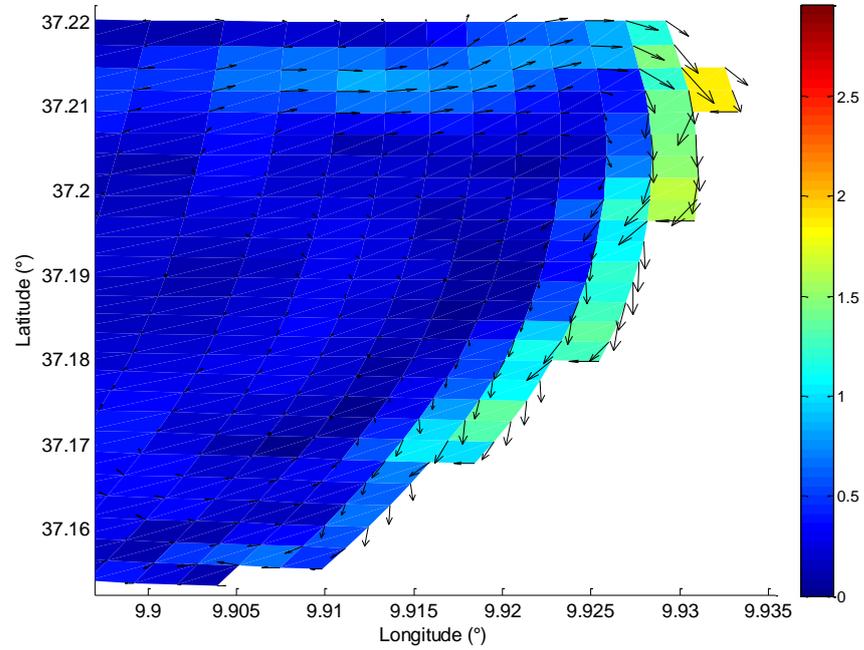


Figure 59. Répartition et intensité des courants barotrope moyen avant dragage du secteur Nord-Est (circulation estivale).

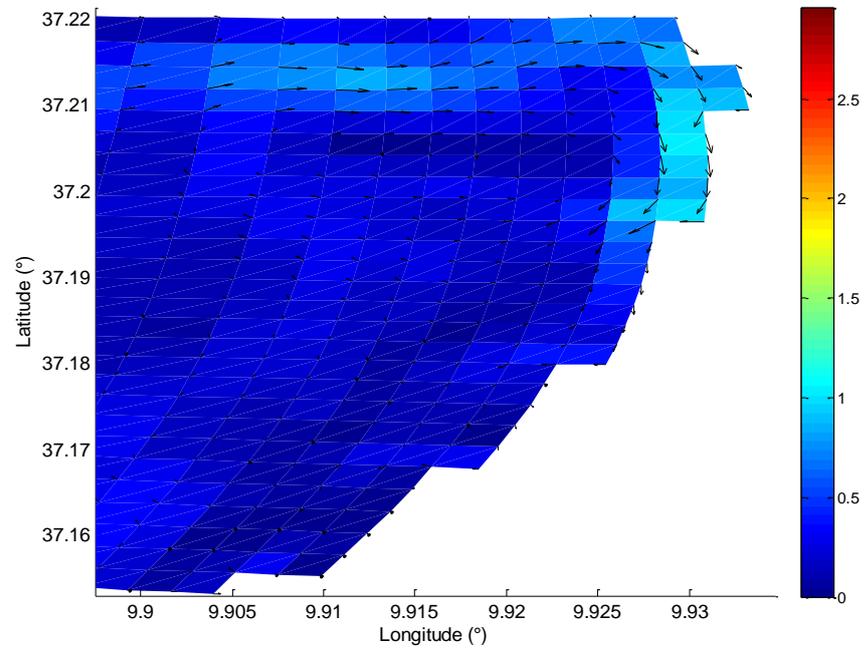


Figure 60. Répartition et intensité des courants barotrope moyen après dragage du secteur Nord-Est (circulation estivale).

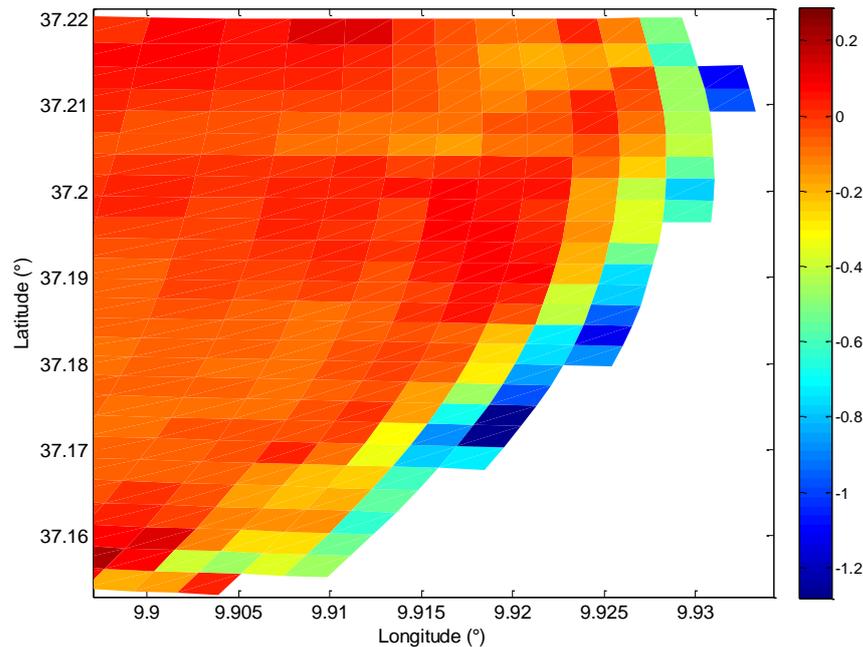


Figure 61. Différence (après – avant) entre les intensités des courants barotrope moyen après et avant dragage du secteur Nord-Est (circulation estivale).

#### 6.4 Variation temporelle des courant avant et après dragage (secteur Nord-Est)

Les intensités des courants à trois niveaux de l'axe z sont présentées sur les figures 62, 63 et 64, soient 0,2, 2,7 et 5 m de profondeur ainsi que l'intensité du courant barotrope (figure 65) avant et après dragage du secteur Nord-Est. Les figures 66 à 69 présentent en plus de l'intensité des courants, une information supplémentaire sur la direction des courants sous l'effet du dragage du sédiment de surface de cette zone Nord-Est de la lagune.

L'observation des courbes correspondant à l'intensité du courant au niveau de la station CMJ montre que l'effet du dragage sur l'intensité des courants au niveau des trois niveaux z est globalement négligeable en particulier sur les courants de surfaces (figures 62, 63, 64). En effet, l'intensité des courants de surfaces subissent principalement l'effet des conditions météorologiques (tensions du vent) qui règnent dans la région, d'autre part l'augmentation de la profondeur n'a affecte pas leurs l'intensité. En s'éloignant de la surface, une légère variation a été notée sur l'intensité des courants au milieu de la colonne d'eau (figure 63) et du fond (figure 64) qui reste toujours négligeable. De même les courants barotropes ne présentent pas une variation après le dragage du sédiment de fond de la zone Nord-Est de la lagune. (figure 65). Les courants de surfaces (figure 62) varient dans une fourchette de 5 à 15 cm/s et peuvent atteindre 30 cm/s alors que l'intensité des courants au milieu et au fond de la colonne d'eau est généralement inférieure à 8 cm/s (figures 63 et 64).

Comme les intensités, les directions des courants n'ont pas été modifiées suite à l'augmentation du tirant d'eau par dragage du fond. La direction des courants au niveau des régions proches des côtes reste biaisée par la forme du littoral qui influence la structure spatiale des courants. Notons que les courants au niveau de cette région (station CMJ) suivent

une direction privilégiée Nord-Sud en fonction des conditions atmosphérique et la bathymétrie de la région (relief et forme de la côte).

La direction de la circulation des eaux de surfaces (figure 66), comme l'intensité, est influencée surtout par les conditions météorologiques qui règnent dans la région. Une légère modification de la direction des courants est notée en allant en profondeur de la colonne d'eau (figures 67 et 68).

La direction des courants *borotropes* confirme bien que le dragage n'a pas d'effet notable sur l'écoulement, dans la figure 69 nous pouvons observer que les directions des courants avant et après dragage n'ont pas changé (les graphiques sont superposables).

En conclusion, la variation verticale de l'intensité et la direction des courants reste faible avant et après le dragage du fond au niveau du secteur Nord-Est.

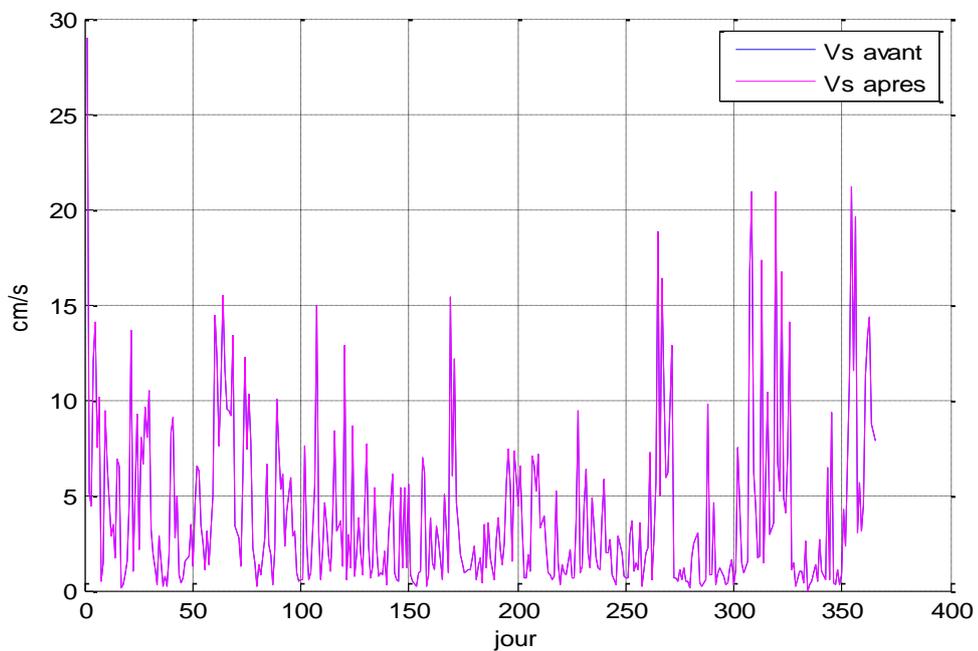


Figure 62. Variation temporelle de l'intensité des courants à 0.2 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune

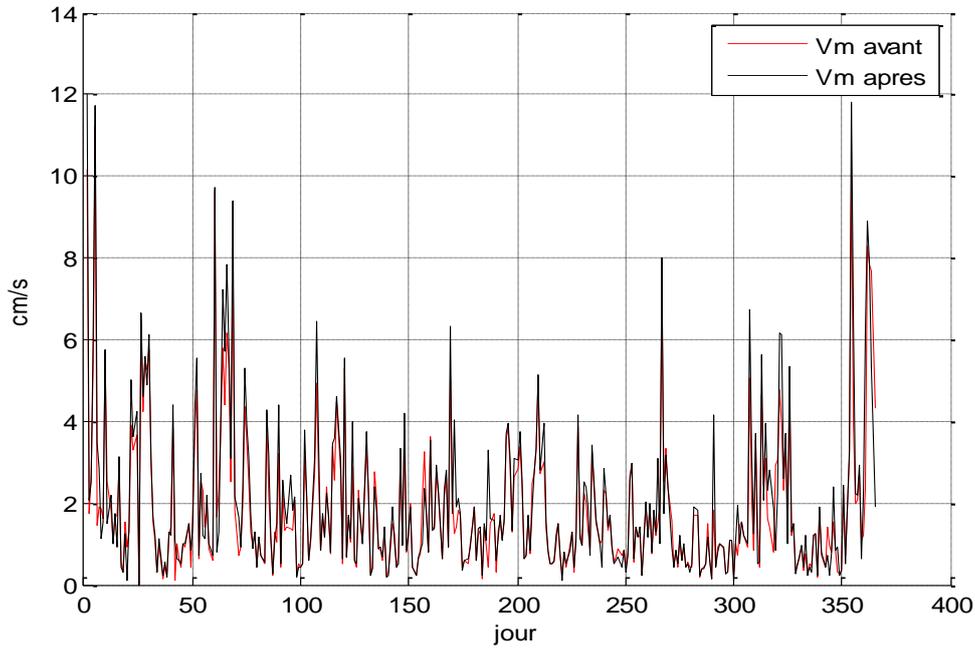


Figure 63. Variation temporelle de l'intensité des courants à 2.7 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune

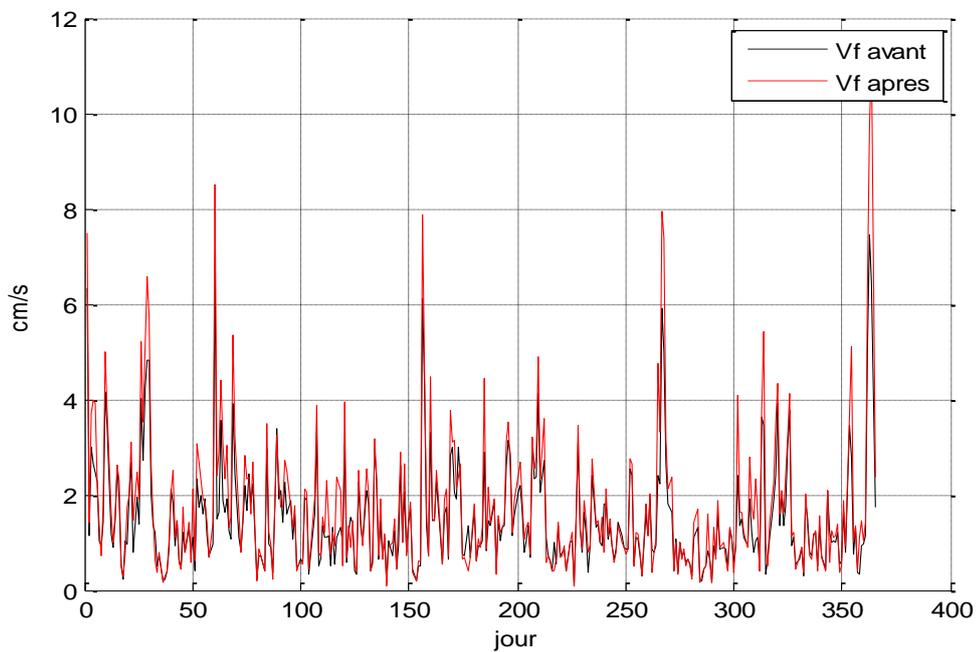


Figure 64. Variation temporelle de l'intensité des courants à 5 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune

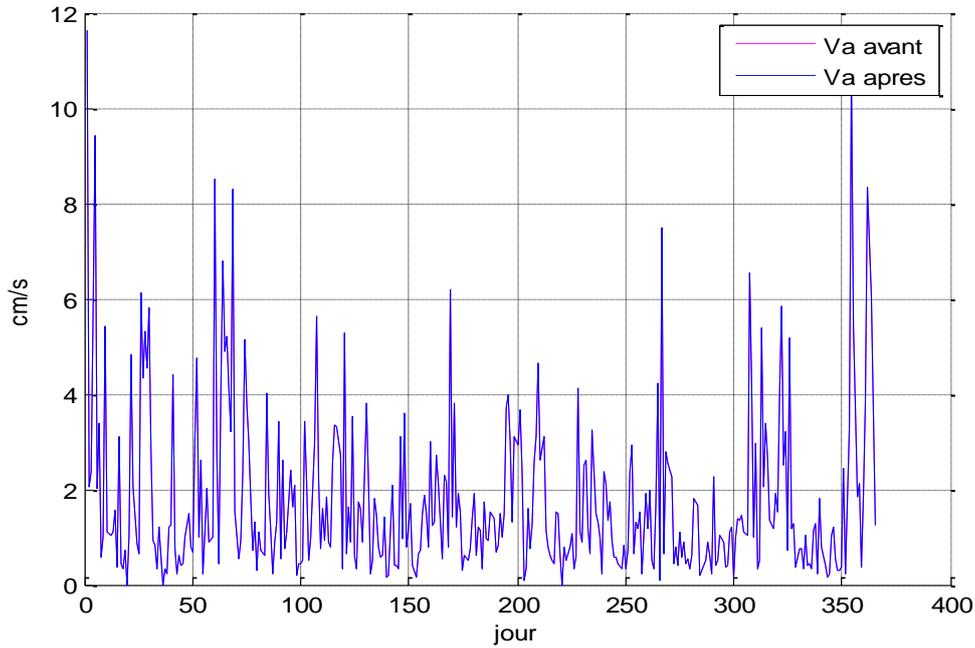


Figure 65. Variation temporelle de l'intensité des courants barotrope au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune

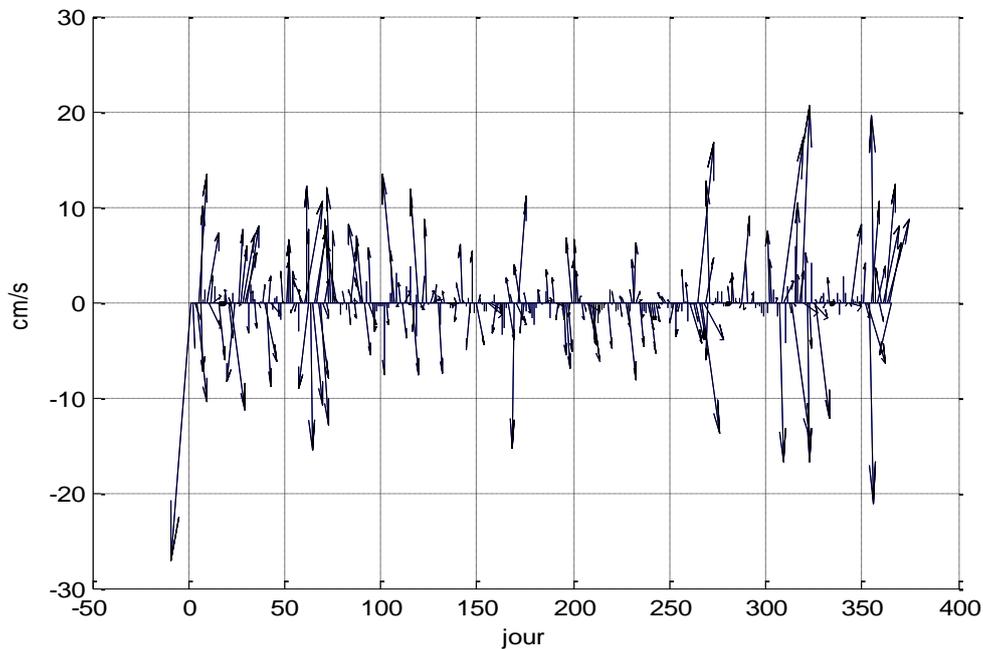


Figure 66. Courants simulés à 0.2 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après)

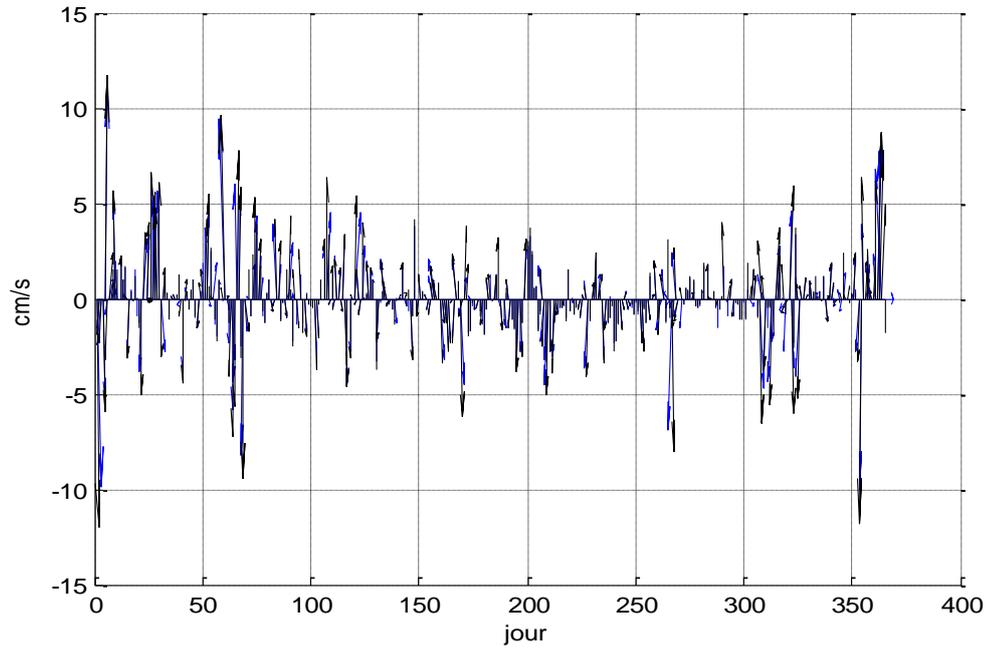


Figure 67. Courants simulés à 2.7 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après)

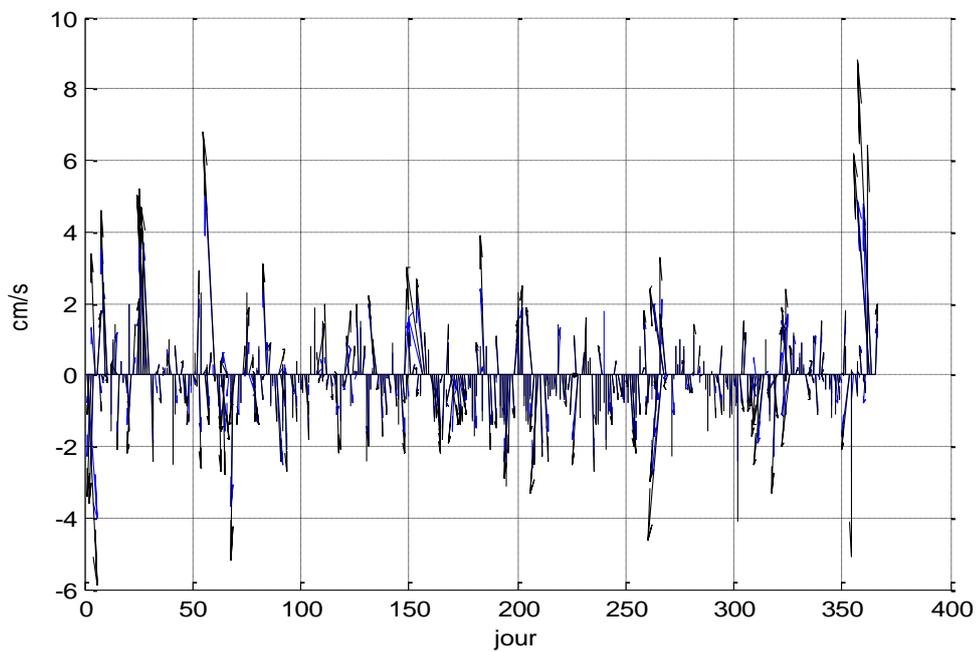


Figure 68. Courants simulés à 5 m de profondeur au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après)

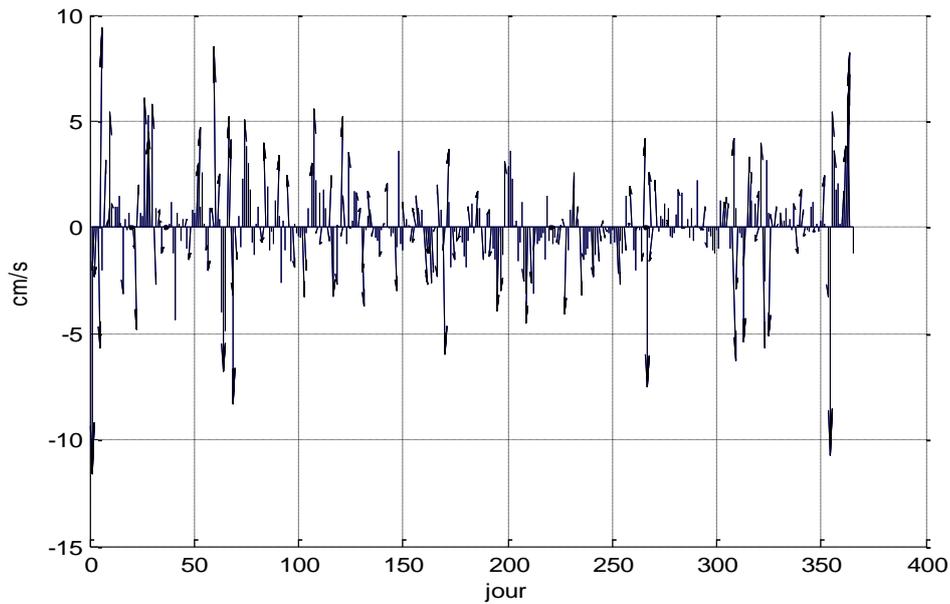


Figure 69. Courants brotrophe simulés au niveau de la station CMJ (voir figure 5) avant et après dragage de la bande littorale du secteur Nord-Est de la lagune (« bleue » avant, « noir » après)

## 6.5 Interprétation

D'après les simulations réalisées, nous avons constaté que le dragage du secteur Nord-Est n'implique pas une amélioration de l'intensité des courants. Au contraire, le dragage a réduit l'intensité de la circulation des eaux en particulier en période estivale lorsque les conditions météorologiques sont moins intenses. En hiver, la colonne d'eau est bien brassée sous l'effet des conditions météorologiques relativement intenses et en conséquence l'écart de l'intensité des courants entre les deux situations avant et après dragage est moins important en comparaison à l'écart en période estivale.

Par analogie à un écoulement unidirectionnel à surface libre dans un canal le fait d'augmenter le tirant d'eau par un dragage la vitesse de l'écoulement diminue conformément aux équations de Saint Venant (cas d'un régime permanent, une répartition hydrostatique de la pression, fluide incompressible ainsi qu'une pente faible). Ce cas permet d'anticiper théoriquement les résultats des simulations quant à l'effet de l'augmentation de la profondeur. Cependant avec un nombre d'aléas dans un écoulement 2 ou 3 dimensions, la résolution des équations devient difficile et la nécessité de la modélisation numérique est alors indispensable. Par conséquent, le dragage réduit l'intensité des courants dans une situation telle que celle de la lagune de Bizerte. La modélisation appliquée à cet objectif a montré qu'effectivement la circulation est réduite en augmentant la profondeur du secteur Nord-Est.

Dans le cas contraire, le fait d'éliminer des haut fonds, les bancs de sables ainsi que les étranglements pourrait améliorer la circulation des eaux. En conséquence, la rectification des berges de la lagune peut améliorer la circulation au niveau des rives. Notons que les berges de la lagune, en particulier celles du côté Nord, se caractérisent par plusieurs étranglement, il est donc conseillé de les lisser pour améliorer la circulation. A titre d'exemple, nous remarquons dans cette zone, un banc de sable parallèle à la côte qui naît au niveau du terre-plein situé en face de la station conchylicole STL. Celui-ci semble donc interférer avec la dynamique sédimentaire et amplifier le confinement de la zone (voir figure 70). Une réflexion pour un réaménagement de la côte devrait aller dans le sens du lissage (positif ou négatif), by-pass, etc.

Par ailleurs, il est important de considérer les effets que pourraient engendrer des travaux de dragage dans cette zone sur l'équilibre du trait de côte, notamment sur le bourrelet dunaire qui sépare la lagune des champs agricoles voisins (secteur sud) et qui pourrait causer une destruction massive de ce bourrelet et des intrusions marines irréversibles dans les champs avec l'extension de sebkhas existantes et la création de nouvelles sebkhas et une perte conséquente en surface agricoles.

Notons également sur cette prise de vue que la sebkha située au Nord-Est est récente et qu'elle a été créée puis entretenue du fait de la cassure du bourrelet dunaire. Cette sebkha, était de taille insignifiante au milieu des années 1980. Visiblement elle est en voie d'extension et sa superficie pourrait prendre de l'ampleur dans le cas où des travaux seraient engagés sans considérer ces risques. Des travaux de restauration de ce bourrelet dunaire contribueront certainement à freiner ce phénomène. Mais cette action ne serait pas efficace à moyen et à long terme si le transit sédimentaire modifié par le terre-plein situé devant la station conchylicole STL (Société Tunisie Lagune : ex-ONP) n'est pas rétabli.



Figure 70. Banc de sable longeant la côte du secteur Est (figure Google Earth)

Plusieurs études ont montré que le sédiment de surface du secteur Nord-Est est contaminé particulièrement par une pollution métallique et organique. L'opération de dragage pourrait présenter des risques potentiels car les sédiments pollués peuvent se disperser sur des surfaces assez importantes suite au phénomène de dispersion et de transport par les courants. Le dragage peut aussi entraîner une augmentation de la turbidité de l'eau qui peut représenter une menace sérieuse pour les mollusques bivalves (action de colmatage chez les organismes filtreurs).

En conclusion, les simulations réalisées désavantagent le scénario de dragage du secteur Nord-Est dans un objectif d'amélioration de la circulation. En conséquence, la solution la plus plausible pour améliorer les conditions environnementales est un curage régulier – si la contamination des sédiments le justifie – avec des précautions importantes concernant la turbidité que de telles opérations pourraient engendrer.

## 7 TEMPS DE RENOUVELLEMENT DES EAUX

Dans un système de réservoir, le temps moyen de renouvellement ou durée de renouvellement est le temps qui doit s'écouler pour que le volume stocké à un moment donné soit remplacé par les apports postérieurs.

En plus de ses échanges avec la Méditerranée, la lagune communique avec le lac Ichkeul situé à l'Ouest. Compte tenu du climat qui règne dans la région (climat semi-aride), la lagune de Bizerte offre un potentiel intéressant pour le développement de l'activité conchylicole. Une bonne connaissance du fonctionnement de cet écosystème et de ses potentialités conchylicoles est nécessaire. Sa capacité trophique dépend, 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. Ainsi, ce paramètre (temps de renouvellement) doit être pris en compte pour tout aménagement et/ou investissements mytilicole dans la lagune.

L'objectif de cette partie est d'estimer le temps de renouvellement intégral et la distribution spatiale du temps de renouvellement local des masses d'eaux dans la lagune, en particulier au niveau du secteur Nord-Est.

Deux approches ont été utilisées, la première est la méthode du prisme et la seconde est celle de l'advection-dispersion d'un traceur soluble.

### 7.1 Méthode du prisme

Traditionnellement, le temps de renouvellement des eaux dans une lagune est estimé par la méthode du prisme de marée (Dyer, 1989). Selon cette méthode :

$$TR = (V+P)*T/P \cong Vm/Qm$$

où :

- $P$  est le prisme de marée, c'est-à-dire le volume d'eau entrant dans la lagune au cours d'une période de marée  $T$ ,
- $V$  est le volume de l'eau présent dans la lagune à marée basse,
- $Vm$  est le volume moyen de l'eau de la lagune (ou du secteur Nord-Est),
- $Qm$  est le débit moyen d'eau entrant dans la lagune (ou dans le secteur Nord-Est).

Ainsi, l'utilisation de cette méthode nécessite la connaissance du volume total de la lagune à marée basse et le débit d'eau entrant dans la lagune au cours d'un cycle de marée. Étant donné que le cycle de marée est dissymétrique au cours du temps, ces deux paramètres ont été déterminés par le modèle dynamique. Le calcul du temps de renouvellement a été effectué pour les deux situations avant et après dragage de la zone Nord-Est de la lagune afin de comprendre l'effet du dragage sur le temps de renouvellement en particulier du secteur Nord-Est.

Les figures 71 et 72 représentent le volume d'eau total ainsi que le débit d'eaux marines entrant dans la lagune à travers le canal (sous le pont de Bizerte) en fonction du temps. Les figures 73 et 74 présentent la variation en fonction du temps du volume d'eau ainsi que le débit entrant dans le secteur Nord-Est, avant dragage. Les figures 75 et 76 présentent la variation en fonction du temps du volume d'eau du secteur Nord-Est ainsi que le débit entrant dans ce secteur à travers les frontières après dragage. La figure 77 présente le temps de renouvellement global de la lagune et du secteur Nord-Est avant et après dragage du secteur Nord-Est, calculés par la méthode du prisme de marée.

A partir des courbes (figures 71 et 72) des variations temporelles du volume total d'eau ainsi que le débit entrant dans la lagune, le volume moyen ( $V_m$ ) ainsi que le débit moyen ( $Q_m$ ) ont été calculées, soient  $8.8E+8 \text{ m}^3$  et  $585.5 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivement. En supposant que ce volume moyen est remplacé à un taux équivalent au débit moyen entrant dans la lagune, le temps de renouvellement des eaux serait alors de l'ordre de 17.5 jours pour la lagune.

Le temps de renouvellement des eaux du secteur Nord-Est a été estimé en adoptant la même approche. Les volumes moyens du secteur Nord-Est ainsi que les débits entrants dans cette région avant et après dragage sont présentés dans le tableau suivant.

*Tableau 11 : Temps de renouvellement des eaux du volume intégral de la lagune et du secteur Nord-Est pour les deux situations avant et après le dragage (Calcul réalisé par la méthode du prisme)*

Méthode du Prisme	Avant dragage		Après dragage	
	Lagune	Secteur Nord-Est	Lagune	Secteur Nord-Est
<b><math>V_m</math> (m3)</b>	8.8E+8	0.5E+8	8.9E+8	0.6E+8
<b><math>Q_m</math> (m3/s)</b>	585.5	330.8	585.5	304.5
<b>TRI (jour)</b>	<b>17.5</b>	<b>1.9</b>	<b>17.6</b>	<b>2.5</b>

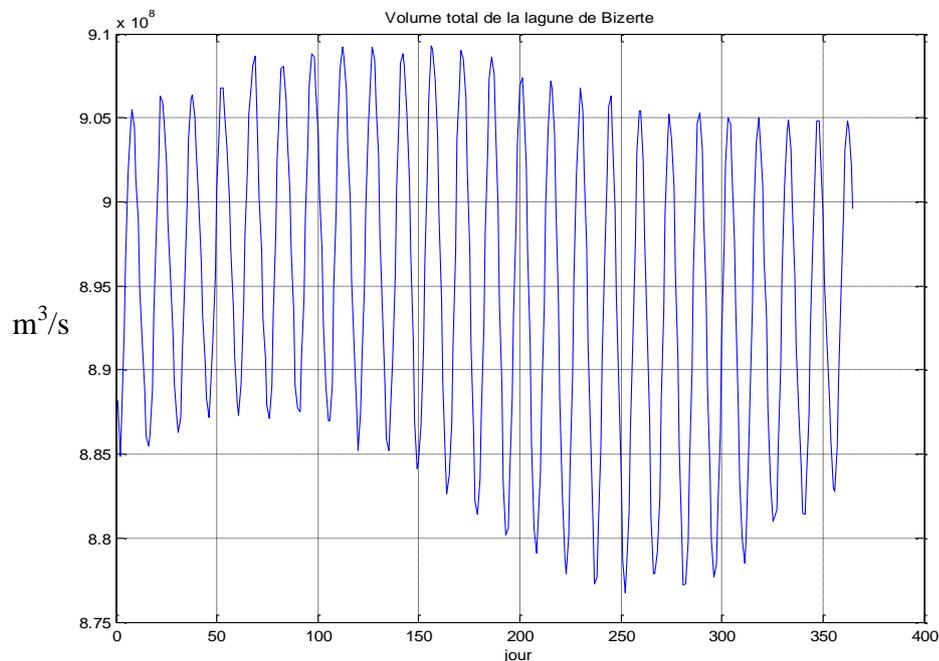
Le volume d'eau du secteur Nord-Est représente seulement 7% du volume d'eau total de la lagune, par conséquent le temps nécessaire pour remplacer les eaux de ce secteur sera alors proportionnel à ce volume. Ainsi, le temps moyen de renouvellement des eaux du secteur Nord-Est sera inférieur à celui de la lagune (volume total).

Ces temps de renouvellement de la lagune et du secteur Nord-Est semblent assez faibles dans les deux situations, avant et après dragage. Pour la lagune ce temps (17.5 jours) reste une valeur très approximative parce que se sont sensiblement les mêmes quantités d'eau qui entrent et qui sortent à l'entrée du goulet sous l'effet de la marée. La durée nécessaire pour remplacer les eaux de la lagune par des eaux venantes de l'extérieur, doit être plus importante.

Dans le secteur Nord-Est, il s'agit du même phénomène, la durée de renouvellement calculée par la méthode du prisme, est aussi approximative et ne reflète que la durée nécessaire pour remplacer ces eaux par celles des régions voisines. Cependant, le temps nécessaire pour remplacer ces eaux par des eaux venant de l'extérieur doit être plus important et même supérieur au temps de renouvellement du volume intégral de la lagune.

Une étude bibliographique sur l'utilisation de la méthode du prisme de marée a montré qu'elle est valable uniquement lorsque le volume d'eau échangé au cours d'une marée se mélange complètement avec les eaux dans la lagune au cours du même cycle de marée et que les eaux qui sortent de la lagune ne rentrent pas dans la lagune au cours de la marée suivante. Ces hypothèses ne semblent pas être vérifiées pour le cas de la lagune de Bizerte. Les études antérieures de Harzallah, 2004, Béjaoui, 2009 sur la circulation des eaux dans la lagune de Bizerte, ont montré que l'effet de la marée sur la circulation à l'intérieur de la lagune est relativement négligeable et que les masses d'eau se balancent au niveau du goulet sous l'effet de la marée.

En conséquence, le temps de renouvellement des eaux de la lagune estimé par la méthode du prisme reste une approximation très grossière. Pour avoir une idée plus précise de ce paramètre (temps de renouvellement) nous avons eu recours à une modélisation numérique 3D qui a permis de calculer le temps de renouvellement local dans la lagune.



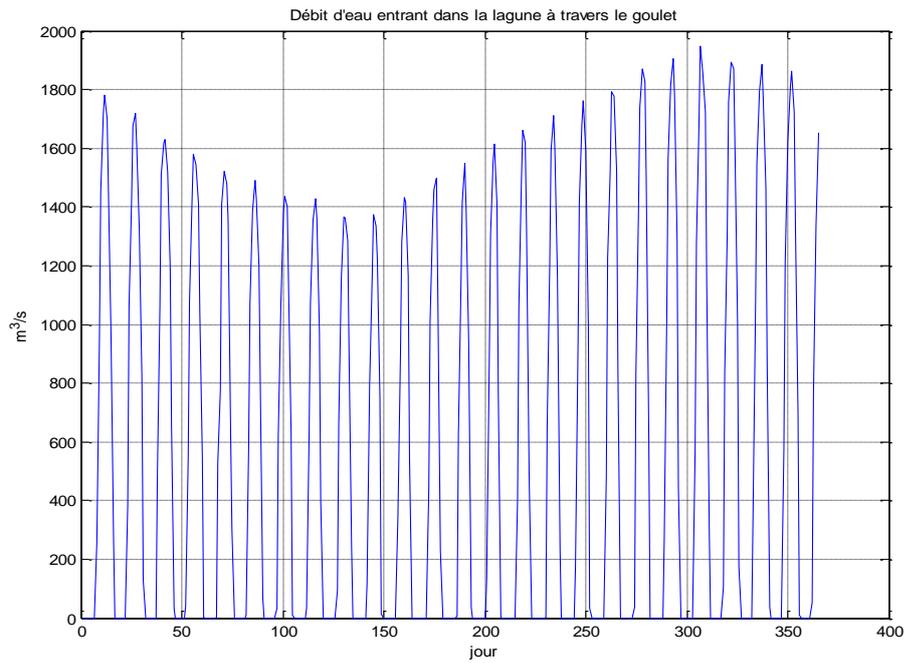


Figure 72. Débit d'eau entrant dans la lagune de Bizerte à travers le goulet – Simulation du modèle de l'INSTM

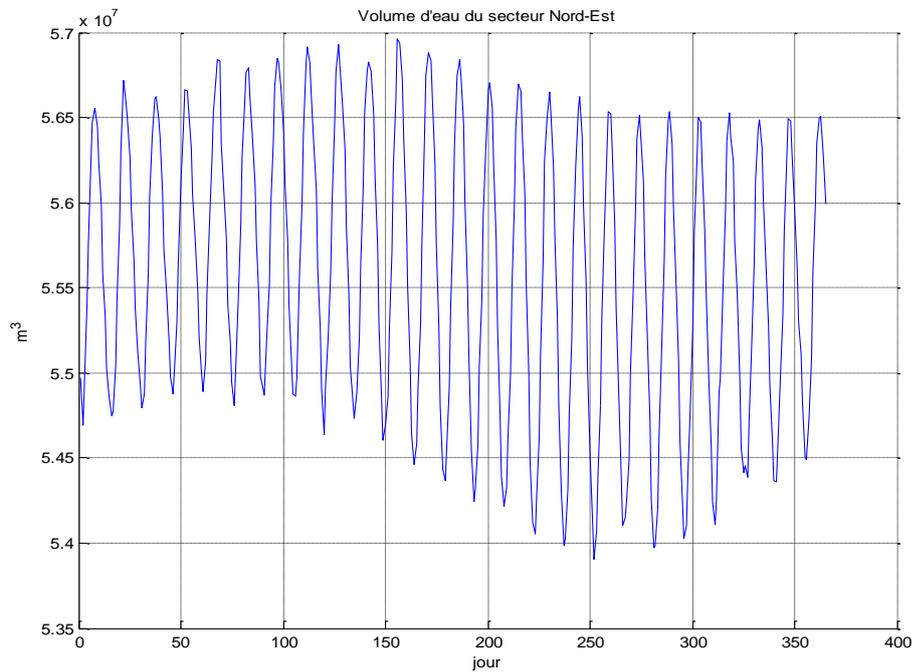


Figure 73. Variation en fonction du temps du volume d'eau du secteur Nord-Est de la lagune de Bizerte – Simulation du modèle de l'INSTM

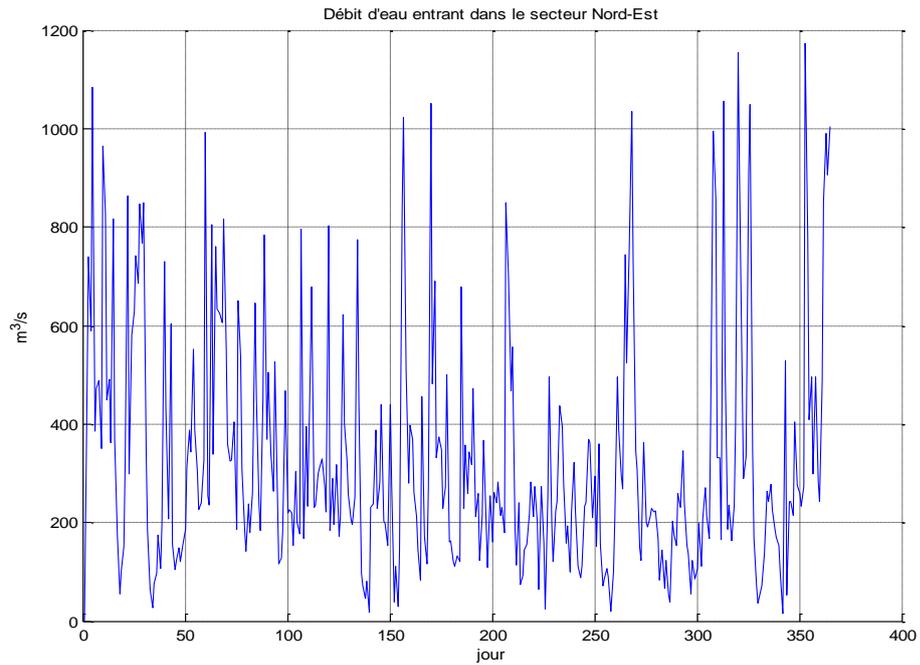


Figure 74. Débit d'eau entrant dans le secteur Nord-Est de lagune de Bizerte – Simulation du modèle de l'INSTM

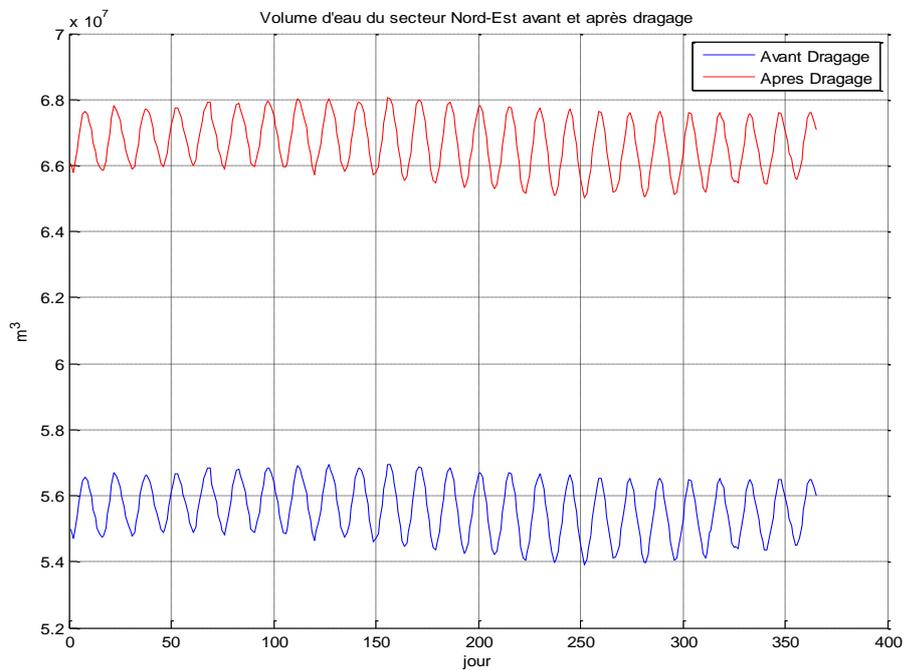


Figure 75. Variation en fonction du temps du volume d'eau du secteur Nord-Est de la lagune de Bizerte avant et après dragage – Simulation du modèle de l'INSTM

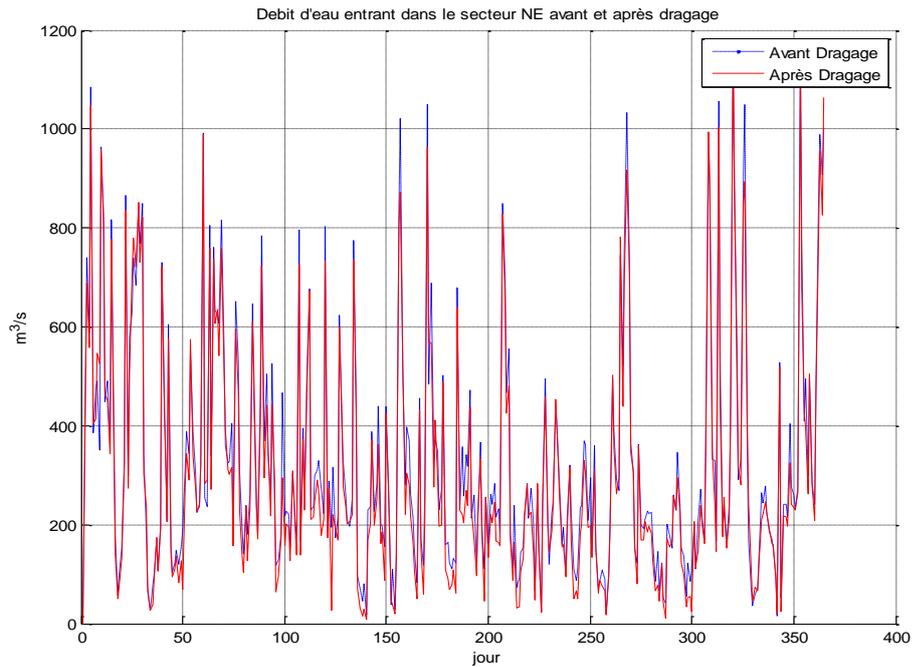
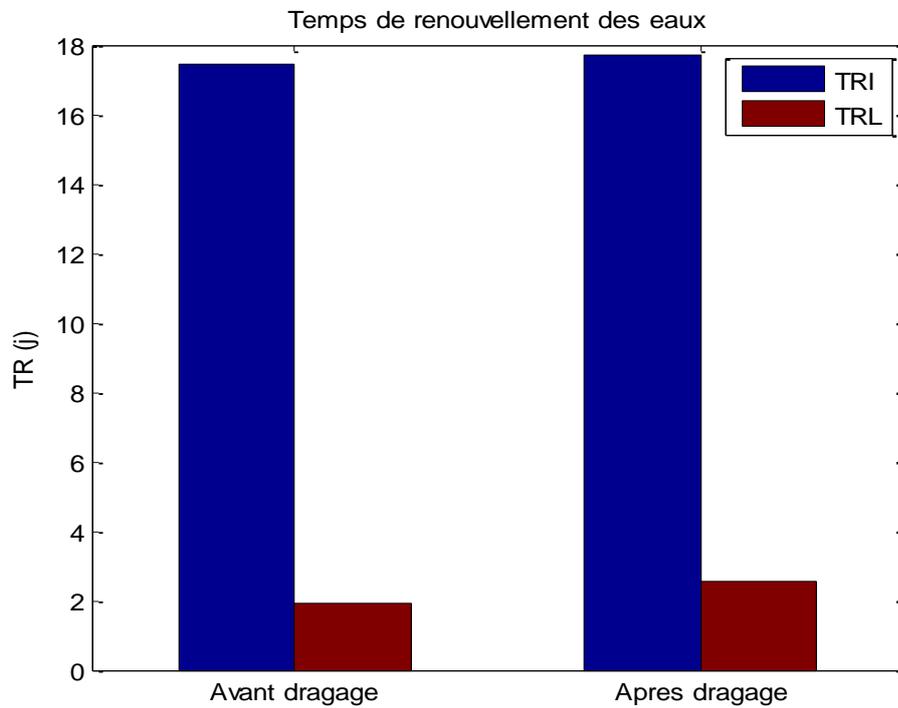


Figure 76. Débit d'eau entrant dans le secteur Nord-Est de lagune de Bizerte avant et après dragage— Simulation du modèle de l'INSTM



Figures 77. Débit d'eau entrant dans le secteur Nord-Est de lagune de Bizerte avant et après dragage— Simulation du modèle de l'INSTM

## 7.2 Méthode Advection-Diffusion

La méthode proposée pour estimer la distribution spatiale du temps de renouvellement des eaux est basée sur l'utilisation de modèles numériques couplés de circulation et d'advection-dispersion d'un traceur inerte en trois dimensions. Elle permet d'estimer le temps de renouvellement des eaux en chaque point de la grille de calcul. Ce temps est défini comme étant le temps nécessaire pour qu'une fraction significative du volume initial de l'eau en un point de la lagune soit diluée par des eaux en provenance de la Méditerranée.

Plus précisément, le temps de renouvellement 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 and Pattiaratchi, 1998 ; Koutitonsky et al., 2004). Ce temps dépendra principalement des processus hydrodynamiques qui animent la circulation et le mélange des eaux dans la lagune.

Ainsi, le mélange des eaux dans la lagune peuvent être suivis au cours du temps en examinant l'évolution temporelle des concentrations des eaux dans la lagune. En débutant les simulations avec des concentrations initiales de  $C = 100$  dans la lagune et  $C = 0$  en mer ; une diminution des concentrations indiquera une augmentation de la proportion des eaux Méditerranéenne dans la lagune. 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 (figures 79 et 82). 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.

Nous constatons que dans les deux situations avant et après dragage, l'intrusion des eaux de la Méditerranée se fait à un rythme relativement lent et ne semble pas contribuer perceptiblement à un renouvellement rapide des eaux du secteur Nord-Est (figures 78 et 81). Les eaux du secteur Nord-Est demeurent confinée pendant une longue période (environ 8 mois) et ce pour les deux situations avant et après dragage du secteur Nord-Est. Le temps de renouvellement local du secteur Nord-Est avant dragage est de l'ordre de 8.3 mois et légèrement supérieur après le dragage de ce secteur. Les figures 80 et 83 montrent que les temps de renouvellements globaux avant et après dragage sont de l'ordre de 214 et de 217 jours, respectivement. Rappelons que, le temps de renouvellement global (figure 77) est légèrement modifié suite à l'opération de dragage du secteur Nord-Est.

Ainsi, il est évident que le dragage du secteur Nord-Est n'améliora pas le renouvellement des eaux. Au contraire, les eaux de ce secteur mettront plus de temps pour qu'elles soient renouvelées à cause de l'augmentation du volume de ce secteur suite au dragage effectué. Cette variation spatiale du temps de renouvellement dans la lagune est tributaire, essentiellement, des échanges avec la Méditerranée. Les eaux dans le goulet mettront environ 6 mois pour qu'une fraction importante soit renouvelée (figures 80 et 83) alors que la même fraction du secteur Nord-Est, mettra 7 mois environ pour son renouvellement. Notons qu'en plus des conditions météorologiques et hydrodynamiques, le renouvellement des eaux dans la lagune est fonction de la distance par rapport à la zone d'échange avec la Méditerranée. Ainsi, les eaux où se trouvent les sites de mytilicole dans le secteur Nord-Est mettraient plus de temps pour être renouvelées.

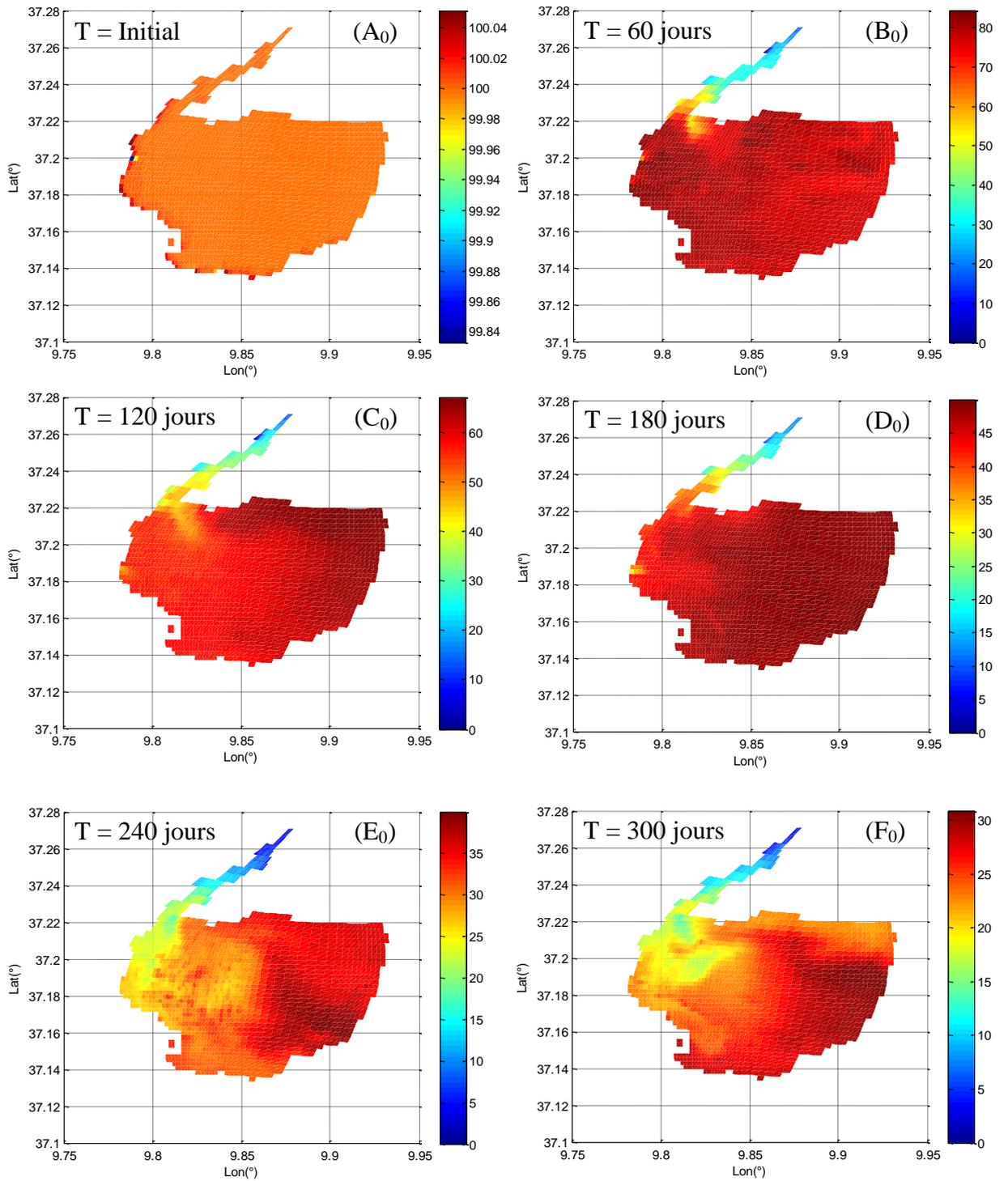


Figure 78. Renouvellement des eaux de surface par les eaux marines sous l'effet de la marée et des vents avant dragage du secteur Nord-Est. Les sorties sont au pas de 60 jours.

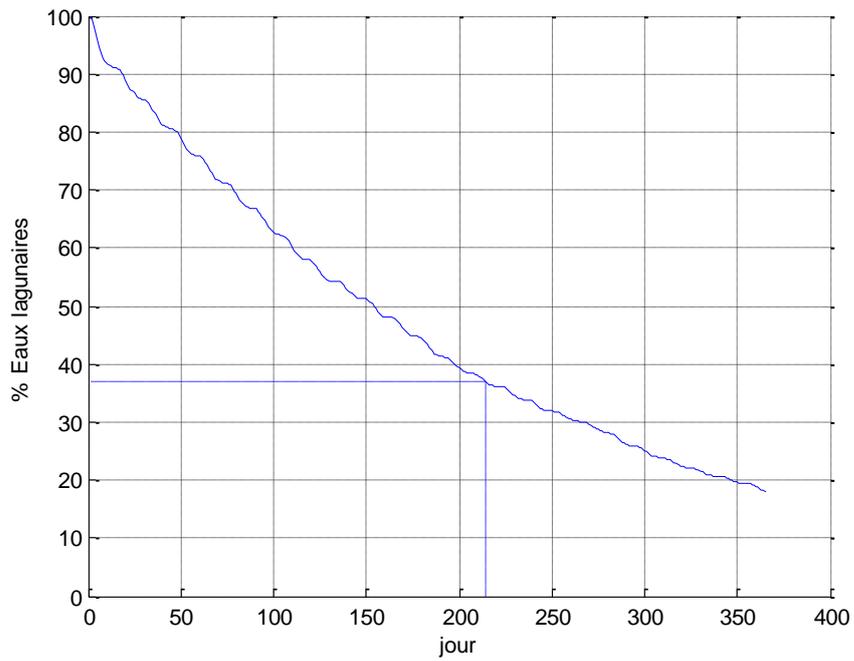


Figure 79. Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans la lagune de Bizerte par la combinaison des marées et vents avant le scénario de dragage du secteur Nord-Est. Le temps de renouvellement intégral correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées.

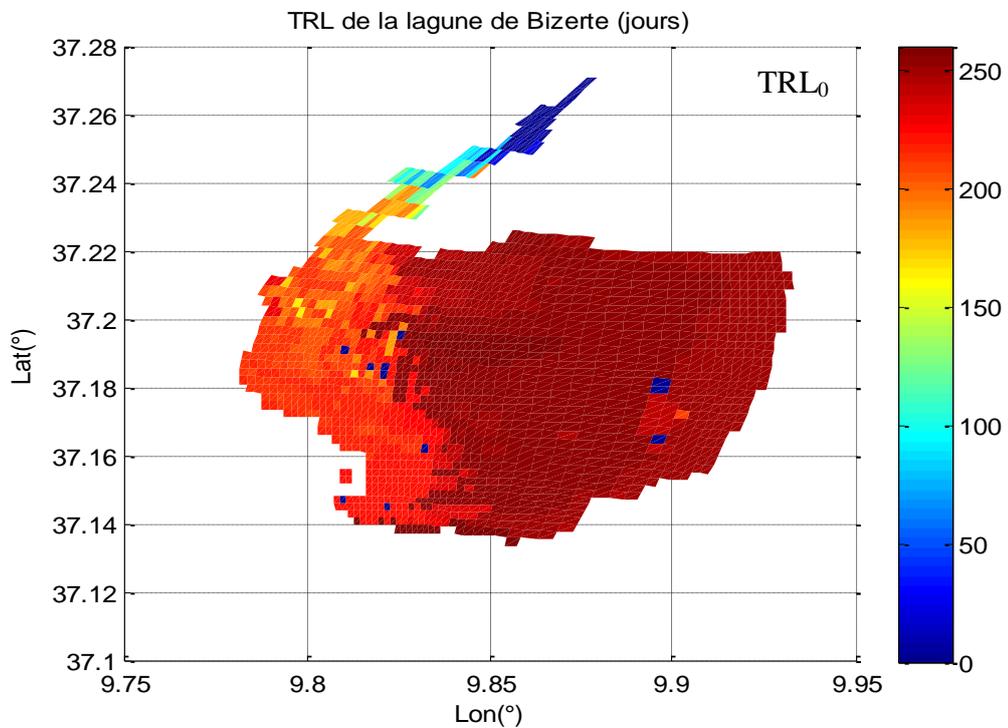


Figure 80. Distribution spatiale du Temps de Renouvellement Local des eaux de surface avant le scénario de dragage du secteur Nord-Est sous l'effet de la marée et des vents.

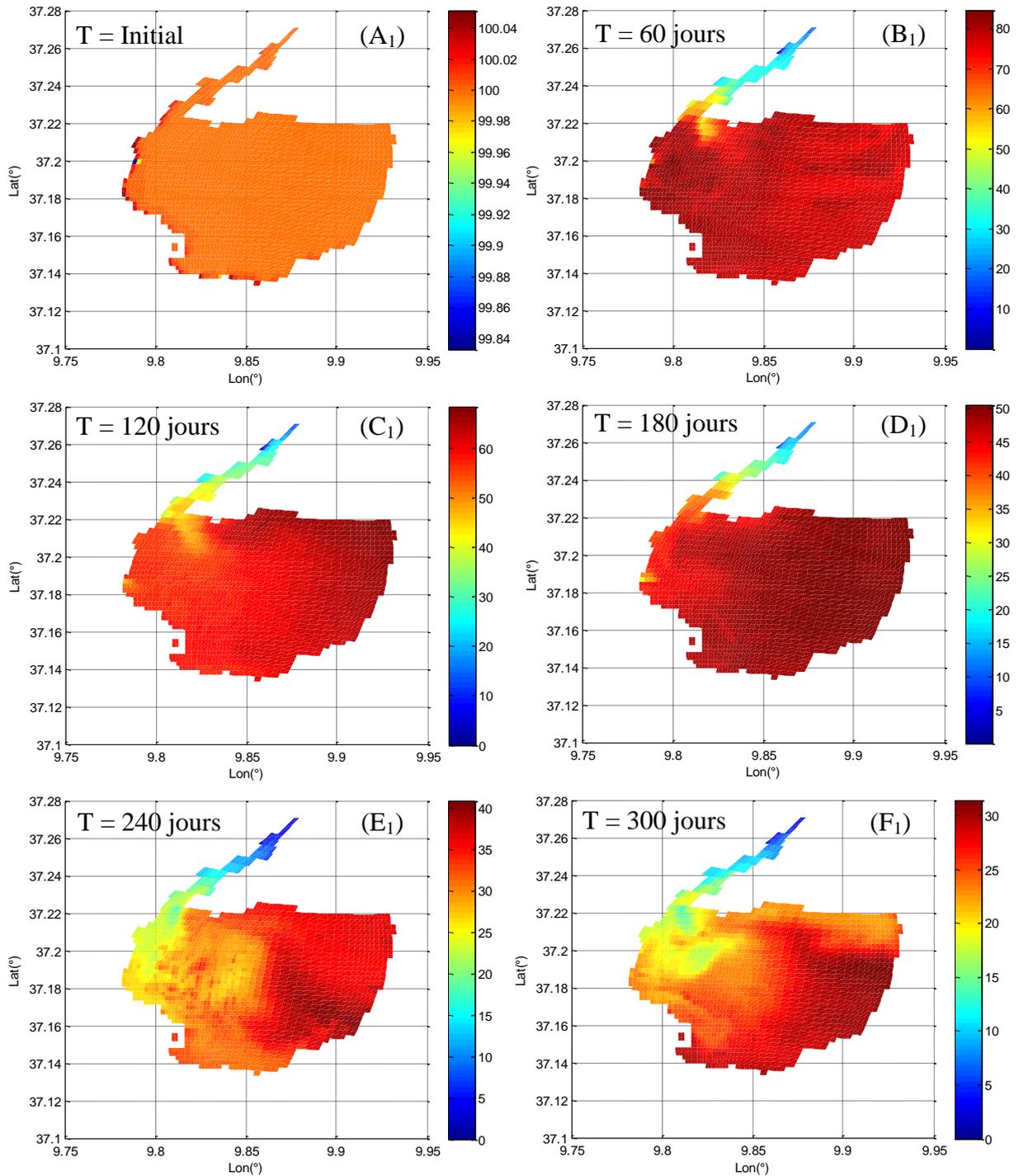


Figure 81. Renouvellement des eaux de surface par les eaux de la Méditerranée sous l'effet de la marée et des vents après dragage du secteur Nord-Est. Les sorties sont au pas de 60 jours.

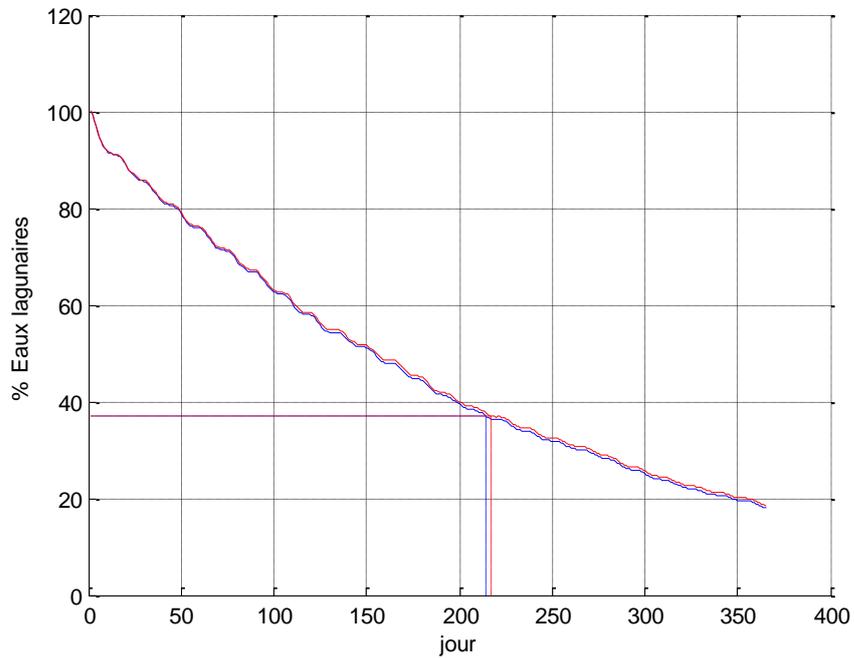


Figure 82. Évolution temporelle des eaux non renouvelées dans la lagune de Bizerte par la combinaison des marées et vents après (courbe rouge) et avant (courbe bleue) dragage du secteur Nord-Est. Le temps de renouvellement intégral correspond à l'intersection de cette évolution avec la ligne de la fraction de 38 % d'eaux non renouvelées.

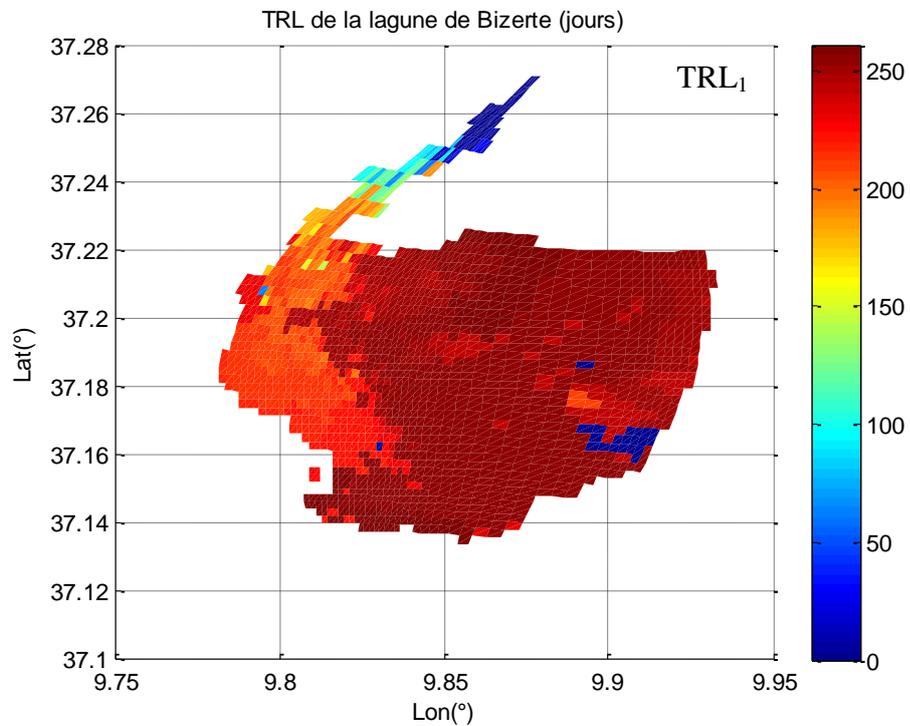


Figure 83. Distribution spatiale du Temps de Renouvellement Local des eaux de surface après le scénario de dragage du secteur Nord-Est sous l'effet de la marée et des vents.

## CONCLUSIONS

Les échanges de la lagune de Bizerte avec les différents plans d'eaux l'extérieur se font principalement avec la mer à travers le goulet. Le débit d'eau qui entre dans la lagune peut atteindre 3000 m<sup>3</sup>/s en marée ascendante. En effet, l'entrée de l'eau de mer se fait en marée ascendante alors que la sortie de l'eau se fait en marée descendante. Ces échanges sont beaucoup plus importants (de l'ordre de 1000 fois plus) que les apports du bassin versant y compris le canal Tinja.

La synthèse des études sur la lagune de Bizerte qui ont traité l'aspect hydrodynamique (Frisoni et al. 1986 ; INSTM, 2002) montre que les courants les plus forts sont localisés au niveau du goulet et dans les zones situées aux bords Ouest, Nord et Sud de la lagune. Par contre, la circulation à l'Est et au centre de la lagune est relativement faible, il s'agit de régions à faible renouvellement d'eau.

Toutes les études récentes ont confirmé l'impact négatif de la construction des barrages sur les cours d'eau de l'Ichkeul. Les eaux de la lagune se sont fortement marinisées, la salinité est proche à celle des eaux de la méditerranée. Ainsi, par rapport à la situation avant la construction des barrages, la salinité moyenne a augmenté d'environ 4 *psu*.

De point de vue sédimentologique, nous distinguons principalement deux faciès : Un premier faciès sableux qui couvre toute la bande littorale y compris le goulet et un deuxième faciès argileux observé au centre de la lagune et vaseux vers l'Est. Cette répartition préférée des sédiments superficiels est contrôlée essentiellement par les apports des cours d'eau et par l'hydrodynamisme du milieu.

Le temps de renouvellement des eaux dans la région Est de la lagune a été étudié afin de comprendre l'effet du dragage sur l'amélioration de la circulation et le renouvellement des eaux dans le secteur Nord-Est. Deux approches ont été utilisées, la première est la méthode du prisme et la seconde méthode est celle de l'advection-dispersion d'un traceur. Cette dernière, fait appel à des modèles numériques d'hydrodynamique et d'advection-dispersion en trois dimensions. La méthode estime, à chaque maille de la grille de calcul, le temps nécessaire pour le renouvellement de ses eaux par des eaux en provenance de l'extérieur, en l'occurrence la Méditerranée. D'après les simulations, le temps de renouvellement des eaux du secteur Nord-Est de la lagune est de l'ordre de 8 mois aussi bien avant et après dragage, le dragage ne réduit donc pas le temps de renouvellement des eaux de la lagune. Pour avoir une idée comparative, le temps de renouvellement au niveau de l'embouchure du goulet avec la mer a été estimé à 19 jours. Notons que le temps de renouvellement peut varier en fonction des conditions météorologiques en présence.

La comparaison de la circulation des eaux (intensité et direction des vitesses) avant et après dragage du secteur Nord-Est réalisée par simulation confirme que le dragage n'a pas eu d'effet remarquable sur l'amélioration de la circulation (intensité et direction des vitesses). L'intensité des courants est en fonction principalement des conditions météorologiques qui règnent dans le milieu ainsi que la forme du milieu. Toutefois, la reconfiguration de la physiographie des berges pourraient sous certaines conditions et précautions d'usage (principalement, l'évaluation des impacts de tels travaux sur la dynamique sédimentaire) améliorer la circulation locale au niveau de certaines zones dans la lagune.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Béjaoui B., 2009.** Développement d'un Modèle Tridimensionnel Couplé Dynamique-Ecologie : Application à la Lagune de Bizerte. *Rapport de thèse de spécialité en génie hydraulique. ENIT, Département d'hydraulique, 210 p.*

**Béjaoui B., A. Harzallah, M. Moussa, A. Chapelle, 2008.** Modèle Couplé Dynamique-Ecologie pour la lagune de Bizerte. *Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer de Salammbô, 35, pp. 131-148.*

**Dyer K. R., 1973:** Estuaries: A Physical Introduction, 1<sup>st</sup> edition. *John Wiley and Sons, London, U.K.*

**Frisoni G. F., Guelorget O. et Perthuisot J. P., 1986 :** Evaluation des potentialités aquacoles du lac de Bizerte. *Projet Régional Méditerranéen de développement de l'aquaculture. FAO/MEDRAP, GCP/REM/049/ITA, RAB/83/016, FD/86/08, INSTOP, 44 p.*

**Harzallah A., 2003.** Transport de polluants dans la lagune de Bizerte simulé par un modèle de circulation de l'eau. *Bulletin de Institut National des Sciences et Technologies de la Mer de Salammbô, 30, pp. 121-133.*

**INSTM, 2002 :** Etat actuel et évolution de l'exploitation halieutique et aquacole des lagunes-Cas de la lagune de Bizerte. *Rapport, Institut National des Sciences et Technologies de la Mer, Tunisie, 128 p.*

**Koutitonsky V. G., T. Guyondet, A. ST-Hilaire, S. C. Courtenay, and A. Bohgen, 2004 :** Water Renewal Estimates for Aquaculture Developments in the Richibucto Estuary, Canada. *Estuaries, Vol. 27, No 5, pp. 839-850.*

**MAERH (Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques), 2004:** Etude sur la dépollution industrielle dans le bassin versant du lac de Bizerte. *Etude réalisée par COMETE-Engineering et IHE pour le MAERH.*

**Masri A., 1996 :** Etude d'impact de la dynamique sédimentaire sur la stabilité du littoral de la baie de Bizerte. *Mémoire de DEA en Géologie, Fac. Sci. Tunis, 104 p.*

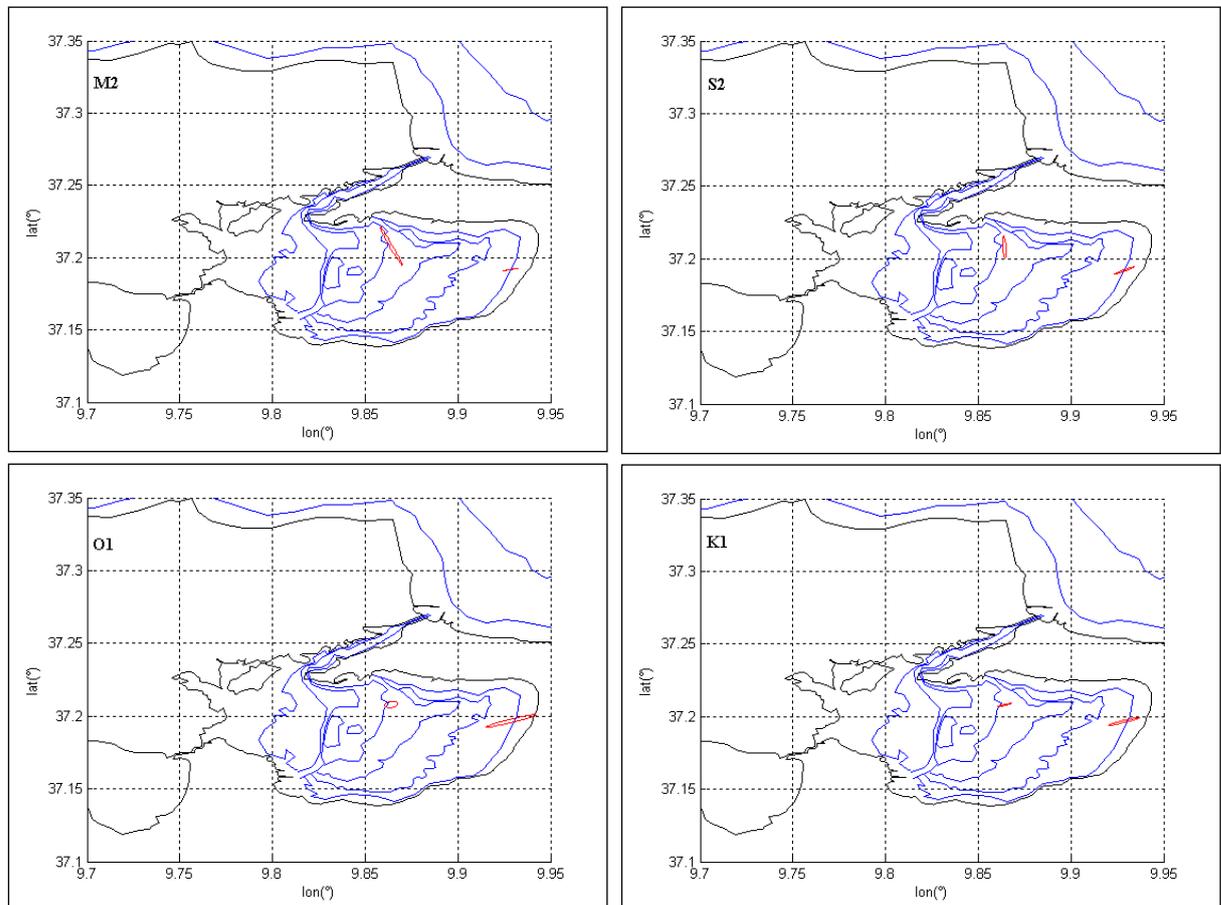
**OTC, 1992 :** Office de la Topographie et de la Cartographie de Tunis.

**Ranasinghe R. and C. Pattiaratchi, 1998 :** Flushing characteristics of a seasonally open tidal inlet: A numerical study. *Journal of coastal research, 14, pp. 1405-1421.*

**Soussi N., 1981 :** Mécanismes de la sédimentation et évolution paléogéographique de la lagune de Bizerte (Tunisie) durant le quaternaire récent. *Thèse de spécialité en géologie structurale, régionale et appliquée. Université Paul Sabatier de Toulouse, 229 p.*

**Soussi N., Levy A. et Zaouali J., 1983 :** La lagune de Bizerte : sédimentologie et écologie des foraminifères et mollusques testasses. *Notes Services géologiques de Tunisie, n°47, pp. 27-40.*

*ANNEXE I : Ellipses de courant des harmoniques les plus significatives*



ANNEXE II : Analyse Harmonique

marée	T(h)	ADCP				NIVEAU ADCP					Argonaut			
		Demi axe majeur	excentricité	Inclinaison /EST	Phase initiale	amp	amp_err	pha	pha_err	snr	Demi axe majeur	excentricité	Inclinaison /EST	Phase initiale
MM	661.2881894	0.6179371	-0.4426573	86.1677601	155.1101	0.0408	0.017	43.87	27.27	6	1.1034084	-0.0394701	23.1659959	194.0191
MSF	354.3711684	0.9460632	0.253219	137.4705482	52.17687	0.0223	0.016	334.33	46.72	1.9	1.0472781	-0.2465479	21.3672748	302.1622
ALP1	29.0726409	0.4264028	0.5078209	116.5559233	8.442169	0.0017	0.007	318.56	186.08	0.061	0.2332429	-0.0429836	1.1572625	73.35273
2Q1	28.00618377	0.6926208	0.0964211	95.0903809	354.7676	0.0073	0.009	154.67	71.78	0.63	0.1834468	0.2021934	18.0103772	263.8049
Q1	26.86835848	0.3896722	-0.343382	58.9765028	178.3321	0.0016	0.006	343.53	203.24	0.063	0.5922494	-0.0336509	13.3396154	218.9935
O1	25.8193113	0.343275	0.6195843	12.9588928	251.9486	0.0183	0.01	174.94	28.64	3.5	1.419738	-0.0809946	17.5660835	259.9153
NO1	24.83324476	0.1947828	-0.8456188	134.3384475	87.09837	0.0053	0.008	133.08	84.69	0.48	0.3592344	-0.0668238	20.8195483	221.1036
P1	24.06588276	0.1228935	0.1150645	14.7748987	214.3646	0.0114	0.008	219.81	40.66	2.1	0.2874933	0.0816751	17.3972904	230.9916
K1	23.93449607	0.3713579	0.1150645	14.7748987	207.2946	0.0345	0.009	212.74	13.62	13	0.8687434	0.0816751	17.3972904	223.9216
J1	23.09847573	0.4348199	0.6864025	32.643313	275.5444	0.0012	0.007	63.22	214.62	0.035	0.1295703	-0.0060805	4.394879	44.793
OO1	22.30609313	0.319421	0.3749492	114.1881943	194.9322	0.0055	0.007	260.78	116.69	0.62	0.1879175	-0.1065192	177.7480427	137.5755
UPS1	21.57823188	0.2864302	-0.595643	77.125856	271.4561	0.0019	0.008	241.23	191.59	0.063	0.798178	-0.1611544	11.9611938	188.6435
EPS2	13.1272702	0.1147749	0.7100823	9.6287596	157.8331	0.0014	0.002	10.08	98.38	0.52	0.1350968	0.3158205	37.5336265	317.1013
MU2	12.8717523	0.2316534	-0.264605	118.494142	256.5389	0.0077	0.002	5.83	17.64	14	0.3220635	-0.0333244	28.3007055	201.3924
N2	12.65835603	0.5994586	0.1166168	121.15899	165.6827	0.0154	0.002	260.39	8.59	46	0.2062708	0.0017769	17.1423057	122.1809
M2	12.42060131	1.4393503	0.057141	114.1423101	187.5485	0.0932	0.002	282.87	1.19	1600	0.4162473	-0.0003411	11.4580886	117.6686
L2	12.19161315	0.1540752	0.0489504	148.6750956	173.5574	0.0041	0.002	268.75	29.51	3	0.1984378	0.0797516	15.6577984	339.0787
S2	12.0000048	0.7540105	0.1230518	93.6897033	213.2499	0.0407	0.002	321.38	2.98	350	0.5916781	0.0890214	25.373672	356.3817
K2	11.96723371	0.205204	0.1230518	93.6897033	235.6499	0.0111	0.002	343.78	10.69	22	0.1610252	0.0890214	25.373672	18.78171
ETA2	11.75452784	0.2037514	0.4520337	167.2983627	309.7946	0.0029	0.002	0.11	53.24	1.5	0.4571772	-0.0219461	17.4105636	283.1408
MO3	8.386299805	0.2309106	-0.3349842	127.8842299	23.95282	0.0028	0.002	173.66	48.06	1.4	0.1573564	-0.0415846	36.1578129	124.1486
M3	8.280400871	0.2339068	0.2112025	53.2410921	356.2165	0.0036	0.002	48.98	39.74	2.2	0.1900097	-0.1528425	14.8144388	202.6415
MK3	8.177143086	0.2203264	0.1860719	156.4644127	255.3103	0.0028	0.002	210.9	48.96	1.5	0.0862061	0.3808827	34.5935224	338.4061
SK3	7.99270426	0.1254446	0.1118086	93.7570098	260.5683	0.0029	0.002	23.3	50.93	1.6	0.2563543	-0.0702243	19.2750951	314.7803
MN4	6.269175842	0.1154639	0.2403279	122.6218003	19.28461	0.0013	0.001	133.13	37.62	3.8	0.0733831	-0.5335366	52.5549478	125.2434
M4	6.210300653	0.1175366	0.3776554	168.9461307	103.7085	0.0007	0.001	163.48	60.26	0.89	0.1645388	-0.1683736	23.5303908	275.4083
SN4	6.160192099	0.1068118	0.2272574	147.9796083	195.0481	0.0004	0.001	134.05	115.25	0.22	0.0774789	0.593444	20.4778725	269.9392
MS4	6.103340541	0.1662923	0.0760354	10.494986	129.8419	0.0011	0.001	253.69	44.45	1.7	0.0423502	-0.3124273	30.1914568	218.1479
S4	5.9999988	0.1750997	0.3345941	96.347045	32.9413	0.0015	0.001	194.87	30.75	3.4	0.1462569	-0.0981603	31.8687178	80.26358
2MK5	4.93088137	0.0733349	0.4262784	174.5250723	357.8809	0.0018	0.001	116.91	35.35	2.8	0.0770022	-0.1388056	19.9234333	300.2793
2SK5	4.797373342	0.0799961	0.4259439	103.6147919	184.745	0.0007	0.001	95.28	76.49	0.57	0.0278043	0.5377977	98.5325838	48.43868
2MN6	4.166283021	0.117354	0.2297227	132.0120142	241.244	0.0006	0.001	168.63	81.86	0.75	0.1258562	0.5656374	43.9352065	327.0155
M6	4.140200435	0.136351	0.6191785	45.2886635	14.72998	0.0016	0.001	190.48	29.46	3.4	0.0850482	0.0166416	61.6200224	75.74988
2MS6	4.092388117	0.0702313	-0.7468167	59.5421969	72.12054	0.0013	0.001	213.42	37.65	2.9	0.1299566	-0.150873	34.9489508	223.4618
2SM6	4.045665858	0.060066	0.0623188	157.6396023	309.6665	0.0003	0.001	213.44	150.75	0.21	0.1076434	0.3735698	52.4411077	48.32262
3MK7	3.529641399	0.1310227	-0.2485108	106.8247097	344.5607	0.0003	0	102.99	105.79	0.4	0.03759	0.5110549	36.7350773	130.1674
M8	3.105150327	0.0544808	-0.4263473	89.5228222	152.0563	0.0003	0	61.84	73.73	0.75	0.1008671	-0.3785184	14.3979919	204.7947
M10	2.484120261	0.0916508	-0.3391102	21.4628469	107.718	0.0001	0	180.12	194	0.094	0.0550527	0.6151604	137.5475554	120.3347